
Généralités sur la lumière

Objectifs :

- distinguer les différents modèles de description de la lumière.

Dans ce chapitre, nous introduisons quelques notions sur les différents niveaux de description de la lumière.

1.1 L'optique géométrique

Si nous "envoyons" un rayon laser sur une interface air-plexiglas et que nous observons la trajectoire du rayon laser à l'aide d'un brumisateuse, nous constatons que le rayon lumineux se propage **en ligne droite** dans l'air et dans le plexiglas et qu'il subit **une déviation** au passage de l'interface air-plexiglas.

Ainsi, il est possible de décrire en première approche le comportement de la lumière par une **succession de "lignes droites" appelées rayons lumineux qui sont déviés et/ou réfléchis aux interfaces**. Cette description de la lumière s'appelle **l'optique géométrique**.

L'optique géométrique est la théorie de la lumière la plus "simple". Cette théorie de la lumière suffit pour concevoir des instruments d'optique et décrire de nombreux phénomènes optiques.

La valeur de l'angle de déviation des rayons lumineux aux interfaces est donnée par la loi de **la réfraction de Snell-Descartes** :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.1)$$

où n est l'indice optique du milieu. La **loi de la réflexion** permet de calculer l'angle de réflexion.

$$i'_1 = -i_1 \quad (1.2)$$

où nous avons utilisé **des angles orientés**, ce qui explique la présence du signe moins dans la formule précédente.

☞ Dans la pratique, le choix de la théorie utilisée dépend du type d'observation que nous voulons expliquer. D'un point de vue plus fondamentale, une théorie doit-être complétée lorsqu'une observation expérimentale n'est pas expliquée par la théorie en question.

Exemple

Un rayon passe de l'air ($n_1 = 1$) au verre ($n_2 = 1.5$) avec un angle d'incidence égal à $i_1 = 35^\circ$. La valeur de l'angle de réfraction est donnée par $i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin i_1}{n_2}\right) = 22.5^\circ$.

La valeur de l'indice optique d'un matériau dépend de la **fréquence de la lumière qui traverse le matériau**.

Ce phénomène de variation de l'indice optique de la lumière en fonction de la fréquence est à l'origine de la **dispersion** de la lumière par un prisme (observé la première fois par Newton) et de la formation des arc-en-ciel.

Un prisme est un milieu d'indice n limité par deux surfaces planes, qui se rencontrent suivant l'arête du prisme. La variation de l'indice optique avec la fréquence provoque la dispersion de la lumière blanche au passage du prisme comme le montre la figure 1.1.

Placer un écran en sortie du prisme pour intercepter le faisceau lumineux permet d'observer le spectre de la lumière blanche.

Il existe de nombreuses **observations expérimentales** que la théorie de la lumière que nous venons d'énoncer ne permet pas d'expliquer et nous devons donc adopter une théorie plus complète.

1.2 L'optique ondulatoire

Thomas Young (1773-1829) a été l'un des premiers à montrer que la lumière se comporte comme une onde lors de certaines expériences. Il est par exemple possible de produire des franges alternativement sombres et lumineuses en "superposant" dans certaines conditions de la lumière que nous faisons ainsi **interférer** (figure 1.2). Fresnel (1788-1827) a montré que ce phénomène est parfaitement explicable en considérant que la lumière se comporte comme une onde : **l'amplitude de l'onde s'additionnant à l'endroit des franges lumineuses et se soustrayant à l'endroit des franges sombres**.

Ce comportement ondulatoire de la lumière a d'ailleurs été conforté grâce aux travaux théoriques de James C. Maxwell (1831-1879) qui a montré que la lumière est **une onde électromagnétique**. Contrairement aux particules qui sont localisées dans l'espace et le temps, une onde occupe une région plus ou moins étendue dans l'espace et dure un certain temps. Une onde électromagnétique correspond à la propagation dans l'espace et dans le temps d'un champ électromagnétique.

Cette théorie ondulatoire de la lumière permet d'expliquer, entre-autre, **les figures d'interférences et la diffraction de la lumière**. La diffraction est "l'étalement" de la lumière qui se produit lorsque cette dernière passe par une ouverture ou rencontre un obstacle.

Lorsque la taille de l'ouverture ou de l'obstacle est beaucoup plus grande que la longueur d'onde, la diffraction est négligeable. L'onde continue en ligne droite après l'obstacle. Par contre, lorsque la taille de l'ouverture ou de l'obstacle est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, nous observons le phénomène de diffraction de l'onde.

La longueur d'onde de la lumière visible est d'environ 500 nm, la taille d'un obstacle provoquant la diffraction de la lumière visible doit donc être inférieure à cette dimension.

☞ De nombreux laboratoires travaillent pour déterminer l'indice optique d'un matériau en fonction de la fréquence. Le principe est d'éclairer le milieu avec de la lumière d'une fréquence donnée et d'étudier la réponse du milieu.



