Chapitre O2 : Miroir plan et lentilles minces

I. Généralités

1. Système optique

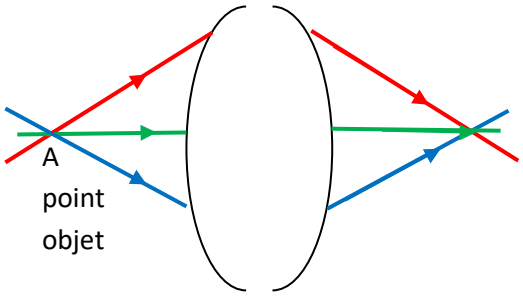
Afin d'agir sur la propagation de la lumière, on utilise un système optique (S). C'est un ensemble de milieux homogènes transparents et isotropes (MHTI) séparés par des dioptres ou par des miroirs.

*Un système optique peut contenir uniquement des dioptres (système **dioptrique**), uniquement des miroirs (système **catoptrique**) ou un ensemble de dioptres et miroirs (système **catadioptrique**).*

Remarques :

- Par convention, le sens positif de parcours de la lumière est dirigé de la gauche vers la droite.
- On appelle rayon incident, un rayon qui s'approche de (S) et rayon émergent, un rayon qui s'éloigne de (S).

2. Notion d'objet



Un point A est un **point objet** s'il est à l'intersection des rayons lumineux incidents sur le système optique.

Il existe plusieurs types d'objet :

- L'objet …….. : il émet spontanément de la lumière : ….
- L'objet …….. : il diffuse de la lumière lorsqu'il est éclairé : ….

Si ses dimensions sont petites devant la distance d'observation, un objet est dit ponctuel.

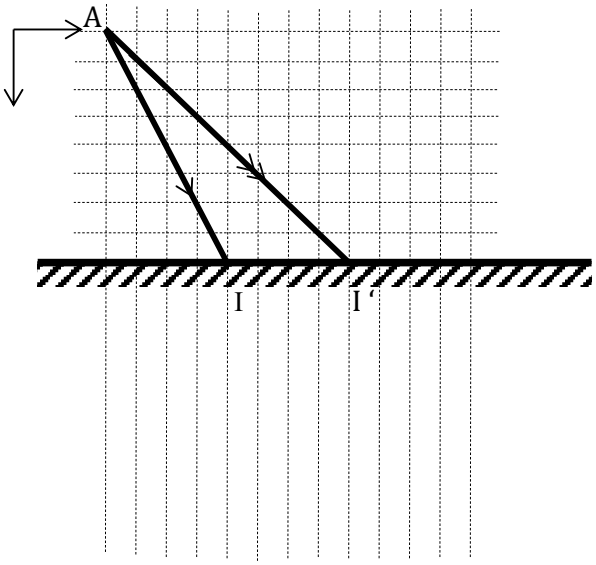
Exemple :

Sinon, l'objet est dit étendu, on le traite alors comme un ensemble d'objets ponctuels indépendants les uns des autres.

Objet à l'infini : Pour un objet très éloigné du système optique, les **rayons lumineux** incidents sur le système optiques sont quasiment **parallèles entre eux**.

II. Cas du miroir plan. Stigmatisme rigoureux.

1. Construction



Considérons un objet A.

D'après les lois de Snell, l'angle de réflexion est l'opposé de l'angle d'incidence.

On construit donc les rayons IR et I'R', symétriques des rayons incidents AI et AI' par rapport aux normales en I et I' (Lois de la réflexion).
On prolonge ensuite ces rayons en pointillés jusqu'à trouver un point d'intersection.

Ils semblent provenir du point A' …… de A par rapport à (M).

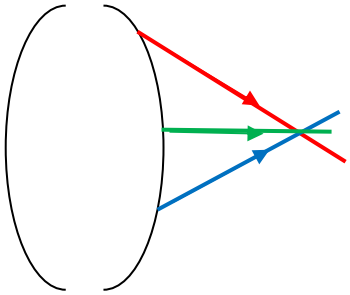
Conventions de tracé :

- *Les traits de construction peuvent être laissés sur la figure.*
- *Les rayons correspondant à un trajet réellement suivi par la lumière sont représentés en trait plein. Le reste doit être représenté en pointillés.*
- *Le sens de propagation de la lumière doit toujours être indiqué par une flèche.*

2. Propriétés

Tous les rayons issus de l'objet ponctuel A et se réfléchissant sur le miroir semblent provenir de A'. C'est **l'image conjuguée de A** par le miroir.

On note :



Définition : Un point image correspond à l'intersection de rayons lumineux émergents (sortants) du système optique.

Si l'on recommence l'opération de construction avec d'autres rayons lumineux, on remarque que tout rayon issu de A émerge du système optique en semblant venir de A'.

Pour le miroir plan, un objet A possède une unique image A', on dit qu'il est **rigoureusement stigmatique**..

Définition : Un système optique (S) est dit **rigoureusement stigmatique** pour le couple (A,A') si tous les rayons incidents passant par A émergent du système optique en passant par le point image A'.
Pour un système stigmatique, **l'image d'un point par le système optique est un unique point**.

3. Caractère réel ou virtuel

On remarque que des rayons incidents ou émergents d'un système optique peuvent réellement passer par un objet ou une image mais qu'ils peuvent également sembler y passer (traits pointillés).
Les objets ou les images ainsi définis seront dits réels ou virtuels suivant que les rayons incidents ou émergents passent réellement ou non par ces points.

Dans le cas du miroir plan, A est un objet …… alors que A' est une image …….

