



**Université Internationale
de Casablanca**

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

UNIVERSITÉ RECONNUE PAR L'ÉTAT

Cours d'Optique géométrique

Filière CPI1

Semestre S2



**Université Internationale
de Casablanca**

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

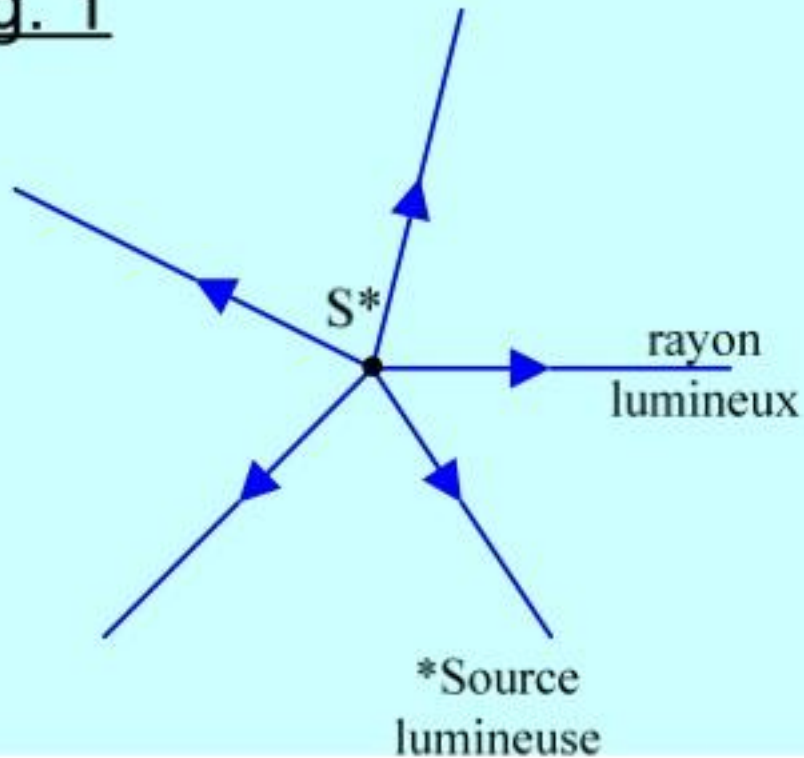
UNIVERSITÉ RECONNUE PAR L'ÉTAT

Chapitre 2

Réflexion – réfraction: Lois de Snell- Descartes

La lumière est représentée par des “rayons lumineux” :

Fig. 1



1-1- Propriétés

- Principe de Fermat

Le chemin suivi par la lumière est celui qui prend le moins de temps.

- Principe de retour inverse

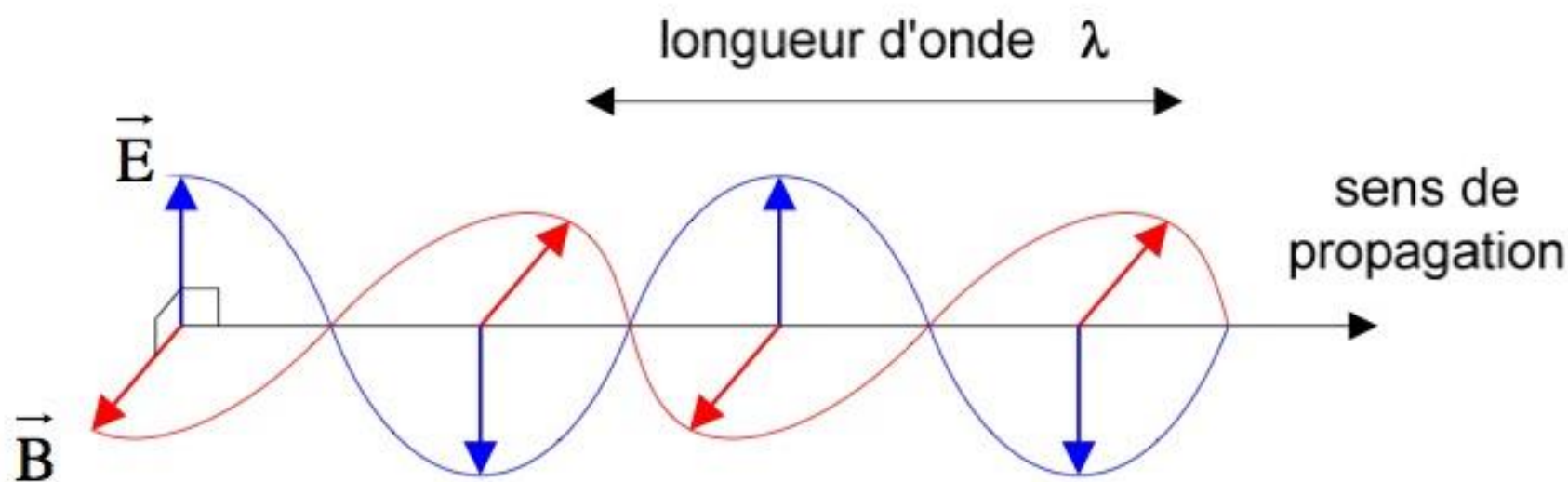
Le chemin suivi par la lumière est indépendant du sens de parcours.

- Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.

L'Optique est la partie de la physique qui étudie les propriétés de la lumière.

Les ondes électromagnétiques

Les ondes EM sont formées d'un champ électrique **E** et d'un champ magnétique **B** (fig. 1) :



1-1- Caractéristiques d'une onde EM

- fréquence f [Hz]
- célérité (vitesse de propagation) c [m/s]
- longueur d'onde λ [m]
- intensité [W/m²]

La longueur d'onde est la distance parcourue en une période :

$$\lambda = cT = c/f$$

c et λ dépendent du milieu de propagation :

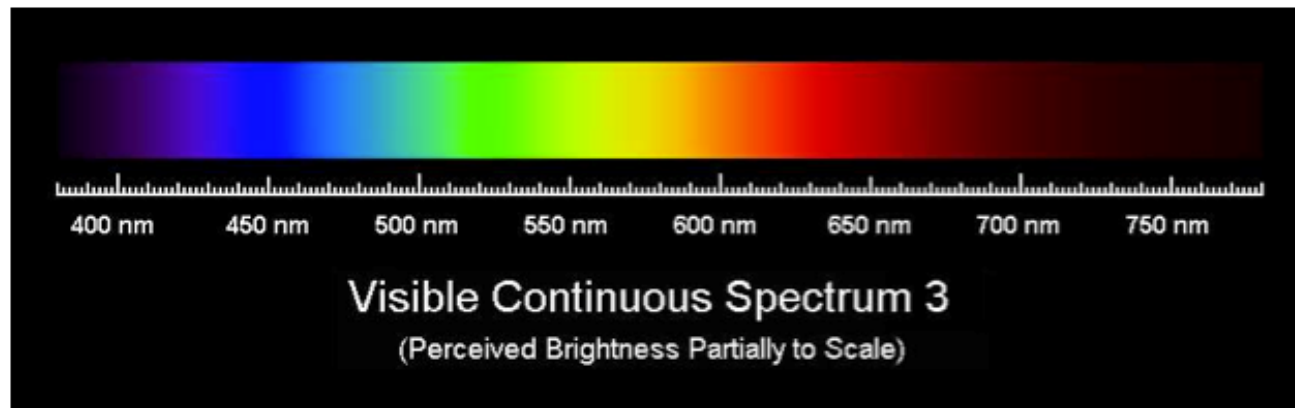
- dans le vide : $c_0 = 299\,792\,458$ m/s ($\approx 300\,000$ km/s)
- $c \leq c_0$
- $\lambda \leq \lambda_0$

