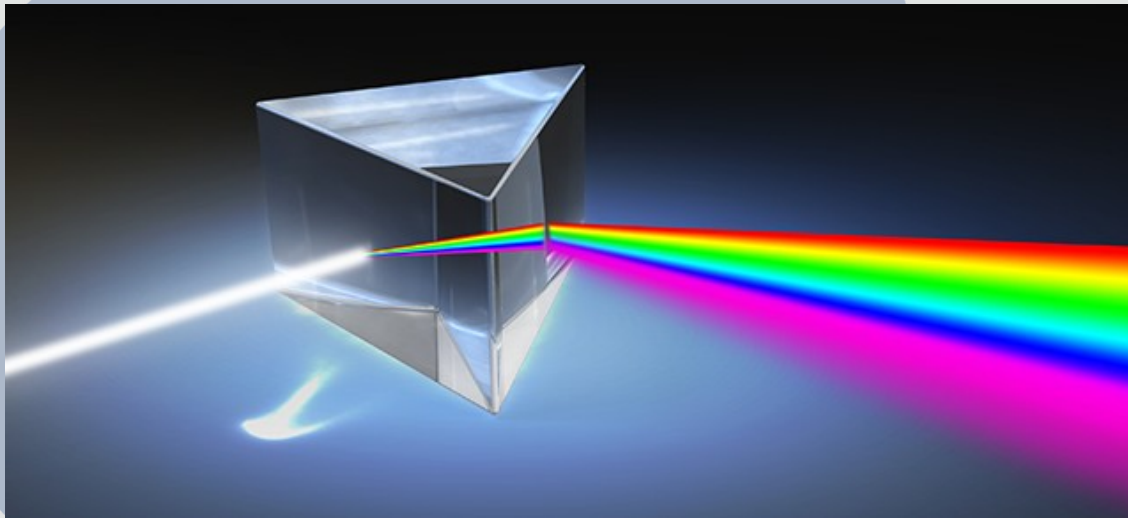


# Panorama sur la Physique

## Chapitre 3 - Optique : l'étude de la lumière



- Chapitre 1 - Introduction
- Chapitre 2 - Introduction à la pensée scientifique
- **Chapitre 3 - Optique : l'étude de la lumière**
- Chapitre 4 - Cinématique : la description du mouvement
- Chapitre 5 - Mécanique

## Approche physique de la lumière et de ses interactions

### Les sources de lumière

Certaines sources de lumière transforment une énergie de type électrique, chimique ou thermique en énergie lumineuse. Ces **sources** sont dites **primaires** car elles sont à l'origine de cette transformation comme dans le cas de l'ampoule électrique ou du soleil.

D'autres **sources** sont dites **secondaires** (ou objets éclairés) car elles ne font que réémettre la lumière qu'elles reçoivent comme dans le cas de la Lune ou des planètes qui sont des objets éclairés par le soleil.

Les sources lumineuses sont toujours étendues.

### Les milieux de propagation

Entre la source et le récepteur, la lumière se propage dans des milieux différents  
La lumière se propage aussi dans le vide.

vide, air, eau ...

## Approche physique de la lumière et de ses interactions

### Les récepteurs de lumière

Corps entre l'œil et un objet lumineux :

*lentilles*



- **Transparent** s'il n'altère pas la visibilité de l'objet lumineux : c'est le cas du verre.
- **Translucide** s'il altère la visibilité de l'objet : c'est le cas du verre dépoli.
- **Opaque** si l'on ne peut voir l'objet au travers : c'est le cas du bois, du métal.
- **Opaque absorbant** si l'énergie lumineuse reçue est totalement transformée en une autre énergie (thermique par exemple) : c'est le cas des matériaux de couleur noire.
- **Opaque diffusant** s'il réémet la lumière dans toutes les directions. Il peut éventuellement absorber une partie de la lumière. C'est le cas le plus général.
- **Opaque réfléchissant** si la lumière est renvoyée dans une direction particulière : c'est le cas des miroirs.

*miroirs*



La lumière véhicule information et énergie sans déplacement de matière, depuis une source vers un récepteur, au travers d'un milieu qui peut être le vide.

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Approche historique de la lumière et de ses modèles

**1621 - SNELL VAN ROYEN (1580-1626)** : astronome et mathématicien hollandais. Découvre la loi de la réfraction.

**1637 – René DESCARTES (1596-1650)** : philosophe et scientifique français. Formalise les lois de la réflexion et réfraction. Publication d'un ouvrage "Dioptrique". Le problème de stigmatisme est posé et Descartes donne une théorie de l'arc-en-ciel mais ignore la complexité de la lumière blanche, il ne peut pas expliquer la coloration de l'arc-en-ciel.

**1657 - Pierre de FERMAT (1601-1665)** : astronome et mathématicien français. Il justifie les lois de l'optique géométrique dans le cadre d'un formalisme variationnel. Il introduit la notion de chemin optique qui permet d'énoncer le Principe de Fermat selon lequel la lumière met un temps minimal pour aller d'un point à l'autre.

**1704 - NEWTON** : publication d'un traité d'optique dans lequel il explique la complexité de la lumière blanche. Celle-ci serait formée de corpuscules : grains de nature imprécise lancés à toute vitesse par l'émetteur. Il explique ainsi la coloration de l'arc-en-ciel.

**1870 - MAXWELL (1831-1879)** : physicien écossais. Elabore une théorie permettant d'unifier l'optique et les phénomènes électromagnétiques. Dans sa théorie électromagnétiques, les ondes lumineuses (visibles ou invisibles) sont constituées d'un champ électrique perpendiculaire à un champ magnétique avec des intensités variant périodiquement dans l'espace et dans le temps. Désormais, la lumière est considérée comme une onde électromagnétique se propageant à la vitesse de  $3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  *dans le vide*.

**1905 - EINSTEIN (1879-1955)** : physicien allemand. Explore la notion de photon pour interpréter l'effet photoélectrique. Des corps convenablement illuminés expulse des photons. Or il faut fournir énormément d'énergie à un atome pour lui arracher des électrons. Par ailleurs cette extraction se fait sur des niveaux d'énergie discontinus. L'apport énergétique de la lumière se fait sous forme corpusculaire (notion de photons). L'extraction étant obligatoirement continue si la lumière était uniquement de nature ondulatoire. Grâce à l'apport de la mécanique ondulatoire, **Louis DE BROGLIE (1892-1987)**, en **1924**, a concilié les deux aspects : corpusculaire et ondulatoire.

L'invention du laser *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (**1960**), de l'holographie imaginée en **1949** par **Dennis GABOR (1900-1979)**, n'a donné des résultats satisfaisants qu'en 1960 grâce aux lasers qui fournissent une lumière cohérente), l'utilisation de fibres optiques (400 000 communications téléphoniques en même temps sur la même fibre, 5Gbits/s) sont quelques uns des aspects de l'optique moderne.

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Approche historique de la lumière et de ses modèles

### Modèles corpusculaire et ondulatoire

*onde et corpuscule*  
↑

Ces deux théories ne s'opposent pas mais se complètent : la lumière a une nature duale ; les ondes ont une signification "statistique" : l'intensité de l'onde mesure la probabilité de présence des photons.

### Modèle ondulatoire : ondes électromagnétiques

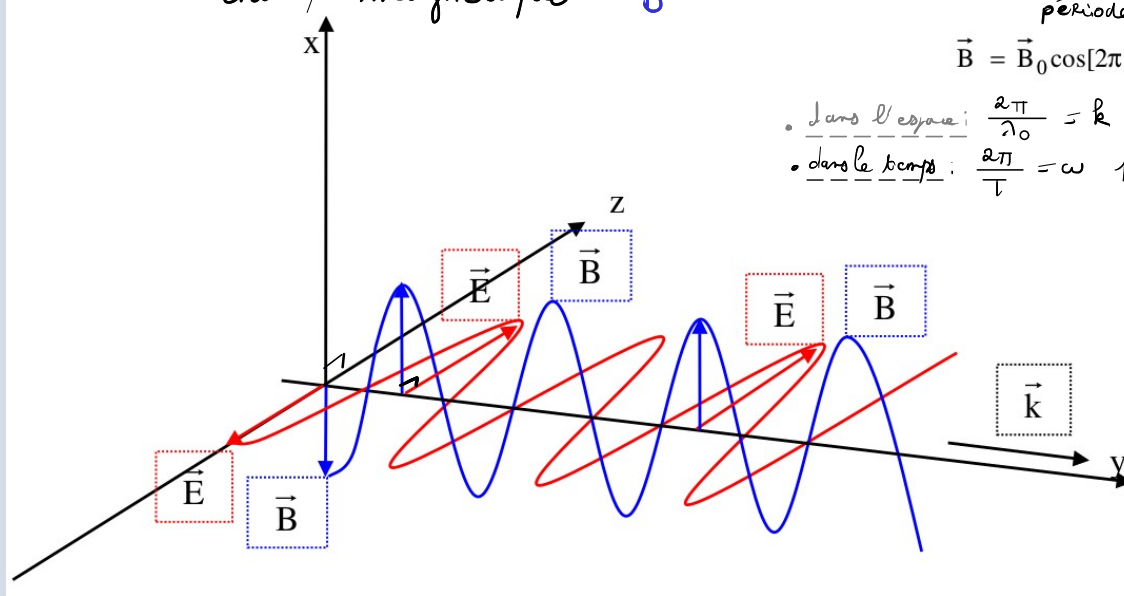
*lumière // champ électrique  $\vec{E}$   
champ magnétique  $\vec{B}$*

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda_0})] : \text{polarisé suivant (Oz)}$$

*période  $T$  — longueur d'onde  $\lambda_0$*

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cos[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda_0})] : \text{polarisé suivant (Ox)}$$

- dans l'espace :  $\frac{2\pi}{\lambda_0} = k$  ,  $\lambda_0$  : "période spatiale"*
- dans le temps :  $\frac{2\pi}{T} = \omega$  pulsation,  $T$  ; période*





# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Approche historique de la lumière et de ses modèles

Dans le cas du vide, nous pouvons écrire (**théorie de Maxwell**) que ces champs électriques et magnétiques se déplacent avec la célérité  $c$  telle que :

$$\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1 \Leftrightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$\epsilon_0$  : constante liée à  $\vec{E}$   
 $\mu_0$  : " " " "  $\vec{B}$

En première lecture, nous admettons que le champ électrique associé à une onde lumineuse **monochromatique** de fréquence  $\nu$  se propageant dans le vide selon l'axe (Oz), est transversal et peut se mettre sous la forme suivante :

$$E_M(z,t) = E_m \cos[2\pi\nu(t - \frac{z}{v})]$$

Pour une radiation électromagnétique monochromatique considérée dans le vide, nous obtenons la longueur d'onde associée par la relation :

$c$  : célérité dans le vide

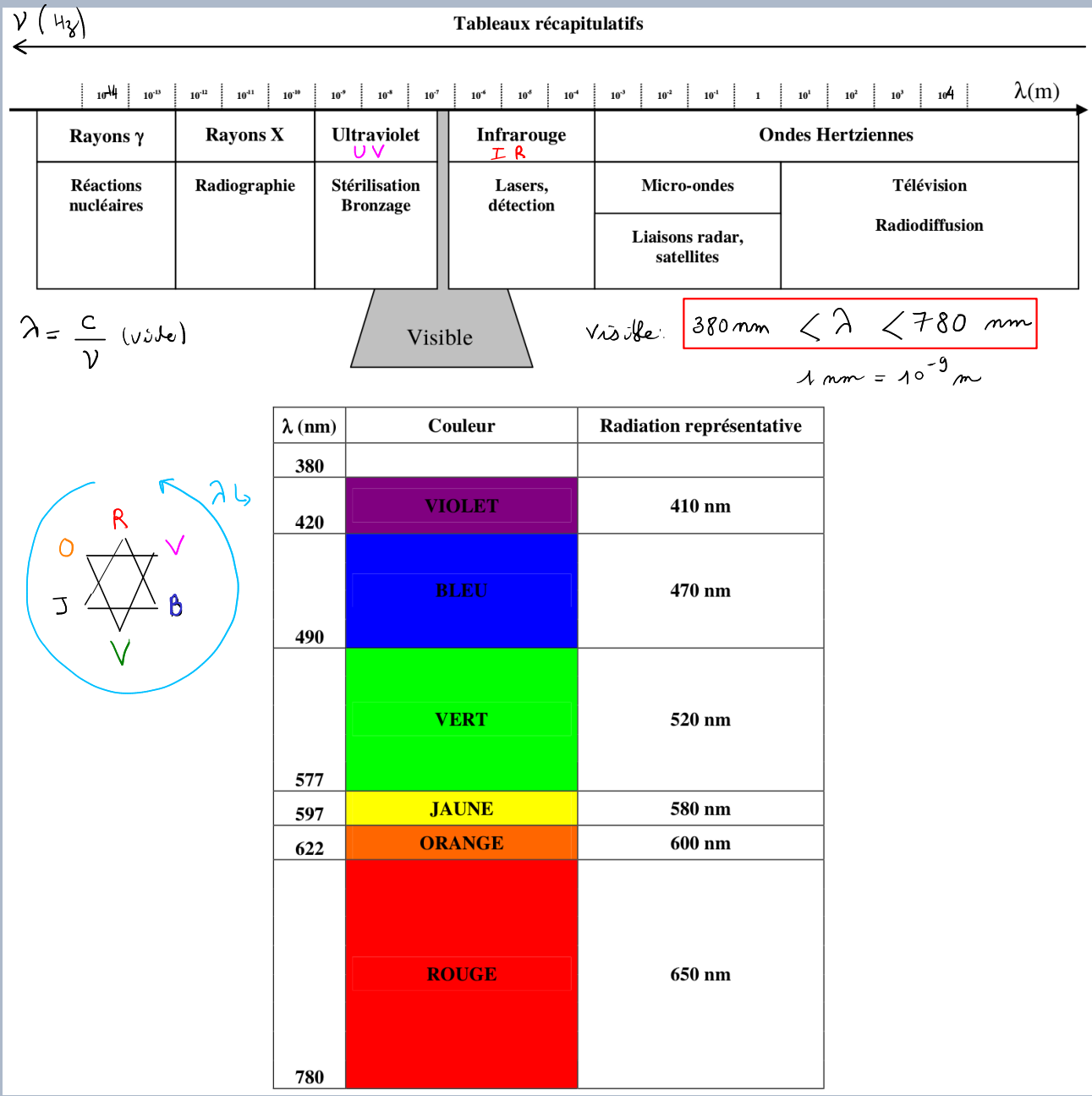
$$\lambda = c.T = \frac{c}{\nu}$$

fréquence :  $\nu = \frac{1}{T}$

$[\nu] = T^{-1}$   
 $[c.T] = (L.T^{-1}) T = L$   
 or  $[\lambda] = L$

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Approche historique de la lumière et de ses modèles





# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Approche historique de la lumière et de ses modèles

### Propagation de la lumière dans les milieux matériels transparents

Les hypothèses sur l'onde lumineuse et le milieu où elle se propage sont les suivantes :

- Le milieu est linéaire, homogène, isotrope et transparent. *(« m̄ lieu ») = milieu p.h.i.(t)*
- L'onde qui se propage est une onde plane

On appelle indice de réfraction  $n$  d'un milieu le rapport de la célérité  $c$  d'une onde lumineuse monochromatique dans le vide à sa célérité  $v$  dans le milieu considéré.

On a donc :

$$v < c$$

*air*

La longueur d'onde dans un milieu est :

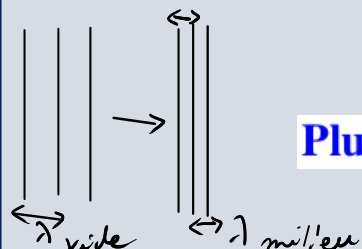
$$n = \frac{c}{v} \geq 1 \Rightarrow v = \frac{c}{n}$$

*vide* (pointing to c), *milieu* (pointing to v), *vide* (pointing to c in the fraction),  $[n] = 1$

$$\lambda_{\text{milieu}} = v \cdot T = \frac{c}{n} \cdot T = \frac{\lambda_{\text{vide}}}{n}$$

*periode* (pointing to T), *célérité dans le milieu* (pointing to v)

$$n \geq 1 : \lambda_{\text{milieu}} \leq \lambda_{\text{vide}}$$



**Un milieu matériel comprime donc les longueur d'onde.**

**Plus l'indice n est grand, plus la vitesse de la lumière dans le milieu est faible.**

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Approche historique de la lumière et de ses modèles

### Dispersion de la lumière

Les milieux transparents sont **dispersifs** : la vitesse de l'onde lumineuse dépend de la fréquence de l'onde.

Ainsi, dans un même milieu matériel, la célérité  $v$  de la lumière diminue lorsque sa fréquence augmente.  $\lambda_0 = v T = \frac{v}{\nu}$ ,  $\lambda_0$  fixe

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

L'indice d'un verre optique est d'autant plus faible que la longueur d'onde est grande.

Nombre d'Abbe :

$$\eta = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

$\lambda_D = \lambda_J = 589,3$  nm pour la radiation jaune

$\lambda_F = \lambda_B = 486,1$  nm pour la radiation bleue,

$\lambda_C = \lambda_R = 656,3$  nm pour la radiation rouge.

