

# Chapitre 2 : Formation des images

## 1 Système optique, objet, image

### 1.1 Système optique

On appelle système optique tout dispositif constitué de lentilles (autrement dit de dioptries) et/ou de miroirs, destiné à modifier la trajectoire des rayons lumineux. L'œil, des jumelles, une loupe, des verres de lunettes, un télescope ou un microscope optique en sont différents exemples.

- un système optique est **dioptrique** s'il n'est constitué que de lentilles, **catoptrique** s'il n'est constitué que de miroirs et **catadioptrique** s'il est constitué à la fois de lentilles et de miroirs ;
- un système optique est **centré** s'il possède un axe de symétrie de révolution. Cet axe de symétrie porte le nom **d'axe optique**.

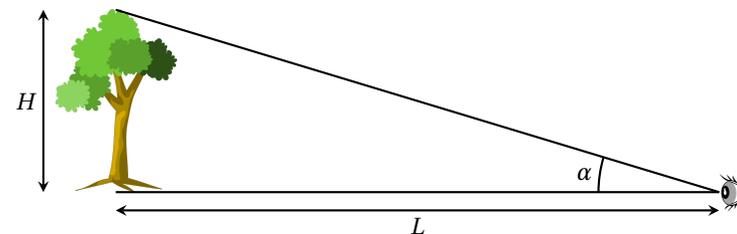
Un système optique est généralement utilisé de manière à former l'image d'un objet lumineux. Le but de ce chapitre est de bien comprendre ce que l'on désigne par le terme "image". Nous verrons également quelles sont les propriétés d'un système optique qui permettent de former des images "de qualité".

### 1.2 Objet lumineux

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

- Une **source primaire** produit elle-même de l'énergie lumineuse (le soleil est une source primaire naturelle, une ampoule est une source primaire artificielle) ;
- une **source secondaire** diffuse la lumière qu'elle reçoit d'une autre source (c'est le cas de tous les objets que vous voyez à la lumière du jour et qui ne produisent pas d'énergie lumineuse par eux-mêmes) ;
- rappel : une source **monochromatique** produit une lumière de longueur d'onde unique ;
- rappel : une source est **ponctuelle** si l'on peut faire l'approximation que sa taille est négligeable, on l'assimile donc à un point ;
- Une **source étendue** est une source qui ne peut pas être réduite à un point. Elle est caractérisée soit par sa taille, soit par sa **taille angulaire**. Dans le cadre de l'optique géométrique, *on peut assimiler une source étendue à une infinité de sources ponctuelles indépendantes les unes des autres.*
- Une source est dite **à l'infini** (par rapport à un système optique/un observateur) si l'on peut faire l'approximation que **chacun des points de cette source** éclaire le système optique/l'observateur avec **un faisceau de rayon parallèles entre eux**.
- En optique on parle de **grandeur** pour désigner la **taille** d'une source et de **grosseur** pour désigner sa **taille angulaire**, c'est-à-dire l'espace occupé par l'objet dans le champ de vision de l'observateur.

