

## Chapitre 2

### Résumé : optique géométrique

L'optique est la science qui décrit les propriétés de la propagation de la lumière.

L'optique géométrique est une des branches de l'optique : elle a pour but l'étude de la propagation des rayons lumineux dans les milieux transparents. Elle n'est valable que si toutes les dimensions des obstacles et ouvertures qu'elle rencontre sont très supérieures à la longueur d'onde. Sans quoi des phénomènes de diffraction interviennent, et la notion même de rayon n'a plus de sens.

La lumière n'est ni une onde, ni un ensemble de particules mais une onde-particule (**nature corpusculaire et ondulatoire de la lumière**).

### L'onde optique

- Une onde optique est un phénomène physique caractérisé par une grandeur qui varie en fonction du temps  $t$ . On pourra caractériser l'onde par sa longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide ou dans un milieu particulier.
- La longueur d'onde  $\lambda = cT = c/f$  ( $T$ : la période,  $f$ : la fréquence et  $c=3.10^8\text{m/s}$ ).  $c$ = la vitesse de la lumière dans le vide
- L'énergie est proportionnelle à la fréquence : relation de Planck,  $E = hf$ , la constante de Planck  $h=6,6 \cdot 10^{-34}\text{j.s}$ .
- Les ondes ultraviolettes sont plus énergétiques que les ondes infrarouges.

Spectre électromagnétique :

- |                              |             |
|------------------------------|-------------|
| • Les signaux radio et TV    | 15cm-2km    |
| • Les micro-ondes            | 1mm-15cm    |
| • Le rayonnement infrarouge  | 700nm-1mm   |
| • La lumière visible         | 400nm-700nm |
| • Le rayonnement ultraviolet | 10nm-400nm  |
| • Les rayons X               | 0,01nm-10nm |
| • Les rayons gamma           | 0,01 nm – ? |

Remarque :

La lumière peut être soit **monochromatique** (une seule longueur d'onde) soit **polychromatique** qui est un mélange de plusieurs couleurs (plusieurs longueur d'onde).

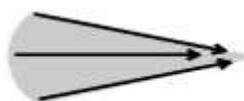
### Rayon, faisceau lumineux

- Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite.
- **Les rayons lumineux** sont des droites issues de la source et montrent le sens de propagation de la lumière.
- Un rayon lumineux n'a pas d'existence physique, c'est un modèle qui permet de décrire la formation des images.

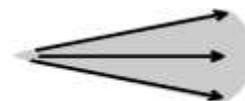
**Faisceau lumineux** : C'est un ensemble de rayons lumineux émis initialement par la même source. Il peut être parallèle, convergent ou divergent.



a) faisceau parallèle



b) faisceau convergent



c) faisceau divergent

### Propagation de la lumière

- L'énergie lumineuse se propage suivant une courbe appelée **rayon lumineux**.
- La lumière se propage de façon rectiligne dans un milieu homogène et isotrope.

- Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux.
- La lumière se propage dans le vide à la vitesse  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  et dans les milieux transparents à une vitesse  $v$ .
- Le milieu transparent est caractérisé par son **indice de réfraction**  $n$  :  $n = c/v$  et  $n = \lambda_{\text{vide}}/\lambda_{\text{milieu}}$

- Pour un milieu homogène  $n = \text{constante}$
- Un milieu est dit dispersif lorsque  $n$  dépend de  $\lambda$
- $n \geq 1$
- L'indice de réfraction  $n$  dépend
  - de la longueur d'onde
  - de la température
  - de la concentration du liquide

milieu	Indice de réfraction
Air	$n = 1,00029$
Eau	$n = 1,33$
Alcool	$n = 1,36$
Verre	$n = 1,52$
Diamant	$n = 2,47$

**Principe de Fermat** : La lumière se propage d'un point à un autre sur une trajectoire de façon à ce que la durée de parcours soit minimale. Les lois qui suivent sont des conséquences du principe de Fermat.

**Principe du retour inverse** : Si un rayon lumineux traverse un système optique de A vers D alors, la propagation de la lumière dans le sens opposé, c'est-à-dire de D vers A est physiquement réalisable.

### Les lois de réfraction (Snell-Descartes-Ibn-Sahl)

- 1<sup>ère</sup> loi :

Le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.

