

OS – Chapitre A

Sources lumineuses

Sources lumineuses

I - Généralités

L'optique est le domaine de l'étude des phénomènes lumineux et de la lumière. D'un point de vue théorique, il s'agit d'un domaine qui est inclus dans la théorie de l'électromagnétisme qui est lui-même un sous-domaine de la théorie quantique des champs.

La lumière est un signal qui transporte une énergie capable d'être détectée par le capteur particulier appelé « œil ». Cette énergie est celle d'une onde électromagnétique transverse caractérisée par deux grandeurs, le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} . Sa direction de propagation est celle du vecteur d'onde \vec{k} , qui est donc perpendiculaire à \vec{E} et \vec{B} . Cette onde se propage dans le vide avec la célérité $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ et on a, *dans le vide*, la relation suivante :

Loi : Relation de dispersion dans le vide



où λ_0 est la longueur d'onde *dans le vide* et ν est la fréquence de la lumière.

I.1 - Spectre électromagnétique et spectre visible

Le spectre visible n'est qu'une infime partie du spectre électromagnétique.

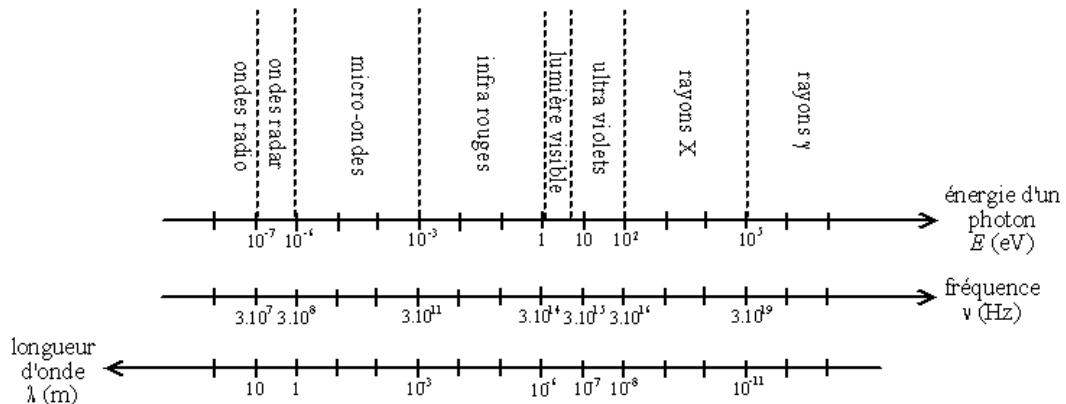


FIGURE 1.1 – Spectre en énergie, fréquence et longueur d'onde.

Par Christophe Dang Ngoc Chan Cdang at fr.wikipedia (work by Cdang) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) ou CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons.

Propriété : Spectre visible

Le spectre du visible correspond à des longueurs situées approximativement entre $4 \cdot 10^2$ et $7 \cdot 10^2$ nm ou $8 \cdot 10^2$ nm avec une longueur moyenne d'environ $6 \cdot 10^2$ nm.

Pour les ordres de grandeur de la fréquence et de la période, on retient $5 \cdot 10^{14}$ Hz et $2 \cdot 10^{-15}$ s.

Les longueurs d'onde supérieures à cet intervalle sont appelées infra-rouge (IR), celles inférieures ultra-violettes (UV).

