Chapitre 4 - Propagation d'un signal

Dans ce chapitre, nous allons étudier **les signaux** et déterminer leur lien avec **les ondes**. Auparavant, nous avons déjà rencontré un premier type d'ondes : les ondes électromagnétiques, et parmi elles, la lumière. Mais les ondes et les signaux ne se limitent pas au domaine électromagnétique.

Après avoir recensé **différentes natures d'ondes et de signaux**, et constaté que nous avons déjà étudié quelques signaux dans les chapitres précédents sans l'avoir explicitement dit, nous étudieront **le phénomène de propagation** des ondes et des signaux. Nous nous concentrerons alors sur un type d'onde particulier : **les ondes sinusoïdales**.

En utilisant ce type d'onde comme modèle, nous pourrons ensuite nous intéresser aux **phénomènes d'interférences** entre deux ondes.

Leçon I. Ondes et signaux

Une créature sensible est par définition capable d'appréhender les phénomènes qui l'entourent grâce à ses sens. Ces phénomènes se caractérisent par des grandeurs physiques. Les organes sensoriels ont pour but de transcrire ces grandeurs physiques en d'autres grandeurs physiques compréhensibles par le cerveau, afin d'en tirer **une information** sur son environnement. **On appelle signal, toute grandeur physique dépendant du temps dont la détermination permet d'accéder à une information.** La pression au niveau du tympan humain est un signal transcrit en une variation de potentiel électrique qui se propage le long du nerf jusqu'au cerveau, qui interprète ces variations en message : le cerveau récolte des informations auditives. On peut noter que le potentiel électrique, puisqu'il permet de véhiculer une information, est aussi un signal. On peut considérer les organes sensoriels des êtres vivants comme des appareils capables de transformer des signaux en d'autres grandeurs physiques. On nomme de tels appareils **des transducteurs**.

Les signaux sont donc des éléments essentiels de notre vie. D'autant plus que la technologie permet aujourd'hui à l'humain d'exploiter d'autres signaux que ceux exploitables par ses cinq sens : par exemple, on peut mesurer des signaux électriques ou observer des radiations invisibles à l'œil nu grâce à des transducteurs particuliers.

Néanmoins, afin qu'un signal puisse être détecté, par nos sens ou à l'aide d'un instrument, il doit se propager. Or, il existe un phénomène que l'on retrouve dans tous les domaines de la Physique (mécanique, électromagnétisme, thermodynamique, physique quantique, etc.) permettant de propager des signaux : la génération d'**une onde progressive**.

I.1. Différents types d'ondes et de signaux

Prenons deux microphones distants d'une longueur d. Ces micros transcrivent un signal sonore en une tension qu'on observe sur chacune des voies d'un oscilloscope réglé en mode "déclenchement" (l'oscilloscope ne fait qu'une acquisition à partir du moment où un seuil de tension est dépassé).

On produit un son. On observe une augmentation de la tension mesurée par l'oscilloscope sur chacune des voies. Cette augmentation est la transcription du son par les micros. Or, l'augmentation n'a pas lieu au même moment pour les deux micros : il y a un retard τ. On peut interpréter ce retard par le fait que le son se déplace à une vitesse finie $c = d/\tau$: **le signal sonore se propage**.

Le phénomène qui permet au signal de se propager est l'onde acoustique.

I.1.a Une classification des d'ondes

Reprenons la définition de l'onde que nous avions introduite dans le chapitre 1.

♥ Définition

Une onde est le déplacement d'une perturbation locale dans l'espace sans qu'il y ait déplacement de matière globale.

Mais qu'est-ce qui est perturbé ? **Ce qui est perturbé, ce sont un ou des champs**. Un champ désigne une grandeur physique présente en tout point de l'espace. Lorsque la valeur d'un champ en un endroit varie, est perturbé, cette variation se propage alentours.

Dans le cas de l'onde acoustique que nous avons mis en évidence précédemment, les champs perturbés sont le champ de pression : la valeur de la pression au niveau d'une enceinte ou de cordes vocales ; et le champ de vitesse des molécules d'air : la valeur de la vitesse locale des particules d'air est modifiée au niveau d'une enceinte ou de cordes vocales.

Il existe deux types de champs : **les champs scalaire et vectorielle**. La pression est une grandeur scalaire, à chaque point de l'espace on peut associer une valeur de pression, mais pas de direction ni de sens : le champ de pression est qualifié de scalaire. La vitesse est une grandeur vectorielle, à chaque point de l'espace on peut associer une valeur, une direction et un sens de vitesse : le champ de vitesse est qualifié de scalaire.

Le diagramme présenté sur la Figure 4.1 décrit cinq grands types d'onde à connaître : les ondes mécaniques, élastiques, acoustique, électromagnétiques et gravitationnelles.

On peut séparer tous les types d'ondes en deux autres familles : **les ondes transverses et les ondes longitudinales**.

