

Spectroscopie et sources lumineuses

3.1 Spectre de différentes sources de lumière

3.1.1 Domaine spectral proche du visible

La lumière est une onde électromagnétique, c'est à dire une perturbation du champ électrique et du champ magnétique qui se propage de proche en proche, dans le vide ou la matière. Cette onde peut être caractérisée par une longueur λ exprimée en mètre (m).

- La lumière visible est comprise entre 400 nm et 700 nm environ.
- Au dessus de 700 nm se situe le proche infra rouge (IR ou NIR pour "Near Infra Red").
- En dessous de 400 nm débute la zone U.V de l'ultra violet (figure 3.1).

On rappelle également la conversion d'unité $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$.

Il existe une relation entre la longueur d'onde λ , en mètre (m), la vitesse de propagation de l'onde dans le vide $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ et la fréquence d'oscillation de cette onde notée ν en Hertz (Hz)

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

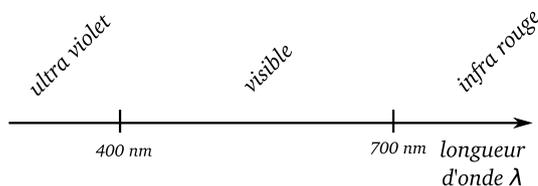


Figure 3.1 – Spectre électromagnétique simplifié

3.1.2 Exemples de sources lumineuses

Sur la figure 3.2 sont regroupés différents spectres de sources lumineuses. Certaines sources ont des spectres caractérisés par la présence de pics de

forte intensité lumineuses pour certaines longueurs d'ondes, il y a des raies d'émissions.

Pour les lasers, il y a en général qu'une seule raie très fine, une source laser sera donc qualifiée comme étant monochromatique, elle ne délivre qu'une seule couleur.

3.2 Sources chaudes, loi de Wien

3.2.1 Principe du rayonnement du corps noir

Un corps dense, solide, liquide ou gaz à forte pression, émet un rayonnement électromagnétique par le simple fait d'avoir une certaine température.

Si cette température dépasse environ 1000 °C, le corps va émettre un rayonnement visible, qui se décale vers la partie bleue du spectre si sa température de surface croit.

On appelle ce phénomène le "rayonnement du corps noir" qui s'observe par exemple dans un four de potier, qui devient rouge orangé durant son fonctionnement alors qu'à température ambiante, l'intérieur est sombre (figure 3.3).

3.2.2 Loi de Wien

Si on connaît le spectre d'émission d'un corps noir (figure 3.4), on observe qu'un maximum d'énergie est émis pour une certaine longueur d'onde λ_{max} . Cette longueur d'onde est liée à la température de surface $T_{surface}$ du corps noir par la "Loi du déplacement de Wien".

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T_{surface}}$$

avec λ_{max} en mètre, $T_{surface}$ en degré Kelvin (K), et $b = 2.899 \times 10^{-3} \text{ m.K}$.

Pour convertir une température θ en °C en une température T en K on utilise la relation simple

$$T = 273 + \theta$$

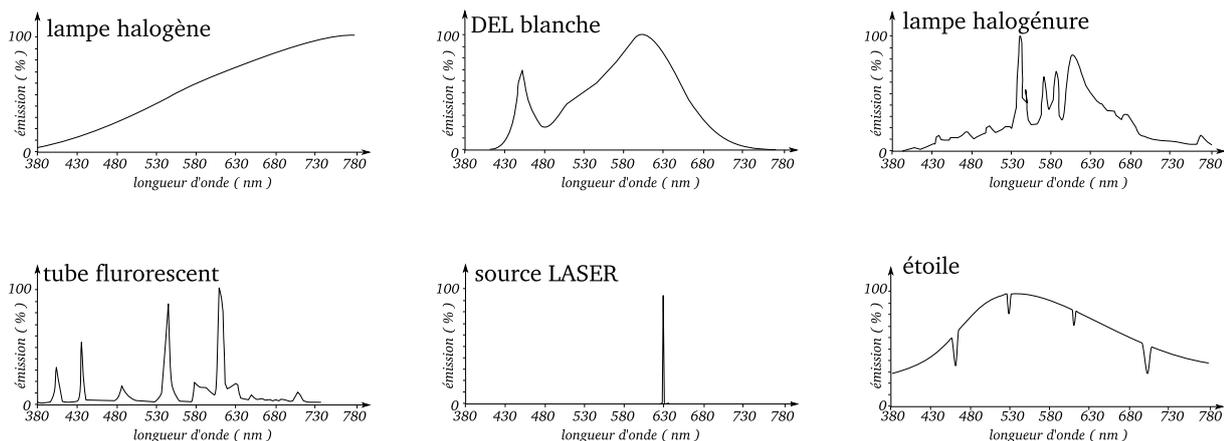


Figure 3.2 – Spectres de différentes sources de lumières



Figure 3.3 – Four à Raku au moment de son ouverture, on observe la couleur jaune orange des parties du four à plus de 1000 °C. Le Raku est une technique d'émaillage