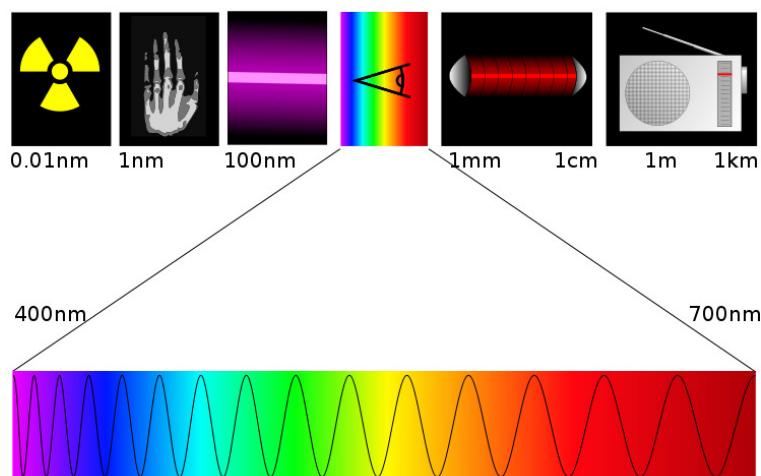


FIGURE 1.2 – Spectre électromagnétique et spectre visible.

Par Tatoute et Phrood (inconnu) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>), CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>) ou CC-BY-SA-2.5-2.0-1.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5-2.0-1.0/>)], via Wikimedia Commons.

L'œil possède également un maximum de sensibilité situé à une longueur d'onde de 550 nm le jour (vision diurne) ce qui correspond à une couleur jaune-verte (couleur du Soleil). La nuit (vision nocturne) le maximum est situé à 505 nm.

I.2 - Longueur d'onde dans le vide et couleur

À chaque longueur d'onde *dans le vide*, ou à chaque fréquence de la lumière visible, correspond une couleur pour l'œil (cf table 1.1). Néanmoins, la couleur n'est pas une notion scientifique objective, mais une *perception*, dépendant de nombreux critères physiologiques (ex : le daltonisme).

Couleur	Longueur d'onde (nm)
Violet	400 - 446
Bleu	446 - 500
Vert	500 - 578
Jaune	578 - 592
Orange	592 - 620
Rouge	620 - 720

TABLE 1.1 – Équivalences approximatives couleur – longueur d'onde.

La sensation de lumière blanche est due à la superposition dans l'œil de lumières de longueurs d'onde couvrant la totalité du spectre visible ou bien de quelques lumières colorées qui, par synthèse additive, redonnent le blanc.

II - Types de sources lumineuses

Une source est un dispositif émettant de la lumière. On caractérise généralement les sources lumineuses par leur spectre, c'est-à-dire par la donnée des longueurs d'onde ou des fréquences qu'elles émettent.

II.1 - Sources spectrales

Un gaz contenu dans une ampoule est soumis à une très forte tension électrique, ce qui le *ionise*¹. Par suite de recombinaisons entre cations et électrons, des photons sont émis. Les **niveaux d'énergie des atomes étant quantifiés, les photons ne peuvent porter que des énergies elles-mêmes quantifiées**², d'où

1. L'ionisation consiste à arracher un ou plusieurs électrons à un atome pour obtenir un ensemble de cations et d'électrons appelé plasma.

2. Selon la formule : $\Delta E = h\nu$ où ΔE est la différence entre deux niveaux d'énergie de l'atome.

le spectre d'émission discret.

Propriété : Source spectrale

Les sources spectrales possèdent un **spectre d'émission discret** (c'est-à-dire discontinu ou de raies).

Le spectre (et les longueurs d'onde et fréquences qu'il contient) est alors caractéristique de la nature chimique du corps utilisé. La table 1.2 donne les raies d'émission d'une lampe à vapeur de mercure, qui sera utilisée expérimentalement en TP pour étudier les propriétés optiques d'un prisme.

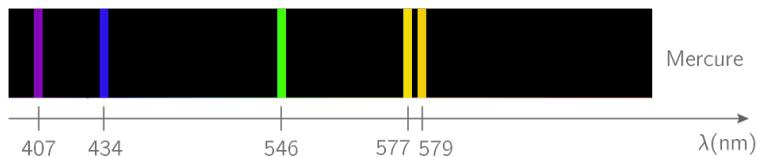


FIGURE 1.3 – Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure. On distingue clairement une raie verte très intense et un doublet jaune

Lampe	Couleur	λ en nm	Intensité
Hg	Rouge	690,7	Pâle
	Rouge	623,4	Pâle
	Rouge	612,3	Très pâle
	Rouge	607,2	Très pâle
	Jaune	579,1-577,0	Doublet intense
	Vert pomme	546,1	Très intense
	Vert	496,0	Très pâle
	Bleu turquoise	491,6	Pâle
	Indigo	435,8	Intense
	Violet	407,8	Très pâle
	Violet	404,7	Intense

TABLE 1.2 – Raies spectrales du mercure.

