

COMPLEMENT 2

VERS LA CONSTRUCTION D'UN DIAGRAMME HR

Dans ce complément, nous allons nous concentrer sur les outils utilisés par les chercheurs pour construire un diagramme HR. Nous avons vu qu'un tel diagramme relie la température de surface des étoiles à leur luminosité. Mais vous vous doutez bien que ces données ne tombent pas du ciel (enfin... seulement en partie !) et que les astronomes doivent trouver des moyens pour les déterminer avec précision. Voici leurs méthodes, vous allez voir qu'elles ne sont pas si compliquées, et qu'elles résultent parfois de simples observations !

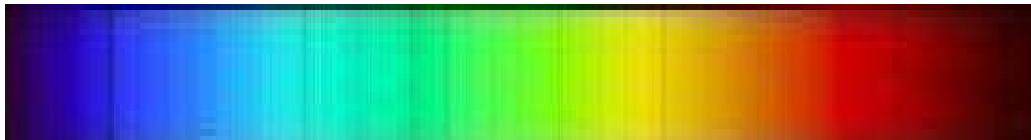
I Couleur et température de surface d'une étoile

A- Spectroscopie

Chaque étoile possède un **spectre**, c'est-à-dire une palette de couleurs propre à elle-même. Les astrophysiciens obtiennent cette palette de couleurs grâce à la spectroscopie : on éclaire à l'aide de la source à étudier (dans notre cas, l'étoile) un outil appelé spectroscope (construit à l'aide de plusieurs lentille et d'un prisme par exemple). Celui-ci décompose la lumière de l'étoile et fait apparaître le spectre continu de l'astre.

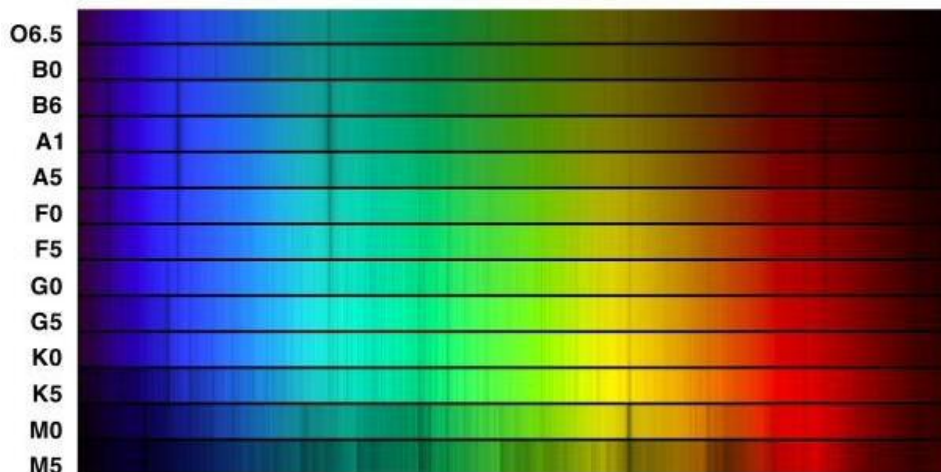


Par exemple, le spectre obtenu pour notre Soleil, après passage dans le spectroscope est :



Mais le Soleil n'est bien évidemment pas l'unique modèle, et on obtient un spectre différent en fonction de l'étoile qu'on observe. En fait, on dénombre 7 principaux types de spectres désignés respectivement par les lettres O, B, A, F, G, K, M. Comment se souvenir de ces lettres ? Voici un bon moyen mnémotechnique pour les anglophones : **Oh Be A Fine Girl, Kiss Me !** (oh, sois une gentille fille, embrasse moi !). Chaque type de spectre est divisé en 10 catégories, de 0 à 9: 0 pour les étoiles les plus chaudes du type, 9 pour les moins chaudes.

Voici des exemples de spectres obtenus en observant différents types d'étoiles.



On voit bien que ces spectres ont des différences remarquables. **Le Soleil fait partie du type G.** Le type O représente les étoiles les plus chaudes, et le type M les étoiles les plus froides.

Ainsi, nous venons de voir que le spectre d'une étoile nous donne un moyen de classification très utilisé. En fait, le spectre d'une étoile est, pour les astrophysiciens, un véritable « messenger de la lumière », et nous apporte un nombre d'informations considérables sur l'étoile en elle-même, comme la composition chimique de l'étoile ou, ce qui va nous intéresser ici, sa température de surface.

