

Chapitre O1 – Optique géométrique

Plan du cours

I Description de la lumière

- I.1 Différentes sources de lumière
- I.2 Source ponctuelle monochromatique
- I.3 Milieux optiques
- I.4 Modèle de l'optique géométrique

II Réflexion, réfraction

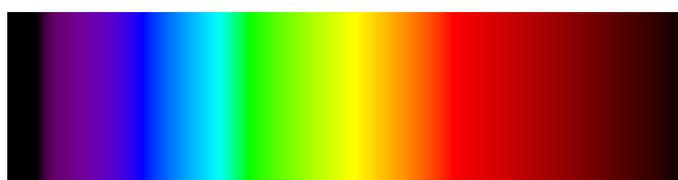
- II.1 Lois de Snell-Descartes
- II.2 Réflexion totale
- II.3 Fibre à saut d'indice

Ce qu'il faut savoir et savoir faire

- Caractériser une source lumineuse par son spectre.
- Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
- Définir le modèle de l'optique géométrique.
- Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.
- Établir la condition de réflexion totale.
- Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

Questions de cours

- Décrire, représenter et comparer les spectres du Soleil, d'une lampe spectrale et d'un laser.
- Indiquer les caractéristiques d'une onde monochromatique qui sont préservées lors d'un changement de milieu et celles qui sont modifiées. Définir l'indice optique du milieu.
- Énoncer avec précision (donc avec schéma!) les lois de la réflexion et de la réfraction.
- Faire un schéma correspondant à la limite de réflexion et établir l'expression de l'angle limite de réflexion totale (App. 7).
- Fibre optique : cône d'acceptance (App. 8).
- Fibre optique : dispersion intermodale (App. 8).



Documents

Document 1 – Spectre visible

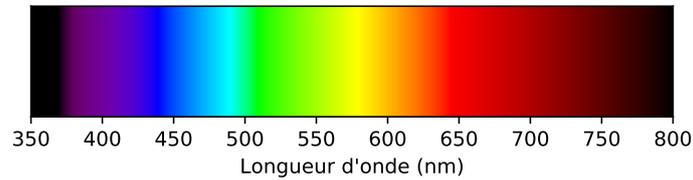


FIGURE 1 – Le spectre visible. Que ce soit sur un écran d'ordinateur (code couleur RVB : rouge, vert et bleu) ou sur une impression (code couleur CMJN : cyan, magenta, jaune et noir), il est impossible de reproduire toutes les couleurs du spectre. Le spectre ci-dessus n'est donc qu'une représentation, aussi fidèle que possible, de la réalité.

