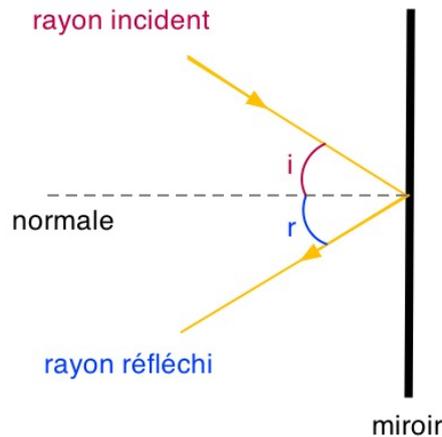


# Chapitre 2 : Lentilles et instruments d'optique

## 1. Miroir plan

### 1.1. Préambule

Dans la pratique, un miroir est une surface métallique recouverte d'une couche de verre protectrice. Pour notre étude, un miroir plan est une surface plane réfléchissante.



Tout rayon lumineux incident est réfléchi en totalité par le miroir ; il n'y a donc aucun rayon réfracté.

Bien sûr, le rayon réfléchi obéit aux lois de Descartes.

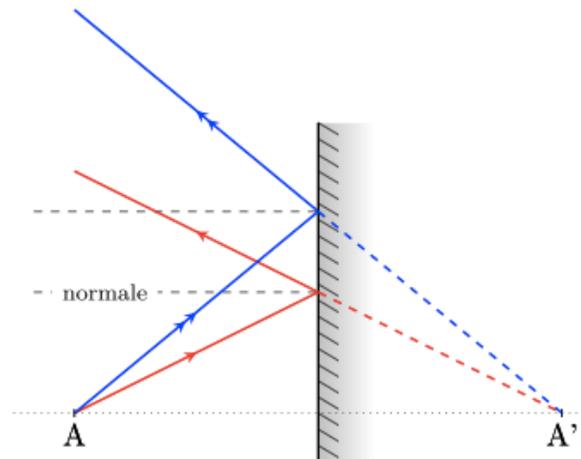
### 1.2. Construction d'un rayon réfléchi

Soit un miroir plan et un rayon incident. On note  $I$  le point d'incidence sur le miroir. Deux méthodes permettent de construire le rayon réfléchi.

- ✓ première méthode : le rayon réfléchi est le symétrique du rayon incident par rapport à la normale en  $I$  au miroir. (méthode souvent peu précise)
- ✓ deuxième méthode :
  - on considère un point  $A$  sur le rayon incident
  - on construit son symétrique  $A'$  par rapport au plan du miroir
  - le rayon réfléchi, issu de  $I$  a la même direction que  $(A'I)$

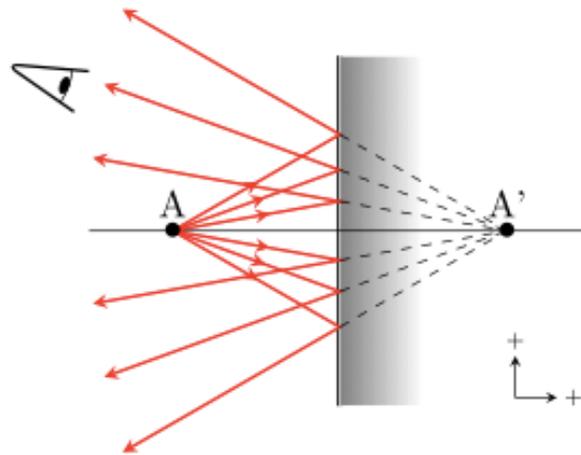
Règles de présentation :

- les traits de construction doivent être effectués au crayon de mine, en pointillés et laissés sur la figure
- les rayons seront tracés en couleur et le sens de propagation sera indiqué par une flèche



### 1.3. Stigmatisme

Considérons un point source  $A$  envoyant plusieurs rayons lumineux sur un miroir plan.



La construction des rayons réfléchis montre que ceux-ci semblent provenir d'un point  $A'$ , symétrique de  $A$  par rapport au plan du miroir.

On introduit ainsi les notions d'objet et d'image. Le miroir plan est dit stigmatique puisqu'à tout point objet ( $A$ ) correspond un point image ( $A'$ ) ; ces points sont alors dit conjugués par le miroir.

