

Sources de lumière, propagation de la lumière

Ondes et signaux - Chapitre S1

La lumière est une onde électromagnétique. Elle se propage à la célérité $c_0 \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide et à la célérité $c = \frac{c_0}{n}$ dans les milieux caractérisés par leur indice optique n . Si les obstacles, les inhomogénéités que la lumière rencontre dans le milieu sont très grands devant sa longueur d'onde alors elle se propage selon des courbes appelées rayons lumineux. Dans les milieux homogènes et isotropes, les rayons lumineux sont des droites. À l'interface entre deux milieux d'indices optiques différents, la direction des rayons lumineux change : une fraction de la lumière est réfléchiée, l'autre est réfractée. Ces déviations obéissent aux lois géométriques de Snell-Descartes et sont mises à profit dans l'élaboration de dispositifs servant à guider la lumière ou à former des images.

D.Malka
Physique MPSI
Lycée Jeanne d'Albret
2021-2022

Table des matières

1	La lumière, une onde électromagnétique	1
1.1	La lumière est une onde électromagnétique	1
1.2	Célérité de la lumière à travers un milieu homogène et transparent – Indice optique	1
1.3	Longueur d’onde d’une radiation lumineuse monochromatique	1
1.4	Domaines spectraux	1
2	Quelques sources de lumières	1
2.1	Le laser	1
2.2	La lampe à vapeur atomique	2
2.3	Le Soleil	2
2.4	Source thermique	2
2.5	Lampe fluorescente	2
2.6	Diode électroluminescente	2
3	Modèle de l’optique géométrique	4
3.1	Une intuition expérimentale	4
3.2	le modèle de l’optique géométrique	4
3.3	Les rayons lumineux	5
3.3.1	Rayons lumineux	5
3.3.2	Faisceau lumineux	5
3.3.3	Lien avec le modèle ondulatoire	5
4	Idéalisation des sources lumineuses	5
4.1	Le modèle de la source ponctuelle	5
4.2	La source étendue	6
4.3	La source ponctuelle à l’infini	6
5	Réflexion et réfraction de la lumière à l’interface entre deux milieux	6
5.1	Observations expérimentales	7
5.2	Paramétrage conventionnel	7
5.3	Lois de Snell-Descartes	8
5.3.1	Lois pour la réflexion	8
5.3.2	Lois pour la réfraction	8
5.4	Incidence normale	8
5.5	Déviation du rayon réfracté par rapport à la normale	9
5.6	La réflexion totale	9
5.6.1	Le phénomène de réflexion totale	9
5.6.2	La condition de réflexion totale	9

Table des figures

1	Indices optiques de quelques milieux	1
2	Couleur perçue en fonction de la longueur d’onde de la radiation	2
3	Spectre d’un laser	2
4	Spectre d’une lampe à vapeur de mercure	3
(a)	Visuel	3
(b)	Graphique	3
5	Spectre de la lumière émise par le Soleil	3
(a)	Visuel	3
(b)	Graphique	3
6	Interprétation de l’ombre géométrique par la propagation rectiligne de la lumière	4
7	Diffraction d’un faisceau de lumière verte ($\lambda \sim 500 \text{ nm}$) par des grains de lycopode de taille $d \sim 40 \mu\text{m} \sim 80\lambda$	5
8	Source ponctuelle de lumière	6
9	Description d’une source étendue de lumière	6
10	A et B sont deux sources ponctuelles à l’infini dans des directions différentes.	6
11	Un faisceau laser incident sur une interface air/eau donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté (ou transmis). Crédit photo : Stéphane Leblond.	7

12	Les directions des rayons incidents, réfléchis et réfractés sont repérées par rapport à la normale à l'interface entre le milieu incident et le milieu émergent.	7
13	Réfraction de la lumière suivant les valeurs relatives des indices n_i et n_r des milieux incident et émergent.	9
	(a) Passage de la lumière d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent : le rayon réfracté se rapproche de la normale.	9
	(b) Passage de la lumière d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent : le rayon réfracté s'écarte de la normale.	9
14	Réflexion totale d'un faisceau laser à l'interface eau/air.	9

