

O1 OPTIQUE GEOMETRIQUE

I.- INTRODUCTION

L'optique est une partie de la physique qui étudie la propagation de la lumière. La lumière visible est une onde électromagnétique (EM) dans le domaine de longueur d'onde compris entre 400nm et 800nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$). En optique géométrique, on traite les ondes EM comme des rayons et on ignore leur caractère ondulatoire. Ce traitement est correct si les dimensions des obstacles rencontrés par l'onde (lentilles, miroirs, etc...) sont très grandes comparées à la longueur d'onde.

II.- THEORIE

Définition : L'indice de réfraction n caractérise le milieu dans lequel se propage la lumière.

$$(1) \quad n_\lambda = \frac{c}{v_\lambda}$$

où c : vitesse de la lumière dans le vide;

v_λ : vitesse de la lumière de longueur d'onde λ dans le milieu considéré.

L'indice n indique que la vitesse d'une onde dans un milieu dépend de sa longueur d'onde. Ainsi, pour un rayon polychromatique (contenant plusieurs longueurs d'onde), chaque onde a une vitesse de propagation différente dans un milieu donné.

Réflexion et réfraction

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre la surface de séparation entre deux milieux optiques différents, une partie de la lumière revient dans le premier milieu (*réflexion*) et une partie pénètre dans le second milieu (*réfraction*).

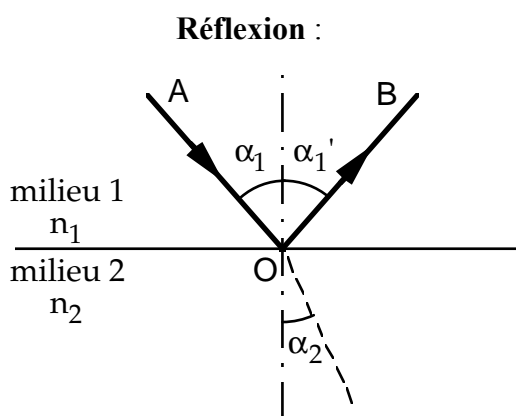


Figure 1

$$(2) \quad \alpha_1 = \alpha_1'$$

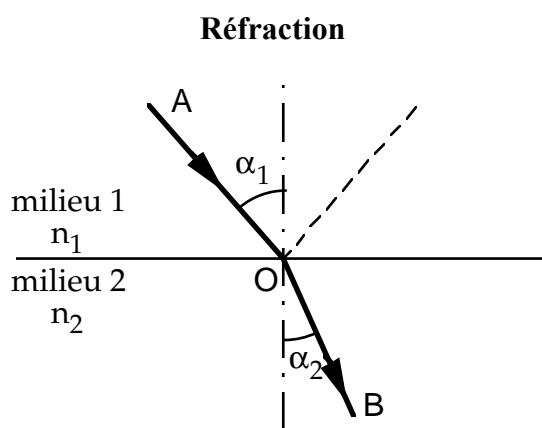
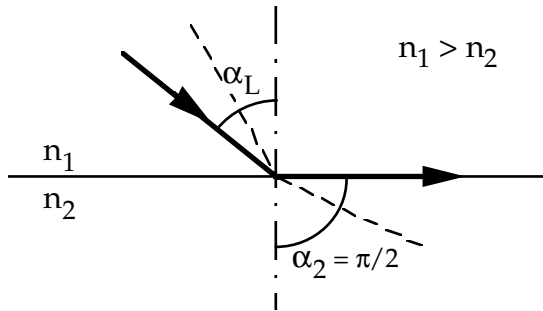


Figure 2

$$(3) \quad n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Remarques : Les angles sont mesurés à partir de la normale à la surface de séparation. La normale à la surface, les rayons incidents, réfléchis et réfractés sont dans un même plan.

Dans le cas où $n_1 > n_2$, il existe un angle d'incidence à partir duquel le rayon ne pénètre plus dans le milieu 2 (voir figure 3).



