

CHAPITRE VI Association d'éléments optiques

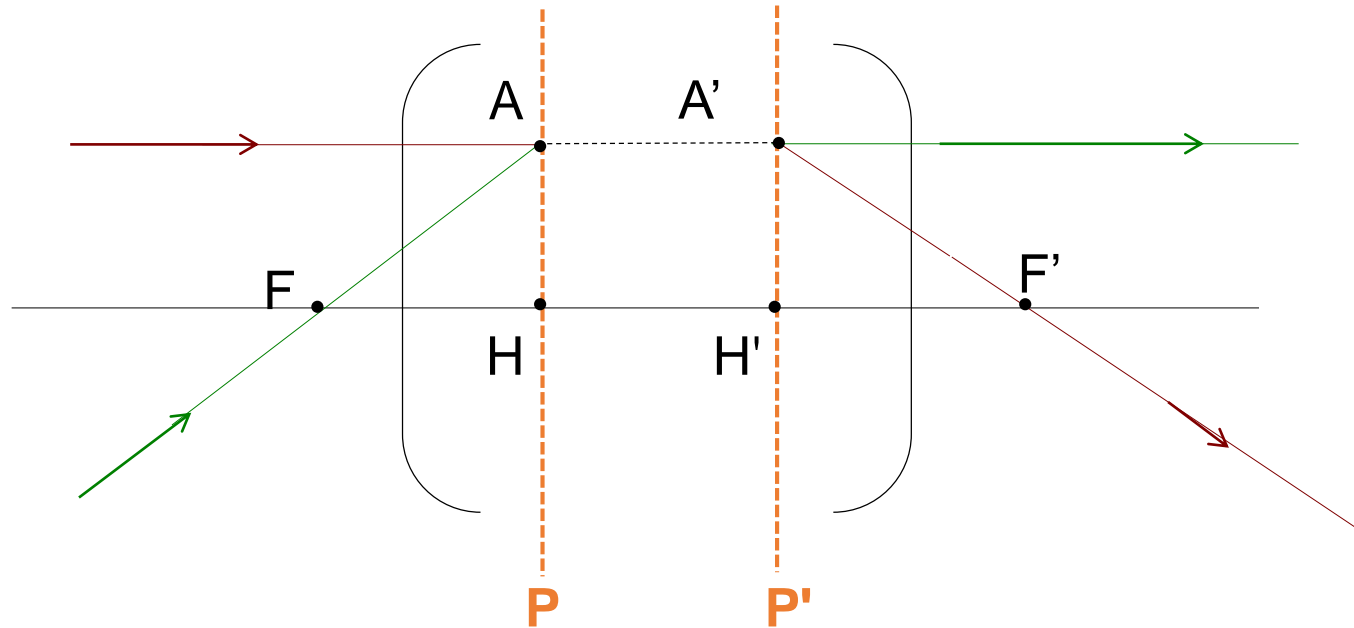
I Les systèmes centrés

1°) Définition

- Série de milieux transparents séparés par des dioptries et /ou des miroirs ayant le même axe optique
- Stigmatisme approché
- Aplanétisme

2°) Plans et points principaux – distances focales

Les plans principaux d'un système centré sont les plans conjugués (P,P') pour lesquels le grandissement transversal γ est égal à +1



Point principal objet H : intersection du plan principal objet P avec l'axe principal

Point principal image H' : intersection du plan principal image P' avec l'axe principal

Les distances focales d'un système centré sont définies par :

• Distance focale objet : $\mathbf{f} = \overline{\mathbf{HF}}$

• Distance focale image : $\mathbf{f}' = \overline{\mathbf{H}'\mathbf{F}'}$

3°) Plans et points antiprincipaux – points nodaux

Plans anti principaux : plans pour lesquels le grandissement transversal γ est égal à -1.

Les points anti principaux : intersections de l'axe optique et des plans anti principaux

Ils sont les symétriques des points principaux par rapports aux foyers

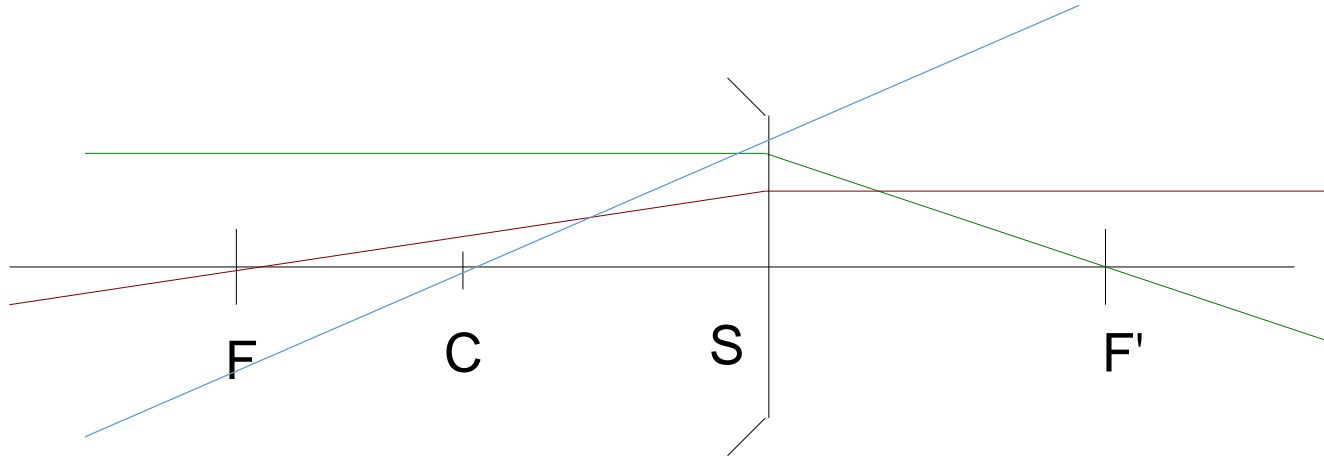
Points nodaux N et N' : points conjugués tels que le grossissement $G = + 1$

Tout rayon passant par N, émerge par N' parallèlement au rayon incident .

$$\overline{FN} = f \quad \text{et} \quad \overline{F'N'} = f'$$

Remarque : si les milieux extrêmes sont identiques : $H = N$ et $H' = N'$

Exemple : le dioptré sphérique

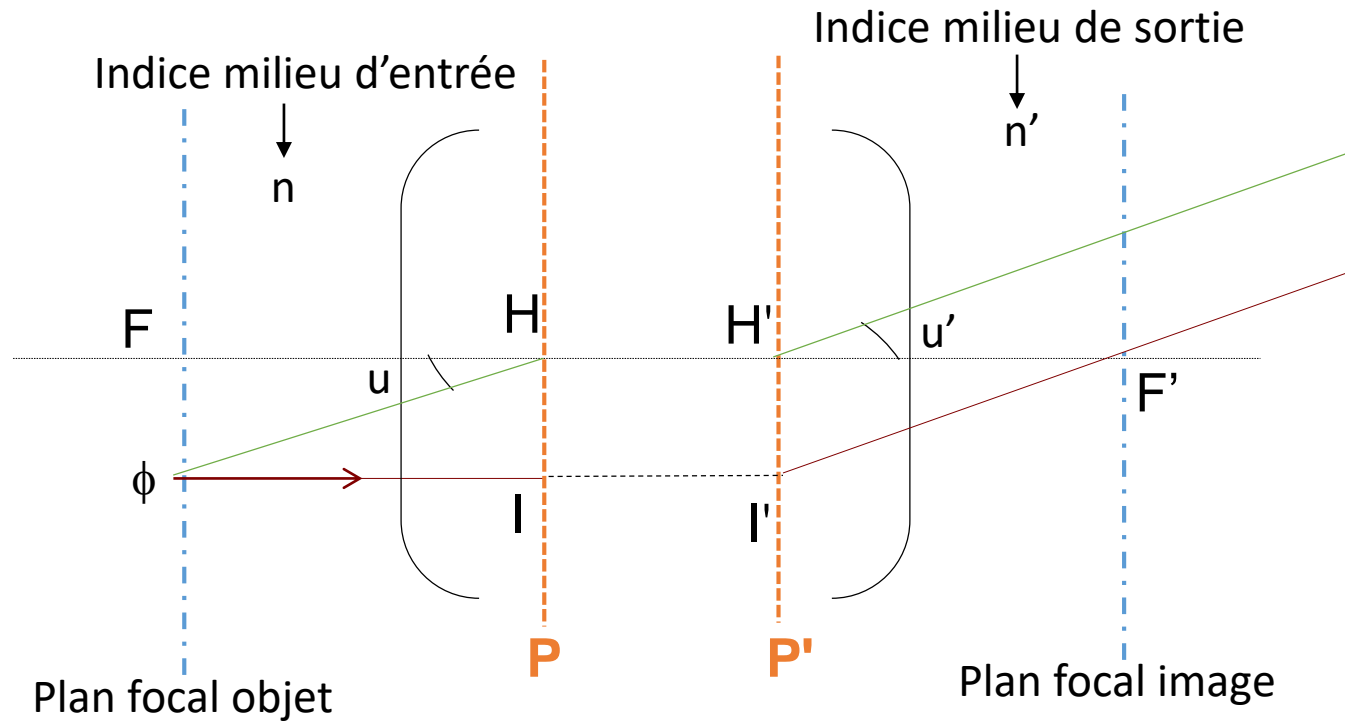


Les plans principaux (P,P') sont tangents en S au dioptré :

→ Les points principaux H et H' sont confondus en S

→ Les points nodaux N et N' sont confondus en C

4°) Construction géométrique

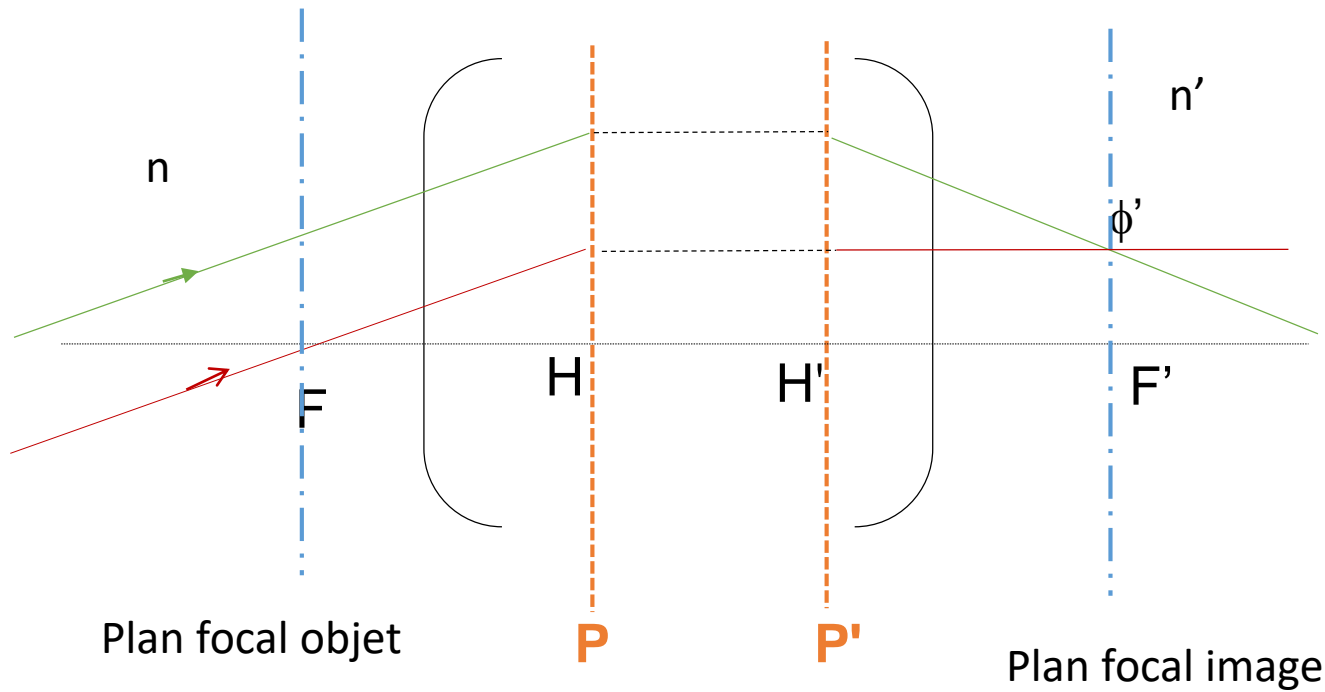


ϕ est un foyer secondaire objet

Deux rayons issus du même foyer secondaire objet ϕ , sont parallèles à la sortie du système

