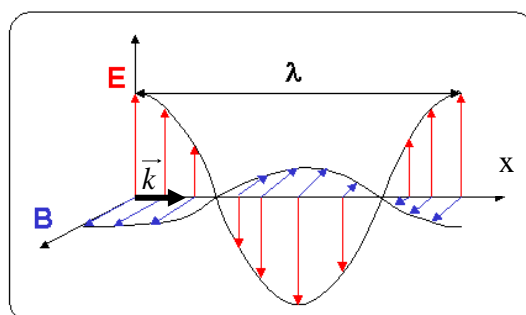


## Chapitre 2: Optique géométrique

### II.1- Introduction

#### II.1.1- Définition:

**Onde électromagnétique:** Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ) se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale  $\vec{k}$ .



- Les **ondes électromagnétiques** se propagent dans le vide et dans les milieux matériels. Elles couvrent une très large gamme de fréquences depuis les ondes radio ( $\nu = 3 \cdot 10^3$  Hz) jusqu'aux rayons  $\gamma$  ( $\nu = 10^{22}$  Hz).
- Les ondes électromagnétiques sinusoïdales se reproduisent identiques à elles-mêmes au bout d'un certain temps appelé période  $T$ , exprimé en secondes, inverse de la fréquence  $\nu = 1/T$ , exprimée en Hertz.
- La distance entre deux points successifs séparés par le temps  $T$  est la longueur d'onde  $\lambda$ . Une onde est dite **monochromatique** si elle est caractérisée par une seule valeur de  $\nu$ , de  $T$  ou de  $\lambda$ . Généralement elle est une superposition de plusieurs ondes électromagnétiques monochromatiques : elle est alors **polychromatique**.
- la longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles : plus la longueur d'onde est petite, plus grande est la fréquence, et vice versa. Cette relation est donnée par l'équation suivante :  **$c = \lambda \nu$**

La période  $T$  est tout simplement l'inverse de la fréquence  $\nu$  de l'onde :  $T = \frac{1}{\nu}$

#### Le spectre électromagnétique

Type	Longueur d'onde $\lambda$ (m)	Fréquence $f$ (Hz)
Radio	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^9$
Micro-ondes	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$
Infrarouge	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$
Visible	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$
Ultraviolet	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$
Rayons X	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$
Rayons $\Gamma$	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$

- La lumière n'est qu'une petite partie du vaste spectre électromagnétique appelée le visible ; *dans le vide, le visible est compris entre  $\lambda = 400$  nm et  $\lambda = 800$  nm.*

couleur	$\lambda$ (nm)
Infra-rouge	>780
Rouge	780-622
Orange	622-597
Jaune	597-577
Vert	577-492
Bleu	492-455
Violet	455-390
Ultra-violet	<390

**Tableau :** le spectre des couleurs de la lumière visible avec leur intervalle de longueurs d'onde.

### II.1.2- Notion de rayon lumineux :

Un rayon lumineux matérialise le chemin effectivement suivi par l'énergie lumineuse pour aller d'un point à un autre.

### II.1.3- Sources lumineuses :

En optique. Tout corps qui envoie de la lumière est considéré comme une source lumineuse ou un objet lumineux. Un corps est lumineux quand on peut le voir c'est-à-dire distinguer sa forme et sa couleur

**Source primaire et secondaire:** Ce qui produit la lumière est appelé « source primaire ». Ex. : le Soleil, une lampe torche, un ver luisant... On appelle « source secondaire » un objet qui renvoie de la lumière mais ne la produit pas - la Lune, un miroir - et tout objet suffisamment « réfléchissant » pour permettre d'éclairer un autre objet.

