

# Nature de la lumière

Extrait de «Théorie et emploi du microscope polarisant»

*Au cours des trois derniers siècles, plusieurs théories ont été successivement proposées pour expliquer les divers phénomènes qui accompagnent la propagation de la lumière.*

*A la fin du XVIIe siècle, le Hollandais Huygens<sup>1</sup> proposait une théorie ondulatoire assortie de l'existence d'un "éther" remplissant tout l'espace et dont la vibration transmettait la lumière. Il pouvait expliquer facilement la réflexion et la réfraction des rayons lumineux. Il pensait qu'il s'agissait d'ondes de compression faut d'avoir pu mettre en évidence la transversalité des vibrations.*

*Au début du XVIIIe siècle, Newton<sup>2</sup> assimilait la lumière à un train de particules extrêmement petites se déplaçant en ligne droite, à très grande vitesse. Il reconnaissait la nécessité d'associer à sa théorie un certain aspect ondulatoire, notamment pour expliquer la formation des anneaux colorés qui portent son nom.*

*Au début du XIXe siècle, l'idée que la lumière est constituée d'ondes réapparaît. Une expérience décisive faite en 1803, par le physicien anglais Thomas Young<sup>3</sup>, démontre que la lumière issue de deux trous très fins produit des phénomènes d'interférence semblables à ceux qu'on observe en acoustique ou avec le déplacement apparent des vagues.*

*A cette même époque les Français Fresnel<sup>4</sup> et Arago<sup>5</sup> démontrent que les deux rayons issus d'un spath de calcite sont polarisés. Ils en déduisent que la lumière ne peut pas être une onde de compression comme le pensait Huygens, mais une onde vibrant perpendiculairement à sa direction de propagation.*

*L'explication claire de la nature de la lumière fut apporté par James Maxwell<sup>6</sup> en 1873. Il admet que la lumière est une onde électromagnétique consistant en des champs électriques et magnétiques perpendiculaires l'un à l'autre et normaux à la direction de propagation de l'onde. Avec cette*

---

*1 Christiaan Huygens, 1629-1695, physicien et astronome néerlandais.*

*2 Isaac Newton, 1642-1727, physicien, mathématicien et astronome anglais.*

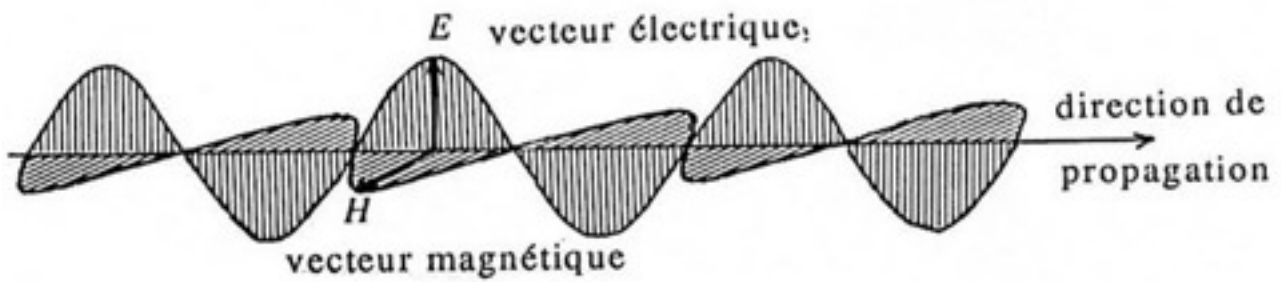
*3 Thomas Young, 1772-1829,, égyptologue et opticien anglais.*

*4 Augustin Fresnel, 1788-1827, physicien français.*

*5 François Arago, 1786-1853, physicien et astronome français*

*6 James Clerk Maxwell, 1831-1879, physicien écossais*

définition, la lumière n'est plus considérée comme une entité indépendante, mais elle est rattachée à d'autres formes d'énergie tels les rayons X ou les ondes radio, constituant le grand ensemble des ondes électromagnétiques.



$\lambda$ [mètres]	type de rayonnement	$f$ [hertz]
$10^{-13}$		$10^{21}$
$10^{-11}$	rayons $\gamma$	$10^{19}$
	rayons X	
$10^{-9}$	ultraviolet	$10^{17}$
$10^{-7}$	lumière visible	$10^{15}$
$10^{-5}$	infrarouge	$10^{13}$
$10^{-3}$	radar	$10^{11}$
$10^{-1}$	télévision	$10^9$
10	radio	$10^7$
$10^3$		$10^5$

Domaine d'application des ondes électromagnétiques. On constate que l'oeil est un récepteur qui ne perçoit qu'une très faible partie des ondes électromagnétiques, les ondes dites "visibles".

