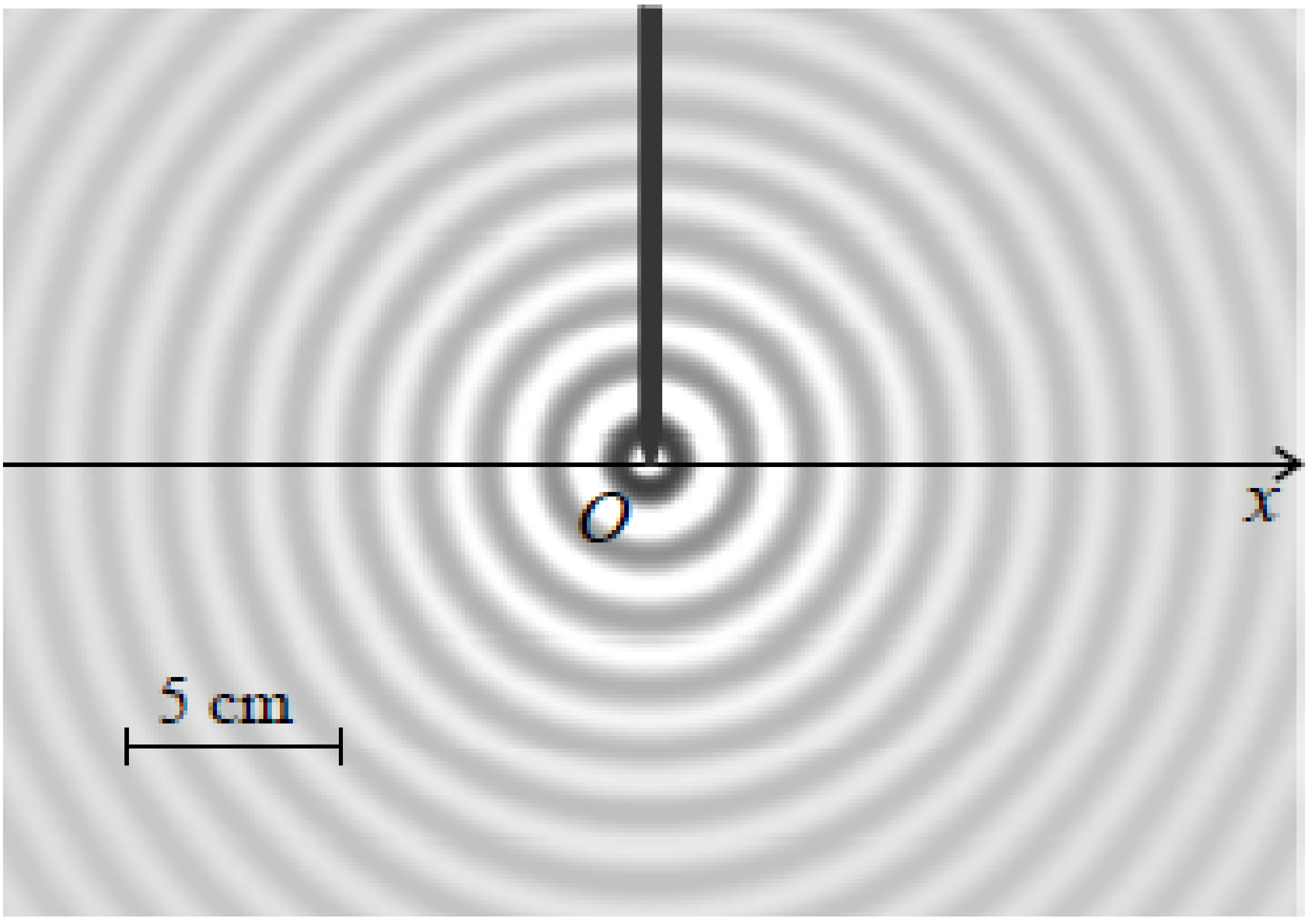
Ondes – chapitre 1

Correction du TD d'entraînement

I Cuve à ondes

La figure représente la surface d'une cuve à onde éclairée en éclairage stroboscopique. L'onde est engendrée par un vibreur de fréquence $f = 18\,\mathrm{Hz}$. L'image est claire là où la surface de l'eau est convexe, foncée là où elle est concave.



1) En mesurant sur la figure, déterminer la longueur d'onde.

