

# Ondes mécaniques progressives

## COURS • P05 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

### Sommaire du cours

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Ce que tu dois savoir faire | 1  |
| Cours                       | 1  |
| Exemples résolus            | 8  |
| Méthodes et pièges          | 8  |
| Vers le PASS                | 9  |
| Exercices                   | 9  |
| Corrigés                    | 11 |

## Ce que tu dois savoir faire

- Définir une onde mécanique progressive et distinguer une onde transversale d'une onde longitudinale.
- Expliquer qu'une onde transporte de l'énergie sans transport global de matière.
- Calculer une célérité à partir d'une distance et d'une durée de propagation, en unités SI.
- Exprimer et calculer le retard d'un point du milieu par rapport à la source.
- Reconnaître une onde périodique et définir sa période, sa fréquence et sa longueur d'onde.
- Exploiter la relation  $\lambda = v \cdot T = v/f$  dans un sens comme dans l'autre.
- Distinguer la périodicité temporelle et la périodicité spatiale d'une onde sinusoïdale.
- Déterminer si deux points d'un milieu vibrent en phase ou en opposition de phase.
- Classer un son selon sa fréquence (infrason, son audible, ultrason) et citer des ordres de grandeur de célérité.
- Exploiter un enregistrement (chronophotographie, oscilloscope, écho) pour mesurer une célérité ou une longueur d'onde.

## Cours

### 1. Qu'est-ce qu'une onde mécanique progressive ?

Lorsqu'on lance un caillou dans une mare, une ride circulaire s'éloigne du point d'impact. Lorsqu'on secoue une extrémité d'une corde tendue, une bosse court le long de la corde. Dans les deux cas, une déformation locale du milieu se déplace de proche en proche.

Une **onde mécanique progressive** est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel, sans transport global de matière, mais avec transport d'énergie.

Trois idées sont contenues dans cette définition.

- Il faut un **milieu matériel** (corde, air, eau, solide). Une onde mécanique ne se propage pas dans le vide : c'est pour cela qu'aucun son ne traverse l'espace interplanétaire.
- Chaque point du milieu reprend sa position d'équilibre après le passage de la perturbation : la matière oscille sur place, elle ne voyage pas. Un bouchon posé sur l'eau monte et descend au passage d'une ride, il n'est pas emporté par elle.
- L'onde transporte de l'**énergie** : la houle peut soulever un bateau, un son fait vibrer le tympan, une onde sismique détruit un bâtiment situé loin de l'épicentre.

La propagation s'explique par les interactions entre les éléments voisins du milieu : chaque portion déformée entraîne la portion suivante, qui entraîne la suivante, et ainsi de suite. La perturbation se transmet donc de proche en proche, à vitesse finie.

**Onde à une, deux ou trois dimensions.** Le long d'une corde, la perturbation se propage dans une seule direction (une dimension). À la surface de l'eau, elle s'étale dans un plan (deux dimensions). Le son émis par un haut-parleur se propage dans tout l'espace (trois dimensions). Dans tous les cas, l'onde se propage dans toutes les directions qui lui sont offertes à partir de la source.

## 2. Ondes transversales et ondes longitudinales

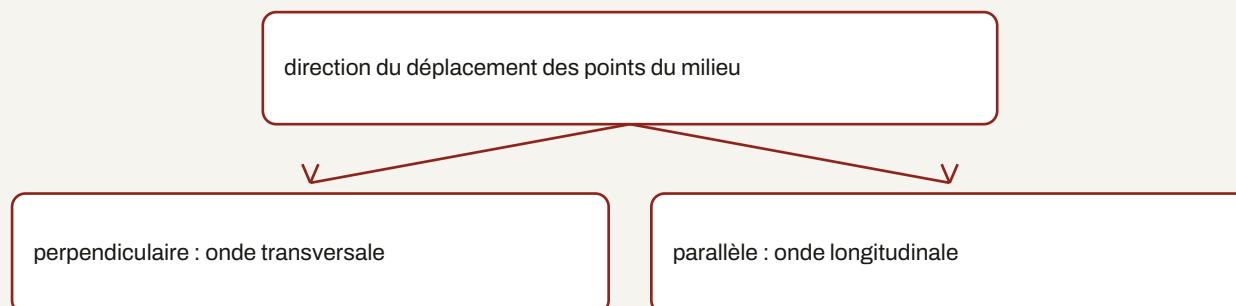
On compare la direction du mouvement des points du milieu à la direction de propagation de l'onde.

- Une onde est **transversale** lorsque la perturbation (le déplacement des points du milieu) est perpendiculaire à la direction de propagation. Exemples : onde le long d'une corde secouée verticalement, « ola » dans un stade (les spectateurs se lèvent verticalement, l'onde court horizontalement).
- Une onde est **longitudinale** lorsque la perturbation est parallèle à la direction de propagation. Exemples : compression qui court le long d'un ressort comprimé dans son axe, onde sonore dans l'air.

| Type d'onde   | Mouvement des points du milieu   | Exemples              |
|---------------|----------------------------------|-----------------------|
| Transversale  | perpendiculaire à la propagation | corde, ola            |
| Longitudinale | parallèle à la propagation       | ressort comprimé, son |



## Comparer la perturbation à la propagation



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

### 3. La célérité d'une onde

La **célérité**  $v$  d'une onde est la vitesse à laquelle la perturbation se propage dans le milieu. Si la perturbation parcourt la distance  $d$  pendant la durée  $\Delta t$  :

$$v = d / \Delta t$$

avec  $d$  en mètres (m),  $\Delta t$  en secondes (s) et  $v$  en mètres par seconde ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Il ne faut pas confondre la célérité de l'onde (vitesse de déplacement de la perturbation) avec la vitesse des points du milieu (qui oscillent sur place). Ce sont deux grandeurs différentes.

