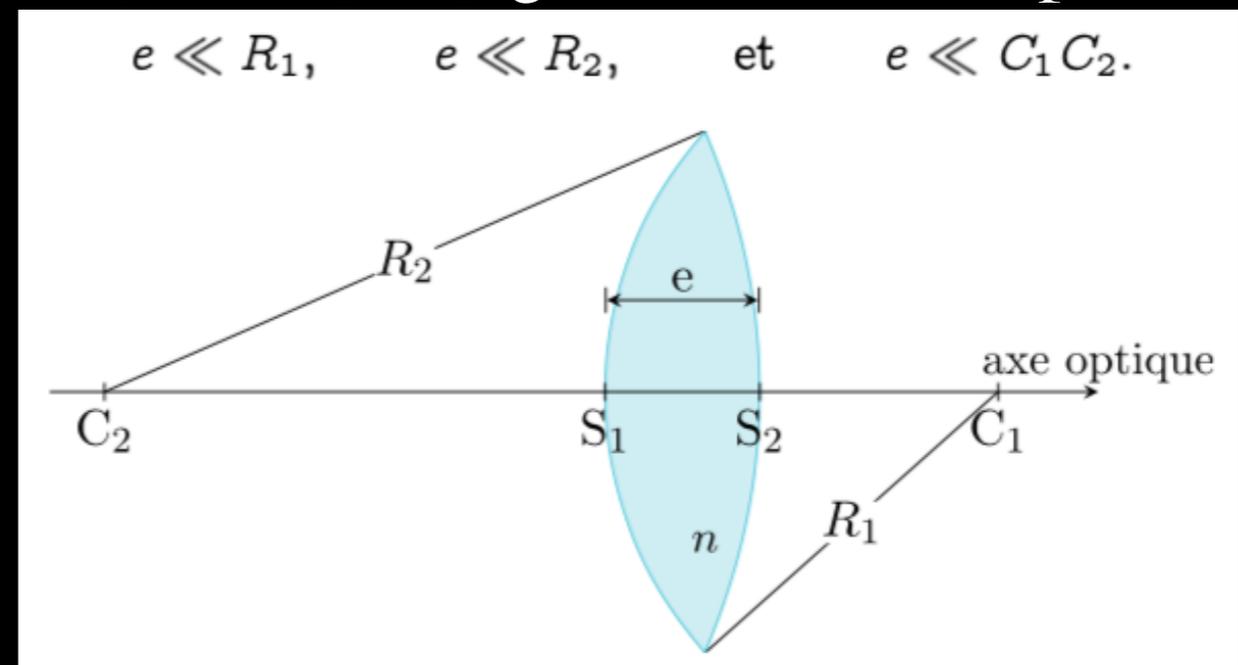


# VI - Lentilles

## VI.1 Lentilles minces : définition (1)

- Les lentilles sphériques sont des systèmes optiques formés par la succession de deux dioptries sphériques (ou un dioptre plan et un dioptre sphérique) d'axes principaux confondus (axe de la lentille).
- Lentille mince : lentille sphérique dont les rayons de courbure des deux dioptries la composant ( $R_1$  et  $R_2$ ) sont (très) grands devant l'épaisseur ( $e$ ) de la lentille.



- $\Rightarrow S_1, S_2$  et le centre optique  $O$  du système sont confondus :  $S_1 \approx S_2 \approx O$ .
- $\Rightarrow$  Les rayons incidents passant par  $O$  ne sont pas déviés.

# VI - Lentilles

## VI.1 Lentilles minces : définition (2)

- On distingue les lentilles à bords minces (biconvexes, plan-convexes, ménisques à bords minces), convergentes, des lentilles à bords épais (plan-concaves, ménisques à bords épais, biconcaves), divergentes.

lentille  
biconvexe

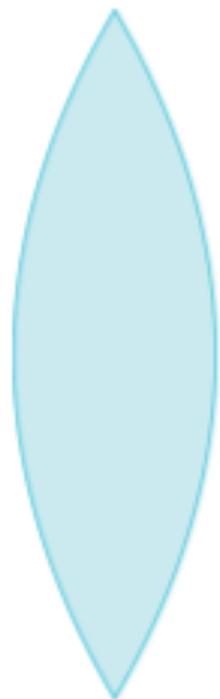
lentille  
plan-convexe

ménisque à  
bords minces

lentille  
plan-concave

ménisque à  
bords épais

lentille  
biconcave



Lentilles convergentes

Symbole

Lentilles divergentes

Symbole

# VI - Lentilles

## VI.2 Formules de conjugaison, foyers (1)

- Stigmatisme approché : si stigmatisme approché pour chacun des deux dioptries composant la lentille => rayons paraxiaux (cond. de Gauss).
- On peut alors appliquer à chacun des deux dioptries la relation de conjugaison du chapitre précédent.

- Premier dioptre ( $S_1, C_1$ ) : point objet  $A$  —> point image  $A_1$

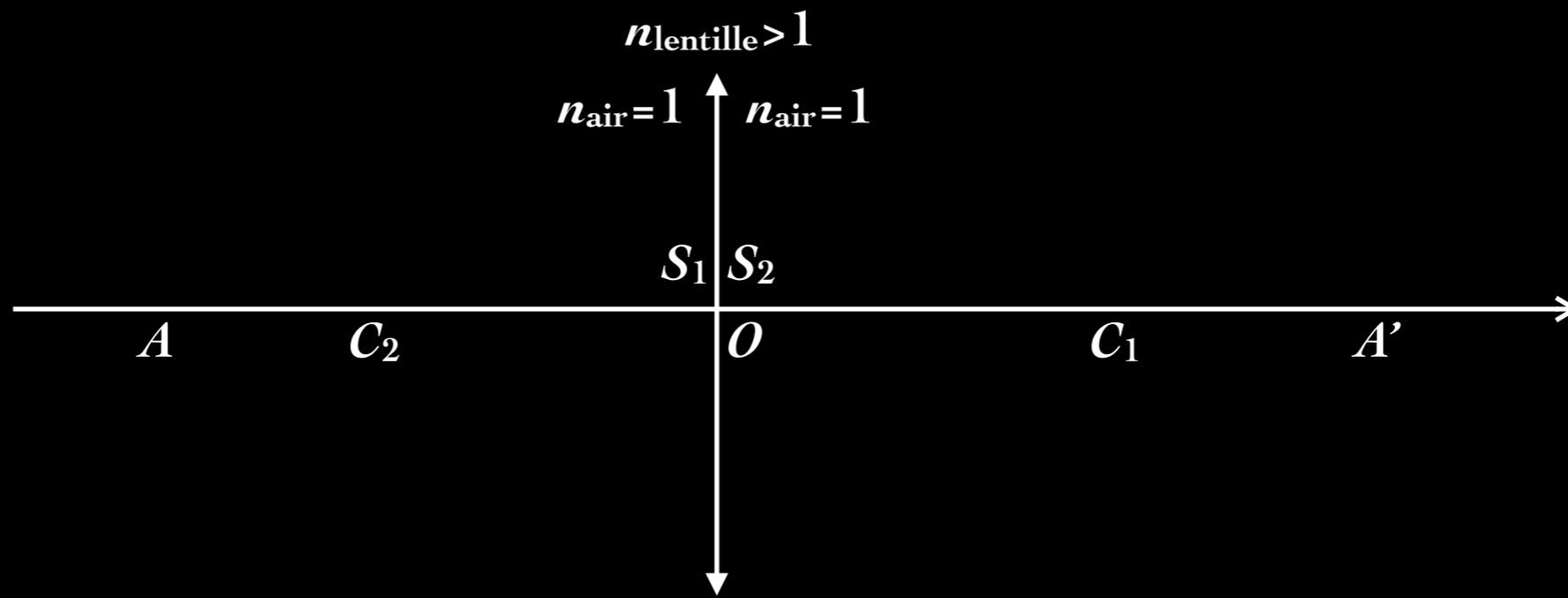
$$\frac{1}{\overline{S_1A}} - \frac{n}{\overline{S_1A_1}} = \frac{1-n}{\overline{S_1C_1}}$$

- Deuxième dioptre ( $S_2, C_2$ ) : point objet  $A_1$  —> point image  $A'$

$$\frac{n}{\overline{S_2A_1}} - \frac{1}{\overline{S_2A'}} = \frac{n-1}{\overline{S_2C_2}}$$

# VI - Lentilles

## VI.2 Formules de conjugaison, foyers (2)



-  $S_1 \approx S_2 \approx O$ , d'où :

$$\frac{1}{OA} - \frac{n}{OA_1} = \frac{1-n}{OC_1} \quad (1) \quad \frac{n}{OA_1} - \frac{1}{OA'} = \frac{n-1}{OC_2} \quad (2)$$

- En additionnant les équations (1) et (2), on obtient :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = (n-1) \left( \frac{1}{OC_1} - \frac{1}{OC_2} \right), \quad \text{ou : } \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

# VI - Lentilles

## VI.2 Formules de conjugaison, foyers (3)

- Le foyer principal image  $F'$  correspond à un objet à l'infini dans la direction de l'axe. D'où, en posant mesure algébrique de  $OF'=f'$  :

$$\frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

- Quant au foyer principal objet  $F$ , en posant mesure algébrique de  $OF=f$  :

$$-\frac{1}{\overline{OF}} = -\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f'}$$

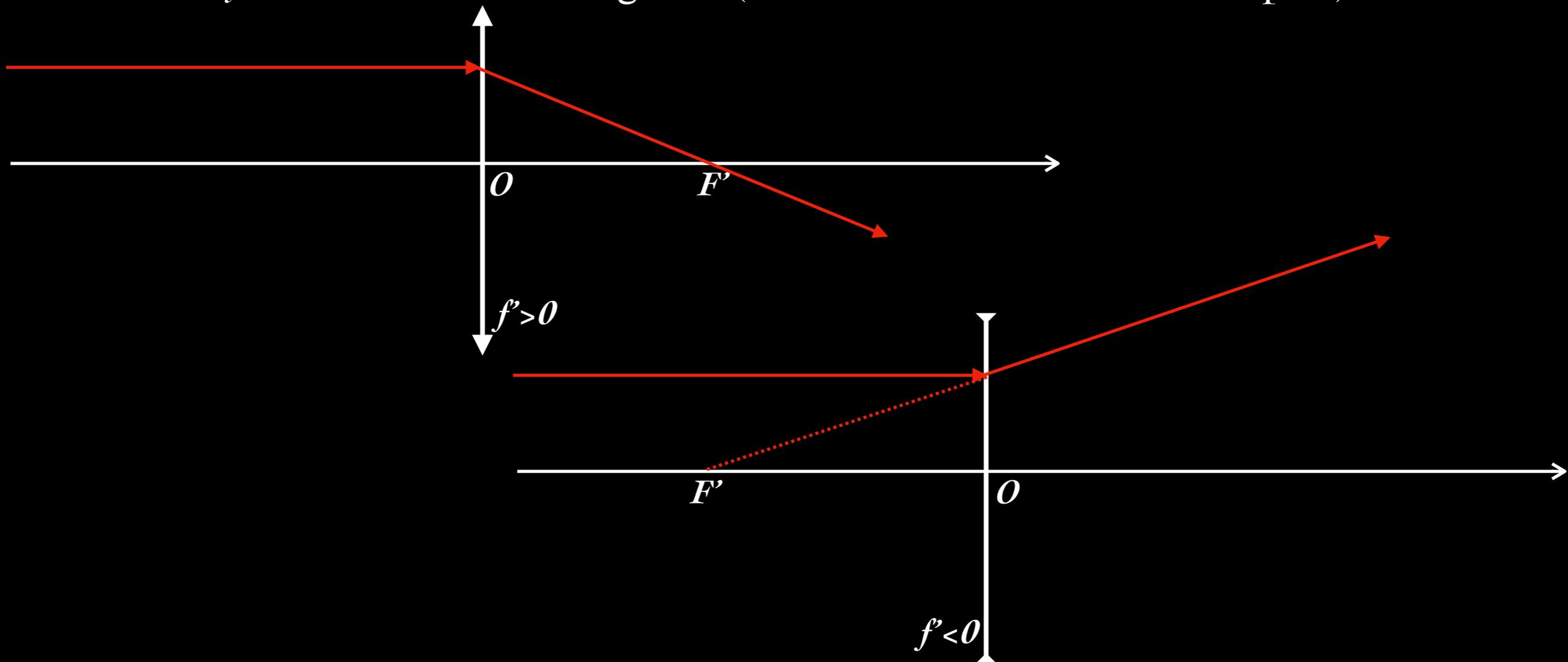
- => Les deux foyers sont symétriques par rapport à la lentille, et on a :

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}, \text{ avec : } \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = V$$

