BURHAN

Ondes mécaniques progressives

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

Version en ligne : burhan.ma/2bac/pc/physique-chimie/ondes-mecaniques-progressives/cours

Chapitre	Semestre
Ondes mécaniques progressives	Semestre 1

Onde mécanique : perturbation et milieu de propagation

Les questions du physicien

Observer, mesurer, modéliser, prévoir. Face à un phénomène, le physicien se pose quatre questions. Qu'est-ce que j'observe ? Que puis-je mesurer, et avec quelle précision ? Quel modèle simple décrit mes mesures ? Ce modèle prévoit-il le résultat d'une nouvelle expérience ?

Ce premier chapitre de l'année applique cette démarche à un phénomène familier : une perturbation qui se déplace dans un milieu.

Devine : Un ruban noué sur une corde

Une longue corde est tendue horizontalement. Un ruban est noué en son milieu. Tu donnes une brève secousse verticale à une extrémité. Que fait le ruban ?

A. Il avance jusqu'à l'autre extrémité de la corde.
Faux.
Faux. Le ruban est noué à la corde : la corde n'avance pas, le ruban non plus.

B. Il monte puis redescend, sans quitter sa place.
Juste.
Juste : la bosse le soulève à son passage, puis il revient au repos.

C. Il reste immobile, car seule l'extrémité a bougé.
Faux.
Faux. La bosse parcourt toute la corde et soulève chaque point à son tour.

D. Il glisse le long de la corde vers ta main.
Faux.
Faux. Rien ne ramène le ruban vers toi : il garde sa place sur la corde.

Correction
La secousse crée une bosse qui parcourt la corde. Quand elle arrive au milieu, elle soulève le ruban. Après son passage, le ruban revient à sa position de repos. Il ne s'est pas déplacé le long de la corde : seule la bosse a voyagé.

Trois perturbations qui se déplacent

Trois perturbations observées.

- **Une corde.** Tu tiens l'extrémité d'une corde tendue. Une secousse rapide de la main forme une bosse. La bosse s'éloigne de ta main et parcourt la corde.
- **Une goutte sur l'eau.** Une goutte tombe sur l'eau calme d'un bassin. Des rides circulaires naissent au point d'impact et s'élargissent.
- **Un haut-parleur.** La membrane d'un haut-parleur avance et recule. La flamme d'une bougie placée devant vacille. À quelques mètres, tu entends le son.

Source, milieu et perturbation dans les trois cas. Dans chaque cas, une **source** crée une modification locale et brève : la main, la goutte, la membrane. Cette modification s'appelle une **perturbation**, un **signal** ou un **ébranlement**. Elle se déplace ensuite dans un **milieu matériel** : la corde, l'eau, l'air.

Vérifie : Source et milieu du son d'un tambour

Tu frappes la peau tendue d'un tambour avec une baguette. Un ami, à quelques mètres, entend le son. Quelle est la bonne paire « source, milieu » ?

A. La peau du tambour, et l'air.
Juste.
Juste : la peau frappée perturbe l'air voisin, l'air transmet cette perturbation.

B. L'air, et l'oreille de ton ami.
Faux.
Faux. L'oreille reçoit le son ; elle n'est pas le milieu où il se propage.

C. La baguette, et la peau du tambour.
Faux.
Faux. La baguette met la peau en mouvement ; le son parvient à ton ami par l'air.

D. Le tambour, et sa caisse de bois.
Faux.
Faux. La caisse porte la peau ; entre le tambour et ton ami, il n'y a que de l'air.

Correction
La source est la peau du tambour : frappée, elle se creuse puis revient, et pousse puis tire l'air voisin. Le milieu matériel est l'air, entre le tambour et ton ami. Il transmet cette perturbation jusqu'à son oreille.

Définition d'une onde mécanique

Définition : Onde mécanique

On appelle **onde mécanique** le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel. La perturbation, appelée aussi signal ou ébranlement, est une modification locale et temporaire de l'état du milieu, créée en un point par une source.

Une onde mécanique transporte de l'énergie **sans transport de matière** : au passage de l'onde, chaque point du milieu s'écarte de sa position de repos puis y revient.

Une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel : elle ne se propage pas dans le vide.

Exemple : Source, milieu et perturbation des trois observations

Observation	Source	Milieu	Perturbation
corde	la main	la corde	une bosse
goutte	la goutte	l'eau	une ride
haut-parleur	la membrane	l'air	air poussé puis tiré

Dans les trois cas, le milieu revient à son état de repos après le passage de la perturbation.

Devine : Un réveil sous une cloche de verre

Un réveil sonne sous une cloche de verre. Une pompe retire peu à peu l'air de la cloche. Qu'entends-tu ?

A. Un son de plus en plus fort.
Faux.
Faux. Moins il y a d'air, moins la perturbation est transmise.

B. Le même son, sans changement.
Faux.
Faux. Sans air autour du réveil, la perturbation n'atteint plus la cloche.

C. Un son de plus en plus faible.
Juste.
Juste : l'air, milieu de propagation, disparaît peu à peu.

D. Un son de plus en plus bref.
Faux.
Faux. Retirer l'air ne change pas la durée du son émis ; cela gêne sa transmission.

Correction
Rappel : le son ne se propage pas dans le vide. En retirant l'air, on retire le milieu matériel qui transmet la perturbation. Le son reçu s'affaiblit, alors que le marteau du réveil frappe toujours. Une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel.

Énergie transportée sans matière

Le bouchon sur l'eau. Un bouchon flotte à un mètre du point d'impact de la goutte. Quand la ride l'atteint, il monte puis redescend. Il ne se rapproche pas du bord du bassin : l'onde ne lui apporte pas de matière.

Elle lui apporte de l'énergie. Le bouchon était immobile ; il se met en mouvement. Une grosse vague soulève de même un bateau entier.

> **Attention : la perturbation avance, le milieu reste en place**
>
> ✗ « Le bouchon avance avec la ride jusqu'au bord du bassin. »
>
> ✓ Le bouchon monte et descend sur place. La ride avance, mais l'eau sous le bouchon revient à sa position de repos. Sur la corde aussi, la bosse voyage d'un bout à l'autre, alors que chaque point ne fait qu'un aller et retour vertical. Deux mouvements sont à distinguer : celui de la perturbation le long du milieu, et celui de chaque point autour de sa position de repos.

> **À toi : une feuille sur le bassin**
>
> Une feuille flotte sur l'eau calme d'un bassin, loin du bord. Une goutte tombe à $50\ \text{cm}$ de la feuille. Nomme la source, le milieu et la perturbation. Décris ensuite le mouvement de la feuille, et dis ce que l'onde lui apporte. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.
>
> **Indice 1**
> Reprends les trois mots de la définition : source, milieu matériel, perturbation.
> **Indice 2**
> Pense au bouchon : se rapproche-t-il du bord quand la ride passe ?
> **Indice 3**
> Point délicat : la feuille reçoit quelque chose, mais ce n'est pas de la matière.
>
> **Réponse**
> La source est la goutte, le milieu est l'eau, la perturbation est la ride circulaire. Quand la ride atteint la feuille, celle-ci monte puis redescend, sans se déplacer vers le bord. L'onde lui apporte de l'énergie : la feuille, au repos, se met à bouger. Elle ne lui apporte aucune matière.

Les questions que pose cette perturbation. Une perturbation qui se déplace pose de nouvelles questions. Comment passe-t-elle d'un point au suivant ? Dans quelles directions part-elle ? À quelle vitesse ? Les sections suivantes y répondent l'une après l'autre, chaque fois à partir d'une observation.

Onde progressive à une, deux et trois dimensions

Une perturbation transmise de proche en proche

Devine : Deux rubans sur la corde

Sur la corde tendue, un ruban A est noué à $1\,\mathrm{m}$ de ta main, un ruban B à $2\,\mathrm{m}$. Tu donnes une secousse. Que se passe-t-il ?

A. A et B se soulèvent au même instant.
Faux.
Faux. La bosse met du temps à parcourir la corde : elle atteint A avant B.

B. B se soulève beaucoup moins haut que A.
Faux.
Faux. Sur une corde bien tendue, la bosse garde presque sa hauteur : B monte presque autant que A.

C. A se soulève, puis B fait le même mouvement.
Juste.
Juste : chaque point reproduit le mouvement de la main, avec un retard.

D. Seul A bouge : il arrête la secousse.
Faux.
Faux. La bosse continue après A et atteint B.

Correction
La bosse part de ta main et avance le long de la corde. Elle soulève d'abord A, puis B, plus loin. Les deux rubans font le même mouvement : monter puis redescendre. Celui de B commence plus tard, car la bosse a encore $1\,\mathrm{m}$ à parcourir.

De proche en proche. Chaque petit morceau de corde est relié à ses voisins. Quand il est soulevé, il tire le morceau suivant, qui tire à son tour le suivant. La perturbation se transmet ainsi de proche en proche. Sur un long ressort à spires, c'est pareil : chaque spire pousse sa voisine. La perturbation s'éloigne de la source : on parle d'onde **progressive**.

Définition et dimensions d'une onde progressive

Définition : Onde progressive et front d'onde

Une onde mécanique est **progressive** lorsque la perturbation s'éloigne de la source et se transmet de proche en proche dans le milieu. En l'absence d'amortissement, chaque point atteint reproduit, avec un retard, le mouvement de la source.