Connaissances et capacités exigibles

- Caractériser une source lumineuse par son spectre.
- Relier la longueur d'onde d'un rayonnement lumineux dans le vide à sa couleur.
- Connaître le lien entre la célérité de la lumière à travers un milieu transparent et son indice optique.
- Définir le modèle de l'optique géométrique et en connaître les conditions de validité.
- Connaître les lois de Snell-Descartes de la réflexion et de la réfraction.
- Savoir établir la condition de réflexion totale.

1 La lumière, une onde électromagnétique

1.1 La lumière est une onde électromagnétique

Classiquement, la lumière est décrite comme une onde. On sait depuis la fin du XIX^{ème} siècle que c'est une onde électromagnétique c'est-à-dire la propagation d'un champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) à travers l'espace. La lumière peut se propager aussi bien dans le vide que dans les milieux matériels.

1.2 Célérité de la lumière à travers un milieu homogène et transparent – Indice optique

Par définition, la célérité c_0 de la lumière dans le vide vaut :

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

On prend souvent $c_0 \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Un milieu transparent homogène et isotrope peut-être caractérisé par un nombre sans dimension : son indice optique ou indice de réfraction n . La lumière se propage alors dans ce milieu à la célérité c telle que :

$$c = \frac{c_0}{n} \quad \text{avec} \quad n \geq 1$$

$c \leq c_0$: la lumière se propage moins vite dans un milieu matériel que dans le vide. On parle de réfringence de la lumière, de milieu réfringent et d'indice de réfringence.

milieu	indice
vide	1
air	1,0003
eau	1,33
verre	1,4 – 1,8

FIGURE 1 – Indices optiques de quelques milieux

1.3 Longueur d'onde d'une radiation lumineuse monochromatique

Soit une radiation lumineuse monochromatique de fréquence f . La longueur d'onde de cette radiation dans un milieu d'indice n est définie par :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{avec} \quad c = \frac{c_0}{n}$$

On définit la longueur dans le vide par $\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$. Dans un milieu d'indice n , la longueur d'onde vaut $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

1.4 Domaines spectraux

Le rayonnement électromagnétique visible correspond au domaine de longueur d'onde [400 nm, 800 nm]. La couleur¹ d'une radiation monochromatique est associée à sa longueur d'onde dans le vide (fig.2).

2 Quelques sources de lumières

2.1 Le laser

Le laser est une source quasi-monochromatique de lumière. Son spectre montre une unique raie extrêmement étroite correspond à un intervalle de longueur d'onde extrêmement resserré autour d'une longueur d'onde moyenne λ .

1. La couleur est la perception physiologique d'une radiation ou d'une combinaisons de radiation de différentes longueurs d'onde ; elles n'est donc pas intrinsèque à la lumière.

Couleur	Longueur d'onde dans le vide λ_0 (nm)
Violet	autour de 400
Bleu	autour de 450
Vert	autour de 530
Jaune	autour de 580
Orange	autour de 600
Rouge	[600, 780]