# VI - Lentilles

## VI.2 Formules de conjugaison, foyers (4)

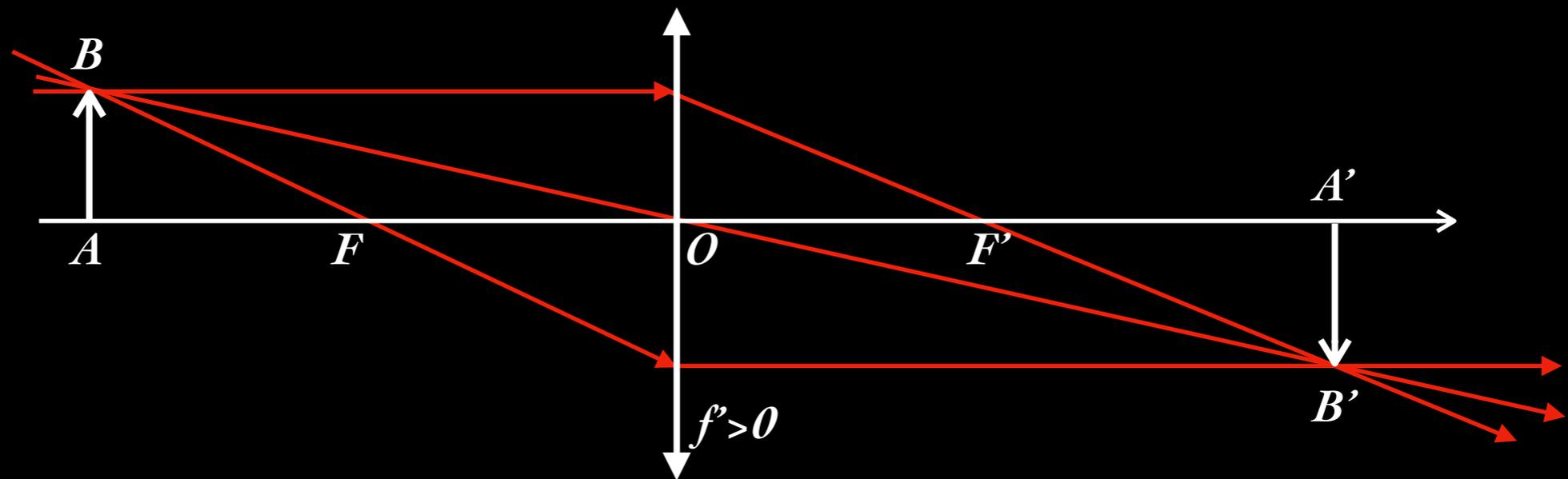
- Suivant  $R_1$  et  $R_2$ ,  $f'$  peut être positive ou négative (et  $(n-1)>0$  car  $n>1$ ).
- $f' > 0 \Rightarrow$  lentille convergente (lentille mince à bords minces).
- $f' < 0 \Rightarrow$  lentille divergente (lentille mince mais à bords épais).



# VI - Lentilles

## VI.3 Construction de l'image (1)

- Construction de l'image d'un objet  $AB$



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

# VI - Lentilles

## VI.3 Construction de l'image (2)

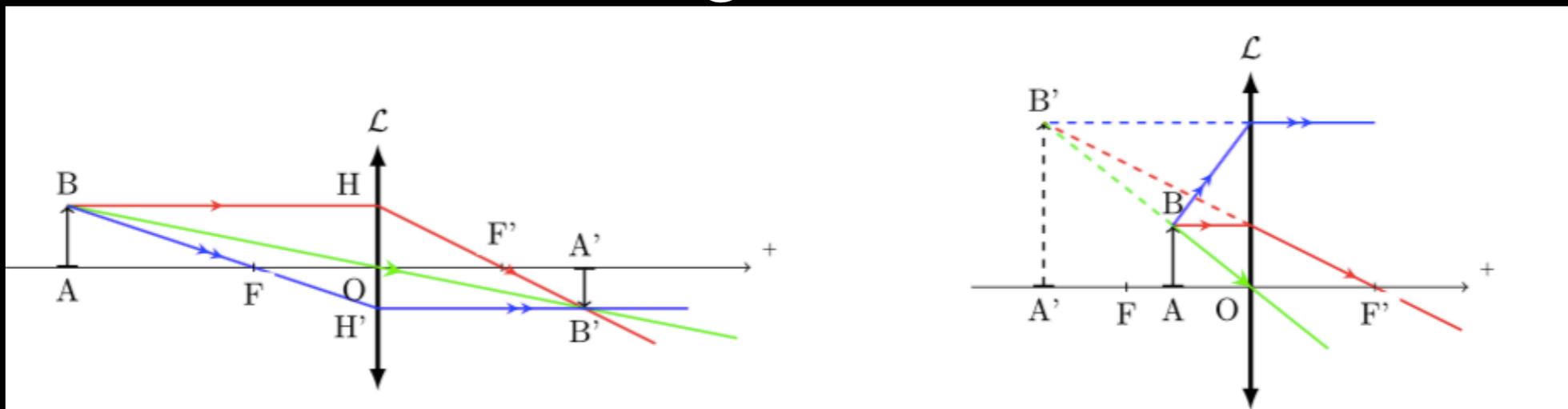


FIGURE : Lentille convergente : image et objet réels

FIGURE : Lentille convergente : objet réel, image virtuelle

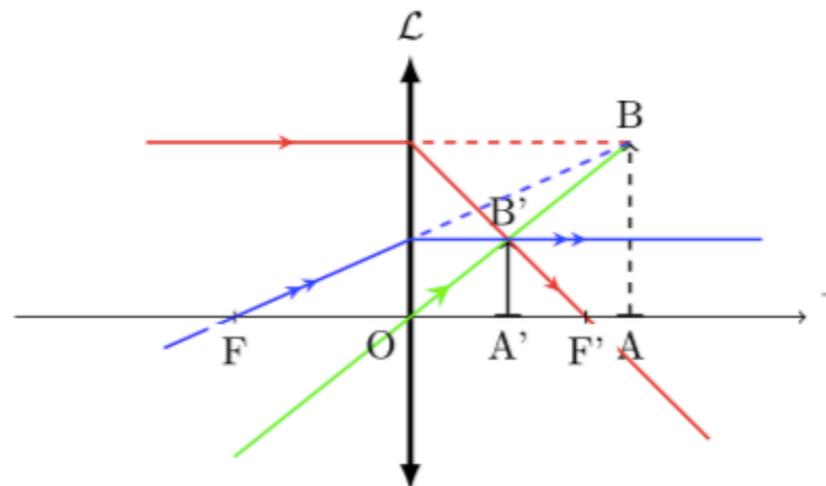


FIGURE : Lentille convergente : objet virtuel, image réel

# VI - Lentilles

## VI.3 Construction de l'image (3)

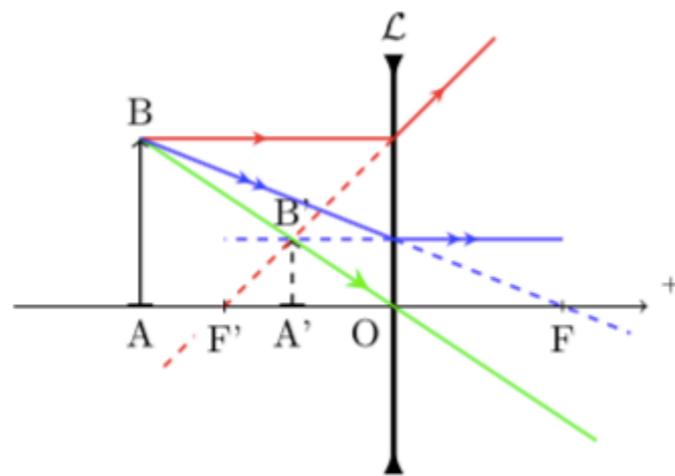


FIGURE : Lentille divergente : objet réel, image virtuelle

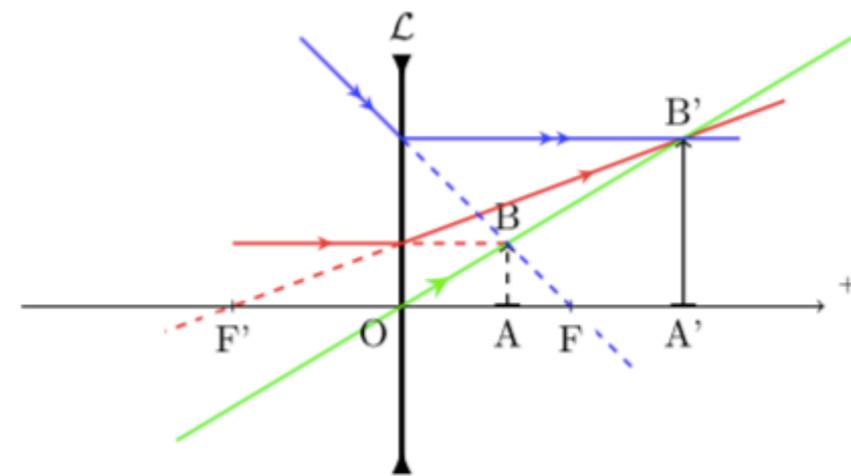


FIGURE : Lentille divergente : objet virtuel, image réelle

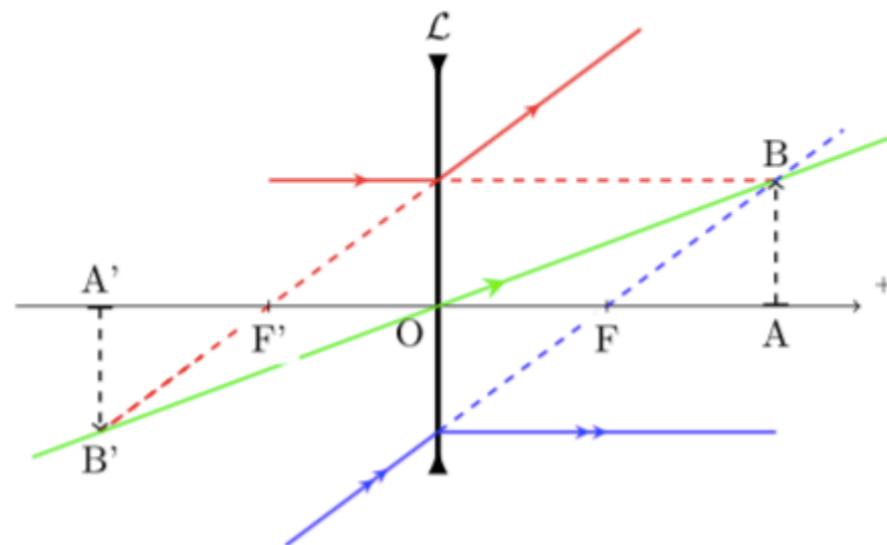


FIGURE : Lentille divergente : objet et image virtuels

# VI - Lentilles

## VI.4 Lentilles accolées

- Soient deux lentilles de vergences  $V_1$  et  $V_2$  :  $A \rightarrow A_1 \rightarrow A'$ , elles sont accolées : donc  $O_1$  et  $O_2$  sont confondus en  $O$ , et l'on a :

$$\frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = V_1 \quad (1)$$

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = V_2 \quad (2)$$

- D'où, avec (1)+(2) :

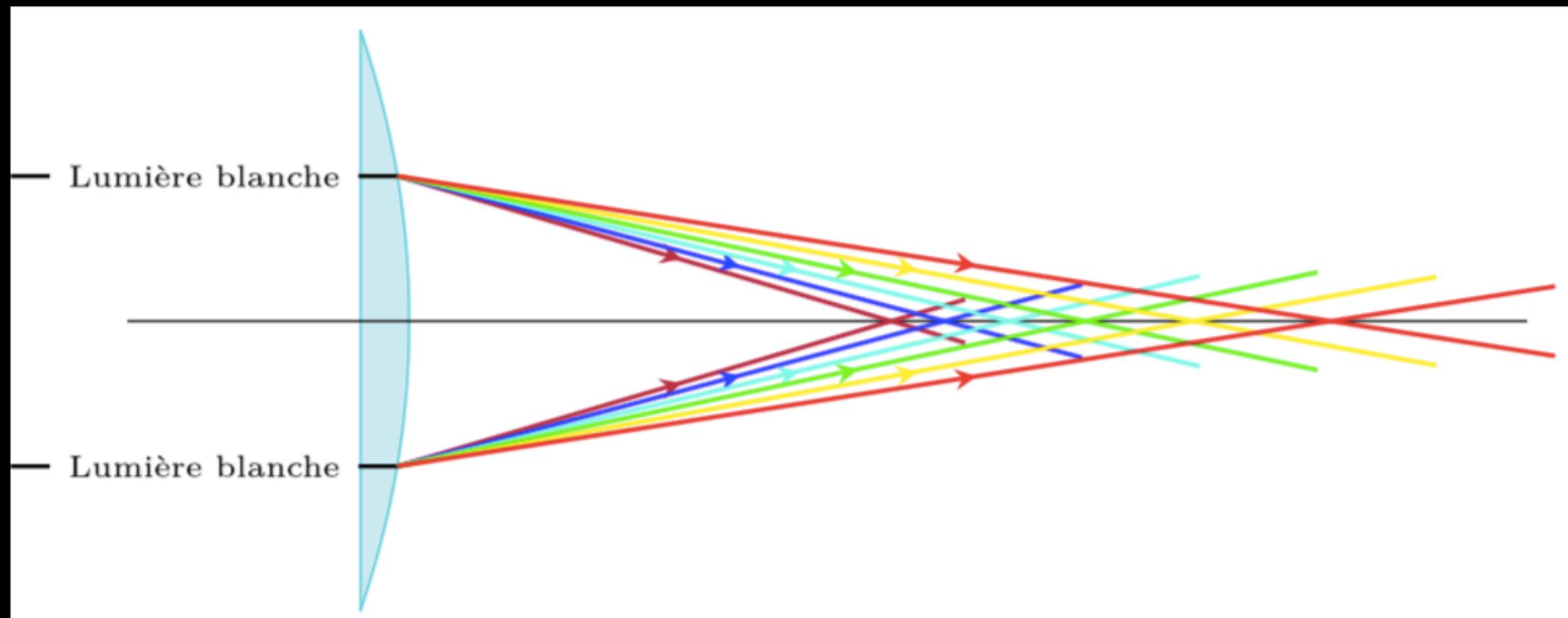
$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = V_1 + V_2$$

