

Modéliser la lumière

I - Un peu d'histoire

La lumière a suscité de nombreuses interrogations depuis l'Antiquité, les premières théories ayant été développées en Grèce. Les partisans de la « théorie atomique » y voyaient des minuscules particules d'écorce des objets envoyées vers l'œil à très grande vitesse, mais la notion de **rayon lumineux** avait déjà été introduite par Euclide au III^e siècle avant Jésus-Christ. C'est le médecin et mathématicien arabe Alhazen qui le premier pose formellement les bases de la théorie des rayons lumineux en 1021 dans son *Traité d'Optique*. Ces bases seront ensuite reprises et développées, notamment aux XVI^e et XVII^e siècles avec l'apparition des premiers instruments d'observation astronomique sous l'impulsion de Galilée, Kepler et Tycho Brahé.

La nature même de la lumière a fait débat pendant longtemps, en particulier aux XVII^e et XVIII^e siècles. Newton défendait l'idée que les objets lumineux émettent des corpuscules qui se déplacent selon les lois de la mécanique, alors que Huygens affirmait de son côté que la lumière était une onde.

Les expériences réalisées par Fresnel et Young au début du XIX^e siècle ont permis (temporairement !) de clore le débat : leur mise en évidence des interférences lumineuses leur a permis de conclure à la nature ondulatoire de la lumière. Il ne restait plus qu'à identifier les grandeurs support de l'onde lumineuse, ce qu'a fait Maxwell à la fin du XIX^e en établissant (théoriquement) l'existence des ondes électromagnétiques, suivi par la confirmation expérimentale dans les travaux de Hertz. La lumière serait donc une **onde électromagnétique**, portée par les variations du champ électrique et du champ magnétique.

Les travaux de Planck sur le corps noir à la toute fin du XIX^e siècle, puis l'avènement de la mécanique quantique dans le courant du XX^e ont généré un retour sur cette affirmation catégorique avec la découverte des **photons**, corpuscules de lumière. On sait aujourd'hui que ces deux natures ne sont pas contradictoires : c'est la dualité onde-corpuscule.

L'objectif de ce chapitre est donc de faire un tour d'horizon des différentes modélisations possibles de la lumière : une onde, des photons, ou des rayons lumineux.

II - Onde lumineuse

II.1 - Célérité

- Dans le vide

Le premier ordre de grandeur de la célérité de la lumière dans le vide a été estimé par l'astronome danois Rømer à la fin du XVII^e siècle, à l'occasion d'une étude des satellites de Jupiter. Il l'estime alors à environ $2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est remarquable compte tenu des moyens à sa disposition. Des mesures de plus en plus précises ont été réalisées tout au long du XIX^e siècle, jusqu'aux travaux de Michelson qui réalise en 1929 la première mesure compatible avec les résultats actuels.

Aujourd'hui, la définition du mètre fixe conventionnellement la vitesse de la lumière dans le vide : elle se propage à exactement

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

On retiendra

Espace 1

- **Dans un milieu transparent**

Un milieu est dit **transparent** si la lumière peut le traverser. Attention à ne pas confondre transparent et incolore : un sirop de grenadine est coloré et transparent, alors qu'une grosse épaisseur de verre ou d'eau est incolore et opaque.

Espace 2

Plus l'indice optique est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**.

Ordres de grandeur : les valeurs des indices optiques varient assez peu d'un milieu à l'autre.

- ▷ $n_{\text{eau}} = 1,33$;
- ▷ $n_{\text{verre}} \sim 1,5$ mais peut aller de 1,2 à 1,8
- ▷ $n_{\text{diamant}} = 2,4$ c'est l'un des plus élevés ;
- ▷ $n_{\text{air}} = 1,0003$.

Un milieu transparent est dit

- ▷ **linéaire** s'il permet d'appliquer le principe de superposition ;
- ▷ **homogène** si ses propriétés sont les mêmes en tout point ;
- ▷ **isotrope** si ses propriétés sont les mêmes quelle que soit la direction de propagation de la lumière.

