Chapitre 1 : Ondes mécaniques

Cours

A. Ondes mécaniques progressives

Figure 1

Sur la photographie ci-dessus (figure 1), des gouttes d'eau tombent à intervalles réguliers sur un grand récipient contenant de l'eau. On observe un système de creux et de vagues qui s'éloignent du point de chute des gouttes d'eau. En mettant un petit bouchon en un point de la surface, il est facile de constater qu'il se déplace verticalement, par conséquent les molécules d'eau ont aussi un mouvement vertical. Il y a donc un mouvement dans l'eau mais celle-ci ne s'éloigne pas globalement du centre. Cet exemple se généralise de la façon suivante :

Si la perturbation se produit dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, on dit que l'onde est transversale.

Exemples : Onde dans l'eau, ola dans un stade, onde le long d'une corde.

Dans l'exemple de la figure 2, on considère une corde posée au sol. En un bout de la corde, situé à gauche, on exerce rapidement un déplacement vertical. Lors du passage de l'onde les molécules de la corde se déplacent verticalement alors que le profil de la déformation se déplace horizontalement.

Voici une mini vidéo de la situation ; Onde mécanique dans une corde : Progressive, transversale et de forme gaussienne.

https://www.jeanhurel.fr/site/documents_pre/chap1/onde1.ogv

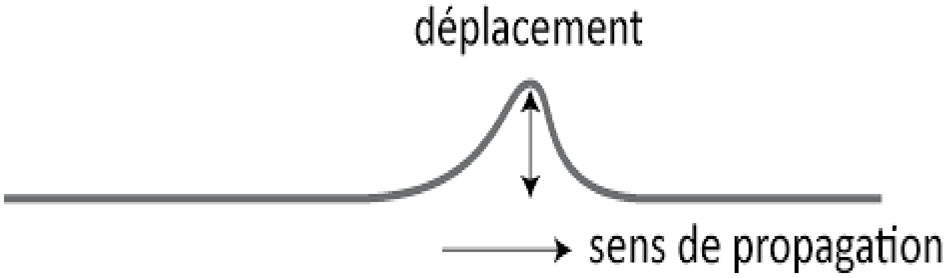


Figure 2

Si la perturbation se produit dans la même direction que la propagation, l'onde est dite longitudinale.

Exemples : Onde dans une barre métallique, son dans l'air, ondes sismiques P et S.

Dans l'exemple ci-dessous (voir figure 3) on considère un ressort posé au sol. En un bout du ressort, situé à gauche, on exerce rapidement une compression horizontale de quelques spires. Lors du passage de l'onde les atomes du ressort se déplacent horizontalement et le profil de la déformation se déplace aussi horizontalement.

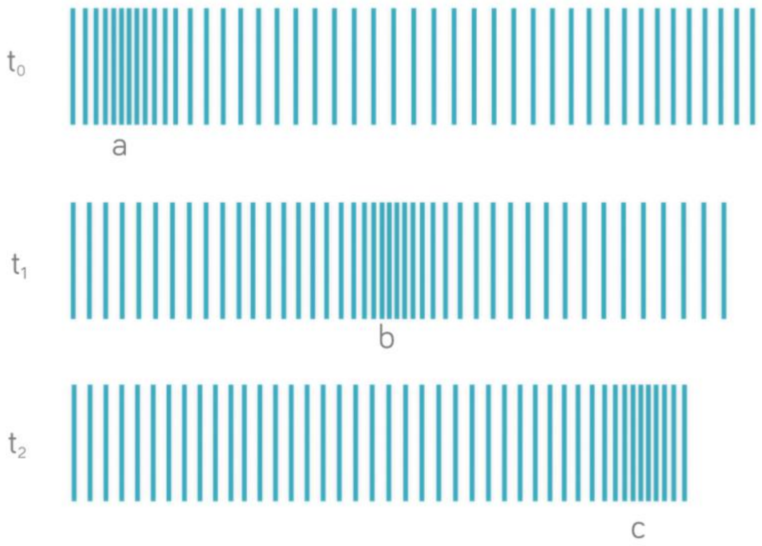


Figure 3

Sur la figure 4 ci-dessous une onde sonore se propageant (dans l'air)de la membrane d'un haut-parleur vers le tympan d'une oreille. Les régions foncées correspondent aux fortes compressions et les régions claires correspondent aux faibles compressions.

