Lois de Snell et Descartes

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

lundi 6 septembre 2021

Lois de Snell et Descartes

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

lundi 6 septembre 2021

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
miroir naturel

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

miroir artificiel

[**miroir-vase**]

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change

réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change

réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

[**pinceau-brise**]

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change
réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

[**guillotin**]

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change
réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

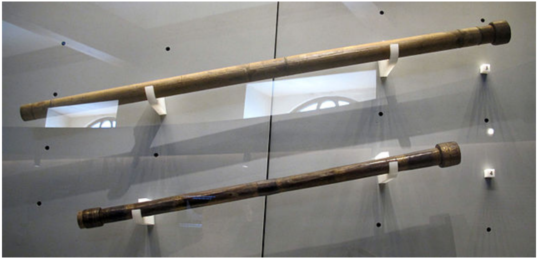
la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change

réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

- lunette de Galilée (1609), fondée sur la réfraction



[**lunettes-galilee**]

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change
réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

- téléscope de Newton (1672), fondé sur la réflexion

[telescope-newton]

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change

réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

L'observation des phénomènes a permis le développement d'outils dont l'étude a conduit à la formulation de lois menant à d'autres développements.

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)

la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs

la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change

réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre

L'observation des phénomènes a permis le développement d'outils dont l'étude a conduit à la formulation de lois menant à d'autres développements.

- on sait qu'en fait la lumière est une onde électromagnétique : le rayon lumineux en est une approximation dans le domaine dit de l'optique géométrique

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change
réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre
L'observation des phénomènes a permis le développement d'outils dont l'étude a conduit à la formulation de lois menant à d'autres développements.

- on sait qu'en fait la lumière est une onde électromagnétique : le rayon lumineux en est une approximation dans le domaine dit de l'optique géométrique
- en optique géométrique, la lumière est modélisée par des rayons dont la trajectoire est déterminée géométriquement

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change
réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre
L'observation des phénomènes a permis le développement d'outils dont l'étude a conduit à la formulation de lois menant à d'autres développements.

- on sait qu'en fait la lumière est une onde électromagnétique : le rayon lumineux en est une approximation dans le domaine dit de l'optique géométrique
- en optique géométrique, la lumière est modélisée par des rayons dont la trajectoire est déterminée géométriquement
- on va présenter le modèle du rayon

la notion de rayon lumineux, se propageant la plupart du temps en ligne droite est présente depuis l'antiquité (observation d'ombres)
la réflexion de ces rayons est connue grâce aux miroirs
la réfraction est observée dans l'eau et avec le verre : la direction de propagation de la lumière change
réfraction naturelle aux interfaces eau/air/verre
L'observation des phénomènes a permis le développement d'outils dont l'étude a conduit à la formulation de lois menant à d'autres développements.

- on sait qu'en fait la lumière est une onde électromagnétique : le rayon lumineux en est une approximation dans le domaine dit de l'optique géométrique
- en optique géométrique, la lumière est modélisée par des rayons dont la trajectoire est déterminée géométriquement
- on va présenter le modèle du rayon
- dont les lois de Snell et Descartes régissent les changements de direction

1. Rayon lumineux

2. Lois de Snell et Descartes

3. Conséquences et applications

1. Rayon lumineux
1.1 Modèle du rayon lumineux
1.2 Limites du modèle

2. Lois de Snell et Descartes

3. Conséquences et applications

Mise en évidence

Laser	Faisceau collimaté de rayons rectilignes
Source ponctuelle	Faisceau divergent de rayons rectilignes

Interactions

Définition (Absorption)

L'absorption correspond au transfert d'une partie de l'énergie lumineuse vers le milieu dans lequel la lumière se propage.

Interactions

Définition (Absorption)

L'absorption correspond au transfert d'une partie de l'énergie lumineuse vers le milieu dans lequel la lumière se propage.

- par la rétine, par une plaque photographique/cellule CCD
- par la chlorophylle pour la photosynthèse
- beaucoup moins par l'air/l'eau/verre
- diminue l'intensité du faisceau lumineux

Interactions

Définition (Diffusion)

La diffusion correspond à la redirection, par le milieu, d'une partie de l'énergie d'un rayon lumineux hors de sa direction principale.

Interactions

Définition (Diffusion)

La diffusion correspond à la redirection, par le milieu, d'une partie de l'énergie d'un rayon lumineux hors de sa direction principale.

