

CHAPITRE 2

OPTIQUE

INTRODUCTION :

Depuis l'antiquité, la lumière a toujours fasciné l'esprit humain par ses aspects multiples et son caractère mystérieux.

Les sumériens (4000 ans avant J.C.) découvrirent le feu en concentrant la lumière et l'utilisaient pour prédire leurs quotidiens ;

Les grecs (V^e siècle avant J.C.) commencèrent à se poser des questions sur l'origine des objets qui les entourent, ils assimilaient la lumière à un mouvement de fines particules qui sont soit émises par les objets lumineux soit émises par l'œil.

Les idées se développent ensuite avec le recours au fait expérimental et les progrès réalisés par Sénèque et Galien -dans l'étude de l'œil- ont permis à Ptolémée d'énoncer à Alexandrie en 140 après J.C les premières lois de l'optique géométrique sur la réflexion et la notion de l'axe visuel

Ensuite ils ont fait les observations sur la réfraction de la lumière à l'intérieur de deux milieux transparents de différentes densités.

Il a fallu attendre XI^e siècle où les Arabes, héritiers des savoirs de l'antiquité par la bibliothèque d'Alexandrie, approfondirent de nouveaux travaux sur l'optique.

Ibn-Al-Haytham dit Alhazen (965-1039) surnommé le second Ptolémée fut à la fois mathématicien, physicien, philosophe et médecin. Il étudia l'œil et la réfraction et établit une véritable théorie corpusculaire de la lumière. Pour lui, la lumière est émise par l'objet lumineux indépendamment de l'observateur, et il a démontré le comportement de la lumière passant d'un milieu moins dense à un milieu plus dense et a reconnu que les angles d'incidence et de réfraction étaient liés.

Il découvrit le phénomène de la chambre noire, il s'intéressa aux miroirs convexes et concaves et encore au phénomène de l'arc en ciel.

Ses explications et ses lois furent la base des travaux de Kepler et de René Descartes six siècles plus tard.

Galilée (1565-1642) décrit pour la première fois des méthodes de mesure de la vitesse de la lumière.

Descartes (1596-1650) fait connaître les lois de la réfraction établies par Snell (1591-1626).

Fermat (1601-1665) retrouve les lois de la réfraction à l'aide du principe de moindre temps.

Christian Huygens (1629-1695) proposa que l'univers est rempli de particules dont l'ensemble de ses particules vibre et constitue une ondelette ; l'enveloppe des ondelettes forme l'onde lumineuse longitudinale. Cette théorie a permis d'expliquer les phénomènes de réflexion, de réfraction

Newton (1642-1727) réalisa le premier télescope et étudia la décomposition de la lumière par un prisme, étudia la lumière émise par les foyers « rayonnement du corps noir ». Il pensait que la lumière est constituée de corpuscules qui se propagent d'un milieu à un autre. Il est l'auteur de la théorie ondulatoire du son.

Thomas Young (1733-1829) réalisa une série d'expériences. Le fait que deux rayons lumineux réfractés par un cristal de calcite ne donnent pas d'interférences lui fait supposer que la lumière est une vibration transversale dont plus tard Fresnel avait la même idée.

Fresnel (1788-1827) est l'auteur d'une théorie complète de la lumière polarisée. Sa théorie du vecteur lumineux est impressionnante.

La spectroscopie vit le jour avec les physiciens allemands Bunsen (1811-1899) et Kirchhoff (1825-1887). Ce dernier démontra le principe d'Huygens –Fresnel.

En 1856 Wilhelm Weber (1804-1891) et Rudolf Kohlrausch (1809-1858) réussirent à déterminer expérimentalement $\left(\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}\right)^{1/2} = 3.11 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Cette valeur était presque exactement égale à la vitesse de la lumière $3.15 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ mesurée par Hippolyte Fizeau en 1849.

James Maxwell en 1873 établit que la lumière est une onde électromagnétique transversale se déplaçant dans le vide à la vitesse constante de $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Cette théorie est confirmée par les expériences de Hertz relatives aux antennes en 1888 et son exploitation commerciale par Guglielmo Marconi qui sont à l'origine de la radio, la télévision et des communications par satellite.

