

Chapitre 2 : Formation des images

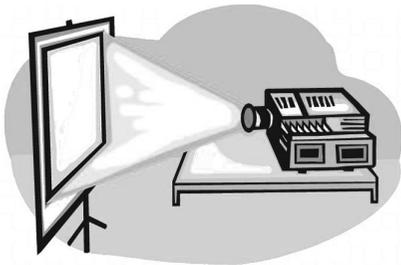
1 Image d'un objet lumineux par un système optique

1.1 Système optique

Système optique

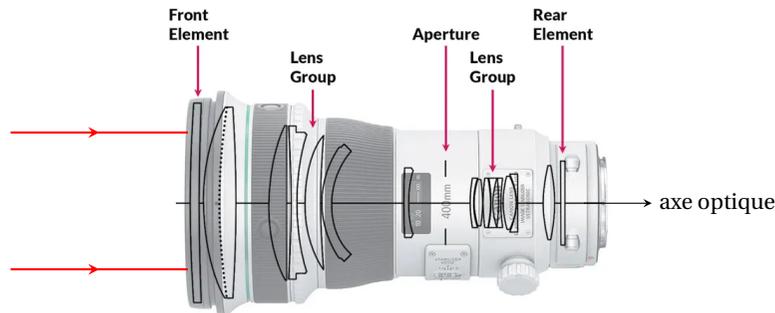
Un système optique est un dispositif qui dévie les rayons lumineux issus d'un objet afin d'en former une image.

Les systèmes optiques sont généralement constitués de lentilles (autrement dit de dioptries) et/ou de miroirs. Certains forment une image **sur une surface** telle qu'un écran ou un capteur photosensible (vidéoprojecteur, appareil photo), tandis que d'autres s'utilisent **en regardant directement au travers** (miroir, loupe, lunettes, jumelles, télescope).



Système centré

Un système optique est *centré* s'il possède un axe de symétrie de révolution, qu'on appelle **l'axe optique**. Par convention l'axe optique est orienté dans le sens de propagation des rayons incidents.



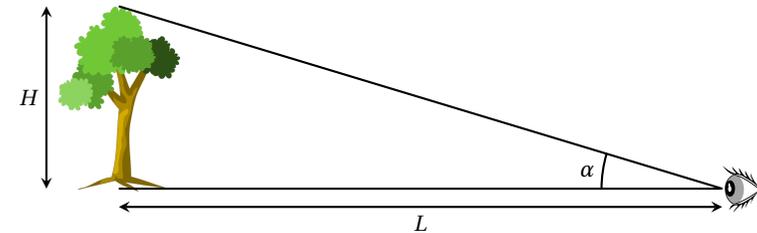
1.2 Objet lumineux

En optique le terme **d'objet** s'applique à n'importe quelle source lumineuse susceptible d'éclairer un système optique.

Source étendue, taille angulaire

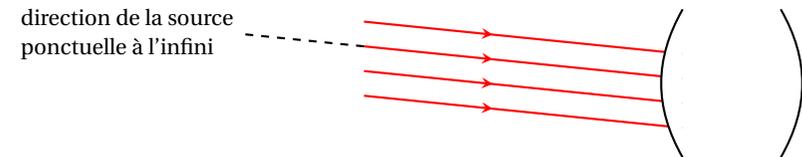
Une source est *étendue* si elle ne peut pas être réduite à un point. Dans le domaine de l'optique géométrique une source étendue peut être assimilée à un ensemble de sources ponctuelles indépendantes.

On appelle *taille angulaire* l'angle sous lequel est vue cette source, **du point de vue d'un observateur**. Pour un objet de taille donnée, la taille angulaire est d'autant plus faible que la distance avec l'observateur est grande. Sur la figure ci-dessous la taille angulaire α de l'arbre vérifie $\tan \alpha = H/L$. Si α est faible on peut faire l'approximation $\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha = H/L$.

