CHAPITRE 10 Les ondes mécaniques progressives

1. Présentation des ondes mécaniques progressives

1.1 Exemples

Exemple 1 : Une ola dans un stade

1. Décrire le mouvement d'un spectateur au cours d'une ola.

A tour de rôle, chaque spectateur se lève et se rassoit

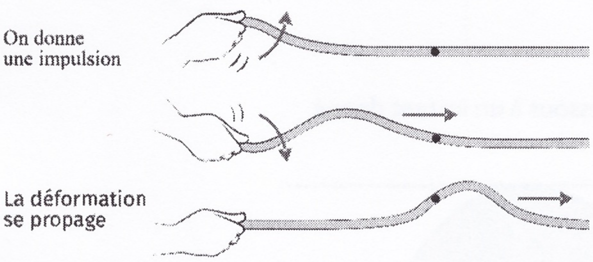
2. Décrire le mouvement de la ola dans le stade.

La ola se déplace dans les tribunes

3. Le spectateur a-t-il changé de place après la ola ? Non

En physique la ola peut être assimilée à une onde mécanique progressive.

Exemple 2 : Une impulsion à l'extrémité d'une corde :

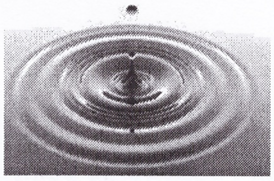


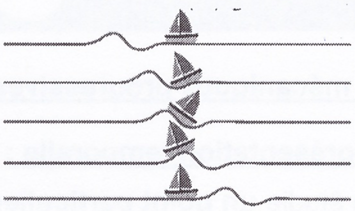
Quels sont les points communs avec la ola ?

chaque point de la corde monte et redescend

La vague se déplace le long de la corde

Exemple 3 : Une goutte tombe à la surface d'une eau calme ou la houle dans un port.





Quels sont les points commun et différences avec la situation précédente

points communs : la surface de l'eau (et le bateau) monte et descend. La vague se déplace à la surface de l'eau

Différence : La propagation est à 2 dimensions (toute la surface de l'eau)

Exemple 4 : Proposer un exemple d'onde mécanique qui se propage dans les 3 dimensions de l'espace.

- Le son dans son milieu de propagation (l'air)
- Les ondes sismiques dans la croûte terrestre.

1.2 Définitions et grandeurs associées

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

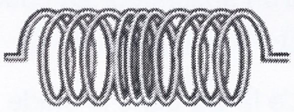
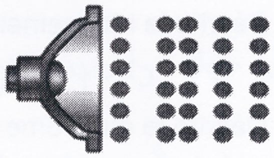
Quelques commentaires :

- Milieu matériel. Il faut de la matière (solide, liquide ou gaz) pour pouvoir parler d'onde mécanique. *(la lumière qui se propage dans le vide n'est pas une onde mécanique c'est une onde* électromagnétique*)*
- Élastique : le milieu doit pouvoir se déformer et retrouver sa forme initiale après le passage de l'onde.
- Sans transport de matière signifie qu'il n'y a pas de mouvement d'ensemble du milieu de propagation. *(ainsi le vent n'est pas une onde mécanique progressive alors que le son est une onde mécanique progressive)*

Description d'une onde :

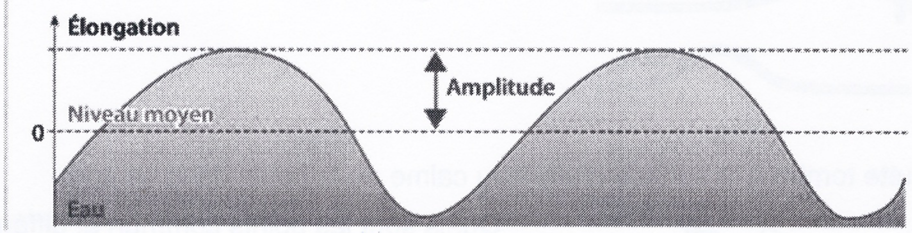
- **L'élongation**, permet de rendre compte de « l'état » du point du milieu de propagation étudié. L'élongation représente l'écart d'une grandeur physique qui varie entre l'état de ce point au passage de l'onde par rapport à sa position au repos

  Identifier l'élongation dans les situations ci-dessous

	Onde le long d'une corde	Onde le long d'un ressort	Onde sonore dans l'air
Exemples d'onde mécanique			
Milieu élastique de propagation	Corde	Ressort	Air
Élongation (grandeur physique qui varie)	L'altitude du point étudié	le déplacement horizontal de la spire par rapport à sa position initiale	La pression de l'air

- **L'amplitude** est l'élongation maximale observée.

