1.8

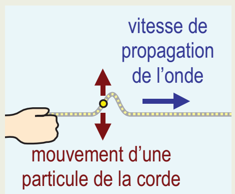
Les ondes mécaniques progressives

Après l'étude de cette section, le lecteur pourra décrire les propriétés des ondes mécaniques progressives (nature longitudinale ou transversale, vitesse de propagation, fréquence et longueur d'onde).

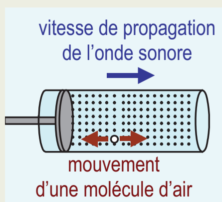
APERÇU

Une **onde mécanique progressive** est une perturbation qui se déplace dans un milieu en transférant de l'énergie d'un endroit à un autre sans qu'il y ait de transport de matière : les vagues à la surface de l'eau, les ondes sur les cordes tendues et les ondes sonores sont des exemples d'ondes mécaniques progressives.

Une onde sur une corde tendue (schéma ci-contre) est un exemple d'**onde transversale** : au passage de l'onde, les particules de la corde se déplacent *perpendiculairement* à la direction de propagation de l'onde.

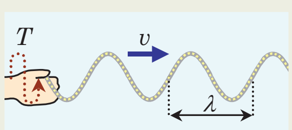


Une onde sonore (schéma ci-contre) est un exemple d'**onde longitudinale** : au passage de l'onde, les molécules d'air (ou de tout autre milieu dans lequel voyage l'onde) se déplacent *parallèlement* à la direction de propagation de l'onde.



Une **impulsion** est une onde progressive localisée créée par une perturbation brève (comme sur les deux schémas ci-dessus).

Lorsque la perturbation qui crée l'onde progressive est périodique dans le temps (elle se répète au bout d'une certaine période T), la forme de l'onde est périodique dans l'espace : elle se répète au bout d'une certaine longueur λ (la lettre grecque lambda), appelée **longueur d'onde** (schéma ci-contre).



Pendant une période T, une onde progressive se déplace d'une longueur d'onde λ. Ainsi,

$$\boxed{\lambda = vT = \frac{v}{f}}$$ **Longueur d'onde**

où v est le module de la vitesse de propagation de l'onde. (La fréquence f correspond à l'inverse de la période T.)

Le module de la vitesse d'une onde sur une corde tendue est

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}}$$ **Module de la vitesse d'une onde sur une corde tendue**

où F est le module de la tension dans la corde et μ (la lettre grecque mu) est sa **masse linéique**. Pour une corde uniforme de masse m et de longueur L,

$$\boxed{\mu = \frac{m}{L}}$$ **Masse linéique d'une corde uniforme**

Dans le SI, μ s'exprime en kilogrammes par mètre.

Le **son** est une onde mécanique progressive longitudinale qui peut se déplacer dans l'air, mais aussi dans n'importe quel milieu, qu'il soit gazeux, liquide ou solide. La température moyenne de la surface de la Terre est d'environ 16 °C. À cette température, le module de la vitesse du son dans l'air est

$$\boxed{v_s = 340 \text{ m/s}}$$ **Module de la vitesse du son dans l'air à 16 °C**

Par comparaison, les ondes lumineuses se déplacent, dans le vide, à une vitesse environ un million de fois plus grande : c = 300 000 km/s.

Les ondes sonores que l'oreille humaine peut entendre ont des fréquences allant de 20 Hz à 20 000 Hz : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu.

EXPOSÉ

Après avoir étudié les oscillations dans les sections qui précèdent, nous abordons maintenant le sujet des ondes. Dans la présente section, nous allons introduire les deux types d'ondes que nous allons étudier dans ce chapitre : les ondes sur les cordes tendues et les ondes sonores. Au début du **chapitre 2 : Optique géométrique**, nous verrons que la lumière est également une onde. Nous analyserons en détail la nature ondulatoire de la lumière dans le **chapitre 3 : Optique ondulatoire**.

Lorsqu'on rencontre le terme « onde », on pense le plus souvent aux vagues à la surface de l'eau. (D'ailleurs, en anglais, il y a un seul mot pour « onde » et « vague » : *wave*.) Les vagues sont des perturbations à la surface de l'eau qui transfèrent de l'énergie d'un endroit à un autre. Par exemple, lorsqu'un bateau à moteur se déplace sur un lac (photo ci-contre), les vagues qu'il crée peuvent faire osciller d'autres embarcations situées sur le lac. De l'énergie voyage, par l'entremise des vagues, entre le bateau qui les crée et les autres embarcations, mais il n'y a aucun transport de matière : l'eau du lac n'est pas emportée par le mouvement horizontal des vagues. Au passage des vagues, l'eau *oscille*, puis elle reprend sa position d'origine : les vagues ne créent pas de *courants* dans le lac. Pour bien réaliser que l'eau du lac ne se déplace pas avec les vagues, on n'a qu'à imaginer une bouée qui flotte sur le lac : pendant le passage des vagues, elle oscille, mais après coup, elle est encore à la même position sur le lac.


