Cours d'optique

PARTIE I : Optique Géométrique

AP1

2019-2020

Pr. I. EL AOUADI

TABLE DE MATIÈRES :

I – Généralités sur la lumière

L'optique est une science dont les fondements ont été établis avant le XX siècle, depuis le début du siècle, la révolution de la mécanique quantique, et par conséquent de la nature quantique de la lumière a profondément modifié notre façon d'apprécier les phénomènes. Néanmoins, les principes déjà établis n'ont pas été pour autant obsolètes, cette nouvelle vision a simplement permis de préciser les concepts et indiquer les limites de validités, l'optique, branche actuelle de l'électromagnétisme, c'est développée difficilement, les applications (lentilles correctrices,…) ont été en avance sur la compréhension de la nature de la lumière.

1- Une brève histoire de l'optique

Depuis l'antiquité, la lumière a toujours fasciné l'esprit humain par ses aspects multiples et son caractère mystérieux. Elle est apparue dans l'histoire 4 000 ans avant Jésus-Christ avec les Sumériens qui utilisaient la lumière et les astres pour prédire le quotidien et pour concentrer la lumière afin de créer du feu. Vers 2 500 avant J.C. les miroirs de métal polis étaient déjà connus et l'usage du verre commença à se répandre. Les peuples khmers, chinois et mayas se livraient même à des calculs et inventaient des instruments d'observation astronomiques des "lumières célestes".

Les grandes dates

- **Ibn al-Haytham (Alhazen)** 965-1039: physicien arabe, comprend le premier que l'œil n'émet pas de rayon venant « scruter» les objets mais que ceux-ci, éclairés par des sources, sont à l'origine de rayons lumineux rectilignes. Il a aussi essayé de trouver une loi entre les rayons incidents et réfractés

- **Lippershey** 1587-1619 : télescope par réfraction

- Lois de **Snell** (1622, non rendues publiques) -**Descartes** (1637) : réflexion et réfraction pour une onde plane incidente sur un dioptre (surface de séparation entre deux milieux).

- **Fermat** 1662 : énonce son principe sur le chemin optique :un rayon lumineux entre 2 points est stationnaire.

- **Hooke** 1665 : aspect ondulatoire

- **Newton** 1704: la lumière blanche peut être décomposée, notion de couleur. La première théorie relative à la nature de la lumière: constituée de grains d'une nature imprécise se propageant à très grande vitesse.

- **Römer** 1675 : vitesse finie de la lumière (éclipse de satellite de Jupiter)

- Principe **d'Huygens** 1690 : tout point de l'espace se comporte comme une source d'ondes secondaires. Notion de polarisation et d'onde transverse de la lumière (aspect ondulatoire de la lumière).

- Diffraction par **Young** 1801 : la lumière est propagée par le mouvement vibratoire d'un milieu hypothétique, *l'éther*. *(nature ondulatoire de la lumière).*

- Théorème de **Malus** 1808 : les surfaces d'onde émises par une source ponctuelle sont orthogonales aux rayons lumineux issus de cette source.

- **Fresnel** 1818 : synthèse des travaux sur la nature ondulatoire (principe d'interférence), 1821 : origine de la dispersion

- - **Maxwell 1876** : la théorie électromagnétique : l'onde lumineuse est une onde électromagnétique constituée par un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires se propageant dans le vide avec la vitesse $c = 299790\ km/s$

la lumière est une onde électromagnétique qui vibre à une fréquence de $5.10^{14}\ Hz$ et se propage dans le vide à la vitesse $c=3.10^{8}\ ms^{-1}$.

- **Planck *1900*** : rayonnement du corps noir, la couleur d'un corps chauffé est une indication de sa température

- **Einstein *1905*** : montre que les lois de l'effet photoélectrique établies par Philip Lenard (1862-1947) ne peuvent s'interpréter que si on introduit de façon beaucoup plus radicale que ne l'avait fait Planck un corpuscule, le photon, auquel il associe une énergie cinétique et une quantité de mouvement

- Entre *1945* et *1950*, R. Feymann, S.I. Tomonaga et J. Schwinger développent la théorie de l'électrodynamique quantique qui, même exposée simplement, permet une interprétation cohérente des phénomènes ondulatoires et corpusculaires.

2- Nature de la lumière

Les premières théories relatives à la nature de la lumière furent énoncées au cours du XVIIème siècle. Deux théories apparemment contradictoires virent le jour, l'une développant l'aspect **corpusculaire**, l'autre s'appuyant sur le mécanisme **ondulatoire**. Elles soulevèrent une controverse qui dura jusqu'au début de notre siècle. En effet, chacune de ces théories s'appuyait sur un certain nombre d'expériences mais laissait inexpliqués d'autres phénomènes physiques ou même semblait être mise en défaut par ces phénomènes.

La **théorie corpusculaire** avancée par Newton considère la lumière comme un ensemble de corpuscules (dont il ne précisait pas la nature) lancés à grande vitesse par l'objet lumineux dans un milieu appelé " éther ", qui y produisent des perturbations et qui viennent frapper le fond de l'oeil (théorie de l'émission). La diversité des couleurs est ainsi expliquée par des différences de grosseur des corpuscules. Descartes avait également expliqué les lois de l'optique par des images empruntées à une cinématique corpusculaire et décrit la lumière comme étant "une tendance au mouvement" qui, par l'intermédiaire d'un milieu, "se redouble par petites secousses ".Cette théorie laisse inexpliquée les phénomènes d'interférences. c'est-à-dire le fait que, dans certains cas, la superposition de " lumières " peut produire l'obscurité.

La **théorie ondulatoire** est proposée en 1665 par Hooke pour expliquer des phénomènes d'interférences. Cette théorie est reprise ensuite par Huygens qui considère que tout point d'une surface lumineuse émet une onde sphérique qui se propage à vitesse finie dans l'éther. Young puis Fresnel la complèteront en expliquant les interférences des ondes lumineuses et en associant la fréquence des ondes à leur couleur. Cette théorie est incapable d'expliquer, entre autres, les échanges d'énergie entre rayonnement et matière tel que l'effet photoélectrique c'est-à-dire l'expulsion d'électrons dans une plaque métallique soumise à un rayonnement lumineux.

Chacune de ces théories n'explique qu'une partie des phénomènes physiques relatifs à la lumière. En fait, la lumière est une entité propre qui a un double comportement : un comportement ondulatoire et un comportement corpusculaire, on parle alors de ***dualité onde-corpuscules***.

Champs d'application :

- Optique ondulatoire : les mesures de très haute précision, spectroscopie
- Optique quantique : développement des lasers, l'holographie

3- Pourquoi étudier l'optique ?

Parce que c'est l'étude de la lumière et que :

- La lumière est un élément important de notre vie : elle permet la vision des couleurs et des formes des objets, elle est un moyen qui transporte l'information (lumière utilisée en communication)
- La lumière permet la formation des images du monde à notre échelle (œil, caméra, photographie, ect…)
- La lumière est un moyen d'observation indirecte (étude de la lumière diffracté ou diffusée donne des renseignements sur la structure des corps (structure de l'atome, distribution des polluants atmosphérique, ect…)

La lumière «visible» correspond à des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 400 nm et 780 nm.

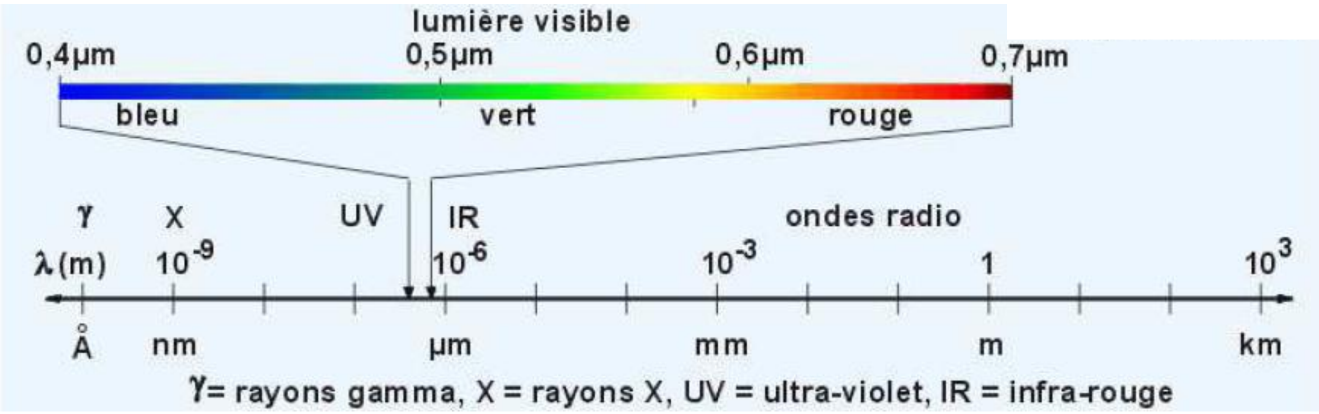


Figure 1:Spectre des ondes électromagnétiques

Les sources de lumière:

Naturelles:

- ✓ **Le Soleil**: l'ozone absorbe le rayonnement *UV* (<*300nm*). La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement *IR*.

Une partie importante de la lumière est diffusée par les molécules d'air d'où la couleur bleu du ciel dans la journée et jaune et rouge le matin et le soir (incidence rasante du soleil). Puissance : *1kW/m²*

Artificielles:

- ✓ **Les sources incandescentes**: principe du rayonnement du corps noir. L'élévation de température de certains corps génère de la lumière. Les lampes à filaments (filament de tungstène dans un gaz rare (ampoule standard) ou un gaz de la famille des halogènes (les halogènes)).
- ✓ **Les tubes à décharges**: gaz sous pression subissant une décharge (les néons)
- ✓ **Les Lasers**: excitation cohérente d'un milieu (gaz, solide, liquide)

Excepté les lasers, toutes ces sources sont polychromatiques. Les lasers sont monochromatiques.

On appelle lumière monochromatique une lumière n'ayant qu'une seule couleur c'est-à-dire composée d'une seule onde de longueur d'onde définie.

Une lumière polychromatique est la somme d'onde de différente longueur d'onde.

