OP1-Cours

Rappels d'optique géométrique

On rappelle ci-dessous des notions d'optique géométrique vues en première année. Elles nous seront utiles pour le développement de l'optique ondulatoire dans les chapitres suivants. Ce résumé de cours ne se veut en aucun cas exhaustif.

Table des matières

1 La lumière

1.1 Aspects ondulatoires

La lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire un champ $(\vec{E}, \vec{B})$ qui se propage, dont la longueur d'onde dans le vide λ_0 est comprise entre 400 nm et 800 nm. Sa fréquence f est de l'ordre de 6×10^{14} Hz. Dans le vide, on a

$$\boxed{\lambda_0 = \frac{c}{f} \qquad \text{avec} \qquad c = 3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ la vitesse de la lumière dans le vide.}}$$

On appellera plus tard (chapitres O1 puis O5) cette relation une relation de dispersion.

Définition. Indice optique. Dans un milieu transparent, on définit l'**indice optique**, ou **indice de réfraction** (sans dimension)

$$\boxed{n = \frac{c}{v} \qquad \text{avec} \qquad v \text{ la vitesse de la lumière dans le milieu.}}$$

On a toujours $n > 1$. On retiendra $n_{\text{vide}} = 1$, $n_{\text{air}} \approx 1{,}003$ (dans les CNTP), $n_{\text{eau}} \approx 1{,}33$ et $n_{\text{verre}} \approx 1{,}5$ (sachant qu'il y a différents types de verre, avec des indices pouvant varier conséquemment).

Propriété. Lorsque la lumière passe du vide dans un milieu d'indice n, la fréquence f ne change pas mais la longueur d'onde devient

$$\boxed{\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\lambda_0}{n}}$$

Définition. Vecteur d'onde. On définit le vecteur d'onde $\vec{k}$ par

$$\boxed{\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\,\vec{u} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}\,\vec{u}}$$

où $\vec{u}$ est le vecteur unitaire donnant la direction et le sens de la propagation de l'onde électromagnétique.

1.2 Aspects corpusculaires

Un faisceau de lumière est composé de **photons** : ce sont les particules associées au champ électromagnétique. Les photons sont de masse nulle (et de charge électrique nulle) mais possèdent une quantité de mouvement

$$\boxed{\vec{p} = \hbar\,\vec{k} = \frac{n\,h}{\lambda_0}\,\vec{u}} \tag{1}$$

avec $\vec{u}$ le vecteur unitaire donnant la direction et le sens du faisceau de lumière, et $h = 6{,}62 \times 10^{-34}$ J·s la constante de Planck. $\hbar = h\,/\,(2\,\pi)$ est la constante de Planck réduite. Un photon possède aussi une énergie

$$\boxed{E = h\,f = \hbar\,\omega} \tag{2}$$

avec f la fréquence de l'onde électromagnétique et $\omega = 2\,\pi\,f$ sa pulsation. Les relations (1) et (2) sont appelées les **relations de Planck-Einstein** (ou de Planck). Leur rôle est de traduire le lien entre les aspects ondulatoires (fréquence f et longueur d'onde λ de l'onde électromagnétique) et corpusculaires (énergie E et quantité de mouvement $\vec{p}$ du photon associé).

1.3 Approximation de l'optique géométrique

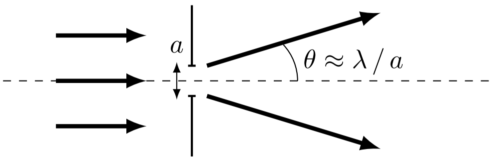
Domaine de l'optique géométrique.

On note a une dimension typique du système optique (le diamètre d'un diaphragme ou d'une lentille par exemple). Le domaine de l'optique géométrique est le domaine où

$$\boxed{a \gg \lambda}$$

Il s'agit ainsi du domaine des **gros objets**. Puisque la longueur d'onde d'un rayonnement visible est toujours de l'ordre du demi-micromètre, en pratique on se retrouve très facilement dans cette approximation. Toute l'optique s'y construit alors avec des règles géométriques ($\rightarrow$ les lois de Descartes notamment), d'où le nom d'optique **géométrique**.

Propriété. En dehors de ce domaine, la lumière manifeste des comportements ondulatoires : diffraction et interférences. Notamment, on rappelle que l'angle de diffraction de la lumière à travers un trou de diamètre a (ou rayon, on donne la relation seulement en ordre de grandeur donc on ne se préoccupe pas d'un facteur 2...) est $\theta \approx \lambda\,/\,a$.