FIGURE 2 – Couleur perçue en fonction de la longueur d'onde de la radiation

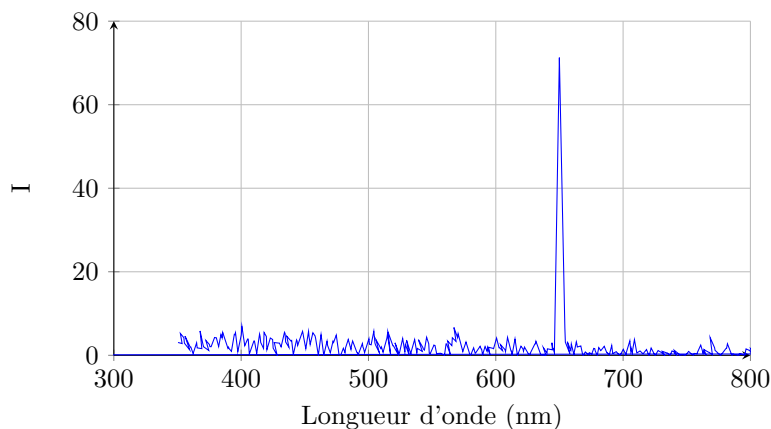


FIGURE 3 – Spectre d'un laser

2.2 La lampe à vapeur atomique

La lampe à vapeur atomique est une source polychromatique à spectre discret. Cette lumière est obtenue par désexcitation d'un gaz atomique par émission de photon. De par la quantification des niveaux d'énergie des atomes, seuls des radiations de longueurs d'onde bien définies peuvent-être émises. Les raies composant le spectre de cette source correspondent à certaines de ces radiations.

2.3 Le Soleil

La lumière rayonnée par le Soleil est polychromatique, composée d'un ensemble continu de radiations. Le spectre s'étend au-delà du visible dans l'ultra-violet et en-deçà du visible dans l'infra-rouge.

2.4 Source thermique

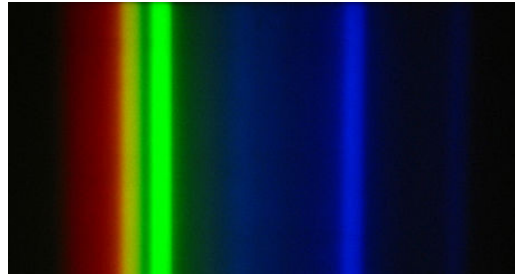
Tout corps à la température T rayonne. Le spectre de ce rayonnement est continu et est assez bien rendu par le modèle du corps noir. Plus la température est élevée et plus le domaine d'émission est décalé vers les petites longueurs d'onde. Ainsi un corps à température ambiante ($T \sim 298$ K) émet essentiellement dans le domaine infrarouge tandis que le Soleil, de température de surface $T \sim 6000$ K, rayonne surtout dans le domaine visible.

2.5 Lampe fluorescente

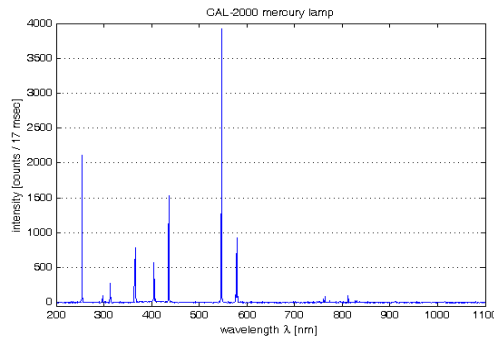
Le spectre de la lumière émise par cette source sera étudié en travaux pratiques.

2.6 Diode électroluminescente

Le spectre de la lumière émise par cette source sera étudié en travaux pratiques.