Abréviation : milieu TLHI.

Exemples :

▷ milieu homogène :

Espace 3

▷ milieu inhomogène :

Espace 4

▷ milieu isotrope :

Espace 5

▷ milieu anisotrope : plus difficile de trouver des exemples connus, et pas possible à notre niveau d'expliquer pourquoi, le seul exemple que vous connaissez est celui des lunettes de cinéma 3d.

L'indice optique d'un milieu TLHI est uniforme, c'est-à-dire qu'il a partout la même valeur.

Attention cependant : cela ne veut « que » dire qu'il est le même en tout point du milieu, pas qu'il est absolument constant et ne dépend d'aucun paramètre.

L'indice optique d'un milieu TLHI peut dépendre de la fréquence de l'onde lumineuse.

Un tel milieu est alors dit **dispersif**.

Exemple où la dispersion se manifeste :

Espace 6

Une loi empirique mais assez efficace pour décrire la dépendance de l'indice d'un milieu par rapport à la longueur d'onde est la **loi de Cauchy**, qui indique que

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

avec A et B deux constantes qui dépendent du milieu. Cette loi n'est pas à connaître ... mais savoir qu'elle existe ne peut pas faire de mal!

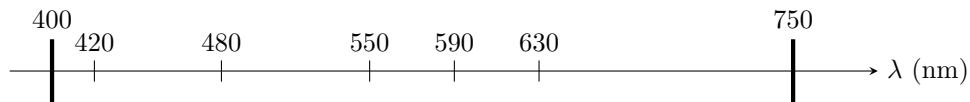
II.2 - Longueur d'onde et fréquence

Les ondes lumineuses harmoniques sont appelées **ondes monochromatiques** (littéralement « d'une seule couleur »). Le domaine visible n'occupe qu'une petite fraction du spectre électromagnétique, voir le document O1-3.

- **Dans le vide**

La longueur d'onde dans le vide des ondes monochromatiques visibles est comprise entre 400 et 750 nm.
La fréquence associée $\nu = c/\lambda$ est comprise entre $4 \cdot 10^{14}$ et $7 \cdot 10^{14}$ Hz.

À une longueur d'onde monochromatique est associée une couleur pure :



Espace 7

☹☹☹ **Attention !** Cette correspondance entre couleur et longueur d'onde concerne les longueurs d'onde *dans le vide*.

- **Dans un milieu transparent**

Dans le vide, la longueur d'onde et la fréquence sont reliées par la relation de dispersion, $\lambda_0 = c/\nu_0$. Dans un milieu, la célérité est différente ($v = c/n$), il est donc forcément nécessaire que la longueur d'onde ou la fréquence soit modifiée pour que la relation de dispersion du milieu puisse être vérifiée.

Espace 8

Exercice C1 : Longueur d'onde d'un laser dans l'air et dans l'eau

Un laser rouge émet un rayonnement de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 633$ nm. Déterminer la longueur d'onde λ' si l'onde vient à pénétrer dans l'eau d'indice optique $n_{\text{eau}} = 1,33$. La couleur du laser change-t-elle ?

Espace 9

Généralisation : comme l'indice est toujours supérieur à 1, alors la longueur d'onde d'une radiation est toujours plus faible dans un milieu transparent que dans le vide.

II.3 - Sources de lumière

La caractérisation des sources lumineuses se fait par leur **spectre d'émission**, exprimé usuellement en termes de longueur d'onde dans le vide plutôt que de fréquence. Il s'agit donc d'une caractéristique ondulatoire.

