

Ces corrigés accompagnent le chapitre **Ondes, interférences et diffraction**. Après lecture d'une solution, reprenez la question sans regarder le corrigé. Repérez si votre difficulté concernait l'axe du graphe, une conversion d'unité, le facteur 2 d'un aller-retour, le milieu de propagation ou la condition d'interférence.

Vérifications flash

F1 — Un point de la corde

La bosse avance vers la droite et P est sur le versant qu'elle vient de franchir : la corde y redescend vers sa position de repos. P se déplace donc vers le bas, perpendiculairement à la corde ; il ne suit jamais l'onde horizontalement. Un point situé exactement au sommet a une vitesse nulle à cet instant : il vient de finir de monter et va commencer à descendre. Un point situé devant la bosse, lui, monte.

F2 — L'orage

Le son met 6,0 s pour parcourir la distance d à 340 m s^{-1} : $d = v\tau = 340 \times 6,0 = 2,04 \times 10^3 \text{ m}$, soit environ 2,0 km. La règle du promeneur, $6/3 = 2 \text{ km}$, donne le même ordre de grandeur. La célérité est une propriété de l'air : un coup de tonnerre plus violent produit un son plus intense, pas plus rapide.

F3 — Fréquence et longueur d'onde

$T = 2,5 \text{ ms} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ s}$, donc $f = 1/T = 1/(2,5 \times 10^{-3}) = 400 \text{ Hz}$. La longueur d'onde est la distance parcourue pendant une période : $\lambda = vT = 20 \times 2,5 \times 10^{-3} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ m}$, soit 5,0 cm. Oublier la conversion des millisecondes donnerait $f = 0,40 \text{ Hz}$.

F4 — Deux photographies

Entre les deux photographies, la crête a avancé de $\Delta x = 0,30 \text{ m}$ en $\Delta t = 0,10 \text{ s}$: $v = \Delta x / \Delta t = 3,0 \text{ m s}^{-1}$. Sur une même photographie, deux crêtes sont distantes de $\lambda = 1,2 \text{ m}$, donc $f = v/\lambda = 3,0/1,2 = 2,5 \text{ Hz}$ et $T = 0,40 \text{ s}$. La crête a parcouru $0,30/1,2 = \lambda/4$: l'intervalle valait un quart de période, ce que confirme $0,10 = 0,40/4$.

F5 — De l'air à l'eau

La fréquence est imposée par la source : elle reste 500 Hz. La célérité passe à 1500 m s^{-1} , donc $\lambda = v/f = 1500/500 = 3,0 \text{ m}$, contre $340/500 = 0,68 \text{ m}$ dans l'air. Le rapport $3,0/0,68 \simeq 4,4$ est celui des célérités.

F6 — Le sonar

L'impulsion fait l'aller et le retour pendant 0,10 s : $2d = v\Delta t$, donc $d = 1500 \times 0,10/2 = 75 \text{ m}$. Sans le facteur 2, on trouverait 150 m ; avec la célérité dans l'air, 17 m.

F7 — La sirène

L'intensité d'une source ponctuelle est inversement proportionnelle au carré de la distance : $I = P/(4\pi R^2)$. De 50 à 150 m, la distance est triplée et l'aire de la sphère multipliée par 9 : l'intensité reçue est divisée par 9. Diviser par 3 serait la réponse pour une loi en $1/R$, qui n'est pas celle d'une onde émise dans toutes les directions.

F8 — Une fente plus étroite

$\theta \simeq \lambda/a$: diviser a par deux double θ . Le cône de lumière s'ouvre deux fois plus et la tache sur l'écran est plus large, pas plus étroite. Une fente plus étroite étale davantage la lumière.

F9 — Décalées d'une demi-longueur d'onde

Sur un graphe spatial, le tour complet est la longueur d'onde : $\Delta\varphi = 2\pi \Delta x/\lambda = 2\pi \times \frac{1}{2} = \pi$, soit 180° . Les deux ondes sont en opposition de phase : en tout point, l'une vaut l'opposé de l'autre ; comme les amplitudes sont égales, la somme est nulle. C'est la situation que le concours appelle « interférence totalement destructive ».