**De quoi dépend la célérité ?** Elle dépend du **milieu** de propagation : de sa nature, de sa rigidité, de son inertie et de sa température. Le long d'une corde, elle augmente quand on tend davantage la corde et diminue quand la corde est plus lourde. Dans le cadre du programme, on admet qu'elle **ne dépend pas de la forme ni de l'amplitude** de la perturbation.

Ordres de grandeur de la célérité du son :

| Milieu                      | Célérité du son                                                                 |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Air à 20 °C                 | environ $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ( $343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
| Eau liquide                 | environ $1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$                                    |
| Tissus mous du corps humain | environ $1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$                                    |
| Acier                       | environ $5\,000$ à $6\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$                         |
| Vide                        | aucune propagation                                                              |

On retient que le son se propage en général plus vite dans les liquides que dans les gaz, et plus vite dans les solides que dans les liquides. Dans l'air, la célérité augmente avec la température.

**Comparaison avec la lumière.** La lumière se propage à  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans le vide (et pratiquement à cette valeur dans l'air), soit environ un million de fois plus vite que le son dans l'air. C'est pour cela que l'on voit l'éclair avant d'entendre le tonnerre : la durée de propagation de la

lumière sur quelques kilomètres est négligeable devant celle du son.

#### 4. Le retard

Considérons une source S qui émet une perturbation à l'instant  $t = 0$ , et un point M du milieu situé à la distance  $SM = d$  de la source. La perturbation atteint M avec un **retard**  $\tau$  (lettre grecque tau) :

$$\tau = d / v$$

Le point M reproduit exactement le mouvement de la source, mais décalé dans le temps de  $\tau$  (en l'absence d'amortissement). Si on note  $y_S(t)$  l'élongation de la source et  $y_M(t)$  celle du point M :

$$y_M(t) = y_S(t - \tau)$$

Autrement dit, ce que fait M à l'instant  $t$ , la source l'a fait à l'instant  $t - \tau$ .

Plus généralement, si deux points M et N sont situés sur la même direction de propagation, avec N plus loin de la source que M, le retard de N sur M vaut  $\tau = MN / v$ .

Le retard ne dépend que de la distance et de la célérité. Il ne dépend pas de la forme de la perturbation.

**Exemple court.** Le long d'une corde où  $v = 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , un point situé à 2,0 m de l'extrémité secouée commence à bouger avec un retard  $\tau = 2,0 / 4,0 = 0,50 \text{ s}$ .

**Double lecture d'un enregistrement.** Une onde se représente de deux façons complémentaires :

- l'aspect du milieu à un instant donné (une « photographie ») : élongation en fonction de la position  $x$  ;
- l'évolution d'un point donné au cours du temps : élongation en fonction du temps  $t$ .

Sur une photographie, la perturbation a une certaine étendue spatiale  $L$ . Sur l'enregistrement temporel d'un point, elle a une certaine durée  $\Delta t$ . Les deux sont liées par  $L = v \cdot \Delta t$ . Attention : sur la représentation spatiale, l'avant de l'onde (le front) est du côté de la propagation, alors que sur la représentation temporelle d'un point, le front est ce qui arrive en premier, donc à gauche (aux petites valeurs de  $t$ ). La forme apparaît donc « retournée » d'une représentation à l'autre.

#### 5. Ondes périodiques : période, fréquence, longueur d'onde

Une onde est **périodique** lorsque la source produit une perturbation qui se répète identique à elle-même à intervalles de temps égaux. L'exemple le plus important est l'**onde sinusoïdale**, dont la source oscille selon une fonction sinus du temps (diapason, haut-parleur alimenté par un générateur de signaux).

**Périodicité temporelle.** Chaque point du milieu reproduit le mouvement de la source : il oscille avec la même période.

- La **période**  $T$  est la plus petite durée au bout de laquelle le mouvement d'un point se reproduit identique à lui-même. Elle s'exprime en secondes (s).
- La **fréquence**  $f$  est le nombre de périodes par seconde :

$$f = 1 / T$$

$f$  en hertz (Hz),  $T$  en secondes. Un hertz correspond à une oscillation par seconde. La fréquence est imposée par la source : elle **ne change pas** quand l'onde passe d'un milieu à un autre.

**Périodicité spatiale.** À un instant donné, l'aspect du milieu se répète le long de la direction de propagation.

- La **longueur d'onde**  $\lambda$  (lambda) est la plus petite distance séparant deux points du milieu qui vibrent en phase. C'est aussi la distance parcourue par l'onde pendant une période. Elle s'exprime en mètres (m).

