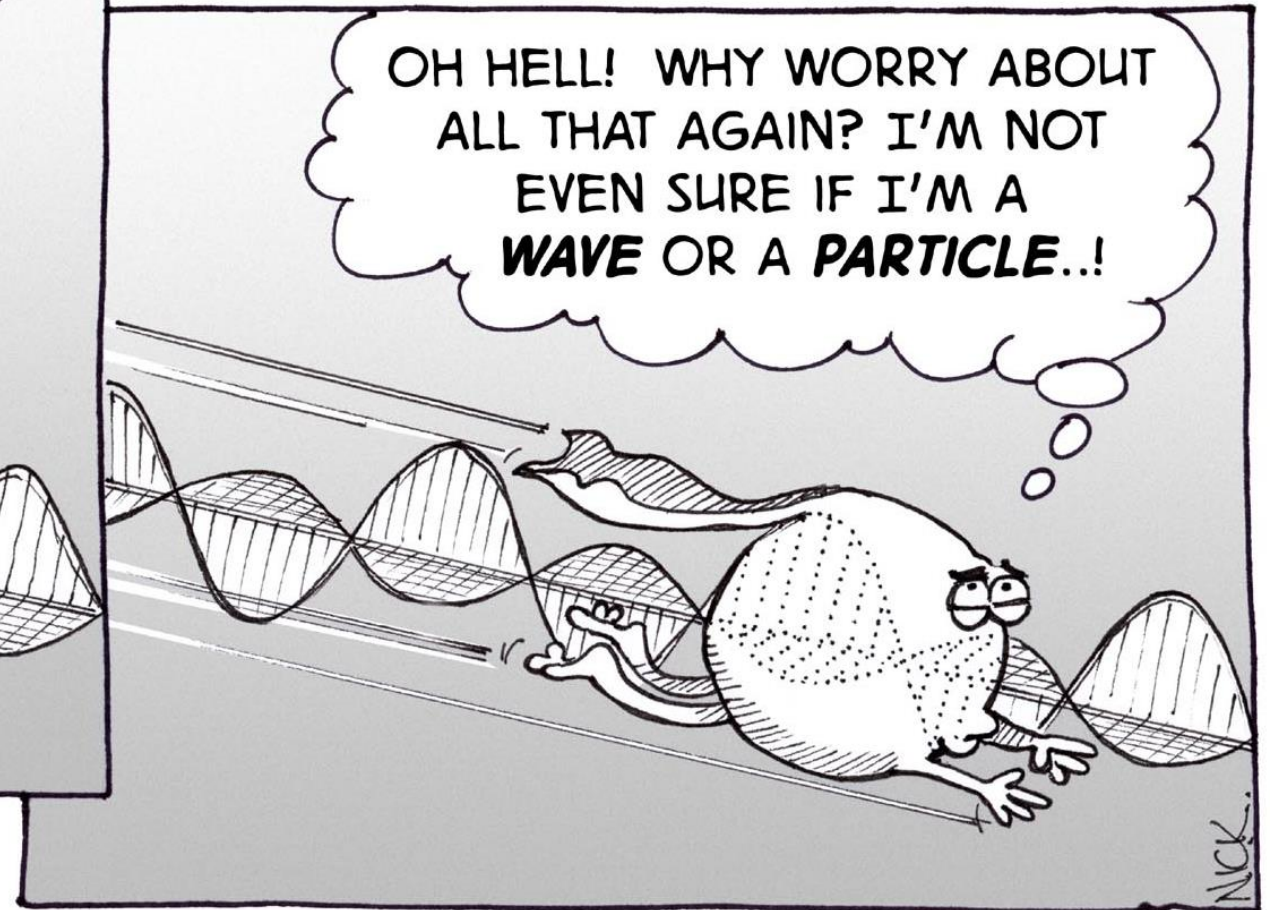
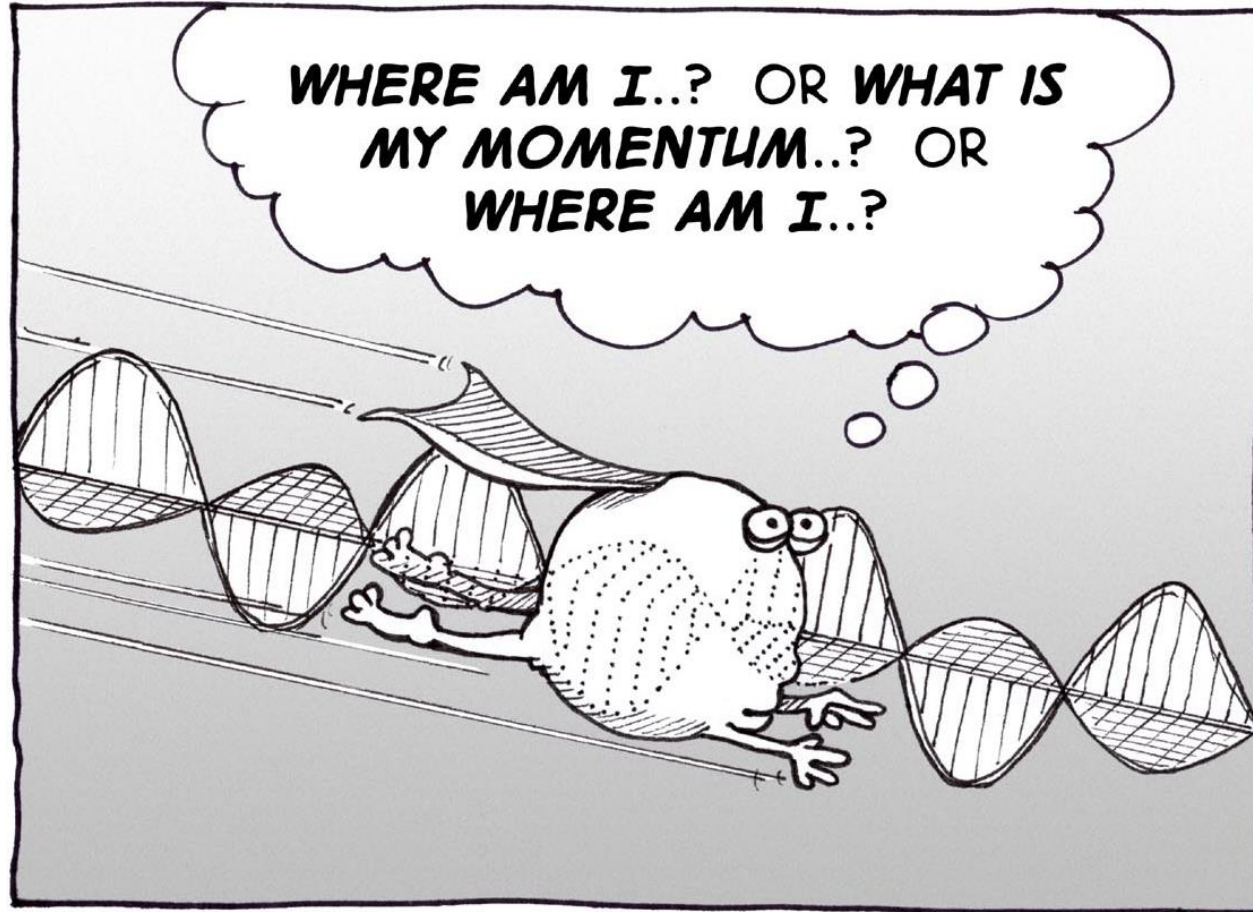


Optique géométrique

Lois de Descartes



Optique = domaine de la physique traitant des propriétés de la lumière.

L'optique se décompose en deux grandes parties :

- **l'optique géométrique** qui est l'étude du comportement de la lumière et la formation des images par un instrument d'optique -> programme de 1^{ère} année.

- **l'optique "physique"** qui traite de la lumière comme d'une onde électromagnétique et concerne les phénomènes d'interférences, de diffraction et de polarisation -> programme de 2^{ème} année dans certaines filières.

Réflexion, réfraction

Notion de rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique. Indice optique d'un milieu transparent.

Réflexion, réfraction des ondes lumineuses.

Lois de Snell-Descartes.

Rais sismiques. Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume.

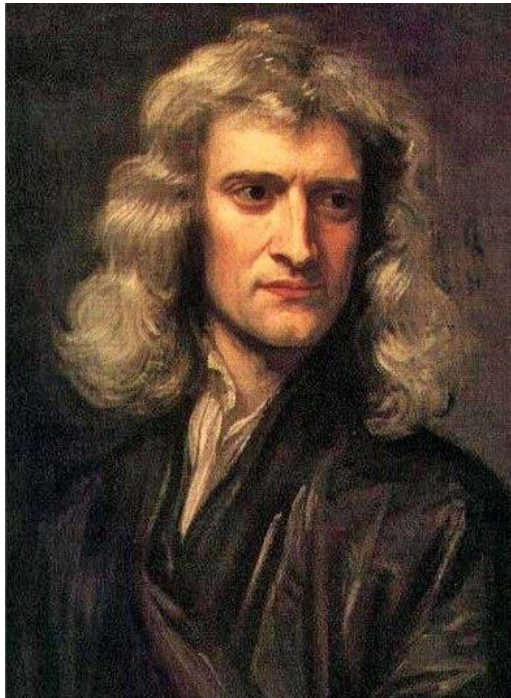
Définir le modèle de l'optique géométrique et en indiquer les limites.

Établir la condition de réflexion totale.

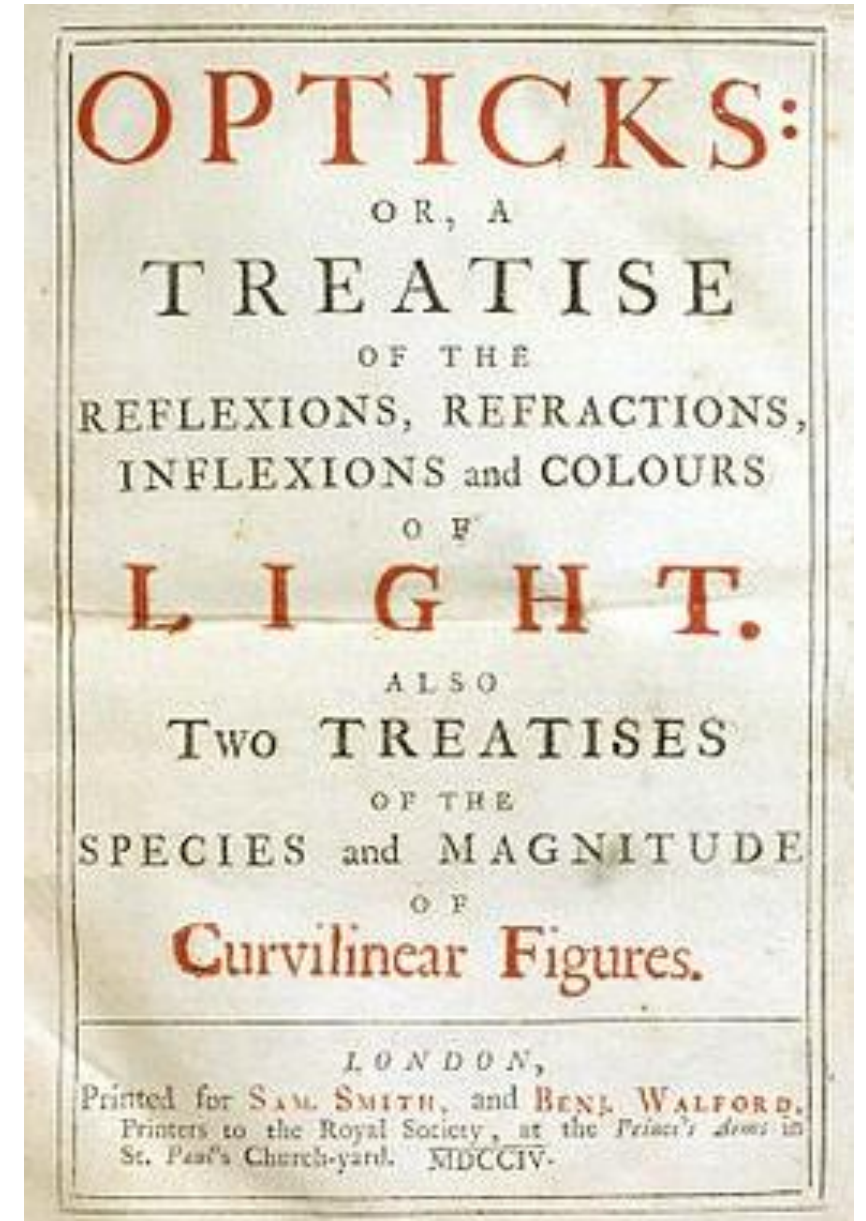
Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.

La nature physique de la lumière a été la source de controverses.

Isaac Newton a été le premier à proposer une théorie de la lumière, dans son ouvrage *Opticks*, publié en 1704. Pour lui, la lumière serait composée de particules de différentes couleurs ; le phénomène de réflexion de la lumière s'interpréterait comme un simple rebond de ces particules sur une surface réfléchissante.



Isaac Newton
1642-1727



La découverte des phénomènes de diffraction et d'interférences aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles a conduit à rejeter cette interprétation corpusculaire de la lumière. **Huygens et Fresnel** ont au contraire jeté les bases d'une théorie ondulatoire de la lumière, qui a été intégrée vers 1875 dans une théorie plus vaste : l'électromagnétisme. Il semblait alors que la nature physique de la lumière était fermement établie.



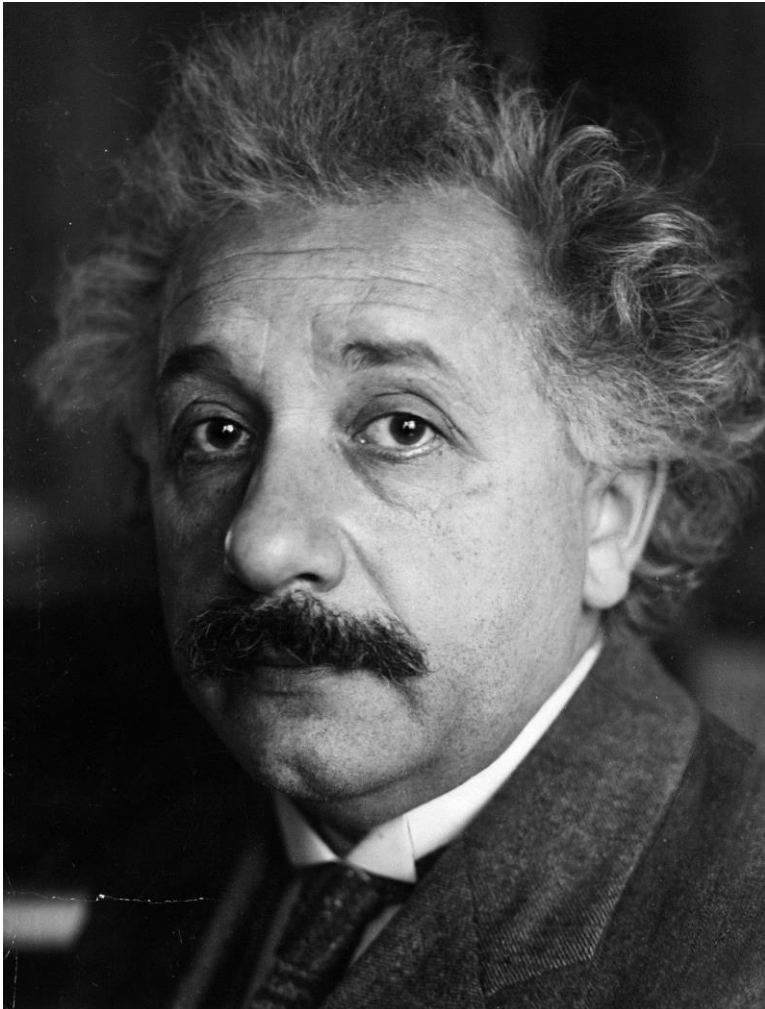
Augustin Fresnel
1788-1827



Christiaan Huygens
1629-1695

Au début du 20^{ème} siècle, les travaux d'**Einstein** sur l'effet photoélectrique l'ont amené à reconsidérer cette position, et à revenir à une interprétation corpusculaire. Les deux points de vue, ondulatoire et corpusculaire, apparemment incompatibles, ont été finalement rassemblés par **Louis de Broglie** vers 1925.

Albert Einstein
1879-1955



Louis de Broglie
1892-1987



Nature ondulatoire de la lumière

Le phénomène de diffraction trouve une explication simple à l'aide de la théorie ondulatoire de la lumière.

Une conséquence importante de cette nature ondulatoire est qu'on ne peut pas isoler un rayon lumineux, cela impose une limitation sur la taille des obstacles utilisés pour que les lois de l'optique géométrique restent valables, environ un micron.

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent en phase, perpendiculairement l'un par rapport à l'autre et perpendiculairement à la direction de propagation.

La lumière peut se propager en l'absence de support matériel (à la différence des ondes mécaniques).

Il s'agit d'une onde progressive sinusoïdale de la forme

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

S_m = amplitude ; ω = pulsation ; φ_0 = phase à l'origine.

L'onde progressive présente une double périodicité :

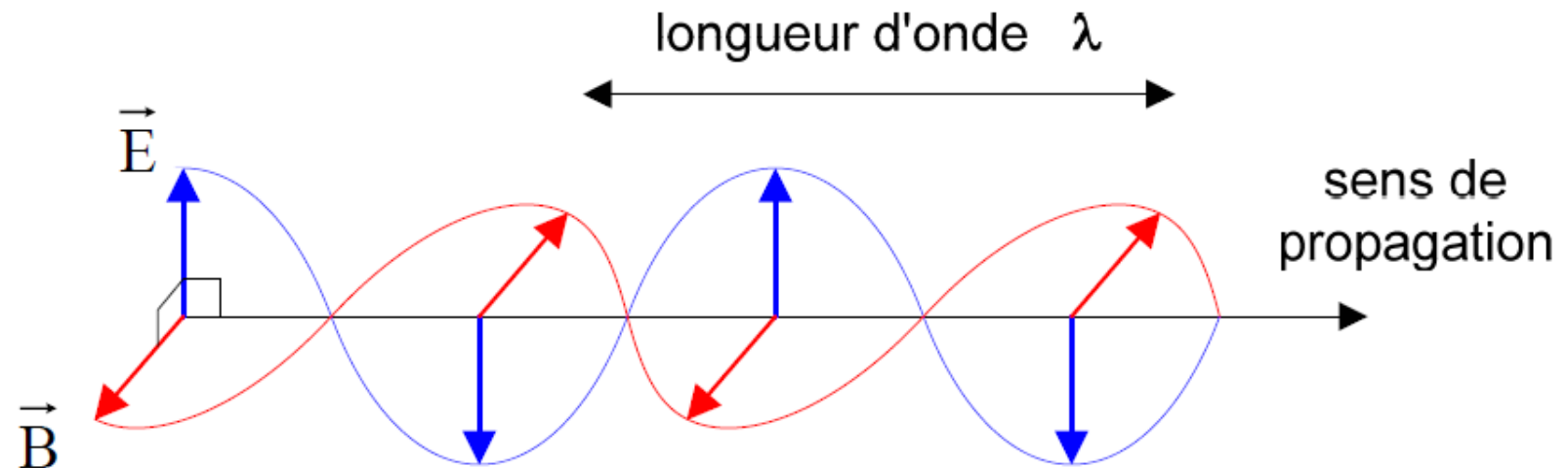
- **spatiale** caractérisée par λ (**longueur d'onde**)

- **temporelle** caractérisée par T (**période**) indépendante du milieu

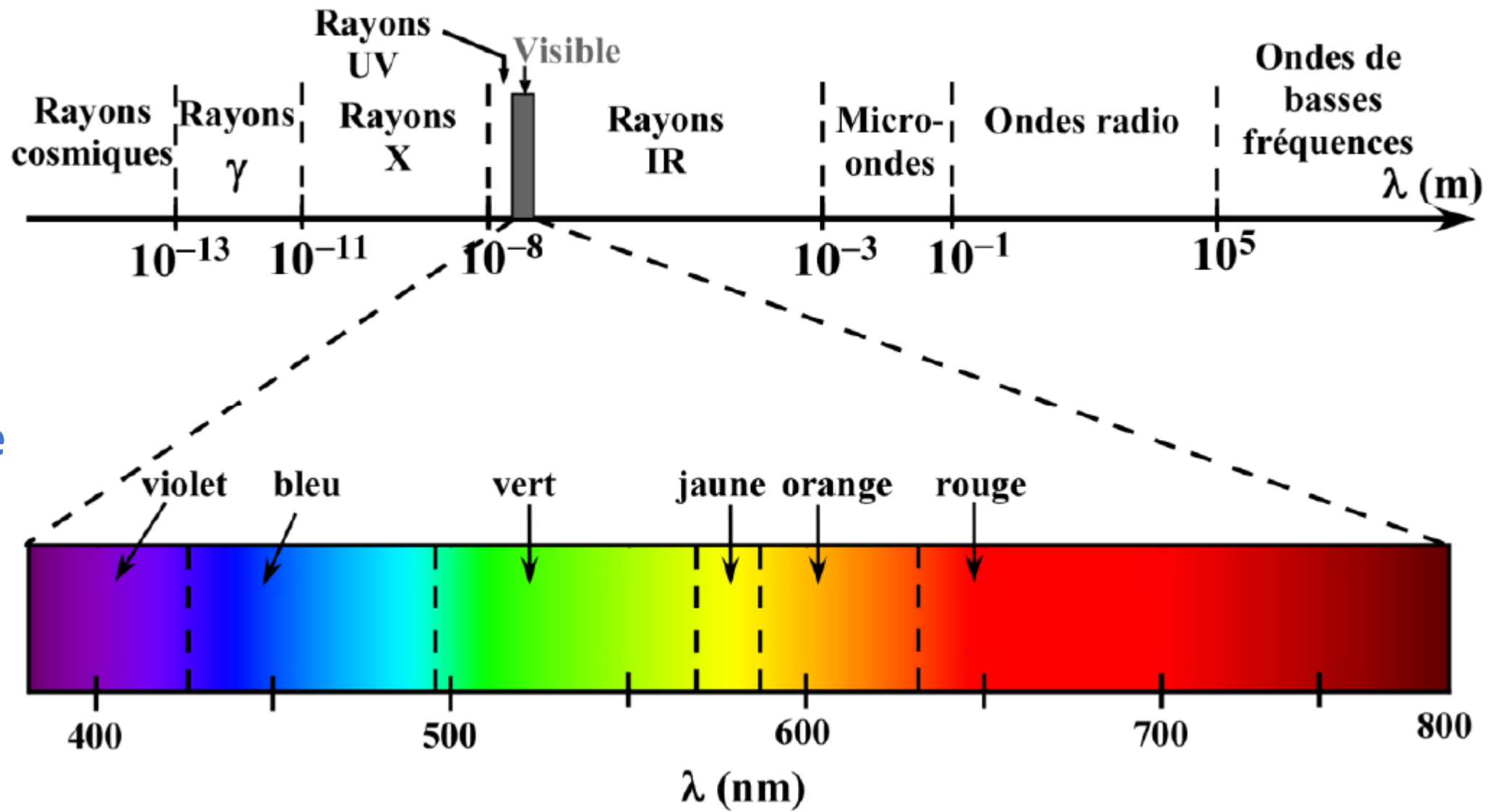
dans lequel se propage l'onde ($T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$),

$\lambda = v.T$, v étant la vitesse de propagation de l'onde dans ce milieu.

Dans le vide : $\lambda_0 = c.T$



La lumière est en général la superposition d'ondes électromagnétiques (OEM) de différentes fréquences : des **ondes monochromatiques**. La lumière blanche peut être décomposée pour former un spectre lumineux.



Spectre OEM
Echelle
logarithmique

Propagation d'une OEM

Hypothèse pour l'ensemble du cours qui suit :

le milieu est un Milieu Homogène Transparent et Isotrope (MHTI).

- **homogène** : propriétés physiques identiques en tout point du milieu
- **transparent** : pas d'absorption de la lumière par le milieu
- **isotrope** : propriétés identiques dans toutes les directions de l'espace.

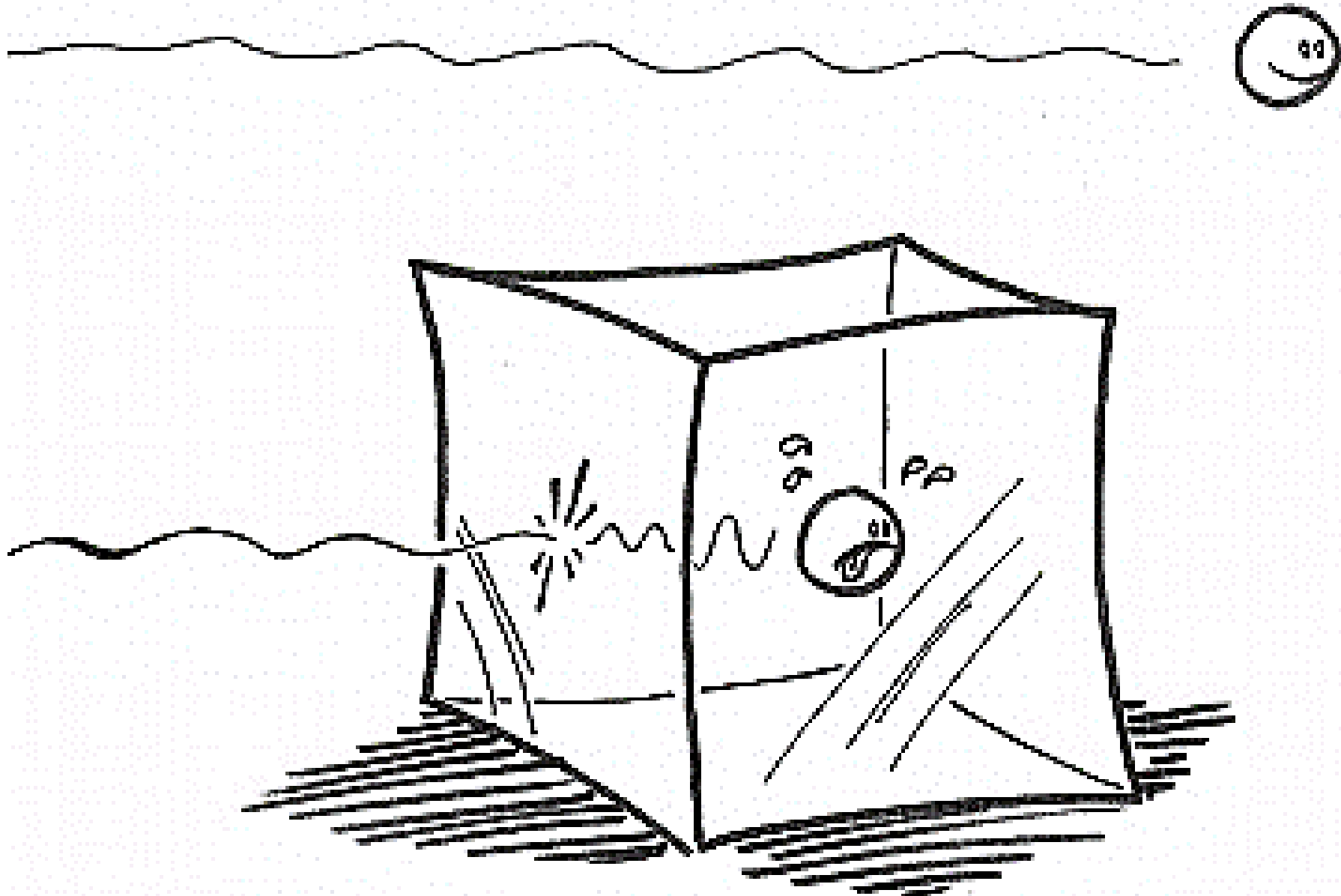
La fréquence ν est une caractéristique intrinsèque de l'OEM, indépendante du milieu traversé.

Le milieu dans lequel se propage cette onde est caractérisé par son indice optique (de réfraction) n défini par :

$$n = \frac{c}{\nu} \geq 1$$

avec c célérité de la lumière dans le vide indépendante de la longueur d'onde et ν célérité de la lumière dans un milieu donné qui dépend de la longueur d'onde.

La vitesse dans un MHTI étant toujours inférieure à celle dans le vide, l'indice n est toujours supérieur à 1.



Indice de réfraction de quelques substances à 20°C

Air	1.00	Opaline	1.45
Acétone	1.36	Plexiglass	1.51
Alcool pur	1.32	Polystyrène	1.20
Ambre	1.54	Rubis	1.78
Cristal	1.60 à 2.00	Quartz	1.55 ou 1.64
Diamant	2.42 à 2.75	Saphir	1.77
Eau	1.33	Topaze	1.61
Emeraude	1.57	Tourmaline	1.27
Glace	1.31	Verre	1.50
Glycérine	1.47	Verre crown	1.52
Lapis lazuli	1.61	Verres flint	1.56 - 1.65 -1.89

- **n est un nombre sans dimension et $\lambda_{milieu} = \frac{\lambda_{o(vide)}}{n}$**
- Dans un même milieu, la vitesse de propagation dépend de la longueur d'onde, donc **n varie avec λ pour un milieu donné** ce qui provoque ce que l'on appelle des **aberrations chromatiques**.
- La plupart des MHTI ont un indice qui vérifie la loi empirique de Cauchy : **$n = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$**
A et B constantes positives caractéristiques du milieu.
- Dans le visible : **$\lambda_{violet} < \lambda_{rouge}$ (et $c_{violet} < c_{rouge}$)**
donc $n_{violet} > n_{rouge}$

Nature corpusculaire

Le rayonnement est composé de particules appelés photons.

Le photon est une particule de masse nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière (c dans le vide et v dans un milieu quelconque), d'énergie:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda_0}, \text{ avec } h \text{ constante de Planck } (h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}).$$

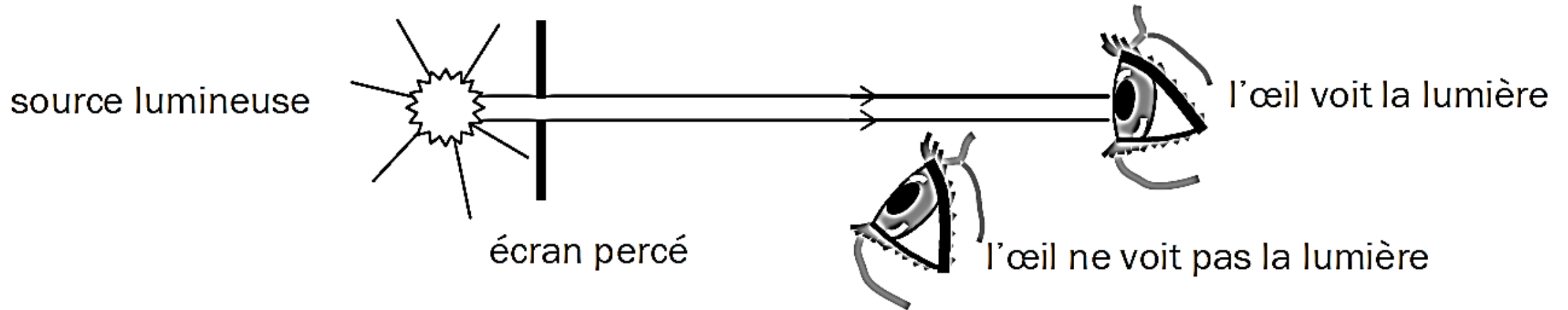
E , quantum d'énergie : aspect corpusculaire.

λ_0 , longueur d'onde : aspect ondulatoire.

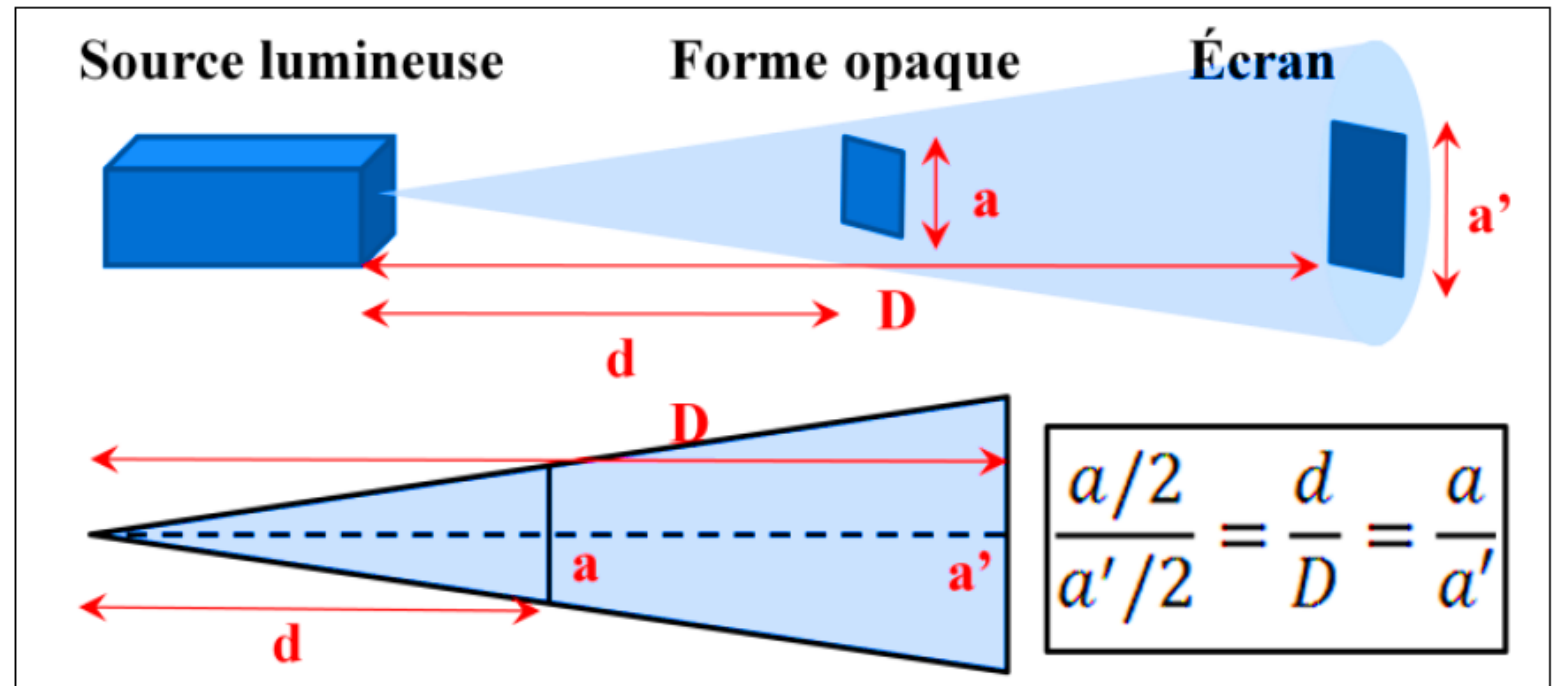
Cette nature corpusculaire est mise en évidence notamment avec l'effet photoélectrique (émission d'électrons d'une plaque métallique soumise à un rayonnement, quelle que soit son intensité lumineuse).

