

CHAPITRE 1

LE DOMAINE DE L'OPTIQUE

► Nature et propriétés de la lumière – dualité onde-particule

L'optique étudie les propriétés de la lumière et ses interactions avec la matière.

La lumière est une onde électromagnétique qui se distingue des autres rayonnements par le fait qu'elle correspond à la zone de sensibilité de l'œil humain et possède de ce fait la propriété physiologique d'être « visible ». L'énergie des photons lumineux est faible : la lumière visible n'est donc pas ionisante.

QCM

On donne l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T$$

Avec : ν : fréquence, T : période, λ : longueur d'onde, c : ?

- La longueur d'onde dépend du milieu traversé
- Dans l'équation, la lettre « c » représente la vitesse de la lumière dans l'eau
- Lorsque la longueur d'onde d'une source lumineuse monochromatique augmente, sa fréquence diminue
- Le principe d'Huyghens-Fresnel décrit une manifestation de l'aspect corpusculaire de la lumière
- Les phénomènes d'interférence et de diffraction sont observables lorsque les dimensions de l'objet éclairé sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière incidente

Généralités : Comportement ondulatoire

La lumière se caractérise par sa fréquence ν en Hz (s^{-1}), sa période T en s ($=1/\nu$) et sa longueur d'onde λ en m. La célérité c (exactement, 299 792 458 m/s ; par simplification, $3 \cdot 10^8$ m/s), est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T$$

Proposition a

La longueur d'onde dépend du milieu traversé

VRAI : car la vitesse de propagation de la lumière varie selon le milieu traversé et sera plus faible dans un milieu matériel que dans le vide.

Proposition b

Dans l'équation, la lettre « c » représente la vitesse de la lumière dans l'eau

FAUX : représente la vitesse de la lumière dans le vide.

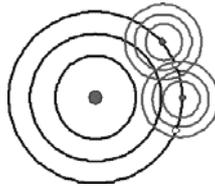
Proposition c

Lorsque la longueur d'onde d'une source lumineuse monochromatique augmente, sa fréquence diminue

VRAI : dans l'équation, v est au numérateur et λ au dénominateur et sont donc inversement proportionnelles. Une source lumineuse est dite monochromatique lorsque tous ses rayons ont la même longueur d'onde.

La lumière, comme tout rayonnement électromagnétique, peut se manifester sous un aspect ondulatoire ou corpusculaire, selon les interactions avec la matière mises en jeu. L'aspect ondulatoire se manifeste par des phénomènes d'interférence et de diffraction, lorsque les dimensions de l'objet éclairé sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière incidente.

Selon le principe d'Huyghens-Fresnel, il y a formation d'une onde sphérique à partir d'une source lumineuse ponctuelle : chaque point de ce front d'onde (ou d'un objet éclairé) peut être considéré comme la source d'une nouvelle onde sphérique, synchronisée des autres sources et en phase avec l'onde incidente.

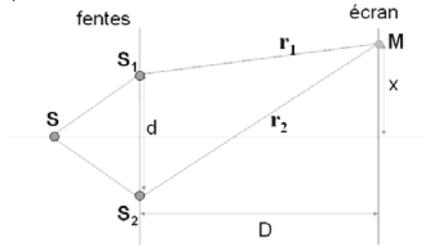
**Proposition d**

Le principe d'Huyghens-Fresnel décrit une manifestation de l'aspect corpusculaire de la lumière

FAUX : c'est une manifestation de l'aspect ondulatoire de la lumière.

Les interférences : l'expérience des « Fentes d'Young » permet d'obtenir des interférences lumineuses : entre une source lumineuse

monochromatique et un écran, on interpose une plaque percée de deux fentes qui se comportent comme des sources secondaires synchrones :



avec : r_1 et r_2 distances entre le point d'observation et S_1 et S_2 .
 d distance entre les fentes
 D distance entre l'écran et les fentes ($D \gg d$)
 x distance de M au centre de l'écran

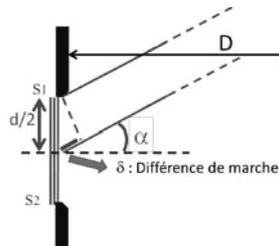
En fonction de la différence de trajet des deux ondes lumineuses émises par les deux sources secondaires S_1 et S_2 on aura :

$$E_1 = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ et } E_2 = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \Delta\varphi)$$

avec : E_0 amplitude, Ω pulsation, $\Delta\varphi$ déphasage des ondes, t temps
 Le déphasage des ondes caractérise le fait qu'une onde a un certain **retard** par rapport à l'autre. En effet, pour arriver à un point M situé sur l'écran, le chemin à parcourir n'est pas le même pour la lumière qui provient d'une source ou de l'autre (r_1 ou r_2).

