

A landscape photograph featuring a vibrant rainbow arching across a cloudy sky. The foreground is a field of golden-yellow crops, likely wheat, with a few dark green trees scattered across the horizon.

# *Optique Géométrique*

LE /MATH ENS UAE

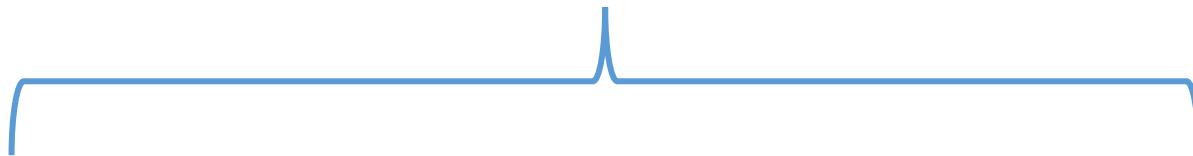
*Pr: F.YAKHLEF*

## *Plan du cours*

- ❖ *Notions fondamentales de l'optique géométrique*
- ❖ *Miroirs et dioptres*
- ❖ *Fibres optiques*
- ❖ *Systèmes centrés*
- ❖ *Associations des systèmes centrés*
- ❖ *Etudes de quelques instruments optiques*

# Notions fondamentales de l'optique géométrique

**L'optique:** (du grec "optikos" signifiant relatif à la vue) est la branche de la physique qui traite de la lumière visible, son comportement, sa propagation et de ses propriétés, de la vision ainsi que les systèmes utilisant ou émettant de la lumière.

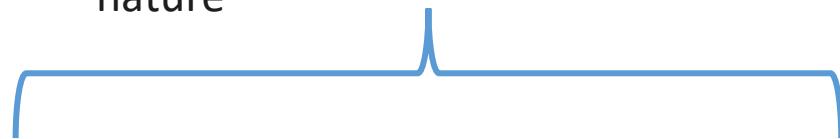


*l'optique géométrique*

étudie des propriétés de la lumière, développée à partir de principes fondamentaux (propagation rectiligne, lois de la réflexion et de la réfraction), sans qu'il soit fait d'hypothèses sur sa nature.

*l'optique physique*

comporte l'interprétation de ces propriétés par la connaissance de cette nature



*optique ondulatoire*

la lumière étant considérée comme formée par la vibration d'un champ électromagnétique qui se propage comme une onde.

*optique corpusculaire*

la lumière étant considérée comme formée de photons.

## ***Notion de rayon lumineux***

La lumière transport de l'énergie sous forme d'onde électromagnétique dans le vide ou dans un milieu transparent. Elle résulte en général de la superposition des ondes de différentes longueurs d'onde.

- ❖ Une **lumière monochromatique** correspond à une seule onde sinusoïdale de fréquence bien déterminée.
- ❖ Une **lumière polychromatique** est constituée de plusieurs ondes électromagnétiques.

Dans le vide, la lumière se propage dans toutes les directions de l'espace à la vitesse :

$$c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide, la fréquence  $\nu$  et la période  $T$  sont liées par:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$$

# Sources lumineuse

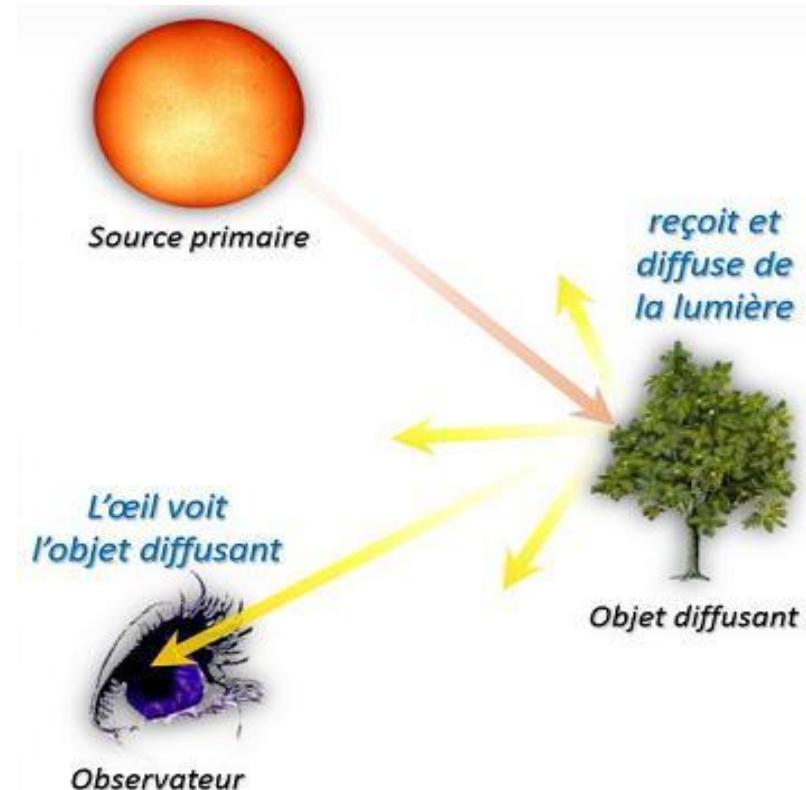
Une source de lumière est un corps qui émet (qui projette) de la lumière autour de lui.

On distingue deux types de source de lumière :

## ❖ Les sources primaires:

Ce sont des corps qui produisent la lumière qu'ils émettent.

On trouve le Soleil, les flammes, le filament d'une lampe etc....

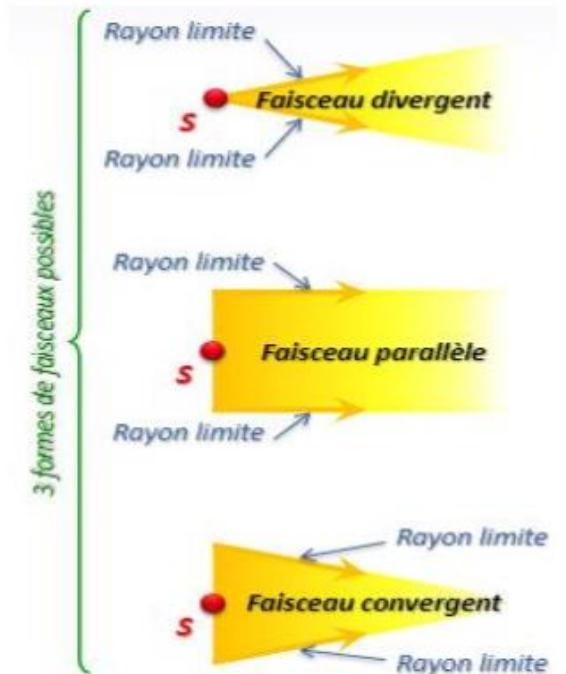


## ❖ Les objets diffusants (sources secondaires):

Ce sont des corps qui ne produisent pas de lumière mais qui renvoient la lumière reçue. On dit que ces corps diffusent la lumière,

**Faisceau de lumière** : c'est un ensemble de rayons lumineux émis par la source et compris entre deux rayons limites. 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,



## Milieu de propagation de la lumière

Les milieux comme le verre, l'eau et l'air, laissent passer la lumière. Ce sont des **milieux transparents**.

Les milieux comme le carton, l'acier ne laissent pas passer la lumière. Ce sont des **milieux opaques**.



*Matériaux transparents*



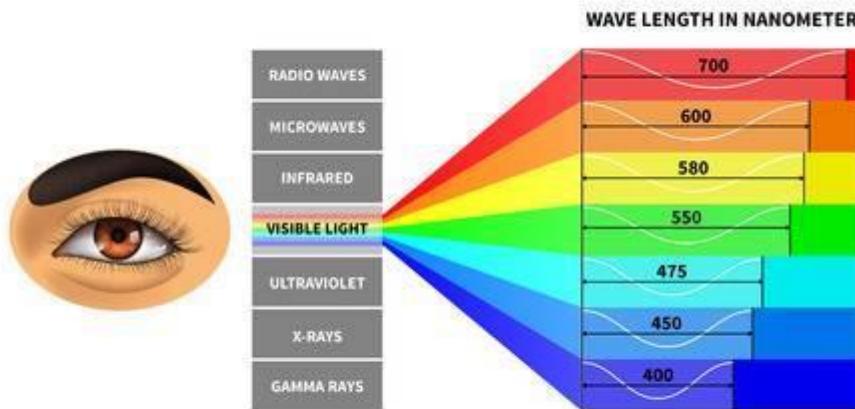
*Matériaux opaques*



## Spectre électromagnétique

Le domaine de la lumière visible par l'œil humain correspond aux longueurs d'onde comprises entre  $0,4 \mu\text{m}$  et  $0,8 \mu\text{m}$  ( $400 \text{ nm}$  et  $800 \text{ nm}$ ).

$$400\text{nm} < \lambda_{\text{visible}} < 800\text{nm}$$



## Vitesse de propagation de la lumière

- ❖ Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite à la vitesse  $C=3.10^8\text{m/s}$ .
- ❖ Dans un milieu transparent, homogène (il a les mêmes propriétés physiques en tout point) et isotrope (il a mêmes propriétés physiques dans toutes les directions), la lumière se propage en ligne droite mais à une vitesse  $V$ :

$$V = \frac{c}{n} < c$$

## l'indice de réfraction

L'indice de réfraction ( $n$ ) d'un milieu est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide ( $c$ ) par la vitesse de la lumière dans ce milieu ( $v$ ).

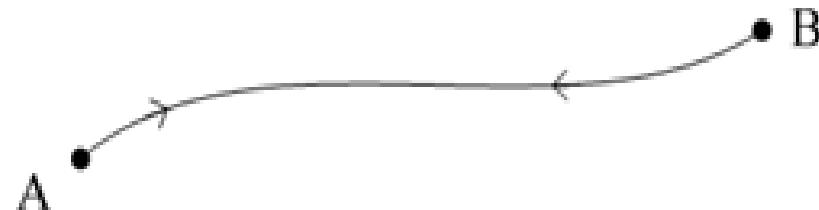
$$n = \frac{c}{v}$$

**Remarque** : dans un milieu matériel, la vitesse de la lumière ne peut être supérieure à celle possédée dans le vide donc un indice de réfraction est toujours supérieur ou égal à 1.

Milieu	air	eau	verre	Polyester	diamant
Indice $n$	1,0003	1,33	1,5-1,8	1,57	2,42

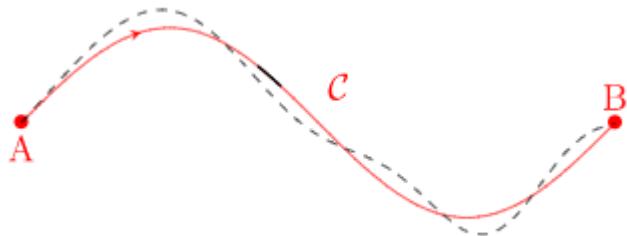
## Principe du retour inverse de la lumière

Un rayon lumineux issu d'un point A, traversant plusieurs milieux et aboutissant à un point B, suivra exactement le même chemin qu'un rayon lumineux issu du point B et aboutissant au point A. On dit que le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation



## Principe de Fermat

La lumière se propage d'un point à un autre de façon à minimiser son temps de trajet.



un rayon lumineux partant d'un point A et se dirigeant jusqu'à un autre point B. Fermat propose que parmi tous les chemins possibles entre A et B, la lumière emprunte seulement le chemin le plus rapide.

## **Postulats de l'optique géométrique**

L'optique géométrique se déduit par deux postulats suivants :

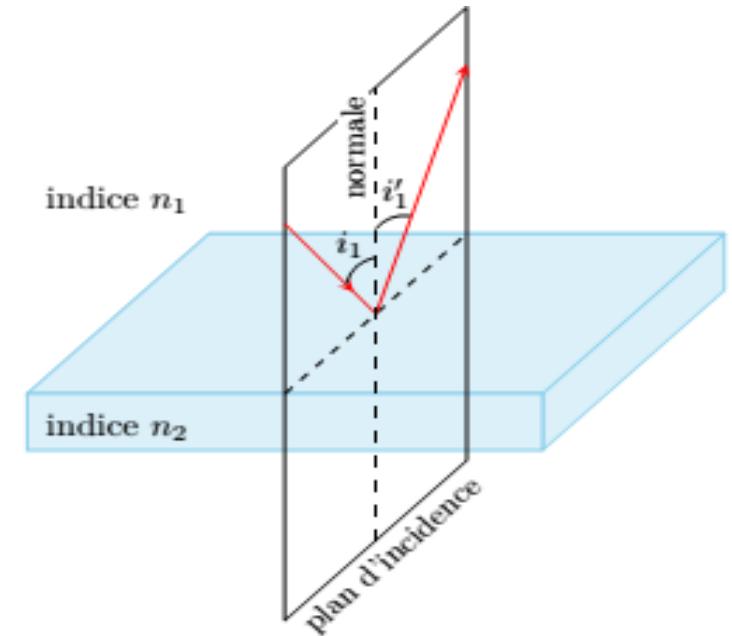
- ❖ La lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène.
- ❖ La lumière se réfléchit et se réfracte selon les lois de Snell-Descartes.

# Lois générales de l'optique géométrique

## ❖ Réflexion de la lumière

**1ère loi de réflexion :** Le rayon incident, le rayon réfléchi est la normale à la surface de séparation sont dans le plan d'incidence.

**2ème loi de réflexion :** Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale. L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont liés par la première loi de Snell-Descartes :  $i_1 = i'_1$ .



Réflexion d'un rayon sur une interface.

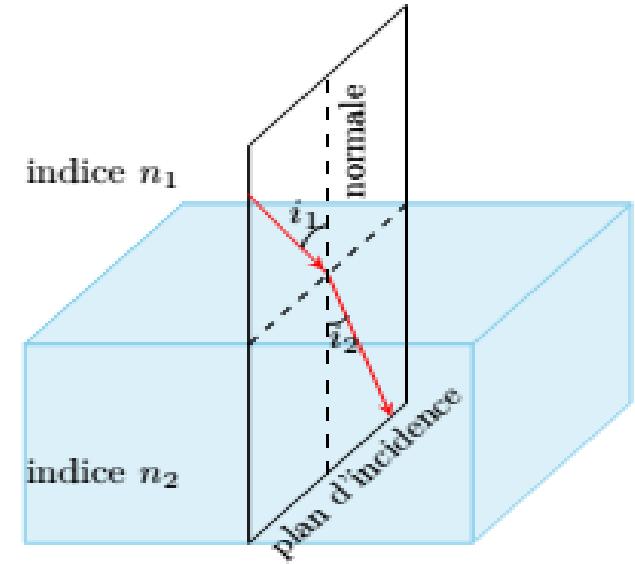
# Lois générales de l'optique géométrique

## ❖ Réfraction de la lumière

**1ère loi de réfraction :** Le rayon incident, le rayon réfracté est la normale à la surface de séparation sont dans le plan d'incidence.

**2ème loi de réfraction :** L'angle d'incidence et l'angle de réfraction sont liés par la deuxième loi de Snell-Descartes :

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



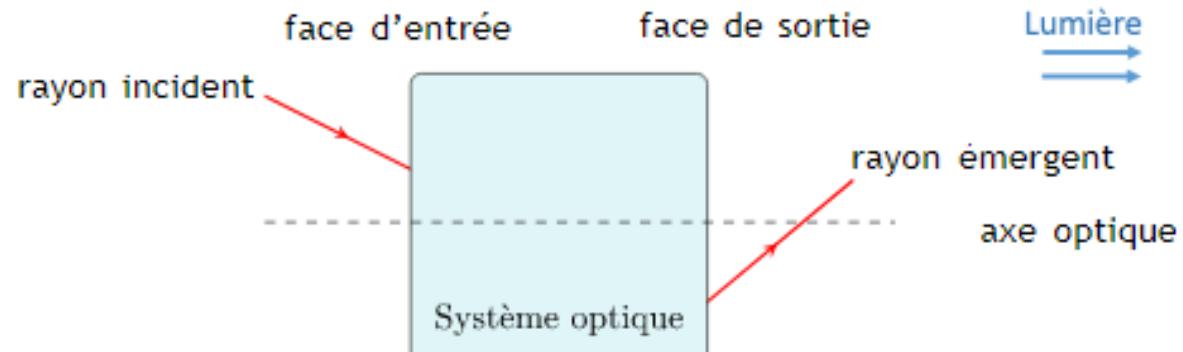
Réfraction d'un rayon lumineux.

# Les systèmes optiques

## Système optique centré

C'est l'ensemble des milieux transparents d'indice de réfraction différents séparés par des dioptres et possédant un axe de symétrie appelé axe optique orienté dans le sens de propagation de la lumière.

Les intersections des différentes surfaces avec l'axe optique sont appelées "**sommets**" de ces surfaces.



Représentation d'un système optique

## Propriétés des systèmes centrés

- ❖ **Relation de conjugaison** : Le système donne, d'un point objet A sur l'axe, une image A' également sur l'axe. La position de A' dépend de celle de A. Il existe donc une relation mathématique qui relie les positions de A et A'. Cette relation est dite " relation de conjugaison ".
- ❖ **Grandissement** : Le grandissement linéaire transversal  $\gamma$  est défini par le rapport des valeurs algébriques des dimensions linéaires de l'image A'B' à celles de l'objet AB :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

$\gamma$  est une valeur algébrique **sans dimension**, positive si l'image et l'objet ont le même sens, négative si l'image est renversée par rapport à l'objet.

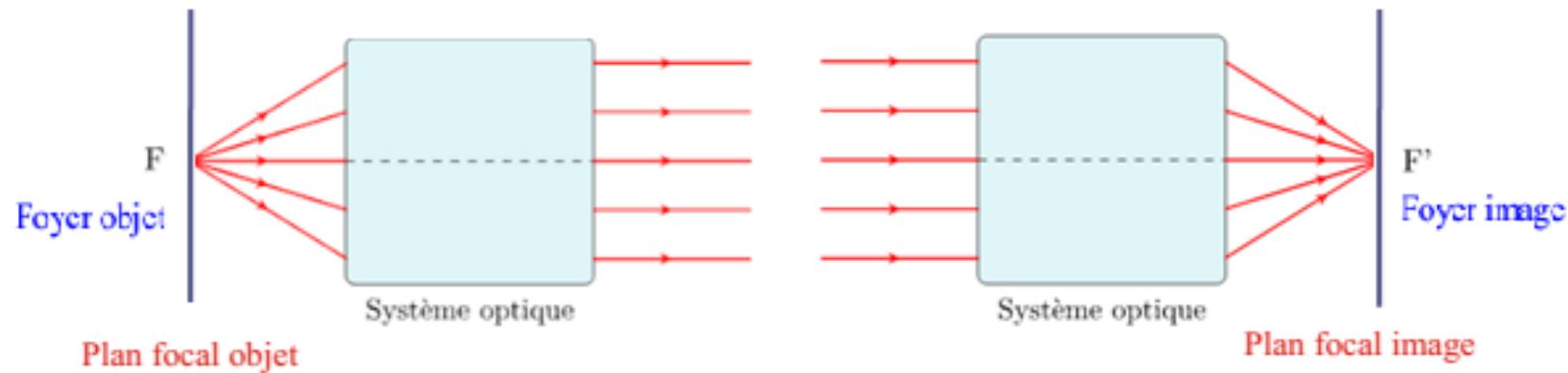
## Principaux éléments d'un système centré

**Foyer image  $F'$**  : Un rayon issu d'un point objet à l'infini sur l'axe (parallèle à l'axe optique), émerge du système en passant par un point  $F'$  de l'axe .Le point  $F'$  est appelé " foyer image ".

Le plan perpendiculaire à l'axe et passant par  $F'$ , est appelé le **plan focal image**.

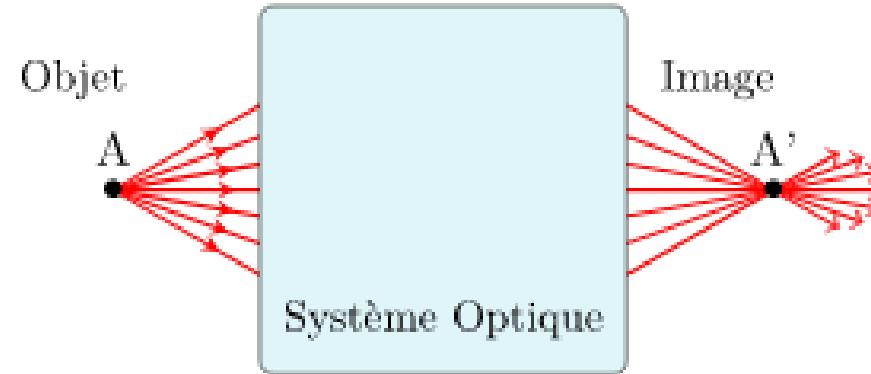
**Le foyer objet  $F$**  : est le point objet d'une image située à l'infini, (les rayons émergents parallèles à l'axe optique).

Le plan passant par  $F$  et perpendiculaire à l'axe optique du système est appelé le **plan focal objet**.



## Les images données par un système optique

Soit un système optique (S). On dit qu'un point A' est l'image d'un point A à travers (S), ou que A et A' sont conjugués à travers (S), si à tous les rayons incidents dont les supports passent par A, correspondent des rayons émergents dont les supports passent tous par A'.

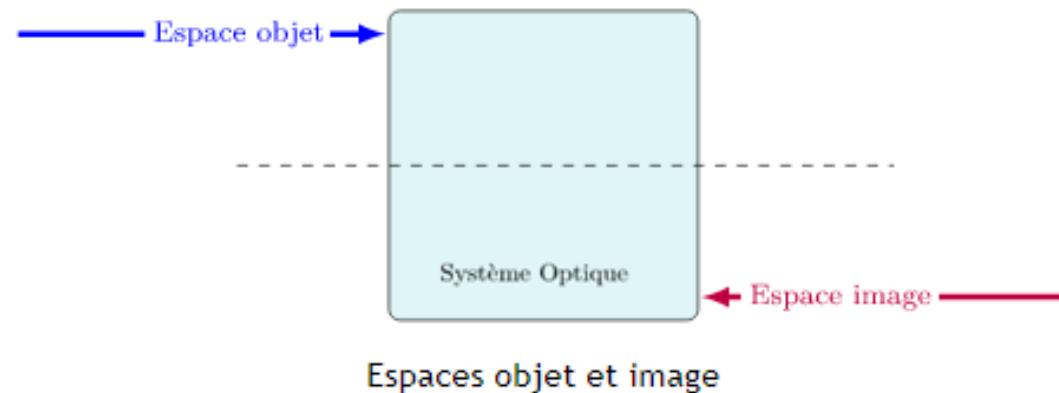


Formation d'un point image

## Espaces objet et image

Autour d'un système optique s'organise deux espaces : espace objet et espace image.

- ❖ L'**espace objet** est la région de l'espace située avant la face d'entrée du système (S)
- ❖ L'**espace image** est la région de l'espace située après la face de sortie de (S)



## **Nature de l'objet et de l'image**

### **Un objet est réel :**

S'il se trouve dans l'espace objet → Les rayons incidents passent effectivement par A.

### **Une image est réelle :**

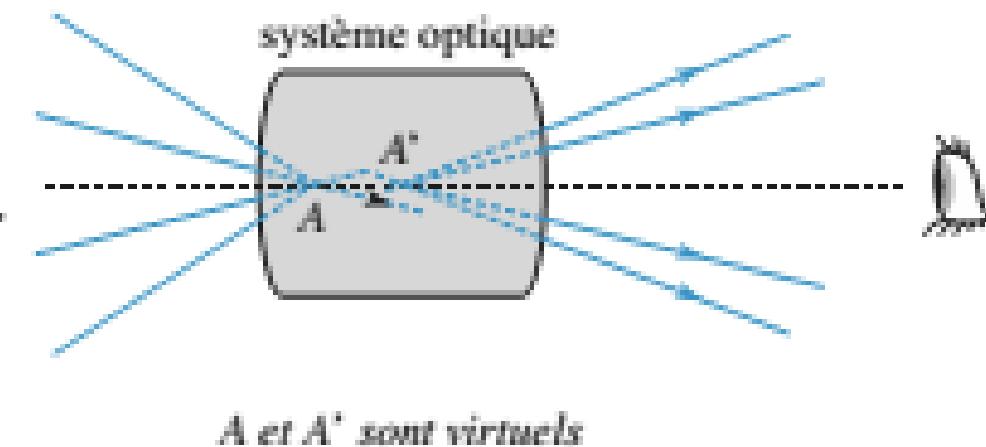
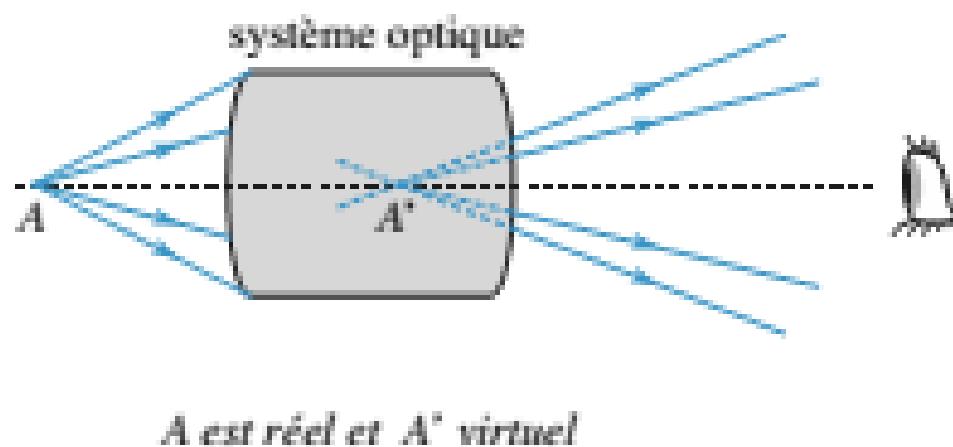
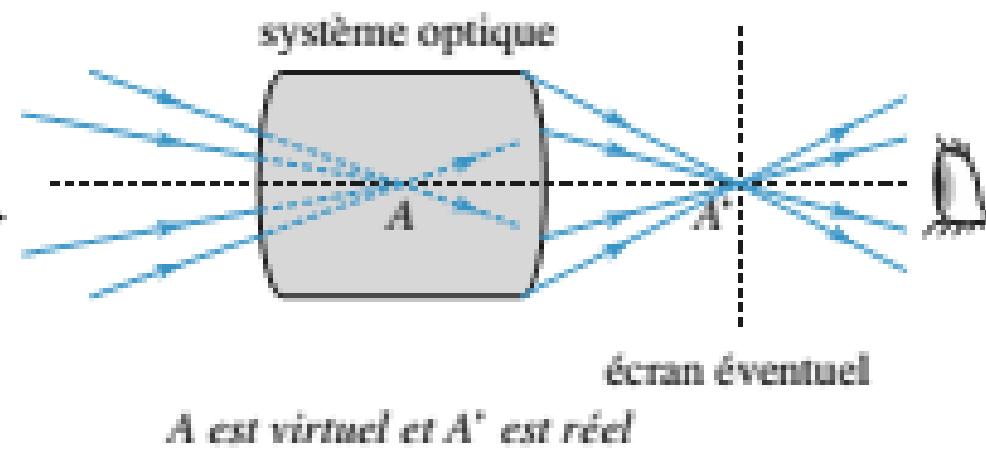
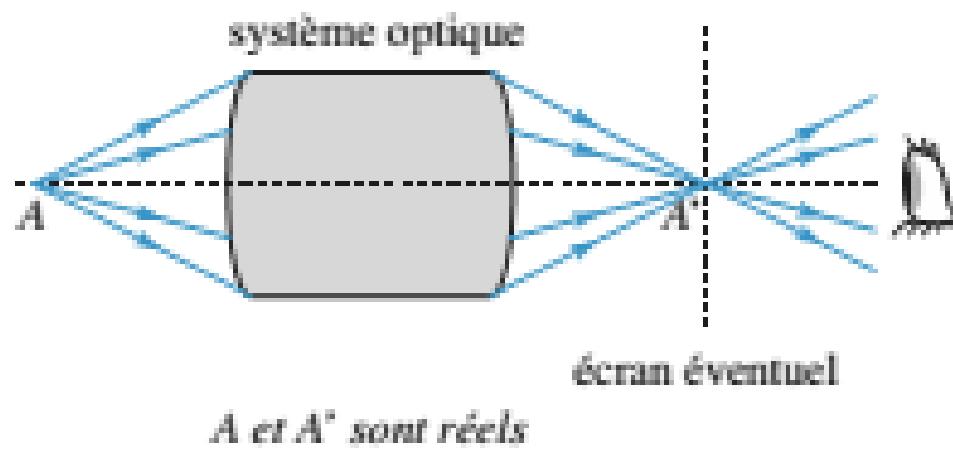
S'elle se formant dans l'espace image → Les rayons émergents passent effectivement par A'.

