

Table des matières

1	Lumière et sources lumineuses	3
1.1	Le spectre électromagnétique et la lumière visible	3
1.2	Les sources de lumière	4
2	Le modèle géométrique de la lumière	5
2.1	Notion de rayon lumineux	5
2.2	Cadre et limites du modèle	6
2.3	L'indice optique	7
2.4	Milieux de propagation	8
2.5	Les hypothèses du modèle géométrique	8
3	Trajectoire des rayons lumineux et lois de Snell-Descartes	9
3.1	Mise en évidence expérimentale	9
3.2	Énoncé des lois	10
3.3	Application au calcul d'angles de réfraction	10
3.4	Réflexion totale d'un rayon	12
4	Applications	13
4.1	Marcher sur un oursin	13
4.2	Modèle de la fibre optique à saut d'indice	16
4.3	Les milieux d'indice variable	18



Savoirs ♥

- ▷ ♥ Propriété de la lumière : vitesse, longueur d'onde, fréquence, lumière visible
- ▷ ♥ Notion de source primaire, secondaire, spectre d'émission

- ▷ ♥ Indice optique : définition (lien avec c) et propriété avec les longueur d'onde
 - ▷ Vocabulaire : homogène, isotrope, réfringence
 - ▷ Valeur de n_{air} , n_{verre} , n_{eau}

- ▷ ♥ Notion de rayon lumineux, lois de propagation.
Approximation de l'optique géométrique et domaine d'application

- ▷ ♥ Loi de Snell-Descartes :
 - ▷ milieu incident, milieu réfracté, point d'incidence, plan d'incidence
 - ▷ notion de rayon incident, réfracté, réfléchi
 - ▷ loi des plans, loi de la réflexion, loi de la réfraction

Savoir Faire

-  *Caractériser une source lumineuse par son spectre d'émission. Savoir discuter couleur de la source ; longueurs d'onde émises ; ...*

-  *Relier longueur d'onde - fréquence - vitesse de propagation dans le vide et indice optique*

-  *Tracer la trajectoire d'un rayon passant par un dioptre. Tracer la trajectoire d'un rayon passant par plusieurs milieux d'indices optiques différents*

-  *Etablir la condition de réflexion totale et calcul de l'angle d'incidence limite.*

-  *Tracer la trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu inhomogène. Expliquer qualitativement le phénomène des mirage.*

En physique classique, le traitement des phénomènes lumineux fait l'objet de deux théories complémentaires :

- l'**optique ondulatoire** : la lumière est vue comme une onde électromagnétique. Les propriétés ondulatoires de la lumière permettent d'expliquer certains phénomènes tels que les interférences lumineuses ou la diffraction.
- l'**optique géométrique**, basée sur la notion de rayon lumineux qui permet d'expliquer la physique du visible dès lors que les obstacles rencontrés au cours de la propagation de la lumière sont assez "grands". Nous allons introduire le formalisme associé à l'optique géométrique dans ce chapitre.

1 Lumière et sources lumineuses

Définition. Lumière

La lumière est une onde électromagnétique, mise en évidence par des phénomènes physiques typiques des ondes (interférence, diffraction, ...).

Sa nature ondulatoire est connue depuis le *XVII*^{ème} siècle. Une onde est caractérisée par :

- ▷ sa fréquence f
 - ▷ sa célérité, ou vitesse de propagation, c
 - ▷ sa longueur d'onde λ
- **Attention !** c et λ dépendent du milieu de propagation, au contraire de la fréquence qui elle est **fixe**.

Propriété. Lien fréquence-célérité-longueur d'onde

$$c = \lambda \times f$$

1.1 Le spectre électromagnétique et la lumière visible

Propriété. Fréquence de la lumière

On caractérise la lumière par sa fréquence, entre 10^2 Hz et 10^{22} Hz.

Les rayonnements électromagnétiques connus couvrent une gamme de fréquence très étendue, sur plus de 20 ordres de grandeurs.

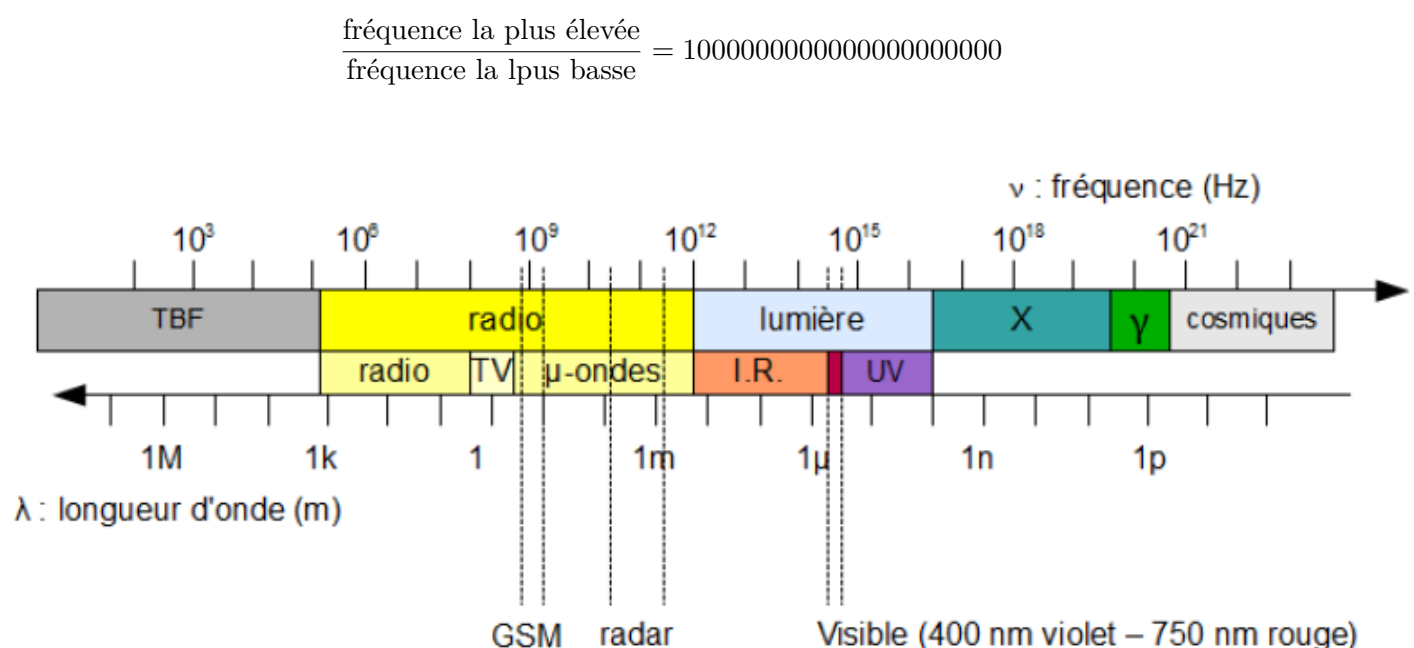


Fig. 1 – Le spectre électromagnétique et longueur d'onde dans le vide.

Propriété. Lumière visible

La lumière visible est une onde électromagnétique, qui correspond à ce que l'on appelle le « visible » de ce spectre. Cela correspond à des longueurs d'ondes dans le vide comprises entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge).



