1 Modéliser la lumière

I – Théorie de l'optique ondulatoire : la lumière comme une onde

1 – Célérité et indice optique

a/ Célérité

Célérité dans le vide

La célérité des ondes lumineuses se propageant dans le vide est $c = 3{,}00 \times 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Célérité dans un milieu transparent (verre, eau, gaz...)

Dans un milieu transparent, la lumière se propage plus lentement que dans le vide, avec une célérité

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

où n est **l'indice optique du milieu**.

n est sans unité : $[n] = 1$. On a toujours $n \geq 1$ ($n = 1$ correspond au vide).

Plus n est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**.

Quelques valeurs :

- $n_{\text{eau}} = 1{,}3$
- $n_{\text{verre}} \simeq 1{,}5$ (peut aller de 1,2 à 1,8)
- $n_{\text{diamant}} = 2{,}4$ (c'est l'un des plus élevés)
- $n_{\text{air}} = 1{,}0003$: on peut faire comme si $n_{\text{air}} \simeq 1$, donc une célérité de la lumière dans l'air d'environ c

b/ Types de milieux

- On parle de **milieu homogène** lorsque l'indice optique prend la même valeur partout (contre exemple : l'atmosphère sous certaines conditions $\rightarrow$ mirages).
- On parle de **milieu isotrope** lorsque la propagation de la lumière se fait de la même façon quelle que soit la direction
- On parle de **milieu dispersif** lorsque l'indice optique dépend de la longueur d'onde de la lumière. C'est le cas de tous les milieux (sauf le vide). Ceci explique par exemple les arc-en-ciel, car les différentes couleurs ne sont pas déviées d'un même angle dans les gouttes d'eau (loi de Snell-Descartes).

  La formule de Cauchy donne n en fonction de λ : $\boxed{n(\lambda) = A + B/\lambda^2}$
  A et B qui dépendent du milieu.

2 – Fréquence et longueur d'onde

Ondes monochromatiques

On étudie des ondes planes progressives harmoniques. On les nomme aussi des **ondes monochromatiques** (ce qui signifie "une seule couleur").

Elles sont donc du type $\qquad s(t) = s_0 \cos(2\pi\nu t - kx),$

avec ν la fréquence, $\lambda = 2\pi/k$ la longueur d'onde (et éventuellement une phase à l'origine φ).
Nous avons également la relation de dispersion : $\boxed{\lambda\nu = v = c/n.}$

a/ Dans le vide

Onde dans le vide : notons ν_0 et λ_0 la fréquence et la longueur d'onde. On a donc $\boxed{\lambda_0\,\nu_0 \;= c}$

La lumière visible

Lumière visible = petite gamme de longueurs d'onde : $\lambda_0 \in [400\,\text{nm}, 800\,\text{nm}]$.
$400\,\text{nm}$ = bleu, $800\,\text{nm}$ = rouge.
En dessous de $400\,\text{nm}$: ultraviolet, au dessus de $800\,\text{nm}$: infrarouge.

b/ Dans un milieu d'indice n

Onde dans un milieu d'indice n : notons ν et λ la fréquence et la longueur d'onde. On a $\boxed{\lambda\nu = v = c/n.}$

Propriétés

Lors du passage d'un milieu à un autre :

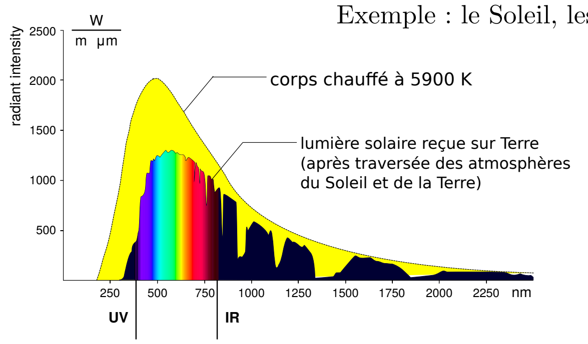
- La fréquence de l'onde ne change pas : $\nu = \nu_0$.
- La longueur d'onde est modifiée pour que la relation de dispersion soit respectée : $\lambda \neq \lambda_0$.

