

## Activité 3.1 – Ondes lumineuses

### Objectifs :

- ▶ Connaître la vitesse de la lumière.
- ▶ Comprendre la notion de longueur d'onde.
- ▶ Comprendre la notion de rayonnement monochromatique.

**Contexte :** La lumière est en fait une onde électromagnétique, constitué d'un champs électrique et d'un champs magnétique.

→ **Quelles sont les propriétés de cette onde électromagnétique ?**

### Document 1 – Onde électromagnétique

Une onde est une **perturbation** qui se **propage**, sans transport de matière.

Une onde électromagnétique est une perturbation du champs électrique et magnétique qui se propage. Une onde peut être décrite par un certain nombre de propriétés qui la définissent. Cette année on va se concentrer sur sa **vitesse de propagation** et sur sa **longueur d'onde**, notée  $\lambda$  (« lambda »).

Une onde est dite **monochromatique** (une couleur) si elle a une longueur d'onde bien définie.

Une onde est dite **polychromatique** (plusieurs couleurs) si elle est la superposition de plusieurs ondes monochromatiques.

**1** — Chercher et donner des exemples de phénomènes dans la vie qui s'apparentent à des ondes.

Les vagues sur la mer, le son, les séismes, la vibration d'une corde de guitare, la vibration d'une plaque métallique, les vaguelettes créées sur une surface d'eau quand on y jette un objet, etc.

**2** — Le soleil est une source de lumière qui émet une onde électromagnétique

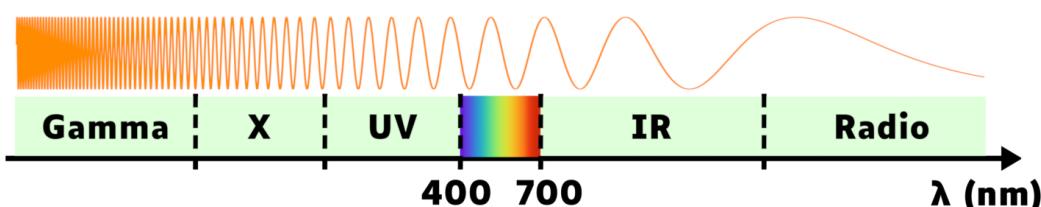
- monochromatique, avec une longueur d'onde.
- polychromatique, avec plusieurs longueurs d'onde.

**3** — Un laser est une source de lumière qui émet une onde électromagnétique

- monochromatique, avec une longueur d'onde.
- polychromatique, avec plusieurs longueurs d'onde.

### Document 2 – Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est le classement des ondes électromagnétiques par longueur d'onde.



Le domaine visible se trouve entre **400 nm (violet)** et **700 nm (rouge)** de longueur d'onde et

représente une petite partie du spectre électromagnétique.

### Document 3 – Vitesse de propagation

Dans le vide, une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière notée  $c$

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

Pour mieux visualiser la vitesse de la lumière, on va la comparer avec la vitesse d'un TGV. Un TGV a une vitesse de pointe de  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 83,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**4 —** Calculer le temps que met le TGV pour parcourir  $10^6 \text{ m}$  (distance Paris-Marseille).

$$\begin{aligned} t_{\text{TGV}} &= \frac{d_{\text{Paris-Marseille}}}{v_{\text{TGV}}} \\ &= \frac{10^6 \text{ m}}{83,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \\ &= 1,20 \times 10^4 \text{ s} \end{aligned}$$

**5 —** Calculer le temps que met la lumière pour parcourir  $10^6 \text{ m}$ . Comparer les deux temps de parcours.

$$\begin{aligned} t_{\text{lumière}} &= \frac{d_{\text{Paris-Marseille}}}{c} \\ &= \frac{10^6 \text{ m}}{3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \\ &= 3,3 \times 10^{-3} \text{ s} \end{aligned}$$

La lumière est beaucoup plus rapide qu'un TGV : le temps que le TGV arrive à Marseille, la lumière aura fait 2 millions de fois l'aller-retour !

### Document 4 – Longueur d'onde et énergie

L'énergie d'une onde électromagnétique est liée à sa longueur d'onde. Plus la longueur d'onde est petite et plus l'énergie d'une onde électromagnétique est élevée. Il peut être dangereux d'être exposé à une onde électromagnétique avec une énergie élevée, qui pourrait endommager les tissus vivants.

Une onde électromagnétique très énergétique, dans le domaine des rayons X, peut briser les liaisons covalentes d'une molécules ou arracher des électrons d'un atome, ce qui peut tuer des cellules vivantes.

**6 —** Expliquer pourquoi un laser rouge est moins dangereux qu'un laser bleu.

Un laser rouge émet une onde électromagnétique avec une longueur d'onde plus élevée qu'un laser bleu. L'énergie de cette onde électromagnétique est donc plus faible et le laser rouge est moins dangereux.