La ***lumière blanche*** est une lumière polychromatique contenant toutes les longueurs d'onde du visible

La lumière peut être représentée par une fonction d'onde en un point *M* et à l'instant t de la forme:

$$s = s_0 \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

T est la période de l'onde, est une caractéristique **intrinsèque** de l'onde. Et λ sa longueur d'onde dépend du milieu dans lequel l'onde se propage

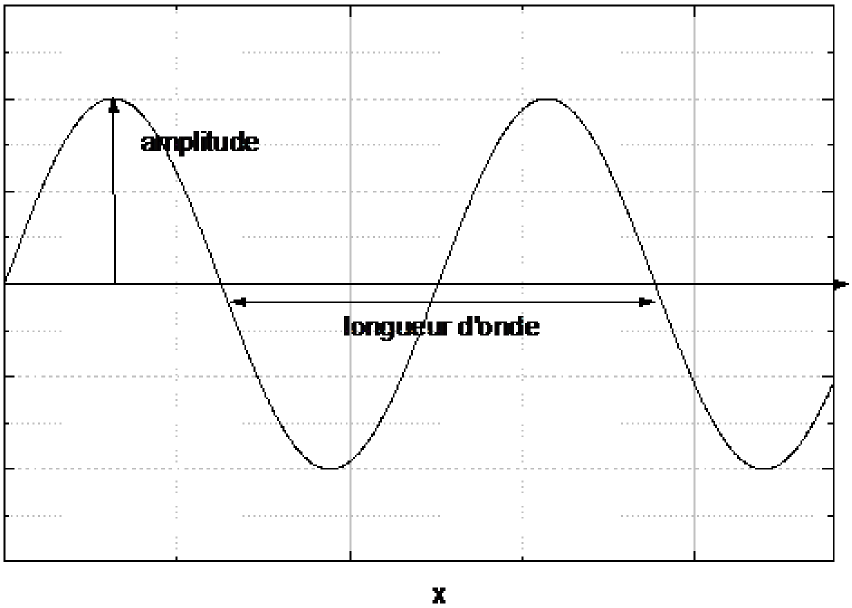


Figure 2: représentation graphique d'une onde

La période temporelle et la longueur d'onde sont reliées :

$$\lambda_n = \mathrm{v}_n T \quad \text{ou encore} \quad \mathrm{v}_n = \lambda_n f$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

ou ω est la pulsation en rad.s^{-1},

f est la fréquence en Hz ou s^{-1},

T la période en s,

et v_n est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu d'indice n

La vitesse de propagation dans le vide ou célérité est notée *c* et vaut :

$$c = 299792458\ ms^{-1} \approx 3.10^8\ ms^{-1}$$

Les vitesses de propagation dans les autres milieux ont comme référence la célérité car rien ne peut aller plus vite que la lumière dans le vide (relativité):

$$\boxed{\mathrm{v} = \frac{c}{n} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{c}{\mathrm{v}}}$$

n est appelé l'indice du milieu.

Remarque : indice du milieu est toujours supérieur à 1 ($n \geq 1$)

Exemple :

Milieu	**Air**	**Eau**	**verre**	**Cornée (humaine)**	**diamant**
Indice *n*	**1,0003**	**1,33**	**1,5-1,8**	**1,34/1,377/1,55**	**2,42**

II – Notions de base de l'optique géométrique

1- Définitions :

- Un milieu est dit *homogène* s'il a la même composition en tous ses points.
- Un milieu est dit *isotrope* si ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions.
- Un milieu *transparent* : On voit nettement les objets.
- Un milieu *opaque* : on ne voit pas les objets.
- Un milieu *translucide* : laisse passer la lumière mais on ne voit pas nettement.

2- Principe de l'optique géométrique

L'*optique géométrique* est une branche de l'optique qui s'appuie notamment sur la notion de *rayon lumineux*. La lumière est vue comme un ensemble de rayons, émis par la source.

Remarque : Un rayon lumineux est une *notion théorique* : il n'a pas d'existence physique. Il sert de modèle de base à l'optique géométrique, où tout faisceau de lumière est représenté par un ensemble de rayons lumineux. L'optique géométrique consiste à étudier la manière dont la lumière se propage en ne considérant que la marche des rayons lumineux.

L'optique géométrique repose sur *deux principes fondamentaux* :

- *Propagation rectiligne de la lumière :*

« Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite : les supports des rayons lumineux sont des droites ».

- *Principe du retour inverse de la lumière :*

« Si la lumière suit un trajet quelconque d'un point *A* à un point *B* (y compris dans un système optique), alors la lumière peut suivre exactement le trajet inverse de *B* vers A.
Autrement dit, le *sens* de parcours change, mais pas les *directions* ».

3- Principe de FERMAT

Le trajet effectivement suivi par la lumière pour aller d'un point *A* à un point *B* est celui pour lequel le chemin optique est extrémal - ou, en toute généralité, stationnaire - c'est-à-dire maximal ou minimal par rapport aux trajets voisins imaginables.

Le principe de Fermat s'écrit lorsque la lumière se propage dans plusieurs milieux d'indices différents.
Pour cela, considérons un trajet *AIB* comportant deux tronçons *AI* et *IB* contenus dans des milieux homogènes d'indices différents n_1 et n_2 séparés par une surface plane.

Le chemin optique [*AB*] a pour expression :

$$L_{AB} = [AB] = n_1\, AI + n_2\, IB$$

D'après le principe de Fermat, si ce trajet est effectivement suivi par la lumière, il sera soit minimum soit maximum.

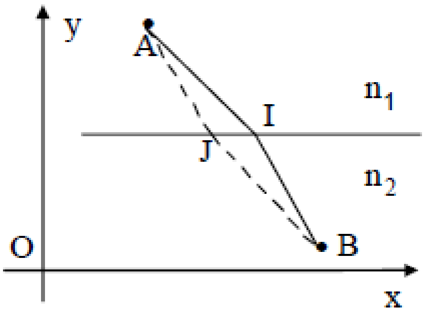


Figure 3:

Dire que le chemin optique est extrémal, c'est écrire que :

$$dL = 0$$

Conséquences du principe de Fermat

- Une première conséquence du principe de Fermat est la *propagation rectiligne des rayons lumineux* dans les milieux homogènes. En effet, dans un milieu homogène, le temps de parcours est proportionnel à la longueur du trajet, et le chemin le plus court pour aller d'un point à un autre est la ligne droite.
- Une deuxième conséquence de ce principe est que le trajet suivi par la lumière pour aller d'un point à un autre ne dépend pas du sens de propagation de la lumière (*principe de retour inverse de la lumière*).

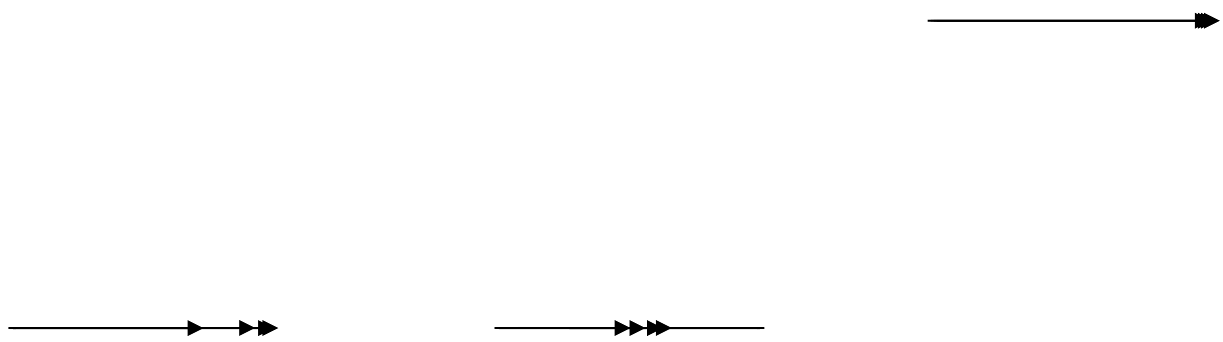
En fait, le *principe de Fermat permet de retrouver toutes les lois de l'optique géométrique*. Il peut servir de ***postulat général*** pour la théorie de l'optique géométrique.

Indépendance des rayons lumineux

On admet que les faisceaux lumineux sont composés de rayons lumineux indépendants les uns des autres. Il en résulte que des rayons issus de différents points d'une source lumineuse ne se perturbent pas les uns les autres et que l'on peut étudier la marche d'un rayon lumineux indépendamment de la marche des autres rayons.

Un faisceau lumineux étant constitué de rayons ayant des directions données, on appellera, en indiquant par une flèche le sens de propagation de la lumière :

- ***faisceau*** "***divergent*** " un faisceau lumineux dont tous les rayons sont issus d'un même point S,
- ***faisceau*** "***convergent*** " un faisceau lumineux dont tous les rayons aboutissent à un même point,
- ***faisceau*** "***parallèle*** " ou "***cylindrique*** "un faisceau lumineux dont tous les rayons sont parallèles.



Faisceau divergent Faisceau convergent Faisceau parallèle

4- Indice de réfraction d'un milieu

L'*indice de réfraction* d'un milieu déterminé pour une certaine radiation monochromatique caractérise la vitesse de propagation de cette radiation dans ce milieu, v étant la vitesse de propagation de la radiation considérée dans le milieu étudié.

Plus précisément, l'indice de réfraction du milieu A par rapport au milieu B est le rapport des vitesses $\frac{v_B}{v_A}$, v_A et v_B étant les vitesses de la même radiation simple dans les milieux A et B.

Si le milieu B est le vide, la vitesse v_B est égale à la constante $c = 3.10^8$ m/s (célérité de la lumière), et l'indice de réfraction est appelé indice absolu : Il est toujours supérieur à un, car la lumière se propage « plus difficilement » dans les milieux autres que le vide. Il vaut par définition :

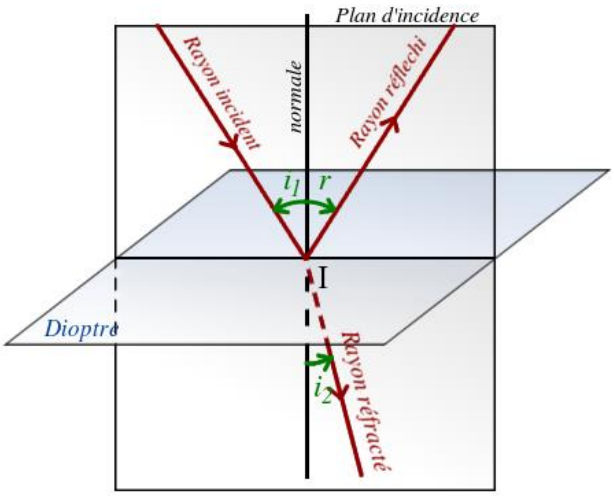
$$n = \frac{c}{v} > 1$$

Phénomènes de réflexion et de réfraction : lois de la réflexion et de réfraction

On appelle ***dioptre*** la surface séparant deux milieux transparents, d'indices de réfractions différents. Les rayons demeurent rectilignes dans un milieu homogène et isotrope ; ils sont déviés lors du franchissement d'un dioptre ou à la rencontre d'une surface réfléchissante.

