

I.1 Introduction

Qu'est ce que la nature de lumière ?

Le modèle ondulatoire de la lumière explique les phénomènes de réfraction, réflexion, dispersion, diffraction, polarisation, et l'interférence. Il explique la propagation de la lumière. Mais il n'explique pas certains phénomènes qui se produisent avec des corps noirs (catastrophe ultraviolettes). L'approche ondulatoire atteint ses limites lors de faibles échanges énergétiques lumière-matière. Le modèle corpusculaire (ou la lumière est un ensemble de corpuscules) doit alors être introduit pour expliquer certains effets comme (l'effet photoélectrique ou la détection de photon).

La lumière est contradictoire : elle a, à la fois une nature ondulatoire et une nature corpusculaire (qui explique les échanges d'énergie entre lumière et matière à petite échelle). Ces deux aspects sont complémentaires. On parle de la dualité onde-corpuscule.

I.2 Limite du modèle ondulatoire

D'un point de vue classique (ondulatoire), la lumière est considérée comme une onde électromagnétique et qui l'on peut décrire par les équations de Maxwell. Dans le cas où, le milieu de propagation est non chargé, non magnétique et isotrope, les équations de Maxwell sont données par,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{I.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{I.3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (\text{I.4})$$

La combinaison de l'équation (I.1) et (I.2) fournit l'équation d'onde dont la solution est une onde périodique caractérisée par un vecteur d'onde lié à la fréquence par la vitesse de la lumière dans le vide.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I.5})$$

$$E = A.e^{i(kz - \omega t)} + \text{c.c.} \quad (\text{I.6})$$

Exemple d'application

Démontrer que la combinaison de l'équation (I.1) et (I.2) donne l'équation (I.5).
avec,

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}(\vec{X})) = \vec{\text{grad}}(\text{Div}(\vec{X})) - \Delta \vec{X}$$

Solution

Si on applique le rotationnel à l'équation (I.1), on obtient,

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}(\vec{E})) = \vec{\text{grad}}(\text{Div}(\vec{E})) - \Delta \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\text{rot}}(\vec{H})}{\partial t}$$

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}(\vec{E})) = \vec{\text{grad}}(\text{Div}(\vec{E})) - \Delta \vec{E} = -\varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial(\partial \vec{E})}{\partial t \partial t}$$

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}(\vec{E})) = \vec{\text{grad}}(\text{Div}(\vec{E})) - \Delta \vec{E} = -\varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

d'autre part,

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}(\vec{E})) = \vec{\text{grad}}(\text{Div}(0)) - \Delta \vec{E} (\text{Div}(\vec{E}) = 0)$$

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}(\vec{E})) = -\Delta \vec{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

C'est l'équation de propagation de l'onde dans le vide.

L'énergie transportée par l'onde est exprimée par le vecteur de Poynting $\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{H}$, et donc proportionnel au carré de l'amplitude du champ A, et comme A peut prendre

n'importe quelle valeur, donc l'énergie de l'onde électromagnétique peut aussi varier de manière continue. D'autre part, une vibration continue de l'énergie d'une onde électromagnétique est incompatible avec la réalité expérimentale. L'expérience a montré que la lumière doit être décrite par quanta d'énergie appelés Photon. Ce sont les expériences de Planck (corps noir) et l'explication d'Einstein (l'effet photoélectrique) qui ont mené à cette conclusion

I.3 Définitions et lois fondamentales

I.3.1 Rayon lumineux

La lumière (l'énergie lumineuse) est décrite par un ensemble de rayons lumineux indépendants. Ces rayons lumineux sont caractérisés par une direction de propagation donnée et une vitesse de propagation. Ces rayons lumineux se propagent en ligne droite dans tout milieu homogène à une vitesse qui dépend du milieu. Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite à la vitesse $c = 3.10^8$

I.3.2 Indice de réfraction

Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite mais à une vitesse $v = \frac{c}{n}$, où n est une grandeur sans dimension, appelé indice de réfraction.

I.3.3 Corps noir

Physiquement, un corps noir est un corps capable d'absorber complètement toutes les radiations électromagnétiques incidentes sur sa surface, sans transmission, sans réflexion et sans diffusion. Dans la nature, il n'existe pas de corps avec les caractéristiques requises, mais en laboratoire, il est possible de construire des modèles avec ces conditions. Toute enceinte isotherme (température constante), fermée à l'exception d'une très petite ouverture, joue le rôle d'un corps noir.

