



# Les lois fondamentales de l'optique géométrique

CHAPITRE III  
OPTIQUE GEOMETRIQUE  
PARTIE I  
1 Année SNV  
2021/2022

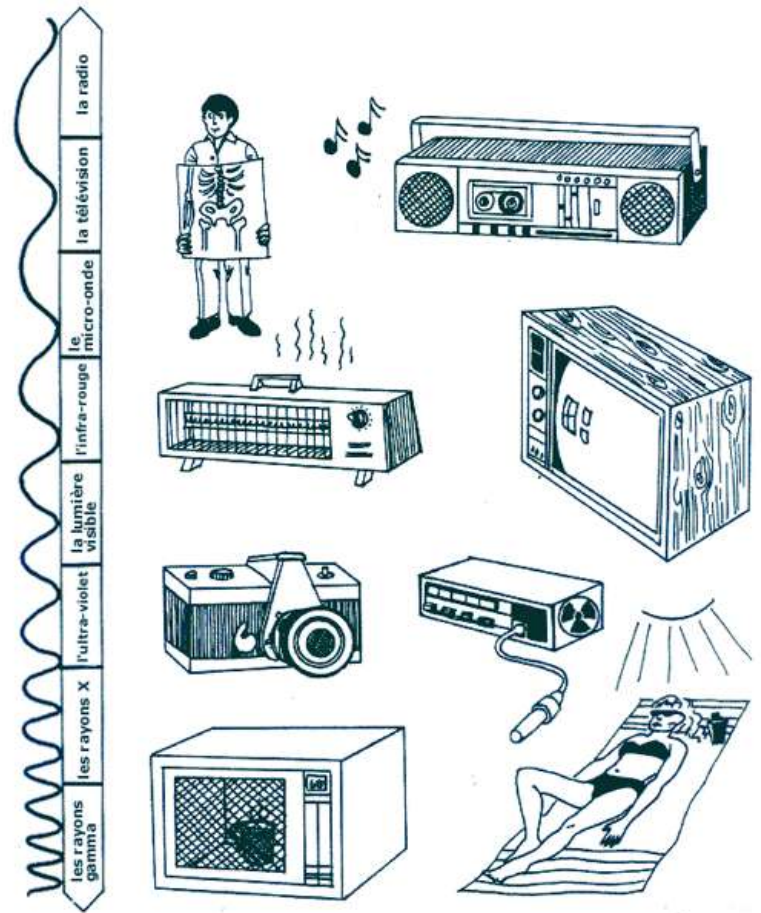
# L'OPTIQUE ?

L'optique est l'étude de la lumière.

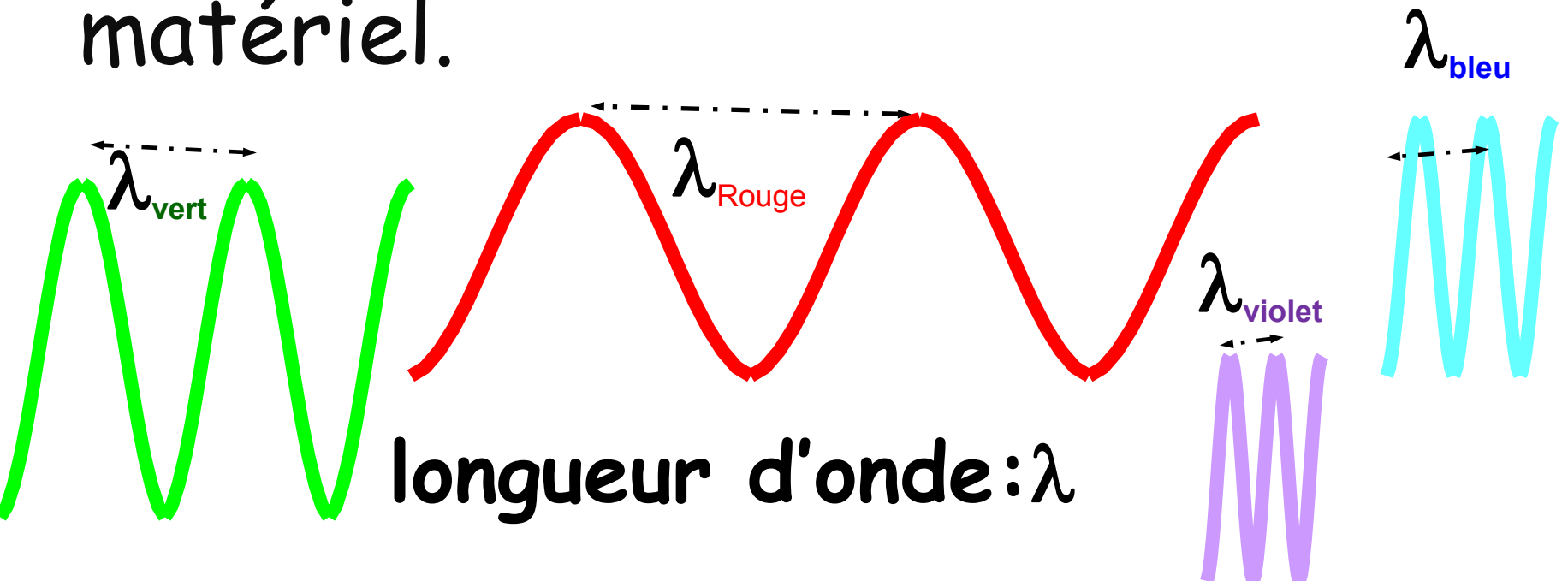
La lumière est le messenger de notre Univers.

La lumière est émise par la matière et se manifeste par son action sur l'œil ou sur d'autres récepteurs parmi lesquels nous citerons : Plaque photographique, ...

Ces récepteurs permettent de mettre en évidence des domaines de lumière que **l'œil** ne perçoit pas, tels ceux de **l'Ultraviolet** et de **l'Infrarouge**.



En optique géométrique, la lumière est considérée comme une **onde électromagnétique (vibration ondulatoire)** qui se propage dans toutes les directions de l'espace, même en absence du milieu matériel.



Une onde électromagnétique est une vibration ondulatoire caractérisée par sa fréquence  $\nu$  (nu) ou par sa période temporelle  $T=1/\nu$ .

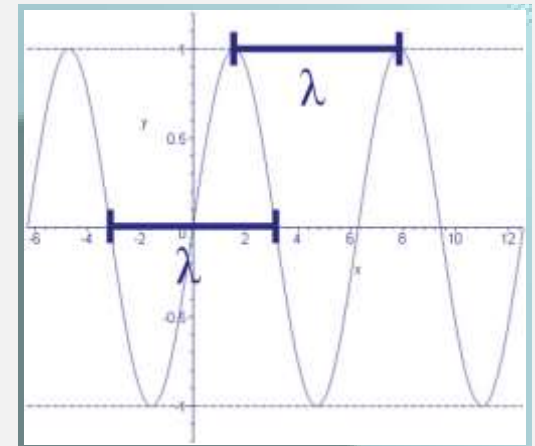
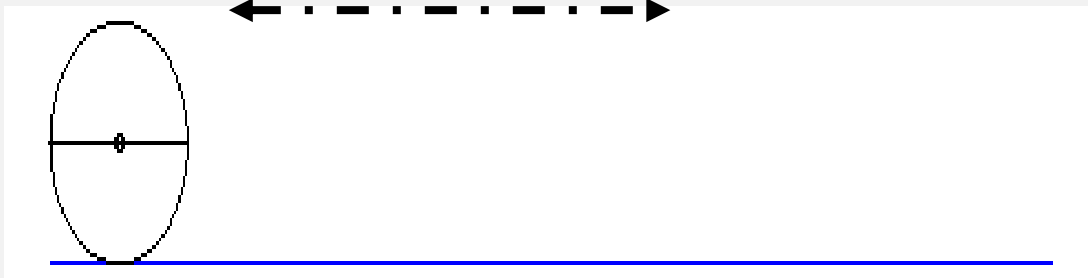
Ces 2 paramètres  $T$  et  $\nu$  sont indépendants du milieu traversé par l'onde en question.

La **longueur d'onde**  $\lambda$  est définie par :

$\lambda = v \cdot T = v / \nu$  où  $v$  est la vitesse de propagation de l'onde.

Ces 2 grandeurs  $v$  et  $\lambda$  dépendent du milieu traversé, à l'inverse de la **période**  $T$  et la **fréquence**  $\nu$ .

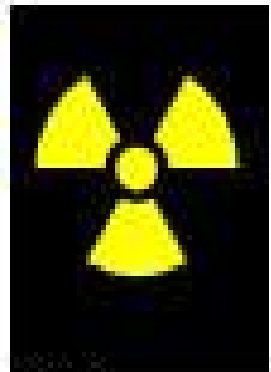
$\lambda$



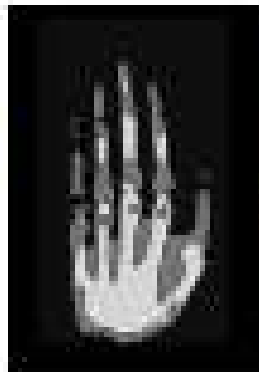
$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

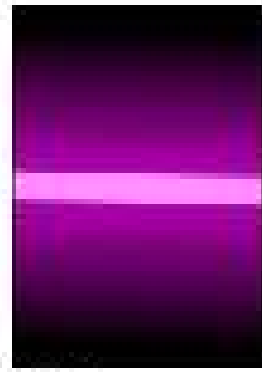
$$1 \text{ \mu m} = 10^{-6} \text{ m}$$



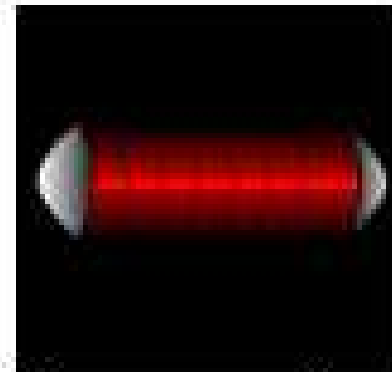
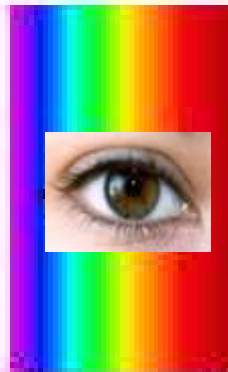
0.01 nm



1 nm

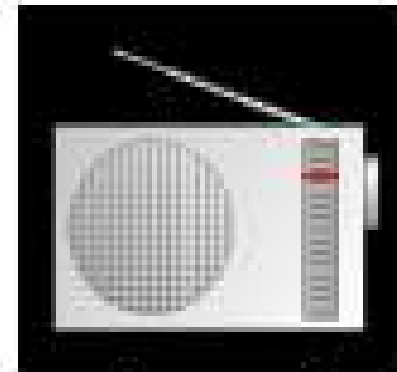


100 nm



1 mm

1 cm



1 m

1 km

Le spectre électromagnétique

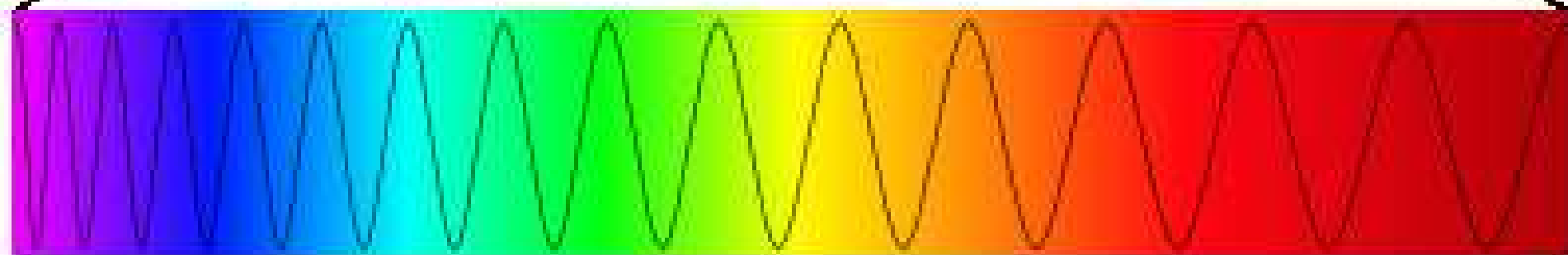
Visible à l'œil nu

$\lambda$

La longueur d'onde  $\lambda_0$  de la lumière visible à l'œil, par rapport au vide

400 nm

800 nm



La **vitesse**  $v$  de propagation de la lumière dépend du milieu traversé :

Air ou vide	eau	verre
300 000 km/s	225 000 km/s	200 000 km/s

La lumière se propage dans les milieux transparents différents à des vitesses différentes.



On définit l'indice de réfraction  $n$  en un point  $M$  quelconque d'un milieu donné par la quantité :

$$n = c/v$$

vitesse lumière dans le vide  
-----  
vitesse lumière dans le milieu

air	eau	éthanol	verres	benzène	diamant
1	1,3	1,36	$1,5 < n < 1,8$	1,6	2,4

**Attention** : c'est très important !!!!

Comme  $v < c$  alors  $1 < n$  ;

l'indice du vide :  $n_0 = c/c = 1$

➤ l'indice de réfraction  $n$  traduit la tendance de la matière à ralentir la propagation des ondes électromagnétiques.

**Remarque** : Une radiation de **fréquence**  $\nu$  et de **longueur d'onde**  $\lambda_0$  dans le vide ( $n_0=1$ ), dans un autre milieu d'indice de réfraction  $n > 1$ , sa longueur d'onde  $\lambda$  s'exprime comme suit :

En changeant le milieu de propagation, la lumière change sa longueur d'onde  $\lambda$ , c'est-à-dire sa **vitesse**  $v$  et non pas sa **fréquence**  $\nu$  ni sa **période temporelle**  $T$ . La lumière **conserve** alors sa **teinte** (**couleur**)

$$\lambda = \nu \cdot T = \frac{\nu}{\underbrace{c}_{\frac{1}{n}}} \cdot \underbrace{T}_{\lambda_0} = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$\lambda_0 / \lambda = n$$

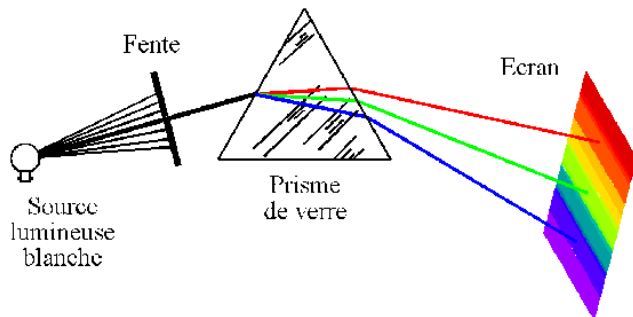
Voir TD Exercice n° 1

# Remarque :

La longueur d'onde  $\lambda$  est inversement proportionnelle à l'indice de réfraction  $n$  du milieu où la radiation se propage.