F10 — Décalés d'une demi-période

$\Delta\varphi = 2\pi (T/2)/T = \pi$: les signaux sont en opposition de phase. À chaque instant, l'un vaut l'opposé de l'autre ; comme les amplitudes sont égales, la somme est nulle.

F11 — Trois demi-longueurs d'onde

$\delta = 3\lambda/2 = (1 + \frac{1}{2})\lambda$: multiple demi-entier, interférences destructives. Pour $\delta = 0 = 0 \times \lambda$, multiple entier : interférences constructives. Une différence de marche nulle donne un renforcement, pas une extinction.

Exercices d'apprentissage**E1 — L'épicentre du séisme**

1. Les deux ondes partent au même instant du même point. Les ondes P sont plus rapides ($6,0$ contre $3,5 \text{ km s}^{-1}$) : pour une même distance d , leur durée de trajet d/v_P est plus courte que d/v_S . Elles arrivent donc toujours les premières, quelle que soit la station.

2. Les durées de trajet sont $t_P = d/v_P$ et $t_S = d/v_S$. L'écart mesuré est

$$\Delta t = t_S - t_P = \frac{d}{v_S} - \frac{d}{v_P} = d \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right),$$

d'où l'expression demandée. Numériquement, avec les célérités en km s^{-1} :

$$\frac{1}{3,5} - \frac{1}{6,0} = \frac{6,0 - 3,5}{3,5 \times 6,0} = \frac{2,5}{21} \text{ s km}^{-1}, \quad d = \frac{30 \times 21}{2,5} = 12 \times 21 \simeq 2,5 \times 10^2 \text{ km}.$$

L'écart Δt ne donne que la distance, pas la direction.

3. Une station place l'épicentre sur un cercle de rayon d ; deux stations donnent deux cercles qui se coupent en deux points ; une troisième lève l'ambiguïté. Il faut donc au minimum trois stations.

E2 — La célérité des ultrasons

1. Le retard est la durée que met l'onde pour parcourir la distance entre les deux récepteurs :

$$v = \frac{d}{\tau} = \frac{0,850}{2,50 \times 10^{-3}} = 340 \text{ m s}^{-1}.$$

C'est la célérité du son dans l'air : les ultrasons sont des ondes sonores, inaudibles seulement parce que leur fréquence est trop élevée.

2. $\lambda = v/f = 340/(40 \times 10^3) = 8,5 \times 10^{-3} \text{ m}$, soit 8,5 mm. Dans l'air, les ultrasons ont des longueurs d'onde millimétriques.

3. La période vaut $T = 1/f = 2,5 \times 10^{-5} \text{ s} = 25 \mu\text{s}$. Pendant le retard, $\tau/T = 2,50 \times 10^{-3}/(2,5 \times 10^{-5}) = 100$ périodes s'écoulent. Ce nombre est entier : le récepteur 2 reproduit le mouvement du récepteur 1 avec un retard de cent périodes entières, les deux signaux sont en phase. On aurait pu raisonner avec $d/\lambda = 0,850/(8,5 \times 10^{-3}) = 100$: deux points distants d'un nombre entier de longueurs d'onde vibrent en phase. C'est le même rapport.

4. La fréquence est imposée par l'émetteur : $f = 40 \text{ kHz}$. La célérité devient celle du son dans l'eau, 1500 m s^{-1} , et $\lambda = 1500/(40 \times 10^3) = 3,75 \times 10^{-2} \text{ m}$, soit 3,75 cm : la longueur d'onde est multipliée par le même facteur $1500/340 \simeq 4,4$ que la célérité.

E3 — Lire deux graphes, puis deux photographies

1. Le graphe de gauche porte le temps en abscisse : on y lit une période. Entre deux maxima successifs, $T = 0,20 \text{ s}$, donc $f = 1/T = 5,0 \text{ Hz}$.