- 2<sup>ème</sup> loi :

Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux :  $i_1 = i'_1$

- 3<sup>ème</sup> loi :

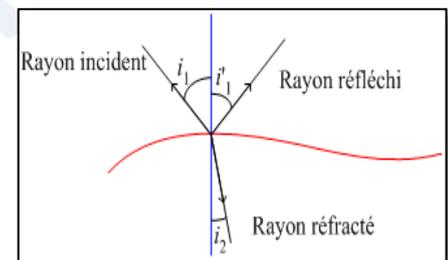
Pour un rayon lumineux monochromatique, on a :

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

$i_1$  : angle d'incidence

$i_2$  : angle de réfraction

$i'_1$  : angle de réflexion



### Remarques :

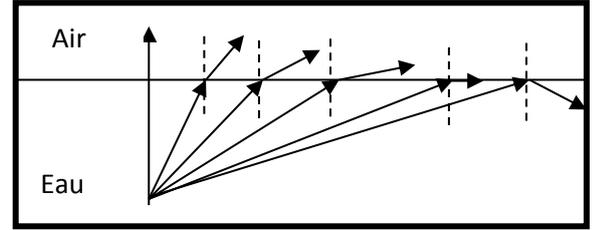
- Lorsque  $n_1 < n_2$ , le second milieu est plus réfringent, le rayon lumineux se rapproche de la normale.
- Si l'angle d'incidence est égal à  $90^\circ$ , alors l'angle de réfraction correspondant est l'angle de réfraction limite  $\lambda$ .
- Si le milieu incident est plus réfringent que le second milieu et l'angle d'incidence est supérieure à l'angle de réfraction limite, le phénomène de réflexion totale se produit.
- L'indice de réfraction d'un milieu  $n$  n'est pas le même pour toutes les longueurs d'ondes. C'est la raison pour laquelle la lumière blanche est séparée en différentes couleurs par un prisme ou par les gouttelettes d'eau pour former un arc-en-ciel

### Réflexion totale ( $n_1 > n_2$ )

Dans le cas de la figure où un rayon passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ( $n_1 > n_2$ ), à partir d'une certaine valeur de  $i_1$ ,  $i_2$  peut atteindre  $\pi/2$ . A ce moment-là, le rayon réfracté n'existe plus, on parle de réflexion totale. L'angle limite  $\lambda$  à partir duquel il y a réflexion totale est donné par la relation suivante :

$$\sin \lambda = n_2/n_1$$

Le phénomène de réflexion totale est utilisé dans les fibres optiques



### Réfraction limite ( $n_1 < n_2$ )

Dans l'autre cas, quand le rayon passe d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent, l'angle que fait le rayon réfracté  $i_2$  ne peut pas dépasser une certaine valeur ( $i_2 = \pi/2$ ). On a alors :

Pour  $i_1 = \pi/2$ ,  $i_2 = \lambda$  (angle limite)

$$\sin \lambda = n_1/n_2$$

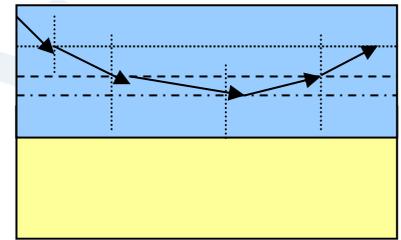
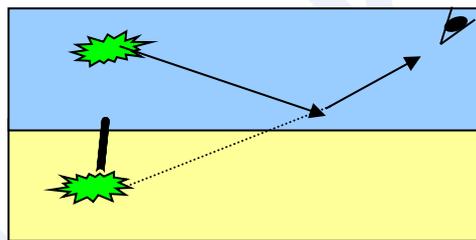
Remarque : dans tous les cas,  $\sin \lambda = n_{\text{inf}}/n_{\text{sup}}$

### Application

#### 1. Mirage

Le mirage est dû à une modification de l'indice de réfraction due au changement de la température. La surface chaude réchauffe l'air immédiatement au-dessus à une température plus élevée que l'air plus haut.

Pour bien comprendre ce phénomène, il suffit de diviser mentalement l'air en couches d'indice de réfraction différent.



Dans ces conditions, un rayon lumineux va se réfracter vers le haut. Il s'écarte de la normale en entrant dans l'air moins dense et moins réfringent près du sol. Finalement les rayons sont assez obliques pour qu'il y ait réflexion totale un peu au-dessus du sol. Lorsque le rayon lumineux réfracté rencontre votre œil, il semble provenir de la surface du sol au lieu du ciel.

