

# Activité – Sources de lumière

La lumière est émise à partir de sources, qui présentent des caractéristiques très différentes selon leur constitution. Avant d'examiner la description de la lumière et sa propagation dans divers milieux, un recensement des différents types de sources lumineuses est utile.

## 1. Lampe spectrale

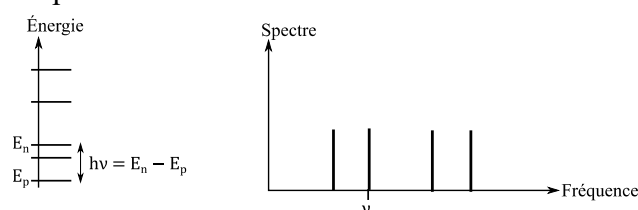
Les lampes spectrales sont constituées d'une ampoule renfermant une vapeur atomique. Les propriétés de la lumière émise dépendent essentiellement de l'élément chimique concerné, on le précise dans le nom de la lampe : on parle ainsi de lampe à vapeur d'hydrogène, de mercure ou de sodium...



Une excitation électrique à haute tension appliquée entre les électrodes modifie l'état de cette vapeur, dont les atomes s'agitent fortement. Excités lors de très nombreuses collisions, les atomes de la vapeur atteignent temporairement des niveaux d'énergie plus élevés que ceux de l'état fondamental. Lorsqu'ils se dés excitent, c'est-à-dire lorsqu'ils regagnent un état d'énergie plus faible, les atomes émettent des *grains de lumière*, appelés *photons*, dont la fréquence  $\nu$  ne peut prendre que des valeurs particulières.

En effet, les niveaux d'énergie  $E_n$  des atomes sont quantifiés par un entier  $n$  : à l'instar des modes d'oscillation d'une corde vibrante. Le principe de conservation de l'énergie impose que l'énergie d'un photon émis ne puisse prendre qu'une valeur égale à la différence de deux niveaux d'énergie de l'atome :  $E = E_n - E_p$ , où  $n$  et  $p$  sont des nombres entiers. Or l'énergie  $E$  d'un photon est liée à sa fréquence  $\nu$  par la relation  $E = h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , donc  $\nu$  ne peut prendre que des valeurs discrètes :  $\nu = \frac{E_n - E_p}{h}$

Le spectre d'une lampe à vapeur atomique, observé grâce à un spectromètre (fonctionnant avec un prisme, ou un réseau...) présente donc des raies fines et isolées les unes des autres, on parle de spectre discret, ou spectre de raies.



On retiendra que le caractère discret du spectre d'une lampe à vapeur atomique est la conséquence de la quantification de l'énergie des atomes.

Quelques ordres de longueur d'onde  $\lambda_0$  (valeurs dans le vide) :

- Raie bleue du mercure (Hg) :  $\lambda_0 = 436 \text{ nm}$
- Raie verte du mercure (Hg) :  $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$
- Doublet jaune du sodium (Na) :  $\lambda_0 = 589,0 \text{ nm}$  et  $\lambda_0 = 589,6 \text{ nm}$
- Raie rouge du cadmium (Cd) :  $\lambda_0 = 644 \text{ nm}$

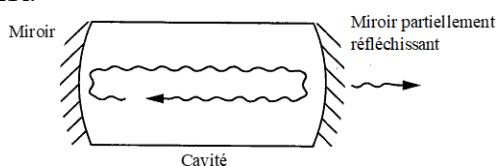
Le spectre est donc une signature de l'élément chimique, avec des applications importantes dans l'étude de la physique atomique. De plus l'intérêt de disposer d'un rayonnement composé de quelques fréquences connues avec précision à de nombreuses applications en métrologie.

## 2. Le laser

La source de rayonnement monochromatique reine est néanmoins, au laboratoire et dans de nombreux domaines de la vie courante, le LASER. Ce sigle, mis pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ou amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement), traduit un phénomène qui est au cœur du principe de fonctionnement du LASER.



Schématiquement, un LASER comporte une cavité dans laquelle une onde lumineuse effectue des allers retours. Elle est amplifiée à chaque traversée d'un milieu amplificateur, afin de compenser les pertes qui se produisent lors des réflexions (entre autres par le fait que de la lumière sort de la cavité, pour être utilisée à l'extérieur). Lorsque cet équilibre entre l'amplification par le milieu et l'atténuation par les réflexions est respecté, on aboutit à un mode entretenu de vibration du LASER.

