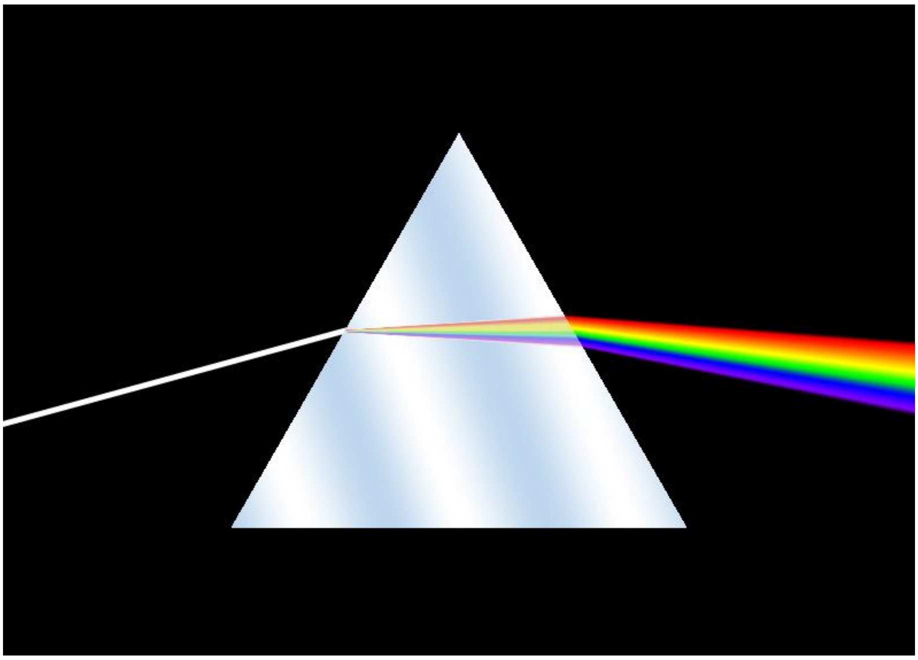
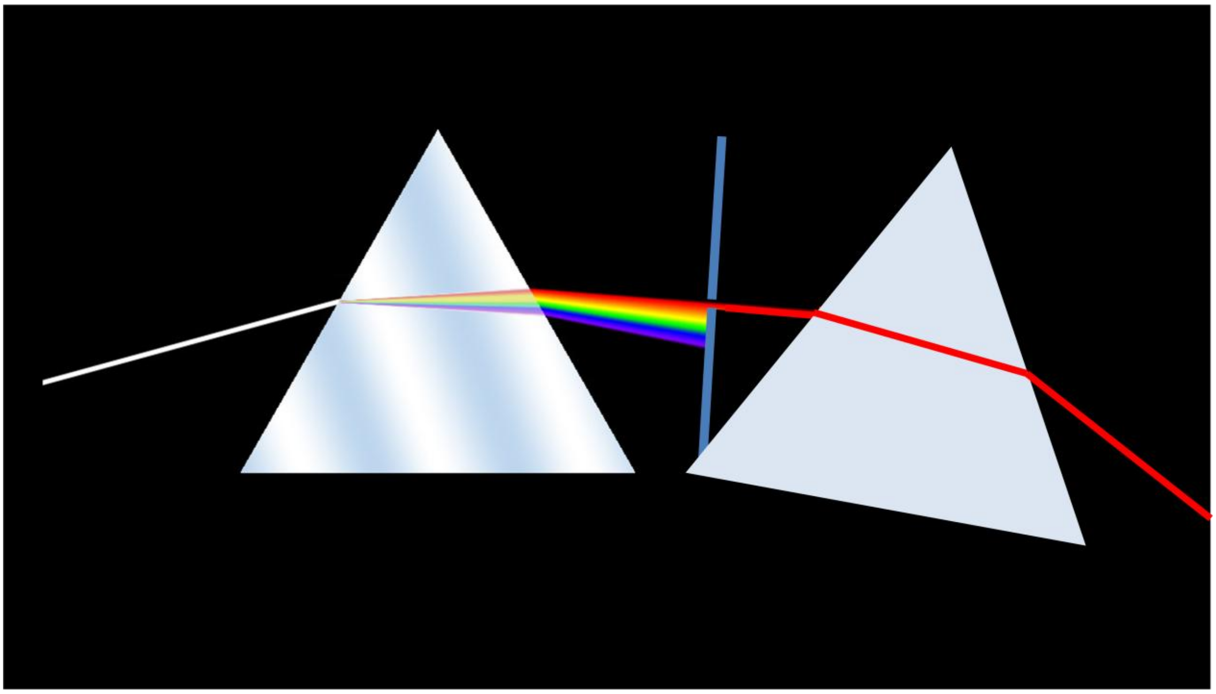
Réfraction de la lumière