Le nombre d'Abbe caractérise le pouvoir dispersif d'une substance; plus ce nombre est élevé, moins le milieu est dispersif.

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Propagation rectiligne dans un M.H.T.I. et Rayon lumineux

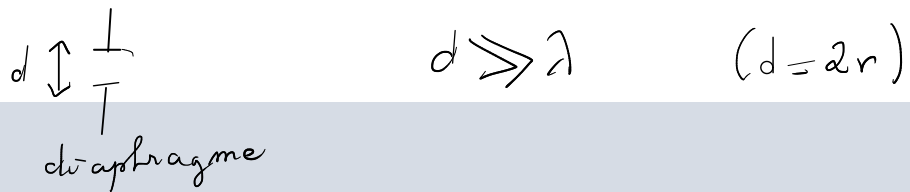
### Hypothèse fondamentale de l'Optique Géométrique

**La lumière se propage rectilignement dans un MHTI**

*milieu transparent isotrope homogène*

### Approximation de l'Optique Géométrique

La loi de propagation rectiligne est une loi limite dans le cas de longueur d'ondes faibles devant les dimensions des diaphragmes (limitant les faisceaux lumineux) des systèmes optiques.



### Notion de rayon lumineux

La notion de rayon lumineux est illustrée par un pinceau lumineux cylindrique obtenu avec un petit diaphragme (mais  $r \gg \lambda$ ).

Par conséquent, le rayon lumineux caractérise le transport "rectiligne" de l'énergie lumineuse dans un MHTI.

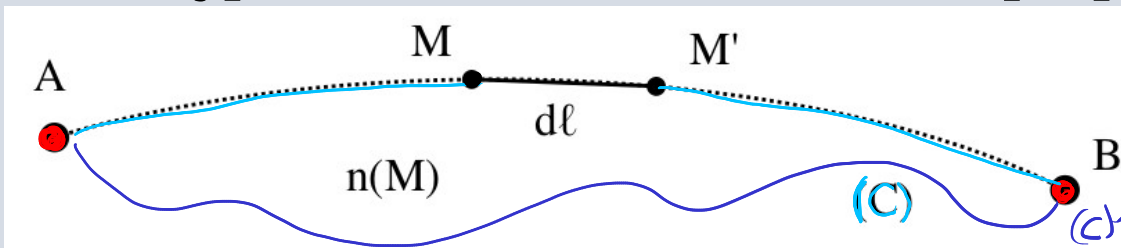


# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Propagation rectiligne dans un M.H.T.I. et Rayon lumineux

### Interprétation de l'hypothèse fondamentale de l'Optique Géométrique

$M, M'$  "très proches"  
 $d\vec{l}$ : déplacement élémentaire



plusieurs chemins (C) possibles pour aller du point A à B

donc

$$\vec{v} = \frac{d\vec{l}}{dt}$$

indice du milieu :

Dans un milieu où l'indice  $n$  varie continûment (cas le plus général), le chemin optique  $\delta$

(AB) est défini par :  $\delta = \int_{(C)} n(M) dl$

$n = \frac{c}{v}$       $\delta = \int_{(C)} n dl$

$$\begin{aligned} (AB) &= \int_A^B \frac{c}{v} dl = \int_A^B c dt = c \cdot \tau_{AB} \\ &= c \int_A^B 1 dt = c [t]_{t_A}^{t_B} = c(t_B - t_A) \end{aligned}$$

Ainsi, le **chemin optique** représente la **distance** que franchit la lumière dans le vide (milieu de référence), dans le même temps  $\tau_{AB}$  qu'elle met à parcourir AB dans un milieu quelconque.

Donc, le chemin effectivement suivi par la lumière, dans un MHTI, correspond au trajet minimal (cette propriété est connue sous le nom de **Principe de Fermat**). = *ligne droite*

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

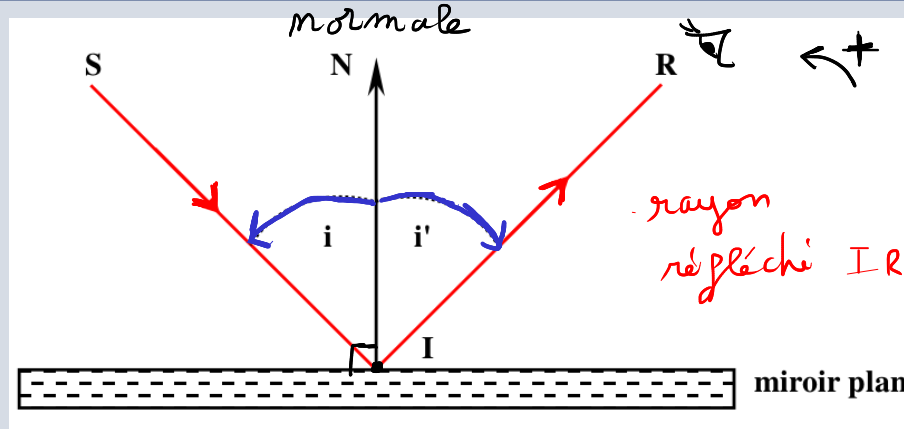
## Loi de la réflexion : 1<sup>ère</sup> loi de Descartes

**Énoncé** S : source

I : point d'incidence

R : récepteur

1<sup>ère</sup> loi :



• sens trigonométrique

angles orientés :

$$i > 0$$

$$i' < 0$$

(angle : de la normale

au rayon)

- Le rayon IR appartient au plan d'incidence, défini par le rayon incident SI et la normale IN au miroir
- L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :  $|i'| = |i|$  en valeur absolue

$$i' = -i$$

### Conséquences :

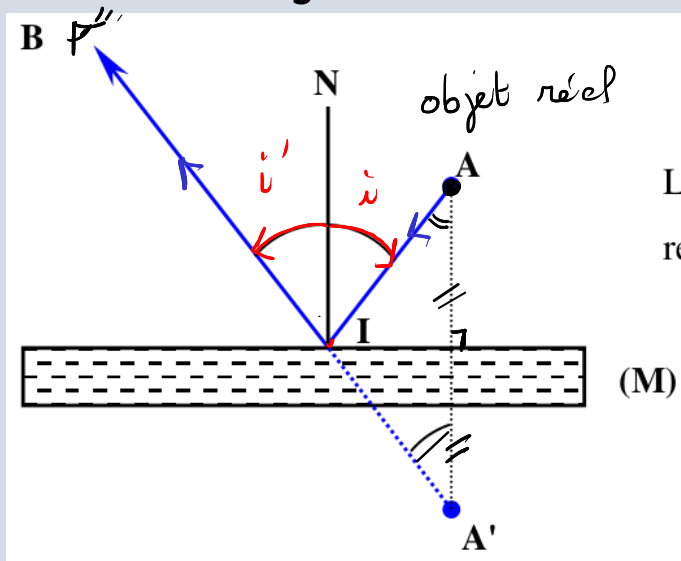
*Loi du retour inverse de la lumière*

Le trajet SIR, suivi par la lumière, est indépendant du sens de parcours (les rayons SI et IR étant symétriques par rapport à la normale IN)

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Loi de la réflexion : 1<sup>ère</sup> loi de Descartes

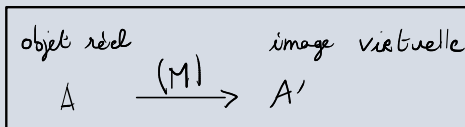
### Notions d'objet réel et d'image virtuelle



Systeme optique :  $\Sigma = (M)$  miroir

AI : rayon incident et IB : rayon réfléchi

Le rayon réfléchi IR semble provenir du point A' symétrique de A par rapport à (M); A' représente l'image dite "virtuelle" de A, à travers le miroir plan.

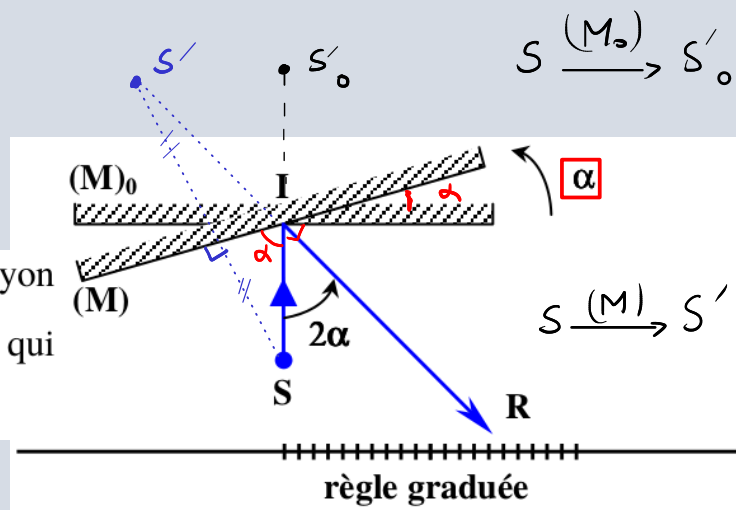


$$i = -i'$$

### Rotation d'un miroir plan

Lorsqu'un miroir plan (M) tourne d'un angle  $\alpha$ , le rayon réfléchi IR, associé au rayon incident SI, est dévié de  $2\alpha$ . (IR est symétrique de IS par rapport à la normale IN qui vient de tourner de l'angle  $\alpha$ )

cf (exemples après)



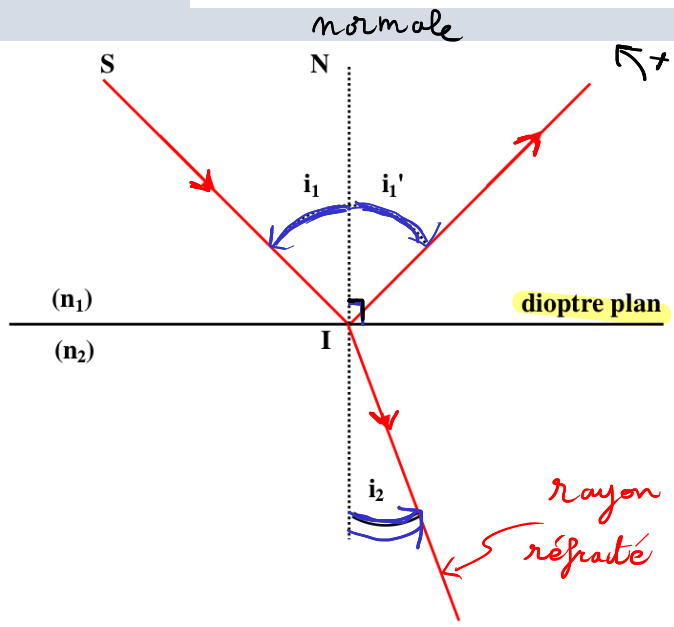


# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Loi de la réfraction : 2<sup>ème</sup> loi de Descartes

### Énoncé

Un dioptre plan désigne une surface plane séparant deux MHTI d'indices différents  $n_1$  et  $n_2$ .



1<sup>ère</sup> loi de Descartes :  $i_1 = -i_1'$   
 2<sup>ème</sup> loi de Descartes :

- le rayon réfracté se trouve dans le plan d'incidence (défini par SI et IN)
  - il existe un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction, égal à l'inverse du rapport des indices correspondants :
- $$\frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{n_2}{n_1} = \text{constante} \iff n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

angles orientés :  $i_1 > 0, i_1' < 0$   
 $i_2 > 0$   
 $i_1 \in [0, \frac{\pi}{2}]$ , idem  $i_1'$  et  $i_2$  (schéma)

si  $i_1 \ll 1, i_1 \approx 0$  :  
 $\sin i_1 \approx i_1$  (rad)

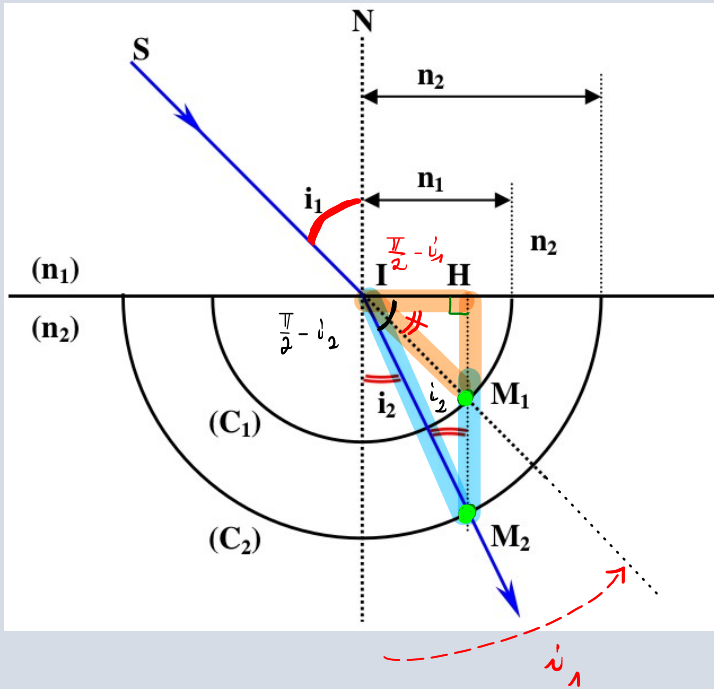
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} = \text{constante} \quad (\text{loi de Képler})$$

pour les petits angles

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Loi de la réfraction : 2<sup>ème</sup> loi de Descartes

### Construction de Huygens et interprétation



$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2) = IH$ ,  $IM_2$  indique la **direction du rayon réfracté**

- dans le milieu 2 : + tracer 2 cercles de rayon  $m_1$  et  $m_2$
- $M_1$  : intersection entre  $SI$  et  $(C_1)$
- $H$  : hauteur issue de  $M_1 \rightarrow M_2$  sur  $(C_2)$
- donc  $IR$ , rayon réfracté = direction  $IM_2$

Le changement de direction du rayon lumineux correspond à un chemin optique (et à une durée du trajet) minimal, entre deux points donnés A et B des milieux  $n_1$  et  $n_2$ .

$$IHM_1 : \cos\left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) = \sin(i_1) = \frac{IH}{IM_1} = \frac{IH}{m_1}$$

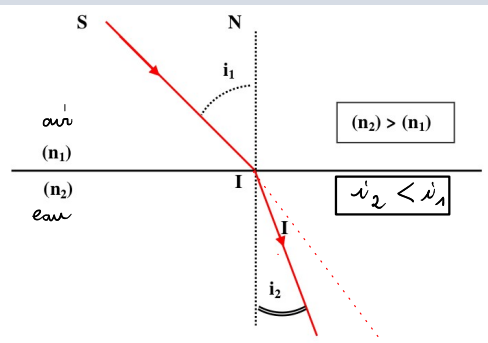
$$IHM_2 : \sin(i_2) = \frac{IH}{IM_2} = \frac{IH}{m_2} \quad \text{donc} \quad IH = m_1 \sin i_1 = m_2 \sin i_2$$

### Conséquences : réfraction limite - réflexion totale

Si  $n_2 > n_1$ , le milieu 2 est dit "plus réfringent" que le milieu 1, sinon il est "moins réfringent".

# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## Loi de la réfraction : 2<sup>ème</sup> loi de Descartes



Puisque  $\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i_1)$ , **le milieu 2 supposé plus réfringent, rapproche le rayon lumineux de la normale ( $i_2 < i_1$ ).**

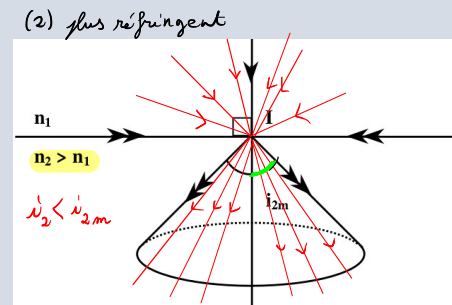
### Passage d'un MHTI (1) vers un MHTI (2) plus réfringent : *réfraction limite*

En conclusion, **lors d'un passage d'un milieu d'indice (1) vers un milieu d'indice (2) plus réfringent**, les rayons réfractés sont tous situés à l'intérieur d'une cône de réfraction, de demi-angle au sommet : l'angle  $i_{2m}$ , appelé **angle de réfraction limite** et égal à :

$n_2 > n_1$

$$i_{2m} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$$

$$\sin i_2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin i_1 \leq \left(\frac{n_1}{n_2}\right) < 1 \iff i_2 < i_{2m}$$



### Passage d'un MHTI (1) vers un MHTI (2) moins réfringent : *réflexion totale*

Il en résulte que **le passage d'un milieu d'indice (1) vers un milieu d'indice (2) moins réfringent** se manifeste par **une réflexion totale** du rayon incident sur le dioptre plan dans le cas où :

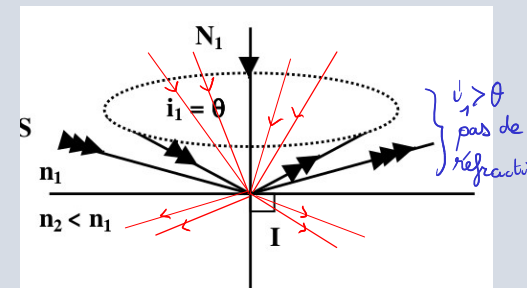
$n_2 < n_1$

$$\sin i_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \sin i_1 < 1 \text{ sinon pas de } i_2$$

$$\iff \sin i_1 < \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$i_1 < \theta = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$i_1 > \theta = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



# 3.1 Les modèles décrivant la lumière

## 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> lois de Descartes

### Exemples :

Un rayon lumineux issu de l'air, d'indice  $n_1 = 1,00$  arrive sur une étendue d'eau, d'indice  $n_2 = 1,33$ , avec un angle d'incidence  $i = 60^\circ$ .

