

# Signaux

## Chapitre S1 : Propagation d'un signal

### I. Notion de signal

#### 1. Définition

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

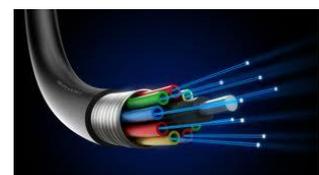
#### Remarques :

- Toutes les grandeurs mesurables peuvent correspondre à un signal. (Mesure de la température, du taux d'humidité, de la vitesse, de la position, de la hauteur des océans ...)
- Une grandeur peut apparaître comme un signal pour un observateur quand elle n'est que parasite (« bruit ») pour un autre. Tout dépend de l'information que souhaite collecter l'observateur.

#### 2. Différents types de signaux

Parmi la multitude de signaux existants, on peut lister quelques catégories :

Type de signal	Grandeur physique caractéristique	Milieu de propagation
Signaux mécaniques	Déformation du milieu. <b>Modification de la position</b> des particules de matière. <i>Exemples :</i>	
Signaux acoustiques	Déplacement des particules de matière, <b>surpression</b> acoustique (son)	
Signaux électriques	<b>Tension ou intensité</b> électrique	
Signaux électromagnétiques	Association d'un <b>champ électrique</b> et d'un <b>champ magnétique</b> . <i>Exemples :</i>	
Signaux optiques		



### 3. Conversion de signal

Un signal est rarement transmis sous une seule et unique forme. Il est généralement converti, à l'aide de capteurs (pour la réception) et de transducteurs (pour l'émissions), plusieurs fois afin de l'adapter au besoin de l'observateur.

Par exemple :



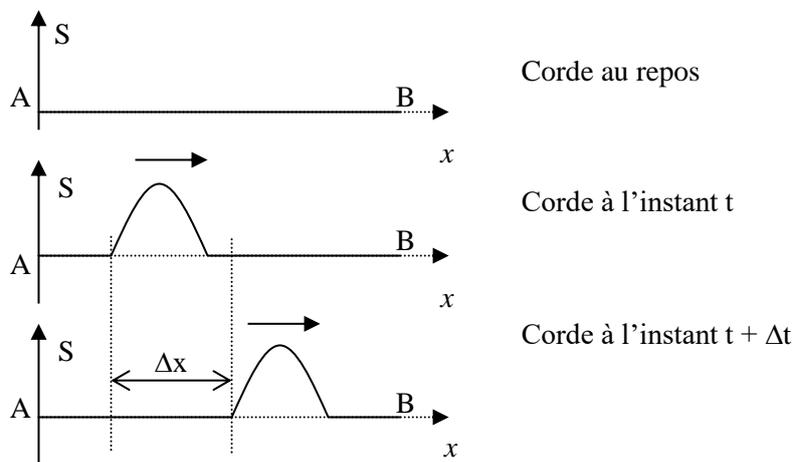
Grâce à la conversion du signal on peut plus facilement stocker, transmettre ou compresser l'information via la technologie numérique.

## II. Propagation d'un signal

### 1. Modèle de l'onde progressive

La notion d'onde est un concept abstrait dont l'émergence ne s'est fait qu'au cours du XVIIème siècle, associée au nom du mathématicien et physicien hollandais Christiaan Huygens. Elle traduit le phénomène de propagation d'un signal.

Soit une corde tendue (libre en B). En a se situe une personne qui communique à ébranlement.



On définit la hauteur  $S(x, t)$  du point de la corde d'abscisse  $x$  mesurée par rapport à la position initiale.

Cette grandeur varie :

- **Dans le temps :** (variable  $t$ ) à deux instants successifs, la forme de la corde a changé.
- **Dans l'espace :** (variable  $x$ ) deux points différents de la corde n'ont pas la même hauteur en général à un instant fixé.

Lorsqu'une personne commence à secouer une extrémité de la corde, la déformation se transmet de proche en proche. Un élément de corde agit sur celui juste à côté et ainsi de suite. Le signal se propage.

**ONDE : Modification locale et temporaire de l'état des paramètres d'un système, qui se propage de proche en proche en laissant derrière elle le système dans son état initial.  
Elle transporte de l'énergie, de l'information, mais pas de matière.**

Une onde ne se propage pas instantanément. Il faut un temps  $\Delta t$  pour que l'onde se déplace d'une distance  $\Delta x$ .

