# Ondes progressives

## La ola : une onde comme une autre

*Posted on 19 septembre 2007 by Cédric Lémery*

**Qu'est-ce qu'une ola ?**

La réponse dépend du point de vue. Pour un *supporter* « c'est trop délire, comme ça déchire », pour un *biologiste*, il s'agit d'un mouvement coordonné de mammifères, pour un *sociologue*, il s'agit d'un mouvement collectif permettant à des individus de signifier leur appartenance à un groupe social et pour le *physicien*, il s'agit d'une onde.

Rappelons la définition d'une onde selon le programme de sc. physique de Terminale : « ***propagation sans transport de matière d'une perturbation dans un milieu initialement à l'équilibre*** ».

Dans une ola, il y a propagation d'une perturbation (les spectateurs qui se lèvent), sans transport de matière dans un milieu (la foule formée par les spectateurs) initialement à l'équilibre (les spectateurs assis, les bras le long du corps). On y retrouve donc tous les ingrédients d'une onde : une perturbation par rapport à un état d'équilibre et une tendance du milieu à revenir à son état d'équilibre (la ola est lancée lorsque les spectateurs sont au repos : essayez de lancer une ola lorsqu'un but est marqué et que tous les spectateurs sautent et lèvent les bras de manière désordonnée !).

Puisque la Ola est une onde, on peut donc la caractériser comme n'importe quelle onde. Le mouvement des spectateurs étant perpendiculaire au mouvement de propagation de la ola, l'onde est **transversale**. On peut également essayer de définir sa célérité.

Allons, vous plaisantez, tout cela n'est pas sérieux !

Si, si, tout cela est très sérieux et a même fait l'objet d'un article dans Nature (La revue scientifique de référence) : Mexican Waves in an excitable medium. Dans cet article, on y apprend que la célérité de l'onde est de 12 m/s (20 sièges par secondes) et que la perturbation a une largeur de 6 à 12 m (correspondant à 15 sièges). Les auteurs de cet article proposent même une simulation en ligne de leur modèle.

**Source** : https://www.mehdimoussaid.com/pourquoi-la-ola-excite-les-physiciens/

# I. Notion de signal

## 1. Définition

**On appelle signal toute grandeur physique dont la détermination permet d'accéder à une information.**

Quelques exemples :

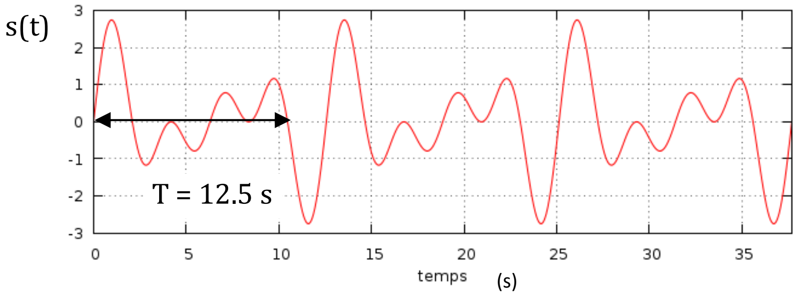
- ✓ Signaux électriques : les tensions et les courants
- ✓ Signaux électromagnétiques : les champs électrique et magnétique

## 2. Signal périodique

### 2.1 Définitions

On dit qu'un signal est périodique lorsque la même forme se répète à intervalle de temps égaux.

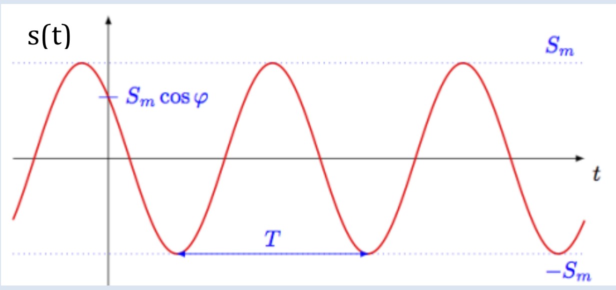
**La période T du signal électrique est le plus petit intervalle de temps au bout duquel se reproduit le signal identique à lui-même : s(t) = s(t + T).**




On appelle **fréquence f** le nombre de périodes par seconde, **f = 1/T**, exprimée en Hertz (Hz).