1-2- Classification des ondes EM (tableau 1)

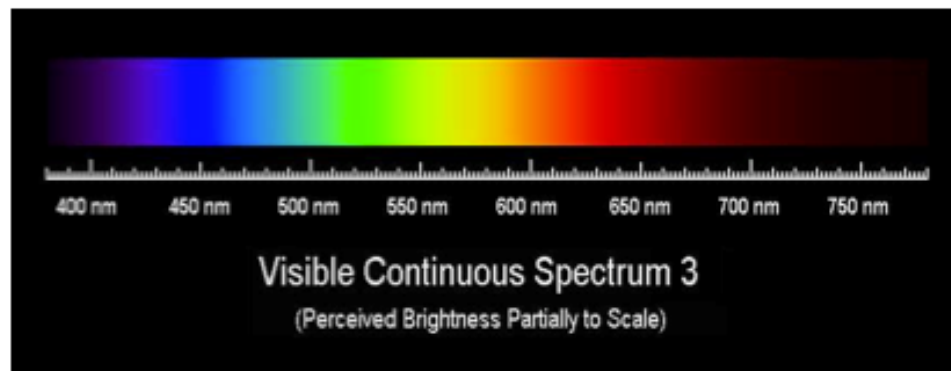
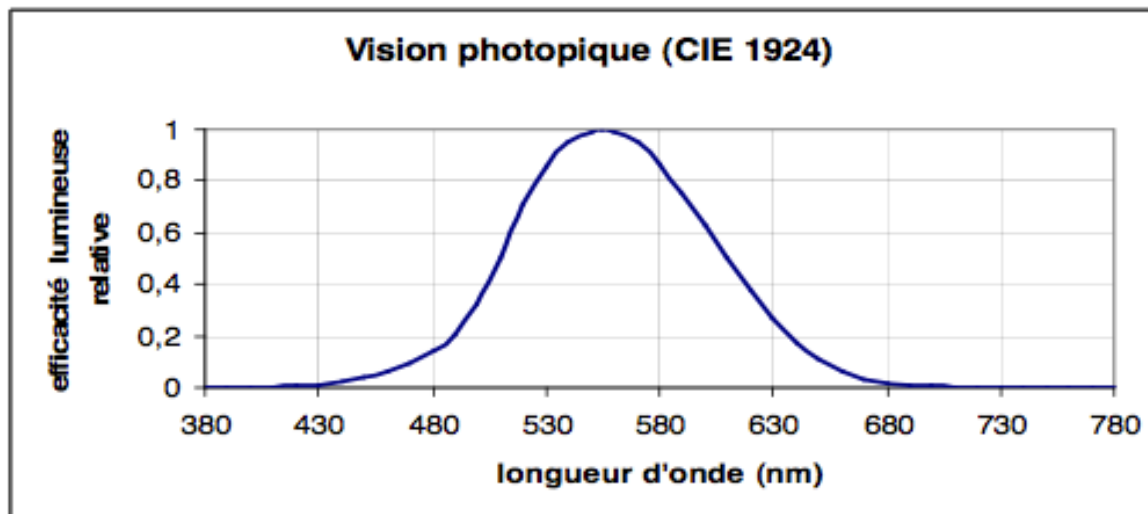
Fréquence f	Longueur d'onde λ_0	Domaine
< 300 kHz	> 1 km	Basse fréquence : réseau électrique EDF 50 Hz, réseau téléphonique, radio GO
300 kHz – 3 MHz	1000 m – 100 m	Moyenne fréquence : radio PO
3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	Haute fréquence (HF)
30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m	Très haute fréquence (VHF) : radio FM, télévision
300 MHz – 3 GHz	100 cm - 10 cm	Ultra haute fréquence (UHF) : télévision, téléphonie mobile, Wifi
3 GHz – 10 GHz	10 cm – 3 mm	Hyperfréquence (SHF) : radar
10 GHz – 600 GHz	3 mm – 0,5 mm	Micro-ondes : four à micro-ondes
600 GHz – $4 \cdot 10^{14}$ Hz	0,5 mm – $0,76 \mu\text{m}$	Infrarouge (IR) : rayonnement thermique
$4 \cdot 10^{14}$ Hz – $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz	$0,76 \mu\text{m}$ – $0,4 \mu\text{m}$	Lumière visible : rouge au violet
$7,5 \cdot 10^{14}$ Hz – $3 \cdot 10^{16}$ Hz	400 nm – 10 nm	Ultraviolet (UV)
$3 \cdot 10^{16}$ Hz – $3 \cdot 10^{20}$ Hz	10^{-8} m – 10^{-12} m	Rayons X
$3 \cdot 10^{20}$ Hz – $3 \cdot 10^{22}$ Hz	10^{-12} m – 10^{-14} m	Rayons γ (gamma)
> $3 \cdot 10^{22}$ Hz	< 10^{-14} m	Rayons cosmiques

1-3- Correspondance entre fréquence et couleur (tableau 2)

Fréquence (Hz)	Longueur d'onde λ_0	Couleur
$7,5 \cdot 10^{14}$	400 nm	Violet extrême
	420 nm	Violet
	440 nm	Indigo
$6,25 \cdot 10^{14}$	480 nm	Bleu
	500 nm	Bleu-Vert
	520 nm	Vert
	560 nm	Vert-Jaune
	580 nm	Jaune
$5 \cdot 10^{14}$	600 nm	Orange
	620 nm	Rouge moyen
	650 nm	Rouge
$4 \cdot 10^{14}$	760 nm	Rouge extrême



1-4- Courbe de sensibilité de l'œil (fig. 2)



Maximum de sensibilité : 555 nm (vert-jaune)

1-5- Sources de lumière

- Lumière monochromatique

C'est une lumière composée d'une seule longueur d'onde.

Ex. : Laser

Lampe à vapeur de sodium ...

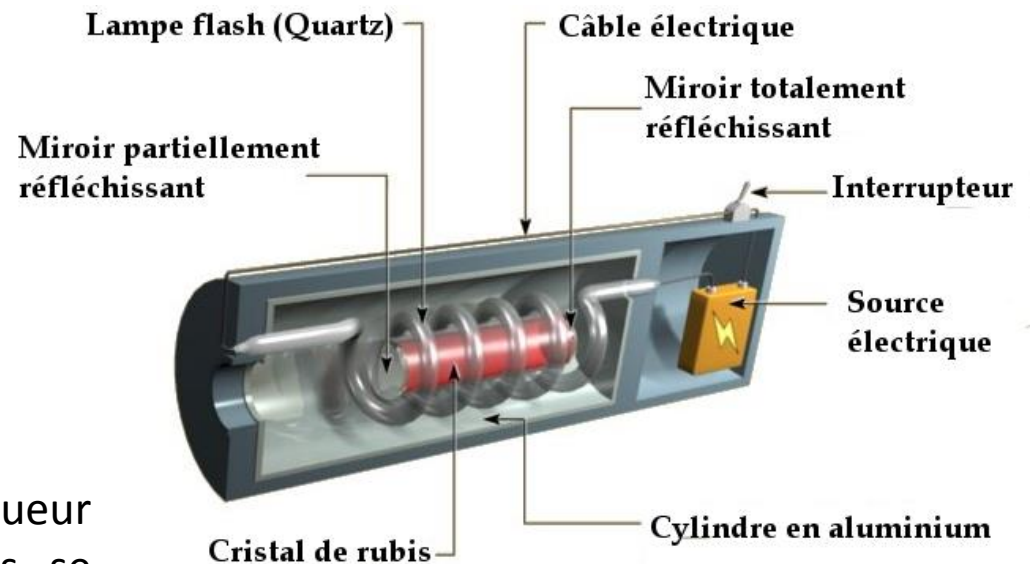


LASER *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement

C'est un faisceau cohérent de longueur d'onde uniforme dont les particules se déplacent toutes dans la même direction. C'est par exemple ce qui permet d'avoir un point lumineux de taille quasiment identique à n'importe quelle distance de la source d'émission contrairement à une lampe classique qui éclaire une large surface

Le principe consiste à exciter des électrons au moyen d'une source d'énergie. Ces électrons retournent à leur état fondamental en émettant des photons. Ceux-ci sont réfléchit par deux miroirs disposé en face à face, jusqu'à ce que le faisceau soit suffisamment puissant pour traverser le miroir semi réfléchissant.