I.3.4 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est quasi totalement invisible pour un œil humain, sauf une petite portion dite spectre visible qui s'étend du rouge au violet en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

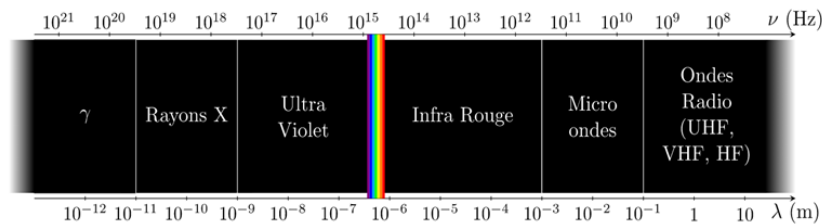


Figure I.1: Spectre électromagnétique

I.3.5 Réflexion

Lorsqu'un rayon arrive à l'interface entre deux milieux isotropes et homogènes différents, il donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon transmis (réfracté). On distingue deux types de réflexion.

- **Réflexion diffuse** est produite par une surface irrégulière.
- **Réflexion spéculaire** est produite par une surface très lisse (cas d'un miroir ou surface d'eau très calme).

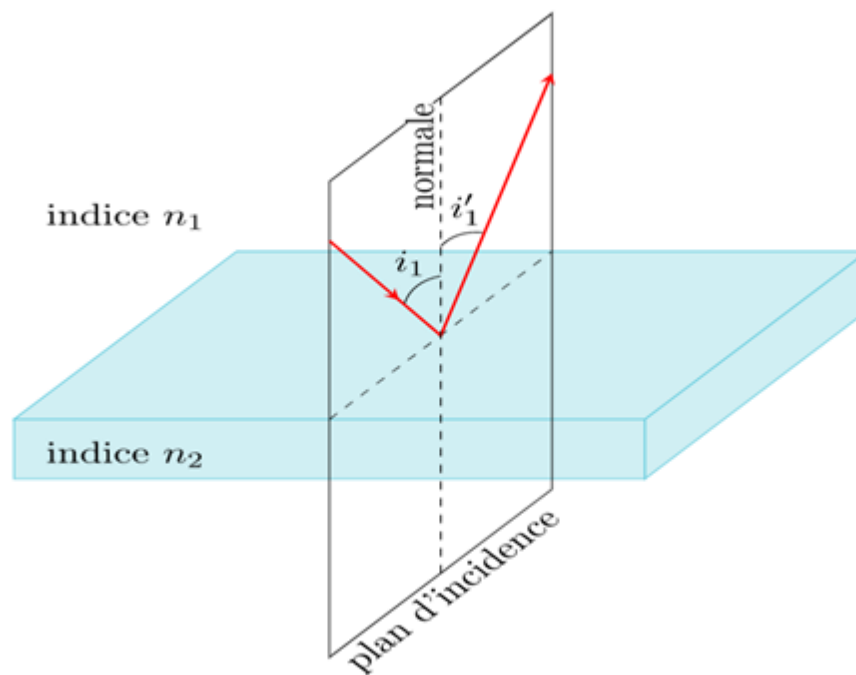


Figure I.2: Reflexion

I.3.6 Réfraction

La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices de réfraction différents.