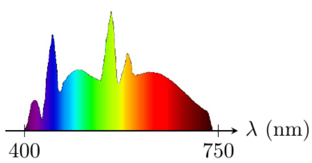
3 – Sources de lumière, spectres

Une source de lumière est caractérisée par le spectre de la lumière qu'elle émet. On peut tracer ce spectre soit en fonction de la fréquence ν, soit le plus souvent en fonction de la longueur d'onde λ dans le vide.

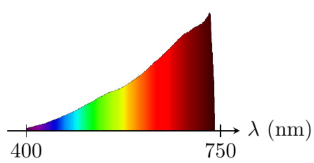
a/ Exemples de sources réelles

Sources de lumière blanche : (sources à spectre continu) elles produisent toutes les longueurs d'onde.
Exemple : le Soleil, les lampes à incandescence.



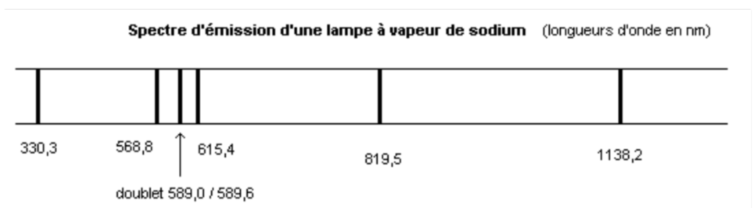


(b) Lampe à économie d'énergie

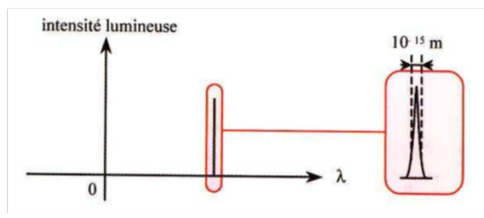


(c) Lampe à incandescence

Lampe spectrale : (sources à spectre discret / de raies) cas des lampes à vapeur de mercure ou de sodium
il s'agit d'une ampoule dans laquelle est enfermé un gaz. Les atomes du gaz sont excités par des décharges électriques, ce qui a pour effet de faire passer leurs électrons dans des états d'énergie plus élevée. Lorsque les électrons repassent dans un niveau d'énergie plus bas, ceci émet une onde de fréquence toujours identique.



spectre lampe spectrale



spectre lumière laser

Laser : un laser produit un spectre composé d'une unique raie, très fine. (qui sont des sources quasi-monochromatiques)

b/ Le modèle de la source ponctuelle monochromatique

Définition

Une source ponctuelle monochromatique est une source d'étendue réduite à un point (ponctuelle) et émettant une seule longueur d'onde (monochromatique).
Il s'agit d'un modèle, aucune source réelle n'atteignant ces spécifications. Le laser est celle s'en approchant le plus.

II – Théorie quantique : la lumière est faite de photons

1 – Nécessité d'une description corpusculaire de la lumière

Nous venons de dire que la lumière doit être décrite comme une onde. Et pourtant,des expériences
ont montré...que ceci ne suffit pas.

Il est donc nécessaire pour comprendre certaines expériences, de décrire la lumière comme composée de corpuscules, les photons, se déplaçant à la vitesse c et dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence : $\boxed{E = h\nu}$

On parle ainsi de **nature corpusculaire** de la lumière.

La constante h est appelée constante de Planck, et vaut environ $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$.

2 – Mais la nature ondulatoire est également nécessaire

Les expériences d'interférences

3 – Bilan sur la description quantique de la lumière

Propriétés

La lumière possède un comportement à la fois ondulatoire et corpusculaire. Elle peut être décrite par des photons, qui possèdent les propriétés suivantes :

- Un photon est associée à une onde $\Psi(x,t)$ (appelée fonction d'onde).
  $\Psi(x,t) \in \mathbb{C}$.
- La probabilité de mesurer un photon en un point x à un instant t est proportionnelle à $|\Psi(x,t)|^2$.

