

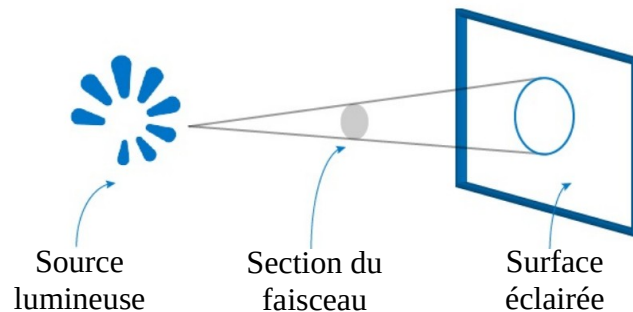
Photométrie

La quantité de lumière et donc l'énergie transmise par le faisceau jouent un rôle très important sur la qualité de l'image formée par l'instrument optique.

Flux d'énergie lumineuse

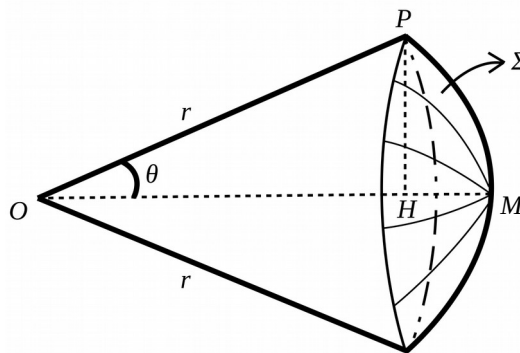
Le flux d'énergie F_e représente l'énergie lumineuse ΔE qui traverse une section du faisceau par unité de temps, il s'exprime donc en watt W sous la forme:

$$F_e = \frac{\Delta E}{\Delta t} .$$



Angle solide

On cherche à caractériser la partie de l'espace délimitée par un cône de sommet O et de demi-ouverture θ . On considère la calotte sphérique de rayon r et d'aire Σ délimitée par ce cône :



L'**angle solide** Ω associé au cône est définie par :

$$\Omega = \frac{\Sigma}{r^2} .$$

La définition de l'angle solide est indépendante du choix de la distance r .

L'angle solide est donc l'équivalent tridimensionnel de l'angle plat usuel : pour un observateur, c'est le rapport entre la surface apparente d'un objet et le carré de sa distance. L'angle solide se mesure en stéradians (sr).

Intensité lumineuse

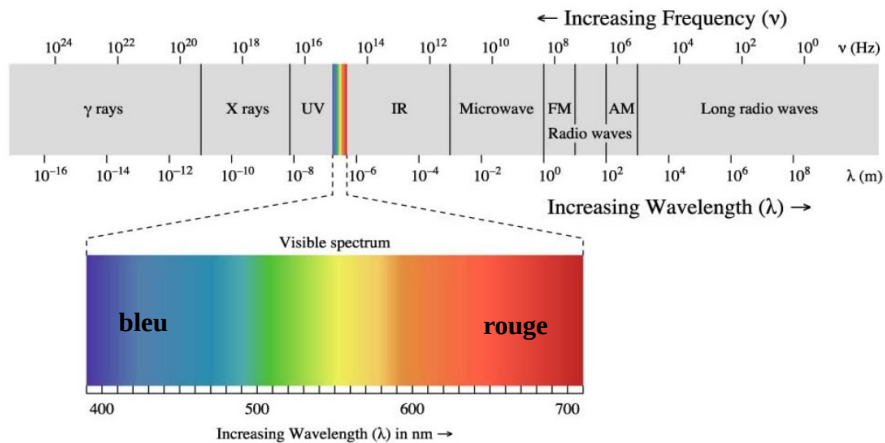
On utilise la notion d'intensité lumineuse pour décrire la densité de flux lumineux émise par la source. L'intensité lumineuse I est définie comme le flux lumineux par unité d'angle solide et s'exprime en Candela (cd)

$$I = \frac{F_e}{\Omega} .$$

Efficacité visuelle de l'œil

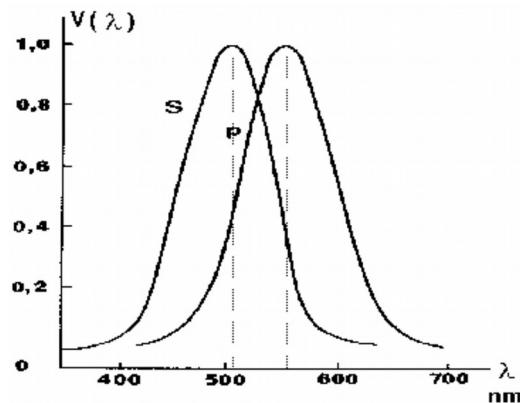
La lumière est une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde λ .

