Chap I

Fondements de l'optique géométrique

Lycée Louis Thuillier - Physique-Chimie - PCSIB

Table des matières

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, réfringeance
  - ▷ 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 physique typiques des ondes (interférence, diffraction, ...).

Sa nature ondulatoire est connu 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 10^2Hz zt 10^{22}Hz.

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

$$\frac{\text{fréquence la plus élevée}}{\text{fréquence la lpus basse}} = 100000000000000000000$$

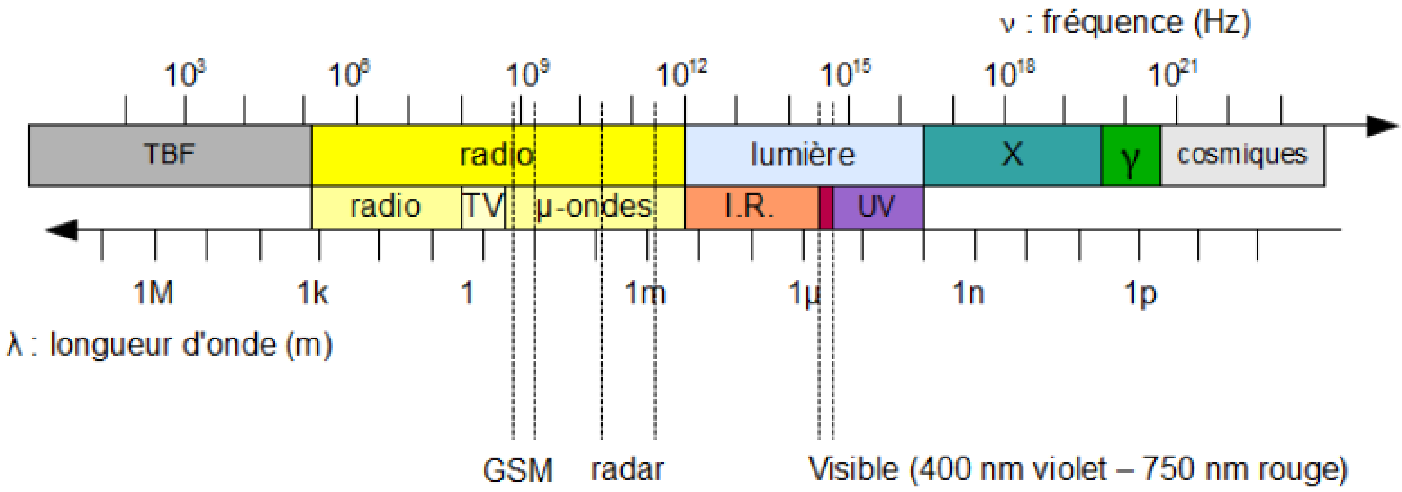
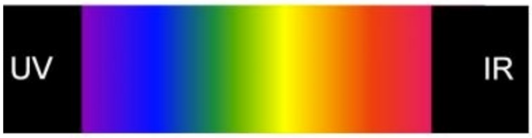


Fig. 1 – Le spectre électromagnétique et longueur d'onde dans le vide.

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 !

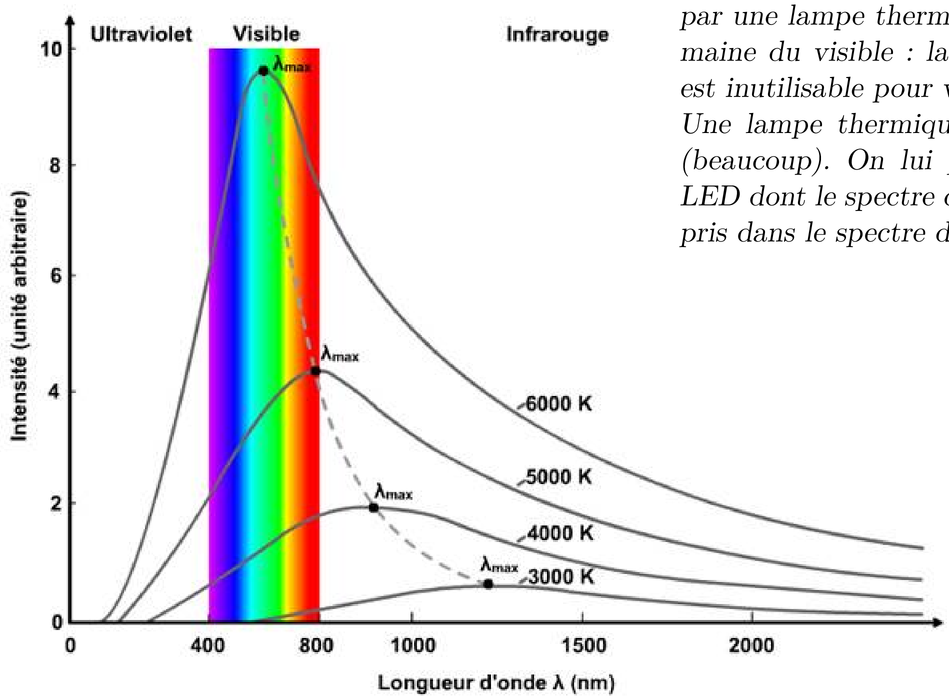
1.2 Les sources de lumière

▶ 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 :



