

Chapitre 1 - Fondements de l'optique géométrique

Table des matières

Introduction	1
I. Sources lumineuses	2
II. Modèle de l'optique géométrique	3
1. Propagation dans le vide	3
2. Propagation dans un milieu transparent	4
3. Modèle de l'optique géométrique	4
III. Lois de Snell - Descartes	5
1. Vocabulaire	5
2. Énoncé des lois de Snell-Descartes	5
3. Réflexion totale	7

Guide de révision du chapitre 1	
Avant le TD	Savoir et Savoir faire du chapitre 1 + exercices du cours
Avant la khôlle	Savoir et Savoir faire du chapitre 1 + exercices du cours + TD : ex 1, 2, 3
Avant le DS	Savoir et Savoir faire du chapitre 1 + exercices du cours + TD : ex 3, 4, 5

Introduction

Au XVIII^e siècle, deux modèles décrivant la nature de la lumière s'opposaient : Newton affirmait que les objets lumineux émettaient des corpuscules obéissant aux lois de la mécanique, tandis que Huygens affirmait que la lumière était une onde. Les expériences d'interférences et de diffraction de Fresnel et Young ont un temps permis d'imposer le modèle ondulatoire de la lumière. À la fin du XIX^e siècle, les travaux de Planck sur le corps noir notamment, ont réintroduit le modèle corpusculaire avec la notion de photon. Aujourd'hui, la lumière est décrite de manière complète par les deux modèles : le modèle corpusculaire (photon) et le modèle ondulatoire (onde électromagnétique). On parle de dualité onde-corpuscule. Ces deux modèles permettent d'expliquer l'ensemble des expériences réalisées jusqu'à maintenant avec la lumière.

Dans ce chapitre et le suivant, on s'intéressera à la modélisation géométrique de la propagation de la lumière et à l'utilisation de la notion de rayon lumineux.

I. Sources lumineuses

La caractérisation des sources lumineuses se fait par leur **spectre d'émission**, exprimé usuellement en termes de longueur d'onde dans le vide plutôt que de fréquence. Il s'agit donc d'une caractéristique ondulatoire.

Parmi les sources lumineuses, on distingue les **sources primaires**, qui émettent de la lumière sans en avoir reçu au préalable, des **sources secondaires**, qui réémettent de la lumière qu'elles ont préalablement absorbé. Quelques sources ne rentrent pas dans ce cadre, en particulier les sources fluorescentes qui réémettent des radiations différentes de celles qu'elles ont absorbé.

Savoir - Caractériser une source lumineuse par son spectre d'émission

• Sources de lumière blanche

Pour chaque exemple de la figure 1, il s'agit d'un **spectre continu** d'une **source polychromatique**. Dans le Soleil ou les lampes à filament, la lumière est émise par un corps chaud, ce qui produit un spectre intrinsèquement continu. Au contraire, les lampes à économie d'énergie ou les LED blanches commencent par émettre un spectre discret (voir le point suivant) dont les radiations sont absorbées et réémises par un matériau fluorescent, appelé luminophore, qui donne un spectre continu.

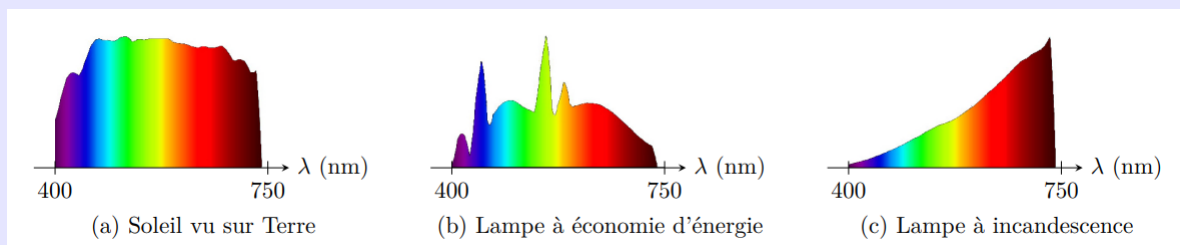


FIGURE 1 – Exemples de spectres d'émission de sources de lumière blanche

• Lampes spectrales

Pour chaque exemple de la figure 2, il s'agit d'un **spectre de raies** d'une **source polychromatique**. Une ampoule contient une espèce chimique à l'état gazeux. On y forme une décharge électrique, ce qui a schématiquement pour effet de porter les atomes du gaz dans un état excité. La désexcitation se fait par émission spontanée de lumière. Les fréquences que contient cette lumière sont reliées à la différence d'énergie entre niveaux des atomes du gaz.

