Optique – Chapitre 1

Rappels d'optique

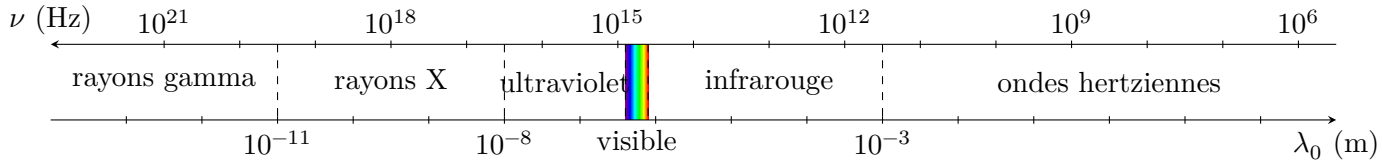
I. Émission de lumière . . . 1
I.1. Spectre des ondes électromagnétiques . . . 1
I.2. Sources lumineuses . . . 2
II. Principes de l'optique géométrique . . . 2
II.1. Notion de rayon lumineux . . . 2
II.2. Indice optique . . . 2
II.3. Lois de Snell-Descartes . . . 3
II.4. Étude de la fibre optique à saut d'indice . . . 3
III. Modèles du miroir plan et de la lentille mince . . . 4
III.1. Nature des objets et des images . . . 4
III.2. Miroir plan . . . 4
III.3. Lentille mince . . . 5
III.4. Stigmatisme et conditions de Gauss . . . 7
IV. Modélisation de quelques dispositifs optiques . . . 7
IV.1. Modèle de l'œil . . . 7
IV.2. Modèle de l'appareil photographique . . . 8
V. Dualité onde-corpuscule . . . 9

L'optique géométrique décrit la propagation de la lumière à partir de l'étude des rayons lumineux. Nous allons rappeler ses principales caractéristiques dans ce chapitre.

I. Émission de lumière

I.1. Spectre des ondes électromagnétiques

Le spectre des ondes électromagnétiques couvre une large gamme de fréquence composée de différents domaines.



- Les **rayons gamma** (γ) sont très énergétiques et dangereux pour les êtres vivants, ils sont émis notamment lors des réactions nucléaires.
- Les **rayons X** sont également assez énergétiques et peuvent être dangereux, ils sont employés dans le domaine médical pour réaliser des radiographies, mais également en recherche fondamental lors de l'analyse de cristaux par diffraction.
- Les **ultraviolets** (UV) sont responsables du bronzage de la peau, bien qu'une grande partie du rayonnement provenant du Soleil soit absorbée par l'ozone atmosphérique.
- La **lumière visible** est le seul domaine électromagnétique perceptible par nos yeux, elle correspond à des longueurs d'onde dans le vide comprises entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge).
- Les **infrarouges** (IR) correspondent au rayonnement émis par les corps aux températures usuelles, on les utilise pour mesurer des températures à l'aide de caméras thermiques, ou des distances à l'aide de télémètres.

- Les **ondes hertziennes**, aussi appelées **ondes radios**, sont principalement utilisées pour la télécommunication (radio, télévision, wifi...), elles peuvent être émises facilement à l'aide d'une antenne et sont peu absorbées par l'atmosphère.

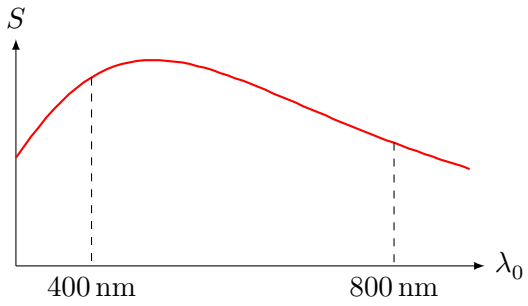
I.2. Sources lumineuses

En optique, on peut distinguer deux types de sources lumineuses :

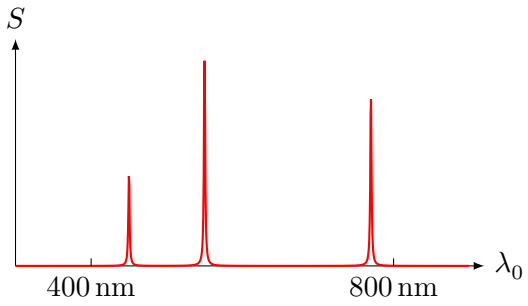
- les **sources primaires** qui émettent elles-mêmes de la lumière, telles que le Soleil ou une ampoule ;
- les **sources secondaires** qui retransmettent la lumière qu'elles reçoivent, telles que la Lune ou un miroir.