## Activité 3.2 – Spectres d'émission

### Objectifs :

- ▶ Comprendre la notion de spectre d'émission.
- ▶ Analyser le spectre d'émission d'une lampe.

**Contexte :** Il existe différentes sources lumineuses, comme le Soleil, les lampadaires, les néons, les écrans de téléphones, etc.

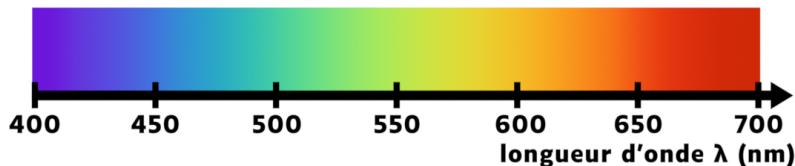
→ **Comment caractériser la lumière émise par une source ?**

| Comp. | Items   | D | C | B | A |
|-------|---|---|---|---|---|
| VAL   | Comparer des spectres avec des valeurs de références. |   |   |   |   |

### Document 1 – Spectre d'émission

La lumière est une onde électromagnétique, qui peut avoir plusieurs longueurs d'ondes. Nos yeux captent certaines longueurs d'ondes et y associent une couleur : c'est le domaine visible.

La donnée de toutes les longueurs d'ondes présentes dans une source lumineuse s'appelle le **spectre d'émission**. Le spectre dans le domaine visible est représenté de la manière suivante :



### 1 ➤ Les spectres d'émissions continus

#### Document 2 – Spectre continu

Un **spectre d'émission continu** présente une suite de raies colorées. Un spectre continu prend la forme d'une bande colorée unique.

#### Document 3 – Lampe à incandescence

Une lampe à incandescence est composée d'un petit filament chauffé par le passage d'un courant électrique. En augmentant la tension d'alimentation d'une lampe à incandescence, on augmente la température du filament.

1 — Quelles différences remarquez-vous quand la lampe est alimentée en 6 et en 12 V ?

La lampe émet plus de lumière et la lumière est plus blanche quand elle est alimentée en 12 V.

#### Document 4 – Émission d'un corps chaud

Un corps chaud émet un rayonnement lumineux avec un spectre continu. Les propriétés du rayonnement lumineux dépendent de la température de l'objet. Quand **la température du corps augmente**, sa **luminosité augmente** et son spectre contient de **plus petites longueurs d'onde**, ce qui correspond à des couleurs plus « froides » (bleue ou violet).

**2** — Utilisons ce résultat pour estimer la température de surface d'une étoile. Bételgeuse est une étoile de couleur rouge-orange, sa température de surface vaut 3 800 °C. L'étoile Rigel est de couleur bleue. Sa température sera-t-elle plus élevée ou plus faible ?

Comme sa couleur est bleue, la longueur d'onde associée est plus petite pour l'étoile Rigel que pour l'étoile Bételgeuse. Donc sa température est plus élevée d'après la loi des corps chaud.

## 2 → Les spectres d'émission de raies

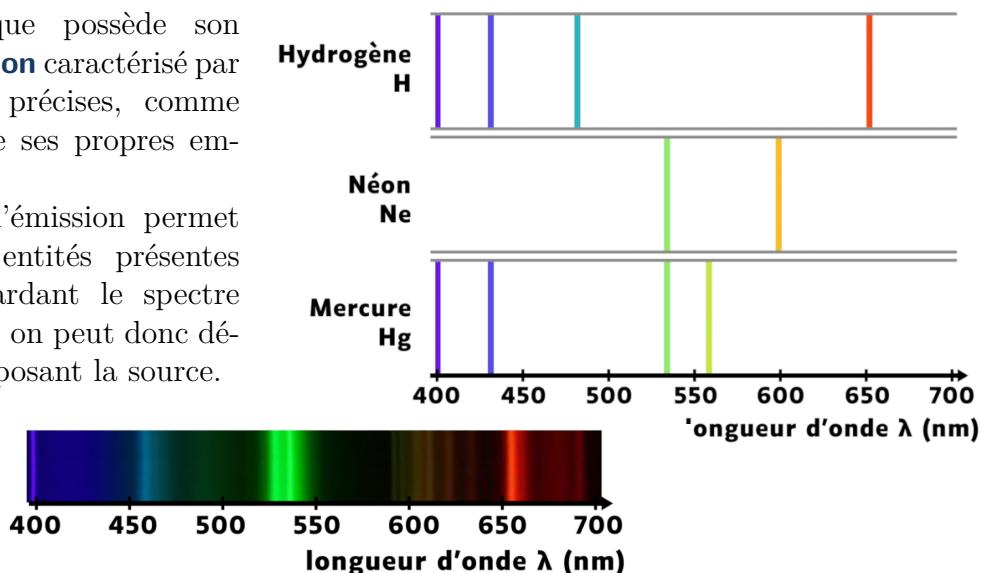
#### Document 5 – Émission atomique ou moléculaire

Lorsque les entités chimiques (atomes, ions, molécules), qui composent un gaz sont excitées, elles émettent des radiations avec des longueurs d'ondes précises.