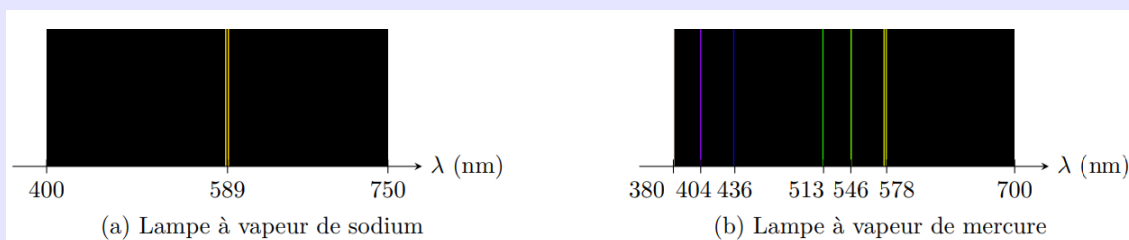


FIGURE 2 – Exemples de spectres d'émission de lampes spectrales

• Lasers

Pour l'exemple de la figure 3, il s'agit d'un **spectre de raies** d'une **source monochromatique**. Les sources les plus courantes sont les lasers hélium-néon et les diodes laser à semi-conducteurs.

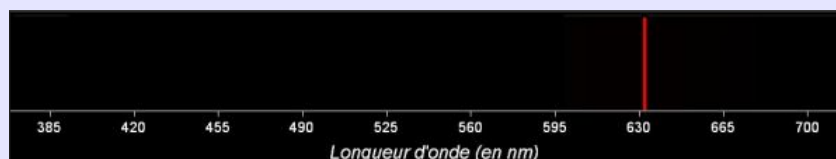


FIGURE 3 – Spectre de raies du laser hélium-néon

Dans la suite nous utiliserons le **modèle de la source ponctuelle et monochromatique** sachant que :

- **source ponctuelle** ($\neq$ étendue) si la lumière provient d'un unique point ;
- **source monochromatique** ($\neq$ polychromatique) si le spectre ne contient qu'une seule radiation.

Une source étendue peut être découpée en une assemblée de sources quasi ponctuelles qui émettent indépendamment les unes des autres. Une source polychromatique peut être décomposée en sources quasi monochromatiques.

II. Modèle de l'optique géométrique

1. Propagation dans le vide

Savoir - Relier la longueur d'onde de la lumière dans le vide, sa fréquence, sa période et sa couleur

- La lumière est une onde électromagnétique se propageant dans le vide à la célérité :

$$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \simeq 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- Lumière visible : longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 \in [400 \text{ nm} ; 800 \text{ nm}]$.
- La couleur de l'onde lumineuse est caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide, notée λ_0 :

Couleur	Bleu	Vert	Jaune	Rouge
Longueur d'onde dans le vide	450 nm	550 nm	600 nm	650 nm

- Relations entre la célérité de la lumière dans le vide c , la longueur d'onde dans le vide λ_0 , la fréquence ν et la période T :

$$c = \lambda_0 \nu \quad ; \quad c = \frac{\lambda_0}{T} \quad \nu = \frac{1}{T}$$

