

Chapitre 2

Formation d'une image

I. Objet et image

1. Système optique
2. Objet
 - 2.1 Définition
 - 2.2 Objet réel ou virtuel
3. Image
 - 3.1 Définitions
 - 3.2 Récepteurs
 - 3.3 Image réelle ou virtuelle

II. Propriétés des systèmes optiques

1. Stigmatisme
 - 1.1 Stigmatisme rigoureux
 - 1.2 Stigmatisme approché
2. Aplanétisme

III. Système rigoureusement stigmatique : le miroir plan

1. Construction de l'image
2. Relation de conjugaison et grandissement transversal

IV. Lentilles sphériques minces

1. Modélisation d'une lentille sphérique mince

1.1 Lentille sphérique

1.2 Les différents types de lentille

1.3 Lentille mince

1.4 Centre optique

2. Propriétés dans les conditions de Gauss

3. Foyers d'une lentille sphérique mince

3.1 Foyers principaux et distance focale

3.2 Foyers secondaires et plans focaux :

4. Constructions géométriques

4.1 Méthode pour construire l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique

4.2 Méthode pour construire un rayon émergent

4.3 Méthode pour construire un rayon incident

4.4 Et quand il y a plusieurs lentilles ...

5. Relation de conjugaison et grandissement transversal

5.1 Relations de conjugaison

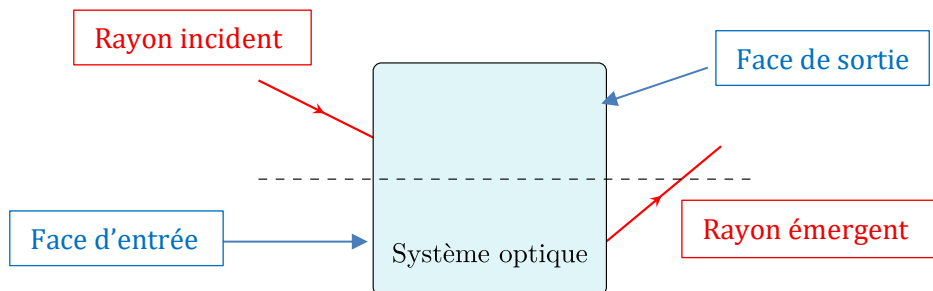
5.2 Grandissement transversal



I. Objet et image

1. Système optique

On appelle système optique un ensemble de surfaces réfringentes et/ou réfléchissantes qui modifient la trajectoire des rayons lumineux. Il donne d'un ensemble de points lumineux (l'objet) une représentation (l'image).



On appelle **axe optique** l'axe de symétrie de révolution du système optique (s'il existe).

Un rayon se propageant selon l'axe optique n'est pas dévié.

2. Objet

2.1 Définition

On considère un ensemble de rayons lumineux issus d'une source lumineuse entrant dans le système optique, les rayons incidents.

Un point objet est l'intersection de rayons incidents.

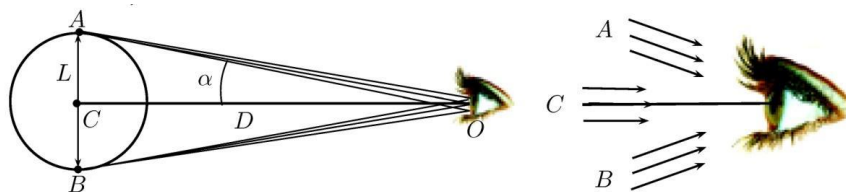
Un objet est un ensemble de points objets.

Objet ponctuel : Un objet est considéré **ponctuel** si ses dimensions sont infiniment petites devant sa distance d'observation. Tous les rayons incidents semblent se couper en un seul point. *Exemple : une étoile vue depuis la Terre*

Objet étendu : Un objet est considéré **étendu** si ses dimensions sont finies. Il est alors traité comme une infinité d'objets ponctuels indépendants les uns des autres.

Exemple : la Lune, un arbre...

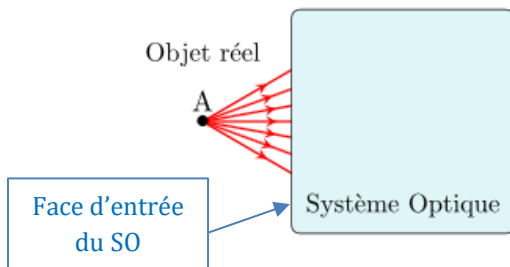
Point objet à l'infini : Si on se place très loin d'une source lumineuse ponctuelle, les rayons incidents semblent être parallèles entre eux.



Des rayons incidents parallèles entre eux définissent un point objet à l'infini.

2.2 Objet réel ou virtuel

Un objet est réel s'il est situé avant la face d'entrée du système optique.

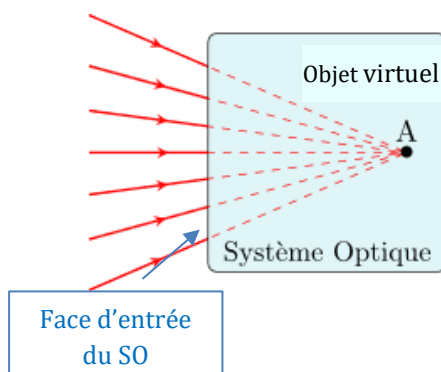


Faisceau incident divergent.

Les rayons incidents sont réellement issus du point objet.

« A peut être touché. »

Un objet est virtuel s'il est situé après la face d'entrée du système optique.

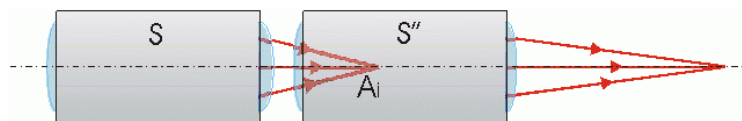


Faisceau incident convergent.

Les rayons incidents se dirigent vers l'objet mais ne se coupent pas réellement en A à cause de la présence du système optique qui les dévient : **il est l'intersection des prolongements des rayons incidents**

« A ne peut être touché. »

Remarque : tout objet dans la nature est un objet réel, cependant, lors d'un enchaînement de systèmes optiques on peut rencontrer des objets virtuels. Sur le schéma ci-dessous, A_i joue le rôle d'objet virtuel pour le système optique S'' .



3. Image

3.1 Définitions

On considère un ensemble de rayons lumineux sortant du système optique, les rayons émergents.

Un point image est l'intersection de rayons émergents.

Une image est un ensemble de points images.

Point image à l'infini : Des rayons émergents parallèles entre eux définissent **un point image à l'infini**.

3.2 Récepteurs

Un récepteur est un ensemble de cellules photosensibles qui fournissent un signal fonction de leur éclairement et de la longueur d'onde.

Exemple : rétine de l'œil et cellules rétinienne, capteur CCD.

On considère un ensemble de points images formant une tâche.

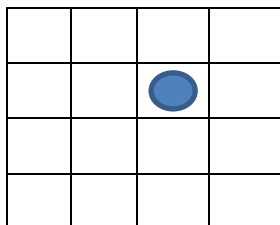


Image ponctuelle

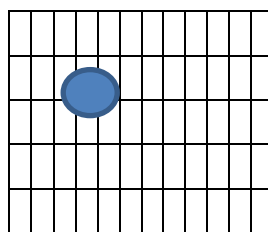


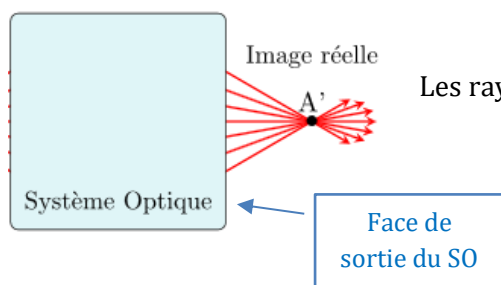
Image étendue

La nature ponctuelle ou étendue d'une image dépend du récepteur : l'image apparaît ponctuelle si sa taille est inférieure à celles des cellules réceptrices.