Parmi les sources lumineuses, on distingue les **sources primaires**, qui émettent de la lumière sans en avoir reçu au préalable, des **sources secondaires**, qui réémettent de la lumière qu'elles ont préalablement absorbé. Quelques sources ne rentrent pas dans ce cadre, en particulier les sources fluorescentes qui réémettent des radiations différentes de celles qu'elles ont absorbé.

| **Remarque** : on peut aussi évoquer les miroirs, inclassables, qui dévient la lumière sans en absorber.

a) Exemples de sources et de spectres

• Sources de lumière blanche



Dans le Soleil ou les lampes à filament, la lumière est émise par un corps chaud, ce qui produit un spectre intrinsèquement continu. Au contraire, les lampes à économie d'énergie ou les LED blanches commencent par émettre un spectre discret (voir le point suivant) dont les radiations sont absorbées et réémises par un matériau fluorescent, appelé luminophore, qui donne un spectre continu.

Exemples : voir figure 1.

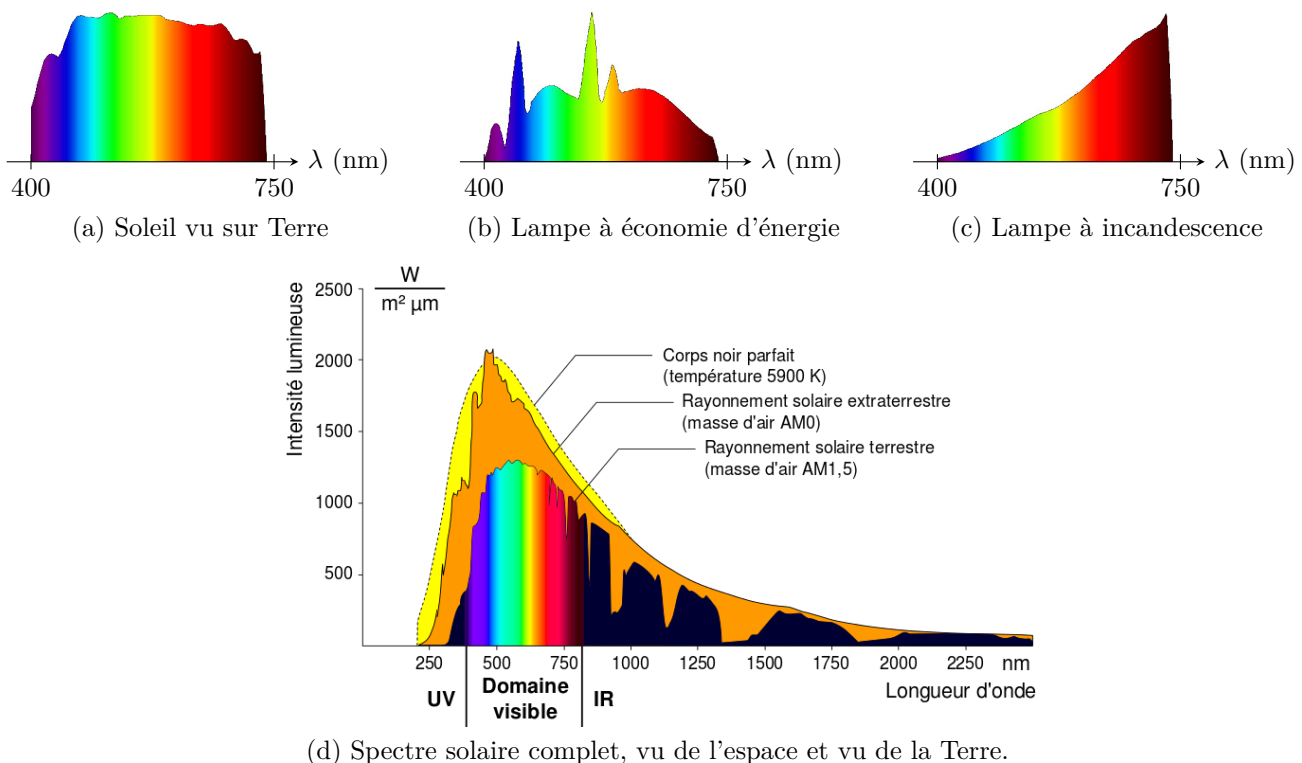


Figure 1 – Exemples de spectres d'émission de sources de lumière blanche. Figures (a) à (c) adaptées du site <http://www.lesnumeriques.com/>, figure (d) extraite de Wikipedia.

