



# OPTIQUE GEOMETRIQUE

Pierre Henne

[pierre.henne@externe.yncrea.com](mailto:pierre.henne@externe.yncrea.com)

# Cours et TDs en ligne

Equipe : **ISEN\_CIR1\_CNB1\_S1\_Optique**



# Planning

Lundi

Mardi

Mercredi

Jeudi

Vendredi

Cours  
2H

TD  
1H

TD  
2H

# Modalités d'évaluation

- QCM le 17 Septembre (40% note)
- Partiel le 8 Octobre (60% note)

# OPTIQUE GEOMETRIQUE

## **Chapitre I. Les lois de l'optique géométrique**

Introduction

1. Postulats de l'optique géométrique
2. Lois de Snell-Descartes (réflexion, réfraction)
3. Généralités sur les systèmes optiques

## **Chapitre II. Les miroirs sphériques**

## **Chapitre III. Les lentilles**

## **Chapitre IV. Les instruments optiques**

# INTRODUCTION



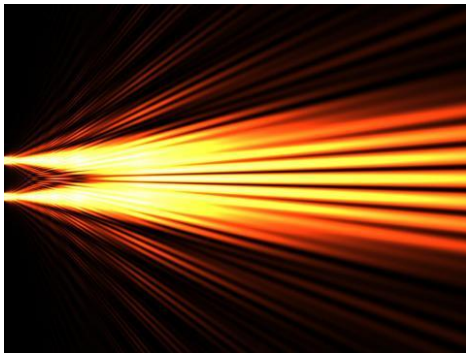
**Alhazen**  
Egypte XI<sup>e</sup> siècle

OPTIQUE : Etude de la propagation de la lumière

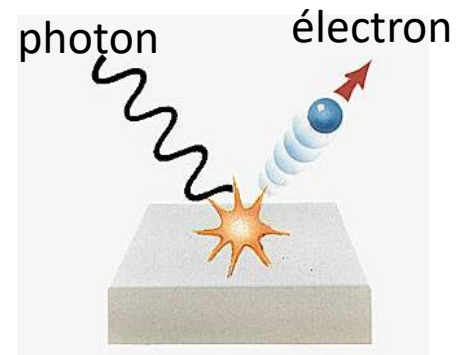
# INTRODUCTION

Différentes approches théoriques :

- **Optique géométrique** : lumière = rayons lumineux
- **Optique ondulatoire** : lumière = onde / rayonnement électromagnétique



- **Optique quantique** : lumière = particule (photon)



# INTRODUCTION

Optique géométrique : applications actuelles

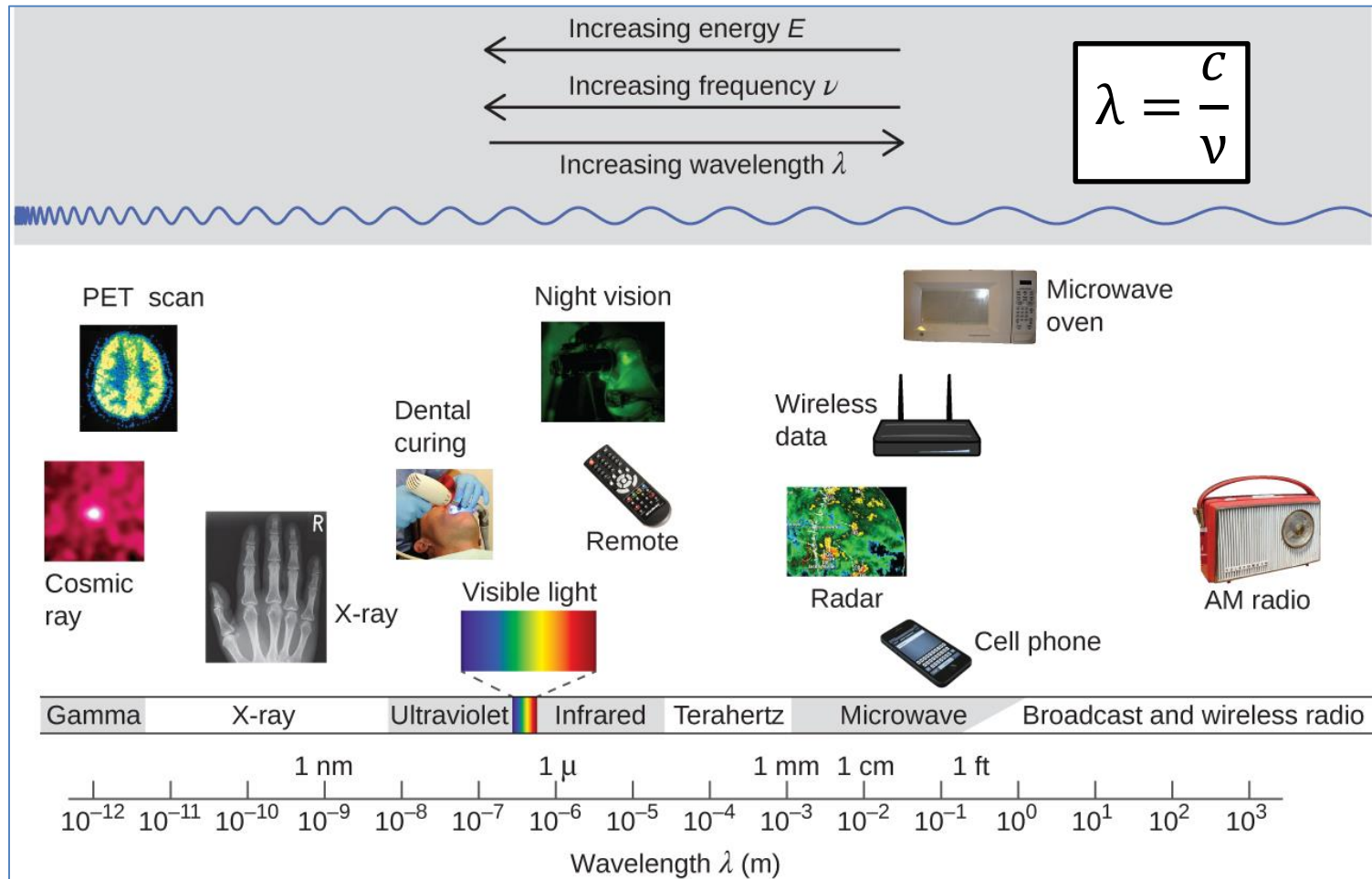




# 1. NATURE DE LA LUMIERE

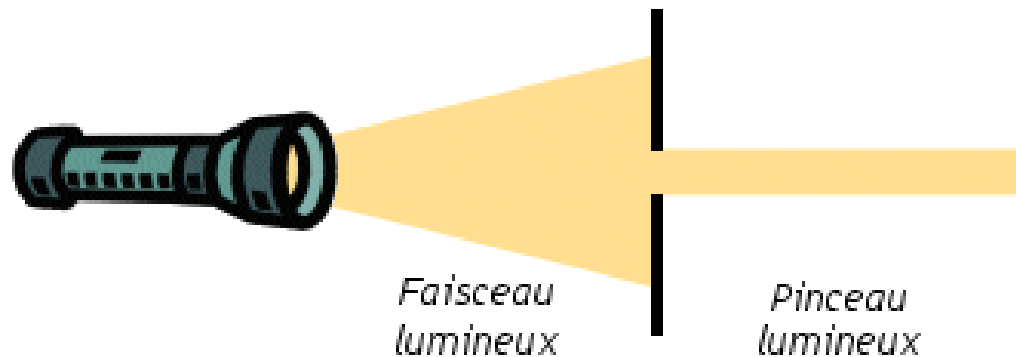
OPTIQUE : Etude de la propagation de la lumière

LUMIERE : onde électromagnétique



## A) Postulats de l'optique géométrique

- *Les faisceaux lumineux peuvent être décomposés en une infinité de rayons lumineux que l'on peut étudier de manière indépendante*
- *Les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans les milieux homogènes et isotropes*
- *Dans le vide, toute lumière se propage à la vitesse  $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$*



## B) Indice de réfraction

*L'indice de réfraction caractérise la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu.*

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

c : vitesse de la lumière dans le vide

v : vitesse de la lumière dans le milieu

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

Remarque : l'indice dépend aussi de la longueur d'onde => **Dispersion**

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

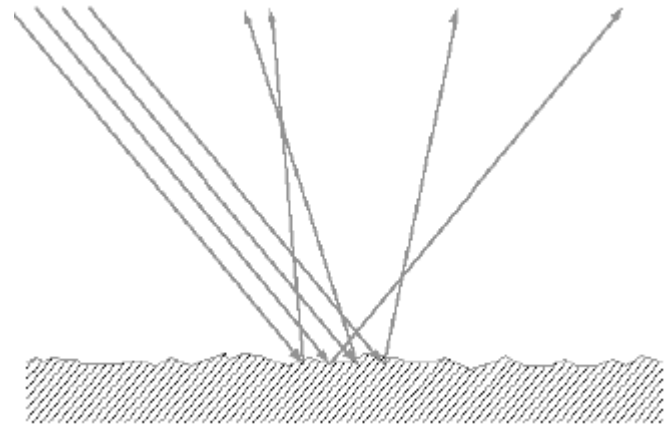
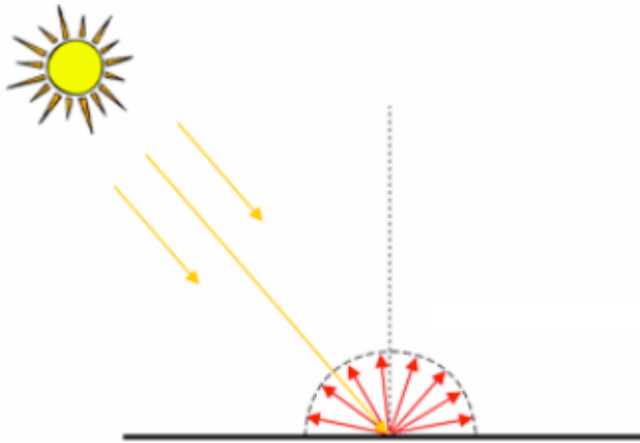


## 2. LOIS DE SNELL-DESCARTES

### A) Réflexions

#### a) Réflexion diffuse

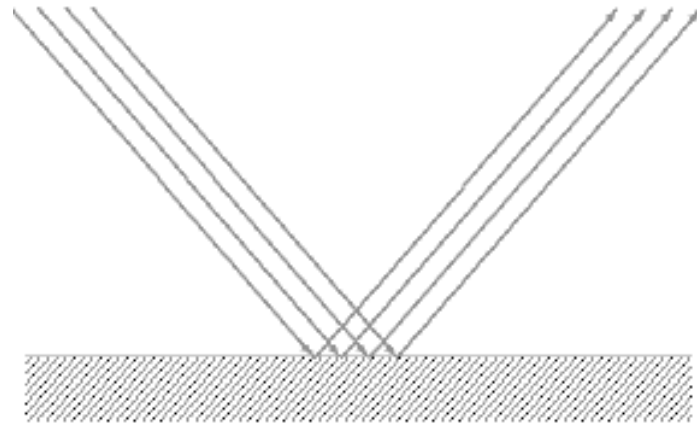
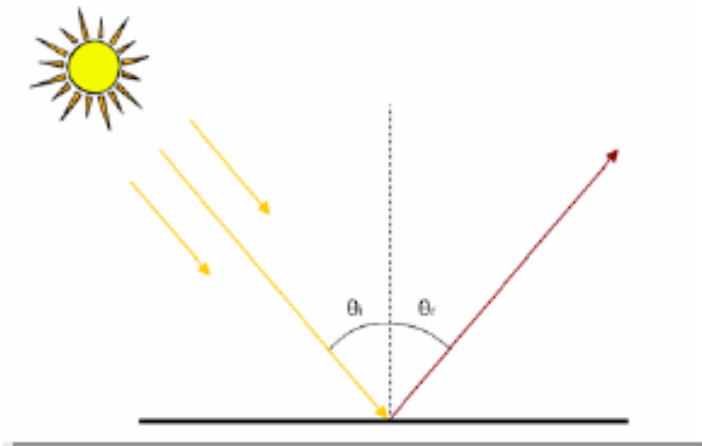
Observation de la plupart des objets de la vie courante : DIFFUSION (Réflexion diffuse)



## A) Réflexions

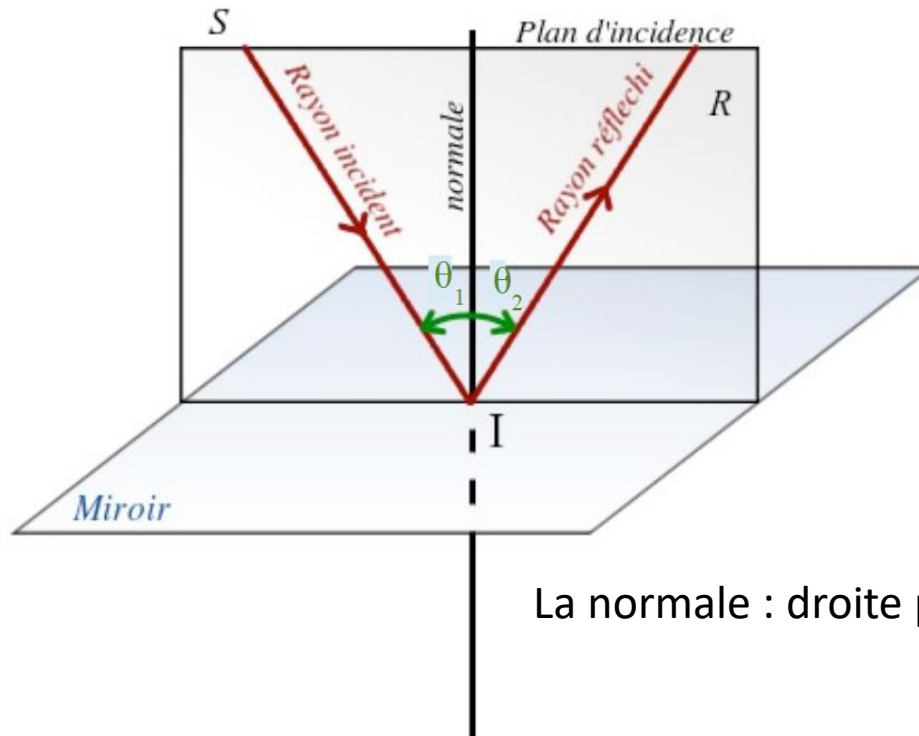
### b) Réflexion spéculaire

Sur les surface « lisses » (rugosité petite devant la longueur d'onde) ou transparente **une direction incidente correspond à une seule direction sortante.**



Correspond à l'aspect « brillant » des objets : on observe la source lumineuse plutôt que l'objet lui-même.

### c) Plan d'incidence



La normale : droite perpendiculaire au miroir

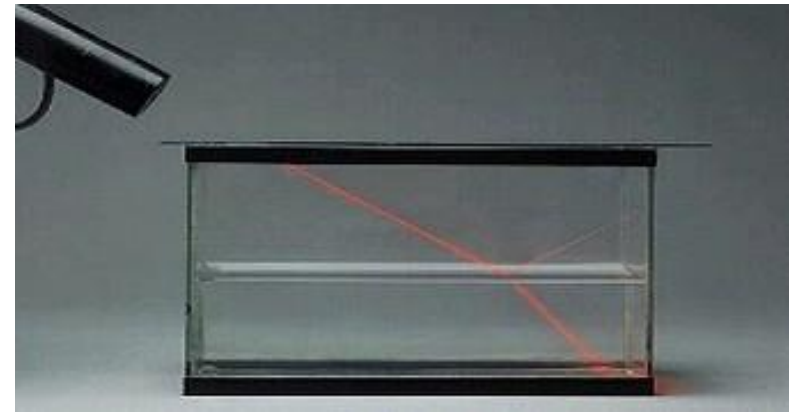
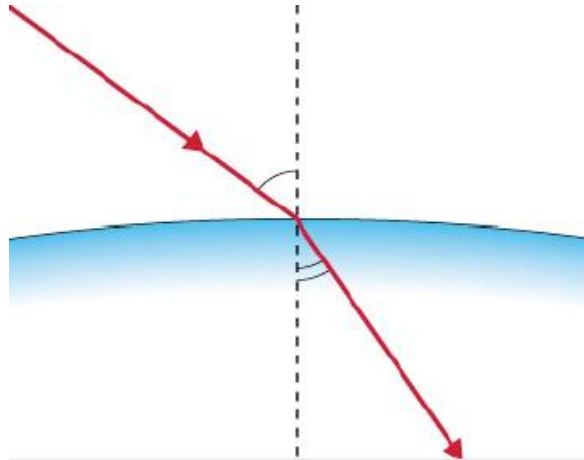
***Le rayon réfléchi*** est dans le plan défini par ***la normale*** et ***le rayon incident*** . Ce plan est appelé le ***plan incident***.