A la fin du 19^{ème} siècle les physiciens se sont trouvés confrontés à des phénomènes nouveaux sont le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique et les spectres atomiques.

Il faut cependant signaler que la physique classique continue à expliquer un grand nombre de phénomènes macroscopiques, mais sa validité s'avère limitée en ce qui concerne une description détaillée dans le domaine microscopique.

Le 14 décembre 1900 Planck énonce sa loi : « les échanges d'énergie entre matière et le rayonnement ne se font pas de façon continue mais par quantités discrètes et indivisibles d'énergies $h\nu$ appelés « quanta » » [h appelée constante de Planck et vaut $6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s]

Planck reçut en 1918 le prix Nobel pour cette découverte et fut la naissance de la physique quantique.

En 1905, les travaux d'Einstein (1879-195) remettent la nature corpusculaire de la lumière à la mode, l'effet Compton, en est une confirmation.

Le photon serait à la fois une onde et un corpuscule a été démontrée en 1927 par De Broglie pour les particules de matière.

Cette dualité est à la base du développement de la mécanique quantique. La notion de trajectoire perd son sens en mécanique quantique au profit de la notion d'état quantique –une vision affirmée par la formulation en 1927 des principes d'incertitude de Heisenberg.

Cette nouvelle théorie formulée entre 1925 et 1927 par les Allemands Max Bohr, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, les Autrichiens Wolfgang Pauli et Erwin Schrödinger et par le britannique Paul Dirac, a conduit en 1927 à une interprétation harmonieuse connue sous le nom d'interprétation de l'école de Copenhague dont les conséquences ont multiplié les succès dans la quête des lois relatives aux systèmes microscopiques.

La physique quantique issue du monde microscopique et se confinait alors essentiellement à l'atome a conquis le noyau et ses constituants et est à l'origine de toutes les théories pertinentes actuelles de la physique.

L'apparition de fibres optiques en 1970 ;

La révolution des technologies de l'information et de la communication, les progrès réalisés dans les nanotechnologies ;

La célérité de l'information véhiculée par les électrons avec une vitesse de 10^6 m/s dans la matière, en revanche les photons traversent un milieu diélectrique plus rapidement que les électrons dans un milieu conducteur et ceci sans freinage ni interaction entre eux d'où on peut ainsi réaliser une architecture neuronale (du cerveau par exemple).

L'optique géométrique

Introduction :

La lumière est la cause des phénomènes qui impressionnent l'œil. Il y a deux sortes d'objets lumineux : d'abord les corps lumineux par eux même, appelés sources de lumière ; exemples le Soleil, le filament d'une lampe électrique, la flamme d'une bougie ; puis les objets éclairés qui renvoient une partie de la lumière. Ces derniers deviennent invisibles si on cesse de les éclairer, exemples la Lune, les planètes et la plupart des objets que nous voyons.

Les milieux autres que le vide :

Milieu Homogène : lorsque la composition est la même en tous les points(\neq inhomogène)

Milieu Isotrope : lorsque ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions (\neq anisotrope)

Milieu Transparent : s'il laisse passer la lumière sans l'atténuer et on peut distinguer les détails d'un objet (air et eau)

Milieu Absorbant ou translucide : laisse passer la lumière, mais à travers lequel il est impossible de voir nettement les forme des objets derrière eux (papier huilé et verre fumés).

Milieu Opaque : ne se laissent pas traverser par la lumière (tous les métaux).

Remarquons qu'une substance opaque peut devenir translucide si on peut diminuer suffisamment son épaisseur.

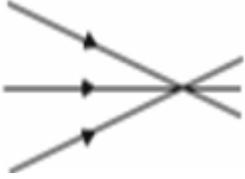
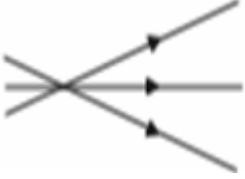
(Une feuille d'or d'épaisseur < 1 micron laisse passer une lumière verte, par contre une substance transparente peut devenir opaque si son épaisseur est suffisamment grande le cas de l'eau a une profondeur de 80m l'obscurité est complète.

