

Chapitre 6 : Les instruments d'optique

I - Introduction

II - L'œil

II-1- Constitution de l'œil

II-2- Système équivalent d'un œil

II-3- L'œil réduit

II-4- Représentation géométrique

II-5- Accommodation de l'œil

II-6- l'Acuité visuelle:

III – Défauts de l'œil et leurs correction

III-1- Myopie

III-2- Hypermétropie

III-3- Presbytie

IV – Qualités d'un instrument optique

IV – Latitude de mise au point

IV – Grandeur de l'image: grandissement, grossissement, puissance

V – La loupe

VI – Le microscope



I – Généralités sur les instruments d'optique :

Un instrument d'optique est une association de plusieurs systèmes ayant pour intérêt l'amélioration de la vision des objets. On distingue deux catégories d'instruments d'optiques :

➤ Les instrument subjectif (ou oculaire):

Ce sont des instruments associés à l'œil qui examine l'image virtuelle obtenue à travers cet instrument.

exemple: la Loupe – le microscope – les lunette astronomique etc....

- Si l'objet est proche, l'instrument est du genre microscope.
- Si l'objet est à l'infini, l'instrument est du genre télescope.

➤ Instrument objectif (ou de projection):

Ce sont des instruments qui donnent une image réelle reçue sur un écran de projection.

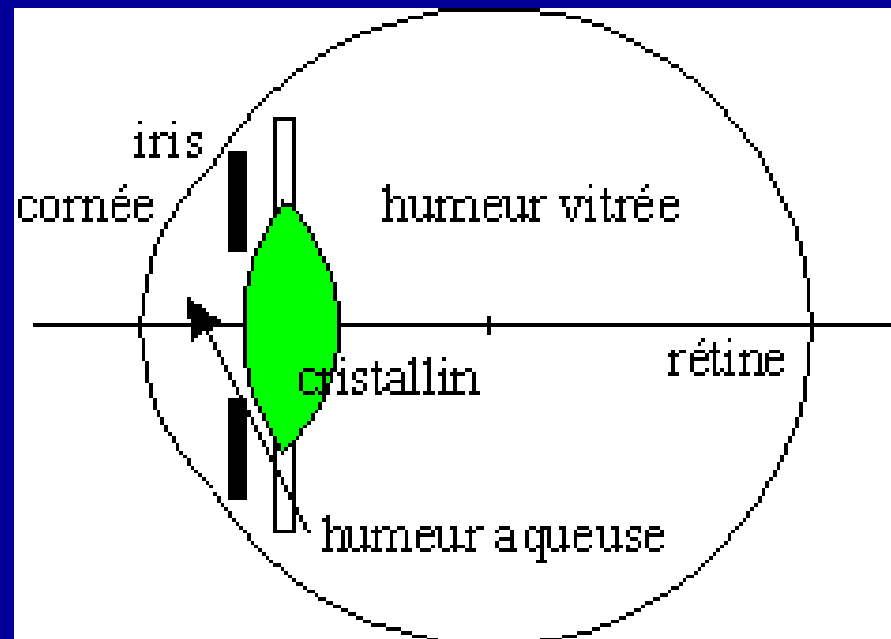
exemple : Rétroprojecteur, Appareil Photographique.

Remarque:

Les instruments d'optiques sont associés à l'œil, il est donc important d'étudier les qualités et les défauts de l'œil.

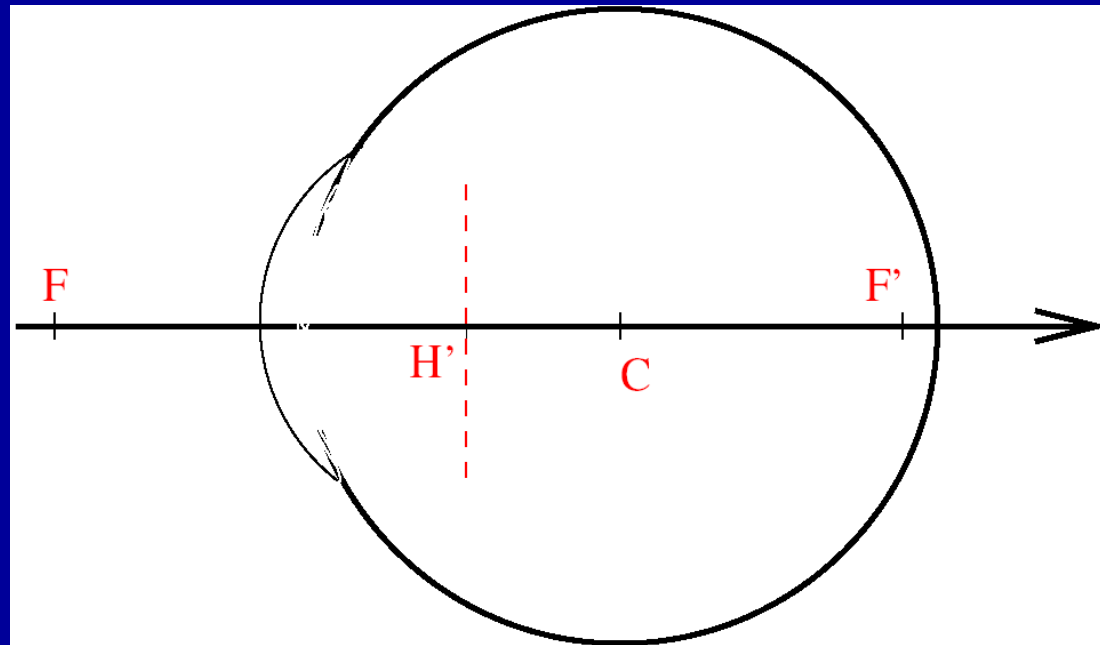
II – L'œil et ses défauts :

II-1 Constitution de l'œil :



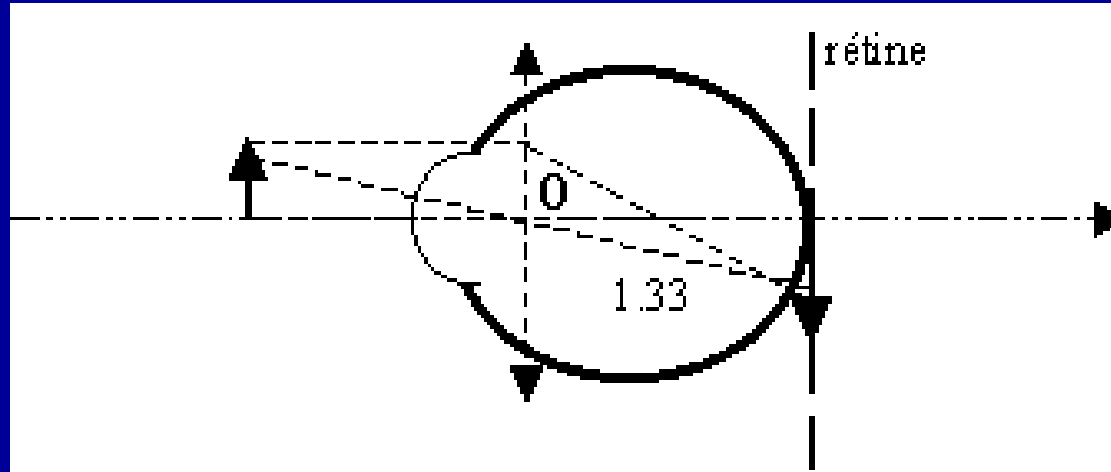
II-2: Système équivalent d'un œil :

L'œil peut être assimilé à un dioptre sphérique dont le foyer image F' est sur la rétine, quand l'œil est normal et au repos, à environ 1.7 cm de son centre optique " supposé sur le cristallin ". Il est souvent assimilé à une lentille convergente de distance focale $f' = 15$ mm.

