

# 1 Lumière visible

La lumière visible est la lumière que notre œil peut voir.

Pour voir la lumière, il faut une source de lumière.

Il y a deux sortes de sources de lumière :

- Les sources primaires (par exemple, le Soleil) ;
- Les sources secondaires (par exemple, la Lune).

Les étoiles, les lampes, les lasers sont des sources de lumière primaire.

La lune, l'écran de cinéma et la plupart des objets qui nous entourent sont des objets qui diffusent la lumière qu'ils reçoivent, ce sont des sources de lumière secondaire.

Contrairement à la réflexion de la lumière par un miroir, par exemple, qui se fait dans une direction bien précise, la diffusion de la lumière se fait dans toutes les directions de l'espace lorsque la surface n'est pas bien lisse (bien polie) donc lorsqu'elle est irrégulière (rugueuse, dépolie).

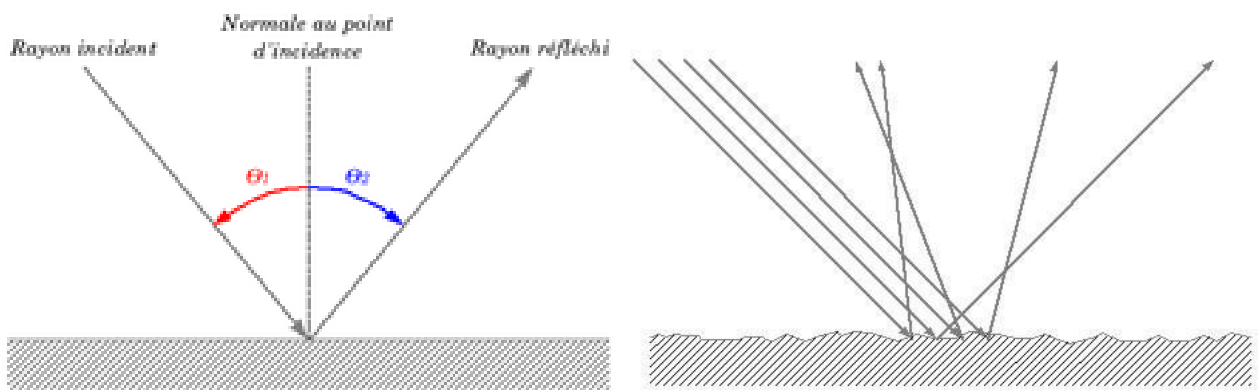


FIGURE 1 – Différence entre réflexion et diffusion de la lumière



FIGURE 2 – Le Soleil (source primaire naturelle), la Lune (source secondaire), les étoiles des Pléiades (sources primaires naturelles, visibles pendant les nuits noires, sans nuages)



FIGURE 3 – Trois sources primaires artificielles de lumière : ampoule (lampe à incandescence), laser (light amplification by stimulated emission of radiation ou amplification de lumière par émission stimulée de radiations), LED (light emitting diode ou diode électroluminescente)

## 2 Domaines des ondes électromagnétiques

### 2.1 Lumières mono et polychromatiques

La lumière émise par une source peut être analysée par un prisme ou un réseau. Cette expérience est connue depuis très longtemps, mais c'est Newton en 1666 qui a su expliquer correctement ce qui se passait : « Ce n'est pas le prisme qui fabrique les couleurs, il ne fait que les séparer car la lumière blanche est la superposition de lumières de toutes sortes de couleurs ».



FIGURE 4 – Décomposition de la lumière blanche par un prisme

Si la lumière est décomposée, elle est **polychromatique**. Elle correspond à une superposition de radiations de toutes sortes de couleurs.

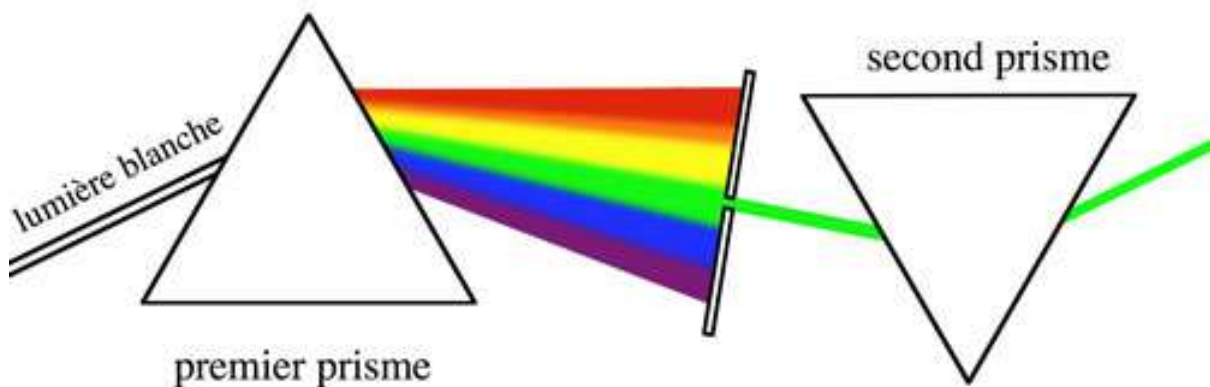


FIGURE 5 – 1<sup>er</sup> prisme : lumière polychromatique, 2<sup>nd</sup> prisme : lumière monochromatique

Si la lumière n'est pas décomposée, elle est **monochromatique**. Elle correspond à une radiation d'une seule sorte de couleur.