Document 2 – Spectres

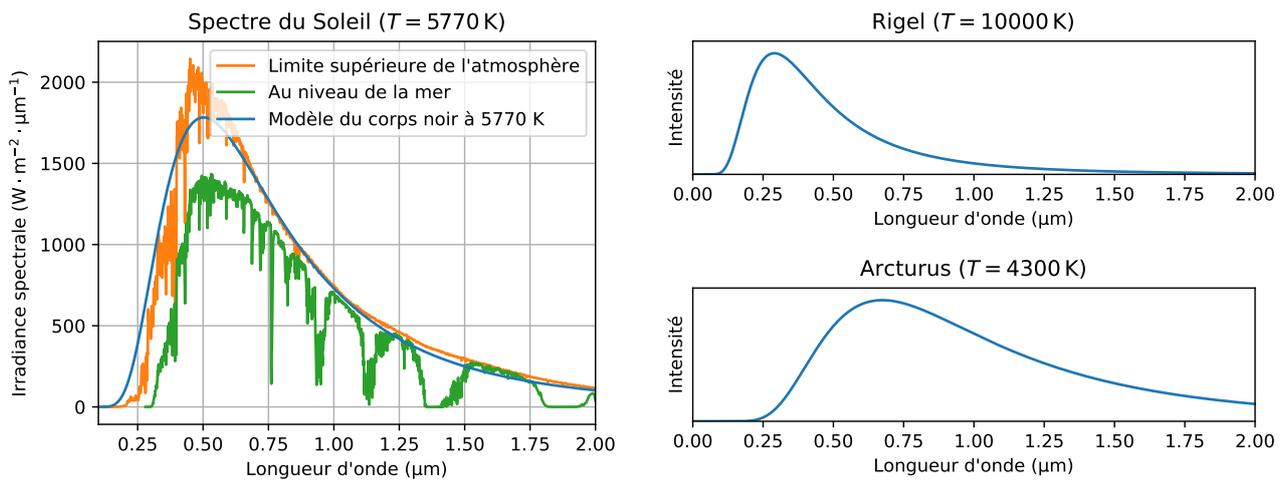
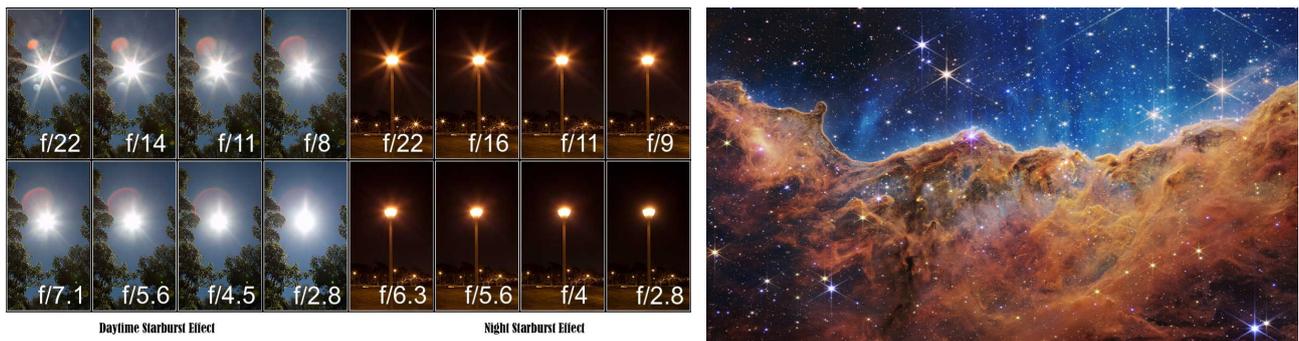
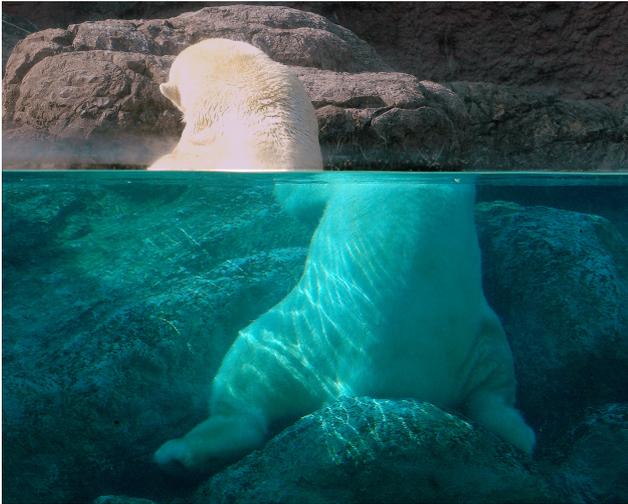


FIGURE 2 – Spectres de quelques étoiles. L'analyse du spectre de la lumière émise par les [étoiles](#) permet d'obtenir de nombreuses informations sur leur température, leur composition, etc...