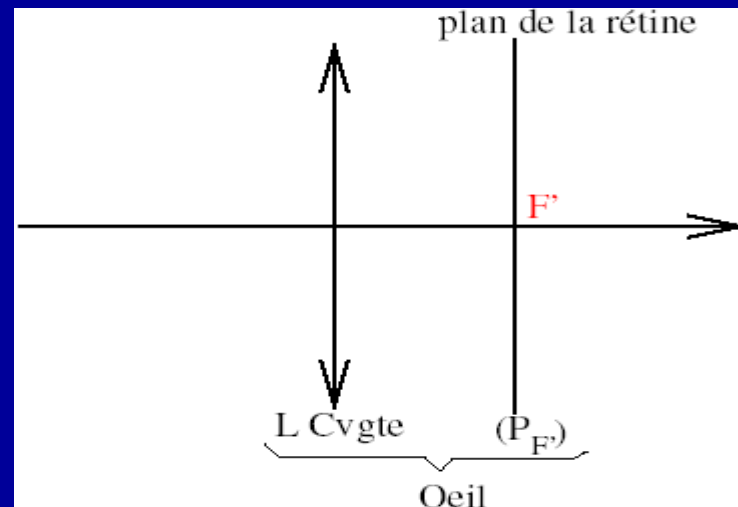


II-3: L'œil réduit :

Lors de la formation des images, l'ensemble des milieux transparents de l'œil se comporte comme une lentille mince convergente L ayant 15 mm entre le centre O et la rétine (voir schéma ci-dessous).



Cet ensemble composé par la rétine jouant le rôle d'un écran et le cristallin constitue l'œil réduit.

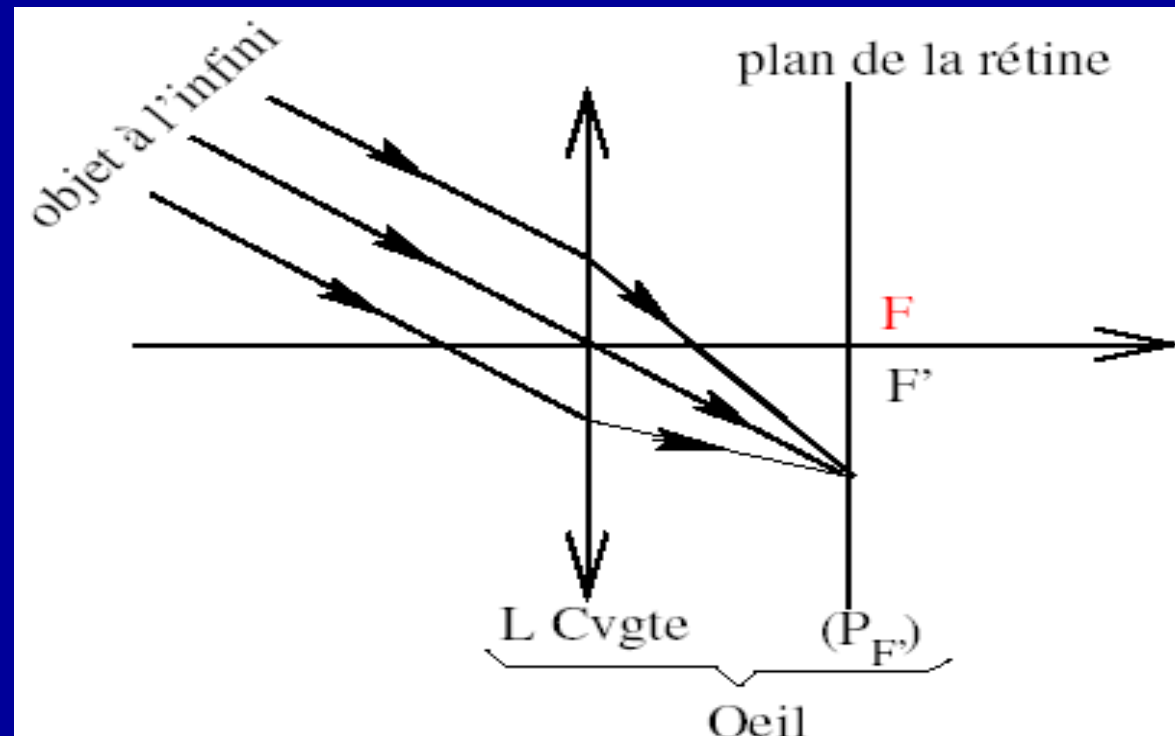


II-4: Représentation géométrique:

Nous allons réaliser deux types d'expériences :

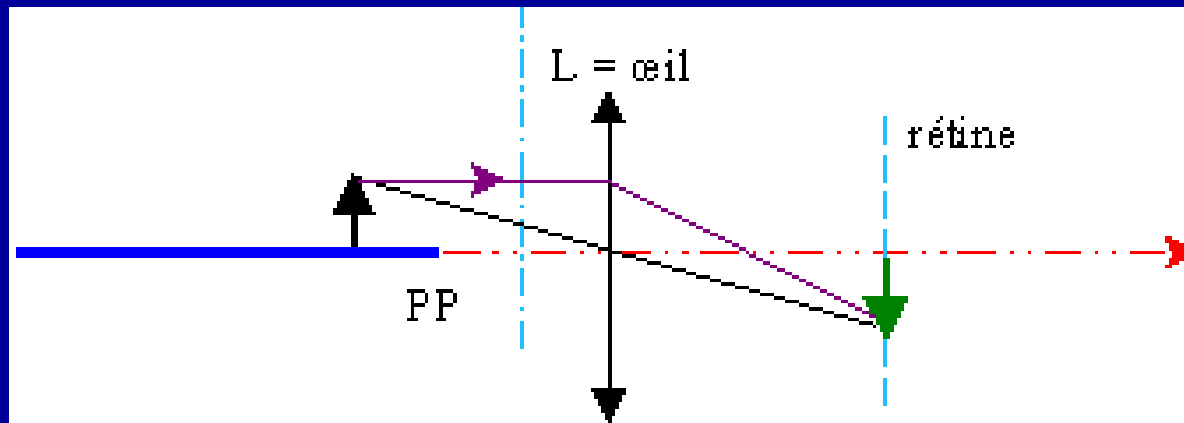
1^{ère} expérience :

Si on place des objets à observer à l'infini, l'œil sera considéré au repos et les images vont se former sur la rétine, qui sera confondue avec le plan focal image de l'œil réduit.



2^{ème} expérience :

Les objets situés à quelques centimètres de nos yeux, paraissent flous. Pour les voir nettement nous devons les déplacer un peu vers l'avant afin que l'œil puisse accommoder et ramener l'image sur la rétine.



II-5: Accommodation de l'œil :

L'accommodation est la faculté d'accroître la convergence du cristallin que possède un observateur.

Un œil normal au repos (qui n'accomode pas) voit nettement les objets si leurs images se forment sur la tache jaune (rétine). La distance maximale de vision distincte D correspond sur l'axe optique à un point R appelé **Punctum Remetum (PR)**.

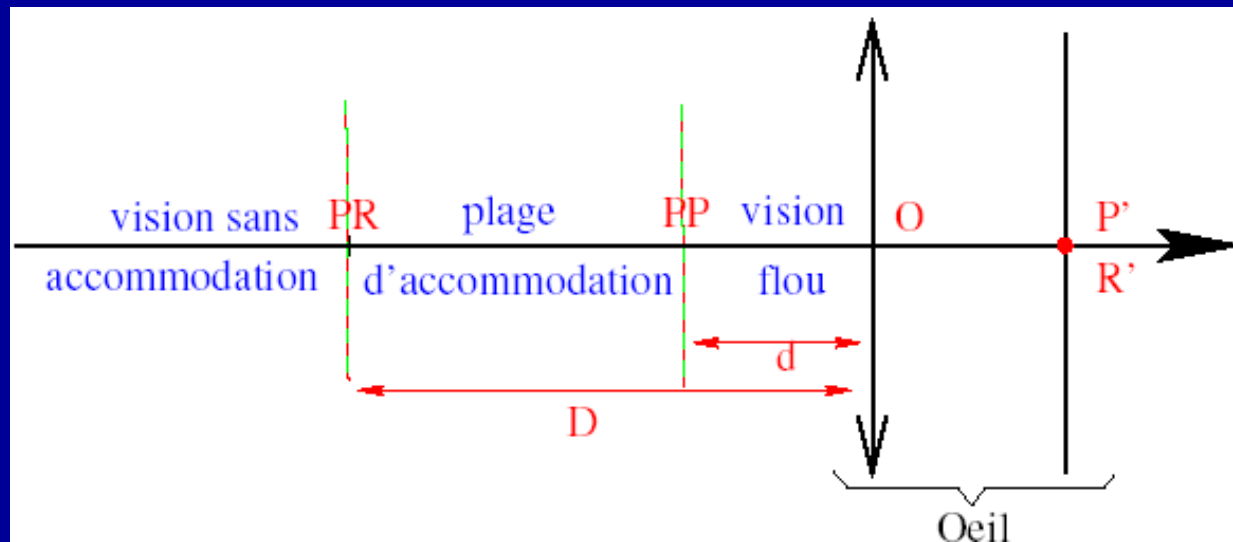
Quand un observateur accommode au maximum la convergence de son oeil augmente.
la distance minimale de vision distincte correspond à un point P appelé
Punctum Proximum (PP).

