

AVANT PROPOS

Ce cours d'optique géométrique est destiné aux étudiants inscrits au module *Physique 2* des filières Sciences de la matière 'Physique' (SMP), Sciences de la matière 'Chimie' (SMC) et Sciences mathématiques (SM). Il constitue un outil très utile pour pouvoir suivre le cours d'optique proposé dans ce module. Il ne dispense en aucun cas l'étudiant de la présence effective au cours.

L'étudiant est amené à refaire lui-même les schémas qui sont présentés dans ce polycopié dans le but d'une bonne maîtrise des constructions géométriques. D'autre part, aucun développement mathématique n'a été présenté. L'étudiant aura l'occasion de suivre ce développement soit pendant le cours magistral, soit pendant les séances de travaux dirigés.

Ainsi, l'étudiant est invité à reprendre le contenu de ce support sur un cahier au fur et à mesure du déroulement du cours en plus des notes développées à l'amphithéâtre.

F. CHIBANE et M.BENMOUSSA

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'optique est la branche de la physique qui s'intéresse à l'étude des phénomènes lumineux, c'est-à-dire des phénomènes perçus par l'œil. Mais aussi des phénomènes engendrés par une cause de même nature que celle qui entraîne l'apparition de phénomènes visuels (UV, IR, etc.). Cette science a connu un regain d'intérêt après la découverte du laser. En effet, la cohérence de cette lumière a permis de développer des techniques sophistiquées comme l'holographie, les méthodes interférométriques, la spectroscopie haute résolution, la microscopie, etc. De plus, la lumière est devenue ces dernières années un support de choix pour la transmission des informations grâce à la découverte de la fibre optique.

À l'échelle de l'enseignement, cette discipline est séparée en deux parties :

- **L'optique géométrique**, qui ne fait aucune hypothèse sur la nature physique de la lumière, s'intéresse aux phénomènes de propagation, réflexion et réfraction de la lumière. Des lois simples peuvent rendre compte de ces phénomènes (lois de Snell-Descartes, loi de propagation rectiligne de la lumière). Bien que basée sur des considérations simples, l'optique géométrique permet l'étude des systèmes optiques simples et des instruments d'optique.

- **L'optique physique** permet d'expliquer les phénomènes d'interférence, de diffraction, de polarisation, etc. en faisant appel à la nature ondulatoire de la lumière.

Dans ce cours, on s'intéresse uniquement à l'étude de l'optique géométrique, le but final étant l'étude des instruments d'optique.

GÉNÉRALITÉS

1. Nature de la lumière

Nous présentons dans ce paragraphe un aperçu sur l'évolution des idées sur la nature de la lumière. On savait depuis l'antiquité la loi de réflexion de la lumière. Grâce au physicien arabe Alhazen (**Ibn Hazm**), on a compris pour la première fois que l'œil n'émet pas de rayons lumineux mais ce sont les objets qui émettent des rayons lumineux lorsqu'ils sont éclairés par des sources. La première théorie relative à la nature de la lumière fut celle énoncée par **Newton**. Elle admettait que la lumière est constituée de grains d'une nature imprécise se propageant à très grande vitesse. Plus tard, pour expliquer les phénomènes d'interférences et de polarisation, **Huygens**, **Fresnel**, **Malus**, **Young** et autres ont supposé que la lumière est propagée par le mouvement vibratoire d'un milieu hypothétique, *l'éther*. **Maxwell** proposa ensuite sa théorie électromagnétique d'après laquelle 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 $c = 299790 \text{ km/s}$. Par la suite, **Planck** et plus particulièrement **Einstein** ont exploré la notion de photon pour interpréter l'effet photoélectrique attribuant ainsi *un aspect corpusculaire* à la lumière. Grâce à la mécanique ondulatoire, **de Broglie** a réussi à concilier les deux aspects *ondulatoire* et *corpusculaire* de la lumière. La contribution de l'époque contemporaine est marquée par la découverte du laser et la fibre optique qui ont ouvert à cette discipline des champs d'investigations de plus en plus vastes.