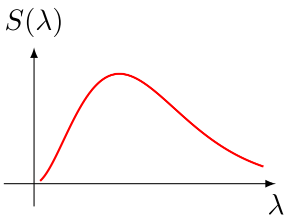
Spectre d'un corps noir en fonction de la température de couleur

Une grande partie des longueurs d'ondes émise 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.

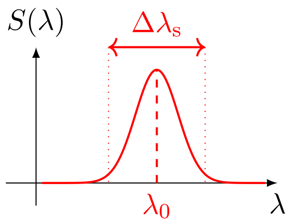
▶ Les sources primaires

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

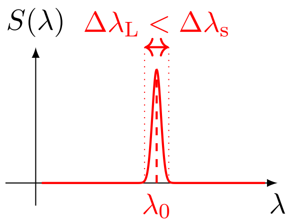
Exemple 2 : Le Soleil, une ampoule, ...



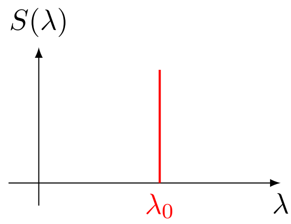
(a) Lampe thermique



(b) Lampe spectrale



(c) LASER



(d) Monochromatique idéal

Exemple 3 : Dans le cas d'une lampe spectrale, si $\lambda_0 \simeq 800nm$, la couleur de la lampe nous apparaître 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 longues 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

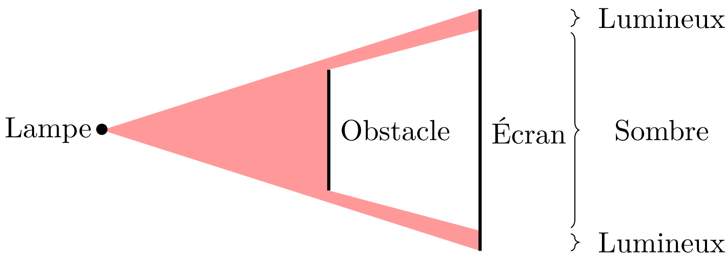
L'optique géométrique a pour objectif de déterminer la trajectoire des rayons lumineux. Elle s'applique aux instruments d'optiques : loupe, lunette astronomique, ...

2.1 Notion de rayon lumineux

On a vu que la lumière est une onde lumineuse. Son caractère purement ondulatoire ne se manifeste que sur des petites échelles : bien souvent, on peut se contenter d'une approche géométrique.

▶ Un outil théorique : le rayon lumineux.

Réalisons l'expérience suivante : n 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.



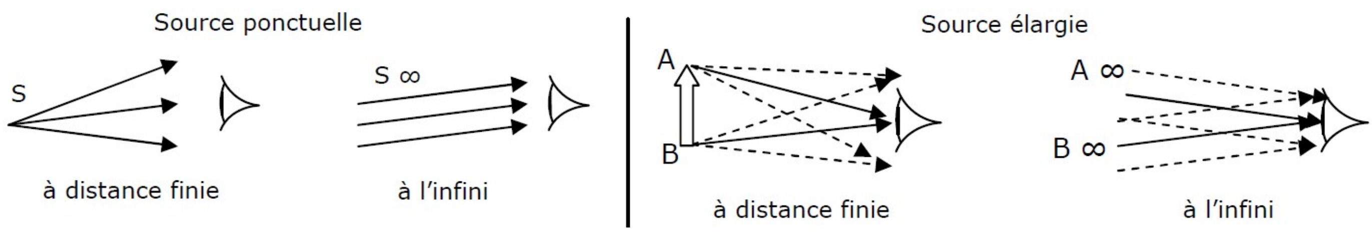
Définition. Rayon lumineux
Un rayon lumineux matérialise la propagation de la lumière. On le représente par un trait et une flèche qui indique le sens de la propagation de la lumière.

Un rayon lumineux : ———→———

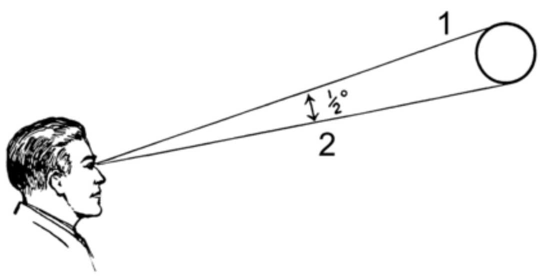
▶ Vocabulaire et sources lumineuses

▷ **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/angulaire** :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 $d = 2$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 ($\lambda \sim 1$cm), cela n'est plus possible.

