

Thème 1 : ondes et signaux

S1. Propagation d'un signal



Notions et contenu	Capacités exigibles
1. Propagation d'un signal	
Signaux.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle linéaire non dispersive. Célérité, retard temporel.	Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $g(x+ct)$. Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$. Prévoir dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée, et l'évolution spatiale à un instant donné.
Onde progressive sinusoïdale : déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustiques et électromagnétiques. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Mesurer la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale. T.P. ultrasons
Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence. Déphasage.	Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes. Cuve à ondes. Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.
Diffraction à l'infini.	Utiliser la relation $\theta \approx \lambda/a$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture. Choisir les conditions expérimentales permettant de mettre en évidence le phénomène de diffraction en optique ou en mécanique. T.P. Caractère ondulatoire de la lumière.

1 ONDES ET SIGNAL

1.1. Les ondes

Lorsqu'on jette un caillou dans l'eau, il s'avère que cette action produit des ronds dans l'eau.

Sur la figure ci-contre, on observe une succession de ronds.



Ces ronds proviennent d'un même point et grandissent petit à petit. De là, on voit qu'un certain nombre de ronds se poursuivent et grandissent peu à peu. En ce qui concerne ce phénomène, la surface de l'eau était plane auparavant.

Au contact de la pierre, elle a été ensuite perturbée. On constate que cette perturbation se transmet depuis ce point **source** sous la forme d'un phénomène que l'on nomme une **onde**. Une onde est une **perturbation qui se déplace**. Cela est appelé le **phénomène de la propagation**.

Définition :

Une onde est la propagation d'une modification des propriétés physiques d'un milieu engendrée par une action locale. Cette propagation s'effectue à vitesse finie déterminée par les caractéristiques du milieu.

Le phénomène ondulatoire nécessite donc une source et un milieu de propagation. Un éventuel récepteur situé plus loin recevra l'onde en un temps fini.

Exemples :

Les ondes mécaniques : vagues, son, ondes sismiques...

Les ondes électromagnétiques : radio, lumière, UV...

Les ondes électriques...

1.2. Le signal

Définition :

Un signal physique correspond à la perturbation portée par l'onde en un point donné de l'espace. Il correspond à une modification temporaire de certaines propriétés physiques d'un milieu.

Les signaux peuvent être de nature:

- **mécanique**: déformation d'une corde, d'un ressort, onde à la surface de l'eau, signaux sonores...
- **électromagnétiques**.

Bien distinguer :

L'Onde : c'est le phénomène global de propagation d'une perturbation à travers un milieu (ou le vide). *Exemple : l'onde produite par un caillou jeté à l'eau.*

Le Signal : c'est la mesure quantitative de cette perturbation à un endroit et un instant donnés. C'est la grandeur physique enregistrée par un capteur. *Exemple : la hauteur de l'eau mesurée par un flotteur, ou la variation de pression mesurée par un microphone.*

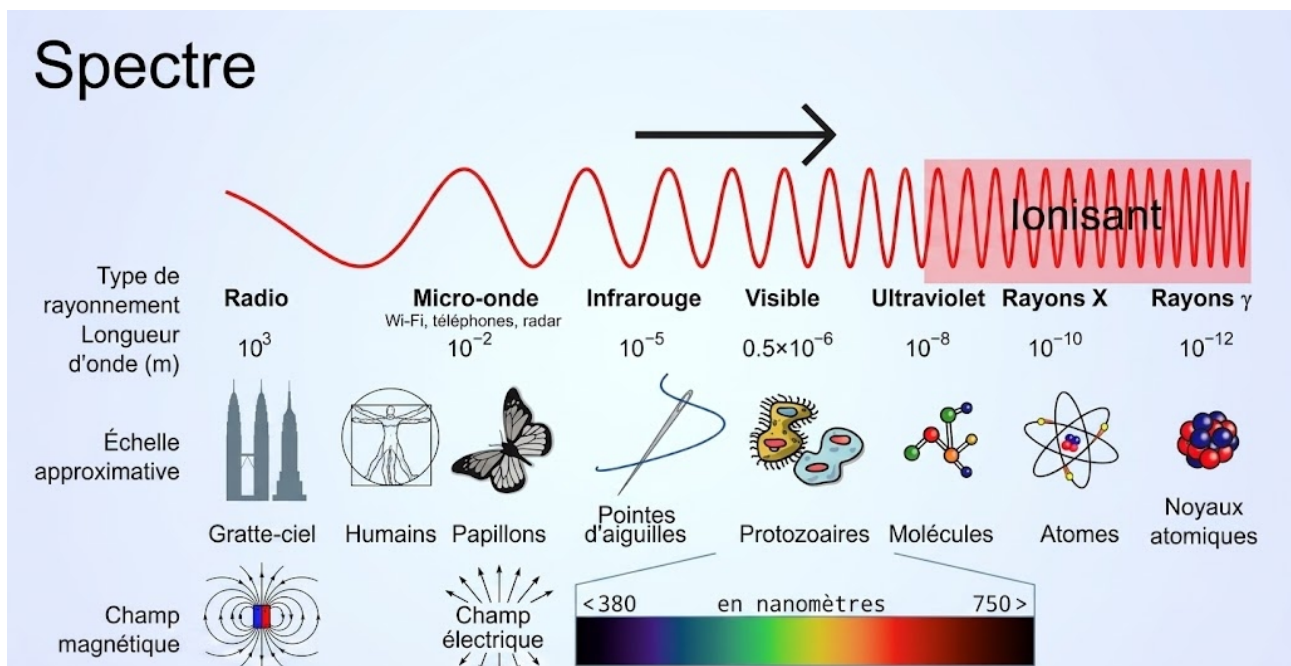
3

Dans tout signal, deux grandeurs se propagent, les variations de l'une engendrant les variations de l'autre et inversement, ce qui provoque une perturbation de proche en proche de tous les points du milieu. Ces deux grandeurs sont liées: si nous connaissons l'une, nous connaissons l'autre. Le signal est complètement décrit par l'une de ces deux grandeurs.

Dans un ressort par exemple, *le déplacement longitudinal des spires* engendre une *compression* qui, à son tour, provoque le déplacement des spires voisines: ainsi de proche en proche s'effectue la propagation du signal.

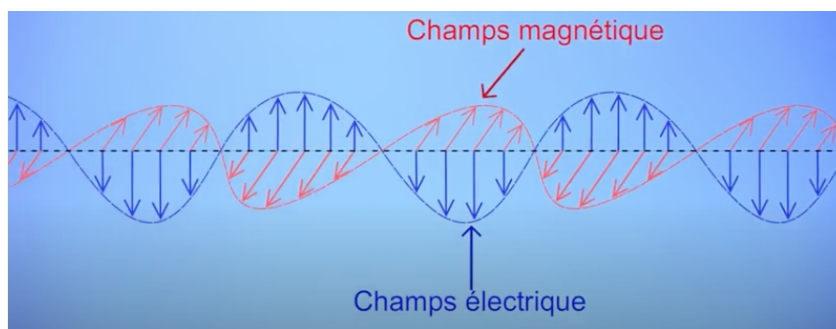
Un signal mécanique résulte de la modification temporaire:
des positions des points du milieu élastique (déplacements);
des caractéristiques mécaniques (torsion, compression) du milieu.

