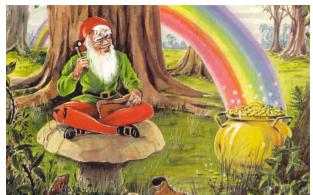


# OG1 : Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique



De tous temps, les arcs-en-ciel ont suscité un sentiment de merveilleux dans le cœur des hommes, donnant lieu à un grand nombre de contes, de mythes et de légendes pour décrire son apparition. L'explication scientifique de l'arc-en-ciel a été apportée à la fin des années 1660 par Isaac Newton, elle repose sur le modèle géométrique de la lumière.

## Plan du cours

<b>I Description et propriétés de la lumière</b>	<b>2</b>
I.1 Nature de la lumière . . . . .	2
I.2 Spectres lumineux . . . . .	2
I.3 Les différents types de sources lumineuses . . . . .	3
I.4 Propagation dans le vide . . . . .	4
I.5 Propagation dans un milieu transparent . . . . .	5
I.6 Phénomène de diffraction . . . . .	6

<b>II Le modèle de l'optique géométrique</b>	<b>7</b>
II.1 Approximation de l'optique géométrique . . . . .	7
II.2 Notion de rayon lumineux . . . . .	8
II.3 Modèle de la source ponctuelle monochromatique . . . . .	8
<b>III Lois de Snell-Descartes</b>	<b>8</b>
III.1 Vocabulaire . . . . .	8
III.2 Énoncé des lois de Snell-Descartes . . . . .	8
III.3 Cas de la réflexion totale . . . . .	11
III.4 Application à la fibre optique . . . . .	12

## À savoir par ❤️

- ✓ Caractéristiques des spectres des différents types de sources lumineuses.
- ✓ Valeur numérique de la célérité de la lumière dans le vide.
- ✓ Longueurs d'onde dans le vide approximatives des principales couleurs.
- ✓ Indice d'un milieu transparent.
- ✓ Lien entre la longueur d'onde dans le vide et celle dans un milieu transparent.
- ✓ Relation entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique  $a$  de l'ouverture ( $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$ ).
- ✓ Définition et limites du modèle de l'optique géométrique.
- ✓ Lois de Snell-Descartes.

## À savoir faire 💡

- ✓ Établir la relation entre la longueur d'onde dans le vide et celle dans un milieu transparent.
- ✓ Utiliser la relation  $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{d}$  entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture.
- ✓ Utiliser les lois de Snell-Descartes.
- ✓ Définir une convention d'orientation des angles et travailler avec des angles orientés.
- ✓ Établir la condition de réflexion totale.

## I Description et propriétés de la lumière

### I.1 Nature de la lumière

La question de la nature de la lumière remonte à l'antiquité. Elle fut à cette époque liée à la perception visuelle, pour laquelle plusieurs théories se sont opposées (théories de l'émission, soutenue par Pythagore, et de l'intromission, soutenue par Démocrite, Epicure). Le plus ancien ouvrage présentant les propriétés de la lumière a été écrit environ 300 ans av. J.-C. par Euclide, qui a notamment postulé que la lumière se propage en ligne droite. Il faut ensuite attendre la fin du XVI<sup>e</sup> siècle pour que de grands progrès en optique soient faits, tant du point de vue expérimental que théorique. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, deux modèles s'opposaient pour décrire la nature de la lumière :

- Pour Newton, les objets lumineux émettaient des corpuscules obéissant aux lois de la mécanique.
- Selon Huygens, la lumière était une onde.

La notoriété de Newton dans le monde scientifique a d'abord empêché l'essor de la théorie ondulatoire d'Huygens, puis les expériences d'interférences et de diffraction de Fresnel et Young au XIX<sup>e</sup> siècle ont permis de valider le modèle ondulatoire de la lumière. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les travaux de Planck (sur le corps noir notamment), ont réintroduit le modèle corpusculaire avec la notion de photon. Aujourd'hui la dualité onde-corpuscule s'est imposée.



