

- différents phénomènes physiques peuvent servir de support à un signal
- ils diffèrent par :
 - le *milieu* de propagation
 - la gamme de fréquences pertinentes

Définition : Signal

Un *signal* est la variation temporelle et/ou spatiale d'une ou de plusieurs grandeurs physiques.

Signaux acoustiques**Définition : Signal acoustique**

Un signal acoustique correspond à la variation conjointe de la pression et de la vitesse des constituants du milieu

Signaux électriques

Qu'est-ce qu'un signal ADSL, téléphone filaire ?

Définition : Signal électrique

Un signal électrique correspond à la variation conjointe de la tension et de l'intensité du courant dans un circuit

Ordres de grandeur

mécanique	sismique	1 Hz → 100 Hz	LIGO2015
	gravitationnelle	10 Hz → 400 Hz	
	acoustique (audible)	20 Hz → 20 kHz	
électromagnétique	hertzien	$1 \cdot 10^4 \text{ Hz} \rightarrow 1 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$	antennes télécom, μ -ondes
	infrarouge	$1 \cdot 10^{12} \text{ Hz} \rightarrow 1 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$	chauffage, laser, observation nocturne
	visible	$1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	
	ultraviolet	$1 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \rightarrow 1 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$	analyse chimique
	X	$1 \cdot 10^{17} \text{ Hz} \rightarrow 1 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$	radiothérapie, imagerie médicale et industrielle
	γ	$1 \cdot 10^{21} \text{ Hz} \rightarrow \dots$	physique nucléaire, radioactivité, gammascopie, radiothérapie
électrique	basse fréquence	$\rightarrow 1 \cdot 10^6 \text{ Hz}$	en TP
	haute fréquence :	$\rightarrow 1 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$	pour l'émission/réception des ondes hertziennes

Onde mécanique progressive**Définition : Onde mécanique progressive**

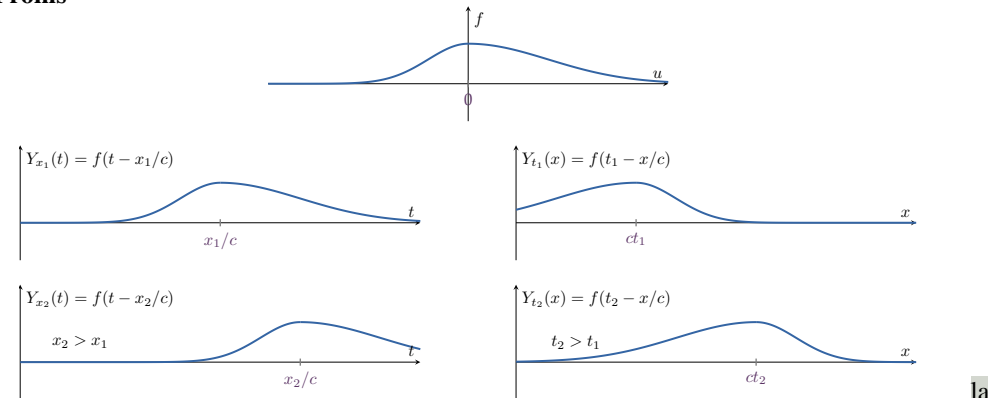
Une onde mécanique progressive est une perturbation d'un milieu *matériel* s'y propageant *sans déplacement global de matière*

Variations spatiale et temporelle**Définition : Célérité d'une onde et sens de propagation**

Une onde se propage à la *célérité* c si les évolutions temporelles des perturbations notées y_A et y_B en deux points A et B points vérifient :

$$y_B(t) = y_A\left(t - \frac{AB}{c}\right) \quad \text{ou} : y_A(t) = y_B\left(t - \frac{AB}{c}\right).$$

Le premier (resp. deuxième) cas correspond à une propagation de A vers B (resp. de B vers A).