Un signal sonore résulte de la modification temporaire:
de la pression du milieu ;
d'un déplacement temporaire des molécules de ce milieu, déplacement engendré par les variations de pression. Il ne se propage que dans un milieu matériel élastique (milieu qui a la



capacité de se déformer, et lorsque la contrainte disparaît, la déformation aussi).

Visible : $f \in [375 \text{ THz}; 750 \text{ THz}]$ (ou $0,375 \times 10^{15} \text{ Hz}$ à $0,75 \times 10^{15} \text{ Hz}$).



<https://youtu.be/w7y-1eY0mcE> onde électromagnétiques spectre em

<https://youtu.be/LgOH6xxCBQA> Onde mécanique et électromagnétique

4

Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.

Il existe ainsi des ondes à **une, deux ou trois dimensions**.

Une onde à une dimension a lieu dans une seule direction, par exemple, le long d'une corde.

Une onde à deux dimensions a lieu dans un plan, par exemple à la surface de l'eau lorsqu'on y jette une pierre.

Une onde à trois dimensions a lieu dans l'espace, par exemple, une onde sonore se propage dans toutes les directions.

On appelle célérité c (ou v) de l'onde la vitesse de propagation de l'onde. C'est le rapport entre la distance d parcourue par l'onde et la durée Δt du parcours.

$$c = d / \Delta t \text{ avec } c \text{ en m.s}^{-1}, d \text{ en m et } \Delta t \text{ en s.}$$

On préfère le mot célérité au mot vitesse auquel est associé la notion de déplacement de matière (vitesse d'une automobile, d'une particule etc...).

La célérité de l'onde est une propriété du milieu de propagation, elle est donc constante dans un milieu donné et dans des conditions données.

Par exemple, la célérité du son dans l'air dépend de sa température. La célérité d'une onde se propageant sur une corde dépend de sa tension et de sa masse linéique (masse par unité de longueur).

milieu	Célérité du son en m.s ⁻¹	milieu	Célérité du son en m.s ⁻¹
Air (20°C)	340	Brique	2500
Eau	1460	Verre	5000 à 6000
Bois	1000 à 2000	Plomb	1320
Béton	3500	Liège	450 à 500
Acier	5000 à 6000	Caoutchouc	40 à 150

Quelques ordres de grandeurs de célérités à connaître.

Signal	Célérité en m.s ⁻¹
Ondes électromagnétiques dans le vide	3.10^8 (vitesse de la lumière)
Son dans l'air à 20°C sous 1 bar	340
Son dans les métaux	Environ 3000 à 5000
Son dans l'eau	Environ 1500

Remarque:

Plus le milieu est rigide, plus l'onde est rapide. Comme le son se propage beaucoup plus vite dans les métaux que dans l'air, . Il était courant au début du XXème siècle, pour entendre l'arrivée de trains, de coller son oreille contre les rails. Écouter la vibration du rail permet de percevoir l'arrivée d'un train bien avant que le son ne se propage par l'air, car le métal transmet le son plus rapidement. De même, une explosion sera entendue beaucoup plus rapidement sous la mer que dans l'air.



5

Définition :

Un milieu est dit dispersif si la célérité des ondes qui se propagent dans ce milieu dépend de leur fréquence.

- Exemple de milieu dispersif :

Sur la cuve à onde on engendre, au moyen d'une règle solidaire du vibreur, des ondes planes se propageant à la surface de l'eau. La fréquence f est réglable et peut être lue sur le générateur d'onde. Une webcam permet d'observer, en arrêt sur image, les rides obtenues à un instant t .

Pour différentes fréquences f , on mesure la longueur d'onde λ (distance entre deux rides) puis on calcule $v = \lambda.f$. **On s'aperçoit que v dépend de f . Le milieu est dispersif.**

La célérité d'une onde progressive périodique plane à la surface de l'eau dépend de la fréquence de l'onde (égale à la fréquence de vibrations de la source).

- Exemple de milieu non dispersif :

Pour les ondes sonores de fréquences audibles ($20 \text{ Hz} < f < 20000 \text{ Hz}$) l'air est un milieu non dispersif. Toutes les ondes sonores audibles se déplacent à la même vitesse (cela est heureux pour les auditeurs se trouvant au fond d'une salle de concert).

Remarque : Pour des ondes sonores audibles de **très grande amplitude** l'air devient dispersif : le roulement du tonnerre s'explique par le fait que les ondes sonores de basses fréquences sont plus lentes que les autres.

De même pour des ondes ultra sonores de très grandes fréquences ($f > 10^9 \text{ Hz}$) l'air devient dispersif.

Nous verrons que le phénomène de dispersion de la lumière joue un très grand rôle en optique. Mais les ondes optiques ne sont pas des ondes **mécaniques**, ce sont des ondes **électromagnétiques** qui se propagent même dans le vide. C'est d'ailleurs dans le vide qu'elles se propagent le mieux et le plus rapidement.

2 DESCRIPTION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS LE CAS UNIDIMENSIONNEL

2.1. Définitions

Un phénomène qui se propage est dit unidimensionnel lorsque la propagation se fait dans une seule direction de l'espace.

C'est le cas des signaux dans les câbles électriques, dans les fibres optiques, les vagues dans les canaux...

6

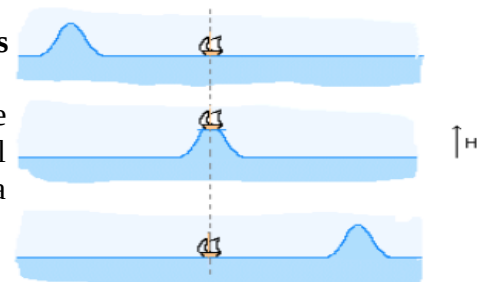
Une onde progressive est une perturbation qui se propage sans transport de matière dans un milieu en restant identique à elle-même. Elle se retrouve à l'identique un peu plus loin un peu plus tard.

Une onde progressive correspond à la propagation d'une perturbation dans un milieu, de proche en proche, avec transfert d'énergie mais sans transport global de matière. Le terme « progressive » signifie qui progresse c'est-à-dire qui se propage.