### Définition

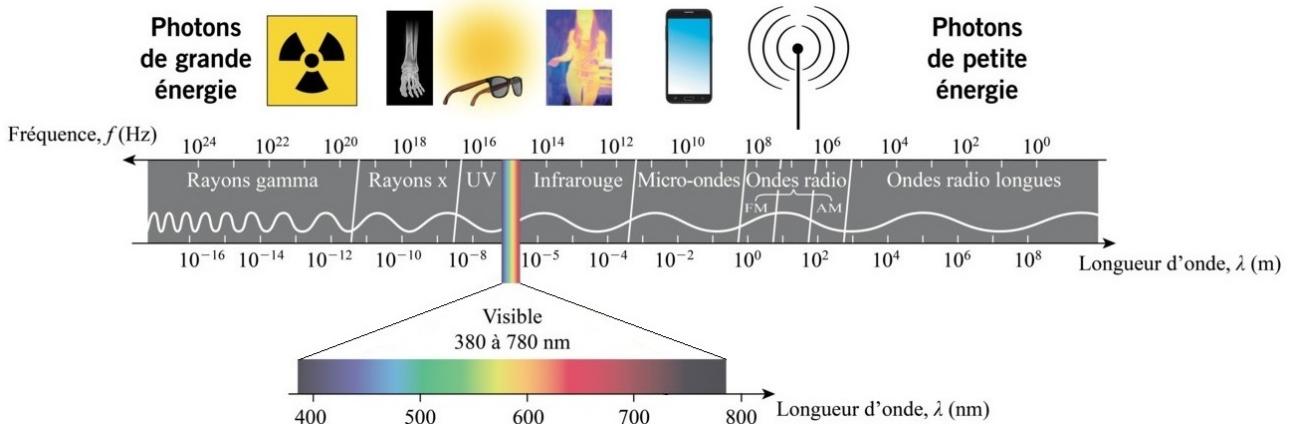
**Dualité onde - corpuscule** : La lumière présente un double aspect, elle est décrite de manière complète par deux modèles :

- le modèle corpusculaire : la lumière est constituée de particules appelées photons
- le modèle ondulatoire : la lumière est une onde électromagnétique (= propagation de variations périodiques d'un champ électrique et d'un champ magnétique → animation ici)

Ces deux modèles permettent d'expliquer l'ensemble des expériences réalisées jusqu'à maintenant avec la lumière.

### I.2 Spectres lumineux

La lumière est une toute petite partie d'un vaste ensemble d'ondes appelées ondes électromagnétiques : elle correspond à la partie du spectre perceptible par l'œil humain.



Le spectre visible s'étend du rouge (longueur d'onde  $\sim 800$  nm) au violet (longueur d'onde  $\sim 400$  nm) en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel (communément divisé en rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet).

Une lumière peut être polychromatique, elle est alors constituée de plusieurs longueurs d'onde, ou monochromatique, elle est alors constituée d'une seule longueur d'onde.

Une lumière blanche est une lumière dont le spectre est continu et contient toutes les longueurs d'onde de domaine visible.

## Expérience de cours

On réalise les spectres de différentes sources lumineuses :

- À l'aide d'un réseau, on réalise le spectre, que l'on visualise sur un écran. Ce dispositif permet de visualiser les couleurs des différentes radiations présentes dans la lumière émise par la source étudiée.
- À l'aide d'un spectromètre à fibre relié à un ordinateur via une interface d'acquisition, on visualise l'intensité de chaque radiation en fonction de la longueur d'onde.

Q1. Représenter le schéma du dispositif expérimental.

Pour chaque lampe étudiée :

Q2. Préciser s'il s'agit d'un spectre de raies ou d'un spectre continu.

Q3. Préciser s'il s'agit d'une source polychromatique ou monochromatique.

**Lampe à incandescence :**

**Lampe à vapeur de mercure :**

**Diode laser :**

## I.3 Les différents types de sources lumineuses

### ➤ Les sources thermiques (ex : le Soleil, les lampes à incandescence)

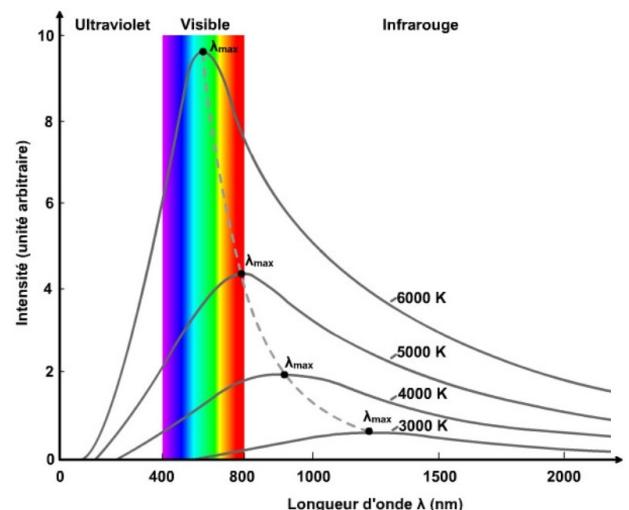
#### ❤ Loi de Wien

Tout corps de température non nulle émet un rayonnement thermique, caractérisé par un spectre continu et large, possédant un maximum à une longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  donnée par la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} \times T = \text{constante} = 2,898 \times 10^{-3}$$

$\lambda_{\max}$  = longueur d'onde du maximum d'émission, en m

$T$  = température de la surface, en K



Spectre d'émission d'un corps chauffé à différentes températures

### ➤ Les sources spectrales (ex : lampe à vapeur de mercure, de sodium)

Les atomes d'un gaz contenus dans les lampes spectrales sont excités par des décharges électriques, il accèdent ainsi à un niveau d'énergie supérieure. En revenant spontanément à leur état fondamental, ils libèrent le surplus d'énergie  $\Delta E$  sous forme de particules appelées photons. Ce flux de photons constitue une onde de fréquence  $\nu$  précise, donnée par la relation de Planck-Einstein.



