BURHAN

Résumé : Propagation des ondes lumineuses

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

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

Chapitre	Semestre
Propagation des ondes lumineuses	Semestre 1

Diffraction et nature ondulatoire de la lumière

Remarque : Une onde mécanique se diffracte aussi

Rappel : pour une onde mécanique sinusoïdale, la diffraction est nette quand l'ouverture rencontrée a une dimension inférieure ou égale à sa longueur d'onde, ou comparable. L'onde diffractée garde la même fréquence et la même longueur d'onde.

Pour la lumière, de longueur d'onde inférieure au micromètre, la diffraction se voit avec des ouvertures de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres.

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.

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

Fente fine. Un faisceau laser traverse une fente de $0{,}10\ \mathrm{mm}$: sur l'écran, la tache s'étale nettement.

Ouverture large. Le même faisceau traverse une fenêtre de $1{,}0\ \mathrm{cm}$: il garde sa largeur, la diffraction ne se voit pas.

Bilan. Une ouverture fine révèle le caractère ondulatoire de la lumière ; une ouverture large le masque.

Fréquence, longueur d'onde et place dans le spectre

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 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

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 $\lambda \approx 400\,\mathrm{nm}$ (violet) à $\lambda \approx 800\,\mathrm{nm}$ (rouge). Au-dessous de $400\,\mathrm{nm}$ se trouve l'ultraviolet, au-dessus de $800\,\mathrm{nm}$ l'infrarouge.

Méthode : Passer de la fréquence à la longueur d'onde

1. **Unités** : écris λ en mètres et ν en hertz avant tout calcul.
2. **Relation** : $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$, ou $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$ pour l'inverse.
3. **Résultat** : son unité, et une précision réglée sur la mesure la plus grossière.
4. **Place** : compare λ aux bornes $400\,\mathrm{nm}$ et $800\,\mathrm{nm}$ du visible.

Exemple

Donnée. Une radiation a pour fréquence $\nu = 5{,}13 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$.

Calcul.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3{,}00 \times 10^{8}}{5{,}13 \times 10^{14}}$$
$$\lambda = 5{,}85 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$$

Place. $585\,\mathrm{nm}$ est entre les deux bornes : la radiation est visible, dans la bande du jaune.

Exemple

Une télécommande émet une radiation de $940\,\mathrm{nm}$, soit $9{,}40 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$. Sa fréquence vaut $\nu = \dfrac{c}{\lambda} = 3{,}19 \times 10^{14}\,\mathrm{Hz}$. Au-dessus de $800\,\mathrm{nm}$, elle appartient à l'infrarouge : l'œil ne la voit pas.

Attention : Des bornes du visible mesurées dans le vide

Les bornes $400\,\text{nm}$ et $800\,\text{nm}$ valent pour des longueurs d'onde dans le vide ou dans l'air. Dans l'eau ou le verre, la longueur d'onde diminue alors que la couleur reste la même. Pour classer une radiation, prends sa fréquence ou sa longueur d'onde dans le vide.

Écart angulaire, longueur d'onde et largeur de l'ouverture

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

Données. Lumière bleue de $470\,\text{nm}$ et fente de $0{,}12\,\text{mm}$, soit $1{,}2\times10^{-4}\,\text{m}$.

Calcul.

$$\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{4{,}70\times10^{-7}}{1{,}2\times10^{-4}}$$
$$\theta = 3{,}9\times10^{-3}\,\text{rad}$$

Contrôle. Cet angle est bien petit devant $0{,}05\,\text{rad}$: la relation s'applique.

Attention : Angle en radians, longueurs dans la même unité

$\theta = \frac{\lambda}{a}$ ne donne un angle qu'en radians, avec λ et a dans la même unité. Ne mélange pas nanomètres et millimètres : convertis les deux en mètres. Si l'on te demande des degrés, convertis seulement le résultat final.

Attention : Largeur de fente et écart angulaire en sens contraires

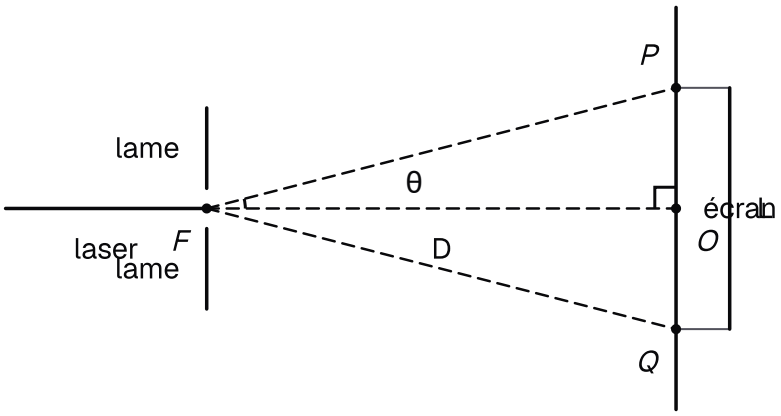
θ et a varient en sens contraires. Une fente trois fois plus étroite donne un écart angulaire trois fois plus grand, donc une tache trois fois plus large. Une ouverture de plusieurs millimètres ne montre presque aucune diffraction.

Exploiter la tache centrale relevée sur l'écran

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

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



Géométrie de la tache centrale, fente F entre deux lames, schéma sans échelle

Méthode : De la tache mesurée à la longueur d'onde

1. **Mesures** : relève L d'une extinction à l'autre, et D de la fente à l'écran ; passe en mètres.
2. **Angle** : le triangle rectangle et les petits angles donnent $\theta = \dfrac{L}{2D}$.
3. **Inconnue** : $\lambda = a\,\theta$ si tu connais la fente, $a = \dfrac{\lambda}{\theta}$ si tu connais la radiation.
4. **Écriture** : unité et chiffres significatifs des mesures.

