

Chapitre 17 : les ondes mécaniques

I) Qu'est-ce qu'une onde mécanique progressive ?



1) Définition

Quand on jette un caillou sur une surface parfaitement calme d'un lac, on crée une **perturbation** : plusieurs petites vagues circulaires se forment et se **propagent**. Au bout de quelques instants, le calme revient, la perturbation a cessée. Cette perturbation qui se propage dans un milieu matériel s'appelle une **onde mécanique**.

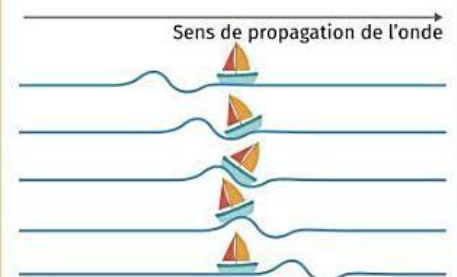
Un bateau peut être soulevé par une vague. Celle-ci transporte donc avec elle de l'**énergie**. Le bateau revient ensuite à sa position d'équilibre. La vague ne le transporte pas avec elle sur son trajet.

Quand une perturbation se propage, les molécules ou atomes du milieu se déplacent puis reviennent à leur position d'équilibre. Ce déplacement local met alors en mouvement les particules voisines, qui poussent à leur tour les voisines. La perturbation se propage de proche en proche : l'onde est **progressive**.

L'onde mécanique ne s'accompagne donc pas d'un déplacement global de la matière, mais seulement d'un déplacement local et temporaire de particules.

Doc. 1 Bateau dans la houle

Le bateau bouge localement verticalement mais revient à sa position initiale après passage de l'onde.



Une onde mécanique progressive est une perturbation qui se propage dans un milieu matériel, sans transport global de matière mais avec transport d'énergie.

Remarque : Les ondes mécaniques ont besoin d'un support matériel pour se propager (air, eau, métal, bois, ...), contrairement aux ondes électromagnétiques qui peuvent se propager dans le vide.

2) Exemples de grandeurs physiques qui varient

Quand le caillou tombe dans l'eau, il provoque une perturbation de la surface de l'eau. Pour étudier cette perturbation, on mesure son élongation, c'est-à-dire l'écart par rapport à la hauteur de l'eau au repos.

La hauteur de l'eau est la grandeur de l'eau qui varie lors du passage de la perturbation.

Exemples d'onde mécanique	Onde le long d'une corde	Onde le long d'un ressort	Onde sonore dans l'air
Milieu élastique de propagation	Corde	Ressort	Air
Élongation (grandeur physique qui varie)	Distance d'un point de la corde par rapport à sa position de repos	Distance de la position d'une spire par rapport à sa position de repos	Pression de l'air par rapport à la pression moyenne

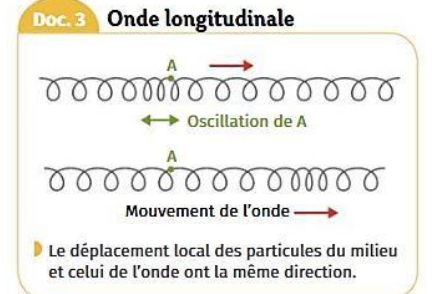
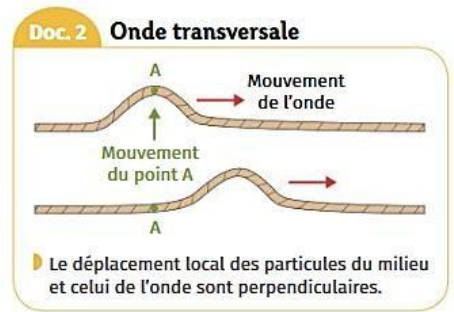
3) Ondes transversales et longitudinales

Lors du passage de l'onde, les particules du milieu sont momentanément mises en mouvement.

Une onde est **transversale** si la direction de la perturbation (du déplacement) est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

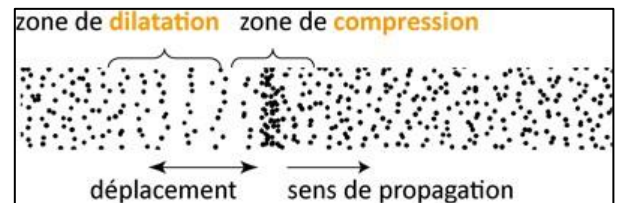
Exemple : propagation le long d'une corde.