Selon le milieu, l'onde progressive se propage :

- dans une seule direction (corde, ressort) : onde à **une dimension** ;
- à la surface d'un liquide : onde à **deux dimensions** ;
- dans tout l'espace (son dans l'air) : onde à **trois dimensions**.

Le **front d'onde** est l'ensemble des points du milieu atteints au même instant par le début de la perturbation.

Exemple : Une, deux ou trois dimensions

- **Une dimension** : la bosse sur la corde, la compression sur le ressort. Le front d'onde est un point, qui avance le long du milieu.
- **Deux dimensions** : les rides à la surface de l'eau. Le front d'onde est un cercle centré sur le point d'impact.
- **Trois dimensions** : le son dans une salle. Pour une source qui émet dans toutes les directions, le front d'onde est une sphère qui grandit.

Vérifie : Une balle sur un drap tendu

Quatre amis tendent un grand drap à l'horizontale, chacun par un coin. Une balle tombe au milieu du drap. Quelle onde parcourt le drap ?

A. Une onde à deux dimensions.
Juste.
Juste : la perturbation s'étale sur le drap, dans toutes ses directions.

B. Une onde à trois dimensions, car le drap se creuse.
Faux.
Faux. Le drap se creuse, mais la perturbation se propage sur sa surface, qui n'a que deux dimensions.

C. Une onde à une dimension, car la balle tombe à la verticale.
Faux.
Faux. La chute de la balle est verticale, mais la perturbation s'étale sur le drap.

D. Aucune onde, car le tissu reste entre les mains.
Faux.
Faux. Une onde ne transporte pas de matière : le tissu reste en place, la perturbation avance.

Correction
La perturbation part du point où tombe la balle et s'étale sur le drap, dans toutes les directions de sa surface. Une surface a deux dimensions : l'onde est à deux dimensions. Son front d'onde est un cercle centré sur le point d'impact.

Le front d'onde et l'amortissement

Le front d'onde sur l'eau. Au laboratoire, une cuve à ondes montre la surface de l'eau vue de dessus. Une pointe frappe l'eau en un point. Un cercle lumineux grandit alors autour de ce point : c'est le front d'onde. Tous ses points sont atteints au même instant. Sur la corde, le front se réduit à un seul point : le début de la bosse.

Vérifie : Trois bouchons autour du point d'impact

Une goutte tombe en O sur une eau calme. Le bouchon P est à $40\,\text{cm}$ de O vers le nord, Q à $60\,\text{cm}$ vers l'est, R à $40\,\text{cm}$ vers l'ouest. Lesquels commencent à bouger au même instant ?

A. P, Q et R ensemble.

Faux.

Faux. Q est plus loin de O : le cercle qui grandit l'atteint plus tard.

B. P et R seulement.

Juste.

Juste : ils sont sur le même cercle centré en O, donc sur le même front d'onde.

C. Q et R, car l'est et l'ouest sont alignés.

Faux.

Faux. Ce qui compte est la distance au point d'impact, pas la direction.

D. Aucun : chaque bouchon bouge à son tour.

Faux.

Faux. P et R sont à la même distance de O : le front les atteint ensemble.

Correction

Le front d'onde est un cercle centré en O, qui grandit. P et R sont tous deux à $40\,\text{cm}$ de O : le front les atteint au même instant. Q, à $60\,\text{cm}$, est atteint plus tard.

Une hypothèse : pas d'amortissement. En s'élargissant, les rides de l'eau deviennent moins hautes. L'énergie se répartit sur un cercle de plus en plus grand, et une partie se perd. Sur une corde bien tendue, la bosse garde presque sa forme. Dans ce chapitre, on néglige cet affaiblissement, appelé amortissement. Chaque point reproduit alors le mouvement de la source.

Reconnaître une onde progressive

À toi : un ressort posé sur la table

Un long ressort à spires est posé sur une table, tendu entre deux points. Tu comprimes quelques spires à une extrémité, puis tu les lâches. Dis si l'onde est progressive, combien de dimensions elle a, et ce qu'est son front d'onde. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Demande-toi si la perturbation s'éloigne de ta main.

Indice 2
Compte les directions dans lesquelles elle peut partir.
Indice 3
Point délicat : pour une onde à une dimension, le front d'onde n'est ni un cercle ni une sphère.

Réponse
La zone de spires resserrées s'éloigne de ta main, de spire en spire : l'onde est progressive. Elle ne peut avancer que le long du ressort : c'est une onde à une dimension. Son front d'onde est un point : la première spire atteinte, qui change à mesure que la perturbation avance.

Deux façons de bouger. Sur la corde, chaque point bouge verticalement, alors que la bosse avance horizontalement. Sur le ressort comprimé, chaque spire bouge le long du ressort, dans le sens où avance la perturbation. Cette différence porte un nom : c'est l'objet de la section suivante.

Ondes transversales et ondes longitudinales

Deux ébranlements sur un ressort

L'expérience du ressort. Un long ressort à spires est posé sur une table.

- **Expérience 1.** On déplace vite l'extrémité perpendiculairement à l'axe du ressort, puis on la ramène. Une bosse latérale parcourt le ressort.
- **Expérience 2.** On pousse l'extrémité dans l'axe du ressort, puis on la ramène. Une zone de spires resserrées, la **compression**, parcourt le ressort. Elle est suivie d'une zone de spires écartées, la **dilatation**.

Dans les deux cas, la perturbation avance le long du ressort.

Devine : Un ruban sur une spire

Dans l'expérience 2, un ruban est attaché à une spire du milieu. Comment bouge-t-il au passage de la compression ?

A. Il s'écarte de l'axe du ressort, puis revient.
Faux.
Faux. C'est le mouvement de l'expérience 1, la bosse latérale.

B. Il avance un peu le long de l'axe, puis revient.
Juste.
Juste : la spire est poussée par sa voisine, puis rappelée.

C. Il avance avec la compression jusqu'au bout.
Faux.
Faux. Les spires ne quittent pas le ressort : seule la compression voyage.

D. Il ne bouge pas : seule la forme change.

Faux.
Faux. Pour que des spires se resserrent, il faut qu'elles bougent.

Correction
La compression arrive : la spire est poussée vers l'avant, dans l'axe du ressort. Puis la dilatation la ramène vers l'arrière. Le ruban fait un petit aller et retour **le long** de l'axe, c'est-à-dire dans la direction où avance la perturbation.

Comparer mouvement et propagation

Définition : Ondes transversales et ondes longitudinales

Une onde est **transversale** lorsque la direction de la perturbation (déplacement des points du milieu) est perpendiculaire à la direction de propagation. C'est le cas de l'onde qui parcourt une corde tendue.

Une onde est **longitudinale** lorsque la perturbation a la même direction que la propagation. C'est le cas des compressions et dilatations qui parcourent un ressort, et de l'onde sonore dans l'air.

Exemple : Trois ébranlements comparés

Situation	Un point bouge	L'onde avance	Nature
corde, secousse verticale	verticalement	horizontalement	transversale
ressort, expérience 1	hors de l'axe	le long de l'axe	transversale
ressort, expérience 2	le long de l'axe	le long de l'axe	longitudinale

Vérifie : Une corde suspendue au plafond

Une corde pend du plafond. Tu agites son extrémité basse d'un geste horizontal. La perturbation monte le long de la corde. Quelle est la nature de l'onde ?

A. Longitudinale, car le geste est horizontal.
Faux.
Faux. Horizontal ne veut pas dire longitudinal : compare le geste à la direction de propagation.

B. Longitudinale, car la perturbation monte.
Faux.
Faux. La direction de propagation seule ne suffit pas : il faut aussi celle du mouvement des points.

C. Ni l'une ni l'autre : la corde est verticale.
Faux.

Faux. La définition ne dépend pas de l'orientation de la corde, seulement de l'angle entre deux directions.

D. Transversale, car le geste est perpendiculaire à la corde.

Juste.

Juste : la perturbation monte verticalement, le point bouge horizontalement.

Correction

La perturbation se propage le long de la corde, donc verticalement. Chaque point de la corde bouge horizontalement. Les deux directions sont perpendiculaires : l'onde est transversale.

Le son, une onde longitudinale

Le son dans l'air. La membrane du haut-parleur avance : elle pousse la tranche d'air voisine, qui se comprime. Elle recule : l'air se détend, c'est une dilatation. Chaque tranche d'air transmet ce mouvement à la suivante. Les tranches d'air bougent donc dans la direction où le son avance. Le son est une onde longitudinale, comme la compression sur le ressort. Rappel : sans air, aucune compression n'est possible, donc aucun son.

Attention : le son ne fait pas onduler l'air

✗ « Au passage du son, les tranches d'air montent et descendent, comme les points d'une corde. »

✓ Les tranches d'air avancent puis reculent, **le long** de la direction de propagation. Elles se rapprochent dans une compression et s'écartent dans une dilatation. Elles ne partent pas avec le son : chacune revient à sa position de repos.

Conclure sur la nature d'une onde

Méthode : Méthode pour trouver la nature d'une onde

1. **Propagation.** Repère la direction dans laquelle la perturbation avance.
2. **Mouvement d'un point.** Repère la direction dans laquelle un point du milieu bouge au passage de la perturbation.
3. **Comparaison.** Directions perpendiculaires : l'onde est transversale. Directions confondues : l'onde est longitudinale.
4. **Contrôle.** Ne compare pas le geste à l'horizontale ou à la verticale : compare-le à la propagation.