FIGURE 1.1: Dispersion de la lumière blanche par un prisme (source : wikipedia).

☞ Avant les travaux de Fresnel et à la suite des idées de Newton, la majorité des physiciens pensait que la lumière était constituée de corpuscules au sens classique du terme. Le coup de grâce à cette théorie corpusculaire de Newton a été donné par la célèbre expérience du point de Poisson. Cette expérience montre qu'il existe un point lumineux au centre de l'ombre d'un objet circulaire parfaitement opaque!

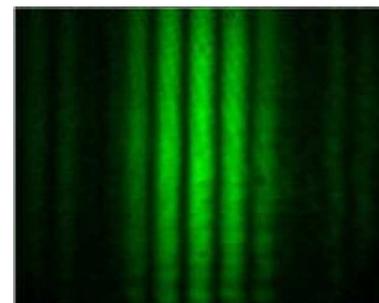


FIGURE 1.2: Exemple de figure d'interférences.

Exemple

Le phénomène de diffraction s'observe facilement pour les ondes sonores et les vagues. Il est par exemple très facile de percevoir la diffraction des ondes sonores lors de leur passage à travers une porte légèrement entrouverte. La vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=BH0NfVUTWG4> montre la diffraction de vaguelettes à travers une ouverture dans une cuve à onde.

1.3 Notion de photons

1.3.1 La lumière : un champ quantique

Au-delà de l'aspect ondulatoire de la lumière, des expériences plus fines ont montré qu'une figure d'interférences se construit par grain de lumière successifs appelés **photons** (figure 1.3).

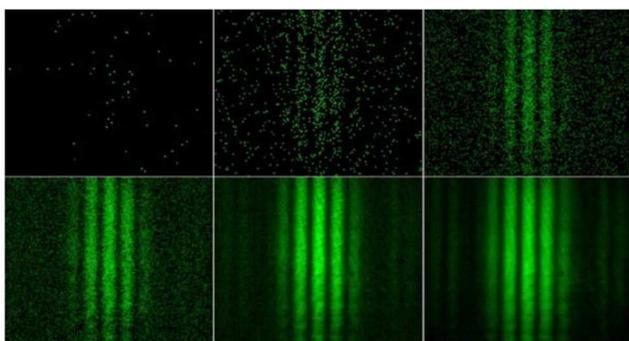


FIGURE 1.3 – Construction d'une figure d'interférence photon par photon.

Un photon n'est pas une particule au sens de la mécanique Newtonienne car il n'obéit pas aux lois de la mécanique classique. La figure 1.3, qui montre la construction d'une figure d'interférence **photon par photon**, nous oblige à admettre qu'un photon est une particule qui peut-être à plusieurs endroits en même temps et ainsi interférer avec elle-même. Une onde de probabilité de présence est ainsi associée au photon afin d'expliquer le comportement ondulatoire du photon. La localisation précise du photon sur l'écran résulte de l'intrication du photon avec l'écran d'observation qui détruit le caractère quantique du photon.

L'interprétation des expériences d'interférences et de diffraction que nous étudierons par la suite ne nécessitera pas l'introduction de cet aspect quantique de la lumière.

Exemple

La vidéo de la chaîne véritasium <https://www.youtube.com/watch?v=GzbKb59my3U> montre la construction d'une figure d'interférence photon par photon.

La vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=zPolTp0ddRg> est une vidéo de la chaîne science étonnante qui explique le phénomène avec des électrons.

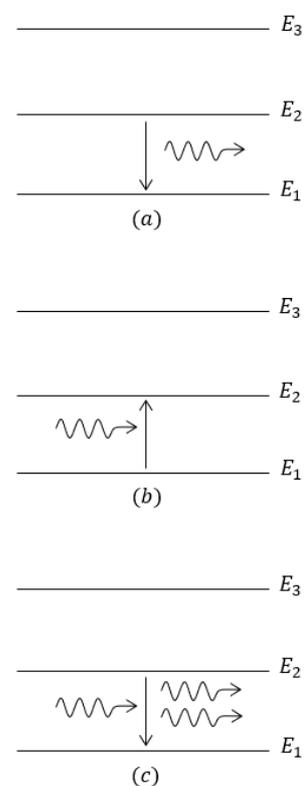


FIGURE 1.4: (a) Émission spontanée d'un photon de fréquence $f_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h}$. (b) Absorption d'un photon de fréquence $f_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h}$. (c) Émission stimulée d'un photon. Les deux photons émis sont des clones dans ce dernier cas de figure.

1.3.2 Processus d'interaction lumière-matière

L'énergie E d'un photon est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique et nous posons :

$$E = hf \tag{1.3}$$

Où $h \simeq 6.626 \times 10^{-34}$ Js est la constante de Planck. Cette formule est nommée **formule de Planck-Einstein**.

