

OP1 – Optique géométrique

1.1. Formation des images		
Sources lumineuses Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.	
Modèle de l'optique géométrique Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.	
Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.	
Conditions de l'approximation de Gauss et applications Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.	
Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences. Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur.	
Lentilles minces dans l'approximation de Gauss.	Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.	
Modèles de quelques dispositifs optiques L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation	
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné. Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.	
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.	
Système optique à plusieurs lentilles.	Modéliser, à l'aide de plusieurs lentilles, un dispositif optique d'utilisation courante.	

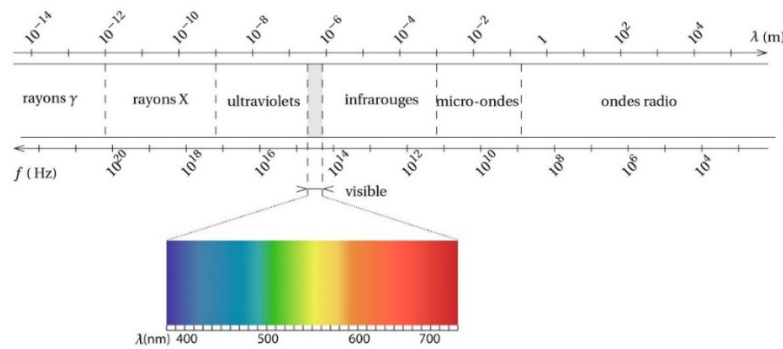
I – Lois de Descartes

I-1) Fréquence et longueur d'onde

Une onde monochromatique est définie par :

- Sa période T , sa fréquence $\nu = \frac{1}{T}$ et sa pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T}$.
- Les périodes temporelle T et spatiale λ sont liées par $\lambda = cT$

Le spectre de la lumière se décompose ainsi :



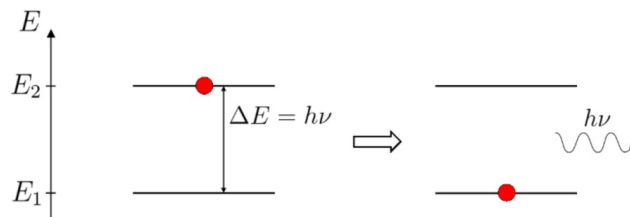
Le domaine de la lumière visible, quant à lui, s'étale de 400 nm à 750 nm.

I-2) Sources de lumière

a) Lampe spectrale

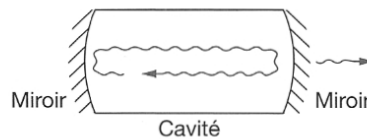
L'énergie E d'un photon émis lors de la désexcitation ne peut prendre que des valeurs discrètes :

$$\nu = \frac{E_n - E_p}{h} \text{ où } h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

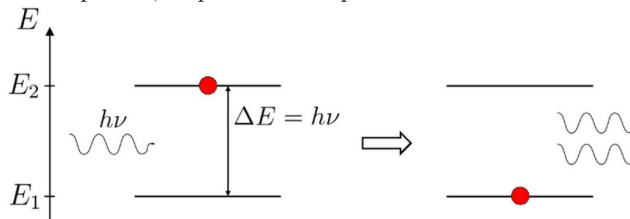


b) Le laser

Un LASER comporte une cavité dans laquelle une onde lumineuse effectue des allers-retours. Elle est amplifiée à chaque traversée d'un milieu amplificateur, afin de compenser les pertes qui se produisent lors des réflexions. Lorsque cet équilibre entre l'amplification par le milieu et l'atténuation par les réflexions est respecté, on aboutit à un mode entretenu de vibration du LASER.



Il faut, pour ce faire, favoriser les conditions d'une émission induite, dans laquelle l'interaction du photon incident et d'un atome excité produit l'émission d'un second photon, en phase avec le premier.



c) Lampe à incandescence

C'est l'agitation des particules chargées qui produit des ondes électromagnétiques. On parle de rayonnement thermique, ce qui donne une totale parenté entre l'émission par une lampe à incandescence et la production de lumière à la surface du Soleil !

I-3) Indice d'un milieu transparent (LHI)

a) Indice d'un milieu

On parle ainsi de milieu transparent :

- Linéaire : la propagation d'une onde sinusoïdale de pulsation reste sinusoïdale de même pulsation.
- Homogène : les propriétés sont les mêmes en tout point ;
- Isotrope : toutes les directions sont équivalentes.

On peut définir un nombre sans dimension, appelé indice du milieu tel que :

$$n = \frac{c}{v} \text{ avec } n_{\text{vide}} = 1, n_{\text{air}} \approx 1 \text{ et } n_{\text{eau}} = 1,33$$

b) Dispersion et absorption

- Dispersion

Contrairement au cas du vide, la vitesse de propagation de la lumière est fonction de la fréquence de l'onde. On parle de dispersion d'où $n=f(\lambda)$.