Milieu dispersif

Modèle de Cauchy



$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

A et B sont des constantes

**Milieu homogène** : tout milieu dans lequel la lumière se propage avec une vitesse  $v$  constante. Donc son **indice de réfraction  $n$**  est aussi constant ( $n=c/v$ ).

**Milieu inhomogène (non homogène)** : Tout milieu dans lequel la lumière se propage avec une vitesse  $v$  variable.

Donc son indice de réfraction  $n$  est aussi variable, dans ce milieu ( $n=c/v$ ).

La lumière blanche est décomposée en plusieurs radiations visibles, définies par des couleurs, c'est-à-dire par la fréquence  $\nu$  ou sa longueur d'onde  $\lambda$ . Chacune de ces radiations est dite simple ou monochromatique, car il est impossible de la décomposer en d'autres radiations.

400 nm

800 nm



La longueur d'onde  $\lambda_0$  de la lumière visible à l'œil, par rapport au vide  $n_0=1$

**Source de lumière** : Tout corps qui émet de la lumière est une source lumineuse.

Cette source peut être :

\* **Source principale** (bougie, lampe, étoile,...)

\* **Source secondaire**. L'objet diffuse la lumière qu'il reçoit (La Lune, Planètes, vous, le mur, la table,...)

- **Sources étendues** :  
Soleil, écran de cinéma, Lampe,...
- **Sources de faibles dimensions** :  
Planètes,...
- **Sources ponctuelles** :  
étoile,...



- On appelle corps transparent tout corps qui laisse passer la lumière.

Exemple : l'eau, le verre, le cellophane,...

- On appelle corps opaque, tout corps qui arrête totalement la lumière.

Exemple : le bois, l'acier, le marbre...



Cellophane




eau

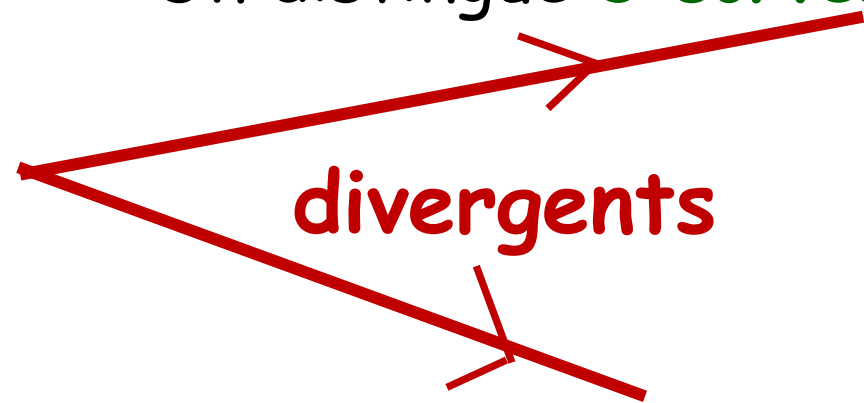


bois



Un **rayon lumineux** est représenté par une droite AB sur laquelle on place une flèche indiquant le **sens de propagation de la lumière**. **A**  **B**

- En pratique un **rayon lumineux** isolé n'existe pas.
- Les rayons sont toujours groupés en faisceaux. On distingue **3 sortes de faisceaux**.



**Pinceau** : tout faisceau étroit est appelé un pinceau lumineux.

➤ L'optique géométrique schématise alors la lumière par un rayon lumineux.

➤ La lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène d'indice  $n$ .

➤ Le principe de retour inverse de la lumière :

$A \rightarrow B$  alors  $B \rightarrow A$

L'indépendance des rayons lumineux permet de décomposer un faisceau en rayons, et d'étudier séparément **la marche** de chaque rayon, ce qui constitue le but de **l'optique géométrique**.

Le **comportement** de ce rayon lumineux à la surface de séparation ou d'un miroir est décrit par **les lois de Snell-Descartes**.

# René Descartes 1596-1650

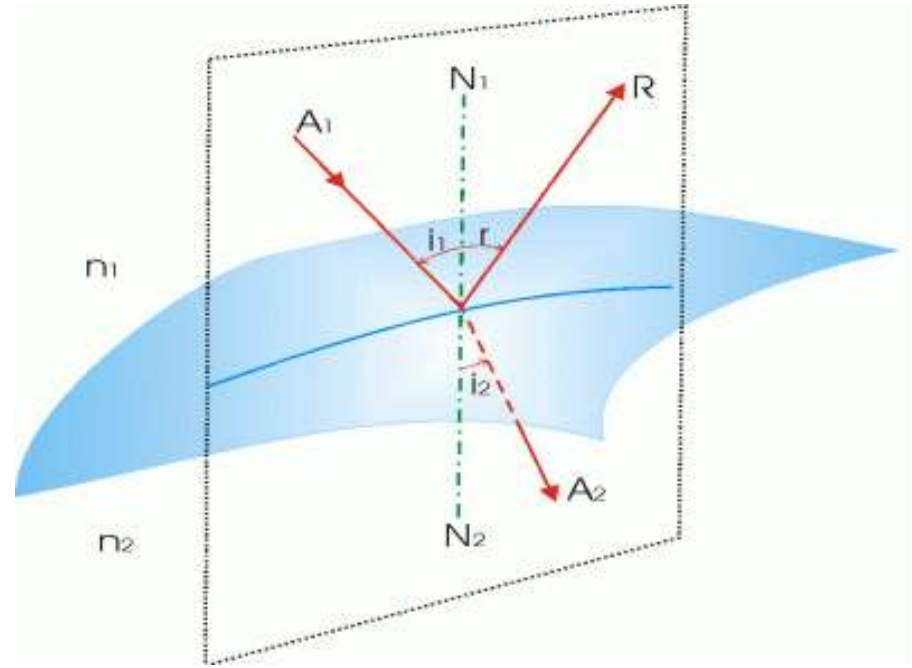


Les fondements de  
l'optique géométrique



Willebrord Snell 1580-1626

Les lois de Snell-  
**Descartes** fixent la  
direction des  
faisceaux **réfléchi**  
et **réfracté** en  
fonction de celle du  
faisceau incident.



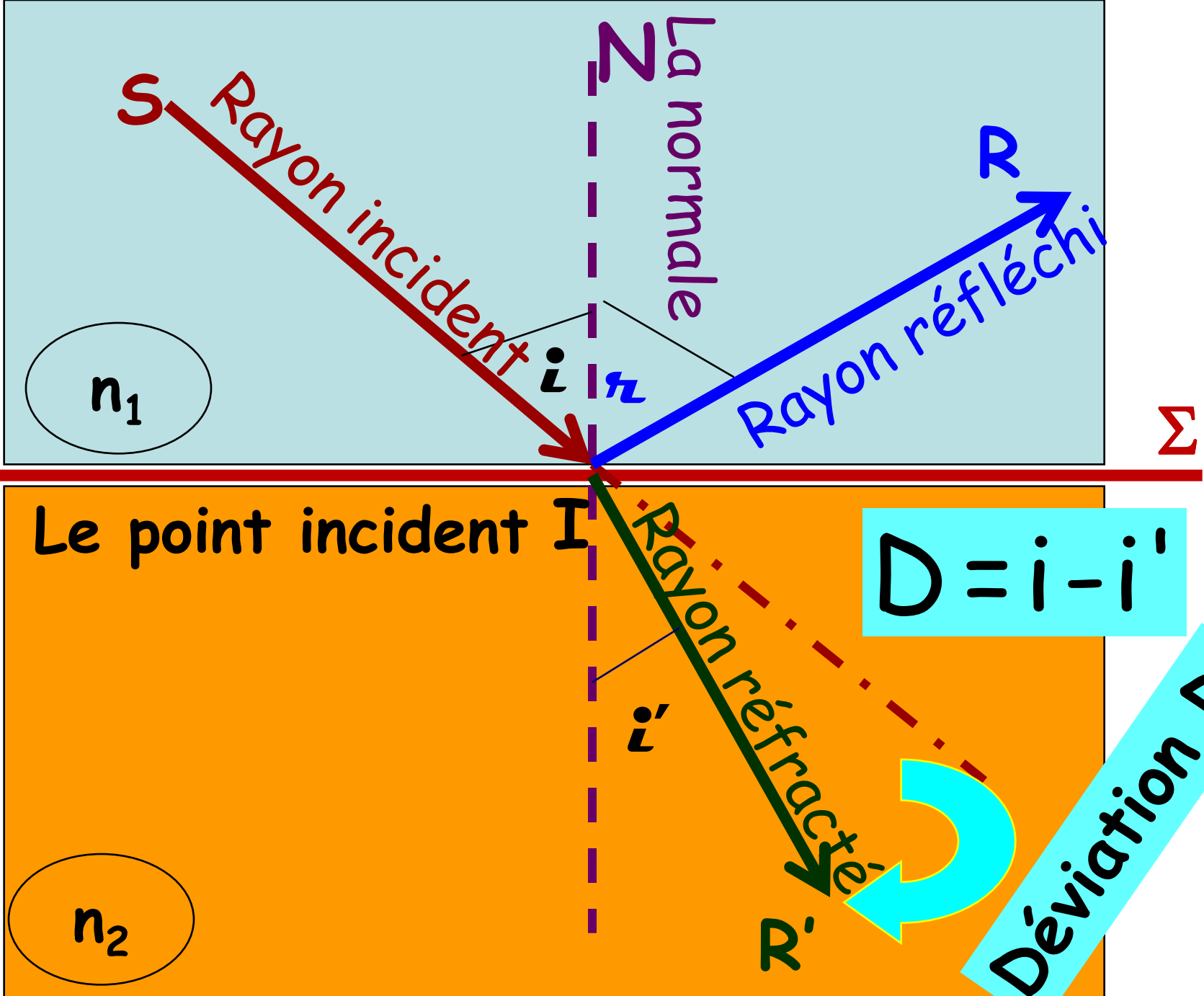
Les lois de Snell-Descartes :

1. Les lois de la réflexion

2. Les lois de la réfraction



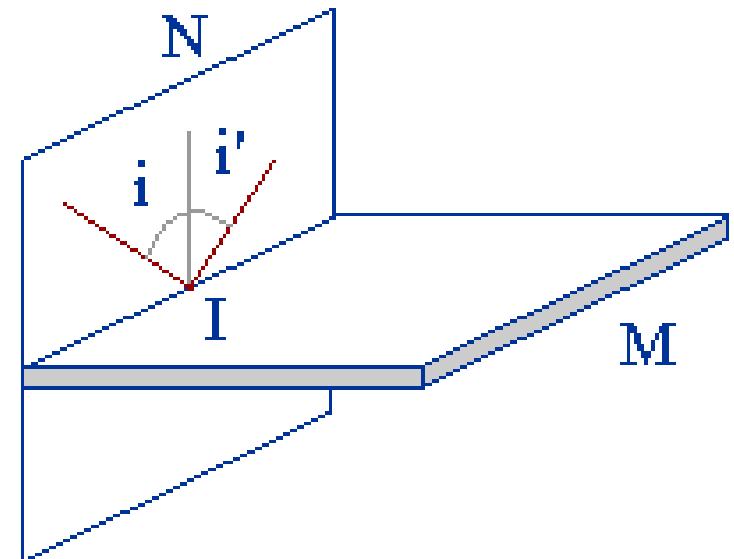
Surface de séparation



$$D = i - i'$$

Déviatiion D

1. Le rayon réfléchi et le rayon incident sont dans le **plan d'incidence** formé par la normale et le rayon incident (IN,SI)
2. L'angle de réflexion est **égal** à l'angle d'incidence, ce qui se traduit par :  $i = r$

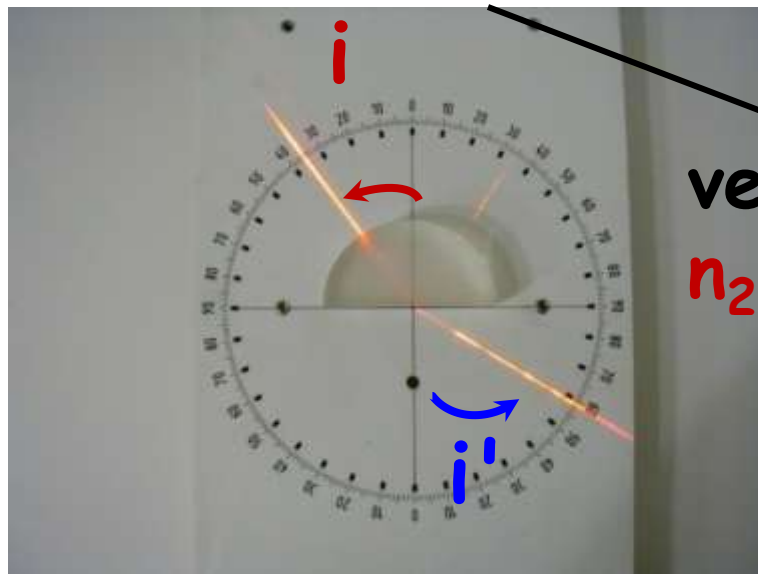


1. Les rayons **réfracté** et **incident** sont dans le même plan d'incidence défini par les deux vecteurs (IN,SI)

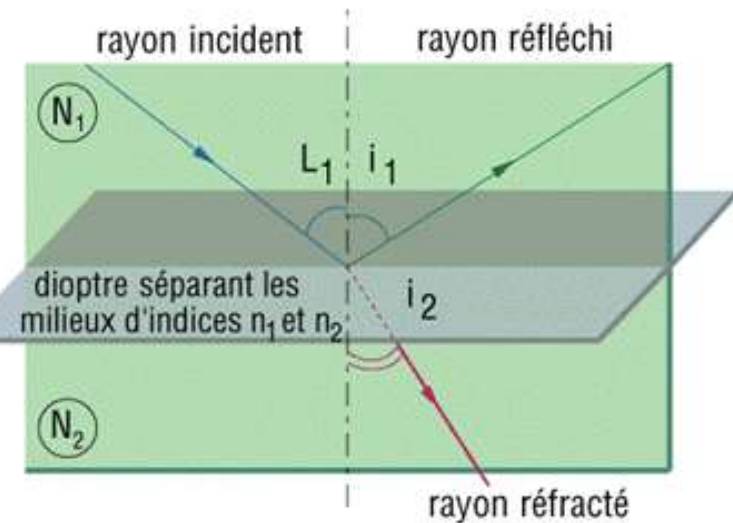
2. L'angle de réfraction  **$i'$**  et l'angle d'incidence  **$i$**  sont liés par la relation :

