Chapitre 3
Généralités sur les systèmes optiques
et
Miroirs

Sidi M. Khefif

Département de Physique
EPST Tlemcen

3 février 2013

1. Généralités

1.1. Objets

Définition : On appelle *objet* la source des rayons lumineux dont on étudie la propagation à travers un système optique donné.

Types de sources et d'objets :

Source primaire : tout objet qui emet spontanément de la lumière.

Source secondaire : tout objet qui n'emet pas spontanément de la lumière ; il doit être éclairé par une lumière extérieure pour être observé.

Objet ponctuel : Objet dont les dimensions ne peuvent pas être déterminées en l'observant à travers un instrument optique.

Objet étendu : Objet de dimensions connues. Il peut être regardé comme une infinité d'objets ponctuels indépendants.

Objet à l'infini : objet si éloigné que tous les rayons lumineux qui en viennent sont parallèles.

1. Généralités

1.2. Systèmes optiques

Définition : On appelle *système optique* tout élément capable de modifier la propagation des rayons issus d'un objet. Un système optique se compose de milieux transaprents, homogènes et isotropes.

- Un système optique est dit *dioptrique* s'il n'est constitué que de dioptres. (ex. Œil)
- Un système optique est dit *catadioptrique* s'il contient au moins un miroir. (ex. Télescope)
- Un système optique est dit *centré* s'il admet un axe de symétrie de révolution (ex. Microscope, objectif d'appareil photo, . . .). On appelle cet axe *l'axe optique.*
- *À noter que tout rayon arrivant suivant l'axe optique n'est pas dévié.*

1.3. Images

Une *image* est définie *par rapport à un système optique donné*. Il s'agit de l'ensemble des points de concourt des rayons lumineux :

- émanants d'un objet,
- ayant traversé un système optique,
- et ayant émergé de celui-ci.

1. Généralités

1.4. Images et objets réels et virtuels

Images réelle et virtuelle

Soit un point objet A émettant des rayons lumineux vers le système optique. Deux cas se présentent :

1. Les rayons émergent du système optique en convergeant vers un point A' : ce point est point image réel, on peut le recueillir sur un écran.
2. Les rayons émergent du système optique en divergeant mais leurs prolongements se coupent en un point A' : ce point est un point image virtuel, on ne peut pas le recuillir sur un écran, mais il peut être vu à l'œil nu à travers le système.

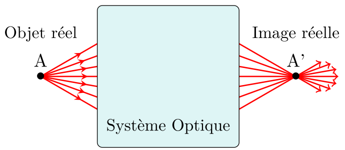

Figure : Formation d'un point image réel

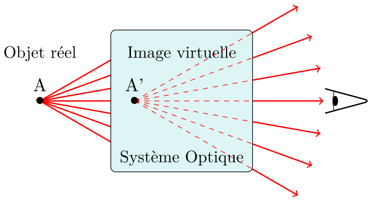

Figure : Formation d'un point image virtuel

1. Généralités

1.4. Images et objets réels et virtuels

Objet virtuel

- Il est également possible de créer un point objet virtuel en faisant converger les prolongements de rayons incidents au système optique.
- L'image de ce point objet virtuel pourra être un point image réel ou un point image virtuel selon les mêmes principes énoncés précédemment.

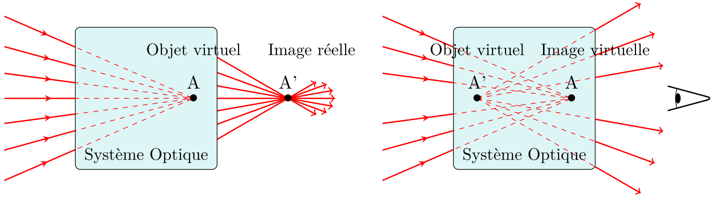

Figure : Cas d'un point objet virtuel

1. Généralités

1.4. Images et objets réels et virtuels

Espaces objet et image

Que le système optique soit par transmission (dioptrique) ou par réflexion (catadioptrique), on peut définir quatre espaces :

