

Physique 2 : Les ondes mécaniques progressives

Une pierre tombant sur la surface d'un étang provoque des vagues circulaires qui se propagent à la surface de l'eau [Doc. 1]. Un tremblement de Terre engendre des secousses sismiques parfois dévastatrices, qui se propagent dans l'écorce terrestre. Ce sont deux exemples d'ondes mécaniques.

1. Qu'est-ce qu'une onde mécanique ?

Étudions la propagation d'une vague à la surface de l'eau. Existe-t-il un transport de matière lors de cette propagation ?

Activité 1

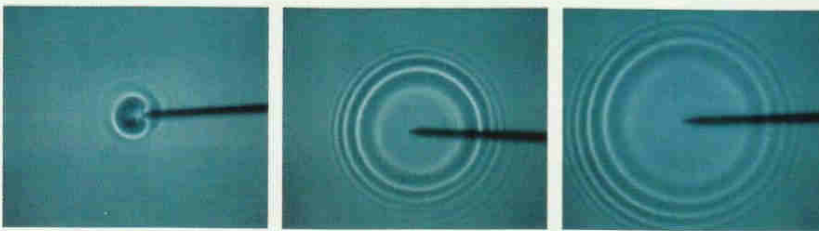
Comment se propage une onde à la surface de l'eau ?

- Déposer un morceau de liège sur la surface de l'eau contenue dans une cuve.
- Laisser tomber une goutte d'eau dans la cuve et observer.

1. Le morceau de liège est-il entraîné vers l'un des bords de la cuve ?
2. Donner une description de ce qui se propage à la surface de l'eau après la chute de la goutte.

> Observation

La chute de la goutte d'eau donne naissance à une perturbation formée de plusieurs vagues circulaires centrées sur le point d'impact [Doc. 2]. L'avant de la perturbation, appelé front, atteint le morceau de liège qui subit un mouvement de va-et-vient selon la verticale, sans être entraîné vers les bords de la cuve [Doc. 3].



Doc. 2 Une vague circulaire s'élargit au cours du temps.

> Interprétation

Le choc de la goutte d'eau provoque une perturbation déformant la surface de l'eau. Ce phénomène est **mécanique**.

À partir du « point source », la perturbation se propage à la surface de l'eau dans toutes les directions qui lui sont offertes. Elle affecte tour à tour les différents points de la surface. La surface de l'eau est le milieu de propagation. C'est un milieu élastique qui reprend sa forme plane horizontale après le passage de la déformation.

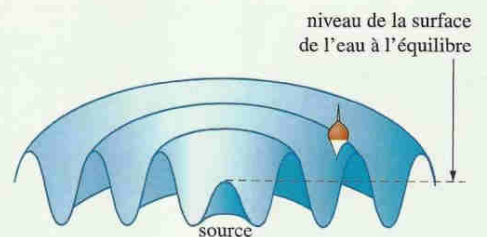
- On appelle **onde mécanique** le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu élastique, sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.
- Une onde mécanique se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.

À la surface des océans, la houle est une onde mécanique. Elle transporte de l'énergie (voir l'activité préparatoire A, page 17).

> Pour s'entraîner : Ex. 1



Doc. 1 L'onde progressive est formée de vagues se propageant à la surface de l'eau.



Doc. 3 Le bouchon se déplace verticalement au passage de la perturbation.

Un milieu élastique reprend sa forme lorsque cesse la cause de la déformation.

2. Quels sont les différents types d'ondes mécaniques ?

Dans l'activité 1, la perturbation due à l'onde qui se propage à la surface de l'eau provoque un mouvement du morceau de liège; ce mouvement est perpendiculaire à la direction de propagation.

En est-il de même pour toutes les ondes mécaniques ?

2.1 Les ondes transversales

Provoquons une secousse brève à l'extrémité d'un long ressort, dans une direction perpendiculaire à celui-ci.

Nous constatons qu'une déformation se propage le long du ressort [Doc. 4a].

Le mouvement d'un point affecté par le passage de l'onde se produit dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation [Doc. 4b]. L'onde qui se propage est dite **transversale**.

Une onde transversale provoque une perturbation dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Les ondes qui se propagent à la surface de l'eau sont aussi transversales.

2.2 Les ondes longitudinales

Une onde longitudinale le long d'un ressort

La perturbation qui se propage le long d'un ressort est-elle nécessairement transversale ?

Activité 2

Comment se propage une compression le long d'un ressort ?

- Tendre horizontalement un ressort de grande longueur.
- Comprimer quelques spires, puis les relâcher [Doc. 5].