B- Mesure de couleur et de température de surface d'une étoile

Les étoiles apparaissent être exclusivement blanches au tout premier coup d'oeil. Mais si nous nous concentrons rien qu'un tout petit peu, nous pouvons noter une plage de couleurs : bleu, blanc, rouge et même doré. Dans la constellation d'hiver d'Orion, un beau contraste peut se voir entre la rouge Betelgeuse au coude d'Orion et la bleue Bellatrix à l'épaule. Ce qui fait que les étoiles montrent différentes couleurs resta longtemps un mystère jusqu'à la fin des années 1800, quand les physiciens eurent suffisamment de compréhension de la nature de la lumière et des propriétés de la matière à très haute température.

1) Le corps noir

Le corps noir est un **objet idéal qui absorberait la totalité de l'énergie électromagnétique qu'il recevrait.** Appelons T la température d'un corps noir, exprimée en Kelvin (1 degré Celsius = 273 degrés Kelvin). Prenons le spectre de ce corps noir, semblable aux spectres vus ci-dessus. Sur ce spectre, chaque couleur (correspondant à une longueur d'onde précise) est plus ou moins visible pour nous, observateurs, c'est-à-dire que chaque couleur a une intensité plus ou moins forte. Appelons λ_{max} (en m) la longueur d'onde correspondant à la couleur ayant la plus forte intensité sur le spectre (celle que l'on voit le plus). Pour un corps noir, la **loi de Wien** donne