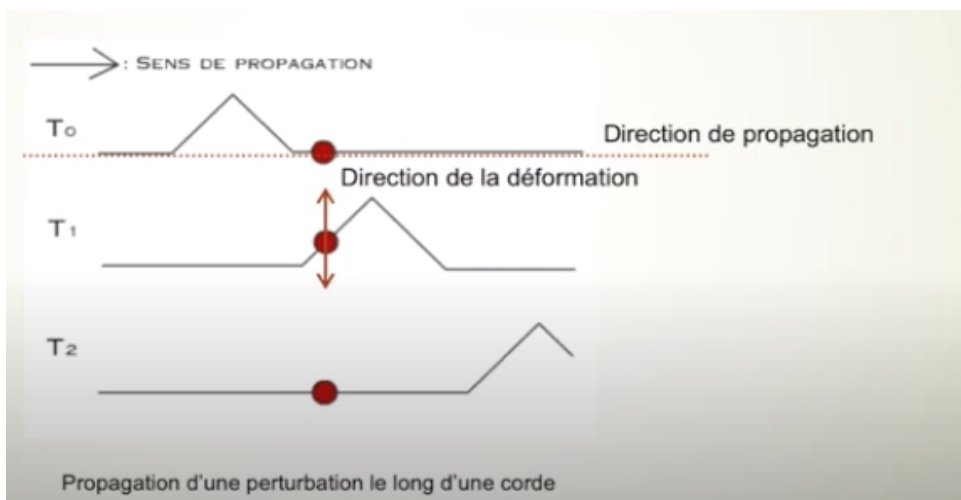
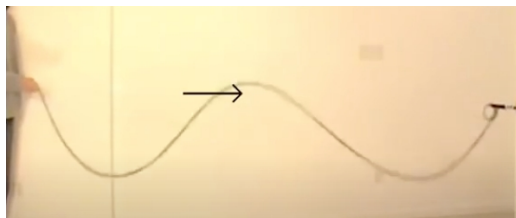
Transfert d'énergie sans transport de matière :

Une onde mécanique progressive transporte de l'énergie sans transport de matière.

Au passage d'une vague, le bateau s'élève d'une hauteur H , son énergie potentielle augmente. Cette énergie lui est apportée par l'onde, mais il n'y a pas de transport de matière (l'abscisse du bateau est restée la même).



Photographie d'une corde :



6

<https://youtu.be/bfkDuhZKCVE>

Les ondes progressives sont de deux sortes:

- onde transversale :

Une onde est transversale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.

Ici, la perturbation est une déformation de la corde provoquée sur la corde qui se propage de proche en proche dans la direction horizontale alors que les points de la corde se déplacent verticalement.

Remarque: La corde est le milieu de propagation, elle ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. Il faut que le milieu de propagation présente une certaine élasticité.

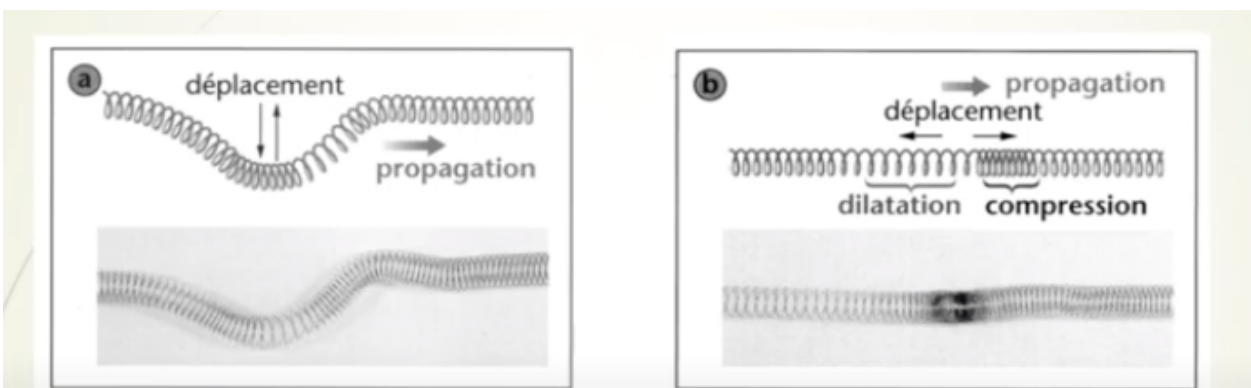
7

- onde longitudinale :

Une onde est longitudinale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue dans la même direction que celle de la propagation.

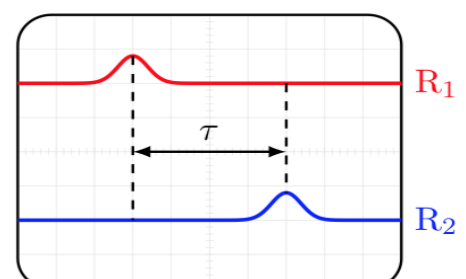
Le son dans l'air est une onde longitudinale. La perturbation (succession de compression et de détente) dans l'air se propage de proche en proche horizontalement, les molécules de l'air effectuent un va-et-vient horizontalement.

Remarque: L'air, milieu de propagation ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. L'air est un milieu élastique.



cas a) ressort soumis à une secousse de haut en bas le long d'un ressort et cas b) ressort dont certaines spires sont pincées puis relâchées.

2.2. Célérité et retard





On réalise l'expérience schématisée ci-dessous : un émetteur d'ultrason envoie des salves mesurées par deux récepteurs situés à une distance L l'un de l'autre. Sur l'oscilloscope, on visualise simultanément les deux signaux mesurés en fonction du temps. On observe une figure similaire au schéma ci-contre.

8

Le temps mesuré τ est le **retard** entre la réception de l'onde par le récepteur R_1 et le récepteur R_2 . Le retard d'une onde correspond au temps nécessaire pour que le signal se propage.

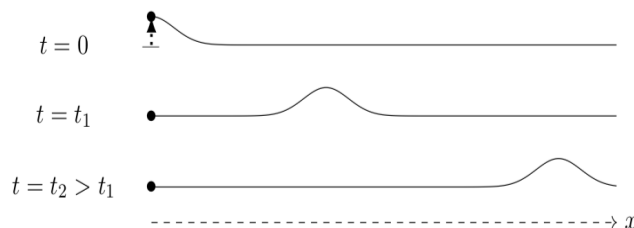
On définit la **célérité** c d'une onde comme sa vitesse de propagation. Elle s'exprime en m/s. La célérité correspond à la distance L entre un récepteur et un émetteur divisée par le temps nécessaire à l'onde pour parcourir cette distance τ , soit $c = L / \tau$.

Remarque : autre méthode expérimentale de mesure de la célérité des ultrasons : voir T.P.

2.3. Représentation spatiale d'une onde progressive

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

Ébranlement d'une corde:



Une photographie est une représentation spatiale, à un instant donné, on regarde la disposition des choses. Voir annexe (représentation mathématique).

2.4. Onde progressive périodique. Périodicité spatiale et temporelle d'une onde périodique.

Définition:

Une onde progressive est dite périodique si la perturbation qui la caractérise se répète à intervalles de temps réguliers appelés **périodes** et notés T .

