

MP n°4 : Vision et image

Bibliographie :

- *Optique expérimentale*, Sextant
- *Expériences de physique* : Capes de sciences physiques, Duffait, Bréal
- *Expériences de physique* : optique, mécanique, fluides, acoustique, Bellier, Dunod
- *Montages de physique* : optique, mécanique, statique des fluides, calorimétrie, Bellier, Bouloy, Guéant, Dunod
- *Optique* : une approche expérimentale, Houard, De Boeck
- *Les montages à l'agrégation interne de sciences physiques*, Dumont, Ellipses
- *Physique expérimentale* : Optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique, Fruchart, Lidon, Thibierge, Champion, Le Diffon, De Boeck

Introduction

Ce montage a pour objectif de mieux comprendre la formation des images. On partira de l'étude de la propagation des rayons lumineux d'un milieu transparent à un autre en s'appuyant sur la loi de Snell-Descartes. Puis, on étudiera la formation des images à travers des lentilles minces convergentes en déterminant leurs distances focales par différentes méthodes. On discutera des limitations liées aux aberrations géométriques et chromatiques. Et, enfin, on terminera par la formation des images au niveau de l'œil qui nous permet de voir.

1 La réfraction

Avant d'expliquer comment se forment les images, il est nécessaire d'étudier la réfraction c'est-à-dire le changement de direction de celle-ci lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre.

On définit le plan d'incidence comme le plan contenant le rayon incident et la normale à l'interface. L'angle d'incidence i_1 est l'angle que forme le rayon incident avec la normale. On définit ensuite l'angle de réfraction i_2 entre le rayon réfracté et la normale au dioptre.

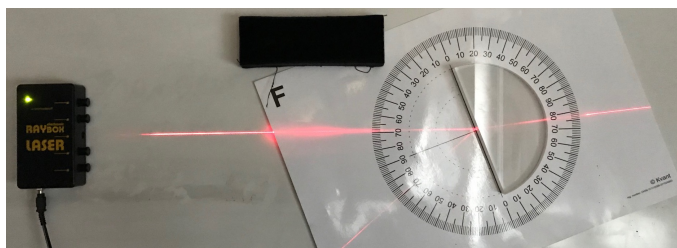
Les lois de Descartes de la réfraction :

- Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence.
- Le rayon réfracté est tel que :

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

1.1. Réfraction air-plexiglas

Placer la source de lumière, ici un laser, de telle sorte que le rayon soit confondu avec la ligne des 0 degrés du disque optique. Placer le demi-cylindre dans le centre du disque optique perpendiculairement au rayon. On constate qu'il n'y a aucune déviation. Tourner le demi-cylindre de 5° en 5° .

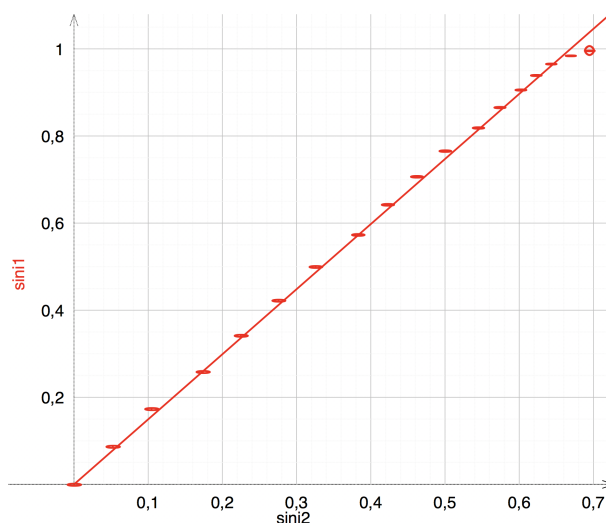


On fait tourner la demi-lune et le cercle gradué d'un angle i_1 et on relève un angle i_2 . On relève deux points devant le Jury et on complète la courbe tracée en préparation.

