

# SPECTRES

## 1 - Le corps noir

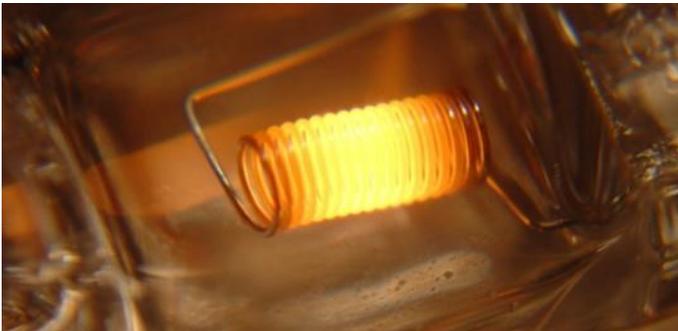
Le corps noir est une notion théorique. C'est un objet matériel qui absorbe parfaitement tous les rayonnements électromagnétiques. En contrepartie, il est capable de les émettre tous, et son spectre est strictement indépendant de tout paramètre autre que la température.

Il n'existe pas en réalité, mais certains objets s'en approchent beaucoup.

C'est le cas de la photosphère du Soleil (ce serait un rayonnement de corps noir s'il n'y avait pas les raies d'absorption), d'un morceau de fer chauffé, etc....

### 1.1- Spectres continus d'origine thermique

Le rayonnement thermique est produit par tout corps chauffé. Il n'est pas nécessaire de chauffer fortement pour produire un rayonnement, mais il le faut pour le rendre visible. La couleur du rayonnement émis varie selon la température.



Filament d'une lampe porté au blanc.

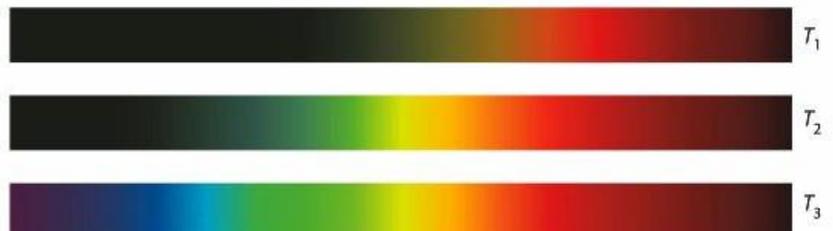


Fer chauffé à blanc.

Lorsqu'un morceau de fer, initialement chauffé à blanc, refroidit, la couleur émise va du bleu vers le rouge puis lorsque nous ne voyons plus rien, vers l'infrarouge. Mais il continue d'émettre tant que sa température dépasse le zéro absolu ( $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$ ).

Ci-contre les spectres d'émission d'un filament de tungstène dont la température augmente.

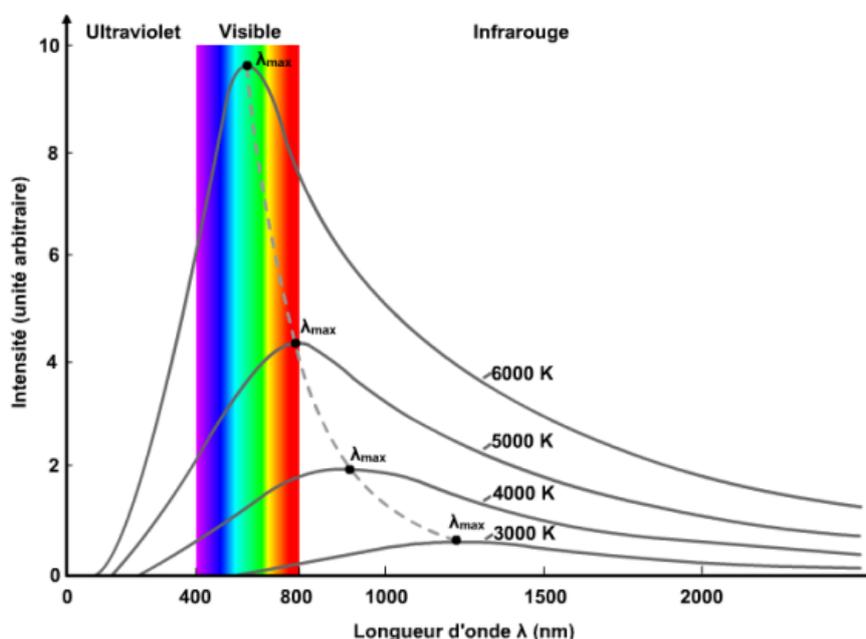
$$T_1 < T_2 < T_3$$



## 1.2- La lumière émise par un corps noir

Les lois de l'émission de lumière par un corps noir ont été décrites par Stefan et Wien, et sont inexplicables dans le cadre ondulatoire. Elles sont parfaitement compatibles avec l'aspect corpusculaire de la lumière.

Le spectre de la lumière émise par un corps chaud et dense (solide, liquide ou gaz sous forte pression) est continu. L'intensité de chaque radiation ne dépend que de la température: plus le corps est chaud, et plus le maximum d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde (le spectre s'enrichit alors en radiations bleu-violet).



**Loi de Wien:** Toute courbe de rayonnement de corps noir atteint une hauteur maximum pour une longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  (m) dépendant de la température T (K):

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T} \quad \left| \begin{array}{l} T: \text{Température du corps noir (K)} \\ \lambda_{\max}: \text{Longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité (m)} \end{array} \right.$$

Cette relation dite "température de couleur" montre que la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$ , correspondant au maximum d'émission lumineuse, est inversement proportionnelle à la température du corps chauffé. Plus la température du corps chauffé augmente, plus la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission diminue.

	Surface du Soleil	Lampe à filament	Peau
T (Kelvin)	6000	3000	300
$\lambda_{\max}$ (nm)	483	966	9660

A faible température, le maximum de rayonnement se produit pour de grandes longueurs d'onde.

A haute température, le maximum se déplace vers des longueurs d'onde plus courtes. A la température ambiante d'une pièce, le rayonnement thermique se produit essentiellement dans l'infrarouge lointain. A une température de 300K, le maximum du rayonnement est émis vers 10mm.

Ce n'est qu'à des températures beaucoup plus élevées qu'un corps rayonne à des longueurs d'onde assez courtes pour que le rayonnement soit visible.

Le rayonnement émis par les étoiles est assimilable, en première approximation, à un rayonnement de corps à température élevée. Ce rayonnement est généralement centré dans la partie visible du spectre et même parfois au-delà, dans l'ultraviolet.

Le Soleil, par exemple, émet le maximum de son rayonnement dans le jaune-vert. Mais la quantité de lumière émise par le Soleil dans tout le domaine visible est suffisante pour qu'il paraisse blanc à l'observateur quand il est haut dans le ciel.

Notre œil étant insensible aux longueurs d'onde plus grandes que celle du rouge ou plus courtes que celle du violet, il ne perçoit pas toute l'énergie rayonnée dans ces domaines. Une étoile plus froide que le Soleil émet davantage aux grandes longueurs d'onde et moins aux courtes longueurs d'onde. De ce fait, elle paraît plus rouge. En revanche, une étoile plus chaude paraît plus bleue.

### 1.3- Applications de la loi de Wien

Pour le Soleil, la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission se situe vers  $\lambda_{\max}=500\text{nm}$  (lumière jaune-verte). La température de surface du Soleil vaut donc:

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{500 \cdot 10^{-9}} \approx 5800\text{K}$$

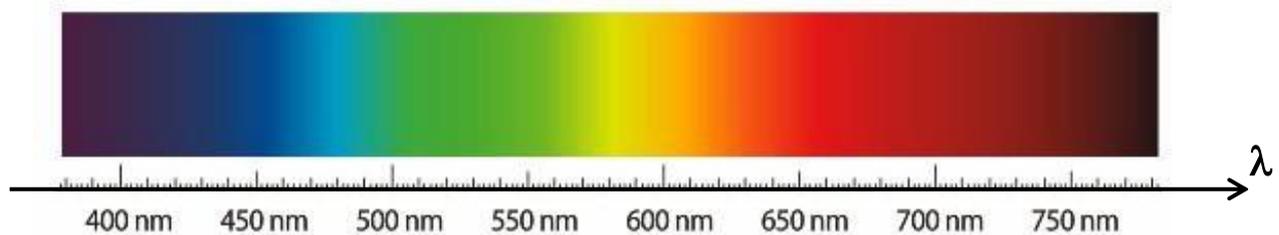
La température du corps humain est de  $37,5^{\circ}\text{C}$ , soit environ 310K. La longueur d'onde correspondant au maximum d'émission du corps humain est:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{310} \approx 9,3 \cdot 10^{-6} \text{m} = 9300\text{nm}$$

Le maximum d'émission lumineuse du corps humain se fait donc dans l'infrarouge.