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin i'$$

Air  
 $n_1 = 1$



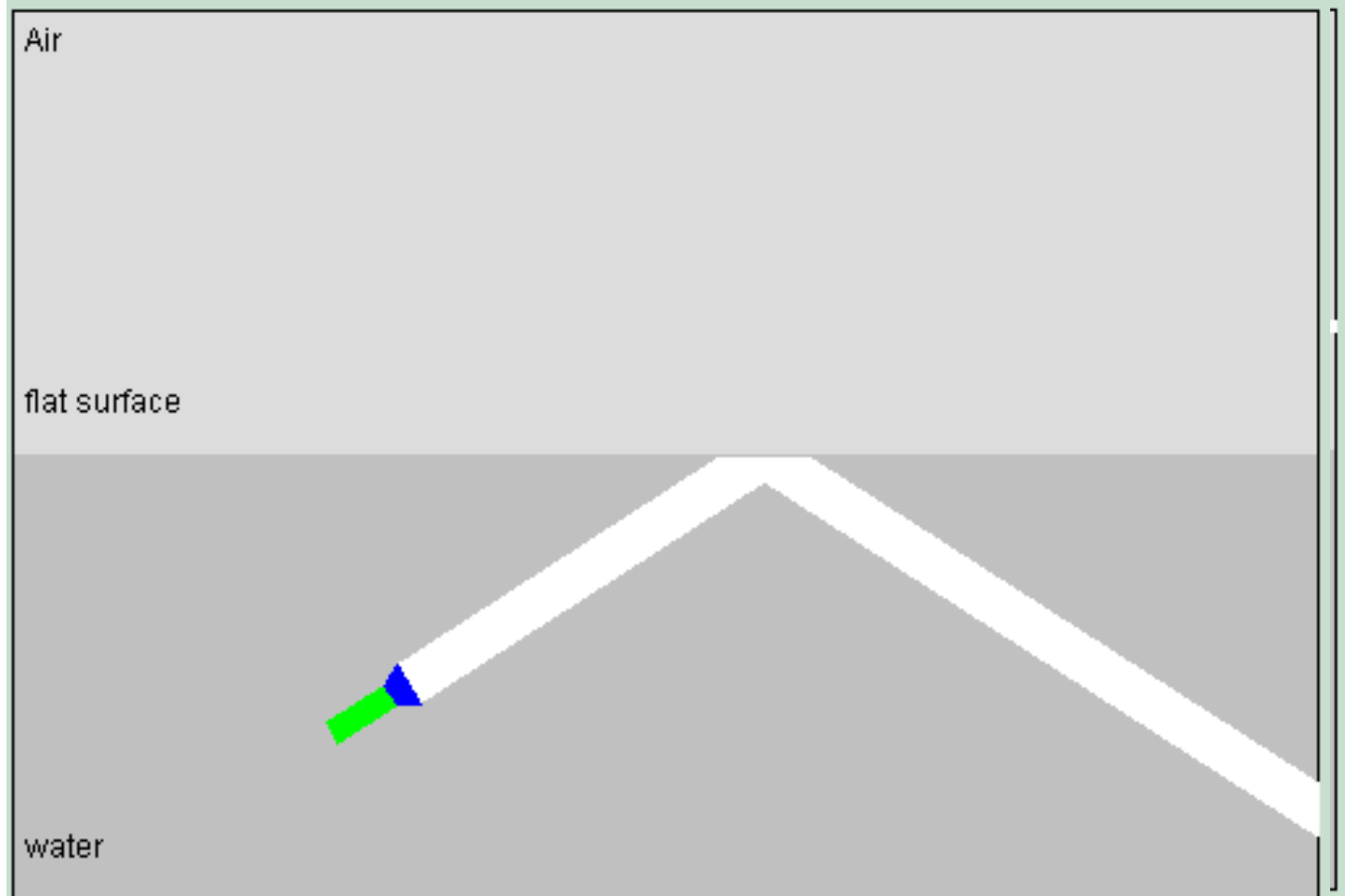
verre  
 $n_2 = 1,5$

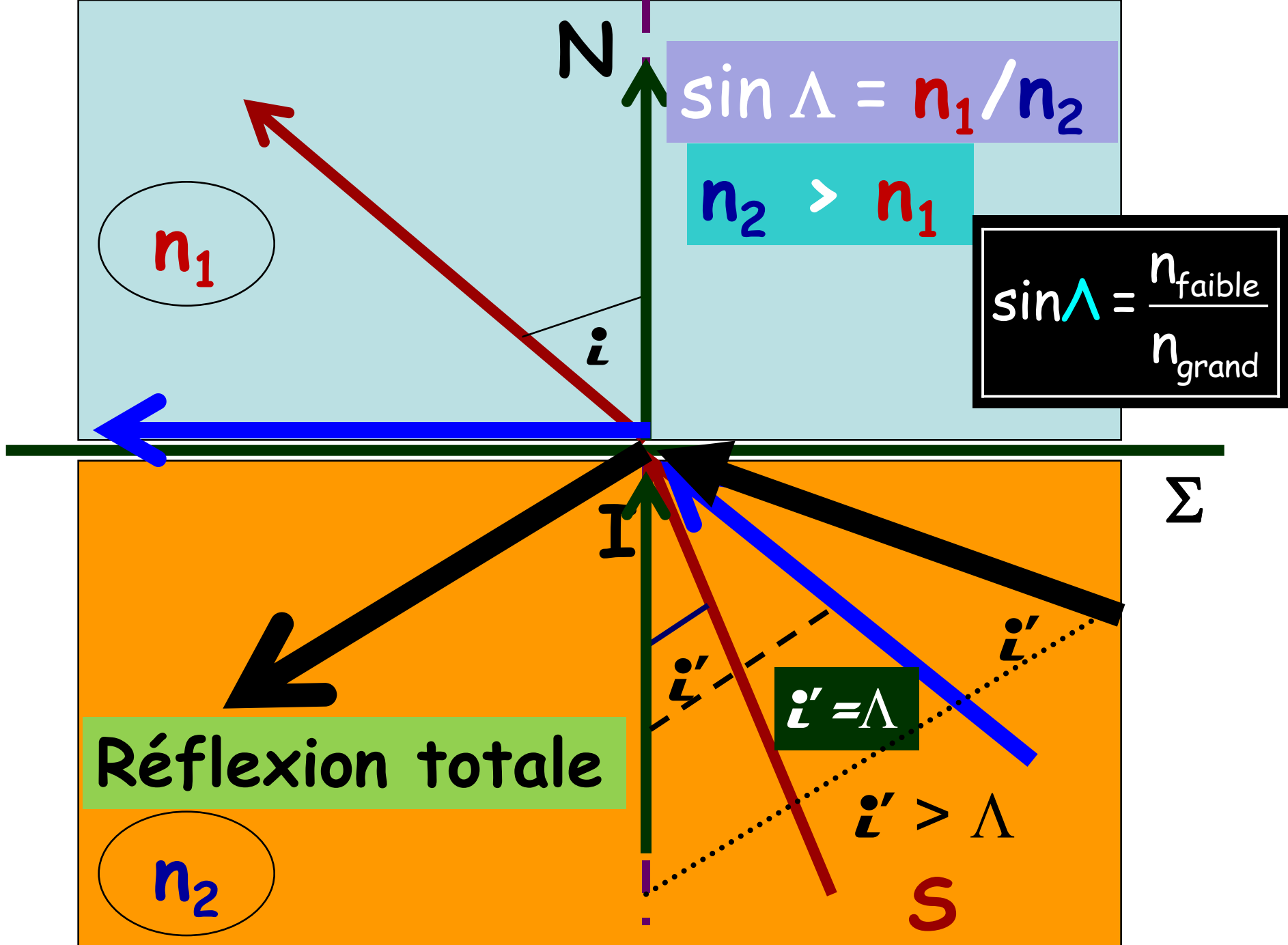


La loi de la réfraction



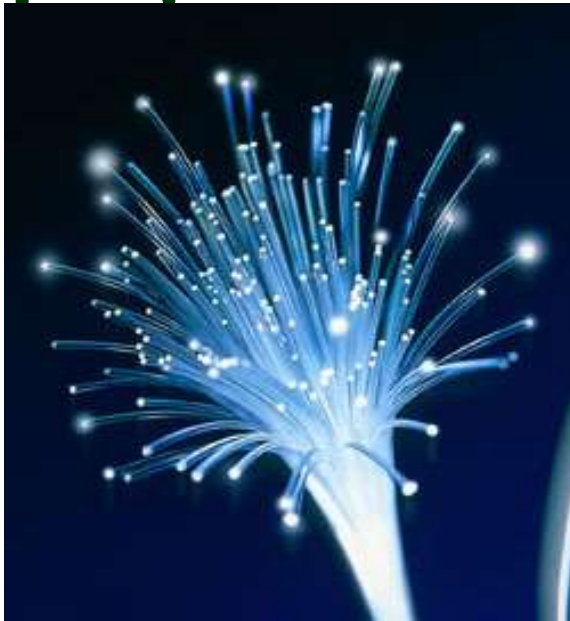
# Angle de réfraction limite





Le phénomène de la **réflexion totale** est utilisé pour canaliser la lumière, par exemple dans les **fontaines lumineuses** ou dans les **fibres optiques**, l'endoscopie, fibroscopie .

fibres optiques



$$\sin \Lambda_{\text{eau-air}} = \frac{n_0 = 1}{n_1 = \frac{3}{2}} = \frac{2}{3} = 0,67 \Rightarrow \Lambda_{\text{eau-air}} = 42^\circ$$

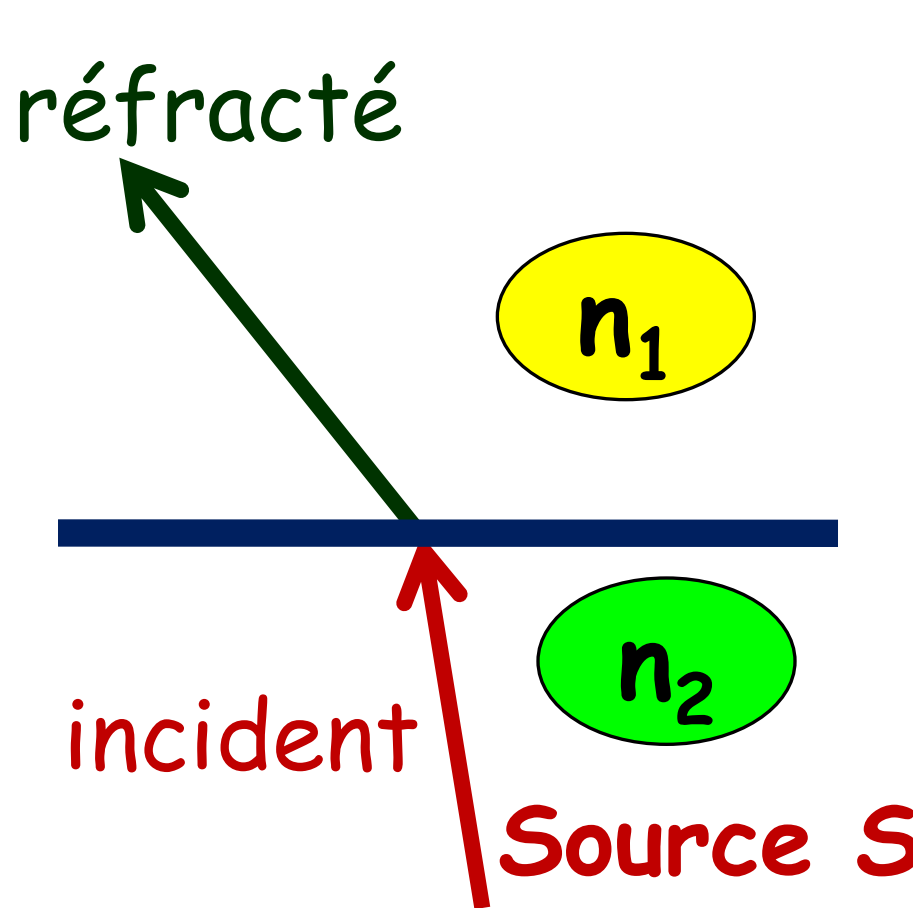
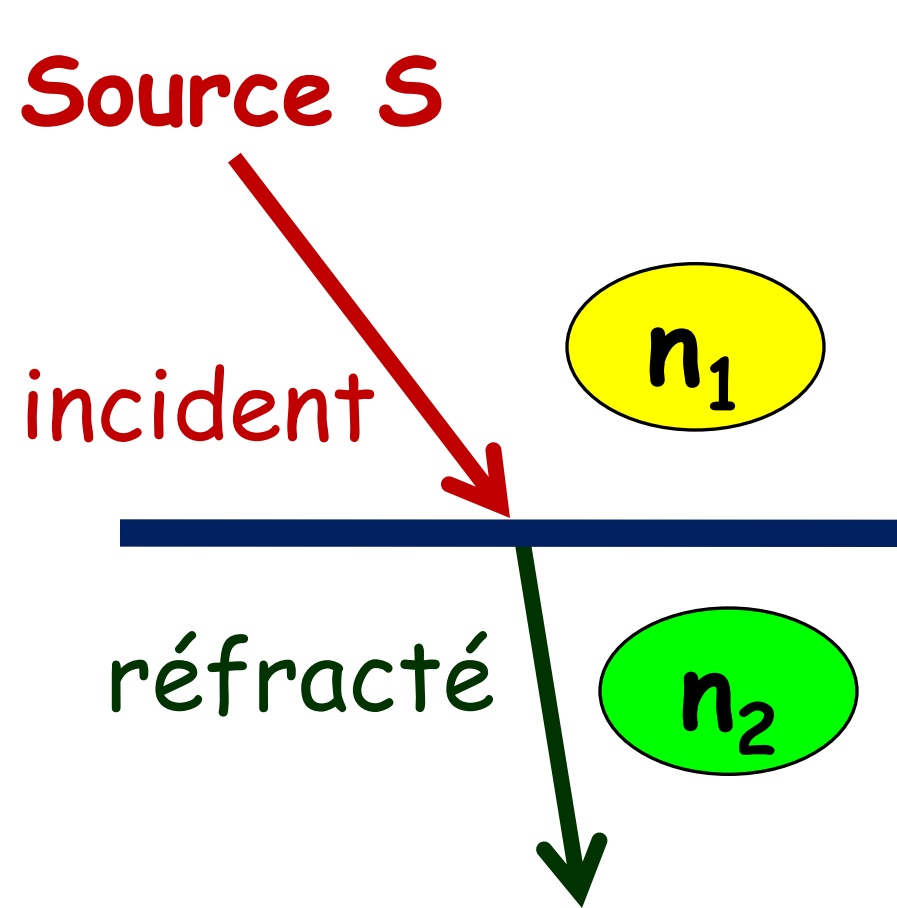
Fontaine lumineuse



$$\sin \Lambda_{\text{eau-air}} = \frac{n_0 = 1}{n_1 = \frac{4}{3}} = \frac{3}{4} = 0,75 \Rightarrow \Lambda_{\text{eau-air}} = 48^\circ,59$$

# Le principe du retour inverse de la lumière :

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



- **Remarques** : Lorsque les angles  $i_1$  et  $i_2$  sont petits,  **$angle \leq 15^\circ$**

la **loi de Snell-Descartes** pour la **réfraction** prend la forme simplifiée :

$$n_1 \cdot i_1 \sim n_2 \cdot i_2$$

connue sous le nom de  
« **la loi de Kepler** »



En appliquant le principe de la propagation rectiligne de la lumière, l'optique géométrique se propose d'étudier comment les rayons lumineux, partant des objets, cheminent en subissant des réflexions et des réfractions à travers divers milieux transparents appelés systèmes optiques, et concourent à la formation des images.