I Expérience du prisme :

Réalisée par Newton en 1666, cette expérience montre qu'un rayon de lumière blanche peut être décomposé en un faisceau de rayons présentant les couleurs de l'arc en ciel.



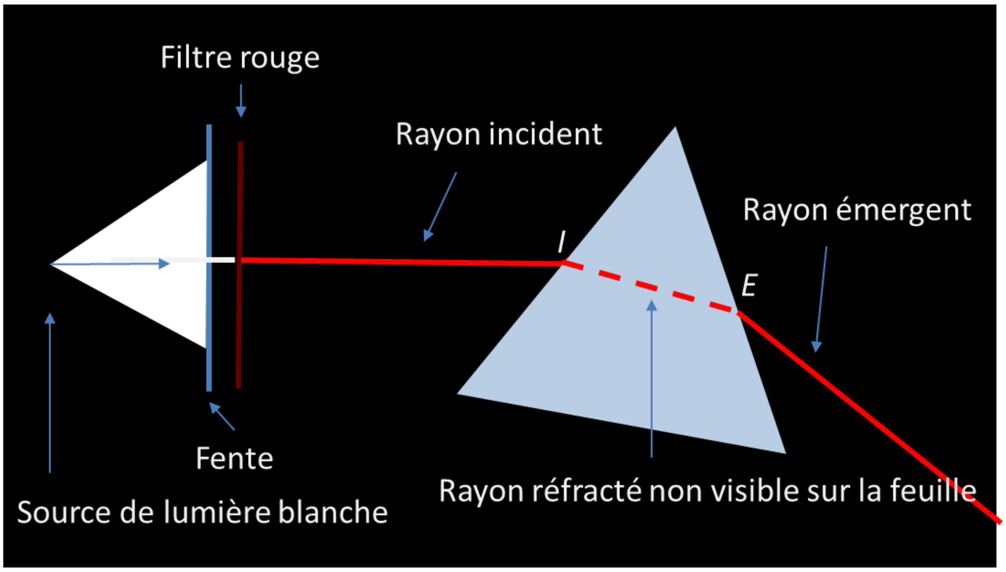
En isolant une des composantes de ce faisceau (un rayon de lumière rouge par exemple, ce que l'on peut obtenir aujourd'hui grâce à un laser ou bien un filtre ne laissant passer que le rouge), on observe, comme le fit Newton, qu'elle n'est plus décomposable mais voit seulement sa trajectoire déviée en traversant le prisme. C'est le phénomène de **réfraction**.