Ces sources lumineuses peuvent émettre :

- un **spectre continu** qui contient toutes les longueurs d'onde dans des proportions variables, dont l'origine est souvent le rayonnement thermique des corps chauds ;
- un **spectre discret** qui ne contient que certaines longueurs d'onde, dont l'origine est souvent la désexcitation d'atomes qui étaient préalablement dans un état excité.



Spectre continu du Soleil



Spectre discret d'une lampe à vapeur atomique

II. Principes de l'optique géométrique

II.1. Notion de rayon lumineux

Dans le cadre de l'optique géométrique, on représente la propagation de la lumière par des **rayons lumineux** qui vérifient les propriétés suivantes :

- ils se propagent en **ligne droite** dans un milieu homogène ;
- ils sont **indépendants** les uns des autres, c'est-à-dire qu'ils n'interagissent pas en se croisant ;
- ils vérifient le **principe de retour inverse**, c'est-à-dire que le chemin pour aller d'un point A à un point B est identique à celui pour aller du point B au point A.

II.2. Indice optique

L'**indice optique** d'un milieu est une grandeur sans dimension qui est définie telle que :

$$\boxed{n = \frac{c_0}{c}}$$

avec $c_0 = 3{,}00.10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ la célérité de la lumière dans le vide, et c la célérité de la lumière dans le milieu.

Comme $c \leqslant c_0$, on en déduit que $n \geqslant 1$, et on donne quelques valeurs numériques : $n_{\text{vide}} = 1$, $n_{\text{air}} = 1{,}00029 \approx 1$, $n_{\text{eau}} = 1{,}33$ et $n_{\text{verre}} \sim 1{,}5$ à $1{,}7$.

Lorsqu'une onde électromagnétique change de milieu de propagation :

- sa fréquence ν reste constante, car celle-ci est reliée à l'énergie de l'onde ;
- sa longueur d'onde λ est modifiée car elle dépend de l'indice optique n du milieu, et on peut l'exprimer en fonction de sa longueur d'onde dans le vide λ_0 telle que :

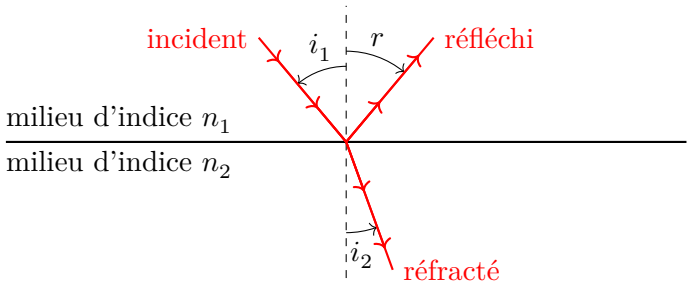
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c_0}{n\,\nu} = \frac{\lambda_0}{n}.$$

On associe usuellement les longueurs d'onde à des couleurs (de 400 nm pour le violet à 800 nm pour le rouge), alors qu'en réalité c'est la fréquence ν qui définie la couleur d'une onde, car celle-ci est indépendante du milieu de propagation.

II.3. Lois de Snell-Descartes

L'interface entre deux milieux d'indices optiques différents est appelée un **dioptre**.

Au passage d'un dioptre, un rayon incident formant un angle i_1 avec la normale produit un rayon réfléchi et un rayon réfracté qui vérifient les **lois de Snell-Descartes** :



1. Les rayons réfléchis et réfractés sont situés dans le plan d'incidence, c'est-à-dire le plan formé par la normale au dioptre et le rayon incident.
2. L'angle du rayon réfléchi vérifie la **loi de la réflexion** :

$$\boxed{r = -i_1}.$$

3. L'angle du rayon réfracté vérifie la **loi de la réfraction** :

$$\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}.$$

À l'interface entre des deux milieux d'indice respectif n_1 et n_2, on peut distinguer deux cas :

- si $n_1 < n_2$ (interface air/verre par exemple), il existe toujours un rayon réfracté ;
- si $n_1 > n_2$ (interface verre/air par exemple), il n'existe pas toujours un rayon réfracté, et on peut ainsi observer la **réflexion totale** du rayon incident sur le dioptre selon la valeur de l'angle i_1.