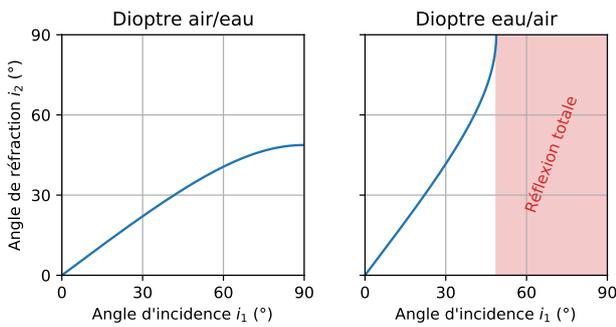
Document 3 – Limites de l'optique géométrique



Document 4 – Illusions



Document 5 – Interface eau-air

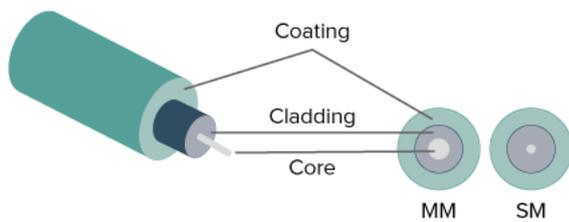


On remarque que la deuxième courbe s'obtient en inversant les rôles de i_1 et i_2 : ceci est une conséquence du **principe de retour inverse de la lumière**. Le trajet suivi par la lumière pour aller d'un point à un autre est indépendant du sens de propagation de la lumière.

[chap01-reflexion_totale.py](#)

FIGURE 3 – Évolution de l'angle de réfraction dans le cas d'une interface entre l'air ($n_{\text{air}} = 1$) et l'eau ($n_{\text{eau}} = 1,33$). La réflexion totale peut intervenir dans le cas d'un rayon lumineux traversant le dioptre eau/air car l'air est moins réfringent que l'eau.

Document 6 – Fibre à saut d'indice



	Fibre MM	Fibre SM
Revêtement	250 μm	250 μm
Gaine	125 μm	125 μm
Cœur	50 μm	9 μm

Crédit : smartoptics.com

FIGURE 4 – Schéma d'une fibre optique. *Coating* : revêtement, *cladding* : gaine, *core* : cœur, *MM (multimode)* : multimode, *SM (singlemode)* : monomode. Le tableau donne les diamètres typiques des différents éléments de la fibre.

1 Description de la lumière

La description physique de la propagation lumineuse sera abordée plus tard dans l'année (Chap. O3 et Q1). On se contentera dans ce chapitre et le suivant d'un modèle simple dans le cadre de l'**optique géométrique**, avec le modèle du rayon lumineux. Pour l'instant, on se contentera de dire que la lumière se propage dans le vide et les milieux matériels transparents.

Définition

La **célérité de la lumière dans le vide**, correspond à sa vitesse de propagation dans le vide. Elle vaut exactement $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et on retiendra

$$c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Un rayonnement lumineux peut être caractérisé par sa **longueur d'onde dans le vide**, souvent notée λ .

Propriété 1

La longueur d'onde **dépend du milieu de propagation**.

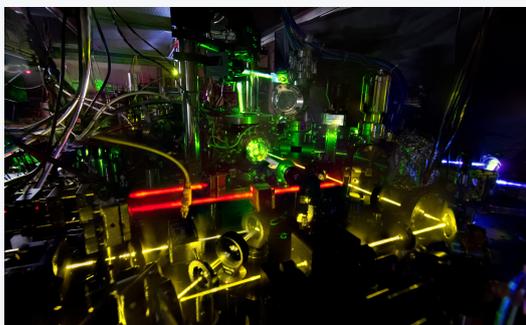
Par convention, on associe les six couleurs de l'arc-en-ciel à six domaines de longueurs d'onde dans le vide du spectre visible.

Propriété 2

Un rayonnement est **visible** si sa **longueur d'onde dans le vide** est comprise entre environ **400 nm et 800 nm** (Doc. 1).



Application 1 – Un nombre pour caractériser la couleur d'un rayonnement



La photographie ci-contre montre la table optique d'une des horloges atomiques les plus précises du monde. Plusieurs lasers sont nécessaires pour manipuler les atomes d'yttrbium utilisées. Quatre rayonnements sont visibles sur cette image, avec des longueurs d'onde différentes : 400 nm, 550 nm, 580 nm et 760 nm.