Exemple : La surface de l'eau est schématisée ci-dessous à un instant donné.

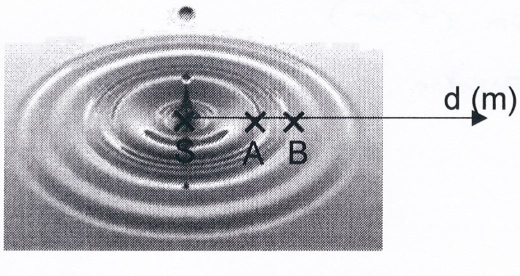


- **Représentations spatiale et temporelle des ondes mécaniques progressives**

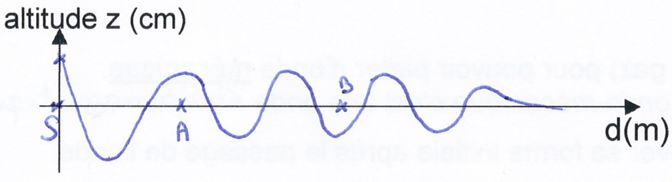
Représentation spatiale

On observe **tous les points de l'espace au même instant (= comme une photo)**.

Exemple de représentation spatiale :
La surface de l'eau à un instant donné



Représenter en coupe tous les points de la droite (SB) au même moment



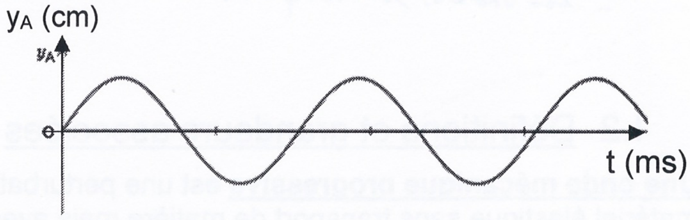
Représentation temporelle :

On étudie **un point particulier de l'espace** (le point A par exemple), **au cours du temps**.

On observe **le même point A à différents instants**.

Dans une représentation temporelle de l'onde, on place **le temps t en abscisse**.

Exemple : Evolution de l'altitude y d'un point A de l'eau au cours du temps



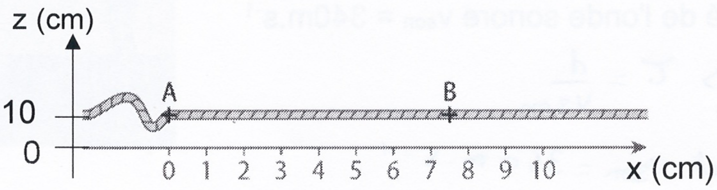
Au cours du temps, A, initialement immobile, s'élève puis descend, puis remonte etc.

Il est très important d'être attentif aux indications et grandeurs sur les axes pour être bien sûr de ce dont on parle. Prenez bien le temps de réfléchir à chaque fois.

Exemple : Passer de la représentation spatiale de la corde à une représentation temporelle

Dans le cas de la corde, à partir de la représentation spatiale $z = f(x)$ suivante, représenter le graphe temporel de l'altitude z du point A, c'est-à-dire l'altitude z_A au cours du temps : $z_A = f(t)$

Représentation spatiale
à l'instant t_1= 140 ms



Pour vous aider à construire le graphe temporel, compléter les phrases suivantes :

A t = 0 le point A est immobile*, à l'altitude z_A =* 10 cm

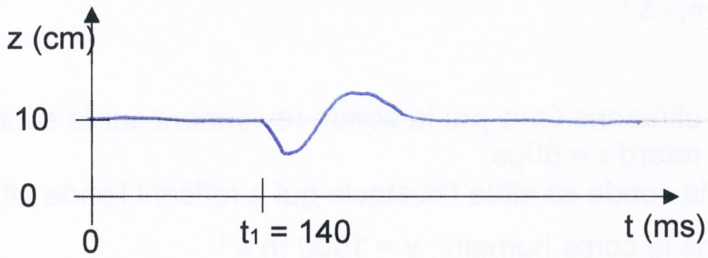
Jusqu'à t = 140 ms = t_1 *le point A ne bouge pas.*