- a. Calculer l'angle de réfraction  $j$ .
- b. Calculer la déviation angulaire  $D$  subie par le rayon.

Un faisceau de lumière parallèle tombe sur une lame à faces parallèles, d'épaisseur  $e$  d'indice  $n$  par rapport à l'air, sous un angle  $\alpha$  avec le plan de la lame. Il sort par la face inférieure après avoir subi 0 ou un nombre pair de réflexions à travers la lame

1. Calculer la différence de temps mis par deux rayons sortant de la lame dont l'un a subi deux réflexions intérieures de plus que l'autre pour atteindre un même plan perpendiculaire aux rayons émergents.

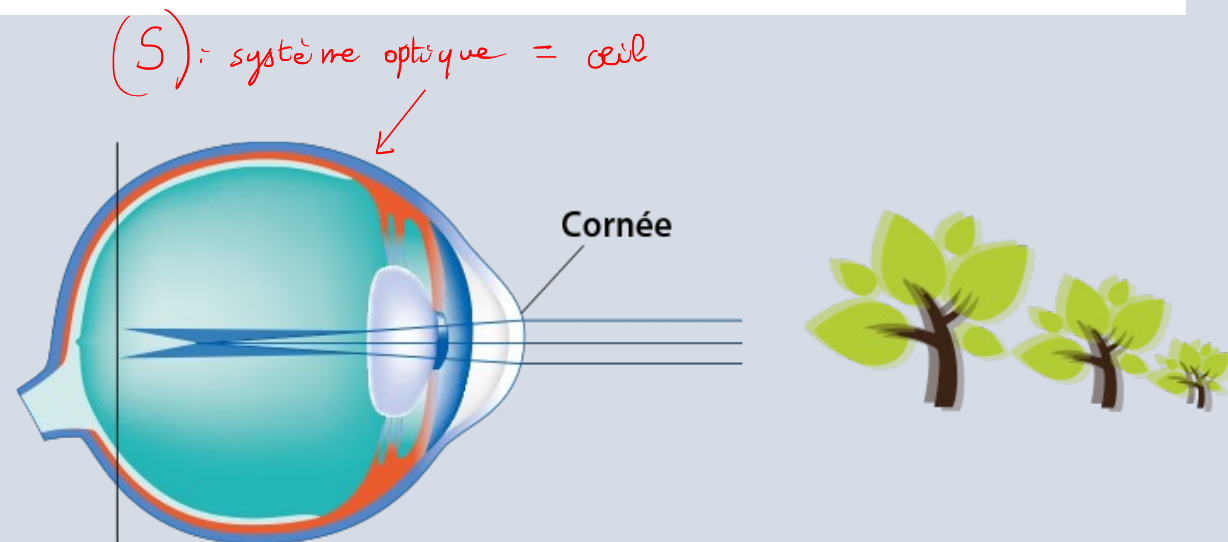
2. Quelle serait la longueur  $L$  que la lumière parcourrait pendant ce temps dans le vide ? Calculer  $L_0$  correspondant à l'incidence rasante. Exprimer  $L - L_0$  pour un angle  $\alpha$  très petit.

## 3.2 Optique géométrique

### Stigmatisme

L'image est le résultat d'une synthèse d'informations multiples réalisée par le cerveau.

L'image optique, ou image, est la reproduction que donne un système optique d'un objet lumineux.



# 3.2 Optique géométrique

## Notion de Point Objet et de Point Image

### Systeme optique

Un **systeme optique (S)** est un ensemble de milieux homogènes et transparents séparés par des dioptries ou par des miroirs.

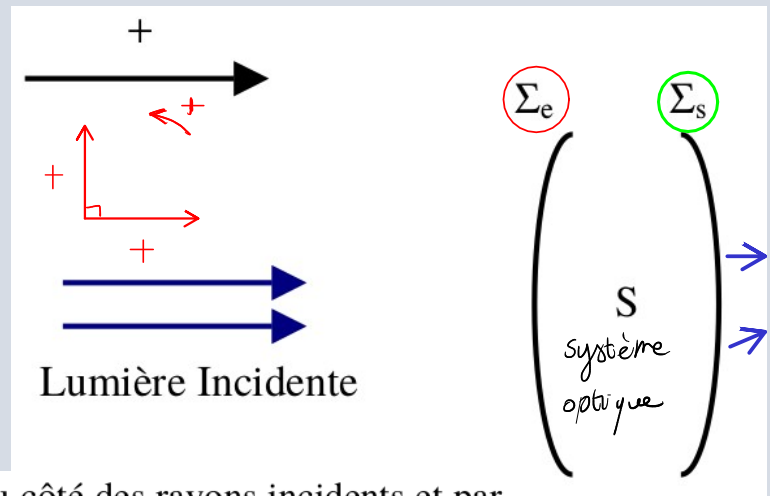
Un système optique est dit :

↳ **Dioptrique** : s'il ne comporte que des dioptries (*lentilles*)

↳ **Catoptrique** : s'il ne comporte que des miroirs

**Catadioptrique** : s'il comporte des dioptries et au moins un miroir

*Convention d'orientation de l'espace*



Un système optique est limité par une face d'entrée  $\Sigma_e$  située du côté des rayons incidents et par une face de sortie  $\Sigma_s$  située du côté des rayons émergents.



# 3.2 Optique géométrique

## Notion de Point Objet et de Point Image

### Rayon incident et rayon émergent

Un **rayon incident** est un rayon qui se dirige vers (S), dans le sens de la propagation de la lumière.

Un **rayon émergent** est un rayon qui s'éloigne de (S), dans le sens de propagation de la lumière.

### Point objet réel ou virtuel – Point image réel ou virtuel

Si le **faisceau incident** est un cône de sommet A, le **point A** est un **point objet** pour le système optique. Deux cas peuvent se présenter, le faisceau conique peut être :

**Divergent** : dans ce cas, le **point objet A** est dit **réel** (figure 3)

**Convergent** : dans ce cas, le **point objet A** est dit **virtuel** (figure 4)

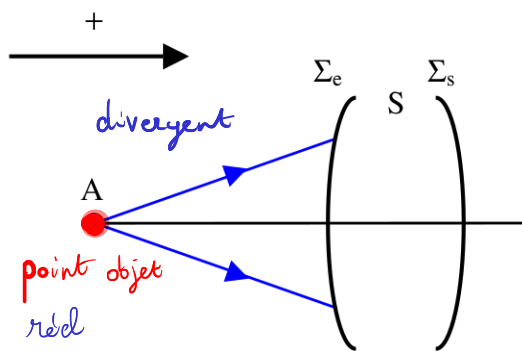


Figure 3

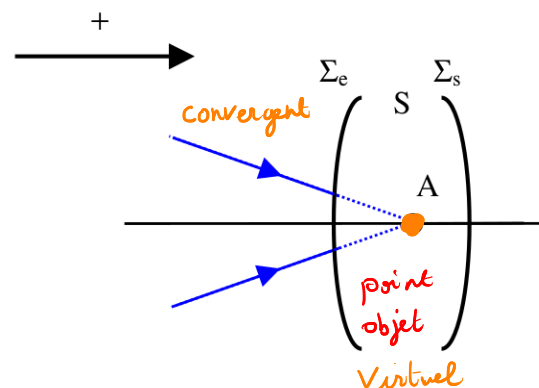


Figure 4

# 3.2 Optique géométrique

## Notion de Point Objet et de Point Image

Le point **A** est un point **OBJET** pour le système s'il se trouve à l'intersection de rayons lumineux **INCIDENTS** sur le système ou à l'intersection de leurs prolongements.

Si le faisceau émergent est un cône de sommet **A'**, le point **A'** est un point image pour le système optique. Deux cas peuvent se présenter, le faisceau conique émergent peut être :

Divergent : dans ce cas, le point image **A'** est dit **virtuel** (figure 5)

Convergent : dans ce cas, le point image **A'** est dit **réel** (figure 6)

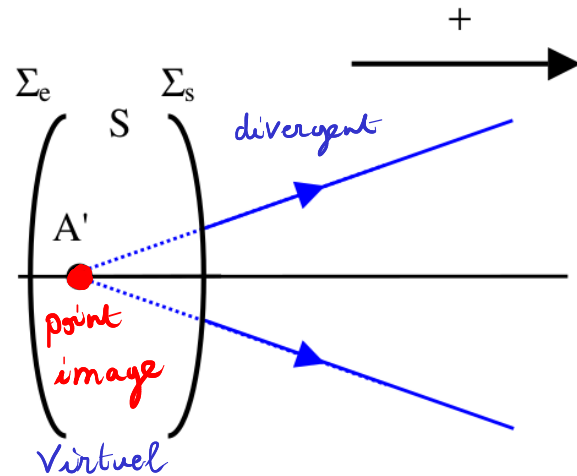


Figure 5

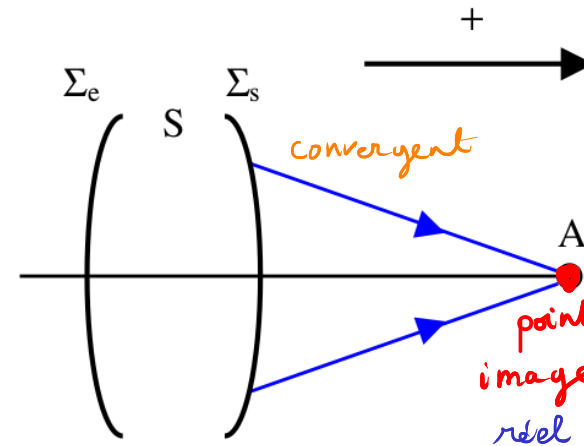


Figure 6

Le point **A'** est un point **IMAGE** pour le système s'il se trouve à l'intersection de rayons lumineux **EMERGENTS** du système ou à l'intersection de leurs prolongements.

# 3.2 Optique géométrique

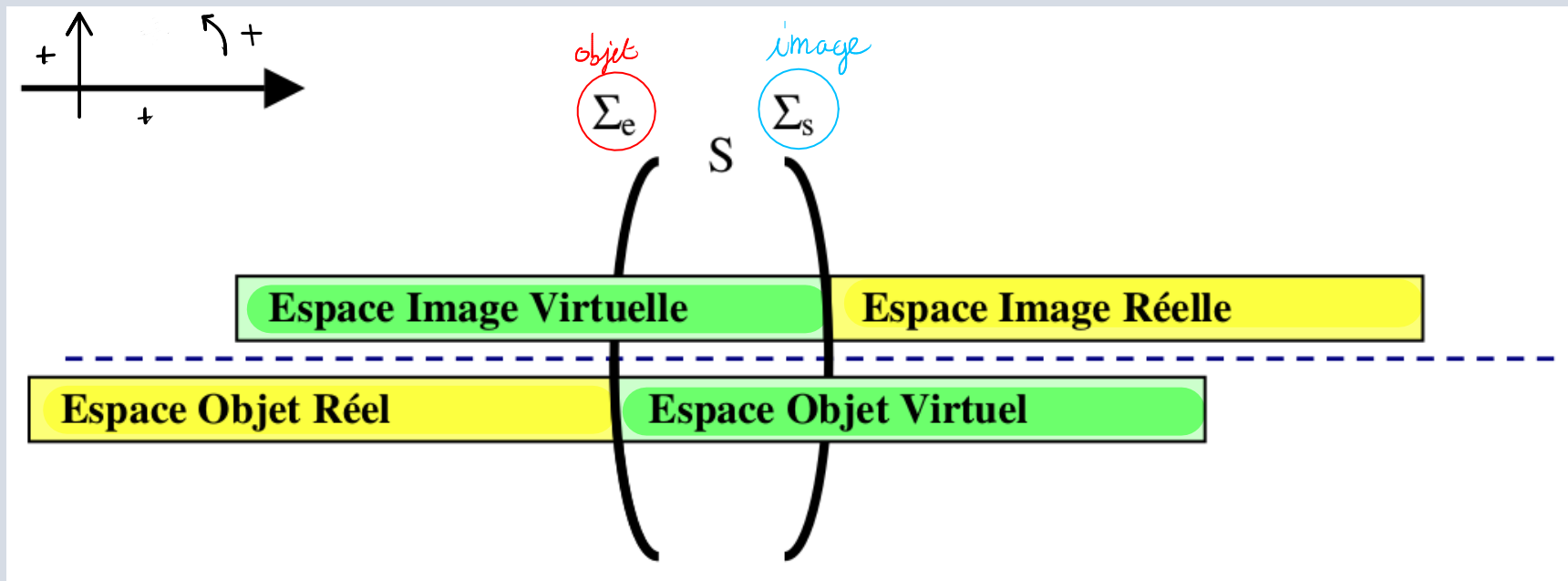
## Notion de Point Objet et de Point Image

### Objet et image

**Un objet est un ensemble étendu de points objets.**

**Une image est un ensemble étendu de points images.**

### Espace Objet - Espace Image



# 3.2 Optique géométrique

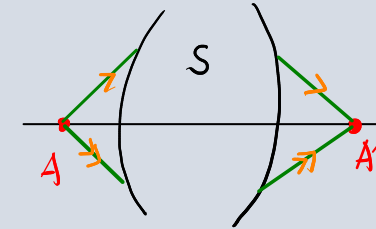
## Stigmatisme rigoureux

### Stigmatisme rigoureux - Points conjugués

- système (S)
- point A

$$A \rightarrow (S) \rightarrow A' \text{ ou } A \xrightarrow{(S)} A'$$

(A') est par définition l'image de A donnée par (S)



Un système optique (S) est dit **rigoureusement stigmatique** pour un point objet A (réel ou virtuel) et le point A' correspondant (réel ou virtuel) si tous les **rayons incidents** passant par A émergent du système optique en passant par le point image A'.

$A' \rightarrow (S) \rightarrow A$ , ce qui montre que A et A' forment un couple de points conjugués pour le système optique (S) rigoureusement stigmatique.

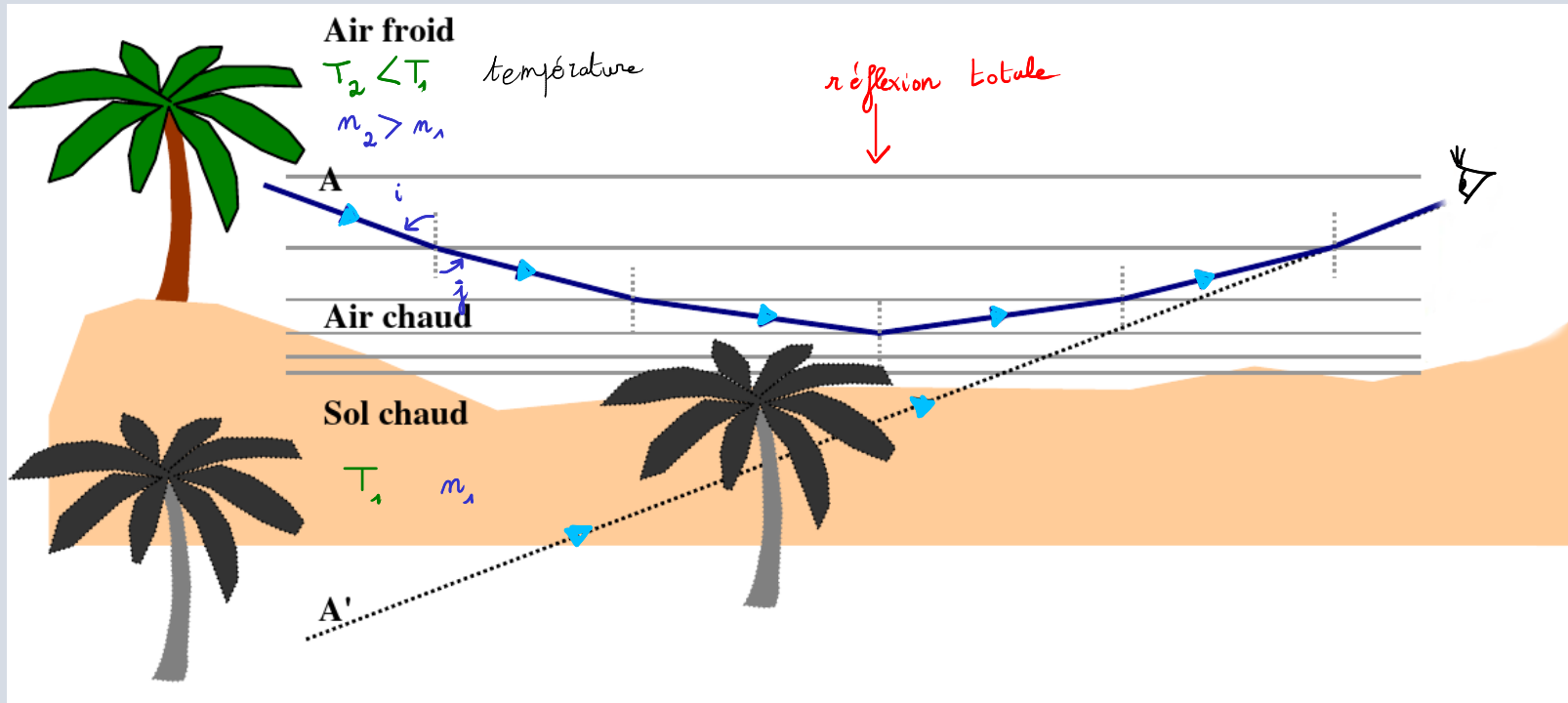
### Que voit l'œil ?