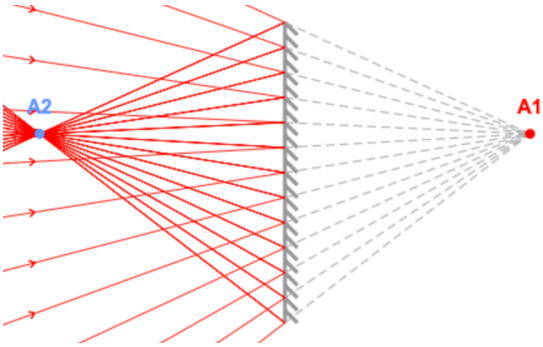
L'image virtuelle : se forme avant la face de sortie du système (au sens de la lumière). (Elle ne peut pas être vue sur un écran. On ne peut pas superposer d'objet réel à cette image).

Exemple :

L'Image réelle : se forme après la face de sortie (au sens de la lumière) du système. On peut la « toucher ».

Exemple :

Il existe aussi des *Objets virtuels* dont le point de convergence des rayons lumineux est situé après la face d'entrée. Il a obligatoirement été formé par un système optique précédent (faisceau convergent)



Si l'on souhaite obtenir une image réelle avec un miroir plan, il faut alors utiliser un objet virtuel.

4. Relation de conjugaison du miroir plan

L'image A' est le symétrique de A par rapport au miroir plan.
Soit H le projeté orthogonal de A sur le miroir (M), on a alors la relation de conjugaison algébrique :

Ici $\overline{HA} < 0$ et $\overline{HA'} > 0$ sont des distances algébriques (leur signe dépend de la convention d'orientation).

III. Lentilles minces.

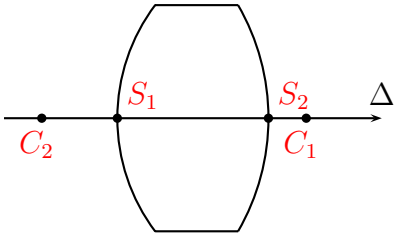
En dehors du miroir plan, nous n'utiliserons et n'étudierons que des lentilles minces.

1. Définition

a. Généralités.

Une lentille sphérique est un système optique l'association de deux dioptres sphériques (ou plan).

- La droite (S_1S_2) qui relie les sommets des deux dioptres est un axe de symétrie de révolution appelé : **axe optique Δ**.
  Il y a invariance par rotation autour de cet axe.
- L'axe optique est orienté dans le sens de propagation de la lumière incidente (de la gauche vers la droite).

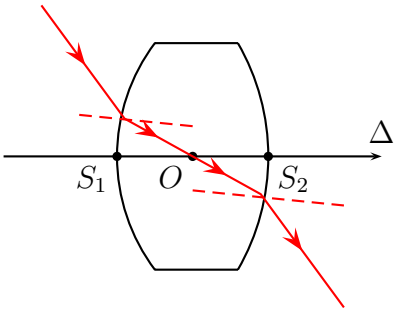


Lentille mince :

Une lentille sphérique est dite « mince » lorsque son épaisseur $e = S_1S_2$ est faible par rapport aux rayons de courbure des deux dioptres.

Propriétés :

- Dans ce cas, S_1 et S_2 sont confondus en un point O :
  C'est le centre optique de la lentille.
- Au voisinage de l'axe optique, on peut assimiler la lentille à une lame à faces parallèles et le rayon ressort parallèlement à sa direction incidente, **il n'est que décalé**.
  Si $e = S_1S_2 \approx 0$ le décalage est négligeable, le rayon n'est pas dévié.



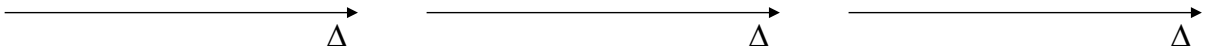
Conclusion : Tout rayon passant par O n'est pas dévié.

b. Types de lentilles

Les lentilles convergentes : Les rayons émergents de la lentille sont déviés **vers l'axe optique.**

Leur bord est plus mince que leur épaisseur au centre.

Les lentilles divergentes : Les rayons lumineux émergents de la lentille **s'écartent de l'axe optique.**

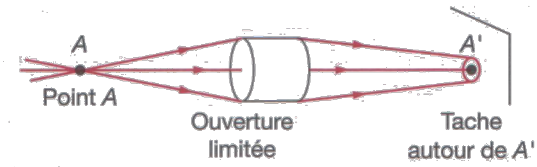


Leur bord est plus épais que leur épaisseur au centre.

On utilise alors la modélisation suivante :

2. Stigmatisme et aplanétisme

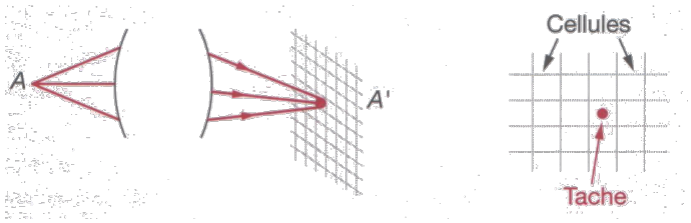
<u>Observation :</u>



Si on éclaire une lentille avec un objet ponctuel A, l'image de cet objet n'est pas un unique point A'. On obtient alors plusieurs images (une par paire de rayons lumineux). On observe une tache.

La lentille n'est pas rigoureusement stigmatique.

Cependant, on peut tout de même obtenir des images de bonne qualité. En effet, les capteurs optiques (rétine de l'œil, cellule d'appareil photographiques …) possèdent une résolution limitée. Ainsi si la tâche est suffisamment petite, le capteur ne fera aucune distinction entre la tache et un point.



On peut se placer dans ce cas en éclairant le système optique dans **les conditions de Gauss** :

Définition : L'approximation de Gauss consiste à ne prendre en compte que les rayons incidents issus d'un point objet A qui sont :

- **Faiblement inclinés par rapport à l'axe optique.**
- **Proches de l'axe optique.**

Ce sont les rayons paraxiaux.

Conséquences : Dans les conditions de Gauss, l'image d'un point par un système centré, est considérée comme un point. Le système conserve la propriété de **stigmatisme approché**.