II.2 - Sources thermiques

Tous les corps, quels qu'ils soient, émettent un tel rayonnement électromagnétique qui peut, en première approximation, être modélisé³ de façon que la longueur d'onde du maximum d'intensité du spectre et la largeur spectrale puissent être déterminées si la température est connue. Une théorie quantique (hors programme) permet de prévoir la longueur d'onde λ_{max} à laquelle l'émission est maximale⁴ : $\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$ avec λ_{max} (longueur d'onde pour laquelle l'intensité émise est maximale) en micromètres et T en kelvins. On peut également déterminer l'émittance totale de la source (c'est-à-dire la puissance totale par unité de surface émise dans toutes les longueurs d'onde : $M = \sigma T^4$ (où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann)).

Propriété : Source thermique

Les sources thermiques sont des sources dont l'émission de lumière est due à l'agitation thermique de particules chargées. Une telle agitation est obtenue en chauffant le corps, et on parle alors de **rayonnement thermique**. Une telle émission de lumière présente toujours **un spectre continu**.

Ce phénomène de rayonnement thermique était mis à profit notamment dans les ampoules à incandescence dans lesquels un filament métallique (souvent en tungstène) est porté à haute température par l'effet Joule du courant électrique qui le traverse. Les lampes à halogène sont un type de lampe à incandescence dont la technologie est

3. Le modèle est appelé *modèle du corps noir*.

4. Cette relation n'est pas à connaître. Mais elle permet, par exemple, de trouver une bonne approximation de la température de surface du Soleil, en admettant que la longueur d'émission maximale est à environ $5 \cdot 10^2 \text{ nm}$.

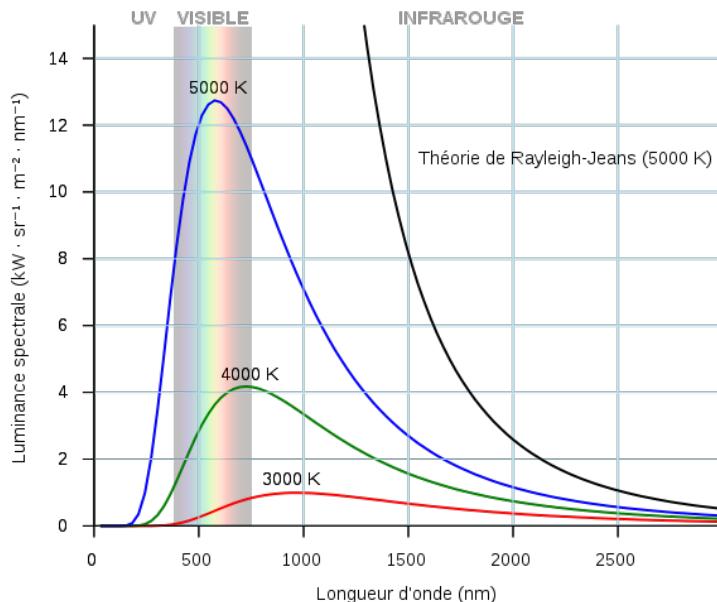


FIGURE 1.4 – Spectre de rayonnement thermique du corps noir. La théorie quantique de l'émission corps noir permet de modéliser le spectre continu d'émission d'une source thermique (3 courbes de gauche). La courbe de droite (théorie de Rayleigh-Jeans) était l'interprétation classique de l'émission du corps noir et était incapable de rendre compte de la « catastrophe ultraviolette » c'est-à-dire de la très forte baisse des courbes d'émission pour les petites longueurs d'onde (donc du côté UV).

améliorée en incorporant un gaz halogène dans l'ampoule, permettant d'atteindre une température plus élevée sans détruire le filament.