2. Notion de source lumineuse

On appelle *source lumineuse* tout objet matériel émettant la lumière. On peut citer comme exemple le Soleil, la Lune ou la flamme d'une bougie. On distingue :

- **les sources primaires** qui transforment l'énergie autre que lumineuse en énergie lumineuse (le Soleil transforme l'énergie nucléaire en lumière) ;
- **les sources secondaires** qui réémettent l'énergie lumineuse en provenance d'autres sources primaires ou secondaires (la Lune par exemple).

Une source est nécessairement étendue, mais du point de vue récepteur, elle est dite ponctuelle d'autant mieux qu'elle est éloignée.

3. Milieux de propagation de la lumière

La lumière traverse plus ou moins bien les milieux de propagation. On distingue :

Les milieux transparents : où la propagation dépend peu de l'épaisseur de la substance (verre, vide, air, etc.).

Les milieux opaques : qui empêchent totalement la propagation.

Les milieux translucides : laissent passer la lumière mais ne permettent pas de distinguer la forme des corps placés derrière eux.

Un milieu est **homogène** lorsqu'il possède les mêmes propriétés en chacun de ses points. Il est **isotrope** s'il possède les mêmes propriétés quelle que soit la direction considérée.

Une source lumineuse émet une vibration. Si cette vibration a une période bien déterminée T , la lumière est dite **simple** ou **monochromatique**. Sa longueur d'onde dans le vide est $\lambda_0 = cT$, avec c est la célérité de la lumière dans le vide. Si la lumière comprend plusieurs vibrations simples différentes, la lumière est dite **complexe** ou **polychromatique**.

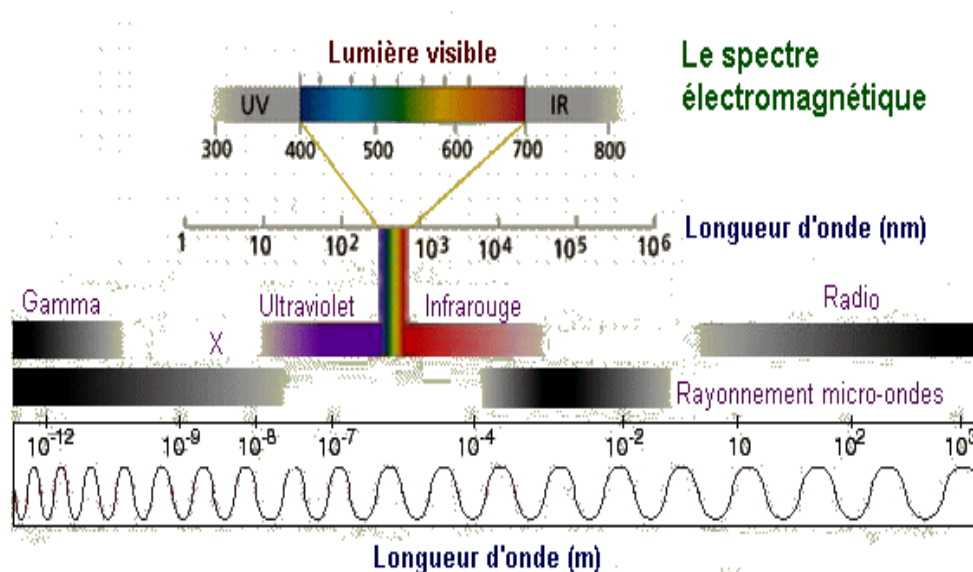


Figure I-1

Quelques caractéristiques de la lumière

- Vitesse de propagation dans le vide: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.
- La lumière peut se propager même en l'absence de milieu matériel, c'est-à-dire même dans le vide (contrairement aux sons).
- La lumière est une onde sinusoïdale fonction du temps et de l'espace, sa période T (en s), sa fréquence $\nu = 1/T$ (en s^{-1} ou Hz) et sa longueur spatiale λ (en m) sont reliés par : $c = \lambda/T = \lambda \nu$.

Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, la lumière se propage à une vitesse v au plus égale à la vitesse dans le vide ($v \leq c$). On définit l'indice du milieu de propagation par la quantité :

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

On retiendra alors que n est un nombre sans dimension supérieur ou égal à 1. Il dépend, cependant, de la longueur d'onde λ_0 .