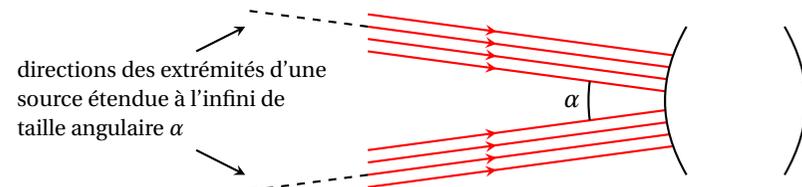


Source à l'infini

Le modèle de la source ponctuelle *à l'infini* consiste à faire l'approximation que la source éclaire le système optique avec **un faisceau de rayons parallèles**.



Une source étendue à l'infini est assimilée à un ensemble de sources ponctuelles situées dans des directions différentes par rapport au système optique. Chacune éclaire le système optique avec un faisceau de rayons parallèles.

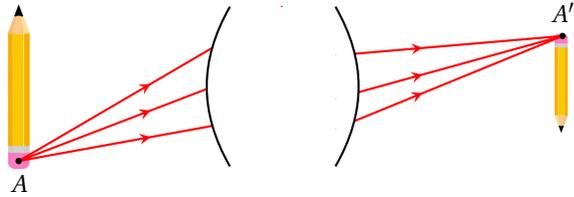


1.3 Image formée par un système optique

Notion d'image en optique

En optique une *image* est une reproduction d'un objet lumineux qui en conserve **tous les détails**, c'est-à-dire telle que l'on peut y reconnaître **chaque point de l'objet**.

On dit qu'un système optique forme l'image d'un objet lumineux si chaque point source A de l'objet est associé par le système optique à un point **conjugué** A' . Cela signifie que tous les rayons issus de A doivent converger **exactement** en A' après avoir traversé le système optique.



Remarque : Une image peut être renversée par rapport à l'objet (comme sur la figure ci-dessus), elle peut être agrandie, rétrécie, voire déformée. Tout ce qui compte, c'est que chaque point de l'objet soit associé à un unique point de l'image.

Remarque : On comprend que la possibilité ou non de former une image dépend de la manière dont le système optique dévie la lumière. Nous verrons dans la partie suivante que la condition énoncée ci-dessus est loin d'être facile à réaliser.

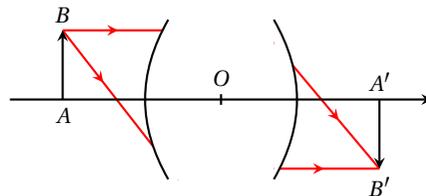
1.4 Conventions d'orientation de l'espace, distance algébrique

Les conventions que l'on présente ici sont valables pour les systèmes centrés, c'est-à-dire ceux qui possèdent un axe optique.

- soient A et B deux points appartenant à l'axe optique ; on définit la **distance algébrique** \overline{AB} qui est comptée positivement si B est derrière A (du point de vue de l'orientation de l'axe optique) et négative si B est devant A . Cette définition des distance algébriques s'accompagne de deux propriétés à retenir :

- Antisymétrie : $\overline{BA} = -\overline{AB}$,
- Relation de Chasles : $\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC}$ pour **tous** points A, B, C de l'axe optique.

- Soient A et B deux points appartenant à un plan transverse (c'est-à-dire un plan perpendiculaire à l'axe optique) ; sur un schéma on choisit conventionnellement que la distance algébrique \overline{AB} est comptée positivement si B est au-dessus A et négativement si B est en-dessous de A .



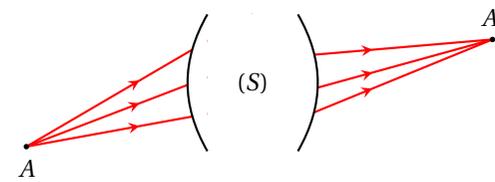
Par exemple sur la figure ci-dessus on a : $\overline{OA} < 0$, $\overline{OA'} > 0$, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$.