- => deux lentilles minces accolées se comportent comme une seule lentille mince, de centre optique  $O$  et de vergence  $V = V_1 + V_2$

# VI - Lentilles

## VI.5 Aberrations (1)

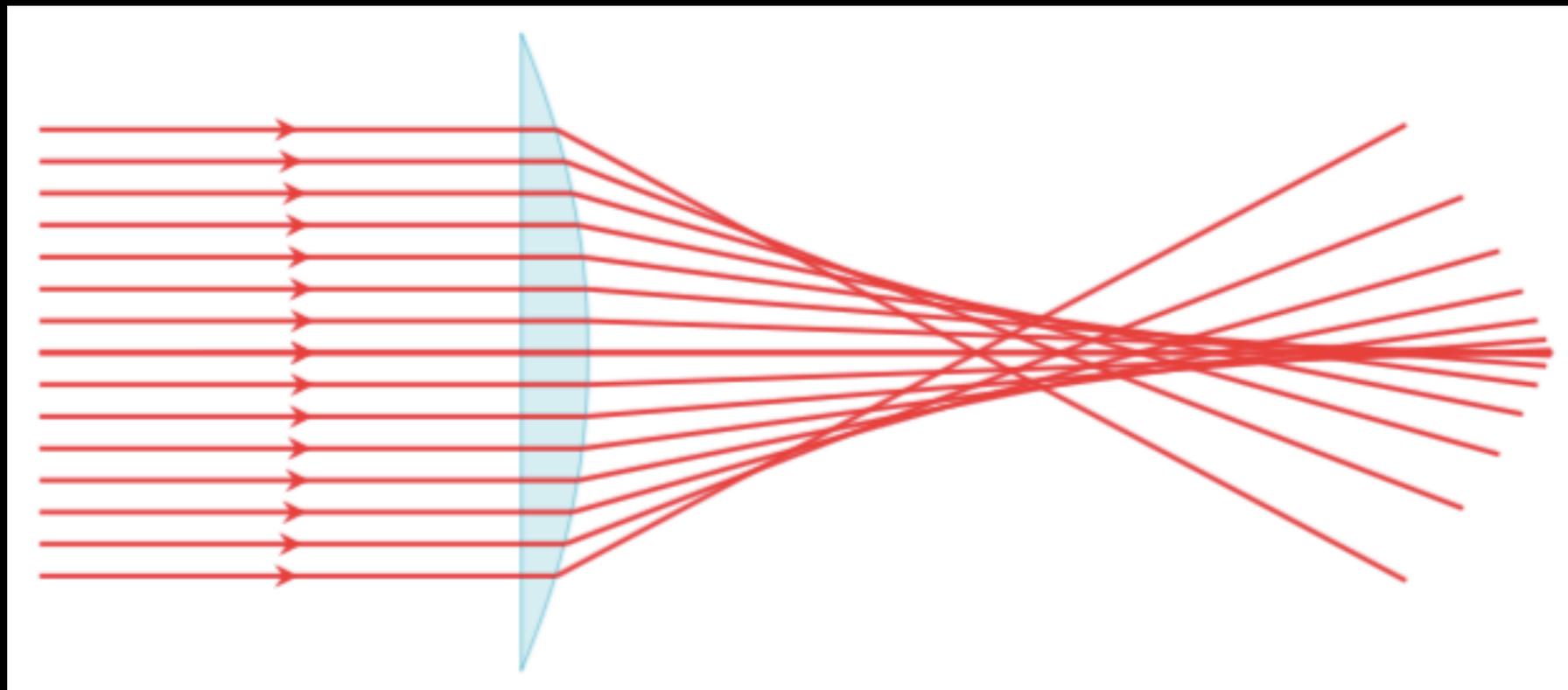
- Aberrations chromatiques :  
le verre est dispersif (le bleu est plus dévié que le rouge)  
=> en lumière polychromatique, l'image est « irisée ».  
=> correction : association de lentilles dont les effets chromatiques se compensent pour corriger des aberrations chromatiques.



# VI - Lentilles

## VI.5 Aberrations (2)

- Aberrations géométriques :  
la lentille n'est pas rigoureusement stigmatique  
=> différence de convergence des rayons qui rencontrent la lentille plus ou moins loin de l'axe optique (rayons plus ou moins paraxiaux)  
=> correction : association de lentilles dont les effets de sphéricité se compensent pour corriger des aberrations géométriques.



# VI - Lentilles

## VI.6 Conclusion

### - Formule de conjugaison

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}, \text{ avec : } \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = V$$

$$\text{et : } p = \overline{OA}, p' = \overline{OA'}, f' = \overline{OF'} = -f = -\overline{OF}, R_1 = \overline{OC_1}, R_2 = \overline{OC_2}$$

$V < 0$  : lentille divergente

$V > 0$  : lentille convergente

$\overline{OA'} > 0$  : image réelle

$\overline{OA'} < 0$  : image virtuelle

### - Grandissement

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

$\gamma > 0$  : image droite

$\gamma < 0$  : image renversée

# VI - Lentilles

## VI.6 Conclusion

- Applications => instruments : l'appareil photo (voir chapitre suivant), la loupe (idem), le microscope (id.), les verres correcteurs, les jumelles, la lunette, etc.



# VII - Instruments optiques

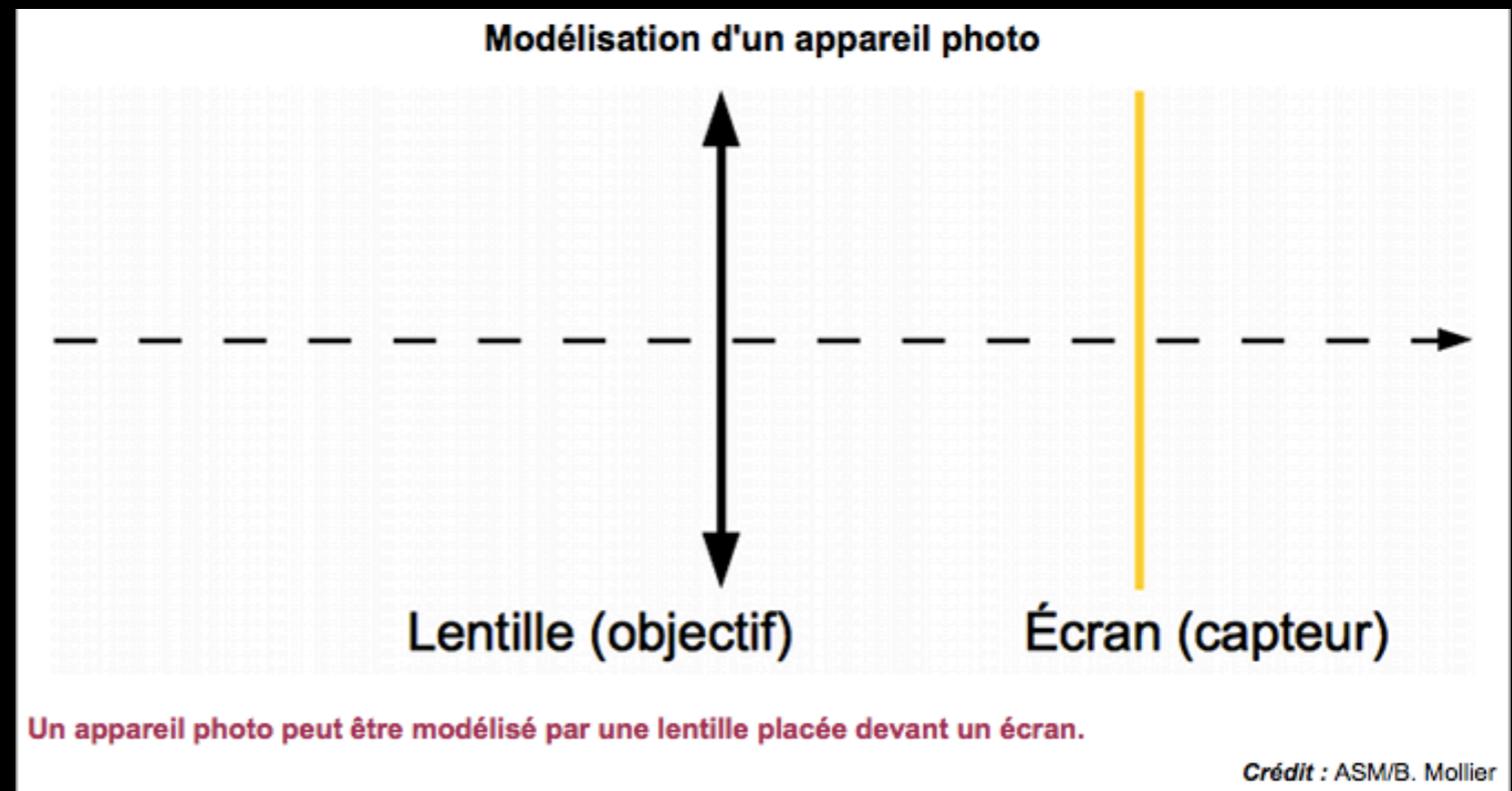
## VII.1 Introduction

- Tous les instruments optiques ne forment pas des images, mais c'est ce sur quoi nous allons nous focaliser ici.
- On distingue deux types d'instruments optiques « imageurs » :
  - . Les systèmes objectifs : qui peuvent former directement l'image sur un écran. Par exemple : vidéo-projecteur, appareil photo.
  - . Les système subjectifs : qui renvoient l'image à l'infini. Ici, c'est l'œil qui forment l'image en son plan focal, sans besoin d'accommoder justement car l'image est à l'infini. Exemples : télescope, jumelles, microscope, et de manière générale tout ce qui possède un oculaire.

# VII - Instruments optiques

## VII.2 Exemple de système objectif : l'appareil photo (1)

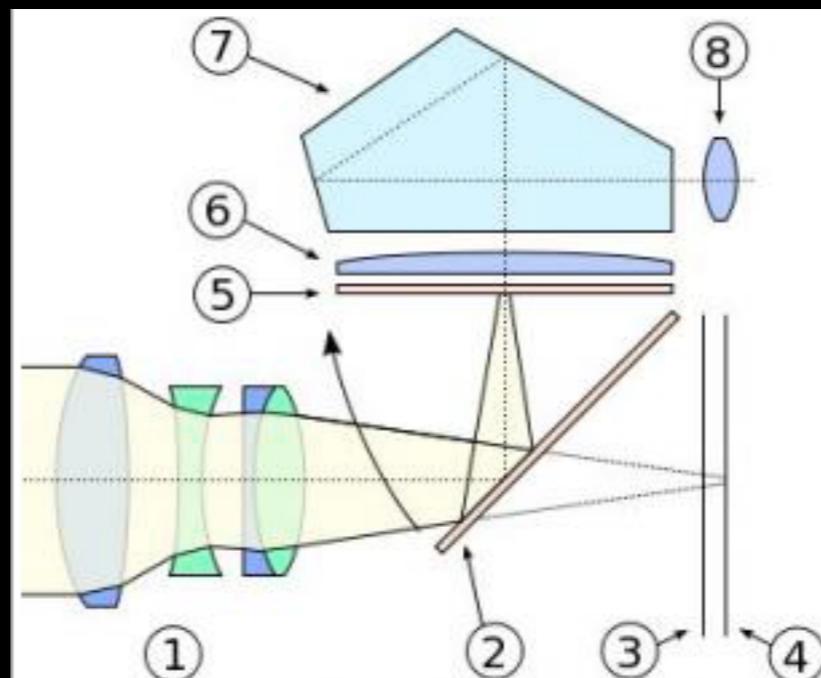
- Modélisation simple d'un appareil photo : une lentille (l'objectif) + un écran (le détecteur/capteur ou la pellicule photo).