## Relation de Planck-Einstein

L'énergie transportée par un photon d'une onde lumineuse de fréquence  $\nu$  vaut :

$$\Delta E = h \times \nu$$

$\Delta E$  = différence d'énergie en J

$\nu$  = fréquence de la radiation lumineuse en Hz

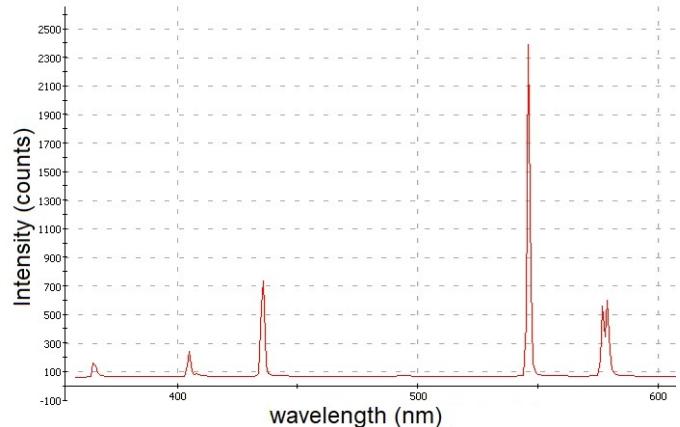
$h$  = constante de Planck =  $6,63 \times 10^{-34}$  J·s

Comme les niveaux d'énergie de l'atome sont discrets (seules certaines valeurs de l'énergie sont accessibles), le spectre est discret, il est constitué de raies colorées fines, dont la longueur d'onde  $\lambda$  dépend de l'écart entre les niveaux d'énergie :

$$\lambda = \frac{h \times c}{\Delta E}$$

$\lambda$  = longueur d'onde de la radiation lumineuse en m

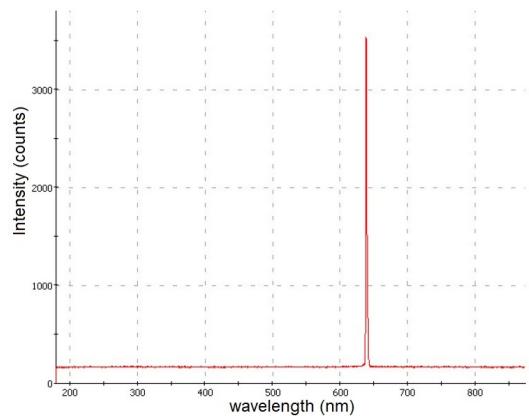
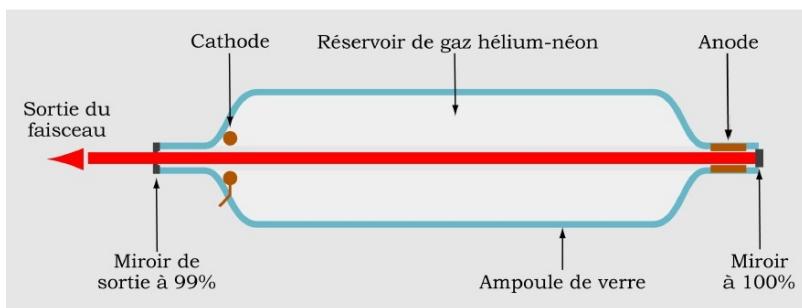
$c$  = célérité de l'onde lumineuse dans le vide  
 $= 3,00 \times 10^8$  m·s<sup>-1</sup>



Spectre d'une lampe spectrale à vapeur de mercure

### Les sources laser

LASER est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Dans ce type de source lumineuse, l'émission de lumière est stimulée par une onde incidente rencontrant les atomes. On obtient une lumière quasi monochromatique, de longueur d'onde égale à celle de l'onde incidente excitatrice, sous forme de faisceau très directif (= très peu divergent).



Spectre d'un laser hélium-néon

## I.4 Propagation de la lumière dans le vide



### Constante fondamentale

**Vitesse de la lumière dans le vide** : la lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans le vide à la célérité :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

### Remarque

Cette valeur est un arrondi. La valeur exacte a été définie en 1983 : au lieu de définir précisément le mètre et la seconde et de mesurer la vitesse de la lumière en utilisant ces définitions, la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide a été fixée par convention à  $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Cette donnée, ajoutée à la définition actuelle de la seconde, sert à définir le mètre.

