

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la formation d'images par des **systèmes optiques** (= ensemble de composants, dioptrés ou miroirs rencontrés successivement par la lumière).

Dans notre cours, ils seront **centrés** (= symétrie de révolution autour d'un axe appelé **axe optique**).

PARTIE I

Objet et images

On s'intéresse à la formation de l'image d'un objet par un système optique. Dans ce cours, les systèmes optiques sont considérés centrés.

Un système centré est constitué par des suites de milieux transparents, séparés par des dioptrés (plans ou sphériques) et éventuellement des miroirs, et qui est de symétrie de révolution autour d'un axe appelé **axe optique** (ou axe principal).

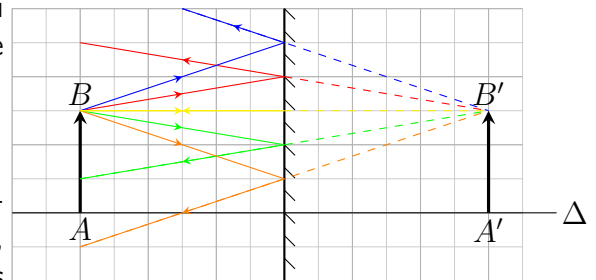
I.1 Construction de l'image d'un objet par un miroir plan

Animation : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr//optiqueGeo/miroirs/miroir_plan.php

Un miroir plan est une surface plane réfléchissante. Le système optique constitué du miroir plan possède un axe de révolution, qui est orthogonal au plan du miroir : toute rotation autour de cet axe ne modifie pas la trajectoire des rayons lumineux.

Cet axe est appelé l'**axe optique** du système, noté (Δ).

Les miroirs plans font réfléchir les rayons lumineux en suivant la loi de la réflexion (vue au chapitre précédent). Toutefois, les rayons réfléchis ne convergent pas vers un même point : ils s'éloignent les uns des autres.



💡 Méthode Règles de tracé

Pour un tracé en optique géométrique,

- Les rayons doivent être tracés très proprement (et évidemment à la règle) avec un crayon fin. On peut donner une couleur différente aux différents rayons.
- Les rayons doivent être **orientés** par une flèche.
- Les rayons incidents et les rayons émergents sont tracés en **traits pleins**, avec une flèche dessus.
- Si nécessaire, les prolongements des rayons incidents et les prolongements des rayons émergents sont tracés en **traits pointillés**.

Pour que l'œil voie un objet, celui-ci doit émettre ou réfléchir de la lumière dans toutes les directions. L'œil perçoit ces rayons comme venant en ligne droite, ce qui crée une image virtuelle à l'endroit où leurs prolongements se croisent.

Dans un miroir plan, l'image est à la même distance que l'objet, de taille identique et dans le même sens. Par exemple, une chandelle droite aura une image droite de l'autre côté du miroir.

En résumé : l'image formée par un miroir plan est virtuelle, de même taille, de même sens et à égale distance de l'objet.

I.2 Nature

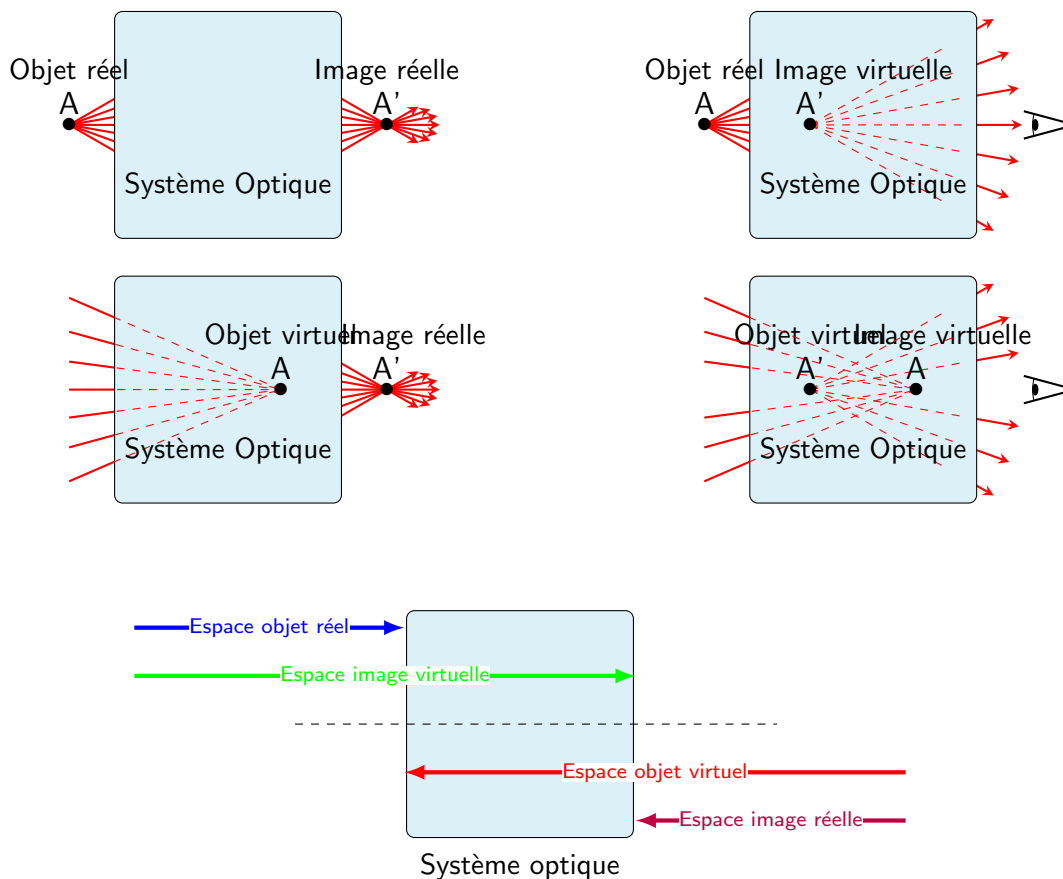


Définition Nature des objets et des images

- Un point *objet* est **réel** si les rayons lumineux incidents convergent effectivement en ce point.
- Un point *image* est **réel** si les rayons lumineux émergents (ou réfléchis si miroir) convergent effectivement en ce point.
- Un point *objet* est **virtuel** si seuls les prolongements des rayons lumineux incidents convergent en ce point.
- Un point *image* est **virtuel** si seuls les prolongements des rayons lumineux émergents (ou réfléchis si miroir) convergent en ce point.