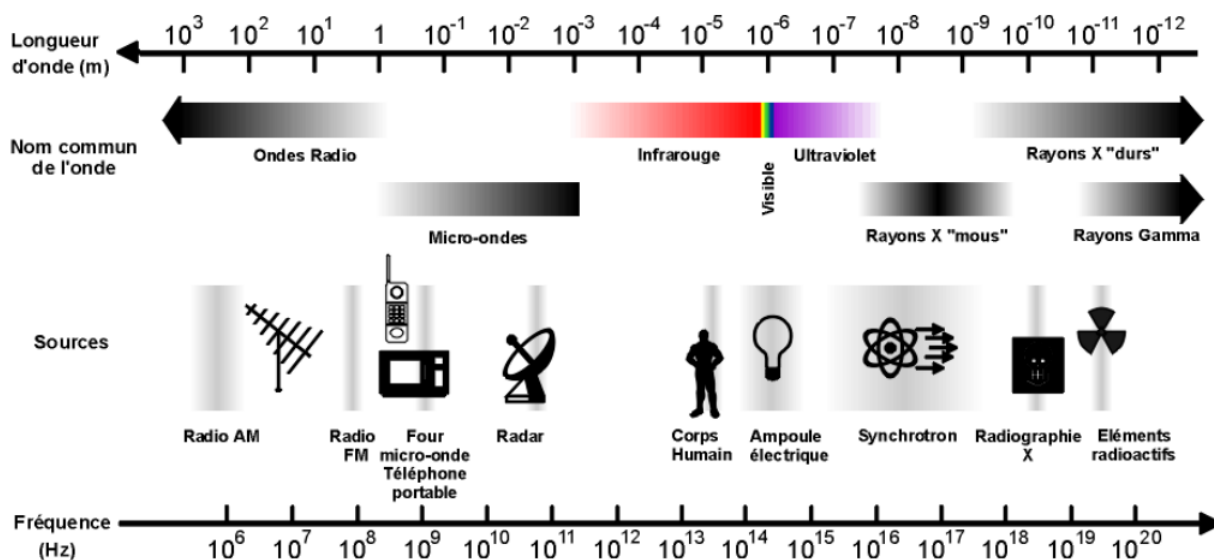


FIGURE 4 – Spectre électromagnétique

2. Propagation dans un milieu transparent

. Propriétés des milieux de propagation

Nous nous placerons dans le cadre de milieux :

- **transparents** : ils n'absorbent pas d'énergie lumineuse ;
- **linéaires** : il n'y a pas de modification de la fréquence de l'onde au cours de la propagation ;
- **homogènes** : les propriétés physiques (température, masse volumique, indice de réfraction) sont identiques en tout point ;
- **isotropes** : la propagation de la lumière se fait de la même façon quelle que soit la direction.

. Indice de réfraction

Savoir - Relation entre indice optique et célérité de la lumière

- On définit l'**indice de réfraction** (optique) d'un milieu transparent comme le rapport de la célérité de la lumière c dans le vide divisée par la célérité de la lumière v dans le milieu transparent :

$$n = \frac{\text{célérité de la lumière dans le vide}}{\text{célérité de la lumière dans le milieu}} = \frac{c}{v}$$

c est la vitesse maximale de la lumière, donc v est toujours inférieure à c , donc $n > 1$.

- La vitesse de propagation d'une radiation lumineuse dans un milieu dispersif dépend de sa fréquence, donc l'indice de réfraction dépend de la fréquence de la radiation.
- Quelques valeurs d'indice de réfraction : $n(\text{vide}) = 1$; $n(\text{air}) = 1,00027 \simeq 1$; $n(\text{eau}) = 1,33$; $n(\text{verre}) = 1,5$

. Longueur d'onde dans un milieu transparent

Savoir - Relation entre indice optique et longueur d'onde dans un milieu transparent

- La fréquence d'une onde est indépendante du milieu dans lequel elle se propage.
- La longueur d'onde λ dans un milieu transparent d'indice n est reliée à la longueur d'onde dans le vide λ_0 :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} < \lambda_0$$

3. Modèle de l'optique géométrique

. Conditions d'application de l'optique géométrique

Savoir - Limites du modèle de l'optique géométrique : interférences, diffraction...

L'approximation de l'optique géométrique de la lumière est valable si les longueurs d caractéristiques du système traversé par la lumière (diamètre de la lentille, du diaphragme, . . .) sont très grandes devant la

longueur d'onde λ : $\frac{\lambda}{d} \ll 1$ ($d > 1000 \lambda$).