► Première mesure de la vitesse de la lumière sur Terre (à partir de 2min54s)

▣ Historique : de Galilée à nos jours, évolution de la notion de vitesse de la lumière

### Formule

Pour une onde monochromatique se propageant dans le vide, on a la relation :

$$\lambda_0 = c \times T = \frac{c}{\nu}$$

avec :  $\lambda_0$  = longueur d'onde dans le vide en m = période spatiale de l'onde

$c$  = célérité de la lumière dans le vide =  $3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$T$  = période temporelle de l'onde monochromatique, en s

$\nu$  = fréquence de l'onde monochromatique, en Hz

Pour la lumière visible : longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0 \in [400 \text{ nm} ; 800 \text{ nm}]$ .

Exemples :

Couleur	Bleu	Vert	Jaune	Rouge
Longueur d'onde dans le vide $\lambda_0$	450 nm	550 nm	600 nm	650 nm

## I.5 Propagation de la lumière dans un milieu transparent

Nous nous placerons dans le cadre de milieux **TLHI** :

- **Transparents** : pas d'absorption d'énergie lumineuse ;
- **Linéaires** : pas de modification de la fréquence de l'onde au cours de la propagation ;
- **Homogènes** : propriétés physiques ( $T$ ,  $\rho$ ,  $n$ , etc.) identiques en tout point ;
- **Isotropes** : propriétés physiques identiques dans toutes les directions (pas de direction privilégiée).

### Définition et formule

**Indice de réfraction** : La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu transparent, linéaire, homogène et isotrope dépend de l'indice de réfraction du milieu  $n$  selon :

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

avec :  $n$  = indice de réfraction du milieu, sans unité

$c$  = célérité de la lumière dans le vide =  $3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$v$  = célérité de la lumière dans le milieu, dans la même unité que  $c$

### Remarques

- $c$  est la vitesse maximale de la lumière, donc  $v$  est toujours inférieure à  $c$ , donc  $n > 1$ .
- Un milieu est qualifié de **dispersif** si la vitesse de propagation  $v$  d'une radiation lumineuse dépend de sa fréquence, donc l'indice de réfraction dépend de la fréquence de la radiation.
- Quelques valeurs d'indice de réfraction :
  - $n(\text{vide}) = 1$  ;  $n(\text{air}) = 1,00027 \approx 1$  ;  $n(\text{eau}) = 1,33$  ;  $n(\text{verre}) = 1,5$

## ❤ Propriétés

- La fréquence d'une onde est indépendante du milieu dans lequel elle se propage.
- La longueur d'onde  $\lambda$  dépend du milieu dans lequel l'onde se propage : dans un milieu transparent d'indice  $n$ , on a :

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

avec :  $\lambda$  = longueur d'onde dans le milieu transparent

$\lambda_0$  = longueur d'onde dans le vide, en m

$n$  = indice de réfraction du milieu de propagation (transparent), sans unité

## bras Démonstration

Retrouver la relation liant  $\lambda$  et  $\lambda_0$ .

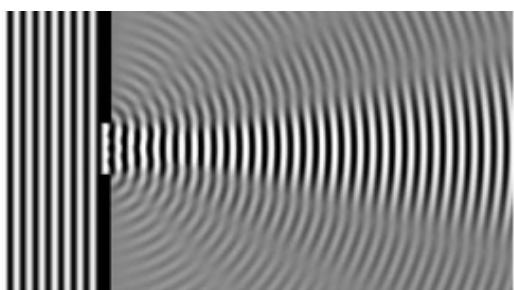
## I.6 Phénomène de diffraction

### œil Expérience de cours

| Qu'observe-t-on quand on place un diaphragme sur le trajet d'un faisceau laser ?

## ❤ Définition

**Diffraction** : modification des propriétés d'une onde lorsqu'on limite sa propagation par un obstacle. Ce phénomène se manifeste généralement par une redistribution de l'intensité émergente dans certaines directions privilégiées. C'est un phénomène très général qui met en évidence le caractère ondulatoire d'un phénomène.



