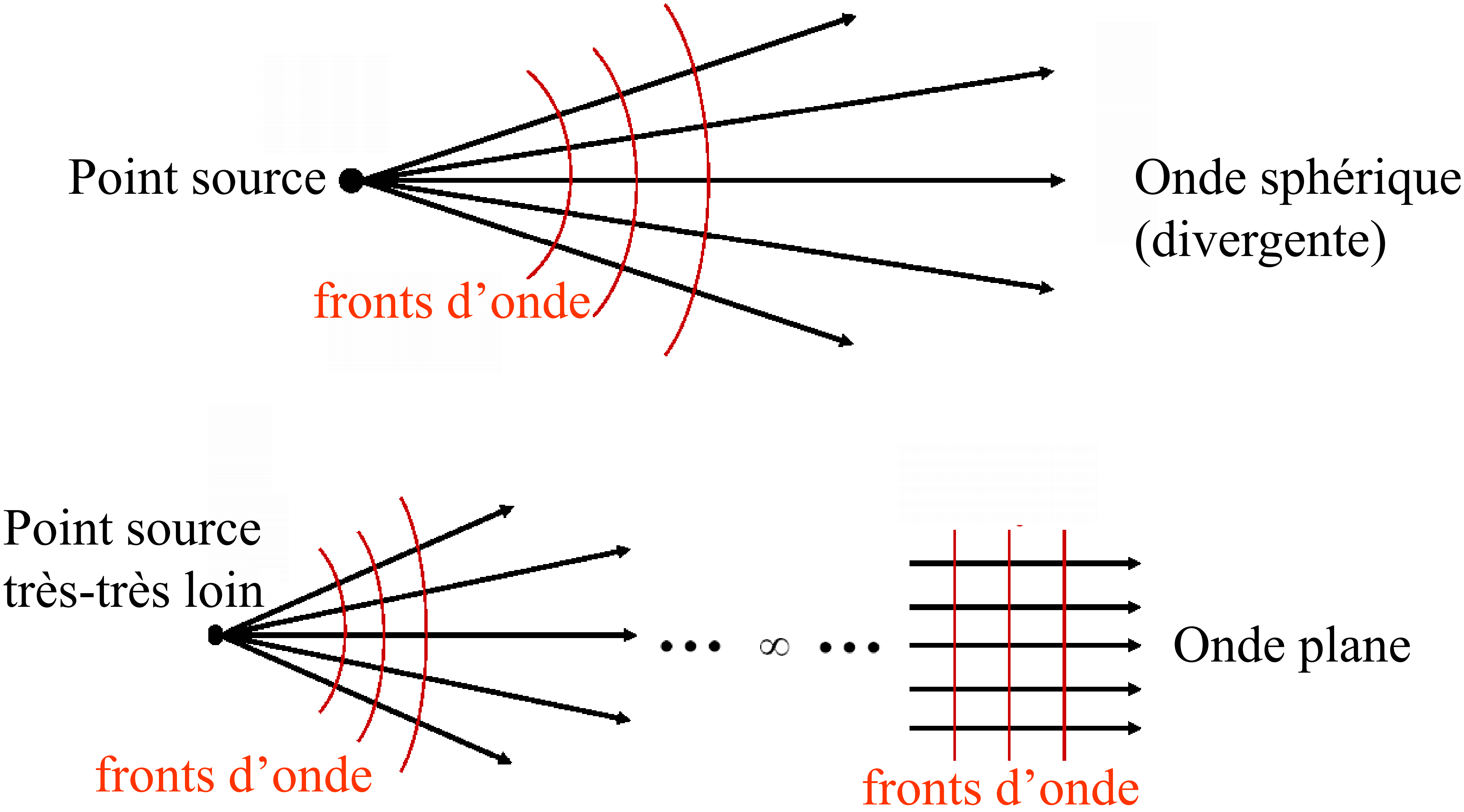
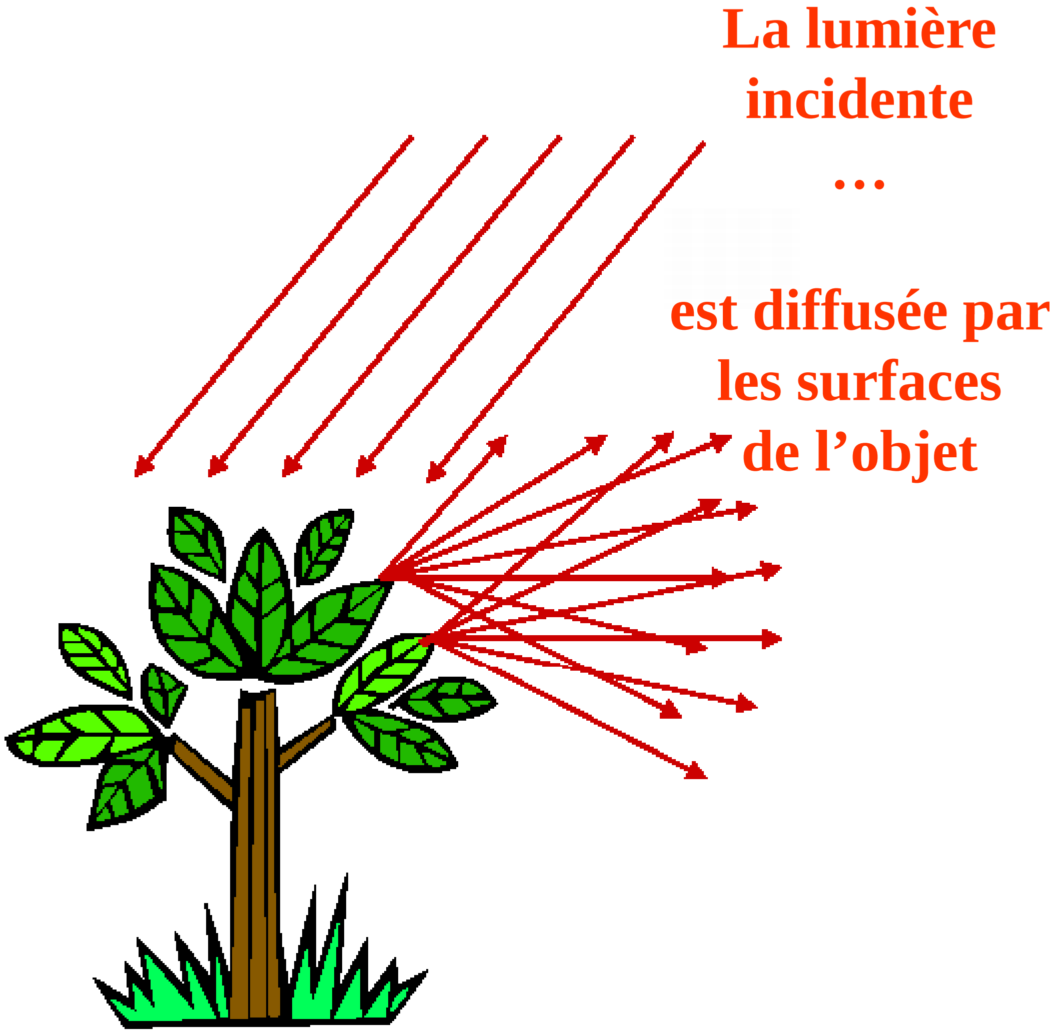
Formation des images, lentilles et miroirs

Pourquoi faut-il une ***optique*** afin de créer une image ?

Préambule: chaque point d'un objet et la source d'un'ensembles de rayons



Pourquoi faut-il une ***optique***, afin de créer une image ?



Objet (3D)

Donc, on a besoin d'<u>une</u> <u>optique</u> pour "reassembler" **dans une image** ces rayons qui ont été diffus

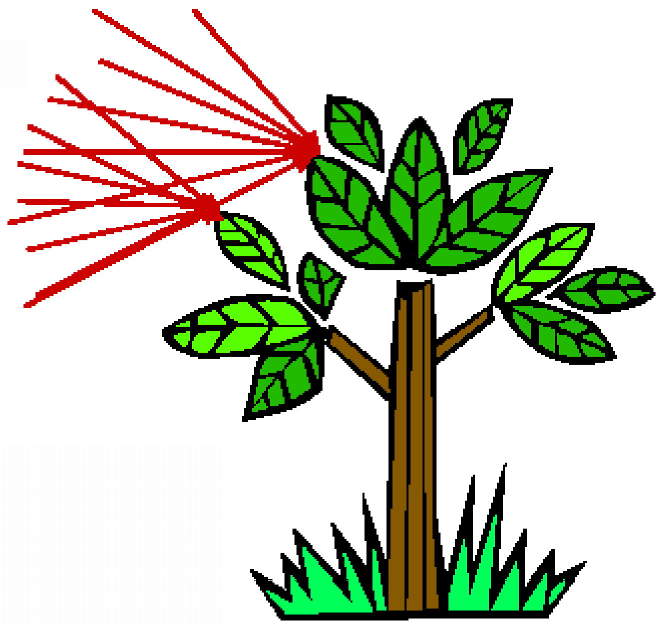
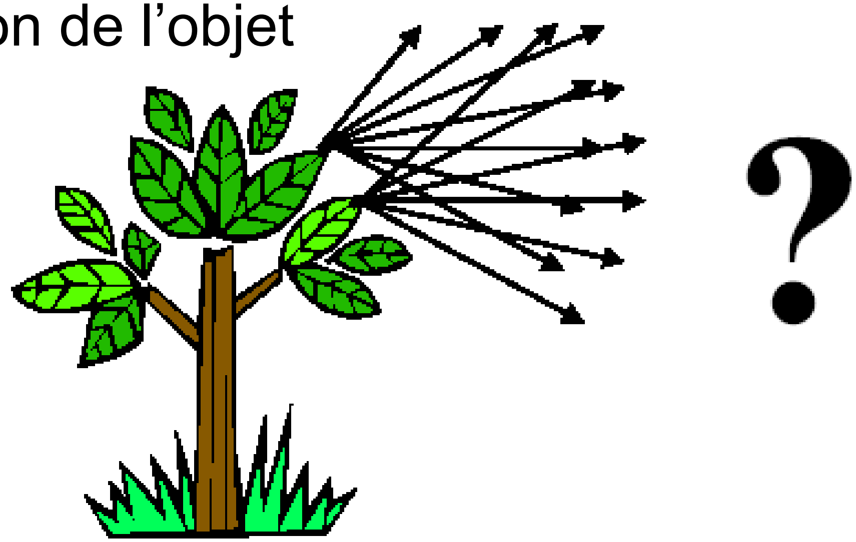


image (2D)

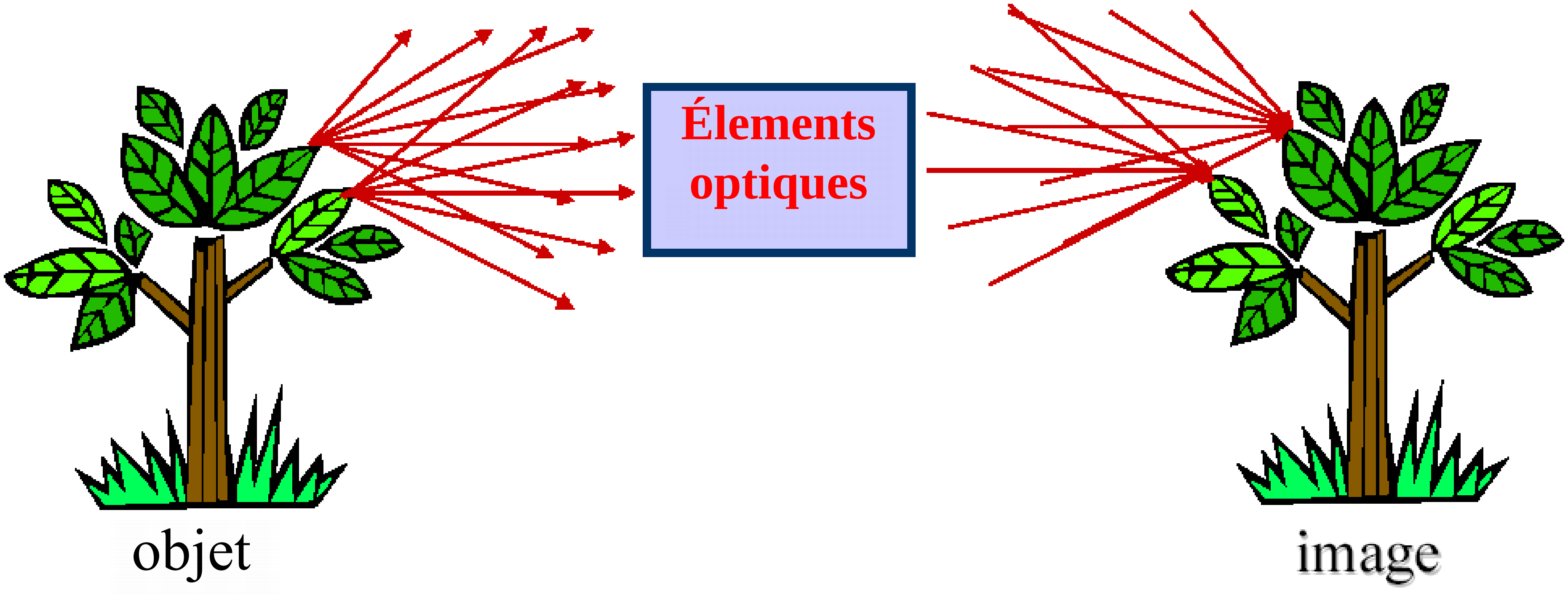
Pourquoi faut-il une ***optique***, afin de créer une image ?

- Chaque **point** d'un objet diffuse la lumière incidente en une onde sphérique
- A peine éloignés de leur source, les rayons ont "**délocalisé**" les détails et la position de l'objet



- Pour "relocaliser" ces détails, il est nécessaire de réunir, re-concentrer ("**focaliser**") tous les rayons venant d'un point objet en un autre point dans l'espace ("**image**")
- Ceci est ce que va faire un **système optique d'imagerie**

Le système d'imagerie idéal



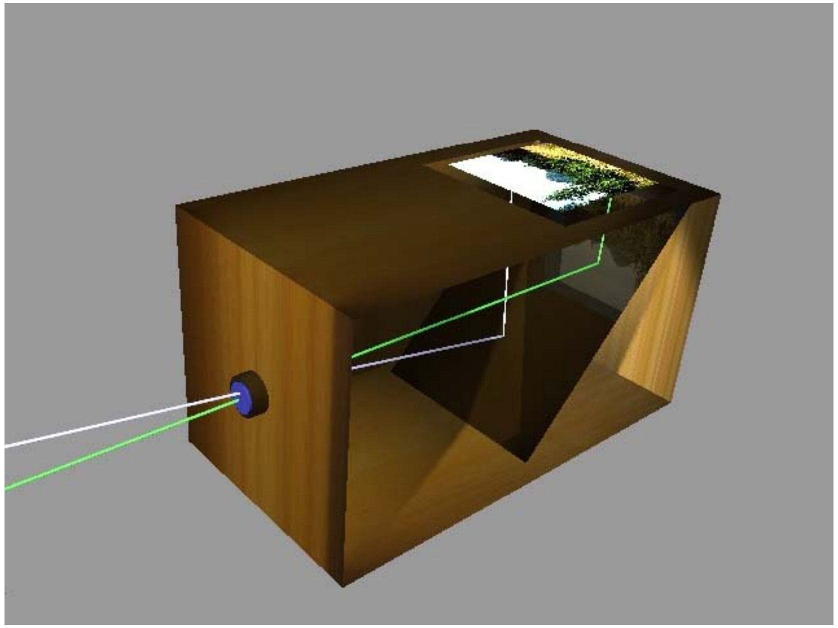
A chaque point de l'objet correspond un **seul** point de l'image

La propriété qui, à un point objet associe un seul point image s'appelle le **stigmatisme**.

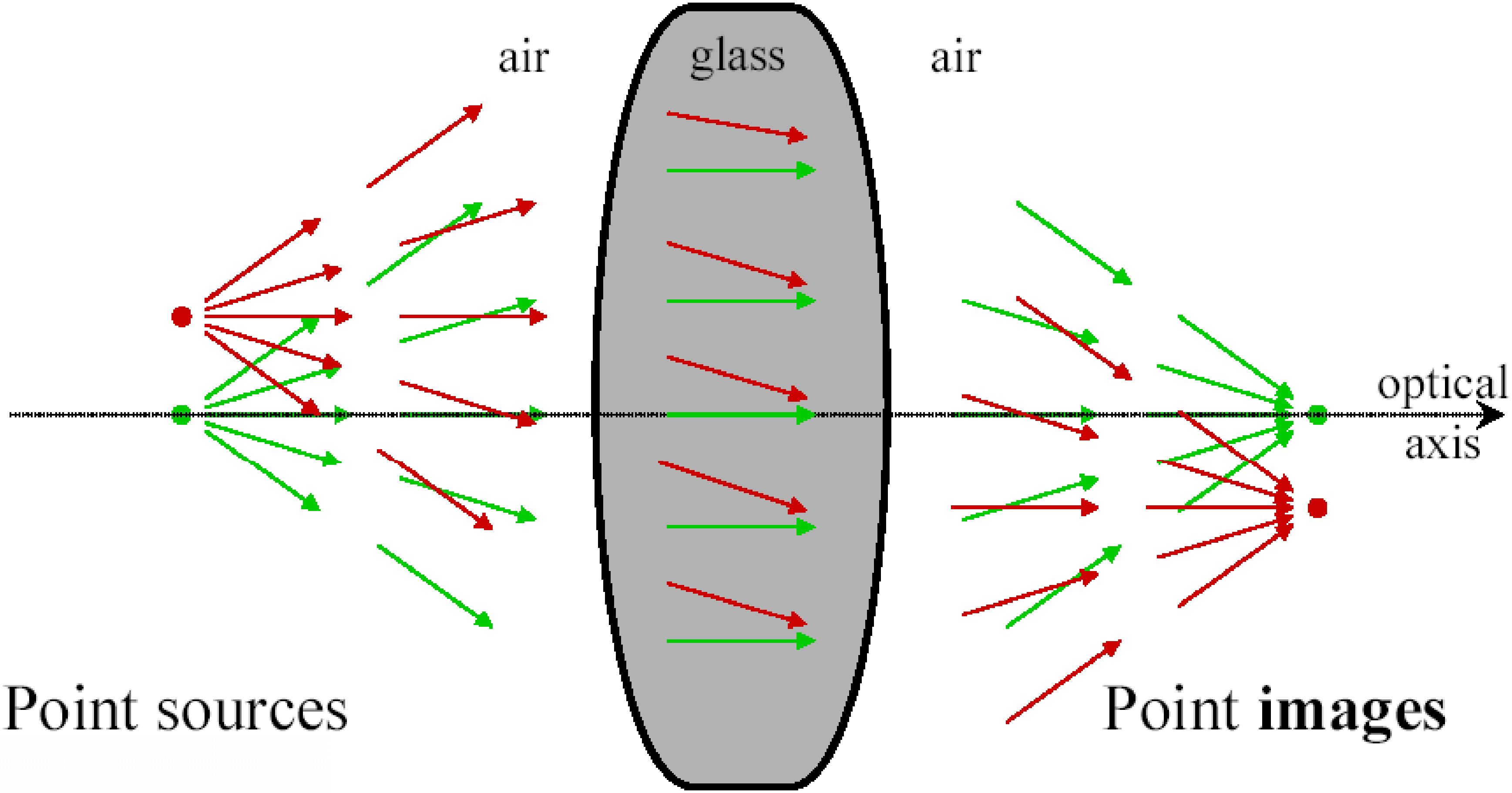
La chambre noire: une système optique ?

- Dans un sens, oui, puisqu'à chaque point de l'objet correspond un seul point de l'image.