**Célérité :**

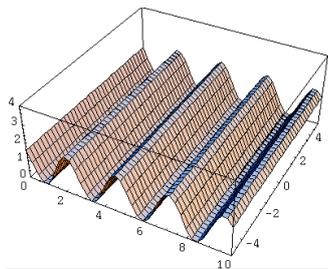
### Ordres de grandeurs :

La célérité du son dans l'air est de l'ordre de :

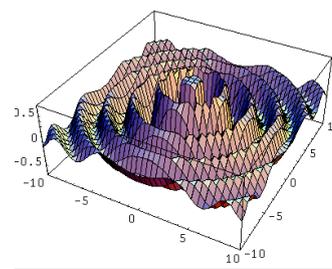
La célérité d'une onde électromagnétique dans le vide correspond à la vitesse de la lumière dans le vide :

### Remarques :

- S'il n'y a pas de dissipation de l'énergie, l'onde se propage dans l'espace sans se déformer.
- La propagation peut être libre (son dans l'air) ou guidée (son dans un tuyau)
  - Une onde **plane** n'a **qu'une seule direction** de propagation (corde, vague dans un fleuve) elle se propage en ligne droite.
  - Une onde **sphérique** se repartie **dans tout l'espace** (onde à la surface de l'eau lorsque l'on jette un caillou) → omnidirectionnelle

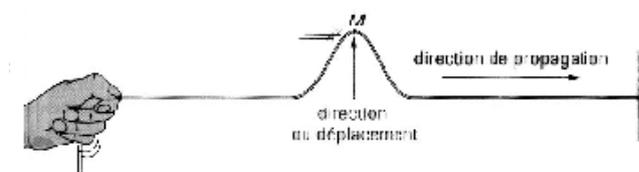


*Onde*

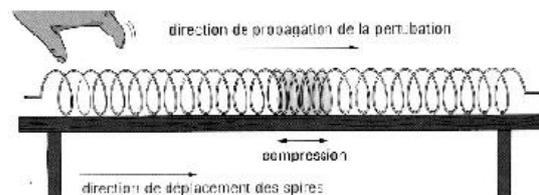


*Onde*

- Si la vibration est perpendiculaire à la direction de propagation, l'onde est dite transverse ; si la vibration est colinéaire à la direction de propagation, l'onde est dite longitudinale.



*Onde*



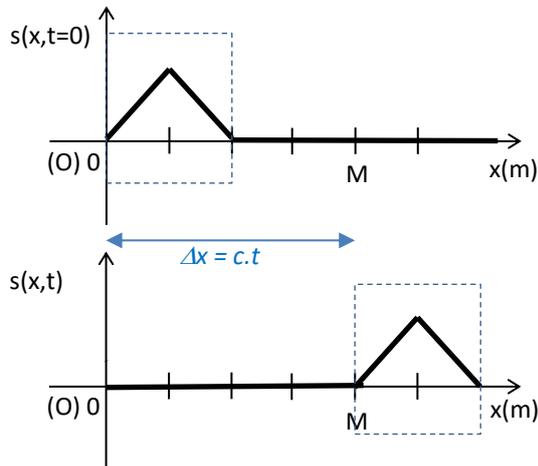
*Onde*

## 2. Deux types de représentation :

Considérons un point d'origine  $O$  et un point  $M$  situé à une distance  $x$  de  $O$ . On considère une onde se propageant à la célérité  $c$  suivant le sens des  $x$  croissants.

### Représentation spatiale :

On peut représenter une onde dans l'espace (**en fonction de  $x$** ) à un instant donné (comme une photo). Il faut alors effectuer plusieurs représentations à différents instants pour observer les modifications.