Une onde est **longitudinale** si la direction de la perturbation est parallèle à la direction de propagation de l'onde.



Exemples : propagation le long d'un ressort, propagation d'une onde sonore dans un gaz.

Une onde mécanique longitudinale se propage par compressions et dilatations successives du milieu.



II) La célérité d'une onde mécanique

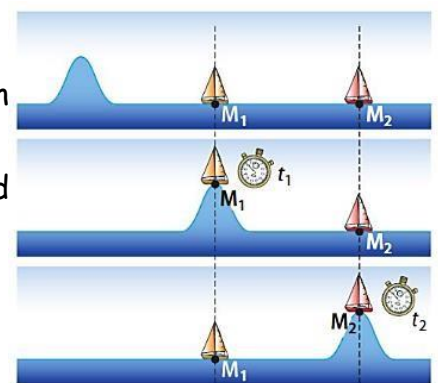
1) Le retard

Une onde progressive qui se propage atteint le point M_1 à un instant t_1 puis le point M_2 à un instant t_2 .

Le décalage temporel entre ces deux instants est appelé « retard » de l'onde.

Le **retard** d'une onde se propageant entre un point M_1 et un point M_2 est la durée séparant son passage entre ces deux points. Il se note τ (« tau » dans l'alphabet grec) et se mesure en seconde.

$$\tau = t_2 - t_1$$



Doc. 4 Le retard de la vague lors de sa propagation entre M_1 et M_2 est $\tau = t_2 - t_1$.

2) La célérité

Le terme « célérité » désigne la vitesse de propagation d'une onde progressive. Il permet d'insister le fait qu'il n'y a pas propagation globale de matière (Il ne s'agit pas de la vitesse de déplacement d'un objet). Elle est quand même notée « v ».

Une onde se propageant d'un point M_1 à un point M_2 avec un retard τ a une célérité qui se calcule par :

$$v = \frac{M_1M_2}{\tau} = \frac{d}{\tau}$$

M_1M_2 ou d en mètre (m)
 τ en seconde (s)
 v en mètre par seconde (m.s^{-1})

La célérité d'une onde dépend du type d'onde et également du milieu de propagation. Plus le milieu est rigide (difficile à déformer), plus la célérité est grande.

Milieu	Air	Eau	Acier
Célérité du son (m.s^{-1})	340	1 500	5 600

Exercices :

- 1) Calculer la distance parcourue par une onde en 34 min par une onde si sa célérité est $v = 2,7 \text{ m.s}^{-1}$.

Retard : $\tau = 34 \times 60 = 2\,040 \text{ s}$.

Distance parcourue : $d = v \times \tau = 2,7 \times 2\,040 = 5\,508 \text{ m}$.

- 2) Une onde se déplace à la célérité $v = 4,5 \text{ m.s}^{-1}$ dans un milieu. Calculer avec quel retard elle arrivera à un récepteur situé à 240 cm de sa source.

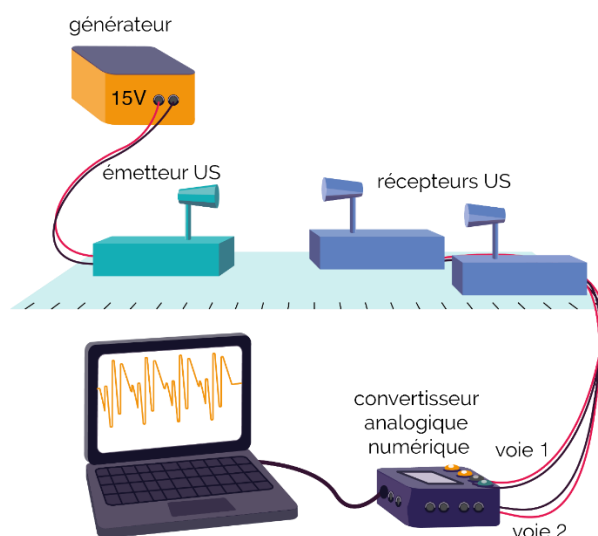
Distance : $240 \text{ cm} = 2,40 \text{ m}$. Retard : $\tau = d/v = 2,40 / 4,5 = 0,53 \text{ s}$