Exemple



1.3 Dimension des images



Définition

On définit le **grandissement** par le rapport $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$.

Pour un instrument d'optique, le grandissement varie avec la position de l'objet. Il ne peut être défini (par une seule valeur).



Attention

Les grandeurs $\overline{A'B'}$ et $\overline{AB}$ sont des **grandeurs algébriques** ! Attention au signe !

- Nature de l'image :

- $|\gamma| > 1$: image plus grande que l'objet.
- $|\gamma| < 1$: image plus petite que l'objet.
- $|\gamma| = 1$: image de même taille que l'objet.

- Sens de l'image :

- $\gamma > 0$: image droite (dans le même sens que l'objet).
- $\gamma < 0$: image renversée (dans sens inverse de l'objet).

PARTIE II

Stigmatisme et conditions de Gauss

II.1 Stigmatisme rigoureux



Définition *Système rigoureusement stigmatique*

Un système optique est **rigoureusement stigmatique** s'il donne d'un objet ponctuel A un point image A' unique.



Remarque

On dit alors que A et A' sont conjugués par le système optique.

Les systèmes optiques que nous utilisons ne sont pas rigoureusement stigmatiques (une exception : le miroir plan).

II.2 Stigmatisme approché

Le stigmatisme rigoureux toutefois n'est pas forcément obligatoire pour obtenir une image nette.

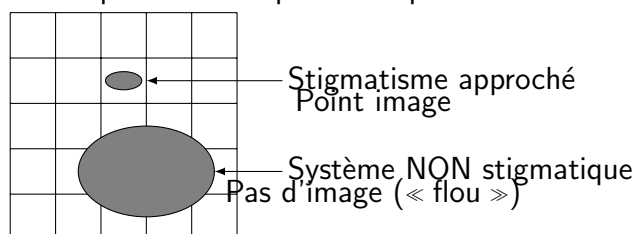


Définition *Stigmatisme approché*

Un système optique réalise un **stigmatisme approché** si les rayons issus du point A forment une tache dont les dimensions sont inférieures aux dimensions caractéristiques de la cellule du capteur.

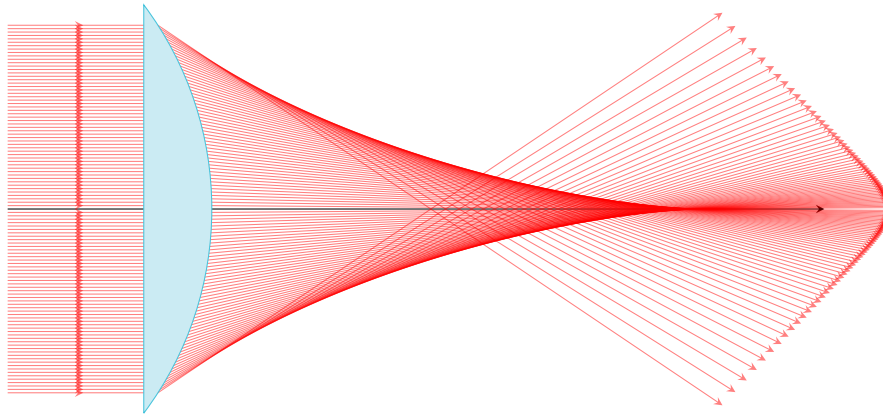
La notion de stigmatisme approché est donc relative au capteur utilisé.

Illustration avec un capteur numérique : 5×5 pixels



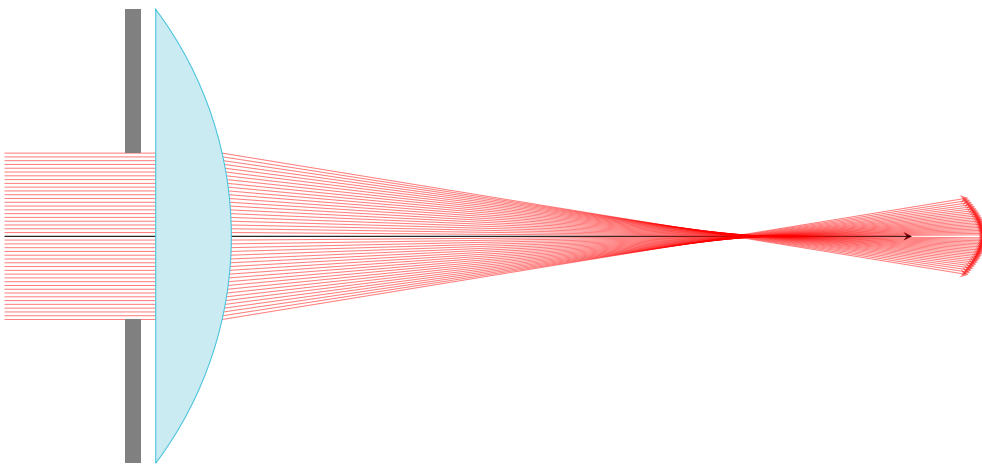
II.3 Conditions de Gauss

Prenons l'exemple de la lentille plan-convexe.



Étudions un faisceau de lumière constitué de plusieurs rayons lumineux (point objet à l'infini). Après la lentille, on constate qu'ils convergent, mais pas tous au même point. Nous ne sommes pas en condition de stigmatisme rigoureux.

Diminuons la largeur du faisceau à l'aide d'un diaphragme dont on réduit l'ouverture. Il ne reste plus que les rayons incidents « proches » de l'axe optique.



La taille de la « tache image » s'est considérablement réduite, et il semble même ne rester qu'un point image. Nous avons un stigmatisme approché.

Animation : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/stigmatisme_lentille.php

Pour se placer dans les conditions d'un **stigmatisme approché**, on se place dans les **conditions de Gauss**.