Signal à l'instant  $t = 0$

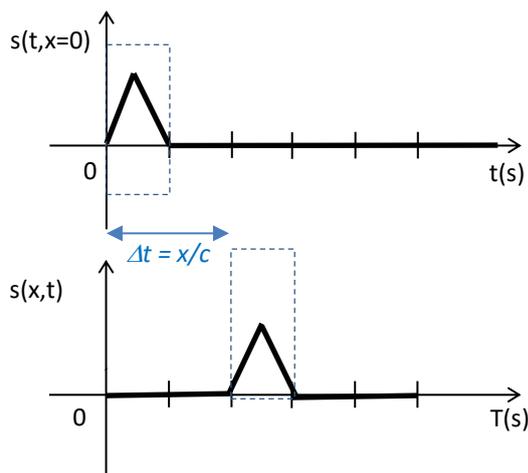
Signal à l'instant  $t$ . La déformation s'est propagée d'une distance  $\Delta x =$  et atteint le point  $M$ .

On constate que le signal observé au point  $M$  à l'instant  $t$  est identique à celui observé au point  $O$  à l'instant  $t = 0$ . Il y a simplement un décalage d'une distance  $c.t$  entre les deux instants observés.

On peut donc écrire ce signal sous la forme d'une fonction  $f(x - ct)$  dépendant du temps et de la position.

### Représentation temporelle :

On peut représenter une onde en fonction du temps (**en fonction de  $t$** ) à un point donné de l'espace. Cela correspond au signal enregistré par un capteur placé en ce point.



Signal émis au point  $O$  ( $x = 0$ )

Signal enregistré au point  $M$  d'abscisse  $x$ . Le signal est identique à celui émis au point  $O$  mais décalé dans le temps d'une durée :

$\Delta t =$  appelée **retard temporel**.

L'observateur au point  $M$  à l'instant  $t$  visualise l'onde telle qu'elle a été émise au point  $O$  mais à un instant antérieur  $t - \Delta t$ . Elle subit un **retard temporel  $\Delta t$** .

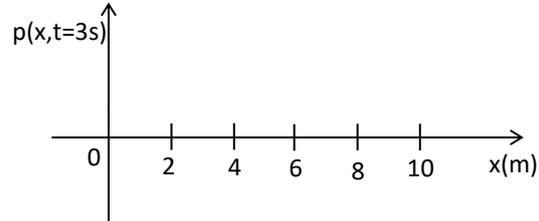
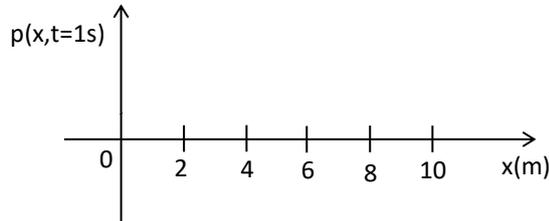
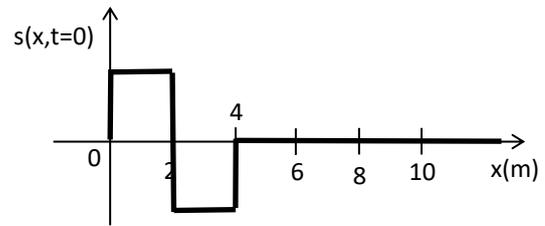
On peut donc écrire ce signal sous la forme d'une fonction  $f(t - x/c)$

**Remarque :** Dans le cas d'une propagation dans le sens des «  $x$  décroissants », le décalage spatial et temporel est opposé à celui décrit précédemment.

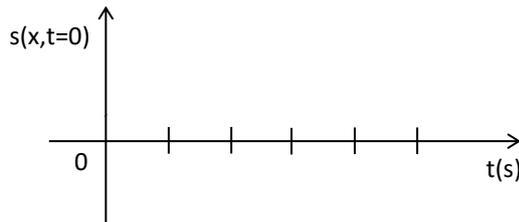
On écrirait alors les signaux sous la forme :  $g(x + ct)$  ou  $g(t + x/c)$

**Application :** On considère l'onde  $s(x, t = 0)$  représentée ci-contre se propageant à la célérité  $c = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans le sens des  $x$  croissants.