Une onde ne peut être périodique que si sa source est elle-même périodique. Comme tous les phénomènes périodiques, une telle onde est aussi caractérisée par sa fréquence f qui peut être calculée à partir de la relation suivante: $f = 1/T$ avec T en seconde (s) et f en Hertz (Hz).

Deux représentations possibles: à x fixé ou à t fixé (photographie). Voir annexe

Périodicité spatiale: longueur d'onde d'une onde progressive périodique

La **longueur d'onde** peut être définie deux manières:

- Il s'agit de la **distance qui sépare deux points en phase consécutifs** (qui se suivent)
- Il s'agit aussi de la **distance sur laquelle se propage une perturbation pendant une durée correspondant à une période.**

Comme pour les ondes électromagnétiques la longueur d'onde se note avec la lettre grecque λ (lambda) et peut être calculée avec les relations suivantes:

$$\lambda = v \cdot T \text{ ou } \lambda = v / f.$$

λ en mètre (m), v (célérité de l'onde) en mètre par seconde (m . s⁻¹), T en seconde (s) et f en hertz (Hz).

9

Périodicité temporelle: période ou fréquence d'une onde progressive périodique

La **période T** d'un phénomène périodique est la durée au bout de laquelle le phénomène se répète identique à lui-même.

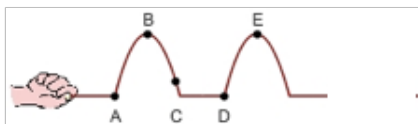
La **fréquence f** d'un phénomène périodique représente le nombre de phénomènes effectués par seconde.

Exemples d'ondes progressives périodiques

- Le son est produit par les vibrations périodiques d'un solide, de cordes vocales ou d'une membrane de haut parleur. Il est caractérisé par sa fréquence (une fréquence élevée correspond à un son aigu tandis qu'une fréquence faible correspond à un son grave)
- Si l'extrémité d'une corde est levée puis abaissée à un rythme régulier alors les perturbations qui s'y propagent forment une onde progressive périodique.

Points en phase d'une onde progressive

Si deux points de l'espace subissent des perturbations qui ont même valeur et varient dans le même sens alors on dit qu'ils sont en phase. Exemple: dans le cas d'une onde périodique à une dimension qui se propage le long d'une corde on dit que deux points sont en phase si l'élongation de la corde est la même avec une variation dans le même sens (les deux s'abaissent ou ils s'élèvent)



Placer le point F.

Sur le schéma de la corde avec les points A, B, C, D, E, F :

- Les points A et D sont séparés d'une longueur d'onde et sont en phase.
- Les points B et E sont des crêtes (en phase).
- Les points C et F sont en phase.

La distinction entre la période T et la longueur d'onde λ est souvent une source de confusion.

Une onde progressive périodique présente une **double périodicité** :

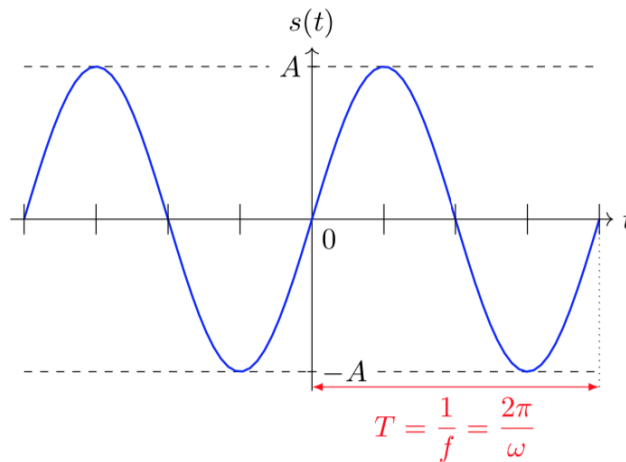
1. **La périodicité temporelle (Période T en secondes)** : C'est la durée au bout de laquelle **un point fixe du milieu** repasse par le même état de vibration. C'est l'évolution au cours du temps à position fixée (observée à l'oscilloscope).
2. **La périodicité spatiale (Longueur d'onde λ en mètres)** : C'est la plus petite distance qui sépare deux points du milieu se trouvant **dans le même état de vibration** au même instant. C'est le motif répétitif observé sur une "photographie" instantanée de l'onde.

Relation fondamentale : $\lambda = c \times T = c / f$

3 L'ONDE PROGRESSIVE SINUSOÏDALE

3.1. Le signal sinusoïdal

Le son d'un diapason : observation à l'oscilloscope du son d'un diapason enregistré avec un microphone. Le signal mesuré est sinusoïdal.



$\omega = 2\pi f$ (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

Le son est un **phénomène vibratoire**, c'est-à-dire un phénomène qui se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps régulier.

La durée entre deux phénomènes identiques consécutifs est la **période** T , son unité est la seconde. Le nombre de périodes par seconde est la **fréquence** f , son unité est le hertz (Hz).

La période et la fréquence sont liées par la relation $f = 1/T$.

On définit la pulsation par $\omega = 2\pi/T$.

Un diapason est un instrument qui émet une note pure, c'est-à-dire que le signal sonore émis est sinusoïdal de fréquence f donnée. Le signal émis est donc de la forme $s(t) = A \sin(2\pi ft) = A \sin(\omega t)$. Chaque note de musique a une fréquence donnée. Par exemple, le La 3 vaut 440 Hz, le La 4 vaut 880 Hz et le Do 2 vaut 130.81 Hz. A désigne l'amplitude du signal.

3.2. Caractéristiques



Une onde sinusoïdale qui se propage est appelée onde progressive sinusoïdale. Une onde progressive sinusoïdale présente donc une double périodicité ; l'une dans sa représentation spatiale et l'autre dans sa représentation temporelle. La longueur d'onde est l'équivalent spatial de la période T .

Ecriture mathématique :

On écrit alors : $y(x,t) = y_0 \cos(\omega t - kx)$ avec $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$ la norme du vecteur d'onde (ou nombre d'onde) et v la vitesse de l'onde ; $\Phi = \omega t - kx$ est la phase de l'onde.

Si on fixe x , on a une fonction de période temporelle : $T = 2\pi/\omega$.

Si on fixe t , on a une fonction de période spatiale appelée longueur d'onde : $\lambda = 2\pi/k$.

En regroupant les trois relations précédentes, on retrouve : $\lambda = vT$.

3.3. Spectre d'un signal

Le diapason produit des notes pures, mais ce n'est pas le cas de tous les instruments, et encore moins de tous les sons. Dans le cas général, un son est la superposition de notes.

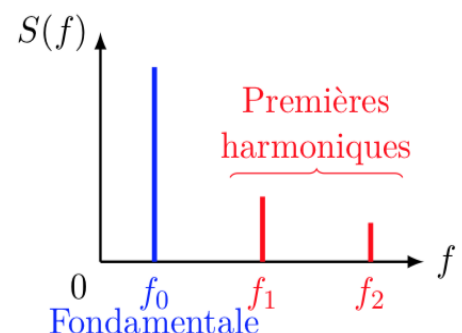
Théorème de Fourier

Tout signal physique périodique peut s'écrire comme une somme de signaux sinusoïdaux.