STOCKXPERT

De même, les ondes sonores voyagent dans l'air en transportant de l'énergie (c'est ce qui nous permet d'entendre), mais elles ne créent pas de courants d'air, et ce, même si elles sont extrêmement intenses. C'est une bonne chose, car le son se déplace à environ 340 m/s : si les sources sonores généraient du vent à cette vitesse, les spectateurs d'un concert devraient s'attacher à leurs sièges pour ne pas être emportés !

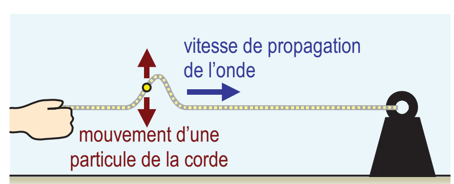
On pourrait être tenté de définir une onde comme *une perturbation qui se déplace dans un milieu en transférant de l'énergie d'un endroit à un autre sans qu'il y ait de transport de matière*, mais il ne s'agirait pas d'une définition générale. En effet, les ondes lumineuses n'ont pas besoin de milieu pour se propager. De plus, il existe des ondes qui ne transfèrent pas d'énergie d'un endroit à un autre : nous les étudierons dans la **section 1.12 : Les ondes stationnaires**. Lorsqu'une onde a besoin d'un milieu de propagation pour exister, on la qualifie de *mécanique* ; lorsqu'elle transfère de l'énergie d'un endroit à un autre, on la qualifie de *progressive*. Ainsi, « une perturbation qui se déplace dans un milieu en transférant de l'énergie d'un endroit à un autre » constitue la définition d'une **onde mécanique progressive**.

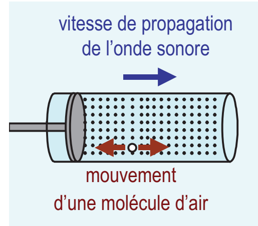
Les ondes transversales et les ondes longitudinales

Dans ce chapitre, nous allons surtout nous intéresser à deux types d'ondes mécaniques progressives : les ondes sur les cordes tendues et les ondes sonores.

Si on bouge la main trop lentement, l'ensemble de la corde va s'incliner vers le haut puis vers le bas, mais il n'y aura pas d'onde. Pour avoir une onde, il faut que la main fasse une oscillation complète en moins de temps qu'il en faut à une impulsion pour traverser la longueur de la corde.

Pour créer une onde sur une corde, on peut attacher une de ses extrémités à un objet fixe, agripper l'autre extrémité afin de créer une tension et agiter la main de manière brusque (schéma ci-contre). La main met en mouvement un petit segment situé à l'extrémité de la corde : comme la corde est flexible, le reste de la corde ne réagit pas tout de suite. En raison de la tension dans la corde, chaque segment influence son voisin : la perturbation créée par la main se propage d'un segment à l'autre, ce qui constitue l'onde. Si la perturbation qui a créé l'onde est de courte durée (comme c'est le cas sur le schéma ci-dessus), l'onde est localisée, et on peut la qualifier d'**impulsion**. Une onde sur une corde est un exemple d'**onde transversale** : lors de son passage, les particules du milieu dans lequel elle se déplace oscillent *perpendiculairement* à sa direction de propagation, comme on peut le constater sur le schéma ci-dessus.



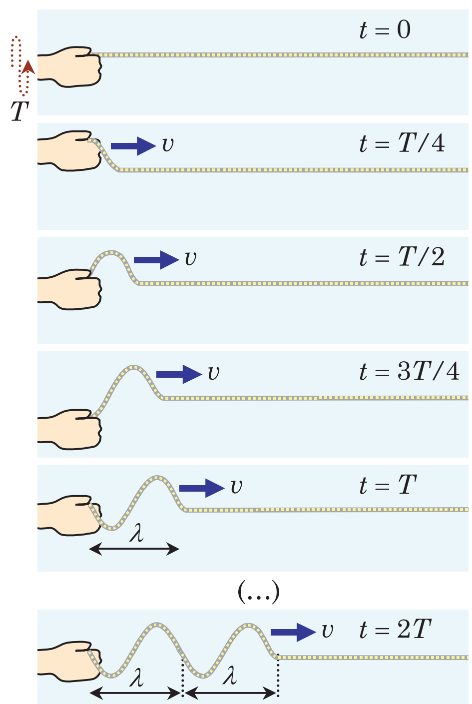


Pour créer une onde sonore dans l'air, on peut utiliser un piston (ou la membrane d'un haut-parleur) et lui imprimer un mouvement brusque (schéma ci-contre). Le mouvement du piston cause, dans la région qui lui est adjacente, une compression de l'air (augmentation de la pression) ou une raréfaction de l'air (diminution de la pression). Comme l'air perturbé a tendance à revenir à sa pression d'origine, la perturbation se propage d'une région à l'autre, ce qui constitue l'onde sonore. Le **son** est un exemple d'**onde longitudinale** : lors du passage d'une onde sonore, les particules du milieu dans lequel elle se déplace oscillent *dans la même direction* que celle de sa propagation, comme on peut le constater sur le schéma ci-dessus.

