



المدرسة العليا للتربية والتكوين - أكادير
ⵜⴰⵎⴰⵔⵜ ⵜⴰⵎⴰⵏⴰⵢⵜ ⵜⴰⵏⴰⵢⵜ ⵜⴰⵔⴰⵎⴰⵏⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⴰⵏⵜ - ⴰⵖⴰⵏⴰⵏ
ECOLE SUPÉRIEURE DE L'ÉDUCATION ET DE LA FORMATION - AGADIR

Cours d'optique géométrique

LEM - LEI

Semestre 2

Pr. OUACHA

Année universitaire 2019/2020



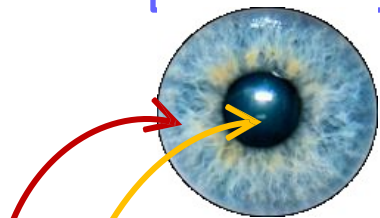
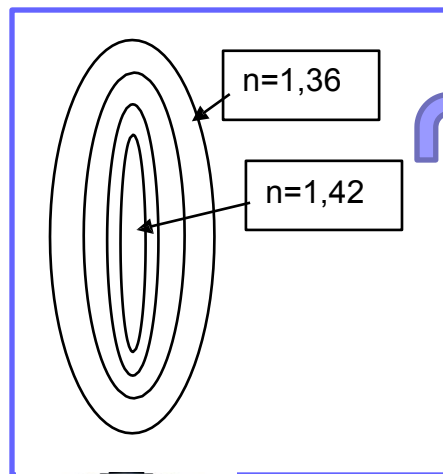
Chapitre V :

Instruments d'optique

Instrument d'optique

L'œil et la vision

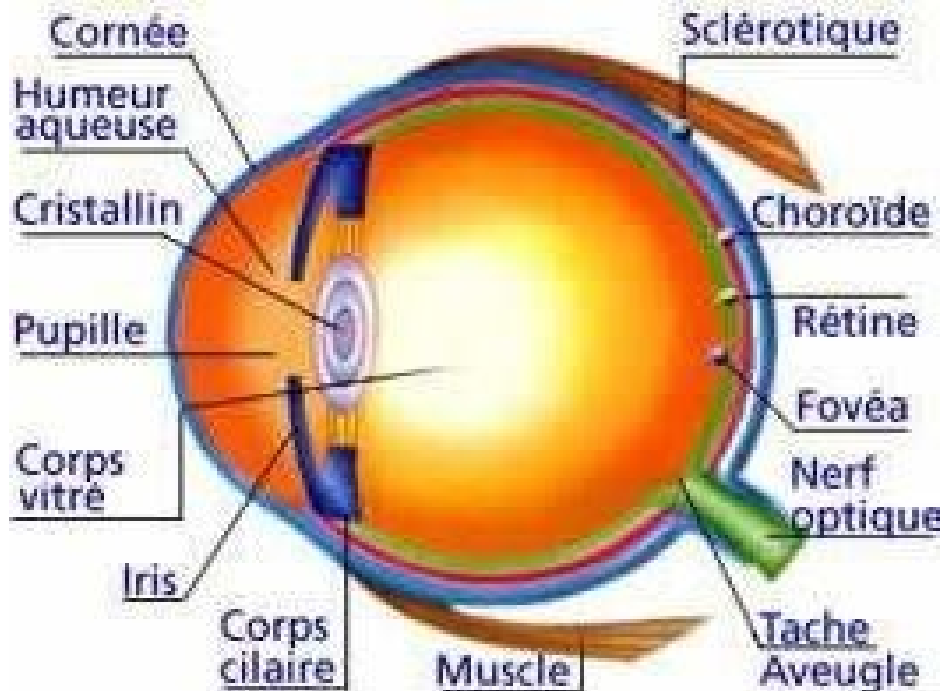
L'OEIL PHYSIOLOGIQUE



Iris : L'*iris* est le diaphragme de l'œil (partie colorée de l'œil).

Pupille : ouverture au centre de l'iris.

Cristallin : lentille biconvexe convergente de distance focale variable ($1.36 < n < 1.42$).



Rétine : partie postérieure de l'œil où se forme les images.

Tâche jaune ou fovéa : c'est une région de la rétine très sensible pour la vision "en couleurs".

Nerf optique : assure la liaison avec le cerveau.

Modélisations de l'œil

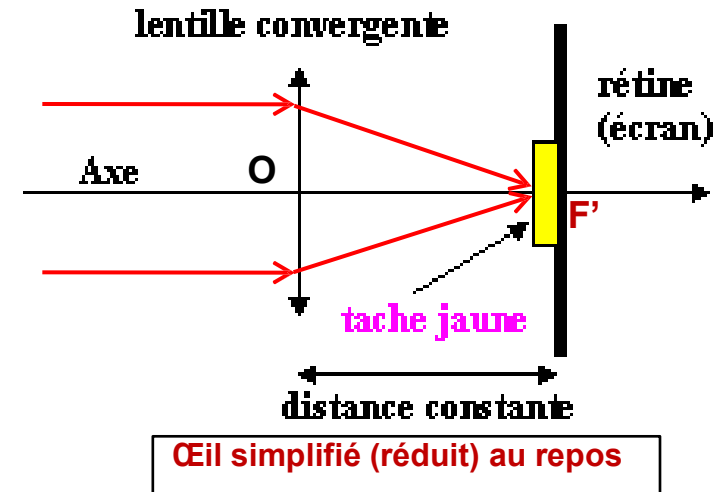
œil réduit

Un œil peut être modélisé par :

Une lentille (adaptative)* convergente de distance focale variable (pour représenter la cornée et le cristallin);

Un écran (rétine photosensible).

- La distance **lentille-écran** est fixe et vaut environ **16,6 mm**.
- \forall La position de l'objet, l'image se forme sur la rétine.
- **Au repos** (vision de loin), F' est sur la rétine ($f' \approx 16.6 \text{ mm}$ et $V = 60 \delta$).
- La position de l'objet et/ou de F' s'obtient par la relation de conjugaison d'une lentille mince.



* Une lentille adaptative ! Pourquoi ?

On a vu qu'avec une lentille convergente, de distance focale constante, la position de l'image dépend de la position de l'objet. Or dans l'œil la position de l'image est fixe (sur la rétine). La nature a donc dû trouver une solution : ne pouvant déplacer l'écran (rétine), elle a choisi d'adapter sa lentille (par changement de f') chaque fois qu'elle en avait besoin.