II.3 - Lampes à fluorescence

Les tubes à fluorescence⁵ ou les ampoules fluocompactes, dites basse consommation, utilisent un mécanisme d'émission en deux étapes : un premier rayonnement est émis selon un principe proche des lampes spectrales et sert ensuite à exciter une poudre fluorescente. C'est la lumière réémise par cette poudre fluorescente qui est à spectre continu. En raison de la première étape du mécanisme, on distingue parfois dans le spectre continu des pics qui correspondent aux raies initialement émises.

Propriété : Lampe à fluorescence

Le spectre d'une lampe à fluorescence est un spectre à **fond continu avec présence de pics**.

II.4 - Lampes à diodes électroluminescentes

Ce sont des lampes à alimentation électrique qui utilisent des diodes électroluminescentes (DEL ou LED pour *light emitting diode*). Le principe d'émission est celui des recombinaisons, à l'intérieur d'un matériau semi-conducteur, de « trous⁶ » et d'électrons. Les DEL émettent généralement une lumière de couleur déterminée : il faut plusieurs DEL de spectres différents à l'intérieur d'une même lampe pour reconstituer la sensation de lumière blanche.

Propriété : Diode électroluminescente

Le spectre d'une lampe à diodes électroluminescentes est généralement la superposition de plusieurs spectres plus ou moins continus.

5. Historiquement appelés « tubes à néon » parce que les premières technologies utilisaient ce gaz.

6. Type particulier de porteurs de charges positives dans existant dans les semi-conducteurs et correspondant à un défaut de d'électrons, d'où leur nom.

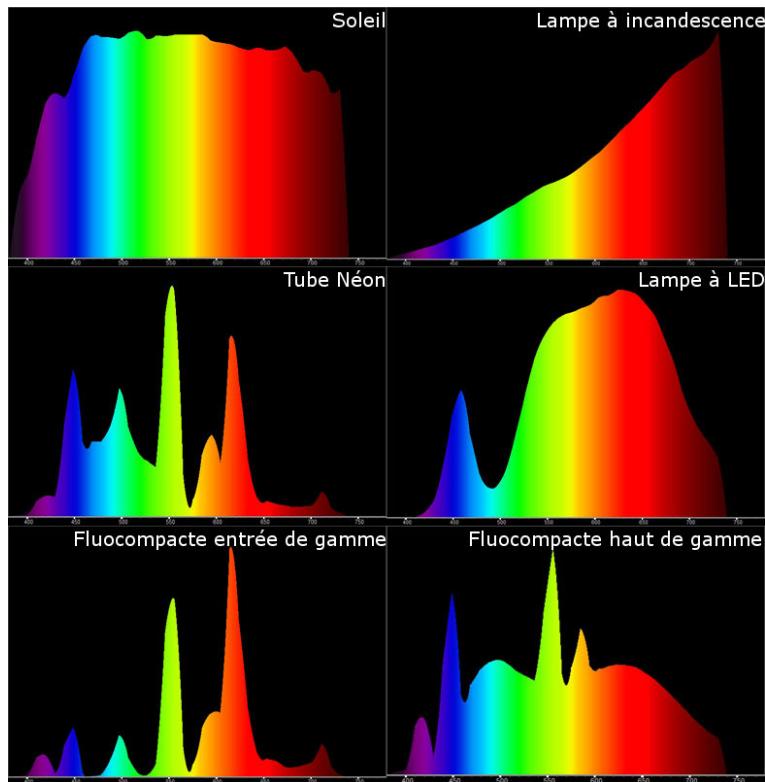


FIGURE 1.5 – Spectre thermique du Soleil : continu, quasi-homogène sur tout le visible (sensation de lumière blanche). Lampe à incandescence : spectre thermique continu, qui augmente des UV vers les IR et qui expliquent pourquoi ces lampes chauffent l'environnement qu'elles éclairent (effet des IR). Pour le « tube Néon » et les lampes : spectre à fond continu dans lesquels on observe des pics spectraux dûs aux gaz utilisés. Pour la DEL : spectre de superposition ; on remarque notamment une partie liée à une DEL bleue.
Sources : scienceettonnante.com et lesnumeriques.com.

