

Rayons lumineux

Lois de Snell Descartes

I L'onde lumineuse

1 Spectre des ondes électromagnétiques

La lumière est une **onde électromagnétique** caractérisée par les amplitudes couplées du champ électrique et du champ magnétique.

Cette onde se propage dans le vide à la célérité de la lumière dans le vide :

$$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$$

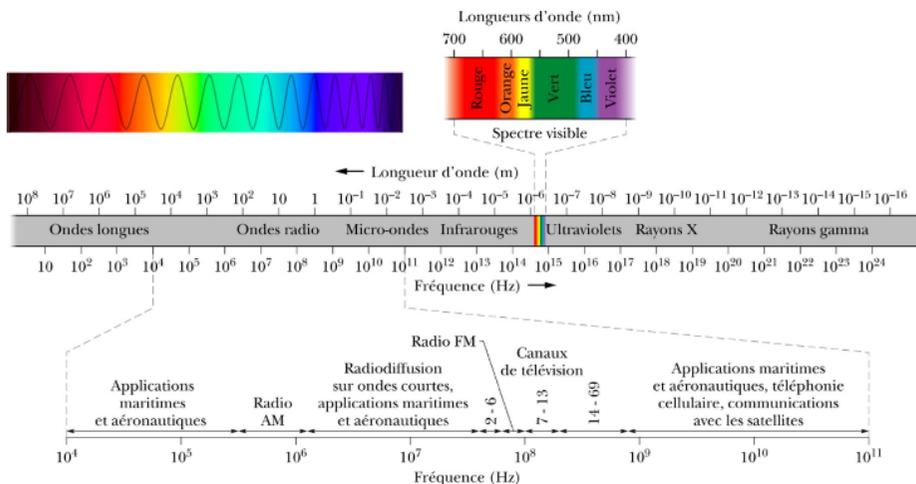
Si on utilise trois chiffres significatifs : $c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Les longueurs d'onde dans le vide, associées aux ondes lumineuses sont comprises entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge), ce qui correspond à une bande de fréquence

$$\left[\frac{c}{\lambda_{\max}} ; \frac{c}{\lambda_{\min}} \right]$$

soit entre 4.10^{14} Hz et $7,5.10^{14} \text{ Hz}$. On retiendra l'ordre de grandeur 5.10^{14} Hz .

Chaque longueur d'onde (et donc chaque fréquence) est associée à une couleur.



Le domaine du visible constitue une très petite partie du spectre électromagnétique, mais il est privilégié puisqu'il s'agit du domaine associé à notre récepteur biologique : l'œil.

	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge
λ en nm	400	470	520	580	600	650

2 Sources

La caractérisation des sources lumineuses se fait par leur spectre d'émission, exprimé usuellement en termes de longueur d'onde dans le vide plutôt que de fréquence.

Parmi les sources lumineuses, on distingue les sources primaires, qui émettent de la lumière sans en avoir reçu au préalable, des sources secondaires, qui réémettent de la lumière qu'elles ont préalablement absorbé. Quelques sources ne rentrent pas dans ce cadre, en particulier les sources fluorescentes qui réémettent des radiations différentes de celles qu'elles ont absorbé.

On peut citer

- lampes à incandescence (spectre continu, lumière blanche)
- tubes fluorescents (spectre discontinu)
- LED (spectre discontinu)
- lampe spectrale (spectre discontinu)
- LASER (quasiment une seule longueur d'onde)

3 Source ponctuelle monochromatique

L'objectif est de proposer un outil de décomposition aussi simple que possible d'une source optique, servant de brique élémentaire d'étude d'une source réelle, c'est-à-dire étendue et polychromatique.

- Le théorème de Fourier permet de considérer que l'onde émise par une source polychromatique est une superposition d'ondes monochromatiques.
- On peut aussi découper par la pensée une source étendue en un grand nombre de sources de petite tailles, à la limite des sources ponctuelles. Le principe de superposition permet alors de reconstruire l'onde totale à partir de la somme des ondes émises par chacune des sources ponctuelles.

On appelle **source ponctuelle** une source infiniment petite (assimilable à un point) qui

émet de la lumière de façon équi-répartie dans toutes les directions : on parle d'émission isotrope.

Une source ponctuelle monochromatique émet une radiation lumineuse sinusoïdale de la forme $s(x, t) = \frac{\alpha}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi)$.

4 MHTI

On considère un Milieu

- Homogène (propriétés physiques identiques en tout point de l'espace)
- Transparent (pas de phénomène d'absorption dans le domaine du visible)
- Isotrope (propriétés identiques dans toutes les directions de l'espace)

On caractérise un tel MHTI par son **indice de réfraction** n défini par $n = \frac{c}{v}$, avec v la vitesse de propagation de l'onde plane progressive monochromatique dans le milieu et c sa vitesse de propagation dans le vide.

On a $n > 1$. Plus n est grand, plus le milieu est dit **réfringent**.

La longueur d'onde est modifiée dans le milieu $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

Dans la plupart des milieux, la vitesse v est fonction de la fréquence de l'onde : il y a **dispersion**.

MHTI	air	eau	verre crown	verre flint
n	1,00029	1,33	1,52	1,67

5 Approximation de l'optique géométrique

Si on essaie de réduire le rayon d'un faisceau lumineux cylindrique en le diaphragmant, le phénomène de diffraction finit par réouvrir le faisceau qu'on cherche à isoler : on ne peut pas isoler un rayon lumineux.

L'objet de l'optique géométrique est l'étude des rayons lumineux, qui sont en réalité un modèle pour décrire un pinceau lumineux de faible extension spatiale, mais suffisam-

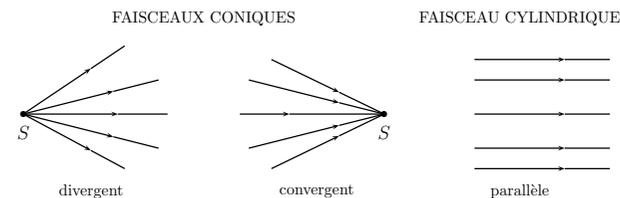
ment large pour pouvoir ignorer la diffraction ($r \gg \lambda$). Ceci constitue l'**approximation de l'optique géométrique**.

On appelle **rayon lumineux** toute courbe suivant laquelle se propage la lumière.