Vérifie : Des wagons reliés par des ressorts

Des wagons de jouet sont alignés sur un rail droit. Chacun est relié au suivant par un petit ressort. Tu pousses le premier wagon le long du rail. Quelle est la nature de l'onde qui parcourt la file ?

A. Transversale, car chaque wagon reste sur le rail.

Faux.

Faux. Rester sur le rail n'est pas le critère : compare le mouvement d'un wagon à la propagation.

B. Longitudinale, car chaque wagon bouge le long de la file.

Juste.

Juste : le wagon bouge dans la direction où avance la perturbation.

C. Aucune onde : des wagons ne forment pas un milieu.

Faux.

Faux. Wagons et ressorts forment un milieu matériel où la perturbation passe de proche en proche.

D. Les deux à la fois, selon le wagon.

Faux.

Faux. Tous les wagons bougent de la même façon, le long du rail.

Correction

La perturbation avance le long de la file. Chaque wagon est poussé vers l'avant par le ressort qui le précède, puis revient. Il bouge le long de la file : les deux directions sont confondues. L'onde est longitudinale.

À toi : deux secousses sur la corde

La corde est tendue horizontalement, d'ouest en est. Tu secoues son extrémité ouest d'abord verticalement, puis horizontalement vers le nord. Donne la nature de l'onde dans chaque cas. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Commence par la direction de propagation : dans quel sens avance la bosse ?

Indice 2

Compare ensuite chaque geste à cette direction.

Indice 3

Point délicat : un geste horizontal peut être perpendiculaire à une propagation horizontale.

Réponse

La bosse avance le long de la corde, vers l'est. Premier geste : le point bouge verticalement, perpendiculairement à la propagation ; l'onde est transversale. Second geste : le point bouge vers le nord, encore perpendiculairement à la direction ouest-est ; l'onde est aussi transversale. Pour une onde longitudinale, le point devrait bouger vers l'est ou vers l'ouest.

Célérité d'une onde et sa mesure

Aspect de la corde à deux dates

Deux photos de la corde. On filme la corde tendue devant une règle graduée. La source S, à l'origine de la règle, crée une bosse à la date $t = 0$. Sur la photo prise à $t_1 = 0{,}60\,\text{s}$, le front de la bosse est à $x_1 = 1{,}5\,\text{m}$ de la source. Sur celle prise à $t_2 = 1{,}0\,\text{s}$, il est à $x_2 = 2{,}5\,\text{m}$.

Devine : Le déplacement de la bosse

De quelle distance la bosse a-t-elle avancé entre les deux photos, et en combien de temps ?

A. $2{,}5\,\text{m}$ en $1{,}0\,\text{s}$

Faux.

Faux. C'est la position du front à la seconde date, comptée depuis la source.

B. $1{,}0\,\text{m}$ en $0{,}40\,\text{s}$

Juste.

Juste : on fait la différence des positions et la différence des dates.

C. $4{,}0\,\text{m}$ en $1{,}6\,\text{s}$

Faux.

Faux. On a additionné les positions et les dates au lieu de les soustraire.

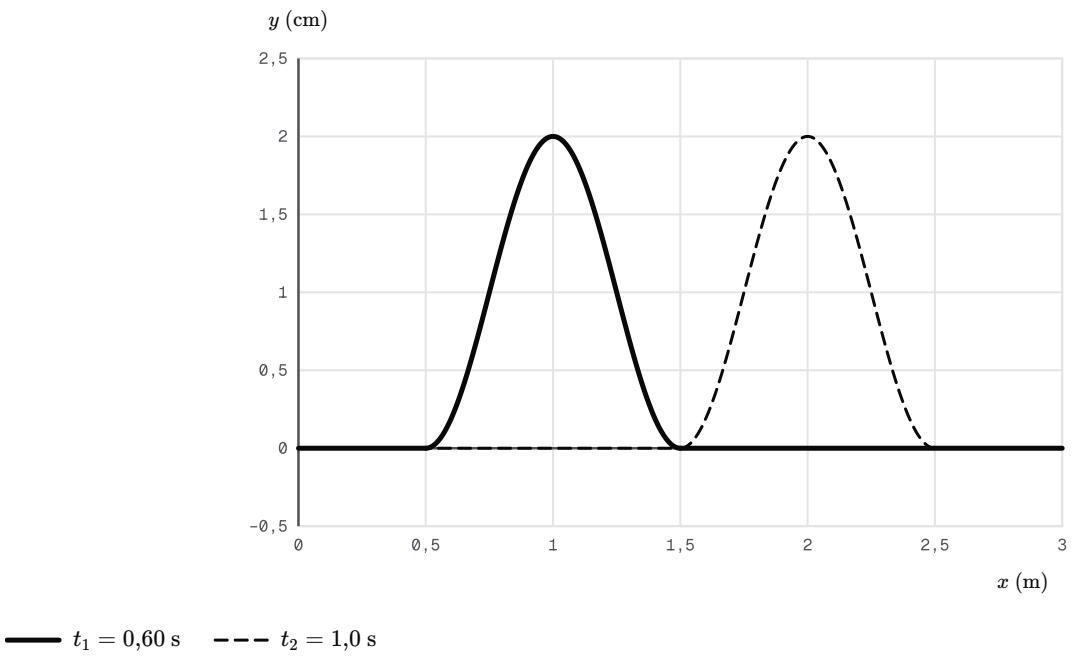
D. $1{,}5\,\text{m}$ en $0{,}60\,\text{s}$

Faux.

Faux. C'est le trajet de la source à la première photo, pas entre les deux photos.

Correction

Entre les deux photos, le front passe de $1{,}5\,\text{m}$ à $2{,}5\,\text{m}$: il avance de $1{,}0\,\text{m}$. La durée écoulée est $1{,}0 - 0{,}60 = 0{,}40\,\text{s}$. La bosse a gardé la même forme : elle s'est seulement déplacée.



Aspect de la corde aux dates 0,60 s et 1,0 s.

Définition de la célérité

La célérité, quotient d'une distance par une durée. La bosse avance de $1{,}0\,\mathrm{m}$ en $0{,}40\,\mathrm{s}$. Depuis sa création, son front a aussi parcouru $1{,}5\,\mathrm{m}$ en $0{,}60\,\mathrm{s}$. Dans les deux cas, le quotient de la distance par la durée a la même valeur. Ce quotient est la vitesse de la perturbation.

Définition : Célérité d'une onde

La **célérité** v d'une onde est la vitesse de propagation de la perturbation dans le milieu. Si le front d'onde parcourt la distance d pendant la durée Δt :

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

avec d en mètres (m), Δt en secondes (s) et v en mètres par seconde ($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$). Équation aux dimensions : $[v] = \mathrm{L \cdot T^{-1}}$.

La célérité caractérise la propagation de l'onde dans le milieu. Elle ne se confond pas avec la vitesse des points du milieu, qui bougent autour de leur position de repos.

Exemple : Célérité de la bosse sur la corde

Entre les deux photos, le front parcourt $d = x_2 - x_1 = 1{,}0\,\mathrm{m}$ pendant $\Delta t = t_2 - t_1 = 0{,}40\,\mathrm{s}$.

$$
\begin{aligned}
v &= \frac{d}{\Delta t} \\
&= \frac{1{,}0\,\mathrm{m}}{0{,}40\,\mathrm{s}} \\
&= 2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}
\end{aligned}
$$

La bosse avance de $2{,}5$ mètres chaque seconde. Les points de la corde, eux, ne font que monter et descendre.

Unité, dimension et chiffres significatifs

Unités et dimension. La célérité s'exprime en mètres par seconde. Une distance en centimètres se convertit d'abord en mètres : $50\,\mathrm{cm} = 0{,}50\,\mathrm{m}$. Une durée en millisecondes se convertit en secondes : $20\,\mathrm{ms} = 2{,}0 \times 10^{-2}\,\mathrm{s}$. L'équation aux dimensions $[v] = \mathrm{L\cdot T^{-1}}$ contrôle un résultat : une longueur divisée par une durée donne bien une célérité.

> **À retenir : Règle des chiffres significatifs**
>
> Un résultat calculé s'écrit avec le nombre de chiffres significatifs de **la donnée la moins précise**. Dans l'exemple, $1{,}0\,\mathrm{m}$ et $0{,}40\,\mathrm{s}$ ont chacune deux chiffres significatifs. On écrit donc $v = 2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, et non $2{,}500\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Cette règle vaut pour tout le chapitre.

> **Vérifie : Combien de chiffres garder ?**
>
> Sur une autre corde, le front parcourt $d = 3{,}00\,\mathrm{m}$ en $\Delta t = 1{,}2\,\mathrm{s}$. Quelle écriture de la célérité convient ?
>
> **A.** $v = 2{,}50\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$
> **Faux.**
> Faux. La distance a trois chiffres significatifs, mais la durée n'en a que deux.
>
> **B.** $v = 3\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$
> **Faux.**
> Faux. Un seul chiffre perd une information que les données contiennent.
>
> **C.** $v = 2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$
> **Juste.**
> Juste : $1{,}2\,\mathrm{s}$ n'a que deux chiffres significatifs.
>
> **D.** $v = 0{,}40\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$
> **Faux.**
> Faux. C'est le quotient de la durée par la distance : le calcul est inversé.
>
> **Correction**

$v = \dfrac{d}{\Delta t} = \dfrac{3{,}00\,\mathrm{m}}{1{,}2\,\mathrm{s}} = 2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. La durée n'a que deux chiffres significatifs : le résultat en garde deux.