1. Représenter la forme de l'onde à l'instant  $t = 1 \text{ s}$  puis à l'instant  $t = 3 \text{ s}$



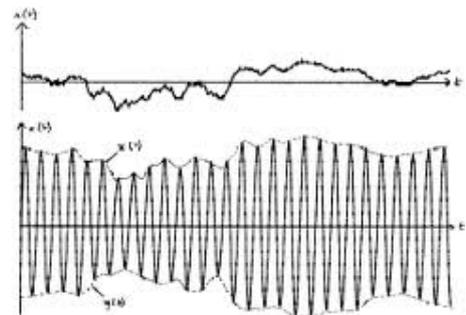
2. Un récepteur est placé à l'abscisse  $x_0 = 10 \text{ m}$  (point M). Tracer l'évolution temporelle du signal reçu par ce récepteur.



### III. Onde progressive sinusoïdale.

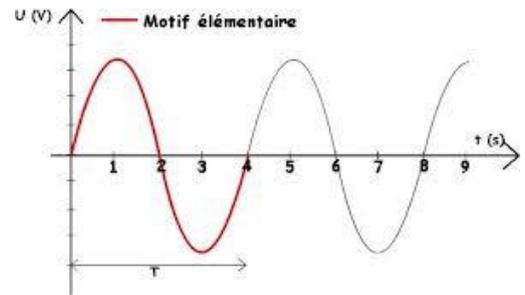
L'information telle qu'elle est transmise en pratique n'est bien évidemment pas périodique ni sinusoïdale puisque celle-ci change à chaque instant.

Pourtant, dans la majorité des cas, un signal sinusoïdal appelé **porteuse** sert de support à l'information qui est en fait contenue dans les variations lentes de l'amplitude du signal (modulation d'amplitude AM, de fréquence FM, ADSL, ...)



## 1. Période et fréquence d'un signal

La période d'un signal est la plus petite durée  $T$  de répétition d'un motif. Le nombre de périodes par unité de temps est appelé fréquence.



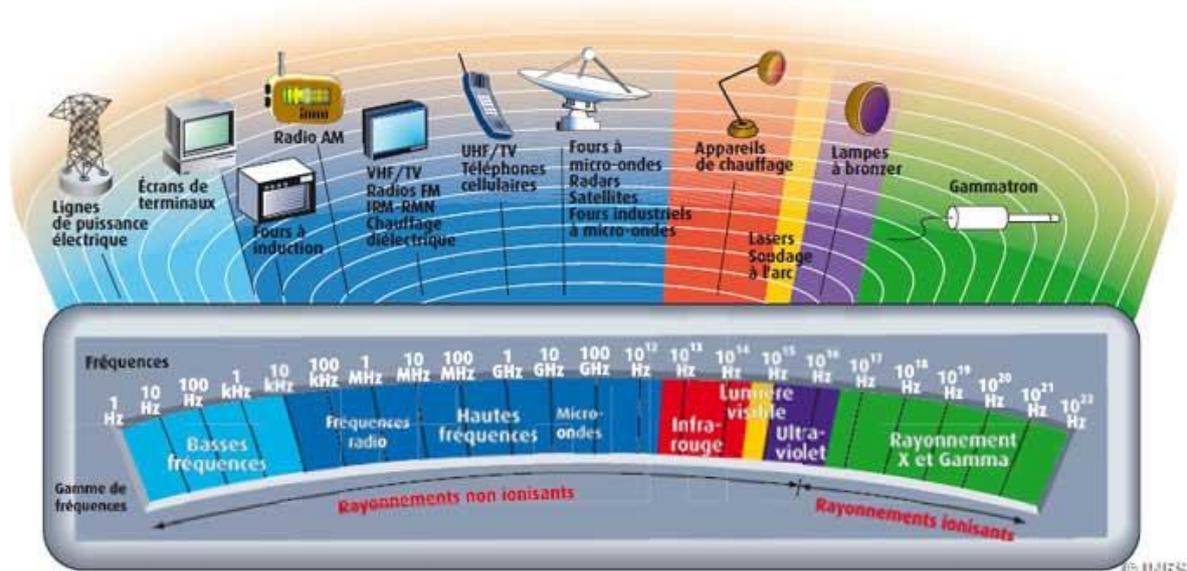
### Signaux acoustiques :

La fréquence des signaux acoustiques audibles s'étend entre quelques dizaines de Hz et une quinzaine de kilohertz. Les valeurs sont variables et dépendent de la sensibilité des auditeurs.