Cela correspond à des **raies fines et bien définies** dans le spectre d'émission.

Chaque entité chimique possède son propre **spectre d'émission** caractérisé par des longueurs d'onde précises, comme chaque humain possède ses propres empreintes digitales.

Observer un spectre d'émission permet donc **d'identifier** les entités présentes dans un gaz. En regardant le spectre d'une source lumineuse, on peut donc déterminer les entité composant la source.



↑ Photo obtenue avec un spectroscope pointé vers une lampe « néon ».

**3** — En comparant les spectres données dans le document 5, indiquer si les lampes éclairant la classe contiennent de l'hydrogène, du néon ou du mercure.

Dans le spectre de la lampe, on retrouve les raies rouge, cyan, bleue et violette de l'hydrogène, donc la lampe contient de l'hydrogène. Par ailleurs on retrouve aussi les raies vertes du mercure, donc la lampe contient aussi du mercure.

## TP 3.1 – Formation des images et vision

### Objectifs :

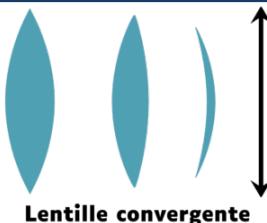
- ▶ Former une image avec une lentille convergente.
- ▶ Comprendre la modélisation optique de l'œil.

**Contexte :** L'œil humain permet de construire l'image d'un objet observé sur la rétine, qui contient des cellules qui donne les couleurs (cônes) ou le contraste (bâtonnets).

→ **Comment modéliser et comprendre la formation d'une image par un œil ?**

### Document 1 – Lentille convergente

Cette année en optique on va travailler avec des **lentilles convergentes**, qui concentrent les rayons lumineux. Elles sont plus épaisses au centre qu'aux extrémités et sont schématisées par une double flèche fermée.



Une **lentille convergente** possède

- un **centre optique** noté  $O$ , au centre de la lentille.
- un **foyer image** noté  $F'$  et son symétrique par rapport à  $O$ , le **foyer objet** noté  $F$ .
- une **distance focale** noté  $f'$ , qui est la distance  $OF'$ .

La droite perpendiculaire à la lentille passant par  $O$  est appelée **l'axe optique**, orientée par rapport au sens de propagation de la lumière.

Les lentilles convergentes ont une propriétés particulières : tous les rayons lumineux qui partent d'un point et traversent la lentille vont converger en un même point, ce qui permet de reconstituer une image.

### Document 2 – Formation d'une image avec une lentille

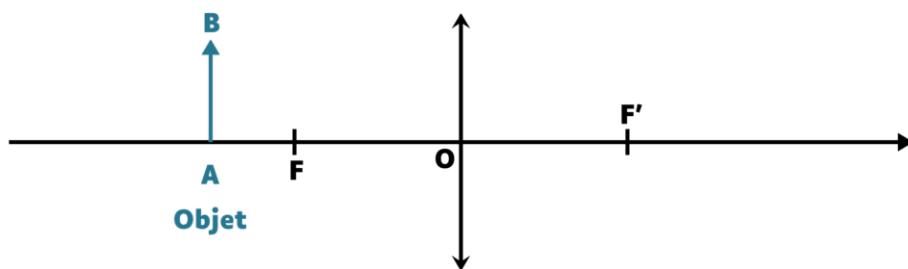
Trois rayons lumineux ont des propriétés particulières quand ils traversent une lentille convergente. En utilisant deux rayons lumineux particuliers qui partent d'un point, on peut trouver où les rayons lumineux convergent pour former son image.

#### Vocabulaire :

Un **rayon incident** va vers la lentille.

Un **rayon émergent** s'éloigne de la lentille.

- Tout rayon incident qui passe par le centre optique n'est pas dévié.
- Tout rayon incident qui passe par le foyer objet  $F$  émerge parallèle à l'axe optique.
- Tout rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image  $F'$ .



**💡💡** Placer la lentille sur le banc optique, puis repérer la position des points virtuels  $F$  et de  $F'$  sur le banc optique par rapport à la lentille.