Calcul d'une célérité à partir d'une mesure

Méthode : Méthode pour calculer une célérité

1. **Repérage.** Identifie la distance d parcourue par le front et la durée Δt de ce parcours.
2. **Conversion.** Exprime d en mètres et Δt en secondes.
3. **Formule.** Écris $v = \dfrac{d}{\Delta t}$, puis remplace par les valeurs.
4. **Résultat.** Donne la valeur avec son unité et le bon nombre de chiffres significatifs.

À toi : la célérité sur une seconde corde

Sur une seconde corde, le front parcourt $420\,\mathrm{cm}$ en $0{,}350\,\mathrm{s}$. Calcule la célérité. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Utilise la définition de la célérité.
Indice 2
Convertis la distance : $420\,\mathrm{cm} = 4{,}20\,\mathrm{m}$.
Indice 3
Point délicat : chaque donnée a trois chiffres significatifs ; le résultat aussi.

Réponse

$$\begin{aligned} v &= \frac{d}{\Delta t} \\ &= \frac{4{,}20\,\mathrm{m}}{0{,}350\,\mathrm{s}} \\ &= 12{,}0\,\mathrm{m\cdot s^{-1}} \end{aligned}$$

Le résultat garde trois chiffres significatifs, comme les deux données.

Ordres de grandeur de la célérité

Exemple : Célérités dans quelques milieux

Milieu	Célérité
corde tendue	de quelques $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ à quelques centaines de $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$
air, son à $20\,^{\circ}\mathrm{C}$	$\approx 343\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

Milieu	Célérité
eau, son	$\approx 1{,}5 \times 10^{3}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$
acier, son	$\approx 5 \times 10^{3}$ à $6 \times 10^{3}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Sur une corde, la célérité dépend de la tension. Le son va environ quatre fois plus vite dans l'eau que dans l'air.

Vérifie : Le son sur un kilomètre

Dans l'air à $20\,^{\circ}\mathrm{C}$, combien de temps le son met-il environ pour parcourir $1{,}0\,\mathrm{km}$?

A. Environ $2{,}9 \times 10^{-3}\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. Le kilomètre n'a pas été converti en mètres.

B. Environ $343\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. 343 est la célérité en $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, pas une durée.

C. Aucun temps : le son arrive tout de suite.

Faux.

Faux. Le son met un temps mesurable : un écho le montre.

D. Environ $2{,}9\,\mathrm{s}$

Juste.

Juste : on divise la distance, en mètres, par la célérité.

Correction

On convertit : $d = 1{,}0\,\mathrm{km} = 1{,}0 \times 10^{3}\,\mathrm{m}$. La définition de la célérité donne $\Delta t = \dfrac{d}{v}$. Donc $\Delta t = \dfrac{1{,}0 \times 10^{3}\,\mathrm{m}}{343\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}} \approx 2{,}9\,\mathrm{s}$, avec deux chiffres significatifs.

Facteurs dont dépend la célérité

Tension, masse linéique et amplitude

Devine : Tendre davantage la corde

Tu tends davantage la corde, sans changer de corde. Comment évolue la célérité de la bosse ?

A. Elle diminue.

Faux.

Faux. Une corde plus tendue transmet la perturbation plus vite.

B. Elle ne change pas : c'est la même corde.

Faux.

Faux. La corde est la même, mais sa tension a changé.

C. Elle augmente.

Juste.

Juste : c'est ce que montrent les mesures qui suivent.

D. Elle dépend seulement de la force de la secousse.

Faux.

Faux. La force de la secousse change la hauteur de la bosse, pas sa vitesse.

Correction

Sur une même corde, une tension plus grande donne une célérité plus grande. Les mesures suivantes le confirment : la bosse parcourt la même distance en moins de temps.

Mesures sur une corde. On mesure la durée que met le front pour parcourir $3{,}0\,\mathrm{m}$.

- Corde peu tendue : $1{,}2\,\mathrm{s}$, soit $v = 2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.
- Même corde, plus tendue : $0{,}75\,\mathrm{s}$, soit $v = 4{,}0\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.
- Corde deux fois plus lourde par mètre, tendue comme la première : $1{,}7\,\mathrm{s}$, soit $v \approx 1{,}8\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

La masse d'un mètre de corde est sa **masse linéique** $\mu = \dfrac{m}{L}$, en $\mathrm{kg\cdot m^{-1}}$.

Deux secousses différentes. Sur la corde peu tendue, on crée une bosse de $1\,\mathrm{cm}$, puis une bosse de $4\,\mathrm{cm}$ d'un geste plus vif. Les deux fronts mettent la même durée, $1{,}2\,\mathrm{s}$, pour parcourir $3{,}0\,\mathrm{m}$. La hauteur et la forme de la bosse ne changent donc pas sa célérité.

Propriétés du milieu et célérité

Propriété : Facteurs dont dépend la célérité

Dans un milieu homogène, la célérité d'une onde mécanique est **constante** : le front d'onde parcourt des distances égales pendant des durées égales.

La célérité dépend des propriétés du milieu (nature, inertie, rigidité, température) et non de la forme ni de l'amplitude de la perturbation. En particulier :

- sur une corde, elle augmente quand la tension de la corde augmente et diminue quand sa masse linéique $\mu = \dfrac{m}{L}$ augmente ;
- dans l'air, la célérité du son augmente avec la température.

Vérifie : Ce qui change la célérité

Sur une même corde, quelle modification change la célérité de la bosse ?

A. Une secousse plus ample.

Faux.
Faux. Pour de petites perturbations, l'amplitude ne change pas la célérité.

B. Une secousse plus longue.
Faux.
Faux. La bosse est plus large, mais elle avance à la même vitesse.

C. Une bosse de forme triangulaire.
Faux.
Faux. La forme de la perturbation n'intervient pas.

D. Une tension plus faible.
Juste.
Juste : la tension est une propriété du milieu ; plus faible, elle diminue la célérité.

Correction
La célérité dépend du milieu : pour une corde, de sa tension et de sa masse linéique. Elle ne dépend ni de l'amplitude, ni de la durée, ni de la forme de la perturbation. Parmi ces choix, seule une tension plus faible modifie la célérité : la bosse va moins vite.

Attention : un geste plus vif ne propage pas plus vite

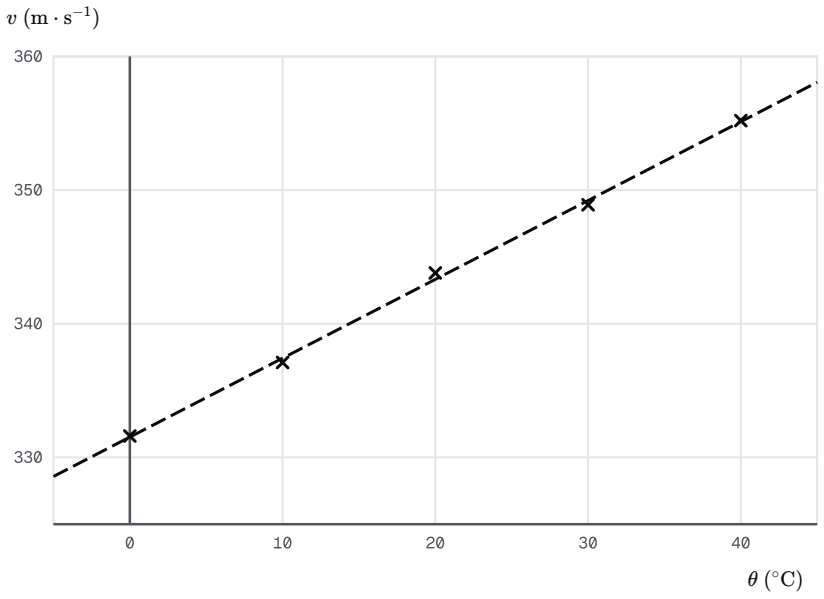
✗ « En secouant plus fort, la bosse arrive plus vite au bout de la corde. »

✓ Une secousse plus forte donne une bosse plus haute, pas plus rapide. Les deux bosses de l'expérience précédente arrivent au bout en $1{,}2\,\mathrm{s}$. Pour changer la célérité, il faut changer le milieu : tendre la corde, ou en prendre une plus lourde.

Célérité du son et température de l'air

Le son et la température. On mesure la célérité du son dans l'air d'une enceinte chauffée, à cinq températures θ.

θ (°C)	v ($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)
0	$331{,}6$
10	$337{,}1$
20	$343{,}8$
30	$348{,}9$
40	$355{,}2$



Célérité du son dans l'air selon la température.

Exemple : Lire la droite de modélisation

La droite passe au plus près des points ; elle a pour équation $v \approx a\,\theta + b$. Ses coefficients, calculés à partir des mesures, valent $a \approx 0{,}59\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ par degré et $b \approx 331{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

À $20\,^\circ\mathrm{C}$, la droite donne $v \approx 331{,}5 + 0{,}59 \times 20 \approx 343\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. La célérité du son augmente avec la température, d'environ $0{,}6\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ par degré.