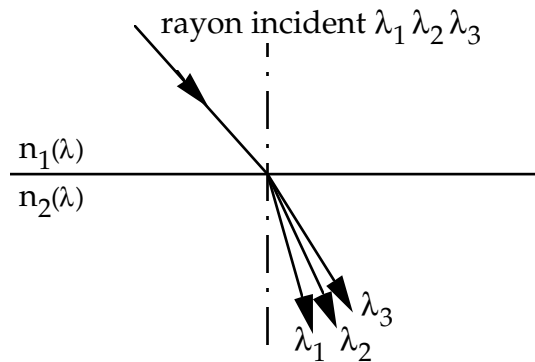
$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \alpha_2 = 1$$

$$4) \sin \alpha_L = \frac{n_2}{n_1}$$

Pour $\alpha_1 > \alpha_L$ il n'y a plus de réfraction, mais *réflexion totale* du rayon incident.

Figure 3

Dispersion



Puisque l'indice de réfraction d'un milieu optique dépend de la longueur d'onde du rayon lumineux, un faisceau de lumière polychromatique verra chacune de ses composantes réfractées suivant un angle différent (Cf. figure 4). Ce processus de décomposition spectrale est la *dispersion*.

Figure 4

Les lentilles

Une lentille sphérique est un corps transparent limité par deux surfaces sphériques. Les rayons lumineux sont déviés par réfraction sur ces surfaces. On a deux types de lentilles :

Lentille convergente (ou convexe)

Lentille divergente (ou concave)

Les rayons parallèles à l'axe optique sont déviés et convergent vers un même point appelé *foyer* de la lentille (figure 5a).

Les rayons parallèles à l'axe optique sont déviés et divergent de l'axe optique. Le prolongement des rayons déviés définit le *foyer* de la lentille (figure 5b).

On symbolise les lentilles convergentes par

On symbolise les lentilles divergentes par



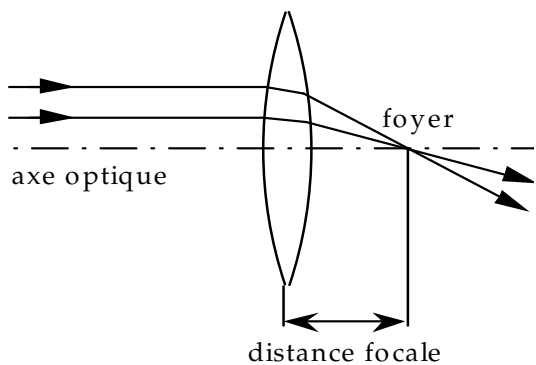


Figure 5a

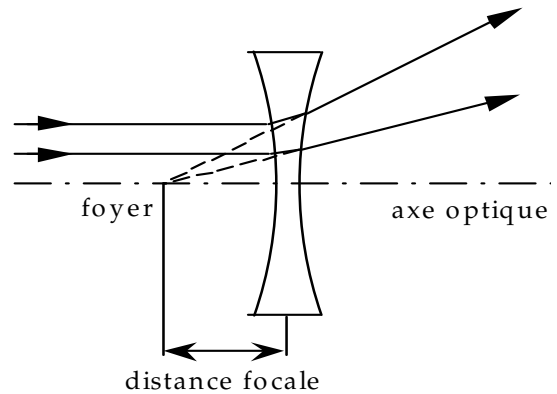


Figure 5b

La distance focale

La *distance focale* d'une lentille dépend de son indice de réfraction (par rapport au milieu extérieur) et de sa forme, c'est-à-dire des rayons de courbure r_1 et r_2 de ses faces. On utilise les conventions suivantes pour caractériser les surfaces (ou dioptries) d'une lentille :

Une surface convexe a un rayon de courbure positif ($r > 0$).

Une surface concave a un rayon de courbure négatif ($r < 0$).