Les faisceaux de lumières : L'expérience montre que la lumière se propage en ligne droite ce qu'on appelle rayon lumineux. Un ensemble de rayons lumineux est appelé faisceau lumineux,

Faisceau convergent : tous les rayons se dirigent vers le même point lumineux (lune, étoiles)

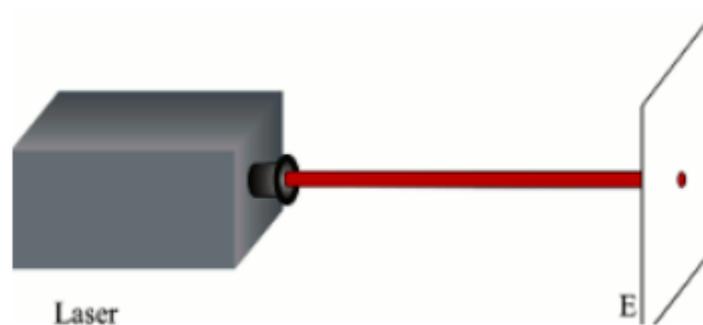
Faisceau parallèle ou cylindrique : tous les rayons sont parallèles.

Faisceau divergent : tous les rayons sont issus d'un même point appelé source lumineuse S (soleil)

Faisceau convergent	Faisceau parallèle	Faisceau divergent
		

Hypothèses fondamentales de l'optique géométrique :

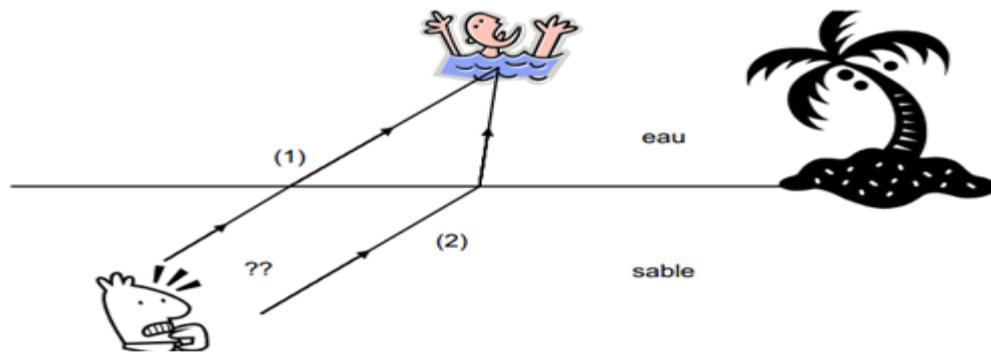
- Dans un milieu homogène, transparent, et isotrope les rayons lumineux sont des lignes droites ; c'est la propagation rectiligne de la lumière.



Propagation rectiligne de la lumière.

- Les rayons lumineux sont indépendants les uns des autres.
- Principe de retour inverse de la lumière, le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation.
- **Le principe de Fermat (1601-1665)** : la lumière choisit toujours, pour aller d'un point à un autre, le chemin ayant le temps le plus court (temps de parcours minimal)

Exemple pour comprendre le principe de déplacement de la lumière dans un milieu:



Choisir le chemin le plus court.

Le sauveur doit choisir le chemin le plus court non par en distance mais en temps, or le chemin 2 est plus court 1 car le sauveur se déplace moins vite dans l'eau que dans le sable.

- **Indice de réfraction :**

Dans un milieu matériel, si la vitesse v de l'onde dépend de la fréquence de l'onde, on dit que le milieu est dispersif.

Le vide est un milieu non dispersif car la célérité c ne dépend pas de la fréquence.