**L'angle réfléchi est égal à l'angle incident  $\theta_1 = \theta_2$**

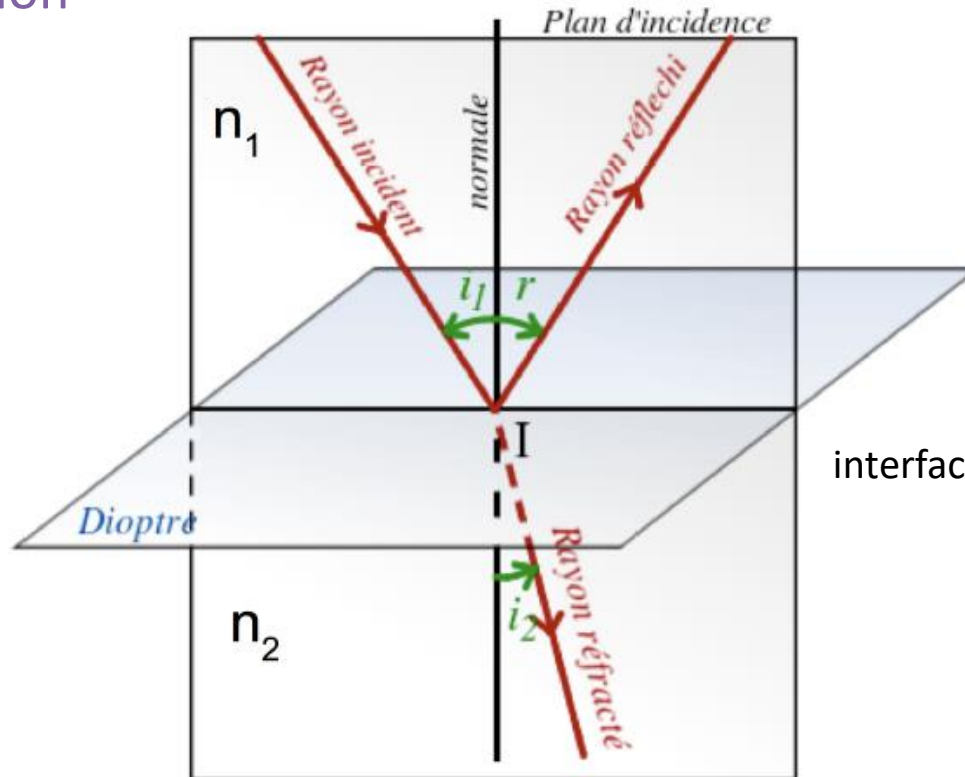
## 2. LOIS DE SNELL-DESCARTES

### B) Réfraction

**Définition** : *changement de la direction de propagation de la lumière passant d'un milieu homogène à un autre.*



## B) Réfraction



**Dioptré :**  
interface entre 2 milieux homogènes

Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence  
L'angle du rayon réfracté  $i_2$  vérifie :

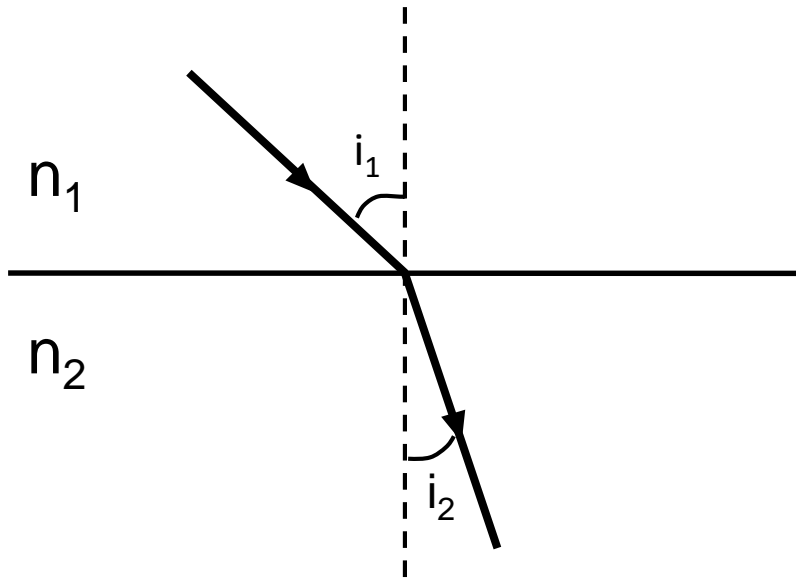
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

*Loi de Snell-Descartes*



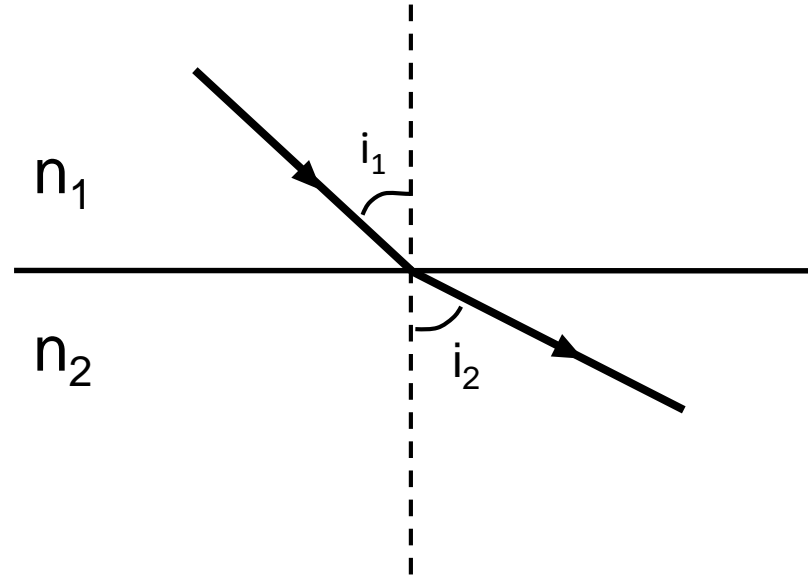
## B) Réfraction

Cas 1



$$n_1 < n_2$$

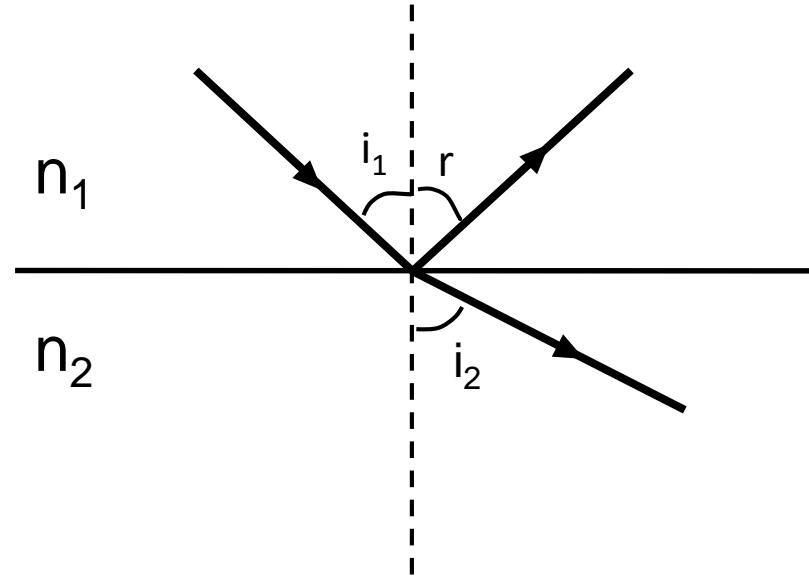
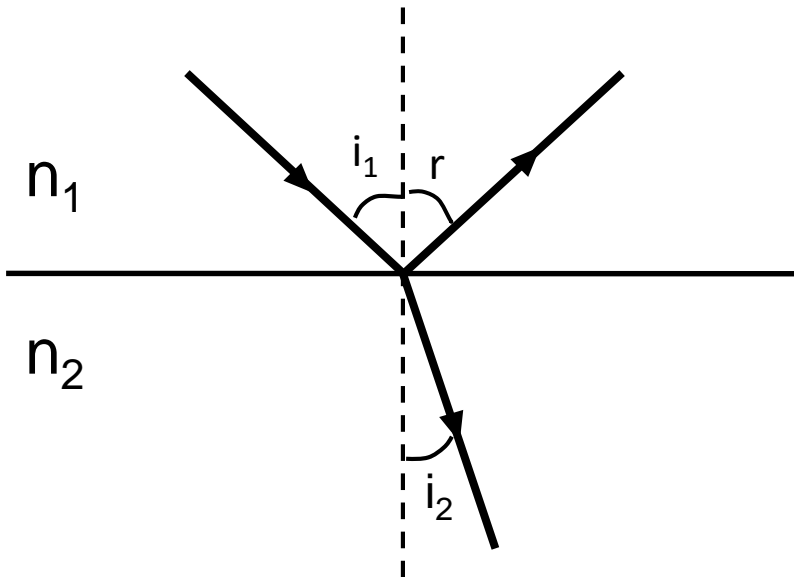
Cas 2



$$n_1 > n_2$$

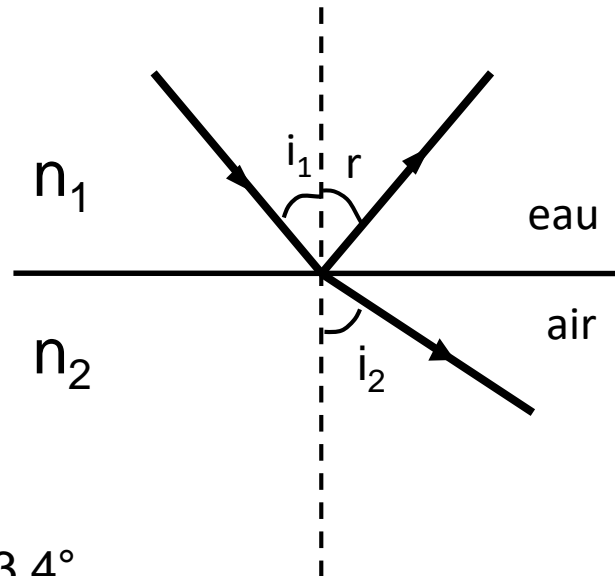
En effet :  $i_1 > i_2 \rightarrow \sin i_1 > \sin i_2$  et  $n_2 = n_1 \sin i_1 / \sin i_2$

Remarque : il y a toujours un rayon réfléchi



## APPLICATION

Calculer l'angle de réflexion et l'angle de réfraction dans le cas suivant, avec  $n_1 = 1,33$  et  $n_2 = 1$  pour a)  $i_1 = 10^\circ$  ; b)  $i_1 = 48^\circ$  ; c)  $i_1 = 50^\circ$ .



Si  $i_1 = 10^\circ$ , alors  $i_2 = 13,4^\circ$

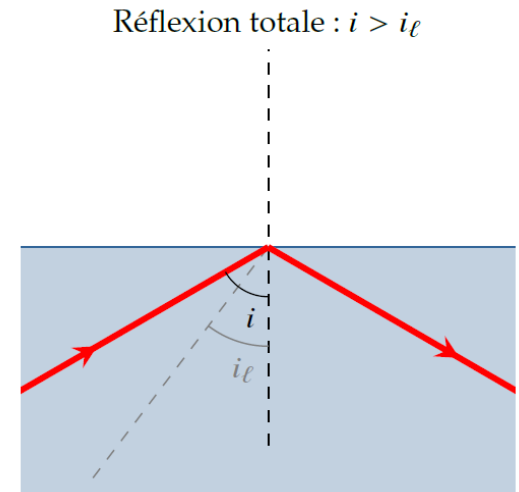
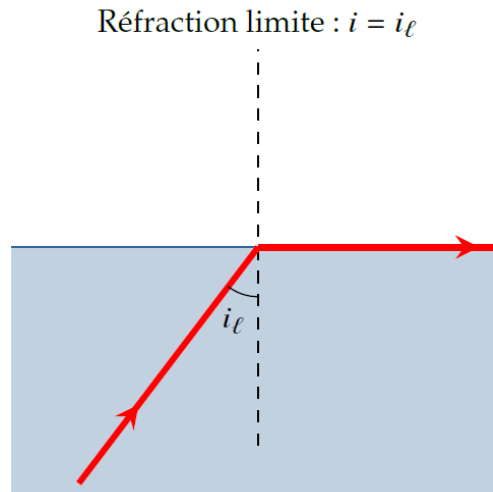
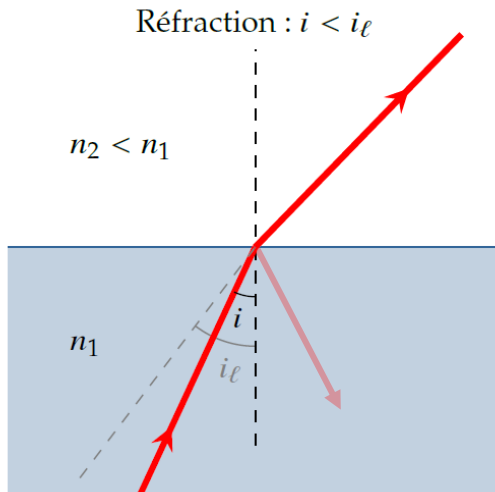
Si  $i_1 = 48^\circ$ , alors  $i_2 = 81,3^\circ$

Si  $i_1 = 50^\circ$ , alors  $i_2 = \text{« Error »}$

Car on cherche un angle  $i_2$  pour lequel  $\sin x > 1$ , ça n'existe pas !

Pas de rayon réfracté : **réflexion totale**

## Cas particulier : réflexion totale



Angle incident limite pour  $i_2=90^\circ$

$$\sin i_2 = 1$$

$$\sin i_l = n_2/n_1$$

$i_l = 48,8^\circ$  pour l'interface eau air

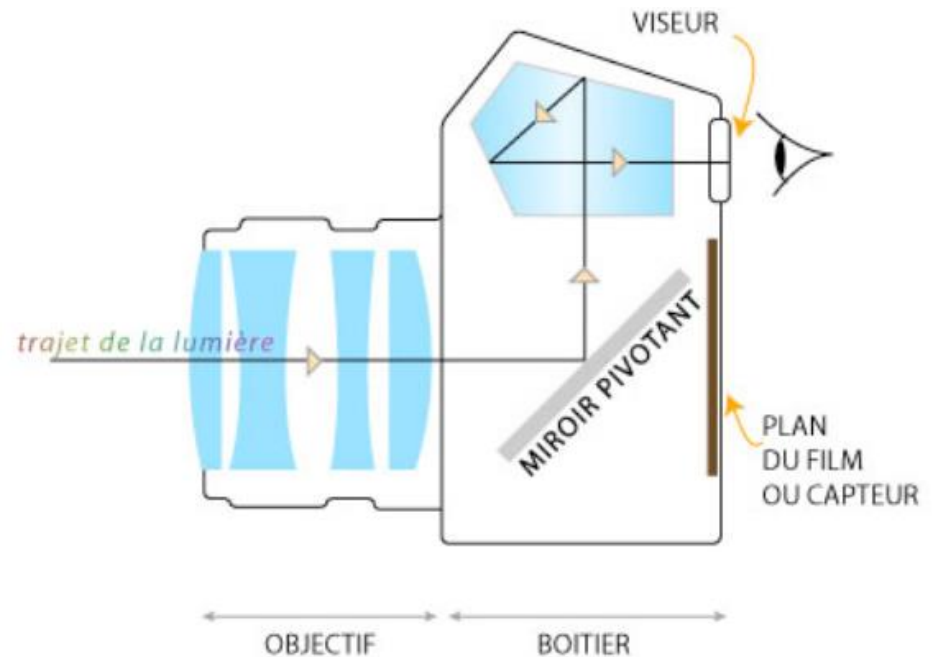
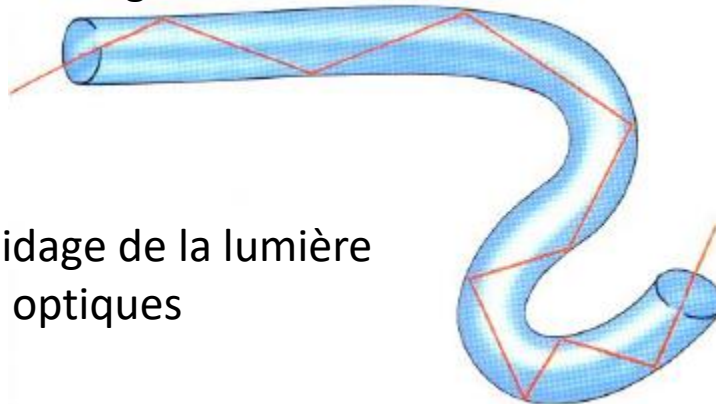
$$\sin(i_l) = \frac{n_2}{n_1}$$