Associer chaque couleur à la bonne longueur d'onde.

Les sources lumineuses naturelles ou artificielles sont souvent complexes, tant dans la forme que par les rayonnements qu'elles émettent. Il est important d'être capable de les caractériser pour les utiliser ensuite à bon escient ou obtenir des informations sur la source.

1.1 Différentes sources de lumière

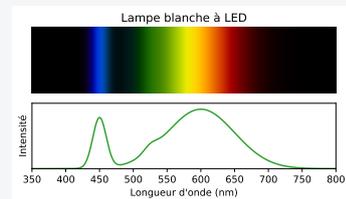
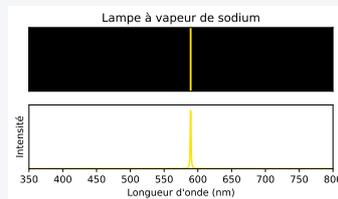
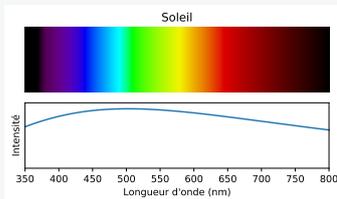
Application 2 – Coucher de soleil et éclairage urbain

De couleurs similaires, le soleil couchant et les lampes de certains lampadaires ne génèrent pourtant pas du tout la même ambiance.



Éclairage autoroutier

En vous appuyant sur les spectres de quelques sources lumineuses représentés ci-dessous et sur vos connaissances, proposer une explication aux différences observées.



Expérience 1 : Spectres

Il est possible d'obtenir qualitativement le spectre d'une source lumineuse à l'aide d'un élément dispersif comme un prisme ou un réseau.

- lampes spectrales Na, Hg;
- fente réglable;
- prisme et ou réseau;
- condenseur;
- lentille $f' \approx 50 \text{ cm}$;
- écran.

Il est possible de caractériser une source de lumière par son **spectre**. Il s'agit de représenter graphiquement l'intensité lumineuse émise par la source en fonction de la longueur d'onde (Doc. 2). On distingue essentiellement deux types de sources associées à deux catégories de spectres.

Spectres continus

Les corps chauds émettent une lumière dont le spectre est un **spectre continu**. Son allure est bien décrite par le modèle du corps noir et dépend de leur température.

Exemple : lampe à incandescence, lave, étoile, etc.

On retiendra notamment que plus un corps est chaud, plus son spectre s'enrichit vers le violet (Doc. 2). En effet on constate expérimentalement que la longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus de lumière est inversement proportionnelle à sa température.

Exemple :

Température du corps noir (K)	λ_{\max}
300 (27°C)	10 μm
5770	500 nm

Spectre de raies

Certains milieux excités émettent quant à eux une lumière dont le spectre est un **spectre de raies**. C'est notamment le cas de gaz atomiques ou moléculaires soumis à des décharges électriques. Le spectre de ces gaz est caractéristique des atomes et molécules qui le composent.

Exemple : lampe à vapeur de sodium, de mercure, etc.