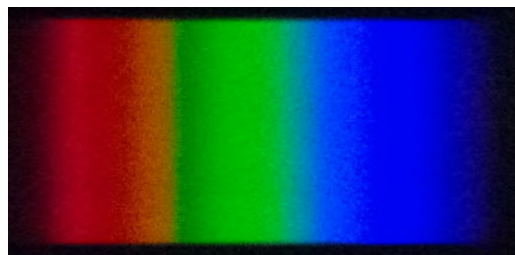


(a) Visuel

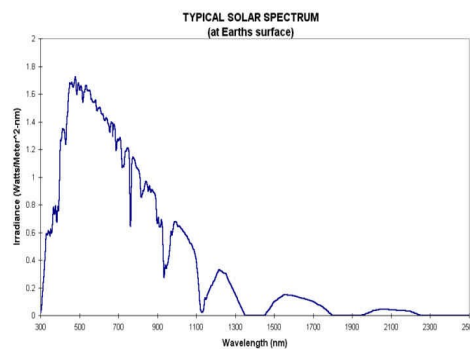


(b) Graphique

FIGURE 4 – Spectre d'une lampe à vapeur de mercure



(a) Visuel



(b) Graphique

FIGURE 5 – Spectre de la lumière émise par le Soleil

3 Modèle de l'optique géométrique

3.1 Une intuition expérimentale

On considère une source lumineuse monochromatique de longueur d'onde λ de petite taille et un écran. On place un obstacle de taille caractéristique $d \gg \lambda$ entre la source et l'écran. L'expérience commune montre qu'il existe une zone d'ombre sur l'écran (fig.6).

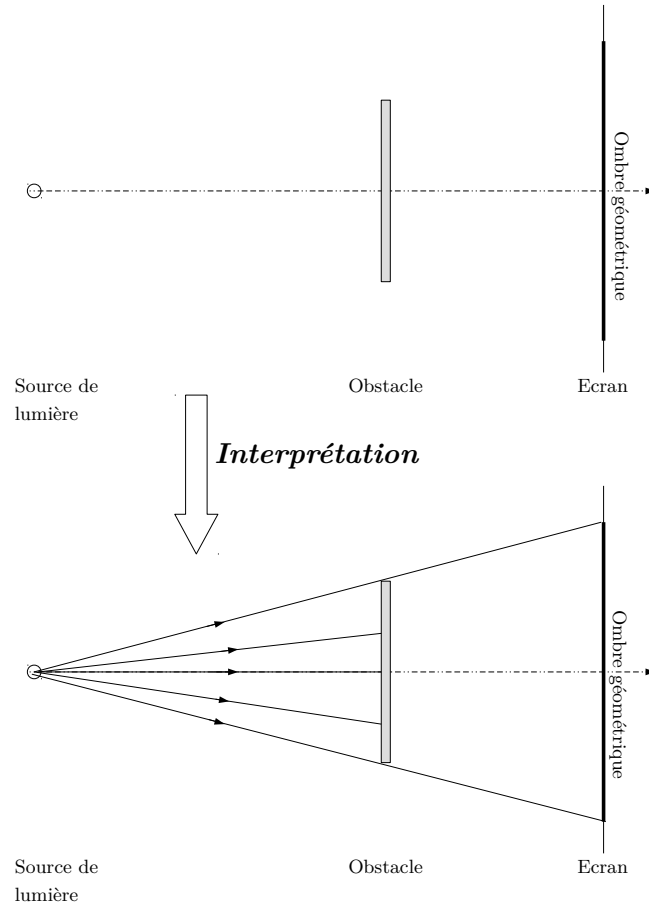


FIGURE 6 – Interprétation de l'ombre géométrique par la propagation rectiligne de la lumière

Cette ombre est géométrique au sens où elle est homothétique de l'obstacle dans le rapport des distances de la source à l'écran et de l'obstacle à l'écran. On peut interpréter ce fait expérimental de la façon suivante : la lumière se propage suivant un ensemble de demi-droites orientées appelées rayons lumineux.

Que se passe-t-il si on diminue la taille de l'obstacle toutes choses égales par ailleurs ? L'intensité lumineuse sur l'écran prend une autre allure : on observe une alternance de zones sombres et de zones brillantes. Ce phénomène bien connu pour les ondes est appelé *diffraction*. La lumière est diffractée par l'obstacle (fig.7).

La modélisation de la propagation de la lumière par des rayons lumineux ne permet pas de rendre compte de la diffraction.

3.2 le modèle de l'optique géométrique



Modèle de l'optique géométrique

Si les caractéristiques des milieux traversés par la lumière varient peu à l'échelle de sa longueur d'onde λ , on peut négliger son caractère ondulatoire. On modélise alors sa propagation par un ensemble de courbes appelées *rayons lumineux*.

