

CLASSIFICATION SPECTRALE DES ETOILES

JP. Maratrey - Mars 2004 – MàJ mai 2021

Un spectre représente la répartition de l'intensité de la lumière en fonction de la fréquence (donc de l'énergie, ou encore de la couleur, dans sa partie visible) de ses différents éléments.

Après un bref historique, ce document se propose de donner une explication simplifiée du phénomène par l'étude de l'atome d'hydrogène, le plus simple des éléments. Il abordera ensuite les différents types de spectres rencontrés en astronomie. Enfin, il donnera une idée des renseignements qui peuvent être tirés d'un spectre ainsi que de la classification spectrale des étoiles.

Bref historique de la classification spectrale

La spectroscopie a vu le jour en 1666 avec Isaac Newton qui décompose la lumière du Soleil avec un prisme.

En 1780, William Herschel montre que le rayonnement du Soleil s'étale au-delà du visible. Il met en évidence l'infrarouge.

Le 18^{ème} siècle met à jour d'autres rayonnements comme l'ultraviolet, et montre l'aspect ondulatoire de la lumière. Fraunhofer décrit le spectre du Soleil avec ses raies d'absorption. La spectroscopie est née et va bouleverser les connaissances des étoiles.

Il fallut attendre la fin du 19^{ème} et le début du 20^{ème} siècle pour mettre un peu d'ordre dans ces raies spectrales et classer les étoiles selon leur spectre. Remarquons que l'invention de la photographie a beaucoup fait avancer les choses.

Le pionnier est Edward Pickernig (1846-1919), directeur de l'observatoire de l'université d'Harvard aux USA.

Il projette de réaliser cette classification. Il travaille d'abord avec des assistants masculins mais les licencie rapidement par manque d'attention et de précision dans leur travail.

Il embauche des femmes qui sont plus minutieuses, grosses travailleuses et surtout payées deux fois moins chères.

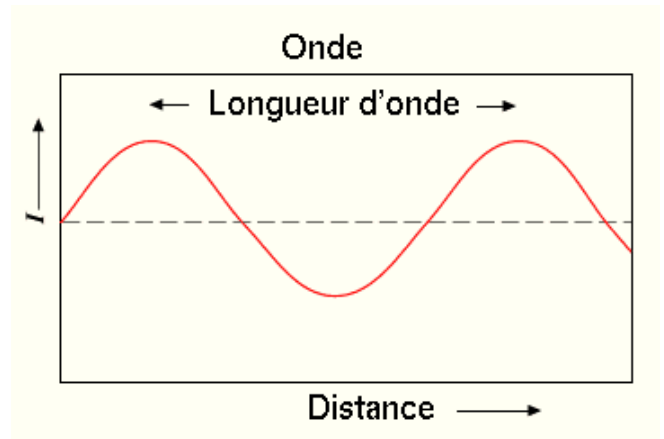
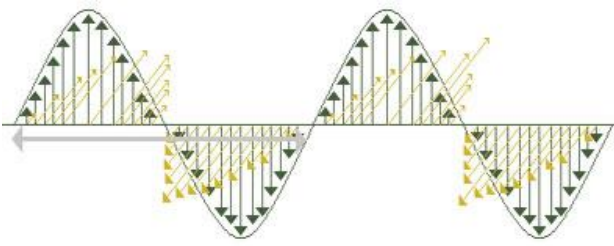
Ce sont ces femmes qui établiront progressivement (entre 1881 et 1896) la classification spectrale encore utilisée aujourd'hui, et qui fut adoptée par l'UAI en 1910.

Il faut citer Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Canon et Henrietta Leavitt qui découvre la relation Période-Luminosité qui permet de mesurer les distances des étoiles.

Notions de base

La lumière blanche visible est composée d'un mélange d'ondes dites électromagnétiques.

Chaque onde individuelle est caractérisée par sa longueur d'onde λ (lambda) et comprend deux composantes perpendiculaires, l'une électrique, l'autre magnétique.



La longueur d'onde λ est la distance parcourue par une onde avant de revenir dans la même position, avec le même sens de variation.