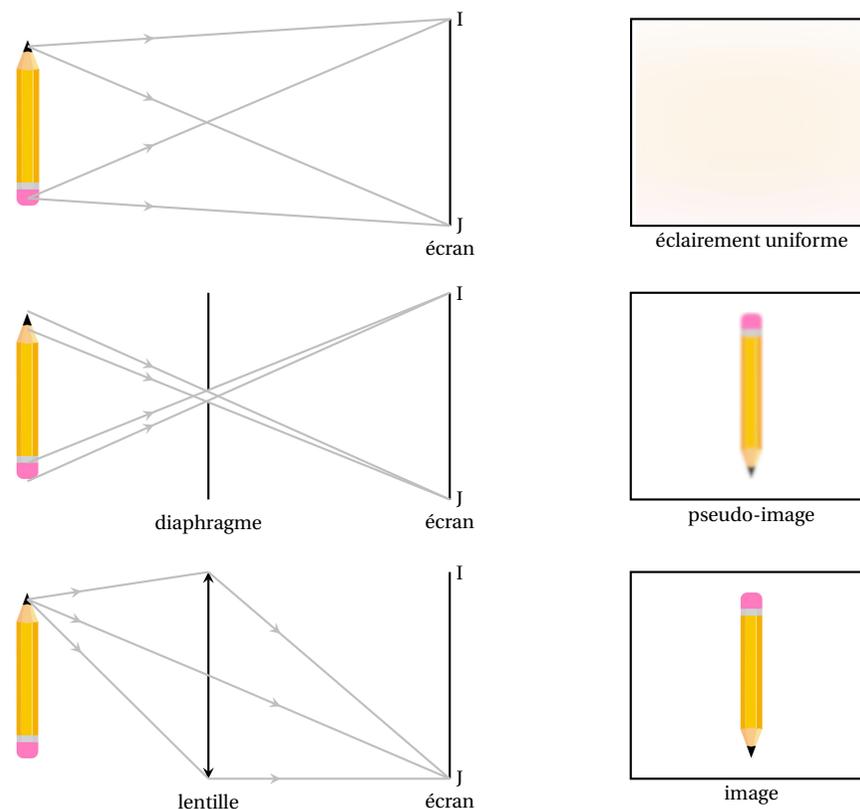
- Deux objets de même taille sont vus plus ou moins gros suivant qu'ils sont plus proches ou plus éloignés de l'observateur ;
- plus un objet est gros et mieux on peut en observer les détails.



Sur la figure ci-dessus  $H$  désigne la taille de l'arbre et  $\alpha$  sa taille angulaire du point de vue d'un observateur situé à une distance  $L$ . Dans cette configuration on montre rapidement que  $\alpha = \arctan(H/L)$ .

### 1.3 Image formée par un système optique

Considérons les trois figures ci-dessous ; sur la première un objet éclaire directement un écran sans système optique, sur la deuxième on intercale un écran percé d'un petit trou entre l'objet et l'écran tandis que sur la dernière on intercale une lentille convergente entre l'objet et l'écran.



- Sur la première figure, les points I et J reçoivent de la lumière venant de l'intégralité de l'objet ; l'éclairement en ces deux points de l'écran est identique. On peut dire en fait la même chose de chaque point de l'écran, on comprend alors que l'éclairement est uniforme sur tout l'écran.
- Sur la deuxième figure le diaphragme sélectionne les rayons lumineux qui peuvent atteindre l'écran, et ce d'autant plus que son diamètre est faible. La lumière qui atteint le point J provient d'une petite zone située autour de la mine du crayon tandis que la lumière qui atteint I provient d'une petite zone située autour de la base du crayon. L'éclairement en I et en J n'est pas le même ; on arrive à distinguer à peu près sur l'écran de quelle partie de l'objet est issue la lumière qui l'a atteint ; on parle de **pseudo-image**. En termes courants, on dit que l'on voit "flou". Notons que la résolution (autrement dit la netteté) est d'autant meilleure que le diaphragme est petit, mais cela au prix d'une plus faible luminosité. Ce dispositif schématise le principe des **chambres noires** utilisées avant l'invention de la photographie.
- Sur la dernière figure, la lentille dévie les rayons lumineux d'une manière très particulière ; les rayons qui atteignent J sont issus **d'un seul point de l'objet**. En fait grâce à la lentille *chaque point de l'objet est "associé" à un unique point de l'écran* ; on dit qu'ils sont **conjugués**. En regardant l'écran, on reconnaît immédiatement de quel point de l'objet est issue la lumière ; en termes courants on dit que l'on voit "net" et on parle **d'image**.

Pour former une image, un système optique doit être capable de dévier les rayons lumineux de sorte que **chaque point d'un objet soit associé à un unique point conjugué, appelé point image**.

Nous verrons dans la partie 2 qu'une lentille ne respecte pas rigoureusement cette propriété ; à vrai dire elle est si remarquable qu'elle se rencontre très rarement. Néanmoins nous expliquerons pourquoi cette contrainte est un peu trop stricte et pourquoi l'on quand même peut parler d'image même si elle n'est qu'approximativement respectée.