### 1.4. Caractère réel ou virtuel

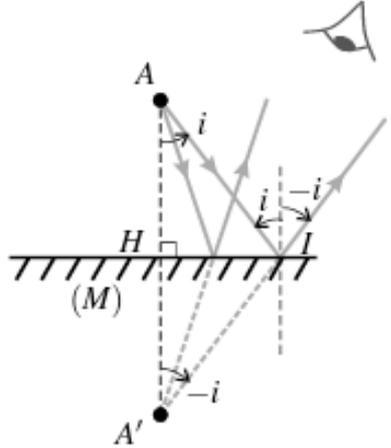
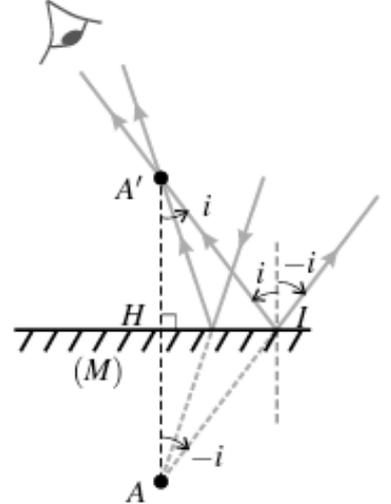
Le plan du miroir définit deux demi-espaces : l'avant et l'arrière du miroir. Tous les rayons lumineux (incidents ou réfléchis) se propagent en amont du miroir. L'arrière du miroir n'est donc utilisé que pour la construction des rayons.

Tout point de concours de rayons incidents (objet) ou réfléchis (image) situé en avant du miroir sera qualifié de réel. A contrario, tout point de concours de rayons incidents (objet) ou réfléchis (image) situé en arrière du miroir sera qualifié de virtuel.

Le caractère réel d'un point objet ou image peut être associé à la possibilité de le visualiser sur un écran.

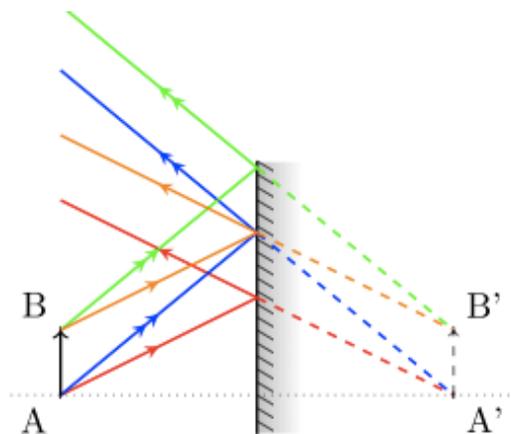
Remarque : le point de concours de rayons lumineux situé derrière le miroir ne peut être vu sur un écran puisqu'aucun rayon ne peut se propager au delà du miroir.

Par construction, nous obtenons pour le miroir plan.

<p>Objet réel</p>	<p>Image virtuelle</p>	
<p>Objet virtuel</p>	<p>Image réelle</p>	

1.5. Image d'un objet étendu

L'objet le plus simple est un vecteur  $\overline{AB}$  perpendiculaire à l'axe optique ; on parle d'objet transverse.

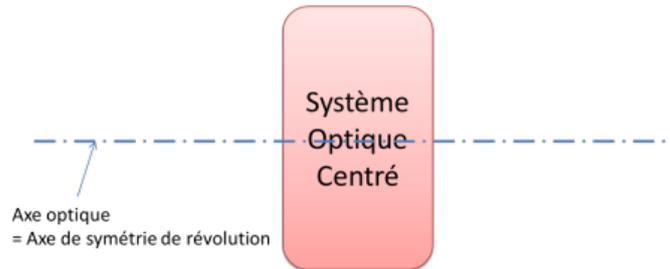


La construction des rayons réfléchis montre que l'image  $\overline{A'B'}$  est le symétrique de l'objet par rapport au plan du miroir. On dit que l'image est droite et de même taille que l'objet.

## 2. Systèmes optiques et conditions de Gauss

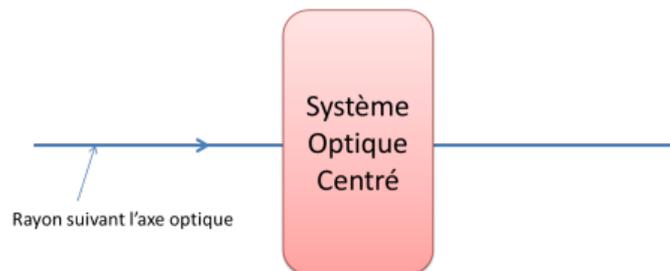
### 2.1. Système optique centré

Un système optique centré est un système optique dont les éléments constitutifs (dioptries, miroirs) ont un axe de symétrie commun. Cet axe est appelé axe optique ; il est orienté dans le sens de propagation de la lumière.



Les plans perpendiculaires à l'axe optique sont appelés plans de front.