## 2.2 Longueur d'onde dans le vide d'une radiation

La lumière est une onde. Une onde est une déformation d'un milieu de propagation qui se déplace de proche en proche avec une certaine vitesse, appelée célérité  $c$  de l'onde, dépendant des caractéristiques physiques de ce milieu de propagation (comme une vague sur l'eau ou le son dans l'air). Une onde transporte de l'énergie mais pas de matière. Pour les physiciens, il ne peut pas y avoir d'onde sans milieu de propagation. Or, la lumière peut se propager dans le vide puisqu'elle vient du Soleil en traversant 150 millions de kilomètres de vide. Les physiciens ont donc inventé la notion d'"éther" pour expliquer ce paradoxe (comment avoir une vague sur l'eau sans eau?). Cette hypothèse a dû être abandonnée à cause d'une grande avancée théorique : la synthèse des lois de l'électromagnétisme par James Clerk Maxwell (équations de Maxwell) à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ses équations prédisaient l'existence d'ondes électromagnétiques, et leur vitesse, permettant l'hypothèse que la lumière est une onde électromagnétique. Sa vitesse de propagation dans le vide est  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . C'est la seule onde qui a le droit de se propager dans le vide et ceci, à une vitesse fabuleuse (un million de fois plus vite que le son dans l'air). À l'échelle du cosmos, la lumière met 8 minutes à venir du soleil, 4 ans et demi pour venir de l'étoile la plus proche (alpha du centaure) et 100 000 ans pour traverser notre galaxie : la Voie Lactée. Ce n'est donc pas si rapide que cela, d'autant qu'Albert Einstein, avec sa théorie de la Relativité restreinte de 1905, nous a dit que cette vitesse était inatteignable et infranchissable par un objet ayant une masse non nulle au repos (plus la vitesse augmente, plus la masse de l'objet augmente en tendant vers l'infini lorsque la vitesse atteint  $c$ , il faudrait pour cela toute l'énergie de l'Univers qui disparaîtrait dans cet objet devenu un trou noir qui engoutirait tout...).

Chaque radiation peut être caractérisée par sa **longueur d'onde dans le vide** (distance entre deux vagues successives), notée  $\lambda$ . L'unité de  $\lambda$  est le mètre (m).

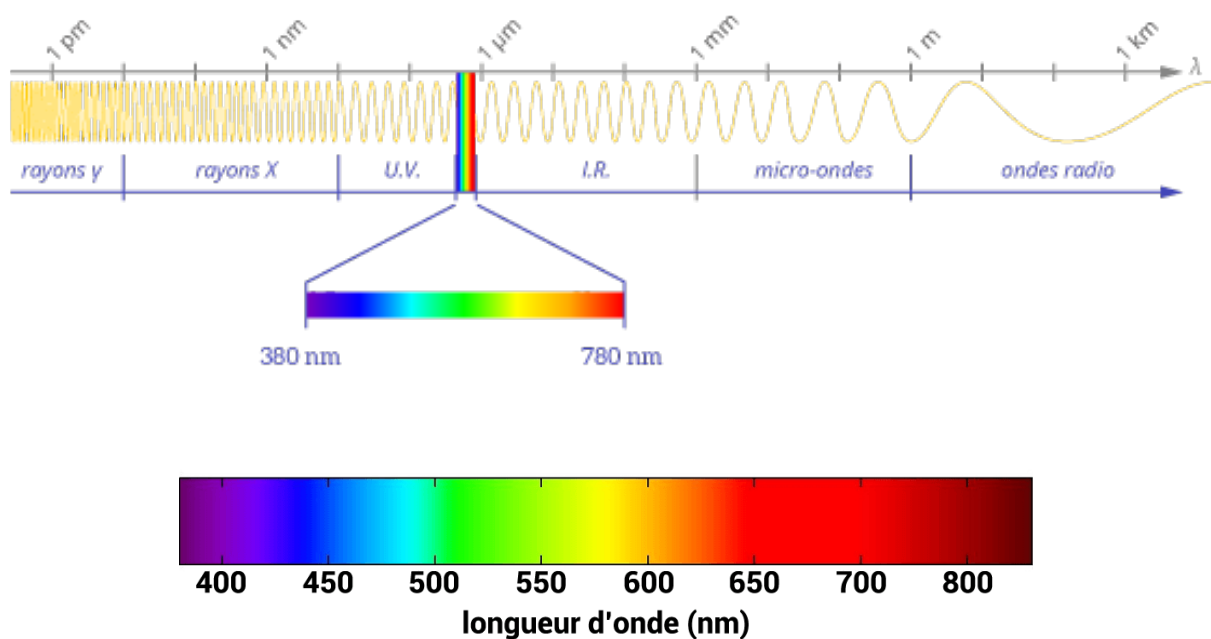


FIGURE 6 – Les ondes électromagnétiques

L'œil humain est un récepteur qui est sensible à des radiations dont la longueur d'onde est comprise entre 400 nm et 800 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).

Les rayonnements ultraviolets (UV) se situent entre la lumière violette et les rayons X. Une partie des UV solaires est absorbée par la couche d'ozone qui entoure la Terre.

Les rayonnements infrarouge se situent entre la lumière rouge et les ondes radio. Les rayonnements émis par un corps chauffé contiennent des IR, le signal d'une trélocmannde de téléviseur est transmis par un faisceau IR.

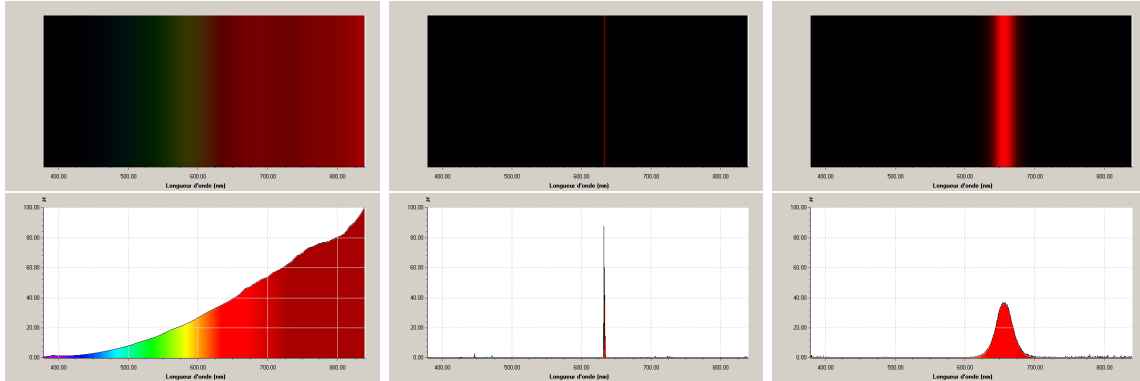


FIGURE 7 – Spectre de l'ampoule (spectre d'émission continu, lumière polychromatique), spectre du laser (spectre d'émission de raie, lumière monochromatique), spectre de la LED (spectre d'émission continu, lumière polychromatique)

### 3 Couleur des corps chauffés. Loi de Wien.

Un corps dense émet un rayonnement électromagnétique que l'on appelle **rayonnement thermique** qui dépend de sa température, et dont le spectre est continu.

Lorsque la température augmente, le spectre s'enrichit progressivement vers le violet et la couleur perçue passe du rouge sombre au blanc.