Réponse

La distance entre deux maxima lumineux correspond à une longueur d'onde. En effet, les parties concaves du dioptre air-eau se comportent comme des lentilles convergentes alors que les parties convexes se comportent comme des lentilles divergentes. On mesure 10 maximum de luminosité consécutifs :

$$10\lambda = 3 \times 5\,\mathrm{cm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\lambda = 1{,}5\,\mathrm{cm}}$$

◇

2) En déduire la célérité de l'onde.

Réponse

$$\boxed{c = \lambda f} \quad \Rightarrow \quad \underline{c = 2{,}7 \times 10^{-1}\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}}.$$

◇

On suppose l'onde sinusoïdale, d'amplitude A constante et de phase initiale nulle en O.

3) Écrire le signal $s(x,t)$ pour $x > 0$ et pour $x < 0$.

Réponse

Pour $x < 0$, l'onde se déplace vers la gauche :

$$s(x,t) = A\cos(\omega t + kx)$$

Pour $x > 0$, l'onde se déplace vers la droite :

$$s(x,t) = A\cos(\omega t - kx)$$

◇

4) Expliquer pourquoi A n'est en fait pas constante.

Réponse

L'amplitude d'onde circulaire (sphérique) diminue lorsque l'on s'éloigne du centre car l'énergie, qui se conserve, est repartie équitablement sur les vagues circulaire dont le périmètre augmente.

◇

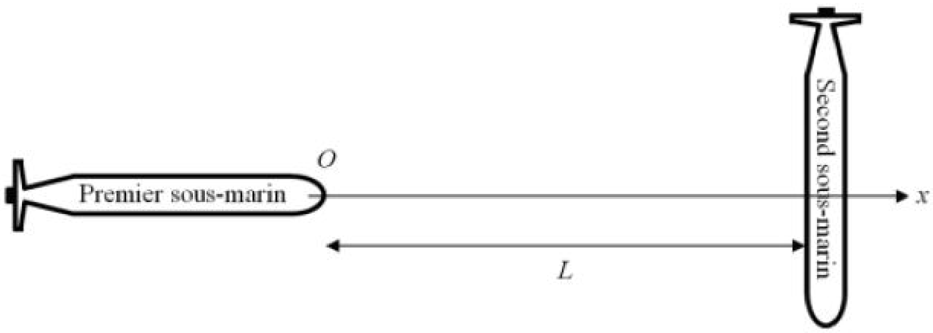
II Propriétés du son et principe du sonar

Un sonar (*SOund NAvigation and Ranging*) est un dispositif de détection utilisant les ondes acoustiques comme signal détectant. Il permet aux marins de naviguer correctement (mesure de la profondeur) ou aux sous-mariniers de repérer les obstacles et les autres navires. Certains animaux (chauve-souris, dauphins...) utilisent des systèmes similaires au sonar pour repérer leurs proies ou des obstacles.

On suppose dans cette partie que la mer est un milieu homogène dans lequel le son se propage rectilignement. À 20 °C, la vitesse du son dans l'eau de mer est $c_{\text{mer}} = 1{,}5 \times 10^3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

L'avant d'un sous-marin est équipé d'un sonar lui permettant d'éviter d'entrer en collision avec un obstacle. Le sonar est constitué d'un émetteur d'ondes sonores et d'un récepteur capable d'identifier l'écho de l'onde précédemment émise.

On note O l'avant du sous-marin équipé du sonar et (Ox) l'axe du sous-marin, correspondant à l'axe de propagation de l'onde sonore. Un second sous-marin est à la distance L du premier, dans la configuration représentée sur la figure ci-dessous.



1) Quelles sont les fréquences des ultrasons ? Connaissez-vous un des usages autres que dans les sonars que l'être humain peut faire des ultrasons ?

Réponse

Les fréquences des ultrasons se situent au-dessus des 20 kHz. L'échographie utilise la réflexion des ultrasons à l'interface entre des tissus de caractéristiques mécaniques différentes (en terme de densité et de vitesse de propagation du son) pour imager de manière non invasive l'intérieur du corps.

◇

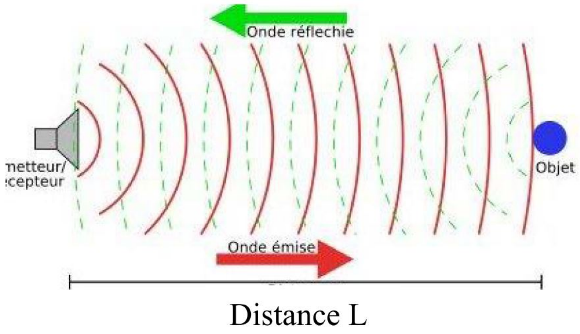
2) Expliquer le principe de fonctionnement d'un sonar. Il est conseillé de faire un schéma.