Pour les verres n vérifie la loi de Cauchy :

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

où A et B sont des constantes dépendant du verre utilisé.

- Absorption

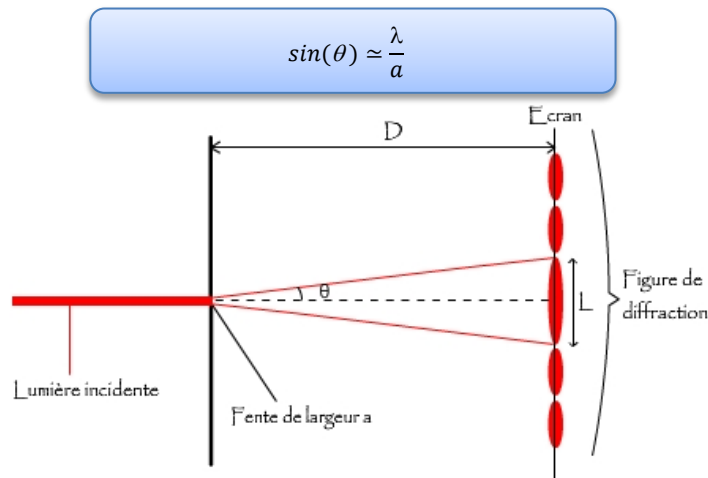
L'intensité lumineuse décroît lors de la propagation de la lumière dans le milieu matériel. La loi de décroissance est une fonction exponentielle qui dépend de la distance parcourue et de la fréquence.

I-4) Approximation de l'optique géométrique et rayon lumineux

a) Notion de rayon lumineux

Un rayon lumineux n'a pas d'existence physique : on ne peut observer de rayon unique, c'est un modèle qui permet de décrire la formation des images.

Dès que l'on essaye d'isoler le rayon lumineux, le phénomène de diffraction apparaît et un élargissement du faisceau apparaît tel que :



b) L'approximation de l'optique géométrique

L'étude de l'optique géométrique suppose que les grandeurs caractéristiques du milieu qui limitent les faisceaux ont des dimensions très supérieures à la longueur d'onde : $a \gg \lambda$

c) Milieu transparent

- Milieu LHI

Dans un milieu transparent linéaire homogène et isotrope la lumière se propage rectilignement.

- Milieu non LHI

Dans les milieux non homogènes, le rayon lumineux devient courbé. (C'est le principe des mirages optiques)

d) Principe de Fermat

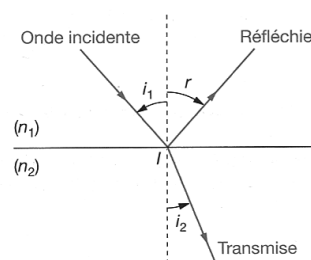
Pour aller d'un point A à un point B la lumière emprunte le chemin de plus courte durée :

$$\tau = \frac{AB}{v} = n \frac{AB}{c} = \frac{(AB)}{c} \text{ minimum}$$

La grandeur $(AB) = nAB$ est appelée chemin optique entre A et B dans le milieu d'indice n . On la minimise.

I-5) Les Lois de Descartes

a) Enoncés



- Les rayons réfléchis et réfractés sont dans le plan d'incidence.
- L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence : $i_1 = r$
- L'angle de réfraction i_2 est lié à i_1 par :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

b) Principe de retour inverse de la lumière

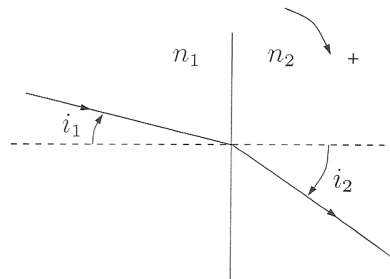
Les lois de Descartes obéissent au principe de retour inverse de la lumière : tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être en sens opposé.

I-6) Réfraction limite et réflexion totale

a) Réfraction limite ($n_1 < n_2$)

Dans le cas où le milieu 2 est plus réfringent que le milieu 1, le faisceau va se rapprocher donc i peut varier de 0 à $\pi/2$ mais i_2 sera limité.

b) Réflexion totale ($n_1 > n_2$)



Réfraction avec un milieu 2 moins réfringent.

Dans le cas où le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2, le faisceau va s'éloigner donc i_2 peut varier de 0 à $\pi/2$ mais i_1 sera limité.

Soit :

$$\begin{aligned} n_1 \sin(i_1) &= n_2 \sin(i_2) \\ \Leftrightarrow \sin(i_2) &= \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1) \\ \text{Or } 0 \leq i_2 \leq \frac{\pi}{2} &\Rightarrow 0 \leq \sin(i_2) \leq 1 \\ \Rightarrow 0 \leq \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1) &\leq 1 \\ \Rightarrow 0 \leq \sin(i_1) &\leq \frac{n_2}{n_1} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 0 \leq i_1 \leq \text{Arcsin} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = i_{1,lim} : \text{angle de réflexion totale.}$$

Tout rayon incident tel que $i_1 > i_{1,lim}$ ne peut être réfracté et subit donc une réflexion totale.