☛ *Nota bene*

Parmi **les ondes mécaniques**, il existe un autre type d'onde qui nous est familier : **les ondes de surface** qui sont **présentes seulement au niveau de la surface libre d'un liquide ou d'un solide**. Un exemple d'ondes de surface est la houle. Le vent souffle sur la surface de l'eau ce qui perturbe le champ de vitesse des particules d'eau et le champ de pression dans l'eau. Plus les particules sont proches de la surface et plus leur vitesse est perturbées. Comme les particules oscillent de haut en bas et d'avant en arrière par rapport à leur position d'équilibre **l'onde de surface est une onde à la fois transverse et longitudinale**. Un autre exemple d'onde de surface est l'onde de Rayleigh qui correspond à une onde sismique se propageant à la surface des solides, et qui est à la fois transverse et longitudinale.

Des animations schématisant la propagation d'une onde transverse, d'une onde longitudinale et d'une onde de surface sont disponibles sur le site de Daniel Russel à l'université de Pennsylvanie.

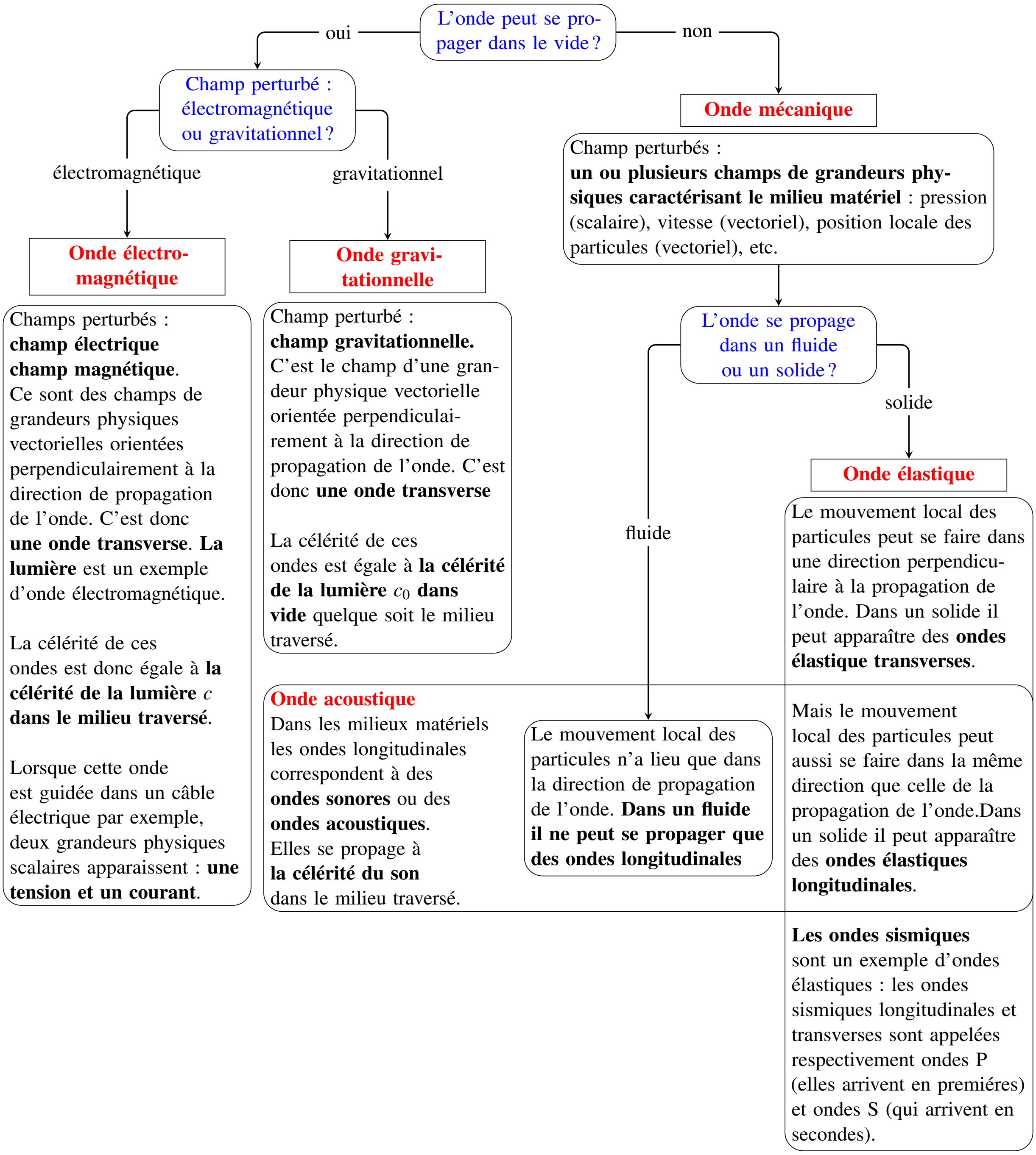
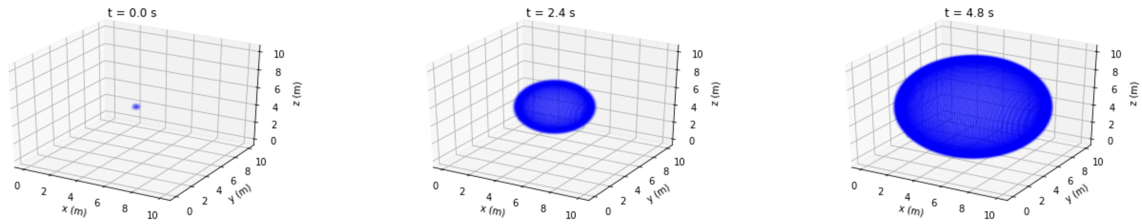