Réponse

Le sonar mesure le décalage temporel entre l'émission et la réception de l'onde sonore réflechie par la cible :

$$\Delta t = \frac{2L}{c_{\text{mer}}}$$

Connaissant la vitesse du son dans l'eau de mer c_{mer}, la mesure de Δt permet de déterminer L.



◇

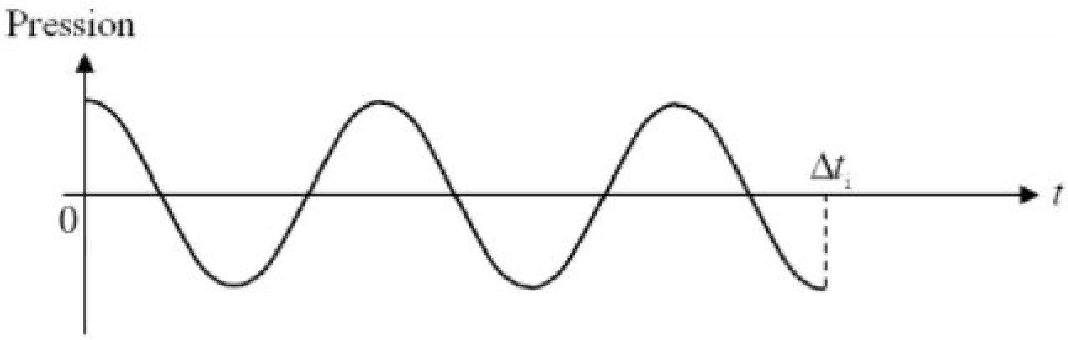
3) L'émetteur produit une très brève impulsion sonore. Le récepteur en reçoit l'écho au bout d'une durée $\Delta t_e = 38{,}8\,\text{ms}$. Exprimer la distance L à laquelle se situe le second sous-marin en fonction de Δt_e et c_{mer} ; faire l'application numérique.

Réponse

$$\Delta t = \frac{2L}{c_{\text{mer}}} \quad \text{donc} \quad \boxed{L = \frac{\Delta t_e c_{\text{mer}}}{2}} \Rightarrow \underline{L = 29{,}1\,\text{m}}$$

◇

À partir de l'instant $t = 0$, le sonar émet l'impulsion sonore sinusoïdale de la figure ci-dessous, pendant une durée $\Delta t_i = 80\,\mu\text{s}$.



4) Déterminer, en justifiant, la valeur numérique de la fréquence f de l'onde émise par le sonar.

Réponse

D'après le schéma, on a : $2{,}5T = \Delta t_i$, soit $2{,}5/f = \Delta t_i$. Ainsi,

$$f = \frac{2{,}5}{\Delta t_i} = 3{,}1 \times 10^4\,\text{Hz}$$

C'est bien dans le domaine des ultrasons.

◇

On s'intéresse à la propagation spatiale de l'impulsion sonore.

5) Exprimer et calculer numériquement la longueur spatiale Δx de l'impulsion.

Réponse

Pour la longueur spatiale de l'impulsion, on a

$$\Delta x = c_{\text{mer}} \times \Delta t_i = 12\,\text{cm}$$

◇

6) Reproduire sur la copie le système d'axes de la figure ci-dessous et y représenter l'impulsion sonore à l'instant $t = 12{,}0\,\text{ms}$; calculer numériquement, en justifiant précisément, les positions du début (ou front) de l'impulsion et de sa fin.

Réponse

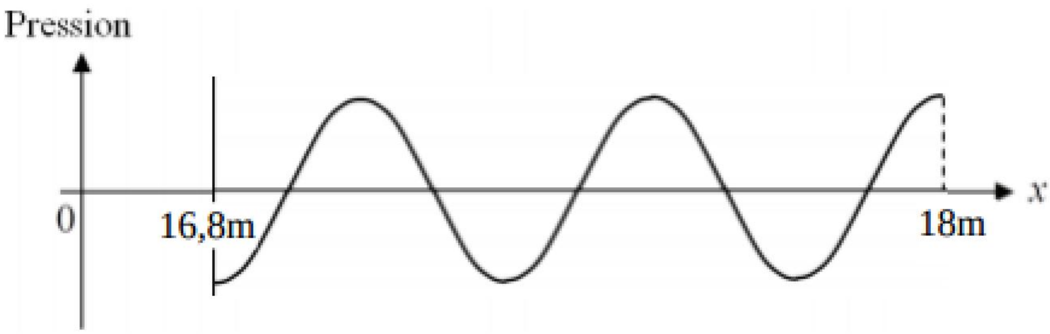
On cherche à passer d'une analyse temporelle (en $x = 0$) à une analyse spatiale. À $t = 12{,}0\,\text{ms}$, le début de l'impulsion émis à $t = 0$ se retrouve en $M_0(x_0)$, tel que