Toutes les substances, qu'elles soient gazeuses, liquides ou solides, ont tendance à revenir à leur pression d'origine lorsqu'on les perturbe : ainsi, on peut y générer des ondes sonores longitudinales. En revanche, les ondes transversales ne peuvent exister qu'à l'intérieur des solides. Un tremblement de terre génère à la fois des ondes transversales et des ondes longitudinales. Les deux types d'ondes ne se déplacent pas à la même vitesse ; de plus, seules les ondes longitudinales peuvent traverser les parties liquides du noyau terrestre. L'analyse comparative de la propagation des ondes transversales et longitudinales permet de dresser un portrait de la structure interne de notre planète. En astrophysique, l'étude des ondes qui se propagent dans les étoiles (en particulier, le Soleil) permet de déterminer plusieurs de leurs propriétés et de construire des modèles de leur structure interne.

Dans un long ressort tendu, on peut générer à la fois des ondes longitudinales et transversales : si on fait osciller l'extrémité perpendiculairement à la longueur du ressort, l'onde est transversale ; si on la fait osciller parallèlement à la longueur, l'onde est longitudinale. Au passage d'une vague, une bouée à la surface d'un lac oscille simultanément selon les directions verticales et horizontales : sa trajectoire forme une ellipse.

La longueur d'onde



Lorsque la perturbation qui crée l'onde progressive est périodique dans le temps (elle se répète au bout d'une certaine période T), la forme de l'onde est périodique dans l'espace : elle se répète au bout d'une certaine longueur λ (la lettre grecque lambda), appelée **longueur d'onde**.

Considérons la situation représentée sur le schéma ci-contre : la main de l'expérimentateur oscille de haut en bas avec une période T, ce qui crée une onde sur la corde. En une période T, l'onde se déplace d'une longueur d'onde λ. Comme le déplacement est égal au produit de la vitesse et du temps (pour un mouvement à vitesse constante), nous pouvons écrire

$$\boxed{\lambda = vT = \frac{v}{f}}$$ **Longueur d'onde**

où v est la vitesse de l'onde. Comme nous l'avons vu dans le **tome A**, la fréquence est l'inverse de la période : $f = 1/T$. Au passage de l'onde, chaque particule de la corde oscille avec la même période et la même fréquence que la main qui génère l'onde.

Le tableau ci-dessous donne un aperçu de l'éventail de longueurs d'onde que l'on rencontre en physique.

Nous présenterons le spectre électromagnétique dans la **section 3.1 : La nature ondulatoire de la lumière**.

Pour les ondes sonores, les longueurs d'onde indiquées sont dans l'air ($v \approx 300$ m/s) ; pour les ondes lumineuses, les longueurs d'onde indiquées sont dans l'air ou dans le vide ($v \approx c = 300\,000$ km/s).

Attention : la lumière et le son sont des phénomènes physiques complètement différents. Les sons aigus ont la même longueur d'onde que la lumière micro-onde et les sons graves ont la même longueur d'onde que la lumière radio, mais l'oreille ne peut entendre ni les micro-ondes ni les ondes radio ! Un poste de radio *transforme* les ondes lumineuses de type radio qu'il reçoit en ondes sonores (ondes mécaniques dans l'air).