## 2- Spectre continu de la lumière blanche

Un spectre d'émission continu est un spectre produit par la lumière directement émise par une source lumineuse (lampe à incandescence, corps chauffé). Il est constitué de bandes colorées.

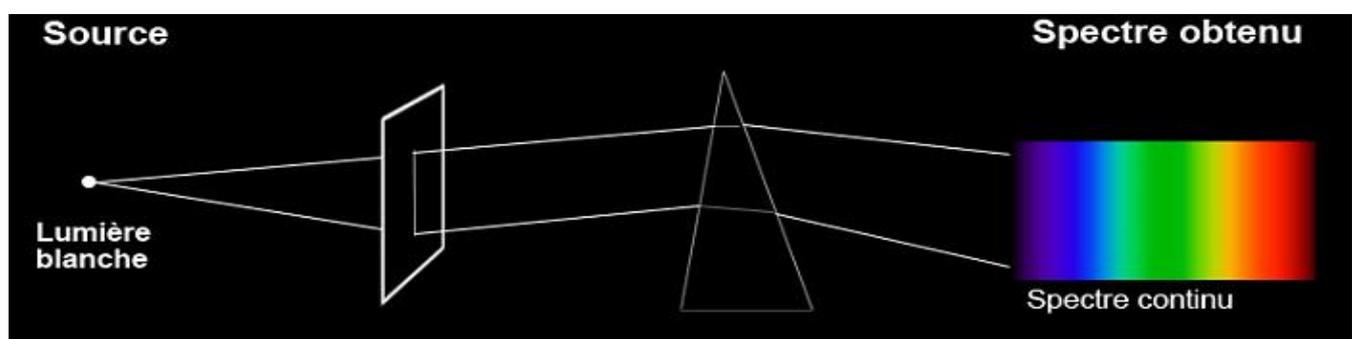


## 3- Les spectres de raies

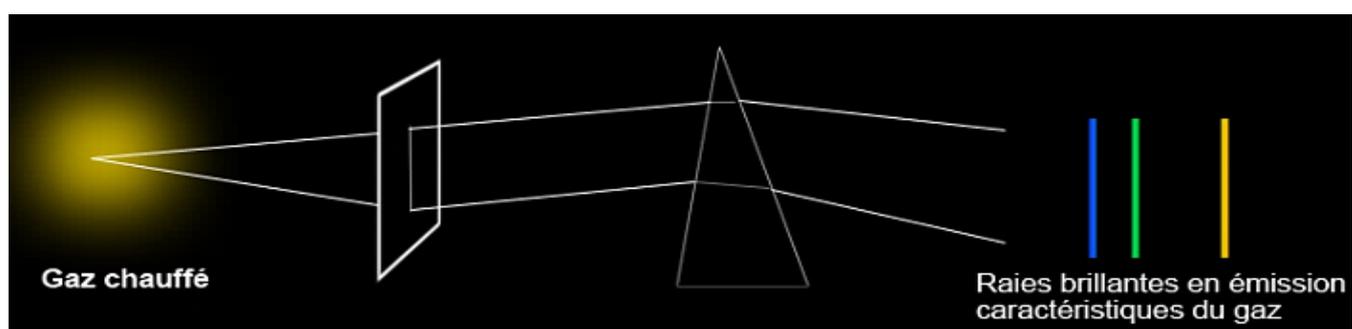
### 3.1- Les lois de Kirchoff

Kirchoff a étudié les émissions de lumière, et en a déduit des lois:

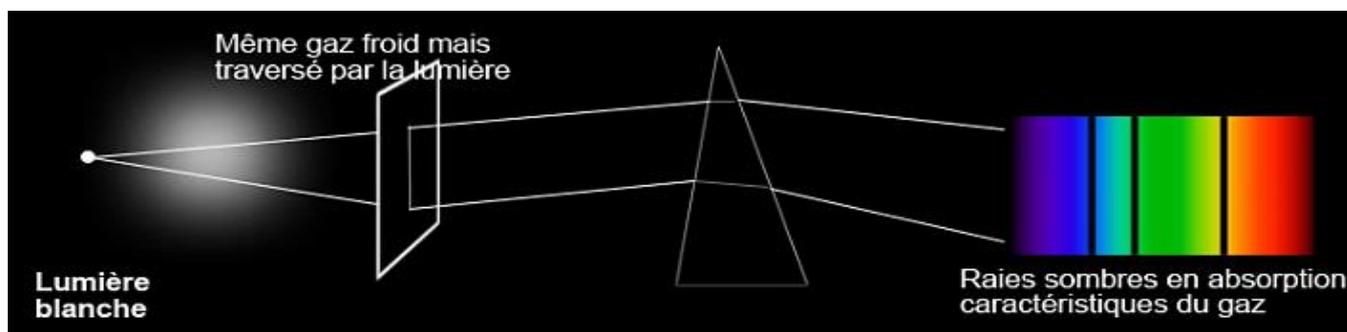
- Tout corps chaud émet un rayonnement continu, qui contient toutes les couleurs (spectre continu: on passe continûment d'une couleur à une autre); ce rayonnement ne dépend pas de l'élément considéré.



- Le spectre de la lumière émise par un gaz, sous faible pression, n'est pas continu, mais présente seulement quelques raies brillantes, sur un fond sombre (sans lumière). Donc, un gaz dans ces conditions n'émet que quelques radiations bien précises. L'important est que ces couleurs changent d'un gaz à un autre: elles les caractérisent. Le spectre est comme les empreintes digitales: une signature du gaz. On appelle ces raies des raies d'émission.

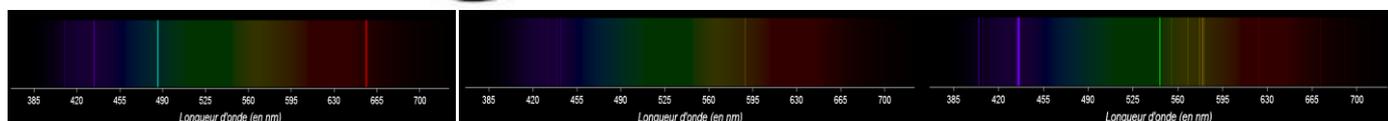
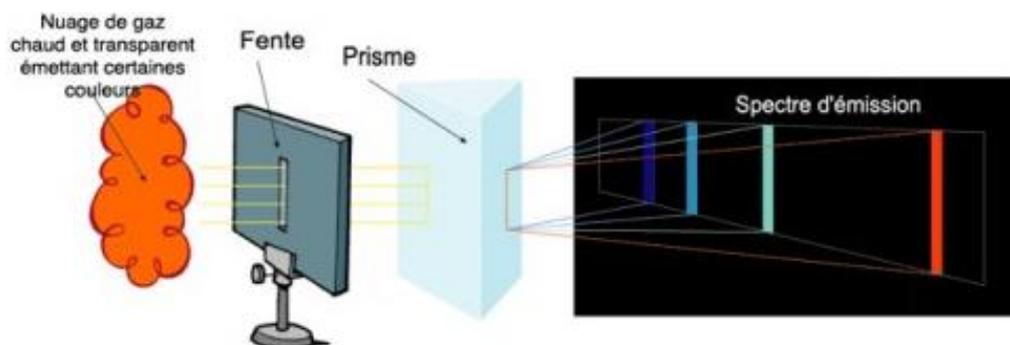


- Si la lumière émise par un corps chaud (contenant toutes les couleurs) traverse un gaz froid, elle en ressort privée de certaines couleurs, qui laissent donc des raies noires dans le spectre. Ces couleurs disparues sont exactement celles que ce gaz émettrait s'il était chaud (confirmant donc bien le fait qu'elles constituent sa signature). On les appelle raies d'absorption, et elles indiquent donc qu'un gaz froid a été traversé par la lumière, et quel est ce gaz.