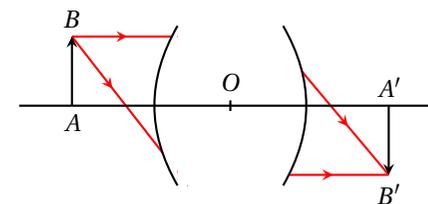
## 1.4 Conventions d'orientation de l'espace, distance algébrique

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

- Quand un tel système est éclairé par une source lumineuse, on oriente arbitrairement l'axe optique **dans le sens de propagation des rayons incidents**. Sur un schéma l'orientation de l'axe optique est désigné par une flèche (voir figure ci-après) ;
- 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 où l'on représente dans un plan arbitrairement choisi contenant  $A, B$  et l'axe optique, la distance algébrique  $\overline{AB}$  est comptée positivement si  $B$  est au-dessus de  $A$  et négativement si  $B$  est en-dessous de  $A$ .



Sur la figure ci-dessus  $\overline{OA} < 0, \overline{OA'} > 0, \overline{AB} > 0$  et  $\overline{A'B'} < 0$ .

## 2 Stigmatisme rigoureux

### 2.1 Définition

**Def :** Un système optique 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  $A'$ . Le point  $A$  est appelé point objet et le point  $A'$  point image.

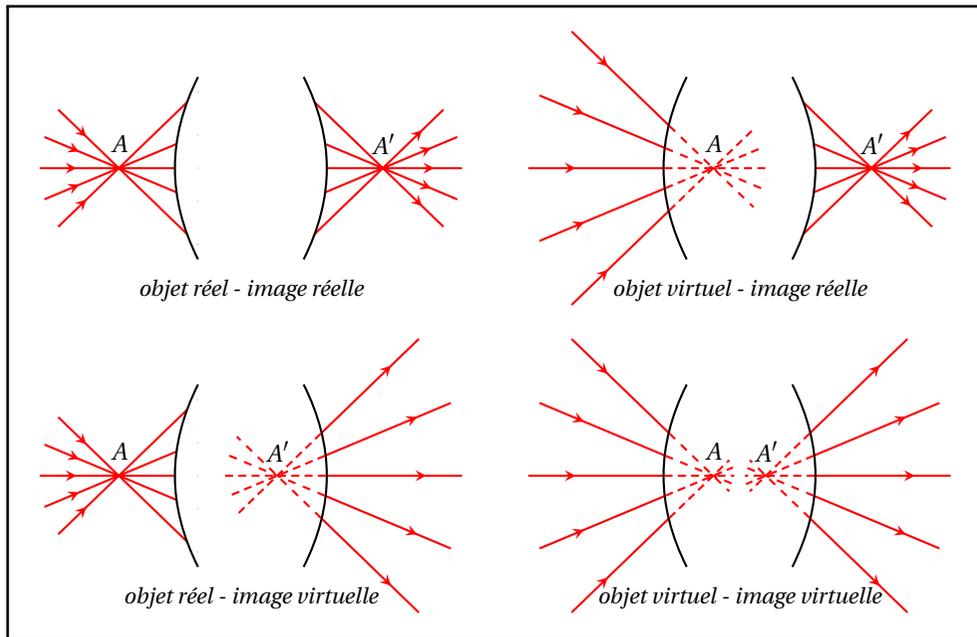
Cette définition s'accompagne de corollaires importants :

- S'il existe, le point image est unique.
- Un point objet est à l'intersection de tous les rayons **incidents**. Un point image est à l'intersection de tous les rayons **émergents**.
- D'après le principe de retour inverse de la lumière, un rayon qui passe par  $A'$  et qui traverse  $(S)$  va émerger en passant par  $A$ . Ainsi, si  $A'$  est image de  $A$  par  $(S)$  alors  $A$  est *nécessairement* image de  $A'$  par  $(S)$ . On dit que  $A$  et  $A'$  forment un **couple de points conjugués par**  $(S)$ .
- Si  $A$  est un point de l'axe optique alors  $A'$  l'est également.
- Les positions de deux points  $A$  et  $A'$  de l'axe optique sont reliées par une équation appelée *relation de conjugaison*.

