BURHAN

Propagation des ondes lumineuses

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

Version en ligne : burhan.ma/2bac/pc/physique-chimie/propagation-des-ondes-lumineuses/cours

Chapitre	Semestre
Propagation des ondes lumineuses	Semestre 1

Diffraction de la lumière par une fente ou un fil

Un laser envoyé sur une fente réglable

Dans une salle sombre, un laser hélium-néon éclaire un écran blanc placé à $2{,}00\,\mathrm{m}$. Sans obstacle, il y dessine un petit point rouge.

On place devant le laser une **fente réglable** : deux lames verticales dont on rapproche les bords. On la ferme peu à peu, jusqu'à une largeur de quelques dizaines de micromètres.

Devine : La tache quand la fente se ferme

Que devient la tache rouge sur l'écran quand on rétrécit la fente ?

A. Elle rétrécit comme la fente, jusqu'à disparaître.

Faux.

C'est ce que prévoit une propagation en ligne droite ; sous une fente très fine, l'expérience montre autre chose.

B. Elle s'étale à l'horizontale, perpendiculairement à la fente.

Juste.

Juste : sous une fente très fine, la lumière ne va plus en ligne droite.

C. Elle s'allonge à la verticale, le long de la fente.

Faux.

L'étalement se fait dans la direction où la fente est étroite : à l'horizontale.

D. Elle se décompose en bandes de toutes les couleurs.

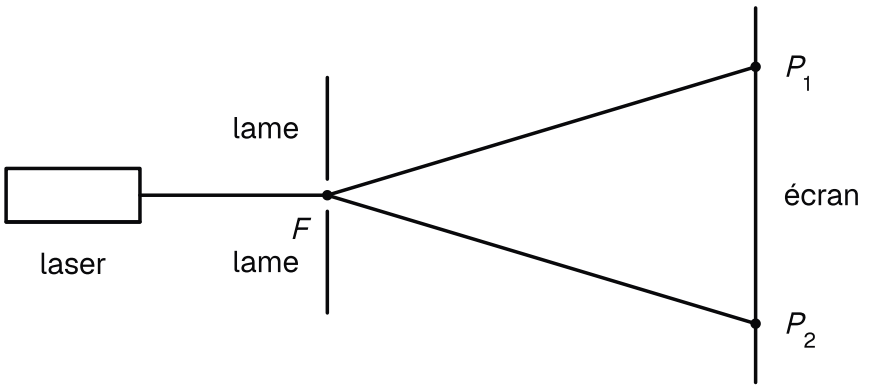
Faux.

Le laser n'émet qu'une couleur : la tache reste rouge.

Correction

Tant que la fente est large, la tache garde la taille du faisceau. Quand la largeur descend à quelques dizaines de micromètres, la tache s'étale à l'horizontale, perpendiculairement à la fente.

Elle devient une **tache centrale** large et brillante. De part et d'autre, des taches moins lumineuses la prolongent, séparées par des zones sombres.



Montage vu de dessus, schéma non à l'échelle : le faisceau du laser traverse la fente F, ouverture entre deux lames, puis s'étale jusqu'à l'écran.

Ce que l'on observe. Plus la fente est fine, plus la tache centrale est large. Une zone sombre, l'**extinction**, la sépare des taches voisines.

Au-delà de la fente, le faisceau ne suit plus la ligne droite : il s'étale.

Dans ce chapitre. Tu relies cette observation à un modèle : la lumière est une onde. Tu mesures l'étalement par un angle, puis tu en tires la longueur d'onde du laser. Enfin, tu suis la lumière dans l'eau et le verre, jusqu'au prisme.

La diffraction d'une onde mécanique

Rappel : au chapitre précédent, une onde à la surface de l'eau traverse une ouverture étroite dans une cuve à ondes. Au-delà, elle s'étale : c'est la **diffraction**.

Elle est nette quand l'ouverture a une dimension inférieure ou égale à la longueur d'onde, ou du même ordre. L'onde diffractée garde la fréquence et la longueur d'onde de l'onde incidente.

> **Vérifie : Le point commun des deux expériences**
>
> Qu'ont en commun l'onde de la cuve et la lumière du laser, dans ces deux expériences ?
>
> **A.** Elles ont toutes deux besoin d'un milieu matériel pour avancer.
> **Faux.**
> La lumière du Soleil traverse le vide spatial : elle n'a pas besoin de milieu. Ce point revient à la section suivante.
>
> **B.** Elles changent de fréquence en traversant l'ouverture.
> **Faux.**

L'onde diffractée garde la fréquence de l'onde incidente.

C. Elles s'étalent au-delà d'une ouverture étroite.
Juste.
Juste : c'est le comportement commun observé dans les deux cas.

D. Elles continuent en ligne droite après l'ouverture.
Faux.
C'est l'inverse : toutes deux s'étalent au-delà de l'ouverture.

Correction
Dans les deux expériences, une onde traverse une ouverture étroite et s'étale au-delà. La lumière se comporte donc comme l'onde de la cuve : elle se diffracte.

Définition de la diffraction de la lumière

Définition : Diffraction de la lumière

Lorsqu'un faisceau de lumière traverse une ouverture étroite ou rencontre un obstacle de petite dimension, il ne se propage plus en ligne droite au-delà : il s'étale. Ce phénomène est la **diffraction** de la lumière. Il est d'autant plus marqué que la dimension a de l'ouverture ou de l'obstacle est petite.

Exemple : La fente réglable de plus en plus fine

Ouverte à quelques millimètres, la fente réglable laisse une tache de la taille du faisceau : la diffraction est négligeable.

Fermée à $100\ \mu\text{m}$, puis à $40\ \mu\text{m}$, elle donne une tache centrale de plus en plus large. Rappel d'unité : $1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\ \text{m}$.

La longueur d'onde de la lumière est inférieure au micromètre. Sa diffraction devient observable quand l'ouverture ne mesure que quelques dizaines à quelques centaines de longueurs d'onde : l'étalement, de quelques milliradians, se voit alors sur un écran éloigné.

Un fil fin, un trou

Avec un obstacle. On remplace la fente par un fil fin, tendu verticalement. La lumière contourne le fil et s'étale aussi : on retrouve une tache centrale horizontale, bordée d'extinctions. Un fil diffracte la lumière comme une fente de même largeur.

Un petit trou circulaire diffracte aussi la lumière : la tache devient un disque entouré d'anneaux. Ce chapitre étudie la fente et le fil.

Vérifie : La direction de l'étalement

On tend un fil fin horizontalement devant le laser. Dans quelle direction la tache s'étale-t-elle sur l'écran ?

A. À l'horizontale, le long du fil.

Faux.
C'est le cas d'un fil vertical : l'étalement est perpendiculaire à l'obstacle.

B. Dans toutes les directions, en anneaux.

Faux.
Des anneaux viennent d'un petit trou circulaire, pas d'un fil.

C. Dans aucune : un fil arrête la lumière.

Faux.
Un fil fin ne fait pas qu'une ombre : il diffracte la lumière comme une fente.

D. À la verticale, perpendiculairement au fil.

Juste.
Juste : l'étalement est perpendiculaire à l'obstacle.

Correction
L'étalement se fait perpendiculairement à l'obstacle, dans la direction où il est étroit. Un fil horizontal donne donc une tache étalée à la verticale.

À toi : Diffraction nette ou négligeable

On éclaire au laser une fente de $5\,\mathrm{mm}$ de large, puis une fente de $60\,\mu\mathrm{m}$. Dans quel cas observe-t-on une diffraction nette ? Décris la tache attendue. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Compare chaque largeur à celle des fentes qui donnent une tache étalée.
Indice 2
Convertis les deux largeurs dans la même unité.
Indice 3
Point délicat : la tache s'étale perpendiculairement à la fente, pas le long d'elle.

Réponse
On convertit : $5\,\mathrm{mm} = 5\,000\,\mu\mathrm{m}$. Cette fente est plus de quatre-vingts fois plus large que l'autre. La tache garde la taille du faisceau : la diffraction est négligeable.

Avec la fente de $60\,\mu\mathrm{m}$, la diffraction est nette. La tache centrale est large, étalée perpendiculairement à la fente, et encadrée d'extinctions.

Modèle ondulatoire et propagation dans le vide

La lumière décrite comme une onde

Devine : Une onde mécanique dans le vide

La lumière du Soleil nous parvient à travers un espace presque sans matière. Une onde mécanique, comme le son, pourrait-elle faire ce trajet ?

A. Oui, comme la lumière du Soleil qui nous arrive.

Faux.
La lumière arrive bien ; mais une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel.

B. Non : sans milieu matériel, elle ne se propage pas.

Juste.
Juste : une onde mécanique perturbe un milieu ; sans milieu, rien ne se propage.

C. Oui, mais beaucoup plus lentement que dans l'air.

Faux.
Sans matière à perturber, l'onde mécanique ne se propage pas du tout.

Correction
Une onde mécanique est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel. Dans le vide, elle ne se propage pas : aucun son du Soleil ne nous parvient. Sa lumière, elle, nous arrive. La lumière est donc une onde d'un autre type.

En clair. La diffraction est la signature d'une onde : un objet lancé en ligne droite ne s'étale pas après une fente. La lumière se diffracte, donc on la décrit comme une onde.

Ce modèle est admis : il rend compte des expériences de ce chapitre.

Propriété : Modèle ondulatoire de la lumière

La diffraction est une propriété des ondes. Puisque la lumière se diffracte, on la décrit par un **modèle ondulatoire** : la lumière est une onde progressive. Contrairement à une onde mécanique, elle se propage aussi dans le vide, sans milieu matériel, avec la célérité

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

Exemple : Le trajet de la lumière du Soleil

La lumière du Soleil parcourt dans le vide environ $d = 1{,}50 \times 10^{11}\ \mathrm{m}$ jusqu'à la Terre. Sa durée de trajet vaut

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{d}{c} \\ &= \frac{1{,}50 \times 10^{11}}{3{,}00 \times 10^{8}} \\ &= 5{,}00 \times 10^{2}\,\text{s}\end{aligned}$$

soit un peu plus de huit minutes. Aucune onde mécanique ne ferait ce trajet.

Vérifie : Ce qui distingue la lumière du son

Parmi ces propriétés, laquelle la lumière possède-t-elle, contrairement au son ?

A. Elle se diffracte par une ouverture étroite.
Faux.
Le son se diffracte aussi : c'est une propriété de toutes les ondes.

B. Elle transporte de l'énergie.
Faux.
Toute onde transporte de l'énergie, le son aussi.

C. Elle a une fréquence.
Faux.
Une onde sonore sinusoïdale a aussi une fréquence.

D. Elle se propage dans le vide.
Juste.
Juste : le son, onde mécanique, ne se propage pas dans le vide.

Correction
La diffraction, le transport d'énergie et la fréquence appartiennent à toutes les ondes. Ce qui distingue la lumière du son, c'est sa propagation dans le vide, avec la célérité c.

Fréquence, période et longueur d'onde

Rappel : une onde progressive sinusoïdale a une période T, en secondes, et une fréquence $\nu = \dfrac{1}{T}$, en hertz. Sa longueur d'onde est la distance parcourue pendant une période, $\lambda = v\,T$.

Pour la lumière, on note la fréquence ν, la lettre grecque « nu ».

Définition : Fréquence et longueur d'onde d'une radiation dans le vide

Une **radiation monochromatique** est une onde lumineuse sinusoïdale de fréquence ν, fixée par la source. Sa **longueur d'onde dans le vide** λ est la distance parcourue par l'onde dans le vide pendant une période $T = \dfrac{1}{\nu}$:

$$\lambda = c\,T = \frac{c}{\nu}.$$

λ s'exprime en mètres, ν en hertz et c en $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Exemple : La fréquence du laser hélium-néon

Le laser du chapitre émet une radiation de longueur d'onde $\lambda = 633\,\mathrm{nm} = 633 \times 10^{-9}\,\mathrm{m}$ dans le vide. Sa fréquence vaut

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{633 \times 10^{-9}} \\ &= 4{,}74 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}\end{aligned}$$

La lumière du laser oscille près de cinq cents mille milliards de fois par seconde.

L'air et le vide. Dans l'air, la lumière va presque aussi vite que dans le vide : l'écart est inférieur à $0{,}03\,\%$. Dans ce chapitre, l'air est assimilé au vide. La lettre λ désigne la longueur d'onde dans le vide, ou dans l'air.

Chiffres significatifs d'un résultat

Chiffres significatifs. Un résultat calculé ne garde pas plus de chiffres significatifs que la donnée qui en a le moins. Les zéros situés à gauche ne comptent pas ; un zéro final compte. Ainsi, $0{,}064\,\mathrm{m}$ a deux chiffres significatifs, $2{,}00\,\mathrm{m}$ en a trois.

Un entier terminé par des zéros est ambigu : on précise sa précision. Le fabricant donne chaque largeur avec trois chiffres significatifs : on écrit $40{,}0$, $60{,}0$ et $80{,}0\,\mu\mathrm{m}$, puis 100 et $120\,\mu\mathrm{m}$, eux aussi à trois chiffres. Cette règle vaut pour tout le chapitre.

Vérifie : L'écriture d'une fréquence calculée

La lampe à incandescence émet, entre autres, une radiation de longueur d'onde $\lambda = 6{,}0 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$. Comment écrire sa fréquence ?

A. $\nu = 5{,}00 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$

Faux.

Trois chiffres : c'est la précision de c, pas celle de la longueur d'onde.

B. $\nu = 5 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$

Faux.

Un seul chiffre : l'arrondi perd une précision que les données portent.

C. $\nu = 5{,}0 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$

Juste.

Juste : la longueur d'onde, donnée la moins précise, a deux chiffres significatifs.

D. $\nu = 5{,}0 \times 10^{14}$

Faux.
Une fréquence sans unité ne veut rien dire : l'unité fait partie du résultat.

Correction
On calcule

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{6{,}0 \times 10^{-7}} \\ &= 5{,}0 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}\end{aligned}$$

La longueur d'onde a deux chiffres significatifs, c en a trois : on garde deux chiffres, et l'unité.

Convertir, puis appliquer la relation

Méthode : Calculer une longueur d'onde ou une fréquence dans le vide

1. **Convertis** les données en unités SI : $1\,\mathrm{nm} = 10^{-9}\,\mathrm{m}$ et $1\,\mathrm{THz} = 10^{12}\,\mathrm{Hz}$.
2. **Applique** $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$ ou $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$, avec $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
3. **Écris** le résultat avec son unité et les chiffres significatifs de la donnée la moins précise.
4. **Situe** la radiation : visible entre $400\,\mathrm{nm}$ et $800\,\mathrm{nm}$ dans le vide, ultraviolet en dessous, infrarouge au-dessus. La section suivante précise ces limites.

Exemple : Une radiation de la lampe donnée en térahertz

La lampe à incandescence émet aussi une radiation de fréquence $\nu = 545\,\mathrm{THz}$. On convertit : $\nu = 5{,}45 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$. Alors

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{\nu} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{5{,}45 \times 10^{14}} \\ &= 5{,}50 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}\end{aligned}$$

soit $550\,\mathrm{nm}$: une radiation visible, de couleur verte.

À toi : La période de la radiation du laser

Calcule la période T de la radiation émise par le laser hélium-néon, de longueur d'onde $633\,\mathrm{nm}$ dans le vide. Vérifie que la lumière parcourt $633\,\mathrm{nm}$ pendant une période. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
La période apparaît dans la définition de la longueur d'onde dans le vide.

Indice 2

Isole T, puis convertis λ en mètres.

Indice 3

Point délicat : n'arrondis pas T avant de vérifier la distance parcourue.

Réponse

D'après la définition, $\lambda = cT$, donc

$$\begin{aligned} T &= \frac{\lambda}{c} \\ &= \frac{633 \times 10^{-9}}{3{,}00 \times 10^{8}} \\ &= 2{,}11 \times 10^{-15}\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

Pendant cette durée, la lumière parcourt $cT = \lambda$, soit $633\,\mathrm{nm}$. On retrouve aussi $T = \dfrac{1}{\nu}$, avec $\nu = 4{,}74 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$.

Une radiation ou plusieurs : le spectre visible

Un laser et une lampe à incandescence

On éclaire la fente réglable avec deux sources, tour à tour. D'abord le laser : la tache diffractée est rouge, d'une seule teinte.

Puis une lampe à incandescence, dont le filament chauffé émet une lumière blanche.

Devine : La tache de la lumière blanche

À quoi ressemblera la tache diffractée par la même fente, éclairée par la lampe ?

A. Une tache blanche uniforme, de la taille de celle du laser.

Faux.

La lumière blanche contient plusieurs radiations ; chacune s'étale à sa façon, et les bords se colorent.

B. Une tache blanche aux bords colorés : ses radiations s'étalent différemment.

Juste.

Juste : chaque radiation s'étale à sa façon ; leurs taches ne se superposent pas exactement.

C. Une tache rouge, comme celle du laser.

Faux.

Seul le laser émet une lumière rouge d'une seule teinte ; la lampe émet de la lumière blanche.

D. Aucune tache étalée : la lumière blanche ne se diffracte pas.

Faux.

Toute lumière se diffracte par une fente fine ; la lumière blanche aussi.

Correction

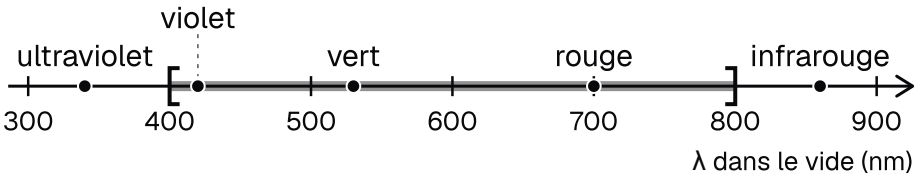
L'expérience montre une tache centrale blanche, aux bords colorés. Le laser donne une tache d'une seule teinte : sa lumière ne contient qu'une radiation. La lampe en contient plusieurs. Chacune s'étale d'un angle qui dépend de sa longueur d'onde, comme le montre la section suivante.

Monochromatique ou polychromatique

En clair. Une radiation est une onde lumineuse sinusoïdale d'une seule fréquence. Une lumière peut en contenir une seule, ou plusieurs. Le mot « monochromatique » signifie « d'une seule couleur ».

Définition : Lumière monochromatique, lumière polychromatique et spectre visible

Une lumière **monochromatique** ne contient qu'une seule radiation : la lumière d'un laser en est un bon modèle. Une lumière **polychromatique** contient plusieurs radiations ; la lumière blanche en contient une infinité. Le **spectre visible** s'étend, dans le vide, de $\lambda \approx 400\,\text{nm}$ (violet) à $\lambda \approx 800\,\text{nm}$ (rouge). Au-dessous de $400\,\text{nm}$ se trouve l'ultraviolet, au-dessus de $800\,\text{nm}$ l'infrarouge.



Spectre visible, longueurs d'onde dans le vide en nanomètres : du violet au rouge, entre l'ultraviolet et l'infrarouge.

Exemple : Le laser et la lampe dans le spectre

Le laser hélium-néon émet une seule radiation, de $633\,\text{nm}$: entre $400\,\text{nm}$ et $800\,\text{nm}$, elle est visible, rouge. Sa lumière est monochromatique.

La lampe à incandescence émet des radiations de tout le visible, et beaucoup d'infrarouge : sa lumière est polychromatique. On sent cet infrarouge comme une chaleur, près de l'ampoule.

Vérifie : Un modèle de lumière monochromatique

Laquelle de ces lumières est un bon modèle de lumière monochromatique ?

A. La lumière du laser hélium-néon.
Juste.
Juste : elle ne contient qu'une radiation, de 633 nm.

B. La lumière d'une lampe à incandescence.
Faux.

Elle contient toutes les radiations du visible : elle est polychromatique.

C. La lumière du Soleil.

Faux.

C'est une lumière blanche : elle contient une infinité de radiations.

D. La lumière blanche filtrée par un verre rouge.

Faux.

Un filtre rouge laisse passer toute une bande de radiations rouges : la lumière reste polychromatique.

Correction

Seul le laser émet une radiation unique. Un filtre coloré ne garde qu'une partie du spectre, mais cette partie contient encore de nombreuses radiations.

Fréquences du spectre visible

Ordre de grandeur. Les limites du visible se traduisent en fréquences, avec $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$. À $800\,\text{nm}$, $\nu \approx 3{,}75 \times 10^{14}\,\text{Hz}$. À $400\,\text{nm}$, $\nu \approx 7{,}50 \times 10^{14}\,\text{Hz}$.

Dans le visible, le violet a la plus grande fréquence, le rouge la plus petite.

Les couleurs. Dans le vide, on repère les couleurs par des bandes approchées, aux frontières floues : violet de 400 à $450\,\text{nm}$, bleu jusqu'à $490\,\text{nm}$, vert jusqu'à $570\,\text{nm}$, jaune jusqu'à $590\,\text{nm}$, orange jusqu'à $620\,\text{nm}$, puis rouge.

Vérifie : La radiation de plus grande fréquence

Parmi ces radiations visibles, laquelle a la plus grande fréquence ?

A. Une radiation rouge de $700\,\text{nm}$.

Faux.

La plus grande longueur d'onde donne la plus petite fréquence.

B. Une radiation jaune de $580\,\text{nm}$.

Faux.

Sa longueur d'onde n'est pas la plus petite de la liste.

C. Une radiation violette de $420\,\text{nm}$.

Juste.

Juste : la plus petite longueur d'onde donne la plus grande fréquence.

D. Une radiation verte de $530\,\text{nm}$.

Faux.

Elle est au milieu du visible : ni la plus grande ni la plus petite fréquence.

Correction

D'après $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$, la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. La plus petite longueur d'onde, celle du violet, donne la plus grande fréquence.

Attention : Les limites du spectre visible sont des longueurs d'onde dans le vide

✗ « Une radiation de longueur d'onde $450\,\text{nm}$ dans le verre est bleue. »

✓ Les valeurs $400\,\text{nm}$ et $800\,\text{nm}$ sont des longueurs d'onde **dans le vide**.

Dans l'eau ou le verre, la même radiation a une longueur d'onde plus petite, sans changer de couleur : la fin du chapitre le montre. Pour situer une radiation dans le spectre, utilise sa longueur d'onde dans le vide, ou sa fréquence.

Ultraviolet et infrarouge

Au-delà du visible. L'œil ne perçoit ni l'ultraviolet ni l'infrarouge. L'ultraviolet du Soleil brunit la peau. L'infrarouge est émis par tout corps chaud : le filament de la lampe en rayonne beaucoup.

À toi : Une radiation invisible de la lampe

La lampe à incandescence émet aussi une radiation de fréquence $\nu = 3{,}00 \times 10^{14}\,\text{Hz}$. Calcule sa longueur d'onde dans le vide. Est-elle visible ? Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1
Utilise la relation entre longueur d'onde et fréquence dans le vide.
Indice 2
Convertis le résultat en nanomètres pour le comparer aux limites du visible.
Indice 3
Point délicat : compare à la borne rouge, $800\,\text{nm}$, et non à $400\,\text{nm}$.

Réponse

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{\nu} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{3{,}00 \times 10^{14}} \\ &= 1{,}00 \times 10^{-6}\,\text{m}\end{aligned}$$

Soit $1\,000\,\text{nm}$: c'est plus que $800\,\text{nm}$. La radiation est dans l'infrarouge, invisible. La lampe en émet beaucoup : elle chauffe plus qu'elle n'éclaire.

Écart angulaire et largeur de la fente

L'angle qui mesure l'étalement

Devine : Rouge ou vert sur la même fente

On éclaire la même fente, de $100\,\mu\mathrm{m}$, avec le laser rouge de $633\,\mathrm{nm}$, puis avec un laser vert de $532\,\mathrm{nm}$. Quelle tache centrale est la plus large ?

A. La tache rouge, de plus grande longueur d'onde.

Juste.

Juste : à fente égale, la plus grande longueur d'onde s'étale le plus.

B. La tache verte, de plus grande fréquence.

Faux.

Une plus grande fréquence va avec une plus petite longueur d'onde ; l'étalement suit la longueur d'onde.

C. Les deux taches sont égales : seule la fente compte.

Faux.

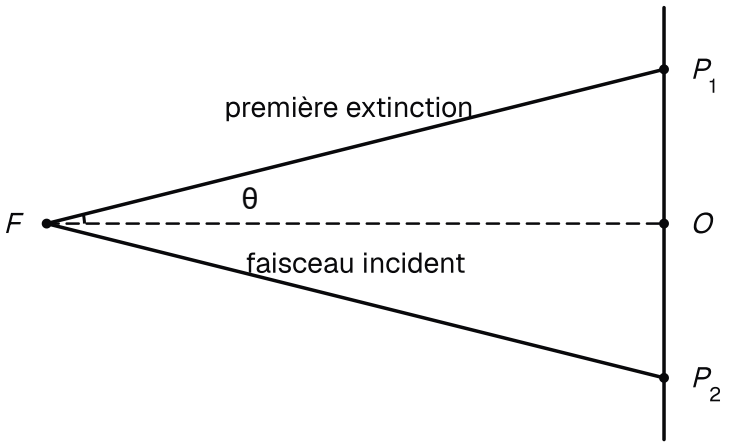
À la cuve à ondes déjà, la diffraction dépendait aussi de la longueur d'onde.

Correction

La diffraction dépend de la longueur d'onde comparée à la largeur de la fente. À fente égale, la plus grande longueur d'onde s'étale le plus : la tache rouge est plus large que la verte. La relation de cette section le chiffre.

En clair. Pour mesurer l'étalement, on repère deux directions depuis la fente. La première est celle du faisceau incident : elle mène au centre de la tache. La seconde mène à la première extinction, au bord de la tache centrale.

L'angle entre ces deux directions est l'**écart angulaire** θ.



Écart angulaire, schéma non à l'échelle : angle entre la direction du faisceau incident et celle de la première extinction.

La relation de l'écart angulaire

Une relation admise. Le modèle ondulatoire permet de calculer θ, mais ce calcul dépasse ce chapitre. On admet la relation suivante ; des mesures la vérifient plus loin dans le chapitre.

Propriété : Écart angulaire de diffraction

Une lumière monochromatique de longueur d'onde λ éclaire une fente de largeur a, ou un fil de diamètre a. L'**écart angulaire** θ est l'angle entre la direction du faisceau incident et la direction de la première extinction, de part et d'autre de la tache centrale. Pour de petits angles :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}.$$

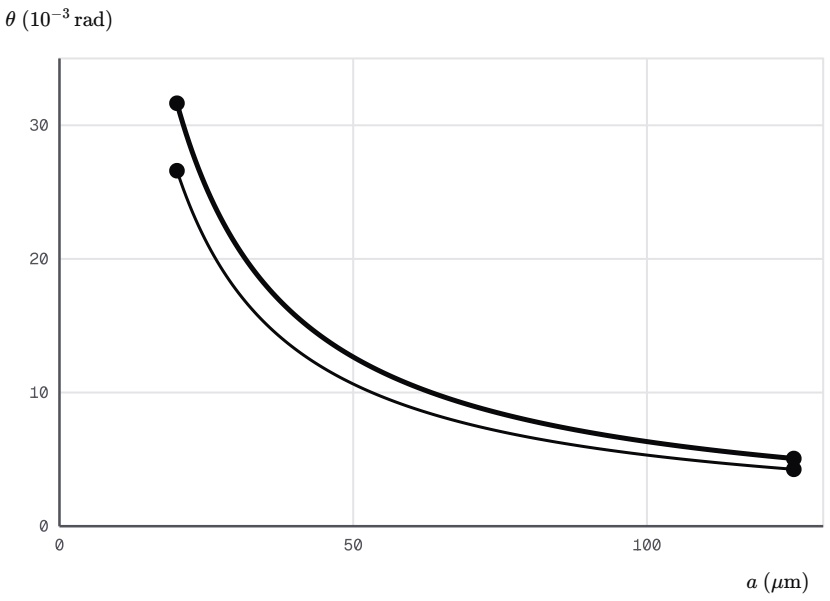
θ s'exprime en radians ; λ et a s'expriment dans la même unité. La tache centrale s'étale perpendiculairement à la fente ou au fil.

Exemple : Les écarts angulaires du laser rouge et du laser vert

Fente de $a = 100\,\mu\text{m} = 1{,}00 \times 10^{-4}\,\text{m}$, laser rouge de $\lambda = 633 \times 10^{-9}\,\text{m}$:

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{\lambda}{a} \\ &= \frac{633 \times 10^{-9}}{1{,}00 \times 10^{-4}} \\ &= 6{,}33 \times 10^{-3}\,\text{rad}\end{aligned}$$

Avec le laser vert, $\theta = 5{,}32 \times 10^{-3}\,\text{rad}$. Ces angles sont petits : quelques milliradians, bien moins que $0{,}05\,\text{rad}$.



Écart angulaire en fonction de la largeur de la fente, pour le laser rouge et le laser vert : θ diminue quand a augmente.

Vérifie : La même tache pour les deux lasers

On veut obtenir le même écart angulaire avec le laser vert qu'avec le laser rouge. Quelle fente faut-il au laser vert ?

A. Une fente plus large, dans le rapport $\dfrac{633}{532}$.

Faux.
Une fente plus large réduirait encore θ, déjà plus petit pour le vert.

B. La même fente : seul l'écart angulaire compte.

Faux.
À fente égale, les deux écarts angulaires diffèrent : la longueur d'onde compte.

C. Une fente plus fine, dans le rapport $\dfrac{532}{633}$.

Juste.
Juste : $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ reste le même si a varie comme λ.

D. Une fente deux fois plus fine.

Faux.
Le rapport des longueurs d'onde vaut environ $0{,}84$, pas $0{,}5$.

Correction

L'écart angulaire $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ ne change pas si a est multipliée par le même nombre que λ. Il faut donc $a_{\text{vert}} = a_{\text{rouge}} \times \dfrac{532}{633}$: une fente plus fine.

Influence de la fente et de la couleur

Vérifie : Diviser la largeur de la fente par deux

Avec le même laser, on remplace la fente de $80{,}0\,\mu\text{m}$ par celle de $40{,}0\,\mu\text{m}$. Que devient l'écart angulaire ?

A. Il est divisé par deux.

Faux.

Ce serait vrai si θ était proportionnel à a ; il est inversement proportionnel à a.

B. Il ne change pas.

Faux.

θ dépend de a : la fente compte.

C. Il est multiplié par quatre.

Faux.

Aucun carré dans $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$.

D. Il est multiplié par deux.

Juste.

Juste : θ est inversement proportionnel à a.

Correction

$\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ est inversement proportionnel à a. Diviser a par deux multiplie θ par deux.

Attention : Une fente plus fine donne une tache plus large

✗ « Une fente plus étroite laisse passer moins de lumière, donc la tache est plus petite. »

✓ L'écart angulaire est inversement proportionnel à a : diviser la largeur de la fente par 2 double la largeur de la tache centrale.

La tache est moins lumineuse, mais plus large. Une ouverture large ne diffracte presque pas ; la diffraction se voit avec une fente ou un fil fins.

Le fil fin. Un fil de diamètre a donne le même écart angulaire qu'une fente de largeur a. Un fil de $100\,\mu\text{m}$, éclairé par le laser rouge, donne donc $\theta = 6{,}33 \times 10^{-3}\,\text{rad}$.

C'est le principe d'une mesure de diamètre : on mesure θ, puis on calcule $a = \dfrac{\lambda}{\theta}$.

Unité et signification de l'écart angulaire

Attention : L'écart angulaire s'exprime en radians

✗ « $\theta = \dfrac{633}{100} = 6{,}33$, avec λ en nanomètres et a en micromètres. »

✓ La relation $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ donne θ en radians, à condition d'écrire λ et a dans la même unité.

L'approximation $\tan\theta \approx \theta$, utile plus loin, n'est valable qu'en radians. Une valeur en degrés se convertit seulement à la fin : $1\,\text{rad} \approx 57{,}3°$.

À retenir : Ce que mesurent l'écart angulaire et la longueur d'onde

θ mesure l'étalement de la lumière derrière la fente, en radians. λ est une propriété de la radiation : la distance parcourue dans le vide pendant une période, en mètres. a est une propriété de l'ouverture.

La diffraction est d'autant plus marquée que le rapport $\dfrac{\lambda}{a}$ est grand.

Vérifie : Un écart angulaire plausible

Laquelle de ces valeurs est plausible pour l'écart angulaire d'une fente du laboratoire, éclairée par un laser ?

A. $\theta \approx 1\,\text{rad}$

Faux.
Près de $57°$: il faudrait une fente aussi fine que la longueur d'onde.

B. $\theta \approx 10^{-2}\,\text{rad}$

Juste.
Juste : quelques centièmes ou millièmes de radian, pour des fentes de quelques dizaines de micromètres.

C. $\theta \approx 10^{-6}\,\text{rad}$

Faux.
Ce serait une ouverture de plus d'un demi-mètre : aucune diffraction visible.

D. $\theta \approx 6\,\text{rad}$

Faux.
Près de $340°$: c'est l'erreur des unités mélangées, λ en nanomètres et a en micromètres.

Correction
Les fentes du laboratoire mesurent de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres, et λ quelques centaines de nanomètres. Le rapport $\dfrac{\lambda}{a}$ est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} : l'écart angulaire vaut quelques milliradians. C'est pourquoi l'approximation des petits angles convient.

À toi : L'écart angulaire de la fente la plus fine

Calcule l'écart angulaire obtenu avec la fente de $40{,}0\,\mu\text{m}$ et le laser rouge de $633\,\text{nm}$. Vérifie que c'est un petit angle. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Applique la relation de l'écart angulaire de diffraction.

Indice 2

Convertis λ et a en mètres avant de diviser.

Indice 3

Point délicat : μ vaut 10^{-6} et n vaut 10^{-9} ; une erreur de préfixe fausse le résultat d'un facteur mille.

Réponse

On convertit : $a = 4{,}00 \times 10^{-5}\,\mathrm{m}$ et $\lambda = 6{,}33 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$.

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{\lambda}{a} \\ &= \frac{6{,}33 \times 10^{-7}}{4{,}00 \times 10^{-5}} \\ &= 1{,}58 \times 10^{-2}\,\mathrm{rad}\end{aligned}$$

C'est moins de $0{,}05\,\mathrm{rad}$: l'angle est petit. Il vaut le double de celui de la fente de $80{,}0\,\mu\mathrm{m}$, et deux fois et demie celui de la fente de $100\,\mu\mathrm{m}$.

Largeur de la tache centrale sur l'écran

De l'angle à la largeur sur l'écran

Devine : Reculer l'écran

Avec la même fente et le même laser, on recule l'écran jusqu'à doubler sa distance à la fente. Que devient la largeur de la tache centrale ?

A. Elle double.

Juste.

Juste : à angle fixe, l'écart entre deux directions est proportionnel à la distance.

B. Elle ne change pas : l'angle est le même.

Faux.

L'angle est le même, mais deux directions s'écartent davantage loin de la fente.

C. Elle est divisée par deux.

Faux.

La tache s'élargit en s'éloignant de la fente : elle ne rétrécit pas.

D. Elle est multipliée par quatre.

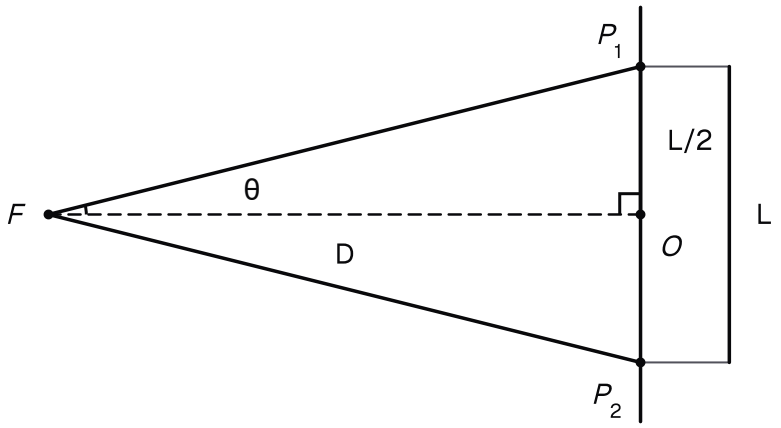
Faux.

La largeur est proportionnelle à la distance, pas à son carré.

Correction

> L'écart angulaire ne dépend que de λ et de a : il ne change pas. Deux directions qui font un angle fixe s'écartent proportionnellement à la distance parcourue. À une distance double, la tache est deux fois plus large. Cette section en tire la relation.

En clair. Sur l'écran, on ne mesure pas un angle mais une longueur : la largeur L de la tache centrale, d'une extinction à l'autre. Un triangle rectangle relie L, la distance D entre la fente et l'écran, et l'écart angulaire θ.



Géométrie de la tache, schéma non à l'échelle : triangle rectangle en O, de côtés D et L/2, d'angle θ au sommet F.

Un outil de mathématiques admis. Pour un angle θ petit, exprimé en radians, $\tan\theta \approx \theta$. Par exemple, $\tan(0{,}0100)$ et $0{,}0100$ ne diffèrent qu'au septième chiffre après la virgule.

Pour $\theta < 0{,}05\,\text{rad}$, l'écart relatif reste inférieur à $0{,}1\,\%$.

Établir la largeur de la tache

Pourquoi est-ce vrai ? Le triangle de la figure donne la tangente de θ en fonction de L et de D. L'approximation des petits angles remplace la tangente par θ. L'écart angulaire de diffraction fait alors le lien avec λ et a.

Propriété : Largeur de la tache centrale sur un écran

Un écran est placé à la distance D de la fente ou du fil, perpendiculairement au faisceau, avec D grand devant la largeur L de la tache centrale. Cette largeur vaut

$$L = \frac{2\lambda D}{a}.$$

Démonstration

Étape 1. Le milieu de la fente, le centre de la tache et une extrémité de la tache forment un triangle rectangle au centre de la tache. L'angle au sommet placé sur la fente est l'écart angulaire θ, et le côté opposé mesure $\frac{L}{2}$:

$$\tan\theta = \frac{L}{2D}.$$

Étape 2. Comme L est petit devant D, l'angle θ est petit. Exprimé en radians, il vérifie l'approximation $\tan\theta \approx \theta$, donc $\theta \approx \frac{L}{2D}$.

Étape 3. D'après l'écart angulaire de diffraction, $\theta = \frac{\lambda}{a}$. En rapprochant les deux expressions :

$$\frac{L}{2D} \approx \frac{\lambda}{a}, \quad \text{soit} \quad L \approx \frac{2\lambda D}{a}.$$

Étape 4. Tant que θ reste petit, l'écart dû à l'approximation est négligeable devant la précision des mesures : on écrit $L = \frac{2\lambda D}{a}$.

À retenir : Égaler deux expressions de l'écart angulaire

Le geste : écrire θ de deux façons. La géométrie donne $\theta = \frac{L}{2D}$, par la demi-largeur et les petits angles. La diffraction donne $\theta = \frac{\lambda}{a}$. On égale les deux expressions, puis on isole L.

Vérifie : L'argument qui supprime la tangente

Dans la preuve, quel argument permet de passer de $\tan\theta = \frac{L}{2D}$ à $\theta = \frac{L}{2D}$?

A. L'écart angulaire de diffraction, $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

Faux.
Il sert à l'étape 3, pour faire apparaître λ et a.

B. L'approximation $\tan\theta \approx \theta$, car L est petit devant D.

Juste.
Juste : c'est l'étape 2 de la preuve.

C. Le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle.

Faux.
Pythagore relie trois longueurs ; il ne relie pas une tangente à un angle.

Correction

L'étape 2 utilise l'hypothèse « L petit devant D » : l'angle θ est petit et, en radians, $\tan\theta \approx \theta$.

L'étape 3 emploie ensuite l'écart angulaire de diffraction.

Exemple : La tache de la fente de cent micromètres

On reprend la fente de $100\,\mu\text{m}$ et le laser rouge : $\theta = 6{,}33 \times 10^{-3}\,\text{rad}$. L'écran est à $D = 2{,}00\,\text{m}$. Comme $L = \dfrac{2\lambda D}{a} = 2D\,\theta$:

$$\begin{aligned} L &= 2 \times 2{,}00 \times 6{,}33 \times 10^{-3} \\ &= 2{,}53 \times 10^{-2}\,\text{m} \end{aligned}$$

La tache centrale mesure $25{,}3\,\text{mm}$: elle se mesure à la règle.

Lire une tache sur l'écran

Méthode : Exploiter une figure de diffraction pour obtenir une longueur d'onde

1. **Relève** la largeur L de la tache centrale, d'une extinction à l'autre, et la distance D entre la fente et l'écran. Convertis-les en mètres.
2. **Calcule** l'écart angulaire $\theta = \dfrac{L}{2D}$, en radians.
3. **Utilise** $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$: $\lambda = a\,\theta$ si la largeur a est connue, $a = \dfrac{\lambda}{\theta}$ si la longueur d'onde est connue.
4. **Conclus** avec l'unité et les chiffres significatifs.

Exemple : La longueur d'onde tirée de la fente de quarante micromètres

Avec la fente de $40{,}0\,\mu\text{m}$, on mesure à la règle $L = 64\,\text{mm}$, à $D = 2{,}00\,\text{m}$.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{L}{2D} = \frac{0{,}064}{4{,}00} \\ &= 1{,}6 \times 10^{-2}\,\text{rad} \end{aligned}$$

Puis

$$\begin{aligned} \lambda &= a\,\theta \\ &= 4{,}00 \times 10^{-5} \times 1{,}6 \times 10^{-2} \\ &= 6{,}4 \times 10^{-7}\,\text{m} \end{aligned}$$

Soit environ $640\,\text{nm}$, proche des $633\,\text{nm}$ du fabricant.

Attention : La demi-largeur de la tache sert au calcul de θ

✗ « $\tan\theta = \dfrac{L}{D}$ »

✓ L'écart angulaire est vu sous la **demi-largeur** de la tache : $\tan\theta = \dfrac{L}{2D}$.

Oublier le facteur 2 donne un écart angulaire, puis une longueur d'onde, deux fois trop grands. Avec la fente de $40{,}0\ \mu\text{m}$, on trouverait $1\,280\ \text{nm}$: une radiation infrarouge, invisible, alors que la tache est rouge.

Vérifie : Le choix d'un écran éloigné

Pourquoi place-t-on l'écran à $2{,}00\ \text{m}$ de la fente, plutôt que tout près d'elle ?

A. Pour que l'écart angulaire θ soit plus grand.

Faux.

θ ne dépend que de λ et de a, pas de D.

B. Pour que la tache soit assez large pour une mesure précise.

Juste.

Juste : la largeur est proportionnelle à la distance.

C. Pour laisser à la lumière le temps de se diffracter.

Faux.

La diffraction a lieu à la fente ; la distance ne change que la taille de la tache.

D. Pour que l'approximation des petits angles soit valable.

Faux.

θ est petit quelle que soit la distance : il ne dépend pas de D.

Correction

La largeur $L = 2D\,\theta$ est proportionnelle à D. À $2{,}00\ \text{m}$, la tache de la fente de $100\ \mu\text{m}$ mesure environ $25\ \text{mm}$: une erreur de lecture de $1\ \text{mm}$ fait $4\ \%$ d'écart. Un écran dix fois plus proche donnerait une tache dix fois plus petite, et un écart dix fois plus grand.

À toi : La largeur de la fente réglable

On règle la fente réglable à une largeur inconnue. Avec le laser de $633\ \text{nm}$ et l'écran à $D = 2{,}00\ \text{m}$, la tache centrale mesure $L = 36\ \text{mm}$. Calcule l'écart angulaire, puis la largeur a de la fente. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Suis la méthode : l'écart angulaire d'abord, à partir de L et de D.

Indice 2

Isole ensuite a dans la relation de l'écart angulaire de diffraction.

Indice 3

Point délicat : L est la largeur totale ; le triangle en utilise la moitié.

Réponse

$$\theta = \frac{L}{2D} = \frac{0{,}036}{4{,}00}$$
$$= 9{,}0 \times 10^{-3}\ \text{rad}$$

Puis

$$\begin{aligned} a &= \frac{\lambda}{\theta} \\ &= \frac{6{,}33 \times 10^{-7}}{9{,}0 \times 10^{-3}} \\ &= 7{,}0 \times 10^{-5}\,\mathrm{m} \end{aligned}$$

La fente mesure environ $70\,\mu\mathrm{m}$, entre les fentes de 60 et de $80\,\mu\mathrm{m}$.

Montage de diffraction et vérification de θ = λ/a

Proposer le montage

Devine : Le graphique qui teste la relation

Si la relation $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ est juste, que donne le graphique de θ en fonction de $\dfrac{1}{a}$, pour un même laser ?

A. Une courbe qui descend, de plus en plus lentement.

Faux.

C'est l'allure de θ en fonction de a, pas de $\dfrac{1}{a}$.

B. Une droite qui passe par l'origine, de pente λ.

Juste.

Juste : θ est proportionnel à $\dfrac{1}{a}$.

C. Une droite qui coupe l'axe vertical au-dessus de l'origine.

Faux.

La relation n'a pas de terme constant : pour $\dfrac{1}{a}$ nul, θ est nul.

D. Une droite horizontale : θ ne dépend que de λ.

Faux.

θ dépend aussi de a.

Correction

On écrit $\theta = \lambda \times \dfrac{1}{a}$: θ est proportionnel à $\dfrac{1}{a}$, de coefficient λ. Le graphique est une droite qui passe par l'origine ; sa pente est la longueur d'onde. Le graphique de θ en fonction de a serait une courbe, plus difficile à tester.

Vérifie : L'ordre des éléments du montage

Tu proposes le schéma du montage. Dans quel ordre places-tu les éléments, sur une même ligne ?

A. Laser, puis écran, avec la fente collée à l'écran.

Faux.

La tache s'étale sur la distance D : la fente doit être loin de l'écran.

B. Fente, puis laser, puis écran.

Faux.

La lumière doit traverser la fente : elle se place entre le laser et l'écran.

C. Laser, fente près de lui, écran loin, règle sur l'écran.

Juste.

Juste : la lumière va du laser à la fente, puis de la fente à l'écran.

Correction

La lumière va du laser à la fente, puis de la fente à l'écran. La fente se place à quelques centimètres du laser, perpendiculaire au faisceau. L'écran, à $D = 2{,}00\,\mathrm{m}$, porte une feuille où l'on repère les extinctions. Une règle mesure L, un mètre ruban mesure D.

Méthode : Montage, protocole et exploitation de la diffraction

Montage. Sur une table, dans l'ordre : le laser hélium-néon, une fente verticale à quelques centimètres, puis un écran blanc à $D = 2{,}00\,\mathrm{m}$ de la fente. Le schéma est celui du début du chapitre, vu de dessus.

Protocole. On mesure D au mètre ruban. Pour chaque fente, on marque au crayon les deux premières extinctions, puis on mesure L à la règle, au millimètre.

Sécurité. Ne regarde jamais le faisceau, ni directement ni par réflexion sur un objet brillant. Garde-le à l'horizontale, sous le niveau des yeux.

Exploitation. On calcule θ et $\dfrac{1}{a}$ pour chaque fente, puis on trace θ en fonction de $\dfrac{1}{a}$.

Vérifie : Une précaution avec le laser

Pourquoi garde-t-on le faisceau sous le niveau des yeux ?

A. Pour qu'aucun faisceau, direct ou réfléchi, n'entre dans un œil.

Juste.

Juste : c'est une consigne de sécurité.

B. Pour que la tache soit plus nette sur l'écran.

Faux.

La hauteur du faisceau ne change pas la netteté de la tache.

C. Pour que l'écart angulaire soit plus petit.

Faux.

θ ne dépend que de λ et de a.

Correction

> Même peu puissant, un faisceau laser concentre sa lumière sur une très petite surface de la rétine et peut la brûler. On le garde sous le niveau des yeux, et on écarte les objets brillants qui le réfléchiraient.

Les mesures des cinq fentes

Méthode : Vérifier la relation de l'écart angulaire par des mesures

1. **Mesure**, à distance D fixée, la largeur L de la tache centrale pour plusieurs fentes de largeurs a connues.
2. **Calcule** pour chaque fente $\theta = \dfrac{L}{2D}$ et $\dfrac{1}{a}$.
3. **Trace** θ en fonction de $\dfrac{1}{a}$: si la relation est juste, les points s'alignent sur une droite qui passe par l'origine.
4. **Lis** la pente de la droite : elle est égale à λ. Compare-la à la valeur du fabricant par l'écart relatif : la valeur absolue de la différence, divisée par la valeur de référence, exprimée en pourcentage.

Les mesures, à $D = 2{,}00\,\text{m}$, sont les suivantes :

a (μm)	L (mm)	$1/a$ ($10^4\,\text{m}^{-1}$)	θ (10^{-3} rad)
40,0	64	2,50	16
60,0	44	1,67	11
80,0	32	1,25	8,0
100	26	1,00	6,5
120	22	0,833	5,5

Exemple : Une ligne du tableau calculée

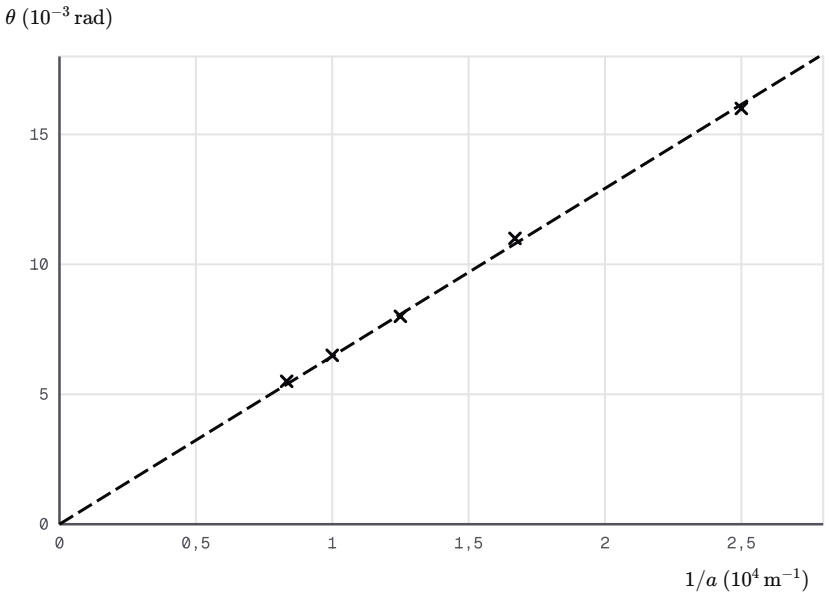
Pour la fente de $60{,}0\,\mu\text{m}$, on calcule

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{6{,}00 \times 10^{-5}} = 1{,}67 \times 10^{4}\,\text{m}^{-1}$$

et, avec $L = 44\,\text{mm}$,

$$\theta = \frac{L}{2D} = \frac{0{,}044}{4{,}00} = 1{,}1 \times 10^{-2}\,\text{rad}$$

soit $11 \times 10^{-3}\,\mathrm{rad}$, la valeur du tableau.



× *Mesures* – – – (libellé indisponible)

Écart angulaire mesuré en fonction de 1/a pour les cinq fentes, et droite de modélisation passant par l'origine.

Droite de modélisation calculée par moindres carrés sur 5 points : y = a x, avec a ≈ 6,462.

Pente et écart relatif

Exemple : La pente de la droite comparée au fabricant

Les points sont presque alignés sur une droite passant par l'origine : θ est proportionnel à $\dfrac{1}{a}$. La pente vaut environ $6{,}46$, en $10^{-3}\,\mathrm{rad}$ par $10^{4}\,\mathrm{m}^{-1}$, soit $6{,}46 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$.

Les mesures de L ont deux chiffres significatifs : $\lambda \approx 6{,}5 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$. Pour l'écart relatif avec les $633\,\mathrm{nm}$ du fabricant, on garde la valeur non arrondie :

$$\frac{6{,}46 - 6{,}33}{6{,}33} \approx 0{,}02$$

soit environ $2\,\%$.

Vérifie : Ce que montre une droite par l'origine

Pourquoi l'alignement des points sur une droite par l'origine vérifie-t-il la relation $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$?

A. Parce que θ augmente quand a augmente.

Faux.

Les mesures montrent l'inverse : θ diminue quand a augmente.

B. Parce que la pente vaut exactement $633\,\mathrm{nm}$.

Faux.

La pente vaut environ $6{,}5 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$, et non exactement $633\,\mathrm{nm}$: la vérification se fait à la précision des mesures.

C. Parce que θ est alors proportionnel à $\dfrac{1}{a}$.

Juste.

Juste : c'est exactement la forme que prévoit la relation.

D. Parce que les cinq fentes ont la même largeur.

Faux.

Les cinq largeurs sont différentes : c'est ce qui fait varier $\dfrac{1}{a}$.

Correction

Une droite par l'origine traduit une proportionnalité : $\theta = k \times \dfrac{1}{a}$. La relation prévoit exactement cette forme, avec $k = \lambda$. La pente mesurée rejoint la longueur d'onde du fabricant à environ $2\,\%$.

Vérifie : La mesure la plus sensible à la lecture

Pour quelle fente une erreur de lecture de $1\,\mathrm{mm}$ sur L pèse-t-elle le plus ?

A. La fente de $40{,}0\,\mu\mathrm{m}$.

Faux.

Sa tache est la plus large : $1\,\mathrm{mm}$ y fait moins de $2\,\%$.

B. La fente de $80{,}0\,\mu\mathrm{m}$.

Faux.

Sur sa tache de $32\,\mathrm{mm}$, $1\,\mathrm{mm}$ fait environ $3\,\%$.

C. La fente de $120\,\mu\mathrm{m}$.

Juste.

Juste : elle donne la tache la plus étroite.

Correction

L'écart relatif dû à la lecture vaut $\dfrac{1\,\mathrm{mm}}{L}$. Il est le plus grand pour la tache la plus étroite, celle de la fente de $120\,\mu\mathrm{m}$: $\dfrac{1}{22}$, soit près de $5\,\%$. Les fentes fines donnent des mesures plus précises.

Autres sources d'erreur. Une extinction n'est pas un trait net, mais une zone sombre. Ici, chaque largeur mesurée dépasse un peu la valeur calculée par $L = \dfrac{2\lambda D}{a}$: les bords ont été placés un peu trop loin du centre. Cela relève la pente au-dessus de $633\,\mathrm{nm}$. S'y ajoutent la mesure de D et la tolérance du fabricant sur a.

Une pente tirée d'un seul point

À toi : Un seul point contre cinq

Sans tracer la droite, un élève calcule la pente à partir du seul point de la fente de $40{,}0\ \mu\mathrm{m}$ et de l'origine. Calcule cette pente, puis son écart relatif avec $633\ \mathrm{nm}$. Pourquoi la droite des cinq points est-elle plus sûre ? Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Pour une droite par l'origine, la pente vaut θ divisé par $\dfrac{1}{a}$, en l'un de ses points.

Indice 2

Lis θ dans le tableau, avec sa puissance de dix.

Indice 3

Point délicat : diviser par $\dfrac{1}{a}$ revient à multiplier par a ; vérifie que la pente est en mètres.

Réponse

$$\begin{aligned} k &= \theta \times a \\ &= 1{,}6 \times 10^{-2} \\ &\quad \times 4{,}00 \times 10^{-5} \\ &= 6{,}4 \times 10^{-7}\ \mathrm{m} \end{aligned}$$

L'écart relatif vaut $\dfrac{6{,}4 - 6{,}33}{6{,}33} \approx 0{,}01$, soit environ $1\,\%$. Ce bon accord tient en partie au hasard : un seul point porte toute son erreur de lecture. La droite des cinq points compense ces erreurs entre elles.

À retenir : Une relation vérifiée dans les limites du montage

Une expérience ne prouve pas une relation : elle la met à l'épreuve.

Ici, θ est proportionnel à $\dfrac{1}{a}$, et la pente rejoint λ à environ $2\,\%$, l'ordre de grandeur des erreurs de lecture. La relation de l'écart angulaire est vérifiée, à la précision du montage.

Indice de réfraction et longueur d'onde dans un milieu

La lumière ralentit dans la matière

Devine : Le faisceau du laser dans l'eau

Le faisceau du laser traverse maintenant une cuve d'eau. Dans l'eau, la lumière va moins vite que dans l'air. Sa couleur change-t-elle ?

A. Oui, elle tire vers le bleu, car l'onde ralentit.

Faux.

Ralentir change la longueur d'onde, pas la fréquence : la couleur reste la même.

B. Oui, elle devient invisible, dans l'infrarouge.

Faux.

La lumière du laser reste visible dans l'eau : on suit le faisceau rouge dans la cuve.

C. Non, elle reste rouge : la source fixe la fréquence.
Juste.
Juste : la couleur est liée à la fréquence, imposée par la source.

Correction
La fréquence d'une radiation est fixée par la source : l'eau transmet les oscillations au rythme du laser. La couleur, liée à la fréquence, ne change pas. Ce qui change, c'est la célérité, et donc la longueur d'onde.

Une mesure. Des mesures donnent la célérité de la lumière du laser dans deux milieux transparents : environ $2{,}26 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ dans l'eau, et $1{,}97 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ dans le verre crown.

Dans les deux cas, $v < c$. On compare les milieux par le rapport $\dfrac{c}{v}$.

Définition : Indice de réfraction d'un milieu transparent

Dans un milieu transparent, une radiation de fréquence ν se propage avec une célérité v inférieure à c. L'**indice de réfraction** du milieu pour cette radiation est

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

C'est un nombre sans unité, supérieur à 1 dans un milieu matériel ; il vaut 1 dans le vide et environ $1{,}00$ dans l'air.

Exemple : L'indice de l'eau pour la lumière du laser

Dans l'eau, $v = 2{,}26 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$:

$$\begin{aligned} n &= \frac{c}{v} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{2{,}26 \times 10^{8}} \\ &= 1{,}33 \end{aligned}$$

Dans le verre crown, $n = \dfrac{3{,}00}{1{,}97} = 1{,}52$. Plus l'indice est grand, plus la lumière est lente dans le milieu.

Vérifie : Un indice impossible

Un élève trouve, pour un verre, un indice $n = 0{,}66$. Que penses-tu de ce résultat ?

A. Il est plausible pour un verre très léger.
Faux.

Pour la lumière visible, aucun milieu transparent usuel n'a un indice inférieur à 1 : ce serait $v > c$.

B. Il est juste, mais il faut l'écrire en $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

Faux.
Un indice est un quotient de deux célérités : il n'a pas d'unité.

C. Il est faux : un indice est un nombre entier.

Faux.
Le verdict est juste, mais la raison est fausse : un indice n'a pas à être entier, celui de l'eau vaut $1{,}33$. C'est $v > c$ qui rend $0{,}66$ impossible.

D. Il est faux : il donnerait $v > c$.

Juste.
Juste : $n < 1$ voudrait dire $v > c$.

Correction
$n = \dfrac{c}{v}$, et $v < c$ dans un milieu transparent usuel, pour la lumière visible : donc $n > 1$. Un indice de $0{,}66$ donnerait une célérité plus grande que c, ce qui est impossible. L'élève a sans doute calculé $\dfrac{v}{c}$ au lieu de $\dfrac{c}{v}$.

Une fréquence fixée par la source

Propriété : Fréquence d'une radiation d'un milieu à l'autre

Lorsqu'une radiation monochromatique passe d'un milieu transparent à un autre, sa **fréquence** ν ne change pas. Sa célérité et sa longueur d'onde, elles, changent. La couleur perçue est liée à la fréquence.

Exemple : La radiation du laser garde sa fréquence dans l'eau

Dans l'air comme dans l'eau, la radiation du laser a la fréquence $\nu = 4{,}74 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$ calculée plus haut. Sa période reste $T = 2{,}11 \times 10^{-15}\,\mathrm{s}$. Seules sa célérité et sa longueur d'onde changent.

Cette propriété est admise : la source impose le rythme des oscillations, et chaque milieu le transmet.

Attention : La fréquence ne change pas d'un milieu à l'autre

✗ « Dans l'eau, la lumière du laser ralentit, donc sa fréquence diminue. »

✓ En entrant dans l'eau, une radiation ralentit et sa longueur d'onde diminue, mais sa fréquence reste la même.

La couleur ne change donc pas : la lumière rouge reste rouge dans l'eau, même si λ' y est plus petite que λ.

Établir la longueur d'onde dans un milieu

Pourquoi est-ce vrai ? Dans le milieu, l'onde parcourt encore une longueur d'onde par période, mais à la célérité v. La période est celle de la source. Comme v est plus petite que c, la longueur d'onde est plus courte que dans le vide.

Propriété : Longueur d'onde dans un milieu transparent

Une radiation de longueur d'onde λ dans le vide entre dans un milieu transparent d'indice n. Sa longueur d'onde λ' dans ce milieu est

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n}.$$

Démonstration

Étape 1. Dans le milieu, l'onde parcourt la distance λ' pendant une période $T = \frac{1}{\nu}$, à la célérité v : $\lambda' = v\,T = \frac{v}{\nu}$.

Étape 2. La fréquence ne change pas d'un milieu à l'autre : ν est la même que dans le vide.

Étape 3. D'après la définition de l'indice de réfraction, $v = \frac{c}{n}$. Donc

$$\lambda' = \frac{c}{n\,\nu}.$$

Étape 4. D'après la relation entre longueur d'onde et fréquence dans le vide, $\frac{c}{\nu} = \lambda$. Finalement $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$.

À retenir : Remplacer v par c/n, puis reconnaître la longueur d'onde dans le vide

Le geste : partir de $\lambda' = \frac{v}{\nu}$, écrite dans le milieu. On remplace v par $\frac{c}{n}$, d'après la définition de l'indice. La fréquence inchangée permet enfin de reconnaître $\frac{c}{\nu} = \lambda$, la longueur d'onde dans le vide.

Vérifie : La fréquence commune au vide et au milieu

Dans la preuve, pourquoi peut-on utiliser la même fréquence ν dans le milieu et dans le vide ?

A. Parce que la fréquence ne change pas d'un milieu à l'autre.

Juste.

Juste : c'est l'étape 2 de la preuve.

B. Parce que l'indice vaut 1 dans le vide.

Faux.
C'est vrai, mais cela ne dit rien de ν ; l'indice sert à l'étape 3.

C. Parce que la célérité est la même dans les deux milieux.
Faux.
Elle change : $v = \dfrac{c}{n}$.

D. Parce que la longueur d'onde est la même partout.
Faux.
C'est justement la longueur d'onde qui change.

Correction
L'étape 2 de la preuve utilise la propriété admise : la fréquence d'une radiation ne change pas d'un milieu à l'autre. C'est elle qui permet de reconnaître $\dfrac{c}{\nu} = \lambda$ à l'étape 4.

La radiation rouge dans l'eau

Exemple : La longueur d'onde du laser dans l'eau

Le laser de $\lambda = 633\,\text{nm}$ éclaire l'eau, d'indice $n = 1{,}33$:

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n} = \frac{633}{1{,}33} = 476\,\text{nm}$$

Dans le vide, cette longueur d'onde serait celle d'un bleu. Pourtant, la lumière reste rouge dans l'eau : la couleur suit la fréquence.

Méthode : Déterminer l'indice d'un milieu et la longueur d'onde dans ce milieu

1. **Identifie** la radiation par sa fréquence ν ou par sa longueur d'onde λ dans le vide.
2. **Calcule** l'indice $n = \dfrac{c}{v}$ si la célérité v dans le milieu est donnée, ou la célérité $v = \dfrac{c}{n}$ si l'indice est donné.
3. **Calcule** la longueur d'onde dans le milieu, $\lambda' = \dfrac{\lambda}{n}$; la fréquence reste ν.
4. **Contrôle** : $n > 1$, $v < c$ et $\lambda' < \lambda$.

À toi : La lumière du laser dans le verre crown

Le faisceau du laser, de $633\,\text{nm}$, traverse un bloc de verre crown d'indice $n = 1{,}52$. Calcule la célérité de la lumière dans ce verre, puis sa longueur d'onde. Quelle est sa fréquence ? Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.

Indice 1

Utilise la définition de l'indice de réfraction pour la célérité.

Indice 2

Puis la relation de la longueur d'onde dans un milieu transparent.

Indice 3

Point délicat : la fréquence ne se recalcule pas ; c'est celle du vide.

Réponse

$$\begin{aligned} v &= \frac{c}{n} \\ &= \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{1{,}52} \\ &= 1{,}97 \times 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}} \end{aligned}$$

Puis

$$\begin{aligned} \lambda' &= \frac{\lambda}{n} \\ &= \frac{633}{1{,}52} \\ &= 416\,\mathrm{nm} \end{aligned}$$

La fréquence reste $\nu = 4{,}74 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$, et la lumière reste rouge dans le verre.

Milieux dispersifs et dispersion par un prisme

La lumière blanche à travers un prisme

On envoie un fin faisceau de lumière blanche, issu de la lampe à incandescence, sur un prisme de verre crown. Un écran recueille la lumière qui sort du prisme.

Devine : Ce que recueille l'écran

Que recueille l'écran placé après le prisme ?

A. Une tache blanche, simplement déplacée.

Faux.

Le faisceau est bien dévié, mais toutes les radiations ne le sont pas autant.

B. Une tache rouge : le verre absorbe les autres couleurs.

Faux.

Le verre crown est transparent pour tout le visible.

C. Une bande colorée, du rouge au violet.

Juste.

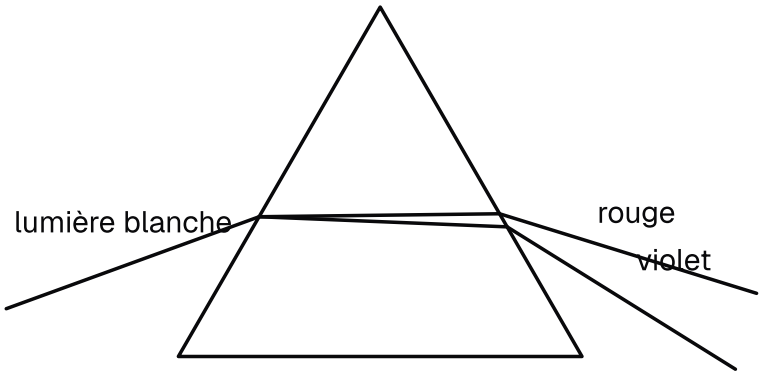
Juste : le prisme sépare les radiations de la lumière blanche.

D. Une tache violette : le verre colore la lumière.

Faux.

Un prisme ne crée aucune couleur : il sépare celles que contient la lumière blanche.

Correction
L'écran montre une bande colorée, du rouge au violet : le **spectre** de la lumière blanche. Le prisme ne fabrique pas les couleurs : il sépare les radiations que la lumière blanche contient, en les déviant inégalement. Le violet est le plus dévié, le rouge le moins.



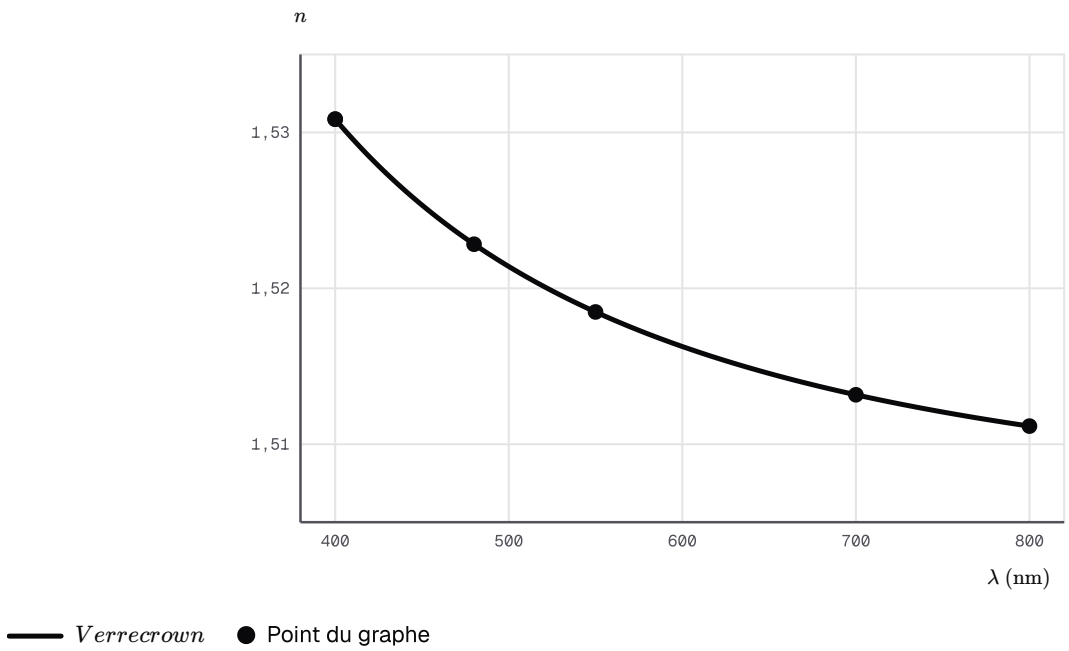
Prisme vu en coupe, schéma non à l'échelle : l'écart entre les deux couleurs est exagéré. Le violet est plus dévié que le rouge.

Un indice pour chaque radiation

Une mesure. L'indice du verre crown dépend de la radiation :

Couleur	λ (nm)	n
violet	400	$1{,}531$
bleu	480	$1{,}523$
vert	550	$1{,}518$
rouge	700	$1{,}513$

L'indice diminue du violet au rouge. L'écart entre ces deux couleurs reste inférieur à $0{,}02$.



Indice du verre crown en fonction de la longueur d'onde dans le vide, sur le spectre visible : il décroît du violet au rouge.

Définition : Milieu dispersif pour la lumière

Un milieu transparent est **dispersif** lorsque la célérité de la lumière dans ce milieu, donc son indice de réfraction, dépend de la fréquence de la radiation. Le vide n'est pas dispersif. Le verre et l'eau le sont, plus ou moins selon le matériau.

Vérifie : L'indice du vide

Dans le vide, toutes les radiations ont la célérité c. Que vaut l'indice du vide pour le violet et pour le rouge ?

A. Il vaut 1 pour les deux : le vide n'est pas dispersif.

Juste.

Juste : $n = \dfrac{c}{c} = 1$ pour toute radiation.

B. Il est plus grand pour le violet, comme dans le verre.

Faux.

Dans le vide, $v = c$ pour toutes les radiations.

C. Il est plus grand pour le rouge, de plus grande longueur d'onde.

Faux.

Dans le vide, $v = c$ pour toutes les radiations : l'indice est le même.

Correction

> On a $n = \dfrac{c}{v}$, avec $v = c$ pour toutes les radiations : $n = 1$, quelle que soit la fréquence. Le vide n'est pas dispersif. La lumière d'une étoile lointaine nous arrive donc avec toutes ses couleurs en même temps.

L'eau aussi. L'indice de l'eau passe d'environ $1{,}331$ dans le rouge à $1{,}343$ dans le violet : elle est un peu dispersive. Les gouttes de pluie séparent ainsi les couleurs de la lumière du Soleil, dans un arc-en-ciel.

Indice et déviation

Un lien admis. Les lois de la réfraction, qui calculent la déviation par un prisme, ne sont pas étudiées dans ce chapitre. On admet leur conséquence : plus l'indice du verre est grand pour une radiation, plus le prisme la dévie.

Propriété : Dispersion de la lumière blanche par un prisme

Un prisme de verre dévie chaque radiation d'un angle qui dépend de l'indice du verre pour cette radiation : plus l'indice est grand, plus la déviation est grande. Dans le verre, l'indice est plus grand pour le violet que pour le rouge. Un faisceau de lumière blanche est donc décomposé : le violet est le plus dévié, le rouge le moins dévié. On observe le **spectre** de la lumière blanche.

Méthode : Comparer les déviations de plusieurs radiations par un prisme

1. **Relève** l'indice du verre pour chaque radiation, dans un tableau ou sur une courbe de l'indice en fonction de la longueur d'onde.
2. **Classe** les radiations par indice décroissant.
3. **Conclus** : la radiation de plus grand indice est la plus déviée, celle de plus petit indice la moins déviée.

Exemple : L'ordre des couleurs à la sortie du prisme de crown

D'après le tableau, du plus grand indice au plus petit :

- violet : $n = 1{,}531$, le plus dévié ;
- bleu : $n = 1{,}523$;
- vert : $n = 1{,}518$;
- rouge : $n = 1{,}513$, le moins dévié.

C'est l'ordre observé sur l'écran : le violet le plus près de la base du prisme, le rouge le plus loin.

Lire un indice et faire le bilan

> **À toi : Le jaune parmi les couleurs du tableau**
>
> Une radiation jaune de $580\,\text{nm}$ traverse le même prisme de crown. Lis son indice sur la courbe, puis situe sa déviation parmi celles du tableau. Écris ta réponse avant de dévoiler la correction.
>
> **Indice 1**
> Place $580\,\text{nm}$ sur l'axe des longueurs d'onde de la courbe.
> **Indice 2**
> Compare l'indice lu à ceux du vert et du rouge.
> **Indice 3**
> Point délicat : une lecture graphique s'écrit avec $\approx$, à la précision de la courbe.
>
> **Réponse**
> Sur la courbe, à $580\,\text{nm}$, on lit $n \approx 1{,}517$. Cet indice est compris entre celui du vert, $1{,}518$, et celui du rouge, $1{,}513$.
>
> La radiation jaune est donc moins déviée que la verte et plus déviée que la rouge : elle se place entre elles sur l'écran.

Ce qu'il faut savoir faire. Pour la diffraction :

- reconnaître une diffraction et relier son importance à la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle ;
- exploiter une figure de diffraction : L, D, θ, puis λ ou a ;
- vérifier $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ par une droite θ en fonction de $\dfrac{1}{a}$.

Pour la lumière dans les milieux :

- passer de λ à ν et situer une radiation dans le spectre ;
- calculer n, v et λ', à fréquence inchangée ;
- prévoir l'ordre des déviations par un prisme.

Le mot du prof. Tu sais maintenant lire la lumière comme une onde. L'onde et ses mesures reviennent dans la suite du programme.

SOURCES

Référentiel BURHAN du chapitre « Propagation des ondes lumineuses » (2bac · pc · physique-chimie)