

# 3 – DESCRIPTION ET PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

## Plan du chapitre

<b>1 Description ondulatoire de la lumière</b>	<b>2</b>
1.1 Caractéristique d'une onde lumineuse . . . . .	2
1.2 Lumière monochromatique et polychromatique ; couleurs . . . . .	3
1.3 Vitesse de la lumière dans un milieu matériel . . . . .	3
1.4 Rayon lumineux . . . . .	4
<b>2 Aspect corpusculaire de la lumière</b>	<b>5</b>
2.1 La lumière est un flux de photons . . . . .	5
2.2 Effet photoélectrique . . . . .	6
2.3 Photoionisation . . . . .	7
<b>3 Propagation de la lumière ; lois de Snell-Descartes</b>	<b>8</b>
3.1 Sources primaires et sources secondaires . . . . .	8
3.2 Propagation dans un milieu homogène . . . . .	8
3.3 Réflexion de la lumière . . . . .	9
3.4 Réfraction de la lumière . . . . .	11
3.5 Réflexion et réfraction sur un dioptre . . . . .	15
<b>4 Réflexion et réfraction des ondes sismiques</b>	<b>15</b>
<b>Exercices</b>	<b>17</b>
<b>Travaux dirigés</b>	<b>22</b>

Programme officiel – Premier semestre – Thème S – ondes et signaux

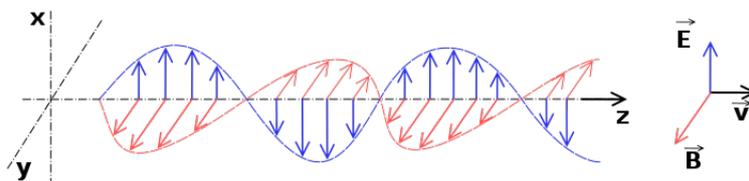
NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
<p><b>S.1 Propagation d'un signal physique</b></p> <p><b>Rayonnement électromagnétique : modèles ondulatoire et particulaire de la lumière.</b></p> <p>Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.</p> <p>Photon : énergie, loi de Planck-Einstein. Effet photoélectrique et photoionisation.</p>	<p>Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, rayonnement infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma). Citer des applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux de rayonnement électromagnétique.</p> <p>Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique et l'effet photoionisant à l'aide du modèle particulaire de la lumière.</p>
<p><b>Réflexion, réfraction</b></p> <p>Notion de rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique. Indice optique d'un milieu transparent.</p> <p>Réflexion, réfraction des ondes lumineuses. Lois de Snell-Descartes.</p> <p>Rais sismiques. Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume.</p>	<p>Définir le modèle de l'optique géométrique et en indiquer les limites.</p> <p>Établir la condition de réflexion totale.</p> <p>Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.</p>

# 1 Description ondulatoire de la lumière

## 1.1 Caractéristique d'une onde lumineuse

### La lumière est une onde électromagnétique

La lumière est une onde transversale, associée à la vibration sinusoïdale d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$  (direction de propagation repérée par le vecteur  $\vec{v}$ ).



Par SuperManu CC BY-CA <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2107870>

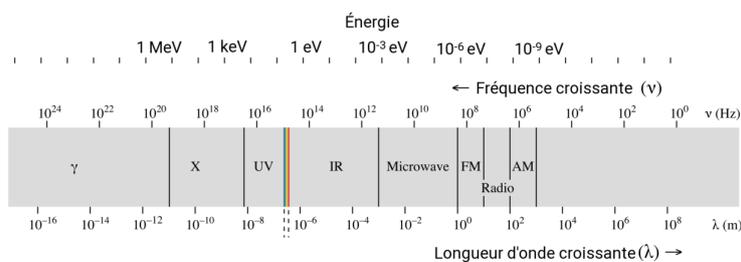
### Caractéristiques de l'onde

Longueur d'onde  $\lambda$ , période  $T$  et fréquence  $\nu$ , avec :

$$\lambda = c \times T = \frac{c}{\nu}$$

### Domaines spectraux

domaine	rayons $\gamma$	rayons X	ultraviolet	visible
$\lambda$	< 10 pm	10 pm – 10 nm	10 nm – 380 nm	380 nm – 780 nm
domaine	infrarouge	micro-ondes	ondes radio	
$\lambda$	780 nm – 100 $\mu\text{m}$	1 mm – 30 cm	> 1 m	



Par Philip Ronan, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=67848114>

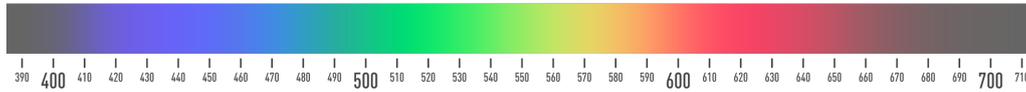
### Utilisation des différents domaines spectraux

- Ondes radio : détection d'objets macroscopiques (radar), transmission d'information recueillies par une antenne.
- Micro-onde : transmission d'information (téléphonie mobile, GPS, WiFi), chauffage (four), détection (radar de recul).
- Infrarouge : analyse des liaisons d'une molécule (spectrométrie infrarouge), détecteur de présence, vision nocturne.
- Visible et ultraviolet : analyse des électrons d'une molécule (spectrophotométrie), désinfection de surface, déclenchement de réactions chimiques.
- Rayons X : radiographie médicale, analyse des cristaux (diffraction des rayons X).
- Rayons  $\gamma$  : radiographie médicale, radiothérapie.

## 1.2 Lumière monochromatique et polychromatique ; couleurs

### Lumière monochromatique

Une lumière monochromatique est associée une unique longueur d'onde  $\lambda$ . Dans le domaine visible, à chaque longueur d'onde est associée une couleur perçue.



Par Bhutajata, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59589865>

couleur	violet	bleu	vert	jaune	rouge
$\lambda$	400 nm	450 nm	520 nm	570 nm	680 nm

### Lumière polychromatique

Une lumière polychromatique est la superposition de plusieurs ondes de longueurs d'onde différentes. Dans le visible, la couleur perçue est difficile à prévoir.

### Lumière blanche

La lumière blanche contient toutes les longueurs d'onde du spectre visible.

La lumière naturelle (émise par le Soleil) contient toutes les longueurs d'onde du spectre visible, en proportions inégales.

### Couleurs complémentaires

Une lumière blanche dont on a ôté une longueur d'onde  $\lambda_0$  est perçue par l'œil de la couleur complémentaire d'une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0$ .

Les couleurs complémentaires sont opposées sur le cercle chromatique.



## 1.3 Vitesse de la lumière dans un milieu matériel

### Célérité de la lumière

Dans le vide :  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (constante universelle).

Dans un milieu matériel, la lumière se propage moins rapidement :

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

où  $n$  est l'**indice optique** du milieu (sans unité), avec  $n > 1$ .

### Valeur de l'indice optique

milieu	air	eau	jus sucrés	verre
$n$	$1,00027 \approx 1$	1,33	1,35 à 1,37	1,5 à 1,9

### Loi de Cauchy

L'indice optique dépend de la longueur d'onde : les milieux matériels sont dispersifs. La loi empirique de Cauchy est valable pour de nombreux milieux :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes positives (particulières à chaque milieu).

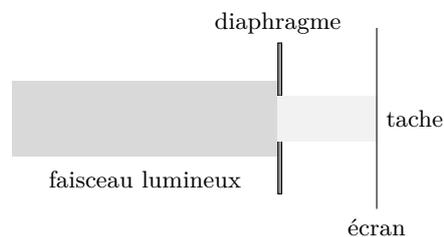
### Application 1 : dispersion de la lumière blanche

On envoie une lumière visible polychromatique à travers un milieu supposé non absorbant. Quelle est la couleur qui arrive la première ?