Postulat fondamental de l'optique géométrique

Dans un MHTI (n constant), la lumière se propage rectilignement.

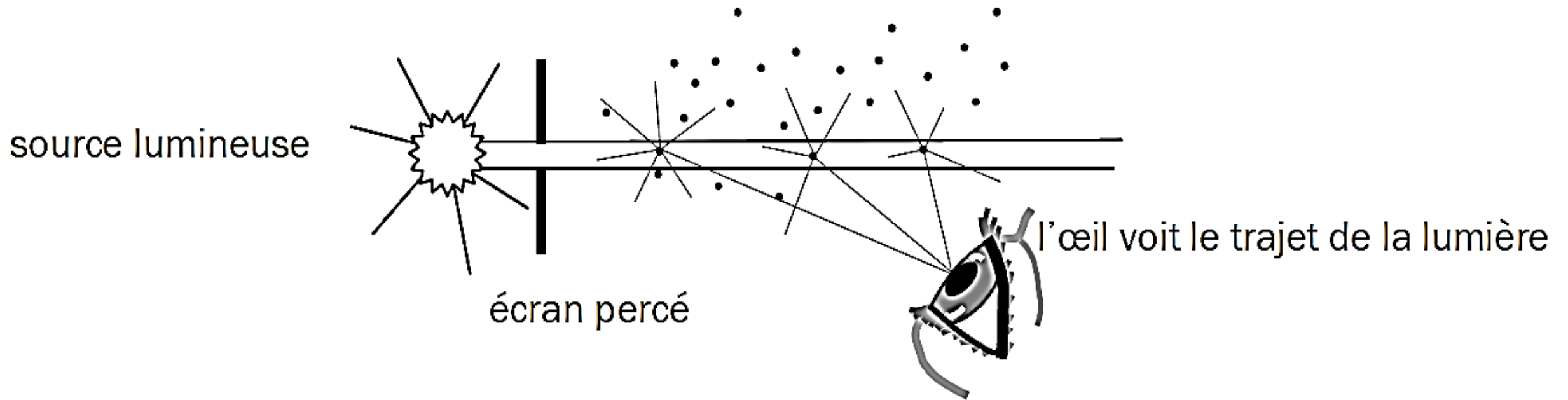


Propagation rectiligne théorème de Thalès



L'œil situé hors du trajet de la lumière peut apercevoir ce trajet grâce aux fines particules en suspension dans l'air.

Ces particules éclairées diffusent la lumière qu'elles reçoivent, devenant autant de points lumineux, nouvelles sources.



Pouvons-nous isoler un rayon lumineux ?

La lumière se propage donc en ligne droite et d'une manière générale dans toutes les directions de l'espace.

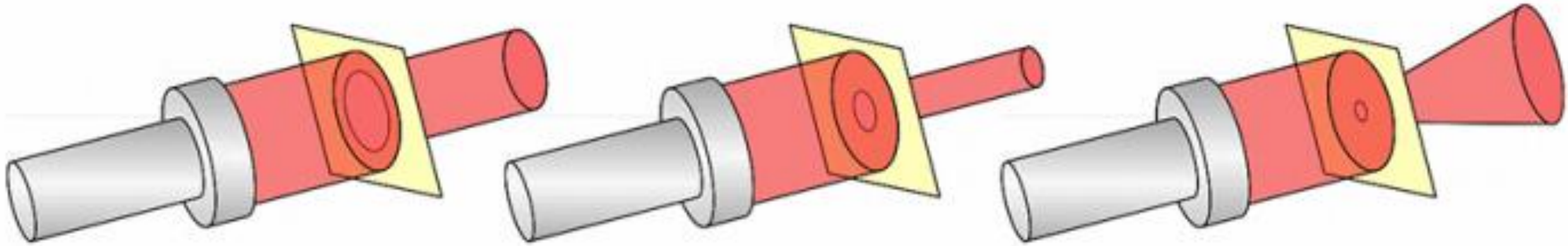
Cette loi n'est plus valable si la lumière rencontre un obstacle de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde : on a alors phénomène de diffraction.

Pour cette raison, il est impossible en pratique d'isoler un rayon lumineux. **Diamètre > 1 μm .**

Un rayon lumineux peut se définir en théorie comme une ligne suivant le trajet de la lumière.

On oriente toujours un rayon lumineux sur un schéma.

Si on diminue le diamètre du diaphragme, l'épaisseur du faisceau diminue d'abord, avant de diverger.



C'est le phénomène de diffraction.

L'ouverture se comporte comme une nouvelle source et la tâche centrale est vue sous un angle $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{r}$

C'est la limite de l'optique géométrique.

Propriétés des rayons lumineux.

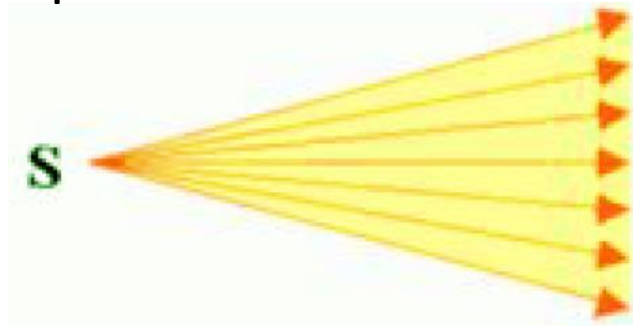
- **Indépendance** : les rayons lumineux se propagent indépendamment les uns des autres.
- **Principe de Fermat** (ou principe du moindre temps) : Dans un MHTI, la lumière pour aller d'un point A à un point B emprunte le chemin qui correspond à un temps de trajet minimal. On a donc

$$t = \frac{AB}{v} = \frac{n \cdot AB}{c}.$$

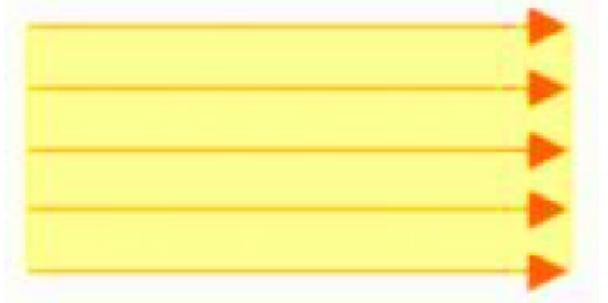
- **Principe du retour inverse de la lumière** : si l'on inverse le sens de propagation de la lumière (donc de B vers A), la trajectoire parcourue sera identique. Le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation.

Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux. Il est composé d'une infinité de rayons lumineux. Un pinceau lumineux est un faisceau lumineux étroit.

Faisceau conique : pour réaliser un faisceau lumineux conique il faut placer un diaphragme circulaire devant une source ponctuelle. Le faisceau lumineux est donc un cône qui a pour origine le point source et qui coupe la surface délimitée par le diaphragme.



Faisceau parallèle : on peut observer des faisceaux lumineux parallèles et non de forme conique. C'est par exemple le cas d'un faisceau laser ou si la source ponctuelle de lumière est infiniment loin du diaphragme.



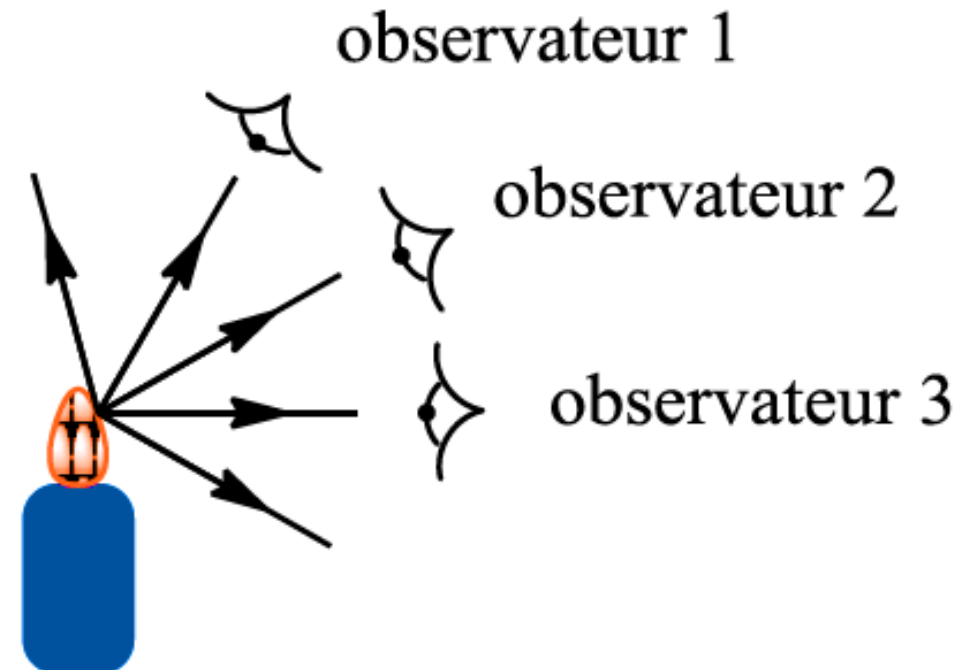
Les sources de lumière

L'œil est un récepteur qui peut voir des objets lumineux soit parce qu'ils émettent de la lumière soit parce qu'ils la diffusent.

Sources primaires

Les sources primaires de lumière sont des corps qui produisent la lumière qu'ils émettent comme par exemple le soleil, une étoile, une flamme, une ampoule...

Une source primaire émet dans toutes les directions, quelle que soit la position de l'observateur, celui-ci reçoit un rayon en ligne droite



En optique, on utilise en pratique trois types de source primaire :

❑ Sources à spectre de raies : les lampes spectrales

Sources émettant un spectre discontinu de radiations monochromatique dues à l'excitation suivie d'une désexcitation des atomes qui constitue le gaz utilisé.

❑ Sources à spectre continu : les lampes à incandescence

Le fonctionnement de ces lampes est basé sur le phénomène de rayonnement du corps noir. Un corps à une certaine température, émet un rayonnement électromagnétique comprenant toutes les longueurs d'onde du spectre.

❑ Sources à émission stimulée : les lasers

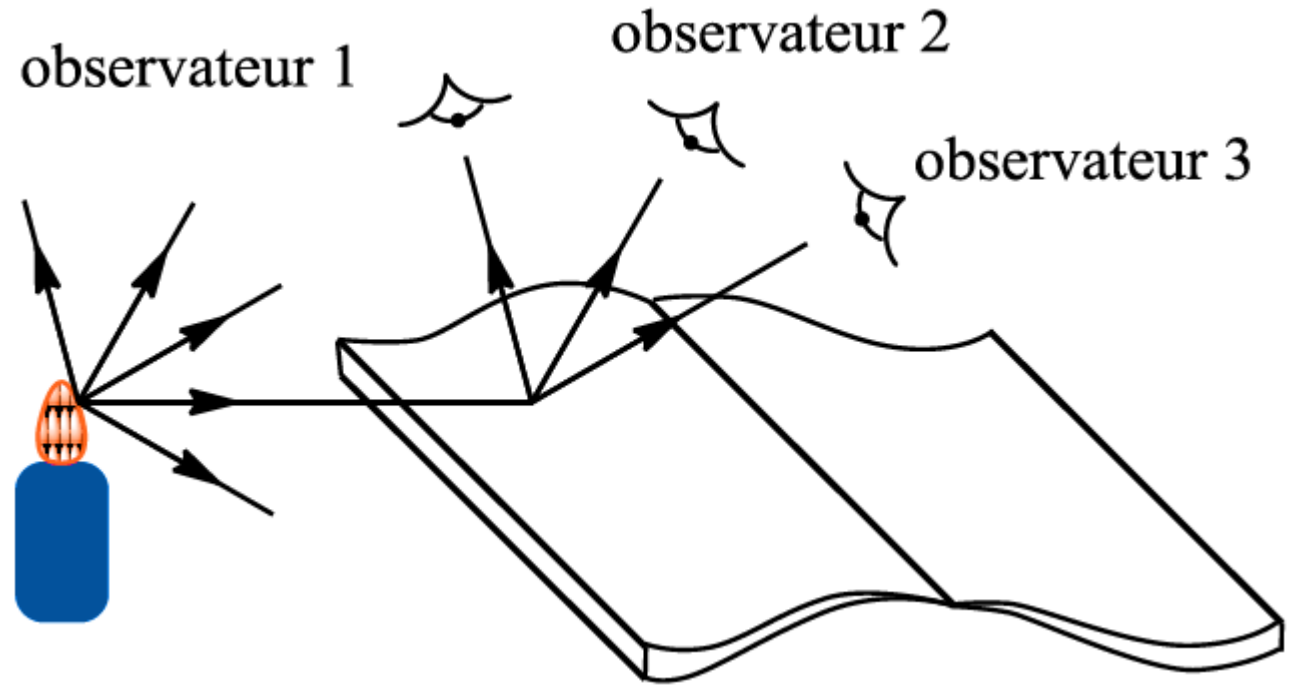
Une source laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est basée sur le principe de l'émission stimulée : les différents atomes de la source se désexcitent de façon synchronisée (la source est dite cohérente). Le laser émet ainsi un rayonnement quasi-monochromatique. Les fréquences des ondes composant la

lumière d'un laser sont très proches : $\frac{\Delta\nu}{\nu_{moy}} = 10^{-10}$

Sources secondaires : Les sources secondaires diffusent la lumière qu'elles reçoivent. Les planètes, les satellites comme la lune, peau, écran de projection, verre dépoli...

Tous les points de l'objet éclairés par la source primaire diffusent la lumière dans toutes les directions.

Quelle que soit la position de l'observateur, ce dernier recevra des rayons diffusés issus de l'objet considéré comme source secondaire.



Il ne faut pas confondre ce phénomène avec la réflexion pour laquelle seul l'observateur placé dans la direction suivant la loi de la réflexion de Descartes (cf la suite) reçoit un rayon.

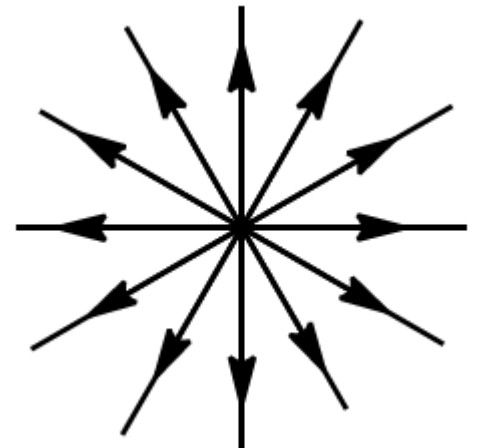
Sources ponctuelles ou étendues

Une source est dite ponctuelle si ses dimensions sont infiniment petites par rapport à sa distance d'observation. Sinon, la source est dite étendue.

Une source étendue peut être modélisée par une infinité de sources ponctuelles.

Ce sont des notions relatives car cela dépend de la position de l'observateur. Une étoile est un objet de très grande dimension mais vue de la Terre elle apparaît comme un point lumineux.

Du point de vue de l'optique géométrique, une source ponctuelle est analysée comme le point de croisement d'une infinité de rayons.



Lois de SNELL-DESCARTES (1637)

- **Un miroir** (ou catadioptré) est une surface polie parfaitement réfléchissante sur laquelle il n'y a que de la réflexion.
- **Un dioptré** est une surface dite réfringente limitant deux MHTI d'indices différents.

A la surface d'un dioptré, un faisceau lumineux peut être :

- réfléchi
- réfracté (ou transmis)

Le miroir plan et les lois de la réflexion.

Soit un rayon lumineux atteignant le dioptre au point I.

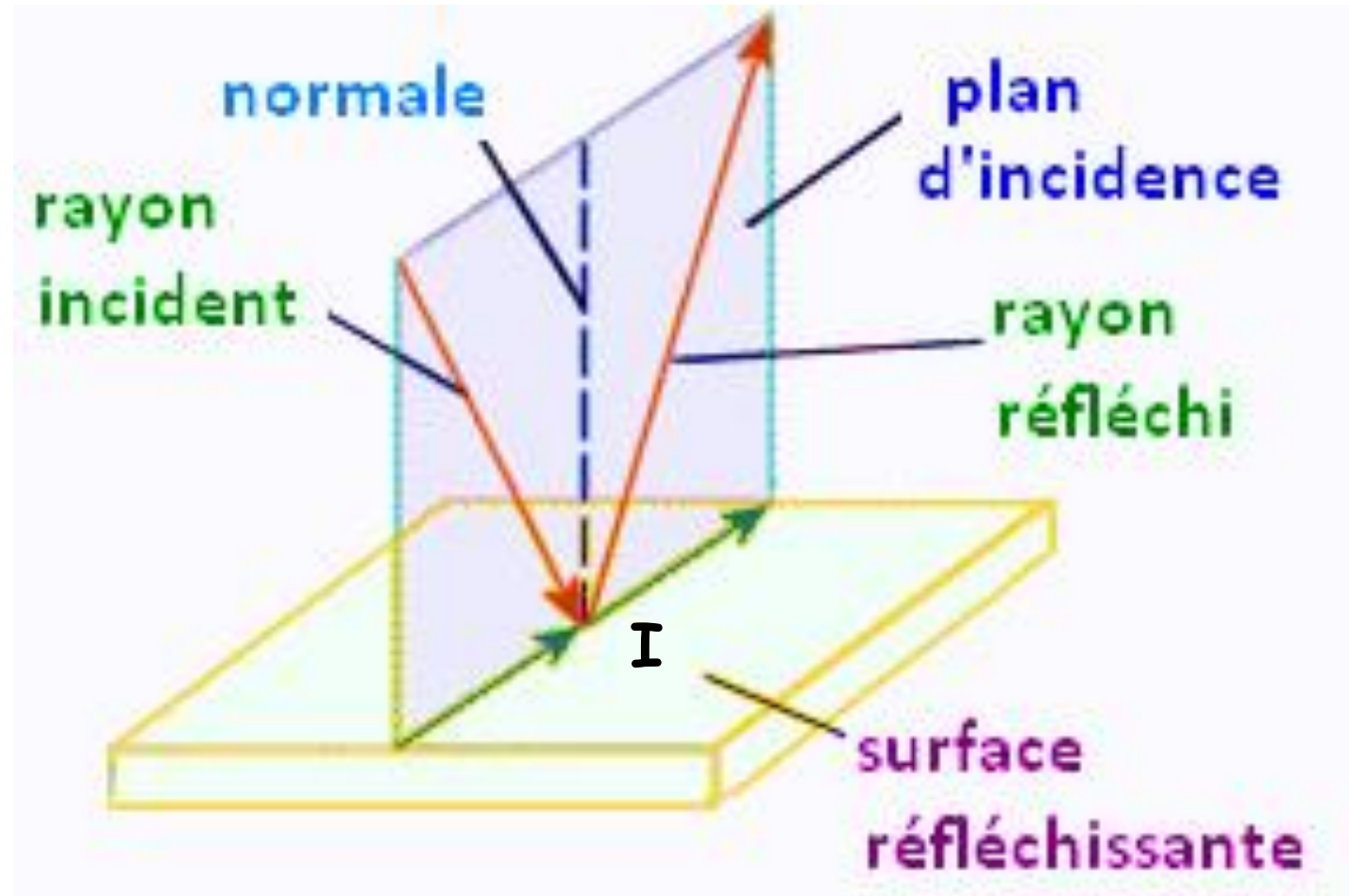
On appelle plan d'incidence le plan contenant le rayon incident et la normale au dioptre au point I.

1ère loi de Descartes relative à la réflexion:

le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence.

Rayon incident et rayon réfléchi sont dans le même plan appelé:

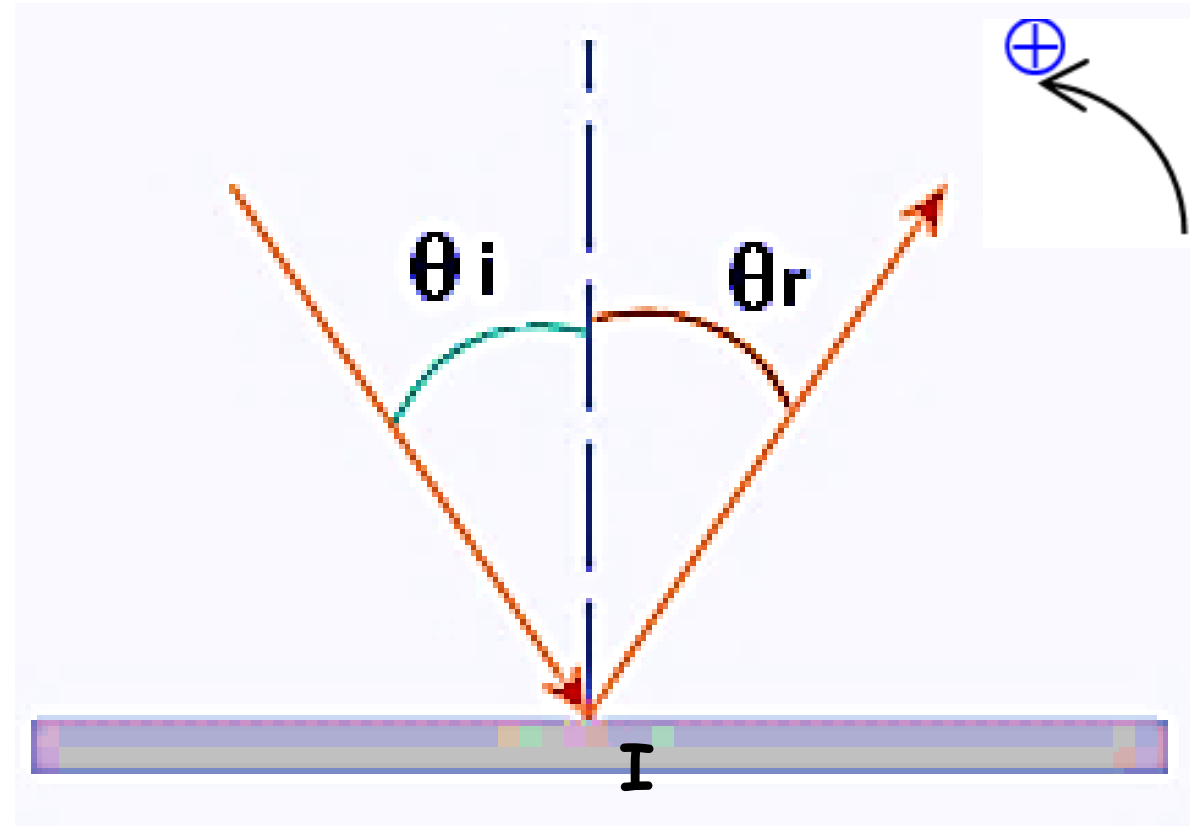
plan d'incidence.



2^{ème} loi de Descartes relative à la réflexion

l'angle de réflexion, mesuré par rapport à la normale au dioptre, vérifie :

- $\theta_r = \theta_i$ si angles non algébriques.
- $\theta_r = -\theta_i$ si angles algébriques orientés.



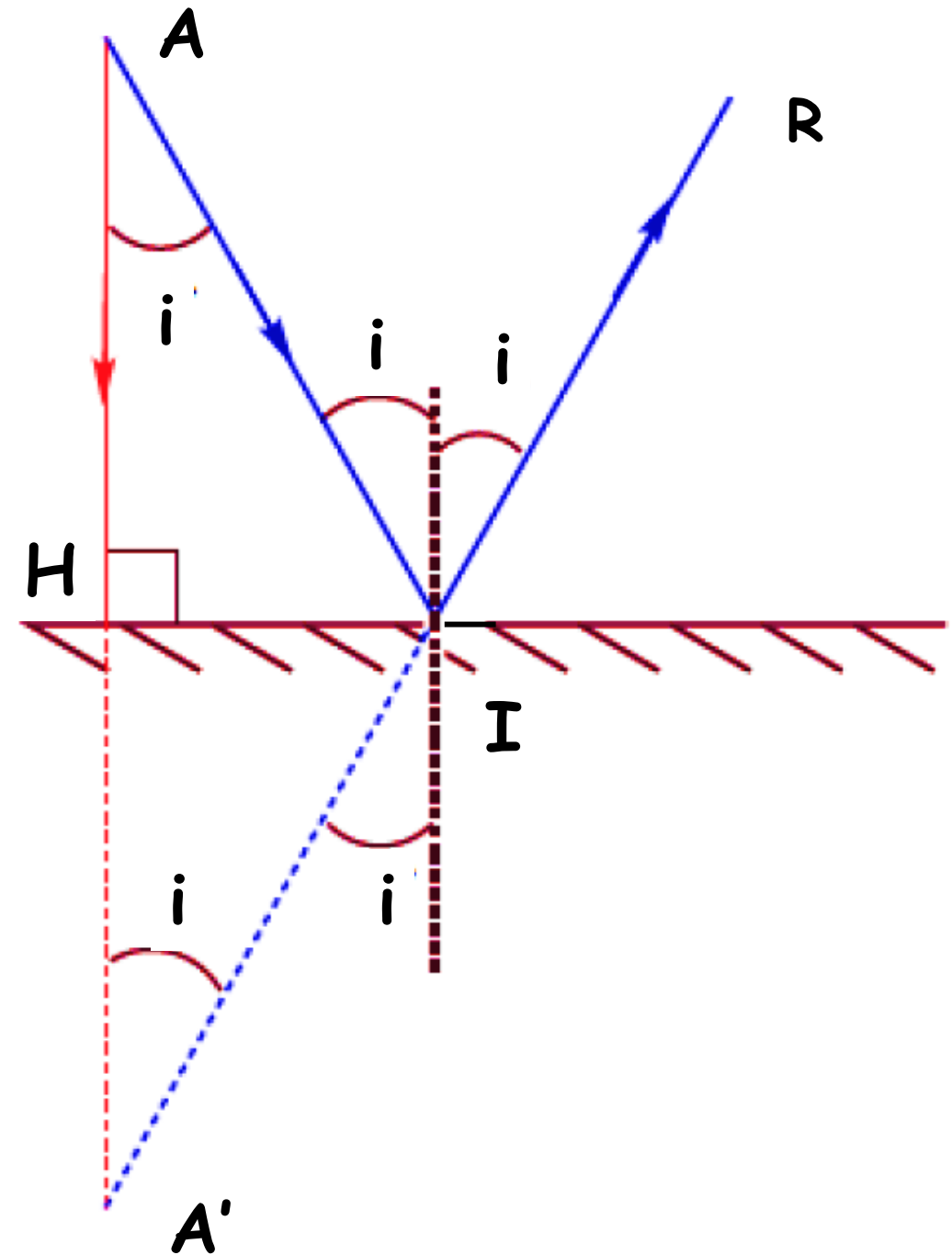
Méthode de construction du rayon réfléchi:

Construire A' le symétrique de A par rapport au miroir;

le rayon incident issu de A vient frapper le miroir en I .

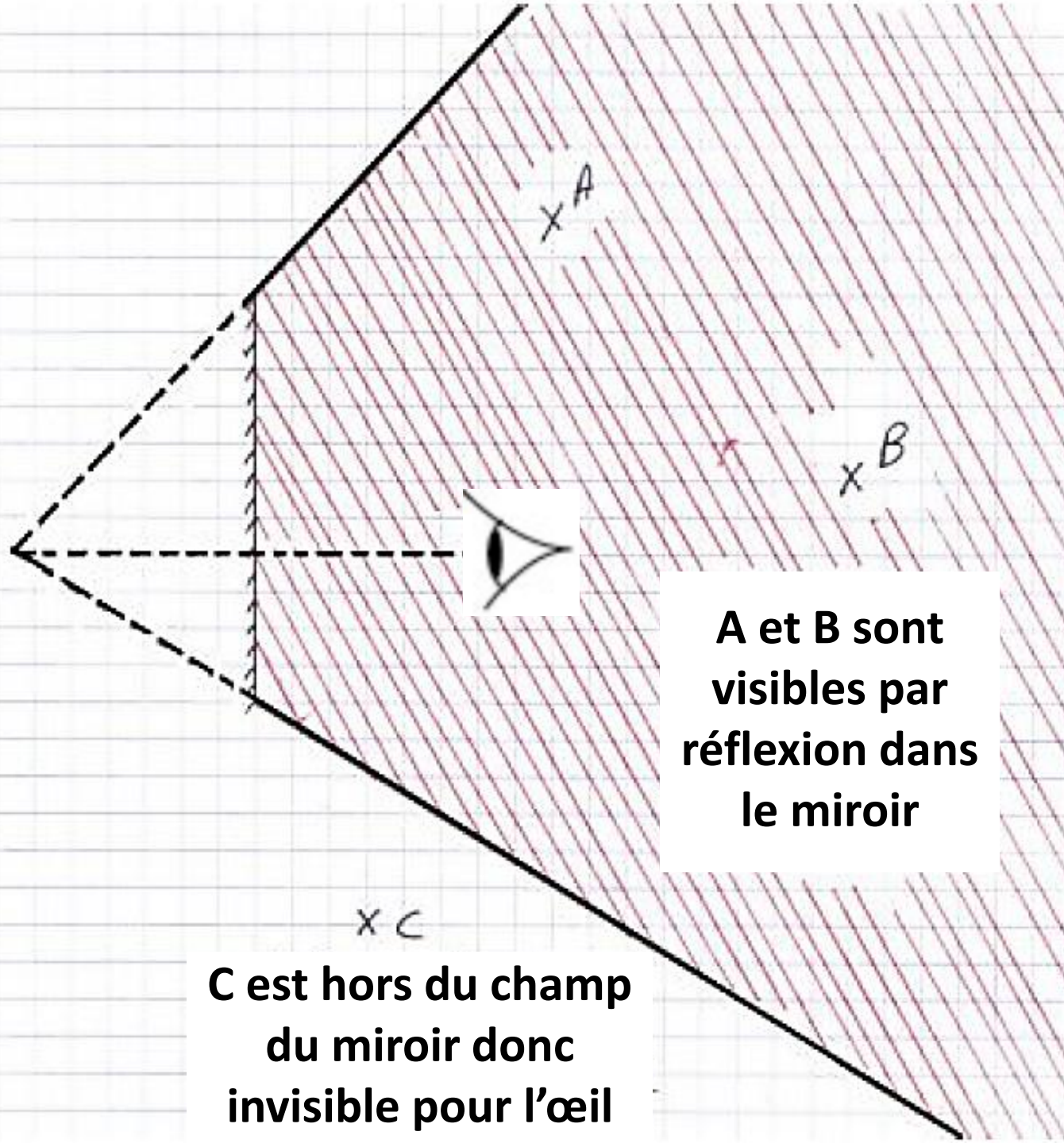
On trace alors la droite issue de A' passant par I .

La portion IR correspond au rayon réfléchi.



Champ du miroir:

- **Point-objet**: point d'où partent les rayons lumineux qui arrivent sur le miroir
- **Point-image**: point symétrique du point-objet par rapport au plan du miroir; c'est un point fictif, virtuel, qui se trouve derrière le miroir.
- **Champ du miroir**: portion de l'espace visible par réflexion dans le miroir; il dépend de la taille du miroir et de la position de l'œil. Pour tracer le champ d'un miroir il faut construire l'image de l'œil dans le miroir puis tracer les rayons qui arrivent à cette image en s'appuyant sur les contours du miroir.