### 2.2 Objets et images réels et virtuels

Un point objet est réel (resp. virtuel) s'il est situé devant (resp. derrière) la surface d'entrée du système optique. Sur un schéma on le reconnaît au fait qu'il est à l'intersection des rayons incidents (resp. des *prolongements* des rayons incidents).

Un point image est réel (resp. virtuel) s'il est situé derrière (resp. devant) la surface de sortie du système optique. Sur un schéma on le reconnaît au fait qu'il est à l'intersection des rayons émergents (resp. des *prolongements* des rayons émergents).



### 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 est une propriété *géométrique* des systèmes optiques qui n'existe de manière rigoureuse que dans peu de cas (miroir plan, foyer d'un miroir parabolique, etc). Dans la quasi-totalité des systèmes optiques, il n'existe pas de points conjugués au sens propre du terme. On illustre un cas de non stigmatisme avec une lentille sphérique (voir schémas en dernière page).

Les rayons émergents ne se coupent pas tous au même point : une lentille sphérique n'est pas rigoureusement stigmatique. Si l'on place un écran derrière la lentille, la lumière ne sera pas localisée en un point mais sera étendue sur une tâche de dimension finie. On ne peut plus parler de point image mais de *tâche image*, située à l'endroit où le faisceau lumineux émergent est le plus étroit.

On constate par ailleurs que si l'on sélectionne uniquement les rayons les moins inclinés et les plus proches de l'axe optique (en plaçant par exemple un diaphragme devant la face d'entrée) alors on se rapproche de plus en plus du stigmatisme rigoureux (la dimension de la tâche image devient très faible) : on parle de **stigmatisme approché** : l'image d'un point objet est quasiment ponctuelle.

Concrètement, pour parler de stigmatisme approché, il faut comparer la dimension de la tâche image à celle d'une cellule du capteur de lumière (dimension d'un pixel, grain d'une pellicule photographique, dimension d'un cône ou d'un bâtonnet...). Si la tâche a une dimension inférieure à celle d'une cellule alors tout se passe comme si l'image était ponctuelle. L'image d'un objet étendu, vu à travers le système optique, est nette. Si elle a une dimension supérieure, alors elle recouvre plusieurs cellules. Du coup, les ondes lumineuses issues de plusieurs points objets différents se mélangent au niveau du détecteur, il y a perte d'information et le rendu est flou.

Flou Flou

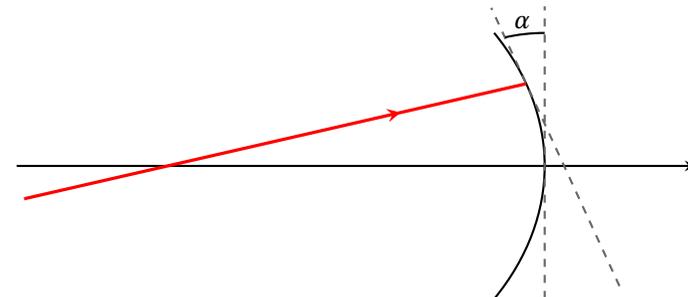
### 3.2 Conditions de Gauss

Le stigmatisme est une propriété essentielle d'un système optique puisqu'il garantit la **netteté** de l'image obtenue d'une source étendue. En général, le stigmatisme rigoureux n'existe pas, mais on peut le réaliser de manière approché si on se place dans les **conditions de Gauss** :

*On se place dans les conditions de Gauss lorsqu'on manipule uniquement des rayons lumineux très peu inclinés et très peu éloignés de l'axe optique. Ces rayons sont appelés rayons paraxiaux. Dans les conditions de Gauss, tout système optique centré présente un stigmatisme approché.*

Il n'y a pas de critère général disant à partir de quel angle d'inclinaison on sort des conditions de Gauss; cela dépend énormément de la qualité des systèmes optiques utilisés (forme, matériau, polissage, traitement de surface, etc...). Par exemple, certains objectifs photos ultra grand angle donneront des images nettes avec un champ de plusieurs dizaines de degrés, tandis qu'il ne faudra pas dépasser quelques degrés pour les lentilles utilisées en salle de TP.