2.3 L'indice optique

Dans le vide, la célérité des ondes électromagnétiques est de

$$\boxed{c_0 = 3 \times 10^8\,\mathrm{m/s}}$$

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

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

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. Propagation des rayons lumineux
Dans le cadre des milieux homogènes, (*i.e.* indice optique n constant), les rayons lumineux :
- se propagent en **ligne droite**.
- sont **indépendants** : ils n'interagissent pas entre eux
- vérifient le **principe du retour inverse** : pour aller de $A \to B$ la lumière prend le même "chemin" que pour aller de $B \to A$.

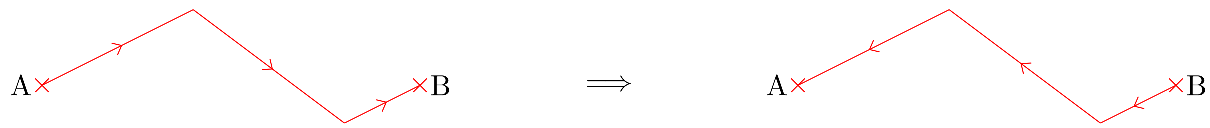


Fig. 3 – Principe du retour inverse de la lumière.

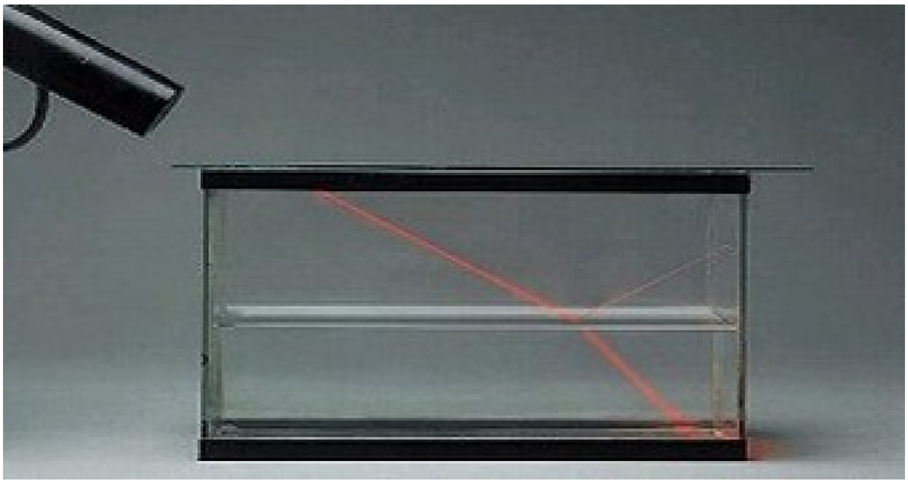
Attention ! Les hypothèses précédentes ne permettent pas de décrire ce qui se passe dans les milieux non homogènes, comme par exemple pour les mirages (voir fin de chapitre et TD).

3 Les lois de Snell-Descartes

3.1 Mise en évidence expérimentale

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

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

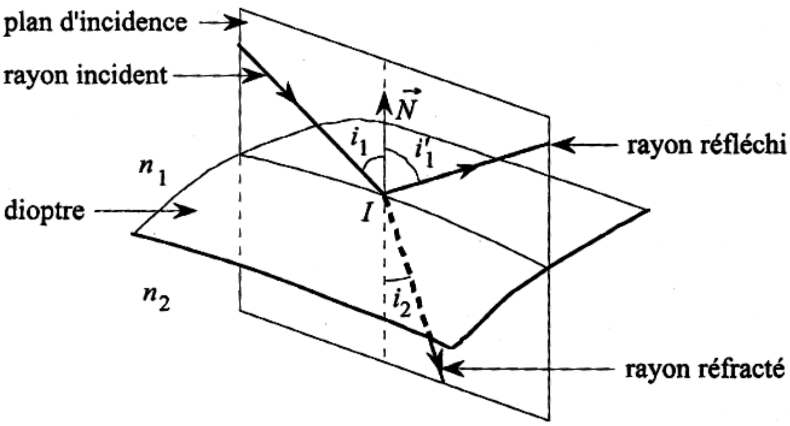


Au passage du dioptre, on observe que le rayon incident se partage entre :

- 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 :*** *Représenter sur la photographie : le dioptre, le rayon incident, réfléchi et réfracté.*

3.2 Énoncé des lois



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**.

