

Introduction à l'optique géométrique :

La lumière



Objectifs

Ce chapitre est consacré d'une manière générale à l'étude de la lumière comme introduction à l'optique géométrique. L'objectif est avant tout de comprendre les phénomènes de base liés à la présence et la propagation de la lumière : réfraction, réflexion, dispersion, image réelle et virtuelle.

L'optique est l'étude de la fraction de l'énergie rayonnante sensible à la rétine, c'est-à-dire la "***lumière***" ou "***ondes électromagnétiques***". Le domaine de l'optique comporte trois sous domaines : la photométrie, l'optique géométrique et l'optique ondulatoire.

- 1) ***La photométrie*** : domaine des définitions des grandeurs relatives aux propriétés énergétiques des ondes électromagnétiques (sensibilité visuelle).
- 2) ***L'optique géométrique*** : domaine qui s'intéresse à la propagation de la lumière dans les milieux transparents sans faire intervenir la nature même de la lumière. S'appuie sur la notion de rayons lumineux.

- 3) **L'optique ondulatoire** : est la discipline qui étudie la lumière en la considérant comme étant une onde électromagnétique. L'optique ondulatoire s'attache plus particulièrement aux phénomènes affectant les ondes, comme les interférences et la diffraction.



Remarque : Domaine de validité de l'optique géométrique

L'optique géométrique ne permet pas d'expliquer tous les phénomènes lumineux. Elle s'applique aux objets qui interagissent avec la lumière et qui ont des tailles caractéristiques grandes devant la longueur d'onde du rayon lumineux. Quand la lumière diffuse ou passe à travers des objets dont la taille est du même ordre de grandeur (voir plus petits) que sa longueur d'onde, alors on entre dans le domaine de l'optique physique (interférences, diffraction).

I. Introduction

Pendant plusieurs siècles deux tendances se sont affrontées, pour expliquer la nature de la lumière ; onde ou corpuscule.

➤ **Au 10^{ème} siècle :**

Alhacen, Alhazen ou Ibn al-Haytham donne les premières explications et fondement de l'optique géométrique et physiologique.

➤ **Au 17^{ème} siècle :**

- Nature Corpusculaire pour expliquer la réflexion (Descartes, Newton).
- Nature Ondulatoire pour expliquer la diffraction (Grimaldi, Huygens).

➤ **Du 17^{ème} au 19^{ème} siècle :**

- Expériences validant l'aspect ondulatoire de la lumière (Fresnel, Maxwell)
- Expériences validant l'aspect corpusculaire de la lumière (Hertz, Einstein)

➤ **Au 20^{ème} siècle :**

- Dualité onde-corpuscule comme les électrons (Broglie, Heisenberg, Einstein)

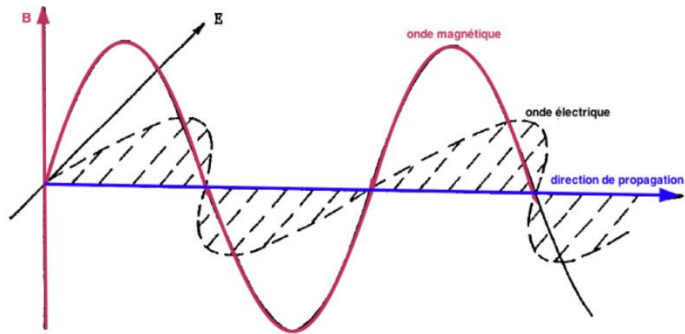


R. Dahmani

[Vidéo I_01](#) : Cette partie du cours est donnée sur la plateforme, sous la forme de vidéos illustratives, suivie par un quiz.

II. Qu'est-ce que la lumière ?

On appelle « lumière » le rayonnement auquel notre œil est sensible. La lumière visible est un ensemble de rayonnements appelés « **ondes électromagnétiques** » ; onde magnétique et onde électrique qui se propagent perpendiculairement l'une à l'autre. Les autres rayonnements électromagnétiques, comme les rayons **X** ou les rayons infrarouges, ne sont pas détectés par nos yeux. La propagation des ondes lumineuses ne nécessite pas de support matériel : la lumière se propage même **dans le vide**.