Exemples

Vide	Air	Eau	Verre	Diamant
1	1,000293	1,33	1,5	2,42

4. Notion de rayon lumineux

L'ombre portée sur un écran par un objet opaque suggère que le faisceau émis par la source est composé de rayons lumineux rectilignes. Essayons d'isoler un de ces rayons. Pour cela, utilisons un diaphragme dont on diminuera l'ouverture progressivement. On constate que plus l'ouverture diminue, plus la tache sur l'écran s'élargit. C'est le phénomène de diffraction. Il est donc impossible d'isoler un rayon lumineux. On peut cependant utiliser la notion de rayon lumineux comme modèle pour décrire la propagation de la lumière et la formation des images. C'est l'objet de l'optique géométrique. Elle repose sur trois principes :

1- Principe de propagation rectiligne de la lumière

Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.

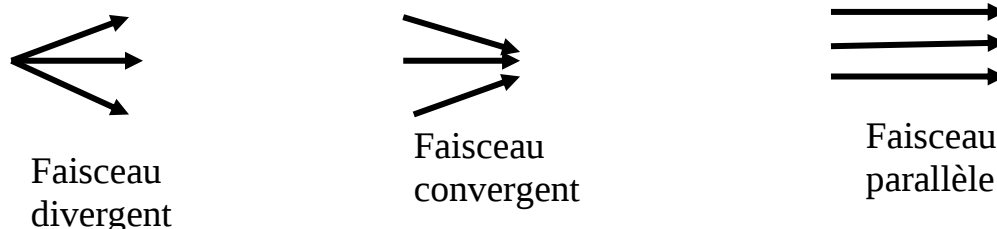
2- Principe d'indépendance des rayons lumineux

Les rayons émis par une ou plusieurs sources sont indépendants.

3- Principe du retour inverse

Dans un milieu transparent et isotrope, le trajet de la lumière est indépendant du sens de parcours.

Un ensemble de rayons constitue un faisceau lumineux, on définit plusieurs types de faisceaux



5- Lois de l'optique géométrique

5.1. Lois de Snell-Descartes

Soient deux milieux transparents, homogènes et isotropes séparés par une surface (Σ). Désignons par n_1 et n_2 les indices de réfraction de ces deux milieux et par N_1N_2 la normale à (Σ) en un point I.

Considérons un rayon lumineux (**Figure I-2**) A_1I se propageant dans le milieu 1 et tombant sur la surface (Σ) au point I. On observe en général deux rayons : un rayon *réfléchi* IR , se propageant dans le milieu 1, et un rayon transmis IA_2 , dit *réfracté*, se propageant dans le milieu 2. Désignons par i_1 , r et i_2 les angles que font respectivement ces trois rayons avec la normale N_1N_2 . Les directions de propagation des différents rayons sont données par les lois de Snell-Descartes :

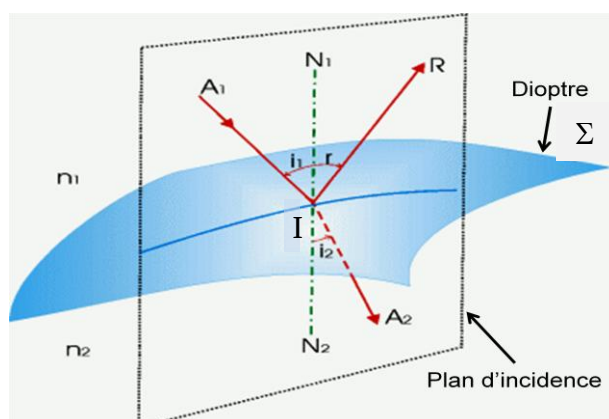


Figure I-2

i. les rayons réfléchi et réfracté sont dans un même plan dit d'*incidence* et contenant la normale N_1N_2 ;

- ii. l'angle r de réflexion est égal et opposé à l'angle d'incidence i_1 : $i_1 = -r$
- iii. il y a un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence i_1 et de réfraction i_2 :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \eta = \text{constante.}$$

La quantité η est appelée indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1. Si $\eta > 1$, le milieu 2 est plus réfringent que le milieu 1 ; le rayon réfracté se rapproche de la normale. Par contre, si $\eta < 1$, le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