Le front de l'onde (= l'arrivée de l'onde sur un point) se produit à l'instant t = t_1 = 140 ms

Après t = t_1 *l'altitude de A commence à changer, d'abord elle* diminue *puis* augmente

Une fois l'onde passée, le point A retrouve l'immobilité à l'altitude z = 10 cm

Représentation temporelle du point A : Traduisez ces phrases sur le graphe ci-dessous.



Ce graphe est une **représentation temporelle** de l'onde, car l'abscisse est le temps. On examine le même point A à différents instants.

Remarquez que la forme dessinée est différente entre la représentation temporelle et spatiale de l'onde.

Pour fixer les idées, utiliser l'animation suivante (pour la source choisir onde solitaire)
https://www.hatier-clic.fr/miniliens/mie/2019/9782401058705/ondes/index.html

1.3 Célérité d'une onde

La propagation d'une onde n'est pas instantanée

Célérité d'une onde : On appelle la célérité d'une onde sa vitesse de propagation. On évite d'utiliser le terme de vitesse car il n'y a pas de déplacement d'objet mais on conserve la notation v.

Par exemple : la célérité du son dans l'air vaut $v_{son} = 340\ m.s^{-1}$ (valeur à connaitre)
La célérité d'une onde à la surface de l'eau est d'environ $v = 25\ cm.s^{-1}$

Le retard d'une onde : Deux points A et B du milieu à des distances différentes de la source, subissent exactement la même perturbation avec un décalage dans le temps lié à la vitesse de propagation de l'onde

Le retard est la durée séparant le passage d'une onde entre deux points différents A et B. On le note souvent avec la lettre τ (lettre grecque "tau")

On a donc la relation suivante :

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

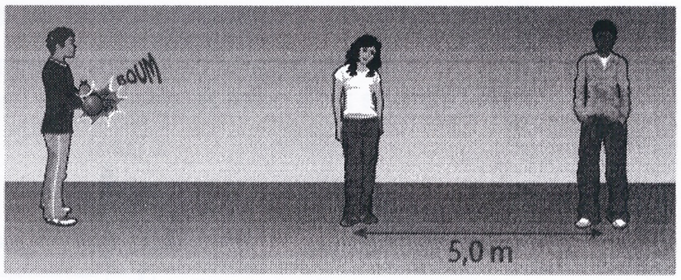
avec d = distance entre deux points A et B frappés successivement par la même onde (en m) (l'un des deux points pouvant être la source de l'onde)
= distance parcourue par l'onde
τ = retard de l'onde (en s)
= durée de la propagation de l'onde pour aller de A à B
v = célérité de l'onde (en $m.s^{-1}$)

Exprimer le retard : $\tau = \frac{d}{v}$

La célérité d'une onde dépend de la nature du milieu matériel de propagation, mais ne dépend pas de la forme et de l'amplitude de l'onde. Ainsi la vitesse du son est différente dans l'air et dans l'eau mais n'est pas lié à la note de musique jouée ou chantée, ni à l'intensité du son (le volume)

Applications :

1. Dans la situation suivante, avec quel retard le garçon perçoit-il le son par rapport à la fille ?



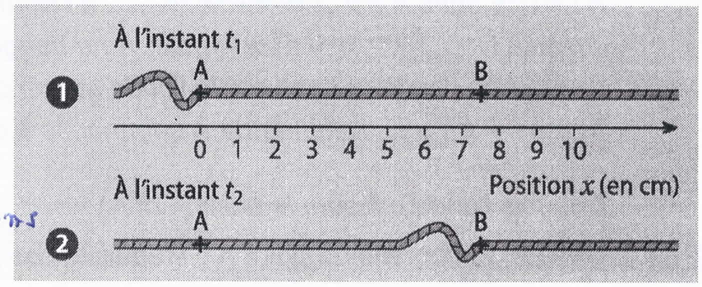
Donnée : célérité de l'onde sonore v_{son} = 340m.s^{-1}

$v_{son} = \frac{d}{\tau} \Leftrightarrow \tau = \frac{d}{v_{son}}$

$d = 5{,}0\ m$ et $v_{son} = 340\ m.s^{-1}$

$\tau = \frac{5}{340} = 1{,}47 \times 10^{-2}\ s \simeq 15\ ms$

2. Représentation de la même corde aux instants t_1 = 140 ms et t_2 = 410 ms



Calculer la célérité de l'onde sur la corde en m.s^{-1}.