2. Le graphe de droite porte la position en abscisse : on y lit une longueur d'onde. Entre deux crêtes, $\lambda = 0,40 \text{ m}$. La célérité vaut $v = \lambda/T = 0,40/0,20 = 2,0 \text{ m s}^{-1}$, ou $\lambda f = 0,40 \times 5,0$.

3. $MN = 0,60 \text{ m} = 1,5\lambda$: multiple demi-entier de la longueur d'onde. M et N vibrent en opposition de phase : quand M sera au sommet, N sera au creux.

4. Sur la figure, chaque crête du trait plein se retrouve un peu plus à droite sur les tirets : celle qui était à 0,10 m est passée à 0,20 m. L'onde se propage dans le sens des x croissants et la crête a avancé de $\Delta x = 0,10 \text{ m}$ en 0,050 s, soit $v = 0,10/0,050 = 2,0 \text{ m s}^{-1}$, en accord avec la question 2. Le déplacement vaut un quart de longueur d'onde en un quart de période. Il ne faut pas confondre Δx , lu entre les deux photographies, et $\lambda = 0,40 \text{ m}$, lue sur une seule ; « instants proches » garantit que la crête n'a pas parcouru plus d'une longueur d'onde, sinon 0,10 m, 0,50 m ou 0,90 m seraient des lectures possibles.

E4 — L'échographie

1. $\lambda = v/f = 1,5 \times 10^3/(5,0 \times 10^6) = 3,0 \times 10^{-4} \text{ m}$, soit 0,30 mm. Dans l'air, $\lambda = 340/(5,0 \times 10^6) = 6,8 \times 10^{-5} \text{ m}$, soit 0,068 mm : la fréquence est la même, la longueur d'onde suit la célérité.

2. Entre le pic (1) et le pic (2), on compte huit divisions de $10 \mu\text{s}$: $\Delta t = 80 \mu\text{s}$. L'écho revient après un aller et un retour : $d = v \Delta t/2 = 1,5 \times 10^3 \times 80 \times 10^{-6}/2 = 6,0 \times 10^{-2} \text{ m}$, soit 6,0 cm. Oublier le facteur 2 donnerait 12 cm ; c'est le distracteur habituel de cette question au concours.

3. La résolution est de l'ordre de λ . Un son audible de 5,0 kHz aurait, dans les tissus, $\lambda = 1,5 \times 10^3/(5,0 \times 10^3) = 0,30 \text{ m}$: il ne distinguerait rien dans le corps. À 5,0 MHz, $\lambda = 0,30 \text{ mm}$ permet de résoudre des détails inférieurs au millimètre. Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte et plus l'image est fine.

4. Le pic (3) suit le pic (2) de quatre divisions, soit $40 \mu\text{s}$. Le second écho a parcouru, en plus du premier, l'aller-retour entre les deux parois : $\Delta d = 1,5 \times 10^3 \times 40 \times 10^{-6}/2 = 3,0 \times 10^{-2} \text{ m}$: la seconde structure est 3,0 cm plus profonde que la première paroi, à 9,0 cm de la sonde.

E5 — Deux haut-parleurs

1. $\lambda = v/f = 340/(1,70 \times 10^3) = 0,20$ m. Les deux haut-parleurs sont alimentés par le même générateur : ils émettent à la même fréquence avec un décalage constant. Les ondes sont cohérentes, condition nécessaire pour qu'une figure d'interférence stable existe.

2. $\delta/\lambda = 0,30/0,20 = 1,5 = 1 + \frac{1}{2}$: multiple demi-entier. Les deux ondes arrivent en opposition de phase et se compensent : le son est atténué. Il serait nul si les deux amplitudes reçues étaient égales, ce qui n'est pas exactement le cas pour des distances différentes.

3. Le son est maximal aux points d'interférences constructives, où $\delta = k\lambda$: par exemple $\delta = 0$ (point à égale distance des deux haut-parleurs) ou $\delta = 0,20$ m. Les valeurs 0,40 m, 0,60 m... conviennent aussi.