Longueur d'onde	**Symbole :** λ — **Unité SI :** mètre (m)
$\approx 10^{-13}$ m	Longueur d'onde de la lumière dans la partie gamma du spectre électromagnétique
≈ 400 nm	Longueur d'onde de la lumière la plus énergétique que l'œil est capable de voir (lumière violette, $f \approx 750$ THz)
≈ 700 nm	Longueur d'onde de la lumière la moins énergétique que l'œil est capable de voir (lumière rouge, $f \approx 430$ THz)
≈ 30 µm	Longueur d'onde des ultrasons utilisés dans une échographie ($f \approx 10$ MHz)
≈ 3 mm	Longueur d'onde des ultrasons utilisés par les chauves-souris pour se guider ($f \approx 100$ kHz)
≈ 5 mm	Longueur d'onde du son le plus aigu que les chiens peuvent entendre ($f \approx 60$ kHz)
≈ 1 cm	Longueur d'onde de la lumière dans la partie micro-onde du spectre électromagnétique
$\approx 1{,}5$ cm	Longueur d'onde du son le plus aigu que les humains peuvent entendre ($f \approx 20$ kHz)
$\approx 1{,}5$ m	Longueur d'onde des ondes sonores produites par le mode fondamental de vibration des cordes vocales chez une femme ($f \approx 200$ Hz)
≈ 3 m	Longueur d'onde des ondes sonores produites par le mode fondamental de vibration des cordes vocales chez un homme ($f \approx 100$ Hz)
≈ 3 m	Longueur d'onde de la lumière qui constitue le signal d'une station de radio dans la bande FM
≈ 15 m	Longueur d'onde du son le plus grave que les humains peuvent entendre ($f \approx 20$ Hz)
≈ 100 m	Longueur d'onde des ondes associées aux tremblements de terre
≈ 200 km	Longueur d'onde d'une vague de tsunami au milieu de l'océan
$\approx 10^{20}$ m	Longueur d'onde d'une onde de densité dans les bras d'une galaxie spirale

La vitesse d'une onde sur une corde

Comme une onde mécanique dépend, pour exister, d'un milieu de propagation, il est normal que sa vitesse soit influencée par les propriétés du milieu. En analysant les détails de la propagation des ondes mécaniques dans un milieu (ce qui dépasse les objectifs de cet ouvrage), on peut montrer que la vitesse d'une onde mécanique est, en général, proportionnelle à la racine carrée de la rigidité du milieu de propagation et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité :

$$\text{vitesse} \propto \sqrt{\frac{\text{paramètre exprimant la rigidité du milieu}}{\text{paramètre exprimant la densité du milieu}}}$$

Par exemple, le module de la vitesse d'une onde sur une corde tendue est

Dans le **tome A**, nous avons utilisé le symbole T pour le module de la tension ; dans ce chapitre, nous allons utiliser le symbole F pour éviter toute confusion avec le symbole T de la période.

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}}$$

Module de la vitesse d'une onde sur une corde tendue

où F est le module de la tension dans la corde (plus la corde est tendue, plus elle constitue un milieu « rigide ») et μ (la lettre grecque mu) est la **masse linéique** de la corde. Pour une corde uniforme de masse m et de longueur L,

$$\boxed{\mu = \frac{m}{L}}$$

Masse linéique d'une corde uniforme

Plus la corde est dense (pour un diamètre donné), plus sa masse linéique est grande.

Avant de démontrer l'équation $v = \sqrt{F/\mu}$ à partir des lois de la dynamique, nous allons examiner ce qu'elle signifie. Pour commencer, nous allons vérifier qu'elle est cohérente du point de vue des unités. Dans le SI, F est en newtons et μ est en kilogrammes par mètre ; comme 1 N = 1 kg·m/s², les unités de $\sqrt{F/\mu}$ sont

$$\sqrt{\frac{(\text{kg·m/s}^2)}{\text{kg/m}}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ce qui correspond bien à celles d'une vitesse.

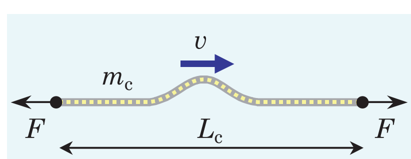
Lorsqu'on déplace l'extrémité d'une corde tendue, la déformation que l'on crée ne demeure pas à l'extrémité de la corde : elle se propage d'un segment de corde à l'autre, ce qui génère une onde qui se déplace sur la corde. En raison de la tension dans la corde, chaque segment de corde revient à sa position normale en transférant la déformation à son voisin. Plus la tension est élevée, plus les segments reviennent rapidement à leur position normale et plus l'onde se déplace vite. Imaginons une corde sans aucune tension (par exemple, une corde posée sur le dessus d'une table) : si on déplace l'extrémité de la corde, on peut créer n'importe quelle déformation et elle demeurera telle qu'on l'a créée, sans se propager le long de la corde. Ce résultat est conforme à l'équation $v = \sqrt{F/\mu}$: si la tension est nulle, la vitesse de propagation de l'onde l'est également.

Comparons deux cordes de même tension, mais de masses linéiques différentes : les segments de la corde qui possède la masse linéique la plus élevée ont une plus grande inertie et prennent plus de temps à revenir à leur position normale. Par conséquent, les ondes se déplacent plus lentement sur la corde dont la masse linéique est la plus grande.