À toi : le son un jour d'été

Un jour d'été, l'air est à $35\,^\circ\mathrm{C}$. Estime la célérité du son avec la droite de modélisation, puis la durée de son trajet sur $1{,}0\,\mathrm{km}$. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Utilise $v \approx a\,\theta + b$ avec les coefficients de la droite.
Indice 2
Calcule ensuite $\Delta t = \dfrac{d}{v}$, avec d en mètres.
Indice 3
Point délicat : le résultat est une estimation ; écris-le avec $\approx$.

Réponse

$$\begin{aligned} v &\approx 0{,}59 \times 35 + 331{,}5 \\ &\approx 352\,\mathrm{m\cdot s^{-1}} \end{aligned}$$

Puis $\Delta t = \dfrac{d}{v} \approx \dfrac{1{,}0 \times 10^{3}\,\mathrm{m}}{352\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}} \approx 2{,}8\,\mathrm{s}$. Le son met un peu moins de temps qu'à $20\,^\circ\mathrm{C}$.

Retard temporel et relation d = v·τ

Deux points atteints l'un après l'autre

Devine : Écart entre deux rubans

Sur la corde où la bosse avance à $2{,}5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, un ruban A est à $0{,}50\,\mathrm{m}$ de la source et un ruban B à $2{,}0\,\mathrm{m}$. Combien de temps après A le ruban B commence-t-il à bouger ?

A. $0{,}80\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. C'est la durée du trajet de la source à B ; il faut celle du trajet de A à B.

B. $0{,}60\,\mathrm{s}$

Juste.

Juste : le front parcourt $1{,}5\,\mathrm{m}$ à $2{,}5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

C. $3{,}8\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. La distance a été multipliée par la célérité au lieu d'être divisée.

D. $0{,}20\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. C'est la durée du trajet de la source à A.

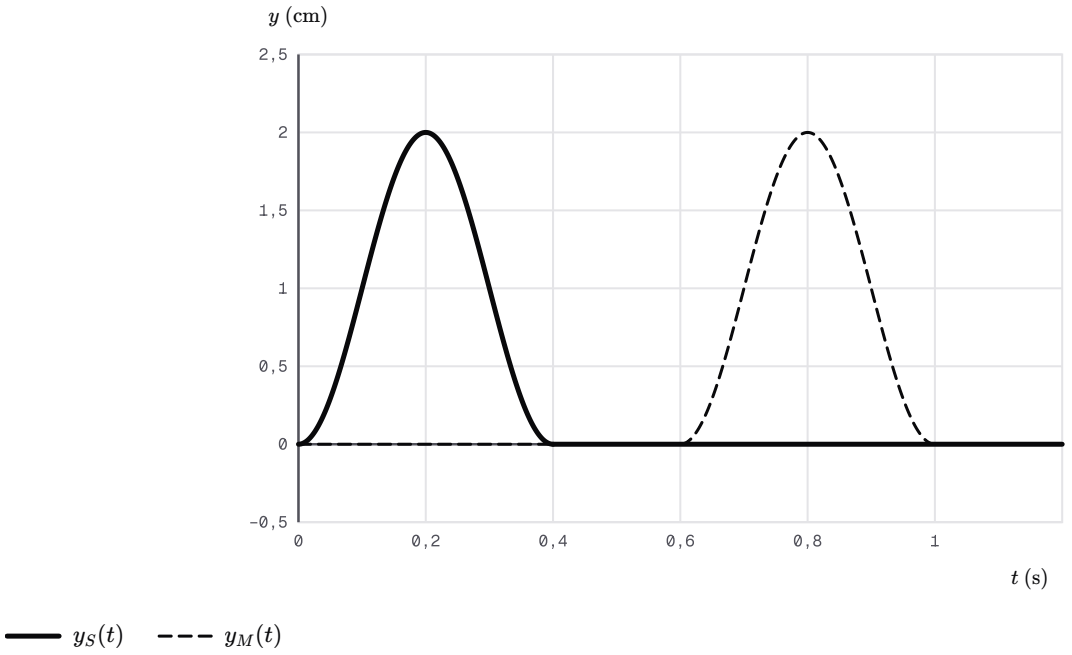
Correction

Le front doit parcourir $AB = 2{,}0 - 0{,}50 = 1{,}5\,\mathrm{m}$. À $2{,}5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, il lui faut $\dfrac{1{,}5}{2{,}5} = 0{,}60\,\mathrm{s}$. Le ruban B commence à bouger $0{,}60\,\mathrm{s}$ après A.

Le retard temporel. Le ruban B fait le même mouvement que A, mais plus tard. La durée qui sépare le début du mouvement de A de celui de B est le **retard temporel** τ de B sur A. Il se mesure en secondes. Plus les deux points sont éloignés, plus le retard est grand.

Signaux de la source et d'un point

Signaux enregistrés en S et en M. Une caméra suit la source S et un point M situé à $SM = 1{,}5\,\mathrm{m}$. L'**élongation** est l'écart vertical à la position de repos. On la note $y_S(t)$ pour la source et $y_M(t)$ pour M. La source crée une bosse de $2{,}0\,\mathrm{cm}$ de haut, qui dure $\Delta t_e = 0{,}40\,\mathrm{s}$.



Élongations de la source et du point M en fonction du temps.

Vérifie : Lecture du retard sur les deux courbes

D'après les deux courbes, quel est le retard de M sur la source ?

A. $0{,}40\,\text{s}$

Faux.

Faux. C'est la durée de l'ébranlement, la largeur de chaque bosse.

B. $1{,}0\,\text{s}$

Faux.

Faux. C'est la date à laquelle M revient au repos.

C. $0{,}60\,\text{s}$

Juste.

Juste : on compare deux détails identiques, ici les débuts des deux bosses.

D. $0{,}80\,\text{s}$

Faux.

Faux. C'est la date du sommet de la bosse de M, pas un écart entre deux dates.

Correction

On repère le même détail sur les deux courbes. La source commence à bouger à $t = 0$, le point M à $t = 0{,}60\,\text{s}$. Le retard est donc $\tau = 0{,}60\,\text{s}$. Les sommets donnent le même écart : $0{,}80 - 0{,}20 = 0{,}60\,\text{s}$.

Relation entre retard, distance et célérité

Un lien avec la célérité. Pendant le retard, le front va de la source jusqu'à M. Il parcourt $1{,}5\,\mathrm{m}$ en $0{,}60\,\mathrm{s}$, à la célérité $2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Le retard, la distance et la célérité sont donc liés.

Propriété : Retard temporel et relation d = v·τ

Une onde progressive se propage à la célérité v dans un milieu homogène. Deux points M_1 et M_2 du milieu, séparés par la distance $d = M_1M_2$ mesurée le long de la propagation, sont atteints successivement par la perturbation. Le **retard temporel** τ de M_2 sur M_1 vérifie :

$$d = v \cdot \tau \quad \text{soit} \quad \tau = \frac{d}{v}$$

En particulier, un point M situé à la distance SM de la source est atteint avec le retard $\tau = \dfrac{SM}{v}$ sur la source.

Démonstration

Étape 1. Le front d'onde atteint M_1 à la date t_1 et M_2 à la date t_2. Par définition, le retard de M_2 sur M_1 est $\tau = t_2 - t_1$.

Étape 2. Entre ces deux dates, le front d'onde parcourt la distance $d = M_1M_2$ pendant la durée τ. D'après les facteurs dont dépend la célérité, la célérité est constante dans un milieu homogène ; la définition de la célérité s'applique donc sur ce parcours : $v = \dfrac{d}{\tau}$.

Étape 3. Il vient $d = v \cdot \tau$, soit $\tau = \dfrac{d}{v}$. Avec $M_1 = S$, on obtient le retard $\tau = \dfrac{SM}{v}$ d'un point M sur la source.

À retenir : Pourquoi le retard vaut la distance divisée par la célérité

Le retard est la durée du trajet du front entre les deux points. Dans un milieu homogène, la célérité ne change pas le long de ce trajet. Sa définition s'y applique donc : $v = \dfrac{d}{\tau}$. On en tire $d = v \cdot \tau$, puis $\tau = \dfrac{d}{v}$.

Exemple : Retards de deux points de la corde

La célérité vaut $v = 2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Le point N est à $SN = 2{,}0\,\mathrm{m}$ de la source.

$$\begin{aligned} \tau_N &= \frac{SN}{v} \\ &= \frac{2{,}0\,\mathrm{m}}{2{,}5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}} \\ &= 0{,}80\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

Le point M est atteint à $0{,}60\,\mathrm{s}$. Le retard de N sur M vaut donc $0{,}80 - 0{,}60 = 0{,}20\,\mathrm{s}$. On le retrouve avec $MN = 0{,}50\,\mathrm{m}$: $\dfrac{0{,}50}{2{,}5} = 0{,}20\,\mathrm{s}$.

Retard sur la source et écho

Vérifie : Le son d'un haut-parleur à 17 mètres

Un auditeur est à $17\,\mathrm{m}$ d'un haut-parleur, dans l'air à $15\,^{\circ}\mathrm{C}$ où $v = 340\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Quel est le retard du son reçu sur le son émis ?

A. $50\,\mathrm{ms}$

Juste.

Juste : $\tau = \dfrac{d}{v}$, converti en millisecondes.

B. $20\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. C'est le quotient $\dfrac{v}{d}$, qui n'est pas une durée.

C. $5{,}0\,\mathrm{ms}$

Faux.

