

## CHAPITRE

## 1

## Lois de Snell-Descartes

## 1 Tracer la marche d'un rayon arrivant sur un dioptre

Un rayon lumineux se propage dans un milieu d'indice  $n_1$  et atteint un dioptre qui le sépare d'un milieu d'indice  $n_2 \neq n_1$ . Il s'agit de déterminer le(s) rayon(s) émergent(s).

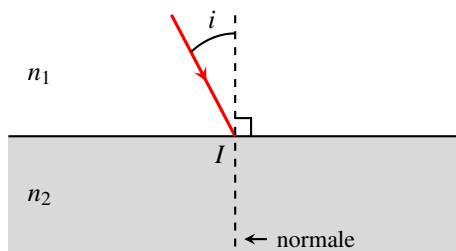
## En résumé

- Schématiser la situation, identifier l'angle d'incidence ;
- déterminer la direction du rayon réfléchi ;
- vérifier s'il y a réflexion totale ou non ;
- le cas échéant déterminer la direction du rayon réfracté.

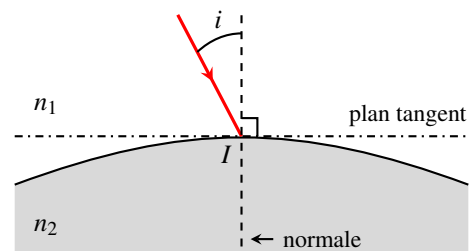
## ► Schématiser la situation

En premier lieu il est nécessaire de tracer **la normale** au dioptre, c'est-à-dire la droite passant par le point d'incidence  $I$  et orthogonale au dioptre, généralement en ligne tiretée pour la distinguer du dioptre qui lui est en trait plein. On mesure alors l'angle d'incidence  $i$ , l'angle de réfraction  $r$  et l'angle de réflexion  $r'$  **par rapport à la normale**.

Remarque : Si le dioptre est courbé alors on trace la normale perpendiculairement au **plan tangent** en  $I$  (voir figures ci-dessous).



Dioptre plan



Dioptre courbé

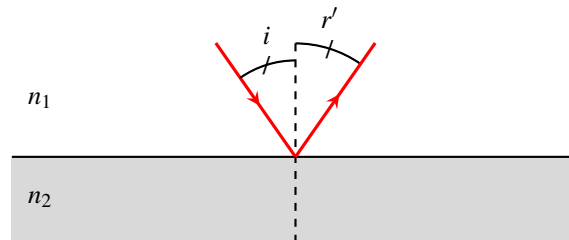
Remarque : En optique géométrique il peut être utile d'utiliser des **angles orientés**, c'est-à-dire des angles mesurés positivement ou négativement suivant que l'on tourne dans un sens ou dans l'autre. Nous en parlerons dans la partie 3 (*Mesurer un angle de déviation*). Nous choisissons en revanche de définir  $i$ ,  $r$  et  $r'$  comme des angles non orientés.

► **Déterminer la direction du rayon réfléchi**

**Cours**

Les lois de Snell-Descartes pour la réflexion énoncent que :

- le rayon réfléchi se propage dans le plan qui contient le rayon incident et la normale, appelé **plan d'incidence** ;
- il vérifie  $r' = i$ .



Remarque : Il existe de rares cas, qui sortent du cadre de l'optique géométrique et donc du programme de première année, où il n'y a pas d'énergie lumineuse réfléchie. Nous laissons ces phénomènes de côté et considérons ici que le rayon réfléchi **existe toujours**.

Remarque : Les lois de la réflexion s'appliquent de la même manière aux **miroirs**. Pour ces derniers le rayon réfléchi est l'unique rayon émergent.

► **Vérifier l'éventualité d'une réflexion totale**

Avant de déterminer la direction du rayon réfracté il convient de vérifier si celui-ci existe, c'est-à-dire s'il y a **réflexion totale** ou pas.

**Cours**

On parle de réflexion totale lorsque l'intégralité de l'énergie lumineuse est réfléchie au niveau du dioptre. Ce phénomène se produit si les deux conditions suivantes sont réunies **conjointement** :

- le rayon incident se propage en direction d'un milieu **moins réfringent**
- et l'angle d'incidence est **strictement supérieur à l'angle de réflexion totale**.