Application :

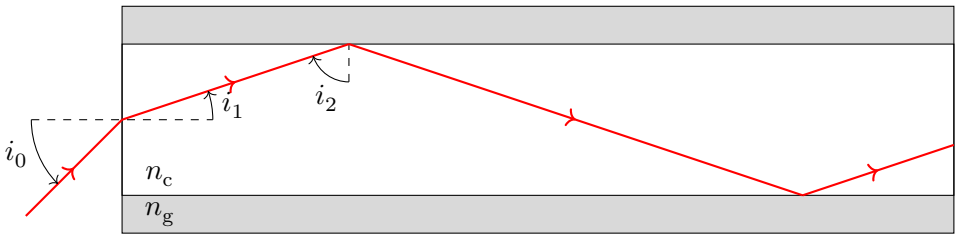
Déterminons l'expression de l'angle limite $i_{1,\text{lim}}$ au-delà duquel le rayon incident est totalement réfléchi.
Le rayon réfracté disparait au-delà d'un angle $i_{2,\text{lim}} = \dfrac{\pi}{2}$.
La loi de la réfraction donne alors : $n_1 \sin i_{1,\text{lim}} = n_2 \sin i_{2,\text{lim}}$, soit : $n_1 \sin i_{1,\text{lim}} = n_2$, d'où : $i_{1,\text{lim}} = \arcsin\left(\dfrac{n_2}{n_1}\right)$.

II.4. Étude de la fibre optique à saut d'indice

Une **fibre optique à saut d'indice** permet de guider une onde lumineuse sur de longues distances à l'aide du phénomène de réflexion totale. Elle est constituée de deux parties :

- un cœur cylindrique d'indice optique n_c ;
- une gaine cylindrique d'indice optique $n_g < n_c$ qui entoure le cœur.

On considère un rayon lumineux monochromatique se propageant dans l'air d'indice optique $n_0 = 1$ et qui pénètre dans la fibre avec un angle d'incidence i_0. L'**angle d'acceptance** $i_{0,\text{lim}}$ est l'angle d'incidence maximal permettant la réflexion totale du rayon à l'interface cœur-gaine.



Application :

Montrons que l'angle d'acceptance de la fibre peut s'exprimer :

$$i_{0,\text{lim}} = \arcsin\left(\sqrt{n_c^2 - n_g^2}\right).$$

À l'interface cœur-gaine, la réflexion totale disparait pour un angle limite $i_{2,\text{lim}} = \arcsin\left(\dfrac{n_g}{n_c}\right)$.
La loi de la réfraction à l'entrée de la fibre donne : $\sin i_{0,\text{lim}} = n_c \sin i_{1,\text{lim}}$, avec $i_{1,\text{lim}} = \dfrac{\pi}{2} - i_{2,\text{lim}}$, soit : $\sin i_{0,\text{lim}} = n_c \sin\left[\dfrac{\pi}{2} - \arcsin\left(\dfrac{n_g}{n_c}\right)\right]$.
Comme $\sin\left(\dfrac{\pi}{2} - x\right) = \cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$, on obtient : $\sin i_{0,\text{lim}} = n_c \sqrt{1 - \left(\dfrac{n_g}{n_c}\right)^2} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$, d'où : $i_{0,\text{lim}} = \arcsin\left(\sqrt{n_c^2 - n_g^2}\right)$.

En pratique, pour transmettre une information à l'aide d'une fibre optique, on envoie une multitude de rayons lumineux monochromatiques qui pénètrent simultanément dans la fibre avec des angles d'incidence différents. Sachant que chaque rayon parcourt une distance plus ou moins longue dans la fibre, le temps mis pour ressortir de la fibre sera différent. À cause de ce phénomène de **dispersion intermodale**, il est nécessaire de séparer l'envoi de chaque impulsion lumineuse en entrée de la fibre pour les distinguer en sortie.