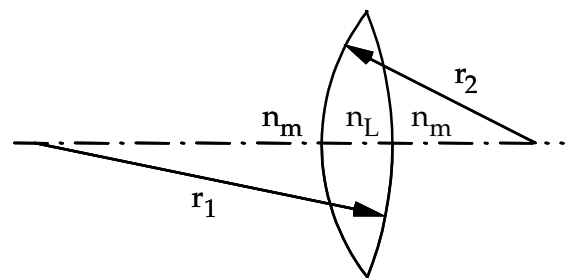


Figure 8

La distance focale f d'une lentille est donnée par :

$$(5) \quad \frac{1}{f} = (n_{Lm} - 1) \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \quad \text{avec } n_{Lm} = \frac{n_L}{n_m} \quad \begin{cases} n_L : \text{indice de réfraction de la lentille} \\ n_m : \text{indice de réfraction du milieu} \end{cases}$$

Les lentilles sphériques minces

Dans le cas de lentilles minces, la construction des images se fait de manière géométrique en respectant les deux règles de base suivantes:

- 1) un rayon parallèle converge au foyer image
- 2) un rayon provenant du foyer objet sort de la lentille en rayon parallèle

La figure 6 illustre la construction de l'image pour une lentille convergente ($f > 0$) lorsque la lumière se propage de la gauche à droite. On introduit deux axes : l'axe image de gauche à droite et l'axe objet de droite à gauche. La distance focale étant positive on place un foyer objet positif à gauche de la lentille et un foyer image à droite de la lentille. On effectue alors la construction de l'image en respectant les deux règles énoncées ci-dessus.

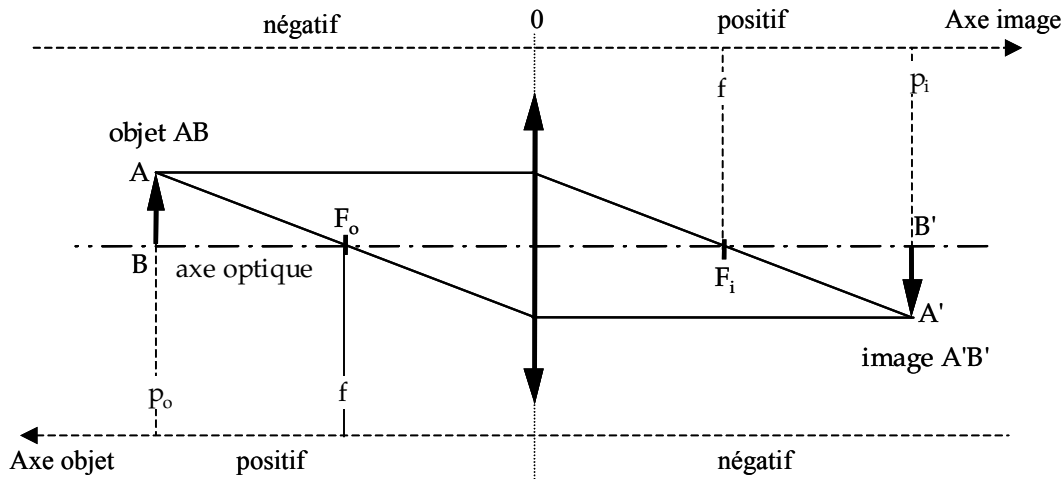


Figure 6

Avec une lentille divergente (focale négative), la position des focales objet et image sont inversée mais la construction reste la même.