### **Un objet est virtuel :**

S'il se trouve après la face d'entrée de (S) → Les prolongements des rayons incidents passent par A.

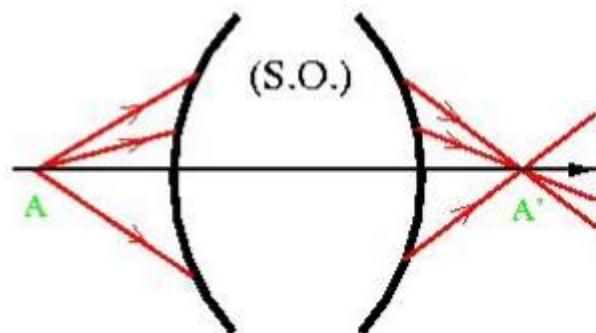
### **Une image est Virtuelle :**

S'elle se formant avant la face de sortie de (S) → Les prolongements des rayons émergents passent par A'.



## Notions de Stigmatisme

**Le Stigmatisme rigoureux:** Un système est rigoureusement stigmatique quand il donne une image nette de bonne qualité. Autrement dit, lorsque l'image d'un point est un point : c'est la condition de stigmatisme.



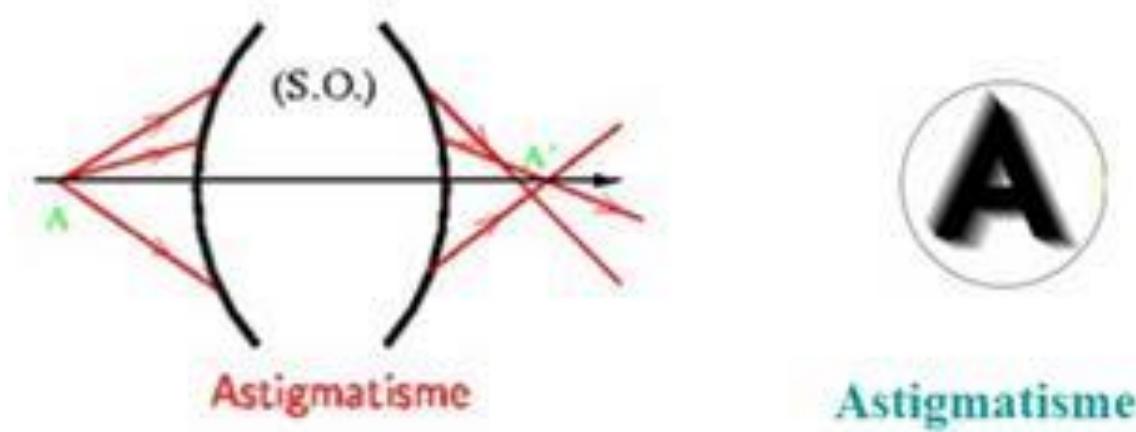
Stigmatisme rigoureux



Stigmatisme

## Notions de Stigmatisme

**Astigmatisme :** Un système optique est astigmate quand il donne une image floue.  
L'image d'un point est une tache (le système ne présente pas la condition de stigmatisme)



## Conditions de stigmatisme approché : Condition de Gauss

**Stigmatisme approché (Approximation de Gauss)** : Un système optique centré donnera une image de bonne qualité d'un objet si les deux conditions suivantes, dites **conditions de Gauss**, sont satisfaites :

**Condition 1** : les rayons incidents sont très proches de l'axe optique

**Condition 2** : Les rayons incidents sont peu inclinés par rapport à l'axe optique.

## Conséquences des conditions de Gauss

### 1. Linéarisation des relations de Snell:

$$n_1 i_1 = n_2 i_2$$



loi de Kepler (vrai jusqu'à 20°)  
Utilisation  $i$  en radian.

### 2. L'image d'un point A est un point A':

Deux rayons suffisent pour déterminer l'image d'un point.

### 3. Le système est aplanétique:

L'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe optique donne une image plane perpendiculaire à l'axe optique.

### 4. Existence d'une relation de conjugaison.

Relation qui lie la position de l'image à la position de l'objet.

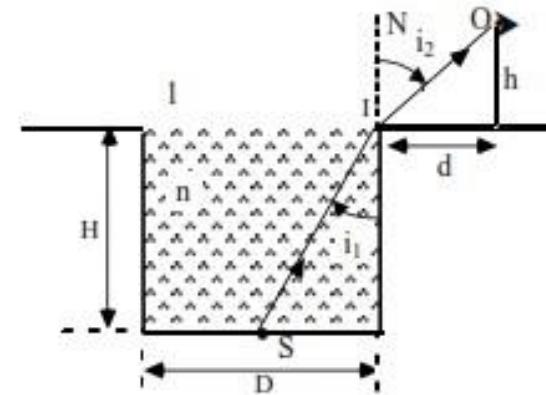
## Exercice d application

Une source lumineuse S est placée au fond d'une piscine remplie d'eau d'indice n. La piscine a une forme cylindrique de base circulaire de diamètre D, et la source S est située au centre de cette base. Un observateur dont les yeux sont à une hauteur h du sol, se tient à une distance d du bord de la piscine.

Quelle doit être la profondeur H de la piscine pour qu'un rayon issu de S et passant par le bord de la piscine soit reçu par l'observateur ?

Application numérique :

$$n = 1,33 ; \quad D = 5,12 \text{ m} ; \quad h = 1,60 \text{ m} ; \quad d = 2,56 \text{ m.}$$



## Correction:

$$\text{En I on a : } n \sin i_1 = \sin i_2$$

$$\text{avec : } \sin i_1 = \frac{D}{2\sqrt{\frac{D^2}{4} + H^2}}$$

$$\sin i_2 = \frac{d}{\sqrt{d^2 + h^2}}$$

$$\text{soit : } n \frac{D}{2\sqrt{\frac{D^2}{4} + H^2}} = \frac{d}{\sqrt{d^2 + h^2}}$$

$$\Rightarrow H^2 = (n^2 - 1) \frac{D^2}{4} + \frac{n^2 h^2}{d^2} \frac{D^2}{4}$$

$$\underline{\text{Application numérique : }} D = 2d \quad \Rightarrow \quad \frac{D^2}{4} = d^2$$

d'où :

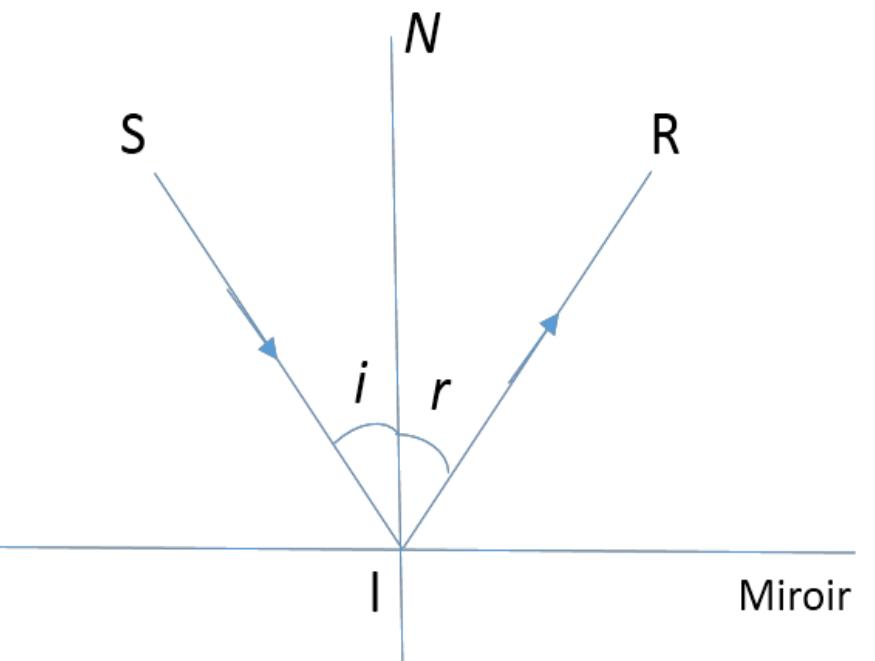
$$H^2 = (n^2 - 1)d^2 + n^2 h^2 \quad \Rightarrow$$

$$H = 3,10 \text{ m}$$

# *Miroirs et dioptres*

## Miroir plan

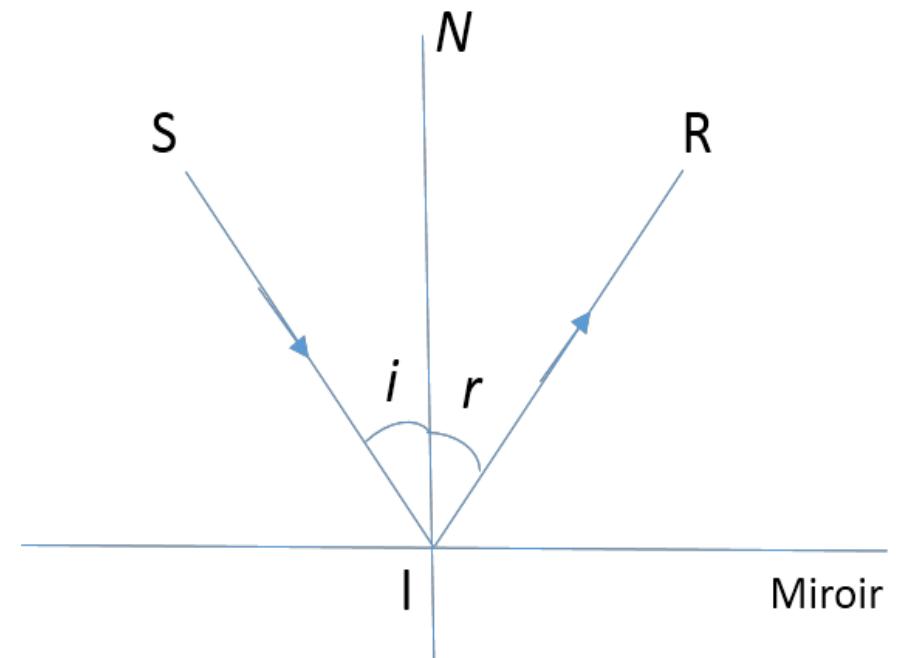
Considérons un rayon lumineux SI (appelé rayon incident) arrivant en un point I (appelé point d'incidence) situé sur la surface d'un miroir plan. On aura un rayon, dit rayon réfléchi IR, qui se propage dans l'espace. On repère par les angles  $i$  (angle d'incidence) et  $r$  (angle de réflexion), les inclinaisons des deux rayons relativement à la normale NI au miroir en I. Le plan défini par la normale au miroir et le rayon incident est appelé plan d'incidence



## Loi de Snell-Descartes pour la réflexion d'un miroir plan

1<sup>ère</sup> loi : SI, IR, et IN appartiennent au même plan.

2<sup>ème</sup> loi : l'angle d'incidence égale de réflexion ( $i = r$ )



## Relation de conjugaison pour un miroir plan

La position de l'image par rapport au miroir égale la position de l'objet par rapport au miroir.

L'image A' est symétrique de l'objet A par rapport au miroir.

$$\overline{SA'} = -\overline{SA}$$

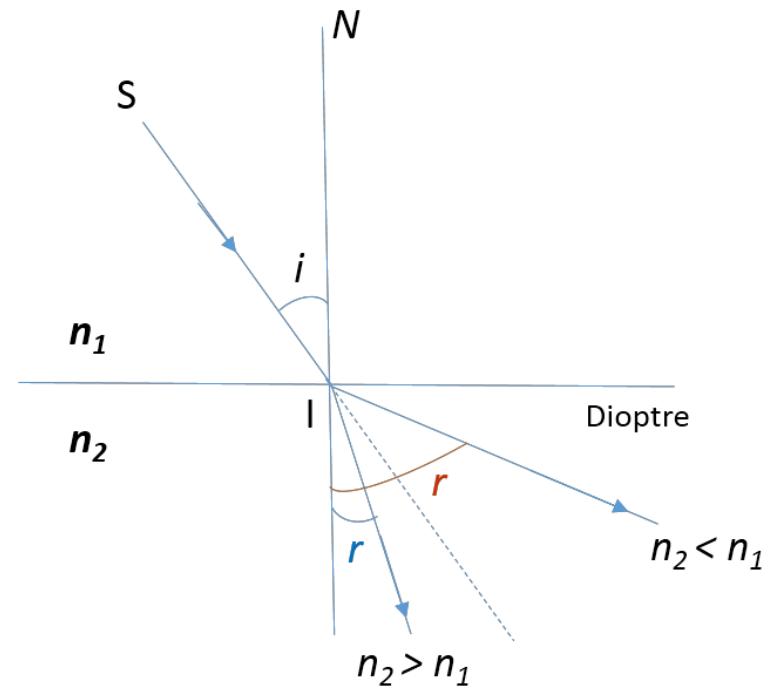
L'objet et l'image sont de natures différentes :

- Objet Réel-Image Virtuelle
- Objet Virtuel-Image Réelle

La taille de l'image égale la taille de l'objet :  $\overline{A'B'} = \overline{AB}$

## Dioptre plan

On repère par les angles  $i$  (angle d'incidence) et  $r$  (angle de réfraction), les inclinaisons des deux rayons relativement à la normale au miroir en I. Le plan défini par la normale au dioptre et le rayon incident est appelé plan d'incidence.



## Cas où $n_1 < n_2$ : réfraction limite

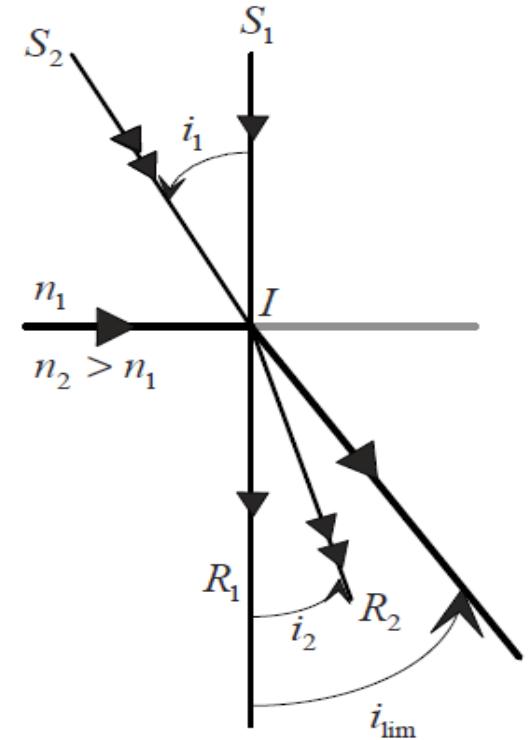
Le rayon lumineux passe du milieu 1 moins réfringent au milieu 2 plus réfringent. Nous avons alors :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2), \text{ avec } n_2 > n_1$$

Il en résulte que  $\sin i_2 < \sin i_1$  ; les angles  $i_1$  et  $i_2$  étant compris entre 0 et  $\pi/2$ , soit  $i_2 < i_1$ . Le rayon réfracté se rapproche donc de la normale. Un rayon incident normal ( $S_1 I$ ), pour lequel  $i_1 = 0$ , entre sans déviation ( $i_2 = 0$ ). Lorsqu'il croît,  $i_2$  croît aussi tout en restant inférieur à  $i_1$ .

Lorsque  $i_1 = \pi/2$ , l'angle de réfraction est maximal (angle de réfraction limite noté  $i_{lim}$ ) et vaut :

$$\sin i_{lim} = \frac{n_1}{n_2}$$



## Cas où $n_1 > n_2$ : réflexion totale

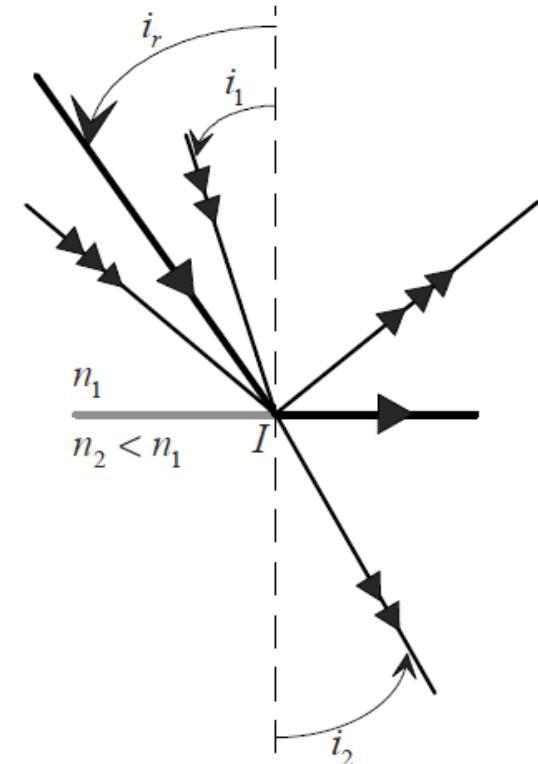
Le rayon lumineux passe maintenant du milieu 1 plus réfringent au milieu 2 moins réfringent.

La troisième loi de Snell-Descartes implique alors que :

$$i_1 < i_2$$

Le rayon réfracté s'écarte donc de la normale et l'angle de réfraction est maximal ( $i_2 = \pi/2$ ) pour un angle d'incidence limite  $i_r$  tel que :

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



### Remarque :

Si l'angle d'incidence est supérieur à  $i_r$ , il n'y a plus de rayon réfracté , le rayon incident est totalement réfléchi : on parle de réflexion totale. Le dioptre se comporte comme un miroir.

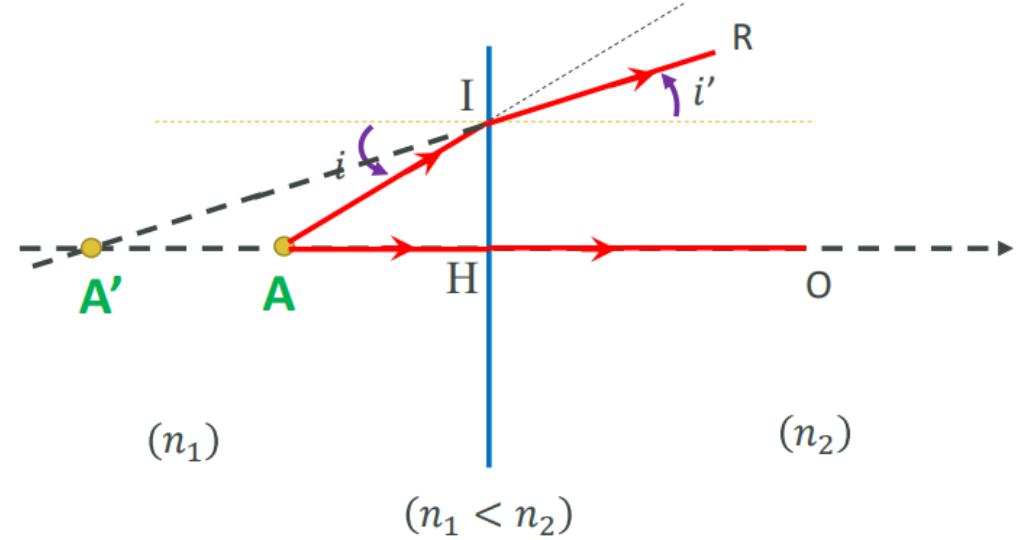
## Stigmatisme d'un dioptre plan

A partir des triangles rectangles AHI et A'HI, on a

$$\tan i = \frac{HI}{AH}$$

$$\tan i' = \frac{HI}{A'H}$$

$$A'H = AH \frac{\tan i}{\tan i'} \quad (1)$$



Lorsque  $i$  varie,  $\frac{\tan i}{\tan i'}$  n'est pas constant. Donc, la position de l'image A' dépend de l'angle d'incidence, l'image n'est pas unique. **Il n'y a pas de stigmatisme rigoureux.**

Dans les conditions de Gauss, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \tan i &\approx \sin i \approx i \\ \tan i' &\approx \sin i' \approx i' \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} n_1 i = n_2 i'$$

En remplaçant dans (1) ,on trouve :

$$\overline{A'H} = \overline{AH} \frac{i}{i'} \longrightarrow \overline{A'H} = \overline{AH} \frac{n_2}{n_1}$$

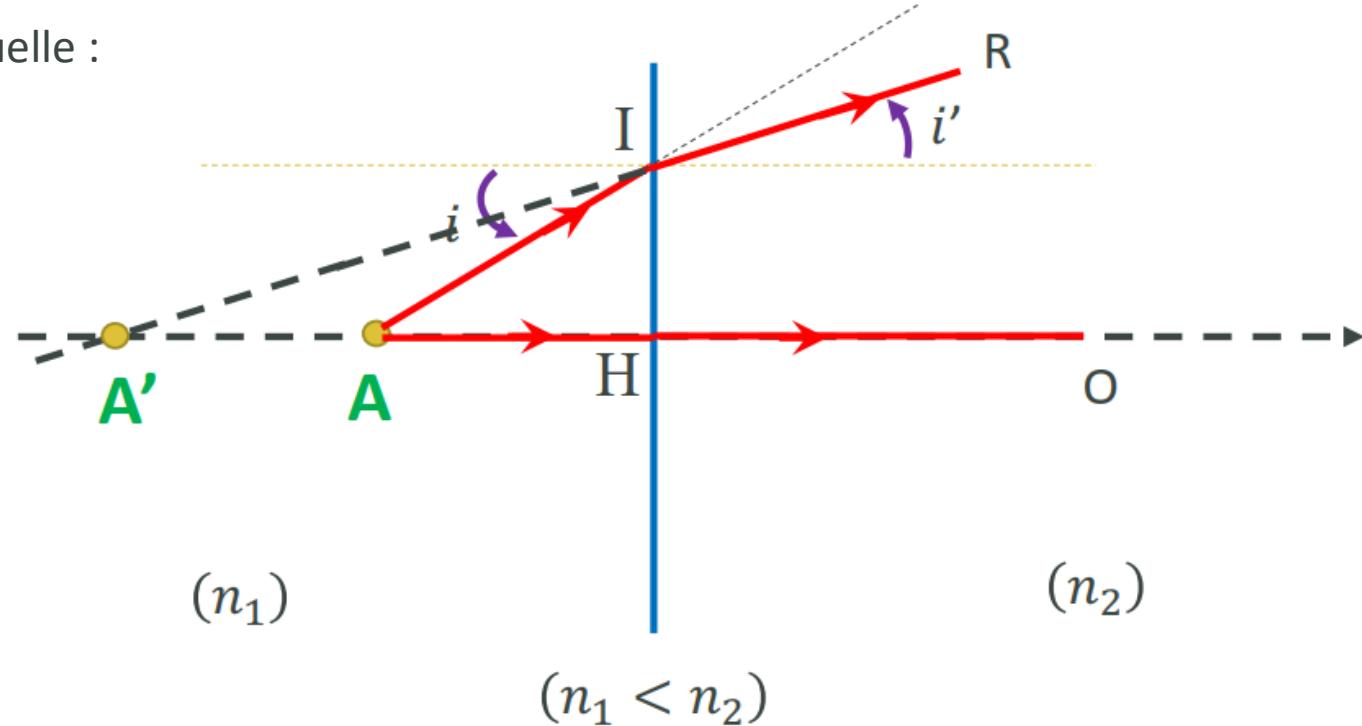
Dans ces conditions, tous les rayons issus de A passent par A'. Donc, il y a stigmatisme approché . La relation de conjugaison des dioptres plans dans les conditions d'approximation de Gauss est :

$$\frac{\overline{A'H}}{n_2} = \frac{\overline{AH}}{n_1}$$

# Construction d'images

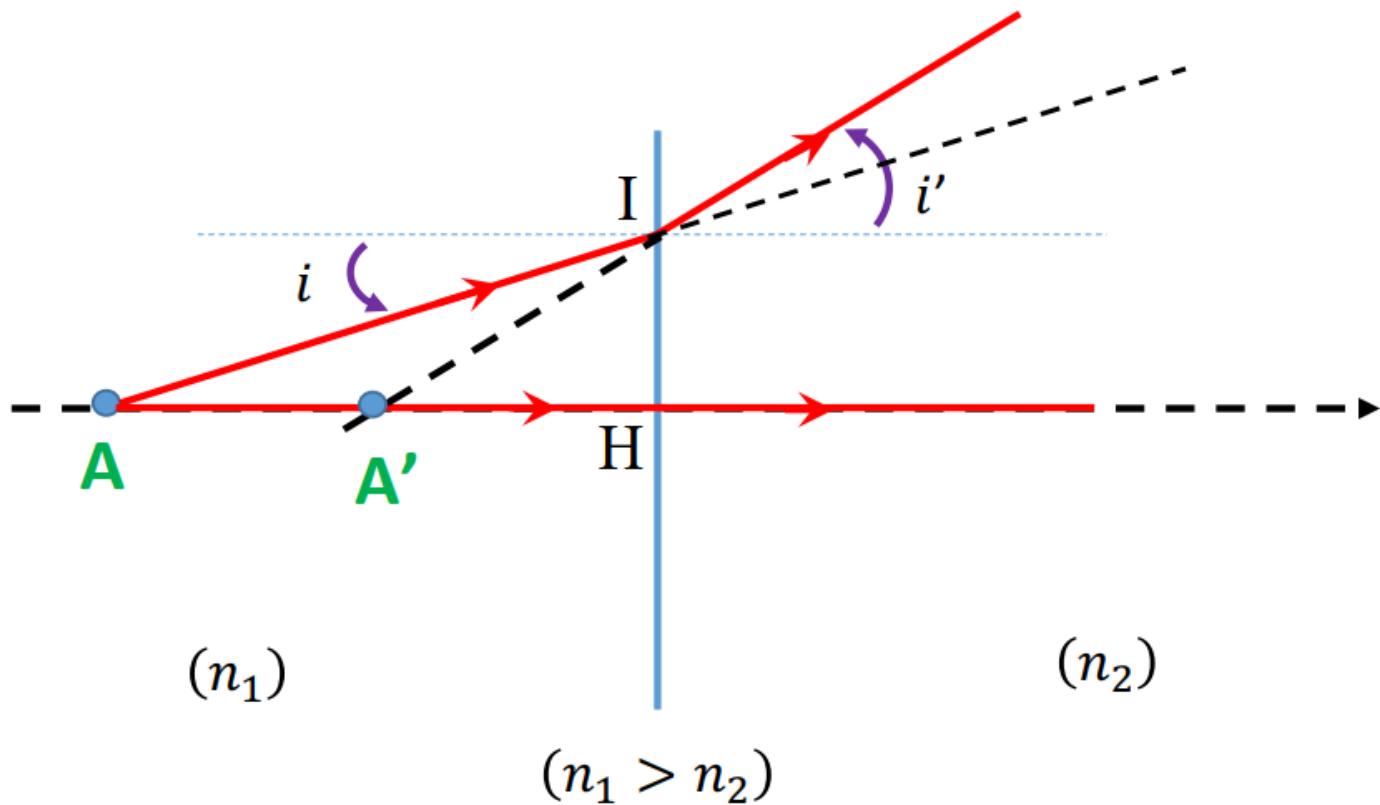
Image d'un point objet

L'objet réel et image virtuelle :