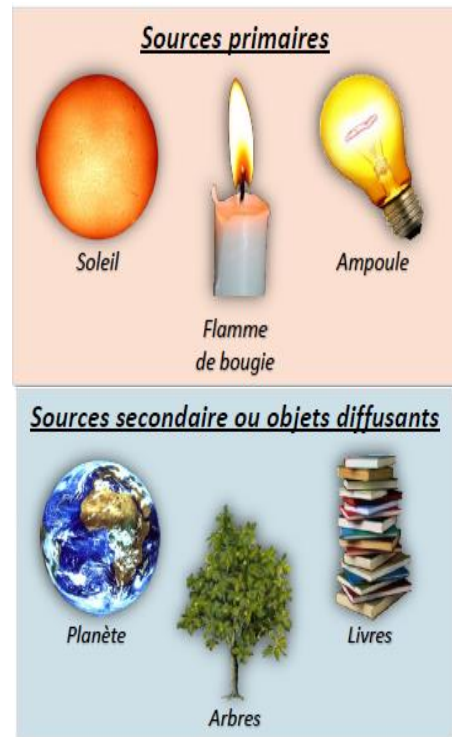


- **La célérité C** de la lumière dans le vide est une constante universelle de valeur approchée :
$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$
- Dans les milieux matériels, la lumière se propage moins vite que dans le vide. Les milieux transparents homogènes (mêmes propriétés en tout point), isotropes (mêmes propriétés dans toutes les directions) et non dispersifs, se caractérisent par leur indice de réfraction.

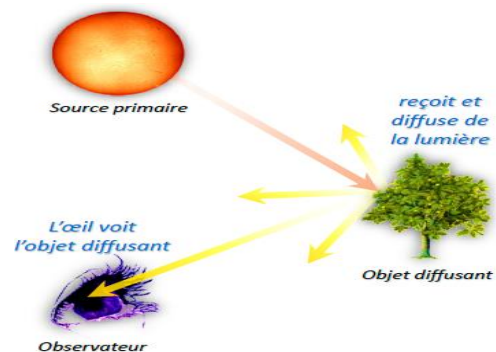
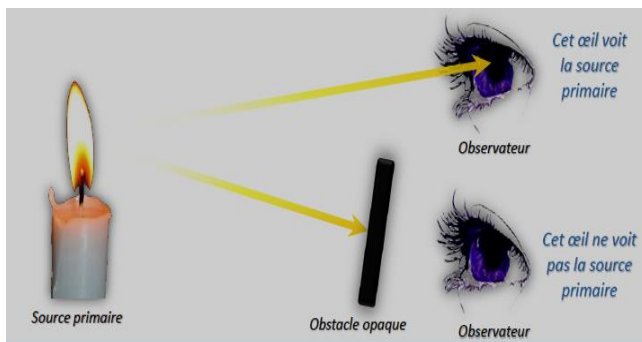
II.1 Sources de lumière

L'expérience nous enseigne que la lumière se propage en ligne droite (rayon lumineux) et que celle-ci provient toujours de "sources lumineuses". Certains objets sont lumineux par eux-mêmes ; ils **produisent de la lumière** (Soleil, flammes). Les autres objets lorsqu'ils sont éclairés renvoient de la lumière dans toutes les directions ; on dit ils **diffusent la lumière** qui les éclaire.