II - Le miroir plan et conditions de Gauss

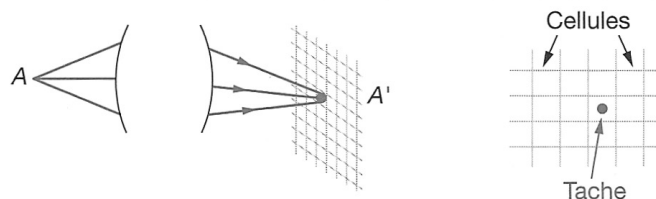
II-1) Conditions de Gauss

a) Le stigmatisme rigoureux

Un système optique (S) est dit rigoureusement stigmatique pour le couple de points (A, A') si tous les rayons issus de A passent par A' après avoir été déviés par le système. Les points A et A' sont dits conjugués par rapport à (S).

C'est le cas du miroir plan.

b) Le stigmatisme approché



Compte tenu de la résolution limitée des capteurs de lumière analysant l'image, il est possible de se contenter d'un stigmatisme approché. Les rayons incidents issus d'un point objet A doivent passer dans un voisinage de A', dont la taille est inférieure à la dimension caractéristique des cellules du capteur.

c) Conditions de Gauss

Un système optique est dit centré, d'axe Δ , s'il est constitué de dioptres et surfaces réfléchissantes invariantes par rotation autour de Δ .

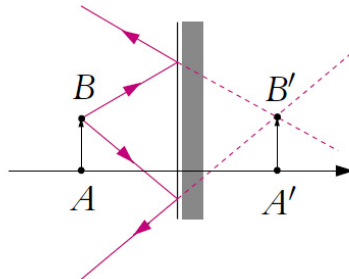
Un système centré est utilisé dans les conditions de Gauss si tous les rayons lumineux qui le traversent sont paraxiaux :

- Rayons peu inclinés par rapport à l'axe
- Rayons proches de l'axe

Dans les conditions de Gauss, c'est-à-dire pour des rayons lumineux paraxiaux, les systèmes centrés présentent un stigmatisme approché pour des couples de points conjugués A et A' situés sur l'axe.

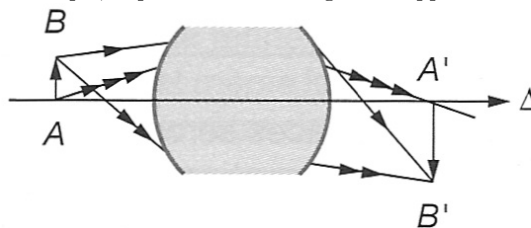
d) Aplanétisme

Dans les conditions de Gauss, le stigmatisme approché valable pour un couple de points A et A' situés sur l'axe se conserve pour des points B et B' proches de l'axe dans un plan transverse. On parle d'aplanétisme du système optique.



Aplanétisme d'un miroir plan.

Dans le cas d'un système centré quelconque, l'aplanétisme est en général approché.



III – Lentilles minces

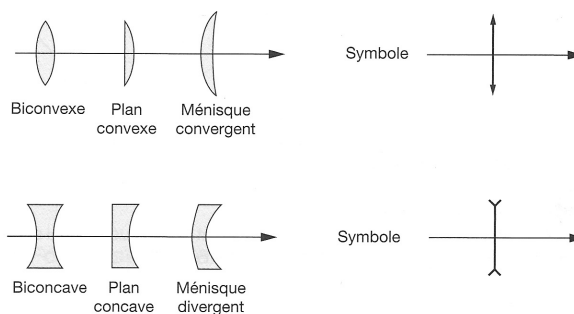
III-1) Définitions

a) Lentilles minces

Les lentilles minces ont l'épaisseur au niveau de l'axe petite devant les rayons de courbure des faces.

b) Lentilles à bords minces ou épais

On distingue les lentilles à bords minces (convergentes) des lentilles à bord épais (divergentes) dont les propriétés sont très différentes.



c) Centre de la lentille



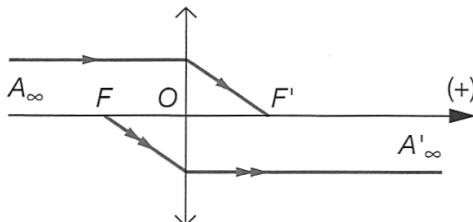
Le rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.

III-2) Foyers d'une lentille

a) Lentille convergente (à bords minces)

On appelle foyer image le point F' conjugué d'un point objet situé à l'infini sur l'axe.

