

# Ondes progressives

## I Introduction

### A Signal

Les signaux constituent l'essence même de l'Univers physique.

On appelle **signal** une grandeur physique mesurable pouvant varier dans le temps et qui transporte une information.

- Signal **sonore** : voix, instrument de musique ;
- Signal sismique ;
- Signal électrique. . .

À noter que la notion de signal ou d'information **dépend de l'observation**. Les ondes radio servent bien sûr à écouter la radio, mais au départ leur découverte était perturbée par le premier signal lumineux de l'Univers, le fond diffus cosmologique : il baigne la totalité de l'Univers et est fondamental dans la cosmologie, mais peut être parasite selon l'objectif.

### B Perturbation

Une **perturbation** est une modification locale et temporaire des propriétés d'un milieu.

- Jet d'un caillou dans un lac ;
- Séisme ;
- Déplacement de la membrane d'un haut-parleur. . .

Une perturbation, quand elle est créée, se propage autour d'elle de proche en proche : chaque point impacté va subir des modifications temporaires similaires à celle de la source. Après le passage de cette perturbation, chaque point retrouve sa position initiale.

### C Onde

On appelle **onde** la propagation d'une perturbation, dans un milieu matériel ou dans le vide.

Certaines ondes ont besoin d'un milieu matériel pour se propager : ce sont les ondes **mécaniques**. Les ondes sismiques, les ondes dans la corde ou les ondes sonores en sont des exemples. Certaines ondes peuvent se propager dans le vide, comme les ondes **électromagnétiques**. Les infrarouges, la lumière visible ou les micro-ondes sont des exemples d'ondes électromagnétiques.

- Le caillou dans le lac forme des rides qui s'éloignent du point d'impact, mais il n'y a **pas de mouvement d'ensemble du fluide**.
- La membrane du haut-parleur, lors de son déplacement elle provoque une brève

**compression-dilatation** de l'air qui la touche. Cette propagation se déplace ensuite dans l'air : ce sont les ondes sonores. Elles peuvent aussi se déplacer dans les liquides et dans les solides.

## D Perturbation et propagation

La perturbation se propageant peut être soit parallèle, soit perpendiculaire à la direction de propagation. On distingue donc :

Définition

- **Onde transversale**<sup>a</sup> : la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation ;
- **Onde longitudinale**<sup>b</sup> : la perturbation est parallèle à la direction de propagation.

a. [https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde\\_transversale.php](https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde_transversale.php)

b. [https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde\\_longitudinale.php](https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/general/onde_longitudinale.php)

Exemples

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>— <b>Longitudinales</b> :</li> <li>• Certaines ondes sismiques ;</li> <li>• Contraction-élongation d'un ressort.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>— <b>Transversales</b> :</li> <li>• Mouvement d'une corde secouée ;</li> <li>• Vagues sur l'eau.</li> </ul> |
|--|--|

## II Onde progressive à une dimension

### A Définition

Définition

Une onde est dite **progressive** si sa propagation ne se fait que **dans un seul sens depuis sa source**. À un instant ultérieur, on retrouve la perturbation *à l'identique plus loin*.

Elle est dite **à une dimension** si c'est :

- une onde qui se propage dans un milieu matériel à une dimension ;
- ou une onde qui se propage dans un milieu matériel à deux ou trois dimensions, avec une direction de propagation unique.

Exemples

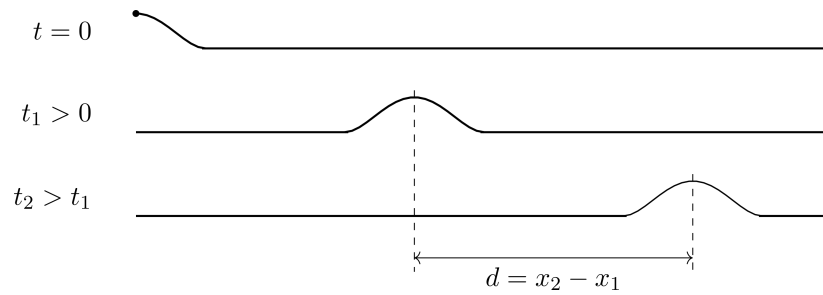
- **1D** : onde le long d'une corde, compression le long d'un ressort ;
- **2D** : vagues sur l'eau ;
- **3D** : son, lumière.