Le système visuel perçoit la lumière reçue comme venant en ligne droite : l'image est toujours interprétée comme située au point d'intersection des rayons reçus par l'œil.

# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

### Mirage



Miroir plan : système optique rigoureusement stigmatique

Le **miroir** donne d'un point objet A, une image **A'** symétrique de A par rapport au plan du **miroir**.

# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

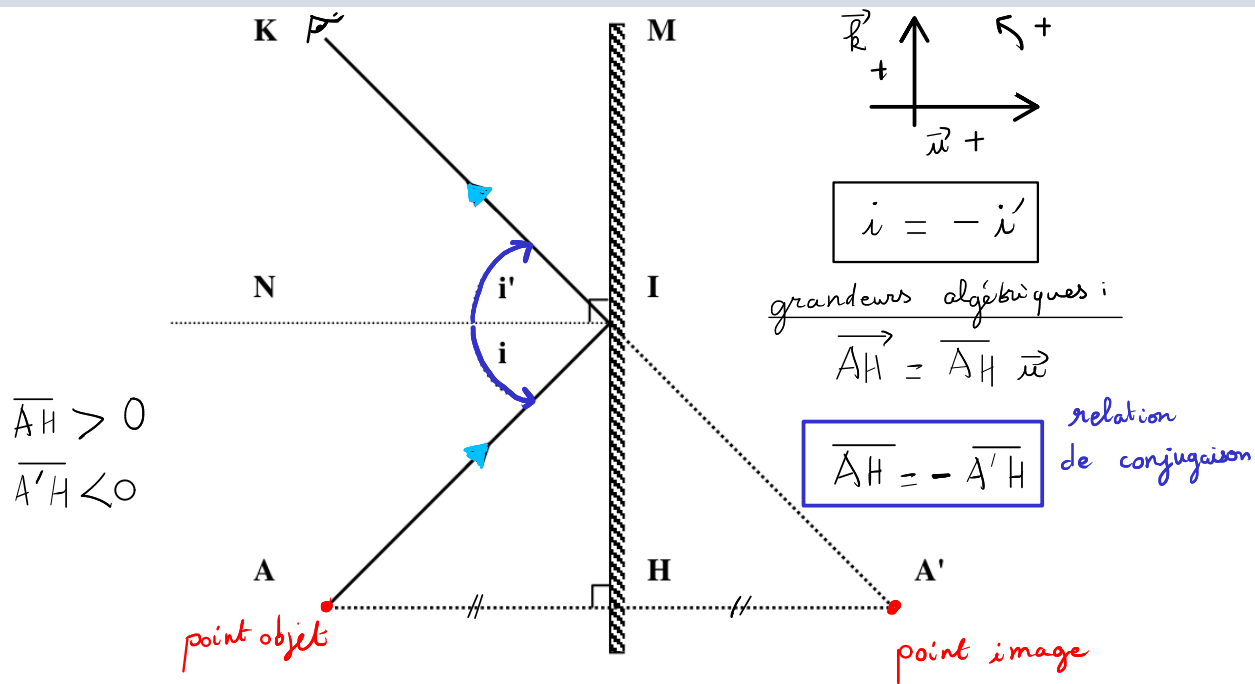


Figure 9

Dans le cas du système optique miroir plan, tout rayon incident passant par le point objet A se réfléchit en passant par le point image A' symétrique de A par rapport au plan du miroir.

Ainsi, tout point objet possède une image rigoureusement stigmatique.

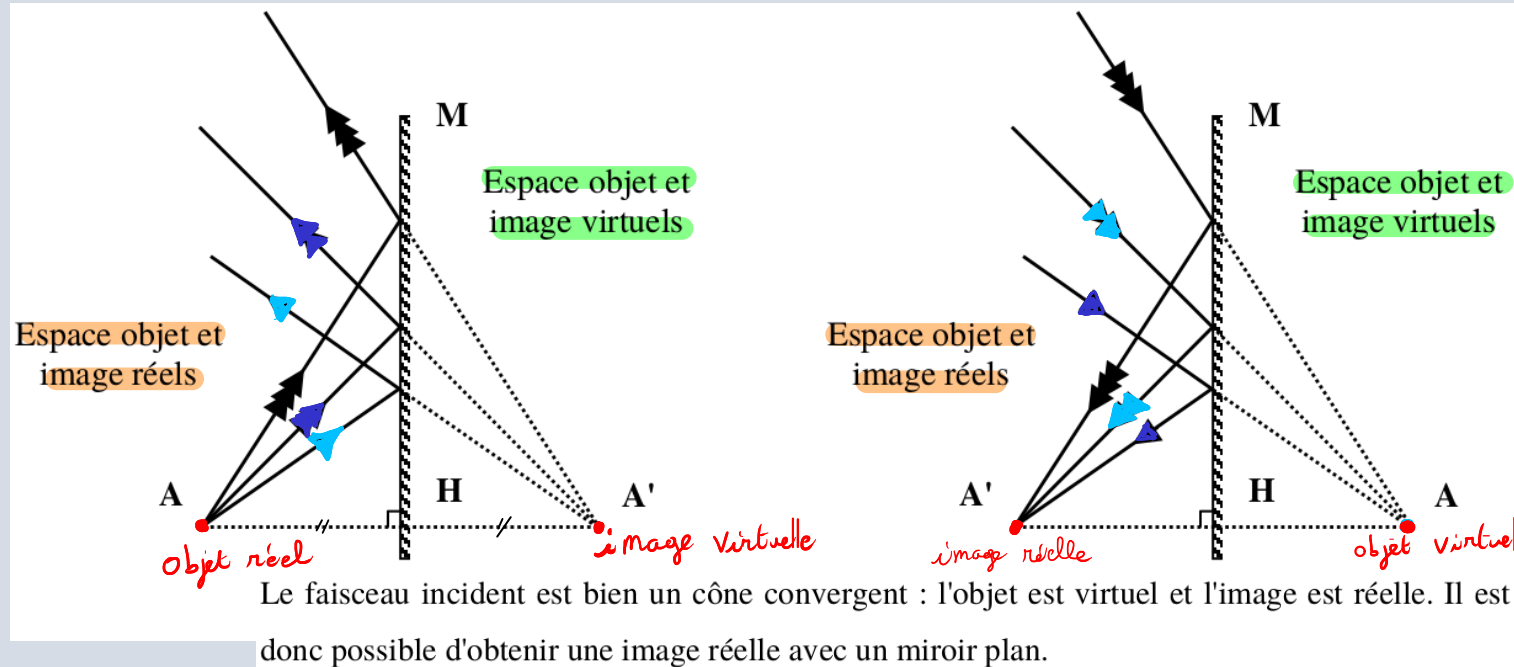
Le miroir plan est le **seul système rigoureusement stigmatique** pour tout point de l'espace objet.



# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

### Réalité et virtualité dans le cas du miroir plan



### Construction d'une image

Dans le cas où il y a stigmatisme rigoureux, pour les deux points A et A', si l'on souhaite déterminer A' en connaissant A, (ou le contraire), deux rayons provenant de A suffisent pour déterminer le point image A' qui se trouve à l'intersection des rayons émergents correspondants du système optique

# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

### Image d'un objet étendu dans un miroir plan

L'opération géométrique qui donne l'image d'un objet étendu dans un miroir plan est donc une symétrie par rapport au plan du miroir.

### Relation de conjugaison

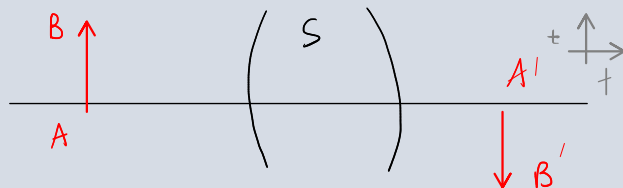
Dans le cas où il y a stigmatisme rigoureux, l'image d'un point objet est unique. Il existe donc une relation de conjugaison algébrique qui lie la position d'un point objet et de son image.

$$\overline{HA} = - \overline{HA'} \text{ ou } H \text{ est le projeté orthogonal de } A \text{ sur le miroir plan.}$$

### Grandissement transversal

Le grandissement transversal  $\gamma$  pour le point B, est le rapport algébrique entre la valeur algébrique du segment image transversal et celle du segment objet transversal conjugué.

$$\begin{aligned} \overline{AB} &> 0 \\ \overline{A'B'} &< 0 \\ \gamma &< 0 \end{aligned}$$



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

# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

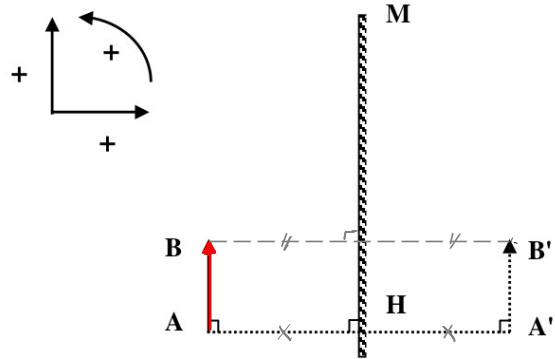


Figure 12

Dans le cas du miroir plan, A'B' étant le symétrique de AB par rapport au miroir, alors :

$\overline{AB} = \overline{A'B'}$  et  $\gamma = 1$ . L'image transversale donnée par un miroir est toujours droite

$$\overline{A'B} = \overline{A'B'} > 0$$

$$\gamma > 0$$

### Grandissement axial

Le grandissement axial  $\gamma_a$ , pour le point B, est le rapport algébrique entre la valeur algébrique du segment image axial et celle du segment objet axial.

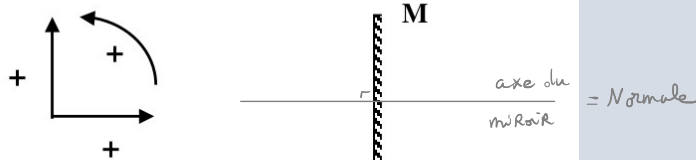


Figure 13

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

Dans le cas du miroir plan,  $\gamma_a = -1$ , l'image axiale est toujours renversée

$$\overline{AB} > 0$$

$$\overline{A'B'} < 0$$

# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

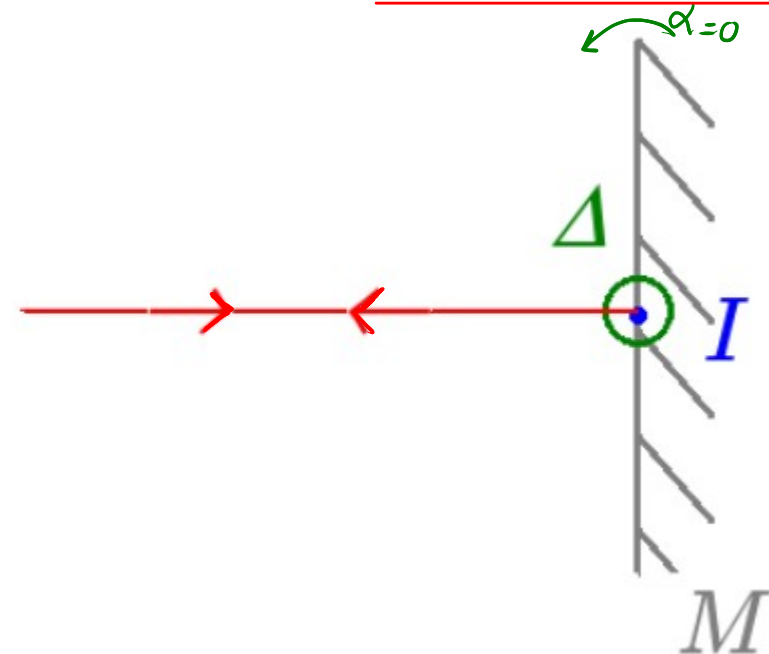
### Exemples :

Un pinceau lumineux (un ensemble de rayons lumineux parallèles ou un faisceau parallèle) arrive perpendiculairement en  $I$  à la surface d'un miroir plan tournant autour d'un axe  $\Delta$  :  $(\dot{\nu} = 0)$

Sur le schéma ci-dessus,  $\alpha = 0$  et le rayon lumineux est d'incidence normale ( $\beta = 0$ ).

Si le miroir tourne d'un angle  $\alpha$  que vaut  $\beta$  ?

*↳ angle entre rayon réfléchi et incident*



# 3.2 Optique géométrique

## Stigmatisme rigoureux

Si le miroir tourne d'un angle  $\alpha$  que vaut  $\beta$  ?

Le rayon lumineux s'est déplacé de  $d$  sur la règle.

situation avec  $\alpha \neq 0$

Que vaut  $d$  ?

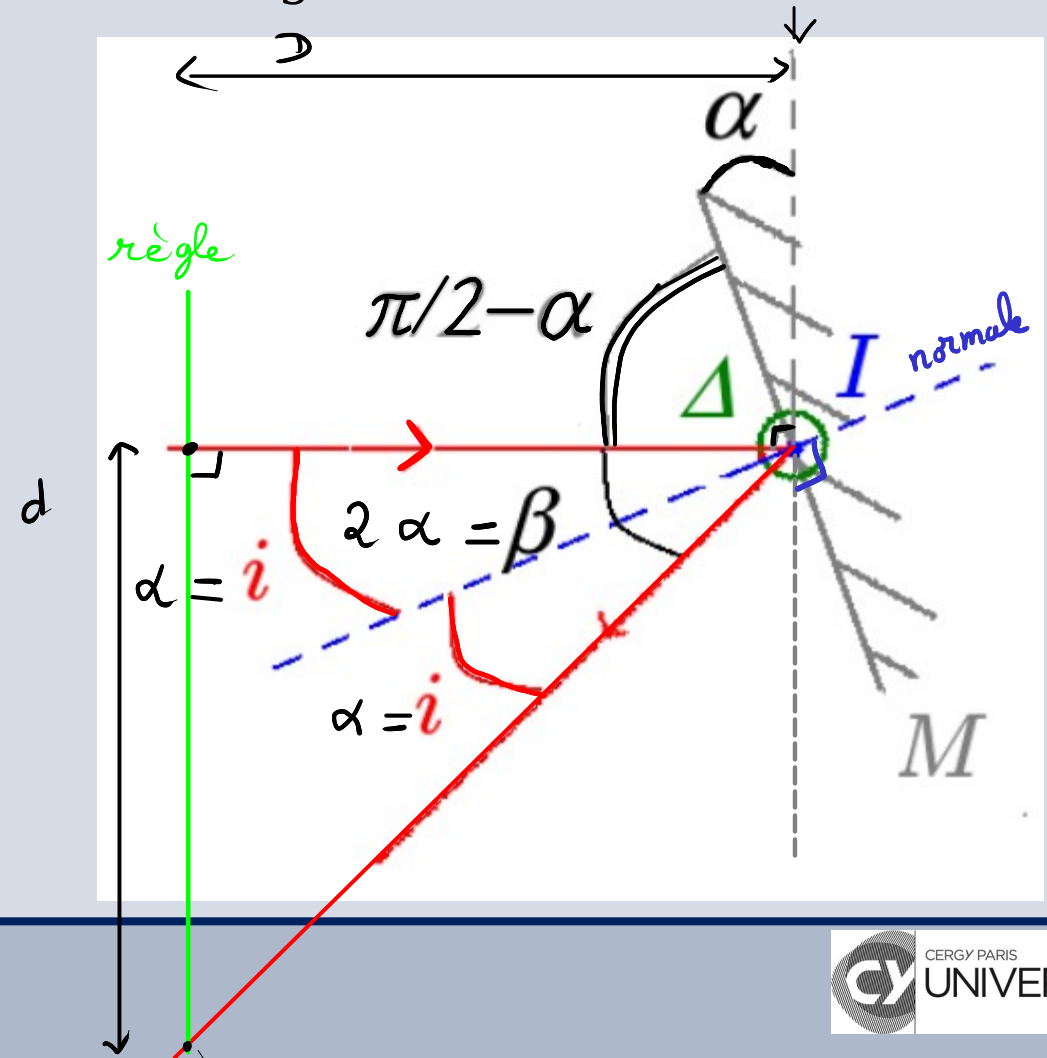
- $$\beta = 2\alpha : |i| = |i'| = \alpha$$

$$\beta = |i| + |i'| = 2\alpha$$

- $$\tan \beta = \frac{d}{D} \Rightarrow d = D \tan(2\alpha)$$

$\alpha \approx 0 \rightarrow \tan \alpha \approx \alpha \text{ (rad)}$

$$\alpha \approx \frac{d}{2D} \rightarrow \underline{d \approx 2D\alpha}$$

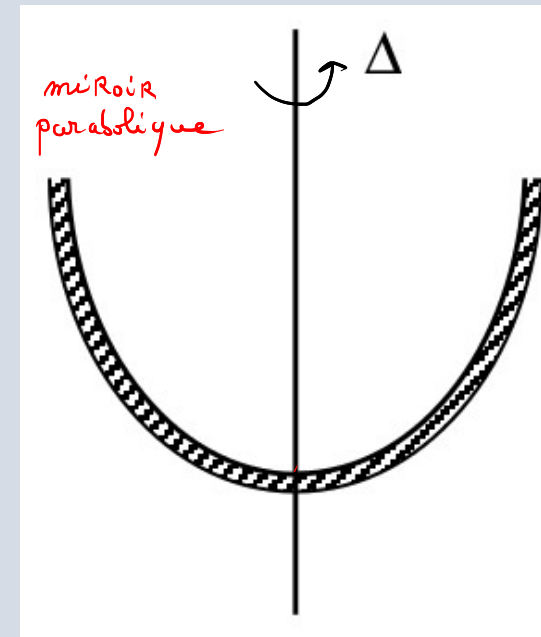
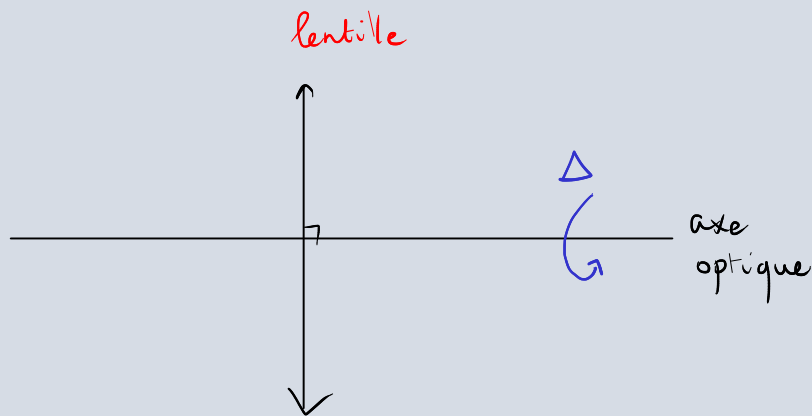


# 3.2 Optique géométrique

## Les systèmes centrés

Un système optique centré est un système qui possède un axe de symétrie de révolution appelé axe optique (appelé aussi axe principal).