• Lampes spectrales

Une ampoule contient une espèce chimique à l'état gazeux. On y forme une décharge électrique, ce qui a schématiquement pour effet de porter les atomes du gaz dans un état excité. La désexcitation se fait par émission spontanée de photons. L'énergie et donc la fréquence de ces photons est liée à la différence d'énergie entre niveaux des atomes du gaz, nous y reviendrons au chapitre AM1.



Espace 11

La couleur d'une lampe spectrale est une couleur composée : tout se passe comme s'il y avait une synthèse additive des couleurs des différentes raies.

Exemples : voir figure 2.

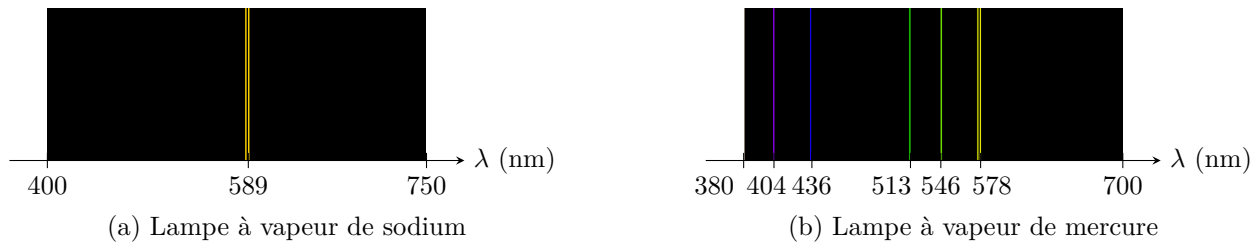


Figure 2 – Exemples de spectres d'émission de lampes spectrales.

- **Laser**



Espace 12

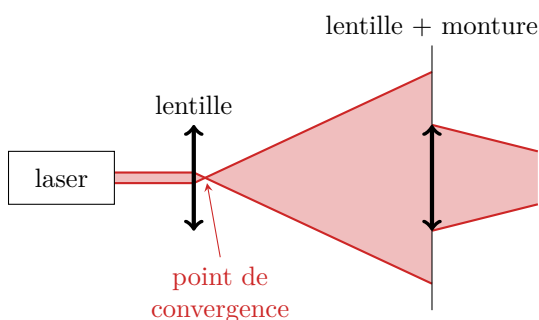
Exemple : laser rouge HeNe de longueur d'onde 633 nm.

b) Outil de modélisation : source ponctuelle monochromatique

L'objectif est de proposer un outil de décomposition aussi simple que possible d'une source optique, servant de brique élémentaire d'étude d'une source réelle, c'est-à-dire étendue et polychromatique.

- ▷ Le théorème de Fourier permet de considérer que l'onde émise par une source polychromatique est une superposition d'ondes monochromatiques.
- ▷ On peut aussi découper par la pensée une source étendue en un grand nombre de sources de petite tailles, à la limite des sources ponctuelles. Le principe de superposition permet alors de reconstruire l'onde totale à partir de la somme des ondes émises par chacune des sources ponctuelles.

On appelle **source ponctuelle** une source infiniment petite (assimilable à un point) qui émet de la lumière de façon équirépartie dans toutes les directions : on parle d'émission isotrope.



Une source ponctuelle n'existe pas mais peut être une bonne approximation d'une source réelle à l'échelle d'une expérience. Par exemple, si dans l'expérience ci-contre on ne s'intéresse qu'à la lumière passant par la seconde lentille, le point de convergence du faisceau peut être assimilé à une source ponctuelle monochromatique en bonne approximation.