Pour un diamètre a très grand devant λ, on a $\theta \approx 0$ donc on peut considérer qu'il n'y a pas de diffraction, comme attendu dans le cadre de l'optique géométrique.

2 Les lois fondamentales de l'optique géométrique

2.1 Les cinq lois fondamentales

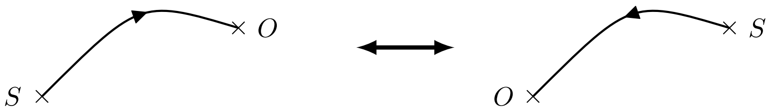
Lois fondamentales de l'optique géométrique.

1. La lumière est composée de rayons lumineux.
2. Les rayons lumineux sont indépendants.
3. Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.
4. Principe de retour inverse de la lumière.
5. Lois de Descartes.

Commentaires sur ces lois.

1. par opposition, en optique ondulatoire la lumière est une onde scalaire ;

2. il faut comprendre qu'il ne se passe rien de particulier lorsque deux rayons se croisent (on peut rattacher cette loi à la charge électrique nulle du photon : s'il n'a pas de charge, il n'interagit pas avec le champ électromagnétique, c'est-à-dire avec les autres photons ! Les photons n'interagissent donc pas entre eux.) ;
3. rien de particulier, hormis qu'elle complète la loi 5 ;
4. il faut comprendre que si on inverse la source S et l'observateur, les rayons sont identiques (mais évidemment en sens inverse) ;



5. les lois de Descartes concernent les milieux non-homogènes (c'est-à-dire où l'indice n change).

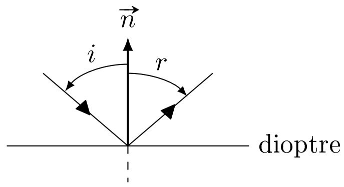
2.2 Les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction

Lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction.

Il y a quatre lois de Descartes : deux pour la réflexion et deux autres pour la réfraction. On rappelle que le plan d'incidence est le plan qui contient le rayon incident et la normale $\vec{n}$ au dioptre.

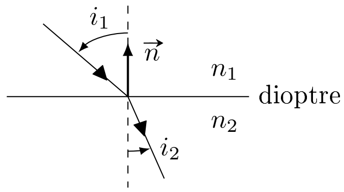
- Pour la réflexion :
  - le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence ;
  - les angles orientés incident et réfléchi vérifient

$$\boxed{r = -i}$$



- et pour la réfraction :
  - le rayon réfracté est dans le plan d'incidence ;
  - les angles orientés incident et réfracté vérifient

$$\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}$$



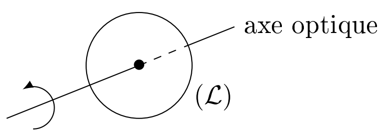
Sur le schéma d'exemple de la réfraction, on observe $i_2 < i_1$ donc on a $n_2 > n_1$.

3 Les lentilles minces dans l'approximation de Gauss

3.1 Les conditions de Gauss

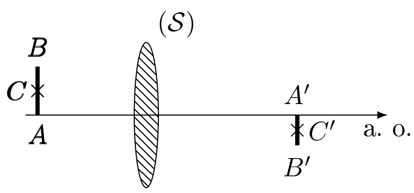
Définition : Stigmatisme. Un instrument optique est dit stigmatique si tous les rayons issus d'un objet A se coupent au même point image A'. A et A' sont dits **conjugués** par le système.

Définition. Système centré. On dit qu'un système optique est centré s'il possède un axe de symétrie de rotation, qu'on appelle alors l'**axe optique**. C'est le cas des lentilles de TP comme en témoigne le schéma ci-contre.

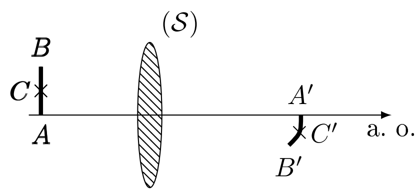


Définition : Aplanétisme. Soient A et A' deux points conjugués par un instrument optique. Soit B un point dans le plan orthogonal à l'axe optique passant par A. L'instrument optique est dit aplanétique si l'image B' du point B est dans le plan orthogonal à l'axe optique passant par A'. Autrement dit, **l'image d'un objet plan est plane**.

Sur les figures ci-dessous qui explicitent graphiquement la notion d'aplanétisme, les points primés sont les images par le système optique $(\mathcal{S})$ des points non primés. C'est cette propriété d'aplanétisme qui nous permet d'observer en TP les images obtenues par des lentilles sur des écrans **plans**.