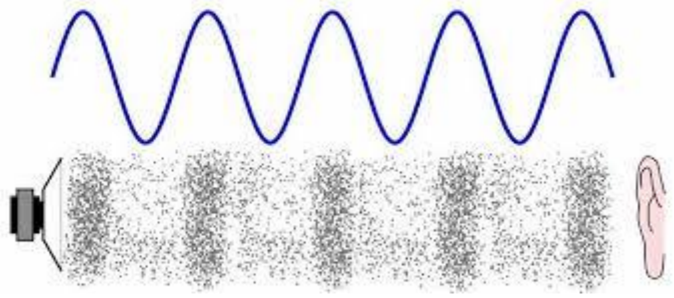


Figure 4

<u>Application</u>

Qualifier les ondes mécaniques suivantes.

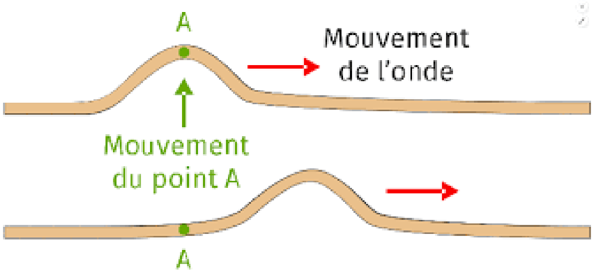


Figure 5

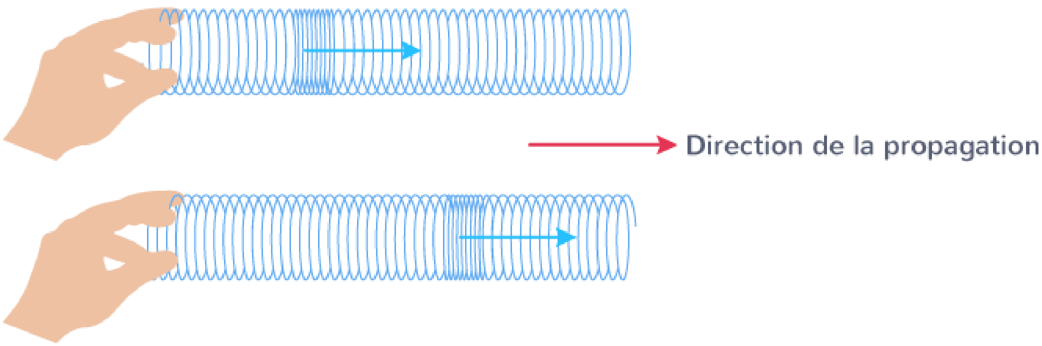


Figure 6

Ce sont deux ondes mécaniques car il y à un déplacement dans la matière(corde ou ressort) sans déplacement global. Elles sont toutes les deux progressives car on voit une évolution spatiale dans un seul sens(ici de gauche à droite).

La première est transversale car le mouvement vertical dans la corde est orthogonal au mouvement horizontal de l'onde.

La seconde est horizontale car le mouvement horizontal dans le ressort est colinéaire au mouvement horizontal de l'onde.

Figure 5 : Onde mécanique progressive transversale

Figure 6 : Onde mécanique progressive longitudinale

B. Célérité d'une onde progressive

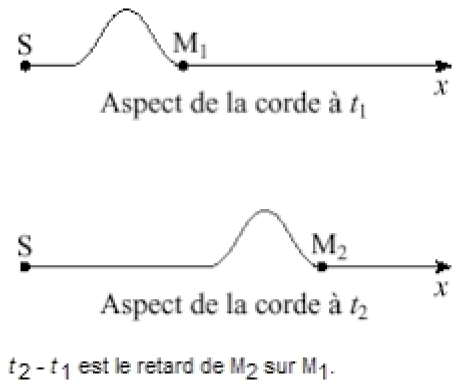


Figure 7

La célérité v est la distance parcourue par le front de l'onde (il passe de M1 à M2) divisée par le retard de M2 sur M1 (soit $t_2 - t_1$) :

$$\boxed{v = \frac{M1M2}{t_2 - t_1}}$$

M_1M_2 : distance en mètres (m)
$t_2 - t_1$: durée en secondes (s)
v : célérité en mètres par seconde ($m.s^{-1}$)