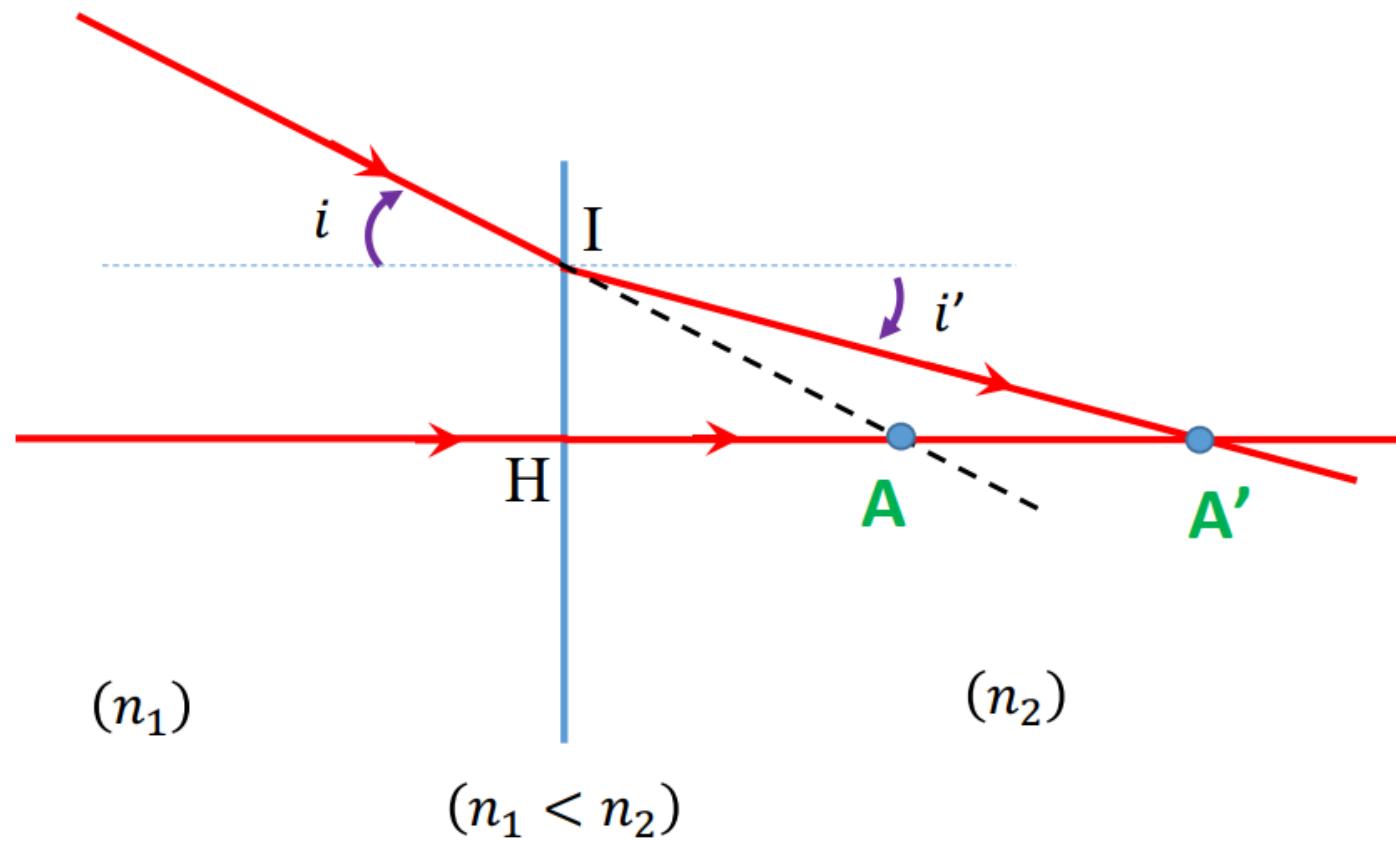
## Image d'un point objet

L'objet réel et image virtuelle



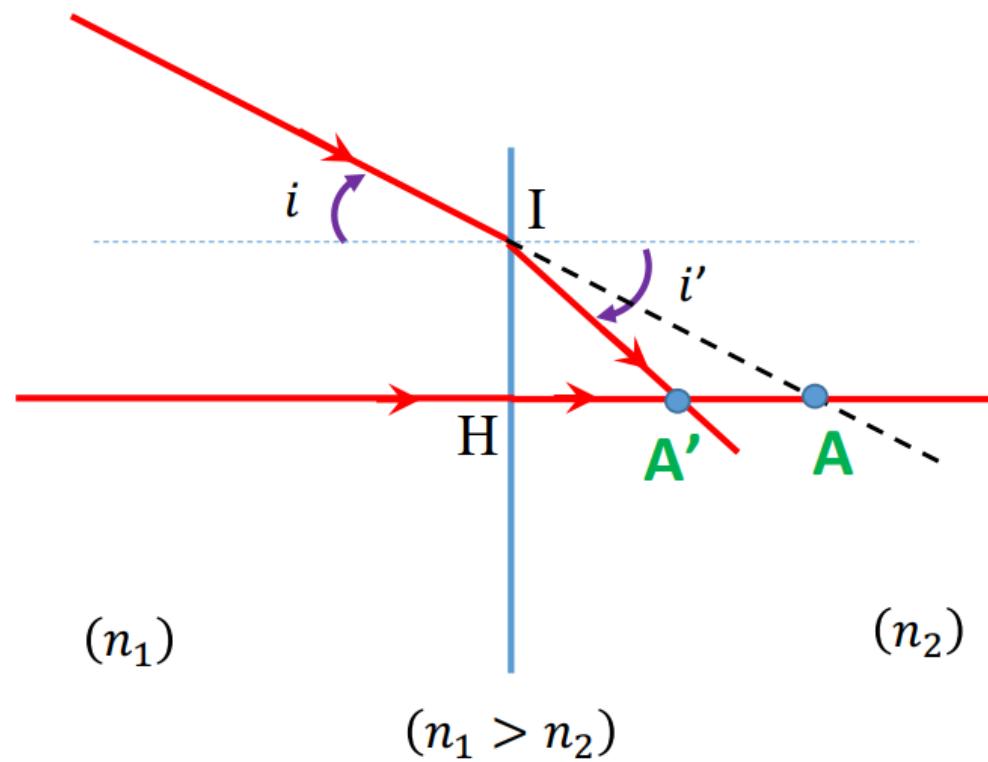
## Image d'un point objet

L'objet virtuel et image réelle



## Image d'un point objet

L'objet virtuel et image réelle



## Image d'un objet étendu

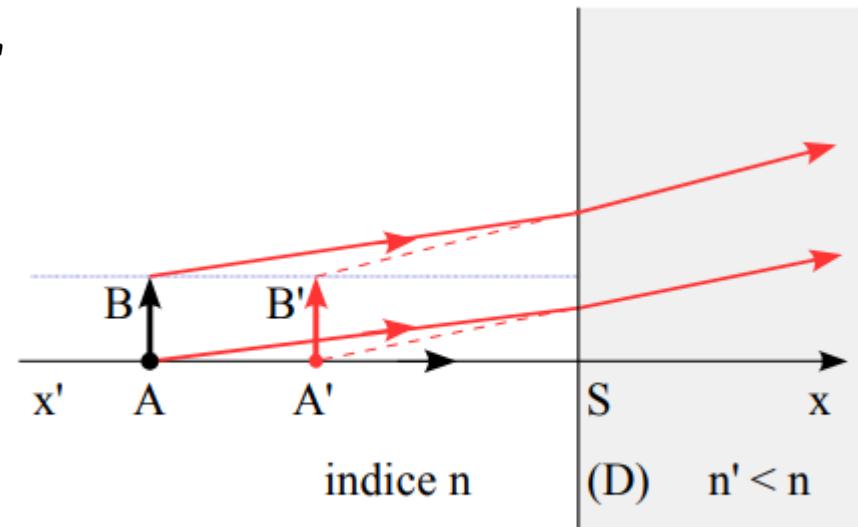
### Objet parallèle au dioptre

Les points A et B étant à la même distance du diopstre, leurs images A' et B' le sont également. L'image A'B' a même orientation que l'objet AB et même dimension  $\overline{A'B'} = \overline{AB}$

Le grandissement transversal  $G_t$  défini par:

$$G_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

est donc égal à 1



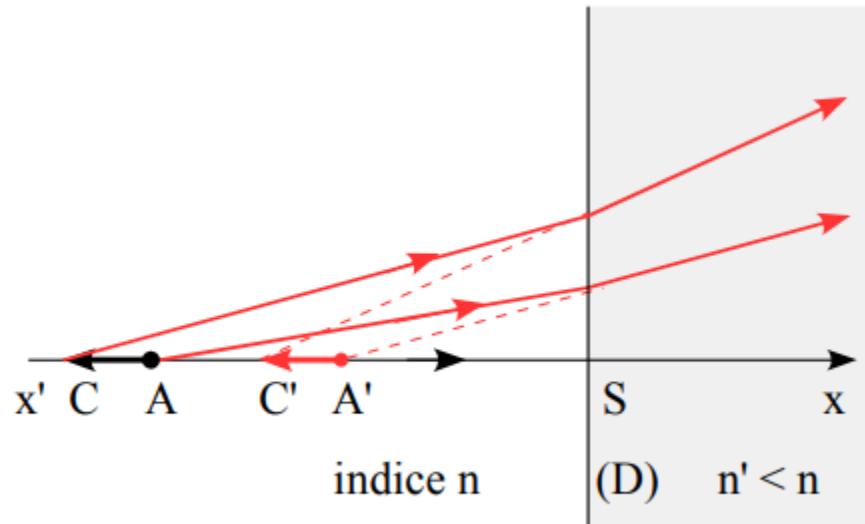
## Objet perpendiculaire au dioptre

Les positions des images A' et C' des points A et C situés sur la normale au dioptre sont données par la relation de conjugaison

$$\frac{n'}{\overline{SA'}} = \frac{n}{\overline{SA}} \quad \text{et} \quad \frac{n'}{\overline{SC'}} = \frac{n}{\overline{SC}}$$

$$\frac{n'}{n} = \frac{\overline{SC'}}{\overline{SC}} = \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} = \frac{\overline{SC'} - \overline{SA'}}{\overline{SC} - \overline{SA}} = \frac{\overline{C'A'}}{\overline{CA}}$$

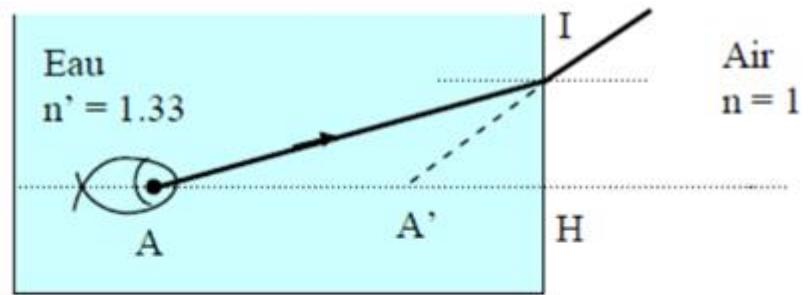
Le grandissement longitudinal  $G_l$  défini par  $G_l = \frac{\overline{C'A'}}{\overline{CA}} = \frac{n'}{n}$



## Application:

On observe un poisson A nageant dans un aquarium rempli d'eau ( $n'=1.33$ ). On néglige dans les calculs l'épaisseur de l'aquarium. Un rayon lumineux provenant de A arrive en I sur la paroi verticale du bocal avec un angle d'incidence  $i$  et émerge dans l'air ( $n=1$ ) avec un angle de réfraction  $i'$ , semblant provenir d'un point A'. Soit H la projection orthogonale de A sur la paroi qui constitue la surface de séparation du dioptre, avec  $AH=20\text{ cm}$ .

- 1) Montrer qu'on a la relation :  $\frac{\overline{HA}}{\overline{HA'}} = \frac{n'}{n} \cdot \frac{\cos i}{\cos i'}$
- 2) En considérant que  $i$  et  $i'$  sont petits, trouver la nouvelle relation entre  $HA$  et  $HA'$ .
- 3) En déduire à quelle distance de la vitre l'observateur voit-il le poisson ? Expliquer pourquoi, dans ce cas, il y a un stigmatisme approché.



## Solution :

1. On a :  $\tan i = \frac{HI}{AH}$  et  $\tan i' = \frac{HI}{A'H}$  d'où  $\frac{\overline{AH}}{A'H} = \frac{\tan i'}{\tan i}$

Par ailleurs, on a :  $n \sin i = n' \sin i'$ .

Par suite, on a/  $\frac{\overline{AH}}{A'H} = \frac{n' \cos i}{n \cos i'}$ .

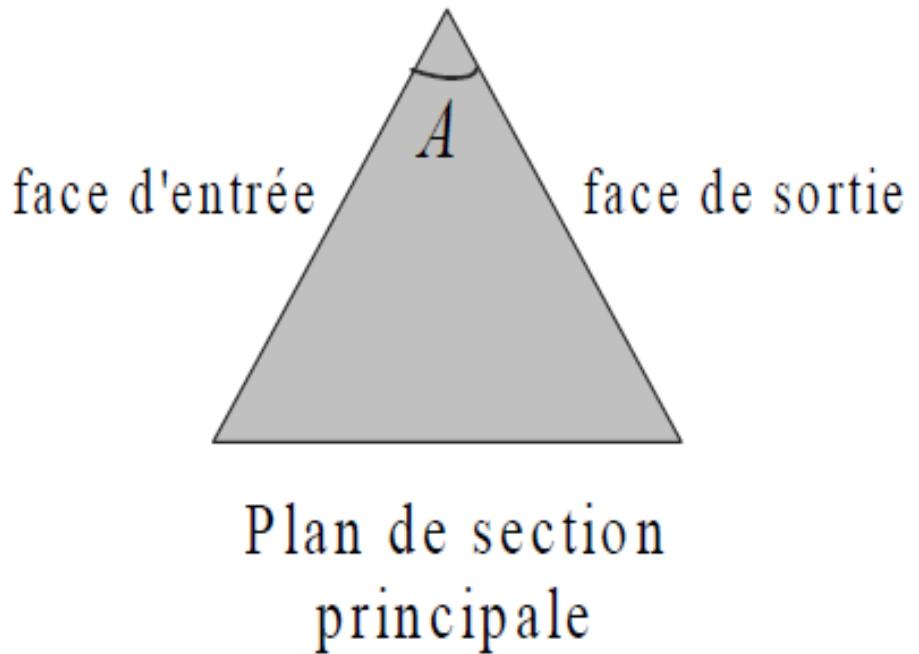
2. Au premier ordre en  $i$ , on a  $\cos i \approx 1$  d'où :  $\frac{\overline{AH}}{A'H} = \frac{n'}{n}$ .

3. On a  $\overline{AH'} = \frac{n}{n'} \overline{AH}$ , donc  $A'H=15$  cm.

Dans ce cas, la position de  $A'$  ne dépend pas de  $I$  donc tous les rayons issus de  $A$  ayant une faible incidence émergeront en semblant provenir du point  $A'$ . Il y a donc un stigmatisme approché.

## Prisme

On appelle prisme, en optique, un milieu transparent limité par deux faces planes non parallèles (dioptres). Il est constitué de verre, c'est un milieu homogène, transparent et isotrope. L'intersection des deux faces du prisme forme l'arête du prisme, caractérisée par un angle  $A$ . La base du prisme est la troisième face, dont les bords sont généralement parallèles à l'arête. Le plan d'incidence est le plan formé par le rayon incident et la normale à la surface d'entrée du prisme au point d'incidence.



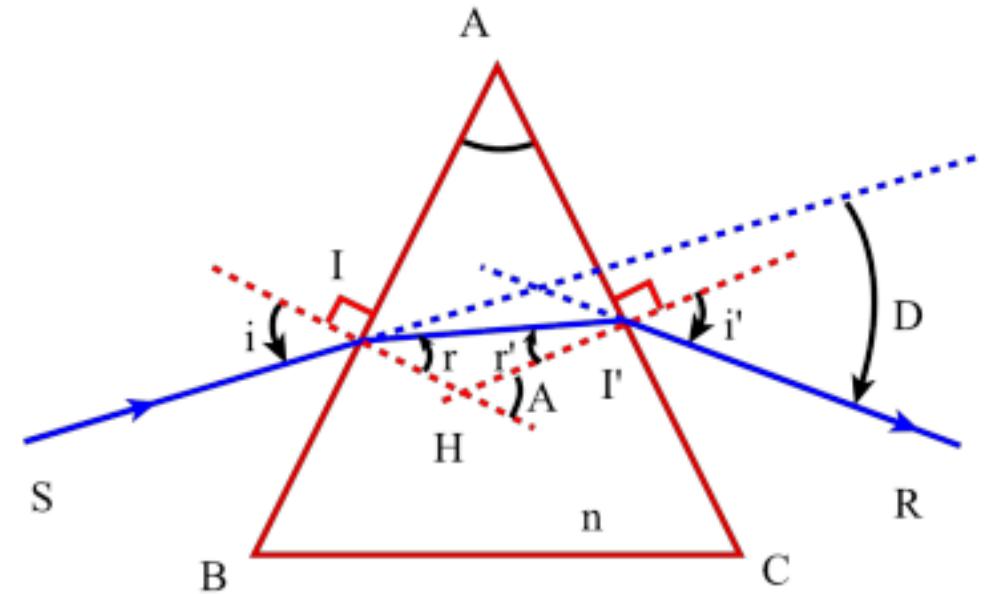
## Etude de la marche du rayon

Soit SI un rayon incident quelconque qui frappe en I la face d'entrée AB du prisme ; provenant d'un milieu moins réfringent que celui du prisme, ce rayon subit en I le phénomène de réfraction en respectant les deux lois de Descartes.

Si n est l'indice du prisme, les lois de Snell-Descartes en I et I' imposent les deux relations suivantes :

$$\sin i = n \sin r$$

$$\sin i' = n \sin r'$$



L'angle de déviation D est par définition l'angle dont il faut faire tourner le rayon incident SI pour l'amener dans la direction du rayon émergent I'R. Cette déviation est donc la somme de deux déviations successives qui ont lieu dans le même sens, l'une à l'entrée, l'autre à la sortie du prisme, soit :

$$D = (i - r) + (i' - r')$$

D'autre part, dans le triangle IHI', on a:  $\pi - A + r + r' = \pi$



$$A = r + r'$$

Les formules du prisme se résument de la façon suivante :

$$\sin i = n \sin r$$

$$\sin i' = n \sin r'$$

$$A = r + r'$$

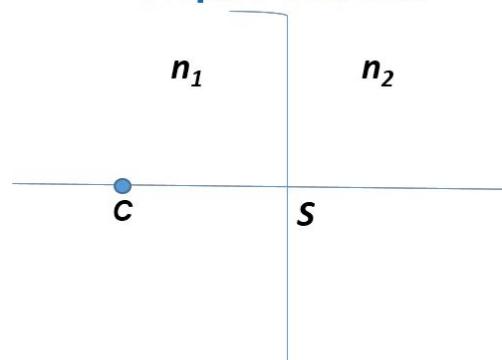
$$D = i + i' - A$$

## Dioptre sphérique

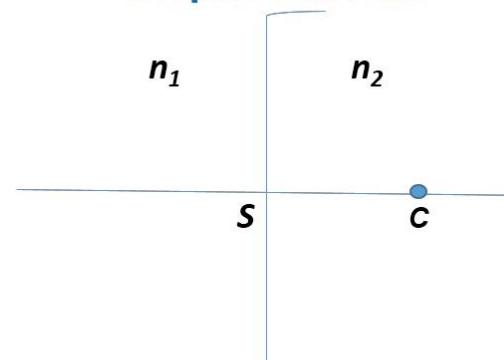
Un dioptre sphérique est l'association de deux milieux d'indices différents, séparés par une surface sphérique, de centre C et de sommet S.

CS est l'axe optique du système.

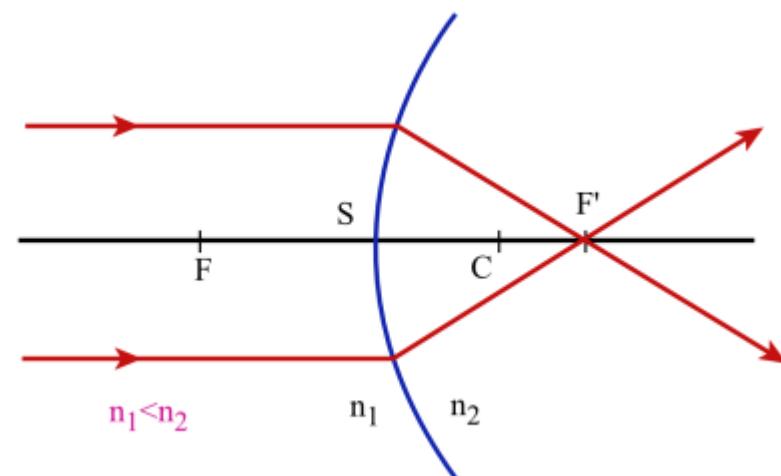
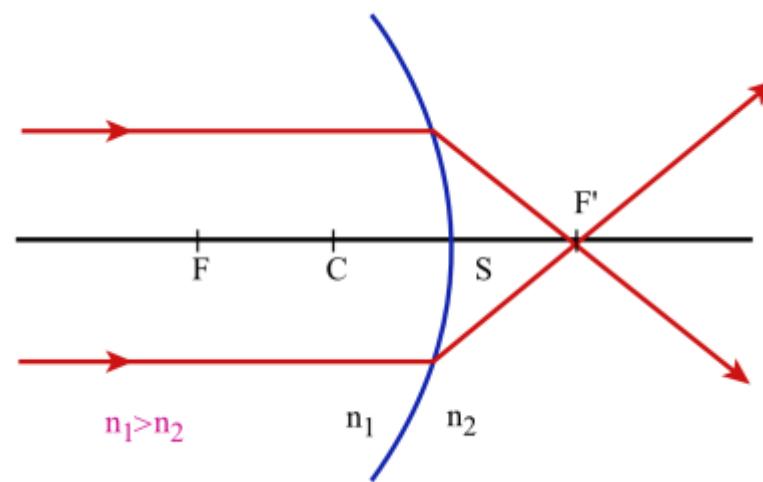
Dioptre Concave



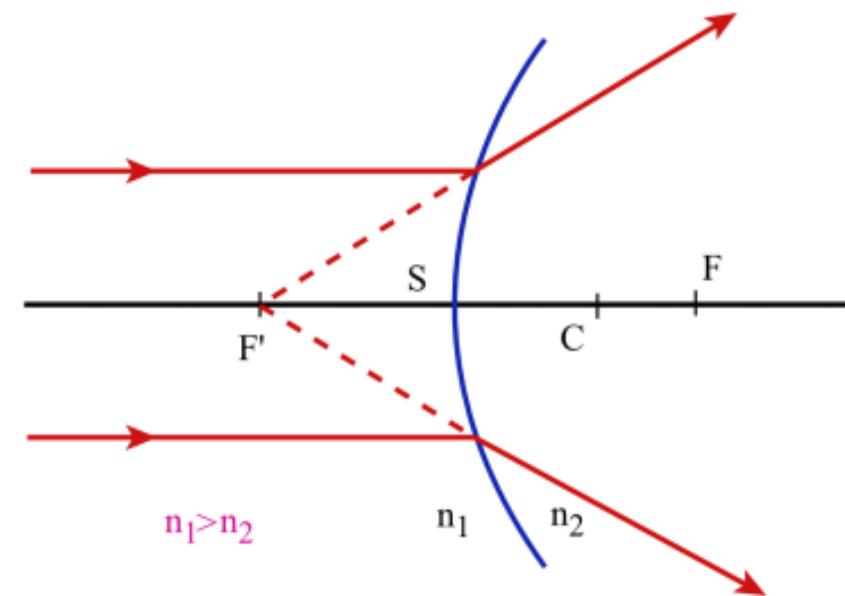
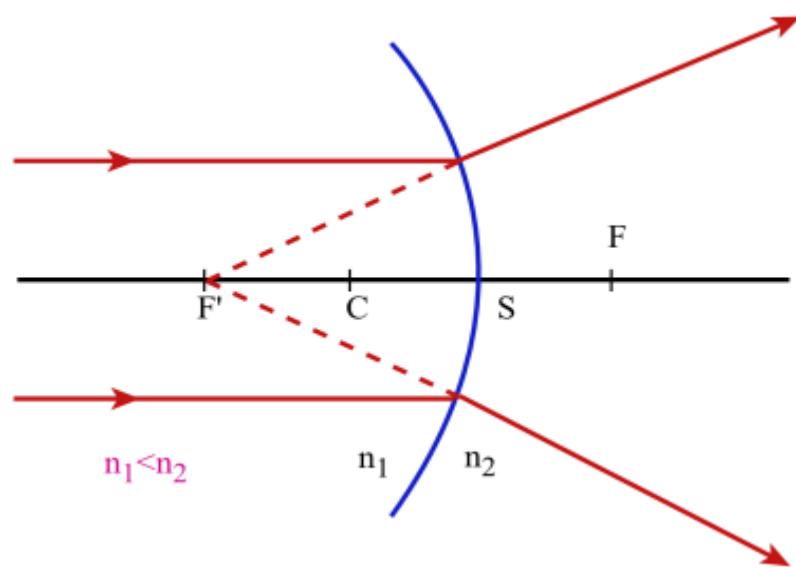
Dioptre Convexe

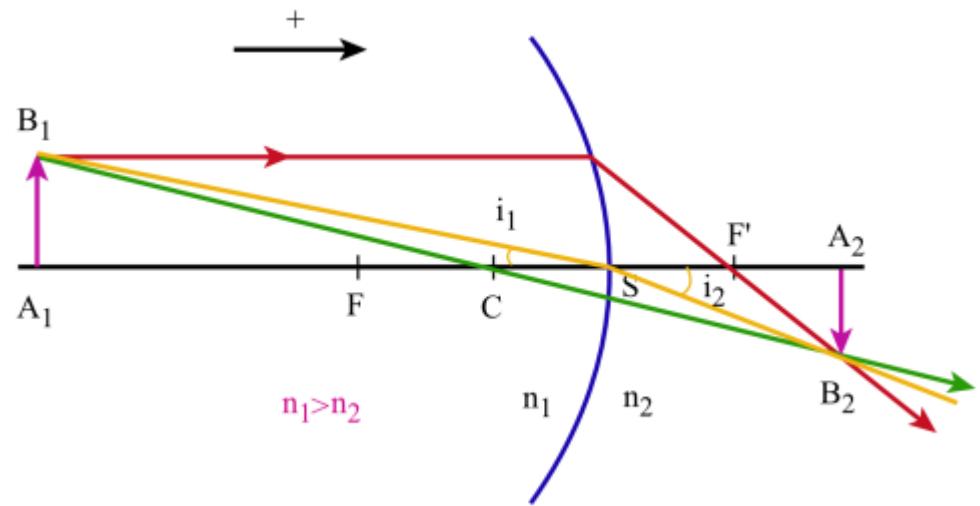


Le dioptre sera **convergent** si le foyer image est réel c'est-à-dire si le centre de courbure C est situé dans le milieu d'indice de réfraction le plus élevé.