- Mais …
c'est aussi «triché», puisque le trou sélectionne un seul rayon provenant de l'objet et élimine tous les autres …



Exemple d'un système optique: une lentille (idéale) …



Si les rayons de chaque point source se refocalisent rigoreusement en un seul point de l'image, le système optique est dit stigmatique

Image réelle ou virtuelle

Si les rayons peuvent être reçus sur un écran placé au bon endroit l'image est (dite) **réelle**

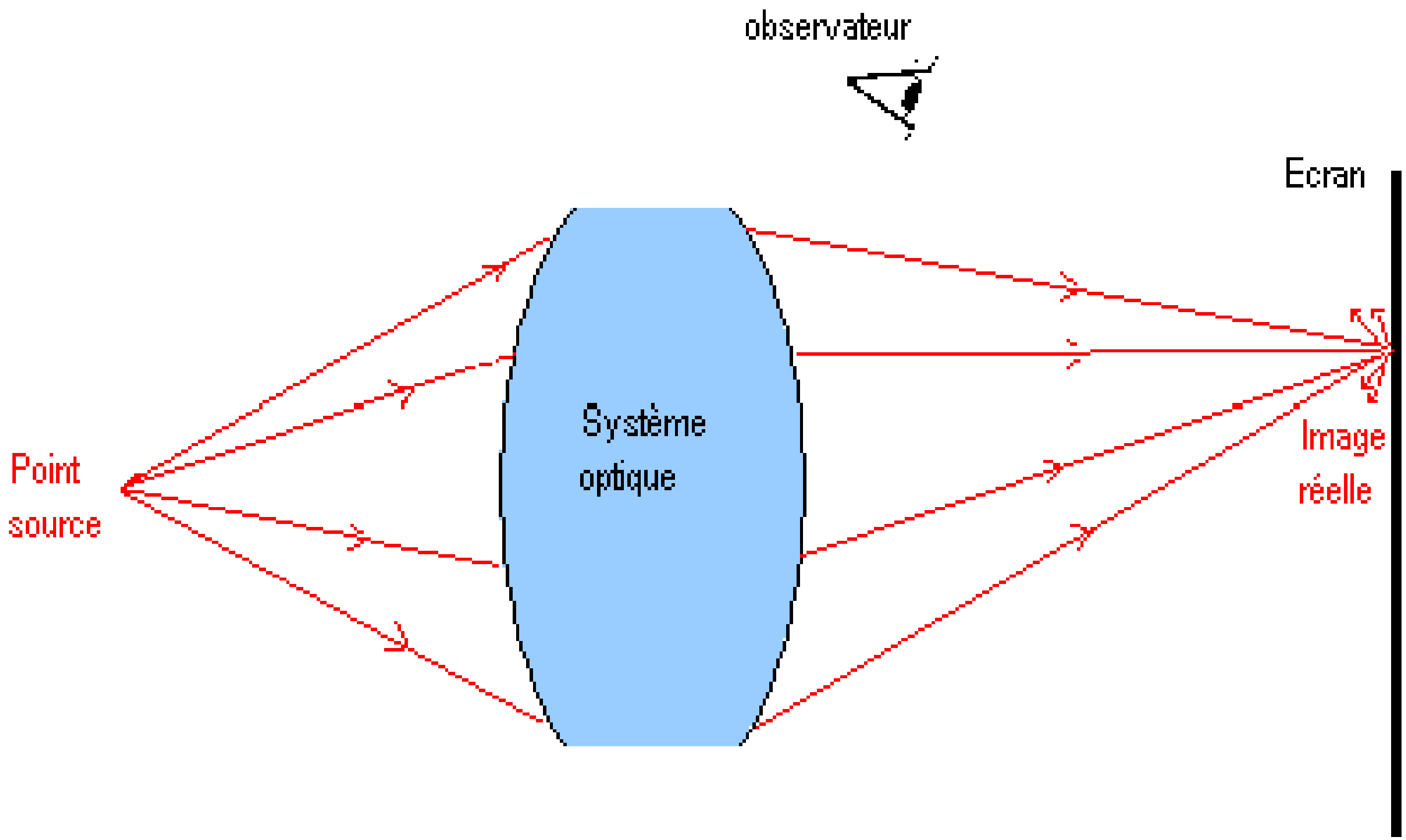
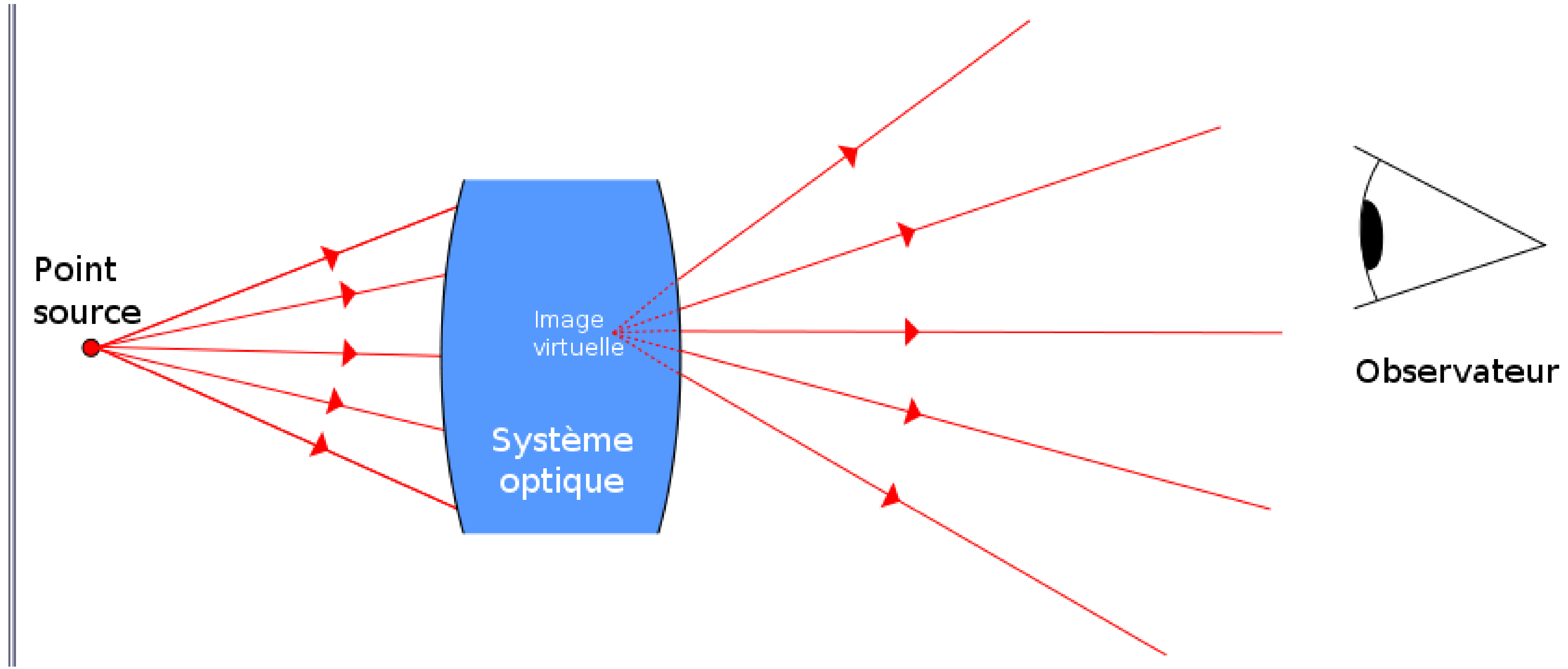
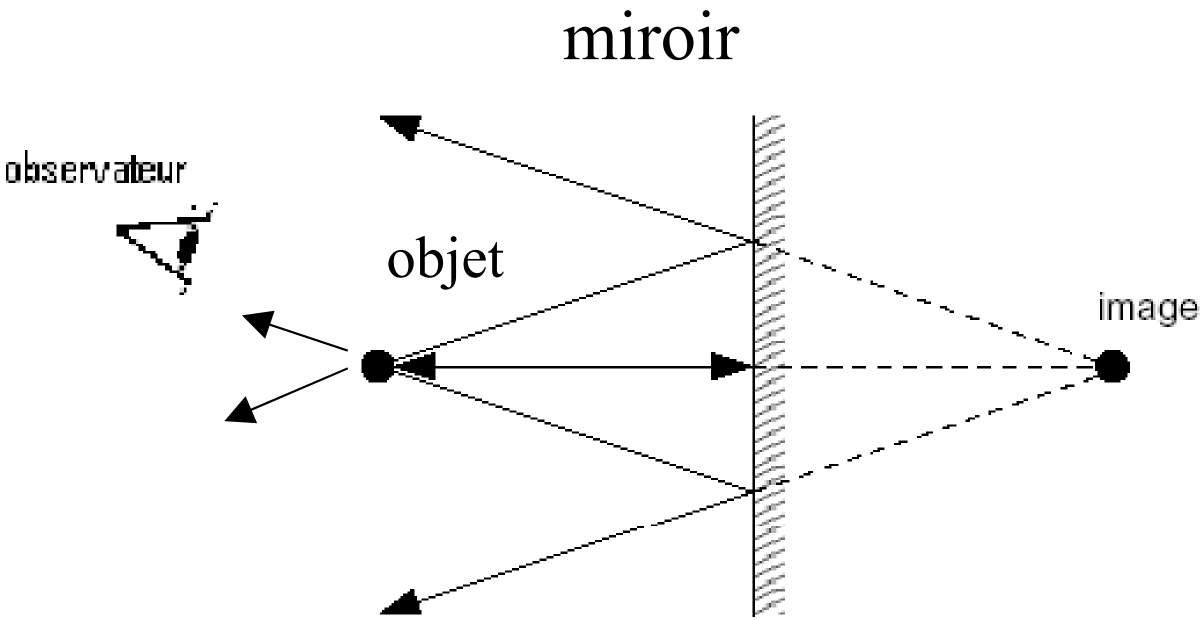


Image virtuelle

- Sinon, l'image est dite virtuelle: on peut la voir en plaçant directement son œil dans le faisceau émergent



Exemple: la réflexion d’un miroir plan est une image virtuelle



L’observateur (œil, camera) perçoit les rayons réfléchis par le miroir **comme venant** d’un «objet» à l’intérieur du miroir

Pourquoi l'image dans le miroir semble avoir une inversion droite-gauche, mais pas haut-bas ?

- Applet: création de l'image d'un miroir plan

http://stwww.weizmann.ac.il/Lasers/laserweb/Java/MirrImge/Imageme1.htm

Stigmatisme

- Un stigmatisme parfait des systèmes optiques est rare. Seul le miroir plan est stigmatique pour tout point.

- En général les systèmes optiques sont rigoureusement stigmatiques que pour des points-source particuliers ou n’approchent la condition stigmatique que pour un faisceau limité.

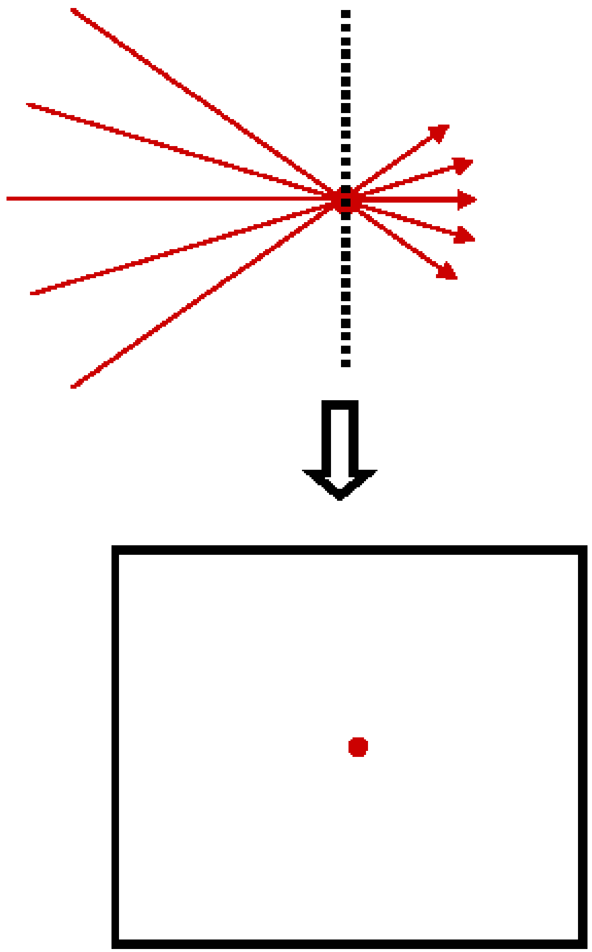
- Dans de nombreux cas (en particulier pour les lentilles) on doit se contenter d'un **stigmatisme approché** et ceci, en général, en limitant le faisceau.

En conséquence

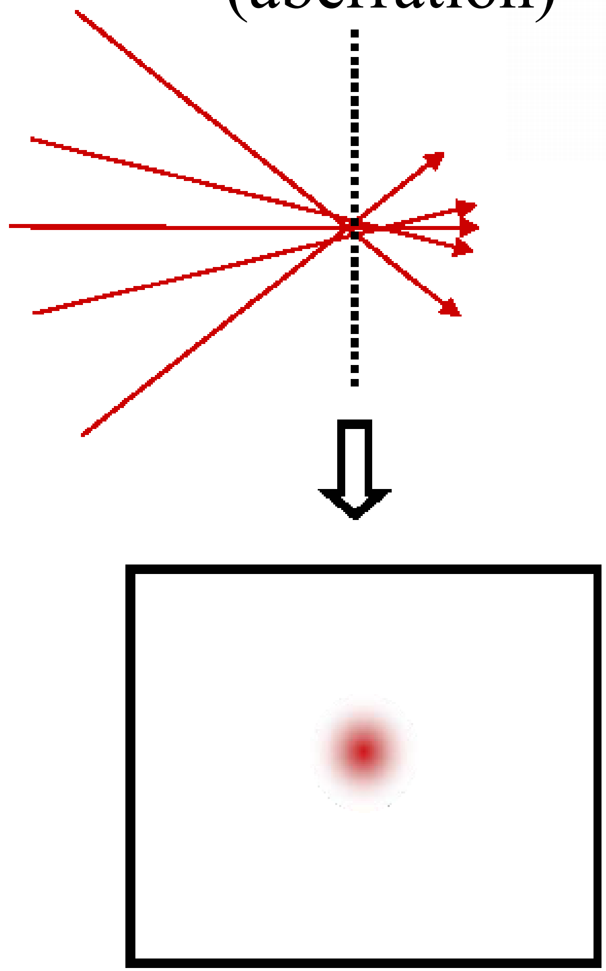
- … les systèmes réels introduisent du “flou” dans l’image …

Attention: l'apparence de "flou" peut avoir plusieurs causes, par exemple …

Pas de flou, focalisation parfaite, écran sur le foyer

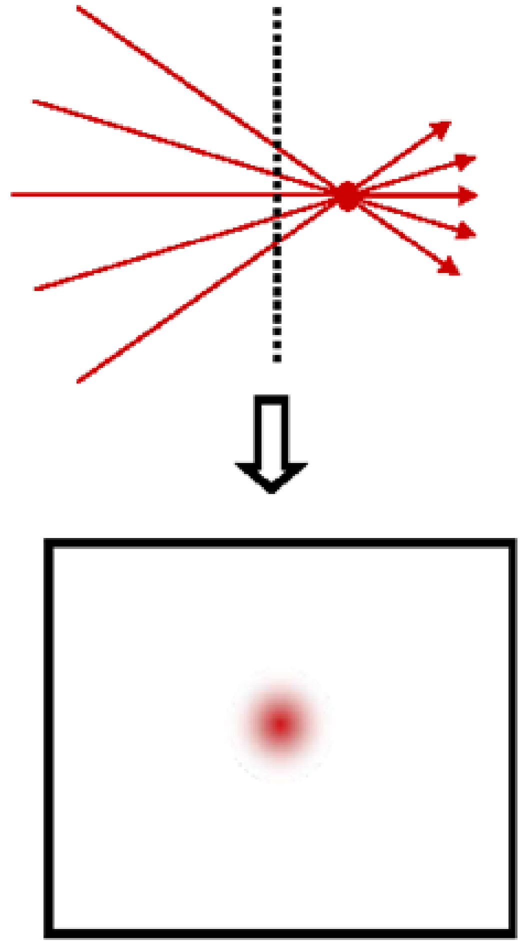


Focalisation imparfaite par une optique non stigmatique (aberration)



mais aussi …

Défocalisation,
écran pas sur le foyer



Pourquoi les systèmes optiques ne focalisent pas parfaitement ?

- **Aberrations**

  Réflexion et réfraction n'obtiennent pas une seule image de la source mais un grumeau de points plus ou moins serré

- **Diffraction**

  Interaction des ondes avec les bords des éléments optiques ou autres objets dans le champ de vue

- Notons que le **capteur** (œil, caméra, …) a aussi ses limites, notamment en résolution et contraste.
- Un **bon système optique** doit être conçu pour que ses défauts (aberrations, diffraction) ne soient pas perceptible par le capteur.

- La caméra d’un portable 1 Megapixel

- Et l’objectif d’un appareil photo à 12 Megapixel

N’ont pas besoin d’avoir les même qualités optiques.

Eléments fondamentaux des systèmes optiques

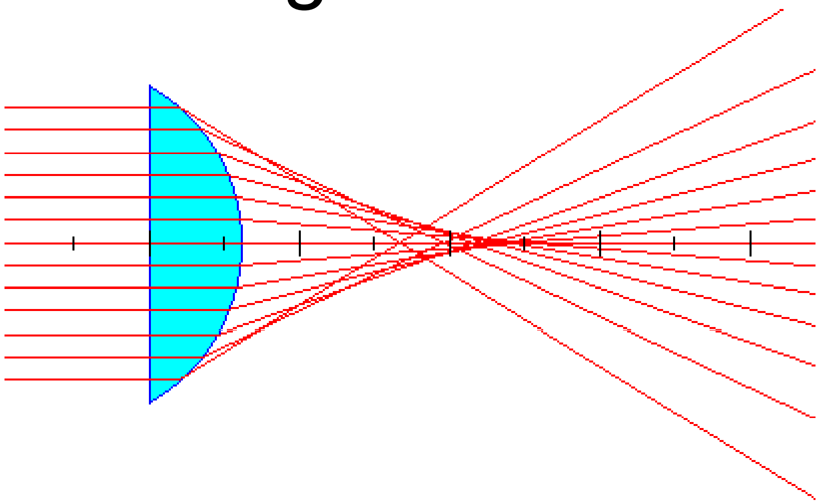
- Lentilles

- Miroirs

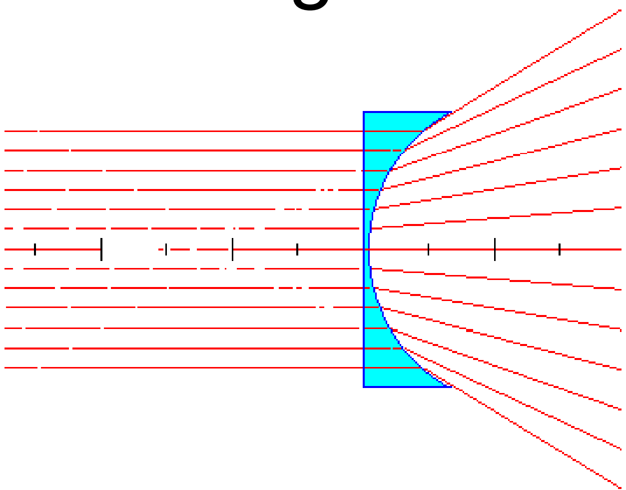
Lentilles

- Un élément en matériaux **transparent** constitué de deux surfaces dont **au moins l'une** est **courbe**, typiquement sphérique
- Les lentilles sont fabriquées en
  - verre
  - quartz
  - plastique,
  - etc.