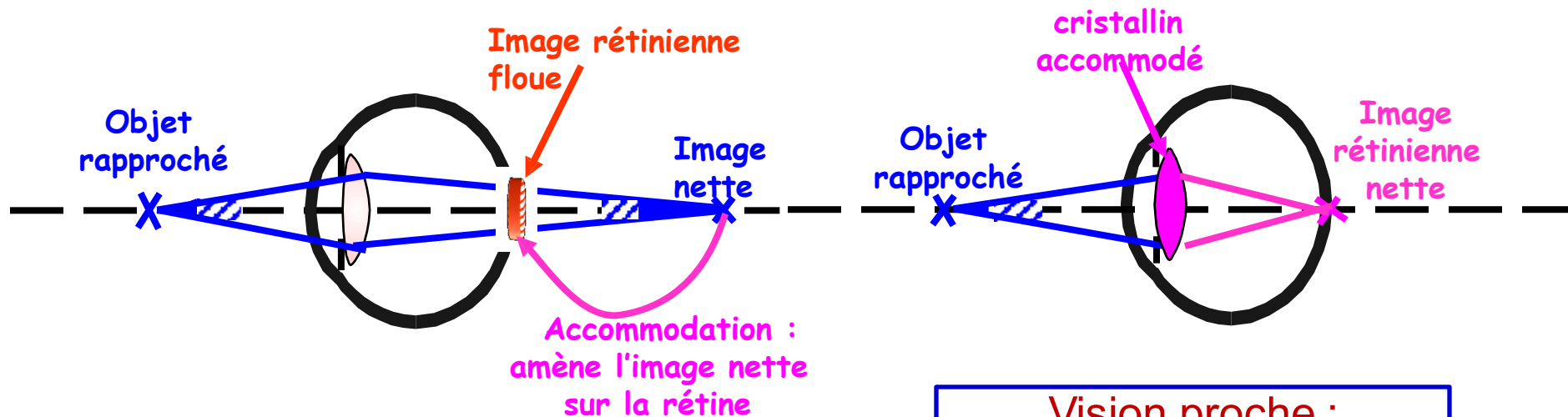
Remarque :

Avec une bonne approximation, en optique, on peut également symboliser l'œil par un dioptre sphérique de sommet S et de centre C tel que $SC = 6\text{mm}$ séparant l'air et le milieu d'indice 1,336 (humeur vitrée).

■ Accommodation : Passage de la vision lointaine à la vision proche

→ L'œil normal peut voir nettement les objets à l'infini sans se fatiguer (œil au repos ou sans accommodation). Un point à l'infini donne un point image sur la rétine et la distance focale vaut au max 16.6 mm.

→ Pour un objet plus proche, le cristallin se bombe et sa distance focale diminue pour ramener l'image sur la rétine : on dit que l'œil accommode.



Vision lointaine :

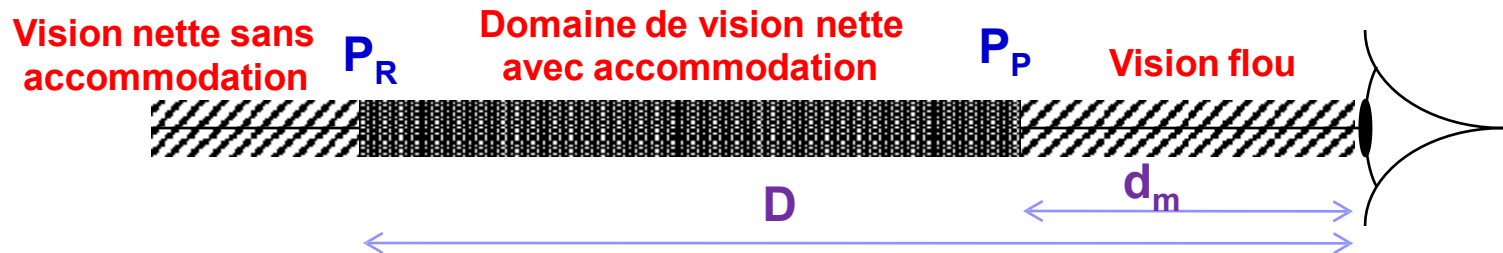
Œil au repos (sans accommodation)
 $A \equiv \infty \rightarrow A' \equiv F'$ (sur la rétine)
 $f' \approx 16,6 \text{ mm}$ ($V = 60 \delta$)

Vision proche :

Œil accommode au maximum
 $A \rightarrow A'$ (sur la rétine)
 $f' \downarrow \rightarrow V \uparrow$

Domaine de vision nette

- L'œil peut voir les objets rapprochés avec accommodation. Cependant, il existe une limite pour la position de l'objet en deçà de laquelle la vision devient floue : c'est le « Punctum Proximum » P_p qui est situé à une distance appelée distance minimale de vision distincte d_m .
- Le point le plus éloigné qu'un œil au repos (sans accommodation) peut voir nettement, appelé « Punctum Remotum » P_R , est situé à la distance maximale de vision distincte D .



- * Pour un œil normal : $d_m = 25 \text{ cm}$ (accommodation maximale)
 $D = \infty$ (œil au repos ou vision sans accommodation), $P_R \rightarrow \infty$.
- * Ces valeurs varient d'un individu à un autre et dépendent aussi de l'âge.
- * d_m augmente et D diminue avec l'âge

Amplitude dioptrique A

L'amplitude dioptrique d'accommodation (ou amplitude du champ de vision) est la quantité suivante exprimée en dioptrie :

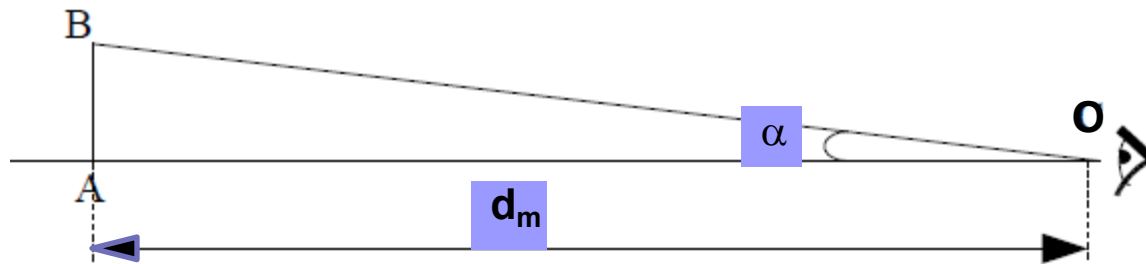
$$A = \frac{1}{d_m} - \frac{1}{D}$$

$$\text{où } d_m = -\overline{OP_p} \text{ et } D = -\overline{OP_R}$$

- Son intérêt est de classer les yeux des individus : Elle diminue avec l'âge : pour un œil normal, elle est de 14δ à 10 ans, 6,7δ à 30 ans et 0,5δ à 60 ans.
- En rapprochant cette relation de la relation de Descartes avec origine au centre O, A mesure la convergence du verre qui donne de l'objet A au P_p une image A' au P_R : ce verre de vergence A permet donc de voir le P_p (objet) sans accommoder puisque l'image est au P_R.
- Retenons enfin qu'un œil corrigé par une lentille possède la même A que l'œil nu correspondant (en supposant que la lentille correctrice est tout contre l'œil ce qui exclu à priori le cas des lunettes).

Diamètre apparent

Le diamètre apparent de l'objet, est le plus grand angle α (en radian) sous lequel l'œil nu (sans recours à un instrument optique) peut voir nettement le plus petit objet possible AB à la distance minimale de vision distincte d_m .



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{d_m}$$

Puisque AB est très petit alors :

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha \text{ et } \alpha = \frac{AB}{d_m}$$

■ Œil normal ou emmétrrope

Un œil est normal lorsque son P_R est situé à l'infini et son P_P est situé à 25 cm en moyenne devant l'œil.