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

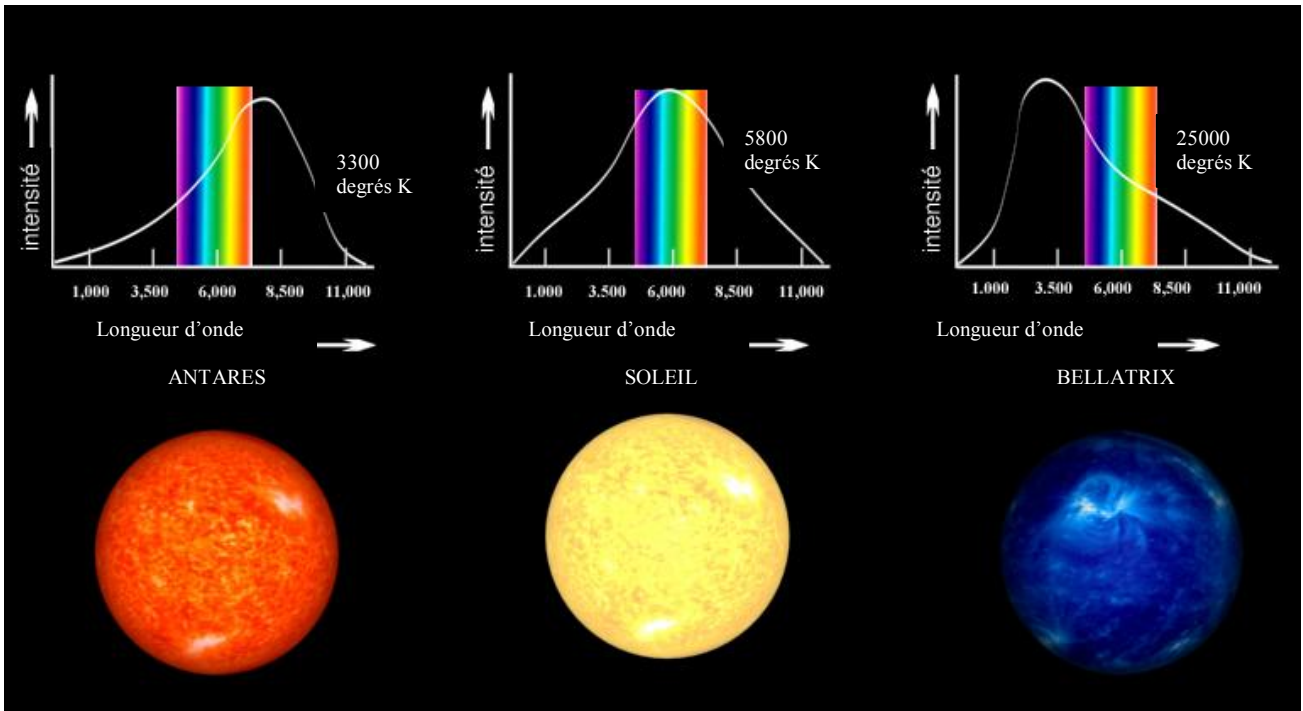
2) Lien avec les étoiles

Spécifiquement, c'était la physique du rayonnement du corps noir qui nous a permis de comprendre les variations de couleur des étoiles. Peu de temps après que la physique du corps noir a été comprise, on a remarqué que le spectre des étoiles était très semblable aux courbes de rayonnement d'un tel corps pour des températures allant de quelques milliers à environ 50 000 degrés. La conclusion évidente était que **les étoiles étaient assimilables à des corps noirs**, et que les variations de couleur des étoiles étaient une conséquence directe de leur température de surface.

A partir des spectres obtenus par spectroscopie (vus dans la partie I A), on réalise alors des courbes « intensité en fonction de longueur d'onde ». Ces courbes possèdent toutes un maximum d'intensité correspondant à λ_{max} . Cette valeur renseigne sur **la couleur de l'étoile** car une couleur n'est en fait qu'une plage de longueurs d'onde, par exemple, le rouge correspond a

λ_{rouge} = entre 620 et 780 nm, et le bleu correspond à λ_{bleu} = 446-500 nm. Puis, la loi de Wien donne alors directement **la température de surface de l'étoile.**

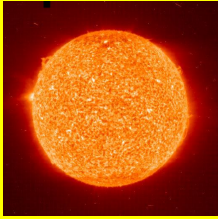
Voici un schéma qui résume ce que l'on vient de voir dans cette partie.



La physique du corps noir nous permet donc, en assimilant avec une bonne approximation les étoiles à des corps noirs, de déterminer la couleur puis la température de surface d'une étoile.

C- Résultats des mesures et récapitulatif

Après étude des spectres vus en IA grâce la méthode vue en IB, on obtient le tableau récapitulatif suivant :

Type spectral	Température de surface (Kelvin)	Couleur	Exemple
O	> 25 000	Bleuté	Naos
B	25 000 – 11 000	Bleuté	Bellatrix
A	11 000 – 7 500	Bleuté - Blanc	Sirius B
F	7 500 – 6 000	Blanc - Jaune	Procyon
G	6 000 – 5 000	Jaune	 Soleil
K	5 000 – 3 500	Orangé	Arcturus
M	< 3 500	Rouge	Antarès

Remarquons avant de clore cette partie que, contrairement à ce que l'on pourrait penser à première vue (et contrairement aux couleurs de notre robinet de cuisine !), **plus une étoile est chaude, plus elle est bleue**. On peut retenir cela en regardant une bougie qui se consume : tentez de passer votre doigt (rapidement !) sur le haut de la flamme (jaune), vous ne sentirez presque rien... En revanche, il vaut mieux éviter d'approcher trop votre doigt du bas de la flamme (bleuté), plus chaud ! On peut aussi comparer les étoiles à une barre de fer : quand on chauffe une telle barre, elle passe du rouge au blanc en passant par le orange et le jaune !

Nous avons donc obtenu, grâce à la spectrométrie des informations sur la température de surface de différentes étoiles. Nous allons maintenant nous concentrer sur un autre paramètre : la luminosité.

II Magnitude d'une étoile : luminosité

A- Histoire

Hipparque, astronome grec du 2ème siècle avant J.C., répertorie les étoiles visibles à l'œil nu en **six classes de grandeur**. A cette époque, les astres "fixes" (les étoiles) sont tous considérés comme étant à la même distance. Il est alors logique de penser que les plus lumineux sont tout simplement les plus grands. Les étoiles de classe de grandeur 1 sont celles qui sont visibles juste après le couchant et celles à la limite de la perception sont dans la classe de grandeur 6. Cette échelle fut reprise par Ptolémée en 137 de notre ère dans sa vaste compilation du savoir scientifique accumulé depuis l'Antiquité – L'Almageste – et nous a ainsi été transmise. Les moyens d'observation se perfectionnant, il devint nécessaire d'élargir et de préciser la mesure de l'intensité lumineuse des étoiles.