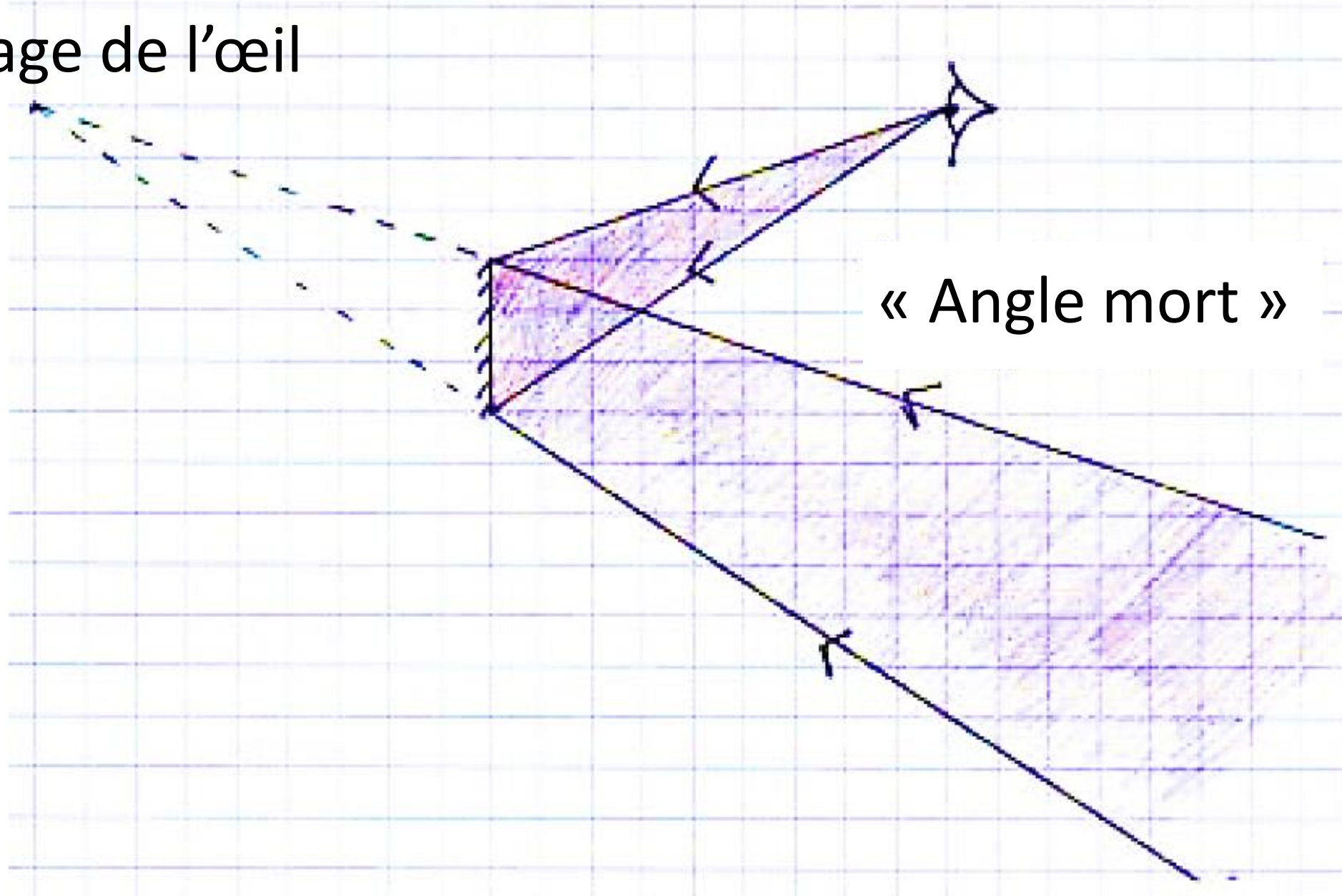


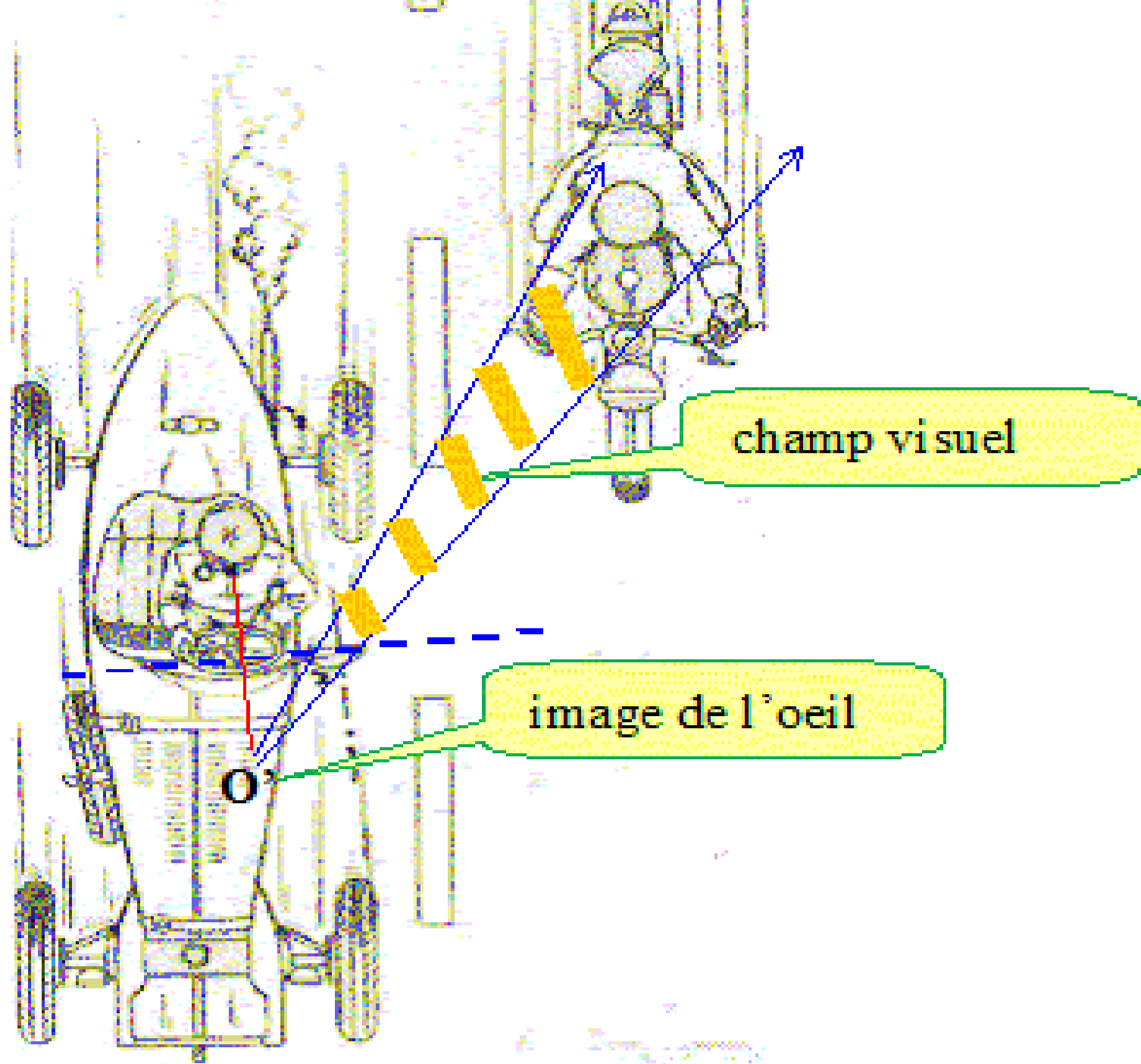
**A et B sont
visibles par
réflexion dans
le miroir**

**C est hors du champ
du miroir donc
invisible pour l'œil**

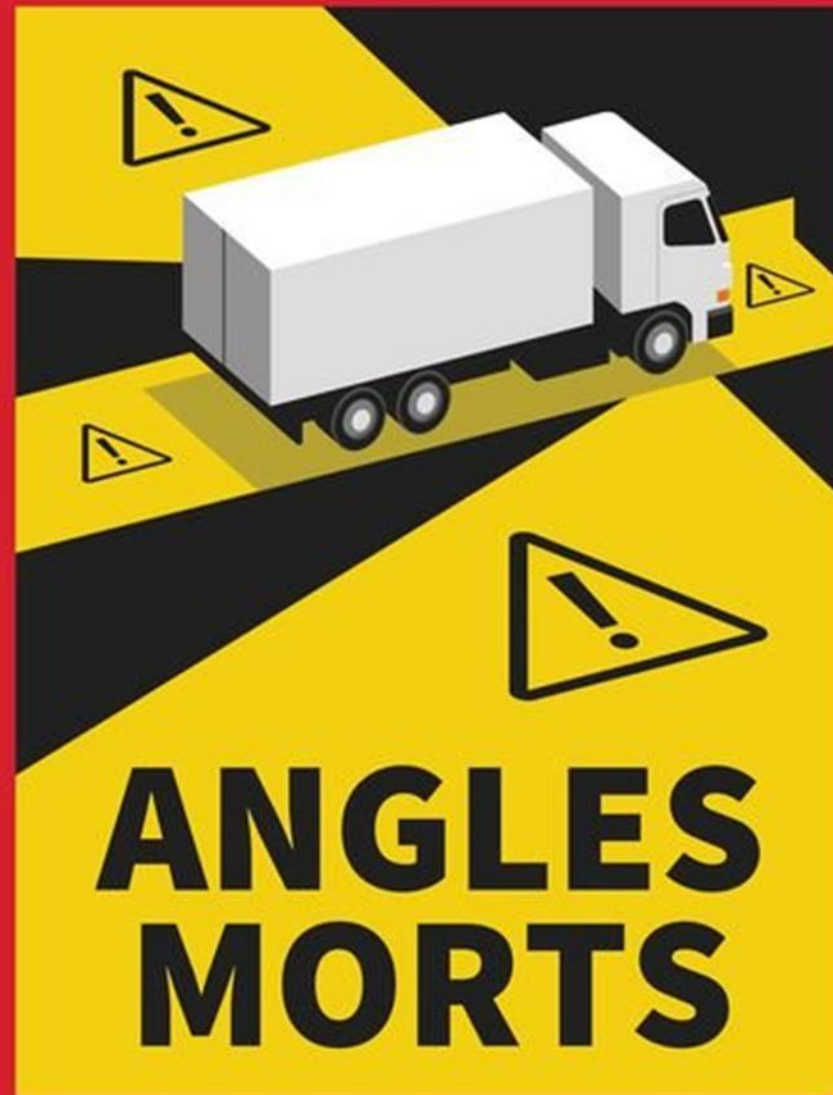
Rétroviseur et angle mort

Image de l'œil





ATTENTION



**ANGLES
MORTS**

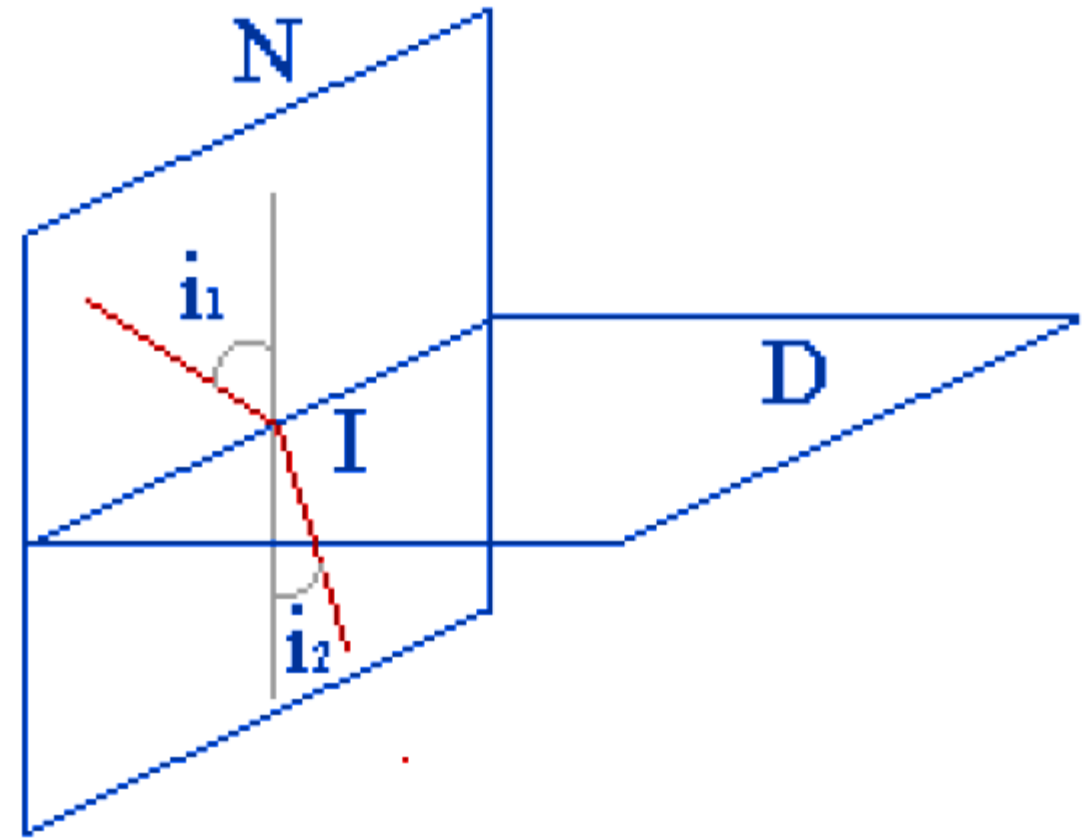
Dioptre plan et lois de la réfraction

Un dioptre plan est une surface plane délimitant deux milieux transparents d'indice de réfraction n_1 et n_2 .

Lois de la réfraction de Snell-Descartes

1^{ère} loi de Snell-Descartes

Le rayon réfracté reste
Dans le plan d'incidence

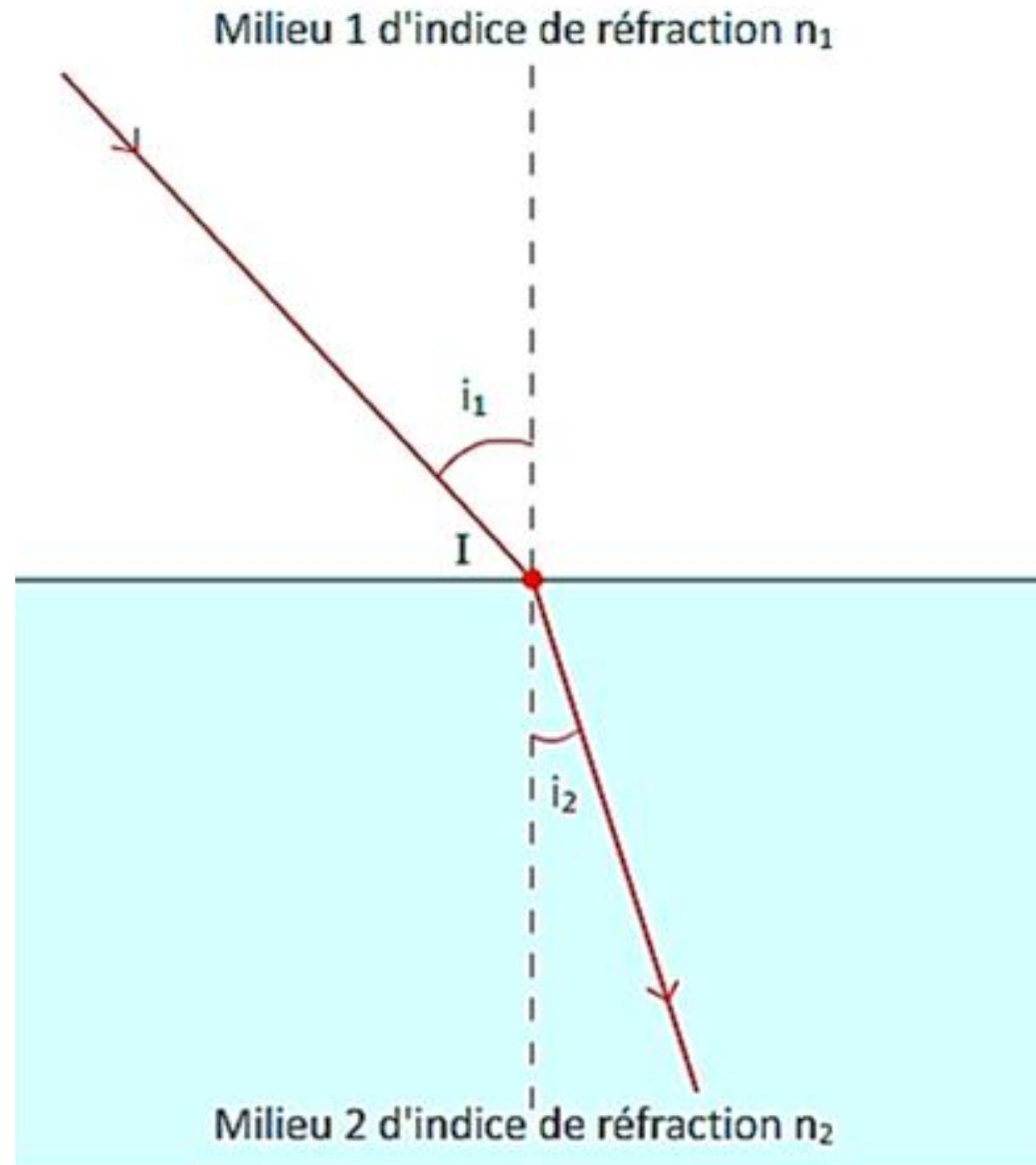


2^{ème} loi de

Snell-Descartes:

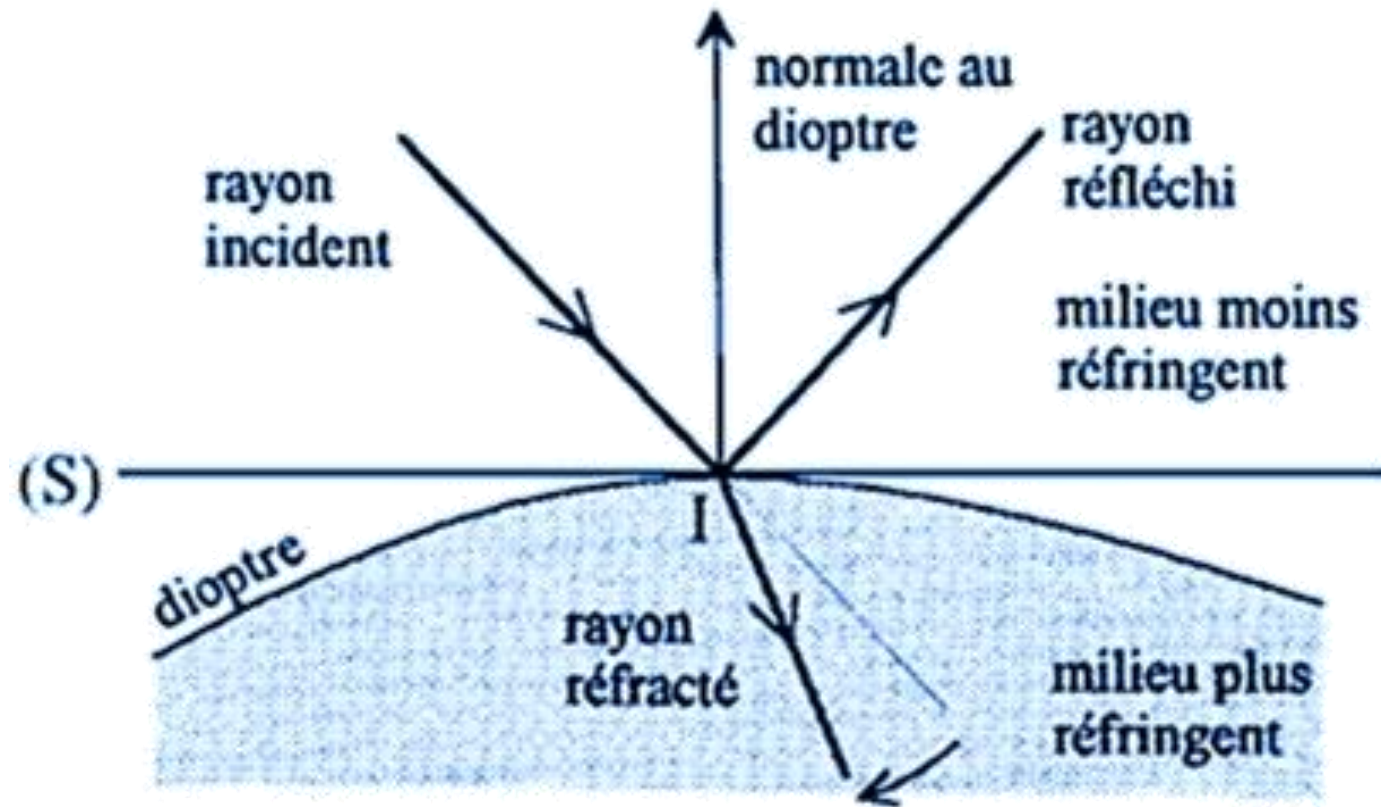
l'angle de réfraction, mesuré par rapport à la normale au dioptre, vérifie :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

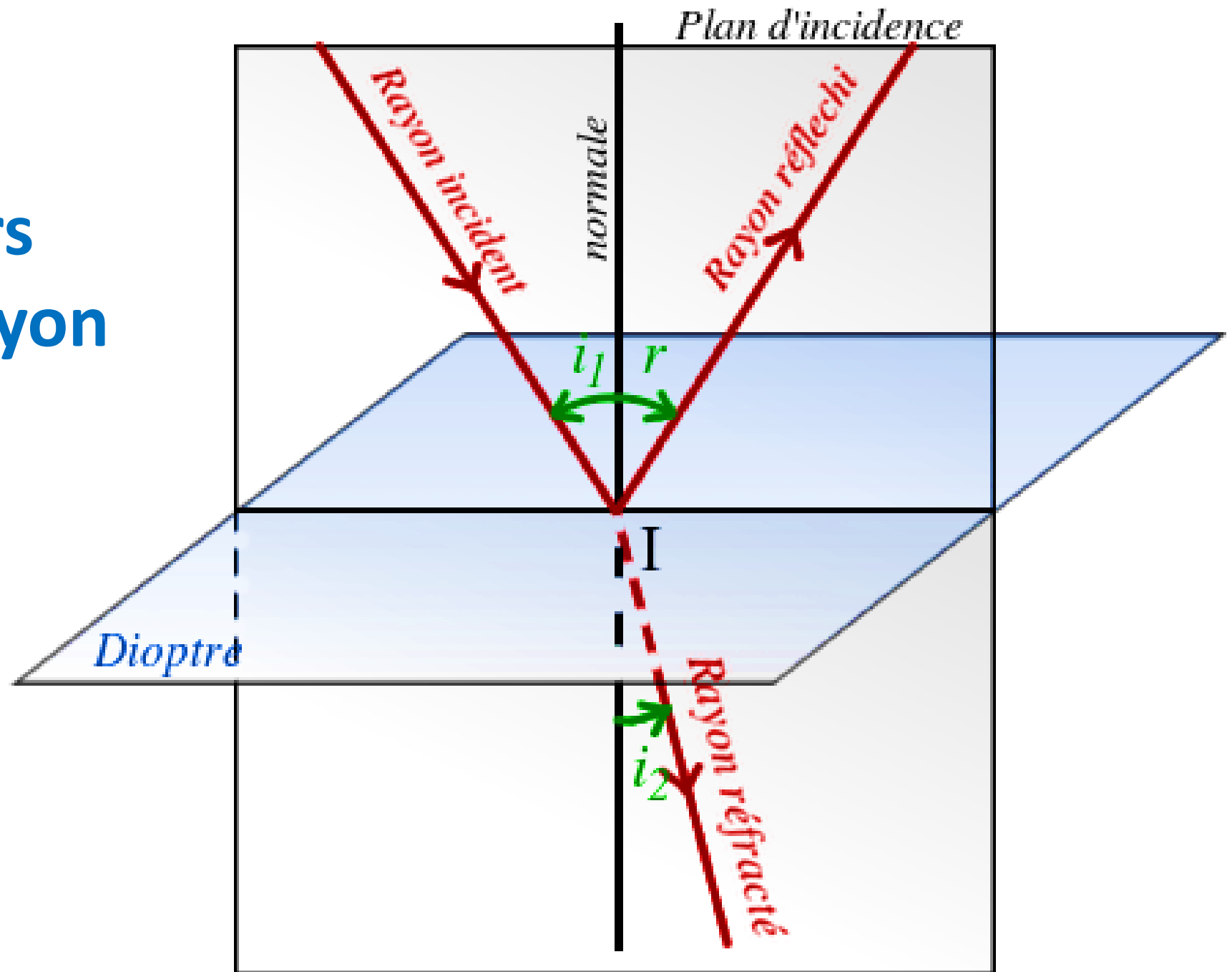


- ❑ Le rayon réfracté passe de l'autre côté de la normale à la traversée du dioptre.
- ❑ En réfraction, si $i_1 = 0$, alors $i_2 = 0$, le rayon réfracté n'est pas dévié.

Pour un dioptre non plan il faut considérer un plan tangent à la surface :



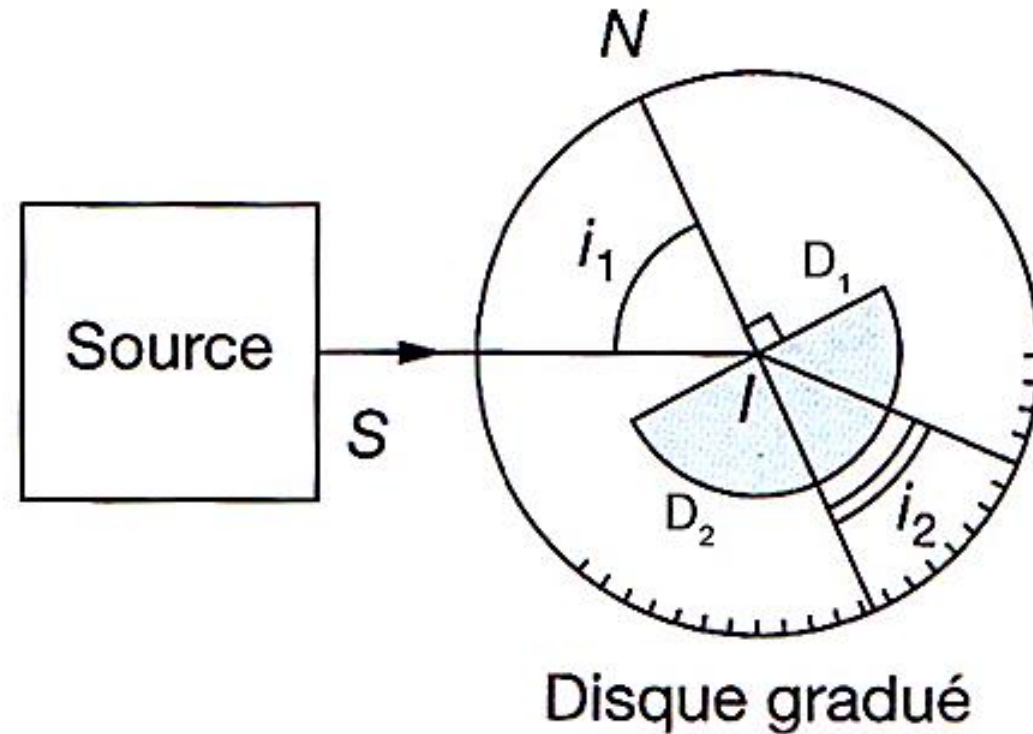
Attention:
Il y a toujours
présence du rayon
réfléchi.



Dispositif de laboratoire pour étudier la réfraction

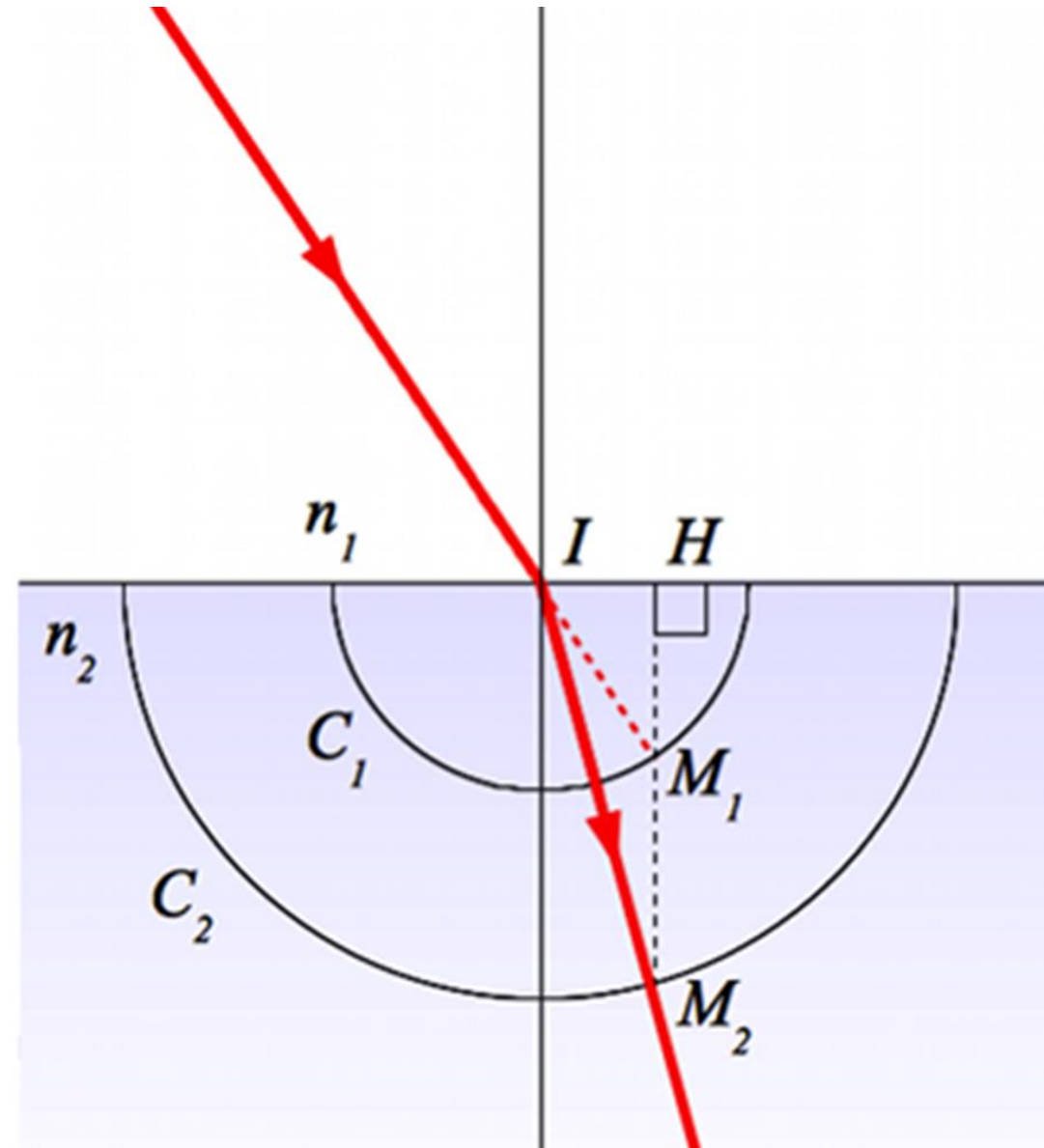
Le dispositif est constitué par :

- une fente source ;
- un disque gradué en degrés ;
- un demi-disque en plastique, d'indice de réfraction n , constituant donc un dioptre plan D_1 et un dioptre cylindrique D_2 .



Construction géométrique des rayons réfléchis et réfractés

Rayon réfracté (construction de Descartes) avec $n_2 > n_1$.



On trace un premier cercle C_1 de centre I et de rayon n_1 ;

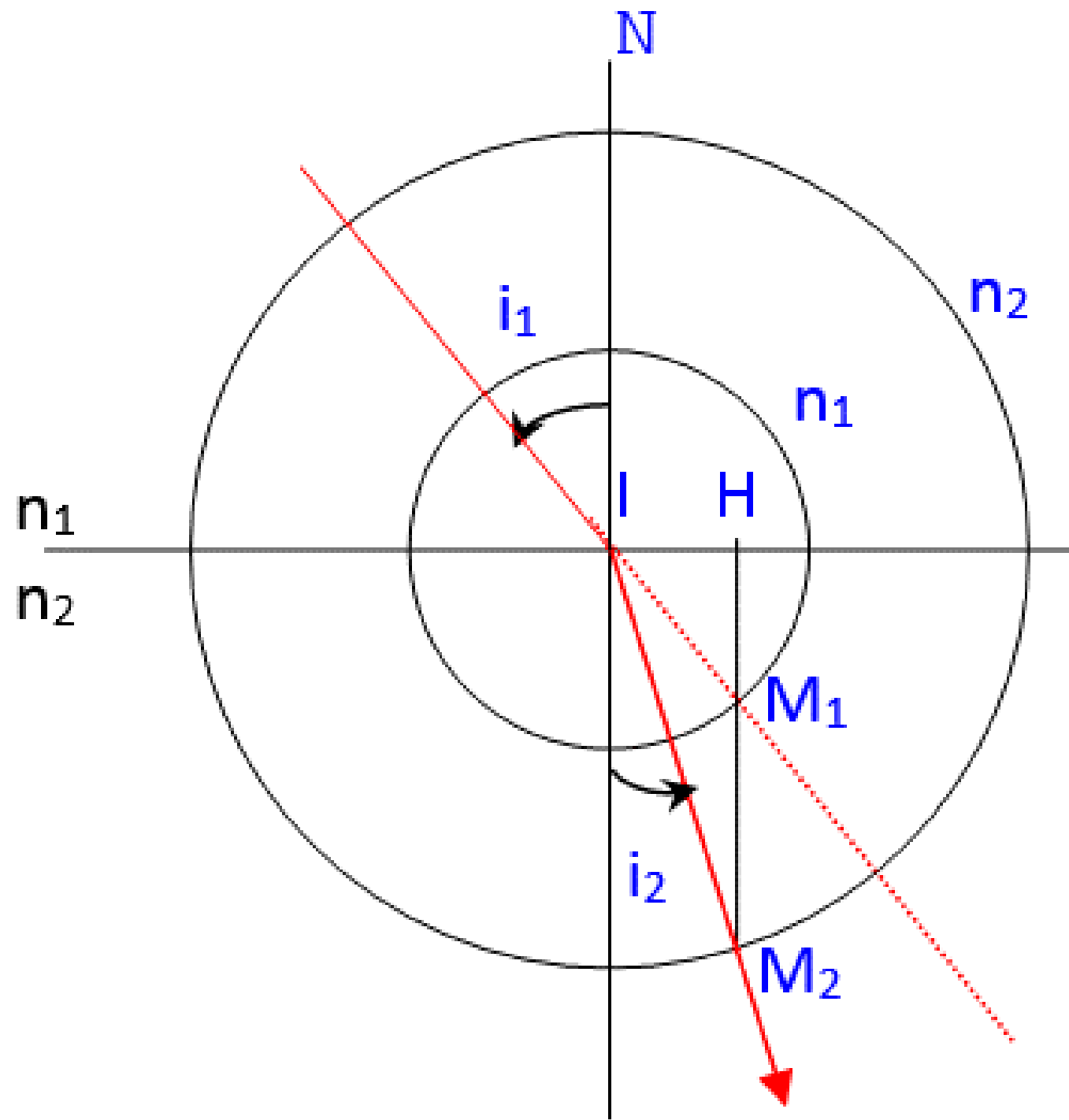
On trace un second cercle C_2 de centre I et de rayon n_2 .

