

MPSI  
PCSI  
PTSI  
MP2I

Renaud Carpentier  
Benoît Dépret  
Baptiste Percier

# Toute la Physique de Sup en applications

150 exercices et problèmes corrigés  
contemporains et résumé de cours



# CHAPITRES 1, 2 et 3

## OPTIQUE GEOMETRIQUE

---

### 1 Bases de l'optique géométrique

L'optique traite de la lumière, de sa propagation et de ses propriétés. Parmi celles-ci, la *nature* de la lumière est une question qui fut âprement débattue dans l'histoire des sciences.

Dans le cadre de l'**optique géométrique**, on s'intéresse à la propagation de la lumière. On dessine par des traits le trajet suivi par la lumière, c'est-à-dire que l'on représente le trajet suivi par les photons ou bien par l'énergie véhiculée par l'onde électromagnétique. Ces traits forment ce que l'on appelle les *rayons lumineux*.



Faisceau laser du télescope Yepun sur le Cerro Paranal au Chili

Auteur : ESO/Yuri Beletsky (licence CC BY-SA)

**Le faisceau laser, assimilable à un unique rayon lumineux du fait de sa faible divergence, est visible grâce à la diffusion par l'air d'une faible fraction de la lumière tout au long de sa propagation.**

<b>Les principes fondamentaux</b>
-----------------------------------

L'optique géométrique s'appuie essentiellement sur trois principes fondamentaux :

- Le principe d'indépendance des rayons lumineux : deux rayons lumineux n'interagissent pas entre eux.
- Le principe de retour inverse de la lumière : le chemin suivi par la lumière ne dépend pas du sens de parcours.
- Le principe de propagation rectiligne dans un milieu homogène transparent isotrope.

Un milieu est dit **homogène** s'il a les mêmes propriétés en tout point de l'espace, **transparent** s'il n'absorbe pas la lumière et **isotrope** s'il possède les mêmes propriétés dans toutes les directions de l'espace.

Dans un milieu homogène transparent isotrope, la lumière se déplace en ligne droite à une vitesse  $v$  dépendant du milieu et de la fréquence de l'onde.

On définit l'**indice de réfraction** ou indice optique  $n$  par la relation :

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

avec  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide, valant exactement  $299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$  (retenir que  $c = 3,00 \cdot 10^8\text{ m.s}^{-1}$ ). Plus l'indice est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**. Il est bon de connaître quelques valeurs d'indice de réfraction :  $n_{\text{vide}} = 1$ ,  $n_{\text{eau}} = 1,33$ ,  $n_{\text{verre}} \approx 1,5$  (selon le type de verre). L'indice de l'air dépend des conditions de température et pression (on l'observe dans le phénomène de mirage), à température et pression ambiantes, il vaut  $n_{\text{air}} = 1,0029$  et la plupart du temps on prendra  $n_{\text{air}} = 1$ .

L'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde du rayonnement. Il est, en général, plus élevé pour les courtes longueurs d'onde. C'est le phénomène de **dispersion**.

<b>Les lois de Snell-Descartes</b>
------------------------------------

**Quelques définitions :**

- Un **dioptre** est une surface séparant deux milieux homogènes transparents isotropes.
- Un **miroir** est une surface parfaitement réfléchissante (la lumière est renvoyée dans une direction privilégiée contrairement aux surfaces diffusantes, comme une feuille de papier).
- Le **plan d'incidence** est le plan contenant le rayon incident sur un dioptre ou un miroir et la normale au dioptre ou au miroir au point d'incidence  $I$ .
- L'angle d'incidence est l'angle orienté de la normale vers le rayon incident.
- L'angle de réflexion est l'angle orienté de la normale vers le rayon réfléchi.
- L'angle de réfraction (ou de transmission) est l'angle orienté de la normale vers le rayon réfracté, s'il existe.

## Un peu d'histoire

### Du modèle corpusculaire...

Depuis l'antiquité grecque, avec les travaux d'Euclide (IV<sup>e</sup> siècle avant JC) jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle, avec les travaux de Newton, la lumière est corpusculaire. Une source lumineuse émet des particules qui se propagent en ligne droite dans le vide, sont réfléchies par les miroirs et déviées lorsqu'elles changent de milieu.

