

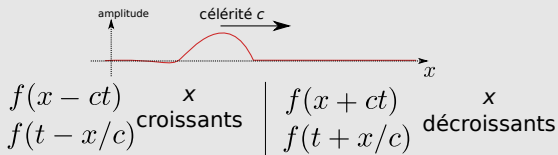
## I Ondes

**Onde** = propagation d'une perturbation de proche en proche

cas particulier

## II Ondes progressives (unidimensionnelles)

**Onde progressives** = se propage sans se déformer



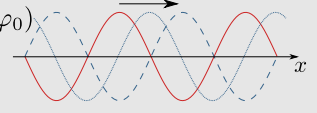
cas particulier

## III Ondes progressives sinusoïdales (unidimensionnelles)

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t \pm kx + \varphi_0)$$

double périodicité  $\lambda$  et  $T$   
déphasage

célérité ou vitesse de phase :  $c = \lambda f = \omega/k$



## IV Milieux dispersifs

Non dispersif : la vitesse de phase ne dépend pas de la fréquence.  
Dispersif : elle en dépend.

## Ce qu'il faut connaître

\_\_\_\_\_ (cours : II)

- <sub>1</sub> Quel est l'ordre de grandeur de la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide (ou vitesse de la lumière) ?  
Et celle des ondes sonores dans l'air ?
- <sub>2</sub> Sous quelle forme peut s'écrire une onde progressive unidimensionnelle pour une propagation vers les  $x$  croissants ?  
Et vers les  $x$  décroissants ?

\_\_\_\_\_ (cours : III)

- <sub>3</sub> Quelle est la forme générale de l'expression d'une onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle se propageant selon les  $x$  croissants ? Comment sont nommés chacun des paramètres qui interviennent dans cette expression ?  
Quelle est la relation entre la pulsation, la norme du vecteur d'onde, et la célérité de cette onde ?
- <sub>4</sub> Double périodicité des ondes progressives sinusoïdales : Quelle est la relation entre la période temporelle  $T$  et la pulsation de l'onde ?  
Et celle entre la période spatiale  $\lambda$  et la norme du vecteur d'onde  $k$  ?  
Quelle est alors la relation entre  $\lambda$ ,  $T$  et  $c$  ?

\_\_\_\_\_ (cours : IV)

- <sub>5</sub> Que signifie "milieu non dispersif" ? Donner des exemples de milieux non dispersifs.

## Ce qu'il faut savoir faire

\_\_\_\_\_ (cours : II)

- <sub>6</sub> Pour une onde progressive unidimensionnelle, prévoir l'évolution à  $t$  fixé ou à  $x$  fixé. →

**EC1**

\_\_\_\_\_ (cours : III)

- <sub>7</sub> Pour une onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle, utiliser la relation entre  $\lambda$  et  $T$  (ou  $f$ ). →

**EC2**

- <sub>8</sub> Exploiter un déphasage dû à la propagation. →

**EC3, TD II**

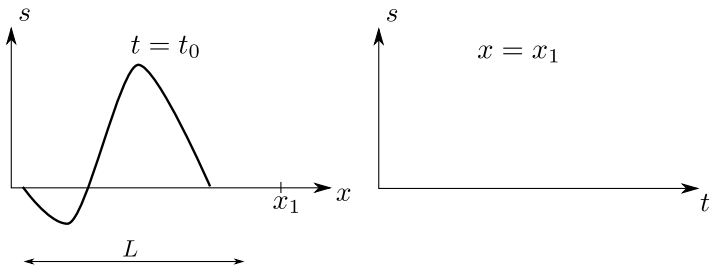
## Exercices de cours

### Exercice C1 – Pour une onde progressive, prévoir l'évolution à $t$ fixé ou à $x$ fixé

On considère l'onde progressive  $f(x - vt)$  dont le profil au temps  $t_0$  est donné ci-contre.

- 1 - Compléter le schéma de droite avec l'allure de la perturbation observée si l'on se place au point fixe  $x_1$ .
- 2 - Pendant quelle durée voit-on l'onde passer en ce point ?

(voir animation 1 sur le site de la classe)



### Exercice C2 – Utiliser la relation entre $\lambda$ et $T$

On considère des ondes sonores dans l'air à température et pression ambiantes.

- 1 - Rappeler l'ordre de grandeur de la célérité de ces ondes.
- 2 - Rappeler le domaine de fréquence audible par l'homme.
- 3 - En déduire les longueurs d'onde associées aux fréquences maximales et minimales.