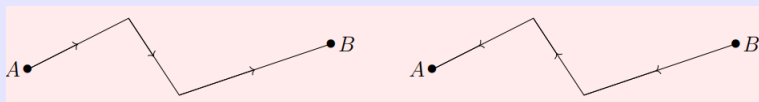
Dans ce cadre, les aspects ondulatoires de la lumière, dont font partie la diffraction et les interférences, sont négligeables.

. Rayons lumineux

Savoir - Modèle de l'optique géométrique : rayons lumineux,...

Dans le cadre de l'optique géométrique, la propagation de l'énergie lumineuse est décrite à l'aide de la notion de **rayons lumineux** qui vérifient les propriétés suivantes :

- **Propagation rectiligne** : Les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans un milieu transparent (d'indice n), homogène et isotrope.
- **Principe du retour inverse de la lumière** : Le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière.



- **Indépendance des rayons lumineux** : Il n'y a pas de phénomènes d'interférences, les rayons lumineux qui se croisent n'interagissent pas entre eux.

III. Lois de Snell - Descartes

1. Vocabulaire

- **Dioptré** : interface séparant deux milieux transparents d'indices différents.
- **Rayon incident** : rayon arrivant sur le dioptré.
- Lorsqu'un rayon lumineux arrive sur un dioptré, ce rayon donne naissance à un **rayon réfléchi** qui repart dans le milieu du rayon incident et à un **rayon réfracté** qui entre dans l'autre milieu.
- Le point I où le rayon incident rencontre le dioptré est appelé **point d'incidence**.
- **Normale** : droite perpendiculaire au dioptré, au point où le rayon incident rencontre le dioptré.
- **Plan d'incidence** : plan contenant la normale et le rayon incident.

2. Énoncé des lois de Snell-Descartes



QR Code - Animation interactive sur les lois de Snell-Descartes. Lien vers : http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptré_plan.php

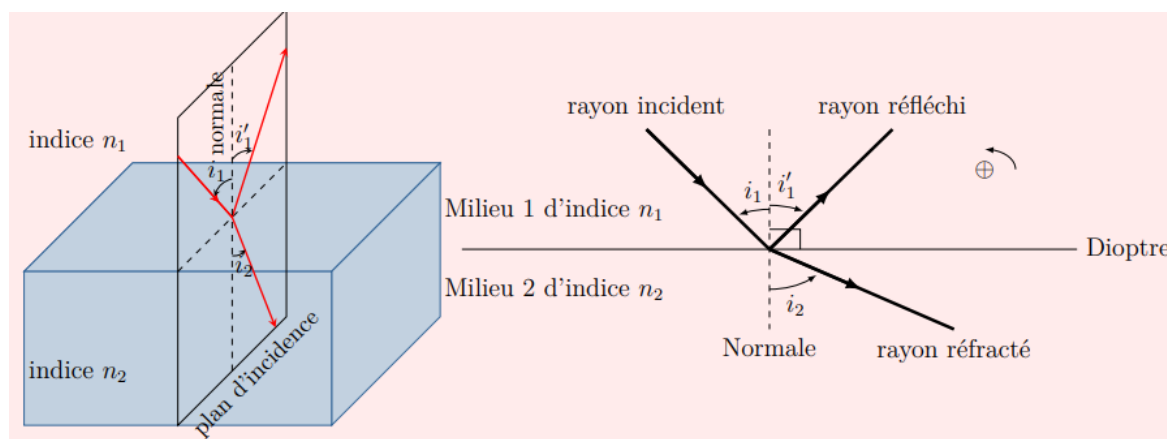


FIGURE 5 – Notations associées à la réflexion et la réfraction

Savoir - Énoncé des lois de Snell-Descartes, angles algébriques

Loi de la réflexion :

- 1) Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence défini par le rayon incident et la normale au point d'incidence.
- 2) L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réflexion i'_1 ont des valeurs égales mais opposées :

$$i'_1 = -i_1$$

Loi de la réfraction :

- 1) Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence défini par le rayon incident et la normale au point d'incidence.
- 2) L'angle d'incidence i_1 et de réfraction i_2 sont reliés par la relation suivante :

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

Les **angles d'incidence, de réflexion et de réfraction** sont des **angles orientés**, qui sont définis **algébriquement à partir de la normale** :

- les angles sont **positifs** pour une **rotation dans le sens trigonométrique** ;
- les angles sont **négatifs** pour une **rotation dans le sens horaire**.