Puisque l'onde parcourt la distance  $\lambda$  pendant la durée  $T$  à la célérité  $v$  :

$$\lambda = v \cdot T = v / f$$

Relation fondamentale :  $\lambda = v \cdot T$ , avec  $\lambda$  en m,  $v$  en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $T$  en s. Elle relie la périodicité spatiale ( $\lambda$ ) à la périodicité temporelle ( $T$ ) par l'intermédiaire de la célérité.

### Conséquences importantes.

- Dans un milieu donné ( $v$  fixée),  $\lambda$  est inversement proportionnelle à  $f$  : doubler la fréquence divise la longueur d'onde par deux.
- Quand une onde change de milieu,  $f$  reste la même,  $v$  change, donc  $\lambda$  change dans le même rapport que  $v$ . Un son de 1 000 Hz a une longueur d'onde de 0,34 m dans l'air et de 1,5 m dans l'eau.

**Points en phase, points en opposition de phase.** Deux points M et N situés sur une même direction de propagation, séparés de la distance  $d$  :

- vibrent **en phase** (ils ont à chaque instant la même élongation et le même sens de mouvement) si  $d$  est un multiple entier de la longueur d'onde :  $d = k \cdot \lambda$ , avec  $k$  entier ;
- vibrent **en opposition de phase** (élongations opposées à chaque instant) si  $d$  est un multiple impair de la demi-longueur d'onde :  $d = (k + 1/2) \cdot \lambda$ .

Méthode : on calcule le rapport  $d / \lambda$ . S'il est entier, les points sont en phase ; s'il vaut un entier plus 0,5, ils sont en opposition de phase ; sinon, ils ne sont ni l'un ni l'autre.

On peut raisonner de façon équivalente avec le retard : N est en phase avec M si le retard  $\tau = d / v$  est un multiple entier de  $T$ .

### De la source à la longueur d'onde

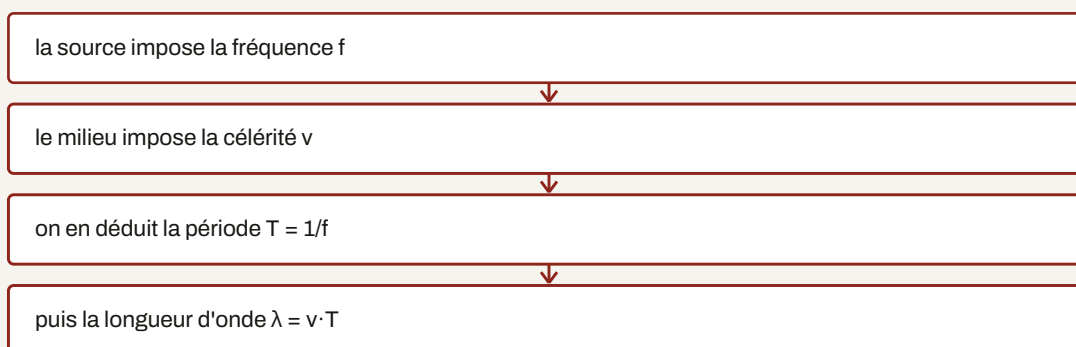


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

## 6. Ondes sonores et ultrasonores

Un son est une onde mécanique progressive **longitudinale**. Une source sonore (membrane de haut-parleur, corde vocale, diapason) comprime puis dilate alternativement le milieu qui l'entoure. Ces compressions et dilatations, c'est-à-dire des petites variations de pression autour de la pression moyenne, se propagent de proche en proche. Les molécules d'air oscillent autour de leur position moyenne, dans la direction de propagation.

Un son ne se propage pas dans le vide : l'expérience classique du réveil placé sous une cloche dont on retire l'air le montre, le son s'affaiblit jusqu'à disparaître alors que l'on voit toujours le marteau frapper.

**Domaines de fréquences.** L'oreille humaine perçoit, en moyenne, les sons de fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz (cette plage se rétrécit avec l'âge, surtout du côté des hautes fréquences).

| Domaine                         | Fréquence           |
|---------------------------------|---------------------|
| Infrasons                       | inférieure à 20 Hz  |
| Sons audibles par l'être humain | de 20 Hz à 20 kHz   |
| Ultrasons                       | supérieure à 20 kHz |

Les infrasons sont produits par les séismes, les éruptions, la houle ; certains animaux comme l'éléphant communiquent par infrasons. Les ultrasons sont utilisés par la chauve-souris et le dauphin (écholocation), par le sonar des navires et par l'échographie médicale (fréquences de l'ordre de 1 à 20 MHz).

**Hauteur d'un son.** Un son périodique est caractérisé par sa fréquence, que l'oreille perçoit comme la **hauteur** : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu. Le  $la_3$  de référence des musiciens ( $la_3$ ) a une fréquence de 440 Hz.

**Écho et mesure de distance.** Lorsqu'une onde rencontre un obstacle, une partie est renvoyée : c'est la **réflexion**, à l'origine de l'écho. Si un émetteur et un récepteur placés au même endroit détectent l'écho au bout de la durée  $\Delta t$  après l'émission, l'onde a parcouru l'aller et le retour, soit deux fois la distance  $D$  à l'obstacle :

$$2D = v \cdot \Delta t, \text{ donc } D = v \cdot \Delta t / 2$$

C'est le principe du sonar (mesure de la profondeur des fonds marins), de l'écholocation et de l'échographie. En échographie, une sonde émet de brèves impulsions ultrasonores et capte les échos renvoyés par les interfaces entre tissus ; la durée de chaque écho donne la profondeur de l'interface, avec  $v \approx 1\,540 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans les tissus mous.