La fréquence d'une onde est le nombre de fois que la longueur d'onde est parcourue en une seconde. C'est le nombre de cycles par seconde. Elle est notée ν (nu) et est liée à la longueur d'onde par la relation :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Où } c \text{ est la vitesse de la lumière}$$

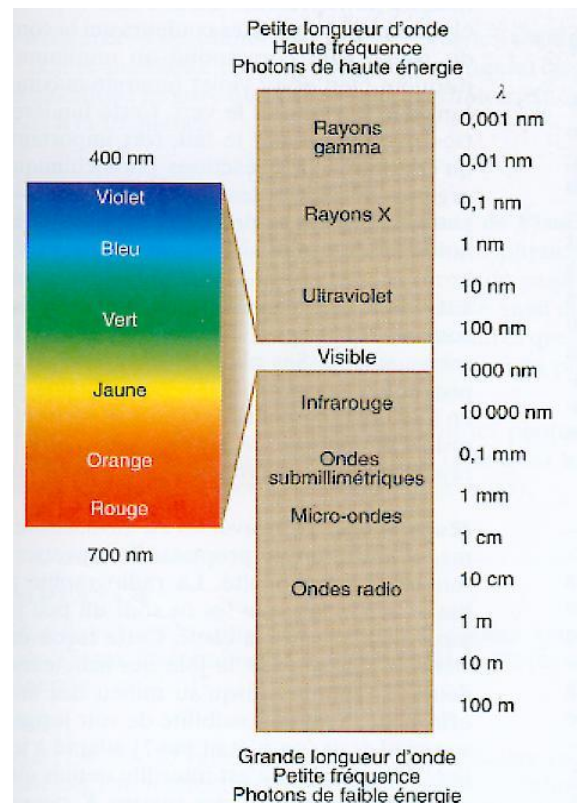
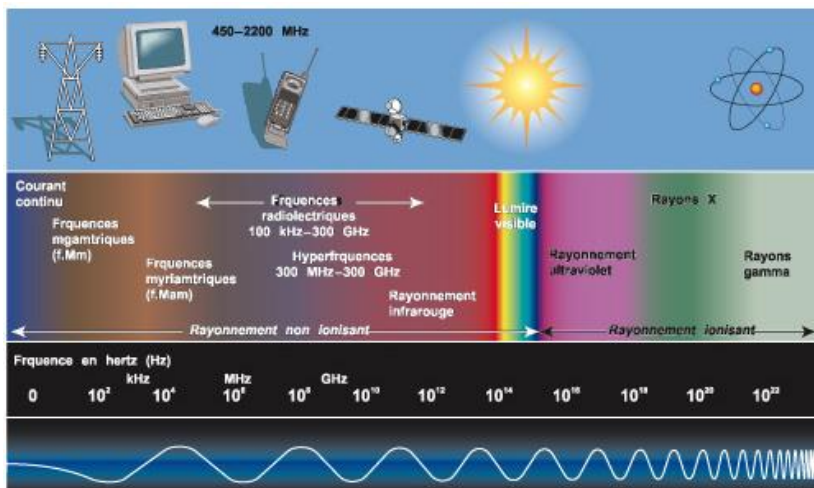
La fréquence est en relation directe avec l'énergie de l'onde électromagnétique :

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

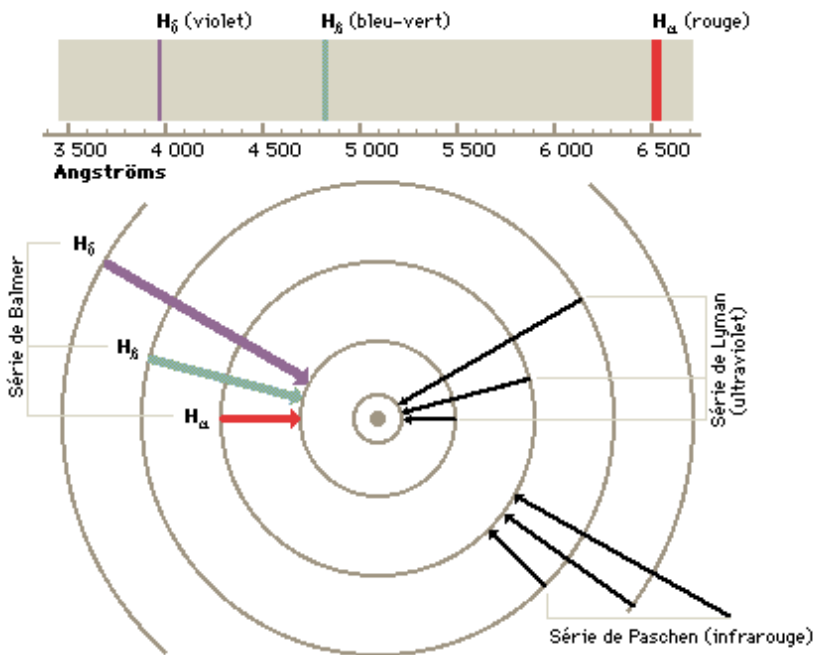
Où E est l'énergie de l'onde et h la constante de Plank qui vaut $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Le schéma ci-contre donne les valeurs des longueurs d'ondes de l'ensemble du spectre Electromagnétique, où l'on voit que la lumière visible ne représente qu'une petite partie, de 400 à 700 nm (1 nm = 1 nanomètre, un milliardième de mètre).

