

Chapitre I

Lumière

Sans lumière, la photographie n'existerait pas. Quand une lumière éclaire un objet, celui-ci la réfléchit et la diffuse dans diverses directions. L'appareil photo qui reçoit une partie de cette lumière peut ainsi fabriquer une image de l'objet éclairé.

Mais qu'est-ce que la lumière et comment se propage-t-elle ?

1. NATURE DE LA LUMIERE

1.1. Dualité onde et corpuscules

La lumière présente à la fois un aspect corpusculaire (photons) et un aspect ondulatoire (onde électromagnétique) qui forment un tout complémentaire et cohérent.

Du point de vue corpusculaire, la lumière est composée de particules sans masse, appelées photons, propageant de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques visibles.

Du point de vue ondulatoire, la lumière est un rayonnement électromagnétique composé d'ondes de diverses fréquences. Une lumière composée d'une seule fréquence d'onde est appelée lumière **monochromatique**. Si elle est composée de plusieurs fréquences d'ondes, elle est appelée lumière **polychromatique** (du grec *polus* nombreux et *khroma* couleur).

Par exemple, un laser émet une lumière monochromatique, constituée d'une seule couleur. Le soleil ou une ampoule à incandescence émettent des lumières polychromatiques, composées d'un grand nombre de radiations monochromatiques associées à des couleurs visibles.

1.2. Caractéristiques de la lumière

Lorsqu'on étudie une lumière monochromatique, on distingue les caractéristiques suivantes :

f : fréquence de l'onde électromagnétique associée (Hz) ;

T : période de l'onde électromagnétique associée (s) ;

v : vitesse de la lumière dans le milieu considéré (m/s) ;

λ : longueur d'onde de la lumière dans le milieu considéré (m).

La fréquence f et la période T d'une lumière monochromatique sont des caractéristiques intrinsèques de cette lumière car elles ne dépendent pas du milieu dans lequel celle-ci se déplace. En revanche, la longueur d'onde λ et la vitesse v , de déplacement d'une lumière monochromatique dans un milieu quelconque, dépendent du milieu dans lequel cette lumière se déplace.

Ces différentes grandeurs sont liées par les formules suivantes :

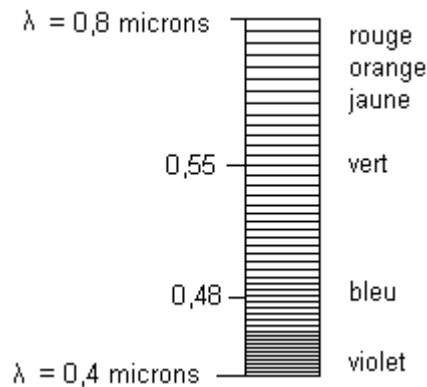
$$\lambda = v \cdot T \text{ (m)} \text{ et } T = \frac{1}{f} \text{ (s)}$$

• Cas du vide ou de l'air

Dans le vide, la lumière se déplace à une vitesse c proche de 300.000 km/s. Cette valeur est la vitesse maximale pouvant être atteinte dans l'univers par tout objet ou information en déplacement (théorie de la relativité d'Einstein).

Dans l'air, la lumière se déplace à une vitesse v sensiblement égale à sa vitesse c dans le vide.

L'œil humain est sensible aux fréquences des radiations lumineuses dont les longueurs d'ondes dans le vide (et dans l'air) sont comprises entre $\lambda = 0,4$ microns (violet) et $\lambda = 0,8$ microns (rouge). Ces radiations constituent le spectre des couleurs de lumière visible. Au-dessus, se trouvent les rayonnements infrarouges et, en-dessous, les rayonnements ultraviolets.



Ces grandeurs sont souvent exprimées en nanomètre (nm), avec un nanomètre égal à 10^{-9} mètres ou 10^{-3} microns. Dans l'air, le spectre des lumières visibles s'étend de 400 nanomètres à 800 nanomètres.

• Cas d'un milieu quelconque

Un milieu quelconque (vide, air, eau, verre...) se caractérise par son **indice de réfraction** n qui est défini par le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans ce milieu : $n = c / v$

Si ce milieu est l'air ou le vide, son indice est égal à 1. Si ce milieu est différent de l'air ou du vide, son indice est supérieur à 1. Dans tous les cas, la vitesse v de la lumière dans ce milieu est égale à c / n .

