

Cours d'optique géométrique

Introduction :

L'optique est étudiée en général de deux façons indépendantes :

a- L'optique physique : Elle s'intéresse au caractère physique de la lumière. Ce caractère se compose de deux aspects complémentaires l'un de l'autre, l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire.

Dans l'aspect corpusculaire, la lumière est décrite comme des grains appelés photons, se déplaçant à la vitesse de la lumière dans le vide, de valeur $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

L'aspect ondulatoire est une description de la lumière comme une onde électromagnétique, avec tout les ingrédients de l'onde, interférences, diffractions, etc..

b- L'optique géométrique : Elle s'intéresse au parcours de la lumière à grande échelle, sans se référer aux caractères physiques qui produisent ces parcours. C'est la discipline que nous allons étudier.

Avant, nous allons donner des définitions préliminaires. La lumière visible fait partie du large spectre des ondes électromagnétiques. Plus précisément c'est les ondes électromagnétiques qui se situent entre la longueur d'onde du rouge, 750 nm à celle du violet, 400 nm, voir figure 1. La lumière visible occupe donc un domaine étroit du spectre.

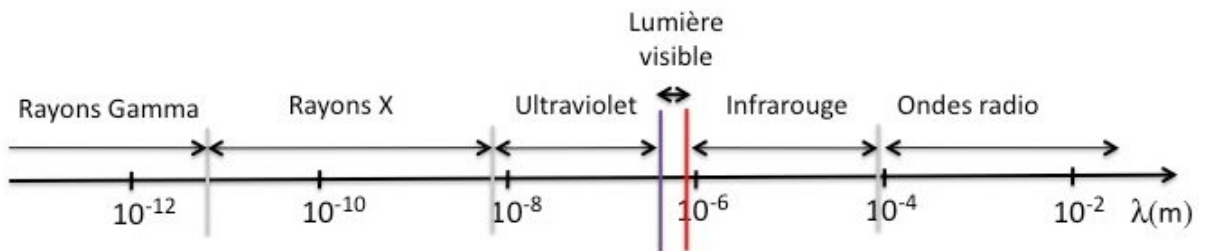


Fig. 1. Le spectre du rayonnement électromagnétique.

Une onde électromagnétique quant à elle, est une perturbation du vide qui se déplace avec la vitesse c dans le vide, exactement comme une perturbation d'une surface d'eau stagnante qui va se propager en cercles autour du point de perturbation. Elle est due aux charges électriques quand elles accélèrent, le phénomène étant décrit par les équations de Maxwell.

Le domaine de l'optique géométrique est celui de la lumière visible qui interagit avec des instruments d'optique de dimension très grande par rapport à la longueur d'onde de la lumière.

Principes de base de l'optique géométrique :

- 1- La lumière est considérée comme des rayons lumineux indépendants les uns des autres.
- 2- Dans un milieu homogène les rayons lumineux sont en lignes droites.
- 3- A la surface de séparation de deux milieux, les rayons sont déviés selon la loi de Snell-Descartes.

Remarque : La notion de rayon lumineux est juste un modèle de représentation de la lumière en optique géométrique, le rayon n'existe pas physiquement. On ne pourrait jamais isoler un rayon lumineux tout seul à cause de l'aspect ondulatoire de la lumière.

Lois de Snell-Descartes :

Un rayon lumineux qui tombe sur une surface de séparation de deux milieux différents va subir une réflexion et une réfraction (figure 2). Le rayon renvoyé par la surface est le rayon réfléchi et celui qui traverse la surface est le rayon réfracté. Ces deux phénomènes sont la réflexion et la réfraction, leurs lois sont appelés « lois de Snell-Descartes ».