1. Un espace objet réel
2. Un espace objet virtuel
3. Un espace image réelle
4. Un espace image virtuelle

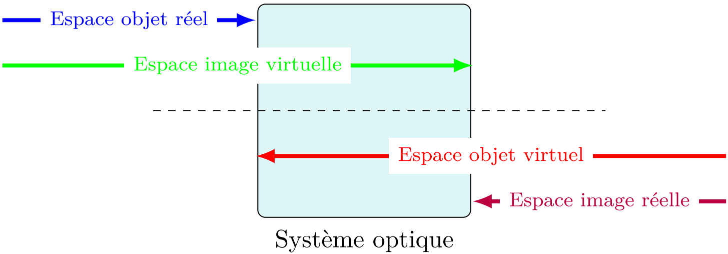

FIGURE : Espaces objet et image

1. Généralités

1.4. Images et objets réels et virtuels

Foyers

Les foyers d'un système optique sont des points particuliers définis comme suit :

1. Le foyer principal image F' est le point image d'un objet situé à l'infini, dont les rayons arrivent parallèles sur le système optique et parallèlement à son axe optique. Le plan passant par F' et perpendiculaire à l'axe optique du sytème est appelé plan focal image.
2. Le foyer principal objet F est le point objet d'une image située à l'infini, les rayons émergent du système optique parallèles entre eux et parallèles à l'axe optique. Le plan passant par F et perpendiculaire à l'axe optique du système est appelé plan focal objet.

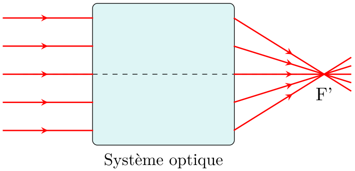

FIGURE : Foyer principal image

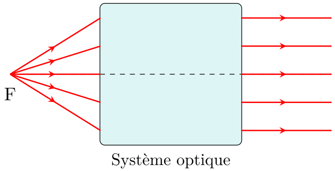

FIGURE : Foyer principal objet

1.5. Stigmatisme et Aplanitisme

Stigmatisme :

Un système optique est *rigoureusement stigmatique* si tous les rayons émis par (point objet) A convergent en un seul point A' (point image), après avoir traversés le sytème optique. On dit que A et A' sont *conjugués* par le système optique.

Aplanétisme :

Soient (A, A') et (B, B') deux couples de points conjugués par le système optique. B est situé dans le plan transverse (plan perpendiculaire à l'axe optique) de A. Si B' est situé dans le plan transverse de A', alors le système est *rigoureusement aplanétique*.

1. Généralités

1.5. Stigmatisme et Aplanitisme

- Considérons tout d'abord un segment lumineux AB sur l'axe optique. L'image est nécessairement sur l'axe optique puisque la symétrie de révolution oblige tout rayon incident confondu avec l'axe optique à sortir en restant sur l'axe optique. On définit alors le grandissement longitudinal

$$\gamma_l = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}.$$

Si $\gamma_l < 0$, on dit qu'il y a inversion de l'image et donc inversion de la gauche et de la droite.

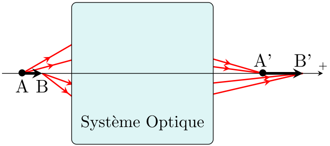

Figure : Déformation longitudinale d'un système optique aplanétique

1. Généralités

1.5. Stigmatisme et Aplanitisme

- Considérons maintenant un segment lumineux AB, perpendiculaire au système optique. Pour quantifier la déformation verticale de l'image, on définit le grandissement transversal

$$\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}.$$

  - Si $\gamma_t > 1$, l'image est droite et agrandie,
  - si $\gamma_t < 1$, l'image est droite et rétrécie,
  - si $-1 < \gamma_t < 0$, l'image est renversée et rétrécie,
  - enfin, si $\gamma_t < -1$, l'image est renversée et agrandie.