Lorsque l'écran est placé loin des fentes : $r_2 - r_1 = \frac{d}{D} \cdot x$

$r_2 - r_1 = \delta$ est appelée : **différence de marche**



Proposition e

Les phénomènes d'interférence et de diffraction sont observables lorsque les dimensions de l'objet éclairé sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière incidente

VRAI : Ces phénomènes correspondent à la nature ondulatoire de la lumière. L'expérience des fentes d'Young est une application du principe de Huyghens-Fresnel.

L'intensité est répartie de manière **périodique** : $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{D} x$

Valeurs particulières :

Lorsque $r_2 - r_1 = k\lambda$: est un multiple de 2π : les ondes s'ajoutent et on obtient une frange lumineuse sur l'écran : on dit qu'il s'agit d'une **interférence constructive**.

Si $r_2 - r_1 = (2k+1)\lambda/2$: est un multiple impair de π , les ondes s'annulent et on obtient une frange sombre sur l'écran : on dit qu'il s'agit d'une **interférence destructive**.

Sur l'écran on observe ainsi des franges successivement claires et sombres, séparées d'une distance i telle que : $i = \frac{\lambda \cdot D}{d}$

Ces résultats aboutissent aux observations suivantes :

- plus les fentes sont éloignées l'une de l'autre, plus les franges sont rapprochées
- plus l'écran est éloigné, plus les franges sont espacées.

La diffraction de la lumière

Pour pousser l'approximation à sa limite, on peut étudier le cas où les rayons interfèrent à l'infini (on dit que les rayons sont parallèles entre eux). Dans la pratique, cela s'obtient en plaçant l'écran à plusieurs mètres des fentes.

La différence de marche entre deux rayons interférant entre eux vaut alors :

$$\delta = \frac{d}{2} \cdot \sin \alpha \approx d \cdot \alpha$$

Les ondes émises en S_1 et S_2 sont des ondes sphériques : leur amplitude décroît au fur et à mesure qu'elles avancent (l'amplitude de E_1 et de E_2 ne sera pas la même au point M).

Les fentes ont une certaine largeur, ce qui implique un phénomène de diffraction par chacune des fentes. En effet, une lumière qui ressort d'un petit trou n'est pas isotrope, mais est majoritairement dirigée vers l'avant.

On observe alors sur l'écran des franges d'intensité décroissante autour d'un disque central brillant, nommé « tache d'Airy ».

Notion de pouvoir séparateur

Un effet important de cette tache de diffraction, en optique physiologique, est la dégradation de la résolution (ou pouvoir séparateur) des images dans les appareils optiques, tels que le microscope, ou le télescope (mais non

pas celle de l'œil, car la tache a une taille inférieure à l'acuité visuelle). Dans ces conditions, l'image d'un point n'est pas un point, mais une tache de diffraction.

On appelle pouvoir séparateur la distance minimale entre deux points objet telle que leurs images (= tache de diffraction) soient distinctes. Cette distance doit être supérieure ou égale à r (rayon de la tache), qui est proportionnel à la longueur d'onde (pour un instrument d'optique donné) et inversement proportionnel à D . En pratique, pour augmenter le pouvoir séparateur d'un instrument d'optique, il faut diminuer la longueur d'onde de la lumière utilisée (comme dans le microscope électronique).



Etoiles : objets à visualiser ; ronds : taches de diffusion sur l'instrument d'optique. Au milieu : distance correspondant au pouvoir séparateur ; A droite : les taches de diffusion se chevauchent et les 2 objets trop rapprochés ne peuvent plus être distingués l'un de l'autre

Comportement corpusculaire

Par la mise en évidence de l'effet photoélectrique, Albert Einstein a montré que les échanges d'énergie entre les rayonnements et la matière se font de façon discontinue, sous forme de « paquets » d'énergie.

Les rayons lumineux sont donc constitués de « grains », ou quanta d'énergie : les **photons**. Il s'agit de particules de masse négligeable et charge nulle, susceptibles de se transporter à vitesse finie (inférieure ou égale à la célérité).

En étudiant le rayonnement du corps noir (objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre; alors que l'émission de lumière observée sous l'effet d'augmentation de sa température ne peut être expliquée par la théorie classique, mais seulement par la théorie quantique), Max Planck a postulé une relation de proportionnalité entre le quantum d'énergie transporté par le photon et la fréquence du rayonnement :

$$E = h\nu = \frac{h}{T} = \frac{hc}{\lambda}$$

avec h : constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s et E : énergie du photon

Les effets "quantiques" n'apparaissent que lorsqu'on s'intéresse à des phénomènes de niveau atomique (c'est-à-dire d'un ordre de grandeur comparable à h). Ainsi, dans les conditions macroscopiques ordinaires, la physique classique reste une approximation valable (h pourra être négligée).