Les récents développements de la physique, en particulier l'étude du rayonnement d'un corps incandescent et la découverte de l'effet photoélectrique, ont obligé les physiciens à reconsidérer les théories de Maxwell. A la suite des travaux de Max Planck et d'Albert Einstein, on a admis, qu'en plus du caractère ondulatoire de la lumière, il fallait lui superposer un aspect corpusculaire. La lumière transporte donc des photons, particules de masse nulle au repos, dans lesquels toute l'énergie est concentrée. Chaque photon transporte une énergie égale à une constante (constante de Planck) multipliée par l'inverse de la fréquence de l'onde à laquelle il est associé.

$$E = h \times \nu \quad \text{ou encore} \quad E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

où  $h$  (constante de Planck =  $6.624 \times 10^{-34}$  [joules/seconde])

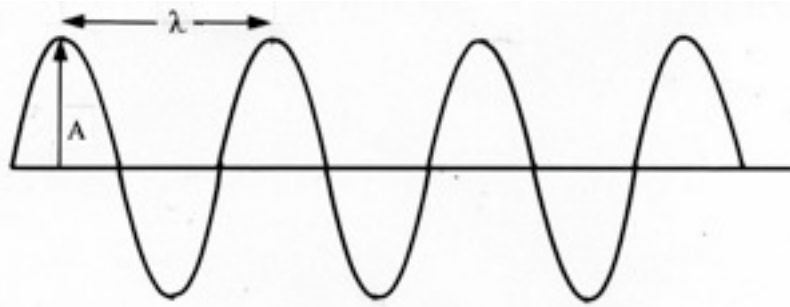
$\nu$  = fréquence,  $c$  = vitesse de la lumière,  $\lambda$  = longueur d'onde

Cette théorie peut être appliquée à toutes les particules élémentaires, en particulier aux électrons dont la longueur d'onde associée est de l'ordre de  $10^{-9}$  m. ce qui explique pourquoi ils peuvent être diffractés par un réseau cristallin.

La théorie électromagnétique de la lumière est amplement suffisante pour expliquer les phénomènes de l'optique cristalline. Nous simplifierons même cette théorie en utilisant l'expression **vibration lumineuse** sans préciser la nature de la variable qu'on appellera **particule**. Cette représentation est destinée à rendre plus intuitives certaines définitions, sans préjuger pour autant de la nature de cette particule.

## Nomenclature de la théorie des ondes

On peut considérer la lumière comme une forme d'énergie transmise par un mouvement ondulatoire. On parle d'onde transversale, c'est à dire dont les vibrations ont lieu dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. On a l'habitude de représenter graphiquement une onde par une sinusoïdale. Voici quelques caractéristiques de cette onde :



- **L'amplitude  $A$**  est la distance d'une "particule" au-dessus de son point d'équilibre maximum.
- **La fréquence  $f$**  est le nombre de vibrations effectuées par une particule en une seconde.
- **La période  $T$**  est le temps mis par une particule pour effectuer une vibration complète. C'est l'inverse de la fréquence.
- **La longueur d'onde  $\lambda$**  est la distance qui sépare deux crêtes successives de l'onde.

- **La vitesse de propagation  $v$  de l'onde** est de 299'792'458 m. par seconde dans le vide. Généralement on se contente de la valeur de 300'000 km/s. Elle est inférieure à cette valeur à l'intérieur de tous les autres corps transparents. Dans l'air elle est très légèrement inférieure à la vitesse atteinte dans le vide.

Ces divers termes sont reliés entre eux par les relations suivantes :

$$v = f \times \lambda \qquad f = \frac{v}{\lambda} \qquad \lambda = \frac{v}{f}$$

**L'intensité  $I$  d'un rayon lumineux** dépend de l'amplitude de l'onde. La relation est :

$$I = A^2$$

**La couleur d'un rayon lumineux** dépend de la fréquence<sup>7</sup> de l'onde. Voici les fréquences de quelques couleurs usuelles :