Exercice 1

Énoncé :

1. Que se passe-t-il si le rayon incident arrive selon la normale ?
2. Comparer les angles de réfraction et d'incidence selon les valeurs respectives des deux indices de réfraction.

Correction :

1. Un rayon arrivant selon la normale arrive avec un angle d'incidence $i_1 = 0$.

D'après la loi de Snell-Descartes, $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$, comme $n_2 \neq 0$, $\sin(i_2) = 0$, soit $i_2 = 0$.

Un rayon incident arrivant selon la normale au dioptre n'est pas dévié.

2. — Si le rayon passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu moins réfringent, c'est-à-dire d'indice $n_2 < n_1$.

D'après la loi de Snell-Descartes $\sin(i_2) = \underbrace{\frac{n_1}{n_2}}_{>1} \sin(i_1)$, donc

$$\sin(i_2) > \sin(i_1).$$

Or les angles $i_1, i_2 \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, intervalle sur lequel la fonction sinus est croissante.

Ainsi $i_2 > i_1$: le rayon s'éloigne de la normale lorsqu'il passe dans un milieu moins réfringent.

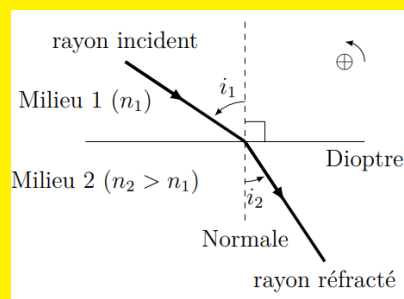
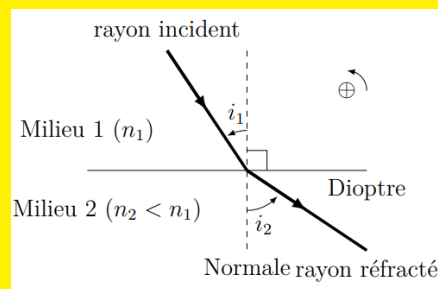
— Si le rayon passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu plus réfringent, c'est-à-dire d'indice $n_2 > n_1$.

D'après la loi de Snell-Descartes $\sin(i_2) = \underbrace{\frac{n_1}{n_2}}_{<1} \sin(i_1)$, donc

$$\sin(i_2) < \sin(i_1).$$

Or les angles $i_1, i_2 \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, intervalle sur lequel la fonction sinus est croissante.

Ainsi $i_2 < i_1$: le rayon se rapproche de la normale lorsqu'il passe dans un milieu plus réfringent.



Exercice 2

Énoncé : Un rayon lumineux dans l'air tombe sur la surface de l'eau d'indice 1,33.

1. Déterminer l'angle de réfraction pour un angle d'incidence de 30° .
2. Déterminer l'angle d'incidence pour un angle de réfraction de 30° .

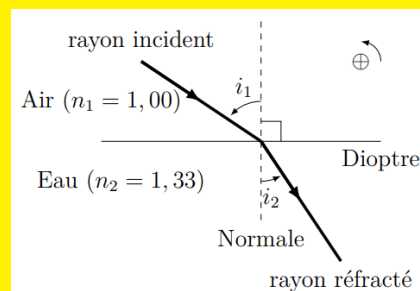
Correction :

1.

$$n_1 = 1,00, i_1 = 30^\circ \text{ et } n_2 = 1,33.$$

Loi de Snell-Descartes : $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$, soit :

$$i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin(i_1)\right) = 22,1^\circ.$$



2. Même schéma et mêmes notations que précédemment : $i_1 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \sin(i_2)\right) = 41,7^\circ$

Remarque sur les mirages froid et chaud : les observations sont dues à l'inhomogénéité du milieu traversé par la lumière. La densité de l'air diminue quand la température augmente, ce qui provoque une diminution de l'indice optique. Le milieu n'étant pas homogène, les rayons lumineux ne sont pas rectilignes, mais nos cerveaux interprètent la lumière arrivant dans les yeux comme venant en ligne droite, ce qui donne l'impression de voir quelque chose à un endroit où ça n'est pas : c'est le mirage.