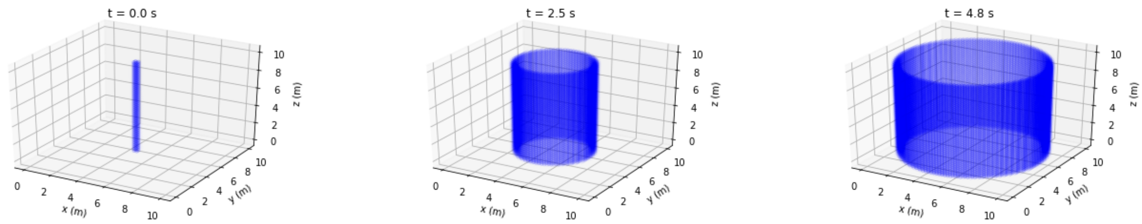
FIGURE 4.1 – Les différentes natures d'onde selon le type de champs perturbés.

Les géométries ou formes d'onde sont très variées, nous n'étudierons que des formes particulières : les ondes sphériques, cylindriques et planes, comme illustré Figure 4.2, Figure 4.3 et Figure 4.4.



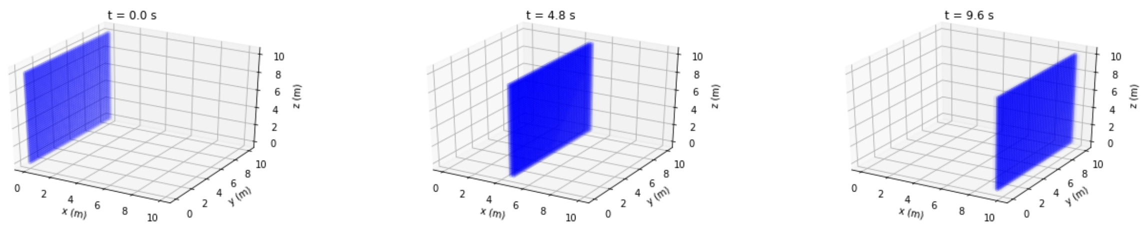
(a) (b) (c)

FIGURE 4.2 – Propagations d'une onde sphérique divergente.



(a) (b) (c)

FIGURE 4.3 – Propagations d'une onde cylindrique divergente.



(a) (b) (c)

FIGURE 4.4 – Propagations d'une onde plane.

I.1.b Signaux physiques

♥ Définition

Nous avons vu en préambule qu'**un signal** désignait toute grandeur physique dépendant du temps dont la détermination permettait d'accéder à une information. Plus précisément, cela désigne toute grandeur physique dont la valeur n'est plus nulle du fait du déplacement d'une perturbation.

Citons quelques exemples de **signaux physiques** et quelques-uns de **leurs capteurs** en fonction de la nature des ondes qui les produisent.

Un des signaux physiques exploitable lors de la propagation d'une **onde électromagnétique** est la **variation du champ électromagnétique**. Cette variation peut-être convertie par un transducteur, qu'on appelle **antenne**, en d'autres signaux exploitables que sont la variation de tension et la variation de l'intensité du courant. Ces deux derniers signaux sont qualifiés de **signaux électriques**.

Les signaux associés à la propagation d'une **onde mécanique** sont qualifiés de **signaux mécaniques**. Ils peuvent correspondent à la variation de la position, de la vitesse ou de l'accélération d'un corps. Les transducteurs que sont le **capteur de position**, le **capteur de vitesse** et l'**accéléromètre** permettent de convertir ces signaux mécaniques en signaux électriques. Le sismographe est un capteur de position particulier utilisé pour détecter les ondes sismiques.

Les signaux associés à la propagation d'une **onde acoustique** sont qualifiés de **signaux acoustiques**. Ils correspondent à la variation de vitesse des particules du fluide et de la variation de pression dans le fluide (appelée également surpression). La variation de pression étant plus facile à mesurer, ce sont généralement des **capteurs de variation de pression** qui sont utilisés pour détecter les ondes acoustiques.

Le signal associé à la propagation d'une **onde gravitationnelle** est la **déformation de l'espace-temps**. Le passage d'une onde gravitationnelle provoque la déformation de l'espace dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation. En comparant la durée du trajet de la lumière dans cette direction et dans la direction de propagation, on voit apparaitre une différence de durée à l'occasion du passage de l'onde : c'est ce principe qui est exploité par **l'interféromètre** Virgo, présenté Figure 4.5, et qui est, par définition, un capteur de déformation.