$$x_0 = c_{\text{mer}}\Delta t_0 = 18{,}0\,\text{m}$$

La fin de l'impulsion (front d'onde) émise à Δt_i se retrouve en $M_1(x_1)$, tel que

$$x_1 = c_{\text{mer}}(\Delta t_0 - \Delta t_i) = 17{,}9\,\text{m}$$

En x_1, La pression est minimale et elle augmente. Entre x_1 et x_0, on a 2,5 longueurs d'ondes. D'où le graphe ci-dessous :



Remarque importante : L'onde apparait « à l'envers » sur les graphes temporel et spatial.

◇

Un détecteur d'ondes sonores est placé sur le second sous-marin, sur l'axe (Ox).

7) Représenter sur la copie l'évolution de l'amplitude enregistrée par ce détecteur au cours du temps. Calculer numériquement, en justifiant précisément, les instants auxquels le détecteur reçoit le début et la fin de l'impulsion et on repérera ces instants sur l'axe horizontal qu'on graduera.

Réponse

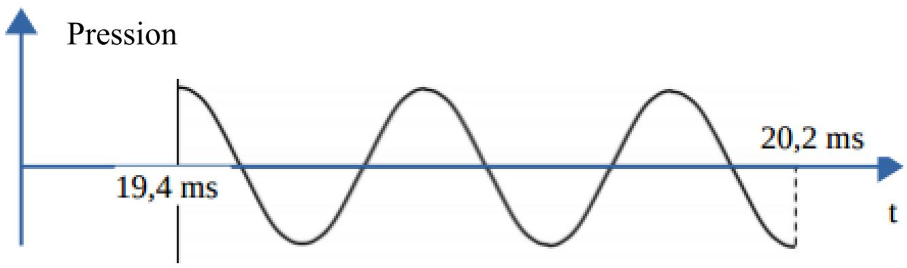
Le second sous-marin est à la distance $L = 29{,}1\,\text{m}$ du premier. On repasse en analyse temporelle. Le début de l'impulsion émis à $t = 0$ est reçu à

$$t_1 = \frac{L}{c_{\text{mer}}} = 19{,}4\,\text{ms}$$

La fin de l'impulsion émise à $t = \Delta t_i$ est reçue à

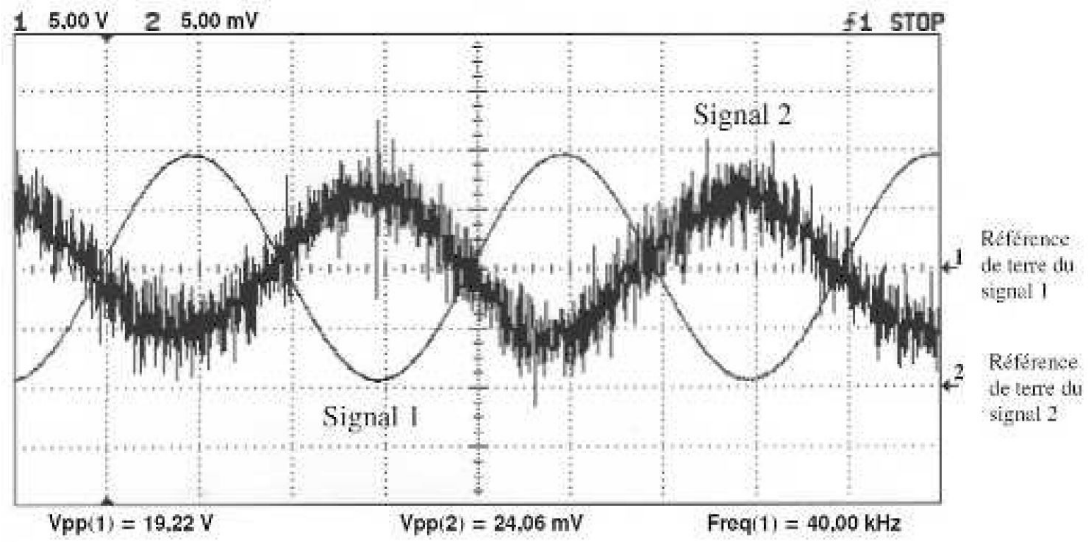
$$t_2 = \frac{L}{c_{\text{mer}}} + \Delta t_i = 19{,}5\,\text{ms}$$