# Le miroir plan

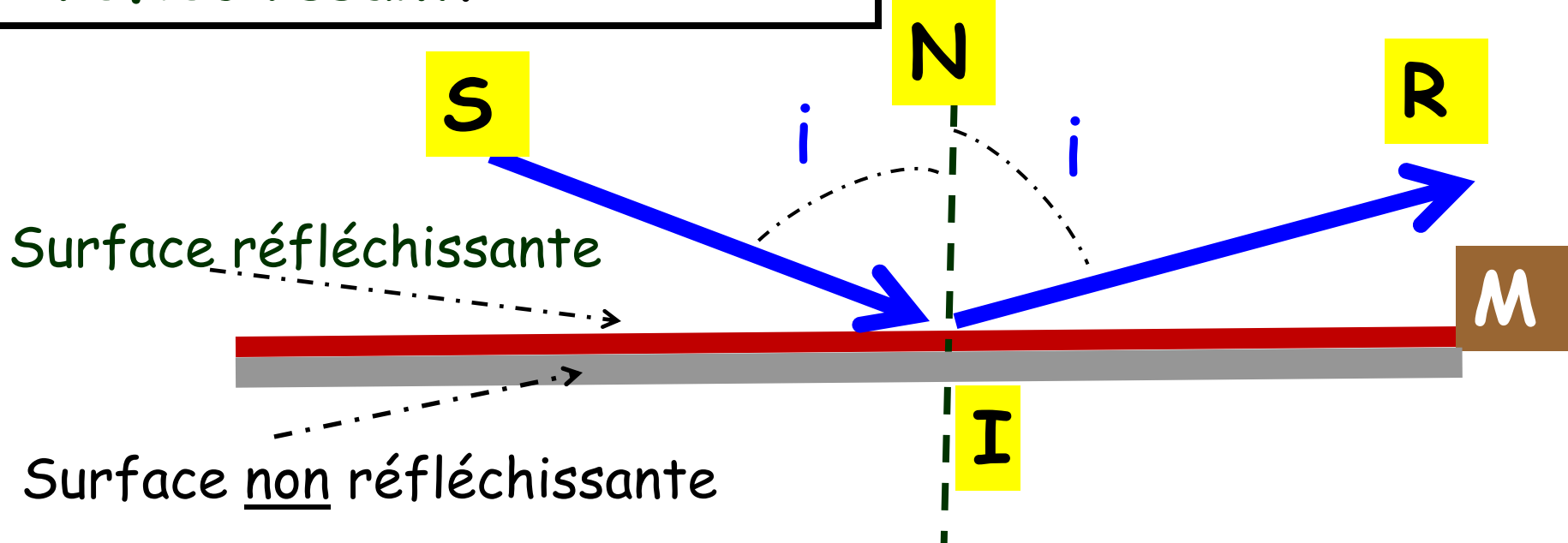
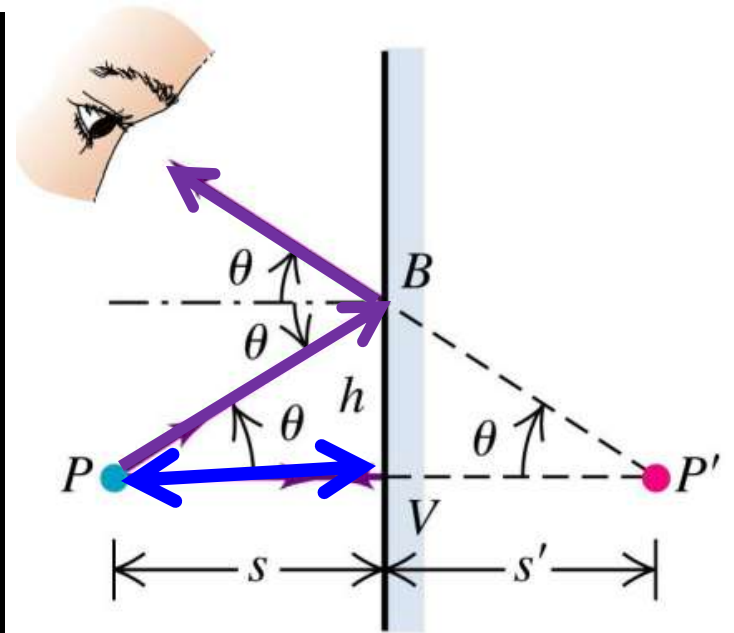
On appelle **miroir plan** une **surface réfléchissante** parfaitement plane polie recouverte d'une mince couche métallique (**argent** ou **aluminium**).



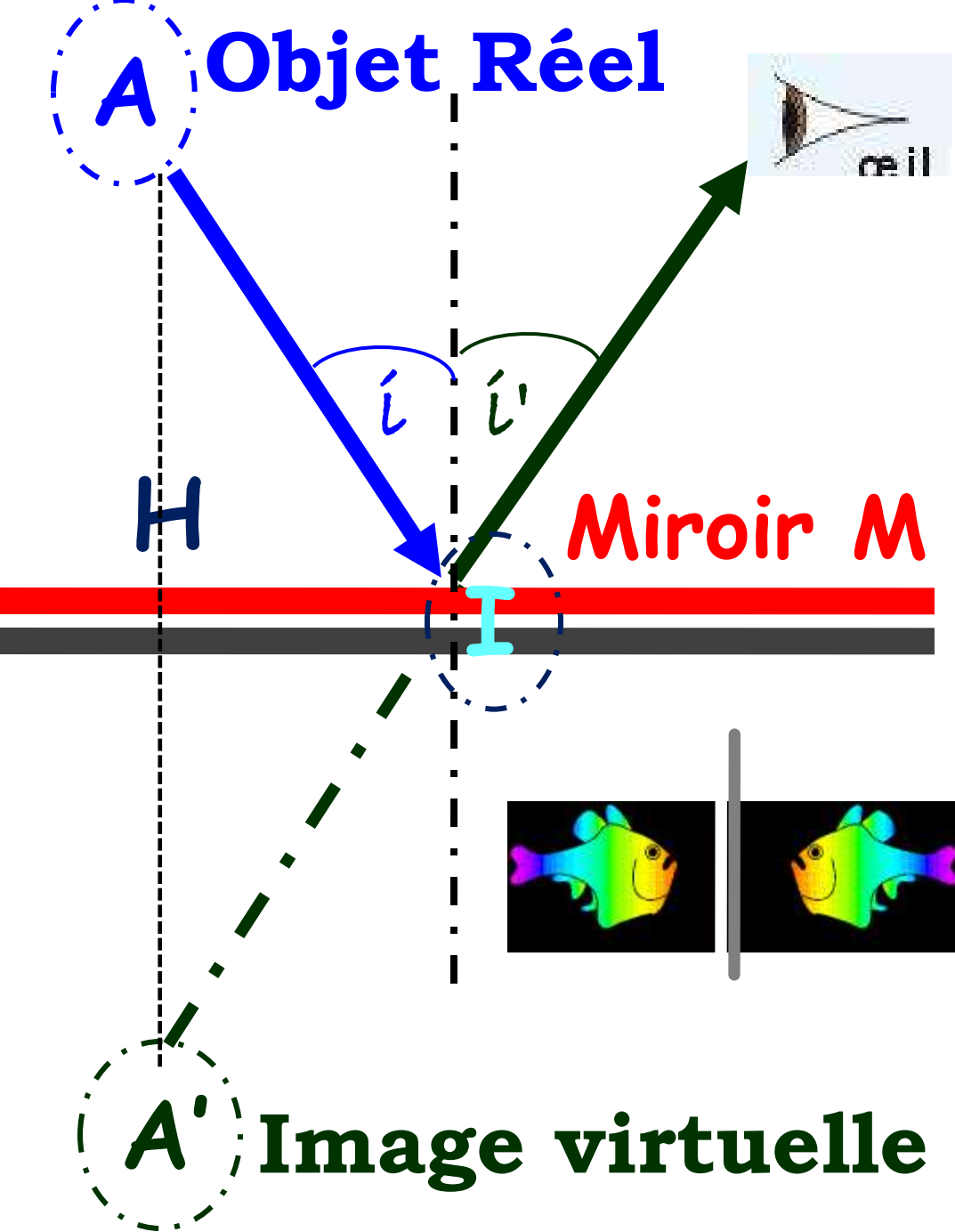
Christophe MOUSTIER - 2005



Un tel **miroir M** est généralement représenté par la trace de son plan disposé normalement au plan de figure. On couvre de **hachures** le **côté non réfléchissant**.