- Lumière polychromatique

C'est un mélange de lumières monochromatiques.

Ex. : Lumière blanche (lumière du jour, ampoule ...)

Soleil, LED ...



1-6- Indice de réfraction d'un milieu transparent

Définition : $n = c_0/c$

- Indice de réfraction du vide : $n_0 = 1$
- $n \geq 1$
- $n_{\text{air}} \approx 1,000\ 3$
- $n_{\text{eau}} \approx 1,33$ ($c_{\text{eau}} \approx 225\ 000\ \text{km/s}$)
- $n_{\text{verre}} : 1,5 \text{ à } 1,9$

- $n(\lambda)$: l'indice de réfraction dépend de la couleur (sauf dans le vide)



Remarque : $\lambda = \lambda_0 / n$

- $\lambda_{\text{air}} \approx \lambda_0$

- Laser He-Ne : $\lambda_{\text{air}} = 632,8 \text{ nm (rouge)}$

$$\lambda_{\text{eau}} = 632,8 / 1,331 = 475 \text{ nm (rouge)}$$

Théorie corpusculaire de la lumière

La lumière est constituée de particules élémentaires :

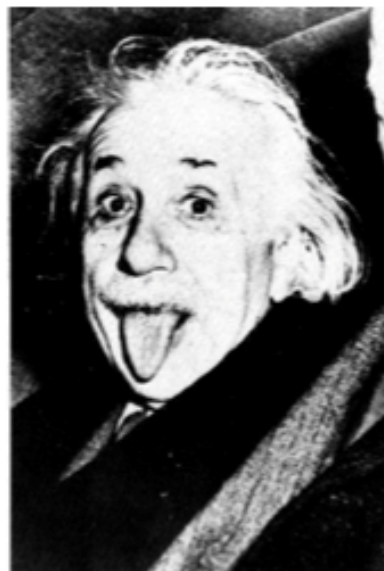
les photons (Einstein 1905)

Propriétés du photon :

- masse nulle
- vitesse de la lumière
- énergie : **$E = hf$**

$$h \approx 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

(constante de Planck)



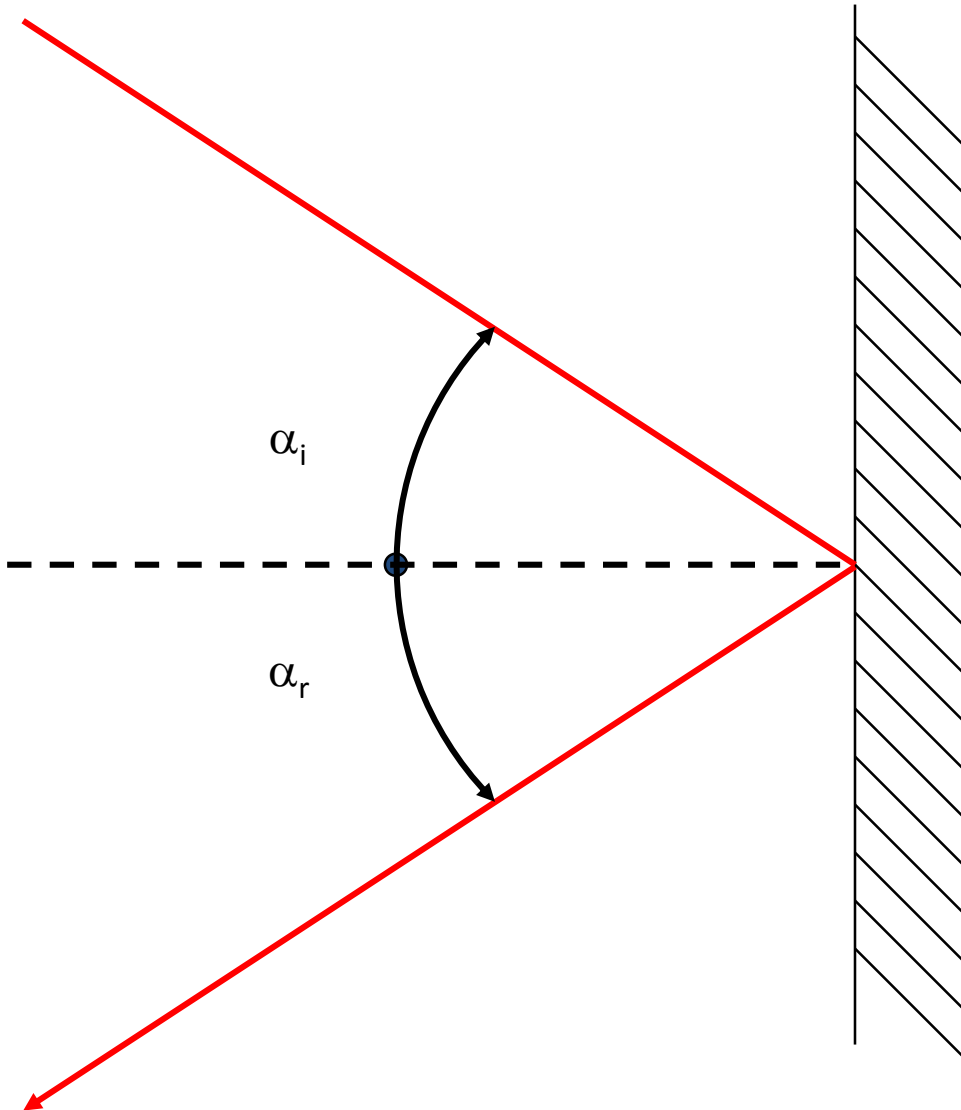


Les différents phénomènes en optique

Phénomène	Description
<i>réflexion</i>	Un milieu réfléchissant renvoie une partie de la lumière.



Réflexion de la lumière



Réflexion sur une surface métallique
bien polie (d'aspect brillant)

L'angle de réflexion, α_r est égal à
l'angle d'incidence, α_i .