Ainsi, si l'on sait travailler sur un signal sinusoïdal, on sait étudier quasiment tous les signaux car, à l'aide de ce théorème, on peut décomposer n'importe quel signal en sommes de signaux que l'on peut traiter indépendamment les uns des autres.

Définition. Pour un signal physique donné, l'ensemble des composantes sinusoïdales d'un signal ainsi que leur amplitude constituent son spectre en fréquences. On le représente généralement graphiquement. Pour un signal périodique, la première fréquence s'appelle la fréquence fondamentale et les suivantes sont les harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples de la fréquence fondamentale.

Remarque : un milieu est dit dispersif si la célérité c dépend de la fréquence ou de la longueur d'onde. 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. Il s'agit de la principale limite des transmissions réelles.



4 TRANSMISSION D'UN SIGNAL PHYSIQUE PAR UNE ONDE

Les signaux acoustiques

Les signaux acoustiques se propagent par une modification locale de la pression et de la vitesse locale du milieu. Il se propagent dans l'air (≈ 340 m/s à 20 °C sous 1 bar) et dans les solides ou les liquides. Les fréquences audibles sont situées entre 20 Hz (grave) et 20 kHz (aigu) mais ces valeurs varient selon les individus.

Les signaux électromagnétiques

Les signaux électromagnétiques se propagent par une modification locale du champ électromagnétique $(\vec{E}, \vec{B})$. Ils se propagent dans le vide ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) et dans certains milieux transparents pour certaines fréquences, par exemple dans l'eau à environ 2.25×10^8 m/s et dans les verres entre 1.66×10^8 m/s et 2.20×10^8 m/s.

Les signaux électriques

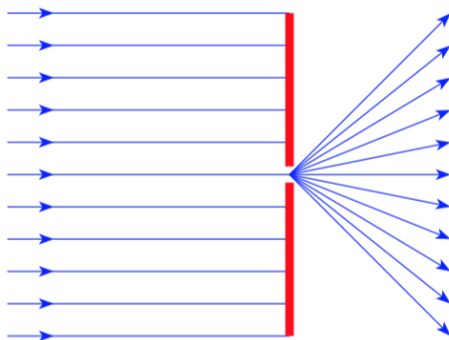
Ils se propagent dans les conducteurs électriques (métaux notamment) et correspondent à une modification locale du courant I et de la tension U .

5 DIFFRACTION A L'INFINI

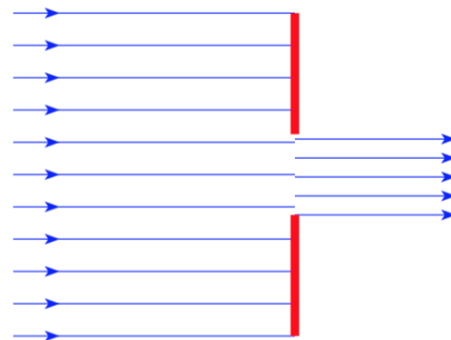
5.1. Le phénomène de diffraction

Définition: On appelle **diffraction**, le phénomène au cours duquel une onde qui traverse une petite ouverture ou rencontre un petit objet change de direction sans modification de fréquence ou de longueur d'onde. Le phénomène est d'autant plus important que la taille de l'obstacle ou de l'ouverture est faible.

Pour que le phénomène de diffraction apparaisse, il faut que la taille de l'obstacle ou de l'ouverture soit du **même ordre de grandeur que la longueur d'onde** de l'onde.



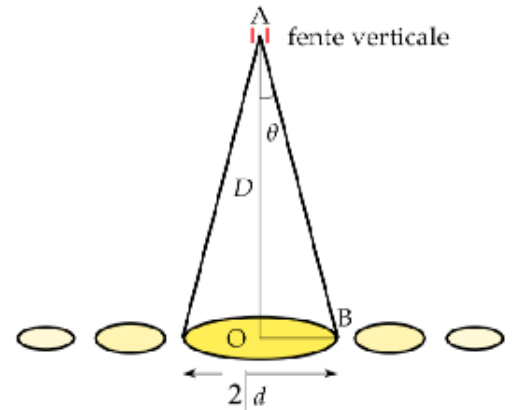
Petite ouverture = diffraction



Grande ouverture = pas de diffraction

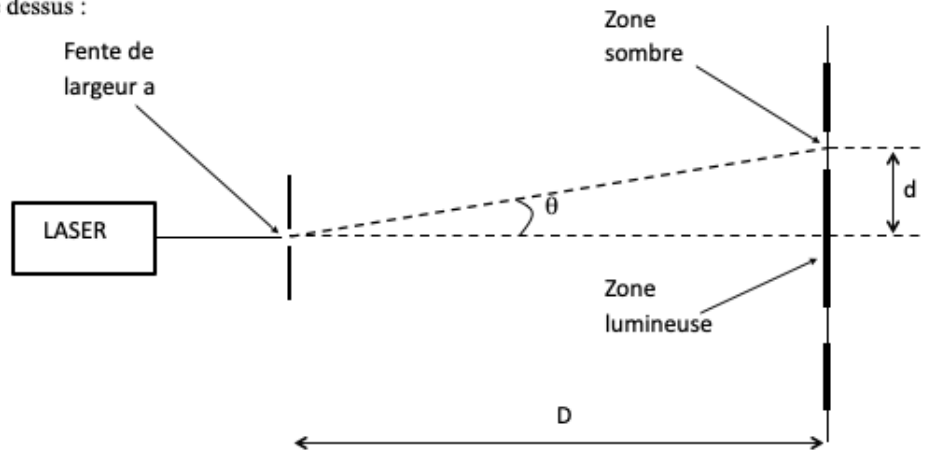
5.2. Diffraction d'une onde lumineuse

Soit une diffraction causée par un faisceau laser étroit dans une fente verticale de dimension du même ordre de grandeur que sa longueur d'onde. Le faisceau se diffracte en formant des tâches lumineuse séparées par des régions sombres qu'on appelle extinctions. La tâche centrale possède une taille plus grande et une intensité plus importante que les autres, dont la taille et l'intensité diminue en partant du centre vers la périphérie



Relation entre l'ouverture angulaire θ du faisceau, la largeur de la fente a et la longueur d'onde λ :

Schéma vu de dessus :



θ : ouverture angulaire du faisceau diffracté (rad)

a : largeur de la fente (m)

λ : la longueur d'onde (m)

d : demi largeur de la tache centrale : $d = L/2$

D : distance de la fente à l'écran (m)

Lorsque $D \gg d$ alors $\theta = \lambda / a$

13

Démonstration:

Dans le triangle rectangle d'angle au sommet θ , on a : $\tan\theta = d/D$

et comme θ est petit, $\tan\theta = \theta$ d'où $\theta := d/D$.