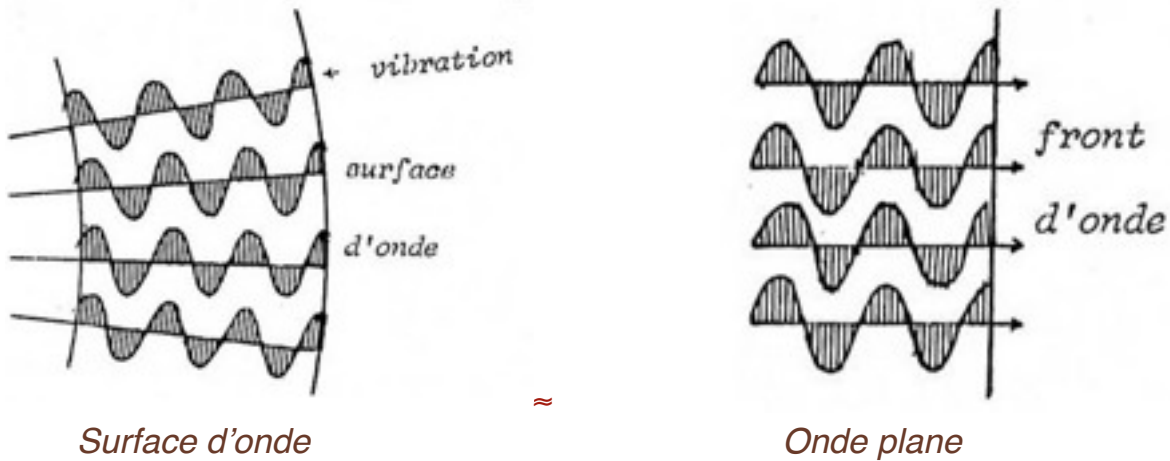
rouge	: $430 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $700 \times 10^{-6}$ mm
orange	: $490 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $620 \times 10^{-6}$ mm
jaune	: $535 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $560 \times 10^{-6}$ mm
vert	: $580 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $515 \times 10^{-6}$ mm
bleu	: $640 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $470 \times 10^{-6}$ mm
indigo	: $680 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $440 \times 10^{-6}$ mm
violet	: $730 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $410 \times 10^{-6}$ mm

Notons, à titre comparatif, que les longueurs d'onde radio sont comprises entre 10 et 3'000 m. environ, celles de la télévision sont de l'ordre du mètre, celles du radar sont de quelques centimètres.

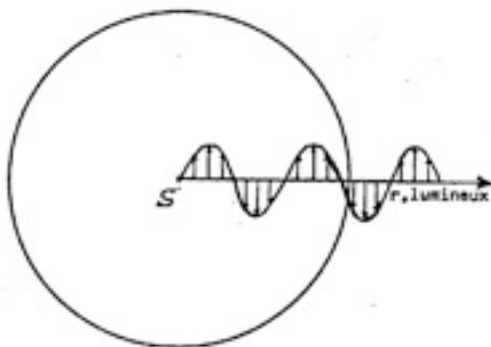
Les ondes lumineuses appartiennent au grand ensemble des ondes électromagnétiques et sont définies comme étant celles qui sont perceptibles par le détecteur limité qu'est l'oeil humain. Juste avant les ondes perceptibles par l'oeil il y a les rayons infrarouges qui sont les ondes du

<sup>7</sup> Dans la plupart des traités on indique que la couleur dépend de la longueur d'onde. Il est plus juste de dire que la couleur dépend de la fréquence car celle-ci reste constante lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre alors que la longueur d'onde change !

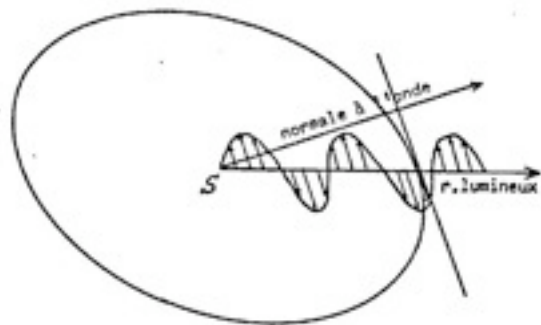
rayonnement thermique. Puis, au-delà du violet, on trouve l'ultraviolet, puis les rayons X et les rayons  $\gamma$ . **La surface d'onde** est le lieu des points atteints, après une unité de temps, par les ondes issues d'une source ponctuelle. On considère que la surface d'onde est plane lorsque la source est située à l'infini,



Dans les milieux isotropes, la surface d'onde est une sphère. Dans les milieux anisotropes, en particulier dans la plupart des minéraux, la surface d'onde est un ellipsoïde. Dans ce dernier cas, on remarque que la direction de vibration n'est plus tout à fait normale au rayon lumineux, ce qui implique que ce dernier n'est plus tout à fait perpendiculaire à la surface d'onde. Sur les figures suivantes, l'excentricité de la surface d'onde a été fortement exagérée. Dans les minéraux, l'angle entre la normale à l'onde et le rayon lumineux n'excède jamais un ou deux degrés.



