

AVEC NOS ÉLÈVES

Synthèse de documents : la classification des étoiles

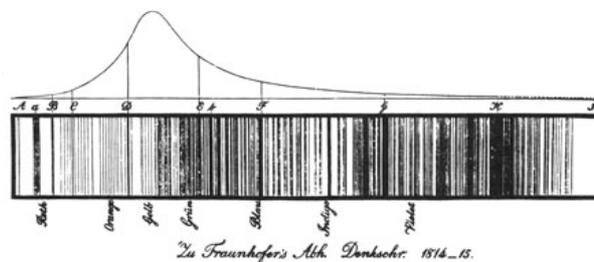
Thomas Appéré, enseignant agrégé de physique-chimie au lycée St-Paul (Vannes),
docteur en planétologie et chercheur associé à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble.

Thomas Appéré nous propose ici un exemple de travail réalisé avec des lycéens sur le thème des étoiles.

Document 1 - Un peu d'histoire

La compréhension de la nature des étoiles est intimement liée à celle de leur composition et de leur source d'énergie. Concernant le Soleil, Anaxagore (V^e s. av. J-C) y voit « une pierre incandescente plus grande que le Péloponnèse ». Emmanuel Kant (XVIII^e s.) considère que nul ne peut objecter qu'il est constitué en partie d'oxygène, puisqu'il brûle.

Au XIX^e siècle, Auguste Comte et les philosophes positivistes considèrent, à propos des astres, que « nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition ». Le XIX^e siècle est (heureusement) aussi celui de l'invention de la spectroscopie. William Wollaston observe des raies sombres dans le spectre du Soleil. En 1814, Joseph von Fraunhofer enregistre ce spectre et établit un premier catalogue de raies. [...] Ces raies sont progressivement associées à différents éléments chimiques. [...]



Spectre du Soleil enregistré par Fraunhofer.

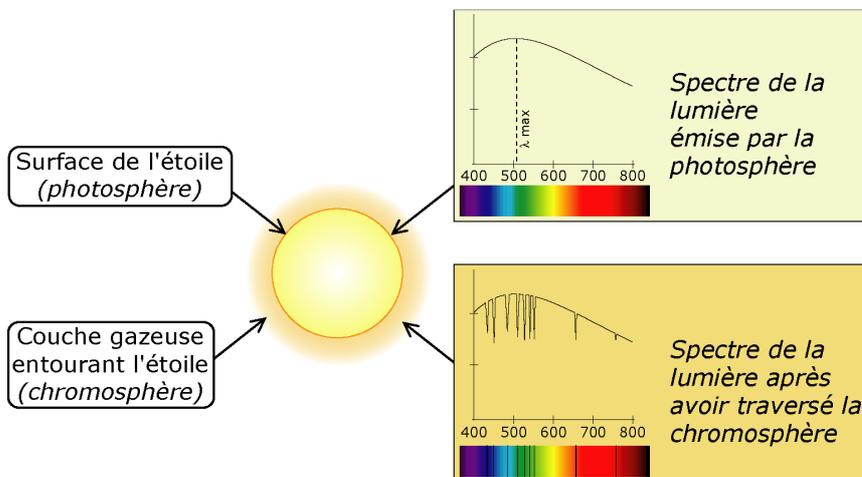
Vient alors le temps de l'observation des spectres d'étoiles autres que le Soleil, la découverte de leur diversité... et les tentatives de classification. De 1866 à 1877, P. A. Secchi propose 3, puis 4 et enfin 5 classes de spectres. Henry Draper affine cette classification et aboutit à ... 17 classes de spectres ! Il faut attendre le début du XX^e siècle et les travaux de Annie Cannon et Cecilia Payne [...] pour trouver une interprétation physique à ces différents types, ramenés à 7.

D'après Introduction à la physique stellaire, E. Josselin pour Les Cahiers Clairaut n°145 mars 2014 - CLEA

Document 2 - Le spectre des étoiles

Le spectre de la lumière émise par une étoile contient un *spectre continu* auquel se superposent des *raies sombres*.