■ Variations de la vergence V

En utilisant la relation de conjugaison d'une lentille mince, on trouve pour :

- vision éloignée (au repos) (**punctum remotum P_R**) :
 - $A \equiv \infty \longrightarrow A'$ sur la rétine; soit $\overline{OA'} = \overline{OF'} \approx 16,6 \text{ mm}$
 - $V = 60 \delta$ ($f' \approx 16,6 \text{ mm}$)
- vision rapprochée (**punctum proximum P_P**) :
 - $\overline{OA} = \overline{OP_P} = -25 \text{ cm}$; A' sur la rétine soit $\overline{OA'} \approx 16,6 \text{ mm}$
 - $V = 64 \delta$ ($f' \approx 15,6 \text{ mm}$)
- amplitude dioptrique : $\Delta V = A = 4\delta$

Les défauts de l'Œil (œil *amétrope*)

La myopie

L'œil myope est **trop convergent** (cristallin trop bombé)
ou **trop long** (distance cristallin-rétine trop importante)

l'image nette (**F'**) d'un objet à l'infini
se forme **avant la rétine**
(l'image sur la rétine est flou)

Le myope voit mal de loin, mais bien
de près et même de très près

Son **P_R** est situé très près (environ 1m)
Son **P_P** est plus faible que celui d'un œil normal



Correction :

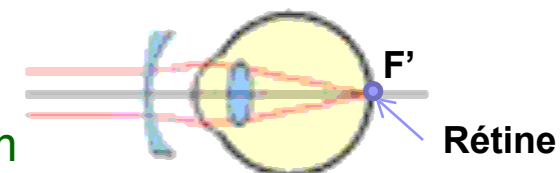
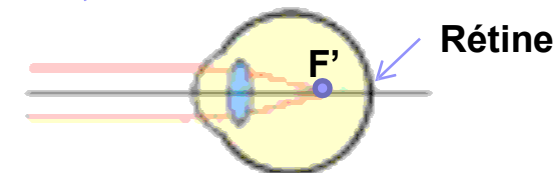
On compense le myope avec des **verres divergents**
(concaves).

Exemple (on utilisera l'image flou formée sur la rétine)

Correction avec des verres divergents : $V' = -1\delta$

Sans lunettes ($\Delta V = 4\delta$) : $61\delta < V < 65\delta$ $-1\text{m} < p < -20\text{cm}$

Avec lunettes ($\Delta V = 4\delta$) : $60\delta < V < 64\delta$ $-\infty < p < -25\text{cm}$



MYOPIE

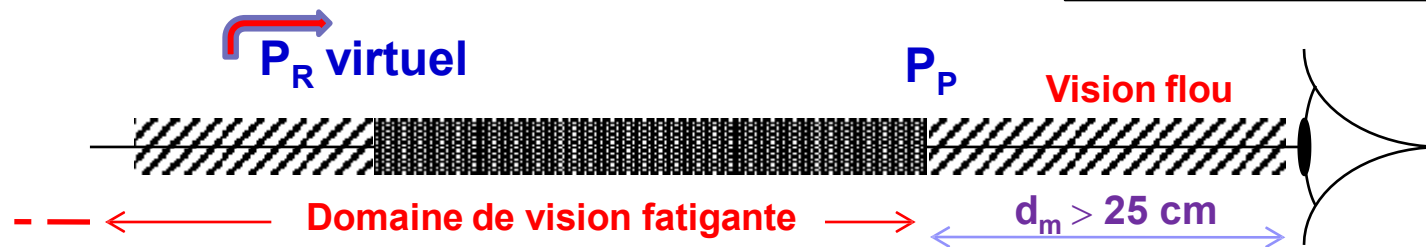
■ L'hypermétropie

L'œil hypermétrope n'est **pas assez convergent** ou **trop court** (distance cristallin-rétine inférieure à l'œil normal)

l'image (**F'**) d'un objet à l'infini se forme en **arrière de la rétine**

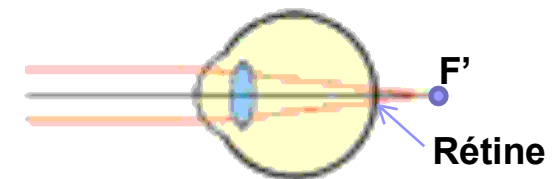
L'hypermétrope voit mal de près et de loin. S'il arrive à voir de loin, c'est au prix d'un effort et d'une fatigue.

Son **P_R** est virtuel
Son **P_P** est plus éloigné de la cornée que dans le cas d'un œil normal



Correction :

Ce défaut est compensé par des **verres convergents** (convexes) .

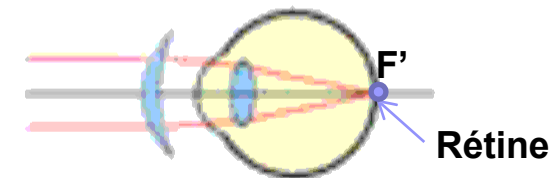


Exemple

Correction avec des verres convergents : $V' = +1\delta$

Sans lunettes ($\Delta V = 4\delta$) : $59\delta < V < 63\delta$ $-\infty < p < -33\text{cm}$

Avec lunettes ($\Delta V = 4\delta$) : $60\delta < V < 64\delta$ $-\infty < p < -25\text{cm}$



HYPERMETROPIE

Autres défauts

■ La presbytie : (en grec « presbus » = vieillard)

L'œil **presbyte** est un œil devenu moins convergent par suite du **vieillissement** (la capacité d'accommoder disparaît) : il faut corriger la **vision** de **près** et celle de **loin** avec des **lentilles bifocales ou progressives**.

exemple :

Correction avec des verres convergents : $V' = 2\delta$

Sans lunettes ($\Delta V = 1\delta$) : $60\delta < V < 61\delta$; $-\infty < p < -1\text{m}$

Avec lunettes ($\Delta V = 1\delta$) : $62\delta < V < 63\delta$; $-50\text{cm} < p < -33\text{cm}$



