Ondes – chapitre 1

# TD application : Ondes progressives

## I Quelques ondes

### I/A Onde sur une corde

On excite l'extrémité d'une corde à une fréquence de 50 Hz. Les vibrations se propagent le long de la corde avec une célérité de $10\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

1 Quelle est la longueur d'onde ?

### I/B Ondes infrasonores des éléphants

Les éléphants émettent des infrasons dont la fréquence est inférieure à 20 Hz. Cela leur permet de communiquer sur de longues distances et de se rassembler. Un éléphant est sur le bord d'une étendue d'eau et désire indiquer à d'autres éléphants sa présence. Pour cela, il émet un infrason. Un autre éléphant, situé à une distance $L = 24{,}0\,\mathrm{km}$, reçoit l'onde au bout d'une durée $\Delta t = 70{,}6\,\mathrm{s}$.

2 Quelle est la valeur de la célérité $c$ de l'infrason dans l'air ?

### I/C Ondes à la surface de l'eau

Au laboratoire, on dispose d'une cuve à onde contenant de l'eau immobile à la surface de laquelle flotte un petit morceau de polystyrène. On laisse tomber une goutte d'eau au-dessus de la cuve, à l'écart du morceau de polystyrène. Une onde se propage à la surface de l'eau. Quelles sont les affirmations exactes ?

3 Ceci correspond :

a) à une onde mécanique, b) à une onde longitudinale, c) à une onde transversale.

4 L'onde atteint le morceau de polystyrène.

1) Celui-ci se déplace parallèlement à la direction de propagation de l'onde,
2) Celui-ci se déplace perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde,
3) Celui-ci monte et descend verticalement,
4) Celui-ci reste immobile.

Pour les ondes progressives sinusoïdales se propageant à la surface de l'eau, la relation de dispersion s'écrit

$$\omega^2 = gk$$

avec $g$ l'accélération de pesanteur constante.

5 Exprimer la vitesse de phase $v_\varphi(k)$. Le milieu est-il dispersif ?

## II Applications directes du cours

1 Calculer la longueur d'onde correspondant à la note $\mathrm{La}_3$, de fréquence $f = 440\,\mathrm{Hz}$ se propageant dans l'air à la célérité $c = 340\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

2 Soit $g(t)$ la fonction modélisant le signal en $x = 0$. Donner l'expression du signal en $M(x)$ ($x > 0$) en considérant une onde qui se propage vers les $x$ croissants de $O$ à $M$ à la célérité $c$. De même pour une onde se propageant vers les $x$ décroissants.

3 Soit $f(x)$ la fonction donnant à la date $t = 0$ la valeur d'une grandeur physique en fonction de l'abscisse $x$ du point d'observation. Donner l'expression de cette grandeur en fonction de $x$ à la date $t$ en considérant une onde se propageant vers les $x$ décroissants à la célérité $c$.

4 Une onde progressive sinusoïdale d'amplitude $A_0$ et de longueur d'onde $\lambda$ se propage dans le sens des $x$ décroissants à la célérité $c$. La phase à $t = 0$ au point $A$ d'abscisse $x_A = \lambda/4$ est nulle. Donner l'expression de la fonction $s(x,t)$ en fonction de $A_0$, $\lambda$, $c$, $x$ et $t$. Quel est le déphasage entre $A$ et l'origine $O$ du repère ?

5 Donner la période, la fréquence, la pulsation, la longueur d'onde, le nombre d'onde ($1/\lambda$) et le vecteur d'onde, de l'onde :

$$s(x,t) = 5\sin\left(2{,}4 \times 10^3 \pi t - 7{,}0\pi x + 0{,}7\pi x\right)$$

où $x$ et $t$ sont exprimés respectivement en mètres et en secondes. Quelle est sa vitesse de propagation ?

6 Une onde sinusoïdale se propage dans la direction de l'axe $(Ox)$ dans le sens négatif avec la célérité $c$. On donne : $s_2(0,t) = A\sin(\omega t)$.