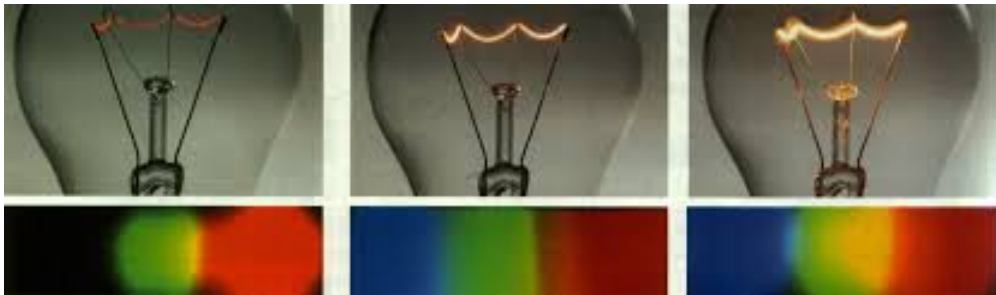


FIGURE 8 – Variation du spectre d'émission en fonction de la température du filament de la lampe à incandescence (qui augmente avec l'intensité du courant électrique qui le traverse puisque la puissance thermique dégagée est  $P_{thermique} = R \times I^2$ )

#### 3.1 Loi de Wien

Dès 1893, Wilhelm Wien (1864-1928) montre expérimentalement que le spectre continu du rayonnement thermique, émis par un corps à la température  $T$ , a une intensité maximale pour une longueur d'onde  $\lambda_{max}$  qui est donnée par la relations :

$$\lambda_{max} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T}$$

où  $\lambda_{max}$  est en mètres (m),  $T$  en kelvins (K), sachant que la relation entre la température  $T$  en kelvin et la température  $\theta$  en degrés celsius est :  $T = \theta + 273$ .

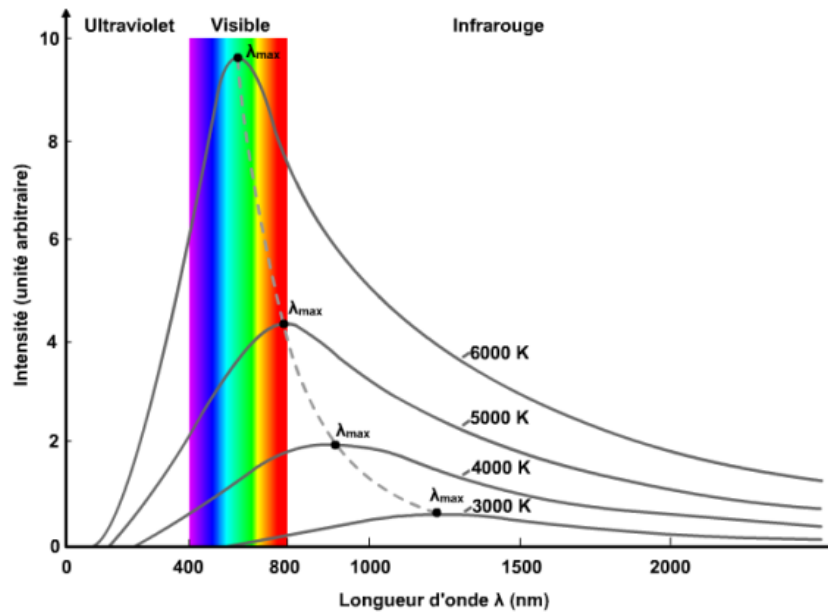


FIGURE 9 – Loi de Wien

*Remarque :* La notation  $\lambda_{max}$  n'indique pas une valeur maximale pour  $\lambda$ , mais c'est la valeur de  $\lambda$  correspondant au maximum de l'intensité du rayonnement thermique.

### 3.2 Couleur perçue

La loi de Wien ne suffit pas à prévoir la couleur d'un corps chauffé car elle dépend de l'ensemble des radiations visibles émises.

*Remarque :* En 1900, Max Planck (1858-1947) a montré à partir d'un modèle de corps idéal, qu'il est possible de calculer l'intensité du rayonnement thermique qu'il émet en fonction de la longueur d'onde, pour une température donnée. L'aspect de la courbe obtenue permet de présumer de la couleur de ce corps.

Certains corps réels ont un comportement qui se rapproche de celui de ce modèle, les étoiles par exemple.

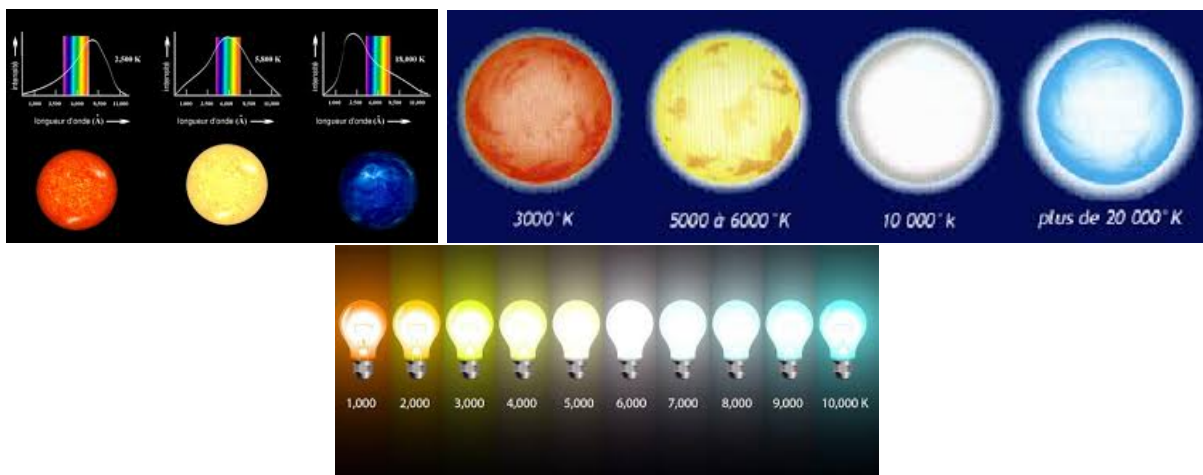


FIGURE 10 – Couleurs des étoiles en fonction de la température effective de leur surface et températures de couleur de diverses ampoules (bien noter qu'elle est différente de la température effective de la surface de l'ampoule). Elle permet de qualifier l'ambiance créée par la lumière émise : "chaude" ou warm light en anglais pour une lumière plutôt rouge ou "ambiance froide" ou cold light, pour une lumière plutôt bleue. Le rendu "lumière solaire" correspond à 4000 K

## 4 Interaction lumière-matière : émission et absorption.

Pour **émettre** de la lumière en permanence, la matière doit recevoir de l'énergie. Par exemple, les piles s'usent lorsque l'on fait fonctionner une lampe de poche ; le compteur d'énergie d'une installation domestique tourne lorsqu'on éclaire une pièce.