2 Stigmatisme rigoureux

2.1 Définition

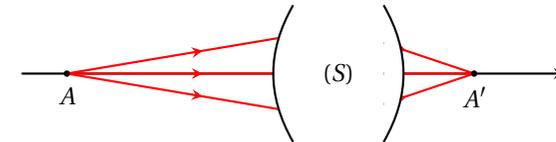
Stigmatisme rigoureux d'un système optique

Un système optique (S) est *rigoureusement stigmatique* pour un couple de points (A, A') si tous les rayons issus de A émergent du système optique en passant **exactement** par A' . Dans ce cas on dit que A' est l'image de A par (S) .



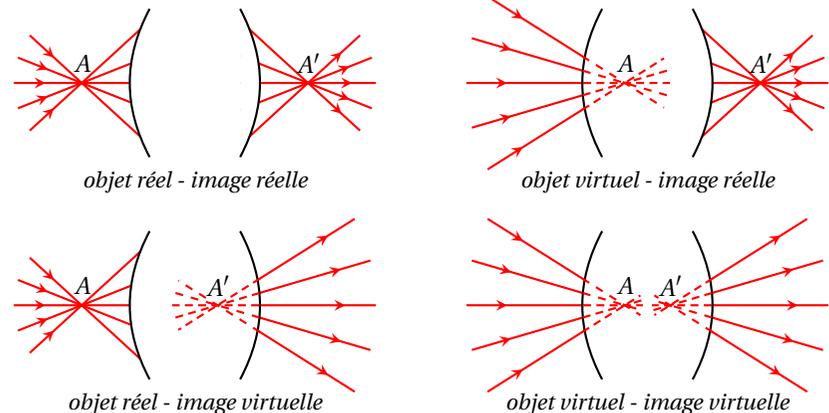
On dit également que les points A et A' sont *conjugés* par le système optique (S) et on le représente symboliquement de la manière suivante : $A \xrightarrow{(S)} A'$.

À retenir : Un point de l'axe optique ne peut être conjugué qu'avec un autre point de l'axe optique.



Une relation mathématique entre les positions de deux points conjugués (A, A') appartenant à l'axe optique s'appelle une *relation de conjugaison* du système optique.

2.2 Objets et images réels et virtuels



Nature réelle ou virtuelle d'un objet et d'une image

Un point objet est réel s'il est situé devant la surface d'entrée du système optique, sinon il est virtuel.

Un point image est réel s'il est situé derrière la surface de sortie du système optique, sinon il est virtuel.

En pratique on peut utiliser les critères suivant pour reconnaître rapidement la nature d'un point sur un schéma optique (voir figure sur la page précédente) :

- Un point **objet réel** est situé à l'intersection de **rayons incidents**.
- Un point **image réel** est situé à l'intersection de **rayons émergents**.
- Un point **objet virtuel** est situé à l'intersection de **prolongements de rayons incidents**.
- Un point **image virtuel** est situé à l'intersection de **prolongements de rayons émergents**.

Remarque : Une image réelle peut être projetée sur une surface (vidéoprojecteur) tandis qu'une image virtuelle s'observe directement à travers le système optique (miroir plan, loupe).

2.3 Construction de l'image d'un point par un miroir plan

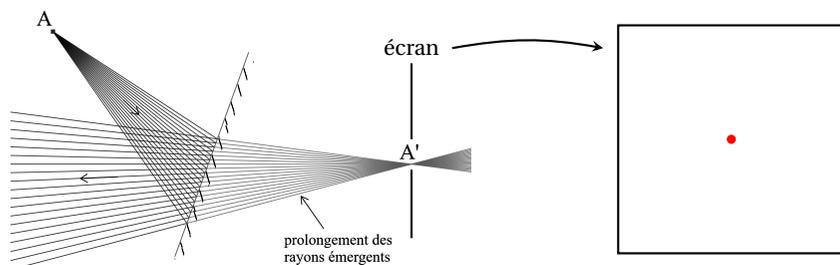
- Le miroir plan est rigoureusement stigmatique pour tous les points de l'espace.
- Deux points conjugués par le miroir sont symétriques par rapport au plan du miroir.
- Le miroir plan donne une image virtuelle d'un objet réel et une image réelle d'un objet virtuel.
- La relation de conjugaison du miroir plan s'écrit sous la forme :

$$\overline{OA'} + \overline{OA} = 0$$

3 Stigmatisme approché : conditions de Gauss

3.1 Mise en évidence

Le stigmatisme rigoureux est une propriété **rare** en optique (voir ci-dessous le cas du miroir plan).