D'après l'équation $v = \sqrt{F/\mu}$, la vitesse à laquelle une onde se déplace sur une corde ne dépend pas de la façon dont on agite son extrémité : qu'on l'agite rapidement ou lentement, avec une grande ou une petite amplitude, la vitesse à laquelle l'onde se déplace reste la même (tant que l'on maintient la même tension dans la corde, bien sûr). Sur une corde donnée, soumise à une tension donnée, toutes les ondes ont la même vitesse ; comme

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

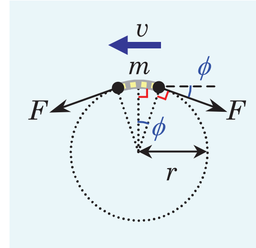
la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence. Lorsqu'on augmente la fréquence, la longueur d'onde diminue ; lorsqu'on diminue la fréquence, la longueur d'onde augmente.



Pour démontrer l'équation $v = \sqrt{F/\mu}$, nous allons utiliser la deuxième loi de Newton. Considérons une petite impulsion qui se déplace vers la droite sur une corde horizontale de masse m_c et de longueur L_c (schéma ci-contre). Pour avoir une tension de module F partout dans la corde, il faut tirer sur chaque extrémité avec une force de module F, comme le montre le schéma. La masse linéique de la corde est $\mu = m_c/L_c$. Comme l'impulsion est petite, nous pouvons négliger le fait que sa présence modifie légèrement la longueur de la corde ainsi que la tension dans son voisinage immédiat.

Pour prouver que les deux angles ϕ indiqués sur le schéma ci-contre sont égaux, on peut utiliser plusieurs méthodes, mais le « théorème des deux équerres » (**sous-section M4.1 : Les angles** de l'annexe mathématique) est particulièrement approprié.

Peu importe la forme de l'impulsion, nous pouvons supposer que la petite portion de corde qui se trouve au sommet est un arc de cercle. Faisons un gros plan sur cette portion de corde (schéma ci-contre) et plaçons-nous dans un référentiel inertiel qui se déplace à la même vitesse que l'impulsion (c'est-à-dire avec une vitesse de module v orientée vers la droite). Dans ce référentiel, l'impulsion est immobile et c'est la corde qui se déplace avec une vitesse de module v orientée *vers la gauche*.



Comme le petit segment de corde se déplace avec une vitesse v sur un arc de cercle de rayon R, il subit une accélération centripète $a_C = v^2/r$ orientée vers le centre du cercle. Écrivons la deuxième loi de Newton selon un axe r' dont le sens positif est orienté vers le centre du cercle (c'est-à-dire vers le bas) :

La méthode que nous utilisons ici a été présentée dans le **tome A**, à la **section 2.7 : La dynamique du mouvement circulaire**.

$$\sum F_{r'} = ma_{r'} = ma_C = \frac{mv^2}{r}$$

où m est la masse du petit segment. Pour que la corde soit tendue malgré son poids, la tension dans la corde doit être beaucoup plus grande que son poids. Par conséquent, nous pouvons négliger le poids du petit segment de corde. Ce sont les tensions de module F s'exerçant de part et d'autre du segment qui sont responsables de la force résultante qu'il subit dans le sens de l'axe r' (vers le bas) : chaque tension fournit une composante $F \sin\phi$, où ϕ est l'angle indiqué sur le schéma ci-dessus. Ainsi,

$$\sum F_{r'} = 2F \sin\phi$$

Comme le petit segment sous-tend un angle 2ϕ sur un cercle de rayon r, la définition d'un angle en radians permet d'affirmer que sa longueur est $2\phi r$; comme la masse linéique de la corde est μ, la masse du petit segment est

La définition d'un angle en radians est présentée dans la **sous-section M4.1 : Les angles** de l'annexe mathématique.

$$m = 2\phi r \mu$$

En combinant les trois équations qui précèdent, nous obtenons

$$2F \sin\phi = \frac{2\phi r \mu v^2}{r}$$

Comme le segment est petit, ϕ est beaucoup plus petit que 1 rad et le sinus de ϕ est égal à l'angle ϕ lui-même. En remplaçant $\sin\phi$ par ϕ dans l'équation précédente et en isolant v, nous obtenons l'équation que nous voulions démontrer,

L'approximation $\sin\phi = \phi$ lorsque $\phi << 1$ rad est justifiée dans la **sous-section M6.2 : Les approximations du petit angle** de l'annexe mathématique.

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Pour obtenir cette équation, il a fallu supposer que l'impulsion qui voyage sur la corde est suffisamment petite pour ne pas influencer la masse linéique de la corde et la tension dans son voisinage. Si l'impulsion est trop grande, la vitesse n'est plus la même pour ses différentes composantes, ce qui modifie sa forme au fur et à mesure qu'elle se propage (elle a tendance à s'aplatir). Dans cet ouvrage, nous allons toujours supposer que l'amplitude des ondes est suffisamment petite pour que l'équation $v = \sqrt{F/\mu}$ s'applique. De plus, nous allons supposer que les pertes d'énergie dues au frottement dans la corde sont négligeables (approximation de la corde idéale). Ainsi, les ondes que nous allons étudier se propageront à vitesse constante en gardant leur forme.