Largeur de la frange centrale: $2d = 2\theta D = 2\lambda D/a$.

Ce dispositif permet de mesurer la taille a de très petits objets. L'objet joue le rôle de la fente. Comme l'on connaît λ et que l'on peut mesurer θ , d et D , on en déduit alors a .

6 INTERFERENCES

Interférence entre deux ondes de même fréquence

Deux sources d'ondes qui vibrent à la même fréquence et en phase sont dites cohérentes.

- C'est le cas, par exemple, de deux vibreurs d'une cuve à onde alimentés par le même générateur.
- C'est le cas aussi de deux sources lumineuses obtenues à partir d'une source unique dont on divise la lumière émise en deux faisceaux.

Le phénomène d'interférences peut se produire dans un espace où deux ondes progressives périodiques produites par deux sources cohérentes sont présentes. Nous considérons le cas le plus simple de superposition d'ondes, l'addition de deux ondes progressives sinusoïdales. On considérera les deux ondes de même pulsation, dont le déphasage en un point donné est le même à tout instant.

Interférences constructives et destructives

Lorsque deux ondes, émises par deux sources S_1 et S_2 interfèrent en un point M, on considère deux situations particulières:

Si à chaque instant les deux ondes, provenant des deux sources, sont en phase quand elles arrivent au point M, l'interférence entre les deux ondes est **constructive**.

Si à chaque instant les deux ondes sont en opposition de phase au point en M, l'interférence entre les deux ondes est **destructive**.

On appelle **différence de marche** entre les deux ondes qui interfèrent en M, la différence entre la distance S_1M et la distance S_2M :

$$\delta = |S_1M - S_2M|.$$

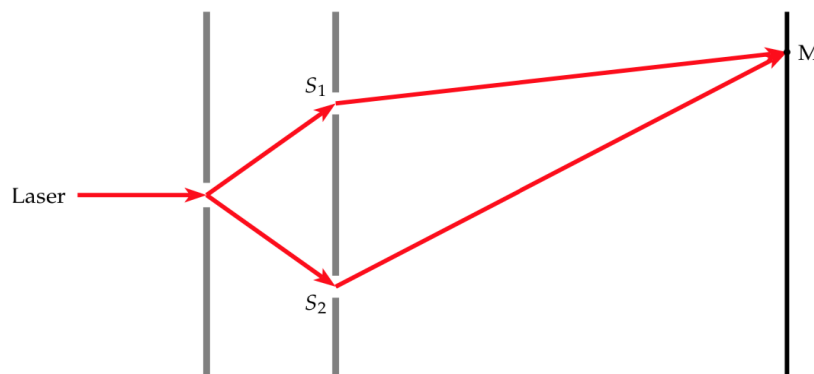
Condition d'interférence constructive:

Les deux ondes doivent être en phase en M ce qui signifie que la différence de marche est un multiple entier de la longueur d'onde: $\delta = k\lambda$.

Condition d'interférence destructive :

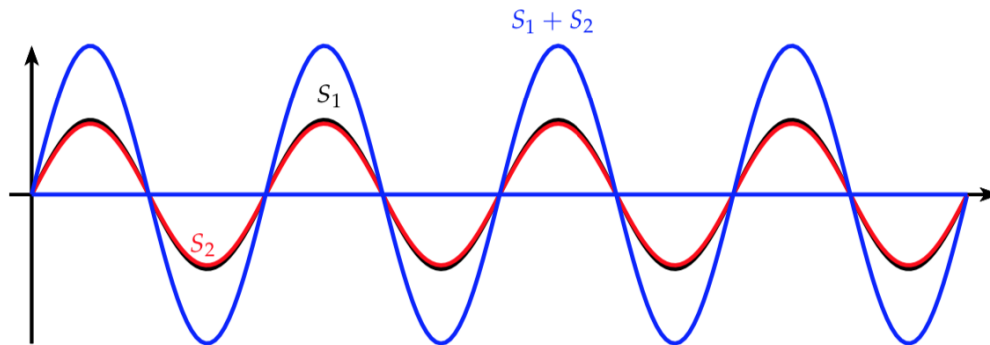
Les deux ondes doivent être en opposition de phase en M ce qui signifie que la différence de marche est un multiple entier de la longueur d'onde, additionné d'une demi longueur d'onde:

$$\delta = k\lambda + \lambda/2.$$

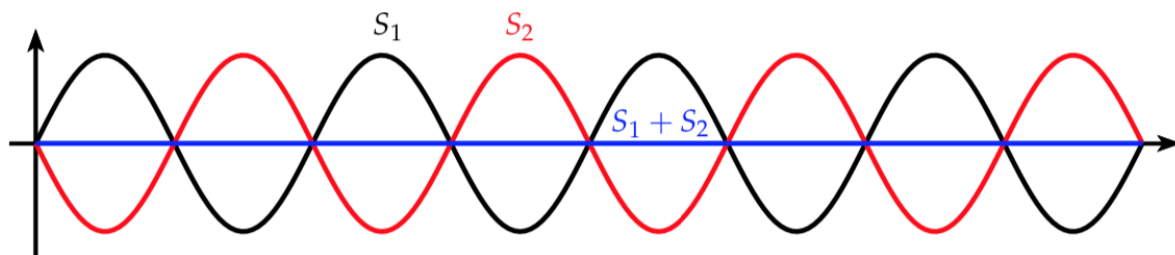


La lumière monochromatique, émise par un laser, est une onde périodique sinusoïdale. Les ondes progressives obéissent au principe de superposition.

Soit un rayon laser monochromatique passant par une petite fente. Après cette première diffraction, on obtient **deux sources de lumière monochromatique** S_1 et S_2 . Ces rayons passent par deux autres petites fentes. Sur un écran, on observe alors une **succession de franges brillantes et de franges sombres** : c'est le phénomène d'interférence. Ce phénomène est dû à la différence de distances S_2M et S_1M appelée **différence de marche** : δ .



Si $\delta = k \lambda$ avec k entier relatif, on a une interférence constructive : « lumière + lumière = lumière ». Il y a superposition. Les ondes arrivant en phase au point M ajoutent leurs effets ; la frange est une frange brillante.



Si $\delta = (k + 1/2) \lambda$ on a une interférence destructive : « lumière + lumière = obscurité ». Il y a annulation.

Exemple de la cuve à onde : <https://youtu.be/R3Mu1vG1t2c>

En un point M du champ d'interférences, on a la somme de deux signaux de même pulsation ω : $S_1(t) = S_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ et $S_2(t) = S_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$.

La somme des deux signaux précédents est un signal de pulsation ω identique à la pulsation de départ : $S(t) = S_1(t) + S_2(t) = S \cos(\omega t + \varphi)$.