1. Décrire le phénomène.

2. Comparer les directions de propagation et de déplacement des spires.

> Observation

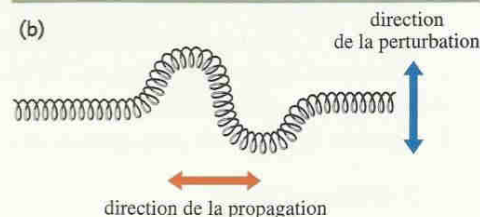
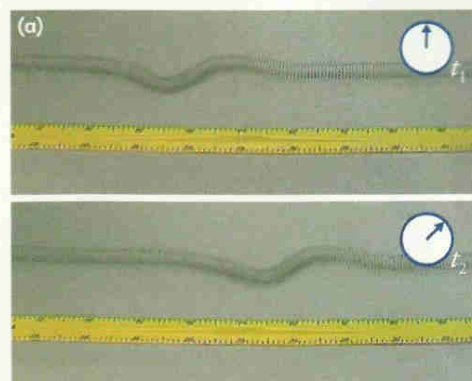
Nous observons une zone où les spires sont resserrées. Cette déformation du ressort progresse, de proche en proche, le long du ressort [Doc. 6].

> Interprétation

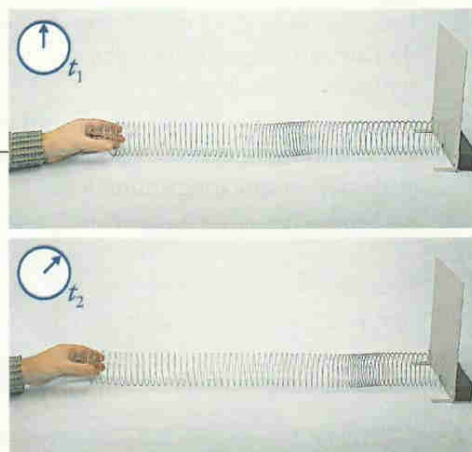
Le resserrement des spires (ou compression) provoqué à l'extrémité du ressort se déplace. De part et d'autre de cette zone de compression, nous observons deux zones de dilatation. Chaque spire subit, par rapport à sa position d'équilibre, un mouvement de va-et-vient selon une direction parallèle à la direction de propagation de l'onde : l'onde est dite **longitudinale**.

Le milieu de propagation de l'onde est élastique : les spires, une fois la perturbation passée, reprennent leurs positions antérieures ; il n'y a pas de transport de matière.

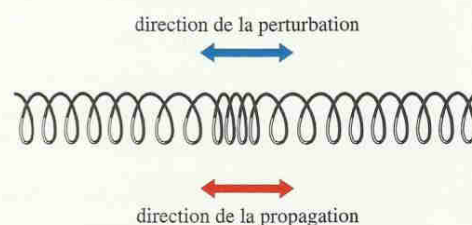
Une onde longitudinale provoque une perturbation dans une direction parallèle à celle de la propagation de l'onde.



Doc. 4 Onde transversale se propageant le long d'un ressort.



Doc. 5 Propagation (de gauche à droite) d'une onde longitudinale le long d'un ressort.



Doc. 6 Une zone de compression des spires se propage le long du ressort.

Les ondes sonores

Un architecte romain du début de l'ère chrétienne comparait le son à « des vagues d'eau qui se déplacent dans l'espace, onde après onde ».

Activité 3

Comment se propage une onde sonore ?

- Alimenter un boomer, c'est-à-dire un haut-parleur destiné à la production de sons graves, avec un générateur basse fréquence (ou G.B.F.) fournissant un courant alternatif de fréquence réglable [Doc. 7].
- Régler la fréquence pour obtenir un son grave (quelques dizaines de hertz).
- Placer une bougie allumée devant la membrane verticale du haut-parleur.
- Diminuer la fréquence jusqu'à 1 ou 2 hertz et observer la flamme.

1. Quel est le mouvement de la membrane du haut-parleur ?
2. Comparer l'aspect de la flamme lorsque le haut-parleur émet un son et lorsqu'il n'en émet pas.
3. Quel est le milieu de propagation de ces ondes sonores ?

> Observation

La membrane du haut-parleur effectue un mouvement de va-et-vient selon la fréquence du courant fourni par le générateur B.F.

Lorsque la fréquence est faible (un son grave), la flamme est le siège de perturbations longitudinales [Doc. 7].

> Interprétation

Les vibrations de la membrane du haut-parleur provoquent des vibrations de l'air qui se propagent dans tout l'espace environnant et atteignent les tympans des auditeurs.

L'onde générée par le haut-parleur dans la direction de la flamme provoque des vibrations de celle-ci, selon cette même direction : l'onde sonore est une **onde mécanique longitudinale**.

Les molécules constituant l'air subissent, au passage de l'onde sonore, des mouvements de va-et-vient longitudinaux. Ces mouvements d'ensemble s'accompagnent de compressions suivies de dépressions [Doc. 8]. L'onde sonore est une **onde longitudinale de compression-dilatation**.