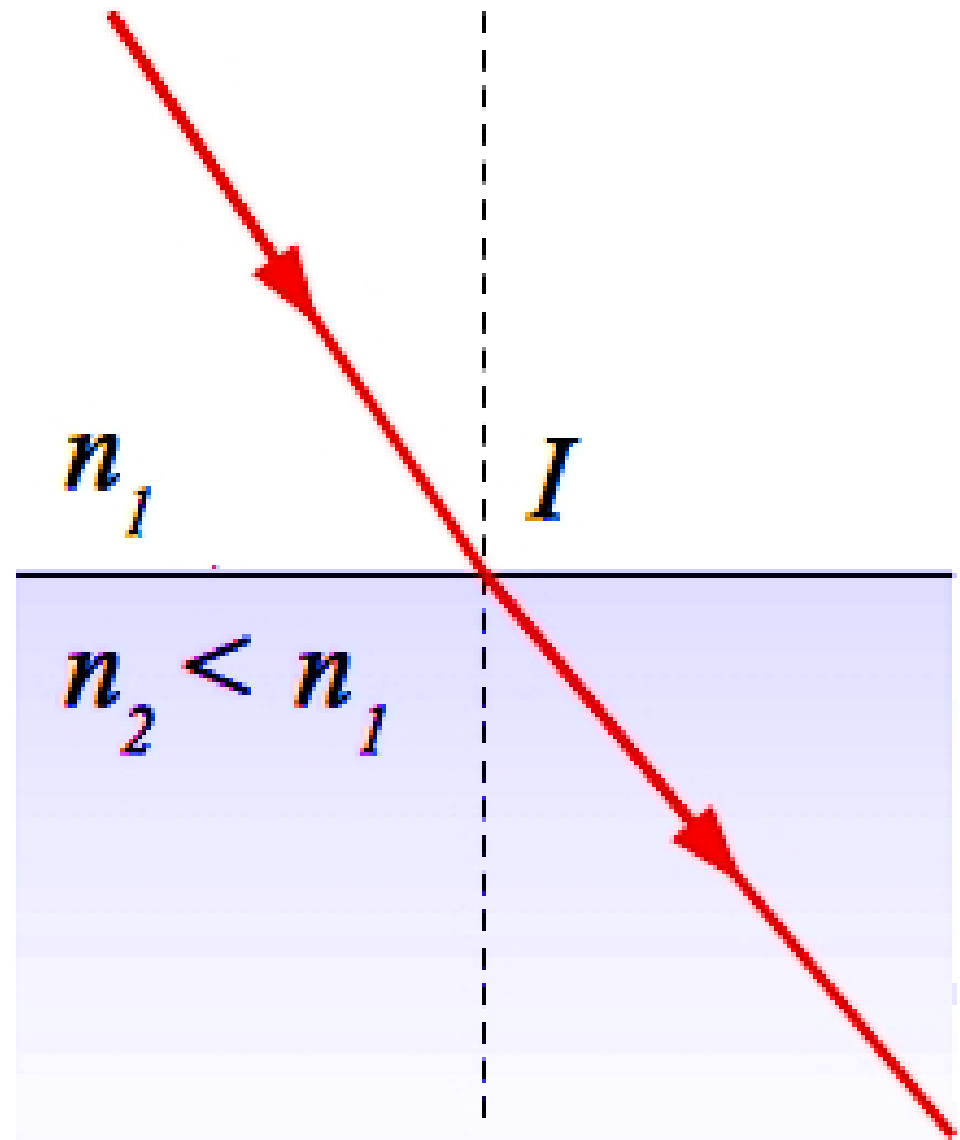
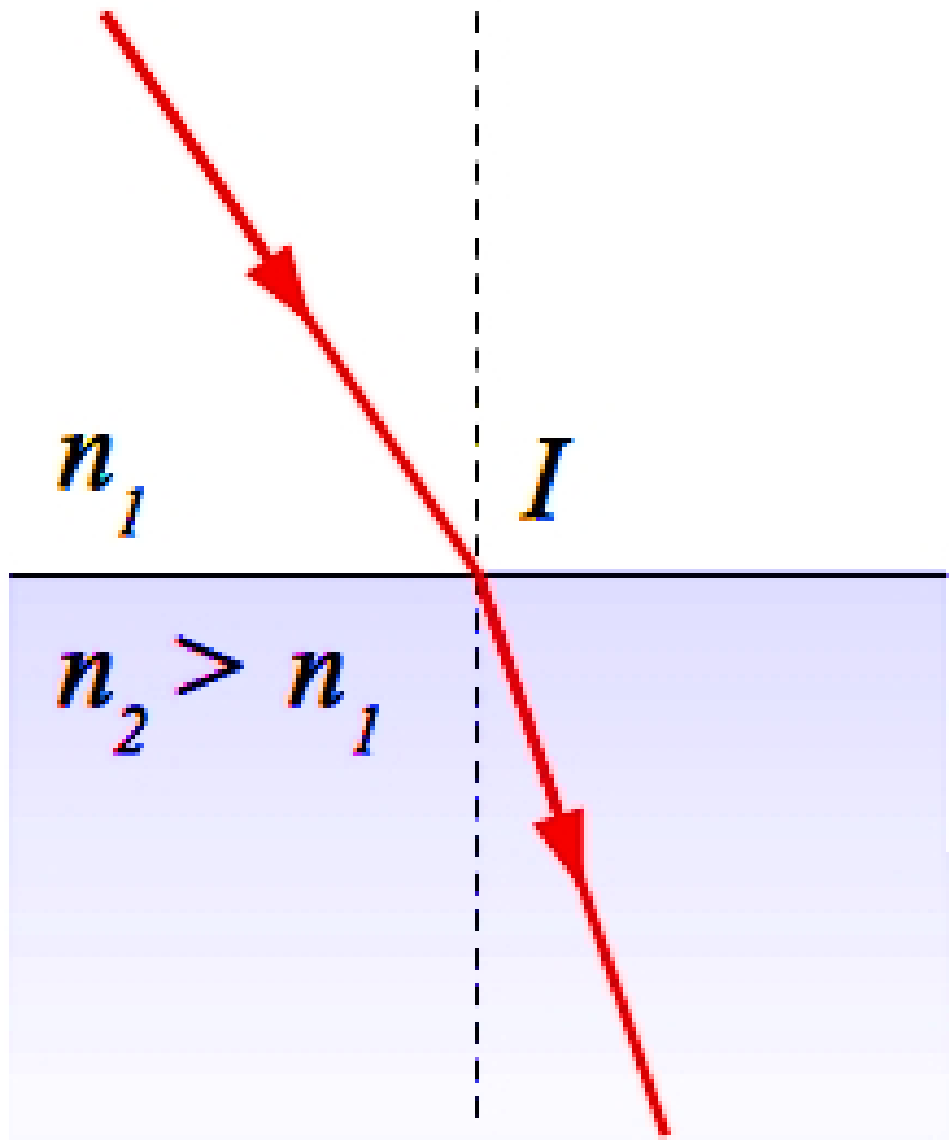
On trace le prolongement du rayon incident qui coupe le cercle C_1 en M_1 . On abaisse alors la perpendiculaire au dioptre D passant par M_1 et qui coupe le cercle C_2 en M_2 . Le rayon réfracté a alors la direction (IM_2) .

$$\sin(i_1) = \frac{IH}{IM_1} = \frac{IH}{n_1} \text{ donc } IH = n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

donc

$$\frac{IH}{n_2} = \sin(i_2)$$





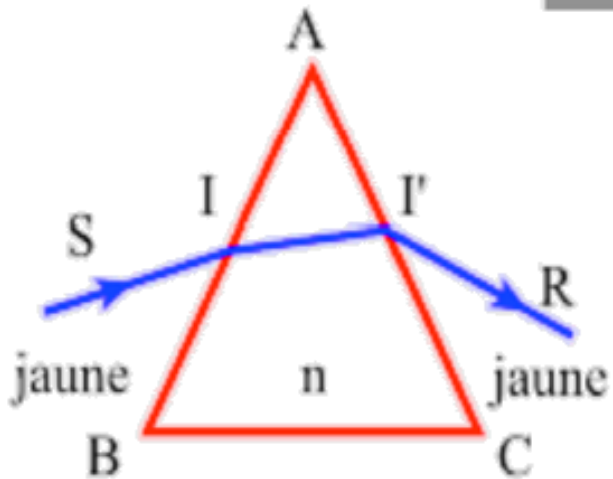
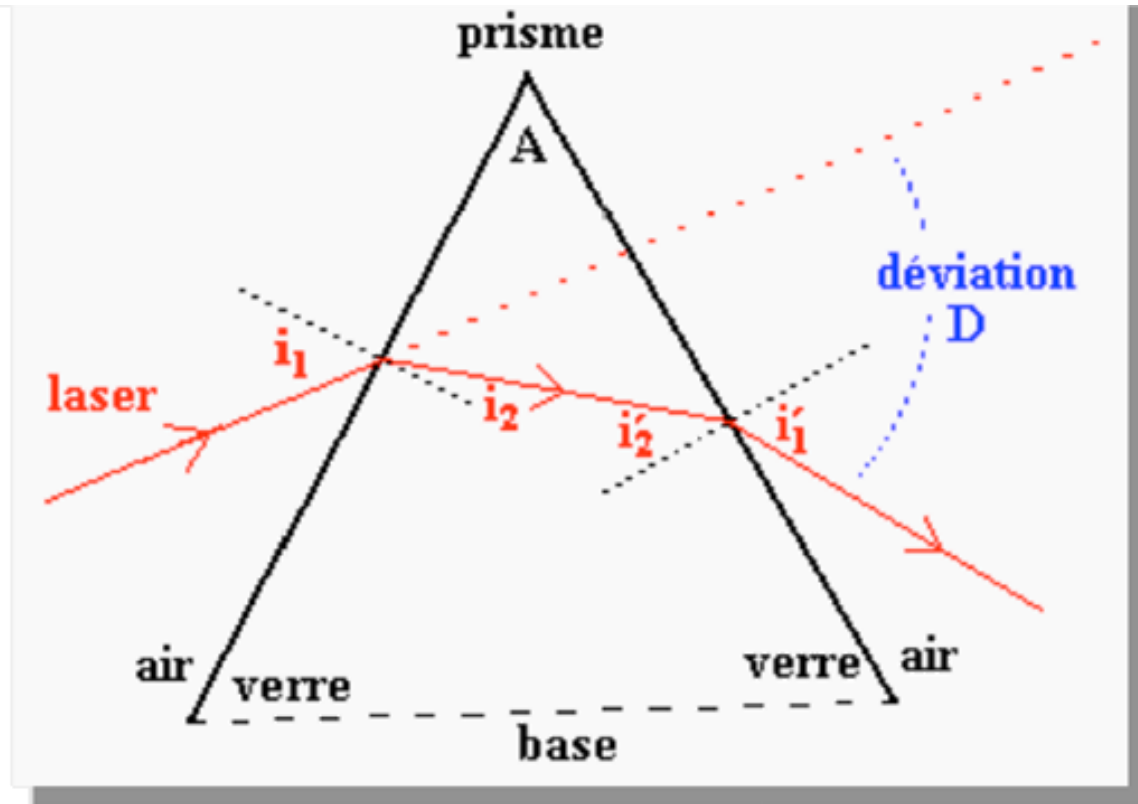
Si $n_2 > n_1$, le rayon réfracté se rapproche de la normale.
Si $n_2 < n_1$, le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

Double dioptre

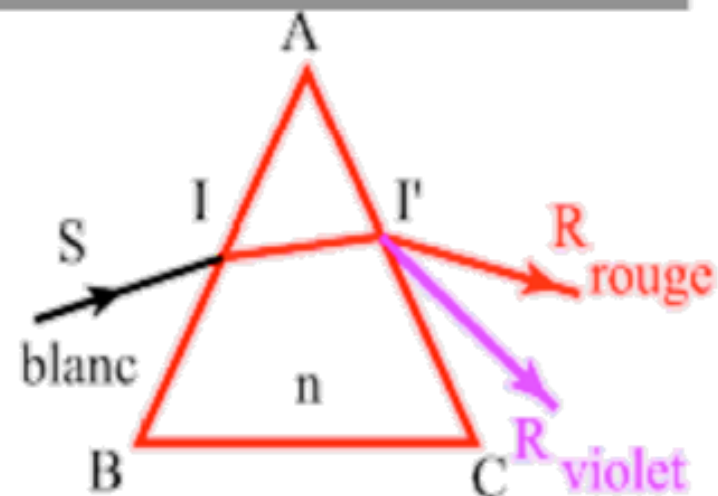
Prisme : cf TD

Rappel

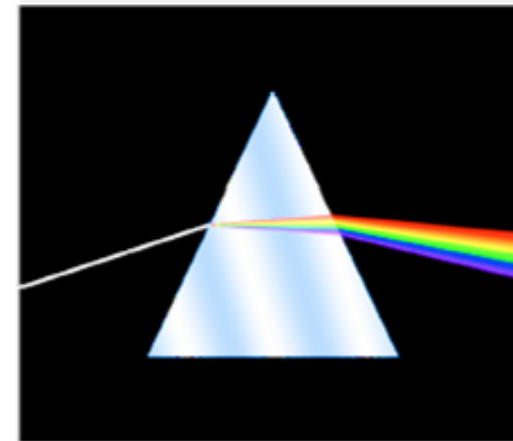
$$n = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$$



Faisceau monochromatique



Faisceau polychromatique

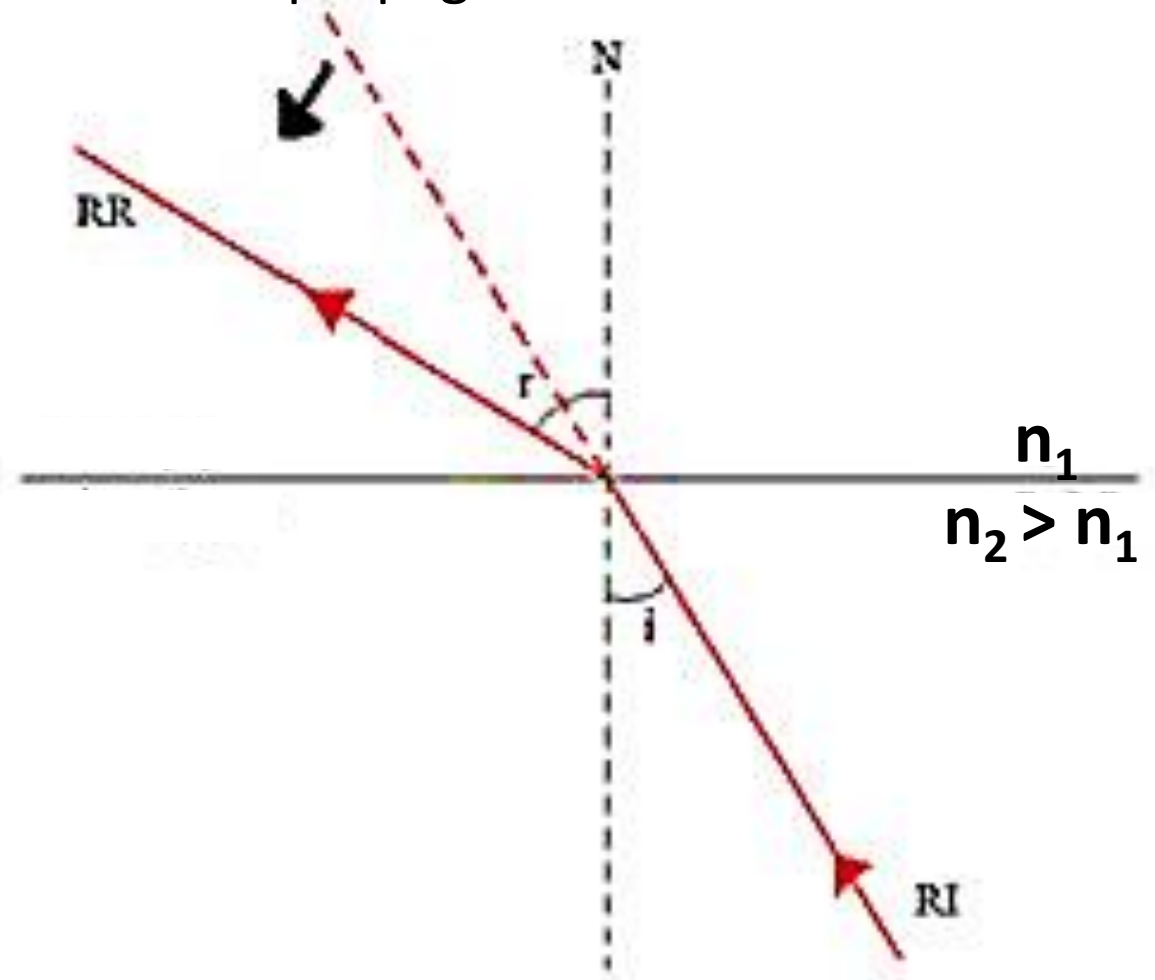
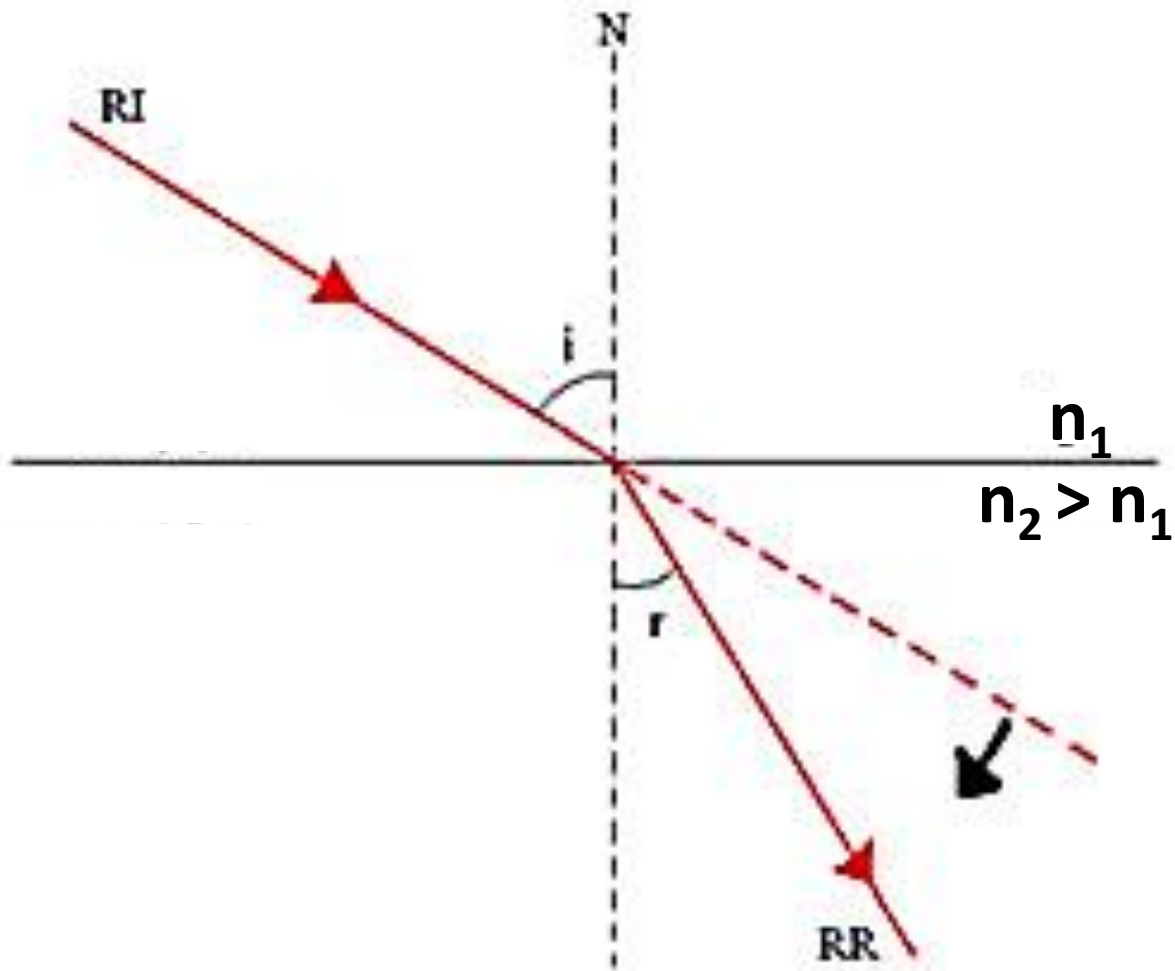


Principe du retour inverse de la lumière :

valable pour la réflexion et la réfraction.

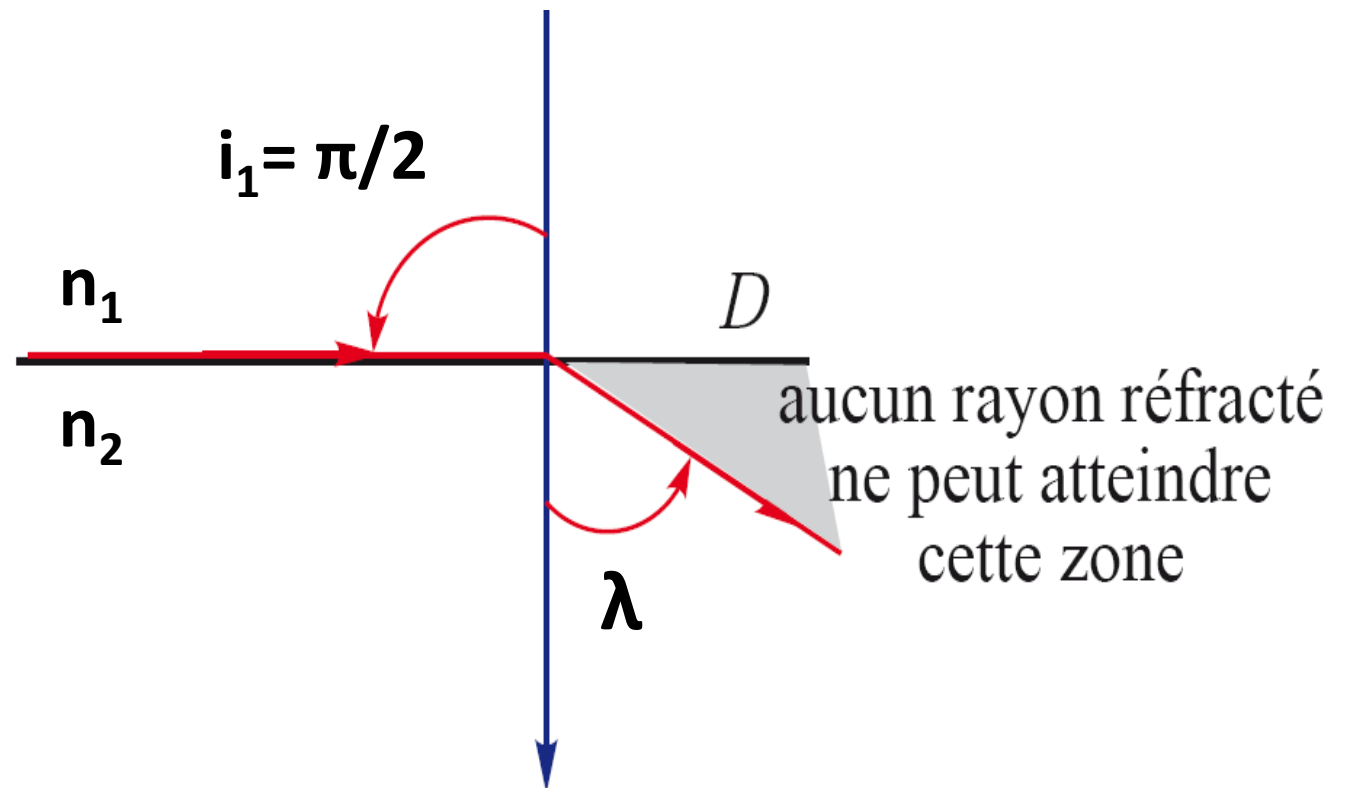
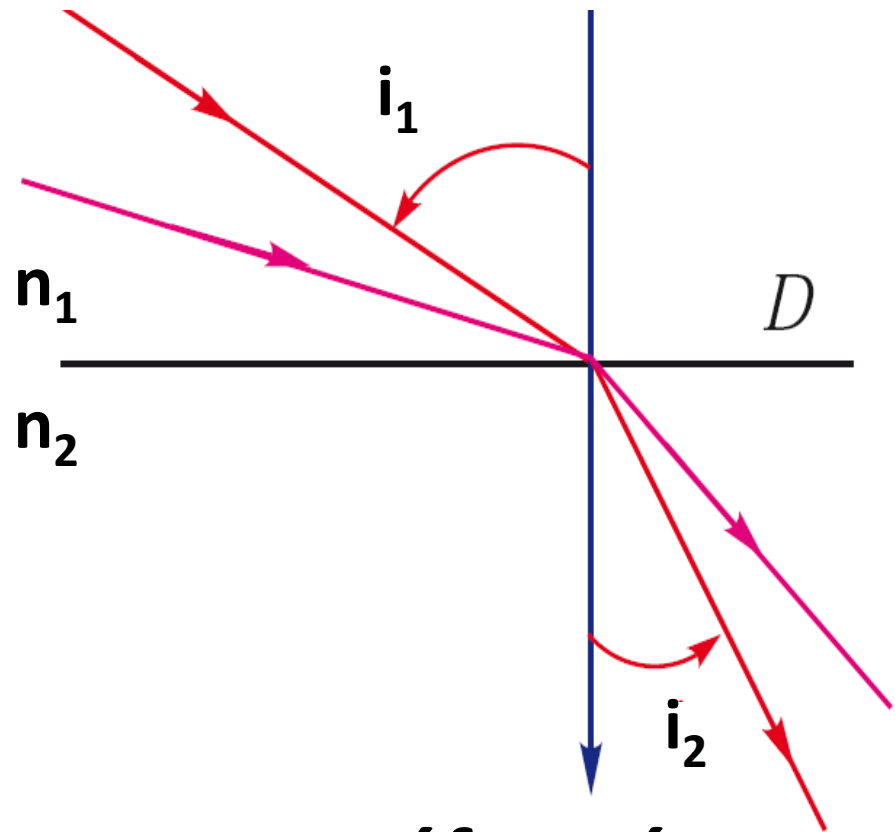
Les lois de la réflexion et de la réfraction ne sont pas modifiées si on inverse le sens de propagation de la lumière.

Le trajet suivi par la lumière n'est pas modifié si le sens de propagation est modifié.



Phénomène de réfraction limite : si $n_2 > n_1$

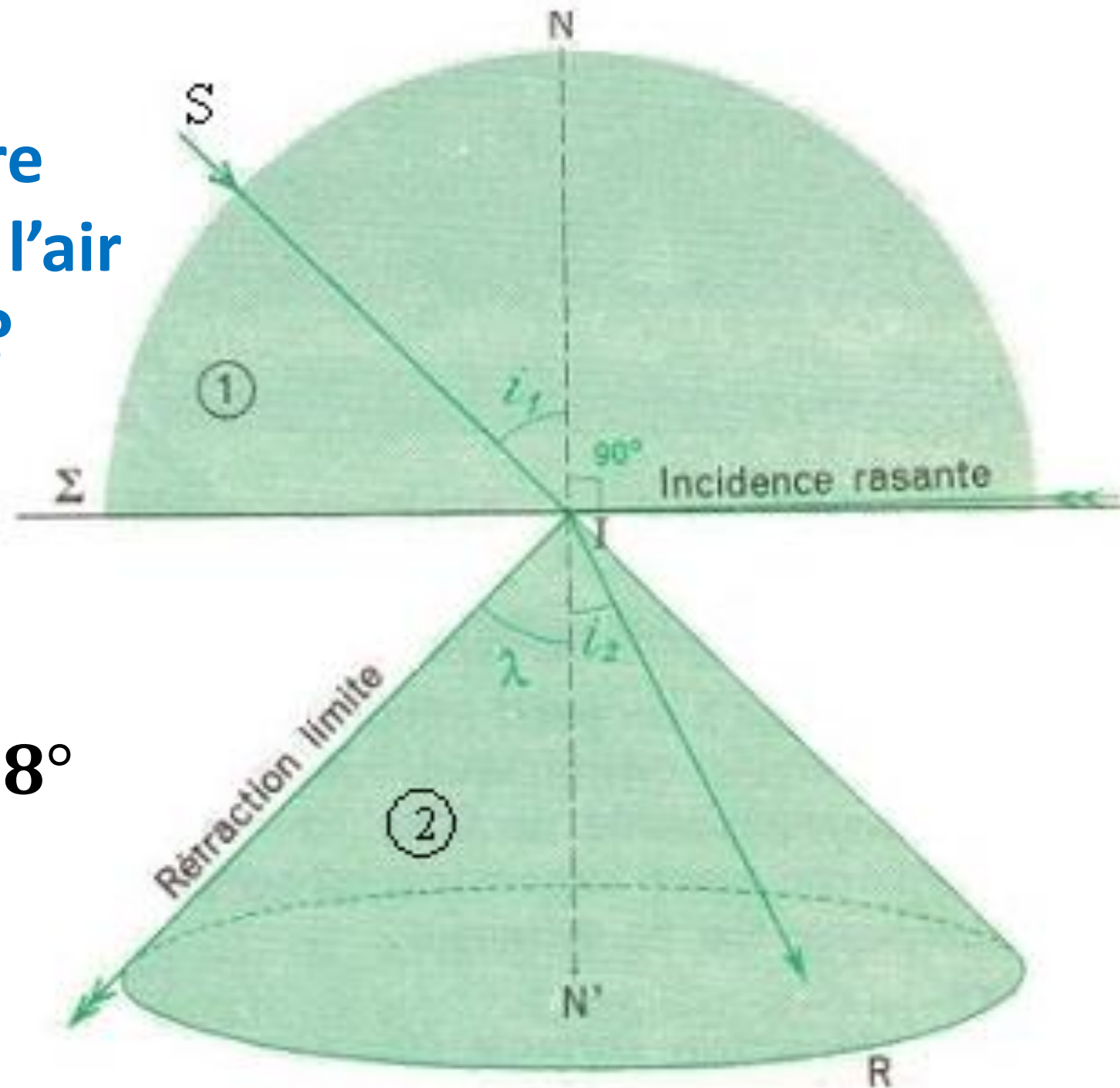
$0 < i_1 < \pi/2$ donc $0 < i_2 < \lambda$ tel que $\lambda = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$



Les rayons réfractés sont tous situés à l'intérieur d'un cône de réfraction de demi-angle au sommet λ .

Angle limite λ de la lumière
qui se propage à partir de l'air
dans du verre ($n_{\text{verre}}=1,5$) ?

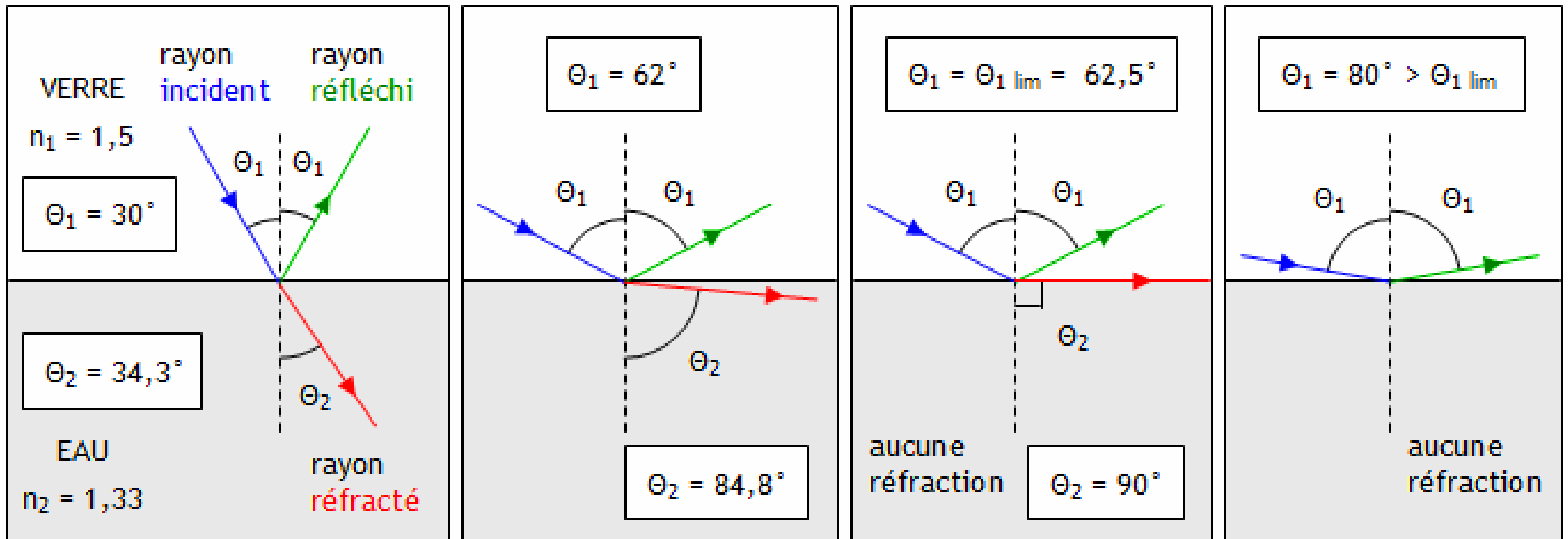
$$\lambda = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$
$$= \arcsin\left(\frac{1}{1,5}\right) = 41,8^\circ$$



Phénomène de réflexion totale : si $n_2 < n_1$

Ce phénomène ne s'observe que si la lumière passe d'un milieu donné à un autre moins réfringent.

Il existe un angle limite d'incidence maximale $i_{1\text{lim}}$ au-delà duquel le faisceau réfracté n'existe plus : toute la lumière est réfléchie dans le milieu incident.



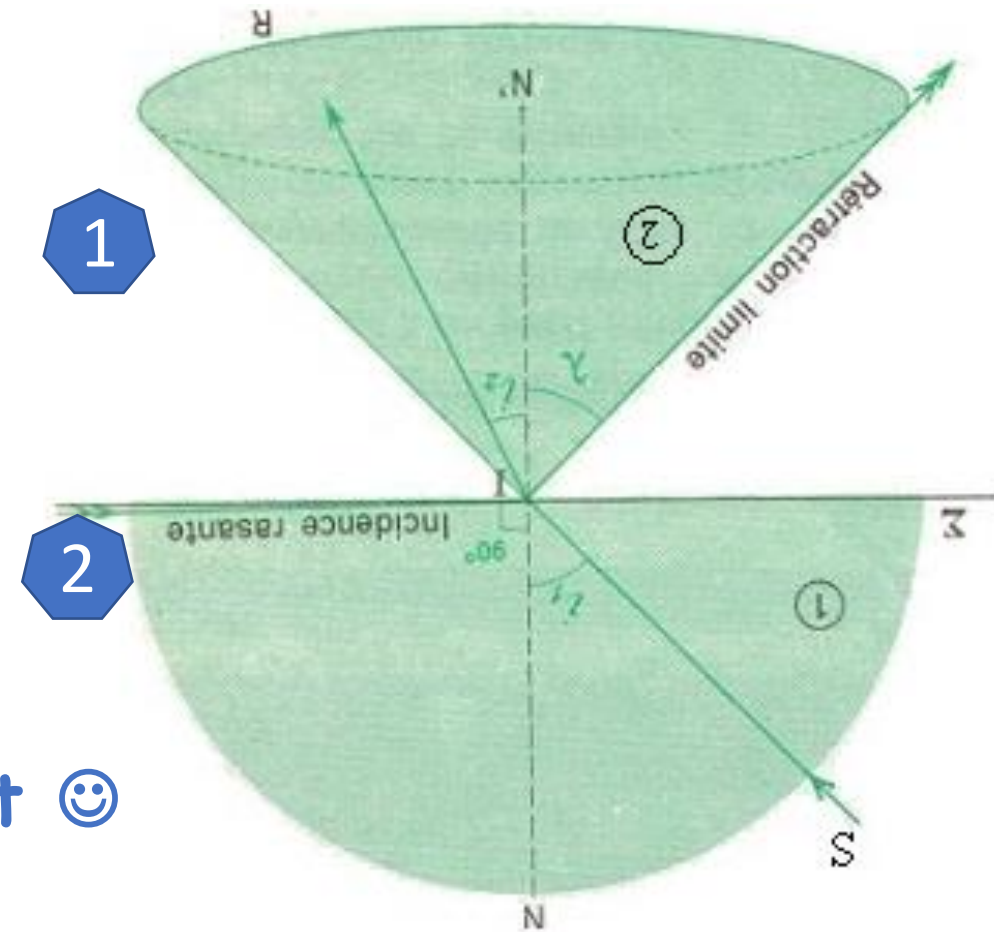
Plus l'angle incident augmente, plus l'angle réfracté augmente et moins le faisceau transmis (réfracté) est intense: il perd de l'énergie alors que le rayon réfléchi en gagne jusqu'à être le seul à exister.