5.2. Indice de réfraction

La constante η , introduite précédemment, caractérise à la fois la nature des deux milieux de propagation ainsi que le sens de cette propagation. Elle est appelée **indice relatif** du milieu 2 par rapport au milieu 1 et désignée par $n_{2/1}$. On montre que $n_{2/1}$ est rattaché aux vitesses de propagation v_1 et v_2 des rayons dans les deux milieux à travers la relation :

$$n_{2/1} = \frac{v_1}{v_2}$$

5.3. Indice absolu

L'**indice absolu** n d'un milieu est son indice relatif par rapport au vide. On a vu que n peut s'écrire sous la forme $n = c / v$. En désignant par n_1 et n_2 les indices absolus des milieux 1 et 2, il vient donc :

$$n_{2/1} = \frac{n_2}{n_1}$$

La troisième loi de Snell-Descartes s'écrit alors : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Dans le cas des faibles angles, cette dernière relation s'écrit : $n_1 i_1 = n_2 i_2$

Cette relation est connue sous le nom de formule de *Kepler*.

5.4. Les limites de réfraction

La réfraction est le changement de direction que subit un rayon lumineux lorsqu'il traverse la surface de séparation de deux milieux d'indices différents, l'étude du phénomène est basée sur la loi de réfraction donnée par :

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

1^{er} cas : Le premier milieu est moins réfringent que le deuxième : $n_1 < n_2$ (**Figure I-3**)

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 < \sin i_1 \Rightarrow i_2 < i_1$$

$\Rightarrow$ Le rayon réfracté s'approche de la normale donc il existe toujours un rayon réfracté.

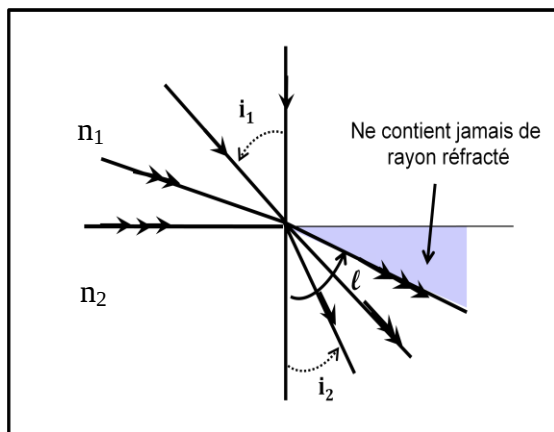


Figure I-3

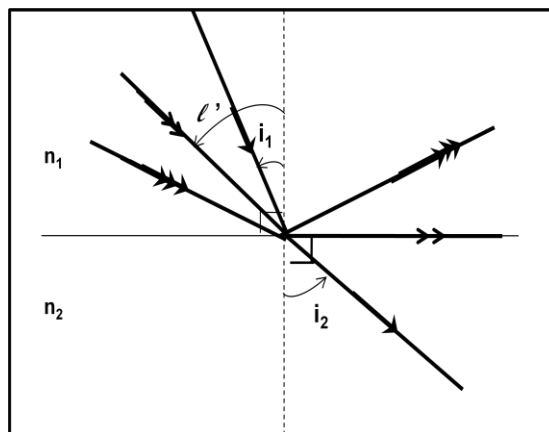


Figure I-4

Incidence rasante : $i_1 = \frac{\pi}{2}$, $i_2 = l$.

l est l'angle de réfraction limite, donné par : $n_1 \sin \frac{\pi}{2} = n_2 \sin l \Rightarrow \sin l = \frac{n_1}{n_2}$

Exemples :

Air – eau : $\sin l = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{1.33} \Rightarrow l = 49^\circ$

Air – verre : $\sin l = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{1.5} \Rightarrow l = 42^\circ$

2^{ème} cas : Le premier milieu est plus réfringent que le deuxième : $n_1 > n_2$ (**Figure I-4**)

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 > \sin i_1 \Rightarrow i_2 > i_1$$

$\Rightarrow$ le rayon réfracté s'éloigne de la normale

- Si $i_1 \leq l' \Rightarrow$ réfraction
- Si $i_1 > l' \Rightarrow$ réflexion totale

Emergence rasante : $i_2 = \frac{\pi}{2}$, $i_1 = \ell'$ telle que :

$$\ell' \text{ est l'angle de réfraction limite. } n_1 \sin \ell' = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \ell' = \frac{n_2}{n_1}$$

5.6. Cas d'un milieu non homogène

Dans un milieu non homogène, la lumière ne se propage pas en ligne droite en général. Dans le cas où l'indice présente un gradient, l'œil peut recevoir des rayons courbés qui peuvent provoquer des illusions d'optique. C'est ainsi que dans les régions très chaudes ou très froides, les phénomènes de mirage peuvent apparaître.