Convergente

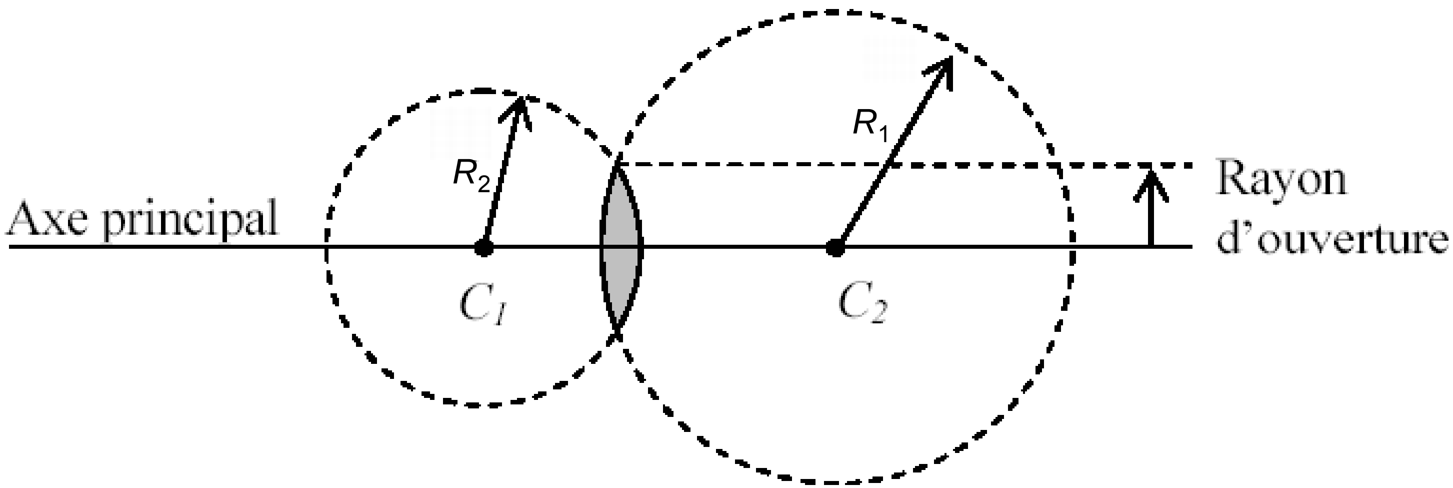


Divergente



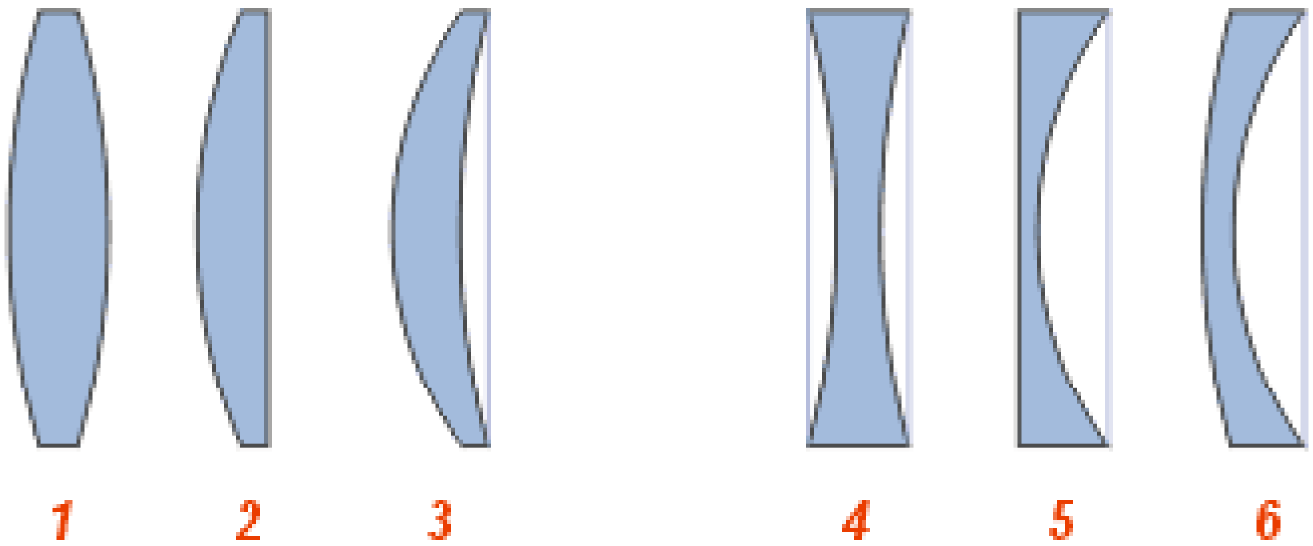
Lentilles

On appelle **axe principal** la droite joignant le centre des deux faces sphériques. R_1 et R_2 sont les rayons de courbure.



Le **rayon d'ouverture** de la lentille est le rayon du cercle du bord de la lentille.

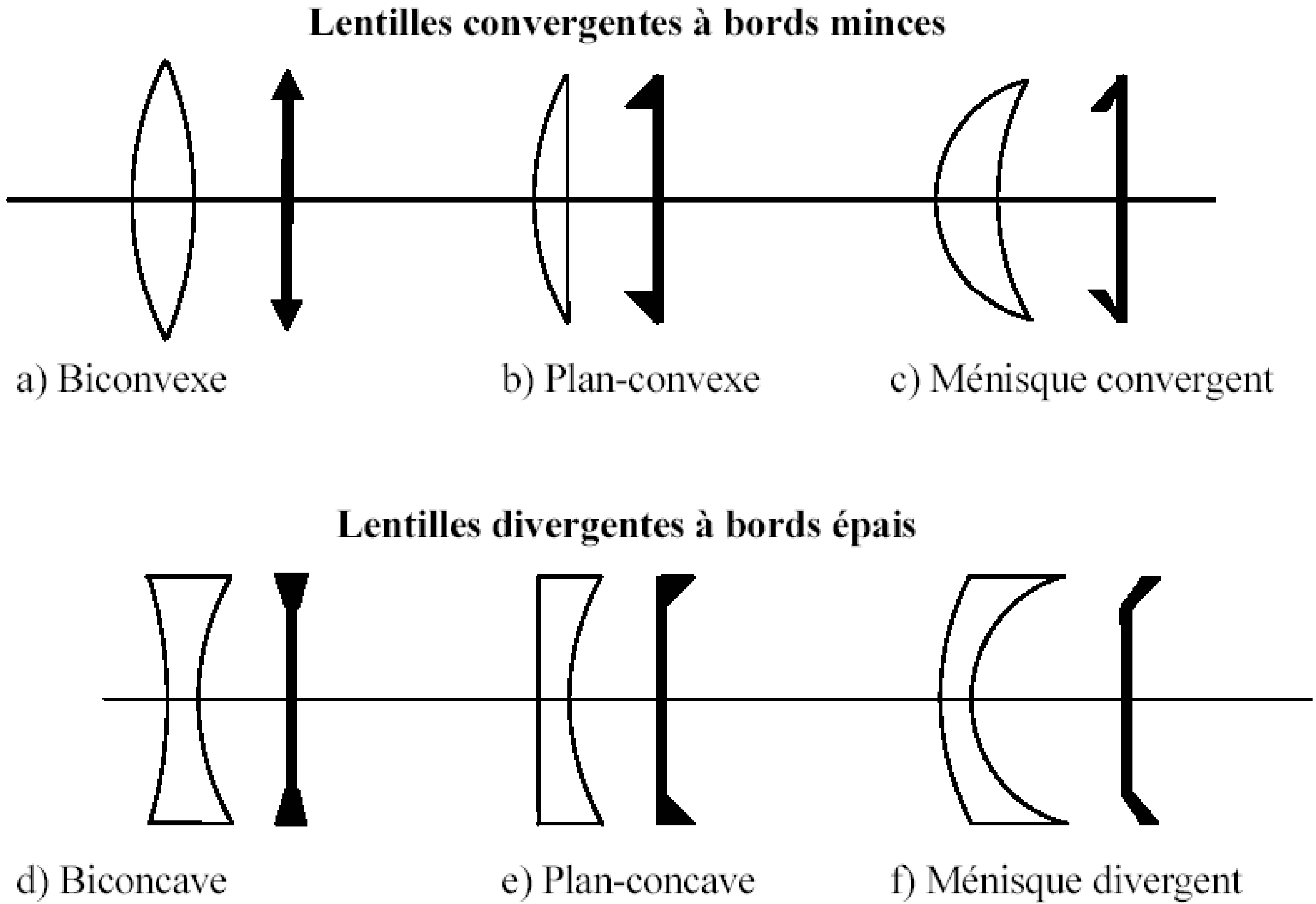
Lentilles - forme



Lentilles convergentes
1 - lentille biconvexe
2 - lentille plan-convexe
3 - ménisque convergent

Lentilles divergentes
4 - lentille biconcave
5 - lentille plan-concave
6 - ménisque divergent

Lentilles - symboles



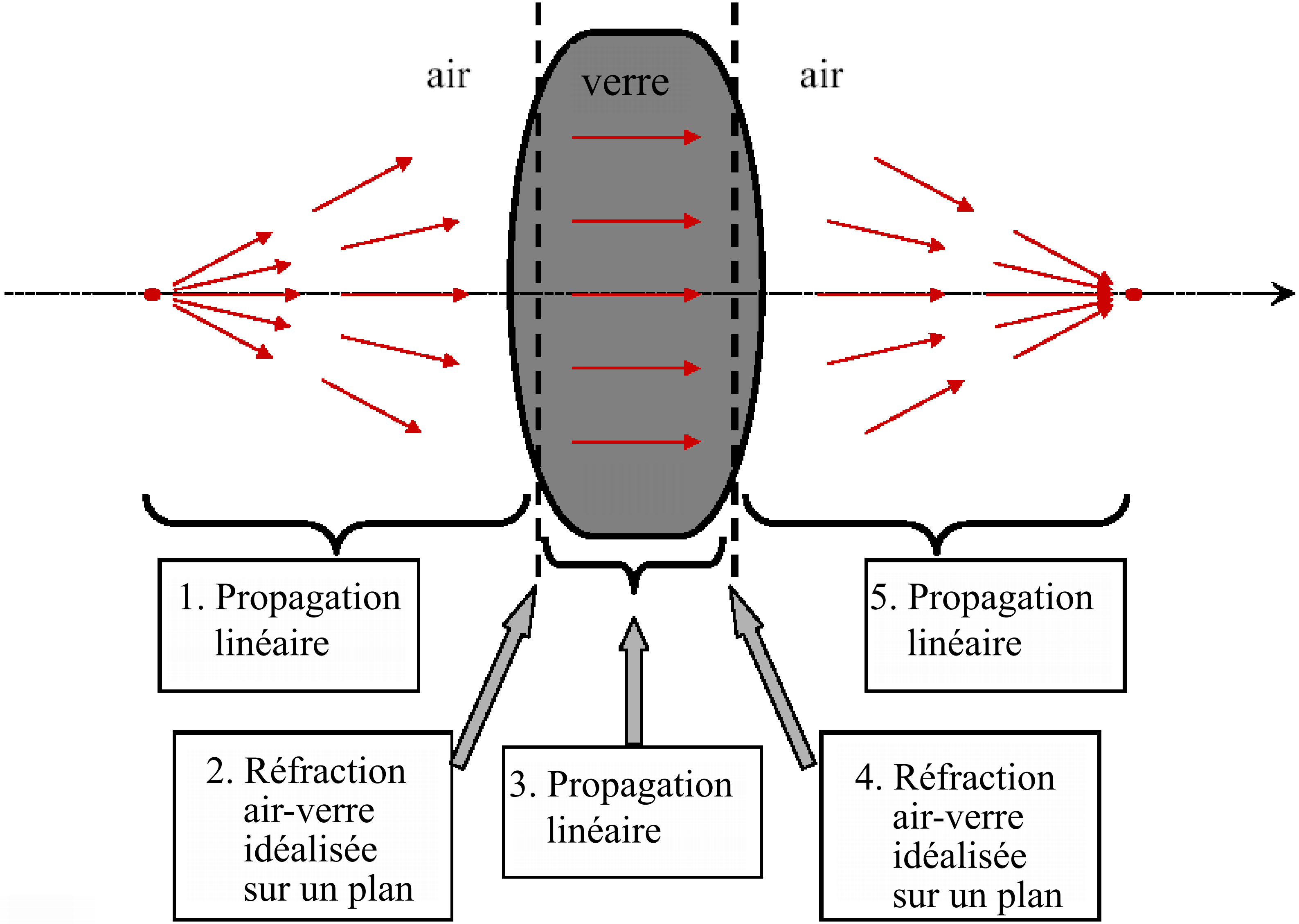
Calcul des lentilles

1. On calcule l’effet des deux réfractions aux surfaces,

2. On dessine le *tracé des rayons* par les foyers de la lentille

3. Pour un premier calcul on peut utiliser l’approximation paraxiale

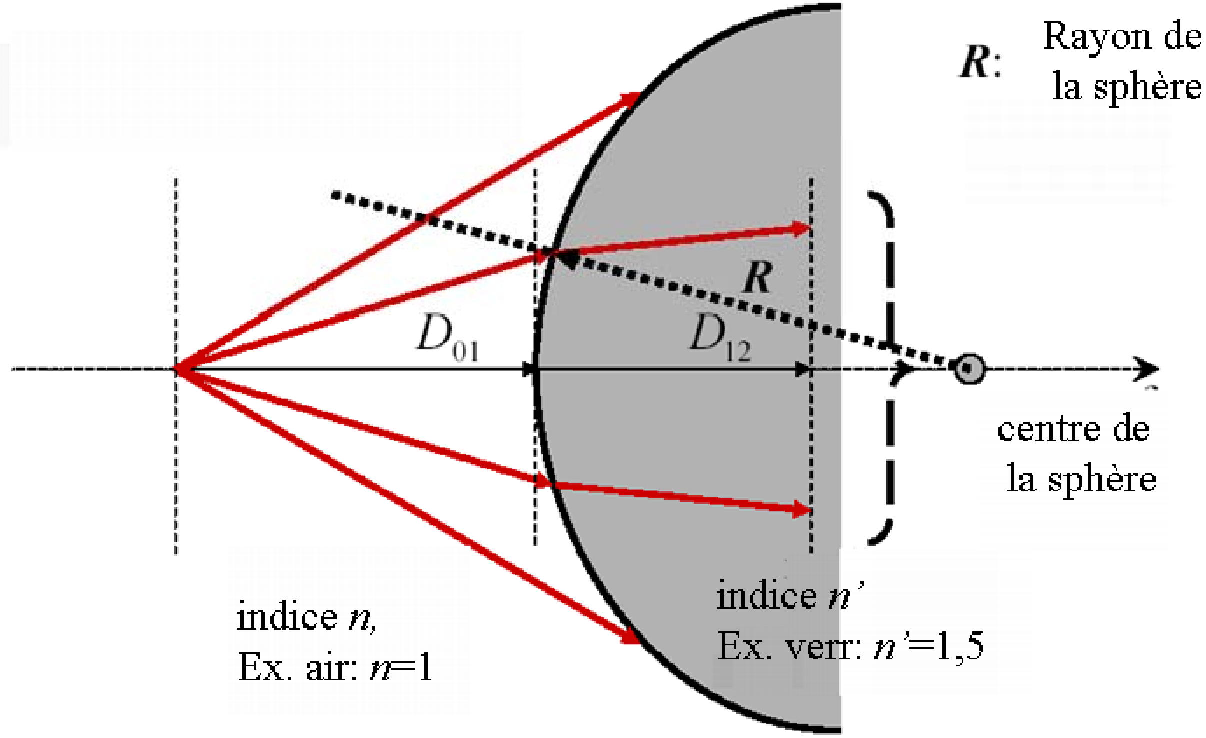
Procédure pour le tracé des rayons et le calcul d'une lentille par l'approximation paraxiale



1) Réfraction à une surface sphérique
2) + Transmission dans le milieu de la lentille
3) + …

Pour chaque rayon on doit calculer:

1. point d'intersection avec la sphere,
2. angle entre le rayon et la normale,
3. appliquer la loi de Snell et calculer la direction du rayon réfracté.



Afin de simplifier ce calcul on va utiliser **l'approximation paraxiale**, aussi appelée **conditions de Gauss**.

L'approximation paraxiale

On ne considère que les rayons qui passent près de l'axe et qui sont peu inclinés ou, autre façon de dire, lorsque le rayon de courbure de la surface optique est très grand en rapport aux dimensions liées à l'objet (taille, distance).

Ceci permet d'assimiler la valeur d'un angle à son sinus et à sa tangente.

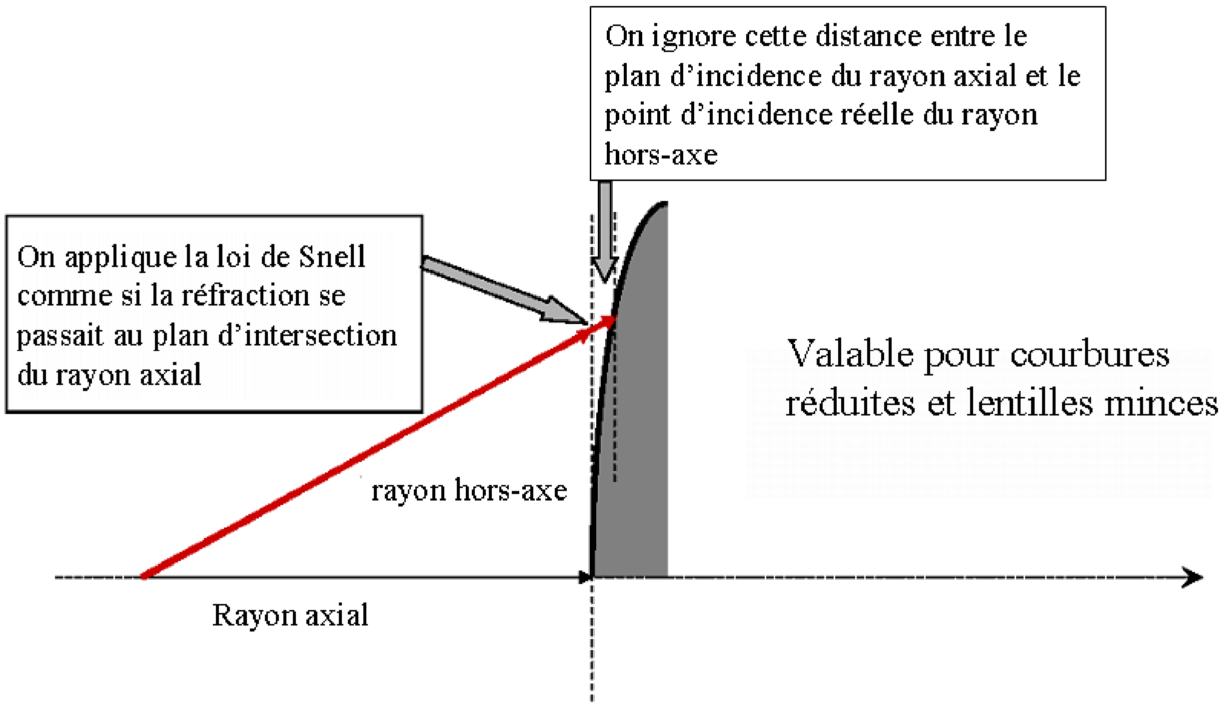
$$\sin\varepsilon \approx \varepsilon \approx \tan\varepsilon \qquad \cos\varepsilon \approx 1$$

ε = angle entre rayon et axe optique

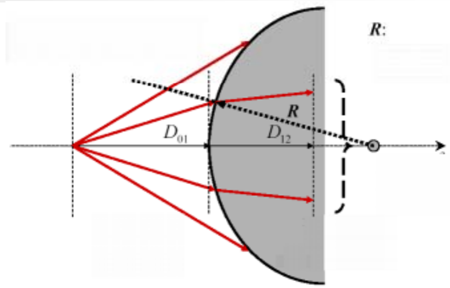
$$\sqrt{1+\varepsilon} \approx 1+\frac{1}{2}\varepsilon$$

L'approximation paraxiale suppose une faible divergence du faisceau par rapport à son axe de propagation.