Cet angle d'incidence maximale limite correspond à l'angle d'incidence pour lequel l'angle de réfraction vaut 90° .

$$n_1 \sin(i_{lim}) = n_2 \sin(i_2) = n_2$$

$$i_{lim} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Principe du retour inverse de la lumière:
il suffit de retourner le schéma précédent 😊

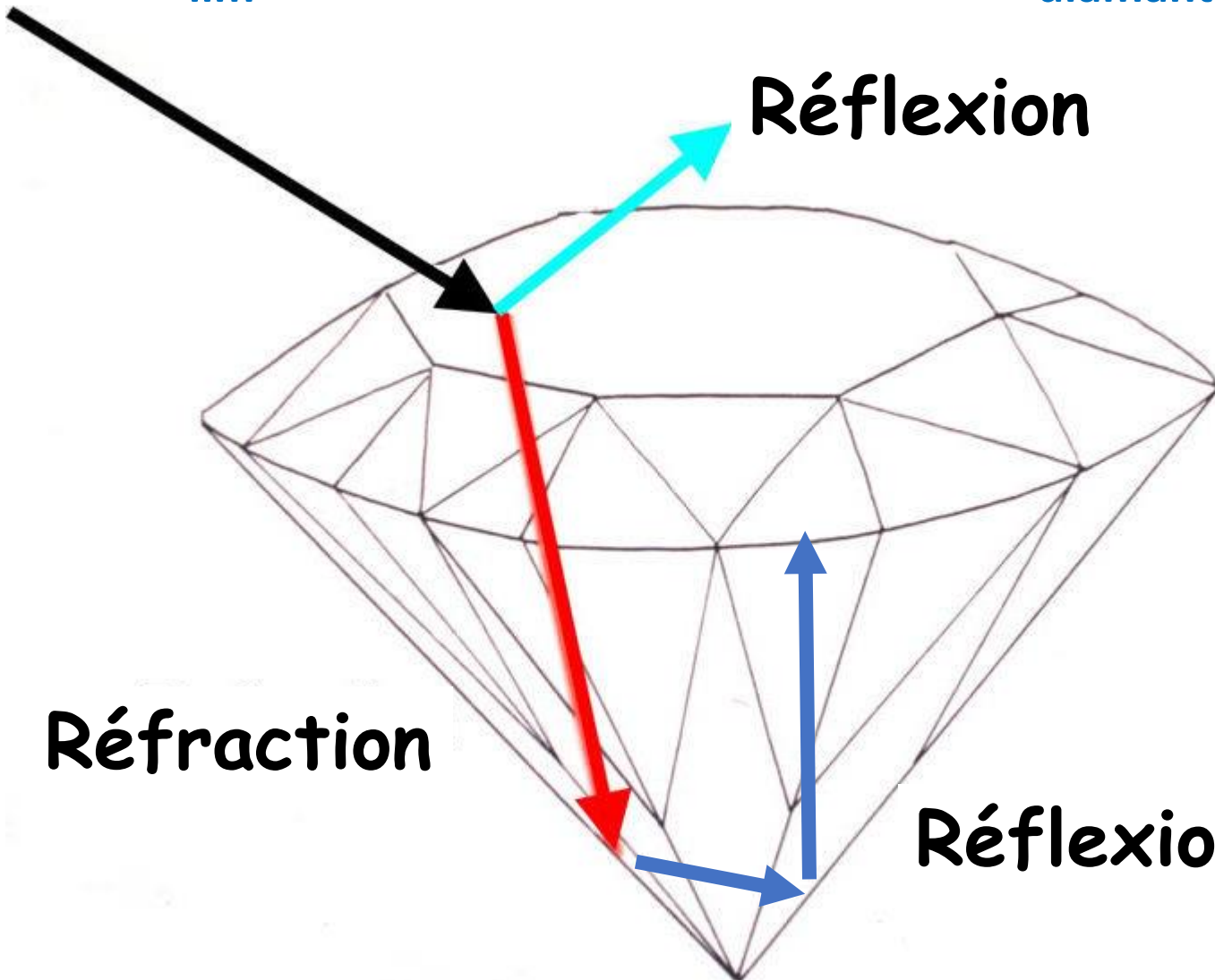


Dans l'eau, la surface peut se comporter comme un miroir lorsque l'angle d'incidence est rasant.



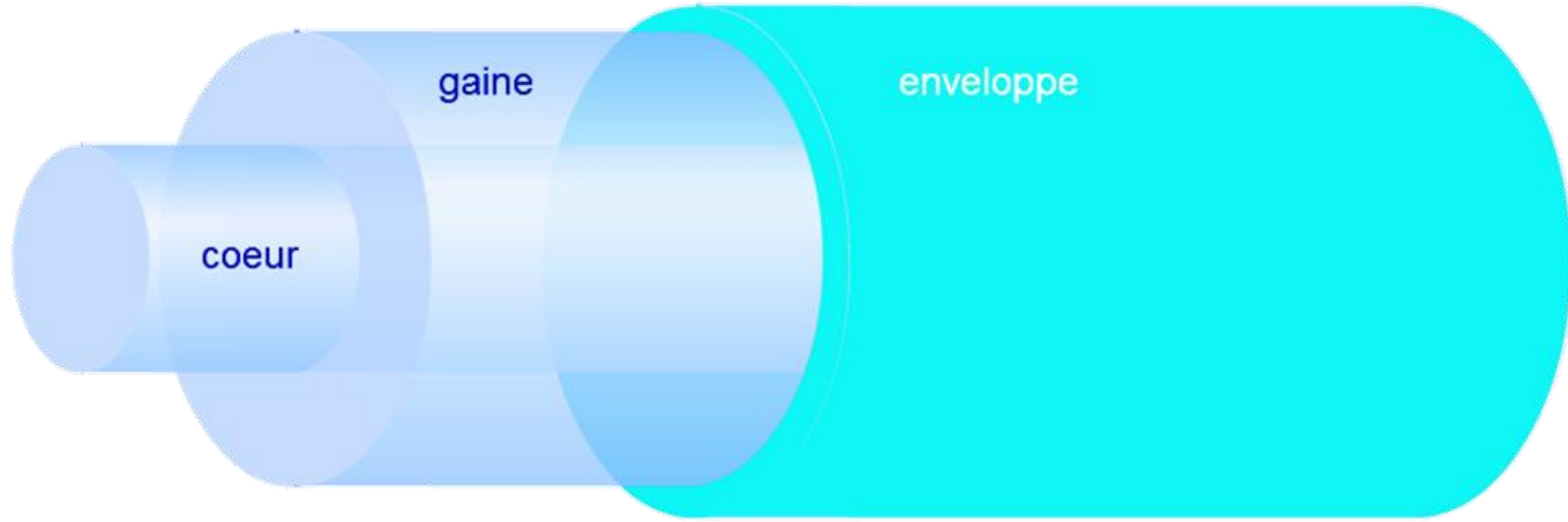
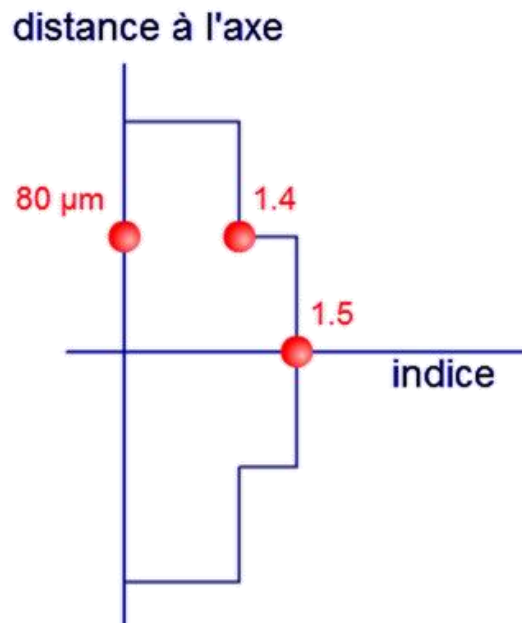
L'indice du diamant étant très élevé, la lumière est piégée à l'intérieur par réflexion totale :

$$i_{\text{lim}} (\text{diamant}) = 22,6^\circ \text{ avec } n_{\text{diamant}} = 2,60$$

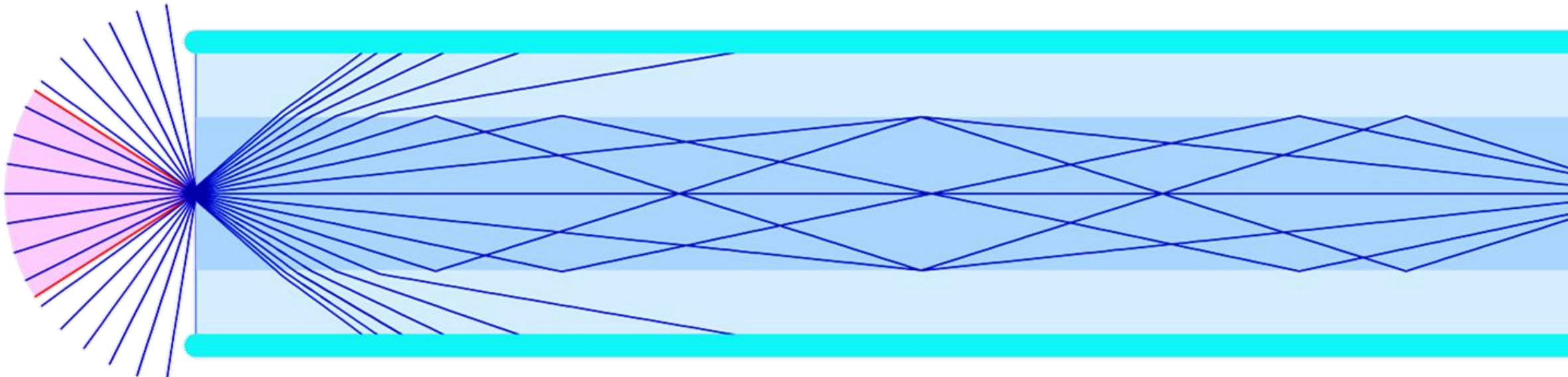


Réflexions totales

Fibre optique à saut d'indice

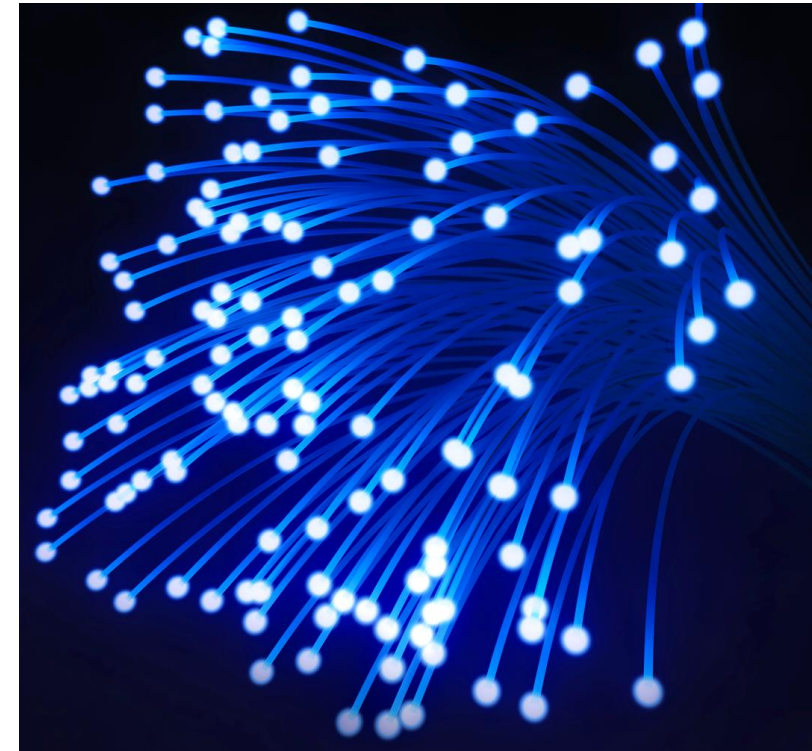
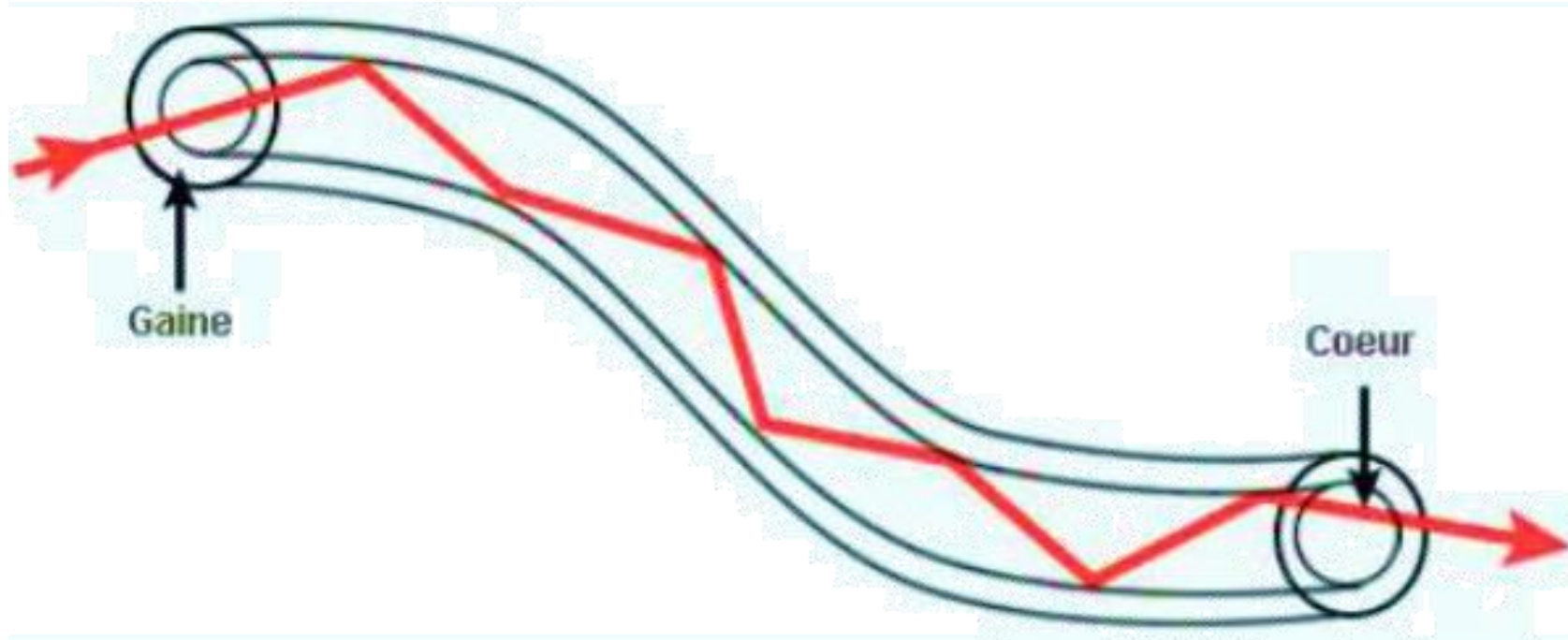


Cône d'acceptance d'angle $32,6^\circ$



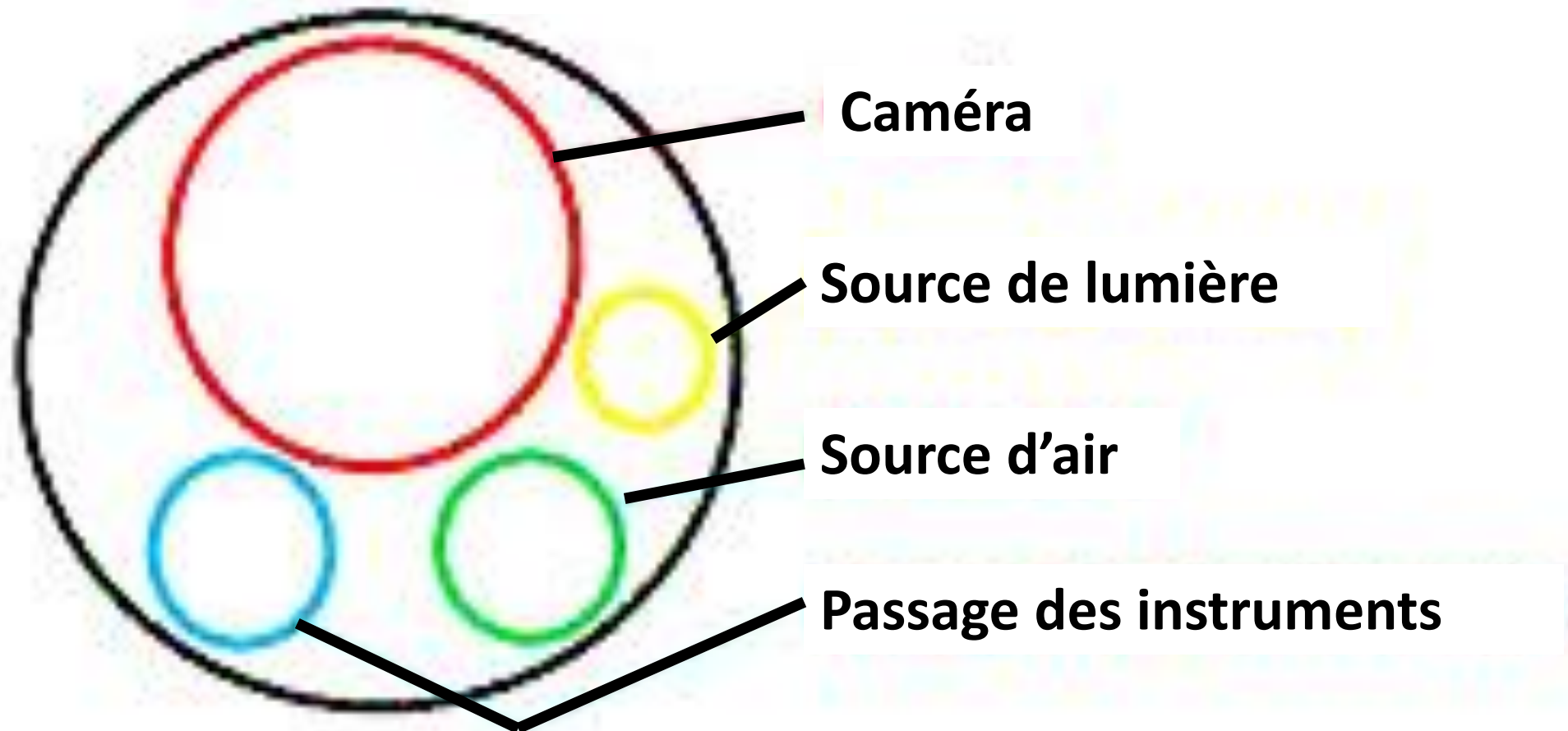
La fibre optique se compose d'un cœur en verre optique d'indice de réfraction élevé et d'une enveloppe en verre d'indice de réfraction faible.

Les rayons lumineux qui entrent par une extrémité dans la fibre sont guidés dans le cœur par réflexion totale tout au long de la fibre malgré les courbures infligés, et ressortent à l'autre extrémité.

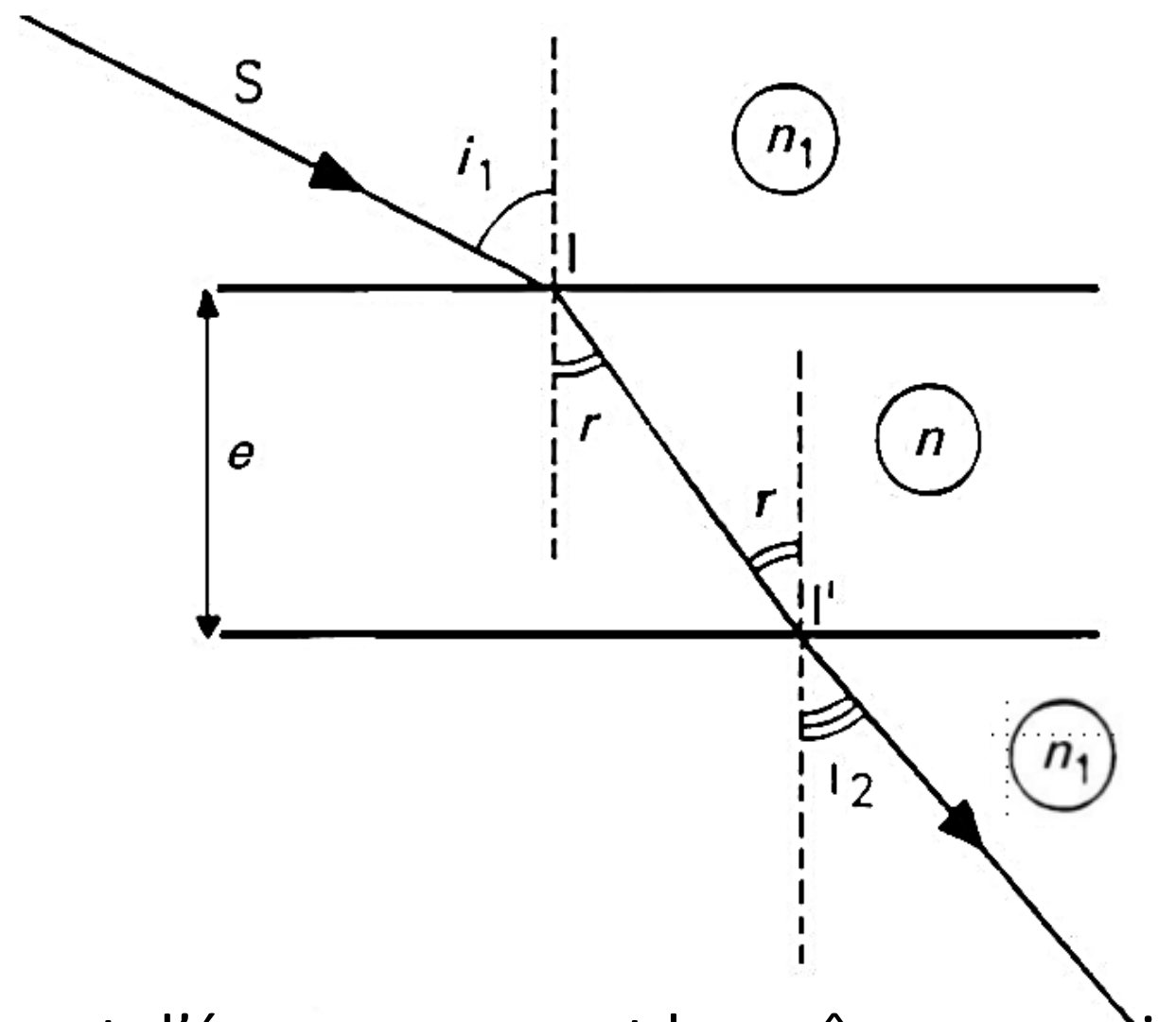


La fibre optique est utile dans le transport d'informations, de lumière. Ce dernier cas est utile aux archéologues (observation d'un tumulus sans y accéder), médecins (endoscope), secouristes (pour fouiller les décombres comme lors de l'effondrement du pont Morandi à Gênes le 14 août 2018).

Tube de l'endoscope vu en coupe



Une lame à faces parallèles est constituée de deux dioptries plans parallèles entre eux. On note e l'épaisseur de la lame.



Les relations entre les angles d'incidence et d'émergence sont les mêmes que si la lame n'existait pas:

$$n_1 \sin(i_1) = n \sin(r) \quad (\text{à l'entrée}), \quad n \sin(r) = n_1 \sin(i_2) \quad (\text{à la sortie}),$$
$$n_1 \sin(i_1) = n_1 \sin(i_2) \quad \text{Angle d'entrée} = \text{angle de sortie} \quad (i_1 = i_2)$$

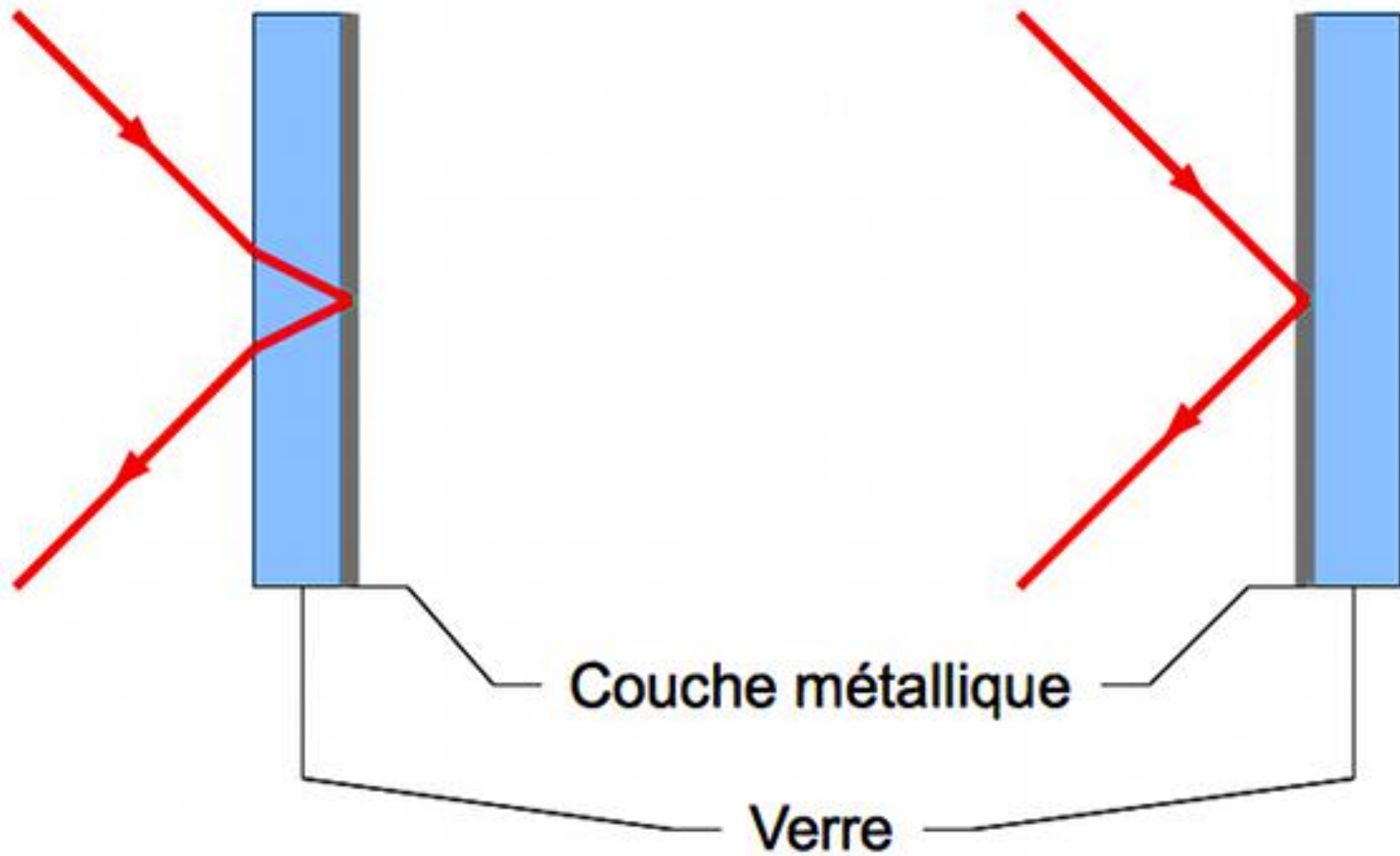
La direction du rayon incident et celle du rayon émergent sont donc les mêmes: une lame à faces parallèles ne modifie pas la direction des rayons lumineux mais introduit un déplacement latéral d proportionnel à l'épaisseur de la lame.

$$d = e \left(1 - \frac{n_{air}}{n_{milieu}} \right)$$

Application: couches anti-reflet des lunettes de Soleil ou des instruments optiques comme l'appareil-photo ou les jumelles.

Salle de bain

Télescope



Notion d'objet et d'image, stigmatisme et aplanétisme

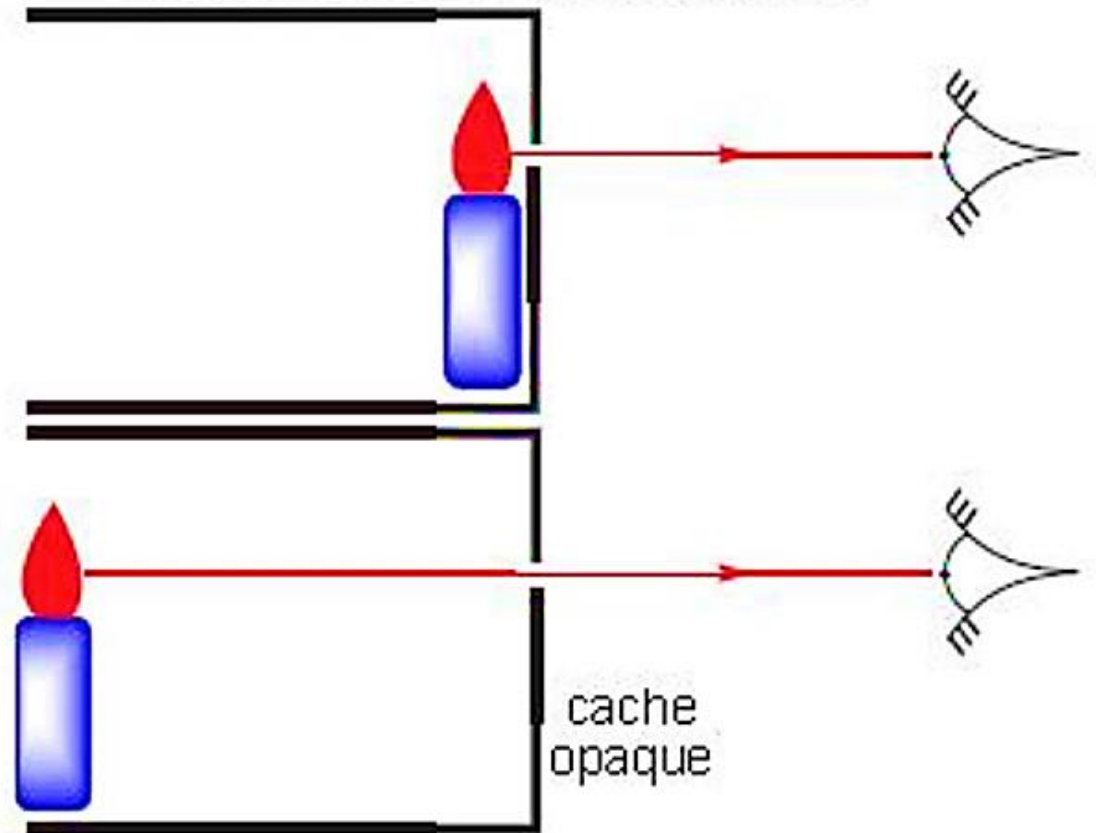
Interprétation du cerveau : Pourquoi voit-on ?

- L'œil reçoit les rayons lumineux émis ou diffusé par les objets qui nous entourent.
- La notion de rayon lumineux existe depuis le III^{ème} siècle av. J-C. (Euclide pose les bases de l'optique géométrique), mais à cette époque la source de la lumière est considérée comme étant dans l'œil ! (XI^{ème} s. Alhazen physicien arabe attribue à la lumière une origine extérieure à l'œil, définit la notion d'image et interprète la formation des images dans l'œil).

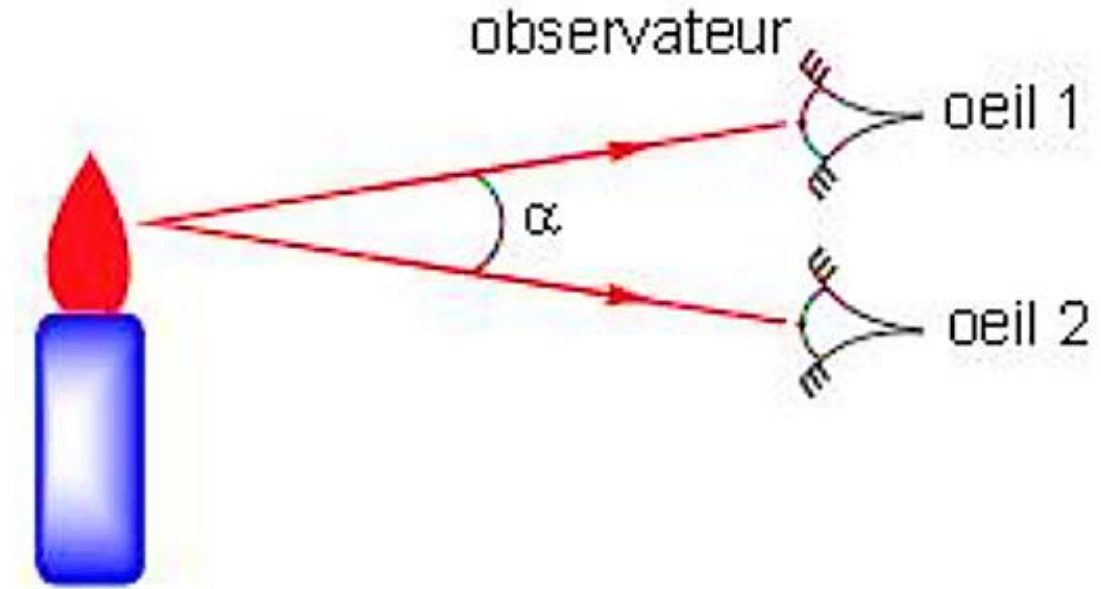
Pourquoi voit-on en 3D ?

Parce qu'on a deux yeux ! Lorsqu'un observateur reçoit un unique rayon lumineux d'une source, il est incapable de dire à quelle distance se situe cette source. L'expérience peut être menée simplement en fermant un œil : seul le rapport de la taille observée à la taille réelle connue par l'observateur permet de se faire une idée de la distance de la source

Cet observateur recevant un unique rayon lumineux est incapable de dire à quelle distance est la source lumineuse.

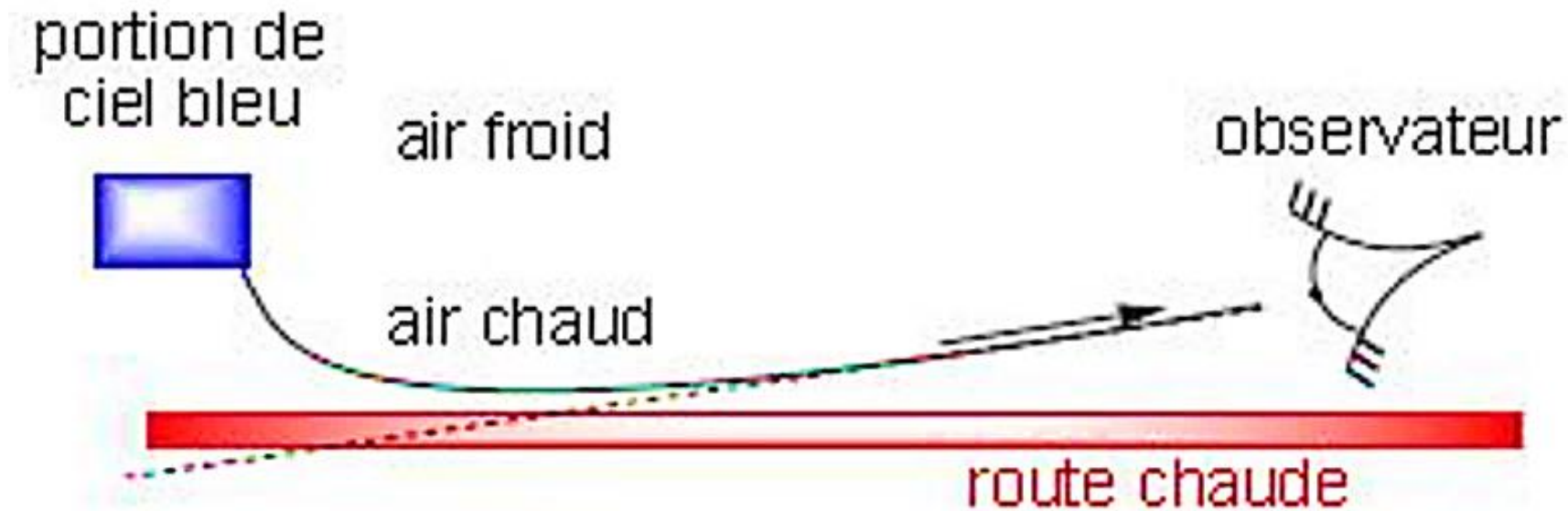


Si l'observateur reçoit **au moins deux rayons issus de la source** ponctuelle, il peut par l'analyse de **l'angle α** , déterminer la position exacte de la source. C'est ce que nous faisons de manière inconsciente.