Il suffit alors de 2 rayons pour placer l'image d'un objet.

Dans la pratique, pour se placer dans les conditions de Gauss :

- *On utilise des objets de faibles dimensions proches de l'axe optique.*
- *On utilise un diaphragme d'entrée en limitant l'inclinaison des rayons incidents.*

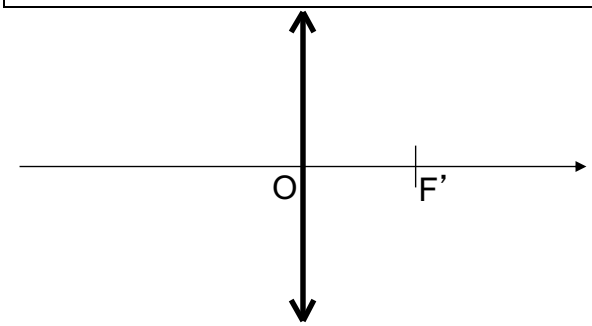
La réalisation expérimentale demande des compromis. En effet, diminuer la taille du diaphragme permet d'améliorer le stigmatisme, mais cela réduit également la luminosité.

3. Propriétés optiques des lentilles.

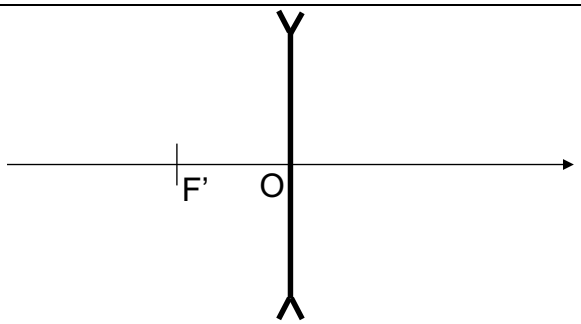
a. Foyers principaux.

On peut associer deux points particuliers F et F' à une lentille mince.

Le point **F'** appelé **foyer principal image** est l'image conjuguée d'un **objet** situé **à l'infini** sur l'axe Δ.

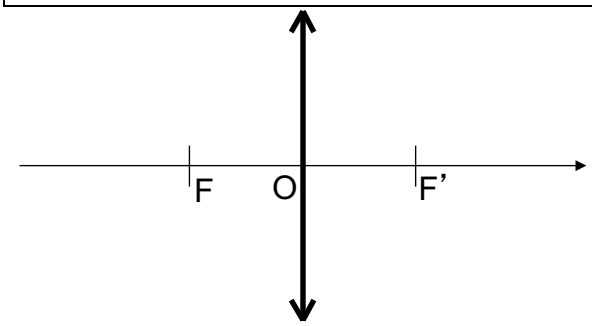


Lentille convergente

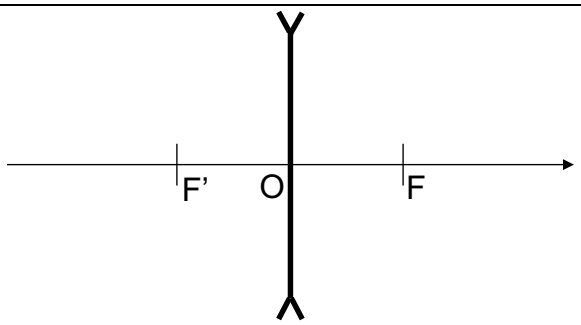


Lentille divergente

Le point **F** appelé **foyer principal objet** est le point dont l'**image** conjuguée est située **à l'infini** sur l'axe Δ.



Lentille convergente



Lentille divergente

Propriétés :

- On appelle **distance focale image** la longueur algébrique $f' = \overline{OF'}$. Elle caractérise la lentille.
- Le foyer objet F est le **symétrique** du foyer principal image F' par rapport à O *(mais ils ne sont pas image l'un de l'autre !)*
- Pour une lentille convergente, F' est réel f'……
- Pour une lentille divergente, F' est virtuel f'……
- On appelle vergence d'une lentille la grandeur exprimée en m^{-1} ou dioptries δ :

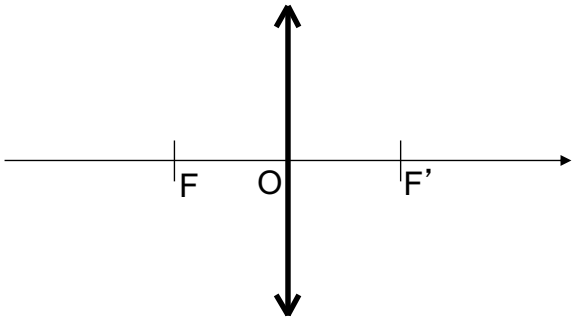
$$V = \frac{1}{f'}$$

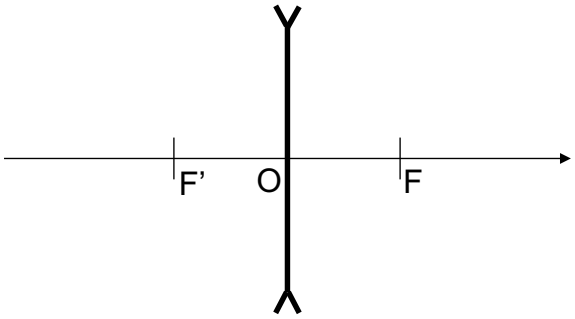
$V > 0$ pour une lentille convergente, et $V < 0$ pour une lentille divergente.

Application : Quelle est la nature et la distance focale d'une lentille notée V = -2 δ ?

b. Plan focal. Foyer secondaire

Si un objet est situé à l'infini mais pas sur l'axe optique**, son image se situe dans le plan focal image** passant par F', perpendiculaire à l'axe optique. Le point image est alors appelé foyer secondaire.