III. Modèles du miroir plan et de la lentille mince

III.1. Nature des objets et des images

En optique géométrique, on caractérise un objet par sa nature :

- un objet ponctuel est **réel** si des rayons lumineux émergent réellement depuis un point, on peut alors le déplacer physiquement ;
- un objet ponctuel est **virtuel** si des rayons lumineux n'émergent pas réellement depuis un point, on ne peut alors pas le déplacer physiquement.

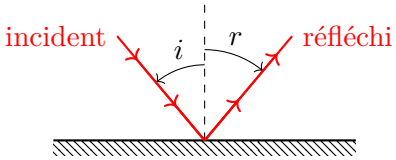
De même, on caractérise une image par sa nature :

- une image ponctuelle est **réelle** si les rayons lumineux convergent réellement en un point, on peut alors l'observer en plaçant un écran en ce point ;
- une image ponctuelle est **virtuelle** si les rayons lumineux ne convergent pas réellement en un point, on ne peut alors pas l'observer avec un écran.

III.2. Miroir plan

Un **miroir plan** est une surface plane qui réfléchie totalement les rayons lumineux en vérifiant la **loi de la réflexion** :

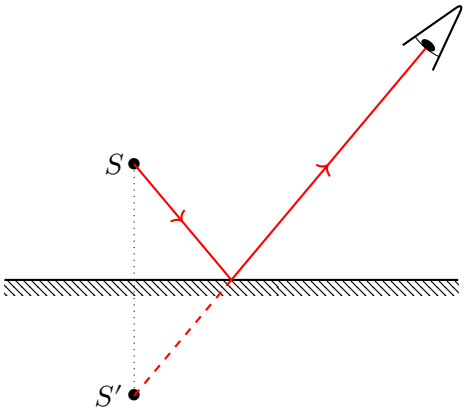
$$\boxed{r = -i}.$$



L'image d'un objet par un miroir plan correspond au symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir.

Application :

Représentons l'image de la source lumineuse S par le miroir plan, puis un rayon lumineux issu de S qui atteint l'œil après une réflexion sur le miroir.



III.3. Lentille mince

Une **lentille mince** est constituée d'un dioptre sphérique air/verre et d'un dioptre sphérique verre/air espacés d'une distance qui est très petite devant leurs rayons de courbure.

Une lentille mince présente plusieurs caractéristiques :

- un **centre optique** O situé à l'intersection de la lentille avec l'axe optique ;
- un **foyer objet** F par lequel passe tout rayon incident qui émerge parallèlement à l'axe optique ;
- un **plan focal objet** orthogonal à l'axe optique et passant par F ;
- un **foyer image** F' par lequel passe tout rayon incident parallèle à l'axe optique ;
- un **plan focal image** orthogonal à l'axe optique et passant par F'.

Les foyers F et F' sont symétriques l'un de l'autre par rapport au centre optique O, et on définit la **distance focale** de la lentille :

$$f' = \overline{OF'} = -\overline{OF}$$

avec $\overline{OF'}$ et $\overline{OF}$ des distances algébriques, qui peuvent donc être positives ou négatives en fonction de leurs orientations par rapport à l'axe optique.

Il existe deux types de lentilles minces :

- les lentilles **convergentes** pour lesquelles $f' > 0$;
- les lentilles **divergentes** pour lesquelles $f' < 0$.

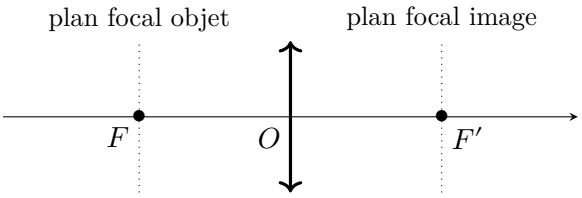


Schéma d'une lentille convergente

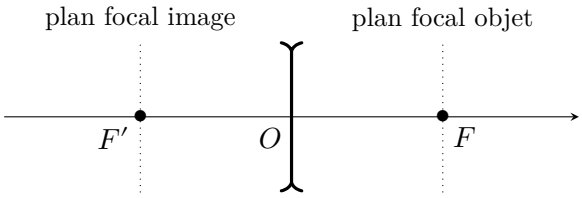


Schéma d'une lentille divergente

La **vergence** d'une lentille mince est définie telle que :