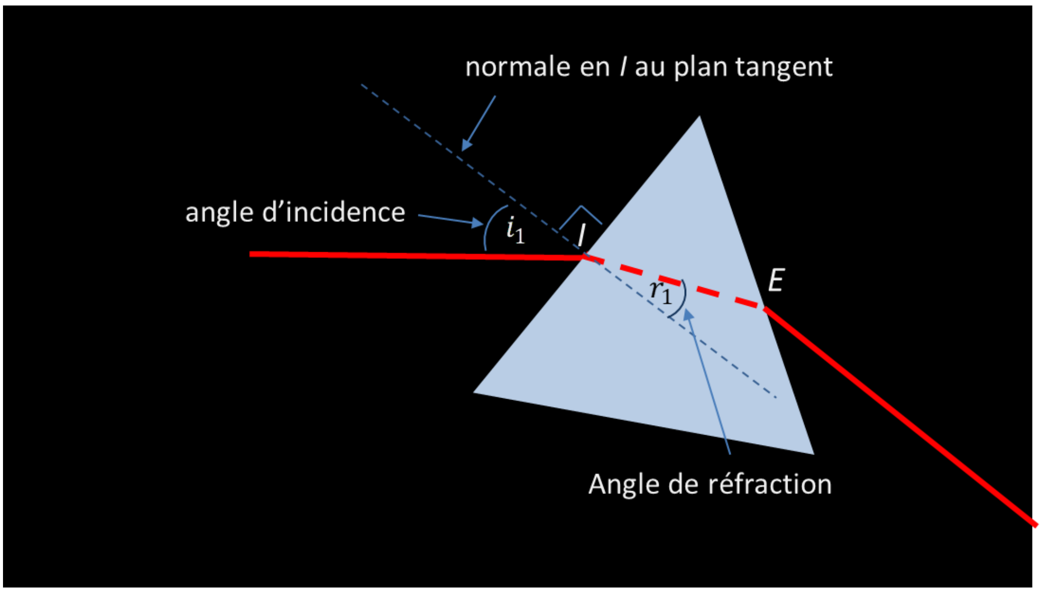
Cette expérience conduit à penser qu'un rayon de lumière blanche est composé de rayons indécomposables appelés **radiations monochromatiques** et à chacun desquels est associée une couleur spécifique. Une autre expérience dite de diffraction montrera un peu plus tard qu'on peut associer à une radiation monochromatique une grandeur caractéristique appelée **longueur d'onde**.

II <u>Analyse quantitative de l'expérience du prisme : Vers la notion d'indice de réfraction</u>

Afin de procéder à des mesures plus ou moins précises de la déviation, on peut réaliser l'expérience suivante. On fait passer la lumière blanche émise par une ampoule à travers une fente disposée verticalement au bord d'une feuille de papier au centre de laquelle on a disposé un prisme de verre ou de plexiglas. La lumière sortant de la fente laisse une trace blanche visible sur le papier représentant un rayon incident et fait apparaitre un faisceau émergent aux couleurs de l'arc en ciel. Afin de sélectionner une seule couleur de ce faisceau, on positionne juste devant la fente un filtre rouge. Ce dernier ne laisse passer que la composante rouge de la lumière blanche. Au crayon, on fixe l'emplacement du prisme sur la feuille ainsi que la partie inférieure du rayon incident, puis celle du rayon émergent. On enlève le prisme et on relie par un segment les rayons incidents et émergents, ce dernier représentant le parcours du rayon dans le prisme. On peut alors mesurer les différentes déviations.