Profils

la même fonction mathématique d'une variable permet de représenter les variations *spatiale* et *temporelle* de l'excitation en tout point

Ondes régressives et généralisation

Champ de perturbation d'une onde de célérité c

Le signal associé à une onde se propageant unidimensionnellement dans un milieu linéaire et non dispersif à la célérité c est de la forme

$$f(x - ct) \quad \text{ou} \quad g\left(t - \frac{x}{c}\right)$$

dans le cas d'une onde **progressive** se propageant vers les x croissants
ou de la forme

$$f(x + ct) \quad \text{ou} \quad g\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

dans le cas d'une onde **régressive** se propageant vers les x décroissants.

- Tracer le profil d'une perturbation y décrite par une fonction $f(u)$
 - croissante de $f = 0$ à $f = y_0$ de $u = 0$ à $u = \tau > 0$
 - nulle partout ailleurs
- Déterminer l'expression de $y = \xi(x, t)$ décrivant une onde de célérité c en propagation unidimensionnelle progressive de direction x telle que la perturbation en $x = 0$ croît de $y = 0$ à $y = y_0$ quand t croît de 0 à τ .
- En déduire les allures de :
 - $\xi(x = 0, t)$ et $\xi(x_1, t)$ pour $x_1 > 0$;
 - $\xi(x, t = 0)$ et $\xi(x, t = t_1)$ pour $t_1 > \tau$
- Même question pour une propagation régressive (et $x_1 < 0$).

Source ponctuelle dans les cas 2D et 3D**Source ponctuelle**

La perturbation créée au point M et à l'instant t par une source ponctuelle située au point M se met sous la forme :

$$\xi = a(OM)f\left(t - \frac{OM}{c}\right),$$

dans laquelle, même en l'absence de phénomènes dissipatifs, l'amplitude $a(OM)$ décroît avec la distance OM pour les cas 2D et 3D

Double périodicité : périodicité temporelle**Définition : Période**

La **période** d'un signal périodique est le plus petit intervalle de temps T tel que pour tous x, t :

$$\xi(x, t + T) = \xi(x, t)$$

Double périodicité : périodicité spatiale**Définition : Longueur d'onde**

La **longueur d'onde** d'un signal périodique est la plus petite distance λ telle que pour tous x, t :

$$\xi(x + \lambda, t) = \xi(x, t).$$

On a $\lambda = cT = c/v = 2\pi c/\omega = 2\pi/k$.

Déphasage**Définition : Phase d'une onde sinusoïdale**

La phase d'une onde sinusoïdale **en un point M et à un instant t** , notée $\Phi(M, t)$ caractérise complètement son évolution.

Le déphasage entre deux points M_1 et M_2 est indépendant du temps, il ne dépend que de la distance les séparant. On a, à 1D, pour une onde progressive selon x :

$$\Phi(M_2) - \Phi(M_1) = \frac{2\pi(x_1 - x_2)}{\lambda}.$$

Déphasages remarquables

- M_2 et M_1 *en phase*

$$\Phi(M_2) = \Phi(M_1) \pmod{2\pi} \Leftrightarrow x_1 - x_2 = p\lambda \Leftrightarrow \xi(M_2, t) = \xi(M_1, t) \forall t$$

- M_2 en quadrature *avance* par rapport à M_1 :

$$\Phi(M_2) = \Phi(M_1) + \frac{\pi}{2} \pmod{2\pi} \rightarrow x_1 - x_2 = \frac{\lambda}{4} + p\lambda.$$

ξ *maximal* en M_2 quand il est *nul* et *croissant* en M_1

- M_2 en quadrature *retard* par rapport à M_1 :

$$\Phi(M_2) = \Phi(M_1) - \frac{\pi}{2} \pmod{2\pi} \Rightarrow x_1 - x_2 = -\frac{\lambda}{4} + p\lambda.$$

ξ *maximal* en M_2 quand il est *nul* et *décroissant* en M_1

- M_2 en *opposition de phase* par rapport à M_1 :

$$\Phi(M_2) = \Phi(M_1) + \pi \pmod{2\pi} \Leftrightarrow \xi(M_2, t) = -\xi(M_1, t) \Leftrightarrow x_1 - x_2 = \frac{\lambda}{2} + p\lambda$$

Signaux non monochromatiques**Définition : Dispersion**

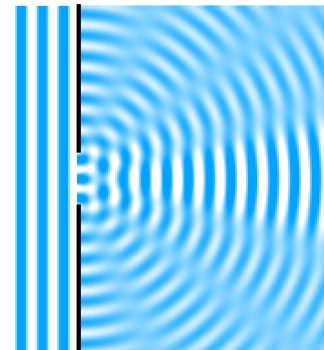
La propagation d'une onde dans un milieu est dite *dispersive* si la *vitesse de phase* $c = \omega/k$ dépend de la pulsation ω . Elle est dite *non-dispersive* dans le cas contraire.