Célérité : Aspect expérimental

Exemple 1 : onde sonore

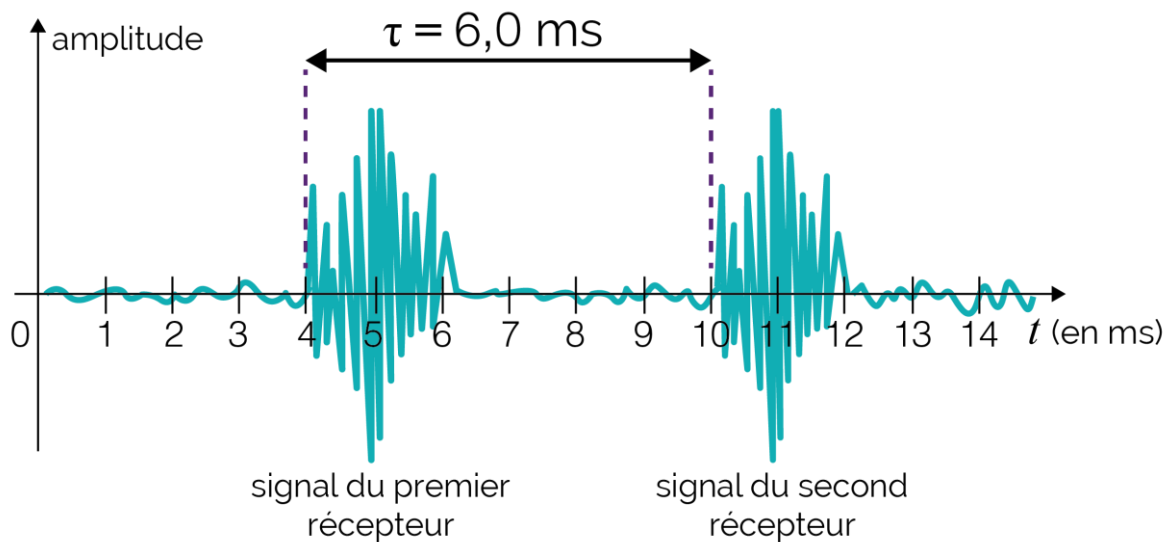
La mesure du retard entre deux détecteurs d'ultrasons permet de déterminer la célérité des ultrasons.

On réalise pour cela le montage suivant, où les deux récepteurs sont distants de **204 cm**.



Dispositif pour mesurer le retard d'une onde sonore

Grâce à un système informatisé de traitement des données, on obtient les mesures suivantes.



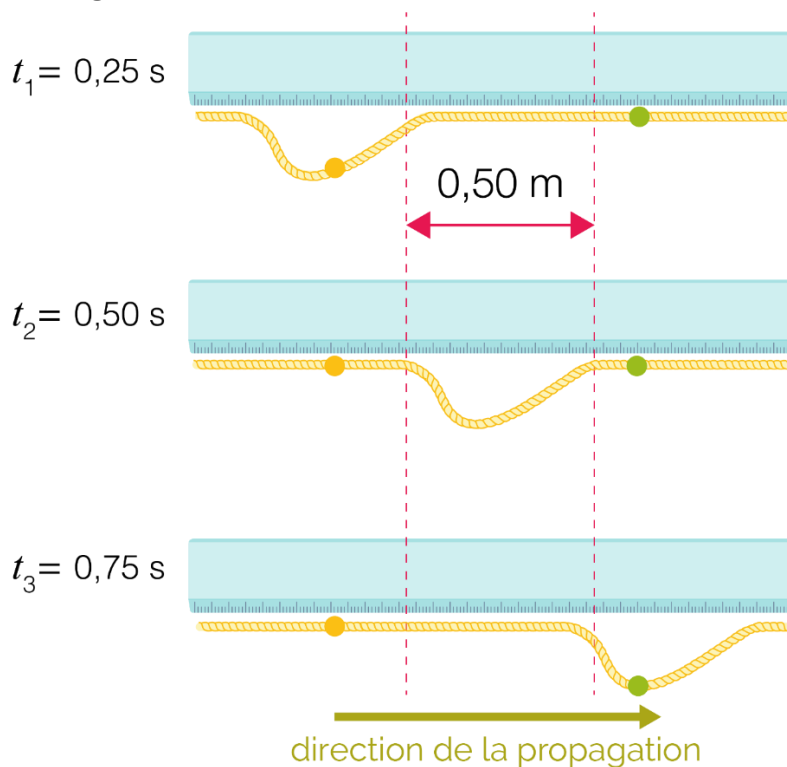
Enregistrement des signaux de deux microphones

On peut ainsi calculer la célérité des ultrasons.