Plus la longueur d'onde est petite, plus l'énergie est grande, et inversement. Les rayons gamma sont les plus énergétiques, et correspondent en astronomie à des évènements de très grande puissance.



L'atome



Sachant que les électrons composant un atome tournent autour du noyau, Niels Bohr a imaginé au début de XX^{ème} siècle que les orbites des électrons ne pouvaient se trouver qu'à des endroits précis, à des distances déterminées du noyau, un peu à l'image d'une échelle, où les pieds (les électrons) ne peuvent se poser que sur les barreaux (les niveaux d'énergie).

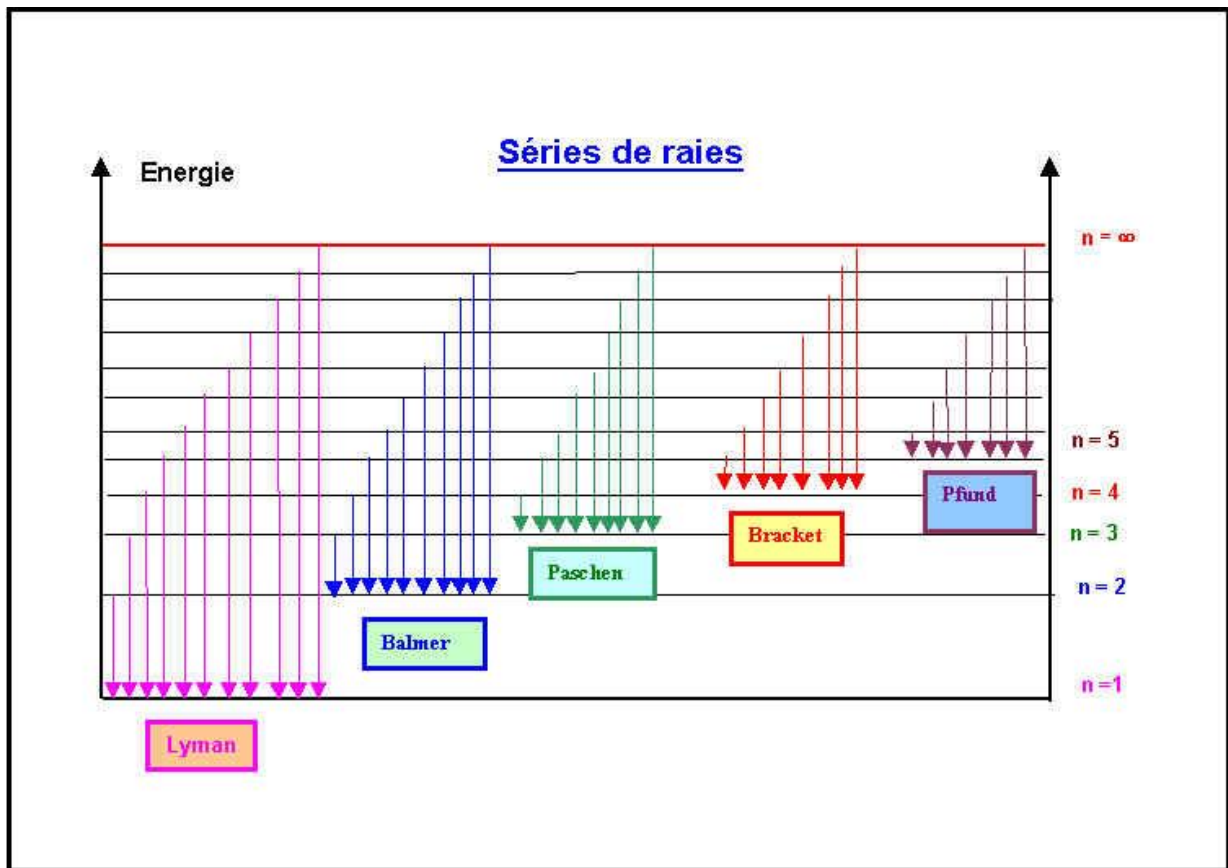
Un atome d'hydrogène est composé d'un noyau (un seul proton) et d'un électron. A l'origine, l'électron est situé sur le niveau le plus stable, le niveau dit « fondamental », le plus proche du noyau. S'il reçoit de l'énergie, par exemple en étant chauffé, l'électron passe à un niveau supérieur, monte l'échelle en utilisant les barreaux.

Cet état « excité » de l'électron n'est pas stable. L'électron aura tendance à revenir rapidement à son niveau fondamental. Il émettra alors son surplus d'énergie, correspondant exactement à la différence d'énergie des deux niveaux. Ce photon émis, ayant une énergie déterminée, aura une longueur d'onde (donc une fréquence) spécifique. Cette longueur d'onde se retrouvera dans le spectre de l'hydrogène.

