

# Lois de Snell et Descartes

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

vendredi 29 septembre 2017

# Lois de Snell et Descartes

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

vendredi 29 septembre 2017

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



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



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

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**



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

- ▶ télescope de Newton (1672), fondé sur la **réflexion**



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** Rayonnement lumineux se propageant en ligne droite :  
faisceau parallèle de rayons rectilignes

**Source ponctuelle** Rayonnement multidirectionnel mais l'ombre d'un  
objet est homothétique de l'objet : 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
- ▶ 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 présents 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  $\vec{E}$ ) et d'un champ magnétique (noté  $\vec{B}$ ).

Sa vitesse de propagation vaut, pour une propagation dans le vide,  $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  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  $\nu$ , 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	$\gamma$ (m)	X (m)	UV (nm)	Visible (nm)			IR (nm)	$\mu$ -onde/radio(m)
$\lambda$	$\leq 1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12} \rightarrow 1e - 8$	$\leq 400$	500	590	630	$\geq 750$	$\geq 1e - 3$
				bleu	jaune	rouge		

## Dimension transversale non nulle : diffraction

Un faisceau lumineux s'évase quand on le fait passer dans une fente de largeur  $a \gtrsim \lambda$  :



## Dimension transversale non nulle : diffraction

Un faisceau lumineux s'évase quand on le fait passer dans une fente de largeur  $a \gtrsim \lambda$  :



### 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  $a \gtrsim \lambda$  :

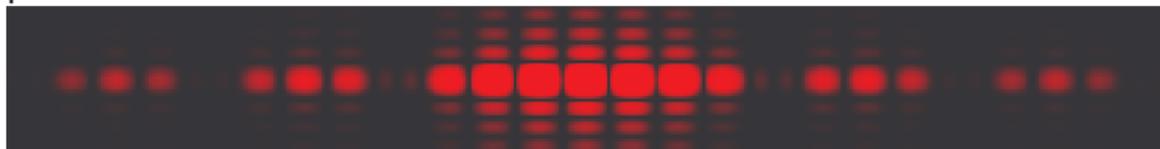


### Diffraction

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

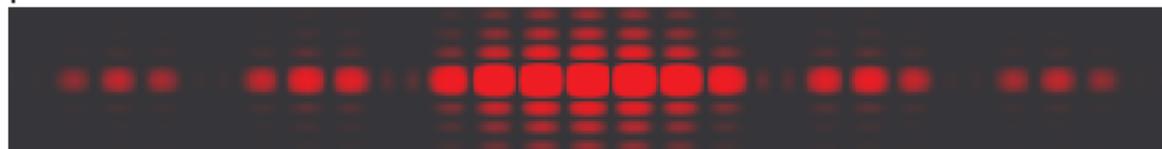
# Non indépendance des rayons : interférences

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

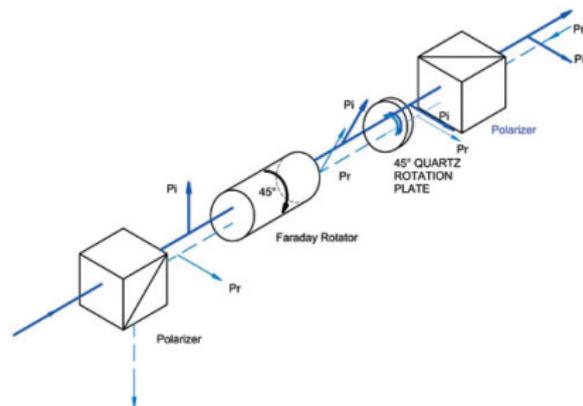
L'énergie d'un rayonnement lumineux ne peut pas prendre toutes les valeurs réelles : elle varie par **sauts discrets**, nommés **quanta**. On peut décrire un rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu$  comme formé de **particules** nommées **photons**, d'énergie  $E = h\nu$ , avec  $h$  la **constante de Planck**  $h = 6,626\,068\,96(33) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

# 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

## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

### 2.1 Réfraction et réflexion

### 2.2 Énoncé

### 2.3 Détermination et propriétés de l'indice absolu

## 3. Conséquences et applications

# 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.

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

## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

### 2.1 Réfraction et réflexion

### 2.2 Énoncé

### 2.3 Détermination et propriétés de l'indice absolu

## 3. Conséquences et applications

# Coplanarité

## 1<sup>re</sup> loi : Coplanarité

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

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

# Coplanarité

## 1<sup>re</sup> loi : Coplanarité

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

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

# Réflexion

## 2<sup>e</sup> loi : Réflexion

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

# Réflexion

## 2<sup>e</sup> loi : Réflexion

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

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

# Réflexion

## 2<sup>e</sup> loi : Réflexion

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

- ▶  $r = -i$  en angles orientés (pas toujours utile)
- ▶ en accord avec le retour inverse

# Réflexion

## 2<sup>e</sup> loi : Réflexion

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

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

# Réfraction

## 3<sup>e</sup> 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<sup>e</sup>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 :