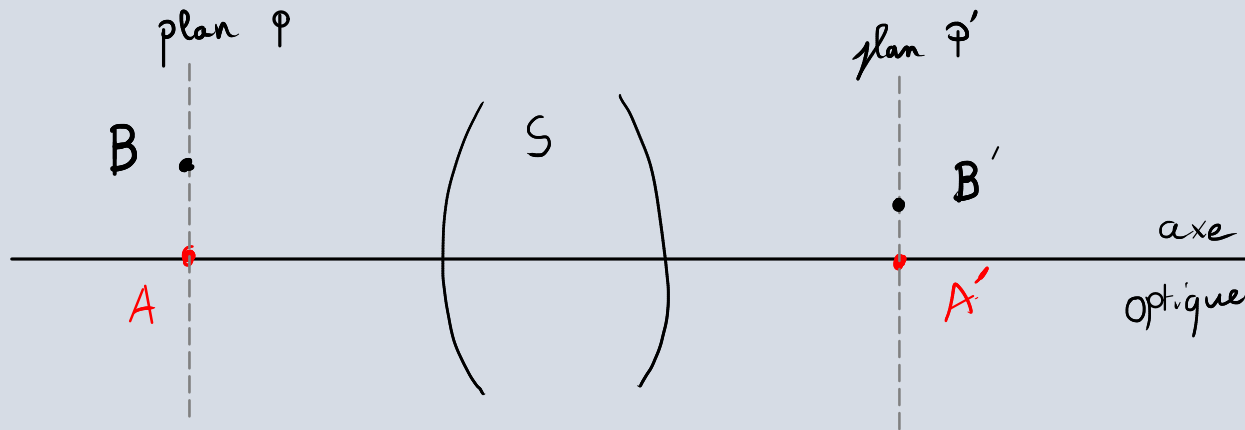
Le miroir parabolique est un système centré. En effet, ce système est engendré par la rotation autour d'un axe  $\Delta$  d'une courbe plane qui est un morceau de parabole (représentée dans le plan de la feuille).



# 3.2 Optique géométrique

## Aplanétisme rigoureux

Dans le cas d'un système centré pour lequel il existe un couple de points  $A$  et  $A'$  de son axe optique rigoureusement stigmatiques, si  $B$  est un point voisin de  $A$  dans un plan transverse, le système est dit **rigoureusement aplanétique** pour les points  $A$  et  $A'$  si l'image  $B'$  au voisinage de  $A'$  est quasiment exempte de défauts, notamment des aberrations sphériques et de coma (ces défauts sont définis plus bas dans ce chapitre)





## 3.2 Optique géométrique

### Stigmatisme approché

A part le cas du miroir plan, il n'existe pas de système optique rigoureusement stigmatique. Au mieux le sont-ils pour quelques points de leurs espaces objet et image.

inutile que les systèmes optiques respectent le stigmatisme rigoureux

→ le récepteur de l'image (œil, négatif, capteur CCD, ...) a une résolution limitée.

→ la lumière étant de nature ondulatoire, la diffraction par les ouvertures du système formera d'un point objet une tache de diffraction image sur le récepteur.

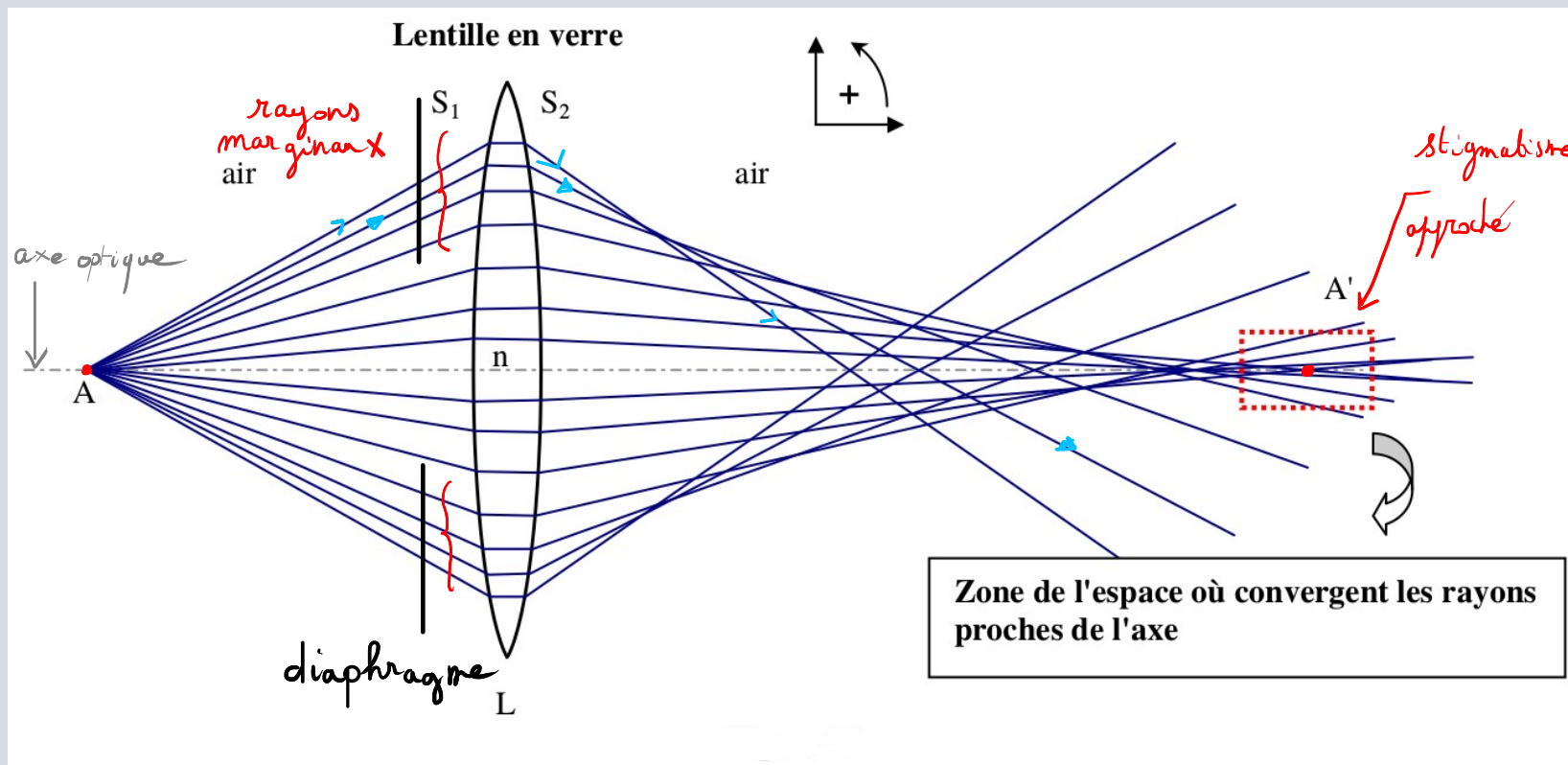
Un système optique est dit **stigmatique approché** pour un couple de points A et A' si les rayons issus du point objet A convergent, après traversée du système optique, dans un volume de petites dimensions autour du point A'.

# 3.2 Optique géométrique

## Les conditions de Gauss

### Mise en évidence des conditions de Gauss

Nous observons que les rayons éloignés de l'axe, appelés rayons marginaux, qui font avec l'axe des angles importants, convergent les premiers près de la lentille, en des points différents selon les rayons considérés.

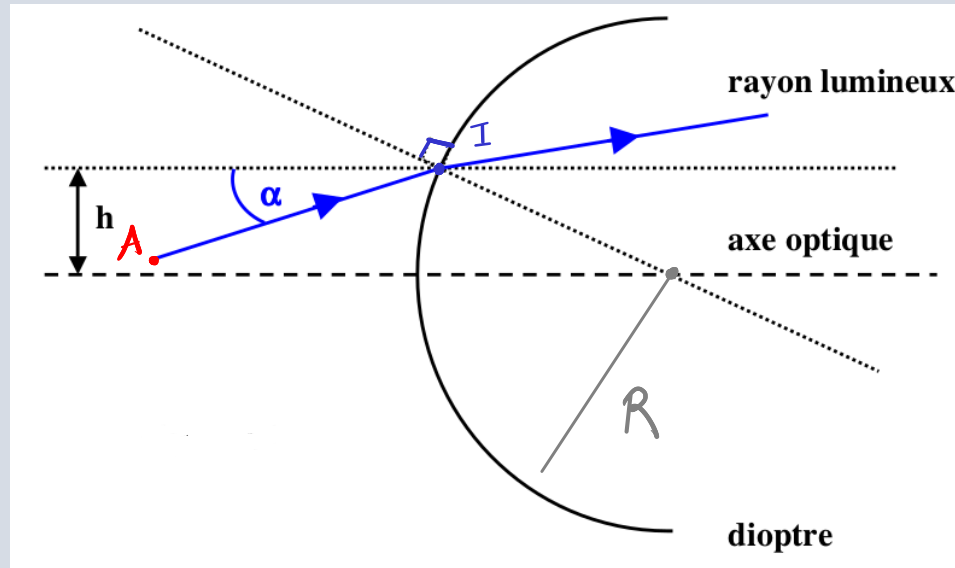


# 3.2 Optique géométrique

## Les conditions de Gauss

La lentille est un système stigmatique approché pour un couple de points **A** et **A'** si les rayons issus de **A** sont proches de l'axe et si ces rayons font avec cet axe **des angles petits**

$h \ll R$   
(rad)  $\alpha \ll$



Pour un système centré il suffit de réaliser les **conditions de Gauss** pour que le système soit **stigmatique approché**. Pour ceci :

- Les angles  $\alpha$  des rayons avec l'axe doivent être **faibles**  $\alpha \ll$
- La **hauteur d'incidence  $h$**  de tous les rayons sur chaque dioptré ou miroir doit être **faible devant le rayon de courbure** de ces dioptrés ou miroirs.  $h \ll R$

## 3.2 Optique géométrique

### Les conditions de Gauss

#### Conséquences des conditions de Gauss

Approximations  
trigonométriques  
Aplanétisme  
approché

Dans les **conditions de Gauss**, un point voisin de l'axe dans un plan transverse vérifie aussi les conditions de **stigmatisme approché**, ce qui fait que l'**aplanétisme** est toujours vérifié.

L'image d'un plan transverse, ou plan de front, est un plan de front. Les plans de front objet et image sont conjugués. → *relations de conjugaison*

Relation de  
conjugaison

La conjugaison des points objet A et image A' appartenant à l'axe, ainsi que celle des plans de front associés, en raison du stigmatisme et de l'aplanétisme approchés, se traduit par une relation algébrique appelée relation de conjugaison.

# 3.2 Optique géométrique

## Les conditions de Gauss

### Construction des

Pour obtenir l'image A'B' d'un objet AB situé dans un plan de front, A étant un point de l'axe optique, il suffit de tracer dans le plan méridien contenant AB, deux rayons issus de B, et d'obtenir leur intersection B' à la sortie du système. Le point A' s'obtient ensuite sur l'axe en utilisant la correspondance de plan de front à plan de front, c'est à dire en abaissant la perpendiculaire depuis B' sur l'axe optique.

Grandissement transversal et grandissement angulaire

$$S : L_1 + L_2 + L_3$$

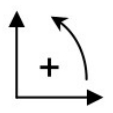
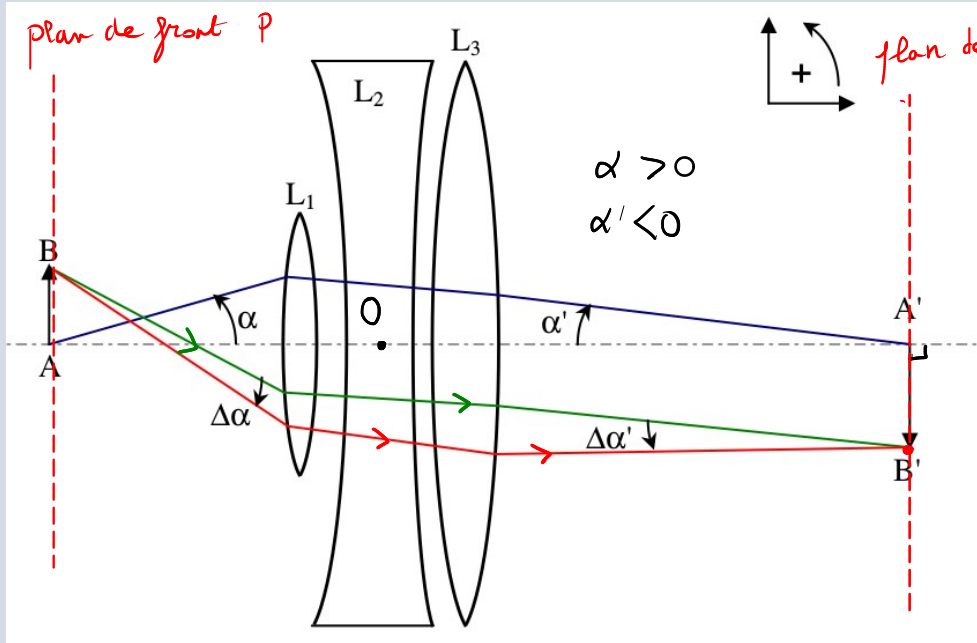
B' conjugué de B par (S)  
 $B \xrightarrow{(S)} B'$



grandeurs algébriques

$$\overline{OA} < 0$$

$$\overline{OA'} > 0$$



plan de front P'

$$\alpha > 0$$

$$\alpha' < 0$$

axe optique

# 3.2 Optique géométrique

## Les conditions de Gauss

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

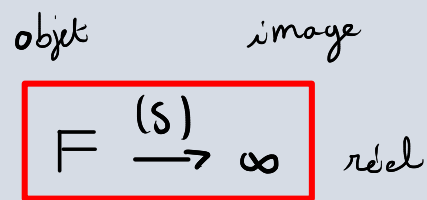
Le grandissement transversal n'est pas une caractéristique fixe du système optique. Il dépend de la position de l'objet (et donc de la position de l'image).

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

Les angles sont orientés, le grandissement angulaire  $g$  est le rapport entre l'angle que fait le rayon émergent avec l'axe optique et l'angle que fait le rayon incident avec ce même axe.

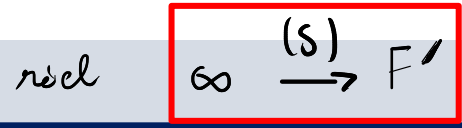
$$g = \frac{\Delta\alpha'}{\Delta\alpha}$$

Foyer  $s$



Le foyer objet (F) d'un système optique a pour conjugué le point image (A') réel à l'infini.