Spectre électromagnétique :



Le spectre de la lumière visible ne représente qu'une infime partie.

L'œil humain ne perçoit pas toutes les couleurs avec la même sensibilité. Donc, on corrige le flux d'énergie introduite précédemment en le pondérant par une **fonction d'efficacité visuelle**. Les courbes ci-dessous représentent la variation de l'efficacité visuelle de l'œil humain $V(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde λ en vision photoscopique (vision de jour) et en vision scotoscopique (vision de nuit) :



Le maximum de sensibilité de l'œil se situe en moyenne à 555 nm (entre vert et jaune) en vision photoscopique et à 507 nm (entre bleu et vert) en vision scotoscopique. La sensibilité devient nulle pour l'infrarouge ou l'ultraviolet qui se situent hors du domaine du spectre visible.

On définit le **flux lumineux visible** F pour un faisceau lumineux monochromatique de longueur d'onde λ sous la forme :

$$F(\lambda) = F_e(\lambda) \times K \times V(\lambda) ,$$

il s'exprime en **lumen** (lm). La correspondance entre le lumen et le watt dépend de la longueur d'onde et de conditions d'observation (photoscopique ou scotoscopique) : $K = 683 \text{ lm/W}$ en vision photoscopique et $K = 1700 \text{ lm/W}$ en vision scotoscopique. Par exemple, pour une vision de jour :

- 1 W = 683 lm pour $\lambda = 555 \text{ nm}$
- 1 W = 341 lm pour $\lambda = 510 \text{ nm}$

Facteurs de transmission et de réflexion

Le flux d'énergie F incident sur un système optique se répartit de la façon suivante :

$$F = F_T + F_R + F_A ,$$

avec F_T le flux transmis, F_R le flux réfléchi et F_A la partie de l'énergie lumineuse absorbée par le système optique (souvent converti en chaleur).

Le **facteur de transmission** T et le **facteur de réflexion** R sont définis comme :

$$T = \frac{F_T}{F} = \frac{I_T}{I} \quad \text{et} \quad R = \frac{F_R}{F} = \frac{I_R}{I} ,$$

avec I_T intensité transmise, I_R intensité réfléchie et I intensité incidente.

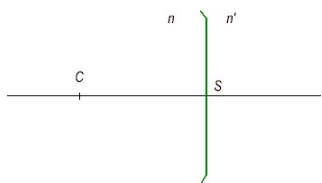
Si F_A est négligeable, alors $F = F_T + F_R$, on a donc :

$$T + R = 1 .$$

Par exemple, pour un miroir parfait, on aurait $T=0$ et $R=1$.

Dioptre

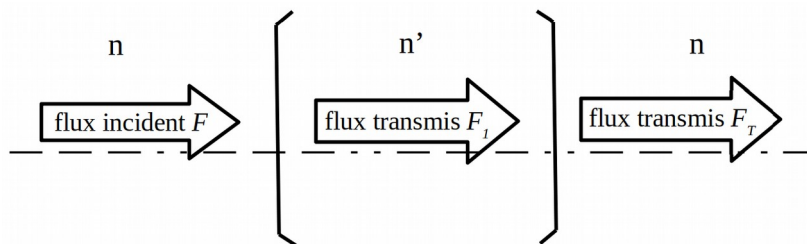
Pour un **dioptre** (sphérique ou plan), éclairé dans les conditions de Gauss, on a :



$$R = \left(\frac{n - n'}{n + n'} \right)^2 \quad \text{et} \quad T = 1 - R = \frac{4nn'}{(n + n')^2} .$$

Lentille

Une **lentille** résulte de l'association de deux dioptrés sphériques :



Le facteur de transmission T_1 du premier dioptré ($n \rightarrow n'$) et le facteur de transmission T_2 du second dioptré ($n' \rightarrow n$) sont :

$$T_1 = \frac{F_1}{F} = \frac{4nn'}{(n+n')^2} \quad \text{et} \quad T_2 = \frac{F_T}{F_1} = \frac{4n'n}{(n'+n)^2} = T_1 .$$

On obtient donc le facteur de transmission T de la lentille :

$$T = \frac{F_T}{F} = \frac{F_1 \times T_2}{F} = \frac{F_1}{F} \times T_2 = T_1 \times T_2 = T_1^2 .$$

Le facteur de transmission d'un système optique composé d'une succession de plusieurs dioptrés de facteurs de transmission T_1, T_2, \dots est :

$$T = T_1 \times T_2 \times \dots .$$

Exercices

Ex 1 : Facteur de transmission d'une lentille mince

Une lentille mince est taillée dans un verre d'indice $n=1,5$ et plongée dans l'air.