Pour un observateur ayant une vision normale:

le **PR** est situé à l'infini.

le **PP** est à une distance $d=25$ cm du centre optique de l'œil.

On peut représenter les deux zones où l'œil peut accommoder par le schéma suivant :



Les objets sont vus nettement s'ils sont placés entre le PP et le PR

Les distances d et D dépendent de l'âge des personnes:

si l'âge augmente: D diminue et d augmente

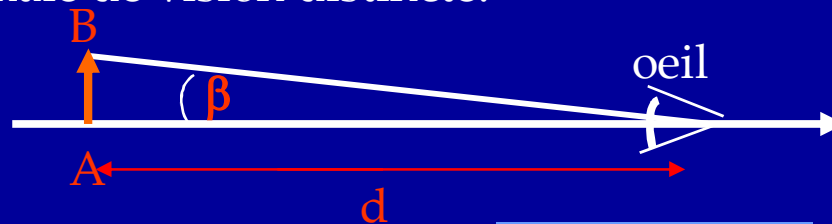
On définit par la suite:

$\frac{1}{d}$ et $\frac{1}{D}$: les distances dioptriques d'accommodation

$A = \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$: l'amplitude dioptrique de vision nette (dioptries)

II-6: l'Acuité visuelle:

C'est l'angle sous lequel l'œil peut voir nettement le plus petit objet possible à la distance minimale de vision distincte.



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{d}$$

AB est petit

$$\operatorname{tg} \beta \approx \beta = \frac{AB}{d}$$

III- Défauts de l'œil et leurs corrections

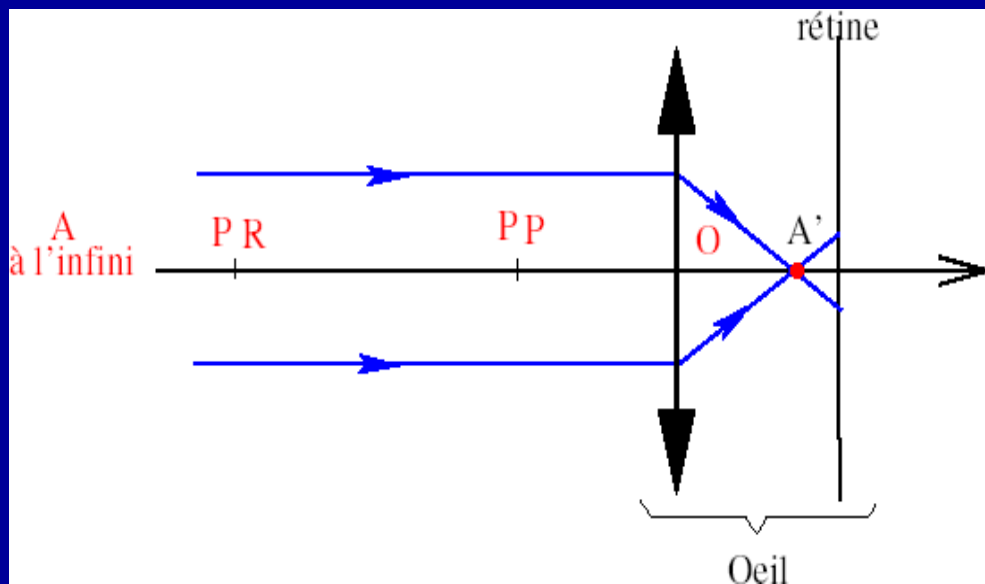
Un œil peut présenter des anomalies et ses capacités d'accommodation se trouvent modifiées. On traitera ici les défauts tels que : la myopie, l'hypermétropie et la presbytie

III-1 Myopie:

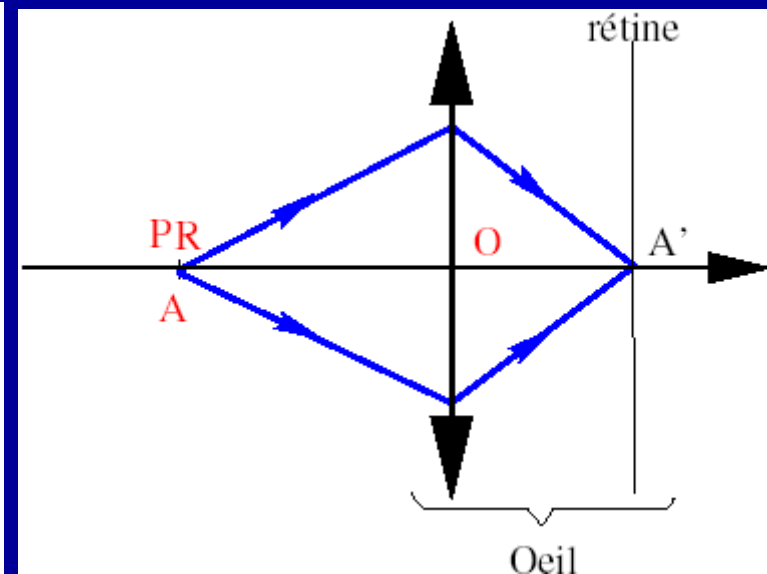
L'œil (cristallin) est trop convergent, même quand il est repos. L'image d'un point à l'infini se forme sur son plan focal image F' qui se situe en avant de la rétine.

Le PP est plus proche de l'œil ($d < 15$ cm) et le PR est réel et à distance finie

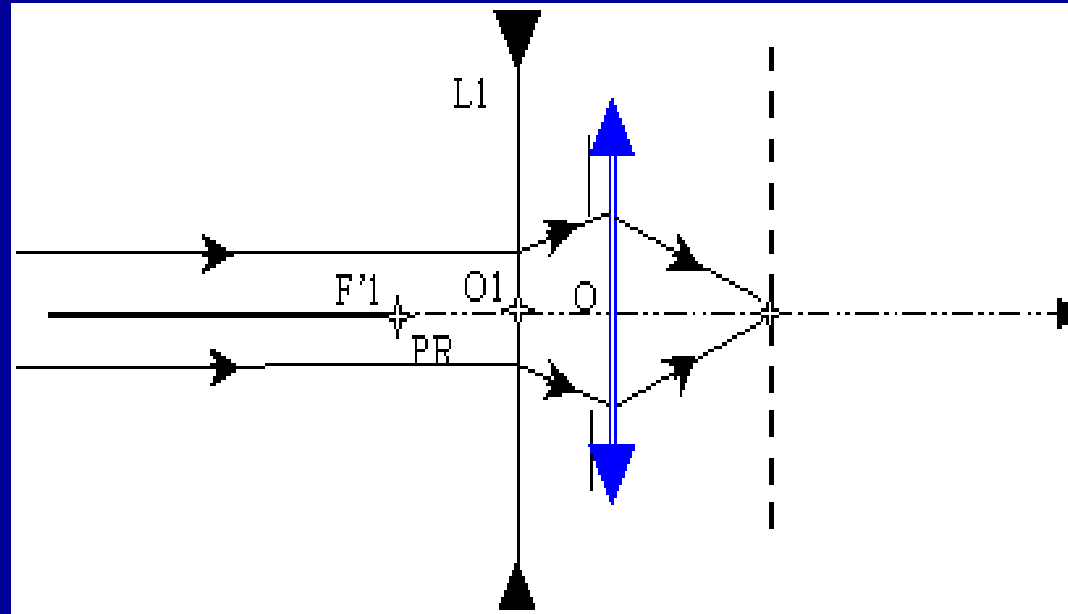
Vision à l'infini



Point sur le PR



Correction: on place devant l'œil une lentille divergente qui donne d'un point situé à l'infini une image située sur le PR, c'est-à-dire de telle sorte que le PR soit confondu avec le foyer image de lentille correctrice.

