

---

---

# OPTIQUE

---

---

CHARLES TUCHENDLER



MPSI 4 – LYCÉE SAINT-LOUIS

ANNÉE 2019/2020



# Table des matières

CHAPITRE XVIII	BASES DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE	1
<b>Introduction</b>		<b>2</b>
<b>I Approximation de l'optique géométrique</b>		<b>2</b>
I.1	Notion de rayon lumineux	2
I.2	Hypothèses de l'approximation de l'optique géométrique	3
I.3	Limites de l'optique géométrique	4
<b>II Lois de la réflexion et de la réfraction</b>		<b>5</b>
II.1	Définitions	5
II.2	Lois de Snell-Descartes	6
II.3	Etude de la réfraction	7
<b>III Applications</b>		<b>10</b>
III.1	Fibres optiques à saut d'indice	10
III.2	Milieux d'indice variable	10
III.2.a	Principe	10
III.2.b	Vérification expérimentale	12
III.2.c	Interprétation des mirages	12

## CHAPITRE XVIII

## BASES DE L’OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

## Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>I Approximation de l’optique géométrique</b>	<b>2</b>
I.1 Notion de rayon lumineux	2
I.2 Hypothèses de l’approximation de l’optique géométrique	3
I.3 Limites de l’optique géométrique	4
<b>II Lois de la réflexion et de la réfraction</b>	<b>5</b>
II.1 Définitions	5
II.2 Lois de Snell-Descartes	6
II.3 Etude de la réfraction	7
<b>III Applications</b>	<b>10</b>
III.1 Fibres optiques à saut d’indice	10
III.2 Milieux d’indice variable	10
III.2.a Principe	10
III.2.b Vérification expérimentale	12
III.2.c Interprétation des mirages	12

## Introduction

Nous allons voir que le concept très simple de rayon lumineux permet de rendre compte de beaucoup d'expériences d'optique, tant que la dimension des objets éclairés est petite devant la longueur d'onde.

## I Approximation de l'optique géométrique

### I.1 Notion de rayon lumineux

#### Définition XVIII.1 – Rayon lumineux

L'approximation de l'optique géométrique considère en pratique la lumière comme un ensemble de rayons lumineux se propageant dans un milieu donné.

Un rayon lumineux est une ligne de l'espace qui traduit la direction de propagation de l'énergie lumineuse.

Quand on observe une ombre, il est assez intuitif d'émettre l'hypothèse que la lumière est constituée de fins **rayons lumineux** : la forme de l'ombre peut être obtenue en traçant des lignes droites entre la source lumineuse et l'objet, et en les prolongeant jusqu'au support d'observation.

Remarque : la zone que les rayons lumineux ne peuvent pas atteindre constitue *l'ombre*.



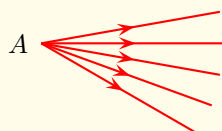
FIGURE XVIII.1 – L'existence de l'ombre d'un objet se comprend si la lumière est assimilée à des rayons lumineux.

Quelque soit la situation et le dispositif optique utilisés, l'image observée d'un point émettant de la lumière est obtenue grâce à un ensemble de rayons qui constituent un faisceau lumineux.

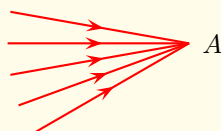
#### Définition XVIII.2 – Faisceau lumineux

Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux associés à un **unique point**. Ce faisceau peut être convergent, divergent ou parallèle.

1) Faisceau divergent



2) Faisceau convergent



3) Faisceau parallèle



## I.2 Hypothèses de l'approximation de l'optique géométrique

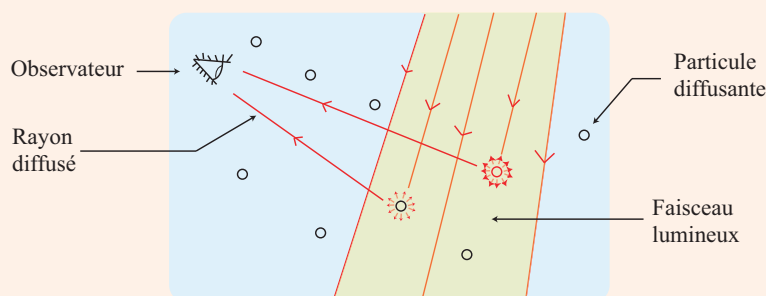
Se placer dans l'approximation de l'optique géométrique en considérant que la lumière est constituée de rayons lumineux, revient à émettre principalement trois hypothèses concernant la propagation de la lumière.