$$V = \frac{1}{f'}$$

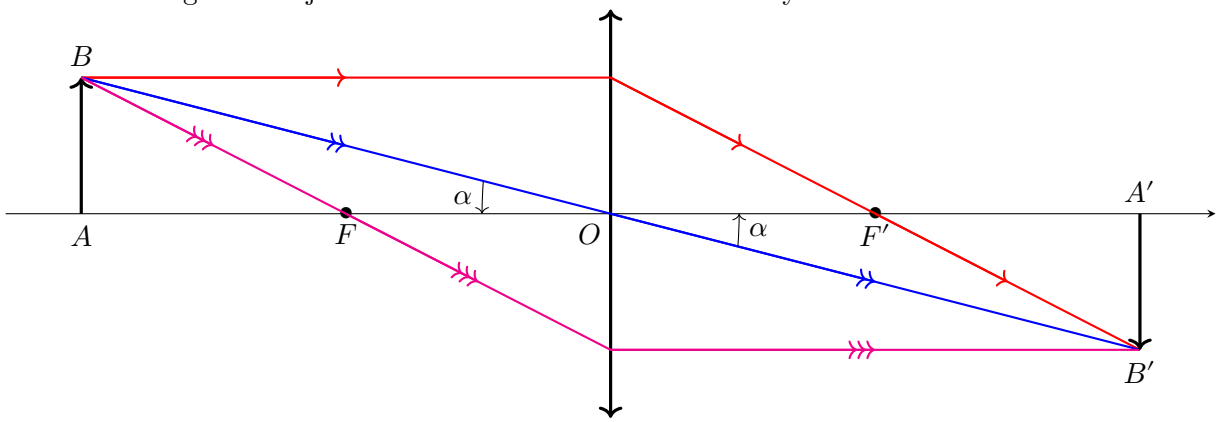
elle s'exprime en dioptrie (δ), avec $1\,\delta = 1\,\mathrm{m}^{-1}$.

Pour construire l'image d'un objet par une lentille, il faut tracer au moins deux rayons parmi les trois suivants :

1. le rayon passant par O qui n'est pas dévié ;
2. le rayon incident passant par F (ou dans la direction de F) qui émerge parallèlement à l'axe optique ;
3. le rayon incident parallèle à l'axe optique qui émerge en passant par F' (ou dans la direction de F').

Application :

Construisons l'image de l'objet AB ci-dessous à l'aide des trois rayons.



Le **grandissement** d'une image $A'B'$ par rapport à son objet AB est défini tel que :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

avec $\overline{A'B'}$ et $\overline{AB}$ des distances algébriques, d'où on en déduit que :

- si $\gamma > 0$, l'image est **droite** ;
- si $\gamma < 0$, l'image est **renversée**.

Avec la construction géométrique de l'application précédente, on peut exprimer à l'aide des grandeurs algébriques :

$$\tan\alpha = \frac{-\overline{A'B'}}{\overline{OA'}} = \frac{\overline{AB}}{-\overline{OA}}$$

d'où on en déduit une seconde expression pour le grandissement :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}.$$

Les positions d'un objet A et de son image A' à travers une lentille mince sont reliées par la **relation de conjugaison de Descartes** :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$$

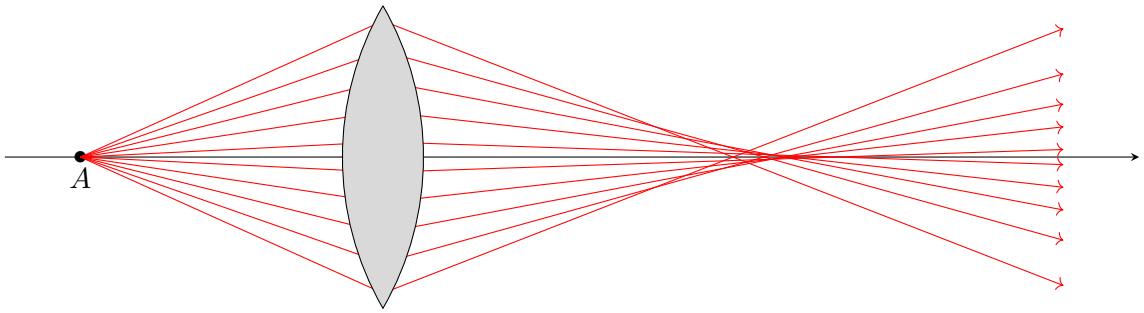
avec $\overline{OA'}$ et $\overline{OA}$ des distances algébriques. On peut alors montrer qu'il n'est possible d'obtenir une image réelle A' à partir d'un objet réel A que si la distance $D = \overline{AA'}$ vérifie la condition :