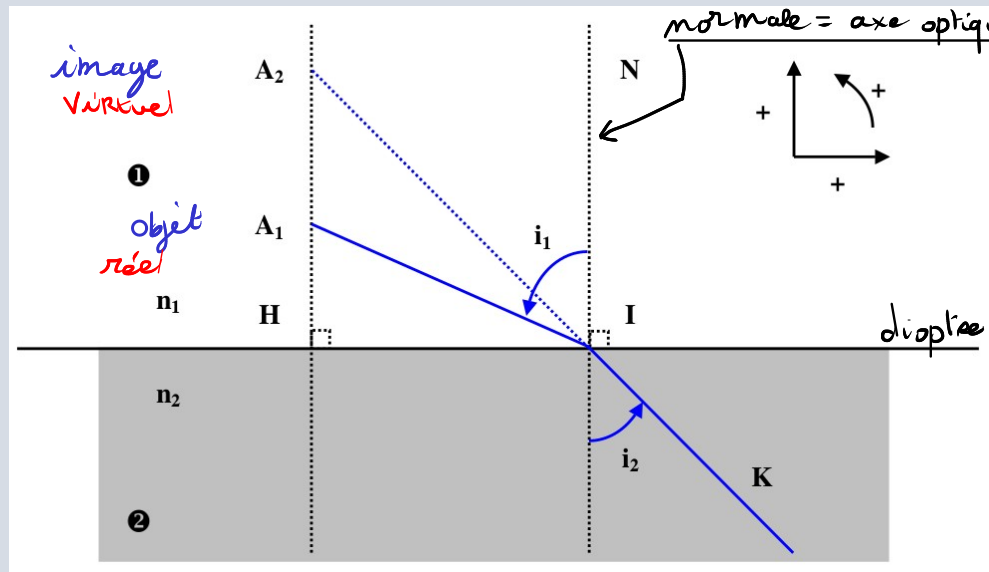
Le foyer image (F') d'un système optique est le conjugué du point objet (A) réel à l'infini.





# 3.2 Optique géométrique

## Application au dioptré plan



$$(*) \quad \overline{HA}_2 = \overline{HA}_1 \frac{n_2}{n_1} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2(i_1)}}{\cos(i_1)} \quad \leftarrow \begin{aligned} &1 - \sin^2(i_2) \\ &= \cos^2(i_2) \end{aligned}$$

TD4 : exercice 8

$$\overline{HA}_2 = \overline{HA}_1 \frac{\tan(i_1)}{\tan(i_2)} \quad \text{et} \quad n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

La position de  $A_2$  dépend donc de l'angle d'incidence  $i_1$ .

Il n'y a donc pas dans ce cas **stigmatisme rigoureux**.

Le point  $H$  étant le projeté du point  $A_1$  sur le dioptré plan, si les rayons font un petit angle avec la droite  $(HA_1)$ , qui est aussi l'axe optique du dioptré plan, le dioptré plan fournit une image  $A_2$  stigmatique approchée du point  $A_1$ . La **relation de conjugaison** s'écrit alors :

$$\overline{HA}_2 = \overline{HA}_1 \frac{n_2}{n_1} \quad \text{car} \quad i_1 \approx 0 \rightarrow i_2 \approx 0 \Rightarrow \begin{aligned} \sin(i_1) &\approx i_1 \\ \cos(i_1) &\approx 1 \quad \text{et} \quad \cos(i_2) \approx 1 \quad \text{dans} \quad (*) \end{aligned}$$



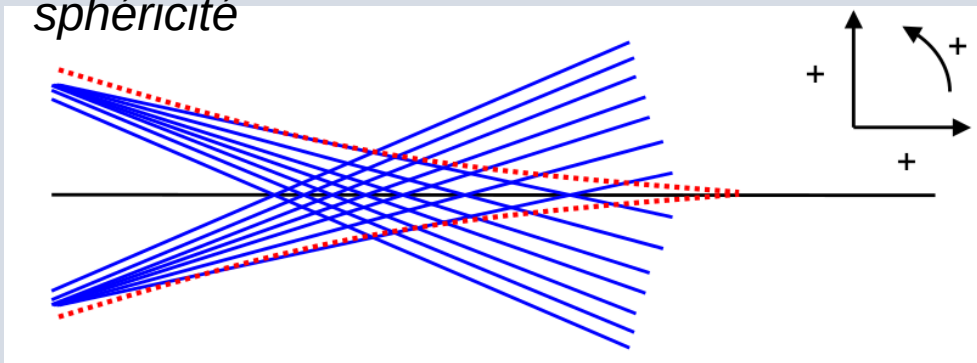
# 3.2 Optique géométrique

## Aberrations des systèmes optiques

On désigne sous le nom d'**aberration** les défauts des images dus à la dispersion et aux écarts à l'optique de Gauss

- Les aberrations dues à la dispersion, ou **aberrations chromatiques**,
- Les aberrations en lumière monochromatique dues aux termes négligés dans le cas de l'optique paraxiale (cf relation de conjugaison du dioptre plan), que l'on appelle **aberrations géométriques**.

Aberrations de sphéricité



distorsion

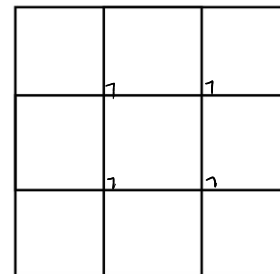


Figure 20a  
Objet et Image paraxiale

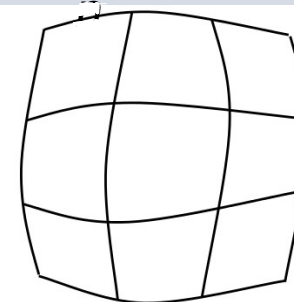


Figure 20b  
Barillet

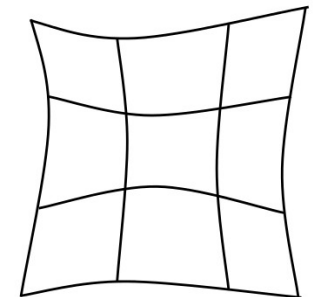


Figure 20c  
Coussinet

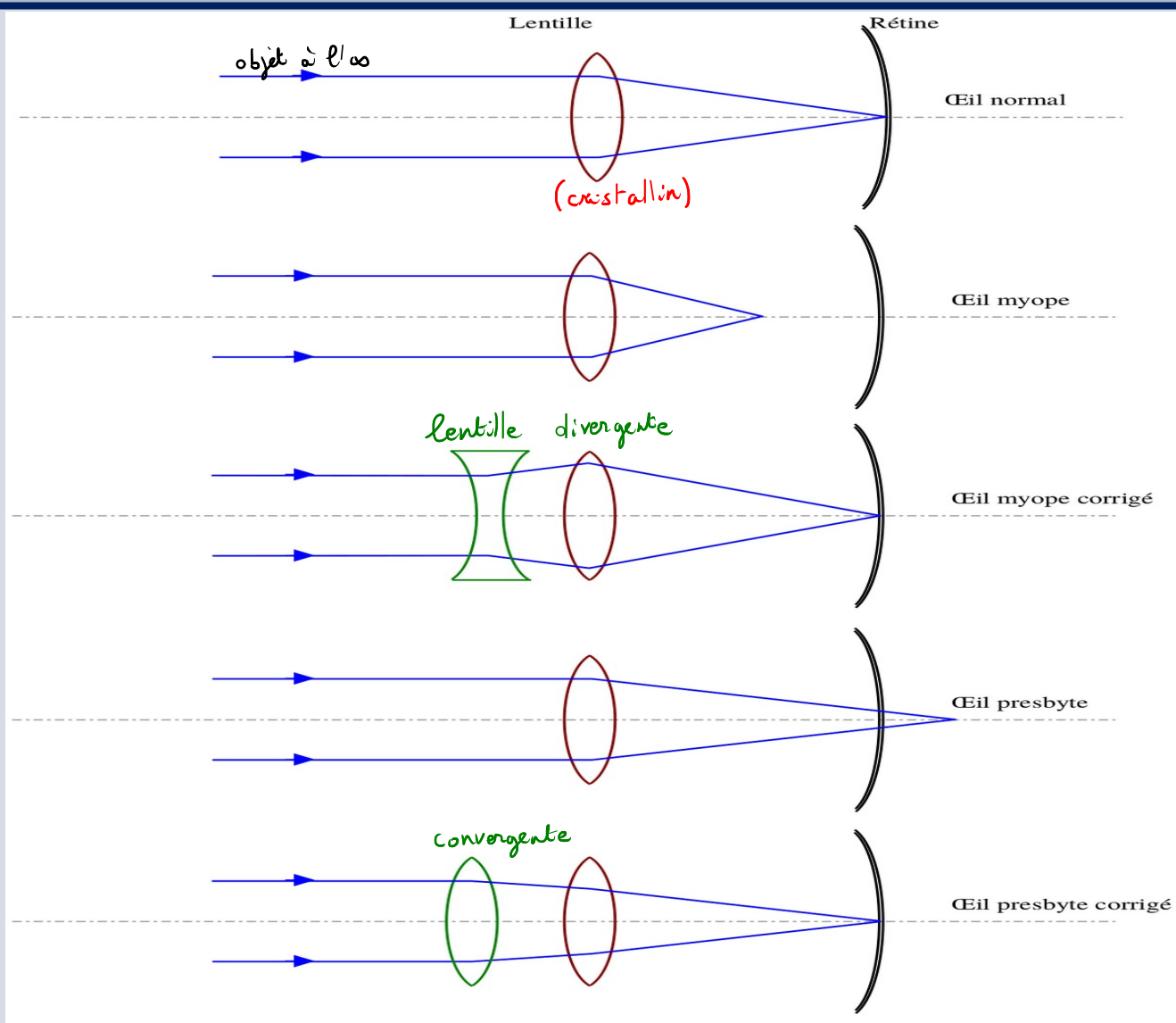
## 3.2 Optique géométrique

### Mise en œuvre

- Vérifier les conditions nécessaires à la formation d'une image : ce sont les conditions de Gauss. Il faut donc considérer des rayons lumineux émis par l'objet et peu inclinés sur la normale au dioptre
- Construire géométriquement l'image de l'objet sachant qu'en pratique on est obligé de tracer des rayons lumineux avec un angle suffisamment grand afin de garantir la lisibilité de la figure
- Appliquer la relation de conjugaison pour déterminer par exemple la position de l'image.

# 3.2 Optique géométrique

## Compléments

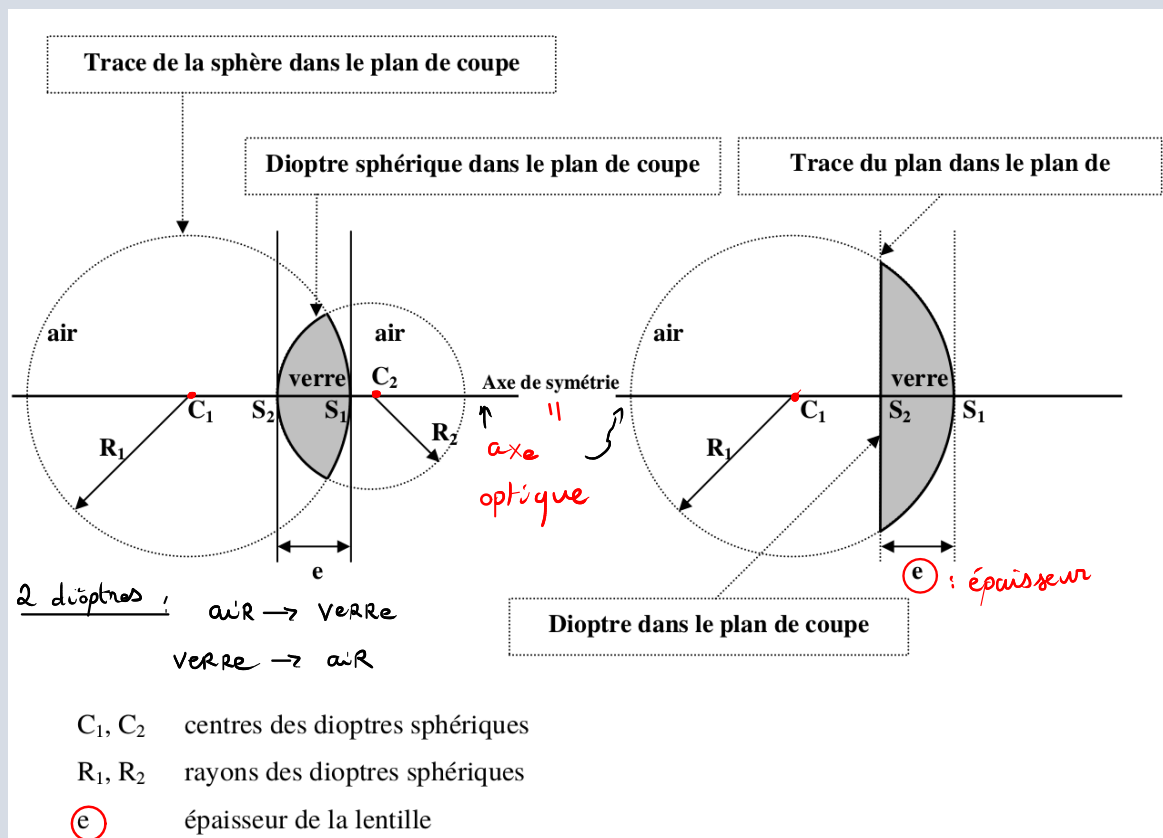


# 3.2 Optique géométrique

## Lentilles sphériques

### Lentilles réelles

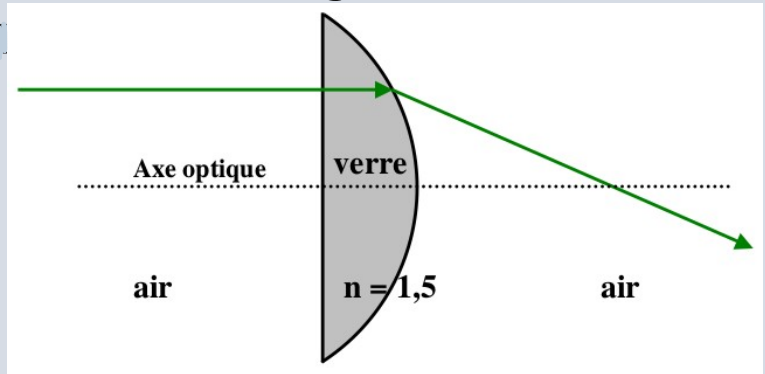
Une **lentille sphérique** est un milieu transparent homogène et isotrope limité par deux dioptries sphériques (de centres  $C_1$  et  $C_2$ ) ou un dioptré sphérique et un dioptré plan. L'axe de révolution de cette lentille est son axe optique.