En termes mathématiques et en utilisant les notations introduites dans cette partie, les conditions de réflexion totale sont :

$$\begin{cases} n_2 < n_1 \\ i > I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \end{cases}$$

► **Le cas échéant déterminer la direction du rayon réfracté**

Dans le cas où le rayon réfracté existe on détermine sa direction en appliquant les lois de Snell-Descartes pour la réfraction.

**Cours**

Les lois de Snell-Descartes pour la réfraction énoncent que si le rayon réfracté existe :

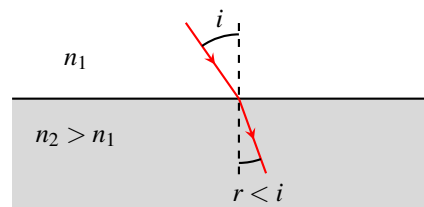
- il se propage dans le plan d'incidence ;
- il vérifie  $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ .

Les valeurs de  $n_1$ ,  $n_2$  et  $i$  étant supposées connues on obtient l'angle de réfraction en utilisant la fonction arcsin qui est la réciproque du sinus :  $r = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i\right)$ .

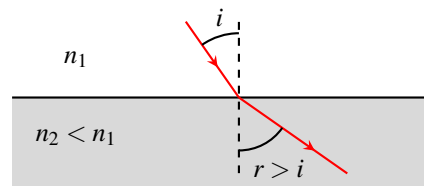
⚠ Lorsque vous faites une application numérique à la calculatrice **vérifiez si celle-ci mesure les angles en degrés ou en radians**, sans quoi vous risquez d'obtenir un résultat aberrant.

Retenez les propriétés suivantes, qui découlent de la loi de la réfraction :

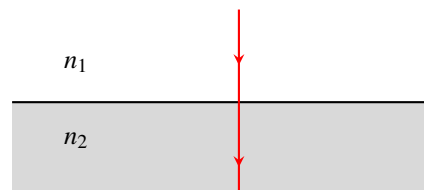
• Quand un rayon se réfracte dans un milieu plus réfringent il se rapproche de la normale.



• Quand un rayon se réfracte dans un milieu moins réfringent il s'éloigne de la normale.



• Quand un rayon arrive **sous incidence normale** (c'est-à-dire perpendiculairement au dioptre :  $i = 0$ ) alors il est réfracté sans être dévié, quelque soient les indices des deux milieux.



**Exemple**

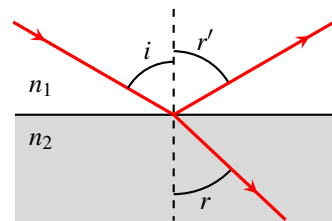
Dans les trois cas de figure ci-dessous déterminer la direction du(es) rayon(s) émergent(s) et faire une représentation schématisée.

1.  $n_1 = 1,25, n_2 = 1,51, i = 60,0^\circ$ .

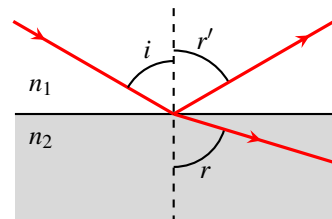
2. :  $n_1 = 1,47, n_2 = 1,33, i = 60,0^\circ$ .

3. :  $n_1 = 1,68, n_2 = 1,33, i = 60,0^\circ$ .

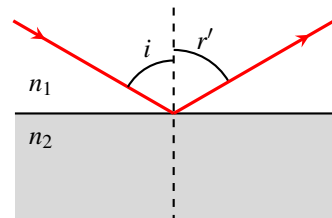
1. Dans chacun des cas le rayon réfléchi existe et  $r' = i = 60^\circ$ . Ici on se trouve dans le cas  $n_2 > n_1$  (le rayon incident se dirige vers un milieu plus réfringent) donc le rayon se réfracte nécessairement et s'approche de la normale. On calcule l'angle de réfraction :  $r = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i\right) = 46,8^\circ$ .



2. Le rayon incident se dirige vers un milieu moins réfringent. On calcule l'angle de réflexion totale :  $I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 64,8^\circ$ . On constate que  $i < I_{\text{tot}}$  : il y a réfraction et le rayon s'éloigne de la normale. On détermine sa direction :  $r = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i\right) = 73,2^\circ$ .



3. Le rayon incident se dirige vers un milieu moins réfringent. On calcule l'angle de réflexion totale :  $I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 52,3^\circ$ . On constate que  $i > I_{\text{tot}}$  : il y a réflexion totale, seul le rayon réfléchi émerge du dioptre.