### 2.2 Cas particulier : le signal sinusoïdal

**Expression générale : $s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi)$**

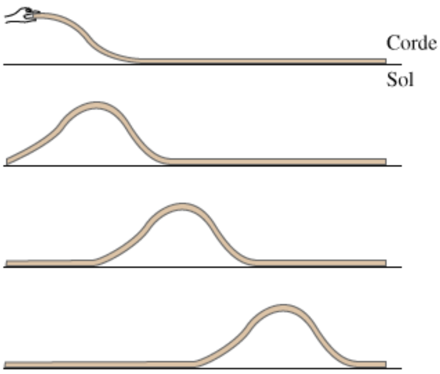



- ✓ **$S_m$ est l'amplitude du signal sinusoïdal**
- ✓ **ω est la pulsation du signal sinusoïdal : $\omega = 2\pi f = \dfrac{2\pi}{T}$**
- ✓ **$(\omega t + \varphi)$ est la phase instantanée (ou phase à l'instant $t$).**
- ✓ **φ est la phase à l'origine (sa valeur est liée au choix de l'origine des temps) : $s(0) = S_m \cos\varphi$**

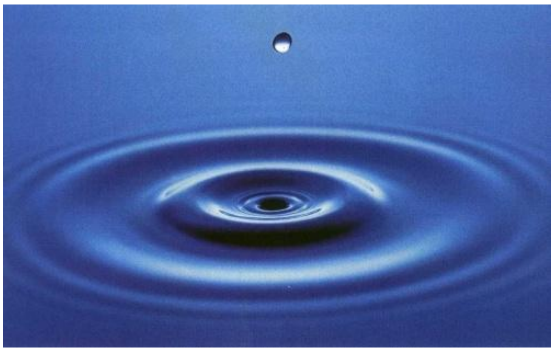
# II. Propagation d'un signal et onde progressive

**Comment véhiculer un signal pour transmettre une information ?**

## 1. Propagation d'une perturbation




Secousse à l'extrémité d'une corde.



Chute d'une goutte d'eau à la surface de l'eau

<u>Observations</u> : la hauteur de la corde et le niveau d'eau sont localement modifiés. Ces perturbations se propagent de proche en proche. Mise à part l'atténuation de la perturbation, le mouvement d'un point est le même que celui de ses prédécesseurs, mais décalé dans le temps.

**On appelle perturbation la modification locale d'une propriété physique à un instant donné.**

Le signal correspond à la grandeur associée à la perturbation en un point donné de l'espace.
*Exemples précédents : hauteur de la corde et niveau d'eau*

## 2. Onde progressive

Une onde est un phénomène physique observé lorsqu'un système subit une perturbation pouvant se propager avec une certaine vitesse. Elle est dite **progressive** si elle se propage dans l'espace à partir d'une source et dans toutes les directions offertes.

Le système revient au repos après passage d'une onde progressive : l'énergie associée à la perturbation se déplace de proche en proche avec l'onde.

**Une onde progressive est le phénomène de propagation d'une perturbation, sans transport global de matière mais avec transport d'énergie et à une vitesse dépendant du milieu dans lequel elle se propage.**

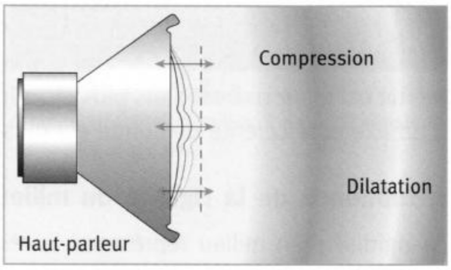
**Les ondes permettent de véhiculer un signal et ainsi de transmettre l'information qu'il contient.**

## 3. Types d'ondes

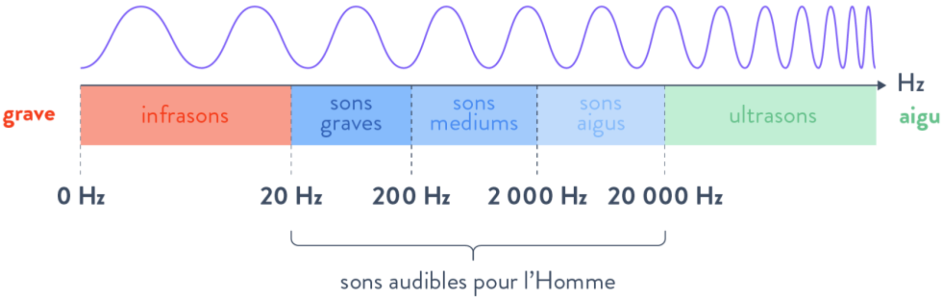
On distingue les ondes mécaniques des ondes électromagnétiques.