Les rayons lumineux ainsi définis ont les propriétés suivantes :

- **propagation rectiligne** : les rayons lumineux sont des segments de droite orientés. Il faut utiliser une règle pour les tracer.
- **indépendance des rayons lumineux** (deux rayons lumineux issus de deux sources se croisent sans interagir)
- **principe de moindre temps** (de Fermat) : le chemin effectivement suivi par la lumière est celui qui minimise le temps de parcours (et pas nécessairement la distance parcourue)
- **principe de retour inverse** : le chemin de la lumière pour aller de A à B est le même que pour aller de B à A.

Les différents types de faisceaux :



Remarque : Pour des milieux d'indice variable, les rayons lumineux sont courbés.

II Lois de Snell Descartes

L'objet de l'optique géométrique est l'étude de la marche des rayons lumineux dans les MHTI.

On considère un rayon lumineux arrivant en I à la surface d'un dioptre, c'est-à-dire d'une interface entre deux MHTI d'indices différents. Une partie de l'énergie lumineuse est transmise dans l'autre milieu, et une partie de l'énergie est réfléchie. Les lois de Snell-Descartes décrivent la direction des rayons réfracté et réfléchi.

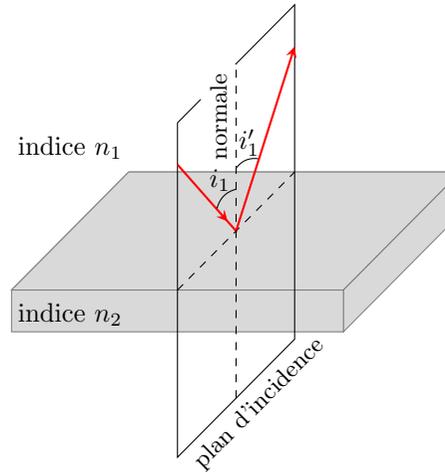
1 Lois de la réflexion

Lois de Snell-Descartes :

- Le rayon réfléchi appartient au **plan d'incidence** défini par le rayon incident et la normale au dioptre ou miroir au point d'incidence.
- L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont liés par la relation :

$$i_1 = i'_1$$

(ou $i_1 = -i'_1$ avec les angles orientés)

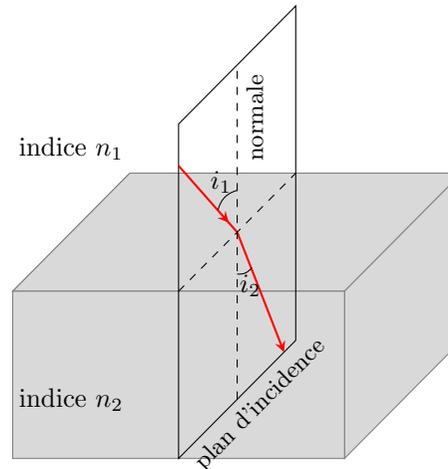


2 Lois de la réfraction

Lois de Snell-Descartes :

- Le rayon réfracté appartient au **plan d'incidence**.
- L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 sont liés par la relation :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$



3 Réfraction limite - Réflexion totale

Quand on passe dans un milieu **plus réfringent** ($n_1 < n_2$), le rayon réfracté **se rapproche** de la normale. Si i_1 décrit l'intervalle $[0, \frac{\pi}{2}]$, i_2 quand à lui décrit l'intervalle

$[0, i_{2,lim}]$, avec $i_{2,lim} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$. $i_{2,lim}$ est l'angle de réfraction limite. Il y a une zone non atteinte par les rayons réfractés.

Réciproquement, quand la lumière passe dans un milieu **moins réfringent** ($n_1 > n_2$), le rayon réfracté **s'écarte** de la normale.

Pour des incidences trop grandes, c'est-à-dire pour $i_1 > i_{1,c}$ avec $i_{1,c} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$,

il n'existe pas de rayon réfracté, toute l'énergie lumineuse est réfléchie, on parle de **réflexion totale**.

Formation d'image

On souhaite former l'image d'un objet, c'est-à-dire une représentation homothétique de cet objet, à l'aide de divers systèmes optiques.

I Système optique

1 Définitions

On appelle **système optique** tout ensemble de dioptries et de miroirs. Ce système transforme un rayon lumineux incident en un rayon émergent dans une direction, a priori différente de la direction incidente.

On appelle **système optique centré** tout système constitué d'éléments transparents (dioptries) ou réfléchissants (miroirs) et possédant un **axe de symétrie de révolution** appelé **axe optique**.

Propriété : un rayon lumineux se propageant selon l'axe optique n'est pas dévié.

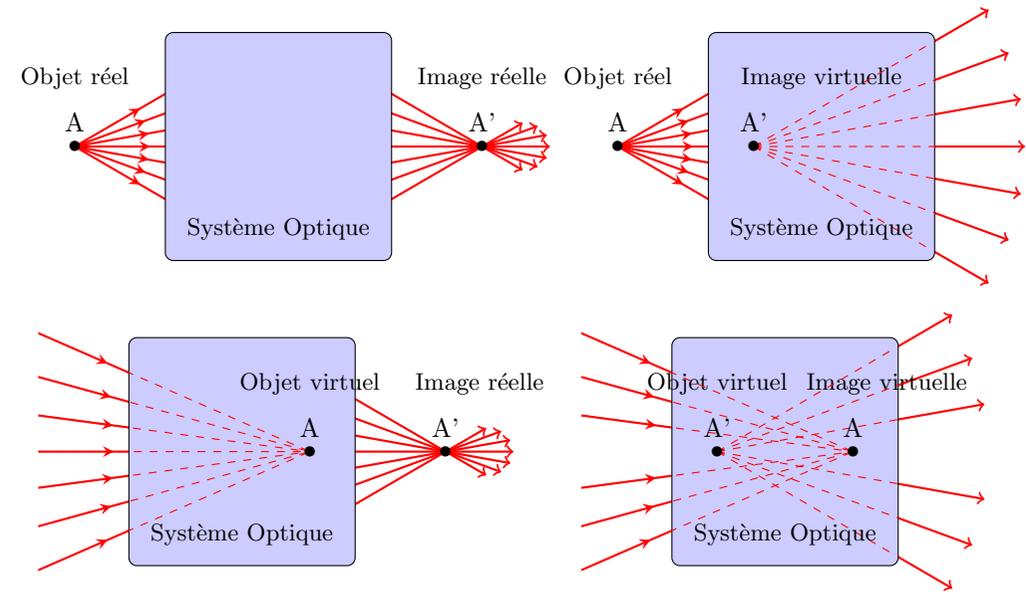
2 Objet et image

★ L'objet correspond aux rayons incidents (faisceau lumineux qui frappe la face d'entrée du système optique). On le notera généralement A .