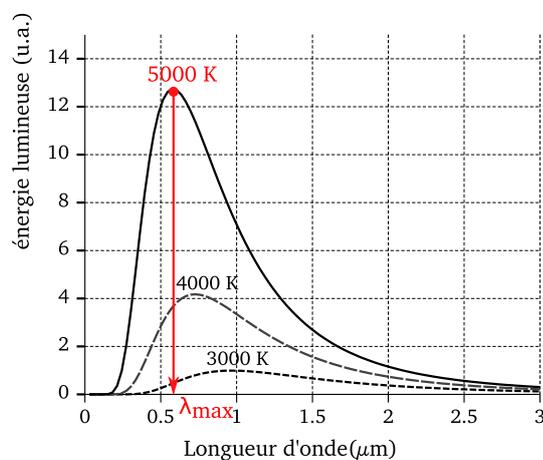


Figure 3.4 – Spectre d'un corps noir. La longueur d'onde où se situe le maximum d'émission dépend de la température de surface du corps noir

3.2.3 Applications

La loi du déplacement de Wien permet de mesurer des températures de surface corps chauds, comme celle des étoiles ou des planètes. Elle est utilisée également dans un instrument de mesure de température de four ou de flammes : le pyromètre optique.

3.3 Interaction rayonnement et matière

3.3.1 Le photon

Le rayonnement électromagnétique peut interagir avec la matière, c'est à dire qu'il peut permettre à un système matériel de gagner ou de perdre de l'énergie. Par exemple, on sent sur notre peau le rayonnement

infrarouge d'un feu de camp ou du Soleil qui nous réchauffe.

La lumière du Soleil peut aussi produire de l'énergie électrique grâce à des panneaux photovoltaïques. Cette lumière solaire permet également aux plantes vertes, via la photosynthèse, de fabriquer de nouvelles molécules pour sa croissance.

Pour décrire ce transfert d'énergie, les physiciens ont mis en place le modèle corpusculaire de la lumière qui est décrite comme étant formée par une "pluie de petites particules sans masse" le photon. Un photon transporte une énergie ΔE qui dépend de la couleur de la lumière, donc de la longueur d'onde λ .

$$\Delta E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

avec ΔE en Joule (J), $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ la constante de Planck, et $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ la vitesse de la lumière dans le vide.

On peut aussi écrire cette relation en fonction de la fréquence ν (en Hz) de l'onde lumineuse

$$\Delta E = h \times \nu$$

Comme ces énergies sont très faibles, on utilise une unité plus commode, l'électron-volt (eV) qui est un paquet d'énergie de $1.6 \times 10^{-19} J$.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} J$$

3.3.2 Échange d'énergie entre rayonnement et matière

Au niveau atomique, la matière peut absorber ou émettre des photons. Dans un atome, ce sont les électrons du nuage électronique qui vont acquérir ou libérer de l'énergie en modifiant leur orbite. Cependant, une découverte fondamentale de la mécanique quantique est que les états d'énergie possibles pour un type d'atome sont bien précis et ne peuvent avoir n'importe quelle valeur. Ces niveaux d'énergies sont quantifiés et les électrons passent d'un état à l'autre par un saut où il va perdre ou gagner de l'énergie sous forme de photon émis ou absorbé (figure 3.5). L'énergie de ce photon se calcule à partir de la différence d'énergie entre les deux états. On peut ensuite calculer la longueur d'onde correspondante de la radiation lumineuse.