♥ À retenir *Conditions de Gauss*

Pour obtenir un stigmatisme approché, il faut considérer des rayons **paraxiaux** c'est à dire

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

Conséquences :

Si les conditions de Gauss sont vérifiées, le système optique réalise

- un **stigmatisme approché** : l'image par le système optique d'un point A est un point A' .
- un **aplanétisme approché** : l'image par le système optique $A'B'$ d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique est également perpendiculaire à l'axe optique.

Dans les conditions de Gauss, les angles entre l'axe optique et les rayons lumineux sont petits. Si on note θ un de ces angles, avec $\theta \ll 1$ rad, on peut écrire $\cos(\theta) \approx 1$, $\sin(\theta) \approx \theta$ et $\tan(\theta) \approx \theta$.

Dès qu'un système centré comporte plus d'un dioptre il est, en général, impossible d'obtenir un système rigoureusement stigmatique.

Aussi notre étude des systèmes centrés sera réalisée dans le cadre des conditions de Gauss, c'est à dire :

- les objets sont plans, perpendiculaires à l'axe et de petites dimensions (aplanétisme)
- les rayons lumineux sont peu inclinés par rapport à l'axe du système (approximation de Gauss)
- en conséquence, les images sont planes et perpendiculaires à l'axe.

PARTIE III

Système optique

Nous allons définir ici quelques généralités sur les systèmes optiques.

**Définition** *Centre optique*

Le **centre optique** est tel qu'un rayon lumineux incident en ce point n'est pas dévié. On le note O .

**Définition** *Foyer principal image*

Le **foyer principal image** est le point de convergence des rayons quand ils arrivent parallèles à l'axe optique sur le système optique. On le note F' .

**Définition** *Foyer image secondaire*

Un **foyer image secondaire** est un point de convergence des rayons quand ils arrivent parallèles entre eux mais inclinés par rapport à l'axe optique sur le système optique.

**Définition** *Plan focal image*

Le **plan focal image** est le plan orthogonal à l'axe optique contenant les foyers images.

**Définition** *Foyer principal objet*

Le **foyer principal objet** est le point de convergence des rayons incidents qui émergent parallèle à l'axe optique du système optique. On le note F .

**Définition** *Foyer objet secondaire*

Un **foyer objet secondaire** est un point de convergence des rayons incidents qui émergent parallèle entre eux mais inclinés par rapport à l'axe optique du système optique.

**Définition** *Plan focal objet*

Plan orthogonal à l'axe optique contenant les foyer objets.

**Attention**

Ne surtout pas dire que F et F' sont conjugués (*à priori*) ! En effet, l'image d'un objet au foyer objet principal objet ne se forme pas (*à priori*) au foyer principal image (mais à l'infini). En d'autres termes, l'image de F n'est pas F' .

**Définition** *Système afocal*

Un **système afocal** est un système qui donne d'une image à l'infini un objet à l'infini.

Remarque

Les foyers peuvent être réels ou virtuels.

PARTIE IV

Lentilles minces

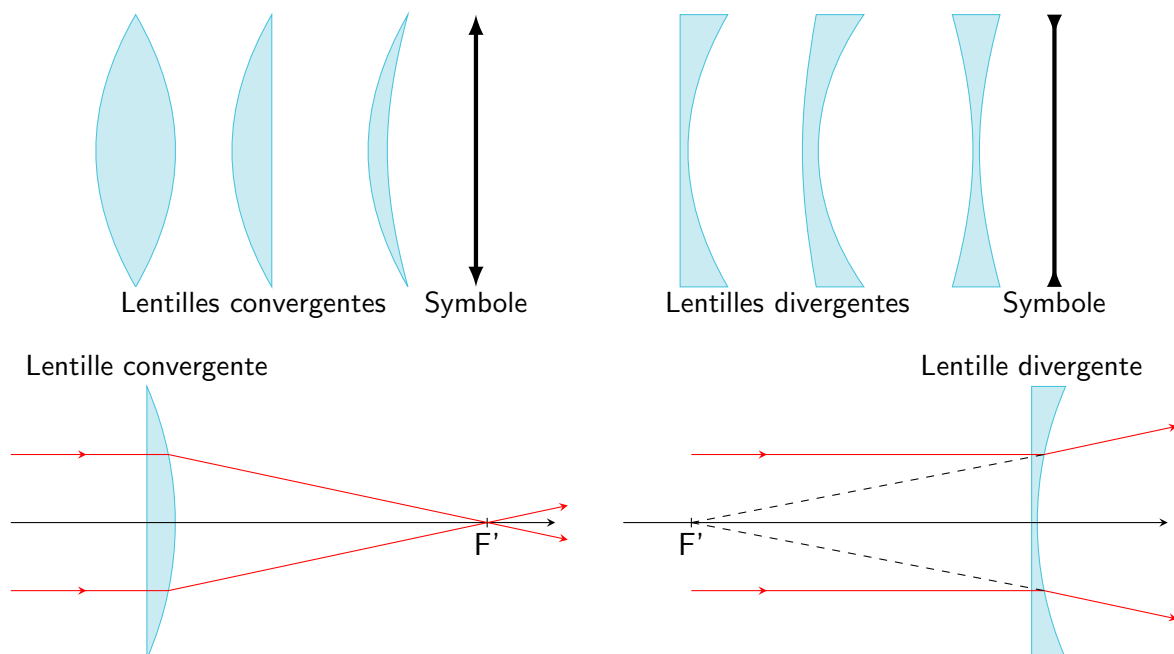
IV.1 Présentation

Une **lentille mince** est un milieu transparent limité par deux dioptries (deux dioptries sphériques, ou un dioptre sphérique et un dioptre plan). Elle peut être

- à **bords mince** (épaisseur au centre plus importante que sur les côtés)
- à **bords épais** (épaisseur au centre moins importante que sur les côtés)

Une **lentille convergente** fait converger un faisceau de rayons parallèles en un point.

Une **lentille divergente** est telle qu'un faisceau de rayons incidents parallèles est divergent.