Les niveaux d'énergie d'un atome d'hydrogène sont aussi nombreux que l'on veut. Le niveau infini correspond à un électron totalement désolidarisé de son noyau. On dit alors que l'atome est ionisé. Il est porteur d'une charge positive, l'électron étant porteur d'une charge négative. Dans la pratique, la distance du noyau à partir de laquelle l'atome est ionisé est très petite, et l'« infini » dont il était question plus haut n'est pas très grand.

Les séries de raies

Les raies d'un spectre sont donc représentatives des sauts d'énergie des électrons excités. Elles sont classées en séries en fonction du niveau sur lequel les électrons retournent. Si les électrons retournent sur le niveau fondamental (niveau 1), on a affaire à la série de raies de « Lyman », du nom de son découvreur. Si les électrons retournent au niveau 2, les raies sont dites de « Balmer », et ainsi de suite selon le schéma ci-dessous.



Les raies de Lyman sont dans Ultraviolet, celles de Balmer dans le visible (elles contiennent pour l'hydrogène les célèbres raies $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$,...). Les autres séries sont dans l'infrarouge.

Ce modèle fonctionne très bien pour l'hydrogène, mais est mis en défaut dès que plusieurs électrons sont présents dans un même atome. Sommerfeld a amélioré ce modèle en transformant les orbites circulaires des électrons en orbites elliptiques. Mais ce nouveau modèle trouve aussi rapidement ses limites.

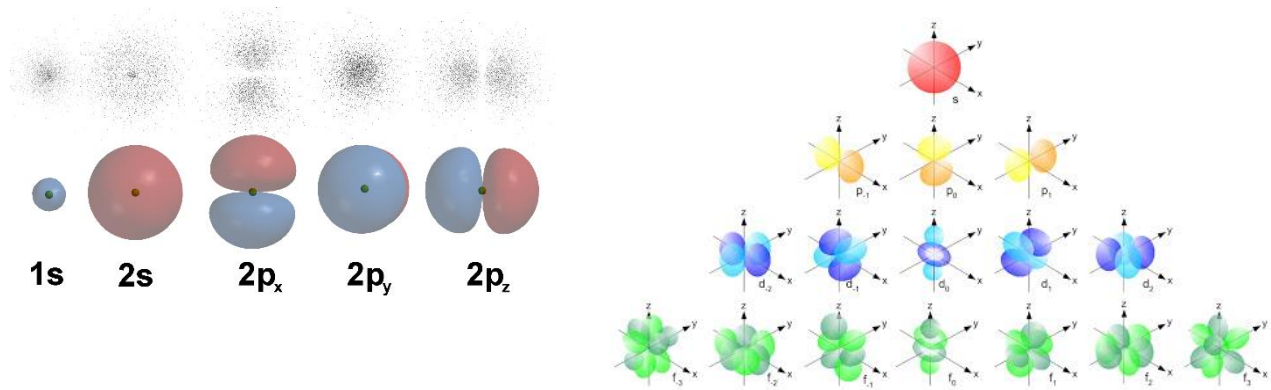
Les orbitales atomiques

Il faudra attendre la mécanique quantique pour trouver la solution théorique s'ajustant parfaitement aux observations. Cette solution fait appel aux orbitales électroniques déterminées grâce aux *fonctions d'ondes de Schrödinger*.

Cette théorie est extrêmement compliquée, et n'est pas l'objet de cet exposé (et c'est tant mieux...).

Pour faire simple, les fonctions d'ondes de Schrödinger nous disent que les électrons sont présents statistiquement dans des volumes (les orbitales) dont l'énergie est caractéristique.

Le niveau fondamental est sphérique, les autres ont des formes géométriques compliquées, comme des tores, des « gouttes d'eau », des lobes, ou des associations de ces formes élémentaires.



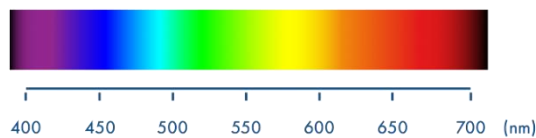
Les formes des orbitales sont les volumes où un électron a 95% de chances de se trouver.

Les différents types de spectres

Le spectre continu

Un filament de lampe, chauffé par un courant électrique, émet un spectre continu, composé d'un mélange inextricable de toutes les longueurs d'ondes.