Notons ν la fréquence de l'onde.

- Énergie du photon : $E = h\nu$ (relation de Planck-Einstein)
- Quantité de mouvement : $\|\vec{p}\| = h/\lambda$.
- Vitesse dans le vide : c.
- Masse : nulle.

Comme la lumière possède à la fois des propriétés associées à une onde et à une particule, on parle de dualité onde-particule.

h est la constante de Planck : $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$ environ.

Propriété : Une lumière rouge se propage plus rapidement qu'une lumière bleue dans un milieu transparent : c'est le phénomène de **dispersion** (➜ TP-Cours sur le **prisme**)

$\boxed{n(\lambda) = A + B/\lambda^2}$ $\qquad \nu_B > \nu_R \Rightarrow \lambda_B < \lambda_R \Rightarrow n_B > n_R \Rightarrow c_B < c_R$

III – Théorie de l'optique géométrique : la lumière décrite par des rayons lumineux

1 – Concepts et hypothèses de la théorie de l'optique géométrique

a/ Rayons lumineux, dioptres, indice optique

Définitions

Rayon lumineux : trajet suivi par le front de l'onde lumineuse dans le point de vue ondulatoire, ou par les photons dans le point de vue corpusculaire.

Indice optique : $\boxed{n = c/v}$ avec v la vitesse du rayon lumineux.

Milieu homogène et isotrope : idem théorie ondulatoire.

Dioptre : surface séparant deux milieux d'indices optiques différents.

Hypothèses de base :

- Les rayons lumineux sont indépendants (ils se croisent sans se perturber) : on ne prend donc pas en compte les interférences.
- Les rayons lumineux ne sont pas déviés par des obstacles ou des ouvertures petites : on ne prend donc pas en compte la diffraction.

Une source émet des rayons dans toutes les directions. L'objectif de la théorie de l'optique géométrique est de prévoir le trajet de ces rayons.

b/ Règles de propagation des rayons

Propriétés des rayons lumineux

- **Propagation rectiligne :** dans un milieu homogène, un rayon lumineux se propage en ligne droite.
- **Principe du retour inverse de la lumière :** si un rayon lumineux va de A à B, alors le trajet de retour de B à A est le même.
- **Changement de milieu :** lois de Snell-Descartes (voir ensuite).

Ces trois propriétés, en plus des deux hypothèses de base au dessus, permettent de démontrer toutes les relations de l'optique géométrique.

Lois de Snell-Descartes

Soit un dioptre, dont on repère la normale. On appelle plan d'incidence le plan qui contient le rayon incident et la normale (c'est le plan de la feuille sur nos schémas).

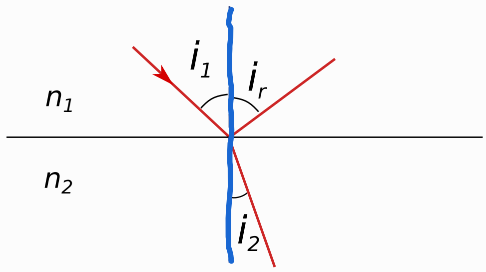
Un rayon incident sur le dioptre est en partie réfléchi, en partie transmis.

1/ Les rayons transmis et réfléchi sont dans le plan d'incidence (donc dans le plan de la feuille).

2/ Rayon réfléchi : l'angle est donné par $\boxed{i_r = i_1}$

3/ Rayon transmis : aussi appelé rayon réfracté. S'il existe il vérifie $\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}$

Schéma :



Attention : les angles sont toujours repérés par rapport à la normale.

Les lois de Snell-Descartes ont été établies expérimentalement par Snell, puis Descartes, vers 1630.

Remarque : Toutes les propriétés ci-dessus (propagation rectiligne, retour inverse, lois de Descartes) peuvent en réalité être démontrées à partir d'un postulat plus fondamental encore, le principe de Fermat. Ce principe n'est pas au programme, mais il est parfois utile pour bien interpréter les déviations.