Point image à l'infini : Des rayons émergents parallèles entre eux définissent **un point image à l'infini**.

3.3 Image réelle ou virtuelle

Une image est dite réelle si elle est située après la face de sortie du système optique.

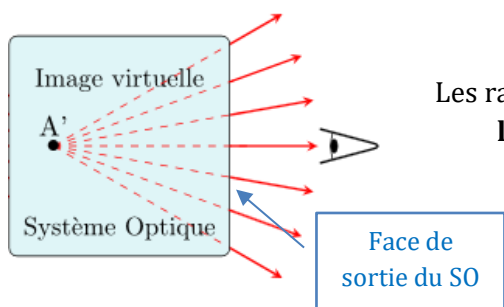


Faisceau émergent convergent.

Les rayons émergents se dirigent vers le point image réel et s'y coupent réellement.

« A' peut être vu sur un écran. »

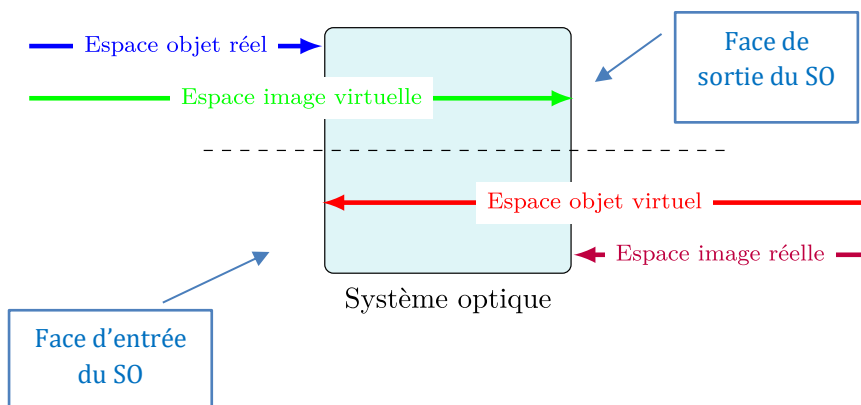
Une image est dite virtuelle si elle est située avant la face de sortie du système optique.



Faisceau émergent divergent.

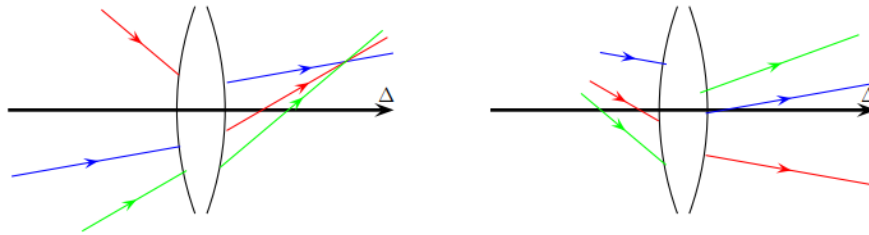
Les rayons émergents semblent provenir du point image virtuel : il est **l'intersection des prolongements des rayons émergents**.

« A' ne peut être directement vue sur un écran. »



Application 1 : Caractère réel/virtuel des objets et des images

Indiquez sur les schémas les positions des objets et des images et indiquez leur caractère réel ou virtuel.



II. Propriétés des systèmes optiques

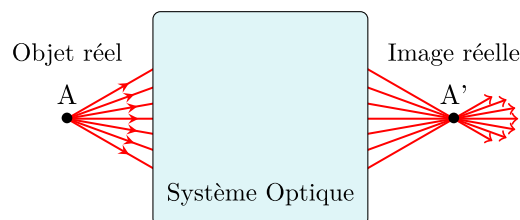
1. Stigmatisme

1.1 Stigmatisme rigoureux

Si tous les rayons émis par un point objet A émergent du système optique en passant par un point unique A' : le système est dit rigoureusement stigmatique, A' est l'image conjuguée de A.

« L'image d'un point est un point »

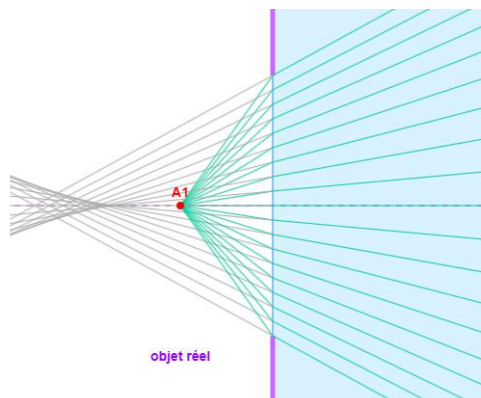
Exemple avec un objet et une image réels :

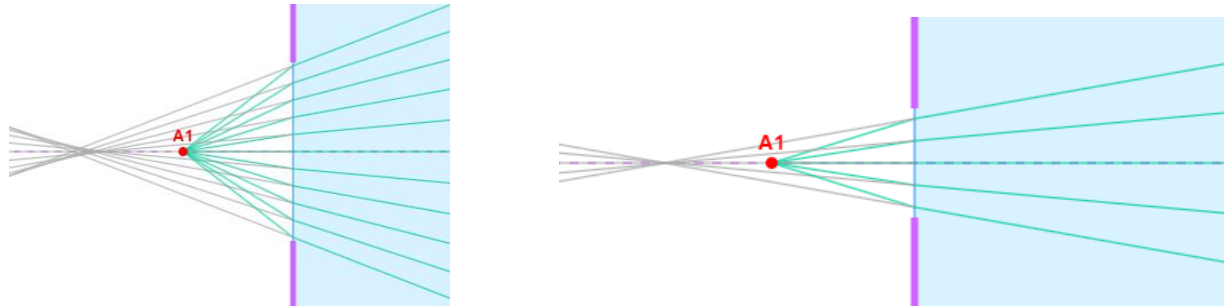


C'est une propriété très importante qui détermine la netteté de l'image.

1.2 Stigmatisme approché

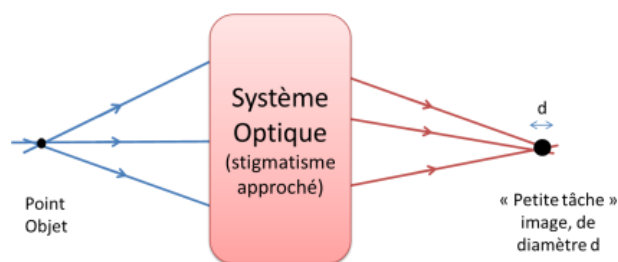
Prenons l'exemple d'un dioptré plan. A₁ est un point objet réel. Les rayons émergents ne se coupent pas en un seul point : le système n'est pas stigmatique. Il donne d'un point objet plusieurs points images et donc une tâche image.





Lien : http://www.sciences.univnantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/stig_dioptre_plan.php

En réduisant l'inclinaison des rayons incidents, les différentes intersections tendent vers une intersection unique. Si la taille caractéristique de la tâche image formée devient plus petite que celle des cellules du récepteur, le récepteur ne verra pas une tâche mais un point.



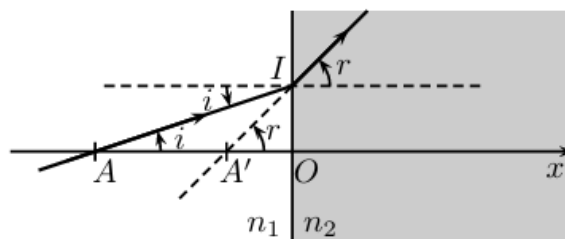
Il existe un stigmatisme approché lorsque la dimension de la tâche image est suffisamment petite pour être considérée ponctuelle par le récepteur.

De manière générale, on pourra avoir un stigmatisme approché dans les conditions de Gauss, c'est-à-dire en se limitant à l'utilisation des rayons paraxiaux (rayons peu éloignés de l'axe optique et peu inclinés par rapport à l'axe optique).