### Propriété XVIII.1 – Propagation rectiligne

Dans un MHTI, les rayons lumineux se propagent en lignes droites.

Remarque : les rayons lumineux ne sont pas visibles directement. Des conditions particulières sont requises pour pouvoir les matérialiser.

Exemples : faisceaux lumineux traversant les nuages ou des feuillages dans un sous-bois, au travers d'une nappe de brouillard, ... la présence de particules diffusantes est nécessaires.



### Propriété XVIII.2 – Principe de retour inverse de la lumière

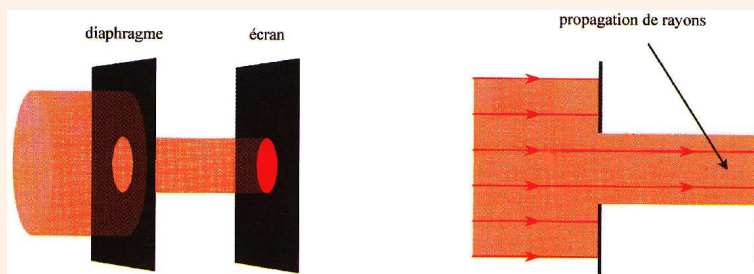
Dans un MHTI, le trajet suivi par la lumière entre deux points est indépendant du sens de parcours de la lumière entre ces deux points.

Autrement dit, si un rayon lumineux peut se propager d'un point  $A$  à un point  $B$ , alors une source placée en  $B$  pourra réciproquement éclairer le point  $A$ .

### Propriété XVIII.3 – Indépendance des rayons lumineux

Un rayon lumineux donné se propage indépendamment de la présence de tout autre rayon. Ils n'interagissent pas. Ils n'affectent pas l'un et l'autre leur propagation.

Exemple : obstacle sur le chemin d'un faisceau lumineux → **éclipses** (les rayons qui rencontrent l'obstacle sont arrêtés, tandis que les autres ne sont pas affectés).



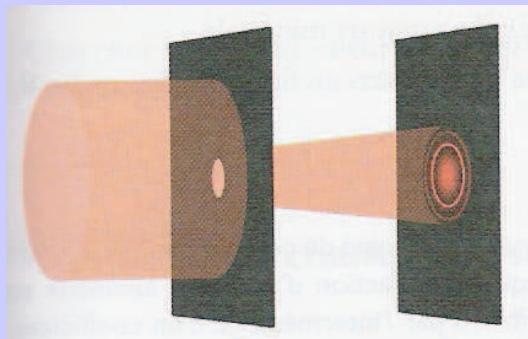
Remarque : cette indépendance des rayons lumineux entraîne également l'additivité des intensités lumineuses. Si  $S_1$  (resp.  $S_2$ ) émet une intensité lumineuse  $I_1$  (resp.  $I_2$ ) au point  $x$ , l'intensité résultante au point  $x$  est :

$$I = I_1 + I_2$$

### I.3 Limites de l'optique géométrique

#### Perspective XVIII.1 – Limite n°1 - Impossible d'isoler un rayon lumineux

L'ombre d'un trou très petit éclairé par un laser est constituée d'anneaux, et ne peut s'interpréter par le modèle de l'optique géométrique. C'est le phénomène de **diffraction**.



Phénomène de diffraction

Néanmoins, *l'optique géométrique reste valable tant que la dimension  $d$  des objets éclairés est plus grande que la longueur d'onde*. Dans ce cas le cône de lumière est limité à  $\theta \simeq 0$ .

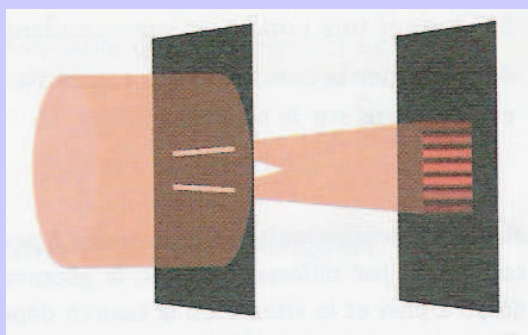
Dans le domaine invisible, cela correspond à

$$d > 1 \text{ mm} \gg 1 \text{ } \mu\text{m} \simeq \lambda$$

ce qui sera toujours vérifié cette année.