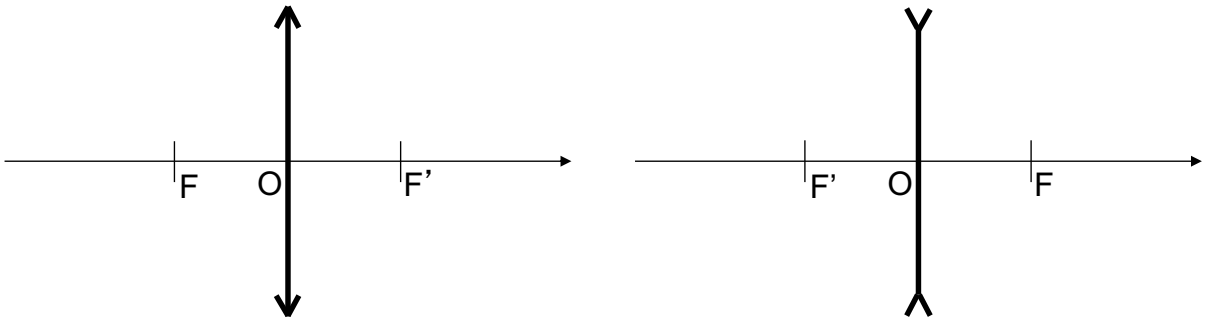


Remarque :

On décrit la taille d'un objet à l'infini par son diamètre apparent α : l'angle sous lequel on le voit.

Exemple : *Le soleil a un diamètre de* 1392.10^3 km *et est situé à* 150.10^6 km *de la Terre.*
Quel est son diamètre apparent ? Quelle est la position et la taille de l'image obtenue si l'on utilise une lentille convergente de focale $f' = 20$ cm *?*

On peut également définir le **plan focal objet** : passant par F, perpendiculaire à l'axe optique. Un point situé dans ce plan possède une **image rejetée à l'infini** en dehors de l'axe optique.



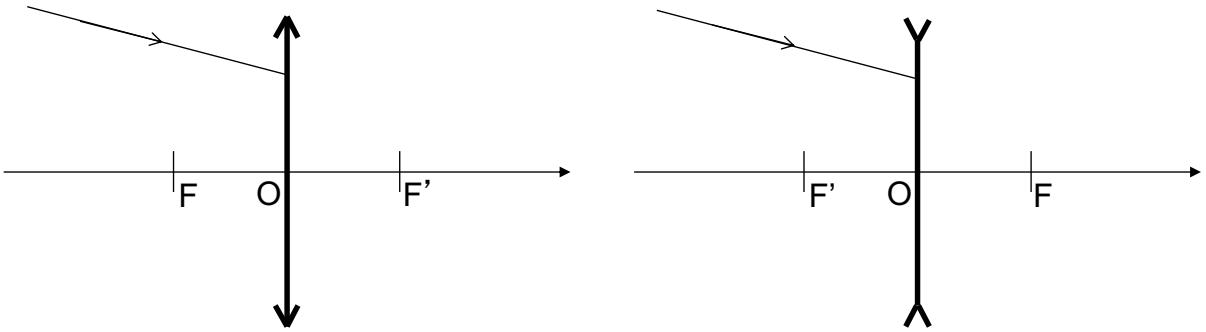
Conclusion importante :
- **Tout objet à l'infini possède une image dans le plan focal image (passant par F')**
- **Tout objet dans le plan focal objet (passant par F) possède une image à l'infini.**

4. Construction des images.

Pour déterminer comment un rayon lumineux est dévié par une lentille, il existe des méthodes graphiques simples utilisables à partir du modèle de la lentille mince.

a. Tracé d'un rayon quelconque

Pour déterminer géométriquement le rayon émergent correspondant à un rayon quelconque (en noir), on procède de la manière suivante :



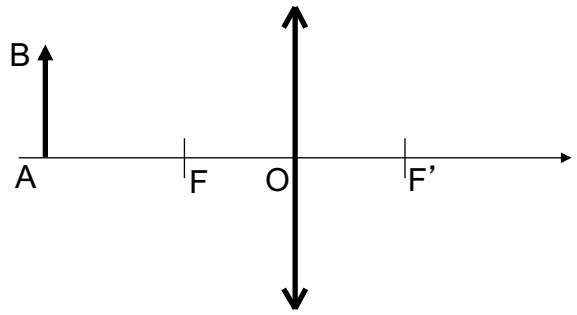
- On trace le rayon parallèle passant par O (en bleu). *Il n'est pas dévié.*
- On repère son intersection Φ avec le plan focal image (*perpendiculaire à Δ passant par F'*)
- Le rayon émergent (en rouge) passe par ce point.

Interprétation : Tout se passe comme si on avait un objet à l'infini hors de l'axe. Son image est dans le plan focal image.

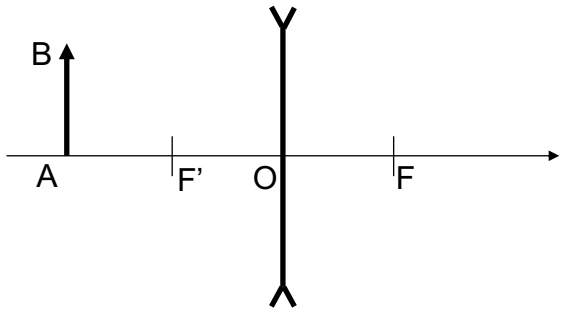
b. Les trois rayons fondamentaux

On cherche à déterminer l'image A'B' d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique.
On commence par déterminer l'image B', pour cela on dispose de trois rayons fondamentaux :

1. Le rayon incident (côté gauche en général) passant par B et le centre optique O n'est pas dévié.
2. Le rayon incident passant (ou semblant passer) par B et parallèle à l'axe optique émerge de la lentille en passant ou en semblant passer par F'.
3. Le rayon incident passant (ou semblant passer) par B et F émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique.