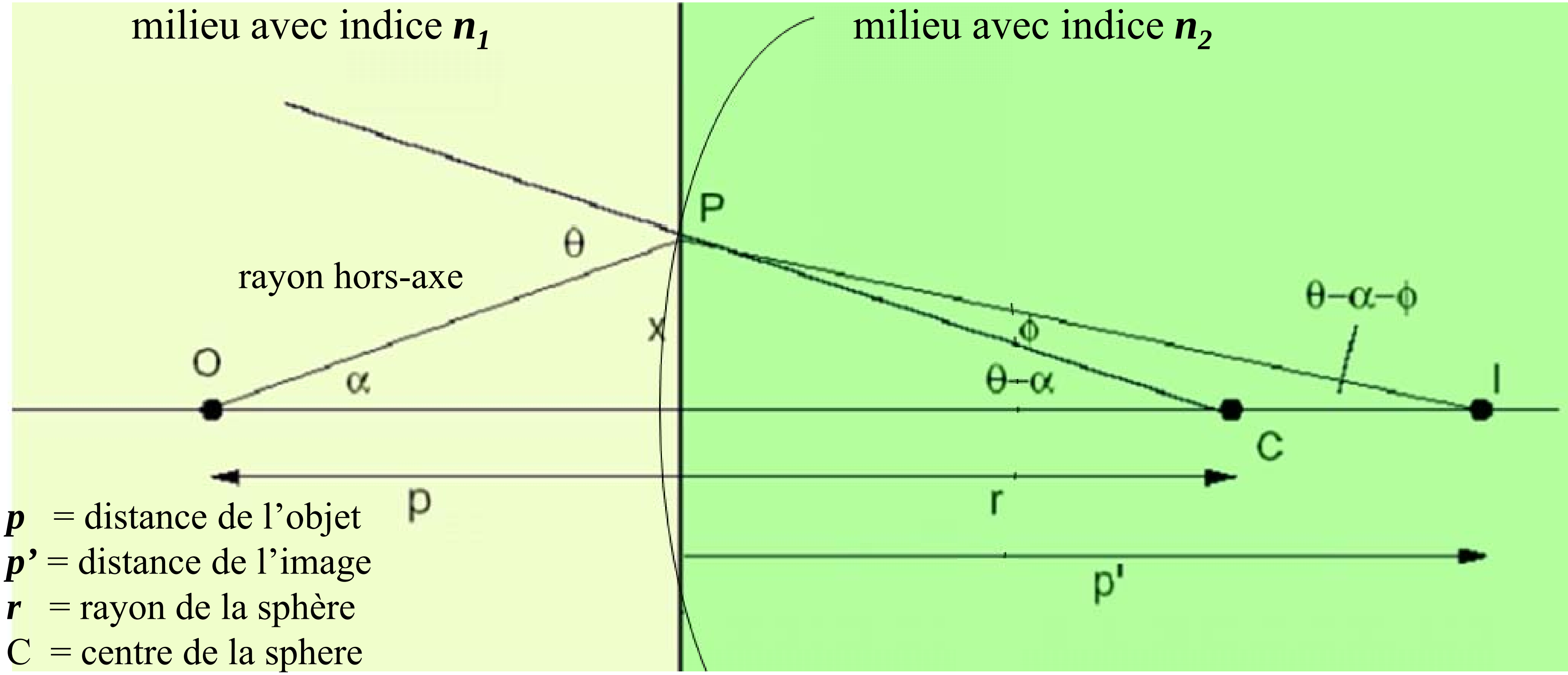
L'angle de divergence maximal ε généralement admis est de **l'ordre de 20º.**



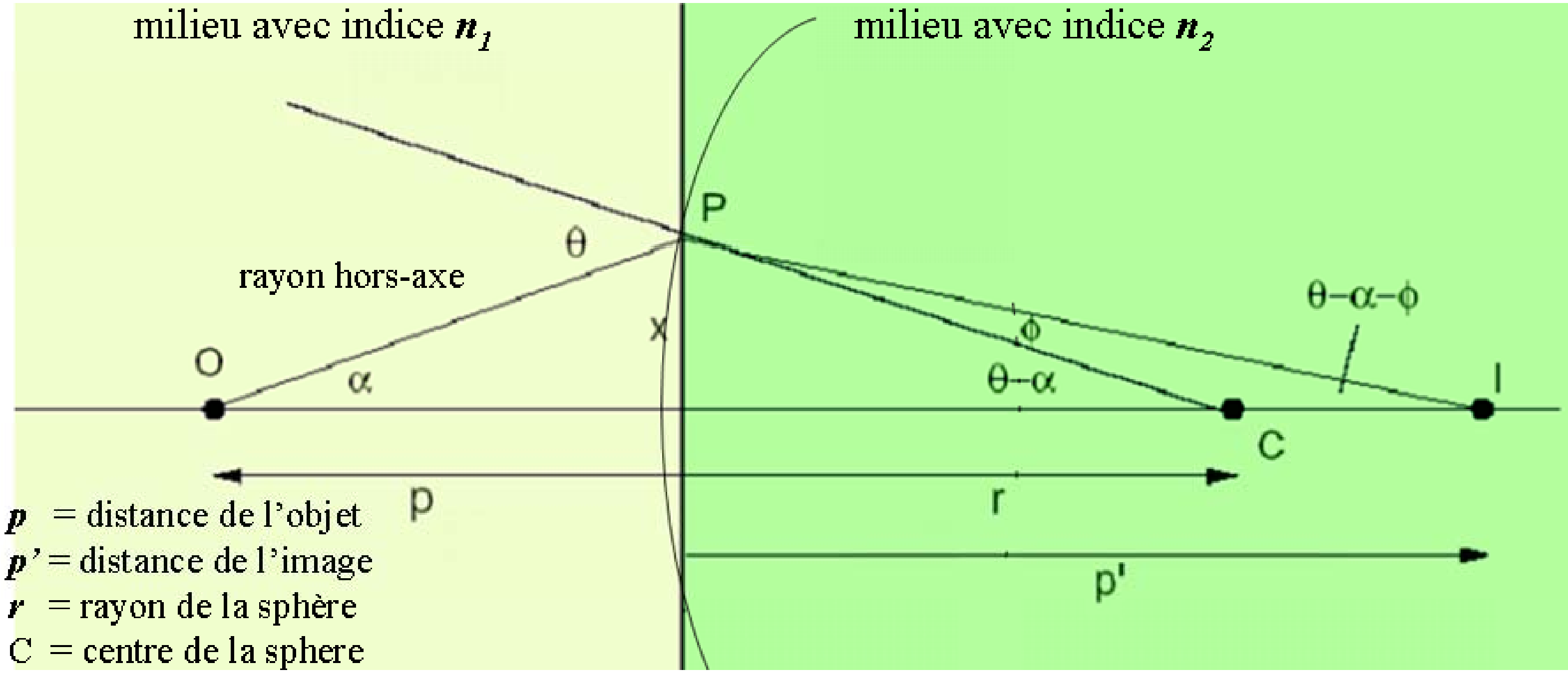
Réfraction à une surface sphérique:



Calculons la position ***p'*** de l'image d'un point situé à la position ***p*** devant la lentille



Dans la figure un point O émet un rayon le long de l'axe optique, et un autre vers le point P de l'interface où il est réfracté et intersecte le premier pour former une image au point I.
Dans ce cas, aussi, la surface est convexe, et donc le centre de courbure de la surface se trouve à droite de l'interface.



Pour le rayon oblique émit avec un angle α d'inclinaison sur l'axe, l'angle d'incidence est θ et l'angle réfracté est φ. La loi de Snell devient pour les petits angles

$$n_1\theta = n_2\phi$$

Par géométrie on a aussi

$$\alpha = \frac{x}{p} \qquad \theta = \frac{x}{p} + \frac{x}{r} \qquad \phi = \frac{x}{r} - \frac{x}{p'}$$

En substituant θ et φ dans la loi de Snell, on obtient

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_1}{r} = \frac{n_2}{r} - \frac{n_2}{p'}$$

$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_1}{r}=\frac{n_2}{r}-\frac{n_2}{p'}$$

peut être réarranger en

$$\boxed{\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{p'}=\frac{n_2-n_1}{r}}$$

et si $n_1 = 1$ (air) et $n = n_2$

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{n}{p'}=\frac{n-1}{r}}$$

Équation du dioptre sphérique

qui permettent de calculer ***p'*** à partir de ***p*** et ***r***

Lentilles – calcul de la position de l'image

On calcule deux réfractions consécutives:

1: Air – verre → $$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i'} = \frac{n_2 - n_1}{r_1} \qquad (1)$$

2: Transmission dans le verre

3: Verre – air → $$\frac{n_2}{L - i'} + \frac{n_1}{p'} = \frac{n_1 - n_2}{r_2} \qquad (2)$$

i' = position de l'image intermédiaire

si L est petit (lentille mince)
on prend L=0 et l'éq. (2) devient:

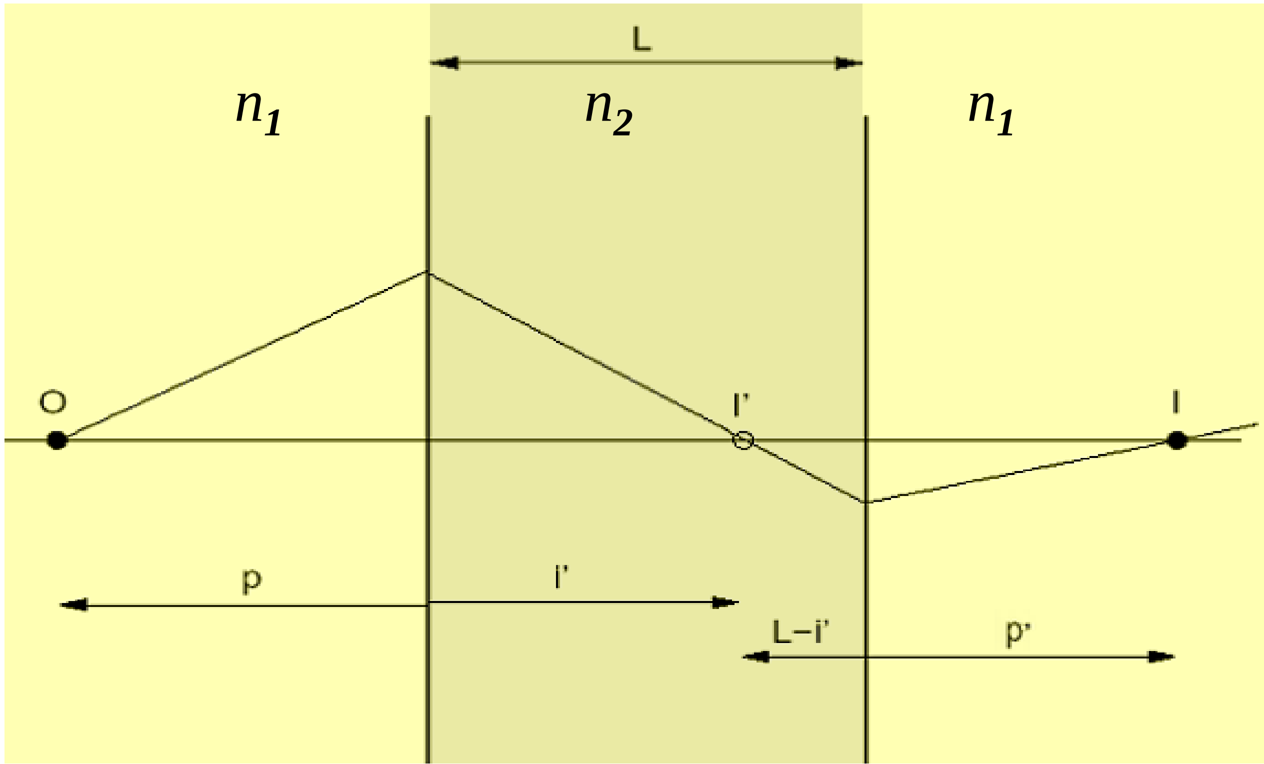
$$-\frac{n_2}{i'} + \frac{n_1}{p'} = \frac{n_1 - n_2}{r_2} \qquad (2a)$$

et par la somme de (1) et (2a)
on obtient:

$$\boxed{\frac{n_1}{p} + \frac{n_1}{p'} = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

et, si $n_1 = 1$:

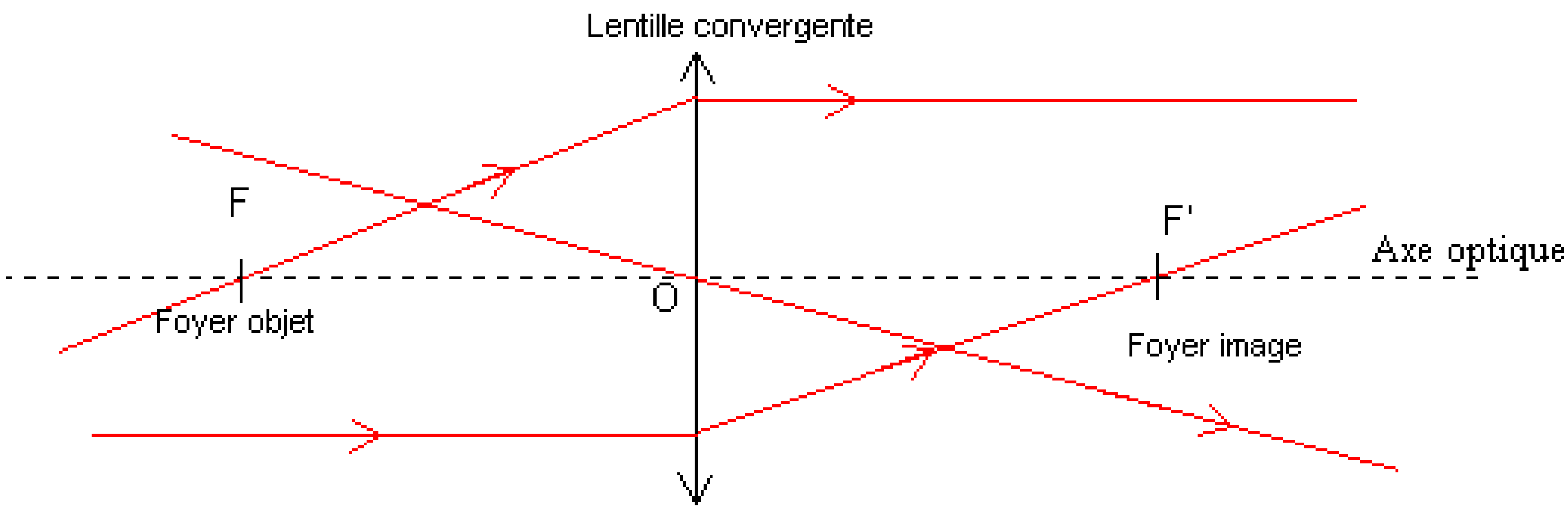
$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

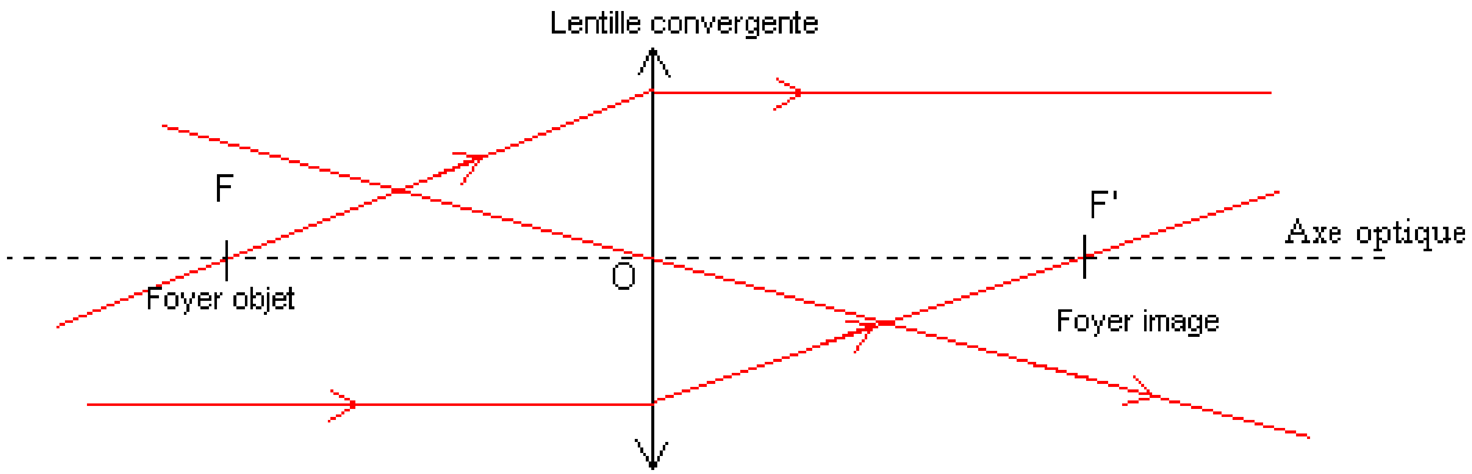


Lentilles –foyers et distances focales

- On appelle **foyer image** l'image d'un objet situé à l'infini: c'est donc le point où focalisent des rayons qui se propagent **parallèlement à l'axe optique**.

- On appelle **foyer objet** le point dont l'image est située à l'infini: les rayons issus de ce point se propagent — après traversée de la lentille — **parallèlement à l'axe optique**.





- De l'équation précédente: $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$

  on déduit donc: $\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$

  distance **focale** d'une lentilles mince

  et enfin: $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$ (formule de Gauss)

Résumé des équations pour les lentilles minces

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)}$$

Relation entre position objet, image et les <u>deux</u> rayons de courbure

$$\boxed{\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)}$$

Relation entre distance focale et les <u>deux</u> rayons de courbure

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}}$$

Relation entre position objet, position image et distance focale

L'inverse de la distance focale est la <u>**vergence**</u>

$$\boxed{\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

Vergence d'une lentille mince
[m^{-1}] ou [dioptrie]

Dans le cas plus général d'une lentille (d'indice $\boldsymbol{n_2}$) dans un milieu quelconque, on a:

$$\boxed{V = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

Conventions de signe pour les lentilles

- La focale f est **positive** pour une lentille convergente, **négative** pour une lentille divergente.
- p est positif si l'objet est réel, négatif s'il est virtuel.
- p' est positif si l'image est réelle, négatif si elle est virtuelle.
- r_1 et r_2 , les rayons de courbure des faces sphériques sont comptés positivement si le centre de courbure est du côté émergent du faisceau, et négativement dans le cas contraire. Dans le cas de la lentille biconvexe, on a r_1 positif et r_2 négatif.