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

- ▶ en accord avec le retour inverse

# Réfraction

## 3<sup>e</sup> 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 :

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

- ▶ en accord avec le retour inverse
- ▶ un rayon en incidence normale n'est pas dévié

# Réfraction

## 3<sup>e</sup> 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 :

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

- ▶ en accord avec le retour inverse
- ▶ un rayon en incidence normale n'est pas dévié
- ▶  $n > 0$  toujours, sauf pour les métamatériaux (synthétiques)

# Réfraction

## 3<sup>e</sup> 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 :

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

- ▶ en accord avec le retour inverse
- ▶ un rayon en incidence normale n'est pas dévié
- ▶  $n > 0$  toujours, sauf pour les métamatériaux (synthétiques)
- ▶ peut s'écrire vectoriellement :  $n_1 \vec{k}_i - n_2 \vec{k}_t \propto \vec{N}_{1 \rightarrow 2}$  (contient alors la coplanarité)

# Des lois phénoménologiques

- ▶ lois **phénoménologiques** : elles décrivent un phénomène sans le déduire d'un cadre théorique (1621 et 1637)

# Des lois phénoménologiques

- ▶ 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

# Des lois phénoménologiques

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

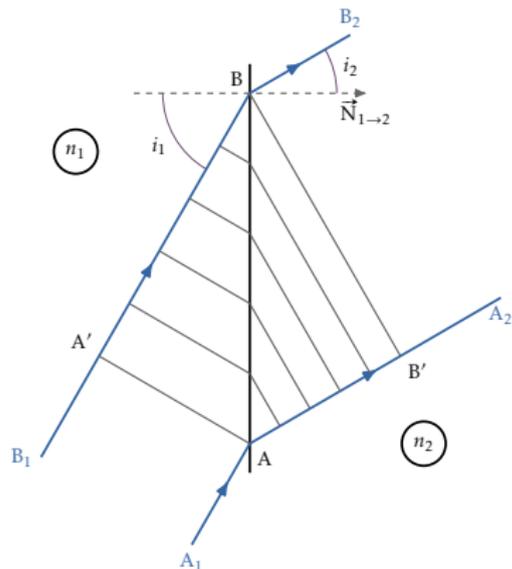
# Retour sur les ondes (HP)

les lois de Snell et Descartes se déduisent de l'étude de la propagation des ondes

# Retour sur les ondes (HP)

- ▶ les fronts d'onde sont orthogonaux à la direction de propagation donc aux rayons
- ▶ la phase est la même dans les fronts d'onde  $AA'$  d'une part et  $BB'$  d'autre part
- ▶ les durées de propagation de  $A' \rightarrow B$  et  $B \rightarrow B'$  doivent être égales
- ▶

$$\frac{A'B}{c_1} = \frac{AB'}{c_2} \rightarrow \frac{\sin(i_1)}{c_1} = \frac{\sin(i_2)}{c_2}$$



## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

### 2.1 Réfraction et réflexion

### 2.2 Énoncé

### 2.3 Détermination et propriétés de l'indice absolu

## 3. Conséquences et applications

# 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

$n \geq 1$  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 °C 1 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  $\lambda_0$  :

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

# 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  $\lambda_0$  :

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

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  $n = \frac{c}{v_n}$ .

- ▶  $v_n \leq c$  pour  $n \geq 1$

# 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  $n = \frac{c}{v_n}$ .

- ▶  $v_n \leq c$  pour  $n \geq 1$
- ▶  $v_n$  est en fait la « vitesse de phase ». Il existe aussi une « vitesse de groupe », associée à la propagation de l'énergie de l'onde, qui est, elle, **toujours** inférieure à  $c$ .

1. Rayon lumineux
2. Lois de Snell et Descartes
3. Conséquences et applications

## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

## 3. Conséquences et applications

### 3.1 Réfringence

### 3.2 Réflexion totale

### 3.3 Étude du prisme

### 3.4 Notions sur la propagation dans un milieu d'indice non uniforme

# 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  $\rightarrow$  verre : se rapproche
- ▶ verre  $\rightarrow$  air : s'éloigne
- ▶ un rayon en **incidence normale** n'est cependant pas 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  $\rightarrow$  verre : se rapproche
- ▶ verre  $\rightarrow$  air : s'éloigne
- ▶ un rayon en **incidence normale** n'est cependant pas dévié

## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

## 3. Conséquences et applications

### 3.1 Réfringence

### 3.2 Réflexion totale

### 3.3 Étude du prisme

### 3.4 Notions sur la propagation dans un milieu d'indice non uniforme

# Réflexion totale

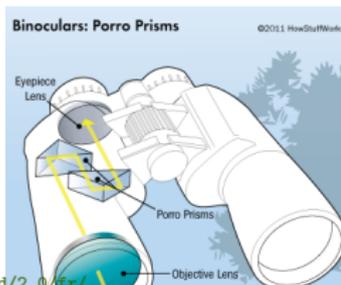
## Définition (Réflexion totale)

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**  $i_\ell$  tel que :

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

On dit qu'il y a **réflexion totale**.