FIGURE 4.5 – Photo aérienne de l'interféromètre Virgo à Santo Stefano en Italie (le bras ouest d'une longueur de 3 km est visible en entier) [1].

I.2. Onde progressive

Les ondes peuvent se propager selon différentes dimensions. Les ondes acoustiques sphériques sont des **ondes tridimensionnelles** se propageant dans toutes les directions de l'espace.

Les ondes de surface ne se propagent que sur la surface libre d'un liquide ou d'un solide, ce sont donc des **ondes bidimensionnelles** se propageant dans un plan.

L'onde se propageant le long d'une corde est une **onde unidimensionnelle**. On va se limiter à ce cas afin de d'obtenir deux expressions d'une onde progressive.

1. Source : wikipédia.

I.2.a Première expression

Considérons une onde se propageant le long d'une corde sans déformation et sans atténuation avec une célérité c, comme cela est représenté sur cette animation. La corde est alignée sur la direction d'un axe Ox. On modélise l'onde par une fonction $s(x,t)$, car l'onde perturbe un certain point x de la corde à un certain instant t. Étudions l'onde lorsque son maximum S passe à un certain point x_0 de la corde à un certain instant t_0, et lorsque son maximum passe à un certain point x_1 de la corde à un certain instant t_1, c'est-à-dire, étudions $S = s(x_0,t_0)$ et $S = s(x_1,t_1)$. Si on considère que l'onde vient des x négatifs et que $x_0 < x_1$, on peut représenter $s(x,t)$ à x_0, t_0 et à x_1,t_1 comme cela est fait sur la Figure 4.6.

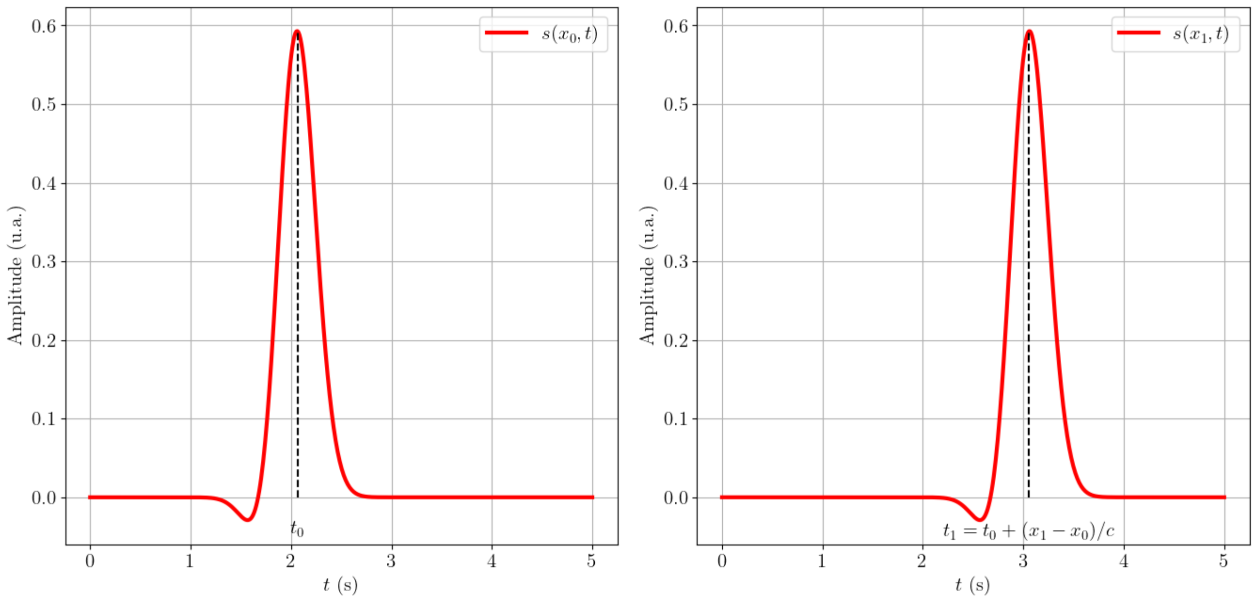


FIGURE 4.6 – Représentations de la fonction $s(x,t)$ au point x_0 par rapport à t et de la fonction $s(x,t)$ au point x_1 par rapport à t.

Si l'on veut représenter la variation de $s(x,t)$ uniquement au point x_0 par rapport aux instants t, on associe la fonction $s(x_0,t)$ à une fonction $f(t)$: comme on a fixé $x = x_0$, $f(t)$ ne dépend que du temps.

Or, comme l'onde se propage des x négatifs vers les x positifs, il apparait que l'onde se déplace de x_0 à x_1 après une durée $t_1 - t_0$, durée que l'on peut voir comme un retard qui est tel que

$$t_1 - t_0 = \frac{x_1 - x_0}{c}.$$

On peut ainsi exprimer t_1 tel que $t_0 = t_1 - \frac{x_1 - x_0}{c}$.