### B Représentation spatiale et célérité des ondes

On fixe le temps et on observe le milieu dans sa dimension de propagation : c'est une représentation **photographique**.

Définition

Dans une représentation **spatiale**, on regarde à un **temps fixé** la perturbation dans **tout l'espace**.



Lorsqu'une onde se propage, on peut définir une vitesse de propagation de la perturbation. Pour la distinguer de la vitesse d'un point matériel, on emploie plutôt le terme célérité. Par convention, celle-ci est toujours positive.

Définition

La célérité  $c$  d'une onde est le quotient de la distance  $d$  parcourue par la perturbation, sur l'intervalle de temps  $\Delta t$  que dure ce parcours :

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

Sur le schéma précédent,

$$c = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

En première approximation, la célérité ne dépend pas de la perturbation mais seulement de la nature et des propriétés du **milieu**.

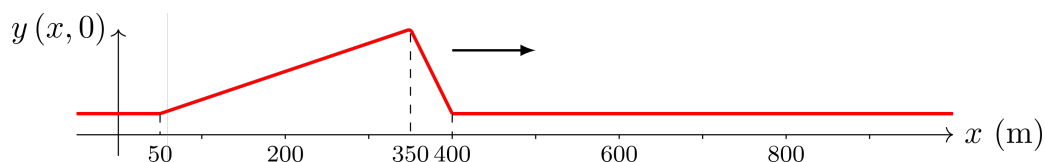
**Tableau 1.1** – Ordres de grandeur de célérité à connaître

Signal	Célérité
Ondes électromagnétiques	$3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Son dans l'air (20 °C, 1 bar)	$\approx 340 \text{ m s}^{-1}$
Son dans les métaux	quelques $\text{km s}^{-1}$
Son dans l'eau	$1,5 \text{ km s}^{-1}$

Application

Un mascaret est une vague solitaire remontant un fleuve au voisinage de son estuaire, et provoqué par une interaction entre son écoulement et la marée montante. On considère ici un mascaret qui se déplace à la vitesse  $c = 18 \text{ km h}^{-1}$  le long d'un fleuve rectiligne, et on définit un axe  $(Ox)$  dans la direction du sens de sa propagation.

À l'instant  $t = 0$ , le profil du niveau de l'eau du fleuve a l'allure suivante :



Faire un schéma du profil du fleuve à  $\tau = 1 \text{ min}$  en supposant que l'onde se propage sans déformation.

## C Représentation temporelle et retard

Définition

On crée à l'instant  $t = 0$  une déformation à un endroit  $M$ . Cette perturbation se propage le long de la corde avec une célérité  $c$ . Elle parvient en un point  $M_0$ , situé à une distance  $D$  de  $M$  à :

Définition

Application

On reprend l'exemple de la vague précédente.

- 1) À quel instant la vague arrive-t-elle au point d'abscisse  $x_1 = 2,2 \text{ km}$  ?
  
- 2) Un détecteur fixe, enregistrant la hauteur du fleuve en fonction du temps, est pacé à l'abscisse  $x_d = 1,6 \text{ km}$ . Dessiner l'allure des variations  $y(x_d, t)$  en fonction du temps à cette abscisse.