**Application 1**

Un dioptre plan sépare de l'eau (d'indice 1,33) et du verre (d'indice 1,61). Un rayon lumineux arrive sur ce dioptre avec un angle d'incidence de  $65^\circ$ . Construire le(s) rayon(s) émergent(s) dans le cas où le rayon passe de l'eau vers le verre puis dans le cas inverse.

## 2 Réflexion totale : étude analytique

Nous avons vu comment déterminer la possibilité d'une réflexion totale dans le cas d'une incidence  $i$  particulière, avec des milieux d'indices  $n_1$  et  $n_2$  connus. Vous rencontrerez fréquemment des exercices dans lesquels on vous demandera de déterminer de manière littérale, sous la forme d'une inégalité portant sur un paramètre (angle, indice), la condition pour laquelle il y a réflexion totale.

### En résumé

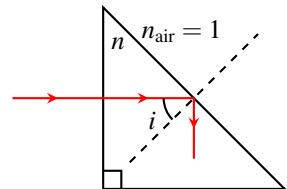
- Schématiser la situation, identifier l'angle d'incidence ;
- vérifier que le rayon se dirige vers un milieu moins réfringent ;
- écrire littéralement la condition de réflexion totale  $i > I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$  (ou bien de non réflexion totale  $i \leq I_{\text{tot}}$ , selon ce qui est demandé dans l'énoncé);
- transformer cette inégalité pour isoler le paramètre étudié.

### Exemple

Un prisme dont la coupe a la forme un triangle rectangle isocèle est constitué de verre d'indice  $n$ . Il est plongé dans l'air d'indice égal à 1. Un rayon lumineux arrive sous incidence normale sur l'une des faces opposée à l'hypothénuse. Montrer qu'il y a une valeur minimale de  $n$  permettant d'obtenir une réflexion totale sur l'hypothénuse.

#### ► Schématiser la situation

Le rayon arrive sous incidence normale sur le premier dioptré air/verre. Par conséquent, il entre dans le prisme **sans être dévié**. Ensuite, il poursuit sa marche jusqu'à atteindre l'hypothénuse (dioptré verre/air).



#### ► Vérifier que le rayon se dirige vers un milieu moins réfringent

Sachant que l'indice du verre est plus élevé que celui de l'air, il est possible qu'il y ait réflexion totale au niveau de l'hypothénuse.

#### ► Mettre en œuvre la condition de réflexion totale

Il y a réflexion totale sur l'hypothénuse à condition que  $i > I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{verre}}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$ .

Le prisme est à la fois rectangle et isocèle, ce qui permet d'affirmer que l'angle d'incidence sur l'hypothénuse vaut  $i = \frac{\pi}{4}$ . On en déduit l'inégalité vérifiée par l'indice du prisme :

$$\arcsin\left(\frac{1}{n}\right) < \frac{\pi}{4} \iff \frac{1}{n} < \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \iff \boxed{n > \sqrt{2}}$$

💡 L'argument d'un arcsinus doit toujours être inférieur à 1 (sinon la valeur  $n$ 'est pas définie). Un angle de réflexion totale s'écrit donc toujours sous la forme :

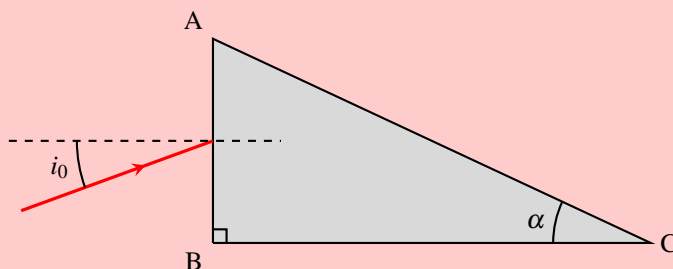
$$I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{\text{"indice le plus petit"}}{\text{"indice le plus grand"}}\right)$$

Remarque : on peut évidemment vous demander de déterminer la condition pour laquelle il n'y a **pas** réflexion totale (autrement dit pour qu'il y ait réfraction). C'est le cas :

- si le rayon incident se dirige vers un milieu plus réfringent
- ou bien si le rayon incident se dirige vers un milieu moins réfringent mais  $i \leq I_{\text{tot}}$ .