- On retiendra la norme HiFi (High Fidelity) :
- En téléphonie, la plage de fréquence utilisée est plus faible ( 300 à 3400 Hz) afin d'optimiser le nombre de signaux transmis.

### Signaux électromagnétiques :

Dans le domaine électromagnétique, les ordres de grandeur rencontrés s'étalent sur un très grand domaine de fréquence, ce qui traduit la grande diversité de ces ondes.



On retiendra les ordres de grandeur suivants :

- Signaux électriques :
- Signaux radiophoniques :
- Téléphonie mobile :
- Wifi :

### Remarques :

- Les choix de fréquence sont d'une part, historiques, mais résultent également de critères techniques liés à la taille des antennes.
- On retrouve les signaux optiques visibles dans le domaine précédent : autour de  $500 \times 10^{12}$  Hz

## 2. Signal sinusoïdal.

Un signal sinusoïdal peut être décrit par une grandeur physique  $s$  (vitesse, pression, intensité, ...) de la forme :

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi)$$

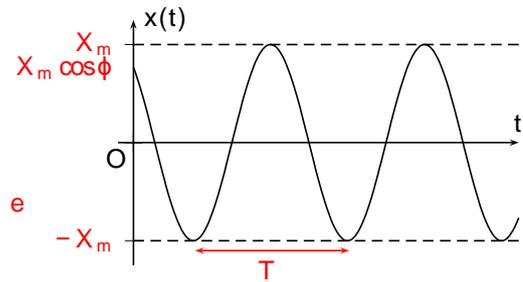
avec :

-  $\omega =$

-  $T =$

-  $S_m$

-  $\varphi$



**Attention :** Il faut distinguer  $S_m$ , amplitude crête mesurée à partir du niveau de valeur nulle et  $S_{cc} = 2.S_m$ , amplitude crête-à-crête mesurée entre deux extrema.

## 3. Modèle de l'onde progressive sinusoïdale.

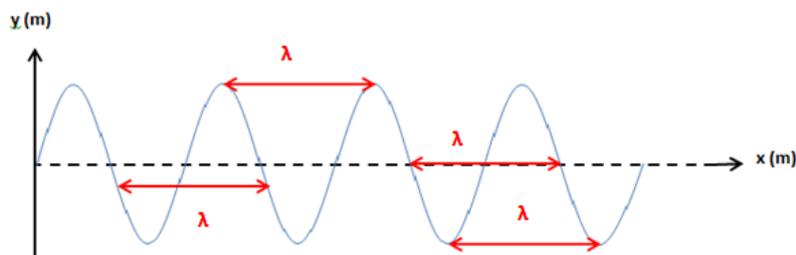
On suppose à présent que la source située au point O émet une onde sinusoïdale de la forme :

$$y(O, t) = Y_0 \cos(\omega t)$$

On considère un observateur situé au point M, à la distance  $x$  de l'origine O.

L'information reçue par l'observateur dépend à la fois d'une variable temporelle  $t$  mais également de sa position  $x$ . On va donc observer un phénomène périodique suivant ces deux variables.

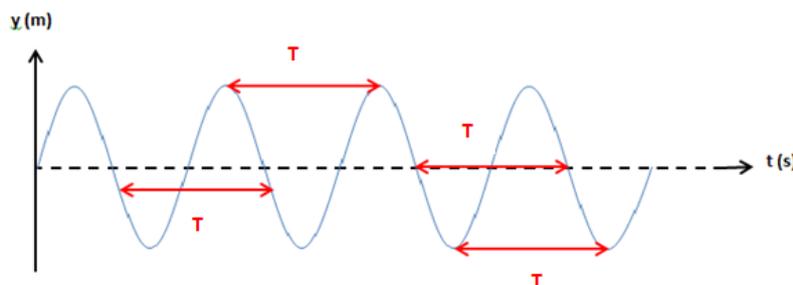
- **Période spatiale :** Si on prend une photographie de l'onde à un instant donné, on observe un signal possédant une périodicité spatiale.



Cette période spatiale, notée  $\lambda$ , est appelée : .....

**C'est la plus petite distance qui sépare deux maxima consécutifs.**

- **Période temporelle :** (signal enregistré par un capteur au cours du temps)



En un point fixé, soit à  $x$  constante, la vibration  $y(x,t)$  varie sinusoïdalement au cours du temps.