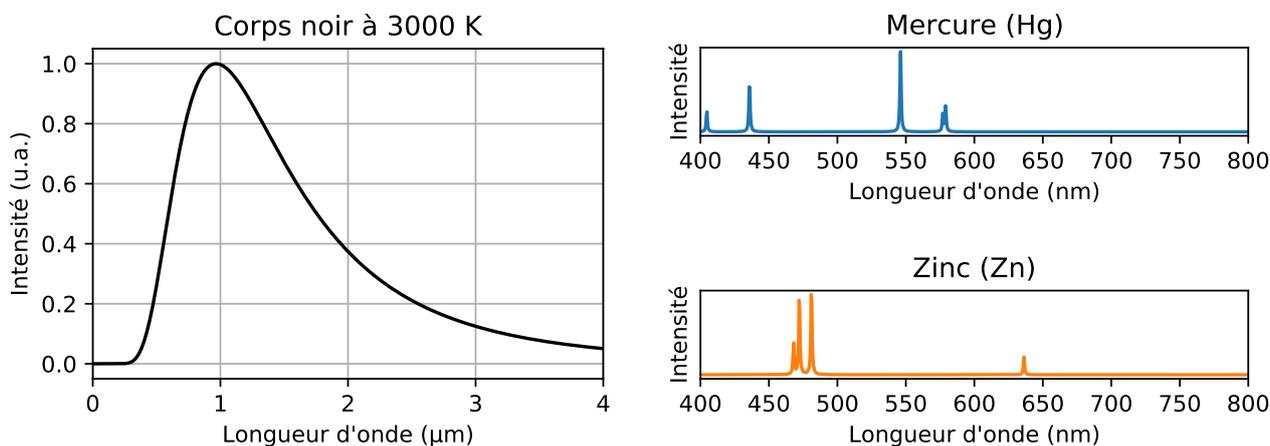


FIGURE 5 – Allures du spectre continu du rayonnement émis par un corps noir chaud (à gauche) et des spectres de raies des rayonnements émis par des lampes spectrales (à droite).

En TP, on utilisera notamment :

- des sources de lumières blanches : Soleil, lampe quartz-iode ou LED (spectre continu) ;
- des lampes spectrales : lampe à vapeur de sodium, mercure, hydrogène, etc. (spectre de raies) ;
- des lasers : laser helium-néon, diode laser, etc. (rayonnement monochromatique).

Application 3 – Quelques spectres

Représenter qualitativement les spectres suivants.

1. Le spectre du rayonnement émis par le Soleil, dont le maximum se situe vers 500 nm ;
2. Le spectre du rayonnement d'une lampe à hydrogène, comprenant une raie intense à 656 nm, une raie d'intensité moyenne à 486 nm et deux raies de faible intensité à 434 et 410 nm.
3. Le spectre d'un laser hélium-néon à 632 nm.

1.2 Source ponctuelle monochromatique

Les sources réelles sont généralement complexes (forme, spectre, amplitude). Pour simplifier, on utilise le modèle de la source ponctuelle monochromatique.

Définition

Une **source ponctuelle monochromatique** est une source lumineuse d'**étendue réduite à un point** (ponctuelle) et qui émet un rayonnement à **une seule longueur d'onde** (monochromatique) dans toutes les directions de l'espace.

La plupart des sources lumineuses peuvent être décrites comme des superpositions de plusieurs sources ponctuelles monochromatiques.

1.3 Milieux optiques

On ne s'intéressera qu'aux **milieux transparents LHI**, dont les propriétés :

- ne dépendent pas de l'intensité lumineuse : **linéaire** ;
- sont identiques en tout point : **homogènes** ;
- ne dépendent pas de la direction de propagation : **isotropes**.

Propriété 3

Dans un milieu LHI et pour un rayonnement monochromatique, la **fréquence** ν du rayonnement, sa **longueur d'onde dans le milieu** λ et sa **vitesse de propagation** v vérifient :

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

ν ne dépend que de la source, mais λ et v dépendent du milieu.

Définition

On définit l'**indice optique** n du milieu

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

où v est la vitesse de propagation de la lumière **dans le milieu** et c la vitesse de propagation de la lumière **dans le vide**.

La vitesse de la lumière dans un milieu est **toujours** inférieure à sa vitesse dans le vide. On a $v < c$, donc $n > 1$.

Exemple :

<i>Milieu</i>	<i>Indice n</i>
<i>Vide</i>	1
<i>Air (0 °C, 1 atm)</i>	1,000 29 \approx 1
<i>Eau</i>	1,33
<i>Verre</i>	\sim 1,5
<i>Diamant</i>	2,42

Application 4 – Longueur d'onde dans le vide, longueur d'onde dans un milieu

Un rayonnement de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 632$ nm traverse un hublot de la Cupola (dôme d'observation de l'ISS), dont l'indice optique est $n = 1,46$.