Lorsqu'un faisceau incident atteint le dioptre au point d'incidence, il peut apparaître un faisceau réfléchi et un faisceau réfracté.

Le plan contenant le *faisceau incident*, le *faisceau réfléchi* et le *faisceau réfracté* est appelé **plan d'incidence**. Il contient la normale au dioptre au point d'incidence.



- ***La réflexion*** caractérise un changement de direction du rayon sur une surface frontière, mais sans changement de milieu (le rayon incident et le rayon réfléchi voyagent dans le même milieu),
- ***la réfraction*** correspond à la déviation d'un rayon lors de la traversée de la frontière entre deux milieux (le rayon incident et le rayon réfractés parcourent des milieux différents).

II Lois de SNELL-DESCARTES

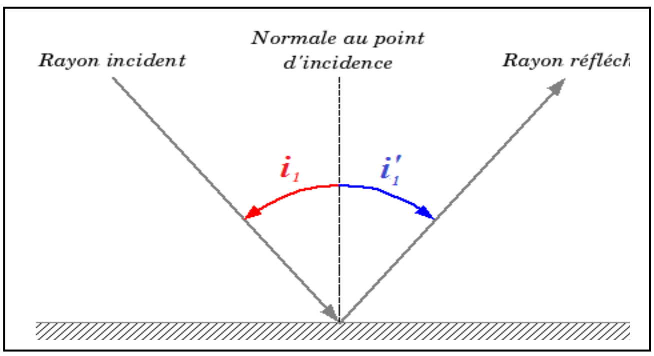
Elles précisent les directions des rayons réfléchis et réfractés à l'interface entre deux milieux transparents d'indice n_1 et n_2

1- Lois de la Réflexion :

1ère loi de Descartes : Le rayon réfléchi et le rayon réfracté appartiennent au plan d'incidence

2ème loi Descartes : L'angle de réflexion i'_1 est égal en norme à l'angle d'incidence i_1

$$\boxed{i'_1 = i_1}$$

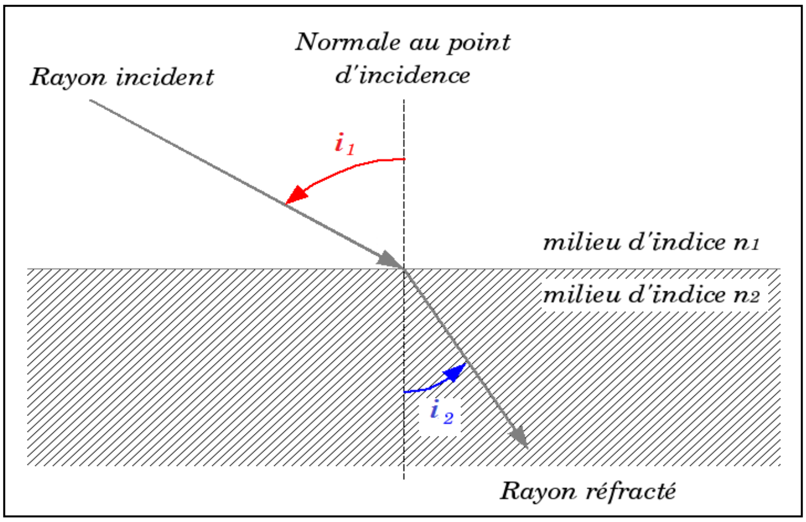


Lois de la réfraction

1ère loi : Le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont coplanaires

2ème loi : L'angle de réfraction et l'angle d'incidence vérifient la loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$



Donc l'angle de réfraction :

$$i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\sin(i_1)\right)$$

Rq : les lois de Snell-Descart peuvent être entièrement déduites du principe de Fermat, et en physique moderne des équations de Maxwell de l'électromagnétisme

Réfraction limite et réfraction totale :

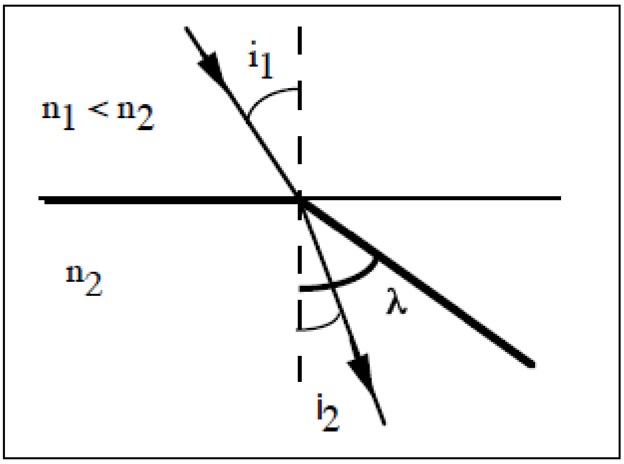
L'angle de réfraction i_2 est au maximum égal à $\pi/2$ et selon la valeur du rapport n_1/n_2 le rayon réfracté peut ne pas exister. Examinons les différents cas possibles.

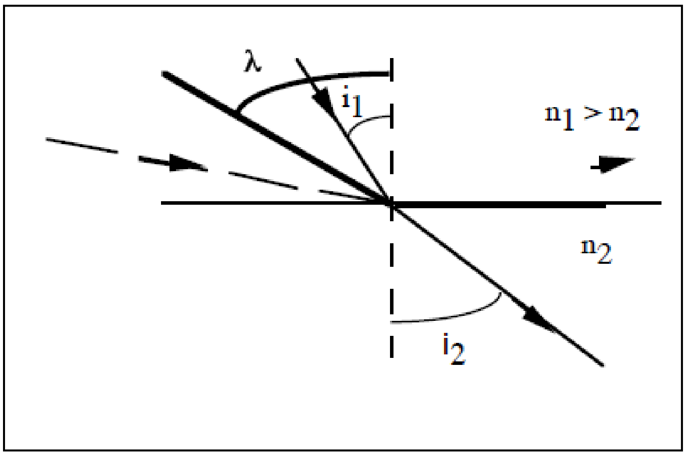
A partir d'un rayon incident, d'angle d'incidence i_1, l'angle de réfraction i_2 donné par la relation précédente, deux cas se présentent alors :

- Si $n_2 > n_1$ (le milieu 2 est dit plus **réfringent** que le milieu 1), l'angle i_2 est toujours défini. L'incidence peut varier de 0 à $\frac{\pi}{2}$, la réfraction variant de façon correspondante de 0 à **l'angle** de réfraction limite λ, défini par $\boldsymbol{sin\lambda = \frac{n_1}{n_2}}$
- Si $n_2 < n_1$, il existe une incidence limite au-delà de laquelle l'angle de réfraction n'est plus défini. Pour une incidence supérieure à cette limite le rayon incident est alors entièrement réfléchi, le phénomène associé étant appelé **réflexion totale**. D'après la loi de retour inverse de la lumière

l'angle de réflexion totale est évidemment la même que l'angle de réfraction limite après permutation des indices. En pratique pour deux milieux, on a toujours :

$$\boldsymbol{sin\lambda = \frac{n_{inf}}{n_{sup}}}$$





Rq.1 Les lois de Descartes n'explicitent pas la répartition d'intensité entre les rayons réfléchi et réfracté. Celle-ci dépend des indices des 2 milieux, de la direction du champ électrique associé au rayon lumineux et de l'angle d'incidence : cette dernière propriété apparaît bien lorsqu'on augmente l'angle d'incidence lors du passage verre –air par exemple. L'intensité du rayon réfracté, d'abord supérieure à celle du rayon réfléchi, diminue progressivement au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'angle limite, au profit de celle du rayon réfléchi qui subsiste seul au-delà de cet angle.

Rq.2 Le phénomène de réflexion totale est utilisé dans les fibres optiques où un rayon lumineux est guidé à l'intérieur d'une fibre souple : le rayon est en fait canalisé à l'intérieur de celle-ci par réflexions totales successives sur les parois de la fibre. On peut ainsi recueillir à l'extrémité de la fibre le rayon et l'énergie (donc l'information) qu'il transporte.

Exemple

Calcul de l'angle limite α_G lors du passage de l'eau *(n_1 = 1,33)* dans l'air *(n_2 = 1,00) :*

$$n_1 \cdot \sin \alpha_G = n_2 \cdot \sin 90° \Rightarrow 1,33 \cdot \sin \alpha_G = 1 \cdot 1$$

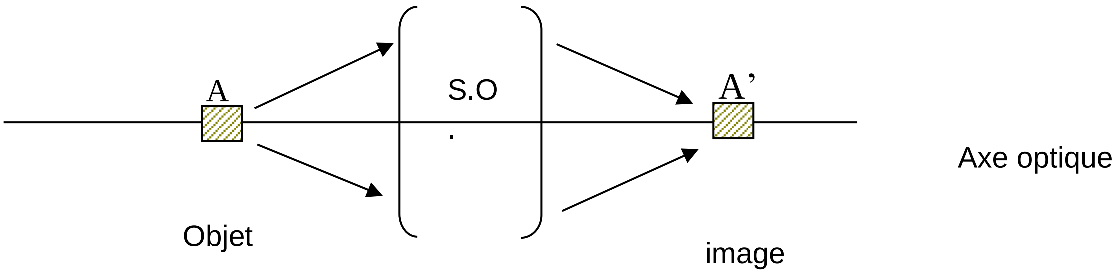
$$\sin\alpha_G = \frac{1.00}{1.33} \Rightarrow \alpha_G = \arcsin(\frac{1.00}{1.33}) = 48.75$$

II. 3 – Systèmes optiques

Définitions :

- **Système optique (S.O.):** ensemble d'un certain nombre de milieux séparés par des dioptres (surfaces réfractantes) et des miroirs. C'est un dispositif assurant une correspondance entre un objet et son image.