✓ Lorsque la perturbation est une **déformation du milieu matériel** lui-même, on parle **d'onde mécanique**. **De telles ondes nécessitent donc un milieu matériel pour se propager**.

Les ondes sonores sont des ondes mécaniques : leur propagation engendre des zones de compression-dilatation dans le milieu qui se transmettent de proche en proche.

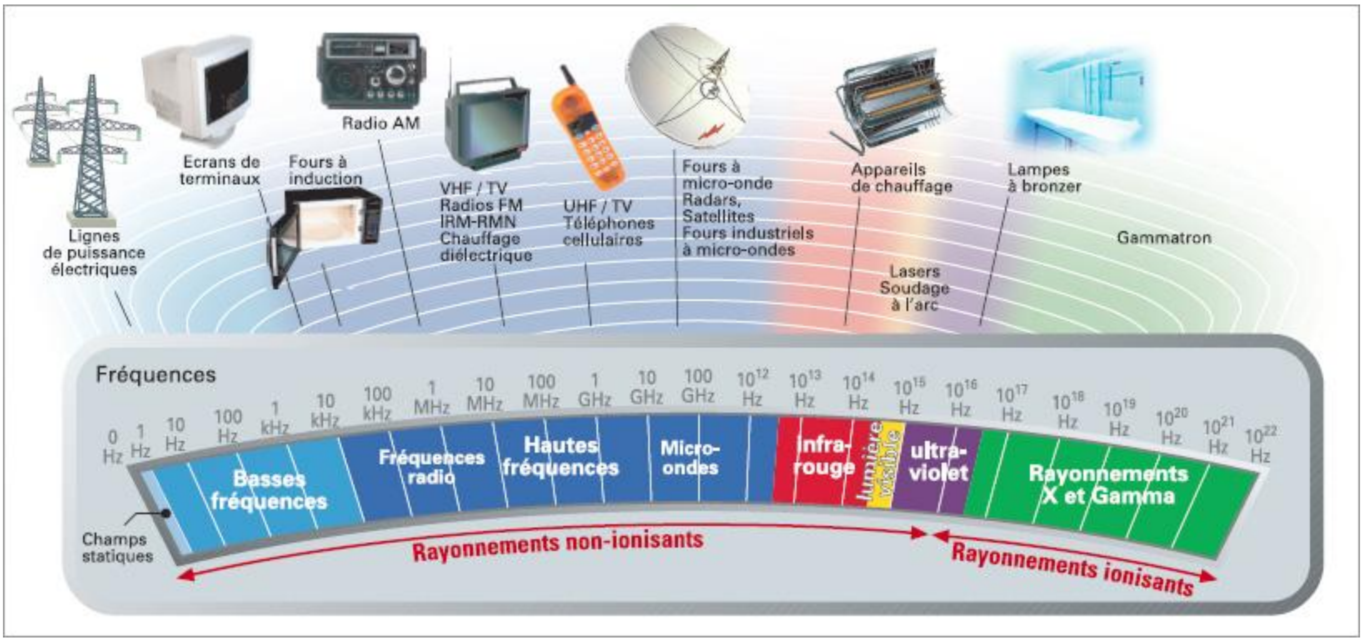



L'ensemble des fréquences pouvant être perçues par un être humain est appelé le "spectre audible". On considère de manière générale que l'ensemble des fréquences acoustiques audibles est compris **entre 20 Hz et 20 kHz.**




- ✓ Une **onde électromagnétique** est quant à elle associée **aux variations du champ électromagnétique** (programme de 2ème année). **Elle peut se propager dans le vide**.