En pratique on utilise un diaphragme, mais ceci présente deux inconvénients : perte de luminosité et phénomène de diffraction.

Application 2 : Stigmatisme approché d'un dioptre plan

On considère un dioptre plan placé perpendiculairement à un axe Ox . Les indices des deux milieux seront notés n_1 et n_2 . On dispose d'un point objet A sur l'axe Ox .

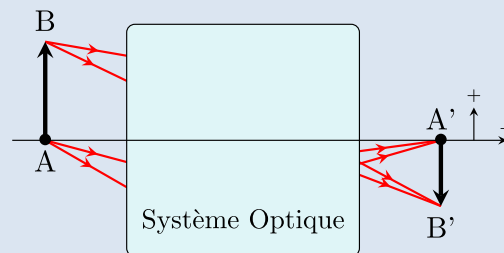


- 1) On considère un rayon issu de A d'incidence i , on note A' l'intersection entre le prolongement du rayon réfracté et la normale en O . Exprimer la distance OA' en fonction de cet angle i , OA et des indices optiques. Le dioptre plan est-il rigoureusement stigmatique ?
- 2) Montrer qu'il y a stigmatisme approché dans le cas de petits angles.

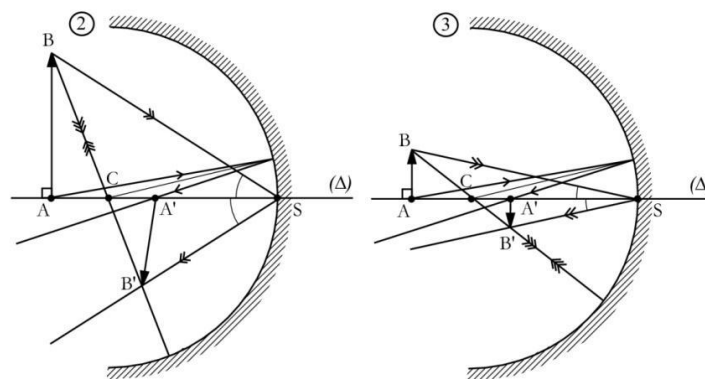
2. Aplanétisme

Dans le cas d'un système optique aplanétique, tout objet AB plan et perpendiculaire à l'axe optique a une image A'B' plane et perpendiculaire à cet axe.

Aplanétisme = Conservation du stigmatisme dans le plan transverse.



Considérons un miroir sphérique et un objet réel :

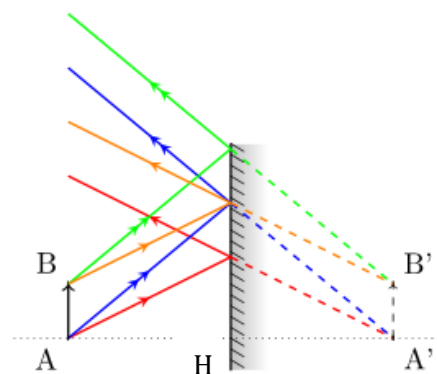


On constate qu'en se plaçant dans les conditions de Gauss, il y a aplanétisme approché.

On retiendra qu'il y a stigmatisme et aplanétisme approchés si on se place dans les conditions de Gauss.

III. Système rigoureusement stigmatique : le miroir plan

1. Construction de l'image



Le miroir plan présente un **stigmatisme et un aplanétisme rigoureux**.

Un miroir plan donne de tout objet AB une image A'B' symétrique de AB par rapport au plan du miroir.

Lien : http://www.sciences.univnantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/miroirs/miroir_plan.php

Remarque : Un objet réel donne une image virtuelle est inversement.

2. Relation de conjugaison et grandissement transversal

Attention : nous utilisons des grandeurs algébriques (grandeurs qui possèdent un signe selon une orientation arbitraire choisie)

Relation de conjugaison : $\overline{HA'} = -\overline{HA}$ **Grandissement transversal :** $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = 1$

Application 3 : Se voir dans un miroir ♥

Un homme mesurant 1,80 m et dont les yeux sont placés à $H = 1,70$ m du sol cherche à s'observer entièrement par réflexion dans un miroir plan vertical. Dessiner l'homme et son image. Déterminer la position et la hauteur minimale du miroir.

Application 4 : Champ de vision d'un miroir plan ♥

Le champ de vision d'un miroir est la portion de l'espace qu'un observateur voit dans ce miroir. On note L la taille du miroir plan et D la distance de l'observateur au miroir. Représenter le champ de vision de l'observateur. Donner l'expression de l'angle α de ce champ de vision.

IV. Lentilles sphériques minces

1. Modélisation d'une lentille sphérique mince

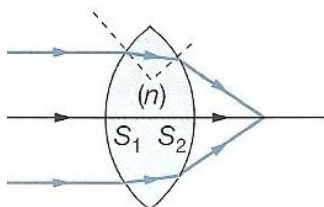
1.1 Lentille sphérique

Un **dioptre sphérique** est une portion surface sphérique de centre C , de rayon R séparant 2 milieux d'indices différents.

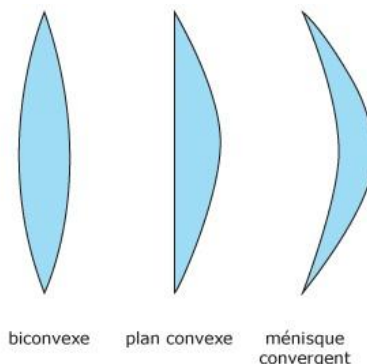
Une **lentille sphérique** résulte de l'association de 2 dioptres sphériques de même axe de symétrie de révolution, l'axe optique.

1.2 Les différents types de lentille

- **Lentille convergente :** les rayons émergents se rapprochent de l'axe optique.

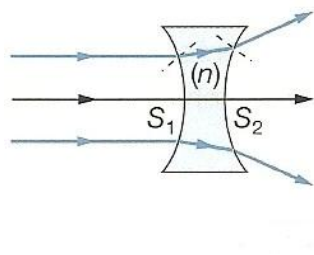


Lentille à bords minces
= Lentille convergente

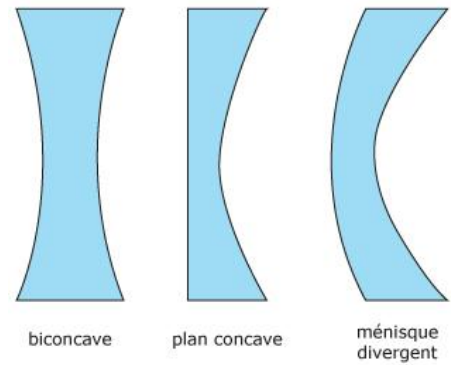


biconvexe plan convexe ménisque convergent

- **Lentille divergente** : les rayons émergents s'écartent de l'axe optique.

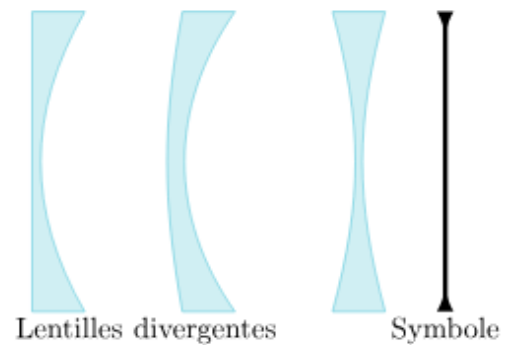
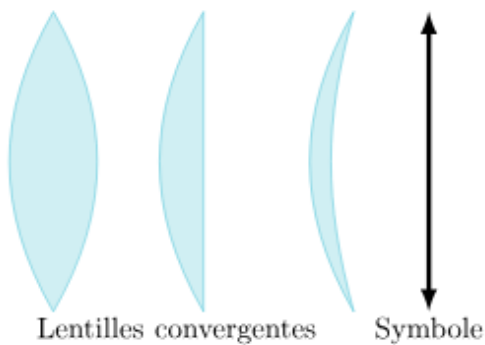
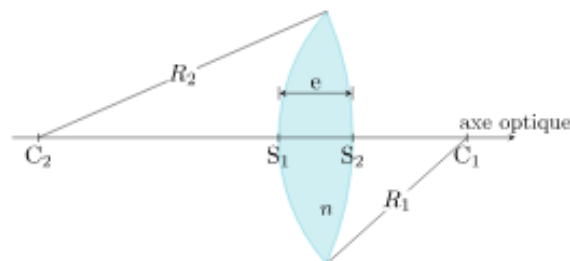