Milieu	Air	Eau douce	Acier
Célérité du son (en $m.s^{-1}$)	340	1500	5800

Remarques : -Le mot vitesse est réservé aux objets qui se déplacent en bloc, ce qui n'est pas le cas d'une onde.
-La célérité augmente avec la densité du milieu(voir tableau précédent).

Application 1

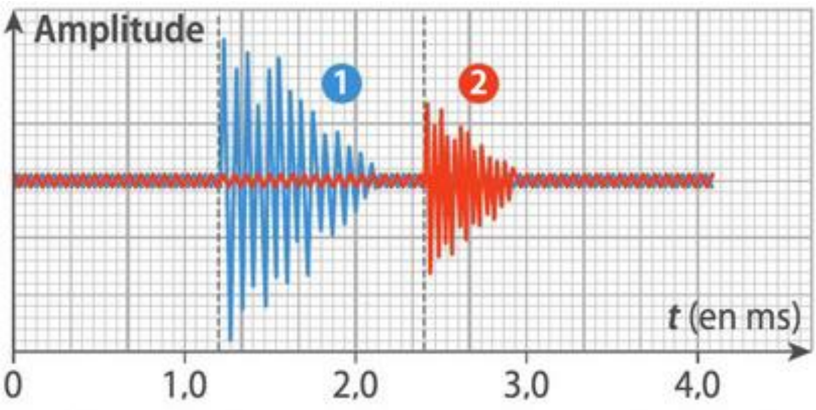


Figure 8

Deux microphones, reliés à une interface informatique, enregistrent un clap sonore effectué dans leur alignement.

1. Déterminer la durée de propagation du signal sonore entre les deux microphones séparés par d = 40,5 cm.
2. En déduire la célérité du son dans l'expérience.

1. On constate sur le schéma que 1ms correspond à 1,5 cm. Or le décalage entre les deux réceptions de l'onde sonore est de 1,8 cm. On en déduit que le décalage de perception sonore est de $\Delta t = 1{,}8/1{,}5 = 1{,}2$ ms.
2. On en déduit la célérité du son

$$v_{air} = \frac{d}{\Delta t}$$

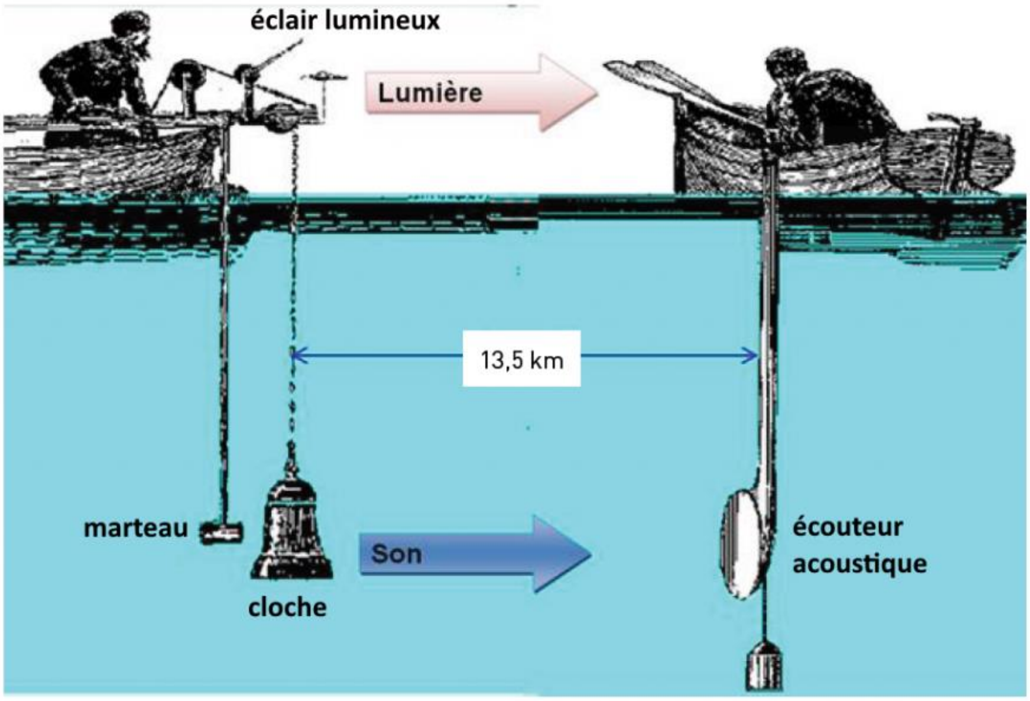
$$= \frac{40{,}5.10^{-2}}{1{,}2.10^{-2}}$$