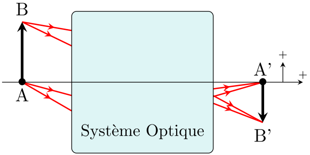

FIGURE : Déformation transversale d'un système optique aplanétique

2. Les miroirs

2.1. Le miroir plan

Le miroir plan est le seul système optique rigoureusement stigmatique et aplanétique.

Pour construire l'image A' de A, on utilise deux rayons incidents auxquels on applique la loi de la réflexion. Le point image A' est le symétique du point objet A par rapport au plan du miroir. La relation de conjugaison du miroir plan s'écrit :

$$\overline{HA} = -\overline{HA'},$$

où H est le projeté orthogonal de A sur le plan miroir.

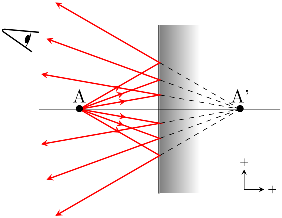

FIGURE : xxx

Question : Cette image est réelle ou virtuelle ? Justifier.

2. Les miroirs

2.1. Le miroir plan

Grandissement transverse et longitudinal :

1. $\gamma_t = 1$: l'image est droite et n'est pas déformée. À noter qu'il y a inversion gauche droite entre l'objet et l'image.
2. $\gamma_l = -1$: L'image est renversée et il n'y a pas de déformation.

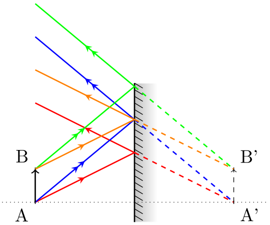

FIGURE : Image d'un objet transverse

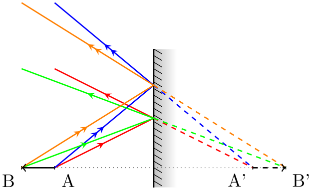

FIGURE : Image d'un objet axial

2. Les miroirs

2.1. Le miroir sphérique

Un miroir sphérique est une calotte (portion) de sphère réfléchissante. Deux cas peuvent se présenter :

- La surface réfléchissante se trouve à l'intérieur de la portion sphérique, on a alors un miroir concave et qui est convergent.
- La surface réfléchissante se situe à l'extérieur, on a alors un miroir convexe et qui est divergent.
- On appelle C le centre du miroir : il s'agit du centre de la sphère dont une partie constitue le miroir. Un rayon qui passe par C n'est pas dévié.
- On appelle S le sommet du miroir : c'est le point d'intersection entre l'axe optique et la surface réfléchissante.
- le miroir concave (convexe) est un miroir sphérique tel que $\overline{SC} < 0$ ($\overline{SC} > 0$).

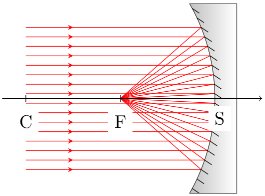

FIGURE : Miroir concave

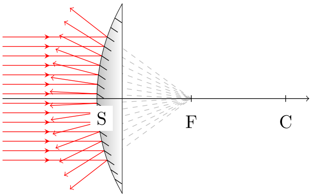

FIGURE : Miroir convexe

2. Les miroirs

2.1. Le miroir sphérique

- Le foyer principal objet et le foyer principal image sont confondus.
- Les rayons qui arrivent sur le miroir parallèlement à l'axe optique se coupent en F.
- Inversement, les rayons qui passent par F et frappent le miroir sont réfléchis parallèlement à l'axe optique.
- Dans le cas d'un miroir stigmatique, le foyer F se situe au milieu de SC.
- Le foyer F est réel dans le cas d'un miroir concave, virtuel dans le cas d'un miroir convexe.
- La distance focale du miroir est définie par $f = \overline{SF} = \dfrac{\overline{SC}}{2}$.
- La distance focale est négative pour un miroir concave, positive dans le cas d'un miroir convexe.
- On peut définir la vergence d'un miroir par $V = \dfrac{1}{f}$. Elle s'exprime en dioptrie (δ) ou m^{-1}.
- On définit souvent le rayon algébrique du miroir par $R = \overline{CS}$.