## Applications



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

Principe de guidage de la lumière dans les fibres optiques

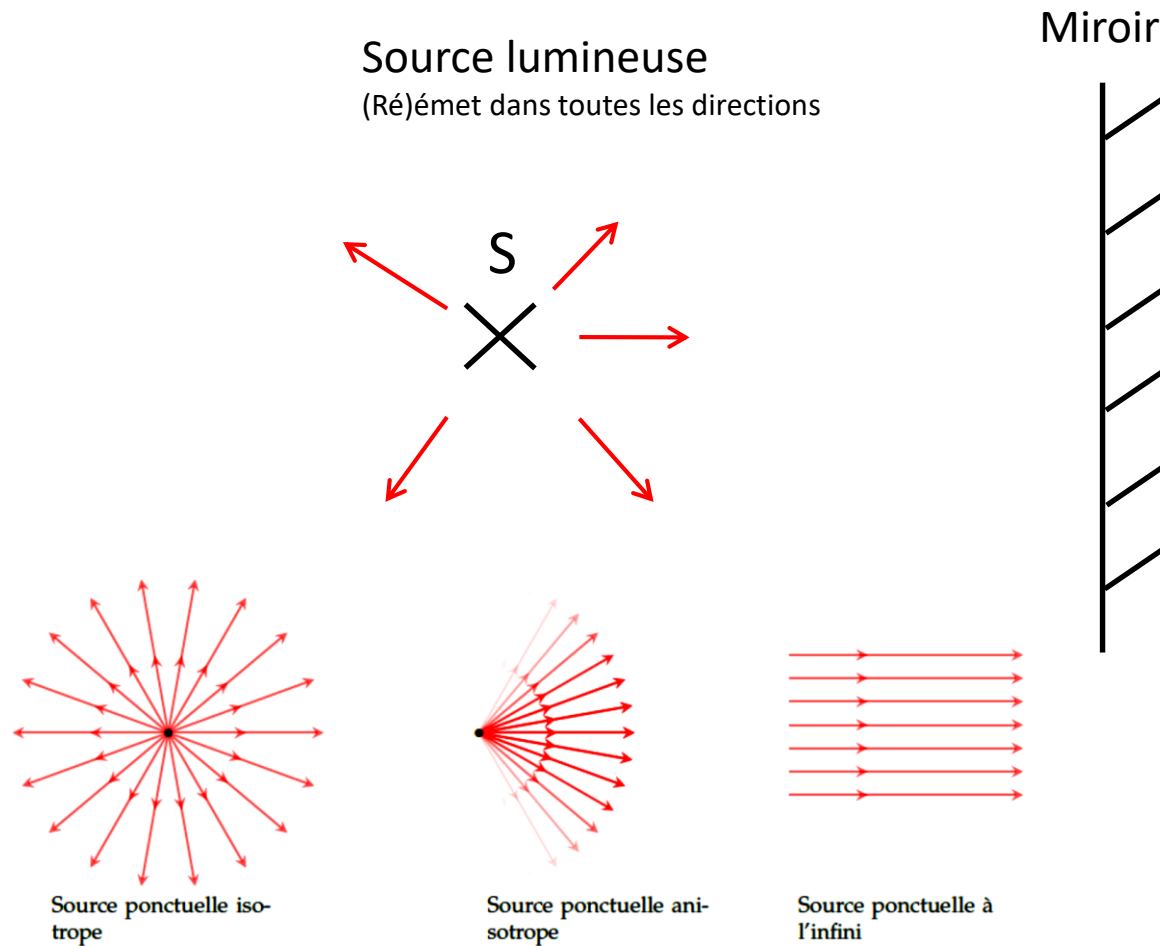


Dans les appareils photos reflex le prisme en verre réfléchit la lumière



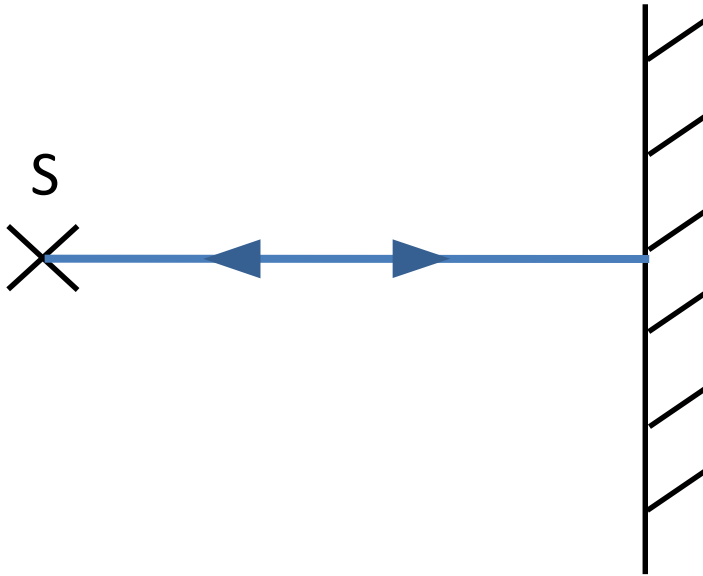
### 3. GENERALITE SUR LES SYSTEMES OPTIQUES

#### Premier exemple : Le miroir plan



## Premier exemple : Le miroir plan

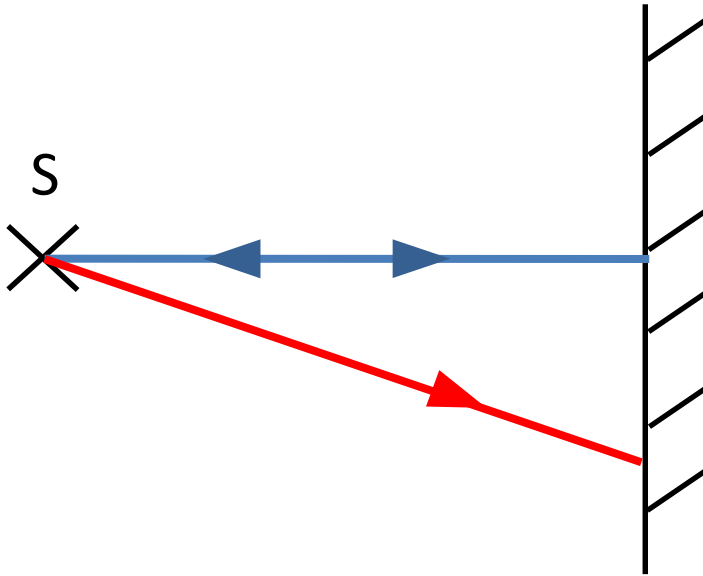
Rayon 1 : rayon perpendiculaire :  $\theta_i = 0$  donc  $\theta_r = 0$





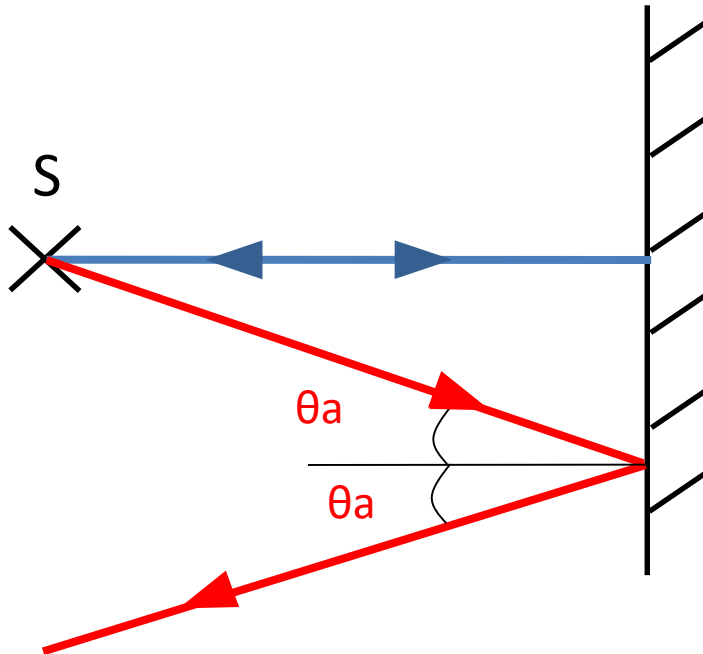
## Premier exemple : Le miroir plan

Rayon 2 : rayon quelconque  $\theta_i = \theta_a$



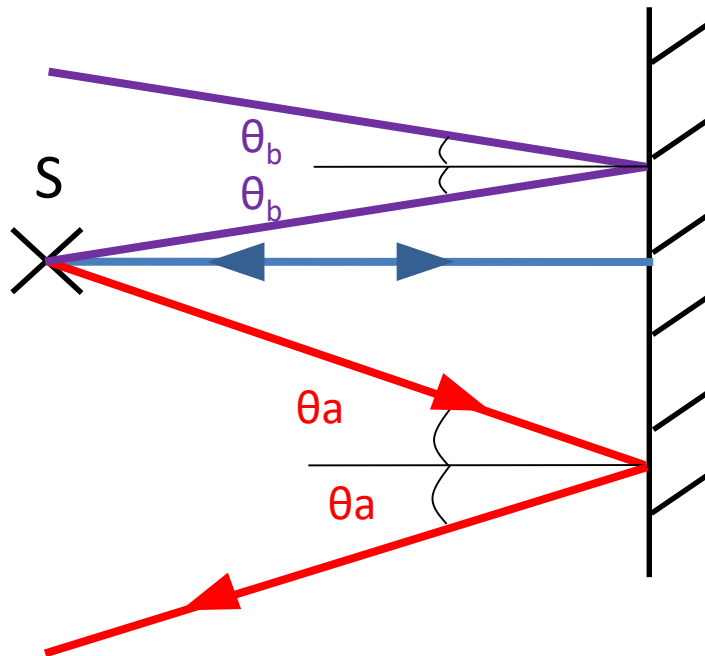
## Premier exemple : Le miroir plan

Rayon 2 : rayon quelconque  $\theta_i = \theta_a$



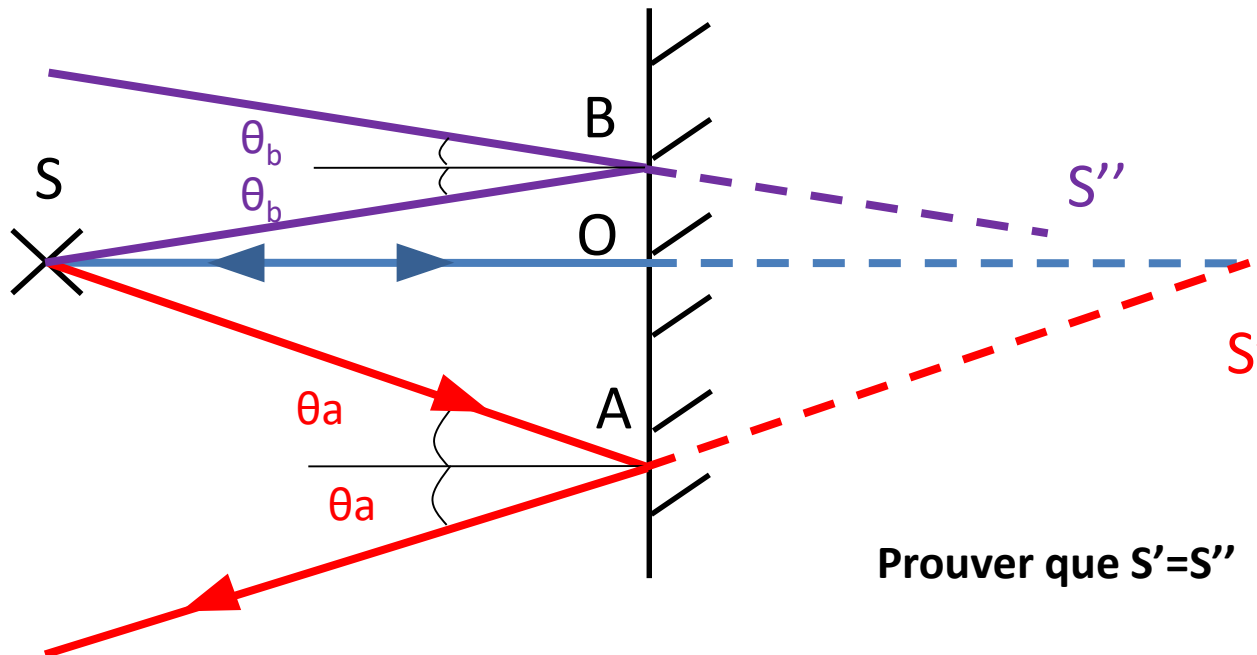
## Premier exemple : Le miroir plan

Rayon 3 : autre rayon quelconque  $\theta_i = \theta_b$



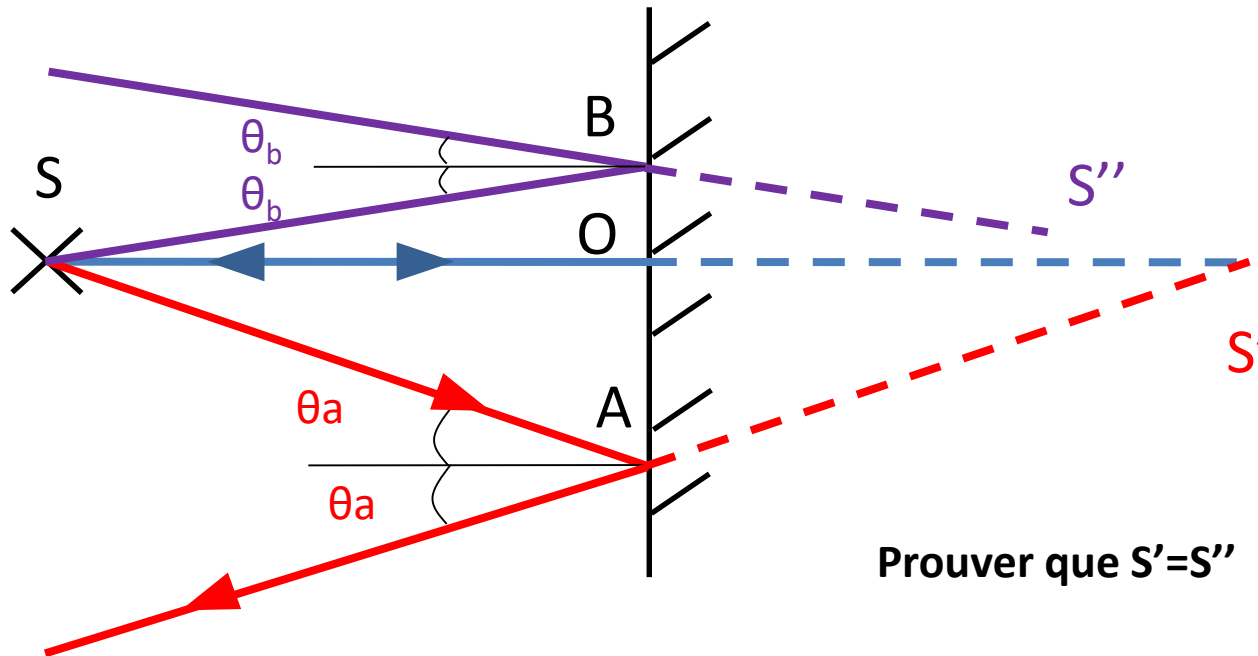
## Premier exemple : Le miroir plan

Rayon 3 : autre rayon quelconque  $\theta_i = \theta_b$



## Premier exemple : Le miroir plan

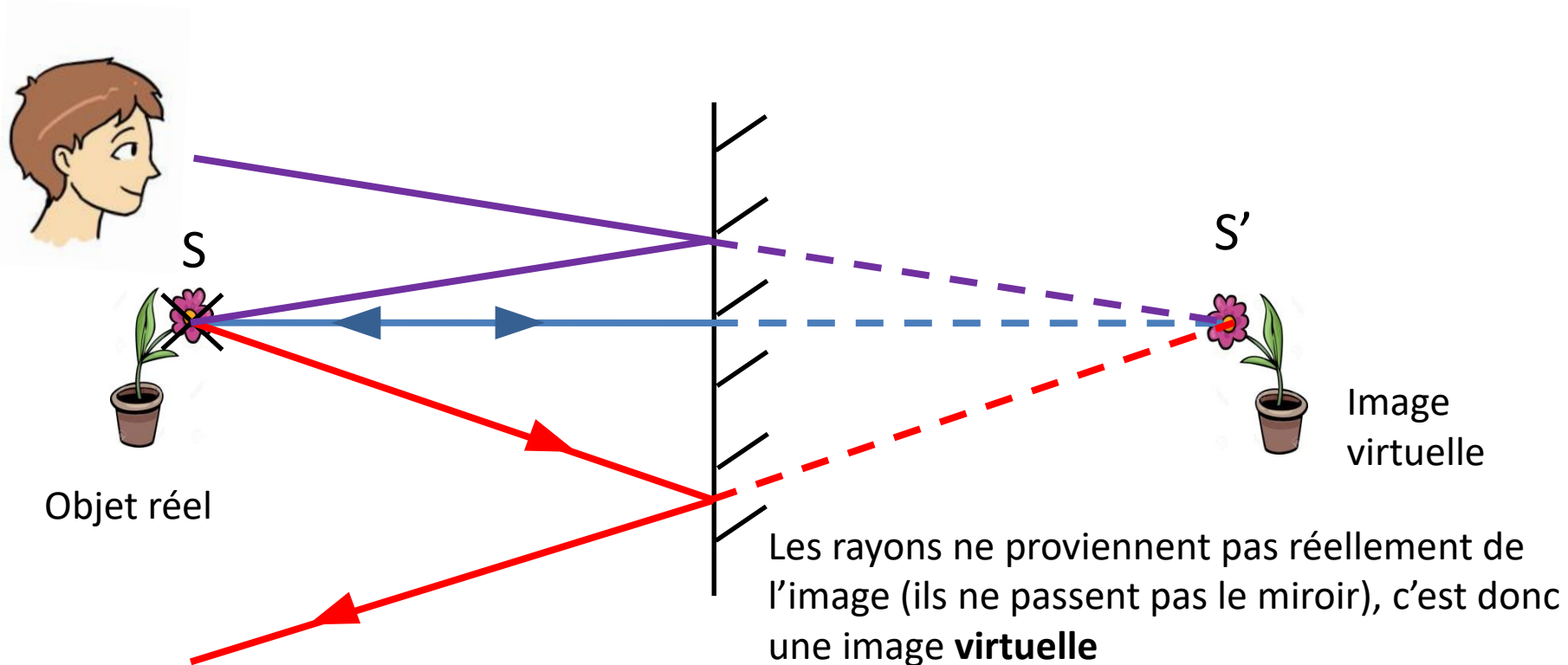
Rayon 3 : autre rayon quelconque  $\theta_i = \theta_b$