On va symboliser une lentille convergente par

et une lentille divergente par

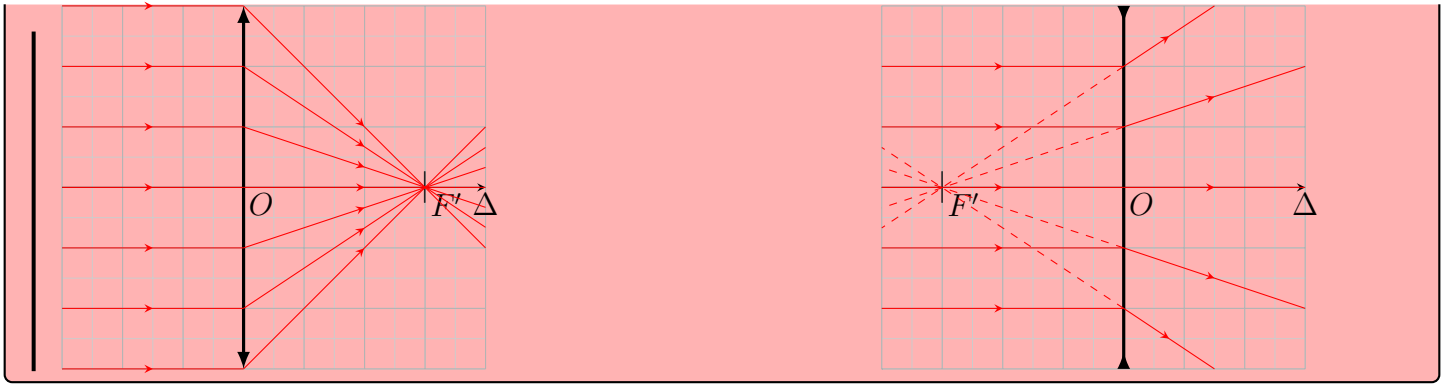
IV.2 Définitions

À retenir Centre optique

Le centre optique est le point de la lentille mince sur l'axe optique. Un rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.

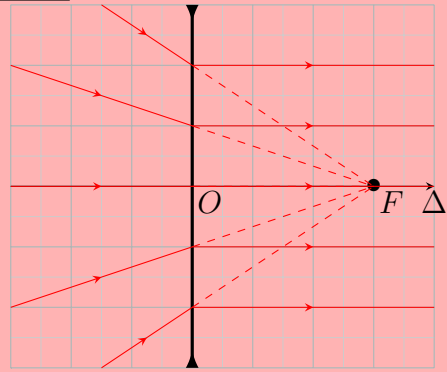
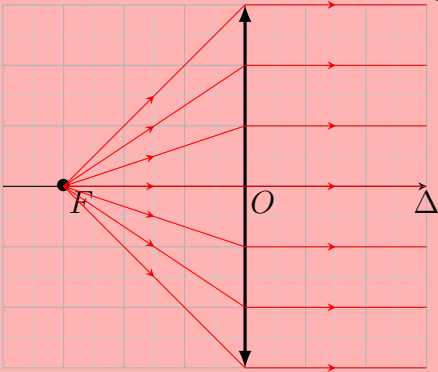
À retenir Foyer principal image

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



♥ À retenir *Foyer principal objet*

- Le foyer principal objet est réel pour une lentille convergente.
- Le foyer principal objet est virtuel pour une lentille divergente.



♥ À retenir *Propriété des foyers image et objet*

Pour une lentille mince, F et F' sont symétriques par rapport à O .

Ils ne sont pas conjugués !

📖 Définition *Distance focale*

La **distance focale image** est la distance $f' = \overline{OF'}$.

On l'appelle « distance focale » ou « focale » par abus de langage.

La **distance focale objet** est la distance $f = \overline{OF}$.

📎 Exemple *Exemples de distances focales au laboratoire*

Pour une lentille convergente, $f' = 15 \text{ cm}$, $f = -15 \text{ cm}$. Pour une lentille divergente, $f' = -15 \text{ cm}$, $f = 15 \text{ cm}$.

⚠ Attention

Faire très attention au signe des grandeurs (algébriques) en optique !



Définition Vergence

La **vergence** est définie comme $V = \frac{1}{f'}$, elle s'exprime en *dioptrie* (δ) ou en m^{-1} .

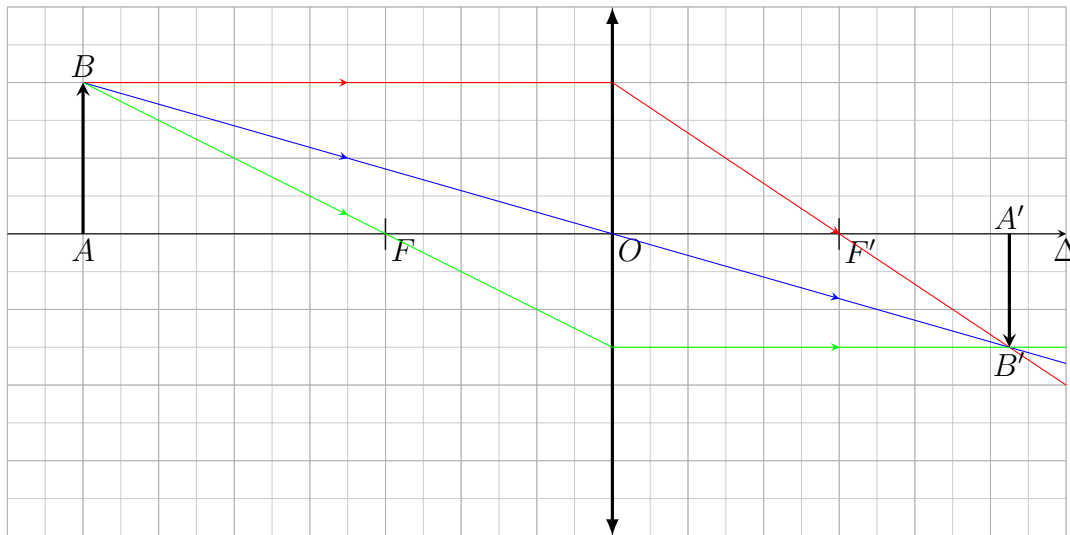
IV.3 Règles de tracé des rayons

On souhaite construire l'image $A'B'$ d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique Δ .