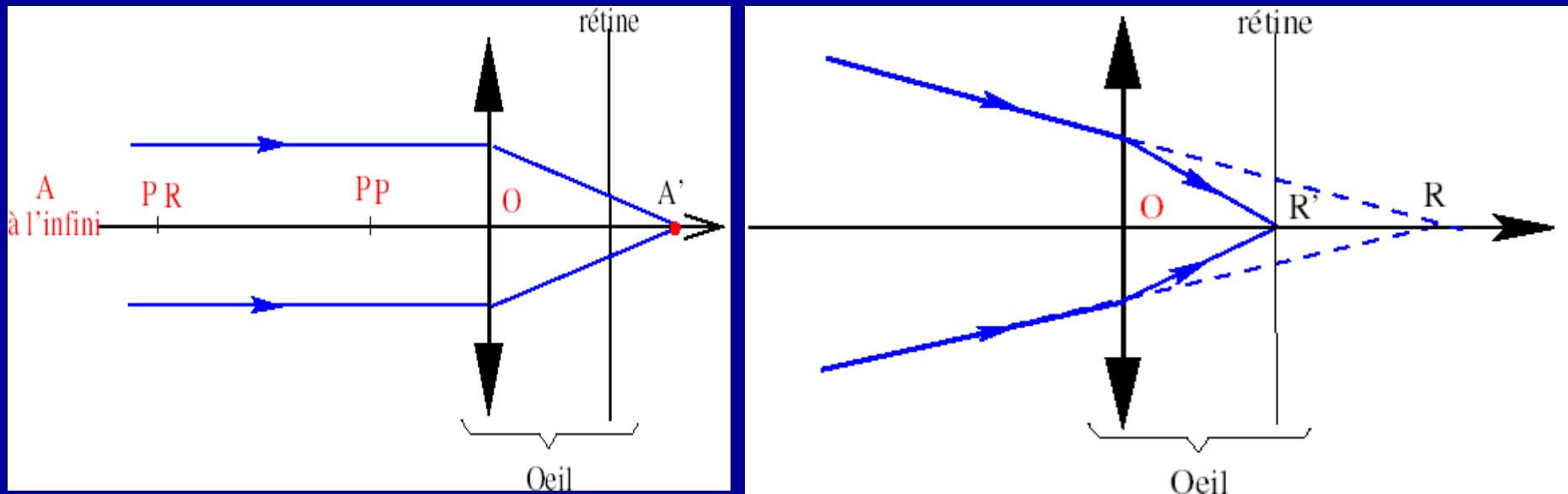


oeil myope
corrigé

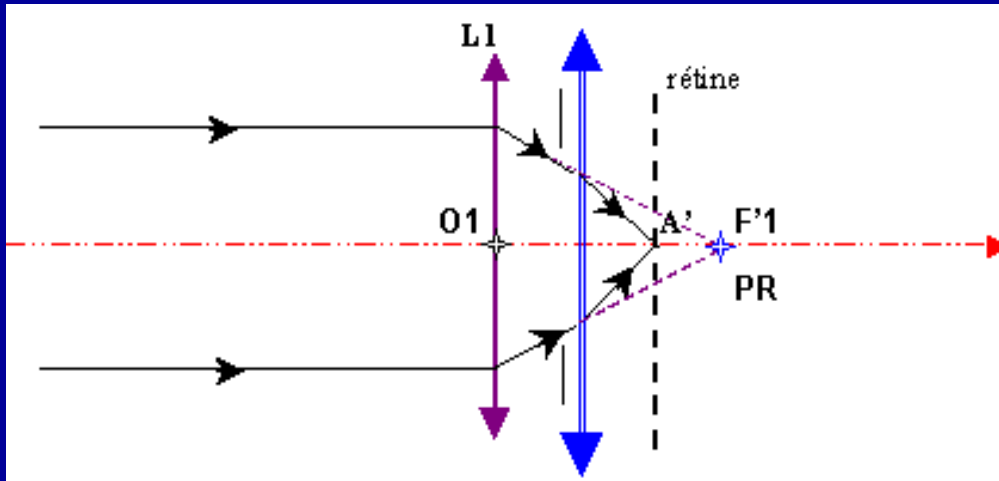
Pour un objet situé à l'infini et avec une lentille divergente L1, l'image est à nouveau sur la rétine.

III- 2 L'hypermétropie

L'œil (cristallin) n'est pas assez convergent. L'image d'un point à l'infini se forme sur son plan focal image F' qui se situe en arrière de la rétine. L'œil doit accommoder pour voir des objets à l'infini. Le **PR est donc virtuel** et le **PP est peu éloigné** que celui d'un œil normal.



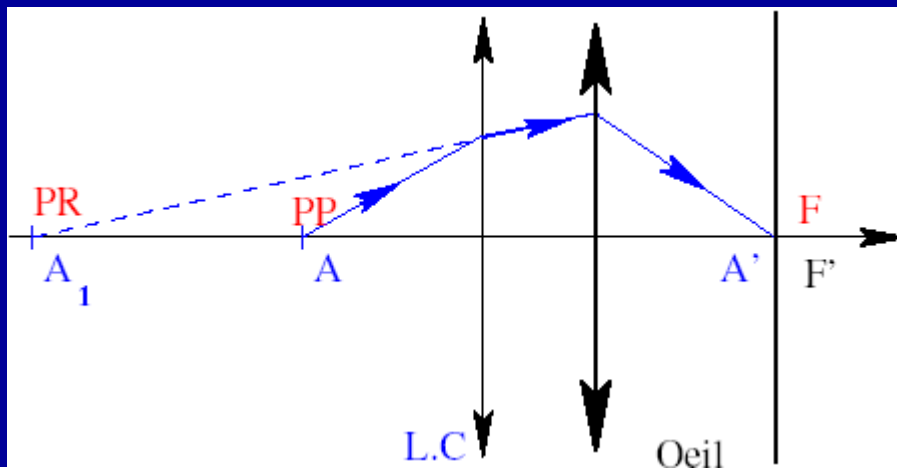
Correction: On place devant l'œil une lentille convergente qui permet de voir sans accommodation et qui donne d'un point à l'infini une image au PR. La lentille est placée de telle sorte que son foyer image le PR.



Pour un objet situé à l'infini et avec une lentille convergente L1, l'image est à nouveau sur la rétine.

III-3 La presbytie:

Elle se définit comme la baisse de la faculté d'accommodation d'un oeil. Elle est due au vieillissement de l'œil et peut affecter des yeux normaux, myopes ou hypermétropes. Cette anomalie se traduit par un éloignement du PP qui se rapproche du PR. Un oeil presbyte voit nettement des objets éloignés et doit pouvoir compenser l'insuffisance de l'accommodation par l'emploi de lentilles convergentes.



La lentille correctrice donne du PP une image A_1 qui sera vue par l'œil presbyte.

IV – Qualités d'un instrument optique

Un instrument d'optique a pour but soit de rapprocher les objets lointains, soit d'observer les objets très petits situés à des distances finies. La qualité de l'image obtenue à travers un instrument d'optique est fonction des performances de cet instrument.