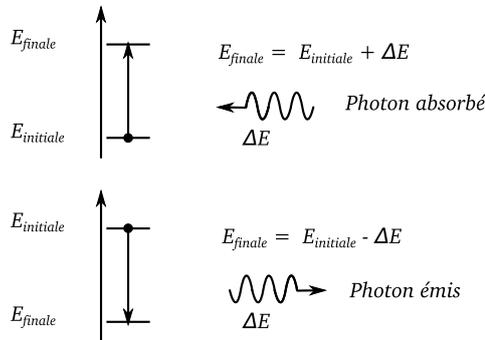


Figure 3.5 – Absorption et émission d'un photon par un atome. L'énergie de l'atome change par niveau quantifié

3.3.3 Exemple : l'atome d'hydrogène

La figure 3.6 présente les niveaux d'énergies permis dans l'atome d'hydrogène. Calculons l'énergie ΔE nécessaire pour passer du niveau 1 au niveau 2.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -1.51 - (-3.40) = 1.89 \text{ eV}$$

On convertit cette énergie en joules

$$\Delta E = 1.89 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.024 \times 10^{-19} J$$

Puis on calcule la longueur d'onde d'un photon ayant cette énergie

$$\Delta E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

donc

$$\lambda = \frac{h \times c}{\Delta E}$$

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 2.99 \times 10^8}{3.024 \times 10^{-19}} = 655 \text{ nm}$$

On a donc un photon rouge qui sera absorbé par l'atome d'hydrogène pour augmenter son énergie du niveau 1 au niveau 2.

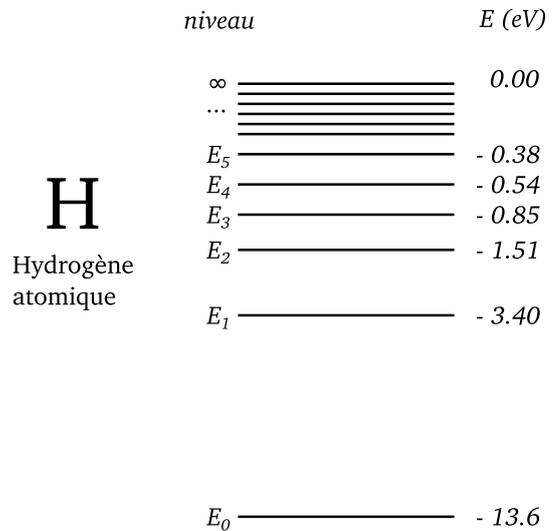


Figure 3.6 – Niveaux d'énergies permis de l'hydrogène atomique

3.4 Spectre du Soleil

3.4.1 Aspect du spectre

Le spectre solaire (figure 3.7) se compose d'un spectre continu dont le maximum d'émission est dans le vert, et de très nombreuses raies d'absorption (fins traits noirs) dues à la présence d'éléments atomiques ionisés. Au niveau du sol, l'atmosphère terrestre a ajouté de grandes bandes d'absorptions dues aux molécules dans l'air comme l'eau, l'ozone, le dioxygène et le dioxyde de carbone.

3.4.2 Température de surface

L'allure générale du spectre solaire est celle d'un corps noir ayant une température de surface de l'ordre de $5778 K$ soit une température de $5500 ^\circ C$, car le maximum d'émission se situe dans le vert, à environ $\lambda_{max} = 500 \text{ nm}$.

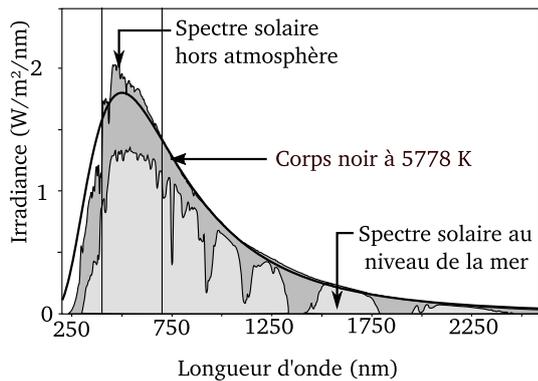


Figure 3.7 – Allure du spectre du Soleil (d'après Wikipédia)

3.4.3 Composition chimique

On observe dans le spectre solaire de très nombreuses fines raies sombres, dans le domaine visible et ultraviolet, qui sont des raies d'absorption atomique des nombreux éléments présents dans l'étoile (He, H, Fe, Na, etc. ...).

3.4.4 Autres informations

Le profil des raies d'absorption (largeur) donne d'autres informations, notamment l'intensité du champ magnétique solaire au niveau de certaines taches sombres (plusieurs centaines voir milliers de Tesla, ce qui est énorme). Le léger décalage des raies donne une information sur les mouvements de surface du Soleil par effet Doppler, cela permet de savoir comment tremble l'étoile et permet de modéliser sa structure interne (héliosismologie).