1. On convertit le retard en seconde : $\tau = 6,0 \text{ ms} = 6,0 \times 10^{-3} \text{ s}$.
2. On convertit la distance M_1M_2 en mètre : $M_1M_2 = 204 \text{ cm} = 2,04 \text{ m}$.
3. On applique la formule :

$$V = M_1M_2 / \tau = 2,04 / 6 \cdot 10^{-3} = 341 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Exemple 2 : onde le long d'une corde



Calculons la célérité de cette onde longitudinale

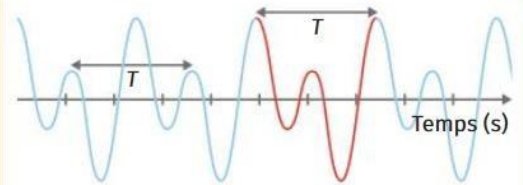
$$V = d / (t_2 - t_1) = 0,50 / (0,50 - 0,25) = 2 \text{ m/s}$$

III) Les ondes mécaniques progressives périodiques

Quand le phénomène qui crée l'onde mécanique est périodique, chaque point du milieu de propagation subit une perturbation périodique. On peut donc dire que l'onde mécanique qui en résulte est périodique. Sa période est imposée par la source de la perturbation.

Une onde mécanique progressive est **périodique** quand la perturbation se répète, identique à elle-même sur un intervalle de temps régulier : la période T . Un motif se répète sur les courbes.

Doc. 5 Onde périodique



Un motif qui se répète est représenté en rouge.

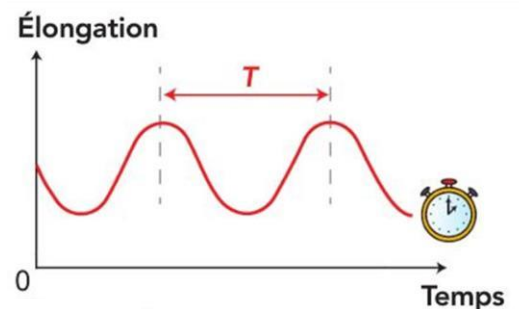
1) La période et la fréquence

Si on prend un point à un « sommet » de l'onde périodique, celui-ci est soumis (comme les autres points) à une perturbation périodique : il descend puis remonte au cours du temps.

La **période** de l'onde (ou période temporelle) est la plus petite durée qui sépare deux perturbations identiques d'un même point. Elle se note T et se mesure en seconde.

C'est donc la durée nécessaire à un point du milieu pour retrouver la même position.

Elle se mesure avec la durée d'un motif sur une représentation temporelle de l'onde (avec le temps en abscisse).



La **fréquence** de l'onde est le nombre de périodes par seconde. Elle se note f et se mesure en hertz.

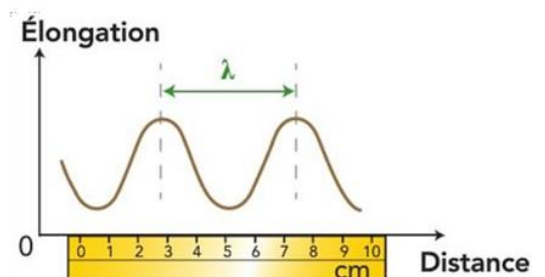
$$f = \frac{1}{T}$$

f en hertz (Hz)
T en seconde (s)

2) La longueur d'onde

Deux points espacés d'une certaine distance qui suivent le même mouvement oscillent de la même façon. On dit qu'ils sont en phase. Ils sont dans le même « état vibratoire ».