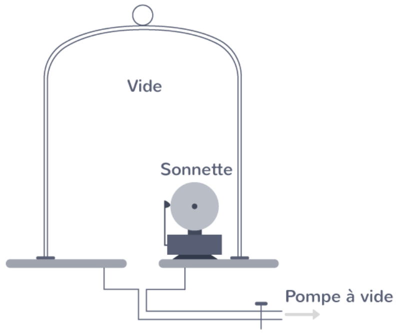
<u>Spectre électromagnétique</u> :




*Quelques ordres de grandeurs à connaître :*

- *Signaux électriques : 50 Hz*
- *Signaux optiques visibles : autour de 500 THz*
- *Wifi : 2.4 GHz et 5 GHz*

On met une sonnette, initialement placée sous une cloche en verre, en marche et on fait progressivement le vide au moyen d'une pompe à vide.

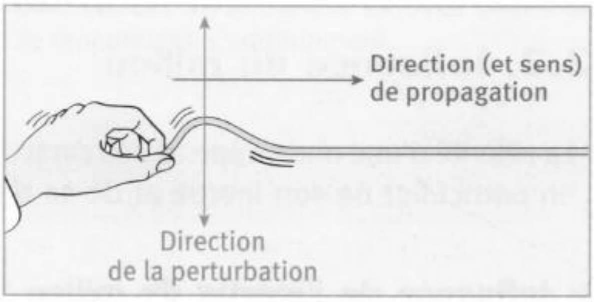



Observations : En l'absence d'air, on voit toujours le réveil mais on ne l'entend plus.

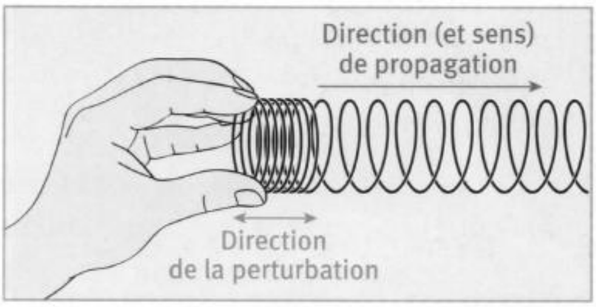
Conclusion : Le son ne se propage pas dans le vide contrairement à la lumière.

On distingue également 2 types d'ondes selon la direction de la perturbation vis-à-vis de celle de la propagation.

**Une onde est transversale lorsque la perturbation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.**




**Une onde est longitudinale lorsque la perturbation s'effectue dans la même direction que celle de la propagation.**




**Lien :**[https://www.youtube.com/watch?v=Rbuhdo0AZDU](https://www.youtube.com/watch?v=Rbuhdo0AZDU), Longitudinal wave using slinky coil - YouTube, Transverse wave using slinky coil - YouTube

*Une onde sonore est-elle transversale ou longitudinale ?*
*même question pour la houle.*

## 4. Célérité

**On appelle célérité de l'onde la vitesse de propagation de l'onde.**

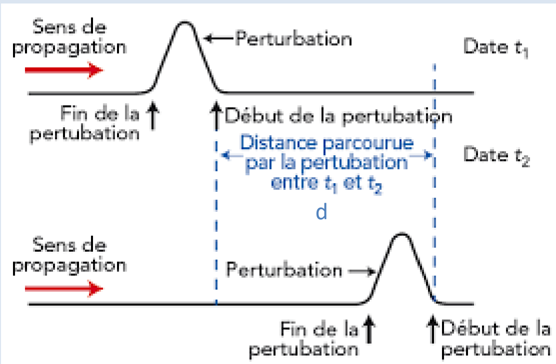
**La célérité est une propriété du milieu de propagation,** elle est constante dans un milieu donné dans des conditions données (température, pression …).

Elle augmente avec la rigidité du milieu et diminue avec son inertie mais est indépendante de l'amplitude de l'onde.