## Exemples des sources lumineuses:



Soleil



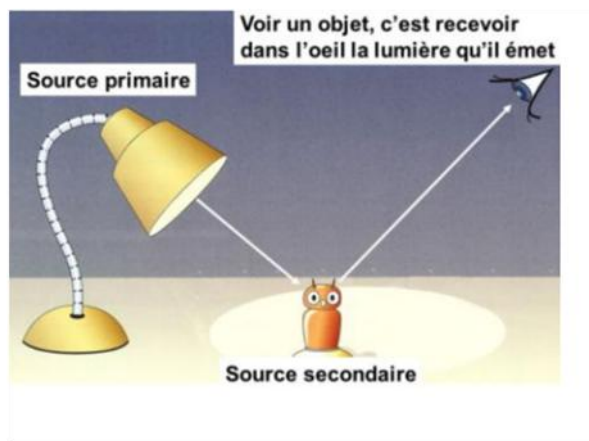
étoile



lampe



bougie

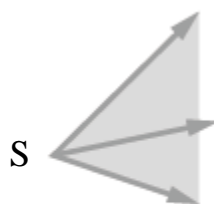


**II.1.3- Faisceaux lumineux :** Un faisceau lumineux est un ensemble contenu de rayons provenant d'une même source. Il peut être:

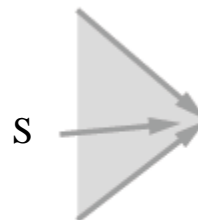
- parallèle si les rayons qui le constituent sont parallèles,
- convergent si les rayons qui le constituent, convergent vers un même point
- divergent si les rayons qui le constituent, semblent provenir d'un même point.



Faisceau de  
rayons parallèles



Faisceau  
divergent



Faisceau  
convergent

## II.1.4- Principes de la propagation rectiligne :

- *dans le vide*, la lumière se propage en ligne droite, indépendamment du sens de propagation, avec une vitesse  $c$  indépendante de la direction ; on a toujours  $\lambda\nu = c$ .  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- Dans un milieu matériel, la vitesse de la lumière est  $V = c/n$ , où  $n$ , **indice de réfraction du milieu**, dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ .  $n$  est toujours supérieur ou égal à 1 (donc  $V < c$ ).  
 $n_{\text{eau}} \approx 1.33, n_{\text{air}} \approx 1.0003, n_{\text{verre}} \approx 1.56$

## II.2- Les lois de Snell-Descartes:

Lorsqu'un rayon lumineux dit rayon incident rencontre une surface de séparation (dioptré) de deux milieux d'un indice optique différents, une partie de la lumière est réfléchi l'autre est transmise dans le deuxième milieu (réfracté) avec une direction différente.

1) Le rayon incident, le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le même plan (plan d'incidence).

2) le rayon réfléchi fait avec la normale à la surface un angle  $r$  égal à l'angle d'incidence  $i$ :

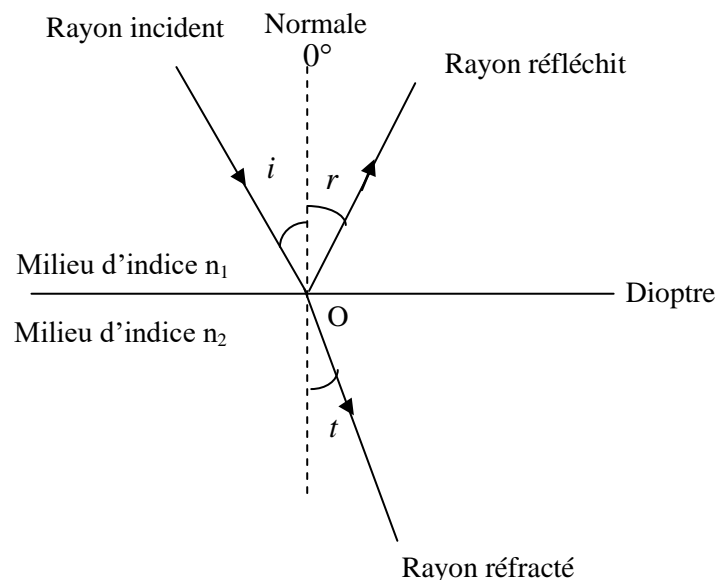
$$(i = r)$$

3) le rayon réfracté fait avec le prolongement de la normale à la surface un angle  $t$  tel que:

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

$n_1$  et  $n_2$  sont respectivement les indices de réfraction du milieu 1 et du milieu 2.