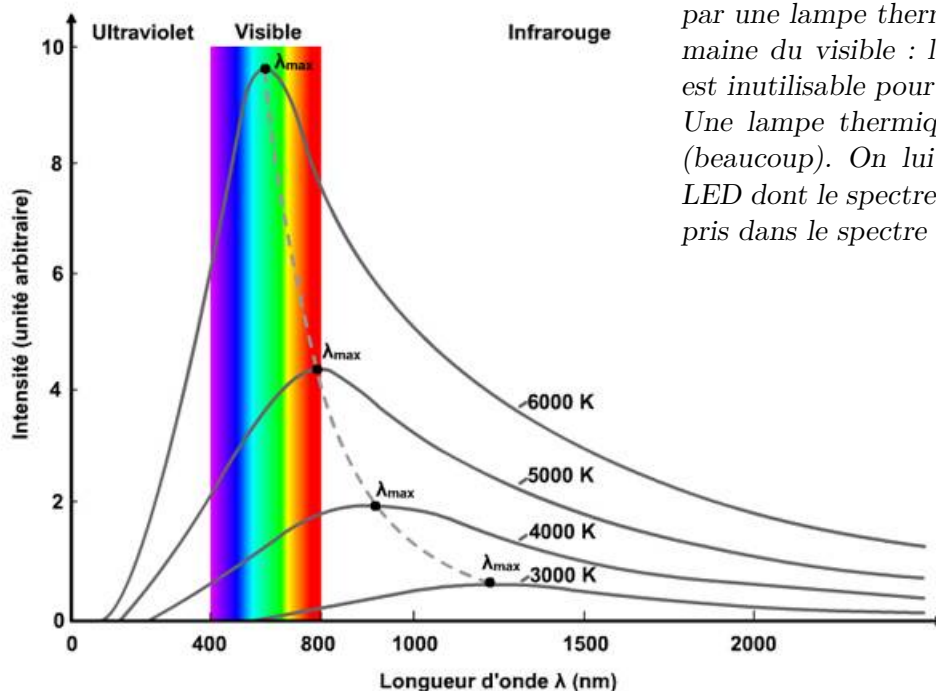
💣💣💣 **Attention !** Même si on caractérise le plus souvent une couleur (rouge) par sa longueur d'onde dans le vide (800nm), une couleur est caractérisée par sa fréquence !

1.2 Les sources de lumière**► Notion de spectre d'émission**

Quelle est la fréquence de la lumière du Soleil ? Il est impossible de répondre à cette question car la lumière du Soleil ne possède pas une seule fréquence mais est composée d'une infinité de fréquence. On caractérise une source lumineuse par son spectre d'émission.

Définition. Spectre d'émission d'une source lumineuse

Le spectre d'émission représente la contribution des différentes radiations composant le rayonnement émis par une source lumineuse en fonction de leur longueur d'onde.

Exemple 1 :

Spectre d'un corps noir en fonction de la température de couleur

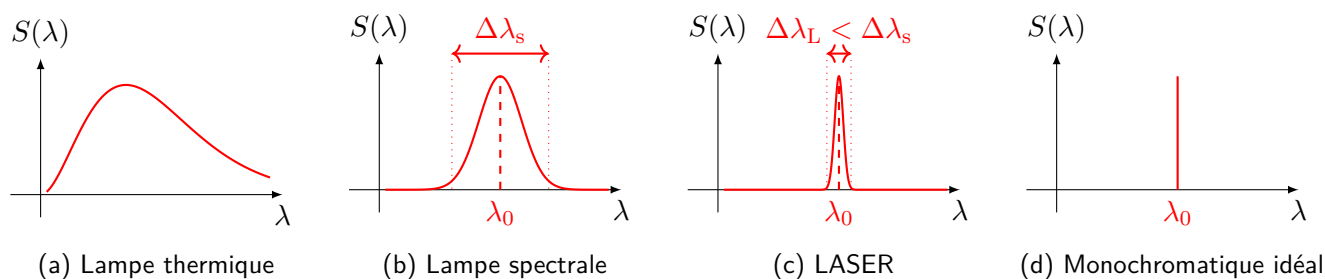
Une grande partie des longueurs d'ondes émises par une lampe thermique ne font pas partie du domaine du visible : la majorité de la lumière émise est inutilisable pour voir.

Une lampe thermique éclaire (un peu) et chauffe (beaucoup). On lui préfère désormais utiliser des LED dont le spectre d'émission est d'avantage compris dans le spectre de la lumière visible.

► Les sources primaires**Définition. Sources primaires**

Les **sources primaires** sont naturellement lumineuses et émettent leur propre lumière.

| **Exemple 2** : Le Soleil, une ampoule, ...



Exemple 3 : Dans le cas d'une lampe spectrale, si $\lambda_0 \simeq 800\text{nm}$, la couleur de la lampe nous apparaît rouge. Néanmoins la lumière qu'elle émet est composée de nombreuses autres "couleurs".

Dans le cours, on supposera que toutes les sources lumineuses sont purement **monochromatiques**, c'est-à-dire qu'elle ne contiennent qu'une seule fréquence sans étalement du spectre lumineux. Ce modèle est purement idéal et n'existe pas dans la réalité, mais permet de bien décrire les processus.

Définition. Lumière blanche

La lumière blanche est une lumière dont le spectre est continu et contient toutes les longueurs d'ondes du domaine visible à parts égales.

| **Application 1** : Dessiner le spectre d'émission de la lumière blanche.

► **Les sources secondaires**

Définition. Sources secondaires

Les **sources secondaires** ne produisent pas de lumière et ne font que la retransmettre.

| **Exemple 4** : la Lune, les murs, les miroirs, nous ...

2 Le modèle géométrique de la lumière

Notion de modèle

L'étude de la lumière s'est développé avec pour objectif d'étudier les instruments d'optiques construits empiriquement (loupe, longue-vue, lunette astronomique, ...). On ne cherche donc pas à construire un modèle le plus "*vrai*" possible (si tant que cette notion a du sens), mais à construire une **modèle simplifié** qui *fonctionne à l'échelle où on souhaite l'appliquer*.

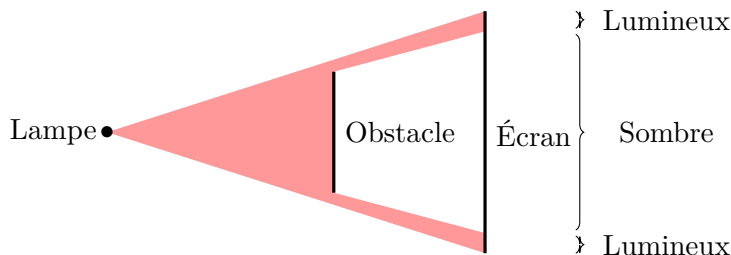
2.1 Notion de rayon lumineux

On a vu que la lumière est une onde lumineuse. Mais a-t-on vraiment besoin de cette information ? Son caractère purement ondulatoire ne se manifeste que sur des petites échelles : bien souvent, on peut se contenter d'une approche géométrique.

Dessignons un soleil :

► Un outil théorique : le rayon lumineux.

Réalisons l'expérience suivante : on éclaire un mur avec une lampe en mettant un obstacle devant. De façon évidente, on observe l'ombre de l'obstacle. Tout se passe comme si la lumière se propageait en ligne droite.