En remontant dans l'air plus froid et plus réfringent, les rayons se rapprochent de nouveau de la normale : on obtient ainsi un mirage « inférieur ».

### Dispersion chromatique produite par un prisme

Le prisme permet de décomposer la lumière et d'en obtenir le spectre des ondes monochromatiques.

La déviation de la lumière dépend directement de l'angle au sommet du prisme : nous le choisirons donc aussi grand que possible pour accentuer l'effet ; en général on utilise un prisme pour lequel l'angle  $\alpha$  vaut  $60^\circ$ , et dont le matériau présente un indice de réfraction le plus élevé possible : c'est le cas du verre « flint ». Dans ces conditions, on observe une déviation :

$$D = 35,4^\circ \text{ pour le rouge}$$

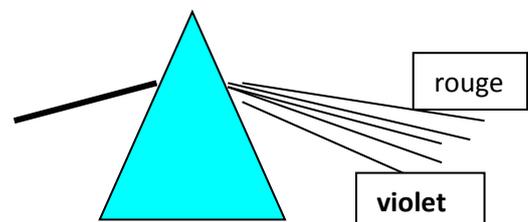
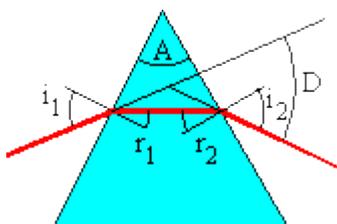
$$D = 37,8^\circ \text{ pour le bleu-violet.}$$

Sachant que :

$$\text{- pour le rouge } n = 1,59$$

$$\text{- pour le violet } n = 1,63$$

On observe en fait un étalement de rayons de couleur différente, qui constitue le « spectre » de la lumière blanche.

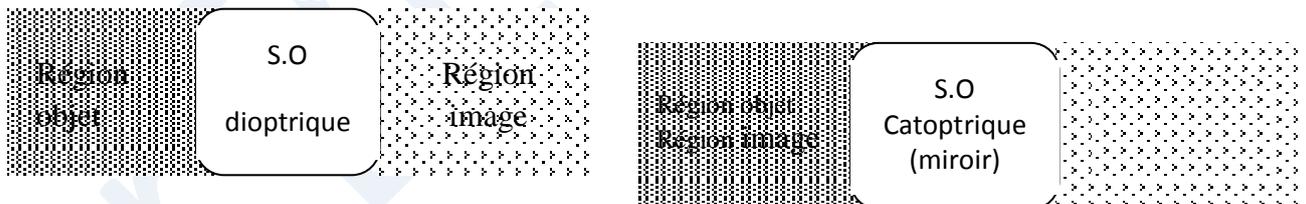


L'angle de deviation  $D=i_1+i_2-A$

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(A + D)}{\sin \frac{A}{2}}$$

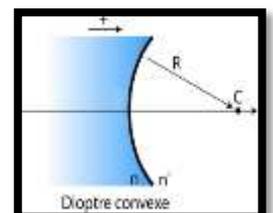
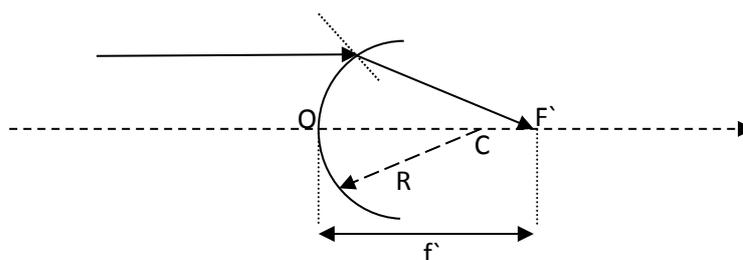
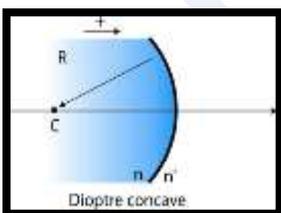
## Le système optique