Exemple : diffraction d'une onde mécanique observée grâce à une cuve à ondes :

Pour les ondes lumineuses, le phénomène de diffraction se produit pour des obstacles de taille jusqu'à une centaine de fois la longueur d'onde  $\lambda$ . (Pour une onde acoustique, la diffraction se produit pour des obstacles de taille plus petite, de l'ordre de la longueur d'onde)

## ❤ Formule

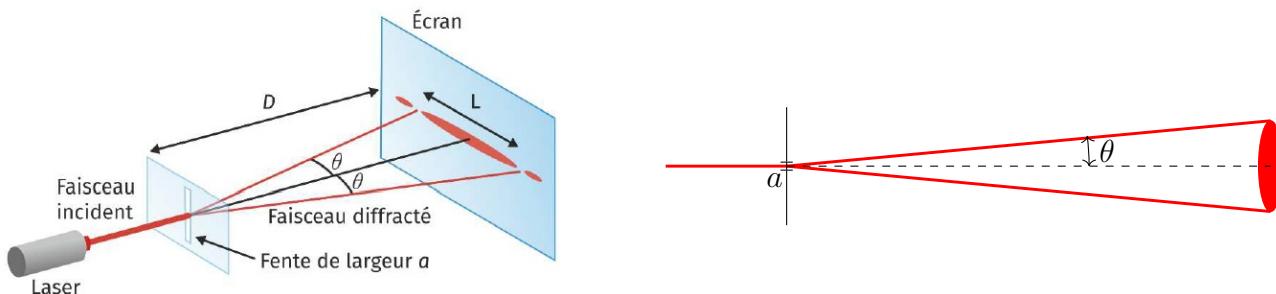
**Formule de la diffraction :** L'ouverture angulaire  $\theta$  est reliée à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la taille caractéristique  $a$  de l'ouverture par :

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$$

avec :  $\theta$  = valeur de l'angle de diffraction pour la première extinction

$\lambda$  = longueur d'onde en m

$a$  = taille de l'ouverture en m



## II Le modèle de l'optique géométrique

### II.1 Approximation de l'optique géométrique

Pour l'étude des systèmes optiques courants (loupe, appareil photo, lunette astronomique, microscope, fibre optique, etc.) un modèle simplifié de la lumière est suffisant : l'optique géométrique.

## ❤ Approximation de l'optique géométrique

En optique géométrique, on néglige tout aspect ondulatoire (dont fait partie le phénomène de diffraction) et quantique ( $\rightarrow$  chapitre MECAQ) de la lumière.

Dans ce modèle, la lumière est décrite par un ensemble de rayons lumineux indépendants, caractérisés par une direction de propagation  $\vec{u}$  et une vitesse de propagation  $v$ .

En notant  $N$  le nombre de photons mis en jeu dans un phénomène optique,  $D$  la dimension caractéristique des obstacles (miroirs, trous, lentilles...) et  $\lambda$  la longueur d'onde, l'approximation de l'optique géométrique est bonne si :

$$N \gg 1 \quad \text{et} \quad D \gg \lambda$$

### 💣 Exercice de cours ④ Peut-on appliquer les lois de l'optique géométrique :

- Q1. Pour un faisceau lumineux qui se propage à l'intérieur d'un objectif de smartphone ?
- Q2. Pour un faisceau laser qui rencontre un cheveu ?

## II.2 Notion de rayon lumineux



### Propriétés des rayons lumineux

**Propagation rectiligne :** Dans un milieu homogène, et isotrope, la lumière se propage en ligne droite (à une vitesse qui dépend du milieu :  $v = \frac{c}{n}$ ), les rayons lumineux sont donc des droites.

**Principe du retour inverse de la lumière :** Le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière.

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

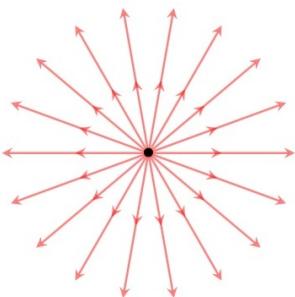


#### Remarque

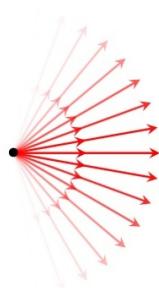
Les rayons lumineux sont un modèle qui permet de décrire la propagation de l'énergie lumineuse dans le cadre de l'optique géométrique, mais cette notion est purement conceptuelle, toute expérience cherchant à isoler un rayon lumineux est vouée à l'échec à cause du phénomène de diffraction.

## II.3 Modèle de la source ponctuelle monochromatique

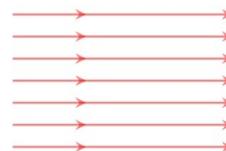
Une source ponctuelle monochromatique est une source d'étendue réduite à un point (ponctuelle), duquel sont émis tous les rayons lumineux, et émettant une seule longueur d'onde (monochromatique). Il s'agit d'un modèle, aucune source réelle n'atteint ces spécifications.