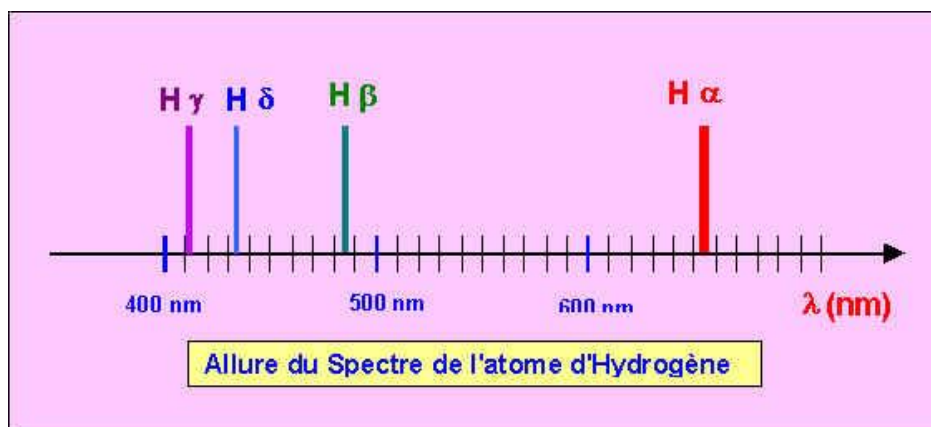
La surface du Soleil émet aussi un spectre continu. Dans le visible, cette lumière est « blanche ». Son passage dans un prisme se solde par un spectre coloré de type arc-en-ciel.

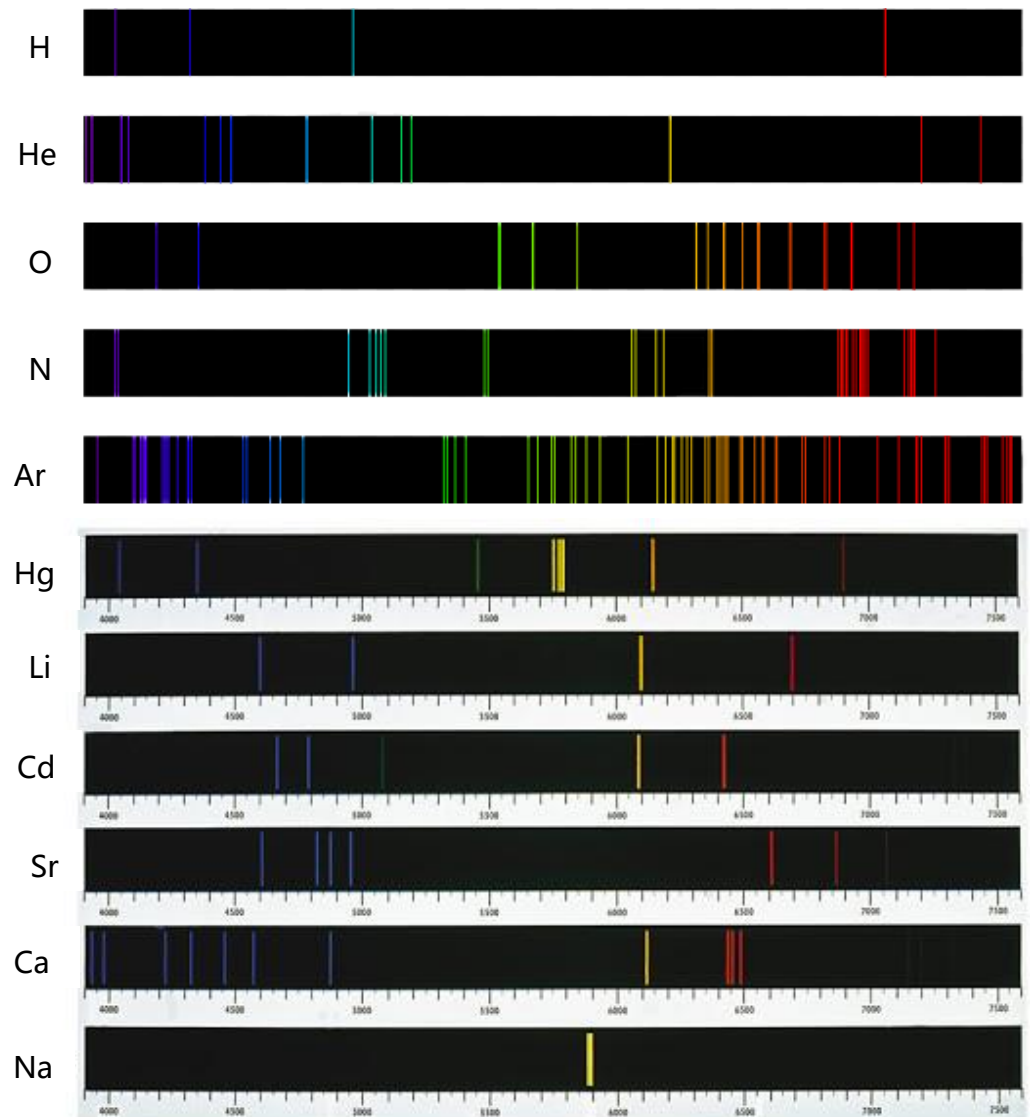


Le spectre d'émission

Supposons une excitation d'un gaz pur, par exemple l'hydrogène. Des raies brillantes vont apparaître sur le spectre, sans fond continu, car seul l'élément hydrogène est présent. Le schéma ci-dessous représente les quatre principales raies très connues de l'hydrogène. On retrouvera ces raies un peu partout dans l'Univers, l'hydrogène y étant présent à 75 %.