Faux. Erreur de puissance de dix : $5{,}0 \times 10^{-2}\,\mathrm{s}$ font $50\,\mathrm{ms}$.

D. $5{,}8 \times 10^{3}\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. La distance a été multipliée par la célérité.

Correction

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{d}{v}\\ &= \frac{17\,\mathrm{m}}{340\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}}\\ &= 5{,}0 \times 10^{-2}\,\mathrm{s}\end{aligned}$$

Soit $50\,\mathrm{ms}$. Ce retard est trop bref pour être remarqué.

Retard sur la source. Avec $M_1 = S$, la relation donne le retard d'un point M sur la source : $\tau = \dfrac{SM}{v}$. Si la source commence à bouger à $t = 0$, le point M commence à la date τ. Les retards vont de quelques dizaines de microsecondes à quelques millisecondes pour des ultrasons au laboratoire. Ils atteignent près de trois secondes pour le son sur un kilomètre.

Remarque : Écho : l'aller et le retour

Le haut-parleur émet un bref signal face à un mur, à $d = 17\,\mathrm{m}$, dans l'air où $v = 340\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Le son revient après réflexion : c'est un écho. Entre l'émission et la réception, il fait l'aller et le retour, soit $2d$. La relation devient $2d = v\,\Delta t$.

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{2d}{v} \\ &= \frac{34\,\text{m}}{340\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}} \\ &= 0{,}10\,\text{s}\end{aligned}$$

À toi : la distance d'un point à la source

Un point P de la corde commence à bouger $1{,}6\times10^{3}\,\text{ms}$ après la source. La célérité vaut $2{,}5\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. À quelle distance de la source se trouve P ? Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Le retard de P sur la source et la distance SP sont liés par la célérité.
Indice 2
Convertis le retard en secondes.
Indice 3
Point délicat : la distance est un produit, $SP = v\cdot\tau$, et non un quotient.

Réponse
Le retard vaut $\tau = 1{,}6\times10^{3}\,\text{ms} = 1{,}6\,\text{s}$.

$$\begin{aligned}SP &= v\cdot\tau \\ &= 2{,}5\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\times 1{,}6\,\text{s} \\ &= 4{,}0\,\text{m}\end{aligned}$$

Le résultat garde deux chiffres significatifs.

Élongation d'un point et aspect de la corde

Un point qui reproduit la source

Devine : Le point M à la date 0,70 s

Le point M est atteint avec le retard $\tau = 0{,}60\,\text{s}$. À la date $t = 0{,}70\,\text{s}$, son élongation est celle qu'avait la source à quelle date ?

A. $1{,}3\,\text{s}$
Faux.
Faux. Le retard a été ajouté : la source a agi avant, pas après.

B. $0{,}70\,\text{s}$
Faux.
Faux. À $0{,}70\,\text{s}$, la source est au repos depuis $0{,}30\,\text{s}$.

C. $0{,}10\,\text{s}$
Juste.
Juste : $0{,}70 - 0{,}60 = 0{,}10\,\text{s}$.

D. $0{,}60\,\mathrm{s}$

Faux.

Faux. C'est le retard lui-même, une durée, pas la date cherchée.

Correction

Ce qui arrive en M à $0{,}70\,\mathrm{s}$ a quitté la source $0{,}60\,\mathrm{s}$ plus tôt. La date cherchée est $0{,}70 - 0{,}60 = 0{,}10\,\mathrm{s}$. Le point M répète ce que faisait la source à cette date.

Le point M, copie décalée de la source. Pour connaître M à une date t, on remonte le temps de τ et on regarde la source. Sur les deux enregistrements de la section précédente, la courbe de M est celle de la source, déplacée de τ vers la droite.

Élongation d'un point et élongation de la source

Propriété : Élongation d'un point du milieu : y_M(t) = y_S(t – τ)

On note $y_S(t)$ l'élongation de la source S et $y_M(t)$ celle d'un point M du milieu, atteint avec le retard $\tau = \dfrac{SM}{v}$. En l'absence d'amortissement, le point M reproduit le mouvement de la source avec le retard τ :

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

À la date t, l'élongation de M est celle qu'avait la source à la date $t - \tau$. Si la source commence à vibrer à la date t_0, le point M reste au repos jusqu'à la date $t_0 + \tau$.

Démonstration

Étape 1. À la date $t - \tau$, la source a l'élongation $y_S(t - \tau)$: c'est l'état de la perturbation émise à cette date.

Étape 2. La célérité ne dépend ni de la forme ni de l'amplitude de la perturbation (facteurs dont dépend la célérité) : chaque partie du signal se propage, comme le front, à la célérité v. D'après la relation entre le retard temporel, la distance et la célérité, la perturbation émise à $t - \tau$ parcourt donc la distance SM pendant la durée $\tau = \dfrac{SM}{v}$: elle atteint M à la date $(t - \tau) + \tau = t$.

Étape 3. D'après la définition d'une onde progressive, en l'absence d'amortissement, M reproduit sans déformation le mouvement de la source : à la date t, son élongation est celle de la perturbation qui l'atteint. Donc $y_M(t) = y_S(t - \tau)$.

À retenir : Pourquoi le point M répète la source avec un retard

La perturbation émise par la source à la date $t - \tau$ met la durée τ pour aller jusqu'à M. Elle l'atteint donc à la date t. Sans amortissement, elle arrive intacte : M prend l'élongation qu'avait la source quand elle l'a émise. D'où $y_M(t) = y_S(t - \tau)$.

Exemple : État du point M de la corde

Pour M à $SM = 1{,}5\,\text{m}$, $\tau = 0{,}60\,\text{s}$. La source bouge de 0 à $0{,}40\,\text{s}$.

- M reste au repos jusqu'à $0{,}60\,\text{s}$. Il bouge ensuite jusqu'à $0{,}60 + 0{,}40 = 1{,}0\,\text{s}$.
- À $t = 0{,}80\,\text{s}$: $y_M(0{,}80) = y_S(0{,}20) = 2{,}0\,\text{cm}$. Le point M est au sommet de la bosse, comme la source à $0{,}20\,\text{s}$.
- À $t = 1{,}2\,\text{s}$: $y_M(1{,}2) = y_S(0{,}60) = 0$. Le point M est revenu au repos.

Dates de début et de fin du mouvement d'un point

Méthode : Méthode pour trouver l'état d'un point

1. **Retard.** Calcule $\tau = \dfrac{SM}{v}$.
2. **Début et fin.** Si la source bouge de t_0 à $t_0 + \Delta t_e$, le point M bouge de $t_0 + \tau$ à $t_0 + \tau + \Delta t_e$.
3. **Élongation.** À une date t, calcule $t - \tau$ et lis l'élongation de la source à cette date.
4. **Contrôle.** Si $t - \tau$ tombe hors des dates où la source bouge, le point est au repos.

Vérifie : Dates du mouvement du point Q

Le point Q est à $SQ = 3{,}0\,\text{m}$ de la source. Entre quelles dates bouge-t-il ?

A. De $1{,}2\,\text{s}$ à $1{,}6\,\text{s}$

Juste.
Juste : $\tau = 1{,}2\,\text{s}$, puis on ajoute la durée de l'ébranlement.

B. De 0 à $0{,}40\,\text{s}$

Faux.
Faux. Ce sont les dates de la source : Q commence plus tard.

C. De $0{,}40\,\text{s}$ à $1{,}2\,\text{s}$

Faux.
Faux. À $1{,}2\,\text{s}$, Q commence à bouger ; il ne s'arrête pas.

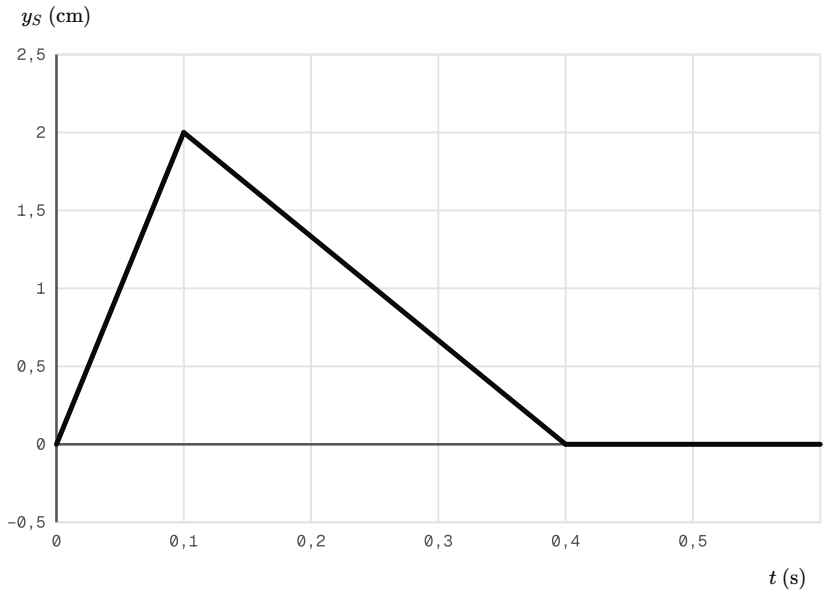
D. De $1{,}2\,\text{s}$ à $2{,}4\,\text{s}$

Faux.
Faux. Le retard a été doublé au lieu d'ajouter la durée de l'ébranlement.