6. Principe de Fermat

6.1. Notion de chemin optique

Le temps dt mis par la lumière pour parcourir la distance ds dans un milieu d'indice n à la vitesse v est :

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

La quantité $dL = n ds$ est appelée *chemin optique* élémentaire. Le chemin optique correspondant à la propagation entre deux points A et B du milieu de propagation est alors :

$$L_{AB} = (AB) = \int_A^B dL = \int_A^B n ds = c \int_{t_A}^{t_B} dt$$

où t_A et t_B sont les instants de passage de la vibration aux points A et B.

Le terme $c \int_{t_A}^{t_B} dt$ n'est autre que le temps mis par la lumière pour aller de A à B au facteur de conversion c près.

6.2. Principe de Fermat

Enoncé

La trajectoire effectivement suivie par la lumière correspond à un chemin optique extrémal.

En termes de temps, le principe de Fermat s'énonce ainsi :

Le trajet effectivement suivi par la lumière est celui pour lequel le temps de parcours est extremum.

7. Théorème de Malus

7.1. Surface d'onde

Soit une source ponctuelle S . On appelle *surface d'onde* le lieu des points M tel que le chemin optique (SM) soit constant, (SM) étant compté le long d'un rayon lumineux.

7.2. Théorème de Malus - Énoncé

Après un nombre quelconque de réflexions ou de réfractions, les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle sont normaux aux surfaces d'onde.

8. Formation de l'image. Stigmatisme

8.1. Système optique

Un système optique (S) est constitué par une suite de milieux transparents homogènes limités par des surfaces réfringentes ou réfléchissantes. Pour des raisons techniques ces surfaces sont en général planes ou sphériques. Le système (S) est caractérisé par une surface d'entrée et une surface de sortie.

8.2. Formation de l'image

Le rôle d'un instrument optique est de donner des images les plus fidèles et, généralement, les plus grandes des objets observés. Si les rayons issus d'un point objet A convergent vers un point A' après avoir traversé le système optique, on dit que A' est l'image de A ou que A' est le conjugué de A ou encore que le système est stigmatique pour le couple (A, A') .

8.3. Réalité et virtualité d'un objet ou d'une image

La nature d'un objet ou d'une image dépend de sa position par rapport aux surfaces d'entrée σ_E et de sortie σ_S du système. Ainsi, l'espace est divisé comme indiqué sur les figures suivantes :