### 3.2- Spectres de raies d'émission

Lorsque les atomes et les ions d'un gaz, sous faible pression, sont excités soit par chauffage soit par décharges électriques, ces entités peuvent émettre de la lumière. Le spectre obtenu est composé d'un nombre limité de radiations monochromatiques bien distinctes, qu'on visualise sous forme de raies.

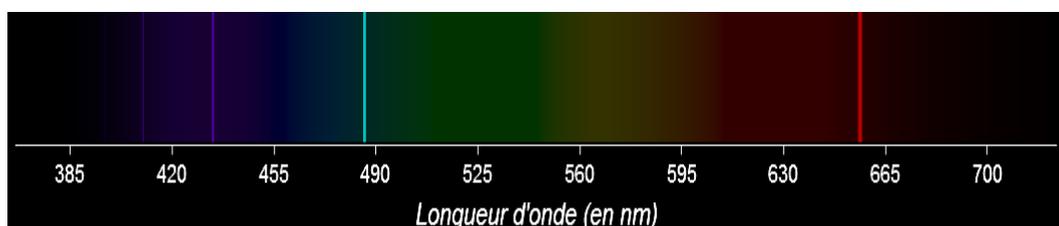


Spectre de raies d'émission de l'hydrogène.

Spectre de raies d'émission du sodium.

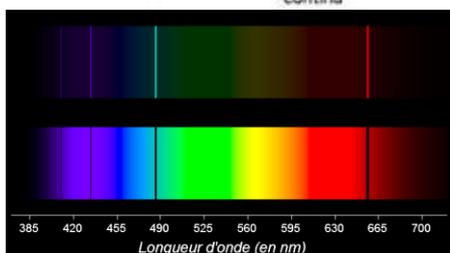
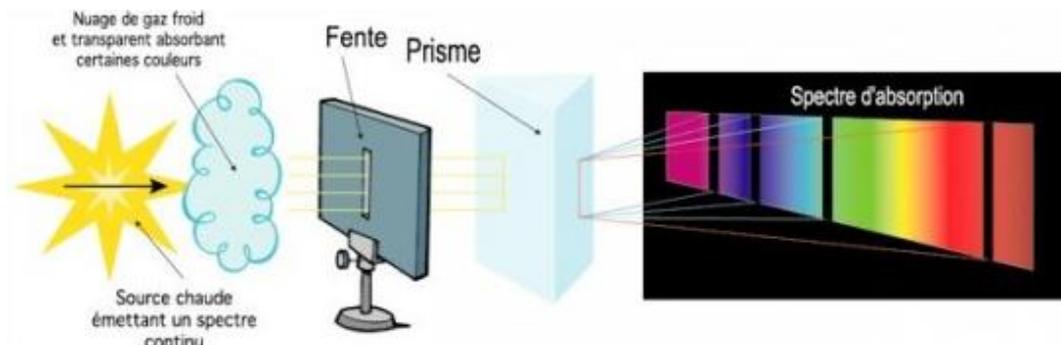
Spectre de raies d'émission du mercure.

Un spectre de raies d'émission est constitué de raies fines et colorées entrecoupées de bandes noires (fond noir). A Chaque élément chimique correspond un spectre d'émission.

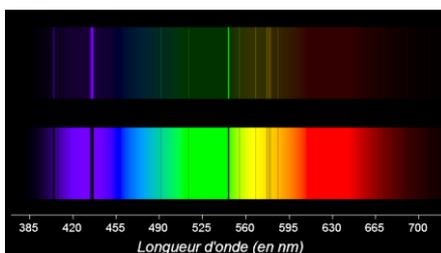


### 3.3- Spectres de raies d'absorption

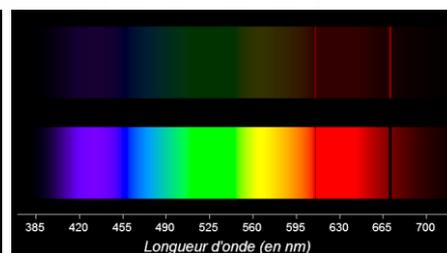
Lorsque des radiations lumineuses traversent un gaz froid sous faible pression, certaines radiations peuvent être absorbées. Si le spectre du rayonnement incident est continu, il est amputé de certaines raies après passage dans le gaz considéré. On obtient alors un spectre de raies d'absorption où les raies absorbées sont de même longueur d'onde que celles que le gaz émettrait s'il était chaud.



Spectres de raies  
d'émission et d'absorption  
de l'hydrogène.

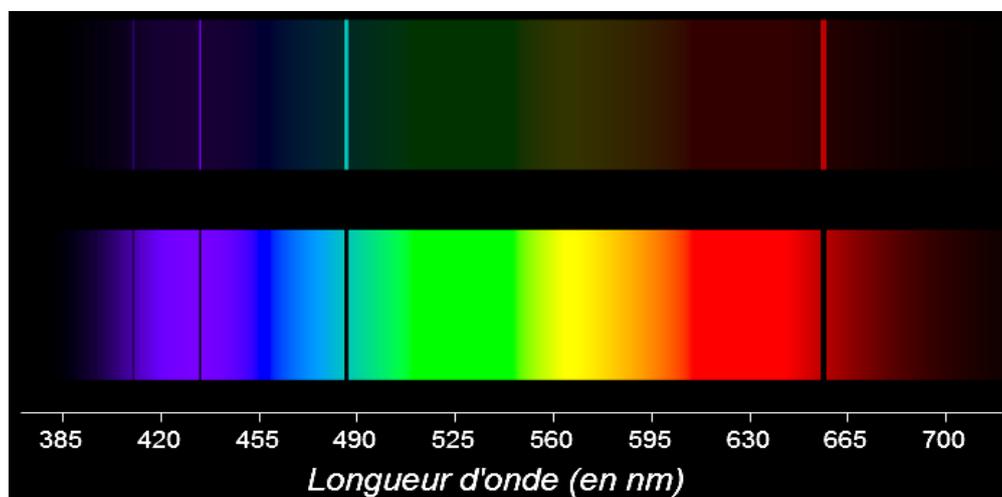


Spectres de raies  
d'émission et d'absorption  
du mercure



Spectres de raies  
d'émission et d'absorption  
du lithium.

Un spectre de raies d'absorption d'un élément chimique est constitué d'une bande colorée entrecoupée de raies noires. Ces raies noires correspondent aux raies d'émission de l'élément chimique.



**Remarque:** Un élément chimique absorbe les radiations qu'il est capable d'émettre. Les raies noires d'absorption et les raies colorées d'émission ont la même longueur d'onde.

