

B5. Propagation d'une onde mécanique

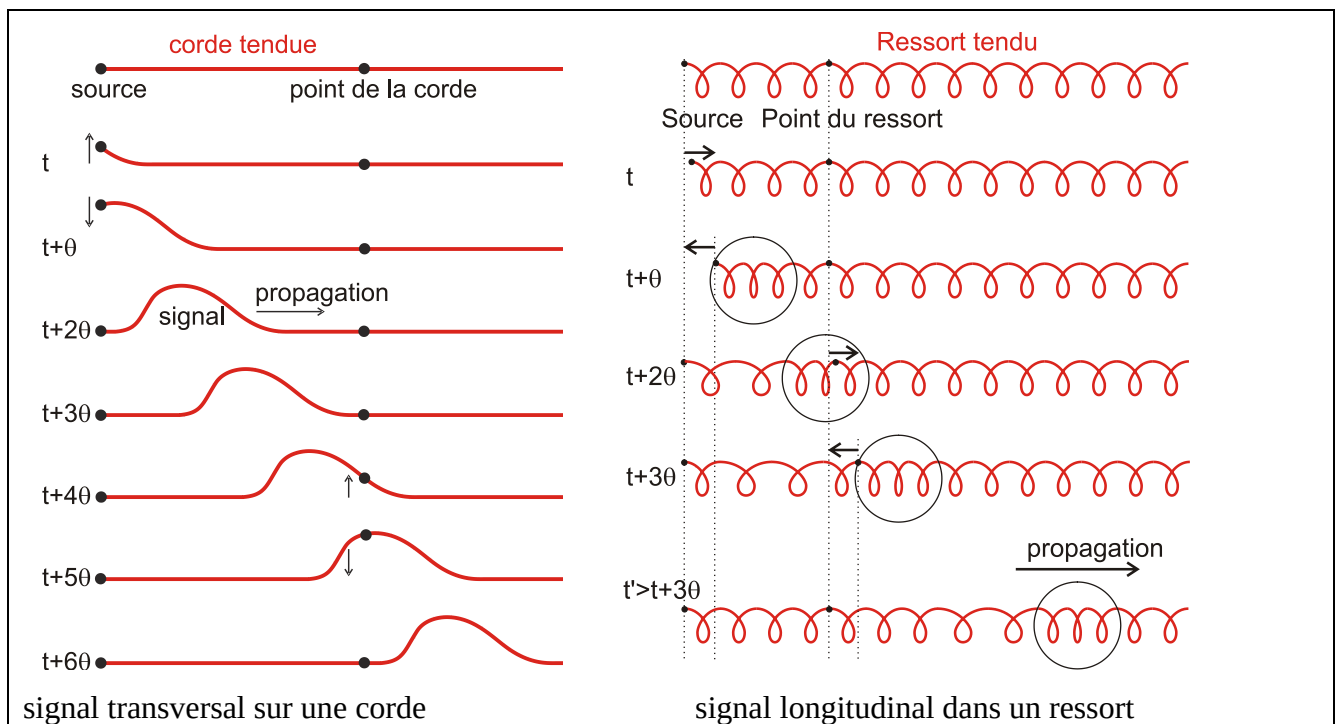
a) Terminologie

On appelle **milieu élastique** un milieu matériel à 1 dimension (corde ou ressort), à 2 dimensions (surface d'eau ou tissu élastique) ou à 3 dimensions (air, eau, solide) qui se laisse comprimer ou étirer localement de manière réversible.

Un **signal mécanique** est une déformation de courte durée d'un **milieu élastique**. Cette déformation ne reste pas localisée à l'endroit où elle est produite, mais elle se déplace dans le milieu élastique: elle se **propage**. Après le passage du signal le milieu reprend son état initial.

Une **onde mécanique** est une déformation périodique (souvent oscillation sinusoïdale) qui se propage dans un milieu élastique.

Le point de départ du signal/onde est la **source**; la direction et le sens dans lesquels il se déplace constituent la **direction et le sens de propagation** représenté par le **rayon d'onde**.