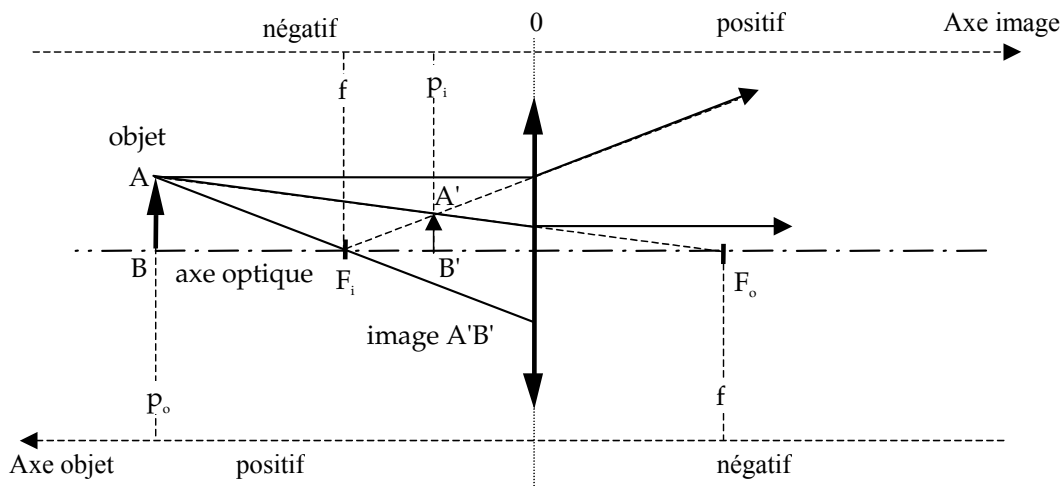


Figure 7

Dans ce cas on voit que la distance image p_i est négative ce qui indique que l'image est virtuelle (on ne peut pas la visualiser sur un écran).

Loi des foyers conjugués

p_o , p_i et f sont reliés par une expression appelée loi des foyers conjugués :

$$(6) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{p_o} + \frac{1}{p_i}$$

Dans cette expression il faut tenir compte des signes de p_o , p_i et f .

f	distance focale (distance lentille-foyer)	lentille convergente	$f > 0$
		lentille divergente	$f < 0$
p_o	distance objet-lentille	objet réel	$p_o > 0$
		objet virtuel	$p_o < 0$

p_i distance lentille-image	image réelle	$p_i > 0$
	image virtuelle	$p_i < 0$

Grossissement

$$\overline{AB}, \text{ hauteur de l'objet et } \overline{A'B'} \text{ hauteur de l'image} \begin{cases} \text{objet et image au-dessus de l'axe} \Rightarrow \overline{AB}, \overline{A'B'} > 0 \\ \text{objet et image au-dessous de l'axe} \Rightarrow \overline{AB}, \overline{A'B'} < 0 \end{cases}$$

On définit le grossissement par le rapport

$$(7) \quad m = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{p_i}{p_o} \quad (\text{voir figure 6 ou 7})$$

$m < 0$ image inversée ou $m > 0$ image non inversée

Lentilles accolées

La distance focale d'un système de N lentilles minces accolées est donnée par la relation suivante:

$$(8) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_n}$$

Défauts des lentilles :

- 1) *Aberrations chromatiques* : elles proviennent du fait que l'indice de réfraction de la matière dont est faite la lentille dépend de la longueur d'onde; il y a donc dispersion de la lumière et la lentille a une distance focale différente pour chaque couleur : plus petite pour les rayons bleus que pour les rayons rouges. Les aberrations chromatiques peuvent être fortement réduites en utilisant des lentilles composées. De telles lentilles sont faites de verres de différents indices de réfraction moyens et de différentes dispersions.
- 2) *Aberration de sphéricité* : lorsque la lentille n'est pas mince, elle est plus convergente pour les rayons marginaux que pour les rayons centraux. Pour les rayons marginaux, l'approximation des petits angles (utilisée pour établir (5)) n'est plus valable. Pour remédier à ce défaut, il suffit d'utiliser des surfaces paraboliques plutôt que sphériques. Malheureusement, de telles surfaces sont plus difficiles à réaliser et sont plus chères.
- 3) *Astigmatisme* : si une lentille est fortement inclinée par rapport aux rayons incidents, des rayons initialement parallèles ne convergent plus en un seul point. Pour l'oeil, une variation de la courbure de la cornée est la cause d'un même effet. Dans ce cas des rayons parallèles arrivant sur l'oeil ne convergent plus en un seul point de la rétine.

L'oeil

D'un point de vue physique, l'oeil peut être considéré comme un système optique convergent à une lentille qui forme une image réelle inversée sur un détecteur photosensible : la rétine.