Correction avec doubles foyers
ou foyers progressifs

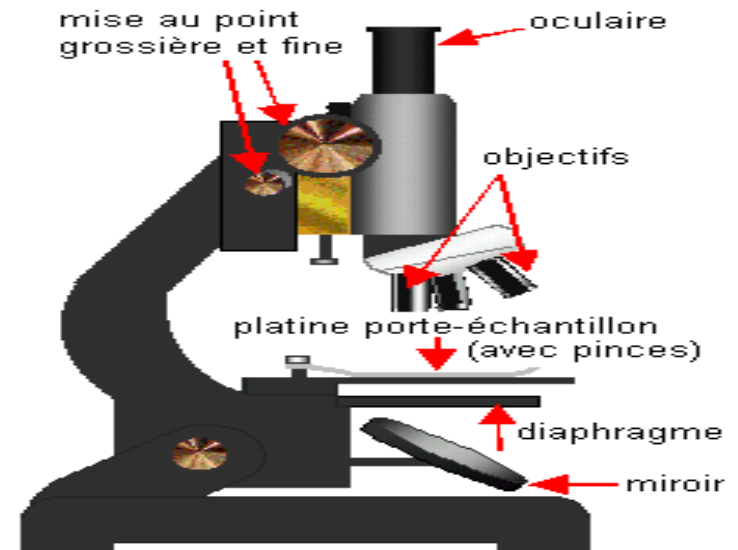
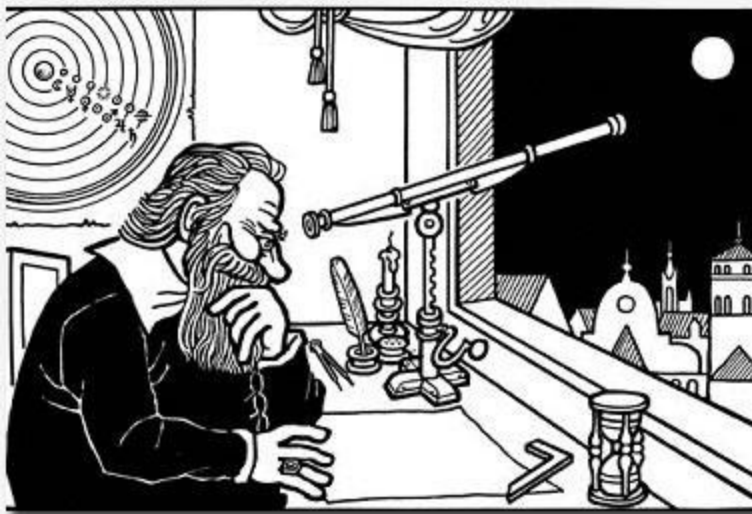
■ Astigmatisme :

Ce défaut résulte **d'irrégularités de la courbure de la cornée** ou du **cristallin**. Un astigmatisme ne peut voir nettement que dans deux directions orthogonales et de façon non simultanée (on confond, par exemple, des lettres proches comme le H et le M). On corrige ce défaut avec des **lentilles cylindriques ou toriques**.

Instruments d'optique

○ LOUPE

○ MICROSCOPE



Classification des instruments d'optique

Les instruments d'optique sont en général des systèmes centrés qui se divisent en deux groupes :

- ♣ Les instruments de projection ou objectifs donnant une image **réelle** (œil, objectif photographiques...);
- ♣ Les instruments oculaires ou subjectifs, associés à l'œil pour faciliter l'observation, donnant une image **virtuelle** (lunettes, loupe, microscope, télescopes ..).

☞ *Les instruments d'optique usuels sont réglés de sorte que l'image qu'ils donnent se forme au $P_R(\infty)$ de l'œil : l'œil est au repos et ne se fatigue pas.*

☞ *On dit que l'on règle l'appareil à l'infini.*

Propriétés générales des instruments d'optiques

Grandissement linéaire :

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

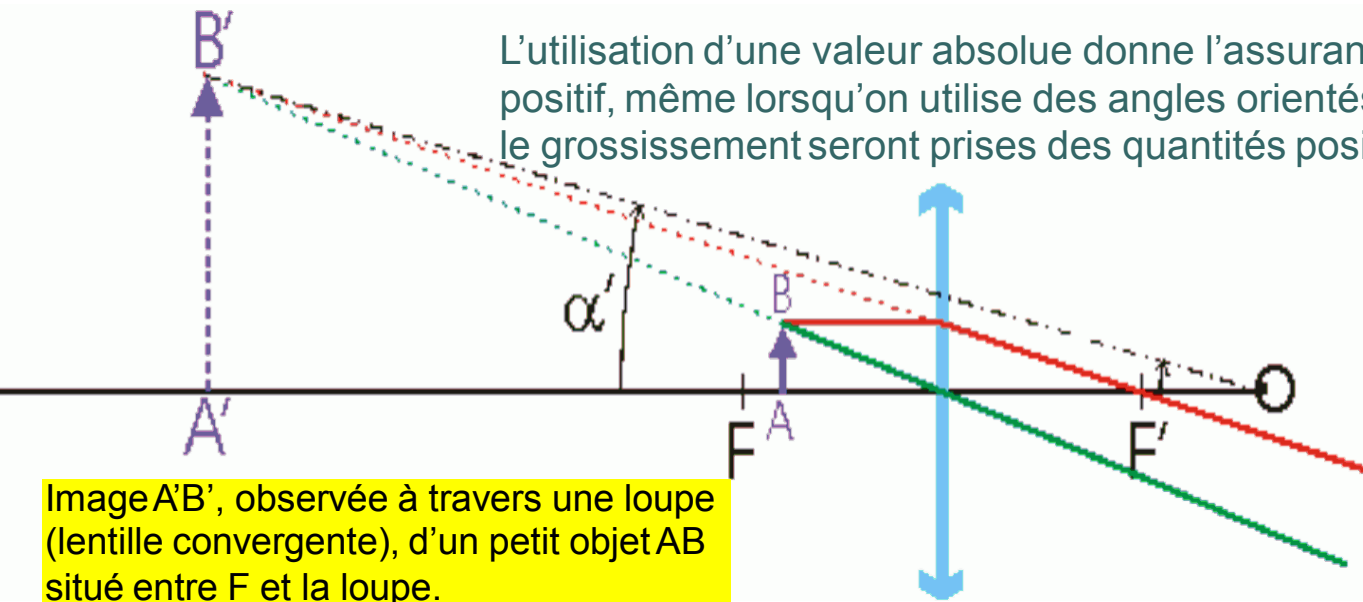
Puissance :

La puissance d'un instrument optique est le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image donnée **par l'instrument** à la longueur de l'objet.

$$P = \left| \frac{\alpha'}{AB} \right|$$

[rad.m⁻¹]

L'utilisation d'une valeur absolue donne l'assurance d'un résultat positif, même lorsqu'on utilise des angles orientés (la puissance et le grossissement seront prises des quantités positives).



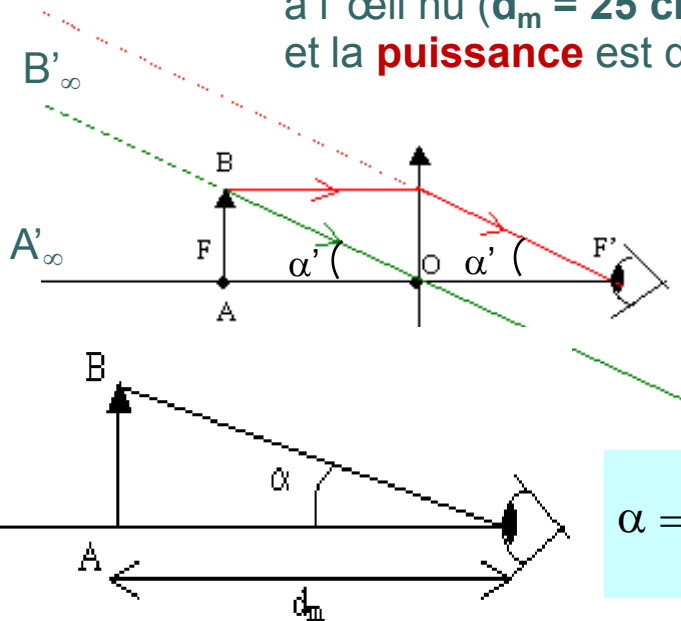
Grossissement d'un instrument optique :

Le **grossissement optique** (grandeur sans dimension) est le rapport de l'angle α' sous lequel on voit l'image (à travers l'instrument d'optique) à l'angle α sous lequel l'objet, placé à la distance minimale de vision distincte d_m , est vu à l'œil nu :

$$G = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$$

Puissance intrinsèque P_i et grossissement commercial G_c :

Pour une image vue au $P_R (\infty)$ à travers l'instrument et un objet vu au P_P à l'œil nu ($d_m = 25 \text{ cm} = \frac{1}{4} \text{ m}$), le **grossissement** est dit **commercial G_c** et la **puissance** est dite **intrinsèque P_i** .