La loi de réfraction est donnée par,

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

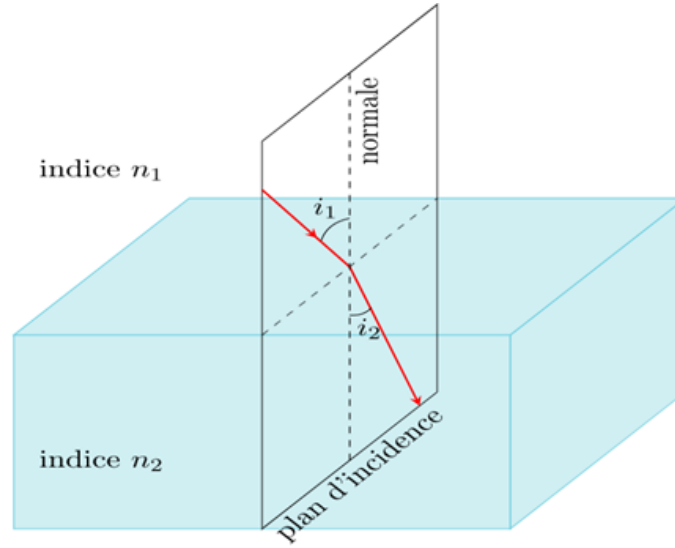


Figure I.3: réfraction

I.3.7 Réflexion totale

Si l'indice réfraction de milieu 2 inférieur au indice du milieu 1 ($n_2 < n_1$), le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Il existe alors un angle limite d'incidence tel que,

$$\sin i_l = \frac{n_2}{n_1}$$

$\forall i < i_l$, le rayon réfracté disparaît, seul le rayon réfléchi existe, on parle alors de réflexion totale car toute l'énergie se retrouve dans le rayon réfléchi.

I.3.8 Dispersion

Lorsque l'on envoie la lumière blanche à travers un prisme, on voit apparaître en sortie du prisme un faisceau divergeant. Chaque composante spectrale est déviée différemment, on dit qu'il y a dispersion. Ce phénomène provient du fait que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la lumière selon la loi de Cauchy comme,

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

avec A et B , sont des constantes.

I.3.9 Polarisation

Le champ électrique $\vec{E}$ d'une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ qui se propageant selon l'axe Oz , comme représenté dans la Figure I.3, est décrit par le système d'équations

suivant,

$$\begin{cases} E_x(z, t) = A_x \cos(\omega t - Kz + \varphi_x) \\ E_y(z, t) = A_y \cos(\omega t - Kz + \varphi_y) \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

- A_x et A_y sont les amplitudes des composantes du champ électrique,
- ω est la pulsation,
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est la norme du vecteur d'onde,
- et φ_x et φ_y sont les phases des composantes.

En posant $z=0$, et en changeant l'origine du temps, l'équation (I.7) s'écrit,

$$\begin{cases} E_x(z, t) = A_x \cos(\omega t) \\ E_y(z, t) = A_y \cos(\omega t + \Delta\varphi) \end{cases} \quad (\text{I.8})$$

où $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$, est le déphasage entre les deux composantes $E_x(z, t)$ et $E_y(z, t)$.

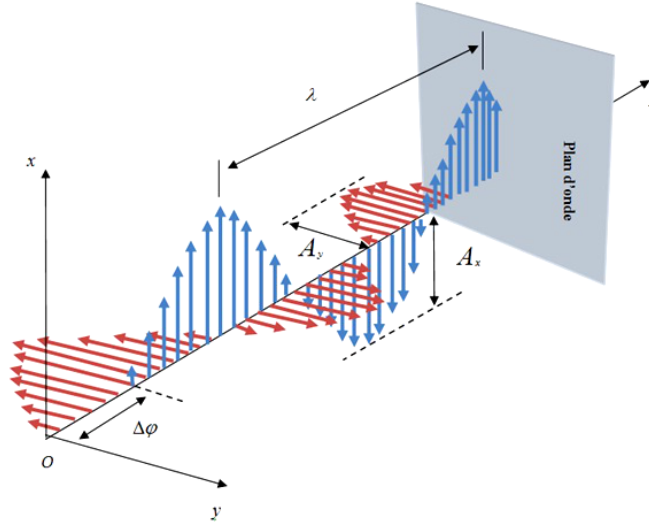


Figure I.4: Schéma de propagation des composantes de l'onde lumineuse.

I.3.9.1 Etats de polarisations d'une onde lumineuse

L'état de polarisation d'une onde est défini par la courbe décrite par l'extrémité du vecteur champ électrique en fonction du temps, projetée sur le plan orthogonal à la direction de propagation. Si on se place dans le plan $z = 0$, et en éliminant la dépendance temporelle ωt entre les composantes E_x et E_y , on montre que l'extrémité du vecteur champ électrique suit une trajectoire correspondant à l'équation suivante,

$$\left(\frac{E_x(z, t)}{A_x} \right)^2 + \left(\frac{E_y(z, t)}{A_y} \right)^2 - 2 \frac{E_x(z, t)}{A_x} \frac{E_y(z, t)}{A_y} \cos(\Delta\varphi) = \sin^2(\Delta\varphi) \quad (\text{I.9})$$

Si $\Delta\varphi$ n'est pas constant dans le temps, alors l'onde lumineuse est **non polarisée**.