Relation d'Abbe : $n \cdot u = n' \cdot u'$ $\rightarrow n \cdot \frac{\overline{HI}}{\overline{HF}} = n' \cdot \frac{\overline{H'I'}}{-\overline{H'F'}}$

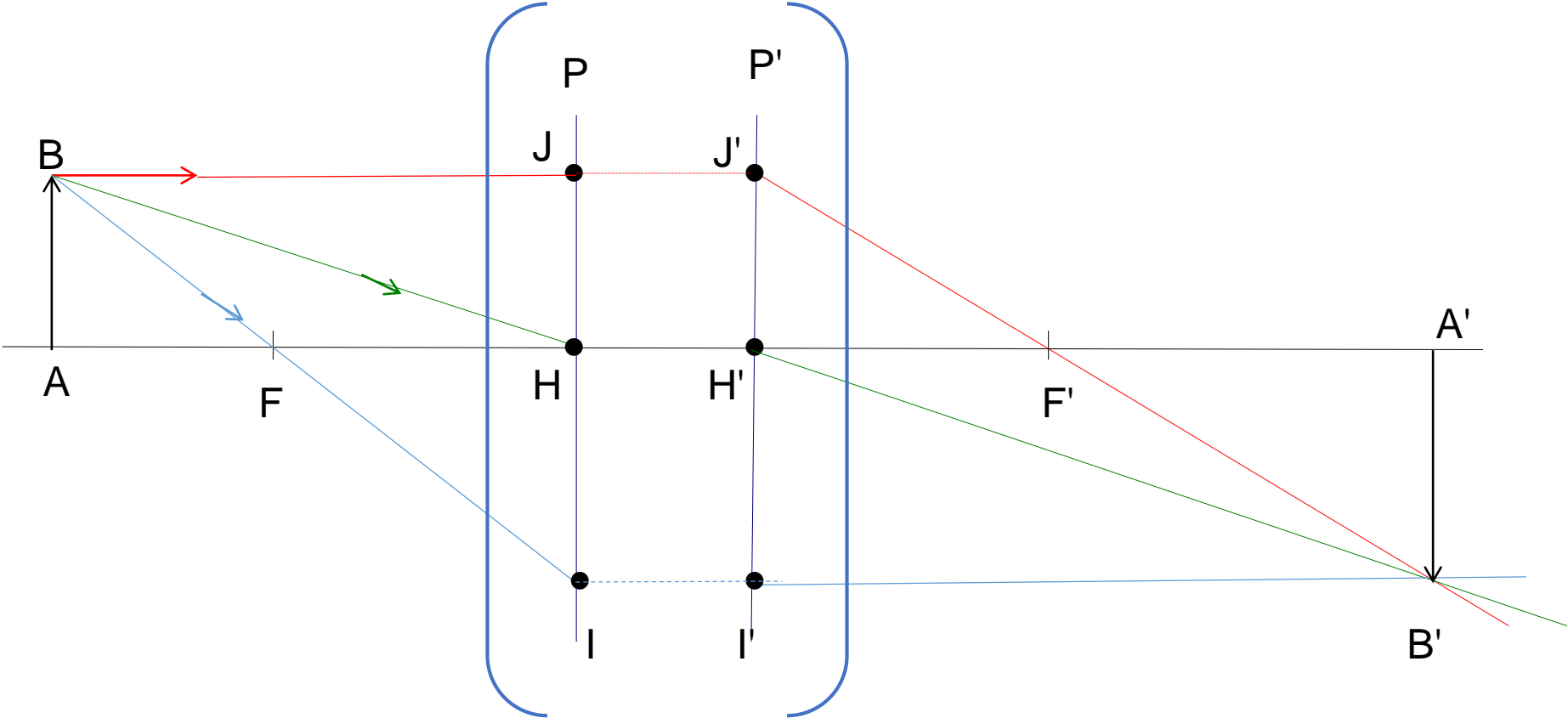
Comme $\overline{HI} = \overline{H'I'}$: $\frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} = \Phi$: Vergence du système



ϕ' est un foyer secondaire image

Deux rayons parallèles à l'entrée du système, convergent en sortie vers le même foyer secondaire image ϕ' .

Construction pour un objet étendu



5°) Relations de conjugaison

- Origine aux points principaux H et H' :

Si indice du milieu d'entrée n différent de celui du milieu de sortie n' : $\frac{n'}{H'A'} - \frac{n}{HA} = \Phi$

Relation de Descartes :
$$\frac{\overline{H'F'}}{\overline{H'A'}} + \frac{\overline{HF}}{\overline{HA}} = 1$$

- Origine aux foyers F et F'

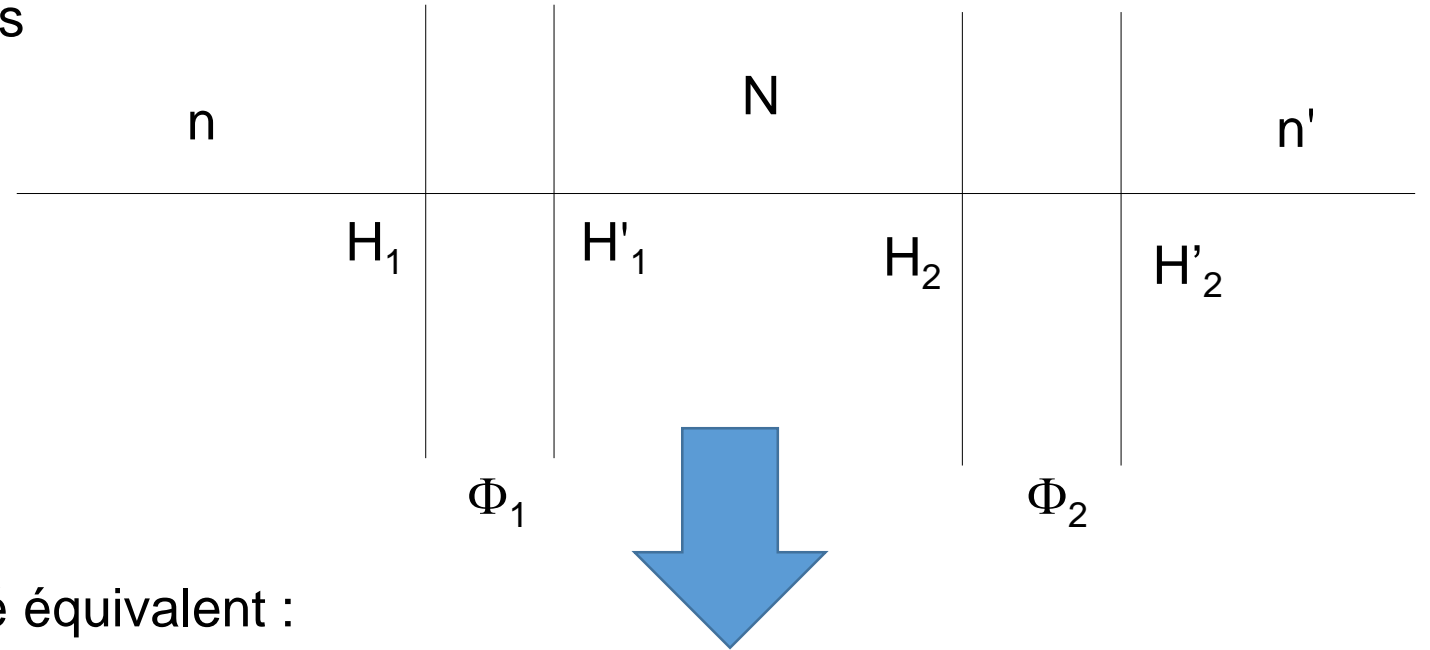
Relation de Newton :
$$\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = f \cdot f'$$

- Grandissement transversal :

$$\gamma = \frac{\overline{H'A'}}{\overline{HA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = -\frac{f}{\overline{FA}}$$

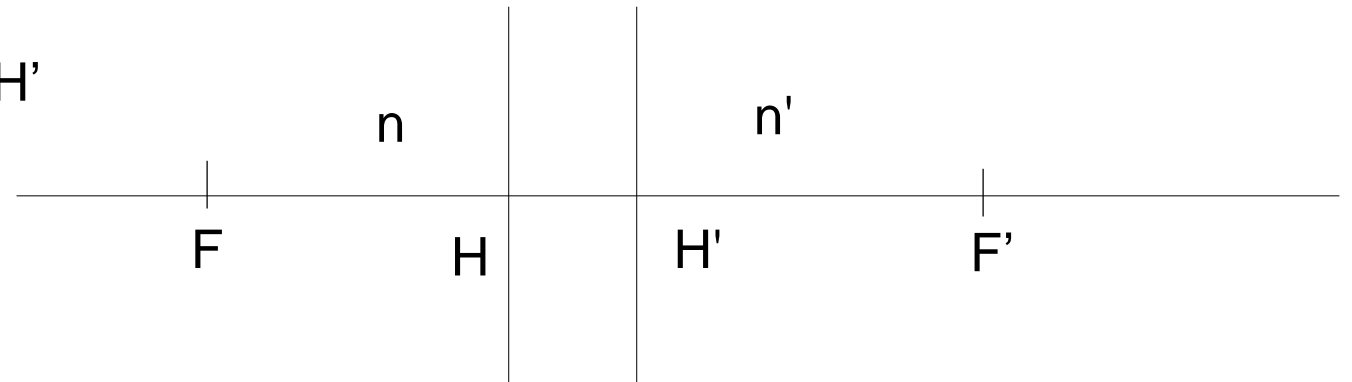
II Association de systèmes centrés

1°) Association de deux systèmes



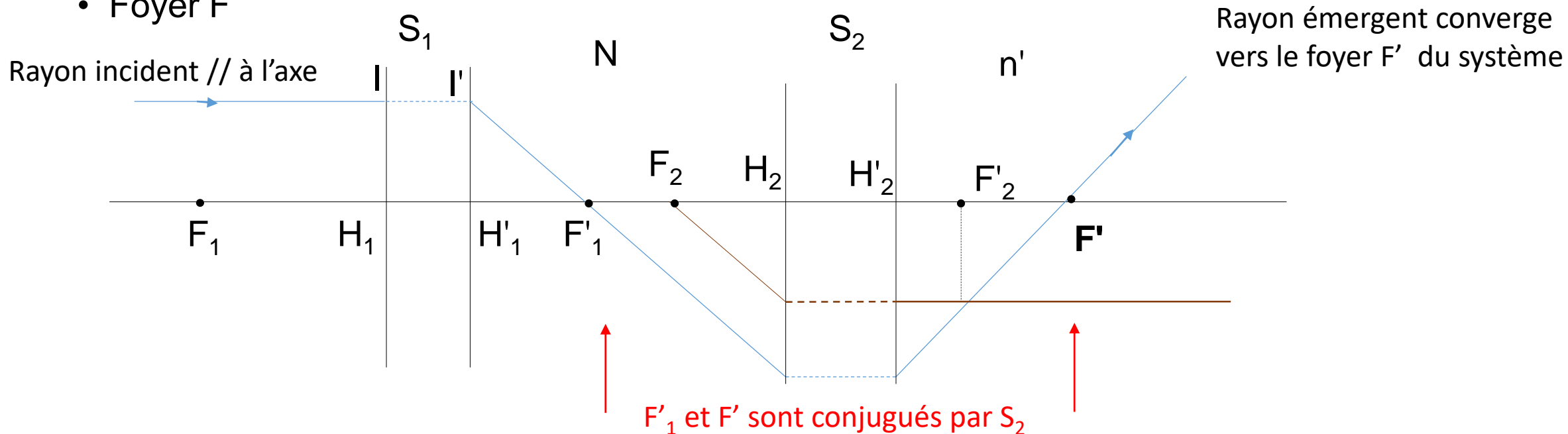
Détermination du système centré équivalent :