Système aplanétique



Système non aplanétique

Conditions de Gauss

Définition : Conditions de Gauss. Les conditions de Gauss désignent une utilisation des systèmes optiques centrés (c'est-à-dire qui possèdent un axe de symétrie de rotation, comme les lentilles de TP) pour laquelle les rayons lumineux sont proches de l'axe optique et peu inclinés par rapport à celui-ci. On parle de rayons « paraxiaux ».

Propriété : Les lentilles minces présentent un **stigmatisme** et un **aplanétisme** approchés dans les conditions de Gauss.

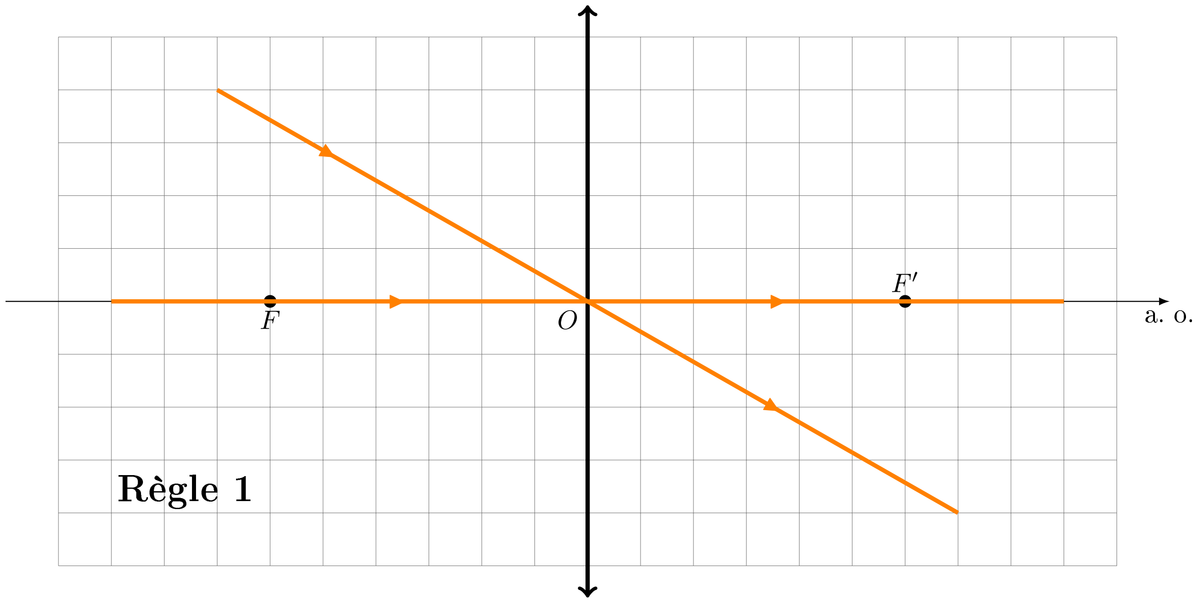
3.2 Construction des rayons lumineux

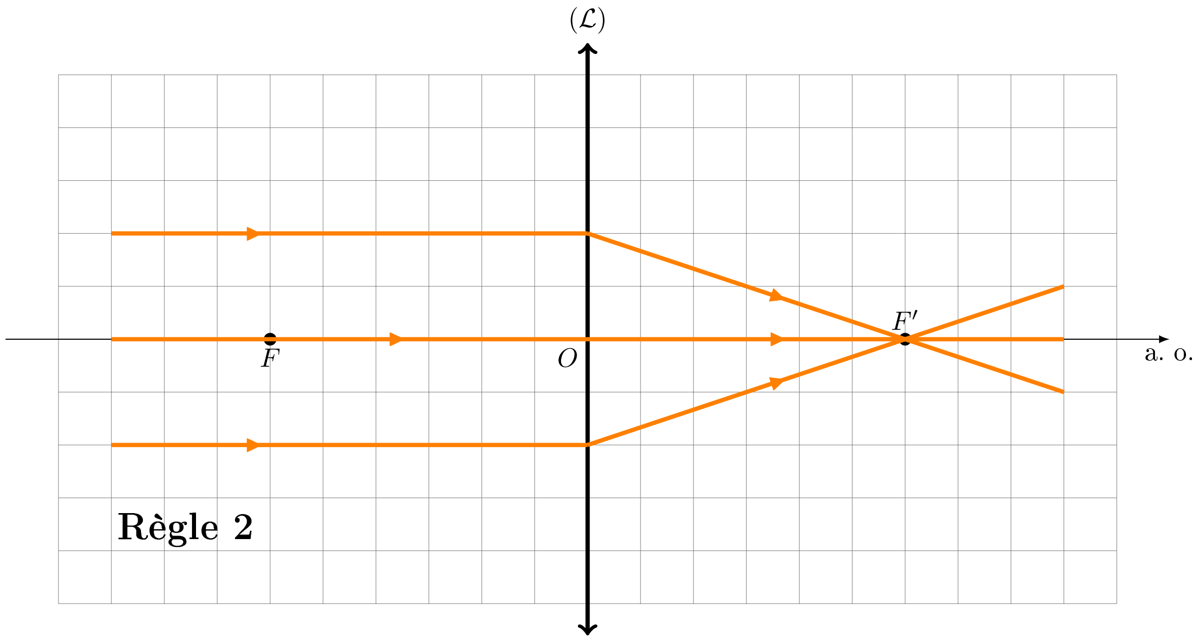
Construction des rayons.