Correction
$\tau = \dfrac{SQ}{v} = \dfrac{3{,}0}{2{,}5} = 1{,}2\,\text{s}$. Le point Q commence à bouger à $1{,}2\,\text{s}$. Il bouge pendant $\Delta t_e = 0{,}40\,\text{s}$, comme la source : il s'arrête à $1{,}2 + 0{,}40 = 1{,}6\,\text{s}$.

Aspect de la corde à une date donnée

Un signal dissymétrique. La source crée maintenant une bosse dissymétrique. Elle monte vite, de 0 à $2{,}0\,\text{cm}$ en $0{,}10\,\text{s}$. Elle redescend lentement, jusqu'à 0, en $0{,}30\,\text{s}$. L'ébranlement dure toujours $\Delta t_e = 0{,}40\,\text{s}$, et la célérité reste $2{,}5\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Élongation de la source : montée rapide, descente lente.

Devine : Où se trouve la partie raide ?

À la date $t = 1{,}0\,\text{s}$, on photographie la corde. Où se trouve la partie la plus raide de la bosse ?

A. Du côté de la source, comme sur le signal.

Faux.

Faux. Sur le signal, la montée rapide vient en premier dans le temps ; sur la corde, ce qui est parti en premier est le plus loin.

B. Du côté du front, le plus loin de la source.

Juste.

Juste : le début du signal, la montée rapide, a parcouru la plus grande distance.

C. Au milieu de la bosse.

Faux.

Faux. La bosse est dissymétrique : sa partie raide est à un bord.

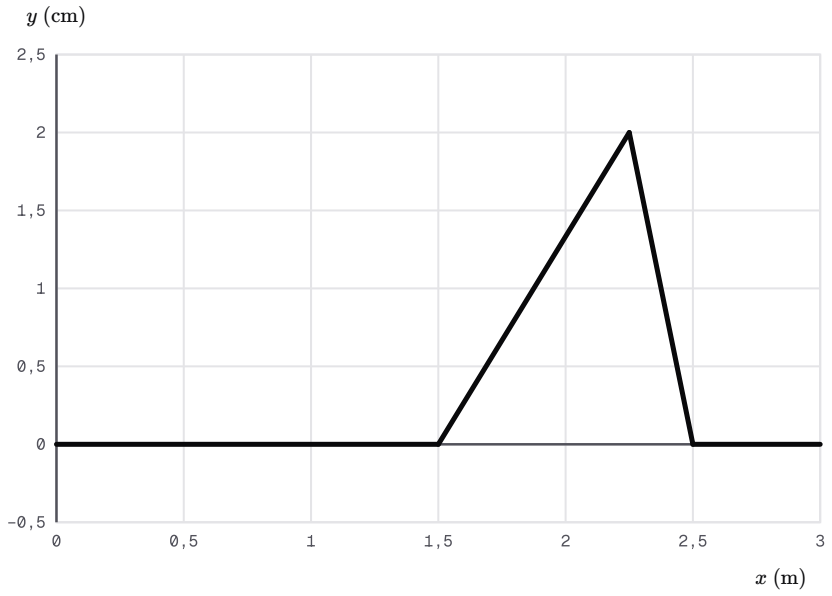
D. Nulle part : la bosse devient symétrique.

Faux.

Faux. Sans amortissement, la bosse garde sa forme ; elle apparaît seulement inversée de gauche à droite.

Correction

Le point de la corde qui reçoit en premier le début du signal est le plus éloigné de la source : c'est le front. La montée rapide, émise de 0 à $0{,}10\,\mathrm{s}$, est donc juste derrière le front. La descente lente, émise ensuite, s'étale vers la source.



Aspect de la corde à la date 1,0 s.

Exemple : Lire l'aspect de la corde à 1,0 s

- **Front.** $x_F = v\,t = 2{,}5 \times 1{,}0 = 2{,}5\,\mathrm{m}$.
- **Fin de la bosse.** Émise à $0{,}40\,\mathrm{s}$, elle a voyagé $0{,}60\,\mathrm{s}$: $2{,}5 \times 0{,}60 = 1{,}5\,\mathrm{m}$.
- **Longueur.** La bosse occupe $\ell = v\,\Delta t_e = 1{,}0\,\mathrm{m}$ de corde.
- **Sommet.** Émis à $0{,}10\,\mathrm{s}$, il a voyagé $0{,}90\,\mathrm{s}$: $2{,}5 \times 0{,}90 = 2{,}25\,\mathrm{m}$, à $25\,\mathrm{cm}$ du front.

Passer du signal à la photo de la corde

Attention : la corde n'est pas une copie du signal

✗ « Sur la corde, la partie raide est près de la source, comme sur la courbe $y_S(t)$. »

✓ Sur la courbe du signal, l'axe horizontal porte le temps ; sur la photo de la corde, il porte la distance à la source. Ce que la source émet en premier est le plus loin, au front. La bosse de la corde est donc inversée de gauche à droite par rapport à la courbe du signal. Elle monte doucement depuis la source, puis descend brutalement juste avant le front.

Méthode : Méthode pour dessiner la corde à une date

1. **Front.** À la date t, le front est à $x_F = v\,t$ de la source.
2. **Longueur.** Un ébranlement de durée Δt_e occupe la longueur $\ell = v\,\Delta t_e$, derrière le front.
3. **Ordre.** Place le début du signal au front et sa fin du côté de la source.
4. **Repos.** Au-delà du front, la corde est au repos ; entre la source et la fin de la bosse aussi, si l'ébranlement est terminé.

À toi : la corde à la date 0,80 s

Avec le même signal dissymétrique, décris la corde à la date $t = 0{,}80\,\mathrm{s}$: position du front, de la fin de la bosse et du sommet. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Le front est à $x_F = v\,t$.
Indice 2
La fin de la bosse a été émise à $0{,}40\,\mathrm{s}$; le sommet, à $0{,}10\,\mathrm{s}$.
Indice 3
Point délicat : un détail émis à la date t' a voyagé pendant $t - t'$, et non pendant t'.

Réponse

- Front : $x_F = 2{,}5 \times 0{,}80 = 2{,}0\,\mathrm{m}$.
- Fin de la bosse : $2{,}5 \times (0{,}80 - 0{,}40) = 1{,}0\,\mathrm{m}$.
- Sommet : $2{,}5 \times (0{,}80 - 0{,}10) = 1{,}75\,\mathrm{m}$.

La bosse occupe la corde de $1{,}0\,\mathrm{m}$ à $2{,}0\,\mathrm{m}$. Sa partie raide va du sommet jusqu'au front.

Mesurer un retard et une célérité avec des ultrasons

Montage de mesure à ultrasons

Devine : Ce qu'il faut mesurer

Les ultrasons sont des sons que l'oreille humaine n'entend pas. On veut mesurer leur célérité dans l'air. Quelles grandeurs faut-il mesurer ?

A. La durée d'une émission d'ultrasons.

Faux.

Faux. Cette durée ne dit rien de la vitesse de propagation.

B. L'amplitude des signaux reçus.

Faux.

Faux. L'amplitude ne donne aucune vitesse de propagation.

C. Une distance entre deux récepteurs, et le retard entre leurs signaux.

Juste.

Juste : la célérité est alors $v = \dfrac{d}{\tau}$.

D. La distance entre l'émetteur et un seul récepteur.

Faux.

Faux. Il manque une durée : sans elle, aucune célérité.

Correction

La relation $d = v \cdot \tau$ donne $v = \dfrac{d}{\tau}$. Il faut donc une distance d, mesurée à la règle, et le retard τ entre deux signaux. Deux récepteurs placés sur le trajet des ultrasons fournissent ces deux signaux.

Méthode : Montage, protocole et exploitation de la mesure

Montage.

- Un émetteur E d'ultrasons, qui émet par salves.
- Deux récepteurs R_1 et R_2, posés sur une règle graduée, alignés avec E.
- R_1 relié à la voie Y_1 d'un oscilloscope, R_2 à la voie Y_2, masses communes.

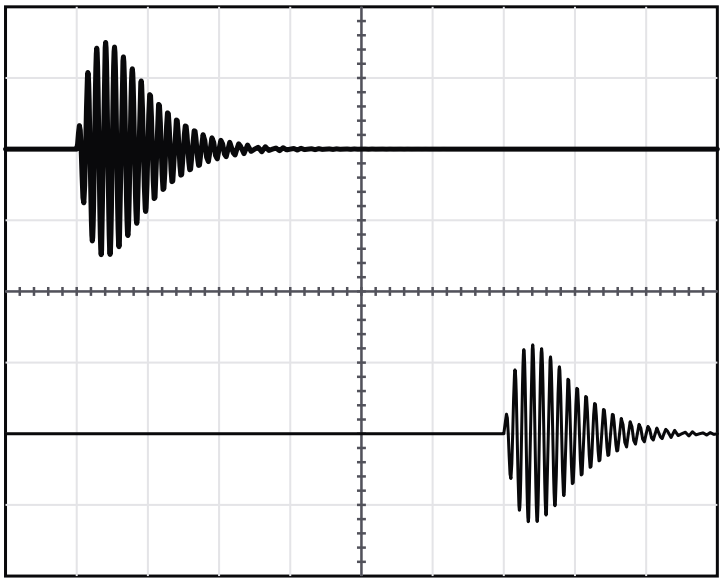
Protocole.

