

Caractéristiques de la lumière

Historique – Domaines de l'optique

D'après <https://fr.wikipedia.org/wiki/Optique>

L'optique apparaît dès l'Antiquité puis est développée par les érudits musulmans dont des Perses. Elle est d'abord géométrique. Ibn al-Haytham (965-1039), scientifique perse, connu par les occidentaux sous le nom d'Alhazen est considéré comme le père de l'optique moderne, de la physique expérimentale et de la méthode scientifique. Une traduction latine d'une partie de ses travaux, le *Traité d'optique*, a exercé une grande influence sur la science occidentale.

L'**optique géométrique** propose une analyse de la formation des images basée sur des principes simples, en termes de **rayons lumineux**.

L'**optique physique** ou **optique ondulatoire** considère la lumière comme une **onde** ; elle permet d'interpréter les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation.

Au début du XXe siècle les théories d'Einstein sur la nature corpusculaire de la lumière donneront naissance au photon et à l'**optique quantique**.

Dualité onde-corpuscule : les physiciens disposent de deux théories pour décrire le comportement de la lumière (des objets quantiques en général) en fonction de l'expérience réalisée (photons pour l'effet photoélectrique et ondes pour les interférences par exemple).

À partir de là, Louis de Broglie considère, au travers de la mécanique ondulatoire, que si le photon peut se comporter comme un corpuscule, alors, à l'inverse, les corpuscules tels que les électrons ou les protons peuvent se comporter comme des ondes.

Optique géométrique

(Alhazen 10^{ème} siècle, Kepler et Galilée 16-17^{ème}, Snell-Descartes 17^{ème}, Newton 17-18^{ème})

L'optique géométrique s'est développée sur la base d'observations simples et repose sur deux **principes** et des lois **empiriques** :

- ✓ la propagation rectiligne dans un milieu homogène et isotrope ;
- ✓ le principe du retour inverse ;
- ✓ les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et la réfraction aux frontières entre deux milieux.

L'optique géométrique, qui est une théorie purement phénoménologique et ne fait pas d'hypothèse sur la nature de la lumière, se trouve validée a posteriori par l'optique ondulatoire, en faisant **l'approximation que tous les éléments utilisés sont de grande dimension devant la longueur d'onde de la lumière**.

Optique ondulatoire ou optique physique

(Newton, Fermat et Huygens 17^{ème}, Fresnel, Fraunhofer et Young 18-19^{ème}, Maxwell 19^{ème})

Le modèle de l'**onde scalaire** permet d'interpréter les phénomènes de diffraction (lors du passage par un trou, une fente étroite, près d'un bord...) et d'interférences.

Il faut ensuite considérer qu'il s'agit d'une **onde transversale**, si on veut interpréter les phénomènes de polarisation.

Enfin, Maxwell permettra de comprendre que les ondes lumineuses ne sont que **des ondes électromagnétiques** caractérisées par un domaine de longueurs d'ondes qui les rend visibles pour l'homme.

Optique quantique

Les problèmes liés au rayonnement du corps noir et à l'effet photoélectrique (1887) ont amené à considérer que la lumière était composée de paquets d'énergie (quanta, en allemand, d'après Einstein en 1905). Ces phénomènes et d'autres ont conduit à considérer la lumière comme constituée de particules à part entière : les **photons**.

Les photons sont caractérisés par :

- une masse nulle ;
- une vitesse égale à c (célérité de la lumière) ;
- une énergie $E = h \nu$ où ν est la fréquence de l'onde électromagnétique associée ;
- une quantité de mouvement $p = h k$ avec $h = h / 2 \pi$ où h désigne la constante de Planck et k le vecteur d'onde $\vec{k} = 2\pi/\lambda \vec{u}$ (\vec{u} vecteur unitaire de la direction de propagation).