Source ponctuelle isotrope



Source ponctuelle anisotrope



Source ponctuelle à l'infini

## III Lois de Snell-Descartes

### III.1 Vocabulaire



#### Vocabulaire

**Dioptre :** c'est la surface de séparation entre deux milieux transparents.

**Rayon incident :** rayon lumineux arrivant sur le dioptre

**Normale :** droite perpendiculaire au dioptre, au point où le rayon incident rencontre le dioptre.

**Plan d'incidence :** c'est le plan contenant le rayon lumineux et la normale au dioptre.

### III.2 Énoncé des lois de Snell-Descartes

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/optiqueGeo/dioptres/Descartes.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/Descartes.php)

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptre\\_plan.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptre_plan.php)

## ❤️ Lois de Snell-Descartes

Schéma en 3D :

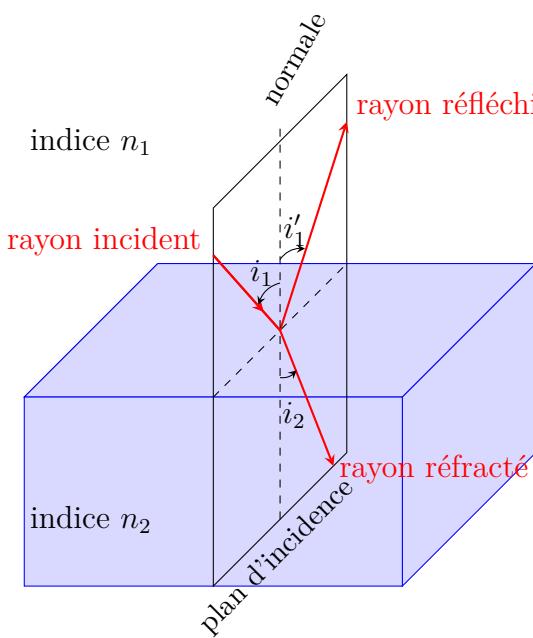
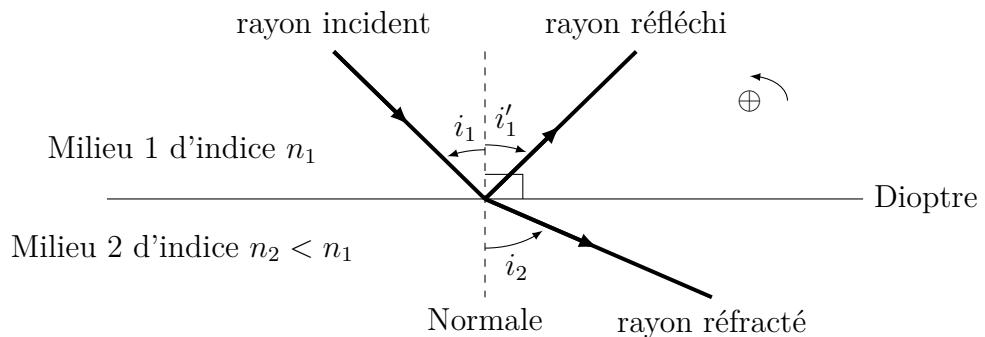


Schéma dans le plan d'incidence :



### Loi de la réflexion

- 1) Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence.
- 2) Les angles d'incidence  $i_1$  et de réflexion  $i'_1$  ont des valeurs égales mais opposées :  $i'_1 = -i_1$

### Loi de la réfraction

- 1) Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence.
- 2) Les angles d'incidence  $i_1$  et de réfraction  $i_2$  sont reliés par :  $n_1 \times \sin(i_1) = n_2 \times \sin(i_2)$



### Remarques

- Les lois de la réfraction sont une conséquence du principe de Fermat, selon lequel le trajet effectivement suivi par la lumière à la traversée d'un dioptre est celui qui est le plus rapide. On peut faire l'analogie avec le déplacement d'une personne sur Terre et en mer (vitesses différentes), → animation ici.
- Les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction sont des angles orientés, qui sont définis algébriquement à partir de la normale : les angles sont positifs pour une rotation dans le sens trigonométrique et négatifs pour une rotation dans le sens horaire.
- L'énoncé des lois de Snell-Descartes doit s'accompagner d'un **schéma complet** sur lequel toutes les notations sont introduites.
- Les rayons réfléchi et réfracté sont de l'autre côté de la normale par rapport au rayon incident.



### Exercice de cours (B)

- Q1. Que se passe-t-il pour un rayon qui arrive selon la normale ?
- Q2. Le rayon lumineux s'écarte-t-il ou se rapproche-t-il de la normale lorsque  $n_1 < n_2$  ?
- Q3. Même question lorsque  $n_2 < n_1$ .



### Exercice de cours (C)

Un rayon se propageant dans l'air arrive à la surface d'un lac. L'indice de réfraction de l'air est égal à 1,0 et celui de l'eau à 1,33.

- Q1. Le rayon incident arrive en formant un angle d'incidence  $i_1 = 38^\circ$ .  
Faire un schéma de la situation, déterminer la valeur de l'angle de réfraction et tracer le rayon réfracté sur le schéma.
- Q2. Le rayon réfracté forme un angle de réfraction  $i_2 = 38^\circ$ .  
Faire un schéma de la situation, déterminer la valeur de l'angle d'incidence et tracer le rayon incident sur le schéma.