Angle incident i_1 ($^\circ$)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Angle réfracté i_2 ($^\circ$)	0	3	6	10	13	16	19	22,5	25	27,5	30	33	35	37	38,5	40	42	44

On peut tracer $i_2 = f(i_1)$. On voit que, pour des angles petits, i_1 et i_2 sont proportionnels. Quand l'angle devient grand, ce n'est plus cas.

On trace ensuite $\sin i_1 = f(\sin i_2)$ et on illustre la deuxième loi de Descartes. On en déduit une évaluation de l'indice du plexiglas qui correspond à la pente de la droite.



Le coefficient directeur de la régression linéaire correspond à l'indice optique du plexiglas.

$$n = 1,49 \pm 0,1$$

La valeur théorique ($n = 1,48$) est recoupée par les incertitudes.

1.2. Réfraction plexiglas-verre

On retourne la demi-lune en gardant le même dispositif. Ainsi, le rayon vient maintenant se réfracter sur le dioptre plexiglas/air. Comme précédemment, on relève i_1 et i_2

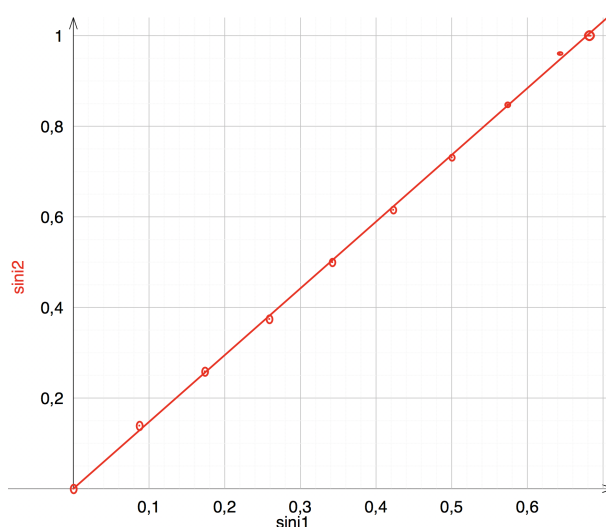
On observe le principe du retour inverse de la lumière.

On peut mettre en évidence le phénomène de réflexion totale. Noter avec précision le rayon incident limite pour lequel le rayon réfracté disparaît et déterminer ainsi l'angle de réfraction limite. On a alors

$$i_{1l} = \arcsin \frac{n_{air}}{n_{plexiglas}}$$

$$i_{1l} = 42^\circ \pm 1^\circ$$

Angle incident i_1 ($^\circ$)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	42
Angle réfracté i_2 ($^\circ$)	0	8	15	22	30	38	47	58	74	90



$$n = 1,48 \pm 0,1$$

De nouveau, ce résultat est en accord avec la valeur théorique ($n = 1,48$) compte tenu des incertitudes.

2 Focométrie

Une lentille mince est système optique transparent limité par deux dioptries. Pour permettre la réfraction de la lumière, l'un des deux dioptries doit être sphérique. La lentille est mince si son épaisseur est faible par rapport aux autres grandeurs considérées, comme le rayon de courbure des deux dioptries, par exemple.

Nous nous proposons, ici, d'étudier plusieurs méthodes de mesure de distance focale d'une lentille simple convergente. Chaque méthode a ses avantages et inconvénients, notamment en termes de rapidité et de précision de mesure.

On utilise un banc optique de type Lycée (environ 2 m) pour les mesures de distance. La source lumineuse est une lampe Quartz-Iode munie d'un condenseur. L'objet lumineux est un F placé juste après le condenseur. Diverses lentilles (de 2 à 10 dioptries), un miroir, et un écran sont à prévoir, ainsi que les supports permettant de déplacer les objets sur le rail. D'une manière générale, les mesures sont entachées d'une incertitude assez importante. En effet, les réglages de position de l'écran ou d'une lentille donnant une image nette sont tributaires de l'observateur et de l'idée qu'il se fait d'une image "nette". Parfois le fait de déplacer l'écran de 0,5 cm ne change pas énormément la définition de l'image.