À retenir

- Le rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié.
- Le rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image principal F' .
- Le rayon incident passant par le foyer objet principal F émerge parallèle à l'axe optique.



IV.4 Relations de conjugaison

Les relations de conjugaison relient la position de l'image à celle de l'objet en fonction des caractéristiques de la lentille.



À retenir Relations de conjugaison

Les points image A' et objet A vérifient les relations

- Formule de Descartes (origine au centre) $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$
- Formule de Newton (origine aux foyers) $\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = f \cdot f' = -f'^2$.



Attention

Les grandeurs sont des **grandeurs algébriques** ! Attention au signe !

 **Exercice** À partir de la relation de Descartes, retrouver celle de Newton

IV.5 Grandissement transversal

Le grandissement transversal permet d'exprimer la taille de l'image en fonction de celle de l'objet (perpendiculaire à l'axe optique) et des caractéristiques du montage.

 **À retenir** Relations de grandissement

Les images $A'B'$ et objets AB vérifient les relations

- Formule de Descartes (origine au centre) $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$
- Formule de Newton (origine aux foyers) $\gamma = \frac{\overline{F'A'}}{-f'} = \frac{f'}{\overline{FA}}$.

 **Exercice** Établir ces expressions

IV.6 Condition pour réaliser une projection

Objectif : On souhaite déterminer la distance D minimale qui sépare l'objet de l'écran sur lequel on souhaite projeter l'image de cet objet.

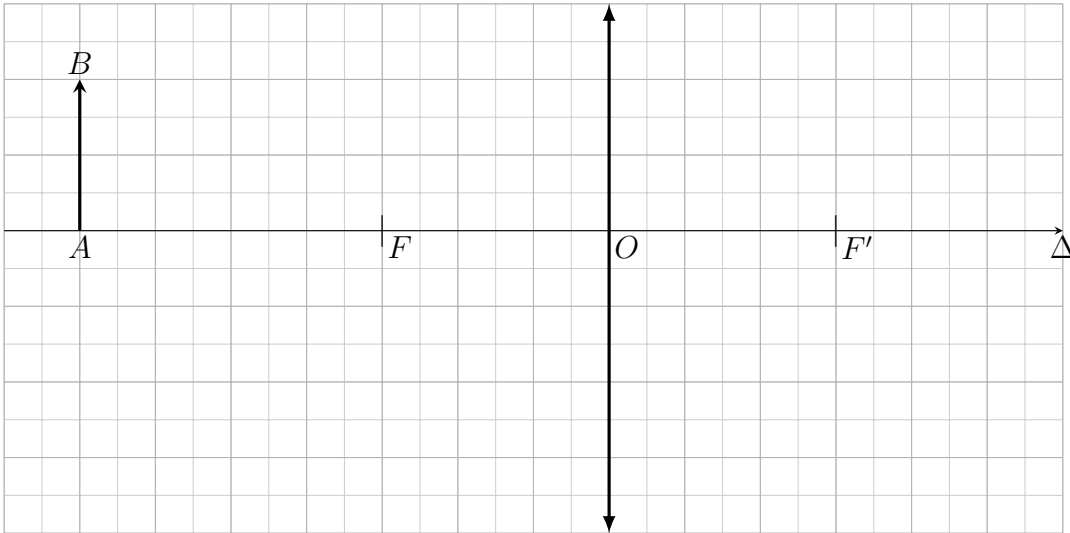
On montre (démonstration faite en cours) que la condition de projection est $D \geq 4f'$.

Exemples

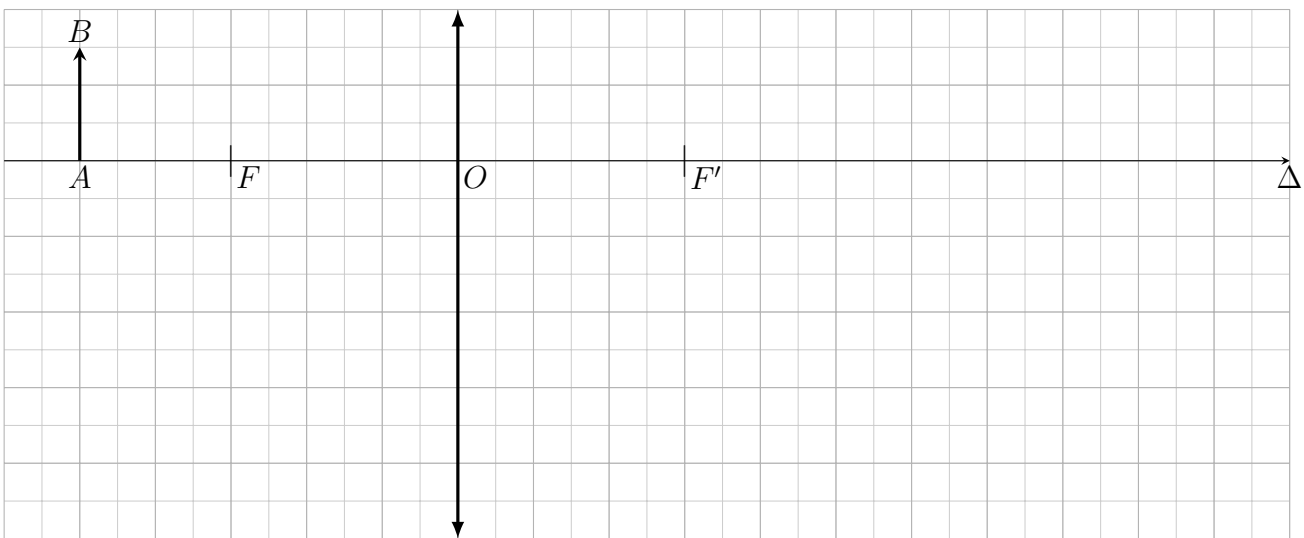
Simulation qui détaille les étapes de la construction de l'image d'un objet par une lentille

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/construction_lentille.php

V.1 Cas des lentilles convergentes

a) Objet réel, $|\overline{OA}| > 2f'$ 

Ce premier domaine où l'objet est situé à grande distance de la lentille, et où l'image est petite et renversée, correspond au fonctionnement de l'œil ou de l'appareil photographique. L'image d'objets très étendus tient entièrement sur la surface de la rétine ou du capteur d'un appareil photographique. L'image formée sur la rétine est renversée, mais le cerveau la retourne automatiquement.