Le maximum S de l'onde se trouve en x_0 à t_0, puis en x_1 à t_1, soit

$$S = s(x_0,t_0) = s(x_1,t_1)$$

ou encore

$$S = s\left(x_0, t_1 - \frac{x_1 - x_0}{c}\right) = s(x_1,t_1).$$

D'après cette relation, on voit que si on représente la variation $s(x,t)$ uniquement au point x_1 par rapport aux instants t, cette variation $s(x_1,t)$ au point x_1 est égale à la variation $s(x_0, t - \frac{x_1 - x_0}{c})$, soit la variation $s(x,t)$ au point x_0, mais retardé d'une durée $\frac{x_1 - x_0}{c}$.

Or on a introduit la fonction $f(t)$ permettant de représenter la variation $s(x,t)$ en un point précis et uniquement par rapport à t. On peut l'utiliser pour décrire la variation $s(x,t)$ au point x_1, car on voit que

$$s(x_1,t) = s\left(x_0, t - \frac{x_1 - x_0}{c}\right) = f\left(t - \frac{x_1 - x_0}{c}\right).$$

Ainsi la fonction f qui décrit la variation $s(x_1,t)$ uniquement au point x_1 par rapport à t est aussi retardé de $\frac{x_1 - x_0}{c}$.

Si on prend $x_0 = 0$ et $t_0 = 0$ il vient que

$$s(x_1,t) = f\left(t - \frac{x_1}{c}\right)$$

or cela est valable pour toute valeur de x_1, donc on peut généraliser cette expression pour tout x

$$\boxed{s(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right).}$$

♥ Définition

Une onde progressive se propageant avec une célérité c dans la direction de l'axe Ox dans le sens des x **positifs**, sans atténuation, sans déformation, est de la forme mathématique

$$s(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right)$$

où f est une fonction qui décrit la forme de l'onde et dont l'argument a la dimension d'un temps.

✎ Application 1

Montre qu'une onde progressive se propageant avec une célérité c dans la direction de l'axe Ox dans le sens des x **négatifs**, sans atténuation, sans déformation, est de la forme mathématique

$$s(x,t) = f\left(t + \frac{x}{c}\right).$$

I.2.b Deuxième expression

Reprenons l'étude, mais cette fois-ci, représentons la variation de $s(x,t)$ uniquement à l'instant t_0 par rapport aux positions x. On associe la fonction $s(x,t_0)$ à une fonction $g(x)$: comme on a fixé $t = t_0$, $g(x)$ ne dépend que de la position.

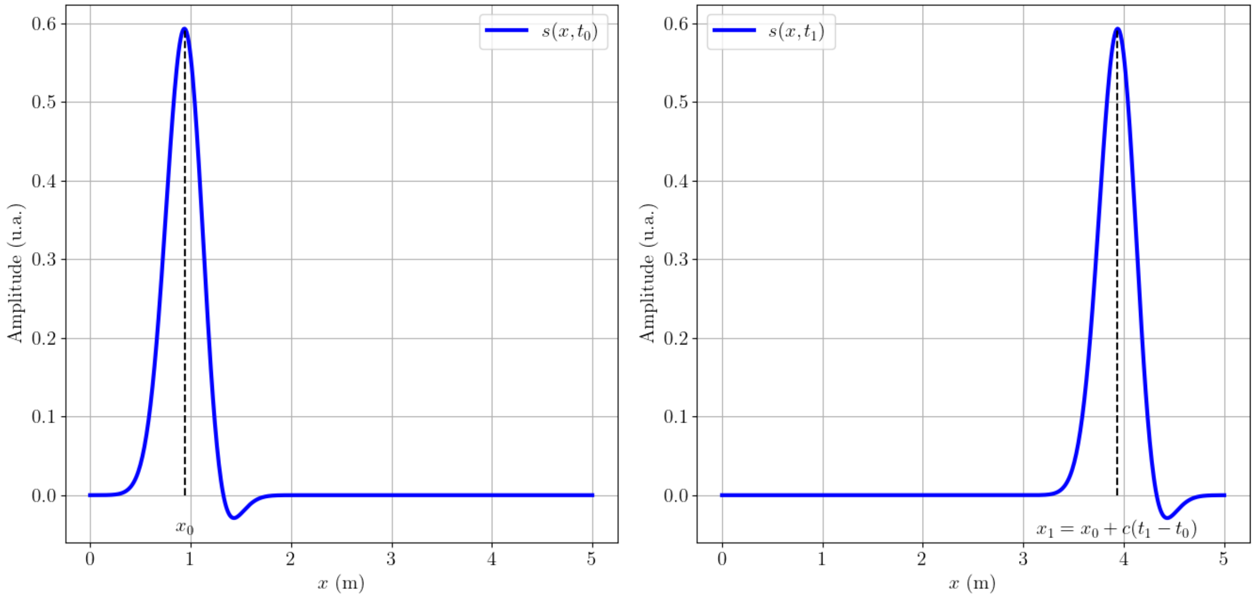


FIGURE 4.7 – Représentations de la fonction $s(x,t)$ à l'instant t_0 par rapport à x et de la fonction $s(x,t)$ à l'instant t_1 par rapport à x.