- **Un corps diffuse de la lumière** : veut dire que le corps absorbe toute (ou une partie de) la lumière qui l'illumine, et en réémet presque instantanément une partie dans toutes les directions.
- **Sources primaires ou naturelles** : Soleil, étoiles, foudre, aurore polaire, feu, ...
- **Sources artificielles** : filament à incandescence, laser, ...etc
- **Sources secondaires** : sources ou objets diffusant de la lumière.
- **Origine de la lumière** : incandescence, luminescence (tube fluorescent, écran TV, ...), passage du courant électrique à travers un gaz, réactions chimiques, fusion de l'hydrogène.
- **Condition de visibilité** :



Pour voir une source primaire, l'œil de l'observateur doit **recevoir de la lumière, issue de cette source**



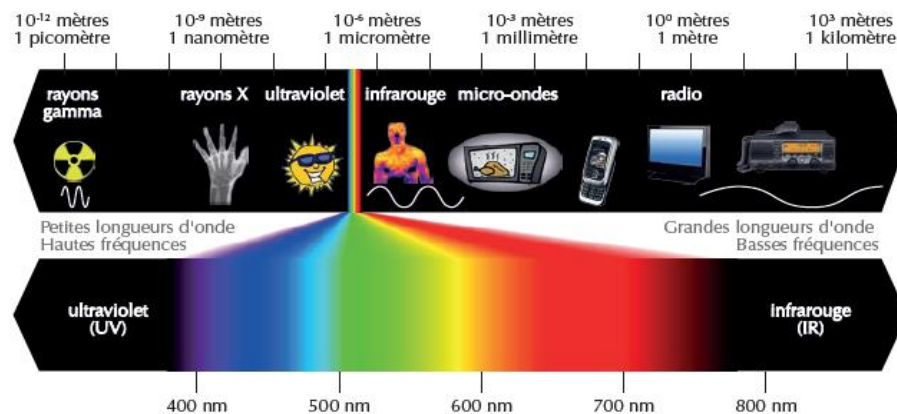
- **Rayon lumineux** : Un rayon lumineux est un objet théorique ; n'a pas d'existence physique. C'est un modèle de base utilisé dans l'optique géométrique, où tout faisceau de lumière est représenté par un ensemble de rayons lumineux. Le rayon lumineux est l'approximation de la direction de propagation de l'onde lumineuse ou des photons.
- ✓ Un "**rayon lumineux**" c'est toute droite suivant laquelle se propage la lumière.
- ✓ Un "**faisceau lumineux**" c'est un ensemble de rayons lumineux.
- ✓ Lorsque l'on considère l'onde lumineuse :

✓ Propriétés :

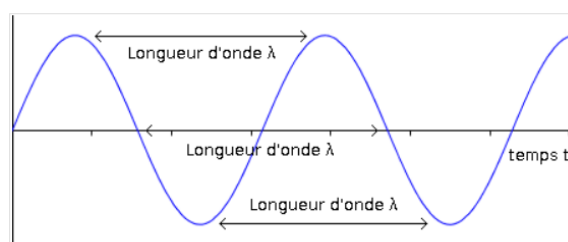
- Si la surface d'onde est un **plan** ; tous les rayons sont **parallèles entre eux**.
- Si la surface d'onde est **sphérique**, tous les rayons se dirigent **vers** un point, ou semblent **provenir** d'un point : on a un faisceau qui **converge** en un point, ou qui **diverge** à partir d'un point.

II.2 Le spectre de la lumière blanche









La **lumière blanche** résulte de la **superposition** d'un ensemble continu de radiations monochromatiques. Les longueurs d'onde dans le vide de la lumière visible s'étalent de **400 nm** à **800 nm**.



- Une lumière **monochromatique** est une radiation ayant *une longueur d'onde* et de *fréquence* bien définie, fixée par la source, qui ne dépend pas du milieu de propagation.



- À une **fréquence** déterminée, correspond une **couleur** déterminée.

Désignation	Couleur	Longueur d'onde (nm)	Fréquence (THz)
Rouge		~ 625 - 740	~ 480 - 405
Orange		~ 590 - 625	~ 510 - 480
Jaune		~ 565 - 590	~ 530 - 510
Vert		~ 520 - 565	~ 580 - 530
Cyan		~ 500 - 520	~ 600 - 580
Bleu		~ 450 - 500	~ 670 - 600
Indigo		~ 430 - 450	~ 700 - 670
Violet		~ 380 - 430	~ 790 - 700

- Nous nommons "**couleur**" la perception d'une excitation lumineuse suite à un processus neuro-photochimique par l'œil d'une ou plusieurs *fréquences d'ondes lumineuses*.
- Il est important de ne jamais confondre "**couleur**", notion perceptive, et "*longueur d'onde*", notion physique.
- Une **lumière polychromatique** est constituée de radiations de fréquences différentes.