### III.3 Cas de la réflexion totale

#### Démonstration

Pour un angle d'incidence  $i_1$  donné, compris entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$ , le rayon réfracté existe-t-il toujours ?



#### Conditions de réflexion totale

Pour avoir réflexion totale, le rayon transmis ne doit pas exister. Pour cela, il faut remplir 2 conditions :

$$n_2 < n_1 \quad \text{ET} \quad i_1 > i_{1\lim} \quad \text{avec} \quad \sin(i_{1\lim}) = \frac{n_2}{n_1}$$

(le rayon lumineux doit se propager d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent **ET** l'angle d'incidence doit être supérieur à l'angle d'incidence limite correspondant à un angle de réfraction égal à  $\frac{\pi}{2}$ .)



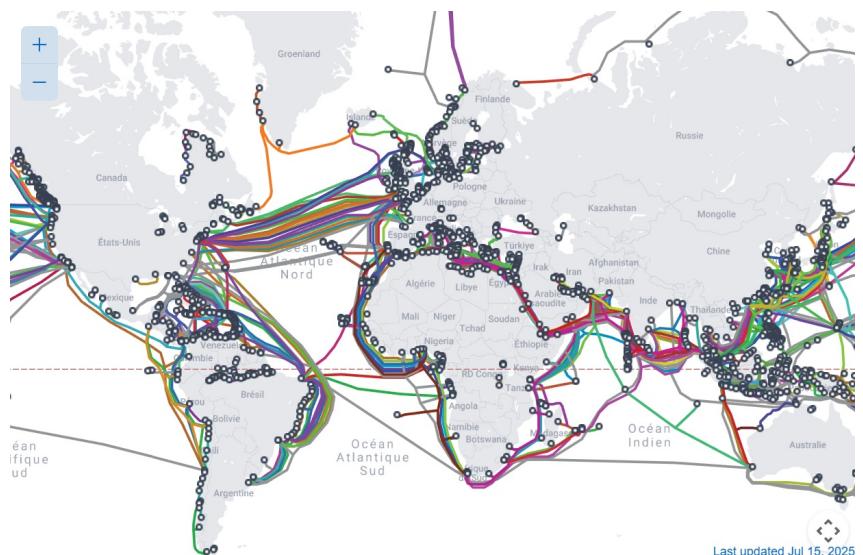
#### Exercice de cours ⑩

- Q1. Peut-il y avoir réflexion totale à l'interface air-eau (le milieu incident est l'air) ?
- Q2. Même question à l'interface eau-air (le milieu incident est l'eau).
- Q3. Si oui, pour quelles valeurs de l'angle d'incidence ?

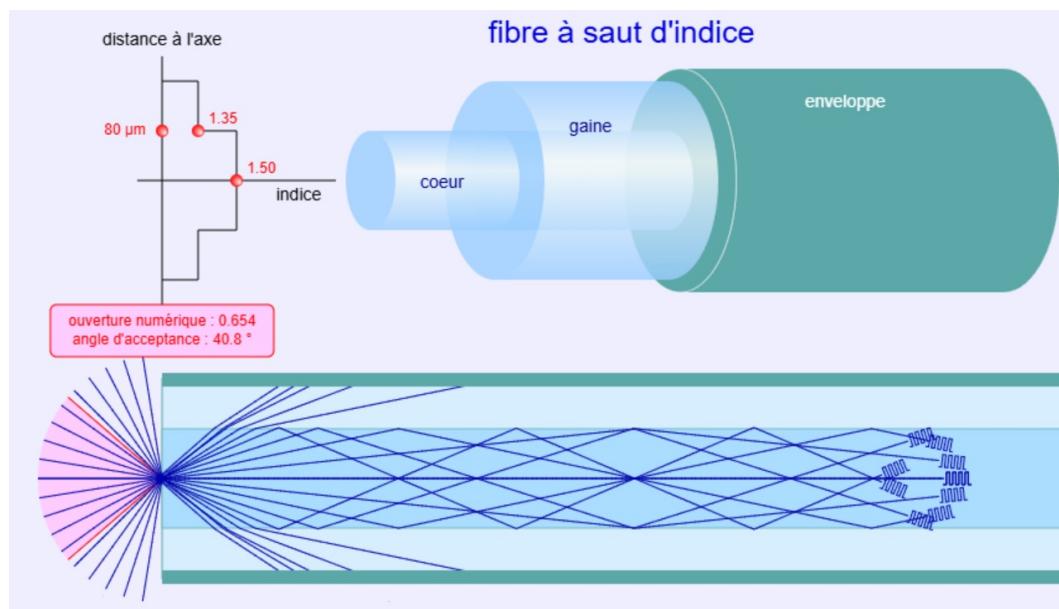
### III.4 Application à la fibre optique

Une fibre optique a la propriété de conduire la lumière et sert pour la fibroscopie, l'éclairage ou la transmission de données numériques.