#### Perspective XVIII.2 – Limite n°2 - Les intensités ne s'additionnent pas toujours

Lorsqu'on observe l'ombre de deux fentes très fines éclairées par une même source monochromatique, on observe l'apparition de franges. L'optique géométrique ne permet pas d'expliquer ce phénomène appelé **interférences**.



Phénomène de d'interférence

Néanmoins, *l'optique géométrique reste valable tant que :*

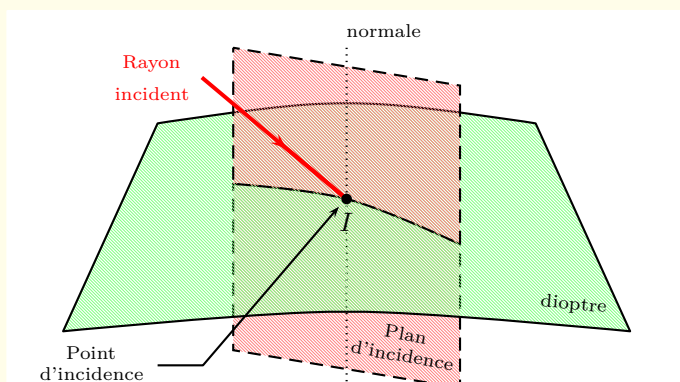
$$d \gg \lambda$$

## II Lois de la réflexion et de la réfraction

### II.1 Définitions

#### Définition XVIII.3 – Dioptre, point et plan d'incidence

- ★ **Dioptre** : il s'agit de la surface séparant deux MHTI d'indice de réfraction différents.  
Si dans un MHTI la lumière se propage en ligne droite, ce n'est plus le cas dans un milieu non homogène, en particulier au niveau d'un dioptre.
- ★ **Point et plan d'incidence** : considérons un rayon quelconque appelé *rayon incident*, se propageant dans un MHTI et venant frapper la surface d'un dioptre séparant le milieu dit *incident* d'un autre MHTI.



- On appelle *point d'incidence* l'intersection  $I$  entre le rayon incident et le dioptre.
  - On appelle *normale*, la droite passant par  $I$  orthogonale au dioptre en  $I$ .
  - Le rayon incident et la normale en  $I$  définissent le *plan d'incidence*.
- ★ **Rayon réfléchi et rayon transmis** : au niveau d'un dioptre, on observe *en général* que le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi et un rayon transmis.



FIGURE XVIII.2 – Lorsqu'on regarde à travers une vitrine, on voit notre reflet (réflexion) et l'intérieur de la vitrine (transmission ou réfraction).

Remarque : on distingue en réalité deux types de réflexion, la *réflexion diffuse* produite par une surface irrégulière qui ne produit pas d'image discernable (les rayons sont envoyés dans toutes les directions) et la *réflexion spéculaire* produite par une surface lisse (les rayons sont envoyés dans une seule direction).



## II.2 Lois de Snell-Descartes

W. Snell (1580-1627) étudia le comportement d'un rayon lumineux à l'interface de deux milieux.

R. Descartes retrouva indépendamment ces résultats et publia en 1637 les lois qui portent leurs noms.

### Théorème XVIII.1 – Lois de Snell-Descartes

On considère un rayon quelconque appelé *rayon incident*, se propageant dans un milieu MHTI d'indice  $n_1$  (indice dans l'espace incident) et qui vient frapper un dioptré séparant le milieu d'indice  $n_1$  d'un autre milieu MHTI d'indice  $n_2$  (indice dans l'espace où le rayon est éventuellement transmis).

On dénombre *trois lois de Snell-Descartes* :

① Le rayon réfléchi et le rayon transmis, s'il existe, sont inclus dans le plan d'incidence.

② Les angles algébriques d'incidence  $i_1$  et de réflexion  $i'_1$  sont opposés :

$$\text{Loi de la réflexion} \quad i'_1 = -i_1$$

③ Si le rayon transmis existe, les angles algébriques d'incidence  $i_1$  et de réfraction  $i_2$  sont liés par :

$$\text{Loi de la réfraction} \quad n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

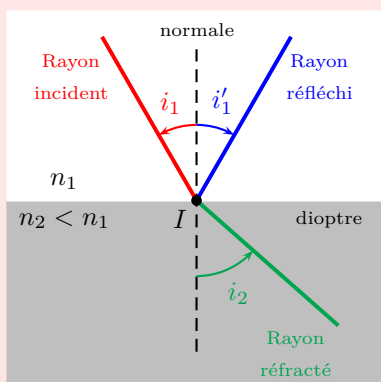


FIGURE XVIII.3 – Propagation des rayons au niveau d'un dioptré plan suivant les lois de Snell-Descartes. A droite, lorsqu'un crayon est plongé dans un verre rempli d'eau, il semble cassé pour un observateur extérieur au verre d'eau.