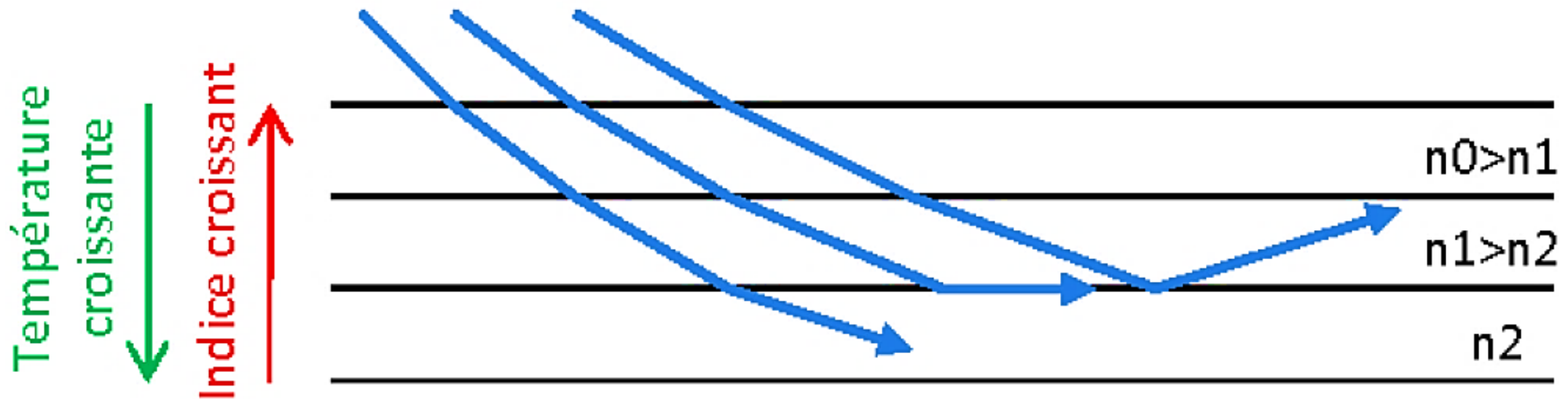
Le cerveau détermine la position d'un point d'un objet (sens commun du terme) en analysant l'angle entre les deux rayons qui proviennent de ce point et qui parviennent à chaque œil. Il extrapole le point de croisement de ces rayons.

Comment explique-t-on le phénomène du mirage chaud ou mirage inférieur ?



Explication de la déviation des rayons lumineux :

le milieu n'est pas homogène ($T \nearrow$ quand on se rapproche du sol, densité \searrow , donc l'indice de réfraction se rapproche de celui du vide : l'indice de réfraction de l'air dépend de sa température : $n \searrow$ quand $T \nearrow$)



Courbure des rayons lumineux dans un milieu dit « stratifié », où la variation des indices de réfraction se fait de manière continue

Le cerveau habitué à interpréter les rayons comme venant en ligne droite croit que le rayon qu'il reçoit provient de la route. La source de lumière est perçue avec une position fictive. Le cerveau ne peut pas imaginer le chemin qu'a réellement parcouru la lumière, il ne fait qu'extrapoler. L'observateur croit apercevoir un point d'eau alors qu'il ne voit que le reflet du ciel bleu.

Le cerveau a été conditionné pour analyser les rayons lumineux qu'il reçoit en considérant qu'ils se sont propagés en ligne droite.

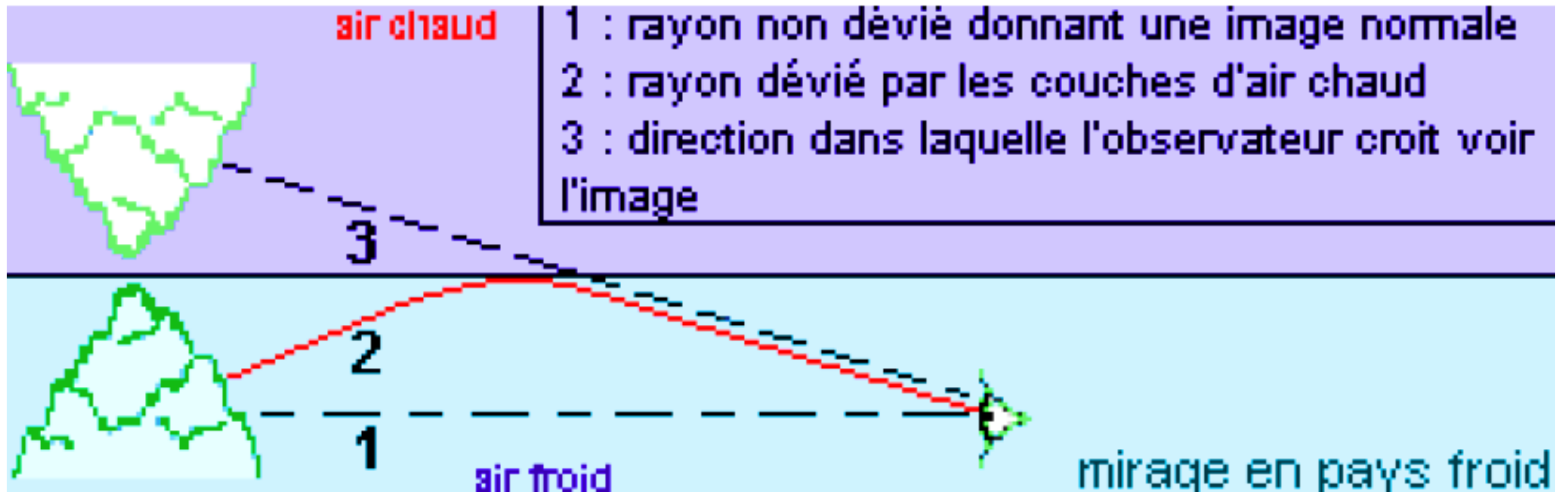
Apprentissage dès la naissance :

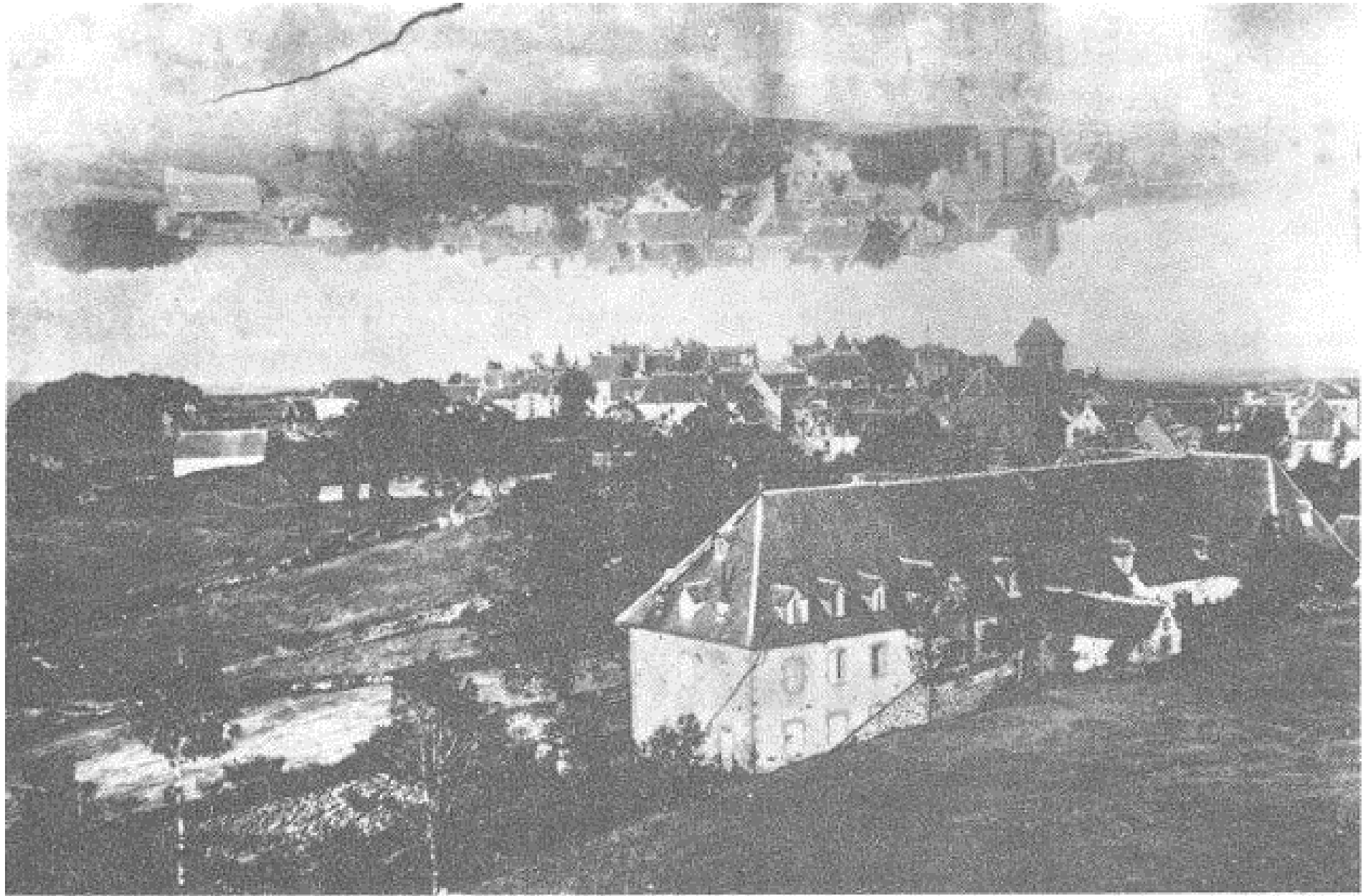
je reçois des informations lumineuses,
je tends le bras, je touche l'objet.



Mirage froid ou mirage supérieur

Dans les régions où le sol est très froid, les rayons lumineux sont courbés vers le bas, ce qui fait qu'un objet situé au sol semble flotter en l'air. Ce phénomène rend possible la vision d'objets situés au-delà de l'horizon.

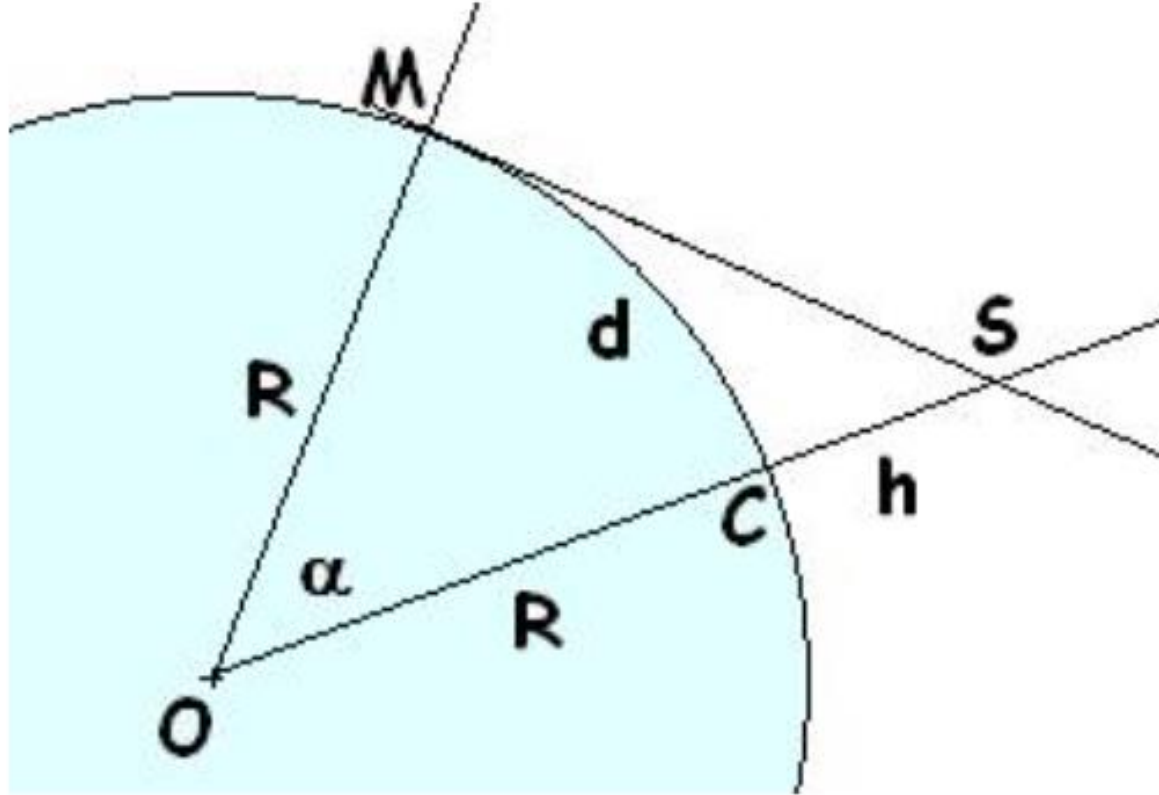




Mirage supérieur exceptionnel (cf §3.1.2.) au-dessus de la ville de Salers, dans le Cantal (cliché réalisé par l'abbé Gély, vers 1900)

Digression: peut-on voir la Corse depuis Menton?

En admettant une propagation rectiligne de la lumière.



R : rayon de la Terre

M : Menton

C : Corse

S : sommet le plus haut

D : distance Menton-Corse

α : angle des verticales de M et C

$R \approx 6380$ km

$d \approx 180$ km

Après calcul, $h = 2540$ m Le point culminant de la Corse (2710m) dépasse donc tout juste l'horizon : la Corse serait donc pratiquement cachée sous l'horizon (sous la mer).

Mais alors?



<https://www.oca.eu/fr/mega-conferences/185-la-corse-vue-de-nice-mythe-reflet-ou-realite>

Suivant le même principe n'inhomogénéité de l'air (température, densité, pression de l'air):

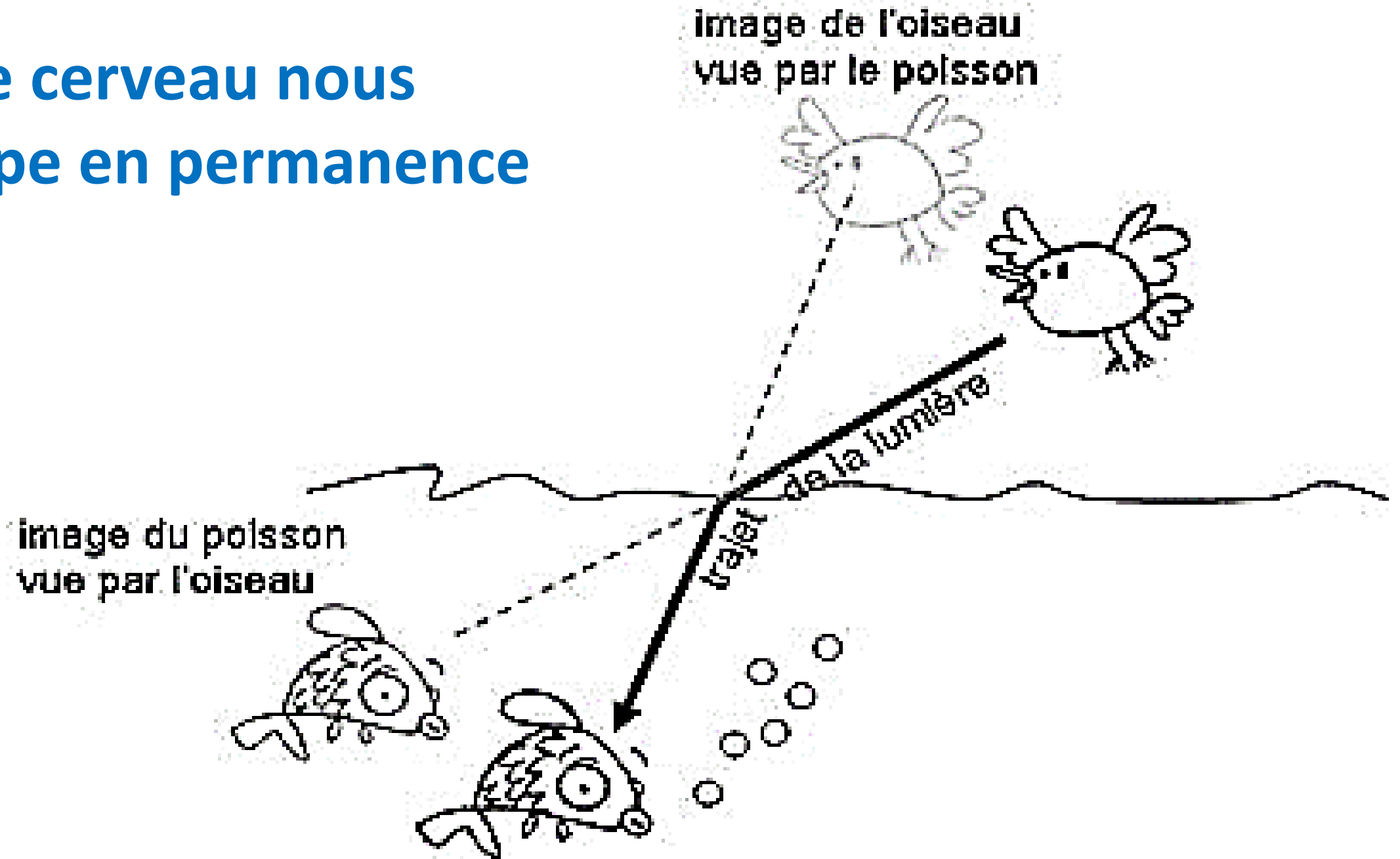


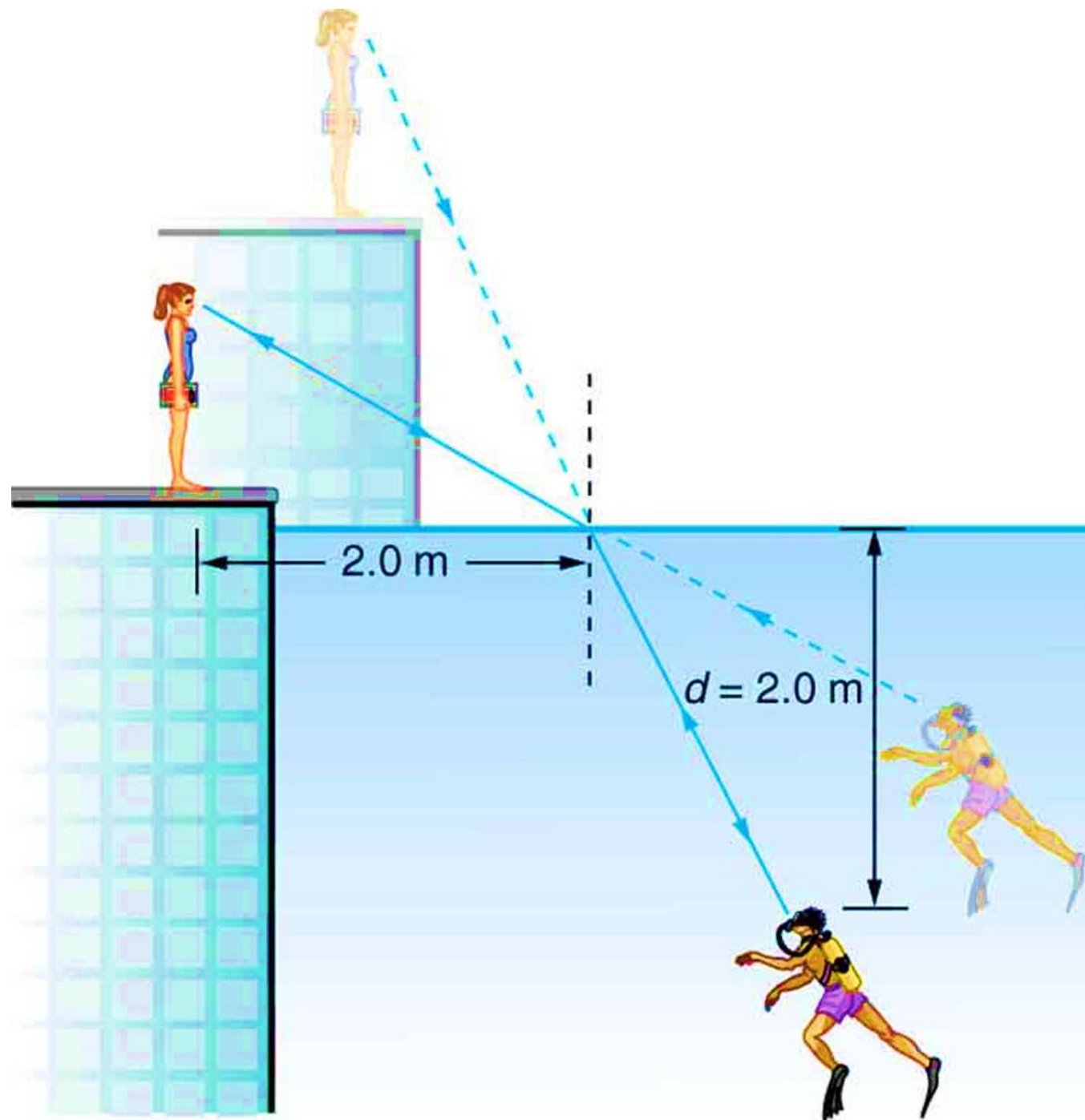
On ne voit que des images, pas des objets. Ces images sont données par l'instrument d'optique, éventuellement réduit à sa plus simple expression comme l'atmosphère, placé entre le vrai objet et l'œil.

L'image c'est "ce qu'on voit".

<http://rpmenton.pagesperso-orange.fr/Corse/VoirLaCorse.htm>

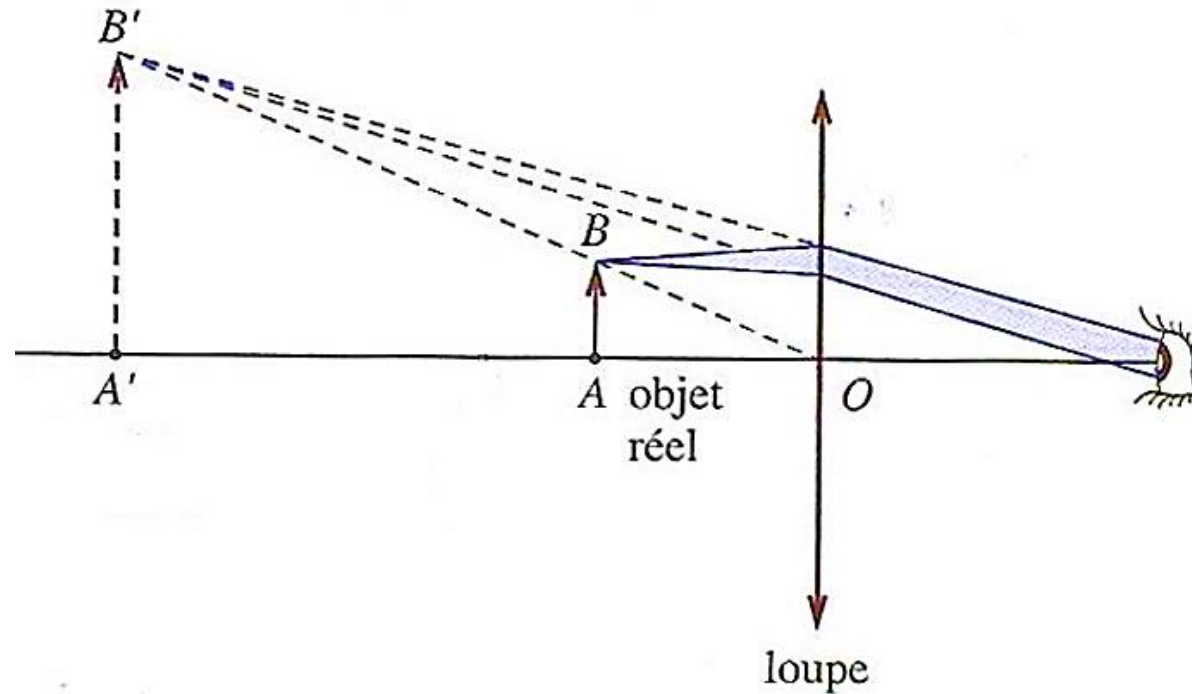
Notre cerveau nous trompe en permanence





Principe d'une loupe

L'objectif d'une loupe est de grossir un objet trop petit pour être bien vu à l'œil nu. Voici un schéma montrant comment un objet permet d'obtenir une image perçue par l'observateur comme plus grande que l'objet.



Le cerveau interprète les informations qu'il reçoit comme si les rayons s'étaient propagés en ligne droite : il ne peut pas savoir qu'il y a eu une déviation. Donc **il croit voir l'objet plus loin, plus gros.**

Application aux ondes sismiques :

Propagation d'ondes sismiques \equiv propagation d'ondes lumineuses

Station sismique : 3 sismographes qui analysent les vibrations du sol :

- suivant N-S (horizontal)
- suivant O-E (horizontal)
- suivant la verticale.

Il existe 3 types d'ondes (rappel) :

- **ondes P** (premières) : longitudinales (compression/décompression, \simeq ressort), faible amplitude, propagation dans tous les milieux ;
- **ondes S** (secondes) : transversales (cisaillement), amplitude moyenne, ne traversent pas les liquides ;
- **ondes L** (longues) : elliptiques, forte amplitude, se propagent uniquement dans les couches superficielles.

Analyse des temps d'arrivée des divers types d'onde permet de déterminer :

- la composition du globe terrestre
- l'épicentre et la magnitude d'un séisme, car $v = f(\text{nature du milieu, profondeur})$.

Ondes sismiques se propagent en ligne droite dans un MH. Mais existence de discontinuités entre croûte – manteau terrestre – noyau (liquide en surface) \rightarrow réflexion + réfraction selon les lois de Descartes.

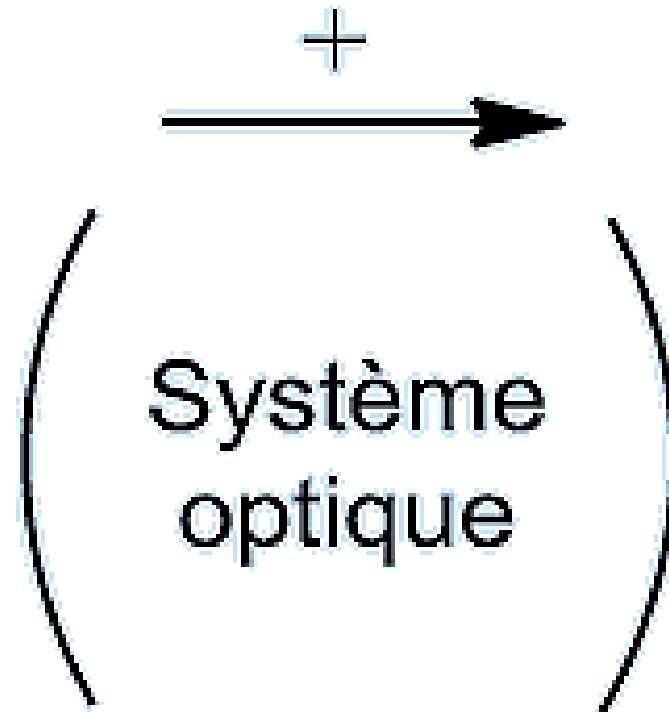
On définit n_i indice sismique : $n_i = \frac{c_0}{c_1}$, avec c_0 et c_1 les célérités de référence et dans le milieu.

Modélisation en optique géométrique

Systeme optique

On appelle système optique tout ensemble de dioptries et de miroirs traversés par des rayons lumineux.

Symbole d'un système optique :



Objet et image

Dans les exemples précédents, l'objet est la source de la lumière, tandis que l'image est ce qu'extrapole le cerveau (donc ce que voit vraiment l'observateur).

Mirage : **objet** = portion ciel bleu à son emplacement réel,
image = portion de ciel bleu telle que le cerveau l'image (au sol)

Loupe : **objet** = la fourmi réelle,
image = la fourmi que le cerveau perçoit plus grande.

Les définitions seront toujours données pour le cas d'objet ou d'image ponctuel(le), il suffira d'étendre la définition pour les objets ou image étendu(e)s en signalant qu'on les traite comme un ensemble d'objets ou d'images ponctuel(le)s indépendant(e)s les un(e)s des autres.

Point objet

On appelle point objet l'intersection (réelles ou fictives) de rayons lumineux entrant dans le système optique (appelés rayons incidents).

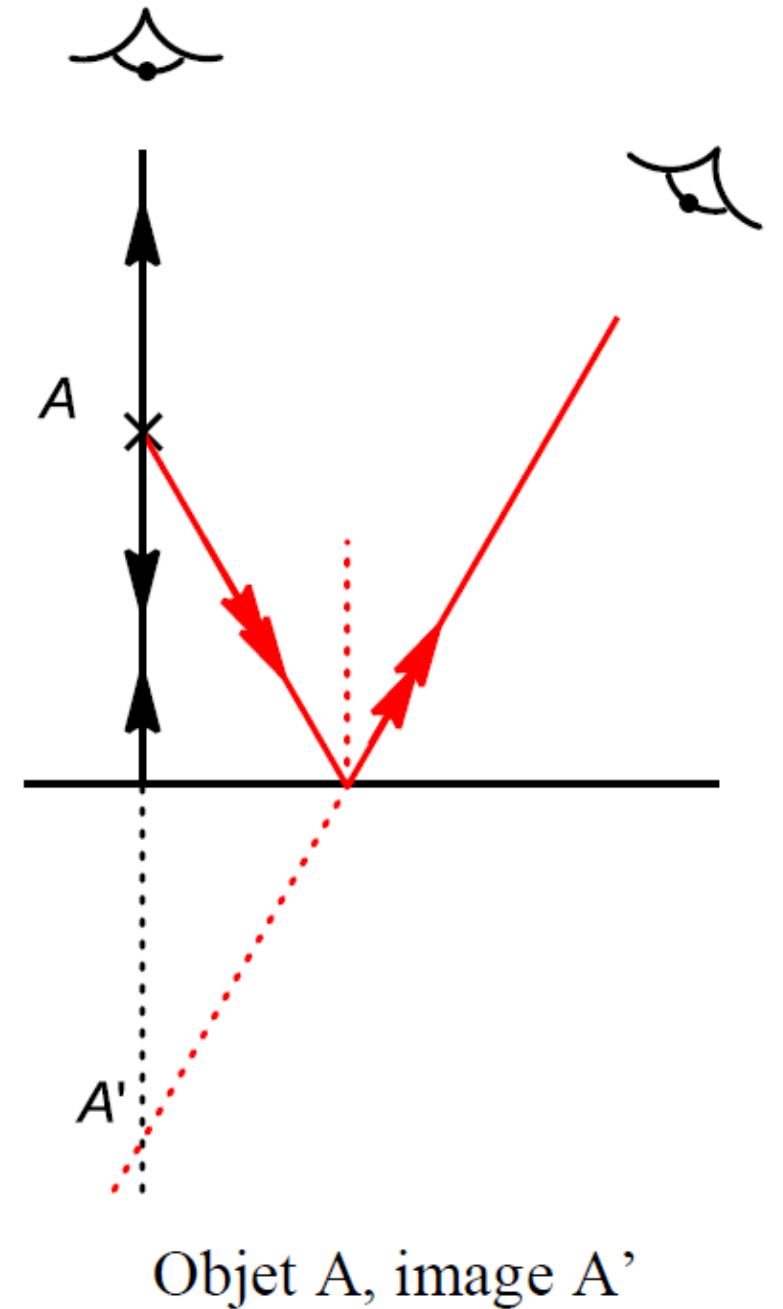
Point image

On appelle point image l'intersection (réelles ou fictives) de rayons lumineux sortant du système optique (appelés rayons émergents).