La somme a une amplitude maximum $S_1 + S_2$ et une amplitude minimum $|S_1 - S_2|$. On obtient un maximum pour $\varphi_2 - \varphi_1 = 2k \pi$ et un minimum pour $\varphi_2 - \varphi_1 = (2k+1) \pi$ avec k entier relatif.

Le champ d'interférences peut être linéaire (corde vibrante), plan (ondes à la surface de l'eau) ou en volume (ondes sonores).

Ce phénomène se retrouve dans le cas : des ondes mécaniques à la surface d'un liquide, des ondes sonores dans l'air, de l'optique, de la sismologie, etc...

Lorsque deux ondes cohérentes arrivent en un point M de l'espace, l'onde résultante dépend du décalage avec lequel elles y parviennent :

Interférence constructive (Frange brillante / Amplitude maximale) : les deux ondes arrivent **en phase** (les crêtes coïncident avec les crêtes).

- Condition sur la différence de marche : $\delta = |S_2M - S_1M| = k \cdot \lambda$ (avec $k \in \mathbb{Z}$).

Interférence destructive (Frange sombre / Extinction) : les deux ondes arrivent **en opposition de phase** (une crête rencontre un creux).

- Condition sur la différence de marche : $\delta = |S_2M - S_1M| = (k + 1/2) \cdot \lambda$ (avec $k \in \mathbb{Z}$).

Conditions de cohérence des sources : pour obtenir une figure d'interférence stable dans le temps, les sources S_1 et S_2 doivent être **cohérentes**, c'est-à-dire :

- émettre des ondes de **même fréquence** f .
- conserver un **déphasage constant** au cours du temps ($\Delta\phi_0 = \text{constante}$). *En pratique, si les deux pointes sont reliées au même vibreur, elles sont en phase ($\Delta\phi_0 = 0$).*

out à fait ! Votre définition est exacte.

Deux sources sont dites **cohérentes** si elles remplissent **deux conditions indispensables** :

1. Même fréquence f (ou même longueur d'onde λ) : Les deux sources doivent vibrer exactement au même rythme (on dit qu'elles sont *monochromatiques* et synchrones).

2. Déphasage constant au cours du temps ($\Delta\phi_0 = \text{Cte}$) : L'écart de phase entre les deux sources au moment où elles émettent ne doit pas varier au cours du temps.

Pourquoi la cohérence est-elle obligatoire pour observer des interférences ?

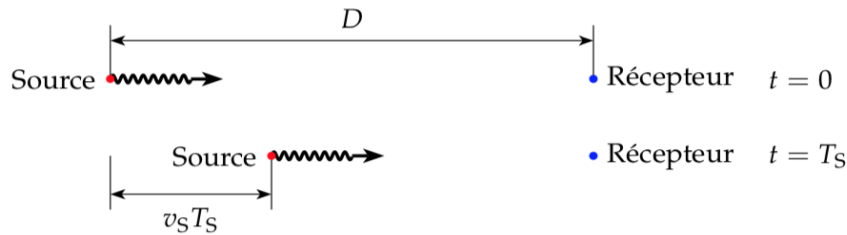
Si le déphasage entre les sources variait de manière aléatoire et constante (sources **incohérentes**, comme deux ampoules ordinaires ou deux haut-parleurs indépendants). Les zones d'interférences constructives et destructives bougeraient

Dans l'expérience des deux pointes à la surface de l'eau, les deux pointes sont fixées au même vibreur. Elles émettent donc à la même fréquence et avec un déphasage égal à zéro (elles frappent l'eau exactement au même instant, donc en phase).

7 EFFET DOPPLER

Tout le monde à fait l'expérience qui consiste à entendre une voiture s'approcher puis s'éloigner d'un observateur au bord d'une route. Le son devient plus aigu lorsque la voiture s'approche puis plus grave au fur et à mesure qu'elle s'éloigne. Il s'agit de l'effet Doppler.

Une source sonore s'approche d'un observateur fixe à la vitesse v_s . Le milieu de propagation, ici l'air, est supposé immobile et la vitesse de propagation est c . La source envoie des bips avec une période T_s . À $t = 0$, la source envoie un premier bip et à $t = T_s$, la source envoie un second bip. On peut résumer cette expérience à l'aide du schéma suivant :



Par rapport au récepteur, fixe par rapport au milieu de propagation, la distance d_1 entre deux bips est donc : $d_1 = cT_s - v_s T_s$

Or la distance entre deux bips donne la quantité cT_R , en appelant T_R la période entendue par le récepteur. On a donc :

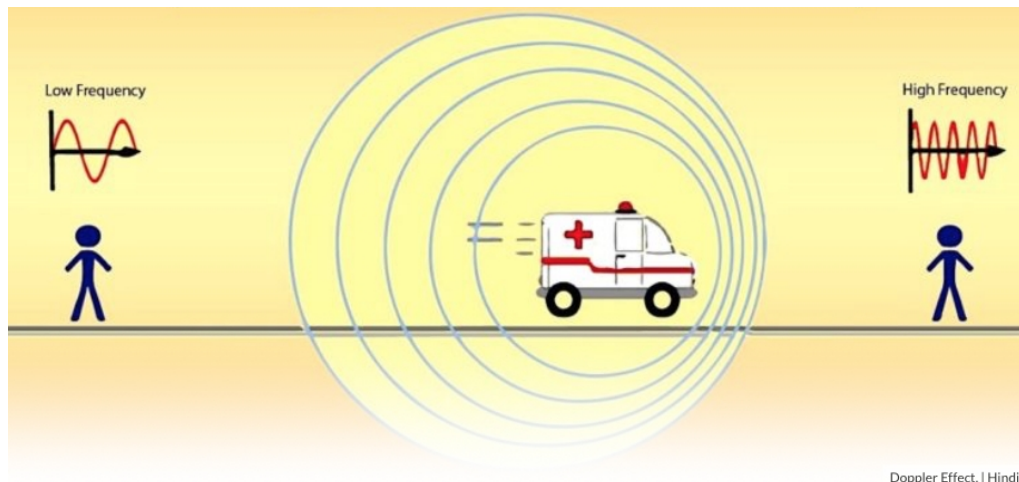
$$cT_R = cT_s - v_s T_s \quad \Leftrightarrow \quad T_R = T_s - \frac{v_s}{c} T_s = T_s \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)$$

En passant aux fréquences source et récepteur, f_s et f_R , on a :

(pour information)

$$\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_s} \left(1 - \frac{v_s}{c}\right) \quad \Leftrightarrow \quad f_R = \frac{1}{1 - \frac{v_s}{c}} \times f_s$$

Si la source s'approche du récepteur, $v_s > 0$; Comme $0 < 1 - v_s/c < 1$, le dénominateur est inférieur à 1, donc $f_R > f_s$. Le son perçu est donc plus aigu.