II.5 - Laser

Un laser⁷ est une source de lumière utilisant le phénomène très particulier d'**émission stimulée**. Schématiquement, grâce à des miroirs, une onde lumineuse effectue de très nombreux allers-retours dans un dispositif appelé *cavité optique* et contenant un gaz. À chaque aller-retour, les photons circulant dans la cavité induisent l'émission d'autres photons ayant la **même fréquence**, la **même phase** et la **même direction**.

D'autre part, la cavité optique est le lieu d'un *phénomène analogue à celui de la corde vibrante* : en raison de la présence de miroirs aux extrémités de la cavité, des ondes stationnaires se forment à des fréquences discrètes (les *modes propres* de la cavité optique utilisée) et dépendant uniquement de la longueur de la cavité et de la célérité des ondes.

Propriété : Laser

Si le laser émet une seule fréquence, on dit qu'il est mono-mode. Les caractéristiques de la cavité ainsi que les propriétés de l'émission stimulée font que **le laser est alors quasi-monochromatique**.

Si le laser émet plusieurs fréquences, on dit qu'il est multi-modes. Son spectre est alors un spectre de raies très fines.

7. Acronyme de *Light amplification by stimulated emission of radiation*.

III - Modélisations des sources

Outre leurs spectres, les sources lumineuses peuvent aussi être caractérisées par leurs géométries (tailles, formes) et les directions de l'espace dans lesquelles elles émettent. Toutes ces caractéristiques font d'une source lumineuse un objet parfois très complexe, dont on simplifie l'étude grâce à des modèles.

III.1 - Modèle de la source ponctuelle

Dans le modèle de la source ponctuelle, on considère que toute la lumière est émise **depuis un seul point** (au sens mathématique du terme) et que ce point émet **dans toutes les directions de l'espace**.

Ce modèle est bien adapté pour les sources de petites tailles, c'est-à-dire dont la taille peut être négligée devant les autres longueurs ou distances en jeu dans l'étude.

Si la taille de la source ne peut pas être négligée, alors on parle de *source étendue* et on traite le problème en considérant qu'une source étendue est la juxtaposition de nombreuses sources quasi-ponctuelles mises côte à côte.

III.2 - Modèle de la source monochromatique

Dans le modèle de la source monochromatique, on considère que la source n'émet qu'**une seule longueur d'onde dans le vide** (et donc une seule fréquence).

Le modèle est bien adapté aux lasers monomodes et aux lampes spectrales si on arrive à isoler une de leur raies d'émission (par dispersion ou avec des filtres par exemple). En effet, une raie est un paquet de fréquences de très faible largeur comme l'indique la figure 1.6. Dans le cas de la lumière émise par désexcitation des atomes on a : $\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx 10^{-7}$. Pour un laser on a : $\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx 10^{-10}$

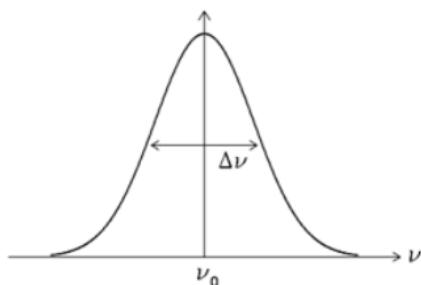


FIGURE 1.6 – Détail d'une raie d'émission d'une source spectrale ou d'un laser. Si $\frac{\Delta\nu}{\nu_0}$ est faible, le modèle d'une source monochromatique est bien adapté.

Si la source a un spectre constitué de plusieurs longueurs d'ondes, alors on parle de *source polychromatique* et on traite le problème en considérant que la source polychromatique est la superposition de nombreuses sources quasi-monochromatiques.

Pour aller plus loin...

Sensibilité de l'oeil humain

L'œil humain possède deux types de cellules photoréceptrices : environ 7 millions de cônes et près de 120 millions de bâtonnets (voir figure 1.7).