Interactions

- par les molécules de l'atmosphère, par du lait, par des poussières

Interactions

- par les molécules de l'atmosphère, par du lait, par des poussières
- ne change pas (la plupart du temps) l'intensité lumineuse totale

Interactions

- par les molécules de l'atmosphère, par du lait, par des poussières
- ne change pas (la plupart du temps) l'intensité lumineuse totale
- absorption et diffusion sont le plus souvent présentes en même temps

Milieu d'étude

Définition (Milieu transparent, homogène et isotrope)

Un milieu est dit transparent si l'intensité lumineuse, *ie* l'énergie transportée par la lumière, est constante au cours de la propagation.
Il est dit homogène si ses propriétés optiques y sont uniformes, *ie* ne dépendent pas de la position dans le milieu.
Il est dit isotrope si ses propriétés optiques ne dépendent pas de la direction de propagation de la lumière.

En particulier : ni absorption ni diffusion dans un milieu transparent homogène et isotrope

Modèle du rayon lumineux

Modèle du rayon lumineux

On établit le modèle du rayon lumineux, sans dimensions, vérifiant trois propriétés fondamentales :

Propagation rectiligne La lumière se propage en ligne droite dans un transparent et homogène.

Retour inverse Dans un milieu transparent et isotrope, le trajet de la lumière est indépendant du sens de parcours. Si un certain chemin reliant un point A à un point B peut être parcouru par un rayon, un rayon pourra suivre le même chemin pour aller de B à A.

Indépendance des rayons lumineux Le chemin suivi par un rayon lumineux ne dépend pas du chemin d'autres rayons lumineux.

Un système physique pour lequel ce modèle est pertinent est dit dans le cadre de l'optique géométrique.

1. Rayon lumineux

1.1 Modèle du rayon lumineux

1.2 Limites du modèle

2. Lois de Snell et Descartes

3. Conséquences et applications

Nature ondulatoire de la lumière

Modèle : nature ondulatoire de la lumière

On peut décrire la lumière comme une onde électromagnétique associée à la propagation d'un champ électrique (noté $\overrightarrow{E}$) et d'un champ magnétique (noté $\overrightarrow{B}$).
Sa vitesse de propagation vaut, pour une propagation dans le vide, $c = 299\,792\,458\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ par définition.

Un système physique pour lequel ce modèle est pertinent est dit dans le cadre de l'optique physique.

Fréquence et longueur d'onde

Une onde électromagnétique quelconque peut être décrite comme composée de différents rayonnements monochromatiques, caractérisés par :

- sa fréquence ν, sa pulsation $\omega = 2\pi/\nu$, sa période $T = 1/\nu$ indépendantes du milieu
- sa longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}$, dépendante du milieu

domaine	γ m	X (m)	UV (nm)	Visible (nm)			IR (nm)	μ-onde/radio (m)
λ	$\leqslant 1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12} \rightarrow$ 1e − 8	$\leqslant 400$	500	590	630	$\geqslant 750$	$\geqslant$ 1e − 3
				bleu	jaune	rouge		

Dimension transversale non nulle : diffraction

Un faisceau lumineux s'évase quand on le fait passer dans une fente de largeur $a \not\gg \lambda$:

Dimension transversale non nulle : diffraction

Un faisceau lumineux s'évase quand on le fait passer dans une fente de largeur $a \not\gg \lambda$:

Diffraction

Le modèle du rayon lumineux n'est pertinent que quand sa plus petite dimension transversale a vérifie $a \gg \lambda$.

Dimension transversale non nulle : diffraction

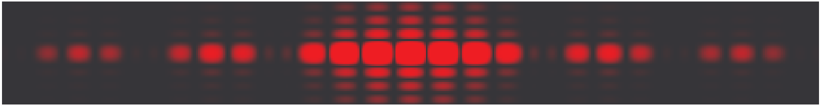
Un faisceau lumineux s'évase quand on le fait passer dans une fente de largeur $a \not\gg \lambda$:

Diffraction

Le modèle du rayon lumineux n'est pertinent que quand sa plus petite dimension transversale a vérifie $a \gg \lambda$.