Il peut être **primaire** (s'il émet de la lumière) ou **secondaire** (s'il se contente d'en diffuser), **ponctuel** (si ses dimensions sont faibles devant la distance d'observation) ou **étendu**, et enfin **réel** (s'il est placé avant la face d'entrée du système optique) ou **virtuel** (s'il est placé après la face d'entrée).

★ L'image correspond aux rayons lumineux émergents (faisceau lumineux qui quitte la face de sortie). On la notera généralement A' .

Elle peut être **réelle** (si elle est placée après la face de sortie du système optique) ou **virtuelle** (si elle est placée avant la face de sortie), **ponctuelle** (la zone dans laquelle se croisent les rayons émergents est de petite dimension devant la taille du capteur) ou **étendue**.



II Qualité des images

1 Stigmatisme

Pour pouvoir observer des images nettes, il faut qu'un objet ponctuel ait une image ponctuelle (ou de dimensions suffisamment faibles). Le point image est alors dit **conjugué** de l'objet ponctuel.

Si tous les rayons issus du point objet A se croisent en A' après avoir traversé le système optique, alors celui-ci est dit **stigmatique** pour le couple (A, A') .

Ce stigmatisme peut être *rigoureux* comme dans le cas du miroir plan, ou seulement *approché* dans le cas des systèmes usuels, sous certaines conditions d'utilisation. La nature granulaire des récepteurs (cellules de la rétine, pixel de capteur numérique, grain de pellicule argentique) nous permet de nous contenter d'un stigmatisme approché.

Les conditions pour obtenir un tel **stigmatisme approché** pour un système dit **centré** (présentant un axe de révolution commun à tous les dioptries et catadioptries qui le constituent, appelé *axe optique*) sont les **conditions de Gauss**, qui consistent à se

limiter aux **rayons paraxiaux**.

Rayons paraxiaux :

- proches de l'axe optique
- faiblement inclinés sur l'axe optique

Pour obtenir de tels rayons, les instruments d'optique usuels comportent généralement un ou plusieurs diaphragmes qui limitent l'inclinaison des rayons incidents.

Relation de conjugaison

Lorsqu'un système donne d'un point objet A une image A' , on dit qu'il conjugue A et A' ou que A' est le conjugué de A . La relation de conjugaison est la relation mathématique qui relie la position de A avec celle de A' :

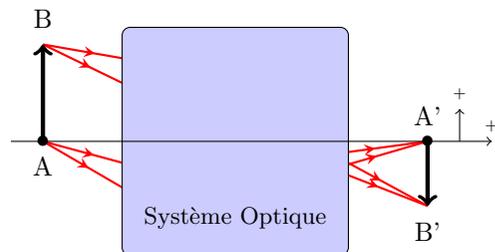
$$f(A, A') = 0$$

2 Aplanétisme

Lorsqu'on cherche à faire l'image d'un objet étendu, constitué d'un ensemble d'objets ponctuels, le stigmatisme doit se conserver pour tous les points de l'objet.

La propriété d'**aplanétisme** caractérise la conservation du stigmatisme dans un plan transverse : l'image $A'B'$ d'un objet étendu transverse AB (perpendiculaire à l'axe optique) est également transverse.

Pour les systèmes centrés utilisés dans les conditions de Gauss, le stigmatisme approché s'accompagne d'un aplanétisme approché, qui permet l'observation d'images nettes, non déformées.



On définit alors le grandissement transversal γ :

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

- ★ si $\gamma > 1$, l'image est droite et agrandie.
- ★ Si $0 < \gamma < 1$, l'image est droite et rétrécie.

- ★ Si $-1 < \gamma < 0$, l'image est renversée et rétrécie.
- ★ Enfin, si $\gamma < -1$, l'image est renversée et agrandie.

III Systèmes centrés focaux

On se place désormais systématiquement dans les conditions de Gauss.

1 Objet à l'infini

On associe à un point objet (ou image) à l'infini un faisceau de lumière parallèle.

Si le point objet à l'infini est sur l'axe optique A_∞ , les rayons provenant de A_∞ sont parallèles à l'axe optique. Sinon, les rayons provenant de B_∞ (n'appartenant pas à l'axe optique) présentent tous la même inclinaison par rapport à l'axe optique.

2 Foyer image F' et plan focal image

Le **foyer principal image** d'un système optique centré est l'image d'un objet à l'infini sur l'axe optique, on le note F' :

$$A_\infty \xrightarrow{\text{système optique centré}} F'$$

Le système étant stigmatique, **tout rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par F'** .

Ce foyer image peut être *réel*, *virtuel* ou ne pas exister, le système étant alors dit *afocal*.

Si le système centré est aplanétique (au moins de façon approchée), alors tout point du plan de l'infini (plan transverse contenant A) a son image dans le plan transverse contenant F' . Ce plan est appelé **plan focal image**. L'image d'un point B_∞ hors de l'axe est dans le plan focal image, en Φ' , appelé *foyer secondaire image*.

3 Foyer objet F et plan focal objet

D'après le principe du retour inverse de la lumière, il existe un point de l'axe optique dont l'image est renvoyée à l'infini, il s'agit du **foyer principal objet**, noté F .

$$F \xrightarrow{\text{système optique centré}} A'_\infty$$

Tout rayon incident passant par F émerge du système optique centré parallèlement à l'axe optique.

Là encore, tous les points du plan transverse passant par F ont leur image renvoyée à l'infini (par aplanétisme), on les appelle des *foyers secondaires objets*.

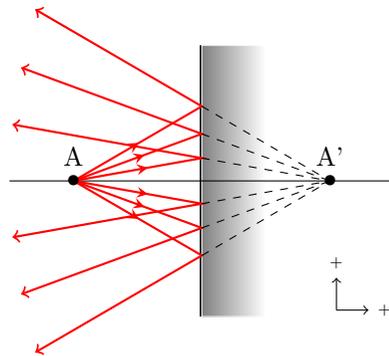
Attention ! Malgré les notations, F' N'EST PAS L'IMAGE DE F .