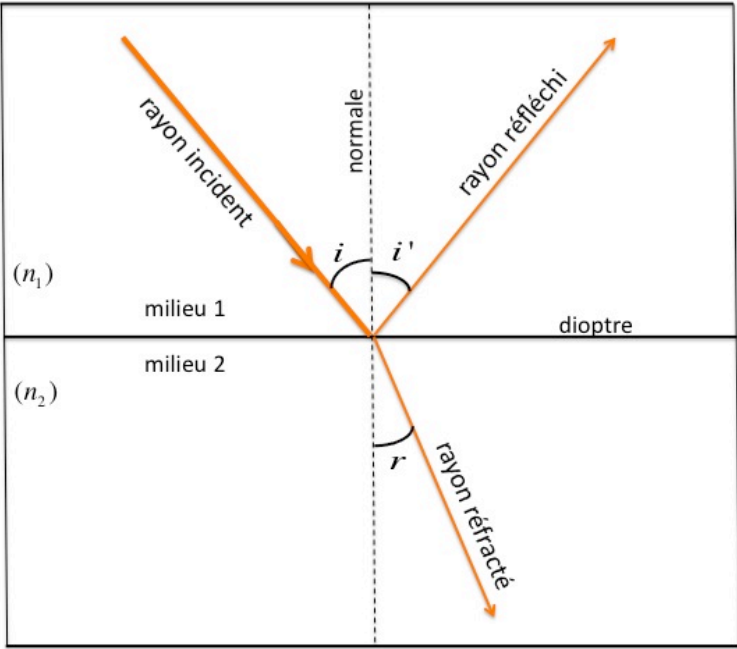


Fig. 2. Réflexion et réfraction d'un rayon incident qui tombe sur un dioptre.

La surface de séparation des deux milieux est appelée dioptre. Le rayon qui tombe est appelé rayon incident, il fait un angle i avec la normale à la surface, appelé angle d'incidence. Le second rayon est le rayon réfléchi, il fait un angle i' avec la normale, c'est l'angle de réflexion. Le troisième rayon est le rayon réfracté, celui qui pénètre dans le second milieu, il est caractérisé par son angle r avec la normale, l'angle de réfraction. Les trois rayons sont situés dans le même plan, c'est le plan réalisé par le rayon incident et la normale, appelé « plan d'incidence » (plan de la figure 2). La normale divise ce plan en deux, dans un demi-plan se trouve le rayon incident (à gauche de la normale sur la figure) et dans l'autre se trouvent les rayons réfléchi et réfracté (à droite de la normale sur la figure).

Loi de réflexion :

Le rayon réfléchi est le symétrique du rayon incident par rapport à la normale. Pour les angles, nous avons la relation :

$$i' = i. \tag{1}$$

Loi de réfraction :

La réfraction obéit à la loi géométrique suivante :

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r). \tag{2}$$

Les nombres n_1 et n_2 sans unité caractérisent à eux seules en quoi sont différents les deux milieux du point de vue optique. Le nombre n_1 est donc propre au milieu 1 et n_2 au milieu 2, ils s'appellent pour chacun « indice de réfraction du milieu ».

L'indice de réfraction d'un milieu transparent doit être supérieur à un. Il est égal à un dans le cas du vide. Des fois même dans le cas de l'air on prend l'indice du vide, c'est à dire un.

L'indice de réfraction a une origine physique liée à la fois à l'aspect ondulatoire et corpusculaire. Nous n'allons pas rentrer dans les détails mais nous allons donner une explication sommaire de cet indice. Quand un photon voyage dans le vide sa vitesse est c . Quand il rentre dans un milieu, il interagit automatiquement avec les atomes du milieu, en particulier les électrons. Le photon peut être capturé définitivement et le milieu serait opaque (il ne laisse pas passer la lumière), comme il peut être capturé et restitué intégralement juste après, dans ce cas le milieu serait transparent. Le photon dans son voyage dans le milieu transparent va subir à chaque rencontre d'un atome une capture suivie d'une libération, ce qui va engendrer un retard dans son voyage. Sa vitesse effective sera diminuée par rapport à sa vitesse dans le vide. Le coefficient de diminution est « l'indice de réfraction du milieu ». La vitesse de la lumière dans le milieu est donnée par :

$$v = \frac{c}{n} \quad (3)$$

L'indice de réfraction n est supérieur à un, ce qui fait que v est inférieure à c .

Angle d'incidence limite :

Lorsque la lumière passe d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent, elle est réfractée quelque soit l'angle d'incidence sous lequel elle arrive. Par contre, si elle passe d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent, il y a un angle d'incidence limite pour lequel toute la lumière qui vient avec un angle d'incidence supérieur à cet angle, est réfléchi en totalité sans être réfractée. C'est ce que nous allons montrer ici.