# VII - Instruments optiques

## VII.2 Exemple de système objectif : l'appareil photo (2)

- En réalité il y a une grande quantité de composants optiques, servant notamment à corriger des aberrations - on est loin des conditions de Gauss en photographie standard (nécessité de champ, de luminosité)...



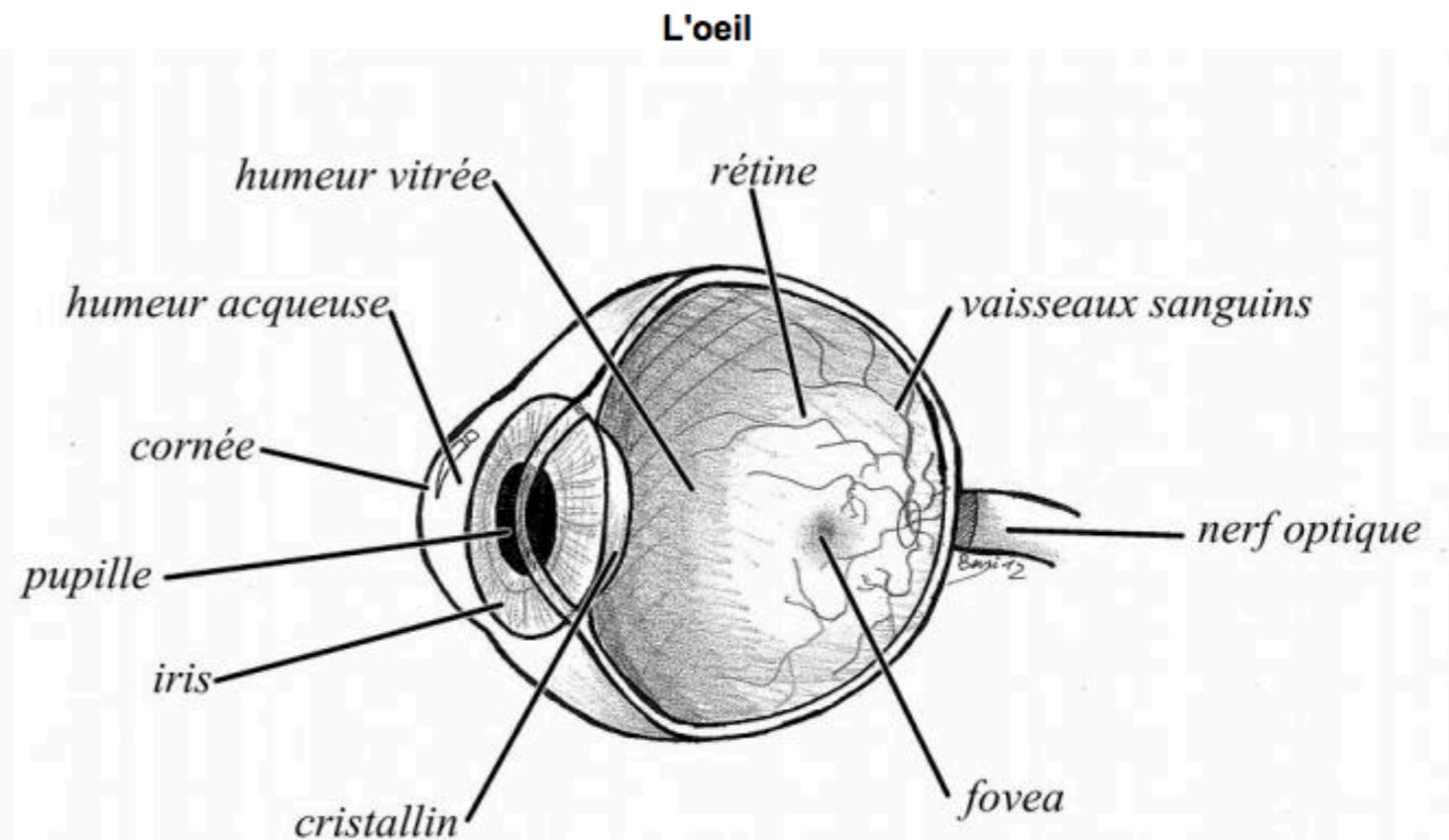
Coupe transversale d'un appareil photo reflex. -  
1. Objectif - 2. Miroir abaissé (image visible dans  
l'oculaire / le viseur) - 3. Obturateur focal - 4.  
Capteur/Film - 5. Verre dépoli - 6. Condenseur -  
7. Pentaprisme - 8. Oculaire/Viseur

Crédit : Colin M.L. Burnett, GFDL/CC BY-SA 3.0

# VII - Instruments optiques

## VII.3 L'œil

- Il est nécessaire d'étudier l'œil (que l'on va coller à un oculaire par exemple) en tant qu'instrument optique avant d'aborder les systèmes optiques dits subjectifs...

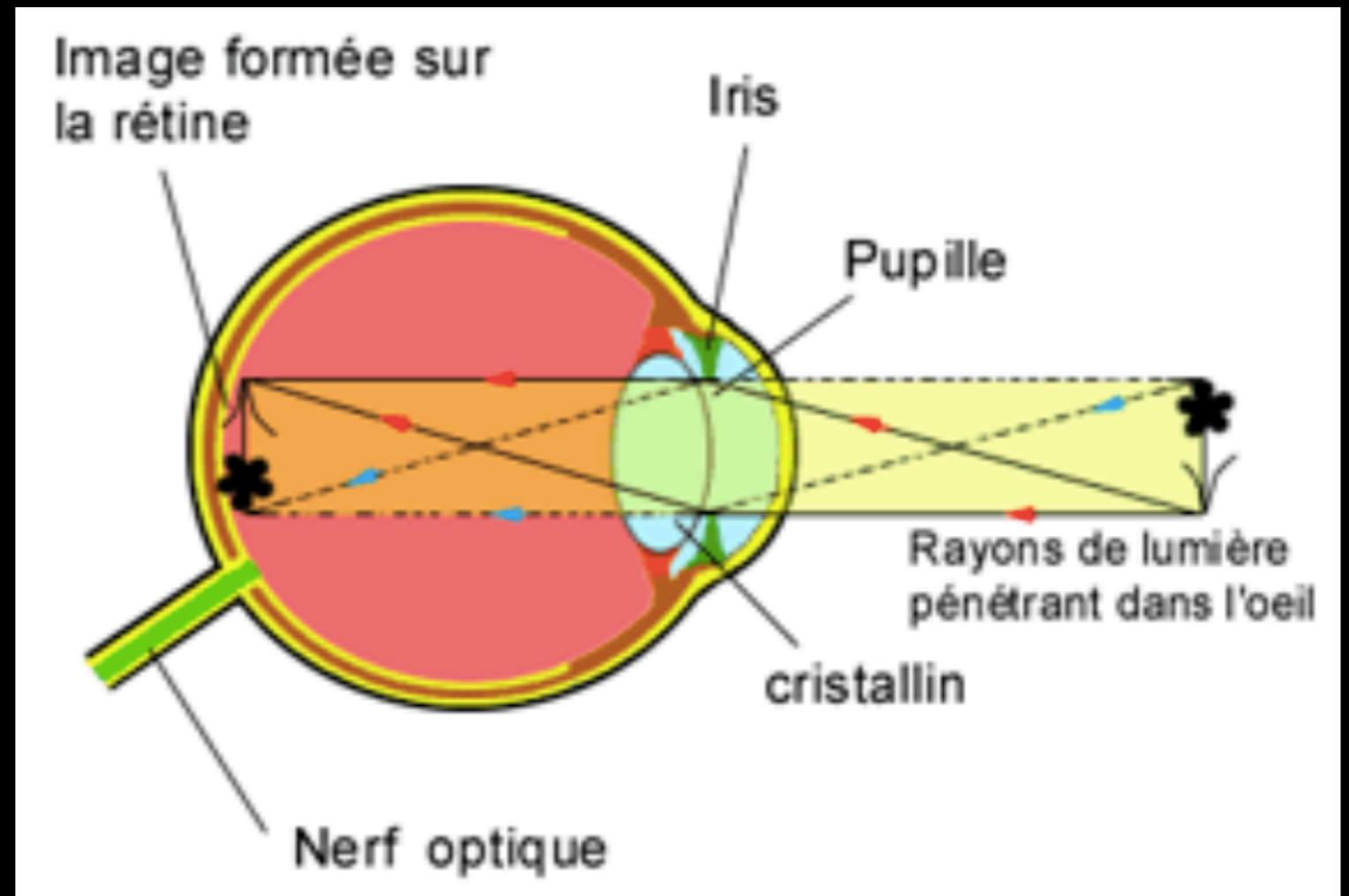
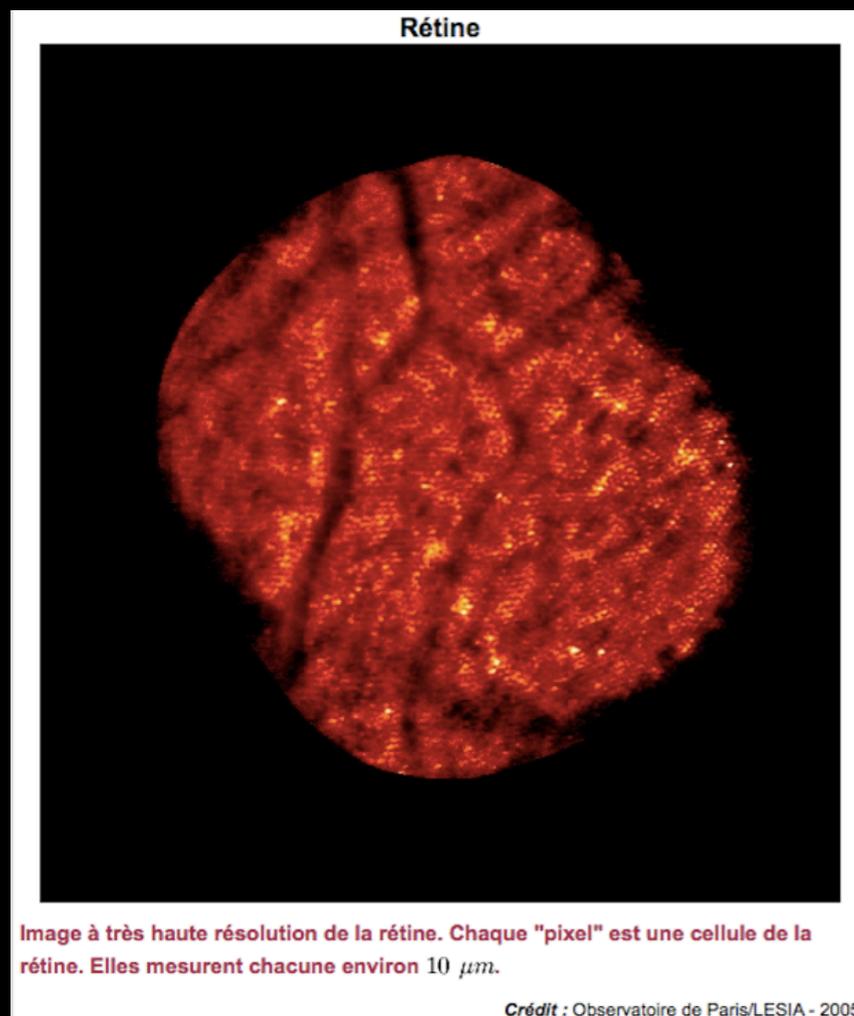


Coupe d'un oeil humain.

# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (1)

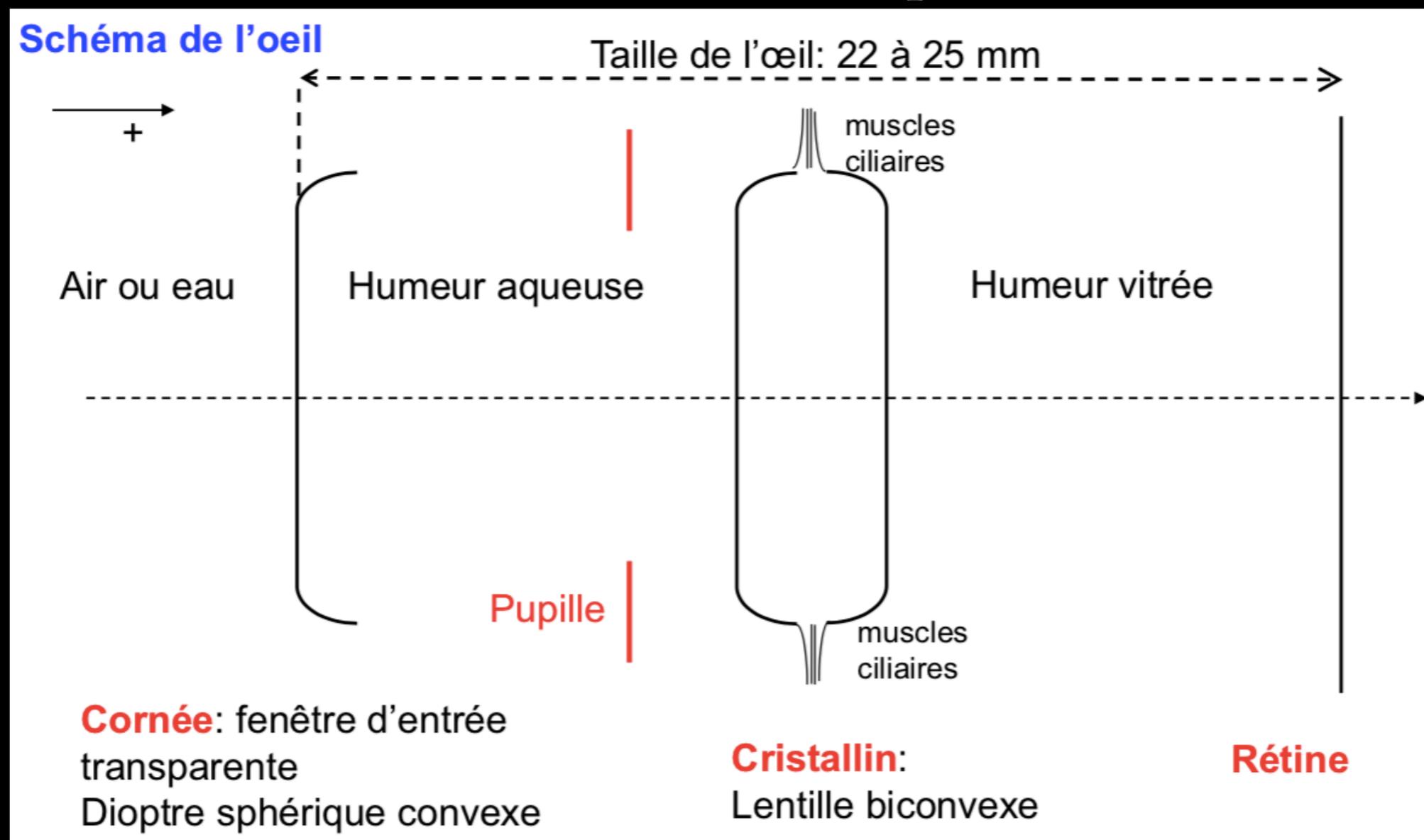
- L'image d'un objet observé se forme sur la rétine...



# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (2)

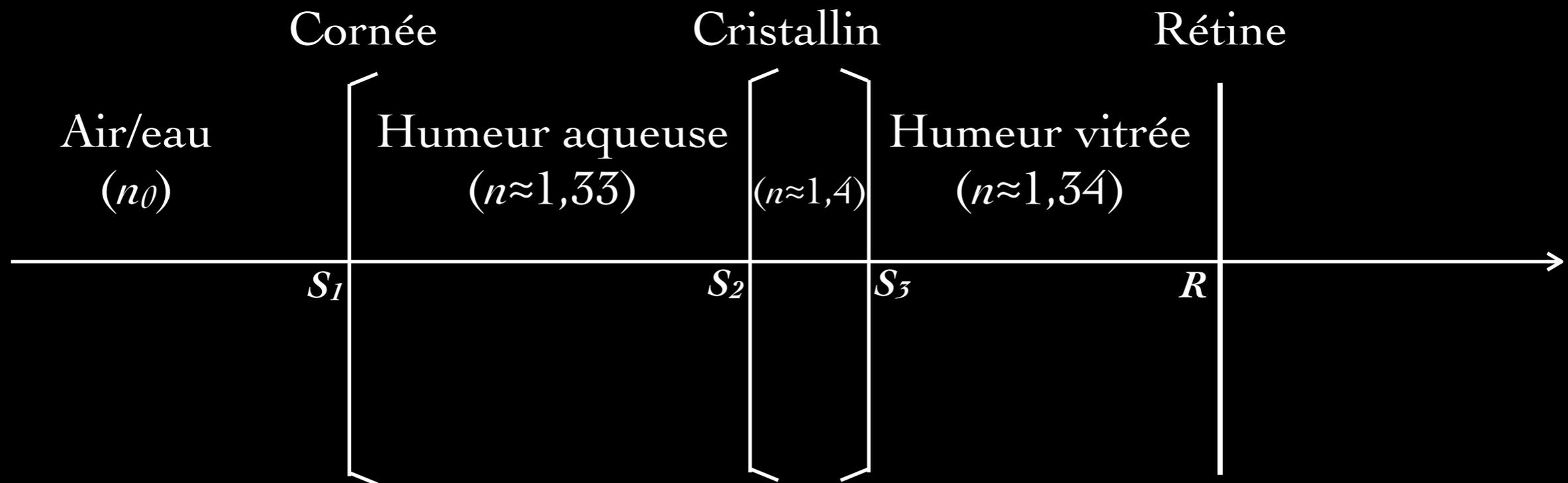
- On peut modéliser l'œil comme un dioptre sphérique (la cornée), suivi d'une lentille biconvexe (le cristallin), puis d'un écran (la rétine).



# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (3)

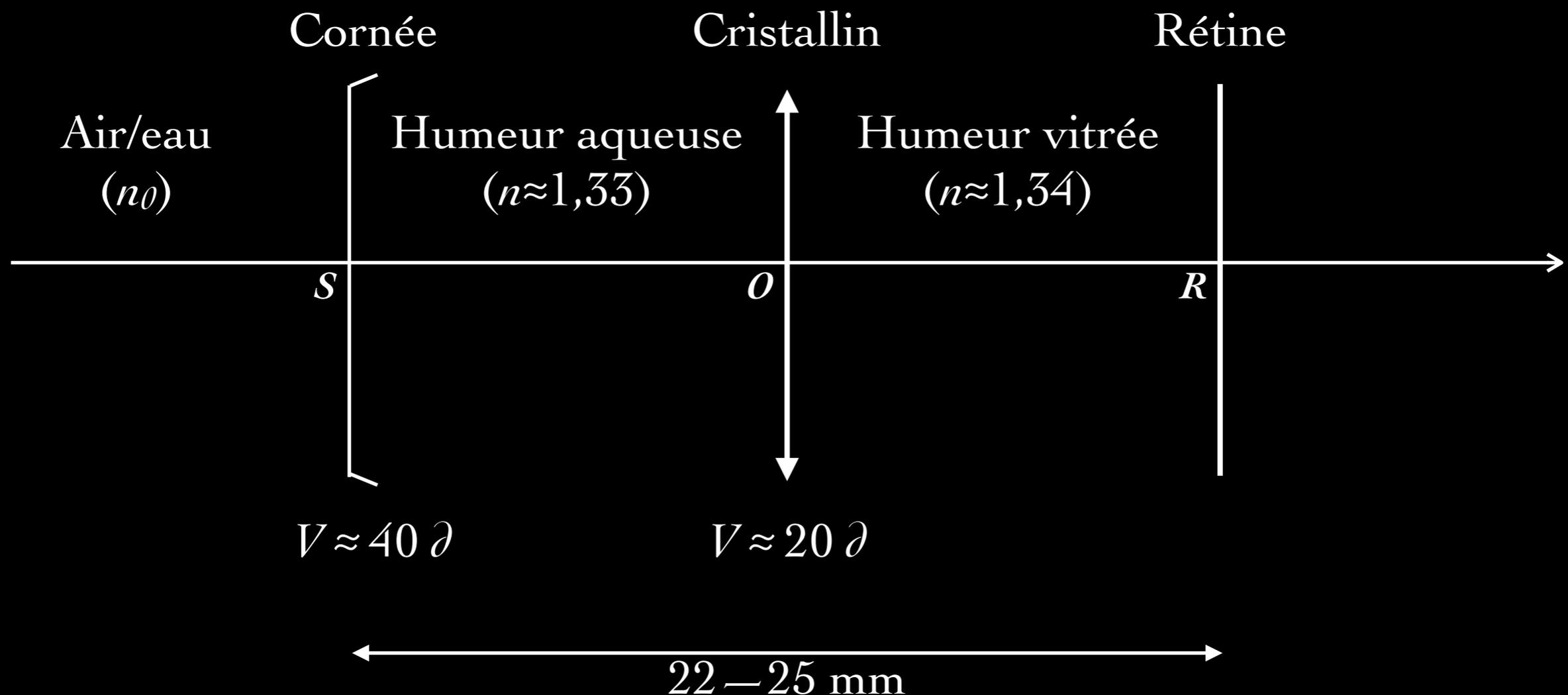
- On peut modéliser l'œil comme un dioptre sphérique (la cornée), suivi d'une lentille biconvexe (le cristallin), puis d'un écran (la rétine).



# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (4)

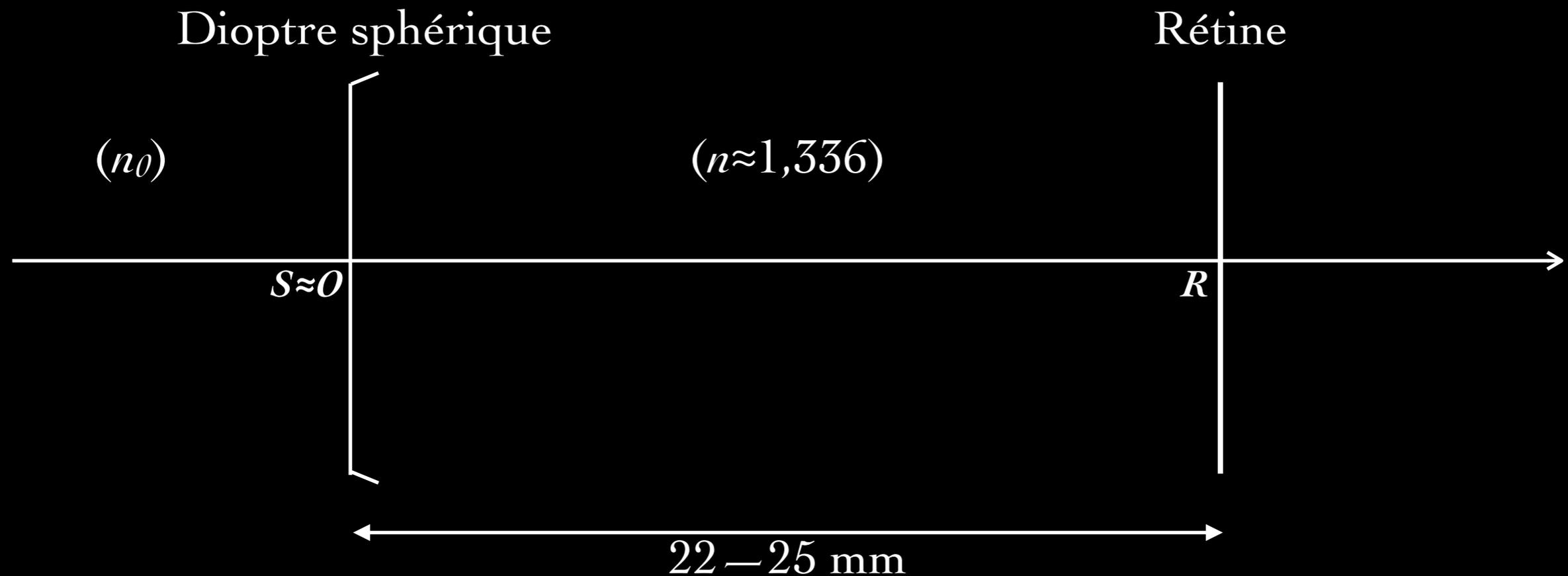
- On peut modéliser l'œil comme un dioptre sphérique (la cornée), suivi d'une lentille biconvexe (le cristallin), puis d'un écran (la rétine).



# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (4)

- On peut simplifier encore => modèle dit de « l'œil réduit » :



$$\text{Conjugaison : } \frac{n}{OA'} - \frac{n_0}{OA} = V$$

# VII - Instruments optiques

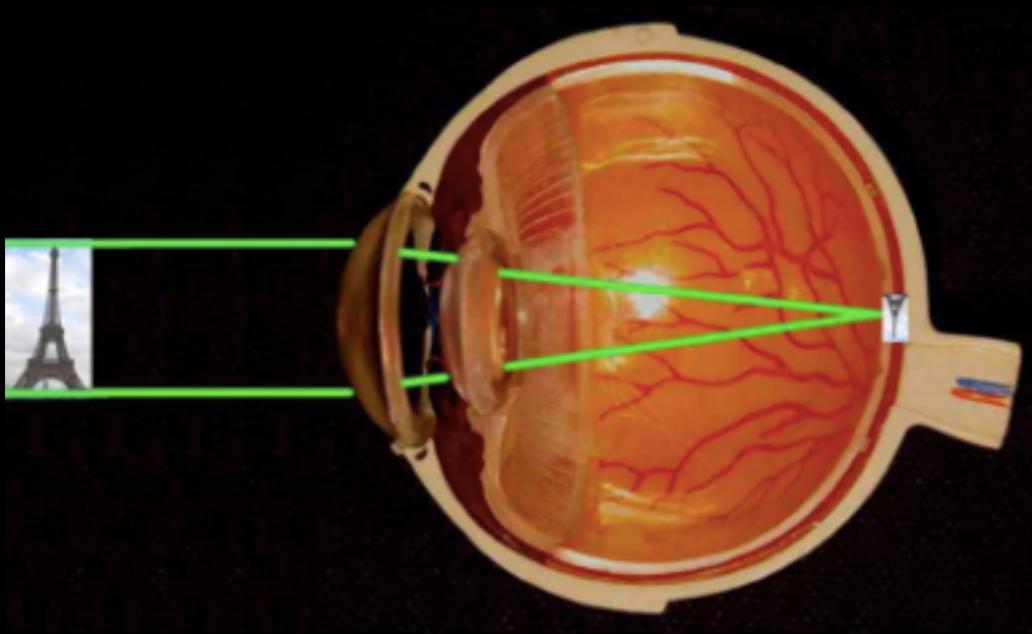
## VII.3.1 L'œil : modélisation (5)

- Vergence de l'œil au repos (objet à l'infini)  $\approx 60 \text{ } \partial$ .
- Mais l'image se forme toujours sur la rétine quand l'objet se rapproche  $\Rightarrow A'$  reste en  $R \Rightarrow$  l'œil adapte  $V$ , c'est l'accommodation (jusqu'à  $V_{max}$ ).
- *Punctum Remotum*  $P_r$  : objet situé à une distance maximale de l'œil. Pour l'œil emmétrope (normal),  $P_r$  est à l'infini (et  $V \approx 60 \text{ } \partial$ ).
- *Punctum Proximum*  $P_p$  : objet situé à une distance minimale de vision nette. L'œil accommode au maximum. Pour l'œil emmétrope,  $P_p$  est à environ 25 cm  $\Rightarrow$  mesure algébrique de  $OP_p = -25\text{cm} \Rightarrow V_{max} \approx 64 \text{ } \partial$ .
- Entre  $P_r$  et  $P_p$  l'œil emmétrope voit nettement, faisant varier  $V$  de  $\approx 4 \text{ } \partial$ .

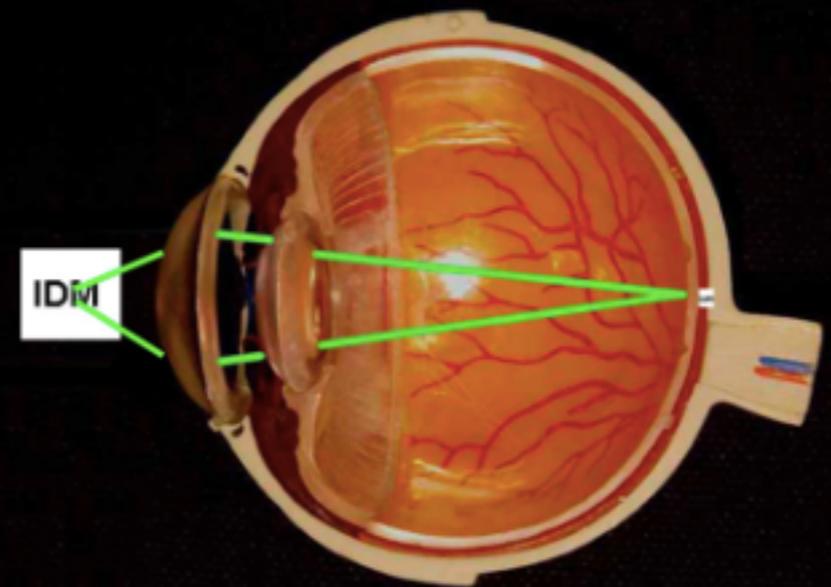
# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (6)

- On a donc, pour l'œil emmétrope (sans défauts) :



Vision de loin : l'image se forme sur la rétine sans accommodation (œil au repos)



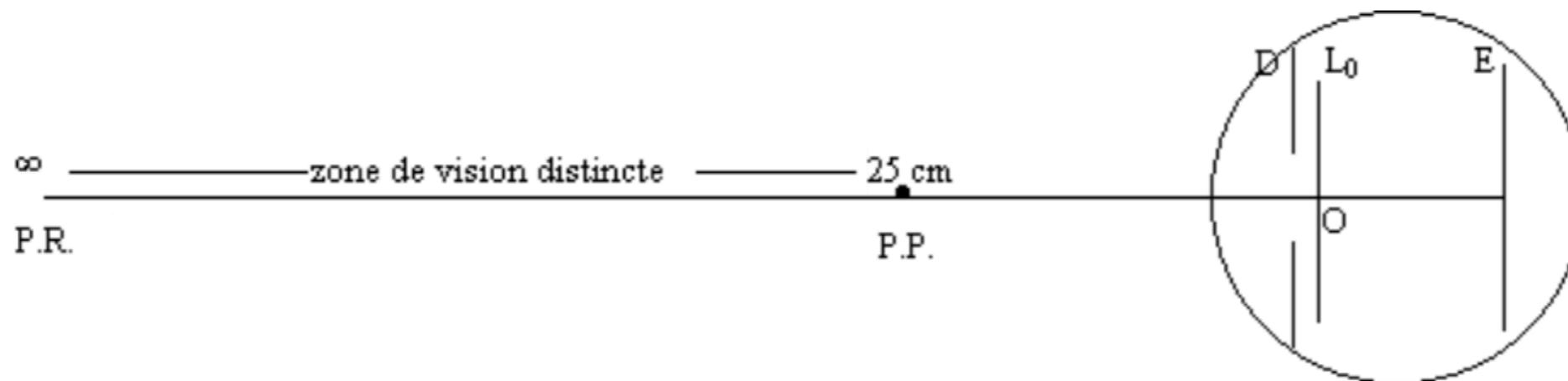
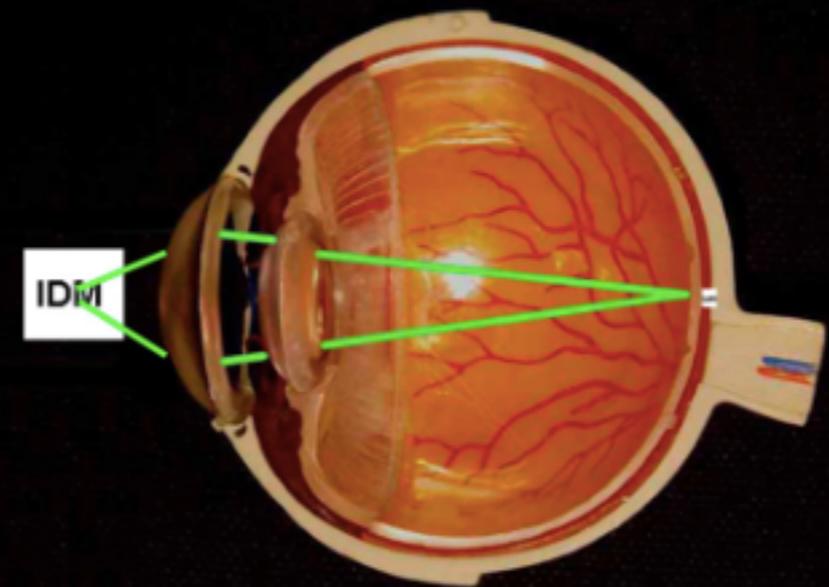
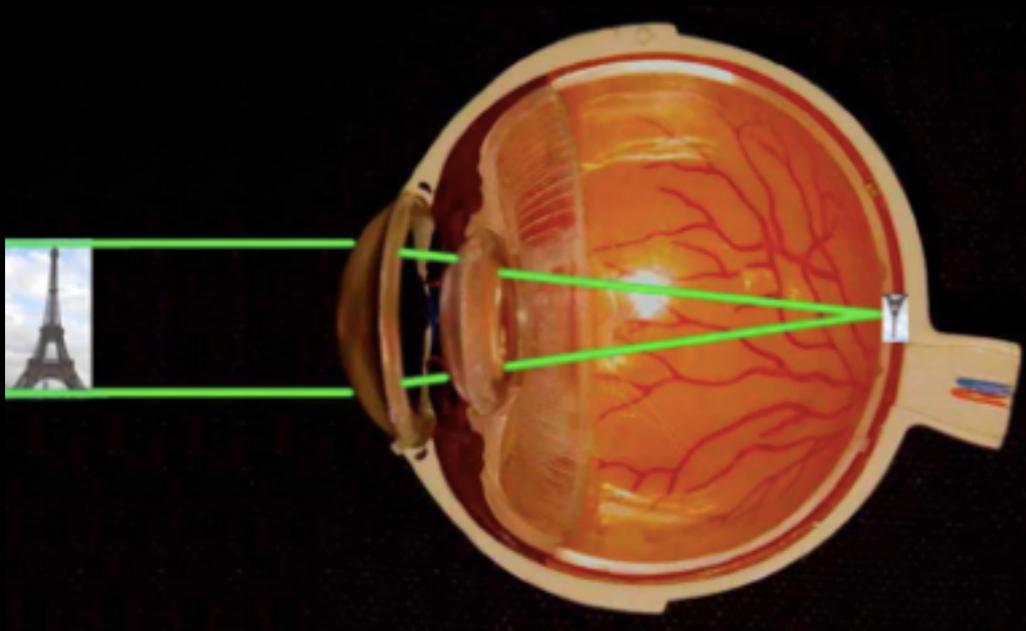
Vision de près : l'image se forme sur la rétine avec accommodation (déformation du cristallin)

L'œil donne donc l'image sur la rétine d'un objet situé entre  $P_r$  et  $P_p$ .  $P_r$  : vision sans accommodation.  $P_p$  : accommodation maximale. Pour l'œil sans défaut,  $P_r$  est à l'infini.

# VII - Instruments optiques

## VII.3.1 L'œil : modélisation (7)

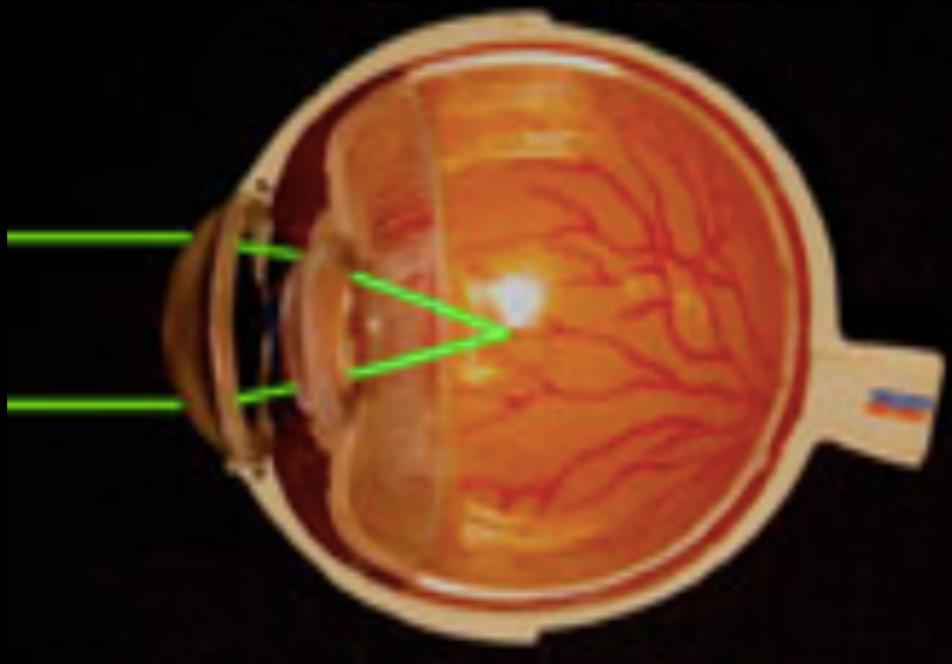
- On a donc, pour l'œil emmétrope (sans défauts) :



# VII - Instruments optiques

## VII.3.2 L'œil : défauts (1)

- Œil myope :



Myopie : œil trop convergent,  $P_r$  à distance finie.

Correction : lentilles divergentes.