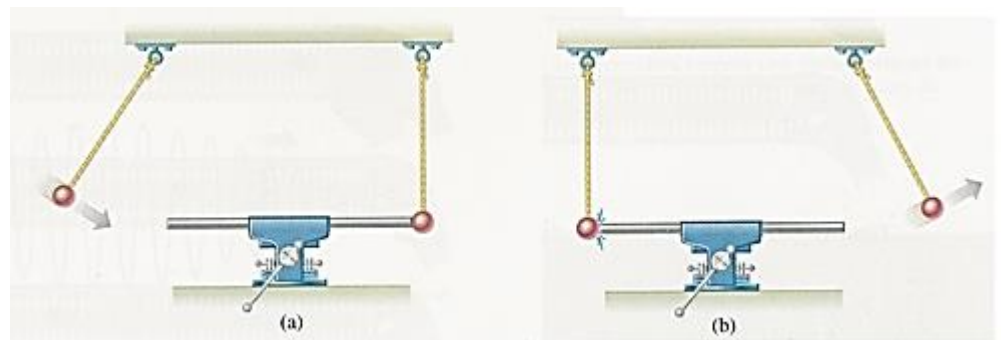
Si, lors du passage de la déformation, les différents points du milieu se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation, la déformation est une **onde transversale**.

Si, lors du passage de la déformation, les différents points du milieu se déplacent dans la direction de propagation, la déformation est une **onde longitudinale**.

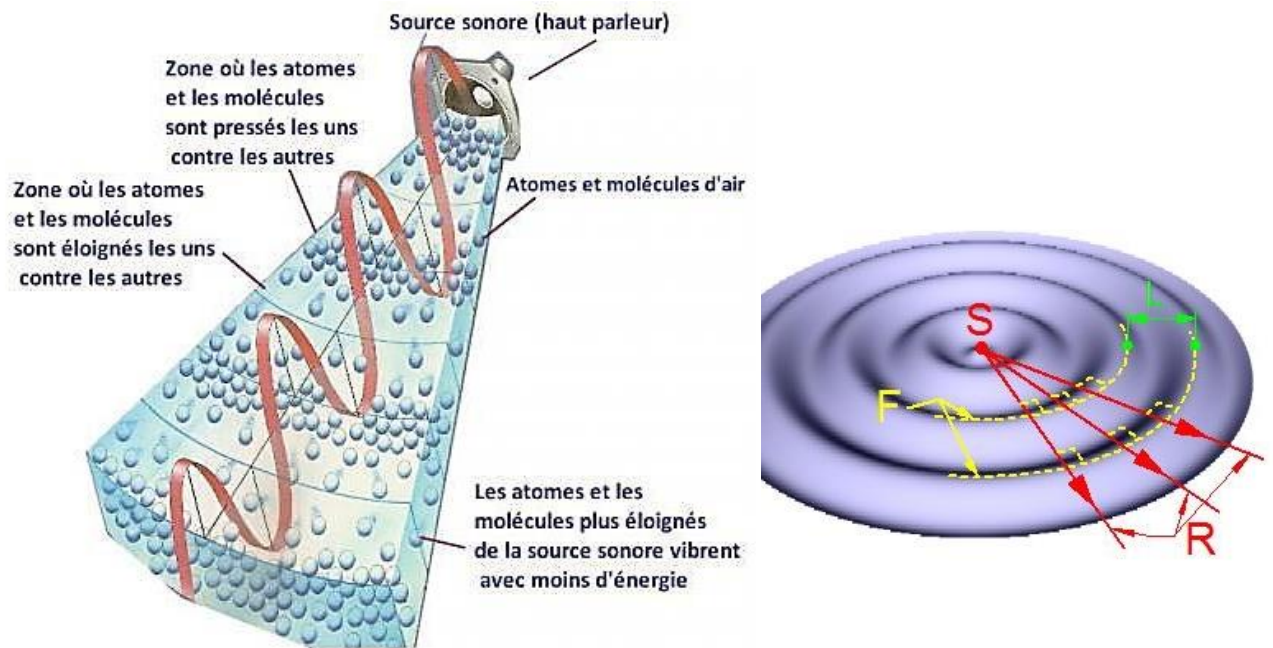
On appelle **front d'onde** un ensemble de points pour lequel l'onde a mis le même temps de parcours pour les atteindre.

Une **onde progressive** transporte de l'**énergie** et de la **quantité de mouvement** sans transport de matière.