Remarque : les angles mentionnés dans ces formules sont algébriques. On choisira par convention de toujours orienter les arcs qui représentent ces angles depuis la normale au dioptré vers le rayon considéré. On précisera aussi sur les schémas le sens conventionnel arbitraire d'algèbrisation des angles.

### Propriété XVIII.4 – Position d'une image vue par un oeil ou un appareil photographique

Si le crayon nous apparaît cassé sur la figure XVIII.3, c'est que l'œil est uniquement sensible à la direction avec lesquels les rayons viennent le frapper.

L'œil place l'image d'un objet qu'il observe à l'intersection au niveau de l'œil des tangentes aux rayons lumineux qui l'atteignent.

## Exercice XVIII.1 – Mauvaises localisation d'objets dans l'eau

1. Un pêcheur observe un poisson dans l'eau. Le voit-il plus proche ou plus loin de ce qu'il n'est en réalité ? Faire un schéma et représenter le sens de parcours des rayons lumineux.
2. Un bateau à quai au port semble ne pas avoir de coque et semble "posé sur l'eau" pour un observateur placé sur le quai. Pourquoi ?

## II.3 Etude de la réfraction

## Méthode XVIII.1 – Propagation vers un milieu plus réfringent

- ★ Lorsqu'un rayon lumineux se propage depuis un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent ( $n_1 < n_2$ ), il est toujours réfracté. Il donnera donc naissance à un rayon lumineux transmis qui se rapprochera de la normale :

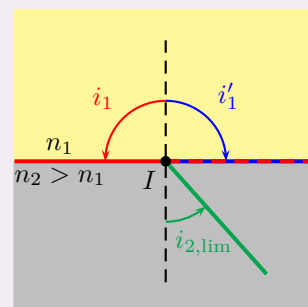
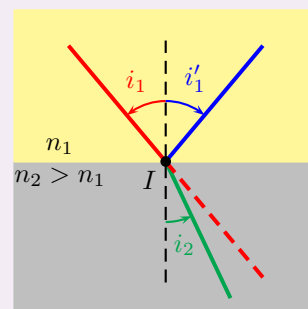
$$n_1 < n_2 \Rightarrow \sin |i_2| < \sin |i_1| \Rightarrow |i_2| < |i_1|$$

- ★ En outre, l'angle du rayon lumineux transmis ne peut pas dépasser l'angle de réfraction limite  $i_{2,\text{lim}}$ . Prenons le cas d'angles orientés positifs :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \Rightarrow \sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$

or  $i_{1,\text{max}} = \frac{\pi}{2}$  et donc :

$$i_{2,\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

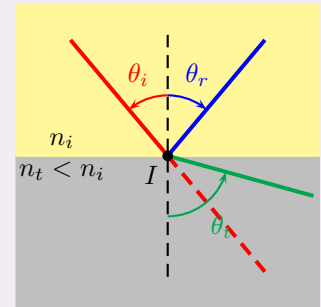


## Méthode XVIII.2 – Propagation vers un milieu moins réfringent

Lorsqu'un rayon lumineux se propage depuis un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent ( $n_1 > n_2$ ), il existe un angle d'incidence limite  $i_{1,\text{lim}}$  au delà duquel le rayon ne peut plus être réfracté.

- ★ Soit  $|i_1| \leq i_{1,\text{lim}}$  et il existe un rayon transmis qui s'écarte de la normale.  
Pour des angles positifs :

$$\text{si } n_2 < n_1 \Rightarrow \sin i_2 > \sin i_1 \Rightarrow i_2 > i_1$$

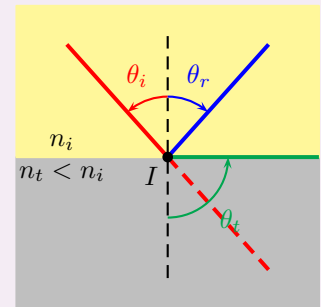


- ★ Soit  $|i_1| > i_{1,\text{lim}}$  et le rayon incident est totalement réfléchi.  
En effet, le rayon lumineux transmis existe tant que :

$$|i_2| \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin |i_2| \leq 1 \Rightarrow n_2 \sin |i_2| \leq n_2 \Rightarrow \sin |i_1| \leq \frac{n_2}{n_1}$$

soit

$$|i_1| \leq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = i_{1,\text{lim}}$$