Inversement, lorsque la lumière est **absorbée** par la matière, de l'énergie est récupérée. Par exemple, la lumière du soleil alimente les piles photovoltaïques des panneaux solaires, chauffe l'atmosphère et le sol, apporte l'énergie nécessaire à la photosynthèse chlorophyllienne.

La lumière transporte de l'énergie.

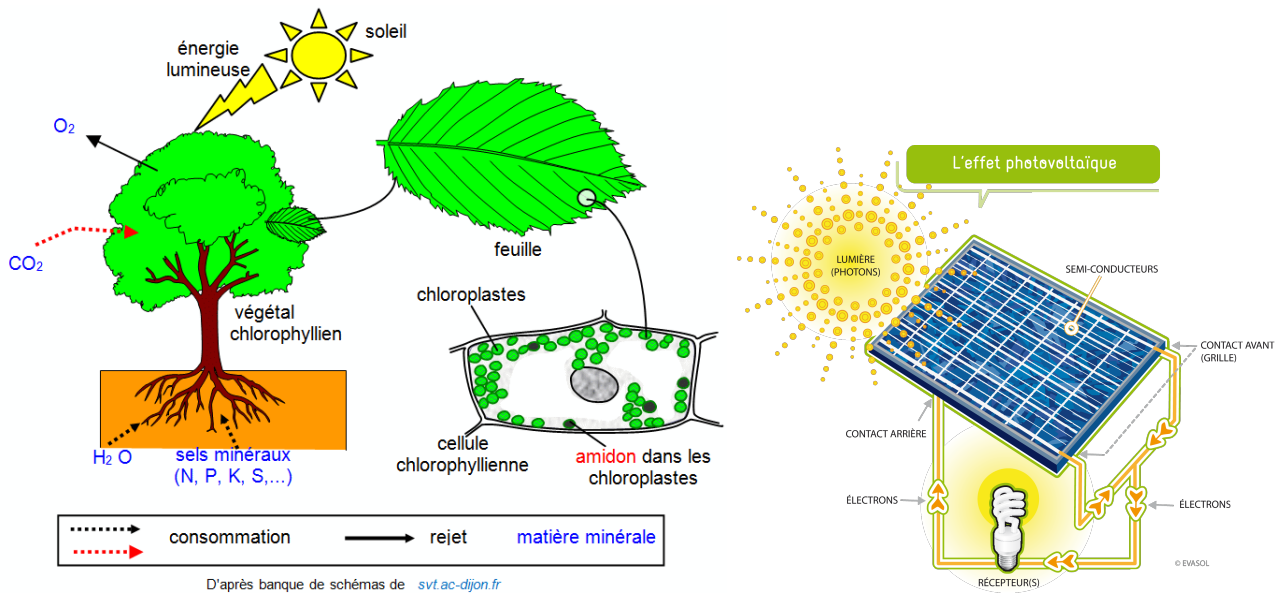


FIGURE 11 – Photosynthèse et panneaux photovoltaïques

Les ondes lumineuses appartiennent au domaine des ondes électromagnétiques : chaque radiation lumineuse est caractérisée par sa **longueur d'onde dans le vide**  $\lambda$ .

Une onde étant la propagation d'une vibration, chaque radiation est aussi caractérisée par sa **fréquence**  $\nu$  (lire "nu"). La fréquence d'une radiation est indépendante du milieu de propagation.

La fréquence  $\nu$  d'une radiation est liée à sa longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  par la relation :

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

Avec  $c$  en mètres par seconde ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ;  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans le vide,  
 $\nu$  en hertz (Hz) et  $\lambda$  en mètres (m).

## 5 Modèle corpusculaire de la matière : le photon

### 5.1 Insuffisance du modèle ondulatoire

En 1900, Lord Rayleigh montre que la puissance rayonnée est proportionnelle à la température absolue et inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde. Malheureusement cette dernière formule ne marche pas dans le domaine ultraviolet, ce qui amènera Paul Ehrenfest à créer le terme de *catastrophe ultraviolette*.

Au cours de l'année 1900, des expériences montrent que cette théorie du rayonnement fonctionne bien pour des émissions allant de l'infrarouge au vert. Par contre, pour le bleu, le violet et, plus encore, l'ultraviolet, les résultats ne concordent pas du tout avec cette théorie, qui est mise en échec. Par exemple, selon la théorie, un feu de cheminée serait une source de rayonnements mortels (de rayons gamma).

C'est pour apporter une réponse à ce problème de théorie du rayonnement que le physicien allemand **Max Planck** propose à la fin de l'année 1900 une idée révolutionnaire.

Pour interpréter les propriétés des échanges d'énergie entre matière et lumière, les physiciens ont été amenés à admettre que les énergies échangées ne peuvent prendre des valeurs quelconques.

Le modèle ondulatoire de la lumière est indispensable pour étudier la propagation de la lumière mais est insuffisant pour décrire les échanges d'énergie entre matière et lumière.