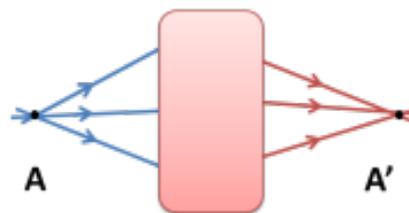
Par définition, l'axe optique d'un système optique centré est perpendiculaire à toutes les surfaces réfractantes (dioptries) et réfléchissantes du système. On a, par conséquent, la propriété suivante : un rayon suivant l'axe optique dans un système centré n'est pas dévié.



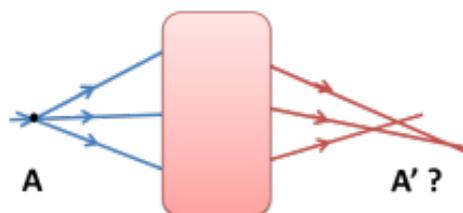
### 2.2. Stigmatisme rigoureux et stigmatisme approché

- stigmatisme rigoureux : deux points  $A$  et  $A'$  sont rigoureusement conjugués si pour tout rayon incident passant par  $A$ , le système optique délivre un rayon passant par  $A'$

On pourrait résumer le stigmatisme rigoureux par la phrase : « L'image d'un point est un point. »

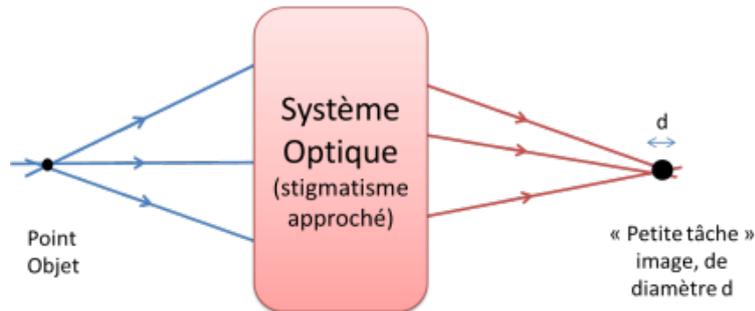


- astigmatisme : les rayons incidents passant par  $A$  ressortent du système optique sans converger en un même point ; le système optique forme alors une tache « image ».



Les images issues d'un système optique seront toujours observées et/ou analysées à l'oeil ou à l'aide d'un capteur. Quelque soit le détecteur utilisé, la résolution est limitée c'est-à-dire qu'au dessous d'une certaine dimension (la taille d'une cellule dans le cas d'un capteur), une tache sera perçue comme un point.

- stigmatisme approché : les rayons incidents passant par  $A$  ressortent du système optique au voisinage d'un même point  $A'$  formant ainsi une tache de taille inférieure à la dimension caractéristique des cellules du détecteur.



### 2.3. Conditions de Gauss

Un rayon incident sur un système optique centré est dit paraxial quand :

- le rayon est proche de l'axe optique du système
- le rayon est peu incliné par rapport à l'axe optique

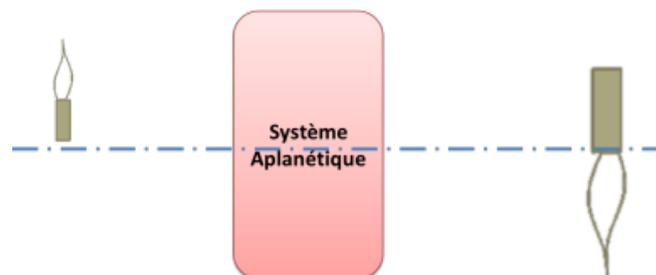
Un système optique centré est utilisé dans les conditions de Gauss si tous les rayons incidents sont paraxiaux.

Dans les conditions de Gauss, les systèmes centrés présentent un stigmatisme approché pour des couples de points conjugués  $A$  et  $A'$  situés sur l'axe.

### 2.4. Aplanétisme

Dans les conditions de Gauss, un point  $B$  situé dans le plan de front d'un point  $A$  de l'axe a son image  $B'$  dans le plan de front du point  $A'$  image de  $A$  par le système optique.

On pourrait résumer l'aplanétisme par la phrase : « L'image d'un objet transverse est également transverse. »

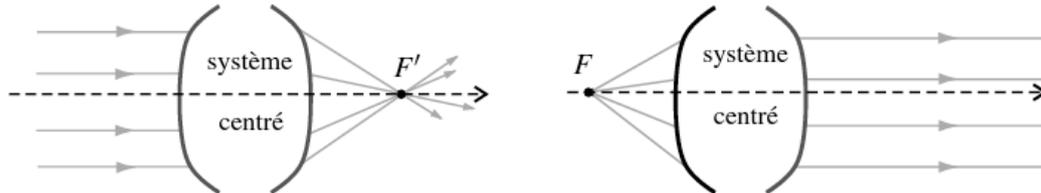


### 2.5. Foyers objet, foyers image - Système afocal

On dit d'un point qu'il est à l'infini lorsqu'il est situé à une distance infinie du système optique. Tous les rayons passant par un point à l'infini sont parallèles entre eux.