Lentille convergente



Lentille divergente

Pour déterminer la position de A' on utilise le projeté orthogonal de B' sur Δ.

Exemple : *Déterminer la position des images associées aux différents objets du document situé en annexe.*

Selon le type de lentille et la position de l'objet on a les images suivantes :

Lentille convergente :

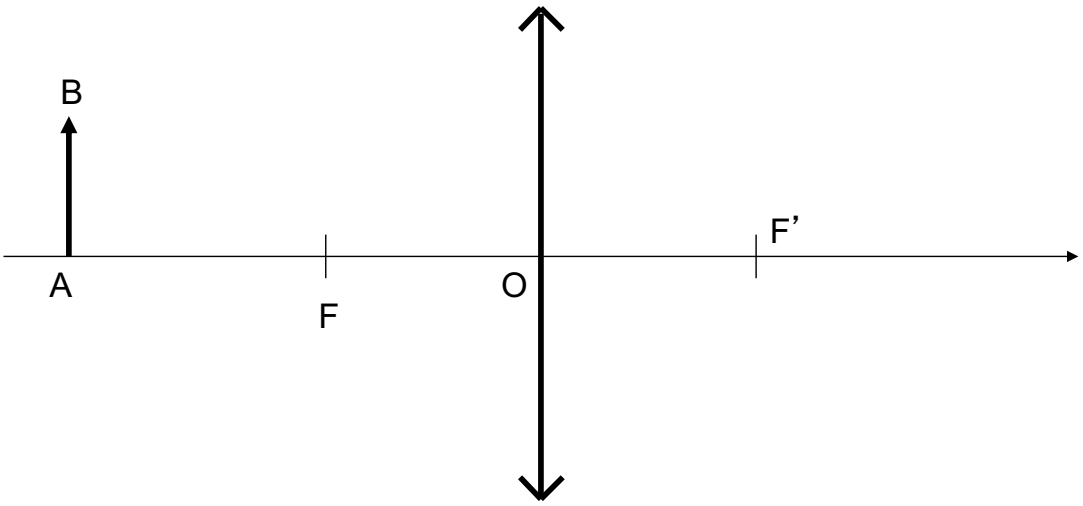
Objet	Réel		Virtuel
	Avant F	Entre F et O	Après O
Image			

Lentille divergente :

Objet	Réel	Virtuel	
	Avant O	Entre O et F	Après F
Image			

Remarque : **Seule une lentille …….. donne une image réelle d'un objet réel.**

5. Formules de conjugaison et de grandissement.



AB est l'objet et A'B' son image conjuguée.

Dans les triangles ABO et OA'B', on applique le théorème de Thalès : $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

Le grandissement de la lentille est donc :

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

Les positions de A et A' sont reliées par la relation de Descartes valable pour toutes les lentilles minces sphériques :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

Attention : Il faut dans tous les cas utiliser les distances algébriques.
Cette relation sera fournie dans les sujets conformément au programme officiel.

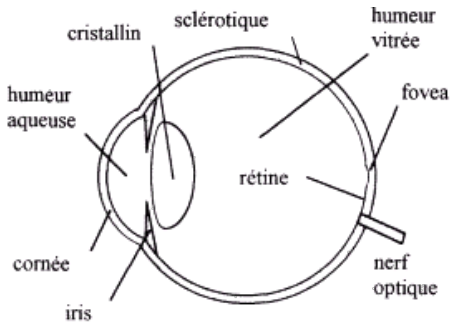
Application : *Un projecteur de diapositive constitué d'une lentille convergente de focale f'=40mm projette une image nette sur un écran situé à 3m de la lentille. Où doit-on placer l'objet ?*

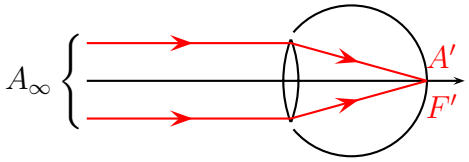
La diapositive a une hauteur h = 24 mm. Quelle sera la taille de l'image sur l'écran ?

IV. Exemples de systèmes optiques.

1. L'oeil.

L'œil humain est un système optique très complexe (voir schéma ci-dessous) mais qui peut être modélisé par une lentille et un écran (voir schéma ci-dessous).





Le _____ : joue le rôle d'une lentille de distance focale variable.

La _____ : joue le rôle d'écran. La lumière y est perçue par une série de capteurs : les bâtonnets.

Définition :

Un œil normal (**emmétrope**) voit nettement sans se fatiguer (sans accommoder) un objet situé **à l'infini**.
Le cristallin n'est pas déformé et l'image se forme sur la rétine.

Plage d'accommodation :

Pour voir nettement un objet plus proche, l'œil doit accommoder. Le cristallin se déforme (il se bombe).

Mais ce processus a ses limites. L'objet doit être situé entre :

- le ……., (situé à l'infini pour un œil normal)
- et le ……., situé de 10 à 50 cm d'un œil normal.
  Par convention on prend $d_{PP} = 25$ cm

La plage d'accommodation correspond à la distance située entre le PR et le PP.

Résolution angulaire :

La rétine ayant une structure discontinue, la capacité de l'œil à distinguer deux rayons de direction voisine a une limite. La valeur de cette limite dépend de l'individu mais également des conditions d'observation (nocturne, diurne, …).