Les lentilles doivent être placées dans les conditions de Gauss pour obtenir des images de bonne qualité :

- rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique
- rayons passant au voisinage de du centre de la lentille

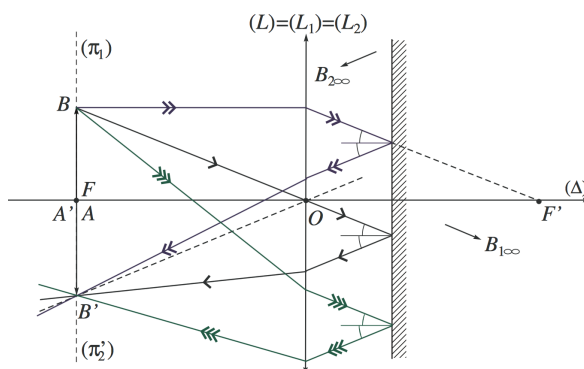
Les lentilles vérifient alors les conditions approchées de stigmatisme (l'image d'un point de l'axe est un point) et d'aplanétisme (stigmatisme réalisé également pour un point voisin de l'axe).

2.1. Autocollimation

Cette méthode est avant tout utiliser pour former à l'infini l'image d'un objet à travers une lentille en plaçant l'objet dans le plan focal objet de la lentille. Se contenter de placer l'objet à la distance annoncée est, en effet, trop imprécis pour former des images de bonne qualité. Une fois la lentille placée, il suffit de mesurer la distance la séparant de l'objet pour estimer la focale.

Protocole :

- Accoler un miroir le long de l'axe optique, puis le déplacer conjointement jusqu'à ce que l'image se forme dans le même plan que lui. Le grandissement doit valoir alors 1.
- Déplacer lentement le miroir le long de l'axe optique. Si l'image reste nette et de même taille que l'objet, ce dernier est situé dans le focal de la lentille.



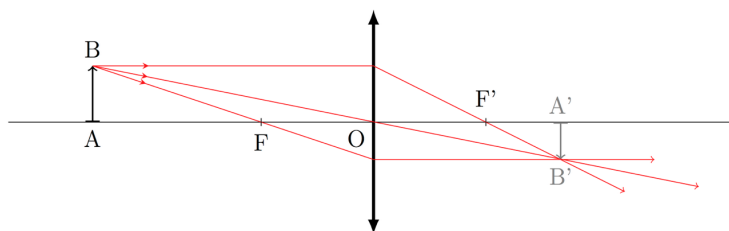
Précision de la mesure :

Cette mesure est principalement limitée par le jugé de l'expérimentateur. Il est, en effet, expérimentalement difficile de repérer précisément la netteté, surtout avec des images de petite taille comme c'est généralement le cas par cette méthode. Ainsi, lorsque nous avons réalisé cette mesure, nous avons évalué une plage de netteté de 4 mm. Il est impossible avec cette méthode de discriminer une position particulière sur cette plage. L'incertitude totale est donc dominée par l'erreur de jugé expérimentalement et non par l'erreur de lecture sur un banc optique gradué.

En prenant comme focale la position centrale de la plage de netteté et comme incertitude, sa longueur, nous obtenons une distance focale :