## 1.4 Rayon lumineux

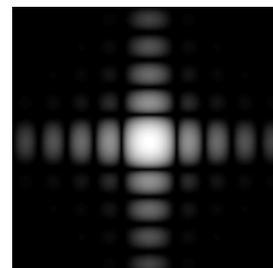
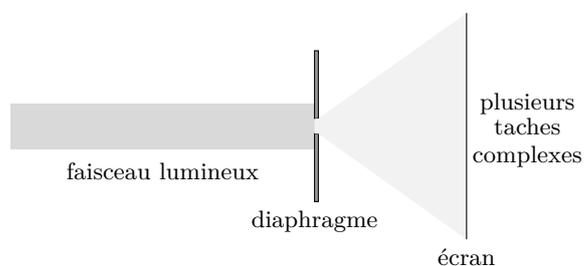
### Rayon lumineux

On envoie un faisceau lumineux à travers un **diaphragme** pour réduire la taille du faisceau.



### Limite de taille du diaphragme

On peut diminuer la taille du faisceau jusqu'à une taille de l'ordre de la longueur d'onde. Si l'ouverture du diaphragme est de l'ordre de la longueur d'onde du faisceau ou plus petite, il y a diffraction.



### Limite de validité de l'optique géométrique

On étudie des dispositifs tels que les objets matériels qui interagissent avec la lumière sont beaucoup plus grands que sa longueur d'onde.

## 2 Aspect corpusculaire de la lumière

### 2.1 La lumière est un flux de photons

#### Le photon

La lumière peut être modélisée comme un flux de particules appelées **photons**.

#### Caractéristiques d'un photon

- Sa charge est nulle.
- Sa masse est nulle.
- Il se déplace à la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.
- Il transporte une énergie.

Un photon est un « grain d'énergie ».

#### Énergie d'un photon

Un photon associé à une lumière de fréquence  $\nu$  et de longueur d'onde  $\lambda$  transporte une énergie :

$$E = h \times \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$h$  est une constante universelle, la constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

#### Valeur de l'énergie d'un photon visible

Calculer l'ordre de grandeur de l'énergie transportée par un photon visible.

#### L'électronvolt (eV)

On définit l'unité d'énergie adaptée à l'échelle des particules : l'**électronvolt** :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Calculer l'ordre de grandeur de l'énergie transportée par un photon visible, exprimée en électronvolt.

- Les aspects corpusculaire et ondulatoire sont deux descriptions d'un même objet physique (la lumière).
- Chacun des deux aspects permet d'expliquer certains phénomènes (les deux aspects sont complémentaires).

#### Puissance transportée par un faisceau lumineux

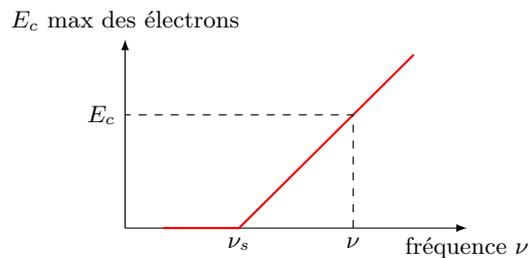
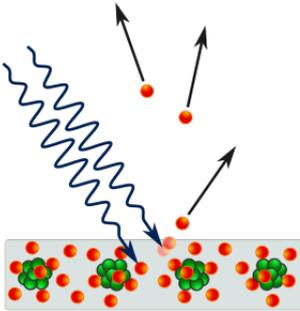
Un faisceau lumineux transporte une puissance, appelée l'**intensité lumineuse** (en watt W). Pour un faisceau monochromatique,  $\mathcal{P} = N \times h\nu$ , avec  $N$  le nombre de photons transportés par unité de temps.

Un faisceau polychromatique est un flux de photons ayant des énergies différentes. Un spectrophotomètre mesure l'intensité lumineuse pour chaque longueur d'onde dans le domaine UV-visible.

## 2.2 Effet photoélectrique

On illumine une surface métallique par un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  et de fréquence  $\nu = c/\lambda$ . On constate qu'il existe une fréquence seuil  $\nu_s$  (et une longueur d'onde seuil  $\lambda_s$ ), telle que :

- si  $\nu < \nu_s$  (soit  $\lambda > \lambda_s$ ), il ne se passe rien quelle que soit l'intensité de la lumière,
- si  $\nu > \nu_s$  (soit  $\lambda < \lambda_s$ ), des électrons sont arrachés du métal, et partent avec une énergie cinétique maximale qui augmente proportionnellement à  $\nu$ .



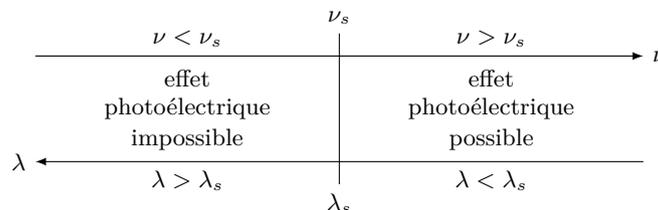
Par Ponor, CC BY-SA 4.0 <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=92684859>

Pour  $\nu < \nu_s$ , aucun électron n'est arraché même si on augmente l'intensité lumineuse : ce n'est donc pas simplement une question de puissance totale.

### Interprétation de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique correspond à un choc entre un électron du métal et un photon à l'issue duquel :

- le photon est absorbé (choc inélastique : les particules après le choc ne sont plus les mêmes qu'avant le choc),
- le photon cède toute son énergie à l'électron.



### Fréquence seuil et travail d'extraction

Si  $\nu < \nu_s$ , le photon n'a pas assez d'énergie pour arracher l'électron du métal.

À la **fréquence seuil**, l'énergie du photon  $E_s = h\nu_s$  est égale à l'énergie exactement nécessaire pour arracher un électron du réseau métallique. Cette énergie s'appelle le **travail d'extraction** du métal  $W_s$  ; elle mesure l'énergie d'interaction de l'électron avec le réseau métallique.

### Énergie cinétique maximale des électrons

Elle se déduit de la **conservation de l'énergie**.

Seuls quelques électrons ont cette énergie maximale ; beaucoup en perdent avant la sortie du métal à l'occasion de chocs.

### Application 2 : expression de l'énergie cinétique en fonction de $\lambda$

Établir l'expression littérale de l'énergie cinétique des électrons en fonction de la longueur d'onde de la lumière et de la longueur d'onde seuil.

### Effet photoélectrique sur le sodium

Pour du sodium, la fréquence seuil mesurée est  $\nu_s = 8,1 \cdot 10^{14}$  Hz. On éclaire du sodium par une lumière de longueur d'onde  $\lambda = 0,25 \mu\text{m}$ . Calculer :

- le travail d'extraction du sodium en eV,
- l'énergie cinétique maximale des électrons.

### Application 3 : effet photoélectrique sur le zinc

Le travail d'extraction du zinc est  $W_s = 3,3 \text{ eV}$ . On éclaire du zinc par une lumière de longueur d'onde  $\lambda = 0,25 \mu\text{m}$ .

1. Calculer la fréquence seuil et l'énergie cinétique maximale des électrons émis.
2. Un effet photoélectrique est-il observé si on interpose entre la source lumineuse et le métal une plaque de verre qui absorbe les radiations lumineuses de longueurs d'onde inférieures à  $0,42 \mu\text{m}$  ?

## 2.3 Photoionisation

### Photoionisation

On appelle **photoionisation** ou **effet photoionisant** la libération d'un électron par un atome ou une molécule suite à l'absorption d'un photon :



Le phénomène est analogue à l'effet photoélectrique mais sur des entités isolées (molécules ou atomes en phase liquide ou gazeuse).

Utilisation de la photoionisation.

- En spectrométrie de masse. On arrache un électron à une molécule pour la convertir en une entité chargée qui pourra être analysée dans des zones où règnent un champ électrique ou un champ magnétique. Le parcours de l'ion est fonction de sa masse, ce qui permet de mesurer celle-ci.
- En astronomie. Les nuages de gaz (nébuleuses) entourant certaines étoiles sont photoionisés par le rayonnement de l'étoile. L'analyse du spectre lumineux après le passage de la nébuleuse permet de déterminer la composition du gaz.