Lentille à bords épais
= Lentille divergente



1.3 Lentille mince

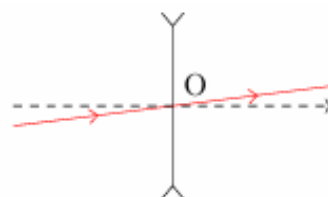
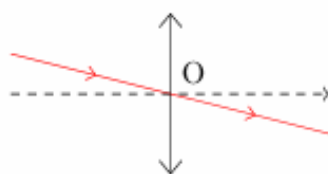
La lentille est dite **mince** lorsque son épaisseur S_1S_2 est négligeable devant les rayons de courbures ainsi que devant la distance C_1C_2 entre les centres des 2 dioptries : $S_1S_2 \ll S_1C_1, S_2C_2$ et C_1C_2



1.4 Centre optique

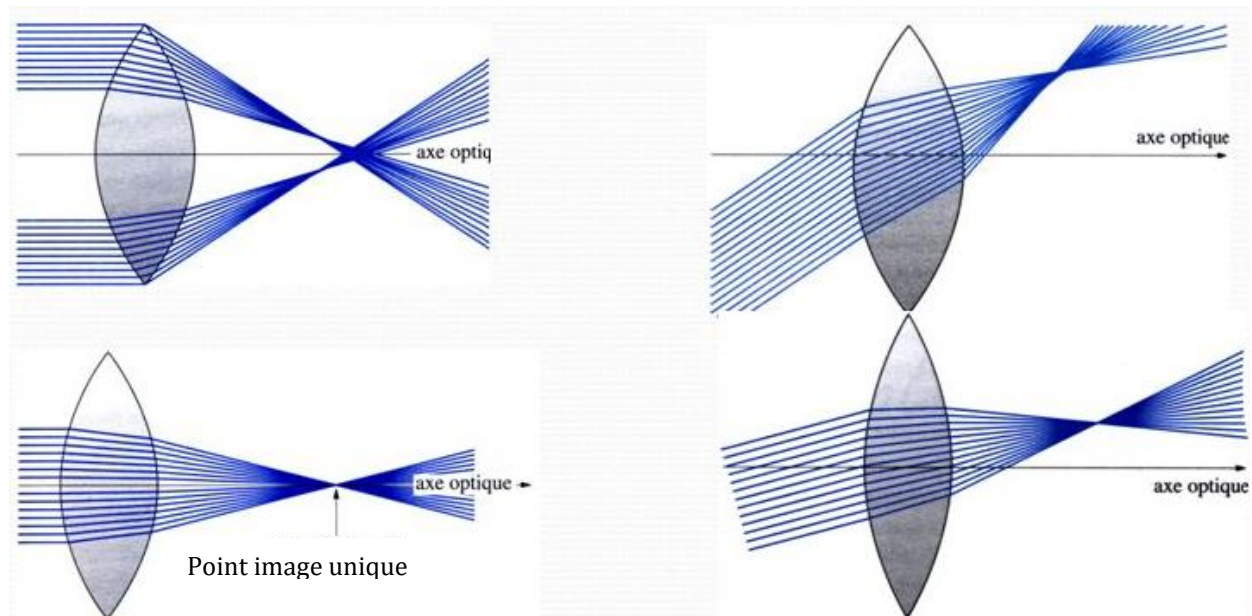
Le point d'intersection entre la lentille mince et l'axe optique O est le centre optique de la lentille.

Propriété importante : Tout rayon passant par le centre optique n'est pas dévié.



2. Propriétés dans les conditions de Gauss

On considère ci-dessous un point objet à l'infini :



Une lentille mince sphérique présente un stigmatisme et un aplanétisme approchés dans les conditions de Gauss.

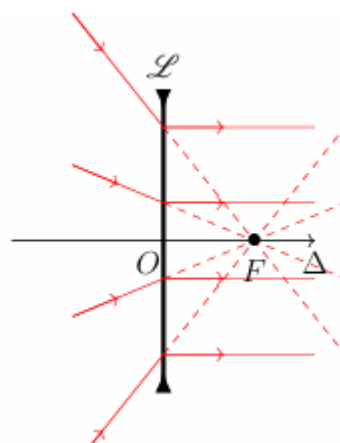
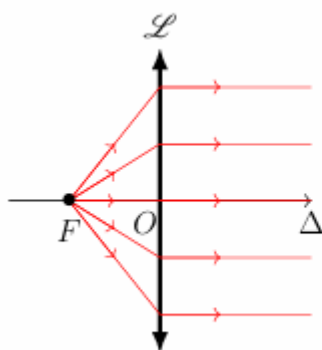
Conséquence du stigmatisme approché : Un rayon se propageant selon l'axe optique n'étant pas dévié, tout point objet sur l'axe optique donne une image située elle aussi sur l'axe optique.

3. Foyers d'une lentille sphérique mince

3.1 Foyers principaux et distance focale

Le foyer principal objet, F , est le point objet situé sur l'axe optique dont l'image est située à l'infini sur l'axe optique.

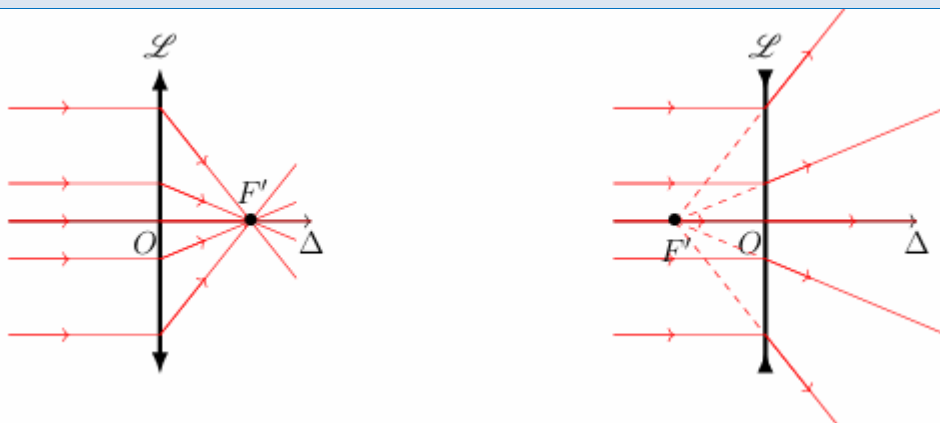
Propriété : Tout rayon incident dont la direction passe par F émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique.



Le foyer objet est un objet réel pour une lentille convergente, virtuel pour une lentille divergente.

Le foyer principal image, F' , est l'image d'un point objet situé sur l'axe optique et à l'infini.

Propriété : tout rayon parallèle à l'axe optique émerge de la lentille tel que sa direction passe par F' .



Le foyer image est réel pour une lentille convergente, virtuel pour une lentille divergente.

F et F' sont symétriques par rapport à O mais ATTENTION : ils ne sont pas objet et image l'un de l'autre !

On appelle distance focale image la distance algébrique $f' = \overline{OF'}$.

Elle est positive si la lentille est convergente, négative si divergente.