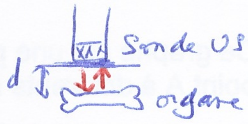
L'onde a progressé de $d = 7{,}5\ cm$ pendant la durée $\tau = t_2 - t_1 = 410 - 140 = 270\ ms$

$v = \frac{d}{\tau} = \frac{7{,}5 \times 10^{-2}\ m}{270 \times 10^{-3}\ s} = 0{,}28\ m.s^{-1}$

3. Au cours d'une échographie, les ultrasons émis par la sonde reviennent sur la sonde, après réflexion sur un organe, avec un retard τ = 60µs.
   Déterminer à quelle distance de la sonde se situe l'obstacle qui a réfléchi l'onde ultrasonore.

Données : célérité des ultrasons dans le corps humain : v = 1500 m.s^{-1}

⚠ l'onde parcourt 2 fois la distance demandée (aller + retour)



$v = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{Retard}} = \frac{2 \times d}{\tau} \Leftrightarrow d = \frac{v \times \tau}{2}$

$\tau = 60\ \mu s = 60 \times 10^{-6}\ s$

$d = \frac{1500 \times 60 \times 10^{-6}}{2} = 4{,}5 \times 10^{-2}\ m = 4{,}5\ cm$

2. Ondes mécaniques progressives périodiques

2.1. Présentation d'une onde mécanique progressive périodique

Une onde mécanique est qualifiée de périodique si la source qui crée l'onde provoque une perturbation périodique, c'est-à-dire répétitive, régulière.

Par exemple un robinet qui goutte, la membrane d'un haut-parleur qui vibre etc…

Rappels (de seconde et d'enseignement scientifique) :

- On appelle période T, la durée au bout de laquelle un phénomène se reproduit identique à lui-même
- Et on appelle fréquence f le nombre de périodes par unité de temps, en général par seconde.

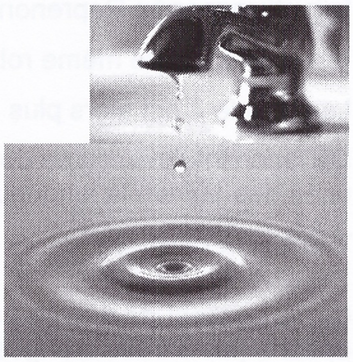
On a la relation $\mathbf{f} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}$ avec T la période en s et f la fréquence en Hz

Remarques : Si la source provoque une perturbation sinusoïdale (exemple : oscillation de la branche d'un diapason), on a une **onde mécanique progressive sinusoïdale**.

Comme pour le son, vu en enseignement scientifique, si la perturbation périodique n'est pas sinusoïdale, elle peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales. C'est la décomposition en série de Fourier.

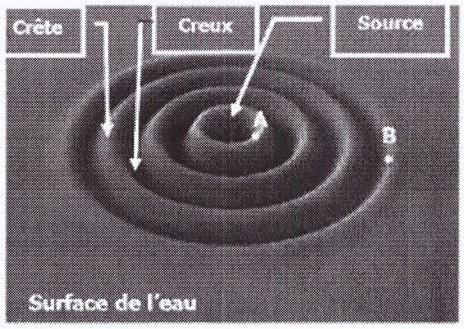
2.2. Double périodicité

A- Présentation à partir d'un exemple :



Un robinet laisse tomber une goutte à intervalles de temps réguliers.
Chaque goutte qui touche l'eau crée une onde progressive.