$$f' = (20,1 \pm 0,2) \text{ cm}$$

2.2. Relation de conjugaison

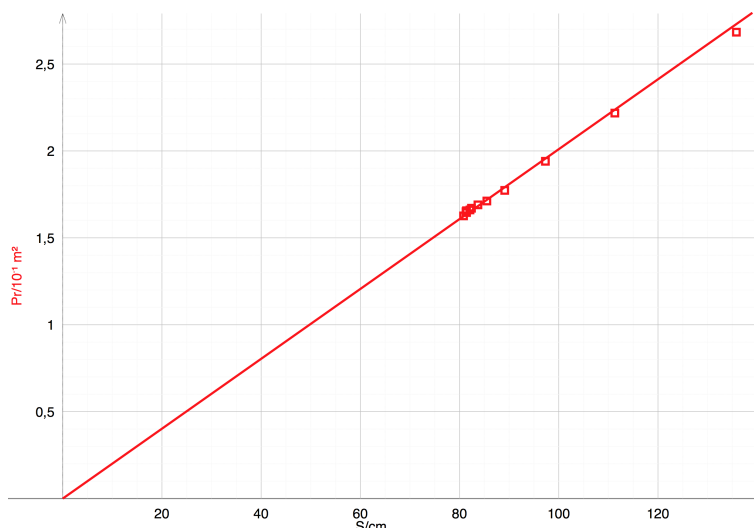


Cette méthode permet de mesurer la distance focale f' d'une lentille en vérifiant la relation de conjugaison d'une lentille mince avec origine au centre optique O, c'est-à-dire :

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

Que l'on peut réécrire sous la forme :

$$f' = \frac{-\overline{OA'} \times \overline{OA}}{\overline{AO} + \overline{OA'}} = \frac{-\overline{OA'} \times \overline{OA}}{\overline{AA'}} = \frac{P}{S}$$



Voici à titre indicatif une série de mesures,

Objet \overline{OA} (cm)	-24,0	-26,0	-28,0	-30,0	-32,0	-0,34	-0,36	-0,38	-40,0	-42,0	-44,0	-46,0
Image $\overline{OA'}$ (s)	111,8	85,3	69,3	59,1	53,5	49,7	46,4	42,8	41,4	39,3	37,4	36,1

On représente $P = f'(S)$.

D'après l'ajustement linéaire, nous avons, ainsi une distance focale donnée par la pente de la droite, soit :

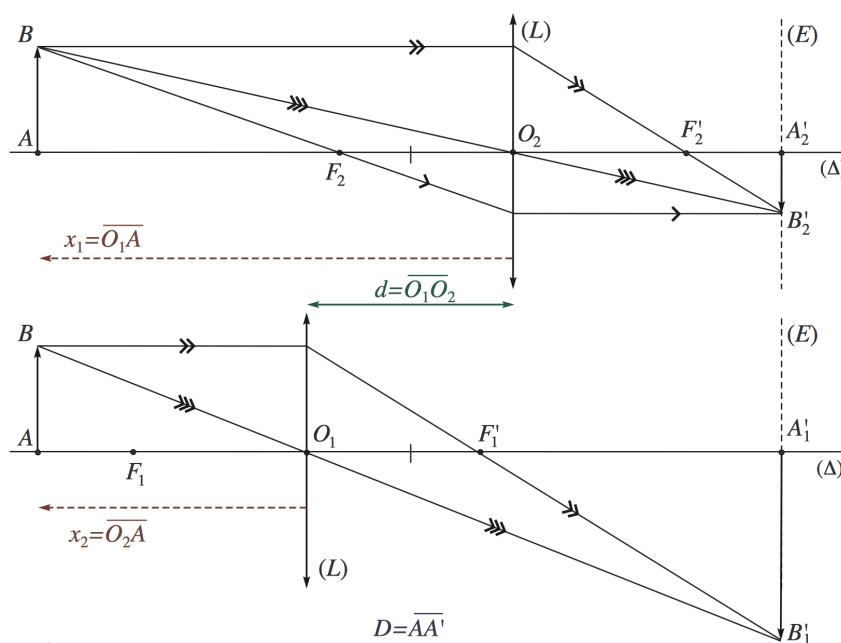
$$f' = (20,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

ce qui est en accord avec la mesure obtenue par autocollimation.

2.3. Méthode de Bessel

La méthode de Bessel exploite à nouveau la relation de conjugaison, mais d'une façon plus subtile. Elle permet une mesure plus précise de la distance focale.