### ...au modèle ondulatoire.

La vision corpusculaire de la lumière permet de rendre compte de nombreux phénomènes (les mirages ou les arcs-en-ciel primaires et secondaires par exemple), mais ne suffit pas pour interpréter les phénomènes de diffraction ou d'interférences. Ainsi, aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle, grâce notamment à Christian Huygens ou à Augustin Fresnel, l'optique ondulatoire se développe. James Clark Maxwell affirme alors que la lumière est une onde électromagnétique progressive transversale qui se propage dans le vide à la vitesse  $c$ . Sa propagation est régie par les équations de Maxwell au même titre que les ondes radio, les ondes wifi ou 5G. Les ondes lumineuses correspondent au domaine visible (par des yeux humains), c'est-à-dire à des longueurs d'onde dans le vide :

$$400 \text{ nm} < \lambda_0 < 800 \text{ nm}$$

soit à des fréquences :

$$3,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz} < f < 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

La fréquence  $f$  de la radiation, et donc sa longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$ , les deux grandeurs étant reliés par la formule  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ , détermine sa couleur. Il est bon de connaître quelques valeurs, notamment les limites infra-rouge (IR) et ultraviolet (UV), ainsi que la valeur centrale pour le vert :

Couleur	<b>limite UV</b>	violet	bleu	<b>vert</b>	jaune	orange	rouge	<b>limite IR</b>
$\lambda_0$ (nm)	<b>400</b>	420	470	<b>530</b>	580	600	650	<b>780</b>

### Modèle corpusculaire II, le retour ?

La nature ondulatoire de la lumière convient parfaitement pour de nombreuses situations. Cependant, au début du XX<sup>e</sup> siècle, Einstein, grâce aux travaux de Planck, interprète les échanges d'énergie entre la lumière et la matière en réintroduisant le modèle corpusculaire : la lumière est constituée de particules de masse nulle, appelées les photons. Ce point de vue permet d'expliquer assez naturellement le rayonnement du corps noir ou encore l'effet photoélectrique. Selon la situation, l'un ou bien l'autre aspect de la lumière (corpusculaire ou ondulatoire) sera utilisé pour interpréter l'expérience étudiée. Ce point sera détaillé dans le chapitre de mécanique quantique.

Un rayon lumineux incident, arrivant sur un dioptre séparant deux milieux homogènes transparents isotropes notés 1 et 2, d'indices de réfraction respectifs  $n_1$  et  $n_2$ , donne lieu à un rayon réfléchi dans le milieu 1 et un rayon réfracté (ou transmis) dans le milieu 2.

**Lois de Snell-Descartes pour la réflexion :**

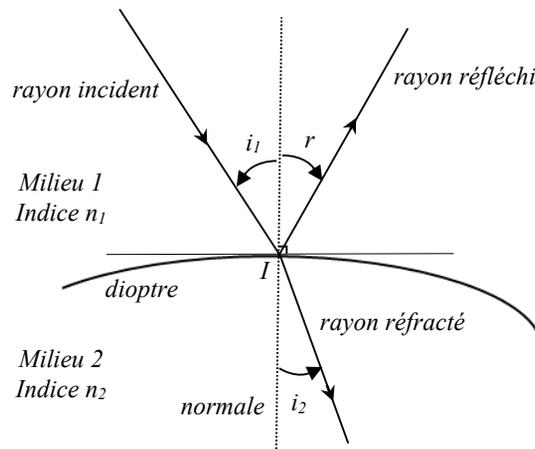
- 1) Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence.
- 2) L'angle de réflexion  $r$  est l'opposé de l'angle d'incidence  $i_1$  :

$$r = -i_1$$

**Lois de Snell-Descartes pour la réfraction :**

- 1) S'il existe, le rayon réfracté appartient au plan d'incidence.
- 2) L'angle de réfraction  $i_2$  est lié à l'angle d'incidence  $i_1$  par la relation :

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



**Les lois de Snell-Descartes régissent la réflexion et la réfraction d'un rayon lumineux à l'interface entre deux milieux**

Important :

- Lorsque l'on trace un rayon lumineux, il faut **préciser son sens** à l'aide d'une flèche.
- Les angles sont toujours repérés par rapport à la normale au dioptre.