Considérons la relation (2) où le second milieu est plus réfringent que le premier, c'est à dire : $n_2 > n_1$. Considérons un rayon qui vient du milieu (1) vers le milieu (2) avec un angle d'incidence i , alors l'angle de réfraction sera donné par :

$$\sin(r) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i)$$

Examinons cette relation. Si l'angle i prend une valeur entre 0 et 90° , son sinus prend une valeur comprise entre 0 et 1. Comme le rapport n_1/n_2 est strictement inférieur à 1, le produit de ce rapport par $\sin(i)$ sera également inférieur à 1. Ce qui fait que l'angle de réfraction existe quelque soit l'angle d'incidence.

Examinons la situation inverse où le rayon incident vient du milieu (2) vers (1), dans ce cas l'angle de réfraction sera donné par la relation :

$$\sin(r) = \frac{n_2}{n_1} \sin(i)$$

Cette fois le rapport n_2/n_1 est supérieur à 1. Il existe donc des valeurs de l'angle d'incidence pour lesquelles le produit de ce rapport par $\sin(i)$ est supérieur à 1, donc $\sin(r) > 1$. C'est une situation où l'angle r n'existe pas, donc la réfraction n'existe pas.

La limite de la réfraction c'est le cas limite où $\sin(r)=1$ (émergence rasante), l'angle d'incidence qui lui correspond est appelé « angle d'incidence limite ». Il est donné par :

$$\sin(i_L) = \frac{n_1}{n_2}$$

(4)

Tout rayon lumineux qui vient du milieu (2) vers (1) avec un angle d'incidence supérieur à i_L , est totalement réfléchi « réflexion totale » sans être réfracté.

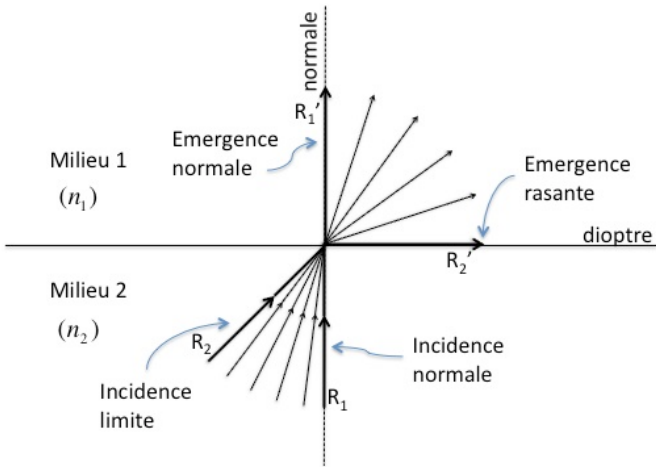


Fig. 3. Le champ de réfraction possible, entre l'incidence normale et l'incidence limite.

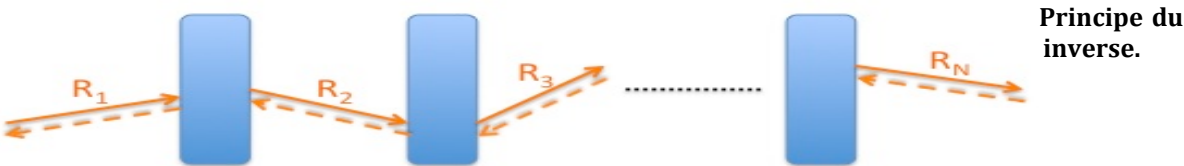
Principe du retour inverse :

Les lois de réflexion et de réfraction sont des lois dont le rôle des rayons peut s'inverser. Nous l'examinons pour la réflexion.

Si nous inversons le sens du rayon réfléchi, il devient un rayon incident dont le rayon réfléchi est l'inverse du rayon incident précédent.

Le même raisonnement est valable pour la réfraction, l'inverse du rayon réfracté devient incident dont le rayon réfracté est l'inverse du rayon incident initial. Cette inversion est rendue possible grâce à la loi (2). Cette loi ne précise pas si le rayon incident vient du milieu 1 ou 2, elle est valable dans les deux cas.

D'une façon générale, si un rayon traverse un ensemble d'instruments d'optique, il passe de R_1 à R_2 puis R_3 jusqu'à R_N , si on inverse le dernier rayon R_N , il va prendre exactement le même chemin de l'allé, $R_N, R_{N-1}, ..., R_1$.