La distance notée D correspond à la distance géométrique fixée par l'expérimentateur entre l'objet et l'écran. On a pris ici $D = 100$ cm. Cherchons les positions de la lentille qui conjuguent ces deux plans. Notons x la distance géométrique correspondant à l'une de ces positions. La relation de conjugaison peut se réécrire sous la forme d'un polynôme de deuxième degré



$$x^2 - Dx + f'D = 0$$

Pour que des positions de lentille conjuguant l'objet et l'écran existent, cette équation doit admettre des solutions réelles. Son discriminant $\Delta = D(D - 4f')$ doit donc être positif. On retiendra que pour deux plans soient conjugués par une lentille donnée, il faut qu'il soient séparés d'une distance supérieure à quatre fois la distance focale. C'est un critère essentiel pour choisir une lentille adaptée à l'encombrement d'un montage.

Dans ce cas, deux positions de la lentille conjuguant l'objet et la lentille existent. Ces positions sont représentées dans la figure suivante. La distance d qui les sépare vérifie

$$d^2 = D(D - 4f')$$

d'où

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

Mesures : $D = 100$ cm, $\overline{OA_1} = -27,9$ cm, $\overline{OA_2} = -71,1$ cm et $d = \overline{O_1O_2} = 43,2$ cm

$$f' = (20,1 \pm 0,1) \text{ cm}$$

Résultats et discussion :

Pour une estimation rapide et relativement précise de la focale, on peut se contenter d'une mesure pour une distance unique D . Pour obtenir une valeur plus précise, on peut effectuer des mesures pour plusieurs valeurs de D et tracer $D^2 - d^2$ en fonction de $4D$. D'après l'équation obtenue avant, il doit s'agir d'une droite de pente f' . On trouve expérimentalement

$$f' = (20,1 \pm 0,05) \text{ cm}$$

L'intérêt de cette méthode est d'être insensible à l'erreur de positionnement de la lentille par rapport à l'index de son support puisqu'on mesure une différence de deux positions.

Il s'agit de la méthode la plus précise.

3 Les défauts des lentilles

3.1. Aberrations géométriques

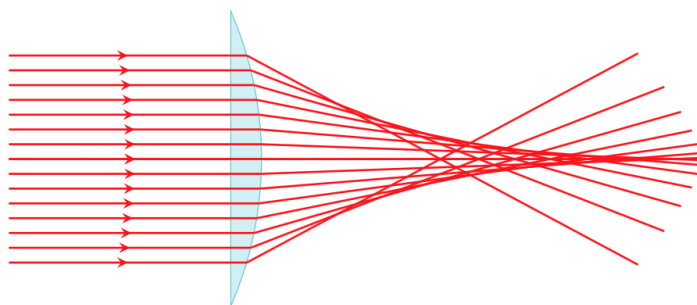
En optique géométrique, on appelle aberration géométrique un écart entre un rayon paraxial défini dans l'approximation de Gauss et le rayon réel correspondant. Une aberration géométrique peut également être caractérisée par un écart entre la surface d'onde paraxiale et la surface d'onde réelle.

Exemples d'aberrations géométriques : aberration sphérique, coma, astigmatisme, courbure de champ, distorsion.

3.1.1. Aberration sphérique

L'aberration sphérique désigne une aberration dont l'une des conséquences est la disparition du foyer. Les rayons provenant du bord et du centre de l'optique ne se focalisent plus au même point. On observe alors une caustique de focalisation, dans laquelle le point image attendu sera remplacé par une surface plus ou moins floue. On définit trois foyers principalement :

- le foyer paraxial : il est défini par l'approximation de l'optique géométrique
- le meilleur foyer : il correspond à l'endroit où la tache est la moins diffuse
- le foyer marginal : c'est celui correspondant à l'intersection des rayons marginaux (i.e. ceux qui passent par les bords de la pupille du système optique)



Les rayons parallèles ne se concentrent pas en un point unique. Pour une lentille sphérique, les rayons se trouvant au bord de la lentille focalisent à une place légèrement différente des rayons se trouvant au centre : l'image d'un point est donc une tache floue. Ceci est dû au fait qu'une surface sphérique n'est pas la forme idéale pour réaliser une lentille. Il s'agit cependant de la forme la plus simple à polir, et elle reste très souvent utilisée. L'aberration sphérique peut être minimisée en choisissant soigneusement une courbure particulière de la surface de la lentille : on utilise des lentilles non-sphériques que l'on nomme lentilles asphériques.