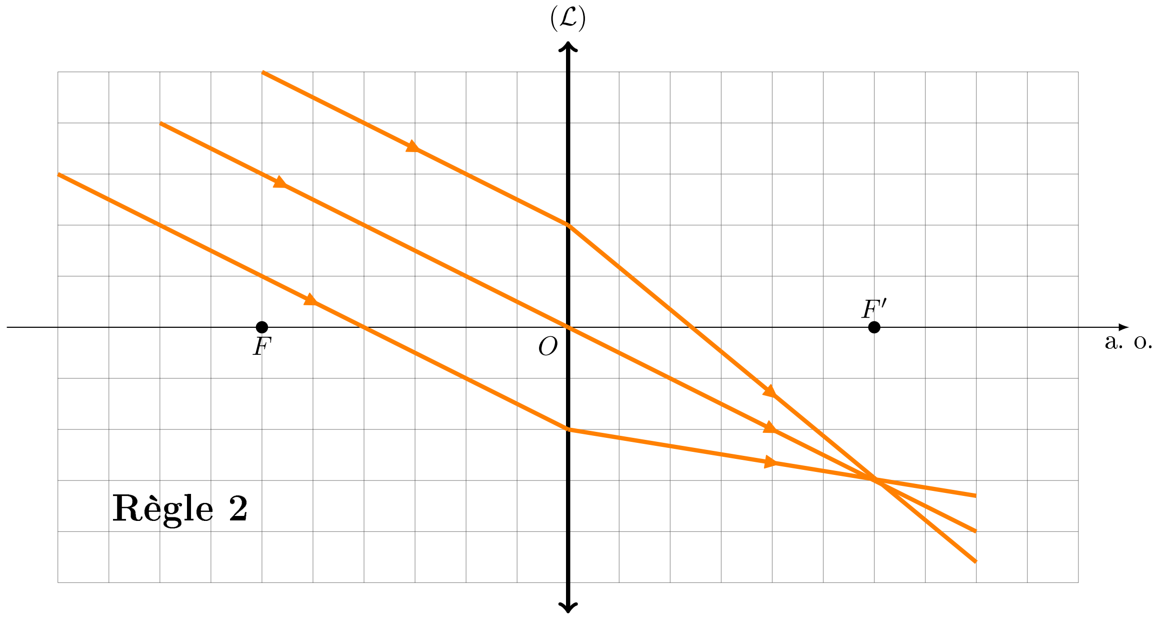
Pour une lentille mince utilisée dans les conditions de Gauss, on sait tracer trois types de rayons :