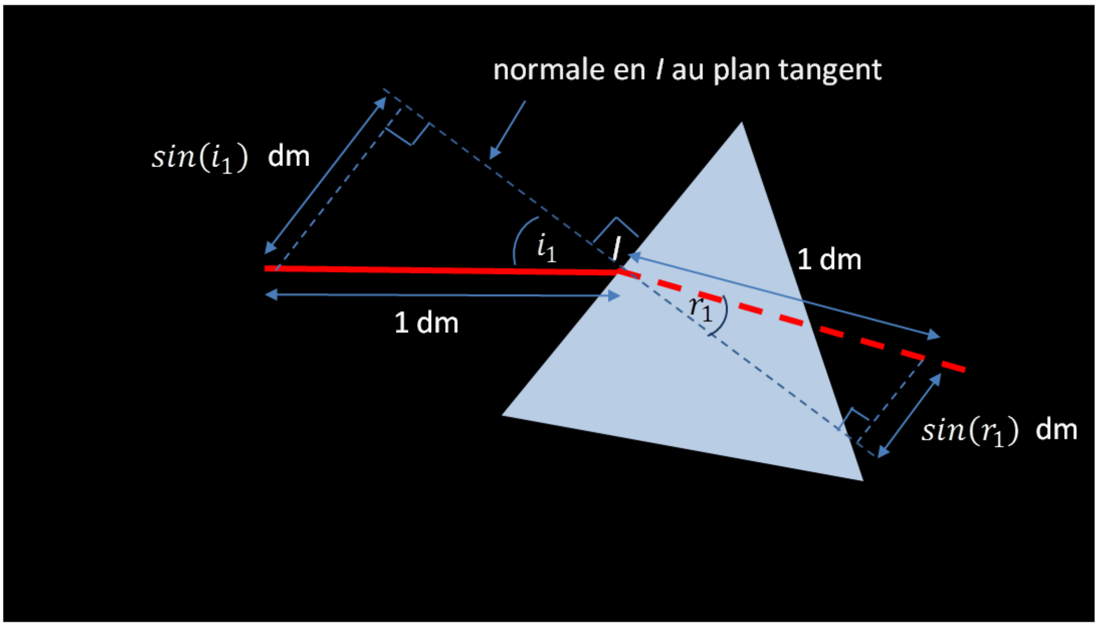


Analysons la première déviation du rayon, c'est-à-dire quand il passe au point I de l'air au milieu transparent formé par le prisme et voyons comment la caractériser. On constate d'abord qu'un rayon se présentant perpendiculairement à la surface du prisme n'est pas dévié. Cette perpendiculaire à la surface du prisme au point d'entrée du rayon semble donc jouer un rôle essentiel d'autant que le rayon réfracté apparaît toujours dans le plan formé par cette droite et le rayon incident. On qualifie cette droite de **normale au plan tangent** au point d'entrée I du rayon incident.



Le rayon incident peut alors être caractérisé par l'angle i_1 qu'il forme avec cette normale appelé **angle d'incidence**. De même, le rayon réfracté peut être caractérisé par l'angle r_1 qu'il forme avec cette normale, appelé **angle de réfraction**. L'observation montre que l'angle de réfraction est inférieur à l'angle d'incidence et en changeant de couleur pour le rayon incident mais en conservant le même angle d'incidence, on observe que l'angle de réfraction diminue en allant du rouge au violet ce qui traduit une déviation plus prononcée pour des longueurs d'onde de plus en plus courte..

Les angles incidents et réfractés peuvent cependant être également caractérisés par les sinus de leurs angles incident et réfracté respectifs, ces derniers se mesurant facilement comme suit : A partir du point de séparation des deux rayons, on porte un point sur chacun des rayons à un décimètre de distance. La distance qui sépare chacun de ces points de la normale correspond aux sinus.



Mesure sur feuille A4 des sinus des angles d'incidence et de réfraction

(Le rayon réfracté a été prolongé en dehors du prisme pour pouvoir faire la mesure)

Faisons varier l'angle d'incidence i_1 en changeant l'orientation du prisme par rapport au rayon incident (en TP l'expérience est faite par une quinzaine de binômes qui orientent leurs prismes au hasard). Relevons les mesures d'angles d'incidence, d'angle de réfraction, ainsi que les sinus de ces derniers mesurés directement sur la feuille d'expérience. Effectuons les rapports de l'angle d'incidence i_1 à l'angle de réfraction r_1 puis le rapport de leurs sinus. On observe alors que le premier rapport varie en fonction de l'angle d'incidence alors que le second reste le même (si l'expérience est conduite avec soin et précision). On aboutit alors au concept **d'indice de réfraction** du prisme par rapport à l'air pour la couleur considérée, caractérisée rappelons le par une longueur d'onde λ :