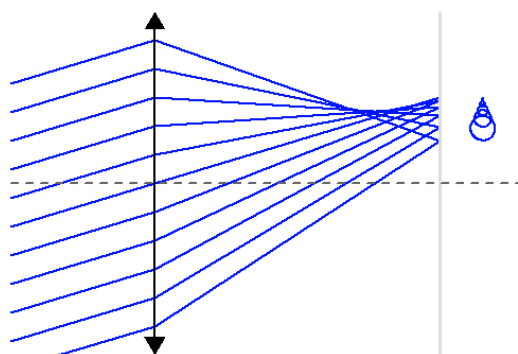
Protocole :

Pour les mettre en évidence, on utilise un faisceau laser multiple parallèle à l'axe sur une lentille de forte courbure, le tout fixé sur le tableau.

3.1.2. Coma

L'aberration de coma désigne une aberration qui dépend du champ d'une part et de l'ouverture d'autre part (i.e. de la distance du point d'impact des rayons sur la pupille par rapport au centre de celle-ci). Cette aberration est dite de champ car elle n'existe pas sur l'axe optique. L'effet de cette aberration est de produire une tache en forme de comète dans un plan d'observation.

Les rayons parallèles qui ne sont pas dans l'axe optique de la lentille ne convergent pas tous en un même point sur le plan focal. Les rayons qui passent sur les bords de la lentille peuvent être focalisés plus loin ou plus près de l'axe optique que ceux passant au centre de la lentille. On parle respectivement de coma positive et de coma négative.



3.1.3. Distorsion

La distorsion est une aberration géométrique de champ ou d'inclinaison. Les aberrations géométriques apparaissent lorsque l'on s'éloigne des conditions de Gauss, là où les aberrations chromatiques apparaissent lorsque l'on ne travaille plus avec une lumière monochromatique. Les aberrations de champ sont les aberrations dépendantes de la position du point objet dans le champ.

La distorsion se manifeste le plus visiblement sur les lignes droites : une grille imagée par un système à forte distorsion aura une forme dite en "barillet", la grille est bombée vers l'extérieur, ou en "coussinet", la grille image ayant l'air déformée vers l'intérieur.

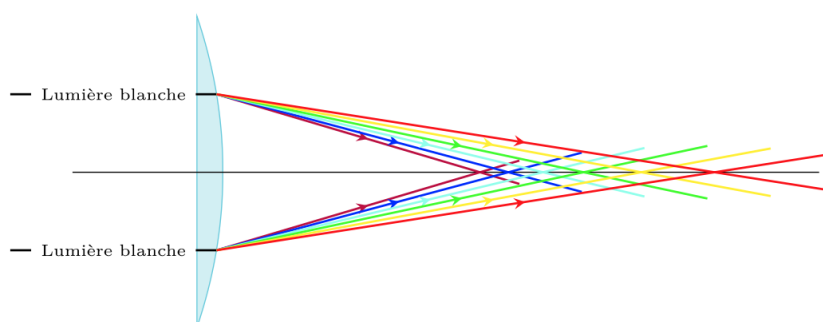


Protocole :

Une diapositive objet, constituée d'une grille et précédée d'un dépoli ou d'un morceau de papier calque est éclairée en lumière blanche par une lampe quartz-iode. A l'aide d'une lentille de grand diamètre et de courte distance focale ($f' = 125$ mm), on forme l'image d'une grille objet sur un écran. Un diaphragme circulaire est placé en aval ou en amont de la lentille de projection, afin de réduire la dimension de la tache image d'un point due aux autres aberrations. Dans ces conditions, l'image observée sur l'écran n'est plus homothétique de l'objet mais présente une distorsion prononcée.