Il existe trois processus d'interaction fondamentaux entre la lumière et la matière.

- Un photon d'énergie E peut être **absorbé** par un atome ou une molécule uniquement si l'écart entre deux niveaux d'énergie de cet atome ou cette molécule est de E . Il est d'usage de représenter un tel processus à l'aide d'un diagramme de Jablonski (figure 1.4-(a)). l'énergie du photon est alors stockée dans la particule sous forme d'énergie cinétique de vibration/rotation/translation de la particule ou sous forme d'énergie chimique.
- Une particule dans un état excité peut réémettre spontanément un photon (figure 1.4-(b)). L'énergie du photon correspond dans ce cas à l'écart d'énergie entre le niveau excité et le niveau désexcité.
- Un dernier processus d'interaction entre la matière et la lumière existe dans la nature. Il s'agit de l'émission stimulée (figure 1.4-(c)). Dans ce cas de figure, le photon émis par émission stimulée est un clone du photon qui stimule l'émission. A l'équilibre thermodynamique, ce dernier processus est négligeable et ces conséquences ne sont pas observées dans la vie de tous les jours. Par contre, le processus d'émission stimulée est à la base de fonctionnement du laser.

☞ La vitesse de la lumière dans un milieu matériel est inférieure à c car les photons subissent une succession d'absorption-émission par la matière pendant la propagation de la lumière.

1.4 Le spectre de la lumière

Mentionnons pour finir que la lumière qui nous parvient du Soleil ou des lampes est un "mélange" de différentes fréquences. Les yeux des êtres humains répondent à la lumière comprise entre **400 THz et 750 THz** (1 THz = 10^{12} Hz). Notre système visuel perçoit des couleurs qui varient selon la fréquence. Ainsi le rouge est par exemple associé à une fréquence de 400 THz. Dans le vide ou dans l'air, la célérité de la lumière est égale ou très proche de c et le domaine visible du spectre lumineux correspond à une longueur d'onde comprise entre 400 nm et 750 nm. La figure 1.5 montre le **spectre électromagnétique de la lumière**. Différents noms ont été donnés à la lumière en fonction de sa longueur d'onde (ou de sa fréquence).

☞ La fréquence est une grandeur intrinsèque à l'onde et ne change pas en passant d'un milieu à l'autre contrairement à la longueur d'onde. Puisque la couleur d'un objet ne change pas lorsqu'il passe de l'air à l'eau, nous en déduisons que la couleur de la lumière perçue par l'œil est liée à la fréquence de l'onde.

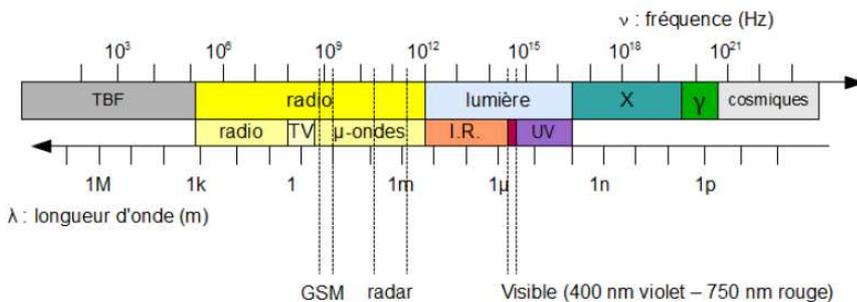


FIGURE 1.5 – Spectre de la lumière.

Le **processus d'émission de la lumière** varie en fonction de la fréquence de la lumière émise. Observer l'univers dans différentes fréquences

nous donne ainsi accès aux processus physiques mis en jeu dans l'univers. L'analyse de la lumière contient également des informations sur le milieu traversé par la lumière entre son émission et son observation. Plus précisément, nous pouvons en déduire quelles sont les processus d'absorption ou de diffusion que subit la lumière sur son trajet. Notons que nous devons utiliser des instruments différents pour capter la lumière à des fréquences différentes (voir figure 1.6).

☞ Les êtres humains ont très récemment réussi à détecter des ondes gravitationnelles. Avant cette détection, seule la lumière pouvait nous apporter des informations sur l'univers. Il est maintenant possible d'observer l'univers avec un nouveau type d'onde qui correspond à la propagation d'une oscillation de l'espace-temps.