Exemple

Mesures. Écran à $D = 1{,}20\,\mathrm{m}$ d'une fente de $0{,}21\,\mathrm{mm}$; tache centrale de largeur $L = 7{,}2\,\mathrm{mm}$.

Angle. $\theta = \dfrac{L}{2D} = \dfrac{7{,}2 \times 10^{-3}}{2{,}40} = 3{,}0 \times 10^{-3}\,\mathrm{rad}$.

Longueur d'onde. $\lambda = a\,\theta = 6{,}3 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$, soit $630\,\mathrm{nm}$: une lumière rouge.

Attention : La moitié de la tache dans le triangle

L'angle θ est vu depuis la fente sous la moitié de la tache. Écris donc $\tan\theta = \dfrac{L}{2D}$. Avec $\dfrac{L}{D}$, tu trouverais une longueur d'onde deux fois trop grande.

Montage et vérification par une série de fentes

À retenir : Le montage et sa consigne de sécurité

Sur un banc, aligne le laser, un support de fentes et un écran perpendiculaire au faisceau. Mesure D au mètre ruban et L à la règle. Prends D grand pour avoir une tache large et une lecture plus précise. Ne regarde jamais le faisceau, même réfléchi.

Méthode : Droite de l'écart angulaire en fonction de 1/a

1. **Série** : garde le laser et D, change la fente ; relève L pour chaque largeur a.
2. **Tableau** : calcule $\dfrac{1}{a}$ et $\theta = \dfrac{L}{2D}$ pour chaque fente.
3. **Graphique** : place θ en ordonnée, $\dfrac{1}{a}$ en abscisse ; une droite par l'origine confirme la relation.
4. **Pente** : son coefficient directeur est λ ; compare-le à la valeur annoncée par un écart relatif.

Exemple

La droite obtenue avec un laser annoncé à $594\,\text{nm}$ a pour coefficient directeur $6{,}05 \times 10^{-7}\,\text{m}$. L'écart relatif vaut $\dfrac{605 - 594}{594} \approx 1{,}9\,\%$: la mesure confirme la relation.

Changer de milieu transparent

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.

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.

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

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

Méthode : Indice, célérité et longueur d'onde dans un milieu

1. **Radiation** : note sa fréquence, ou sa longueur d'onde λ dans le vide.
2. **Indice ou célérité** : $n = \dfrac{c}{v}$ donne l'un quand on connaît l'autre.
3. **Milieu** : $\lambda' = \dfrac{\lambda}{n}$, et la fréquence reste celle de la source.
4. **Vérification** : n dépasse 1, v reste inférieure à c, λ' est plus courte que λ.

Exemple

Données. Une radiation jaune de $589\,\text{nm}$ entre dans du glycérol d'indice $n = 1{,}47$.

Célérité. $v = \dfrac{c}{n} = \dfrac{3{,}00 \times 10^{8}}{1{,}47} = 2{,}04 \times 10^{8}\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Longueur d'onde. $\lambda' = \dfrac{\lambda}{n} = \dfrac{589}{1{,}47} = 401\,\text{nm}$.

Fréquence. Elle vaut $5{,}09 \times 10^{14}\,\text{Hz}$ dans l'air comme dans le glycérol.

Attention : La couleur suit la fréquence

Dans le glycérol, la radiation jaune a une longueur d'onde voisine de $401\,\text{nm}$. Elle ne devient pas violette pour autant : sa fréquence n'a pas changé, et c'est la fréquence qui fixe la couleur.

Indice variable et décomposition de la lumière blanche

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.

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 : Classer les déviations d'un prisme

1. **Indices** : relève, sur le document fourni, l'indice du matériau pour chacune des radiations.
2. **Classement** : range les radiations de l'indice le plus grand au plus petit.
3. **Déviations** : le même ordre classe les radiations de la plus déviée à la moins déviée.

Exemple

Le quartz a pour indice $1{,}456$ pour une radiation rouge et $1{,}470$ pour une radiation violette. Son indice dépend de la radiation : le quartz est dispersif. Un prisme de quartz dévie donc davantage le violet que le rouge.

Formulaire et choix des méthodes

Méthode : Quelle méthode pour quelle question ?

- **Couleur ou domaine d'une radiation** : $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$ dans le vide, puis comparaison aux bornes du visible.
- **Écart angulaire** : $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$, en radians.
- **Figure sur un écran** : $\theta = \dfrac{L}{2D}$, puis λ ou a.
- **Série de fentes** : droite θ en fonction de $\dfrac{1}{a}$, pente λ.
- **Autre milieu** : $n = \dfrac{c}{v}$, $\lambda' = \dfrac{\lambda}{n}$, fréquence inchangée.
- **Prisme** : indice plus grand, déviation plus grande.

Longueur d'onde

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

Écart angulaire

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

Petits angles

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

Tache centrale

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

Indice

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

Dans un milieu

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

Visible

$$400\,\text{nm} \leq \lambda \leq 800\,\text{nm}$$

Conversions

$$1\,\text{nm} = 10^{-9}\,\text{m}$$

À retenir : Rédiger une application numérique

Écris d'abord la relation littérale, puis les valeurs converties en mètres, puis le résultat avec son unité. Garde autant de chiffres significatifs que la mesure la plus grossière. Une lecture sur une règle ou un graphique s'écrit avec $\approx$.