Définition. Rayon lumineux

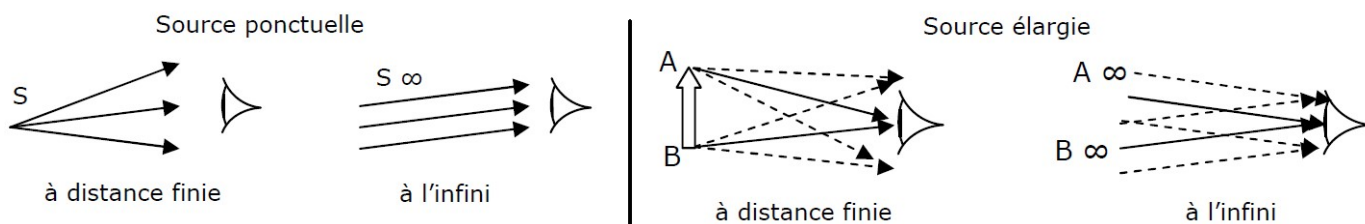
Un rayon lumineux matérialise la propagation de la lumière. On le représente par un trait et une flèche qui indique le sens de la propagation de la lumière.

Un rayon lumineux :

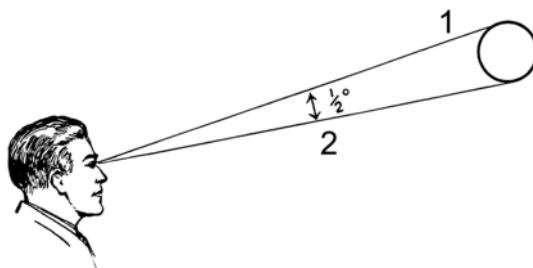
► Vocabulaire et sources lumineuses

▷ **faisceau lumineux** : ensemble des rayons partant d'un même point.

On étudie souvent le cas de **sources ponctuelles** qui représente une source de dimension infiniment petite. Que voit-on pour une source dans différents cas ?



▷ La **taille/diamètre apparente/angularaire** : angle formé entre ses points extrêmes au point d'observation.



2.2 Cadre et limites du modèle

Ce modèle à l'air bien simpliste mais il est vrai **tant qu'on reste dans le cadre dans lequel il s'applique**.

Définition. Approximation de l'optique géométrique (OG)

L'approximation de l'optique géométrique revient à négliger tout phénomène de diffraction.

Propriété. Domaine d'application de l'OG

La taille des objets/obstacles qu'on considérera doit être largement supérieur à la longueur d'onde de la lumière considéré.

Exemple 5 : Le diamètre d de l'ouverture d'un appareil photo est de $d = 2\text{mm}$. Peut-on appliquer les lois de l'OG à cet appareil ? Et si on utilisait des ondes radio ?

CORRECTION

Un appareil photo doit fonctionner avec le domaine visible de la lumière. la longueur d'onde λ de la lumière visible est de l'ordre de 500nm . On a donc $d\lambda \sim 4000$. On peut raisonnablement appliquer les lois de l'OG.

Par contre avec des ondes radios ($\lambda \sim 1\text{cm}$), cela n'est plus possible.

2.3 L'indice optique

Dans le vide, la célérité des ondes électromagnétiques est de

$$c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Dans les milieux matériels, la vitesse des ondes électromagnétiques est modifiée.

Définition. Indice optique

Soit une onde électromagnétique se propageant à la célérité c dans un milieu. On définit l'**indice optique** n d'un milieu par la relation

$$c = \frac{c_0}{n}$$

avec c_0 la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide. L'indice optique est une grandeur sans dimension et sans unités.

Rien ne peut aller plus vite que la lumière : $c < c_0$. En remplaçant c par sa définition, il vient $n > 1$.

Propriété.

Les indices optiques sont toujours supérieurs à 1.

Milieu	Vide	Air	Eau	Verre
n	1	≈ 1	≈ 1.33	1.5 à 1.8

Astuce : dans la majorité des cas, plus un milieu est dense plus n est grand.

► Conséquences sur les longueurs d'ondes

Considérons une onde de fréquence f , passant du vide dans un milieu d'indice n . $f = f_{\text{vide}} = f_{\text{milieu}}$. Comme $f = c/\lambda$

$$\frac{c_0}{\lambda_0} = \frac{c}{\lambda}$$

avec c_0 et λ_0 la vitesse et la longueur d'onde dans le vide et c et λ la vitesse et la longueur d'onde dans le milieu.

Propriété. Longueur d'onde dans un milieu matériel

Dans un milieu d'indice n , la longueur d'onde λ d'une onde électromagnétique est modifiée et vaut

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

avec λ_0 sa longueur d'onde dans le vide et n l'indice optique du milieu.

💡💡💡 **Attention !** C'est la fréquence qui impose la couleur d'une onde (et non pas la longueur d'onde) : une onde lumineuse ne change pas de couleur en changeant de milieu !

| **Application 2** : Quelle est la longueur d'onde dans l'eau d'une lumière rouge ?

2.4 Milieux de propagation

Dans tout ce qui va suivre, on se placera dans le cas où le milieu de propagation est homogène et isotrope :

Définition. Milieu homogène :

Les propriétés physiques (densité, indice de réfraction, ...) d'un milieu homogène sont les mêmes en tout point du milieu.

Exemple 6 :

- ▷ *homogène* : un morceau de verre, de l'eau à température uniforme, ...
- ▷ *non-homogène* : tout milieu dans lequel la température varie dans l'espace

Définition. Milieu isotrope :

Les propriétés physiques d'un milieu isotrope sont identiques dans toutes les directions de propagation du rayon lumineux.

Exemple 7 : Quand on fait des glissades en chaussettes :

- ▷ *isotrope* : un carrelage
- ▷ *non-isotrope* : du vieux parquet (il y a un sens plus simple que l'autre, suivant les lattes du parquet)

2.5 Les hypothèses du modèle géométrique

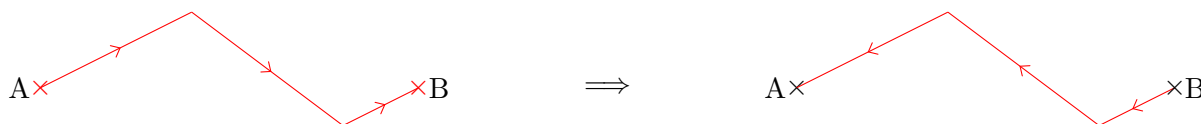
Propriété. Indépendance des rayons lumineux

Les rayons lumineux sont **indépendants** : ils n'interagissent pas entre eux et donc peuvent se croiser sans conséquence.

| **Remarque** : Les sabres LASER, si jamais ils existaient, ne seraient pas décrits avec l'OG.

Propriété. Principe du retour inverse

Pour aller de $A \rightarrow B$ la lumière prend le même "chemin" que pour aller de $B \rightarrow A$.



| **Remarque** : C'est le classique : "si je vois quelqu'un dans un miroir, cette personne me voit également dans le miroir."

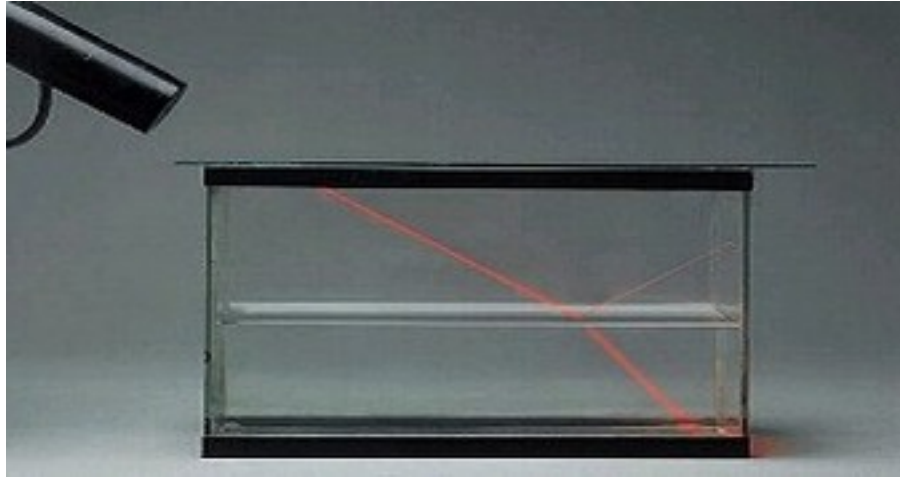
On va enfin chercher à décrire comment un rayon lumineux se propage dans un milieu.