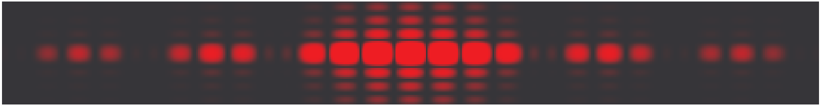
Non indépendance des rayons : interférences

Cette figure est changée quand le faisceau peut traverser deux fentes proches



Non indépendance des rayons : interférences

Cette figure est changée quand le faisceau peut traverser deux fentes proches



Interférences

Les faisceaux formés par division d'un même faisceau ne sont pas indépendants : le modèle des rayons indépendants n'est pas valable en présence d'interférences.

Quantification de l'énergie : le photon

Quantification de l'énergie

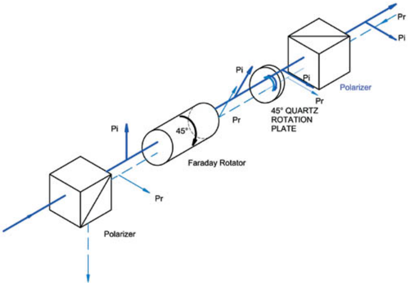
L'énergie d'un rayonnement lumineux ne peut pas prendre toutes les valeurs réelles : elle varie par sauts discrets, nommés quanta. On peut décrire un rayonnement monochromatique de fréquence ν comme formé de particules nommées photons, d'énergie $E = h\nu$, avec h la constante de Planck $h = 6{,}626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$.

Retour inverse non vérifié : effet Faraday

Effet Faraday

En présence d'un champ magnétique extérieur, on peut créer des dispositifs dans lesquels la lumière emprunte des chemins différents suivant son sens de parcours.

utilisé pour réaliser des isolateurs optiques



1. Rayon lumineux

2. Lois de Snell et Descartes

3. Conséquences et applications

- la propagation est rectiligne dans un milieu transparent et homogène

- la propagation est rectiligne dans un milieu transparent et homogène
- → il faut des hétérogénéités pour observer un changement de direction

- la propagation est rectiligne dans un milieu transparent et homogène
- → il faut des hétérogénéités pour observer un changement de direction
- on étudie principalement des changements discrets (*ie* non continus) de propriétés à l'interface entre de milieux homogènes

Dioptre et miroir

Définition (Dioptre et miroir)

On nomme dioptre l'interface entre deux milieux optiques aux propriétés optiques différentes.
On nomme miroir une surface recouverte d'un mince dépôt métallique réfléchissant.

Définition (Plan d'incidence)

Pour un rayon incident sur une surface en un point I, le plan d'incidence est le plan défini par I, le rayon incident et le vecteur normal à la surface au point I.

Ils doivent présenter le « poli optique » : les écarts entre la surface désirée et sa réalisation ne doivent pas dépasser $\lambda/10$

Rayons réfléchi et réfracté

Définition (Rayons réfléchi et réfracté)

Soit un dioptre séparant deux milieux isotropes, notés 1 et 2.
Un rayon (noté I), se propageant dans un milieu 1 (alors nommé *incident*) d'indice n_1 et atteignant le dioptre (resp. miroir) au point dit d'incidence, noté M_I, donne naissance à deux rayons (resp. un rayon) :

réfléchi (R) se propageant dans le milieu d'incidence 1 dans les deux cas,

réfracté ou transmis (T) se propageant dans le milieu 2, uniquement dans le cas du dioptre.

On note :

$\vec{k}_i$ le vecteur unitaire dirigeant le rayon incident,

$\vec{N}_{1\to2}$ le vecteur unitaire normal au dioptre au point M_I, dirigé de 1 vers 2,

$\mathscr{P}_I$ le plan d'incidence, engendré par M_I, $\vec{k}_i$ et $\vec{N}_{1\to2}$

Coplanarité

1$^{\text{re}}$loi : Coplanarité

Les rayons I, R et T sont coplanaires dans le plan d'incidence $\mathscr{P}_I$.

I, R et T sont alors complètement déterminés par trois angles orientés : i, r, t.

Réflexion

2^{e}loi : Réflexion

La trajectoire du rayon réfléchi est symétrique de celle du rayon incident par rapport au vecteur normal $\overrightarrow{N}_{1\to 2}$ au dioptre au point d'incidence.

Réflexion

2^{e}loi : Réflexion

La trajectoire du rayon réfléchi est symétrique de celle du rayon incident par rapport au vecteur normal $\overrightarrow{N}_{1\to 2}$ au dioptre au point d'incidence.