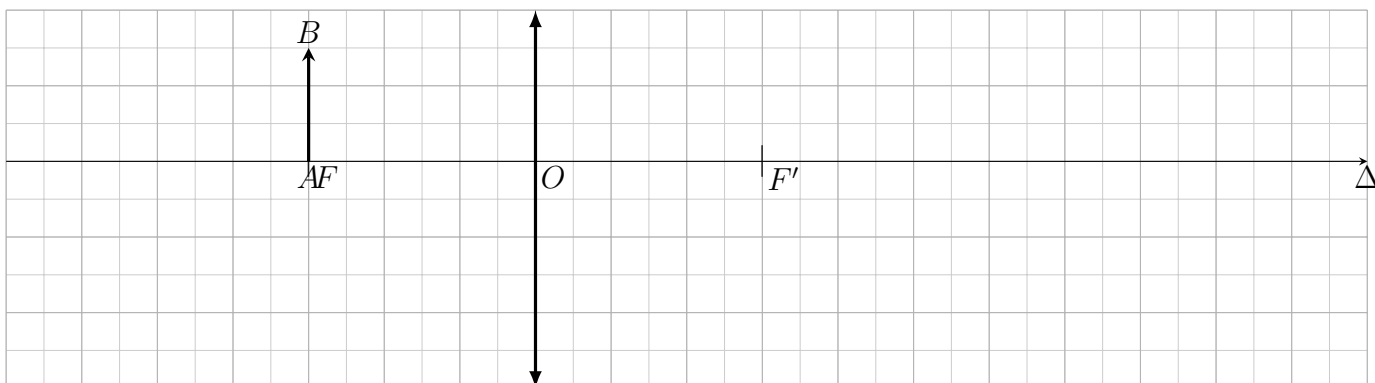
b) Objet réel, $f' < |\overline{OA}| < 2f'$ 

Ce second domaine correspond au fonctionnement des rétroprojecteurs (ancien temps !) ou vidéoprojecteurs des salles de classe, des projecteurs de diapositives ou des projecteurs de cinéma.

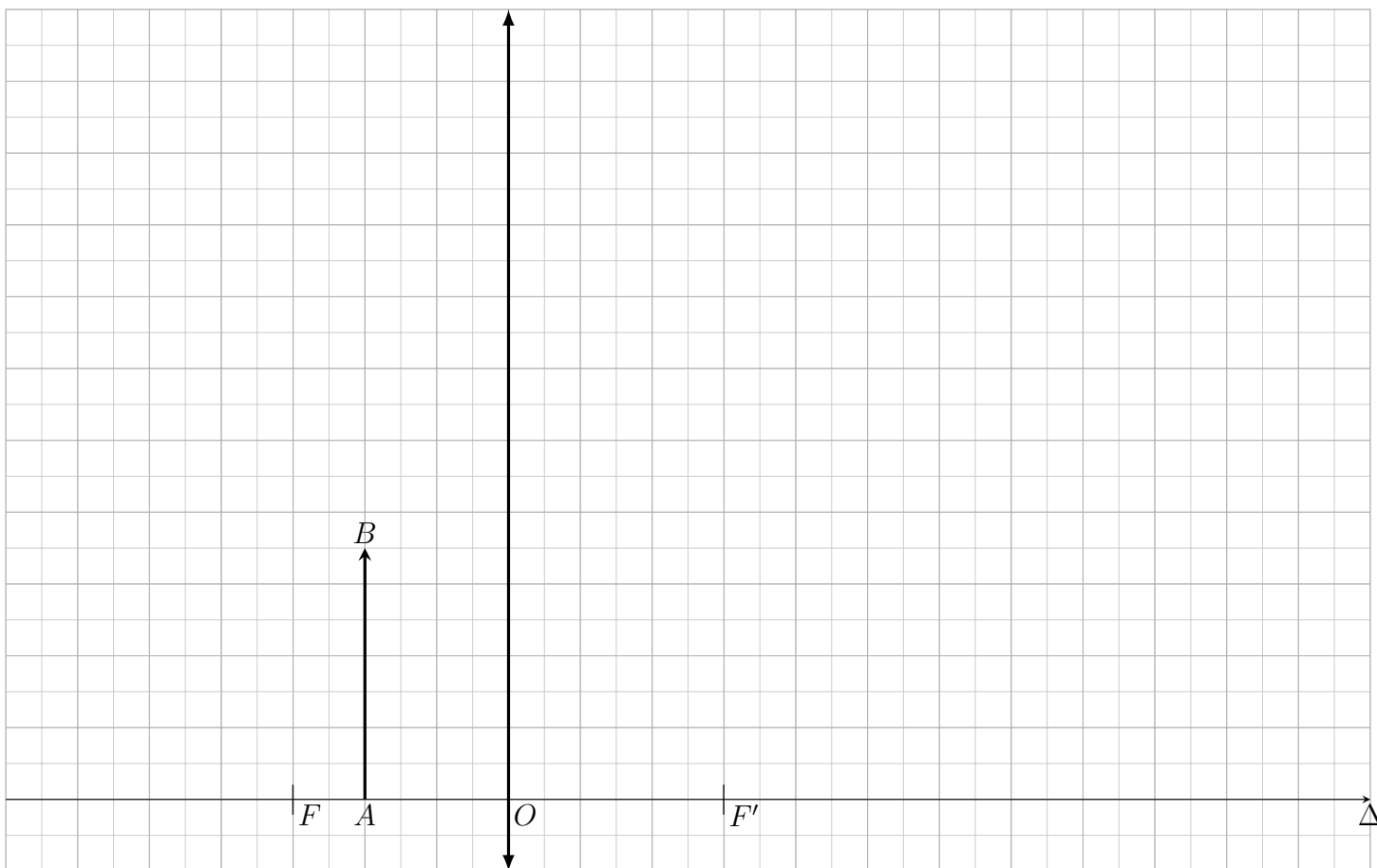
L'image formée par la lentille étant renversée, dans un projecteur de diapositives, la diapositive doit être placée à l'envers dans le chargeur.