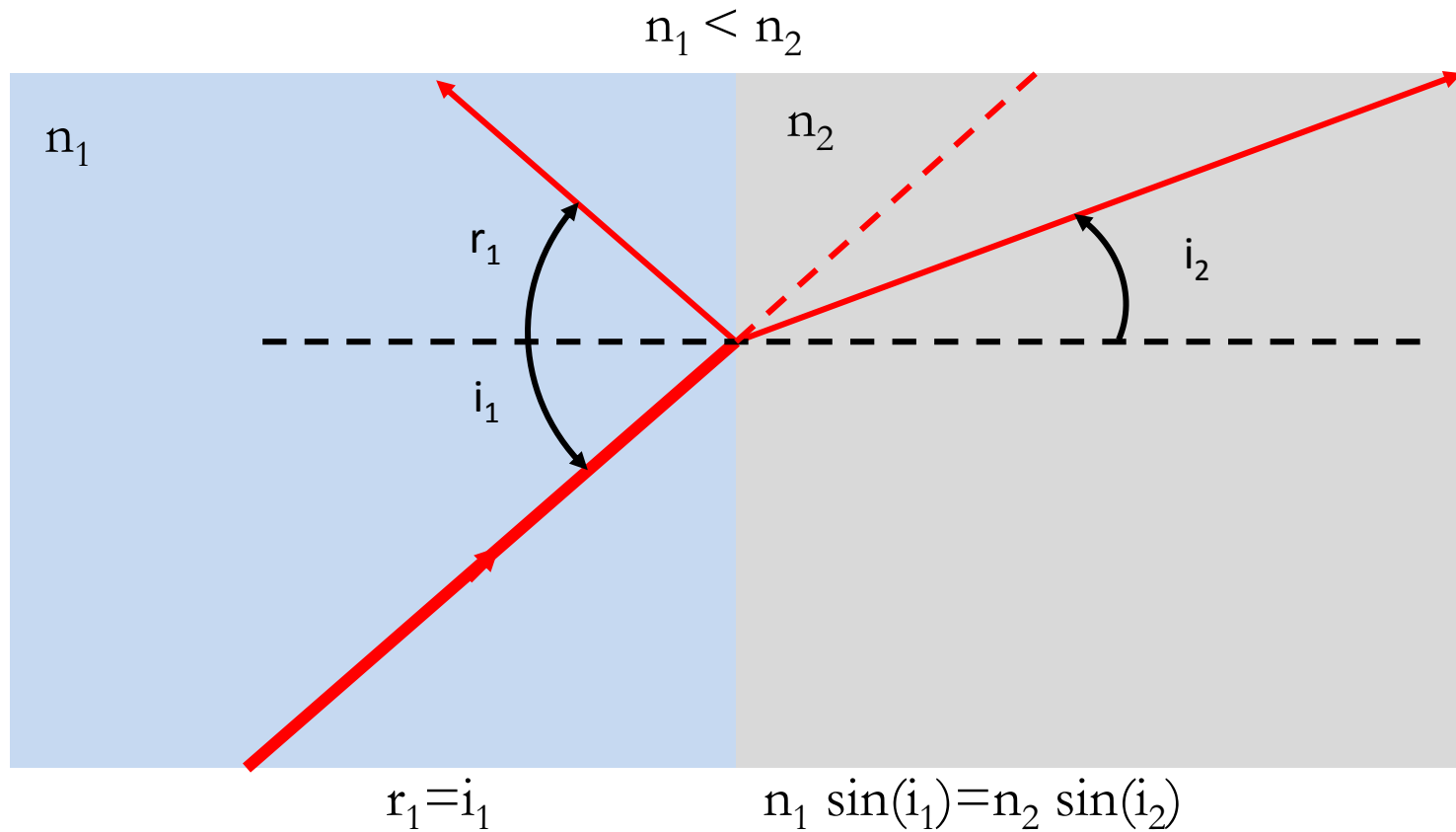


Les différents phénomènes en optique

Phénomène	Description
<i>réflexion</i>	Un milieu réfléchissant renvoie une partie de la lumière.
<i>réfraction</i>	La réfraction est la courbure des rayons lumineux lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre.



Réfraction de la lumière



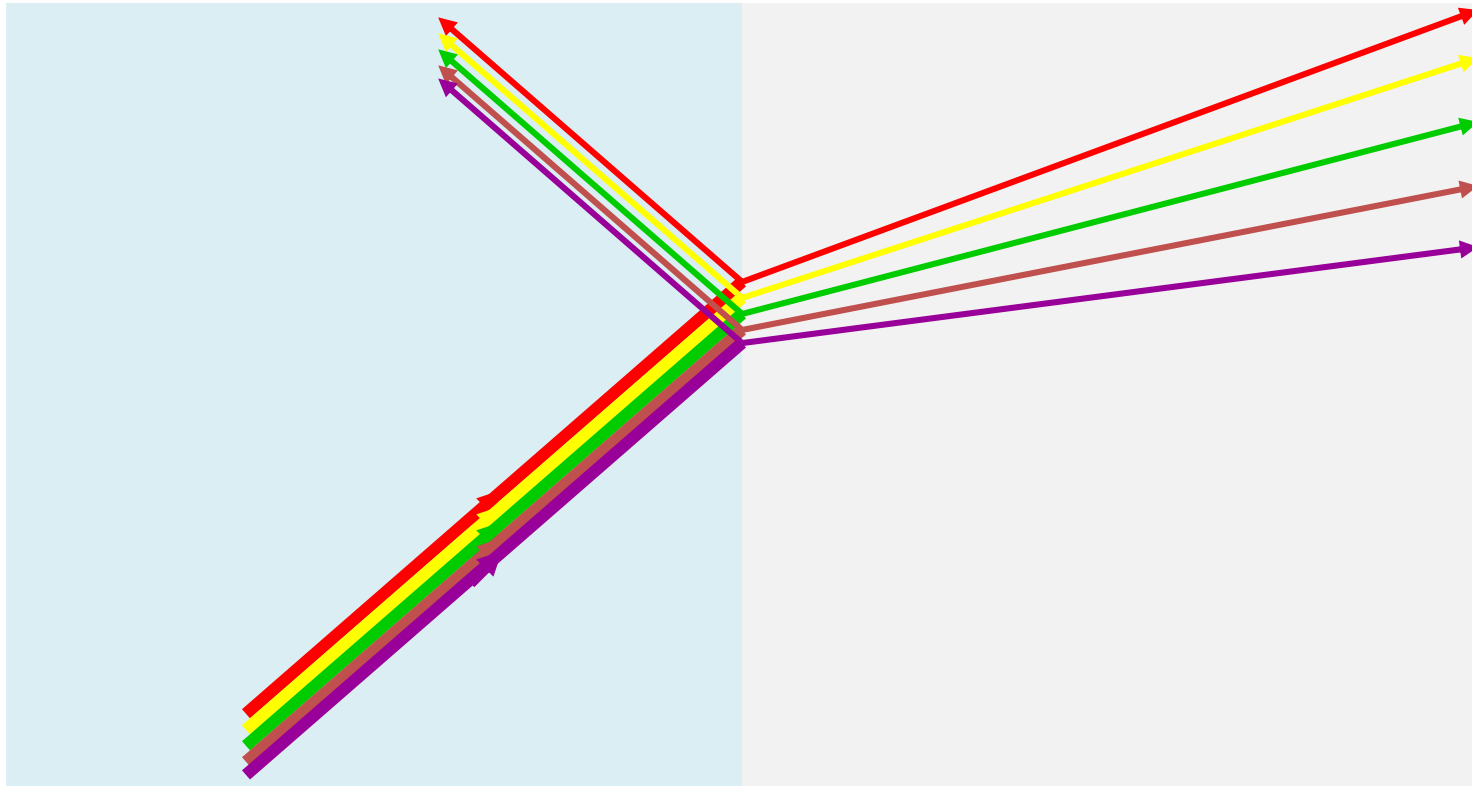


Les différents phénomènes en optique

Phénomène	Description
<i>réflexion</i>	Un milieu réfléchissant renvoie une partie de la lumière.
<i>réfraction</i>	La réfraction est la courbure des rayons lumineux lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre.
<i>dispersion</i>	la dépendance de l'angle de réfraction avec la longueur d'onde implique la dispersion de la lumière



Dispersion de la lumière



L'indice du milieu varie avec la couleur : c'est un **milieu dispersif**.

Si la lumière est composée de plusieurs couleurs, son passage de l'air dans ce milieu va provoquer la décomposition de cette lumière.