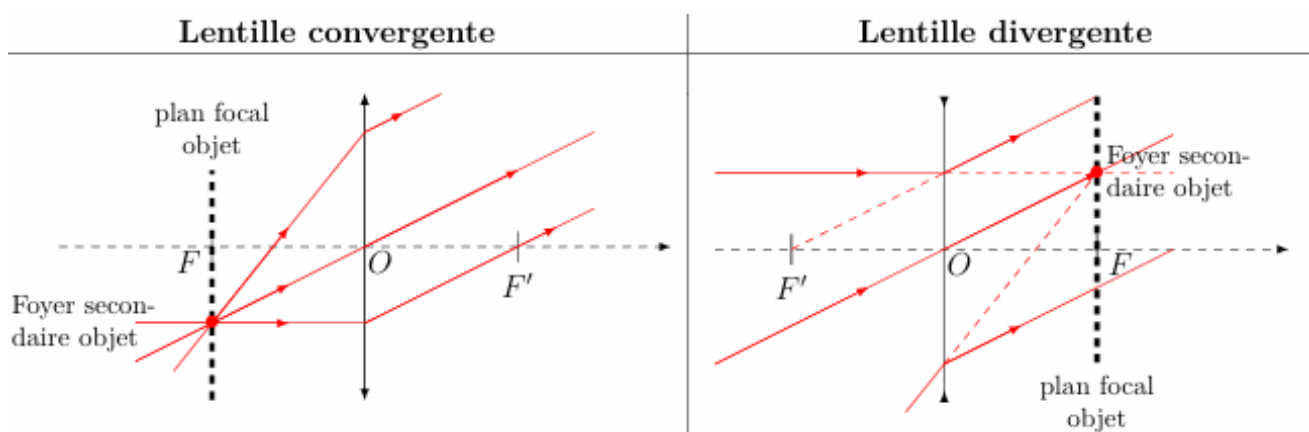
La vergence est définie par $V = \frac{1}{f'}$, elle s'exprime en dioptrie δ ($1 \delta = 1 \text{ m}^{-1}$). (> 0 si convergente, < 0 si divergente).

3.2 Foyers secondaires et plans focaux

- Plan focal objet : plan passant par le foyer objet F perpendiculaire à l'axe optique.

Tout point objet hors de l'axe optique et appartenant au plan focal objet, appelé foyer objet secondaire, a son image à l'infini hors axe optique.

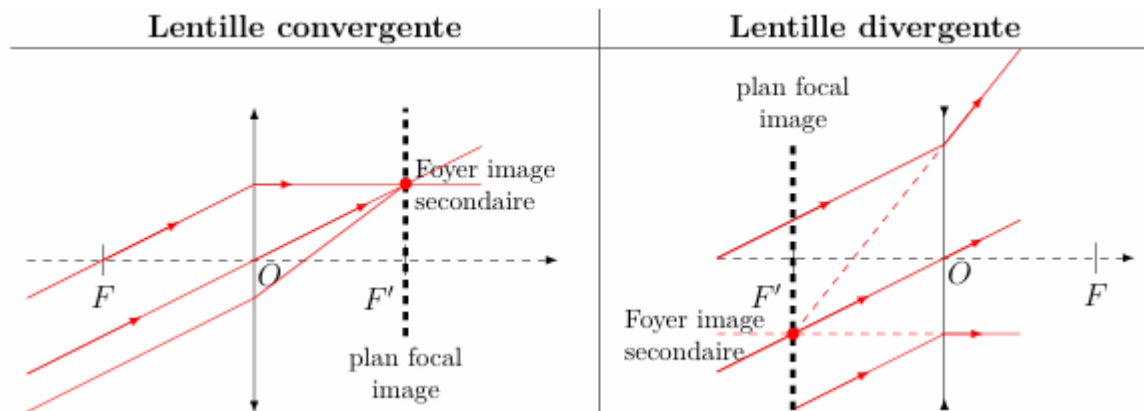
Propriété : 2 rayons incidents se coupant dans le plan focal objet émergent parallèlement entre eux.



- **Plan focal image** : plan passant par F' perpendiculaire à l'axe optique.

Tout point objet situé à l'infini hors de l'axe optique a pour image un point hors axe optique appartenant au plan focal image, appelé foyer image secondaire.

Propriété : 2 rayons incidents parallèles entre eux émergent en se coupant dans le plan focal image.



4. Constructions géométriques

4.1 Méthode pour construire l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique

Soit AB un objet perpendiculaire à l'axe optique tel que A est situé sur l'axe optique et B en dehors. On note $A'B'$ son image conjuguée.

On se place dans les conditions de Gauss :

Stigmatisme approché : Tous les rayons incidents passant par un même point objet émergent en passant par un point image unique $\Rightarrow$ **2 rayons suffisent**.

Aplanétisme approché : L'image $A'B'$ d'un objet perpendiculaire à l'axe optique est elle aussi perpendiculaire à l'axe optique $\Rightarrow$ **il suffit de déterminer B'** .

Pour construire B' , l'image conjuguée de B

1. On trace 2 rayons parmi :
 - Le rayon incident (1) passant par B et le centre optique, qui n'est pas dévié.
 - Le rayon incident (2) passant par B et parallèle à l'axe optique qui émerge en passant par le foyer image F' .
 - Le rayon incident (3) passant par B et le foyer objet F qui émerge parallèlement à l'axe optique.
2. B' est l'intersection des rayons émergents.
3. Le système étant aplanétique A' est le projeté orthogonal de B' sur l'axe.

Application 5 : Constructions de l'image dans le cas d'une lentille convergente

Pour chaque cas du document en annexe, déterminer graphiquement la position de l'image et caractériser l'objet (réel ou virtuel) et l'image (réelle, virtuelle).

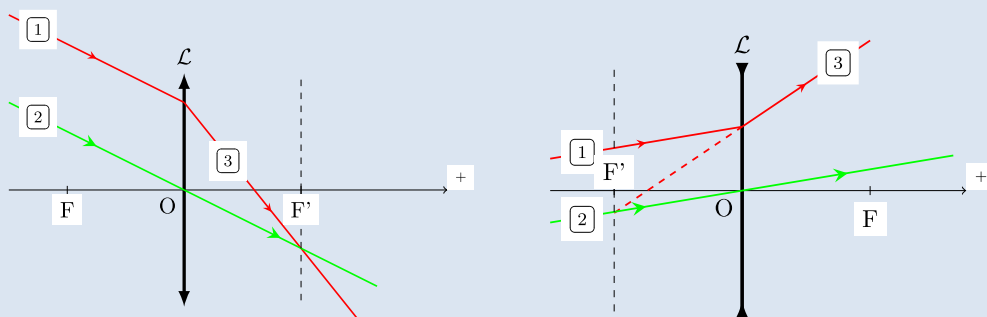
Application 6 : Constructions de l'image dans le cas d'une lentille divergente

Pour chaque cas du document en annexe, déterminer graphiquement la position de l'image et caractériser l'objet (réel ou virtuel) et l'image (réelle, virtuelle).

4.2 Méthode pour construire un rayon émergent

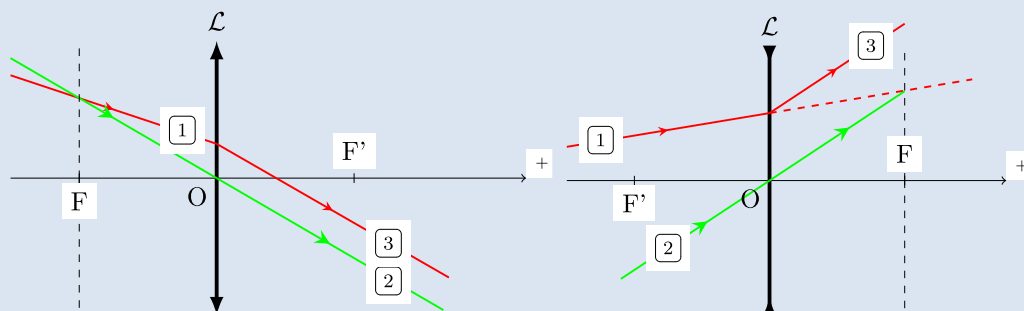
On utilise la propriété du plan focal image : 2 rayons incidents parallèles émergent en se coupant dans le plan focal image.