Une solution : les triangles  $SAS'$  et  $SBS''$  sont isocèles ;  
 $OA \perp SS'$  et  $OB \perp SS''$  donc (propriétés des triangles isocèles)  
 $OS = OS'$  et  $OS = OS'' \rightarrow S'=S''$

## A) Stigmatisme

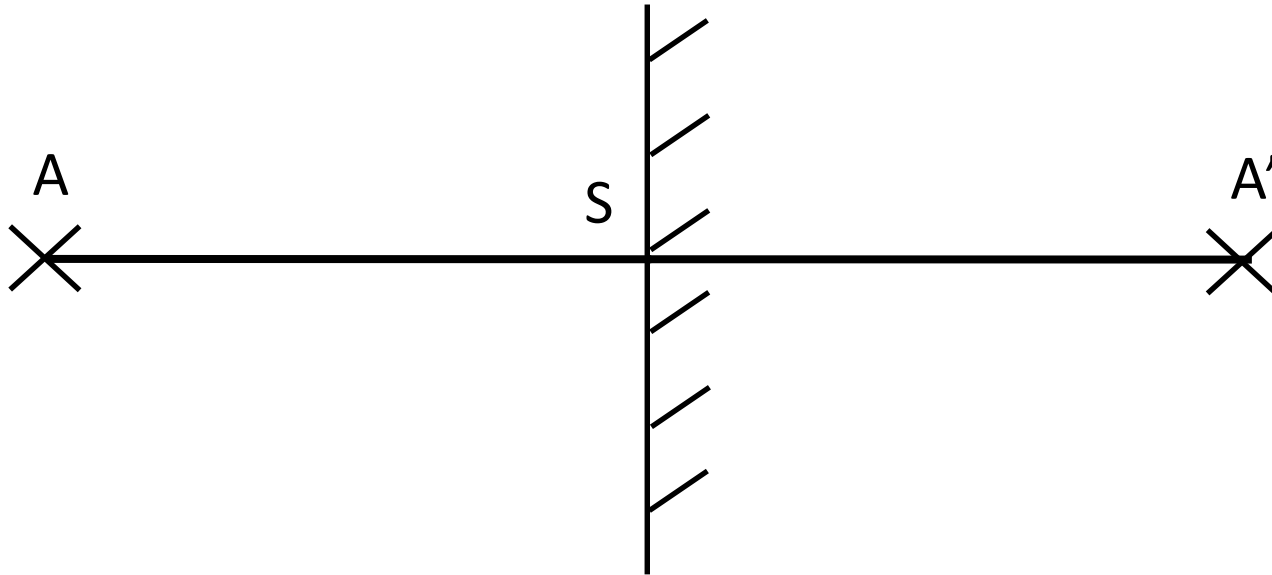
**Stigmatisme** : tous les rayons provenant d'un point objet donnent lieu à un seul point image ; l'observateur voit une image nette.



Le **stigmatisme rigoureux** s'obtient uniquement avec un miroir plan. Pour les autres systèmes optiques, on verra comment obtenir un **stigmatisme approché**.

## B) Relation de conjugaison

*Relation entre la position de l'objet et de l'image*

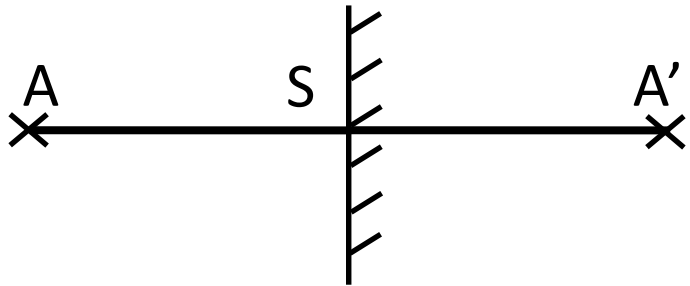


On vient de voir que  $SA' = SA$

Il faut encore indiquer de quel coté se forme l'image : notation de **distance algébrique**

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

Relation de conjugaison du  
miroir plan



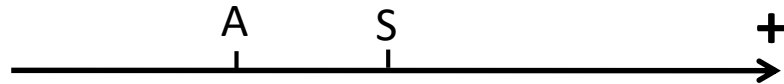
$$\overline{SA} = -\overline{SA'}$$

Rappel sur les distances algébriques

-On choisit un axe positif



-Si on a deux points A et S tels que :



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

$\overline{SA}$  est négatif

AS est la distance classique, toujours positive

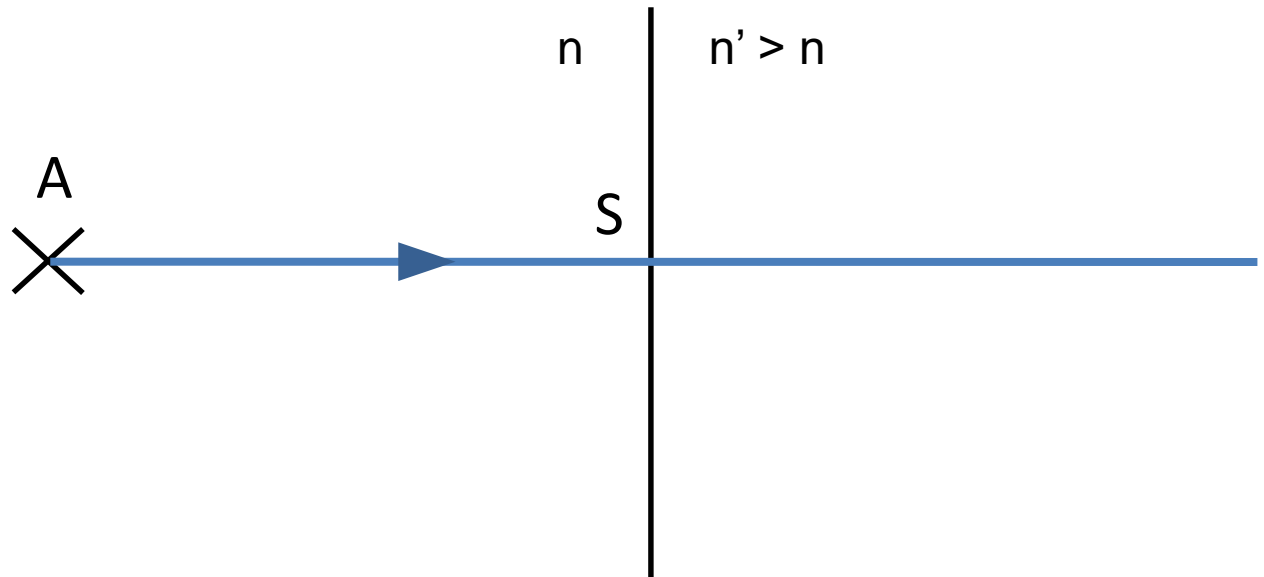
Test : est-ce correct d'écrire  $\overline{SA} = -SA$  ?

Et  $\overline{AS} = AS$  ?



## Deuxième exemple : Stigmatisme approché du dioptre plan.

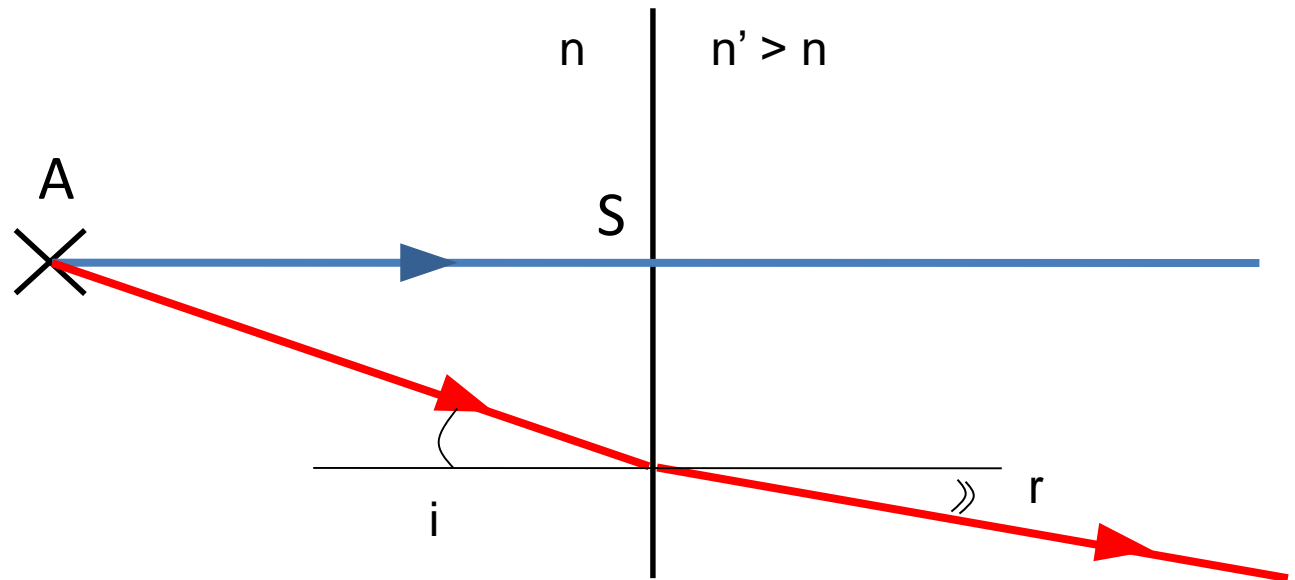
Rayon 1 : rayon perpendiculaire :  $i_1 = 0$  donc  $i_2 = \sin i_1 n_1 / n_2 = 0$



## Deuxième exemple : Stigmatisme approché du dioptre plan.

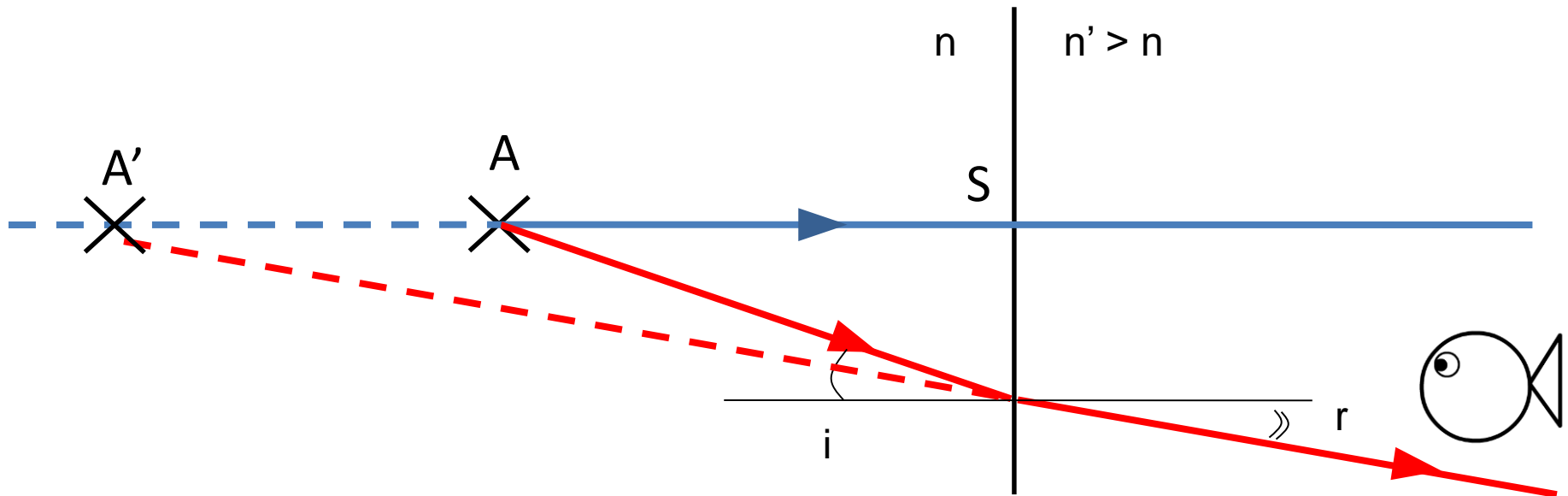
Rayon 1 : rayon perpendiculaire :  $i_1 = 0$  donc  $i_2 = \sin i_1 n_1 / n_2 = 0$

Rayon 2 : rayon quelconque d'angle d'incidence  $i$  et de réfraction  $r$



## Deuxième exemple : Stigmatisme approché du dioptre plan.

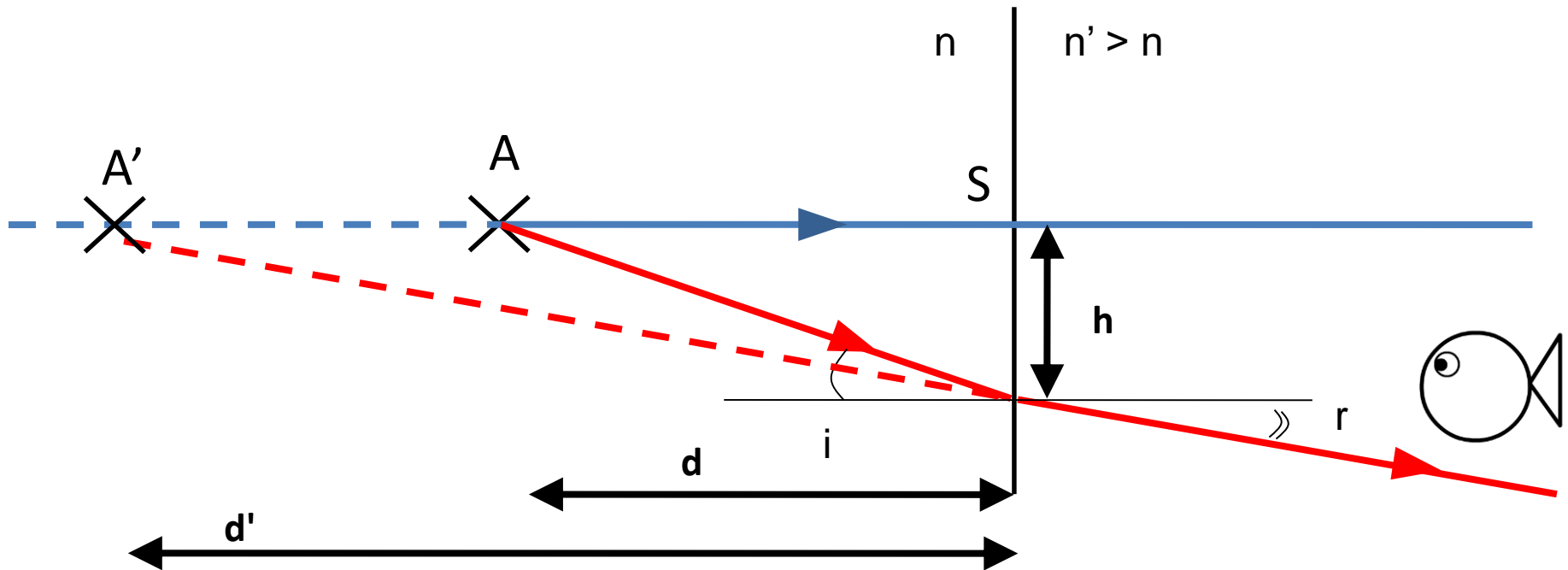
Objectif : trouver les propriétés de l'image de l'objet à travers le dioptre  
Autrement dit : que voit le poisson ?