**💡💡** Mesurer la longueur totale du « F » sur la lampe, on la note  $AB = 1,5 \text{ cm}$

**💡💡** Placer la lampe à une distance supérieure à  $f'$ , mais inférieure à  $2 \times f'$ . Placer l'écran de l'autre côté du banc optique et le déplacer pour trouver la position où l'image est nette sur l'écran. Mesurer la taille de l'image  $A'B'$ , la distance  $OA$  et la distance  $OA'$ . Répéter cette opération en plaçant la lampe à une distance de  $2f'$ , puis à une distance supérieure à  $2f'$ .

**📝** Remplir le tableau ci-dessous avec vos mesures.

| Position de l'objet | Taille de l'image $A'B'$ (cm) | Distance lentille objet $OA$ (cm) | Distance lentille image $OA'$ (cm) |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 $f' < OA < 2f'$   | 4,6                           | 15,0                              | 44,8                               |
| 2 $OA = 2f'$        | 1,5                           | 20,0                              | 20,0                               |
| 3 $OA > 2f'$        | 0,5                           | 36,0                              | 12,1                               |

**1 —** Pour chaque position de l'objet, calculer le **grandissement**  $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$  (« gamma ») et le rapport  $g = \frac{OA'}{OA}$ . Est-ce que  $g$  et  $\gamma$  sont égaux ?

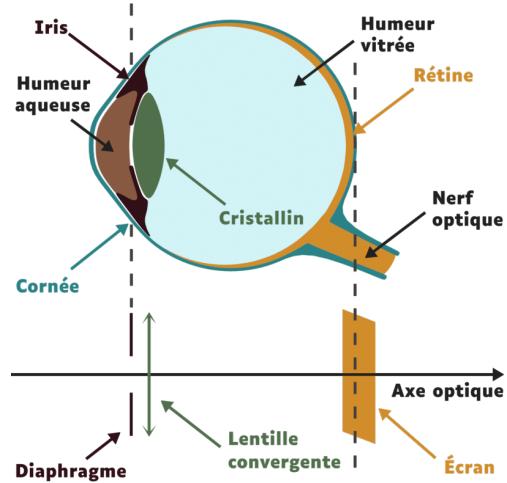
Oui, dans tous les cas  $g$  et  $\gamma$  sont très proches ou égaux.

$$\begin{aligned} \text{cas 1 : } g &= \frac{44,8}{15,0} = 2,99; \quad \gamma = \frac{4,6}{1,5} = 3,06 \\ \text{cas 2 : } g &= \frac{20,0}{20,0} = 1,00; \quad \gamma = \frac{1,5}{1,5} = 1,00 \\ \text{cas 3 : } g &= \frac{12,1}{36,0} = 0,34; \quad \gamma = \frac{0,5}{1,5} = 0,33 \end{aligned}$$

### Document 3 – Modèle simplifié de l'œil

L'œil humain est un organe complexe (et fragile !) composé de plusieurs éléments. On peut modéliser un œil humain en trois parties :

- **l'iris**, avec un trou central (la pupille) de taille variable. L'iris permet de contrôler la quantité de rayons lumineux arrivant dans l'œil.
- **le cristallin, la cornée et les humeurs**, qui dévient les rayons lumineux comme une lentille convergente.
- **la rétine**, qui reçoit les rayons lumineux et sur laquelle l'image est formée. Elle est composée de cônes pour percevoir les couleurs et de bâtonnets pour percevoir l'intensité lumineuse.



Une fois l'image d'un objet formée sur la rétine, la lumière est transformée en signaux électriques. Ces signaux électriques sont transmis au cerveau par le nerf optique, qui les utilise pour former

notre vision.

 Associer chaque composant de l'œil avec l'objet permettant de le modéliser

|         |            |            |        |
|---------|------------|------------|--------|
| Optique | diaphragme | lentille   | écran  |
| œil     | iris       | Cristallin | rétine |

## Activité 3.3 – Grandissement d'une image

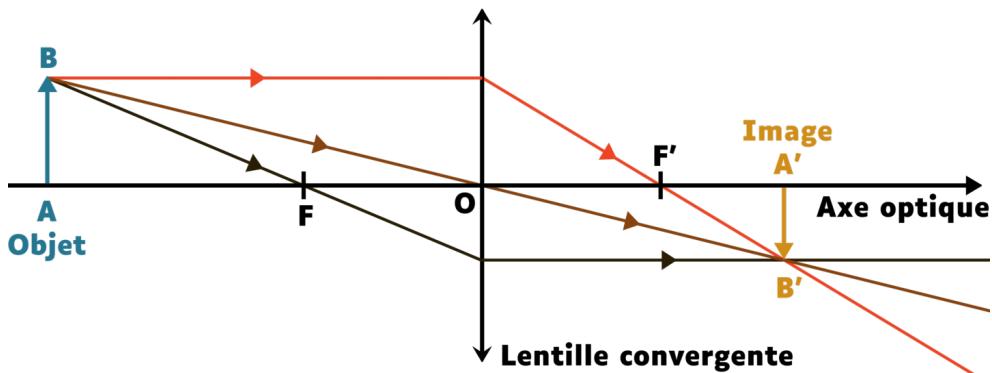
### Objectifs :

- Comprendre l'approche géométrique pour construire l'image d'un objet avec une lentille convergente à partir de rayons lumineux particuliers.