- $r = -i$ en angles orientés (pas toujours utile)

Réflexion

2$^{\text{e}}$loi : Réflexion

La trajectoire du rayon réfléchi est symétrique de celle du rayon incident par rapport au vecteur normal $\overrightarrow{N}_{1\to 2}$ au dioptre au point d'incidence.

- $r = -i$ en angles orientés (pas toujours utile)
- peut s'écrire vectoriellement : $\overrightarrow{k}_i - \overrightarrow{k}_r \propto \overrightarrow{N}_{1\to 2}$ (contient alors la coplanarité)

Réflexion

2eloi : Réflexion

La trajectoire du rayon réfléchi est symétrique de celle du rayon incident par rapport au vecteur normal $\overrightarrow{N}_{1\to 2}$ au dioptre au point d'incidence.

- $r = -i$ en angles orientés (pas toujours utile)
- peut s'écrire vectoriellement : $\overrightarrow{k}_i - \overrightarrow{k}_r \propto \overrightarrow{N}_{1\to 2}$ (contient alors la coplanarité)
- en accord avec le retour inverse

Réfraction

3^{e}loi : Réfraction et indice

Un milieu optique transparent homogène et isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n. Lors de la traversée d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, les angles orientés d'incidence i (rayon I) et de réfraction t (rayon T) vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t.$$

Réfraction

3^{e}loi : Réfraction et indice

Un milieu optique transparent homogène et isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n. Lors de la traversée d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, les angles orientés d'incidence i (rayon I) et de réfraction t (rayon T) vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t.$$

- un rayon en incidence normale n'est pas dévié

Réfraction

3^e loi : Réfraction et indice

Un milieu optique transparent homogène et isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n. Lors de la traversée d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, les angles orientés d'incidence i (rayon I) et de réfraction t (rayon T) vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t.$$

- un rayon en incidence normale n'est pas dévié
- peut s'écrire vectoriellement : $n_1 \overrightarrow{k}_i - n_2 \overrightarrow{k}_t \propto \overrightarrow{N}_{1 \to 2}$ (contient alors la coplanarité)

Réfraction

3^e loi : Réfraction et indice

Un milieu optique transparent homogène et isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n. Lors de la traversée d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, les angles orientés d'incidence i (rayon I) et de réfraction t (rayon T) vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t.$$

- un rayon en incidence normale n'est pas dévié
- peut s'écrire vectoriellement : $n_1 \vec{k}_i - n_2 \vec{k}_t \propto \vec{N}_{1\to 2}$ (contient alors la coplanarité)
- on peut également définir des indices pour d'autres ondes (sonores…)

Réfraction

3^{e}loi : Réfraction et indice

Un milieu optique transparent homogène et isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n. Lors de la traversée d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, les angles orientés d'incidence i (rayon I) et de réfraction t (rayon T) vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t.$$

- un rayon en incidence normale n'est pas dévié
- peut s'écrire vectoriellement : $n_1 \vec{k}_i - n_2 \vec{k}_t \propto \vec{N}_{1\to 2}$ (contient alors la coplanarité)
- on peut également définir des indices pour d'autres ondes (sonores…)
- $n > 0$ toujours, sauf pour les métamatériaux (synthétiques)

Réfraction

3^{e}loi : Réfraction et indice

Un milieu optique transparent homogène et isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n. Lors de la traversée d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, les angles orientés d'incidence i (rayon I) et de réfraction t (rayon T) vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin t.$$

- un rayon en incidence normale n'est pas dévié
- peut s'écrire vectoriellement : $n_1 \vec{k}_i - n_2 \vec{k}_t \propto \vec{N}_{1\to 2}$ (contient alors la coplanarité)
- on peut également définir des indices pour d'autres ondes (sonores…)
- $n > 0$ toujours, sauf pour les métamatériaux (synthétiques)
- en accord avec le retour inverse

Des lois phénoménologiques

- elles déterminent les directions des rayons réfléchi et réfracté mais ne disent rien sur leurs intensités :

Des lois phénoménologiques

- elles déterminent les directions des rayons réfléchi et réfracté mais ne disent rien sur leurs intensités :
- dans le cas air-verre : $\simeq 4\%$ de l'énergie incidente est réfléchie, le reste est transmis (dépend de l'angle d'incidence)*