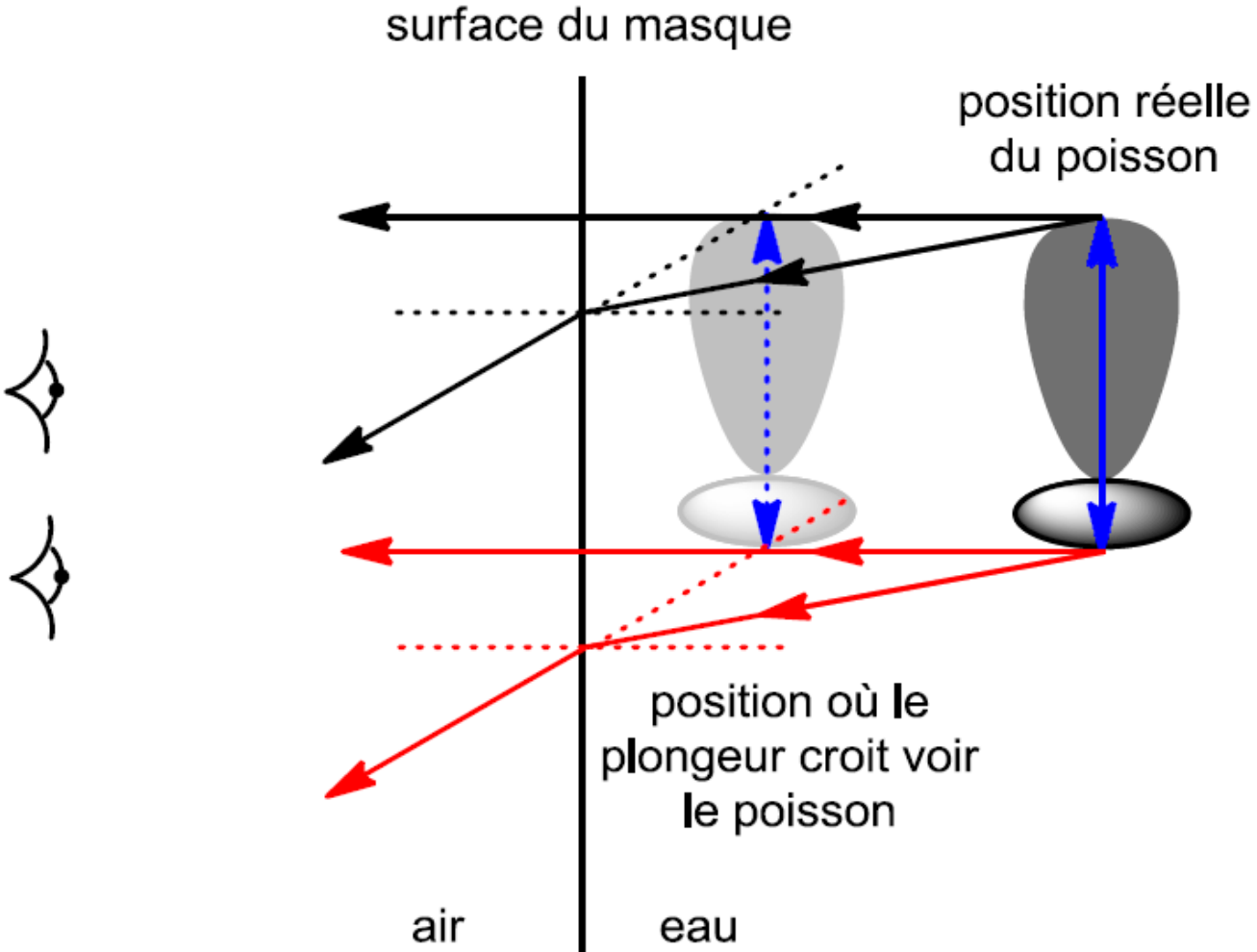
TRES IMPORTANT : pour déterminer la position d'un point objet ou un point image il faut AU MOINS DEUX rayons.

Où voit-on son reflet quand on se regarde dans un miroir ?

- **ATTENTION** : l'image de soi n'est pas sur le miroir !
- Si les animaux se laissent bernier par un miroir en pensant qu'il y a un autre animal identique à lui-même en face de lui c'est parce que lorsque l'on regarde dans un miroir on voit quelque chose en 3D : l'image se situe derrière le miroir. Ce n'est pas juste un film en 2D sur un écran.



En plongée, à travers notre masque, les poissons nous semblent toujours plus proches que dans la réalité (vous pensez qu'en tendant le bras vous allez l'attraper et en fait non...)



Objets, images, réel(le)s, virtuel(le)s

Définition : point réel

On parle d'objet et d'image réels quand les rayons concernés (incidents ou émergents) se croisent réellement. Ils se croisent dans la zone d'espace où ils se propagent.

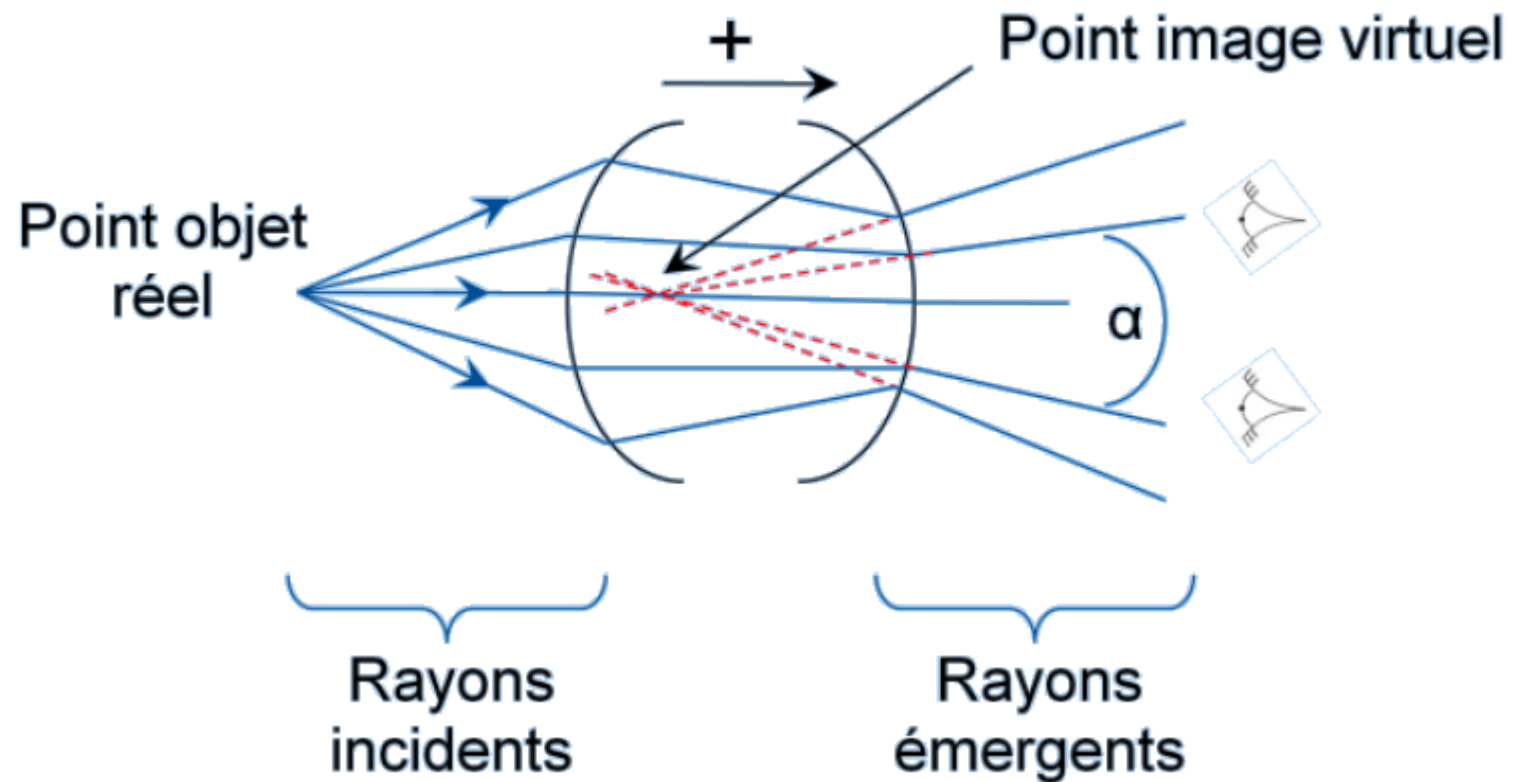
Définition : point virtuel

On parle d'objet et d'image virtuels quand les rayons concernés (incidents ou émergents) ne se croisent pas réellement.

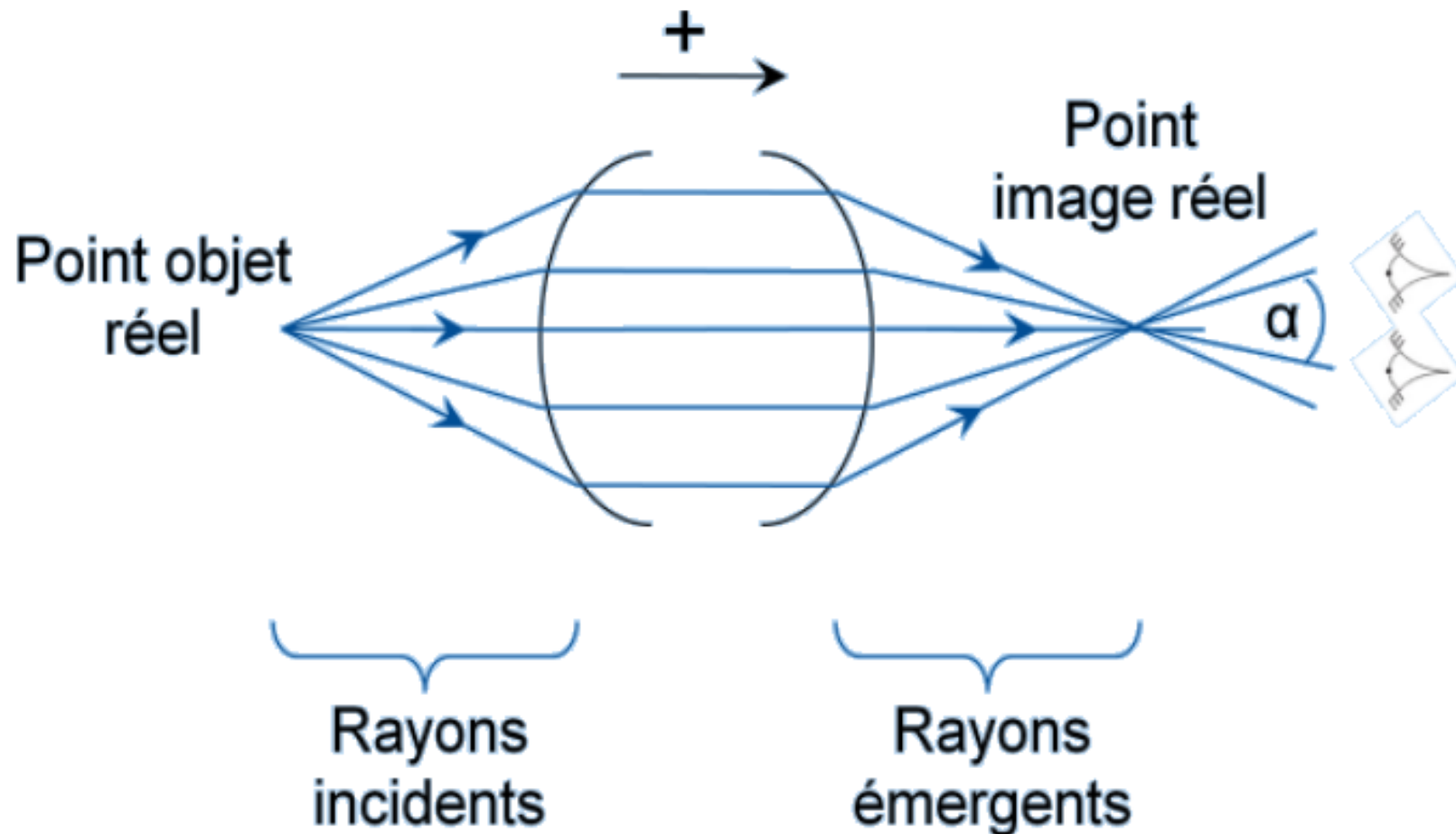
Leurs prolongements se croisent dans la zone d'espace où ils ne se sont pas propagés.

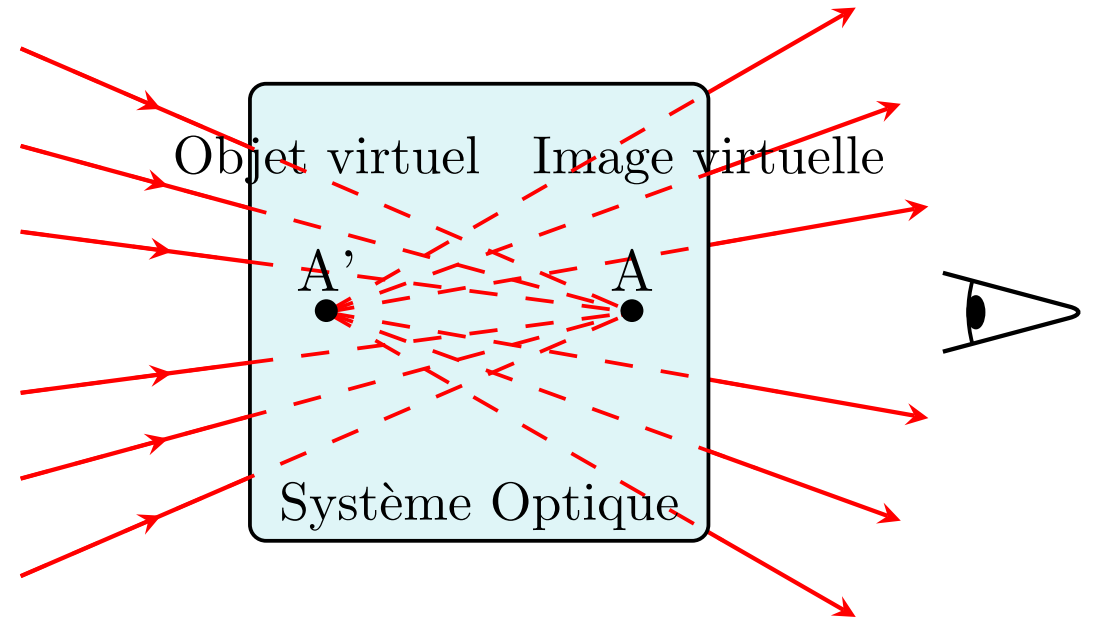
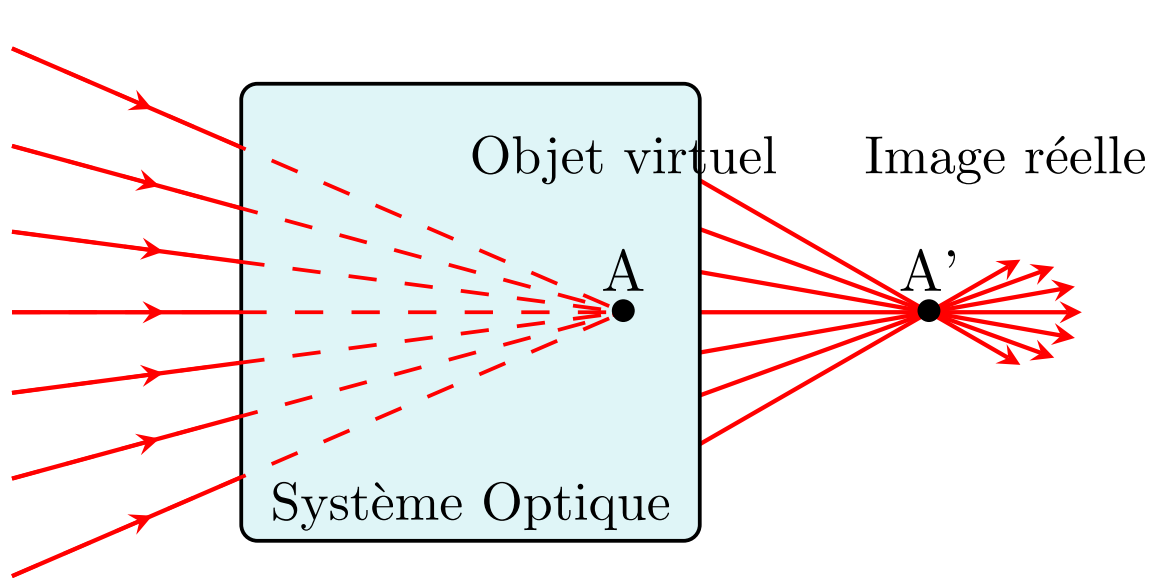
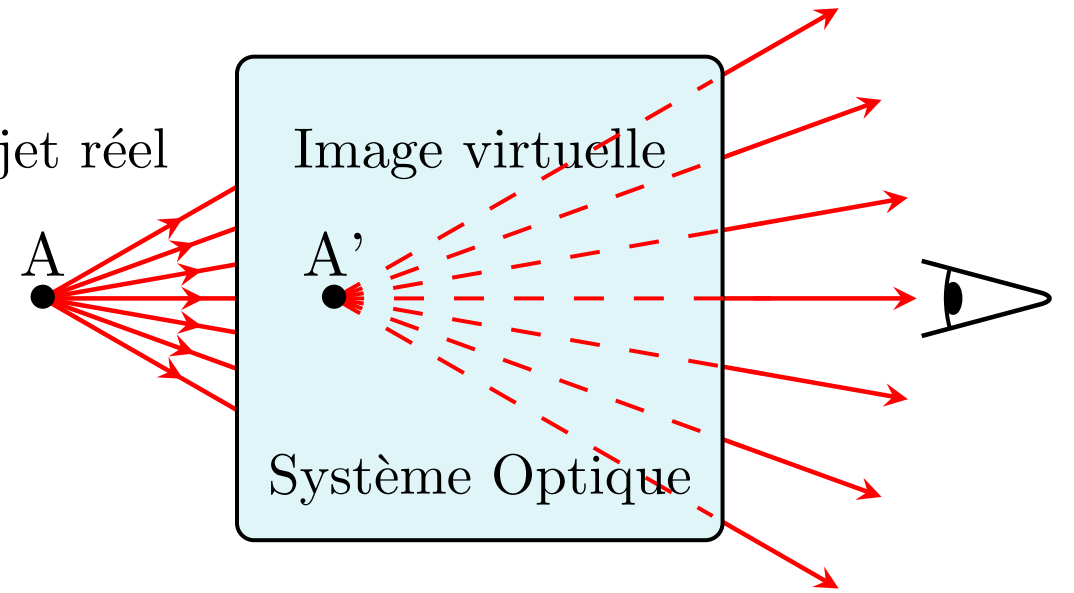
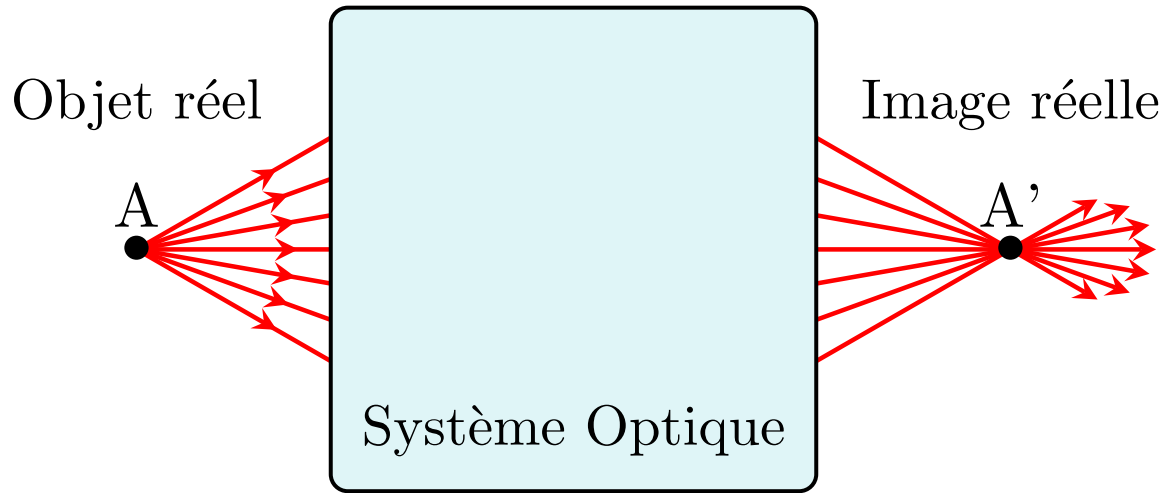
Définition : objet réel Un objet est réel s'il est placé avant la face d'entrée du système optique. Les rayons incidents partent de l'objet réel.

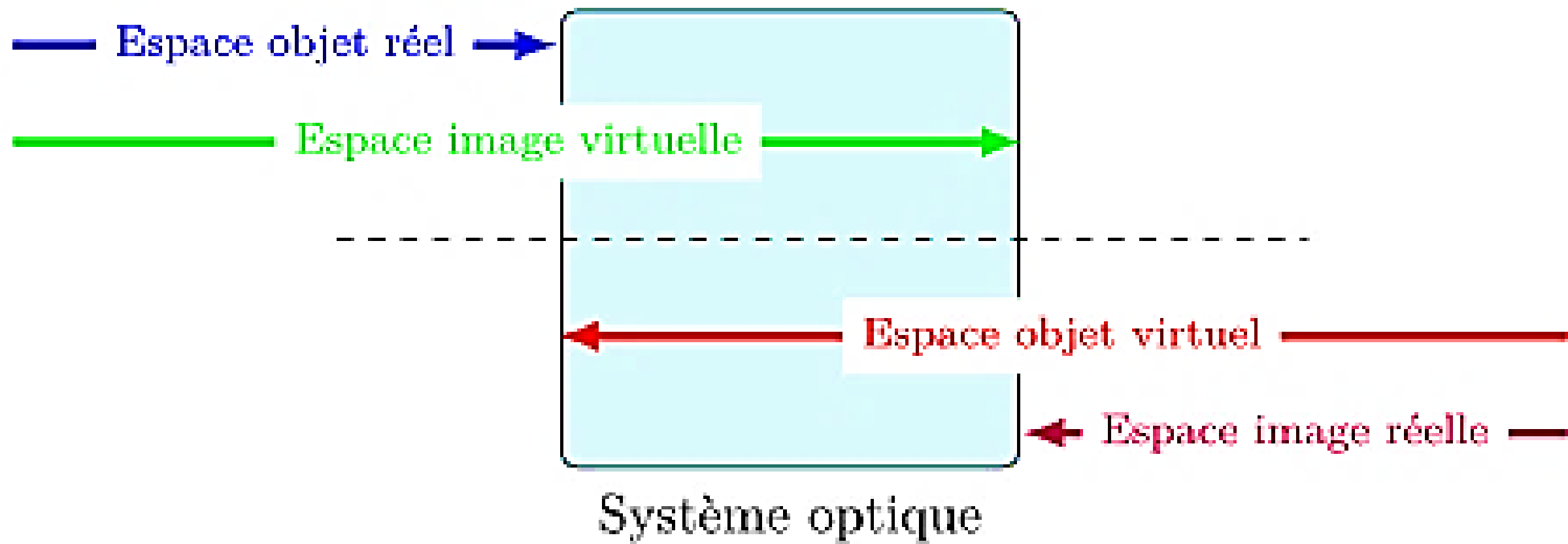
Définition : image virtuelle Une image est dite virtuelle si elle est située derrière la face de sortie du système optique. Pour une image ponctuelle les rayons lumineux émergents semblent provenir de cette image mais elle ne peut être matérialisée sur un écran.



Définition : image réelle Une image est réelle si elle est située après la face de sortie du système optique. Les rayons émergents se dirigent vers elle. Cette image peut être vue sur un écran placé au lieu de l'intersection. (projection cinéma)

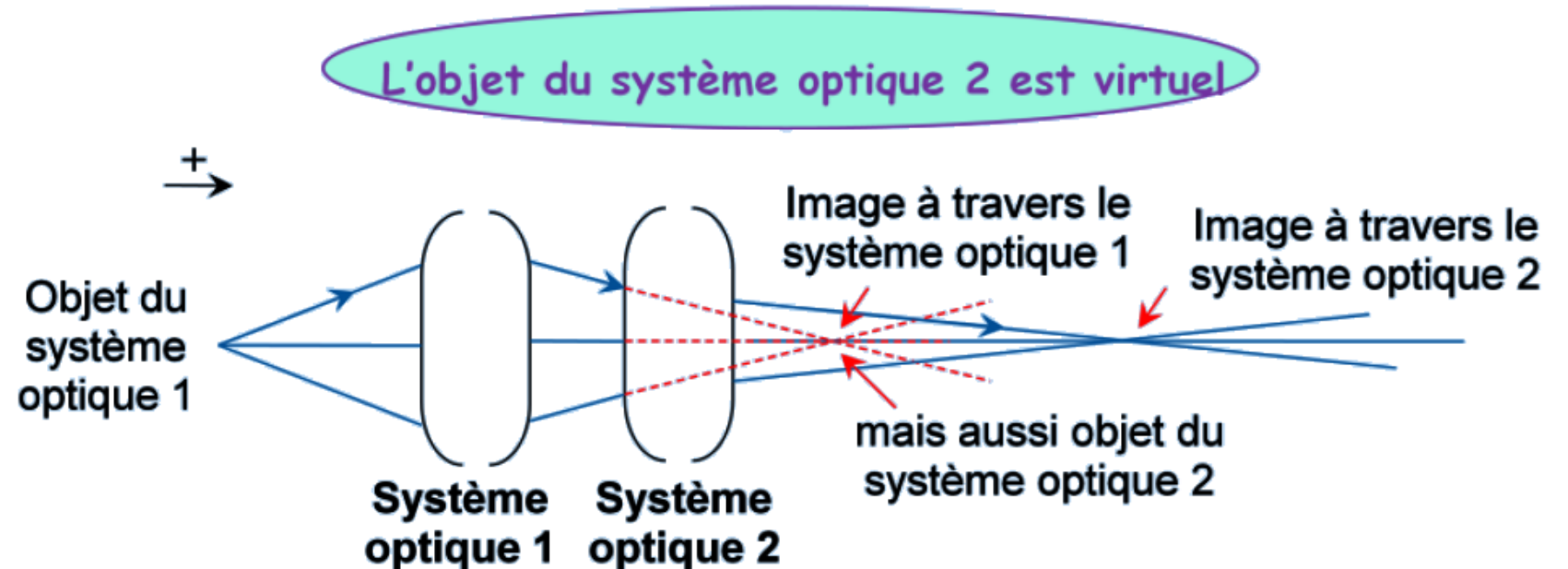
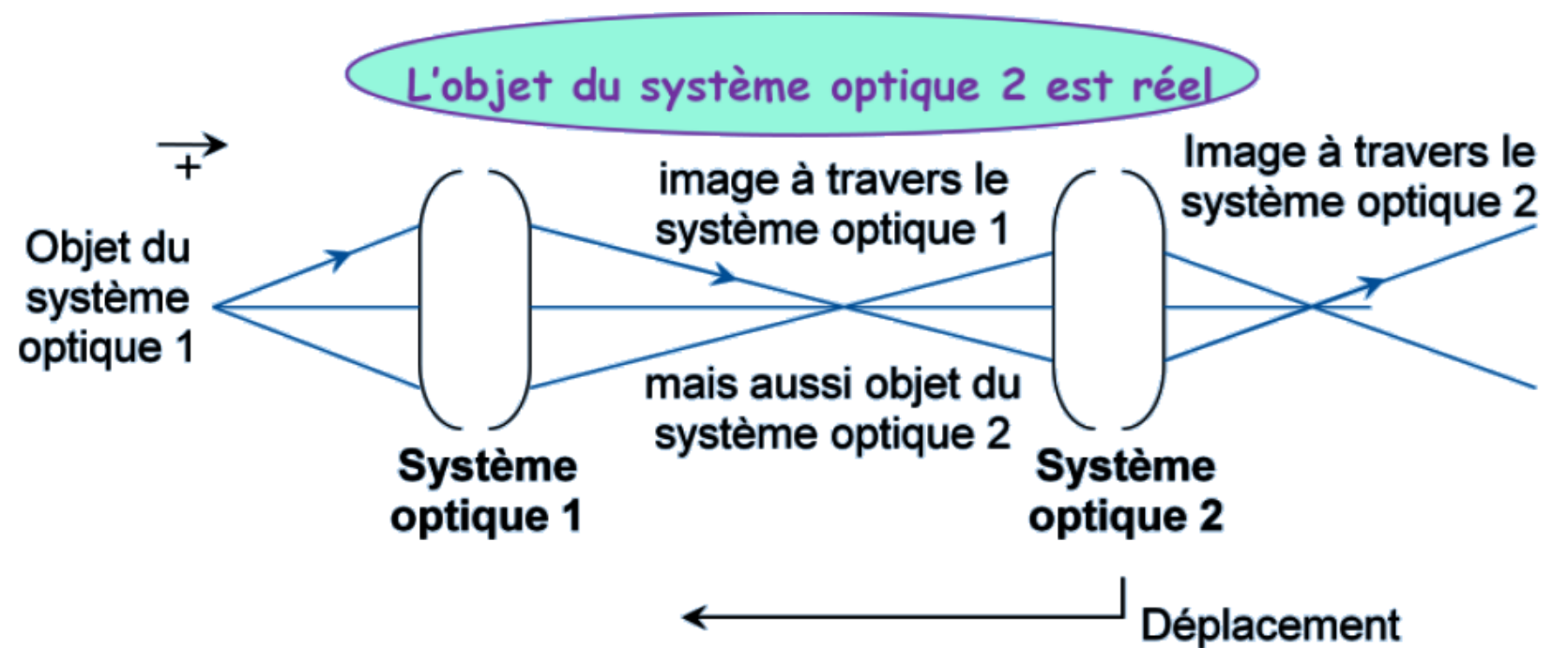






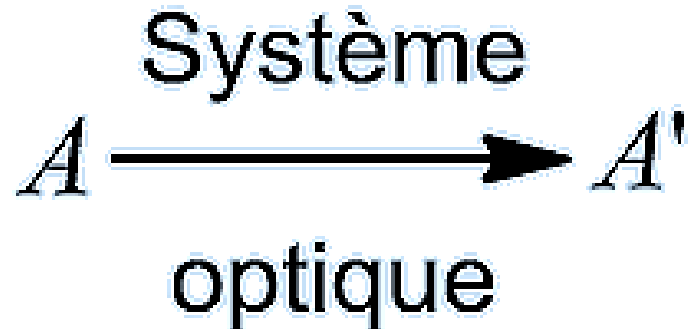
Objet virtuel

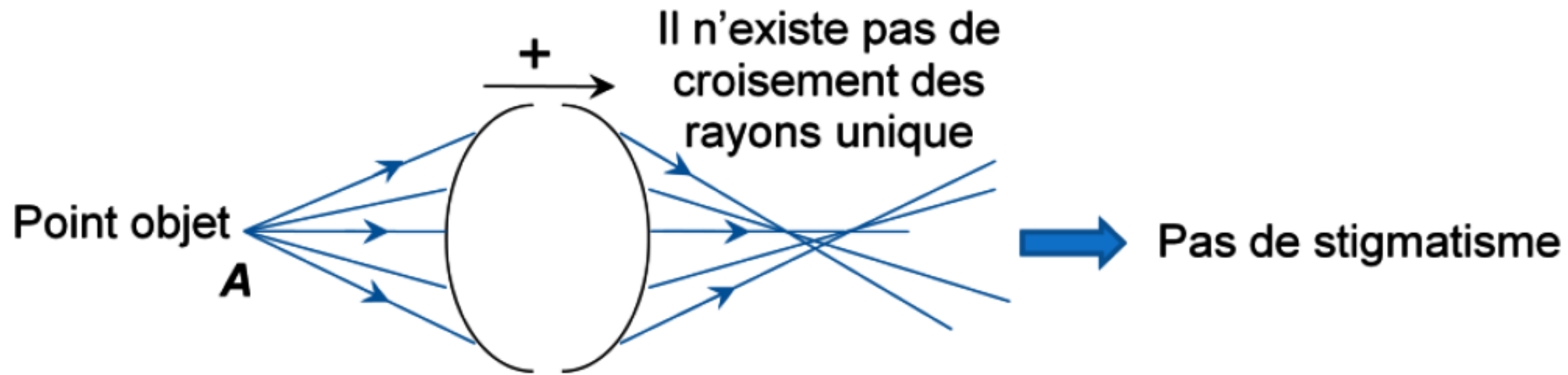
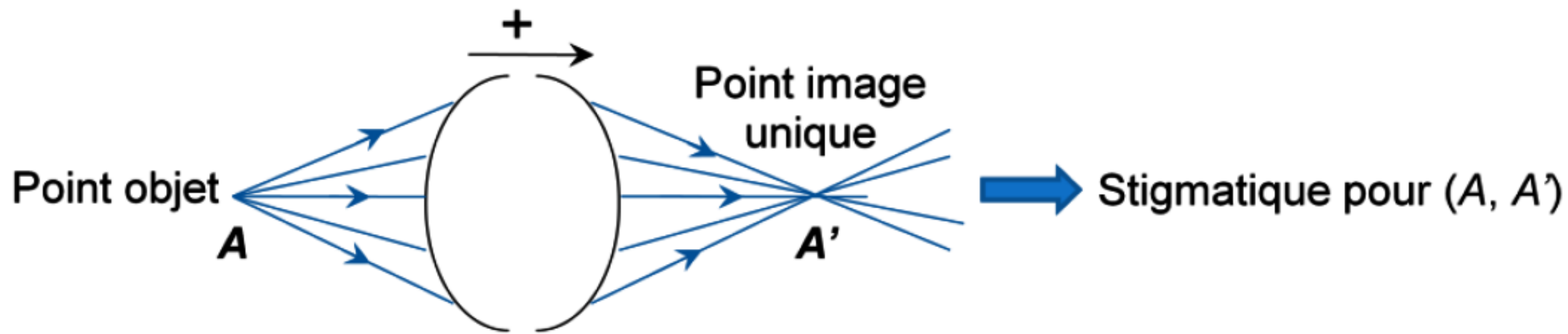
Un objet virtuel doit être créé par un précédent système optique.