Exemples : la lumière laser est monochromatique, la lumière blanche est polychromatique.

III. Propagation de l'onde lumineuse dans les milieux

L'onde lumineuse résulte de la propagation d'une perturbation de nature électromagnétique dans les milieux transparents.

- La lumière peut traverser un objet **transparent** mais pas un objet **opaque**. Certains matériaux, comme le verre ou l'air, laissent passer la lumière : ce sont des **matériaux transparents**.
- D'autres matériaux, comme le bois et le fer, ne laissent pas passer la lumière : ce sont des **matériaux opaques**.
- D'autres matériaux, comme le miroir, réfléchissent la lumière : ce sont des **matériaux réfléchissants**.

III.1 Longueur d'onde d'une lumière monochromatique

La longueur d'onde λ (en m) d'une lumière monochromatique en propagation dans le vide dépend de la période T (en s) et de la fréquence f (en Hz) de l'onde par :

$$\lambda = C.T = C / f.$$

C : célérité de la lumière dans le vide (en m.s-1).

- Dans un milieu matériel, on remplace la **célérité C** dans le vide par la **célérité V** dans le milieu.
- **Contrairement** à la période et à la fréquence, propriétés intrinsèques à l'onde, la **longueur d'onde** dépend du milieu de propagation.
- Quand une lumière laser passe d'un milieu à un autre, sa longueur d'onde change ! En revanche, sa couleur reste la même.

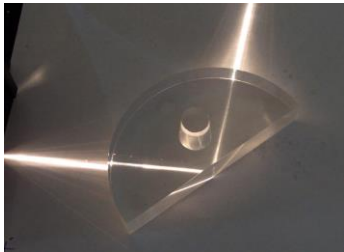

III.2 Caractéristique des milieux de propagation


Dans ce cours, on se limitera à l'étude de la propagation de la lumière dans des milieux homogènes transparents et isotropes (HTI).

- **Transparent** : le terme transparent fait référence ici à un milieu non absorbant.
- **Homogène** : les propriétés du milieu sont les mêmes en tout point de l'espace.
- **Isotrope** : les propriétés du milieu sont les mêmes dans toutes les directions.

III.3 Interaction lumière-matière

Quand la lumière rencontre un milieu homogène, isotrope et transparent on peut observer les phénomènes :

Réflexion		Une interaction lumière-matière conduisant à une déviation de la trajectoire de la lumière du même côté du corps d'où elle est venue.
Réfraction		Une interaction lumière-matière conduisant à une déviation de la trajectoire de la lumière au moment où elle traverse deux milieux transparents.

Dispersion		Une interaction lumière-matière conduisant à la décomposition de la lumière blanche en ses différentes composantes.
-------------------	---	---




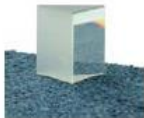

III.3 Interaction lumière - milieu : Indice de réfraction d'un milieu

L'Interaction Lumière-Matière (milieu) est définie par une seule grandeur physique : vitesse de la lumière V dans le matériau.

L'indice « n » d'un milieu transparent homogène, isotrope et non dispersif, est le rapport de la célérité de la lumière dans le vide à la célérité de la lumière dans ce milieu :

$$n = \frac{c}{v} \quad \left| \begin{array}{l} n \text{ indice du milieu (sans unité)} \\ c \text{ célérité de la lumière dans le vide (m.s}^{-1}\text{)} \\ v \text{ célérité de la lumière dans le milieu (m.s}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

Quelques indices :

Air  $n = 1,0003$	Eau  $n = 1,33$	Plexiglas  $n = 1,49$	Verre crown  $n = 1,52$	Diamant  $n = 2,42$
--	--	--	---	--



Remarque :