V_{air} = $\underline{3{,}4.10^{2}\ m.s^{-1}}$.

Application 2

Le Suisse Jean-Daniel Colladon et le Français Charles Sturm ont, en 1826, sur le lac Léman, mesuré la célérité du son dans l'eau(voir figure 9).

Propagation du son dans l'eau



Des expériences furent faites par Colladon et Sturm en 1828 sur le lac Léman de nuit.

Figure 9

Un expérimentateur produit un son dans l'eau à l'aide d'une cloche. A l'instant où la cloche est frappée un dispositif enflamme une poudre formant un signal lumineux observable par un second expérimentateur présent dans le bateau récepteur et muni d'un chronomètre.
La durée mise par le son pour aller d'un bateau à l'autre est mesurée et vaut $\Delta t = 9{,}4$ s.
Déterminer la célérité du son obtenue dans cette expérience historique.
Tout simplement

$$v_{eau} = \frac{d}{\Delta t}$$

$$= \frac{13{,}5.10^3}{9{,}4}$$

$$v_{eau} = 1{,}4.10^3 \text{ m.s}^{-1}.$$

C. Ondes mécaniques périodiques

1. Période temporelle T

La cause (ou source) d'une onde périodique est un objet (vibreur) qui émet des perturbations à intervalles de temps réguliers. Il s'agit de la période T.

Exemples de sources : -Membrane d'un haut-parleur
-Boule plongeant verticalement dans l'eau

Les autres points du milieu reproduisent le mouvement de la source avec un certain retard égal à d/v. V est la célérité de l'onde et d est la distance entre le point considéré et la source.

Lorsque la période est petite devant la seconde on préfère utiliser le nombre de périodes par seconde. Il s'agit de la fréquence :

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

T : période en secondes (s)
f : fréquence en hertz (Hz)

Application 1

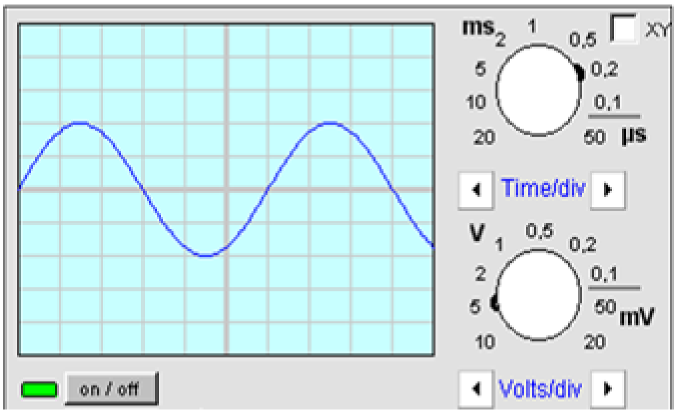


Figure 10

Sur la figure 10 ci-dessus est représenté une tension sinusoïdale. Déterminer la période puis la fréquence de cette tension.
Sur l'axe horizontal on voit que la période correspond à $n_H = 6{,}0$ div. Le balayage est réglé sur $b = 0{,}2$ ms/div donc la période est

$T = b\ n_H$

$\quad = 0{,}20 \times 6{,}0$

$T = \underline{1{,}2\ \text{ms}}$.

La fréquence est alors $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1{,}2.10^{-3}} = \underline{8{,}3.10^{2}\ \text{Hz}}$.