4. $\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda = 2\pi \times 0,050/0,20 = \pi/2$: les ondes sont en quadrature. L'amplitude résultante est intermédiaire, $A\sqrt{2}$ pour deux amplitudes égales A : plus forte qu'au point de la question 2, où elle serait nulle, mais plus faible qu'un maximum, $2A$.

E6 — L'épaisseur d'un cheveu

1. La diffraction est marquée lorsque la taille de l'obstacle n'est pas très grande devant la longueur d'onde. Un cheveu mesure quelques dizaines de micromètres, soit une centaine de fois λ : l'angle $\theta \simeq \lambda/a$ est de l'ordre du centième de radian, mesurable. Un crayon de 7 mm donne $\theta \sim 10^{-4}$ rad : la tache est indiscernable, l'ombre paraît nette.

2. De $\theta \simeq \lambda/a$ on tire $a = \lambda/\theta$:

$$a = \frac{633 \times 10^{-9}}{8,0 \times 10^{-3}} \simeq 7,9 \times 10^{-5} \text{ m},$$

soit 79 μm . Ce fil se comporte comme une fente de même largeur : la relation s'applique à un obstacle comme à une ouverture.

3. Le vert a une longueur d'onde plus courte que le rouge. Comme $\theta = \lambda/a$ avec a inchangé, l'angle est plus petit et la tache sur l'écran plus étroite.

E7 — Rides sur l'étang

1. Les crêtes en trait plein sont des cercles de rayons $\lambda, 2\lambda, 3\lambda$; les creux en pointillés s'intercalent à $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2$. A est sur la troisième crête : $SA = 3\lambda$. B est sur le deuxième creux : $SB = 3\lambda/2$. Compter les cercles depuis S, chaque passage d'un trait à un pointillé ajoutant $\lambda/2$, évite de se tromper d'une demi-longueur d'onde.

2. $SA - SB = 3\lambda/2$, multiple demi-entier de λ : A et B vibrent en opposition de phase. On le voit sur l'instantané : A est sur une crête, B dans un creux ; une demi-période plus tard, ce sera l'inverse.

3. Quatre coups par seconde : $f = 4,0$ Hz. La célérité vaut $v = \lambda f = 0,050 \times 4,0 = 0,20 \text{ m s}^{-1}$, soit 20 cm/s. C'est la relation de 2018 au concours, posée avec « une demi-seconde de période » et « 20 cm entre deux creux consécutifs ».

4. La célérité est une propriété de l'eau : elle reste $0,20 \text{ m s}^{-1}$. La fréquence double, donc $\lambda = v/f = 0,20/8,0 = 2,5 \text{ cm}$: les cercles se resserrent.

QCM d'automatismes

A1 — Réponse B

Une onde progressive transporte de l'énergie sans transporter de matière : le bouchon, porté par l'eau, oscille verticalement sur place. A et D lui attribuent un déplacement d'ensemble ; C nie le transport d'énergie, alors que le bouchon se met bien en mouvement.

A2 — Réponse C

$f = 1/T = 1/(2,0 \times 10^{-3}) = 5,0 \times 10^2$ Hz. A oublie la conversion des millisecondes ; B multiplie par 10^3 au lieu d'inverser ; D convertit 2,0 ms en $2,0 \times 10^{-2}$ s.

A3 — Réponse A

$\lambda = v/f = 340/680 = 0,50$ m. B inverse le rapport (680/340) ; C multiplie v par f ; D confond avec une demi-longueur d'onde.

A4 — Réponse D

Un axe en mètres décrit le milieu à un instant donné : la distance entre deux maxima est la période spatiale, la longueur d'onde. La période T se lirait sur un axe en secondes ; f et v ne se lisent pas directement sur un graphe.

A5 — Réponse C

La fréquence est fixée par la source et conservée au changement de milieu. La célérité est une propriété du milieu, et $\lambda = v/f$ change avec elle.

A6 — Réponse B

Deux points distants de $\lambda/2 = (0 + \frac{1}{2})\lambda$ font à chaque instant le contraire l'un de l'autre : ils sont en opposition de phase. Ils seraient en phase pour une distance λ et en quadrature pour $\lambda/4$. Tous les points du milieu vibrent avec la même période.