*Exemples : le son se propage à 344 m/s dans l'air à 20°C sous 1 bar, à 332 m/s dans l'air à 0°C sous 1 bar, à 1.5 km/s dans l'eau à 20°C et à environ 5.6 km/s dans l'acier à 20°C.*

**Si la célérité dépend de la fréquence de l'onde, le milieu est dit dispersif.**

**Prenons l'exemple d'une onde mécanique se propageant le long d'une corde. On observe la corde à deux instants différents : $t_1$ et $t_2$.**




**La perturbation s'est déplacée pendant la durée $\Delta t = t_2 - t_1$.**

**Si on note d la distance parcourue par la perturbation pendant la durée $\Delta t$, la célérité est :**

$$c = \frac{d}{\Delta t}.$$

## 5. Représentations spatiales et temporelles

Du fait du phénomène de propagation, le signal est une fonction à la fois du temps et de l'espace !

*Reprenons l'exemple d'une onde mécanique se propageant <u>sans déformation</u> le long d'une corde à la célérité c.*

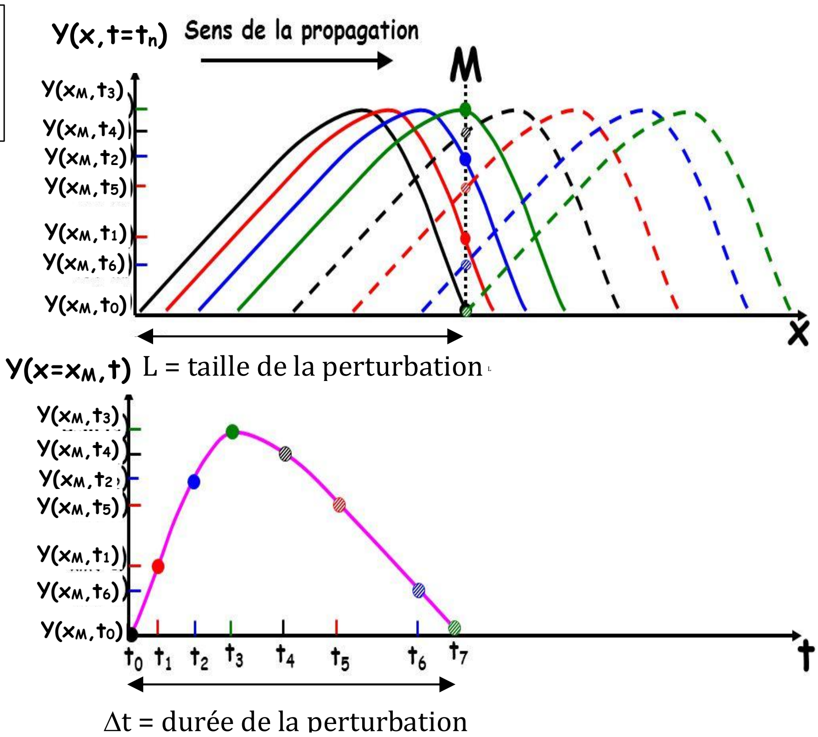
- On peut représenter l'élongation y de la corde telle qu'on la voit réellement dans l'espace à un instant donné (« on prend une photo »), il s'agit d'une **représentation spatiale**.
- On peut aussi la représenter dans le temps en une position donnée M (on fixe un point et on étudie sa position au cours du temps), il s'agit alors d'une **représentation temporelle**.

**Représentation spatiale : on se fixe une date précise** (« photo »), **la courbe représentative est une fonction de l'espace.**

**Représentation temporelle : on étudie le phénomène dans le temps en un point précis, la courbe représentative est une fonction du temps** (chronographe).

**Représentations spatiales**
Allures de la corde en un point M à différents instants $t_n$

**Représentation temporelle**
Position du point M au cours du temps




On voit sur la **représentation temporelle** que le point M est atteint par l'onde à la date $t_0$ et qu'il revient à son état de repos à la date $t_7$ : $\Delta t = t_7 - t_0$ est **durée de la perturbation**.

**La représentation spatiale** permet quant à elle de mesurer la **taille de la perturbation** L.

Pendant la durée $\Delta t$ l'onde parcourt la distance L : si $c$ est la célérité de l'onde, $\mathbf{L = c\,\Delta t}$.