B- Magnitude apparente

L'échelle a depuis été établie sur une base plus scientifique, de sorte qu'une étoile de magnitude 1 est :

- 2,5 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude 2 ;
- 16 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude 3 ;
- 40 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude 5 ;
- 100 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude 6 !

Vous voyez bien que cette échelle n'est pas linéaire : elle est en fait **logarithmique**. Pour généraliser les exemples précédents, à une différence de n magnitudes correspond un rapport de $(2,5)^n$.

L'éclat ou luminosité d'une étoile se mesure alors grâce à la magnitude apparente. **Plus la magnitude apparente est petite, plus l'objet est brillant pour un observateur terrestre**. Certains astres sont d'ailleurs tellement brillants qu'ils peuvent avoir des magnitudes négatives. Ainsi Véga est de magnitude 0, Sirius de magnitude - 1,6, **le Soleil de magnitude - 26,8**. Il n'existe pas de magnitude apparente plus faible que celle du Soleil, car c'est bien évidemment l'étoile la plus lumineuse vue de la Terre !

Les étoiles les moins visibles de la Terre, non visibles à l'œil nu, ont des magnitudes supérieures à six. Les étoiles les plus faibles, visibles avec les télescopes les plus puissants du monde, sont de magnitude 30 environ. Rendez vous compte : ces étoiles étant de magnitude 30 (et le Soleil étant de magnitude -26.8), elles sont, si on applique la règle précédente, $(2,5)^{30-(-26,8)}$

fois moins lumineuse que notre Soleil, soit $4 \cdot 10^{22}$ fois (4 mille milliards de milliards) moins lumineuses que le Soleil pour un observateur terrestre!

C- Magnitude absolue

Sachant maintenant que toutes les étoiles ne sont pas à la même distance de la Terre, on se doute bien que, lorsqu'on découvre un beau ciel, les étoiles qui nous paraissent les plus brillantes, celles qui par conséquent possèdent la luminosité apparente la plus forte (et donc la magnitude apparente la plus faible), ne sont pas forcément les plus grosses et les plus lumineuses ! En effet, une étoile très fortement éloignée de la Terre, même si elle est extrêmement lumineuse, est difficilement distinguable pour nous !

En fait, la **magnitude apparente** ne donne d'indication que sur **l'éclat apparent sur Terre**, pour un observateur terrestre, et non l'intensité réelle de la lumière émise. Elle ne nous renseigne en rien sur l'éclat réel de l'astre et ne donne aucune indication sur sa nature physique. En effet, elle ne tient pas compte de la distance du corps observé et **ne permet donc pas de comparer ses propriétés à celles d'autres astres**, tous situés à des distances différentes.

Afin de comparer la luminosité intrinsèque des étoiles, on définit une échelle de **magnitude absolue** qui correspond à la magnitude qu'aurait l'astre s'il était placé conventionnellement à une distance de 10 parsecs ($10 \text{ pc} = 32,6$ années de lumière). Cette fois ci, la magnitude absolue renseigne sur l'éclat réel de l'astre. **Plus la magnitude absolue est petite, plus l'objet est brillant et lumineux**. C'est pourquoi, si on trace un diagramme HR, on inverse la graduation en magnitude absolue pour correspondre avec la luminosité.

D- Exemples

Objet	Magnitude apparente	Magnitude Absolue	Distance Terre-Etoile
Soleil	-26.7	4.9	$5 \cdot 10^{-6}$ pc
Sirius	-1.45	1.4	2.7 pc
Véga	0.00	0.5	8.1 pc
Antarès	1.00	-4.8	130 pc
Adhara	1.50	-5.0	200 pc
Zeta Puppis (Naos)	2.21	-6.2	430 pc

On voit donc que le Soleil, parmi ces étoiles, a la plus petite magnitude apparente mais la plus grande magnitude absolue. On en déduit que le Soleil, parmi ces 6 étoiles, est celle que l'on voit le mieux de la Terre (la plus petite magnitude apparente), mais pourtant, c'est l'étoile la moins lumineuse de toutes (la plus grande magnitude apparente) ! Zeta Puppis, quant à elle, est la moins lumineuse pour un observateur terrien, mais pourtant, c'est la plus lumineuse de toutes !

Nous avons donc vu dans ce complément quels ont été les outils des physiciens Hertzsprung et Russell pour construire leur diagramme, élément désormais incontournable en astronomie.