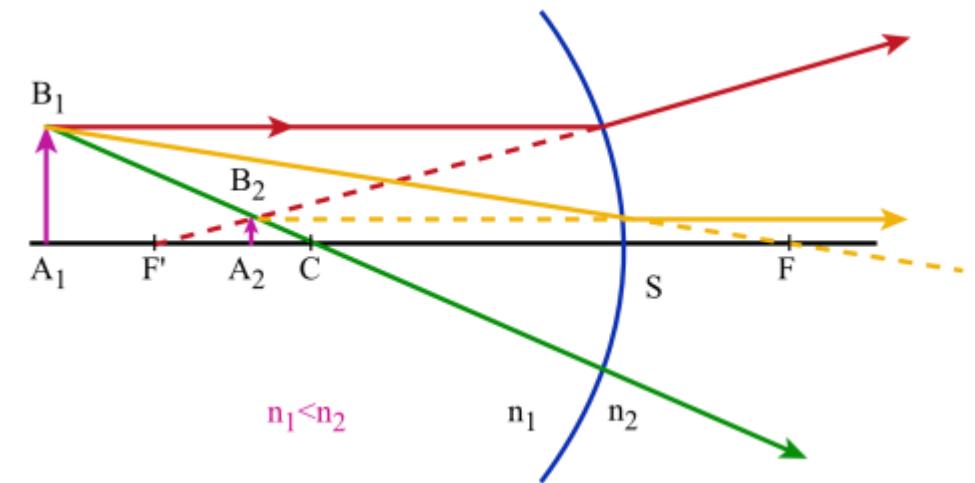


Le dioptre sera **divergent** si le foyer image est virtuel c'est-à-dire si le centre de courbure C est situé dans le milieu d'indice de réfraction le moins élevé.





Dioptre convergent



Dioptre divergent

## Relations de conjugaison pour un dioptre sphérique

Origine au sommet :

$$\frac{n_1}{\overline{SA}_1} - \frac{n_2}{\overline{SA}_2} = \frac{n_1 - n_2}{\overline{SC}}$$

Origine au centre:

$$\frac{n_2}{\overline{CA}_1} - \frac{n_1}{\overline{CA}_2} = \frac{n_2 - n_1}{\overline{CS}}$$

Foyers objet et image :

Lorsque  $A_2$  tend vers l'infini,  $A_1$  se trouve au foyer objet F:

$$\overline{SF} = \frac{n_1}{n_1 - n_2} \overline{SC} = f \quad f : \text{distance focale objet}$$

Lorsque  $A_1$  tend vers l'infini,  $A_2$  se trouve au foyer image F':

$$\overline{SF'} = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \overline{SC} = f' \quad f' : \text{distance focale image}$$

Formule de Newton:

C'est la formule de conjugaison avec origine aux foyers:

$$\overline{FA}_1 \cdot \overline{FA}_2 = \overline{SF} \overline{SF'}$$

On définit la vergence d'un diopstre par la relation :  $V = \frac{n_2 - n_1}{\bar{s}\bar{c}}$

ou V est la vergence du diopstre et se mesure en dioptre  $\delta[m^{-1}]$ .

$$f = -\frac{n_1}{V} \quad \text{et} \quad f' = +\frac{n_2}{V}$$

**Si  $V > 0$  on dit que le diopstre est convergent et  $f < 0$  et  $f' > 0$**

**Si  $V < 0$  on dit que le diopstre est divergent et  $f > 0$  et  $f' < 0$**

## Grandissement

C'est le rapport de la taille de l'image à la taille de l'objet :  $\gamma = \frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{A_1B_1}}$

origine au sommet :

$$\gamma = \frac{n_1}{n_2} \frac{\overline{SA_2}}{\overline{SA_1}}$$

Origine au centre :

$$\gamma = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{CA_1}}$$

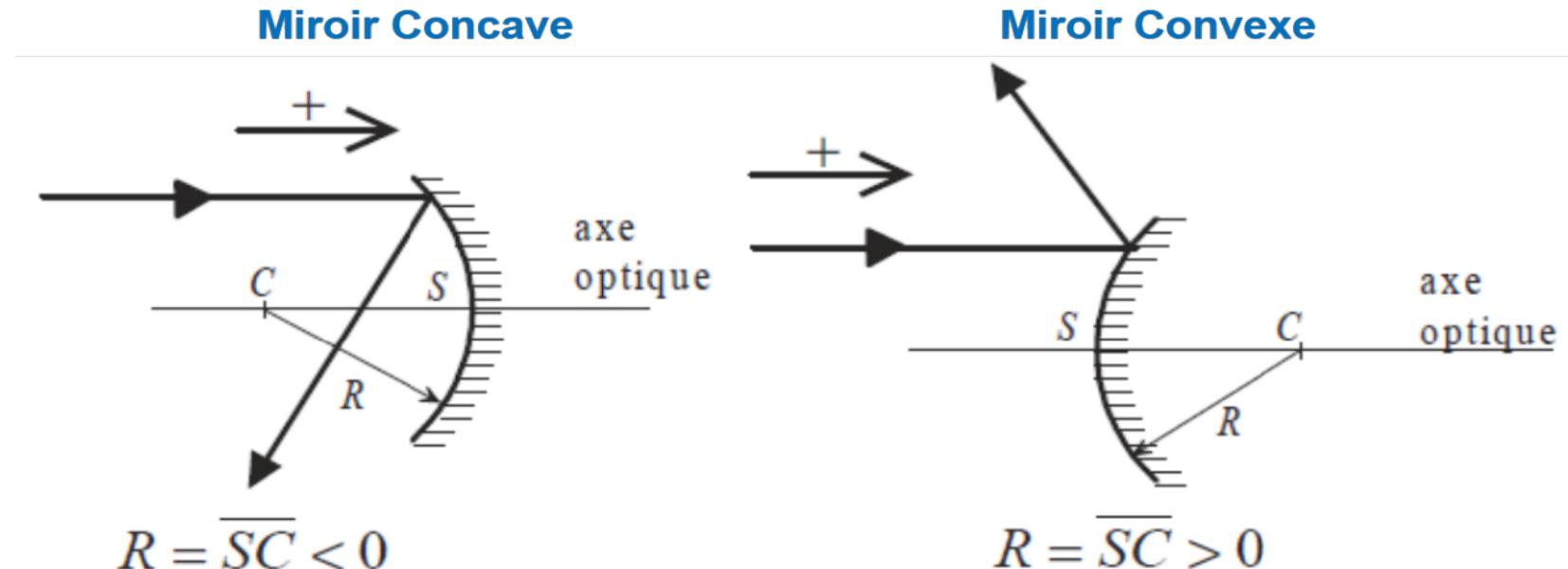
Origine aux foyers :

$$\gamma = -\frac{\overline{SF}}{\overline{FA_1}} = -\frac{\overline{F'A_2}}{\overline{SF'}}$$

## Miroir sphérique

On appelle miroir sphérique S une surface sphérique rendue réfléchissante par un dépôt métallique. On distingue deux types de miroirs sphériques :

- si la réflexion se produit vers l'intérieur de la sphère, le miroir est dit concave.
- si la lumière se réfléchit vers l'extérieur de la sphère, le miroir est dit convexe.



Un miroir sphérique est caractérisé par :

- Le centre *C de la sphère* appelé *centre du miroir*.
- Le point *S* appelé *sommet du miroir*.
- L’axe optique, qui est l’axe de symétrie de révolution du miroir, passant par les points *C et S*.
- Le rayon de la sphère  $R = SC$ , appelé *rayon de courbure du miroir, quantité algébrique qui est* négative pour un miroir concave et positive pour un miroir Convexe.

**Remarque** : en optique géométrique, la mesure des distances est algébrisée. Le long de l’axe optique, on choisit comme sens positif le sens de propagation de la lumière (en général de la gauche vers la droite).

## Formules de conjugaison pour un miroir sphérique

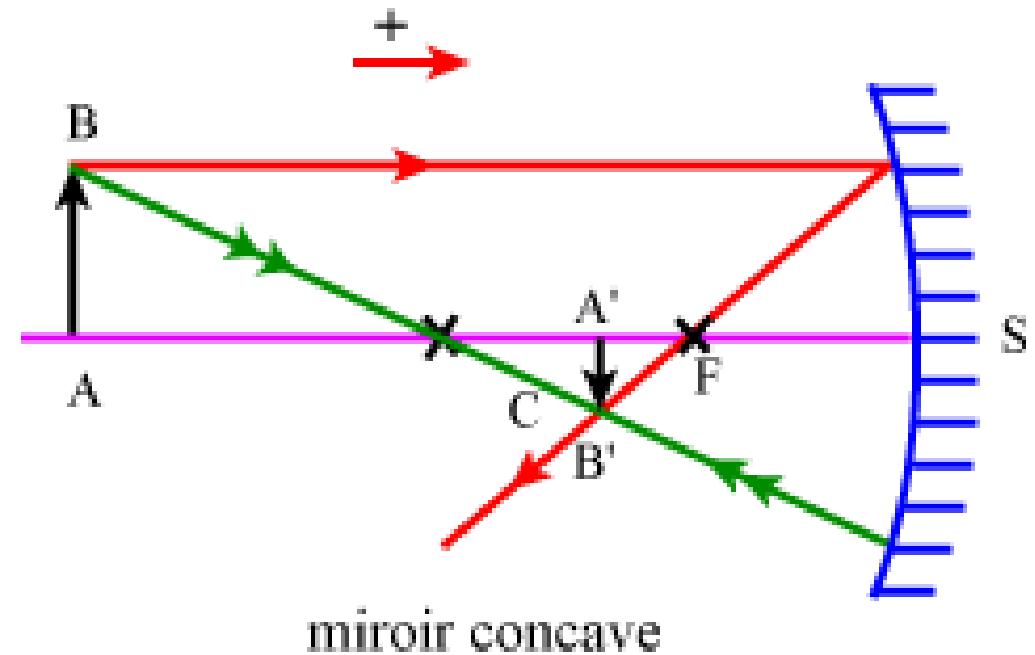
Origine au sommet

$$\frac{1}{SA} + \frac{1}{SA'} = \frac{2}{SC}$$

Cette relation est appelée aussi formule de Descartes

Origine au centre

$$\frac{1}{CA} + \frac{1}{CA'} = \frac{2}{CS}$$



miroir concave

Foyers objet et image :

$$\overline{SF} = \overline{SF'} = \frac{\overline{SC}}{2}$$

Dans un miroir sphérique, les foyers objet et image sont confondus et situés au milieu de SC.

Formule de Newton :

$$\overline{FA} \cdot \overline{FA'} = \overline{SF}^2$$

## Grandissement

C'est le rapport de la taille de l'image à la taille de l'objet :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Origine au sommet :

$$\gamma = -\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}$$

Origine au centre :

$$\gamma = \frac{\overline{CA'}}{\overline{CA}}$$

Origine au foyer:

$$\gamma = -\frac{\overline{FA'}}{\overline{SF}} = -\frac{\overline{SF}}{\overline{FA}}$$

**Remarque:**

Si

$\gamma > 0$ : Image droite

$\gamma < 0$ : Image renversée

Si

$|\gamma| > 1$ : Image agrandie

$|\gamma| < 1$ : Image réduite

$|\gamma| = 1$ : La taille de l'image égale la taille de l'objet

## Application : Lame à faces parallèles

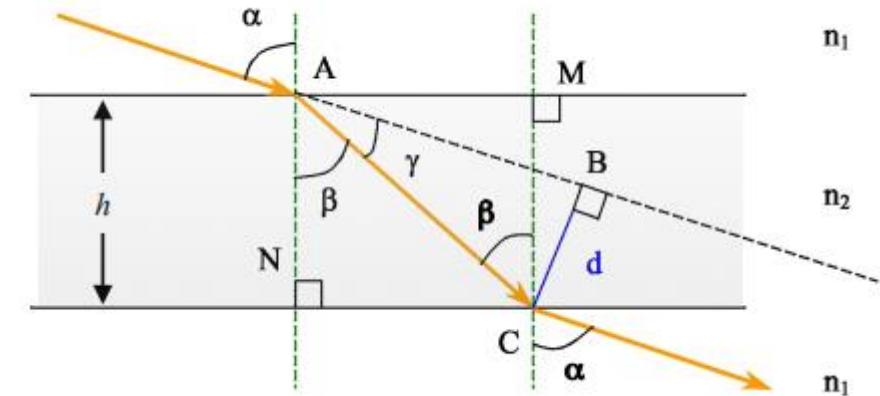
Si un rayon lumineux tombe obliquement, il subit un déplacement parallèle lors de son passage.

Loi de réfraction en A

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

Du fait de la symétrie du problème, on a en C les mêmes angles qu'en A.  
On obtient donc ici également la loi de la réfraction:

$$n_2 \cdot \sin \beta = n_1 \cdot \sin \alpha$$



Sur le schéma, on peut reconnaître une relation entre  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  :

$$\gamma + \beta = \alpha \Rightarrow \gamma = \alpha - \beta$$

Dans le triangle ABC, on a le déplacement latéral:

$$d = BC = AC \cdot \sin \gamma$$

$$d = AC \cdot \sin (\alpha - \beta)$$

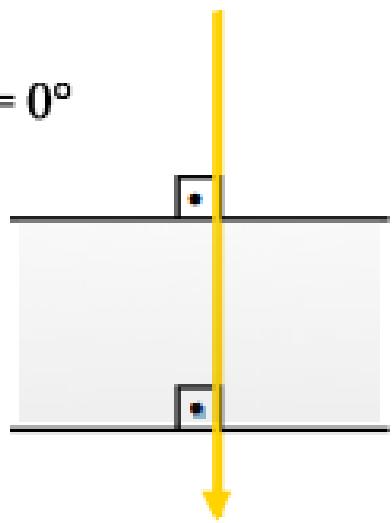
Nous pouvons introduire l'épaisseur  $h$  de la plaque. Dans le triangle ACN:

$$h = AN = AC \cdot \cos \beta \quad \longrightarrow \quad AC = \frac{h}{\cos \beta}$$

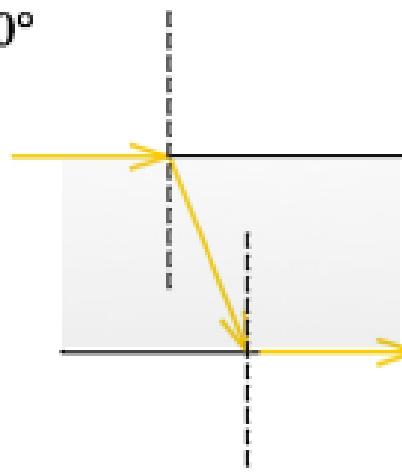
Le déplacement latéral augmente proportionnellement avec l'épaisseur  $h$  de la plaque

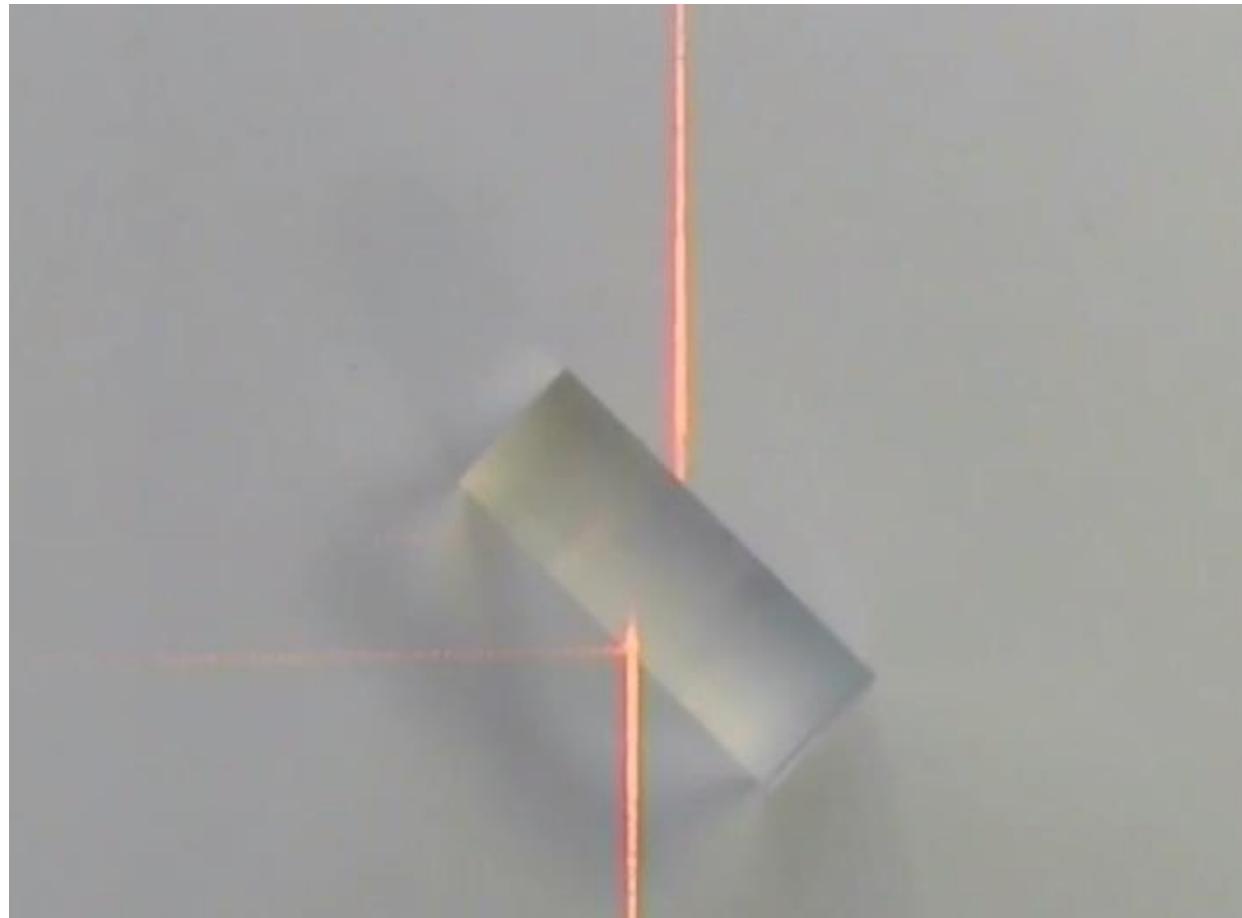
$$d = \frac{h \cdot \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}$$

$$\alpha = 0^\circ$$



$$\alpha = 90^\circ$$





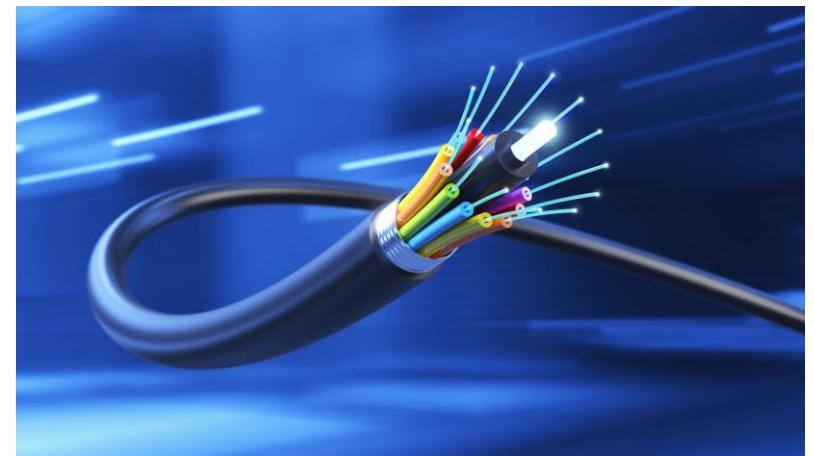
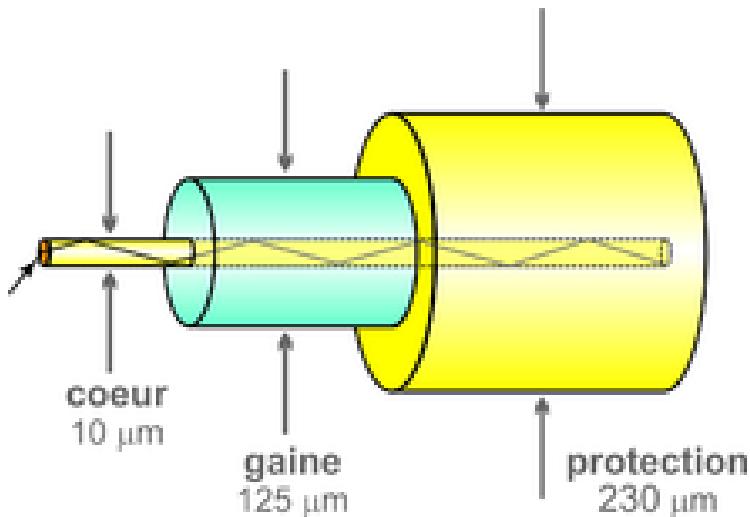
[https://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo\\_ch06/co/apprendre\\_ch06\\_03.html](https://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch06/co/apprendre_ch06_03.html)

# *Fibres optiques*

## Fibre optique

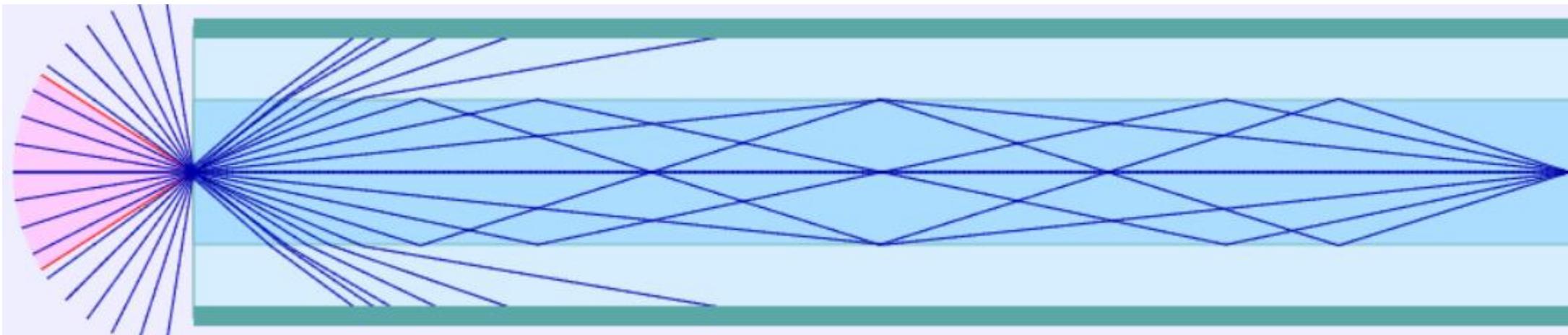
Une fibre optique est un « guide de lumière ». Elle est constituée d'un **cœur** cylindrique d'indice  $n'$  et d'une **gaine** d'indice  $n''$ . Ces deux milieux sont transparents .

Le diamètre de la gaine est de l'ordre d'une centaine de  $\mu\text{m}$  alors que celui du cœur est de quelques microns.

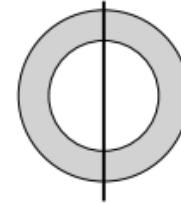


## Quel est le principe physique du fonctionnement d'une fibre optique ?

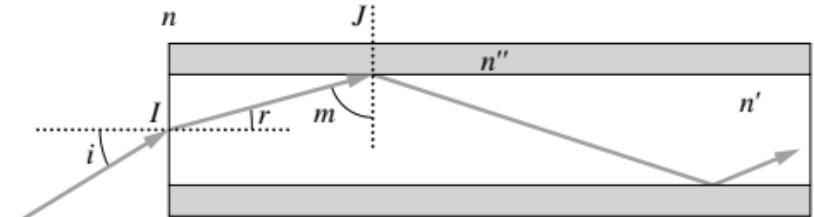
Le principe de fonctionnement d'une fibre optique **repose sur la réfraction de la lumière**. Celle-ci se propage dans le cœur de la fibre en empruntant un parcours en zigzag. Le rôle de la gaine qui entoure le cœur est de favoriser la transmission du signal grâce à un faible indice de réfraction.



Un rayon arrive en I sous une incidence  $i$  ; il se réfracte avec un angle  $r$  et frappe la gaine avec un angle d'incidence  $m$ .



Vue de face



Vue de côté dans le plan méridien

Réfraction en  $I$  :

$$n \sin i = n' \sin r \quad \text{et} \quad m + r = \pi/2$$

En  $J$  il y a réflexion totale si :

$$n' \sin m = n'' \sin \pi/2$$

Soit :

$$\sin m = \cos r = \frac{n''}{n'}$$

$$n^2 \sin^2 i = n'^2 \left[ 1 - \left( \frac{n''}{n'} \right)^2 \right] = n'^2 - n''^2$$



$$\sin i = \frac{\sqrt{n'^2 - n''^2}}{n}$$

Avec  $n' = 1,5$  et  $n'' = 1,48$ ,  $\sin i = 0,244$  et  $i = 14^\circ$ .

Si  $i$  est inférieur à cette limite,  $m$  est supérieur à l'angle de réflexion limite et le rayon se réfléchit à l'intérieur de la fibre pour ressortir à son extrémité opposée.

La quantité  $\sqrt{n'^2 - n''^2}$  est appelée **ouverture numérique** de la fibre.

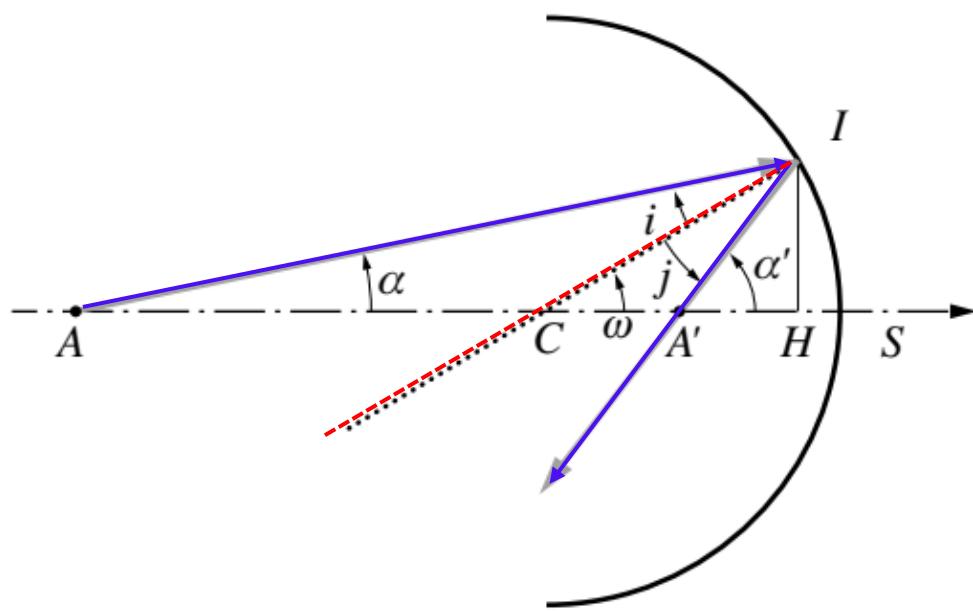
La fibre sert pour des lampes décoratives,

- Pour des explorations médicales ([endoscopes](#))
- Ou pour les télécommunications.
- Un ensemble de fibres très fines (chacune de diamètre variant de 5 à 100  $\mu\text{m}$ ) peut aussi permettre un transport point par point d'une image dont la définition est naturellement conditionnée par ce diamètre.