La lumière, onde électromagnétique

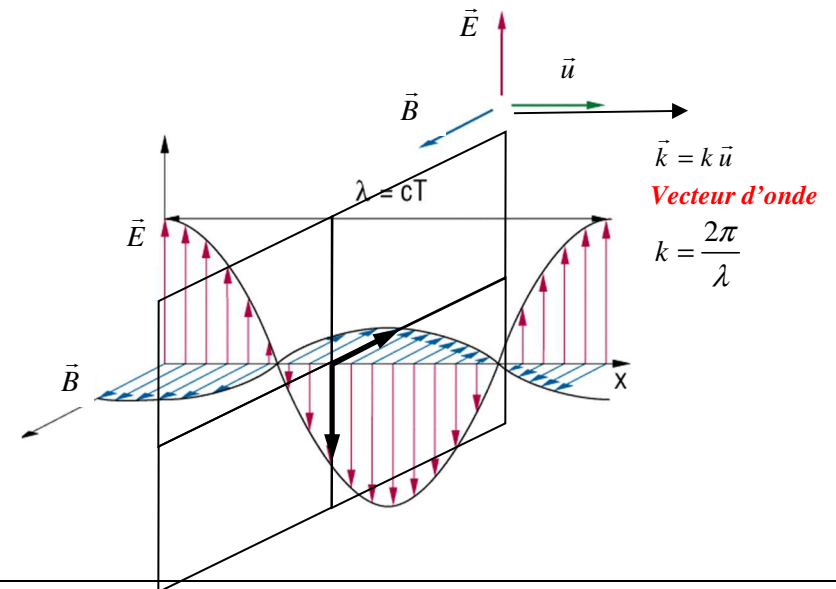
L'onde lumineuse est caractérisée par :

- sa **direction de propagation** ;
- sa **polarisation** ;
- sa **fréquence, indépendante du milieu** ; la fréquence ne dépend que du **référentiel d'étude** (cf. **effet Doppler**).

Tous ces termes sont définis précisément ci-dessous.

La lumière est une **onde électromagnétique** se propageant à la célérité $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ dans **le vide** (cette valeur fixée par convention définit le mètre en fonction de la seconde).

Une onde lumineuse plane **se propageant dans la direction** \vec{u} est un couple de **champs électrique et magnétique** (\vec{E}, \vec{B}) tels que : $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{u})$ soit un trièdre direct.

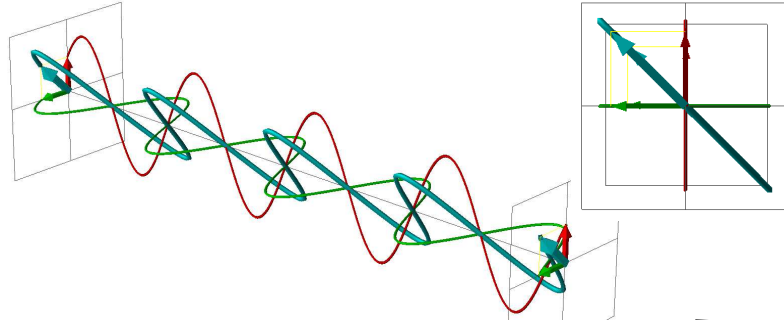


Néanmoins la direction du champ \vec{E} n'est pas nécessairement constante (de même que celle du champ \vec{B} qui lui est perpendiculaire).

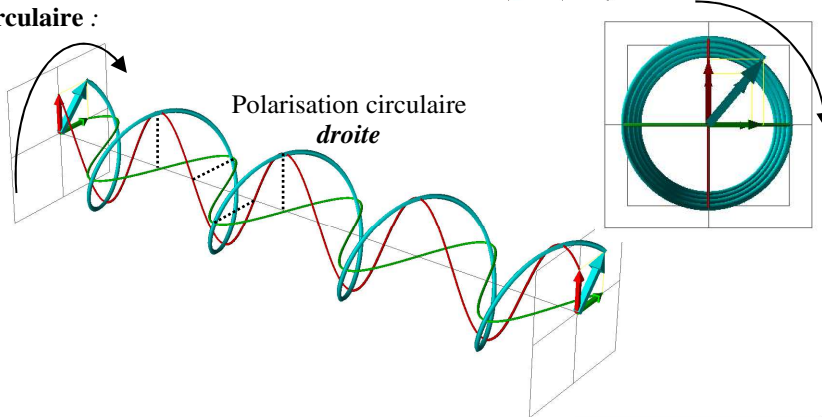
Si \vec{E} garde une **direction constante**, on dit que l'onde est **polarisée rectilignement**. La lumière naturelle n'est pas polarisée, la direction du champ évolue **aléatoirement** très rapidement (à un rythme qui dépend du mécanisme d'émission).