Exemples :



- Ondes transversales : Ondes à la surface d'un liquide (2D), ondes sismiques (3D), cordes des instruments de musique (1D), ..., (ondes électromagnétiques $\neq$ mécaniques)
- Ondes longitudinales : ondes sonores (3D), ondes sismiques (3D), ressort (1D), tige (1D)



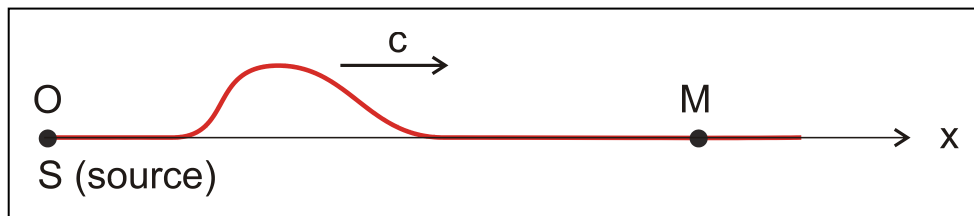
Animations : <http://physiquemichelet.eklablog.com/recent/2>

b) Célérité

On appelle **célérité** c la vitesse de propagation d'un signal ou d'une onde. La célérité dépend des propriétés du milieu mais pas de la forme du signal ou de la fréquence de l'onde. Dans un milieu homogène à 2 ou 3 dimensions, la vitesse de propagation est la même dans toutes les directions.

Application : Célérité sur une corde

Pour parcourir une distance $\Delta x = OM$ le signal prend un temps $\Delta t = \frac{\Delta x}{c}$



Expérience : Influence de la tension sur la célérité d'un signal transversal sur une corde

Figure :

Longueur de la corde : L=

Masse totale de la corde : m=

Masse linéique : μ =

Trajet de mesure : Δx =

m_T (kg)	F_T (N)	Δt (s)	c (m/s)	$\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$ ()
0,2				
0,3				
0,5				
0,7				

Conclusion : Le long d'une corde tendue, la célérité augmente avec la tension F_T de la corde et diminue avec la masse linéique μ (= masse par unité de longueur) suivant la relation:

$$c = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad \text{avec } \mu = \frac{m}{L} \quad (L = \text{longueur de la corde ; } m = \text{masse de la corde})$$

Simulation d'ondes (utiliser les différentes représentations)

Signal	Milieu de propagation	Célérité en m/s
Son (ondes longitudinales se propageant à travers un milieu matériel élastique)	air à 0°C	330,7
	air à 20°C	342,6
	air à 40°C	354,1
	eau de mer à 15°C	1500
	acier (ondes transversales)	3240
	acier (ondes longitudinales)	5880
	hydrogène à 20°C	1300
rides à la surface d'eau (ondes transversales miniatures)	flaque d'eau avec tension superficielle	0,25
lumière	vide	$c_0 = 3 \cdot 10^8$
	eau	$c = c_0/n = 2,24 \cdot 10^8$
vagues d'eau (ondes de plus grande amplitude qui affichent un mouvement de roulement plus complexe)	eau avec mouvement en profondeur Ne réponds pas à notre théorie linéaire !!	30 - 140km/h suivant la période des ondes 800km/h Tsunami augmente avec la longueur d'onde et la profondeur de l'eau

Résumé : <https://www.leifiphysik.de/mechanik/mechanische-wellen>

c) Propagation d'une onde sinusoïdale le long d'une corde

Expérience : Observation stroboscopique d'une corde tendue excitée à une extrémité par un vibreur et amorti par de la ouate de l'autre côté pour éviter des réflexions.

Figure :

Si on règle le stroboscope à la même fréquence que le vibreur $f_s = f_{vib}$, le système apparaît figé parce qu'il effectue exactement une oscillation entre 2 éclairs.

Dans ce cas on voit que la corde adopte une **forme périodique dans l'espace** (longueur d'onde λ).

Si on diminue légèrement $f_s < f_{vib}$, le vibreur fait un peu plus d'une oscillation entre deux éclairs et le mouvement apparaît au ralenti.

Dans ce cas on observe que l'onde se propage. Chaque point M de la corde répète avec un certain retard le même **mouvement périodique dans le temps** (période d'oscillation T) que la source.