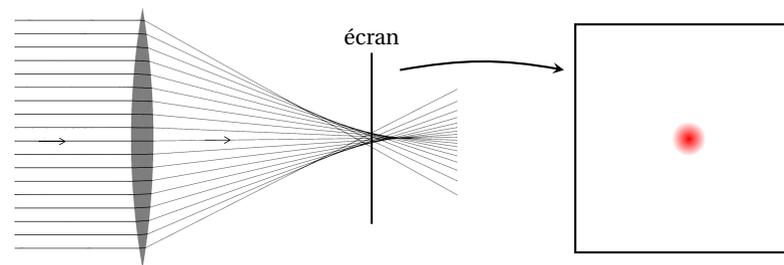


Tout point A possède un conjugué A' par un miroir plan

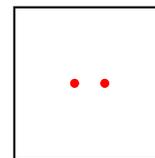
Dans la grande majorité des cas un point objet **n'a pas de conjugué** par un système optique. On illustre un cas de non stigmatisme avec une lentille sphérique (voir schémas en dernière page).

3.2 Notion de "tâche image"

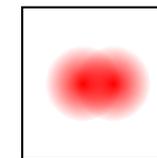
En l'absence de stigmatisme le faisceau émergent ne converge pas exactement en un point mais dans une petite zone de l'espace. On parle de *tâche image* à l'endroit où le rayon du faisceau est minimal.



Imaginons deux points A et B très proches appartenant à l'objet. Si ces deux points forment des tâches images qui se superposent, les lumières issues de A et B se mélangent. Il devient alors impossible de distinguer A et B quand on utilise le système optique. La qualité se dégrade car les détails de l'objet s'estompent. Si l'effet est très marqué on peut même ressentir une sensation de **flou**.



points images formées par un système stigmatique



tâches images formées par un système non stigmatique

Rôle du stigmatisme en optique

Un système optique **doit être stigmatique** pour former une image qui conserve tous les détails de l'objet (voir 1.3).

Quand un système optique n'est pas stigmatique, il est possible d'observer une *pseudo-image* dans laquelle on perd certains détails de l'objet. Plus on s'éloigne du stigmatisme rigoureux (c'est-à-dire plus le rayon des tâches images est grand) et plus la qualité de la pseudo-image se dégrade, ce qui se manifeste généralement par une sensation de flou.

Remarque : L'image ci-dessus montre un exemple de situation dans laquelle un instrument d'optique (ici une loupe) n'est pas stigmatique. On remarque que la qualité se dégrade à mesure que l'on s'éloigne du centre de la lentille. On expliquera pourquoi dans le prochain paragraphe.

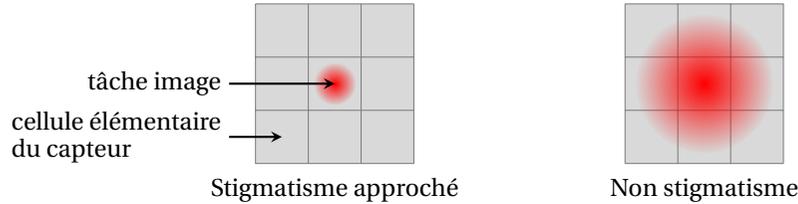


3.3 Conditions de Gauss

Stigmatisme approché

On parle de *stigmatisme approché* lorsqu'un système optique n'est pas stigmatique, mais que **la résolution du capteur de lumière ne permet pas de voir la différence avec un stigmatisme rigoureux.**

On utilise communément le critère suivant : il y a stigmatisme approché si **la dimension de la tâche image est inférieure à la résolution spatiale du capteur** (taille d'un pixel pour un capteur numérique, taille d'une cellule photoréceptrice pour la rétine, etc).