### 3 Propagation de la lumière ; lois de Snell-Descartes

#### 3.1 Sources primaires et sources secondaires

##### Source primaire

La lumière est émise par une source dite primaire (usuellement suite à une desexcitation atomique) : Soleil, filaments d'ampoule, diode lumineuse.

##### Source secondaire

Une source secondaire reçoit de la lumière et la rediffuse dans toutes les directions. Il s'agit de tout objet invisible dans le noir mais visible dans la lumière.

#### 3.2 Propagation dans un milieu homogène

##### Cadre d'étude de l'optique géométrique

La lumière se propage dans un milieu :

- homogène (indice optique identique en tout point du milieu),
- non dispersif (indice optique identique pour toutes les longueurs d'onde) sauf avis contraire,
- sans dispositif diffractant.

On se limite au domaine visible ou proche du visible.

##### Principe de Fermat (simplifié)

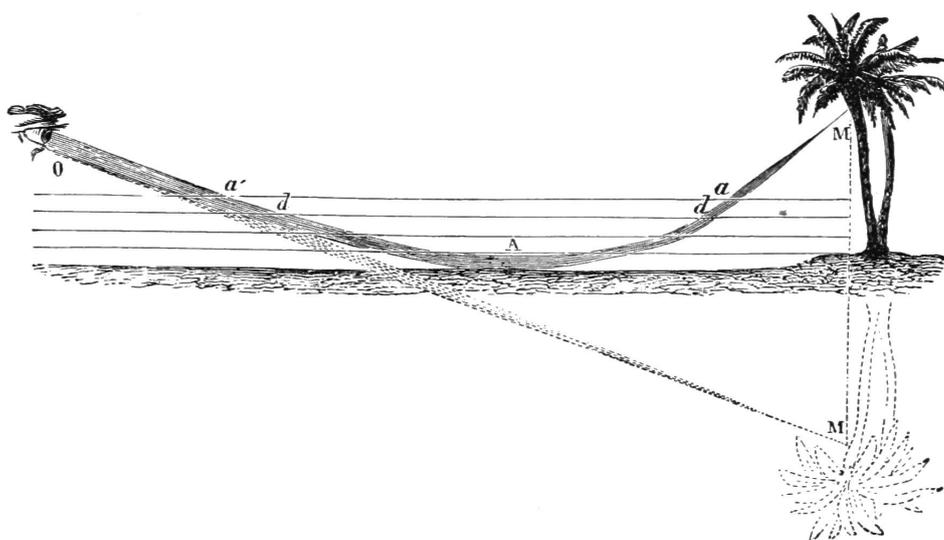
La lumière suit le chemin le long duquel son temps de propagation est le plus court.

Dans un milieu homogène : la lumière se **propage en ligne droite**.

##### Principe du retour inverse de la lumière

Le chemin parcouru par la lumière entre une source et un récepteur est le même, mais parcouru en sens inverse, si on échange les positions de la source et du récepteur.

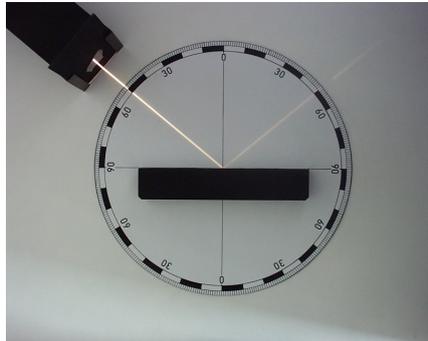
Principe de Fermat dans le cas d'un milieu non homogène : phénomène du mirage optique.



### 3.3 Réflexion de la lumière

#### 3.3.1 Loi de Snell-Descartes de la réflexion

On envoie un rayon lumineux sur une surface réfléchissant la lumière (surface catadioptrique).

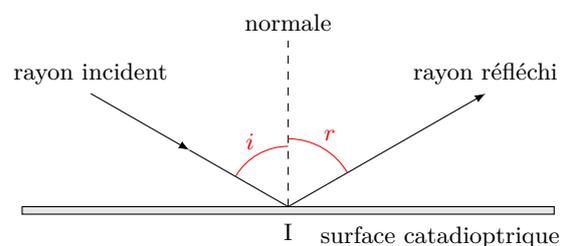


Par Zátanyi Sándor (ifj.), travail personnel, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10035697>

#### Réflexion de la lumière

Un **rayon incident** parvenant sur une **surface catadioptrique** en I, est réfléchi sous forme d'un **rayon réfléchi**. On définit :

- la **normale** au catadioptré au point I = la direction orthogonale au catadioptré en I,
- l'**angle d'incidence**  $i$  entre la direction du rayon incident et la normale au catadioptré,
- l'**angle de réflexion**  $r$  entre la direction du rayon réfléchi et la normale au catadioptré.

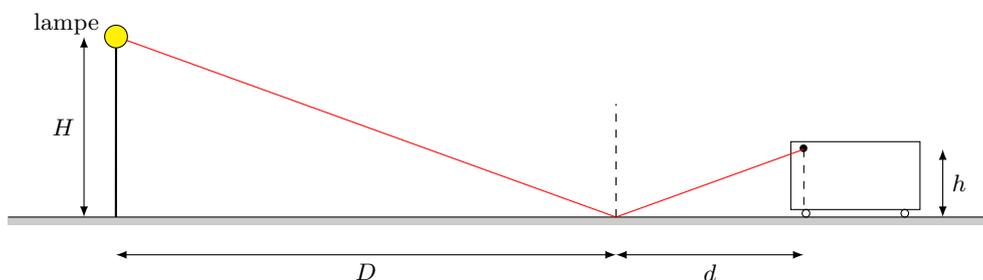


#### Loi de Snell-Descartes pour la réflexion

- Le rayon réfléchi appartient au **plan d'incidence** défini par le rayon incident et la normale.
- Les rayons incident et réfléchi sont de part et d'autre de la normale.
- Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux :  $r = i$ , avec :  $i \in [0, \pi/2]$

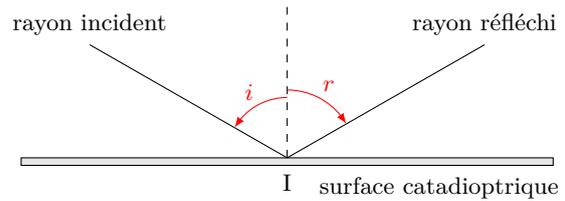
#### Réflexion par une flaque d'eau

Soit un lampadaire de hauteur  $H = 6$  m, assimilé à une source ponctuelle (de la taille d'un point) qui éclaire une route plane sur laquelle se trouve une flaque d'eau à  $D = 20$  m en avant du lampadaire. Un automobiliste, dont les yeux sont à une hauteur  $h = 1,5$  m au-dessus de la chaussée, roule vers le lampadaire. À quelle distance du lampadaire sera-t-il ébloui par le reflet de la lampe sur la flaque ?



#### Application 4 : utilisation des angles orientés

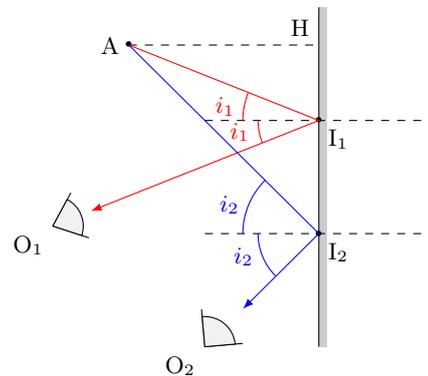
Il peut être utile d'utiliser des angles orientés (angles algébriques, c'est-à-dire avec un signe selon le sens de rotation), si on cherche la déviation d'un rayon lumineux suite à plusieurs réflexions. On définit les angles orientés à partir de la normale. Énoncer la loi de Snell-Descartes pour réflexion en utilisant les angles orientés  $i$  et  $r$ .



### 3.3.2 Image par un miroir plan

#### Observation d'un objet ponctuel par un miroir plan

Un observateur observe un objet ponctuel A par réflexion sur un miroir plan, en se plaçant en  $O_1$  puis en  $O_2$ .