1. Calculer le facteur de transmission du dioptre $\text{air} \rightarrow n$.
2. Calculer le facteur de transmission de la lentille.

Ex 2 : Facteur de réflexion d'un miroir plan

Un miroir est constitué d'une plaque en verre d'indice $n=1,45$ dont l'une des faces est recouverte d'une fine couche d'aluminium. Le facteur de réflexion de la couche vaut $R_{\text{alu}}=0,90$.

Calculer le facteur de réflexion du miroir.

Ex 3 : Facteur de transmission d'un objectif photographique

Un objectif photographique supposé achromatique, est constitué de deux lentilles L_1 et L_2 .

Les deux lentilles sont taillées dans le même verre d'indice $n=1,6$.

La distance focale image du téléobjectif vaut $f'_{\text{ob}}=30\text{ mm}$ et son encombrement, 40 mm .

1. Calcul des distances focales de L_1 et de L_2

- 1.1. Montrer que la distance focale de la première lentille est solution de l'équation :

$$(f'_1)^2 - 2e \cdot f'_1 + e \cdot f'_{\text{ob}} = 0.$$

- 1.2. Sachant que L_2 est la lentille la plus convergente, calculer f'_1 et f'_2 .

2. Facteur de transmission du téléobjectif

Calculer le facteur de transmission du téléobjectif.

3. Champ transversal

- 3.1. La matrice CCD est située 15 mm derrière la lentille L_2 . Le champ de pleine lumière dans l'espace image a un diamètre de 10 mm . On admet que la monture de L_2 est diaphragme d'ouverture, son diamètre vaut $\phi_2=20\text{ mm}$.

Construire graphiquement le faisceau utile convergent vers le point B_{PL} du bord du champ de plein lumière (échelle horizontale : 1/1 échelle verticale : 1/1).

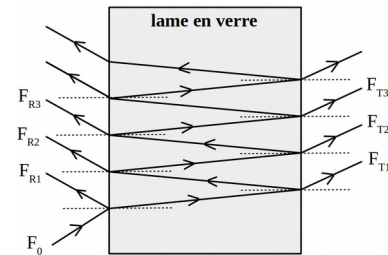
- 3.2. À l'aide de la construction graphique, déterminer le diamètre minimum de L_1 de sorte que le faisceau utile ne soit pas interrompu lors de son passage au travers de L_1 .

Ex 4 : Transmission et réflexion d'une lame à faces parallèles

On considère une lame à faces parallèles, éclairée par un faisceau transportant un flux lumineux incident noté F_0 . L'angle d'incidence est très faible, dans ces conditions, le facteur de réflexion du dioptre (air/verre) vaut : $R=3 \cdot 10^{-2}$. On néglige l'absorption par le verre de la lame.

1. Calculer l'indice optique du verre et le facteur de transmission du dioptre (air/verre).

2. Calculer les rapports $\frac{F_{R1}}{F_0}$, $\frac{F_{R2}}{F_0}$ et $\frac{F_{R3}}{F_0}$, pour les faisceaux réfléchis, ainsi que les rapports $\frac{F_{T1}}{F_0}$, $\frac{F_{T2}}{F_0}$ et $\frac{F_{T3}}{F_0}$ des faisceaux transmis par la lame.



3. Quelle remarque peut-on formuler ?

Ex 5 : Transmission d'un doublet de lentilles accolées

La lentille de champ d'un objectif photographique est composée de deux lentilles minces accolées :

- une lentille L_1 biconvexe, taillée dans un verre crown d'indice $n_1=1,52$ et de constringence $\nu_1=75$. Le rayon de courbure de sa face d'entrée vaut $R_1=80\text{ mm}$ et celui de sa face de sortie, $R_2=-121\text{ mm}$.
- une lentille L_2 concave-plan, taillée dans un verre flint d'indice $n_2=1,61$ et de constringence $\nu_2=35$.

Les deux lentilles sont assemblées à l'aide d'une résine spéciale (baume du Canada) d'indice optique $n=1,55$.

1. Calculer la vergence du doublet.
2. Le doublet est-il achromatique ? (on néglige la présence de la couche de résine pour cette question)
3. Calculer le facteur de transmission du doublet.
4. Quelle serait la valeur du facteur de transmission si on remplaçait la résine par une couche d'air ?
5. L'utilisation de la résine permet d'éviter la formation d'image fantôme entre L_1 et L_2 , expliquer brièvement pourquoi.