- Position des foyers F et F'
- Position des points principaux H et H'
- Vergence Φ



Position des foyers par construction :

- Foyer F'

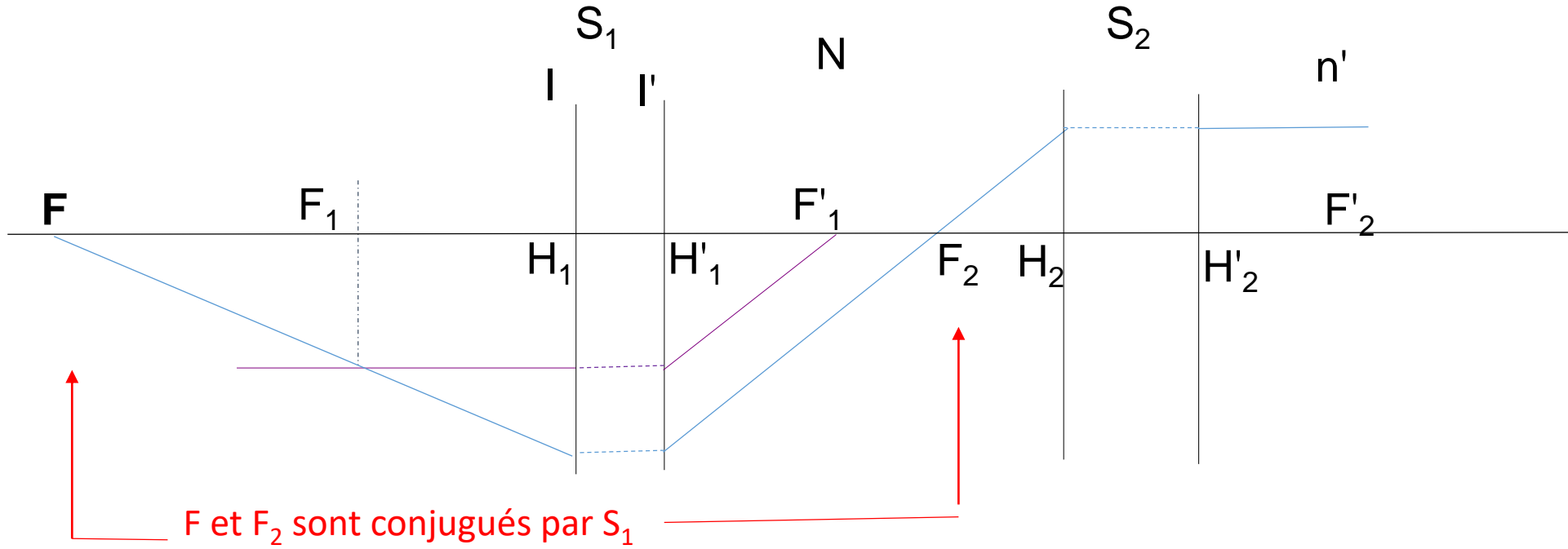


Relation de Newton : $\overline{F_2 F'_1} \cdot \overline{F'_2 F'} = f_2 \cdot f'_2$

$\overline{F'_1 F_2} = \Delta$: intervalle optique

$$\overline{F'_2 F'} = -\frac{f_2 \cdot f'_2}{\Delta}$$

- Foyer F



Relation de Newton : $\overline{F_1 F} \cdot \overline{F'_1 F_2} = f_1 \cdot f'_1$

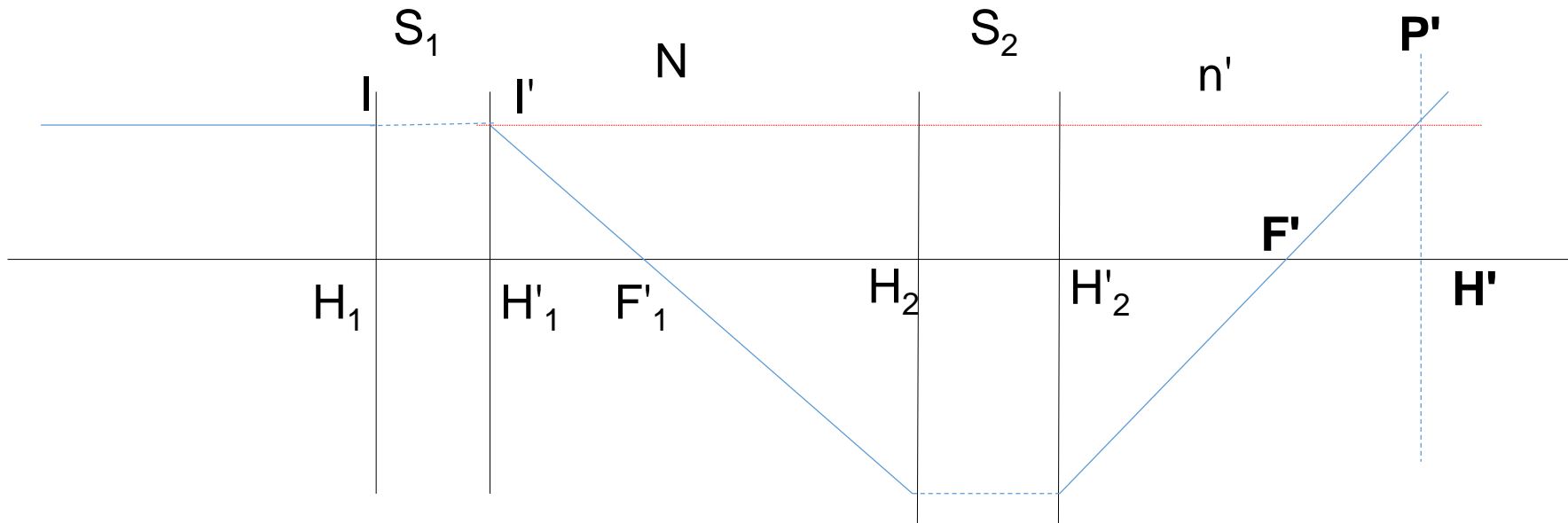
$\overline{F'_1 F_2} = \Delta$: intervalle optique

$$\overline{F_1 F} = \frac{f_1 \cdot f'_1}{\Delta}$$

2°) Plans et Points principaux

Par construction :

La position du plan principal image P' est donnée par l'intersection du rayon incident parallèle à l'axe et du rayon émergent passant par F'



Par le calcul :

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

$$\overline{HF} = f = \frac{f_1 \cdot f_2}{\Delta}$$

3°) Formule de Gullstrand

$$\Delta = \overline{F'_1 H'_1} + \overline{H'_1 H_2} + \overline{H_2 F_2} = -f'_1 + e + f_2 \quad \text{avec } e = \overline{H'_1 H_2}$$

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n'}{f'_1} \cdot \frac{\Delta}{f'_2} = -\frac{n'}{f'_2} - \frac{n' \cdot e}{f'_1 \cdot f'_2} - \frac{n' \cdot f_2}{f'_1 \cdot f'_2}$$

En posant $n' = n' \cdot \frac{N}{N}$ et $\frac{f_2}{f'_2} = -\frac{N}{n'}$

$$\Phi = \frac{N}{f'_1} + \frac{n'}{f'_2} - \frac{e}{N} \cdot \frac{n'}{f'_2} \cdot \frac{N}{f'_1}$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{e}{N} \Phi_1 \cdot \Phi_2$$

4°) Exemple : doublet de lentilles minces dans l'air

Intervalle optique : $\overline{F'_1 F_2} = \Delta$

Epaisseur du système : $\overline{H'_1 H_2} = \overline{O_1 O_2} = e$

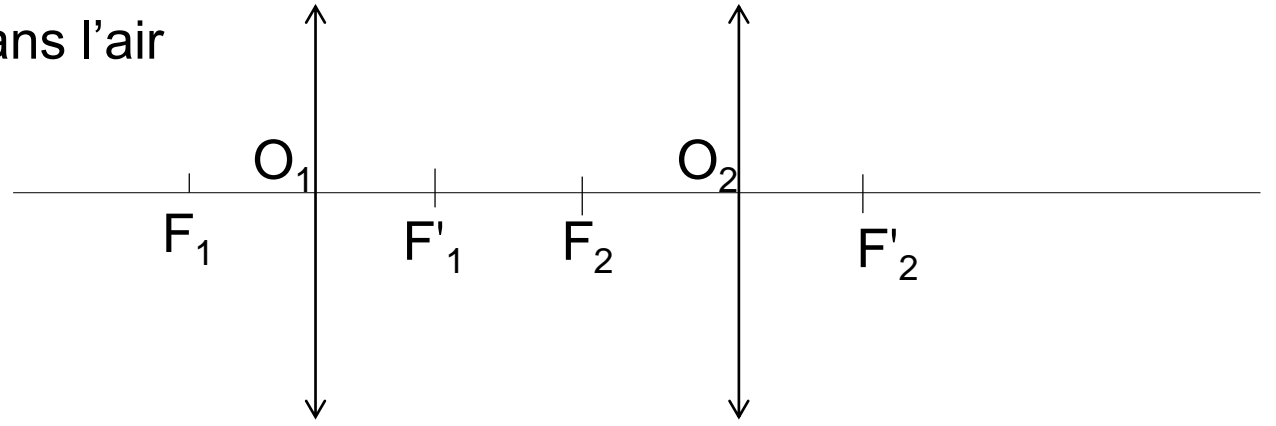
$$\Phi_1 = \frac{1}{f'_1} \quad \Phi_2 = \frac{1}{f'_2}$$

Vergence du système : $\Phi = \frac{1}{f'} = \Phi_1 + \Phi_2 - e\Phi_1\Phi_2$

Pour les lentilles minces : plans principaux confondus avec le centre optique :