A7 — Réponse C

La diffraction est gouvernée par λ/a : elle est plus marquée pour une fente plus étroite ou une longueur d'onde plus grande. A et B vont dans le mauvais sens ; la distance de l'écran change la taille de la tache sur l'écran, pas l'angle de diffraction.

A8 — Réponse B

$\delta = 2\lambda = k\lambda$ avec $k = 2$: multiple entier, interférences constructives. Les conditions valent pour tout entier k , positif, négatif ou nul ; δ peut dépasser λ .

A9 — Réponse B

La bosse se déplace vers la droite ; P est sur le versant gauche, que la bosse a déjà franchi : la corde y redescend, P va vers le bas. A conviendrait pour un point situé devant la bosse ; C fait suivre l'onde au point, alors qu'un point de la corde ne se déplace jamais dans la direction de propagation ; D ne vaut qu'au sommet, à l'instant précis où le point change de sens.

A10 — Réponse C

$\lambda = v/f = 340/2000 = 0,17 \text{ m} = 17 \text{ cm}$, comprise entre 10 et 20 cm. Sans calculatrice, $340/2000 = 34/200 = 0,17$. B vient d'une erreur de virgule (1,7 cm); D du rapport inversé, $f/v = 2000/340 \simeq 5,9$, pris pour des mètres. Au concours, la réponse est souvent une fourchette ou un ordre de grandeur : il suffit d'un calcul approché, à condition de le faire dans le bon sens (v/f , pas f/v) et dans la bonne unité.

A11 — Réponse C

Pour une source ponctuelle, l'intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance : $I \propto 1/R^2$. La distance est multipliée par 3, donc l'intensité est divisée par $3^2 = 9$. A oublie le carré; B élève au carré la nouvelle distance, $6^2 = 36$, au lieu du rapport des distances; D inverse la variation.

QCM de niveau concours

C1 — Réponse B

Seuls les passages par zéro sont étiquetés. Sur le graphe temporel, la courbe part de zéro en montant, redescend à zéro à 2 ms et remonte à zéro, de nouveau en montant, à 4 ms : $T = 4,0 \text{ ms}$. Sur le graphe spatial, de même, deux passages par zéro dans le même sens sont à 0 et 1,2 m : $\lambda = 1,20 \text{ m}$. Donc $v = \lambda/T = 1,20/(4,0 \times 10^{-3}) = 300 \text{ m s}^{-1}$. A multiplie au lieu de diviser; D vient d'une période lue entre deux zéros voisins (2,0 ms); C d'une longueur d'onde lue entre deux zéros voisins (0,60 m).

C2 — Réponse B

Le son fait l'aller et le retour pendant 0,50 s : $d = v \Delta t/2 = 340 \times 0,50/2 = 85 \text{ m}$. La fréquence ne sert à rien ici : elle fixe la hauteur du cri, pas la durée du trajet. C oublie le facteur 2; A est la longueur d'onde $v/f = 0,50 \text{ m}$, qui n'est pas une distance à la falaise; D multiplie par 2 au lieu de diviser, $340 \times 0,50 \times 2 = 340 \text{ m}$. Une donnée inutile dans l'énoncé est un piège courant du concours.

C3 — Réponse A

La fréquence est imposée par la source : elle reste 500 Hz. La longueur d'onde suit la célérité du milieu : $\lambda = v/f = 340/500 = 0,68 \text{ m}$ dans l'air, contre $1500/500 = 3,0 \text{ m}$ dans l'eau. Le son **raccourcit** en entrant dans l'air, où il va moins vite. C garde la longueur d'onde de l'eau; B et D font porter le changement sur la fréquence. Dans les sujets, cette question est posée dans les deux sens et le plus souvent sans calcul : « un son de 256 Hz est produit dans l'eau; dans l'air, la fréquence reste la même mais la longueur d'onde est plus courte » (2020 août).