Déterminer l'expression de $s_2(x,t)$. Représenter graphiquement $s_2(\lambda/4,t)$ et $s_2(\lambda/2,t)$ en fonction de $t$.

7 En $x = 0$ on excite un train d'onde de la forme

$$s(0,t) = S_0 \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right)\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Avec $T = 0{,}2\,\mathrm{s}$ et $\tau = 1\,\mathrm{s}$. L'onde se propage dans la direction des $x$ positifs à la célérité $c = 2\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. Donner l'expression de $s(x,t)$.

8 La vibration d'une corde tendue horizontalement est modélisée par la fonction d'onde donnant l'altitude $y$ à la date $t$ et au point d'abscisse $x$ (en mètre) :

$$y(x,t) = 0{,}050\cos(10\pi t + \pi x)$$

- ◇ Préciser les valeurs et unités de l'amplitude $Y_0$, la pulsation $\omega$, la fréquence $f$, la période $T$, le vecteur d'onde $k$ et la longueur d'onde $\lambda$.
- ◇ L'onde se propage-t-elle vers les $x$ croissants ou décroissants ?
- ◇ La célérité d'une onde le long d'une corde vibrante est donnée par l'expression $c = \sqrt{T_s/\mu}$ avec $T_s$ la tension de la corde et $\mu = 0{,}10\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-1}}$ la masse linéique de la corde. Calculer la tension de la corde.
- ◇ On multiplie la tension de la corde par 2 et on garde même fréquence d'excitation $f$. Comment varie alors la longueur d'onde ?

## III Distance d'un impact de foudre

On peut lire, dans une revue de vulgarisation scientifique :

« Lorsque nous parlons, nos cordes vocales mettent en mouvement l'air qui les entoure. L'air étant élastique, chaque couche d'air se comporte comme un ressort. La couche d'air comprimé se détend, et ce faisant comprime la couche qui la suit dans le sens de propagation du son, etc. »