- **Axe optique**: axe de symétrie d'un système optique.



A' est appelé image de l'objet A si toute la lumière issue de ou passant par A converge en A'.

On distingue deux catégories de systèmes optiques :

- Les systèmes dioptriques composés de milieux où la lumière ne peut subir que des réfractions.

- Les systèmes catadioptriques contenant des milieux où la lumière subit un certain nombre de réfractions et une réflexion

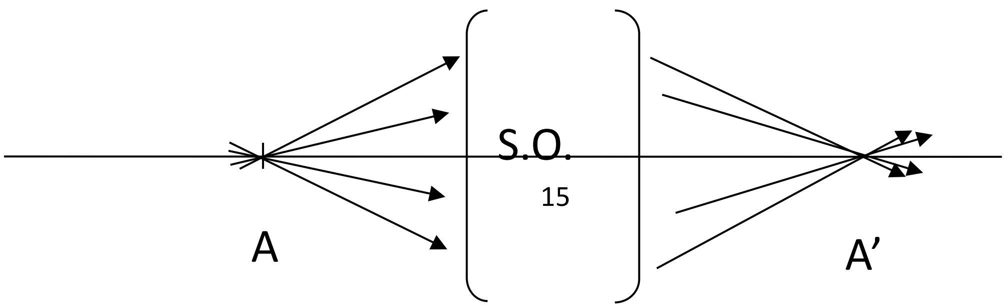
- On appel ***système optique*** centré, un système optique où tous les éléments sont centrés sur un même axe nommé axe optique du système

- Les intersections des différentes surfaces avec l'axe optique sont appelées "sommets" de ces surfaces.

- L'axe optique étant perpendiculaire à toutes les surfaces, tout rayon suivant l'axe optique n'est pas dévié.

Notions d'image

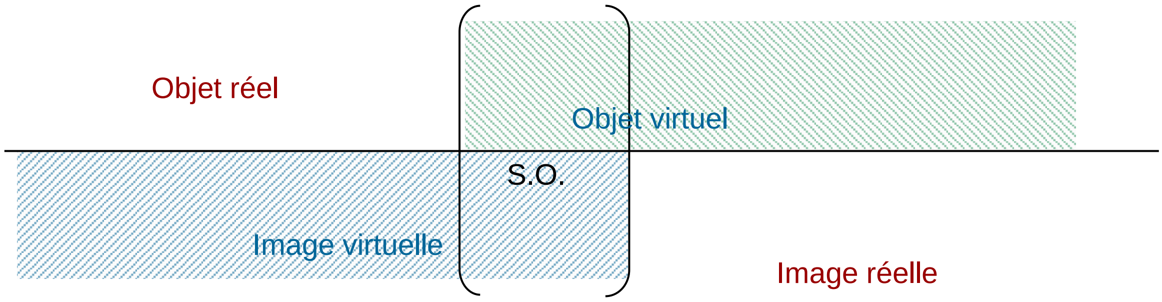
Soit A une source lumineuse envoyant des rayons sur un système optique (S). Si tous les rayons issus de A, convergent en un point A' après la traversé de (S), on dit que A' est l'image de A par rapport à (S). Par application du principe de retour inverse de la lumière, on dit alors que A et A' sont conjugués à travers (S)



Caractère réel et virtuel :

Un **objet** sera dit **réel** s'il est situé dans l'espace objet du système optique, c'est-à dire en **amont** de la face d'entrée du système. Sinon, il sera dit **virtuel**.

Une **image** sera dite **réelle** si elle est située dans l'espace image du système optique, c'est-à-dire en **aval** de la face de sortie du système. Sinon, elle sera dite **virtuelle**

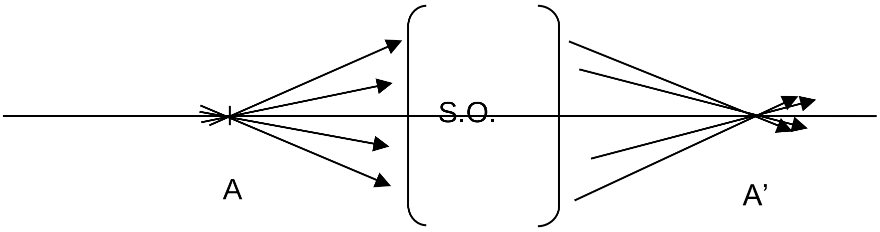


Une image réelle peut être vue sur un écran

Limite de l'optique géométrique :

Stigmatisme:

Un système est dit **rigoureusement stigmatique** si l'image d'un point A est un point A';

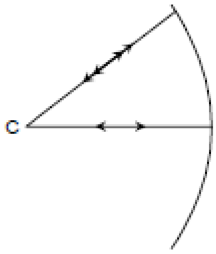


Exemples de systèmes rigoureusement stigmatiques

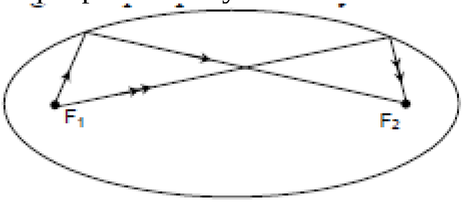
Bien que la majorité des systèmes optiques soient non rigoureusement stigmatiques, il existe cependant quelques cas particuliers très utiles qui remplissent la condition de stigmatisme rigoureux pour des couples de points conjugués.

- Le miroir plan est stigmatique pour tous les points

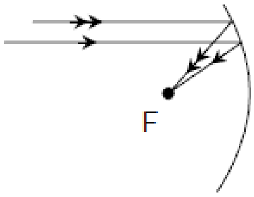
- Le miroir sphérique est stigmatique pour son centre de courbure; il en est de même pour le centre du miroir.



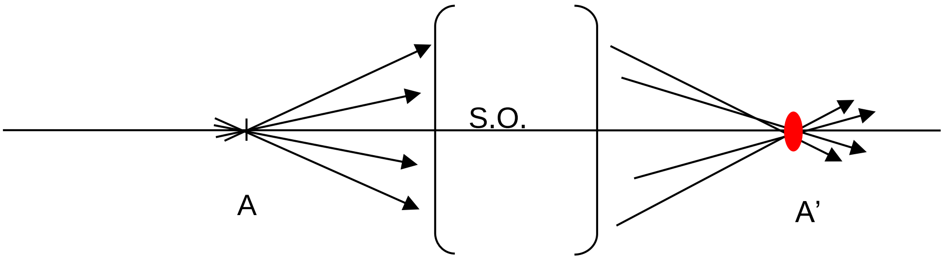
- Le miroir elliptique est stigmatique pour ses foyers.



- le miroir parabolique est stigmatique pour le couple de points infini-foyer.



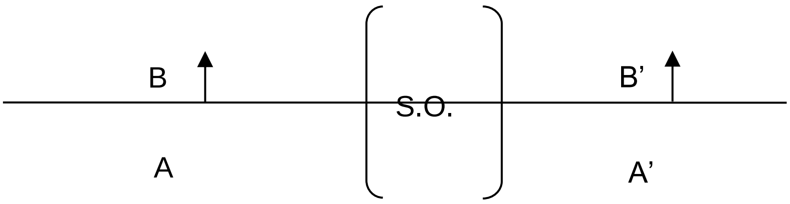
<u>Approximativement stigmatique</u> (Stigmatisme approché) : si l'image d'un point A est une petite tache centrée sur A'. Condition: rayons ***<u>paraxiaux</u>*** formant un angle faible avec l'axe optique



<u>Aplanétisme</u> :

Pour tout objet AB plan perpendiculaire à l'axe optique, son image A'B' est plane et perpendiculaire à l'axe optique:

A' est l'image de A et B' est l'image de B



Approximation de GAUSS :

À part le miroir plan, un système optique ne donne pas d'image nette sauf dans certaines conditions : les conditions de Gauss.

Images hors conditions de Gauss : Floues**,** déformées

L'approximation de Gauss : est l'approximation linéaire de l'optique géométrique obtenue dans certaines conditions appelées **conditions de Gauss**. Cette approximation, souvent applicable en pratique, permet de simplifier les relations mathématiques de l'optique géométrique. On obtient dans ces conditions un stigmatisme approché.

Les conditions de Gauss :

Le système optique considéré doit être un système centré « système optique ayant la symétrie de révolution autour d'un axe appelé axe optique ».

- Les angles d'incidence des rayons sont faibles (c'est-à-dire suivant une direction proche de la normale à la surface de l'instrument d'optique).
- Objet perpendiculaire à l'axe

Dans les conditions de Gauss, les systèmes optiques centrés (ensemble des dioptres ont le même axe optique) sont approximativement **stigmatiques et aplanétiques**

Conséquences des conditions de Gauss.