Donc par définition, l'indice de réfraction absolu d'un milieu étant : $n = \frac{c}{v}$

Par conséquent, les indices des milieux transparents usuels sont supérieurs à 1, nous avons $n \geq 1$ car $v \leq c$.

matériaux	n
Vide	1
Air	1.0029
Eau	1.33
verre ordinaire	1.50
verre crown	1.52
verre flint	1.67
Diamant	2.42 à 2.75
Acétone	1.36
Alcool pur	1.32
Fluorine	1.43

Ambre	1.54
Cristal	1.60 à 2.00
Glace	1.31
Glycérine	1.47
Quartz	1.55 ou 1.64
Saphir	1.77
plexiglass	1.51
Rutile (TiO ₂)	2.907
Phosphure de gallium	3.5

Lorsqu'une onde se propage d'un milieu à un autre, sa fréquence ν ne change pas alors que sa vitesse change ;

$$v_1 = \lambda_1 \nu \text{ le milieu 1}$$

$$v_2 = \lambda_2 \nu \text{ le milieu 2}$$

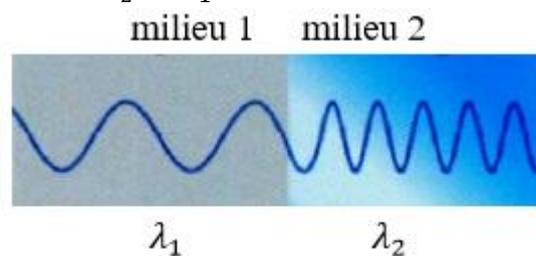
$$\nu = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$

De l'autre côté nous avons :

$$\text{Pour le milieu 1 : } v_1 = \frac{c}{n_1}$$

$$\text{Pour le milieu 2 : } v_2 = \frac{c}{n_2}$$

$$\text{Finalement on trouve : } \frac{n_1}{n_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$



Propagation d'une onde dans de milieux différents.

v_1, v_2 : vitesse de l'onde dans le milieu 1 et 2 respectivement

λ_1, λ_2 : longueur d'onde du milieu 1 et 2 respectivement

n_1, n_2 : indice de réfraction du milieu 1 et 2 respectivement

Remarque :

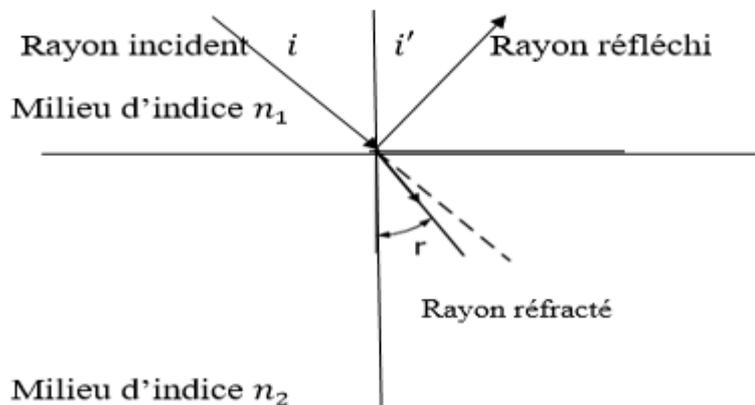
Si $n_1 \geq n_2$: on dit que le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2

et on a $v_1 < v_2$

Un dioptre : on désigne par ce terme toute surface entre 2 milieux homogènes et transparents, peut être soit plan, soit sphérique eu d'une forme quelconque.

Lois de Snell et Descartes :

L'étude du comportement des rayons lumineux à la surface de séparation entre deux milieux obéit aux lois de Snell et Descartes. On peut observer deux phénomènes :



Les rayons incident, réfléchi et réfracté sont dans le même plan d'incidence

Les rayons réfléchi et réfracté sont dans le plan d'incidence (plan défini par la normale à la surface et le rayon incident)

La réflexion de la lumière :

Les rayons incident et réfléchi sont symétrique par rapport à la normale ;

Soit l'angle d'incidence i , et l'angle de réflexion i' .

Ces angles vérifient $i=i'$.

Alors la loi de réflexion :

$$i = i'$$

Analogie mécanique : balle de tennis projetée sur un mur.

La réfraction de la lumière :

Il existe un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction,

Soit l'angle d'incidence i , et l'angle de réfraction r .