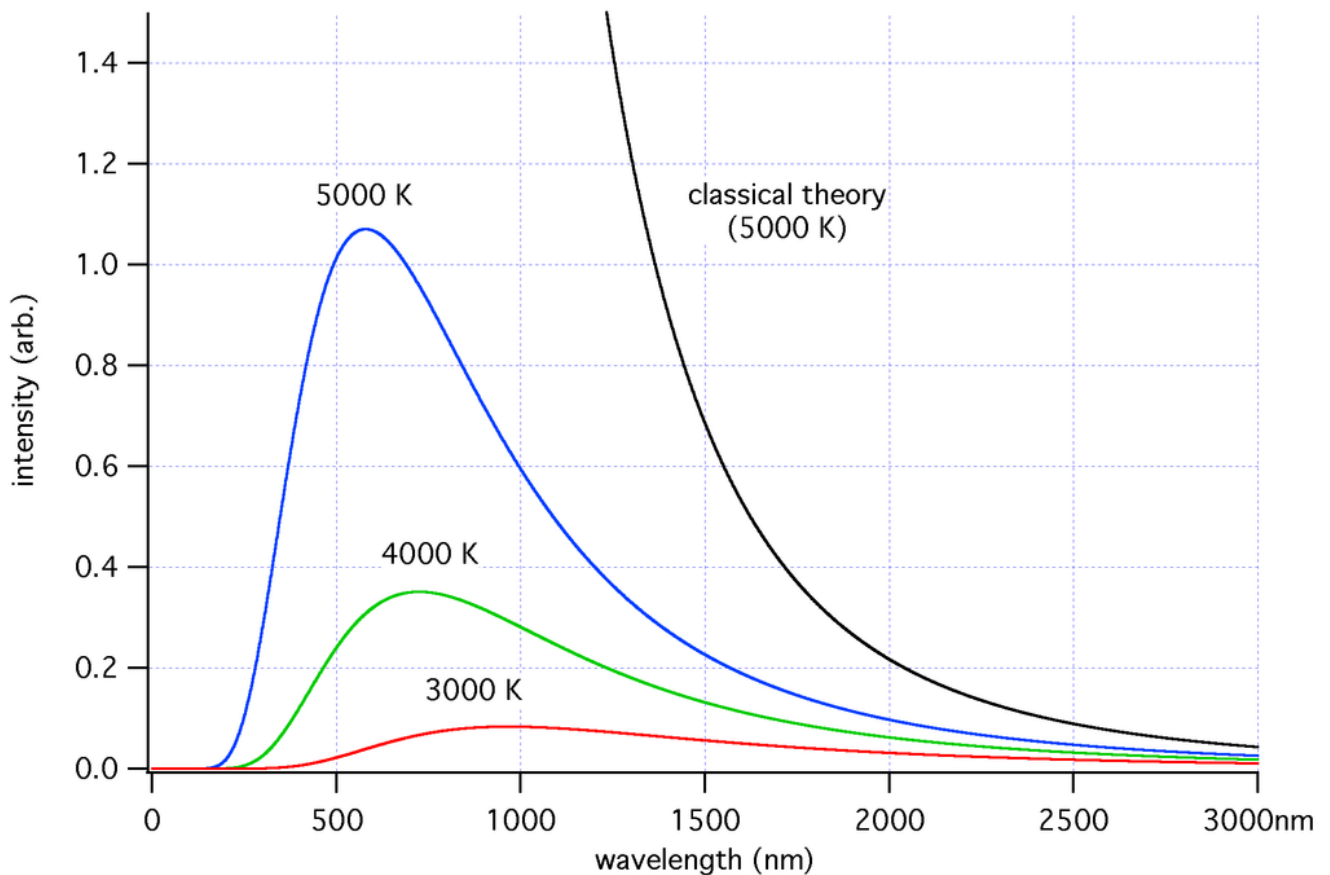


FIGURE 12 – La catastrophe ultraviolette est l'erreur mise en évidence pour les courtes longueurs d'onde dans la loi de Rayleigh du modèle classique (courbe en noir calculée à  $T = 5000$  K), donnant l'énergie émise par un corps noir idéal (la courbe correcte est celle en bleue prédite par la loi de Planck calculée à  $T = 5000$  K)

## 5.2 Le photon

Les transferts d'énergie entre matière et lumière sont **discontinus** ou **quantifiés**. Ils ne peuvent se faire que par "paquets" d'énergie contenant chacun une énergie bien déterminée.

En physique, un paquet d'énergie contenant la plus petite énergie échangeable est appelé un *quantum* (au pluriel : des quanta).

Un quantum d'énergie lumineuse est appelé un **photon**.

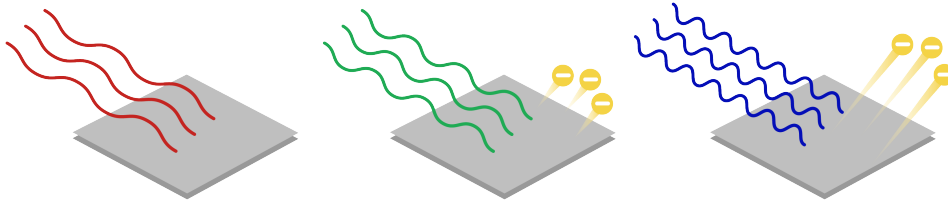


FIGURE 13 – L’effet photoélectrique : pour arracher des électrons d’une plaque métallique, augmenter l’intensité lumineuse ne suffit pas, il faut que la couleur de la lumière (représentée par des vagues) respecte certaines conditions. Ça ne marche pas du tout avec de la lumière rouge mais ça marche avec de la lumière verte. Avec de la lumière bleue les électrons (ronds jaunes) sont émis avec une plus grande vitesse (une plus grande énergie cinétique). En 1905 Einstein a postulé que la lumière était composée de photons dont l’énergie est proportionnelle à la fréquence de l’onde électromagnétique et le coefficient de proportionnalité est égal à la fameuse constante de Planck  $h$  de la loi de Planck, inventée par Planck pour modéliser (par artifice, selon lui) l’intensité des couleurs émises par les corps chauffés (mais il n’y croyait guère)

### 5.3 Energie du photon

L’énergie du photon ne dépend que de la fréquence de la radiation qui le transporte ou, ce qui revient au même, de sa longueur d’onde dans le vide.

L’énergie  $E$  d’un photon, associé à une radiation de fréquence  $\nu$ , est donnée par la relation :

$$E = h \cdot \nu \text{ (formule de Planck)}$$

Avec  $\nu$  en hertz (Hz),  $E$  en joules (J) et  $h$  qui désigne une constante universelle appelée *constante de Planck* telle que  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s.

*Remarque* : Plus la longueur d’onde dans le vide est petite, plus sa fréquence et donc l’énergie du photon associé à l’onde sont grandes.

*Application* : Calculer l’énergie des photons pour une longueur d’onde dans le vide égale à 400 nm (violet) et pour une longueur d’onde dans le vide égale à 800 nm (rouge).