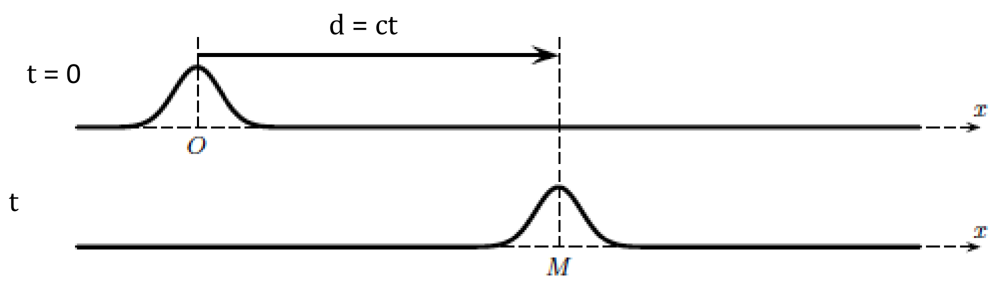
***Remarque : les deux représentations semblent « inversées » mais elles n'ont pas le même « étalement ».***

**Lien :** https://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/meca/ondeprog.html

## 6. Propagation et translation spatiale

**Comment représenter l'évolution spatiale à un instant donné ?**

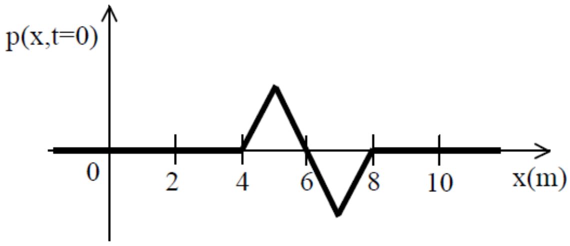
Reprenons encore l'exemple précédent. On prend la corde en photo à t = 0 puis à un instant t quelconque.




Au bout d'un temps t, l'onde s'est déplacée d'une distance d = ct.

**La représentation spatiale à un instant t est obtenue par translation de la représentation spatiale à l'instant t = 0 d'une distance d = ct et dans le sens de la propagation.**

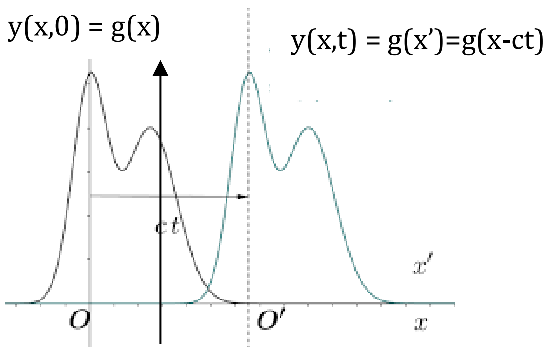
On considère une corde infinie, horizontale, parallèle à l'axe (Ox) et soumise à une onde progressive se propageant à la célérité c = 1 m.s⁻¹ selon l'axe des x croissants. L'allure de la corde à t = 0 est la suivante :




Représenter la corde à la date t = 2 s.

Expression mathématique générale d'une onde progressive à 1 dimension :

Si maintenant on désigne par g(x) la fonction mathématique décrivant la perturbation à t =0 : y(x,0) = g(x), la perturbation se propageant dans le sens des x croissants, la représentation spatiale à l'instant t correspond à la fonction g translatée vers la droite de la distance d parcourue par la perturbation pendant une durée t, telle que d = ct.




Le signal qui se trouve en x à l'instant t se trouvait en x − ct à l'instant t = 0.

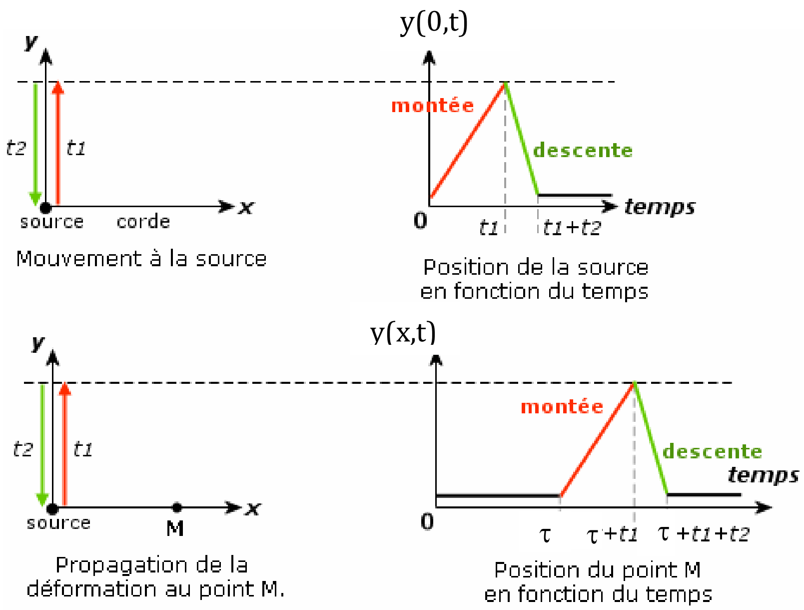
**On obtient la représentation spatiale à un instant t, y(x,t), à partir de g(x) grâce à une translation spatiale :** $\boldsymbol{y(x,t) = g(x-ct)}$**.**