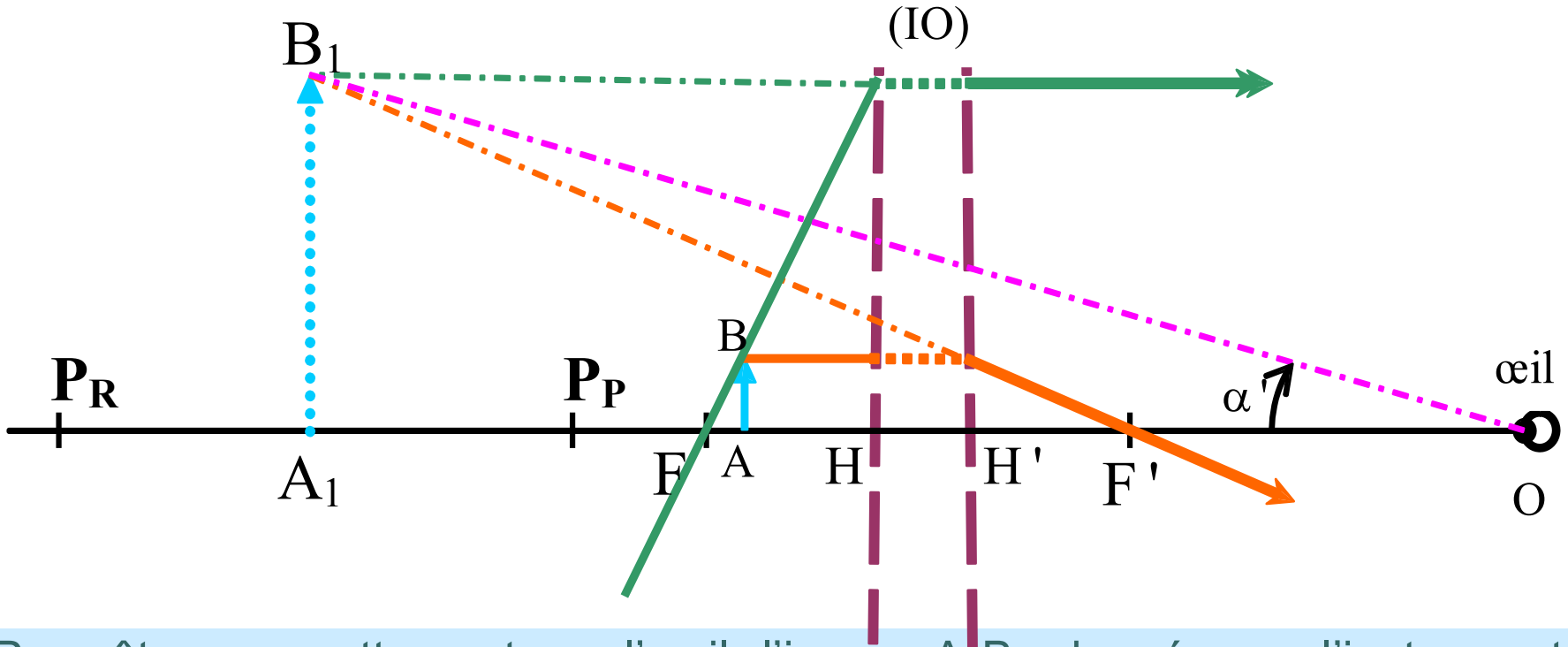
$$\alpha' \approx \tan \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{OF}} = -\frac{\overline{AB}}{\overline{OF}} = -\frac{\overline{AB}}{f}, \quad (A \equiv F)$$

$$\Rightarrow P = P_i = \left| \frac{\alpha'}{AB} \right| = \frac{1}{f} \quad (\delta) \text{ (vergence du système)}$$

$$\alpha = \frac{AB}{d_m} \Rightarrow G_c = \left| \frac{\alpha'}{AB} \right| d_m$$

$$\Rightarrow G_c = P_i \cdot d_m = \frac{d_m}{f} = \frac{1}{4f} = \frac{AP_i}{4}$$

La latitude de mise au point



Pour être vue nettement par l'œil, l'image A_1B_1 donnée par l'instrument optique (IO) doit être située entre le **Punctum Remotum P_R** et le **Punctum Proximum P_P** de l'oeil.

$AB \xrightarrow{(IO)} A_1 B_1 \xrightarrow{(\text{œil})} A' B' \text{ (sur la rétine)}$
 on pose: $\overline{P_R O} = D$, $\overline{P_P O} = d$ et $\overline{F' O} = a$

on pose: $\overline{P_R O} = D$, $\overline{P_P O} = d$ et $\overline{F' O} = a$

Si A_R et A_P désignent les conjugués de P_R et P_P à travers l'IO, la quantité $\overline{A_R A_P}$ est la "latitude de mise au point" de l'instrument.



$$\overline{FA_R} \cdot \overline{FP_R} = f \cdot f' = -f^2$$

$$\Rightarrow \overline{FA_R} = \frac{-f^2}{\overline{FO} + \overline{OP_R}} = \frac{f^2}{D - a}$$



$$\overline{FA_P} \cdot \overline{FP_P} = f \cdot f' = -f^2$$

$$\Rightarrow \overline{FA_P} = \frac{-f^2}{\overline{FO} + \overline{OP_P}} = \frac{f^2}{d - a}$$

$$\overline{A_R A_P} = \overline{A_R F} + \overline{FA_P} = f^2 \left(\frac{1}{d - a} - \frac{1}{D - a} \right)$$

Souvent l'œil de l'observateur est situé au voisinage du foyer image de l'instrument, ($F' \equiv O \rightarrow a = 0$)

$$\overline{A_R A_P} \approx f^2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = A \cdot f^2 \quad \text{où } A \text{ est l'amplitude dioptrique}$$

Dans le cas d'un œil normal $D \rightarrow \infty$ et $d = d_m = 25 \text{ cm}$ \Rightarrow

$$\overline{A_R A_P} \approx \frac{f^2}{d_m} = 4 \cdot f^2$$

Exemple d'instruments optique subjectifs: LA LOUPE

Une loupe est une lentille convergente mince ou épaisse de courte distance focale. L'image d'un petit objet placé entre la loupe et le foyer objet, est virtuelle et plusieurs fois plus grande que l'objet.

On place généralement l'objet au foyer objet de la loupe afin d'obtenir une grande **image virtuelle** située au **Punctum Remotum** de l'observateur (à l' ∞ pour l'œil normal). Ainsi, l'œil voit l'image de l'objet (à travers la loupe) sans accommodation et ne se fatigue pas.