Les lois de **Snell-Descartes** sont représentées sur la figure.



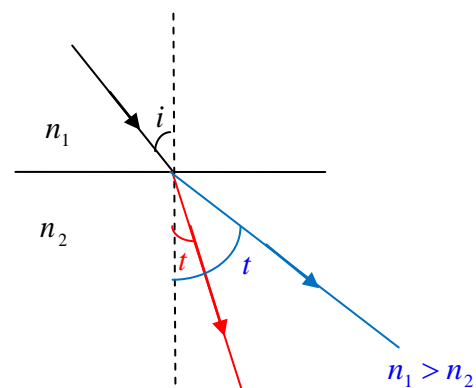
**Figure :** Définition des angles d'incidence ( $i$ ), de réfraction ( $t$ ) et de réflexion ( $r$ ) et des rayons correspondants dans le plan d'incidence.

- **Principe de retour inverse de la lumière :** Si l'on inverse son sens de propagation, le rayon lumineux décrit la même trajectoire.

**Remarque:**

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

$$1) \Rightarrow \frac{\sin(t)}{\sin(i)} = \frac{n_1}{n_2} \begin{cases} n_1 < n_2 \rightarrow \frac{n_1}{n_2} < 1 \rightarrow \sin(t) < \sin(i) \Rightarrow t < i \\ n_1 > n_2 \rightarrow \frac{n_1}{n_2} > 1 \rightarrow \sin(t) > \sin(i) \Rightarrow t > i \end{cases}$$



**2) a- Cas où  $n_1 \leq n_2$  : réfraction limite**

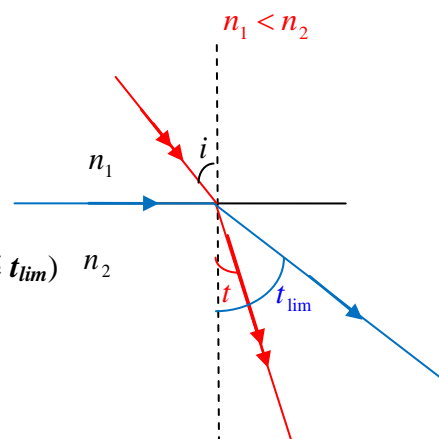
$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(t) \Rightarrow \sin(t) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i)$$

- Si  $i = 90^\circ \left( \frac{\pi}{2} \right)$  :  $\sin(t) = \frac{n_1}{n_2}$

$n_1 \leq n_2 \Rightarrow$  *réfraction possible* et l'angle

de réfraction est maximale (angle de réfraction limite noté  $t_{lim}$ )

et vaut  $t_{lim} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$

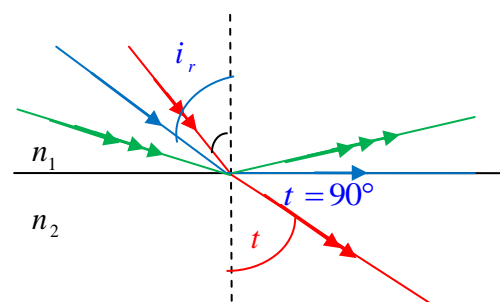


**b- Cas où  $n_1 > n_2$  : réflexion totale**

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

- Si  $t = 90^\circ \left( \frac{\pi}{2} \right)$  :  $\sin(i) = \frac{n_2}{n_1}$

$\rightarrow i_r = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$



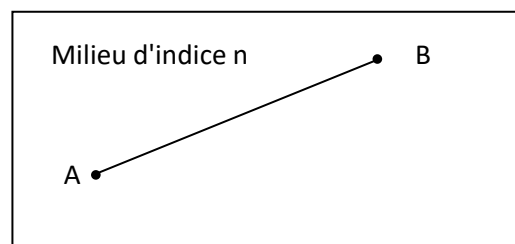
Lorsque  $n_1 > n_2$  et  $i > i_r \Rightarrow$  *réfraction impossible*  $\Rightarrow$  *réflexion totale* et le dioptre se comporte comme un miroir.