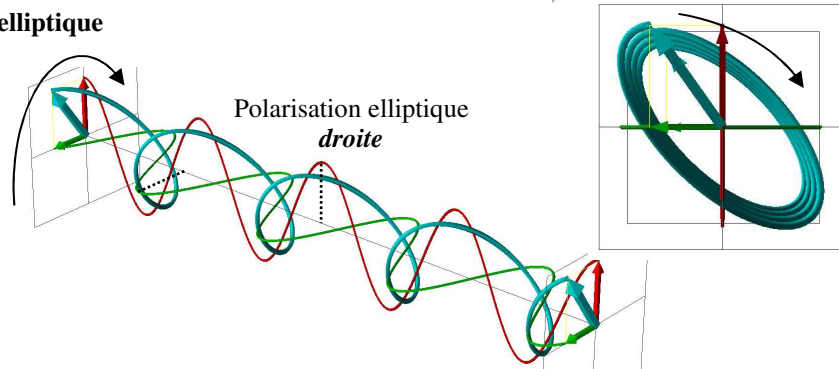
Polarisation rectiligne



Polarisation circulaire :



Polarisation elliptique



L'onde lumineuse est caractérisée par sa **fréquence, indépendante du milieu**. La fréquence ne dépend que de la **source** et du **référentiel d'étude** (cf. *effet Doppler*).

Au contraire, **la longueur d'onde dépend du milieu de propagation** via l'**indice n** caractéristique d'un milieu homogène et isotrope à une fréquence donnée.

Caractéristiques du milieu de propagation

L'indice d'un milieu **linéaire, homogène et isotrope** est :

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)} \geq 1 \quad (\text{onde de célérité } c \text{ dans le vide et } v \text{ dans le milieu considéré}).$$

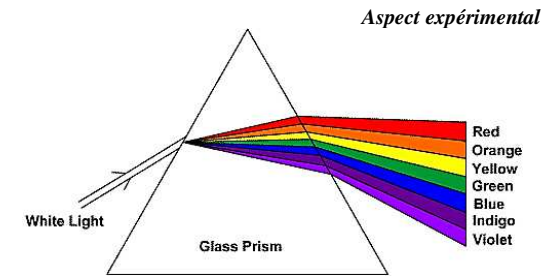
Rq : l'indice d'un gaz dépend de sa masse volumique (cf. loi de Gladstone).

La **loi de Cauchy** relie l'indice et la **longueur d'onde dans le vide λ_0** :

$$n(\lambda_0) = A + \frac{B}{\lambda_0^2} \quad (\lambda_0 = cT = \frac{c}{N}).$$

La loi de Cauchy est responsable de la **dispersion** de la lumière blanche par un prisme via la loi de la réfraction qui fait intervenir l'indice du prisme.

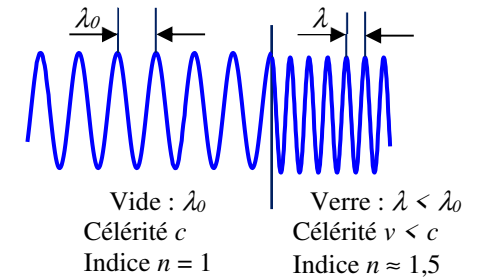
Ces deux lois permettent de justifier que le bleu est plus dévié que le rouge.



Longueur d'onde λ dans un milieu d'indice n et longueur d'onde dans le vide λ_0

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = vT \\ \lambda_0 = cT \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} = \frac{1}{n(\lambda_0)}$$

D'où $\lambda = \frac{\lambda_0}{n(\lambda_0)} < \lambda_0$ (ci-contre).



Domaine visible

λ_0 (nm)	400-440	440-490	490-570	570-585-620	620-670
Couleur	Violet	Indigo	Bleu	Vert	Jaune / Orange

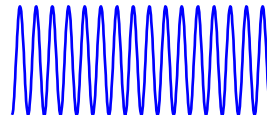
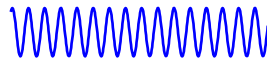
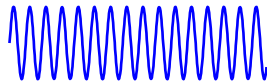
Ordres de grandeur (connaître)

Domaine visible : fréquence $N \approx 10^{14}$ Hz (100 THz), période $T \approx 10^{-14}$ s (10 fs).

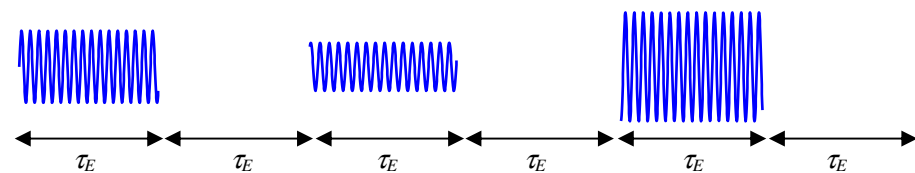
Indices : $n_{air} = 1,0003 \approx n_{vide} = 1$; $n_{eau} \approx 1,3$; $n_{verre} \approx 1,5$ (crown) à 1,9 (flint) ; $n_{diam} \approx 2,4$.