La longueur d'onde d'une radiation dans un milieu « n » est donnée par : (λ_0 = longueur d'onde dans le vide)

$$\lambda = \lambda_0 / n$$

IV. Les lois de l'optique géométrique

Toute l'optique géométrique est basée sur le principe de Fermat (1657). En effet, de ce dernier découle la notion de rayon lumineux ainsi que les lois de la réflexion et de la réfraction, dites lois de Snell-Descartes. (Vidéo :I_02)

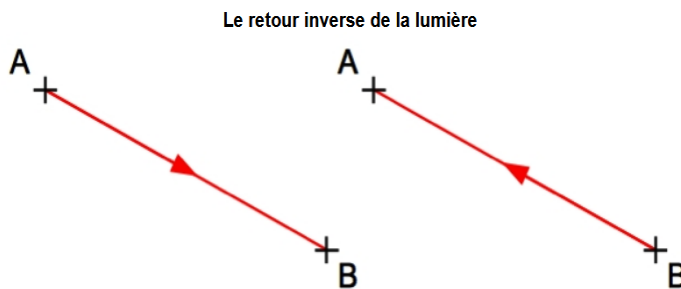
IV.1 Enoncé du principe de FERMAT

La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours est minimale.

Donc, le chemin suivi par la lumière pour aller d'un point à un autre est celui pour lequel le temps de parcours est minimum (en toute rigueur extrémum).

Ce principe admet deux conséquences immédiates :

- Dans un milieu transparent et homogène la lumière se propage en ligne droite. C'est le principe de *propagation rectiligne de la lumière*.
- Le trajet suivi par la lumière est *indépendant du sens de parcours*. C'est le principe du retour inverse de la lumière. Le trajet de la lumière ne dépend pas de son sens de parcours. Le chemin le plus court pour aller de B vers A est aussi la même ligne droite que précédemment. Le temps de parcours dans ce sens est aussi minimal (c'est le même).



L'étude d'un système optique pourra tout aussi bien se faire en partant de l'entrée comme de la sortie.

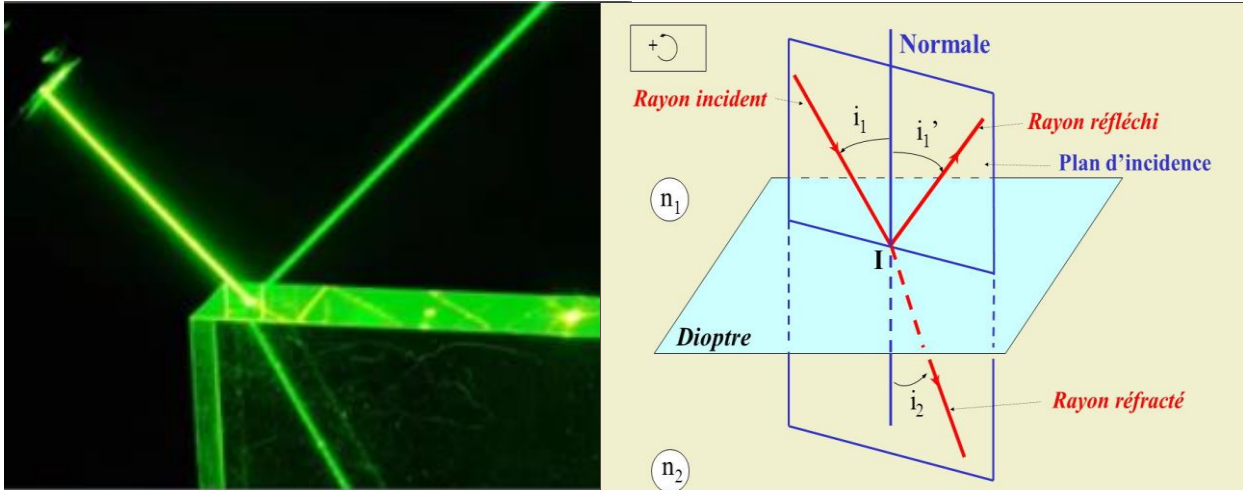
VI.2. Les lois de Snell Descartes.