## 4- Messages de la lumière

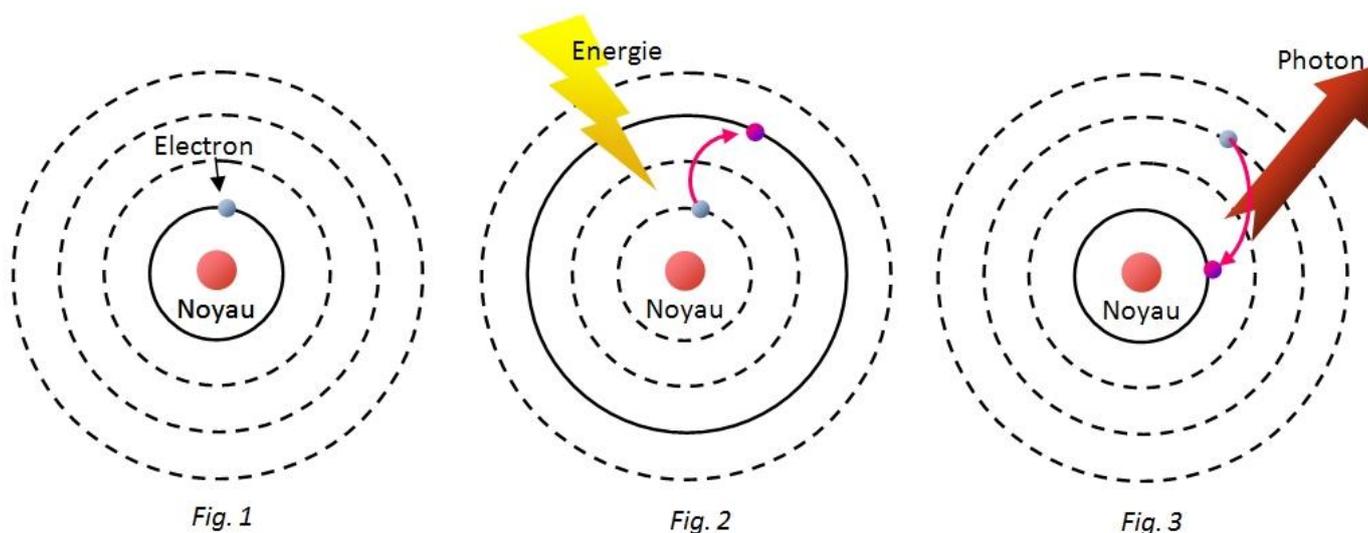
### 4.1- Spectre d'un élément chimique

Chaque atome existant dans l'Univers possède une structure électronique qui lui est propre (répartition des électrons de son nuage).

Prenons l'atome d'hydrogène qui ne possède qu'un seul électron.

Dans son état fondamental, cet atome n'émet pas de lumière car il occupe l'état de plus basse énergie (fig. 1).

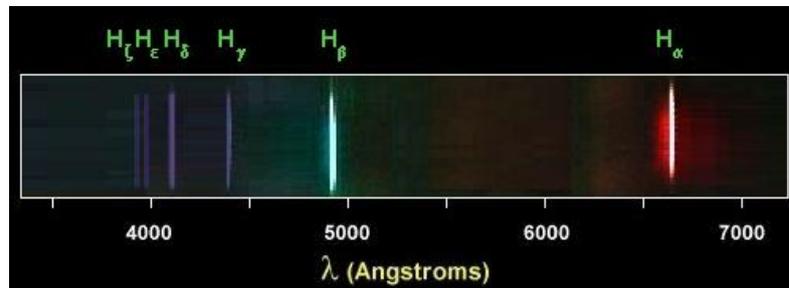
A basse pression, lorsqu'il est chauffé ou soumis à des décharges électriques, l'hydrogène émet de la lumière dont le spectre présente, dans le visible, des raies colorées. Il s'agit d'un spectre de raies d'émission. A chacune de ces raies correspond une radiation monochromatique de longueur d'onde déterminée.



En effet, lorsque l'atome est soumis à une action extérieure qui lui apporte de l'énergie, il se trouve déstabilisé: on dit qu'il se trouve dans un état excité (fig.2). L'électron utilise alors cette énergie pour passer à un niveau d'énergie supérieure (saut quantique).

Lorsque l'excitation cesse, l'atome tend à revenir à l'état fondamental en restituant à l'extérieur l'énergie qu'il avait reçue (fig.3). Cette relaxation d'énergie se fait en un temps très court et se traduit par l'émission d'un photon lumineux d'énergie correspondant exactement à celle du saut quantique. Si la relaxation porte simultanément sur un grand nombre d'atomes, on observe un spectre d'émission où sont présentes toutes les radiations correspondant aux photons émis.

Ainsi, le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène comporte un grand nombre de raies qu'il est possible de classer en séries spectrales. Chaque série spectrale correspond à la relaxation sur un niveau d'énergie donné.



Ce spectre ainsi produit caractérise l'élément chimique présent dans le gaz chauffé. Il constitue une sorte de signature.

Il en est de même pour tous les éléments chimiques.

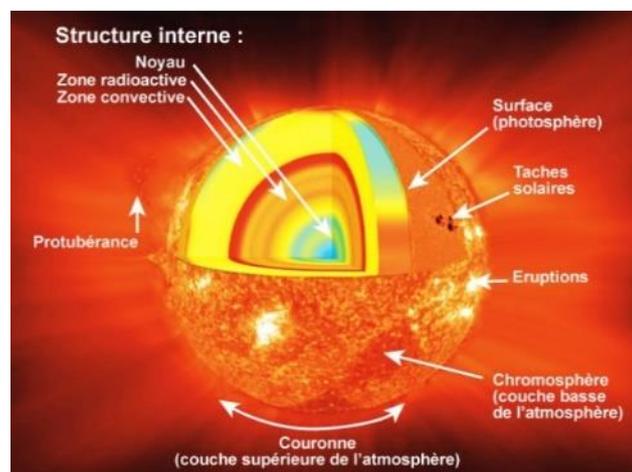
A un élément chimique est associé un spectre de raies d'émission unique qui représente sa signature spectrale.

**Remarque:** Ne pas oublier qu'un élément chimique absorbe les radiations qu'il est capable d'émettre. Les raies noires d'absorption et les raies colorées d'émission ont la même longueur d'onde.

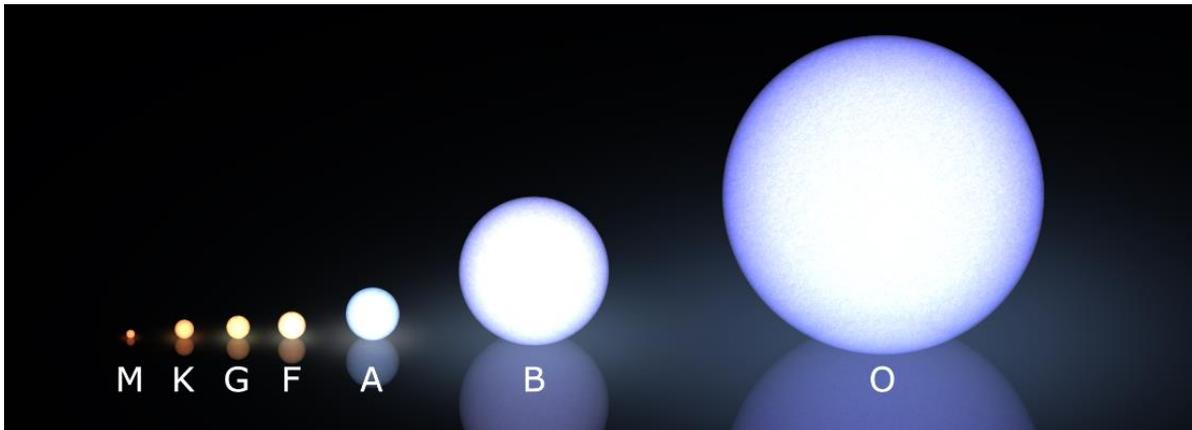
#### 4.2- Les étoiles - Structure - Couleur - Température

Une étoile est une boule de gaz sous haute pression dont la température varie beaucoup entre le centre et sa surface.

Le rayonnement que l'on perçoit d'une étoile provient de la photosphère qui se trouve sur le bord externe de l'étoile. La couleur de la photosphère nous renseigne sur sa température: les bleues sont les plus chaudes et les rouges les plus froides.