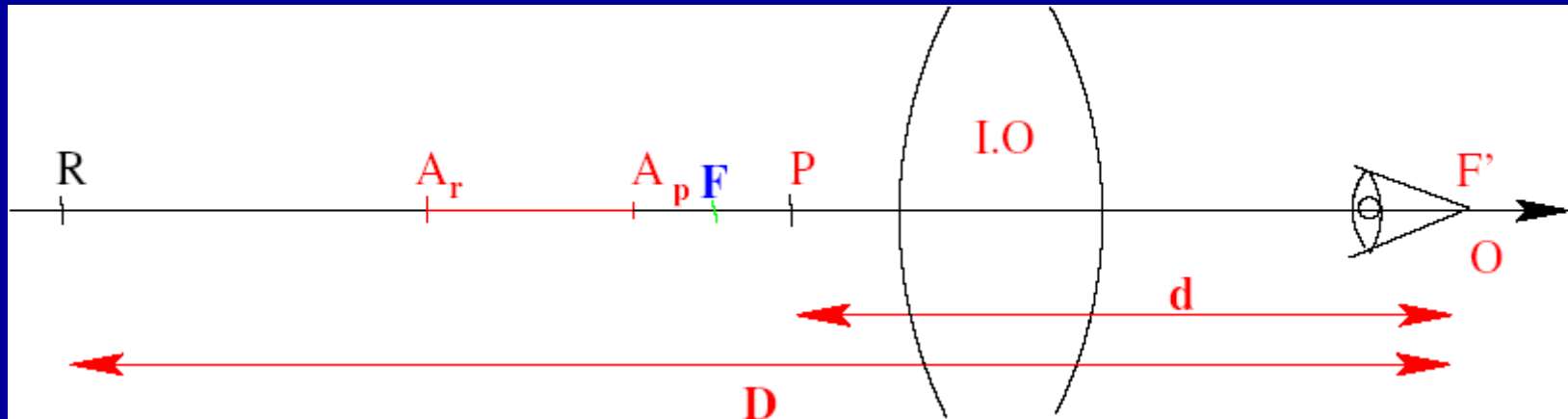
IV-1 Latitude de mise au point:

Soit un instrument d'optique (I.O) de distances focales f et f' et un objet AB placé devant l'instrument optique qui en donne une image A_1B_1 . c'est cette image qui jouera le rôle d'objet par l'observateur.

$$AB \xrightarrow{\text{I.O}} A_1B_1 \xrightarrow{\text{œil}} A'B'$$

Pour que l'image $A'B'$ soit vue nettement par l'observateur, il faut que l'objet A_1B_1 (image donnée par l'I.O) soit entre le PP et le PR de l'œil. Ces points correspondent à certaines positions de l'objet AB sur l'axe principale: A_r et A_p

$$\begin{array}{l} A_r \xrightarrow{\text{I.O}} R \\ A_p \xrightarrow{\text{I.O}} P \end{array}$$



En conclusion si un objet est situé sur le segment ArAp alors l'image sera située entre le PP et PR et donc l'œil peut l'intercepter nettement.

La quantité $A_r A_p$ est appelé latitude de mise au point de l'instrument optique ou latitude d'accommodation de l'œil.

$$\overline{A_r A_p} = \overline{A_r F} + \overline{F A_p}$$

or

$$\begin{aligned} A_r &\xrightarrow{\text{I.O}} R \\ A_p &\xrightarrow{\text{I.O}} P \end{aligned}$$

La formule de Newton donne:

$$\begin{cases} \overline{F A_r} \cdot \overline{F' R} = f \cdot f' \\ \overline{F A_p} \cdot \overline{F' P} = f \cdot f' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overline{F A_r} = \frac{f \cdot f'}{\overline{F R}} \\ \overline{F A_p} = \frac{f \cdot f'}{\overline{F' P}} \end{cases}$$

Donc:

$$\overline{A_r A_p} = f.f' \left(\frac{1}{\overline{F'P}} - \frac{1}{\overline{F'R}} \right)$$

or:

$$F' \equiv 0 \Rightarrow \overline{F'P} = \overline{OP} = -d \quad \text{et} \quad \overline{F'R} = \overline{OR} = -D$$

d'où

$$\overline{A_r A_p} = -f.f' \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

$$\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = A$$

Amplitude dioptrique de vision

soit:

$$\overline{A_r A_p} = -A.f.f'$$

IV-2 Grandeur de l'image: grandissement, grossissement, puissance.

La définition choisie pour chiffrer cette qualité sera fonction du type de l'instrument.

a- Instrument objectif

pour cet instrument d'optique, **l'image est réelle** et donc c'est sa longueur $A'B'$ qui a un sens physique et on distingue deux cas:

➤ Objet proche:

l'instrument optique sera caractérisé par son grandissement linéaire.

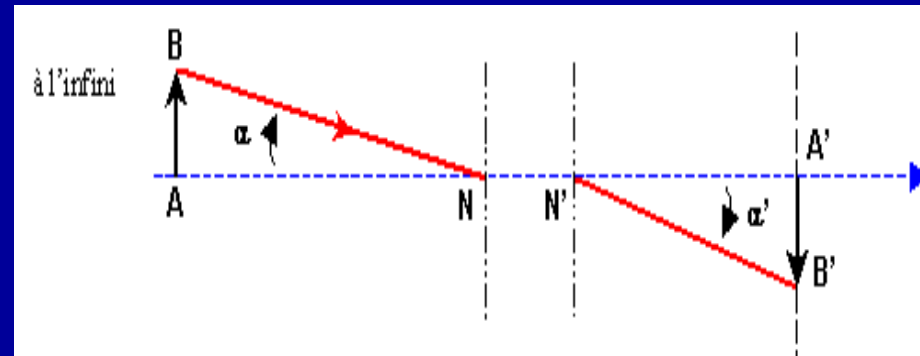
$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

➤ Objet à l' ∞ :

C'est le diamètre apparent α de l'objet qui a un sens. l'instrument optique sera caractérisé par le rapport:

$$f = \frac{\overline{A'B'}}{\alpha}$$

f: distance focale de l'I.O



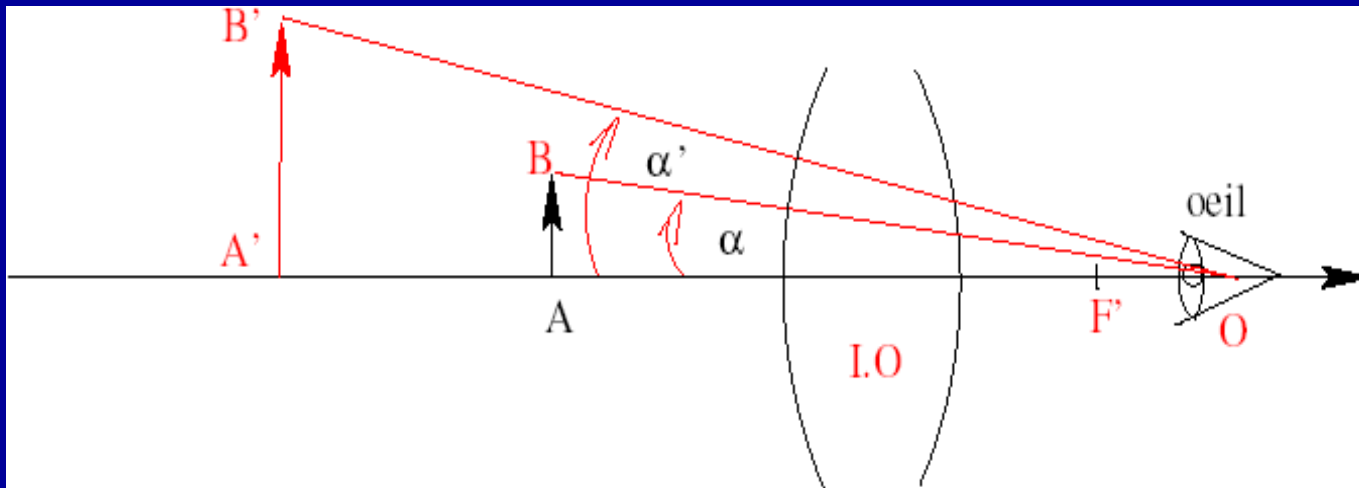
b- Instrument surjectif (subjectif)

pour cet instrument d'optique, l'image est virtuelle et l'œil ne sera sensible qu'au diamètre apparent α' de ce qu'il voit. On distingue deux cas:

➤ Objet proche (genre Microscope, Loupe)

la longueur de l'objet a un sens. L'instrument optique sera caractérisé par son puissance:

$$P = \frac{\alpha'}{AB} \quad \text{en dioptries}$$



Calculons P:

soient f' la distance focale image de l'I.O , F' son foyer image et O le centre optique de l'œil qui examine l'image (supposé normal).

$$\text{tg}\alpha' \approx \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A'O}} \longrightarrow P = \frac{\alpha'}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \frac{1}{\overline{A'O}}$$

avec $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \gamma$ grandissement linéaire de l'I.O

on a $P = \frac{\gamma}{\overline{A'O}}$

or pour un système centré $\gamma = \frac{\overline{A'F'}}{f'} = \frac{\overline{A'O} + \overline{OF'}}{f'}$

d'où $P = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{\overline{OF'}}{\overline{OA'}} \right)$

C'est l'expression de la puissance d'un Instrument optique dans le cas général.