Les lois de Snell Descartes découlent du principe de Fermat. Elles régissent le comportement d'un rayon lumineux à la surface de séparation de deux milieux transparents différents (dioptre).

Considérons :

- Un rayon lumineux (appelé rayon incident) arrivant en un point I (appelé point d'incidence) situé sur la surface d'un dioptre séparant deux milieux d'indices n_1 et n_2 .
- Ce rayon est alors **scindé** en deux parties d'intensités différentes :
 - ✓ Un rayon, dit rayon **réfléchi**, qui se propage dans le milieu d'indice n_1 ,
 - ✓ Un rayon se propageant dans le milieu d'indice n_2 , qualifié de **réfracté**.

- On repère par les angles i_1 (angle d'incidence), i'_1 (angle de réflexion) et i_2 (angle de réfraction). Les inclinaisons des trois rayons relativement à la normale au dioptre en I
- Le plan défini par la normale au dioptre et le rayon incident est appelé plan d'incidence.



Les lois de Snell-Descartes (au nombre de trois) sont les suivantes :

1. *Le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.*
2. $i_1 = -i'_1$
3. $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$



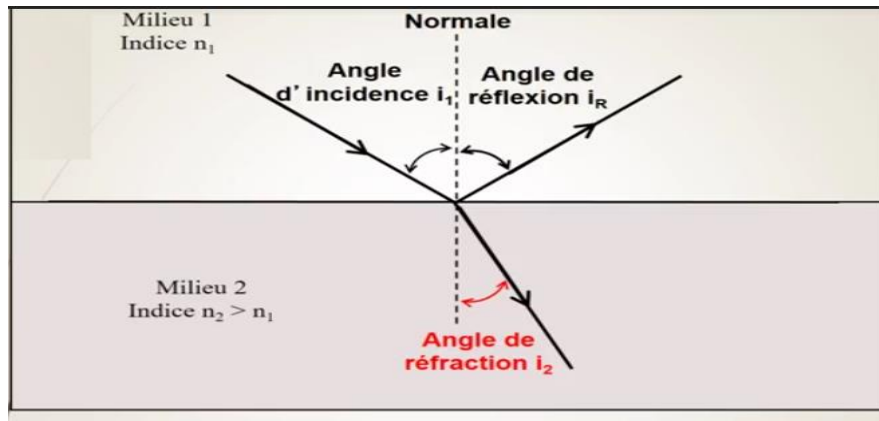
Remarques : [Vidéo :I 03 /](#)

- Les angles considérés sont des angles orientés.
- n_1 et n_2 étant positifs, i_1 et i_2 sont de même signe.
- Les rayons incident et réfracté sont toujours de part et d'autre de la normale.
- Tout rayon **incident normal** au dioptre n'est pas réfracté.
- Le principe du **retour inverse** de la lumière : le trajet de la lumière est **indépendant** du sens de la propagation.
- Lorsque l'angle d'incidence est faible, l'angle de réfraction l'est aussi. Alors on peut dire que : $n_1 i_1 = n_2 i_2$ (*loi de Kepler*).

- **Cas possibles :**

✓ Si $n_2 > n_1$ alors $i_2 < i_1$; le rayon réfracté se rapproche de la normale.

($i_2 < i_1$) \longrightarrow ($\sin i_2 < \sin i_1$) les angles i_1 et i_2 étant compris entre 0 et $\pi/2$, sinus et angles varient dans le même sens, soit $i_2 < i_1$. Le rayon réfracté se rapproche donc de la normale.



Lorsque i_1 augmente, i_2 augmente aussi tout en restant inférieure à i_1 .