Une fois la perturbation passée, l'air retrouve son état antérieur : c'est un milieu élastique propice à la propagation des ondes sonores.

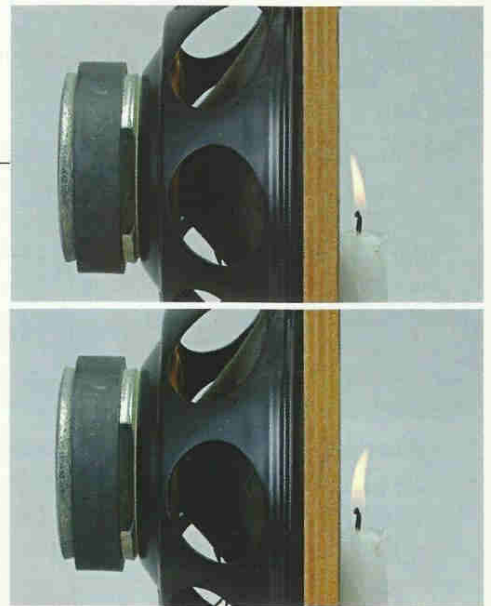
➤ Réalisons l'expérience du document 9. Un buzzer et un sonomètre sont placés sous une cloche reliée à une pompe à vide.

- Dans un premier temps, la cloche contient de l'air. Lorsque le buzzer est actionné, le sonomètre capte un son.
 - Dans un second temps, on fait le vide sous la cloche. Lorsque le buzzer est actionné, le sonomètre ne capte plus de son.
- Cette expérience montre que le son ne se propage pas dans le vide. Le son se propage bien dans les métaux et dans les liquides.

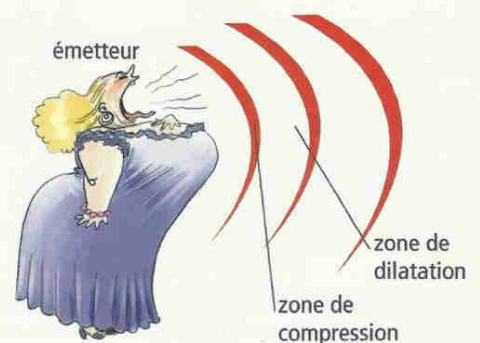
Certains matériaux non élastiques ne se prêtent pas à la propagation du son : ce sont des isolants phoniques (laine de roche, polystyrène...).

Le son est une onde mécanique longitudinale se propageant dans les milieux matériels élastiques.

➤ Pour s'entraîner : Ex. 2



Doc. 7 Les ondes sonores provoquent des vibrations horizontales de la flamme.



Doc. 8 Propagation d'une onde sonore : les zones en rouge correspondent à des compressions.



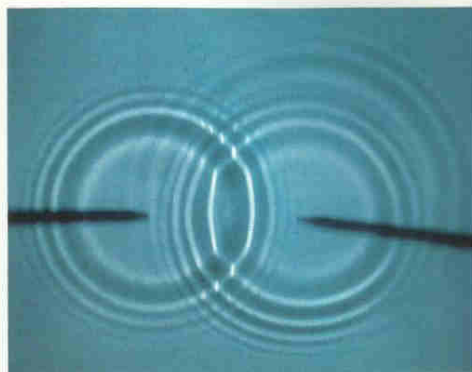
Doc. 9 Dispositif expérimental pour étudier la propagation du son.

3. Quelles sont les caractéristiques de la propagation d'une onde progressive ?

3.1 Croisement de deux ondes

Il est possible d'avoir des conversations croisées entre plusieurs personnes : les ondes sonores émises par l'un des interlocuteurs ne sont pas affectées par les ondes sonores émises par les autres, lorsqu'elles se croisent.

De même, si nous provoquons des déformations transversales, simultanément, en chacune des extrémités d'un long ressort, les ondes se croisent sans subir de modification. Après leur rencontre, leurs formes respectives restent inchangées. Nous observons le même phénomène avec des ondes se propageant à la surface de l'eau [Doc. 10].



Doc. 10 Croisement de deux ondes transversales à la surface de l'eau.

Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.

3.2 Vitesse de propagation d'une onde

Déterminons la vitesse de propagation d'une onde transversale le long d'une corde.

Si d est la distance parcourue par l'onde et Δt la durée de la propagation, on définit une vitesse moyenne de propagation par la relation :

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

Avec d en mètre, Δt en seconde, v s'exprime en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

La vitesse de propagation d'une onde est aussi appelée **célérité**.

De quels paramètres dépend la vitesse de propagation ?

Activité 4

Quelle est l'influence des caractéristiques du milieu sur la célérité d'une onde ?