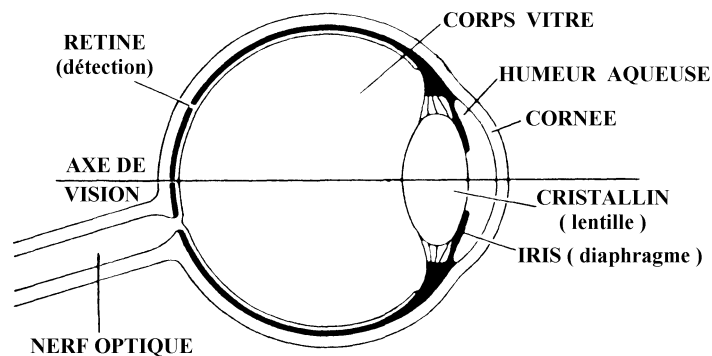


Figure 8

Les éléments constitutifs de l'oeil sont :

- la *cornée* : membrane résistante d'épaisseur voisine de 1 mm. L'essentiel de la réfraction se produit au niveau de la cornée, étant donné que son rayon de courbure est petit (0.8 cm) et que la différence d'indice de réfraction entre l'air ($n = 1$) et l'humeur aqueuse ($n = 1.336$) est importante;
- l'*humeur aqueuse* : fluide transparent d'indice 1.336 (proche de celui de l'eau, $n_{\text{eau}} = 1.333$) contenu dans l'espace qui sépare la cornée du cristallin;
- le *cristallin* : lentille convergente, d'indice de réfraction légèrement supérieur, 1.437, dont la forme et la distance focale sont contrôlées par les muscles ciliaires. Cela permet de faire varier la distance focale de tout le système optique de l'oeil (essentiellement cornée + cristallin, considérés comme deux lentilles accolées) d'environ 2 à 3 mm pour former une image nette d'objets situés entre 25 cm et l'infini;
- le *corps vitré* : gelée plus fine que l'humeur aqueuse, mais de même indice de réfraction ($n = 1.336$), qui se trouve au-delà du cristallin;
- la *rétine* : membrane mince d'épaisseur de l'ordre de 0.5 mm qui tapisse le fond de l'oeil et constitue un écran photosensible.

Pour un oeil normal, le foyer se trouve sur la rétine lorsque les muscles sont au repos. La lumière provenant d'objets éloignés (à l'infini) est focalisée sur la rétine. Lorsque les muscles ciliaires se contractent, la courbure du cristallin augmente, et sa distance focale diminue. La lumière provenant d'objets proches converge alors sur la rétine. L'ajustement de la distance focale du cristallin pour produire une image nette des objets situés dans différents plans est l'*accommodation*.

Les défauts de l'œil

- la *myopie* : lorsque les muscles ciliaires sont au repos, le foyer est devant la rétine. L'œil ne peut pas voir nettement des objets éloignés. Une lentille divergente corrige ce défaut en augmentant la distance focale de l'œil;
- l'*hypermétropie* : c'est le défaut inverse de la myopie; lorsque les muscles sont au repos, le foyer est derrière la rétine. Les muscles doivent déjà travailler pour voir les objets à l'infini et n'arrivent plus à diminuer la distance focale pour les objets proches. Ce défaut peut être corrigé à l'aide de lentilles convergentes;

III.- MANIPULATIONS

a) Lois de base de l'optique géométrique

Effectuer le montage de la figure 9; utiliser les fentes comme diaphragme et le masque pour n'obtenir qu'un seul rayon lumineux, passant par le centre du disque optique.

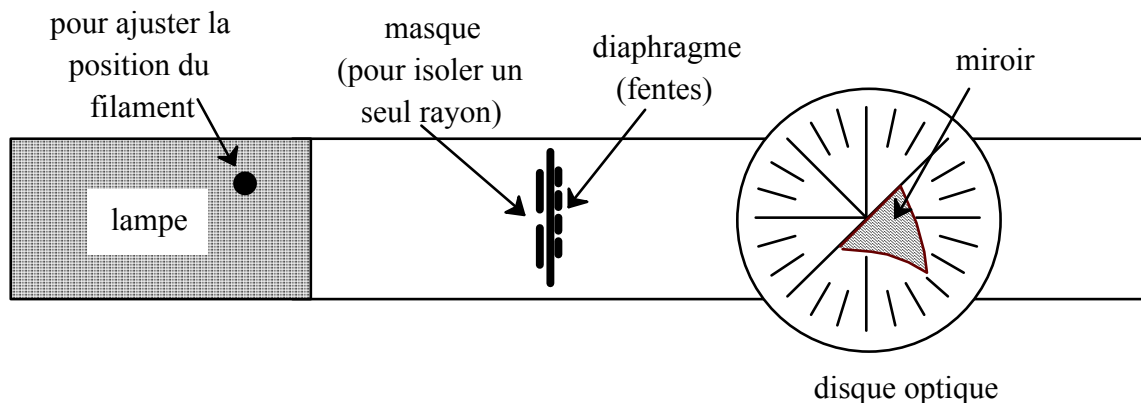


Figure 9. Montage expérimental (vue de dessus).