1 Définir une onde progressive. Quelle grandeur physique constitue la perturbation pour une onde acoustique ?

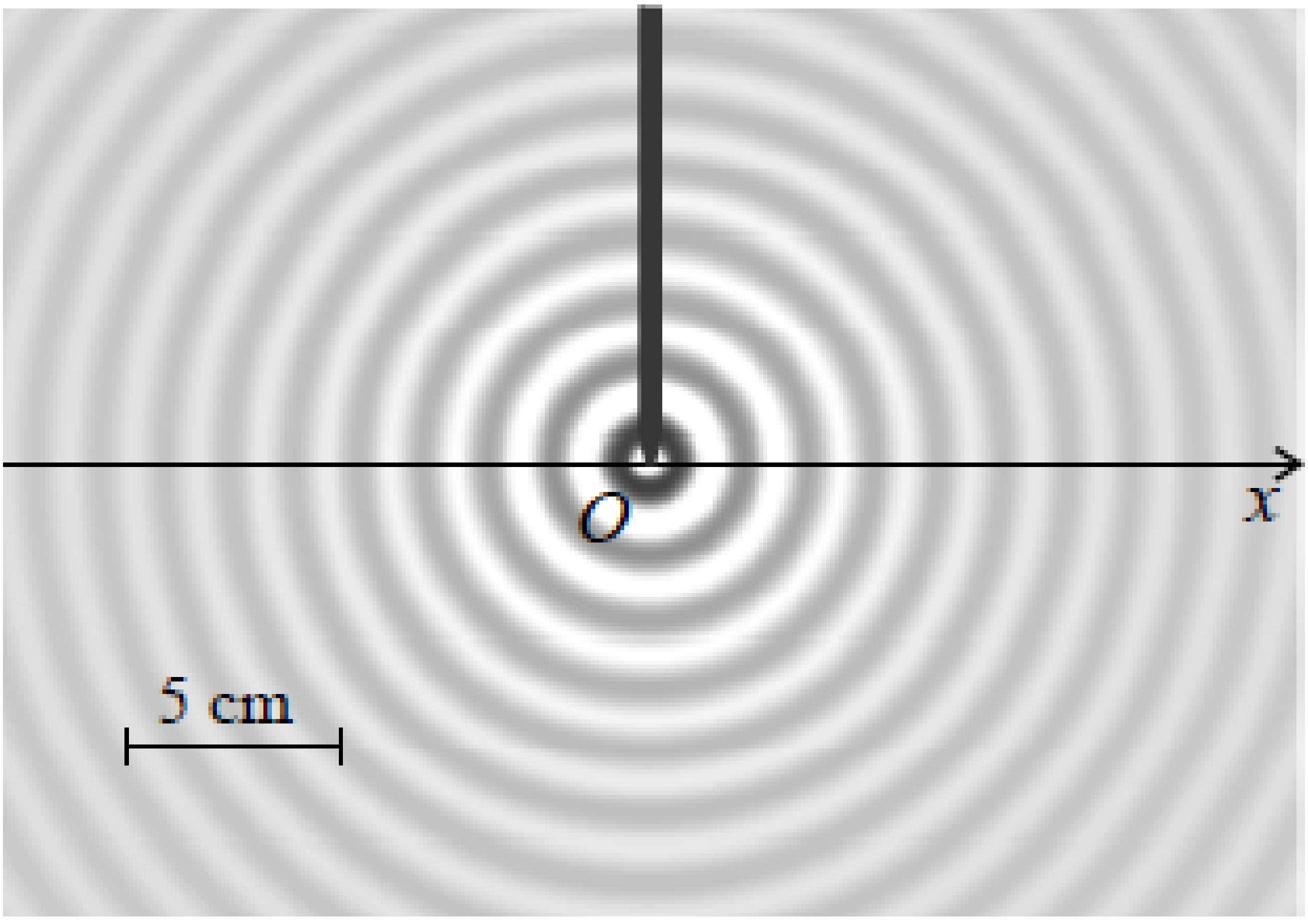
2 Le son est une onde mécanique. Que peut-on alors dire de son milieu de propagation ? Donner deux autres exemples d'ondes mécaniques (mais non acoustiques).

3 Pendant un orage, on peut grossièrement évaluer la distance à laquelle est tombée la foudre. Si on divise par trois la durée (en secondes) entre l'éclair (phénomène visible) et le tonnerre (phénomène audible), on obtient la distance cherchée (en kilomètres). À quel type d'onde est associé l'éclair ? Donner l'intervalle de longueurs d'onde dans le vide du spectre visible. À partir de l'observation faite pendant l'orage, estimer approximativement la valeur numérique de la vitesse $c_{\text{air}}$ de propagation du son dans l'air. La réponse sera justifiée avec soin.

# TD entraînement : Ondes progressives

## 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.

2 En déduire la célérité de l'onde.

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 $x < 0$.

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

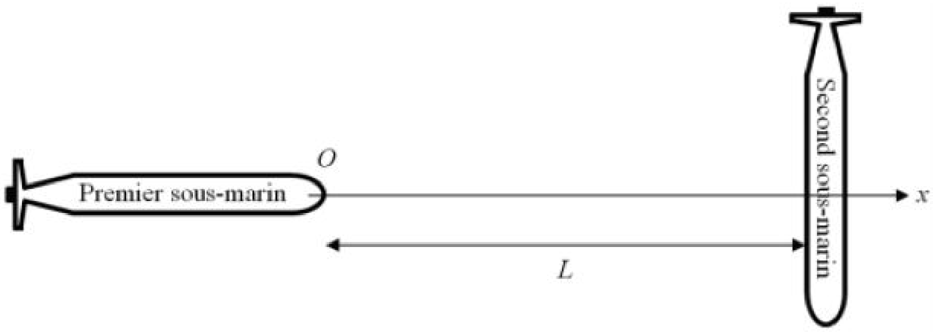
## II Propriétés du son et principe du sonar

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 $c_{\text{mer}} = 1{,}5 \times 10^3\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$.