La plupart des systèmes optiques centrés présentent des points particuliers :

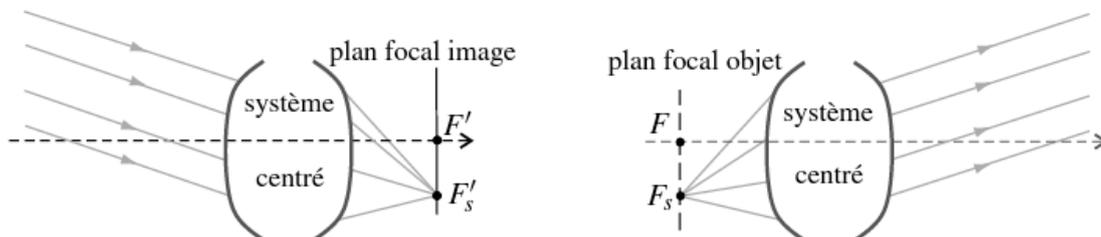
- foyers principaux objet et image
  - on appelle foyer principal image, noté  $F'$  l'image du point objet  $A_\infty$  situé à l'infini dans la direction de l'axe optique.
  - on appelle foyer principal objet, noté  $F$ , le point objet dont l'image  $A'_\infty$  est située à l'infini dans la direction de l'axe optique.



Il s'ensuit que :

- tout rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image
- tout rayon incident passant par le foyer objet émerge parallèle à l'axe optique

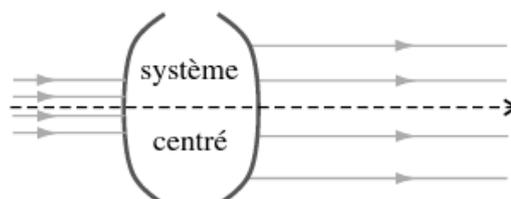
- foyers secondaires objet et image
  - par aplanétisme, tout point objet situé à l'infini mais hors de l'axe optique a son image dans le plan de front de  $F'$  appelé plan focal image. Les points de ce plan sont appelés foyers image secondaires et notés  $F'_s$  ou  $\phi'$
  - par aplanétisme, tout point objet situé dans le plan de front de  $F$  appelé plan focal objet a son image rejetée à l'infini. Les points de ce plan sont appelés foyers objet secondaires et notés  $F_s$  ou  $\phi$



Il s'ensuit que :

- un faisceau de rayons incidents parallèles entre eux mais non parallèles à l'axe optique, émerge en un faisceau de rayons qui convergent vers un foyer image secondaire
- un faisceau de rayons incidents issus d'un foyer objet secondaire émerge du système en un faisceau de rayons parallèles entre eux mais non parallèles à l'axe optique.

Un système optique ne présentant aucun foyer est appelé système afocal. Il transforme un faisceau incident parallèle en un faisceau émergent parallèle.

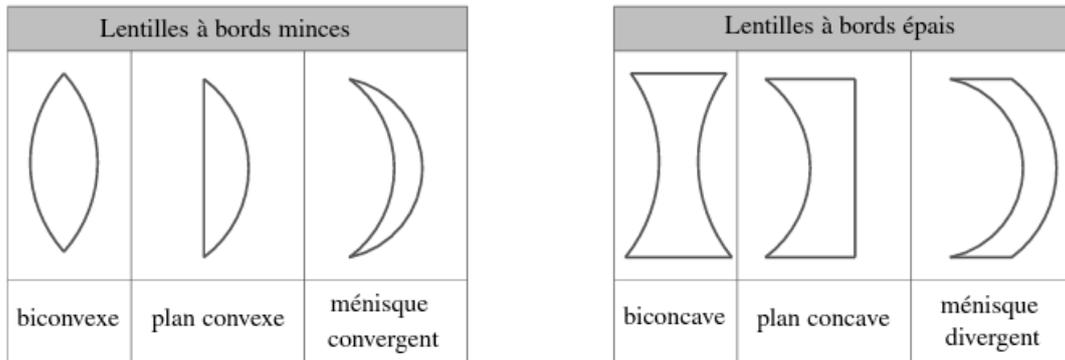


### 3. Lentilles minces

#### 3.1. Les différentes sortes de lentilles

Une lentille est constituée d'un milieu L.T.H.I délimité par deux dioptries sphériques ou un dioptre sphérique et un dioptre plan. Il s'ensuit deux grandes familles de lentilles :