3.5 Exercices

Ex. 7 p.55	Ex. 8 p.55	Ex. 10 p.55
Ex. 11 p.55	Ex. 12 p.55	Ex. 14 p.55
Ex. 20 p.57	Ex. 22 p.57	Ex. 23 p.58
Ex. 24 p.58	Ex. 27 p.59	Ex. 28 p.60

3.6 Corrections

Exercice 7 p.55 On utilise le document 3 p. 49, ainsi que le tableau des puissances de dix, en bas de couverture, rabat I. **a.** $\lambda = 6 \times 10^{-7} m = 600 nm$ c'est une radiation rouge, dans le visible. **b.** $\lambda = 0.3 \mu m = 0.3 \times 10^{-6} m = 300 nm$ c'est une radiation ultraviolette. **c.** $\lambda = 9 \times 10^{-7} m = 900 nm$ c'est une radiation dans le proche infra rouge.

Exercice 8 p.55 Voir la définition p. 49 paragraphe 1. **1.** On a la relation générale, dans le vide $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1}$

avec λ_1 en mètre, $c = 2.99 \times 10^8 m.s^{-1}$ et ν_1 en Hertz. Donc, après avoir convertit, $\nu_1 = \frac{2.99 \times 10^8}{632.8 \times 10^{-9}} = 473 THz$. **2.** On a la relation générale, dans le vide $\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2}$, puis on isole la longueur d'onde, on multiplie chaque membre par λ_2

$$\lambda_2 \times \nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} \times \lambda_2$$

On simplifie

$$\lambda_2 \times \nu_2 = c$$

On divise chaque membre par ν_2

$$\frac{\lambda_2 \times \nu_2}{\nu_2} = \frac{c}{\nu_2}$$

Puis on simplifie

$$\lambda_2 = \frac{c}{\nu_2}$$

On effectue ensuite le calcul numérique en étant attentif aux unités à utiliser

$$\lambda_2 = \frac{2.9 \times 10^8 m.s^{-1}}{5.64 \times 10^{14} Hz} = 532 nm$$

C'est une radiation verte.

Exercice 10 p.55 **1.** Voir p. 49 la définition, λ_{max} est la longueur d'onde pour laquelle l'émission de lumière est maximale quand on observe le spectre d'un objet chaud, de température θ , exprimée en degré Celsius. **2.** Si λ_{max} devient de plus en plus grand, on constate que dans l'équation de la loi de déplacement de Wien, on divise une constante par un nombre de plus en plus grand, le résultat tend à devenir de plus en plus petit, et T tend vers le zéro absolu.

3. Il faut isoler le paramètre λ_{max} dans l'équation fournie On ajoute 273 aux deux membres, puis on simplifie

$$\theta + 273 = \frac{2.89 \times 10^6}{\lambda_{max}} - 273 + 273$$

$$\theta + 273 = \frac{2.89 \times 10^6}{\lambda_{max}}$$

On multiplie chaque membre par λ_{max} puis on simplifie

$$\lambda_{max} \times (\theta + 273) = \frac{2.89 \times 10^6}{\lambda_{max}} \times \lambda_{max}$$

$$\lambda_{max} \times (\theta + 273) = 2.89 \times 10^6$$

On divise chaque membre par $\theta + 273$ et on simplifie

$$\frac{\lambda_{max} \times (\theta + 273)}{\theta + 273} = \frac{2.89 \times 10^6}{\theta + 273}$$

$$\lambda_{max} = \frac{2.89 \times 10^6}{\theta + 273}$$

$$4. \lambda_{max} = \frac{2.89 \times 10^6}{20000 + 273} = 143 nm$$

Exercice 11 p.55 1. Non, seules certaines valeurs sont possibles, l'atome passe de façon discontinue d'une valeur à l'autre (un « saut »). L'énergie est quantifiée car elle ne prend que certaines valeurs possibles. 2. Pour gagner de l'énergie et sauter à un état plus énergétique, l'atome absorbe de l'énergie lumineuse (le photon). Pour descendre d'un niveau d'énergie, l'atome libère cet excès d'énergie sous forme d'un photon dont la couleur dépend de cette énergie. Plus l'énergie est grande plus le photon a une couleur bleue. 3. Non, car elles n'ont pas forcément le même nombre d'électrons, donc les niveaux d'énergies et les transitions possibles sont différents et du coup, les énergies des photons émis différentes.