Où se croisent les rayons réfractés ?  $A'$

## Deuxième exemple : Stigmatisme approché du dioptre plan.

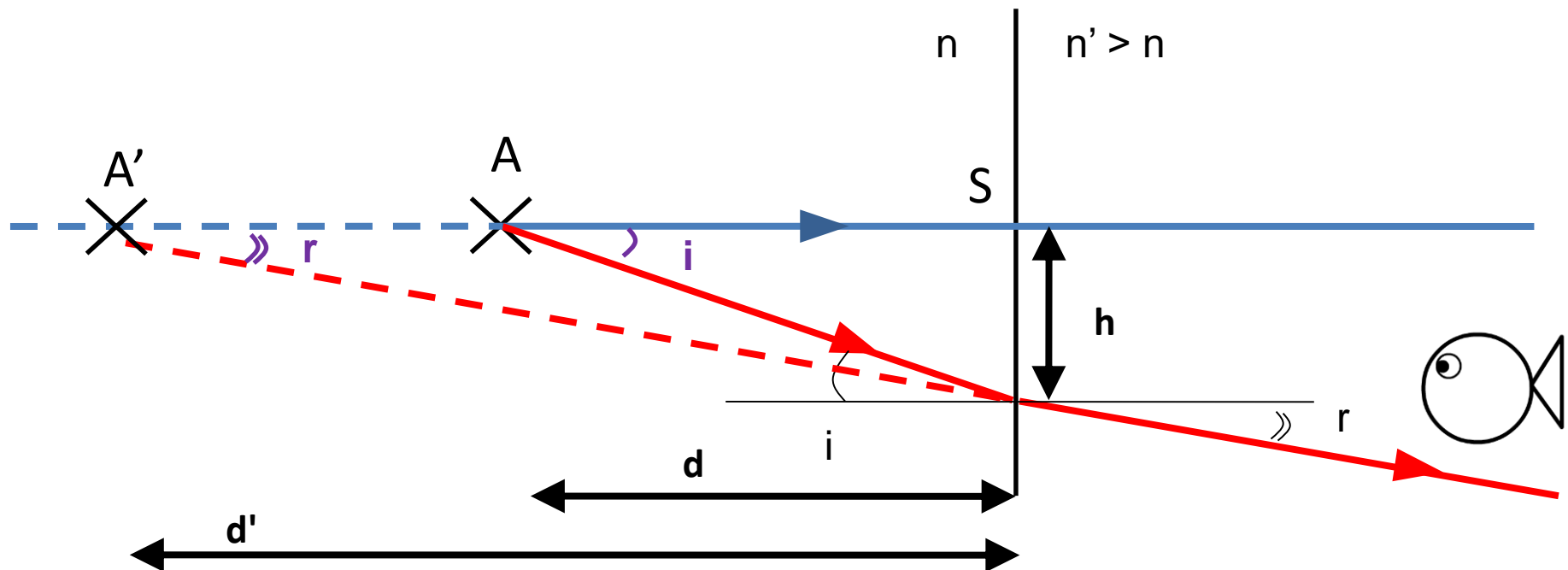
Objectif : trouver les propriétés de l'image de l'objet à travers le dioptre



Trouver une relation entre  $h$  et  $d$  en utilisant les angles  
une relation entre  $h$  et  $d'$

## Deuxième exemple : Stigmatisme approché du dioptre plan.

Objectif : trouver les propriétés de l'image de l'objet à travers le dioptre



$$h = d \tan i$$
$$h = d' \tan r$$

On cherche une relation entre  $d$  et  $d'$

On sait aussi que

$$n \sin i = n' \sin r_{37}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n \sin i = n' \sin r \text{ (1)} \\ h = d \tan i \text{ (2)} \\ h = d' \tan r \text{ (3)} \end{array} \right.$$

Donc  $d' \tan r = d \tan i$  qu'on réécrit  $d' = d \frac{\sin i}{\cos i} \frac{\cos r}{\sin r} \text{ (4)}$

On veut réécrire (4) en faisant disparaître l'angle  $r$  en utilisant (1)

D'après (1),  $\sin r = \frac{n}{n'} \sin i$

Donc (4) devient  $d' = d \frac{\sin i}{\cos i} \frac{n'}{n} \frac{\cos r}{\sin i} = d \frac{n'}{n} \frac{\cos r}{\cos i}$

On utilise la relation trigonométrique :  $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1 \text{ (5)}$

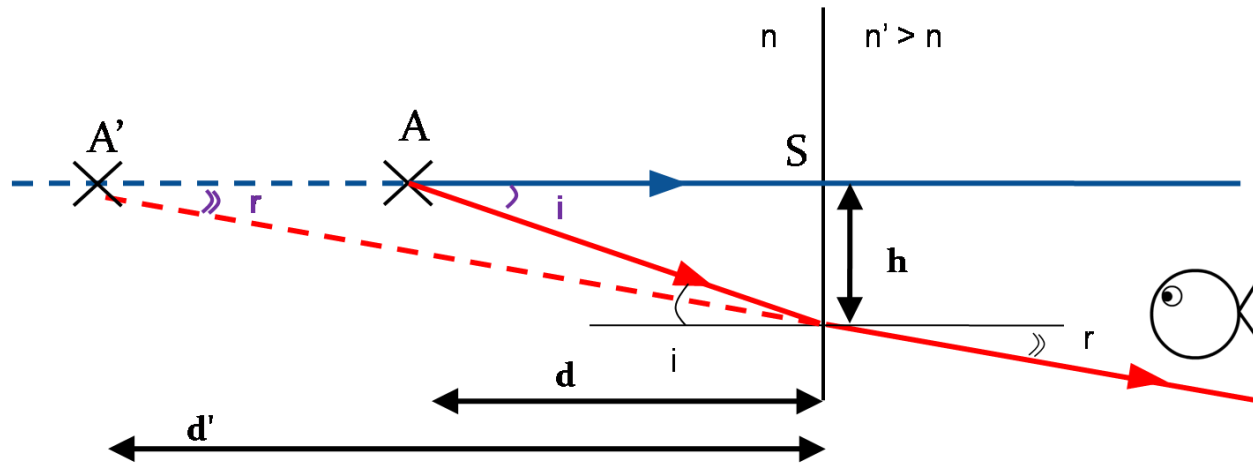
$$\cos r = \sqrt{1 - \sin^2 r}$$

En utilisant (1) on obtient

$$\cos r = \sqrt{1 - \frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i}$$

La relation (4) devient alors (en réécrivant aussi  $\cos i$  avec (5)):

$$d' = \frac{n'}{n} d \frac{\sqrt{1 - \frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \sin^2 i}}$$



$$d' = \frac{n'}{n} d \frac{\sqrt{1 - \frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \sin^2 i}}$$

Contrairement au miroir plan  $d'$  dépend de l'angle  $i$  !

$A'$  change pour chaque rayon émis par  $A$

L'image ( $A'$ ) n'est pas unique = image floue, les dioptries ne sont pas stigmatiques rigoureux.

**Stigmatisme approché aux petits angles**

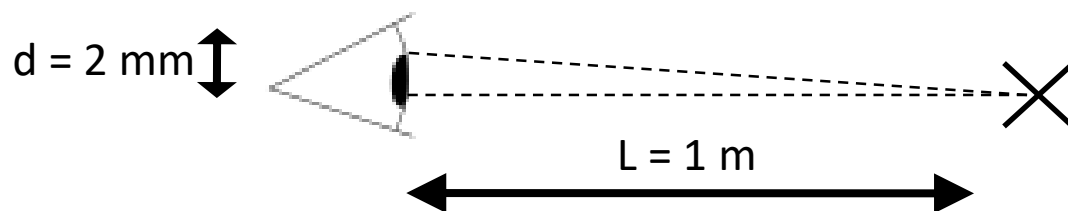
Stigmatisme approché aux petits angles :

$$d' = \frac{n'}{n} d \frac{\sqrt{1 - \frac{n^2}{n'^2} \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \sin^2 i}} \quad \xrightarrow[\sin^2 i \ll 1]{\text{Quand } i \text{ petit}} \quad d' \approx \frac{n'}{n} d$$

→  $d'$  dépend très peu de  $i$  aux petits angles. On peut considérer que chaque point objet donne lieu à un point image unique

Les conditions de stigmatisme approché sont validées dans de très nombreux cas

Exemple : un observateur regarde un objet à 1 mètre. L'angle est limité par la pupille



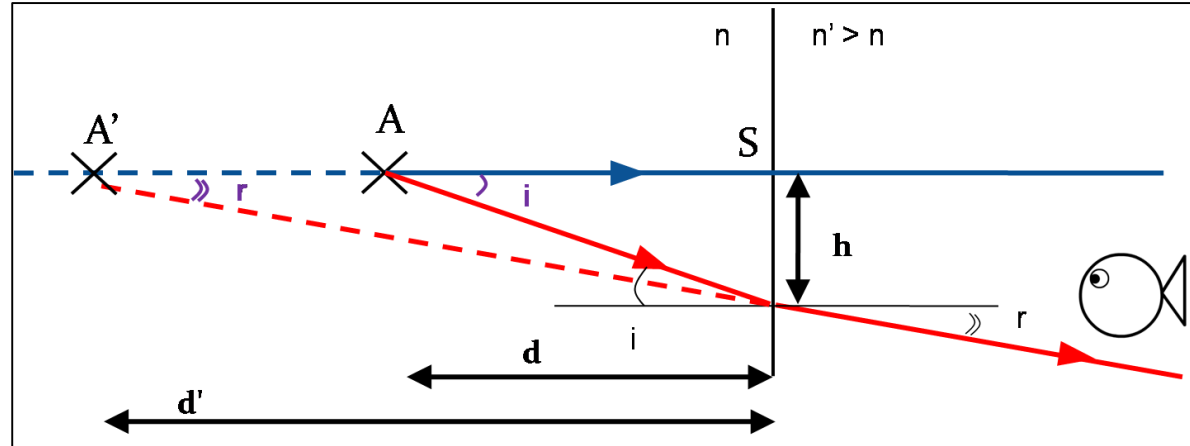
$$\tan i = L / d \rightarrow i = 0,002 \text{ rad}$$

$$\sin^2 i = 0,000004$$



## RELATION DE CONJUGAISON DU DIOPTRE PLAN

$$d' \approx \frac{n'}{n} d$$



A et A' sont du même côté du dioptre

$$\overline{SA'} = \frac{n'}{n} \overline{SA}$$

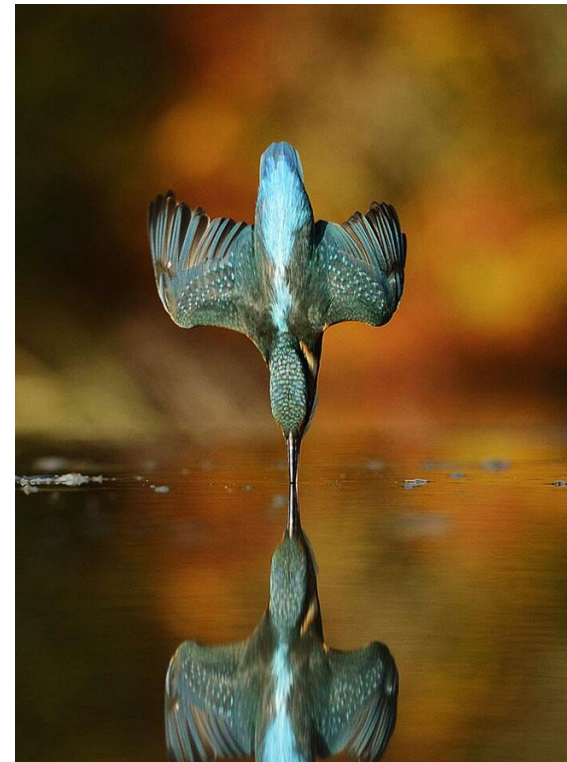
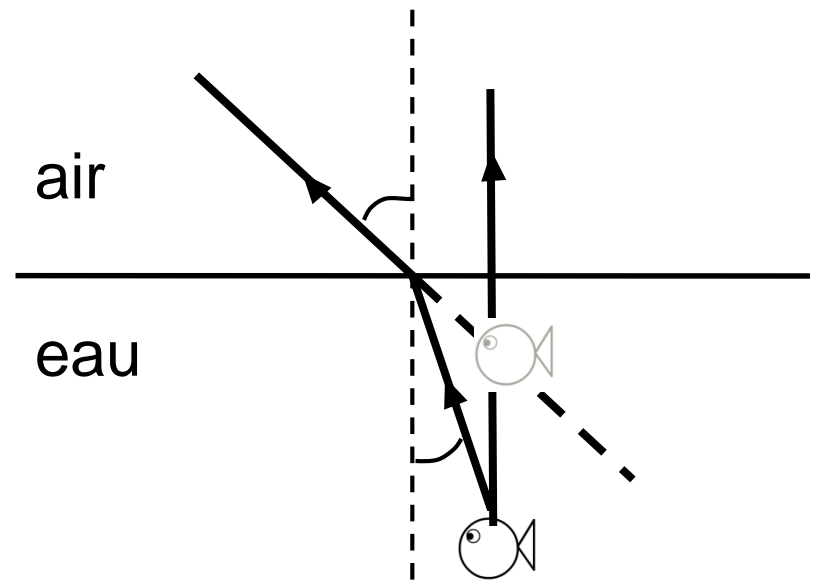
Relation de conjugaison du dioptre plan

Remarque 2

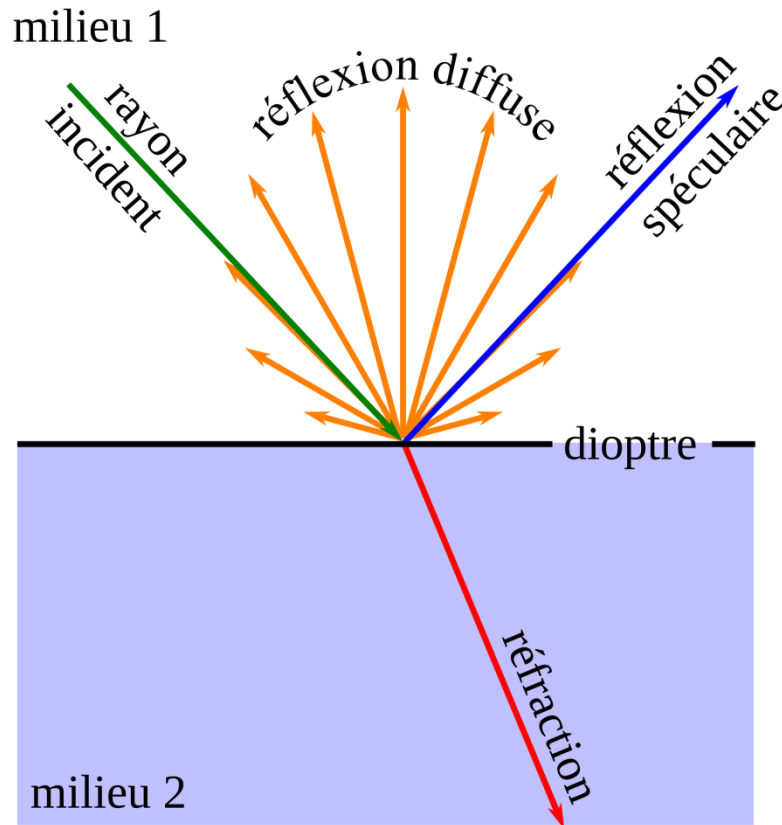
$$\overline{SA'} = \frac{n'}{n} \overline{SA}$$

Mais comment font les oiseaux pour pêcher ?  
Le poisson n'est pas à l'endroit où ils le voient.