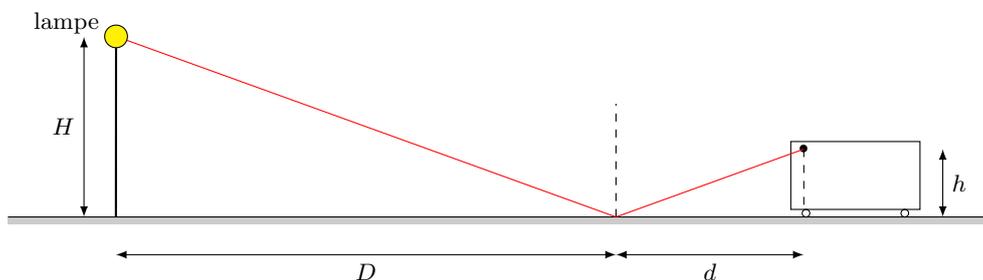


#### Image par un miroir

Pour l'observateur, tout se passe comme si la lumière venait du point symétrique de A par le miroir. Ce point  $A'$  est l'image de A par le miroir.

#### Réflexion par une flaque d'eau

Soit un lampadaire de hauteur  $H = 6$  m, assimilé à une source ponctuelle (de la taille d'un point) qui éclaire une route plane sur laquelle se trouve une flaque d'eau à  $D = 20$  m en avant du lampadaire. Un automobiliste, dont les yeux sont à une hauteur  $h = 1,5$  m au-dessus de la chaussée, roule vers le lampadaire. À quelle distance du lampadaire sera-t-il ébloui par le reflet de la lampe sur la flaque ?



## Stigmatisme

L'image d'un objet ponctuel A est elle-même ponctuelle : le miroir plan est un système rigoureusement stigmatique. L'image d'un objet par un miroir plan est aussi nette que l'objet.

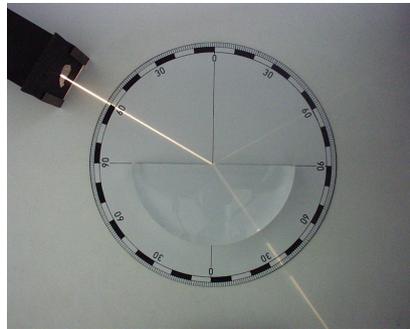
## L'image est virtuelle

L'image de A se trouve derrière le miroir. On ne peut pas la visualiser sur un écran placé en A'. L'image est dite virtuelle.

## 3.4 Réfraction de la lumière

### 3.4.1 Loi de Snell-Descartes de la réfraction

On envoie un rayon lumineux sur une interface entre deux milieux transparents (surface dioptrique ou dioptre).

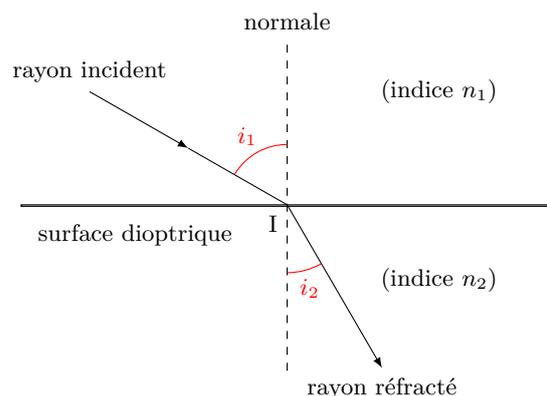


Par Zátónyi Sándor (ifj.) Fized (talk), travail personnel, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2845439>

## Réfraction de la lumière

Un **rayon incident** se propageant dans un milieu d'indice  $n_1$  et parvenant sur une **surface dioptrique** en I, est réfracté selon un **rayon réfracté** dans un milieu d'indice  $n_2$ . On définit :

- la **normale** au dioptre au point I = la direction orthogonale au dioptre en I,
- l'**angle d'incidence**  $i_1$  entre la direction du rayon incident et la normale au dioptre,
- l'**angle de réfraction**  $i_2$  entre la direction du rayon réfracté et la normale au dioptre.



## Loi de Snell-Descartes pour la réfraction

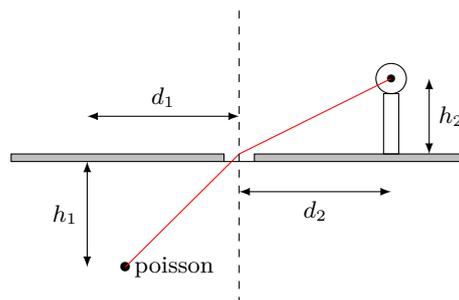
- Le rayon réfracté appartient au **plan d'incidence** défini par le rayon incident et la normale.
- Les rayons incident et réfracté sont de part et d'autre de la normale.
- Les angles d'incidence (avec :  $i \in [0, \pi/2]$ ) et réfracté vérifient la relation :

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

### Observation à travers un dioptre plan

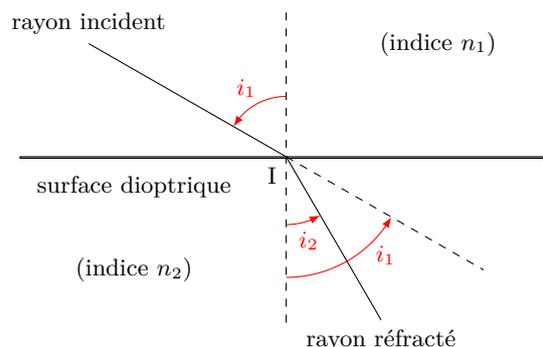
On considère la banquise, dans laquelle se trouve un petit trou. Un poisson, supposé ponctuel, se trouve à une profondeur de  $h_1 = 2\text{ m}$  et décalé de  $d_1 = 2\text{ m}$  par rapport à la verticale du trou. Un ours, dont les yeux sont à  $h_2 = 1\text{ m}$  du sol observe le poisson.

À quelle distance du trou doit-il se placer ?



### Application 5 : utilisation des angles orientés

Il peut être utile d'utiliser des angles orientés (angles algébriques, c'est-à-dire avec un signe selon le sens de rotation), si on cherche la déviation d'un rayon lumineux suite à plusieurs réflexions. On définit l'angle d'incidence et l'angle de réfraction orientés par rapport à la normale. Énoncer la loi de Snell-Descartes pour réfraction en utilisant les angles orientés  $i_1$  et  $i_2$ .



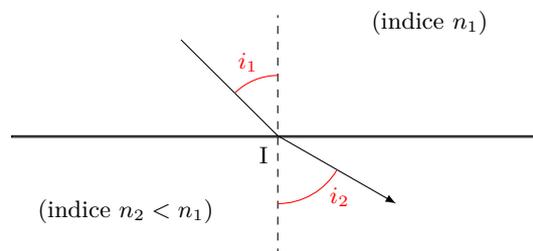
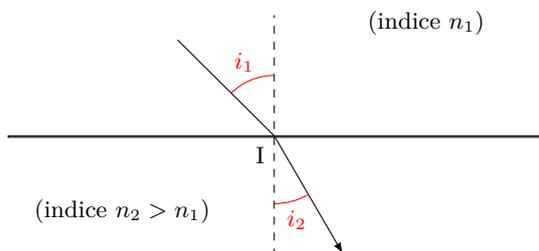
### 3.4.2 Comparaison de l'angle incident et de l'angle réfracté

Considérons un rayon lumineux se propageant dans un milieu d'indice  $n_1$  et arrivant sur un dioptre le séparant d'un milieu d'indice  $n_2$ . Deux cas sont à considérer, en fonction de la valeur de  $n_2$  par rapport à  $n_1$ .

#### Réfraction vers un milieu plus réfringent ou vers un milieu moins réfringent

Lors de la réfraction d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent, soit  $n_1 < n_2$ , l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence ; le rayon se rapproche de la normale lors du passage du dioptre.