Émission - Sources lumineuses

Les mécanismes d'émission sont variés et complexes mais pour fixer les idées, considérons une source ponctuelle monochromatique.



Succession de trains d'onde émis au même point source au cours du temps



La durée d'un train d'ondes et la durée entre deux trains est de l'ordre de $\tau_E \approx 10^{-11}$ s pour une lampe spectrale ($\tau_E \approx 10^{-7}$ s pour un laser) : $\tau_E \gg T$ donc un train d'ondes est composé d'un grand nombre d'oscillations du champ (≈ 1000 pour lampe spectrale).

Les atomes d'une source lumineuse ordinaire émettent des trains d'onde de durée moyenne $\tau_E \approx 10^{-11}$ s, contenant environ 1000 oscillations, quasi monochromatiques, polarisés rectilignement mais dont l'amplitude, la phase à l'origine et la direction de polarisation varient aléatoirement au cours du temps.

Conséquence : la lumière naturelle est non polarisée.

Mécanismes d'émission spontanée (\neq laser = émission stimulée) :

- ✓ Lampe spectrale : vapeur atomique excitée (décharges électriques). Les raies émises correspondent aux désexcitations entre deux niveaux discrets ($\Delta E = h\nu$) \Rightarrow **spectre de raies**.
- ✓ Corps chauffés (soleil, ampoules à filament...) : agitation thermique \Rightarrow modification des fréquences discrètes par effet Doppler. Les vitesses n'étant pas quantifiées (chocs), les fréquences émises peuvent prendre n'importe quelle valeur \Rightarrow **spectre continu**.

Définitions :

On appelle **temps de cohérence** τ_c la durée moyenne des trains d'onde ($\tau_c \approx \tau_E$).

On note $\ell_c = c \tau_c$ la distance parcourue dans le vide pendant le temps τ_c .

ℓ_c est appelée **longueur de cohérence** (longueur des trains d'onde).

Il existe un lien entre le temps de cohérence temporelle τ_c et la composition spectrale de la source (les fréquences présentes, i.e. le spectre de largeur $\Delta\nu$) : $\tau_c \Delta\nu \approx 1$.

source lumineuse.	allure du profil spectral.	allure du paquet d'onde.
Raie monochromatique :		
Doublet de raies de même intensité :		
Distribution rectangulaire		
Raie gaussienne (attribuée à l'effet doppler, donc rôle de T) $S(\nu) = I_0 \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\sigma^2}\right]$		
Raie lorentzienne (attribuée aux collisions, donc rôle de P) $S(\nu) = \frac{I_0}{1 + 4\pi^2\tau_c^2(\nu - \nu_0)^2}$		

Détection - Intensité lumineuse

Les détecteurs sont sensibles non pas au champ électrique \vec{E} instantané dont les variations sont très rapides ($T \approx 10^{-14}$ s) mais à la **valeur moyenne du carré** du champ (on parle de détecteurs quadratiques) sur un **temps de réponse** $\tau_R \gg T$ ($\approx 1/20$ s pour l'œil, $\approx \mu s$ pour une cellule photoélectrique, $\approx 10^{-10}$ s pour des détecteurs de laboratoires).

On a donc en général $\tau_R \gg \tau_E \gg T$.

Un détecteur de surface utile S fournit un signal proportionnel à $S \langle \vec{E}^2 \rangle_{\tau_R}$ donc proportionnel à $\langle \|\vec{\Pi}\| \rangle$ (cf. cours d'électromagnétisme).

On définit donc l'**intensité** ou **éclairement** (**puissance surfacique moyenne**) en un point M par : $I(M) = K \langle \vec{E}^2(M, t) \rangle_{\tau_R}$ ou $I(M) = \alpha \langle \|\vec{\Pi}(M, t)\| \rangle_{\tau_R}$ en Wm^{-2} .

La puissance reçue par une surface S normale au faisceau lumineux est $P = I \times S$ en W.

Rq : K est un facteur de proportionnalité souvent choisi arbitrairement égal à 1 car l'intensité est utilisée pour calculer des contrastes (rapport d'intensités).