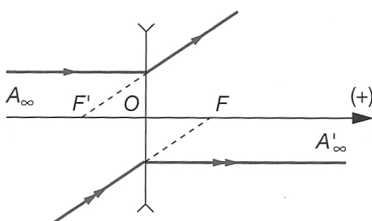
Il est réel dans le cas d'une lentille à bords minces. Une lentille à bords minces possède un foyer image réel, elle est dite convergente.



Le point F , symétrique du point F' par rapport à la lentille, est le foyer objet. Il est réel pour une lentille convergente.

b) Lentille divergente (à bords épais)

On définit un foyer image F' , qui s'avère être virtuel. De même, le foyer objet F , conjugué d'un point A' , situé à l'infini sur l'axe optique, se révèle être virtuel.



Une lentille à bords épais est divergente, ses foyers objet et image sont virtuels.

c) Distances focales

La position des foyers d'une lentille est ainsi définie par :

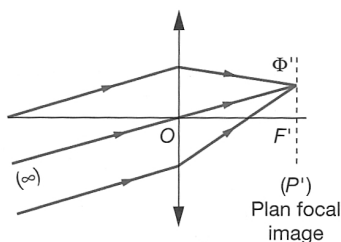
- La distance focale image de la lentille : $f' = \overline{OF'}$;
- La distance focale objet : $\overline{OF} = -f'$

Une lentille convergente a une distance focale image positive, une lentille divergente a une distance focale image négative.

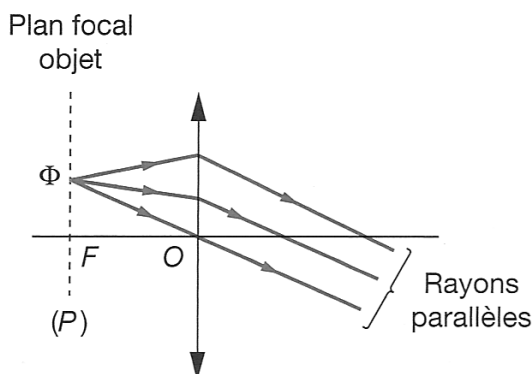
d) Foyers secondaires

Les points conjugués d'objets à l'infini sont situés dans le plan focal image, on les appelle foyers secondaires.

- Le plan focal image.



- Le plan focal objet

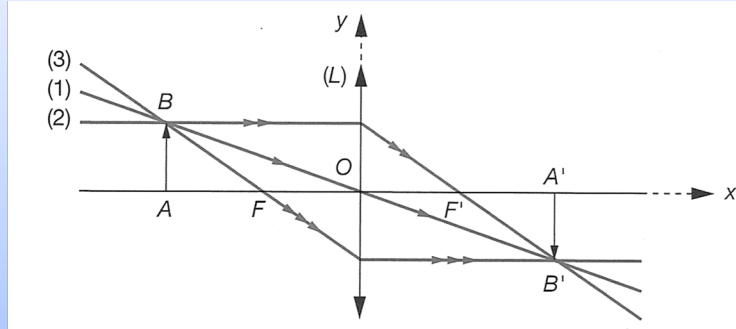


III-3) Construction d'une image

a) Lentille convergente

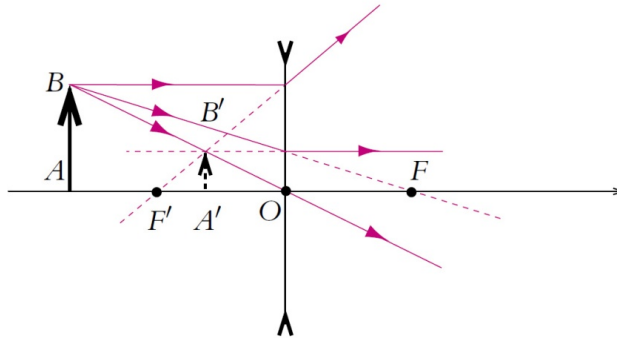
On considère un objet AB perpendiculaire à l'axe, situé devant une lentille convergente en amont du foyer. On construit l'image A'B' en exploitant les propriétés d'aplanétisme : A'B' est nécessairement perpendiculaire à A. Deux rayons issus de B, parmi les 3 suivants, permettent de déterminer géométriquement la position de B' :

- Le rayon passant par le centre optique sans être dévié;
- Le rayon incident parallèle à l'axe, dont l'émergent passe par F';
- Le rayon passant par F, dont l'émergent est parallèle à A.



b) Lentille divergente

Les mêmes méthodes de construction sont utilisables pour une lentille divergente.