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



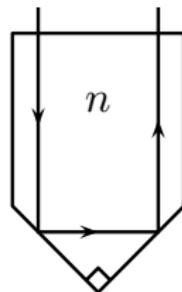
## Exercice : prisme à réflexion totale

### Définition (Prisme optique)

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

## Exercice : prisme à réflexion totale

- 1 On considère le prisme de la figure ci-contre, d'indice  $n$ , dont la pointe forme un angle de  $90^\circ$ . Le prisme est plongé dans l'air d'indice  $n_0 \simeq 1,000$ . On constate qu'un rayon lumineux arrivant sous incidence normale ressort du prisme parallèlement à lui-même après avoir subi deux réflexions totales sur les faces de la pointe. En déduire que l'indice du prisme doit être supérieur à une valeur  $n_{min}$ .



- start=2 La pointe du prisme est maintenant plongée dans de l'eau, d'indice  $n_1 = 1,33$ .
- La direction du rayon émergent du prisme par la face supérieure est-elle modifiée ?
  - On constate qu'il n'y a maintenant plus réflexion totale : on observe des rayons émergents dans l'eau. En déduire que l'indice du prisme est inférieur à une autre valeur  $n_{max}$ .
  - Déterminer la direction des rayons émergents dans l'eau pour  $n = 1,52$ . Réaliser un schéma des différentes réflexions et

# Correction

- ▶  $n > n_{min} = \frac{1}{\sin \pi/4} = \sqrt{2} \simeq 1,414.$
- ▶
  - ▶ inchangé
  - ▶  $n < n_{max} = \frac{n_1}{\sin \pi/4} \simeq 1,886.$
  - ▶  $\sin i' = \frac{n}{n_1} \sin i \simeq \rightarrow i' = 53^\circ.$

## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

## 3. Conséquences et applications

### 3.1 Réfringence

### 3.2 Réflexion totale

### 3.3 Étude du prisme

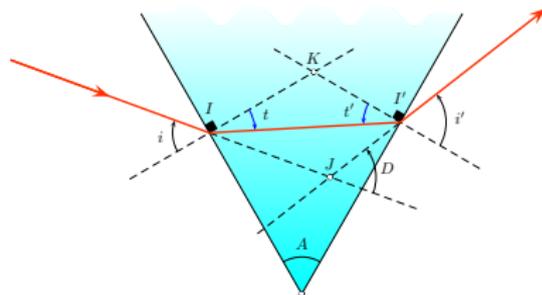
### 3.4 Notions sur la propagation dans un milieu d'indice non uniforme

# Propriété fondamentale

## 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 :  $i, t, i', t' \geq 0$

**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

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

$$A = t + t'$$

$$D_1 = i - t$$

$$D_2 = i' - t'$$

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

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

# Minimum de déviation

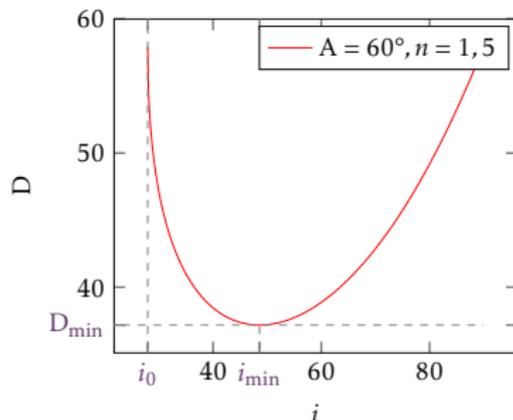
La déviation  $D$  passe pour un minimum en fonction de  $i$   
(animation du prisme)

## 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  $D_m$  :

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



## 1. Rayon lumineux

## 2. Lois de Snell et Descartes

## 3. Conséquences et applications

### 3.1 Réfringence

### 3.2 Réflexion totale

### 3.3 Étude du prisme

### 3.4 Notions sur la propagation dans un milieu d'indice non uniforme

## Illustration qualitative : mirages

### Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique  $\rho$  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  $\rho$  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,  $\rho$  et donc  $n$  croissent donc avec l'altitude

## Illustration qualitative : mirages

### Loi de Gladstone

Soit un fluide de masse volumique  $\rho$  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,  $\rho$  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  $\rho$  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,  $\rho$  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  $\rho$  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,  $\rho$  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  $dz$

# Modélisation

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

# Modélisation

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

# Modélisation

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

La cotangente à la trajectoire vérifie :

Équation différentielle de la trajectoire

$$\frac{dx}{dz} = \frac{n_0 \sin i_0}{\sqrt{n^2(z) - n_0^2 \sin^2(i_0)}}$$

intégrable éventuellement si  $n(z)$  est connu

- ▶ 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

## Quelques images

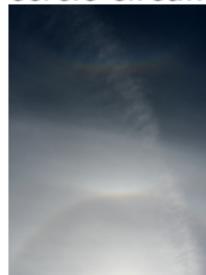


9GAG.COM/GAG/4744760

halo et parhélies



cercle circumzénithal



## Quelques autres images

pilier inférieur



arc infralatéral