Application 2

La fréquence de la tension ci-dessous est f= $5,0.10^2$ Hz. Déterminer la valeur du balayage b.

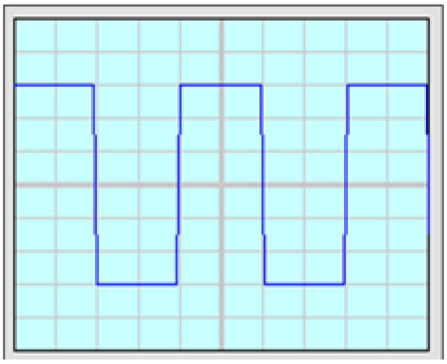


Figure 11

La période est $T = 1/f = 1/5,0.10^2 = 2,0.10^{-3}$s ou 2,0 ms et donc le balayage est

$$b = \frac{T}{n_H}$$

$$= \frac{2,0}{4,0}$$

$b =$ <u>0,5 ms/div</u>.

2. <u>Période spatiale ou longueur d'onde λ</u>

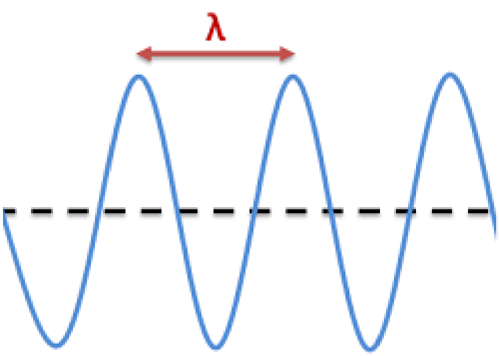


Figure 12

Sur la photographie ci-dessus est représentée une élongation y en fonction de l'abscisse x, le temps est fixe. Comme le temps s'écoule toujours, il faut utiliser un stroboscope qui envoie des flash séparés d'une durée T (La scène devient immobile).

La longueur d'onde λ est la plus petite distance en deux points vibrant en phase (ensemble).

3. Relation longueur d'onde, période et célérité

Cette relation a été prouvée dans un point cours au sujet d'une onde mécanique progressive sinusoïdale dans l'eau. Un vibreur constitué d'une sphère exécute un mouvement périodique vertical. Le résultat se voit en regardant la vidéo : Le déplacement de l'onde est horizontal alors que les molécules d'eau se déplacent verticalement (en témoigne la présence de l'objet flottant en rouge). Pendant que le vibreur fait une période T, l'onde se déplace horizontalement à la célérité v pour parcourir une longueur d'onde λ.
Par conséquent :

$$\boxed{\lambda = v\,T}$$

λ : longueur d'onde en mètres (m)
v : célérité en mètres par seconde ($m.s^{-1}$)
T : période en secondes (s)

Voici une mini vidéo de la situation ; Onde mécanique dans l'eau : Progressive, transversale et de forme sinusoïdale.