*Dans le cas d'une propagation dans le sens des x décroissants, on a :* $y(x,t) = g(x+ct)$*.*

## 7. Retard et translation temporelle

**Comment représenter l'évolution temporelle en un point donné ?**

Reprenons l'exemple précédent. On considère un point M de la corde situé à une distance x de la source, origine de la perturbation ($x_{source} = 0$). On note y(x,t) l'élévation de la corde en un point M d'abscisse x et à l'instant t, grandeur caractéristique de la perturbation.

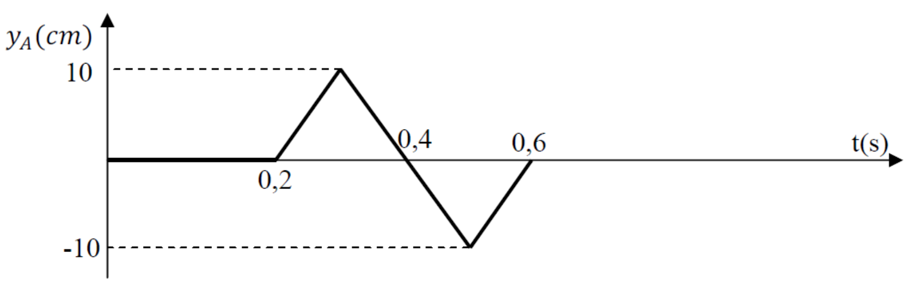



Il faut un certain temps de propagation τ pour que la perturbation atteigne le point M depuis la source.

**Le point M d'abscisse x reproduit le mouvement de la source avec un décalage dans le temps τ, appelé retard, tel que $\tau = \left|\frac{x}{c}\right|$.**

**La représentation temporelle de la perturbation en M, y(x,t), est celle de la source y(0,t) translatée de $\tau = \left|\frac{x}{c}\right|$.**

*On considère une corde infinie, horizontale, parallèle à l'axe (Ox) et soumise à une onde progressive se propageant à la célérité c = 50 m.s⁻¹ selon l'axe des x croissants. En x=0 (point A), on crée le signal suivant :*




*Représenter le signal en un point B, $y_B(t)$, tel que $x_B$ = 10 m.*

Expression mathématique générale d'une onde progressive à 1 dimension :

Si on désigne par f(t) la fonction mathématique décrivant la perturbation en x = 0 : y(0,t)=f(t), la perturbation se propageant dans le sens des x croissants, le signal au point M d'abscisse x et à l'instant t, y(x,t), sera celui en x = 0 à l'instant antérieur t-τ, où τ est le retard tel que $\tau = \frac{x}{c}$ :
$y(x,t) = y(0,t-\tau) = f(t-\tau)$

**On obtient en un point M quelconque d'abscisse x la fonction y(x,t) à partir de f(t) grâce à une translation temporelle : $\boldsymbol{y(x,t) = f(t - x/c)}$.**

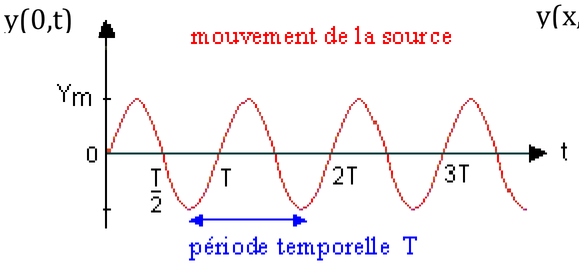
*Dans le cas d'une propagation dans le sens des x décroissants, x est négatif et le retard est $\tau = -\frac{x}{c}$, dans ce cas : $y(x,t) = f\left(t + \frac{x}{c}\right)$.*