**Pourquoi des ultrasons en échographie ?** Leur fréquence élevée donne une petite longueur d'onde ( $\lambda = 1\,540 / (5 \times 10^6) \approx 3 \times 10^{-4} \text{ m}$ , soit 0,3 mm à 5 MHz). Or on ne distingue bien que des détails de taille au moins comparable à la longueur d'onde : une petite longueur d'onde permet donc de voir des détails fins.



## Principe de la mesure par écho

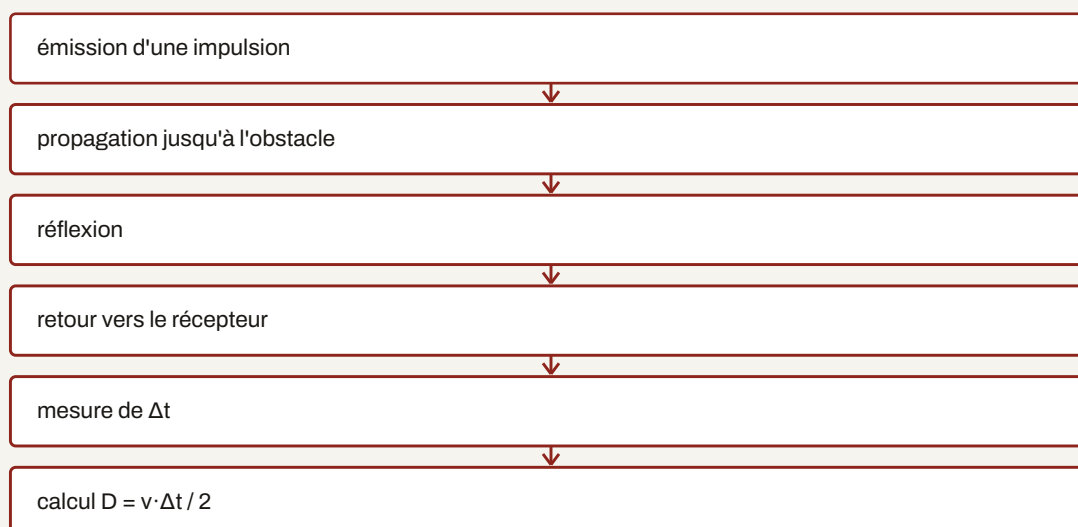


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

## 7. Mesurer une célérité et une longueur d'onde

Plusieurs méthodes expérimentales sont au programme.

**Mesure d'un retard.** Deux microphones (ou deux récepteurs ultrasonores) sont placés sur la même direction de propagation, à une distance  $d$  l'un de l'autre. On enregistre une impulsion sonore (un claquement) et on mesure le décalage temporel  $\tau$  entre les deux signaux. On en déduit  $v = d / \tau$ .

**Chronophotographie ou vidéo.** On filme une perturbation qui se propage le long d'une corde ou d'un ressort. On relève la position du front à différents instants : la pente de la droite position en fonction du temps est la célérité.

**Mesure de la longueur d'onde à l'oscilloscope.** Un émetteur produit une onde sinusoïdale (par exemple des ultrasons de 40 kHz). Deux récepteurs  $R_1$  et  $R_2$  sont reliés aux deux voies d'un oscilloscope. Au départ, ils sont côte à côte et les deux signaux sont en phase. On éloigne lentement  $R_2$  : les signaux se décalent, puis redeviennent en phase chaque fois que  $R_2$  a reculé d'une longueur d'onde. On compte un grand nombre  $n$  de retours en phase et on mesure la distance totale  $D$  parcourue par  $R_2$  :  $\lambda = D / n$ . Mesurer plusieurs longueurs d'onde d'un coup réduit l'erreur relative de lecture. Connaissant  $f$  (lue à l'oscilloscope à partir de  $T$ , ou affichée par le générateur), on obtient  $v = \lambda \cdot f$ .

**Lecture d'un oscillogramme.** La sensibilité horizontale (par exemple 10  $\mu s$  par division) permet de convertir un nombre de divisions en durée. On mesure la durée de plusieurs périodes et on divise par leur nombre pour obtenir  $T$  avec plus de précision.

## Exemples résolus

### Exemple 1 : perturbation le long d'une corde

**Énoncé.** On secoue brièvement l'extrémité S d'une corde horizontale à l'instant  $t = 0$ . La perturbation atteint un point A situé à 1,20 m de S à l'instant  $t_A = 0,40$  s. a) Calculer la célérité de l'onde. b) Quand atteindra-t-elle le point B situé à 3,00 m de S ? c) La perturbation dure 0,10 s en chaque point : quelle longueur de corde est déformée à un instant donné ? d) L'onde est-elle transversale ou longitudinale ?