2.3. Conditions de Gauss

- Le miroir concave n'est pas rigoureusement stigmatique. En effet, Lorsque des rayons parallèles frappent le miroir en des points d'incidence éloignés du sommet S, l'image du point objet situé à l'infini n'est plus un point ; les rayons ne convergent plus en un seul point F !

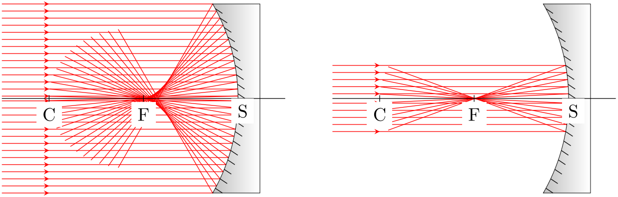

FIGURE : Conditions de stigmatisme approché

2. Les miroirs

2.3. Conditions de Gauss

- Si le miroir sphérique n'est pas stigmatique, il ne peut pas être aplanétique !
- En pratique, il y a stigmatisme approché pour tous les rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique de tout système centré.
- En pratique, également, il y a aplanétisme approché pour tous les petits objets proches de l'axe optique de tout système centré.

Définition :

On dit qu'on est dans l'approximation de Gauss (ou dans les conditions de Gauss) lorsqu'on utilise un système optique centré en se limitant aux rayons lumineux *paraxiaux*, *i.e.*, aux rayons :

1. peu inclinés par rapport à l'axe optique,
2. et proches de cet axe.

2. Les miroirs

2.4. Formules de conjugaison

Construisons l'image d'un objet AB à travers un miroir concave tel que $\overline{SA} > \overline{SC}$.

Notons que la démonstration suivante reste valable quelle que soit la position de l'objet et quelle que soit la nature du miroir.

Traçons les rayons suivants puisqu'on connait leurs directions respectives :

- Le rayon qui arrive parallèle sur le miroir est réfléchi en passant par le foyer.
- La rayon qui passe par le foyer se réfléchit dans le miroir en étant parallèle à l'axe optique.
- La rayon qui passe par le centre C et qui se réfléchit dans le miroir n'est pas dévié.
- La rayon qui frappe le miroir en son sommet est réfléchi avec un angle de réflexion identique à son angle d'incidence.

2. Les miroirs

2.4. Formules de conjugaison

On obtient la construction suivante :

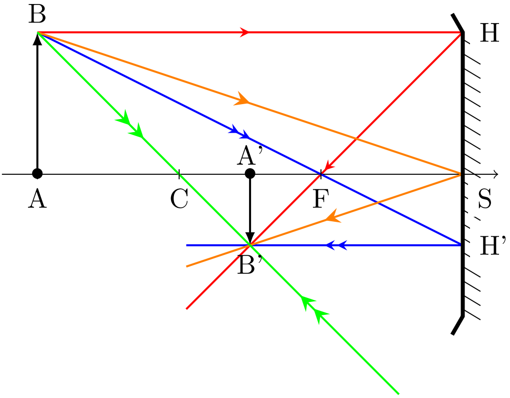

FIGURE : Image d'un objet réel par un miroir concave

2. Les miroirs

Formules avec origine aux foyers (dites de Newton)

Le théorème de Thalès appliqé aux triangles BAF et FSH' donne l'agrandissement défini par rapport à la position de l'objet :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{SH'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FS}}{\overline{FA}}.$$

Dans les triangles $B'A'F$ et FSH, l'agrandissement par rapport à la position de l'image est :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{SH}} = \frac{\overline{FA'}}{\overline{FS}}.$$