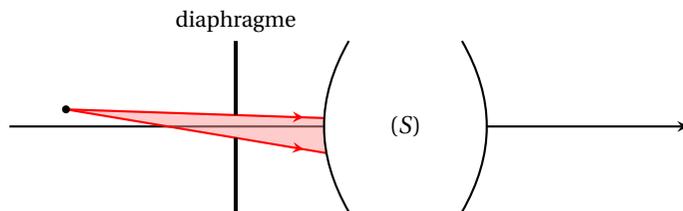
On admet la propriété suivante (que l'on illustre avec les figures en fin de poly) : pour les systèmes centrés, on est d'autant plus proche du stigmatisme que les rayons qui traversent le système optique sont **peu inclinés par rapport à l'axe optique** et **peu éloignés de l'axe optique**. En sélectionnant convenablement les rayons qui entrent dans le système optique, il est alors possible d'obtenir un stigmatisme approché.

Conditions de Gauss

Tout système optique centré devient stigmatique approché s'il est éclairé dans les *conditions de Gauss*, c'est-à-dire avec des rayons :

- peu inclinés par rapport à l'axe optique,
- peu éloignés de l'axe optique.

En pratique on utilise généralement un **diaphragme** pour sélectionner les rayons qui sont dans les conditions de Gauss.



Remarque : Par la suite on supposera toujours que les systèmes optiques étudiés sont éclairés dans les conditions de Gauss. Ainsi on les supposera stigmatiques (au moins de façon approchée), ce qui nous permettra d'établir leur(s) **relation(s) de conjugaison**.

3.4 Cas du dioptre plan

- Le dioptre plan n'est pas rigoureusement stigmatique.
- Dans les conditions de Gauss, la relation de conjugaison du dioptre plan s'écrit :

$$\frac{\overline{OA}}{n_1} = \frac{\overline{OA'}}{n_2}$$

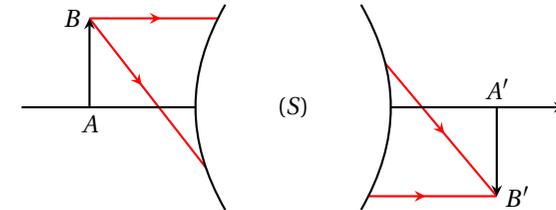
Où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux de part et d'autre du dioptre.

3.5 Aplanétisme

Aplanétisme

Un système optique est *aplanétique* pour un point A de l'axe optique s'il est stigmatique pour A (conjugué à un point A' lui aussi sur l'axe optique) et que **le stigmatisme est conservé quand on s'éloigne de A perpendiculairement à l'axe optique.**

Dans les conditions de Gauss tout système centré est aplanétique et un objet transverse AB est conjugué avec une image transverse $A'B'$.



Aplanétisme d'un système centré dans les conditions de Gauss

Remarque : L'aplanétisme est une autre propriété importante des systèmes optiques. Elle garantit que la qualité de l'image est aussi bonne au centre que sur les bords. Là encore, il est souvent nécessaire d'utiliser un diaphragme pour garantir que ce soit le cas (au moins de façon approchée).

4 Limites d'un instrument d'optique

4.1 Introduction

Un instrument d'optique permet d'observer une image mais, pour différentes raisons que nous allons évoquer dans cette partie, **il est impossible de retrouver dans une image exactement tous les détails de l'objet**. On parle de *limite de résolution* pour désigner la taille (ou la taille angulaire) minimale des détails de l'objet que l'on peut détecter grâce à un système optique.