Conjugaison objet-image : notion de stigmatisme

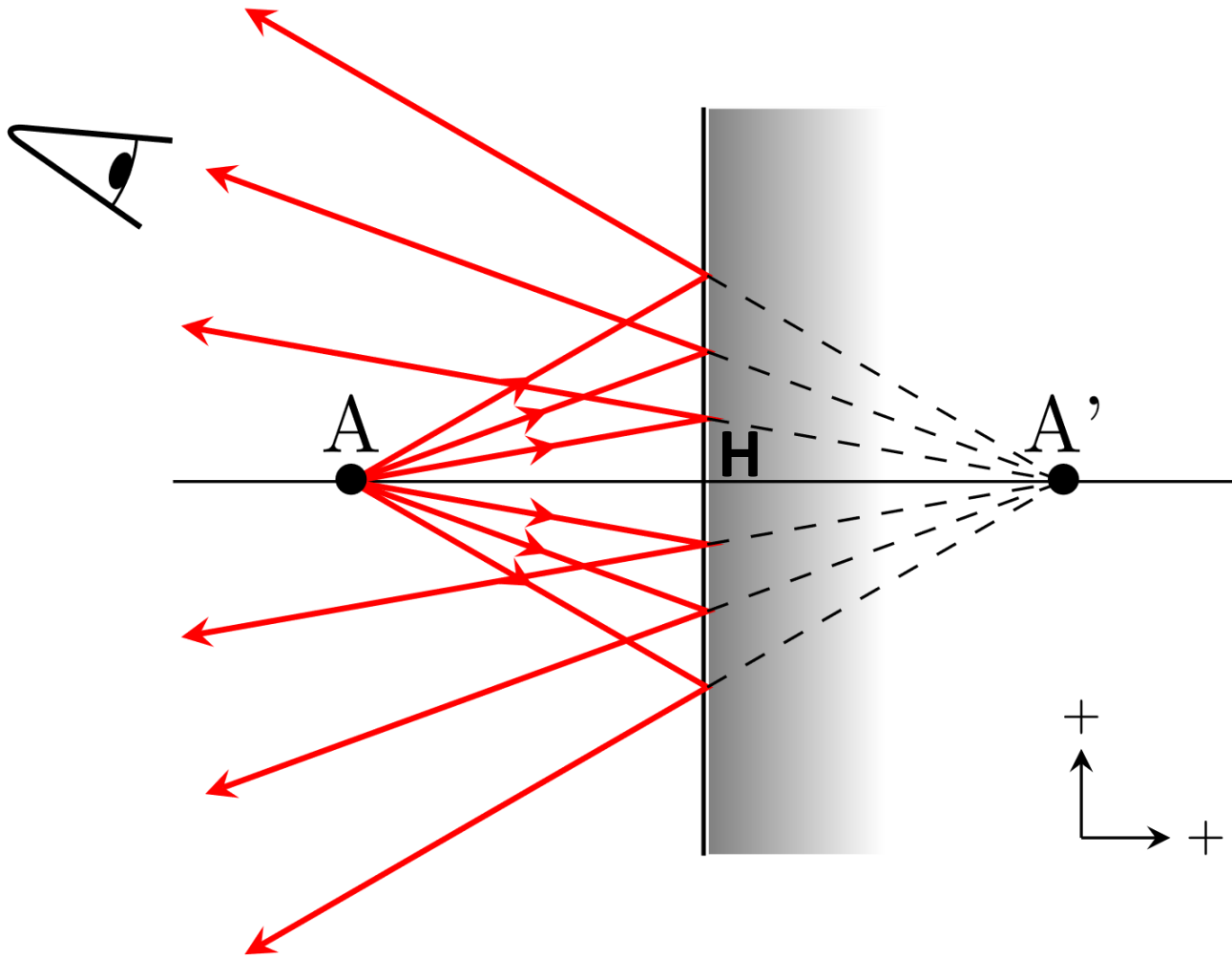
- Un système optique est **stigmatique** si, tous les rayons émergents issus d'un objet ponctuel A , se croisent exactement en un unique point image A' . Sinon le système n'est pas stigmatique ou astigmatique.
- **Les points A et A' sont dits conjugués : A' est l'image conjuguée de A par le système optique.**
- **Il existe une relation mathématique entre ces deux points, appelée relation de conjugaison.**



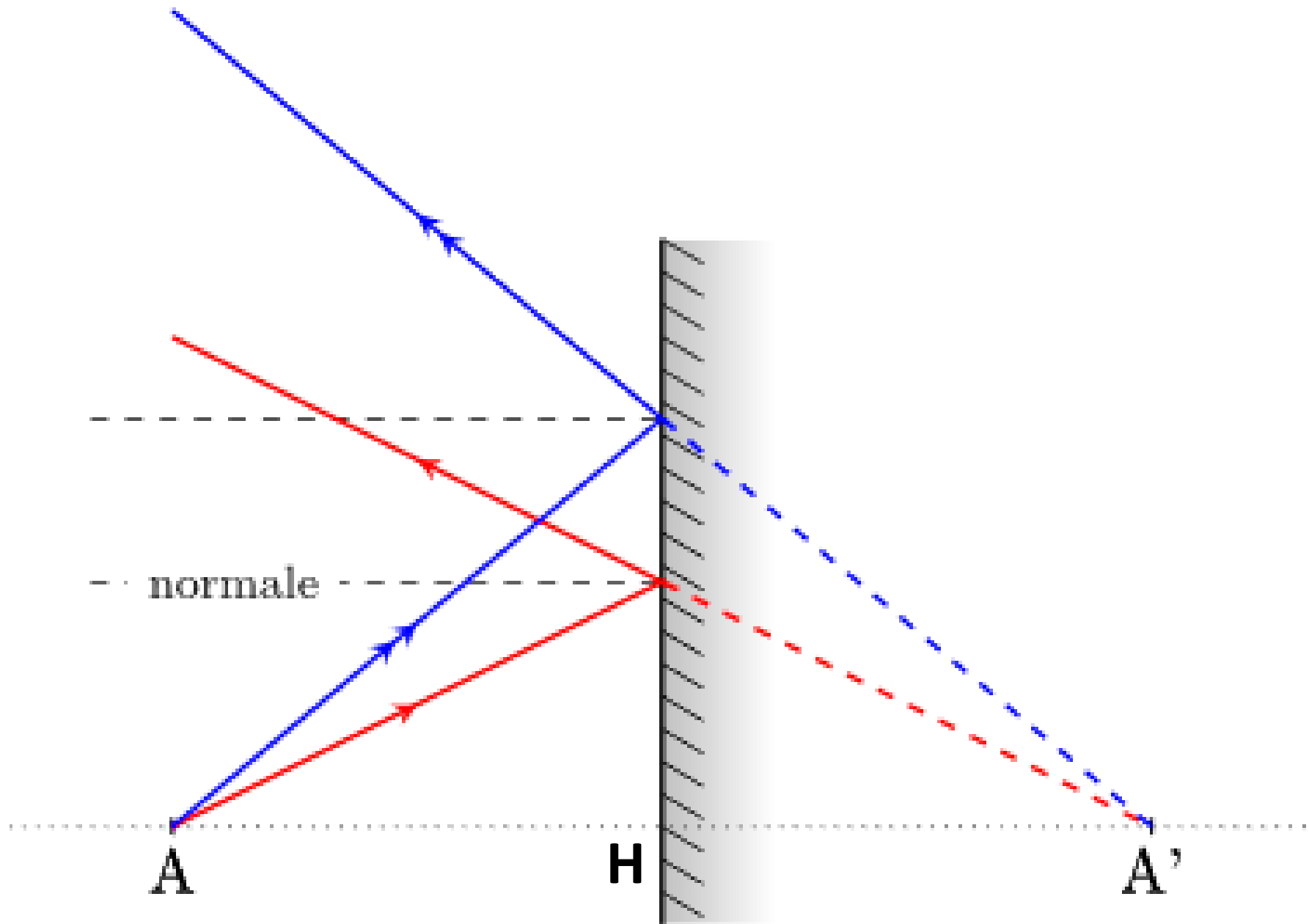


Le miroir plan présente un stigmatisme rigoureux.

L'objet ponctuel réel A a pour image virtuelle unique A' son symétrique par rapport au plan du miroir.



**H est le projeté orthogonal de
A sur le miroir :
L'image de A est le symétrique
orthogonal de A.**



Relation de conjugaison

La relation de conjugaison d'un système optique est la relation mathématique qui lie les distances caractéristiques de l'emplacement de l'objet et de l'emplacement de l'image.

Dans le cadre du miroir :

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

$\overline{HA'}$ représente la distance algébrique entre H et A'

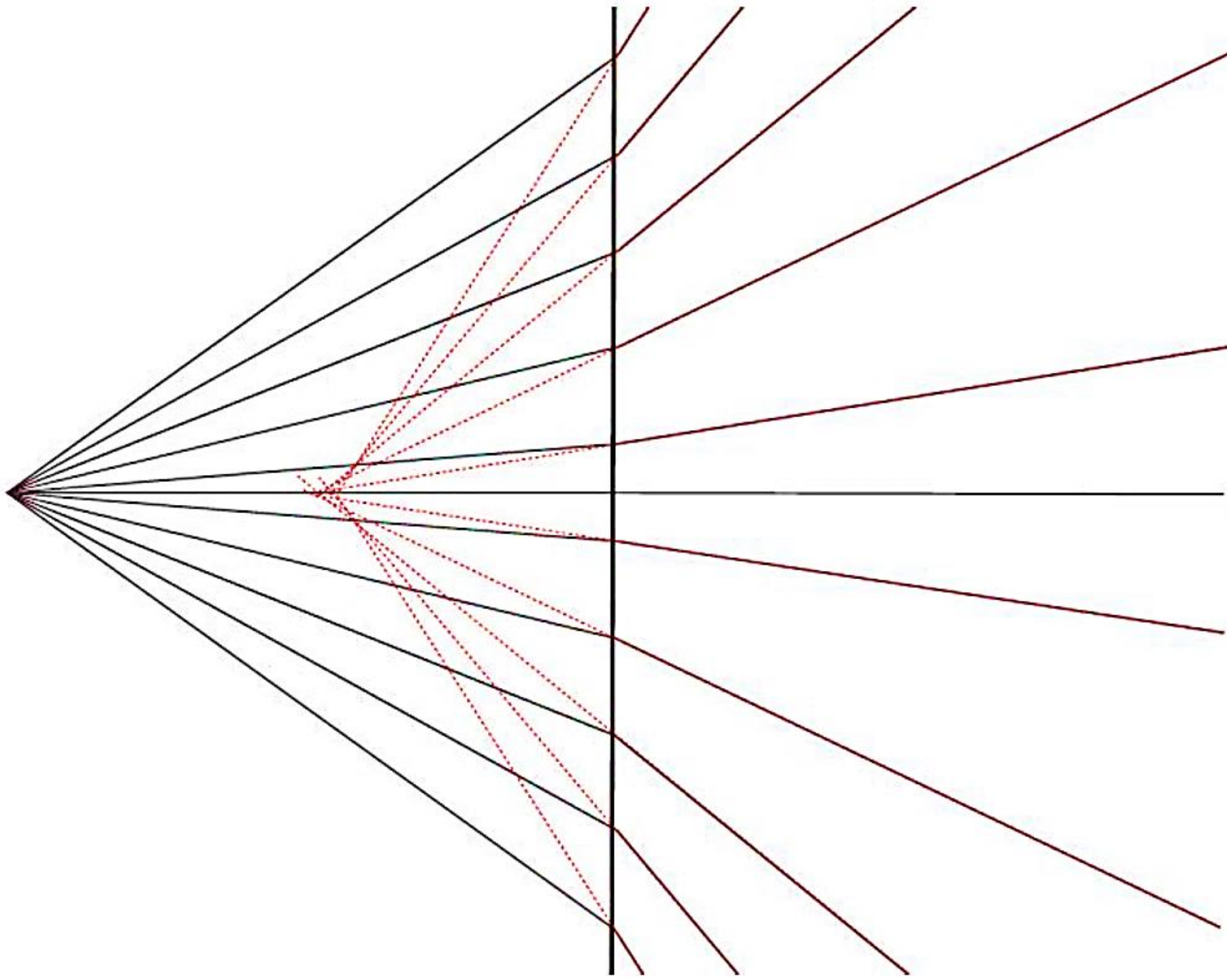
\overline{HA} représente la distance algébrique entre H et A

Rappel : une grandeur algébrique est une grandeur dont la valeur est affectée d'un signe, il faut donc avoir choisi une convention d'orientation positive au préalable.

Le miroir plan est le seul système optique rigoureusement stigmatique.

Le dioptré plan présente un stigmatisme approché : en toute rigueur l'objet ponctuel réel A ne permet pas d'obtenir un point image A' unique (il y a une infinité de points de croisement très proches, on obtient une tache image).

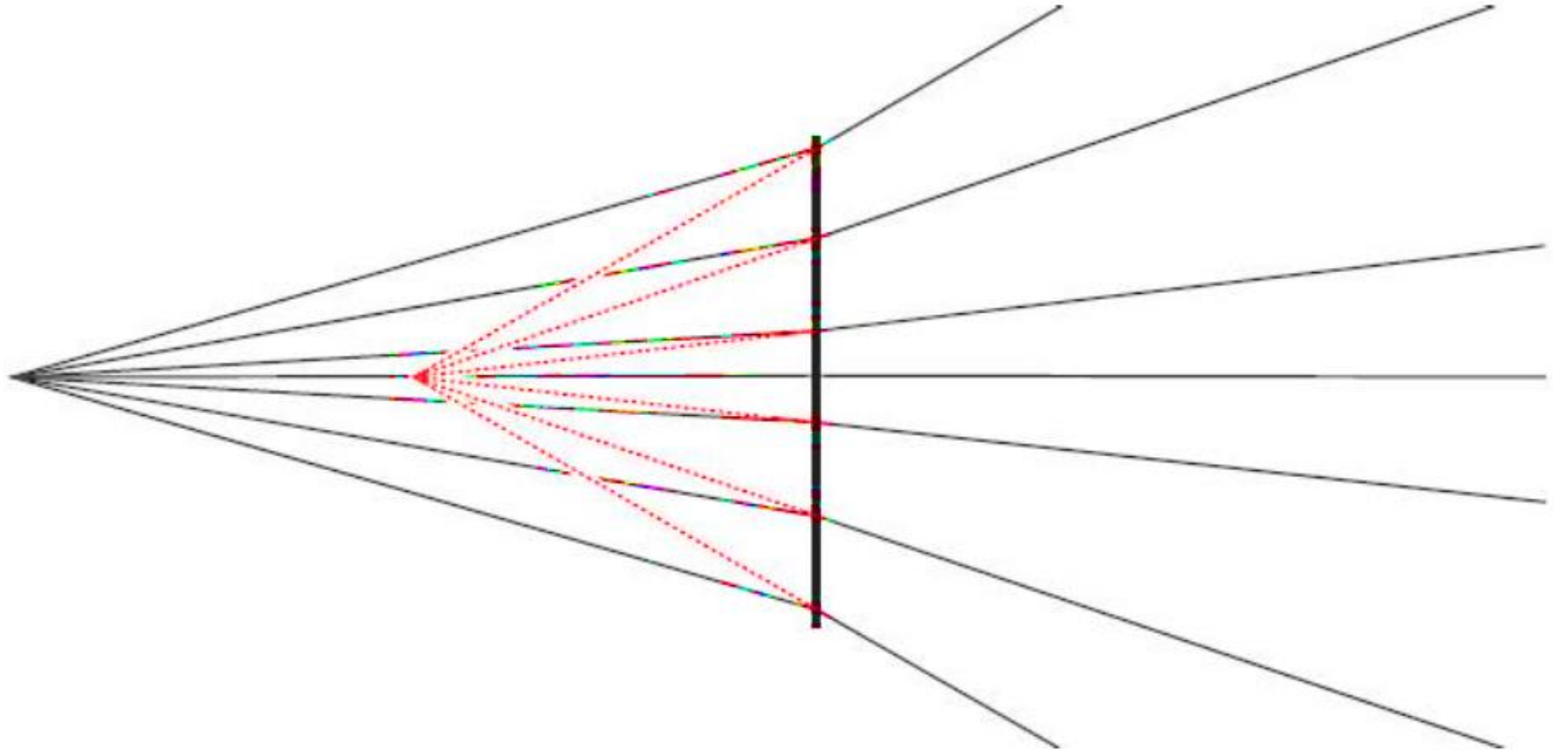
Si on se contente de n'utiliser que les rayons incidents faisant un angle d'incidence $i \ll \text{rad}$, alors les rayons émergents se croisent «presque» en un point. (si la tache image est plus petite que la taille des récepteurs optiques alors l'œil perçoit bien un point image).



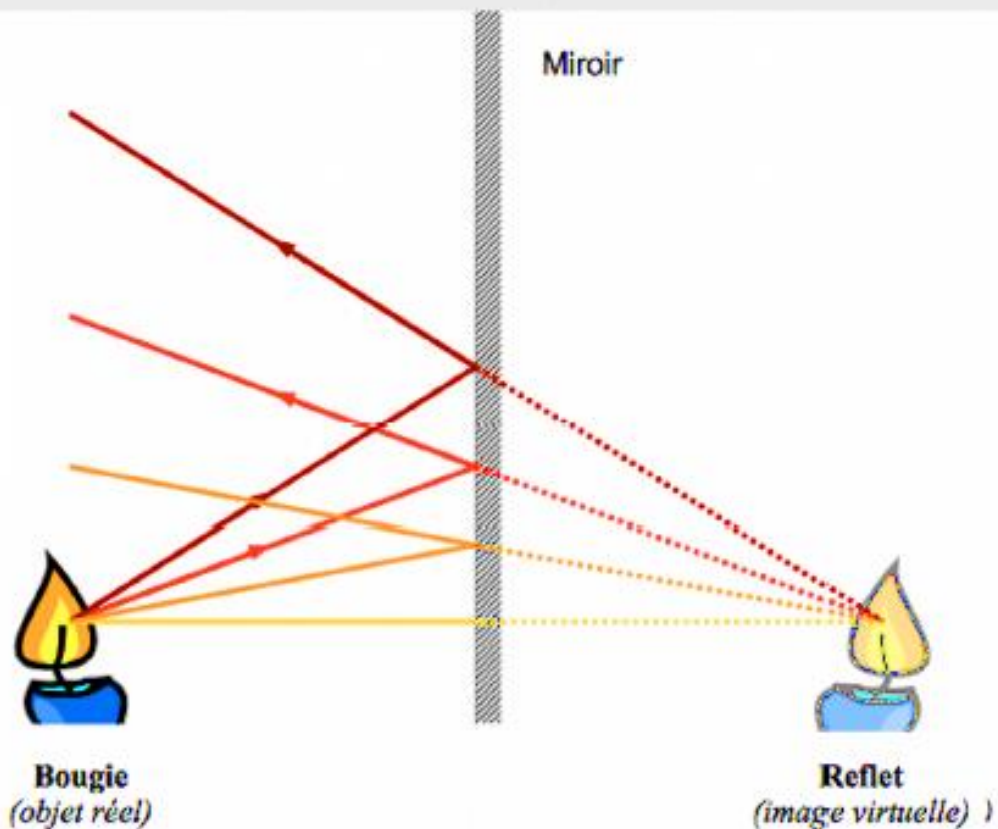
Simulation réalisée
avec un dioptre plan
d'indice de
réfraction 2,0 à
gauche et 1,0 à
droite.

**Dioptre
astigmatique.**

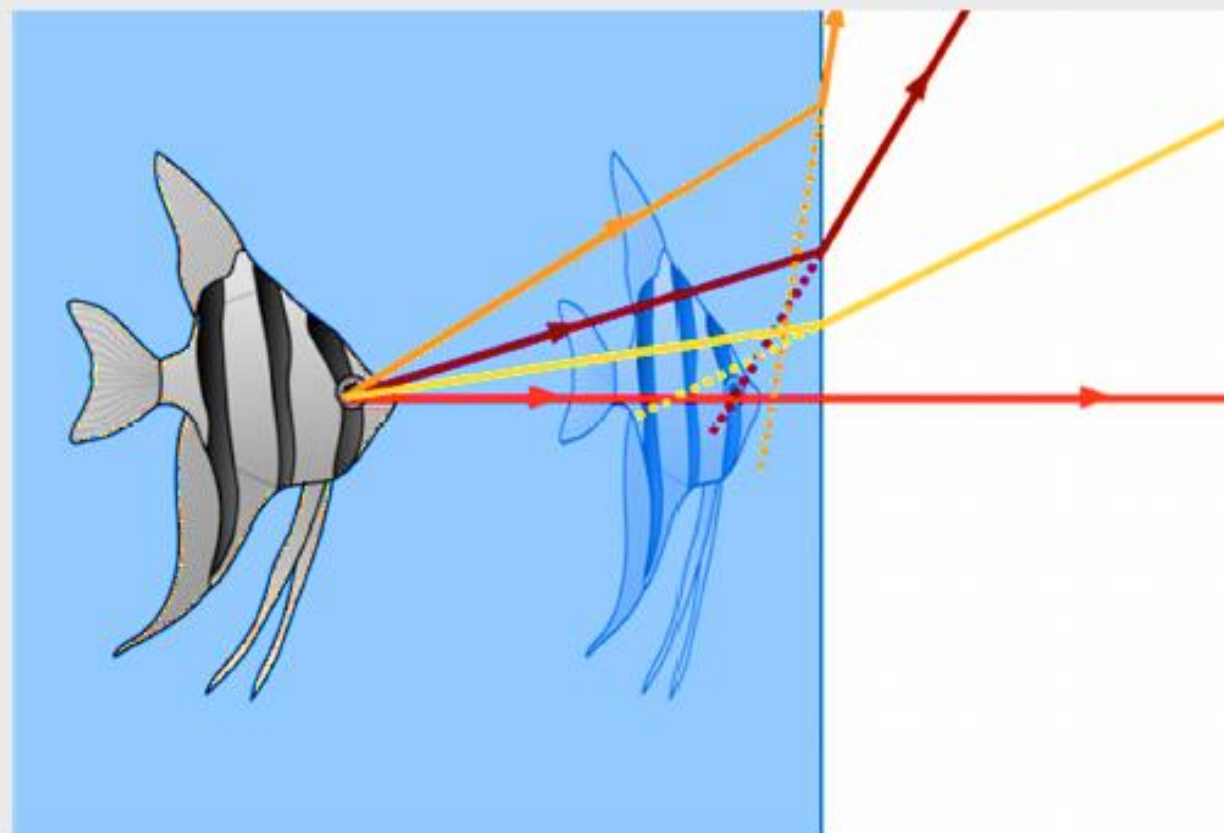
Si nous sélectionnons uniquement les rayons peu inclinés par rapport à la normale au dioptre, on obtient la figure suivante.



Stigmatisme rigoureux



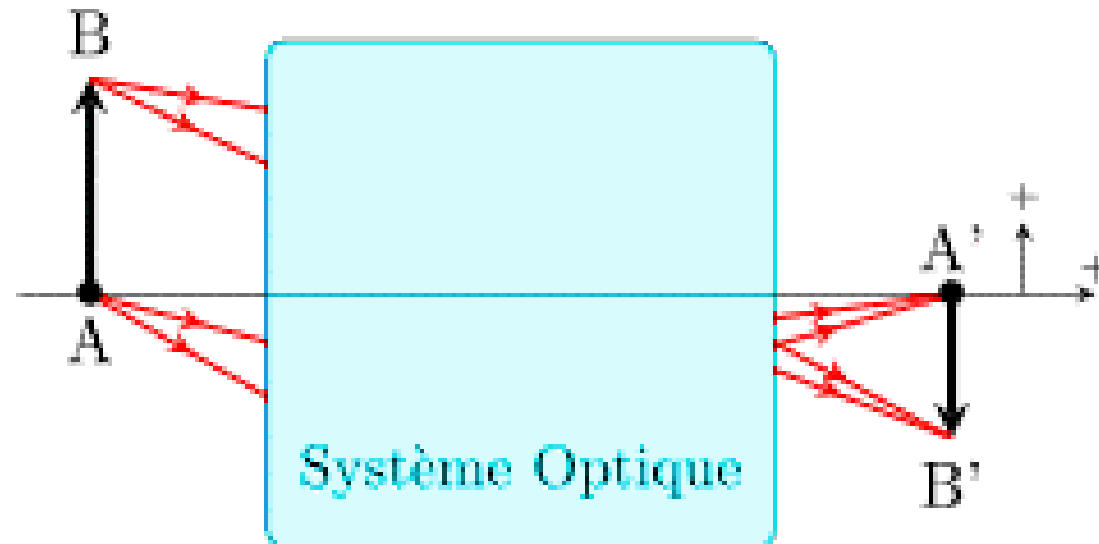
Stigmatisme approché



Aplanétisme

Un système optique est le plus souvent destiné à donner d'un objet étendu une image la plus nette possible que l'on peut recueillir sur un capteur généralement plan et perpendiculaire à l'axe optique. Aussi, il est souhaitable que l'image d'un objet plan soit également plane.

Un système optique est aplanétique s'il donne de tout objet lumineux situé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique une image plane également perpendiculaire à l'axe optique.



Le segment image n'a pas nécessairement la même taille que le segment objet.

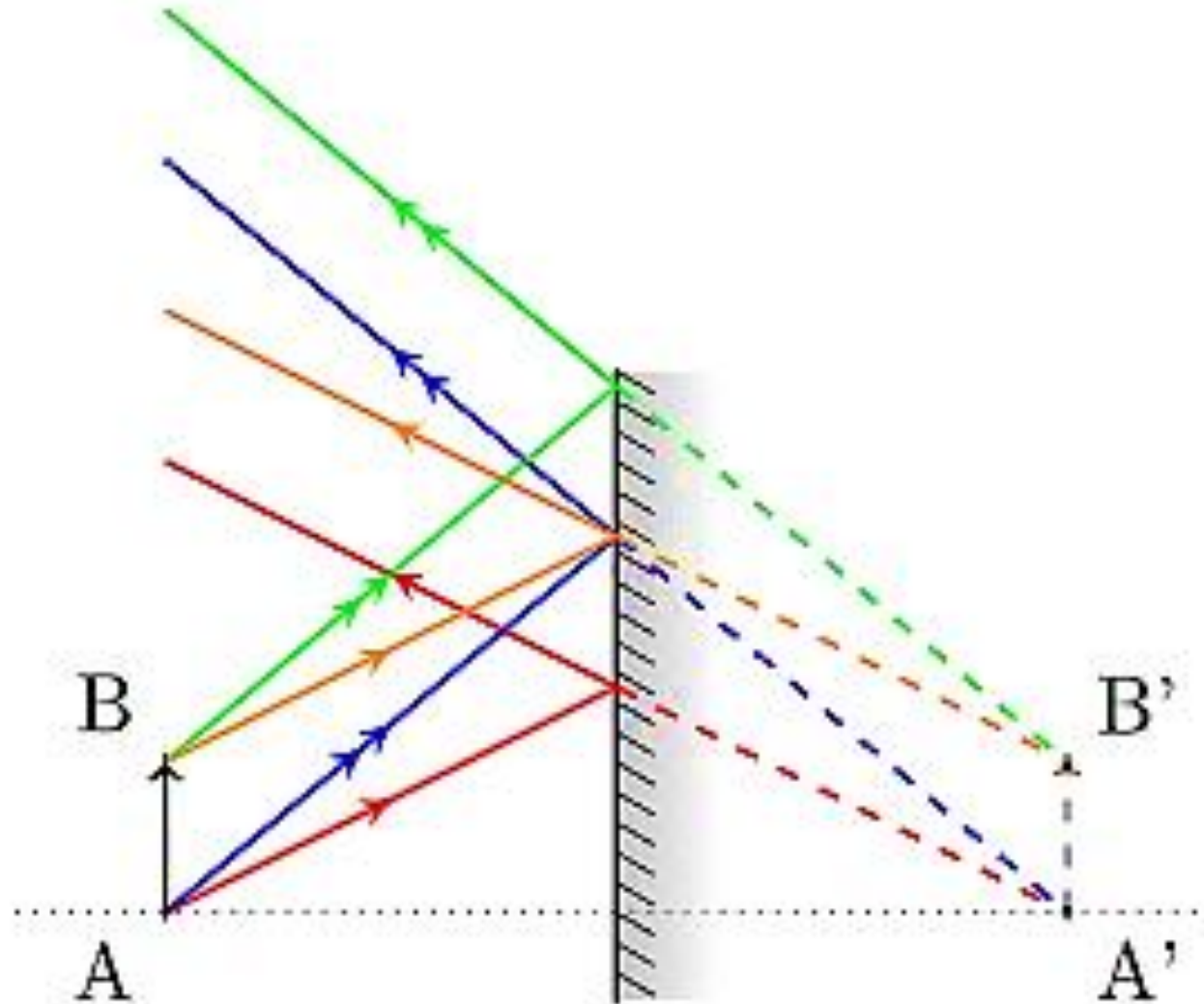
On définit le **grandissement transversal** γ_t

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

- Si $\gamma_t > 1$, l'image est droite et agrandie.
- Si $0 < \gamma_t < 1$, l'image est droite et rétrécie.
- Si $-1 < \gamma_t < 0$, l'image est renversée et rétrécie.
- Si $\gamma_t < -1$, l'image est renversée et agrandie.

Le miroir plan présente un aplanétisme rigoureux.

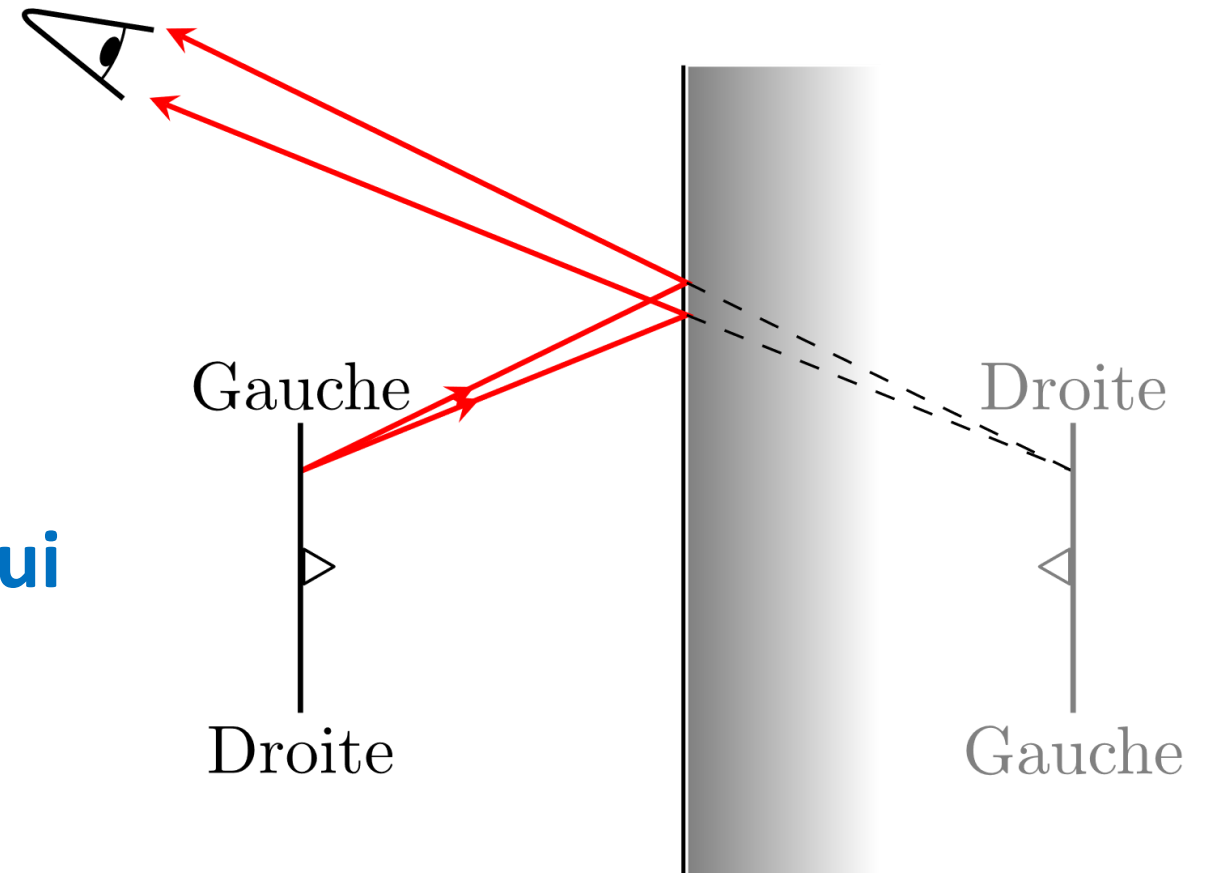
Pour un objet AB parallèle au miroir, $\gamma_t = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = 1$

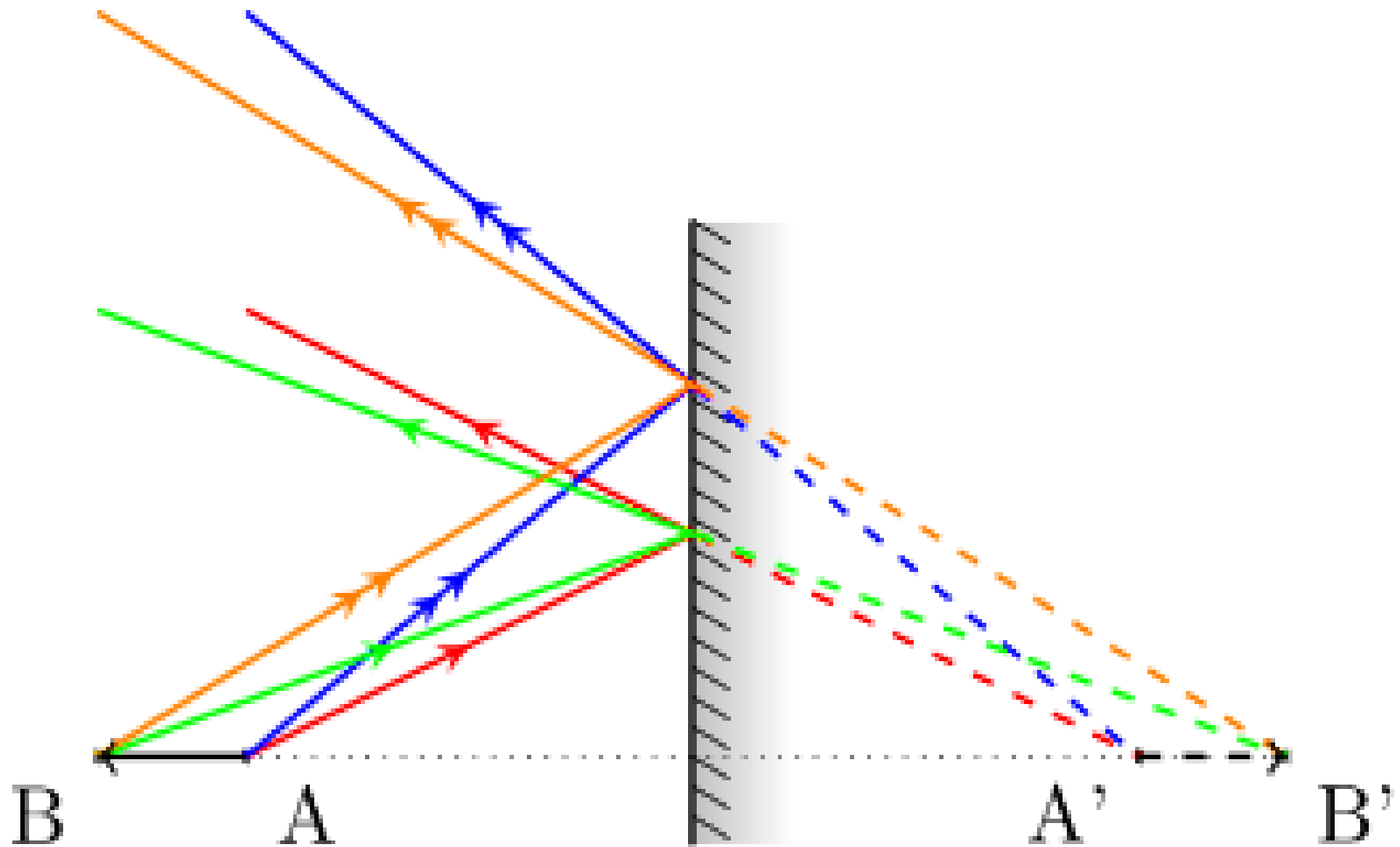


Le grandissement transversal est de 1 : image droite et pas de déformation. Par contre, **il y a inversion gauche droite entre l'objet et l'image**. On peut définir un agrandissement longitudinal.

Pour un objet AB sur l'axe optique, $\gamma_l = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -1$

Dans le cas du miroir plan, $\gamma_e = -1$ qui traduit l'inversion gauche-droite.





**Le grandissement axial est de -1 :
image renversée et toujours pas de déformation.**

Le miroir plan est le seul dispositif qui présente un stigmatisme et un aplanétisme rigoureux.

Pour des rayons peu inclinés, on peut juste considérer un dioptre comme présentant un stigmatisme et aplanétisme approché.