3 Trajectoire des rayons lumineux et lois de Snell-Descartes

3.1 Mise en évidence expérimentale

On envoie un rayon lumineux depuis un LASER dans de l'eau. Dans l'air et dans l'eau "tout va bien", le rayon va tout droit.

| **Expérience 1** : Réflexion et réfraction d'une lumière laser sur un dioptre air/eau.



Propriété. Propagation dans un milieu homogène

Dans des milieux homogènes, (*i.e.* indice optique n constant), les rayons lumineux se propagent en **ligne droite**.

Par contre à l'interface air-eau, il se passe quelque chose.

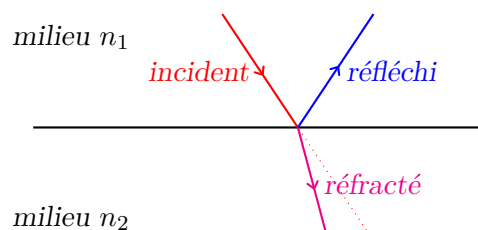
Définition. Dioptre

On appelle **dioptre** la surface de séparation entre deux milieux d'indices différents.

Au passage du dioptre, on observe que le rayon incident se partage entre :

- ▷ un rayon qui se situe du même côté du dioptre que le rayon incident. On dit qu'il y a **réflexion**, on parle de rayon réfléchi.
- ▷ un rayon qui se trouve de l'autre côté du dioptre. On dit qu'il y a **réfraction**, on parle de rayon réfracté. De plus, le rayon réfracté est dévié par rapport au rayon incident.

Exemple 8 : Si on en fait un schéma :



Définition. Point d'incidence

On appelle **point d'incidence**, généralement noté I , le point où le rayon incident rencontre la surface du dioptre.

Définition. Normale au dioptre

La droite passant par I , orthogonale à la surface du dioptre est appelée **normale en I** .

Définition. Plan d'incidence

Le plan contenant le rayon et la normale en I est appelé **plan d'incidence**.

3.2 Énoncé des lois

Théorème. Les trois lois de Snell-Descartes

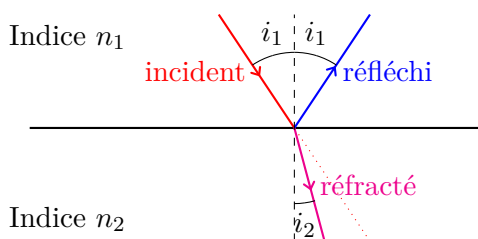
1 - Loi des plans Les rayons réfléchis et réfractés sont situés dans le plan d'incidence.

2 - Loi de la réflexion :

$$i_1 = i'_1.$$

3 - Loi de la réfraction :

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



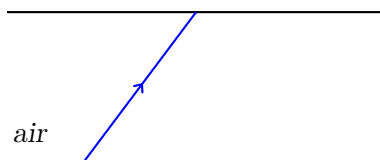
*** Attention ! Tous les angles sont mesurés par rapport à la normale au dioptre, pas par rapport au dioptre !

Déviation d'un rayon lumineux :

l'angle $D_{\text{réfraction}}$ entre le prolongement du rayon incident et le rayon émergent. On a alors $D_{\text{réfraction}} = |i_2 - i_1|$.

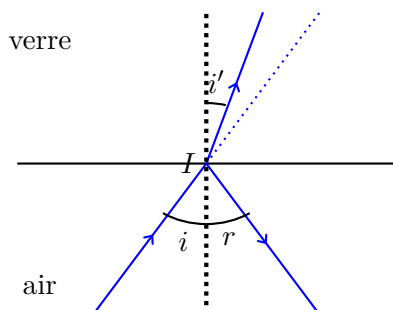
Exemple 9 : Représenter les rayons réfléchis, réfractés. Placer les angles d'incidence, de réflexion, de réfraction et de déviation.

verre



air

Pour quel valeur d'angle d'incidence, un rayon n'est pas dévié ?



Loi de Snell-Descartes en I :

$$n_a \sin i = n_v \sin i'$$

On remarque que si $i = 0$ (le rayon arrive perpendiculairement au dioptre) alors $i' = 0$ également et donc le rayon n'est pas dévié.

Propriété. Rayon non dévié

Un rayon arrivant perpendiculairement au dioptre n'est pas dévié.

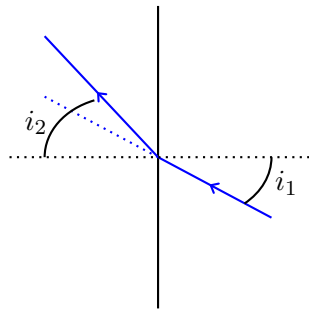
3.3 Application au calcul d'angles de réfraction

Définition. Réfringence

Soit deux milieux d'indice n_1 et $n_2 < n_1$, on dit alors que le milieu 1 est **plus réfringent** que le milieu 2.

Exemple 10 : Cas de la réfraction dans un milieu moins réfringent pour $i_1 = 40^\circ$

☹☹☹ **Attention !** La lumière ne va pas toujours de haut en bas ! Le milieu incident n'est pas tout le temps le milieu au dessus.



Indice $n_0 < n$

Indice n

Loi de la réfraction :

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

Donc : $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$ et

$$i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i_1\right)$$

☹☹☹ **Attention !** Avant d'utiliser sa calculatrice

Pour la fonction $\arcsin$, on vérifie bien qu'elle est réglée en degré/radian suivant ce qu'on utilise.

► Déviation d'un rayon

On remarque que, dans la loi de Snell-Descartes, pour $n_1/n_2 > 1$:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \Rightarrow i_1 > i_2$$

Propriété. Déviation

Réfraction dans un milieu plus réfringent :

$$n_2 > n_1 \Rightarrow i_2 < i_1$$

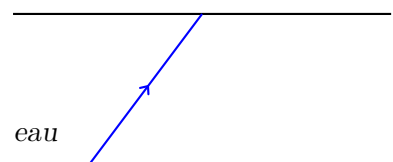
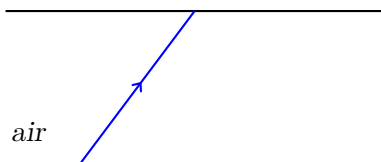
Réfraction dans un milieu moins réfringent :

$$n_2 < n_1 \Rightarrow i_2 > i_1$$

Exemple 11 : Tracer la trajectoire des rayons dans les cas :

verre

air



Astuce : l'indice optique est très souvent lié à la densité du milieu. Plus le milieu est dense, plus n est élevé. L'important sur un schéma est de dévier les rayons "dans le bon sens" suivant les valeurs relatives des deux indices optiques