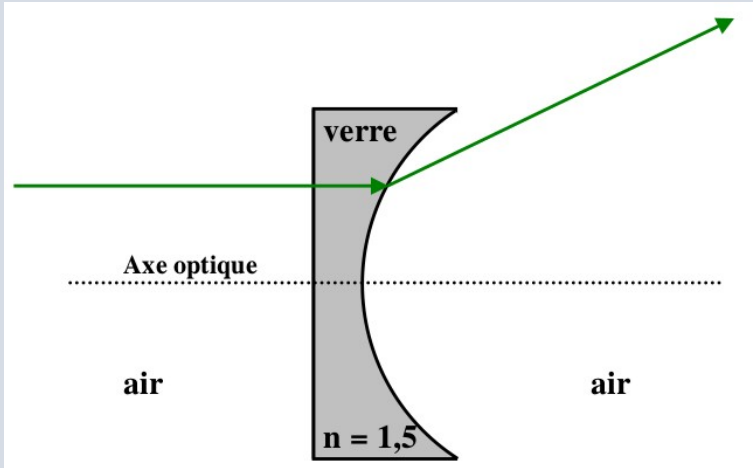
# 3.2 Optique géométrique

## Lentilles sphériques

### Lentilles convergentes

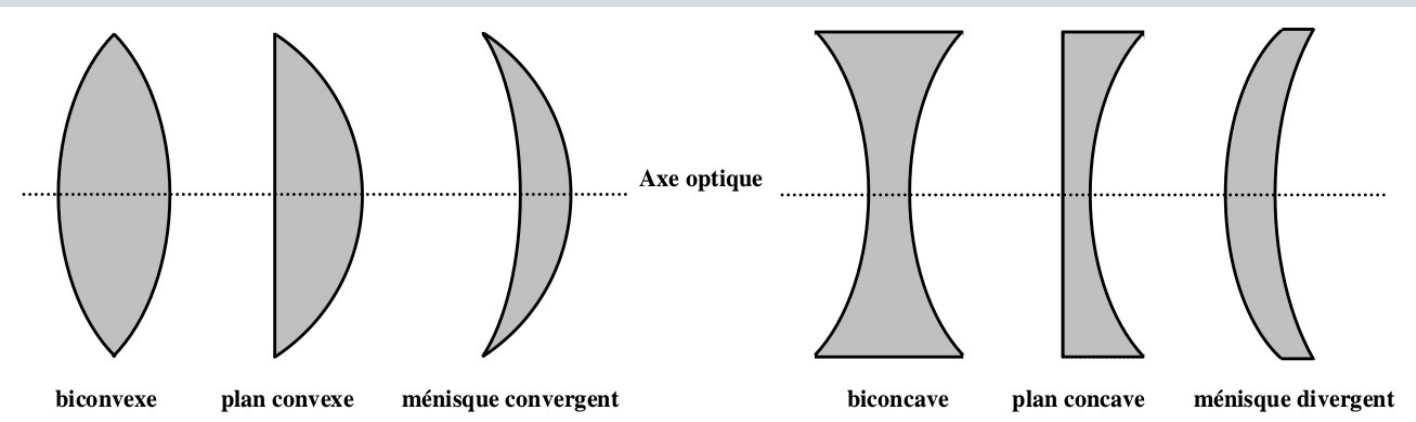


### Lentilles divergentes



**Les lentilles convergentes** : le rayon lumineux émergent est dévié vers l'axe optique

**Les lentilles divergentes** : le rayon lumineux émergent s'écarte de l'axe optique



# 3.2 Optique géométrique

## Lentilles sphériques

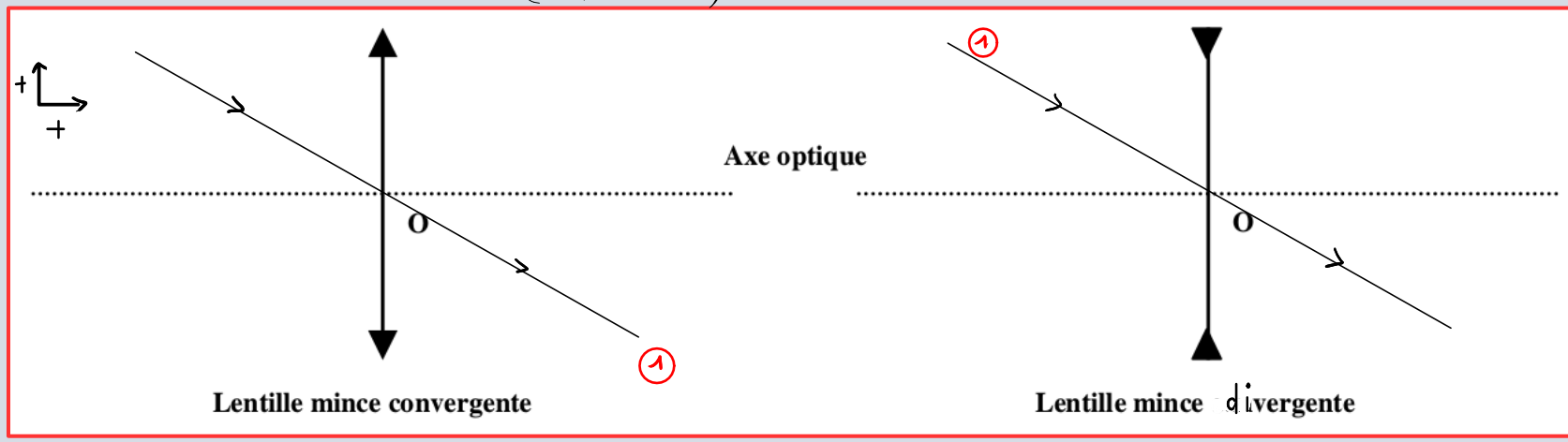
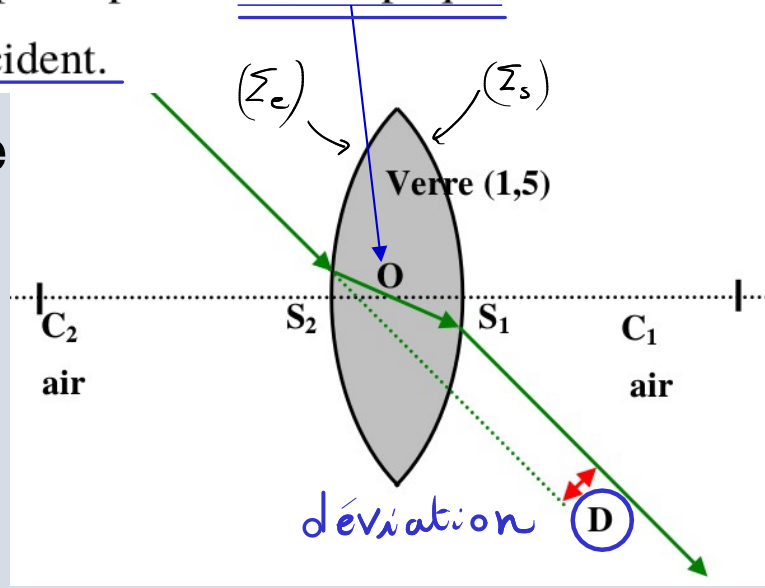
Tout rayon dont le trajet intérieur à la lentille passe par le centre optique, ressort de la lentille parallèlement à la direction du rayon incident.

### Approximation de la lentille mince sphérique

$$e \ll |R_1|; e \ll |R_2|; e \ll |R_1 - R_2|$$

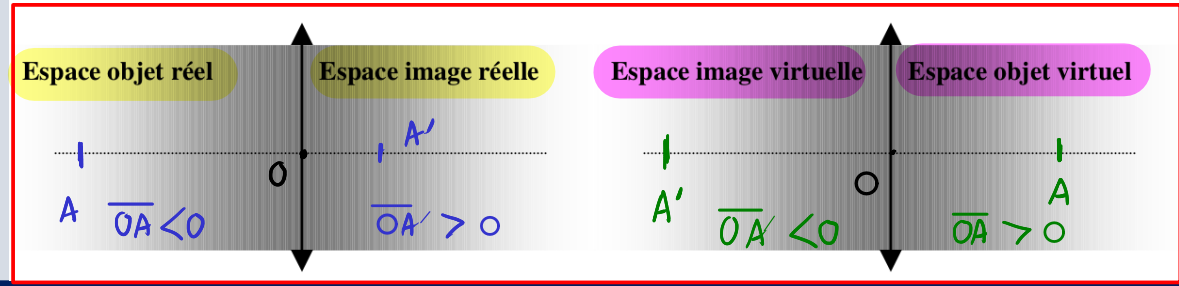
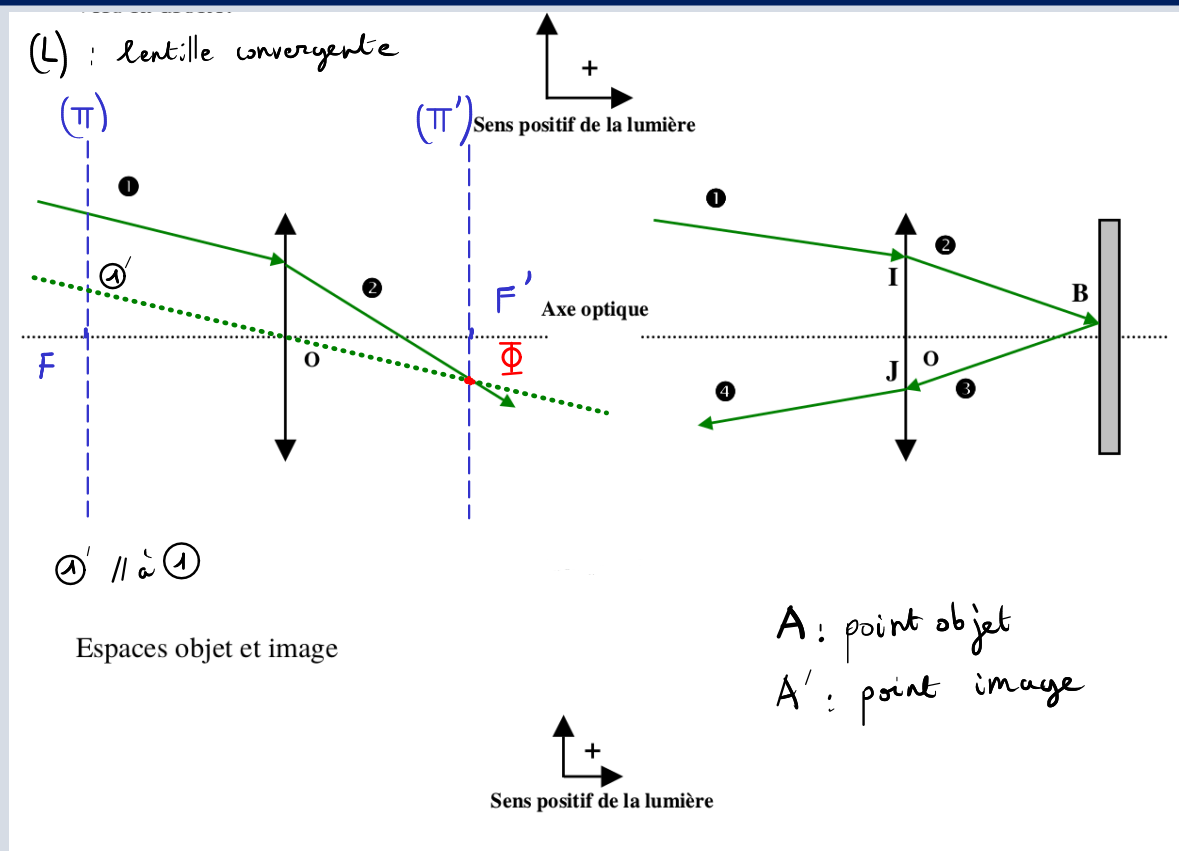
épaisseur

O: centre optique  $(\Sigma_e) = (\Sigma_s)$



# 3.2 Optique géométrique

## Algébrisation - Espace objet et image





## 3.2 Optique géométrique

### Stigmatisme et aplanétisme

**Une lentille sphérique peut être considérée stigmatique et aplanétique au sens du stigmatisme et de l'aplanétisme approchés :**

- **Si les rayons sont parallèles à l'axe et peu éloignés de l'axe.**
- **Si les rayons sont peu inclinés sur l'axe optique.**

**Ces conditions du stigmatisme et de l'aplanétisme approchés sont les conditions de Gauss.**

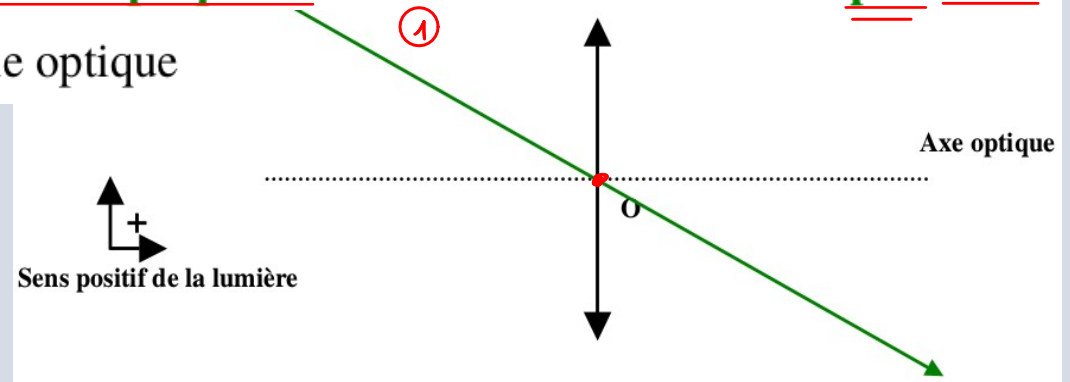
# 3.2 Optique géométrique

## Propriétés des lentilles minces

### Centre optique d'une lentille mince

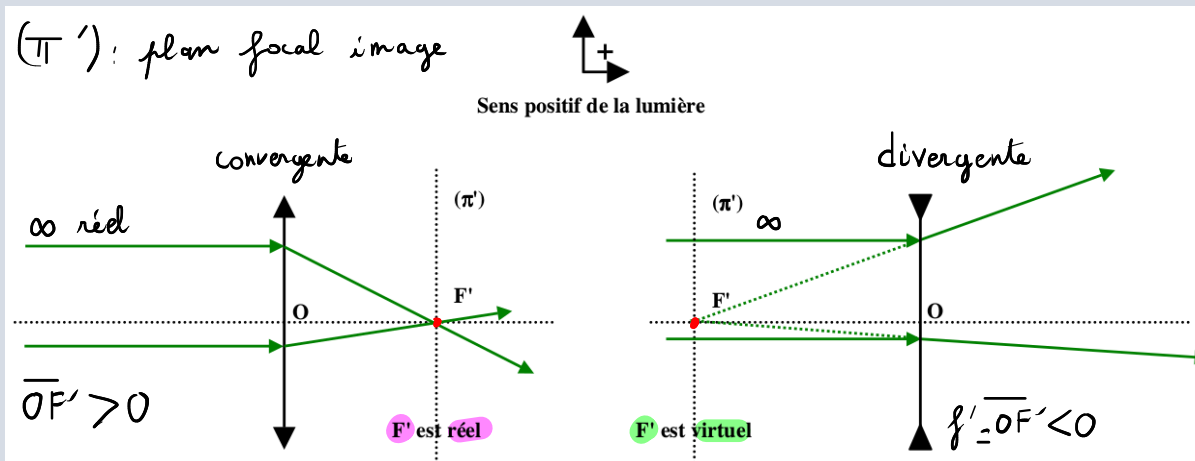
**Tout rayon lumineux passant par le centre optique O d'une lentille mince n'est pas dévié.**

Le point O est donc à l'intersection de l'axe optique



### Foyers, plans focaux, distances focales

Le foyer principal image ( $F'$ ) est le point de l'axe optique dont l'objet est à l'infini sur l'axe



# 3.2 Optique géométrique

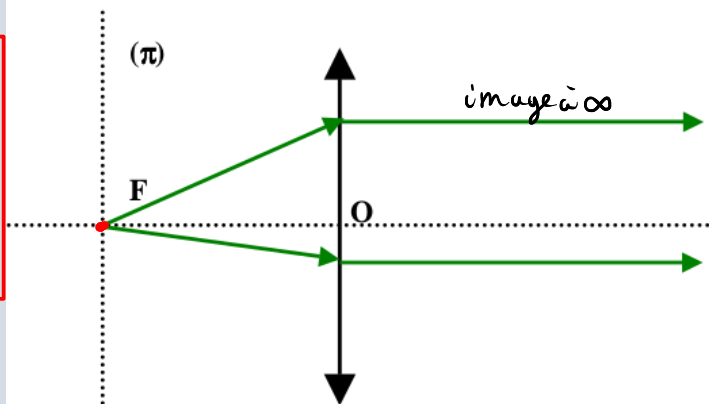
## Propriétés des lentilles minces

Le foyer principal objet ( $F$ ) est le point objet de l'axe optique dont l'image est à l'infini sur l'axe.

objet      image

$\infty //$  →  $F'$   
à l'axe  
 $F$  →  $\infty //$   
à l'axe

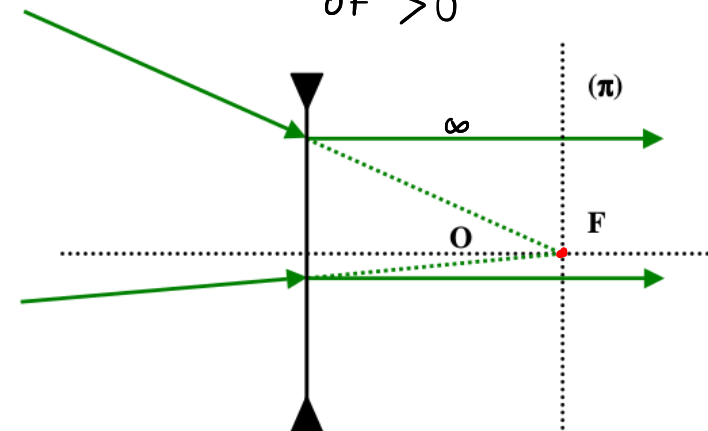
$\overline{OF} < 0$



Pour une lentille convergente,  $F$  est un objet réel

Sens positif de la lumière

$\overline{OF} > 0$



Pour une lentille divergente,  $F$  est un objet virtuel

Lorsque le milieu optique possède le même indice de chaque côté de la lentille,  $F$  et  $F'$  sont symétrique par rapport au centre optique.

Les mesures algébriques  $\overline{OF}$  et  $\overline{OF}'$  sont appelées respectivement distance focale objet et distance focale image de la lentille. On note  $f = \overline{OF}$ ;  $f' = \overline{OF}'$  et on a la relation  $f = -f'$ , lorsque le milieu est le même des deux côtés de la lentille.