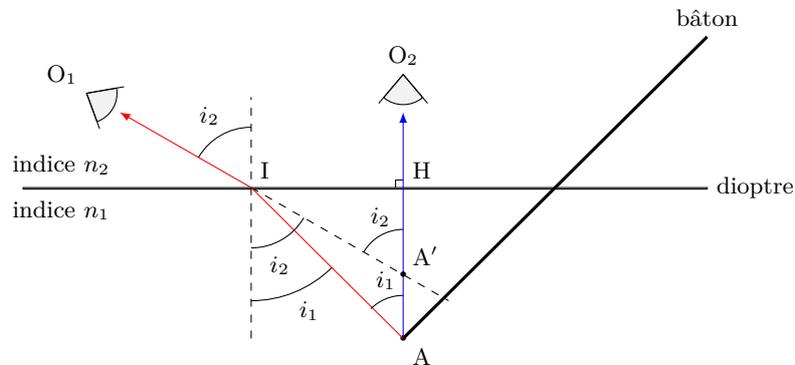
Lors de la réfraction d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent, soit  $n_1 > n_2$ , l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence ; le rayon s'écarte de la normale lors du passage du dioptre.



#### Démonstration (à connaître)

### Le bâton dans l'eau

Un bâton d'une longueur  $L = 1$  m, incliné de  $45^\circ$  par rapport à la verticale, est plongé à moitié dans l'eau. À quelle profondeur sous l'eau l'observateur a-t-il l'impression de voir son extrémité? Comment perçoit-il le bâton?



### Conditions de Gauss

On dit qu'on se trouve dans les **conditions de Gauss**, lorsqu'on limite l'étude aux rayons peu inclinés par rapport à la normale :  $i_1$  et  $i_2$  petits.

Dans les conditions de Gauss, et pour un angle  $i$  exprimé **en radians**, on peut faire l'approximation :

$$\tan i \approx \sin i \approx i$$

### Application 6 : qui se termine toujours avec la manche mouillée

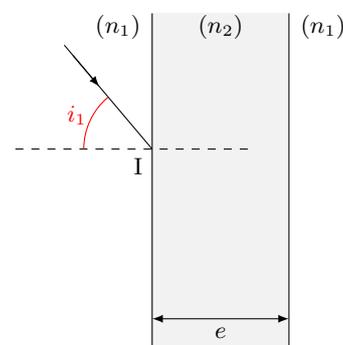
Une pièce de monnaie se trouve au fond d'une fontaine remplie d'eau sur une profondeur de 50 cm. À quelle profondeur la pièce semble-t-elle se trouver pour un observateur situé dans l'air et faisant l'observation dans les conditions de Gauss? Que lui arrive-t-il lorsqu'il veut la saisir?

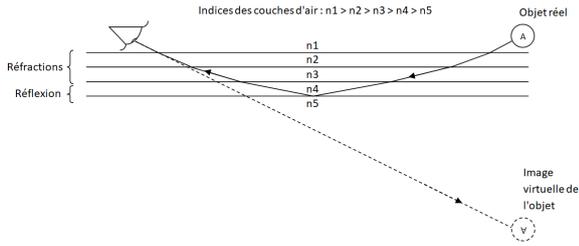
### Application 7 : lames à faces parallèles

Une lame à faces parallèles est constituée de deux surfaces dioptriques parallèles séparant un milieu intermédiaire d'indice optique  $n_2$  de deux milieux extrêmes de même indice  $n_1$ . C'est le cas d'une lame de verre ( $n_2 = 1,5$ ) dans l'air ( $n_1 = 1$ ).

Montrer que le rayon émergent (rayon sortant) de la lame est parallèle au rayon incident.

Calculer le décalage entre le rayon incident et le rayon émergent, en fonction de  $e$  et des angles intervenant dans le problème. Faire l'application numérique si  $i = 11,3^\circ$  et  $e = 0,66$  cm.



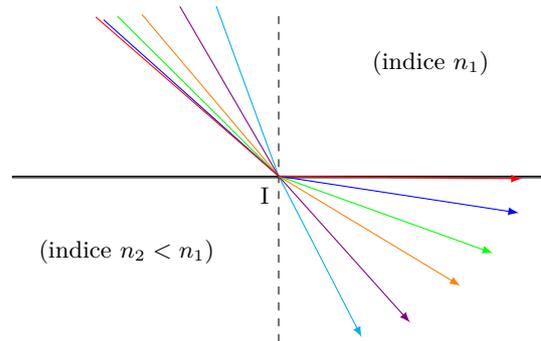


L'effet mirage peut être modélisé en supposant que le milieu est constitué d'une infinité de couche d'indice optique différents.

Par Bezzerides 57 — Travail personnel, CC BY-SA 4.0  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=67749159>

### 3.4.3 Angle limite de réfraction

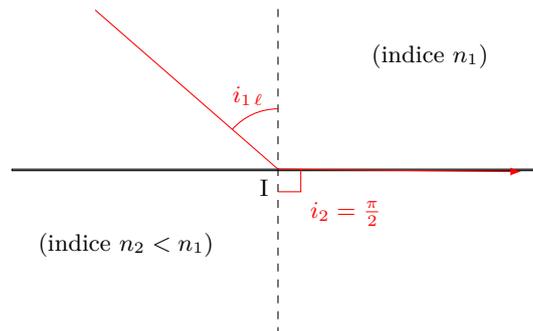
Considérons un rayon incident dans un milieu d'indice  $n_1$  qui est réfracté en un point I vers un milieu moins réfringent d'indice  $n_2 < n_1$ ; le rayon s'éloigne de la normale lors du passage par le dioptre, soit  $i_2 > i_1$ . Une augmentation progressive de l'angle incident  $i_1$  entraîne une augmentation de l'angle réfracté  $i_2$ .



#### Angle limite de réfraction

Pour un rayon se propageant dans un milieu d'indice  $n_1$  arrivant sous une incidence  $i_1$  sur un dioptre le séparant un milieu moins réfringent d'indice  $n_2 < n_1$ , il existe une **valeur limite** de l'angle d'incidence  $i_{1\ell}$ , telle :

- si  $i_1 < i_{1\ell}$ , la réfraction est possible,
- si  $i_1 > i_{1\ell}$ , la réfraction est impossible et il y a **réflexion totale**.



#### Détermination de $i_{1\ell}$ (à connaître)

L'angle limite  $i_{1\ell}$  correspond à l'angle d'incidence tel que l'angle de réfraction soit maximal soit  $i_2 = \pi/2$ .

### Réfraction de l'air vers l'eau

Un source ponctuelle située dans l'air émet un rayon lumineux vers la surface d'un plan d'eau. Le rayon émerge-t-il toujours dans l'eau ? Si oui, pourquoi ? Si non, à quelle condition émerge-t-il ?

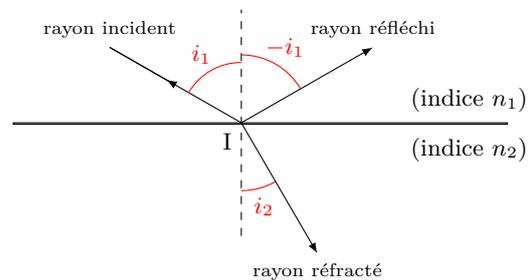
### Réfraction de l'eau vers l'air

Un source ponctuelle située dans l'eau émet un rayon lumineux vers la surface. Le rayon émerge-t-il toujours dans l'air ? Si oui, pourquoi ? Si non, à quelle condition émerge-t-il ?

## 3.5 Réflexion et réfraction sur un dioptre

Lorsqu'un rayon incident arrive sur un dioptre dans des conditions telles que la réfraction soit possible :

- une partie de la lumière est réfractée et une partie est réfléchie,
- les proportions de l'énergie transmise à travers le dioptre et réfléchies dépendent de la nature des milieux et de la longueur d'onde de la lumière.



## 4 Réflexion et réfraction des ondes sismiques

Les lois de Snell-Descartes se généralisent, avec des adaptations, aux autres phénomènes ondulatoires : ondes sonores, ondes mécaniques (vagues, corde vibrante, ressort...), ondes sismiques.