Autres questions possibles : on considère maintenant des ondes électromagnétiques.

- 4 - Quelle est la fréquence d'une onde lumineuse de longueur d'onde 500 nm ?
- 5 - Quelle est la longueur d'onde d'une onde radio de 100 MHz ?

### Exercice C3 – Exploiter un déphasage dû à la propagation

Considérons une onde progressive harmonique produite par un haut parleur et se propageant dans le sens des  $x$  croissants. Sa forme est du type

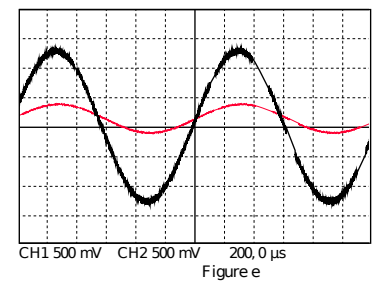
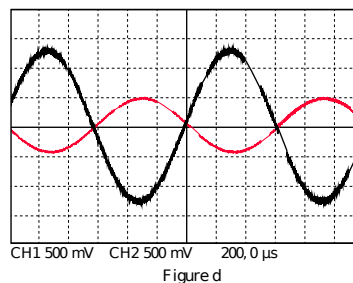
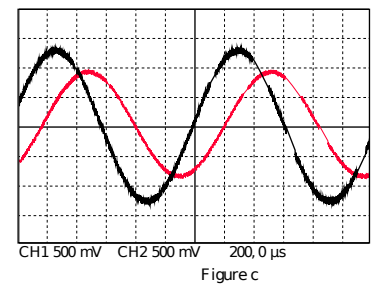
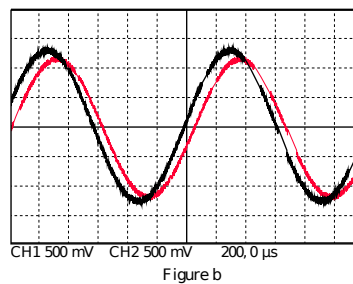
$$s(x, t) = S_0 \cos(\omega t - kx + \varphi).$$

Deux microphones sont placés à deux positions  $x_1 = 0$  fixe, et  $x_2 > 0$  fixe mais pouvant être déplacé, et enregistrent les signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ .

- 1 - Donner l'expression des signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$  enregistrés par chaque micro.
- 2 - Donner les expressions de leur phase à l'origine. En déduire le déphasage  $\Delta\varphi_{12}$  de 2 par rapport à 1. L'exprimer en fonction de  $\lambda$ .
- 3 - Établir une condition sur  $x_2$  et  $\lambda$  pour que les signaux soient en phase. Même question pour l'opposition de phase.
- 4 - On donne ci-dessous des relevés de l'enregistrement de  $s_1(t)$  (en noir, courbe la plus à gauche) et de  $s_2(t)$ .

La figure b correspond à  $x_2$  proche de 0. La figure c à  $x_2 = 6,7$  cm, la d à  $x_2 = 21$  cm et la e à  $x_2 = 42$  cm.

Déduire de ceci la valeur de la longueur d'onde  $\lambda$ .



# Le cours

## I – Ondes

### Définition : onde

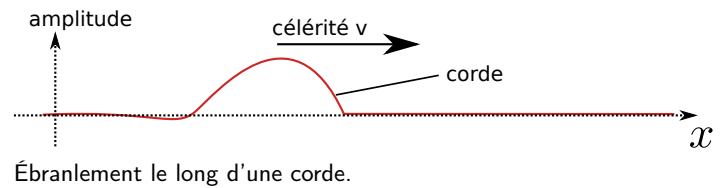
Une onde est la perturbation d'une grandeur physique qui se propage de proche en proche dans un milieu ou dans le vide.

### Propriétés et remarques :

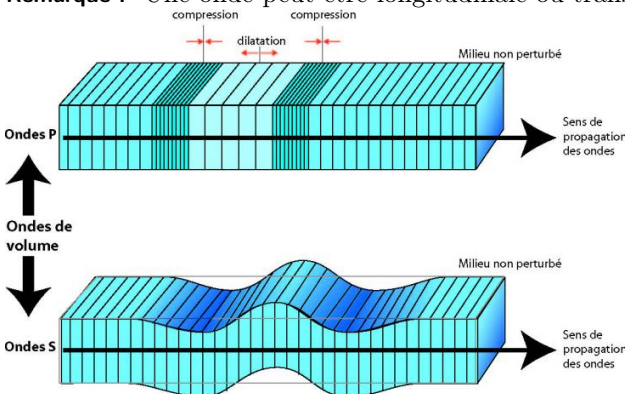
- ▶ Il n'y a pas de transport de matière entre le point d'émission et le point de réception.
- ▶ En revanche, il y a transport d'information et d'énergie.
- ▶ Dans un milieu matériel on parle d'onde mécanique.
- ▶ L'amplitude de l'onde dépend de la position et du temps : c'est une fonction  $s(x,y,z,t)$ . À une dimension :  $s(x,t)$ .