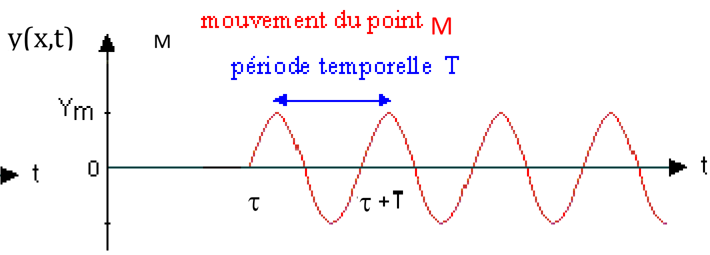
## 8. Ondes progressives périodiques

On s'intéresse au cas particulier d'une onde progressive sinusoïdale. Soit une source S subissant une perturbation périodique sinusoïdale telle que : $y(0,t) = f(t) = Y_m \cos(\omega t + \varphi)$. On note T la période du signal.

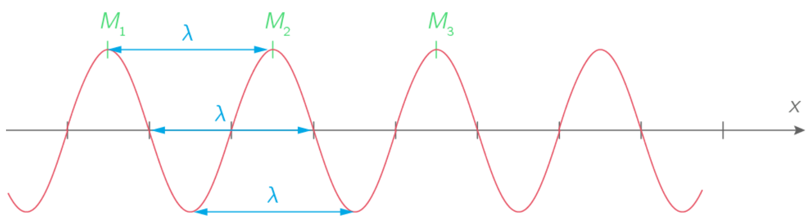
L'onde progressive sinusoïdale se propageant dans le milieu dans le sens des x croissants est telle qu'en un point M d'abscisse x : $y(x,t) = Y_m \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi\right)$.

**Graphiquement, la représentation temporelle en M est identique à celle de la source mais décalée du retard $\tau = \frac{x}{c}$. Le point M a, tout comme la source, un mouvement périodique de période T.**



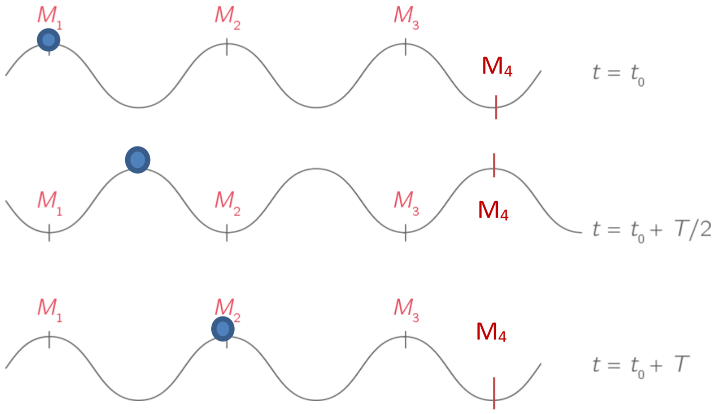




Prenons à nouveau le cas de la corde, on la prend en photo à un instant t. On observe une périodicité dans l'espace : les maximas de la perturbation sont régulièrement espacés d'une distance λ.




**On appelle longueur d'onde λ la période spatiale de l'onde progressive périodique,** c'est la distance minimale séparant deux points de l'espace dans un même état.

On photographie la corde à 3 instants différents espacés d'une demi période. On suit la propagation de l'onde durant une période.




**La longueur d'onde est égale à la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période : $\lambda = c\,T$**

On remarque que les points $M_1$, $M_2$ et $M_3$ vibrent en phase alors que les points $M_1$ et $M_4$ vibrent en opposition de phase.

**2 points distants de $p\lambda$ ($p \in \mathbb{N}$) vibrent en phase.**

**2 points distants de $p\lambda + \frac{\lambda}{2}$ ($p \in \mathbb{N}$) vibrent en opposition de phase.**

**Liens :**
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/cuve_ondes/index.php
http://www.ostralo.net/3_animations/swf/cuve_ondes_circulaires.swf