L'ensemble des couleurs de cette lumière forme **son spectre**.

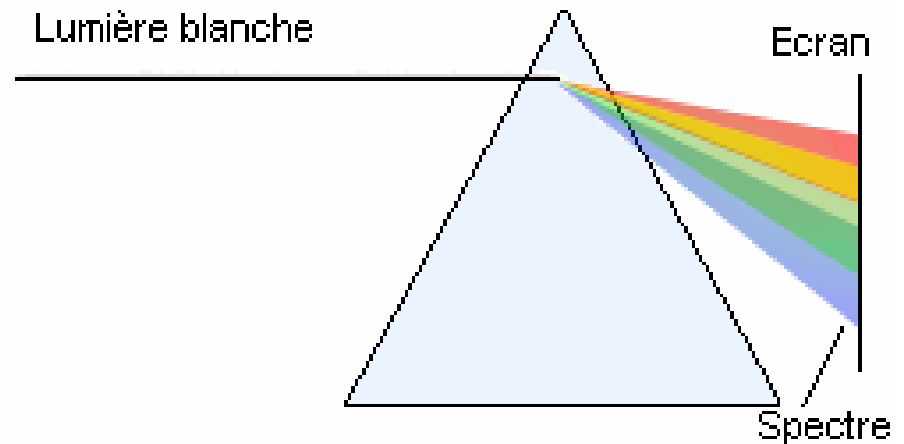
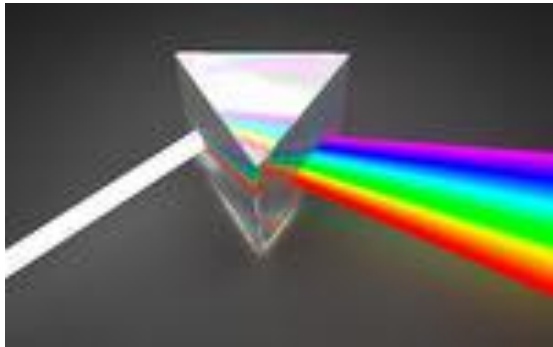
La dispersion de la lumière

En passant à travers le prisme, la lumière blanche est transformée en lumières colorées.

On dit que le prisme **décompose** la lumière blanche.

La figure colorée obtenue est appelée **spectre**.

Explication: La lumière blanche est constituée de plusieurs lumières (ou radiations) colorées. On dit que la lumière blanche est **polychromatique**. Les différentes radiations qui composent la lumière blanche sont séparées par le prisme.



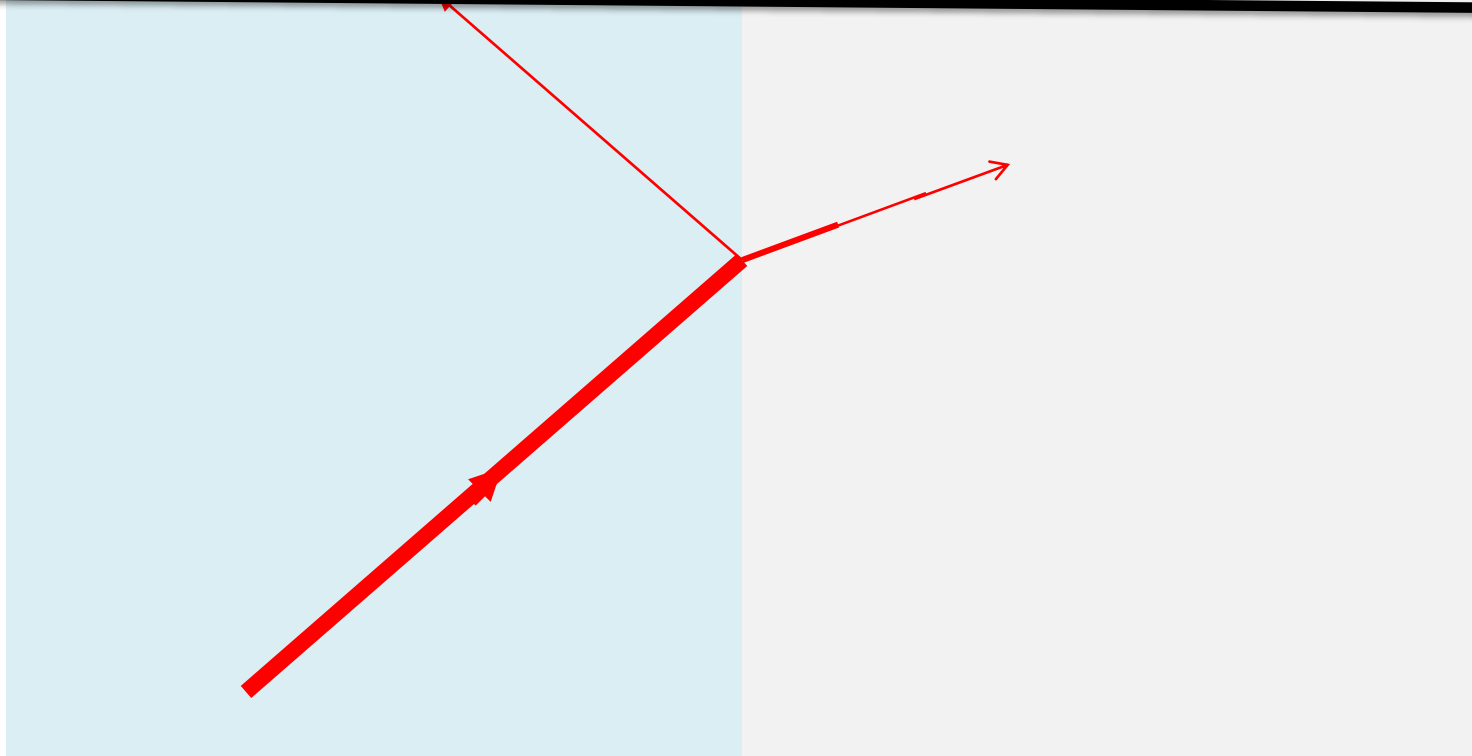


Les différents phénomènes en optique

Phénomène	Description
<i>réflexion</i>	Un milieu réfléchissant renvoie une partie de la lumière.
<i>réfraction</i>	La réfraction est la courbure des rayons lumineux lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre.
<i>dispersion</i>	la dépendance de l'angle de réfraction avec la longueur d'onde implique la dispersion de la lumière
<i>absorption</i>	l'absorption de la lumière se traduit par la diminution de l'intensité lumineuse au fur et à mesure du trajet de la lumière dans un milieu matériel absorbant