## D Lien entre les représentations

Nous avons vu deux représentations graphiques différentes, une selon l'espace et une selon le temps. En réalité, le signal d'une onde est une fonction de **deux** variables :

$$y(x, t)$$

Pour obtenir l'une au l'autre des représentations, on fixe l'une des variables. Une animation sur les représentations temporelles et spatiales est disponible au lien suivant : <https://www.geogebra.org/m/RkmRF9M6>

## E Formes mathématiques des représentations

### II.E.1 À partir de la représentation spatiale

L'onde observée à  $t = 0$  se déplace vers la droite. À l'instant  $t$ , elle est décalée vers la droite de  $\delta = ct$  : la valeur de  $y(x, t)$  en  $x$  et à l'instant  $t$  était en  $x - ct$  à l'instant  $t = 0$ , soit :

On note alors  $f(x) = y(x, 0)$  : c'est la représentation spatiale de l'onde à  $t = 0$ . On a alors

### II.E.2 À partir de la représentation temporelle

Lorsqu'une onde se propage sans atténuation ni déformation, les valeurs observées en  $x = 0$  au cours du temps sont aussi observées en  $x > 0$  mais avec un retard lié à la propagation. La valeur de  $y(x, t)$  en  $x$  à l'instant  $t$  était en  $x = 0$  plus tôt, à l'instant  $t - x/c$ . Ainsi,

La fonction  $y(0, t)$  est la hauteur de la perturbation en  $x = 0$  à l'instant  $t$  : c'est la perturbation imposée par la source. On la note alors  $g(t) = y(0, t)$  : c'est la représentation temporelle de l'onde à  $x = 0$ . On a alors

Conclusion

La représentation temporelle en  $x_0$  est le graphique de la fonction  $t \mapsto y(x_0, t)$ , soit :

$$t \mapsto f(x_0 - ct) = g\left(t - \frac{x_0}{c}\right)$$

La représentation spatiale en  $t_0$  est le graphique de la fonction  $x \mapsto y(x, t_0)$ , soit :

$$x \mapsto f(x - ct_0) = g\left(t_0 - \frac{x}{c}\right)$$

Si l'onde se propage vers la gauche, le raisonnement est le même : on remplace  $x - ct$  par  $x + ct$ , et  $t - x/c$  par  $t + x/c$ .

## III Onde progressive sinusoïdale

### A Définition

Si on relie un haut-parleur à un GBF délivrant une tension sinusoïdale, on observe le mouvement périodique dont est animé la membrane de l'air, qui génère une perturbation périodique de l'air.

L'exemple du diapason étudié au DS03 est également une onde progressive sinusoïdale : lorsque l'on frappe le diapason, celui-ci vibre à une fréquence bien déterminée, qui se propage ensuite dans l'air pour parvenir à nos oreilles.

## B Double périodicité spatiale et temporelle

### III.B.1 Observations sur l'animation Geogebra

### III.B.2 Périodicité temporelle

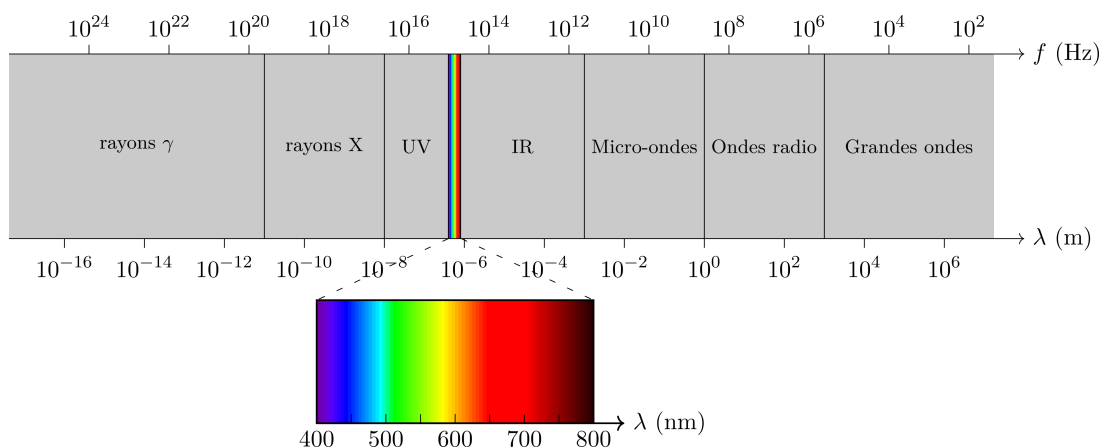
Si la perturbation créée en S est sinusoïdale avec une période  $T$ , alors l'onde en M l'est également (il n'y a qu'un retard entre les deux dû à la propagation).