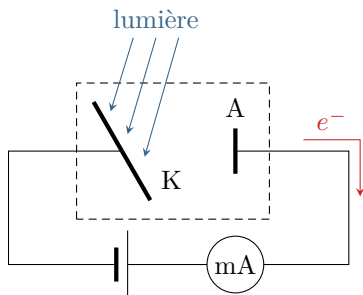
III - Photons et dualité onde-corpuscule

☛ Conformément au programme, cette partie est abordée sous forme d'un dossier documentaire.

III.1 - Quantification des échanges d'énergie

☛ Analyse du document 2 sur l'effet photoélectrique.

• Expérience



Rôle du générateur : polariser l'électrode A pour y attirer les électrons, qui a priori sont émis par l'électrode K dans une direction quelconque.

Milliampèremètre : mise en évidence d'un courant.

• Observations

▷ avec une lampe visible :

Espace 13

▷ avec une lampe UV :

Espace 14

• Modélisation et interprétation

Modèle de physique classique : L'électron est attiré à l'intérieur du matériau par les noyaux des atomes. L'arracher demande de lui fournir une énergie W , appelé travail d'extraction. Cela permet d'expliquer pourquoi des électrons sont arrachés, mais a priori le courant mesuré ne devrait dépendre que de l'énergie lumineuse et pas du tout de la fréquence du rayonnement.

Modèle proposé par Einstein :

Espace 15

↪ les quanta d'énergie échangés entre l'électrode K et le rayonnement sont appelés **photons**, chaque photon étant porteur d'une énergie $\varepsilon = h\nu$.

Explication du seuil en fréquence dans le modèle d'Einstein :

Espace 16

Ce qui reste de l'énergie ε du photon absorbé est pris par l'électron sous forme d'énergie cinétique. Cela permet d'interpréter les résultats de l'expérience de Millikan présentés figure 2 du dossier documentaire.

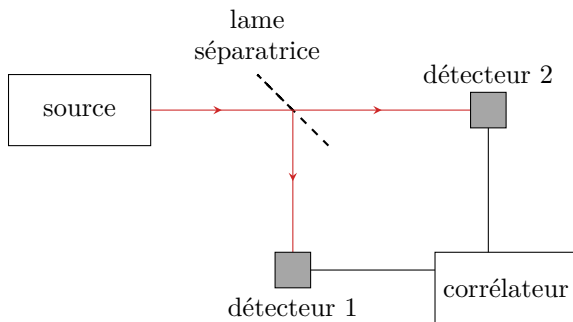
• Bilan

- ▷ Ce qu'on a montré : les échanges d'énergie entre la lumière et la matière sont quantifiés ;
- ▷ Question ouverte : quelle est la nature exacte des photons ?

III.2 - Comportement corpusculaire de la lumière

📖 Analyse du document 3 sur l'expérience de Mandel.

• Expérience



La source est très peu lumineuse : si la lumière se compose de photons, alors il n'y a pas plus d'un photon à la fois dans le dispositif.

Le corrélateur permet de mesurer le paramètre de corrélation

$$g^{(2)} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}.$$

où I_1 et I_2 sont les intensités mesurées par les détecteurs et les crochets désignent la moyenne sur un temps très long.

• Modélisation

▷ Si la lumière a un comportement ondulatoire :

Espace 17

▷ Si la lumière a un comportement corpusculaire :