c1 Mouvement de la source dans le temps

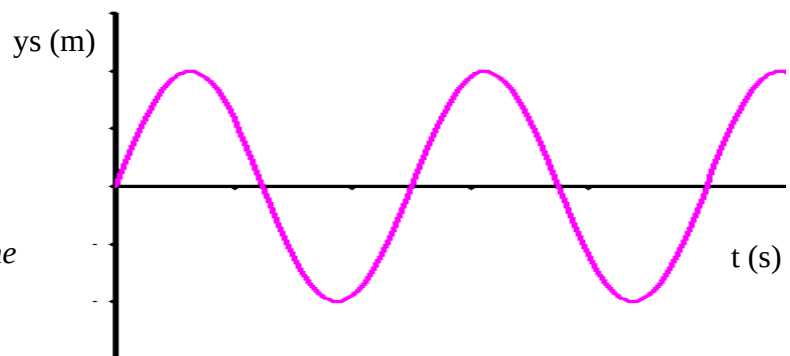
Le mouvement oscillant de la source est caractérisé par son amplitude Y_0 et sa période T ou fréquence f. On obtient alors la pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$. Si on suppose que le mouvement démarre à $t=0$ en partant de la position d'équilibre vers le haut, on a :

$$y_s(t) = Y_0 \sin(\omega t)$$

$$y_s(t) = Y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

Rem : Si le départ à $t=0$ se fait de manière différente, il faut inclure une phase initiale φ .

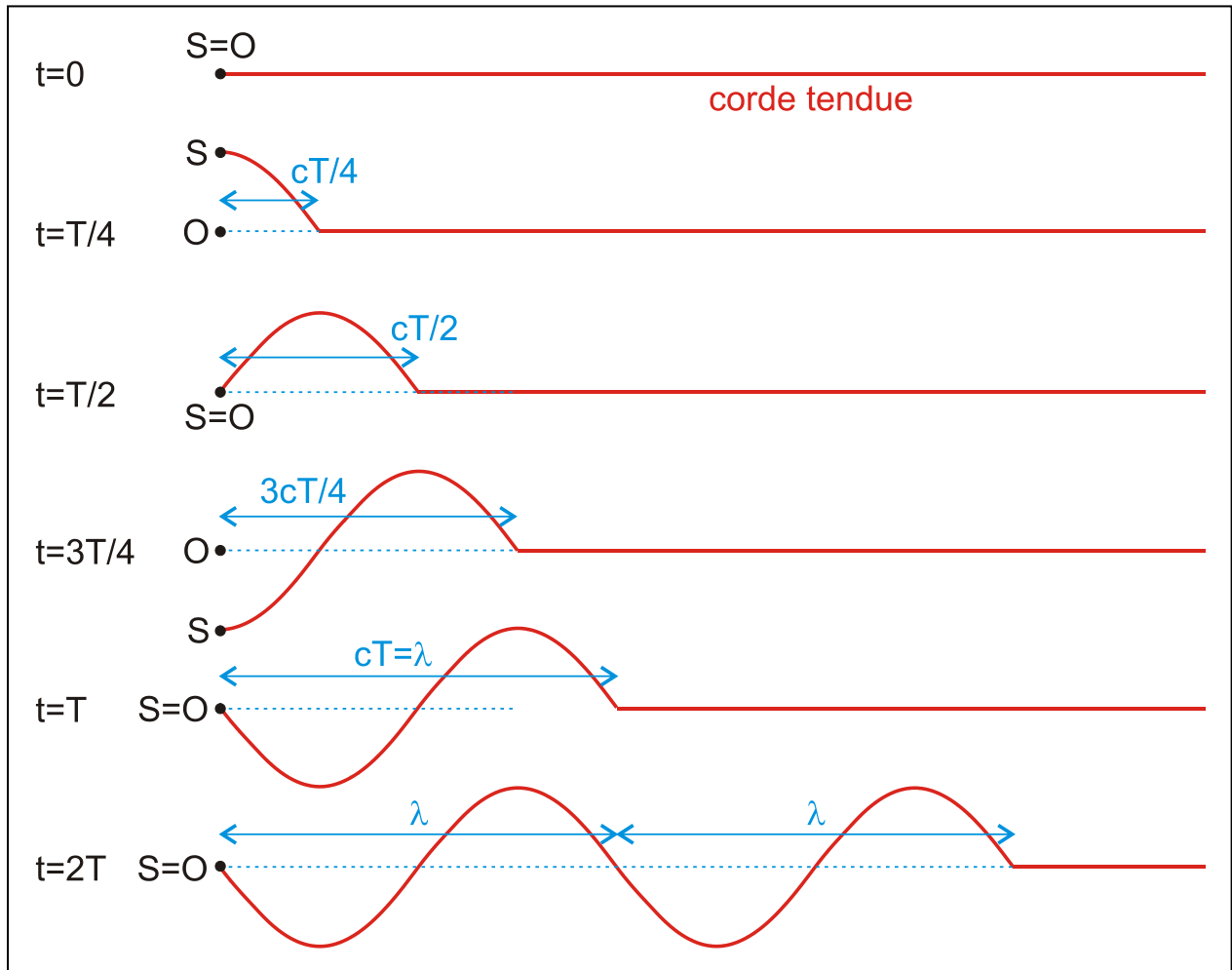
$$y_s(t) = Y_0 \sin(\omega t + \varphi)$$



Comme chaque point de la corde effectue un mouvement sinusoïdale de même période, la période T s'obtient si on analyse le mouvement selon y d'un point M d'**abscisse x fixe**.

c2 Propagation du mouvement dans l'espace [\(Link\)](#)

Le mouvement sinusoïdal de la source se propage sur la corde avec une célérité c selon Ox.