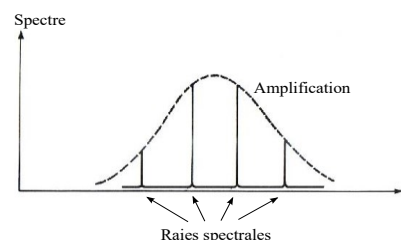


Toute la difficulté du procédé, qui n'a été maîtrisé que dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, repose dans l'obtention d'une amplification de lumière. En effet, un grain de lumière qui rencontre un atome peut être absorbé, ce qui va dans le sens de l'atténuation de l'onde lumineuse, et il peut être émis lors de la désexcitation ultérieure de l'atome, comme ce qui a été décrit pour les lampes spectrales. Mais ce jeu d'absorption-émission spontanée ne permet pas d'amplification.

Il faut, pour ce faire, favoriser les conditions d'une émission stimulée, dans laquelle l'interaction du photon incident et d'un atome excité produit l'émission d'un second photon, en phase avec le premier. Ce phénomène, d'abord prédit théoriquement, a pu être favorisé en réunissant des conditions très particulières, dans lesquelles une assemblée nombreuse d'atomes excités est en permanence présentée au rayonnement lumineux, de manière à ce que l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption.

Cette production d'un état non naturel, qualifié d'inversion de population, où les atomes excités sont plus nombreux que les atomes au repos, nécessite un apport permanent d'énergie. De ce fait, il n'y a pas de génération spontanée d'énergie : le rayonnement LASER créé possède une puissance qui est bien inférieure à celle qu'il est nécessaire de fournir pour entretenir l'inversion de population dans la cavité.

D'un point de vue spectral, la cavité joue un rôle analogue à celui de la corde vibrante, en n'oscillant qu'à des fréquences discrètes, fonction de sa longueur d'onde et de la célérité des ondes. D'autre part, l'amplification de lumière ne peut avoir lieu que dans un domaine étroit de fréquences.



Ces deux propriétés jointes donnent au rayonnement LASER un caractère quasi monochromatique.

Pour les applications courantes, un LASER Hélium-Néon tel que celui présent dans le laboratoire de travaux pratiques délivre une lumière rouge de longueur d'onde (dans le vide)  $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$ .

### 3. Lampe à incandescence

Après l'obtention d'un spectre de raies discrètes, puis d'ondes monochromatiques, intéressons-nous maintenant à un procédé générant un rayonnement polychromatique à spectre continu et large, c'est-à-dire couvrant tout le visible.

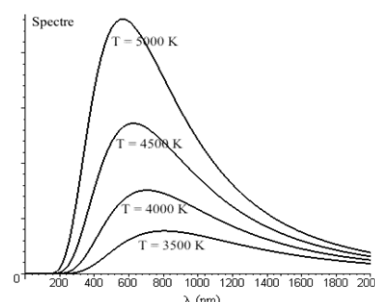
Un filament métallique placé dans une atmosphère inerte, dépourvue de dioxygène, peut être porté à haute température sans subir de combustion. On choisit bien entendu un métal dont la température de fusion est supérieure à celle utilisée, afin qu'il reste à l'état solide. Porté ainsi à une température supérieure à  $2500\text{ K}$ , le filament émet un rayonnement visible, c'est-à-dire dont une partie du spectre entre dans l'intervalle  $[400\text{ nm} ; 750\text{ nm}]$ .



Ce procédé permet d'obtenir un rayonnement visible de manière très économique, ce qui explique qu'il a été très utilisé dans l'éclairage domestique depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Son rendement jugé trop faible a conduit à lui préférer, depuis quelques années, des ampoules basse consommation. Le principe de fonctionnement de ces ampoules ne sera pas détaillé ici ; on peut simplement préciser qu'il met en jeu un phénomène de *fluorescence* dans une couche déposée sur le verre d'une ampoule.

Du point de vue du phénomène physique en jeu dans l'émission d'une lampe à incandescence, c'est à l'agitation des particules chargées que l'on doit la production d'ondes électromagnétiques. On parle de *rayonnement thermique*, ce qui donne une totale parenté entre l'émission par une lampe à incandescence et la production de lumière à la surface du Soleil !

Entre les deux, seule la température change, ce qui a comme conséquence que le spectre du rayonnement d'une lampe n'est pas situé dans le même domaine spectral que celui du Soleil, bien que les allures des deux spectres soient similaires. Alors que le spectre solaire, de température caractéristique  $5800\text{ K}$ , est centré dans le visible, celui d'une lampe à incandescence a son maximum d'émission dans l'infrarouge proche.