L'absorption de la lumière

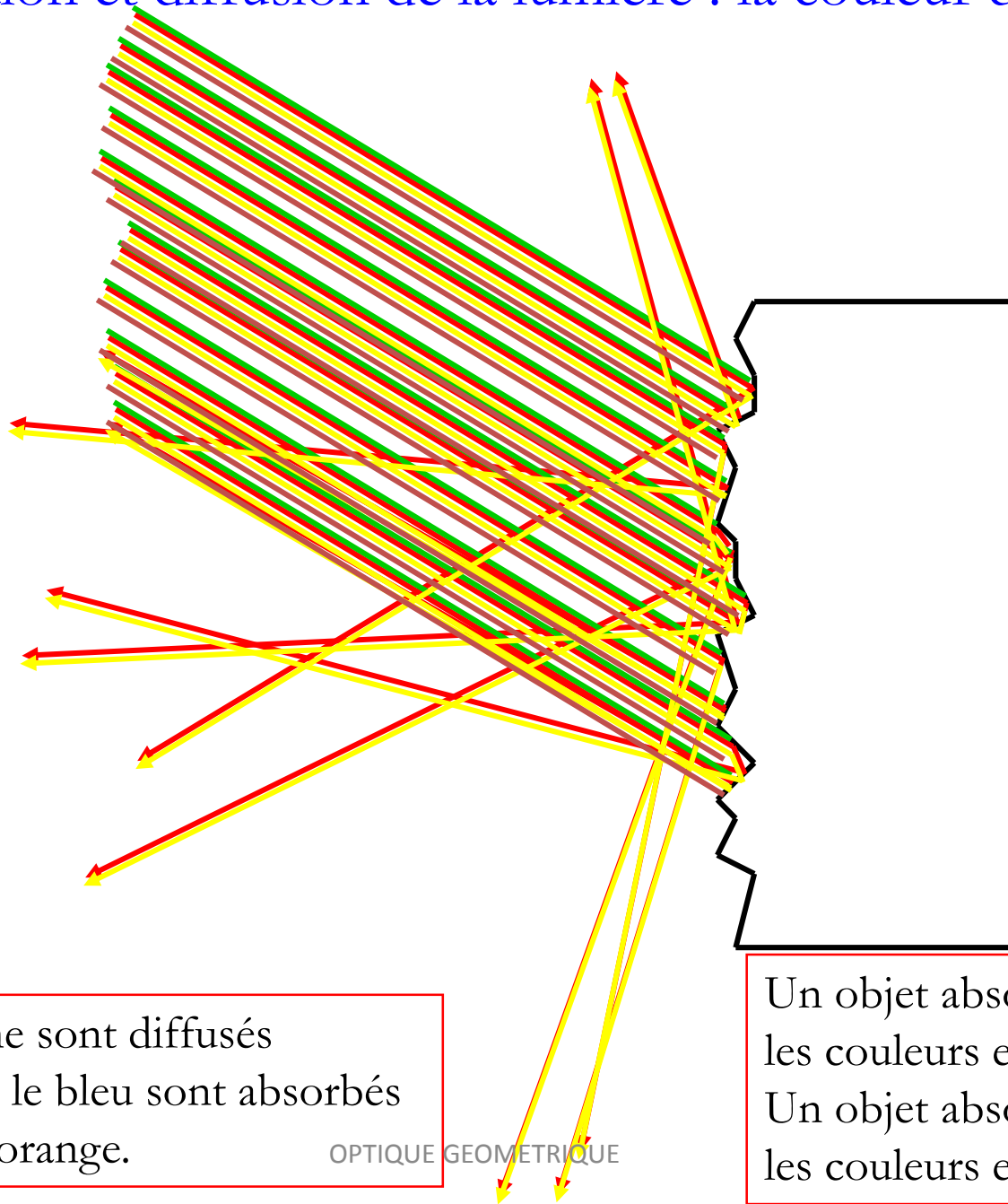


En général, tous les milieux absorbent la lumière **de façon plus ou moins importante suivant la couleur.**

Cette absorption provoque un échauffement du milieu ou du matériau.
La lumière réfléchi est aussi affaiblie.

Pratiquement, tous les milieux diffusants sont absorbants

Absorption et diffusion de la lumière : la couleur des objets



Le rouge et le jaune sont diffusés
alors que le vert et le bleu sont absorbés
l'objet apparaîtra orange.

OPTIQUE GEOMETRIQUE

Un objet absorbant toutes
les couleurs est noir.
Un objet absorbant très peu
les couleurs est blanc.

Les différents phénomènes en optique

Phénomène	Description
<i>réflexion</i>	Un milieu réfléchissant renvoie une partie de la lumière.
<i>réfraction</i>	La réfraction est la courbure des rayons lumineux lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre.
<i>dispersion</i>	la dépendance de l'angle de réfraction avec la longueur d'onde implique la dispersion de la lumière
<i>diffraction</i>	Phénomène de déviation des ondes (lumineuses, acoustiques...) lorsqu'elles passent au voisinage d'un obstacle.
<i>absorption</i>	l'absorption de la lumière se traduit par la diminution de l'intensité lumineuse au fur et à mesure du trajet de la lumière dans un milieu matériel absorbant

Les différents phénomènes en optique

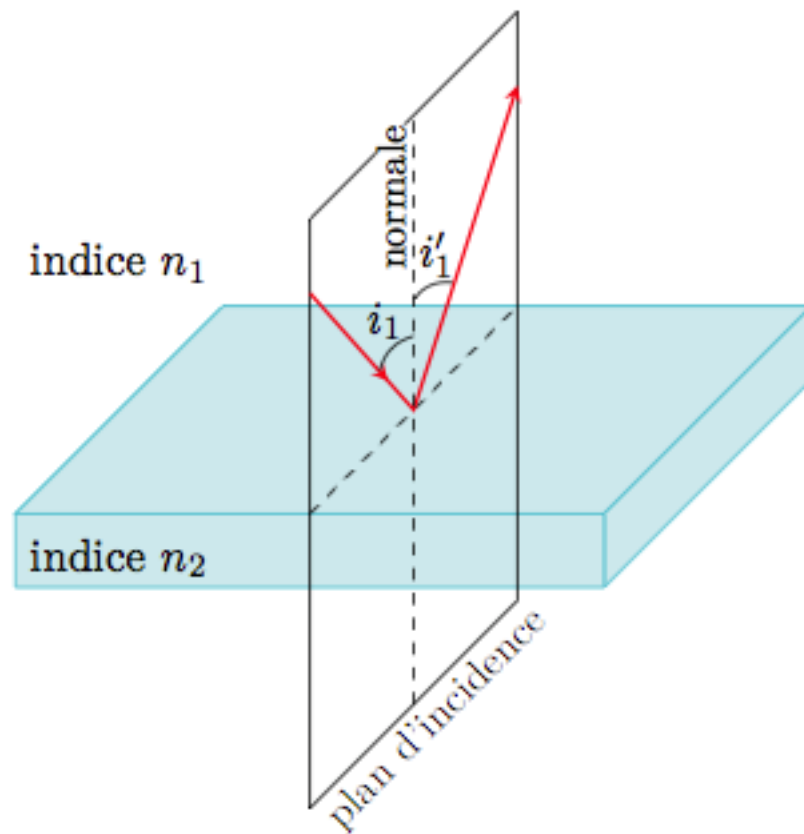
Généralités

Lorsqu'un rayon arrive à l'interface entre deux milieux isotropes et homogènes différents, il donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon transmis (réfracté). On distingue deux types de réflexion :

1. La réflexion diffuse est produite par une surface irrégulière. Elle ne produit pas d'image discernable. C'est cependant cette sorte de réflexion qui nous permet de voir le monde qui nous entoure.
2. La réflexion spéculaire est produite par une surface très lisse (ex. : miroir ou surface d'eau très calme). Elle produit une image discernable d'un objet.