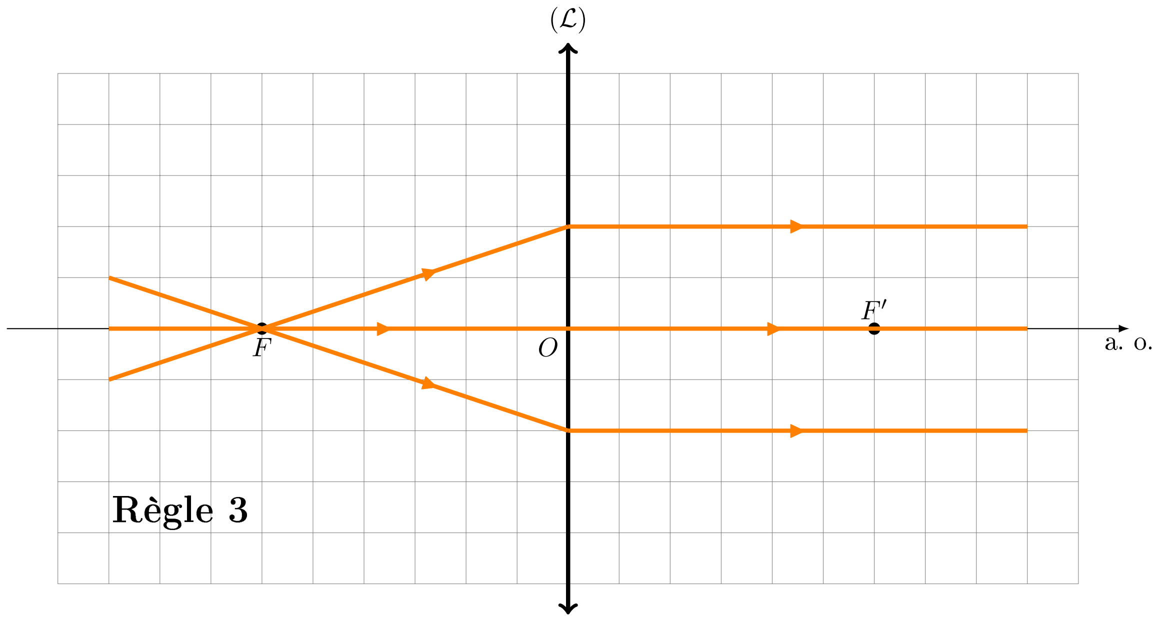
1. les rayons passant par le centre de la lentille ne sont pas déviés ;
2. deux rayons incidents parallèles donnent des rayons émergents qui se croisent dans le plan focal image ;
3. deux rayons incidents qui se croisent dans le plan focal objet donnent des rayons émergents parallèles.

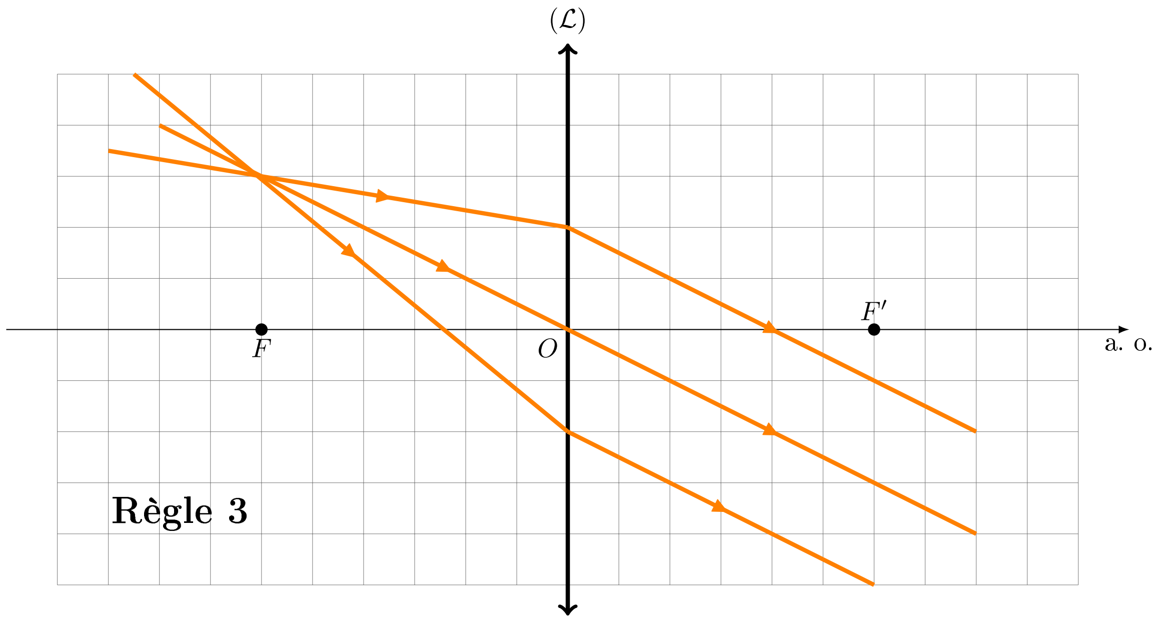
On dessine quelques exemples ci-dessous avec une lentille convergente.