- A l'aide du miroir plan, vérifier la loi de la réflexion, pour différents angles d'incidences. Remplacer le miroir par la lentille cylindrique épaisse (figure 10).

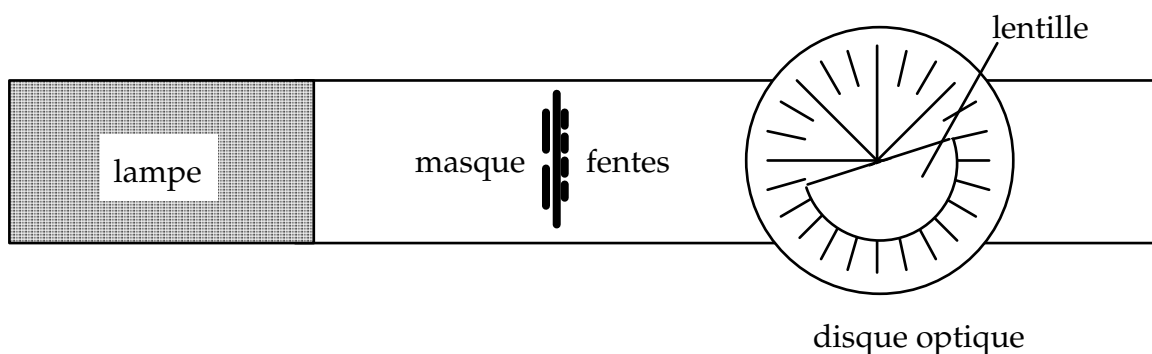


Figure 10

- Relever l'angle de réfraction pour différents angles d'incidence. Afin de réduire les erreurs d'alignement, choisir les mêmes angles d'incidence de part et d'autre de la normale et faire la moyenne des angles de réfraction mesurés. Tracer $\sin \alpha_1$ en fonction de $\sin \alpha_2$ et déterminer l'indice de réfraction du Plexiglas ($n_{\text{air}} = 1$).

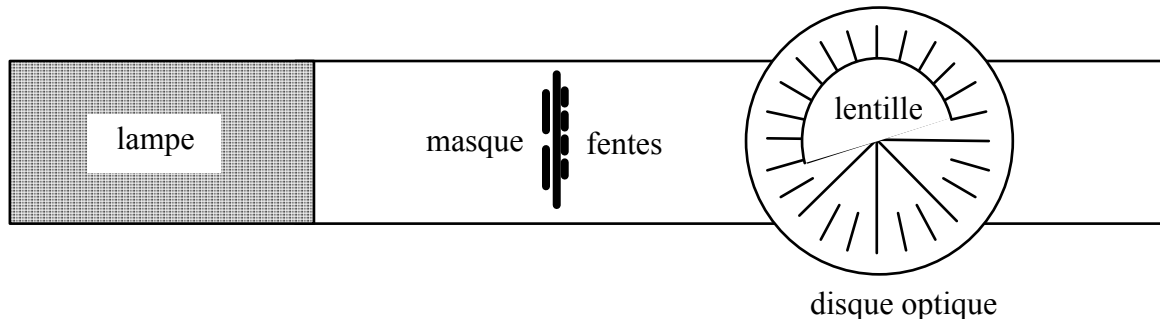


Figure 11

- Répéter l'expérience avec l'autre orientation de la lentille (côté arrondi face à la lampe, comme sur la figure 11).
- Observer également le rayon réfléchi. Quel est l'angle à partir duquel on a réflexion totale ? Que se passe-t-il alors avec l'intensité lumineuse du rayon réfléchi ?
- Pour des angles de réfraction élevés, étudier la dispersion; à partir de quel angle distingue-t-on les différentes couleurs ?