**Remarques et cas particuliers :**

Il y a toujours une fraction de l'énergie lumineuse qui est réfléchi. Son importance relative dépend des indices des deux milieux et de la polarisation de la lumière. Les lecteurs et lectrices pratiquant la pêche ont certainement apprécié l'utilisation de lunettes à verres polarisants diminuant les reflets à la surface de l'eau.

- Lorsque l'angle d'incidence est nul, il y a toujours un rayon réfracté et la lumière n'est pas déviée.
- Lorsque le milieu 1 est **moins réfringent** que le milieu 2 ( $n_1 < n_2$ ), il y a toujours un rayon réfracté et celui-ci est dévié en se rapprochant de la normale.

Dans le cas limite où  $i_1 = \frac{\pi}{2}$ , on a  $i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ .

- Si le milieu 1 est **plus réfringent** que le milieu 2 alors le rayon réfracté est dévié en s'écartant de la normale. Or  $i_2 \leq \frac{\pi}{2}$ , il existe donc une valeur maximale de  $i_1$ , notée  $i_{\text{lim}}$ , au-delà de laquelle il n'existe plus de rayon réfracté. Cette valeur est telle que  $n_1 \sin(i_{\text{lim}}) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = n_2$ , soit  $i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ . Pour un angle d'incidence plus grand que  $i_{\text{lim}}$ , le rayon est entièrement réfléchi, on dit qu'il y a **réflexion totale**. Ce phénomène est mis à profit dans les fibres optiques à saut d'indice.

## 2 Systèmes optiques

Un objet lumineux émet de la lumière. On peut caractériser cet objet grâce à son spectre, qui peut être continu (Soleil, lampe à incandescence) ou discret (lampe spectrale – les lampes orangées d'éclairage urbain par exemple – laser). Si un objet a une dimension faible devant les autres distances du problème, on pourra le considérer ponctuel. Dans le cas contraire, il est étendu, mais pourra être considéré comme une collection d'objets ponctuels.

Un **système optique** est formé par une succession de milieux homogènes transparents isotropes séparés par des dioptres et/ou des miroirs.

Un système optique est dit **centré** s'il possède un axe de symétrie de révolution. Cet axe est appelé **axe optique**, toujours orienté dans le sens de la lumière incidente. Dans toute la suite, sauf mention contraire, on ne considérera que des systèmes optiques centrés.

En optique, les grandeurs sont algébriques. Par convention, on compte positivement une distance orientée dans le sens de la lumière incidente et négative dans le cas contraire. On préférera parler de mesure algébrique plutôt que de distance algébrique car en mathématiques, une distance est, par définition, une grandeur positive.

On dit que deux points  $A$  et  $A'$  sont **conjugués par un système optique** si tout rayon issu de  $A$  sort d'un système optique en passant (ou en semblant passer) par  $A'$ . Ce dernier est alors l'**image de  $A$**  par le système optique. Les positions de  $A$  et  $A'$  sont alors liées par une relation appelée **relation de conjugaison**.

Les objets et les images peuvent être **réels** ou **virtuels** suivant que les rayons passent effectivement ou non par ces points. On représente en pointillés les prolongements de rayons.