1. Exprimer sa fréquence ν en fonction des données de l'énoncé et de la vitesse de la lumière dans le vide c . Faire l'application numérique.
2. Exprimer sa longueur d'onde λ dans le hublot en fonction de λ_0 et n . Faire l'application numérique.
3. Quelle est la couleur de ce rayonnement ?

La couleur d'un rayonnement monochromatique est arbitrairement définie par rapport à la **longueur d'onde dans le vide**.

1.4 Modèle de l'optique géométrique

Définition

Un **rayon lumineux** correspond à la **trajectoire suivie par l'énergie lumineuse** pour aller d'un point à un autre. Dans les milieux homogènes et isotropes, la lumière se propage en ligne droite : on le représente par un **segment orienté**.



Dans le cadre du modèle de l'optique géométrique :

- les rayons lumineux sont **indépendants** : ils n'interfèrent pas entre eux ;
- on néglige les phénomènes de **diffraction** (Doc. 3).

Cela suppose de travailler avec des objets (de taille caractéristique a) grands devant la longueur d'onde λ : $a \gg \lambda$.

2 Réflexion, réfraction

Expérience 2 : Tour de magie

Un petit tour de magie pour briller en société...

- tasse à café ;
- pièce de monnaie ;
- eau.

Sur un ou plusieurs schéma(s), représenter la trajectoire de quelques rayons lumineux permettant d'expliquer ce « tour de magie ». Nommer les phénomènes mis en jeu.

2.1 Lois de Snell-Descartes

On s'intéresse au comportement de la lumière quand elle passe d'un milieu optique à l'autre (Doc. 4).

Définition

Un **dioptre** est l'interface entre deux milieux d'indices optiques différents.

n_1	milieu 1
n_2	milieu 2

Expérience 3 : Réflexion, réfraction

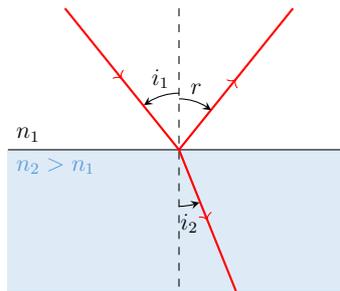
Un rayon incident sur un dioptre peut donner naissance à plusieurs rayons.

- pointeur laser ;
- dioptre ;
- écran.

phet.colorado.edu

Un rayon incident sur un dioptre plan donne *a priori* lieu à deux rayons : un rayon **réfléchi** et un rayon **réfracté**. Pour repérer la direction des différents rayons, on utilise des angles repérés **par rapport à la normale au dioptre** et **orientés** de la normale vers le rayon.

Lois de Snell-Descartes



1^{ère} loi : le rayon incident et la normale au dioptre définissent le **plan d'incidence** dans lequel sont contenus les rayons réfléchis et réfractés.

2^{ème} loi (loi de la réflexion) : les angles d'incidence et de réflexion vérifient

$$r = -i_1.$$

3^{ème} loi (loi de la réfraction) : dans le cas où cette relation a un sens, les angles d'incidence et de réfraction vérifient :