Quelques visualisations à propos de la distance focale: banc optique virtuel

http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/GVA_05/simulations/optique/bancopt.html

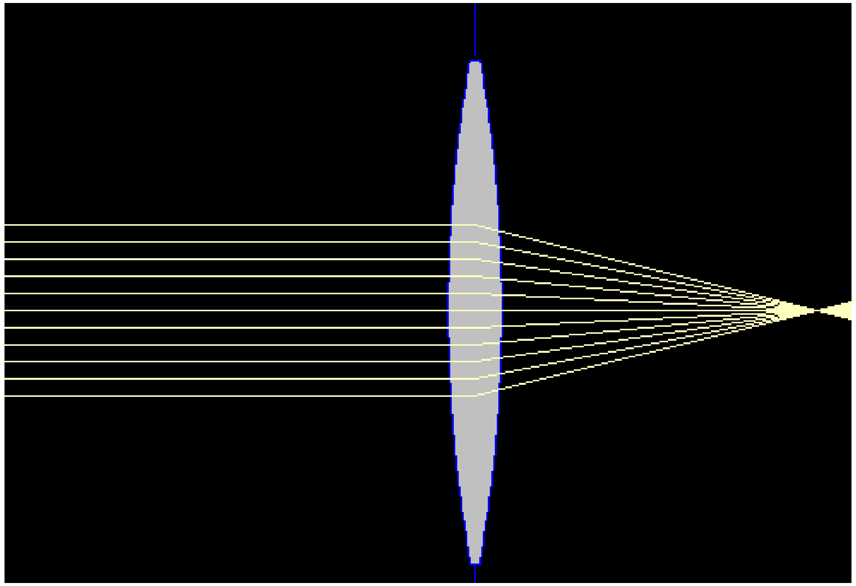
1. Lentille, faisceau, source
2. Une faisceau parallèle converge au foyer de la lentille
3. Si on change orientation du faisceau parallèle, l'image se déplace verticalement, donc dans le même **plan focal**
4. Une source au foyer d'une lentille produit un faisceau parallèle
5. Si on déplace la source dans le plan focal, on obtient on faisceau parallèle **orienté**
6. Une lentille divergente fait **diverger** un faisceau parallèle
7. Sur un faisceau convergent, elle en modifie la convergence, peut le rendre **parallèle ou divergent** …

Exercices

1. On a un faisceau (laser) parallèle émis avec un diamètre D_1 = 20 mm.
   <u>On veut le focaliser à une distance de 200 mm</u>.

   a) Calculer le rayon de courbure des faces de la lentille biconvexe nécessaire.

   b) Vérifier que les hypothèses de l'approximation paraxiale restent valables

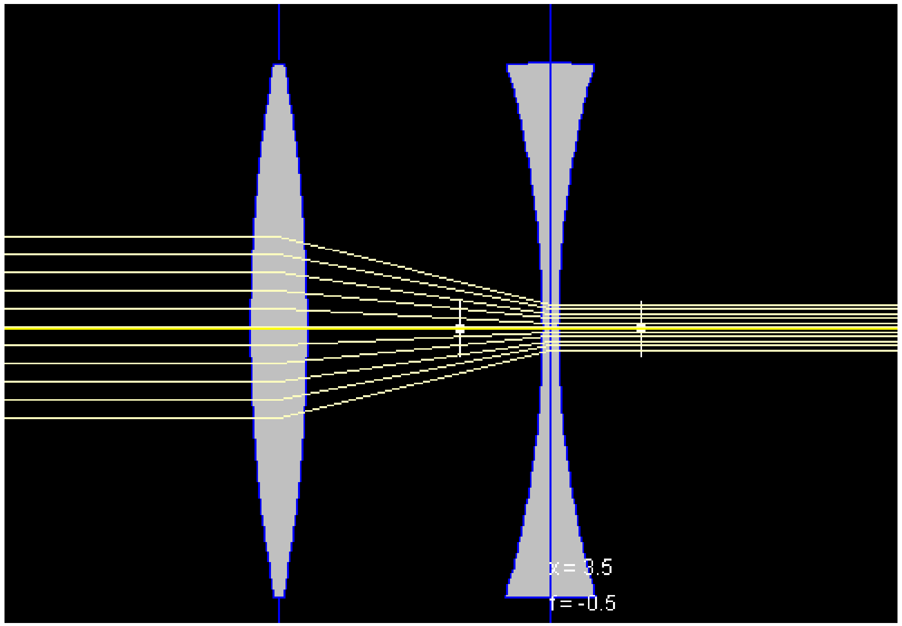


2. On veut réduire le diamètre d'un faisceau parallèle émis avec un diamètre D_1 = 20 mm à D_2 = 5 mm.

   a) Définir deux lentilles pour faire cette réduction sur moins de 200 mm:
   une convergente + une divergente

   b) calculer leur position relative

   c) Calculer les rayons de courbure des faces des lentilles

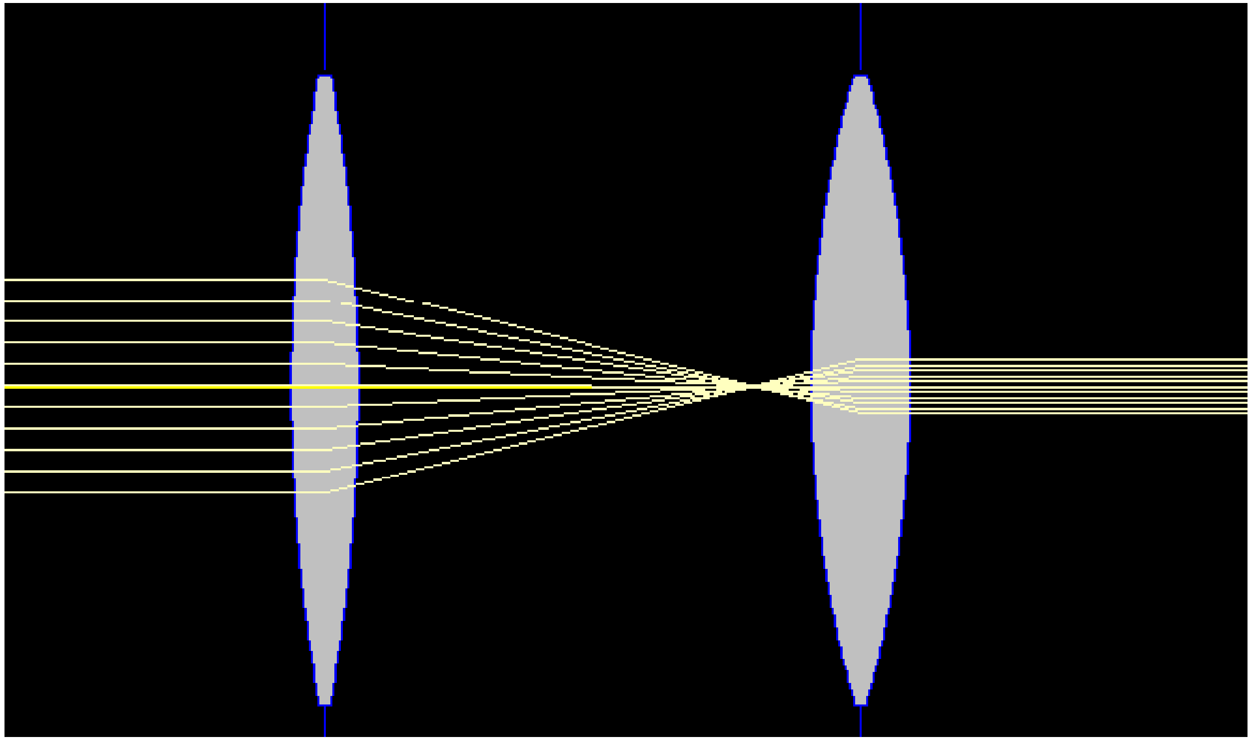


3. On veut réduire le diamètre d'un faisceau parallèle émis avec un diamètre $D_1 = 20$ mm à $D_2 = 5$ mm.

   a) Définir deux lentilles **convergentes** pour faire cette réduction

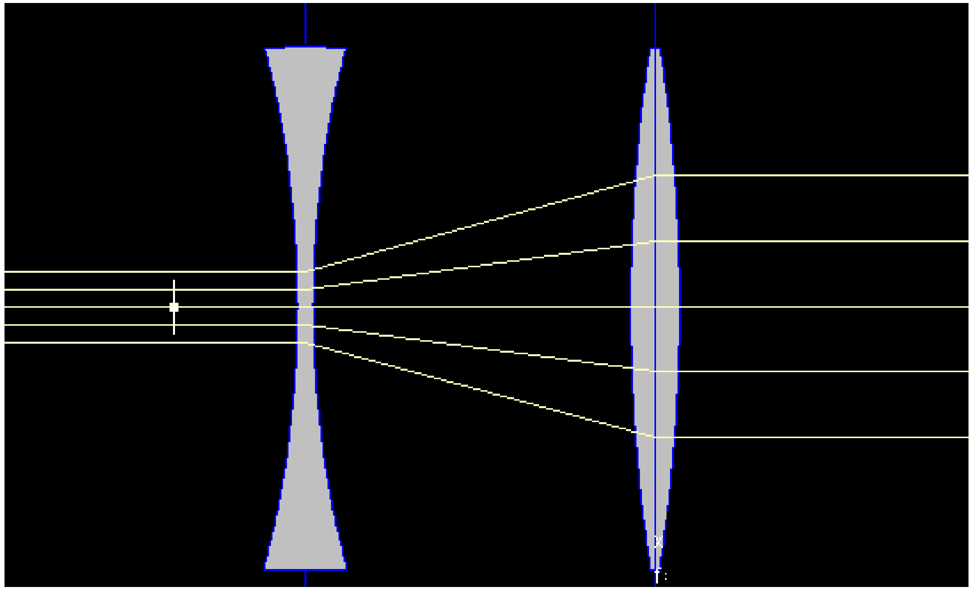
   b) calculer leur position relative

   c) Calculer les rayons de courbure des faces des lentilles



Travail personnel

1. On veut augmenter le diamètre d'un faisceau parallèle émis avec un diamètre D_1 = 2 mm à D_2 = 10 mm.
   - Définir deux lentilles pour faire cette réduction sur moins de 100 mm: une divergente + une convergente
   - Calculer leur position relative
   - Calculer les rayons de courbure des faces des deux lentilles



2. Effectuer la même augmentation du diamètre avec deux lentilles convergentes

Tracé de rayons

Rappel

1. Un point objet émet ses rayons **dans toutes les directions**

2. **Une partie** de ces rayons est «vue» par la lentille et forme **l'image**

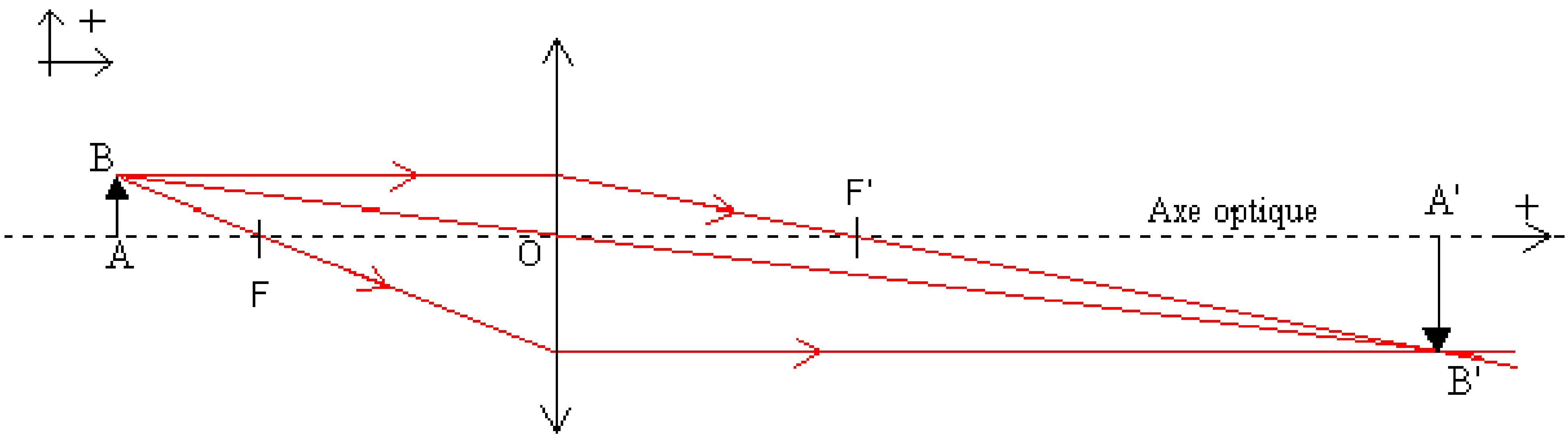
Constructions optiques

Pour effectuer des constructions sur un schéma optique, il est pratique de considérer **trois** rayons particuliers :

1. le rayon **passant par le centre optique** n'est pas dévié (si le milieu est le même de chaque côté de la lentille) ;
2. le rayon **parallèle à l'axe avant la lentille**, qui est dévié ensuite vers le foyer
3. le rayon **passant par le foyer image**, et qui donc devient ensuite parallèle à l’axe

Ceci permet de construire l'image A'B' d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique.

Construction des rayons pour une lentille convergente



Applet

en fait, deux rayons suffisent …

http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/applets_optique/www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/images.html

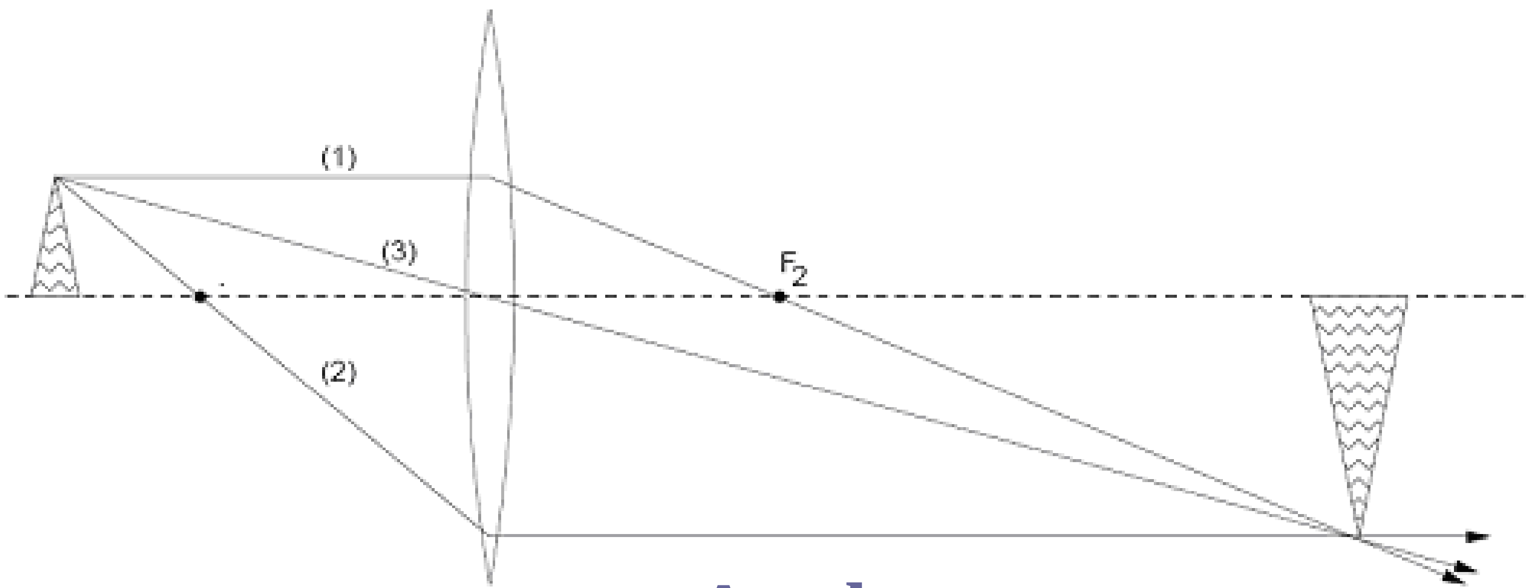
Constructions optiques

Pour effectuer des constructions sur un schéma optique, il est pratique de considérer **trois** rayons particuliers :

1. le rayon **passant par le centre optique** n'est pas dévié (si le milieu est le même de chaque côté de la lentille) ;
2. le rayon **parallèle à l'axe avant la lentille**, qui est dévié ensuite vers le foyer
3. le rayon **passant par le foyer image**, et qui donc devient ensuite parallèle à l'axe

Ceci permet de construire l'image A'B' d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique.

Construction des rayons pour une lentille convergente (cas d'une image virtuelle



Applet

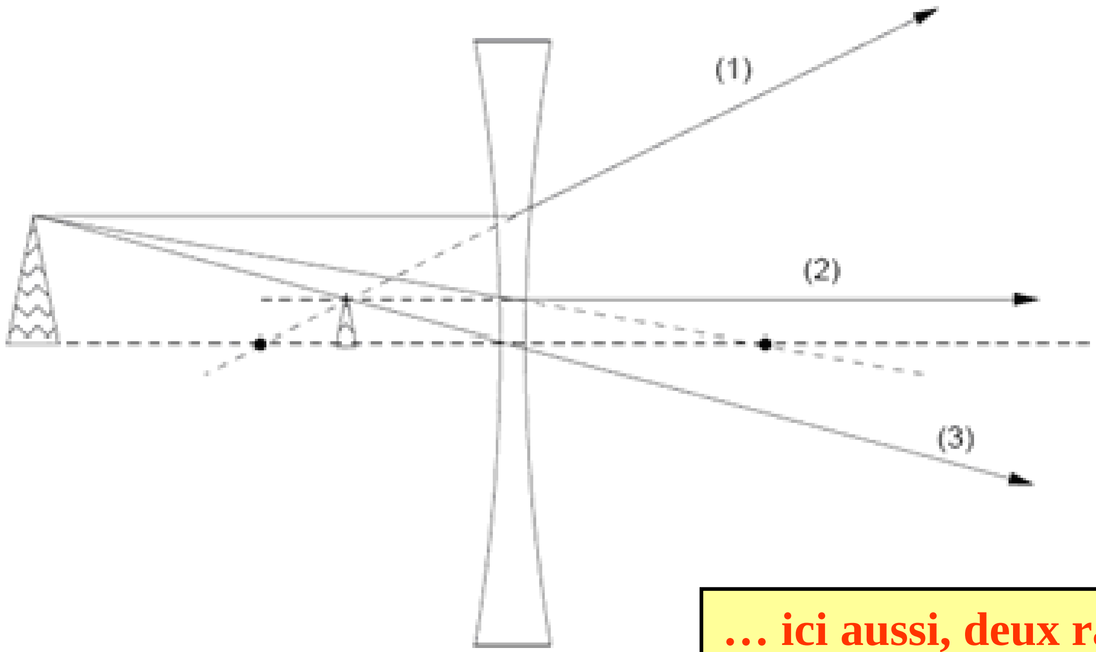
http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/applets_optique/www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/images.html

Constructions optiques

1. le rayon **passant par le centre optique** n'est pas dévié (si le milieu est le même de chaque côté de la lentille) ;
2. le rayon **parallèle à l'axe avant la lentille**, qui est dévié ensuite vers le foyer
3. le rayon **passant par le foyer image**, et qui donc devient ensuite parallèle à l’axe

Ceci permet de construire l'image A'B' d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique.

Construction des rayons pour une lentille divergente



… ici aussi, deux rayons suffisent …

[**Applet**]

http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/applets_optique/www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/images.html

Formules de conjugaison :

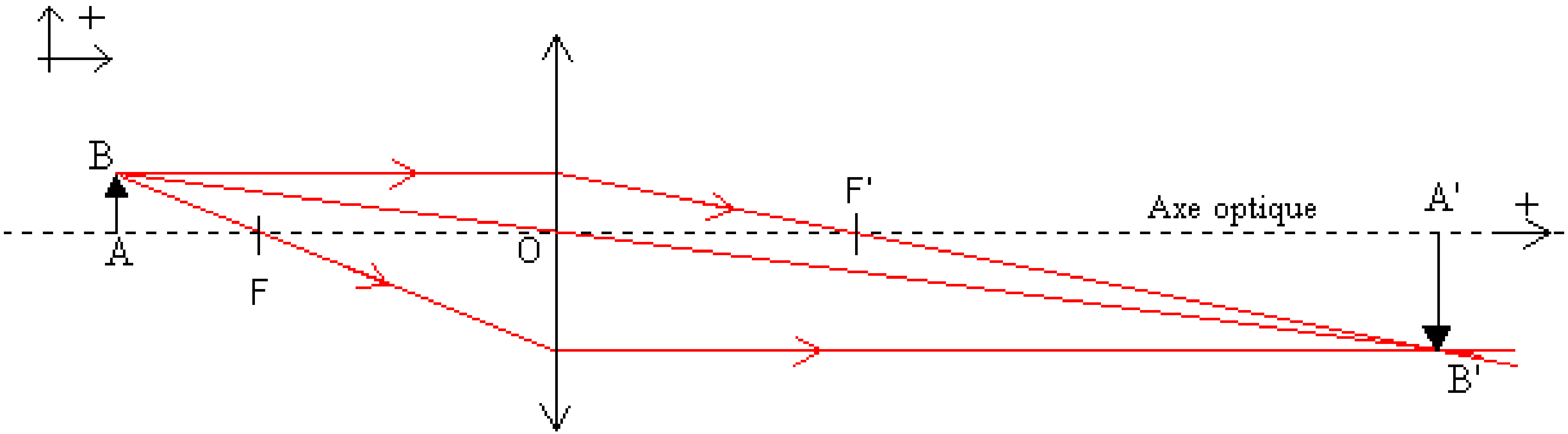
On considère un objet vertical AB dont le point A est situé sur l'axe optique de la lentille à la distance $\overline{OA}$ du centre de la lentille. La position du point image correspondant A' est donné par la relation de conjugaison suivante :

$$\boxed{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}}$$

(**<u>notez</u>**: c'est la formule de Gauss en tenant compte du signe)

La position du point image B' est donné par la relation de grandissement :

$$\boxed{\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}} = \boldsymbol{-\,p'/p}$$



Formation des images avec le banc optique virtuel

http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/GVA_05/simulations/optique/bancopt.html

1. Lentille convergente, objet
2. Objet au delà du foyer: plus l'objet est loin, plus l'image est petite, plus proche est-elle du foyer image.
3. Objet entre foyer et lentille: l'image est virtuelle et agrandie – effet de loupe.
4. Lentille divergente, objet
5. L'image est toujours virtuelle

Exercice

Calcul de la position de l'image

Si on connaît *f* et *p* – position de l'objet

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}}$$

Relation entre position objet, position image et distance focale

$$p' = 1 / (1/f - 1/p)$$

Calculer la position de l'image d'un objet de 30 mm de haut placé à 750 mm d'une lentille de 250 mm de focale.
Quel est le grandissement ?