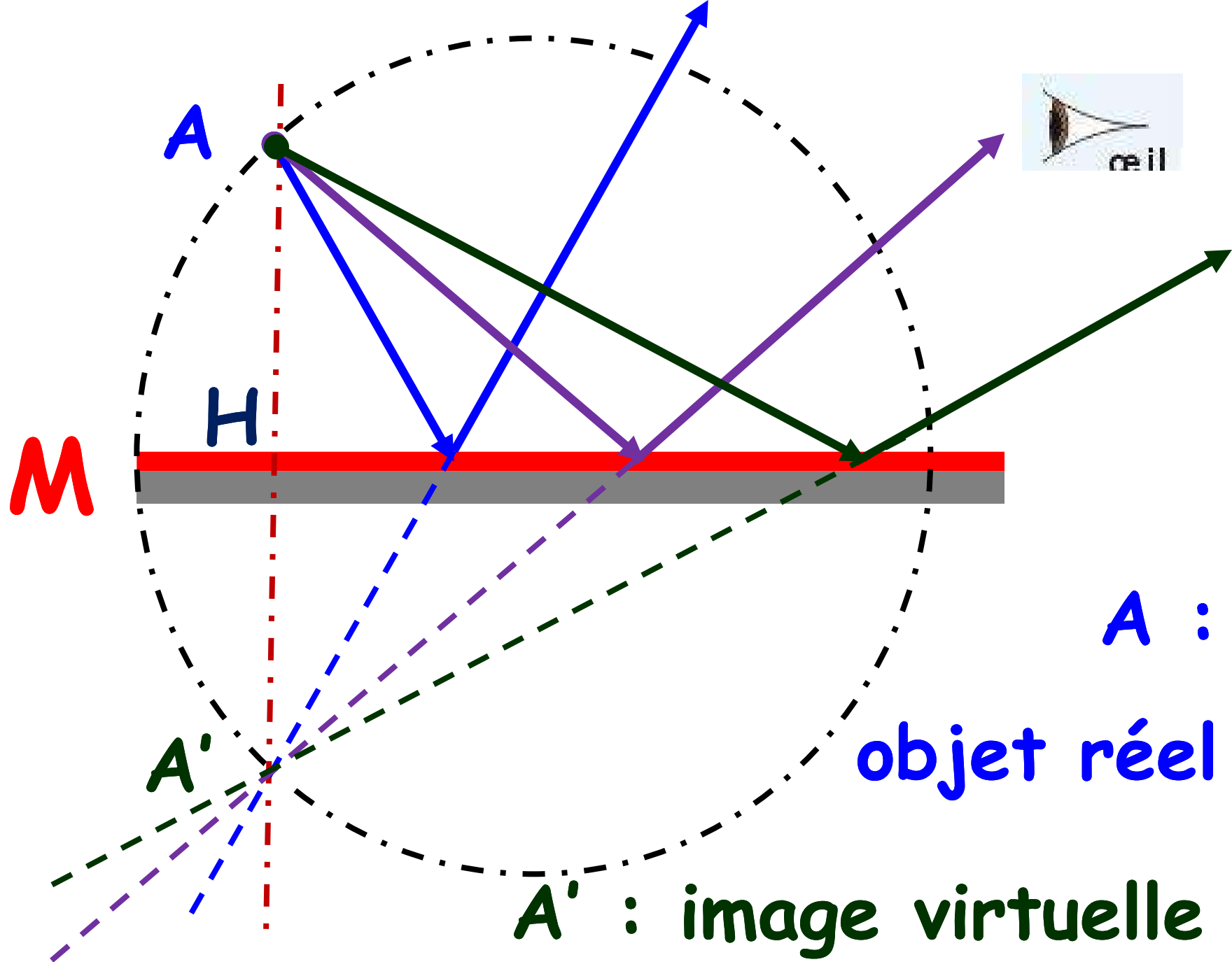




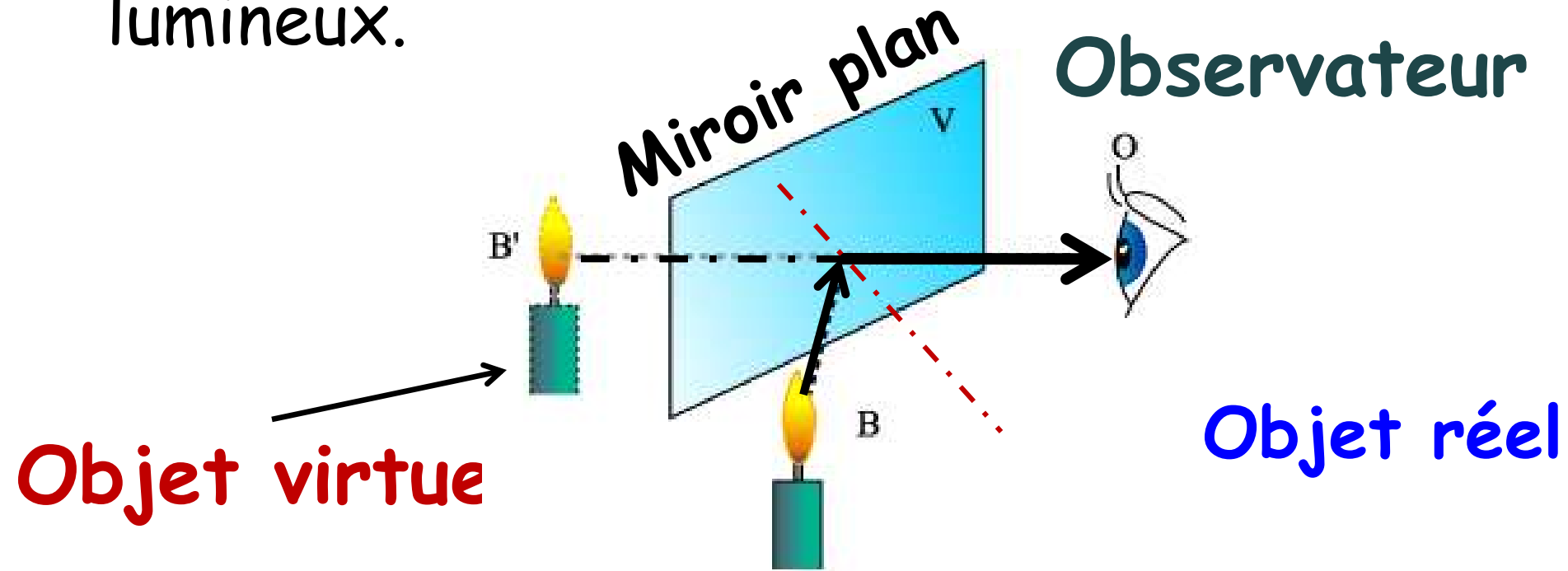
L'objet **A** et son image **A'**, fournie par le **miroir M**, sont symétriques par rapport à **M**

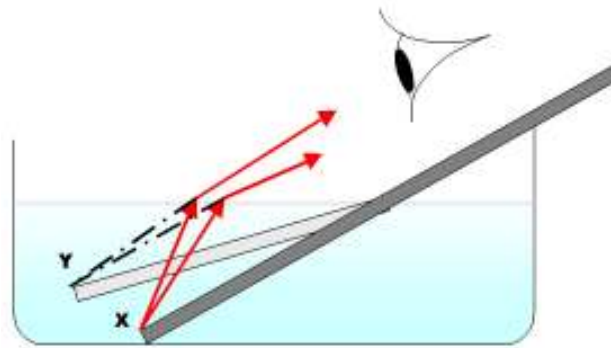
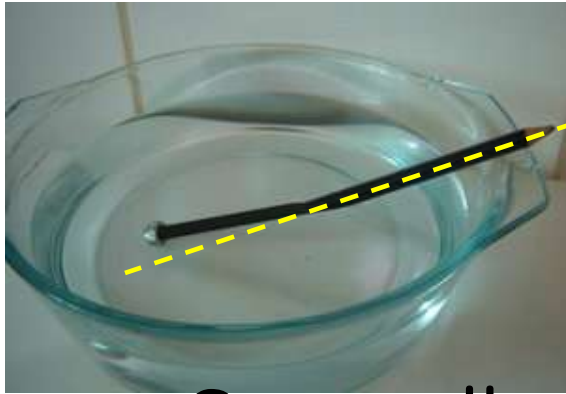
$$AH = HA'$$

**A** et **A'** sont conjugués par le **miroir plan M**



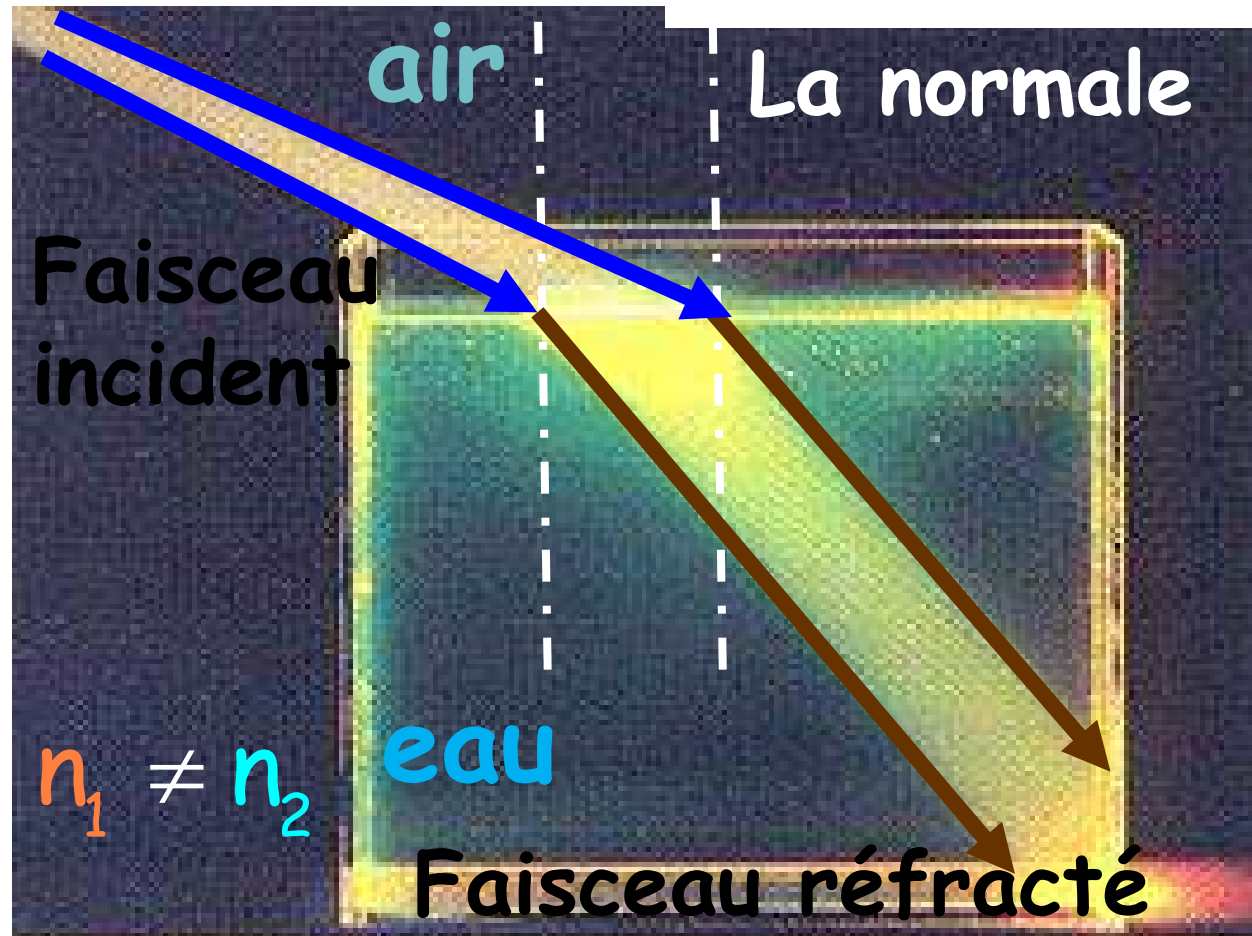
- **Objet réel** : quand des rayons lumineux sont réellement issus de cet objet.
- **Objet virtuel** : quand les rayons lumineux semblent provenir de cet objet. Cet objet est l'intersection des prolongements des rayons lumineux.

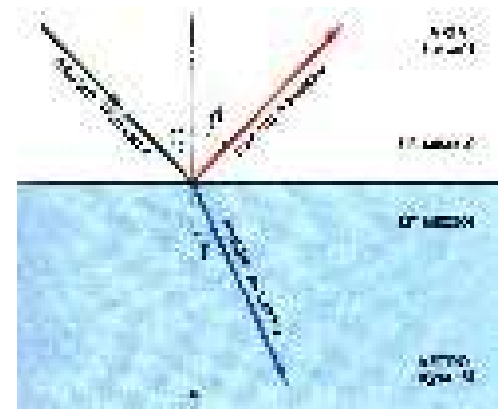
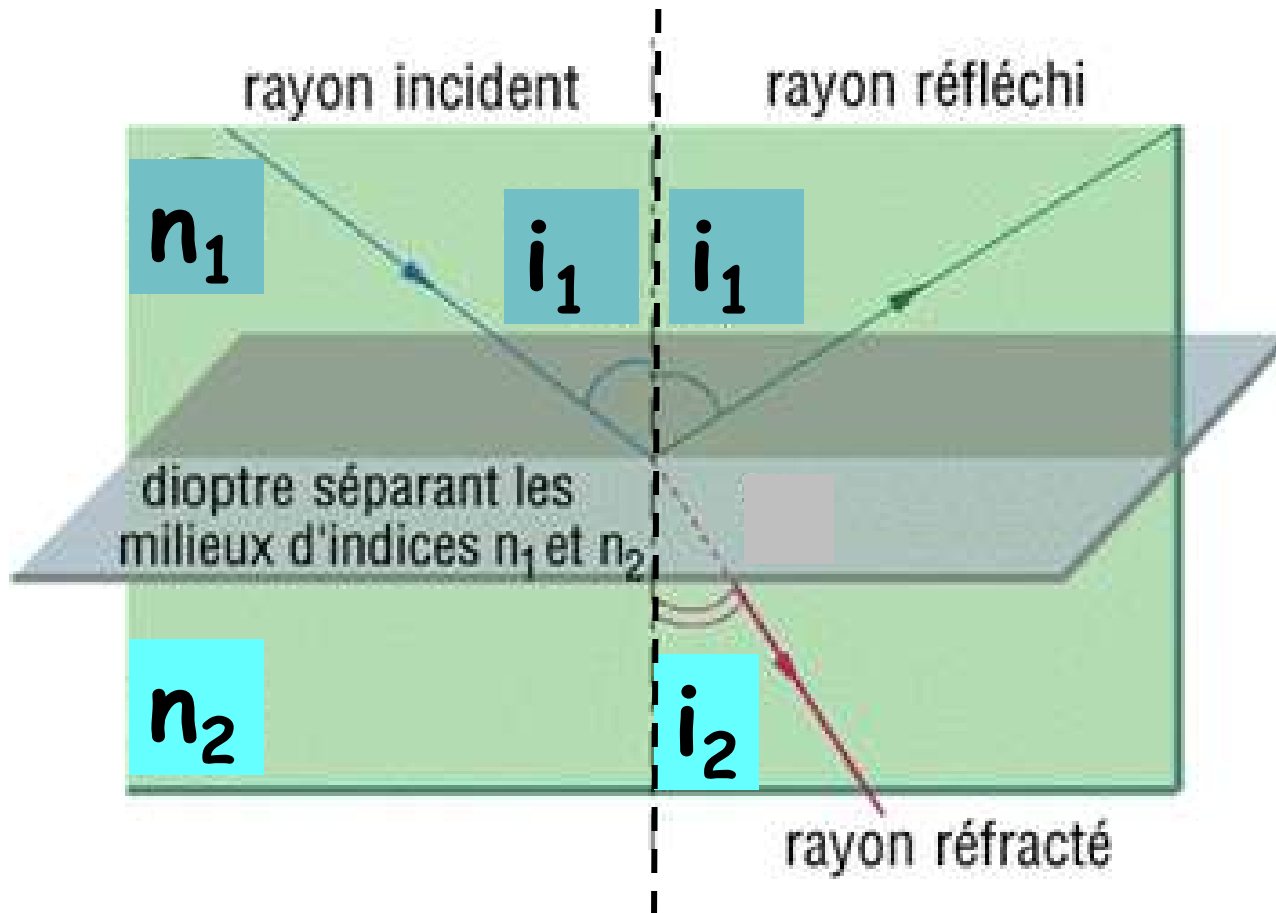




# LE DIOPTRE PLAN

On appelle **dioptre plan** la surface plane séparant deux milieux transparents et homogènes d'indices absolus  $n_1$  et  $n_2$  différents





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

2<sup>ème</sup> loi de Snell-Descartes

## Conditions de Gauss

Lorsque le point objet n'envoie que des rayons incidents sensiblement proches à la normale au dioptre plan, autrement dit pour des angles  $i$  et  $r$  faibles, et les lois de Snell-Descartes s'écrivent comme suit :