On retiendra que l'angle minimal perceptible par l'œil est de l'ordre de la minute d'angle (1/60e degré)

c'est à dire :

$$\boldsymbol{\alpha_m = 3.10^{-4}\ rad}$$

Les défauts de l'œil : *(pour information)*

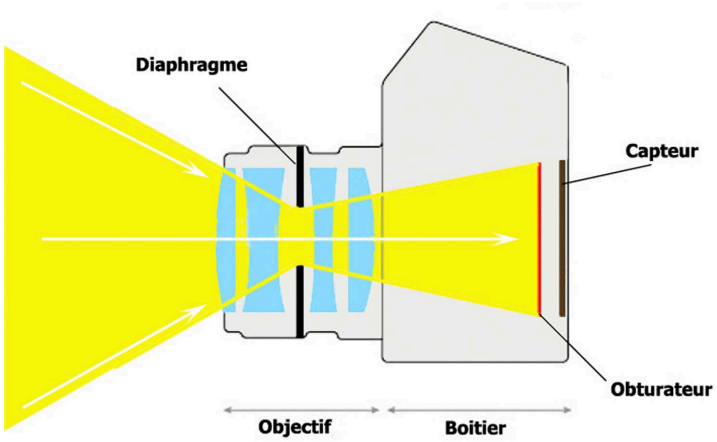
- **La myopie :** l'œil légèrement trop long, le cristallin converge trop. Corrigé à l'aide de lentilles divergentes.
- **L'hypermétropie :** l'œil est légèrement trop court, le cristallin ne converge pas assez. Corrigé à l'aide de lentilles convergentes.
- **L'astigmatisme :** L'œil n'a pas la symétrie de révolution autour de son axe. Donc même en faisant un effort d'accommodation, l'image d'un point ne peut pas être obtenue.
- **La presbytie :** C'est une réduction avec l'âge de la souplesse des muscles du cristallin. Le PP s'éloigne, alors que le PR reste inchangé.

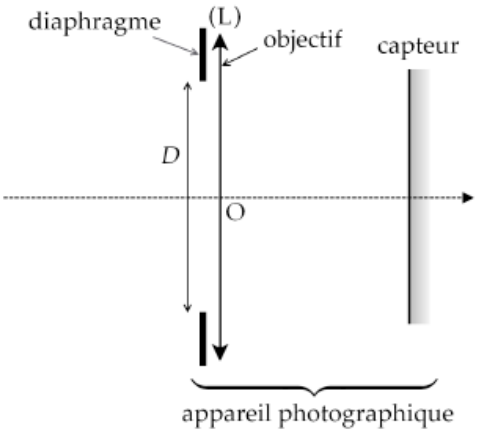
Pour voir sans fatiguer, un instrument d'optique (lunette, loupe, microscope …) doit renvoyer son image à l'infini (lumière parallèle en sortie).

2. L'appareil photographique.

Principe et modèle optique : Un modèle simple d'appareil photographique comprend :

- l'**objectif**, modélisé comme une lentille convergente de distance focale *f'* (Elle est appelée focale et notée *f* en photographie)
- un **diaphragme** circulaire de diamètre D réglable, qui limite l'étendue du faisceau lumineux. Le diamètre D est indiqué sur l'objectif sous la forme *f/N* où N est le nombre d'ouverture (par exemple : *f/2.8* ; *f/5.6* ; *f/11* ; …)
- un **capteur** photosensible constitué d'une matrice de cellules ou pixels (*picture element*)
- un **obturateur** : volet mobile laissant ou non entrer la lumière (responsable du « clic-clac » des appareils photographiques reflex)





Mise au point :

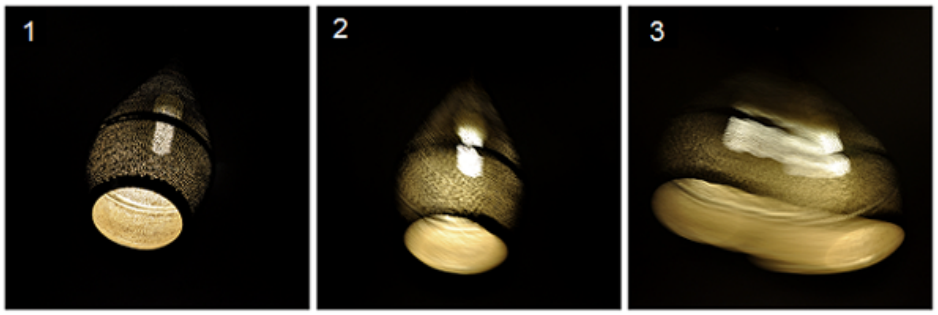
La mise au point consiste à modifier la position de l'objectif par rapport au capteur de façon à former une image nette sur celui-ci. Ce réglage se fait automatiquement par « auto-focus ».

Exposition d'un cliché :

En fonction des effets désirés, il faut régler la quantité de lumière entrant dans l'appareil. On peut :

- Modifier le diamètre D d'ouverture du diaphragme.
- Modifier le temps de pose (durée pendant laquelle l'obturateur est ouvert).

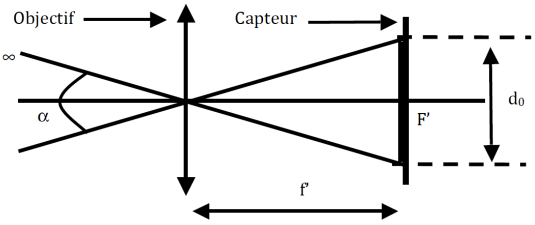
Augmenter le temps de pose permettra d'obtenir plus de luminosité mais pourra également créer un effet de « filet » si la scène photographiée est en mouvement.



Lampe en mouvement photographiée avec différents temps de pose.

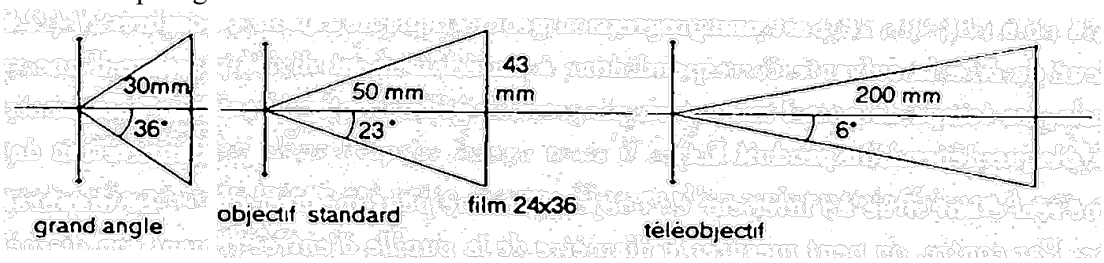
T = 1/100 s *T = 1/10 s* *T = 1s*

Angle de prise de vue :



Il correspond au champ de vision de l'objectif.