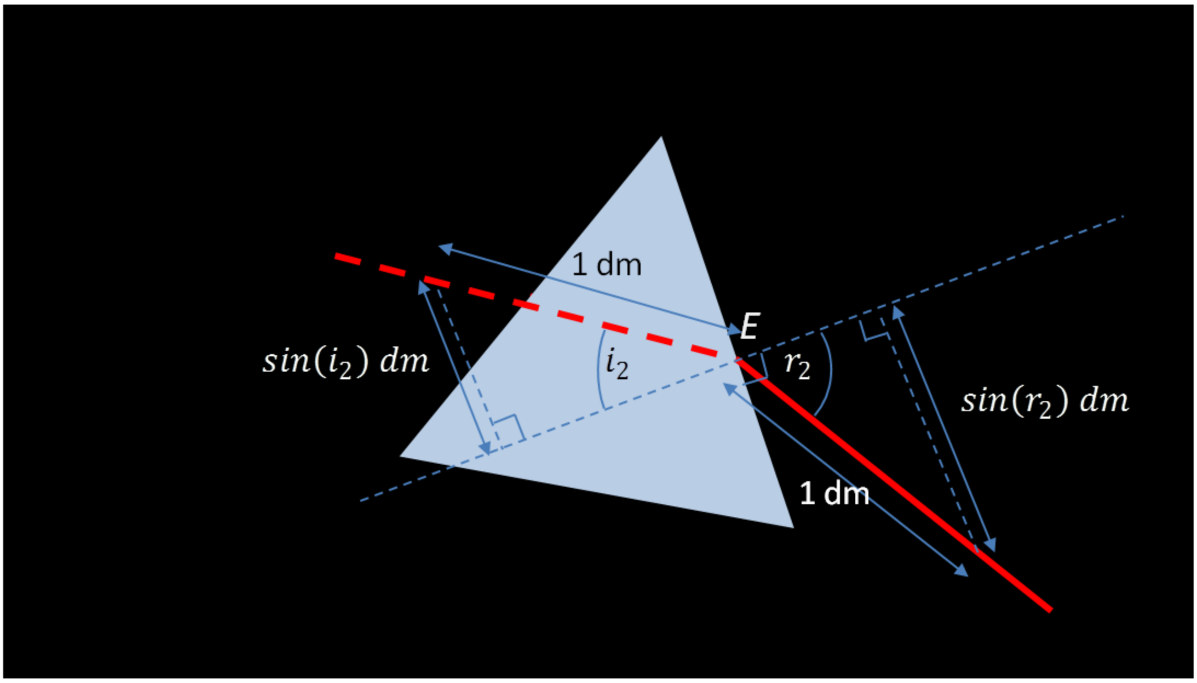
$$n_\lambda = \frac{sin(i_1)}{sin(r_1)}$$

L'observation montre que l'on a :

$$n_\lambda > 1$$

L'expérience de réfraction de la lumière blanche par un prisme baignant dans l'air ou un vide poussé ne montrerait pas de différence significative quant aux déviations, de sorte que l'indice de réfraction mesuré précédemment représente de façon satisfaisante l'indice de réfraction du prisme par rapport au vide. Des expériences montreront que l'indice de réfraction de l'air par rapport au vide est 1,00.

Qu'en est-il alors de la seconde déviation, celle du rayon sortant du prisme pour se propager à nouveau dans l'air ? Notons i_2 l'angle d'incidence du rayon se propageant dans le prisme au point d'émergence E et r_2 l'angle d'incidence du rayon réfracté qui émerge dans l'air en E.



<u>Mesure sur feuille A4 des sinus des angles d'incidence et de réfraction</u>

(Le rayon incident a été prolongé en dehors du prisme pour pouvoir faire la mesure)

On observe alors :

$$\frac{sin(r_2)}{sin(i_2)} = n_\lambda$$

Comment expliquer cela ? Faisons rentrer un rayon de même couleur au point E selon le même angle que le rayon émergent mais se propageant en sens inverse, donc avec un angle d'incidence i_3 égal à r_2. Nous observerons alors que ce rayon suit exactement le parcours inverse de l'expérience précédente et donc, donne en E un rayon réfracté dont l'angle de réfraction r_3 est égal à i_2. Ainsi nous aurons :

$$\frac{sin(i_3)}{sin(r_3)} = n_\lambda$$

ce qui correspond à la formule précédente.