Plus on rapproche l'objet du foyer objet F , plus l'image formée est agrandie, et se déplace de plus en plus à droite.

c) **Objet réel**, $|\overline{OA}| = f'$



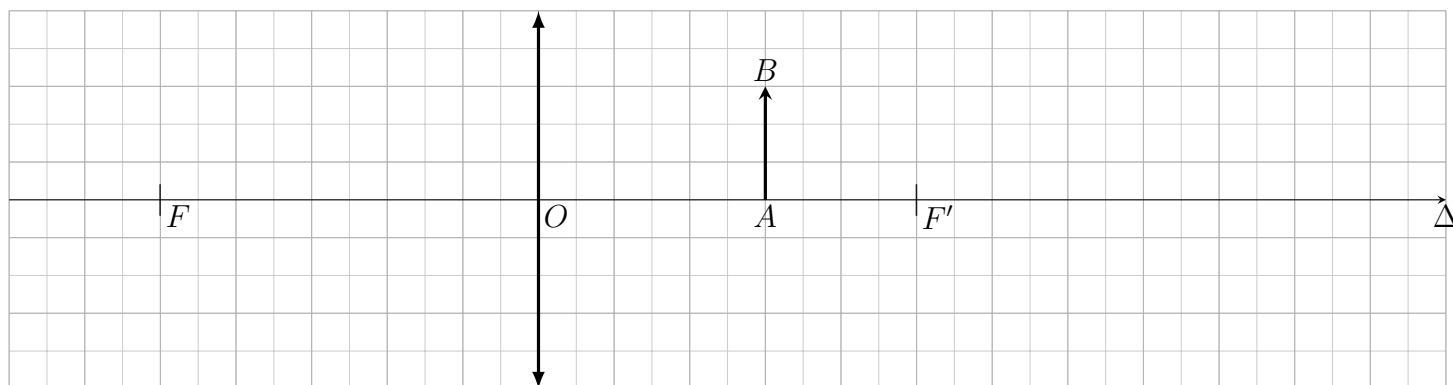
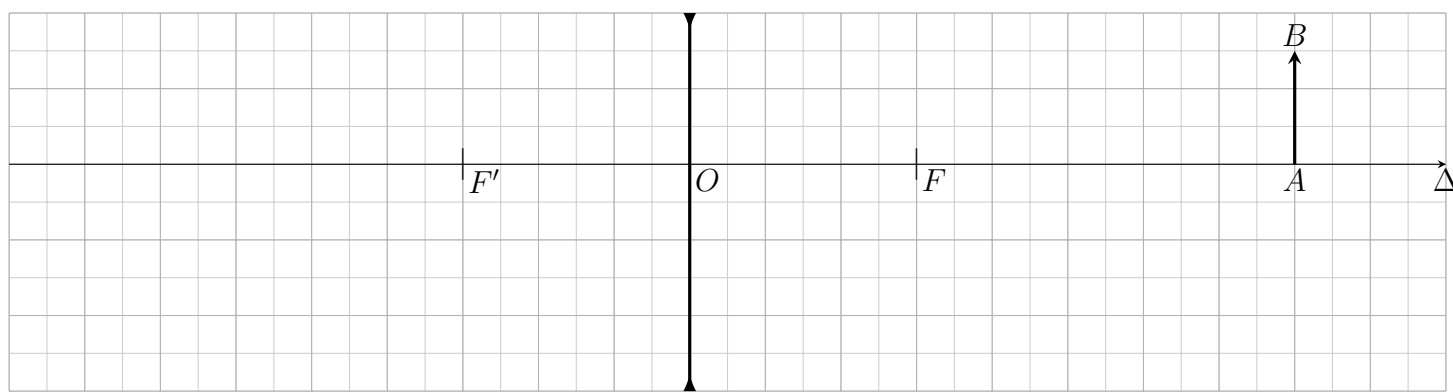
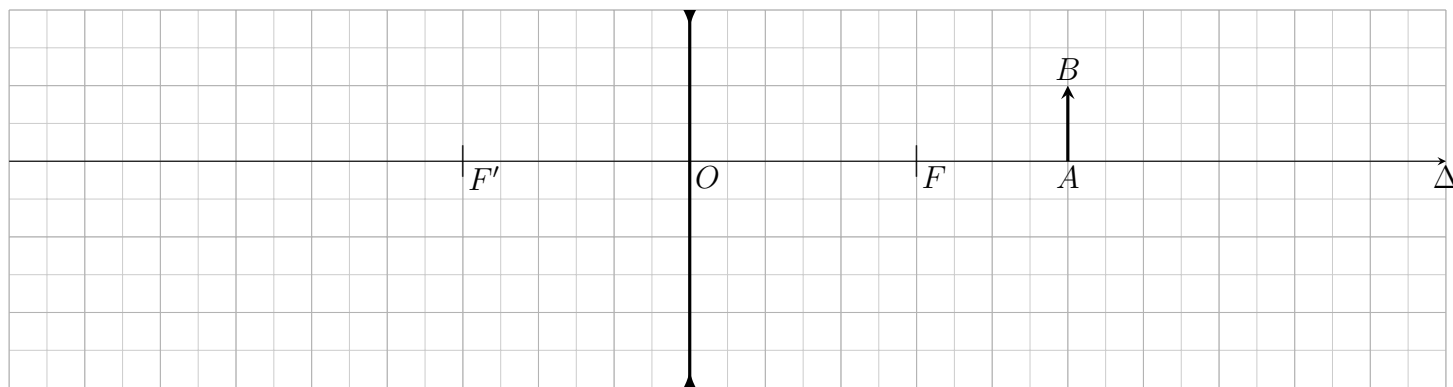
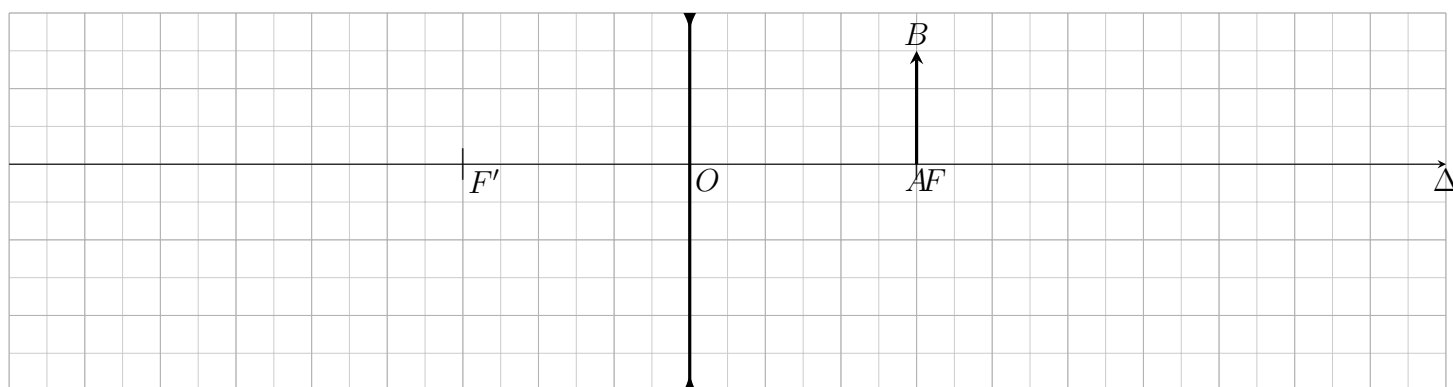
d) **Objet réel**, $|\overline{OA}| < f'$