### Document 1 – Rappel sur la détermination graphique d'une image

Une lentille convergente possède un **centre optique**  $O$ , un **foyer image**  $F'$  et un **foyer objet**  $F$ . La droite perpendiculaire à la lentille passant par le centre optique  $O$  est appelée **l'axe optique**.

L'image d'un objet  $AB$  est notée  $A'B'$ .



Trois rayons ont des propriétés particulières pour une lentille convergente :

- Tout rayon incident qui passe par le centre optique n'est pas dévié.
- Tout rayon incident qui passe par le foyer objet  $F$  émerge parallèle à l'axe optique.
- Tout rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image  $F'$ .

Pour trouver où se forme l'image d'un point, on trace deux rayons particuliers qui partent de ce point. L'image du point sera nette là où ces rayons lumineux s'intersectent (se croisent).

### Document 2 – Grandissement d'une image

En optique les longueurs sont **algébriques**, c'est-à-dire qu'elles sont positives ou négatives en fonction de leur sens, on les note avec une barre  $\overline{AB}$ .

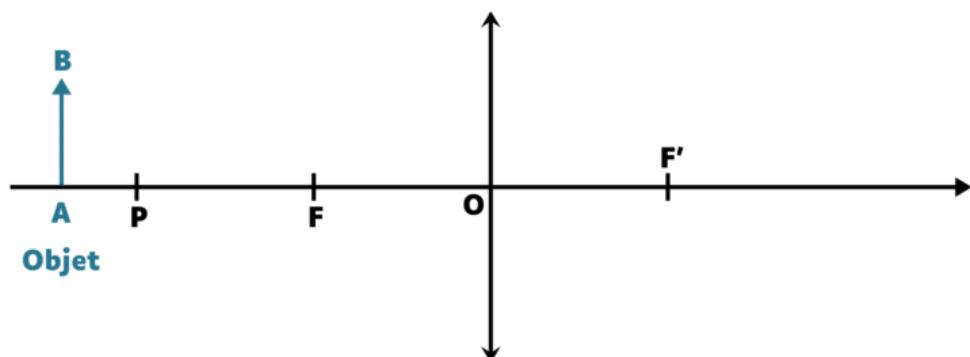
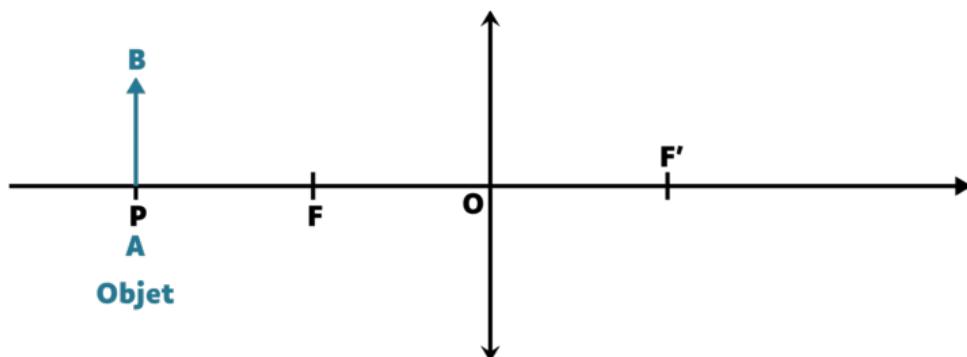
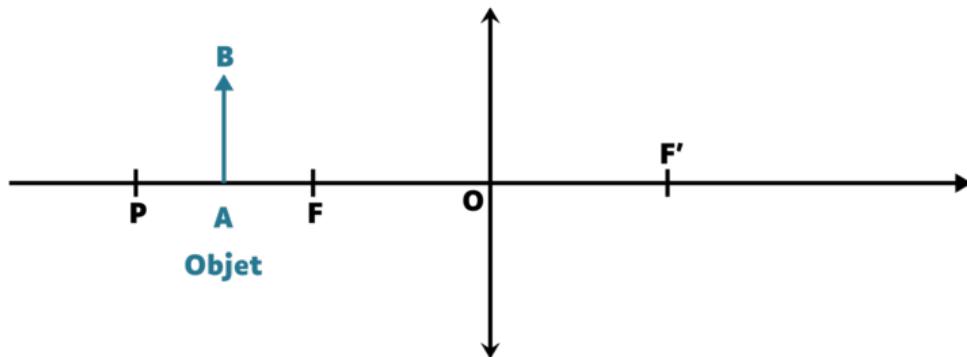
- $\overline{AB} > 0$ , si B est au dessus de A (ou si B est à droite de A) ;
- $\overline{AB} < 0$ , si B est en dessous de A (ou si B est à gauche de A).