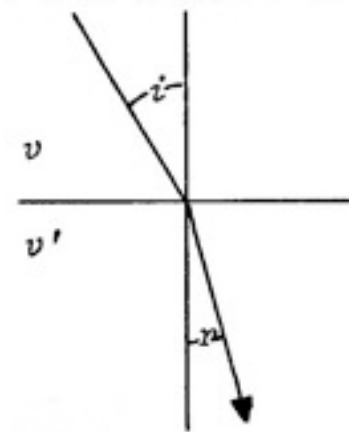
Propagation de la lumière dans un milieu isotrope



Propagation de la lumière dans un milieu anisotrope

**La lumière blanche** est l'impression que provoque sur la rétine l'ensemble des rayons colorés issus du soleil. On appelle lumière monochromatique une lumière qui est caractérisée par une longueur d'onde unique.

**L'indice de réfraction** d'un milieu transparent est un nombre sans unité qui est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur la vitesse de la lumière dans ce milieu. Ce rapport est toujours supérieur à 1. Rappelons que c'est la variation de vitesse qui est responsable de la brisure du rayon lumineux lorsque celui-ci passe d'un milieu à un autre. Nous avons alors la relation bien connue :



$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'} = n$$

où  $v$  est la vitesse de la lumière,  $v'$  celle du second milieu et  $n$  l'indice de réfraction du second milieu par rapport à celui du premier milieu. Ainsi, à l'intérieur du diamant ( $n = 2.42$ ), la vitesse de la lumière n'atteint que 124'000 km/s. On peut se demander alors, puisque l'équation de la vitesse de la lumière est  $v = f \times \lambda$ , si c'est la fréquence ou la longueur d'onde qui diminue. Nous verrons plus loin que c'est la longueur d'onde qui diminue et que la fréquence demeure constante.

On attribue à tous les milieux transparents un indice de réfraction comparé à celui du vide ( $n - 1$ ). L'indice de l'air est très faible et vaut 1.00294. L'indice de réfraction d'un corps varie légèrement suivant la fréquence utilisée. Ainsi l'indice mesuré avec une radiation violette est un peu plus élevé que celui mesuré avec le rouge. Cette variabilité de l'indice en fonction de la fréquence s'appelle la **dispersion**.

Pour fixer l'indice de réfraction d'un milieu transparent, on utilise la lumière jaune de sodium ( $= 589 \times 10^{-6}$  mm). Voici quelques exemples d'indices :

Air	1.00029	Blende	2.37
Eau	1.309	Diamant	2.42
Quartz	1.54		

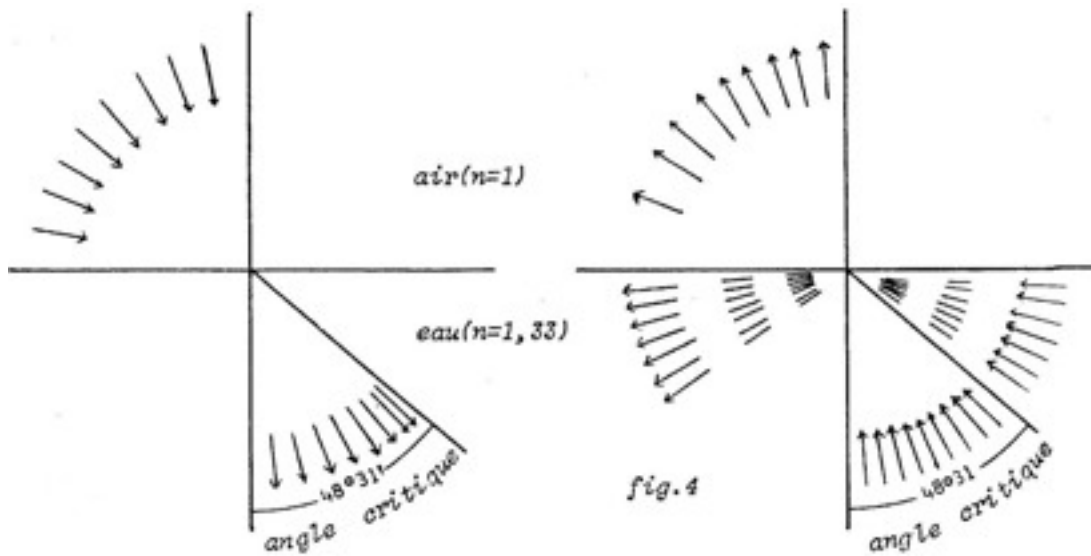
## La réflexion totale

Si on considère un rayon lumineux se déplaçant de l'air vers l'eau, on constate que les angles d'incidence peuvent être compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et les angles réfractés compris entre  $0^\circ$  et  $48^\circ 31'$ . Ce angle est appelé angle critique  $r_c$ . Il vaut :