*Réponse* :

$$E_1 = h \cdot \nu_1 = \frac{h \cdot c}{\lambda_1} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \cdot 3,00 \times 10^8}{400 \times 10^{-9}} = \frac{1,989 \times 10^{-16}}{400} = 4,9725 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_1 = 4,9725 \times 10^{-19} \text{ J} = \frac{4,9725 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}} \simeq 3,11 \text{ eV avec } 1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_2 = h \cdot \nu_2 = \frac{h \cdot c}{\lambda_2} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \cdot 3,00 \times 10^8}{800 \times 10^{-9}} = \frac{1,989 \times 10^{-16}}{800} = 2,48625 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_2 = 2,48625 \times 10^{-19} \text{ J} = \frac{2,48625 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}} \simeq 1,55 \text{ eV}$$

$$E(\text{eV}) = \frac{1,989 \times 10^{-16}}{1,6 \times 10^{-19} \cdot \lambda(\text{nm})} = \frac{1243,13}{\lambda(\text{nm})}$$

*Conclusion* : le photon violet a une énergie deux fois plus grande que le photon rouge. L’énergie est *proportionnelle* à la fréquence et *inversement proportionnelle* à la longueur d’onde (dans le vide). Le rouge a une longueur d’onde deux fois plus grande que le violet donc une fréquence et une énergie deux fois plus petites. Le violet a une longueur d’onde deux fois plus petite que le rouge donc une fréquence et une énergie deux fois plus grandes.



## 5.4 Dualité onde corpuscule

On peut modéliser la lumière par un déplacement de particules de masse nulle au repos (mais ils ne sont jamais au repos et ne peuvent se mouvoir qu'à une seule vitesse dans le vide, à savoir  $c$ ) : les photons. On dit pour cela que la lumière a une **structure corpusculaire**.

On peut également modéliser la lumière par une onde électromagnétique, capable de se déplacer dans le vide à la vitesse de la lumière, à savoir  $c$ . On dit pour cela que la lumière a une **structure ondulatoire**.

Par conséquent, la lumière a une double structure corpusculaire et ondulatoire que l'on nomme "dualité onde corpuscule". On entend parfois dire que la lumière est "à la fois" onde et corpuscules (ou onde et corpuscule) mais cela n'a aucun sens. La lumière est en réalité quelque chose de plus complexe, appelé "quantum" qui sous certains aspects a des propriétés corpusculaires (pour les photons de haute énergie comme les rayons X ou les rayons gamma, ce sont ces propriétés corpusculaires qui dominent) et sous d'autres aspects des propriétés ondulatoires (pour les photons de basse énergie comme les ondes radio, ce sont ces propriétés ondulatoires qui dominent). La lumière n'est pas "à la fois" onde et corpuscule, elle n'est, en toute rigueur "ni" l'un "ni" l'autre, même si elle peut prendre l'apparence tantôt de l'une ou tantôt de l'autre pour un expérimentateur.

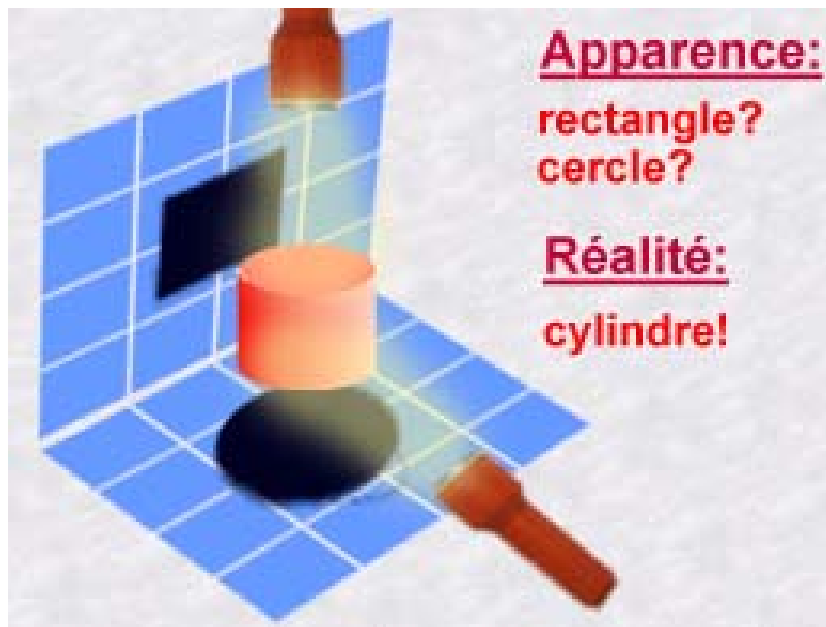


FIGURE 14 – La métaphore du cylindre

## 6 Quantification des niveaux d'énergie de la matière

La découverte du photon et l'étude des spectres de raies atomiques ont permis aux physiciens de comprendre la structure de l'atome.

### 6.1 Quantification des niveaux d'énergie de l'atome

À chaque répartition des électrons sur les couches électroniques correspond un **niveau d'énergie** de l'atome.

Pour qu'un électron passe d'une couche électronique à une couche supérieure, l'atome doit recevoir une certaine quantité d'énergie : il passe d'un niveau à un niveau supérieur.

Si le changement de couche est l'inverse du précédent, l'atome restitue la même quantité d'énergie.

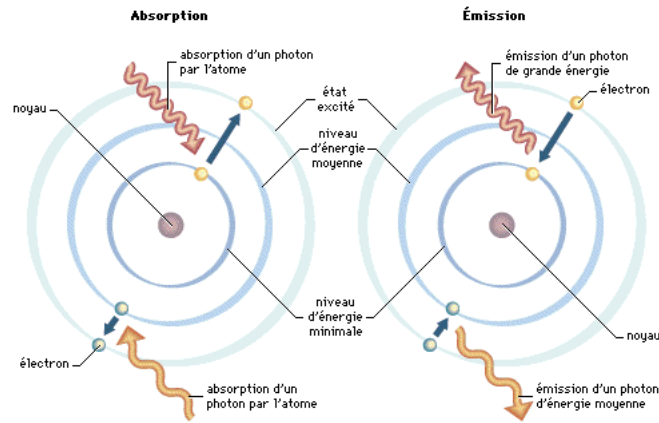


FIGURE 15 – Les niveaux d'énergie de l'atome

Les **énergies** pouvant être échangées par un atome au repos sont quantifiées : elles ne peuvent prendre que des valeurs discrètes.

On appelle énergie d'un niveau l'énergie que l'atome doit fournir pour passer de ce niveau à un niveau de référence (arbitrairement choisi). La quantification des échanges peut ainsi s'exprimer de façon équivalente :

Les **niveaux d'énergie** de l'atome sont quantifiés : leur énergie ne peut prendre que des valeurs discrètes.

Les niveaux d'énergie d'un atome ont des valeurs bien déterminées, caractéristiques de l'atome.

Lorsque l'atome est à son niveau d'énergie le plus bas, on dit qu'il est dans son **état fondamental**. Sinon, on dit qu'il est dans un **état excité**.