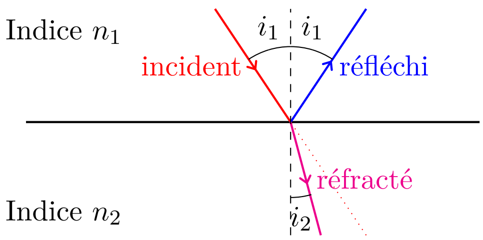
Théorème. Les trois lois de Snell-Descartes

1 - Loi des plans Les rayons réfléchis et réfractés sont situés dans le plan d'incidence.
2 - Loi de la réflexion :

$$\boxed{i_1 = i_1'}\ .$$

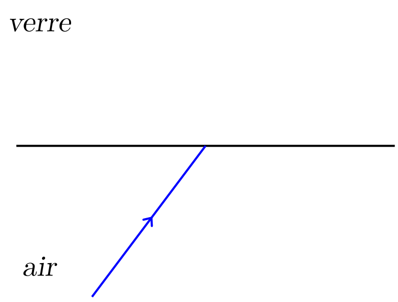
3 - Loi de la réfraction :

$$\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}\ .$$



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

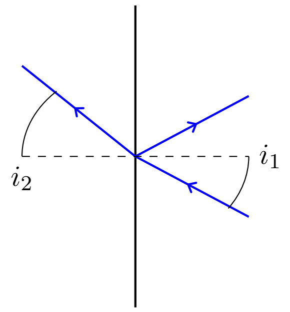
Déviation d'un rayon lumineux :
l'angle $D_{\text{réfraction}}$ entre le prolongement du rayon incident et le rayon émergent.
On a alors $D_{\text{réfraction}} = i_2 - i_1$.

> **Exemple 9 :** *Représenter les rayons réfléchis, réfractés. Placer les angles d'incidence, de réflexion, de réfraction et de déviation.*
>
> 
>
>
> *Pour quel valeur d'angle d'incidence, un 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 réfringeant pour i_1 =40°***
> ***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 :* $\sin i_2 = \dfrac{n_1}{n_2} \sin i_1$ *et*
>
> $$i_2 = \arcsin\left(dfracn_1 n_2 \sin i_1\right)$$
>
> ***Attention ! Avant d'utiliser sa calculette***
> *Pour la fonction arcsin, on vérifie bien qu'elle est réglée en degré/radian suivant ce qu'on utilise.*

▶ Dévition 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

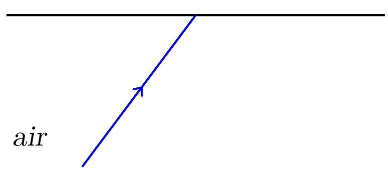
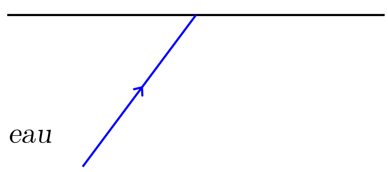
Réfraction dans un milieu moins réfringent :

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

Réfraction dans un milieu moins réfringent :

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

Astuce : l'important sur un schéma est de dévier les rayons "dans le bon sens" suivant les valeurs relatives des deux indices optiques

> *Exemple 11 : Tracer la trajectoire des rayons dans les cas :*
>
> *verre*
>
> 
>
> *air*
>
> *air*
>
> 
>
> *eau*

3.4 Les angles limites

Les résultats de ce paragraphe sont à redémontrer par le calcul systématiquement, et donc tout résultat donné par cœur sera considéré comme faux.

▶ L'angle de réfraction limite ($n_2 > n_1$)

Transition de petit n à grand n : air→verre ou eau→verre.

Comme $n_2 > n_1$ alors $i_2 < i_1$. Calculons la valeur maximale de l'angle de réfraction.
A l'incidence maximale $i_{1,\text{max}} = 90°$ et donc :

$$\sin i_{2,\text{max}} = \frac{n_1}{n_2} \sin i_{1,\text{max}} = \frac{n_1}{n_2}$$

i_2 ne pourra jamais être plus grand que $\arcsin \frac{n_1}{n_2}$

Définition. Angle de réfraction limite
Condition : réfraction dans un milieu plus réfringent.
Conséquence : l'angle de réfraction i_2 sera toujours inférieur à un **l'angle de réfraction limite**

$$i_{2,\text{max}} = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \ .$$

C'est le rayon réfracté du rayon incident d'angle $i_1 = 90°$.

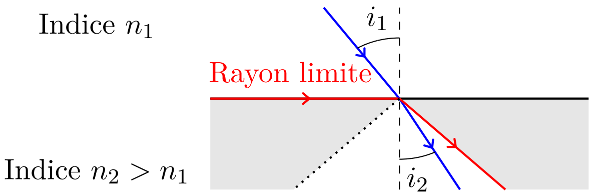


Fig. 4 – Tous les rayons réfractés seront situés à l'intérieur du cône de réfraction. Aucun rayon réfracté ne sera dans la zone grise.

> *Application 3 : Calculer l'angle de réfraction limite pour les interfaces air/eau, air/verre et eau/verre.*

▶ La réflexion totale ($n_2 < n_1$) (TRÈS IMPORTANT)

Transition de grand n à petit n : verre→air/eau ou eau→air.