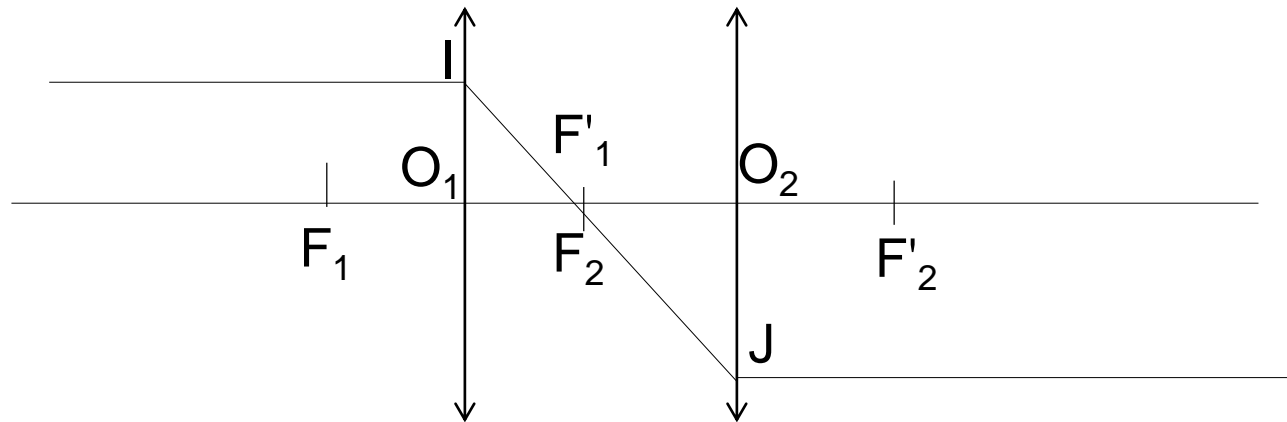
$$H_1 \approx H'_1 \approx O_1$$

$$H_2 \approx H'_2 \approx O_2$$



Cas du doublet afocal : $\Delta = 0$

F'_1 confondu avec F_2



Grandissement transversal : $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{O_2J}}{\overline{O_1I}} = \frac{\overline{O_2F_2}}{\overline{O_1F_1}} = \frac{f_2}{f'_1} = -\frac{f'_2}{f_1} = \text{cste}$

- Grandissement indépendant de la position de l'objet
- Les foyers sont rejetés à l'infini

III Les instruments d'optique

Deux catégories :

- 1. Instruments visuels** : donnent une image virtuelle
 - Vision rapprochée : loupe , microscope
 - Vision lointaine : jumelles, lunette, télescope
- 2. Instruments de projection** : forment une image réelle sur un écran ou un détecteur

Les instruments sont caractérisés par :

- le grandissement transversal γ (instrument de projection)
- la puissance (loupe, microscope)
- le grossissement G (lunette)

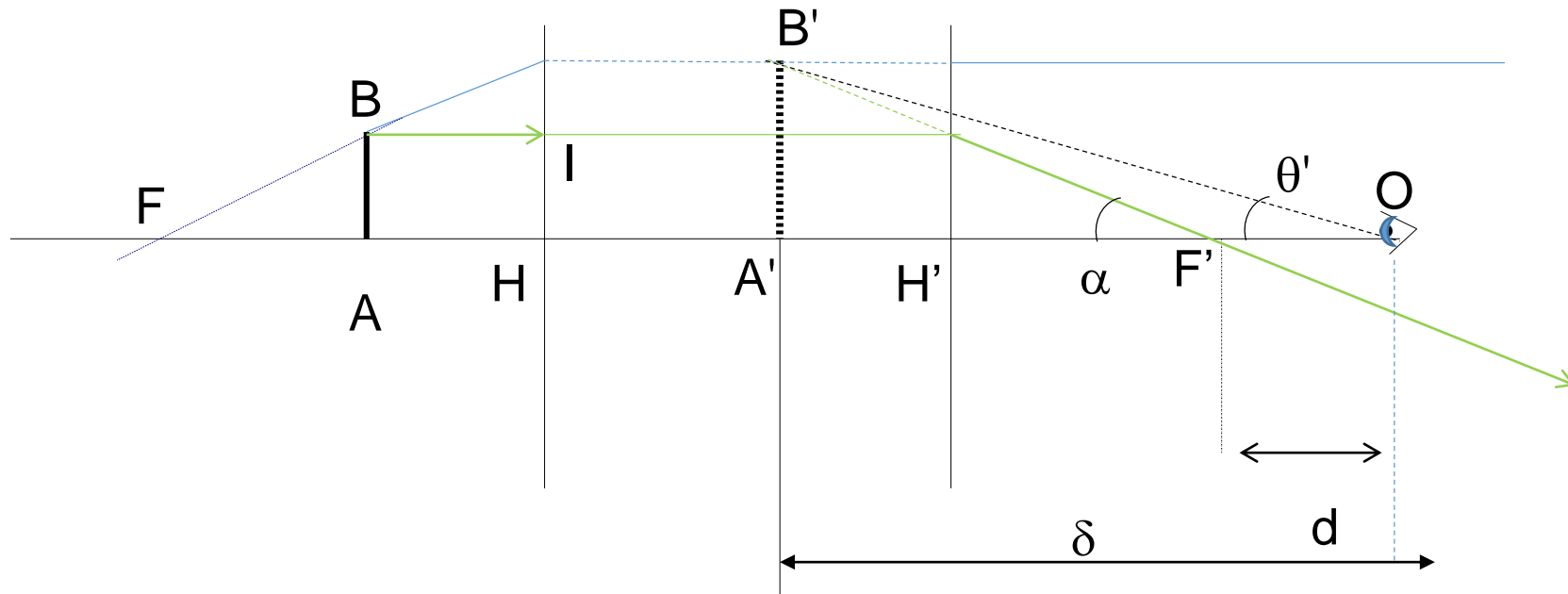
1°) La puissance

Déterminée pour la vision d'objets rapprochés

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

Angle sous lequel on voit l'image à travers l'instrument

Taille de l'objet



$$d = \overline{F'O} \quad \delta = \overline{A'O}$$

$$\tan(\theta') \approx \theta' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}} = -\gamma \frac{\overline{AB}}{\delta}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'A'}} = \frac{\overline{H'J}}{\overline{F'H'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{F'H'}}$$

D'où le grandissement transversal : $\gamma = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = -\frac{1}{f'}(\overline{F'O} + \overline{OA'}) = -\frac{1}{f'}(d - \delta)$

Alors : $\theta' = \frac{\overline{AB}}{\delta \cdot f'}(d - \delta)$ et $P = -\frac{1}{f'}\left(1 - \frac{d}{\delta}\right)$

La puissance est directement reliée aux positions de l'œil par rapport à F' ou à l'image.
Pour avoir une convention indépendante des conditions d'observation:

$$d = 0 \text{ (œil au foyer F')} \text{ ou } \delta \rightarrow \infty \text{ (objet au foyer F)}$$

On définit alors la puissance intrinsèque :

$$\mathbf{P}_i = -\frac{1}{f'} \quad (\text{exprimée en valeur absolue})$$

2°) Le grossissement

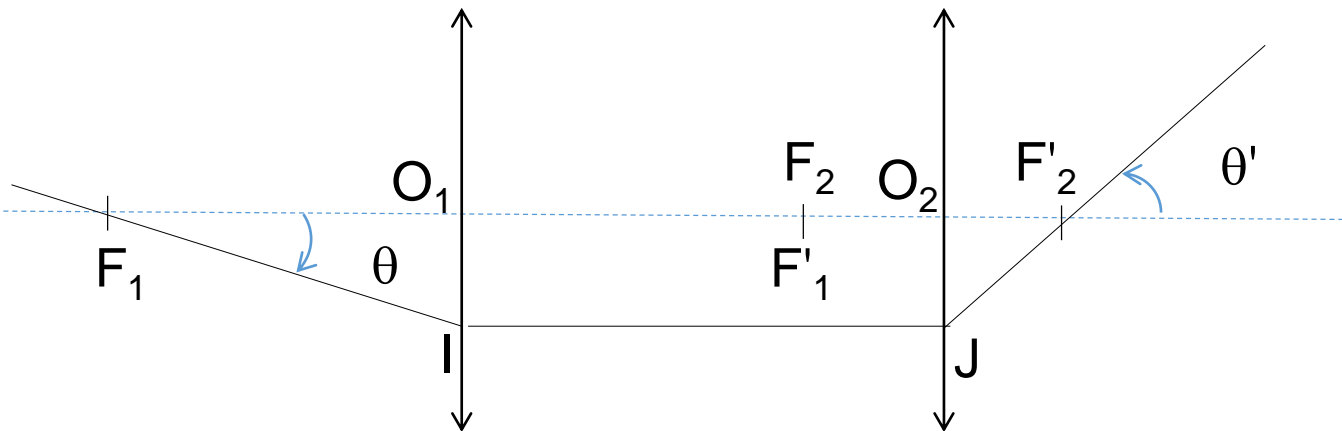
Déterminé pour les objets situés à l'infini.

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

Angle sous lequel est vue l'image à travers l'instrument

Angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu

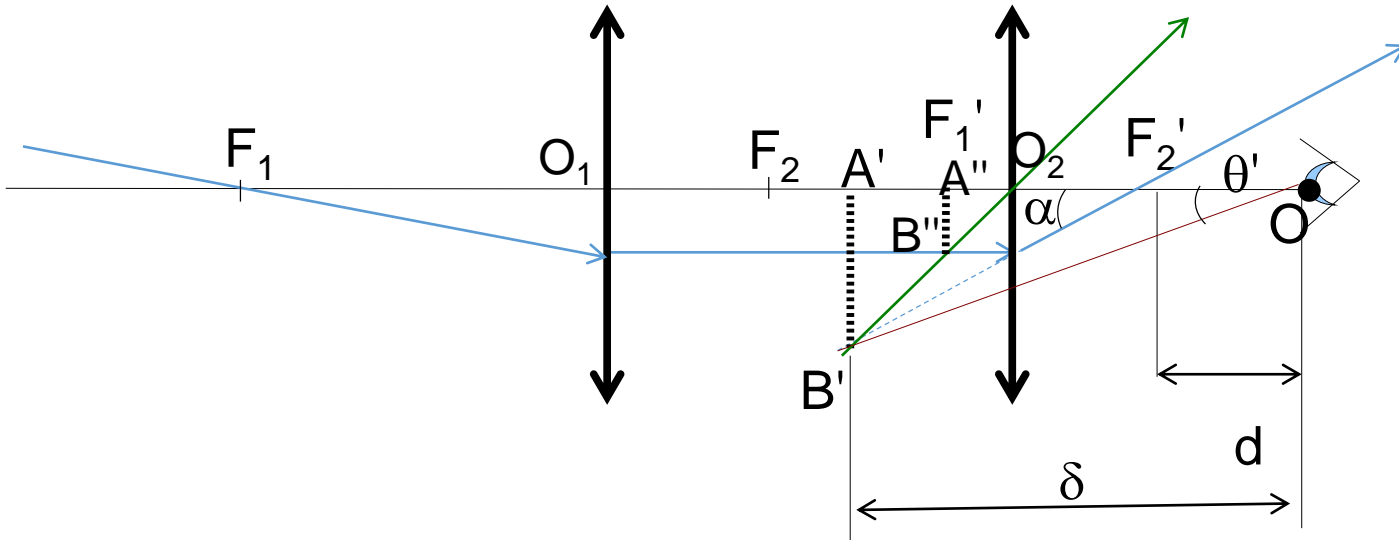
Exemple : la lunette astronomique en configuration afocale



$$\theta = \frac{\overline{O_1 I}}{\overline{F_1 O_1}} \quad \theta' = \frac{\overline{O_2 J}}{\overline{F'_2 O_2}}$$

$$\text{D'où : } G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f_1}{f'_2} = -\frac{f'_1}{f_2}$$