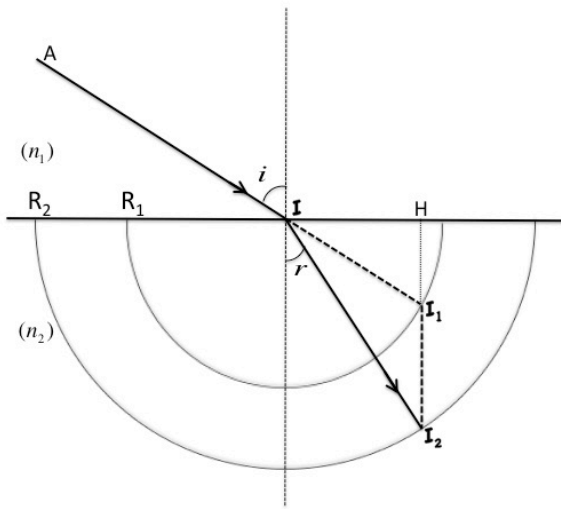


Tracé du rayon réfracté par méthode graphique :

Cas où $n_1 < n_2$, le même raisonnement est valable pour $n_1 > n_2$:

- 1- On trace d'abord le dioptre plan et la normale au point d'impact I.
- 2- Dans le milieu qui doit contenir le rayon réfracté, on trace un demi-cercle de rayon quelconque R_1 de centre I.
- 3- On trace un second demi cercle de rayon $R_2 = R_1 * n_2 / n_1$.

- 4- On trace le rayon incident AI avec l'angle d'incidence qu'on nous a fixé, puis on prolonge sur la même droite jusqu'à l'intersection avec le premier cercle en I_1 .
- 5- A partir de I_1 on trace une droite verticale (parallèle à la normale) jusqu'à l'intersection avec le second cercle en I_2 .
- Le rayon réfracté serait donc II_2 .



Montrons que la figure 5 satisfait bien la relation (2) de réfraction. Nous avons d'après la figure :

$\sin(i) = \frac{IH}{II_1}$ et $\sin(r) = \frac{IH}{II_2}$, ce qui nous donne :

$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{II_2}{II_1}$. Comme $II_1 = R_1$ et $II_2 = R_2$ et le rapport $\frac{R_2}{R_1} = \frac{n_2}{n_1}$, on obtient la relation (2).

Fig. 5. Réfraction par construction graphique.

Faisceau lumineux :

- En optique on a affaire à un ensemble de rayons lumineux qu'on appelle « faisceau ».
- On distingue trois sortes de faisceaux :
- 1- Faisceau parallèle : tout les rayons sont parallèle et dans le même sens.
 - 2- Faisceau convergent : les rayons semble converger vers un point.
 - 3- Faisceau divergent : les rayons semble provenir d'un point.

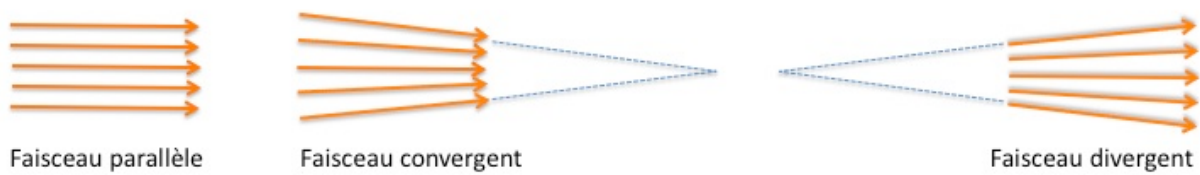


Fig. 6. Faisceaux lumineux.

Instrument d'optique :

Un instrument d'optique est un milieu artificiel ou naturel qui transforme le trajet des rayons lumineux pour donner à partir des objets, des images. D'une part, il y a des rayons qui pénètrent dans l'instrument qu'on appelle « rayons incidents » ou « rayons d'entrée », d'autre part, il y a des rayons qui sortent de l'instrument qu'on appelle « rayons émergents » ou « rayons de sortie ». Le trajet des rayons incidents est transformé par l'instrument, généralement par les phénomènes de réflexion et de réfraction pour donner à la sortie des rayons émergents.