Considérons maintenant le cas d'une réfraction dans un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$). Les loi de Snell-Descartes donnent :

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

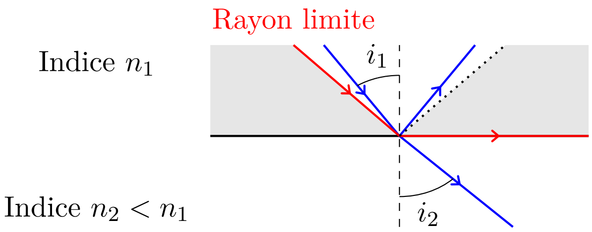
♡ *Instant Math* ♡ : $\arcsin(x)$ a du sens si $x \leq 1$! !

Il faut donc que $\frac{n_1}{n_2} \sin i_1 < 1$ donc $i_1 < \arcsin \frac{n_2}{n_1}$. .
Que se passe-t-il si $i_1 > \arcsin \frac{n_2}{n_1}$? Il n'y a pas de solution pour l'angle de réfraction ⇒ il n'y a pas de rayons réfractés ! Tout la lumière se réfléchis, on parle de réflexion totale.

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 soit être plus petit que **l'angle d'incidence limite**

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

On parle de **réflexion totale**.



Attention ! La lumière ne disparaît pas : le rayon incident est **entièrement réfléchi**.
La lumière "ne passe pas".

▷ *Astuce :* pour retrouver facilement l'angle d'incidence limite, on prend une valeur de $i_2 = \pi/2$.

▷ *Astuce : 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" ⇒ **RÉFLEXION TOTALE !!!!!**

> ***Application 4 :*** *Calculer l'angle d'incidence limite de la réflexion totale pour les interfaces eau/air, verre/air et verre/eau.*

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*

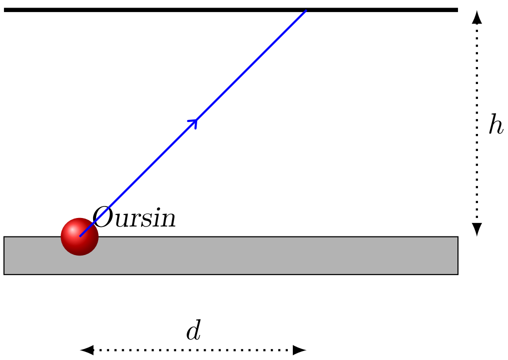
Pour réaliser cela, on a besoin d'un schéma **clair** de la situation sur lequel on fera apparaître de façon **explicite** (*vous avez des stylos de couleurs, utiliser les !*) les angles, les distances et **les triangles rectangles ! ! !**

Méthode en DS. Géométrique du triangle (*voir fascicule de math*)
Dans mon triangle rectangle, **je cherche une longueur** et :
- ▷ j'ai deux longueurs ⇒ Pythagore
- ▷ j'ai une longueur un angle ⇒ trigonométrie

Dans mon triangle rectangle, **je cherche un angle** et :
- ▷ j'ai deux longueurs ⇒ trigonométrie
- ▷ j'ai deux angles ⇒ somme des angles égale π

4.1 Marcher sur un oursin

Exemple 12 : J'aime me promener le long de la plage à la mer, les pieds d'en 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 ?



1. *Montrer que pour un angle d'incidence limite, le rayon est entièrement réfléchi.*
2. *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.*
   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.*
   Données : $d = 0,20m$; $h = 30\text{cm}$; $n_{\text{eau}} = 1,33$

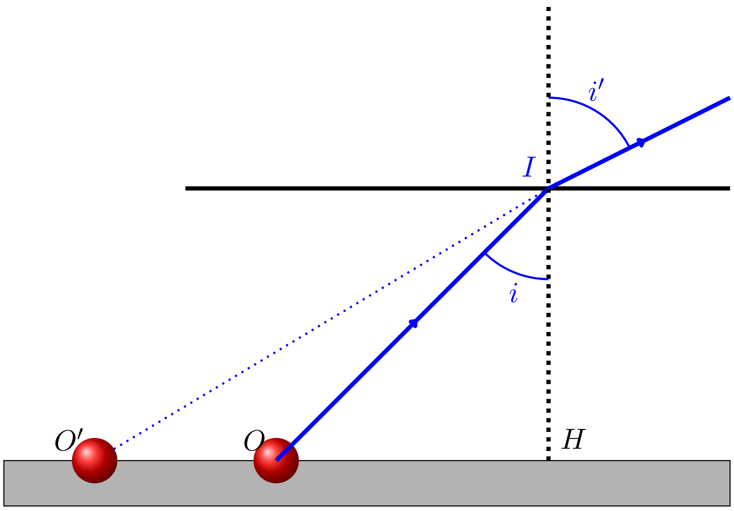
CORRECTION

1. "*entièrement réfléchi*" .... ⇒ **réflexion totale** ! ! !
   Pour observer un 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 loi de Snell-Descartes :

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

Il y aura réflexion totale si $i > 48°$.