Solution... Plongée verticale



## CONCLUSION



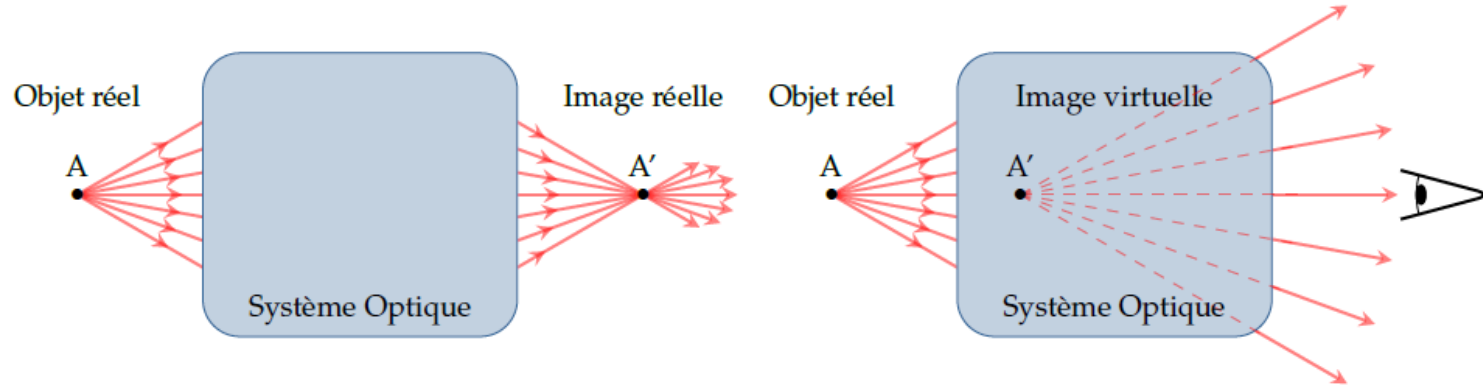
Réflexion  
 $\theta_i = \theta_r$

Réfraction  
 $n \sin i_1 = n' \sin i_2$

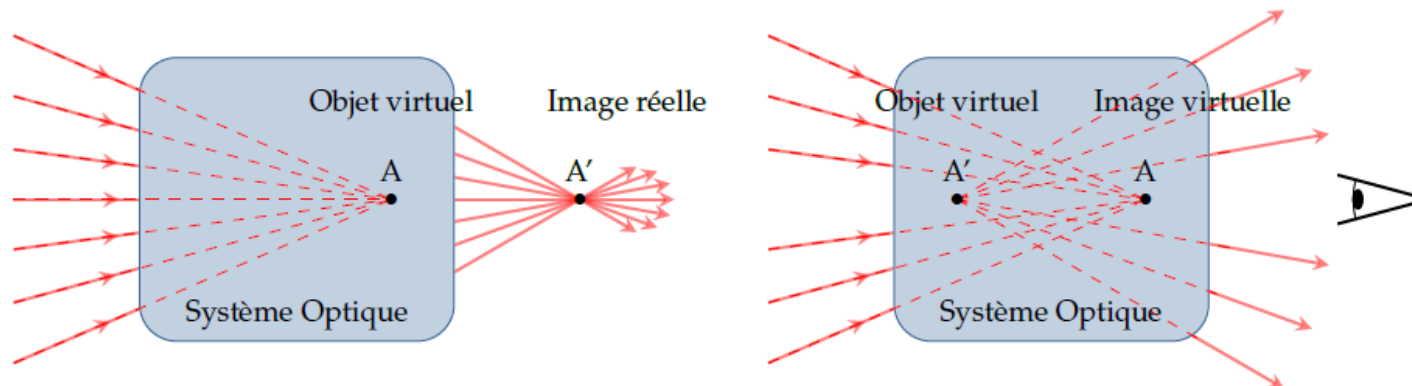
Réfraction totale au-delà  
D'un angle limite  $i_2 = 90^\circ$

*Le rayon se rapproche de la normale dans le milieu d'indice le plus grand*

## Objet/Image réel/virtuel

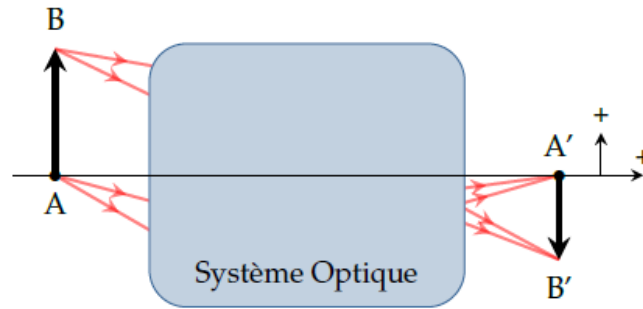


Formation de l'image par un **objet** ponctuel **réel** par un système optique stigmatique



Formation de l'image par un **objet** ponctuel **virtuel** par un système optique stigmatique

*Aplanétisme :*



## SUPPLEMENT :

Indice, vitesse de la lumière, longueur d'onde, fréquence, dispersion de la lumière blanche

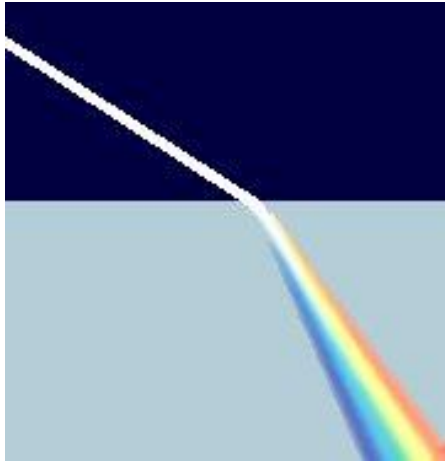
On a vu que

$$n = c / v$$

c : vitesse de la lumière dans le vide

v : vitesse de la lumière dans le milieu

Le plus souvent, dans un milieu matériel, **la vitesse** de la propagation d'une onde **dépend de sa fréquence (couleur)**. On dit que le milieu est **dispersif** pour cette onde.



### ROUGE.

Exemple

Fréquence = 457 THz

Indice dans le verre crown = **1.504**

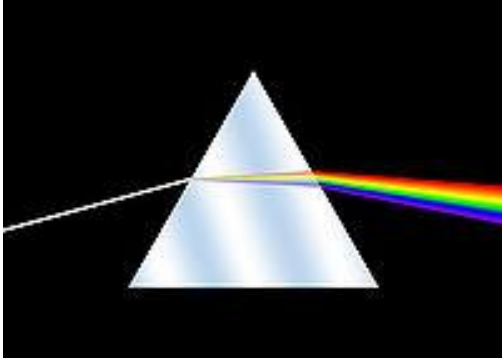
### BLEU

Fréquence 617 THz

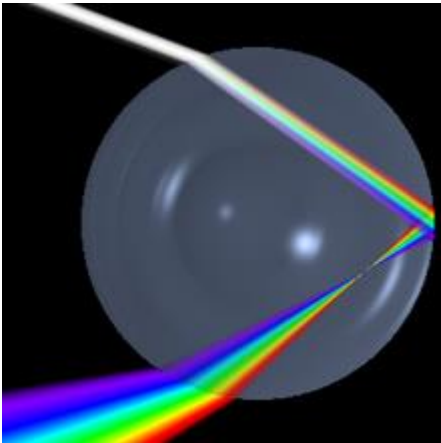
Indice dans le verre crown = **1.521**

Remarque : la longueur d'onde  $\lambda = v/f$  varie aussi en fonction du milieu, puisque la vitesse change

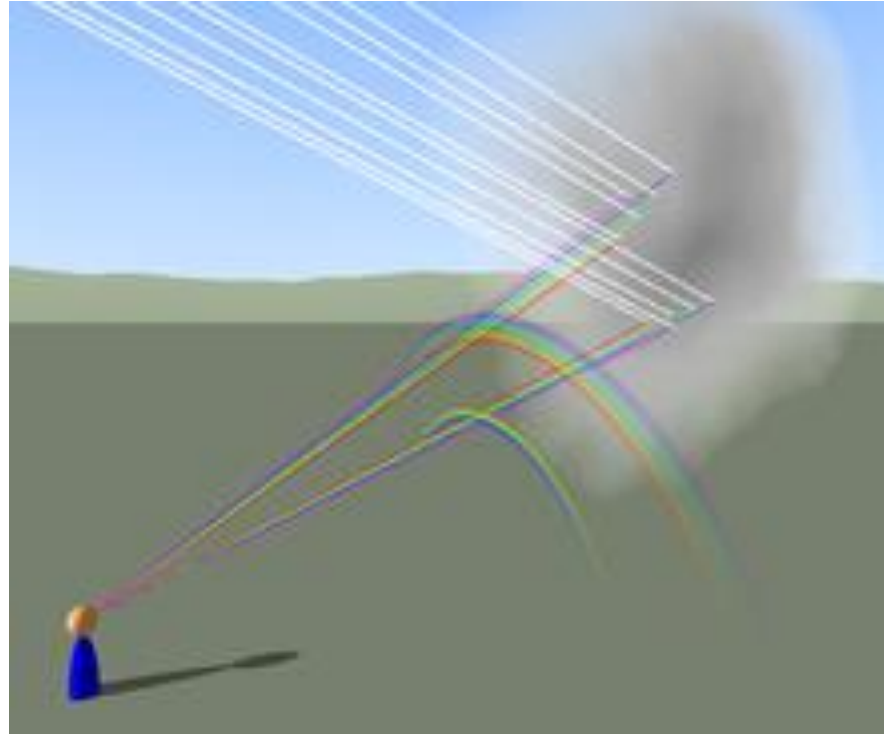
## PRISME

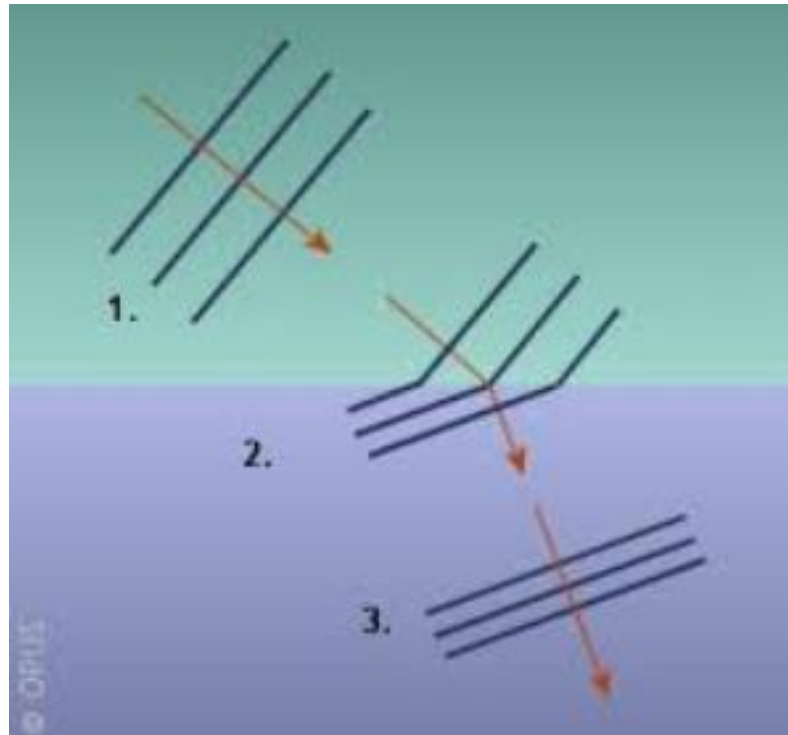


## GOUTTE DE PLUIE



FORMATION DES ARCS EN CIEL PAR DISPERSION DE LA LUMIERE BLANCHE SUR LES GOUTTES DE PLUIE

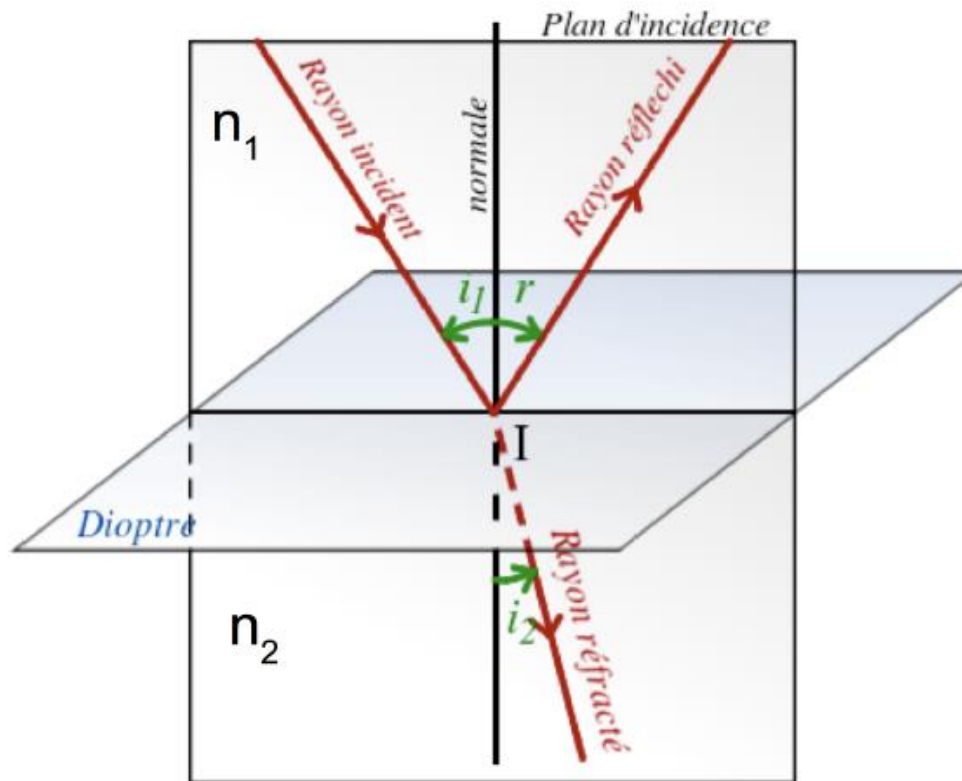




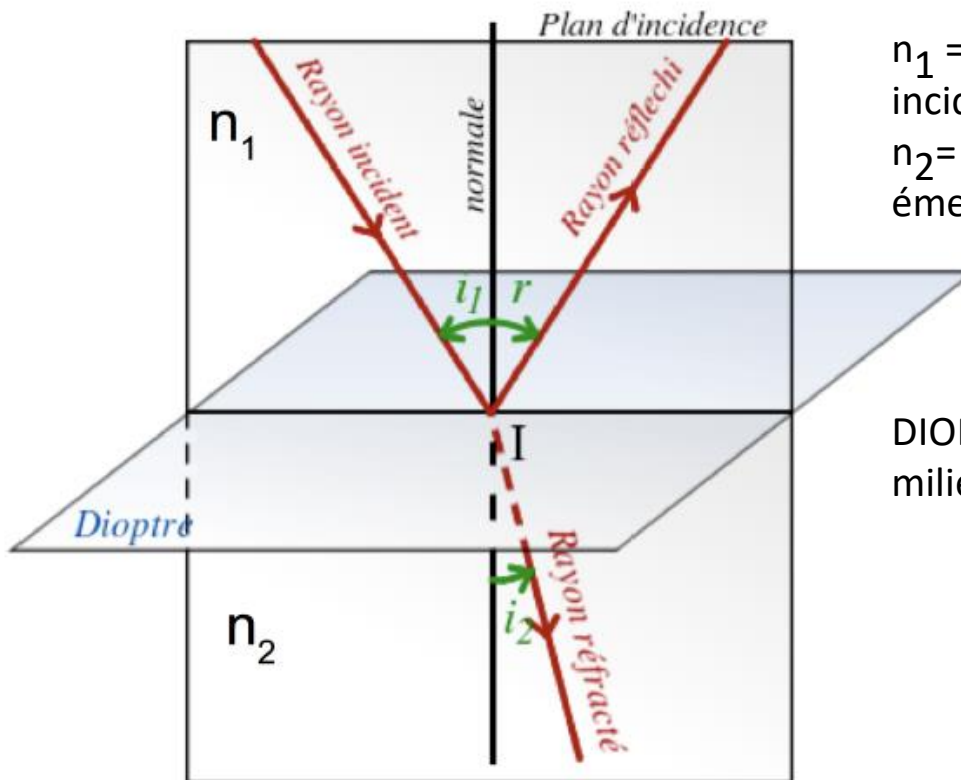
Rencontre d'un front d'onde avec un dioptre



# 1. Qu'est-ce qu'un rayon réfléchi ? Un rayon réfracté ?



## 2. Qu'est-ce qu'un indice de réfraction ?



$n_1$  = indice de réfraction du milieu incident

$n_2$  = indice de réfraction du milieu émergent

DIOPTRE = interface entre 2 milieux homogènes

### 3. Donner des valeurs typiques de l'indice de réfraction ?

**L'indice de réfraction est  
caractéristique d'un milieu**

Indice de réfraction de référence, dans le vide,  $n=1$ .