A noter que ces raies ne sont pas les seules. Le spectre de l'hydrogène, le plus simple des éléments est déjà très compliqué.





Cette illustration montre les raies caractéristiques d'émission de quelques.

On note que l'allure du spectre est caractéristique de l'élément, c'est en quelque sorte sa signature.

Le spectre d'absorption

Une étoile émet, dans toutes les longueurs d'ondes, un spectre continu. Si l'on interpose un gaz, par exemple l'hydrogène, entre la source et l'observateur, cet hydrogène va « absorber » la lumière aux longueurs d'ondes correspondant à ce gaz. Dans le spectre, cette lumière va disparaître, et l'on obtiendra un spectre d'absorption avec des raies sombres sur un fond continu.

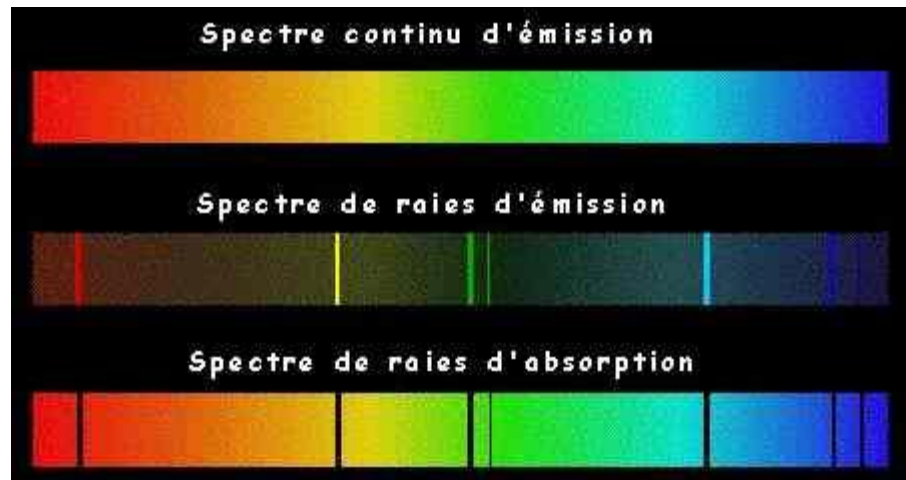
Le spectre ci-dessous est celui du Soleil qui émet un spectre continu. Les bandes absorption sont caractéristiques de son atmosphère (et de la nôtre...), qui s'interpose entre l'émission et nous.



La présence de certaines raies dans un spectre de l'étoile voudra dire que l'élément correspondant est présent.

L'intensité relative des raies sera représentative de la quantité de l'élément présent.

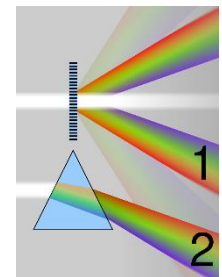
En résumé



Que nous apprend un spectre ?

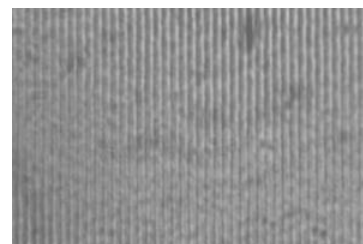
Faire un spectre d'une étoile, veut dire d'abord décomposer sa lumière. Ceci s'obtient à l'aide soit d'un prisme, soit, de façon plus moderne et plus efficace, grâce à un réseau de diffraction.

Le réseau donne un spectre dont la réponse est linéaire, contrairement au prisme. Une réponse linéaire signifie que si une couleur est deux fois plus éloignée qu'une autre, sa longueur d'onde est dans le même rapport.



Dans un prisme, le rouge est moins dévié que le bleu. C'est l'inverse dans un réseau.

La lumière étant étalée par le réseau, il faudra une certaine quantité de lumière pour impressionner les caméras des spectrographes.



La composition chimique

Le premier renseignement exploitable en analysant un spectre d'étoile est sa composition chimique. En effet, la position des raies est caractéristique des éléments chimiques présents dans son atmosphère. De plus, l'intensité des raies est représentative des proportions de l'élément. On sait ainsi que le Soleil a sensiblement la même composition que le reste de l'Univers, à savoir, trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium, et des traces des autres éléments.