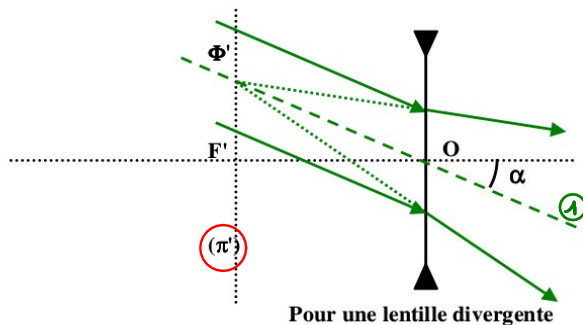
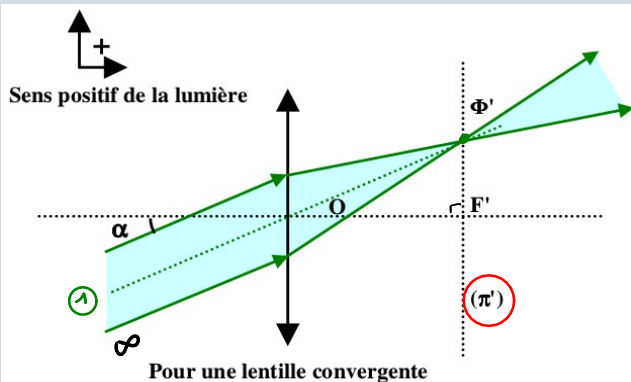
$\overline{OF} = -\overline{OF}'$

# 3.2 Optique géométrique

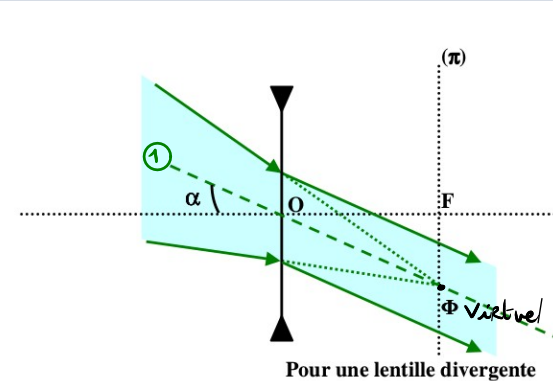
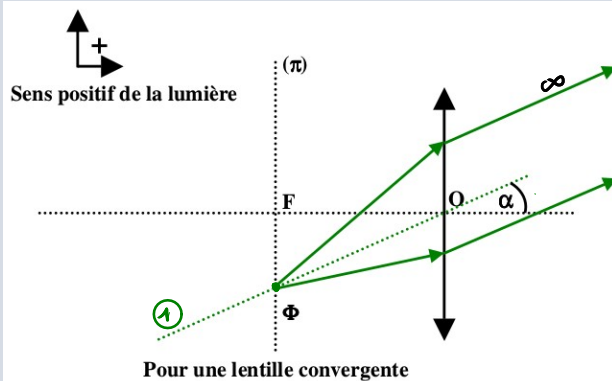
## Propriétés des lentilles minces

Le plan perpendiculaire à l'axe optique en  $F$  est appelé plan focal objet (plan  $\pi$ ). Le plan perpendiculaire à l'axe optique en  $F'$  est appelé plan focal image (plan  $\pi'$ ).

Un faisceau de rayons parallèles issus de l'espace objet, inclinés sur l'axe optique, donne un faisceau émergent de rayons dont les supports se croisent en un point image  $\Phi'$  du plan focal image.  $\Phi'$  est obtenu par intersection du plan focal image et du rayon non dévié, parallèle au faisceau incident et passant par le centre optique. ①



L'image d'un point  $\Phi$ , appartenant au plan focal objet et situé hors de l'axe optique, est rejeté à l'infini dans la direction du support passant par  $\Phi$  et  $O$ .



## Propriétés des lentilles minces

### Vergence

**La vergence  $V$  d'une lentille est l'inverse de la distance focale image.**

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

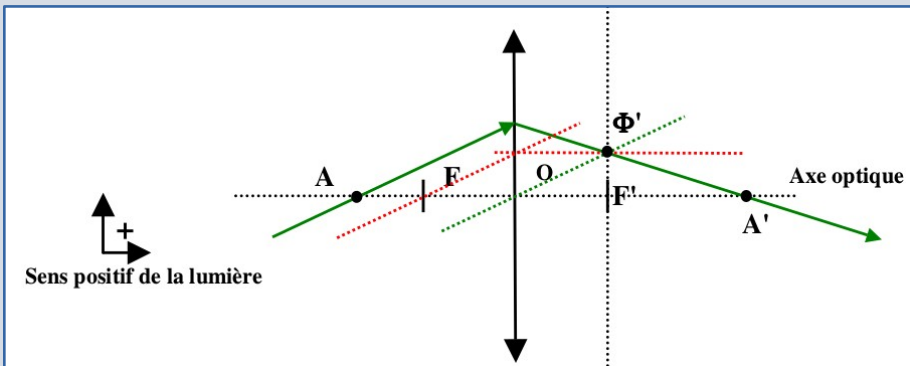
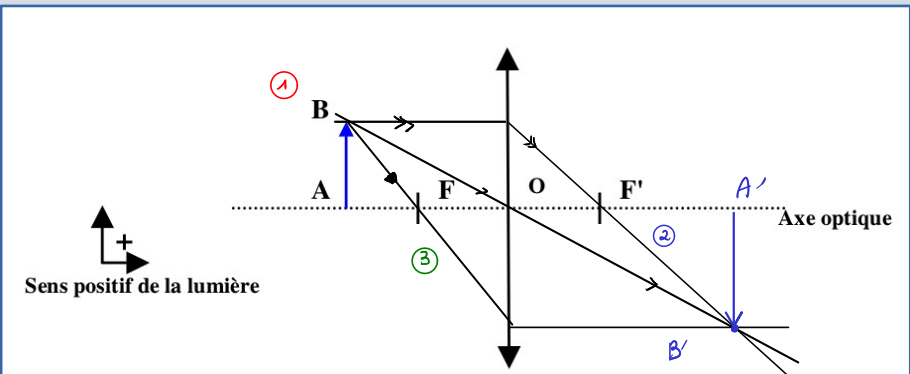
La vergence s'exprime *en* dioptrie ( $\delta$ ) avec  $1 \delta = 1 \text{ m}^{-1}$

# 3.2 Optique géométrique

## Construction géométrique d'une image

### Image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique

- ① rayon issu de B passant par le centre optique O
- ② rayon " " " parallèle à l'axe optique ressort en passant par F'
- ③ " " " passant par F ressort parallèle à l'axe optique

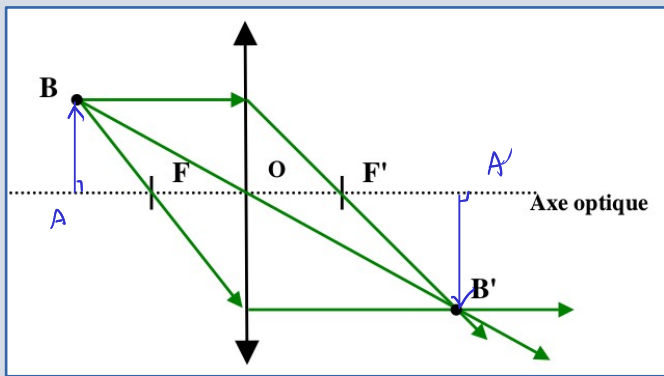
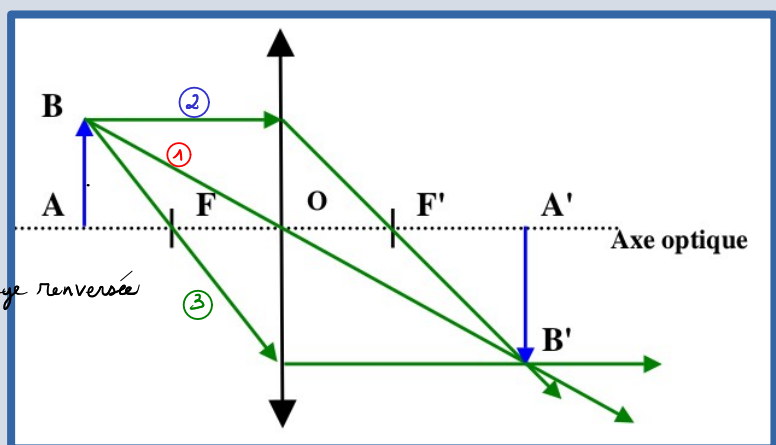


lentille convergente :  $\overline{OA} < 0$  objet réel et  $\overline{OA'} > 0$  image réelle

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

$\gamma < 0$  : image renversée

$$|\gamma| > 1$$



Pour trouver A', il suffit alors de projeter B' sur l'axe optique.

# 3.2 Optique géométrique

## Relations de conjugaison et de grandissement

Avec origine au centre (Descartes)

*Thales*

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

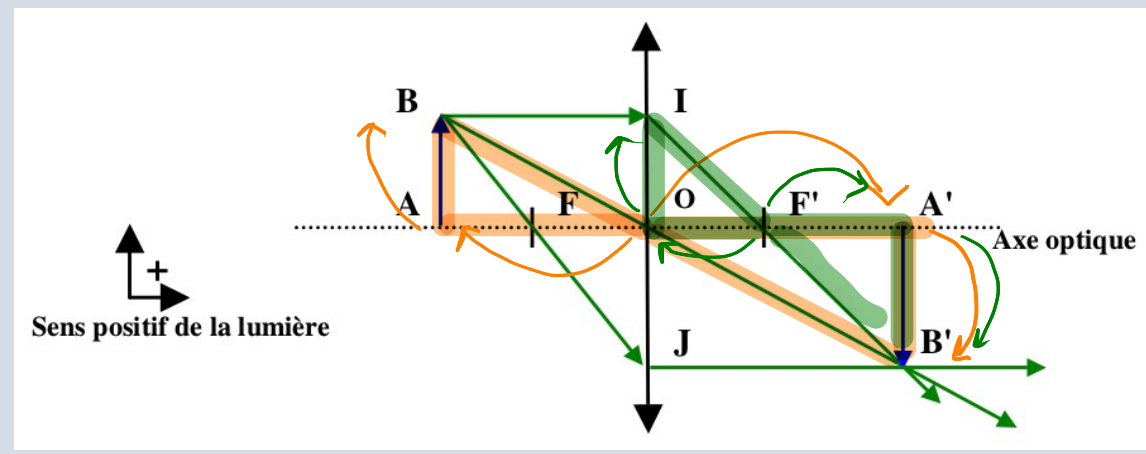
Avec origine aux foyers (Newton)

$$\Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = -\frac{1}{\overline{OF}}$$

*Thales*

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

$$\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = -f'^2 = f f'$$



**relation de Descartes.**

**relation de Newton.**



## 3.2 Optique géométrique

### Relations de conjugaison et de grandissement

#### Exemples :

Un objet réel AB est placé à 2 cm devant une lentille divergente de distance focale  $f' = -2\text{cm}$ .

1. Déterminer par construction géométrique la position de l'image A'B'.
2. Déterminer par application de la formule de conjugaison la position du point image A' ainsi que le grandissement  $\gamma$ .

Un objet virtuel AB est placé dans le plan focal image d'une lentille convergente de distance focale  $f' = 2\text{ cm}$ .

1. Déterminer par construction géométrique la position de l'image A'B'.
2. Déterminer par application de la formule de conjugaison la position du point image A' ainsi que le grandissement  $\gamma$ .

# 3.2 Optique géométrique

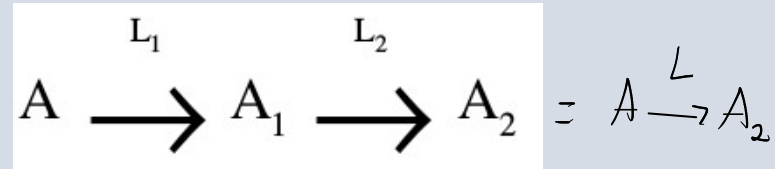
## Association de lentilles minces

### Lentilles accolées

$$d = 0$$

$$V' = V'_1 + V'_2$$

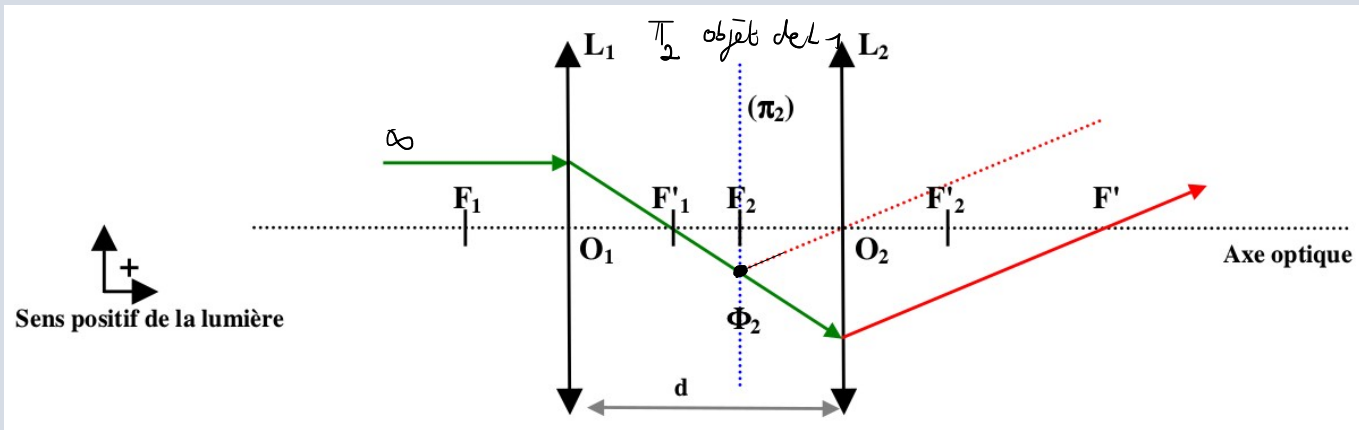
$$\frac{1}{OA_2} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'}$$



équivalent à une lentille unique L de distance focale f'

### Lentilles non accolées

$$\overline{F'_2 F'} = \frac{f_2^2}{d - f'_1 - f'_2}$$

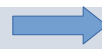


$$F'_1 = F_2$$

$$\pi'_1 = \pi_2$$

le foyer image de la lentille d'entrée est confondu avec le foyer objet de la lentille de sortie.

↳ l'image d'un faisceau parallèle incident sur le système optique est un faisceau émergent parallèle



**le système optique est dit afocal.**

# 3.2 Optique géométrique

## Aberration chromatique d'une lentille

### Mise en évidence

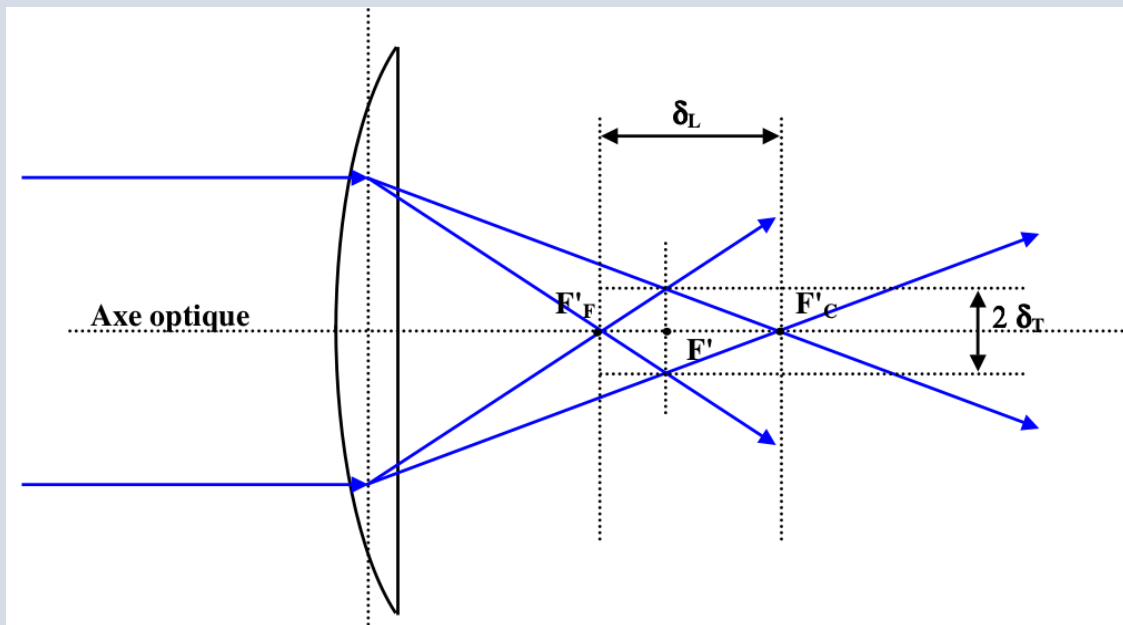
*aberration chromatique longitudinale principale.*

$$\delta_L = f'_C - f'_F$$

$$\delta_L = f'_C - f'_F = \frac{f'_D}{\eta}$$

nombre d'Abbe  $\eta$ .

foyers  $F'_F$  (radiation bleue) et  $F'_C$  (radiation rouge)



### Correction de l'aberration

Combinaison de lentilles de nature et de matériaux différents

**Système achromatique**

Lentilles accolées telles que

$$\frac{1}{\eta_1 f'_{1D}} + \frac{1}{\eta_2 f'_{2D}} = 0$$

- [1] Polycopié de cours – Optique (ex- EISTI)
- [2]

**Bibliographie du cours (Chapitres 1 à 6):**

**Les Nouveaux Précis Bréal : Physique**

Optique MPSI-PCSI-PTSI  
P. BRENDERS, M.SAUZEIX  
Bréal Editions  
Réf. 209.0345

**Optique : Fondements et applications**

Premiers cycles - Licence  
José-Philippe PEREZ  
MASSON Sciences  
DUNOD 7<sup>ème</sup> édition

**H Prépa : Nouveau Programme**

Optique 1<sup>ère</sup> année MPSI – PCSE – PTSI  
Jean-Marie BREBEC, Thierry DESMARAIS, Marc MENETRIER, Bruno NOËL, Régine NOËL, Claude Orsini  
Hachette Supérieur