# *Correction du devoir*

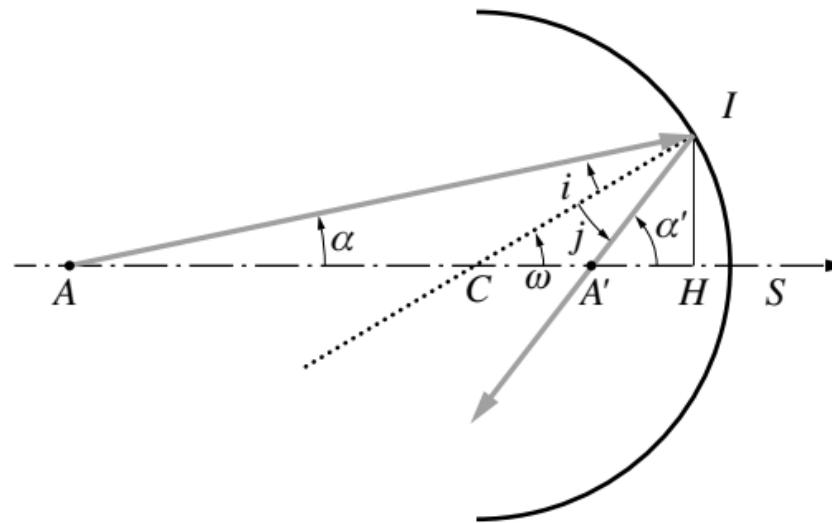
*Optique géométrique: Série 3 exercice 2*

- Du point objet réel  $A$ , situé sur l'axe principal, on trace deux rayons particuliers.
- Le premier, d'incidence nulle passe par l'axe principal.
- Le deuxième,  $AI$ , fait, avec la normale en  $I$ , un angle d'incidence  $i$  et se réfléchit.
- Finalement, ces deux rayons se coupent sur l'axe principal en  $A'$  (image réelle).
- On pose  $\overline{SA} = p$  ;  $\overline{SA'} = p'$  et  $\overline{SC} = r$ .



- Dans les triangles  $AIC$  et  $CIA'$ , on écrit que la somme des angles orientés est égale à  $\pi$  :

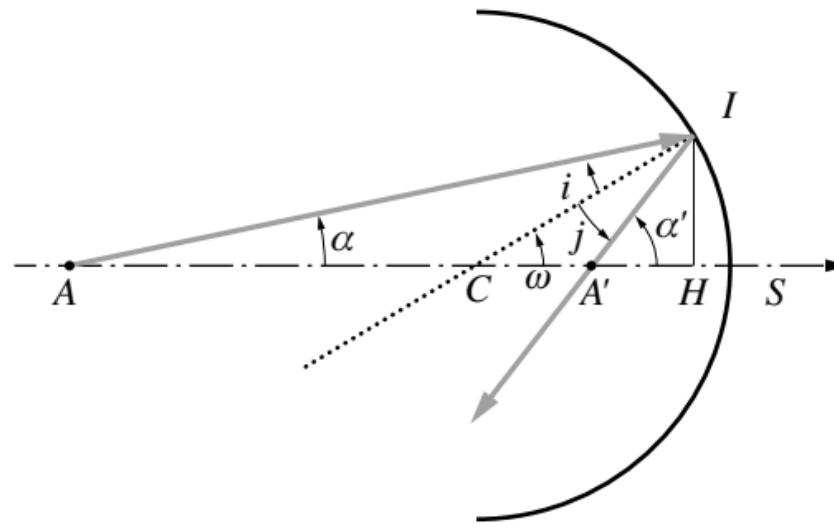
$$\begin{aligned}\alpha + \pi - \omega - i &= \pi \implies \alpha - \omega = i \\ \omega + \pi - \alpha' + j &= \pi \implies \alpha' - \omega = j\end{aligned}$$



- En considérant les orientations, la loi de Snell-Descartes s'écrit  $j = -i$  ;
- On a finalement :  $2\omega = \alpha + \alpha'$ .
- Dans l'approximation des petits angles, on peut confondre  $\alpha$ ,  $\alpha'$  et  $\omega$  avec leurs tangentes et  $H$  avec  $S$ . On trouve alors :

$$\tan \alpha \approx \alpha = \frac{\overline{SI}}{\overline{AS}} = \frac{\overline{SI}}{-p}, \quad \tan \alpha' \approx \alpha' = \frac{\overline{SI}}{\overline{A'S}} = \frac{\overline{SI}}{-p'} \quad \text{et} \quad \tan \omega \approx \omega = \frac{\overline{SI}}{\overline{CS}} = \frac{\overline{SI}}{-r}$$

- Dans les triangles  $AIC$  et  $CIA'$ , on écrit que la somme des angles orientés est égale à  $\pi$  :



$$\tan \alpha \approx \alpha = \frac{\overline{SI}}{\overline{AS}} = \frac{\overline{SI}}{-p}, \quad \tan \alpha' \approx \alpha' = \frac{\overline{SI}}{\overline{A'S}} = \frac{\overline{SI}}{-p'} \quad \text{et} \quad \tan \omega \approx \omega = \frac{\overline{SI}}{\overline{CS}} = \frac{\overline{SI}}{-r}$$

- Finalement, si l'on reporte dans  $2\omega = \alpha + \alpha'$ , on a :  $2\frac{\overline{SI}}{-r} = -\overline{SI} \left( \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \right)$
- On aboutit ainsi à la relation de conjugaison des miroirs sphériques qui s'écrit :

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{2}{r}$$

ou  $\frac{1}{\overline{SA}} + \frac{1}{\overline{SA'}} = \frac{2}{\overline{SC}}$

# Les systèmes centrés

## Définition

*Un système centré est un ensemble de milieux transparents séparés par des surfaces planes ou sphériques dont l'axe principal est celui de toutes les surfaces du système centré*

.

On distingue deux types de systèmes centrés :

- **Systèmes dioptriques** : composés seulement de dioptres.
- **Systèmes catadioptriques** : composés de miroirs et de dioptres.

## Stigmatisme des systèmes centrés

Il serait bien difficile de parler d'un stigmatisme parfait dans le cas d'un système centré.

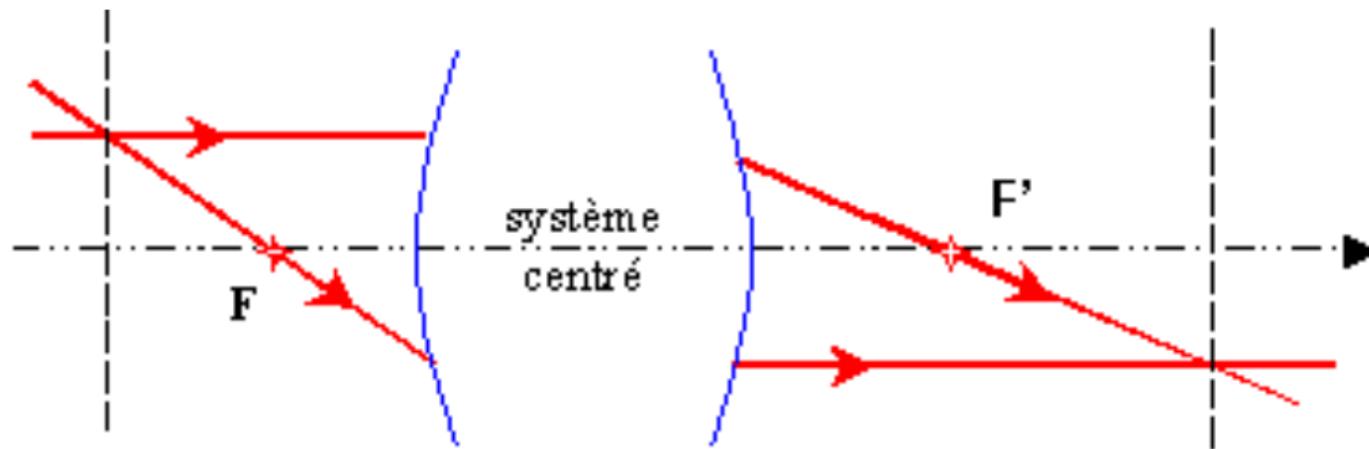
Pour le stigmatisme approché il peut se réaliser uniquement si les rayons sont **paraxiaux**(*peu inclinés*),on travaille dans les "conditions d'approximation de Gauss".

Pour satisfaire ces conditions on utilise des systèmes optiques de faible ouverture et les objets sont autour de l'axe principal .

## Etude d'un système centré à foyer

### Définition

Un système est dit à foyer si ses foyers objet et image ne sont pas rejetés à l'infini.

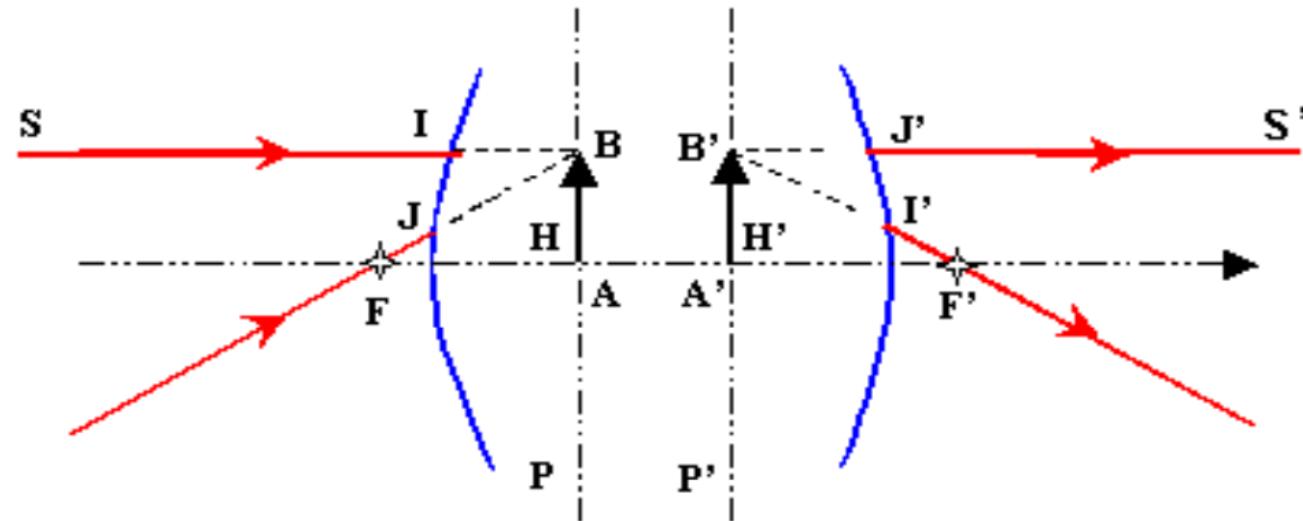


## Plans principaux

Ce sont deux plans conjugués  $P$  et  $P'$  pour lesquels le grandissement est égale à **1**.

Un objet **AB** appartenant à  $P$  aura une image **A'B'** appartenant à  $P'$  et de même longueur que **AB**.

$P$  et  $P'$  sont appelés *les plans principaux objet et image*.



Avec la distance focale objet  $f = \overline{HF}$  et la distance focale image  $f' = \overline{H'F'}$

( $F, F', H$  et  $H'$ ) sont appellés l'ensemble des points *cardinaux* d'un système centré

Définitions :

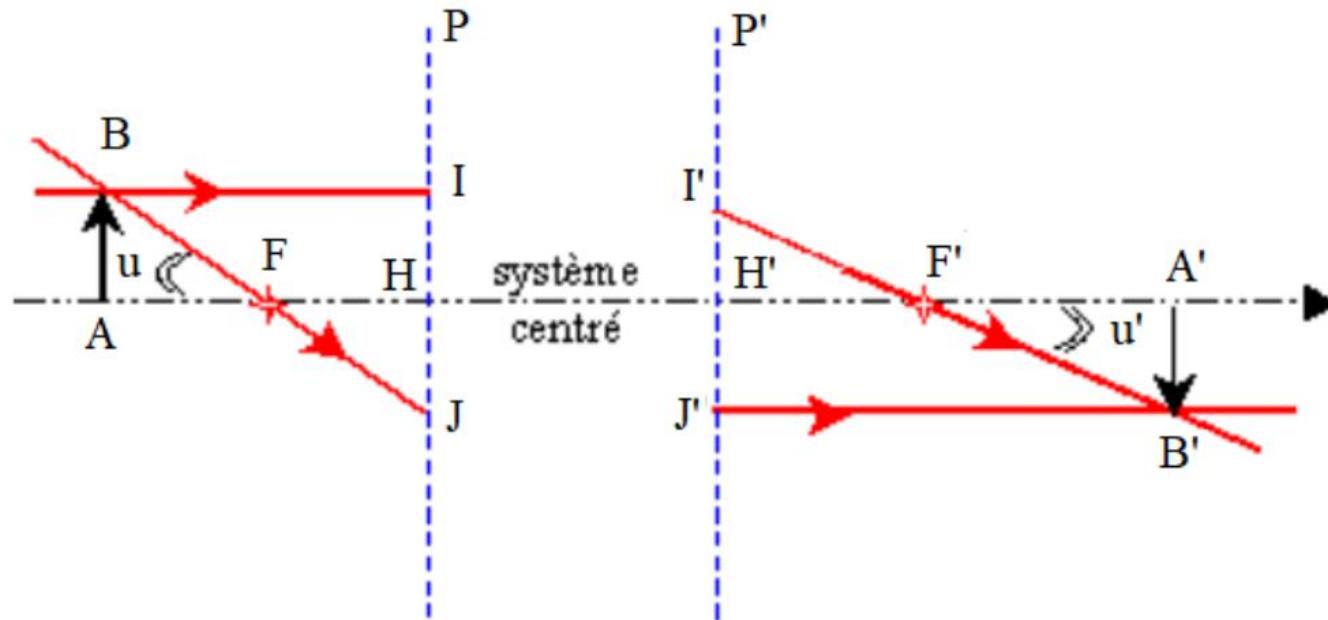
les points cardinaux :

sont un ensemble de points dont la connaissance permet la détermination complète des propriétés d'un système optique qui n'est pas afocal.

Un système afocal :

a comme propriété de laisser ressortir de façon parallèle après le système, des rayons qui sont parallèles entre eux avant le système.

## Construction de l'image d'un objet AB à travers un système centré



- ❖ Le rayon **BI** incident // à l'axe principal, émerge en passant par le foyer image **F'**.
- ❖ Le rayon **BFJ** incident passant par le foyer objet **F**, émerge // à l'axe principal.
- ❖ **B'** est l'image de **B**, obtenue en joignant l'intersection des 2 rayons **IF'** et **JJ'**.

On considère les triangles semblables (BIJ) et (HFJ), nous avons :

$$\frac{\overline{JH}}{\overline{JI}} = \frac{\overline{HF}}{\overline{IB}} \quad \text{avec } \overline{IB} = \overline{HA} \quad \text{donc} \quad \frac{\overline{HF}}{\overline{HA}} = \frac{\overline{HJ}}{\overline{IJ}} \quad (1)$$

On considère les triangles semblables (H'F'I') et (J'B'I'), nous avons :

$$\frac{\overline{H'F'}}{\overline{J'B'}} = \frac{\overline{H'I'}}{\overline{J'I'}} \quad \text{avec } \overline{J'B'} = \overline{H'A'} \quad \text{donc} \quad \frac{\overline{H'F'}}{\overline{H'A'}} = \frac{\overline{HI}}{\overline{JI}} \quad (2)$$

En sommant membre à membre les équations (1) et (2) on obtient :

$$\frac{\overline{HF}}{\overline{HA}} + \frac{\overline{H'F'}}{\overline{H'A'}} = \frac{\overline{HJ}}{\overline{IJ}} + \frac{\overline{HI}}{\overline{JI}} = \frac{(\overline{HJ} - \overline{HI})}{\overline{IJ}} = \frac{\overline{IJ}}{\overline{IJ}} = 1$$

Donc :

$$\frac{\overline{HF}}{\overline{HA}} + \frac{\overline{H'F'}}{\overline{H'A'}} = 1 \quad \rightarrow$$

$$\boxed{\frac{f}{HA} + \frac{f'}{H'A'} = 1}$$

*Formule de conjugaison d'un système centré*

## Grandissement

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{f}{AF}$$

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'F'}}{f'}$$

## La vergence d'un système centré

On définit la vergence d'un système centré par:

exprimée en Dioptrie ( $m^{-1}$ ).

$$V_s = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

Un système centré est convergent si sa vergence est positive :  $V_s > 0$

Un système centré est divergent si sa vergence est négative :  $V_s < 0$

**Remarque :** C'est une relation valable quelque soit le système centré.

# *Associations des systèmes centrés*

## Les lentilles

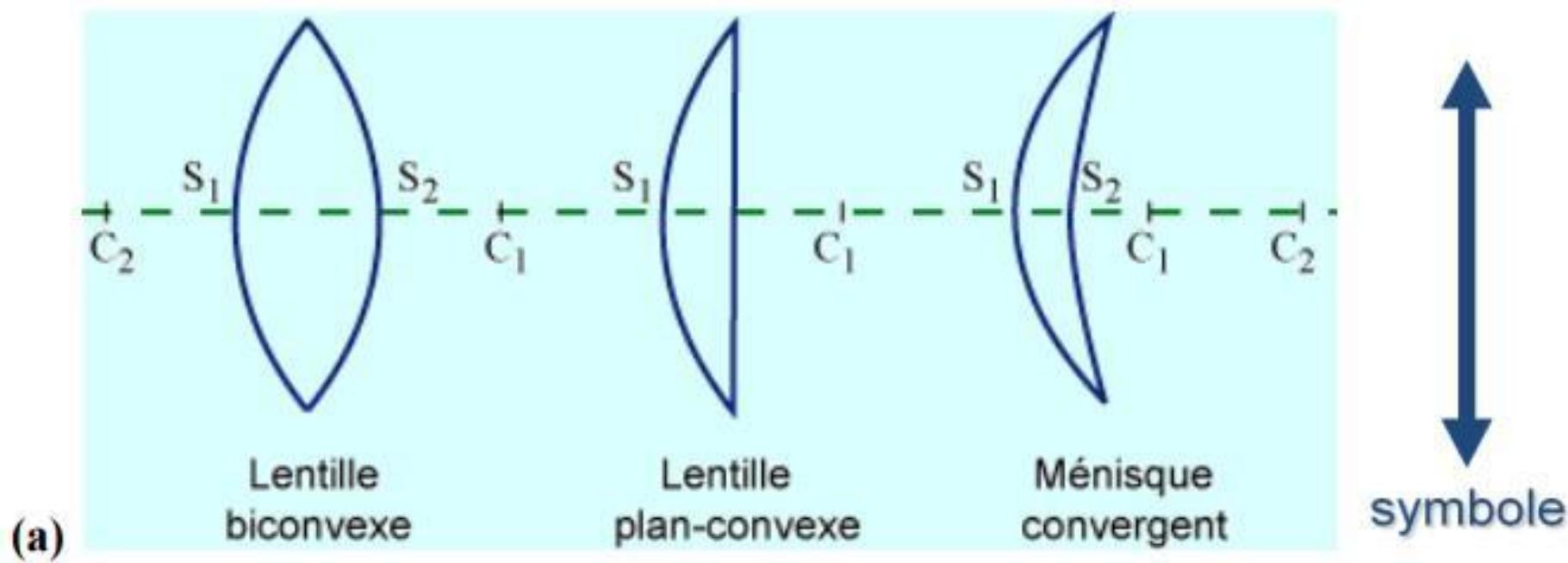
### Définition

Une lentille est un système formé par l'association de deux dioptres dont l'un au moins est sphérique.

C'est un système centré d'axe, la droite joignant les deux centres de ces deux dioptres.

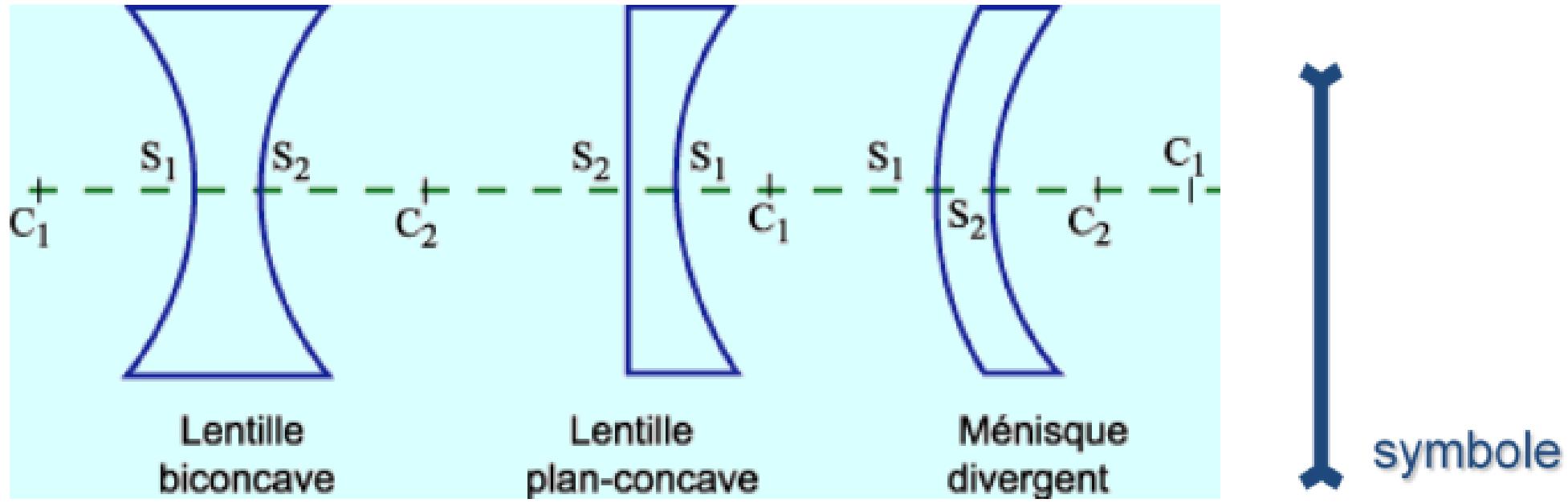
On distingue plusieurs types de lentilles.

Elles peuvent être classées en deux catégories: *convergentes et divergentes*



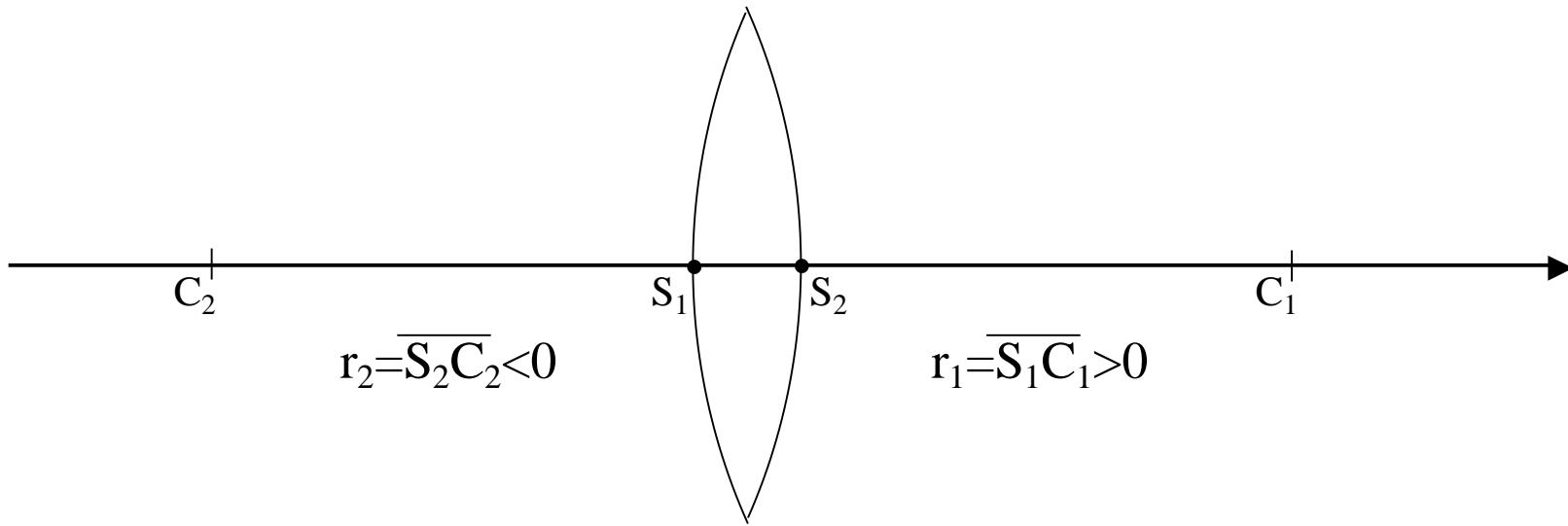
**Remarque:** Les lentilles dont le bord est plus mince que le centre sont convergentes

(b)



**Remarque:** Les lentilles dont le bord est plus épais que le centre sont divergentes

## Qu'est-ce qu'une lentille mince ?



**Lentille :**

- Système dioptrique centré.
- Le rayon incident va subir 2 réfractions.