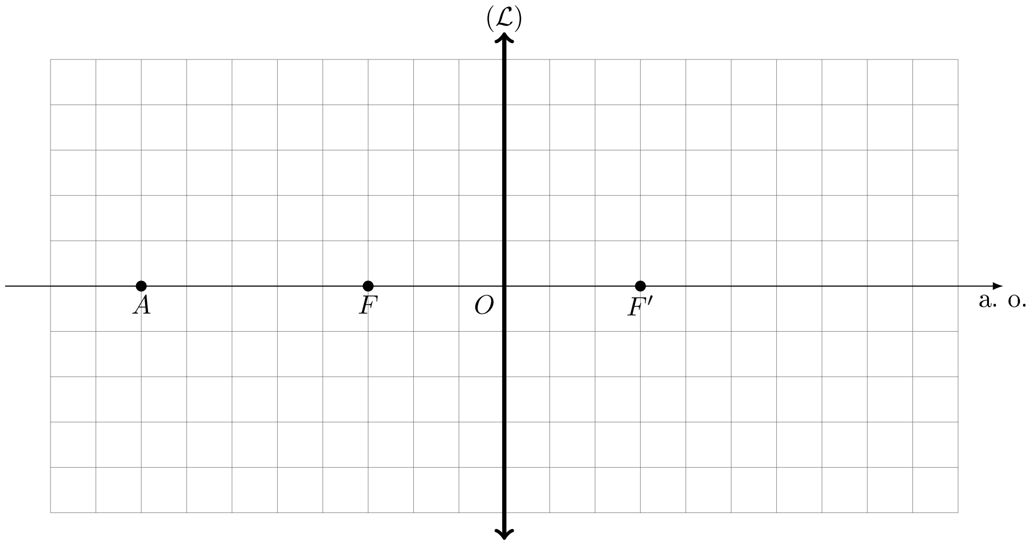

(ℒ)
F′
F
O
a. o.
Règle 2


(ℒ)
F′
F
O
a. o.
Règle 3

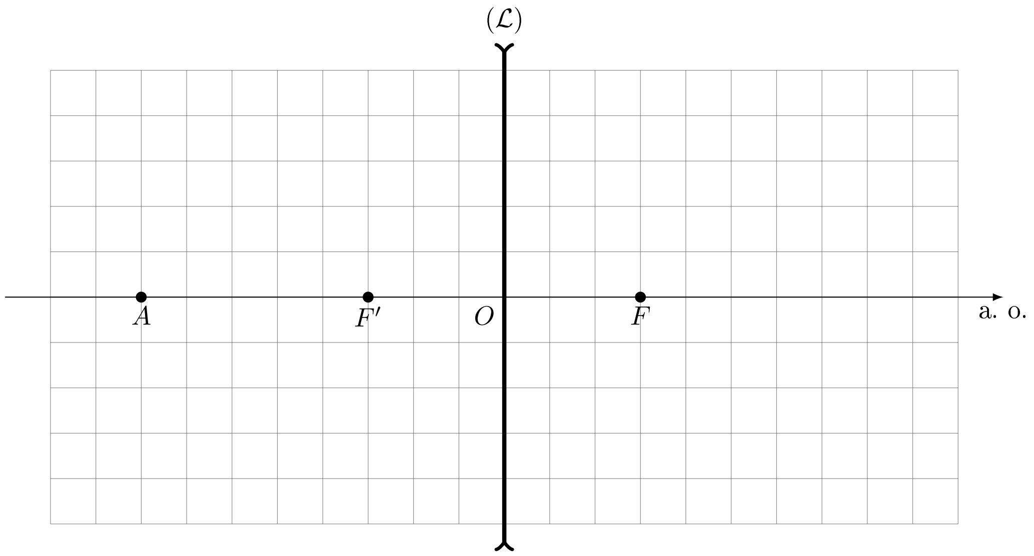

(ℒ)
F′
F
O
a. o.
Règle 3

Propriété. En conséquence des règles ci-dessus, un rayon lumineux incident parallèle à l'axe optique repart en passant par le point focal image ; et un rayon lumineux émergent parallèle l'axe optique est passé par le point focal objet.