La taille du capteur étant limitée, plus la focale sera longue, plus l'angle de vue sera faible et l'image apparaîtra alors plus grande.



Prises de vues avec des focales différentes pour une distance objet/photographe identique

f' = 18 mm *f' = 35 mm* *f' = 50 mm*

Profondeur de champ :

Considérons un appareil photographique dont la mise au point est effectuée sur un point objet A. Son image A' est alors ponctuelle située sur le capteur.

Pour un objet A_1 situé avant A (au sens de la lumière), l'image A_1' sera située devant le capteur.
Pour un objet A_2 situé après A (au sens de la lumière), l'image A_2' sera située derrière le capteur.
Dans les deux cas, une tâche lumineuse se formera sur le capteur.

Si cette tâche possède un diamètre inférieur à la dimension d'un pixel (quelques µm), elle sera alors perçue comme un point et apparaîtra nette sur le cliché.

On peut ainsi définir un intervalle [A_1,A_2] de positions d'un objet pour lesquels l'image apparaît nette. La distance A_1A_2 est appelée **profondeur de champ**.

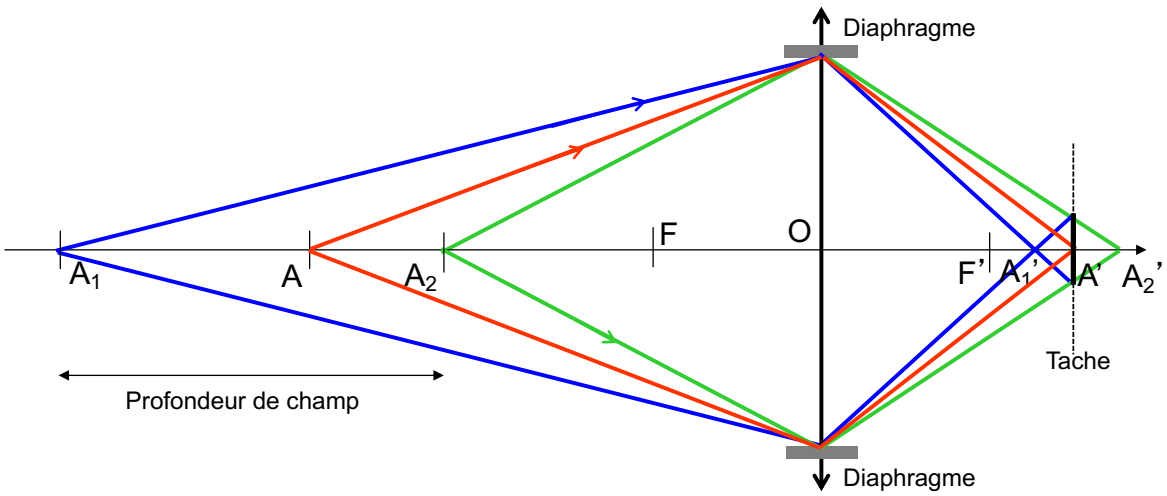


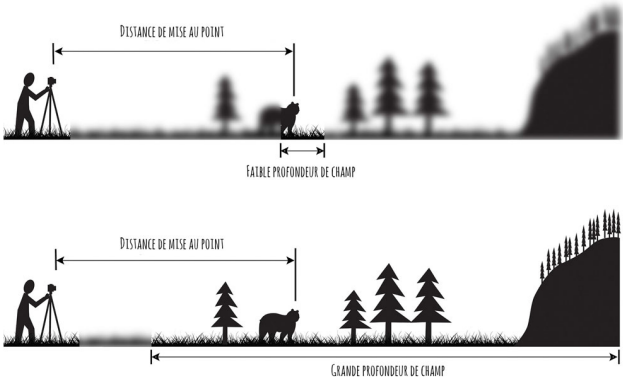
Illustration de la profondeur de champ

Pour une position de mise au point et une focale fixée, on remarque que si le diamètre du diaphragme diminue, celui de la tache diminue également. La profondeur de champ augmente.

Un grand diamètre d'ouverture entraîne une …….. profondeur de champ.

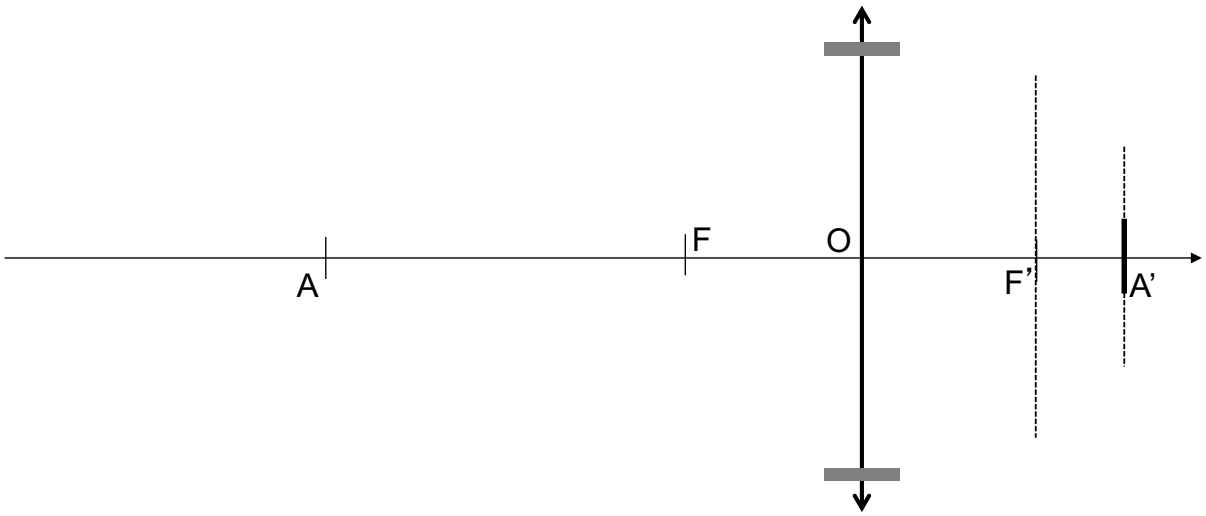
Un petit diamètre entraîne une …… profondeur de champ.