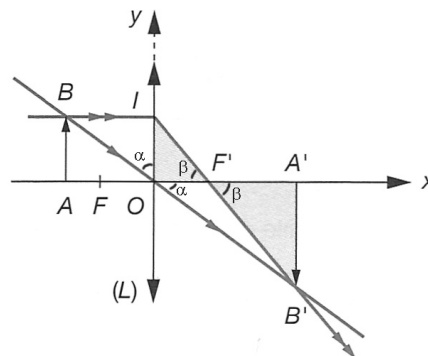
III-4) Relations de conjugaison

a) Relation de Descartes

Les constructions géométriques d'objets et d'images à l'aide de rayons remarquables mettent en jeu des triangles, dont on peut exploiter les propriétés pour déterminer :

- La relation entre les abscisses de points conjugués : on parle de relation de conjugaison ;
- Le rapport des tailles de l'objet et de l'image : définit ainsi le grandissement algébrique :

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



D'après le théorème de Thalès dans les triangles OAB et OA'B', ou à l'aide de la définition de la tangente on a :

$$\tan(\alpha) = \frac{BI}{OI} = \frac{OA'}{B'A'} \Leftrightarrow \frac{AO}{AB} = \frac{OA'}{B'A'} \Leftrightarrow \frac{OA}{AB} = \frac{OA'}{A'B'}$$

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \quad (1) : \text{formule du grandissement}$$

De même :

$$\tan(\beta) = \frac{\overline{OI}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{B'A'}}{\overline{F'A'}} \Leftrightarrow \frac{\overline{AB}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{B'A'}}{\overline{F'A'}} \Leftrightarrow \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{F'A'}}{\overline{OF'}} \quad (2)$$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -\frac{\overline{F'O} + \overline{OA'}}{\overline{OF'}} = 1 - \frac{\overline{OA'}}{\overline{OF'}}$$

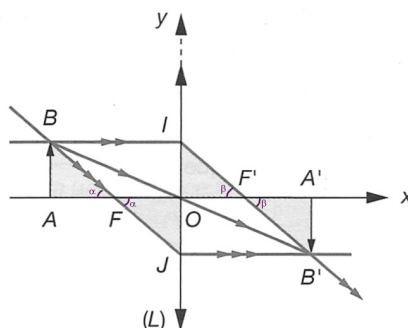
$$\text{On divise par } \overline{OA'} \Leftrightarrow \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OF'}}$$

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

La quantité $1/f'$ joue un rôle remarquable dans la formule de conjugaison : on appelle vergence d'une lentille l'inverse de la distance focale image : $v = \frac{1}{f'}$. Elle s'exprime en m^{-1} ou dioptrie δ .

b) Relation de Newton

De la même façon on démontre :



$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$$

$$\text{Et : } \overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = \overline{FO} \cdot \overline{F'O} = -f'^2$$

c) Association de lentilles accolées

L'association de deux lentilles minces accolées est équivalente à une lentille mince. Les vergences s'ajoutent algébriquement.

d) Relations de Bessel

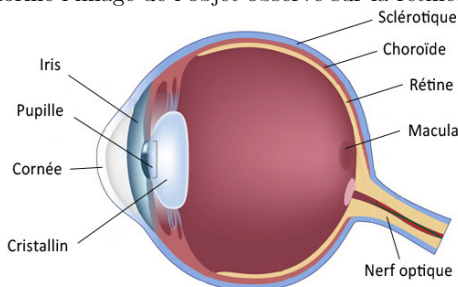
Pour former l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente il faut remplir la condition : $D > 4f'$

IV – Modèles de quelques dispositifs optiques

IV-1) L'œil

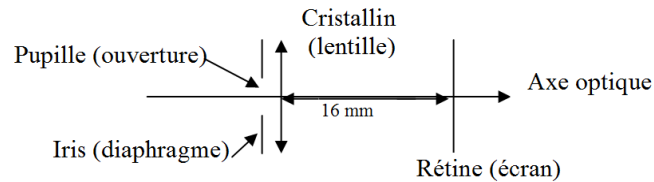
a) Anatomie non exhaustive de l'œil

Le cristallin, lentille convergente biconvexe, forme l'image de l'objet observé sur la rétine.



b) Modélisation

D'un point de vue optique, l'œil se modélise grâce à une lentille mince convergente (le cristallin) diaphragmée (iris) et d'un écran (la rétine). La distance lentille-écran est de l'ordre de 16 mm environ.

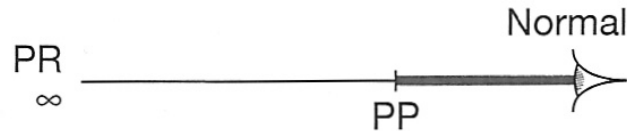


c) Accommodation

Le cristallin ne peut se déformer que dans certaines limites qui dépendent beaucoup de l'âge. L'œil ne peut donc voir nettement que les objets situés entre deux positions limites appelées punctum remotum (P.R.) et punctum proximum (P.P.) :

Le P.R. est le point le plus éloigné vu net par un œil au repos. Pour un œil normal il est situé à l'infini.