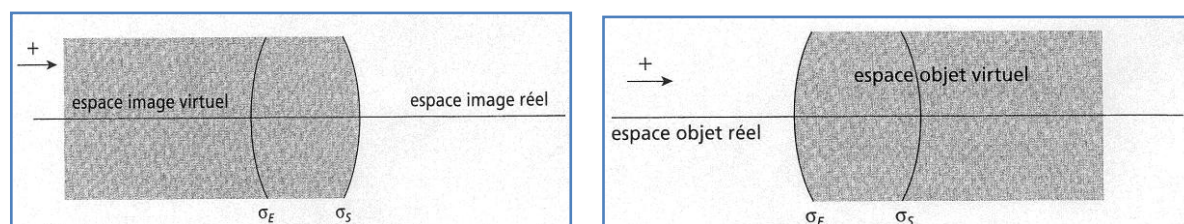


Figure I-5 : Espace objet – espace image pour les dioptries

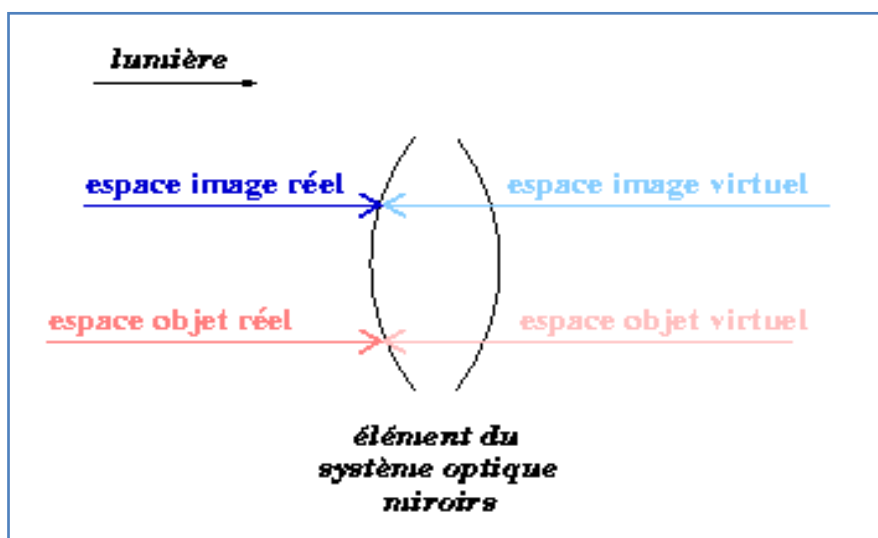


Figure I-6 : Espace objet – espace image pour les miroirs

Un objet (respectivement une image) est dit réel (**Figure I-7**) s'il se trouve dans l'espace objet réel (respectivement dans l'espace image réel). Un objet (respectivement une image) est dit virtuel s'il se trouve dans l'espace objet virtuel (respectivement dans l'espace image virtuel).

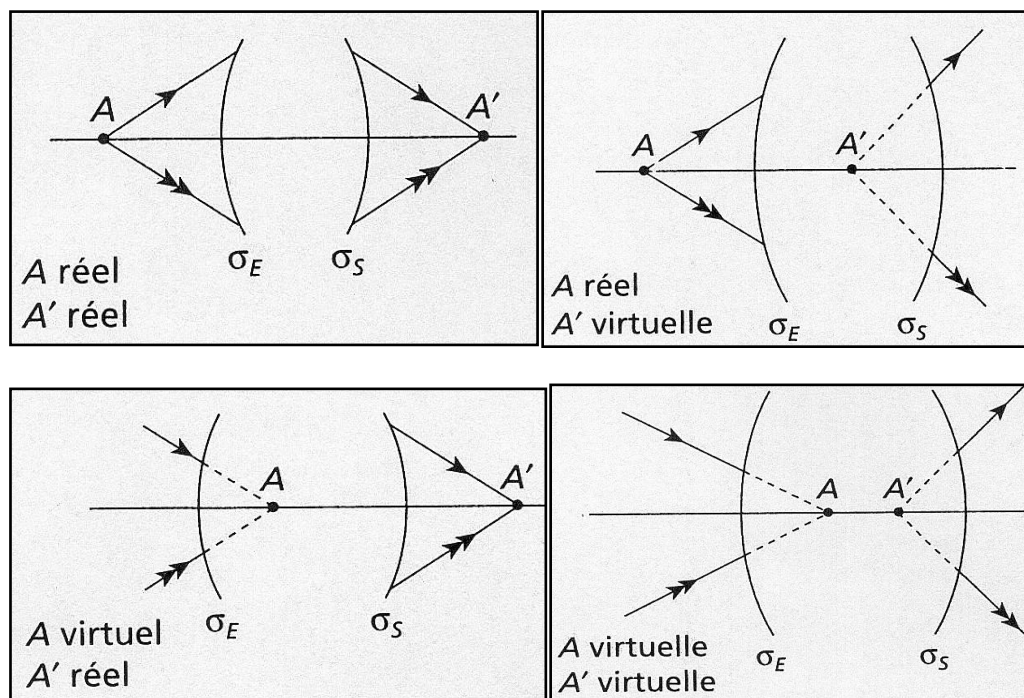


Figure I-7

8.4. Stigmatisme rigoureux

Définition : Un système optique est rigoureusement stigmatique pour un couple de point A (objet) et A' (image) si tout rayon passant par A, passe par A' après avoir traversé le système optique (**Figure I-8**).