1. Tracer un rayon incident parallèle (2) au rayon incident (1) et passant par le centre optique, il n'est pas dévié.
2. Tracer le plan focal image.
3. Le rayon incident (1) émerge de façon à ce que les rayons émergents (3) et (2) se coupent dans le plan focal image.

**4.3 Méthode pour construire un rayon incident**

On utilise le plan focal objet : 2 rayons incidents se coupant dans le plan focal objet émergent parallèles entre eux.

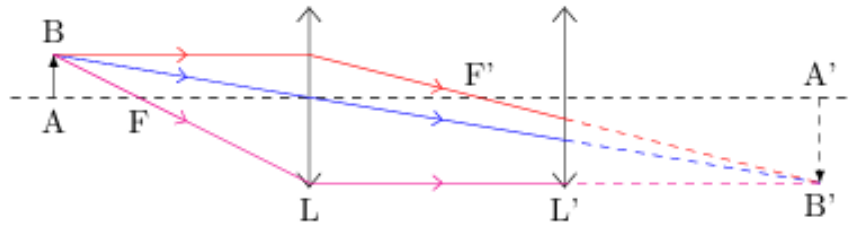
1. Tracer un rayon émergent parallèle (2) au rayon émergent (3) et passant par le centre optique, il n'a pas été dévié.
2. Tracer le plan focal objet.
3. Le rayon incident (1) est tel qu'il coupe le rayon (2) dans le plan focal objet.



4.4 Et quand il y a plusieurs lentilles ...

Le caractère objet/image et réel/virtuel d'un objet n'est pas absolu : il dépend de la lentille qu'on considère.

Exemple :



L'objet initial AB a pour image $A'B'$ à travers la lentille L . Pour la lentille L , l'image $A'B'$ est réelle. Or cette image est derrière la lentille L . Ainsi, $A'B'$ est un objet virtuel pour cette seconde lentille L' .

Pour tracer l'image d'un objet AB à travers plusieurs lentilles

1. On trace A_1B_1 , l'image de AB par la première lentille en ignorant toutes les autres lentilles.
2. On trace l'image de A_1B_1 par la deuxième lentille sans tenir compte des autres lentilles, et ainsi de suite.
3. $A'B'$ est l'image générée par la dernière lentille.

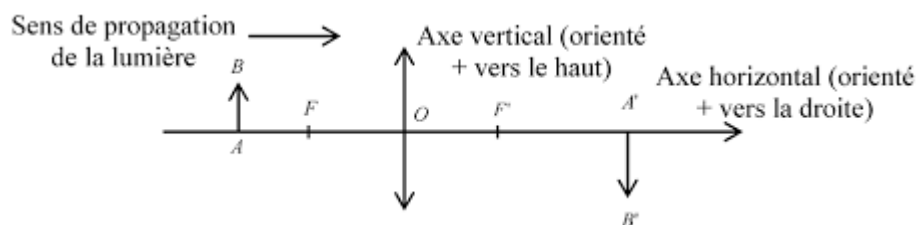
5. Relation de conjugaison et grandissement transversal

La partie précédente permet de déterminer **graphiquement** la position et la taille de l'image d'un objet AB donné. Mais cela reste une estimation selon la précision des tracés !

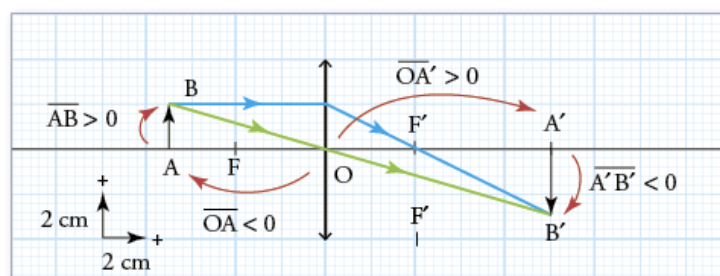
Les formules qui suivent permettent de déterminer **par le calcul** la position de l'image sur l'axe optique, autrement dit la position de A' , ainsi que la taille de l'image $A'B'$.

Grandeurs algébriques

- L'axe optique (horizontal) est orienté positivement dans le sens de propagation de la lumière.
- L'axe vertical (perpendiculaire à l'axe optique) est orienté positivement vers le haut



- Les distances orientées dans le même sens que l'axe optique ou l'axe vertical seront comptées positivement et celles dans le sens opposé seront comptées négativement.



5.1 Relations de conjugaison

→ Pour déterminer la position de l'image.

$$\text{Relation de Descartes : } \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

$$\text{Relation de Newton : } \overline{F'A'} \cdot \overline{FA} = -f'^2$$

5.2 Grandissement transversal

→ Pour déterminer la taille de l'image.

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

$$\text{Relation de Descartes : } \gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

$$\text{Relation de Newton : } \gamma = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = \frac{f'}{\overline{FA}}$$

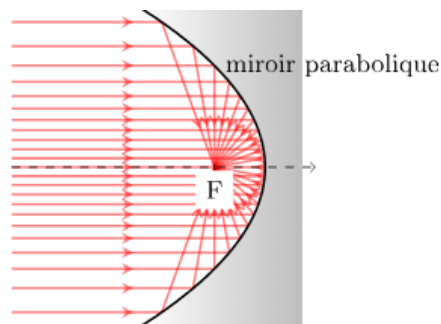
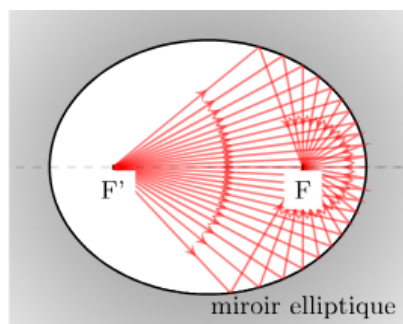
Application 7 : Relations de conjugaison et grandissement

En vous appuyant sur une construction géométrique quelconque, établir les relations de conjugaison et de grandissement, de Newton et de Descartes.

Application 8 : Caractérisation d'une image

On considère un objet réel de hauteur 1 cm situé à 4 cm d'une lentille de distance focale image $f' = 3$ cm. Déterminer par le calcul la position et la taille de son image.

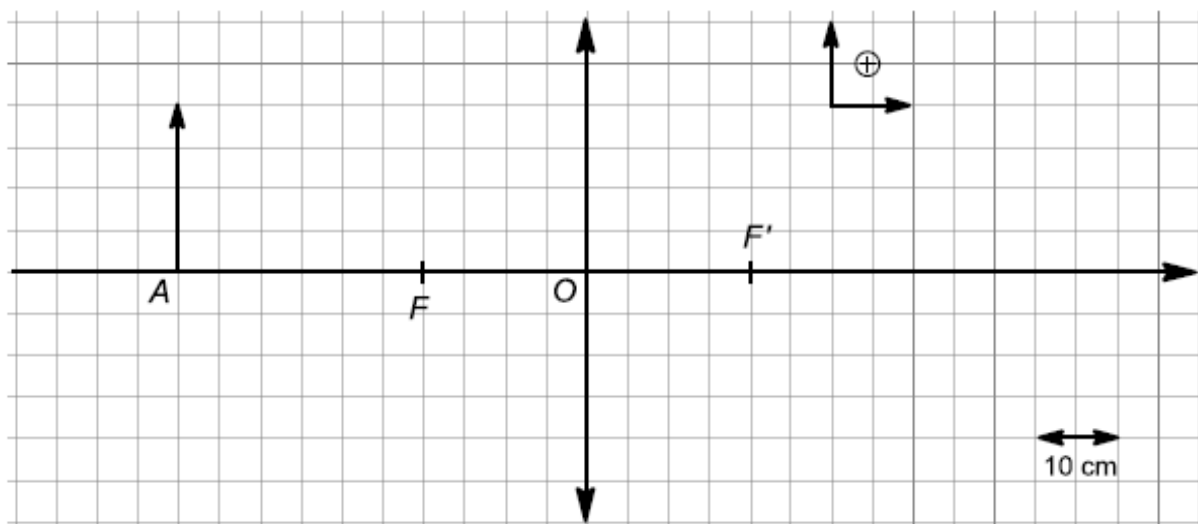
Remarque : Mis à part le miroir plan, il n'existe pas de système optique rigoureusement stigmatique pour tout point. Par contre il est possible de trouver la forme que doit avoir un système optique pour conjuguer deux points particuliers. Par exemple, le miroir parabolique est rigoureusement stigmatique pour le couple (∞, F) : l'image d'un point à l'infini sur l'axe de révolution est le foyer de la surface parabolique. De même, l'ellipse conjugue parfaitement ses deux foyers.