La vitesse

Certaines raies ou ensembles de raies (par exemple les quatre raies principales de l'hydrogène) sont facilement reconnaissables sur un spectre, mais peuvent être décalées en longueur d'onde par rapport au même élément analysé sur Terre.

Ce phénomène est dû à la vitesse de rapprochement ou d'éloignement de l'objet, et est plus connu sous le terme de Red Shift (décalage vers le rouge). L'étude de ce Red Shift nous donne donc la vitesse de l'objet par rapport à la Terre. Ce phénomène a permis de constater expérimentalement que les galaxies s'éloignent les unes des autres, et donc que l'Univers est en expansion.

La classe spectrale

L'allure générale du spectre d'une étoile permet de la ranger dans l'une des classes spectrales qui ont par ailleurs des caractéristiques communes.

Les étoiles sont classées selon leur température de surface. Les classes principales sont, des plus chaudes aux plus froides : O, B, A, F, G, K, M. S'ajoutent les très chaudes (W), et les très froides (C, S).

Pour affiner l'analyse, des sous classes existent, notées de 0 à 9 (B0, M5...)

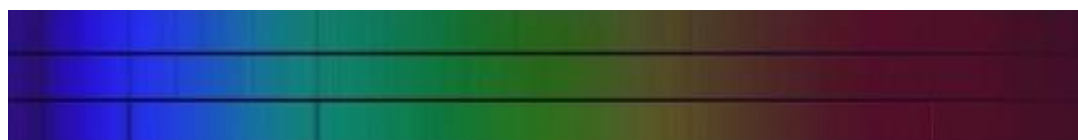
Classe spectrale	Masse	Rayon	Luminosité	Température de surface (en degrés K)	Durée de vie (en millions d'années)	Abondance relative (en %)
W	>40	20	1.000.000	50.000	<1	négligeable
O5	32	18	600.000	40.000	1	0.00002
B0	16	7.4	16.000	28.000	10	
B5	6.5	3.8	600	15.500	100	0.1
A0	3.2	2.5	60	9.900	500	
A5	2.1	1.7	20	8.500	1.000	1
F0	1.75	1.4	6	7.400	2.000	
F5	1.25	1.2	3	6.600	4.000	3
G0	1.06	1.1	1.3	6.000	10.000	
<i>G2 Soleil</i>	1	1	1	5.800	12.000	
G5	0.92	0.9	0.8	5.500	15.000	9
K0	0.80	0.8	0.4	4.900	20.000 (1)	
K5	0.69	0.7	0.1	4.100	30.000	14
M0	0.48	0.6	0.02	3.500	75.000	
M5	0.20	0.3	0.001	2.800	200.000	73
C	~5 à 10	(2)	(2)	~2500	0.1	négligeable
S	~5 à 10	(2)	(2)	~2000	0.1	négligeable

On voit que la détermination de la classe permet de connaître la luminosité absolue (qui permettra d'en déduire la distance avec la mesure de la magnitude apparente), la masse, le rayon (donc la densité moyenne), la durée de vie de l'étoile.

Le Soleil est une étoile de classe G2.

A noter également que les étoiles peu chaudes, petites, peu lumineuses, et donc peu facilement repérables, sont largement majoritaires.

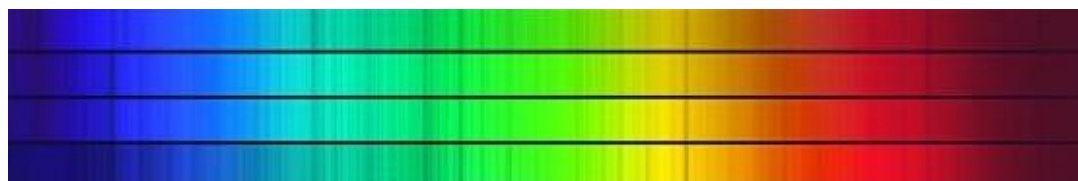
Voici quelques exemples de spectres de différentes classes. On note que plus l'étoile est chaude, plus les raies larges, importantes, sont situées dans le bleu, aux hautes énergies.