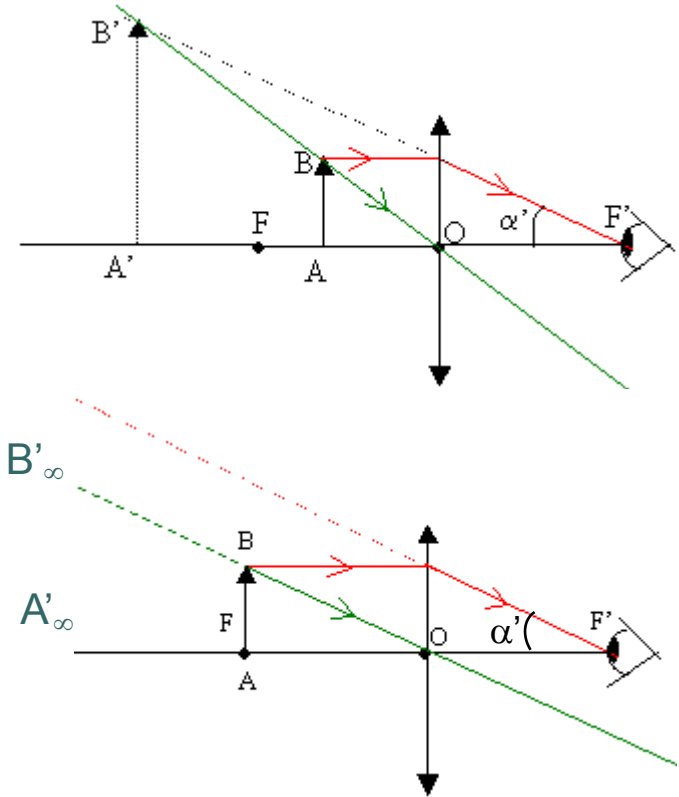
Dans ces conditions, on a vu que le grossissement commercial et la puissance intrinsèque sont donnés par :

$$G_c = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right| = \frac{d_m}{f}$$

$$P_i = \left| \frac{\alpha'}{AB} \right| = \frac{1}{f}$$

$$\Rightarrow G_c = P_i d_m = \frac{1}{4f} = \frac{P_i}{4} \quad (d_m = 0.25 \text{ m})$$

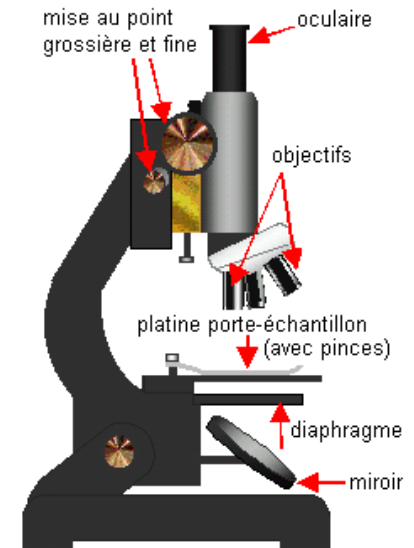
(pour la loupe G_c peut atteindre 25)



Le Microscope

- ⑩ Un fort grossissement
- ⑩ Observation à courte distance
- ⑩ Image finale virtuelle

Le Microscope se compose essentiellement d'un :



✓ **objectif** qui est constitué de plusieurs lentilles assimilables à une lentille convergente de très courte distance focale (de l'ordre du mm), et qui donne d'un petit objet AB une image réelle A_1B_1 très agrandie ;

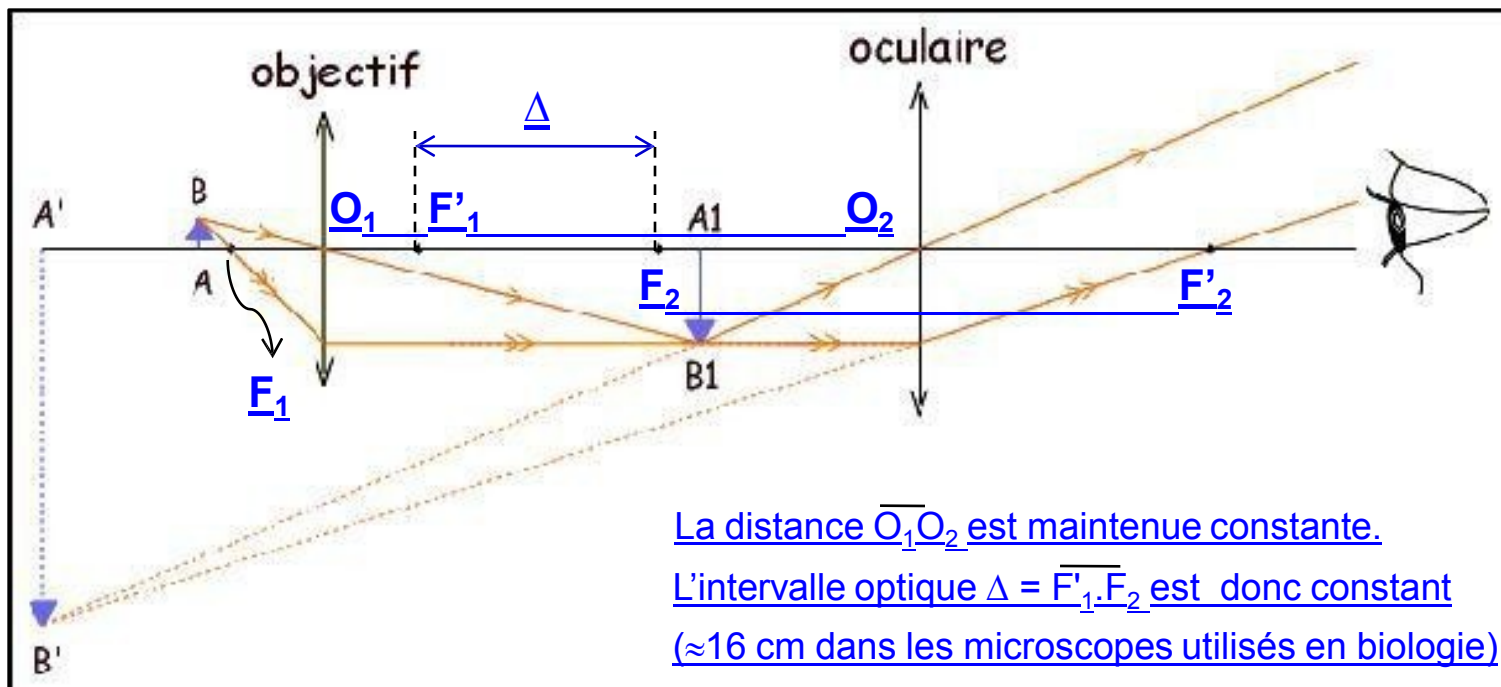
✓ **oculaire** qui est souvent un doublet assimilable à une lentille convergente de distance focale de l'ordre du cm (jouant le rôle d'une loupe), et qui sert à examiner cette image A_1B_1 (objet pour l'oculaire) pour en donner une image finale $A'B'$.