- La surface qui sépare deux milieux transparents d'indices de réfraction différents s'appelle dioptre.
- Surface sphérique  $\longrightarrow$  dioptre sphérique.
- Surface plan  $\longrightarrow$  dioptre plan.
- Tout système optique est limité par des dioptres (ou miroirs).
- Dans un système optique centré, les dioptres et les miroirs sont alignés sur un même axe, appelé axe optique.
- Dans un système dioptrique, il y a des dioptres seulement.
- Dans un système catadioptrique, il y a des miroirs et des dioptres.
- Dans un système catoptrique, il y a des miroirs seulement.
- Le système optique est rigoureusement stigmatique lorsque chaque point de l'objet A possède une image A'. on dit que A' est l'image conjuguée de A par rapport au système optique.
- Un système optique donnera une image nette si les conditions de Gauss, sont satisfaites :
  - l'objet est plan et perpendiculaire à l'axe optique ;
  - les rayons lumineux incidents font un angle faible avec l'axe optique.
- Selon leurs positions par rapport à un système optique, l'objet ou l'image peuvent être réel ou virtuels.



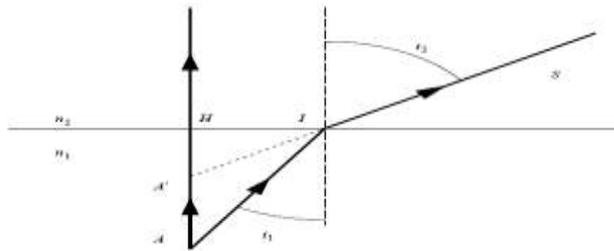
## Le dioptre sphérique

Un *dioptre sphérique* est une surface sphérique de *rayon de courbure R* et de centre C. Il peut être concave ou convexe.



## Le dioptre plan

Le **dioptre plan** est le système optique le plus simple. C'est un système afocal (pas de point focal). C'est un dioptre sphérique dont le rayon de courbure est infini :  $R = OC = +\infty$ .

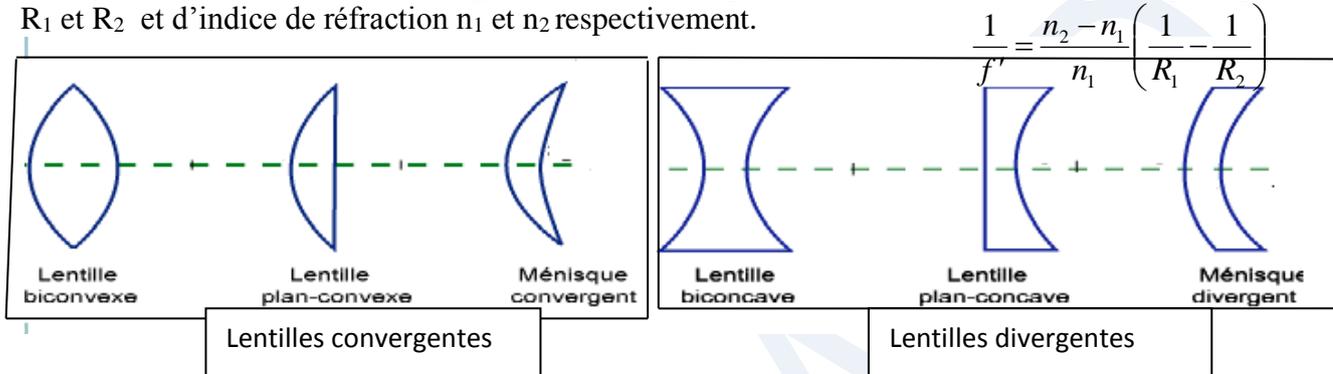


$$n_1 > n_2$$

La relation de conjugaison des dioptries plans est :  $n_1 / HA = n_2 / HA'$

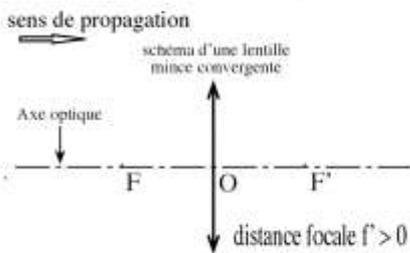
### Lentille Minces

Une **lentille** (de distance focale image  $f'$ ) est constituée par l'association de deux dioptries sphériques de rayons  $R_1$  et  $R_2$  et d'indice de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  respectivement.