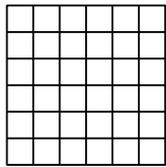
4.2 Diffraction

Même avec un instrument rigoureusement stigmatique et une source parfaitement ponctuelle, la diffraction empêche de faire converger un faisceau lumineux exactement en un point de l'espace. Au mieux, on peut espérer faire converger les rayons sur une "tâche image" dont la taille est inversement proportionnelle au diamètre des lentilles/miroirs utilisés dans l'instrument. Cet effet limite la faculté de l'instrument à distinguer des objets très proches les uns des autres, autrement dit cela limite son **pouvoir de résolution**. On retient que :

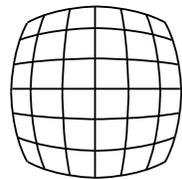
- pour améliorer la résolution d'un instrument d'optique, il est nécessaire de travailler avec des instruments de grande taille (les miroirs du *Very Large Telescope* (VLT), installé dans le désert d'Atacama au Chili, ont un diamètre de 8,2 m).
- la limite de résolution linéaire d'un microscope est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde utilisée. Pour un microscope optique, celle-ci dépasse donc rarement 0,5 μm . On peut améliorer la résolution en utilisant un microscope électronique.

4.3 Aberrations géométriques

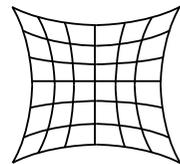
Les aberrations géométriques rassemblent tous les phénomènes qui apparaissent lorsque l'on s'écarte des conditions de Gauss. Généralement ces aberrations s'accompagnent d'un défaut de stigmatisme, ce qui limite la résolution de l'instrument. Dans le cas particulier de la **distorsion**, le stigmatisme approché peut être conservé mais l'image est déformée (modification des angles, perte du parallélisme). On distingue deux types de distorsion, en **barillets** et en **coussinets** (voir ci-dessous).



objet



distorsion en barillets

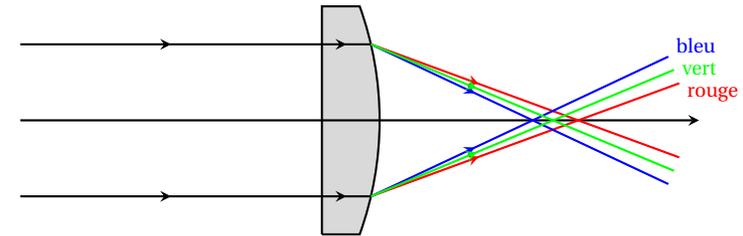


distorsion en coussinets

Deux effets différents d'un défaut d'aplanétisme sur l'observation d'une grille rectangulaire : la distorsion en barillets et en coussinets

4.4 Aberrations chromatiques

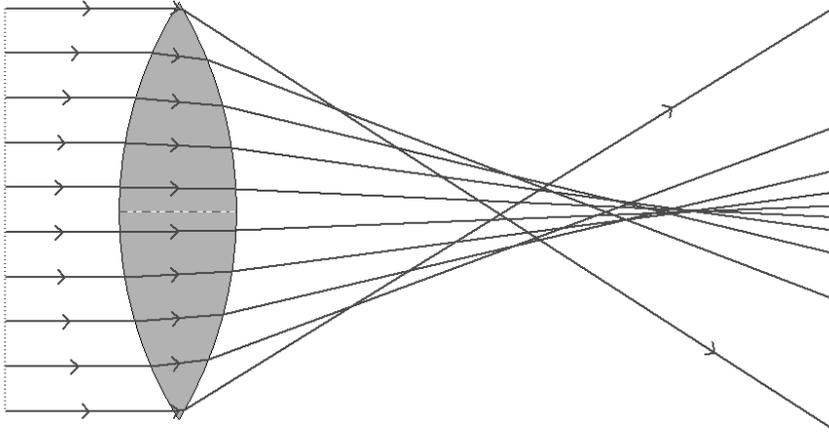
Ce sont toutes les aberrations dues au caractère **dispersif** des milieux traversés par la lumière dans un instrument d'optique. Un instrument dispersif (les lentilles, en verre, le sont toujours) décompose la lumière blanche donc il forme une image différente pour chaque couleur, ce qui dégrade la résolution.