Ondes mécaniques à la surface de l'eau.



Remarque : Une onde peut être longitudinale ou transverse :



- Ondes **transverses** : le déplacement du milieu est perpendiculaire à la direction de propagation. Cas des ondes S ici.
- Ondes **longitudinale** : le déplacement du milieu est dans la direction de propagation. Cas des ondes P ici.

(Ondes P et S correspondent à des ondes sismiques)

## II – Ondes progressives unidimensionnelles

### a/ Manipulation avec un ressort ou une corde

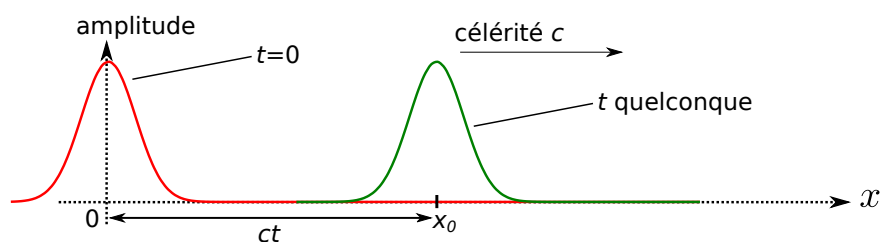
On tend un ressort ou une corde, et on initie une perturbation verticale.

"photographies" à  $t=0$  et  $t$  quelconque

Ci-contre un schéma de la perturbation  $s(x,t)$  à  $t=0$  et à un instant  $t$  quelconque :

Modèle : il n'y a pas de déformation du profil.

→ On appelle alors ceci une onde **progressive**.



**Définition : onde progressive**

Onde progressive unidimensionnelle (ou plane) : onde se propageant sans déformation de son profil.

Mathématiquement, la perturbation s'écrit :

- ▶ Propagation selon les  $x$  croissants : il existe  $f$  telle que  $s(x,t) = f(x - ct)$ .  
(Ou de façon équivalente :  $s(x,t) = f(ct - x)$ , ou  $s(x,t) = f(t - x/c)$ .)
- ▶ Propagation selon les  $x$  décroissants : il existe  $f$  telle que  $s(x,t) = f(x + ct)$ .  
(Ou de façon équivalente :  $s(x,t) = f(ct + x)$ , ou  $s(x,t) = f(t + x/c)$ .)

$x$  est une coordonnée d'un repère cartésien (il peut aussi s'agir de  $y$  ou  $z$ ).

Ce type d'onde est un modèle, bien adapté dans certains cas où la déformation du profil est faible.  
Contre exemple : une onde sphérique, qui se propage à 3D et dont l'amplitude décroît nécessairement.

**b/ Interprétation de la forme en  $f(x - ct)$** 

On reprend l'exemple de la corde ou du ressort (figure précédente)

- Notons  $f(x)$  le profil de la perturbation à  $t = 0$ . Donc  $s(x,t = 0) = f(x)$ .
- À un instant  $t$  quelconque, le profil s'est déplacé d'une distance  $c \times t$ .  
Donc à l'instant  $t$ , le profil est obtenu en translatant le profil  $f(x)$  d'une distance  $a = ct$  vers la droite.
- La fonction qui décrit le profil à l'instant  $t$  est donc  $s(x,t) = f(x - ct)$ .  
(rappel de mathématiques : le graphe de  $x \mapsto f(x - a)$  est obtenu en translatant celui de  $x \mapsto f(x)$  d'une distance  $a$  vers la droite.)

→ Conclusion : la perturbation peut alors s'écrire sous la forme  $h(x,t) = f(x - ct)$ , avec  $f(x)$  le profil pour  $t = 0$  (qui ensuite se propage). C'est ce qui figure dans la définition.