- Que se passe-t-il au cours du temps **?**
  Les gouttes tombent à intervalle de temps régulier. Ce temps **T est la période de l'onde en s**, c'est un temps. Il y a une **périodicité temporelle** dans la chute des gouttes : (T : période temporelle)
  Chaque point de la surface de l'eau subit la même perturbation régulière (avec un retard). Chaque point du milieu vibre avec la période temporelle T.
- Que se passe-t-il dans l'espace ?
  Si on observe toute la surface de l'eau à un instant donné, on y voit une succession de cercles concentriques. La forme de l'eau présente une grande régularité, on a des creux et des vagues (ou crêtes) régulièrement espacés : c'est la **périodicité spatiale**.



  La distance entre deux creux ou deux crêtes successifs est constante, on l'appelle **la longueur d'onde λ**. C'est une distance, donc en m.

  Deux points du milieu matériel, dans le même état (les deux en haut ou les deux en bas) sont dit **en phase.** Sur le dessin, A et B sont séparés de 3 longueurs d'onde et sont en phase.

  Au fur et à mesure que l'onde se propage, les points A et B vont rester en phase, ils vont tous les deux devenir des creux, puis redevenir des crêtes etc…

  On peut visualiser ça sur l'animation à manipuler (pour la source choisir onde périodique ou onde sinusoïdale et déplacer les points étudiés):
  https://www.hatier-clic.fr/miniliens/mie/2019/9782401058705/ondes/index.html

B – A retenir

LA PERIODE d'une onde, notée T, est la période temporelle de la source qui crée l'onde.
C'est le plus petit temps que met la source ou tout point du milieu à retrouver son état initial.
T = la période (ou période temporelle) **en s. C'est un TEMPS** !

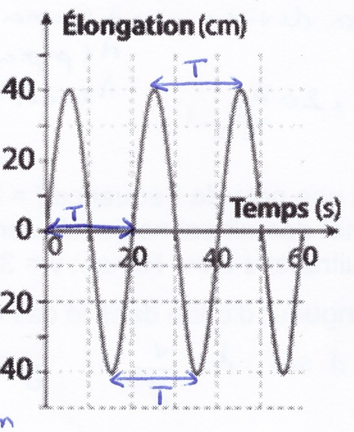
On en déduit la fréquence de l'onde : La fréquence est le nombre de périodes observées pendant une unité de temps, dans le système international pendant une seconde.

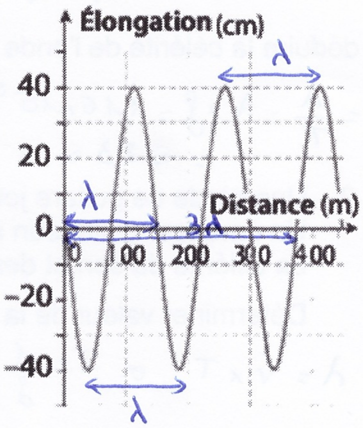
$$f = \frac{1}{T}$$ Si T est en s, f est en s^{-1}, unité appelée Hz (Hertz)

LA LONGUEUR D'ONDE notée λ, est la période spatiale de l'onde, c'est la distance séparant deux points du milieu de propagation dans le même état, deux points en phase
La longueur d'onde λ est la période spatiale **en m. C'est une DISTANCE** entre deux points !
On la lit sur la représentation spatiale, sur une photo par exemple

Application :

Déterminer l'amplitude, la période et la longueur d'onde de l'onde périodique représentée par ces graphes.





graphe 1 - temporel (abscisse t (s))
⇒ lecture de T

$\boxed{T = 20 \text{ s}}$

graphe 2 - spatial (abscisse d (m))
⇒ lecture de λ

$3\lambda = 370 \text{ m} \Leftrightarrow \lambda = \frac{370}{3} = 123 \text{ m}$

$\boxed{\lambda = 1{,}2 \times 10^2 \text{ m}}$

2.3. Lien entre période T et longueur d'onde λ

Intuitivement : Reprenons l'exemple du robinet qui fuit dans un évier :

Imaginons que le même robinet fuit davantage, les gouttes tombent plus rapprochées.