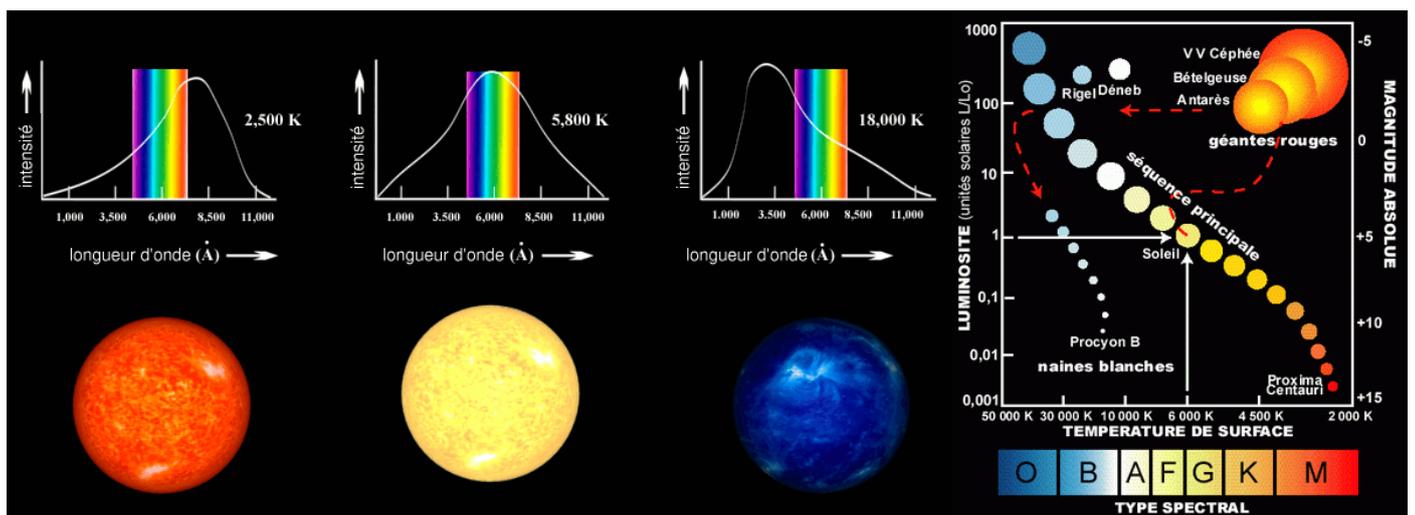


La couleur de l'étoile, comme celle du filament d'une lampe, renseigne sur sa température de surface.



Classe	Température	Couleur	Exemple
O	> 25 000 K	Bleue	Delta Orionis
B	10000 K - 25000 K	Bleue - Blanche	Rigel
A	7500 K - 10000 K	Blanche	Deneb, Sirius
F	6000 K - 7500 K	Jaune - Blanche	Upsilon Andromedae A, Polaris
G	5000 K - 6000 K	Jaune	Soleil, Alpha Centauri A
K	3500 K - 5000 K	Jaune - Orange	Alpha Centauri B
M	< 3500 K	Rouge	Proxima Centauri, Bételgeuse

**Remarque:** Pour mémoriser l'ordre des types spectraux (OBAFGKM), les anglophones utilisent la phrase "Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me!", ce qui se traduit par "Oh! Sois une gentille fille/un gentil gars, embrasse-moi".



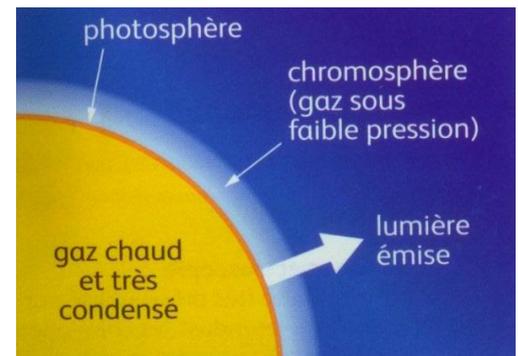
Dans la constellation d'Orion, Rigel apparaît blanche à bleutée (température de surface 11000°C), alors que Bételgeuse est rougeâtre (température de surface de l'ordre de 3000°C).

Orion fait partie des rares constellations immédiatement reconnaissables par leur forme. Ses sept étoiles les plus brillantes forment un nœud papillon (ou un sablier) facilement identifiable: quatre étoiles très brillantes forment un rectangle caractéristique au milieu duquel se trouve un alignement de trois autres étoiles, la ceinture d'Orion, qui constituent une signature remarquable.



### 4.3- Spectre d'une étoile

Une étoile peut être assimilée à une boule de gaz très chaud et sous haute pression. La lumière émise par sa surface, la photosphère, donne le fond continu d'origine thermique du spectre de l'étoile. A la périphérie de la photosphère d'une étoile, il existe une atmosphère constituée d'un gaz sous faible pression. C'est dans cette partie de l'étoile que certaines radiations sont absorbées par les éléments chimiques présents.



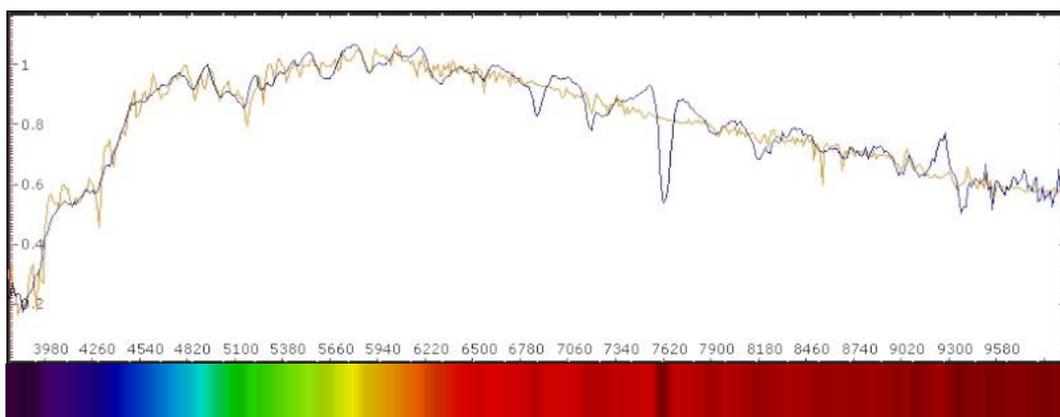
Lorsque la lumière émise par la photosphère de l'étoile traverse la chromosphère, d'une étoile qui peut être assimilée à une couche gazeuse relativement froide et à basse pression, les atomes ou ions présents absorbent un certain nombre de radiations.

C'est ainsi que les entités chimiques de l'atmosphère d'une étoile sont identifiées par les raies d'absorption présentes dans le spectre de la lumière stellaire.

Le spectre de la lumière émise par une étoile sera donc un spectre d'absorption.

**Le spectre de la lumière d'une étoile est un spectre de raies d'absorption constitué d'un fond continu d'émission présentant des raies d'absorption.**

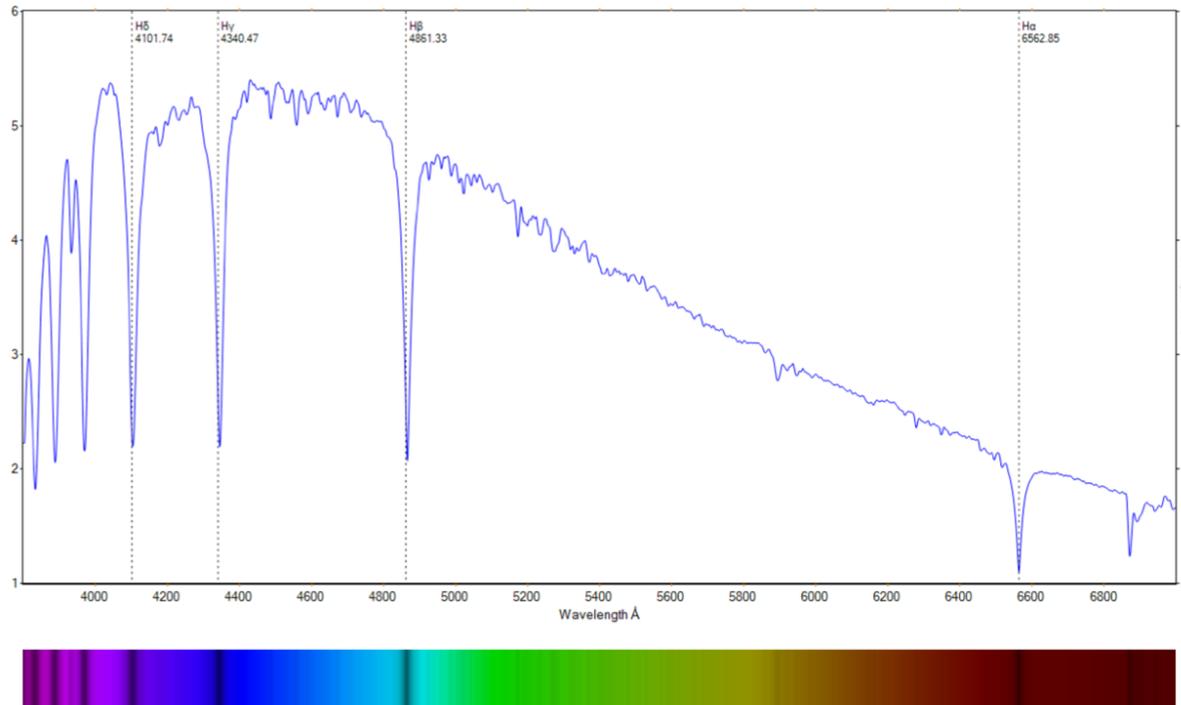
La figure ci-dessous correspond au profil spectral de l'étoile Eta Cephei ainsi qu'à celui de son spectre de raies d'absorption.