Or, comme l'onde se propage des x négatifs vers les x positifs, comme illustré Figure 4.7, il apparait que l'onde évolue de t_0 à t_1 après s'être déplacée d'une distance $x_1 - x_0$ telle que

$$x_1 - x_0 = c\,(t_1 - t_0)\,.$$

On peut ainsi exprimer x_1 tel que $x_0 = x_1 - c\,(t_1 - t_0)$.

Le maximum S de l'onde se trouve en x_0 à t_0, puis en x_1 à t_1, soit

$$S = s(x_0,t_0) = s(x_1,t_1)$$

ou encore

$$S = s\,(x_1 - c\,(t_1 - t_0)\,,t_0) = s(x_1,t_1).$$

D'après cette relation, on voit que si on représente la variation $s(x,t)$ uniquement à l'instant t_1 par rapport aux positons x, cette variation $s(x,t_1)$ à l'instant t_1 est égale à la variation $s(x - c\,(t_1 - t_0)\,,t_0)$, soit la variation $s(x,t)$ à l'instant t_0, mais repoussée d'une distance $c\,(t_1 - t_0)$.

Or on a introduit la fonction $g(x)$ permettant de représenter la variation $s(x,t)$ à un instant précis et uniquement par rapport à x. On peut l'utiliser pour décrire la variation $s(x,t)$ à l'instant t_1, car on voit que

$$s(x,t_1) = s\,(x - c\,(t_1 - t_0)\,,t_0) = g\,(x - c\,(t_1 - t_0))\,.$$

Ainsi la fonction g qui décrit la variation $s(x,t_1)$ uniquement à l'instant t_1 par rapport à x est aussi repoussée d'une distance $c\,(t_1 - t_0)$.

Si on prend $x_0 = 0$ et $t_0 = 0$ il vient que

$$s(x,t_1) = g\,(x - ct_1)$$

or cela est valable pour toute valeur de t_1, donc on peut généraliser cette expression pour tout t

$$\boxed{s(x,t) = g\,(x - ct)\,.}$$

♥ Définition

Une onde progressive se propageant avec une célérité c dans la direction de l'axe Ox dans le sens des x **positifs**, sans atténuation, sans déformation, est de la forme mathématique

$$s(x,t) = g\,(x - ct)$$

où g est une fonction qui décrit la forme de l'onde et dont l'argument a la dimension d'une longueur.

✎ Application 2

Montre qu'une onde progressive se propageant avec une célérité c dans la direction de l'axe Ox dans le sens des x **négatifs**, sans atténuation, sans déformation, est de la forme mathématique

$$s(x,t) = g\,(x + ct)\,.$$

I.3. Onde progressive sinusoïdale

I.3.a Description

Une onde est sinusoïdale si le signal mesuré en tout point de l'abscisse x est une fonction sinusoïdale du temps de **pulsation temporelle** ω, indépendante de la position. Par exemple, au point d'abscisse $x = 0$, le signal d'une onde progressive dans le sens des x positifs est telle que

$$s(x = 0, t) = f(t) = A\cos\left(\omega t + \varphi_0\right)$$

avec A_0 **l'amplitude de l'onde** et φ_0 **la phase initiale à l'origine de l'onde.**

Comme on l'a vu, on peut généraliser cette expression dans le cas de tous les x de telle manière que

$$s(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) = A\cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right).$$

♥ Définition

Une onde progresive sinusoïdale de pulsation ω se propageant avec une célérité c dans la direction de l'axe Ox dans le sens des x **positifs**, sans atténuation, sans déformation, est de la forme mathématique

$$s(x,t) = A\cos\left(\omega t - kx + \varphi_0\right)$$

avec $k = \omega/c$ la valeur du **vecteur d'onde** $\vec{k}$, k est encore appelé **la pulsation spatiale**.

L'argument de la fonction sinusoïdale est appelé **la phase de l'onde**. Ici la phase est $\omega t - kx + \varphi_0$.

I.3.b Double périodicité spatio-temporelle

Pour une position x_1 fixée, le signal $s(x_1, t)$ de l'onde progressive sinusoïdale est une fonction sinusoïdale du temps t avec une pulsation temporelle ω. On peut relier cette pulsation temporelle à la période temporelle T telle que

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Pour un instant t_1 fixé, le signal $s(x,t_1)$ de l'onde progressive sinusoïdale est une fonction sinusoïdale de la position x avec une pulsation spatiale k. On peut relier cette pulsation spatiale à la longueur d'onde λ, qui n'est autre que la période spatiale de l'onde

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

On constate que **l'onde possède une double périodicité** : spatiale et temporelle.

♥ Définition

Une onde progressive sinusoïdale se propageant dans la direction de l'axe Ox dans le sens des x **positifs** peut s'écrire

$$s(x,t) = A\left(\omega t - kx + \varphi_0\right)$$

soit

$$s(x,t) = A\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right)$$

avec T la période temporelle de l'onde, et λ la période spatiale de l'onde, encore appelée longueur d'onde.