Si $\Delta\varphi$ est constant dans le temps, l'onde est alors dite **polarisée elliptiquement** et l'équation (I.9) correspond à une ellipse (cas général).

Si $\sin \Delta\varphi > 0$, l'ellipse est parcourue dans le sens horaire (la polarisation est dite droite). Lorsque $\sin \Delta\varphi < 0$, l'ellipse est parcourue dans le sens inverse (la polarisation est dite gauche). Deux principaux états peuvent être déduits de l'état de polarisation elliptique. Quand $\sin \Delta\varphi = 0$, nous sommes en présence d'une onde polarisée linéairement (Cf. Figure I.6.a). Si $\sin \Delta\varphi \pm 1$, la figure décrite par l'extrémité du champ électrique est un cercle (Cf. Figure I.6.b).

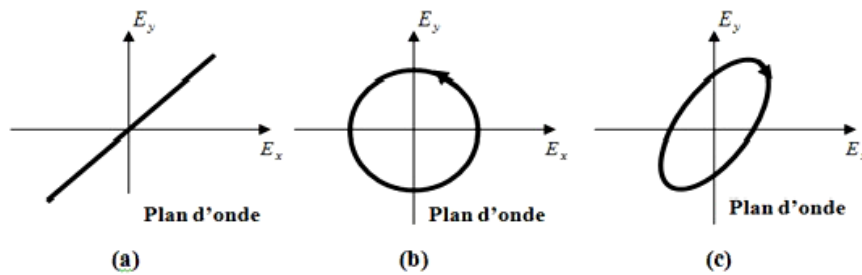


Figure I.5: États de polarisation d'une onde lumineuse (a) polarisation rectiligne orientée à 45° , (b) polarisation circulaire gauche, (c) polarisation elliptique droite.

I.4 Différents types d'interactions lumière-matière

I.4.1 Photoconductivité

On peut distinguer deux types de photoconductivités intrinsèque et extrinsèque qui nécessitent l'application d'une différence de potentiel extérieure,

I.4.1.1 Photoconductivité intrinsèque

est observée dans un semi-conducteur non dopé si un photon d'énergie suffisante (supérieure à la largeur de la bande interdite) fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Les électrons et les trous créés contribuent à la conductivité.

I.4.1.2 Photoconductivité extrinsèque

est observée dans un semi-conducteur dopé par des impuretés un photon peut faire passer un électron d'un centre N à la bande de conduction ou de la bande de valence à un centre P, le processus exigent une énergie plus faible que dans le cas précédent.

I.4.2 Photo-ionisation

L'ionisation est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule. L'atome perdant ou gagnant des charges n'est plus neutre électriquement. Il est alors appelé ion. L'ionisation peut être réalisée par des rayonnements de longueur d'onde suffisante pour éjecter cet électron périphérique. Lorsque le rayonnement ionisant est constitué de photons, on parle de photo-ionisation.

I.4.3 Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905.

I.4.3.1 Principe

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

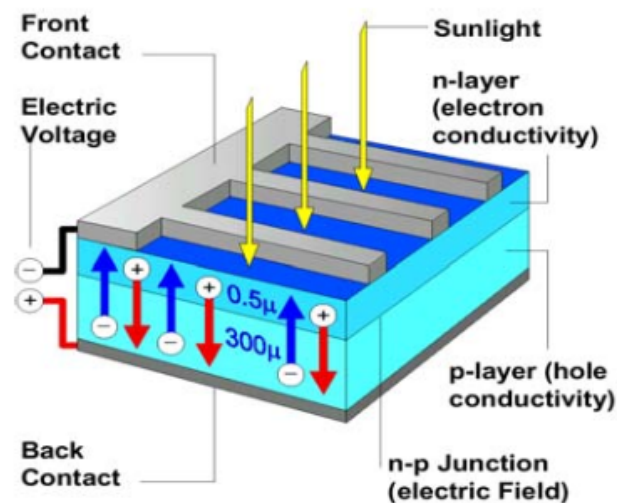


Figure I.6: Effet photovoltaïque

I.4.4 Effet photoélectrique

L'effet photoélectrique a été observé pour la première fois en 1887 par Heinrich Hertz, qui réalisa expérimentalement qu'un métal exposé au rayonnement pouvait émettre des particules chargées négativement (électrons). Cette expérience connue sous le nom effet photoélectrique. Hertz ne fut pas en mesure d'expliquer théoriquement certaines caractéristiques de ce phénomène avec la théorie classique de l'électromagnétisme.