$$D \geqslant 4\,f'.$$

III.4. Stigmatisme et conditions de Gauss

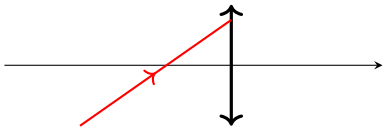
Un système optique vérifie un **stigmatisme rigoureux** si tous les rayons émis par un objet ponctuel A convergent vers une image ponctuelle A' en sortie du système. Les points A et A' sont alors **conjugués**.

Un miroir plan est un système rigoureusement stigmatique, mais ce n'est pas le cas d'une lentille mince. En effet, on représente ci-dessous les trajectoires réelles de rayons lumineux issus d'un objet ponctuel A et traversant une lentille mince, que l'on détermine à l'aide de la loi de la réfraction de Snell-Descartes. On constate que les rayons en sortie de la lentille ne convergent pas vers une image ponctuelle, mais vers une zone plus ou moins étendue sur l'axe optique.

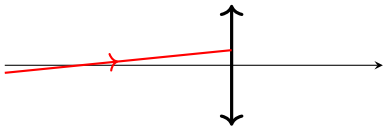


Si la zone où convergent les rayons n'est pas trop étendue, on peut toutefois considérer que le système optique vérifie un **stigmatisme approché**. Pour un système constitué de lentilles minces, on peut considérer que celui-ci vérifie un stigmatisme approché à condition de se placer dans les **conditions de Gauss** :

- les rayons lumineux doivent être **peu inclinés** par rapport à l'axe optique ;
- les rayons lumineux doivent être **proches** de l'axe optique.



Conditions de Gauss non vérifiées



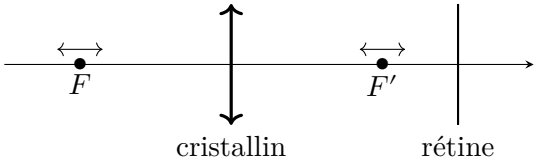
Conditions de Gauss vérifiées

IV. Modélisation de quelques dispositifs optiques

IV.1. Modèle de l'œil

Un **œil** peut être modélisé simplement par l'association de deux éléments séparés par une distance fixée :

- une **lentille convergente** de distance focale **variable**, qui joue le rôle du cristallin ;
- un **capteur photosensible**, qui joue le rôle de la rétine.



Pour observer une image nette, celle-ci doit se former sur la rétine. Dans ce but, le cristallin a la capacité de se déformer afin de modifier sa distance focale, c'est le principe de l'**accommodation** :

- sans accommoder, un œil voit net un objet qui se trouve à une distance éloignée, au niveau de son ***punctum remotum*** (PR) ;
- en accommodant, un œil peut voir net un objet qui se trouve jusqu'à une distance proche, au niveau de son ***punctum proximum*** (PP).

Un œil emmétrope, c'est-à-dire sans défaut de vision, présente un PR à l'infini et un PP à environ 25 cm, il peut donc voir net un objet entre ces deux points.

Parmi les défauts courants de l'œil, on peut citer :

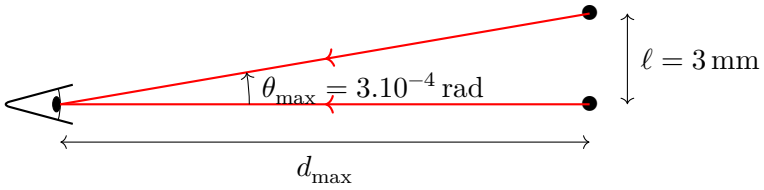
- la myopie lorsque le cristallin est trop convergent, l'œil présente alors un PR à une distance finie et un PP à une distance inférieure à 25 cm, on peut corriger ce défaut en utilisant une lentille divergente ;