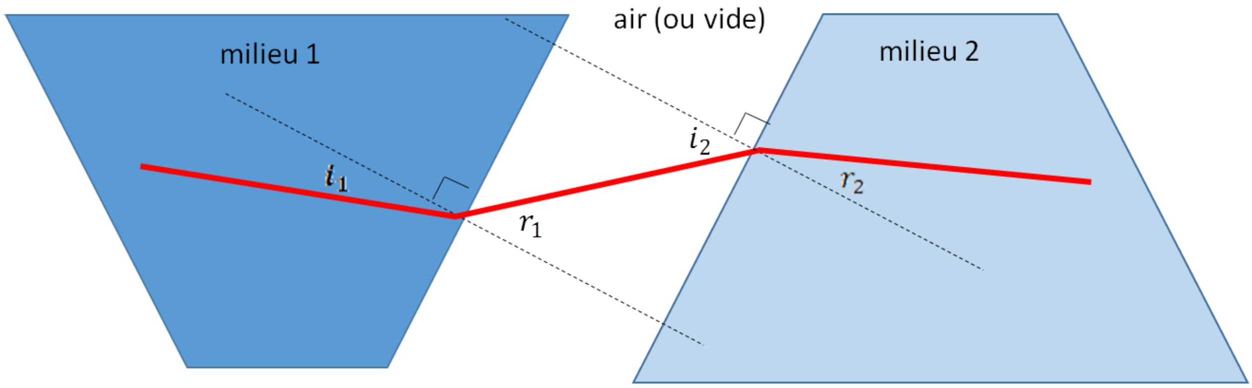
III <u>Réfraction à l'interface de deux milieux transparents : Vers la loi de Snell-Descartes</u>

Jusqu'à présent, nous n'avons considéré la réfraction d'un rayon lumineux monochromatique que dans le cas d'un changement de milieu comme de l'air au verre ou bien du verre à l'air. Qu'en est-il alors, du verre à l'eau par exemple ou de l'eau au verre, ou bien encore d'un certain type de verre à un autre type de verre.

Définissons d'abord ce qu'on entend par milieu transparent : Un **milieu transparent** est une région de l'espace occupée par du vide, de l'air, ou un matériau homogène tel que le verre ou l'eau, dans lequel la lumière peut se propager en ligne droite sans atténuation notable de son intensité (il y a en fait toujours un peu d'absorption) et ce quelque soit la couleur considérée.

Nous allons montrer que la loi de Snell-Descartes peut-être anticipée de l'expérience précédente où l'un des milieux est l'air (assimilable au vide).

Considérons deux milieux transparents (deux verres différents par exemples) séparés par une mince couche d'air (ou de vide). Le premier milieu dans lequel se propage un rayon incident a un indice de réfraction $n_{1\lambda}$ pour la couleur considérée de ce rayon de longueur d'onde λ et le second milieu un indice $n_{2\lambda}$. Notons i_1 l'angle d'incidence dans le premier milieu, r_1 l'angle de réfraction qui lui est associé, r_2 l'angle de réfraction du rayon réfracté dans le second milieu et i_2 l'angle d'incidence associé.



Les observations précédentes ont montré que nous devrions avoir :

$$n_{1\lambda} = \frac{sin(r_1)}{sin(i_1)}$$

$$n_{2\lambda} = \frac{sin(i_2)}{sin(r_2)}$$

Or r_1 et i_2 sont des angles alterne-interne égaux. Il en résulte :

$$sin(r_1) = sin(i_2)$$

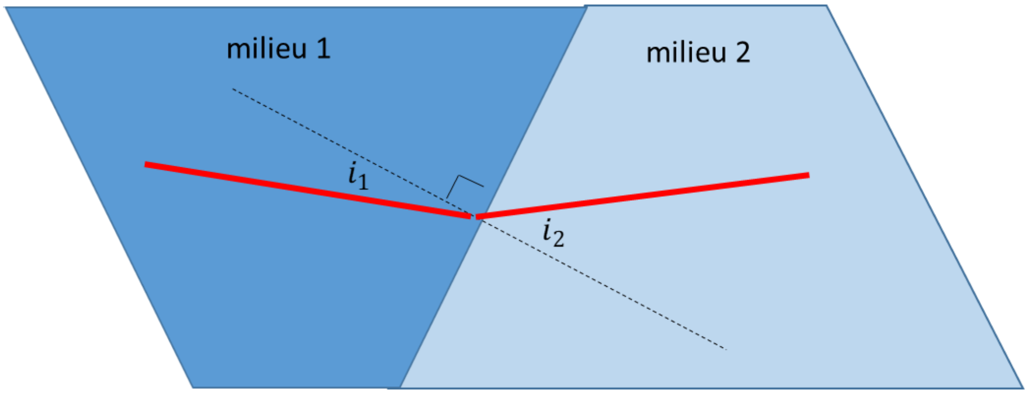
ce qui conduit à :