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1 * c}{v_2 * c} = \frac{n_2}{n_1}$$

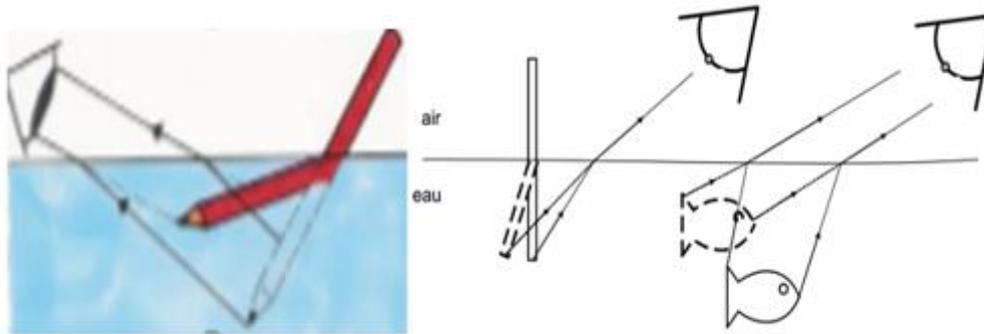
Alors on obtient la loi de réfraction :

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

Exemples pour comprendre la réfraction de la lumière :

Un stylo dans un verre d'eau apparaît brisé ;

Un poisson dans un aquarium semble plus près de la surface qu'il n'ait vraiment ; de même pour une pièce de monnaie dans une tasse.



Phénomènes de réfraction

Exercice 1:

Un faisceau de lumière tombe sous une incidence de 15° dans l'air sur la surface de séparation air/eau. Déterminer les angles que fait la normale avec les rayons réfléchis et réfractés.

Solution :

- Le rayon réfléchi : $i = i' = 15^\circ$
- Le rayon réfracté : $n_{air} \sin i = n_{eau} \sin r$
Application numérique : $\sin r = \frac{n_{air}}{n_{eau}} \sin i = \frac{1}{1.33} \sin 15^\circ$
Finalement : $r = 11.2^\circ$

Exercice 2 :

Une lame à face parallèles en verre, d'épaisseur e d'indice optique $n=1.5$, est placée dans l'air. Un faisceau incident étant parallèle incliné d'un angle $i=40^\circ$ par rapport à la normale à la lame passe à travers cette lame. Décrire son chemin optique.

Solution :

Les rayons incidents sur le premier dioptre verre-air d'un angle $i = 40^\circ$

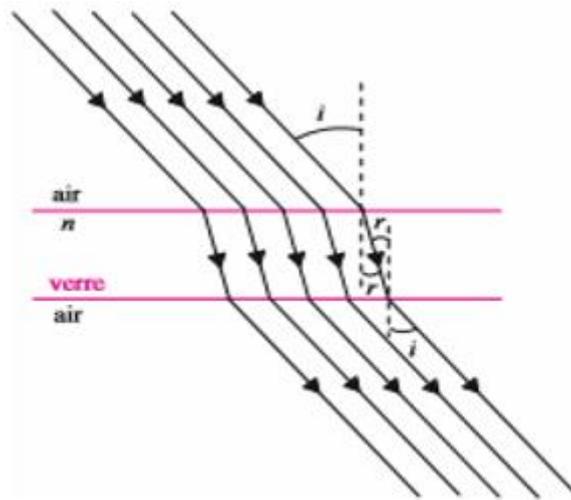
Les rayons sont réfractés d'un angle r tel que :

$$n_{air} \sin i = n_{verre} \sin r \Rightarrow r = 25.4^\circ$$

Les rayons incidents sur le deuxième dioptre verre-air d'un angle $r = 25.4^\circ$;

Les rayons émergent avec un angle i tel que :

$$n_{verre} \sin r_1 = n_{air} \sin i \Rightarrow i = 40^\circ$$



Ainsi en sortie de la lame un faisceau parallèle ayant même direction que le faisceau incident.