Généralités

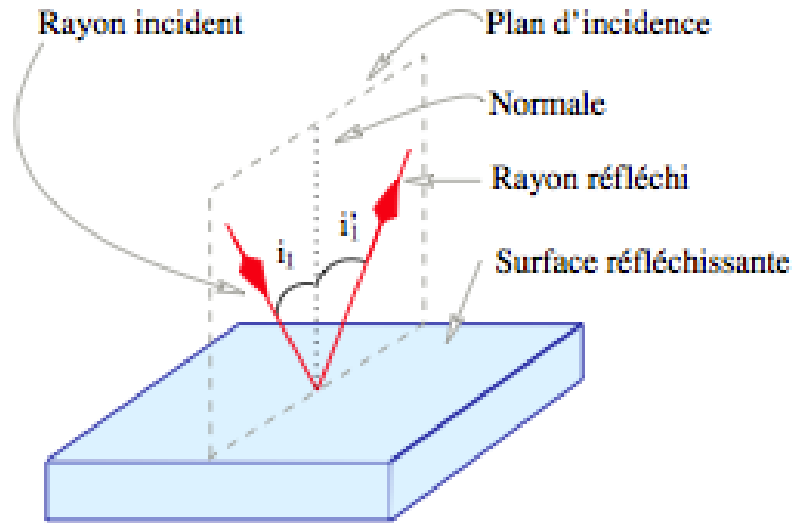
Dans cette partie, on s'intéresse ici à la réflexion spéculaire. On définit le plan d'incidence comme le plan contenant le rayon incident et la normale à l'interface. L'angle d'incidence i_1 est l'angle que forme le rayon incident avec la normale.



Lois de Snell-Descartes:

Plan d'incidence

On définit le plan d'incidence comme le plan contenant le rayon incident et la normale à l'interface

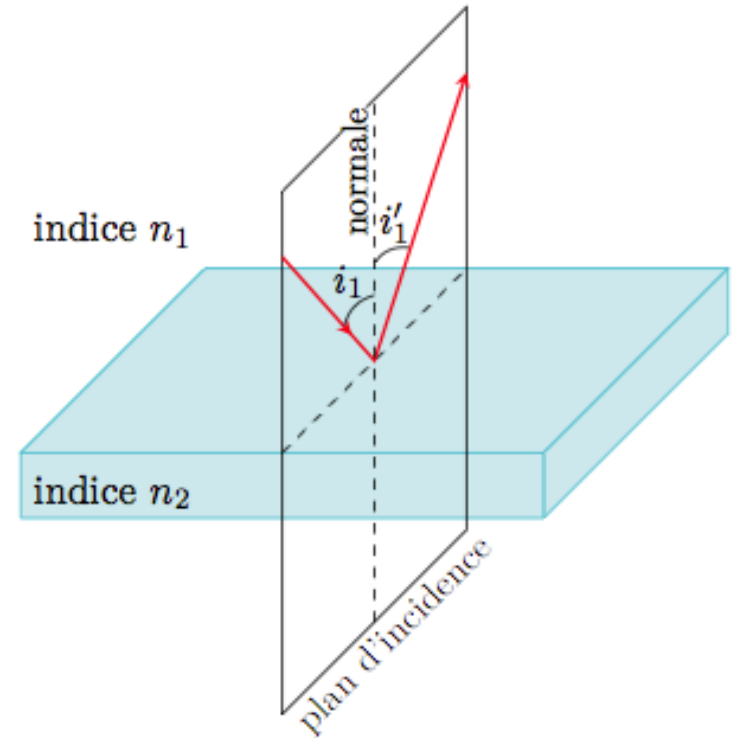


Lois de Snell-Descartes:

Lois de la réflexion

1. Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence. On définit alors l'angle de réflexion i_1 .
2. Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale :

$$i_1 = i_1'$$



Pouvoir Réflecteur : le pouvoir réflecteur d'une interface (énergie réfléchie sur l'énergie incidente) vaut, en incidence normale,

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} . \text{ Pour une}$$

interface verre-air cela vaut 4%. En déposant une couche mince métallique sur l'interface on ramène le pouvoir réflecteur très proche de 100% : on parle alors de miroir. On peut aussi déposer une couche mince de MgF2 pour réduire le pouvoir réflecteur (anti reflet).

Lois de Snell-Descartes:

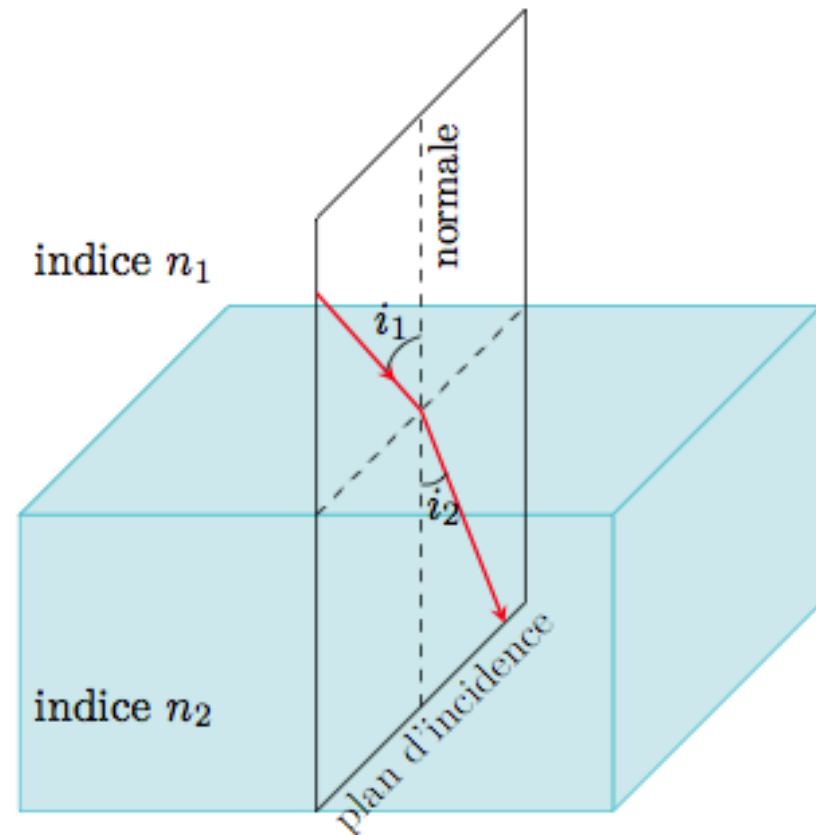
Lois de réfraction

La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices optiques différents.

1. Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence.

2. Le rayon réfracté est tel que :

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



Lois de Snell-Descartes:

Conséquences

- **Principe du retour inverse de la lumière** : tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être en sens opposé.
- **Réflexion totale**. Lorsque le milieu 2 est moins réfringent que le milieu 1 (c'est-à-dire $n_2 < n_1$), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limite d'incidence i tel que:

$$\sin i_\ell = \frac{n_2}{n_1}$$

et tel que si $i > i_\ell$ le rayon réfracté disparaît ; seul le rayon réfléchi existe : on parle alors de réflexion totale car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi.

Réfringence:

Un milieu est d'autant plus réfringent que son indice de réfraction est important. Ainsi, un milieu 2 est plus réfringent qu'un milieu 1 si $n_2 > n_1$.

Lois de Snell-Descartes:

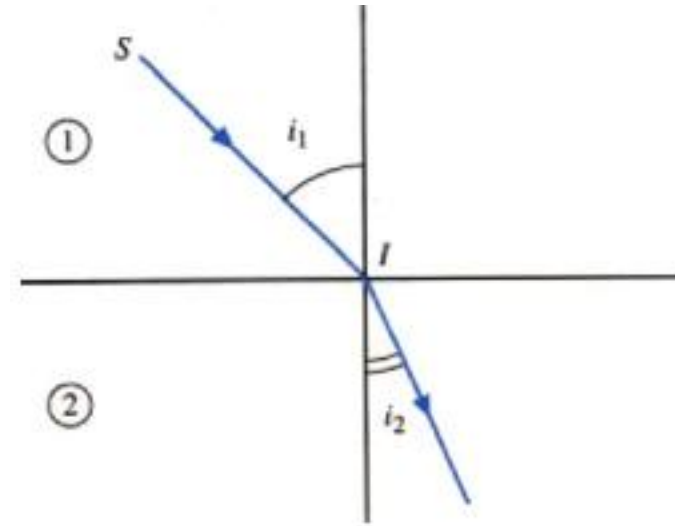
Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent

Exemple :

la lumière passe de l'air 1 à l'eau 2,

$$n_1 = 1 < n_2 = 1,33$$

$n_2 > n_1$ entraîne $\sin i_1 > \sin i_2$ d'où $i_1 > i_2$.