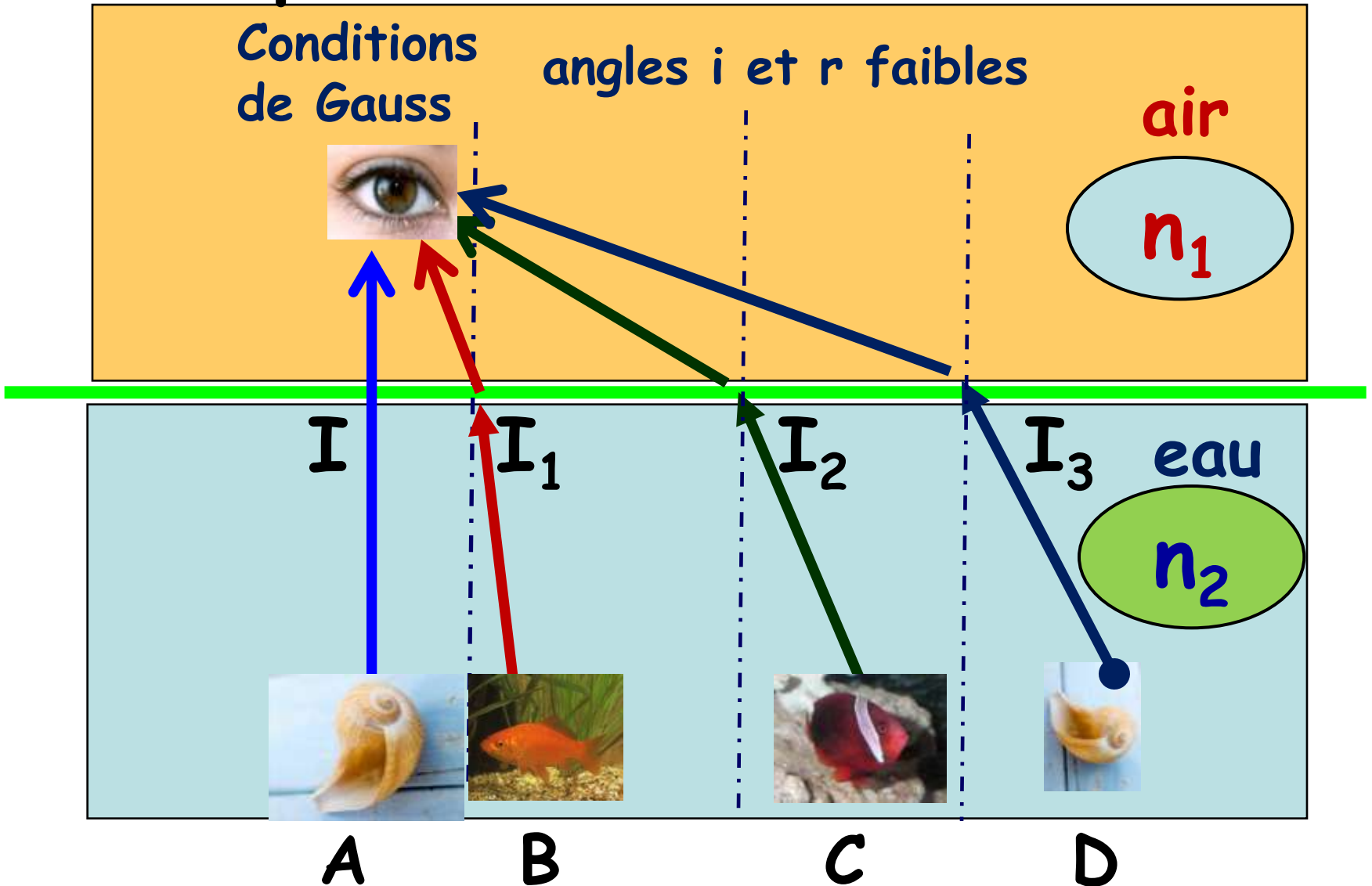
$$\underbrace{i = r}_{\text{Réflexion}}$$

et

$$\underbrace{n_1 \cdot i_1 = n_2 \cdot i_2}_{\text{Réfraction}}$$

$$n_1 < n_2$$

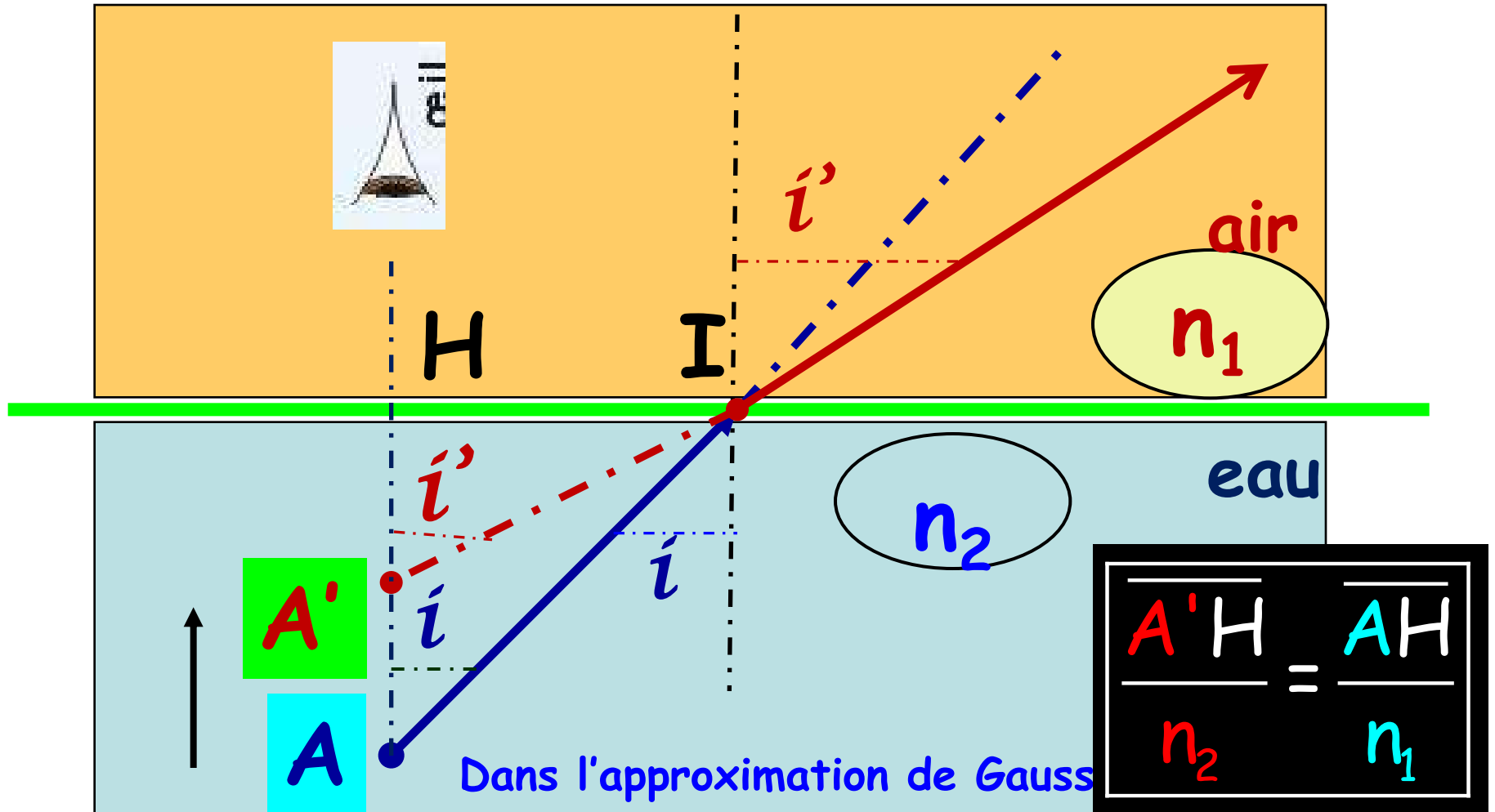
A et B sont vus nettement,  
par contre C et D sont flous



$$n_1 < n_2$$

$$\text{tgi} = \frac{\overline{HI}}{\overline{AH}} \quad \text{et} \quad \text{tgi}' = \frac{\overline{HI}}{\overline{A'H}}$$

$$\overline{AH.i} = \overline{A'H.i'} \Rightarrow$$



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


## La relation de conjugaison d'un dioptre plan



# Relation de conjugaison d'un dioptre plan ( $n_1, n_2$ )

$$n_1 < n_2$$

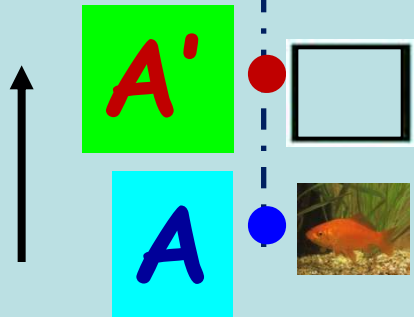
$n_1$  air



$A'H = AH$   
 $n_2 \quad n_1$

H

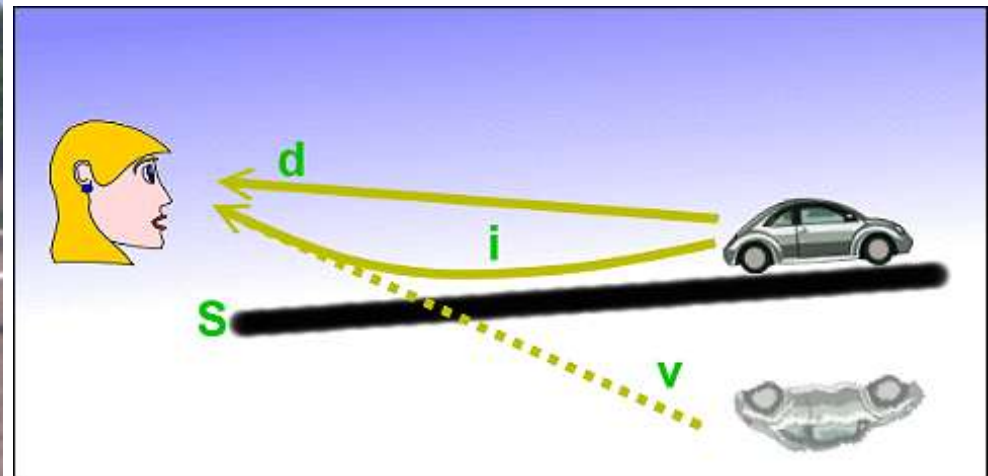
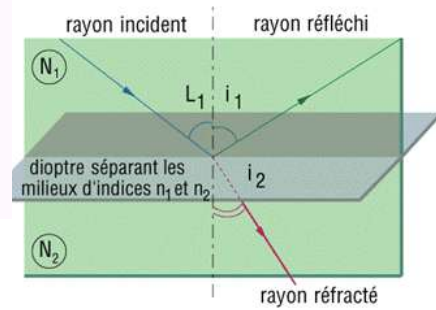
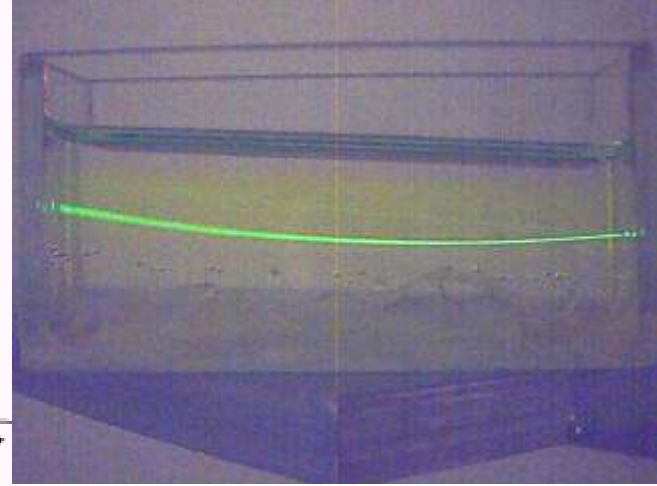
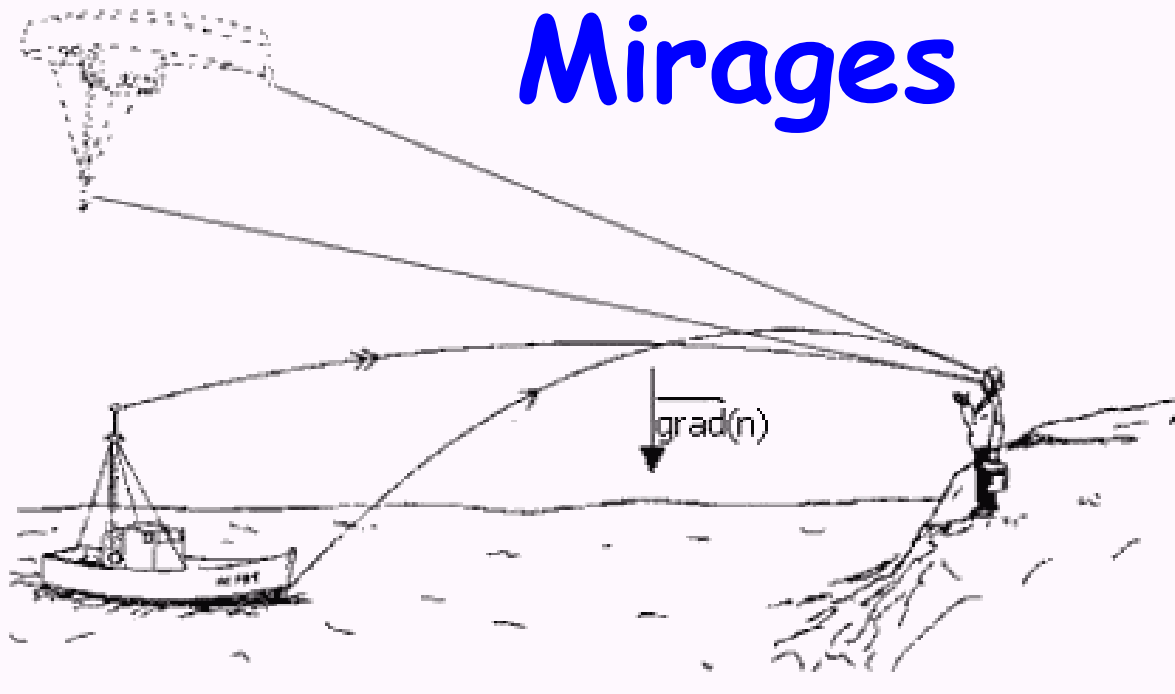
## Conditions de Gauss