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.

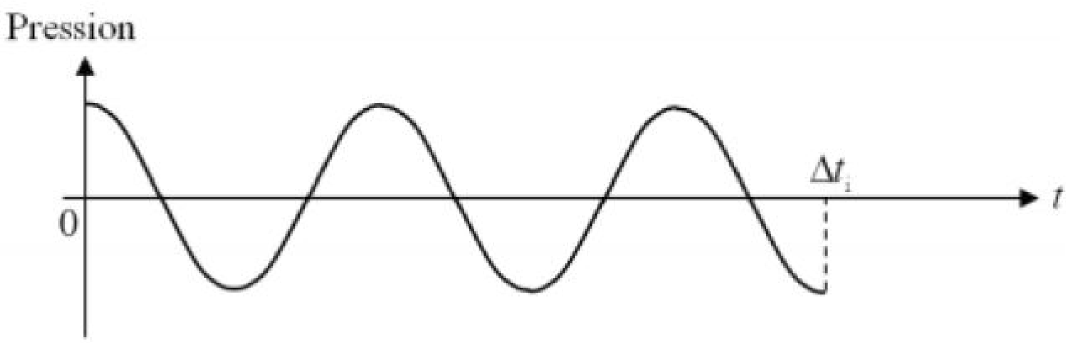



1 Quelles sont les fréquences des ultrasons ? Connaissez-vous un des usages autres que dans les sonars que l'être humain peut faire des ultrasons ?

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

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

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




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

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

5 Exprimer et calculer numériquement la longueur spatiale $\Delta x$ de l'impulsion.

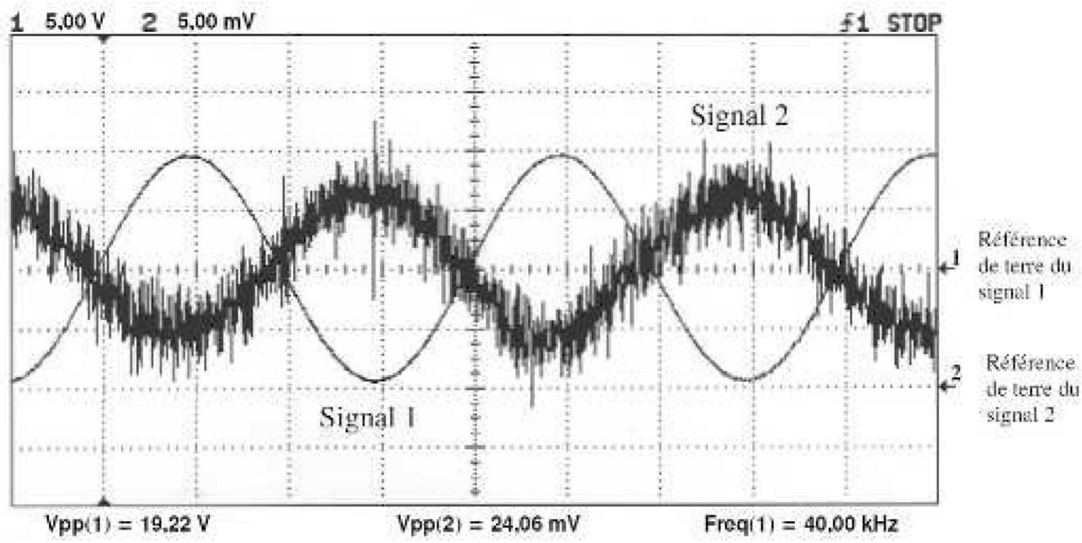
6 Reproduire sur la copie le système d'axes de la figure ci-dessous et y représenter l'impulsion sonore à l'instant $t = 12{,}0\,\mathrm{ms}$ ; calculer numériquement, en justifiant précisément, les positions du début (ou front) de l'impulsion et de sa fin.


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.

# 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.

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.

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.

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.

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.