$$\frac{\sin i}{\sin r_c} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{pour } i = 90^\circ, \sin i = 1 : \quad \sin r_c = \frac{n_1}{n_2}$$

si un des milieux est l'air, nous aurons :  $\sin r_c = \frac{1}{n}$

Prenons le cas inverse : pour des rayons d'incidence (dans l'eau) compris entre  $0^\circ$  et  $48^\circ 31'$ , nous avons des rayons réfractés (dans l'air)  $s$  compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Les rayons incidents situés au delà de  $48^\circ 31'$  sont **réfléchis totalement** sur la surface de séparation des deux milieux.



Rayons lumineux cheminant de l'air vers l'eau.

Rayons lumineux cheminant de l'eau vers l'air.

Plus l'indice de réfraction est élevé, plus l'angle critique est faible. Pour le diamant, par exemple, l'angle critique n'atteint que  $24^\circ 30'$ . Cette particularité est utilisée par les lapidaires qui taillent le diamant de manière à ce que la lumière blanche qui entre dans la pierre subisse plusieurs réflexions totales avant de s'en échapper. Ce surcroît de trajet augmente la dispersion et provoque l'apparition des "feux" colorés qui font la particularité de cette gemme.

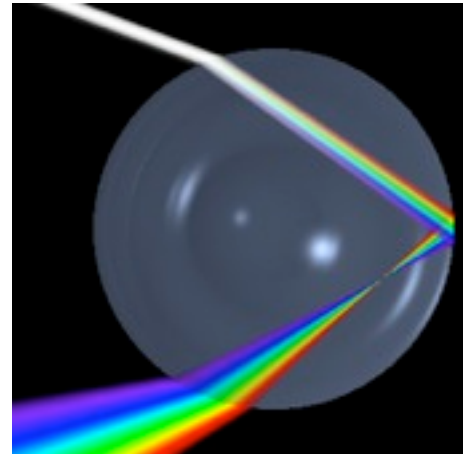
## Commentaires

*Pour mieux comprendre le mécanisme de la propagation des ondes nous pouvons recourir à l'exemple classique du caillou jeté au milieu d'un étang : autour du point de chute se développent des vaguelettes qui semblent s'éloigner d'une manière concentrique avec une vitesse qu'on peut comparer à la vitesse de l'onde. La hauteur des vaguelettes au-dessus de la surface de l'eau correspond à l'amplitude de l'onde. La distance entre deux vaguelettes successives est comparable à la longueur d'onde.*

*Si nous plaçons un bouchon sur le trajet des vaguelettes, nous le voyons osciller verticalement. La vibration a donc bien lieu perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Le bouchon oscille sur place : il n'y a donc pas déplacement de l'eau dans la direction de propagation de l'onde mais seulement une transmission d'énergie.*

*Nous avons vu que la couleur de la lumière dépendait de sa fréquence. La lumière du Soleil qui nous paraît blanche est en réalité constituée d'une multitude de rayonnements monochromatiques.*

*On peut mettre ce fait en évidence en faisant passer un rayon de soleil à travers un prisme dispersif. On obtient alors un spectre lumineux analogue à un arc-en-ciel qui est le produit de la décomposition de la lumière blanche en ses composants élémentaires. Naturellement, les myriades de gouttelettes d'eau de pluie décomposent le spectre solaire ; c'est l'arc-en-ciel.*



*Un rayon lumineux pénètre dans la gouttelette. Il subit une première réfraction qui le conduit au fond de celle-ci. Là, le phénomène de la réflexion totale renvoie le rayon de l'autre côté de la goutte où l'angle d'incidence lui permet de s'en échapper.*

*Dispersion de la lumière dans une goutte d'eau et formation d'un arc-en-ciel  
(Photo Wikipedia)*

*L'indice de réfraction de l'eau variant légèrement avec la fréquence de la lumière, le rayon solaire qui nous semblait originellement blanc est dispersé et chaque radiation ressort de la goutte sous un angle un peu différent. C'est l'arc-en-ciel. Pour l'observer dans de bonnes conditions, il faut observer une ondée avec le soleil dans le dos.*