### II.3- Chemin optique

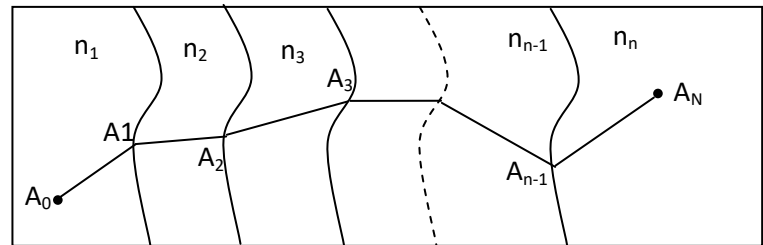
Le chemin optique d'un rayon lumineux entre deux points A et B situés dans un milieu d'indice n est donné par :  $L_{AB} = n \cdot AB$

$$L_{AB} = nAB = \frac{cAB}{v} = ct$$

Le chemin optique  $L_{AB}$  représente la distance algébrique qu'aurait parcourue la lumière dans le vide pendant le même temps qu'elle met à parcourir le trajet réel dans le milieu considéré.



Si on a plusieurs milieux:



$$L_{A_0 A_n} = n_1 A_0 A_1 + n_2 A_1 A_2 + \dots + n_n A_{n-1} A_n = \sum_{n=1}^{n=N} n_n A_{n-1} A_n$$

#### II.4- Principe de Fermat:

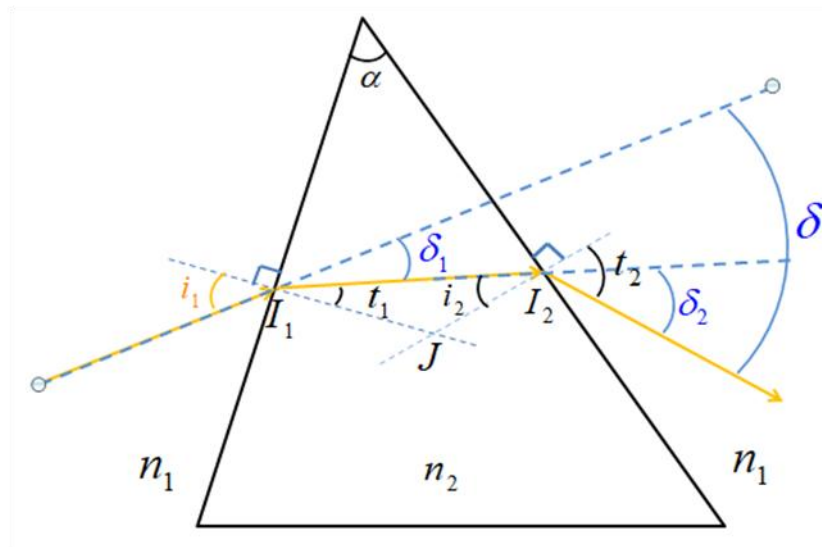
Parmi toutes les trajectoires possibles, celle effectivement suivie par un rayon lumineux correspond à un chemin optique  $L$  extrémal  $\delta L_{AB} = 0$ .

#### II.5- Application des lois de Snell-Descartes: Prisme

$i_1$ ,  $i_2$  et  $t_1$ ,  $t_2$  sont respectivement les angles d'incidence et de réfraction sur les faces d'entrée et de sortie du prisme

##### II.5.1- Formules d'un prisme d'angle

$$\begin{cases} n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(t_1) \\ n_2 \sin(i_2) = n_1 \sin(t_2) \\ t_1 + i_2 = \alpha \end{cases}$$



##### II.5.2- Déviation du prisme

Le trajet du rayon, représenté sur la figure, montre qu'il existe, de manière générale, une **déviation** d'angle  $\delta$  entre les rayons incident et sortant du prisme.