### Application 2

Un rayon lumineux se propage dans l'air d'indice égal à 1,00. Il arrive avec un angle d'incidence  $i_0$  sur la face AB d'un prisme ABC d'indice  $n = 1,55$  dont la coupe est un triangle rectangle en B. L'angle au sommet C vaut  $\alpha = 25^\circ$ .



Déterminer la valeur maximale de  $i_0$  pour laquelle il y a réflexion totale sur l'hypoténuse AC. Pour simplifier la démonstration on cherchera d'abord numériquement la valeur limite de  $i_0$  puis on justifiera sans calcul que c'est une valeur maximale.

## 3 Calculer un angle de déviation

Le principe d'un instrument d'optique tel qu'un appareil photographique, une loupe ou bien une lunette astronomique consiste à dévier les rayons lumineux issus d'une source pour en former une image. L'angle de déviation permet de quantifier l'effet d'un dioptre ou d'un miroir sur le changement de direction de propagation d'un rayon lumineux.

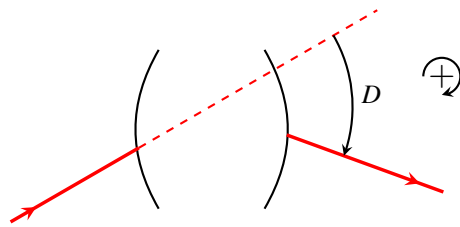
Nous allons voir comment mesurer la déviation produite par un système optique, puis comment traiter le cas de plusieurs déviations successives. Nous définissons l'angle de déviation comme un **angle orienté**, son signe renseignant sur le sens dans lequel la déviation s'effectue (horaire ou anti-horaire).

**En résumé**

- Schématiser la situation, tracer le prolongement du rayon incident et identifier l'angle de déviation ;
- Exprimer littéralement l'angle de déviation en fonction des angles utiles (angle d'incidence/de réflexion/de réfraction) ;
- en cas de déviations successives, sommer les angles de déviation en les comptant positivement dans un sens de rotation et négativement dans l'autre. Le sens de rotation positif est arbitraire.

**► Schématiser la situation****Cours**

Lorsqu'un rayon lumineux est dévié par un système optique quelconque, on appelle **angle de déviation** l'écart angulaire (ici noté  $D$ ) entre le rayon émergent et le **prolongement** du rayon incident. Le prolongement du rayon incident est *le chemin qu'aurait suivi le rayon incident s'il n'avait pas été dévié*, il est communément tracé en ligne tiretée.



Sur la figure ci-contre on a représenté uniquement la face d'entrée et la face de sortie du système optique, la structure interne n'étant pas nécessaire pour définir l'angle de déviation. On a également représenté la convention choisie pour orienter  $D$ . Sur cet exemple l'angle de déviation est positif.

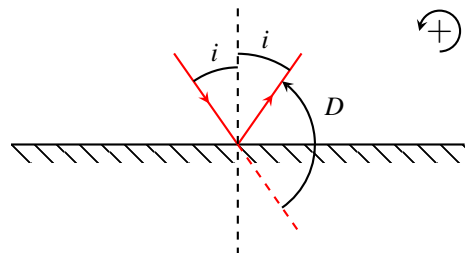
**!** Un angle orienté est représenté avec une flèche, partant de la direction de référence (prolongement du rayon incident) et allant vers la direction à mesurer (rayon émergent).

**► Exprimer littéralement l'angle de déviation**

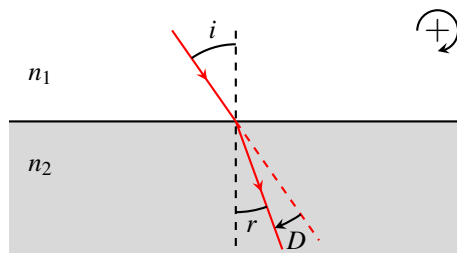
Voici deux exemples portant sur la réflexion et la réfraction.

Dans le cas d'une réflexion, en utilisant  $r' = i$  et l'angle plat formé par le rayon incident et son prolongement, on obtient rapidement que

$$D = \pi - 2i.$$



Dans le cas de cette réfraction on reconnaît, en utilisant deux angles opposés par leur sommet, que  $i = r + D$ , ce qui revient à dire que  $D = i - r$ .



Dans les deux cas le signe de  $D$  est positif conformément à la convention choisie. On notera que le sens de déviation produit par une réfraction est différent suivant que le rayon se rapproche ou s'éloigne de la normale.