D'où le graphe ci-contre :



⁂ III Télémètre ultrasonore

On place un émetteur et un récepteur à ultrasons côte à côte. Ce bloc est appelé le télémètre. À la distance D, on place un obstacle réfléchissant les ondes sonores, que nous appellerons la cible. Une onde sinusoïdale, de période T, est émise par l'émetteur du télémètre, elle se réfléchit sur la cible et est détectée par le récepteur du télémètre. Sur l'écran d'un oscilloscope, on visualise simultanément deux signaux ; celui capté (par un dispositif non décrit) en sortie de l'émetteur et celui du récepteur.



1) On appelle temps de vol, noté t_v, la durée du trajet aller-retour de l'onde entre le télémètre et la cible. Exprimer t_v en fonction de la distance D séparant le télémètre de la cible et de la célérité c de l'onde.

Réponse

Le temps de vol est la durée de la propagation de l'onde sur une distance $2D$ correspondant à l'**aller-retour** jusqu'à la cible. Ainsi :

$$t_\mathrm{v} = \frac{2D}{c}$$

2) Pour illustrer le principe de la mesure, on colle la cible au télémètre, puis on l'éloigne lentement, en comptant le nombre de coïncidences, c'est-à-dire le nombre de fois où les signaux sont en phase. Pour simplifier, on suppose que lorsque $D = 0$, les signaux sont en phase. On se place dans le cas où l'on a compté exactement un nombre n de coïncidences. Exprimer D en fonction de n et de la longueur d'onde des ondes ultrasonores.

Réponse

Au fur et à mesure que l'on éloigne la cible, le décalage temporel entre les deux signaux augmente. Chaque fois que ce décalage est un multiple entier de la période T, les signaux sont en phases. Si on éloigne d'une distance D, on augmente de décalage temporel de $2D/c$. La première fois que les signaux sont en phase à nouveau, on a

$$\frac{2D}{c} = T \quad \text{soit} \quad D = \frac{cT}{2} = \frac{\lambda}{2}$$

où λ est la longueur d'onde des ondes ultrasonores. La deuxième fois,

$$\frac{2D}{c} = 2T \quad \text{soit} \quad D = 2 \times \frac{\lambda}{2}$$

À la n^{ime} coïncidence (par récurrence immédiate),

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

◇

3) Lors du recul de la cible, 50 coïncidences ont été comptées avant d'observer les signaux suivants sur l'écran de l'oscilloscope (voir figure). Dans les conditions de l'expérience, la longueur d'onde des ondes sonores valait 8,5 mm. En exploitant les données de l'enregistrement, calculer la distance séparant le télémètre de la cible.

Réponse

Dans l'expérience on a reculé la cible d'une distance comprise entre $50\lambda/2$ et $51\lambda/2$. Les deux signaux sont en opposition de phase, ce qui veut dire qu'après la 50e coïncidence on a reculé la cible d'une distance ΔD telle que

$$\frac{2\Delta D}{c} = \frac{T}{2} \quad \text{soit} \quad \Delta D = \frac{\lambda}{4}$$

La distance de la cible est donc :

$$D = 50 \times \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} = 10{,}8\,\text{cm}$$

◇

4) Pourquoi les deux signaux de la figure sont-ils si différents ? Identifier quel est, selon toute vraisemblance, le signal capté en sortie de l'émetteur et celui reçu par le récepteur.

Réponse

Le niveau du signal reçu par le récepteur en provenant de la cible est faible en raison de l'éloignement de celle-ci. Pour l'observer sur l'oscilloscope il faut augmenter la sensibilité, ce qui a pour conséquence d'amplifier le bruit électronique. C'est pourquoi ce signal a une allure irrégulière que l'on qualifie de « bruitée ».

◇

5) Le comptage des coïncidences a été réalisé en plaçant l'oscilloscope en mode XY (c'est-à-dire une représentation telle que le signal 2 soit tracé comme une fonction du signal 1). Dans le cas des signaux de la figure, représenter la figure que l'on obtiendrait en se plaçant dans ce mode.

Réponse

Les deux signaux étant en opposition de phase on observerait en mode XY un segment de droite de pente négative (de contour assez flou à cause du bruit).

◇