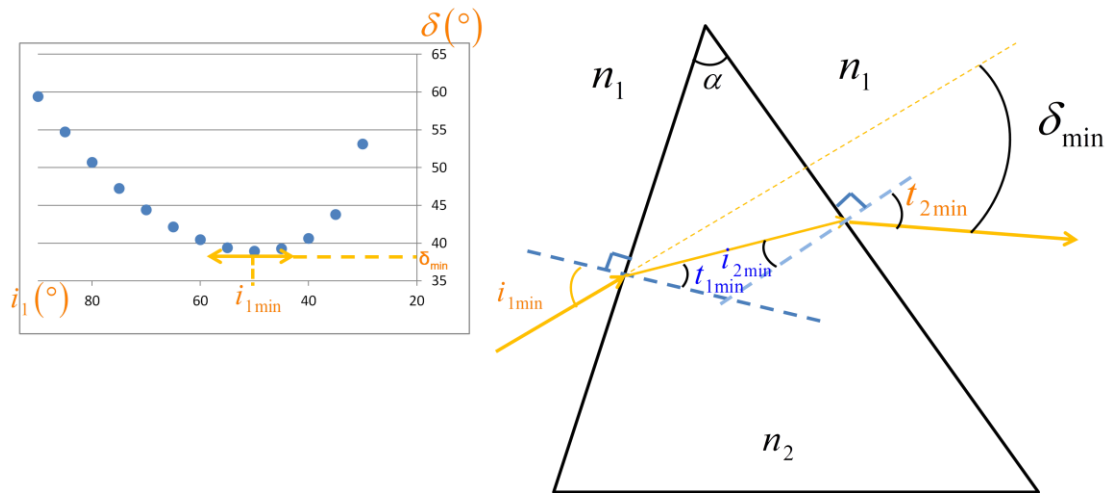
Il peut être déterminé analytiquement en examinant les angles  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , où l'on a la relation :

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = (i_1 - t_1) + (t_2 - i_2) = i_1 + t_2 - (t_1 + i_2)$$

$$\delta = i_1 + t_2 - \alpha$$

La déviation  $\delta$  passe par un minimum pour un certain angle d'incidence  $i_{\min}$ , donné par :

$$\begin{cases} i_{1\min} = t_{2\min} = i_{\min} \\ \text{et} \\ t_{1\min} = i_{2\min} = \frac{\alpha}{2} \end{cases} \Rightarrow \delta_{\min} = 2i_{\min} - \alpha$$



On obtient une relation entre  $n_1$ ,  $\alpha$  et  $\delta_{\min}$  permettant des mesures d'indice de matériaux optiques  $n_2$

$$n_1 \sin(i_{1\min}) = n_2 \sin(t_{1\min}) \Rightarrow n_2 = n_1 \frac{\sin(i_{1\min})}{\sin(t_{1\min})} \Rightarrow n_2 = n_1 \frac{\sin\left(\frac{\delta_{\min} + \alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

### II.5.3- Dispersion de la lumière blanche par un prisme:

On appelle ce phénomène la dispersion optique qui peut-être quantifié grâce à la loi

**de Cauchy** :  $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$ , A et B sont des constantes

couleur	$\lambda$ (nm)
Rouge	780-622
Violet	455-390

**On a :**  $\lambda_V < \lambda_R \Rightarrow n_{2V} > n_{2R}$

$$\begin{cases} n_1 \sin(i) = n_{2R} \sin(t_R) \\ n_1 \sin(i) = n_{2V} \sin(t_V) \end{cases} \Rightarrow 1 = \frac{n_{2R} \sin(t_R)}{n_{2V} \sin(t_V)} \Rightarrow \frac{n_{2V}}{n_{2R}} = \frac{\sin(t_R)}{\sin(t_V)} > 1 \Rightarrow \sin(t_R) > \sin(t_V)$$