Exercice

On veut former une image agrandie deux fois à l'aide d'une lentille biconvexe avec le rayon de courbure de 1000 mm. Trouver les positions de l'objet et de l'image par rapport à la lentille.

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Relation entre distance focale et les <u>deux</u> rayons de courbure

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

Relation entre position objet, position image et distance focale

Travail personnel

- Chapitres 5 et 6 du polycopié, avec leurs exercices

Travail personnel: exercices

1. On utilise une lentille mince positive pour projeter l'image agrandie 100 fois d'une diapositive sur un mur à 10 m.   Calculer la focale de la lentille et sa distance à la diapositive.
   (f = 0.099 m,   p = 0.1 m)

2. Une lentille mince de focale 25 mm forme une image réelle distante de 26 mm.   Quelle est la taille de l'objet qui forme une image qui a la dimension de 2 mm ?   (50 mm)

3. Une lentille mince positive de focale 240 cm donne d'un objet de 5 cm une image droite (non-inversée) de 8 cm.   Calculer les positions de l'objet et son image. (p = 90 cm, p'= -144 cm)

Lentilles minces

Résumé et quelques définitions …

Relation de conjugaison

- La relation de conjugaison relie la position d'un objet à celle de son image par un système optique.

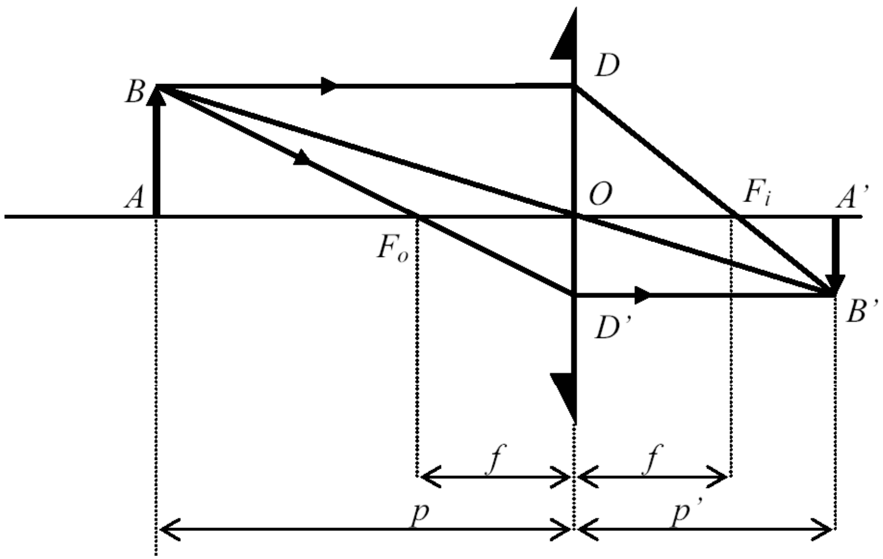
- Elle tire son nom du fait qu'en optique géométrique, dans les conditions de stigmatisme, lorsque tous les rayons issus d'un point objet émergent en sortie du système en un point unique, ce point est appelé image conjuguée du point objet.

- On dit aussi alors que les deux points sont conjugués.

Formule de conjugaison

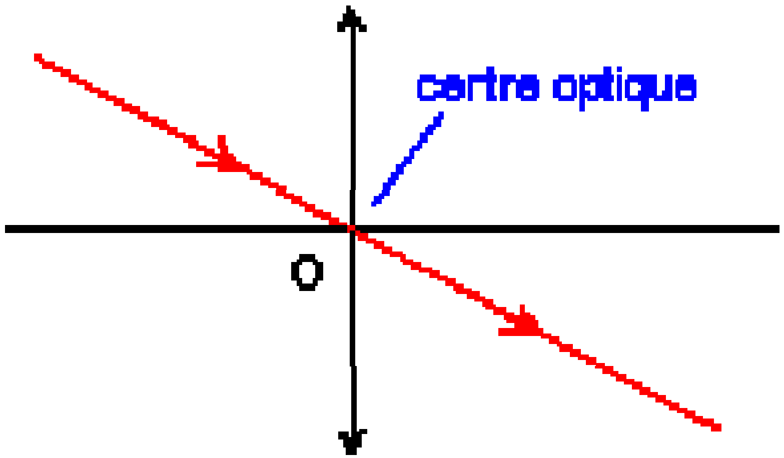
- Pour les lentilles minces, dont les points principaux sont confondus en un point appelé centre optique (noté O), on parle de formule avec origine au centre. Elles sont exprimées avec des distances algébriques.

- Soit A un point de l'axe optique et A' son image par la lentille :



$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF}} = \frac{1}{f'}$$

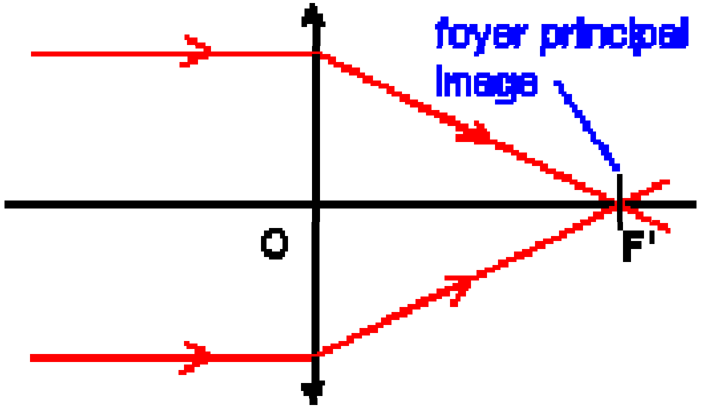
Centre optique (lentilles minces)



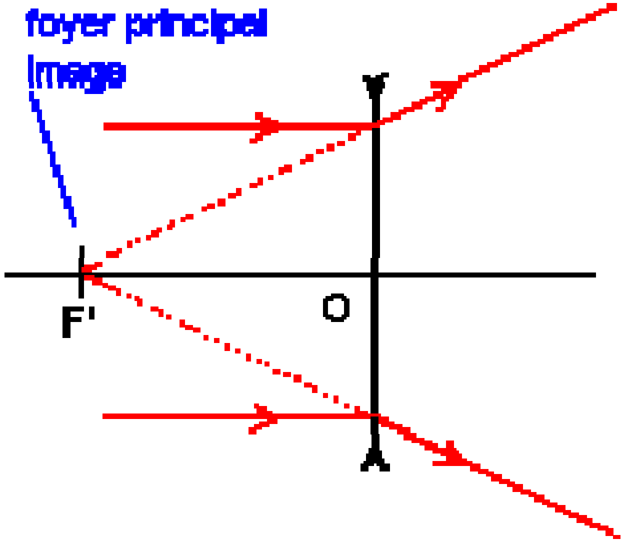
Un rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.

Foyers principaux

Foyer principal image:

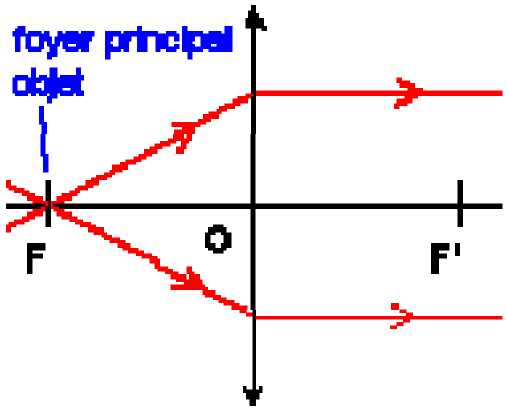


Tout rayon incident parallèle à l'axe principal d'une **lentille convergente** émerge en passant par le foyer **principal image F'**.



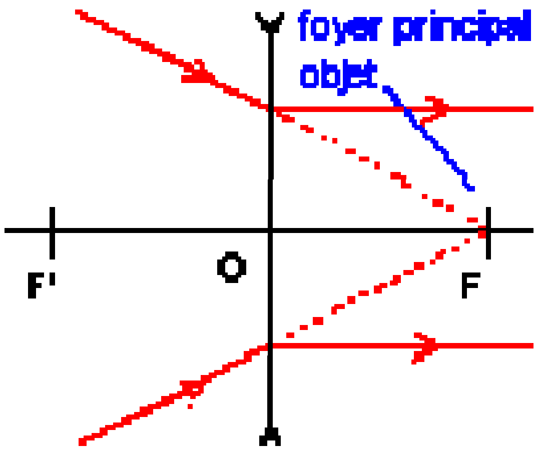
Tout rayon incident parallèle à l'axe principal d'une **lentille divergente** émerge en semblant provenir du **foyer principal image F'**.

Foyers principaux



Foyer principal objet:

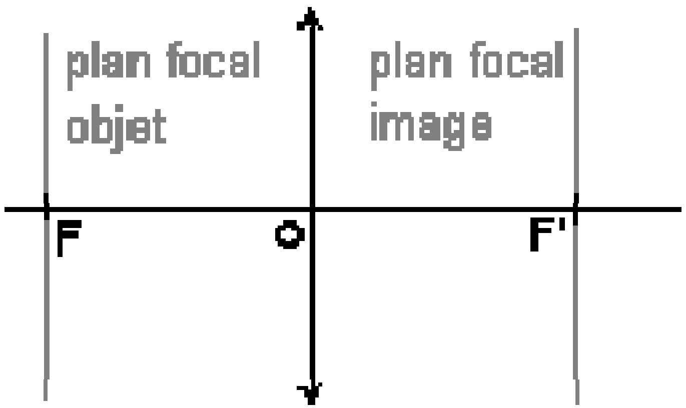
Tout rayon incident passant par le foyer principal objet F d'une lentille convergente émerge parallèlement à l'axe principal de cette lentille.



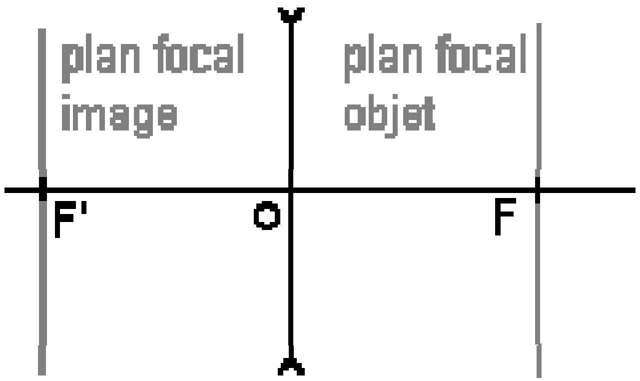
Tout rayon incident semblant passer par le foyer principal objet F d'une lentille divergente émerge parallèlement à l'axe principal de cette lentille.

Plan focal

On appelle **plan focal** le plan passant par un foyer et orthogonal à l'axe optique.



Lentille convergente



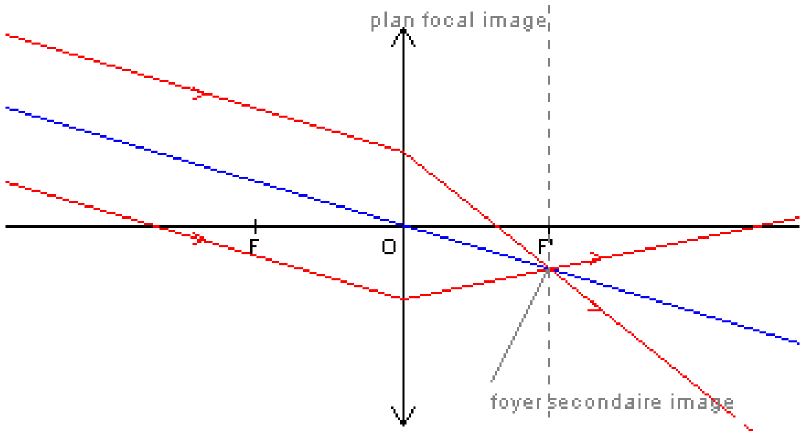
Lentille divergente

Foyers secondaires

Un point situé dans le plan focal (objet ou image) est appelé foyer secondaire (objet ou image).

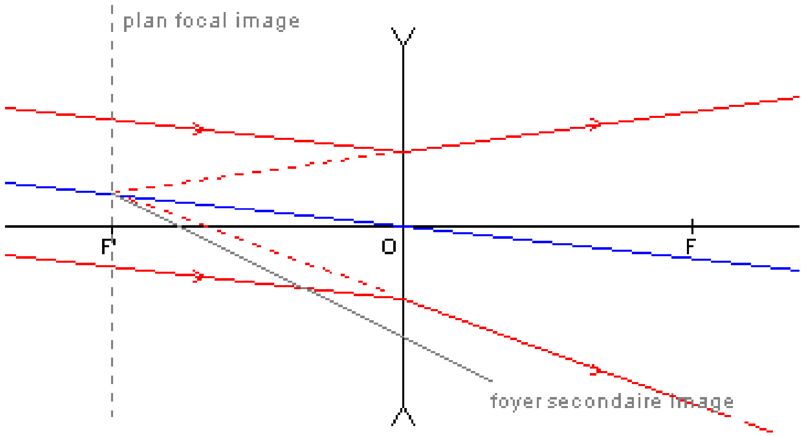
Foyers secondaires image d'une lentille convergente

Un faisceau parallèle à un axe secondaire SO d'une lentille convergente émerge en passant par le point S, intersection du plan focal image et de l'axe secondaire.



Foyers secondaires image d'une lentille divergente

Un faisceau parallèle à un axe secondaire SO d'une lentille divergente émerge en semblant provenir du point S, intersection du plan focal image et de l'axe secondaire.



(Rappel)
L’inverse de la distance focale est la **vergence**

$$\boxed{\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

Vergence d’une lentille mince
[m^{-1}] ou [**dioptrie**]

Dans le cas plus général d’une lentille (d’indice $\boldsymbol{n_2}$) dans un milieu quelconque, on a:

$$\boxed{V = \frac{1}{f} = (\frac{n_2}{n_1} - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

Conventions de signe pour les lentilles (important !)

- La focale f est **positive** pour une lentille convergente, **négative** pour une lentille divergente.
- p est positif si l'objet est réel, négatif s'il est virtuel.
- p' est positif si l'image est réelle, négatif si elle est virtuelle.
- r_1 et r_2 , les rayons de courbure des faces sphériques sont comptés positivement si le centre de courbure est du côté émergent du faisceau, et négativement dans le cas contraire. Dans le cas de la lentille biconvexe, on a r_1 positif et r_2 négatif.

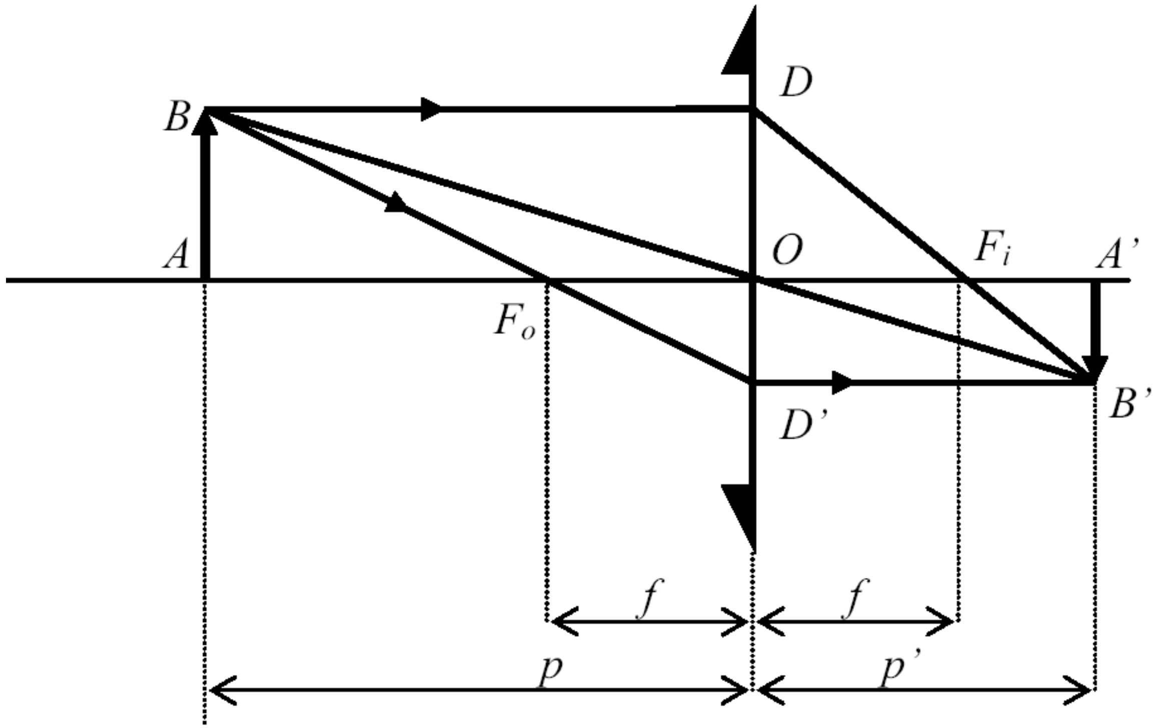
Grandissement

- On appelle **grandissement**
  le rapport entre la taille de l'image et la taille de l'objet.

- Ce rapport est positif si l'image est droite.

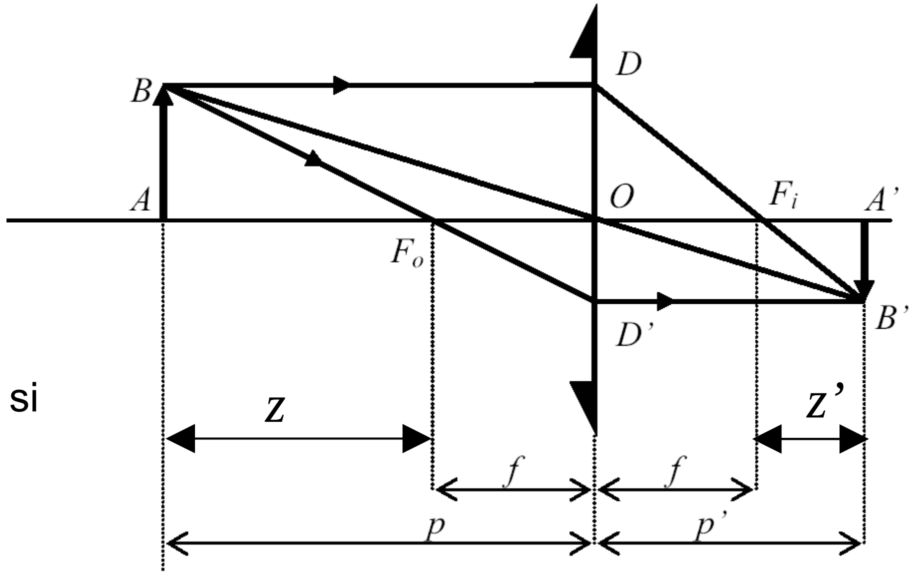
- Ce rapport est négatif si l'image est renversée.