Des lois phénoménologiques

- elles déterminent les directions des rayons réfléchi et réfracté mais ne disent rien sur leurs intensités :
- dans le cas air-verre : $\simeq 4\%$ de l'énergie incidente est réfléchie, le reste est transmis (dépend de l'angle d'incidence)*
- lois phénoménologiques : elles décrivent un phénomène sans le déduire d'un cadre théorique (1621 et 1637)

Des lois phénoménologiques

- elles déterminent les directions des rayons réfléchi et réfracté mais ne disent rien sur leurs intensités :
- dans le cas air-verre : $\simeq 4\%$ de l'énergie incidente est réfléchie, le reste est transmis (dépend de l'angle d'incidence)*
- lois phénoménologiques : elles décrivent un phénomène sans le déduire d'un cadre théorique (1621 et 1637)
- on sait maintenant les déduire des lois du champ électromagnétique

Indice du vide et indice absolu

l'observation de la réfraction permet seulement de mesurer le rapport n_1/n_2 :

Définition (Indice absolu)

On définit l'indice absolu d'un milieu par :

- $n = 1$ pour le vide,
- $n_X = \frac{\sin i}{\sin t}$ lors de la réfraction du vide vers un milieu X.

Indice du vide et indice absolu

l'observation de la réfraction permet seulement de mesurer le rapport n_1/n_2 :

Définition (Indice absolu)

On définit l'indice absolu d'un milieu par :

- $n = 1$ pour le vide,
- $n_X = \frac{\sin i}{\sin t}$ lors de la réfraction du vide vers un milieu X.

Propriétés

$n \geqslant 1$ pour un milieu transparent

	Bleu $\lambda_0 = 486{,}1\,\text{nm}$	Vert $\lambda_0 = 589{,}0\,\text{nm}$	Rouge $\lambda_0 = 656{,}3\,\text{nm}$
Verre Crown	1,523	1,517	1,514
Verre Flint	1,585	1,575	1,571
Diamant	2,435	2,417	2,410
Eau	1,338	1,333	1,331
Air ($20\,°\text{C}$ $1\,\text{bar}$)		1,000293	

Dispersion

Définition (Dispersion)

Un milieu optique est dit dispersif si son indice de réfraction varie avec la longueur d'onde.

Loi de Cauchy

La loi de Cauchy (1836) donne, pour le visible, les variations de l'indice d'un milieu transparent avec la longueur d'onde dans le vide notée λ_0 :

$$n = n_0 + \frac{A}{\lambda_0^2} \quad A > 0.$$

Dispersion

Définition (Dispersion)

Un milieu optique est dit dispersif si son indice de réfraction varie avec la longueur d'onde.

Loi de Cauchy

La loi de Cauchy (1836) donne, pour le visible, les variations de l'indice d'un milieu transparent avec la longueur d'onde dans le vide notée λ_0 :

$$n = n_0 + \frac{A}{\lambda_0^2} \quad A > 0.$$

Le bleu est plus dévié que le rouge

En optique physique

l'indice est également important en optique physique :

Indice et vitesse de la lumière

La vitesse, notée v_n, de la lumière dans un milieu d'indice n est différente de sa vitesse dans le vide c. L'indice absolu n d'un milieu représente le quotient $n = \frac{c}{v_n}$.

En optique physique

l'indice est également important en optique physique :

Indice et vitesse de la lumière

La vitesse, notée v_n, de la lumière dans un milieu d'indice n est différente de sa vitesse dans le vide c. L'indice absolu n d'un milieu représente le quotient $n = \frac{c}{v_n}$.

- v_n est la « vitesse de phase ». La « vitesse de groupe », associée à la propagation de l'énergie de l'onde est, elle, toujours inférieure à c.

En optique physique

l'indice est également important en optique physique :

Indice et vitesse de la lumière

La vitesse, notée v_n, de la lumière dans un milieu d'indice n est différente de sa vitesse dans le vide c. L'indice absolu n d'un milieu représente le quotient $n = \frac{c}{v_n}$.

- v_n est la « vitesse de phase ». La « vitesse de groupe », associée à la propagation de l'énergie de l'onde est, elle, toujours inférieure à c.
- $v_n \leqslant c$ pour $n \geqslant 1$

1. Rayon lumineux

2. Lois de Snell et Descartes

3. Conséquences et applications

Déviation

Déviation à la réfraction

Lors de la réfraction d'un milieu 1 vers un milieu 2 plus (resp.\ moins) réfringent, le rayon réfracté se rapproche (resp.\ s'éloigne) de la normale au dioptre.