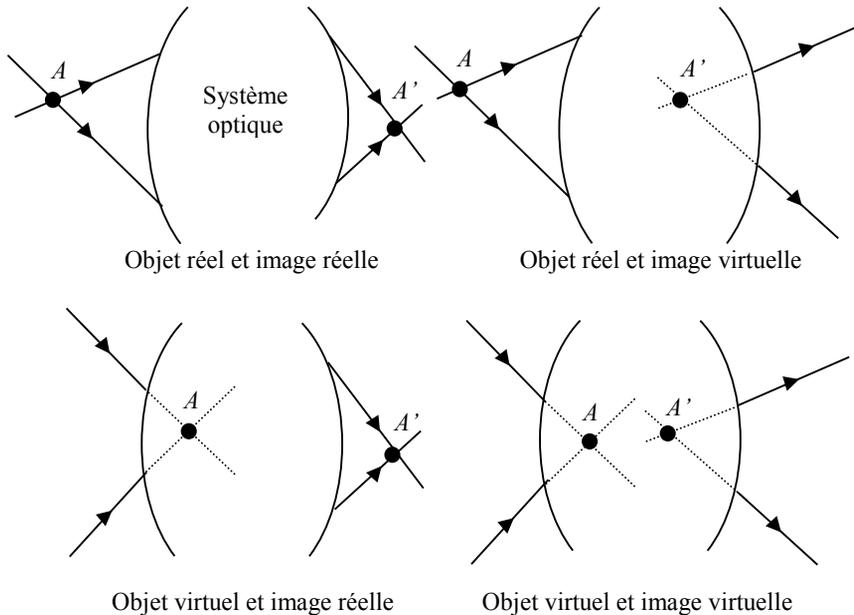
<b>Stigmatisme rigoureux et stigmatisme approché</b>
--

Un système optique est dit **rigoureusement stigmatique** pour le couple de points  $(A, A')$  si tous les rayons issus de  $A$  émergent du système optique en passant (ou semblant passer) exactement par  $A'$ . Concrètement, il existe très peu de système rigoureusement stigmatique. Le miroir plan est un système rigoureusement stigmatique. Heureusement, le stigmatisme rigoureux n'est pas nécessaire pour avoir une image de bonne qualité, un stigmatisme approché suffit. En effet, un capteur de lumière (d'appareil photo ou même un œil) est constitué de cellules photosensibles (pixel ou cônes et bâtonnets) de taille finie. Ainsi, si l'image d'un point n'est pas un point mais une tache de taille plus petite que celle d'un élément photosensible alors le capteur ne pourra pas faire la différence avec un stigmatisme rigoureux.

En pratique, pour obtenir un **stigmatisme approché**, on place le système dans les **conditions de Gauss** :

*les rayons incidents doivent être peu inclinés et peu écartés de l'axe optique*

On les qualifie de **rayons paraxiaux**. En pratique, on utilise des objets de faibles dimensions et on limite l'ouverture des rayons à l'aide de diaphragmes.



**Les points  $A$  et  $A'$  sont conjugués par le système optique  
L'objet  $A$  et l'image  $A'$  peuvent être réels ou virtuels**

**Quelques définitions :**

- Un système optique centré est rigoureusement **aplanétique** si l'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe optique est plane et perpendiculaire à l'axe optique. (l'aplanétisme nécessite le stigmatisme).
- Le **foyer principal image** (souvent noté  $F'$ ) est l'image d'un point situé à l'infini sur l'axe optique (il peut être réel ou virtuel).
- Le **foyer principal objet** (souvent noté  $F$ ) est un point de l'axe optique dont l'image est située à l'infini sur l'axe optique.
- Un foyer secondaire image est l'image d'un point à l'infini (non nécessairement sur l'axe optique). L'ensemble des foyers images forment le **plan focal image**.
- Un foyer secondaire objet est un point dont l'image est à l'infini (non nécessairement sur l'axe optique). L'ensemble des foyers objets forment le **plan focal objet**.
- Un système optique est dit **afocal** si ses foyers principaux objets et images sont à l'infini. Un système afocal fait d'un objet à l'infini une image à l'infini.

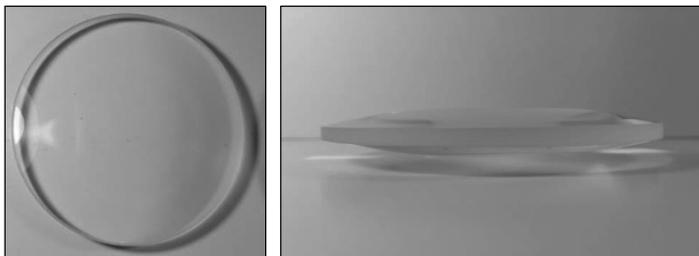
***Une expérience à tester à la maison***

*Imaginez que vous avez cassé vos lunettes et vous devez absolument lire un texte. Rien, n'est perdu, il suffit de placer vos yeux dans les conditions de Gauss. Appuyez votre index sur votre pouce pour chaque main puis joignez index contre index et pouce contre pouce de façon à former un tout petit trou entre les quatre doigts. Placez l'un de vos yeux devant ce trou, votre vision s'est améliorée !*

**3 Lentilles minces sphériques**

Une lentille sphérique résulte de l'association de deux dioptries sphériques. Il s'agit par nature d'un système optique centré dont l'axe optique passe par les centres des dioptries sphériques.