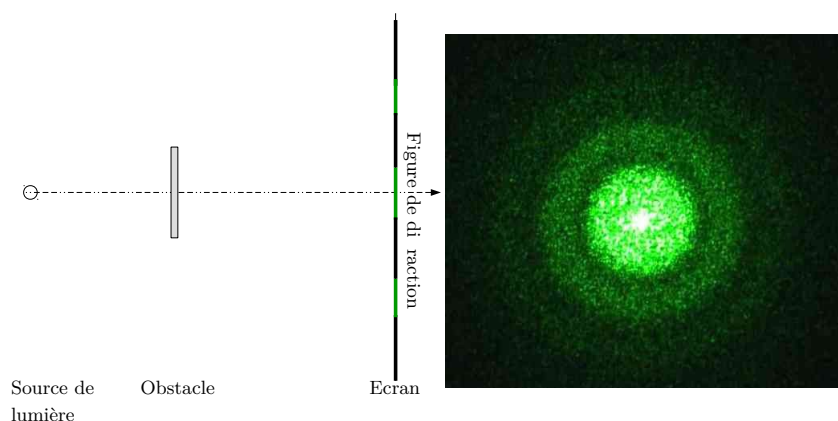


FIGURE 7 – Diffraction d'un faisceau de lumière verte ($\lambda \sim 500 \text{ nm}$) par des grains de lycopode de taille $d \sim 40 \mu\text{m} \sim 80\lambda$.

Ainsi :

- si la lumière rencontre un obstacle de taille $d \sim \lambda$, la diffraction est notable et la théorie ondulatoire de la lumière doit être utilisée pour traiter le problème.
- si la lumière rencontre un obstacle de taille $d \ll \lambda$, la diffraction est négligeable et on peut traiter le problème dans le cadre du modèle de l'optique géométrique avec une très bonne approximation.

Formellement, l'optique géométrique est la théorie de la propagation de la lumière pour $\lambda \rightarrow 0$.

3.3 Les rayons lumineux

3.3.1 Rayons lumineux



Rayon lumineux

Les rayons lumineux correspondent au trajet emprunté par l'énergie lumineuse. Dans les milieux linéaires, homogènes et isotropes, les rayons lumineux sont des demi-droites : la lumière se propage de façon rectiligne.

3.3.2 Faisceau lumineux

On appelle faisceau lumineux un ensemble de rayons lumineux se coupant en un même point.

3.3.3 Lien avec le modèle ondulatoire

Le modèle de l'optique géométrique n'est évidemment pas décorrélié de la théorie ondulatoire de propagation de la lumière. Le théorème de Malus affirme que les rayons lumineux sont localement orthogonaux aux fronts d'onde des ondes lumineuses. On laisse ce point au cours de 2^{ème} année.

4 Idéalisation des sources lumineuses

4.1 Le modèle de la source ponctuelle

Les sources de lumière sont étendues c'est-à-dire qu'elle possèdent un volume, une surface non nulle d'où elles émettent de la lumière. En première approximation, on peut assimiler à un point lumineux une source dont l'extension spatiale est très petite devant la distance de la source au capteur de lumière.



Modèle de la source ponctuelle

Une source ponctuelle est une source de lumière qu'on peut assimiler à un point. Elle émet un faisceau de lumière divergent (fig.8).

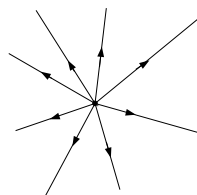


FIGURE 8 – Source ponctuelle de lumière

4.2 La source étendue

On décrit alors une source étendue de lumière comme une collection infinie de sources ponctuelles ((fig.9)).

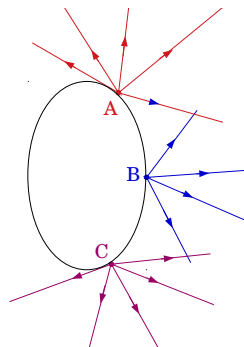


FIGURE 9 – Description d'une source étendue de lumière

Chaque point de la source étendue émet un faisceau divergent de lumière.