I.3.c Vitesse de phase

Soit une onde progressive sinusoïdale de la forme $s(x,t) = A\cos\left(\omega t - kx + \varphi_0\right)$. Cette onde progresse jusqu'au point x_1 puis au point x_2.

Déterminons l'instant t_2 où le signal mesuré en x_2 aura la même phase que le signal mesuré en x_1 à l'instant t_1 comme cela est illustré Figure 4.8, soit

$$\omega t_1 - kx_1 + \varphi_0 = \omega t_2 - kx_2 + \varphi_0.$$

Il vient que

$$t_2 - t_1 = \frac{k}{\omega}\left(x_2 - x_1\right) = c\left(x_2 - x_1\right).$$

Ainsi, à l'instant t_2, on retrouve une valeur de la phase de l'onde en x_2 identique à celle de x_1 à l'instant t_1. On en déduit que la phase de l'onde progressive sinusoïdale se propage à la vitesse c. C'est pour cela que l'on nomme cette vitesse, **la vitesse de phase**.

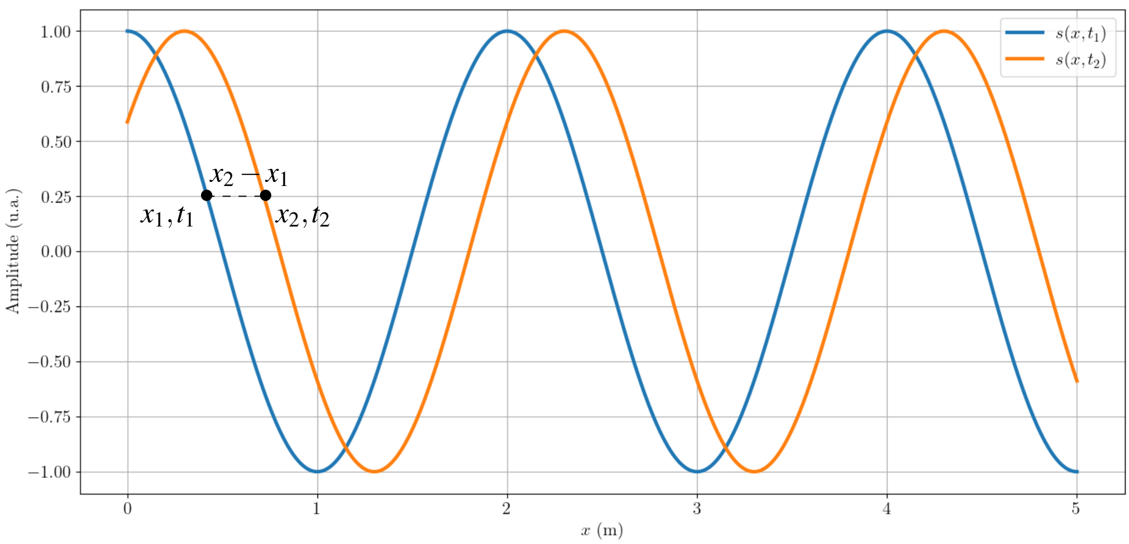


FIGURE 4.8 – Propagation d'une onde s vers les x positifs à deux instants t_1 et t_2 différents.

Une onde peut être qualifiée de périodique lorsqu'elle retrouve la même valeur à une position x après une durée T, soit

$$s(x,t) = s(x,t+\Delta t).$$

Ainsi lorsque $t_2 - t_1 = T$ l, pour la même position x l'onde a les mêmes valeurs aux instants t_1 et t_2, soit $s(x,t_1) = s(x,t_2)$. Il vient ainsi que

$$T = \frac{k}{\omega}(x_2 - x_1)$$

$$T\frac{\omega}{k} = x_2 - x_1$$

$$T\frac{\lambda}{T} = x_2 - x_1$$

$$\lambda = x_2 - x_1.$$

Le signal de l'onde s'est décalé d'une distance λ après une durée T.

♥ Définition

La longueur d'onde λ est égale à la distance sur laquelle l'onde progressive sinusoïdale se propage pendant une durée égale à la période temporelle T :

$$\lambda = cT,$$

avec c la vitesse de phase.

I.3.d Déphasage entre deux points

Soit deux points x_1 et x_2 pour lesquels on regarde les valeurs de l'onde au même instant t, soit

$$s(x_1,t) = A\left(\omega t - kx_1 + \varphi_0\right)$$

$$s(x_2,t) = A\left(\omega t - kx_2 + \varphi_0\right).$$

La différence de phase aux points x_2 et x_1, aussi appelé **déphasage** est

$$\omega t - kx_1 + \varphi_0 - \left(\omega t - kx_2 + \varphi_0\right) = -k\left(x_1 - x_2\right)$$

or

$$k\left(x_2 - x_1\right) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(x_2 - x_1\right).$$

♥ Définition

Les signaux sinusoïdaux $s(x_1,t)$ et $s(x_2,t)$ d'une onde sinusoïdale se propageant dans le sens positif de Ox sont déphasés de

$$\frac{2\pi}{\lambda}\left(x_2 - x_1\right) = \frac{2\pi}{T}\frac{x_2 - x_1}{c}.$$

On dit que les signaux au point x_1 et au point x_2 sont en phase à l'instant t lorsque

$$\frac{2\pi}{\lambda}\left(x_2 - x_1\right) = m \times 2\pi$$

avec m entier relatif, soit

$$x_2 - x_1 = m \times \lambda.$$

♥ Définition

Deux points séparés d'un **nombre entier de fois la longueur d'onde** le long de la direction de propagation Ox vibrent **en phase**.