Principe de Fermat

Les rayons lumineux suivent le chemin le plus rapide pour aller de la source jusqu'à un point d'arrivée donné.

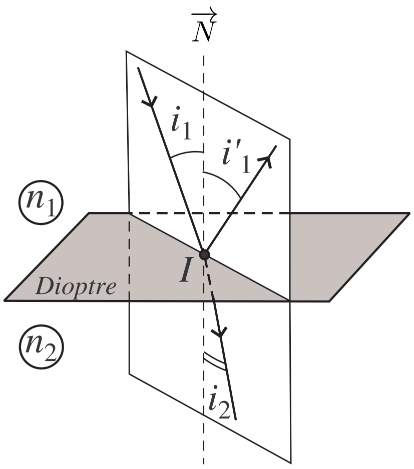
2 – Étude de la réflexion et réfraction lors d'un changement de milieu

Nous passons maintenant à une étude plus détaillée de ce phénomène.

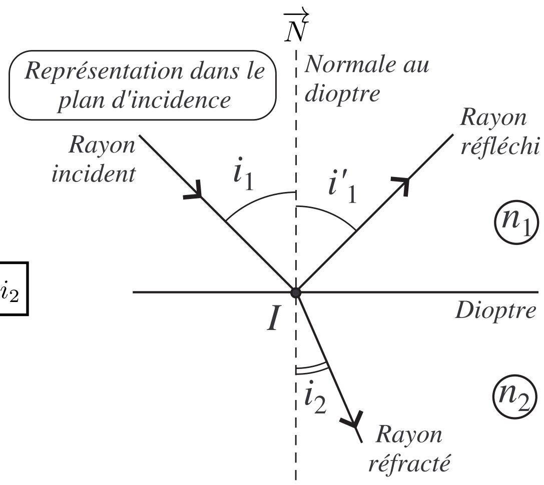
a/ Déviation plus ou moins importante

◇ **Définition :** On appelle :

- **dioptre** la surface de séparation entre deux milieux matériels d'indices différents ;
- **plan d'incidence** le plan contenant le rayon incident et la normale $\overrightarrow{N}$ au dioptre.



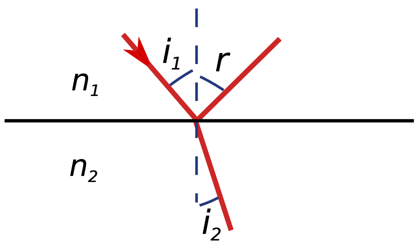
$$\boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2}$$



Considérons deux cas :

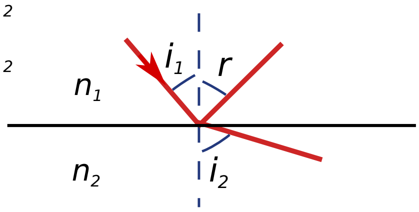
- Passage vers un milieu plus réfringeant : $n_1 < n_2$.

$$\begin{cases} n_1 < n_2 \\ i_1 > i_2 \end{cases}$$



- Passage vers un milieu moins réfringeant : $n_1 > n_2$.

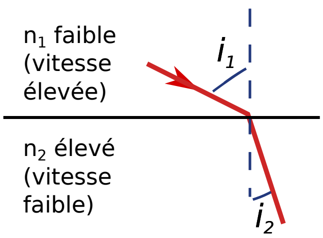
$$\begin{cases} n_1 > n_2 \\ i_1 < i_2 \end{cases}$$



SI $n_1 > n_2$, alors ① est plus **réfringent** que ② et le rayon réfracté s'éloigne de $\overrightarrow{N}$;

SI $n_2 > n_1$, alors ② est plus **réfringent** que ① et le rayon réfracté se rapproche de $\overrightarrow{N}$.

Remarque : Interprétation en terme de vitesse de propagation et du principe de Fermat :



Le trajet suivi est tel que le temps de parcourt est minimal.