$AA' = AH \cdot \left( 1 - \frac{n_2}{n_1} \right)$

eau  $n_2$

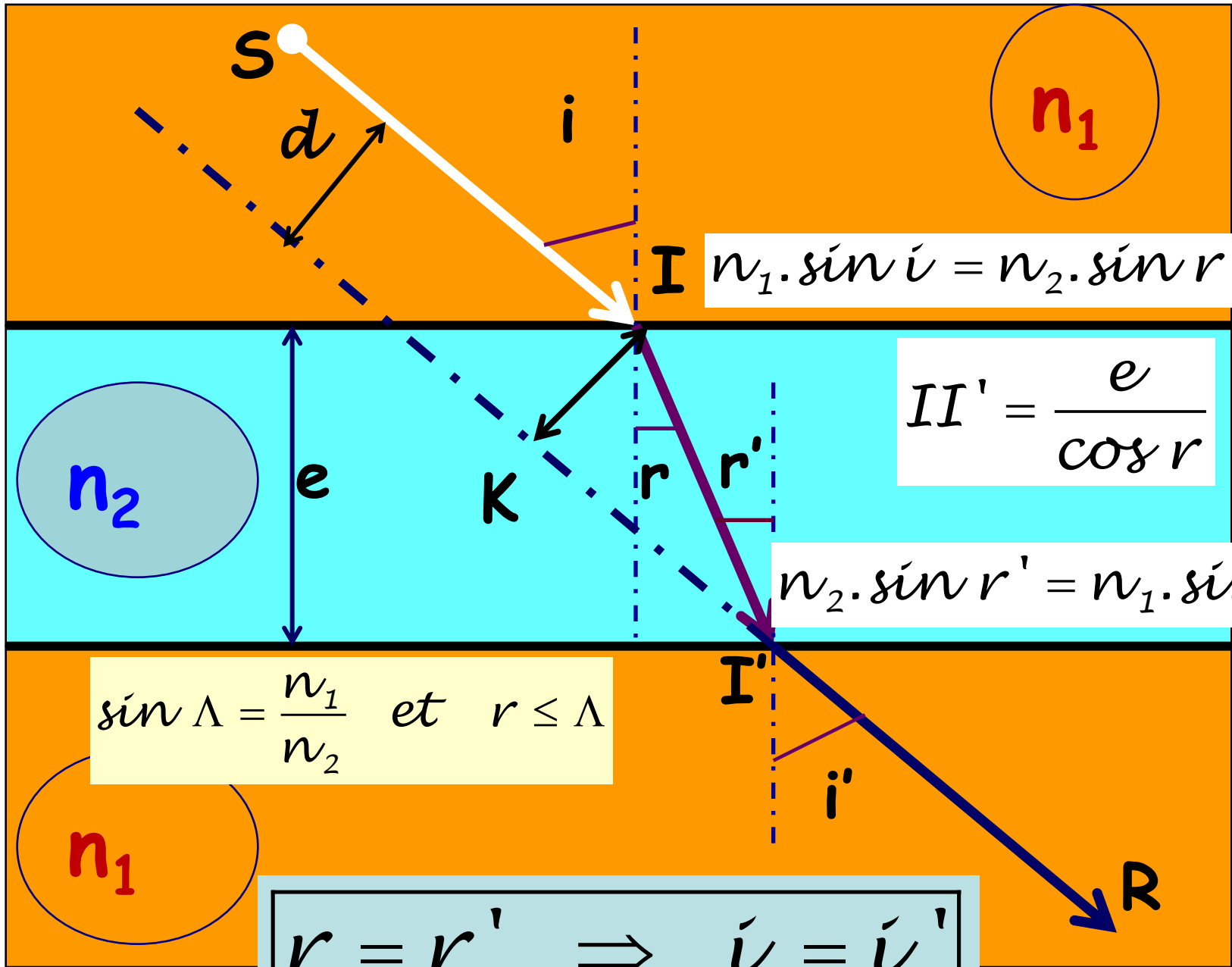
# Mirages



# Lame à faces parallèles

**Définition** : Une lame à faces parallèles est un milieu homogène et transparent limité par deux dioptries plans parallèles, à une distance  $e$  qui est l'épaisseur de la lame. Les milieux extrêmes peuvent être différents ou identiques.





$$I \quad n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$$

$$II' = \frac{e}{\cos r}$$

$$n_2 \cdot \sin r' = n_1 \cdot \sin i'$$

$$\sin \Lambda = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{et} \quad r \leq \Lambda$$

$$r = r' \Rightarrow i = i'$$

Les rayons lumineux incident et émergent sont parallèles. La lame à faces parallèles d'épaisseur  $e$  et d'indice de réfraction  $n$  permet alors de translater la lumière d'incidence  $i$  d'une quantité  $d$  :

$$\sin i = n \cdot \sin r \Leftrightarrow i = n \cdot r$$

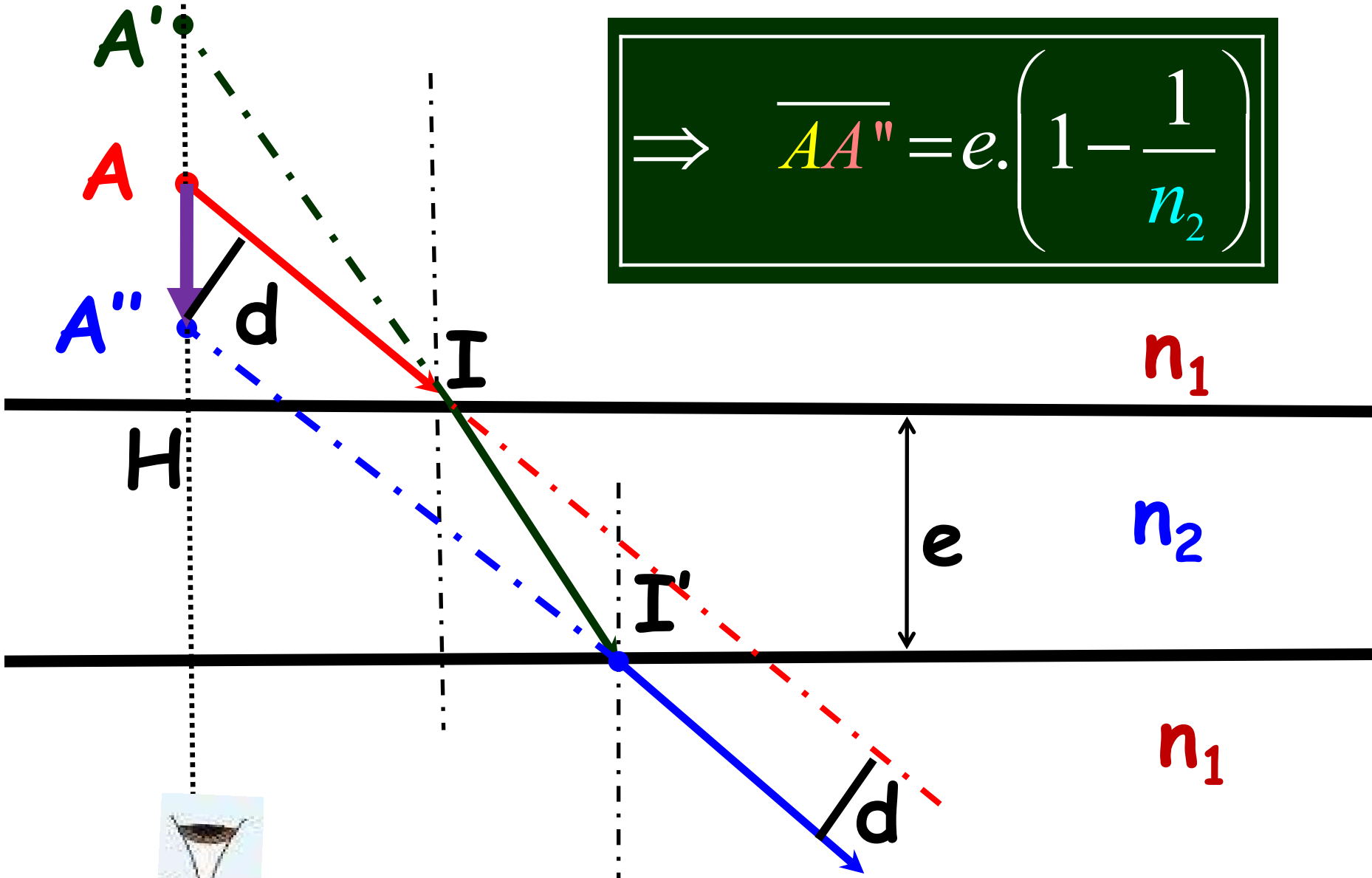
$$\text{et } \overline{IH} = d = \frac{e}{\cos r} \cdot \sin(i - r)$$

$$\text{avec } \sin(i - r) \approx i - r \approx i \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \text{ et } \cos r \approx 1$$

Si on se place dans les conditions de Gauss, à savoir :  $i$  et  $r$  sont des angles petits ( $i < 15^\circ$  &  $r < 15^\circ$ )

$$\overline{IH} = \overline{JS'} = d = e \cdot i \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

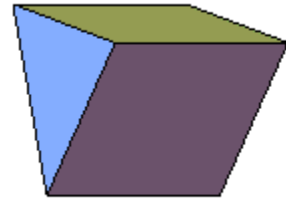
$$\Rightarrow \overline{AA''} = e \cdot \left( 1 - \frac{1}{n_2} \right)$$



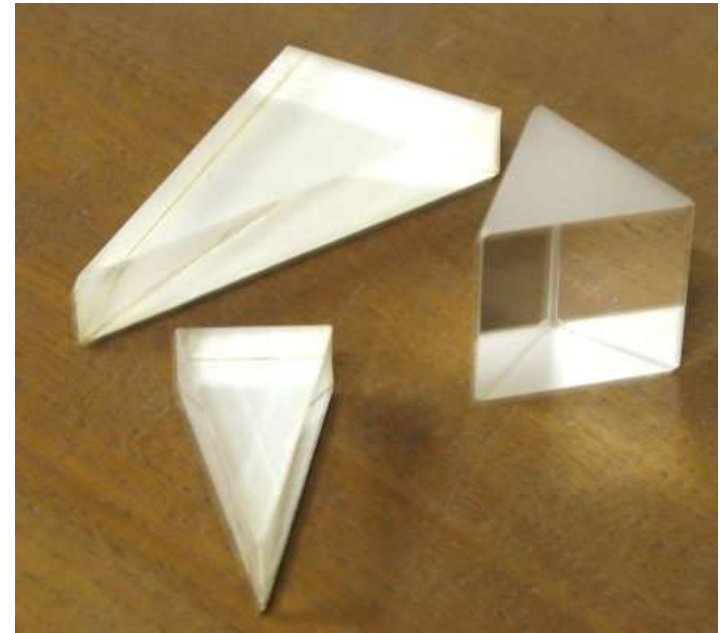
Cas où  $n_1=1$  et  $n_2=n$

# Le prisme

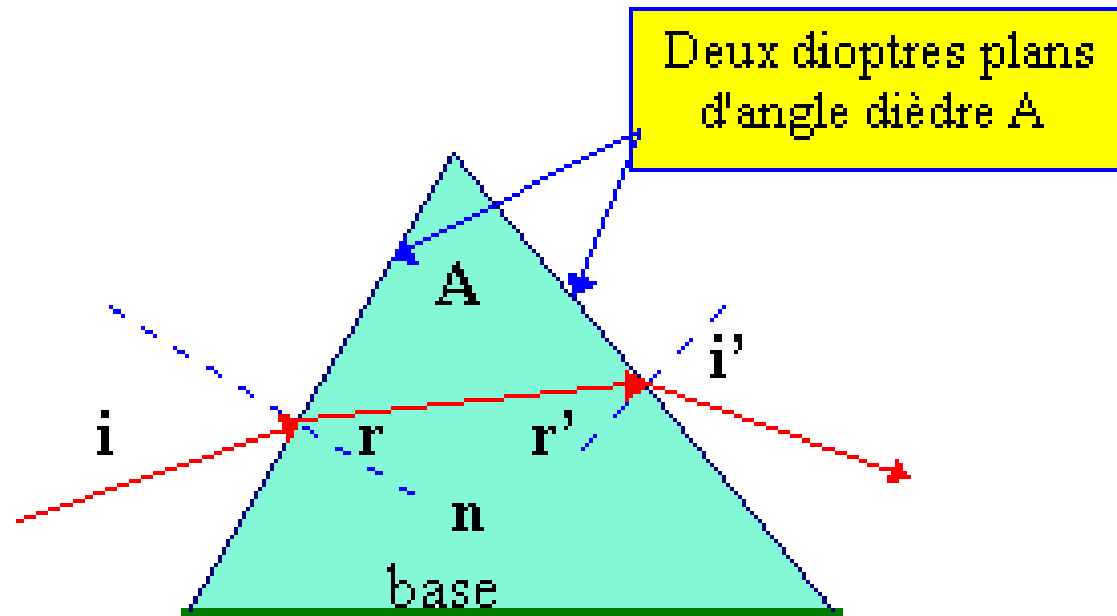
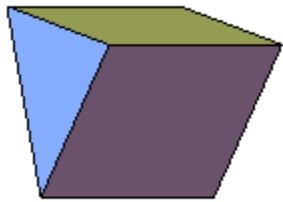
**Définition** : le prisme est un milieu réfringent limité par deux faces planes non parallèles.



Quand ces deux faces se coupent réellement, la droite d'intersection est l'arête du prisme, la face opposée à l'arête est la **base**. L'angle du prisme est défini par les deux faces non parallèles



L'interposition d'un prisme sur le trajet d'un **faisceau monochromatique cylindrique** provoque **seulement une déviation**, le faisceau reste cylindrique après la traversée de chacun des surfaces.