Situation 1 : ***Une onde sur une corde.*** Un robot extrêmement rapide agrippe l'extrémité d'une corde horizontale et agite sa main verticalement selon un MHS en effectuant 25 oscillations par seconde. La corde possède une longueur de 10 m, une masse de 2 kg et une tension de 50 N. On désire déterminer la longueur d'onde des ondes générées sur la corde.

La corde a une masse $m = 2\,\text{kg}$ et une longueur $L = 10\,\text{m}$. Le module de la tension dans la corde est $F = 50\,\text{N}$. En 1 s, il se produit 25 oscillations : la fréquence est $f = 25\,\text{Hz}$.

La masse linéique de la corde est

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{(2\,\text{kg})}{(10\,\text{m})} = 0{,}2\,\text{kg/m}$$

Le module de la vitesse de l'onde est

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{(50\,\text{N})}{(0{,}2\,\text{kg/m})}} = 15{,}81\,\text{m/s}$$

La longueur d'onde est

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{(15{,}81\,\text{m/s})}{(25\,\text{Hz})} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda = 0{,}632\,\text{m}}$$

La vitesse du son

Nous venons de voir que la vitesse d'une onde sur une corde tendue dépend uniquement des propriétés de la corde (tension et masse linéique), et non de la forme de l'onde (tant que l'amplitude de l'onde est suffisamment petite). De même, la vitesse des ondes sonores dépend des propriétés du milieu où elles se propagent, et non des caractéristiques du son (comme la fréquence ou l'amplitude). En fait, si l'intensité du son ou sa fréquence sont trop élevées, la vitesse des ondes est modifiée ; toutefois, nous n'aurons pas besoin de tenir compte de ce genre de complications dans les situations que nous allons étudier.

La parole et la musique sont constituées d'une superposition d'ondes sonores de différentes fréquences : plus la fréquence est élevée, plus nous percevons un son aigu. Il est heureux que la vitesse du son soit indépendante de sa fréquence. Une variation de la vitesse en fonction de la fréquence se traduirait par une distorsion du son de plus en plus grande au fur et à mesure qu'il se propage. Les concerts dans une grande salle (ou en plein air) seraient impossibles.

L'analyse détaillée de la propagation des ondes sonores dépasse les objectifs de cet ouvrage. Elle révèle que le module de la vitesse du son dans un gaz est

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

où P est la pression du gaz, ρ est sa masse volumique et γ (la lettre grecque gamma) est un paramètre sans unité physique qui est relié au nombre de « degrés de liberté » des molécules du gaz (pour l'air, $\gamma = 7/5 = 1{,}4$). Comme la pression exprime la « rigidité » du gaz et que la masse volumique exprime sa densité, l'équation a la même forme que celle qui permet de calculer la vitesse d'une onde sur une corde tendue :

$$\text{vitesse} \propto \sqrt{\frac{\text{paramètre exprimant la rigidité du milieu}}{\text{paramètre exprimant la densité du milieu}}}$$

Pour les liquides et les solides, le produit γP dans l'équation ci-contre est remplacé par un paramètre exprimant la rigidité du milieu. Pour un liquide, il s'agit du *module de compressibilité* ; pour un solide, il s'agit du *module de Young*.

La valeur $\gamma = 7/5$ est caractéristique des molécules diatomiques ; l'air est surtout constitué de ce type de molécules (N_2 et O_2).

On peut obtenir l'équation ci-contre en combinant les équations $PV = nRT$ et $\rho = nM/V$, où V est le volume et n est le nombre de moles de molécules.

Pour un gaz,

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M}$$

où T est la température en kelvins, M est la masse molaire en kilogrammes par mole et R = 8,314 J/(mol·K) est la constante universelle des gaz parfaits. Ainsi,

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

L'air est un mélange de N_2 (M = 28 g/mol = 0,028 kg/mol) et de O_2 (M = 32 g/mol = 0,032 kg/mol). Sa masse molaire est M = 0,029 kg/mol, d'où

$$v_s = \sqrt{\frac{1{,}4 \times \left(8{,}314 \text{ J/(mol·K)}\right) T}{\left(0{,}029 \text{ kg/mol}\right)}} = \left(20 \text{ m/(s·K}^{1/2})\right)\sqrt{T}$$

L'équation ci-contre a été présentée dans le **tome A**, à la **section 3.8 : L'énergie thermique et la température**.