4.3 La source ponctuelle à l'infini

Une source ponctuelle à l'infini² émet un faisceau de lumière parallèle (fig.10).

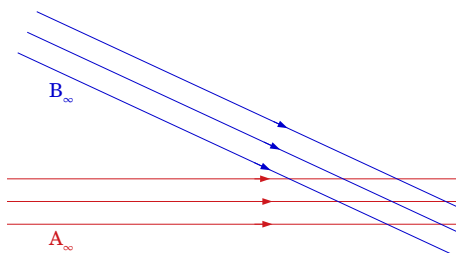


FIGURE 10 – A et B sont deux sources ponctuelles à l'infini dans des directions différentes.

5 Réflexion et réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux

Les milieux considérés sont transparents, homogènes et isotropes. On se place dans le cadre du modèle de l'optique géométrique

². La notion d'infini est à préciser en comparant la distance de la source au dispositif optique à une longueur caractéristique de ce dispositif.

5.1 Observations expérimentales

Lorsque de la lumière arrive à l'interface entre deux milieux, on observe qu'une fraction est réfléchi – elle repart vers le milieu incident – et qu'une autre fraction est transmise (elle se propage à travers le milieu émergent) (fig.11).

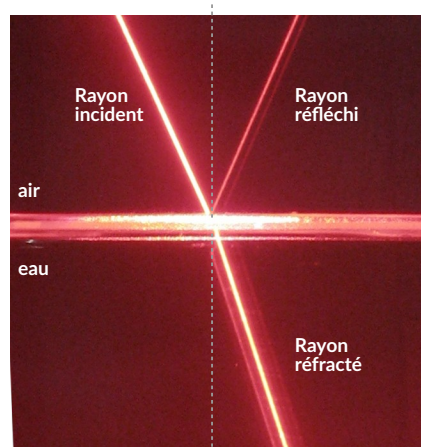


FIGURE 11 – Un faisceau laser incident sur une interface air/eau donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté (ou transmis). Crédit photo : Stéphane Leblond.

L'expérience montre que cette réflexion et cette transmission s'accompagne d'un changement de direction des rayons lumineux. Elle montre aussi que les direction des rayons incidents et réfractés dépendent de la direction du rayon incident par rapport à l'interface et des indices relatifs du milieu incident et du milieu émergent.

5.2 Paramétrage conventionnel

Pour dégager des lois relatives aux directions des rayons incidents, réfractés et réfléchis, il est nécessaire de paramétrer le problème afin de repérer ses directions par rapport à une droite et un plan de référence. Dans l'expression usuelle de ces lois, on choisit de repérer les directions par rapport à la normale à l'interface entre les deux milieux et par rapport au plan formé par cette normale et par le rayon incident : le plan d'incidence (fig.12).

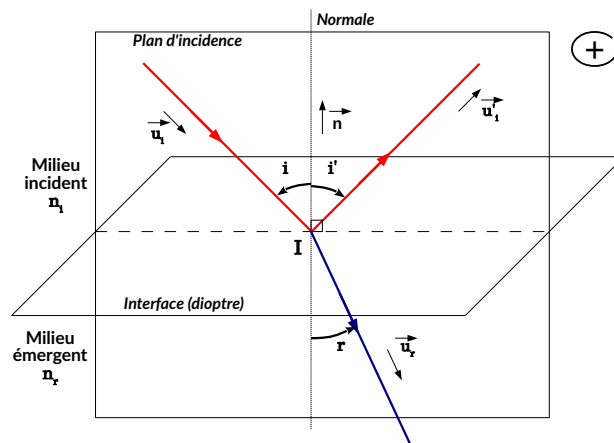


FIGURE 12 – Les directions des rayons incidents, réfléchis et réfractés sont repérées par rapport à la normale à l'interface entre le milieu incident et le milieu émergent.