3.2. Aberration chromatique

Une aberration chromatique est une aberration optique qui produit différentes mises au point en fonction de la longueur d'onde. On observe alors une image floue et aux contours irisés. Elle résulte de la décomposition de la lumière blanche en plusieurs bandes de couleurs.



Elle est généralement due à la variation de l'indice de réfraction du matériau composant les lentilles en fonction de la longueur d'onde de la lumière qui les traverse.

Loi de Cauchy :

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

On parle de dispersion du verre. Il en résulte que la distance focale dépend de la longueur d'onde, de sorte que la mise au point ne peut être effectuée simultanément pour toutes les couleurs du spectre. Si, par exemple, la mise au point est effectuée pour le rouge, le bleu est alors flou : l'image d'un objet blanc présente alors sur ses bords une irisation bleutée.

L'aberration chromatique peut être à la fois longitudinale, lorsque les couleurs sont focalisées à des distances différentes ; et transversale ou latérale, lorsque les couleurs sont focalisées à différentes positions dans le plan focal (car le grandissement d'une lentille varie également avec la longueur d'onde).

Protocole :

Placer un trou source circulaire de 1 ou 2 mm de diamètre juste devant l'objectif d'un projecteur de diapositives. On place une lentille plan-convexe de grand diamètre (12 cm environ) et de focale $f' = 200$ mm à environ 1 m du trou source, face bombée vers le trou. La lentille est centrée afin que le faisceau lumineux issu du trou source couvre entièrement sa surface. On place ensuite un diaphragme annulaire, préalablement découpé, juste devant la lentille. On peut, ensuite, une lentille de projection de focale $f' = 50$ mm.

Expérimentalement, on réalise le montage avec un filtre rouge. On déplace l'écran afin d'obtenir une image nette. On remplace le filtre rouge par un filtre bleu et on refait la mise au point. On est obligé de rapprocher l'écran pour obtenir une image nette.

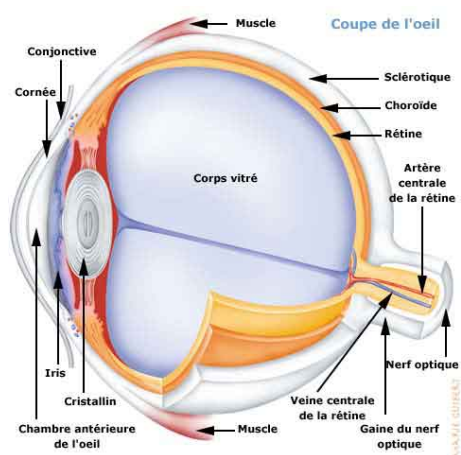
La distance focale est plus courte pour le bleu que pour le rouge en accord avec la loi de Cauchy.

4 L'œil

L'œil est l'organe de la vision qui peut être facilement modélisé au laboratoire par un ensemble diaphragme-lentille convergente-écran. Ainsi nos connaissances sur les lentilles minces nous permettent de comprendre le fonctionnement de l'œil, lorsqu'il est normal ou non.

4.1. L'organe et son modèle réduit

- L'œil est composé d'un ensemble de milieux transparents, mais on considère que le cristallin a le rôle le plus important en ce qui concerne la réfraction des rayons lumineux. Dans la modélisation optique, on assimilera donc la lentille au cristallin.
- Pour moduler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil, l'ensemble pupille/iris joue le rôle de diaphragme.
- La rétine est l'écran de l'œil, elle est tapissée de deux types de cellules :
Les cônes sont les cellules qui permettent la vision en couleur, de trois types différents, ils sont sensibles soit au rouge, soit au bleu soit au vert ;
Les bâtonnets permettent la vision dans des conditions de faible luminosité.
- Via le nerf optique, les informations reçues par les cellules de la rétine arrivent au cerveau et sont interprétées en terme d'image.



4.2. Caractéristiques

4.2.1. Pouvoir de résolution

L'œil ne peut distinguer deux détails d'un objet que si leur image se forme sur deux cellules différentes de la rétine. Dans des conditions normales d'éclairage et de contraste, le pouvoir de résolution de l'œil est d'environ $1'$ d'arc soit 3×10^{-4} rad (cela correspond à distinguer deux détails séparés de 1 mm à une distance de 3 m).