Exemple d'application

Un laser émet un faisceau de lumière de 0,1 watt dont la longueur d'onde est égale à 633 nm. On désire déterminer le nombre de photons émis par le laser à chaque minute.

Solution

L'énergie d'un photon,

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{(6,63.10^{-34}m^2kg/s)(3.10^8m/s)}{633.10^{-9}m} \Rightarrow E = 3,14.10^{-19}J(m^2.kg.s^{-2})$$

L'énergie totale dégagée par le Laser durant une minute,

$$E_T = P.t = 0,1.60 = 6J(Wat.s)$$

Le nombre de photon émis par le Laser durant une minute,

$$E_T = N.E = N.(3,14.10^{-19}J) \Rightarrow N = 1,9.10^{19}photons$$

I.4.4.1 Explication corpusculaire de l'effet photoélectrique

Si une structure est exposée au rayonnement, elle est exposée au flux de photons. Ces photons entrent en collision avec les électrons et peuvent être absorbée, et dans ce cas l'énergie cinétique de l'électron sera augmentée d'une quantité $h.\nu$, pour que l'électron être éjecté, il doit avoir suffisamment d'énergie pour quitter la structure, cette énergie porte le nom de travail d'extraction,

avec,

$$E = h.\nu > Tr_{extraction}(J)ou(eV)$$

et,

$$E = E_c + Tr_{extraction}$$

Exemple d'application

On éclaire une plaque de cuivre $Tr_{\text{extraction}} = 4,7\text{eV}$ avec de la lumière ultraviolette à 200 nm et on désire déterminer le module de la vitesse maximale des photoélectrons. (La masse de l'électron est $m = 9,11 \cdot 10^{-31}\text{kg}$).

Solution

Travail d'extraction en J

$$Tr_{\text{extraction}} = \frac{4,7\text{eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{e} = 7,52 \cdot 10^{-19}\text{CV} = 7,52 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

L'énergie cinétique maximale de L'électron éjecté,

$$E = E_c + Tr_{\text{extraction}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} (3 \cdot 10^8)}{200 \cdot 10^{-9}} = E_c + 7,52 \cdot 10^{-19} \Rightarrow E_c = 2,42 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

La vitesse maximale de l'électron à partir de son énergie cinétique,

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (2,425 \cdot 10^{-19})}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 7,296 \cdot 10^5\text{m/s}$$

I.4.4.2 Emission photoélectrique : expérience

Lorsqu'on envoie la longueur d'onde rouge de la lumière qui correspond aux grandes longueurs d'onde, cette lumière ne va pas pouvoir avoir d'influence sur le métal. D'autre par, lorsqu'on envoie de la lumière violette (petite longueur d'onde), on remarque les électrons de métal vont arracher facilement du métal, c'est ce qu'on appelle l'émission photoélectrique.

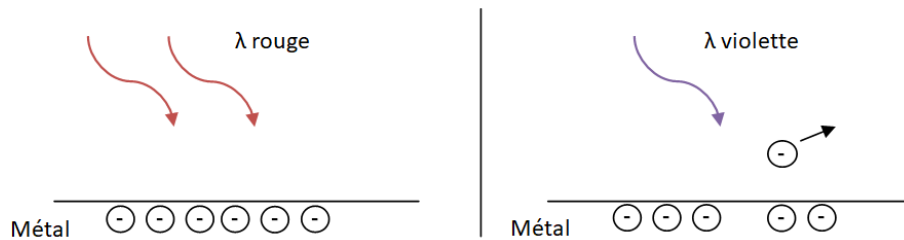


Figure I.7: Emission photoélectrique