Annexe

Constructions de l'image dans le cas d'une lentille convergente

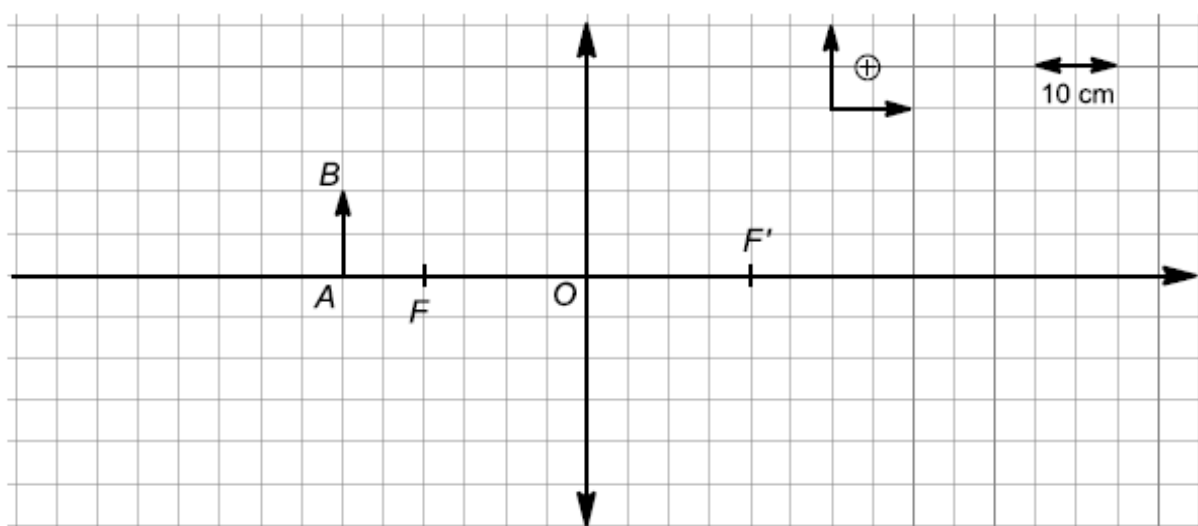
$$\overline{OA} < -2f' : \overline{OA} = -50 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :

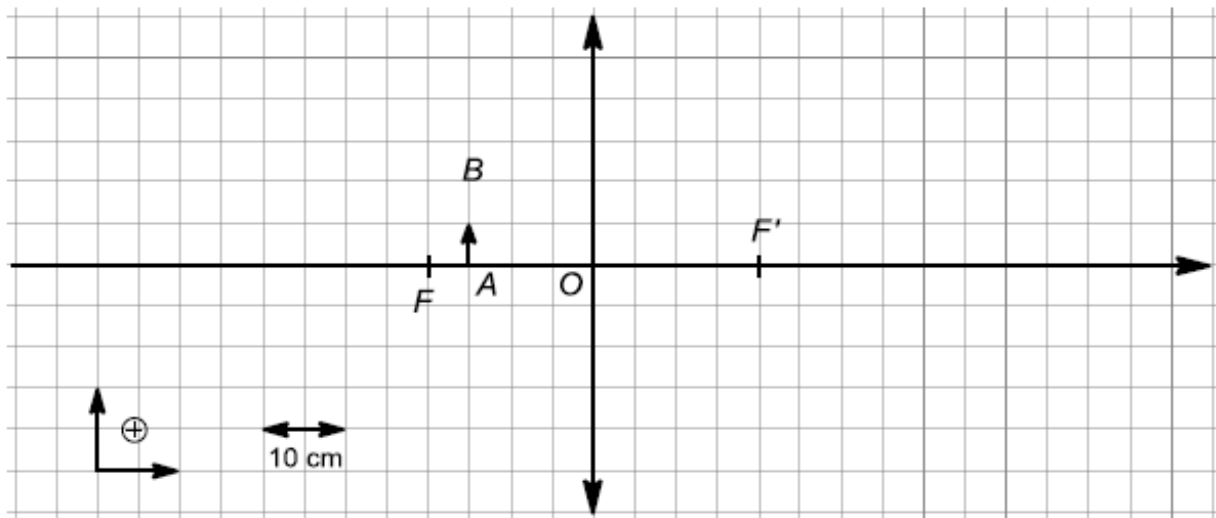
$$\overline{OA} < f : \overline{OA} = -30 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :

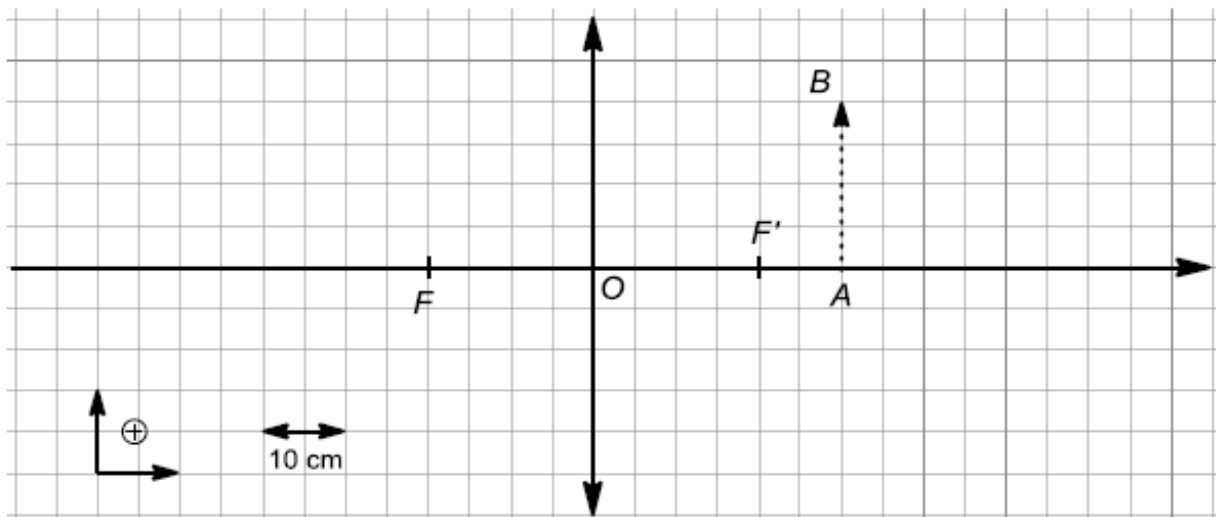
$$-f' < \overline{OA} < 0 : \overline{OA} = -15 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :

$$\overline{OA} > 0 : \overline{OA} = +30 \text{ cm}$$

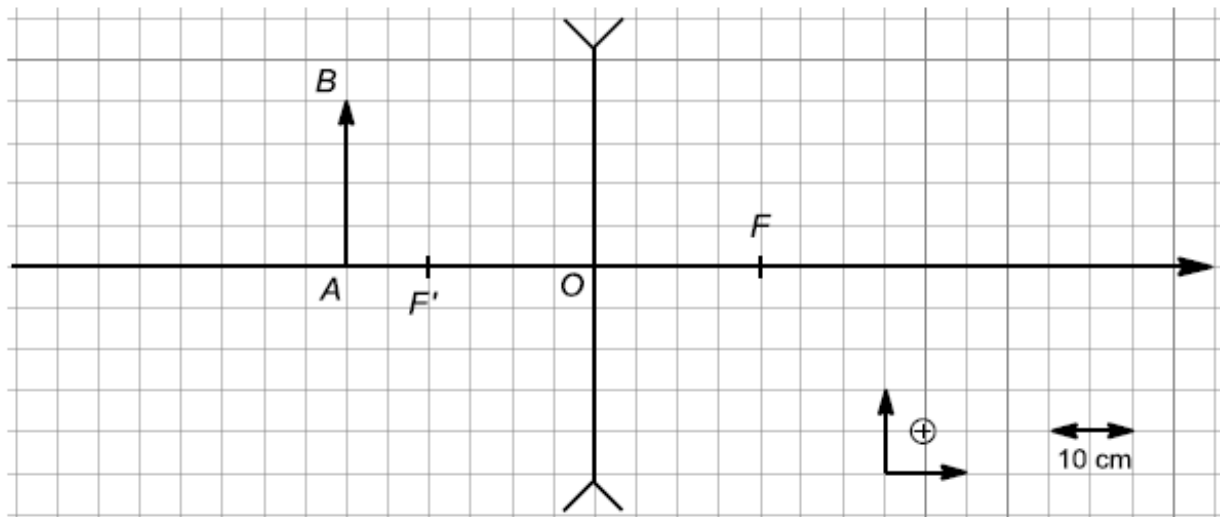


Nature de l'objet :

Nature de l'image :

Constructions de l'image dans le cas d'une lentille divergente

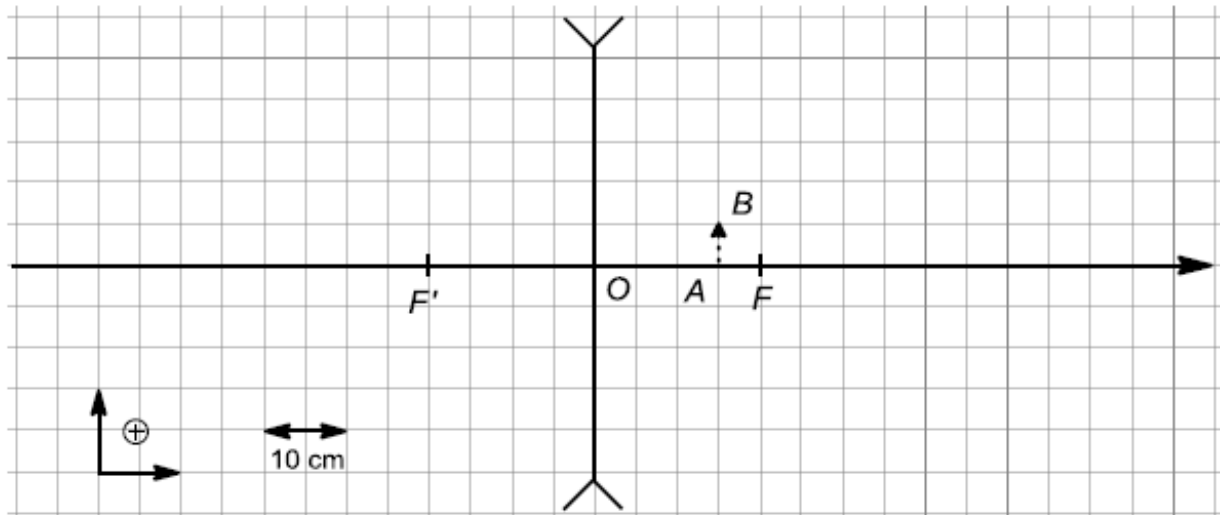
$$\overline{OA} < 0 : \overline{OA} = -30 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :

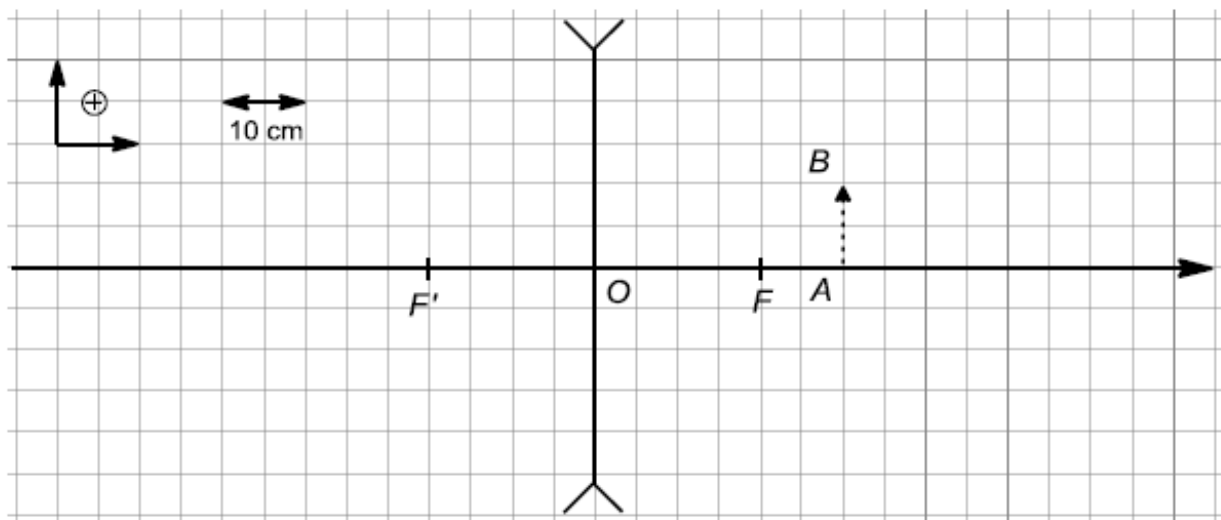
$$0 > \overline{OA} > f : \overline{OA} = +15 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :

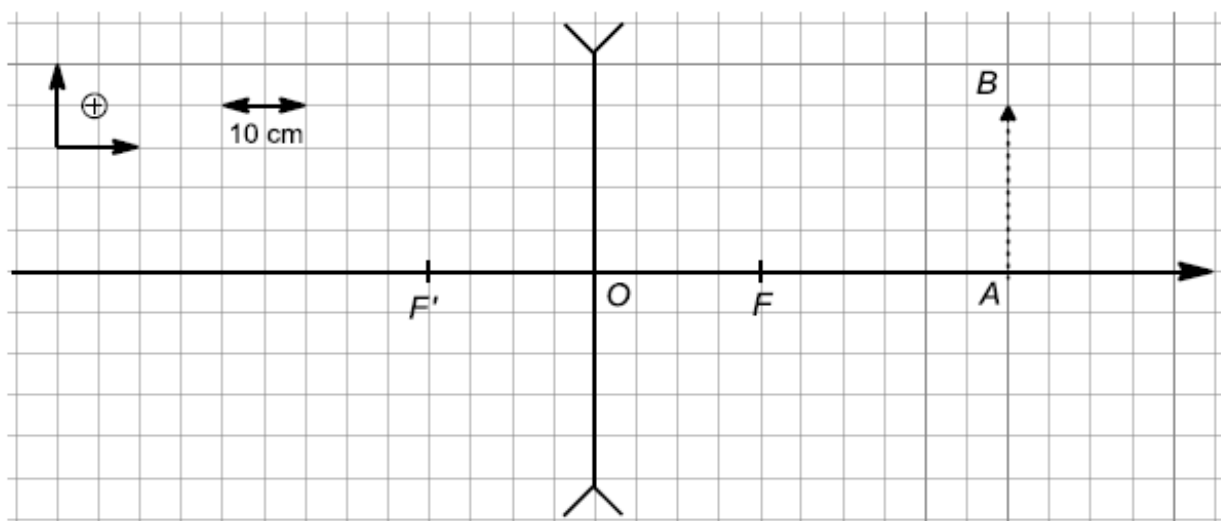
$$f < \overline{OA} < 2f : \overline{OA} = +30 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :

$$2f < \overline{OA} : \overline{OA} = +50 \text{ cm}$$



Nature de l'objet :

Nature de l'image :