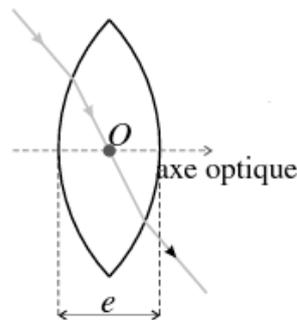
- les lentilles convergentes qui sont à bords minces
- les lentilles divergentes qui sont à bords épais



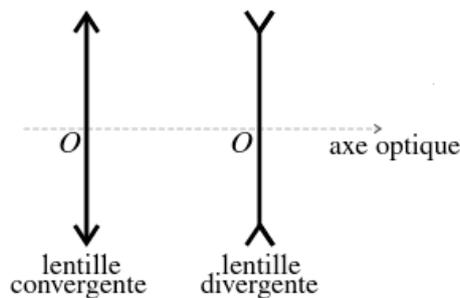
Remarque : il ne faut pas confondre la notion de lentille à bords minces ou épais avec la notion de lentilles minces définie ci-après.

Les lentilles sont des systèmes optiques centrés possédant un axe de révolution  $\Delta$  formant l'axe optique de la lentille.

Pour toute lentille, il existe un point de l'axe optique, noté  $O$ , tel que, pour tout rayon passant par  $O$  à l'intérieur de la lentille, le rayon émergent de la lentille est parallèle au rayon incident. Ce point est appelé centre optique de la lentille.



On parle de lentille mince lorsque l'épaisseur  $e$  de la lentille sur l'axe est négligeable devant le ou les rayons de courbure de ces faces. On utilise alors les symboles suivants.

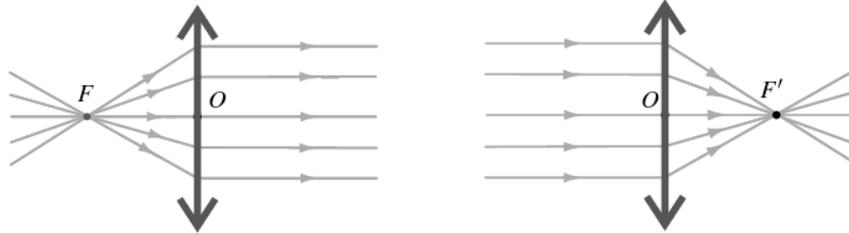


Il s'ensuit qu'un rayon lumineux passant par le centre optique  $O$  d'une lentille mince n'est pas dévié.

### 3.2. Foyers d'une lentille mince

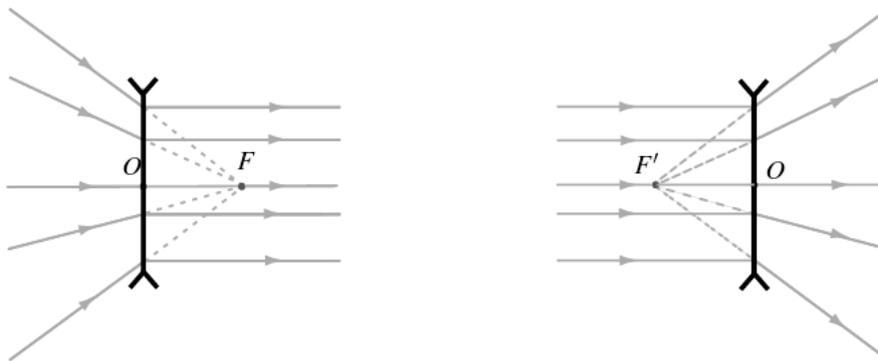
Pour une lentille convergente, on a :

- les foyers principaux  $F$  et  $F'$  sont symétriques par rapport au centre optique  $O$
- $F$  est situé avant le centre optique  $O$ ,  $F'$  après.



Pour une lentille divergente, on a :

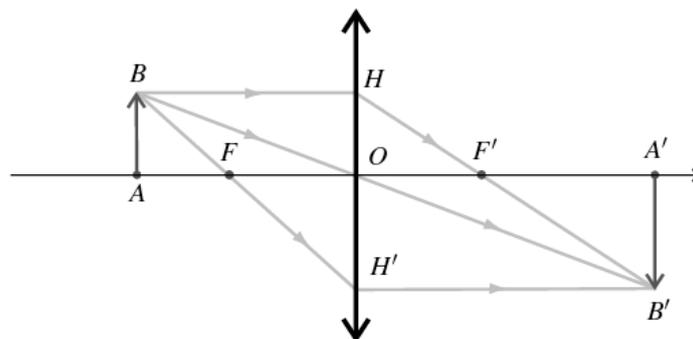
- les foyers principaux  $F$  et  $F'$  sont symétriques par rapport au centre optique  $O$
- $F$  est situé après le centre optique  $O$ ,  $F'$  avant.