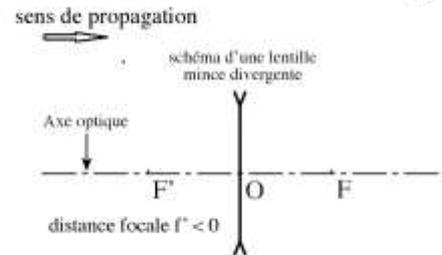
Lentille mince : épaisseur axiale négligeable comparée aux rayons de courbures des deux faces

#### Les lentilles convergentes

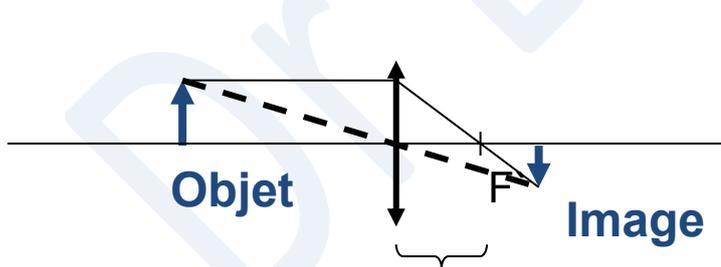


F : foyer objet  
 F' : foyer image  
 O : centre optique  
 Distance focale  $f' = OF'$   
 Vergence  $V = \frac{1}{f'}$   
 f' en mètres ; V en dioptries (δ)

#### Les lentilles divergentes



### Formule des lentilles minces. (Relation de Descartes)



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

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

Distance focale  $f'$

C'est la relation liant la position de l'objet (p), celle de l'image (q) et la distance focale de la lentille ( $f'$ ).

#### Construction de l'image.

Les 3 rayons utiles sont :

Rayon 1 :

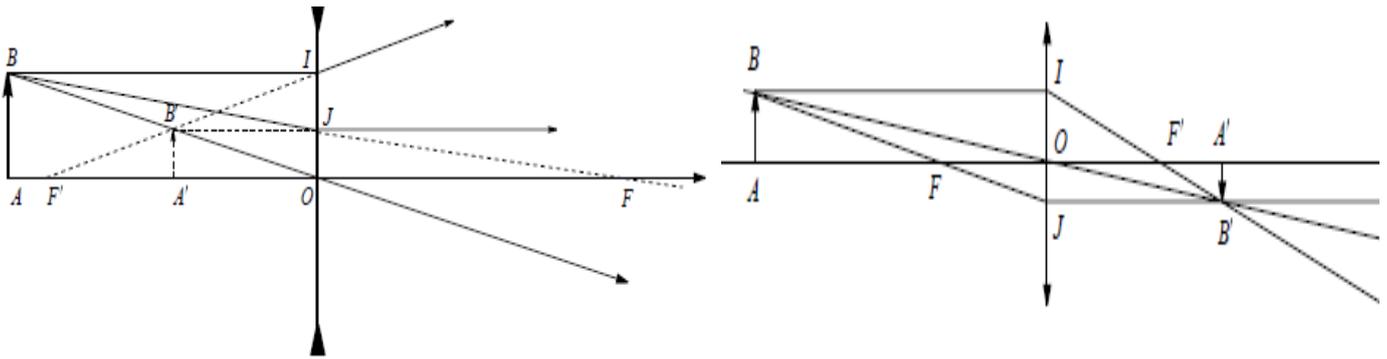
« Tout rayon incident passant par le centre O n'est pas dévié. »

Rayon 2 :

« Tout rayon incident parallèle à l'axe optique est dévié par la lentille en passant par le foyer image F' ». »

Rayon 3 :

« Tout rayon incident passant par le foyer objet  $F$  est dévié par la lentille en émergeant parallèle à l'axe optique. »



### Remarques :

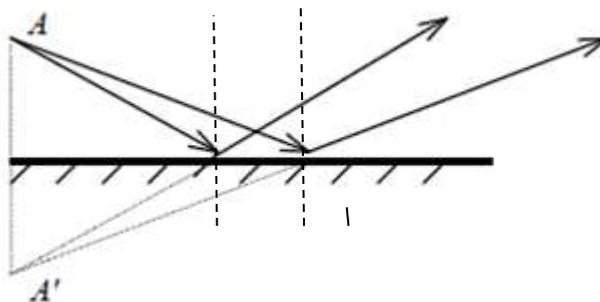
- Pour les lentilles CV (convergente)  $f' > 0$ ,
- Pour les lentilles DV (divergente)  $f' < 0$ .
- Le grandissement transversal  $G$  est le rapport algébrique de la taille de l'image à celle de l'objet:

$$G = \frac{A'B'}{AB} = -\frac{q}{p}$$

- Si  $G > 0$ , l'image est du même sens que l'objet (image droite) ; si  $G < 0$ , l'image est renversée.
- On définit la vergence d'une lentille :  $V = 1/f'$
- L'unité de  $V$  est la dioptrie ( $\delta$ ) (la dimension de la vergence :  $[V] = L^{-1}$ ).
- $V < 0$  pour une lentille DV
- $V > 0$  pour une lentille CV
- Deux lentilles minces accolées équivalent à une lentille unique dont la vergence et le grandissement sont :
 
$$V = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} = V_1 + V_2 \qquad G = G_1 \cdot G_2$$
- le foyer image  $F'$  n'est pas l'image du foyer  $F$ .
- les lentilles minces sont symétriques, la distance focale  $f'$  est aussi égale à la distance entre le foyer objet et la lentille.
- Un objet réel peut avoir une image réelle qui peut elle-même être un objet réel ou virtuel pour une seconde lentille à droite de la première, selon sa position.
- Une lentille convergente peut produire des images réelles ou virtuelles ; une lentille divergente produit toujours une image virtuelle.
- La distance entre l'objet et le centre de la lentille est  $P$  :  $p > 0$  : objet réel,  $p < 0$  : objet virtuel.
- La distance entre l'image et le centre de la lentille est  $q$  :  $q > 0$  : image réelle,  $q < 0$  : image virtuelle.

### Miroir Plan :

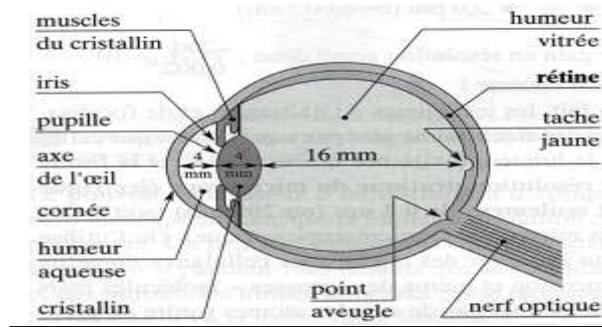
Par application des lois de la réflexion, tout se passe comme si les rayons réfléchis étaient issus d'un point virtuel  $A'$ , symétrique de  $A$  par rapport au miroir. Un miroir plan donne d'un objet réel une image virtuelle.



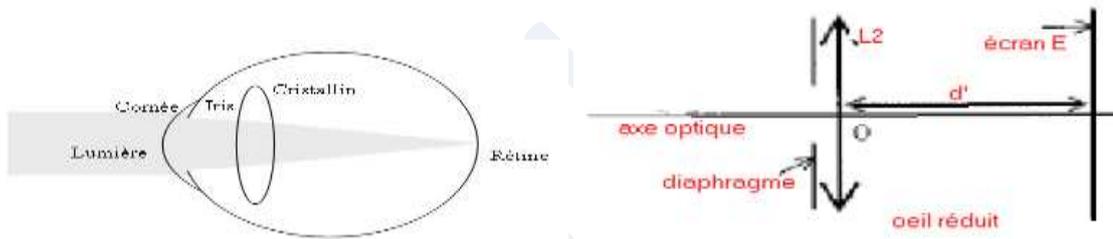
## Instruments optiques

- La loupe est l'instrument oculaire le plus simple, constitué par une seule lentille mince de faible distance focale et généralement biconvexe. Pour une lentille convergente, lorsque l'objet est plus rapproché que la distance focale, l'image est virtuelle et agrandie.
- Dans un microscope optique, l'**objectif** est une lentille convergente de distance focale égale à quelques millimètres, et l'**oculaire** est une lentille convergente qui fonctionne usuellement sur le principe d'une loupe.

## L'Œil



D'un point de vue optique, l'œil peut être assimilé à un système optique comprenant un diaphragme (l'iris), une lentille convergente de distance focale variable (le cristallin) **sous l'action des muscles ciliaires** et d'un écran à distance fixe sur lequel se forment les images (la rétine).



**Accommodation** : un objet n'est vu nettement que si son image se forme sur la rétine. Il faut que l'œil adapte sa distance focale.

- Distance minimale de vision distincte pour l'œil normal :  $d = 25 \text{ cm}$  (accommodation)
- Distance maximale :  $\infty$  (au repos)