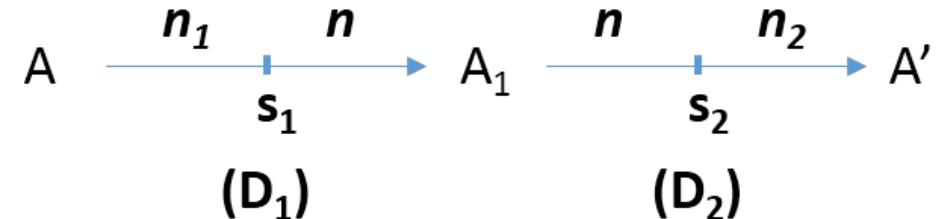
**Lentille mince:**

- $S_1 S_2 \ll |r_1 - r_2|$

## Formule de Conjugaison

**Dioptre (D<sub>1</sub>) :**

$$\frac{n}{S_1 A_1} - \frac{n_1}{S_1 A} = \frac{n - n_1}{S_1 C_1}$$



$$\gamma_1 = \frac{n_1}{n} \frac{\overline{S_1 A_1}}{\overline{S_1 A}}$$

**Dioptre (D<sub>2</sub>) :**

$$\frac{n_2}{\overline{S_2 A'}} - \frac{n}{\overline{S_2 A_1}} = \frac{n_2 - n}{\overline{S_2 C_2}}$$

$$\gamma_2 = \frac{n}{n_2} \frac{\overline{S_2 A'}}{\overline{S_2 A_1}}$$

**Lentille mince :  $S_1 = S_2 = S$**

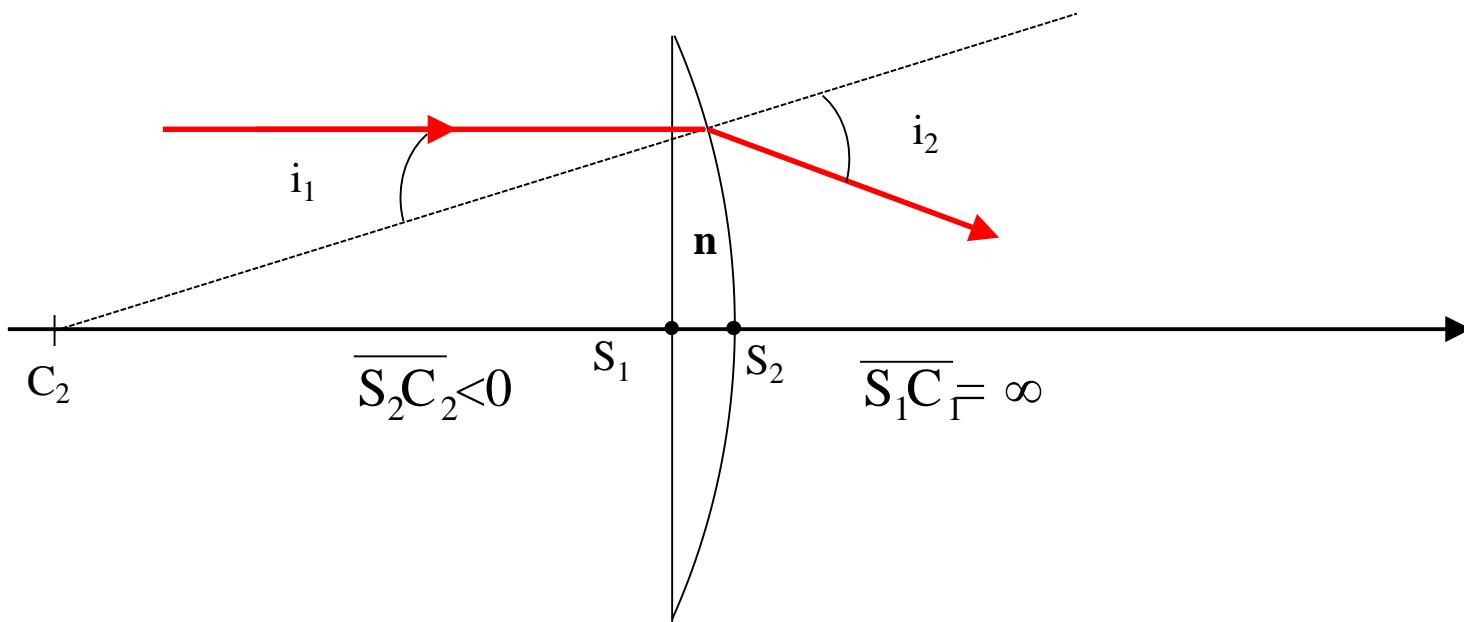
$$\frac{n_2}{SA'} - \frac{n_1}{SA} = \frac{n-n_1}{SC_1} + \frac{n_2-n}{SC_2}$$

Formule du grandissement au sommet :  $\gamma = \frac{n_1}{n_2} \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}$

Formule du grandissement au Foyers :  $\gamma = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$

D'où la formule de Newton :  $\overline{FA} \overline{F'A'} = \overline{OF} \overline{OF'} = -\overline{OF'}^2$

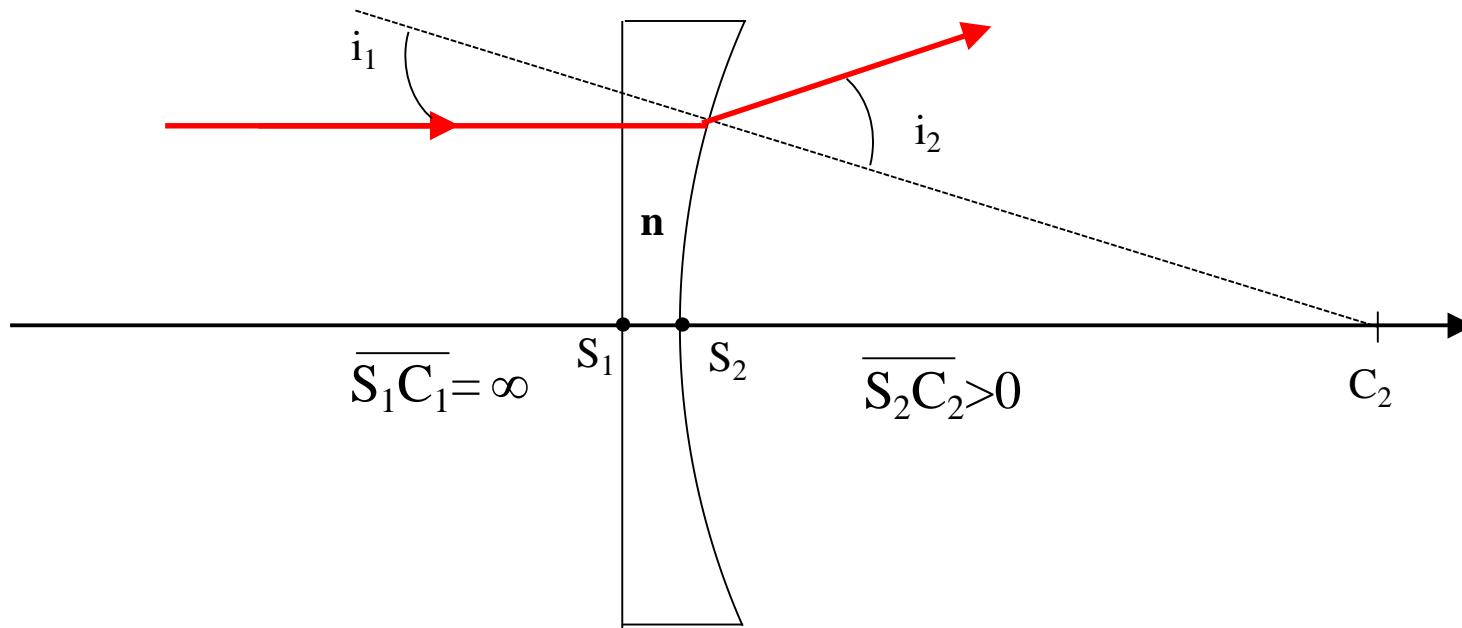
## Bord des lentilles: bords minces



- Si un **rayon incident parallèle** à l'axe optique sort **incliné vers l'axe optique**: **lentille convergente**.
- Les lentilles à **bords minces** sont **convergentes**.

**Ne pas confondre lentille mince et à bords minces.**

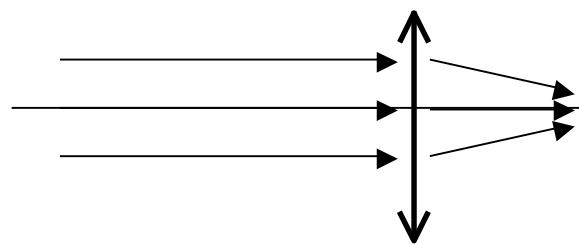
## Bord des lentilles: bords épais



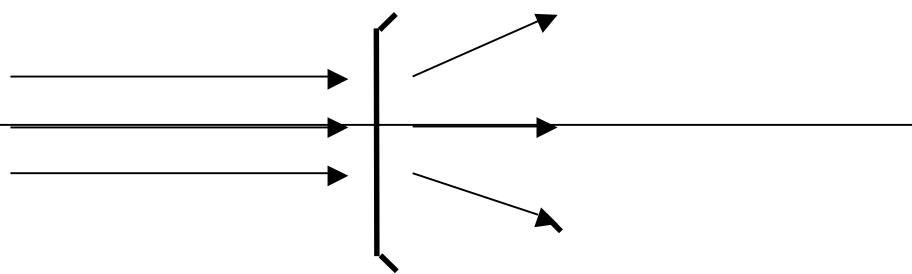
- Si un **rayon incident parallèle** à l'axe optique sort **écarté de l'axe optique** :  
**lentille divergente.**
- Les lentilles **à bords épais** sont **divergentes**.

Ici on a une lentille mince et à bords épais.

**On représente les lentilles minces de la façon suivante:**



**Lentille convergente**



**Lentille divergente**

On admettra que dans le cas des lentilles minces dont les milieux extrêmes sont identiques, on a :

$$f = \overline{OF} = -\overline{OF'} = -f'$$

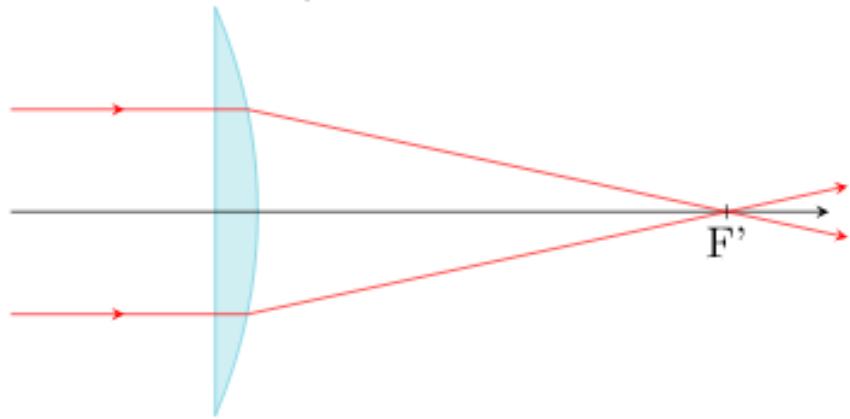
Pour une lentille convergente,  $f' > 0$ .

pour une lentille divergente,  $f' < 0$ .

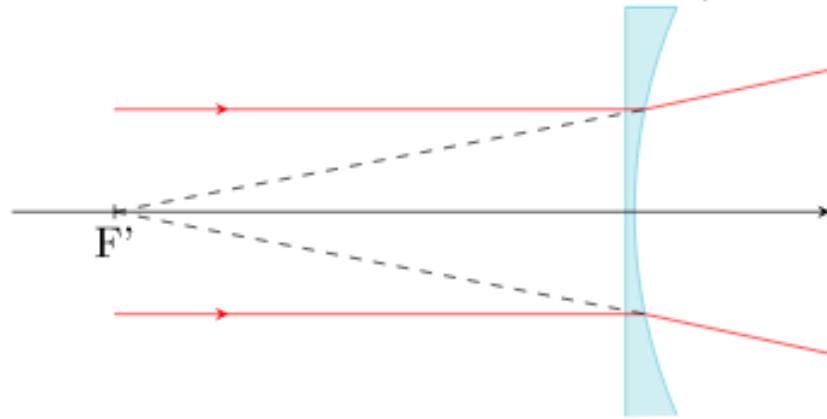
On définit la vergence  $V$  d'une lentille par : 
$$V = \frac{n}{f'} = \frac{1}{f'} \quad si \quad n = 1$$

Avec : *V est la vergence ou la puissance de la lentille (unité : Dioptrie = m<sup>-1</sup>).*

Lentille convergente

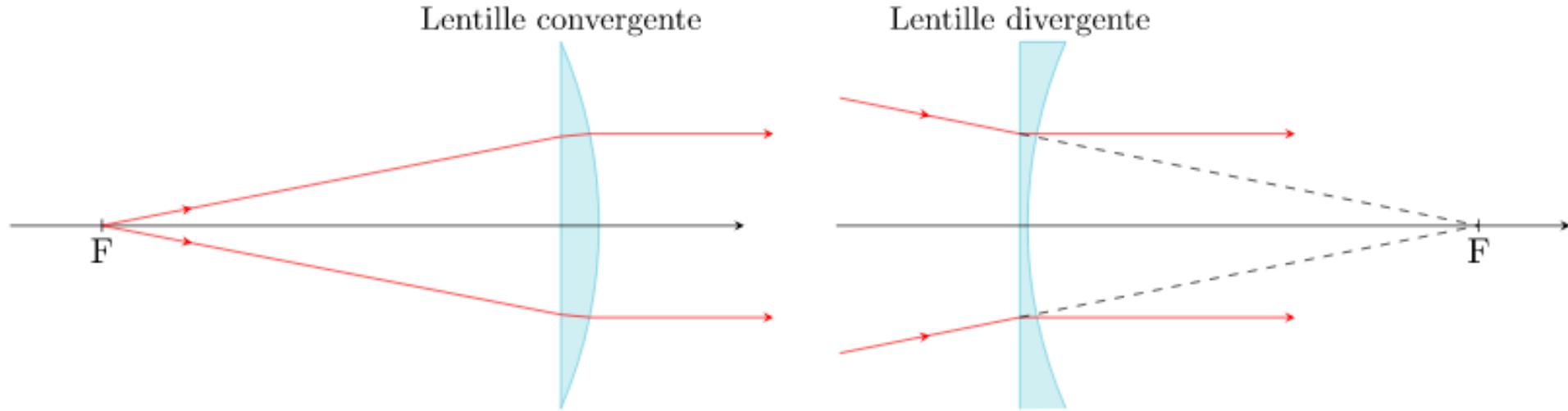


Lentille divergente



On définit la distance focale image :

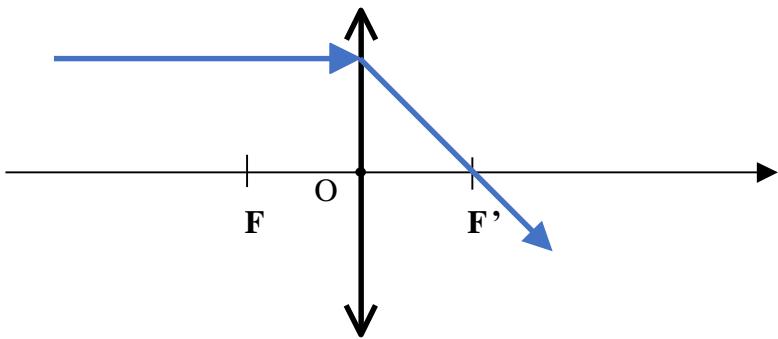
$$f' = \overline{OF'}$$



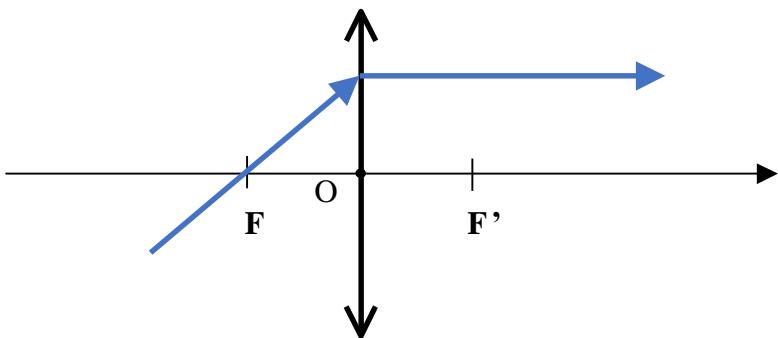
on définit la distance focale objet :

$$f = \overline{OF}$$

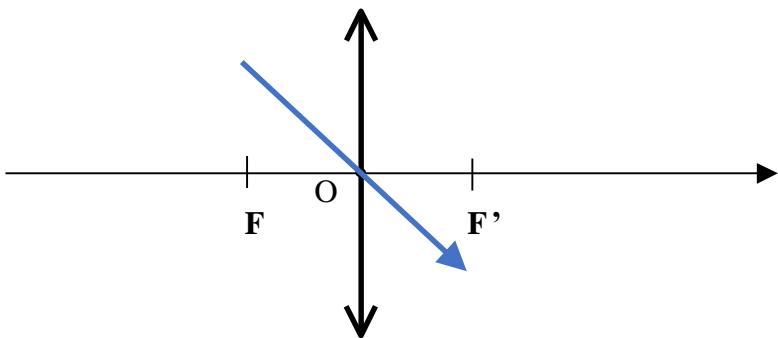
## Lentilles convergentes



$$\text{on } a : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

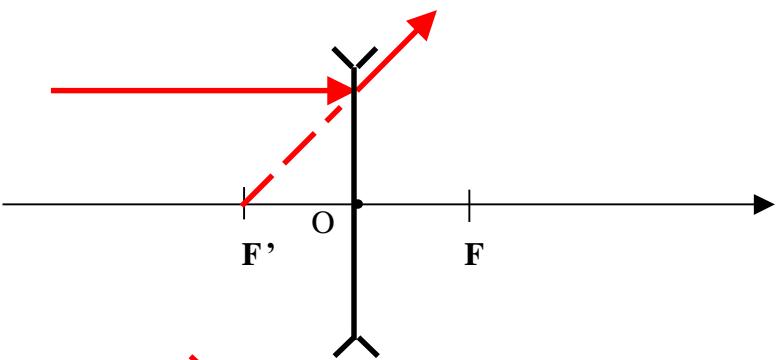


$$\text{on } a : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

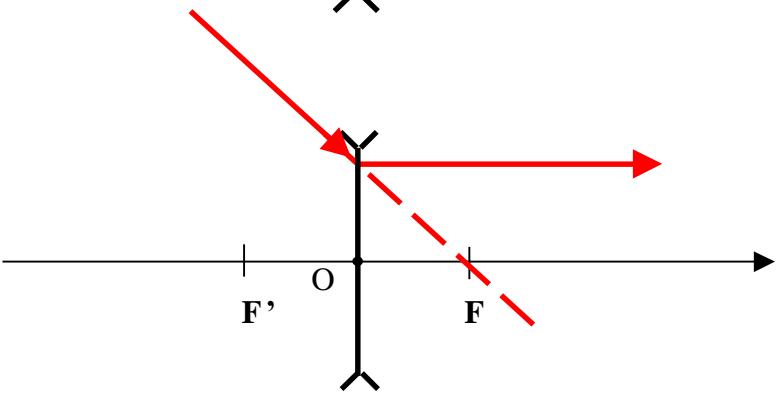


$$\text{on } a : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

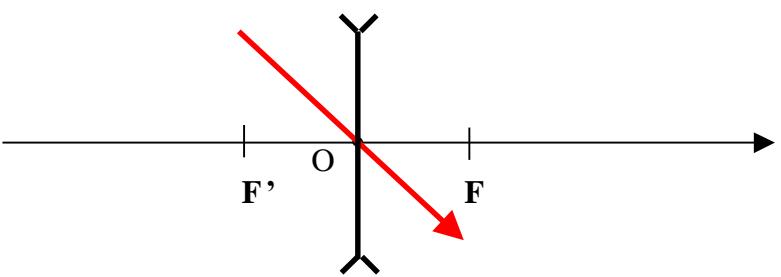
## Lentilles divergentes



$$\text{on } a : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$



$$\text{on } a : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

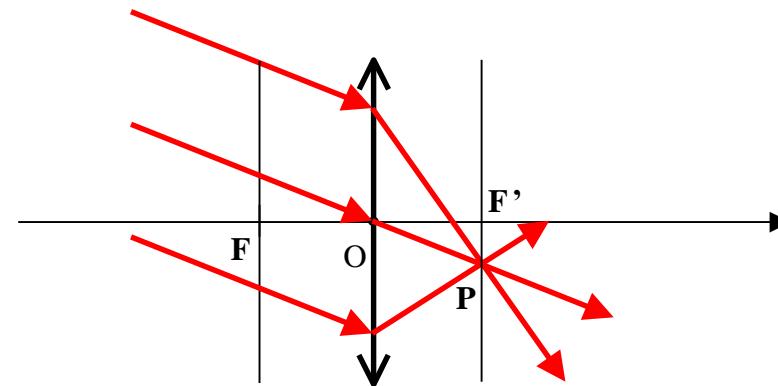
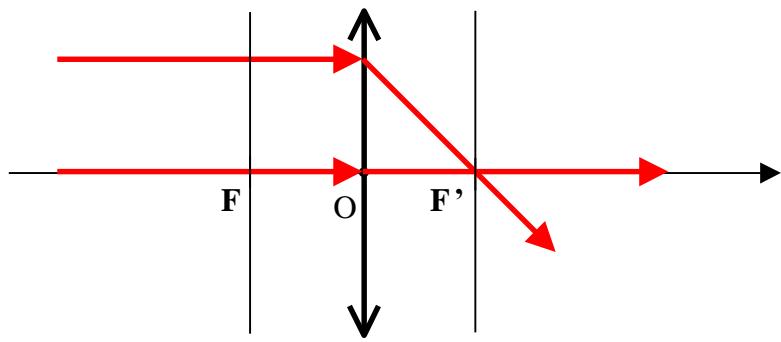


$$\text{on } a : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

## Plans focaux pour lentilles.

### Plans focaux:

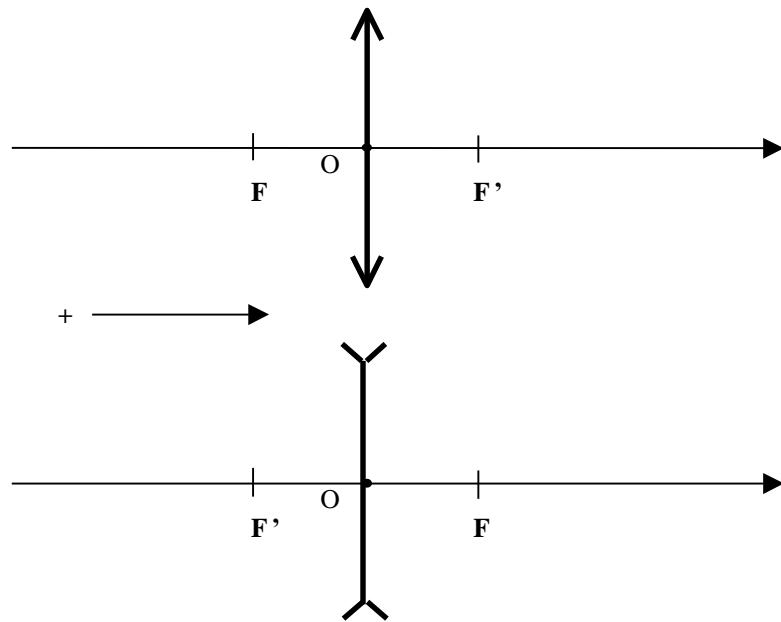
- Plans perpendiculaires à l'axe optique passant par  $F$  et  $F'$ .
- Les rayons parallèles passent tous par un seul point  $P$  appartenant à un des plans focaux.



- Plan focal image et plan focal objet.
- Foyer secondaire image.
- Foyer secondaire objet.
- Idem pour les lentilles divergentes.

## Espace objet et espace image.

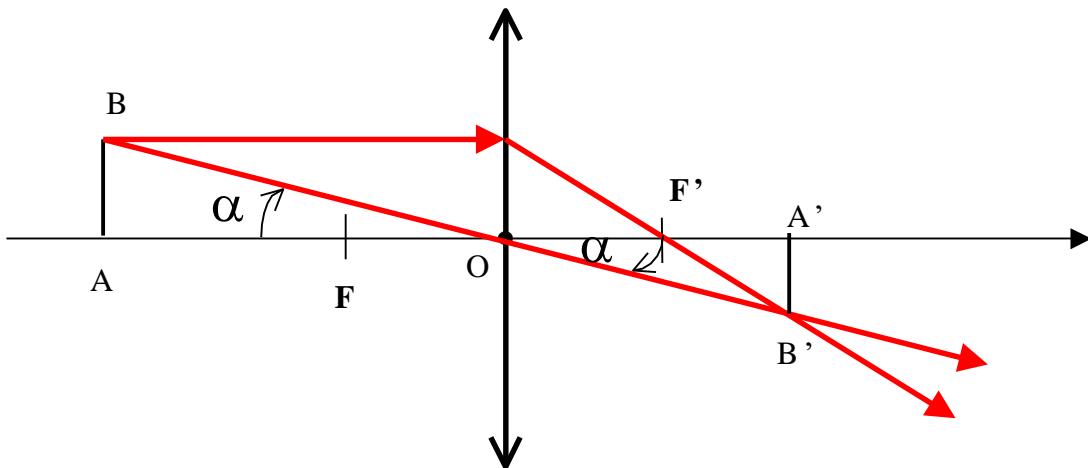
A priori, un objet est situé du côté d'où vient la lumière avant la lentille et l'image à travers la lentille se situe après cette dernière.



- Objet réel:** avant la lentille.  $p < 0$
- Objet virtuel:** après la lentille.  $p > 0$
- Image réelle:** après la lentille.  $p > 0$
- Image virtuelle:** avant la lentille.  $p < 0$

•**Objet virtuel n'a pas d'existence physique, il s'agit en réalité de l'image d'un objet à travers un système optique.**

## Formation d'une image, grandissement.



$$\text{on a : } \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

Grandissement transversale :  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

Par construction géométrique on a :  $\tan(\alpha) = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{OA}}$

d' où :  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

- L'image est droite si  $\gamma > 0$ , au contraire elle est renversée si  $\gamma < 0$ .
- Enfin l'image est réduite si  $|\gamma| < 1$  et agrandie quand  $|\gamma| > 1$ .

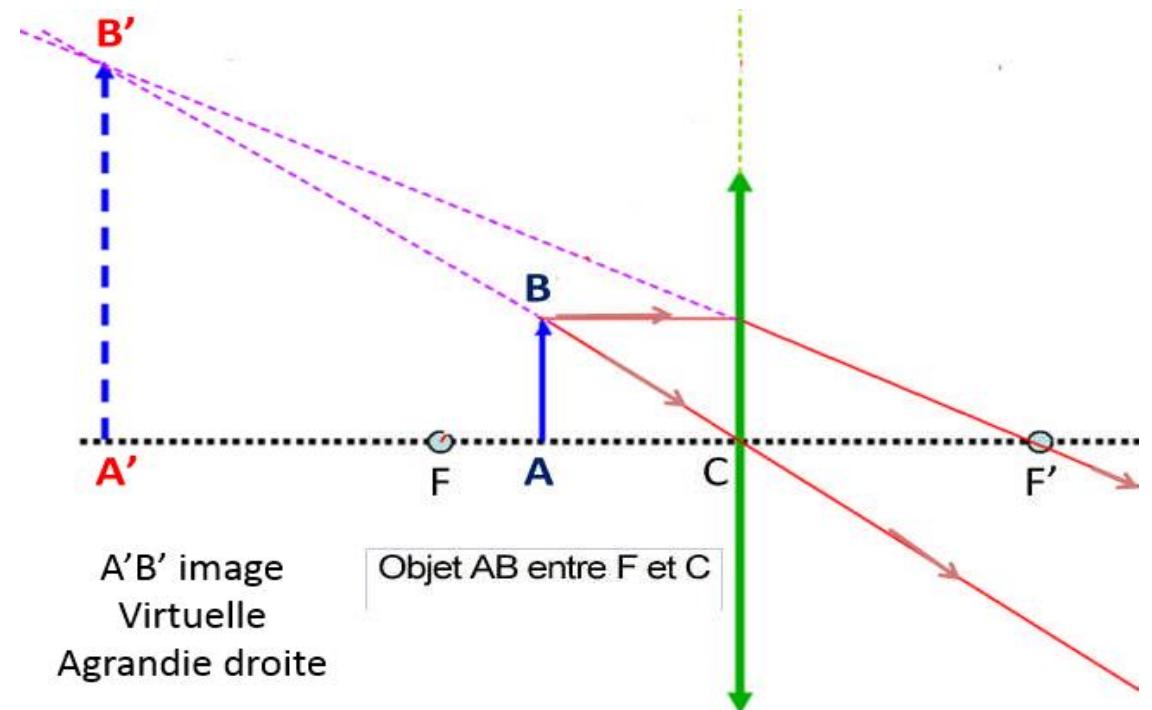
*Etudes de quelques instruments optiques*

## La loupe



La loupe est une lentille convergente de faible distance focale (quelques cm). Elle a pour fonction d'augmenter le diamètre apparent d'un objet.

On dispose l'objet de dimension réduite entre la lentille et son foyer objet. Une construction correcte donne une image virtuelle, droite et plus grande que l'objet située en avant du plan focal objet.

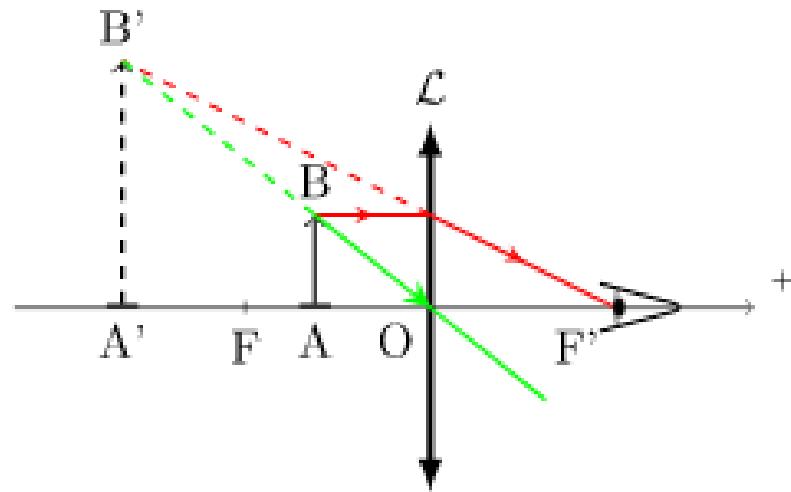


Pour obtenir l'effet Loupe, il faut que l'objet soit situé entre le centre optique d'une lentille convergente et son foyer objet : on obtient alors une image virtuelle, droite et agrandie.