La température moyenne à la surface de la Terre est d'environ 16 °C. Comme

$$T(\text{K}) = T(°\text{C}) + 273{,}15$$

cela correspond à 289 K. À cette température, le module de la vitesse du son est

$$\boxed{v_s = 340 \text{ m/s}}$$

Module de la vitesse du son dans l'air à 16 °C

En Antarctique, lorsque la température de l'air descend à –89 °C, le son se déplace à 271 m/s ; dans le désert du Sahara, lorsque la température de l'air monte à 58 °C, le son se déplace à 364 m/s. Dans cet ouvrage, à moins d'avis contraire, nous allons considérer que le son se déplace dans l'air à 340 m/s.

Le tableau ci-contre indique la vitesse des ondes sonores dans divers milieux de propagation. On constate qu'en général le son se déplace plus vite dans les liquides et les solides que dans les gaz.

Il est intéressant de noter que les ondes lumineuses sont *beaucoup* plus rapides que les ondes sonores. La vitesse de la lumière dans le vide, c = 300 000 km/s, correspond à environ un million de fois la vitesse du son dans l'air.

Milieu de propagation	Vitesse du son v_s (km/s)
gaz carbonique (CO_2) à 14 °C	0,27
dioxygène (O_2) à 14 °C	0,33
air à 14 °C	0,34
hélium à 14 °C	0,99
alcool méthylique à 0 °C	1,13
dihydrogène (H_2) à 14 °C	1,32
eau à 0 °C	1,40
eau à 20 °C	1,48
eau de mer à 20 °C	1,52
cuivre*	5,01
acier inoxydable*	5,79
aluminium*	6,42
diamant*	12,0
béryllium*	12,9

* Pour les solides, la vitesse dépend très peu de la température ; la vitesse indiquée est celle des ondes sonores longitudinales qui se déplacent à l'intérieur du solide.

GLOSSAIRE

impulsion : onde progressive localisée, générée par une perturbation brusque.

longueur d'onde : (symbole : λ, la lettre grecque lambda) longueur d'un cycle d'une onde périodique ; par exemple, la distance entre une crête et la crête suivante ; unité SI : m.

masse linéique : (symbole : μ, la lettre grecque mu) masse d'un objet filiforme homogène (comme un corde) divisée par sa longueur ; unité SI : kg/m.

onde longitudinale : lors du passage d'une onde longitudinale, les particules du milieu dans lequel elle se déplace oscillent dans la même direction que celle de sa propagation ; les ondes sonores sont longitudinales.

onde mécanique progressive : perturbation qui se propage dans un milieu en transférant de l'énergie d'un endroit à un autre sans qu'il y ait de transport de matière.

onde transversale : lors du passage d'une onde transversale, les particules du milieu dans lequel elle se déplace oscillent perpendiculairement à sa direction de propagation ; une onde sur une corde tendue est transversale.

son : onde mécanique longitudinale qui peut se déplacer dans n'importe quel milieu, qu'il soit solide, liquide ou gazeux.

QUESTIONS

Q1. Donnez trois exemples d'ondes.

Q2. Vrai ou faux ? **(a)** Au passage d'une onde, les particules oscillent nécessairement dans la même direction que celle de la propagation de l'onde. **(b)** Une onde mécanique peut se propager dans le vide.

Q3. Donnez un exemple d'une onde **(a)** mécanique ; **(b)** non mécanique ; **(c)** transversale ; **(d)** longitudinale.

Q4. En général, la vitesse d'une onde mécanique est proportionnelle à la racine carrée d'un paramètre qui exprime la __________ du milieu de propagation, et inversement proportionnelle à la racine carrée d'un paramètre qui exprime la __________ du milieu.

Q5. Vrai ou faux ? Lorsqu'on augmente la tension dans une corde, la vitesse des ondes sur la corde augmente.

Q6. Vrai ou faux ? Sur une corde donnée, une onde de plus grande amplitude se déplace plus rapidement qu'une onde de moins grande amplitude.

Q7. Lorsqu'on augmente la fréquence d'une onde sur une corde donnée, dites si chacun des paramètres suivants augmente, diminue ou demeure inchangé : **(a)** la période ; **(b)** la longueur d'onde ; **(c)** le module de la vitesse de l'onde.

Q8. Vrai ou faux ? Le son se déplace plus vite dans l'air froid que dans l'air chaud.

Q9. Vrai ou faux ? En général, le son se déplace plus lentement dans les liquides et dans les solides que dans les gaz.

Q10. À un facteur 10 près, la vitesse de la lumière dans le vide est ______________ fois plus grande que la vitesse du son dans l'air.

DÉMONSTRATION

D1. Démontrez l'équation qui permet de calculer le module de la vitesse d'une onde sur une corde en fonction du module de la tension dans la corde et de sa masse linéique.

EXERCICES

○ Exercice dont la solution ne requiert ni calculatrice ni algèbre complexe.