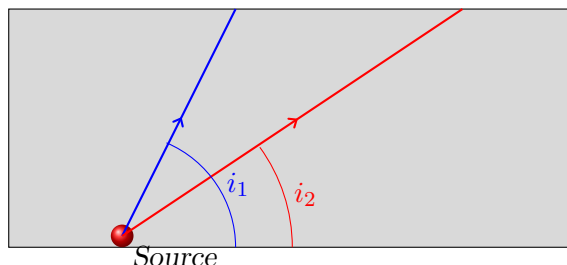
Ordre de grandeur :

$$n_{\text{air}} < n_{\text{eau}} < n_{\text{verre}}$$

3.4 Réflexion totale d'un rayon

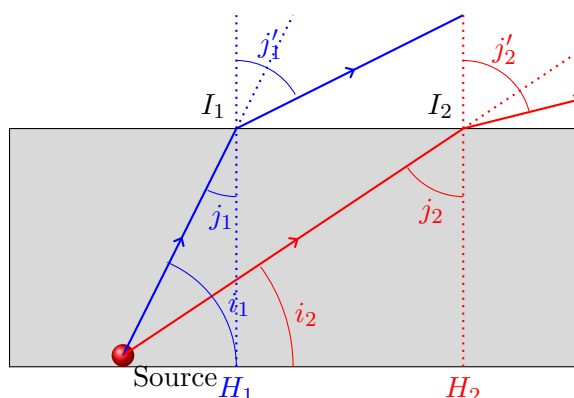
On remarque qu'au passage du dioptré, le rayon lumineux se "coupe en deux" : une partie est réfléchi et une partie est réfracté (i.e. traverse). Mais il y a-t-il toujours un rayon qui traverse ?

Exemple 12 : Deux rayons sont émis depuis une source lumineuse située au bas d'une lame de verre. On cherche à représenter leur trajectoire et à exprimer leur angle de réfraction. On donne $i_1 = 80^\circ$ et $i_2 = 10^\circ$.



*** **Attention !** Ca c'est **MON SCHEMA**, à moi!! On fera toujours l'effort de refaire un schéma à la main sur sa feuille (sauf si l'énoncé vous demande explicitement de compléter une annexe).

CORRECTION



*** **Attention !** à bien faire les schémas :

- ▷ point d'incidence et normale
- ▷ prolongement du rayon incident et rayon réfracté
- ▷ angle d'incidence et angle de réfraction

*** **Attention !** au nom des angles (il faudra parfois être inventif sur les noms)

▷ **Snell-Descartes au point I_1 :** $n_v \sin j_1 = n_a \sin j'_1 \Rightarrow \sin j'_1 = \frac{n_v}{n_a} \sin j_1$

▷ **Snell-Descartes au point I_2 :** $n_v \sin j_2 = n_a \sin j'_2 \Rightarrow \sin j'_2 = \frac{n_v}{n_a} \sin j_2$

Problème : on ne connaît pas j_1 ou j_2 .

On a déjà fait l'optique, on va faire de la géométrie **DU TRIANGLE RECTANGLE**. Pour cela on cherche/fait apparaître des **TRIANGLE RECTANGLE**.

Dans les triangles rectangles SH_1I_A , la somme des angles vaut π donc :

$$i_1 + j_1 + \pi/2 = \pi \text{ soit } j_1 = \pi/2 - i_1 = 20^\circ$$

De la même façon $j_2 = \pi/2 - i_2 = 80^\circ$.

On trouve alors :

▷ $\sin j'_1 =$ donc $j'_1 =$

▷ $\sin j'_2 =$ donc $j'_2 =$ *** **Attention !** Problème : le sinus d'un angle ne peut jamais dépasser 1.

On ne peut pas trouver l'angle de réfraction, c'est donc qu'il n'y a pas de rayon réfracté.

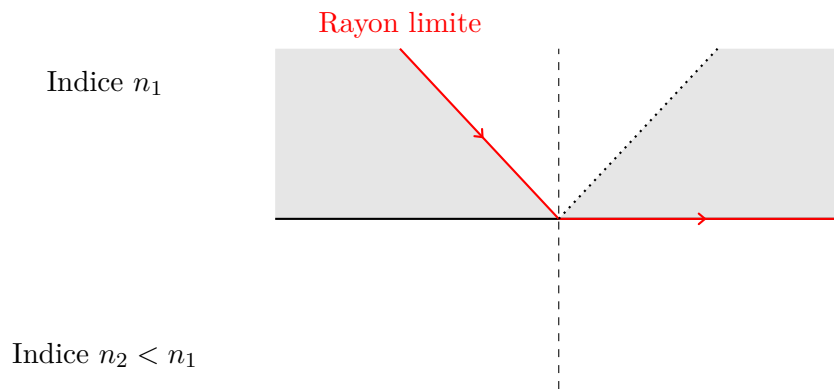
Définition. Réflexion totale

Condition : réfraction dans un milieu moins réfringent

Conséquence : si l'angle d'incidence est trop grand, il n'y a pas de rayon réfracté.
L'angle d'incidence doit être plus petit que **l'angle d'incidence limite**

$$\sin i_{1,\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

On parle de **réflexion totale**.



*** **Attention !** La lumière ne disparaît pas : le rayon incident est **entièrement réfléchi**. Ça agit comme un miroir pour les rayons "trop penchés".

Démonstration

On va prendre le cas limite où l'angle de réfraction est maximum et chercher l'angle d'incidence associé.

L'angle maximale de réfraction est $\pi/2$. Donc la loi de Snell-Descartes donne :

$$n_1 \sin i_{\text{lim}} = n_2 \sin \pi/2 \Rightarrow \sin i_{\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1}$$



il est important en physique d'avoir des réflexes pavlovien !

Si l'énoncé parle "d'angle maximale d'incidence",
"d'angle d'incidence limite" ou bien "aucun rayon ne ressort" $\Rightarrow$ **RÉFLEXION TOTALE!!!!**

4 Applications**Méthode en DS. Faire de l'optique géométrique**

Pour faire de l'*optique géométrique* il faut faire :

- ▷ de l'optique : loi de Snell-Descartes ; ... ; *c'est tout*
- ▷ de la géométrie : géométrie du triangle ; ... ; *c'est tout*

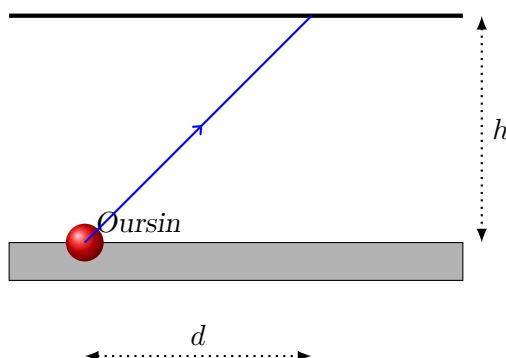
Pour réaliser cela, on a besoin d'un schéma **clair** de la situation sur lequel on fera apparaître de façon **explicite** (*vous avez des stylos de couleurs, utiliser les !*) les angles, les distances et **les triangles rectangles !!!**

4.1 Marcher sur un oursin

Un oeil humain qui reçoit des rayons lumineux issus d'une source va placer l'image de cette source au point de l'espace d'où semblent provenir les rayons qui entre dans son oeil.

Exemple 13 : J'aime me promener le long de la plage à la mer, les pieds dans l'eau à hauteur de mollet. Je vois alors devant moi un oursin (ou un tesson de verre) sur lequel je ne veux pas marcher. Où dois-je mettre mon pied ?

Données : $d = 0,20\text{m}$; $h = 30\text{cm}$; $n_{\text{eau}} = 1,33$



On supposera que l'image de l'oursin que produit l'oeil se trouve au fond de l'eau.