IV Le miroir plan

Le miroir plan est une surface plane dont le pouvoir de réflexion est proche de 1. C'est le seul type de miroir qui soit rigoureusement stigmatique et aplanétique

1 Stigmatisme

Considérons un point source A envoyant des rayons lumineux sur un miroir plan. Une simple construction des rayons réfléchis montre que tous les rayons émergents semblent provenir d'un point A' , image virtuelle de A . De la même manière, si l'on inverse le sens de propagation de la lumière, on constate que l'image d'un objet virtuel placé en A' est une image réelle placée en A

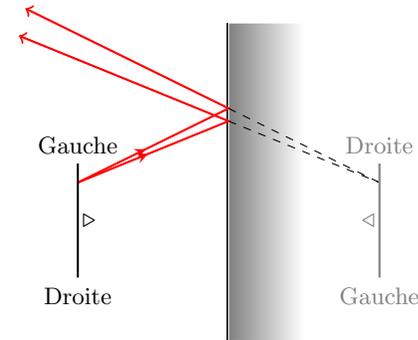


Le miroir plan est donc **rigoureusement stigmatique**. La relation de conjugaison qui lie la position de l'objet A à celle de l'image associée A' s'écrit

$$\overline{AH} = \overline{HA'}$$

où H est le projeté orthogonal de A sur le miroir : **l'image de A est le symétrique orthogonal de A .**

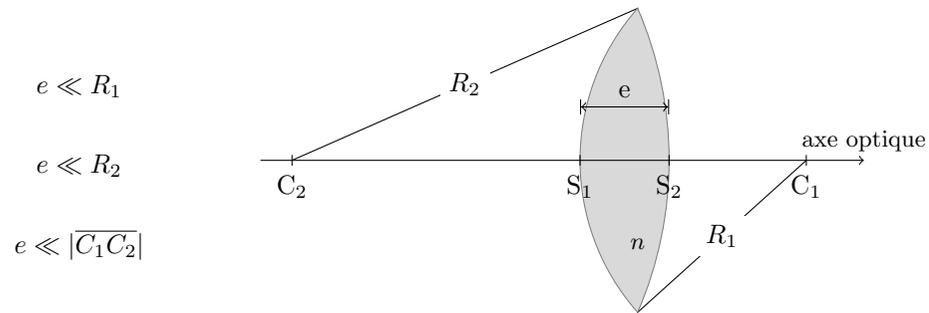
2 Aplanétisme



Lentilles sphériques minces

I Présentation

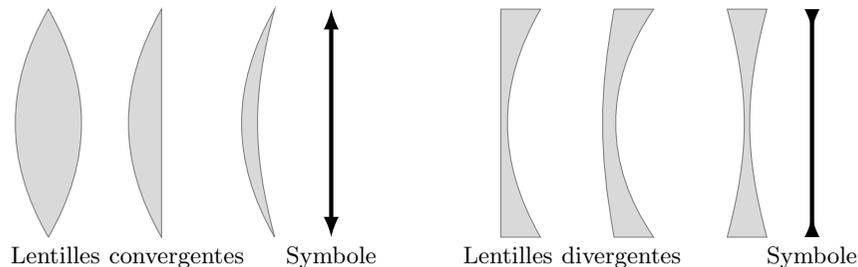
Une lentille sphérique est formée par l'association de deux dioptries sphériques de grand rayon de courbure par rapport à l'épaisseur de la lentille. Plus précisément, si l'on note R_1 et R_2 les rayons de courbure, C_1 et C_2 les centres de courbure et e l'épaisseur de la lentille, on a



Dans l'approximation des lentilles minces, les sommets S_1 et S_2 sont considérés confondus en un point O appelé **centre optique**.

On distingue deux types de lentilles :

- les lentilles à bords minces qui sont convergentes,
- les lentilles à bords épais qui sont divergentes.



II Caractéristiques optiques

On définit la **distance focale image** d'une lentille mince par la distance entre le centre optique de la lentille et le foyer principal image : $f' = \overline{OF'}$.

Les deux foyers F et F' sont symétriques l'un de l'autre par rapport au centre optique de la lentille.

La **vergence** est l'inverse de la distance focale image $V = \frac{1}{f'}$

On distingue deux sortes de lentilles minces :

- les lentilles **convergentes**, avec $f' > 0$, referment les faisceaux lumineux ; les foyers image et objet sont **réels**.
- les lentilles **divergentes**, avec $f' < 0$, ouvrent les faisceaux lumineux ; les foyers image et objet sont **virtuels**.

III Constructions

1 Les fondamentaux

Pour construire l'image d'un objet étendu on obéira à ces quelques principes :

On se placera dans l'**approximation de Gauss** : il y a donc **stigmatisme approché** et **aplanétisme approché**.

Pour trouver l'image d'un point il suffit de considérer **deux rayons** issus de ce point ; tous les autres issus du même point passeront par le point image.

De plus, l'image d'un point sur l'axe optique étant sur l'axe optique, pour trouver l'image d'un objet droit vertical AB (A est sur l'axe optique et B est l'extrémité de l'objet) il suffit de trouver B' l'image de B ; on sait alors que l'image est $A'B'$ avec A' situé sur l'axe optique tel que $A'B'$ est perpendiculaire à l'axe optique.

Pour trouver l'image d'un point il faut choisir des rayons dont on connaît le comportement :

- Tout rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image F' (réellement si la lentille est convergente et virtuellement si la lentille est divergente).

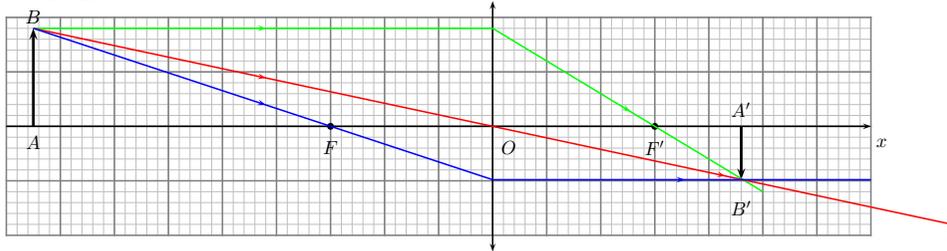
- Tout rayon incident passant (ou se prolongeant) en F foyer objet émerge parallèlement à l'axe optique.
- Tout rayon passant par O n'est pas dévié.