A l'incidence rasante ($i_1 = \pi/2$), l'angle de réfraction est maximal (**angle de réfraction limite noté i_{2c}**) et vaut :

$$\sin i_{2c} = n_1 / n_2$$

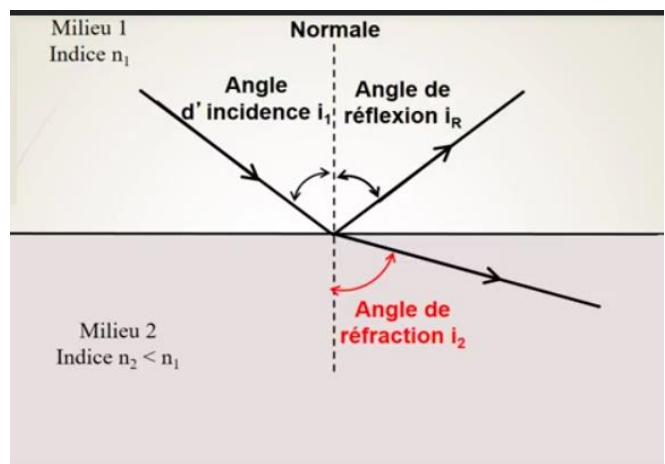
✓ Si $n_2 < n_1$ alors $i_2 > i_1$; le rayon réfracté s'éloigne de la normale.

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

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

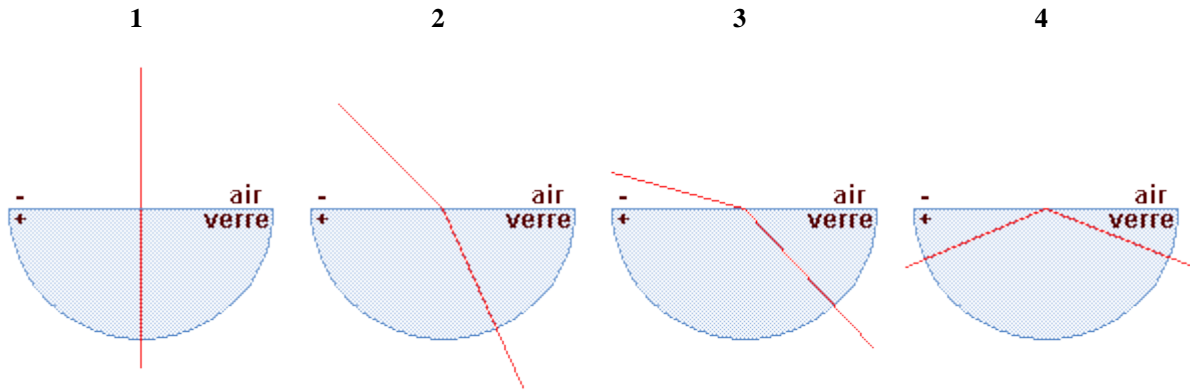
$$\sin i_{1c} = n_2 / n_1$$

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



Exemple : Vidéo : I_04

Dirigeons un fin faisceau lumineux **de l'air dans le verre** et **du verre dans l'air**; le faisceau lumineux venant du bas et dirigé vers le centre du demi-cylindre n'est pas dévié car il est normal à la surface du verre, il figure donc la lumière passant du verre dans l'air.



Un **rayon normal** au dioptre **n'est pas dévié**.

Un **rayon oblique** au dioptre et venant de l'air se réfracte en **se rapprochant** de la normale au point d'incidence.

Un **rayon oblique** au dioptre et venant du verre se réfracte en **s'écartant** de la normale au point d'incidence.

Plus l'amplitude de l'**angle d'incidence** augmente, plus l'amplitude de l'**angle de réfraction** augmente.

Le **retour inverse de la lumière**: la lumière conserve les mêmes directions qu'elle passe de l'air dans le verre ou du verre dans l'air.

Lorsque la lumière passe du verre dans l'air, elle ne se réfracte plus vers l'air si l'amplitude de l'angle d'incidence est supérieure à une certaine valeur limite: elle **se réfléchit totalement** dans le verre.

Le verre est plus **réfringent** que l'air (sur les schémas, + pour le verre et - pour l'air) ; la **réfringence** d'un milieu transparent est indiquée par son **indice de réfraction : n** (voir plus haut).