1. Tracer le prolongement du rayon lumineux issu de l'oursin et expliquer pourquoi l'oeil humain ne le voit pas où il se trouve réellement. 🚫🚫🚫 **Attention !** à la déviation !!
2. Est-il plus près ou plus loin qu'on ne le pense ?
3. Exprimer Δd l'écart entre la position vue O' et la position réelle O de l'oursin.
4. Justifier pourquoi l'oursin apparaît à notre vue "au dernier moment". (Astuce : réflexion totale)

CORRECTION

1. "entièrement réfléchi" $\Rightarrow$ **réflexion totale!!!**

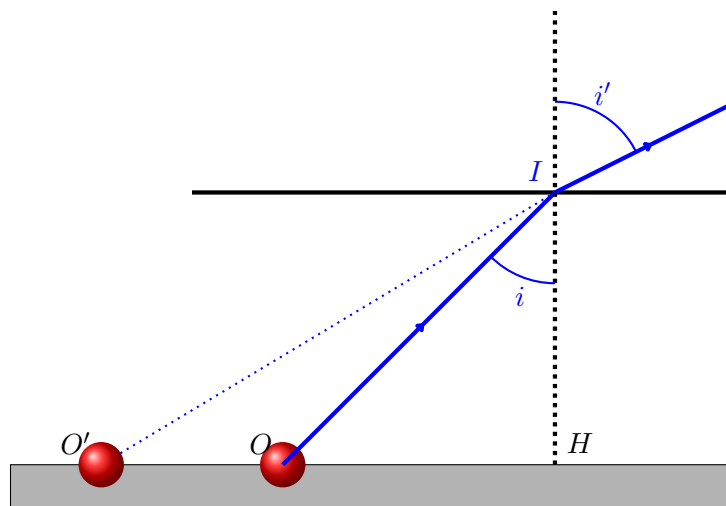
Pour observer une réflexion totale, il faut passer d'un milieu 1 à un milieu 2 avec $n_2 < n_1$. C'est le cas ici.

Cela apparaît si $i > i_{\text{max}}$ avec i_{max} l'angle d'incidence dans le cas limite où $i' = \pi/2$. Soit, avec les lois de Snell-Descartes :

$$n_{\text{eau}} \sin i_{\text{max}} = n_{\text{air}} \sin \pi/2 \Rightarrow \sin i_{\text{max}} = \frac{n_{\text{eau}}}{n_{\text{air}}} \times 1 \text{ soit } i_{\text{max}} = 48^\circ$$

Il y aura réflexion totale si $i > 48^\circ$.

2. Le rayon lumineux passe de l'eau ($n = 1,33$) à l'air ($n = 1$) donc l'angle de réfraction i' est plus grand que l'angle d'incidence i .

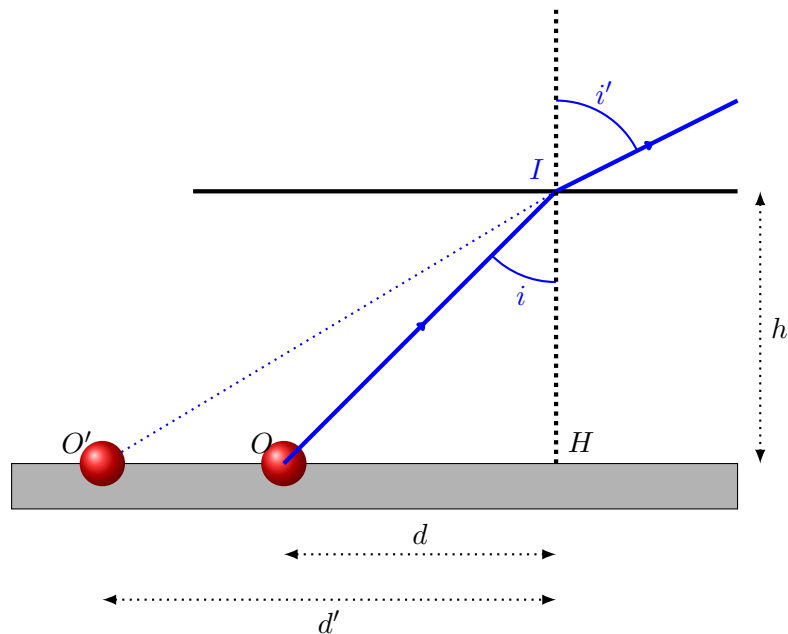


L'œil humain, en dehors de l'eau, reçoit le rayon réfracté. Il prolonge alors le rayon reçu en ligne droite (notre cerveau ne connaît pas intuitivement les lois de Snell-Descartes) et le place au fond de l'eau. On

voit l'oursin en O' , et non en O . Du fait de la déviation au dioptre eau→air, on le voit plus loin de nous qu'il n'est réellement.

3.

SCHEMAAAAA!!!!!! avec angles, triangles et distances



Géométrie : on cherche d' . On repère alors deux triangles rectangles : $O'IH$ et OIH .

▷ dans le triangle OIH on a : $\tan i = \frac{d}{h}$ soit $i = 34^\circ$.

▷ Dans le triangle $O'IH$ on a : $\tan i' = \frac{d'}{h}$ soit $d' = h \tan i'$

Optique

Loi de Snell-Descartes : $n_{\text{eau}} \sin i = n_{\text{air}} \sin i'$ donc : $\sin i' = \frac{n_{\text{eau}}}{n_{\text{air}}} \sin i$ soit : $i' = 47^\circ$

On trouve alors $d = 33\text{cm}$. On obtient alors un écart $\Delta d = d' - d$ de 13cm.

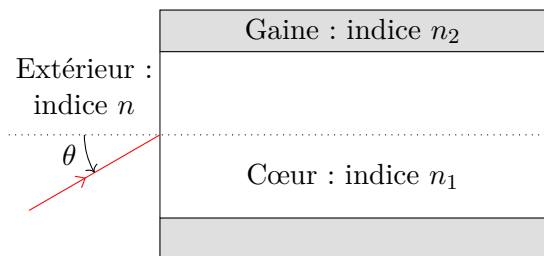
4.2 Modèle de la fibre optique à saut d'indice

Cette partie est une application directe du cours. Les résultats ne sont pas à connaître par coeur, par contre il est impératif de savoir les retrouver. Autrement dit, c'est un exercice qu'il faut savoir refaire par soi même (cf TD).

Une fibre optique est un fil dont l'intérieur a la propriété de conduire la lumière et sert pour la fibroscopie, l'éclairage ou la transmission de données numériques. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et peut servir de support à un réseau « large bande » par lequel transitent aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. Le principe de la fibre optique date du début du XX^{ème} siècle mais ce n'est qu'en 1970 qu'est développée une fibre utilisable pour les télécommunications.

Une fibre optique cylindrique est constituée d'un cœur cylindrique d'indice optique n_1 entourée d'une gaine d'indice optique n_2 .

Son rôle est de guider la lumière dans son coeur. La gaine contribue aux propriétés mécaniques mais évite également les fuites de lumière. On considère un rayon incident dans un milieu extérieur d'indice n cherchant à entrer dans la fibre avec un certain angle d'incidence θ .



Application 3 :

1. Confiner la lumière :

- Donner une propriété sur les indices optiques du coeur et de la gaine pour que la lumière puisse être confiné dans la fibre optique.
- Exprimer le lien entre θ et i_1 , l'angle d'incidence du rayon sur la gaine.
- (*) Donner alors la valeur maximale θ_m de l'angle d'entrée θ pour que la lumière soit confinée.