Un rayon est peu éloigné de l'axe optique s'il vient frapper le dioptre/miroir près de son centre, c'est-à-dire à un endroit où la tangente au dioptre au point d'incidence est très peu inclinée par rapport à la normale à l'axe optique (voir figure ci-dessous).



### 3.3 Cas du dioptre plan

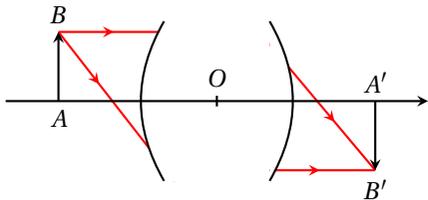
- Le dioptre plan n'est pas rigoureusement stigmatique.
- Dans les conditions de Gauss, la relation de conjugaison du dioptre plan s'écrit :

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

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

### 3.4 Aplanétisme

Soient  $(A, A')$  deux points conjugués (au sens du stigmatisme rigoureux **ou bien** approché) appartenant à l'axe optique d'un système centré. Ce système est dit aplanétique si le stigmatisme est conservé lorsque l'on s'écarte perpendiculairement à l'axe optique. On illustre l'aplanétisme sur la figure ci-dessous ; si  $B$  est un point objet situé dans le plan de front passant par  $A$  alors il possède un conjugué  $B'$ . Dans les conditions de Gauss on montre que  $B'$  est situé dans le plan de front passant par  $A'$ .



Lorsqu'un système centré est éclairé dans les conditions de Gauss, un objet situé dans un plan de front est conjugué avec une image située elle-aussi dans un plan de front.

## 4 Limites d'un instrument d'optique

### 4.1 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  $\mu\text{m}$ . On peut améliorer la résolution en utilisant un microscope électronique.

### 4.2 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).



Deux effets différents de la distorsion produite par un système optique : en barillets et en coussinets

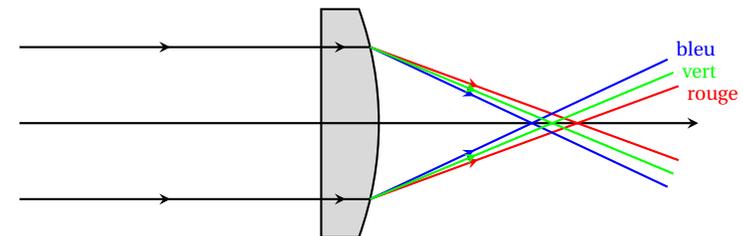
Photographie prise à travers un objectif "fish-eye" grand angle. Hors des conditions de Gauss, un effet de distorsion parfois recherché par le photographe.

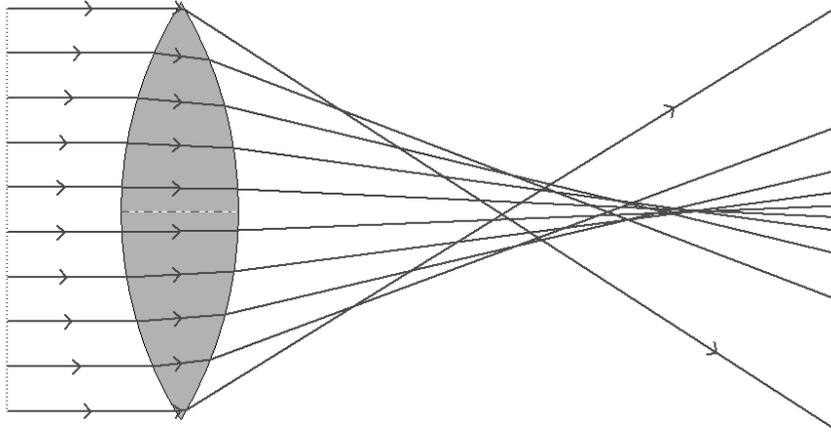
Photographie extraite de la page wikipedia "Objectif fisheye" : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Objectif\\_fisheye](http://fr.wikipedia.org/wiki/Objectif_fisheye)