**c/ Célérité****Définition : célérité**

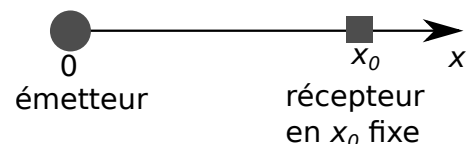
La célérité, ou vitesse de propagation, est la vitesse de déplacement de la perturbation.

**Exemples d'ondes et ordres de grandeurs de célérité :**

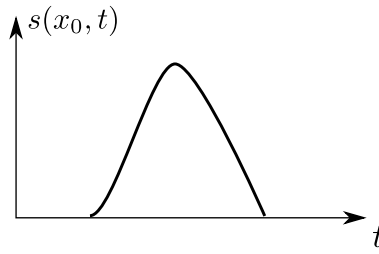
Type de signal	Grandeurs physiques associées (exemples)	Célérité
onde sonore ou acoustique		dans l'air* à $T$ et $p$ ambiants : , dans l'eau : $\simeq 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
onde électromagnétique (dont la lumière)		dans le vide* :
onde électrique dans un câble		$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
onde mécanique à la surface de l'eau ("vagues")	vitesse du fluide $v$ et pression $p$	quelques m/s
ébranlement le long d'une corde	ébranlement $y$ et force de rappel	quelques cm/s à qq m/s

**d/ Profils à  $t$  fixé ou  $x$  fixé**

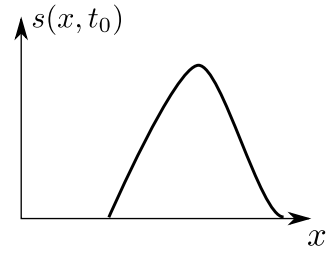
Ne pas confondre l'enregistrement du signal  $s$  qui est reçu au point  $x_0$ , et la photographie du signal à un instant  $t_0$  donné.



→<sub>1</sub> Faire l'EC1, et voir animation 1.



enregistrement de \$s\$ reçu au point \$x\_0\$



photographie de l'onde à un instant \$t\_0\$

### III – Onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle

- Onde *progressive* :  $s(x, t) = f(t - x/c)$ .
- En plus, onde *sinusoïdale* :  $f$  est une fonction cosinus,  $f(u) = s_0 \cos(\omega u + \varphi)$ .

→<sub>2</sub> On a donc :

#### a/ Définition

##### Définition : onde progressive sinusoïdale

Une onde progressive sinusoïdale (ou progressive harmonique, ou progressive monochromatique) s'écrit sous la forme :

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t - kx + \varphi) \quad \text{pour une propagation selon les } x \text{ croissants}$$

amplitude    pulsation    norme du vecteur d'onde    phase à l'origine

(autres écritures équivalentes :  $s_0 \sin(\omega t - kx + \varphi)$  ou  $\cos(kx - \omega t + \varphi)$ )

ou :

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t + kx + \varphi) \quad \text{pour une propagation selon les } x \text{ décroissants.}$$

(autres écritures équivalentes :  $s_0 \sin(\omega t + kx + \varphi)$  ou  $\cos(kx + \omega t + \varphi)$ )

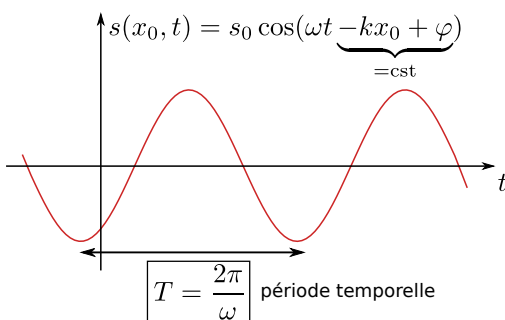
Sa célérité, aussi appelée vitesse de phase, est  $c = \frac{\omega}{k}$ .

→<sub>3</sub> Quelle est la dimension du vecteur d'onde  $k$ ?

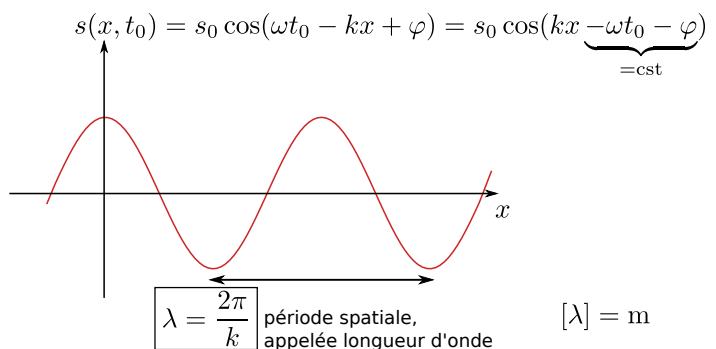
**Remarque :**  $\Phi = \underbrace{\omega t - kx + \varphi}_{\text{tout ce qui est dans le cos}}$  est la phase de l'onde.  $\varphi$  est donc la phase à  $t = 0$  en  $x = 0$ , d'où son nom.