Doppler Effect. | Hindi

PLAN

1 ONDES ET SIGNAL

1.1. Les ondes

1.2. Le signal

2 DESCRIPTION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS LE CAS UNIDIMENSIONNEL

2.1. Définitions

2.2. Célérité et retard

2.3. Représentation spatiale d'une onde progressive

2.4. Onde progressive périodique. Périodicité spatiale et temporelle d'une onde périodique.

3 L'ONDE PROGRESSIVE SINUSOÏDALE

3.1. Le signal sinusoïdal

3.2. Caractéristiques

3.3. Spectre d'un signal

4 TRANSMISSION D'UN SIGNAL PHYSIQUE PAR UNE ONDE

5 DIFFRACTION A L'INFINI

5.1. Le phénomène de diffraction

5.2. Diffraction d'une onde lumineuse

6 INTERFERENCES

7 EFFET DOPPLER

Annexe

Caractérisation mathématique d'une onde progressive à une dimension

a) Analyse

On considère la propagation d'une onde à la vitesse c , le long de l'axe x , dans le sens des x croissants.

Deux approches sont possibles : soit on suit le signal au cours du temps (en prenant des "photographies" successives), soit on place des capteurs en des points donnés et on y enregistre le signal temporel.

On constate que pour décrire correctement le signal, nous devons utiliser deux variables x et t . On introduit donc la fonction à deux variables $s(x, t)$

$s(x_0, t)$ correspond à un enregistrement du signal en fonction du temps, en un point d'abscisse x_0 donné

$s(x, t_0)$ correspond à une "photographie" du signal, à un instant t_0 donné.

b) Expression en fonction du retard.

Supposons connu le signal en $x = 0$: $s(0, t) = f(t)$.

On se place désormais au point M d'abscisse $x > 0$. Quel signal enregistrera-t-on en ce point ?

Pour se propager de 0 vers M le signal va mettre un temps Δt tel que $x = c \Delta t$.

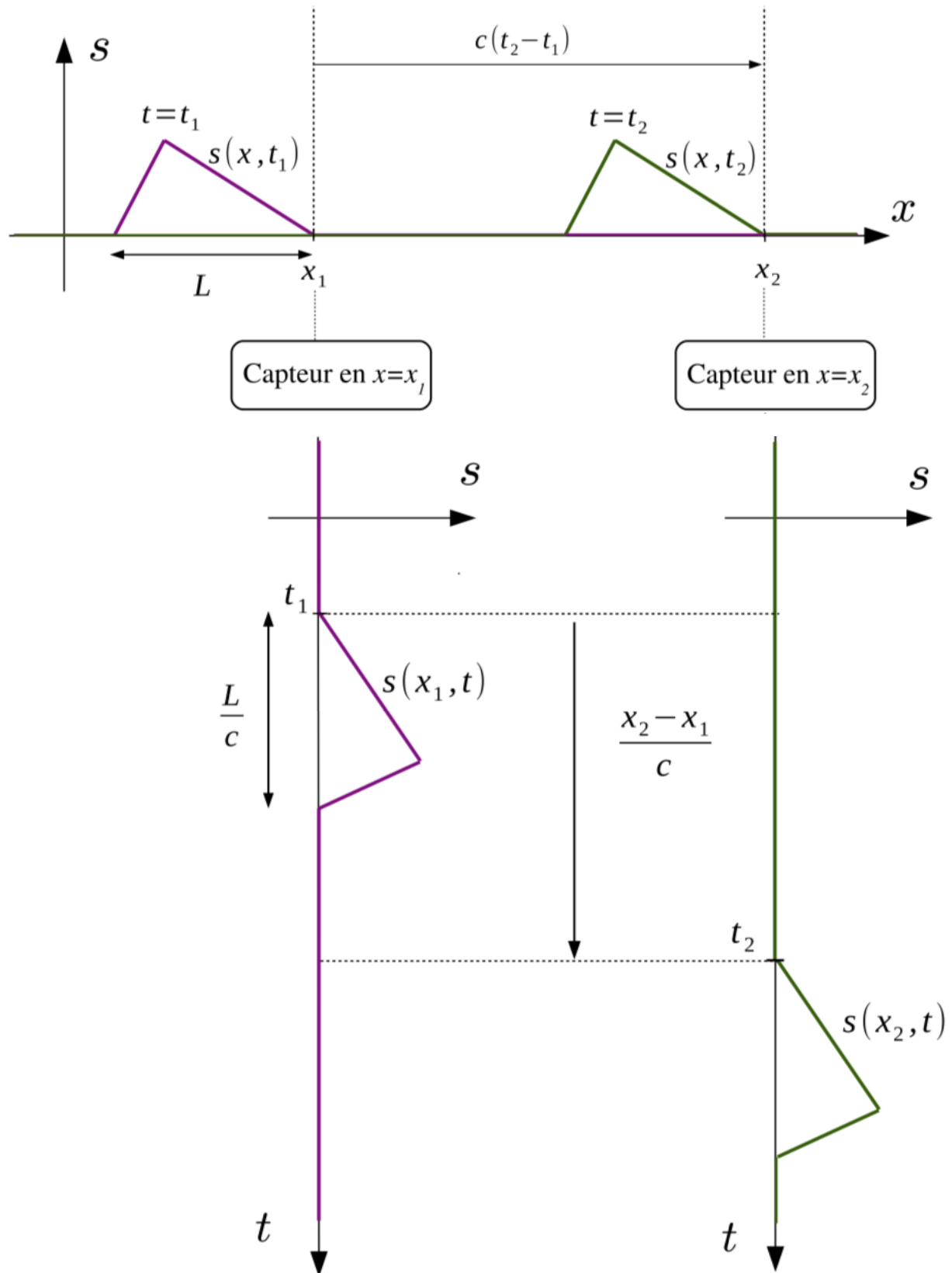
$\Delta t = x/c$ représente donc le retard du signal en M par rapport à celui en O .

Remarque : cette notion de retard lié à la vitesse finie de propagation de l'onde peut être illustrée lors de l'observation des astres : lorsqu'on dit qu'alpha du Centaure est située à 4 AL (Année Lumière) de la Terre, cela signifie qu'elle se situe à une distance parcourue en quatre années par la lumière. Si cette étoile venait à exploser nous ne pourrions en être informés que quatre années plus tard. À ce titre, le soleil est situé à environ 8 min lumière de la Terre...

Le signal reçu en M à l'instant t est le même que le signal émis en 0 à l'instant $t - \Delta t$. L'expression de ce signal sera donc $s(x, t) = s(0, t - \Delta t) = s(0, t - x/c) = f(t - x/c)$

Toute onde progressive se propageant à la vitesse c dans le sens des x croissants peut s'écrire sous la forme : $s(x, t) = f(t - x/c)$

Inversement, pour une onde se propageant dans le sens des x décroissants, on obtient, en changeant c en $-c$ une expression de la forme : $s(x, t) = g(t + x/c)$



Les deux représentations : l'amplitude du signal S en fonction du déplacement x et l'amplitude du signal S en fonction du temps