https://www.jeanhurel.fr/site/documents_pre/chap1/onde2.ogv

Application 1

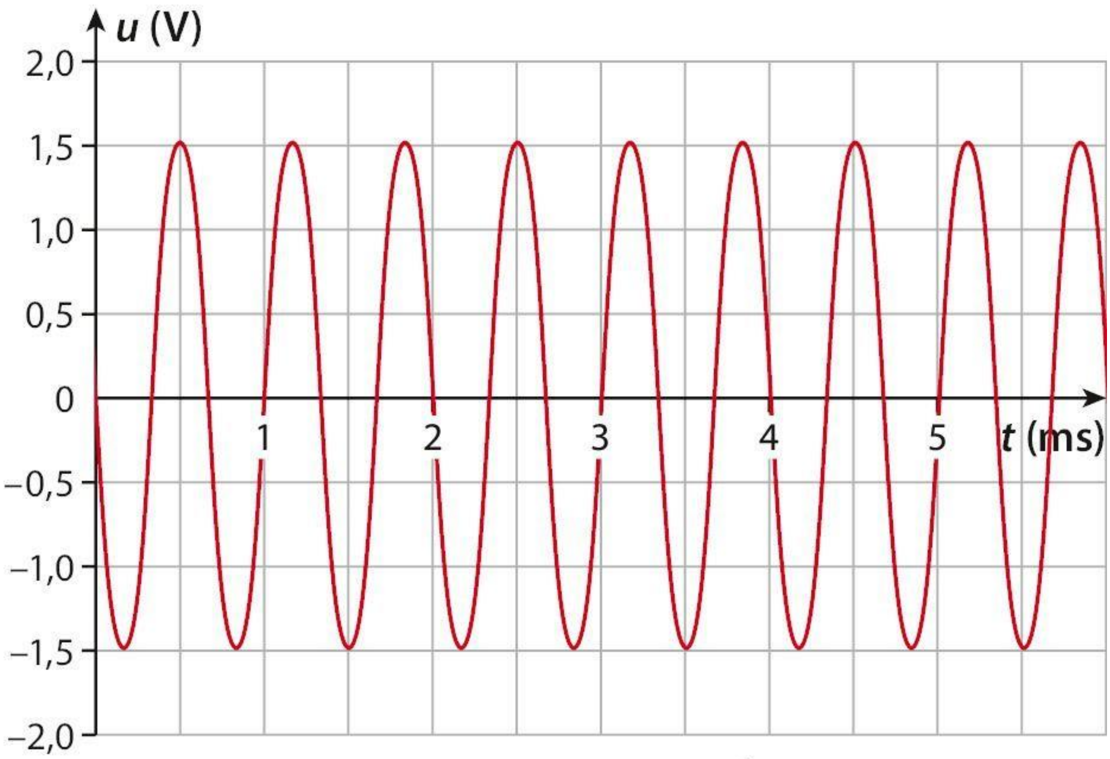


Figure 13

Sur la figure 13 est représentée la tension aux bornes d'un microphone qui enregistre un son dans l'air ; La célérité est de 342 $m.s^{-1}$.
1. Déterminer l'amplitude et la période de cette tension.
2. En déduire la fréquence.
3. Calculer la longueur d'onde.

1. Par lecture graphique l'amplitude est A = <u>1,5 V</u> (Lecture verticale). Par lecture horizontale on observe que 6 périodes (motifs élémentaires) ont une durée de 4,0 ms ; Ce qui donne une période T = 4,0/6 = <u>0,67 ms</u>.
2. La fréquence est par définition l'inverse de la période, soit

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}67.10^{-3}}$$

$$f = \underline{1{,}5.10^3 \text{ Hz ou } 1{,}5 \text{ kHz.}}$$

3. Pour la longueur d'onde λ, utilisons

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{342}{1{,}5.10^3}$$

$$\lambda = \underline{0{,}23 \text{ m}}.$$

<u>Application 2</u>

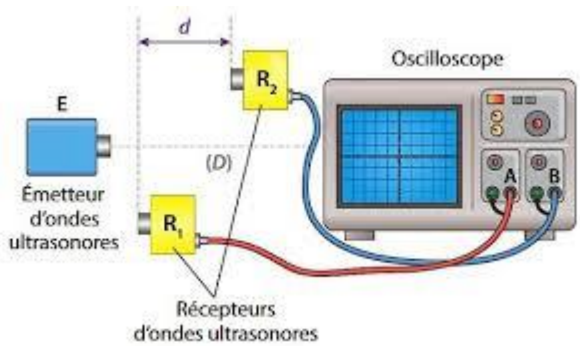


Figure 14

Sur la figure 14 ci-dessus un émetteur d'ultrasons E et deux récepteurs d'ultrasons R_1 et R_2 reliés aux deux voies d'un oscilloscope.
-Dans un premier temps on règle d pour que les deux signaux soient en phase (proportionnels).
-Après on augmente d et on voit que les deux signaux sont décalés dans le temps ; Arrive un moment ou les deux signaux redeviennent proportionnels ; La variation de d est donc égale à λ, car les deux récepteurs vibrent de nouveau en phase.
-On continue le déplacement et on observe au total n = 10 coïncidences si le déplacement est D = 8,5 cm.
1. Quelle est la longueur d'onde des ultrasons ?
2. En déduire la célérité des ultrasons sachant que la fréquence des ultrasons est f = 40 kHz.