**Résolution.** a) La perturbation parcourt  $SA = 1,20$  m en  $\Delta t = 0,40$  s :  $v = SA / \Delta t = 1,20 / 0,40 = 3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . b) Le retard de B sur S est  $\tau_B = SB / v = 3,00 / 3,0 = 1,0$  s. Comme la source a été perturbée à  $t = 0$ , B est atteint à  $t_B = 1,0$  s. c) Pendant les 0,10 s que dure le passage en un point, le front avance de  $L = v\cdot\Delta t = 3,0 \times 0,10 = 0,30$  m : c'est l'étendue de la perturbation sur la corde. d) La main déplace la corde perpendiculairement à sa direction, et la perturbation se propage le long de la corde : le mouvement des points est perpendiculaire à la propagation, l'onde est **transversale**.

### Exemple 2 : mesure de la longueur d'onde d'ultrasons

**Énoncé.** Un émetteur produit des ultrasons sinusoïdaux. Sur l'oscilloscope, avec une sensibilité horizontale de  $5 \mu\text{s}$  par division, quatre périodes occupent 20 divisions. On éloigne le récepteur  $R_2$  du récepteur  $R_1$  : les signaux redeviennent en phase 10 fois pendant un déplacement de 8,5 cm. a) Déterminer la période et la fréquence. b) Déterminer la longueur d'onde. c) En déduire la célérité des ultrasons dans l'air. d) S'agit-il bien d'ultrasons ?

**Résolution.** a) Quatre périodes durent  $20 \times 5 \mu\text{s} = 100 \mu\text{s}$ , donc  $T = 100 / 4 = 25 \mu\text{s} = 2,5 \times 10^{-5}$  s. Alors  $f = 1 / T = 1 / (2,5 \times 10^{-5}) = 4,0 \times 10^4$  Hz, soit 40 kHz. b) Chaque retour en phase correspond à un déplacement d'une longueur d'onde :  $10 \lambda = 8,5$  cm, donc  $\lambda = 0,85$  cm =  $8,5 \times 10^{-3}$  m. c)  $v = \lambda \cdot f = 8,5 \times 10^{-3} \times 4,0 \times 10^4 = 3,4 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , soit  $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , valeur attendue pour le son dans l'air. d)  $f = 40$  kHz est supérieure à 20 kHz : ce sont bien des **ultrasons**, inaudibles pour l'être humain.

### Exemple 3 : échographie

**Énoncé.** Une sonde échographique émet des impulsions ultrasonores de fréquence 5,0 MHz. L'écho renvoyé par la paroi d'un organe revient  $65 \mu\text{s}$  après l'émission. Dans les tissus mous,  $v = 1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . a) À quelle profondeur se trouve la paroi ? b) Calculer la longueur d'onde des ultrasons dans les tissus. c) Pourquoi utilise-t-on une fréquence aussi élevée ?

**Résolution.** a) L'onde fait l'aller et le retour :  $2D = v\cdot\Delta t$ , donc  $D = v\cdot\Delta t / 2 = 1\,540 \times 65 \times 10^{-6} / 2 = 0,100 / 2 \approx 5,0 \times 10^{-2}$  m. La paroi est à **5,0 cm** de profondeur. b)  $\lambda = v / f = 1\,540 / (5,0 \times 10^6) = 3,1 \times 10^{-4}$  m, soit environ 0,31 mm. c) On ne distingue que des détails dont la taille est au moins de l'ordre de la longueur d'onde. Une fréquence élevée donne une longueur d'onde petite, donc une image plus fine : une fréquence de quelques mégahertz permet de voir des structures de l'ordre du millimètre.

## Méthodes et pièges

- Méthode type : identifie d'abord ce que l'énoncé fixe (la source fixe  $f$ , le milieu fixe  $v$ ), puis déduis  $T = 1/f$  et  $\lambda = v\cdot T$ . Écris toujours la formule littérale avant l'application numérique.
- Convertis avant de calculer : cm en m,  $\mu\text{s}$  en s ( $1 \mu\text{s} = 10^{-6}$  s), kHz en Hz ( $1 \text{ kHz} = 10^3$  Hz), MHz en Hz ( $1 \text{ MHz} = 10^6$  Hz).

- Ne confonds pas la célérité de l'onde avec la vitesse des points du milieu : un bouchon sur l'eau n'avance pas avec la vague.
- Quand une onde change de milieu, c'est la fréquence qui reste constante, pas la longueur d'onde. Le rapport des longueurs d'onde est égal au rapport des célérités.
- Pour un écho, n'oublie pas le facteur 2 : la durée mesurée correspond à un aller-retour.
- Pour mesurer une période ou une longueur d'onde, mesure plusieurs périodes ou plusieurs longueurs d'onde et divise : l'erreur de lecture est alors répartie.
- Pour savoir si deux points sont en phase, calcule  $d / \lambda$  : entier, en phase ; entier plus 0,5, opposition de phase.
- Sur une représentation spatiale, le front de l'onde est du côté vers lequel elle avance ; sur une représentation temporelle d'un point, le front est ce qui arrive en premier. Ne recopie pas une forme d'un graphique à l'autre sans la retourner.
- Un son ne traverse pas le vide : toute réponse qui fait se propager un son dans l'espace interplanétaire est fausse.