$Objet\ AB \xrightarrow{L_1\ (Obj\ ectif)} A_1B_1 \xrightarrow{L_2\ (Oculaire)} Im\ age\ A'\ B'$

Microscope

Construction géométrique de l'image

Les objets à examiner sont placés légèrement en avant du plan focal objet de l'objectif, et l'ensemble (objectif-oculaire) est assemblé de telle sorte que l'image intermédiaire A_1B_1 , donnée par l'objectif, se forme au voisinage du plan focal objet de l'oculaire.

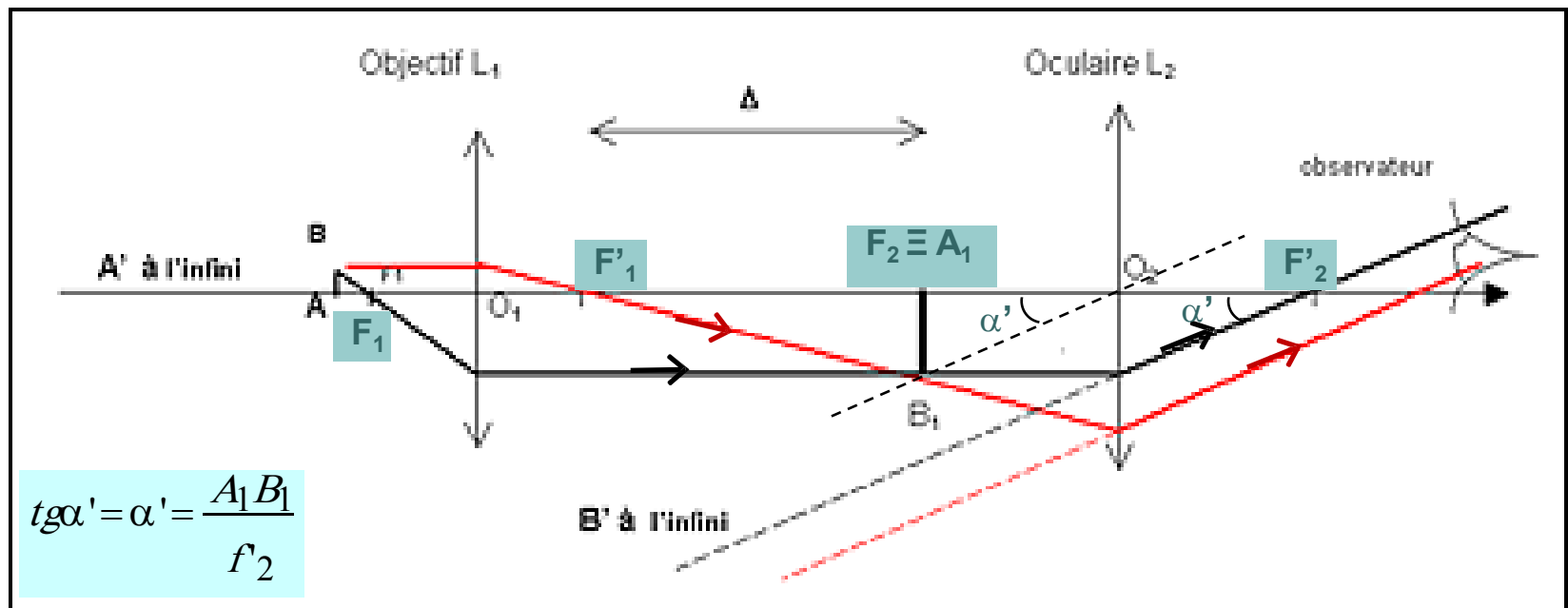


L'objectif donne du petit objet AB une image réelle et agrandie A_1B_1 . Celle-ci joue le rôle d'un objet réel pour l'oculaire qui en donne une image définitive $A'B'$ virtuelle, droite par rapport à l'objet A_1B_1 , renversée par rapport à l'objet initial AB , et plusieurs fois plus grande que ce dernier. Cette image virtuelle $A'B'$ se comporte pour l'œil comme un objet réel dont l'image réelle se forme sur sa rétine.

Cas particulier important : vision à l'infini

L'œil doit pouvoir regarder l'image finale $A'B'$ sans accommoder (vision moins fatigante pour l'œil). Dans ce cas, $A'B'$ se trouve à l'infini, et l'image intermédiaire A_1B_1 se trouve alors dans le plan focal objet de l'oculaire. L'objet AB , lui se trouve donc au foyer objet de l'association des deux lentilles.

Ceci étant possible grâce à la mise au point, qui consiste au déplacement du bloc (objectif-oculaire), pour amener l'image intermédiaire A_1B_1 dans le plan focal objet de l'oculaire.



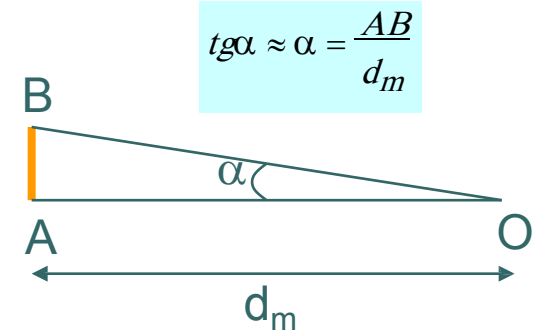
Objectif : foyers F_1 et F'_1 ; distance focale image f'_1 .

Oculaire : foyers F_2 et F'_2 ; distance focale image f'_2 . $AB \xrightarrow{L_1 \text{ (Objectif)}} A_1B_1 \equiv F_2 \xrightarrow{L_2 \text{ (Oculaire)}} A'B' \equiv \infty$

Grossissement d'un microscope

Grossissement :

$$G_{mic} = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right| = \left| \frac{\alpha'}{AB} \cdot \frac{AB}{\alpha} \right| = P_{mic} \cdot d_m$$



Grossissement commercial :

Dans le cas d'une vision à l'infini ($A_1B_1 \equiv F_2 \rightarrow A'B' \equiv \infty$):

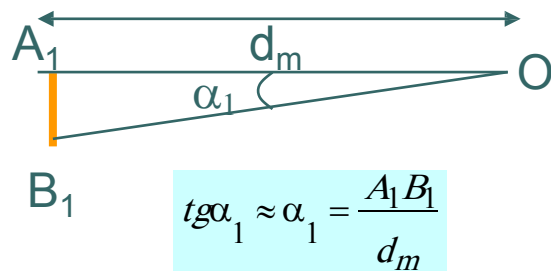
$$\alpha' = \frac{A_1B_1}{f_2}; \quad G_{oc} = \frac{\alpha'}{\alpha_1} = \frac{d_m}{f_2}$$



$$G_c = G_{mic} = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right| = \left| \frac{A_1B_1}{f_2} \cdot \frac{d_m}{AB} \right| = \left| \frac{A_1B_1}{AB} \right| \cdot \frac{d_m}{f_2} = |\gamma_{obj}| \cdot G_{oc}$$

α_1 : diamètre apparent de A_1B_1 vu à l'œil nu.