Dans un milieu différent de l'air ou du vide, n est supérieur à 1 et une lumière monochromatique de fréquence f se déplace à une vitesse v inférieure à sa vitesse c dans le vide. Chaque photon associé à cette lumière se déplace avec cette vitesse v et possède une énergie $E = h \cdot f$ joules avec :

- f fréquence en hertz (Hz) de l'onde électromagnétique ;
- h constante égale à $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s (constante de Planck).

1.3. Modélisation de la lumière

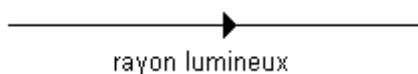
Les phénomènes mettant en jeu de la lumière peuvent être étudiés en considérant la lumière comme un ensemble :

- de rayons lumineux géométriques (optique géométrique) ;
- d'ondes électromagnétiques (optique ondulatoire) ;
- de photons (optique quantique).

• Modélisation de la lumière par des rayons lumineux

Lorsque la dimension D de l'objet considéré est très grande, par rapport à la longueur d'onde λ de la lumière ($D \gg \lambda$), ce qui est le cas en photographie, on représente la lumière par des rayons lumineux. Cette représentation permet d'interpréter les phénomènes de réflexion, de réfraction et de dispersion de la lumière, ainsi que la formation des images.

Un rayon lumineux est représenté par un segment de droite orienté, avec une flèche dirigée dans le sens de propagation de la lumière.

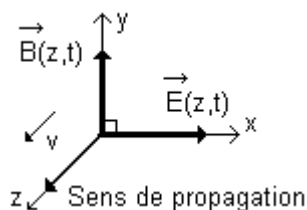


• Modélisation de la lumière par une onde électromagnétique

Lorsque la dimension D de l'objet considéré est sensiblement égale à la longueur d'onde λ de la lumière ($D \approx \lambda$), on représente la lumière par des ondes électromagnétiques. Cette représentation permet d'interpréter les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation de la lumière.

Une onde électromagnétique se déplaçant en ligne droite avec une vitesse v , dans une direction z à l'intérieur d'un milieu d'indice n , est composée en tout point d'un champ électrique $E(z,t)$ et d'un champ magnétique $B(z,t)$.

Ces deux champs sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation z . Les vecteurs $E(z,t)$, $B(z,t)$ et z forment un trièdre direct et sont liés par la formule $E(z,t) = v \cdot B(z,t)$.



Le champ électrique $E(z,t)$ et le champ magnétique $B(z,t)$ de l'onde lumineuse se mesurent respectivement en volt par mètre et en tesla.

La puissance énergétique $P_s(z,t)$, par unité de surface perpendiculaire à l'axe z , d'une onde électromagnétique se propageant dans la direction z , est appelée **irradiance** ou **éclairage radiométrique** (éclairage énergétique). Sa valeur est égale à :

$$P_s(z,t) = \frac{E(z,t) \cdot B(z,t)}{\mu} \text{ W.m}^{-2} \quad \text{avec } c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \quad \text{et } v^2 = \frac{1}{\epsilon \mu}$$

c vitesse de la lumière dans le vide, en mètres par seconde

μ perméabilité magnétique du milieu

ϵ permittivité du milieu

Dans le vide, $\mu = \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ m.kg.s}^{-2} \text{ A}^{-2}$ et $\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$.

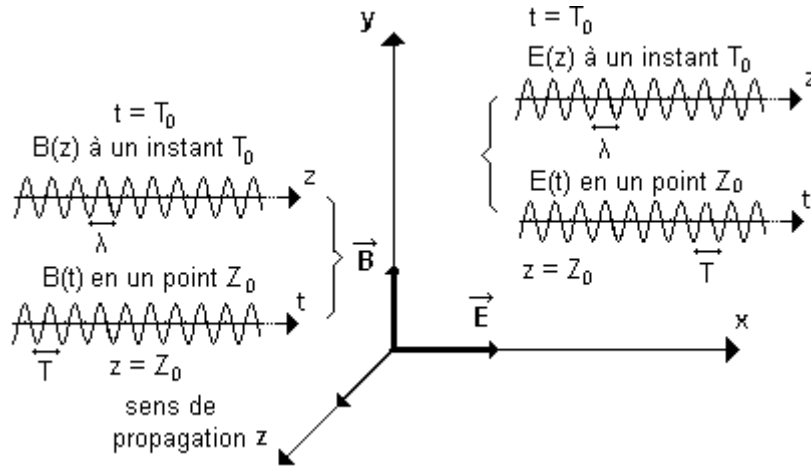
- Cas particulier de l'onde monochromatique