- air → verre : se rapproche
- verre → air : s'éloigne
- un rayon en incidence normale n'est jamais dévié

Déviation

Déviation à la réfraction

Lors de la réfraction d'un milieu 1 vers un milieu 2 plus (resp.\ moins) réfringent, le rayon réfracté se rapproche (resp.\ s'éloigne) de la normale au dioptre.

- air → verre : se rapproche
- verre → air : s'éloigne
- un rayon en incidence normale n'est jamais dévié

Réflexion totale

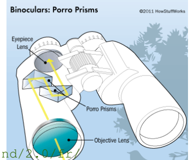
Définition (Réflexion totale)

Lors de la réfraction vers un milieu moins réfringent, il n'y a pas de rayon réfracté si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle de réfraction limite i_ℓ tel que :

$$\sin i_\ell = \frac{n_2}{n_1}.$$

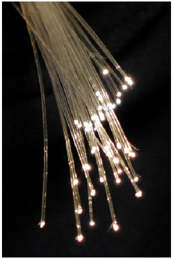
On dit qu'il y a réflexion totale.

- possible uniquement pour « verre sur air » : $i_\ell = \arcsin(1/1{,}5) \simeq 42°$
- utilisé dans les prismes à réflexion totale où on ne perd pas d'énergie lumineuse dans les rayons réfractés



Fibre optique à saut d'indice

- pour diriger à loisir un faisceau lumineux, il faut des réglages (miroirs/lentilles) délicats et sensibles
- la diffraction empêche la collimation du faisceau sur une grande distance (intercontinentale par exemple)
- on utilise des fibres optiques qui guident la lumière :
  - pas de perte d'intensité par diffraction
  - « tuyau » à lumière pour l'amener où on souhaite
- transmission d'information avec un débit bien meilleur (record $1 \cdot 10^{15}$ bit/s sur quelques 10 km) que le câble coaxial ($\simeq 1 \cdot 10^{8}$ bit/s)



Fibre optique à saut d'indice

Définition (Fibre optique à saut d'indice)

Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux cylindres coaxiaux

- le cœur d'indice n_c de rayon r_c
- la gaine optique d'indice $n_g < n_c$ et de rayon $r_g > r_c$.

Fibre optique à saut d'indice

Définition (Fibre optique à saut d'indice)

Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux cylindres coaxiaux

- le cœur d'indice n_c de rayon r_c
- la gaine optique d'indice $n_g < n_c$ et de rayon $r_g > r_c$.

Fibre optique à saut d'indice

Définition (Fibre optique à saut d'indice)

Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux cylindres coaxiaux

- le cœur d'indice n_c de rayon r_c
- la gaine optique d'indice $n_g < n_c$ et de rayon $r_g > r_c$.

- en verre ou en plastique

Fibre optique à saut d'indice

Définition (Fibre optique à saut d'indice)

Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux cylindres coaxiaux

- le cœur d'indice n_c de rayon r_c
- la gaine optique d'indice $n_g < n_c$ et de rayon $r_g > r_c$.

- en verre ou en plastique
- rayons de l'ordre de quelques $100\,\mu m$

Fibre optique à saut d'indice

Définition (Fibre optique à saut d'indice)

Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux cylindres coaxiaux

- le cœur d'indice n_c de rayon r_c
- la gaine optique d'indice $n_g < n_c$ et de rayon $r_g > r_c$.

- en verre ou en plastique
- rayons de l'ordre de quelques $100\,\mu\text{m}$
- il existe des fibres à gradient d'indice où il diminue continûment

Fibre optique à saut d'indice

Définition (Fibre optique à saut d'indice)

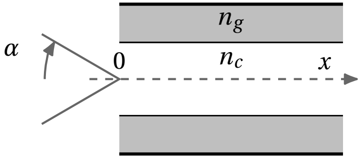
Une fibre optique à saut d'indice est constituée de deux cylindres coaxiaux

- le cœur d'indice n_c de rayon r_c
- la gaine optique d'indice $n_g < n_c$ et de rayon $r_g > r_c$.