Le maximum d'absorption est à  $\lambda_{\max} \approx 560\text{nm}$  ce qui correspond à une température de surface:

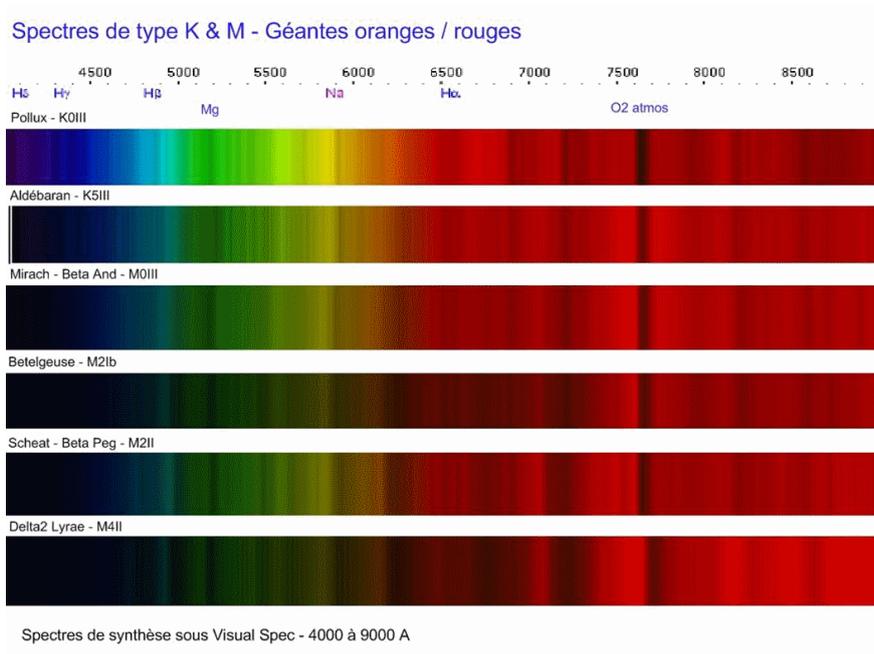
$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{560 \cdot 10^{-9}} \approx 5200\text{K}$$

La figure ci-dessous correspond au profil spectral d'une étoile de type F ainsi qu'à celui de son spectre de raies d'absorption.



Le maximum d'absorption est à  $\lambda_{\max} \approx 410\text{nm}$  ce qui correspond à une température de surface:

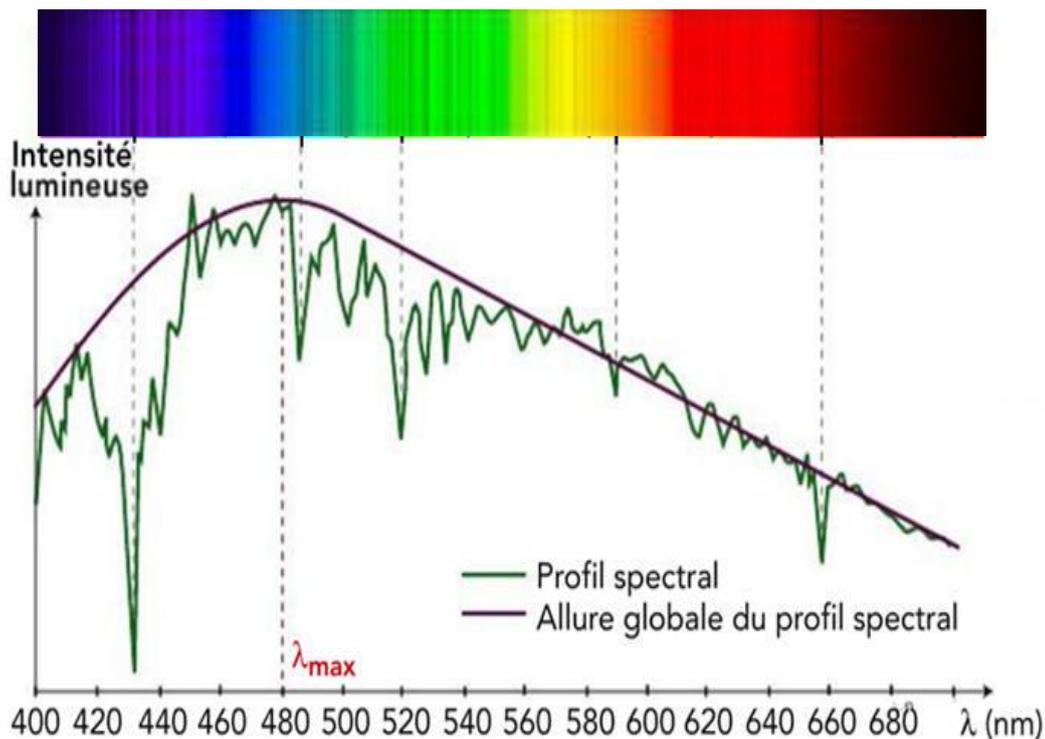
$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{410 \cdot 10^{-9}} \approx 7000\text{K}$$



#### 4.4- Spectre du soleil

L'enveloppe gazeuse du Soleil est essentiellement composée d'hydrogène, et d'hélium. Elle contient aussi, dans des proportions moindres, de nombreuses autres entités chimiques comme l'oxygène, le carbone ou le fer.

Le spectre de raie d'absorption du soleil permet de déterminer son profil spectral ainsi que son allure générale. L'allure globale du profil spectral permet de déterminer la valeur de  $\lambda_{\max}$  et donc la température à la surface en utilisant la loi de Wien.



L'allure global qui donne  $\lambda_{\max} \approx 480$  nm permet d'évaluer la température de surface:

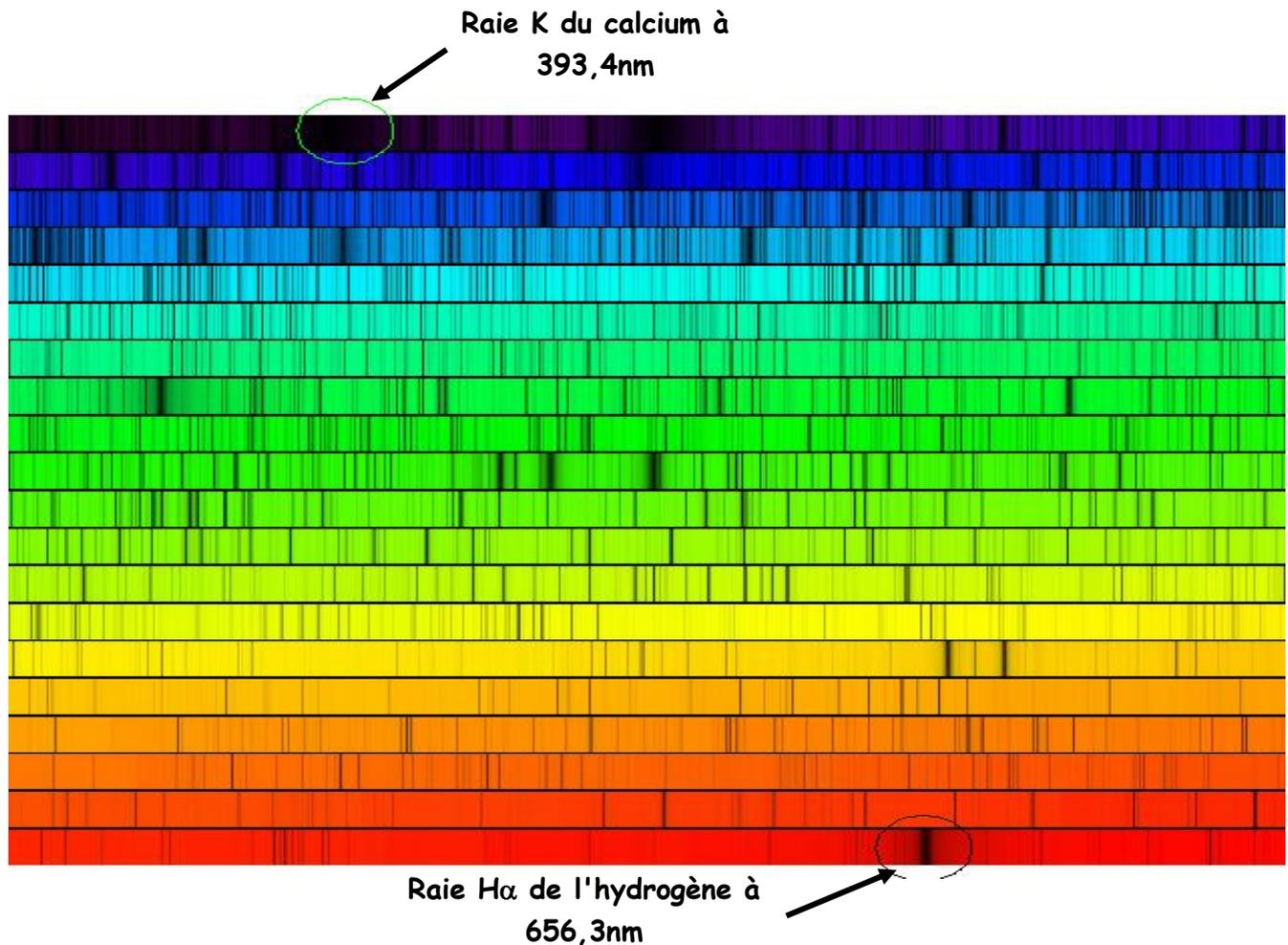
$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{480 \cdot 10^{-9}} \approx 6000 \text{ K}$$

Les spectroscopes à haute résolution permettent de réaliser des spectres solaires dans lesquels des milliers de raies sont disponibles. C'est un outil de diagnostic qui permet aux astronomes d'imager les différentes couches de l'atmosphère solaire.

Chacune de ces raies est caractéristique d'une transition entre 2 niveaux d'un atome particulier. Cela permet d'identifier les éléments chimiques présent dans une étoile.

Dans le rouge (bas à droite), la raie H $\alpha$  de l'hydrogène à 656,3 nm est universellement utilisée pour la chromosphère.

Dans le bleu (en haut à gauche), la raie K du calcium à 393,4nm fournit une autre vision de la chromosphère.



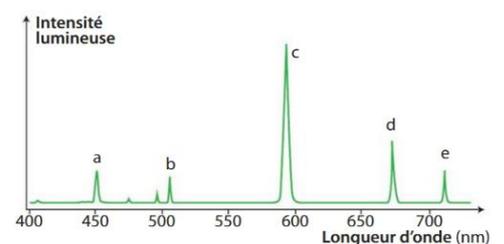
## 5- Exercices d'application

### Exercice 1

On considère le spectre de la lumière émise par l'hélium représenté ci-contre.

Quelles sont les longueurs d'onde des radiations a, b, c, d et e émise par l'hélium?

De quelle type de lumière s'agit il?



Les mesures des longueurs d'onde sont les suivantes:

$$\lambda_a = 450 \text{ nm} , \lambda_b = 510 \text{ nm} , \lambda_c = 590 \text{ nm} , \lambda_d = 670 \text{ nm} , \lambda_e = 710 \text{ nm}$$

A chaque pic d'intensité correspond une raie colorée du spectre de la lumière émise. On observe cinq raies colorées.

La lumière émise par l'hélium est polychromatique car il comporte plusieurs raies colorées.

**Exercice 2**

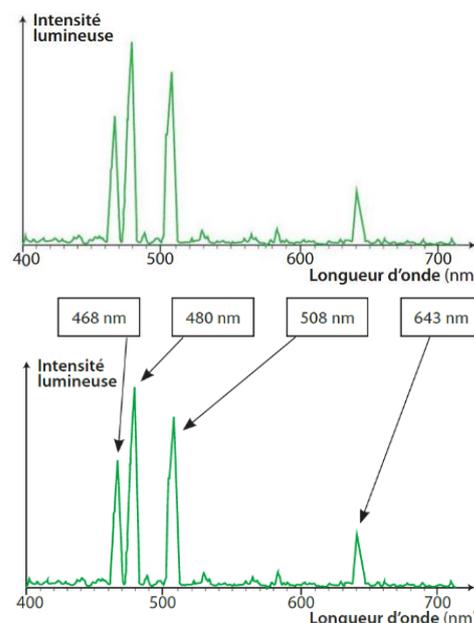
Le cadmium émet des radiations correspondant aux longueurs d'onde suivantes:

$$\lambda_1 = 468 \text{ nm}, \lambda_2 = 480 \text{ nm}, \lambda_3 = 508 \text{ nm}, \lambda_4 = 643 \text{ nm}$$

Est ce que le spectre ci-contre correspond au cadmium?

A chaque pic d'intensité correspond une raie colorée du spectre de la lumière émise.

Lorsque l'on compare les valeurs des longueurs d'onde à ces pics, on peut dire que le spectre est bien celui du cadmium.

**Exercice 3**

Les lampes spectrales à décharge sont constituées d'un tube de verre contenant un gaz qui émet de la lumière lorsqu'il est soumis à un courant électrique.

Le spectre de la lumière émise par une de ces lampes est représenté ci-dessous.

On donne ci-dessous les longueurs d'onde (en nm) de quelques entités chimiques.



Hydrogène	410, 434, 486, 656
Lithium	412, 497, 610, 671
Mercure	405, 436, 546, 579

Après avoir précisé de quel type de spectre il s'agissait, identifier l'entité chimique responsable de l'émission lumineuse.

Le spectre de la lumière émise est un spectre de raies d'émission possédant plusieurs raies: la lumière est donc polychromatique.

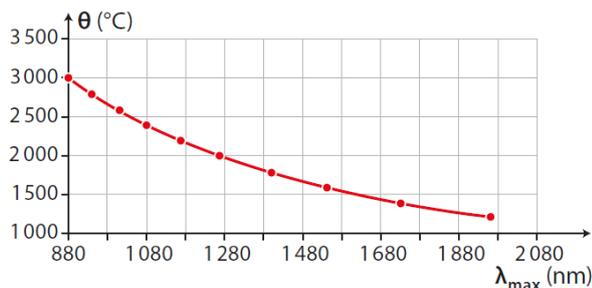
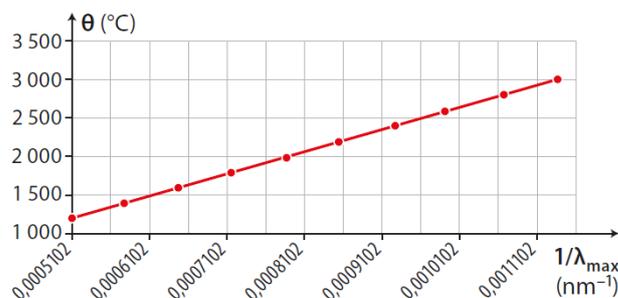
Sur ce spectre on peut observer quatre raies à environ 410 nm, 435 nm, 485 nm et 655 nm.

Ces raies correspondent (aux imprécisions de mesures près) à celle de l'hydrogène.

**Exercice 4**

Pour étudier la relation entre la température d'une source lumineuse et la longueur d'onde de la radiation de son spectre émise avec le maximum d'intensité, on prend un morceau de métal dont on augmente progressivement la température  $\theta$ .

Pour chaque température on mesure à l'aide d'un spectromètre la longueur d'onde de la radiation pour laquelle l'intensité lumineuse émise est maximale. On représente ensuite les courbes représentant l'évolution de la température  $\theta$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  et celle représentant l'évolution de la température  $\theta$  en fonction de l'inverse de la longueur d'onde  $1/\lambda_{\max}$ .