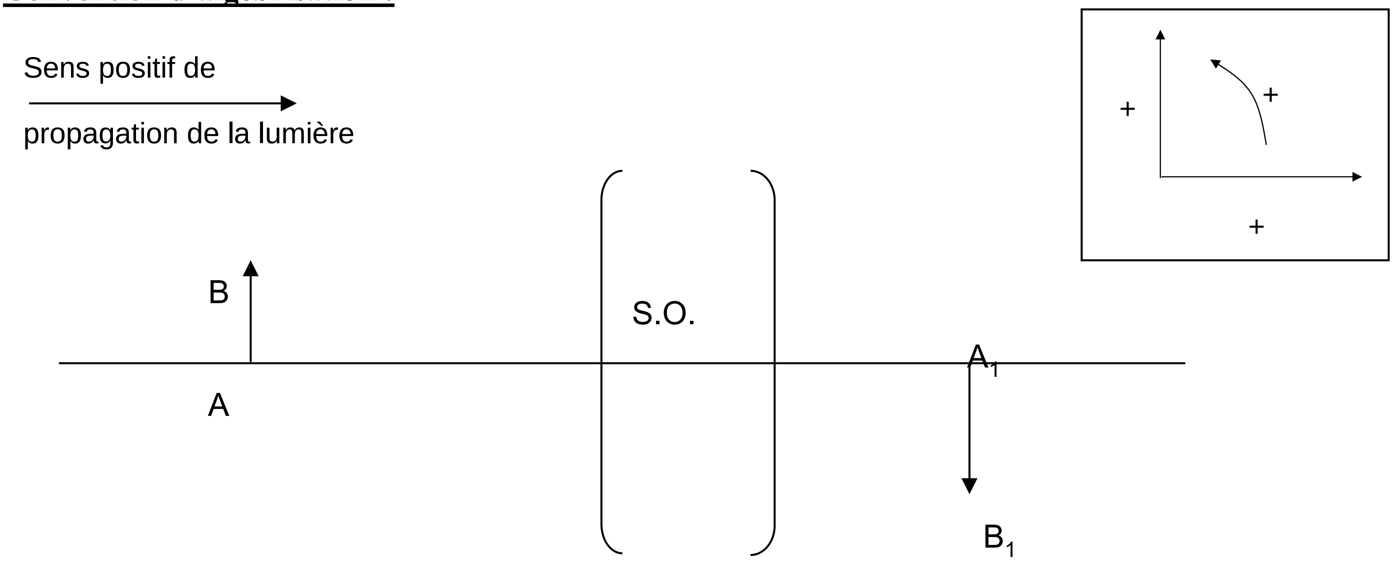
- *Linéarisation des relations de Snell- Descartes:*

$$n_1 i_1 = n_2 i_2$$ loi de Kepler (vrai jusqu'à *20°* et *i* en radian.)

- *L'image d'un point A est un point A':* Deux rayons suffisent pour déterminer l'image d'un point.
- *Le système est aplanétique***:** L'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe optique donne une image plane perpendiculaire à l'axe optique.
- *Existence d'une relation de conjugaison* **:** Relation qui lie la position de l'image à la position de l'objet.

Nous nous placerons maintenant dans le cadre des conditions de GAUSS

Convention d'algébrisation :

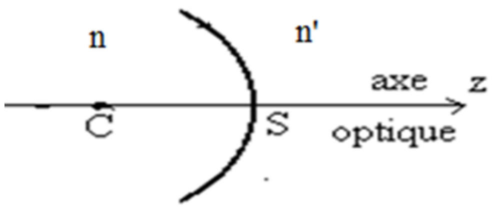


$$\overline{AB} > 0 \;\; ; \;\; \overline{A_1B_1} < 0 \;\; ; \;\; \overline{AA_1} > 0 \;\; ; \;\; \overline{A_1A} < 0$$

Dioptre sphérique

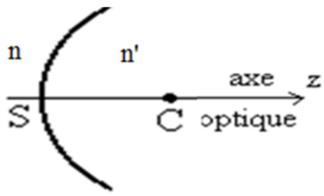
Définition

Un dioptre sphérique est l'association de deux milieux transparents d'indices de réfraction différents, séparés par une surface sphérique, de centre *C* et de sommet *S*



$R = \overline{SC} < 0$

Dioptre sphérique concave



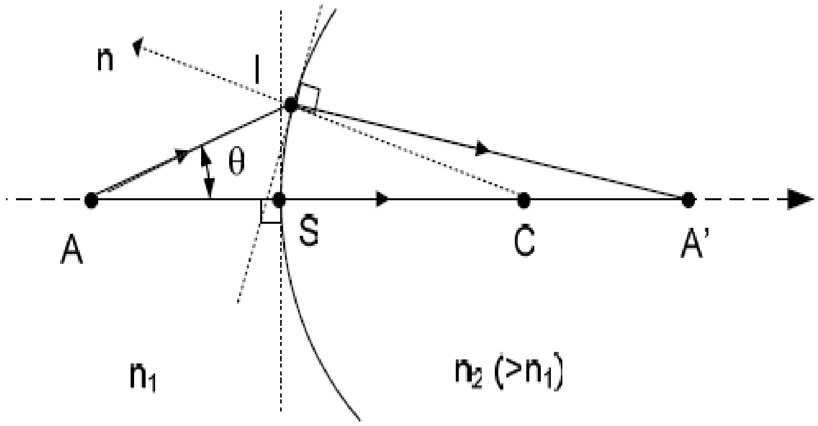
$R = \overline{SC} > 0$

Dioptre sphérique convexe

Relation de conjugaison des dioptres sphériques

Soit un dioptre sphérique de centre *C*, de rayon de courbure *R*, de sommet *S* et séparant un milieu d'indice n_1 d'un milieu d'indice n_2 (voir la Figure : cas où $n_2 > n_1$).

Soit le rayon ***AS***, ce rayon étant normal à la surface, il traverse le dioptre sans être dévié (incidence nulle) et passe alors par le centre *C*.



Un rayon quelconque *AI*, faisant un angle θ avec l'axe ***SC***, traverse le dioptre au point *I*. Ce rayon est réfracté avec un angle donné par rapport à la normale au dioptre au point *I*. Soit *A'* l'image de *A* qui est l'intersection entre le rayon émergent et l'axe ***SC*** du dioptre.

Etude de dioptre sphérique dans les conditions de Gauss :

Formule de conjugaison

C'est la relation qui lie un point objet A et son image A':

Origine au sommet :

$$\frac{n}{\overline{SA}} - \frac{n'}{\overline{SA'}} = \frac{n-n'}{\overline{SC}}$$

Origine au centre :

$$\frac{n}{\overline{CA'}} - \frac{n'}{\overline{CA}} = \frac{n-n'}{\overline{CS}}$$

Foyer objet et image

Lorsque *A'* tend vers l'infini, *A* se trouve au foyer objet *F*:

$$\overline{SF} = \frac{n}{n-n'}\overline{SC}$$

Lorsque *A* tend vers l'infini, *A'* se trouve au foyer image *F'*:

$$\overline{SF'} = \frac{n'}{n'-n}\overline{SC}$$

Formule de Newton : C'est la formule de conjugaison avec origines aux foyers

$$\overline{FA}.\overline{F'A'} = \overline{SF}.\overline{SF'}$$

Grandissement

C’est le rapport de la taille de l’image à la taille de l’objet:

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

- **Origine aux sommet**

$$\gamma = \frac{n}{n'}\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}$$

- **Origine aux centre** :

$$\gamma = \frac{\overline{CA'}}{\overline{CA}}$$

- **Origine aux foyers** :

$$\gamma = -\frac{\overline{SF}}{\overline{FA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{\overline{SF'}}$$

Remarque :

$f' = \overline{SF'} = \dfrac{n'}{n'-n}\overline{SC}$; $f' =$ distance focale image

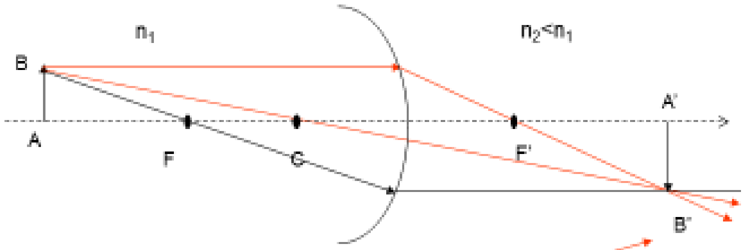
$f = \overline{SF} = \dfrac{n}{n-n'}\overline{SC}$, f = distance focale objet

Construction de l’image

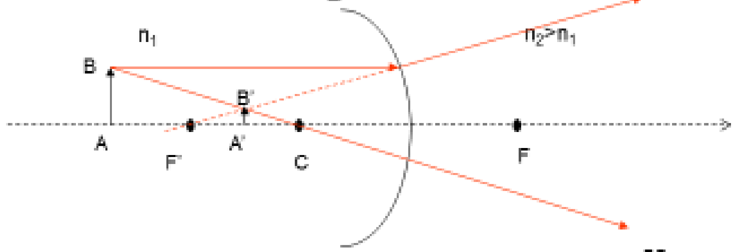
Nous utiliserons pour faire cette construction 3 rayons particuliers :

- un rayon passant par le centre du dioptre et qui n'est pas dévié à la traversée de celui-ci
- un rayon issu de B et passant par le foyer objet F : il est réfracté suivant une parallèle à l'axe principal
- un rayon issu de B et parallèle à l'axe principal : il est réfracté suivant un rayon qui passe par le foyer image F'.

a) Dioptre convergent

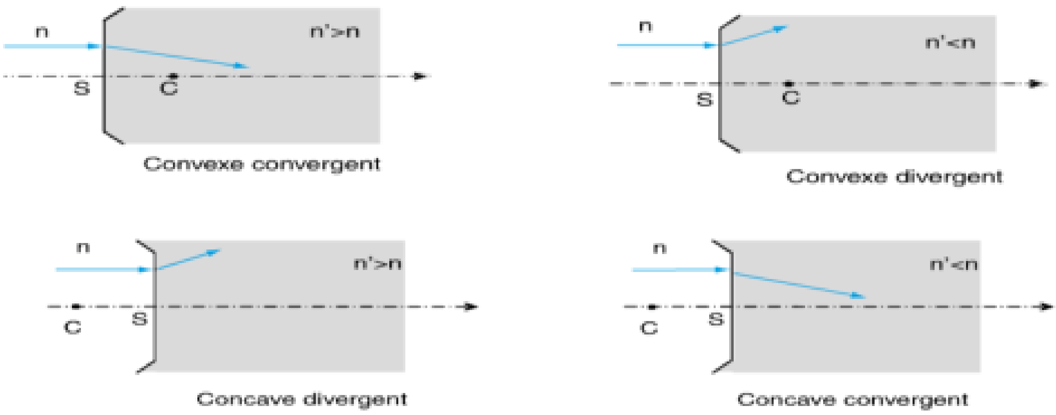


b) Dioptre divergent



55

Les quatre configurations possibles d'un dioptre sphérique



Soit un rayon incident parallèle à l 'axe optique.