Espace 18

• Observation

Résultat expérimental : $g^{(2)} = 0,2 \pm 0,3$

↔

Espace 19

• Bilan

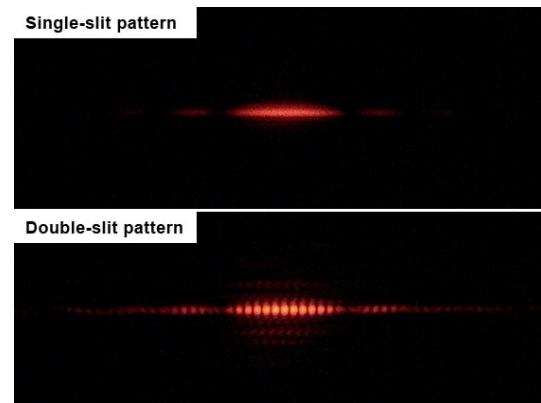
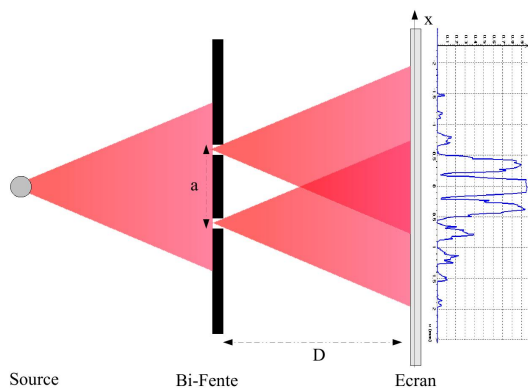
- ▷ Ce qu'on a montré : la lumière est composée de corpuscules.
- ▷ Question ouverte : que faut-il faire du modèle ondulatoire ?

III.3 - Dualité onde-corpuscule pour la lumière

👉 *Analyse du document 4 sur les fentes d'Young optiques.*

• Expérience

Avec une source lumineuse intense :



Observations :

Espace 20

Avec une source de photons uniques :

Espace 21

• Interprétation

Espace 22

La lumière a donc une double nature : on parle de **dualité onde-corpuscule**.

👉 *Illustration par la vidéo du site « Tout est quantique », qui soulève aussi la question (hors programme) de l'influence d'un observateur qui regarderait par quelle fente le photon est passé.*

• Propriétés d'un photon

Comme la particule « photon » décrit le même objet physique que l'onde lumineuse, alors leurs propriétés sont reliées.

Un photon

- ▷ se propage à la vitesse de la lumière dans la direction \vec{u} de propagation de l'onde ;
- ▷ est de masse rigoureusement nulle ;
- ▷ transporte une énergie $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$ où ν et ω sont la fréquence et la pulsation de l'onde ;
- ▷ a une quantité de mouvement $\vec{p} = \frac{h}{\lambda} \vec{u} = \hbar \vec{k}$.

Ces deux dernières relations sont appelées **relations de Planck-Einstein**, et elles impliquent la **constante de Planck h** ou la constante de Planck « réduite » notée \hbar ,

$$h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \text{et} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Remarque : Comme le photon se déplace à la vitesse de la lumière, alors il est relativiste. Le fait que sa masse soit nulle en est une conséquence, et de même sa quantité de mouvement n'est pas donnée par une relation de type « $\vec{p} = m\vec{v}$ ».

III.4 - Du quantique au classique

Compte tenu de la dualité onde-corpuscule, comment expliquer qu'avec un laser on obtienne directement la figure d'interférences prévue par le modèle complètement ondulatoire de la lumière ?

Exercice C2 : Nombre de photons envoyés par un laser

On considère un laser rouge de longueur d'onde $\lambda \sim 600 \text{ nm}$ et de puissance $P = 1 \text{ mW}$. Calculer l'ordre de grandeur du nombre de photons qu'il envoie en $\Delta t = 1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$, c'est-à-dire moins que la persistance rétinienne.

▷ Énergie totale arrivant sur l'écran :

Espace 23

▷ Énergie d'un photon du faisceau laser :

Espace 24

▷ Nombre de photons contenus dans le faisceau :

Espace 25

Conclusion :

Espace 26

Espace 27

Le terme « de l'ordre de » est à prendre au sens large et peut inclure 1000 voire 10 000 fois supérieur. Par ailleurs, ce critère ne lève pas la difficulté d'identifier correctement les énergies caractéristiques avec lesquelles il faut faire la comparaison !

Exemples :

- ▷ *Effet photoélectrique : comparaison au travail d'extraction ;*
- ▷ *Expérience de Mandel : l'intensité lumineuse est telle qu'il n'y ait qu'un seul photon à la fois dans le dispositif.*