Loi de Kepler :

Dans le cas où le rayon lumineux serait proche de la normale. Les angles d'incidence et de réfraction deviennent faibles et on peut confondre le sinus et l'angle ;

On obtient ainsi la loi de Kepler :

$$n_1 i = n_2 r$$

La réfraction limite et réflexion totale :

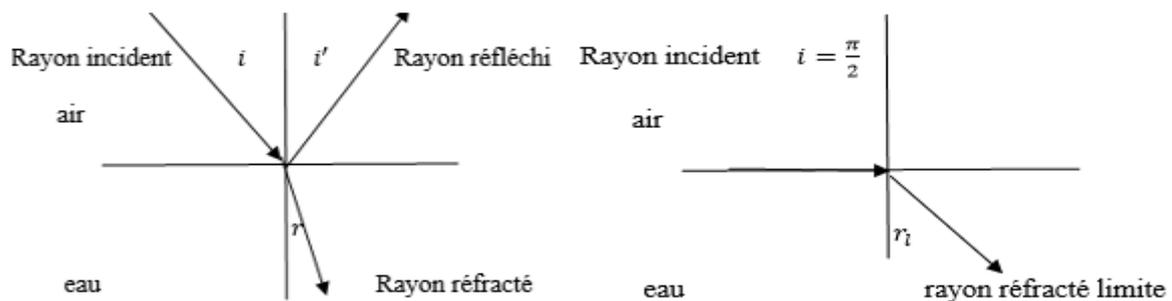
Cas $n_1 < n_2$

Si on augmente progressivement l'angle d'incidence i , on constate que l'angle de réfraction croît avec l'angle d'incidence, mais moins vite tel que $i > r$;

Le rayon réfracté se rapproche de la normale.

Si $i = \frac{\pi}{2}$ (angle d'incidence est maximum) alors on obtient un angle de réfraction limite r_l qu'on calcule :

$$n_1 \sin \frac{\pi}{2} = n_2 \sin r_l \quad \text{alors} \quad \sin r_l = \frac{n_1}{n_2}$$



Réfraction limite

Cas $n_1 > n_2$

Si on augmente progressivement l'angle d'incidence i , on constate que l'angle de réfraction croît avec l'angle d'incidence et le rayon réfracté s'écarte de la normale ;

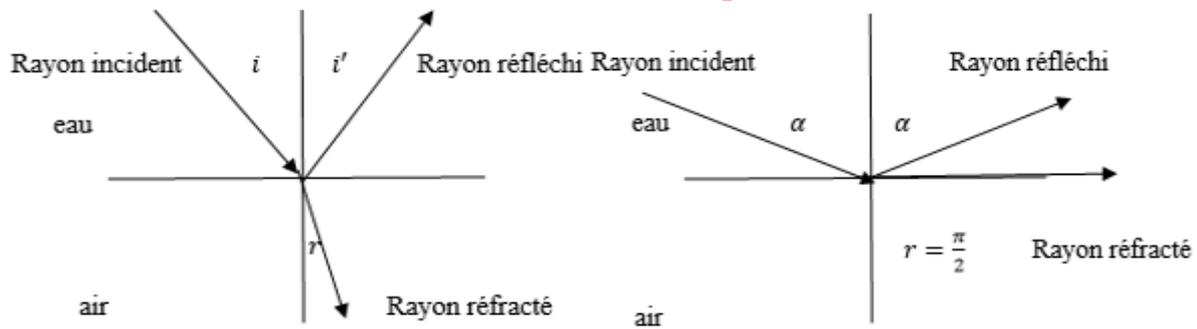
Jusqu'à une certaine valeur $i = \alpha$, l'angle de réfraction va atteindre une valeur maximale : $r = \frac{\pi}{2}$

Si $i \geq \alpha$ toute la lumière incidente est réfléchié totalement.

On obtient l'angle de la réflexion totale comme suit :

$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \frac{\pi}{2}$ alors

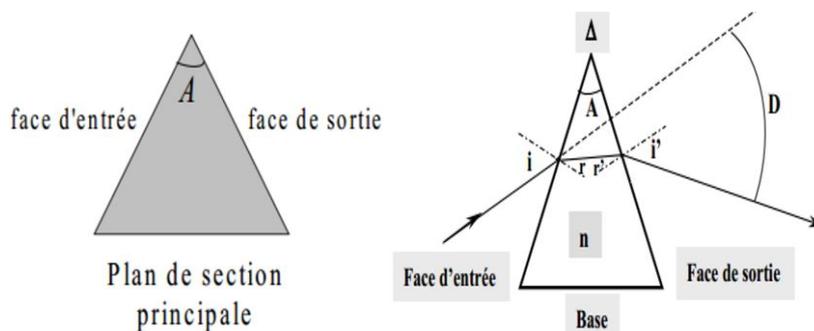
$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1}$



Réflexion totale

Applications :

1. Le prisme : c'est un milieu transparent homogène d'indice n limité par deux faces qui font un angle A. Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur une face d'un prisme, il est en général réfracté deux fois et sort ainsi de l'autre face d'un angle D appelé l'angle de déviation du rayon incident .