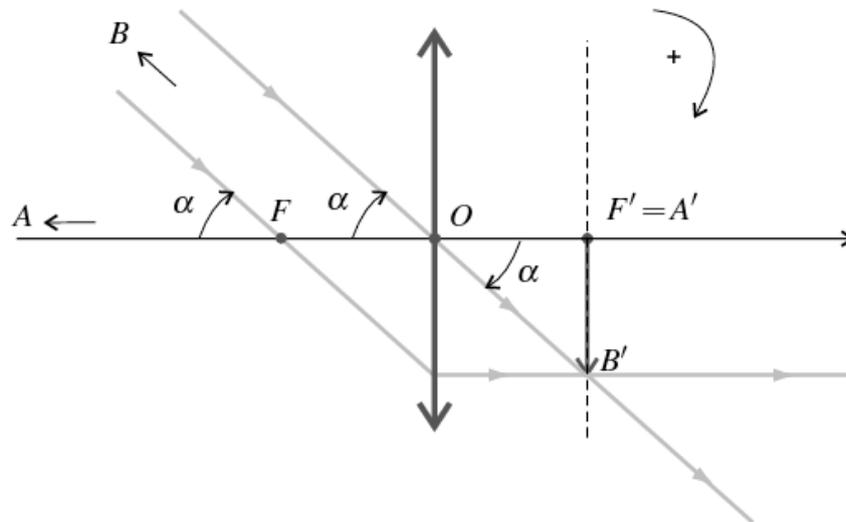
### 3.3. Construction géométrique

Soient une lentille mince et un objet transverse  $AB$ , réel ou virtuel, à distance finie ou infinie. Afin de construire l'image correspondante  $A'B'$ , on utilise l'une des méthodes ci-après :

- si  $AB$  est à distance finie, on trace les trois rayons remarquables issus de  $B$  suivants
  - le rayon passant par le centre optique sans être dévié
  - le rayon incident, parallèle à l'axe optique, dont l'émergent passe par le foyer  $F'$
  - le rayon incident, passant par le foyer  $F$ , dont l'émergent est parallèle à l'axe optique



- si  $AB$  est à distance infinie de la lentille, sachant que l'image se trouve dans le plan focal image de la lentille, on trace les deux rayons remarquables issus de  $B$  suivants
  - le rayon passant par le centre optique sans être dévié
  - le rayon incident parallèle au précédent, passant par le foyer  $F$ , dont l'émergent, parallèle à l'axe optique, passe par le foyer secondaire  $B'$



Tous les prolongements virtuels des rayons incidents ou émergents (traits de construction) seront effectués en pointillés.

### 3.4. Distance focale et vergence d'une lentille mince

On choisit d'orienter l'axe optique dans le sens de la lumière incidente (par convention, de gauche à droite) ce qui permet de définir des valeurs algébriques.

Pour les deux types de lentilles minces, on définit ainsi la distance focale par :

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

On définit par ailleurs la vergence d'une lentille par :

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

La vergence s'exprime en dioptrie ( $\delta$ ).

On a alors :

- $f' > 0$  et  $V > 0$  pour une lentille convergente
- $f' < 0$  et  $V < 0$  pour une lentille divergente.

### 3.5. Relations de conjugaison

On cherche à établir cette fois par le calcul les résultats obtenus par construction géométrique. Pour cela, on a besoin de déterminer :

- la position de l'image compte tenu de celle de l'objet sur l'axe optique
- la taille de l'image par rapport à celle de l'objet et son aspect (renversée ou droite) ; on utilise pour cela le grandissement transversal défini par

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

Le signe de  $\gamma$  traduira ainsi l'aspect de l'image :

- ✓  $\gamma > 0$  image droite
- ✓  $\gamma < 0$  image renversée

On pourra s'appuyer sur plusieurs relations fournies par l'énoncé :

- les relations de conjugaison et de grandissement avec origine au centre (dites de Descartes)

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} = V \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

- les relations de conjugaison et de grandissement avec origine aux foyers (dites de Newton)

$$\overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = -f'^2 \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{F'A'}}{\overline{OF'}} = -\frac{\overline{OF}}{\overline{FA}}$$

### 3.6. Objet et image réels par une lentille

On se pose la question de connaître la condition pour obtenir d'un objet réel une image réelle par une lentille de distance focale  $f'$ .