## Vers le PASS

En PASS, les ondes mécaniques sont la base de l'acoustique physiologique et de l'imagerie ultrasonore. On y étudie l'intensité et le niveau sonore en décibels, la notion d'impédance acoustique qui explique pourquoi une partie de l'onde est réfléchiée à chaque interface entre tissus (et pourquoi on applique un gel entre la sonde et la peau), l'atténuation qui croît avec la fréquence, et l'effet Doppler qui permet de mesurer la vitesse du sang. Le compromis entre résolution (petite longueur d'onde, donc haute fréquence) et profondeur d'exploration (faible atténuation, donc basse fréquence) découle directement de la relation  $\lambda = v / f$  vue ici. Les questions classiques de concours portent sur le calcul d'une profondeur à partir d'un écho, d'une longueur d'onde dans un tissu, ou sur le changement de milieu à fréquence constante.

Suite en PASS : Ondes, acoustique et formation des images

## Exercices

### Niveau 1 : s'entraîner

1. Un son parcourt 1,02 km dans l'air en 3,0 s. Calcule sa célérité en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
2. Un diapason émet un la de fréquence 440 Hz dans l'air, où la célérité du son vaut  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Calcule la période du son puis sa longueur d'onde.
3. Une perturbation se propage le long d'une corde à la célérité de  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . La source est secouée à  $t = 0$ . À quel instant un point M situé à 1,5 m de la source commence-t-il à bouger ?
4. Classe chacun des sons suivants parmi les infrasons, les sons audibles et les ultrasons : 15 Hz ; 1,2 kHz ; 18 kHz ; 25 kHz ; 3 MHz.
5. Indique si chaque onde est transversale ou longitudinale, en justifiant : a) onde le long d'une corde de guitare pincée ; b) onde sonore dans l'air ; c) compression se propageant le long d'un ressort, dans son axe ; d) ola dans un stade.

## Niveau 2 : type bac

6. Un bouchon flottant sur la mer effectue 12 oscillations verticales complètes en 60 s. On mesure que deux crêtes successives de la houle sont distantes de 40 m.
- a) Calcule la période et la fréquence de la houle. b) Indique la longueur d'onde, puis calcule la célérité de la houle. c) Combien de temps une crête met-elle pour atteindre un voilier situé à 200 m du bouchon, dans la direction de propagation ? d) Le bouchon est-il emporté par la houle ? Justifie.
7. Un émetteur sonore est relié à deux microphones  $R_1$  et  $R_2$  branchés sur un oscilloscope réglé à 50  $\mu$ s par division. Sur l'écran, une période du signal occupe 5,0 divisions.
- a) Calcule la période et la fréquence du son. Est-il audible ? b) Au départ,  $R_1$  et  $R_2$  sont côte à côte et les signaux sont en phase. On éloigne  $R_2$  : les signaux redeviennent en phase pour la cinquième fois après un déplacement de 42,5 cm. Calcule la longueur d'onde. c) Déduis-en la célérité du son. d) Pourquoi vaut-il mieux compter cinq retours en phase plutôt qu'un seul ?
8. Lors d'un orage, Léa voit un éclair puis entend le tonnerre 4,5 s plus tard. On donne la célérité du son dans l'air,  $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , et celle de la lumière,  $3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- a) Calcule la distance qui sépare Léa de l'impact. b) Calcule la durée de propagation de la lumière sur cette distance et justifie qu'on peut la négliger. c) Une règle pratique dit « trois secondes par kilomètre ». Vérifie-la.
9. On filme une perturbation qui se propage le long d'une corde tendue. Le front de la perturbation est à la position  $x = 0,30 \text{ m}$  à l'instant  $t = 0,10 \text{ s}$  et à  $x = 0,90 \text{ m}$  à  $t = 0,30 \text{ s}$ .
- a) Calcule la célérité de l'onde. b) À quel instant la perturbation a-t-elle quitté la source, placée en  $x = 0$  ? c) À quel instant atteindra-t-elle le point situé à  $x = 1,80 \text{ m}$  ? d) La perturbation s'étend sur 0,15 m de corde. Combien de temps dure le mouvement d'un point de la corde à son passage ?

## Niveau 3 : vers le PASS

10. Une sonde échographique de fréquence 3,5 MHz est posée sur l'abdomen. Elle reçoit deux échos, 26  $\mu$ s et 91  $\mu$ s après l'émission, correspondant aux parois avant et arrière d'un organe. Dans les tissus mous,  $v = 1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- a) Calcule la profondeur de chacune des deux parois. b) Déduis-en l'épaisseur de l'organe. c) Calcule la longueur d'onde des ultrasons dans les tissus. d) Un médecin souhaite distinguer des détails plus fins. Doit-il augmenter ou diminuer la fréquence ? Justifie à l'aide de la relation entre  $\lambda$  et  $f$ .
11. Pour chaque affirmation, indique si elle est vraie ou fausse en justifiant.
- A. Dans un même milieu, doubler la fréquence d'une onde sinusoïdale divise sa longueur d'onde par deux. B. Quand un son passe de l'air ( $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) à l'eau ( $1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), sa longueur d'onde est multipliée par environ 4,4. C. La célérité d'une onde le long d'une corde augmente avec l'amplitude de la perturbation. D. Deux points d'une même direction de propagation séparés de  $1,5 \lambda$  vibrent en phase. E. Une onde sonore transporte de l'air depuis la source jusqu'à l'auditeur.
12. Un sonar fixé sous la coque d'un navire émet de brèves impulsions ultrasonores verticalement. Dans l'eau de mer,  $v = 1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- a) L'écho du fond revient 0,80 s après l'émission. Calcule la profondeur. b) Un second écho, plus faible, revient 0,24 s après l'émission. Interprète-le et calcule la profondeur correspondante. c) Pour ne pas confondre l'écho d'une impulsion avec l'impulsion suivante, chaque écho du fond doit revenir avant l'émission suivante. Calcule la durée minimale entre deux impulsions, puis la fréquence maximale de

répétition des impulsions à cette profondeur.