Elle dépend de l'observateur qui utilise l'instrument optique. Deux cas sont possibles:

- l'œil de l'observateur est au foyer F' de l'I.O ($F' \equiv O$)
- l'œil est normal et n'accommode pas: ($A'O$ tend vers l'infini)

Dans les deux cas on dit que la puissance est **intrinsèque** est vaut:

$$P_i = \frac{1}{f'} \text{ dioptries}$$

➤ **Objet éloigné (genre Télescope)**

l'objet ne peut être caractérisé que par le diamètre apparent α sous lequel il sera vu à l'œil nu. Dans ce cas l'instrument sera caractérisé par le rapport $G = \alpha' / \alpha$ appelé grossissement de l'instrument.

or $\text{tg}\alpha \approx \alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}}$ \longrightarrow $G = \alpha' \frac{\overline{AO}}{\overline{AB}}$

si l'objet est à distance finie (**distance minimale de vision distincte d**) alors:

$$\alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}}$$



$$G = \alpha' \frac{d}{\overline{AB}}$$

or

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



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

le grossissement est dit commercial si la puissance P est intrinsèque et d=0,25 m soit:

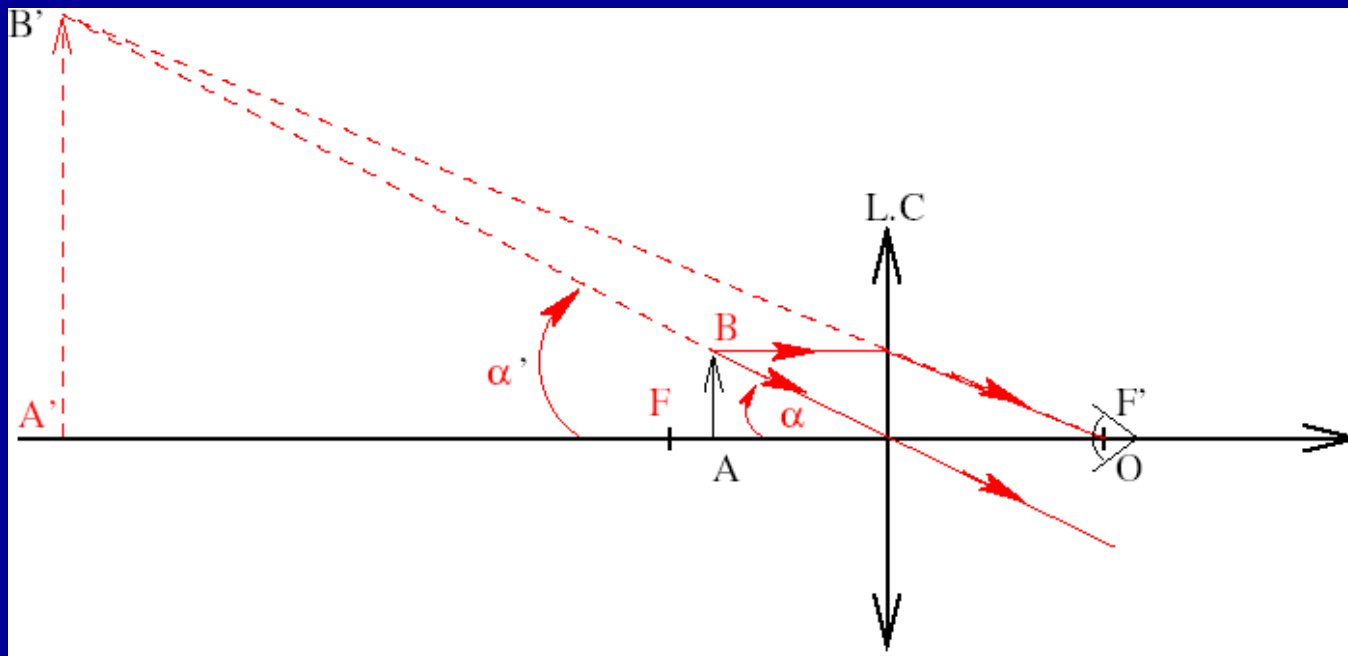
$$G_c = P_i \cdot 0,25 = \frac{P_i}{4} = \frac{1}{4f'}$$

V- La loupe:

La loupe est un instrument surjectif constitué d'une lentille mince ou épaisse convergente destiné à examiner des objets proches et petits qui ne sont pas visible à l'œil nu.

Son rôle consiste à augmenter le diamètre apparent de l'objet à examiner par l'œil. L'objet à examiner doit être placé **entre le centre optique** de la lentille et son **plan focal objet (P_F)** et proche du foyer objet F.

On schématise une loupe par :



La loupe donne d'un objet réel, placé à côté du foyer objet, une image virtuelle droite agrandie.

Caractéristiques:

a- mise au point

La mise au point se fait en déplaçant l'objet par rapport à la loupe qui reste fixe.
La latitude de mise au point ou profondeur de champs est donné par:

$$\ell = \overline{A_r A_p} = f'^2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = f'^2 . A$$

f' : est la distance focale image de la lentille (loupe). $1 \leq f' \leq 10 \text{ cm}$

b- puissance

Par définition, la puissance d'une loupe est donné par le rapport:

$$P = \frac{\alpha'}{\overline{AB}} \text{ dioptries}$$

α' angle sous lequel l'observateur voit l'image $A'B'$ de l'objet AB à travers la loupe.
(en radians)

D'après § IV-2 on a:

$$P = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{\overline{OF'}}{\overline{OA'}} \right)$$

la puissance intrinsèque est:

$$P_i = \frac{1}{f'} \text{ dioptries}$$

c- grossissement

Le grossissement d'une loupe est donné par le rapport:

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

d'après § IV-2 on a:

$$G = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{\overline{OF'}}{\overline{OA'}} \right) \times d$$

la grossissement commercial est:

$$G_c = P_i \cdot 0,25 = \frac{P_i}{4} = \frac{1}{4f'}$$

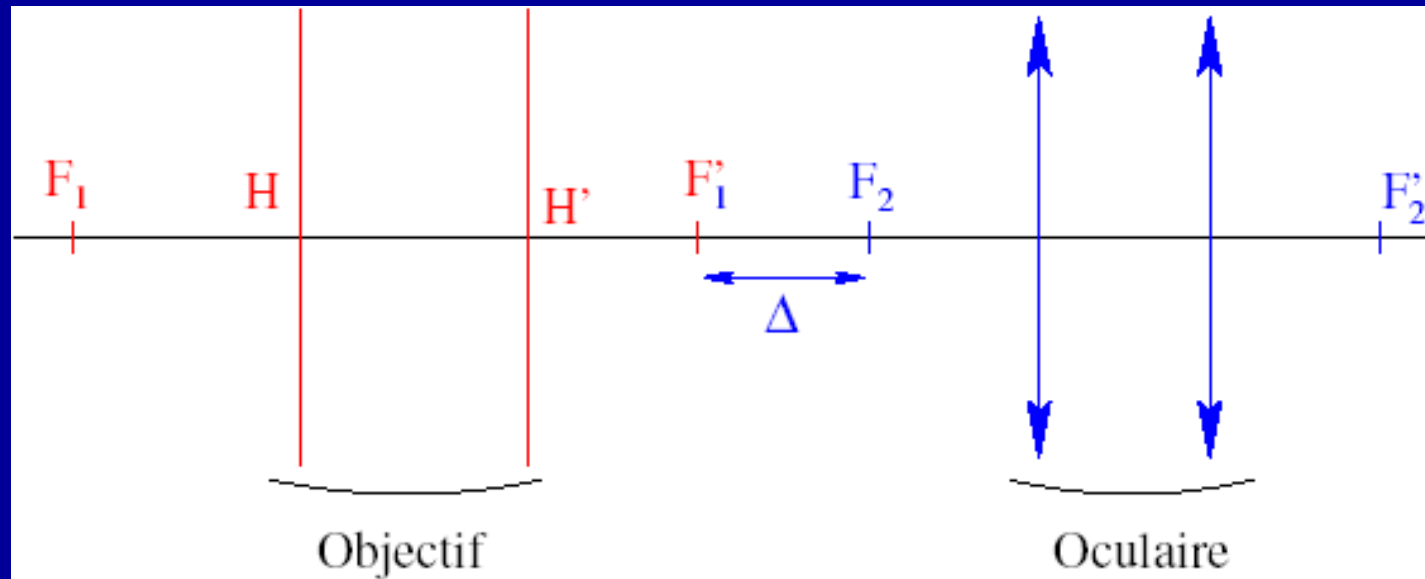
VI – Le microscope :