Le rayon réfracté se rapproche de la normale

Le rayon réfracté se rapproche de la normale ; une partie de la lumière est transmise du milieu 1 au milieu 2 quel que soit l'angle d'incidence i_1 .

Lois de Snell-Descartes:

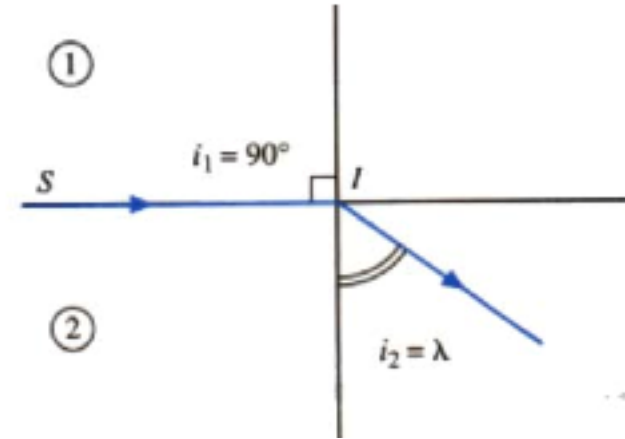
Passage de la lumière dans un milieu plus réfringent

Incidence rasante et angle de réfraction limite

Angle de réfraction limite : λ .

Quand $i_1 = 90^\circ$ (incidence rasante), i_2 prend une valeur limite notée λ . D'après la relation de Descartes :

$$\sin \lambda = \frac{n_2}{n_1}$$



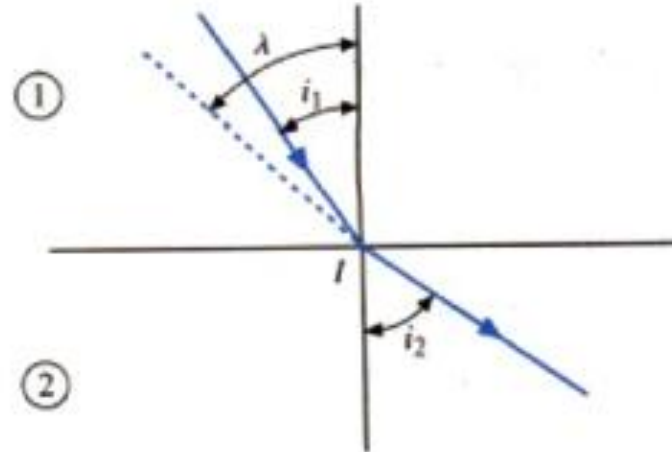
Lois de Snell-Descartes:

Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent

$n_1 > n_2$ entraîne $\sin i_1 < \sin i_2$ d'où $i_1 < i_2$.

Le rayon réfracté s'écarte de la normale (figure).

Quand $i_2 = 90^\circ$, $i_1 = \lambda$ tel que $\sin \lambda = \frac{n_2}{n_1}$, λ : angle de réfraction limite.



Le rayon réfracté s'écarte de la normale.

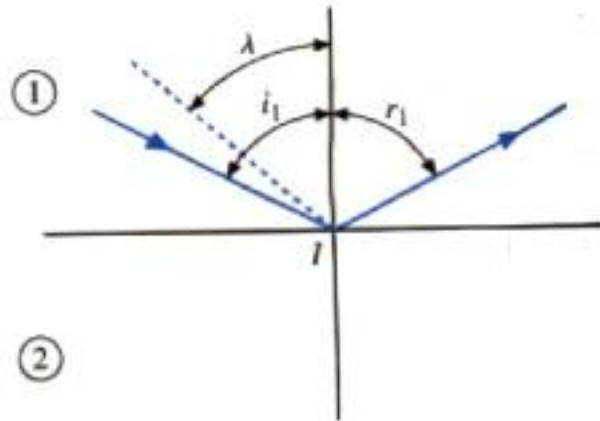
si $i_1 > \lambda$, il n'existe plus de rayon réfracté : il y a **réflexion totale**.

Lois de Snell-Descartes:

Passage de la lumière dans un milieu moins réfringent

Lorsque la lumière rencontre un milieu moins réfringent, le rayon incident ne donne naissance à un rayon réfracté que si l'angle d'incidence i_1 est inférieur à l'angle de réfraction limite.

Quand $i_1 > \lambda$, le rayon incident se réfléchit totalement, la lumière n'est plus transmise.



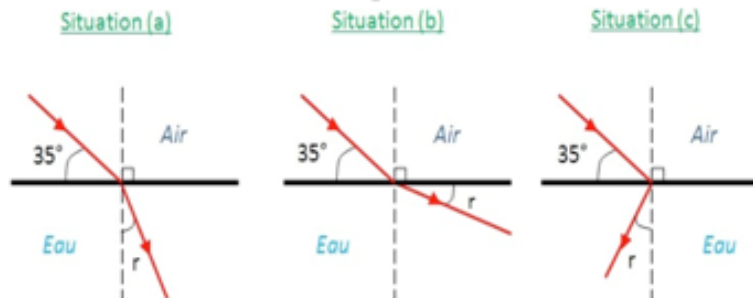
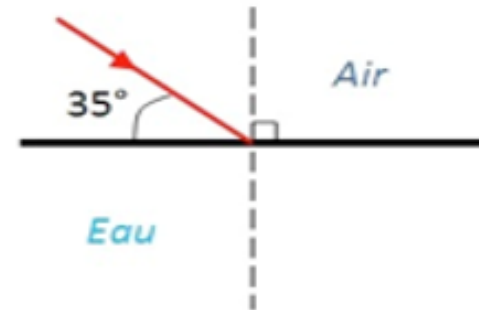
Réflexion totale : $i_1 > \lambda$.

Application

Exercice 1

On considère la situation suivante :

1. Quelle est la valeur de l'angle d'incidence?
2. Quelle est l'expression de la loi de Snell-Descartes qu'il faut utiliser pour calculer l'angle de réflexion? Quelle est sa valeur?
3. On précise que l'indice de réfraction de l'eau vaut $n=1.33$. Déterminer la valeur de l'angle de réfraction r . Vous exprimez vos résultats avec 2 chiffres significatifs.
4. Quel est le schéma qui convient pour représenter le rayon réfracté?



Application

Exercice 2: Dioptre air-eau

Un rayon lumineux passe de l'air dans l'eau avec un angle d'incidence $i_1 = 60^\circ$; l'angle de réfraction i_2 est de 40°

1. Déterminer l'indice de réfraction de l'eau.
2. On immerge une source lumineuse de façon que la lumière se propage d'abord dans l'eau et arrive à la surface de l'eau-air avec un angle d'incidence $i_3 = 60^\circ$. Obtiendra-t-on un rayon réfracté dans l'air ? Justifier votre réponse.

Exercice 3 : dioptre air-verre

Quelle déviation subit un rayon lumineux lorsqu'il traverse une surface plane séparant l'air et un verre d'indice $n=1.52$?

1. le rayon passe de l'air au verre, l'angle d'incidence valant $i_1 = 50^\circ$
2. le rayon passe du verre à l'air, l'angle d'incidence valant $i_1 = 30^\circ$