Remarque : le passage à la réflexion totale ne se fait pas brutalement mais continûment. Lorsque l'angle d'incidence augmente, l'intensité lumineuse du rayon transmis diminue et celle du rayon réfléchi augmente. Ceci peut être expliqué grâce à une description ondulatoire de la lumière.

## Définition XVIII.4 – Réfraction limite et Réflexion totale

Ces deux phénomènes se déduisent facilement l'un de l'autre par application du principe de retour inverse de la lumière.

$$\text{Angle de réfraction limite : } |\theta_{i_{2,\text{lim}}}| = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

$$\text{Angle de réflexion totale : } |\theta_{i_{1,\text{lim}}}| = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

## Exercice XVIII.2 – Angle de réfraction limite pour le verre

Quel est l'angle de réfraction limite pour un rayon traversant le dioptre air/eau ?

**Exercice XVIII.3 – Cône de lumière**

1. Les plongeurs, lorsqu'ils relèvent la tête vers la surface de l'eau, ont l'impression de voir un "gouffre lumineux", c'est à dire un disque lumineux entouré d'obscurité, comme le montre la figure ci-contre. Expliquer ce phénomène qualitativement puis exprimer et calculer le diamètre angulaire apparent  $\alpha$  du cône de lumière. Dépend-il de la profondeur à laquelle se trouve le plongeur ?

*Données :*  $n_{\text{air}} = 1,00$  et  $n_{\text{eau}} = 1,33$ .

2. Une piscine de profondeur  $h = 1,5$  m est totalement remplie d'eau. Un projecteur d'éclairage se trouve au fond du bassin. Cette source, considérée comme ponctuelle émet de la lumière dans toutes les directions. Quel est le rayon  $R$  de la tache lumineuse formée à la surface de l'eau ?

### III Applications

#### III.1 Fibres optiques à saut d'indice

Les fibres optiques sont couramment utilisées en télécommunication ou en chirurgie (endoscopie). Le fonctionnement de certaines fibres optiques repose sur la réflexion totale pour guider la lumière. Elles sont constituées d'un cœur d'indice de réfraction plus élevé que leur gaine. Les rayons sont ainsi piégés à l'intérieur du cœur de la fibre car ils subissent des réflexions totales à l'interface cœur-gaine (en  $I_1$  et  $I_2$  par exemple sur la figure ci-dessous).

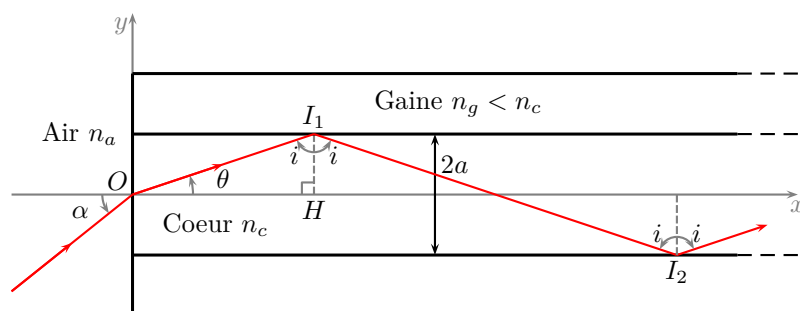


FIGURE XVIII.4 – A gauche : représentation schématique de la propagation d'un rayon dans une fibre optique à saut d'indice. A droite : lumière émergent de plusieurs fibres optiques.

#### Expérience XVIII.1 – Fibre à saut d'indice liquide

Preçons une bouteille vide ou un cristalliseur d'un trou de 3 mm de rayon. Faisons passer un faisceau laser à travers ce trou et remplissons la bouteille d'eau. Lorsque l'eau s'écoule on observe dans son filet, les réflexions totales du faisceau laser au niveau de l'interface eau/air.