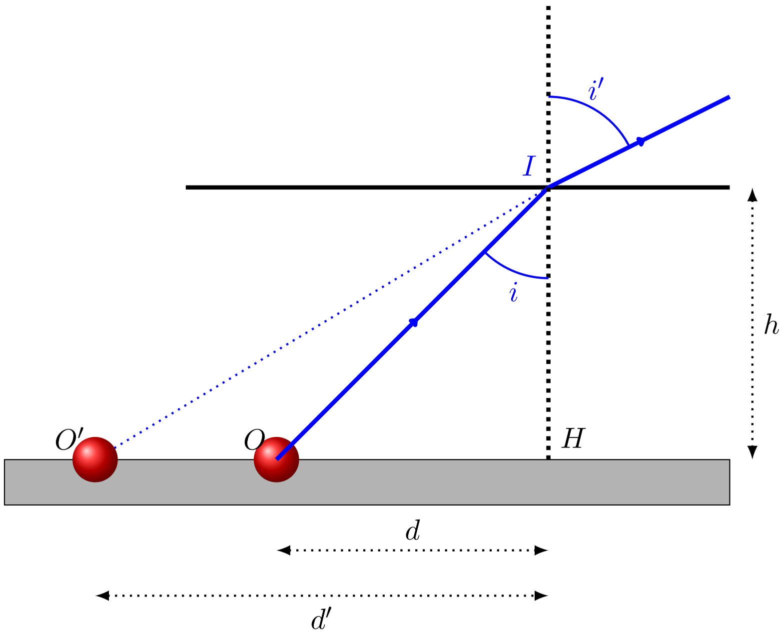
2. Le rayon lumineux passe de l'eau ($n = 1,33$) à l'air ($n = 1$) donc l'angle de réfraction i' est plus grand que l'angle d'incidence i.



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 : $\tan i = \dfrac{d}{h}$ soit $i = 34°$.

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

Optique

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

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

4.2 Le prisme

Définition. Milieu dispersif
Les propriété d'un milieu dispersif dépend de la fréquence de l'onde qui le traverse.

Le verre est un milieu disperif, l'indice dépend de la longueur d'onde de la lumière considéré. On peut donc se servir d'un prisme pour obtenir le spectre de la lumière visible : chaque longueur d'onde de la lumière ne sera pas déviée du même angle. On peut ainsi séparer les différentes couleurs qui composent la lumière blanche.

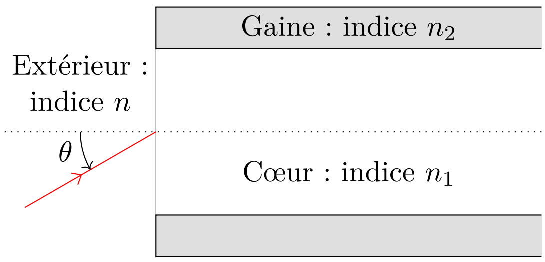
4.3 Modèle de la fibre optique à saut d'indice

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.



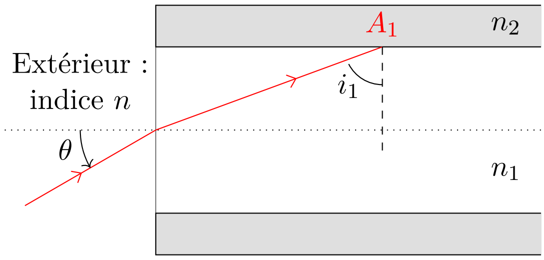
Application 5 :

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 entré de la fibre



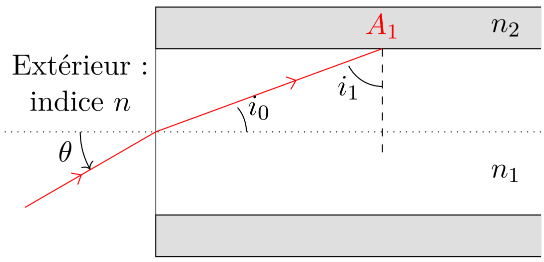
Pour que la lumière reste confinée dans le coeur de la fibre, il ne doit pas avoir de rayon réfracté au niveau du point A_1. Pour cela, il doit avoir **réfléxion totale**. Pour que cela soir possible, le milieu de la faine doit avoir un indice plus petit que celui du coeur : $n_2 < n_1$.