13. Une onde sinusoïdale de fréquence 50 Hz se propage le long d'une corde à la célérité de  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Deux points A et B de la corde, dans cet ordre à partir de la source, sont distants de 1,0 m.

a) Calcule la longueur d'onde et la période. b) Calcule le retard de B sur A et exprime-le en nombre de périodes. A et B vibrent-ils en phase, en opposition de phase, ou ni l'un ni l'autre ? c) Quelle est la plus petite distance non nulle entre A et un point de la corde vibrant en phase avec A ? d) On règle la fréquence de la source à 100 Hz, sans changer la corde. Que deviennent la longueur d'onde et la relation de phase entre A et B ?

## Corrigés

1. La célérité est le quotient de la distance parcourue par la durée :  $v = d / \Delta t$ . On convertit  $d = 1,02 \text{ km} = 1\,020 \text{ m}$ . Donc  $v = 1\,020 / 3,0 = 3,4 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), valeur habituelle du son dans l'air.

2. Période :  $T = 1 / f = 1 / 440 = 2,27 \times 10^{-3} \text{ s}$ , soit  $T \approx 2,3 \text{ ms}$ . Longueur d'onde :  $\lambda = v / f = 340 / 440 = 0,773 \text{ m}$ , soit  $\lambda \approx 0,77 \text{ m}$ . Vérification :  $v \cdot T = 340 \times 2,27 \times 10^{-3} = 0,772 \text{ m}$ , cohérent.

3. Le retard de M sur la source est  $\tau = d / v = 1,5 / 2,5 = 0,60 \text{ s}$ . La source a été secouée à  $t = 0$ , donc M commence à bouger à  $t = 0,60 \text{ s}$ .

4. Les sons audibles par l'être humain vont de 20 Hz à 20 kHz. Donc : 15 Hz est un **infrason** (inférieur à 20 Hz) ; 1,2 kHz = 1 200 Hz est **audible** ; 18 kHz est **audible** (inférieur à 20 kHz, même si beaucoup d'adultes ne l'entendent plus) ; 25 kHz est un **ultrason** ; 3 MHz =  $3 \times 10^6 \text{ Hz}$  est un **ultrason** (domaine de l'échographie).

5. a) Les points de la corde se déplacent perpendiculairement à la corde alors que l'onde se propage le long de la corde : **transversale**. b) Les molécules d'air oscillent dans la direction de propagation (compressions et dilatations successives) : **longitudinale**. c) Les spires se déplacent le long de l'axe, qui est aussi la direction de propagation : **longitudinale**. d) Les spectateurs se lèvent verticalement, l'onde parcourt les gradins horizontalement : **transversale**.

6. a) Douze oscillations durent 60 s, donc  $T = 60 / 12 = 5,0 \text{ s}$ , et  $f = 1 / T = 1 / 5,0 = 0,20 \text{ Hz}$ .

b) Deux crêtes successives vibrent en phase et sont les plus proches : leur distance est la longueur d'onde,  $\lambda = 40 \text{ m}$ . Alors  $v = \lambda / T = 40 / 5,0 = 8,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . c) Durée de propagation :  $\Delta t = d / v = 200 / 8,0 = 25 \text{ s}$ . d) **Non** : une onde transporte de l'énergie sans transport global de matière. Le bouchon monte et descend (et oscille un peu autour de sa position), mais il n'est pas entraîné avec la houle.

7. a)  $T = 5,0 \text{ div} \times 50 \mu\text{s/div} = 250 \mu\text{s} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ s}$ .  $f = 1 / T = 1 / (2,5 \times 10^{-4}) = 4,0 \times 10^3 \text{ Hz}$  (4,0 kHz). Cette fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz : le son est **audible**.

b) Chaque retour en phase correspond à un déplacement d'une longueur d'onde :  $5 \lambda = 42,5 \text{ cm}$ , donc  $\lambda = 8,5 \text{ cm} = 8,5 \times 10^{-2} \text{ m}$ . c)  $v = \lambda \cdot f = 8,5 \times 10^{-2} \times 4,0 \times 10^3 = 3,4 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . d) L'erreur de repérage d'une position de mise en phase est à peu près la même quel que soit le nombre de longueurs d'onde mesurées. En la répartissant sur cinq longueurs d'onde, on divise par cinq l'erreur commise sur  $\lambda$  : **la mesure est plus précise**.