Onde plane**Définition : Front d'onde et onde plane**

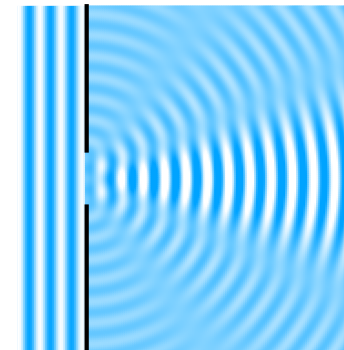
Un *front d'onde* est une surface formée des points où le *phase* est la même. Une onde *plane* est une onde dont les fronts d'ondes sont contenus dans des plans tous *perpendiculaires* à une même droite qui constitue la *direction de propagation* de l'onde : $\xi = f(t-x/c)$ (progressive) $\xi = f(t+x/c)$ (régressive)

Extension finie

- modèle de propagation des ondes : chaque point atteint devient une source ponctuelle
- les interférences entre leurs ondes donnent l'onde globale



simulation de l'onde produite par 3 sources sur la fente



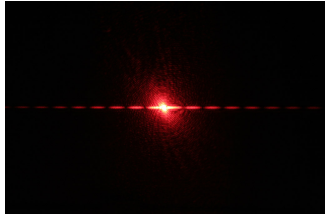
simulation de l'onde produite par 200 sources sur la fente

Définition : Cône de diffraction

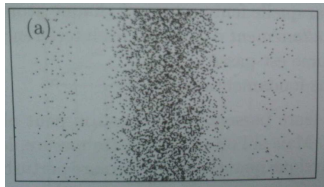
Une onde de *longueur d'onde* λ tombant sur une ouverture de *taille caractéristique* d dans la direction perpendiculaire à sa propagation est *diffractée*. Loin en aval de l'ouverture, la perturbation est essentiellement *concentrée dans un cône de demi angle au sommet* θ tel que :

$$\sin(\theta) \simeq \frac{\lambda}{d}.$$

Ubiquité



Diffraction de la lumière par une fente



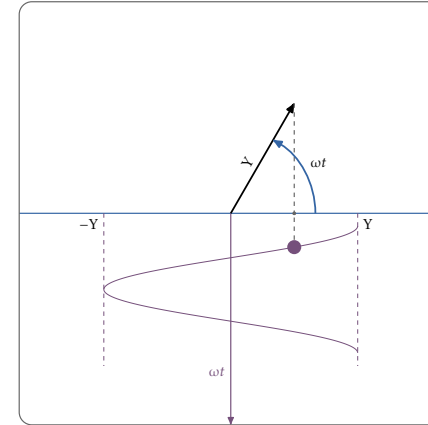
Diffraction d'un faisceau d'atomes par une fente (cf. Mécanique Quantique)

Milieu linéaire

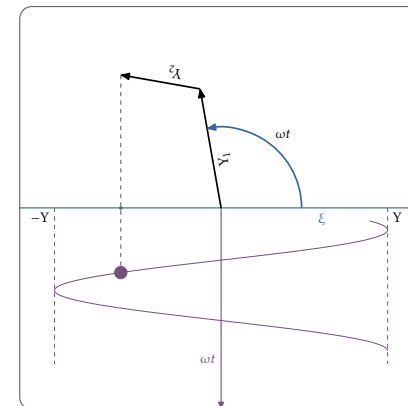
Définition : Milieu linéaire et principe de superposition

Un milieu est dit *linéaire* si la réponse à une combinaison linéaire de signaux est la même combinaison linéaire des réponses à chaque signal pris séparément. Il obéit au *principe de superposition*.