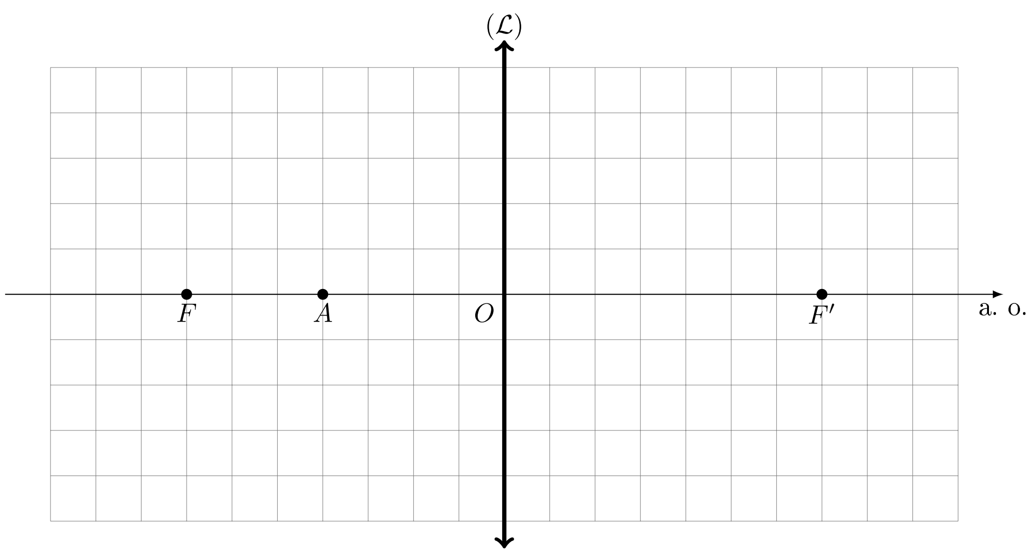
Exercice 1. Obtenir l'image du point objet A par la lentille convergente ci-dessous.



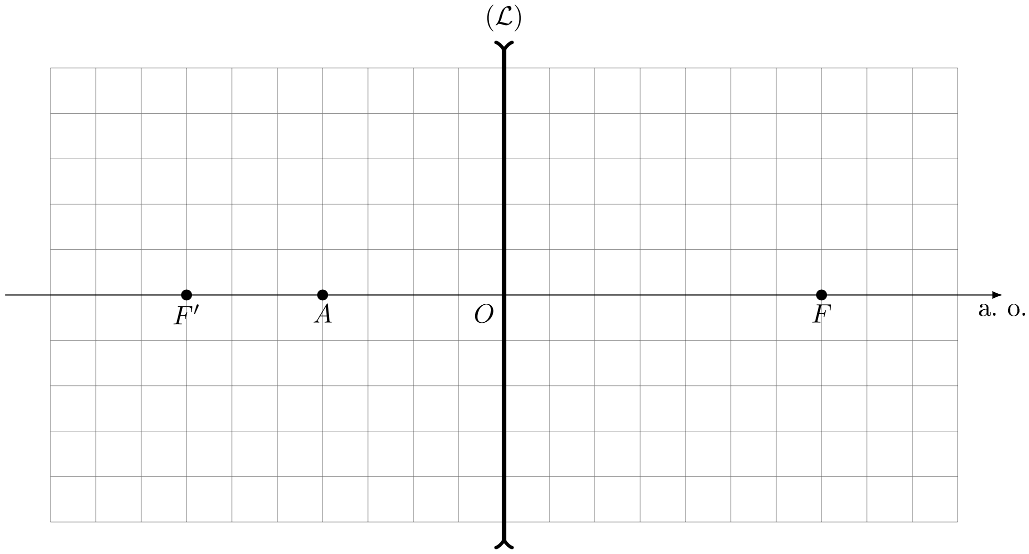
Exercice 2. Obtenir l'image du point objet A par la lentille divergente ci-dessous.



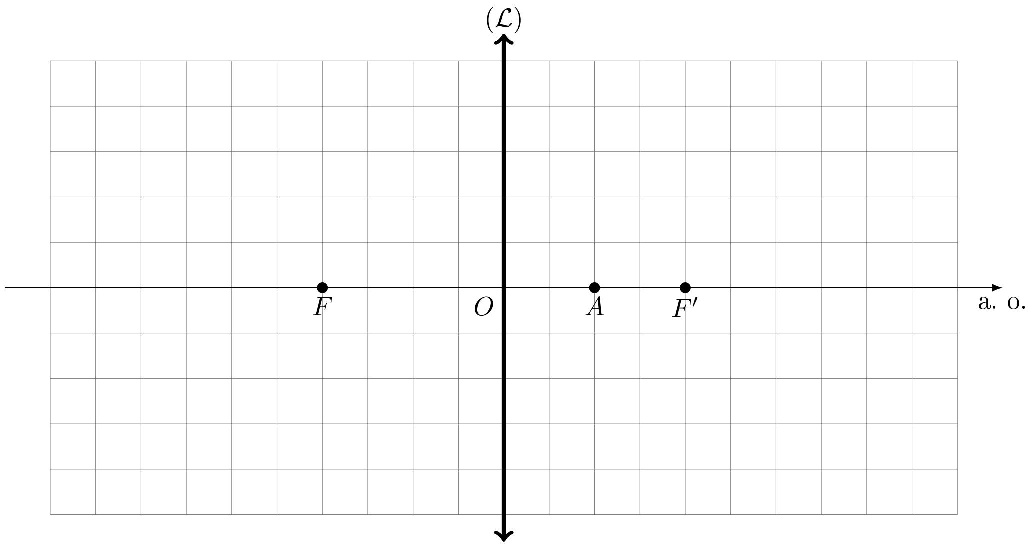
Exercice 3. Obtenir l'image du point objet A par la lentille ci-dessous.