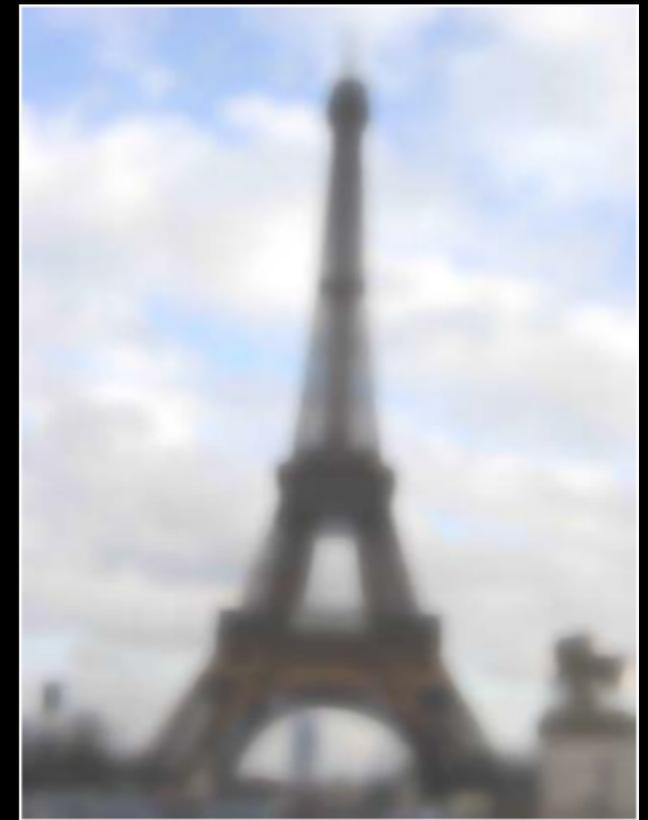
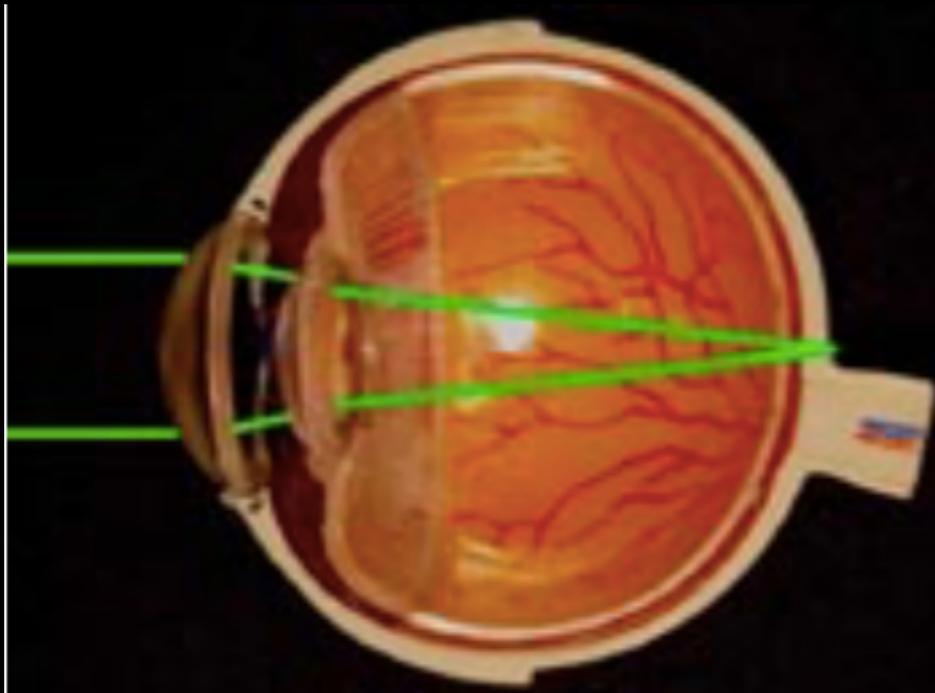


Image de loin floue.

# VII - Instruments optiques

## VII.3.2 L'œil : défauts (2)

- Œil hypermétrope :



Hypermétropie : œil pas assez convergent.

Correction : lentilles convergentes.

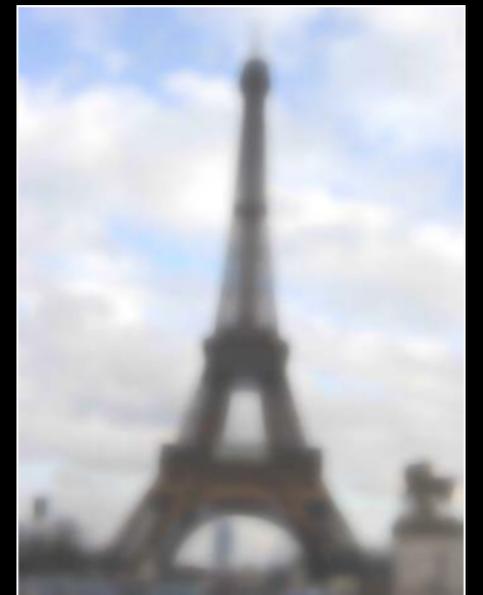
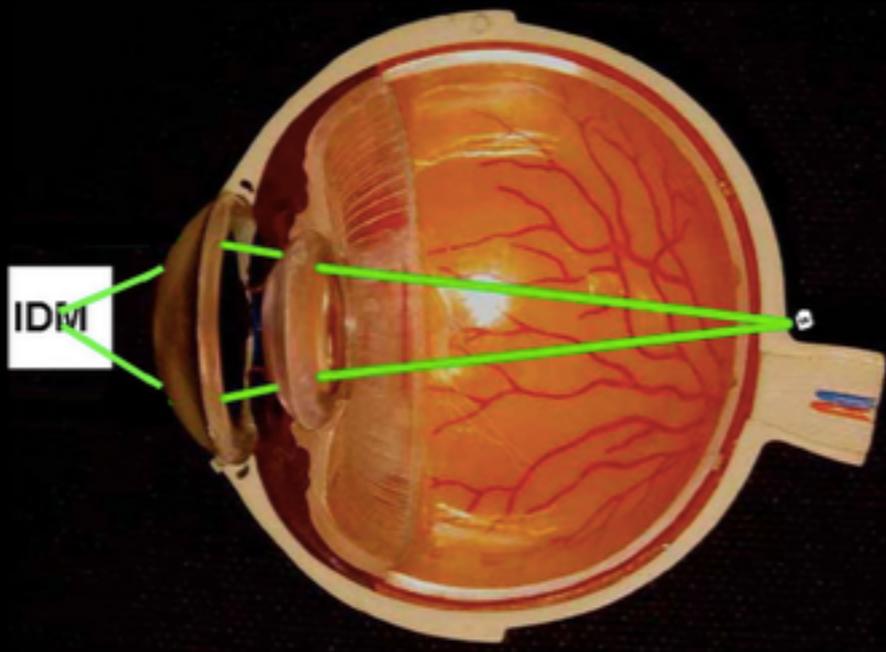


Image (de loin comme de près) floue.

# VII - Instruments optiques

## VII.3.2 L'œil : défauts (3)

- Œil presbyte :



Presbytie : vieillissement cristallin, accommodation imparfaite,  $P_p$  plus éloigné.

Correction : lentilles convergentes.

Image de près floue.

# VII - Instruments optiques

## VII.3.2 L'œil : défauts (4)

- Œil astigmat :

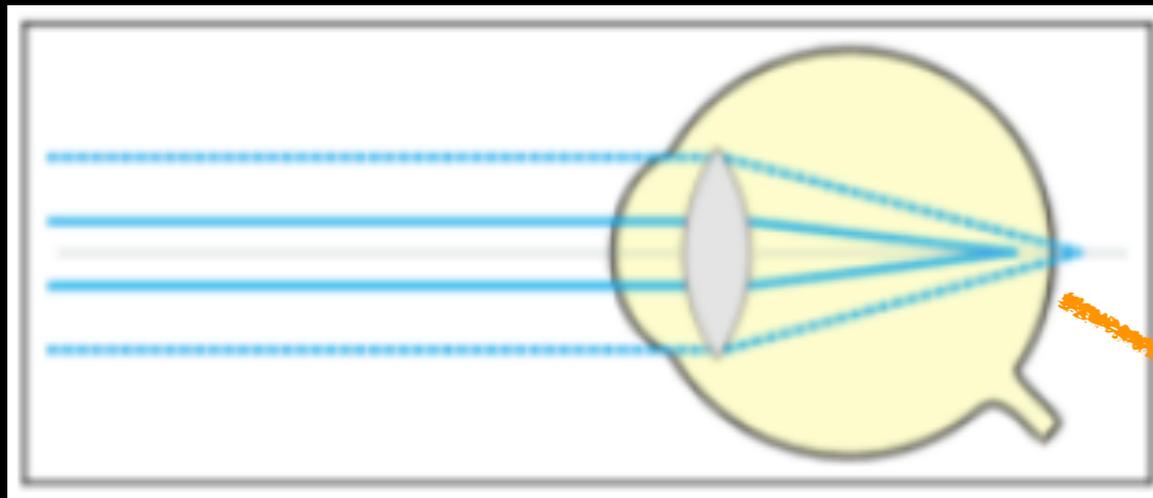


Image formée en différents points => vision brouillée, déformée, imprécise.

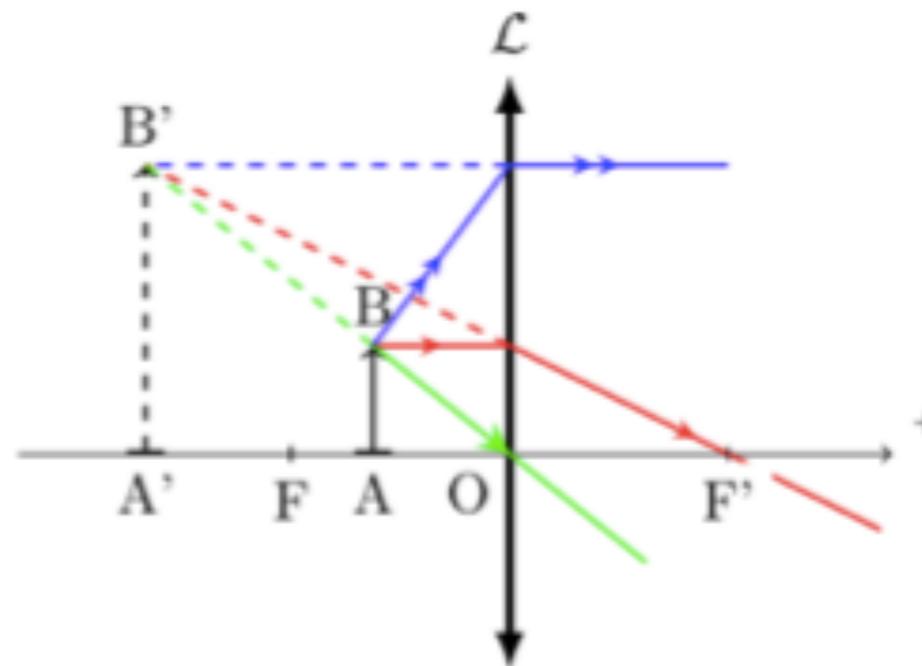
Astigmatisme : courbure de la cornée différente selon direction.

Correction : lentilles spécifiques (cylindriques ou toriques).

# VII - Instruments optiques

## VII.4 La loupe (1)

- Tout simplement l'un des cas vus au chapitre précédent : la loupe est une lentille convergente avec une focale de quelques cm pour laquelle l'objet à « grossir » est placé entre le centre optique et le foyer objet.