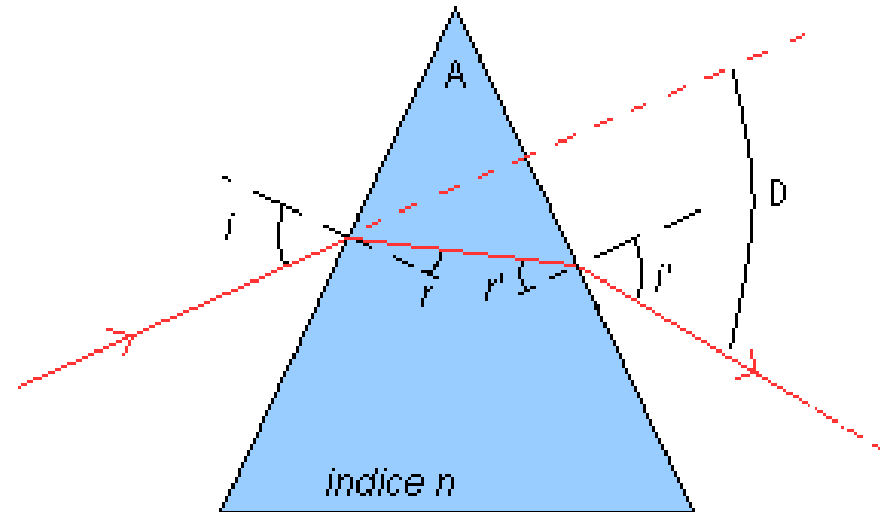




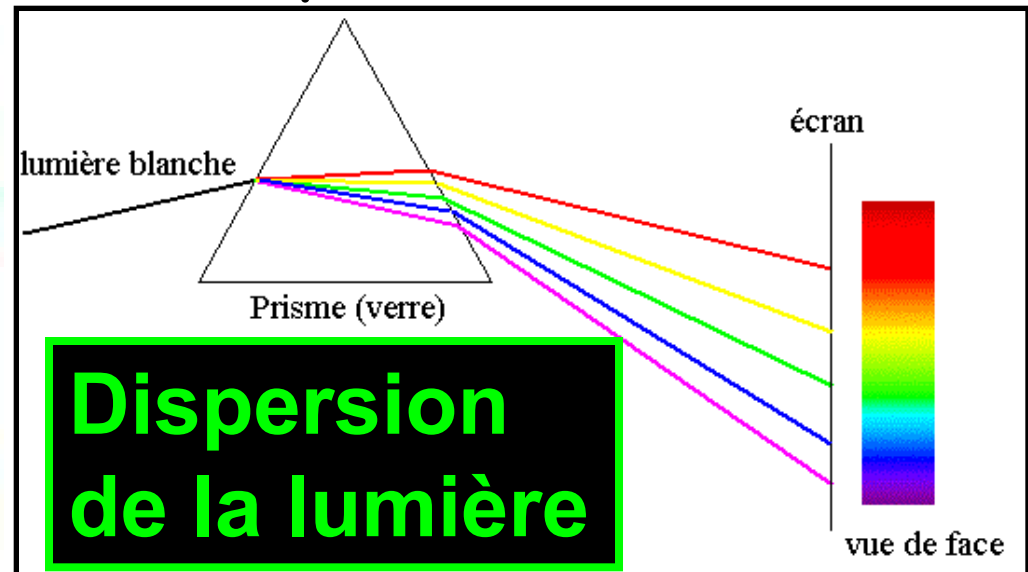
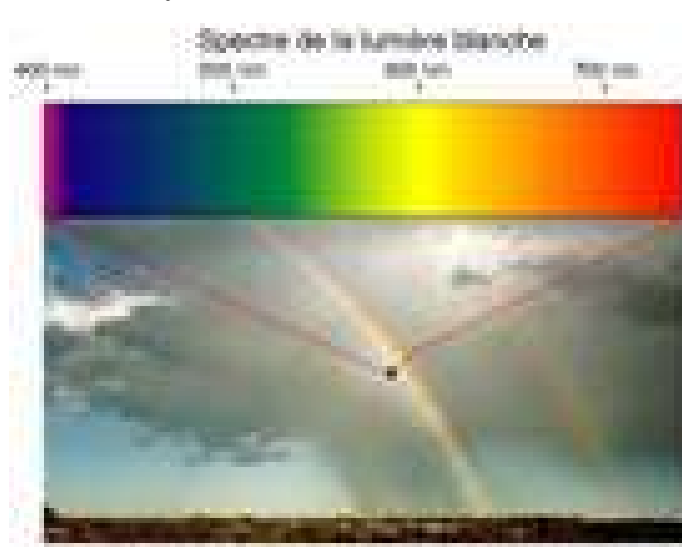
Déterminer la marche d'un rayon lumineux à travers un prisme, revient à déterminer les relations mathématiques qui lient les paramètres :  $A$ ,  $n$ ,  $i$ ,  $r$ ,  $r'$  et  $i'$ .

## Les formules du prisme :

1.  $\sin i = n \cdot \sin r$
2.  $\sin i' = n \cdot \sin r'$
3.  $A = r + r'$
4.  $D = i + i' - A$



Si l'on opère avec de la lumière blanche, le faisceau émergent n'est plus cylindrique, outre **la déviation**, il subit **une décomposition** en **faisceaux colorés** : le phénomène de la **dispersion** de la lumière complexe en lumières simples.

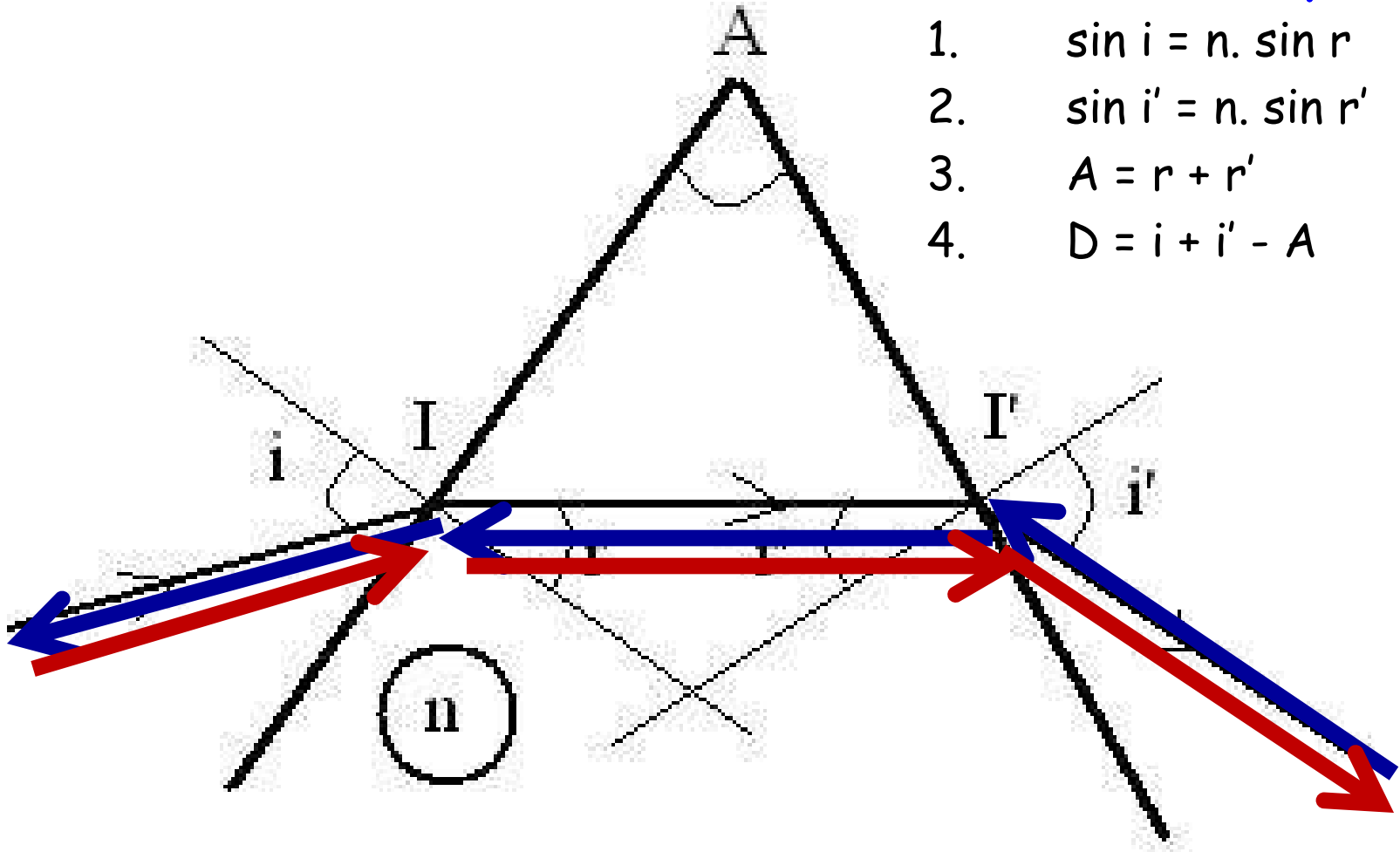


Décomposition de la lumière blanche

# Remarque : Principe du retour inverse de la lumière

## Les formules du prisme :

1.  $\sin i = n \cdot \sin r$
2.  $\sin i' = n \cdot \sin r'$
3.  $A = r + r'$
4.  $D = i + i' - A$



Si les angles  $A$  et  $i$  sont petits, il en résulte que  $r$ ,  $r'$  et  $i'$  sont également petits, et les formules du prisme s'écrivent comme suit :

$$i = n.r$$

$$i' = n.r'$$

$$A = r + r'$$

$$D = n.r + n.r' - A = (n - 1).A$$

Les formules du prisme :

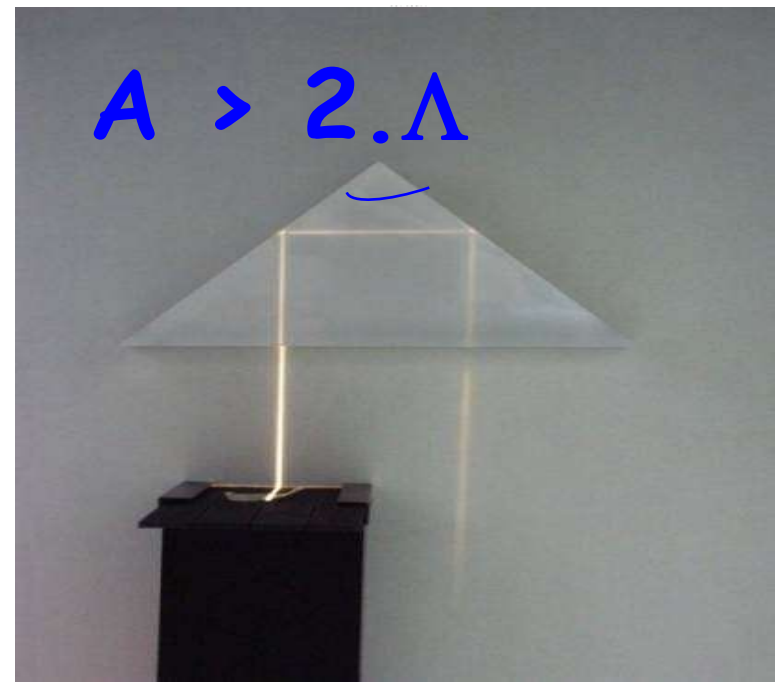
Dans le cas des petits angles, la déviation  $D$  est indépendante de l'angle d'incidence.

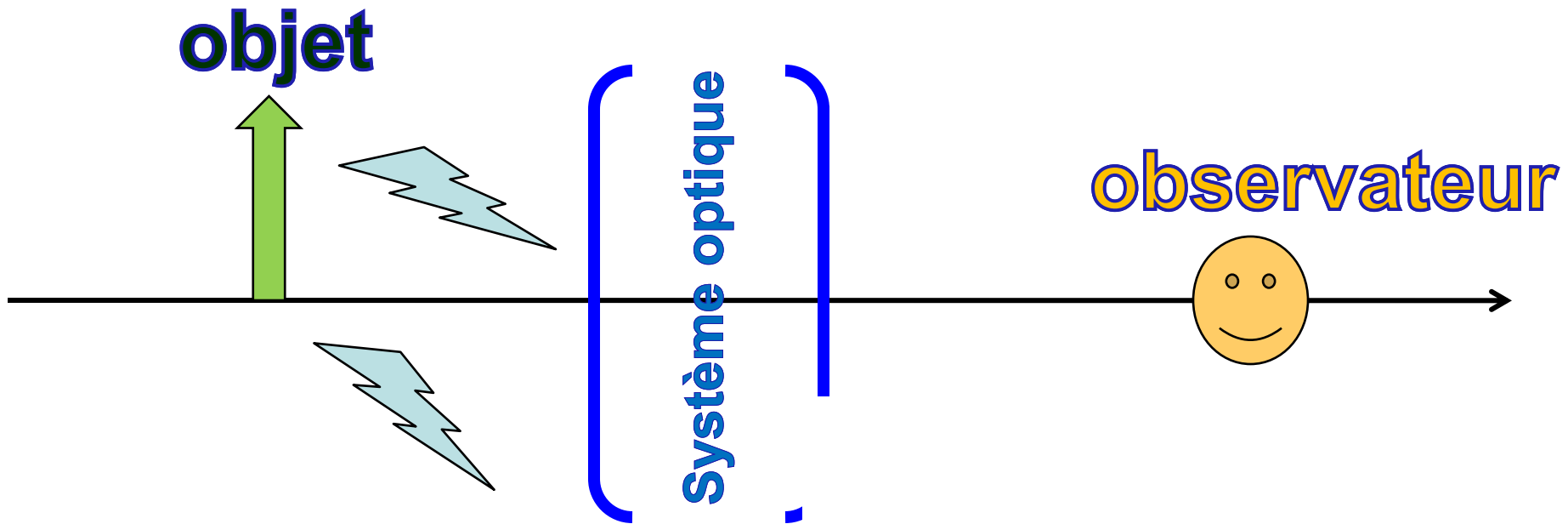
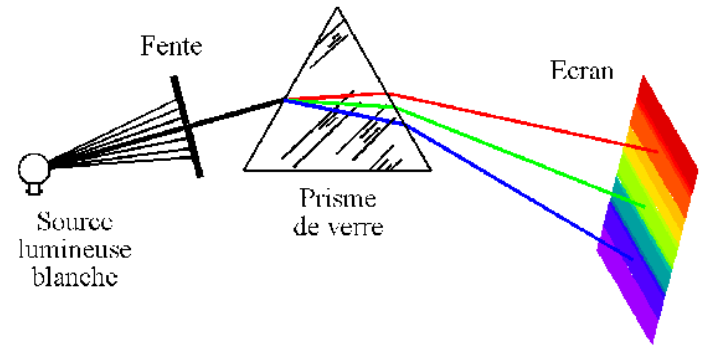
# Conditions d'émergence pour un prisme

Pour avoir une réfraction aux points I et I', il faut que  $A \leq 2.\Lambda$ . Si  $A > 2.\Lambda$  alors on aura **une réflexion totale** sur la 2<sup>ème</sup> face du prisme.

$$r + r' \stackrel{\substack{= \\ r < \Lambda \quad r' < \Lambda}}{=} A \Rightarrow A \leq 2.\Lambda \Rightarrow A_{\max} = 2.\Lambda$$

Tout prisme ayant un **angle A supérieur à  $A_M = 2\Lambda$** , sa face de sortie joue un rôle de **miroir**, et elle réfléchit tout rayon lumineux arrivant sous un angle  $r' > \Lambda$





**Fin...**