Grandissement



Comme $\boxed{\dfrac{A'B'}{AB} = \dfrac{p'}{p} = \dfrac{f}{p-f}}$ on a $\boxed{G = -\dfrac{A'B'}{AB} = -\dfrac{p'}{p}}$

Formule de Newton



Soit *z* la distance de l'objet au foyer objet, positive si l'objet est placé devant le foyer objet:

$$z = AF_o = p - f$$

Soit *z'* la distance de l'image au foyer image, positive si l'image se trouve après le foyer image:

$$z' = A'F_i = p' - f$$

Multiplions:

$$zz' = (p - f)(p' - f) = pp' - pf - p'f + f^2$$

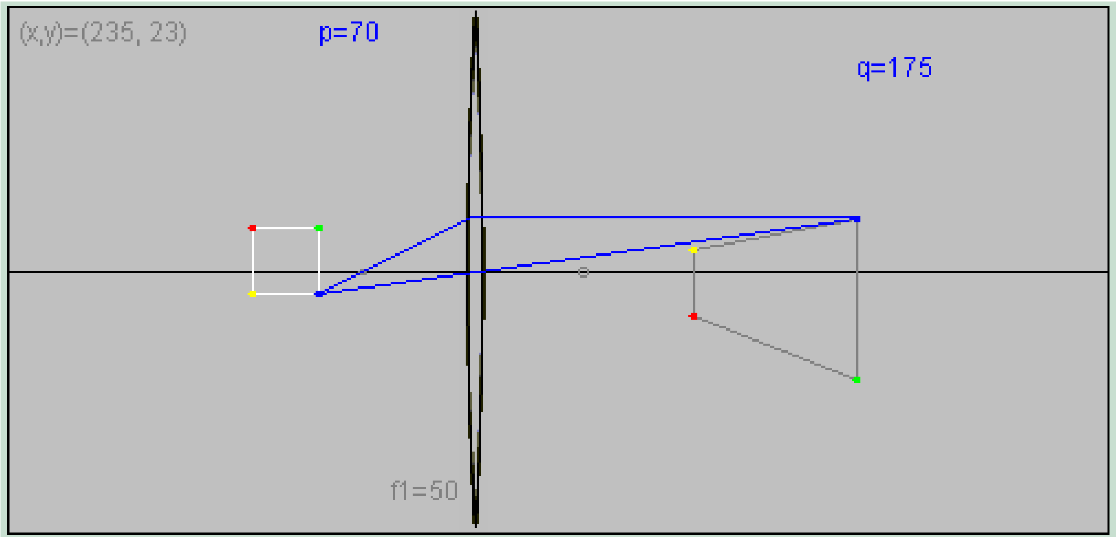
Compte tenu que $(pp' - pf' - p'f) = 0$, on obtient la formule de Newton (pour les lentilles):

$$zz' = f^2$$

Ce qui donne pour le grandissement

$$\boxed{G = \frac{p - f}{f} = \frac{z}{f} = -\frac{f}{z'}}$$

Grandissement **longitudinal**



[Applet](http://www.schulphysik.de/ntnujava/thinLens/thinLens.html)

http://www.schulphysik.de/ntnujava/thinLens/thinLens.html

Problèmes

1. Calculer la distance focale d’une lentille plan-concave (*n* = 1,5) de 10 cm de rayon de courbure.
   Quelle est sa vergence en dioptries.

2. Soit une lentille mince de focale f .
   Montrer que la distance minimal entre un objet **réel** et son image **réelle** est $4f$.

   (on peut commencer par explorer la question sur le banc optique virtuel …)

Problèmes

3. Un expérimentateur voudrait placer un objet 45 cm devant une lentille et projeter son image à 90 cm à l'arrière.

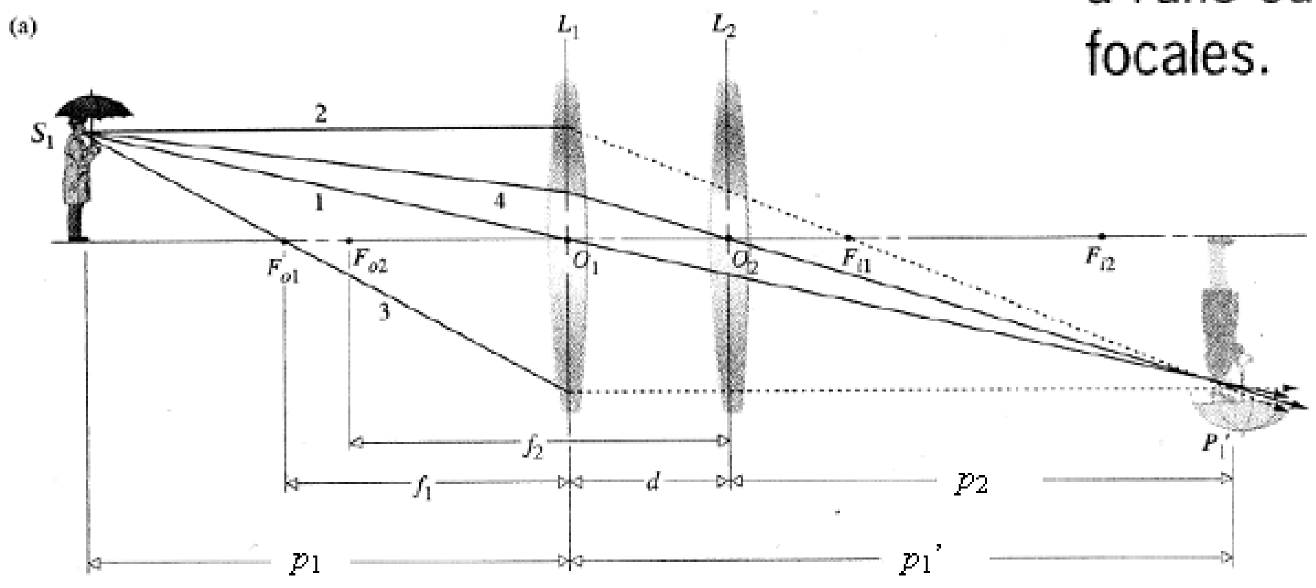
   Quelle est la focale de la lentille convergente appropriée ?

   Quel est le rayon de courbure dans le cas d'une lentille plan-convexe ?

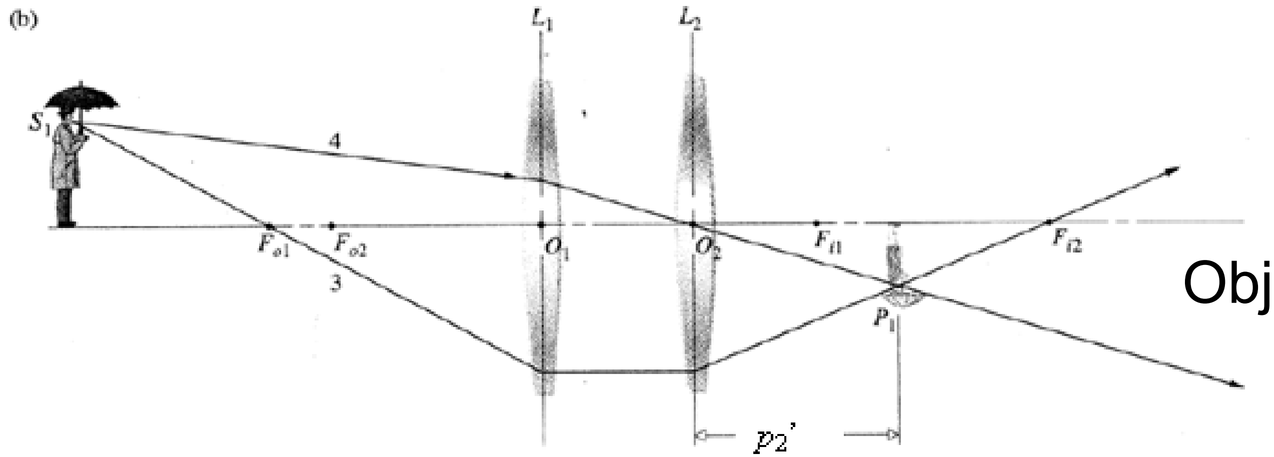
Associations de lentilles minces

Méthode du tracé des rayons

Deux lentilles minces séparées par une distance inférieure à l'une ou l'autre des deux distances focales.



Objet intermédiaire



Objet final

Tracé des rayons pour lentilles séparées de plus que la somme de leurs distances focales

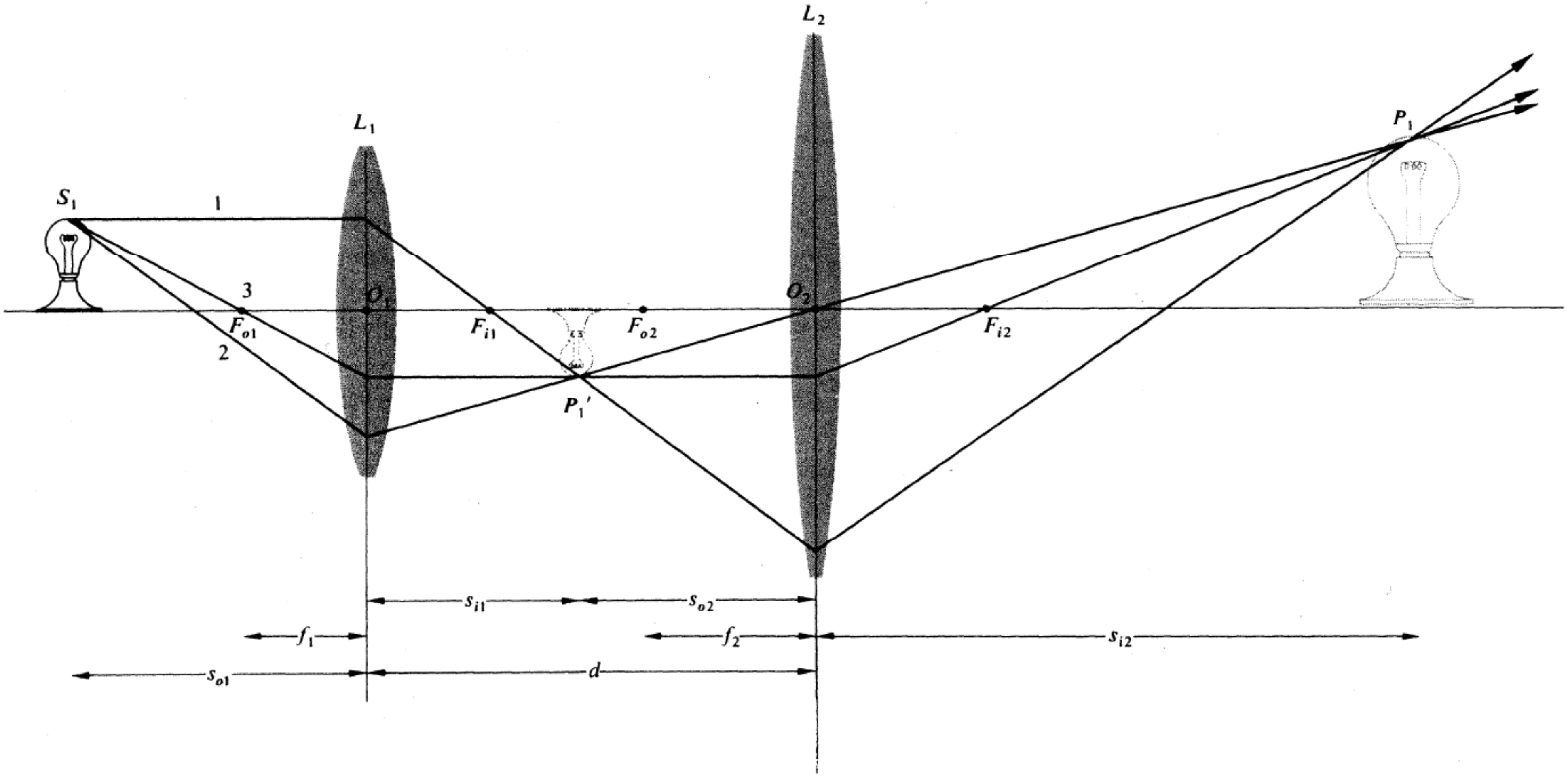
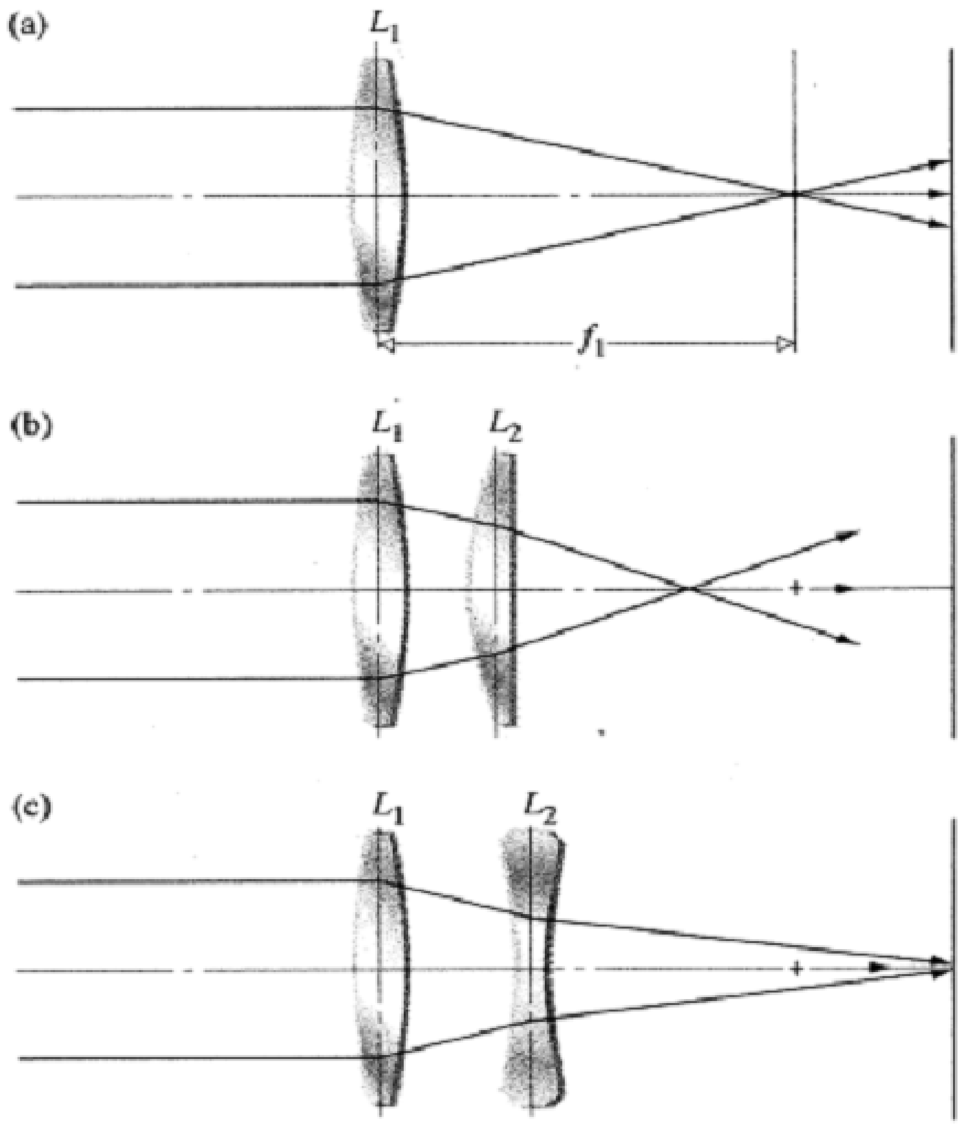


Figure 5.30 Deux lentilles séparées par une distance supérieure à la somme de leurs distances focales. Comme l'image intermédiaire est réelle, elle joue le rôle d'objet réel pour L_2. Ainsi, le rayon passant par P_1' et par F_{o2} arrive en P_1.



Insertion d'une lentille

(a) Effet de l'insertion d'une deuxième lentille L_2 entre le foyer image et une lentille convergente L_1. (b) Lorsque L_2 est positive, son insertion augmente la convergence du faisceau. (c) Dans le cas où L_2 est négative, c'est de la divergence qui est ajoutée.

Calcul des associations de lentilles minces

1. Méthode graphique: tracés de rayons

2. Méthode itérative:

$$p_1' = \frac{f_1 p_1}{p_1 - f_1}$$

$$p_2 = d_{2-1} - p_1'$$

$$p_2' = \frac{f_2 p_2}{p_2 - f_2}$$

$d_{2\text{-}1}$ = distance entre les lentilles 1 et 2

p_1 = position de l’objet par rapport à la première lentille

p_1' = position de l’image produite par la première lentille

f_1 = focale de la première lentille

p_2 = position de l’image de la première lentille par rapport à la deuxième lentille

f_2 = focale de la deuxième lentille

p_2' = position de l’image de la deuxième lentille

Calcul des associations de lentilles minces

Applet

http://www.livephysics.com/tools/optics/two-lens-system-image-distance-and-magnification.html

(pour le cas de deux lentilles)

Grandissement de l'association de deux lentilles

$$G = G_1 G_2$$

Le grandissement $\mathbf{G_1}$ produit par la première lentille est ensuite agrandi dans le rapport $\mathbf{G_2}$ par le seconde lentille.

Exercices

1. Un système est composé de deux lentilles minces biconvexes de focales respectives 10 et 20 cm, séparées par une distance de 20 cm. Tracer les rayons et calculer position et taille de l'image d'un objet de 5 cm, placé 15 cm devant la première lentille.

2. On a deux lentilles minces biconvexes de focales respectives 30 et 50 cm, séparées par une distance de 20 cm.
   Tracer les rayons et calculer position et taille de l'image d'un objet de 5 cm, placé 50 cm devant la première lentille.