Après $t=T$ la source a effectué une oscillation complète et la déformation s s'est propagé sur une longueur d'onde λ (=période spatiale).

$$\boxed{\lambda = c \cdot T} \quad \text{avec célérité } c \text{ en m/s, période } T \text{ en s et } \lambda \text{ en m}$$

La période spatiale λ s'obtient si on analyse une photo prise à un **instant t fixe**.

Exercice : Nommer a, b, c, d les quarts de périodes générés et envoyés dans l'ordre sur les 2 graphiques. Indiquer l'appellation des axes.

d) Equation d'onde

L'équation d'onde décrit le mouvement au cours du temps t d'un point M situé à une distance x de la source O .

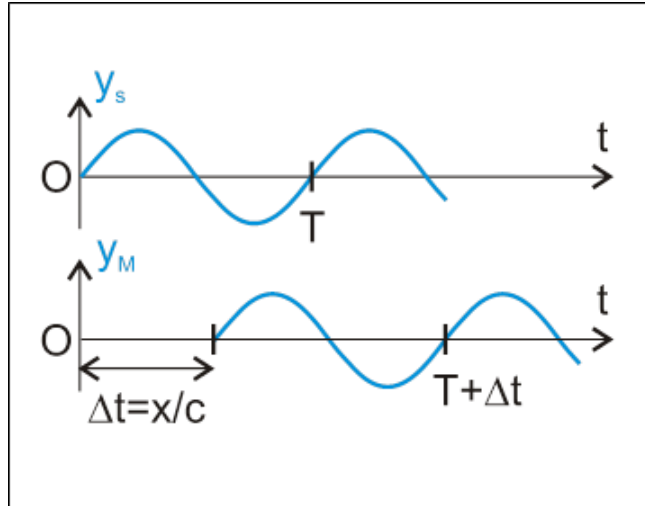
On sait que le point M répète le mouvement de la source S avec un retard

$$\Delta t = \frac{OM}{c} = \frac{x}{c}$$

Il en résulte que :

$$y_M(t) = y_S(t - \Delta t)$$

élongation de M = élongation de S à une date antérieure $t - \Delta t$



En remplaçant $t - \frac{x}{c}$ au lieu de t dans l'équation horaire de la source $y_S(t) = Y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$ on a :

$$y_M(t) = Y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$$

$$y_M(t) = Y_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{cT}\right)\right) \quad \text{or} \quad \lambda = c \cdot T$$

$$y_M(t) = Y_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)$$

Comme l'élongation y du point M dépend de x et de t on écrit:

$$y_M(x; t) = Y_0 \sin\left(2\pi\frac{t}{T} - 2\pi\frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{l'argument du sinus désigne la phase en rad}$$

Noter que l'équation d'onde montre bien la double périodicité T pour t et λ pour x .

c.à.d. le mouvement se répète pour $t' = t + T$ resp. $x' = x + \lambda$

Si on compare $\left(2\pi\frac{t}{T} - 2\pi\frac{x}{\lambda}\right) = \text{phase du point M}$ et $\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = \text{phase de S}$

on a $2\pi\frac{x}{\lambda} = \text{déphasage entre M et S en rad}$ si $2\pi\frac{x}{\lambda} = k \cdot 2\pi$ les points S et M vibrent en phase.

Animation : <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/wave-x-t/wave-x-t.html>

De manière générale il en résulte que :

2 points M et N qui se situent à une distance

$$d = n \cdot \lambda \quad \text{avec } n \in \mathbb{Z}$$

vibrent en phase (nombre entier de longueurs d'ondes)

2 points M et P qui se situent à une distance

$$d = \frac{\lambda}{2} + n\lambda = (2n + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{avec } n \in \mathbb{Z}$$

vibrent en opposition de phase (nombre impair de demi-longueur d'ondes)