- Sur la corde du document 11 sont fixés deux cavaliers.

Une onde transversale est émise à l'une des extrémités de la corde. Au passage de l'onde, le mouvement de chaque cavalier est perçu par un photocapteur relié à un chronomètre.

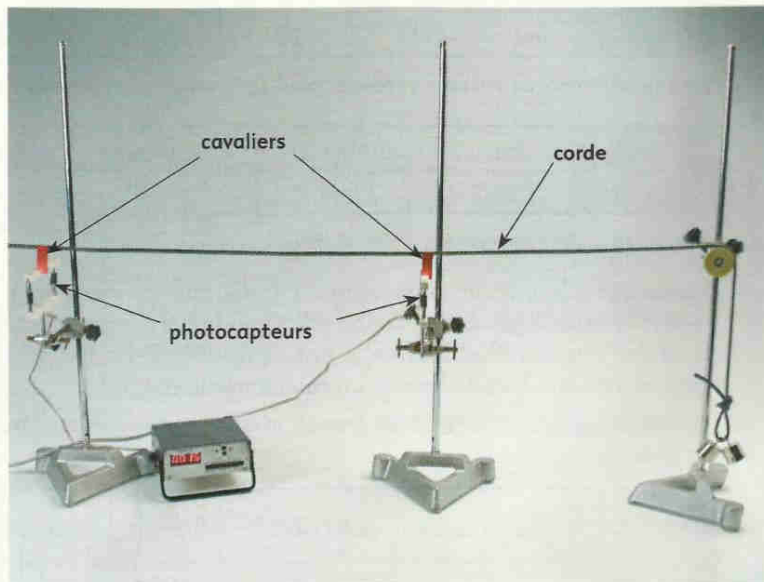
Ce montage permet de mesurer la durée de propagation de l'onde le long de la corde entre les deux cavaliers.

- Réaliser plusieurs mesures de durée de propagation de l'onde en modifiant la tension de la corde, puis en changeant de corde (corde plus ou moins grosse).

1. Quelle mesure préalable est nécessaire pour pouvoir calculer la célérité à partir de l'indication du chronomètre ?

2. La vitesse de propagation dépend-elle :

- de la tension de la corde ?
- de sa masse par unité de longueur ?



Doc. 11 Deux cavaliers sont placés sur la corde tendue, en face de deux photocapteurs. Une masse marquée suspendue à l'extrémité de la corde, qui repose sur une poulie, permet de régler la tension de la corde.

> Observation

Pour une corde et une tension données, nous obtenons toujours la même durée de propagation de l'onde entre les deux cavaliers maintenus à une distance constante l'un de l'autre.

Cette valeur est indépendante de la forme et de l'amplitude de l'onde.

Si nous augmentons la tension de la corde, la durée diminue; par conséquent, la célérité augmente.

Pour une même tension, nous remarquons que cette durée dépend de la corde choisie (plus la corde est grosse, c'est-à-dire plus sa masse linéique est grande, plus la durée de propagation est grande, et la célérité faible).

> Interprétation

La célérité de l'onde dépend de la tension de la corde et de la masse linéique (masse par unité de longueur) de la corde.

Plus généralement, pour des ondes de faible amplitude, la célérité d'une onde mécanique ne dépend que du milieu de propagation et de son état physique (température, tension d'une corde, rigidité ...).

3.3 La vitesse de propagation dépend de la nature du milieu

La vitesse du son dans l'air est constante, voisine de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, à la température ambiante (voir l'exercice résolu 1, page 29). Cette célérité augmente avec la température. Dans l'air, à 0°C , la célérité du son est de $331 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La connaissance de cette vitesse permet de déterminer des distances (comme dans le télémètre par exemple **Doc. 12**).

• La célérité du son dans les gaz est plus faible que dans les liquides ou les solides **Doc. 13, 14 et 15** et voir l'activité préparatoire B, page 17.

Gaz	air	dioxygène	diazote	dioxyde de carbone	dihydrogène
$v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	340	327	349	291	1 307

Doc. 13 La célérité du son dans différents gaz à 20°C sous une pression de 1013 hPa .

Liquide	eau	eau de mer	benzène	chloroforme
$v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	1 500	1 504	1 250	960

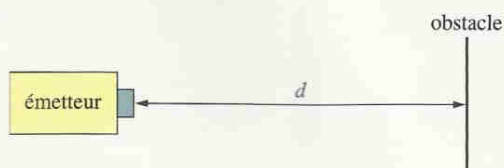
Doc. 14 La célérité du son dans différents liquides.

Remarque : le monde sous-marin est le monde du silence, car les ondes sonores « extérieures », c'est-à-dire celles produites par un émetteur à l'extérieur de l'eau, se réfléchissent à la surface de la mer. En revanche, un plongeur entend très bien le bruit d'un moteur de hors-bord.