VI-1 Description :

Le microscope est un instrument d'optique subjectif très grossissant. Il est construit pour l'observation d'objets dont les dimensions sont trop petites situés à distance finie et invisible à l'œil nu. Il a le même rôle que la loupe. Il comprend deux systèmes optiques :

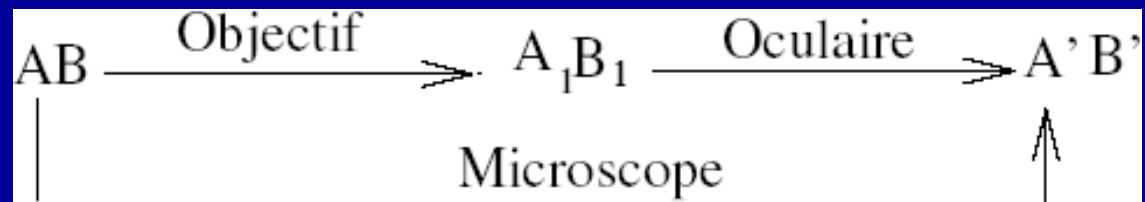
➤ **Un objectif** : Système placé près de l'objet, très épais convergent, constitué de plusieurs lentilles et qui donne de l'objet AB une image réelle A_1B_1 fortement agrandie et d'une grande netteté. Sa distance focale est de quelques millimètres.

➤ **Un oculaire** : Système derrière lequel se place l'œil (joue le rôle d'une loupe) et donne de l'image A_1B_1 donné par l'objectif, une image virtuelle définitive $A'B'$. Il comprend au moins deux lentilles et ayant pour distance focale quelques centimètres. La distance objectif oculaire se repère par l'intervalle optique $\Delta = F'_1F_2$. Il est d'environ 18 cm.



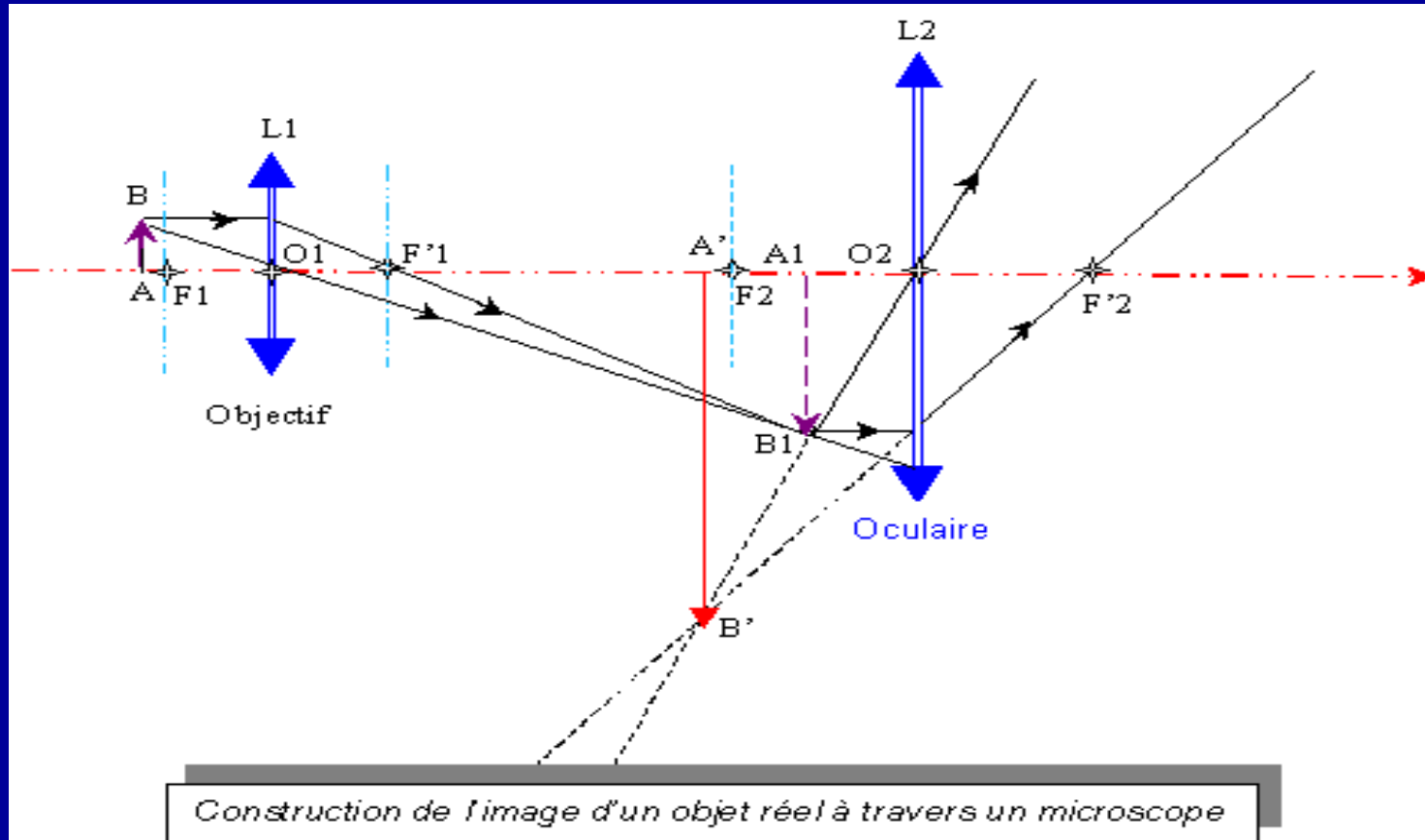
Objectif: système centré

Oculaire: doublet = système centré



VI-2 Construction de l'image :

Un microscope est une association de deux systèmes centrés qui sont un oculaire et un objectif. Un schéma simplifié d'un tel microscope est le suivant :



L'objet est généralement **placé en avant** du foyer objet de l'objectif. A_1B_1 est une image réelle renversée beaucoup plus grande que AB . $A'B'$ est l'image finale renversée, virtuelle et sera perçue par l'œil.

Le microscope étant un système centré (association de deux systèmes centrés), on peut alors déterminer ces éléments cardinaux en utilisant les formules de l'association des systèmes centrés.

Les foyers principaux objet et image:

$$\overline{F_1 F} = \frac{f_1 \cdot f'_1}{\Delta} \quad \overline{F'_2 F'} = -\frac{f_2 \cdot f'_2}{\Delta}$$

Les distances focales objet et images:

$$f = \overline{HF} = \frac{f_1 \cdot f_2}{\Delta} \quad f' = \overline{H'F'} = -\frac{f'_1 \cdot f'_2}{\Delta}$$

f_1, f'_1 et f_2, f'_2 sont les distances focales objets et images respectivement de l'objectif et de l'oculaire.

f' est petite et négative ce qui implique que le microscope est un système **divergent**.

Mise au point :

Pour un microscope, l'œil observe à travers l'oculaire et l'image formée doit être située entre le **PP** et **PR** de cet œil. Cette condition impose à l'objet un déplacement dans un intervalle $A_r A_p$, appelé latitude de mise au point et qui est généralement très faible.

$$\ell = \overline{A_r A_p} = -f.f' \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = -f.f'.A \approx 2 \mu\text{m}$$

f, f' sont les distances focales du microscope

Puissance:

Par définition:

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

→

$$P = \frac{\alpha'}{\overline{A_1 B_1}} \times \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{AB}}$$

soit
$$P_{\text{mic}} = P_{\text{oc}} \cdot \gamma_{\text{obj}}$$

La puissance d'un microscope est égale au produit de la puissance de son oculaire par le grandissement linéaire de son objectif.

si la puissance de l'oculaire est intrinsèque, alors:

$$P_{\text{mic}} = \frac{1}{f'_{\text{oc}}} \cdot \gamma_{\text{obj}}$$

Autre expression de P_{mic} :

si on considère le microscope comme étant un Instrument Optique, alors sa puissance est:

$$P_{\text{mic}} = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{\overline{OF'}}{\overline{OA'}} \right)$$

f' : distance focale image du microscope et F' son foyer

Si l'œil est placé au foyer image du microscope alors:

$$P_{\text{mic}} = \frac{1}{|f'|} \quad \text{soit} \quad P_{\text{mic}} = \frac{\Delta}{f'_1 \cdot f'_2}$$

Remarque: on prend la valeur absolue de f' car la puissance P est >0

Grossissement:

Par définition:

$$G_{\text{mic}} = \frac{\alpha'}{\alpha} = P_{\text{mic}} \cdot d$$

si la puissance du microscope est intrinsèque et $d=0,25 \text{ m}$, alors:

$$G_{\text{C mic}} = P_i \cdot 0,25 = \frac{P_i}{4} \quad \text{soit} \quad G_{\text{C mic}} = \frac{P_{\text{oc}} \cdot \gamma_{\text{obj}}}{4} = G_{\text{oc}} \cdot \gamma_{\text{obj}}$$

Le grossissement commercial du microscope est le produit du grossissement commercial de l'oculaire par le grandissement linéaire de son objectif.