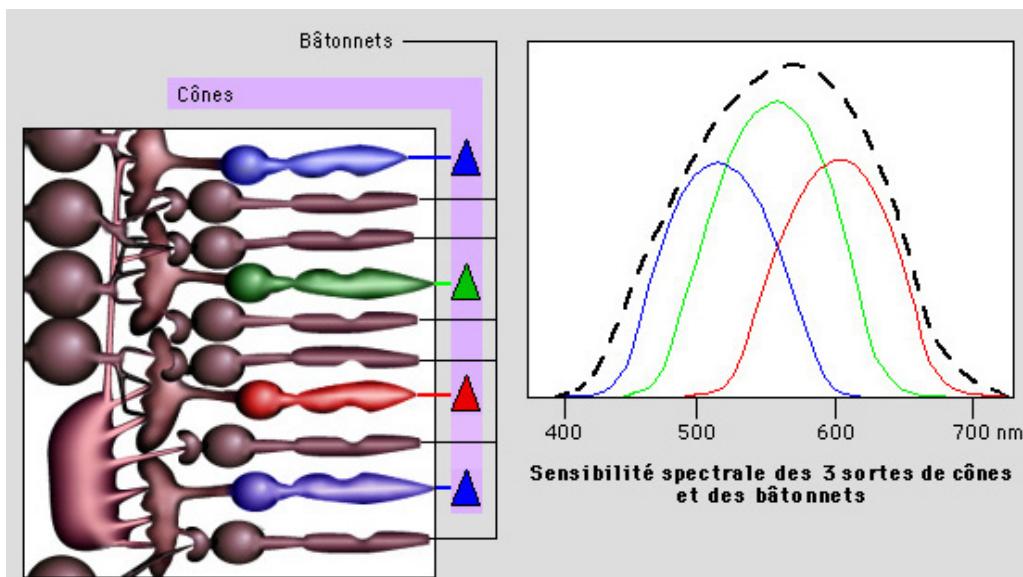


FIGURE 1.7 – À gauche : représentation des différents types de cellules photosensibles (cônes et bâtonnets) sur la rétine.
À droite : courbes de sensibilité spectrale pour les bâtonnets (noir) et les trois types de cônes : bleus (S), verts (M) et rouges (L). D'après tecfa.unige.ch

Les bâtonnets sont très sensibles à la lumière. Ils assurent donc la vision en faible luminosité (vision nocturne). En revanche, comme ils sont tous identiques, ils ne donnent accès qu'à une information d'intensité lumineuse. L'image perçue est alors en niveaux de gris, sans perception des couleurs.

Les cônes, au contraire, existent en trois types, chacun ayant une sensibilité maximale pour une longueur d'onde différente : dans le rouge, le vert ou le bleu. La perception des couleurs résulte de la combinaison des réponses de ces trois types de cônes (voir figure 1.7).

La notion de couleur n'a donc pas de définition purement physique : certaines couleurs correspondent directement à une longueur d'onde unique (les couleurs de l'arc-en-ciel) tandis que d'autres n'existent que par mélange de plusieurs longueurs d'onde (par exemple le rose ou le marron). Enfin, une même couleur peut provenir de spectres différents : par exemple, un rayonnement monochromatique de 560 nm excite deux fois plus les cônes verts que les cônes rouges ou bleus. Mais une superposition de rayonnements à 510 nm et 600 nm produira la même réponse combinée, et donc la même couleur perçue.

Dualité onde–corpuscule

La lumière est décrite en **physique quantique** par une double nature : elle se comporte à la fois comme une **onde électromagnétique**, capable de se propager et d'interférer, et comme un **flux de photons**, particules élémentaires qui transportent l'énergie par quanta. Cette dualité onde-corpuscule explique des phénomènes aussi variés que les interférences lumineuses et l'effet photoélectrique. L'énergie d'un photon est reliée à la longueur d'onde par la relation :

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

où h est la constante de Planck.