Les solides conduisent très bien le son : le stéthoscope médical, par exemple, est basé sur ce principe.

Solide	fer	acier	polyéthylène	bétons	liège	croûte terrestre
$v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	6 000	5 500	2 000	1 000 à 2 000	500	5 000 à 9 000

Doc. 15 La célérité du son dans différents solides.



Doc. 12 Le télémètre permet de mesurer des distances. C'est un émetteur ultrasonore qui envoie une onde vers un obstacle. L'onde se réfléchit et retourne vers l'appareil qui comporte un détecteur.

Grâce à la mesure du décalage temporel τ entre les signaux incident et réfléchi, il détermine la distance d entre l'émetteur et l'obstacle

par la relation : $d = \frac{v \cdot \tau}{2}$, v désigne

la vitesse des ultrasons qui est aussi celle des sons dans l'air.



Doc. 16 Les dauphins communiquent par sons et ultrasons.

La vitesse du son dépend du milieu de propagation. Elle est plus importante dans les solides et les liquides que dans l'air.

Exercice d'entraînement 1

1. Lors d'une expérience sur la détermination de la célérité du son dans l'eau (voir l'activité préparatoire B, page 17), on a trouvé une durée $\Delta t = 533 \text{ ms}$ pour une distance $d = 800 \text{ m}$. Calculer la célérité du son dans l'eau.

2. En utilisant le document 13, calculer la durée si, pour la même distance, la mesure a été effectuée dans l'air.

1. La vitesse est donnée par :

$$\vartheta = \frac{d}{\Delta t} = \frac{800}{533 \times 10^{-3}} = 1,50 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. La durée de propagation est donnée par :

$$\Delta t = \frac{d}{\vartheta} = \frac{800}{340} = 2,35 \text{ s}.$$

3.4 Retard lors de la propagation d'une onde

Désignons par u les valeurs du déplacement transversal provoqué par une onde se propageant le long d'une corde.

Les graphiques du document 17 représentent la perturbation u en fonction du temps en un point M de la corde, puis en un point M' .

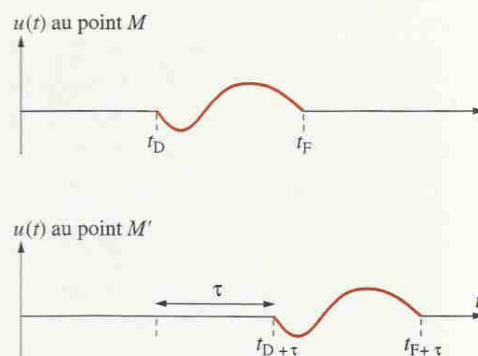
La perturbation u se propage à la vitesse ϑ ; elle affecte le point M à partir de la date t_D (D comme début de la perturbation), puis le point M' à partir de la date $t_D + \tau$.

τ désigne le retard du passage de la déformation en M' , par rapport à M .

On a :

$$\vartheta = \frac{MM'}{\tau}.$$

La perturbation en M' à l'instant t' est celle qui était en M à l'instant $t' - \tau$ avec $\tau = \frac{MM'}{\vartheta}$, τ étant le retard et ϑ la célérité de l'onde.



Doc. 17 t_D et t_F désignent les instants du début et de la fin de la perturbation au point M .

La courbe représentant la perturbation passant au point M' se déduit de celle représentant la perturbation au point M par une translation de valeur :

$$\tau = \frac{MM'}{\vartheta}.$$

Exercice d'entraînement 2

On tape un coup de marteau sur une canalisation d'eau, en fonte. L'eau est immobile dans la canalisation. Un capteur, situé à une distance d du choc, capte deux signaux séparés d'une durée $\tau = 1,80 \text{ s}$.

1. Interpréter le phénomène.

2. Déterminer la valeur de la distance d .

Données :

Vitesse du son dans l'eau : $\vartheta_1 = 1,50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Vitesse du son dans la fonte : $\vartheta_2 = 5,00 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Le son se propageant avec des vitesses différentes dans l'eau au repos et dans la fonte. Le détecteur capte deux signaux distincts : le premier correspondant à la fonte, le second à l'eau.

2. Exprimons la distance d :

$d = \vartheta_1 \cdot \Delta t_1$ avec Δt_1 , la durée de propagation dans l'eau.

De même, $d = \vartheta_2 \cdot \Delta t_2$ avec Δt_2 , la durée de propagation dans la fonte.

Nous avons un système de deux équations à deux inconnues.

Numériquement :

$$1,50 \times 10^3 \cdot \Delta t_1 = 5,00 \times 10^3 \cdot \Delta t_2 \text{ et } \Delta t_1 - \Delta t_2 = 1,80.$$

Soit : $\Delta t_1 = 2,57 \text{ s}$ et $\Delta t_2 = 0,771 \text{ s}$.