Une fois les rayons tracés on détermine si l'image est réelle ou virtuelle. Si les rayons issus de B se coupent effectivement en B' , alors B' est une image réelle. On peut la capturer sur un écran. Si les rayons issus de B divergent après avoir traversé la lentille en semblant provenir de B' , alors B' est une image virtuelle visible à l'œil nu mais que l'on ne peut pas capturer directement sur un écran.

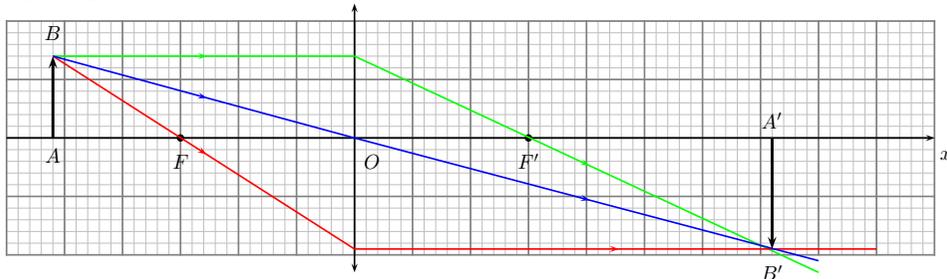
2 Image d'un objet AB

a Cas des lentilles convergentes $f' > 0$

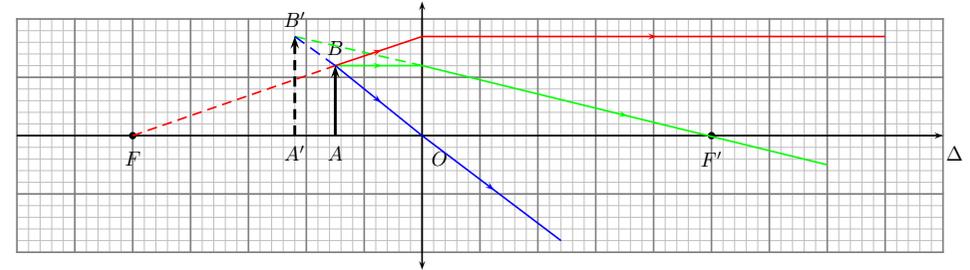
A avant $2F$:



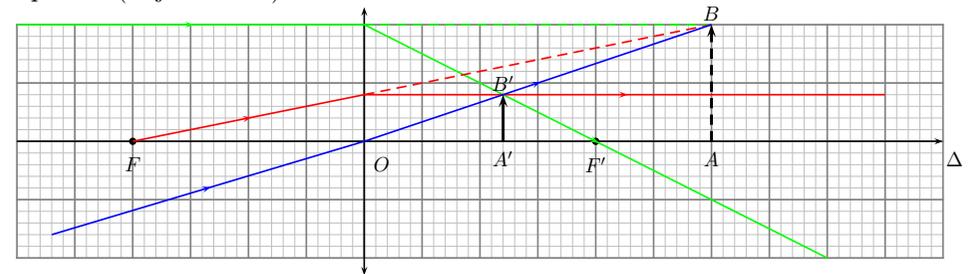
A entre $2F$ et F



A entre F et O

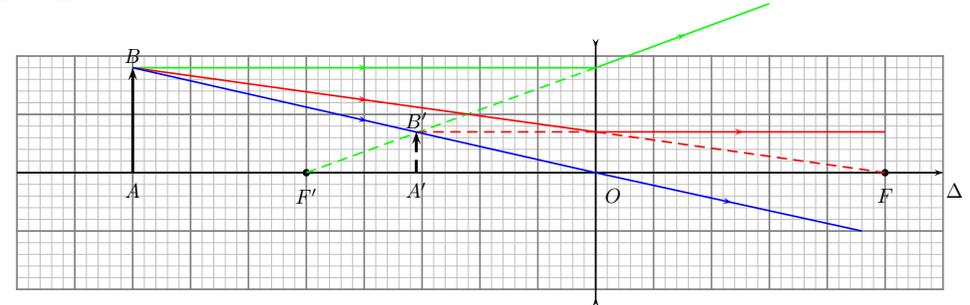


A après O (objet virtuel)

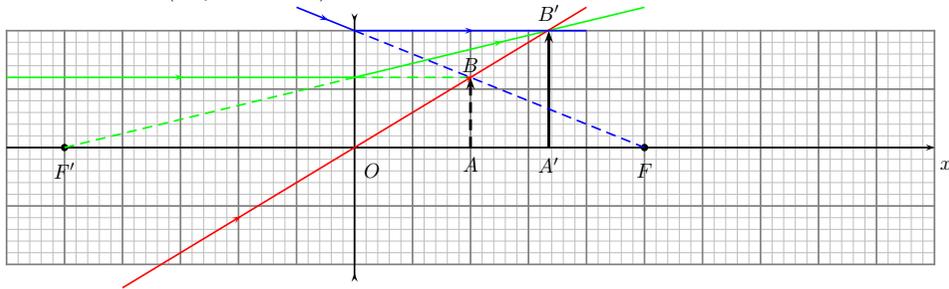


b Cas des lentilles divergentes $f' < 0$

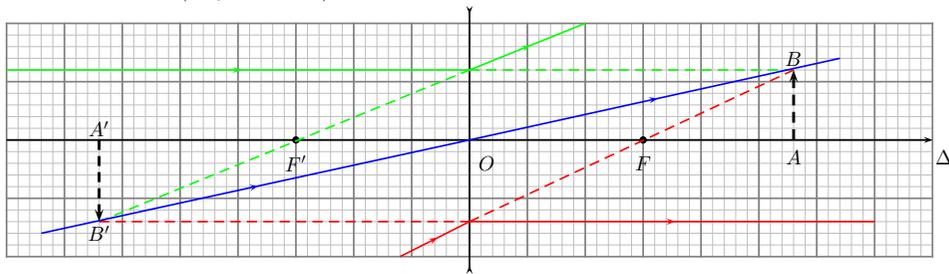
A avant O



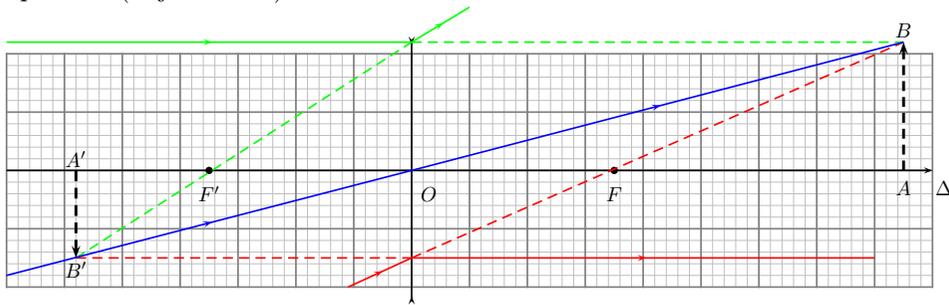
A entre O et F (objet virtuel)