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 entré 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 dioptre $n \rightarrow n_1$:

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

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 : $\sin i_1 > \arcsin \dfrac{n_2}{n_1}$. 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 :

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

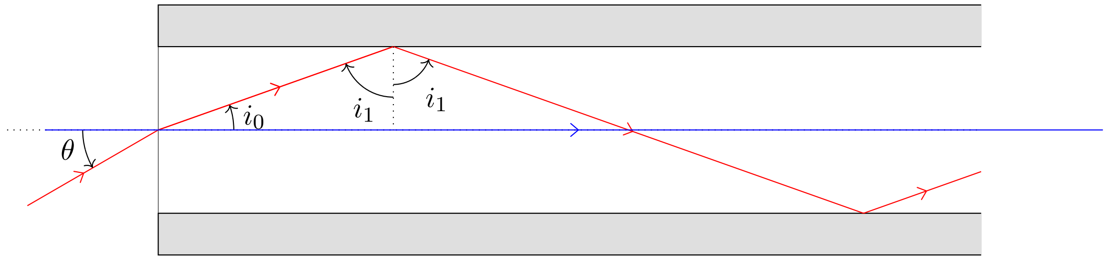
▶ Dispersion d'un signal et débit maximale dans une fibre à saut d'indice *

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 ressortit de la fibre avec une 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.

4.4 Les milieux d'indice variable

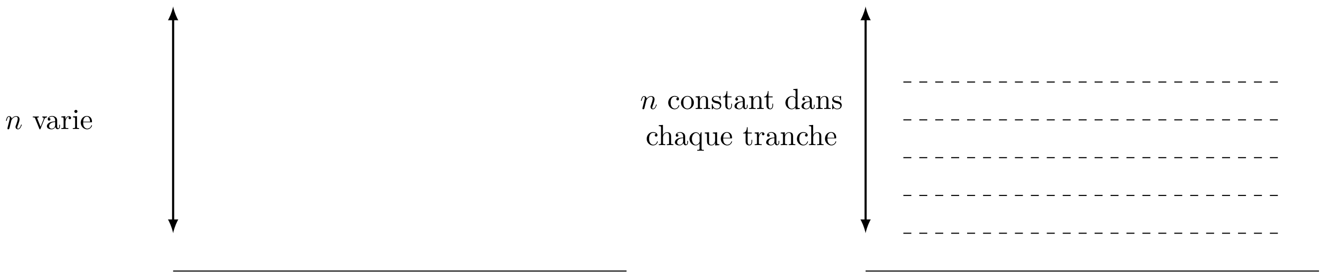
► Modélisation d'un milieu inhomogène

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.

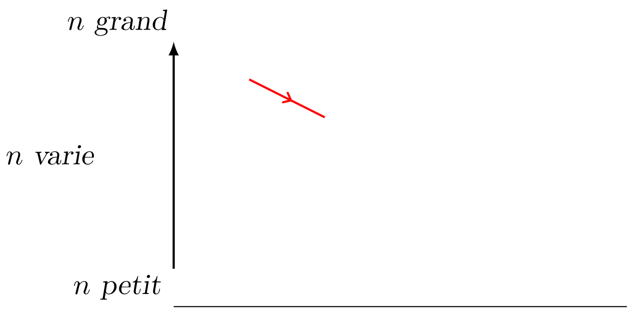
Technique du "mille-feuille" :

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 dioptre et ainsi décrire le trajet du rayon lumineux.

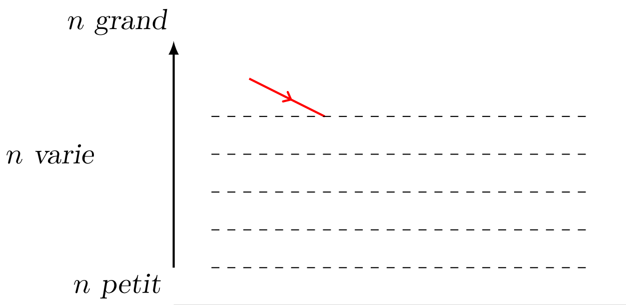


Exemple 13 :

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

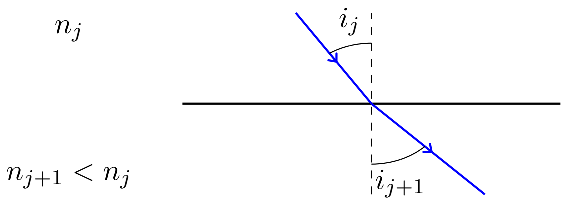


On découpe le milieu en tranches fines, dans chaque tranche l'indice optique est constant :



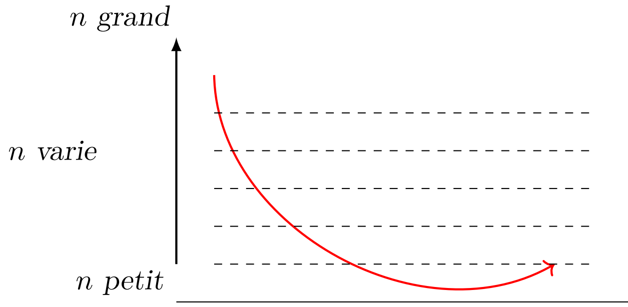
Lorsque le rayon passe d'une couche à l'autre, il passe d'un milieu n_j plus réfringeant à un milieu n_{j+1} moins réfringeant.