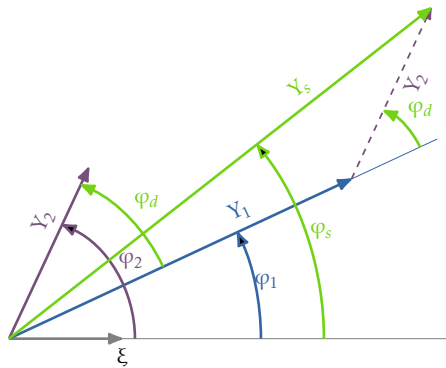
Représentation de Fresnel : principe



Représentation de Fresnel : Utilisation



Détermination graphique



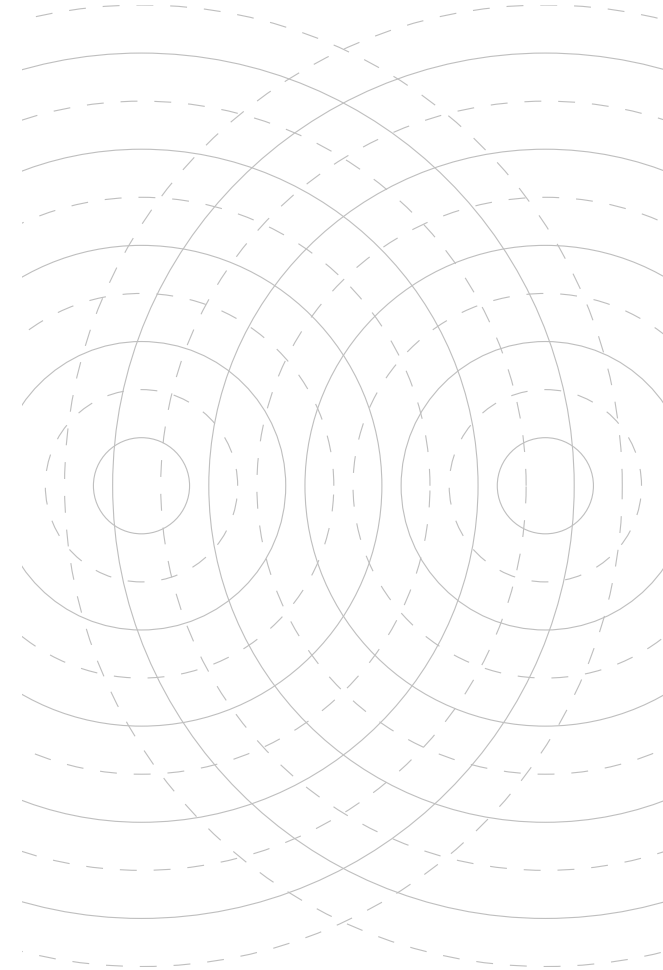
Conditions d'interférences

Conditions d'interférences

Les ondes **synchrones** de longueur d'onde λ émises par deux sources S_1 et S_2 **en phase** interfèrent :

- **constructivement** aux points M tels que $S_2M - S_1M = p\lambda \quad p \in \mathbb{Z}$
- **destructivement** aux points M tels que $S_2M - S_1M = \frac{\lambda}{2} + p\lambda \quad p \in \mathbb{Z}$

L'amplitude en interférences constructives (resp. destructives) est maximale (resp. minimale) si elles ont même amplitude X , elle vaut alors $2X$ (resp. 0).



Détermination graphique des interférences constructives

Fréquence de battement

Fréquence de battement

La somme de deux fonctions sinusoïdales $g_1(u)$ et $g_2(u)$ de fréquences ν_1 et ν_2 *proches* est une fonction *quasi-périodique* dont l'amplitude varie lentement. Dans le cas où g_1 et g_2 ont même amplitude g_0 , la somme $g_1 + g_2$ peut être décrite comme :

- une sinusoïde à la **fréquence moyenne** $\nu_0 = (\nu_1 + \nu_2)/2$,
- dont l'amplitude oscille sinusoïdalement à la **fréquence différence** $\Delta\nu = |\nu_2 - \nu_1|$, d'autant plus faible que ν_2 et ν_1 sont proches.