Autres QCM

1. Quelle est, en électron-volts (eV), l'énergie d'une lumière dont la longueur d'onde dans le vide est de 500 nm ? (une seule réponse). On donne : vitesse de la lumière $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; constante de Planck $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s
 - a. 2,48 eV
 - b. 24,8 eV
 - c. 39,8 eV
 - d. $4,0 \cdot 10^{-19}$ eV
 - e. $6,0 \cdot 10^{-14}$ eV

2. L'expérience des « Fentes d'Young »
 - a. permet d'obtenir des interférences lumineuses
 - b. permet d'obtenir deux ondes lumineuses émises en phase
 - c. permet d'obtenir des franges successivement claires et sombres au niveau des sources secondaires
 - d. plus les fentes sont éloignées l'une de l'autre, plus les franges sont rapprochées
 - e. plus les fentes sont rapprochées l'une de l'autre, plus les franges sont rapprochées

Lois de propagation, diffusion et diffraction de la lumière**Généralités : Optique géométrique**

L'optique géométrique s'intéresse aux effets macroscopiques de la lumière (propagation, réflexion, réfraction). Dans ces cas, les longueurs d'onde sont petites devant les dimensions du système observé et les effets de la diffraction peuvent être négligés. Il s'agit donc d'une approximation de l'optique ondulatoire, où l'on n'émet aucune hypothèse sur la nature physique de la lumière, son mode ou sa vitesse de propagation.

En optique géométrique, on ne considère plus que le trajet des rayons lumineux, en tant que droites au sens géométrique du terme ; les angles (d'incidence, de réflexion et de réfraction) sont toujours envisagés par rapport à la normale au plan.

QCM

- L'indice de réfraction absolu est indépendant de la fréquence de la lumière incidente
- L'indice de réfraction absolu est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et celle de la lumière dans un milieu matériel; il est toujours inférieur à 1
- L'indice de réfraction relatif d'un milieu 1 par rapport à un milieu 2 s'exprime en mètres par seconde
- Le point conjugué d'un objet situé à l'infini est le point focal image
- Pour un dioptre sphérique, les distances focales sont de signe opposé et différentes en valeur absolue

Notion d'indice optique

Une onde est un phénomène qui se développe dans l'espace et dans le temps. Dans le vide, le transport d'énergie (pas de matière) se fait en ligne droite, à la vitesse **c**. Dans la matière, la propagation se fait dans un milieu transparent (la lumière visible ne pénètre pas les milieux opaques), avec une vitesse réduite, **v** : le rapport entre la vitesse de propagation de l'onde dans le vide et celle dans une substance donnée (indice de réfraction) dépend du matériau considéré, mais également de la fréquence de l'onde.

Proposition a

L'indice de réfraction absolu est indépendant de la fréquence de la lumière incidente

FAUX

L'indice absolu de réfraction d'un milieu matériel transparent **n_{abs}** est donné par :

$$n_{\text{abs}} = \frac{c}{v}$$

avec : c célérité et v vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

Proposition b

L'indice de réfraction absolu est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et celle de la lumière dans un milieu matériel; il est toujours inférieur à 1

FAUX : la première partie de la proposition est exacte mais sa seconde partie est fautive : l'indice de réfraction absolu est toujours supérieur à 1 puisque v est inférieur à c

Dans le tableau suivant figurent les valeurs d'indice optique absolu de quelques milieux matériels, pour une même fréquence v :

Matière	Indice n à $\nu = 510$ THz
Air	1,00029 (≈ 1)
Eau	1,333
Verre léger CROWN	1,517
Verre lourd FLINT	1,647
Diamant	2,417

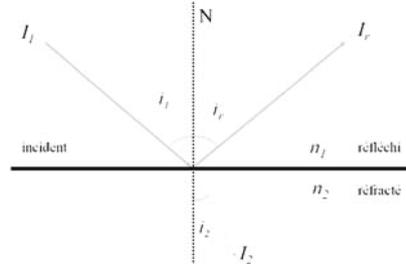
Lois de Snell-Descartes : deux grands groupes de lois régissent la propagation de la lumière :

Les lois de la **propagation rectiligne de la lumière**, selon lesquelles le trajet effectivement emprunté entre 2 points A et B est tel que le temps de parcours entre ces 2 points est minimal (la lumière prend le chemin le plus court)

Les lois de Snell-Descartes, qui concernent la **réflexion et la réfraction**.

Ces lois, qui s'appliquent à la lumière comme à d'autres ondes (ondes sonores, par exemple). Elles définissent les interactions de la lumière avec l'interface séparant deux milieux d'indice de réfraction différents.

Loi régissant la localisation des rayons dans les plans de l'espace : Le rayon incident (I_1), la normale au plan (N), le rayon réfléchi (I_r) et le rayon réfracté (I_2) sont dans le même plan.



Réflexion : une réflexion est spéculaire quand l'interface est lisse (plane). Sinon, elle est diffuse.

Loi régissant la réflexion : l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion :

$$i_i = i_r$$

L'intensité de l'onde réfléchie est fonction du rapport d'indice des deux milieux

Le **coefficient de réflexion** permet de calculer cette intensité :

$$\frac{I_r}{I_1} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$