2. Dispersion d'un signal :

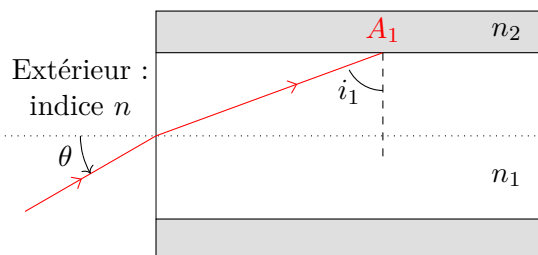
Considérons deux faisceau lumineux arrivant dans la fibre : l'un arrivant avec un angle $\theta < \theta_m$, l'autre arrivant sous incidence normale.

- A l'aide d'un schéma, expliquer lequel des deux faisceau va ressortir de la fibre en premier
- (*) Exprimer le retard Δt du rayon sortant en dernier de la fibre.

► Confiner la lumière dans la fibre

Condition sur la fibre optique :

Considérons un rayon arrivant en entrée de la fibre



Pour que la lumière reste confinée dans le coeur de la fibre, il ne doit pas avoir de rayon réfracté au niveau du point A_1 . Pour cela, il doit avoir **réflexion totale**. Pour que cela soit possible, le milieu de la gaine doit avoir un indice plus petit que celui du coeur : $n_2 < n_1$.

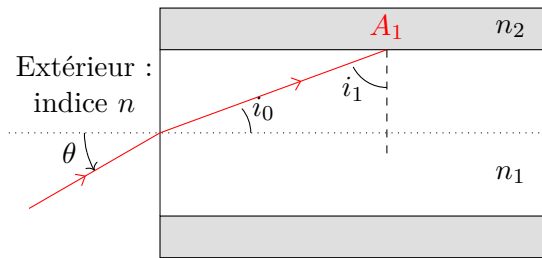
Condition sur l'angle d'incidence

Mais cette condition n'est pas suffisante : il faut également que l'angle d'incidence du rayon lumineux au point A_1 soit supérieur à l'angle d'incidence limite

$$i_1 > i_{1,lim} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Cela fixe une condition sur la valeur de l'angle θ : si θ est trop grand, alors $i_1 < i_{1,max}$ et il y aura un rayon réfracté dans la gaine. on va chercher la valeur maximale θ_m de l'angle d'incidence θ .

Considérons un rayon arrivant en entrée de la fibre



On appelle i_0 l'angle du rayon réfracté au niveau de l'entrée du rayon dans la fibre.

Le lien entre θ et i_0 est donné par la relation de Descartes lors du passage du dioptré $n \rightarrow n_1$:

$$n \sin \theta = n_1 \sin i_0$$

On a de plus une relation entre i_0 et i_1 car ils forment un triangle rectangle : $i_0 + i_1 = \pi/2$.
Finalement

$$n \sin \theta = n_1 \sin(\pi/2 - i_1) = n_1 \cos(i_1)$$

♡ *Instant math* ♡ : $\cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$

On a alors : $n \sin \theta = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 i_1}$.
Or pour qu'il y est réflexion totale : $\sin i_1 > \arcsin \frac{n_2}{n_1}$. Donc :

$$n \sin \theta < n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

L'angle d'incidence θ d'entrée dans la fibre doit donc être inférieure à un angle limite θ_m :

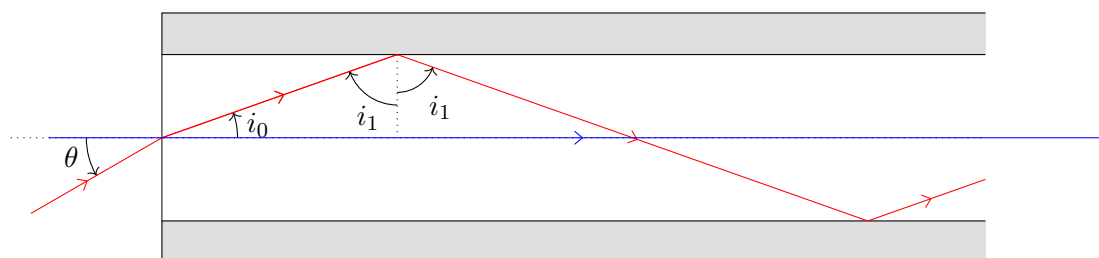
$$\theta < \theta_m = \arcsin \left(\frac{n_1}{n} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \right)$$

► Dispersion d'un signal et débit maximale dans une fibre à saut d'indice *

Considérons deux faisceau lumineux arrivant dans la fibre :

- ▷ l'un arrivant avec un angle $\theta < \theta_m$ (en rouge)
- ▷ l'autre arrivant sous incidence normale (en bleu)

Pour parcourir la fibre, le rayon rouge va avancer en zig-zag, alors que le bleu va aller tout droit. Par conséquent, le premier va parcourir une distance plus longue et va donc prendre plus de temps.



Pour parcourir une distance L le long de la fibre optique :

- ▷ le rayon rouge parcourt une distance :

$$L' = \frac{L}{\sin i_1} = \frac{L}{\cos i_0}$$

Comme $\cos i_0 = \sqrt{1 - \sin^2 i_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{n}{n_1} \sin \theta\right)^2}$:

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1 - \sin^2 i_0}} = \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{n}{n_1} \sin \theta\right)^2}}$$

▷ le rayon bleu parcourt une distance L

Le retard Δt du rayon rouge est donc :

$$\Delta t = \frac{L'}{c} - \frac{L}{c}$$

avec c la vitesse de la lumière dans la fibre. On a : $c = c_0/n_1$. Finalement :

$$\Delta t = L \frac{n_1}{c_0} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n}{n_1} \sin \theta\right)^2}} - 1 \right)$$

Par conséquent si on envoie une impulsion lumineuse sur la fibre sous la forme d'un faisceau conique demi-angle au sommet θ , il va les rayons formant les bords du cônes vont ressortir de la fibre avec un retard Δt par rapport à ceux allant tout droit.

Il y aura en sortie un étalement, **une dispersion** des rayons suivant le mode de déplacement de ces derniers dans la fibre.

4.3 Les milieux d'indice variable

► Modélisation d'un milieu inhomogène

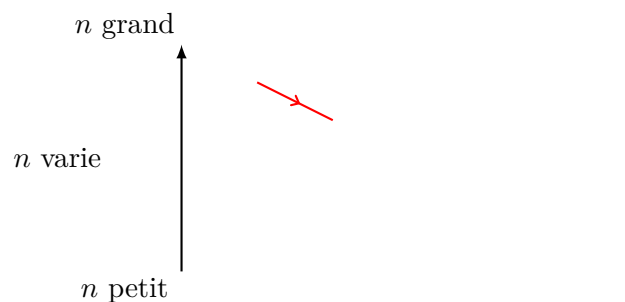
Influence de la température :

Avec la température, la masse volumique de l'air varie. Si la température augmente, la masse volumique diminue et l'indice optique diminue également : le milieu n'est alors plus homogène. Néanmoins la loi de la réfraction reste valide.