Exercice 12 p.55 Voir formule p.50 et attention aux unités! 1. $\lambda = 516 \text{ nm} = 516 \times 10^{-9} \text{ m}$ donc $\Delta E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 2.99 \times 10^8}{516 \times 10^{-9}} = 3.85 \times 10^{-19} \text{ J}$ 2. $3.85 \times 10^{-19} \text{ J}$ correspond à $\frac{3.85 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 2.41 \text{ eV}$.

Exercice 14 p.55 1. On calcule la valeur du saut d'énergie à partir du diagramme des niveaux d'énergie $\Delta E = -3.54 - (-5.39) = 1.85 \text{ eV}$ Cette énergie est libérée sous la forme d'un photon. En joules, on a donc $\Delta E = 1.85 \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.96 \times 10^{-19} \text{ J}$. 2. Comme $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$, on peut isoler la longueur d'onde pour obtenir la relation $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$. On fait le calcul numérique $\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 2.99 \times 10^8}{2.96 \times 10^{-19}} = 672 \text{ nm}$ ce qui correspond à une radiation lumineuse rouge.

Exercice 20 p.57 1. C'est une émission de lumière, la nébuleuse est brillante, elle émet de la lumière. 2. Quand l'atome perd de l'énergie, il passe du niveau -1.51 eV à -3.40 eV . L'énergie que l'atome perd s'échappe grâce à un photon dont l'énergie sera $\Delta E = -1.51 - (-3.40) = 1.89 \text{ eV}$ soit en Joules, $\Delta E = 3.02 \times 10^{-19} \text{ J}$. 3. $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$ et donc $\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 2.99 \times 10^8}{3.02 \times 10^{-19}} = 658 \text{ nm}$. 4. C'est une raie d'émission dans le rouge.

Exercice 22 p.57 1. Le niveau d'énergie E_0 est le « niveau fondamental », c'est le niveau d'énergie le plus faible que puisse avoir un atome. Les autres niveaux sont les « niveaux excités » que peut prendre l'atome. Mais ce ne sont pas des états stables et rapidement, l'atome va se désexciter en émettant de la lumière. 2. La plus grande longueur d'onde émise correspond à la plus petite énergie absorbée, donc à la transition du niveau E_0 au niveau E_1 permet d'absorber les photons avec la plus grande longueur d'onde. 3. La transition du niveau 1 vers le niveau 0 correspond une énergie $\Delta E = -5.77 - (-10.44) = 4.67 \text{ eV}$ soit $\Delta E = 7.47 \times 10^{-19} \text{ J}$ qui correspond à une longueur d'onde $\lambda = 266 \text{ nm}$ qui est trop

grande. On essaye maintenant la transition de 2 vers 0. $\Delta E = -5.55 - (-10.44) = 4.89 \text{ eV} = 7.82 \times 10^{-19} \text{ J}$. Dans ce cas, $\lambda = 254 \text{ nm}$ qui est la longueur d'onde observée. La transition observée est donc celle de E_2 vers E_0 .

Exercice 23 p.58 1.a Figure 3.8.a. 1.b On constate que les deux grandeurs ne sont pas proportionnelles. 2.a Figure 3.8.b. 2.b L'allure de la courbe est une droite d'équation $\theta = a \times \frac{1}{\lambda_{\text{max}}} + b$ avec $a = 2.88 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{nm}$ et $b = -268 \text{ } ^\circ\text{C}$. 2.c Voir ci dessus, c'est en bon accord avec la loi de Wien. 3. Elle permet de connaître la température de surface de l'étoile.