- en verre ou en plastique
- rayons de l'ordre de quelques $100\,\mu\text{m}$
- il existe des fibres à gradient d'indice où il diminue continûment
- ses propriétés demeurent quand on courbe les cylindres

Exercice

1. Justifier que l'indice doit être supérieur dans le cœur pour que les rayons lumineux puissent y rester sans passer dans la gaine.



2. La fibre est plongée dans l'air d'indice $n = 1$. Déterminer l'angle maximal $\alpha_{\max}$ que peut former un rayon avec l'axe de la fibre pour pouvoir y être guidé. Calculer α pour $n_c = 1{,}48$ et n_g inférieur de $1{,}4\%$. Tracer le trajet du rayon dans les cas $\alpha = 0$ et $\alpha = \alpha_{\max}$.
3. Déterminer la durée $\Delta t(\beta)$ mise pour progresser d'une distance x en fonction de l'angle β formé par le rayon avec l'axe de la fibre.
4. On envoie des impulsions de période τ. Montrer que les signaux associés aux rayons d'angles $\alpha = 0$ et $\alpha_{\max}$ se brouillent au bout d'une distance L dont on estimera l'ordre de grandeur en fonction de c, τ et des indices. Estimer L pour $T = 1\,\mu s$.

Correction

1. réflexion totale sur la gaine
2. $\sin(\alpha_{\max}) = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$, soit $\alpha_{\max} = 14°$.
3. $\Delta t = x n_1 / (c \cos(\beta))$.
4. $L \simeq \frac{c n_g T}{n_c (n_c - n_g)} = 14$ km. http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.php

Caractéristiques d'une fibre

Caractéristiques d'une fibre à saut d'indice

- Le cône d'admission d'une fibre à saut d'indice délimite les rayons pouvant se propager dans le cœur en subissant des réflexions totales à la frontière de la gaine. Son $1/2$ -angle au sommet vaut :

$$\sin(\alpha_{\max}) = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}.$$

- La dispersion intermodale caractérise la différence de vitesse axiale d'un rayon le long de la fibre. La durée Δt de propagation pour une longueur L le long de la fibre parcourue par un rayon incliné d'un angle β par rapport à l'axe de la fibre est :

$$\frac{Ln}{c\cos(\beta)}.$$

Caractéristiques d'une fibre

- la dispersion intermodale limite le débit maximal dans le cas des fibres à saut d'indice
- α sera différent si la fibre est plongée dans un autre milieu.
- un mode est, en optique physique, une structure spatio-temporelle particulière qui peut se propager sans s'altérer dans la fibre.
- chaque mode à une vitesse axiale différente, on retrouve le même phénomènes qu'en optique géométrique où la vitesse axiale varie avec l'incidence du rayon.

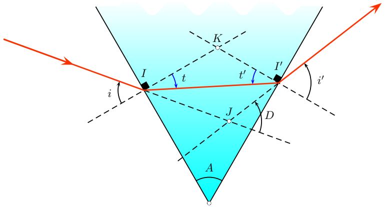
Prisme optique

Définition (Prisme optique)

Un prisme optique est un milieu réfringent transparent, homogène et isotrope délimité par deux dioptres formant un dièdre.

Déviation vers la base

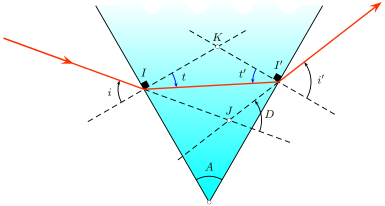
Un prisme plongé dans un milieu moins réfringent que le matériau dont il est constitué dévie les rayons lumineux vers sa base.



Prisme optique

Déviation vers la base

Un prisme plongé dans un milieu moins réfringent que le matériau dont il est constitué dévie les rayons lumineux vers sa base.



- animation du prisme
- pas de rayon émergent pour certaines incidences à cause des réflexions totales
- la dispersion du matériau utilisé permet de séparer les différentes couleurs d'un rayonnement : le bleu est plus dévié que le rouge (Cauchy)

Formules

- rayon incident dans un plan perpendiculaire à l'arête
- plongé dans l'air $n_1 = 1$, indice du milieu noté n,
- on ne regarde que les rayons réfractés
- convention différente en entrée et sortie pour avoir : $i, t, i', t' \geqslant 0$

Relations géométriques
- Établir, en étudiant le triangle $II'K$, une relation entre les angles A, t, t'.
- Exprimer la déviation D en fonction des angles i, i' et A.