En configuration non afocale :



$$d = \overline{F'_2 O} \quad \delta = \overline{A' O}$$

$$\overline{A'' B''} = -f_1 \theta = f'_1 \theta$$

$$\theta' = \frac{\overline{A' B'}}{\overline{O A'}} = -\frac{\overline{A' B'}}{\delta}$$

$$\frac{\overline{A' B'}}{\overline{F'_2 A'}} = \frac{\overline{A'' B''}}{\overline{F'_2 O_2}}$$

Le grossissement :
$$G = \frac{\theta'}{\theta} = -\frac{\overline{A' B'}}{f'_2} \left(1 - \frac{d}{\delta}\right) \frac{f'_1}{\overline{A' B'}} = -\frac{f'_1}{f'_2} \left(1 - \frac{d}{\delta}\right)$$

Comme la puissance, la convention du grossissement intrinsèque :

$d = 0$ (œil au foyer) ou $\delta \rightarrow \infty$ (réglage afocal)

$$G_i = -\frac{f'_1}{f'_2}$$

3°) Grossissement et puissance

$D = \overline{OA}$: distance algébrique entre l'œil et l'objet AB

θ et θ' : angles apparents

$$P = \frac{\theta'}{\overline{AB}} = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{d}{\delta} \right) \quad \text{et} \quad \theta = \frac{\overline{AB}}{D}$$

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{D}{f'} \left(1 - \frac{d}{\delta} \right) = \frac{D}{f'} = D \cdot P$$

Grossissement intrinsèque commercial G_c : défini pour une distance entre l'œil et l'objet de 25 cm (Punctum Proximum : $D = -0,25 \text{ m} = -1/4 \text{ m}$)

$$G_c = +\frac{1}{4f'} = -\frac{P_i}{4}$$

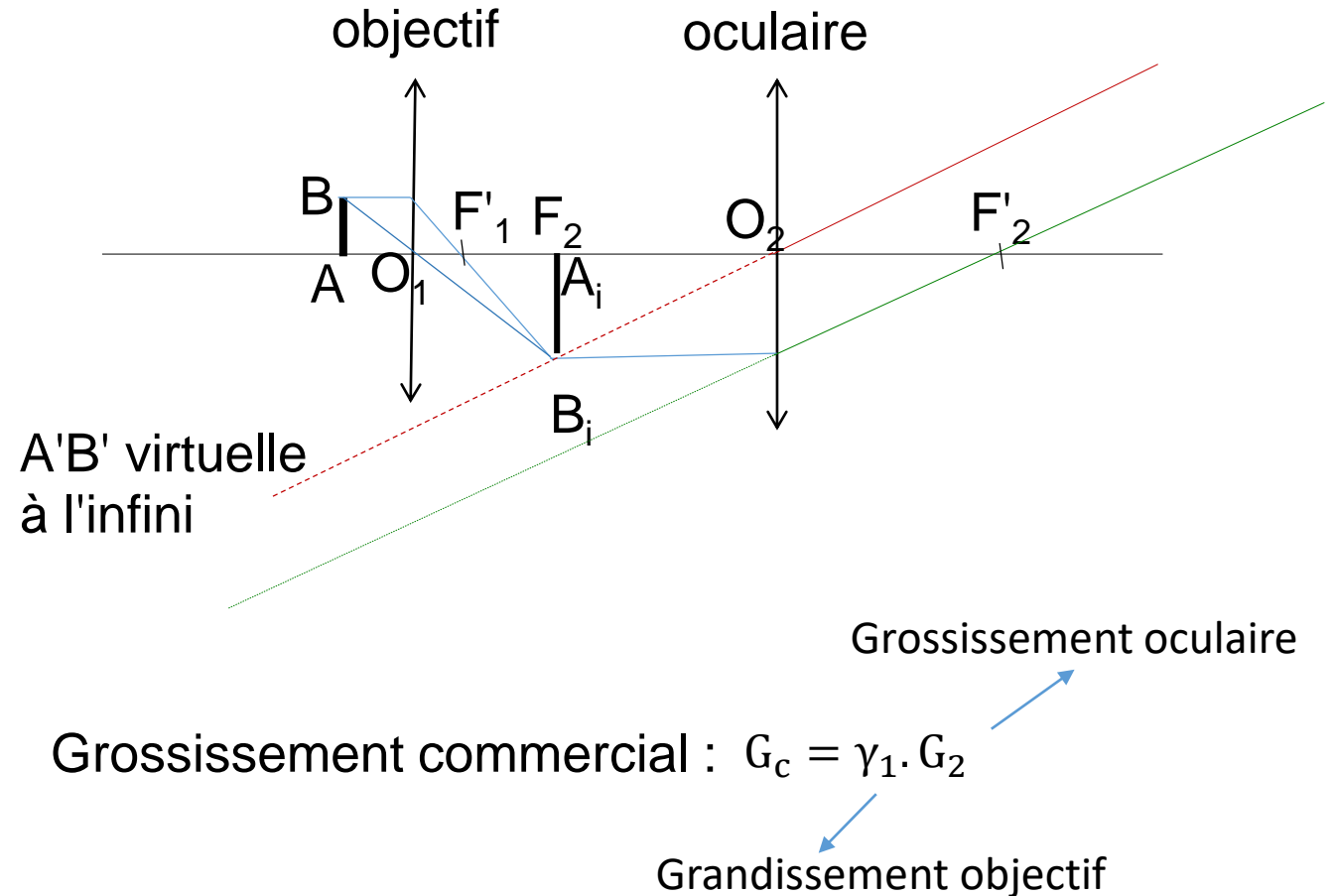
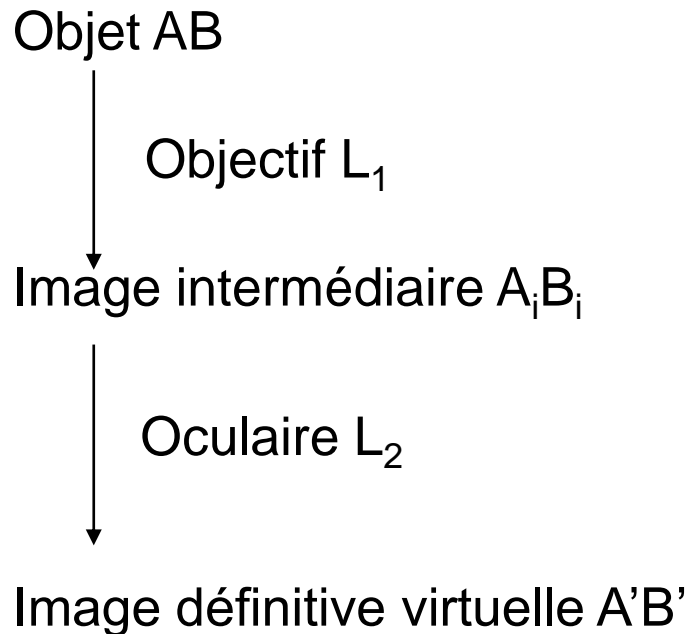
IV Exemples d'instruments d'optique

1°) Le microscope

Deux lentilles minces L_1 et L_2 de distances focales f'_1 et f'_2 :

L_1 : objectif, f'_1 de quelques mm

L_2 : oculaire, f'_2 de quelques cm



Exemple de calcul des caractéristiques d'un microscope :

Objectif : lentille convergente de distance focale $f'_1 = 3\text{mm}$

Oculaire : lentille convergente de distance focale $f'_2 = 3\text{ cm}$

Intervalle optique $\Delta = 20\text{ cm}$

- Grossissement commercial de l'oculaire : $G_2 = \frac{1}{4f'_2} \approx 8,3$
- Grandissement de l'objectif :

Fonctionnement normal : A_i au foyer F_2 $\overline{O_1A_i} = \overline{O_1F_2} = \overline{O_1F'_1} + \overline{F'_1F_2} = f'_1 + \Delta$

Relation de conjugaison pour L_1 : $\frac{1}{\overline{O_1A_i}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{f'_1} \rightarrow \overline{O_1A} = \frac{\overline{O_1A_i} \cdot f'_1}{f'_1 - \overline{O_1A_i}} = \frac{\overline{O_1A_i} \cdot f'_1}{-\Delta}$

$$\gamma_1 = \frac{\overline{O_1A_i}}{\overline{O_1A}} = -\frac{\Delta}{f'_1} = -66,67$$

Grossissement commercial : $G_c = \gamma_1 \cdot G_2 = -533$

Puissance $P = 4 G_c \approx 2\,200\ \delta$

2°) Lunettes et télescopes

Instruments destinés à l'observation visuelle ou photographique d'objets éloignés constitués de :

- un tube contenant les lentilles ou les miroirs
- une monture qui entraine l'instrument pour compenser la rotation de la terre
- un objectif : lentille (lunette) ou miroir (télescope)
- un oculaire : agrandit l'image donnée par l'objectif



Lunette astronomique

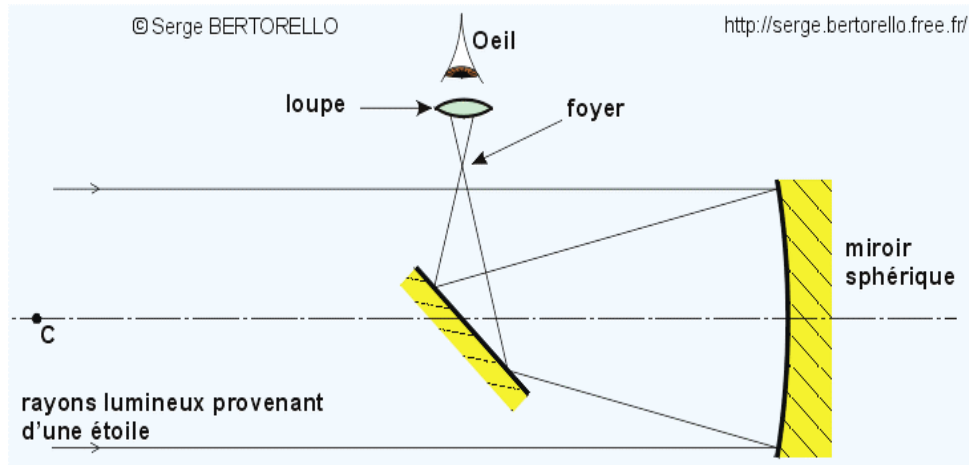


télescope

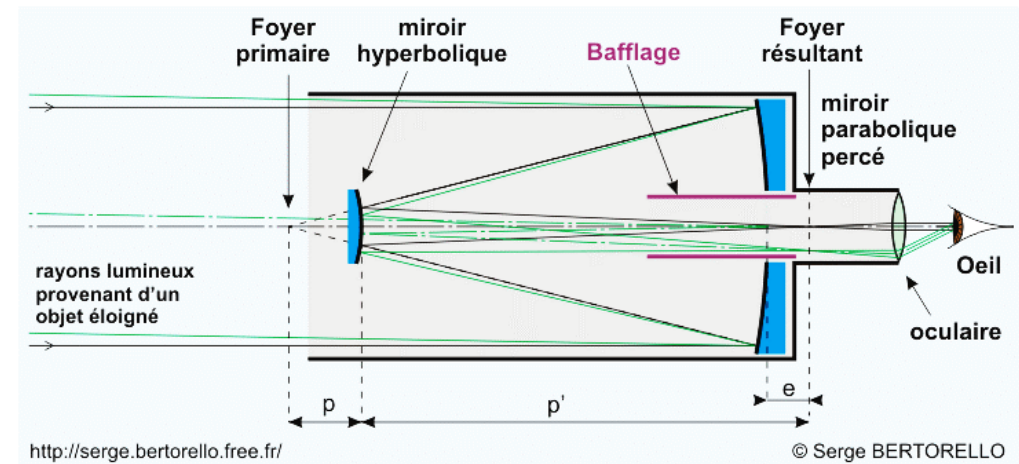
a- Télescope

Instrument catadioptrique.