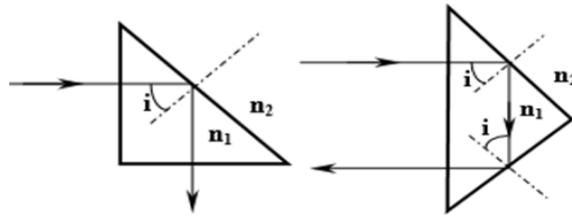
D'après les lois de réflexion et réfraction, on a : $\sin i = n \sin r$, et $\sin i' = n \sin r'$

Dans le triangle ISI', on a : $(\frac{\pi}{2} - r) + A + (\frac{\pi}{2} - r') = \pi$ avec $r + r' = A$

Dans le triangle IMI', on a : $(i - r) + (\pi - D) + (i' - r') = \pi$ avec $D = i + i' - (r + r')$ d'où $D = i + i' - A$.

Les prismes à réflexion totale

Ces prismes dont la section droite est un triangle rectangle isocèle permettant de dévier un faisceau lumineux à angle $\frac{\pi}{2}$ ou π .



Cas de Réflexions totales dans un prisme rectangle isocèle

Ainsi on peut l'utiliser pour dresser une image, généralement dans les jumelles.

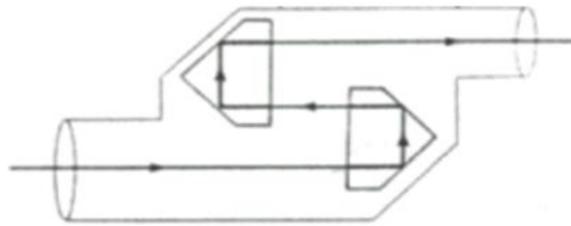
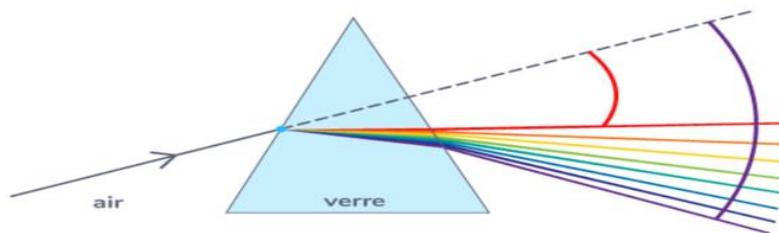


Schéma optique d'une paire de jumelles

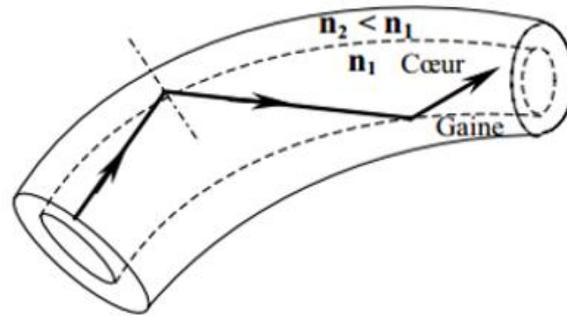
La dispersion de la lumière :

Un prisme disperse (décompose) la lumière blanche en ses différentes composantes qui constituent le spectre de la lumière blanche (rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet)



Dispersion de la lumière blanche

2. Les fibres optiques : ces fibres ont connu ces dernières années un développement considérable. Elles sont utilisées de plus en plus dans les lignes téléphoniques, en médecine (endoscopie).



Fibre optique

Dans les fibres optiques, on fait volontairement varier l'indice de réfraction en fonction de la distance par rapport au centre de la fibre, dans ce cas la variation de l'indice sert à piéger le rayon lumineux qui ondule et suit la fibre plutôt que de se réfléchir sur les bords.