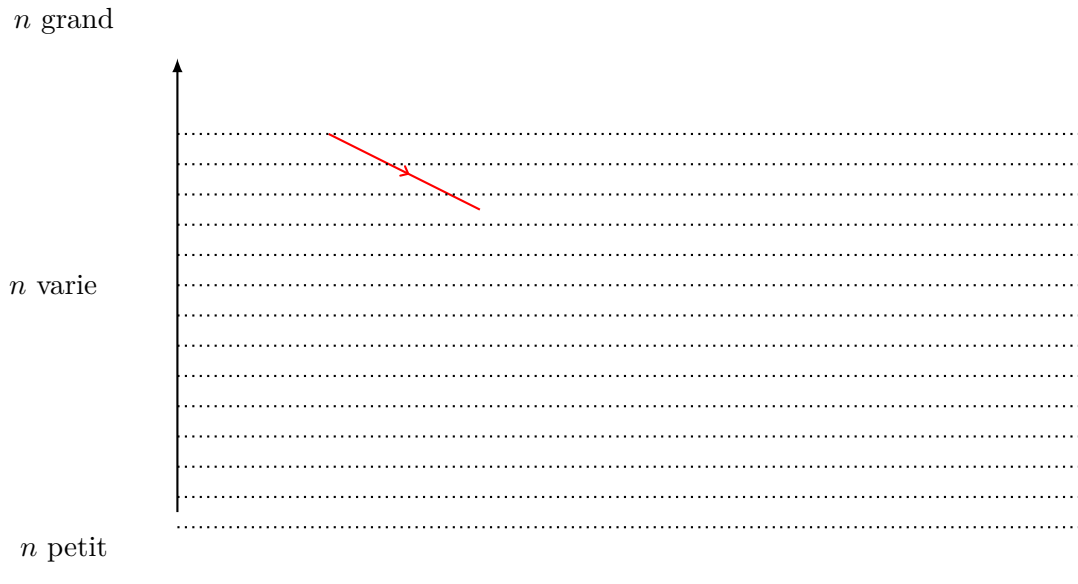
Technique du "mille-feuille" :

Pour appréhender ce type de problème on va alors découper le milieu en tranches suffisamment fine pour considérer que dans chaque tranche l'indice optique est constant. On peut alors appliquer les lois de Descartes au passage de chaque dioptré et ainsi décrire le trajet du rayon lumineux.

Dans cet exemple, l'indice optique augmente avec l'altitude. Traçons la trajectoire d'un rayon arrivant du dessus

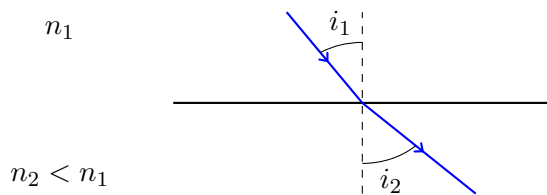


On découpe le milieu en tranches fines, dans chaque tranche l'indice optique est constant :



Lorsque le rayon passe d'une couche à l'autre, il passe d'un milieu n_1 plus réfringent à un milieu n_2 moins réfringent.

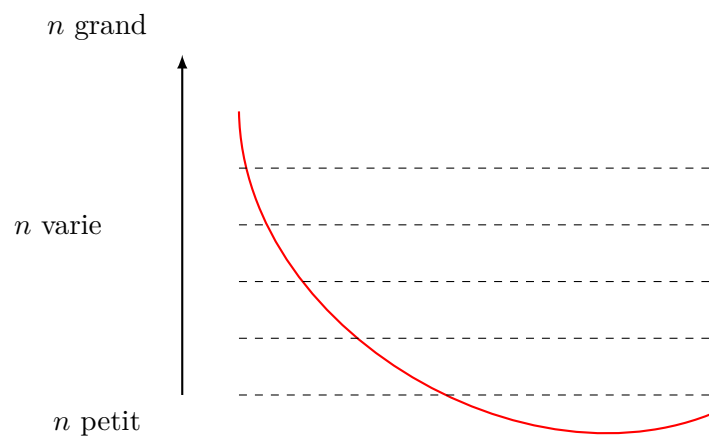
Zoom sur le passage d'une tranche à une autre :



Au passage d'un dioptré, on peut définir deux angles i_1 et i_2 , des rayons incident et réfracté.

Milieu 2 est plus bas que le milieu 1 : ici $n_1 > n_2$ alors $i_1 < i_2$

Ce phénomène survient à chaque passage de dioptré, c'est-à-dire tout au long de la trajectoire du rayon.



Cette dernière s'éloigne de la verticale : le rayon se courbe en direction des zones où l'indice optique est le plus élevé.

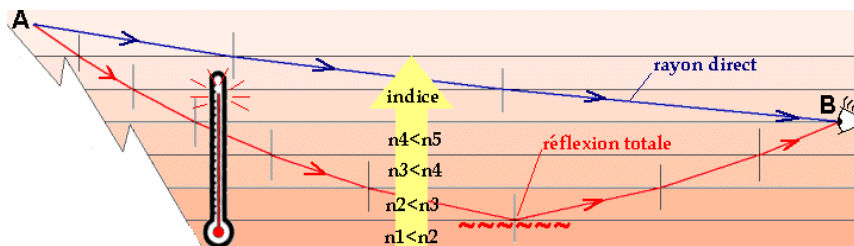
Propriété. Trajectoire d'un rayon dans un milieu inhomogène

Dans un milieu d'indice variable, la trajectoire d'un rayon lumineux est courbe : le rayon se dirige vers les zones où l'indice optique est le plus haut.

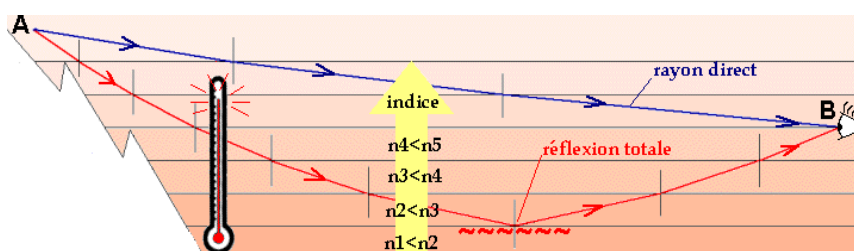
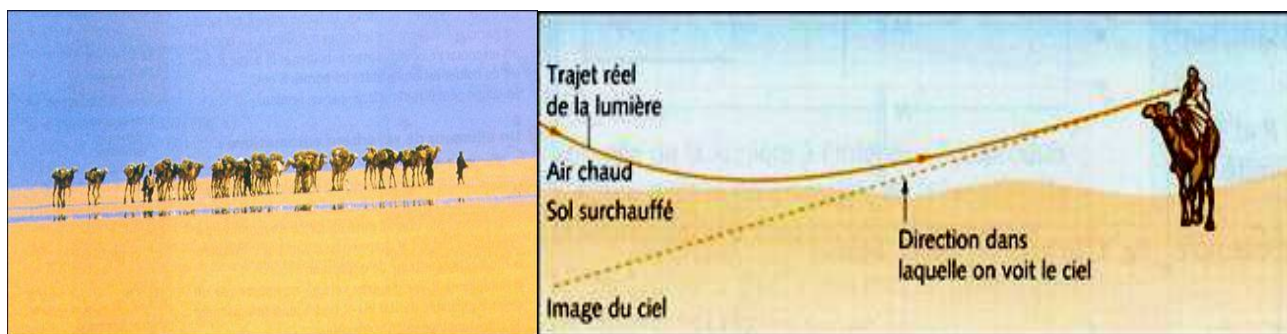
► Approche qualitative des mirages

Sur les routes noires chauffées par le soleil ou sur le sable du désert, la température augmente lorsque l'on se rapproche du sol. Ce faisant, l'indice optique diminue.

Un rayon dirigé vers le bas s'écarte donc progressivement de la verticale (normale aux dioptries successifs).



S'il n'est pas trop incliné par rapport à l'horizontale, il peut subir une réflexion totale avant de toucher le sol, comme le montre la figure. Le sol joue donc le rôle d'un miroir pour certains rayons.



Application 4 : Expliquer les deux clichés suivant :

- ▷ pourquoi voit-on de l'eau sur le désert ?
- ▷ pourquoi voit-on un iceberg flotter dans l'air ?



Fig. 3 – Photographies de mirages dans le désert et sur la mer polaire.