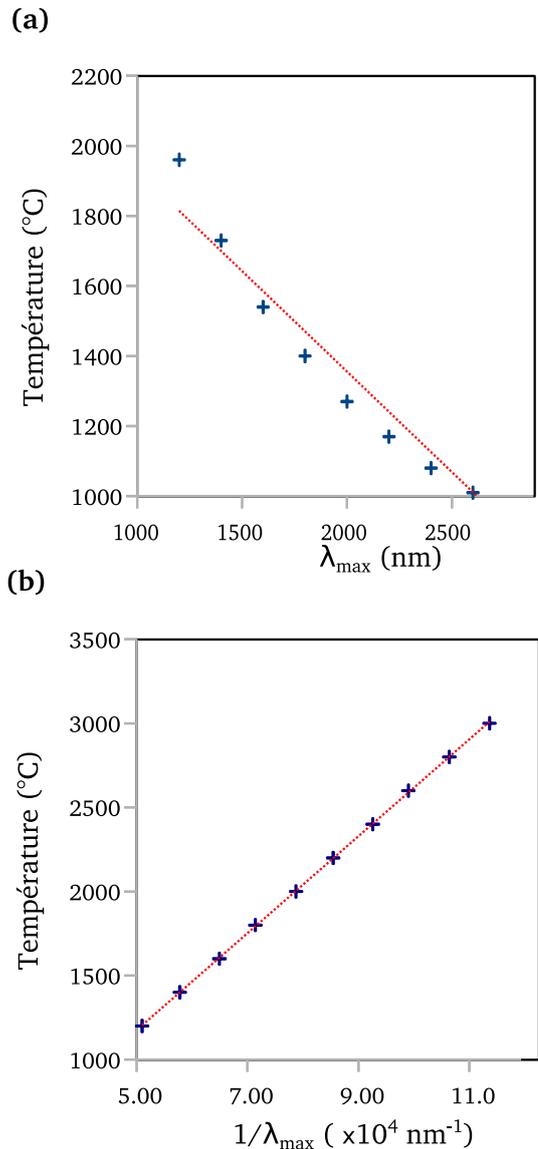


Figure 3.8 – Exercice 23 p.58

Exercice 24 p.58 1.a On utilise la formule p.50 en étant attentif au choix des unités $\Delta E = \frac{hc}{\lambda} =$

$$\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 2.99 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} = 3.38 \times 10^{-19} \text{ J} \text{ et on convertit}$$

$$\text{en électron volt } \Delta E = \frac{3.38 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 2.11 \text{ eV. 1.b}$$

On constate que cette transition correspond à l'écart d'énergie entre les niveaux E_0 et E_1 car $E_1 - E_0 = -3.03 - (-5.14) = 2.11 \text{ eV}$. **2.a** Pour absorber le photon quand l'atome est à l'état E_1 , l'énergie du photon doit au moins permettre d'atteindre le niveau E_2 . Cette énergie est $E_2 - E_1 = 1.1 \text{ eV}$. L'énergie du photon est suffisante, il pourra être absorbé. **2.b** Le photon va permettre de donner de l'énergie à l'atome. Il va donc disparaître et macroscopiquement, il « manquera » de la lumière. Nous verrons donc une raie d'absorption (raie sombre dans le spectre).

Exercice 27 p.59 1.a Figure 3.9.

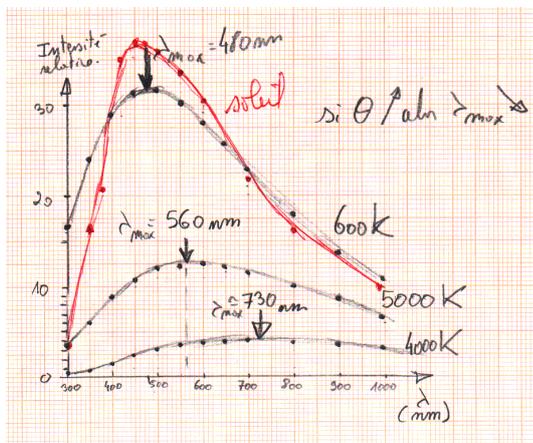


Figure 3.9 – Exercice 27 p.59

1.b Voir figure 3.9. **1.c** Si λ_{max} augmente alors la température θ diminue. **2.a** Voir ci dessus. **2.b** La température de surface du Soleil est voisine de 6000 K.

Exercice 28 p.60 1. L'énergie va être évacuée grâce à un photon de longueur d'onde correspondante à cette énergie. On observera une raie d'émission dans le spectre du gaz. **2.a** L'écart d'énergie est $\Delta E = -5.77 - (-10.44) = 4.67 \text{ eV}$ et donc en Joules $\Delta E = 4.67 \times 1.6 \times 10^{-19} = 7.47 \times 10^{-19} \text{ J}$. Comme $\lambda = \frac{h \times c}{\Delta E}$ on a après calcul numérique $\lambda = 266 \text{ nm}$. **2.b** Voir p. 49, le visible étant dans la zone $400 \text{ nm} - 800 \text{ nm}$, cette raie d'émission est clairement dans l'ultra violet. **3.** Oui, en émettant des ultra violets, le mercure va exciter la paroi qui sera fluorescente. **4.** La première poudre émet surtout dans le rouge, la lumière sera jaunâtre, la deuxième émet dans le vert et le rouge, la lumière est plus verdâtre (cyan).