G_c : grossissement commercial du microscope;
 G_{oc} : grossissement de l'oculaire.



$$\begin{cases} \gamma_{obj} = -\frac{\Delta}{f_1} \\ G_{oc} = \frac{d_m}{f_2} \end{cases}$$



$$G_c = |\gamma_{obj}| \cdot G_{oc} = \left| -\frac{\Delta}{f_1} \right| \cdot \frac{d_m}{f_2} = \frac{d_m}{|f|}$$

$$= \frac{1}{4|f|} = \frac{P_l}{4} \quad (d_m = 0.25 \text{ m} = \frac{1}{4} \text{ m})$$

Instrument astronomique :

Systemes afocaux

Selon le type de la surface principale collectrice de lumière (objectif), on distingue parmi ces instruments :



La lunette astronomique

appelée aussi *réfracteur ou télescope à réfraction*, dans laquelle cette surface est composée d'une ou plusieurs lentilles.



Le télescope

appelé aussi *réflecteur ou télescope à réflexion*, dans lequel cette surface est un miroir.

Exemple d'instrument objectif : Projecteur

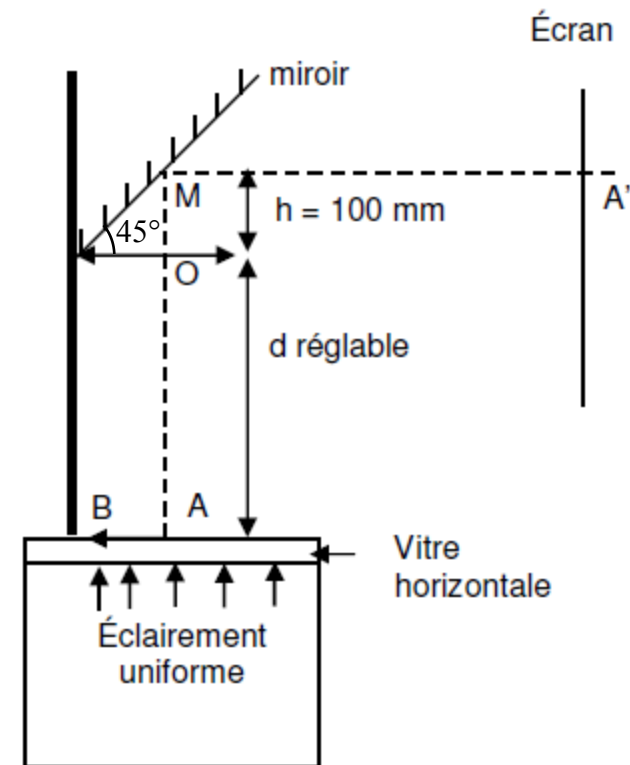
Principe :

Un projecteur de photos ou de transparents est un système optique formé par une Lentille de projection et par un miroir plan.

L'image d'un objet AB placé sur la vitre du rétroprojecteur est projetée sur un écran après réflexion sur un miroir plan. Le miroir et l'axe optique de la lentille font un angle α

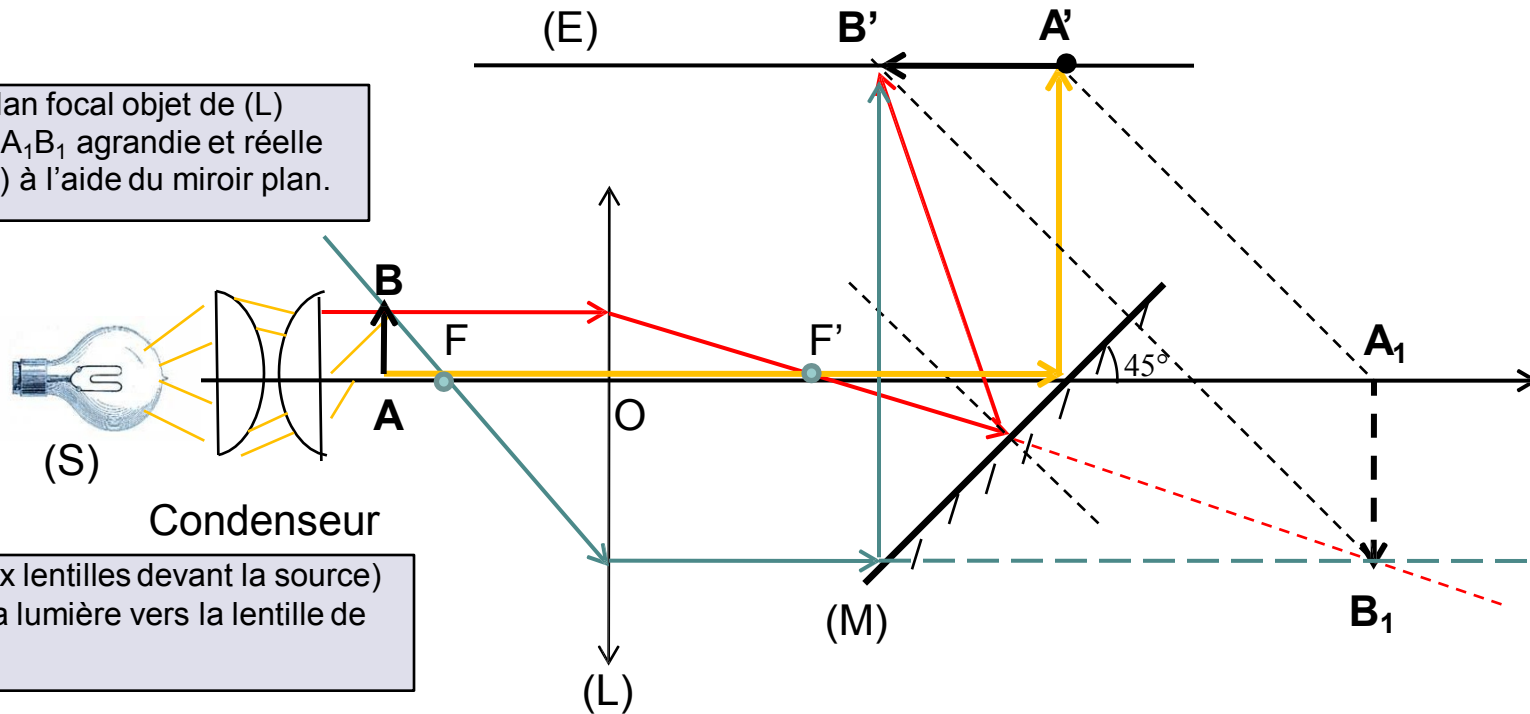
Pour obtenir une image nette sur l'écran, il faut :

- déplacer convenablement la lentille de projection et l'écran;
- régler l'angle α (on prendra $\alpha = 45^\circ$ pour la construction);
- régler la luminosité de la source de lumière.



Construction de l'image d'un objet

AB est placé avant le plan focal objet de (L) pour obtenir une image A_1B_1 agrandie et réelle qui sera projetée sur (E) à l'aide du miroir plan.



Le condenseur (les deux lentilles devant la source) a pour rôle d'envoyer la lumière vers la lentille de projection (L).

Objet AB $\xrightarrow{\text{Len tille de p ro j ec tion (L)}}$ M ir oir p lan (M) \rightarrow Im age A' B'
 $A_1 B_1$ — $\xrightarrow{\text{Projecteur sur (E)}}$

Grandissement linéaire :

Puisque le miroir plan a un grandissement $\gamma = 1$, alors :

$$\gamma_{\text{projecteur}} = \gamma(L) = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA}}$$