Un changement de niveau s'appelle une *transition électronique* (ou plus simplement *transition*). Une transition est symbolisée par une flèche droite.

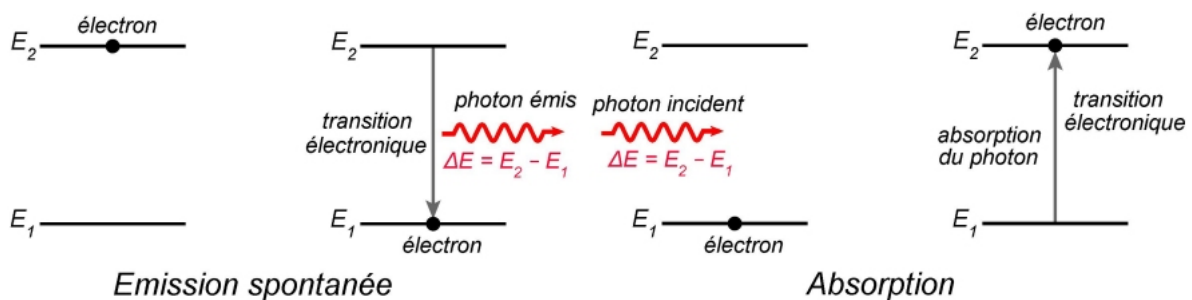


FIGURE 16 – Mécanismes d'émission de photon et d'absorption de photon

L'atome cède l'énergie  $E_2 - E_1$  lors d'une transition d'un niveau supérieur (2) à un niveau inférieur (1) : on représente cette transition par une flèche droite, orientée de haut en bas. Cette transition s'accompagne de l'**émission d'un rayonnement, un photon**, représenté par une flèche ondulée "sortante".

L'atome absorbe de l'énergie  $E_2 - E_1$  lors d'une transition d'un niveau inférieur (1) à un niveau supérieur (2) : on représente cette transition par une flèche droite, orientée de bas en haut. Cette transition s'accompagne de l'**absorption d'un rayonnement, d'un photon**, représenté par une flèche ondulée "rentrante".

## 6.2 Relation $\Delta E = h \cdot \nu$ dans les échanges d'énergie et interprétation des spectres atomiques

Pour interpréter les **spectres lumineux atomiques**, il faut admettre les hypothèses suivantes :

Un atome peut subir des transitions en échangeant de l'énergie avec un rayonnement lumineux. Dans ce cas, à chaque transition, l'énergie est intégralement échangée sous forme d'un photon et d'un seul.  
Si l'atome transite vers un niveau inférieur, un photon est émis ; dans le cas inverse, un photon est absorbé.

Dans ce cadre, on peut expliquer les propriétés des spectres atomiques.

Les énergies  $E$  des photons qu'un atome peut échanger ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, et ces valeurs sont les mêmes que les photons soient émis ou absorbés ; il en est de même pour les fréquences des radiations puisque  $\nu = \frac{E}{h} = \frac{\Delta E}{h}$  avec  $\Delta E$  l'écart d'énergie entre le niveau de départ et le niveau d'arrivée pour la transition électronique. Le spectre d'un atome est un **spectre de raies** et les raies ont les mêmes places dans les **spectres d'émission** que dans les **spectres d'absorption**.

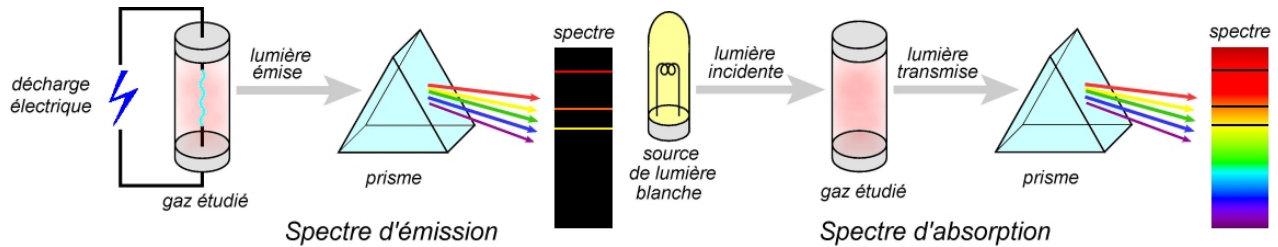


FIGURE 17 – Spectre d'émission de raies et spectre d'absorption de raies pour un même atome

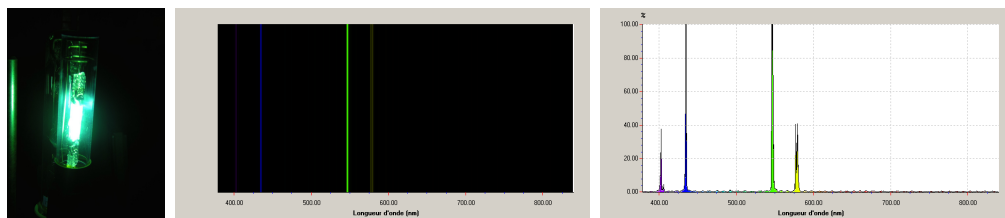


FIGURE 18 – Spectre d'émission de raies d'une lampe spectrale au mercure

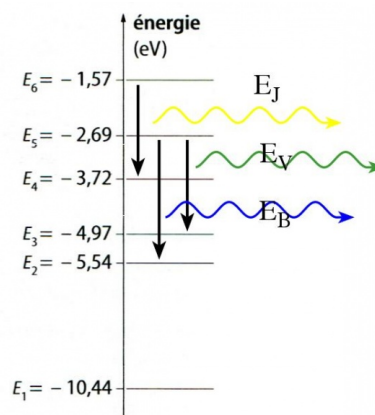


FIGURE 19 – Niveaux d'énergie de l'atome de mercure et transitions électroniques possibles

La quantification des énergies est une propriété générale observée à l'échelle microscopique. Ainsi les molécules ou encore les noyaux atomiques, ont des niveaux d'énergie quantifiés ; ce qui se manifeste dans différents domaines du spectre des ondes électromagnétiques.