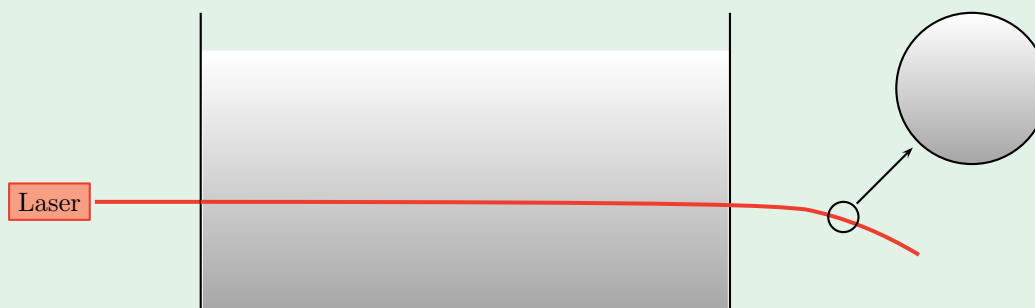


FIGURE XVIII.5 – Réalisation d'une fibre optique liquide. On profite ici de la différence d'indice entre l'air et l'eau pour guider la lumière d'un laser à l'intérieur d'un filet d'eau.

#### III.2 Milieux d'indice variable

##### III.2.a Principe

#### Question XVIII.1 – Fibre à gradient d'indice

Que se passe-t-il maintenant si le passage d'un indice élevé à un indice faible se fait de manière continue et non plus brutale ?

Peut-on encore observer le phénomène de réflexion totale ?

Si oui, quels avantages cela peut-il présenter ?

Pour répondre à cette question, nous allons commencer par nous intéresser à un milieu stratifié par des couches homogènes. On considère donc un milieu non homogène constitué d'une succession de couches d'épaisseur très minces et d'indice constant.

## Exercice XVIII.4 – Courbure d'un rayon dans un milieu d'indice continûment variable

Comment se propagerait un rayon à l'intérieur de ce type de milieu ?

Intéressons nous à la figure XVIII.6.

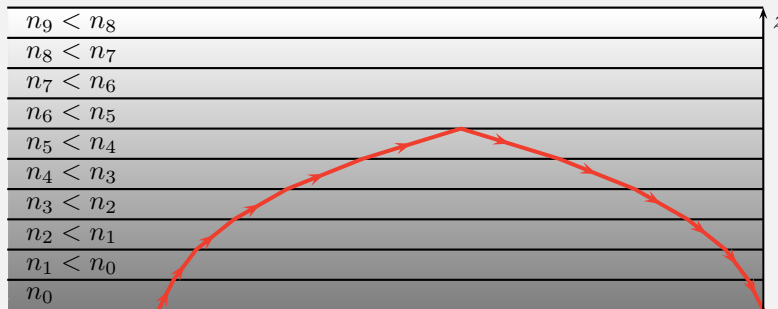


FIGURE XVIII.6 – Propagation d'un faisceau lumineux dans un milieu constitué de couches d'indice de réfraction décroissant.

Notons  $i_j$  l'angle d'incidence entre la  $j$ -ième et la  $(j+1)$ -ième couches. Au niveau de chaque dioptre rencontré, on peut écrire la loi de Snell-Descartes pour la réfraction :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 = n_3 \sin i_3 \dots \quad (\text{XVIII.1})$$

Finalement, pour tout entier  $j \in \{1, \dots, N\}$  :

$$n_j \sin i_j = Cte$$

Il y a réfraction à la traversée de chacune des surfaces de séparation et le trajet de la lumière est formé d'une suite de tronçons rectilignes. L'angle d'incidence augmentant à chaque fois, une réflexion totale peut se produire (ici entre les couches d'indices  $n_6$  et  $n_7$ ) et le rayon lumineux est alors renvoyé vers les couches inférieures.

Si l'on fait tendre l'épaisseur des couches vers zéro, on peut passer à la limite et se retrouver dans la situation où  $n(z)$  est une fonction de continue. On a alors :

$$n(z) \sin i(z) = Cte$$

## Propriété XVIII.5 – Courbure d'un rayon dans un milieu d'indice continûment variable

Dans un milieu d'indice continûment variable, **les rayons lumineux se courbent dans le sens des indices de réfraction élevés.**