Dans le cadre de ce cours,  $n_{\text{air}} = n_{\text{vide}} = 1$ .

$$n_{\text{eau}} \approx 1,33$$

$$n_{\text{verre}} \approx 1,5$$

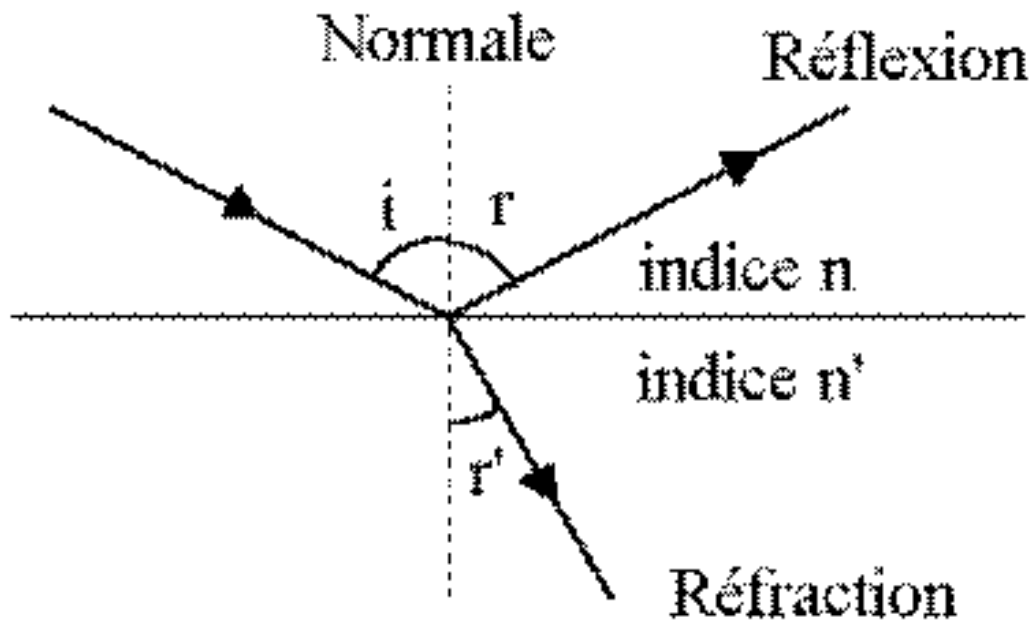
*D'ordinaire  $n$  est compris entre 1 et 6*

$$n = c / v$$

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide

$v$  : vitesse de la lumière dans le milieu

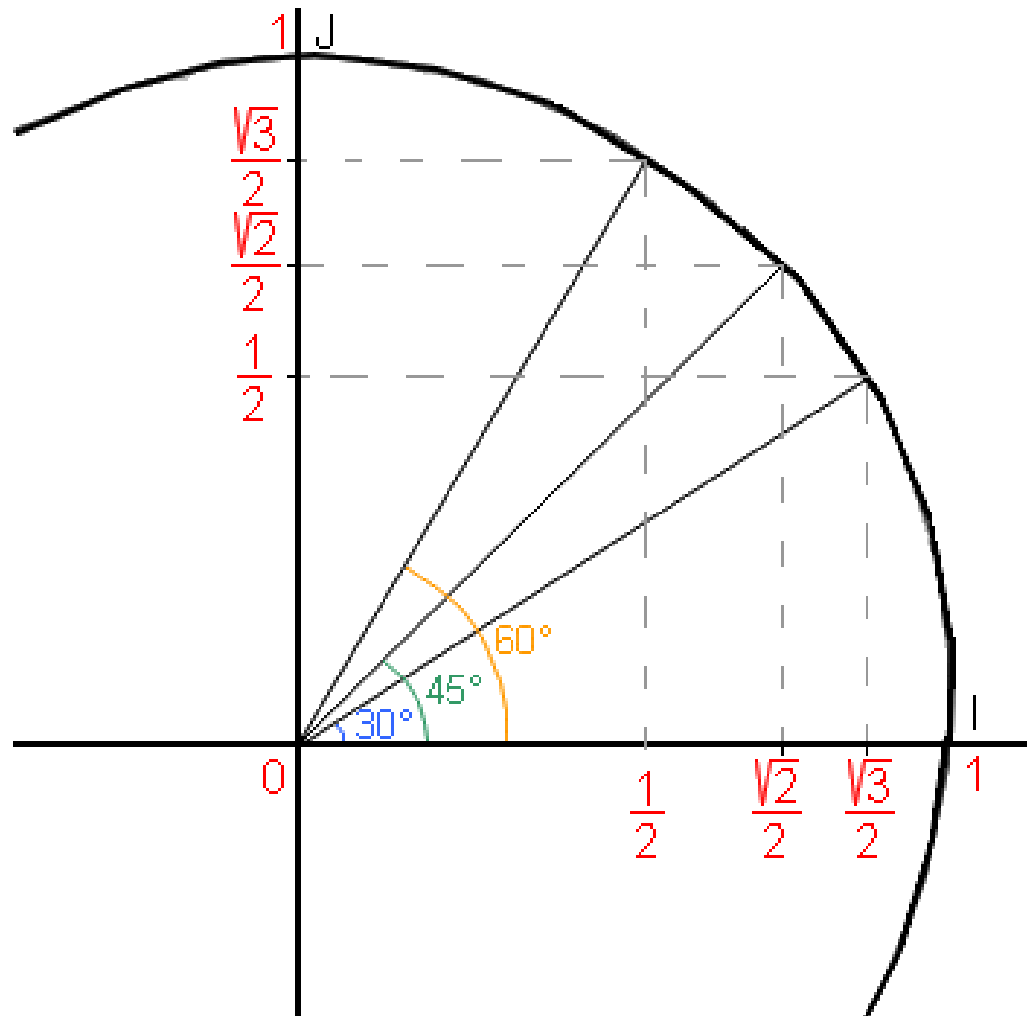
**4.** Donner les relations de Snell Descartes pour le schéma suivant ?



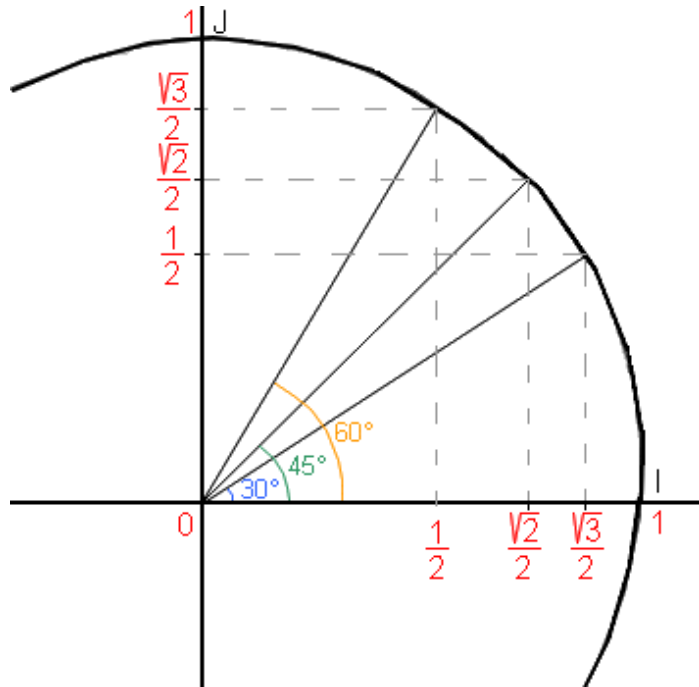
$$i = r$$

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

**5.** Que vaut le sinus de  $0^\circ$  ?  $30^\circ$  ?  $45^\circ$  ?  $60^\circ$  ?  $90^\circ$  ?



## 6. Approximation de sin, cos et tan aux petit angles ?



$$\sin \theta \approx \theta \text{ (en radians)}$$

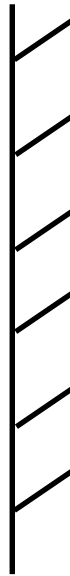
$$\cos \theta \approx 1$$

$$\tan \theta \approx \theta \text{ (en radians)}$$

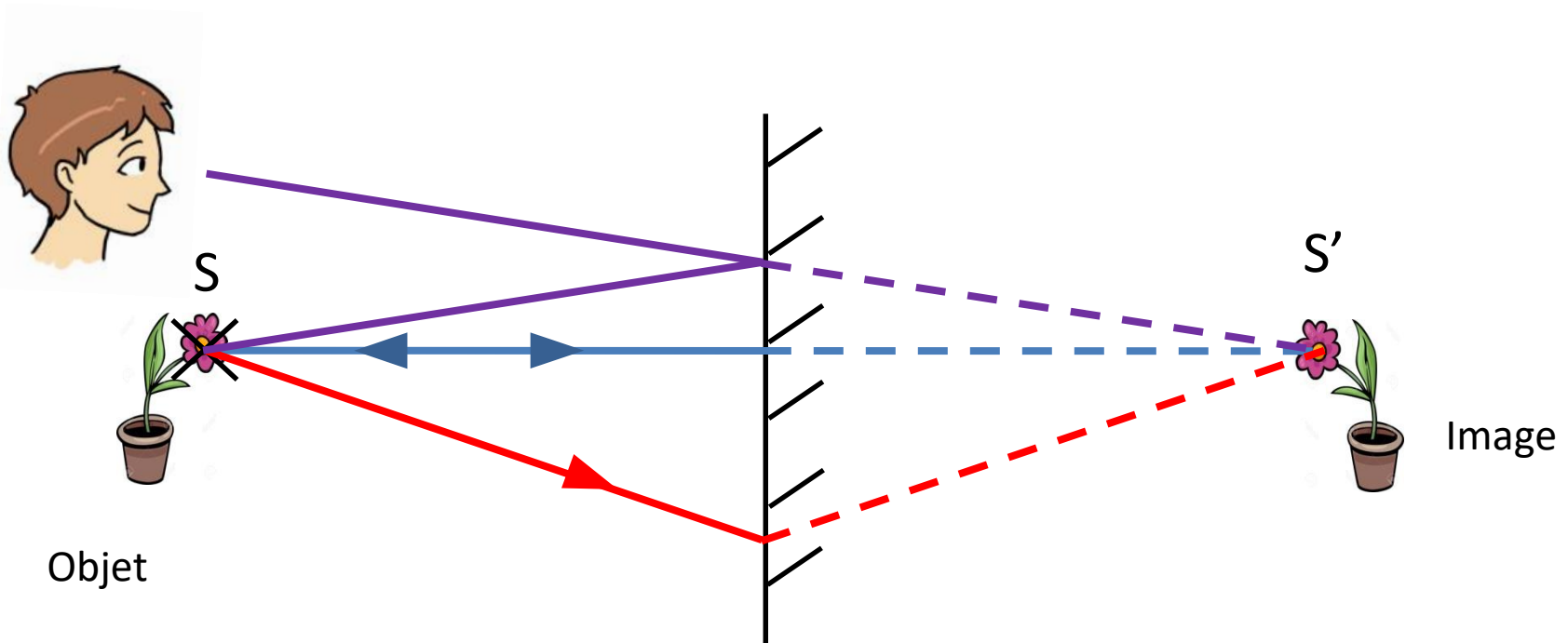
Exemple : faire le calcul  
pour  $5^\circ = 0,087 \text{ rad}$

## 7. En optique, comment représente-t-on un miroir ?

Miroir

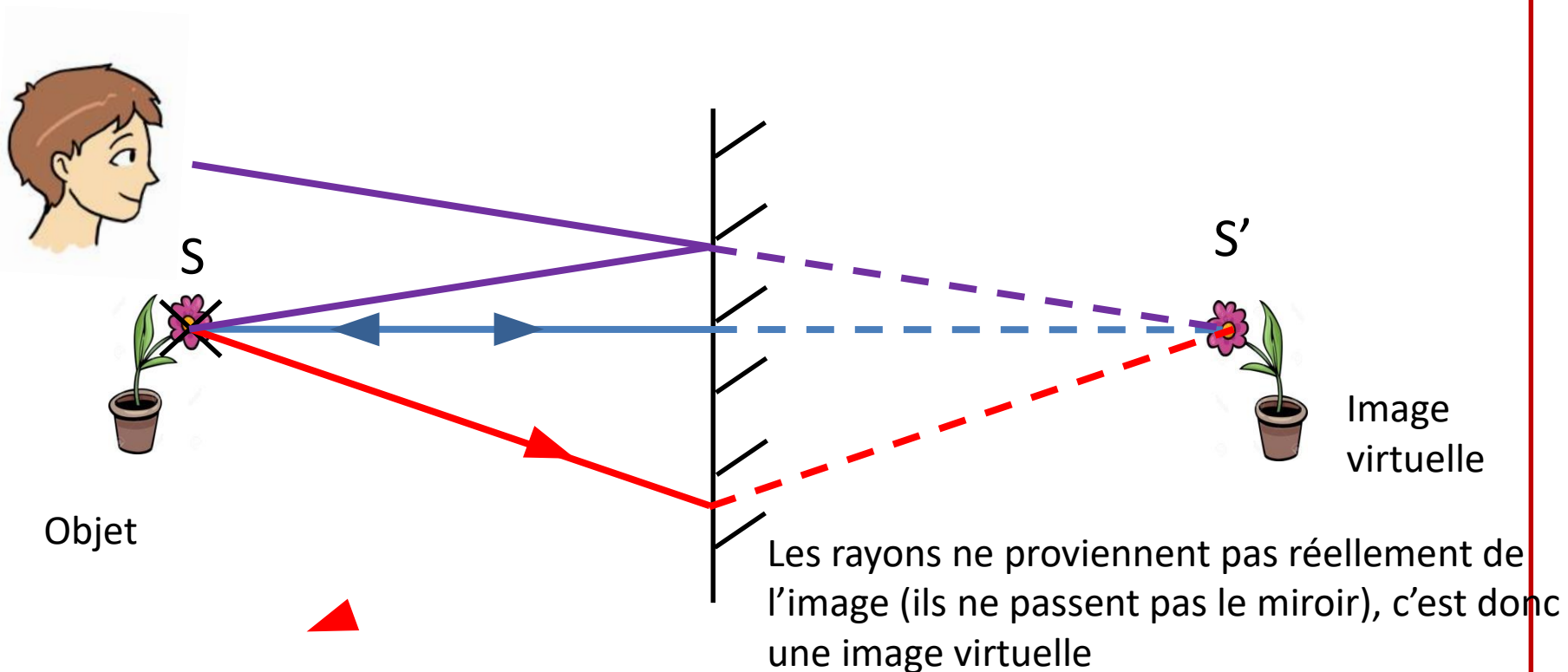


## 8. En optique, qu'est-ce qu'un objet ? Une image ?

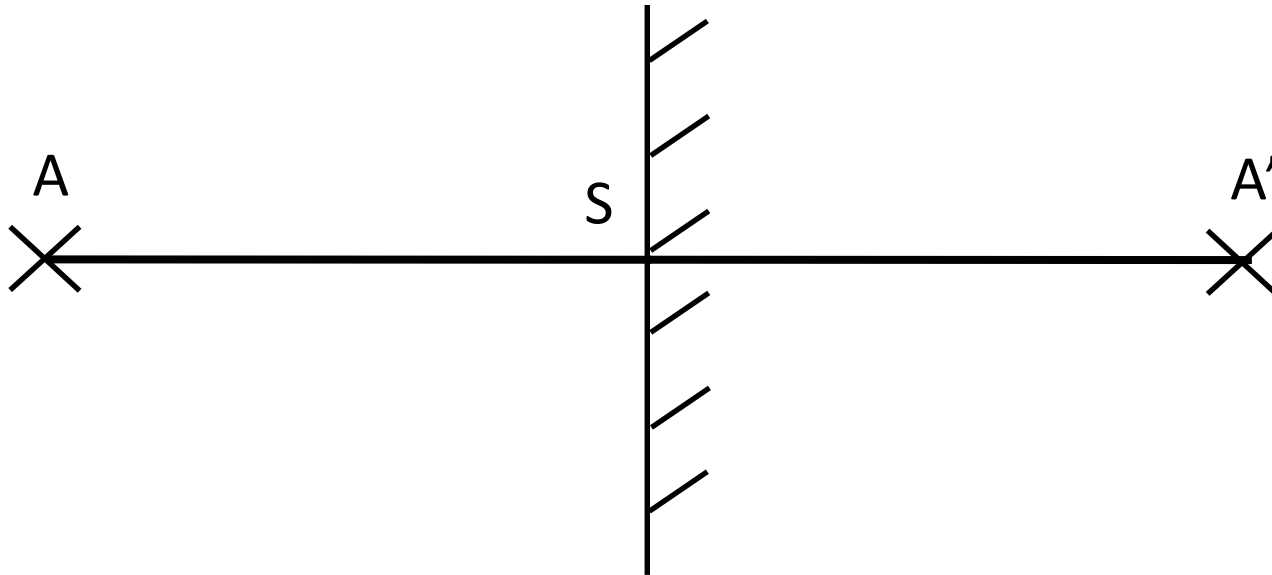




## 9. Qu'est-ce qu'une image virtuelle ?

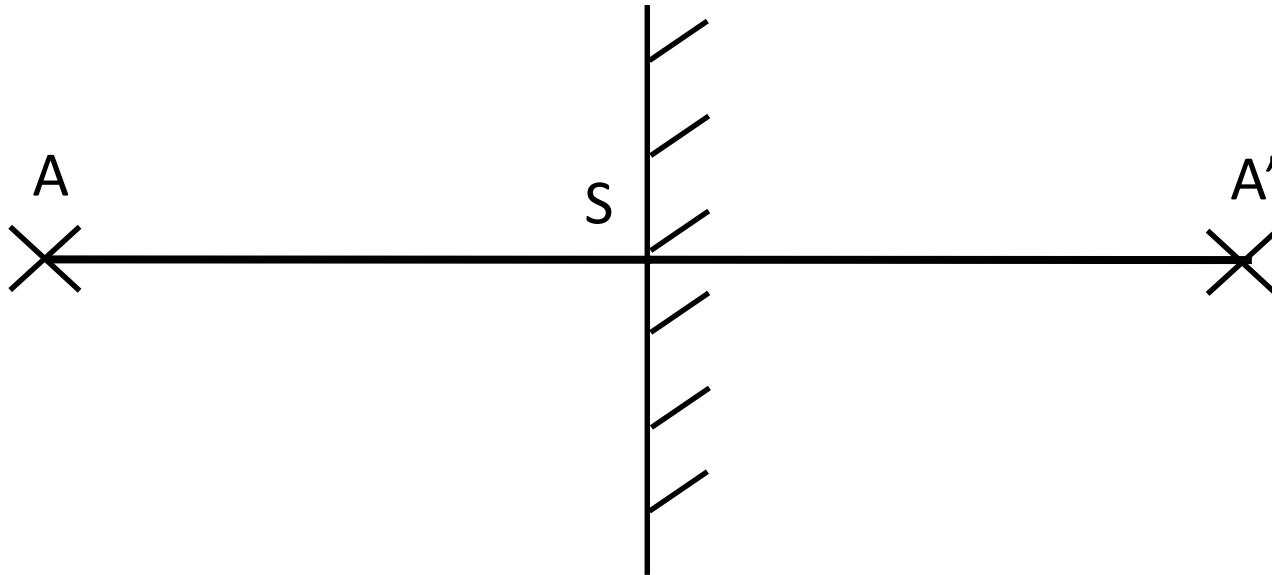


**10.** Qu'est-ce qu'une relation de conjugaison ?



Relation entre la position de l'objet et de l'image  
→ entre  $SA$  et  $SA'$ , en notation algébrique