## 7 De l'atome aux étoiles, le spectre solaire

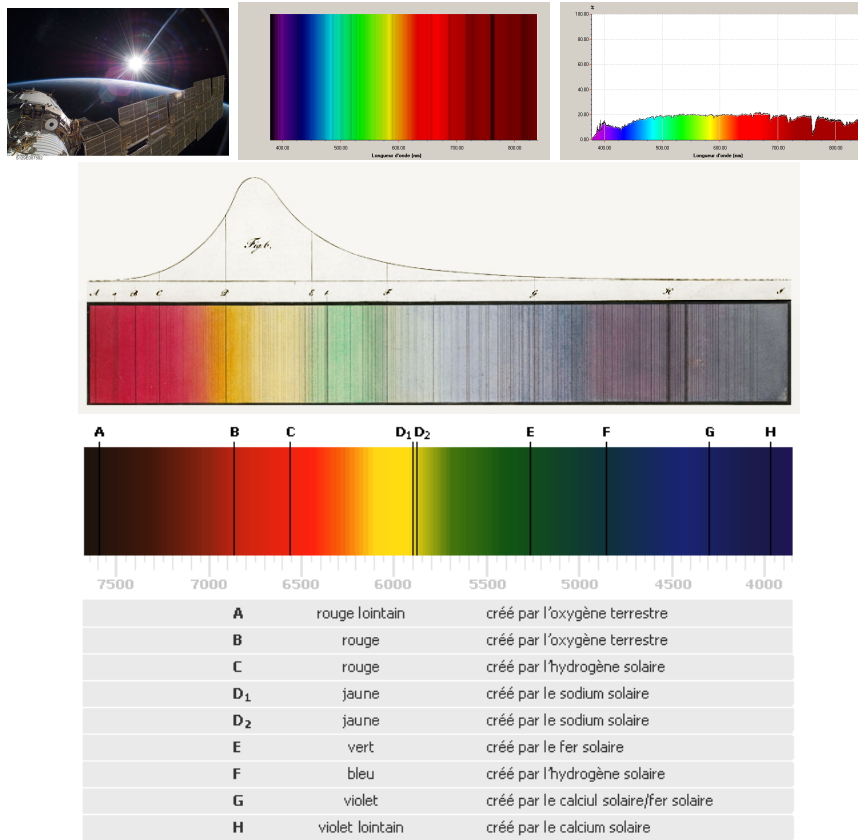


FIGURE 20 – Spectre d'émission du soleil

Le spectre solaire est constitué par le spectre de la lumière blanche, appelé le **fond continu**, auquel se superpose un **spectre de raies d'absorption** constitué d'environ 20 000 raies sombres.

La lumière provenant de la *photosphère* est émise par un gaz condensé et chaud. Son spectre constitue le fond continu.

L'atmosphère du Soleil, ou *chromosphère*, absorbe une partie de cette lumière. Elle est responsable des raies d'absorption.

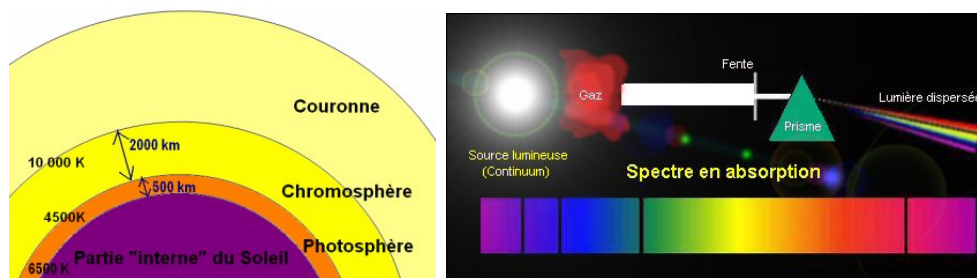


FIGURE 21 – Spectre d'émission continu (photosphère) et spectre d'absorption de raies (chromosphère) du soleil

Le fond continu du spectre solaire est dû au rayonnement thermique de la photosphère. Le spectre d'absorption caractérise les éléments présents dans la chromosphère.

*Remarque :* Le spectre solaire observé depuis le sol terrestre contient en outre quelques raies d'absorption dues à l'atmosphère terrestre.

D'une manière générale, l'étude détaillée des spectres des étoiles, ou des autres objets lumineux lointains de l'Univers, permet d'accéder à leurs caractéristiques physiques et chimiques (température, composition chimique mais aussi pression, vitesse, propriétés magnétiques, etc.).

## 8 Luminescence

La luminescence est une émission de lumière dite « froide » par opposition à l'incandescence qui est dite « chaude ». La lumière émise par luminescence résulte d'interactions entre particules électriquement chargées. Dans les cas les plus fréquents, ce sont des transitions électroniques ayant lieu dans des atomes, des molécules ou des cristaux qui provoquent l'émission de photons. L'énergie libérée sous forme de lumière lors de la transition peut être initialement fournie sous forme électrique, chimique, mécanique ou lumineuse. On distingue différents types de luminescence selon le mode d'excitation initial.

- l'électroluminescence (excitation électrique (champ électrique)), utilisée dans les diodes électroluminescentes (DEL), les télévisions ;
- la photoluminescence (excitation par absorption de photons), par exemple dans les tubes luminescents, les colorants fluorescents, les azurants optiques ;
- la fluorescence, photoluminescence rapide (de  $10^{-9}$  à  $10^{-6}$  secondes pour la majorité des molécules organiques) ;
- la phosphorescence, photoluminescence lente (de  $10^{-3}$  à 10 secondes pour la majorité des molécules organiques) ;
- la chimiluminescence (excitation à la suite d'une réaction chimique), utilisée par exemple dans les bâtons lumineux ou se produisant au niveau de la flamme bleue de diffusion ou de prémélange (méthane ou butane de brûleur d'une gazinière, d'un briquet).
- la bioluminescence, (réaction enzymatique), utilisée par les lucioles ;
- la cristalloluminescence (excitation à la suite d'une modification structurale cristalline), peut avoir lieu lors de la cristallisation d'une solution ou de la dissolution de certains cristaux ;
- la thermoluminescence et la cryoluminescence, par exemple dans la datation archéologique d'objets ;
- la piézoluminescence (excitation créée par la pression sur certains solides) ;
- la cathodoluminescence (excitation par collision électronique), on provoque la collision en accélérant des électrons grâce à des champs électriques, par exemple dans les tubes cathodiques ;
- la triboluminescence (excitation à la suite de la rupture de liaisons chimiques dans un solide), par exemple dans le sucre broyé ou écrasé ;
- la sonoluminescence (excitation par absorption de phonons), par exemple dans les crevettes claquantes ;
- la radioluminescence (excitation à la suite d'une irradiation par RX ou rayonnement  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), par exemple dans les écrans de radiographie X, etc.



FIGURE 22 – Bioluminescence du ver luisant ou lampyre, encres luminescentes, DEL