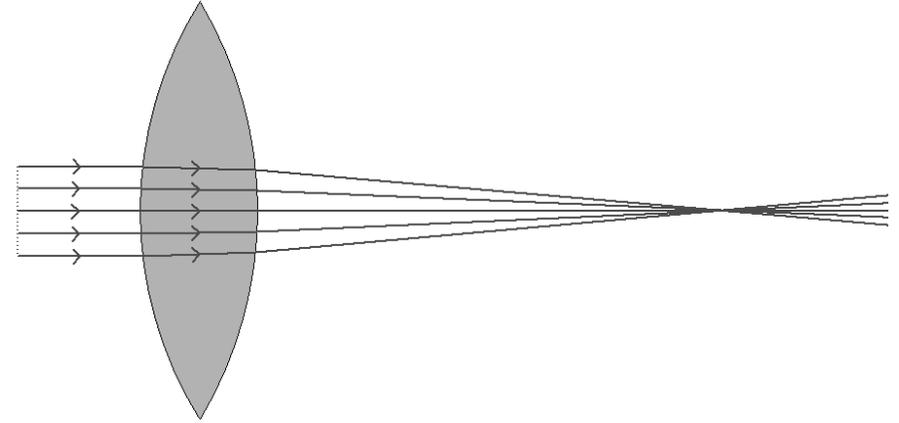
### 4.3 Aberrations chromatiques

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) éclairé en lumière polychromatique va propager différemment les différentes radiations du visible et donc former pour chacune d'entre elle une image différente, ce qui nuit à la résolution.

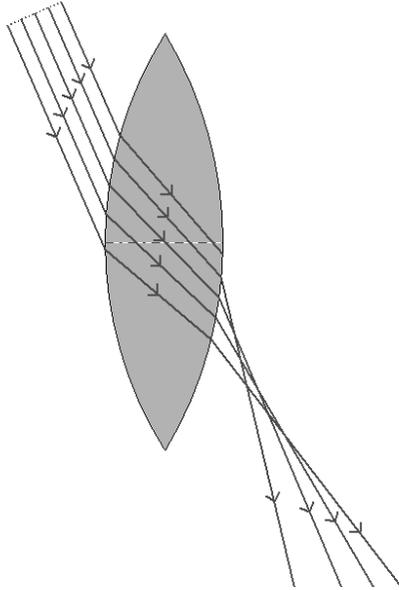




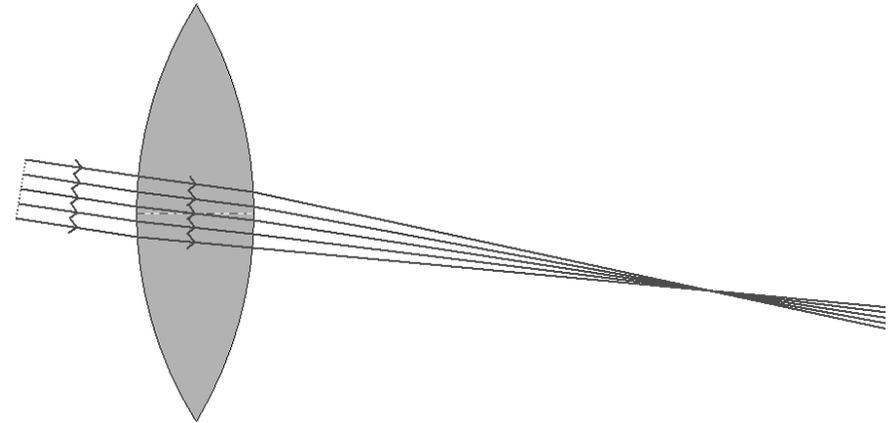
*Non stigmatisme d'une lentille sphérique pour des rayons éloignés de l'axe optique*



*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*