Une onde lumineuse monochromatique se propageant dans une direction z peut être représentée par les équations suivantes :

$$E(z,t) = E_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right) + \varphi \right] \quad \text{et} \quad B(z,t) = B_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right) + \varphi \right]$$

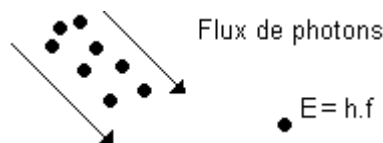
λ longueur d'onde de l'onde lumineuse, en mètre

φ phase de l'onde lumineuse, en radians (sans dimension)



- Modélisation de la lumière par un flux de photons

Lorsque la dimension D de l'objet considéré est inférieure à la longueur d'onde λ de la lumière ($D < \lambda$), on représente la lumière par un flux de photons ayant chacun une énergie individuelle $E = hf$. Cette représentation permet d'interpréter l'effet photo-électrique.



Si une lumière de fréquence f transporte n photons par seconde, l'énergie totale par seconde, c'est-à-dire la puissance, rayonnée par cette lumière est :

$$P = nhf \text{ (W)}$$

2. PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

Quand on photographie un objet, la lumière diffusée par cet objet arrive en général sur l'appareil photo en ligne droite. Parfois, certains rayons lumineux parviennent à l'appareil photo après avoir été réfléchis par une surface (eau, miroir...) ou après avoir été réfractés. Le phénomène de réfraction se produit si on photographie un objet à travers une vitre ou à travers un objet transparent par exemple.

2.1. Milieux de propagation

On appelle milieu une substance liquide, solide ou gazeuse, à l'intérieur (ou à la frontière) de laquelle se produit un phénomène physique.

Un milieu est **transparent** s'il se laisse traverser par la lumière. Il est opaque dans le cas contraire. On peut remarquer qu'un milieu transparent devient de plus en plus opaque au fur et à mesure que son épaisseur augmente. Ainsi, l'eau devient opaque lorsqu'elle présente une profondeur de plusieurs dizaines de mètres.

Un milieu **homogène** est composé d'éléments de même nature. L'air et l'eau sont en général des milieux localement homogènes mais peuvent ne pas l'être dans certaines conditions. Par exemple, selon les conditions atmosphériques, l'air n'est pas toujours homogène. Son contenu peut varier en fonction de l'altitude ou en fonction du lieu considéré. Ceci peut conduire à certains phénomènes d'apparence surnaturelle comme les mirages.

Un milieu **isotrope** possède des propriétés identiques dans toutes les directions. L'air et l'eau sont en principe des milieux isotropes. Une pierre précieuse taillée n'est pas isotrope.

Dans ce livre, on s'intéresse aux milieux et objets suivants qui sont fréquemment rencontrés en photographie :

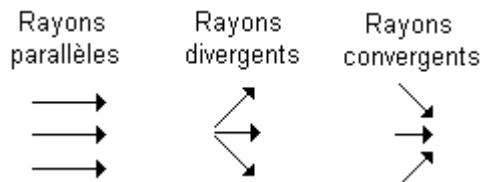
- L'air, l'eau et le verre qui sont en général des milieux localement homogènes, transparents, isotropes (MHTI) et dans lesquels la lumière se propage en ligne droite ;
- Les objets à photographier (un visage, une fleur...) qui constituent en général des milieux qui ne sont pas homogènes, transparents et isotropes.

2.2. Propagation rectiligne

Pour étudier le trajet suivi par la lumière, on schématise celle-ci avec des rayons lumineux convergents, divergents ou parallèles, en précisant le sens du parcours à l'aide de flèches.