La période T est alors plus …petite………………

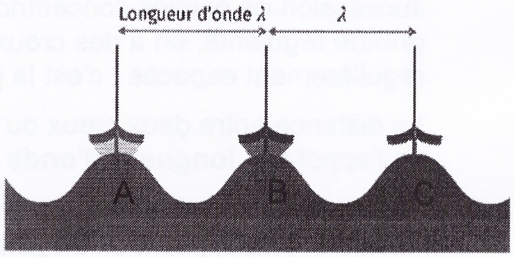
De façon intuitive, on se doute que les vaguelettes à la surface de l'eau seront plus …serrées, proches… les unes des autres, la longueur d'onde λ sera plus …petite……………………

T et λ sont deux grandeurs dépendantes et semblent évoluer …dans le même sens………..

Ce qu'on vient de décrire pour l'eau peut aussi s'observer sur une corde (dans les réglages et options (les 3 traits oranges) choisir signal et changer la valeur de la fréquence)
https://www.hatier-clic.fr/miniliens/mie/2019/9782401058705/ondes/index.html

Relation littérale entre T et λ

Représentation spatiale de la houle dans un port
Trois bateaux montent et descendent en même temps



- Les trois bateaux sont …en phase… et deux bateaux successifs sont séparés d'une longueur égale à …la longueur d'onde : λ
- Le temps nécessaire pour qu'un bateau retrouve la même position est …la période : T………

Suivons l'onde initialement située sous le premier bateau A. Elle se propage en direction du deuxième bateau B. Pendant ce déplacement de l'onde de A vers B, chaque bateau descend puis remonte.

Quand l'onde arrive en B, il s'est écoulé la durée ……T……………, puisque chaque bateau a retrouvé sa position haute, et l'onde a parcouru la distance ……λ…………………

Ainsi **l'onde a parcouru la distance λ (la longueur d'onde) pendant une durée T (la période)**

A partir de cette information en gras, on établit la relation qui relie T et λ

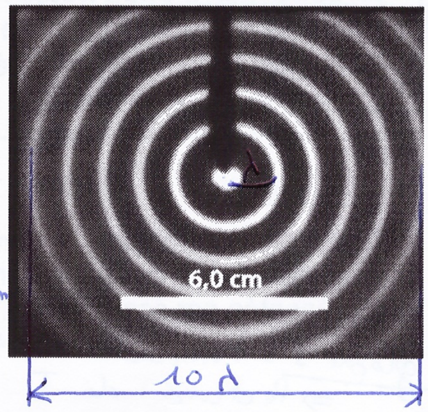
$$v = \frac{\text{distance parcourue par l'onde}}{\text{retard de l'onde}} \quad \text{ici } v = \frac{\text{longueur d'onde}}{\text{période}} = \frac{\lambda}{T}$$

$$\boxed{\mathbf{v = \frac{\lambda}{T}}} \ \textbf{qu'on peut écrire} \quad \mathbf{v = \lambda \times \frac{1}{T}} \quad \textbf{soit} \ \boxed{\mathbf{v = \lambda \times f}}$$

Avec v = célérité en $m.s^{-1}$ λ : longueur d'onde en m T = période en s f = fréquence en Hz

Applications :

1. On fait vibrer la surface de l'eau avec une pointe métallique qui frappe l'eau à la fréquence f = 20 Hz. On photographie la surface de l'eau.



À l'aide de la photo, déterminer la longueur d'onde de cette onde.

échelle : 6 cm ⇔ 2,7 cm papier
La mesure d'1 λ est peu précise ⇒ on en compte un grand nombre et on divise : 10 λ (papier) = 5,2 cm
λ (papier) = 0,52 cm
$\lambda (\text{réel}) = \frac{0{,}52 \times 6}{2{,}7} = 1{,}16$ cm

En déduire la célérité de l'onde

$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times f = 1{,}16 \times 10^{-2} \text{ m} \times 20 \text{ Hz}$ (= s^{-1})
$= 0{,}23 \text{ m.s}^{-1}$

2. Une corde de guitare joue une note de fréquence f = 82 Hz.
Un émetteur d'ultrason émet des ultrasons de fréquence f = 25 000 Hz
La célérité du son et des ultrasons dans l'air est v = $340 m.s^{-1}$

Déterminer valeur de la longueur d'onde dans le cas du son de la guitare, puis de l'ultrason.