- l'hypermétropie lorsque le cristallin n'est pas assez convergent, l'œil doit alors accommoder pour voir à l'infini et présente un PP à une distance supérieure à 25 cm, on peut corriger ce défaut en utilisant une lentille convergente ;
- la presbytie lorsque l'œil perd sa capacité à accommoder avec l'âge, on peut corriger ce défaut en utilisant des lentilles à plusieurs foyers (« verres progressifs ») ;
- l'astigmatisme lorsque l'œil ne présente pas une symétrie de révolution autour de son axe, on peut corriger ce défaut en utilisant des lentilles qui compensent cette asymétrie.

La **résolution angulaire** d'un œil humain lui permet de distinguer deux objets séparés d'une minute d'arc (que l'on note $1'$ sachant que $60' = 1°$), soit 3.10^{-4} rad.

Application :

Déterminons la distance maximale à laquelle nous pouvons encore distinguer deux objets séparés de 3 mm.

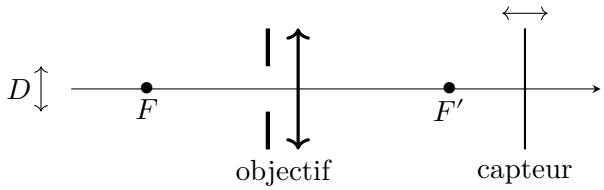


On peut exprimer : $\tan\theta_{\text{max}} = \dfrac{\ell}{d_{\text{max}}}$, avec $\tan\theta_{\text{max}} \approx \theta_{\text{max}}$ pour ce petit angle, d'où la distance maximale : $d_{\text{max}} = \dfrac{\ell}{\theta_{\text{max}}} = 10\,\text{m}$.

IV.2. Modèle de l'appareil photographique

Un **appareil photographique** est constitué de nombreux composants optiques, notamment des lentilles et des diaphragmes. Il peut cependant être modélisé simplement par l'association de deux éléments :

- un **objectif**, lui-même constitué d'une lentille convergente accolée à un diaphragme circulaire dont le diamètre d'ouverture D est réglable ;
- un **capteur photosensible**, qui est un capteur CCD pour les appareils numériques modernes, dont la distance par rapport à l'objectif est réglable.



Parmi les différents paramètres que l'on peut régler sur un appareil photographique, on peut citer :

- la **mise au point**, qui est obtenue en modifiant la distance entre l'objectif et le capteur afin de former l'image de l'objet photographié sur le capteur pour l'avoir nette ;
- la **durée d'exposition**, qui correspond à la durée sur laquelle la lumière arrive sur le capteur pour réaliser une photographie ;



Photographies de nuit avec des durées d'exposition croissantes (source : Wikipédia).

- la **profondeur de champ**, qui est la distance entre l'objet le plus proche et l'objet le plus éloigné qui sont nets sur une photographie, elle est augmentée en réduisant le diamètre d'ouverture D du diaphragme.





Photographies avec des profondeurs de champ croissantes (source : Wikipédia).

V. Dualité onde-corpuscule

En 1905, Einstein postula que la lumière peut être vue comme une onde électromagnétique, mais également comme un déplacement de particules, appelées **photons**, qui présentent les propriétés suivantes :

- la masse d'un photon est nulle ;
- un photon se propage à la vitesse $c = \dfrac{c_0}{n}$;
- l'énergie d'un photon de fréquence ν est donnée par la **relation de Planck-Einstein** :

$$\boxed{E = h\,\nu}$$

avec $h = 6{,}626.10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$ la **constante de Planck**.

On exprime souvent l'énergie d'un photon en électronvolt (eV), sachant que $1\,\text{eV} = 1{,}6.10^{-19}\,\text{J}$ (il s'agit de la valeur numérique de la charge électrique élémentaire e).

Application :

> Estimons l'énergie en électronvolt d'un photon émis par une source de lumière violette.
> Le photon présente une longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 \approx 400\,\text{nm}$.
> Son énergie est donc : $E = h\,\nu = \dfrac{h\,c_0}{\lambda_0} = 5{,}0.10^{-19}\,\text{J} = 3{,}1\,\text{eV}$.