On adopte les notations suivantes :

$$\overline{OA} = p ; \quad \overline{OA'} = p' ; \quad \overline{AA'} = D = p' - p$$

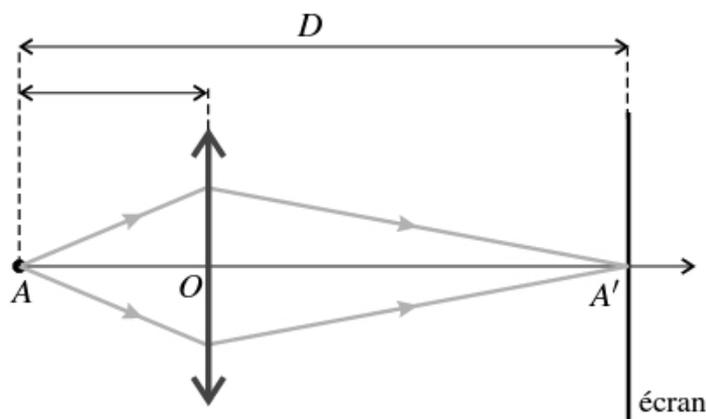
D'après la relation de conjugaison avec origine au centre, on a :

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p' - D} = \frac{1}{f'}$$

Soit

$$p'^2 - p'D + f'D = 0$$

Cette équation n'admet de solutions réelles que sous la condition  $\Delta = D^2 - 4f'D \geq 0$



On en déduit que pour former l'image réelle d'un objet réel avec une lentille, on doit avoir :

- $D \geq 4f'$
- une lentille convergente (puisque  $D$  est forcément positive)

### 3.7. Association de lentilles accolées

On dit de deux lentilles  $L_1$  et  $L_2$  qu'elles sont accolées lorsqu'elles ont le même axe optique et de position suffisamment voisines pour que leurs centres optiques  $O_1$  et  $O_2$  puissent être confondus en même point  $O$ .

$$O_1 = O_2 = O$$

Remarque :  $L_1$  et  $L_2$  peuvent être de même nature (convergentes ou divergentes) ou de natures différentes (une divergente et une convergente)

Soient  $V_1$  et  $V_2$  les vergences respectives de  $L_1$  et  $L_2$  ainsi que  $f'_1$ ,  $f'_2$  leurs distances focales. Soit un objet placé sur l'axe en  $A$  et son image finale située en  $A'$ . Soit  $A_1$  la position de l'image intermédiaire par  $L_1$ .

On a donc :

$$A \xrightarrow{L_1} A_1 \xrightarrow{L_2} A'$$

Les relations de Descartes avec origine au centre s'écrivent alors :

$$\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1} \quad \text{et} \quad \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = \frac{1}{f'_2}$$

Par sommation de deux équations, on obtient :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} = V_1 + V_2$$

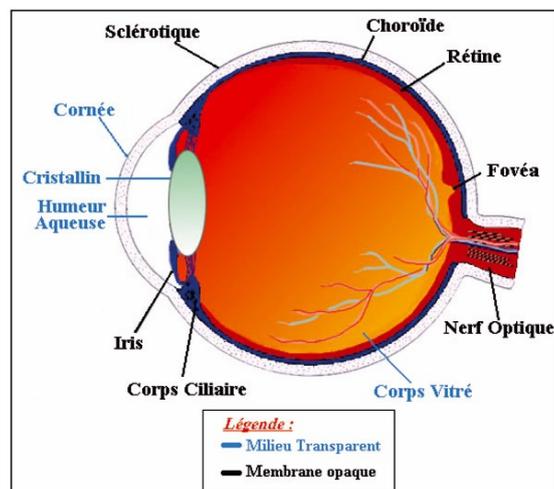
L'association des deux lentilles accolées est donc équivalente à une lentille mince :

- de centre optique  $O$
- de vergence  $V = V_1 + V_2$

## 4. L'oeil

### 4.1. Description anatomique

L'oeil est un organe très sophistiqué qui peut être décrit comme un ensemble de milieu transparent d'indices différents.