Calculons d :

$$d = \vartheta_1 \cdot \Delta t_1 = \vartheta_2 \cdot \Delta t_2$$

Numériquement : $d = 3,86 \times 10^3 \text{ m}$, soit $3,86 \text{ km}$.

Pour s'entraîner : Ex. 3, 4 et 6

Applications directes

Définir une onde mécanique

(§ 1 du cours)

1. Étudier le phénomène de la houle

1. Pourquoi la houle est-elle une onde mécanique?
2. Donner un exemple montrant que la houle transporte de l'énergie.
3. Citer d'autres exemples d'ondes mécaniques.

Connaître les différents types d'ondes mécaniques

(§ 2 du cours)

2. Connaître le mode de propagation du son

Trouver les propositions fausses et les corriger.

1. La propagation du son dans l'air est une onde transversale.
2. Le son dans l'air correspond à un phénomène de compression-dilatation des tranches d'air.
3. Lors de la propagation d'un son dans l'air, des molécules sont entraînées depuis la source vers le récepteur.
4. La propagation du son s'accompagne d'un transport de matière et d'un transport d'énergie.

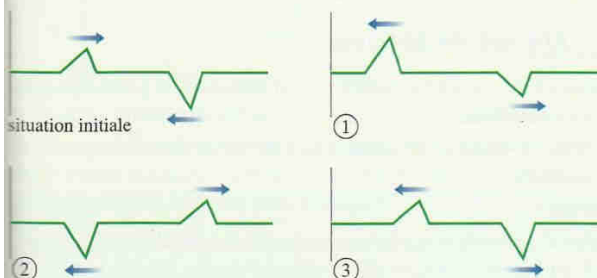
Étudier la propagation des ondes

(§ 3 du cours)

3. Analyser le croisement de deux ondes

La situation initiale du document ci-dessous présente deux ondes se propageant le long d'une corde et qui vont se croiser.

Choisir la proposition correcte parmi les trois propositions, numérotées de 1 à 3, de la situation après le croisement. Justifier le choix.



4. Calculer la célérité du son dans l'air

Lors de la détermination de la célérité du son dans l'air en 1822, les physiciens F. ARAGO, M. PRONY et L. GAY-LUSSAC ont mesuré avec précision la distance Villejuif-Monthléry, soit 18 611,5 m. Ils mesurèrent la durée séparant l'observation de l'éclair produit par un coup de canon, et la réception du son. La température était de 10 °C et la durée moyenne mesurée par les chronomètres de 55,2 s.

1. Pourquoi peut-on admettre que la propagation de l'éclair est instantanée?
2. Pourquoi précise-t-on la température de l'air?
3. Calculer la célérité du son.

5. Calculer la célérité d'une vague

En eau peu profonde, la célérité d'une vague à la surface de l'eau dépend de l'intensité de la pesanteur, $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et de la profondeur h de l'eau.

1. Une seule des relations ci-dessous est homogène et permet de calculer la célérité v de la vague. Déterminer laquelle en effectuant une analyse dimensionnelle.

$$v = \sqrt{g \cdot h^2}; \quad v = \sqrt{\frac{g}{h}}; \quad v = \sqrt{g \cdot h}.$$

2. Calculer la valeur de la célérité v pour une profondeur $h = 0,92 \text{ m}$.

6. Calculer la célérité des ondes sismiques

À l'instar d'une cloche qui vibre, la Terre est secouée de tremblements incessants. Cependant, des tremblements de terre plus importants provoquent des ondes sismiques qui se propagent sur de grandes profondeurs et de grandes distances.

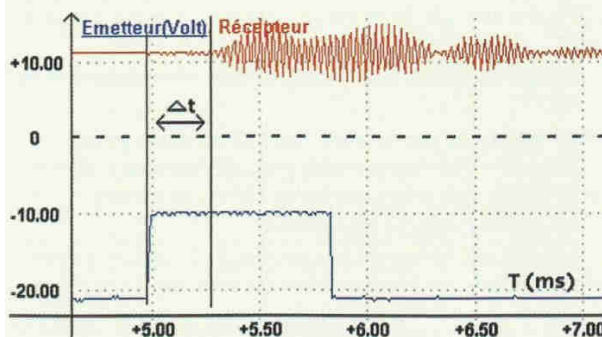
1. Les ondes sismiques n'ont pas la même vitesse en chaque point du globe terrestre. Pourquoi?
2. Le 16 mars 1999, au Québec, un tremblement de terre a été détecté à 7 h 50 min 52 s pratiquement à l'épicentre. Une station de détection sismique située à 61 km l'a détecté à 7 h 51 min 17 s. Calculer la célérité moyenne de ces ondes sismiques.