A entre F et 2F (objet virtuel)



A après 2F (objet virtuel)



3 Rayon transmis

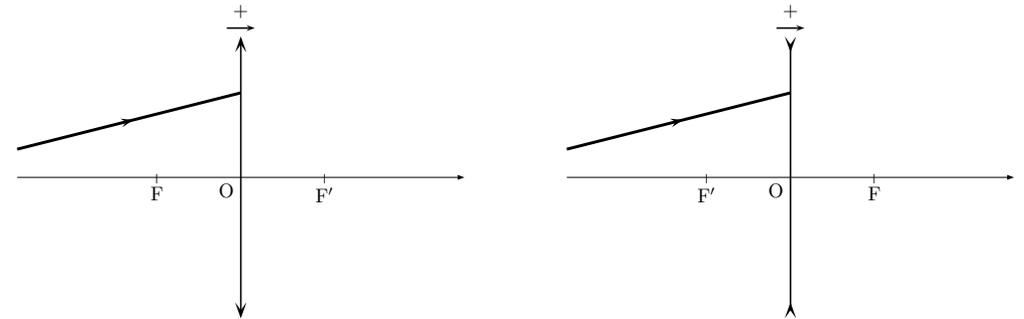
Pour construire le rayon émergent correspondant à un rayon incident quelconque, on peut utiliser l'une des trois méthodes suivantes, qui reposent sur le stigmatisme et l'aplanétisme de la lentille mince :

- Le rayon parallèle au rayon incident quelconque passant par O n'est pas dévié

et coupe le plan focal image en un foyer secondaire image Φ' . Le rayon émergent correspondant au rayon incident quelconque passe lui aussi par Φ' .

- Le rayon incident quelconque coupe le plan focal objet en un foyer secondaire objet Φ . Par ce point Φ passe également le rayon (ΦO) qui émerge de la lentille sans être dévié. Le rayon incident quelconque émerge de la lentille parallèlement au rayon (ΦO) .
- On choisit un point B sur le rayon incident quelconque. On trace son image B' en utilisant 2 des 3 rayons fondamentaux. Le rayon émergent doit passer par B'.

Exemples :



IV Relations de conjugaison

Soit A' l'image de A par une lentille mince : $A \xrightarrow{\mathcal{L}} A'$. Il existe des relations de conjugaison qui donnent la position et la taille de l'image en fonction de la position et la taille de l'objet. On les établit, dans les conditions de Gauss, à partir d'une construction géométrique.

1 Relation de conjugaison de Newton

L'objet est repéré par rapport au foyer principal objet F .

L'image est repérée par rapport au foyer principal image F' .

Relations de Newton

$$\begin{aligned} \text{Position} \quad & \overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = ff' = -f'^2 \\ \text{Grandissement} \quad & \gamma \triangleq \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = -\frac{f}{\overline{FA}} \end{aligned}$$

2 Relation de conjugaison de Descartes

L'objet et l'image sont tous les deux repérés par rapport au centre optique O de la lentille.

Relations de Descartes

$$\begin{aligned} \text{Position} \quad & \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \\ \text{Grandissement} \quad & \gamma \triangleq \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \end{aligned}$$

3 Condition de projection

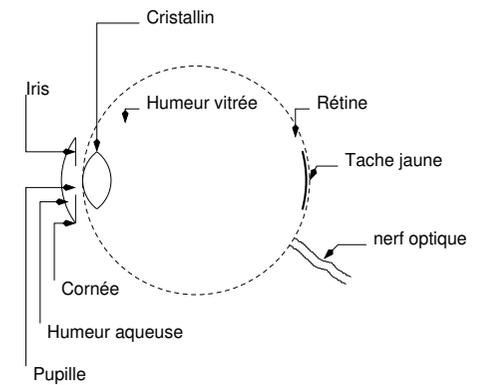
Lorsqu'on veut projeter une image réelle d'un objet réel sur un écran, il faut remplir la condition $D \geq 4f'$, où D est la distance entre l'objet et l'image et f' la distance focale image de la lentille convergente utilisée pour la projection.

On peut montrer qu'il existe deux positions de la lentille qui donnent une image nette sur l'écran, l'une avec un grandissement γ_1 , et l'autre avec un grandissement $\gamma_2 = \frac{1}{\gamma_1}$.

On choisit naturellement celle avec un grandissement tel que $|\gamma| > 1$ si on souhaite une image agrandie, cela correspond à placer la lentille du côté de l'objet.

V Quelques systèmes optiques usuels**1 Modèle optique de l'œil****a Description sommaire de l'œil**

L'œil possède une forme pratiquement sphérique de rayon voisin de 15 mm avec une courbure plus prononcée vers l'avant, au niveau de la cornée (de rayon 8 mm). Il se comporte comme un appareil photographique pour l'observation d'objets lumineux.



Élément optique	Fonction	Caractéristiques
Objectif : dioptré sphérique (cornée) et lentille mince biconvexe (cristallin)	Formation de l'image	Système convergent de vergence $+20 \delta$ donnant une image inversée. Le cristallin sépare l'humeur aqueuse de l'humeur vitrée
Diaphragme : pupille	Réglage de la quantité de lumière pénétrant dans l'œil	La pupille est entourée par l'iris, celui-ci agissant (réflexes inconscients) sur la pupille par des muscles circulaires et longitudinaux
Obturbateur : paupière	Réglage de la durée d'admission de la lumière	L'ouverture et la fermeture de la paupière sont déclenchées par un réflexe
Récepteur de la lumière : rétine	Impression de l'image au niveau de la tache jaune	Elle est constituée de cellules (μm) sensibles à la lumière

Nerf optique	Perception de l'image	Il transmet l'information à l'aire optique du cerveau qui la decode
--------------	-----------------------	---

b Phénomène d'accommodation

★ punctum remotum et punctum proximum de l'œil normal

Le point objet A_0 à l'infini appelé **punctum remotum** et noté PR est vu nettement par l'œil normal au repos, l'image correspondante étant formée au foyer F'_O du cristallin : la rétine.

Afin que l'image d'un objet AB à distance finie se trouve également sur la rétine, l'œil doit déplacer son foyer. Il doit diminuer la distance focale du cristallin, en bombant la face antérieure de la lentille biconvexe associée. Il s'agit du phénomène d'**accommodation**, notamment ressenti physiologiquement lorsqu'on fait un effort pour lire de très près.

Le **punctum proximum** ou PP est le point objet, vu nettement par l'œil avec une accommodation maximale. Ce point limite caractérise la distance minimale de vision distincte : d_m .

La faculté d'accommodation, liée à une action musculaire de l'œil, décroît avec l'âge.

La convention pour les instruments commerciaux, est de considérer que

$$d_m = 25 \text{ cm} = \frac{1}{4} \text{ m}$$

Âge (ans)	10	30	40	50
d_m (cm)	10	15	25	50 puis presbyte

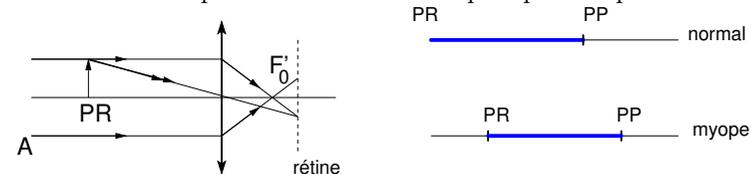
★ Les défauts de l'œil

L'œil normal, où **emmétrope**, a un champ de vision qui s'étend de $d_m \simeq 25 \text{ cm}$ à D_m infini, l'effort d'accommodation diminuant lorsque la distance augmente.

• Myopie

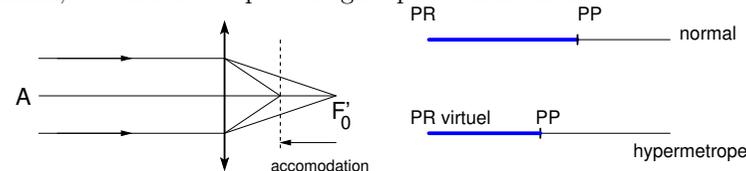
Le cristallin est trop convergent. Pour la vision à l'infini, l'image est en avant de la rétine, donc le myope ne voit pas de loin. Pour le PR , le

myope n'accommode pas et obtient une image nette sur la rétine. Sa faculté d'accommodation lui permet d'avoir un PP plus proche que l'œil normal.



• Hypermétropie

Le cristallin n'est pas assez convergent. L'hypermétrope doit accommoder même à l'infini, et son PP est plus éloigné que l'œil normal.



• Presbytie

L'œil perd sa faculté d'accommodation et ne voit plus qu'au voisinage de son PR , c'est-à-dire de loin.

• Astigmatisme

L'œil présente des défauts de symétrie de révolution sphérique, ce qui se traduit par des aberrations géométriques.

2 Lunette de visée

Dans la vie de tous les jours, l'observation des objets ou des images se fait à l'œil nu, ce qui limite fortement la précision et le pouvoir de résolution. On peut améliorer les performances à l'aide d'outils usuels de laboratoire.

a Objet secondaire et condenseur

Une source lumineuse constitue un objet primaire. Par contre, un objet secondaire a besoin d'être de la lumière. On utilise à cet effet un condenseur, dont le rôle est de concentrer la lumière d'une

Un condenseur est constitué de deux lentilles plan-convexes accolées, et il est positionné de telle sorte que les rayons ne convergent pas sur l'objet (sinon, l'image de la source jouerait le rôle d'objet virtuel superposé à l'objet étudié) mais éclairent la totalité de l'objet.

b Objet à l'infini : collimateur

Pour obtenir un objet à l'infini (nécessaire pour la mise au point de nombreux instruments), on utilise un collimateur. Il comprend :

- une source d'éclairage
- un réticule (deux fils en croix)
- une lentille, dite objectif du collimateur (L_c).

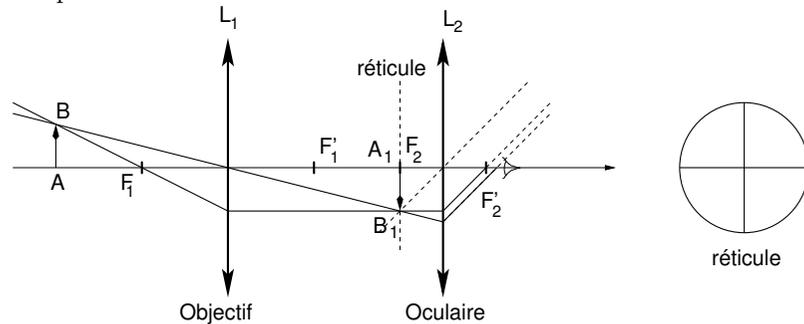
Le réglage du collimateur consiste à amener le réticule au foyer objet F_c grâce à une molette :

$$\text{Réticule en } F_c \xrightarrow{L_c} A'_\infty.$$

L'image réelle A'_∞ joue alors le rôle d'objet virtuel à l'infini.

c Principe d'une lunette

Une lunette peut être schématisée ainsi :



- un **objectif** (lentille convergente L_1 du côté de l'objet) donnant de l'objet étudié AB une image intermédiaire A_1B_1 .
- un **oculaire** (lentille convergente L_2 du côté de l'œil) jouant le rôle de loupe pour l'observation de A_1B_1 . Si A_1B_1 est placée en F_2 , l'image finale $A'B'$ se forme alors à l'infini (vision sans accommodation pour l'œil normal).
- un **réticulaire** (deux fils croisés à angle droit) que l'on superpose à l'image $A'B'$ en le plaçant lui aussi en F_2 .

REMARQUE : Un oculaire est lui-même constitué par un doublet de lentilles convergentes non accolées, mais la modélisation précédente est suffisante pour comprendre les propriétés et réglages d'une lunette.

d Lunette de visée à l'infini

En pratique la lunette est constituée de trois tubes, l'un contenant l'objectif, l'autre le réticule et le troisième l'oculaire. Il existe deux molettes de réglage dans une lunette :

- **réglage (1)** de la distance oculaire - réticule : on place l'œil devant la lunette soit au foyer F'_2 de l'oculaire, et on déplace le réticule de façon à le voir net et sans accommodation (réticule au foyer objet F_2)
- **réglage (2)** de la distance objectif - réticule pour une visée à l'infini : il suffit de pointer un objet très éloigné. Son image A_1B_1 se forme alors au foyer image F'_1 et on l'amène à coïncider avec F_2 . En pratique, on tourne la molette de manière à superposer image finale et réticule.

Il faut cependant faire attention aux erreurs de parallaxe (plans proches mais différents dus à l'accommodation de l'œil : déplacer la tête pour vérifier une parfaite superposition)

Réglage à l'infini :

$$A_\infty \xrightarrow{L_1} F'_1 = F_2 \xrightarrow{L_2} A'_\infty.$$

système afocal

REMARQUE 1 : Le réglage d'une lunette de visée à l'infini est fait pour l'œil emmétrope (normal). Si un myope utilise cette lunette, il ne touche pas à la molette de réglage de l'objectif (l'image se superpose au réticule) mais il doit en revanche jouer sur la molette de réglage de l'oculaire pour amener l'image finale $A'B'$ à son propre PR pour pouvoir observer l'image sans accommodation.

REMARQUE 2 : Le dispositif d'éclairage du réticule n'est pas évoqué ici, même s'il est nécessaire.

e Viseur à frontale fixe

Il s'agit d'une lunette observant un objet à distance finie. Désormais, le système n'est plus afocal ($F'_1 \neq F_2$) et l'objet étudié est en fait placé au foyer objet F du système $\{L_1, L_2\}$.

$$AB \text{ en } F \xrightarrow{L_1} A_1B_1 \text{ en } F_2 \xrightarrow{L_2} A'_\infty B'_\infty \text{ (œil)}.$$

Transformer une lunette de visée à l'infini en viseur revient à augmenter la distance objectif - réticule (réglage (2)) puis à la bloquer. En revanche, pour l'œil emmétrope, le réglage (1) est inchangé, le réticule est toujours en F_2 . Une fois cette position choisie,

on déplace le viseur sur le banc optique pour réaliser des pointés longitudinaux. Tout objet réel ou virtuel est repéré en superposant le réticule à l'image intermédiaire A_1B_1 .

Comme la distance objet-objectif reste fixe pour toute visée nette (objet au foyer F de $\{L_1, L_2\}$), de l'ordre de 10 cm à 30 cm selon le viseur, un tel système est dit *viseur à frontale fixe*.

Pour déterminer la distance de deux points (objets ou images virtuels d'un autre instrument par exemple), on les vise successivement et on mesure sur le banc optique le déplacement de l'objectif du viseur. Cette technique peut être utilisée en focométrie pour la méthode des points conjugués en cas d'image virtuelle par exemple, puisqu'on ne peut matérialiser ces dernières sur un écran.

3 Lunette astronomique

— Description - construction de l'image

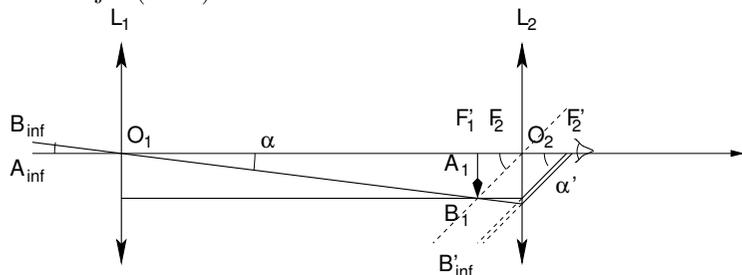
Une lunette astronomique correspond à une lunette de visée à l'infini, mais avec des performances bien supérieures, dues à un objectif convergent de grande distance focale. L'objectif est en effet assimilable à une lentille convergente de distance focale f'_1 de 1 à 20 m et l'oculaire étant une lentille convergente de distance focale f'_2 de l'ordre du cm.

L'objet étudié (astre) étant à l'infini et l'image devant se former à l'infini (pour une observation sans accommodation par un oeil normal), le système doit être **afocal**. L'intervalle optique Δ défini comme la distance entre le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire est alors nulle :

$$\Delta = \overline{F'_1 F_2} = 0$$

$$A_\infty \xrightarrow{L_1} F'_1 = F_2 \xrightarrow{L_2} A'_\infty \text{ (oeil)}.$$

La qualité essentielle d'une lunette est d'augmenter fortement le diamètre angulaire de l'objet (astre) observé.



— Latitude de mise au point

L'astre étant toujours à l'infini, l'image intermédiaire est toujours au foyer objet de l'oculaire ($F'_1 = F_2$). La latitude de mise au point est donc celle de l'oculaire, soit celle d'une loupe. La profondeur de champ est donc $\ell = \frac{f'_2{}^2}{d_m}$, de l'ordre de 0,4 mm si $f'_2 = 1$ cm et $d_m = 25$ cm.

— Grossissement

La puissance n'a plus d'intérêt puisque l'objet est caractérisé par son diamètre apparent α et non par sa taille AB . Par définition, $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$. Comme le montre la figure précédente, on a immédiatement :

$$\alpha \simeq \tan \alpha = \frac{A_1 B_1}{f'_1} \quad \text{et} \quad \alpha' \simeq \tan \alpha' = \frac{A_1 B_1}{f'_2}$$

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_1}{f'_2}$$

— Pouvoir séparateur

Il est comme précédemment limité par l'oeil et la nature ondulatoire de la lumière (effets de diffraction), auxquels il faut ajouter les perturbations atmosphériques (variations de l'indice de l'air). On atteint couramment des valeurs α_m de 10^{-6} à 10^{-7} radians.

— Quelques variantes

LE TÉLÉSCOPE : l'objectif est remplacé par un miroir sphérique

LA LUNETTE DE GALILÉE (jumelles) : l'oculaire est désormais constitué par une lentille divergente, ce qui permet de raccourcir la distance entre l'objectif et l'oculaire (car $F'_1 = F_2$ est alors après la lentille L_2).

4 L'appareil photographique

5 La fibre à saut d'indice