### Rais sismiques

On appelle rai sismique la trajectoire décrite par une onde sismique entre un site d'émission et un site de réception. C'est l'équivalent du rayon lumineux.

### Réflexion d'une onde sismique

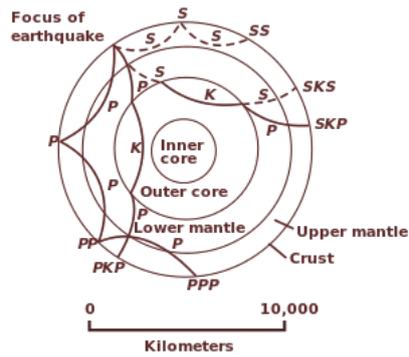
Lorsqu'un rai sismique parvient à une interface entre deux milieux avec un angle d'incidence  $i$ , une partie de l'onde se réfléchit avec un angle de réflexion  $r = i$ .

### Réfraction d'une onde sismique

Lorsqu'un rai sismique parvient à une interface entre deux milieux dans lesquels les célérités sont différentes  $c_1$  et  $c_2$ , avec un angle d'incidence  $i_1$ , une partie de l'onde se réfracte avec un angle de réfraction tel que :

$$\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin i_2}{c_2}$$

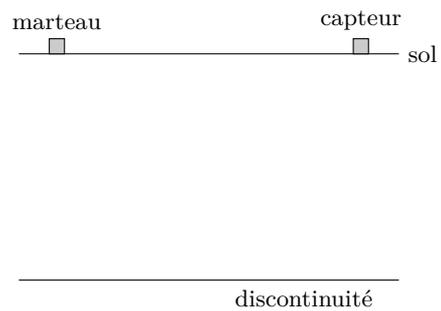
Dans un milieu donné (croûte, manteaux, noyau), la célérité n'est pas uniforme, et les rais sismiques ne sont pas rectilignes (mirage).



### Sondage sismique

Un marteau est actionné à la surface du sol, et envoie une onde mécanique de célérité  $c = 6,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Cette onde se réfléchit sur la première discontinuité et est enregistré par un détecteur situé à une distance  $d = 100 \text{ m}$  du marteau. Le retard avec lequel l'onde est enregistré est  $\Delta t = 580 \text{ ms}$ . On suppose que les ondes mécaniques se propagent en ligne droite dans le milieu considéré.

Représenter le rai sismique recueilli par le capteur. Estimer la profondeur à laquelle se trouve la première discontinuité.



## Exercices

### Aspect corpusculaire de la lumière

#### Exercice 1 : effet photoélectrique

Une lumière de longueur d'onde  $\lambda = 0,35 \mu\text{m}$  est envoyée sur une surface métallique. Des électrons sont émis, et une étude montre que leur énergie cinétique maximale est de  $1,1 \text{ eV}$ .

1. Calculer l'énergie d'un photon arrivant sur le métal.
2. Calculer la valeur du travail d'extraction de ce métal.
3. Calculer la longueur d'onde seuil.

#### Exercice 2 : détermination de la constante de Planck

On soumet un métal à des rayonnements monochromatiques de différentes fréquences. Au-dessus d'une certaine fréquence  $\nu_s$ , on observe une émission d'électrons, dont l'énergie cinétique maximale est mesurée.

$\nu (10^{14} \text{ Hz})$	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
$E_{c \text{ max}} (\text{ eV})$	0,21	0,42	0,62	0,83	1,04

1. À quel effet l'émission d'électrons est-elle due ? À quoi la fréquence seuil correspond-elle ?
2. Établir l'expression de  $E_{c \text{ max}}$  en fonction de la fréquence de la lumière incidente et de la fréquence seuil  $\nu_s$ . De quelle fonction mathématique s'agit-il ?
3. Tracer  $E_{c \text{ max}}$  en fonction de  $\nu$ . En déduire le travail d'extraction  $W_s$  et la valeur de la constante de Planck.

#### Exercice 3 : rendement quantique de l'effet photoélectrique

On irradie du césium, métal dont le travail d'extraction est  $W_s = 1,9 \text{ V}$ , par un faisceau lumineux monochromatique de longueur d'onde  $\lambda = 546 \text{ nm}$  et d'intensité  $\mathcal{P} = 0,540 \text{ W}$ . Les électrons arrachés par effet photoélectrique sont intégralement collectés par une cathode reliée à un circuit extérieur. L'intensité du courant dans ce circuit est mesurée et vaut :  $I = 475 \mu\text{A}$ .

1. Montrer que des électrons peuvent être émis dans ces conditions.
2. Calculer le flux de photons incidents, c'est-à-dire le nombre de photons arrivant sur le métal par seconde.
3. Calculer le flux d'électrons arrachés par effet photoélectrique.
4. Quelle est la proportion de photons qui donne effectivement lieu à l'arrachement d'un électron ? Commenter.

## Réflexion et réfraction

#### Exercice 4 : construction géométrique de rayons lumineux

1. Soit un rayon issu d'un point S et parvenant sur une surface catadioptrique en I. Réaliser une construction géométrique du rayon réfléchi.
2. Soit une source en un point S émettant vers une surface catadioptrique. Un observateur place son œil en un point Q. Construire géométriquement la marche du rayon issu de S et parvenant en Q.

•  
S

•  
Q

### Exercice 5 : translation d'un objet ou d'un miroir

On considère un miroir plan et un objet ponctuel au point A. On appelle H la projection de A sur le miroir. On définit un axe  $(H, x)$  normal au miroir.

1. Le miroir restant fixe, on éloigne l'objet du miroir de  $d$  selon la direction  $x$ . Déterminer le déplacement de (sens et valeur) de l'image.
2. L'objet restant fixe, on éloigne le miroir de  $d$  selon la direction  $x$ . Déterminer le déplacement de (sens et valeur) de l'image.

### Exercice 6 : alignement des rayons incidents et réfractés

1. Déterminer dans quel cas le rayon réfracté par un dioptre, séparant deux milieux d'indices optiques quelconques, est aligné avec le rayon incident.
2. Dans ce cas comment est le rayon réfléchi? En déduire comment il faut se placer par rapport à un dioptre partiellement réfléchissant (de l'eau, par exemple) pour voir sa propre image.

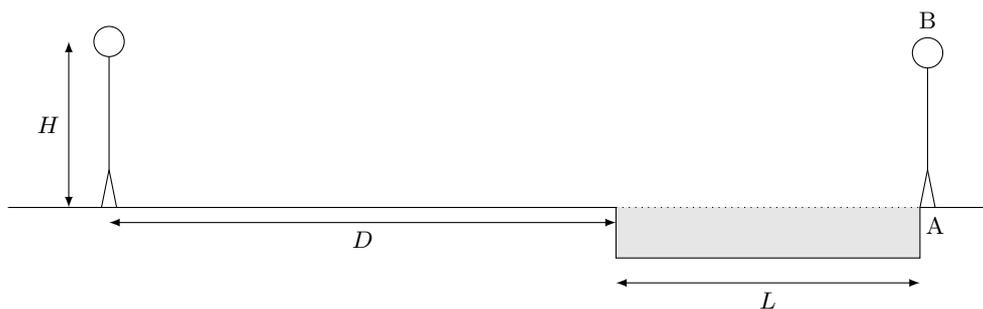
### Exercice 7 : phénomène de parallaxe

On considère un dioptre plan séparant deux milieux d'indices optique  $n_1$  et  $n_2$ . Un rayon lumineux arrive sur le dioptre sous une incidence quelconque (différente de 0 et de  $\pi/2$ ).

1. Tracer l'allure du rayon réfracté dans les deux cas :  $n_1 > n_2$  et  $n_1 < n_2$ .
2. Application au cas de l'air ( $n_1 = 1,00$ ) et de l'eau ( $n_2 = 1,33$ ). Expliquer pourquoi le fond d'un ruisseau paraît moins profond qu'il n'est réellement. On pourra appliquer le principe du retour inverse de la lumière.