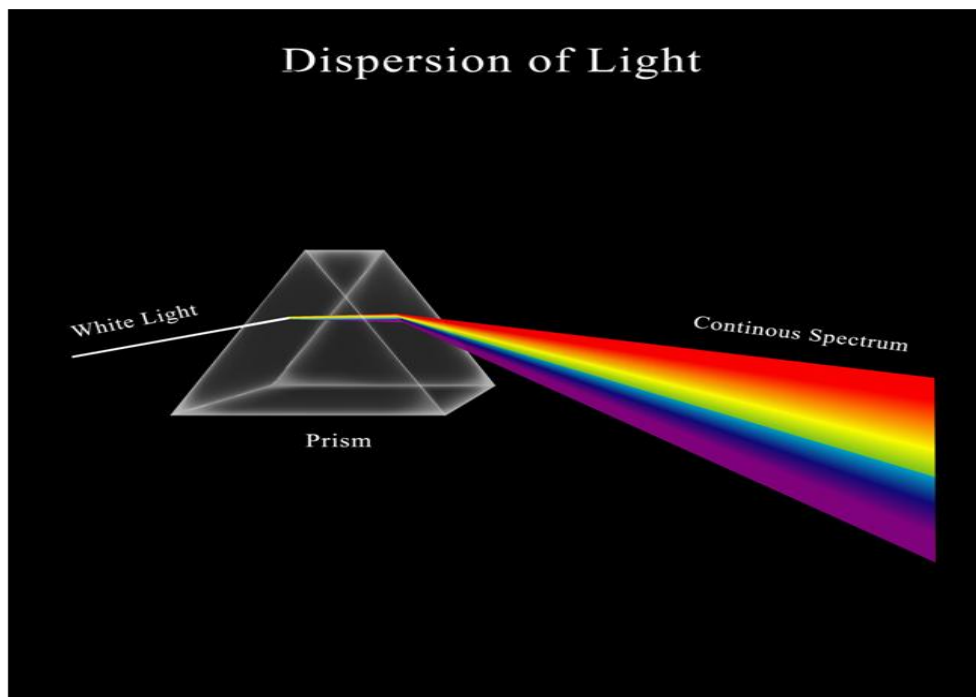
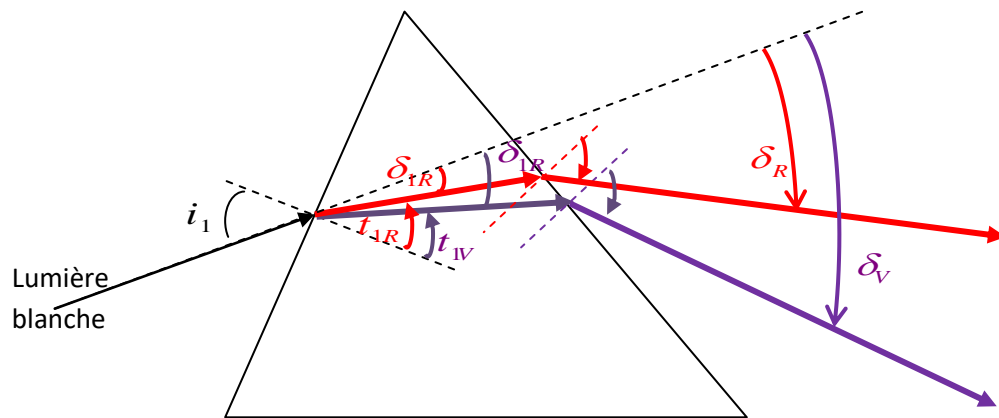
$$\Rightarrow t_R > t_V \Rightarrow \delta_{1R} < \delta_{1V}$$

D'autre part:

$$t_R > t_V \Rightarrow -t_{1R} < -t_{1V} \Rightarrow \alpha - t_{1R} < \alpha - t_{1V} \Rightarrow i_{2R} < i_{2V} \Rightarrow \sin i_{2R} < \sin i_{2V}$$

$$\Rightarrow n_{2R} \sin i_{2R} < n_{2V} \sin i_{2V} \Rightarrow n_1 \sin t_{2R} < n_1 \sin t_{2V} \Rightarrow \sin t_{2R} < \sin t_{2V} \Rightarrow t_{2R} < t_{2V}$$