À moins d'avis contraire, on peut considérer que le son voyage dans l'air à 340 m/s.

RÉCHAUFFEMENT

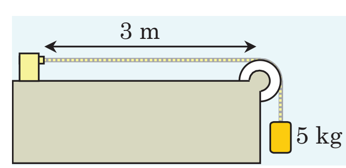
○ **1.8.1** ***Trouvez l'erreur.*** Quelle est l'erreur de physique sur la photo ci-dessous ?

STOCKXPERT

○ **1.8.2** ***Un peu de calcul mental.*** **(a)** Quel est le module de la vitesse d'une onde dont la longueur d'onde est de 12 m et dont la période est de 4 s ? **(b)** Quelle est la fréquence d'une onde qui se déplace à 8 m/s et dont la longueur d'onde est de 4 m ? **(c)** Des vagues se déplaçant à 4 m/s frappent un poteau planté dans un lac avec une période de 5 s : quelle est leur longueur d'onde ?

1.8.3 ***La masse d'une corde.*** Une onde prend 0,3 s pour traverser une corde de 5 m de longueur ; le module de la tension dans la corde est de 100 N. Déterminez la masse de la corde.

1.8.4 ***La vitesse d'une onde sur une corde.*** Déterminez le module de la vitesse d'une onde qui se déplace sur une corde dans les situations suivantes : **(a)** la corde a une masse de 0,1 kg, une longueur de 0,3 m et une tension dont le module est de 50 N ; **(b)** la corde de 3 m de longueur a une masse linéique de 2 g/cm et est tendue à l'aide du poids d'un bloc de 5 kg (schéma ci-contre).



1.8.5 ***Le décalage entre l'éclair et le tonnerre.*** Vous voyez un éclair (photo ci-dessous) et vous entendez le tonnerre 8,22 s plus tard. **(a)** À quelle distance de vous l'éclair s'est-il produit ? **(b)** Combien de temps la lumière de l'éclair a-t-elle pris pour vous parvenir ? (La lumière se déplace presque un million de fois plus rapidement que le son.)

PETER ALOISIO, STOCK.XCHNG

SÉRIE PRINCIPALE

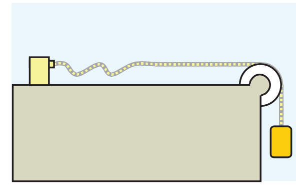
1.8.6 ***Le son du diapason.*** Lors du passage de l'onde sonore créée par un diapason utilisé pour accorder les instruments de musique (photo ci-contre), une molécule d'air oscille avec une période de 2,273 ms (milliseconde). Déterminez **(a)** la longueur d'onde et **(b)** la fréquence du son.

ISTOCKPHOTO

○ **1.8.7** ***Le module de la tension dans une corde.*** Lorsque le module de la tension dans une corde est de 100 N, la vitesse des ondes sur la corde est de 6 m/s. Quel doit être le module de la tension pour que la vitesse soit de 12 m/s ?

1.8.8 ***La longueur d'onde.*** Un oscillateur vibrant à 60 Hz génère une onde dans une corde de 5 m dont la masse est de 1,5 kg et la tension est de 90 N. Quelle est la longueur d'onde ?

1.8.9 ***L'onde créée par un oscillateur.*** Un oscillateur vibrant à 75 Hz génère une onde dont la longueur d'onde est de 10 cm dans une corde tendue par le poids d'un bloc de 2 kg (schéma ci-contre). Quelle est la masse linéique de la corde ?



1.8.10 ***L'onde créée par un oscillateur, prise 2.*** Dans le montage de l'**exercice 1.8.9**, on accroche un bloc *supplémentaire* de 2 kg à l'extrémité de la corde. **(a)** Calculez la nouvelle longueur d'onde. **(b)** Si l'on désire que la longueur d'onde soit de nouveau de 10 cm, quelle doit être la fréquence de l'oscillateur ?

SÉRIE SUPPLÉMENTAIRE

1.8.11 ***Un kilomètre en trois secondes.*** Le module de la vitesse du son dans l'air est $v_s = 20\sqrt{T}$ où v_s est en mètres par seconde et T est en kelvins. À quelle température le son parcourt-il exactement 1 km en 3 s ?

1.8.12 ***Plouf !*** **(a)** À $t = 0$, on laisse tomber une roche (vitesse initiale nulle) dans un puits profond : la surface de l'eau se situe à une profondeur de 30 m. Au bout de combien de temps entend-on le bruit de l'impact de la roche dans l'eau ? (On néglige la résistance de l'air.) **(b)** On reprend l'expérience avec un autre puits et on entend le bruit de l'impact au bout de 2,22 s. À quelle profondeur se trouve la surface de l'eau ?