Pris isolément, ces rayons n'ont pas d'existence physique mais leur dessin permet d'interpréter un grand nombre de phénomènes lumineux, comme par exemple la formation des ombres et des images, et de calculer les paramètres correspondants.

Le schéma suivant illustre la représentation de la propagation rectiligne de la lumière à l'aide de rayons lumineux.



2.3. Réflexion et la réfraction

Dès le 17^{ème} siècle, les mathématiciens et physiciens néerlandais et français **Snell** (1580-1626) et **Descartes** (1596-1650) ont pu observer, comprendre et expliquer la façon dont la lumière se comportait lorsqu'elle rencontrait la surface de séparation entre deux milieux.

Loi de Snell - Descartes

À l'interface séparant 2 milieux homogènes et isotropes, la lumière ne peut subir que des phénomènes de réflexion et de réfraction.

Une lumière qui rencontre un miroir lors de sa propagation se réfléchit en totalité à la surface de ce miroir.

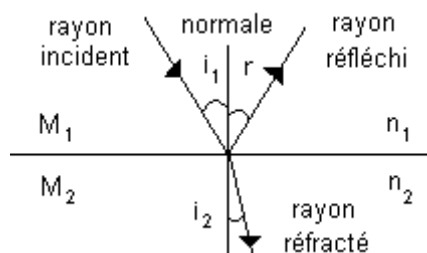
Une lumière qui se propage dans l'air et qui rencontre de l'eau ou du verre subit à la fois une réflexion (rayon réfléchi) et un changement de direction (rayon réfracté). Elle ne subit pas de réflexion ni de réfraction si le rayon lumineux incident est perpendiculaire à la surface séparant les deux milieux.

La valeur du changement de direction subit par la lumière incidente dépend, d'une part, de l'angle que forme cette lumière avec la surface qu'elle rencontre et, d'autre part, de l'indice de réfraction n du milieu rencontré.

L'indice n est égal à 1 pour l'air, supérieur à 1 pour le verre et égal à environ 4/3 pour l'eau.

Soient deux milieux M_1 et M_2 , homogènes, transparents et isotropes et soient :

- n_1 et n_2 les indices de réfraction de ces milieux ;
- i_1 et i_2 les angles que forment les rayons lumineux incident et réfracté, par rapport à la normale à la surface de séparation des 2 milieux ;
- r l'angle que forme le rayon lumineux réfléchi, par rapport à la normale à la surface de séparation de ces 2 milieux.



La lumière se réfléchit et se réfracte en suivant les règles ci-après :

- 1) le rayon réfléchi se trouve dans le plan formé par le rayon incident et par la normale à la surface de séparation des deux milieux (plan d'incidence) ;
- 2) l'angle de réflexion r est égal à l'angle d'incidence i_1 ($r = i_1$) ;
- 3) le rayon réfracté se trouve dans le plan d'incidence ;
- 4) l'angle de réfraction i_2 est tel que $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$, d'où $n_1 \cdot i_1 \approx n_2 \cdot i_2$ si les angles i_1 et i_2 sont suffisamment petits ;
- 5) le chemin suivi par la lumière, de chaque côté de la frontière séparant les deux milieux, est inchangé quand on inverse le sens de propagation (principe du retour inverse de la lumière)

L'indice de réfraction n d'un milieu pour une lumière donnée dépend : de la longueur d'onde λ de la lumière considérée ; de la température T ; et de la pression P de ce milieu. Donc $n = n(\lambda, T, P)$.

La formule empirique de Cauchy suivante peut être utilisée, en première approximation, pour une onde lumineuse monochromatique se propageant avec une longueur d'onde λ à l'intérieur d'un milieu M transparent comme le verre.