Exercice 4. Obtenir l'image du point objet A par la lentille ci-dessous.



Exercice 5. Obtenir l'image du point objet A par la lentille ci-dessous.



3.3 Relations de Descartes et de Newton

Relations de Descartes et de Newton.

Les deux relations suivantes ne sont pas à connaître par cœur d'après le programme officiel de PCSI. Pour une lentille mince utilisée dans les conditions de Gauss, si A est le point objet et A' le point image conjugué de A par la lentille, on a

$$\boxed{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{(Relation de Descartes)} \quad \text{et} \quad \overline{F'A'} \times \overline{FA} = -f'^2 \quad \text{(Relation de Newton)}}$$

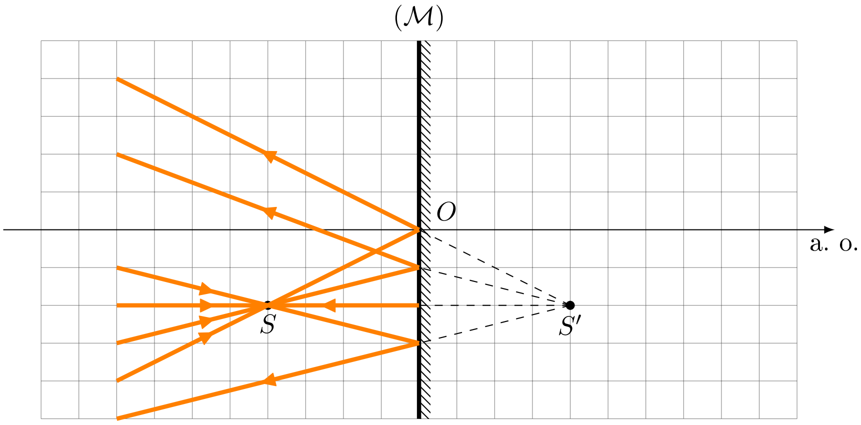
où O désigne le centre optique de la lentille, F son point focal objet, F' son point focale image et $f' = \overline{OF'}$ sa distance focale. *(Insistons sur le fait que les deux relations de Newton et de Descartes sont valables à la fois pour les lentilles convergentes et divergentes.)*

4 Le miroir plan

Construction des rayons. Astuce de la source virtuelle.

L'image d'un point objet par un miroir plan est le **symétrique orthogonal** de cet objet par le miroir. L'image d'un objet réel est donc toujours virtuelle.

On peut se servir de cette propriété pour tracer facilement les rayons lumineux : un rayon émergent d'un miroir provient de l'image d'un point du rayon incident. Notamment, un rayon émergent depuis le miroir d'un rayon incident émis par une source S provient de la source virtuelle S' image de S par le miroir.



Propriété. Le miroir plan est le seul instrument optique **rigoureusement stigmatique et aplanétique**. *(En d'autres termes, et contrairement aux lentilles minces, il n'est pas utile d'être dans les conditions de Gauss pour qu'un miroir plan vérifie ces propriétés.)*

Propriété. Du fait de l'astuce de la source virtuelle, on peut en fait retenir la méthode suivante : dans une situation où une source fait face à un miroir, tout se passe, pour les rayons passant par le miroir, comme si **la source et le miroir étaient absents mais remplacés par la source virtuelle**. Nous utiliserons cette méthode pour « déplier » l'interféromètre de Michelson dans le chapitre OP7, mais aussi par exemple pour l'étude des interférences avec miroir de Lloyd.

Exercice 6. Tracer le rayon qui passe par M et M' (et par le miroir !) en utilisant l'astuce de la source virtuelle.