Plan d'incidence

Soit I le point d'intersection du rayon incident avec l'interface entre deux milieux. I est appelé point d'incidence. Le rayon incident et la normale à l'interface au point I définissent le *plan d'incidence*.

L'angle i repérant le rayon incident par rapport à la normale est l'angle d'incidence, l'angle i' repérant le rayon réfléchi par rapport à la normale est l'angle de réflexion, L'angle r repérant le rayon réfracté par rapport à la normale est l'angle de réfraction. Ces angles sont orientés donc algébrique. Par exemple, sur la figure 12, le sens trigonométrique a été choisi arbitrairement comme sens positif. Il en résulte que $i \geq 0$, $i' \leq 0$ et $r \geq 0$.

5.3 Lois de Snell-Descartes

5.3.1 Lois pour la réflexion



1^{ère} loi de Snell-Descartes

Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence.



2^{ème} loi de Snell-Descartes

Le rayon réfléchi est tel que :

$$i' = -i$$

Le rayon lumineux « traverse » la normale.

5.3.2 Lois pour la réfraction



3^{ème} loi de Snell-Descartes

Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence.



4^{ème} loi de Snell-Descartes

Le rayon réfracté est tel que :

$$n_i \sin i = n_r \sin r$$

Le rayon lumineux « traverse » la normale.

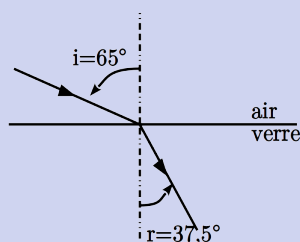


Application 1

Soit un rayon incident depuis l'air d'indice $n_1 = 1$ sur un bloc de verre d'indice $n_2 = 1,49$ avec un angle d'incidence égal à 65° . Déterminer l'angle que forme le rayon transmis avec la normale puis représenter le trajet de la lumière.

Réponse

On note $i = 65,0^\circ$ l'angle d'incidence, on cherche r l'angle de réfraction. D'après la 4^{ème} loi Snell-Descartes, $n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow r = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i\right)$. A.N. : $r = 37,5^\circ$.



5.4 Incidence normale

Un rayon arrive en incidence normale sur l'interface si $i = 0$. Les lois de Snell-Descartes donne :

- $r = 0$, le rayon réfracté n'est alors pas dévié.
- $i' = 0$, le rayon réfléchi est confondu avec le rayon incident.

5.5 Déviation du rayon réfracté par rapport à la normale

Voir fig.13.

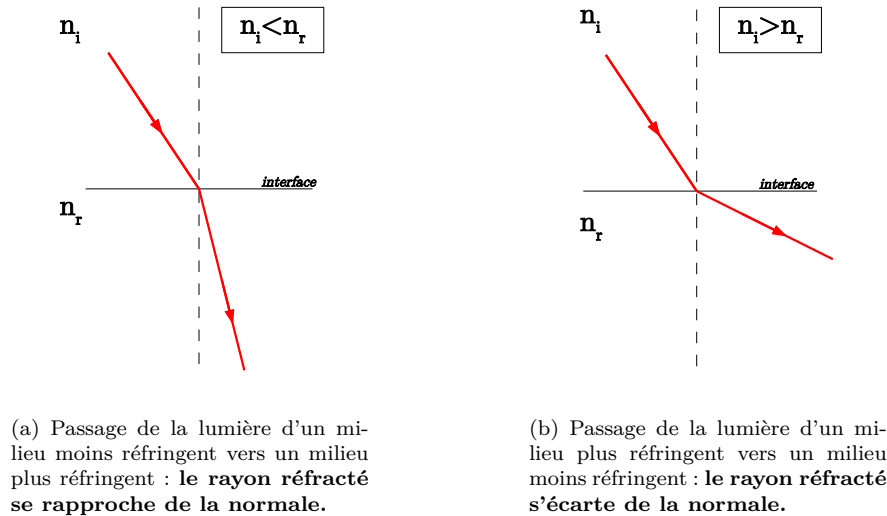


FIGURE 13 – Réfraction de la lumière suivant les valeurs relatives des indices n_i et n_r des milieux incident et émergent.