7. Déterminer la célérité des ondes ultrasonores dans l'eau

(voir l'exercice résolu 1)

Un élève se propose de déterminer la célérité des ondes ultrasonores dans l'eau. Il place l'émetteur et le récepteur (adaptés à l'eau), face à face, à 36 cm l'un de l'autre, dans un aquarium au fond duquel il verse de l'eau.

À l'aide d'un système d'acquisition informatisé, il enregistre, en fonction du temps, les signaux émis et reçus (voir le document ci-dessous).



1. a. Sur le document, que représente Δt ?
- b. Déterminer la valeur de Δt .
2. En déduire la valeur de la célérité v_{eau} des ultrasons dans l'eau.

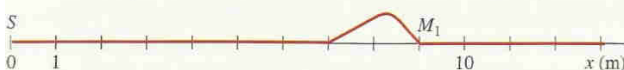
8. Calculer un retard lors de la propagation d'une onde

(voir l'exercice résolu 1)

On a schématisé (en coupe, dans un plan vertical) la surface de l'eau lors du passage d'une vague.

À la date $t = 0 \text{ s}$, le front de l'onde a quitté le point S de la surface.

À la date $t_1 = 3,0 \text{ s}$, la forme de la surface de l'eau a l'aspect dessiné ci-dessous. M_1 est la position du front de l'onde à la date t_1 .



1. L'onde est-elle transversale ou longitudinale?
2. Calculer la valeur de la célérité de l'onde.
3. Quelle est la durée Δt du mouvement d'un point de la surface lors du passage de l'onde?
4. Où se situe le front de l'onde à la date $t' = 1,0 \text{ s}$?
5. Un point M_2 est situé à la distance 12 m de M_1 . Avec quel retard sera-t-il atteint par le front de l'onde?

Utilisation des acquis

10. Sonomètre

Un élève fait sonner un réveil à proximité d'un sonomètre. Cet appareil détecte le son émis. Il place le sonomètre à l'intérieur de la cloche de verre et le réveil à l'extérieur.

Il fait le vide sous la cloche; il arrête la pompe à vide et fait sonner le réveil. Il constate que



Exercices du chapitre Physique 1 : Les ondes mécaniques progressives

le sonomètre ne détecte pas de son. Il en conclut que le son ne se propage pas dans le vide.

Un autre élève pense que le son a été arrêté par le verre de la cloche. Comment compléter cette expérience pour la rendre concluante?

11. Les vagues

(voir l'activité préparatoire A)

On évalue la puissance transportée par les vagues à 45 kW par mètre de rivage sur les côtes du sud-ouest de la France.

1. L'onde formée par les vagues est-elle transversale ou longitudinale?
2. Une vague parcourt une distance $d = 100$ m en une durée $\Delta t = 20,0$ s. Quelle est la célérité de la propagation?
3. Quel est le mouvement d'une bouée lors du passage d'une vague?
4. Quelle est l'énergie dissipée par les vagues en un an sur chaque kilomètre de côte?

13. Le télémètre à pointeur laser

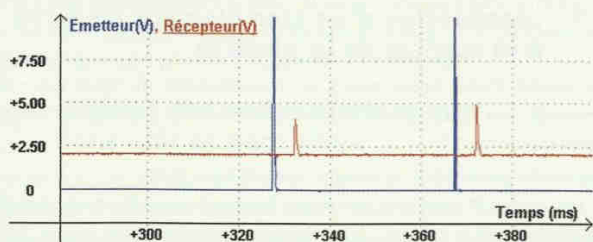
Un élève a lu dans une revue de bricolage l'annonce suivante :

« Télémètre à ultrasons 40 kHz à faisceau lumineux ».

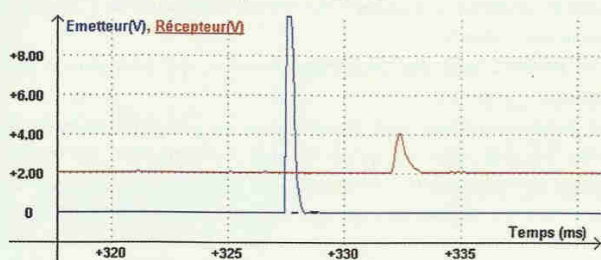
Il se demande si la mesure se fait grâce à la réflexion des ultrasons ou bien grâce à la réflexion de la lumière. Pour le vérifier, il relie l'émetteur du télémètre à un système d'acquisition informatisé. Puis, il place un récepteur ultra-sonore à 1,60 m du télémètre. Le récepteur est également relié au système d'acquisition. Il obtient l'enregistrement ci-dessous. Les signaux ont été décalés verticalement pour une meilleure lisibilité.