C4 — Réponse B

Seuls les passages par zéro sont étiquetés. u_1 passe par zéro en montant à 0 puis à 8 ms : $T = 8,0 \text{ ms}$. u_2 passe par zéro en montant à 2 ms, $\Delta t = 2,0 \text{ ms}$ après u_1 , soit $T/4$. Donc $\Delta\varphi = 2\pi \Delta t/T = 2\pi/4 = \pi/2$: les signaux sont en quadrature. A prend π au lieu de 2π pour un tour complet; C correspond à un décalage de $T/2$; D à un décalage d'une période entière, qui ramène en phase.

C5 — Réponse C

En opposition de phase, les deux ondes se retranchent à chaque instant : l'amplitude résultante est $|A_1 - A_2| = 3 - 2 = 1$. A ne vaudrait que pour des amplitudes égales ; B est l'amplitude en phase ; D est une moyenne sans signification.

C6 — Réponse A

$\lambda = v/f = 340/680 = 0,50$ m ; $\delta = 3,25 - 2,0 = 1,25$ m = $2,5\lambda$, multiple demi-entier : interférences destructives. B se trompe de condition ; C utilise une longueur d'onde moitié ; D calcule f/v au lieu de v/f , et une différence de marche inférieure à λ n'empêcherait de toute façon pas les interférences.

C7 — Réponse A

$\theta \simeq \lambda/a = 500 \times 10^{-9}/(0,10 \times 10^{-3}) = 5,0 \times 10^{-3}$ rad. B inverse le rapport (a/λ) et donne un angle absurde ; C laisse a en millimètres ; D double l'angle, comme si l'on calculait l'angle total de la tache au lieu du demi-angle.

C8 — Réponse C

$\theta = \lambda/a$: diviser λ par deux divise θ par deux, diviser a par deux le multiplie par deux. Les deux effets se compensent : l'angle est inchangé, et la figure sur un écran fixe aussi. A ne tient compte que de la fente, B que du laser ; D multiplie les deux effets au lieu de les compenser.

C9 — Réponse B

Sur la photographie en trait plein, deux crêtes successives sont à 1,0 et 5,0 m : $\lambda = 4,0$ m. Sur les tirets, la crête de 1,0 m est passée à 2,0 m : $\Delta x = 1,0$ m en 0,20 s, donc $v = 5,0$ m s⁻¹, entre 4 et 6. A donne la fréquence $f = v/\lambda = 1,25$ Hz, prise pour une célérité ; C associe la crête des tirets à 2,0 m à la crête du trait plein à 5,0 m, comme si l'onde reculait : $\Delta x = 3,0$ m et 15 m s⁻¹ ; D prend la longueur d'onde pour l'avance de la crête, $4,0/0,20 = 20$ m s⁻¹. La longueur d'onde ne sert pas ici : elle servirait si la question portait sur la fréquence.

C10 — Réponse B

$\lambda = 2,0$ m ; les crêtes de l'onde 2 suivent celles de l'onde 1 de $\Delta x = 0,50$ m = $\lambda/4$: $\Delta\varphi = 2\pi \times \frac{1}{4} = \pi/2$, quadrature. Deux sinusoides de même amplitude X en quadrature se somment en une sinusoïde d'amplitude $X\sqrt{2} \simeq 1,4X$, comprise entre X et $2X$. A confond $\lambda/4$ et $\pi/4$ et prend l'amplitude du cas en phase ; C donne un encadrement trop bas ; D décrit l'opposition de phase, qui exigerait un décalage de $\lambda/2$. C'est la réunion de deux questions du concours : la différence de phase lue sur un graphe spatial (2019 septembre) et l'amplitude résultante pour « une avance d'un quart de longueur d'onde » (2023).

C11 — Réponse B

À 850 Hz, $\lambda = 340/850 = 0,40$ m : la différence de marche vaut $0,60/0,40 = 1,5\lambda$, donc les interférences sont destructives. À 1700 Hz, $\lambda = 340/1700 = 0,20$ m : la même différence de marche vaut 3λ , donc les interférences deviennent constructives. La différence de marche ne change pas ; c'est la longueur d'onde qui est divisée par deux lorsque la fréquence double.