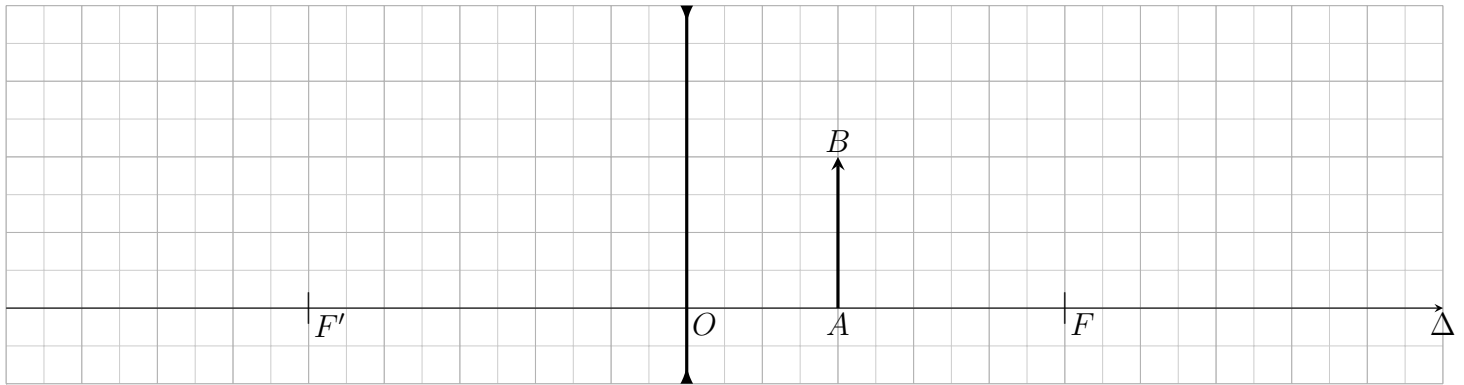
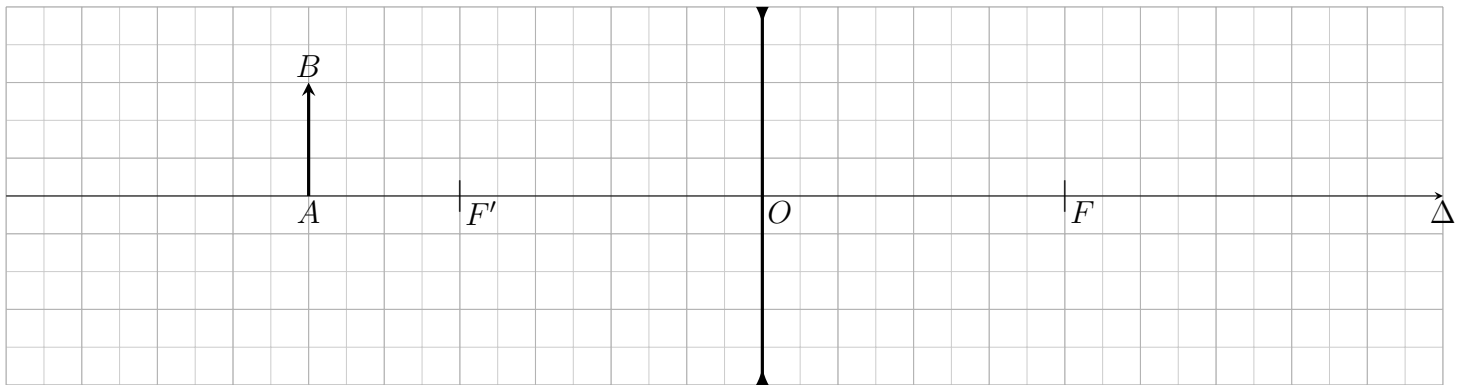


L'image $A'B'$ est virtuelle.

On ne peut pas recueillir une image virtuelle sur un écran (car ce sont les prolongements des rayons lumineux, et non les rayons eux mêmes).

On peut cependant observer cette image à l'oeil, ou avec un capteur (appareil photographique par exemple). Ce domaine correspond au fonctionnement des loupes.

e) Objet virtuel**V.2 Cas des lentilles divergentes****a) Objet virtuel, $OA > 2|f'|$** **b) Objet virtuel, $|f'| < OA < 2|f'|$** **c) Objet virtuel, $OA = |f'|$** 

d) Objet virtuel, $OA < |f'|$ **e) Objet réel****Attention**

Toujours vérifier après un tracé qu'une lentille convergente fait effectivement converger les rayons, qu'une lentille divergente fait effectivement diverger les rayons.