•Quand il se rapproche de l'axe optique = **convergent.**

•Quand il s'écarte de l'axe optique = **divergent.**

56

Remarque : Vergence d'un dioptre

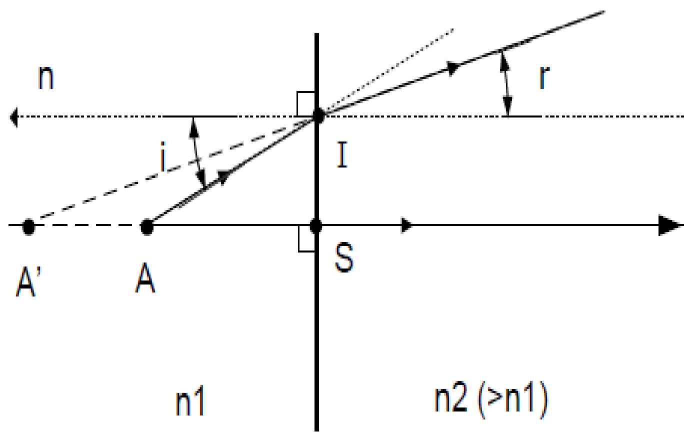
On peut introduire la notion de vergence du dioptre *V*

$$V = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}}$$

- **Si *V>0*, le dioptre est convergent**
- **Si *V<0*, le dioptre est divergent**

Cas particulier : Dioptre plan

Le dioptre plan est un dioptre sphérique de rayon infini. C'est aussi une surface plane séparant deux milieux transparents d'indice différents.



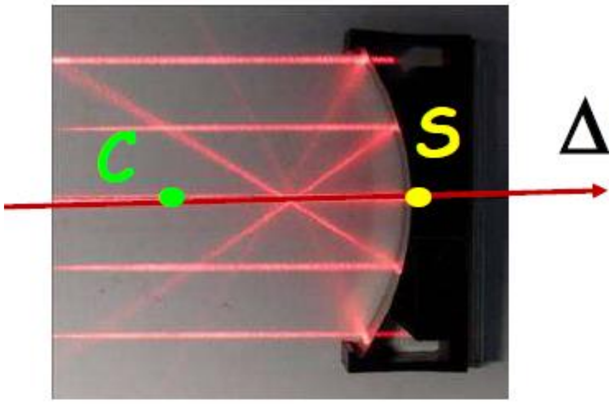
Dans les conditions de Gauss, la formule de conjugaison est :

$$\frac{n_1}{\overline{SA}} - \frac{n_2}{\overline{SA'}} = 0$$

Miroirs sphériques

I – Présentation

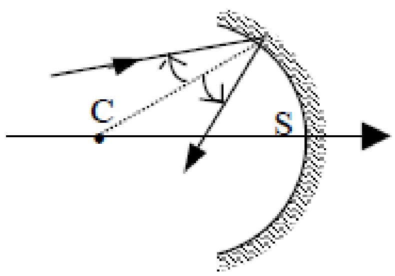
Un miroir sphérique est une portion de surface sphérique de ***centre*** **C,** rendue réfléchissante par un dépôt métallique. C'est donc une calotte sphérique de ***sommet S*** et de rayon $R = SC$. La droite CS représente l'axe principal du miroir.



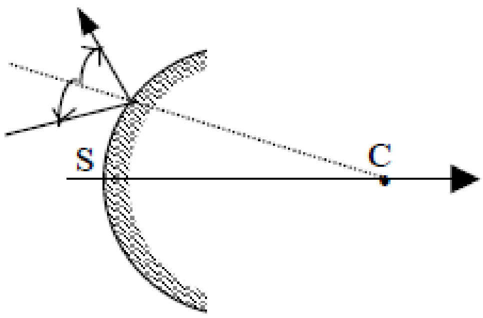
Rq : Il est à noter que **l'origine** de l'axe optique Δ peut être fixée arbitrairement en **C** ou en **S**.

Un miroir sphérique peut être concave ou convexe .

- ***Miroir convexe*** : la surface réfléchissante est du côté opposé du centre de la sphère, la réflexion se fait vers l'extérieur de la sphère.
- ***Miroir concave*** : la surface réfléchissante est du même côté que le centre de la sphère, la réflexion se fait vers l'intérieur de la sphère



miroir concave

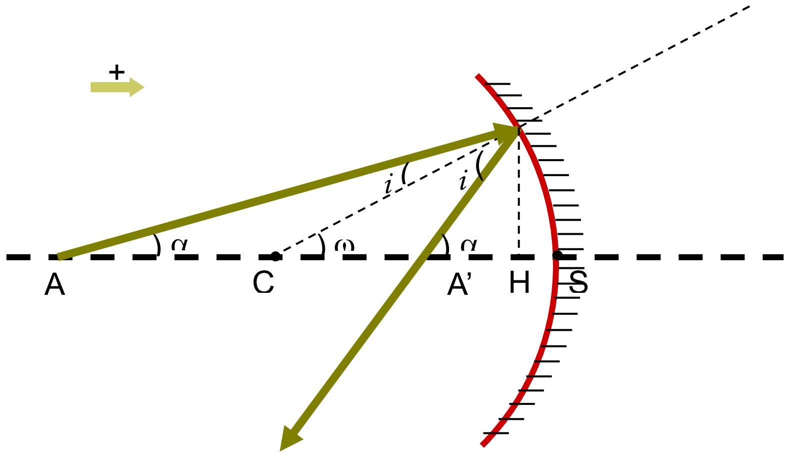


miroir convexe

Relations de conjugaison

Ces formules sont constituées, d'une part, des relations entre les positions de l'objet et de l'image et, d'autre part, des relations entre les valeurs algébriques des dimensions de l'objet et de l'image

Foyers. Distance focale. Vergence Formule de Newton



Origine au sommet : $\frac{1}{\overline{SA}}+\frac{1}{\overline{SA'}}=\frac{2}{\overline{SC}}$

Origine au centre : $\frac{1}{\overline{CA'}}+\frac{1}{\overline{CA}}=\frac{2}{\overline{CS}}$, Cette relation est connue sous le nom de "**Formule de Descartes** "

Position des foyers :

D'après la définition du foyer image *F*, la position de celui-ci dans le cas d'un miroir sphérique est obtenue en écrivant que $\overline{SA}\rightarrow\infty$, soit $\frac{1}{\overline{SA}}\rightarrow 0$

$$\overline{SF'}=\frac{\overline{SC}}{2}$$

Le foyer image F' d'un miroir sphérique est donc situé au milieu de SC.

De la même manière, on trouve la position du foyer objet F en écrivant que : $\overline{SA'}\rightarrow\infty$, soit $\frac{1}{\overline{SA'}}\rightarrow 0$

$$\overline{SF}=\frac{\overline{SC}}{2}$$

Le foyer objet F1 d'un miroir sphérique est donc également situé au milieu de SC.

Les foyers objet et image d'un miroir sphérique sont confondus en *F* et situés au milieu de *SC*.

Distance focale et vergence

La distance focale *f'* est donnée par la distance *SF'*. On a : $\overline{SF'}=\frac{\overline{SC}}{2}=\frac{R}{2}$

La vergence est définie par : $C=\frac{n}{\overline{SF'}}$ où *n* est l'indice de réfraction du milieu dans lequel se trouve le miroir.

La vergence d'un miroir sphérique est donc :

$$C=\frac{n}{\overline{SF'}}=\frac{n}{f'}=\frac{2n}{R}$$

La vergence s'exprime en dioptrie δ (m^{-1}).
Rq : Dans le cas où le miroir est placé dans l'air ($n = 1$) on a :

$$C = \frac{1}{\overline{SF'}} = \frac{1}{f'} = \frac{2}{R}$$

La vergence est une grandeur algébrique. Le miroir est dit convergent lorsqu'elle est négative, et divergent si elle est positive.

Relation de conjugaison avec origine au foyer F.

Formule de Newton : $\overline{FA}.\overline{F'A'} = \overline{SF}^2 = f^2$

Construction de l'image d'un petit objet perpendiculaire à l'axe

Pour effectuer cette construction, nous allons tirer profit des propriétés des foyers, du centre C et du sommet S et utiliser des rayons particuliers.

Rayons particuliers

- Tout rayon incident passant par le centre C, se réfléchit sur lui-même,
- Tout rayon incident passant par le foyer objet F, se réfléchit parallèlement à l'axe,
- Tout rayon incident parallèle à l'axe, se réfléchit en passant par le foyer image F',
- Tout rayon incident en S, se réfléchit symétriquement à l'axe optique.

Remarquons que lorsque l'objet AB est de petite dimension et que A est situé sur l'axe, l'image $A'B'$ sera également perpendiculaire à l'axe avec A' sur l'axe. Il suffit donc de construire l'image B' de B.

s F c

Image réelle droite **image virtuelle renversée**

Grandissement linéaire transversal

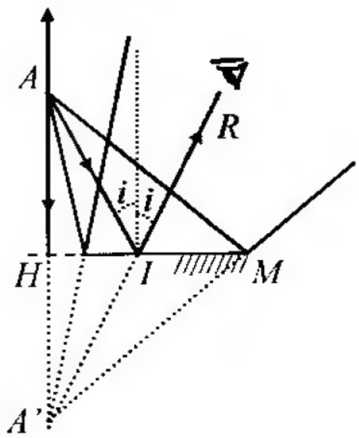
Rappelons que le grandissement linéaire transversal $\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ représente le rapport des valeurs algébriques de la dimension de l'image à celle de l'objet.

- Origine au centre : $\gamma = \dfrac{\overline{CA'}}{\overline{CA}}$
- Origine au sommet : $\gamma = \dfrac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}$
- Origine au foyer : $\gamma = -\dfrac{\overline{SF}}{\overline{FA}} = -\dfrac{\overline{F'A'}}{\overline{SF'}}$

Cas particulier : Miroir Plan

Un miroir plan est une surface réfléchissante plane. On peut aussi dire aussi qu'un miroir plan est un miroir sphérique de rayon infini.

Un miroir plan donne d'un point *A* une image *A'* symétrique par rapport au plan du miroir. L'image de tout point de l'espace est un point.



Le miroir plan est dit **rigoureusement stigmatique**.

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

La taille de l'image est égale à celle de l'objet, on dit que le grandissement linéaire est égal à l'unité. Notons que l'objet et l'image ne sont pas superposables, l'image de la main droite, par exemple, est la main gauche.

Systèmes optiques : Les lentilles

Les lentilles sont des éléments les plus employés dans les instruments et les montages optiques. On les trouve aussi bien dans la vie courante (lunettes, lentilles de contact, appareils photographiques) que dans le domaine de la recherche scientifique (télescopes, spectrographes, microscope). Elles sont formées par l'association de deux dioptres sphériques ou d'un dioptre sphérique et d'un dioptre plan limitant un milieu homogène et transparent d'indice *n*.