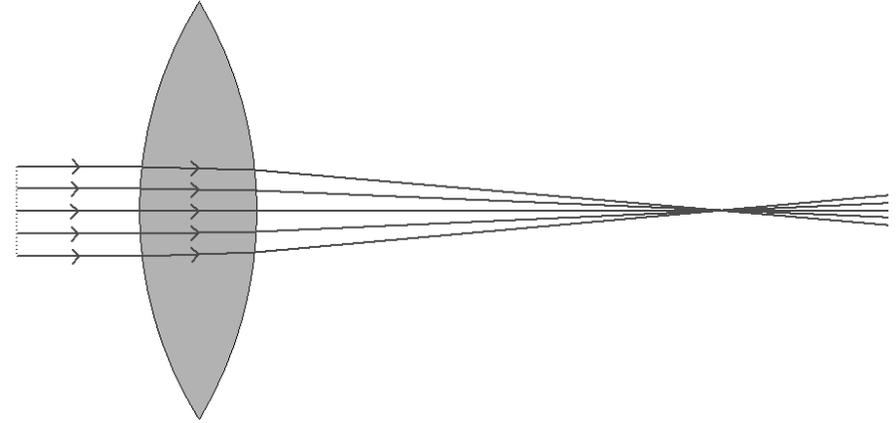
Photographie prise à travers un objectif "fish-eye" grand angle. Hors des conditions de Gauss, un effet de distorsion parfois recherché par le photographe.

Photographie extraite de la page wikipédia "Objectif fisheye" :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Objectif_fisheye

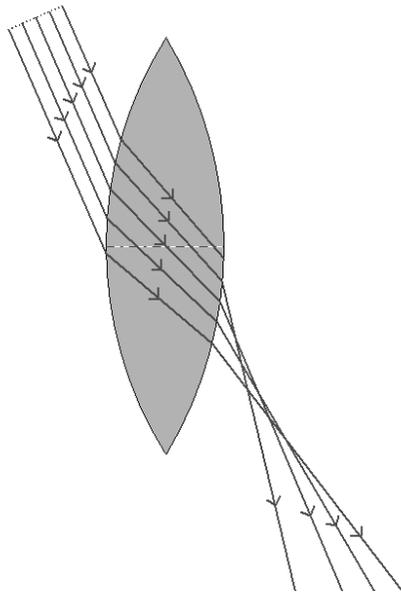




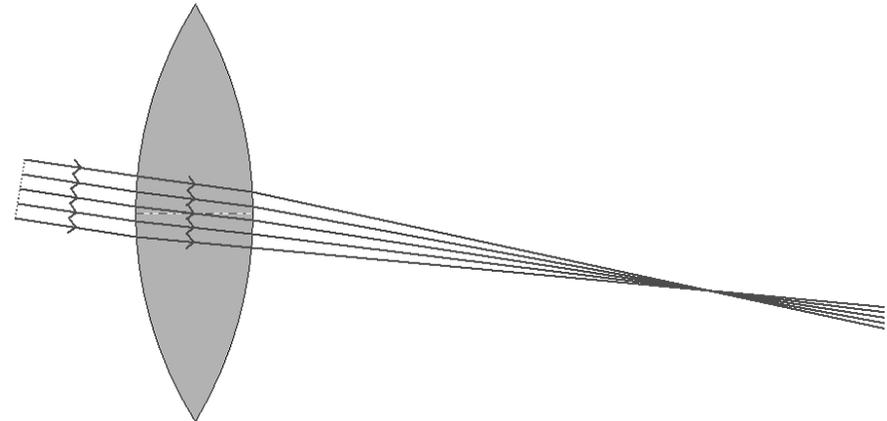
Non stigmatisme d'une lentille sphérique pour des rayons éloignés de l'axe optique



stigmatisme approché pour des rayons proches de l'axe optique



Non stigmatisme d'une lentille sphérique pour des rayons inclinés par rapport à l'axe optique



stigmatisme approché pour des rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique