

Optique

Modèle scalaire de la lumière

Nature électromagnétique de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) .

La fréquence des ondes lumineuses visibles varie de $4 \cdot 10^{14}$ Hz à $8 \cdot 10^{14}$ Hz. La longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge).

Modèle du train d'onde

L'onde émise par une source lumineuse peut être assimilée à une succession de trains d'onde quasi monochromatiques, de durée moyenne τ_c , appelée *temps de cohérence* de la source, avec $\tau_c \gg T$, période de l'onde. On a classiquement $\tau_c = 10^{-11}$ s.

La longueur moyenne des trains d'onde, $l_c = c\tau_c$, est appelée *longueur de cohérence* de la source.

Laser $l_c \approx 30$ cm.

Lampe spectrale $l_c \approx 3$ mm.

Lampe à incandescence $l_c \approx 10$ μ m.

La longueur de cohérence d'une source décrit son caractère plus ou moins monochromatique : plus la longueur de cohérence est grande, plus l'onde est monochromatique (raie spectrale fine).

Rayon lumineux

Dans le cadre de l'approximation de l'optique géométrique, une onde lumineuse est caractérisée par une direction de propagation $\vec{u}(M)$ et une vitesse de propagation $v(M)$.

On définit l'indice optique du milieu au point M par $n(M) = c/v(M)$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Si n a même valeur en tout point du milieu, celui-ci est dit homogène.

Un rayon lumineux est une courbe tangente à $\vec{u}(M)$ en chacun de ses points.

L'approximation de l'optique géométrique est valide si les variations spatiales de l'indice optique $n(M)$ se font sur une échelle grande devant la longueur d'onde.

Modèle scalaire

La lumière est décrite par un champ scalaire $a(M, t)$, qui représente la composante du champ électrique $\vec{E}(M, t)$ de l'onde lumineuse le long de sa direction de polarisation.

Une onde sinusoïdale — ou monochromatique — émise par une source ponctuelle en S , est décrite en M par le champ scalaire

$$a(M, t) = A(M) \cos(\omega t - \varphi_M)$$

La phase en M est reliée à la phase en S par un terme de propagation :

$$a(M, t) = A(M) \cos(\omega(t - \tau_M) - \varphi_S)$$

Le terme φ_S , caractéristique de la phase lors du processus d'émission, varie aléatoirement d'un train d'onde à un autre.

- Un déphasage supplémentaire de π apparaît pour :
 - une réflexion sur un milieu plus réfringent ;
 - une réflexion sur un métal ;
 - un passage par un point de convergence.

En utilisant la notation complexe, l'onde lumineuse sera décrite par le champ scalaire :

$$\underline{a}(M, t) = \underline{A}(M) e^{i\omega t} \quad \text{avec} \quad \underline{A}(M) = A(M) e^{-i\varphi_M}$$

Chemin optique

Le chemin optique le long d'un rayon lumineux Γ allant du point S au point M est défini par :

$$(SM) = \int_S^M n(P) ds$$

l'intégrale étant calculée le long du rayon lumineux ($P \in \Gamma$).

Le chemin optique est homogène à une longueur.

- Le temps τ_M mis par la lumière pour aller de S à M est donné par $\tau_M = \frac{(SM)}{c}$.
- La pulsation de l'onde est indépendante du milieu : $\omega = 2\pi/T$; la longueur d'onde dépend du milieu : $\lambda = \lambda_0/n$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

L'amplitude scalaire en M de l'onde émise en S s'écrit

$$a(M, t) = A(M) \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{(SM)}{\lambda_0} - \varphi_S\right).$$

Surface d'onde

On considère une onde lumineuse émise par une source ponctuelle S . Une surface d'onde est le lieu des points M à égale chemin optique de la source de l'onde :

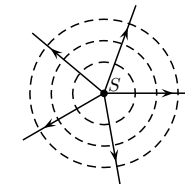
$$(SM) = \text{cte}$$

Théorème de Malus

Les rayons lumineux sont orthogonaux aux surfaces d'onde.

Onde sphérique dans un milieu homogène

Une onde sphérique est caractérisée par des surfaces d'ondes sphériques concentriques de centre S . D'après le théorème de Malus, les rayons lumineux sont des demi-droites issues de S .



Une telle onde représente l'onde lumineuse émise par une source ponctuelle S dans un milieu homogène d'indice n .

L'amplitude d'une onde sphérique de centre S est de la forme

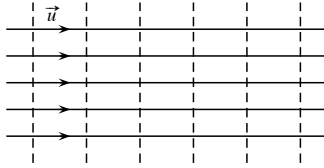
$$a(M, t) = \frac{A_0}{SM} \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{nSM}{\lambda_0} - \varphi_S\right)$$

Une onde sphérique est assimilable à une onde plane loin de la source S (c'est-à-dire si on l'étudie dans un domaine de dimension $d \ll SM$).

Onde plane dans un milieu homogène

Une onde plane est caractérisée par des surfaces d'ondes planes, parallèles entre elles.

D'après le théorème de Malus, les rayons lumineux sont donc des droites parallèles entre elles.



Une telle onde représente l'onde lumineuse émise par une source ponctuelle située à l'infini.

Dans le cas d'une source à l'infini, la phase en M ne peut pas s'écrire $\varphi_M = 2\pi \frac{(SM)}{\lambda_0} + \varphi_S$ car on a $(SM) \rightarrow \infty$. Il faut se donner une origine O arbitraire; l'amplitude de l'onde est alors donnée par

$$a(M, t) = A_0 \cos\left(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM} - \varphi_0\right)$$

où $\vec{k} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \vec{u}$ est le vecteur d'onde de l'onde lumineuse et n l'indice du milieu.

Éclairement

Les capteurs optiques sont quadratiques (*i.e.* sensibles au carré de l'amplitude de l'onde lumineuse), et mesurent une puissance lumineuse. Leur temps de réponse τ_r étant très grand devant T , période de l'onde lumineuse, ils mesurent la valeur moyenne temporelle de la puissance reçue. Cette valeur moyenne porte sur un grand nombre de trains d'onde.

On définit l'éclairement par la puissance surfacique moyenne reçue :¹

$$\mathcal{E}(M) = 2\langle a^2(M, t) \rangle$$

Dans le cas d'une onde monochromatique, l'éclairement s'écrit

$$\mathcal{E}(M) = A^2(M)$$

1. L'éclairement est ainsi défini à une constante multiplicative près. On a choisi le facteur 2 car il simplifie les calculs dans le cas des ondes sinusoïdales.