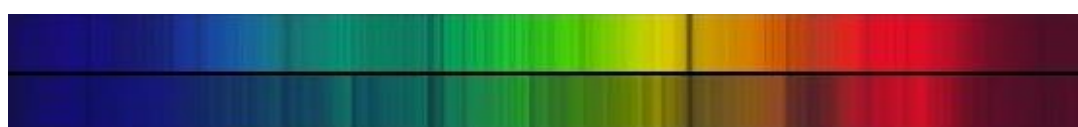
O6, B0, B6



A1, A5, F0, F5



G0, G5, K0, K5



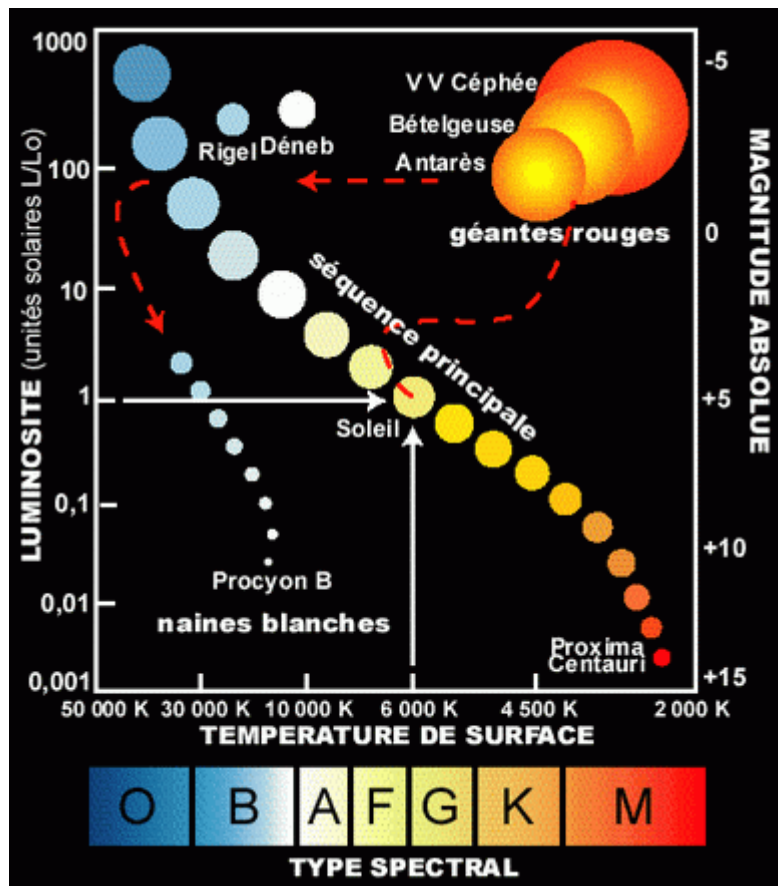
M0, M5

Le tableau suivant donne quelques éléments de la composition des étoiles selon leur classe :

Classe	Raies principales	Autres raies
W	Hélium ionisé, hydrogène	Carbone, et Oxygène (classe WC) Azote (classe WN)
O	Hélium ionisé	Hélium neutre, faibles raies de l'hydrogène
B	Hélium neutre	Raies de l'hydrogène se renforçant dans les classes B6 à B9
A	Hydrogène très visibles en A0, allant en décroissant vers A9	Raies du calcium ionisé de plus en plus fortes de A0 vers A9
F	Raies du calcium ionisé de plus en plus fortes	
G	Raies du calcium ionisé très marquées	Métaux, particulièrement le Fer
K	Fortes raies métalliques	Molécules CH et CN
M	Raies d'absorption de l'oxyde de titane	Nombreuses raies métalliques
C	Raies métalliques	Carbone
S	Raies métalliques	Oxyde de Zirconium, Yttrium, Baryum

Retour sur le diagramme HR

Ce diagramme positionne les étoiles sur un graphique montrant leur luminosité (leur magnitude absolue) en fonction de leur température de surface.



Les étoiles qui transforment leur hydrogène en hélium sont réparties sur une large ligne appelée « séquence principale ». Une fois l'hydrogène consommé, les étoiles deviennent des géantes rouges qui finissent leur vie soit en étoiles à neutrons ou en trous noirs, soit en naines blanches, selon leur masse.

L'axe des abscisses (horizontal) donne la température de surface, mais peut aussi être exprimé en classe spectrale puisque les deux sont liés. On note qu'on aurait aussi pu l'exprimer en termes de couleurs (B-V) : les O sont bleues, les M rouges.

Vitesse de rotation des étoiles

Le spectre d'une étoile nous renseigne également sur sa vitesse de rotation sur elle-même. En effet, l'un des bords de l'étoile s'éloigne de nous, l'autre se rapproche. Les raies sont élargies par effet du Red Shift. L'élargissement de la raie donnera la vitesse de rotation.

Rappel : le centre de la raie large donnera la vitesse d'éloignement ou de rapprochement de l'étoile, en mesurant le Red Shift correspondant.

Etoiles doubles spectroscopiques

De même, deux étoiles liées gravitationnellement mais non séparées par les instruments pourront donner un dédoublement des raies, si la première étoile s'éloigne de nous, et la deuxième se rapproche (ou l'inverse).

Autres effets

Citons enfin que des données concernant le champ magnétique ou la polarisation de la lumière peuvent être déduites des spectres.