### Exercice 8 : observation par réflexion dans un bassin

On considère un bassin de profondeur  $h = 0,5\text{ m}$  et de largeur  $L = 3\text{ m}$ . Un observateur, dont les yeux sont à  $H = 1,8\text{ m}$  au-dessus du sol, est situé à une distance  $D = 5\text{ m}$  du bord du bassin. Il observe par réflexion sur la surface de l'eau la créature de ses rêves<sup>1</sup>, notée AB (avec A sa tête et B ses pieds), qui se tient au bord du côté opposé du bassin. Cette créature a une hauteur  $AB = 1,7\text{ m}$ .



1. Définir ce qu'est l'image d'un objet ponctuel par un miroir plan, et préciser à quelle position cette image se trouve.
2. Déterminer graphiquement si l'observateur peut voir entièrement AB par réflexion (le schéma ci-dessus est à l'échelle).
3. Si oui, déterminer la taille maximum de AB pouvant être vue par l'observateur. Si non, déterminer la hauteur  $y$  de AB pouvant être vue par l'observateur, et préciser s'il voit la partie haute ou la partie basse de AB.

En fonction de la position  $\ell$  de la créature par rapport au bassin, l'observateur peut ou non voir la tête (point B) de celle-ci par réflexion.

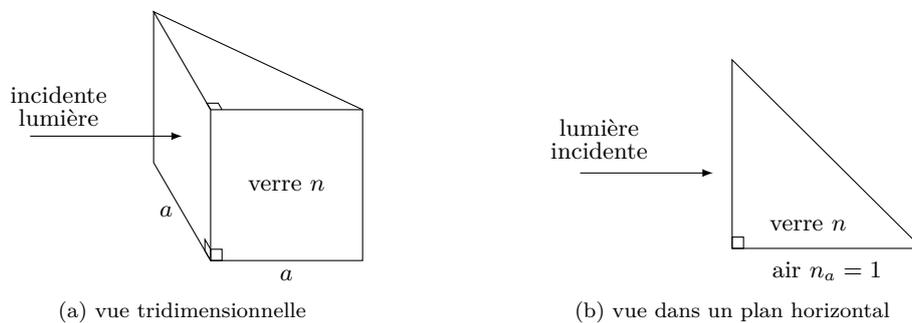
1. La nature de cette créature est laissée à la libre imagination de chacun.

4. Déterminer l'intervalle de position que doit avoir la créature par rapport au bord du bassin pour que l'observateur puisse voir sa tête par réflexion.

### Exercice 9 : réflexion totale par un prisme droit

1. On considère un dioptre séparant deux milieux d'indice  $n_1$  et  $n_2 < n_1$ . De la lumière provenant du milieu le plus réfringent (de plus grand indice optique) arrive sur le dioptre. Montrer qu'il existe un angle limite d'incidence au-delà duquel il y a réflexion totale. Faire le calcul pour le cas du passage d'un milieu d'indice 1,7 à un milieu d'indice 1.

Dans certains appareils, on utilise un prisme pour dévier la lumière. Le prisme est droit (sa section est perpendiculaire à sa hauteur) et sa section a la forme d'un triangle isocèle rectangle. Il est fait dans un matériau transparent d'indice optique  $n$ , et le milieu environnant est de l'air d'indice optique 1. La lumière pénètre par une des petites faces, sous une incidence normale et frappe la plus grande face en un point I. On appelle déviation d'un rayon par un système optique l'angle que fait le rayon émergent de ce système avec le rayon incident.

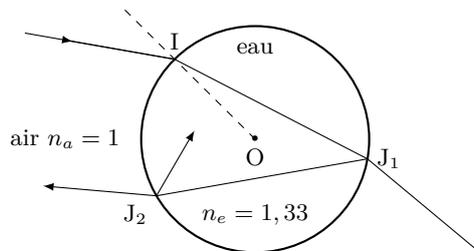


2. Représenter le trajet du rayon qui se réfléchit en I. Quelle est sa déviation après sortie du prisme ?
3. Exprimer en fonction de  $n$  la déviation  $D$  subit par le rayon qui est réfracté en I lorsqu'il existe. Application pour  $n = 1,3$ .
4. Quelle condition l'indice optique du prisme doit-il vérifier pour que la totalité de la lumière soit réfléchi ?
5. Reprendre la question précédente dans le cas où le prisme baigne dans l'eau (indice optique : 1,33).

### Exercice 10 : déviation d'un rayon par une goutte d'eau

On considère une goutte d'eau (indice optique  $n_e = 1,33$ ), assimilable à une sphère de centre O et de rayon  $R$ . Cette goutte est en suspension dans l'air (indice optique  $n_a = 1,00$ ).

Un rayon lumineux monochromatique parvient à la surface de la goutte en un point I sous une incidence  $i$ , et est réfracté avec un angle de réfraction  $r$ . Il se propage ensuite à l'intérieur de la goutte, où il subit une série de réflexions et de réfractions. Ainsi en  $J_1$ , une partie de la lumière est réfléchi et l'autre est réfractée et sort de la goutte ; il en est de même en  $J_2$ , etc.



1. Combien le rayon émergent de la goutte au point  $J_1$  a-t-il subi de réflexions à l'intérieur de la goutte ? Même question pour le rayon émergent en  $J_2$ . Si  $N$  est le nombre de réflexions internes subie par la lumière à l'intérieur de la goutte, que vaut  $N$  pour un rayon émergent au point  $J_k$  ?

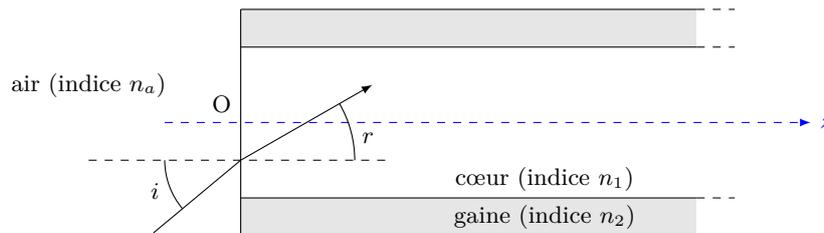
- On s'intéresse au rayon émergent de la goutte au point  $J_1$ . Quelle est, en fonction des angles  $i$  et  $r$  la déviation  $D_1$  subie par ce rayon, c'est-à-dire l'angle dont la lumière a tourné par rapport à la direction incidente ?
- Calculer de même la déviation  $D_2$  du rayon émergent au point  $J_2$ . Généraliser la formule pour un rayon émergent au point  $J_k$ .
- Exprimer la déviation  $D_k$  en fonction de l'angle d'incidence  $i$  et des indices optiques  $n_a$  et  $n_e$ .

La déviation de la lumière par des gouttelettes d'eau en suspension dans l'air est à l'origine de la formation des arcs-en-ciel. Le premier modèle a été proposé par DESCARTES, et ne sera pas étudié de façon approfondie ici.

- À l'aide de considérations sur l'intensité des rayons émergents successifs, justifiez qu'on ne puisse voir, la plupart du temps, qu'un seul arc, et parfois deux arcs l'un au-dessus de l'autre.
- Justifier qualitativement que, pour un rayon émergent après un nombre donné de réflexions internes, les différentes longueurs d'onde ne soient pas déviées de la même façon. Quelle en est la conséquence esthétique ?

### Exercice 11 : fibre à saut d'indice

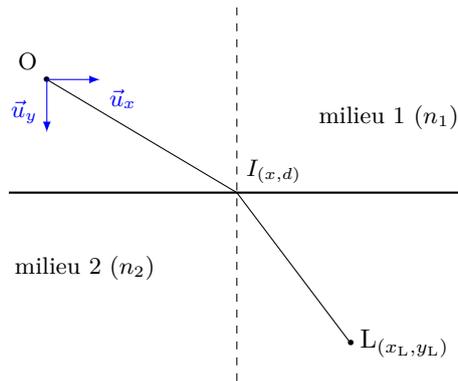
Une fibre optique à saut d'indice est un cylindre constitué d'un milieu d'indice optique  $n_1$ , appelé le cœur de la fibre, entouré d'une gaine cylindrique d'indice optique  $n_2 < n_1$ . On appelle  $(Oz)$  l'axe de la fibre. La face d'entrée de la fibre est une section perpendiculaire à l'axe  $(Oz)$  en contact avec de l'air d'indice optique  $n_a = 1$ . La lumière rentre dans le cœur de la fibre sous une incidence  $i$ , de sorte que le plan d'incidence contienne l'axe  $(Oz)$ . L'angle réfracté est  $r$ .