Réseau sous-marin de fibres optiques



Une fibre optique est formée de deux milieux transparents : le « cœur », cylindrique, d'indice constant ou variable, entouré par la « gaine », d'indice plus petit, animation ici .



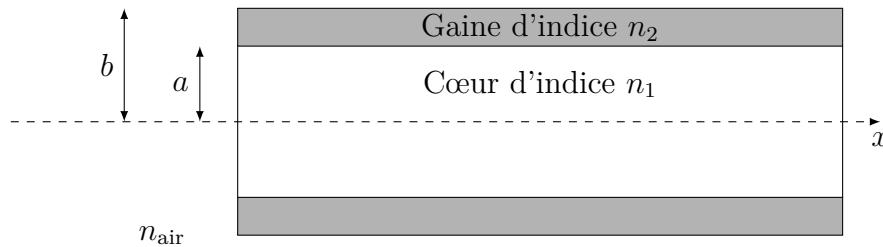
#### ♥ Définition

**Cône d'acceptance :** c'est le cône à l'intérieur duquel les rayons incidents seront guidés par réflexion totale interne.

**Ouverture numérique ( $ON$ ) :**  $ON = n_{\text{air}} \sin(\theta_{\max})$  où  $n_0$  est l'indice optique du milieu d'où provient le rayon et  $\theta_{\max}$  l'angle au sommet du cône d'acceptance.

**Dispersion intermodale :** Les rayons parvenant dans la fibre avec des angles d'incidence différents suivent des chemins optiques (ou modes) différents. À chaque mode correspond un temps de parcours légèrement différent, ce qui entraîne une dispersion intermodale. On définit le retard intermodal qui est le temps de retard à l'arrivée du rayon le plus lent (le plus incliné) par rapport au rayon le plus rapide (rayon axial).

Compléter le schéma suivant avec le trajet d'un rayon à travers la fibre, en représentant plusieurs réflexions sur l'interface cœur/gaine.



### Démonstration

Montrer qu'un rayon peut être guidé dans le cœur s'il est à l'intérieur d'un cône d'acceptance, c'est à dire si  $\theta$ , l'angle d'incidence de ce rayon à l'entrée de la fibre, reste inférieur à une valeur  $\theta_{\max}$  telle que  $\sin(\theta_{\max}) = \frac{1}{n_{\text{air}}} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Pour cela, suivre les étapes ci-dessous :

- Établir la condition sur l'angle d'incidence sur le dioptre cœur/gaine pour qu'il s'y produise une réflexion totale.
- En déduire une condition sur l'angle de réfraction au niveau du dioptre air/cœur.
- Déterminer la condition sur l'angle  $\theta$  en étudiant la réfraction à l'entrée de la fibre.

## Démonstration

Une impulsion lumineuse arrive à  $t = 0$ , au point  $O$  sur la fibre précédente de longueur  $L$ , sous la forme d'un faisceau conique convergent d'axe  $Ox$  et de demi-angle au sommet  $\theta_i < \theta_{\max}$ . Déterminer le retard intermodal, c'est à dire la différence  $\Delta t$  entre la durée maximale et la durée minimale de propagation d'un bout à l'autre de la fibre. Pour cela, suivre les étapes ci-dessous :

- Quel rayon sortira en premier de la fibre ? Déterminer le temps qu'il met à parcourir la fibre en fonction de  $L$ ,  $n_1$  et  $c$ .
- Quel rayon sortira en dernier ? Déterminer le temps qu'il met à parcourir la fibre en fonction de  $L$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  et  $c$ .
- En déduire  $\Delta t$  en fonction de  $L$ ,  $n_1$  et  $n_2$  et  $c$ .

## 💡 Remarques

- Une fibre peut transmettre une impulsion au mieux séparées de  $\Delta t$ , ce qui permet de déterminer un débit maximal  $\frac{1}{\Delta t}$ .
- AN pour  $n_1 = 1,456$  (silice),  $n_2 = 1,410$  (silicone), et  $L = 10\text{ m}$  :  
 $ON = 0,3631$  (soit  $\theta_{\max} = 21^\circ$ ) et  $\Delta t = 1,58\text{ ns}$  (soit débit maximal : 633 Mbit/s, ce qui est plus rapide que pour les câbles ethernet ou le wifi, débits de 50 à 100 Mbit/s).
- Il existe des dispositifs de compensation de dispersion pour permettre des transmission sur de longues distances.