La vibration est donc périodique de période :  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

**La période T est la durée séparant deux passages par des maxima consécutifs**

- **Relation entre période temporelle et spatiale :**

Un observateur situé en un point  $x$  ou en un point  $x + \lambda$  perçoit exactement le même signal (on dit que les ondes sont en phase).

**La longueur d'onde correspond à la distance parcourue par l'onde en une période.**

On en déduit la relation :  $\lambda =$

**CONCLUSION :**

**L'onde progressive sinusoïdale possède une double périodicité, temporelle T (en seconde) et spatiale  $\lambda$  (en mètre) telles que :**

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \text{ avec } f \text{ la fréquence (en Hertz)}$$

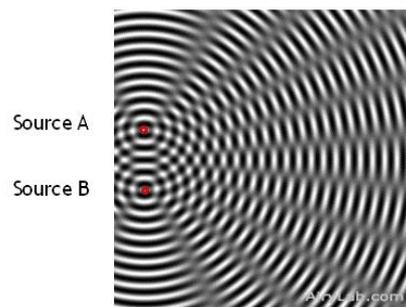
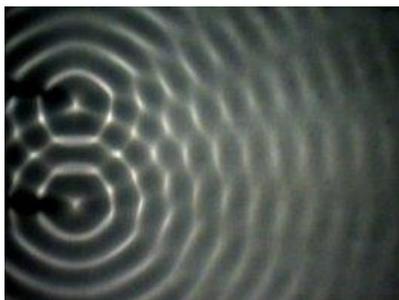
→ Calculer la longueur d'onde associée à une onde électromagnétique de fréquence  $f = 2,43$  GHz

## IV. Propriétés particulières des ondes

### 1. Interférences.

#### a. Approche expérimentale

Dans une cuve à ondes, un film d'eau de faible épaisseur est placé sur une plaque de verre horizontale. Deux pointes font vibrer, à la même pulsation, la surface du liquide. On obtient 2 ondes **synchrones**. Voici le résultat :



On distingue des zones sombres et des zones claires correspondant à la vibration de la surface du liquide. Avec les deux sources, on observe une modification de la structure de l'onde, avec l'apparition de lignes fixes alternativement foncées et claires. **Ce sont des franges d'interférence.**

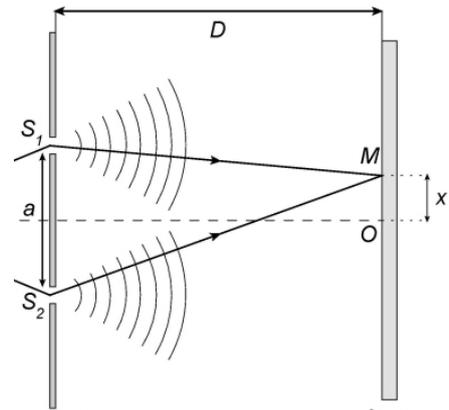
Les deux ondes émises interagissent entre elle, leur amplitude est modifiée. Les franges claires sont les franges d'amplitude maximale et les franges sombres sont d'amplitude minimale.

Emettons le même signal sonore à l'aide de deux sources séparées. Un observateur (micro) situé à une distance D constate une variation de l'intensité sonore lorsqu'il se déplace parallèlement au plan des sources. Il y a une **interférence acoustique**.

**b. Interprétation physique**

L'observateur situé au point M reçoit deux ondes **synchrones** (même fréquence)