### III.B.3 Périodicité spatiale

Au moment de l'émission du deuxième maximum, le premier maximum a déjà parcouru une distance  $cT$ . L'écart entre deux maximum successifs est la période spatiale soit :

$$\lambda = cT$$

Cette relation ne vous est sûrement pas inconnue : c'est de cette manière qu'on définit à la fois la fréquence (temporelle) et la période (spatiale) d'une onde électromagnétique, donnant les domaines connus rappelés ci-dessous :



## C Expression mathématique de l'onde progressive sinusoïdale

Par définition, la perturbation  $g(t)$  imposée en  $x = 0$  est un signal sinusoïdal :

Ainsi,

Définition

Comme pour la fréquence et la pulsation, on relie la longueur d'onde à une autre grandeur permettant une expression simple dans une fonction sinusoïdale : le **vecteur d'onde**  $k$ , tel que

Propriété

L'expression générale d'une onde progressive sinusoïdale se propageant sans déformation ni atténuation est :

Application

On peut vérifier la double périodicité de l'onde ( $T$  et  $\lambda$ ). Vérifier par exemple la périodicité spatiale.

## D Vitesse de phase

Soit une onde progressive sinusoïdale. La **phase** de l'onde est, par définition, le terme à l'intérieur de la fonction :  $\omega t - kx + \varphi$ . Cette phase varie spatialement et temporellement, de manière corrélée. Si on trouve une phase mesurée en  $x_1$  à l'instant  $t_1$ , le signal aura la même phase en  $x_2$  à un instant  $t_2$  donnés par la **vitesse de phase**, notée  $v_\varphi$ , telle que :



## IV Milieux dispersifs

### Définition

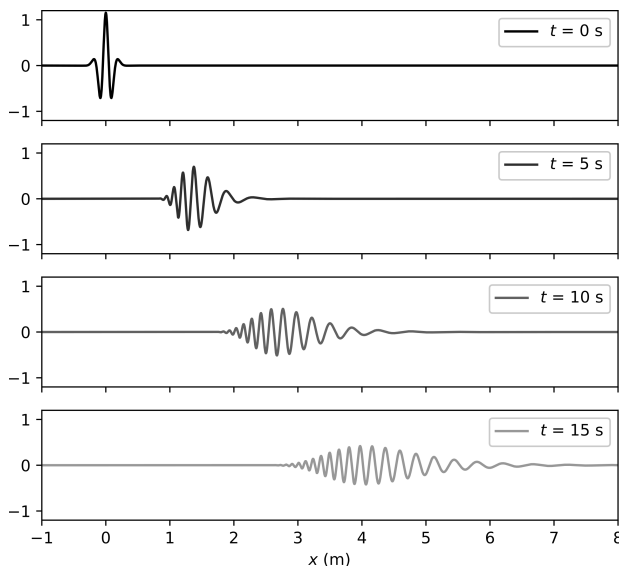
Un milieu est dit **dispersif** si

Si c'est le cas, les différentes composantes spectrales d'un signal ne vont pas à la même vitesse, et donc le signal peut se déformer lors de la propagation.

### Exemples

#### Propagation non-dispersive

#### Propagation dispersive



**FIGURE 1.1** – Propagation dispersive d'une onde à la surface de l'eau. On observe nettement que les composantes sinusoïdales de hautes fréquences se propagent avec une moins grande vitesse que les composantes de basses fréquences. En ordonnée, l'unité de la hauteur d'eau est arbitraire.