Le P.P. est le point le plus proche vu net par l'œil qui accommode. Pour un œil normal il est situé à 25cm environ.



d) Profondeur de champ

La latitude de mise au point est l'intervalle des positions de l'objet tel que l'image sur le capteur soit nette. Pour l'œil, elle s'étend entre le Punctum Proximum (PP) et le Punctum Remotum (PR). La profondeur de champ correspond à la longueur de cet intervalle.

e) Résolution angulaire (ou Pouvoir séparateur)

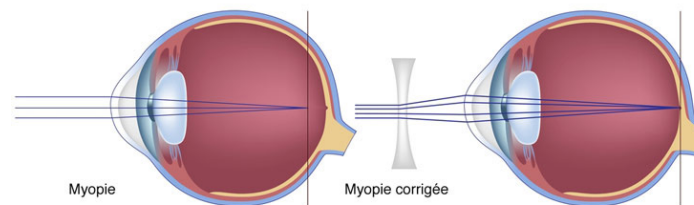
Le pouvoir séparateur d'un instrument d'optique correspond à l'angle apparent qui sépare les deux objets les plus rapprochés dont l'instrument peut faire deux images distinctes.

La résolution angulaire de l'œil est d'environ une minute d'arc ($1/60^\circ$ soit $0,017^\circ$).

f) Les défauts de l'œil

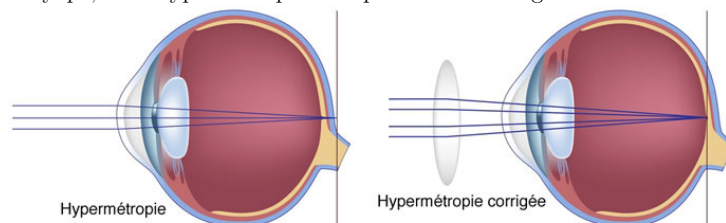
- La myopie

Le cristallin de l'œil myope est trop convergent.



- L'hypermétropie

Contrairement à l'œil myope, l'œil hypermétrope n'est pas assez convergent.



- La presbytie

La presbytie est liée au vieillissement de l'œil dont les facultés d'accommodation diminuent avec l'âge. Comme pour l'hypermétrope, le PP est situé plus loin que pour un œil emmétrope et gêne la vision de près.

IV-2) Appareil photographique

a) Principe de fonctionnement de l'appareil

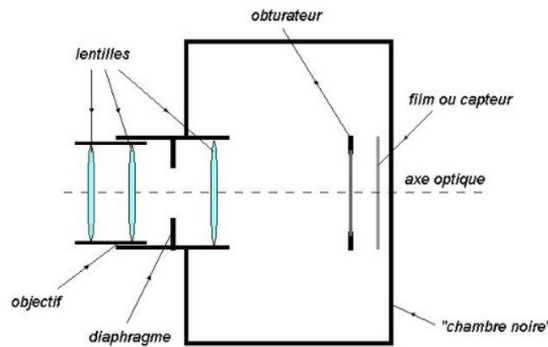
Mis à part quelques détails de structure qui diffèrent suivant leur type, les appareils photographiques actuels fonctionnent sur un même principe et se composent des éléments de base suivants :

- Un viseur
- Un déclencheur

- Un objectif (ou plusieurs) : de distance focale image f'
- Un diaphragme : de dimension D
- Un obturateur
- Un film ou un capteur

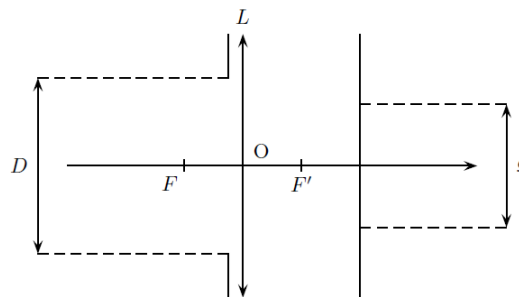
Lors de l'appui sur le déclencheur, l'obturateur s'ouvre afin de laisser passer la lumière par l'objectif qui va fournir une image du sujet à photographier au film ou au capteur numérique. La quantité de lumière entrante est déterminée par le temps durant lequel l'obturateur va rester ouvert et par la taille de l'ouverture du diaphragme. À la fin de l'exposition, l'obturateur reprend sa position fermée initiale.

Dans les appareils photographiques modernes, numériques, le capteur lumineux, CCD (charge coupled device) ou CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor), est une matrice de cellules photosensibles : les pixels (picture element). Il est caractérisé par la taille des pixels, le grain (résolution) noté $g = L \times l$ en pixels.



b) Modélisation

Pour simplifier la modélisation que l'on fait de l'appareil photographique, on utilisera uniquement une lentille convergente de distance focale f' précédée d'un diaphragme de dimension D et un écran pour modéliser le film ou le capteur. On fait apparaître le grain g .