Une lentille sphérique est dite **mince** lorsque son épaisseur sur l'axe optique est faible devant le rayon des dioptries. Dans ce cas, on considère que cette épaisseur est nulle. L'intersection de la lentille avec l'axe optique définit le **centre optique**.

**Lentille de laboratoire, vue de face et de profil**

**Dans le modèle de la lentille mince, on considère que son épaisseur est nulle**

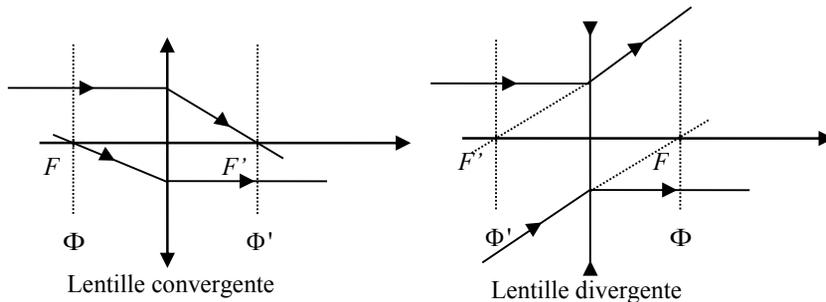
*Auteur : Benoît Dépret (licence CC BY-SA)*

Au voisinage de l'axe optique, une lentille mince sphérique est assimilable à une lame à faces parallèles. Ainsi un rayon passant par le centre optique n'est pas dévié (il est seulement décalé, mais ce décalage est nul dans le cas d'une lentille mince dont l'épaisseur est négligée).

Les foyers principaux objet et image d'une lentille mince sphérique sont symétriques par rapport au centre optique et placés sur l'axe optique, soit  $\overline{OF'} = -\overline{OF}$ . Attention, ils ne sont pas conjugués !

### Quelques définitions :

- La distance focale objet  $f$  est la mesure algébrique  $f = \overline{OF}$ .
- La **distance focale image**  $f'$  est la mesure algébrique  $f' = \overline{OF'}$ .
- Pour une **lentille convergente**  $f' > 0$  (et  $f < 0$  puisque  $f' = -f$ ) les deux foyers principaux sont réels.
- Pour une **lentille divergente**  $f' < 0$  (et  $f > 0$ ) les deux foyers principaux sont virtuels.
- La **vergence** d'une lentille est définie comme l'inverse de la distance focale image, par la relation  $V = \frac{1}{f'}$ . La vergence s'exprime en *dioptrie* (notée  $\delta$ ) ou en  $m^{-1}$ .



### Construction des foyers principaux $F$ et $F'$ et des plans focaux objet et image $\Phi$ et $\Phi'$

#### Tracé de rayons lumineux

Il est possible, à partir des propriétés et définitions précédentes, de trouver le cheminement d'un rayon quelconque à travers une lentille.

La méthode consiste à :

- Tracer un rayon parallèle au rayon incident et dont on connaît le cheminement après la lentille. Le plus simple est de considérer le rayon passant par le centre optique, celui-ci n'étant pas dévié.
- On peut alors considérer que ces deux rayons proviennent d'un objet (fictif) situé à l'infini. D'après la définition des foyers secondaires images, ces deux rayons se croisent (ou semblent se croiser) dans le plan focal image de la lentille. On repère donc l'intersection du rayon passant par le centre optique avec le plan focal image.
- On trace le rayon émergent en le faisant passer (ou en semblant passer) par le foyer secondaire image trouvé (et on n'oublie pas de mettre des flèches sur les rayons !)