Les astres observés avec un miroir de télescope donnent une image au foyer de l'instrument, qui sera soit photographiée soit observée en la grandissant avec un oculaire.



Télescope de Newton

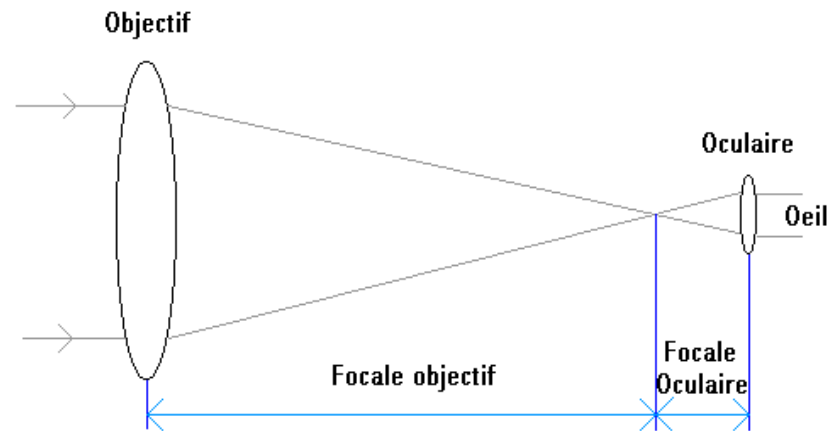


Télescope de Cassegrain

b- Lunette astronomique

Système dioptrique constitué de deux lentilles :

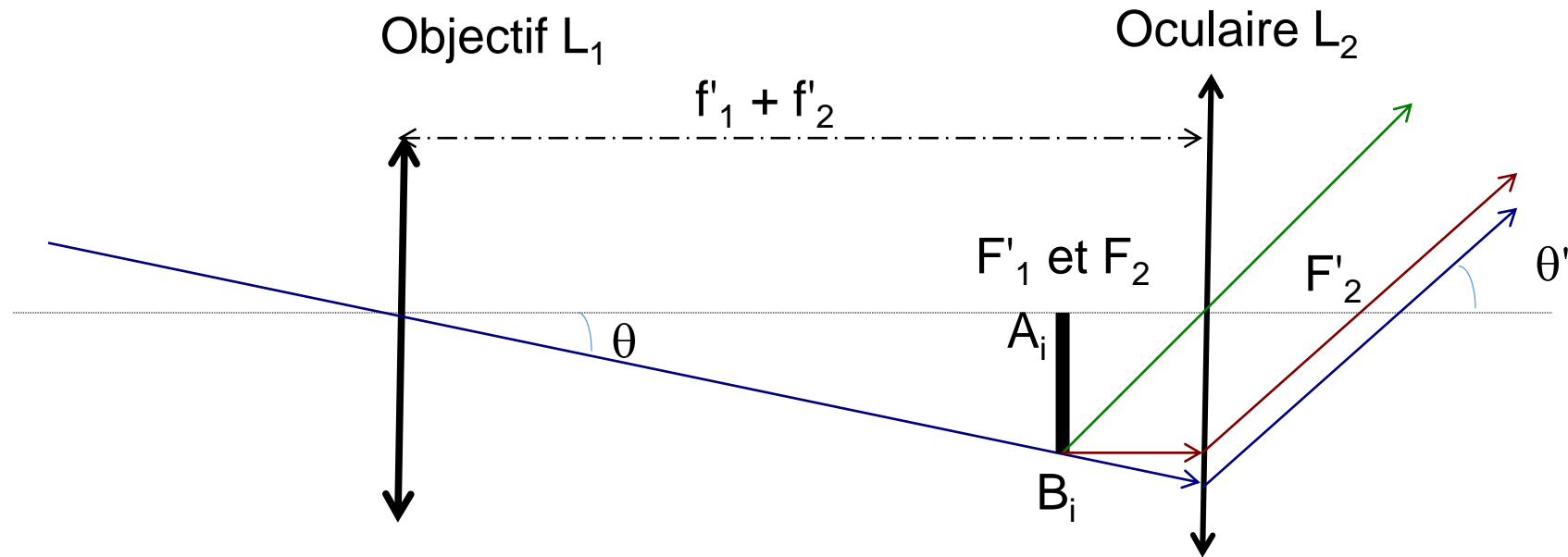
- Image primaire formée au foyer à l'aide d'un objectif
- image définitive observée à l'aide d'un oculaire



Dans les conditions normales d'observation les foyers de l'oculaire et de l'objectif sont confondus (système afocal)

Grossissement de la lunette astronomique

En fonctionnement afocal : $G = \frac{\theta'}{\theta} = -\frac{f'_1}{f'_2}$



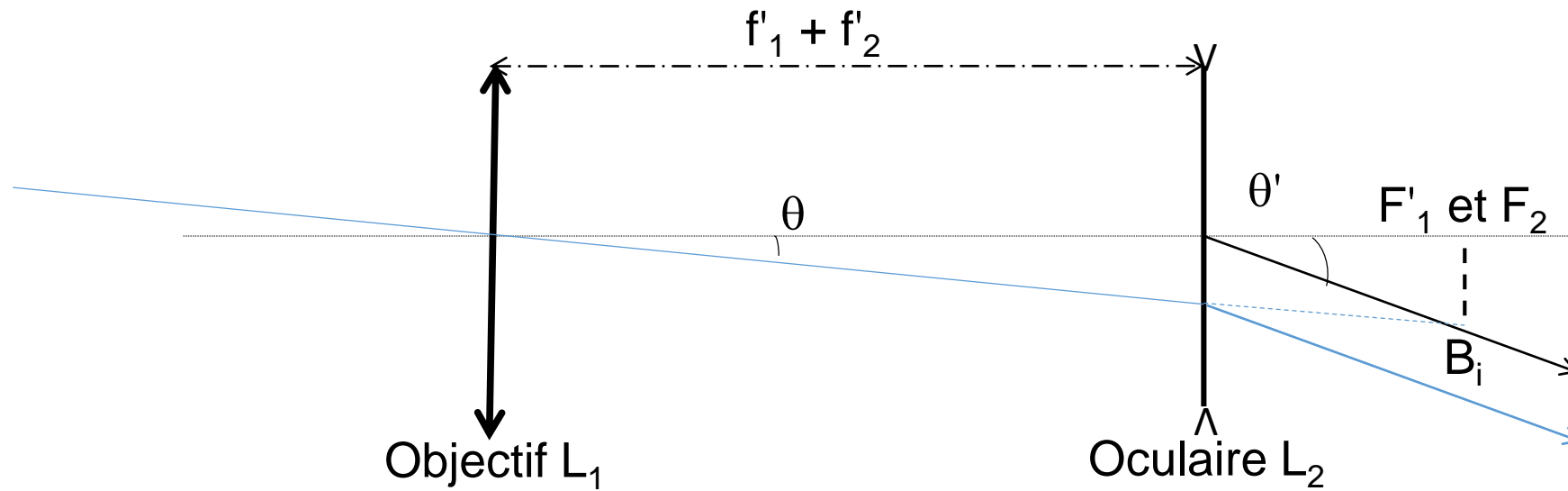
$L_1 : f'_1 = 1\text{ m}$
 $L_2 : f'_2 = 1\text{ cm}$

$G = -100$

L'image définitive est inversée par rapport à l'objet

La lunette de Galilée

Destinée à l'observation terrestre : utilisation d'un redresseur ou d'un oculaire divergent

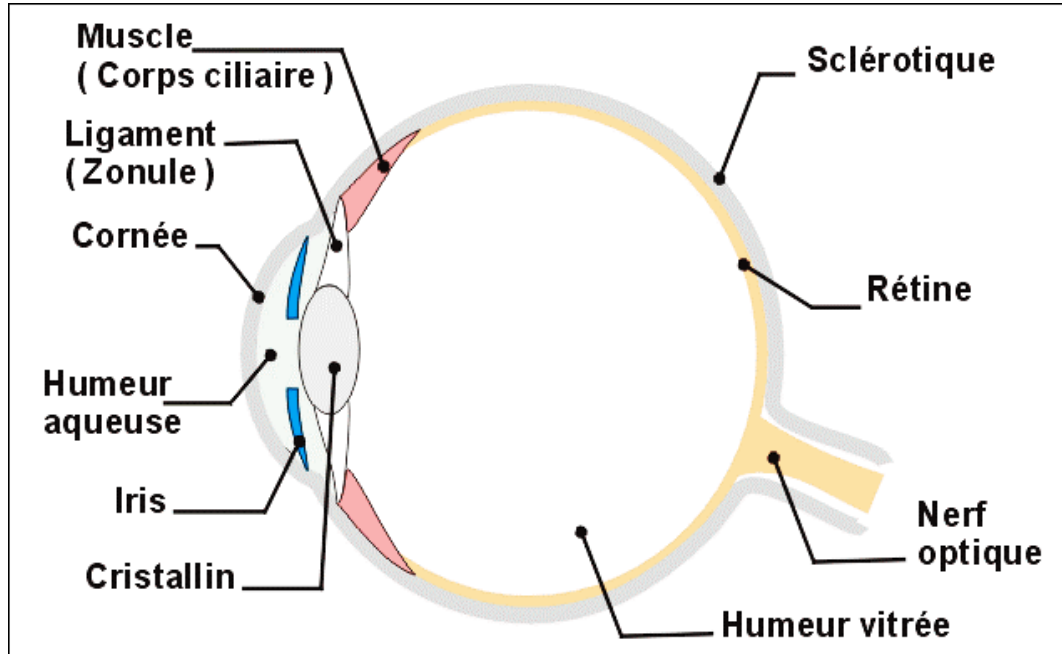


$$f'_1 = 1\text{m}$$
$$f'_2 = -1\text{ cm}$$

$$G = -\frac{f'_1}{f'_2} = +100 \quad \text{Image définitive droite}$$

V L'œil

- Association complexe de dioptries séparés par des milieux d'indices différents
- Faculté d'accommodation : modification de la distance focale du système pour que l'image nette d'un objet se forme toujours sur la rétine, quelque soit sa position, sans modification de la position des éléments optiques



1°) Description de l'œil

La cornée : dioptré sphérique – fenêtre d'entrée de l'œil

L'iris : membrane contractile percée d'un trou (pupille) de diamètre variable (2 à 8 mm) qui contrôle le flux de lumière entrant.

Le cristallin : lentille de distance focale variable. Ce pouvoir d'accommodation est dû aux muscles ciliaires auxquels il est rattaché. Il est diaphragmé par l'iris dont l'ouverture circulaire permet d'améliorer le stigmatisme.