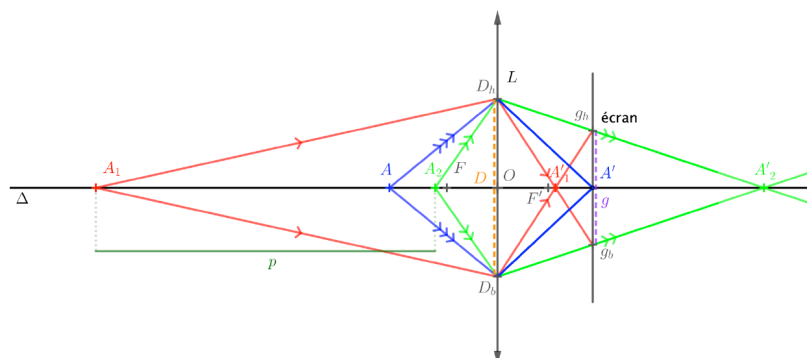
c) Profondeur de champ

Faire varier la position du capteur permet de modifier le plan objet de l'image se forme sur le capteur : c'est la mise au point. L'intervalle de positions que peut occuper l'écran est donc compris entre $\overline{OF'}$ et $\overline{OF'} + d_{max}$. Cet intervalle de positions images correspond à un intervalle de position objet :

$$\overline{OA} \in \left] -\infty, -f' \frac{f' + d_{max}}{d_{max}} \right[$$

C'est la latitude de mise au point.

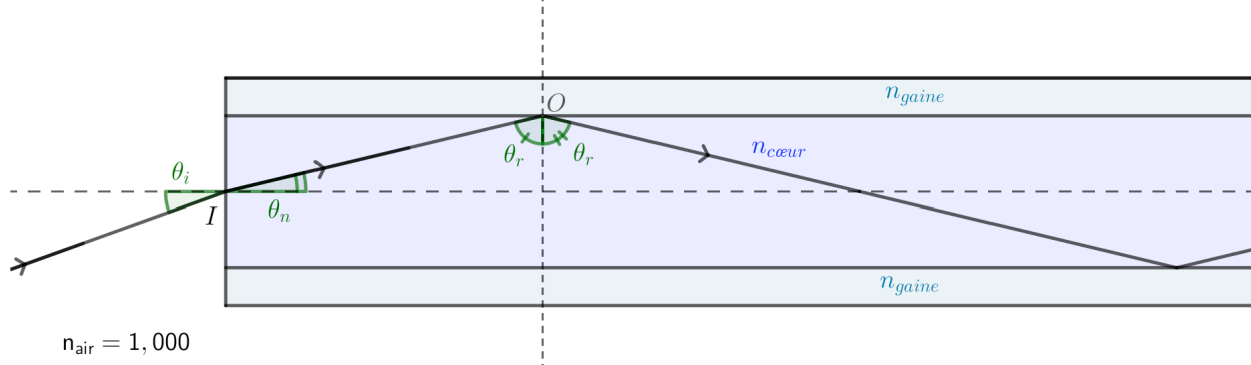
Puisque chaque photosite a une extension spatiale non nulle, on peut se contenter d'un stigmatisme approché et il existe une plage de positions objet qui permet d'obtenir une image dont les dimensions sont plus petites que la taille d'un photosite. C'est ce qu'on appelle la profondeur de champ. La distance entre A_1 et A_2 est p la profondeur de champ.



IV-3) Fibre à saut d'indice

a) Présentation

On considère une fibre à saut d'indice constitué de deux cylindres concentriques de section circulaire, et constitués l'un et l'autre de matériau isolant (la silice). L'indice de réfraction de la partie centrale, appelée cœur, est noté $n_{\text{cœur}}$. L'indice de la partie périphérique, appelée gaine, est noté n_{gaine} , avec $n_{\text{gaine}} < n_{\text{cœur}}$.



b) Cône d'acceptance

Pour que le signal soit correctement guidé, il ne faut pas qu'il y ait de réfraction dans la gaine. En effet le signal transmis ne serait plus guidé et serait donc perdu.

Vu les indices, il peut y avoir réfraction en O ainsi on cherche à avoir :

$$\begin{aligned} \theta_r &\geq \theta_{r, \text{lim}} \\ \Leftrightarrow \sin(\theta_r) &\geq n_{\text{gaine}}/n_{\text{cœur}} \end{aligned}$$

Et en entrée :

$$\begin{aligned} \sin(\theta_i) &= n_{\text{cœur}} \sin(\theta_n) \\ \Rightarrow \sin(\theta_i) &= n_{\text{cœur}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right) \\ \Rightarrow \sin(\theta_i) &= n_{\text{cœur}} \cos(\theta_r) \end{aligned}$$

Or :

$$\begin{aligned} \sin^2(\theta_r) + \cos^2(\theta_r) &= 1 \\ \Rightarrow \sin(\theta_i) &\leq n_{\text{cœur}} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{\text{gaine}}}{n_{\text{cœur}}}\right)^2} \\ \Rightarrow \sin(\theta_i) &\leq \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} = \sin(\theta_i)_{\text{max}} \end{aligned}$$