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



Au passage d'un diotre, on peut définir deux angles i_j et i_{j+1}, des rayon incident et réfracté. Milieu $j+1$ est plus bas que le milieu j : ici $n_j > n_{j+1}$ alors $i_j < i_{j+1}$

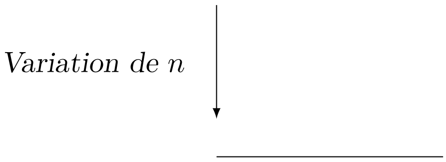
Ce phénomène survient à chaque passage de dioptre, c'est-à-dire tout au long de la trajectoire du rayon.
Cette dernière s'éloigne de la verticale : le rayon se courbe en direction des zones où l'indice optique est le plus élevé.



A un moment, l'angle d'incidence sera trop élevé : il y aura réflexion totale et le rayon repartira dans l'autre sens.

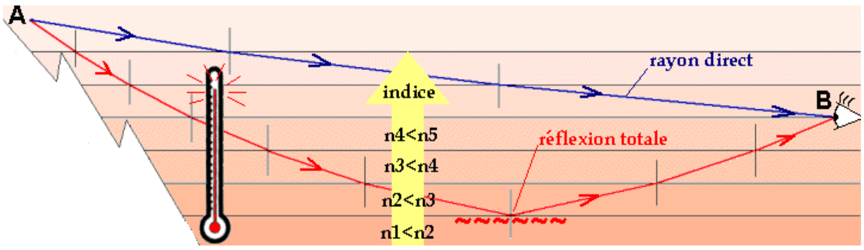
Propriété. Trajectoire d'un rayon dans un milieu inhomogène
Dans un milieu d'indice variable, la trajectoire d'un rayon lumineux est courbe : le rayon se dirige vers les zones où l'indice optique est le plus haut.

Application 6 : *Représenter de façon qualitative, mais en la justifiant, la trajectoire du rayon dans le cas suivant :*

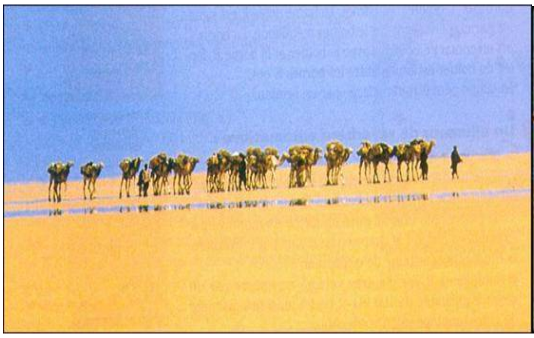


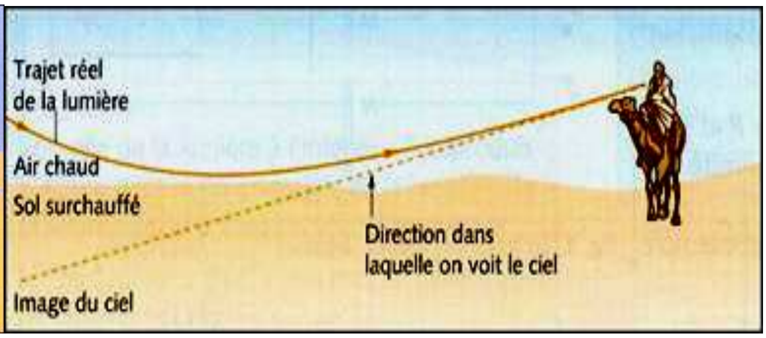
▶ Approche qualitative des mirages

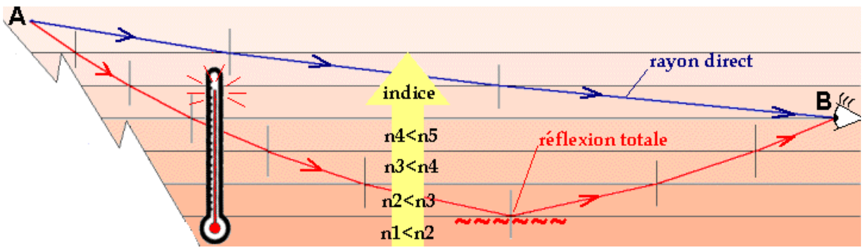
Sur les routes noires chauffées par le soleil ou sur le sable du désert, la température augmente lorsque l'on se rapproche du sol. Ce faisant, l'indice optique diminue.
Un rayon dirigé vers le bas s'écarte donc progressivement de la verticale (normale aux dioptres successifs).



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 7 : Expliquer les deux clichés suivant :*
> ▹ *pourquoi voit-on de l'eau sur le désert ?*
> ▹ *pourquoi voit on un iceberg flotter dans l'air ?*

Fig. 5 – Photographies de mirages dans le désert et sur la mer polaire.