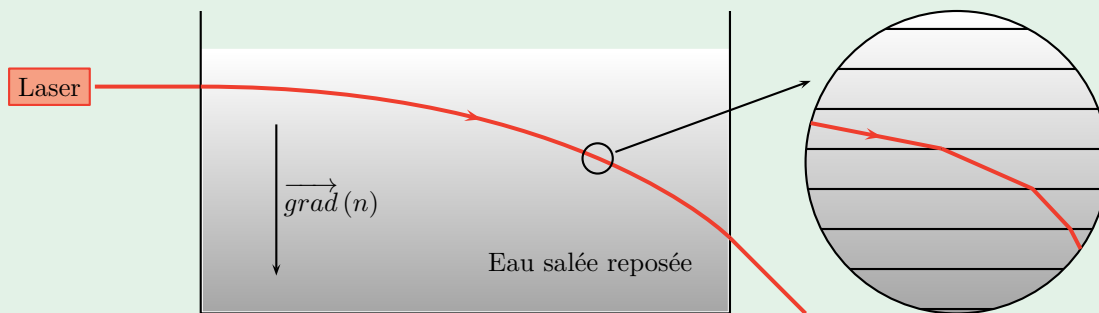
Remarque : cette propriété est notamment utilisée dans les fibres dites à *gradient d'indice*, dont le fonctionnement est proche des fibres à *saut d'indice*.

### III.2.b Vérification expérimentale

#### Expérience XVIII.2 – Bain d'eau salée à gradient d'indice

Plaçons du sel au fond d'un cristalliseur rempli d'eau. Le sel va diffuser, ce qui signifie que la concentration en sel sera plus forte au fond et diminuera de plus en plus vers le haut du cristalliseur. L'indice  $n$  augmente alors lorsque la profondeur augmente ( $n_{\text{sel}} > n_{\text{eau}}$ ), ce qui signifie que  $\sin i$  diminue.

Le rayon lumineux s'incurve alors au fur et à mesure qu'il traverse des milieux d'indices plus importants.



### III.2.c Interprétation des mirages

L'air, dans certaines situations, n'est pas un gaz homogène. Son indice dépend de la température et de la pression. Concernant l'effet de la température, l'indice de réfraction diminue quand la température augmente.

Quantitativement, il diminue d'environ  $4,5 \cdot 10^{-3}$  par  $^{\circ}\text{C}$  lorsqu'il s'agit d'un liquide<sup>1</sup> de référence pris à  $20^{\circ}\text{C}$ . Ceci s'explique par le fait que la densité du milieu diminue et que ses propriétés se rapprochent donc de celles du vide. Les rayons lumineux sous l'action d'un gradient de température peuvent donc se courber. On a alors affaire à un *mirage*.

#### ➤ Mirages inférieurs

Pour les *mirages inférieurs*, le sol est plus chaud que l'air. Ce type de mirage se produit typiquement dans le désert où le sable est surchauffé par le soleil. L'indice diminuant avec la température, l'indice qui augmente avec l'altitude. Les rayons s'incurvent donc comme sur la figure XVIII.7 :  $\sin i$  augmente quand on se rapproche du sol. À partir d'une certaine inclinaison, il y a réflexion totale et les rayons "remontent". L'objet que nous observons semble parvenir du lieu d'où les rayons qui arrivent à l'œil convergent.

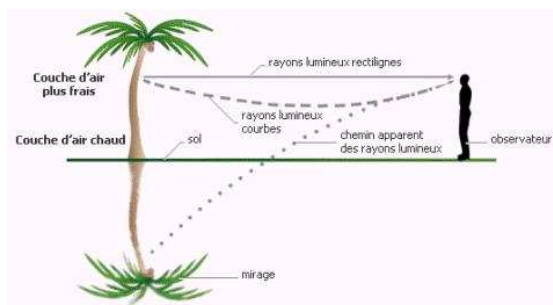


FIGURE XVIII.7 – À gauche : photographie d'un mirage inférieur. À droite : schéma des rayons lumineux dans un phénomène de mirage inférieur.

On peut également croire voir un lac au milieu du désert, ou encore des flaques d'eau sur le bitume surchauffé, alors que c'est une partie du ciel que l'on voit.

#### ➤ Mirages supérieurs

Le phénomène inverse se produit lorsque le gradient de température est inversé. On parle alors de *mirage supérieur*. On observe ces mirages généralement dans les régions polaires, où la température de la mer ou du sol gelé est plus faible que l'air des couches supérieures.

1. Dans le cas de l'air, la formule de Gladstone permet de remonter à l'écart à 1.



FIGURE XVIII.8 – *Cliché de l'abbé Gély, vers 1900, lors d'un mirage supérieur au-dessus de la ville de Salers.*