De plus, afin que l'œil puisse observer cette image sans accommodation, celle-ci doit être à l'infini. La meilleure position de l'objet est celle où il sera sur le foyer principal objet.

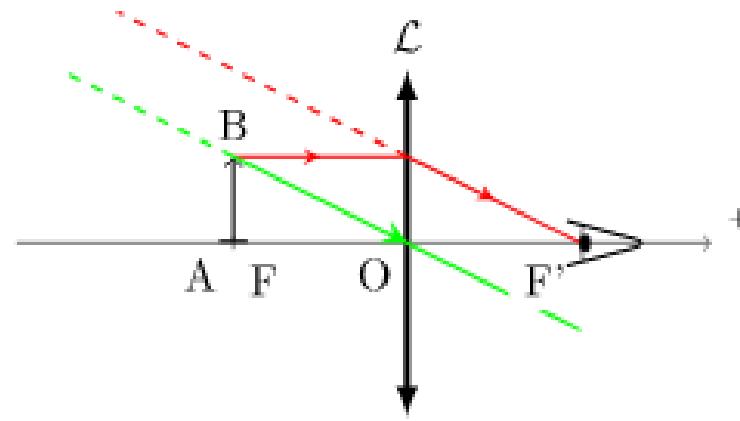
**Remarque** :En optique physiologique, l'**accommodation**, appelée aussi **mise au point**, désigne les modifications oculaires adaptatives permettant d'assurer la netteté des images pour des distances différentes de vision.

## Loupe avec accommodation



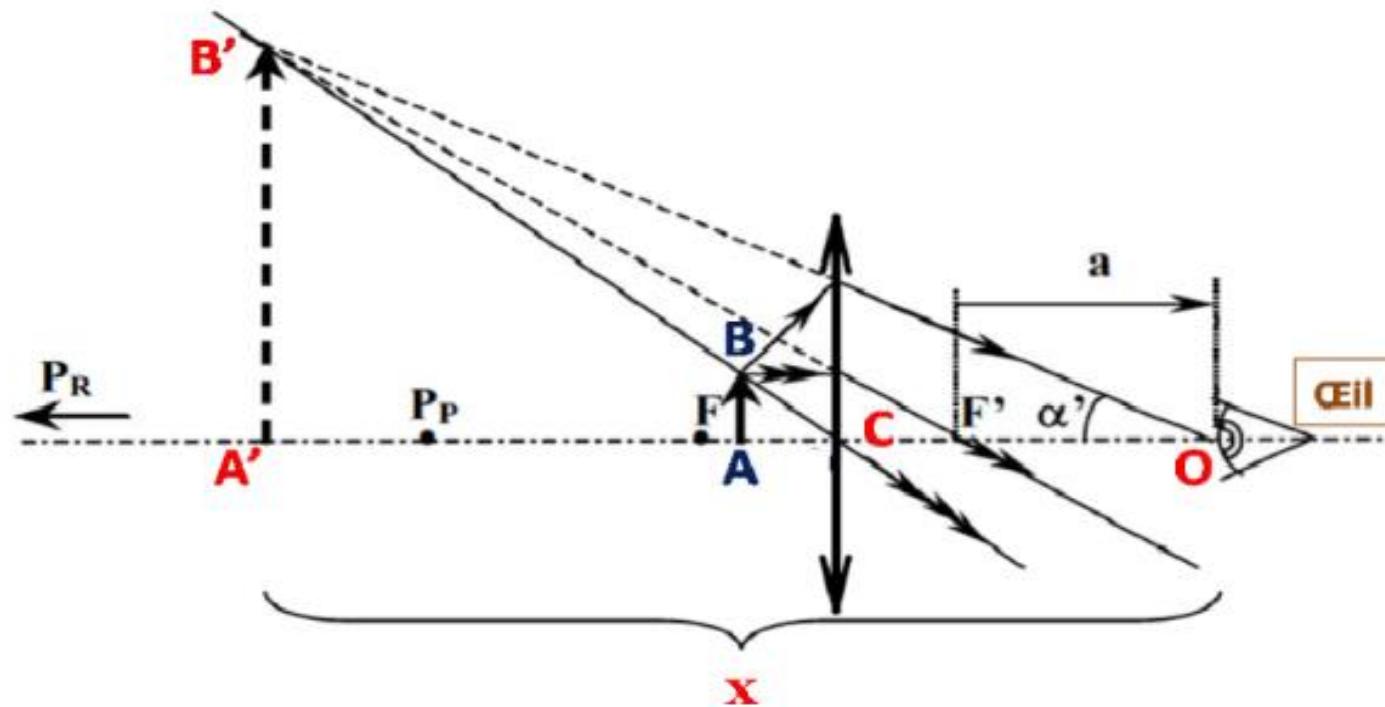
On observe l'image à travers la loupe. L'image obtenue est droite et agrandie.

## Loupe sans accommodation



Pour que l'œil puisse observer l'image sans accommodation, celle-ci doit se trouver à l'infini. Dans ce cas, l'objet est situé dans le plan focal objet.

## Caractéristiques d'une loupe



## La puissance

On appelle « puissance » de la loupe le rapport du diamètre apparent de l'image  $\alpha'$  sur la grandeur de l'objet AB.

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

$\alpha'$  : angle sous lequel est observé l'image par l'œil exprimé en radian (rad) .

AB : longueur de l'objet exprimée en mètre (m) .

P : puissance exprimée en dioptre ( $\delta$ ) .

## La puissance intrinsèque

Elle permet la comparaison entre les instruments d'optique.

- **cas où l'œil est au foyer F', a=0**

$$P_i = \frac{1}{f'}$$

- **cas où l'image à l'infini x →∞**

$$P_i = \frac{1}{f'}$$

## **Le grossissement commercial**

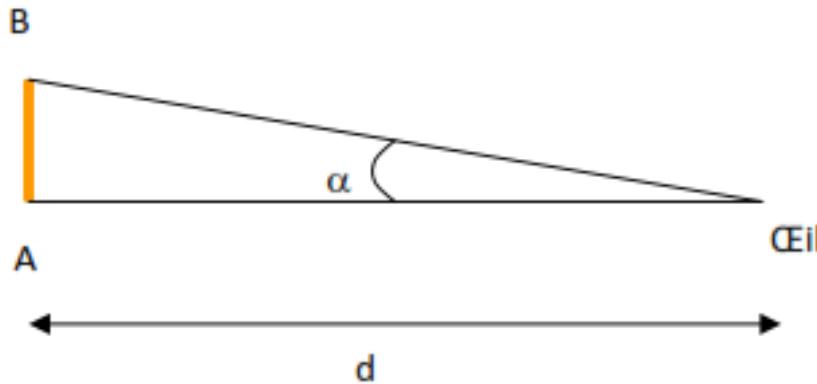
Pour  $d = 25$  cm (objet au punctum proximum), le grossissement commercial est donné par :

$$G_c = \frac{P_i}{4}$$

## Le grossissement

Le rapport  $\frac{\alpha'}{\alpha}$  est appelé le « grossissement » de la loupe. Il est égal au rapport du diamètre apparent de l'image  $\alpha'$  sur celui  $\alpha$  de l'objet observé à la distance minimale de vision distincte  $d$  par l'œil nu .

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

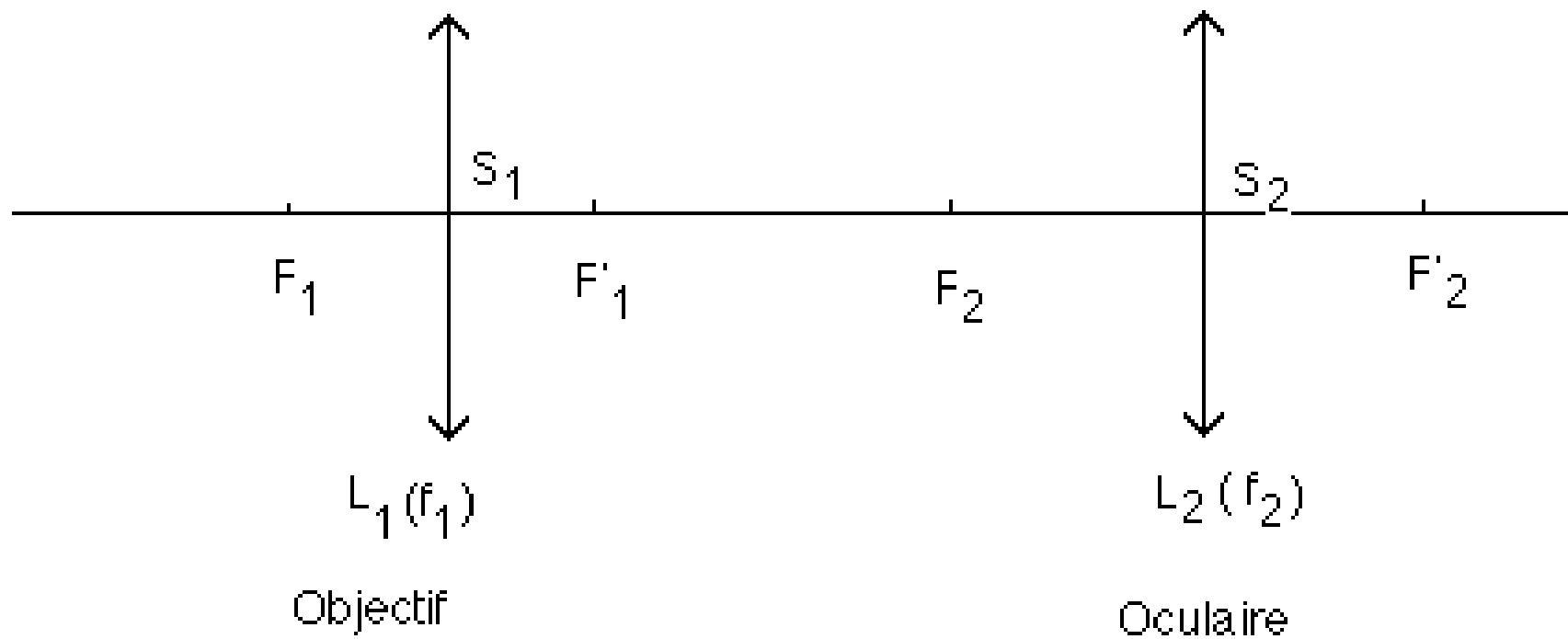


$\alpha$  : angle sous lequel est vu l'objet

$\alpha'$  : angle sous lequel est observé l'image par l'œil

## Le microscope





Le microscope est constitué de deux systèmes de lentilles, l'objectif (placé du côté de l'objet) et l'oculaire (placé du côté de l'œil). La distance entre l'objectif et l'oculaire est constante.

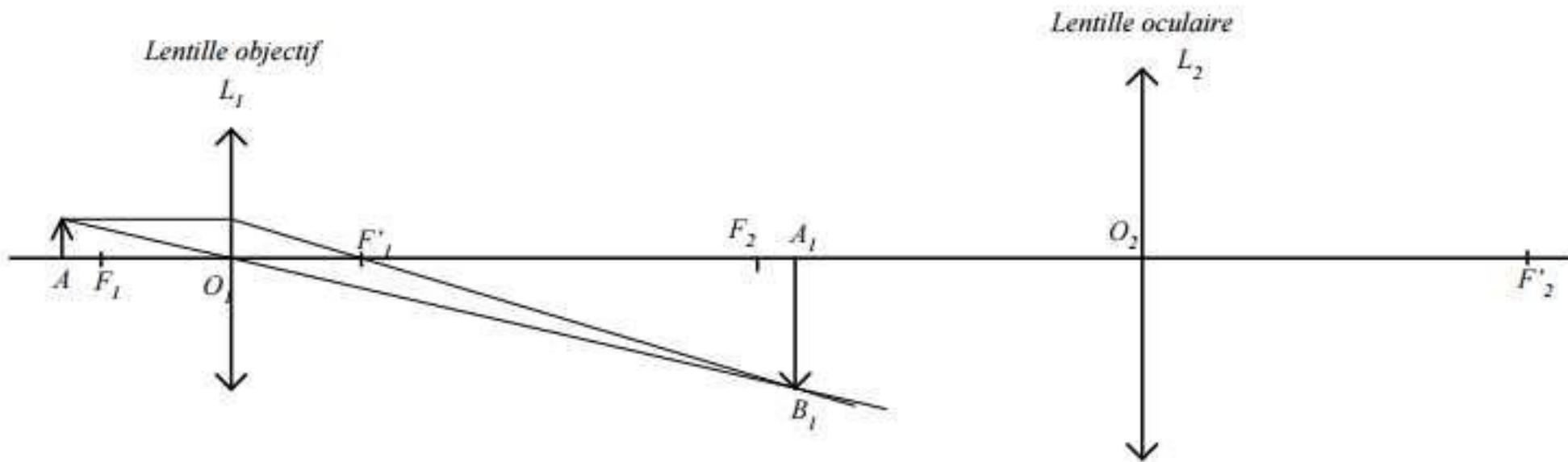
L'objectif est constitué d'une lentille convergente  $L_1$  dont la distance focale objet  $f_1$  est très petite (quelques mm).

L'oculaire est constitué d'une lentille convergente  $L_2$  dont la distance focale objet  $f_2$  est de quelques centimètres.

La distance  $O_1O_2$  est invariable est de l'ordre de 20 cm. On appelle l'intervalle optique  $\Delta$  la distance  $F'_1F_2$  entre le foyer principal image de l'objectif et le foyer principal objet de l'oculaire.

## Construction de l'image

L'objet observé  $AB$  est placé en avant et proche du foyer principal objet  $F_1$  de l'objectif. L'objectif  $L_1$  donne de l'objet  $AB$  une image  $A_1B_1$  réelle, renversée et agrandie dite « intermédiaire ».



L'oculaire  $L_2$  joue le rôle de loupe pour  $A_1B_1$ . Il est donc placé de manière que  $A_1B_1$  se trouve entre  $L_2$ , et son foyer objet  $F'_2$ . L'image définitive  $A'B'$  est alors virtuelle, agrandie, droite par rapport à  $A_1B_1$ , c'est-à-dire renversée par rapport à  $AB$ .

L'image intermédiaire  $A_1B_1$  joue le rôle d'objet réel pour la lentille  $L_2$ .

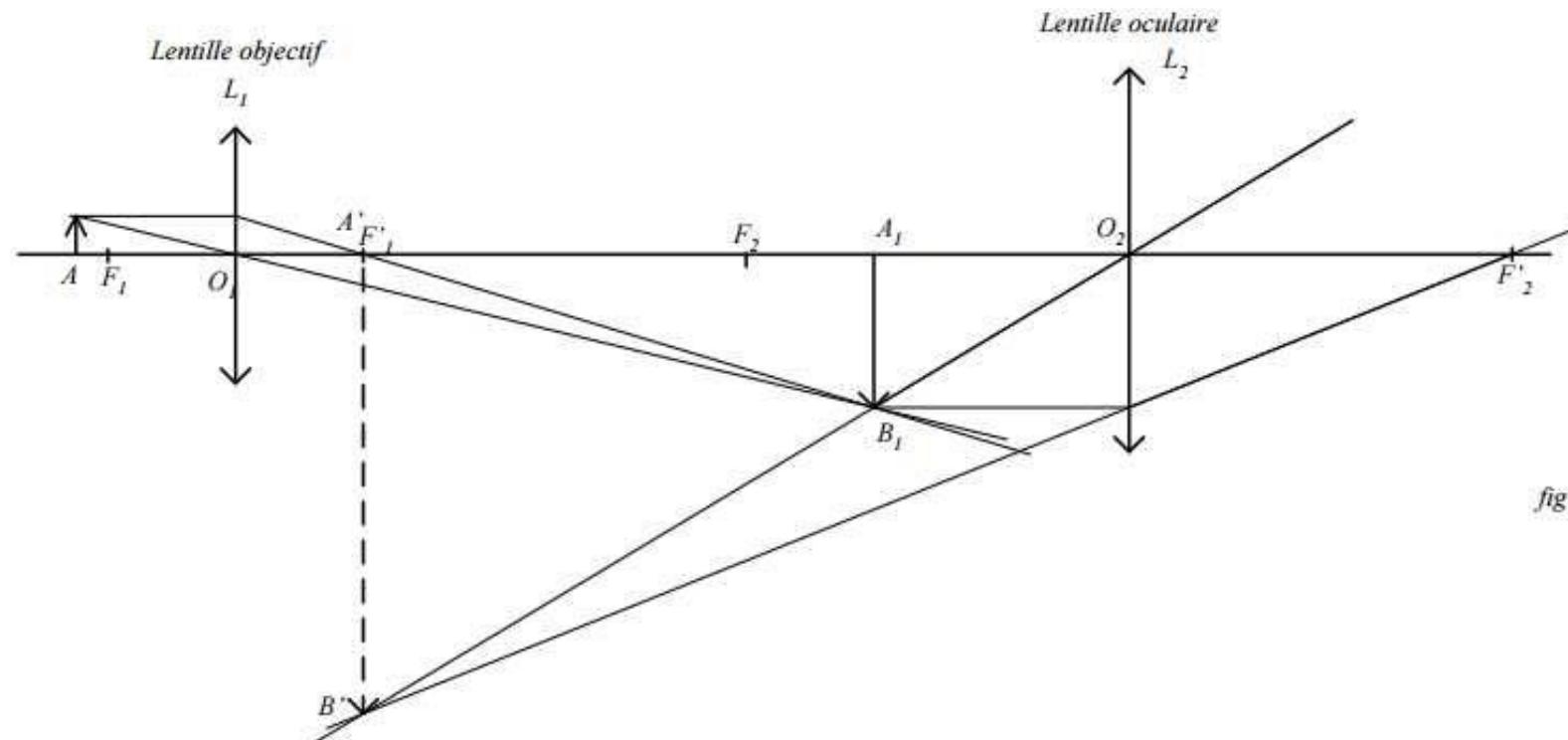


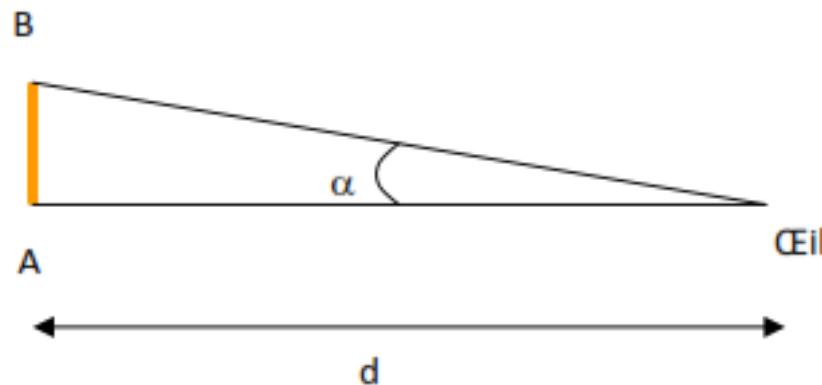
fig 4

## Grandeurs caractéristiques d'un microscope

### Le grossissement

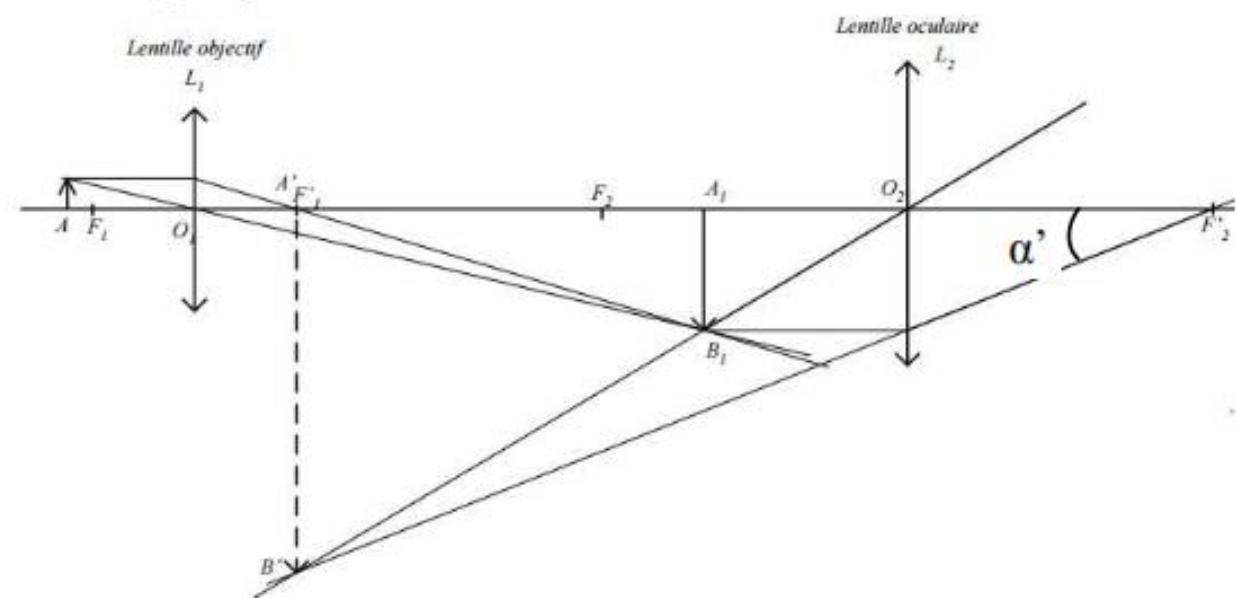
La notion de grossissement définie pour la loupe est également valable pour le microscope. Le grossissement  $G$  est défini par la relation suivante :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$



$\alpha$  : angle sous lequel est vu l'objet

$\alpha'$  : angle sous lequel est observé l'image par l'œil



## Le grossissement commercial

Le grossissement commercial  $G_c$  est défini comme étant le grossissement que l'obtient lorsque l'objet est placé à la limite de la vision nette c'est-à-dire au point appelé punctum proximum (PP) situé à la distance  $d = 25$  cm. C'est le grossissement commercial qui est indiqué sur les instruments d'optique.

$$G_c = \frac{P_i}{4}$$

## La puissance

La puissance P est définie par la relation suivante :

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

$\alpha'$ : angle sous lequel est observé l'image par l'œil exprimé en radian (rad).

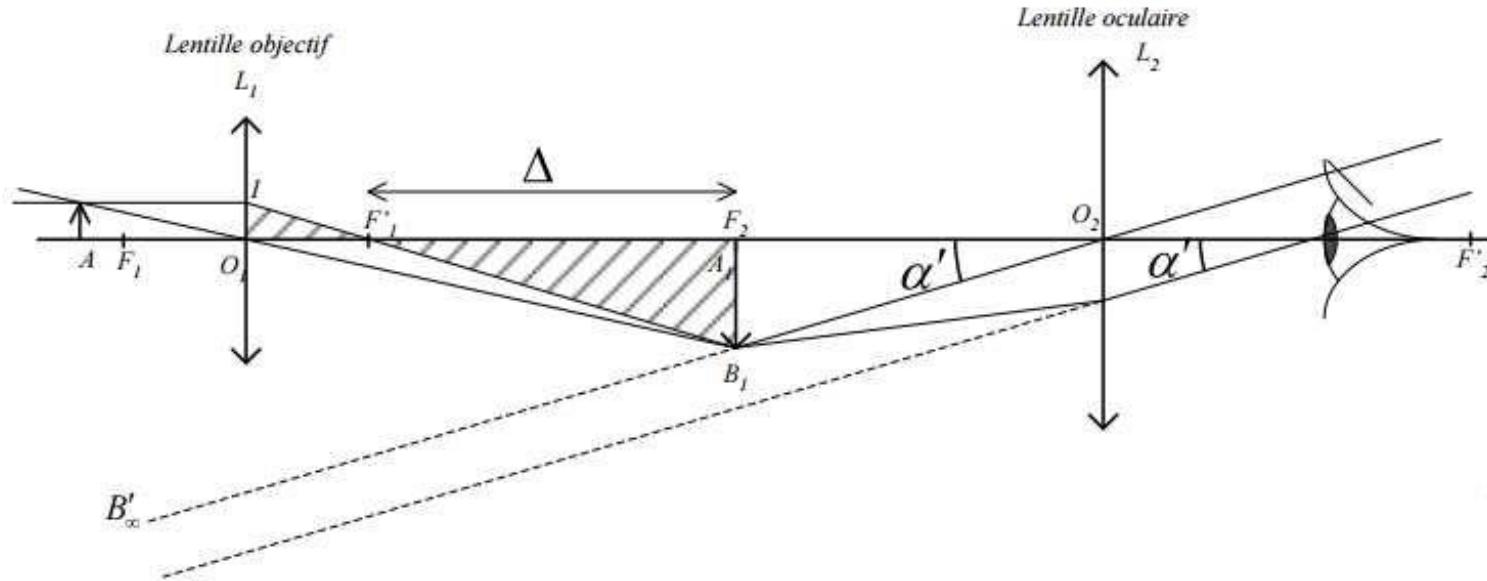
AB : longueur de l'objet exprimée en mètre (m).

P : puissance exprimée en dioptrie ( $\delta$ ).

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\alpha'}{A_1 B_1} \times \frac{A_1 B_1}{AB} = P_2 \gamma_1$$

La puissance d'un microscope est égale au produit de la puissance  $P_2$  de l'oculaire par le grandissement  $\gamma_1$  de l'objectif :  $P = P_2 \times \gamma_1$ .

## La puissance intrinsèque



La puissance intrinsèque correspond au cas où l'image  $A'B'$  est à l'infini ; l'image intermédiaire  $A_1B_1$  se forme alors au foyer objet  $F_2$  de l'oculaire.

Dans ce cas, l'expression de la puissance intrinsèque est :  $P_i = \frac{\Delta}{f'_1 f'_2}$

La puissance intrinsèque du microscope ne dépend que des caractéristiques optiques du microscope.

## **Le grossissement de microscope**

le grossissement de microscope est donné par la relation suivante:

$$\gamma = \gamma_{\text{objectif}} \cdot \gamma_{\text{oculaire}}$$

## Pouvoir de résolution

Deux points A et B peuvent être vu séparés, à travers le microscope, à condition que l'angle sous lequel est vu l'image des deux points soit supérieur à  $3 \times 10^{-4}$  rad.

C'est le pouvoir de résolution du microscope.