- Représenter la marche du rayon lumineux dans le cœur de la fibre. Préciser, en fonction de  $r$ , l'angle sous lequel la lumière se réfléchit sur la gaine.
- Dans le cas général, une partie de la lumière est réfractée dans la gaine. Calculer l'angle réfracté en fonction des données. En déduire à quelle condition sur l'angle d'incidence  $i$  la lumière est guidée par la fibre, c'est-à-dire reste confinée dans le cœur. Exprimer l'angle d'incidence limite  $i_a$ , appelé *angle d'acceptance* de la fibre, pour que cette condition soit satisfaite, ainsi que l'*ouverture numérique* de la fibre :  $ON = n_a \sin i_a$ .
- Un premier type de fibre optique possède un cœur en silice ( $n_1 = 1,456$ ) et une gaine en silicone ( $n_2 = 1,410$ ). Calculer  $i_a$  et  $ON$ . Même question pour une fibre à base d'arséniure de gallium pour laquelle  $n_1 = 3,9$  et  $n_2 = 3,0$ . Quel est l'avantage de cette fibre par rapport à la première ?

### Exercice 12 : interprétation de Huygens de la réfraction

Considérons un dioptré plan, séparant un milieu 1 d'indice  $n_1$  et un milieu 2 d'indice  $n_2 > n_1$ . On définit le repère  $(O, x, y)$ , dont l'origine se situe dans le milieu 1. Un rayon lumineux partant de  $O$  se propage à la vitesse  $v_1$  jusqu'au dioptré qu'il franchit en  $I(x, d)$ , puis à la vitesse  $v_2$  jusqu'au point  $L(x_L, y_L)$ . Les points  $O$  et  $L$  étant fixés, on cherche à déterminer la position du point  $I$  tel que le temps de parcours entre  $O$  et  $L$  soit le temporellement le plus court possible.



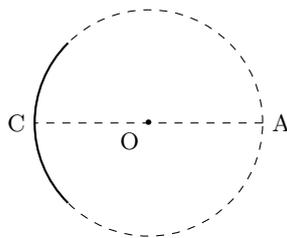
1. Exprimer le temps mis par le rayon pour aller de O à L, en fonction des distances OI et IL et des vitesses de propagation  $v_1$  et  $v_2$  dans les deux milieux, puis en fonction de  $x$ ,  $d$ ,  $x_L$ ,  $y_L$ ,  $v_1$  et  $v_2$ .
2. Que signifie mathématiquement que la position  $x$  cherchée corresponde à un minimum du temps de parcours ? En déduire que cette position  $x$  est telle que :

$$\frac{1}{v_1} \times \frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}} = \frac{1}{v_2} \times \frac{(x_L - x)}{\sqrt{(x_L - x)^2 + (y_L - d)^2}}$$

3. Retrouver la relation de Snell-Descartes.
4. La condition énoncée à la question 2 correspond-elle nécessairement à un temps de parcours minimum ? Proposer un énoncé général du principe de Fermat.

### Exercice 13 : principe de Fermat dans le cas d'un miroir sphérique

On considère un miroir en forme de calotte sphérique, défini à partir d'une sphère de centre O. Soit C le centre du miroir, et A le point diamétralement opposé à C. On cherche le chemin suivi par un rayon lumineux partant de A qui revient en A après *une seule* réflexion sur le miroir.



1. Quels sont les points du miroir les plus proches de A ? En déduire quel est le plus court chemin permettant l'aller-retour de A à A *via* le miroir.
2. Montrer que la lumière ne peut pas suivre le chemin précédent. Quel est le seul point de réflexion possible ? Que dire de la distance alors parcourue par la lumière ? Ceci est-il en accord avec le principe de Fermat, tel qu'énoncé à la fin de l'exercice précédent ?

## Travaux dirigés

### Exercice 1 : travail d'extraction du césium

On éclaire du césium métallique par une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda = 180 \text{ nm}$ . Une analyse des électrons émis montre que leur énergie cinétique maximale est de  $5,0 \text{ eV}$ .

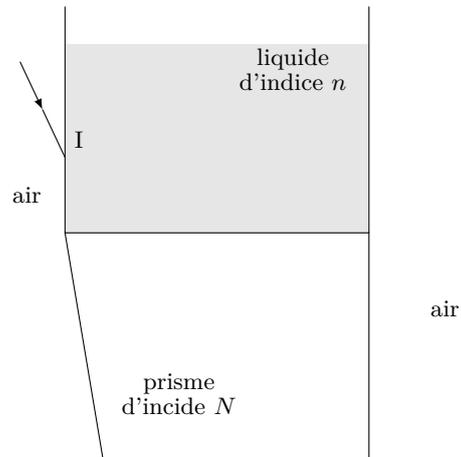
Établir l'expression du travail d'extraction du césium, puis faire l'application numérique.

### Exercice 2 : principe d'un réfractomètre

Un réfractomètre est un appareil permettant la mesure de l'indice de réfraction d'un milieu, généralement un liquide. Le principe de certains réfractomètre est le suivant.

Le liquide d'indice optique  $n$  inconnu est placé dans une cuve dont la face inférieure est au contact d'un prisme transparent d'indice optique  $N$  connu. Le milieu extérieur est l'air, d'indice optique égal à 1. On considèrera que les parois en verre de la cuve sont suffisamment fines pour pouvoir être négligées.

On envoie un rayon incident monochromatique sur la face gauche de la cuve sous une incidence  $i$ . Après propagation dans la cuve puis le prisme, le rayon ressort par la face droite du prisme avec un angle réfracté  $i'$ . C'est la mesure de cet angle qui permet la détermination de  $n$ .



1. Pourquoi travaille-t-on avec une lumière monochromatique ?
2. Représenter schématiquement le trajet du rayon à jusqu'à sa sortie, dans l'hypothèse où  $n < N$ .
3. Écrire la loi de Snell-Descartes au niveau de chacun des dioptrés, en prenant garde à bien définir les angles.
4. Établir l'expression de  $n$  en fonction de  $N$ ,  $i$  et  $i'$ .

En pratique, ce dispositif fonctionne sous incidence rasante, c'est-à-dire que le faisceau incident arrive quasiment parallèlement à la face d'entrée de la cuve.

5. Quel est alors la valeur de  $i$  ? Que devient l'expression de  $n$  ?
6. Déterminer la valeur de  $n$  si on mesure  $i' = 60^\circ$  et que  $N = \sqrt{3}$ .
7. Montrer à partir de l'expression de  $n$ , que ce réfractomètre ne permet la mesure de  $n$  que dans une certaine gamme de valeurs qu'on déterminera.

### Exercice 3 : un peu d'élégance

Monsieur Coniglio désire pouvoir se regarder du bas des pattes jusqu'à la pointe des oreilles dans son miroir. Avant d'avoir fait de l'optique, il avait placé sur son mur un miroir qui en couvre la totalité, du sol jusqu'au plafond. Il désire maintenant, par souci d'élégance, installer quelque chose de plus modeste.

1. Sur un dessin, positionner l'image de Monsieur Coniglio par le miroir.
2. Représenter les rayons extrêmes qui lui permettent de se voir entièrement dans son miroir.
3. En déduire graphiquement la taille minimale du miroir et sa position sur le mur.
4. Calculer la taille minimale du miroir en fonction de celle de Monsieur Coniglio. Le résultat dépend-il de sa distance au miroir ?