Pour passer moins de temps dans le milieu où n est élevé (et donc la vitesse faible !), la lumière se rapproche de la normale.

b/ Angle de réfraction limite

Cas du passage vers un milieu plus réfringeant : $n_1 < n_2$. L'angle i_2 possède alors une valeur maximale $i_{2,\text{max}}$.

c/ Réflexion totale

Cas du passage vers un milieu moins réfringeant : $n_1 > n_2$. Lorsque i_1 est supérieur à un angle limite $i_{1,\text{lim}}$, alors il n'y a plus de rayon réfracté. $\Rightarrow$ la réflexion est totale.

Ceci est utilisé par exemple pour guider la lumière dans les fibres optiques, pour les détecteurs de pluie, etc.

3 – Domaine de validité de la théorie de l'optique géométrique

Pour que la théorie de l'optique géométrique mène à des prédictions correctes, il faut que les phénomènes de diffraction soient négligeables.

Or l'angle θ de déviation (par la diffraction) d'un faisceau de lumière (de longueur d'onde λ) lorsqu'il rencontre un objet de taille ou d'ouverture a vérifie $\boxed{\sin\theta \simeq \frac{\lambda}{a}}$ Cette déviation doit être négligeable, il faut donc $\frac{\lambda}{a} \ll 1$

Un bon ordre de grandeur est $a \geq 1000\lambda \simeq 1\,\text{mm}$.

Approximation de l'optique géométrique: il faut des objets ou ouvertures de taille $\boxed{a \gg \lambda.}$

Exercices de cours

Exercice C1 – Longueur d'onde d'un laser dans l'air et dans l'eau

Un laser rouge émet un rayonnement de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 633\,\text{nm}$.

1 - Déterminer la longueur d'onde λ si l'onde vient à pénétrer dans l'eau d'indice optique $n = 1{,}33$.

2 - La couleur du laser change-t-elle ?

Exercice C2 – Nombre de photons envoyés par un laser

On considère un laser rouge de longueur d'onde $\lambda = 600\,\text{nm}$ et de puissance $P = 1\,\text{mW}$. Calculer l'ordre de grandeur du nombre de photons qu'il envoie en $\Delta t = 1 \times 10^{-2}\,\text{s}$ (ce qui est un temps plus court que la persistance rétinienne).

Exercice C3 – Appliquer les lois de Snell-Descartes

Un rayon lumineux se propage dans l'air et arrive sur un bloc de verre d'indice $n = 1{,}5$. Calculer l'angle d'incidence pour que le rayon réfléchi soit perpendiculaire au rayon réfracté.

Exercice C4 – Valeur maximale de l'angle de réfraction

On considère un dioptre plan séparant des milieux d'indice optique n_1 et n_2. Un rayon lumineux arrive depuis le milieu 1. Supposons $n_1 < n_2$.

1 - Donner un exemple de deux milieux qui vérifient cette condition.

2 - Représenter la situation sur un schéma. À partir de ce schéma, expliquer qualitativement (= sans calculs) pourquoi le rayon réfracté existe toujours et pourquoi l'angle de réfraction i_2 admet une valeur maximale $i_{2,\text{max}}$.

3 - Calculer $i_{2,\text{max}}$ en fonction des indices n_1 et n_2.

Exercice C5 – Condition de réflexion totale

On considère un dioptre plan séparant des milieux d'indice optique n_1 et n_2. Un rayon lumineux arrive depuis le milieu 1. Supposons $n_1 > n_2$.

1 - Donner un exemple de deux milieux qui vérifient cette condition.

2 - Représenter la situation sur un schéma. À partir de ce schéma, expliquer qualitativement (= sans calculs) pourquoi il existe une valeur limite $i_{1,\text{lim}}$ de l'angle d'incidence au delà de laquelle le rayon réfracté ne peut plus exister.

3 - Calculer $i_{1,\text{lim}}$ en fonction des indices n_1 et n_2.