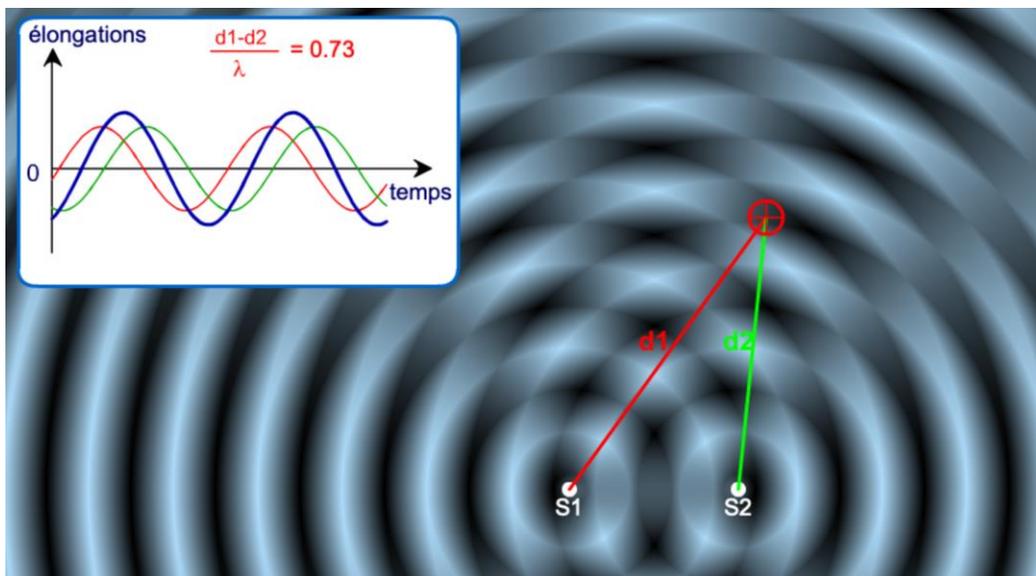
- Un signal sinusoïdal  $s_1(t)$  provenant de la source  $S_1$
- Un signal sinusoïdal  $s_2(t)$  provenant de la source  $S_2$



**Remarques :**

- Les amplitudes sont a priori différentes car les deux sources ne sont pas parfaitement identiques en pratique.
- Les signaux émis subissent un retard temporel au point M lié à la propagation entre les émetteurs et le récepteur (mais qui peut également être lié à un retard d'émission de l'émetteur lui-même), les deux signaux perçus en M sont donc **déphasés**.

L'observateur percevra alors au point M un signal :  $s(t) =$



La somme de deux signaux sinusoïdaux de même pulsation donne un signal sinusoïdal de pulsation identique, mais l'amplitude sera modifiée.

Choisissons les deux cas limites :

$$\begin{matrix} \text{onde 1} \\ + \\ \text{onde 2} \end{matrix} = \text{onde} \quad \text{(a)}$$

$$\begin{matrix} \text{onde 1} \\ + \\ \text{onde 2} \end{matrix} = \text{—} \quad \text{(b)}$$

**Conclusion :** Dans le cas de signaux de même amplitude, l'amplitude maximale est  $S_{max} = 2S_{1m}$  alors que l'amplitude minimale est nulle.

Les interférences sont constructives si les signaux sont en phase et destructives en opposition de phase (décalés d'une demi-période)

### c. Différence de marche

Le phénomène d'interférence peut également être appréhendé en terme de distance.

Supposons que les sources 1 et 2 soient rigoureusement identiques et en phase. Les retards temporels ne sont alors dus qu'à la propagation du signal.

L'observateur est situé à la distance  $d_1 = S_1M$  de la source  $S_1$  et  $d_2 = S_2M$  de la source  $S_2$

On appelle **différence de marche** la grandeur :  $\delta = d_2 - d_1$ .

Le temps de propagation du signal de  $S_1$  jusqu'à l'observateur (retard temporel) est :

Le temps de propagation du signal de  $S_2$  jusqu'à l'observateur est :

La différence de marche s'écrit alors :

#### Interférences constructives :

Elles ont lieu si les signaux sont en phase donc  $t_2 - t_1 = pT$  ( $p$  entier) ainsi :

**La différence de marche est donc un multiple de la longueur d'onde.**

#### Interférences destructives :

Elles ont lieu si les signaux sont en opposition de phase donc  $t_2 - t_1 = pT + \frac{T}{2}$ . Ainsi :

**La différence de marche est donc un multiple de la longueur d'onde augmenté d'une demi-longueur d'onde.**

### d. Remarques

Le phénomène d'interférences se rencontre dans de nombreux domaines tels que :

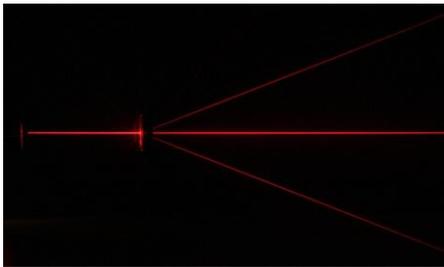
- l'optique, mais la mise en œuvre est plus délicate à cause des sources lumineuses.
- La sismologie, les phénomènes de marée
- L'astronomie
- Les casques à réduction active du bruit

## 2. Diffraction. (Exp laser)

### a. Approche expérimentale

Jusqu'à présent, nous avons étudié la propagation d'une onde en espace libre (sans limitation). Mais que se passe-t-il en présence d'un obstacle limitant l'extension spatiale de l'onde ?