 $\theta$  en fonction de  $\lambda_{\max}$  $\theta$  en fonction de  $1/\lambda_{\max}$ 

Laquelle de ces deux courbes faut-il utiliser pour retrouver une équation simple?  
 Etablir l'équation de la courbe, montrer qu'elle est en accord avec la loi de Wien:

$$\theta = \frac{2,89 \cdot 10^6}{\lambda_{\max}} - 273$$

avec  $\theta$  en degré Celcius (°C) et  $\lambda_{\max}$  en nanomètre (nm).

Dans le cas où cette loi est applicable à n'importe quel corps chaud, identifier la grandeur que l'on peut déterminer par analyse du spectre de la lumière émise.

La première courbe qui représente T en fonction de  $\lambda_{\max}$ , n'est pas une droite et sera donc difficile à modéliser (trouver son équation).

Il est préférable d'utiliser la seconde courbe qui représente T en fonction de  $1/\lambda_{\max}$ , et qui pourra être modélisée par une fonction affine.

La modélisation de cette courbe est donc une fonction affine du type:

$$\theta \left( \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) = a \times \frac{1}{\lambda_{\max}} + b$$

La modélisation conduit à l'équation de la fonction affine:

$$\theta \left( \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) = \frac{3 \cdot 10^6}{\lambda_{\max}} - 268$$

où  $\theta$  est la température exprimée en degré Celcius (°C) et  $\lambda_{\max}$  la longueur d'onde exprimée en nanomètre (nm).

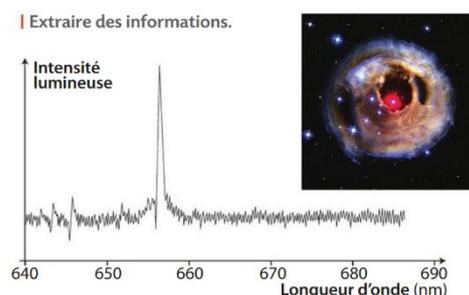
On constate que cette équation est bien en accord avec la loi de Wien.

La longueur d'onde de la radiation émise avec le maximum d'intensité peut être repérée avec un spectromètre. La loi de Wien permettra donc d'évaluer la température de surface d'un corps chaud.

### Exercice 5

En janvier 2002, la surface de l'étoile V838 s'est soudainement et considérablement dilatée: cette étoile est ainsi devenue la plus brillante de la Voie Lactée. Puis, tout aussi soudainement, elle s'est éteinte.

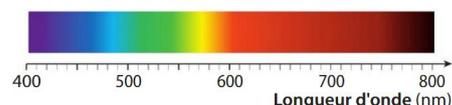
Le spectre de la lumière émise lors de cet évènement est représenté ci-contre.



Après avoir identifié l'élément chimique correspondant à la radiation relevée, donner la région de l'étoile où se situe cette émission.

On donne quelques longueurs d'onde de radiations caractéristiques ainsi que le spectre de la lumière blanche.

$$\lambda_{\text{hydrogène}} = 656 \text{ nm} , \lambda_{\text{calcium1}} = 646 \text{ nm} , \lambda_{\text{calcium2}} = 646 \text{ nm} , \\ \lambda_{\text{fer}} = 668 \text{ nm}$$



La radiation observée possède une longueur d'onde comprise entre 655 nm et 660 nm.

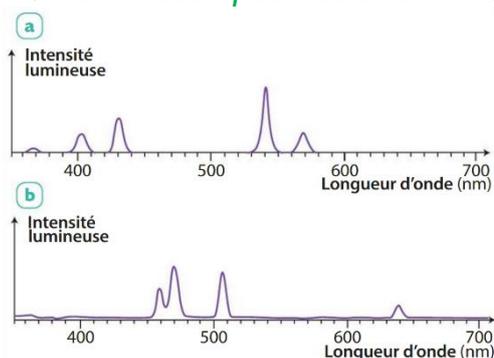
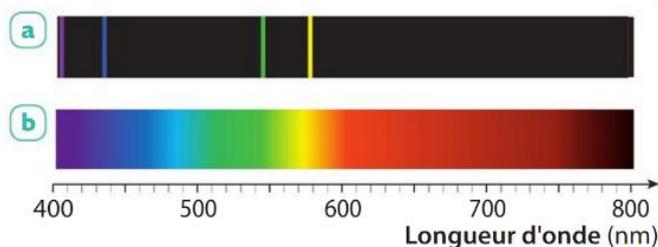
D'après le spectre de la lumière blanche cette longueur d'onde correspond à une radiation rouge.

Cette émission est due à l'hydrogène qui possède une radiation de longueur d'onde très proche de 656 nm.

L'émission de cette radiation se situe dans la région centrale rouge de l'image.

### Exercice 6

En expliquant la démarche, identifier le gaz inconnu en utilisant des spectres ci-dessous.



Spectre de raies d'émission de la lumière émise par un gaz inconnu (spectre a) et spectre de la lumière blanche (spectre b).

Spectres du mercure (spectre a) et du cadmium (spectre b) obtenus avec un spectromètre.

En s'aidant du spectre de la lumière blanche on trouve les longueurs d'onde pour les radiations du spectre de raies d'émission:

$$\lambda_1 = 410 \text{ nm} , \lambda_2 = 430 \text{ nm} , \lambda_3 = 540 \text{ nm} , \lambda_4 = 580 \text{ nm}$$

Pour le mercure on trouve les longueurs d'ondes suivantes:

$$\lambda_1 = 410 \text{ nm} , \lambda_2 = 430 \text{ nm} , \lambda_3 = 540 \text{ nm} , \lambda_4 = 580 \text{ nm}$$

Pour le cadmium on trouve les longueurs d'onde suivantes:

$$\lambda_1 = 470 \text{ nm} , \lambda_2 = 480 \text{ nm} , \lambda_3 = 510 \text{ nm} , \lambda_4 = 640 \text{ nm}$$

On en déduit que le gaz correspondant au spectre inconnu est le mercure.

### Exercice 7

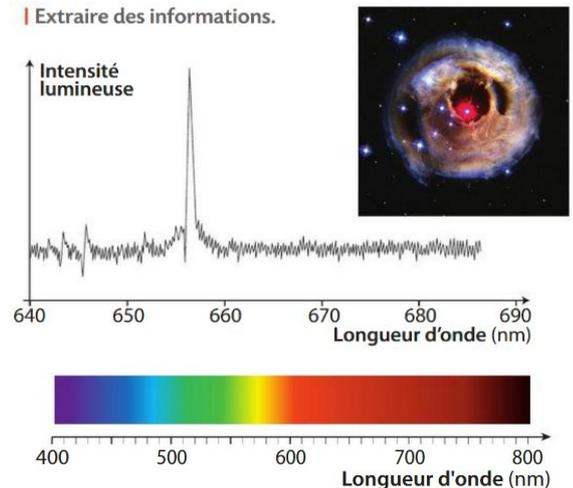
En janvier 2002, la surface de l'étoile V838 s'est soudainement et considérablement dilatée: cette étoile est ainsi devenue la plus brillante de la Voie Lactée. Puis, tout aussi soudainement, elle s'est éteinte.

Le spectre de la lumière émise lors de cet évènement est représenté ci-contre.

Après avoir identifié l'élément chimique correspondant à la radiation relevée, donner la région de l'étoile où se situe cette émission.

On donne quelques longueurs d'onde de radiations caractéristiques ainsi que le spectre de la lumière blanche.

$$\lambda_{\text{hydrogène}} = 656 \text{ nm}, \lambda_{\text{calcium1}} = 646 \text{ nm}, \lambda_{\text{calcium2}} = 646 \text{ nm}, \lambda_{\text{fer}} = 668 \text{ nm}$$



La radiation observée possède une longueur d'onde comprise entre 655 nm et 660 nm.

D'après le spectre de la lumière blanche cette longueur d'onde correspond à une radiation rouge.

Cette émission est due à l'hydrogène qui possède une radiation de longueur d'onde très proche de 656 nm.

L'émission de cette radiation se situe dans la région centrale rouge de l'image.