Le **grandissement** noté  $\gamma$  (gamma) est le rapport entre la hauteur algébrique de l'image et celle de l'objet

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Si  $\gamma < 0$  l'image est renversée. Si  $|\gamma| > 1$  l'image est plus grande que l'objet. Si  $|\gamma| < 1$  l'image est plus petite que l'objet.

Tracer l'image  $A'B'$  pour chacun des 3 cas suivants,  $P$  est un point tel que  $\overline{OP} = 2 \times \overline{OF}$ .



**1 —** Est-ce que l'image  $A'B'$  obtenue graphiquement est cohérente avec celle observée dans ces 3 situations pendant le TP 0.1 ?

Oui, on retrouve bien les trois configurations étudiées pendant le TP : un cas où l'image est agrandie avec un objet proche de la lentille ; un cas où l'objet et l'image ont la même taille et sont à la même distance de la lentille ; un cas où l'image est rétrécie avec un objet loin de la lentille.

**2 —** En utilisant le théorème de Thalès sur les triangles  $ABO$  et  $A'B'O$  dans le document 1, montrer que  $\gamma = \overline{OA'}/\overline{OA} = g$ , comme mesuré dans le TP 0.1.

...

## TP 3.2 – La réfraction de la lumière

### Objectifs :

- ▶ Comprendre comment décrire le phénomène de réfraction.
- ▶ Découvrir la loi de Snell-Descartes.

**Contexte :** La lumière se propage en ligne droite dans un même milieu transparent. Lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre sa direction de propagation change : c'est le phénomène de **réfraction**.

En arrivant avec certains angles, la lumière peut aussi être **réfléchie**, c'est le phénomène de **réflexion**.

→ **Comment décrire mathématiquement le phénomène de réfraction et de réflexion ?**

### Document 1 – Indice de réfraction

Quand la lumière se propage dans un milieu, sa vitesse est réduite.

La capacité d'un milieu à réduire la vitesse de la lumière est mesurée par un nombre que l'on appelle **l'indice de réfraction** et que l'on note  $n_{\text{milieu}}$ .

Dans le milieu, la vitesse de la lumière est

$$c_{\text{milieu}} = \frac{c}{n_{\text{milieu}}}$$

▶ *Exemple :*

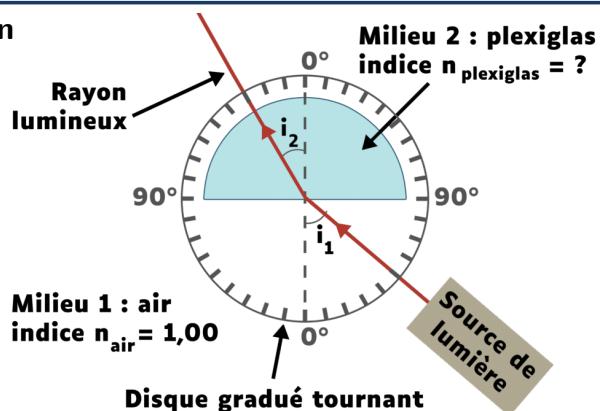
- L'air a un indice de réfraction  $n_{\text{air}} = 1,00$  et donc  $c_{\text{air}} = c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- L'eau a un indice de réfraction  $n_{\text{eau}} = 1,33$  et donc  $c_{\text{eau}} = 2,26 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Document 2 – Mesure de l'indice de réfraction

#### Matériel utilisé :

- 1 source de lumière alimentée en 12 V continu ;
- 1 demi-cylindre de plexiglas sur son disque-support gradué en degrés.

Votre professeur préféré a réalisé les mesures suivantes avec ce dispositif expérimental :



|                           |   |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Angle d'incidence $i_1$   | 0 | 5   | 10  | 15  | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| Angle de réfraction $i_2$ | 0 | 3.3 | 6.7 | 9.9 | 13.2 | 19.5 | 25.4 | 30.7 | 35.3 | 38.8 | 41.0 | 41.8 |

Ouvrir le programme python `refraction_1.py` et le lire en entier.

Dans le programme python `refraction_1.py`, repérer les lignes correspondant aux angles  $i_1$  et  $i_2$  mesurés. Les remplir avec les valeurs du document 2 et lancer le programme.

**Document 3 – La proportionnalité**

Deux grandeurs  $a$  et  $b$  sont **proportionnelles** si le graphique représentant la grandeur  $a$  en fonction de la grandeur  $b$  est une droite passant par l'origine du repère. Ces deux grandeurs  $a$  et  $b$  sont alors reliées par l'égalité

$$a = k \times b$$

Dans cette égalité  $k$  est une constante.  $k$  est le **coefficients directeur** de la droite.

**1 –** Est-ce que l'on a une relation de proportionnalité entre  $i_1$  et  $i_2$ ? Justifier à partir du graphique obtenu.

Non, car les points ne sont pas alignés sur une droite.

Ouvrir le programme python `refraction_2.py` et repérer les lignes correspondant aux angles  $i_1$  et  $i_2$ . Les remplir en les copiant depuis `refraction_1.py` et lancer le programme.

**2 –** Est-ce que l'on a une relation de proportionnalité entre  $\sin(i_1)$  et  $\sin(i_2)$ ? Justifier à partir du graphique obtenu.

Oui, car les point sont alignés sur une droite.

**Document 4 – Loi de Snell-Descartes**

Lorsque la lumière passe d'un milieu d'indice  $n_1$  à un milieu d'indice  $n_2$ , alors

- le rayon incident, le rayon réfracté et la normale sont dans le même plan.
- $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$  pour la réfraction.
- $i_3 = i_1$  pour la réflexion.

La relation entre l'angle d'incidence  $i_1$  et l'angle de réfraction  $i_2$  s'appelle la **loi de Snell-Descartes**.

On retrouve bien la relation de proportionnalité mesurée :

$$\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \times \sin(i_1) \quad n_2 \sin(i_2) = n_1 \sin(i_1)$$

**3 –** En utilisant la valeur du coefficient directeur  $k = n_{\text{air}}/n_{\text{plexiglas}}$  calculée par le second programme python, calculer la valeur de l'indice de réfraction  $n_{\text{plexiglas}}$ .

On trouve que  $k = 0,67$  et comme  $k = \frac{n_1}{n_2}$ ,

$$0,67 = \frac{n_1}{n_2}$$

$$n_2 \times 0,67 = n_1$$

$$n_2 = \frac{n_1}{0,67} = \frac{1,00}{0,67} = 1,49$$

## Activité 3.4 – Formation d'un arc-en-ciel

### Objectifs :

- ▶ Expliquer la formation d'un arc-en-ciel à l'aide de la loi de Snell-Descartes.
- ▶ Comprendre que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde.

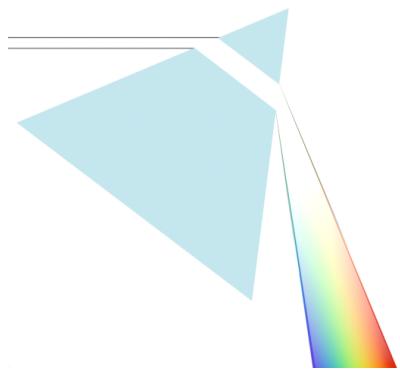
**Contexte :** Quand le soleil brille pendant la pluie, on peut observer un arc-en-ciel. C'est aussi le cas quand de la lumière blanche traverse un prisme.

→ **Quel phénomène physique est à l'origine de la formation d'un arc-en-ciel ?**

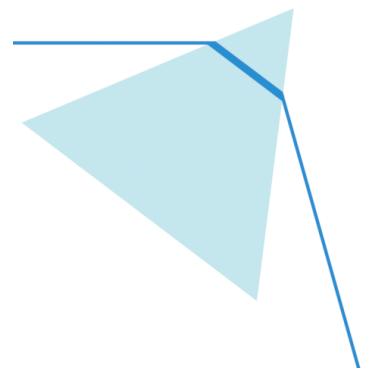
### Document 1 – L'expérience de Newton

En 1666, Newton étudie la lumière. Au cours d'une expérience, il parvient à former un arc-en-ciel à partir d'une source de lumière blanche et d'un prisme de verre.

Pour enrichir son étude, Newton réalise une autre expérience : il isole la partie bleue de la lumière formée par son prisme et éclaire un second prisme avec. **La lumière bleue est déviée, mais pas étalée et ne change pas de couleur !** Newton en déduit que la lumière « blanche » du soleil est une superposition de lumière de toutes les couleurs et le prisme dévie différemment ces lumières.