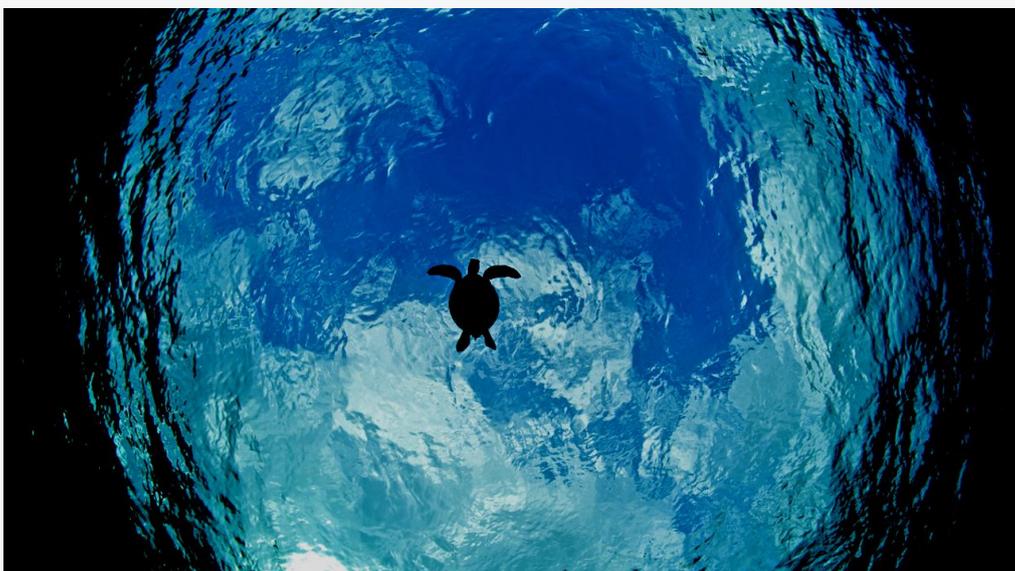
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

Application 5 – Réfraction

Un rayon lumineux se propage dans un milieu d'indice n_1 et arrive au niveau du dioptre avec un autre milieu d'indice n_2 , avec un angle incident $i_1 = 30^\circ$. On suppose que $n_1 < n_2$.

1. Donner un exemple de milieux qui vérifient cette condition, puis faire un schéma.
2. Exprimer, puis calculer l'angle de réfraction i_2 . On prendra $n_1 = 1,00$ et $n_2 = 1,33$.
3. Montrer que la troisième loi de Snell-Descartes est toujours définie, de sorte qu'il existe toujours un rayon réfracté.
4. Exprimer, puis calculer l'angle maximal de réfraction $i_{2,\max}$ correspondant à la valeur maximale de i_2 .

Application 6 – Fenêtre de Snell



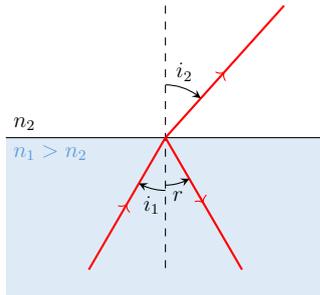
Lorsqu'il relève la tête, un plongeur a l'impression de voir un « gouffre lumineux », c'est-à-dire un disque lumineux entouré d'obscurité, visible sur la photographie ci-dessus.
 En vous appuyant sur un schéma, expliquer qualitativement ce qu'observe le plongeur.

2.2 Réflexion totale

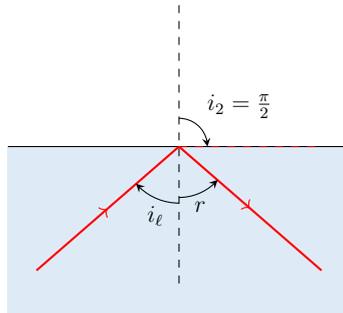
Expérience 4 : Réflexion totale

Dans certains cas on peut assister au phénomène de réflexion totale.

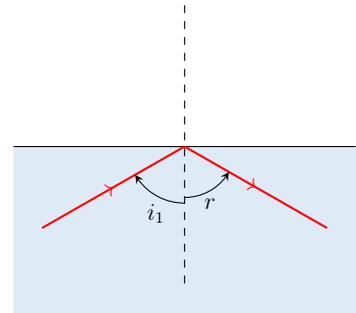
phet.colorado.edu



Réfraction : $i_1 < i_\ell$



Réfraction limite : $i_1 = i_\ell$



Réflexion totale : $i_1 > i_\ell$

Définition

On dit qu'un milieu d'indice n_1 est **plus réfringent** qu'un milieu d'indice n_2 si $n_1 > n_2$.