Les télémètres à ultrasons sont utilisés par les artisans pour mesurer les dimensions d'une pièce.



1. À quoi correspondent les pics bleus et les pics rouges?
2. On agrandit une partie de l'acquisition afin de pouvoir effectuer des mesures précises. Calculer la célérité du signal et en déduire la nature des ondes utilisées pour la mesure.



3. Quel est le rôle du laser?

17. Le record de vitesse du TGV

L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement d'un TGV est apportée par une ligne suspendue, la **caténaire**, sur laquelle vient frotter la partie supérieure d'un dispositif articulé, le **pantographe**. Cela provoque une onde qui soulève la caténaire et qui se propage avec une célérité ϑ . Pour un bon fonctionnement, il ne faut pas que le train rattrape cette onde. Si on note ϑ_r la vitesse du train, il faut donc avoir $\vartheta_r < \vartheta$.

1. L'onde qui se propage le long de la caténaire est-elle transversale ou longitudinale?
2. a. La célérité ϑ de cette onde est égale à la racine carrée du quotient de la tension F par la masse linéique μ (masse par unité de longueur). Écrire l'expression littérale de la célérité de cette onde.

b. La caténaire peut être assimilée à un câble cylindrique en cuivre de rayon $r = 0,70$ cm. La densité du cuivre est $d = 8,9$.

Montrer que la masse linéique du câble est $\mu = 1,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$. **SOS**

c. La tension normale d'une caténaire est $F_1 = 2,6 \times 10^4$ N.

Quelle est alors la célérité ϑ_1 de l'onde le long de la caténaire?

3. Lors du record de vitesse du 18 mai 1990, la rame 325 du TGV a roulé à la vitesse de $515 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. La tension de la caténaire avait été augmentée spécialement pour la tentative. Sa valeur était alors de $3,0 \times 10^4$ N. Justifier cette augmentation.

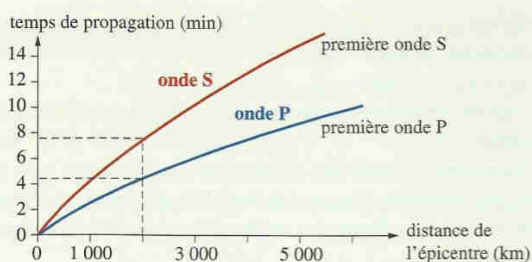
18. Localisation d'un tremblement de terre à la surface de la planète

En moins d'une heure après un tremblement de terre, on nous annonce son épicentre. Comment arrive-t-on à localiser un séisme aussi rapidement?

Les ondes émises par un séisme sont de trois types :

- les **ondes P** sont des vibrations longitudinales de compression; ce sont les plus rapides, leur vitesse de propagation atteint $3,5$ à $14 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, suivant la nature des roches et la profondeur de propagation ;
- les **ondes S** sont des vibrations transversales de cisailment perpendiculaires à la direction de propagation, moins rapides que les ondes P (la vitesse des ondes P est environ supérieure de 1,7 fois à la vitesse des ondes S) ;
- les **ondes L** sont des ondes superficielles, qui sont encore plus lentes que les ondes S.

Les ondes sismiques sont enregistrées, en plusieurs endroits du globe, par des appareils qu'on nomme sismographes. En un lieu donné, on obtient sur l'enregistrement sismographique un décalage entre les débuts des enregistrements des ondes P et S. Les vitesses de propagation de ces deux types d'ondes dans la croûte terrestre sont connues et on possède des courbes étalonnées, comme sur le **document 1**.

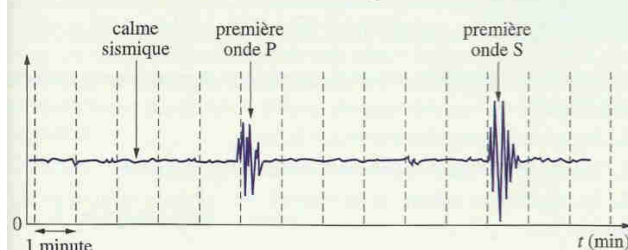


Doc. 1

1. En examinant le **document 1**, peut-on dire que les vitesses des ondes S ou P sont constantes? Si elles ne le sont pas, expliquer pourquoi.

2. Calculer la vitesse moyenne des ondes S et P lors d'un parcours de 2000 km.

3. Lors d'un séisme, on a détecté les signaux du **document 2** :



Doc. 2

a. Quelle est l'onde détectée en premier?

b. Quel est l'intervalle de temps séparant les débuts des détections des deux ondes?

c. À l'aide du **document 1**, déterminer la distance à l'épicentre.

4. Montrer que, pour localiser l'épicentre, il faut au moins trois stations de détection placées à trois endroits différents.