1. Nous avons D = n λ donc

$$\lambda = \frac{D}{n}$$

$$= \frac{8{,}5.10^{-2}}{10}$$

$\lambda \quad = \underline{8{,}5.10^{-3}\ \text{m}}$.

2. De λ = V/f on en déduit

$$V = f\,\lambda$$
$$= 40.10^{3} \times 8{,}5.10^{-3}$$
$V = \underline{3{,}4.10^{2}\ \text{m.s}^{-1}}$.

4. <u>Ondes sinusoïdales</u>

Une onde sinusoïdale se modélise par une relation de la forme :

$$\boxed{y(x,t) = y_{max} \sin(2\,\pi\, t/T - 2\,\pi\, x/\lambda)}$$

y(x,t) : élongation au point x et au temps t en mètres (m)
y_{max} : élongation maximale ou amplitude en mètres (m)
t : temps en secondes (s)
T : période temporelle en secondes (s)
x : position en mètres (m)
λ : longueur d'onde en mètres (m)

Les deux programme suivants peuvent s'exécuter en ligne(choisir Python en bas à droite) sur le site :
https://sagecell.sagemath.org/

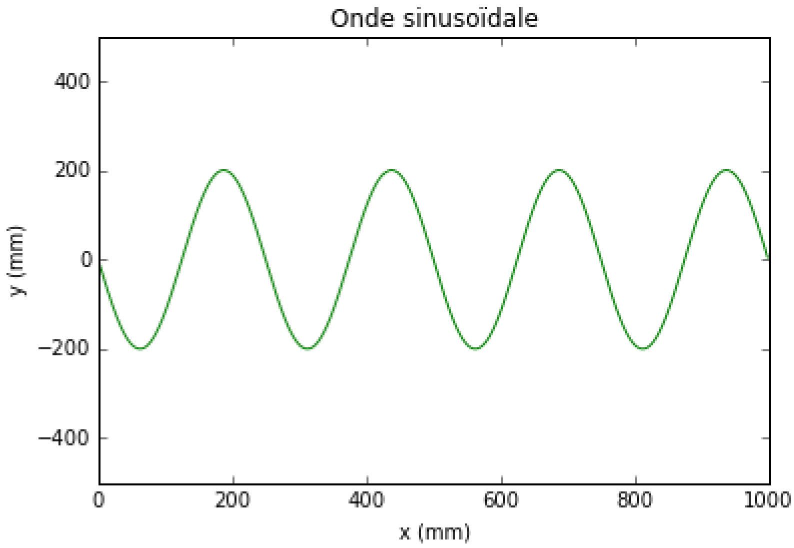
<u>Programme N° 1</u>

Voici un programme informatique en langage python qui représente y en fonction de x, le temps est fixé à 0.

```
#Onde sinusoïdale
from matplotlib import pyplot as plt
from math import*

L=1000;f=50;l=250;ym=200
T=1/f
t=0
list_x=[];list_y=[]
```

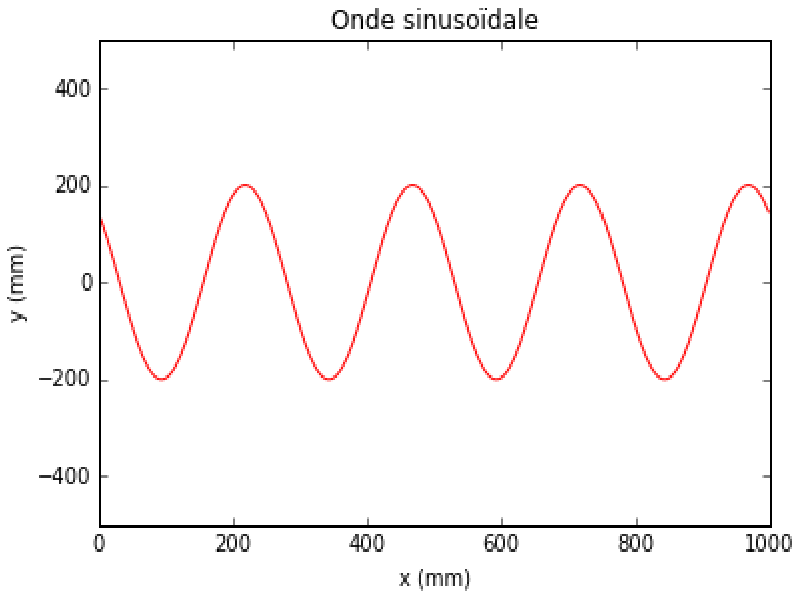
```
for j in range(1000):
    list_x.append(j)
    list_y.append(ym*sin(2*pi*t/T-2*pi*j/l))

plt.plot(list_x,list_y,color='green')
plt.axis([0,L,-L/2,L/2])
plt.xlabel("x (mm)");plt.ylabel("y (mm)")
plt.title("Onde sinusoïdale")
print("t="+" "+str(t)+" "+"s")
plt.show()
```

```
t= 0 s
```