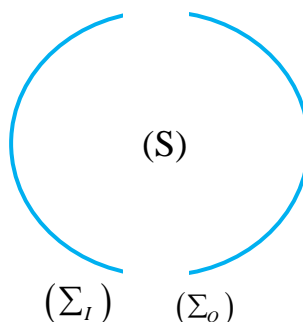
$$\Rightarrow \delta_R < \delta_V$$



## II.6- Systèmes optiques

Un système optique (S) est un ensemble de surfaces qui réfléchissent (miroirs) ou réfractent (dioptries) les rayons lumineux.

(S) est un système optique figuré par ses deux faces extrêmes  $(\Sigma_I)$  et  $(\Sigma_O)$ .  $(\Sigma_I)$  qui est du côté de la lumière incidente et reçoit les rayons lumineux, est la face d'entrée ; la face  $(\Sigma_O)$  est la face de sortie.



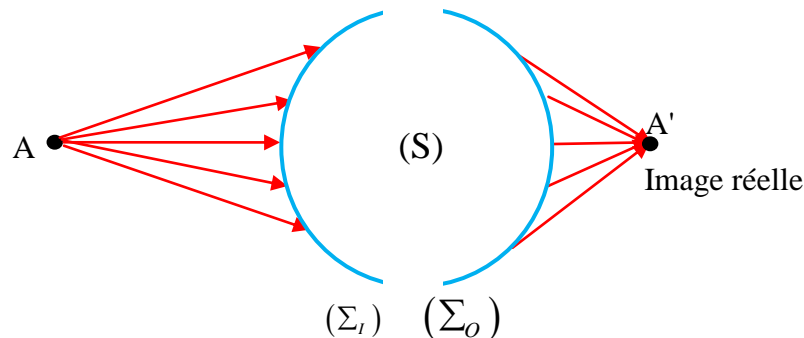


## II.7- Notion d'objet et d'image

Soit un système optique figuré par ses deux faces extrêmes  $(\Sigma_I)$  et  $(\Sigma_O)$ .  $(\Sigma_I)$  qui est du côté de la lumière incidente et reçoit les rayons lumineux, est la face d'entrée ; la face  $(\Sigma_O)$  est la face de sortie. Le faisceau lumineux incident rencontre la face d'entrée  $(\Sigma_I)$ . Une partie de ce faisceau pénètre dans le système optique, chemine à travers lui et en sort par  $(\Sigma_O)$  constituant le faisceau émergent.

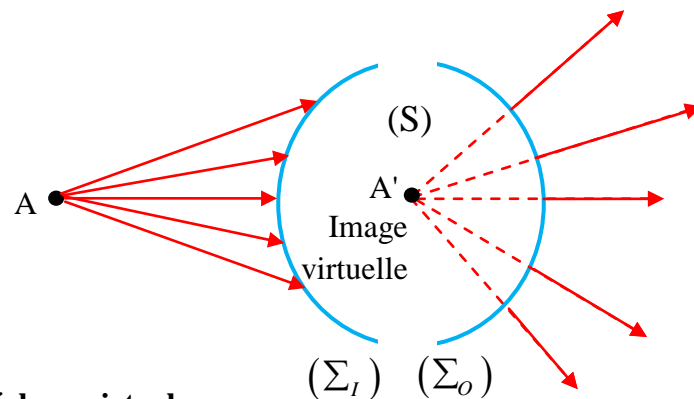
### II.7.1- Image réelle ou virtuelle

**Image réelle** : une image est réelle si elle est formée par l'intersection des rayons physiques issus de l'objet A. Elle peut être obtenue sur un écran.