Si l'on cherche à diminuer la taille d'un faisceau laser à l'aide d'une fente, celui-ci finit par « s'écartier ». C'est la **diffraction**.



Vue du dessus d'un faisceau laser traversant une fente fine

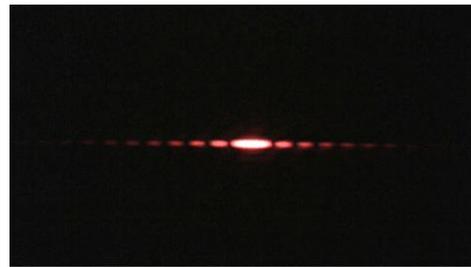


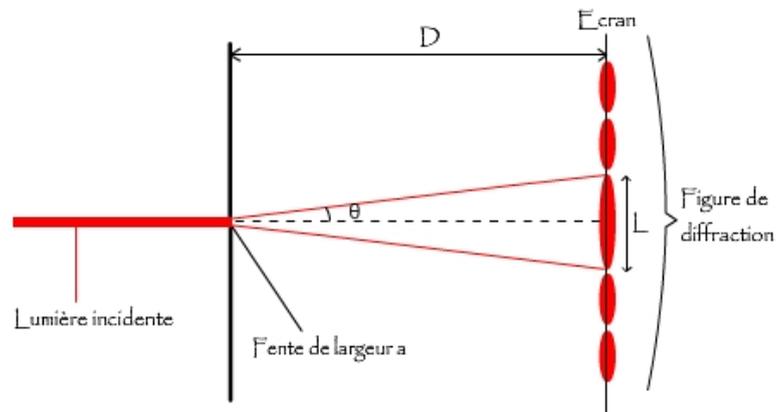
Figure observée sur un écran

Il apparaît dans la direction d'observation une figure de diffraction laissant apparaître une tache centrale et des taches secondaires.

### b. Caractérisation de la diffraction

L'expérience montre que la largeur de la tache centrale dépend :

- de la longueur d'onde
- est inversement proportionnelle à la dimension  $a$  de l'objet.



Si on se limite à une fente rectangulaire, on obtient la relation :

où  $\theta$  est le demi-angle au sommet du cône délimitant la tache centrale et  $a$  la largeur de la fente.

#### Remarques :

- Pour une ouverture circulaire de diamètre  $d$ , on a la relation :  $\sin(\theta) = 1,22 \frac{\lambda}{d}$
- La diffraction d'une onde est d'autant plus visible que le diamètre du diaphragme tend à se rapprocher de la longueur d'onde.

### c. Généralisation

La diffraction s'applique à la lumière mais également à tous les phénomènes ondulatoires : ondes acoustiques, vagues à la surface de l'eau, ondes électromagnétique, etc ...

**Pour l'optique**, le phénomène est visible pour une fente dont la largeur est jusqu'à 100x plus grande que la longueur d'onde.

*Exemple* : Pour un laser de longueur d'onde 633 nm traversant une fente de largeur  $a = 100 \mu\text{m}$ , on a :

Sur un écran situé à 1,0 m, la tache aura une dimension :

Les objectifs d'appareils photo, les lunettes, les jumelles diffractent également les ondes lumineuses, mais ce phénomène est peu visible au quotidien.

**Pour le son**, avec une fréquence de 400 Hz, on obtient une longueur d'onde :

Les portes, les fenêtres dont la taille est de l'ordre de la longueur d'onde, ainsi que la bouche sont donc des obstacles qui diffractent le son. C'est pourquoi un auditeur peut entendre un son même s'il n'est pas dans l'axe de l'émetteur.