Comme instrument d'optique naturel nous citons, l'œil, une flaque d'eau stagnante comme dioptre plan, etc., comme instrument artificiel, un miroir, une loupe, un télescope, microscope, etc..

Notion d'objet et d'image, réels ou virtuels :

Lorsqu'un faisceau lumineux F , convergent ou divergent, se dirige vers un instrument d'optique I , (faisceau incident), lorsque le prolongement du faisceau d'un côté ou de l'autre passe par un point A , on dira que A est un objet ponctuel par rapport à l'instrument I .

Si les rayons lumineux passent effectivement par A , on dira que l'objet est réel.

Si par contre A est juste un point d'intersection du faisceau et que les rayons n'y passent pas, on dira que A est un objet virtuel.

Lorsqu'un instrument reçoit un faisceau F d'un point objet A , et que ce faisceau est transformé à la sortie de l'instrument en un autre faisceau F' (faisceau émergent) dont le prolongement d'un côté ou de l'autre donne un point A' , on dira que A' est l'image de A par rapport à l'instrument en question.

Si les rayons lumineux passent effectivement par A' , on dira que l'image est réelle.

Si par contre A' est juste un point d'intersection du faisceau F' et que les rayons de F' ne passent pas par ce point, on dira que A' est une image virtuelle.

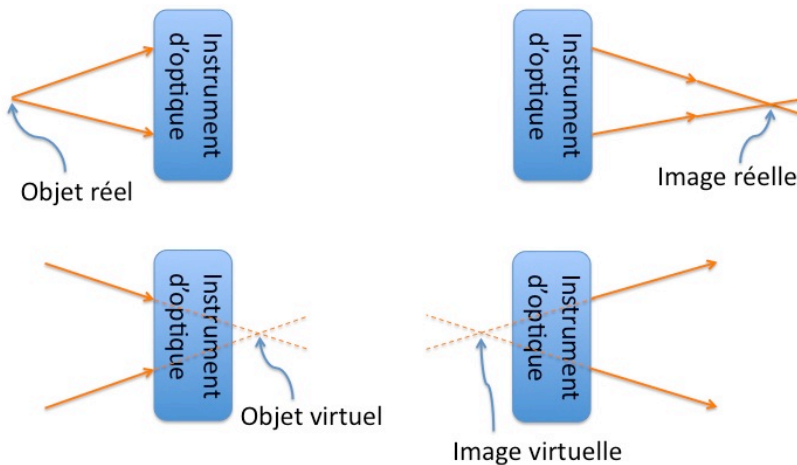


Fig. 7. Nature d'un objet et d'une image.

Des images données par quelques instruments d'optique :

1- Image donnée par un miroir plan :

Considérons un objet étendu posé devant un miroir et A un point quelconque de cet objet (fig. 8). Le point A est source de lumière dont une partie va se réfléchir sur le miroir. Cette partie forme un faisceau divergent qui est le faisceau incident et A est un objet réel dans ce cas. Pour construire l'image de A il suffit de considérer deux rayons différents du faisceau incident. Le premier le plus simple est le rayon R_1 d'incidence normale. Il est réfléchi selon la loi de réflexion sur la normale, rayon R'_1 . Le second rayon R_2 est d'incidence i non nulle, il sera réfléchi avec le même angle avec la normale, c'est R'_2 . Les deux rayons émergent R'_1 et R'_2 donnent l'image de A par prolongement. Ce prolongement peut se faire d'un côté ou de l'autre. Dans notre cas il se fait selon la figure et donne l'image A' . La nature de cette image est virtuelle puisque les rayons émergents R'_1 et R'_2 ne passent pas par A' . D'après la géométrie de la figure, A' est le point symétrique de A par rapport au plan du miroir. Pour le montrer, nous avons :