8. a) La lumière arrive pratiquement instantanément, donc 4,5 s est la durée de propagation du son.  $d = v \cdot \Delta t = 340 \times 4,5 = 1\,530 \text{ m}$ , soit  $d \approx 1,5 \text{ km}$ .

b) Durée de propagation de la lumière :  $\Delta t' = d / c = 1\,530 / (3,00 \times 10^8) = 5,1 \times 10^{-6} \text{ s}$ . Elle est près d'un million de fois plus petite que 4,5 s : elle est **négligeable**. c) Durée pour 1 km = 1 000 m :  $\Delta t = 1\,000 / 340 = 2,9 \text{ s}$ , soit environ 3 s. La règle est **vérifiée**.

9. a) Entre  $t = 0,10$  s et  $t = 0,30$  s, le front avance de  $0,90 - 0,30 = 0,60$  m en  $0,20$  s :  $v = 0,60 / 0,20 = 3,0$  m·s<sup>-1</sup>.

b) Pour aller de  $x = 0$  à  $x = 0,30$  m, il faut  $0,30 / 3,0 = 0,10$  s. Le front était en  $0,30$  m à  $t = 0,10$  s, il a donc quitté la source à  $t = 0,10 - 0,10 = 0$  s. c) Retard du point  $x = 1,80$  m sur la source :  $\tau = 1,80 / 3,0 = 0,60$  s. Il est atteint à  $t = 0,60$  s. d) La perturbation de longueur  $L = 0,15$  m défile devant un point à la célérité  $v$  : la durée du mouvement est  $\Delta t = L / v = 0,15 / 3,0 = 0,050$  s (50 ms).

10. a) Pour chaque écho, la durée correspond à un aller-retour :  $D = v \cdot \Delta t / 2$ .

Paroi avant :  $D_1 = 1\,540 \times 26 \times 10^{-6} / 2 = 0,0400 / 2 = 2,0 \times 10^{-2}$  m, soit 2,0 cm. Paroi arrière :  $D_2 = 1\,540 \times 91 \times 10^{-6} / 2 = 0,140 / 2 = 7,0 \times 10^{-2}$  m, soit 7,0 cm. b) Épaisseur :  $e = D_2 - D_1 = 7,0 - 2,0 = 5,0$  cm. On peut aussi écrire  $e = v \cdot (\Delta t_2 - \Delta t_1) / 2 = 1\,540 \times 65 \times 10^{-6} / 2 = 5,0 \times 10^{-2}$  m. c)  $\lambda = v / f = 1\,540 / (3,5 \times 10^6) = 4,4 \times 10^{-4}$  m, soit 0,44 mm. d) On ne distingue que des détails de taille au moins comparable à  $\lambda$ . Pour voir plus fin, il faut une longueur d'onde plus petite. Comme  $\lambda = v / f$  avec  $v$  fixée par le tissu, il faut **augmenter la fréquence**. (En pratique, l'onde est alors plus atténuée et explore moins profondément : c'est un compromis.)

11. A. **Vrai** :  $\lambda = v / f$  et  $v$  ne dépend que du milieu, donc  $\lambda$  est inversement proportionnelle à  $f$ .

B. **Vrai** :  $f$  est conservée, donc  $\lambda_{\text{eau}} / \lambda_{\text{air}} = v_{\text{eau}} / v_{\text{air}} = 1\,500 / 340 = 4,4$ . C. **Faux** : dans le cadre du programme, la célérité dépend du milieu (tension et masse de la corde), pas de l'amplitude. D. **Faux** :  $1,5 \lambda = (1 + 1/2) \lambda$ , c'est un multiple impair de  $\lambda/2$ . Les points vibrent en **opposition** de phase. E. **Faux** : l'onde sonore transporte de l'énergie, pas de matière. Les molécules d'air oscillent autour de leur position moyenne.

12. a) L'écho correspond à un aller-retour :  $D = v \cdot \Delta t / 2 = 1\,500 \times 0,80 / 2 = 6,0 \times 10^2$  m (600 m).

b) Un écho plus précoce provient d'un obstacle situé entre le navire et le fond, par exemple un banc de poissons. Sa profondeur :  $D' = 1\,500 \times 0,24 / 2 = 1,8 \times 10^2$  m (180 m). c) L'écho du fond revient 0,80 s après l'émission : l'impulsion suivante doit partir au moins 0,80 s après. La fréquence maximale de répétition est  $f_{\text{max}} = 1 / 0,80 = 1,25$  Hz, soit environ 1,3 impulsion par seconde.

13. a)  $\lambda = v / f = 20 / 50 = 0,40$  m ;  $T = 1 / f = 1 / 50 = 0,020$  s (20 ms).

b) Retard de B sur A :  $\tau = AB / v = 1,0 / 20 = 0,050$  s. En périodes :  $\tau / T = 0,050 / 0,020 = 2,5$ . De même  $AB / \lambda = 1,0 / 0,40 = 2,5 = 2 + 1/2$  : A et B vibrent en **opposition de phase**. c) Les points en phase avec A sont à des distances multiples entières de  $\lambda$ . La plus petite distance non nulle est  $\lambda = 0,40$  m. d) La corde n'a pas changé, donc  $v = 20$  m·s<sup>-1</sup> reste la même.  $\lambda' = v / f' = 20 / 100 = 0,20$  m (divisée par deux).  $AB / \lambda' = 1,0 / 0,20 = 5$ , nombre entier : A et B vibrent désormais en **phase**.