$$n_{1\lambda}\, sin(i_1) = n_{2\lambda}\, sin(r_2)$$

Imaginons alors par la pensée que la couche d'air est infiniment mince, nous obtenons la loi de Snell-Descartes.

IV Les lois de la réfraction de Snell-Descartes

Considérons un rayon monochromatique se propageant dans un milieu transparent 1 et pénétrant dans un second milieu transparent 2 en un point I. Le rayon dit incident subit une déviation et continue sa course sous forme d'un rayon dit réfracté dans le milieu 2. Comme la lumière pourrait effectuer le parcours inverse, le rayon réfracté devenant alors un rayon incident et le rayon incident un rayon réfracté, il est commode d'utiliser une notation symétrique, sans faire apparaitre de sens de propagation pour les rayons. L'angle formé par le rayon situé dans le milieu 1 avec la normale au plan tangent au point de réfraction de ce rayon sera noté i_1 et celui formé par le rayon situé dans le milieu 2 avec la même normale, i_2. L'indice de réfraction du milieu 1 (sous-entendu par rapport au vide) pour la couleur considérée caractérisée par une longueur d'onde λ sera noté $n_{1\lambda}$ et celui du milieu 2, $n_{2\lambda}$



1$^{\text{ère}}$ loi de Snell-Descartes :

Le rayon réfracté se trouve dans le plan formé par la normale au plan tangent au point de réfraction (point où a lieu la déviation) et le rayon incident, ce plan étant qualifié de **plan d'incidence** (C'est le plan de la figure précédente).

2$^{\text{ème}}$ loi de Snell-Descartes :

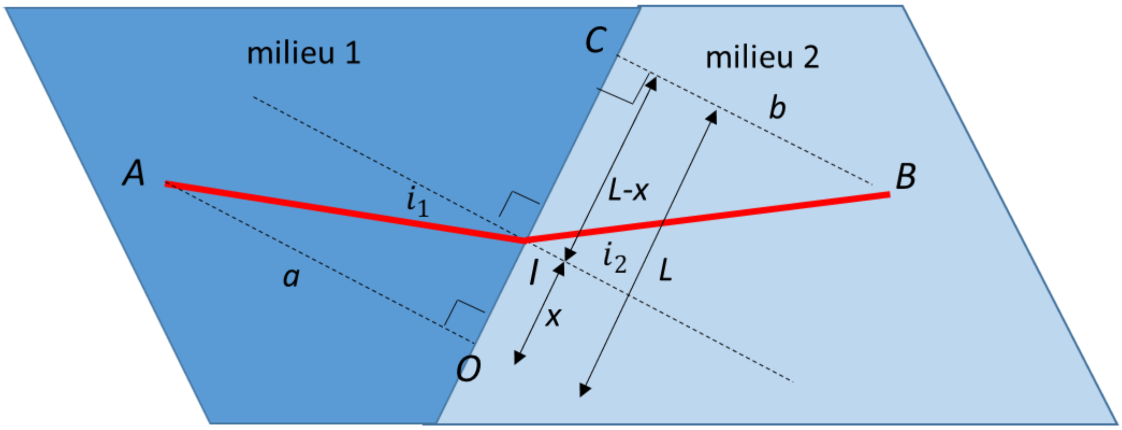
$$\boxed{\boldsymbol{n_{1\lambda}\, sin(i_1) = n_{2\lambda}\, sin(r_2)}}$$

Remarque :

L'indice de réfraction de l'air étant 1,00, cette loi redonne la définition de l'indice de réfraction d'un milieu transparent lorsque l'un des deux milieux est l'air.