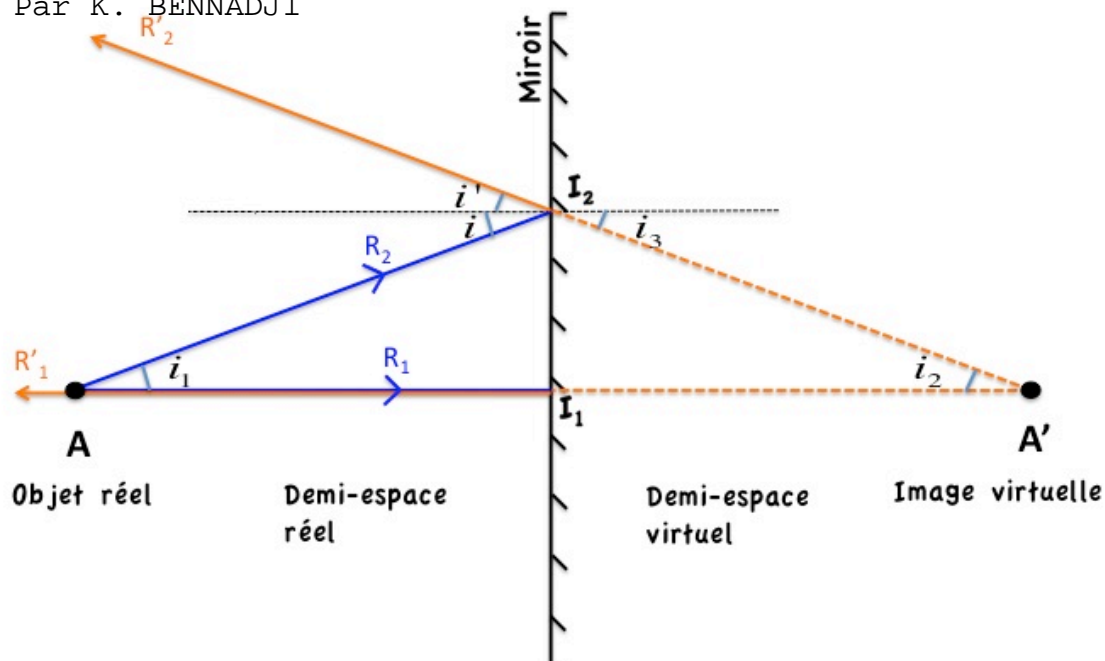


Fig. 8. Image donnée par un miroir plan.

$i = i'$ par la loi de réflexion.

$i' = i_3$ angles opposés.

$i = i_1$ et $i_3 = i_2$ car la normale en I_2 est parallèle à R'_1 et à son prolongement.

Ce qui nous donne : $i_1 = i_2$, donc les triangles AI_1I_2 et $A'I_1I_2$ sont identiques. D'où l'égalité des cotés AI_1 et $A'I_1$. Comme ces deux segments sont perpendiculaires au plan du miroir, A' est donc le symétrique de A par rapport à ce plan.

Dans la figure 8, A est un objet réel et A' son image virtuelle. Si on applique le principe du retour inverse, A' devient un objet virtuel et A son image qui est réelle. D'une façon générale, le miroir divise l'espace en deux, le demi-espace réel situé du côté de la surface réfléchissante et le demi-espace virtuel situé de l'autre côté. Tout objet (ou image) qui se trouve dans le demi-espace réel est un objet (ou image) réel ; tout objet (ou image) qui se trouve dans le demi-espace virtuel est un objet (ou image) virtuel.

2- Image donnée par un dioptre plan :

Tout le monde a fait l'expérience d'une tige droite, règle ou crayon par exemple, introduite dans un récipient d'eau en incliné, et la tige paraît tordue vers le haut de sa partie émergée dans l'eau. Cela vient du fait que l'image de la règle produite par le dioptre, a une position un peu élevée par rapport à la position de la règle. C'est ce que nous allons voir dans ce qui suit.

Considérons deux milieux d'indices de réfraction différents (figure 9), la surface de séparation constituant un dioptre plan. Nous allons procéder de la même façon qu'avec le miroir, nous prenons un point A comme objet réel et deux rayons R_1 et R_2 incidents, R_1 étant normal au dioptre et R_2 d'incidence non nulle i . Le rayon réfracté R_2' correspondant à R_1 est normal tandis que le rayon réfracté R_2 à un angle r donné par :

$$n_2 \sin(i) = n_1 \sin(r)$$

A ce stade nous allons introduire une approximation importante et nous allons expliquer plus tard l'utilité de cette approximation. Nous considérons que la différence angulaire des deux rayons émergents est très