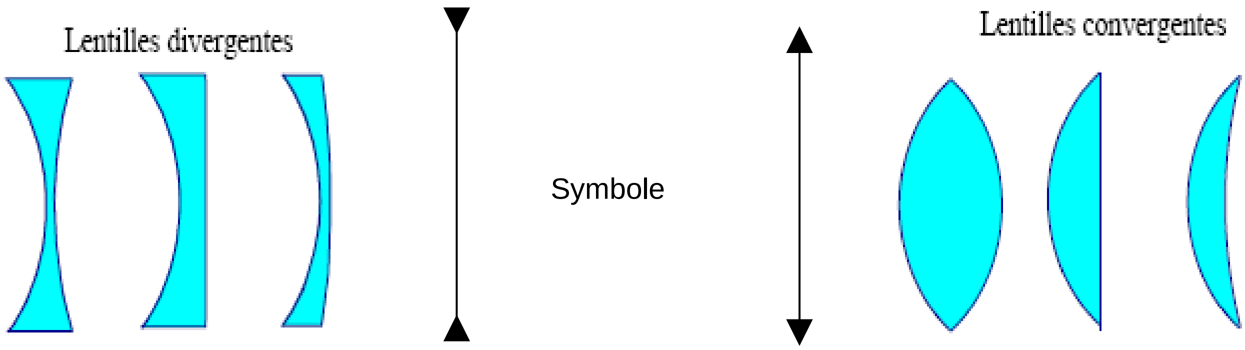
Nous allons d'abord présenter les différentes formes de lentilles ainsi que leurs différentes caractéristiques (sommet, centre, axe optique, rayon de courbure, foyers, vergence …). On construira ensuite la marche des rayons lumineux et la position des images et on établira les formules de conjugaison donnant ces positions à partir de diverses origines (centre, sommet et foyers).

On présentera enfin quelques constructions fondamentales et on montrera comment l'association de deux lentilles (doublet) peut améliorer la performance d'un instrument en augmentant son agrandissement.

Définitions

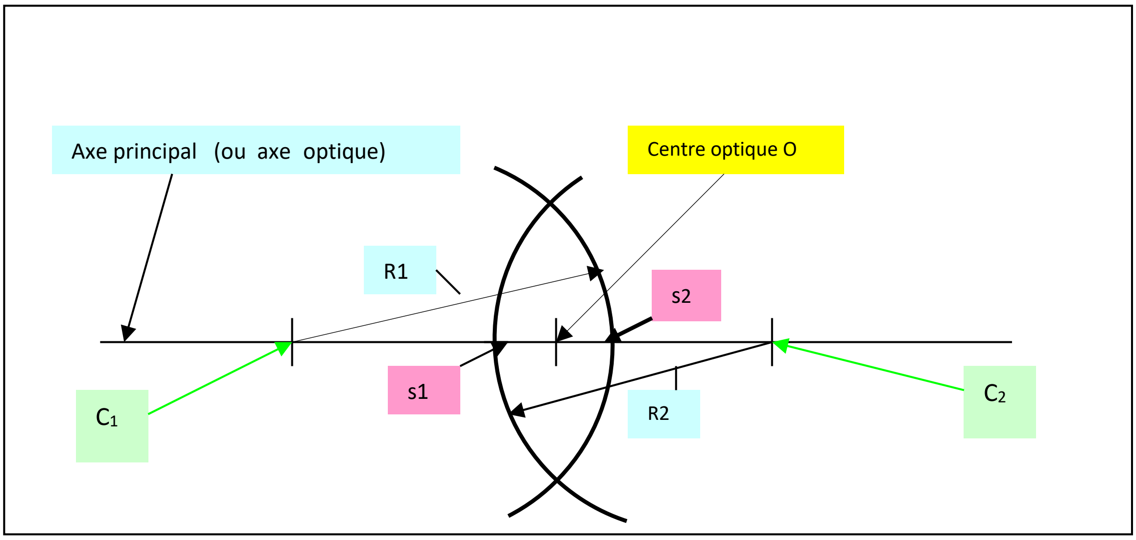
Une lentille est un milieu transparent homogène d'indice n limité par deux dioptres dont l'un au moins est sphérique, l'autre pouvant être, à la limite, plan. C'est un système centré dont l'axe est la droite qui joint les deux centres des dioptres respectifs.

Ils existent des lentilles à bords minces (convergentes) et à bords épais (divergentes)



Les éléments géométriques d'une lentille sont :

- **l'axe optique**, qui joint les centres de courbures C_1 et C_2 des deux faces
- **le centre optique *O*** .Une lentille est mince si l'on peut considérer l'épaisseur petite devant les rayons R_1 et R_2 (*ce que l'on supposera toujours vérifié par la suite*). Dans ce cas le centre optique est confondu avec les sommets S_1 et S_2 des deux sphères

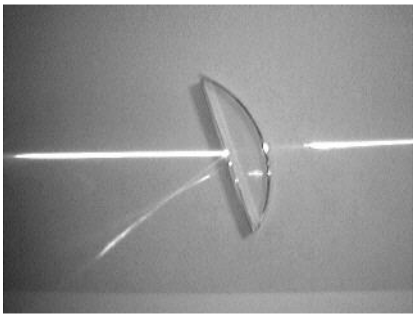


Remarque : Etant formée par l'association de deux dioptres, une lentille est donc un système optique qui **ne réalise pas le stigmatisme rigoureux** (sauf dans des cas très particuliers pour certaines lentilles) mais elle réalise le **stigmatisme approché** dans les conditions de l'approximation de Gauss.

Propriétés :

Le centre de la lentille est le point d'intersection avec l'axe optique. Il est généralement appelé O.

Un faisceau passant par le centre de la lentille n'est pas dévié.

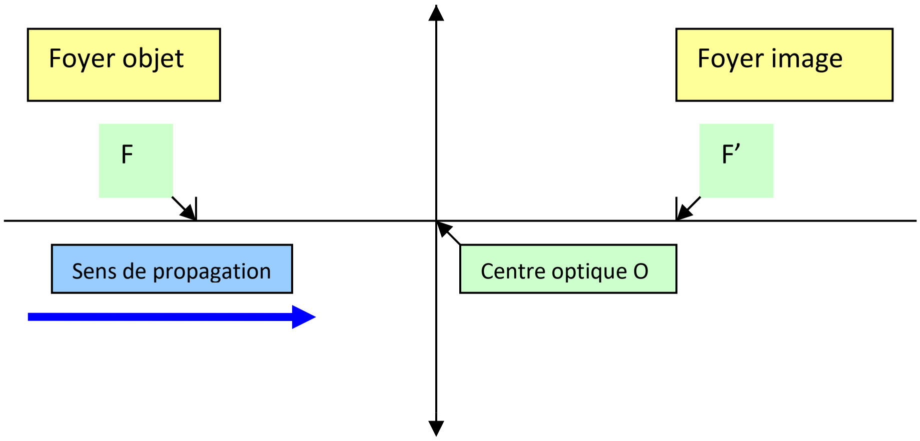


Foyers principaux objet – Plan focal objet

Le foyer principal objet *F* est défini de façon symétrique. Tout rayon incident passant par F, qui traverse la lentille est parallèle à l'axe optique. Une source de lumière placée au foyer objet de la lentille produira un faisceau parallèle.

L'application du principe de retour inverse de la lumière permet de dire que *F* est le symétrique de *F'* par rapport à *O*. (Sur la figure ci-dessus il suffit de modifier le sens de propagation de la lumière, le point *F'* devient *F* et *OF'=OF*

Algébriquement : $\overline{OF} = -\overline{OF'}$



On appelle *plan focal* ***objet*** le plan perpendiculaire à l'axe en *F*.

Foyers secondaires objets – Distance focale objet

On appelle foyer secondaire ***objet*** tout point du plan focal objet autre que F.

La distance focale ***objet*** est la distance centre/foyer objet :

$$f = \overline{OF}$$

Foyer principal image – Plan focal image

On appelle foyer principal ***image*** le point *F'* de l'axe optique ou se forme l'image d'un point objet à l'infini.

On appelle plan focal ***image*** le plan perpendiculaire à l'axe en F'.

Foyers secondaires images – Distance focale image

On appelle *foyer secondaire* ***image*** tout point du plan focal objet autre que *F*.

La *distance focale* ***image*** est la distance centre/foyer image :

$$f' = \overline{OF'} = -f$$

- Pour une *lentille convergente*, **f<0** et **f'>0**
- Pour une *lentille divergente*, **f>0** et **f'<0**

La **vergence** d'une lentille est définie par: $C = \dfrac{1}{f'}$

La vergence s'exprime en dioptries *(δ): $1\ \delta = 1\ m^{-1}$*

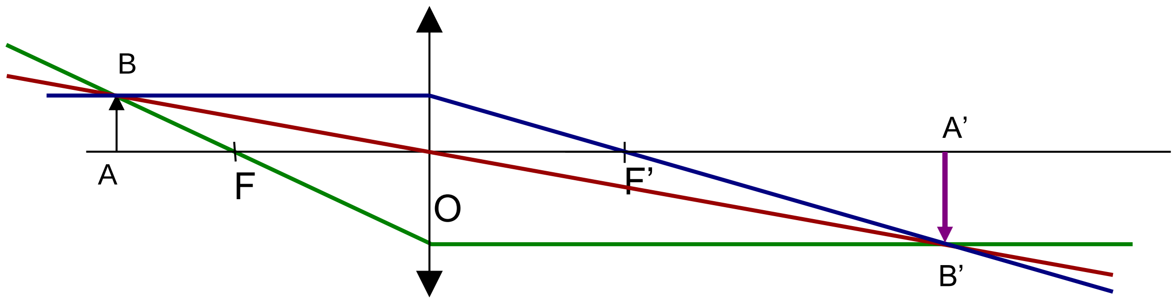
Comment déterminer l'image d'un objet:

Il existe 3 rayons « remarquables »:

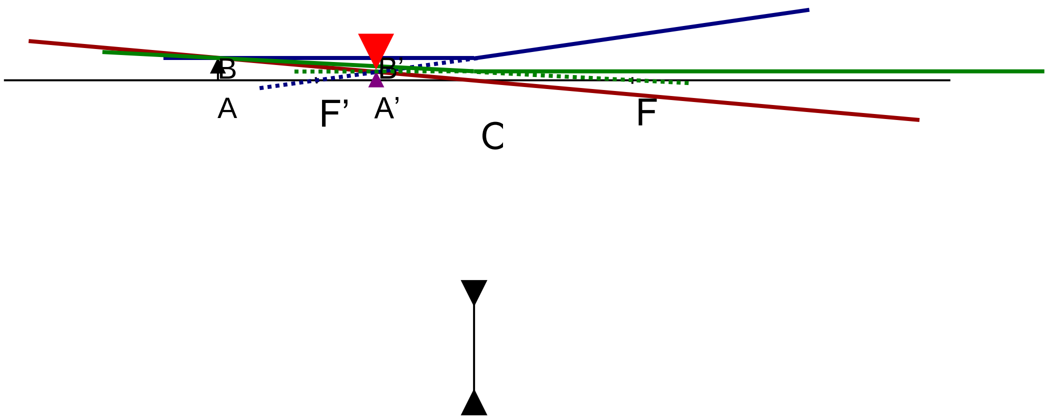
- **Rayon 1** : Tout rayon incident passe par le centre *O* n'est pas dévié
- **Rayon 2** : Tout rayon incident parallèle à l'axe optique est dévié par la lentille en passant par le foyer image F'
- **Rayon 3** : Tout rayon incident passant par le foyer objet F est dévié par la lentille en émergeant parallèle à l'axe optique

Comment déterminer l'image d'un objet réel :

- Pour une *lentille convergente* :

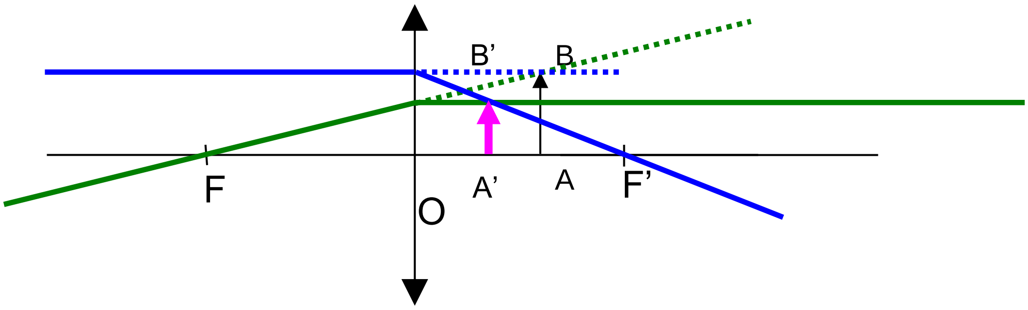


- Pour une *lentille divergente* :

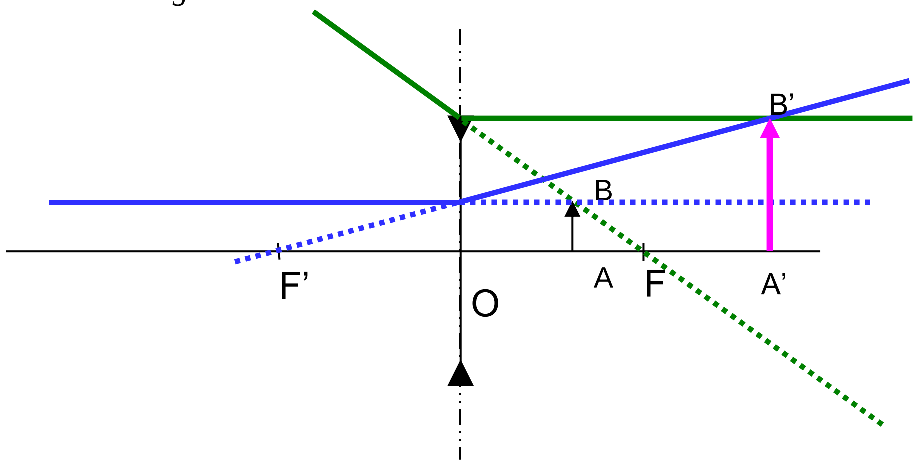


Comment déterminer l'image d'un objet virtuel :

- Pour une *lentille convergente* :



- Pour une *lentille divergente* :



Relations de conjugaison :

relation de DESCARTES: $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{1}{f'}$

relation de NEWTON: $\overline{FA}.\overline{F'A'} = -f'^2 = f.f'$

grandissement: $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -\frac{f}{\overline{FA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'}$

La vergence, exprimée dioptrie, d'une lentille mince est **l'inverse** de sa **distance focale *f'***

$$C = \frac{1}{f'}$$

***f'* en mètre et *C* en dioptrie (*δ*)**

Associations de lentilles

On considère deux lentilles L_1 et L_2 de centres optiques O_1 et O_2, de distances focales $f'_1 = O_1F'_1$ et $f'_2 = O_2F'_2$ et dont les axes optiques sont confondus. Leur association réalise un système appelé "***doublet*** ".

Comment déterminer l'image d'un objet AB→A'B'

$$A \xrightarrow{L_1} A_1 \xrightarrow{L_2} A'$$

1ère étape

$$A \xrightarrow{L_1} A_1$$

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{f_1'} \quad \Rightarrow \quad \overline{O_1A_1} = \frac{\overline{O_1A}.f_1'}{\overline{O_1A} + f_1'}$$

2ème étape

$$A_1 \xrightarrow{L_2} A'$$

$$\frac{1}{\overline{O_2A'}} - \frac{1}{\overline{O_2A_1}} = \frac{1}{f_2'} \quad \Rightarrow \quad \overline{O_2A'} = \frac{\overline{O_2A_1}.f_2'}{\overline{O_2A_1} + f_2'}$$

grandissement: $\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} . \dfrac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \gamma_2 . \gamma_1$

<u>Caractéristiques d'un instrument optique</u> :

1 - grandissement transversal: $\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

1' - grandissement angulaire: $\gamma = \dfrac{u'}{u}$

- pour les instruments qui donnent une image virtuelle

2 - puissance: $P = \dfrac{\alpha'}{\overline{AB}} = \dfrac{\text{diamètre apparent de l'image}}{\text{taille de l'objet}}$

2' - puissance intrinséque: P_i puissance qd image à l'∞

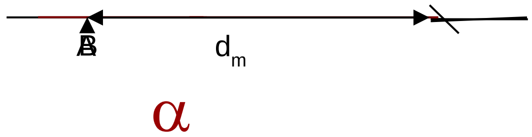
3 - grossissement angulaire: $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$

$$= \frac{\text{diamétre apparent de l'image à travers le S.O.}}{\text{diamétre apparent de l'objet placé au } PP}$$

3' - grossissement commercial : $G_c = \dfrac{\alpha'}{\alpha} = \dfrac{P_i}{4}$ A'B' est à l'∞

S.

O



Instruments optiques :

Les instruments optiques tels que loupe, microscope, lunette et télescope permettent de voir l'image agrandie d'un objet, cette image ayant sensiblement les dimensions de celle que l'on peut observer a l'œil nu. La loupe donne un modeste agrandissement de l'ordre de *10*. Le microscope permet de voir des objets de l'ordre de grandeur du micron. Le télescope ou la lunette permet d'agrandir les détails d'objet situes à l' infini. Notre œil est une lentille mince qui peut former d'un objet réel droit, dirigé verticalement vers le haut, une image réelle droite, inversée, donc dirigée vers le bas, comme une lentille positive. Cependant, notre cerveau redresse cette image et nous la voyons de même sens que l'objet, nous devons tenir compte de cette inversion lors d'une discussion sur un montage optique. Quand nous étudions un microscope, ou un télescope astronomique, le sens de l'image finale n'est souvent pas primordial, peu importe que l'image soit de même sens, ou de sens inverse, que l'objet.
Par contre, lors de l'utilisation d'une paire de jumelle, ou d'un périscope, il est impératif que l'image transmise par le cerveau soit de même sens que l'objet.
Nous pouvons déduire, une règle simple sur la détermination du sens d'une image : *quand l'image est placée du même côté que l'objet par rapport à interface du dioptre ou de la lentille, elle a le même sens que l'objet ; quand elle est placée de l'autre côté du système, l'image est inversée.*

La loupe

La loupe sert à agrandir un objet. C'est une lentille convergente.

puissance intrinséque: $P_i = \dfrac{1}{f'}$

puissance qd image à l'∞ ou oeil en F' (foyer image)

Le microscope

Le grossissement commercial d’une loupe est donc limité (à environ 20).Pour avoir de plus grands grossissements, il faut utiliser d’autres instruments comme le microscope.

Le microscope est constitué de deux systèmes optiques. Le premier, ***l’objectif***, assimilé à une lentille convergente, donne d’un petit objet une image très agrandie qui est observée à travers un second système, ***l’oculaire***, également assimilé à une lentille convergente ou loupe. L’image définitive est beaucoup plus grande que l’objet. La première lentille L_1 est l'objectif. Cette lentille a une petite distance focale, elle forme de l'objet réel une image réelle droite de sens inverse a l'objet. Ensuite, le montage grossissant loupe-œil est applique. Nous désignons la loupe par L_2. En fait, la lentille qui joue le rôle de la loupe est appelée l'oculaire. L'image finale observée par l'expérimentateur est formée sur la rétine de l'œil : elle est réelle et inversée.

L’objet $\overline{AB}$ est placé très près mais au-delà du foyer objet F_1 de l’objectif. Celui-ci en donne une image $\overline{A_1B_1}$, réelle, renversée et très agrandie.

L’oculaire fonctionnant comme une loupe, $\overline{A_1B_1}$ doit être entre son centre optique O_2 et son foyer objet F_2, très près de celui-ci. L’image définitive $\overline{A'B'}$ est virtuelle, renversée par rapport à l’objet $\overline{AB}$ et encore agrandie par rapport à $\overline{A_1B_1}$. En particulier, si on veut voir cette image à l’infini, le point A_1 doit être confondu avec F_2.

Remarquons que si A_1 se forme avant F_2, l’image $\overline{A'B'}$ est réelle, droite par rapport à l’objet et beaucoup plus grande que celui-ci.

Δ choisi tel que A_1B_1 soit entre F_2 et O_2