1. Placer R_1 et R_2 côte à côte : les deux salves reçues débutent ensemble.
2. Reculer R_2 le long de la règle et mesurer $d = R_1R_2$.
3. Lire le retard τ entre les débuts des deux salves.
4. Recommencer pour plusieurs distances.

Exploitation. Tracer d en fonction de τ, puis déterminer la pente de la droite obtenue.

Salves et balayage. Une salve est une émission brève d'ultrasons, suivie d'un silence. Seul le début de chaque salve reçue nous intéresse ici. Rappel : sur l'écran d'un oscilloscope, une durée se lit en divisions horizontales. La sensibilité horizontale b, ou balayage, donne la durée d'une division, en $\mathrm{ms/div}$.

Lire le retard sur l'oscillogramme



Voie Y_1 : 0,5 V/div, zéro 2 divisions au-dessus du centre

Voie Y_2 : 0,2 V/div, zéro 2 divisions au-dessous du centre Balayage : 0,2 ms/div

Salves reçues par R1 et R2 ; balayage de 0,20 ms par division.

Vérifie : Divisions entre les deux salves

Les récepteurs sont à $d = 41{,}0\,\mathrm{cm}$ l'un de l'autre. Combien de divisions horizontales séparent les débuts des deux salves ?

A. $7{,}0\,\mathrm{div}$

Faux.

Faux. C'est la position du début de la seconde salve, comptée depuis le bord de l'écran.

B. $1{,}0\,\mathrm{div}$

Faux.

Faux. C'est la position du début de la première salve.

C. $8{,}0\,\mathrm{div}$

Faux.

Faux. Les deux positions ont été additionnées au lieu d'être soustraites.

D. $6{,}0\,\mathrm{div}$

Juste.

Juste : $7{,}0 - 1{,}0 = 6{,}0\,\mathrm{div}$.

Correction

Le début de la salve de R_1 est à $1{,}0$ division du bord gauche, celui de R_2 à $7{,}0$ divisions. Ils sont séparés de $7{,}0 - 1{,}0 = 6{,}0$ divisions. Ce nombre doit encore être converti en durée.

Méthode : Méthode pour lire un retard à l'oscilloscope

1. **Même détail.** Repère sur chaque voie le même détail : le début de la salve, ou son premier sommet.
2. **Divisions.** Compte le nombre n de divisions horizontales qui les séparent.
3. **Conversion.** Multiplie par la sensibilité horizontale : $\tau = n \times b$.
4. **Unité.** Donne τ en millisecondes ou en secondes, jamais en divisions.

Du nombre de divisions à la célérité

Exemple : Retard et célérité lus sur l'écran

Le balayage vaut $b = 0{,}20\,\text{ms/div}$ et $n = 6{,}0\,\text{div}$.

$$\begin{aligned}\tau &= n \times b \\ &= 6{,}0\,\text{div} \times 0{,}20\,\text{ms/div} \\ &= 1{,}2\,\text{ms}\end{aligned}$$

Avec $d = 41{,}0\,\text{cm} = 0{,}410\,\text{m}$ et $\tau = 1{,}2 \times 10^{-3}\,\text{s}$:

$$\begin{aligned}v &= \frac{d}{\tau} \\ &= \frac{0{,}410\,\text{m}}{1{,}2 \times 10^{-3}\,\text{s}} \\ &= 3{,}4 \times 10^{2}\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\end{aligned}$$

Deux chiffres significatifs seulement : la lecture de n limite la précision.

Attention : un retard se donne en secondes

✗ « Le retard vaut $\tau = 6{,}0\,\text{div}$. »

✓ Une division n'est pas une durée : $\tau = 6{,}0 \times 0{,}20 = 1{,}2\,\text{ms}$.

Autre piège : la distance utile est $d = R_1R_2$, et non la distance de l'émetteur à un récepteur. Le décalage entre les voies ne mesure que le trajet de R_1 à R_2.

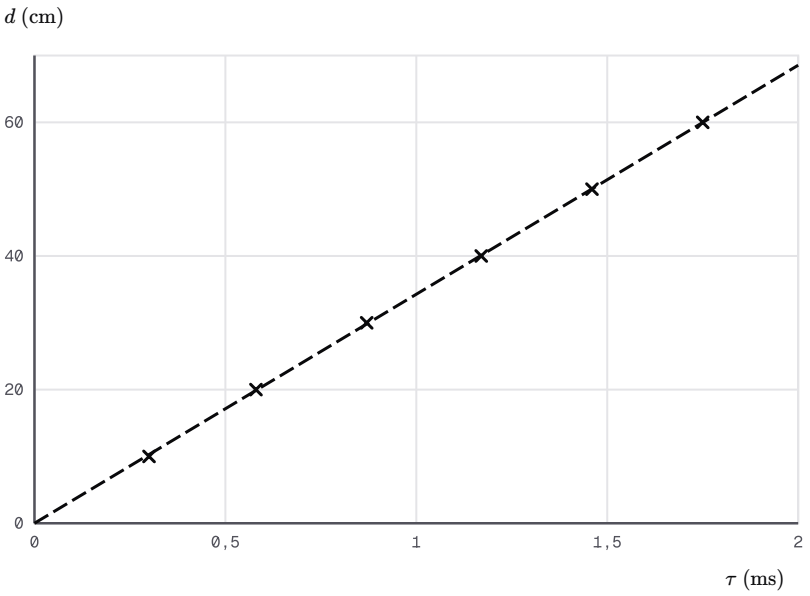
Série de mesures et droite de modélisation

Une série de mesures. On recommence pour six distances $d = R_1R_2$, et on lit chaque retard.

d (cm)	τ (ms)
10	$0{,}30$
20	$0{,}58$

d (cm)	τ (ms)
30	0,87
40	1,17
50	1,46
60	1,75

Chaque lecture porte une petite erreur : les points ne sont pas parfaitement alignés.



Distance entre les récepteurs en fonction du retard.

Vérifie : Signification de la pente

La droite de modélisation passe par l'origine : $d = a\,\tau$. Que représente sa pente a ?

A. L'inverse de la célérité.

Faux.

Faux. Ce serait la pente de τ en fonction de d.

B. La célérité des ultrasons.

Juste.

Juste : $d = v \cdot \tau$, donc $a = v$.

C. Le retard moyen des mesures.

Faux.

Faux. Le retard est porté en abscisse ; la pente est un quotient d'une distance par une durée.

D. La distance moyenne des récepteurs.

Faux.

Faux. Une pente n'est pas une distance : son unité est le $\mathrm{cm/ms}$.

Correction
La relation entre le retard temporel, la distance et la célérité s'écrit $d = v \cdot \tau$. C'est une droite passant par l'origine, de pente v. La pente de la droite de modélisation mesure donc la célérité.

Exemple : Célérité tirée de la droite

La pente, calculée à partir des six points, vaut $a \approx 34{,}3\ \mathrm{cm/ms}$. Or $1\ \mathrm{cm/ms} = \dfrac{10^{-2}\ \mathrm{m}}{10^{-3}\ \mathrm{s}} = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Donc $v \approx 343\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. C'est la célérité du son dans l'air à $20\ ^\circ\mathrm{C}$: les ultrasons sont des sons, ils vont aussi vite. Six mesures valent mieux qu'une : la droite moyenne les erreurs de lecture.

Proposer et améliorer un protocole

À toi : un seul récepteur

Un groupe ne dispose que d'un récepteur R. La voie Y_1 affiche le signal électrique qui commande l'émetteur, la voie Y_2 celui de R. Propose un protocole pour mesurer la célérité des ultrasons. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Le signal de la voie Y_1 marque la date de l'émission.
Indice 2
Fais varier la distance entre l'émetteur et R, et relève chaque retard.
Indice 3
Point délicat : l'émetteur et le récepteur ajoutent un petit délai ; exploite la pente plutôt qu'une seule mesure.

Réponse

1. Placer R face à l'émetteur, sur une règle graduée, à une distance D.
2. Lire le retard τ du début de la salve de Y_2 sur celui du signal de Y_1.
3. Reculer R de quelques centimètres, noter D et τ, et recommencer plusieurs fois.
4. Tracer D en fonction de τ : la pente de la droite est la célérité.

Un petit délai de l'électronique décale la droite sans changer sa pente. C'est pourquoi on exploite la pente plutôt qu'une seule mesure.

Précautions pour lire le retard entre deux récepteurs. Aligne l'émetteur et les deux récepteurs : sinon le trajet entre R_1 et R_2 n'est pas d. Mesure d entre les mêmes repères des deux boîtiers. Choisis le plus petit balayage qui garde les deux débuts de salve sur l'écran : la lecture gagne en précision. Écarte les mains et les objets du trajet des ultrasons.

À retenir : Gestes à maîtriser sur les ondes mécaniques progressives

- Nommer la source, le milieu et la perturbation d'une onde mécanique.
- Reconnaître une onde transversale ou longitudinale.
- Calculer une célérité, avec unité et chiffres significatifs.
- Relier retard, distance et célérité : $d = v \cdot \tau$.
- Trouver l'état d'un point avec $y_M(t) = y_S(t - \tau)$.
- Dessiner la corde à une date, le début du signal au front.
- Lire un retard sur un oscillogramme et exploiter une série de mesures.

Le chapitre suivant étudie d'autres signaux.

SOURCES

Référentiel BURHAN du chapitre « Ondes mécaniques progressives » (2bac · pc · physique-chimie)