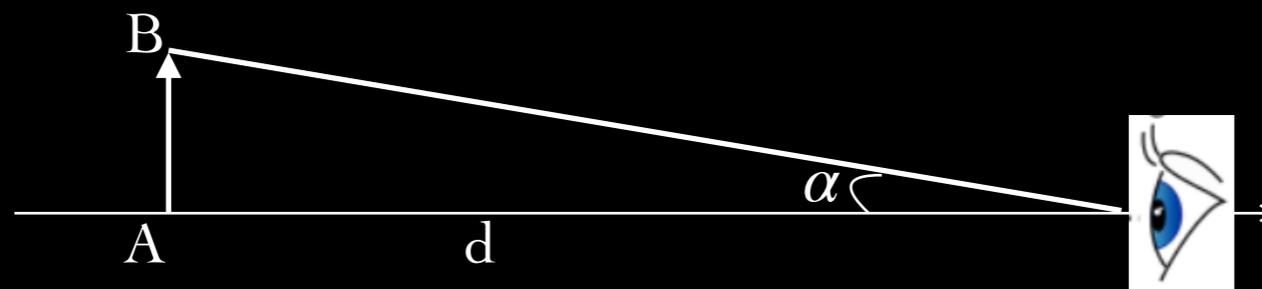


**FIGURE :** Lentille convergente : objet réel, image virtuelle  $\gamma > 0$   $|\gamma| > 1$

# VII - Instruments optiques

## VII.4 La loupe (2)

- Les instruments conçus pour observer les objets rapprochés, comme la loupe ou le microscope, peuvent être caractérisés à l'aide du grossissement  $G$ , du grossissement commercial  $G_c$  et de la puissance  $P$ . Ces caractéristiques nécessitent la définition préliminaire de l'angle apparent, ou taille (angulaire) apparente.
- Angle apparent : angle sous lequel on voit un objet ( $\alpha$ ) / une image ( $\alpha'$ ).



$$\alpha = \arctan \frac{AB}{d} \Rightarrow \alpha \simeq \frac{AB}{d}$$

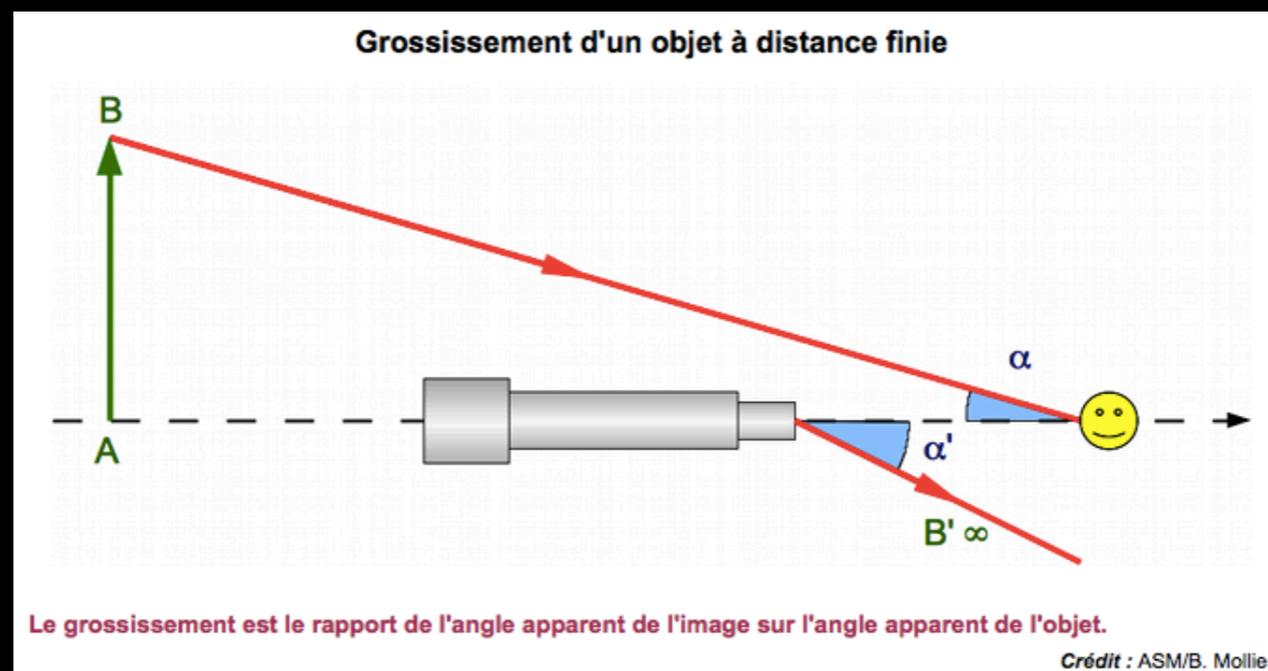
( $\alpha$  dépend à la fois de  $AB$  et de  $d$  !)

# VII - Instruments optiques

## VII.4 La loupe (3)

- Grossissement  $G$  : rapport entre l'angle apparent à l'œil nu  $\alpha$  et celui  $\alpha'$  vu à travers l'instrument.

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



# VII - Instruments optiques

## VII.4 La loupe (4)

- Puissance  $P$  : rapport entre l'angle apparent de l'image et la dimension de l'objet (puissance  $P$  en dioptries,  $[P]=L^{-1}$ , angle  $\alpha'$  en radians,  $[\alpha']=1$ ,  $AB$  en mètres,  $[AB]=L$ ).

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

- Du coup, on peut revenir sur la définition du grossissement  $G$  en remarquant que :

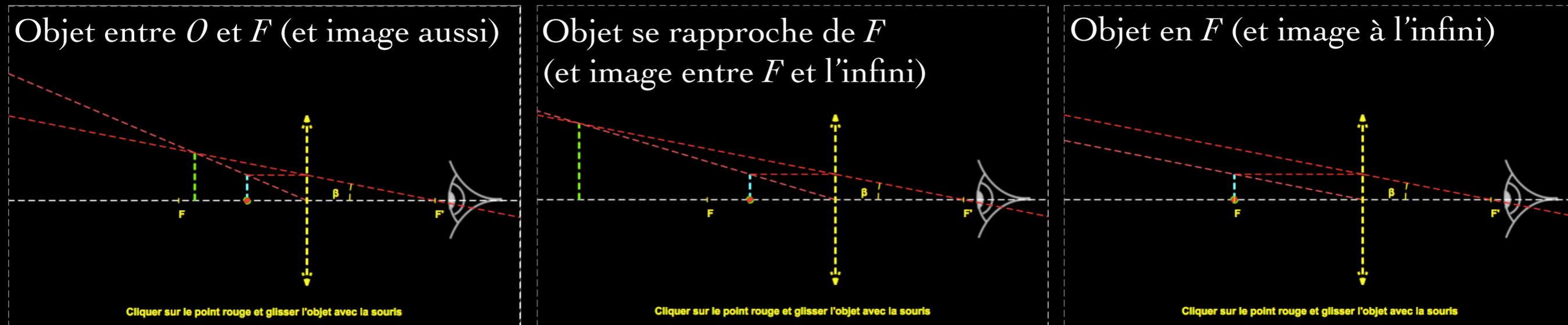
$$G = \frac{\alpha'}{AB} \frac{AB}{\alpha} = P \frac{AB}{\alpha} \simeq P d$$

- Et vouloir définir un grossissement qui ne dépende pas de  $d$ . On obtient alors le grossissement commerciale  $G_c$ , obtenu lorsque l'image est à l'infini et l'objet placé à  $d=25$  cm de l'œil.

$$G_c = P \times 0.25 = \frac{P}{4}$$

# VII - Instruments optiques

## VII.4 La loupe (5)



(Simulateur en ligne : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/loupes.html>)

- Si l'objet est placé en  $F$ , l'image est renvoyée à l'infini  $\Rightarrow$  l'œil n'a alors pas besoin d'accommoder, et :

$$\alpha' \simeq \frac{AB}{f} \Rightarrow P = \frac{\alpha'}{AB} \simeq \frac{1}{f} \text{ (ou : } P \simeq V) \Rightarrow G_c \simeq \frac{1}{4f} \text{ (ou : } G_c \simeq \frac{V}{4})$$

- Remarque pour la suite : un oculaire est certes plus complexe qu'une simple loupe (plusieurs lentilles, plus puissant, plus de champ, correction des aberrations) mais on le modélise de la même manière.

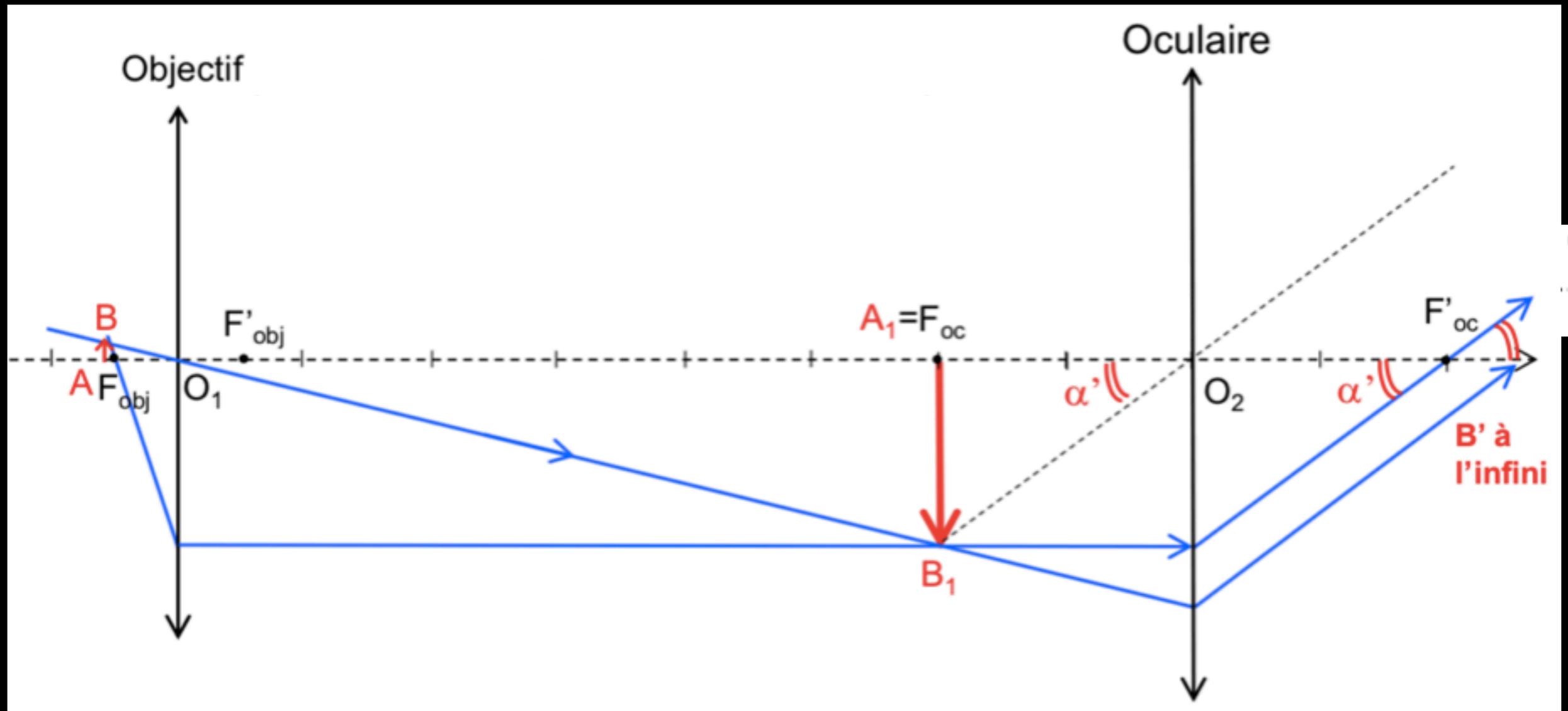
# VII - Instruments optiques

## VII.5 Le microscope (1)



# VII - Instruments optiques

## VII.5 Le microscope (2)



# VII - Instruments optiques

## VII.5 Le microscope (3)

Principe du microscope

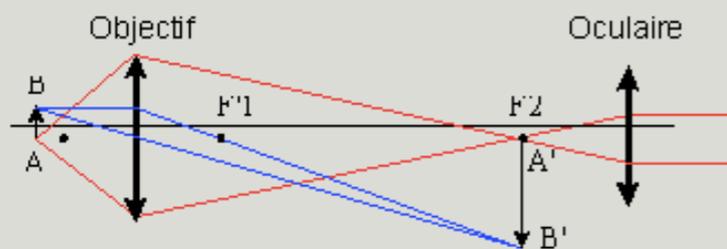
Objectif x 10    Oculaire x5    Oculaire x10

Glisser verticalement le point A avec la souris    IMAGE A L'INFINI

Mise au point



Simulateur en ligne :  
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/microscope.html>



Un microscope est l'association :

d'un **objectif** convergent de distance focale  $f'_1$  qui donne d'un objet AB situé en avant de son foyer objet une image réelle A'B' et d'un **oculaire** convergent de distance focale  $f'_2$  qui permet d'observer cette image intermédiaire.

# VII - Instruments optiques

## VII.5 Le microscope (4)

- On peut caractériser le microscope à l'aide du grossissement (commercial)  $G$  et de la puissance  $P$ , de l'oculaire seul et du microscope tout entier.

- Puissance de l'oculaire

$$P_{oc} = \frac{\alpha'}{A_1 B_1} = \frac{A_1 B_1 / f'_{oc}}{A_1 B_1} = \frac{1}{f'_{oc}} = V_{oc}$$

- Grossissement de l'oculaire

$$G_{oc} = \frac{A_1 B_1}{f'_{oc}} \times \frac{OP_p}{A_1 B_1} = \frac{0.25}{f'_{oc}} = \frac{P_{oc}}{4}$$

- Puissance du microscope

$$P_M = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{A_1 B_1 / f'_{oc}}{AB} = |\gamma_{obj}| \times P_{oc}$$

- Grossissement du microscope

$$G_M = \frac{A_1 B_1}{f'_{oc}} \times \frac{OP_p}{AB} = |\gamma_{obj}| \times G_{oc} = \frac{P_M}{4}$$