On dit que les signaux au point x_1 et au point x_2 sont en opposition de phase à l'instant t lorsque

$$\frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \left(m + \frac{1}{2}\right) \times 2\pi$$

avec m entier relatif, soit

$$x_2 - x_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \times \lambda.$$

♥ Définition

Deux points séparés d'un **nombre entier de fois la longueur d'onde plus une demi-longueur d'onde** le long de la direction de propagation Ox vibrent **en opposition de phase**.

I.3.e Ordre de grandeur des fréquences

Dans le cas des **ondes acoustiques**, **les fréquences du domaine audible**, soit le domaine des sons perçus par l'oreille humaine, s'étend de **20 Hz à 20 kHz**. En deçà de 20 Hz, on passe dans le domaine des **infrasons**, au delà de 20 kHz, on passe dans le domaine des **ultrasons**.

Dans le cas des **ondes mécaniques**, le domaine de fréquences des **ondes sismiques élastiques** s'étend entre 1 Hz et 100 Hz. Les machines génèrent également des ondes élastiques dont le domaine de fréquences s'étend de 1 Hz à 1000 Hz.

Le domaine de fréquences des **ondes de surfaces**, que soit la houle ou les ondes sismiques de surface, appelée ondes de Rayleigh, s'étend de 0,01 Hz à 1 Hz.

Les différents domaines de fréquences des **ondes électromagnétiques** a été étudié section Spectre et propagation de la lumière.

I.3.f Analyse spectrale

L'étude que nous venons de mener se limiter aux ondes sinusoïdales. En général, une onde n'est pas sinusoïdale, alors pourquoi s'intéresser à ce type d'onde ?

Joseph Fourier, mathématicien, physicien et homme politique français, a établi une théorie mathématique qui montre que **tout signal peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux** d'amplitude, de fréquences et de phase à l'origine différentes.

L'opération qui consiste à déterminer les signaux sinusoïdaux composant un signal $s(t)$ quelconque est appelée **analyse spectrale**. Grâce à l'analyse spectrale menée sur $s(t)$ on obtient

- la liste des fréquences f_i des composantes sinusoïdales contenues dans le signal (éventuellement nulle dans le cas d'un signal constant)
- l'amplitude A_i de chaque composante sinusoïdale de fréquence f_i
- la phase initiale φ_i de chaque composante sinusoïdale de fréquence f_i.

On peut alors exprimer le signal quelconque $s(t)$ comme la somme de ces composantes sinusoïdales

$$\boxed{s(t) = \sum_i A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)\,.}$$

Chaque signal sinusoïdale $s_i(t) = A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ est une composante sinusoïdale du signal $s(t)$. On dit que le signal "contient les fréquences f_i". Le spectre du signal est l'ensemble des fréquences f_i contenues dans le signal. Un spectre peut être caractéristique du phénomène physique qui lui donne naissance, ce qui peut permettre son identification, par exemple, en comparant le spectre d'un signal sismique, on peut identifier un séisme d'origine naturel ou d'origine artificiel comme une explosion minière.

Certains signaux sont **purement sinusoïdaux** et leur spectre contient une unique fréquence. Ils sont souvent associés à **l'évolution d'un oscillateur harmonique**, c'est pourquoi on parle également de **signaux harmoniques**, comme les signaux de tension ou de courant d'un circuit LC. C'est aussi le cas du signal acoustique émis par un diapason dont les extrémités des branches vibrent de manière sinusoïdale.

Lorsque **le signal est périodique et non sinusoïdal**, son spectre est constitué de fréquences qui sont des multiples entiers d'**une fréquence fondamentale**, qui est la plus petite fréquence contenue dans ce signal. Les composantes de ce signal sont appelées **les harmoniques du signal**. La composante dont la fréquence est la fréquence fondamentale est appelée l'harmonique de premier rang ou la fondamentale.

Finalement, l'analyse de Fourier permet également de décomposer des **signaux non périodiques**.

Synthèse

Connaissances

- Types d'onde et exemples de signaux.
- Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive.
- Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle.
- Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.

Savoir-faire

- **Identifier** les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
- **Écrire** les signaux sous la forme $f(t-\frac{x}{c})$ ou $g(x-ct)$.
  Écrire les signaux sous la forme $f(t+\frac{x}{c})$ ou $g(x+ct)$.
  Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants.
- **Citer** quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique.
- **Établir** la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase.
- **Relier** le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.