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

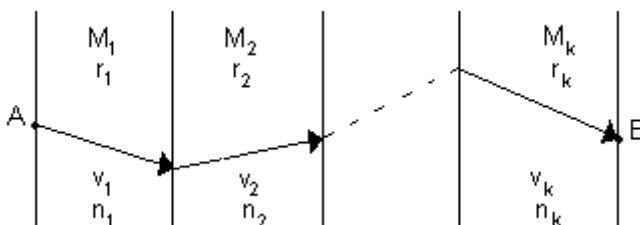
2.4. Principe de Fermat

Pierre Fermat (1601-1665) est un juriste et mathématicien français du 17^{ème} siècle, auteur de nombreux travaux en mathématiques et en sciences physiques. Il est connu pour ses travaux en optique, illustrés par le fameux principe de Fermat qui généralise la loi de Snell-Descartes à un milieu quelconque :

Principe de Fermat

Dans un milieu quelconque, pour se rendre d'un point A à un point B, la lumière emprunte une trajectoire qui lui assure une durée de trajet minimale.

Supposons que, pour aller d'un point A à un point B un rayon lumineux traverse un ensemble de milieux M_1, M_2, \dots, M_k , d'indices de réfraction n_1, n_2, \dots, n_k , en parcourant des distances r_1, r_2, \dots, r_k avec des vitesses v_1, v_2, \dots, v_k .



Le temps T mis par le rayon lumineux pour traverser l'ensemble de ces milieux est donné par l'équation suivante :

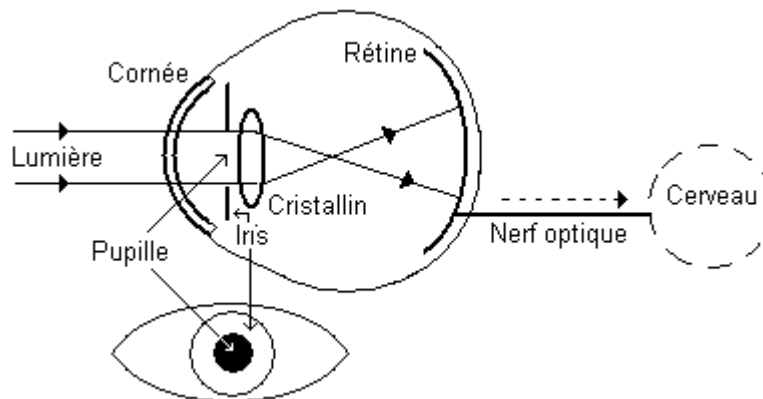
$$T = \sum_{i=1}^k \frac{r_i}{v_i} \quad \text{avec} \quad n_i = \frac{c}{v_i} \quad \text{d'où} \quad T = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^k n_i r_i$$

L'expression $L = \sum_{i=1}^k n_i r_i$ est appelée chemin optique du rayon lumineux, avec $L = cT$.

Dans le cas de la traversée d'un milieu unique dont l'indice n varie de façon continue, le chemin optique devient : $L = \int_A^B n(r) dr$.

3. Perception de la lumière par l'oeil

L'oeil perçoit et utilise la lumière comme un appareil photo.



Les rayons lumineux, en provenance d'un objet ou d'une scène, pénètrent dans l'oeil à travers la cornée, puis traversent la pupille et le cristallin. Ces éléments constituent un système optique évolué qui forme sur la rétine une image de la scène regardée.

L'iris règle automatiquement le diamètre de la pupille en fonction de l'intensité de la lumière entrante, de façon à assurer une exposition correcte de la rétine, comme le ferait le diaphragme d'un appareil photo. Le signal lumineux reçu par la rétine est ensuite transmis au cerveau sous forme d'influx nerveux, via le nerf optique. Le cerveau interprète ces informations pour reconstituer l'image de l'objet.

La rétine est tapissée de deux types de cellules nerveuses (les bâtonnets et les cônes) dont le rôle consiste à capter la lumière et à transformer les informations lumineuses reçues en signaux nerveux.

- Les bâtonnets (plus de 100 millions) sont plus nombreux et plus sensibles à la lumière que les cônes mais ils n'interprètent pas les couleurs. Les bâtonnets présentent une densité plus forte sur la périphérie de la rétine. Ils travaillent uniquement en niveaux de gris et sont particulièrement adaptés à la vision en basse lumière (vision crépusculaire notamment) ;
- Les cônes (environ 5 millions) sont moins nombreux et moins sensibles à la lumière que les bâtonnets mais ils perçoivent les couleurs. Ils sont particulièrement sensibles aux mouvements et aux détails car ils sont concentrés dans la région centrale de la rétine. Les cônes sont particulièrement adaptés à la vision diurne.