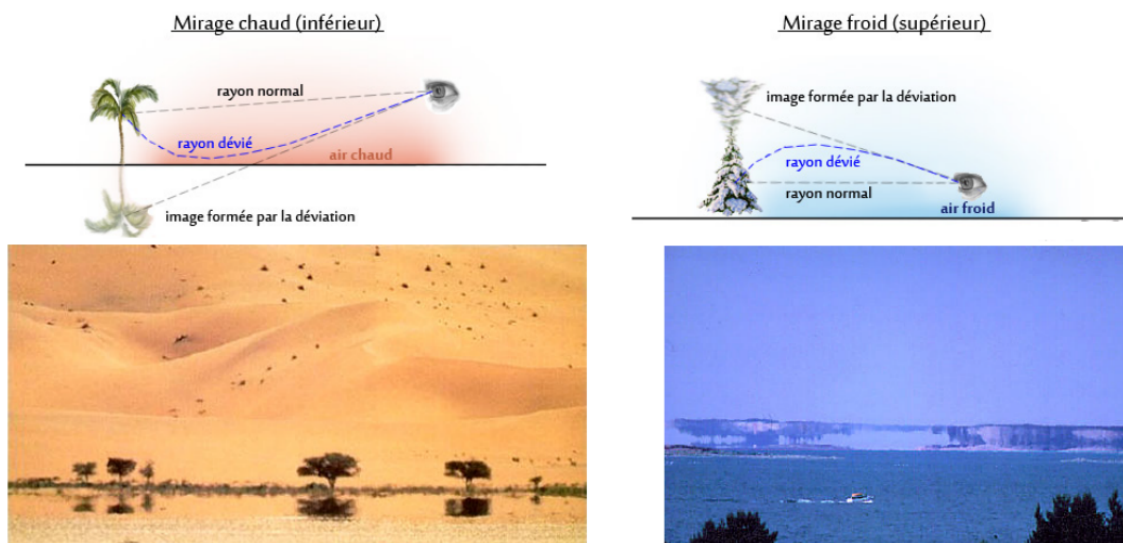


FIGURE 6 – Mirages et propagation des rayons lumineux

3. Réflexion totale

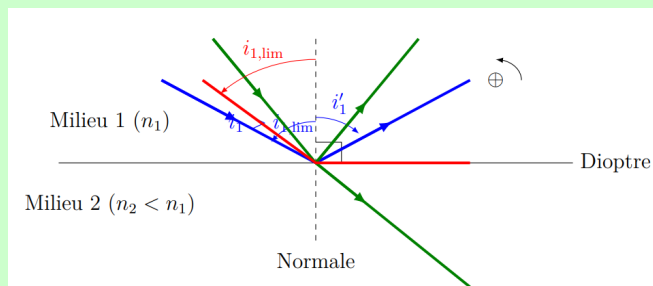
Savoir faire - Exercice 3 Établir la condition de réflexion totale

Énoncé :

1. Lorsque la lumière passe d'un milieu 1 à un milieu 2 moins réfringent ($n_2 < n_1$), que se passe-t-il si l'angle d'incidence i_1 « devient trop grand » ?
2. Se produit-il la même chose lorsque l'indice n_2 du deuxième milieu est supérieur à celui du premier milieu n_1 ?
3. Déterminer l'angle d'incidence limite $i_{1,lim}$ au-delà duquel il n'existe plus de rayon réfracté. Que devient alors l'énergie lumineuse ? Ce phénomène s'appelle la **réflexion totale**.