La rétine : fine membrane constituée de cellules nerveuses (cônes et bâtonnets) qui transforment la lumière en signaux électriques transmis au cerveau par le nerf optique.

2°) Caractéristiques de l'œil

- **Acuité visuelle** : capacité à distinguer deux points proches d'un de l'autre à une distance donnée.

- **Sensibilité spectrale** :

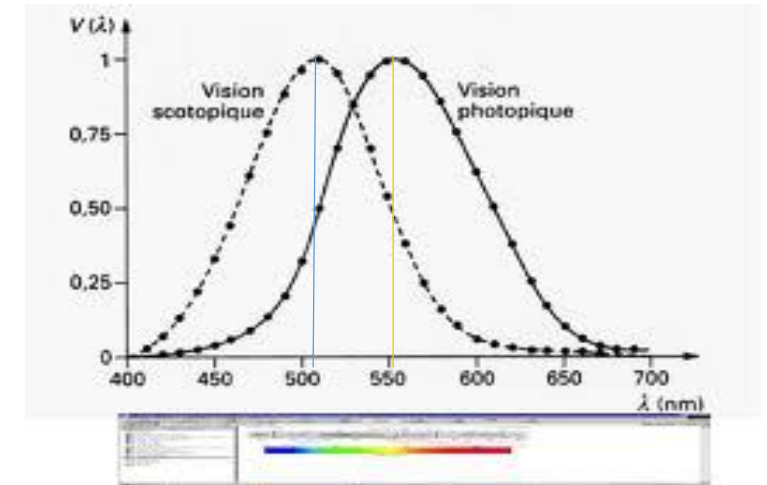
sensibilité maximale dans le jaune de jour (vision photopique)

sensibilité maximale dans le bleu de nuit (vision scotopique)

- **Taille de l'image sur la rétine** : proportionnelle à la taille de l'objet

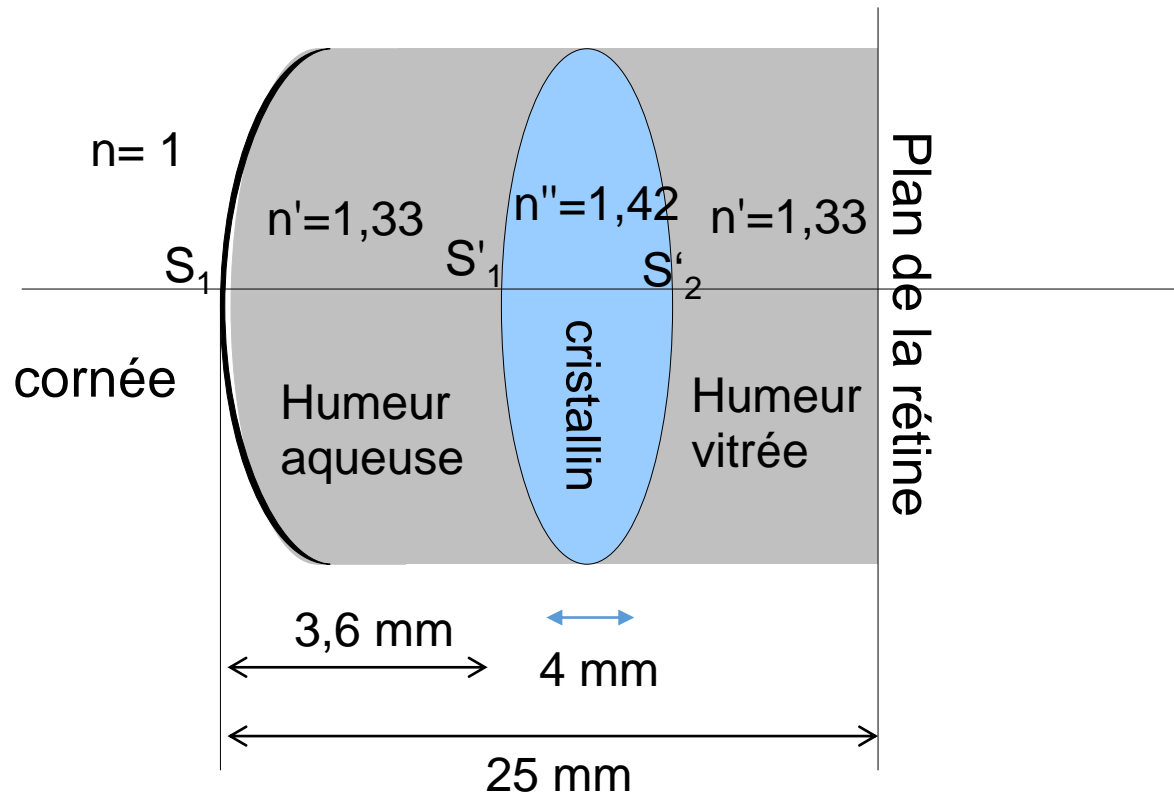
Mais dépend également de la distance de l'objet ou de l'utilisation de l'instrument

d'observation : processus cognitif complexe consistant à comparer l'image observée avec les informations stockées dans le cerveau.



3°) Modèle simplifié de l'œil

Composé d'un dioptre sphérique convexe (cornée) et d'une lentille biconvexe (cristallin)



Dioptre sphérique convergent :

$$R_1 = 8 \text{ mm}$$

$$f_1 = \overline{S_1 F_1} = -\frac{R_1 n}{n' - n} = -24,24 \text{ mm}$$

$$f'_1 = \overline{S_1 F'_1} = \frac{R_1 n'}{n' - n} = 32,24 \text{ mm}$$

Lentille mince convergente :

$$f_2 = \overline{S_2 F_2} = -56,04 \text{ mm}$$

$$f'_2 = \overline{S_2 F'_2} = 56,04 \text{ mm}$$

Le dioptr (cornée) et la lentille (cristallin) constituent un doublet dont l'intervalle optique est :

$$\Delta = \overline{F'_1 F_2} = e - f'_1 + f_2 = -82,68\text{mm}$$

e : distance entre le sommet de la cornée et le centre du cristallin (e = 5,6 mm)

Distances focales du doublet :

$$f' = \overline{H'F'} = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = 21,85\text{mm}$$

$$f = \overline{HF} = \frac{f_1 f_2}{\Delta} = -16,43\text{mm}$$

Doublet convergent

Vergence de l'œil normal : $\Phi = \frac{n'}{f'} = 60\delta$

4°) L'œil emmétrope

Relation de conjugaison du modèle simplifié de l'œil : $\frac{1}{H'A'} - \frac{1}{HA} = \Phi$

- H' et H sont les points principaux du doublet
- La vergence Φ varie suivant la position de l'objet (accommodation) sans

Vision éloignée nette : $\overline{HA} \rightarrow \infty$ ($\Phi = 60 \delta$) **Punctum Remotum (PR)**

sans accommodation (œil au repos)

Vision nette rapprochée : $\overline{HA} = -25 \text{ cm}$ ($\Phi = 64 \delta$) **Punctum Proximum (PP)**

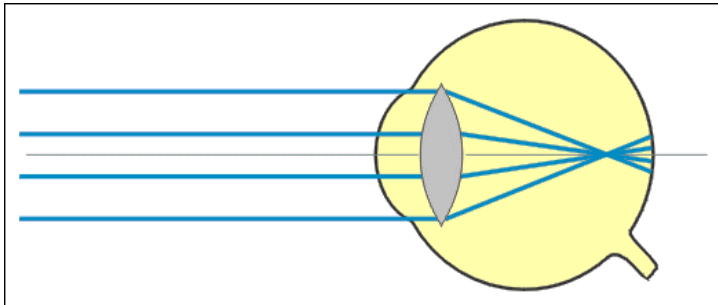
accommodation maximale - distance minimale de vision $\approx 25 \text{ cm}$

Amplitude dioptrique de 4 δ

5°) L'œil amétrope

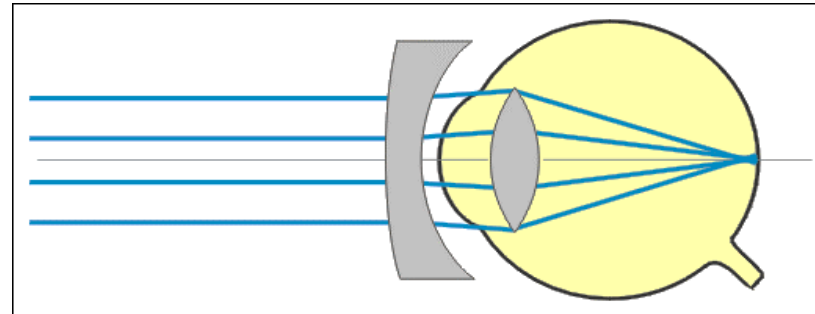
a- la myopie

Œil trop convergent : en vision sans accommodation, l'image d'un objet à l'infini se forme en avant de la rétine : $\Phi > 60 \delta$



Œil myope sans correction

Correction : lentille divergente



Œil myope corrigé

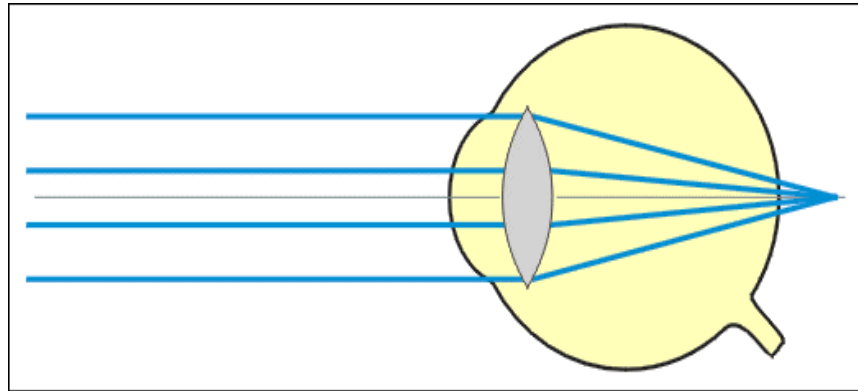
Exemple : œil myope de vergence égale à 61δ avec amplitude dioptrique de 4δ

→ Vision nette de 20cm à 1 m

→ Correction : verre de vergence -1δ

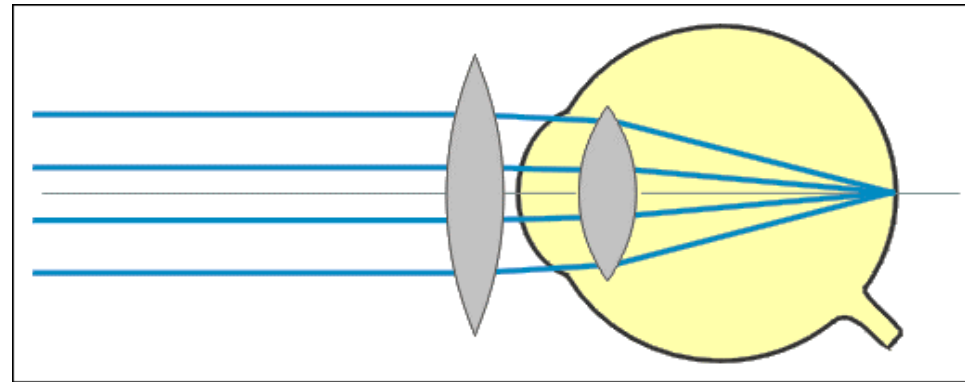
b- Hypermétropie

Œil pas assez convergent : l'image d'un objet à l'infini se forme derrière la rétine $\Phi < 60 \delta$