8.5. Stigmatisme approché

De nombreux systèmes optiques ne présentent pas la condition de stigmatisme rigoureux. Les rayons issus du point A et émergeant du système optique ne passent pas tous par le point A' de sorte que l'image n'est pas ponctuelle : le système optique est astigmatique.

Définition : Un système présente un stigmatisme approché pour un couple de point A (objet) et A' (image) si tout rayon passant par A passe au voisinage de A' après avoir traversé le système optique (**Figure I-9**).

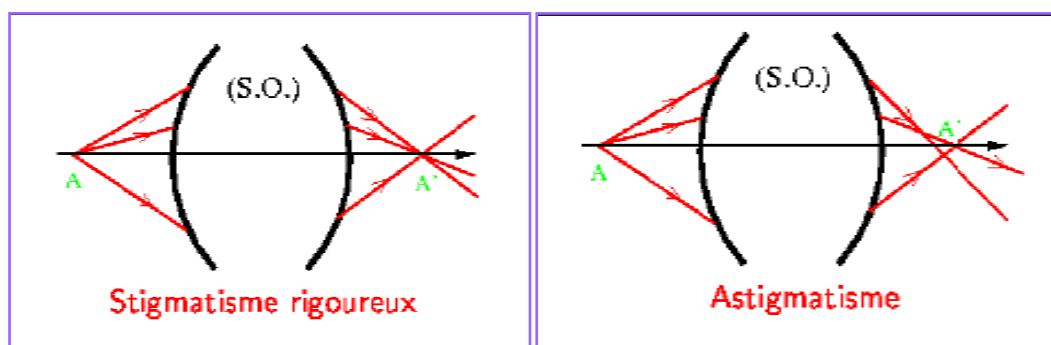


Figure I-8

Figure I-9

8.6. Conditions de Gauss

La condition de stigmatisme rigoureux n'étant pas atteinte pour beaucoup de systèmes optiques, on se contente le plus souvent de la condition de stigmatisme approché. Cette dernière condition est vérifiée dans l'approximation de Gauss.

Conditions de Gauss (ou approximation de Gauss)

- ◆ Les rayons lumineux font des angles petits avec l'axe optique (**Rayons par axiaux**)
- ◆ Les rayons lumineux parallèles à l'axe optique sont peu éloignés de celui-ci

Exercices

Exercice 1

Une radiation monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 488 \text{ nm}$ (radiation verte) passe de l'air dans une eau d'indice $n = 4/3$.

- 1- Calculer sa longueur d'onde dans l'eau. Commenter ce résultat.
- 2- Que devient la fréquence de cette radiation ainsi que sa vitesse ?

Solution :

1°) Soit λ_{eau} la longueur d'onde de cette radiation dans l'eau, on a : $\lambda_{\text{eau}} = v.T$ où v la vitesse de la radiation dans l'eau, et $\lambda_0 = C.T$, avec C la vitesse de la radiation dans le vide. Or $n = C/v$, donc $n = \lambda_0 / \lambda_{\text{eau}}$, et $\lambda_{\text{eau}} = \lambda_0 / n \approx 367 \text{ nm}$. La longueur d'onde d'une radiation dépend du milieu où elle se propage.

2°) La fréquence f de la radiation considérée est donnée par :

$$\lambda_0 = C.T = C/f, \text{ donc } f = C/\lambda_0 \approx 6.10^{14} \text{ Hz}$$

La fréquence d'une radiation ne dépend pas du milieu de propagation, donc dans l'eau $f \approx 6.10^{14} \text{ Hz}$.

Soit: $\lambda_{\text{eau}} = v.T = v/f$, donc $v = f.\lambda_{\text{eau}} \approx 2,25.10^8 \text{ m/s}$.

La vitesse peut se calculer par la relation : $n = \lambda_0 / \lambda_{\text{eau}} = C/v$, Donc $v = C/n \approx 2,25.10^8 \text{ m/s}$.

Exercice 2 :

Quel est l'angle d'incidence maximum d'un rayon lumineux tombant sur la surface de séparation sulfure de carbone-diamant, pour que le rayon traverse la surface,

- 1- Dans le sens sulfure $\rightarrow$ diamant ;
- 2- Dans le sens diamant $\rightarrow$ sulfure

On donne : indice de réfraction du sulfure $n_1 = 1.6$; indice du diamant $n_2 = 2.4$.