Correction :

1. Cf animation lien ci-dessus.



Le rayon s'éloigne de la normale lorsque le rayon passe dans un milieu moins réfringent : $i_2 > i_1$.

Ainsi $i_2 = \frac{\pi}{2}$ pour un angle $i_{1,lim} < \frac{\pi}{2}$. Pour $i_1 > i_{1,lim}$, i_2 ne peut plus exister, il n'y a plus de rayon réfracté.

L'énergie lumineuse ne pouvant disparaître, la totalité de la lumière incidente est réfléchie : c'est la réflexion totale.

2. Lorsque le rayon passe dans un milieu plus réfringent, le rayon se rapproche de la normale : $i_2 < i_1$. L'angle de réfraction restera inférieur à $\frac{\pi}{2}$ quelque soit l'angle i_1 . Dans ce cas, il ne pourra se produire le phénomène de réflexion totale.

3. L'angle d'incidence limite $i_{1,lim}$ au-delà duquel il n'existe plus de rayon réfracté est l'angle pour lequel l'angle $i_2 = \frac{\pi}{2}$.

D'après la loi de Snell-Descartes, $n_1 \sin(i_{1,lim}) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$, soit $i_{1,lim} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$.

L'énergie lumineuse est entièrement transmise dans le rayon réfléchi.

Savoir faire - Établir la condition de réflexion totale

1. Vérifier que le rayon lumineux se propage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent (deuxième milieu d'indice plus faible que le premier).
2. Calculer l'angle d'incidence limite qui permet d'avoir un angle de réfraction égal à $\frac{\pi}{2}$, en utilisant la loi de Snell-Descartes de la réfraction.
3. Il y a réflexion totale si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle d'incidence limite.

Savoir - Conditions pour avoir une réflexion totale

Pour avoir réflexion totale, le rayon transmis ne doit pas exister. Pour cela, il faut :

- ✓ que le rayon lumineux se propage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent (deuxième milieu d'indice plus faible que le premier) ;
- ✓ que l'angle d'incidence soit supérieur à l'angle d'incidence limite obtenu pour un angle de réfraction égal à $\frac{\pi}{2}$.

Exercice 4

Enoncé : Dans le cas du dioptre air-eau, déterminer les conditions pour avoir réflexion totale. On donne : $n_{air} = 1,00$ et $n_{eau} = 1,33$.

Correction :

Pour qu'il se produise le phénomène de réflexion totale, il faut vérifier deux conditions :

— le deuxième milieu doit être moins réfringent, ainsi il y a réflexion totale dans le cas du dioptre air-eau si le rayon lumineux passe de l'eau vers l'air.

— l'angle d'incidence i_1 doit être supérieur à l'angle d'incidence limite $i_{1,lim}$ pour lequel l'angle de réfraction est égal à $\frac{\pi}{2}$.

D'après la loi de Snell-Descartes :

$$n_{eau} \sin(i_{1,lim}) = n_{air} \underbrace{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}_{=1}$$

Soit $i_{1,lim} = \arcsin\left(\frac{n_{air}}{n_{eau}}\right) = 48,8^\circ$. Il se produit le phénomène de réflexion totale lors du changement de milieu eau→air avec un angle d'incidence supérieur à $48,8^\circ$.

Chapitre 1 - Fondements de l'optique géométrique		
Savoir	☺	☹
- Caractériser une source lumineuse par son spectre (I)		
- Relier la longueur d'onde de la lumière dans le vide, sa fréquence, sa période et sa couleur (II.1)		
- Relation entre indice optique et célérité de la lumière (II.2)		
- Relation entre indice optique et longueur d'onde dans un milieu transparent (II.2)		
- Limites du modèle de l'optique géométrique : interférences, diffraction.. (II.3)		
- Modèle de l'optique géométrique : rayons lumineux, ... (II.3)		
- Énoncé des lois de Snell-Descartes, angles algébriques (III.2)		
- Conditions pour avoir une réflexion totale (III.3)		
Savoir faire		
- Établir la condition de réflexion totale (III.3 : ex 3 + méthode)		
- Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice (TD : ex 3)		