## Questions

---

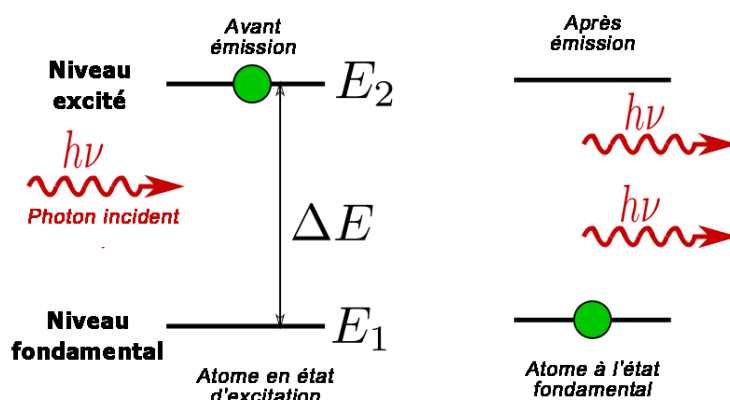
1. Qu'est-ce qu'un rayonnement monochromatique ? polychromatique ?
2. Qu'est-ce qu'un spectre continu ? un spectre de raies ?
3. Pour chacune des sources de lumière mentionnées dans le texte, indiquer si elle émet un rayonnement dont le spectre est continu ou bien de raies. Tracer un exemple de spectre dans les trois cas.
4. Réaliser un schéma expliquant le principe d'émission stimulée.
5. L'intervalle fréquentiel d'amplification étant de l'ordre de  $\Delta\nu = 10^9 \text{ Hz}$ . Comparer la largeur spectrale relative  $\frac{\Delta\nu}{\nu_0}$  à celle d'un doublet de sodium. Conclure sur la notion de lumière monochromatique.

Un corps porté à une température  $T$  émet un rayonnement thermique dont le spectre continu présente son maximum à la fréquence  $\nu_m$ , avec  $\nu_m$  proportionnelle à  $T$  d'après la loi de Wien :  $\nu_m = Cst \cdot T$ . L'intervalle de fréquences dans lequel se situe grossièrement l'essentiel de l'émission est  $\left[\frac{\nu_m}{8}, 2\nu_m\right]$ .

6. Déterminer la valeur de la constante  $Cst$  de la loi de Wien, sachant que le Soleil est à la température  $T = 5800 \text{ K}$  et que la longueur d'onde émise par le Soleil avec le maximum d'intensité est  $\lambda_m = 500 \text{ nm}$ .
7. En déduire dans quel intervalle spectral se trouve l'essentiel de l'émission d'une lampe à incandescence dont le filament est porté à la température  $T = 2500 \text{ K}$ . Quel est l'intervalle spectral d'émission ? Recouvre-t-il le visible ?
8. À quelle température minimale faut-il porter un filament pour qu'il y ait une intersection entre son intervalle spectral d'émission et le domaine visible ?
9. D'après les informations données dans le texte pourquoi les lampes à incandescence ne sont pas très rentables d'un point de vue énergétique ?

# Réponses

1. Rayonnement monochromatique = une longueur d'onde  
Rayonnement polychromatique = plusieurs longueurs d'ondes
2. Spectre continu = on passe d'une longueur d'onde à l'autre de façon continu  
Spectre de raies = seules quelques longueurs d'ondes sont présentes.
3. Lampes spectrales = spectre de raies polychromatiques  
Laser = spectre de raies monochromatique  
Lampes à incandescence = spectre continu
- 4.



5. Largeur relative du spectre de la lampe à vapeur de sodium  $\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 10^{-3}$ . La largeur relative du spectre total du LASER est de  $\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{10^9}{10^{14}} = 10^{-5}$ . C'est pour ça que l'on considère la lumière du LASER « monochromatique ». On parlera du modèle pour une lumière monochromatique.
6. La longueur d'onde de  $500\text{nm}$  correspond à  $\nu_m = 6 \cdot 10^{14}\text{Hz}$  donc  $C = 10^{11}\text{Hz/K}$
7. Intervalle spectral  $[3 \cdot 10^{13}\text{Hz}; 5 \cdot 10^{14}\text{Hz}]$  visible et surtout IR.
8. Pour obtenir  $2\nu_m = 4 \cdot 10^{14}\text{Hz}$  il faut  $T = 2000\text{K}$ . Le filament doit être porté à haute température : sans changement d'état (donc tungstène) et sans combustion (ampoule sans  $\text{O}_2$ ).
9. Une lampe à incandescence émet dans le non visible. On perd alors de l'énergie pour émettre ces longueurs d'ondes.