Application 7 – Limite de réflexion totale

Un rayon lumineux se propage dans l'eau et arrive au niveau de la surface avec un angle d'incidence i_ℓ à la limite de réflexion totale.

1. Faire un schéma.
2. Réécrire la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction dans ce cas.
3. Donner l'expression de l'angle limite i_ℓ en fonction de n_1 et n_2 puis faire l'application numérique.
4. Commenter par rapport au résultat de l'application 5.

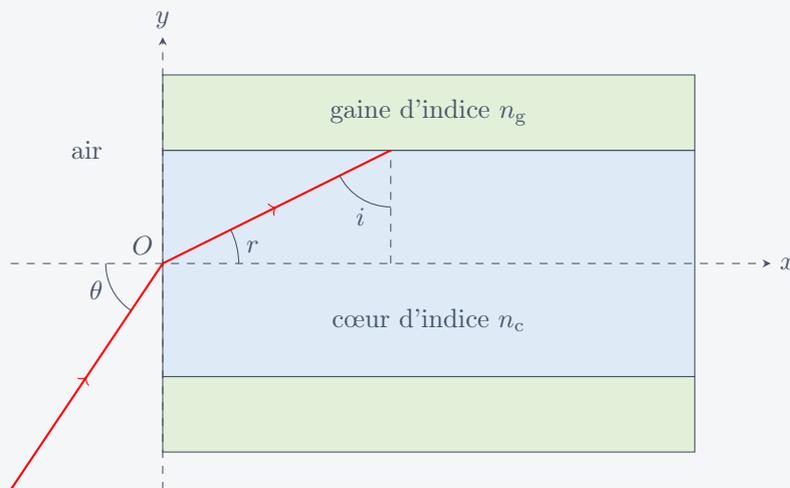
Propriété 4 (à démontrer)

Dans le cas où le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2 ($n_1 > n_2$), on a **réflexion totale** si $i_1 > i_\ell$. L'angle i_2 n'est alors pas défini et il n'y a pas de rayon réfracté.
 L'**angle limite de réflexion totale** est donné par :

$$i_\ell = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

2.3 Fibre à saut d'indice

Application 8 – Fibre à saut d'indice



Une fibre à saut d'indice, représentée ci-dessus, est formée d'un cœur cylindrique d'axe (Ox) , de diamètre $2a$ et d'indice n_c entouré d'une gaine optique d'indice n_g . La fibre est dans l'air. Un rayon contenu dans le plan (xOy) entre dans la fibre au point O avec un angle d'incidence θ . Il y a guidage lorsque le rayon subit une succession de réflexions totales au niveau du dioptré cœur/gaine.

Ouverture numérique

1. Donner la condition sur n_c et n_g pour laquelle le rayon incident peut être guidé par la fibre.
2. Donner la condition sur i pour laquelle le rayon est guidé. Exprimer l'angle d'incidence limite i_ℓ en fonction de n_c et n_g .
3. Montrer que cette condition est vérifiée si l'angle d'incidence θ est inférieur ou égal à un angle limite θ_l . Exprimer $\sin \theta_l$ en fonction de n_c et i_ℓ , puis montrer que l'ouverture numérique $ON = \sin \theta_l$ peut s'écrire :

$$ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}.$$

4. Faire l'application numérique pour $n_c = 1,500$ et $n_g = 1,470$.

Dispersion

On note L la longueur totale de la fibre et c la vitesse de la lumière dans le vide. La lumière entre dans la fibre en couvrant toutes les valeurs d'angle d'incidence comprises entre 0 et θ_l .

5. Représenter le rayon qui traverse le plus rapidement la fibre et celui qui la traverse le plus lentement.
6. Exprimer l'intervalle de temps δt entre le temps de parcours minimal et maximal en fonction de c , n_c , n_g et L .
7. Justifier l'intérêt d'utiliser des matériaux pour le cœur et la gaine de la fibre avec des indices très proches. Quel compromis cela entraîne-t-il ? Comment peut-on y remédier ?