5.6 La réflexion totale

5.6.1 Le phénomène de réflexion totale

Lorsque la lumière passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent – typiquement à l'interface verre/air – il existe un angle d'incidence limite au delà duquel l'intégralité de la lumière est réfléchie vers le milieu incident (fig.14). C'est le phénomène de *réflexion totale*.

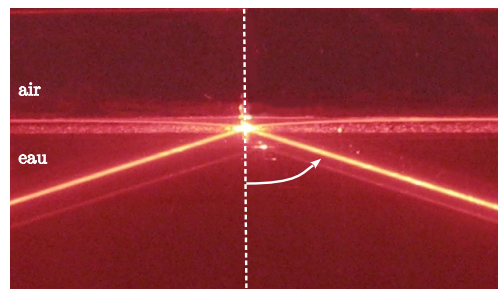


FIGURE 14 – Réflexion totale d'un faisceau laser à l'interface eau/air.

5.6.2 La condition de réflexion totale

Soit une interface entre un milieu incident, homogène et transparent d'indice n_i , et un milieu émergent, homogène et transparent d'indice $n_r < n_i$. Nous établissons ici la condition de réflexion totale sur l'angle d'incidence i repéré par rapport à la normale. Pour cela, nous cherchons à quelle condition sur i il existe un rayon réfracté dans le milieu émergent, la négation de cette existence étant la condition de réflexion totale.

Il existe un rayon réfracté dans le milieu émergent à condition que l'angle de réfraction r soit défini. En prenant le sens trigonométrique comme sens positif, cette condition s'écrit naturellement sur r comme suit :

$$0 \leq r \leq \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow 0 \leq \sin r \leq 1 \quad (1)$$

Traduisons la condition (1) sur i . Pour cela, il faut exprimer r en fonction de i à l'aide de la 4^{ème} loi de Snell-Descartes :

$$n_i \sin i = n_r \sin r \Rightarrow \sin r = \frac{n_i}{n_r} \sin i \quad (2)$$

La condition d'existence du rayon réfracté (1) s'écrit à l'aide de (2) :


$$0 \leq \frac{n_i}{n_r} \sin i \leq 1 \Leftrightarrow 0 \leq \sin i \leq \frac{n_r}{n_i} \quad (3)$$

La condition de réflexion totale est la négation de la condition (3) : il y a réflexion totale de la lumière à l'interface si :

$$\sin i > \frac{n_r}{n_i} \quad (4)$$

Soit encore sur l'angle i lui-même :

$$i > \arcsin\left(\frac{n_r}{n_i}\right) \quad (5)$$

 La condition de réflexion totale n'est pas à connaître par cœur mais à savoir redémontrer.

la réflexion totale est à l'origine de certaines propriétés comme l'éclat des diamants et intervient dans certains phénomènes tels que la formation des arcs-en-ciel. Elle est aussi mise à profit dans différents dispositifs de guidage de la lumière (fibres optiques à saut d'indice, prisme à réflexion totale...).



Application 2

On envoie un faisceau incident à l'interface eau/air sous 30° d'incidence. Y-a-t-il une réflexion totale ?

Réponse

Il y a réflexion totale si $i > i_{\text{lim}}$ avec $i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_r}{n_i}\right)$. Pour $n_i = 1,33$ (eau) et $n_r = 1$ (air), on calcule $i_{\text{lim}} = 0,851 \text{ rad} = 48,8^\circ$. L'angle d'incidence $i = 30^\circ$ est inférieur à i_{lim} donc la lumière n'est pas totalement réfléchie.