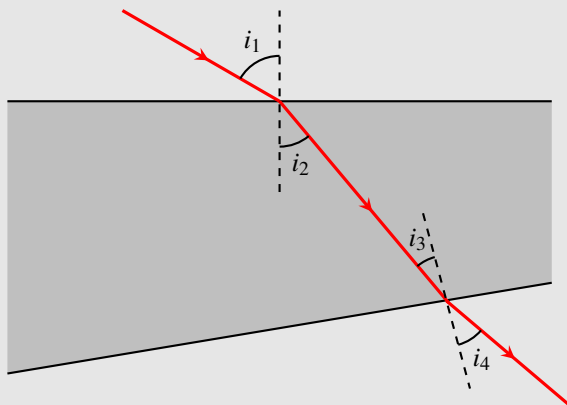
### ► Déviations multiples

Une fois la convention d'orientation choisie, on détermine l'angle de déviation résultant en sommant les angles de déviation successifs :

- de valeur positive si la déviation est dans le sens conventionnel,
- de valeur négative si la déviation est dans le sens anti-conventionnel.

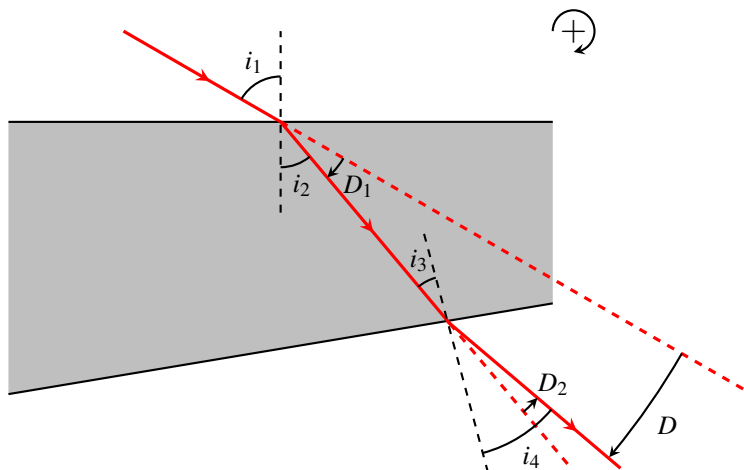
#### Exemple

Un rayon lumineux traverse un prisme en étant réfracté deux fois successivement. On admet ici les différentes directions :  $i_1 = 60^\circ$ ,  $i_2 = 40^\circ$ ,  $i_3 = 25^\circ$  et  $i_4 = 35^\circ$ . Déterminer l'angle déviation résultant produit par le prisme entre l'entrée et la sortie.



On commence par indiquer sur le schéma les deux angles de déviation successifs ainsi que l'angle de déviation résultant. On indique également la convention d'orientation choisie (voir page suivante).





La première déviation s'effectue dans le sens conventionnel :  $D_1 = i_1 - i_2 = 20^\circ$ .

La seconde déviation s'effectue dans le sens anti-conventionnel :  $D_2 = i_3 - i_4 = -10^\circ$ .

L'angle de déviation résultant vaut  $D = D_1 + D_2 = 10^\circ$ .

### Application 3

On reprend les notations de l'application 2, en se plaçant dans le cas  $i_0 = 50,0^\circ$ . On considère ici le rayon qui entre dans le prisme et se réfracte sur l'hypothénuse. Calculer l'angle de déviation entre l'entrée et la sortie du prisme.

⚠ On conclut en insistant sur l'importance des schémas, non seulement en optique géométrique mais aussi de manière plus générale en physique.

- Il est **indispensable** de réaliser un schéma clairement annoté de la situation, notamment pour introduire toutes les grandeurs utiles (normale(s), angles, orientation conventionnelle des angles de déviation, points d'incidence, sommets des triangles utiles).
- S'il y a plusieurs dioptries il faut que les notations permettent de reconnaître clairement chaque dioptre (interdit par exemple d'utiliser le même symbole  $i$  pour tous les angles d'incidence, ou bien  $r$  pour tous les angles de réfraction).
- **Toute grandeur utilisée dans un calcul doit avoir été définie auparavant.** Si une grandeur utile n'a pas été définie dans l'énoncé vous devez le faire vous-même (généralement sur le schéma), faute de quoi le correcteur aura beaucoup de mal à suivre votre raisonnement (et vous pénalisera à juste titre pour manque de clarté).