Chemin optique**Définition : Chemin optique**

Pour étudier la propagation, dans un milieu homogène d'indice n , d'une onde lumineuse on définit le **chemin optique** $\mathcal{L}_{M_1 M_2}$ entre deux points M_1 et M_2 comme le produit :

$$\mathcal{L}_{M_1 M_2} = n M_1 M_2$$

Interférences et chemin optique**Déphasage et chemin optique**

Pour une onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ se propageant dans un milieu homogène d'indice n :

- on considère deux points M_1 et M_2 pouvant être atteints par un rayon lumineux se propageant selon la même direction et le même sens que l'onde ;
- la phase acquise par une onde lumineuse lors de sa propagation dans un milieu homogène d'indice n d'un point M_1 à un point M_2 est égale au quotient :

$$\Delta\varphi_{M_1 M_2} = \frac{2\pi \mathcal{L}_{M_1 M_2}}{\lambda}$$

Condition d'interférences

- les interférences entre les ondes empruntant différents chemins seront **constructives** (resp. **destructives**) quand leurs **différences de chemins optiques** δ seront congrues à $0 \bmod \lambda$ (resp. congrues à $\lambda/2 \bmod \lambda$).
- dans le cas de l'expérience des trous d'Young, on aura donc des interférences :
constructives pour $\delta = n(SA_2 + A_2 M) - (SA_1 + A_1 M) = 0 \bmod \lambda$
destructives pour $\delta = n(SA_2 + A_2 M) - (SA_1 + A_1 M) = \lambda/2 \bmod \lambda$
- sur l'écran, le lieu des points contigus de même phase est nommé **frange d'interférences**

Définition : Interfrange

On nomme **interfrange**, noté δ , la distance séparant deux zones d'interférences constructives.

Dans l'expérience des trous d'Young, dans le plan $S; A_1; A_2$, elle vaut, pour $x \ll$:

$$i = \frac{\lambda D}{2na},$$

avec $2a$ la distance entre les trous.

Intensité lumineuse

Formule de Fresnel

On considère deux ondes lumineuses monochromatiques de même fréquence, d'intensité lumineuses respectives I_1 et I_2 . En un point où leur déphasage est $\Delta\varphi$, l'intensité de l'onde totale est :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi).$$

On nomme *contraste* de la figure d'interférences le quotient :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}.$$

Exercice : Expérience des trous d'Young

On réalise une expérience de trous d'Young avec une source lumineuse de longueur d'onde dans le vide égale à $\lambda = 633 \text{ nm}$. L'écran est placé à une distance $D = 2,0 \text{ m}$ du plan des deux trous qui sont identiques. On note x l'abscisse d'un point par rapport au centre de l'écran, dans la direction de l'axe des trous.

1. On mesure une interfrange de $0,5 \text{ mm}$. En déduire la distance $2a$ entre les trous.
2. En déduire l'allure de la courbe de l'intensité $I(x)$ sur l'écran.
3. Dans cette question, un des trous a un rayon deux fois plus faible que l'autre :
 - (a) L'interfrange est-elle modifiée ?
 - (b) Calculer le contraste et tracer la nouvelle allure de $I(x)$.

Interférences à l'infini**Interférences à l'infini**

Dans une expérience de trous d'Young distants de $2a$ observée à l'infini, la *différence de chemin optique* dans la direction θ entre les deux sources vaut :

$$\delta = 2a \sin(\theta)$$

Indispensable

- expressions de la phase d'une onde progressive régressive en fonction de x, t
- relations entre fréquence, période, pulsation, longueur d'onde et vitesse de phase pour une onde sinusoïdale
- déphasages remarquables
- principe de la décomposition en série de Fourier
- conditions sur les phases de deux ondes pour avoir des interférences constructives/destructives
- cône de diffraction
- chemin optique et déphasage
- dispositif des trous d'Young : calcul de l'interfrange
- formule de Fresnel de l'intensité

Indispensable