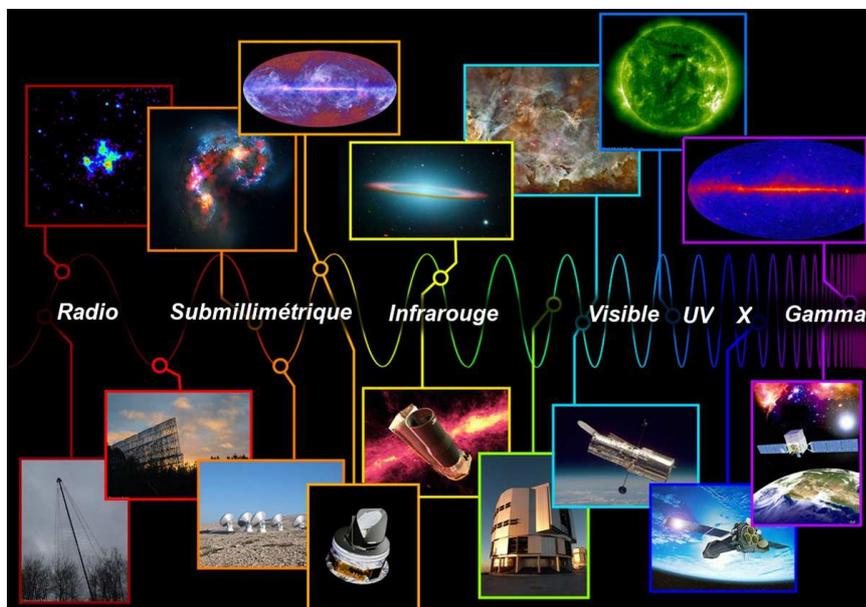


FIGURE 1.6 – Différents objets de l'univers dans différentes longueurs d'onde.

1.5 Fenêtres atmosphériques

L'interaction de la lumière avec l'atmosphère dépend de la fréquence de la lumière. Si l'écart entre deux niveaux d'énergies correspond à l'énergie du photon, alors ce dernier est possiblement absorbé par l'atmosphère. La figure 1.7 montre la contribution des composées de l'atmosphère à l'absorption de l'atmosphère en fonction de la fréquence. La figure 1.7 montre que l'atmosphère est très peu absorbante dans le visible (on parle de fenêtre atmosphérique). On constate également que le CO_2 est responsable d'un pic d'absorption dans l'infrarouge.

L'observation de l'espace depuis le sol est possible uniquement dans les fenêtres atmosphériques. C'est ce qui explique pourquoi des satellites sont utilisés à certaines fréquences comme le montre la figure 1.6.

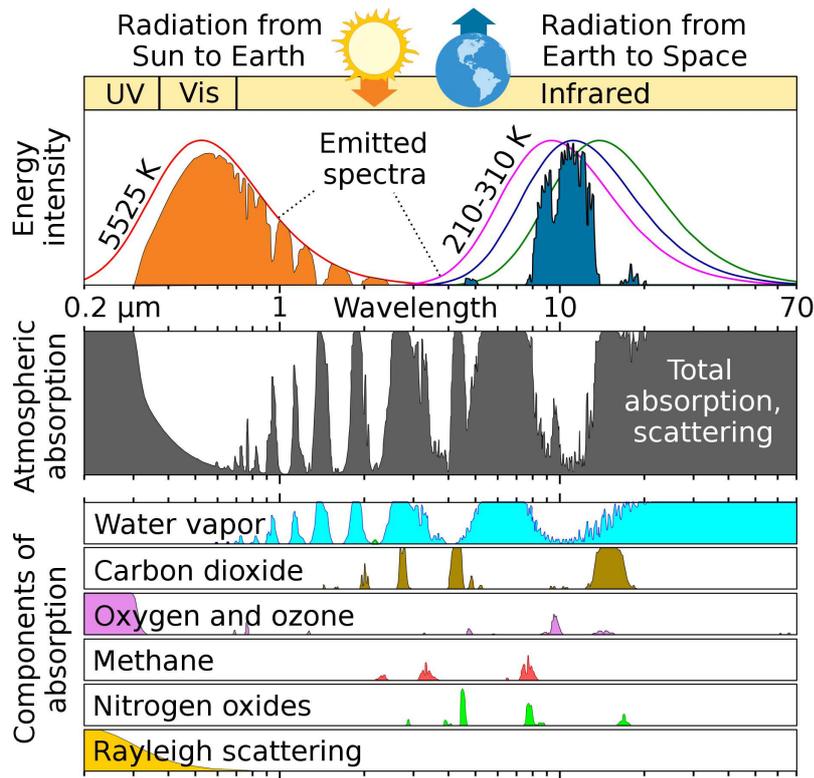


FIGURE 1.7 – Graphe de l'énergie lumineuse en fonction de la fréquence émise par le Soleil qui arrive au niveau du sol et de l'énergie lumineuse émise par la Terre qui franchit l'atmosphère. Le deuxième graphe montre coefficient d'absorption entre 0 et 1 de l'atmosphère en fonction de la fréquence. Les différentes fenêtres atmosphériques sont clairement visibles sur cette figure.