Prises de vues avec deux ouvertures différentes.
f/2.8 *f/16*



De même, la focale modifie également la profondeur de champ. Si la focale est faible, la taille de la tâche est faible et la profondeur de champ est importante.

<u>*Construction géométrique de la profondeur de champ :*</u>



Pour déterminer géométriquement la profondeur de champ, on procède de la façon suivante :

- *On trace les deux rayons émergents passant par les extrémités du diaphragme et celles de la tâche.*
- *On construit leur rayon incident en utilisant la méthode évoquée en III.4.a) que l'on applique dans le sens inverse.*
- *L'intersection de ces rayons avec l'axe optique représente les deux extrémités de la profondeur de champ.*

Conclusion :

Les réglages d'un appareil photographique sont nombreux et peuvent influencer plusieurs phénomènes.

- La focale agit sur l'angle de prise de vue et la profondeur de champ,
- Le diamètre du diaphragme agit sur la profondeur de champ et la luminosité
- Le temps de pose agit sur la luminosité.

Dans les appareils photographiques « bon marché », l'ouverture et la focale sont rarement modifiables et la profondeur de champ est grande (l'objectif a souvent un petit diamètre).
Seul le temps de pose varie, souvent de manière automatisée.

3. Systèmes de deux lentilles.

Supposons un système optique constitué de 2 lentilles notées L_1 et L_2.

Si on note A l'objet étudié, la lentille L_1 forme une image conjuguée de A notée A_1.

A_1 est alors un objet pour la lentille L_2 qui formera l'image finale notée A'.

On peut synthétiser la situation avec la relation de conjugaison suivante :

A_1 est appelée **image intermédiaire** du système.

En général, on ne la voit pas à l'utilisation du système.
On introduit cette image pour faciliter les tracés de rayons lumineux et l'utilisation des formules de conjugaison (On applique 2x Descartes par exemple. Pour L_1 avec A et A_1 et pour L_2 avec A_1 et A)

Exemple de la lunette astronomique

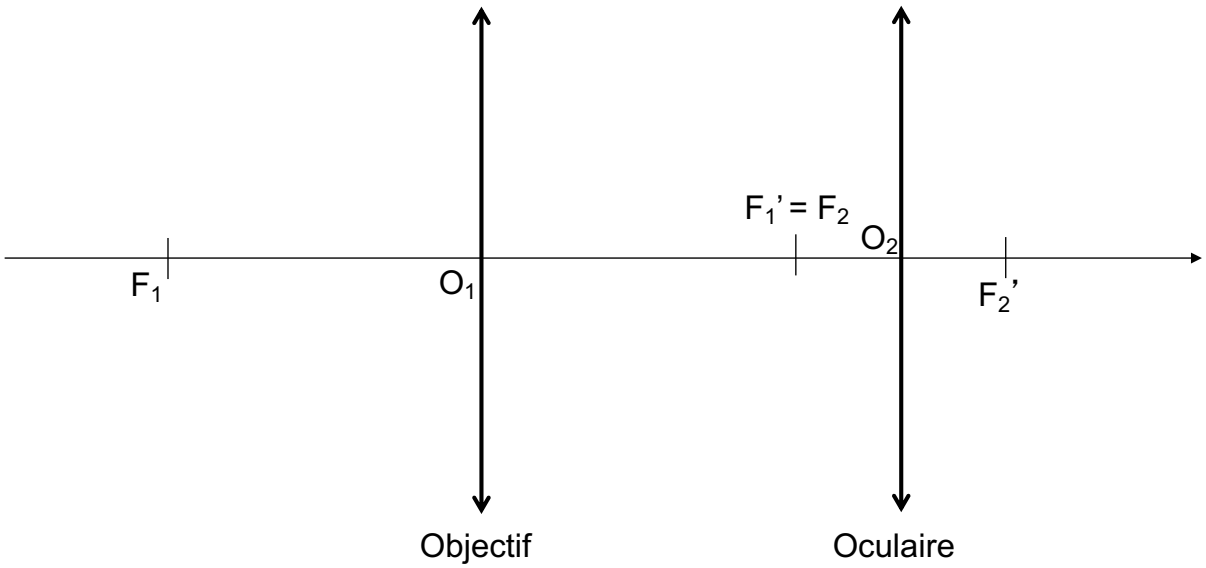
La lunette astronomique est un système afocal. Elle permet d'observer un objet à l'infini et renvoie une image à l'infini pour que l'œil n'accommode pas.

Comme l'objet A est situé à l'infini, son image par la lentille L_1 se forme en ……..

Comme l'image A' formée par la lentille L_2 se situe à l'infini, alors son objet conjugué se situe en ….

On en déduit que la lunette est correctement réglée si F'_1 est confondu avec F_2

Construction de rayons lumineux :



Grossissement angulaire :

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

C'est le rapport de l'angle sous lequel est vue l'image à travers la loupe sur l'angle sous lequel est vue l'image à l'œil nu.