Grandissement linéaire:

$$\gamma_{\text{mic}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} \times \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}}$$

soit

$$\gamma_{\text{mic}} = \gamma_{\text{oc}} \cdot \gamma_{\text{obj}}$$

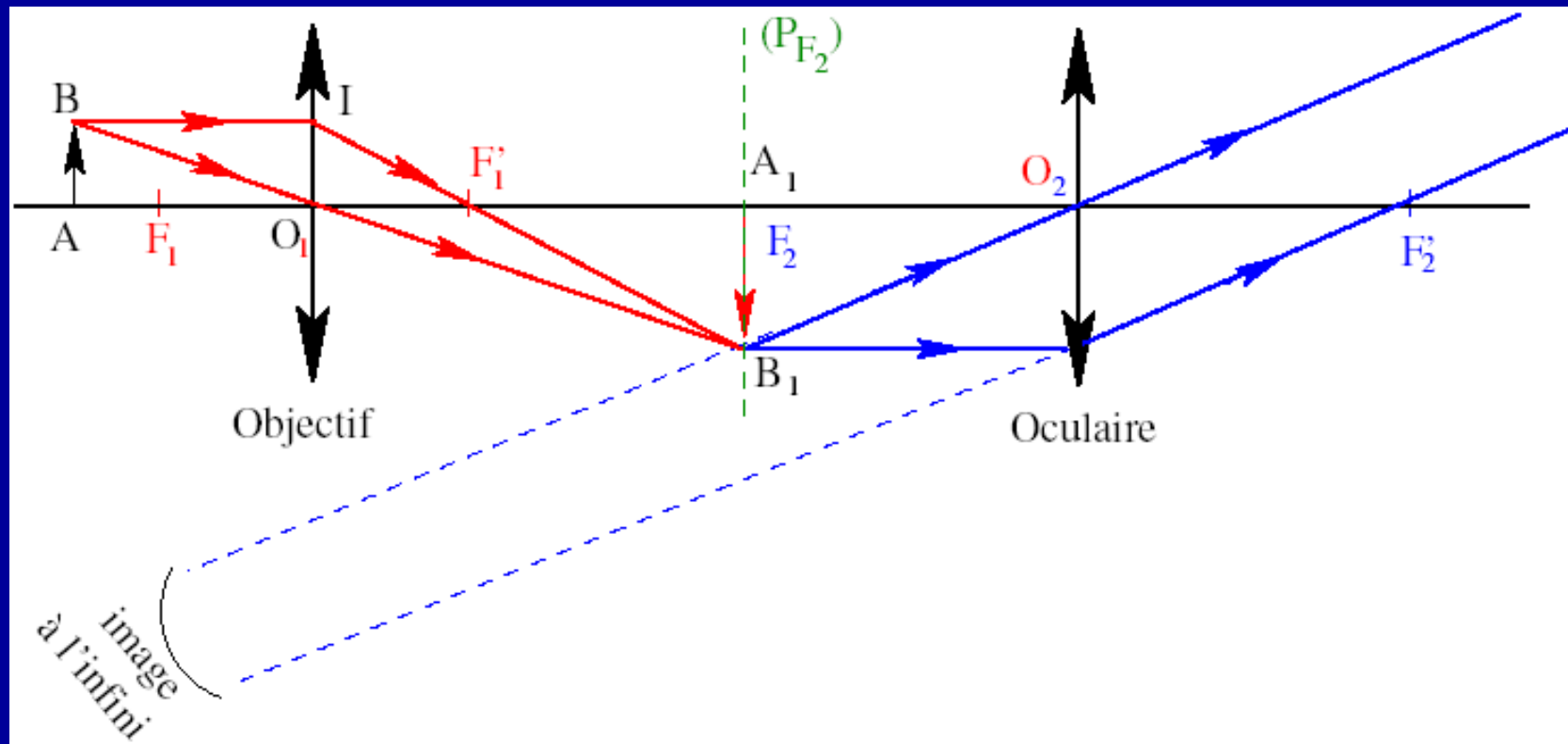
Cas particulier: la vision à l'infini :

Pour un œil normal le cas de vision à l'infini évite la fatigue due à l'accommodation.

Pour le microscope la vision à l'infini se présente lorsque l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif est située sur le plan focale objet de l'oculaire P_{F_2} . Dans ce cas l'image définitive $A'B'$ se trouve rejetée à l'infini et pour l'œil, cette image sera reçue sans effort ni accommodation.

Une bonne construction géométrique permet de déterminer la position de l'objet AB , qui normalement devra être situé au voisinage avant du foyer objet de l'objectif tel que $|O_1A| > |O_1F_{ob}|$.

On reprend, dans ce cas de vision à l'infini, toutes les formules établies qui s'avèrent les plus utilisées pour un microscope en prenant A_1B_1 situé dans le plan focal objet (P_{F_2}) de l'oculaire.



Les triangles $(IO_1F'_1)$ et $(F'_1A_1B_1)$ sont semblables avec $A_1 \equiv F_2$ (A_1B_1 est située sur le plan focal objet de l'oculaire P_{F_2}). On peut écrire :

$$\frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1I}} = \frac{\overline{F'_1F_2}}{\overline{F'_1O_1}} \quad \Rightarrow \quad \gamma_{\text{obj}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\Delta}{-f'_{\text{obj}}}$$

la puissance de l'oculaire est:

$$P_{oc} = \frac{1}{f'_{oc}}$$

donc la puissance intrinsèque du microscope est:

$$P_{mic} = P_{oc} \cdot \gamma_{obj} = \frac{1}{f'_{oc}} \times \left(- \frac{\Delta}{f'_{obj}} \right)$$

soit

$$P_{mic} = - \frac{\Delta}{f'_{oc} \cdot f'_{obj}} = \frac{1}{f'_{mic}}$$

On remarque que la puissance d'un microscope dans le cas de vision à l'infini est réduite à l'inverse de f'_{mic} qui représente la puissance intrinsèque P_i de cet instrument. C'est une grandeur qui ne dépend que des caractéristiques du microscope et non de l'œil.

Nous pouvons aussi montrer que :

$$G_{mic} = \frac{\alpha'}{\alpha} = P_{mic} \cdot d = P_{oc} \cdot \gamma_{obj} \cdot d$$

or

$$P_{oc} = \frac{1}{f'_{oc}} \text{ et } \gamma_{obj} = -\frac{\Delta}{f'_{obj}}$$

donc

$$G_{mic} = -\frac{\Delta}{f'_{oc} \cdot f'_{obj}} \cdot d = \frac{d}{f'_{mic}}$$

d'autre part:

$$\gamma_{mic} = \gamma_{oc} \cdot \gamma_{obj}$$

avec

$$\gamma_{obj} = \frac{\Delta}{-f'_{obj}}$$

et

$$\gamma_{oc} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{\overline{A'O_2}}{\overline{A_1O_2}} = \frac{\overline{A'O_2}}{\overline{F_2O_2}} = \frac{d}{f'_{oc}}$$

donc

$$\gamma_{mic} = \frac{d}{f'_{obj} \cdot f'_{oc}} = \frac{d}{f'_{mic}}$$



$$\gamma_{mic} = G_{mic}$$

dans le cas de la vision infinie, le grandissement linéaire et le grossissement commercial d'un microscope sont égaux.