#### b/ Double périodicité

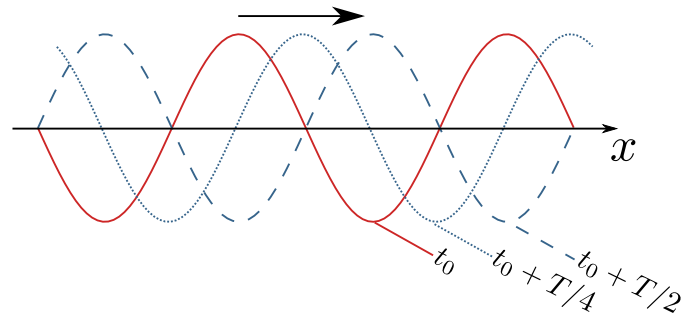
► Enregistrement en  $x_0$  fixé :



► "Photographie" à  $t_0$  fixé :



**Exemple :** Onde plane progressive monochromatique se propageant selon les  $x$  croissants, à différents instants :  
(faire apparaître  $\lambda$  sur le schéma)



→ Voir aussi animation 2 ou 3.

**Remarque :**

- La fréquence est  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ , parfois notée  $\nu$  (lettre grecque “nu”).
- On utilise parfois (rarement) le nombre d’onde  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$  (lettre grecque “sigma”).

**Lien entre  $\lambda$  et  $T$  :**

↪<sub>4</sub>

**c/ Ordres de grandeur**

↪<sub>5</sub> Faire l’EC2.

**d/ Déphasage induit par la propagation**

↪<sub>6</sub> Faire l’EC3.

## IV – Milieux dispersifs

On considère une onde progressive sinusoïdale :  $s(t,x) = s_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$ . Sa célérité, ou vitesse de phase, est  $c = \frac{\omega}{k}$ .

### Définition

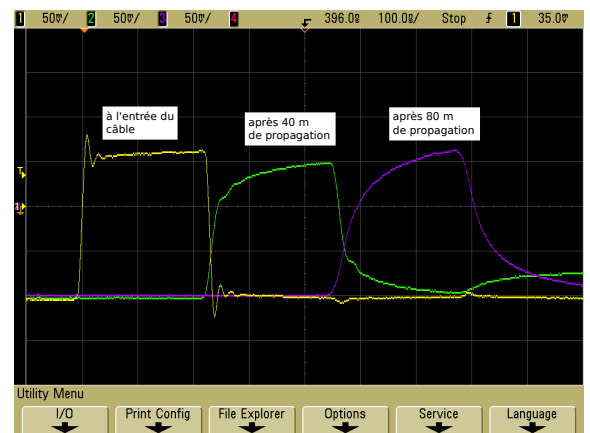
Un milieu est **dispersif** lorsque la vitesse de phase **dépend de la pulsation** :  $c = c(\omega)$ .

- Dans un milieu **non** dispersif, toutes les ondes progressives sinusoïdales se propagent à la même vitesse.
- Dans un milieu **dispersif** ce n’est pas le cas, leur vitesse dépend de leur pulsation.

**Conséquence :** dans un milieu dispersif, une perturbation non sinusoïdale se propage **en se déformant**.

Ceci peut se comprendre en considérant la décomposition de Fourier de la perturbation : chaque harmonique se déplace à une vitesse différente.

Exemple ci-contre : il s’agit du signal enregistré dans un câble coaxial. On voit qu’il se propage en se déformant : la câble est un milieu dispersif.



- Milieux non dispersifs : le vide pour les ondes électromagnétiques, l’air en très bonne approximation pour les ondes sonores.
- Milieux dispersifs : câble coaxial, surface de l’eau pour les ondes de surface, l’eau ou le verre pour les ondes lumineuses (car la célérité de la lumière dépend de sa longueur d’onde, donc de sa pulsation).

**Remarque :** le milieu peut aussi être **absorbant**, ce qui provoque une diminution globale de l’amplitude de l’onde à mesure qu’elle se propage.