Tirage focal

Le tirage focal est la distance du foyer mesurée à partir de la dernière (respectivement première) lentille

- Tirage focal image
  - Si $\boldsymbol{p}$ est à l'infini:

$$p'_2 = Tfi = \frac{f_2(d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)}$$

Mesuré depuis la 2ème lentille

- Tirage focal objet
  - Si $\boldsymbol{p_2}'$ est à l'infini:

$$p = Tfo = \frac{f_1(d - f_2)}{d - (f_1 + f_2)}$$

Mesuré depuis la 1ère lentille

Lentilles (minces) en contact

- Si $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{0}$ on a

$$Tfi = Tfo = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2}$$

- L'association de lentilles a ainsi une focale effective f :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Cette formule est généralisable pour N lentilles minces en contact :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \cdots + \frac{1}{f_N}$$

Travail personnel

- Chapitre 7 du polycopié, avec leurs exercices

Miroirs

- Miroirs plans

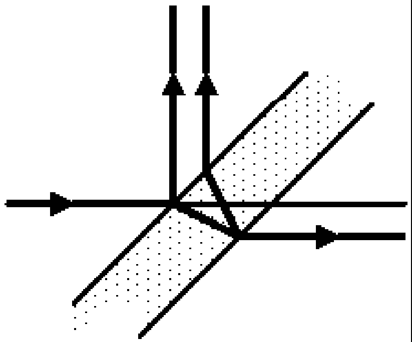
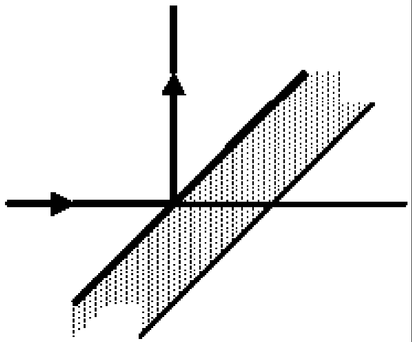
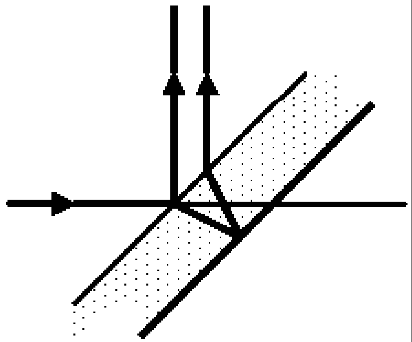
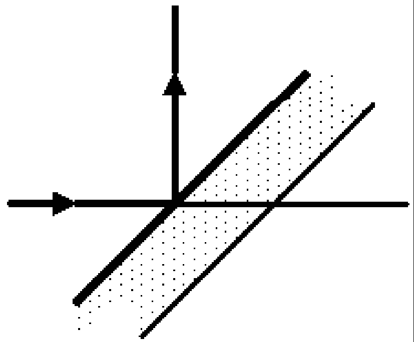
- Miroirs courbes
  - Sphérique
  - Parabolique
  - Elliptique

Miroir plan

- Typiquement utilisé pour orienter ou balayer un faisceau.
- L'angle de rotation mécanique est ½ de l'angle optique.
- Applet

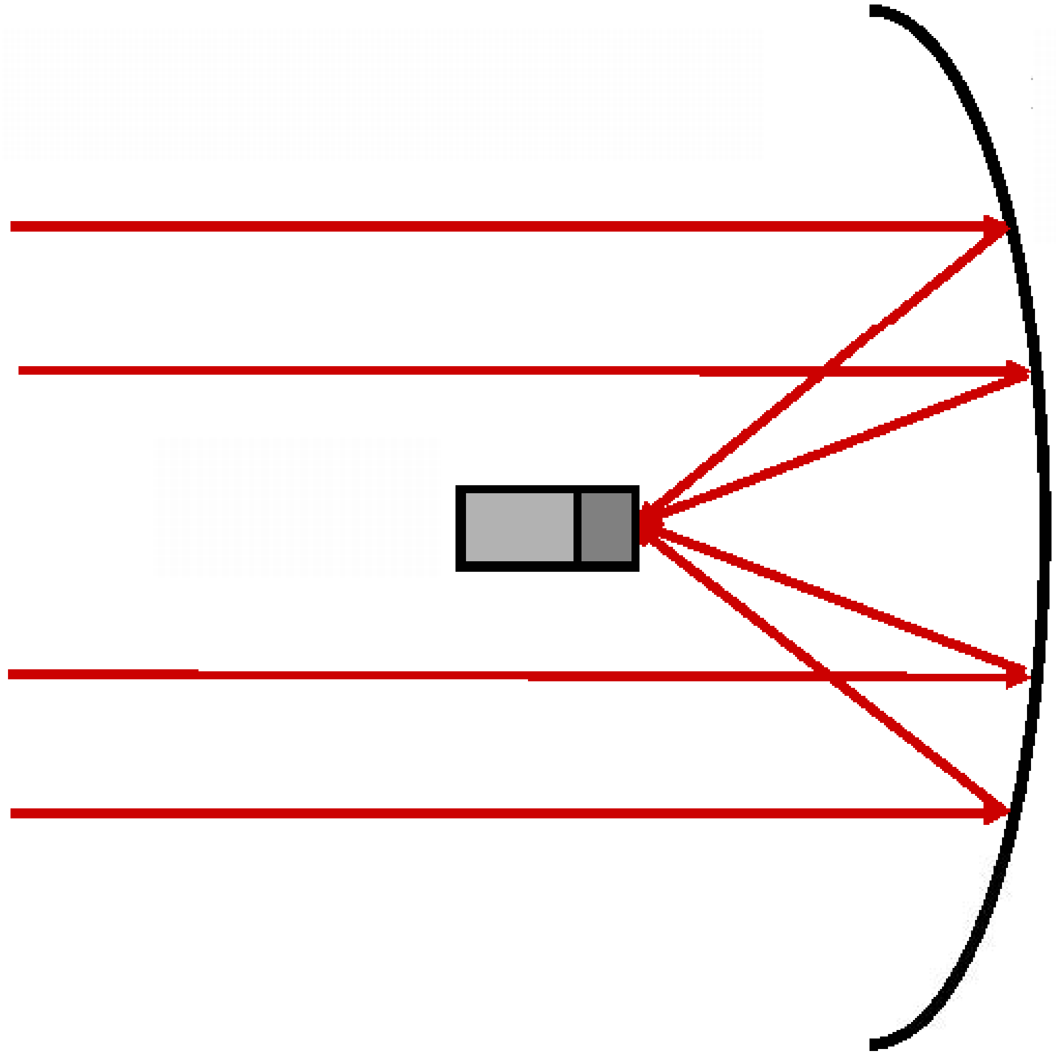
http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/NTNUJAVA/mirrordoubleangle/mirrordoubleangle.html

Types de miroirs plans

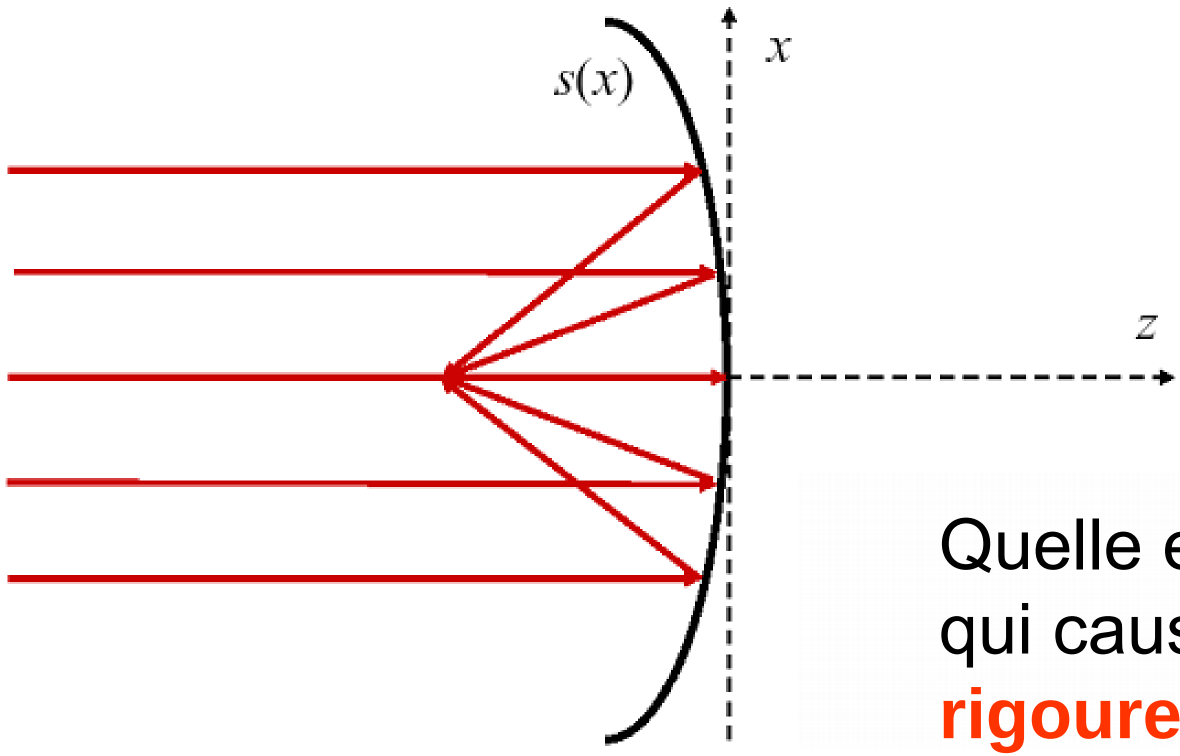
			
Plaque de verre polie	Plaque de métal polie	Verre métallisé (face arrière)	Verre métallisé (face avant)
Facile à usiner			Facile à usiner
Résistant aux agents chimiques		Résistant aux agents chimiques	Surface délicate
Double image	Réflexion parfaite	Double image	Réflexion parfaite
Perte de lumière dans le verre		Perte de lumière dans le verre	
Sans emploi particulier	Eclairage	Glaces, miroirs	Miroirs optiques

La métallisation d'un miroir usuel se fait par un dépôt chimique d'un métal. Pour les miroirs de téléscopes, elle se fait par évaporation sous vide d'un métal (argent, aluminium, titane,…). L'épaisseur de la couche est de l'ordre du micromètre.

Miroirs:
réflexion par une surface courbée

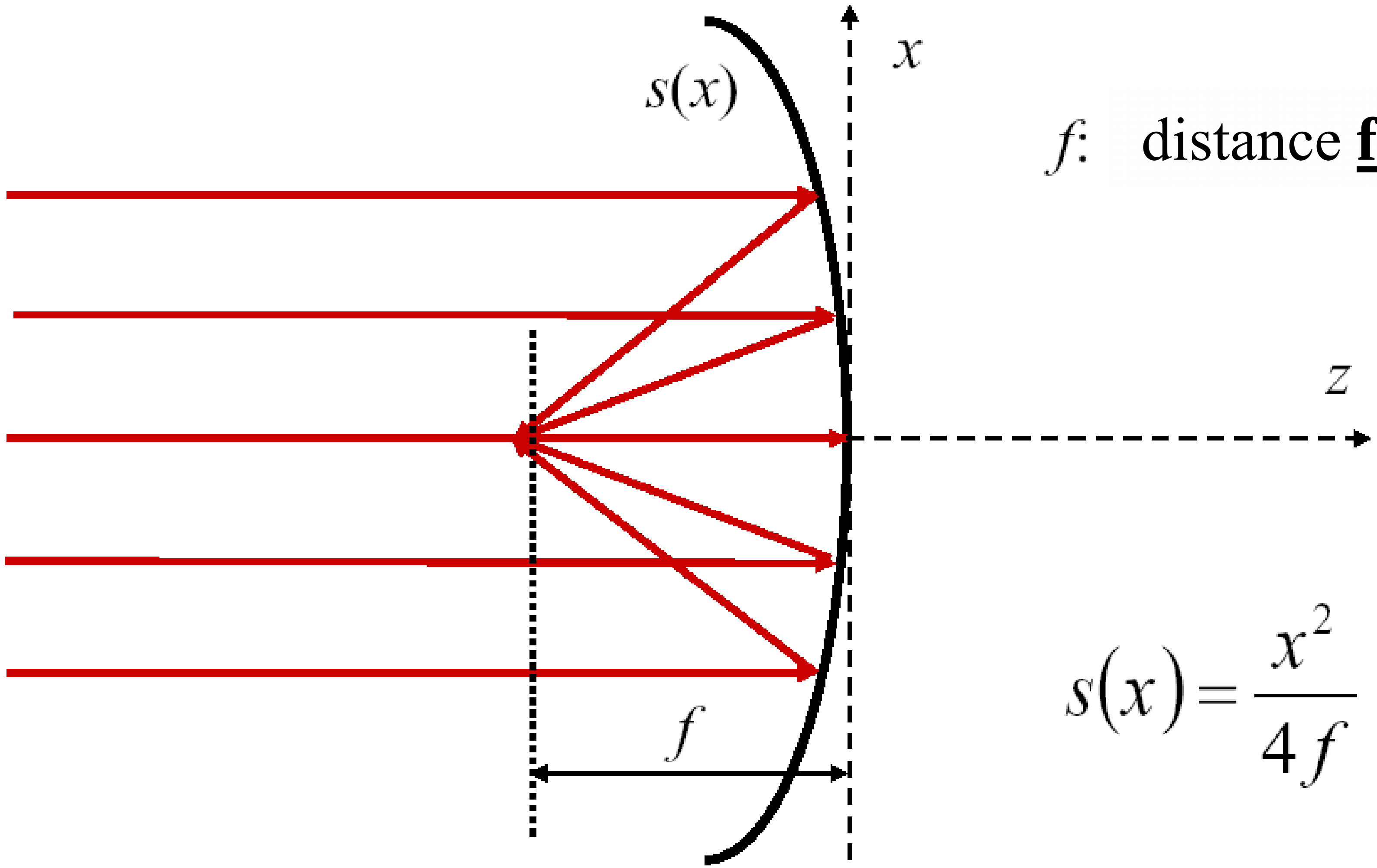


Focalisation par un miroir



Quelle est la fonction z (x,y) qui cause une concentration **rigoureuse** au **foyer** des rayons parallèles ?

Focalisation par un miroir **parabolique (paraboloïde)**



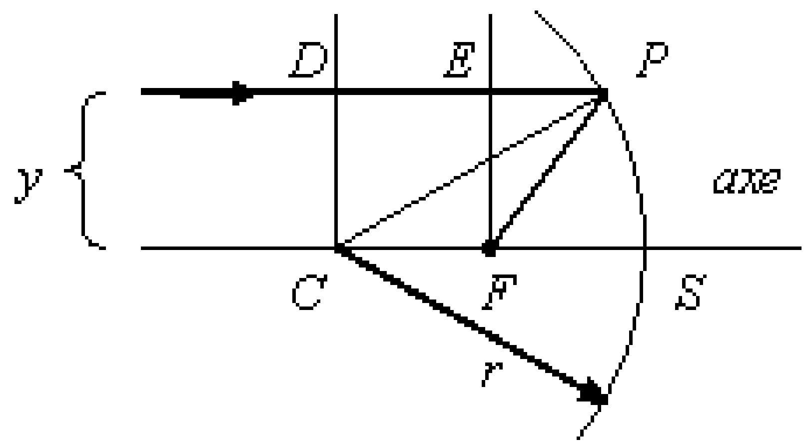
f: distance **focale**

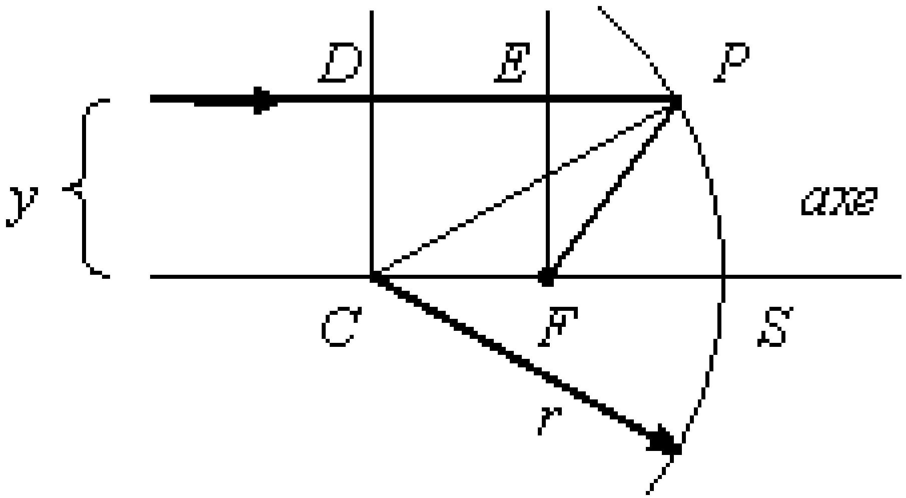
$$s(x) = \frac{x^2}{4f}$$

Miroir sphérique

Peut être considéré comme une approximation d'un miroir parabolique.

Les rayons d'un faisceau étendu ne convergent pas tous en un même point. En revanche les rayons proches de l'axe convergent, avec une bonne approximation en un point F, appelé **foyer**, et **situé sur l'axe à mi-distance entre le miroir et le centre de courbure**.





La distance FS est appelée **distance focale** du miroir.

Pour des miroirs dont l'ouverture est petite par rapport à leur rayon de courbure, les rayons incidents « proches » de l'axe convergent au foyer.

Formule des miroirs sphériques

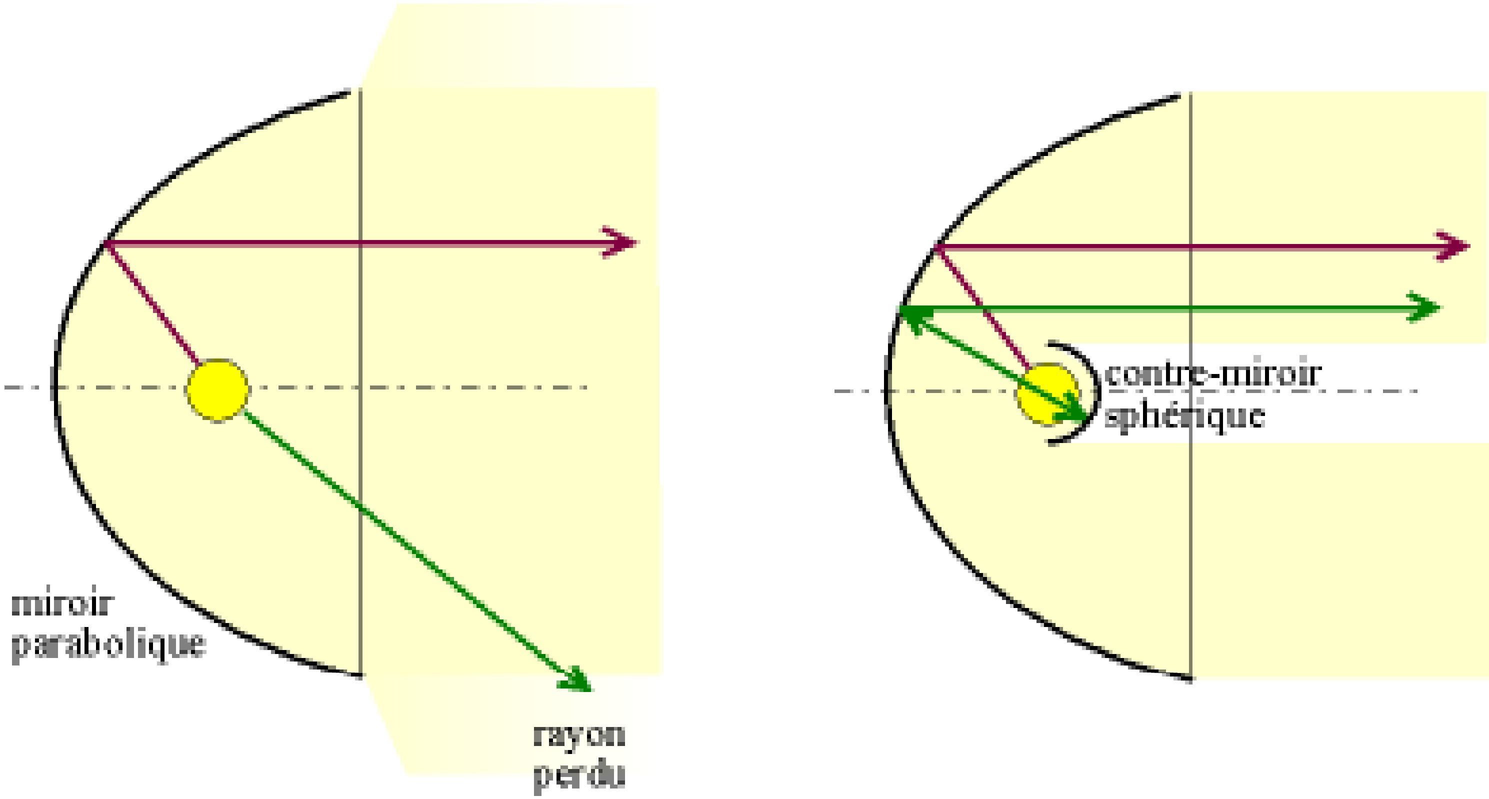
$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$$

Miroirs parabolique et leur distance focale: banc optique virtuel

http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/GVA_05/simulations/optique/bancopt.html

1. Miroir
2. Une faisceau parallèle et réfléchi au foyer d'un miroir concave
3. Si on change orientation du faisceau parallèle, l'image se déplace verticalement, donc dans le même **plan focal**
4. Une source au foyer d'un miroir concave produit un faisceau parallèle
5. Une miroir convexe divergente fait **diverger** un faisceau parallèle

Projecteur à miroir parabolique



Miroir elliptique

Lanterne de projecteur de cinéma.