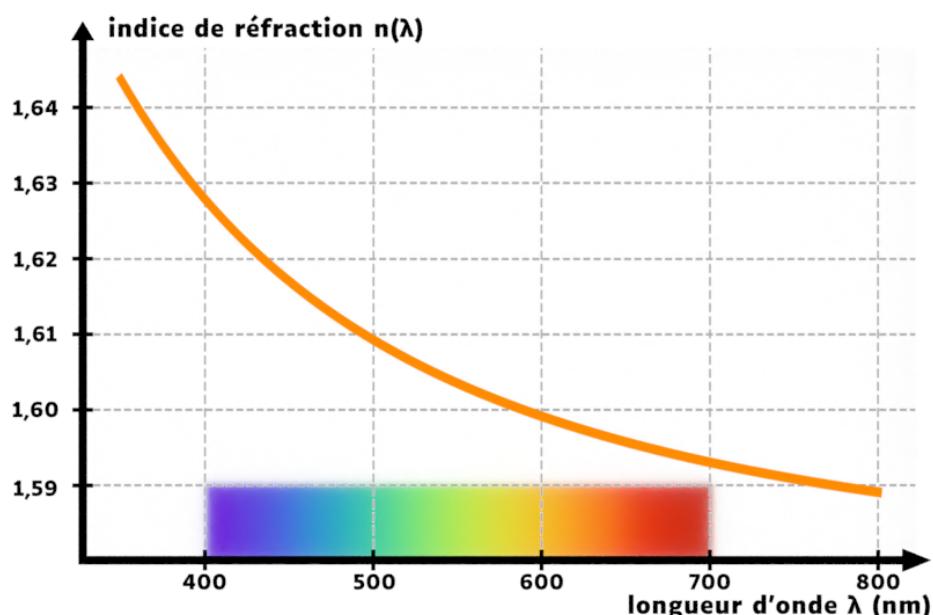


↑ Lumière blanche



↑ Lumière bleue

### Document 2 – Évolution de l'indice de réfraction $n$ d'un verre



Évolution de  $n$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour le verre « Flint »

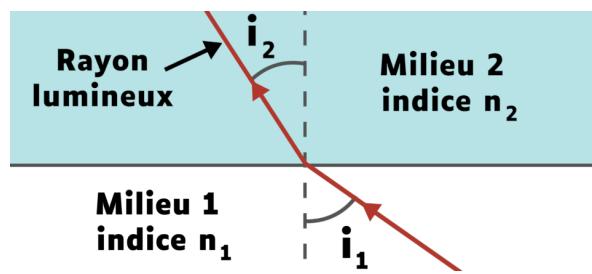
**Document 3 – Rappel sur la réfraction**

D'après la loi de Snell-Descartes, on a

$$n_2 \sin(i_2) = n_1 \sin(i_1)$$

Si on veut calculer la valeur de l'angle de réfraction  $i_2$ , on commence par isoler  $\sin(i_2)$  dans l'équation, puis on inverse la fonction sinus pour obtenir l'expression de  $i_2$

$$\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1) \quad \Rightarrow \quad i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin(i_1)\right)$$



**1 —** Quel est le nom du phénomène que subit la lumière en passant de l'air (milieu 1) au verre du prisme (milieu 2)? Et en passant du verre à l'air?

La lumière est déviée en passant de l'air au prisme, c'est le phénomène de réfraction. De même en passant du verre à l'air.

**2 —** Les couleurs composant la lumière blanche sont-elles déviées de la même façon en traversant le prisme ?

Non, le rouge est moins dévié que le violet ou le bleu.

**3 —** En utilisant le document 2, indiquer l'indice de réfraction  $n_{\text{rouge}}$  pour le rouge ( $\lambda \approx 650\text{nm}$ ) et  $n_{\text{bleu}}$  pour le bleu ( $\lambda \approx 450\text{nm}$ ).

À partir du graphique on lit  $n_{\text{rouge}} = 1,595$  et  $n_{\text{bleu}} = 1,615$ .

**4 —** En supposant que l'angle d'incidence de la lumière soit  $i_1 = 35^\circ$ , calculer l'angle de réfraction  $i_2$  pour le passage du verre à l'air pour la lumière bleu  $i_{2,\text{bleu}}$  et la lumière rouge  $i_{2,\text{rouge}}$  à la sortie du prisme. **Rappel :**  $n_2 = n_{\text{air}} = 1,00$ .

On utilise la relation du document 3 :

$$i_{2,\text{rouge}} = \arcsin(1,595 \times \sin(35)) = 66,2$$

$$i_{2,\text{bleu}} = \arcsin(1,615 \times \sin(35)) = 67,9$$

**5 —** En comparant ces deux angles de déviations, conclure sur la séparation de la lumière blanche et la formation d'un arc-en-ciel par un prisme.

On voit que  $i_{2,\text{rouge}} < i_{2,\text{bleu}}$ , le rouge est donc moins dévié que le bleu en passant au travers du prisme.

Cette petite déviation initiale devient de plus en plus grande et permet de séparer les couleurs de la lumière blanche de manière continue : cela forme un arc-en-ciel.