(La mise en évidence de la séparation des couleurs est favorisée par l'utilisation de l'écran monté sur le disque optique.)

Pour produire des rayons distincts et parallèles, placer entre la source lumineuse et les fentes la lentille à rayons parallèles (*Parallel Ray Lens*), comme indiqué sur la figure 12, et ajuster sa position.

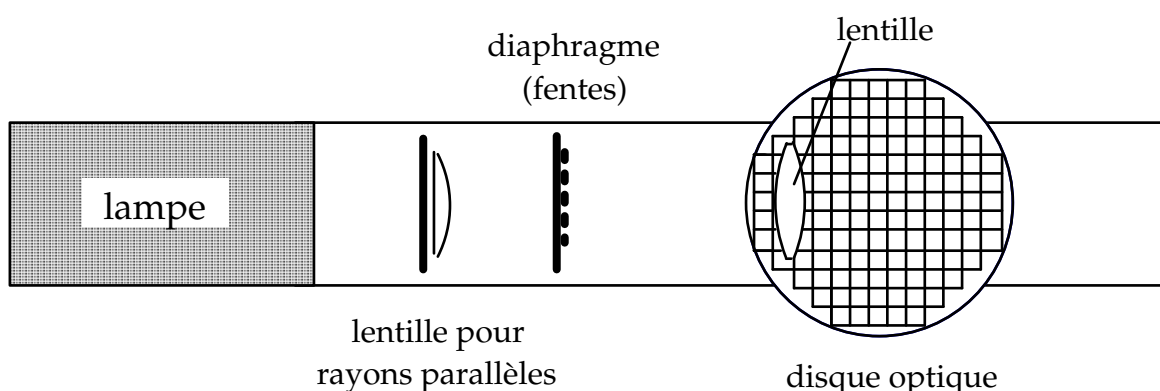


Figure 12

- Mesurer la distance focale de la lentille convergente mince. Sachant que ses rayons de courbure sont de 11 cm et qu'elle est en Plexiglas, comparer avec la valeur théorique.
- Observer le phénomène d'aberration sphérique sur la lentille convergente épaisse.
- Quel est l'effet de la lentille divergente sur les rayons incidents ?

b) Les lentilles

Placer la plaque de verre dépoli entre la source lumineuse et le diaphragme servant d'objet. Utiliser l'écran pour visualiser l'image produite par la lentille.

- Déterminer la distance focale d'une lentille convergente à partir de la loi des foyers conjugués
- Pour une distance focale donnée (lentille convergente), quand obtient-on une image virtuelle ou réelle, inversée ou non, agrandie, réduite ou de même taille que l'objet ? Vérifier expérimentalement.
- Mesurer la distance focale de deux lentilles accolées pour deux lentilles convergentes et pour une lentille convergente et une divergente (donnant une résultante convergente). Comparer avec la théorie.

c) L'oeil

Comme modèle pour l'oeil, on utilise une lentille (cornée + cristallin) de $f = 150$ mm et un écran blanc (la rétine). Prendre comme objet la règle graduée et placer le devant la plaque de verre dépoli. Placer l'écran à environ 600 mm de l'objet et chercher la position de la lentille donnant une image nette.

- hypermétropie : On simule l'hypermétropie en rapprochant l'écran de la lentille (environ 100 mm). On corrige l'image sur l'écran en plaçant une autre lentille (lunette) devant le système "cornée + cristallin". Déterminer le type de lentille et la distance à laquelle doit se trouver cette lentille corrective pour obtenir une image nette. Connaissant la distance focale de cette lentille vérifier le résultat obtenu expérimentalement pour la position.
- myopie : La myopie est simulée en éloignant l'écran de la lentille, par rapport à la position donnant une image nette. On corrige l'image sur l'écran en plaçant une autre lentille (lunette) devant le système "cornée + cristallin". Déterminer le type de lentille et la distance à laquelle doit se trouver cette lentille corrective pour obtenir une image nette. Connaissant la distance focale de cette lentille vérifier le résultat obtenu expérimentalement pour la position.

N'oubliez pas que les lunettes se mettent entre l'objet et l'oeil (i.e. la lentille) !