$\lambda = v \times T$ or $T = \frac{1}{f}$ d'où $\lambda = \frac{v}{f}$

guitare $\lambda = \frac{340 \text{ m.s}^{-1}}{82 \text{ s}^{-1} (= \text{Hz})} = 4{,}1$ m

ultrason $\lambda = \frac{340}{25000} = 1{,}4 \times 10^{-2}$ m $= 1{,}4$ cm

3. Équation d'une onde sinusoïdale

On a vu en enseignement scientifique que toute fonction périodique peut être décomposée comme une somme de fonctions sinusoïdales, de fréquences multiples de la fréquence de l'onde.
On peut donc donner l'équation d'une onde périodique sous la forme d'une somme de fonction sinus.

Activité python : Relier la courbe obtenue aux coefficients de l'équation mathématique

Rappels sur la fonction sinus :

L'équation générale d'une fonction sinus est f(x) = **a** × sin (**bx** + **c**) : a, b et c étant des coefficients numériques.
(par exemple f(x) = 1,5 × sin (8x + 6))
En physique on suit une grandeur y au cours du temps, l'équation devient y(t) = 1,5× sin (8t + 6)

Essayons de comprendre l'influence des coefficients **a**, **b** et **c** sur le graphe de la fonction

Pour cela, réaliser le notebook https://capytale2.ac-paris.fr/web/c/94cc-1317769 en lien sur pronote ou accessible par la page capytale (ENT/Ressources/capytale) code : **94cc-1317769**

Bilan de l'activité notebook :

- Lorsqu'on écrit une fonction sinusoïdale sous la forme f(x) = **a** × sin (**bx** + **c**)
  L'amplitude du signal se manifeste dans le coefficient ....a..............................
  La période du signal se manifeste dans le coefficient ....b..............................
  Le démarrage de la sinusoïde se manifeste dans le coefficient ....c (la phase)
- Pour repérer rapidement la valeur de la période d'un signal sinusoïdal, il faut écrire le terme ..b.... sous la forme ..$b = \frac{2\pi}{T}$..........

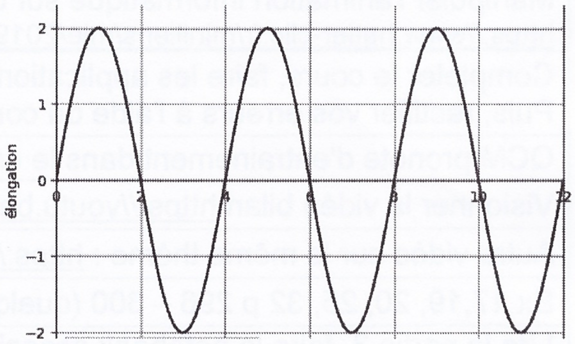
En physique, l'équation d'un signal sinusoïdal se note :

$y(t) = A \times \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times t + c\right)$ pour l'étude temporelle (étude d'1 point au cours du temps)
$y(t) = A \times \sin(2\pi f \times t + c)$
T période
A amplitude
f fréquence

ou $f(x) = A \times \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + c\right)$ pour l'étude spatiale (étude des points du milieu au même instant)
λ = lgr d'o

Applications :

1. Déterminer l'équation mathématique de la fonction représentée ci-contre



En maths l'abscisse est x.
on lit une période de valeur 4
- une amplitude de valeur 2 ⇒ A = 2
- un démarrage à 0 (c = 0)

Soit $f(x) = 2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{4} x + 0\right)$

2. Un microphone transforme une onde sonore en tension électrique.

Un microphone capte le son émis par un diapason (son sinusoïdal de 440 Hz).
Donner l'équation au cours du temps de la tension aux bornes du micro pour une amplitude de 250 mV et une fréquence d'un son sinusoïdal de 440 Hz.

$u(t) = 0{,}250 \times (2\pi \times 440\, t)$
tension (en V) — amplitude (en V) — fréquence (en Hz)

3. Que valent l'amplitude et la longueur d'onde d'un signal périodique d'équation :

   y = 1,8 × sin (5x)
   a — b

$a = A = 1{,}8$ m amplitude

$b = \frac{2\pi}{\lambda} = 5 \Leftrightarrow \lambda = \frac{2\pi}{5} = 1{,}26$ m longueur d'onde