Relations de réfraction Établir les relations entre les angles i et t d'une part, et i' et t' d'autre part.

Formules

$$\pi = \frac{\pi}{2} - t + \frac{\pi}{2} - t' + A \rightarrow \qquad A = t + t'$$

$$D_1 = i - t \qquad D_2 = i' - t'$$

$$D = D_1 + D_2 = i + i' - (t + t') = i + i' - A.$$

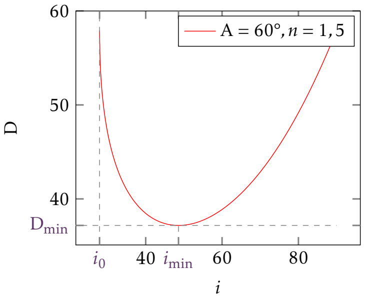
$$\begin{cases} \sin i & = n \sin t \\ \sin i' & = n \sin t' \end{cases}$$

Minimum de déviation

La déviation D passe pour un minimum en fonction de i (animation du prisme)

Minimum de déviation

Au minimum de déviation d'un prisme, on a $i = i' = i_m$ et $t = t' = t_m$.



L'indice n est relié à la déviation minimale D_m :

$$n = \frac{\sin \frac{D_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

Illustration qualitative : mirages

Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique ρ et d'indice de réfraction n. Le quotient :

$$\frac{n-1}{\rho},$$

est constant lors des variations de masse volumique.

Illustration qualitative : mirages

Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique ρ et d'indice de réfraction n. Le quotient :

$$\frac{n-1}{\rho},$$

est constant lors des variations de masse volumique.

- la température décroît avec l'altitude, ρ et donc n croissent donc avec l'altitude

Illustration qualitative : mirages

Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique ρ et d'indice de réfraction n. Le quotient :

$$\frac{n-1}{\rho},$$

est constant lors des variations de masse volumique.

- la température décroît avec l'altitude, ρ et donc n croissent donc avec l'altitude
- atmosphère d'indice non uniforme, modélisée par des dioptres horizontaux

Illustration qualitative : mirages

Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique ρ et d'indice de réfraction n. Le quotient :

$$\frac{n-1}{\rho},$$

est constant lors des variations de masse volumique.

- la température décroît avec l'altitude, ρ et donc n croissent donc avec l'altitude
- atmosphère d'indice non uniforme, modélisée par des dioptres horizontaux
- en descente : les rayons se courbent pour s'éloigner de la normale aux dioptres

Illustration qualitative : mirages

Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique ρ et d'indice de réfraction n. Le quotient :

$$\frac{n-1}{\rho},$$

est constant lors des variations de masse volumique.

- la température décroît avec l'altitude, ρ et donc n croissent donc avec l'altitude
- atmosphère d'indice non uniforme, modélisée par des dioptres horizontaux
- en descente : les rayons se courbent pour s'éloigner de la normale aux dioptres
- en montée : les rayons se courbent pour s'en rapprocher

Modélisation

- propagation dans un plan vertical

Modélisation

- propagation dans un plan vertical
- tranches fictives d'épaisseur $\mathrm{d}z$

Modélisation

- propagation dans un plan vertical
- tranches fictives d'épaisseur $\mathrm{d}z$
- à la cote z, indice $n(z)$ et angle $i(z)$

Modélisation

- propagation dans un plan vertical
- tranches fictives d'épaisseur $\mathrm{d}z$
- à la cote z, indice $n(z)$ et angle $i(z)$

Modélisation

- propagation dans un plan vertical
- tranches fictives d'épaisseur $\mathrm{d}z$
- à la cote z, indice $n(z)$ et angle $i(z)$

La cotangente à la trajectoire vérifie :

Équation différentielle de la trajectoire

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}z} = \frac{n_0 \sin i_0}{\sqrt{n^2(z) - n_0^2 \sin^2(i_0)}}$$

intégrable éventuellement si $n(z)$ est connu

Indispensable

- les 3 lois de Snell-Descartes avec les schémas
- réfringence et éloignement/rapprochement de la normale
- réflexion totale
- calculs : formules du prisme et indice variable pas au programme, à s'entraîner
- interprétation ondulatoire pas au programme