Œil hypermétrope non corrigé

Correction : lentille convergente



Œil hypermétrope corrigé

Exemple : œil hypermétrope de vergence $\Phi = 59 \delta$ avec une amplitude dioptrique de 4δ

→ zone d'accommodation est au-delà de 33 cm

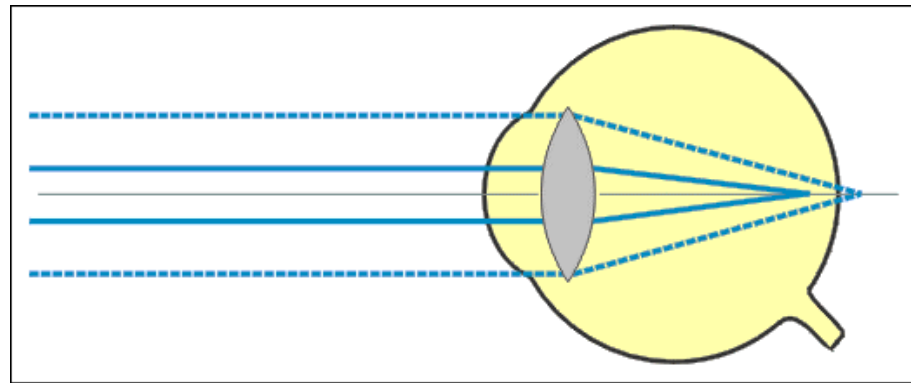
→ Correction : verre de vergence $+1 \delta$

c- Astigmatisme

Vision floue, déformée, de loin comme de près

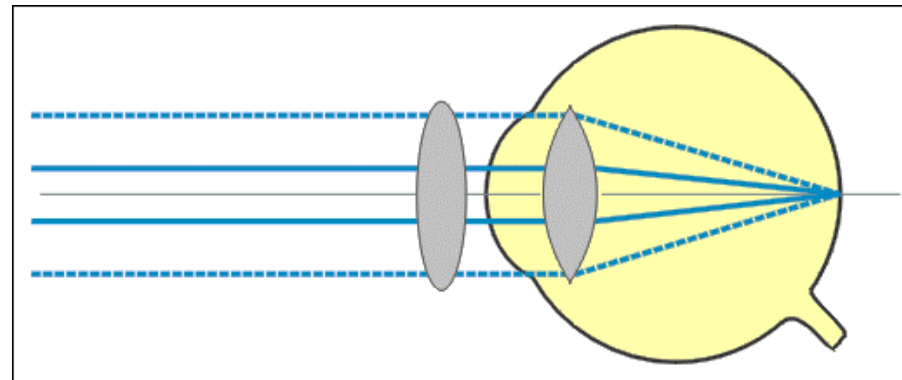
Dû à une inégalité de courbure de la cornée ou du cristallin (ellipsoïde au lieu de sphérique)

Distance focale différente suivant la direction d'observation



Œil astigmatique non corrigé

Correction : lentille cylindrique



Œil astigmatique corrigé

d- Presbytie

- Vieillessement du cristallin qui devient moins déformable
- Difficulté d'accommodation
- Diminution de l'amplitude dioptrique

La vision de loin n'est pas altérée

Correction : lentille convergente

Exemple : œil avec une amplitude dioptrique de 1δ

→ distance minimale de vision nette : -1 m

Pour amener le PP à -25 cm : verre de vergence de $+3 \delta$

6°) La perception des couleurs

- Perception des couleurs subjective
- Dépend de l'environnement coloré de l'objet
- Se fait au niveau des cellules rétinienne et du cerveau

Couleur déterminée par :

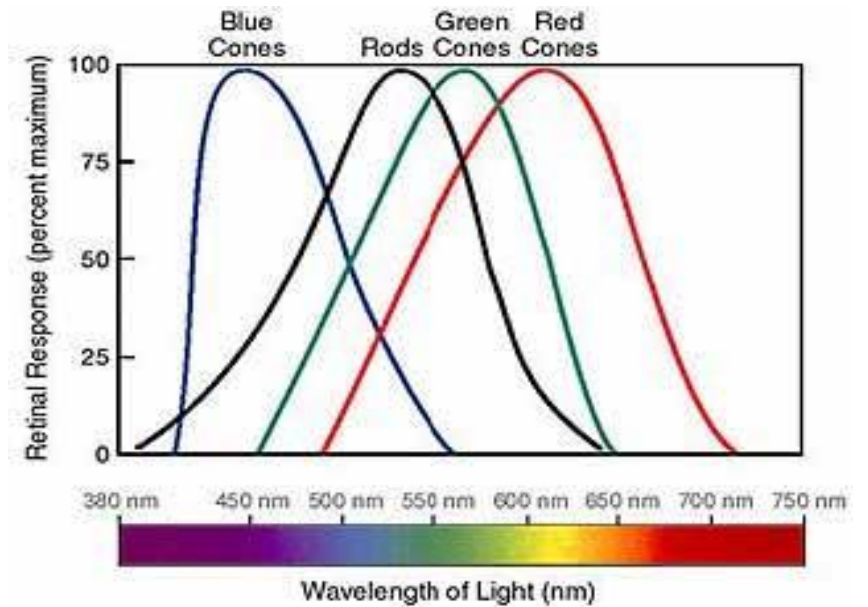
- la teinte (longueur d'onde)
- le degré de saturation
- L'intensité de la lumière réfléchié ou transmise



Mesure de la courbe spectrale de la lumière par un spectrophotocolorimètre

Les photorécepteurs situés sur la rétine :

- Cônes (R, V, B) (domaine photopique)
- Bâtonnets (domaine scotopique)



Distinction entre mélanges des couleurs :

- synthèse additive : mélange de couleurs par superposition (sur une même zone rétinienne) ou par juxtaposition (zones rétiniennes proches)
- synthèse soustractive : suppression d'une partie du contenu spectral du rayonnement provenant d'une source lumineuse

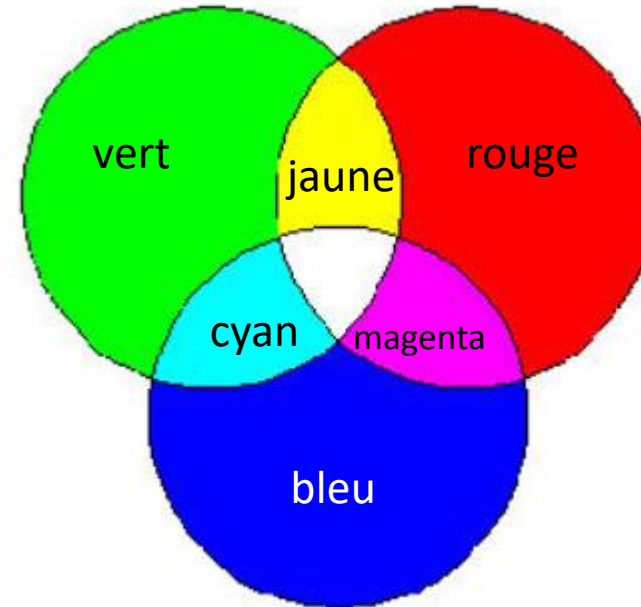
Synthèse additive : toutes les nuances de couleur sont obtenues en mélangeant les 3 couleurs primaires (Rouge, Vert, Bleu)

Vert + rouge = jaune

Rouge + bleu = magenta

Vert + bleu = cyan

Rouge + vert + bleu = blanc

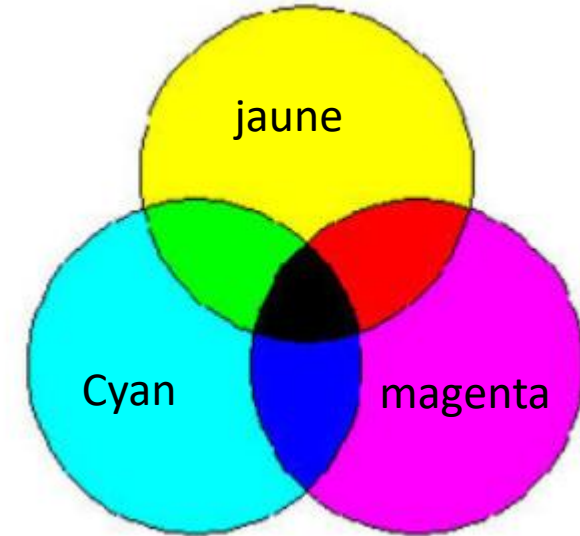
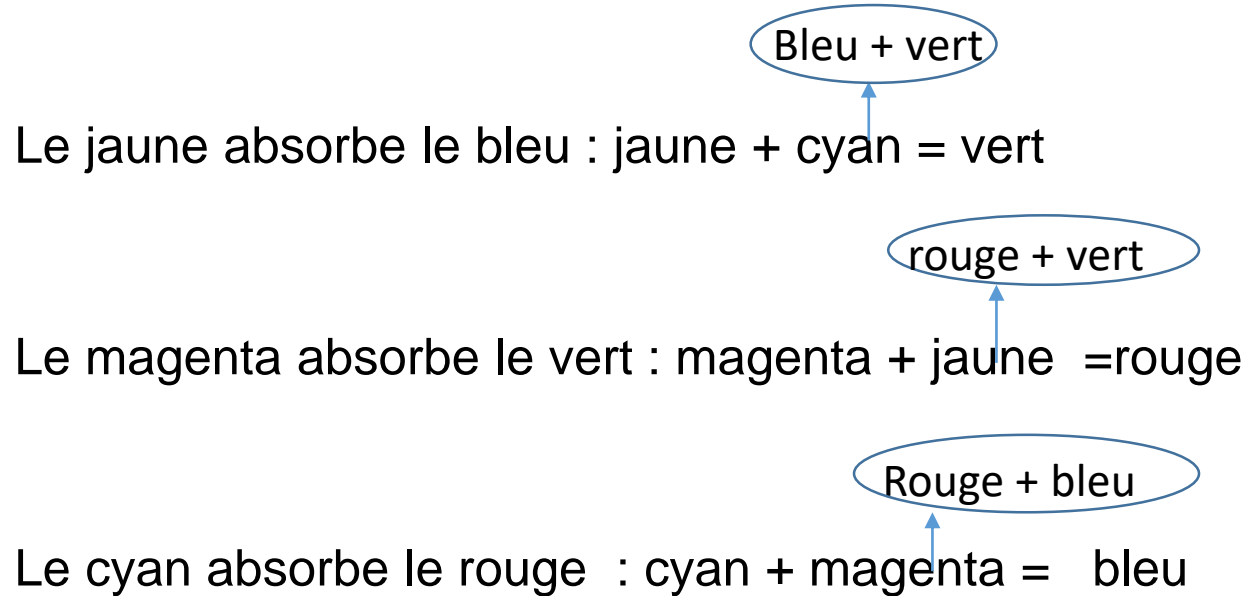


Jaune et bleu sont complémentaires (jaune + bleu = blanc)

Magenta et vert sont complémentaires (magenta + vert = blanc)

Rouge et cyan sont complémentaires (rouge + cyan = blanc)

Synthèse soustractive : modification spectrale de la lumière par les milieux de propagation avant de pénétrer dans l'œil par transmission sélective (filtres) ou diffusion sélective.



La couleur absorbe sa couleur complémentaire

En plaçant trois filtres: jaune , magenta, cyan , devant un faisceau de lumière blanche

→ Toutes les radiations sont absorbées : noir