**11.** Qu'elle est la relation de conjugaison du miroir plan ?



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

Relation de conjugaison du  
miroir plan

**12.** Quelle est la relation de conjugaison du dioptre plan ?

$$\overline{SA'} = \frac{n'}{n} \overline{SA}$$

Relation de conjugaison du dioptre plan

Pas besoin de le savoir par cœur (formulaire à l'examen)  
mais à savoir utiliser.

**13.** Exercice. Dioptre air/eau (1 et 1,33), poisson à 10 cm de la surface, où le pêcheur voit-il le poisson ?

$$\overline{SA'} = \frac{n'}{n} \overline{SA}$$

Objet = poisson

Rayon incident : rayon qui viennent du poisson

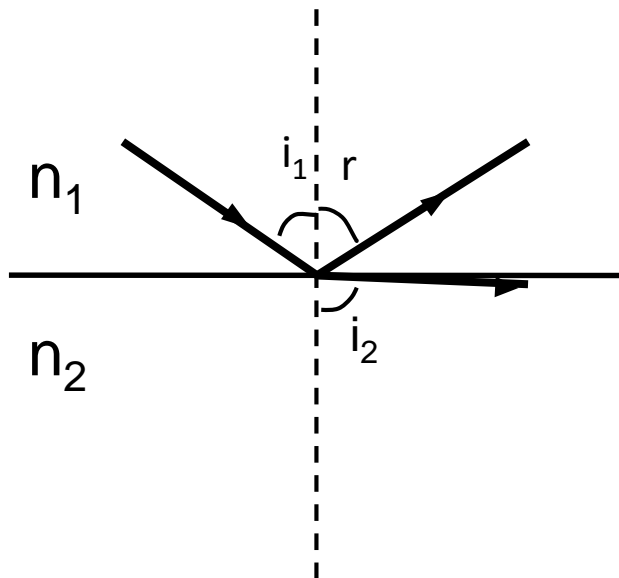
Donc indice  $n$  = indice du côté de l'objet/du poisson = 1,33

Indice  $n'$  = indice du côté de l'observateur = 1

$$SA' = 10 \text{ cm} * 1 / 1,33 = 7.5 \text{ cm environ}$$

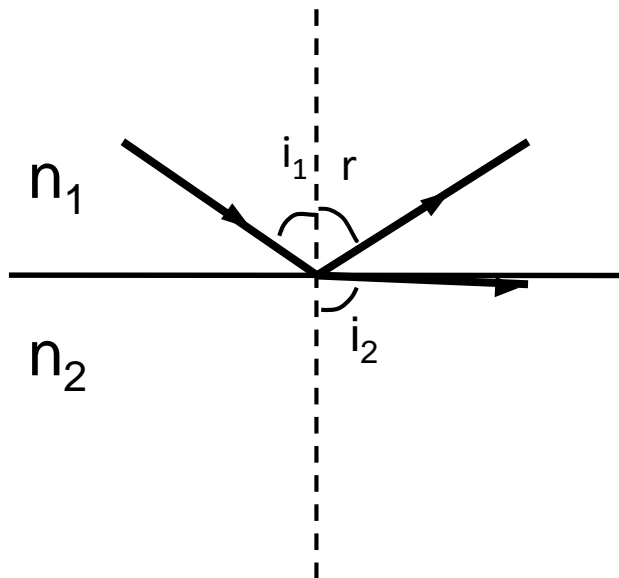
## 14. Qu'est-ce la réflexion totale ?

Réflexion totale



Seuls les rayons avec un angle d'incidence pas trop élevé nous parviennent dans l'eau, les autres autour sont réfléchis à la surface

# 15. Qu'est-ce que l'angle d'incidence limite ?



Angle incident limite pour  $i_2 = 90^\circ$

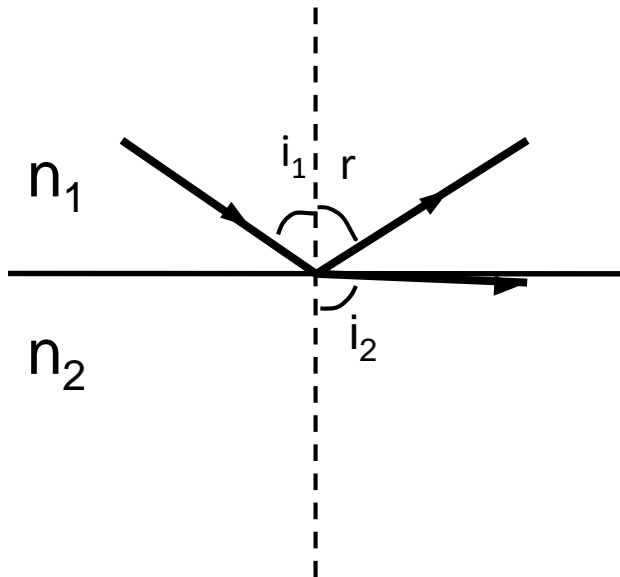
$$\sin i_2 = 1$$

$$\sin i_1 = n_2 / n_1$$

$i_1 = 48,8^\circ$  pour l'interface eau air

## 16. Comment calcule t on l'angle d'incidence limite ?

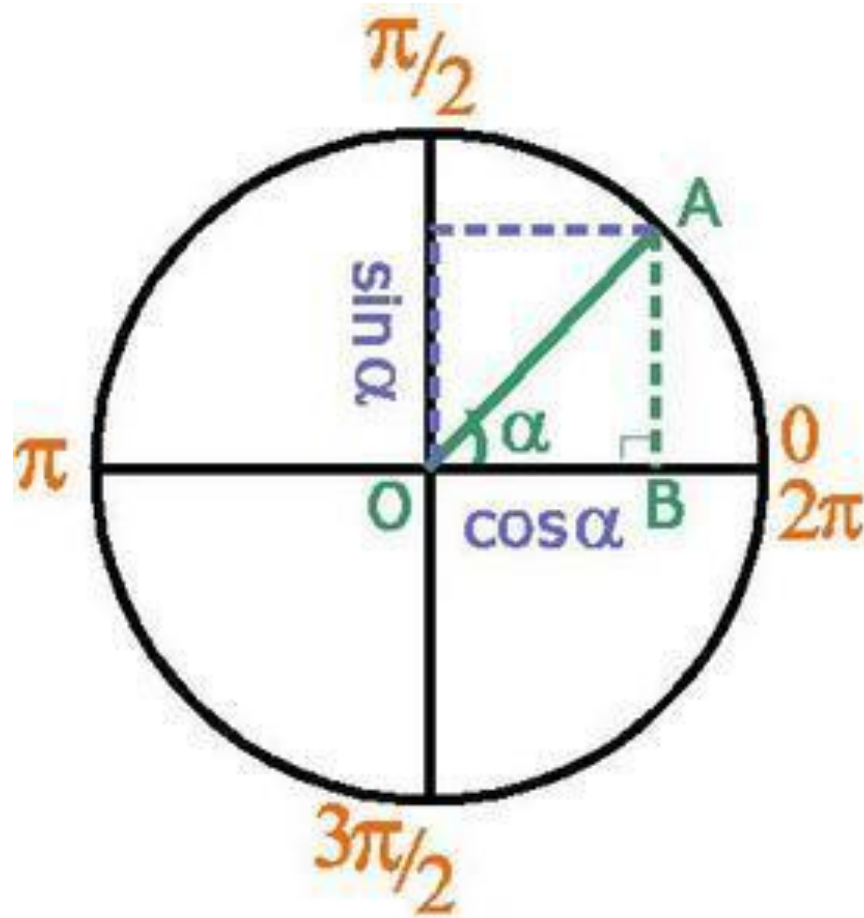
Exemple : interface air / eau (1,33)

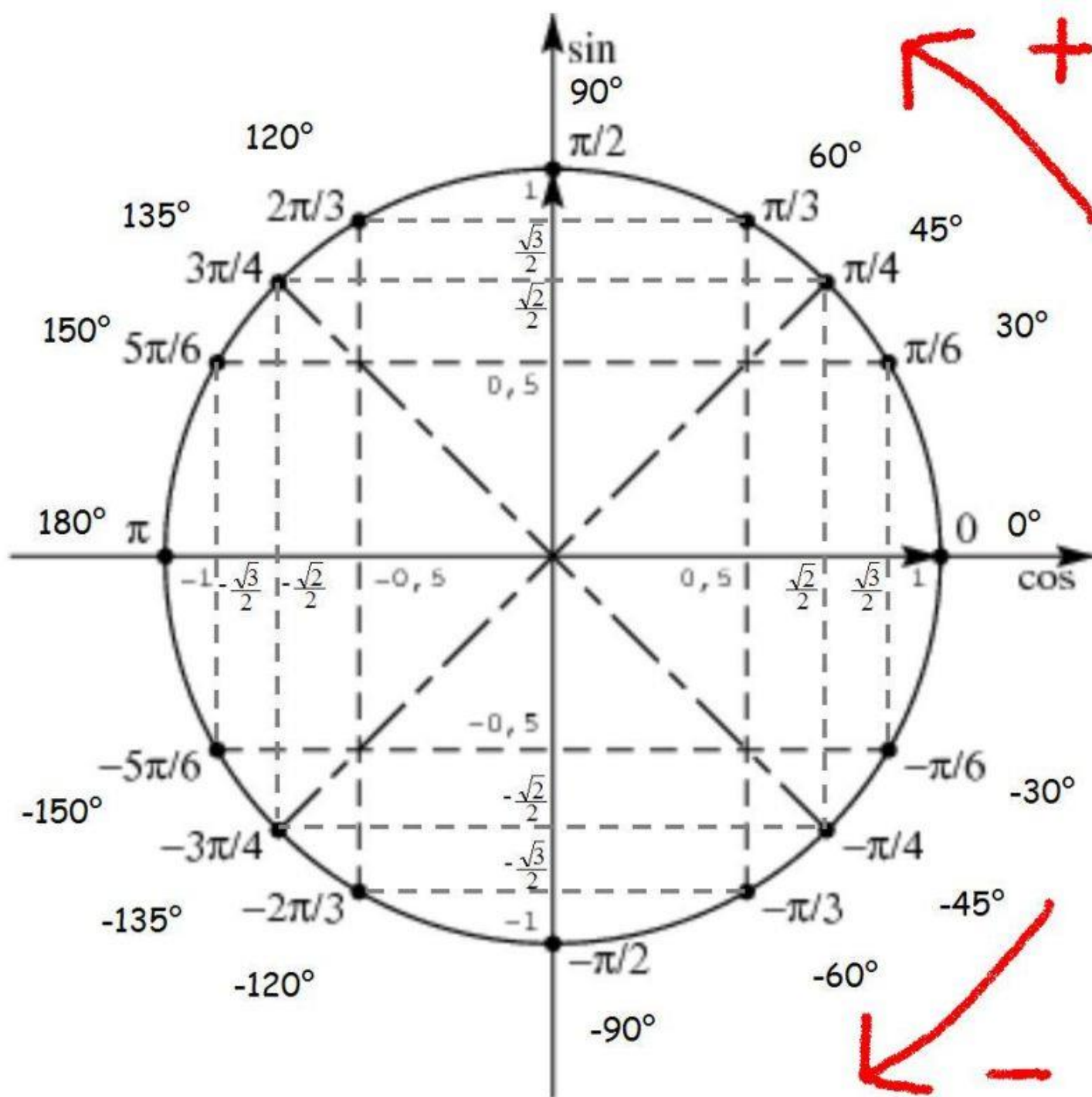


Angle incident limite pour  $i_2 = 90^\circ$   
 $\sin i_2 = 1$   
 $\sin i_1 = n_2/n_1$

$i_1 = 48,8^\circ$  pour l'interface eau air

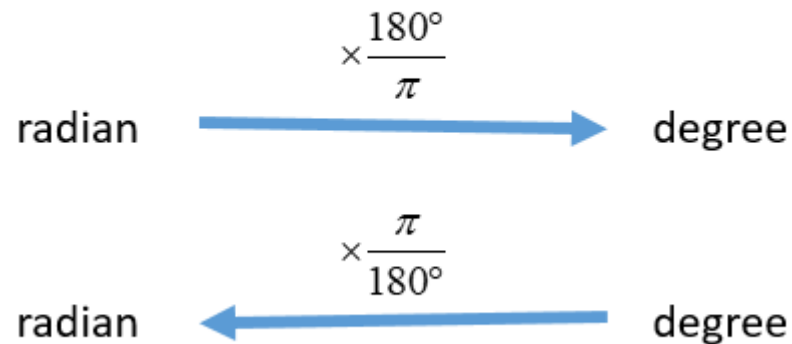




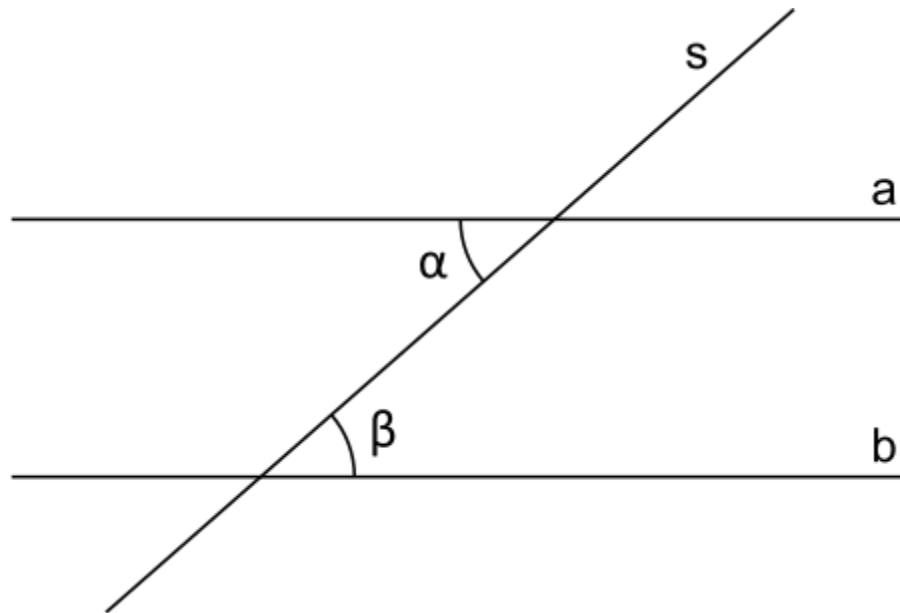


Degrés	0°	30°	45°	60°	90°	120°	135°	150°	180°	360°
Radians	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	$\pi$	$2\pi$

## Radian-Degree Conversion



## Angles alternes internes



Si  $a \parallel b$ ,  $\alpha = \beta$