4.2.2. Vision à l'infini, vision de près

L'œil normal est appelé œil emmétrope. Nous étudions son cas ici.

Pour obtenir une image nette, le cristallin fait converger les rayons lumineux reçus sur la rétine.

Le point situé à la distance maximale qui permet la vision d'une image nette pour l'œil au repos est appelé Punctum Remotum (PR). Pour l'œil normal, celui-ci est à l'infini.

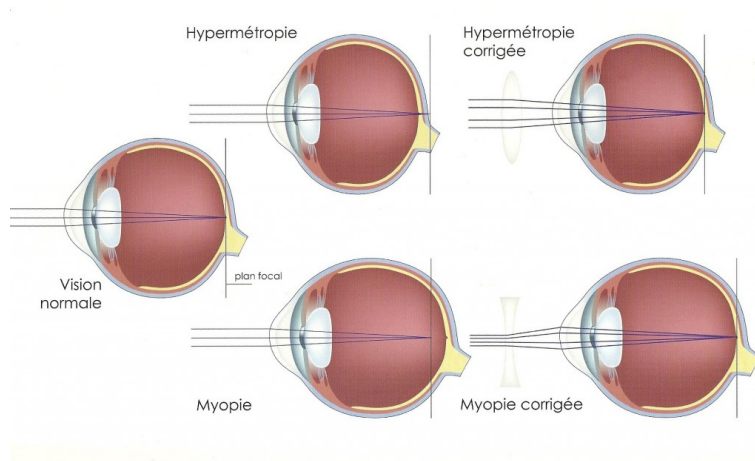
Pour voir des objets plus près, l'œil doit accommoder, c'est-à-dire courber son cristallin pour que celui-ci devienne plus convergent. Il existe un point pour lequel est au maximum de sa convergence, qui correspond au point le plus proche dont on peut avoir une image nette : celui-ci est appelé Punctum Proximum (PP). Pour un normal, le P.P est à 25 cm de celui-ci.

4.2.3. Défauts de l'œil

- Si l'œil est trop convergent, il est myope : son PR n'est plus situé à l'infini mais à quelques mètres. L'œil myope voit flou de loin, par contre ça vision de près est meilleure car le PP est plus proche. Pour corriger la myopie, on associe à l'œil une lentille divergente.
- Si l'œil est trop divergent, il est hypermétrope : cet œil est capable de voir à l'infini mais en accommodant. Le PP est plus éloigné de l'œil (il n'est pas assez convergent), la vision de près est moins aisée. Pour corriger ce défaut, on

associe à l'œil une lentille convergente.

- La presbytie est un défaut qui vient avec l'âge de l'organe, le cristallin n'est plus assez souple pour se déformer à la demande. La vision de près qui demande au cristallin de devenir plus convergent est altérée.
- L'astigmatisme provient de la forme de l'œil qui n'est pas tout à fait sphérique, ce qui diminue la qualité de la vision que ce soit de près ou de loin.



Expérience qualitative : Présenter la maquette de l'œil. Modifier l'indice optique du cristallin avec une seringue remplie d'eau. Montrer les défauts de l'œil et leurs corrections.



Conclusion

Au cours de ce montage, on a d'abord étudié la propagation des rayons lumineux passant d'un milieu à un autre afin d'expliquer la formation des images. Ensuite, on a pu illustrer différentes techniques de mesure des lentilles minces convergentes et étudier leurs défauts qui peuvent limiter notre vision. Enfin, en assimilant l'œil à un modèle simple constitué d'une lentille mince convergente et d'un écran, on a illustré le fonctionnement de l'œil et la correction de ses éventuels défauts. D'autres dispositifs permettent de former des images comme les miroirs par exemple. Les instruments d'optique tels que la lunette astronomique, le microscope ou telescope sont conçus grâce à l'assemblage ingénieux de lentilles et/ou de miroirs.