Si on remplace l'instruction t= 0 par t=T/8, on obtient la courbe suivante :

t= 0.0025 s

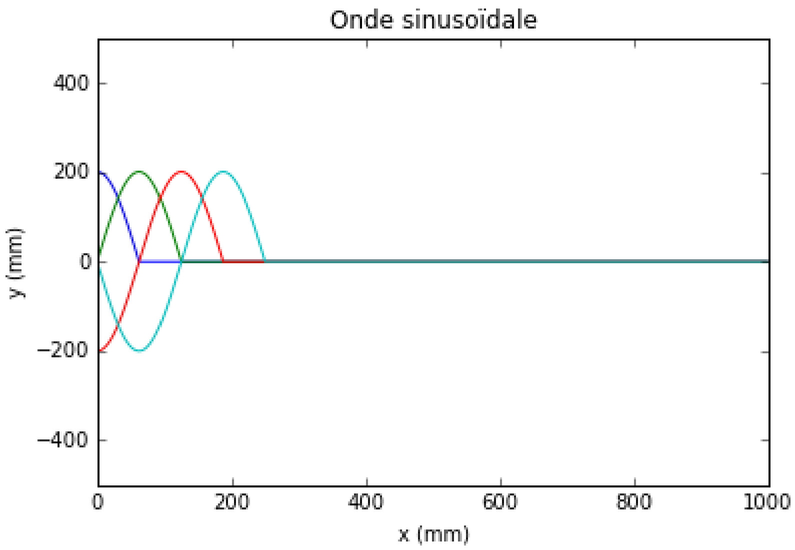


Programme N° 2

Voici un programme informatique en langage python qui représente y en fonction de x. Il correspond à l'activité page 299 du livre Belin.

```
#Onde progressive sinusoïdale
from matplotlib import pyplot as plt
from math import*

L=1000; f=50; l=250; ym=200
T=1/f

for i in range(1,5,1):
    list_x=[];list_y=[]
    plt.axis([0,L,-L/2,L/2])
    plt.xlabel("x (mm)");plt.ylabel("y (mm)")
    plt.title("Onde sinusoïdale")
    N=floor(i*l/4)
    for j in range(1000):
        list_x.append(j)
        if j<N:
            list_y.append(ym*sin(2*pi*i/4-2*pi*j/l))
        else:
            list_y.append(0)
    plt.plot(list_x,list_y)
    print("t="+" "+str(i*T/4)+" "+"s")
plt.show()
```

```
t= 0.005 s
t= 0.01 s
t= 0.015 s
t= 0.02 s
```



Voici une vidéo qui résume bien le chapitre :
https://www.youtube.com/watch?v=fTEs3xgtdSk

Pour finir nous pouvons remarquer que les ondes mécaniques rencontrées dans ce chapitre sont toujours progressives ; Cela signifie qu'elles vont dans un seul sens(souvent de gauche à droite). Les ondes progressives s'opposent aux ondes stationnaires qui sont la superposition de deux ondes allant en sens contraire ; Les ondes stationnaires ne sont pas au programme.

Exercices

N°	9	page	304
N°	14	page	305
N°	17	page	305
N°	22	page	306
N°	24	page	307
N°	25	page	307
N°	27	page	307
N°	29	page	308
N°	31	page	308