Les rayons lumineux incidents dans une fibre optique à saut d'indice sont guidés sans perte s'ils sont compris dans un cône appelé « cône d'acceptance » défini par son demi-angle au sommet tel que :

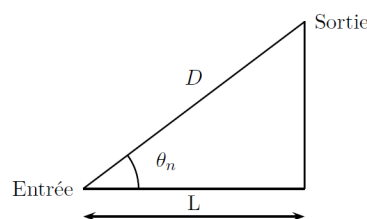
$$\sin(\theta_i) \leq \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} = \sin(\theta_i)_{\text{max}}$$

$\sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$ est appelée ouverture numérique

c) Dispersion intermodale

Pour pouvoir transmettre un signal, il est nécessaire que les différentes informations soient distinguables, en particulier que deux impulsions successives soient telles que la première finit d'arriver avant que la seconde commence à arriver. Toutefois, en fonction de l'angle θ_n , la distance parcourue et donc le temps de parcours varie. Une impulsion va donc s'élargir (temporellement) au fur et à mesure de la propagation le long de la fibre. On appelle dispersion intermodale la grandeur :

$$\Delta t = t_{\text{max}} - t_{\text{min}}$$



$$\text{où } \left\{ \begin{aligned} t_{max} &= \frac{D}{v} = \frac{L}{\frac{c}{n_{cœur}} \times \cos(\theta_n)} = \frac{Ln_{cœur}}{c} \times \frac{1}{\frac{n_{gain}}{n_{cœur}}} \\ & \text{car } \cos(\theta_n) = \sin(\theta_r) \\ t_{min} &= \frac{L}{v} = \frac{L}{\frac{c}{n_{cœur}}} = \frac{Ln_{cœur}}{c} \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta t &= t_{max} - t_{min} \\ \Rightarrow \Delta t &= \frac{Ln_{cœur}}{c} \left(\frac{n_{cœur}}{n_{gain}} - 1 \right) \\ \Rightarrow \Delta t &= \frac{L n_{cœur}}{c n_{gain}} (n_{cœur} - n_{gain}) \end{aligned}$$

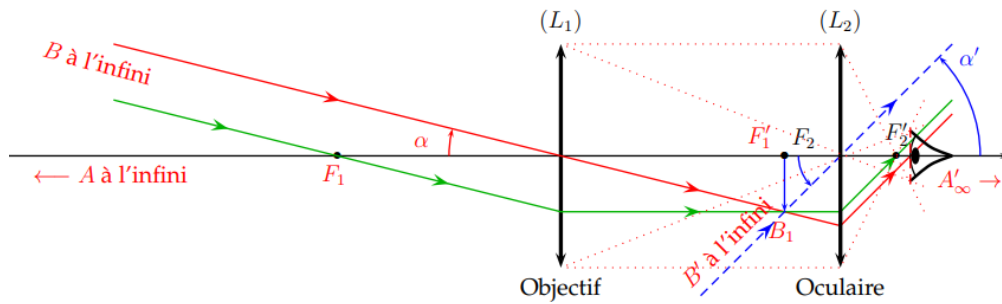
IV-5) Système à deux lentilles

a) Lunette

Une lunette sert à regarder un objet situé à l'infini sans que l'œil n'ait à accommoder, sous un diamètre apparent plus grand et avec plus de luminosité. On utilisera pour cela un système centré comportant deux lentilles. A_1 est l'image intermédiaire telle que :

$$A_{\infty} \rightarrow A_1 = F'_1 = F_2 \rightarrow A'_{\infty}$$

L'image d'un objet situé à l'infini se situe elle-même à l'infini, on parle de système afocal.



On définit le grossissement algébrique par :

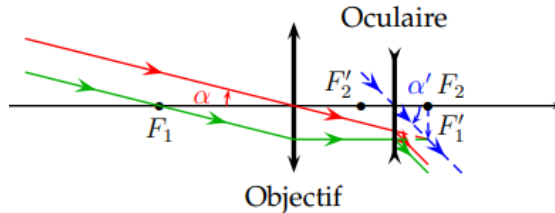
$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

On a ici :

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{\overline{A_1 B_1}}{f'_1} \\ \alpha' = \frac{\overline{A_1 B_1}}{f'_2} \end{cases} \Rightarrow G = \frac{\alpha'}{\alpha} = -\frac{f'_1}{f'_2}$$

L'image est donc inversée, comme le montre la figure ci-dessus. Pour remédier au grossissement négatif on utilise une lunette de Galilée où la lentille de sortie devient divergente.

Pour collecter un maximum de lumière, l'observateur doit placer son œil au cercle oculaire, image de (L1) par (L2).



b) Microscope

Le microscope permet de regarder un objet proche sous un diamètre apparent plus grand et sans que l'œil n'ait à accommoder. Le système n'est plus afocal.

$$A \rightarrow A_1 = F_2 \rightarrow A'_{\infty}$$