IV Signification physique de l'indice de réfraction :

Pour aller d'un point à un autre dans un milieu transparent, on constate que la lumière choisit la ligne droite, c'est-à-dire le chemin qui lui prend le moins de temps. Quand elle doit changer de milieu transparent, ce n'est plus le cas. D'où l'idée qu'elle ne se propage pas à la même vitesse dans deux milieux d'indices de réfraction différents comme l'air et le verre. C'est l'idée d'une personne qui devrait en sauver une autre qui se noie, sachant que la première devra, pour sauver la seconde, courir à une certaine vitesse sur la berge puis nager dans l'eau à une vitesse moindre. La ligne droite n'est intuitivement pas le chemin qui prend le moins de temps. Ce problème peut être étudié par une voie purement théorique de la façon suivante. Considérons un point A sur un rayon incident se propageant dans le milieu 1 et un point B sur le rayon réfracté correspondant se propageant dans le milieu 2. Notons I le point de réfraction et définissons les projetés respectifs O et C des points A et B sur le plan tangent à la surface de séparation des deux milieux en I comme indiqué sur le schéma.



Le théorème de Pythagore donne pour les triangles rectangles AOI et BCI :

$$AI^2 = IO^2 + AO^2 = x^2 + a^2$$

$$BI^2 = IC^2 + BC^2 = (L - x)^2 + b^2$$

Soit :

$$AI = \sqrt{x^2 + a^2}$$

$$BI = \sqrt{(L - x)^2 + b^2}$$

Notons $v_{1\lambda}$, respectivement $v_{2\lambda}$, la vitesse de la lumière dans le milieu 1, respectivement le milieu 2, pour la radiation monochromatique considérée de longueur d'onde λ. Le temps mis par la lumière pour aller de A à I puis de I à B est :

$$t = \frac{AI}{v_{1\lambda}} + \frac{BI}{v_{2\lambda}} = \frac{1}{v_{1\lambda}}\sqrt{x^2 + a^2} + \frac{1}{v_{2\lambda}}\sqrt{(L - x)^2 + b^2}$$

Fixons a et b et considérons ce temps comme une fonction de x. Cherchons alors la position du point I rendant ce temps minimal. Pour cela dérivons la fonction et écrivons la nullité de cette dérivée. Il vient :

$$\frac{1}{v_{1\lambda}} \times \frac{2\,x}{2\sqrt{x^2 + a^2}} - \frac{1}{v_{2\lambda}} \times \frac{2\,(L - x)}{2\sqrt{(L - x)^2 + b^2}} = 0$$

Soit :

$$\frac{1}{v_{1\lambda}}\frac{OI}{AI} - \frac{1}{v_{2\lambda}}\frac{LI}{BI} = 0$$

$$\frac{1}{v_{1\lambda}} sin(i_1) - \frac{1}{v_{2\lambda}} sin(i_2) = 0$$

Soit finalement

$$\frac{1}{v_{1\lambda}} sin(i_1) = \frac{1}{v_{2\lambda}} sin(i_2)$$

Ou encore :

$$\frac{sin(i_1)}{sin(i_2)} = \frac{v_{1\lambda}}{v_{2\lambda}}$$

Traitons le cas où le premier milieu est l'air (assimilable au vide) alors on a $v_{1\lambda} = c \approx 3{,}00 \times 10^8\ m/s$ et par l'expérience :

$$\frac{sin(i_1)}{sin(i_2)} = n_{2\lambda}$$

On en déduit par comparaison à la formule théorique précédente :

$$n_{2\lambda} = \frac{c}{v_{2\lambda}}$$

La vitesse de la lumière peut être également mesurée expérimentalement et cette formule se trouve confirmée.

En conclusion :

L'indice de réfraction $\boldsymbol{n_\lambda}$ d'un milieu transparent pour une radiation monochromatique de longueur d'onde $\boldsymbol{\lambda}$ est le quotient de la célérité de la lumière dans le vide (assimilable à l'air) à la vitesse de la lumière dans le milieu transparent.

$$\boldsymbol{n_\lambda = \frac{c}{v_\lambda}}$$