La combinaison de ces deux relations donne la formule de conjugaisons selon Newton :

$$\overline{FAFA'} = \overline{FS}^2 = f^2 = ff'.$$

2. Les miroirs

Formules avec origine au centre

En utilisant le théorème de Thalès dans les triangles CAB et $CA'B'$, on a :

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

En partant des relations de Newton et en introduisant le centre C du miroir, on a :

$$(\overline{FC} + \overline{CA})(\overline{FC} + \overline{CA'}) = f^2,$$

or $\overline{FC} = f$:

$$f^2 + f\,\overline{CA} + f\,\overline{CA'} + \overline{CA\,CA'} = f^2.$$

On divise l'équation par $f\,\overline{CA\,CA'}$:

$$\frac{1}{\overline{CA'}} + \frac{1}{\overline{CA}} = -\frac{1}{f}.$$

Enfin, $f = \dfrac{\overline{SC}}{2}$:

$$\frac{1}{\overline{CA'}} + \frac{1}{\overline{CA}} = -\frac{2}{\overline{CS}}.$$

2. Les miroirs

Formules avec origine au sommet

En utilisant le théorème de Thalès dans les triangles SAB et $SA'B'$, on a :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}.$$

En partant des relations de Newton et en introduisant le sommet S du miroir, on a :

$$(\overline{FS} + \overline{SA})(\overline{FS} + \overline{SA'}) = f^2,$$

or $\overline{FS} = -f$:

$$f^2 - f\overline{SA} - f\overline{SA'} + \overline{SASA'} = f^2.$$

On divise l'équation par $f\overline{SASA'}$:

$$\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{1}{f}.$$

Enfin, $f = \dfrac{\overline{SC}}{2}$:

$$\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = -\frac{2}{\overline{SC}}.$$

2. Les miroirs

2.5. Constructions

Miroir concave

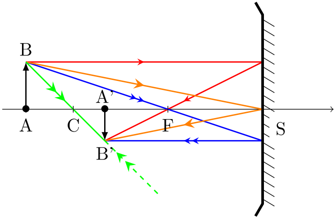

FIGURE : Objet et image réels

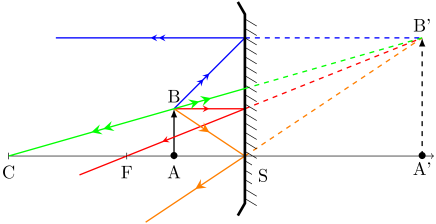

FIGURE : Objet réel, image virtuelle

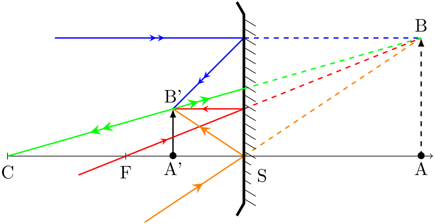

FIGURE : Objet virtuel, image réelle

2. Les miroirs

2.5. Constructions

Miroir convexe

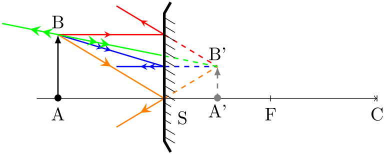

Figure : Objet réel, image virtuelle

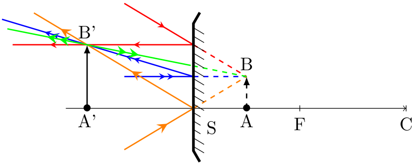

Figure : Objet virtuel, image réelle

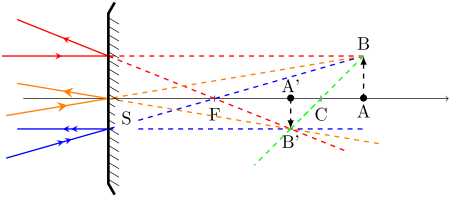

Figure : Objet et images virtuels