Le pouvoir de résolution du microscope **ne dépend que du grossissement commercial.**

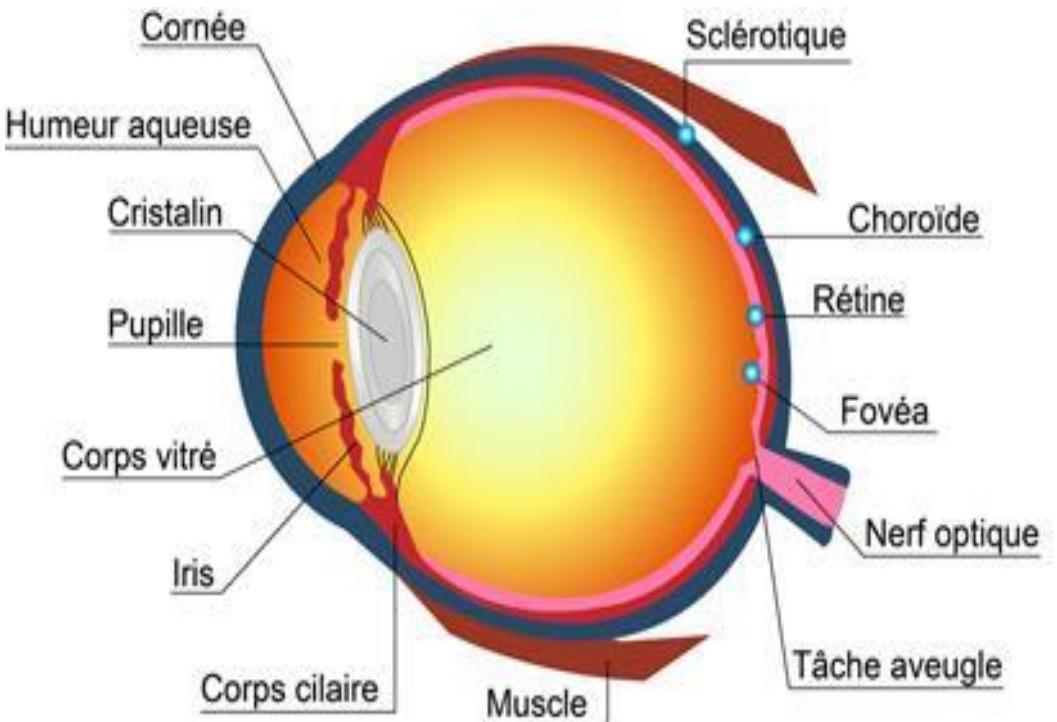
Cependant, on ne peut pas augmenter le pouvoir de résolution du microscope en augmentant le grossissement commercial. A partir d'un certain grossissement (de l'ordre de 1500), les phénomènes de diffraction ne sont plus négligeables et ils limitent le pouvoir de résolution des microscopes.

D'autres techniques, comme le microscope électronique, permettent d'obtenir un meilleur pouvoir de résolution.

L'œil

## L'œil humain

L'œil, également appelé globe oculaire, correspond à l'organe de la vue, captant le signal lumineux avant que l'information ne soit réinterprétée par le cerveau et transformée en formes et en couleurs. Il se compose de différentes régions lui permettant d'assurer sa fonction, de la cornée jusqu'à la rétine.



## Description de l'œil

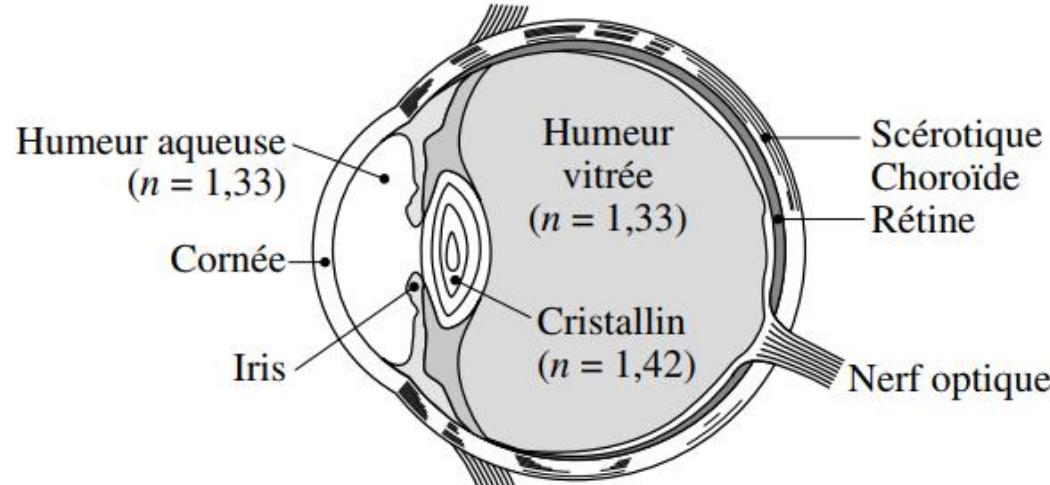


Schéma de l'œil humain.

**Cornée:** Membrane transparente directement en contact avec l'extérieur.

• **Humeur aqueuse:** Liquide transparent, il maintient la pression et la forme du globe oculaire. Son indice de réfraction est de **1.33**.

• **Iris:** Diaphragme qui permet de contrôler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. Son pigment détermine la couleur de l'œil.

• **Pupille:** Orifice central de l'iris se comportant comme un diaphragme. Son diamètre varie en fonction de la luminosité.

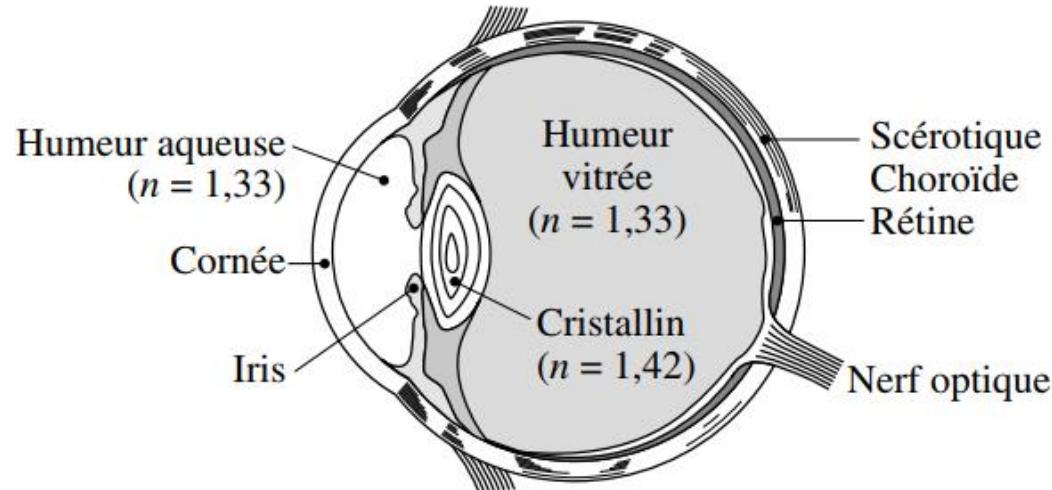
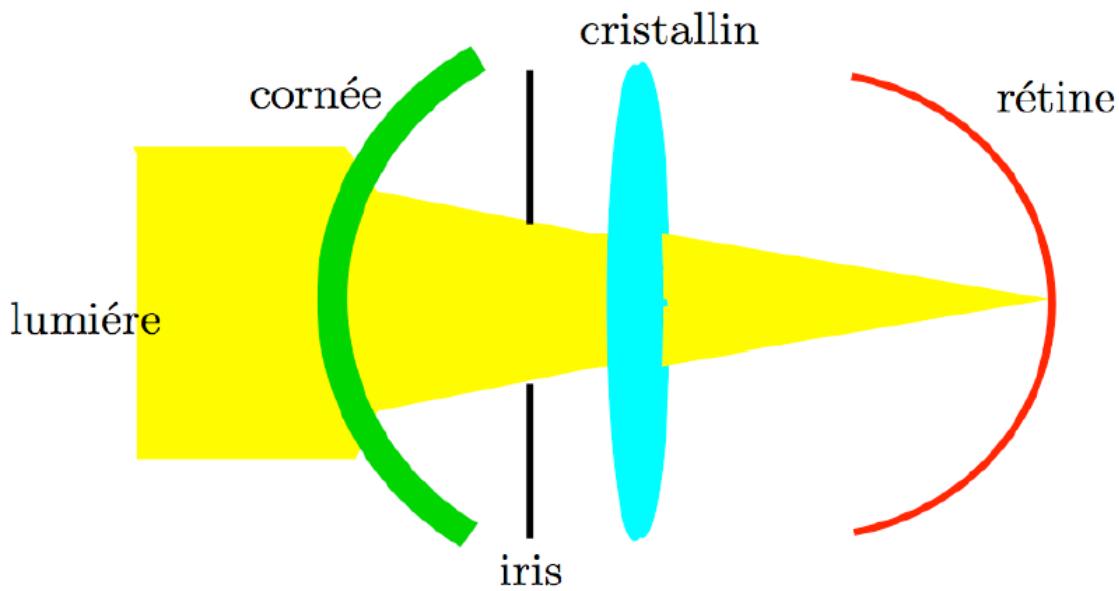


Schéma de l'œil humain.

- **Cristallin:** Lentille effectuant la mise au point pour obtenir la netteté à toute distance. Son indice de réfraction est de **1.42**.
- **Humeur vitrée:** Liquide gélatinieux qui donne à l'œil sa forme et sa consistance. Son indice de réfraction est de **1.33**.
- **Rétine:** Partie sensible de l'œil sur laquelle est détectée l'information lumineuse.
- **Nerf optique:** Il est constitué d'environ un million de fibres et a pour rôle de transmettre l'image rétinienne au cerveau.

## Biophysique de la vision



Les rayons lumineux pénétrant dans l'œil humain traversent quatre dioptres : face antérieure et face postérieure de la cornée, face antérieure et face postérieure du cristallin.

Lors de la traversée de chaque dioptre, ils subissent une réfraction parfaitement définie par les lois de Descartes. Le trajet d'un rayon lumineux dans l'œil est donc parfaitement déterminable en appliquant les lois de Descartes aux quatre réfractions qu'il va subir.

## Pouvoir de résolution

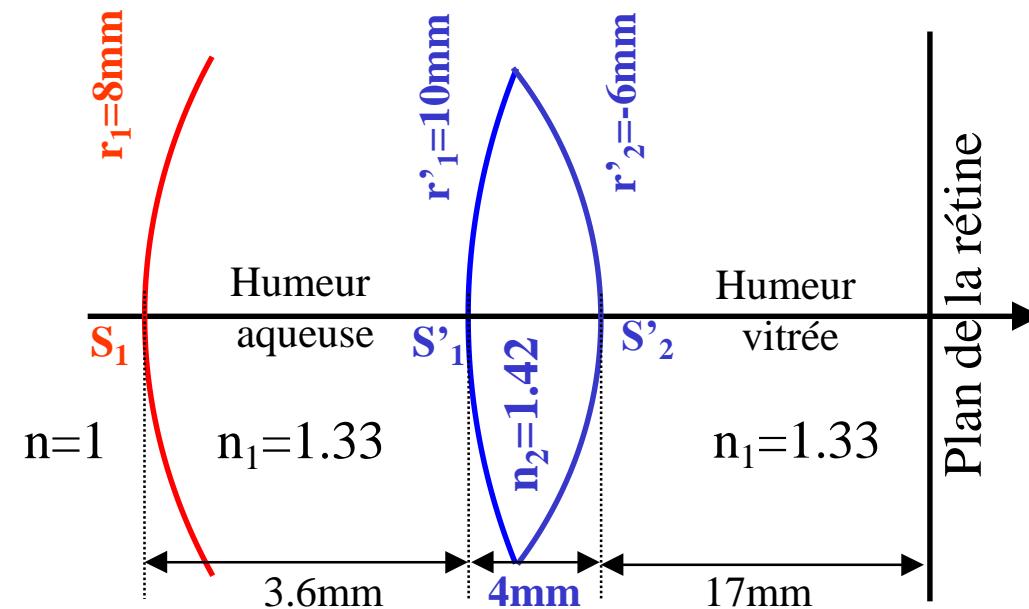
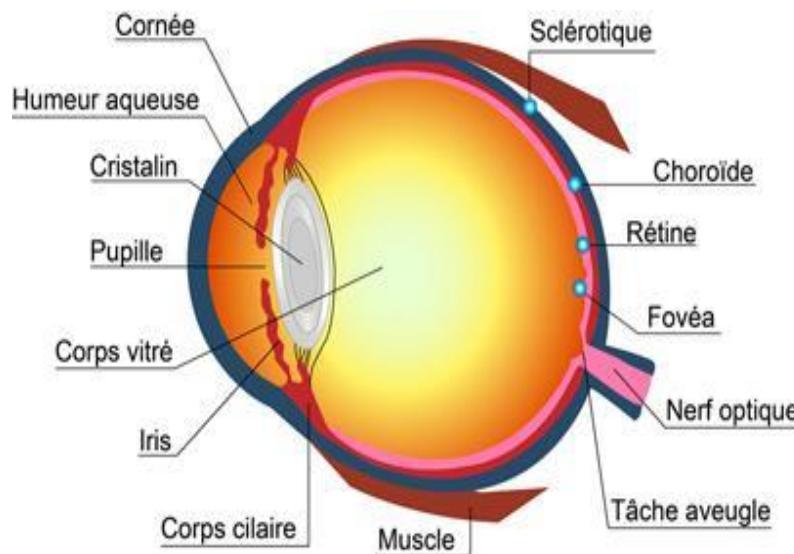
L'œil ne peut distinguer deux détails d'un objet que si leur image se forme sur deux cellules différentes de la rétine. Dans des conditions normales d'éclairement et de contraste,

le pouvoir de résolution de l'œil est d'environ 1' d'arc

$$1 \text{ minute} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ radian}$$

# Œil: schéma optique.

L'œil peut être assimilé à un système optique constitué d'un dioptre sphérique (la cornée) et d'une lentille mince (le cristallin). Il est alors constitué de 3 dioptres. Le schéma optique équivalent est le suivant:



La cornée peut être assimilée au dioptre sphérique suivant:

$$\frac{n_1}{S_1A'} - \frac{1}{S_1A} = \frac{n_1 - 1}{r_1} = V_1 = 41,25\delta$$

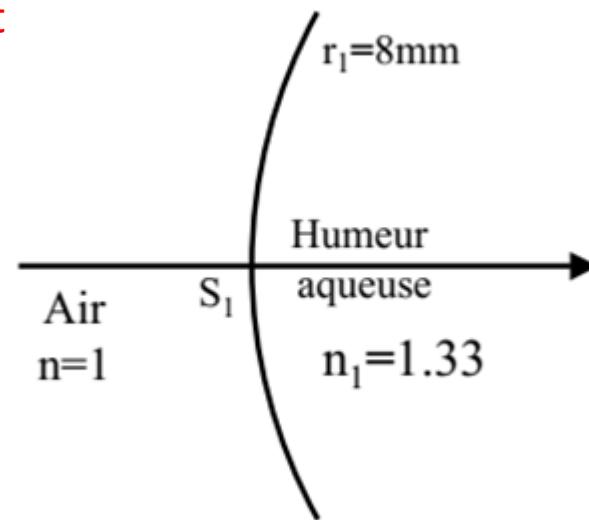
Dioptre convergent

Distance focale objet de la cornée :

$$f_1 = -\frac{1}{V_1} = \frac{r_1 n}{n_1 - n} = -24,4mm$$

Distance focale image de la cornée :

$$f'_1 = \frac{n_1}{V_1} = \frac{r_1 n_1}{n' - n} = 32,24mm$$



Le cristallin peut être assimilé à la lentille mince suivante:

Pour le dioptre  $D_1$

$$V'_1 = \frac{n_2 - n_1}{r'_1} = 9\delta > 0$$

Pour le dioptre  $D_2$

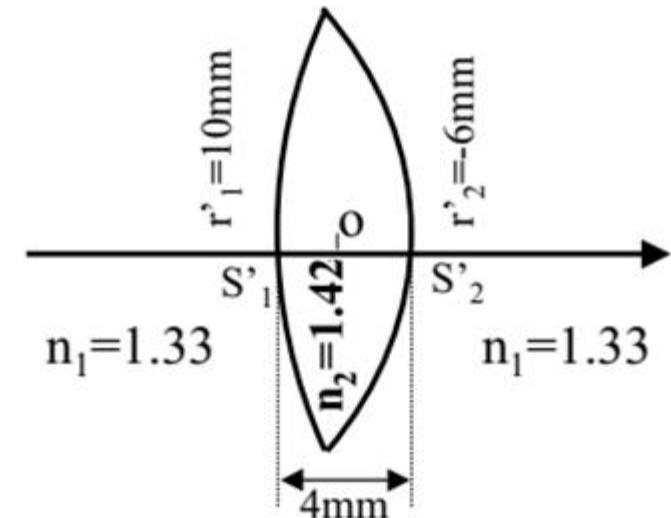
$$V'_2 = \frac{n_1 - n_2}{r'_2} = 15\delta > 0$$

La vergence des deux dioptres est donnée par la formule de Gullstrand

$$V = V'_1 + V'_2 - S'_1 S'_2 \frac{V'_1 V'_2}{n_2} = 23,62\delta > 0$$

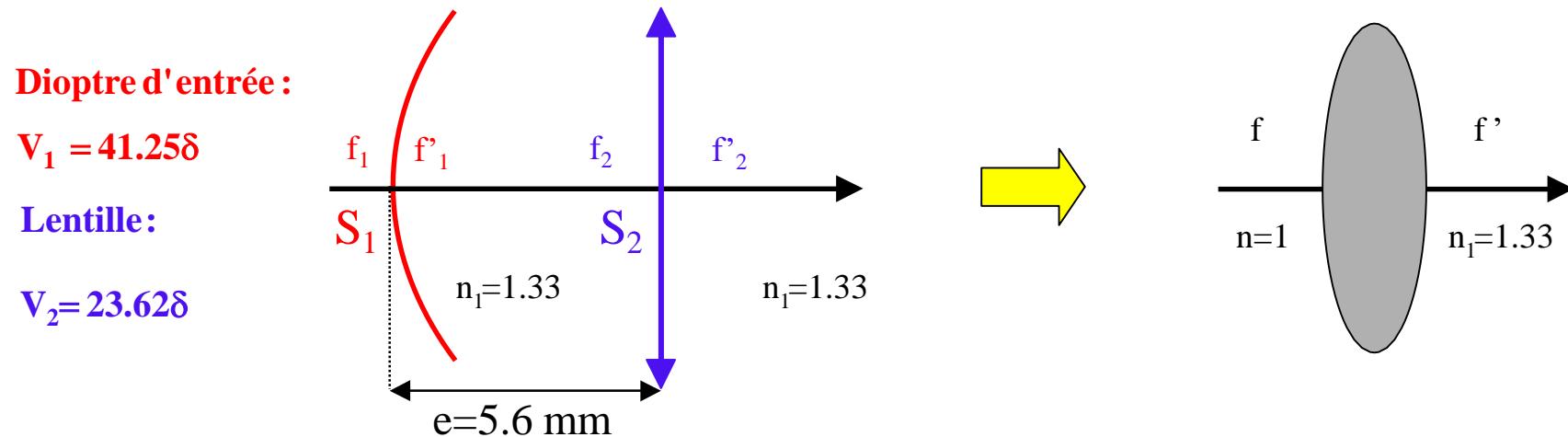
On remarque que  $S'_1 S'_2 \frac{V'_1 V'_2}{n_2} \ll V'_1 + V'_2$

On peut dire :



## Œil: Système optique équivalent

L'association de deux systèmes optiques de vergence  $V_1$  et  $V_2$  peut être assimilée à un nouveau système optique de vergence.



La nouvelle vergence est donnée par la formule de Gullstrand:

Système équivalent  $S$  de vergence  $V$ :

$$V = V_1 + V_2 - e \frac{V_1 V_2}{n_2}$$

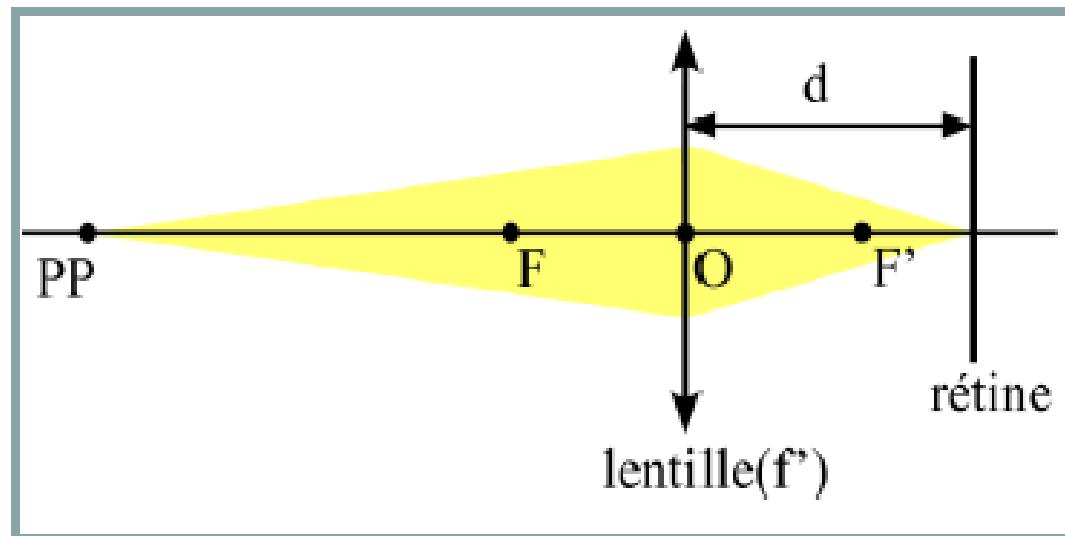
Soit:  $V = 64.87 - 4.1 = 60.77\delta \approx 60\delta$

$$f' = \frac{n_1}{V} = 21.88 \text{ mm} \quad \text{et} \quad f = -\frac{1}{V} = -16.45 \text{ mm}$$

## Ponctum Proximum :

C'est la distance la plus proche correspondant à une image nette.

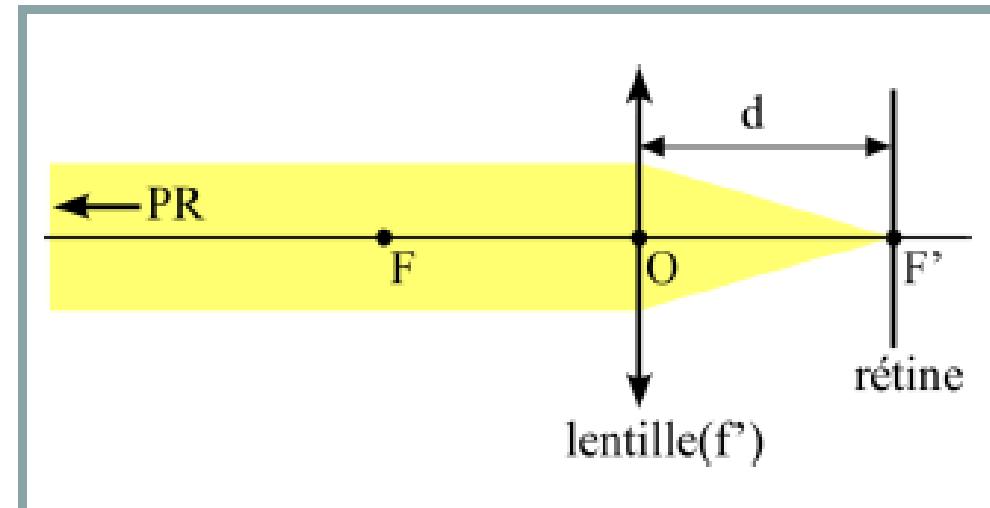
Oeil normal : P.P. = quelques cm (dépend des individus)



## Ponctum Remotum :

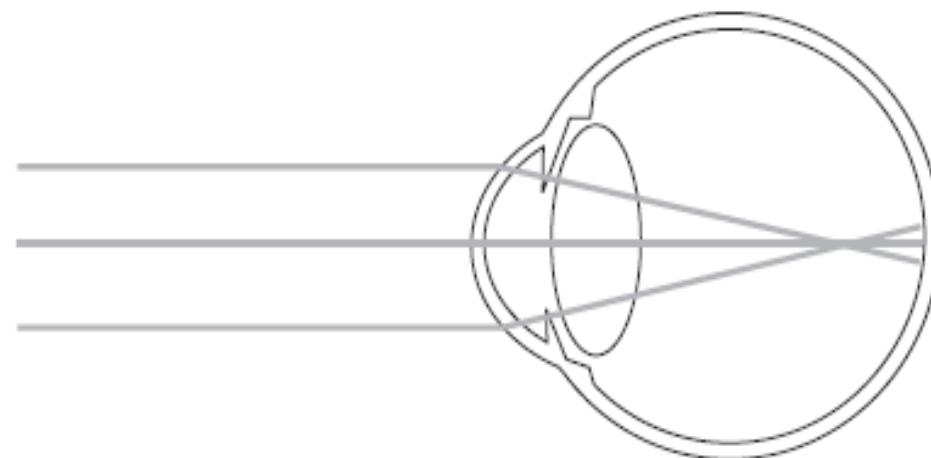
C'est la distance la plus éloignée correspondant à une image nette.

Oeil normal : P.R. = **infini**

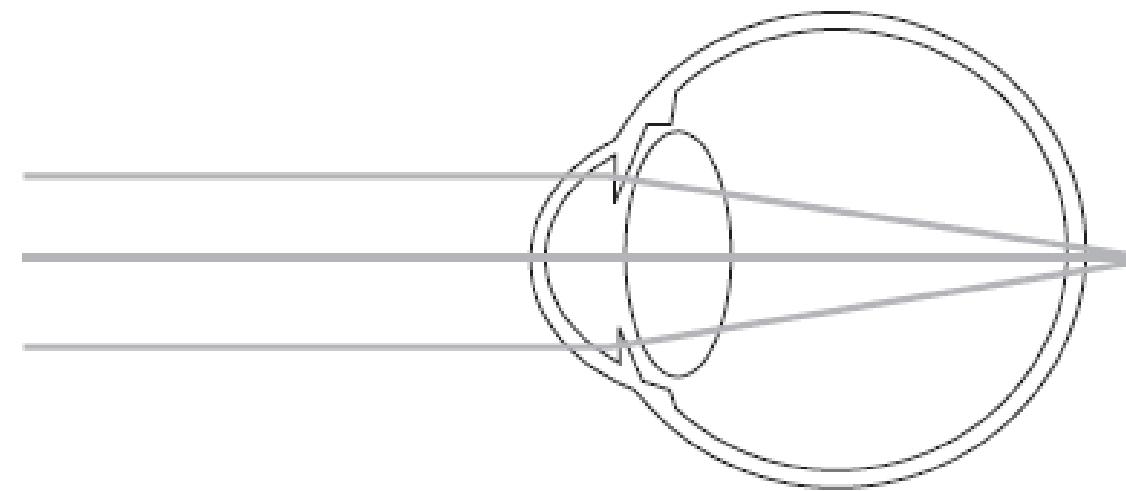


## Défauts de l'œil

- Si l'œil est trop convergent, il est myope : son PR n'est plus situé à l'infini mais à quelques mètres. L'œil myope voit flou de loin, par contre ça vision de près est meilleure car le PP est plus proche. Pour corriger la myopie, on associe à l'œil **une lentille divergente**.



- Si l’œil est trop divergent, il est hypermétrope : cet œil est capable de voir à l’infini mais en accommodant. Le PP est plus éloigné de l’œil (il n’est pas assez convergent), la vision de près est moins aisée. Pour corriger ce défaut, on associe à l’œil **une lentille convergente**.



- La presbytie est un défaut qui vient avec l'âge de l'organe, le cristallin n'est plus assez souple pour se déformer à la demande. La vision de près qui demande au cristallin de devenir plus convergent est altérée.
- L'astigmatisme provient de la forme de l'œil qui n'est pas tout à fait sphérique, ce qui diminue la qualité de la vision que ce soit de près ou de loin.

Punctum Remotum

P.R= $\infty$

Au repos

Œil emmétrope (normal)

Punctum Proximum

P.P=25cm



Accommodation  
maximale

Punctum Remotum

P.R finie

Œil myope

Punctum Proximum

P.P<25cm



Punctum Remotum

$$P.R=\infty$$

Avec accommodation

Œil hypermétrope

Punctum Proximum

$$P.P > 25\text{cm}$$



Punctum Remotum

$$P.R=\infty$$

Au repos

Œil presbyte

Punctum Proximum

$$P.P > 25\text{cm}$$