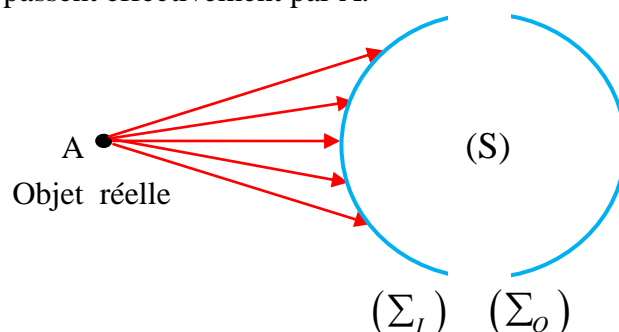
A' est l'image de A à travers le système optique. On dit aussi que A' est le conjugué de A

**Image virtuelle**: Une image est virtuelle si elle est formée par l'intersection des prolongements de rayons physiques. Elle ne peut pas être obtenue sur un écran.

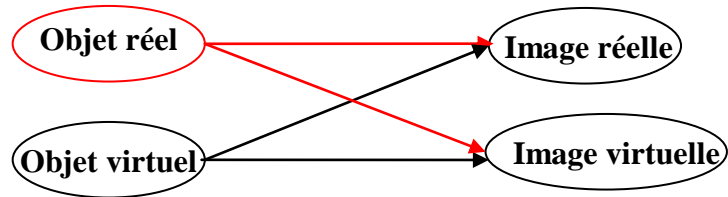
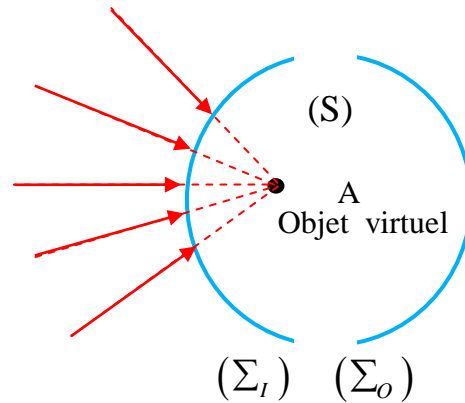


### II.7.2- Objet réel ou virtuel

**Objet réel** : Un objet est réel s'il existe physiquement (lampe, Soleil...). Les rayons incidents passent effectivement par A.

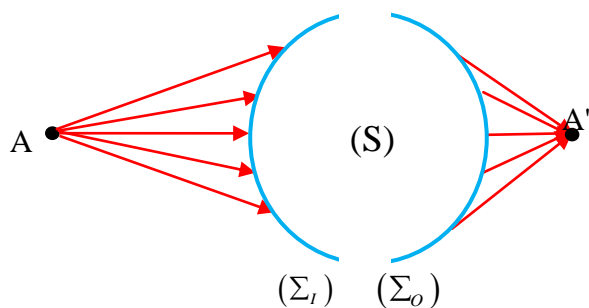


**Objet virtuel:** On dit que A est un objet virtuel pour le système (S) si ce sont les *prolongements des rayons incidents* qui passent par A. On peut dans certains cas constituer un **objet virtuel** si le système étudié est précédé d'un autre système optique.

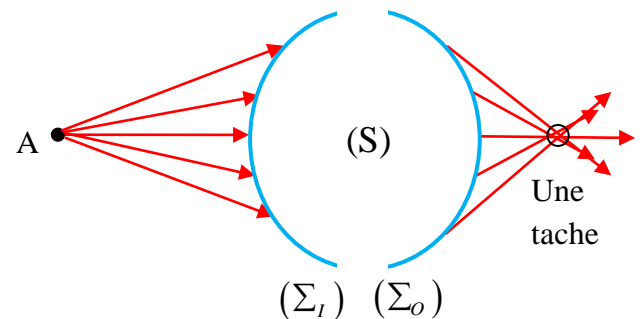


## II.8- Notion de Stigmatisme rigoureux

Un système optique est dit **stigmatique** pour un couple de points A (objet) et A' (image) si tout rayon passant par A passe par A' après avoir traversé le système optique (image d'un point est un point).



**Stigmatisme**



**Astigmatisme**