Solution :

1 – Sens sulfure ($n_1 = 1,6$) $\rightarrow$ diamant ($n_2 = 2,4$) : le milieu incident étant le moins réfringent, il y a toujours réfraction.

2 – Sens diamant $\rightarrow$ sulfure : le milieu incident étant le plus réfringent, il n'y a réfraction que si l'angle d'incidence est inférieur à ℓ , avec $\sin \ell = n_1/n_2 \implies \ell = 41.8^\circ$

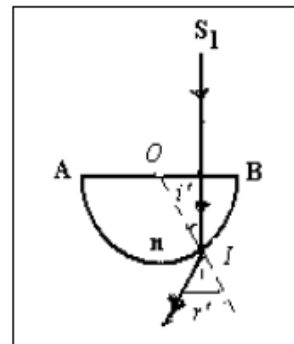
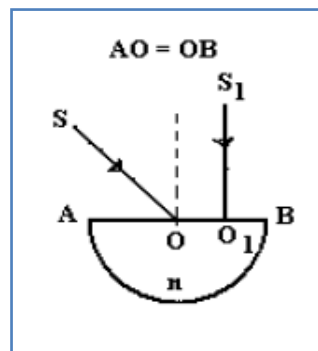
Exercice 3 : Déviation par un demi-cylindre

On considère un demi-cylindre en verre d'indice $n = 1,5$ et de rayon $R = 5 \text{ cm}$ (voir figure). Calculer l'angle d'émergence dans les cas suivants :

- 1) Le rayon incident est SO, l'angle d'incidence est $i = 45^\circ$.
- 2) Le rayon incident est S_1O_1 normal à la face AB. On prend: $OO_1 = R/2$.
- 3) On déplace O_1 vers B. Calculer la valeur de $x = OO_1$ à partir de laquelle il y a réflexion totale.

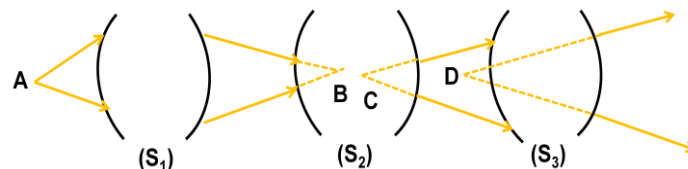
Solution :

- 1) Sur la face plane, le rayon incident subit une réfraction avec un angle r tel que :
 $\sin i = n \sin r \implies \sin r = (1/n) \sin i = (2/3) \sin 45^\circ \implies r \approx 28^\circ$
 Le rayon réfracté étant confondu avec la normale à la partie circulaire ne subira donc aucune déviation.
- 2) Le rayon incident S_1O_1 normal à la face AB ne subit aucune déviation sur cette face et tombe sur la partie circulaire sous un angle i' tel que : $n \sin i' = \sin r'$
 Or : $OO_1 = R/2 = OI \sin i' = R \sin i' \implies i' = 30^\circ$
 D'où $\sin r' = n/2 = 3/4 \implies r' = 49^\circ$
 Remarque : En I l'angle de réfraction limite ℓ est tel que : $n \sin \ell = \sin 90^\circ$
 Donc $\ell = \arcsin (1/n) = 41,8^\circ$. $i' = 30^\circ$ est bien inférieur à ℓ et il y a donc bien une réfraction en I.
- 3) Il y a réflexion totale en I si $i' > \ell$ ou $\sin i' > 1/n \implies R \sin i' > R/n$
 Soit $OO_1 = x$ tel que $x > R/n$, donc à partir de $x = R/n = 3,3 \text{ cm}$,



Exercice 3

Caractériser la nature des points A pour le système (S_1) , B pour (S_1) et (S_2) , C pour (S_2) et (S_3) et D pour (S_3) .



Solution :

- A : objet réel pour S_1 ;
 B : image réelle pour S_1 et représente un objet virtuel pour S_2 ;
 C : image virtuelle pour S_2 et représente un objet réel pour S_3 ;
 D : image virtuelle pour S_3 .