La **longueur d'onde** (ou période spatiale) est la plus petite distance séparant deux points du milieu en phase. Elle se note λ (« lambda » dans l'alphabet grec) et se mesure en mètre.



Elle se mesure avec la distance entre deux sommets de motifs par exemple sur une représentation spatiale de l'onde (avec la distance en abscisse).

Remarque : Si une onde progressive est temporellement périodique, elle est aussi spatialement périodique. Les ondes progressives périodiques présentent donc une **double périodicité**, à la fois spatiale et temporelle.

3) Relation entre période, longueur d'onde et célérité

On considère une onde mécanique progressive périodique qui se déplace avec la célérité v .

La longueur d'onde λ correspond à la distance parcourue par l'onde pendant une période T .

distance

On a donc la relation : $v = \frac{\lambda}{T}$

temps

On déduit

$$\lambda = v \times T \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

λ en mètre (m)
 v en mètre par seconde (m.s^{-1})
 T en seconde (s)
 f en hertz (Hz)

Exercices :

- 1) Une onde sonore a pour fréquence $f = 980 \text{ Hz}$. Sa célérité est $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$. Calculer sa longueur d'onde.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{980} = 0,347 \text{ m.}$$

- 2) Une onde a pour longueur d'onde $\lambda = 3,0 \text{ mm}$. Sa célérité est $v = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. Calculer sa période puis sa fréquence.

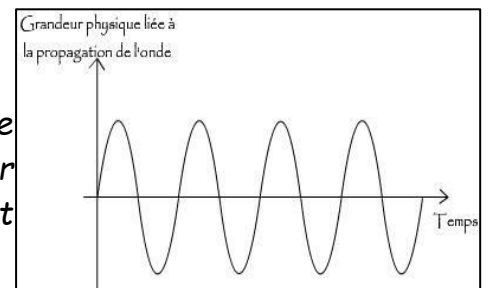
$$\lambda = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m} \quad \text{Période } T = \frac{\lambda}{v} = \frac{3,0 \times 10^{-3}}{2,5 \times 10^{-6}} = 1\,200 \text{ s} \quad \text{Fréquence } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1200} = 8,33 \times 10^{-4} \text{ Hz.}$$

4) Ondes sinusoïdales

Une onde sinusoïdale est un cas particulier d'ondes périodiques pour lequel les variations de la perturbation se font en suivant la fonction mathématique sinus.

On peut identifier ce type de fonction à partir du graphique comportant une alternance de « vagues » positives et négatives de mêmes amplitudes.

Remarque : En pratique, peu d'ondes dans la nature ont une allure sinusoïdale. Toutefois, il est possible de montrer mathématiquement que n'importe quel signal périodique peut être considéré comme une somme de signaux sinusoïdaux. On peut alors analyser l'onde en étudiant chaque onde sinusoïdale qui la compose.



Exercice : Le diapason

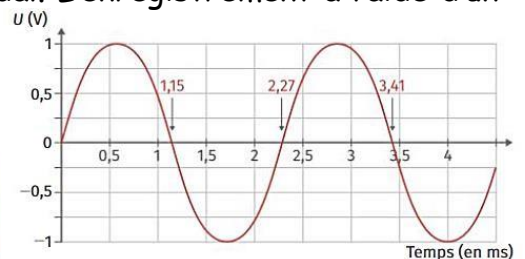
Un diapason permet de générer un son quasiment sinusoïdal. L'enregistrement à l'aide d'un micro donne la courbe suivante.



Données

• Célérité du son dans l'air : $v_{\text{air}} = 340 \text{ m.s}^{-1}$;

Note	Do3	Ré3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Si3
f(Hz)	262	294	330	349	392	440	494



- 1) Déterminer la période puis la fréquence du son émis par le diapason.

Un motif occupe une durée de 2,27 ms, donc la période vaut $T = 2,27 \text{ ms} = 2,27 \times 10^{-3} \text{ s}$

Fréquence : $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,27 \times 10^{-3}} = 441 \text{ Hz}$.

- 2) A quelle note correspond sa hauteur ? **Sa hauteur correspond à la note « La3 ».**

- 3) Calculer sa longueur d'onde dans l'air.

Longueur d'onde : $\lambda = v \times T = 340 \times 2,27 \times 10^{-3} = 0,772 \text{ m}$.