Un rayon lumineux traverse successivement :

- l'humeur aqueuse d'indice voisin de 1,336, la cornée formant le dioptré séparateur avec l'air
- le cristallin qui est assimilable à une lentille dont les propriétés (géométrie et indice) varie sous l'action de muscles (corps ciliaire)
- un milieu liquide appelé humeur vitrée ou corps vitré d'indice voisin de 1,336

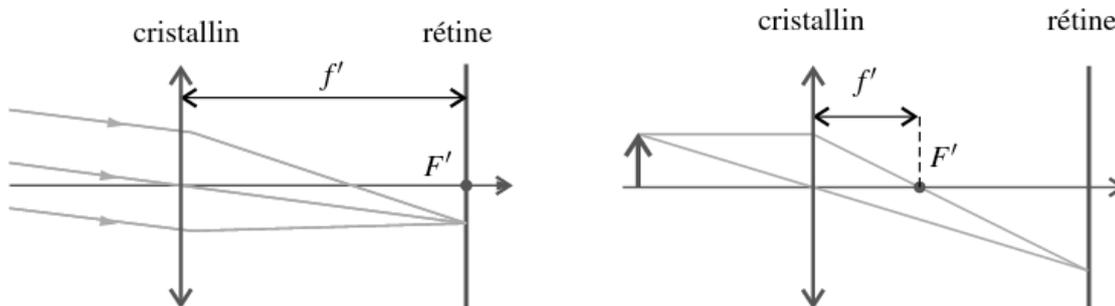
Les autres éléments constitutifs de l'oeil ont les rôles suivants :

- l'iris délimite un diaphragme, la pupille, permettant de régler la quantité de lumière entrant dans l'oeil suivant la luminosité
- la rétine constitue le capteur de lumière ; elle est formée de cellules sensibles à la lumière et aux couleurs : les cônes et les bâtonnets. La rétine n'est pas homogène ; le maximum d'acuité visuelle se situe au niveau de la fovéa (rayons proches de l'axe)

On peut modéliser l'oeil par une lentille mince convergente de vergence variable (cristallin) formant une image sur un écran fixe (rétine).

#### 4.2. Caractéristiques optiques

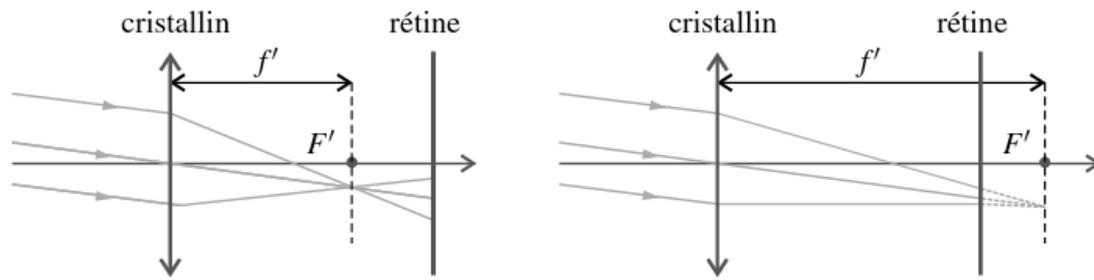
- ✓ On définit pour l'oeil la résolution angulaire comme l'angle limite entre deux rayons de directions voisines pouvant être distingués ; pour l'oeil humain, elle est de l'ordre d'une minute d'arc.
- ✓ Pour que l'image soit nette, il est nécessaire que celle-ci se forme sur la rétine. Un oeil normal forme l'image nette d'un objet à l'infini ; on parle d'une vision sans accommodation. Lorsque l'objet se rapproche, l'oeil est contraint d'augmenter sa vergence afin de maintenir l'image sur la rétine. Cette accommodation n'est possible que jusqu'à une distance minimale définissant un point sur l'axe : le punctum proximum (PP).



#### 4.3. Défauts de l'oeil et correction

Il existe plusieurs défauts de vision dont la myopie et l'hypermétropie.

- ✓ l'oeil hypermétrope : l'oeil hypermétrope est insuffisamment convergent ; en l'absence d'accommodation, il a son foyer situé en arrière de la rétine. Pour voir les objets lointains, il peut accommoder en augmentant sa vergence et ramener l'image sur la rétine.
- ✓ l'oeil myope : en l'absence d'accommodation, l'oeil myope a son foyer situé devant la rétine. Un objet situé à l'infini ne peut être donc vu correctement.



La correction d'un oeil souffrant d'un défaut de vision s'effectue en lui associant une lentille pour que la vergence de l'ensemble corresponde à celle d'un oeil sain et que l'image se forme bien sur la rétine.

L'oeil et la lentille correctrice étant très proche, on peut utiliser la loi d'additivité des vergences.

Ainsi :

- ✓ pour un oeil hypermétrope dont la vergence est trop faible ( $f'$  trop grande), on utilise une lentille convergente.
- ✓ pour un oeil myope dont la vergence est trop grande ( $f'$  trop petite), on utilise une lentille divergente.