• Le *spectre continu* est émis par la surface de l'étoile, la *photosphère*, qui est très chaude. La température de cette photosphère influence directement l'allure globale du profil spectral de l'étoile : plus la température de l'étoile est élevée, plus sa couleur tirera vers le bleu, moins la longueur d'onde du maximum d'intensité λ_{\max} sera grande. Cette longueur d'onde λ_{\max} et la température de l'étoile T sont reliées par la *loi de Wien* :
 $\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$



- Les **raies sombres** correspondent aux radiations absorbées par l'atmosphère de l'étoile, la **chromosphère**, bien moins chaude que la photosphère. Ces raies sombres correspondent aux raies d'absorption des éléments chimiques présents dans la chromosphère. Elles permettent donc de connaître la composition de l'étoile.

Document 3 - La classification des étoiles

Les étoiles sont classées en fonction de leur température et des raies d'absorption présentes dans leur spectre. **7 classes** ont été définies, repérées par une lettre allant de O à M par ordre de température décroissante. Le tableau ci-dessous indique pour chaque classe la gamme de température correspondante, les raies d'absorption principales et le type de spectre observé.

Classe	Gamme de température (K)	Raies d'absorption principales	Spectre typique
O	> 28000	hélium azote, carbone, oxygène	
B	10000 - 28000	hélium, hydrogène	
A	7500 - 10000	hydrogène, calcium	
F	6000 - 7500	hydrogène, métaux : fer, titane, calcium, strontium, magnésium	
G	5000 - 6000	hydrogène, calcium et métaux	
K	3500 - 5000	métaux et monoxyde de titane	
M	< 3500	métaux et monoxyde de titane	

Remarque : Pour se souvenir de l'ordre des classes, les astrophysiciens utilisent la phrase suivante : "Oh Be A Fine Girl Kiss Me" (ou "Oh Be A Fine Guy Kiss Me" pour les astrophysiciennes).

Le spectre d'une étoile permet également de déterminer la luminosité L de l'étoile (en Watts). Elle est directement reliée au rayon et à la température de l'étoile par la formule : $L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$

où R est le rayon de l'étoile (en mètres), T est la température de l'étoile (en Kelvins) et σ est la constante de Stefan avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Ainsi, plus une étoile est grosse et chaude et plus elle est lumineuse. Une étoile est donc aussi classée par sa luminosité. **5 classes de luminosité** ont été définies, repérées par un chiffre romain comme indiqué ci-contre.

I	Supergéantes
II	Géantes brillantes
III	Géantes
IV	Sous géantes
V	Naines

Le Soleil, étoile naine de température 5780 K, est donc une étoile de type G V.

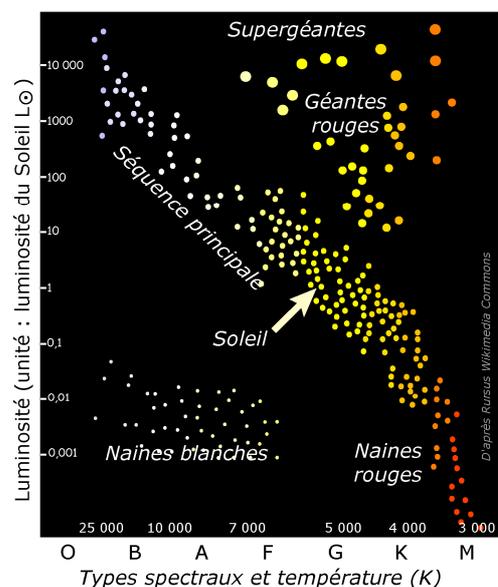
Document 4 - Le diagramme de Hertzsprung-Russell

Le diagramme de Hertzsprung-Russell est un graphique dans lequel les étoiles sont repérées par leur température en abscisse et par leur luminosité en ordonnée. Ce diagramme permet d'étudier l'évolution des étoiles.

La luminosité d'une étoile est généralement notée en unités solaires L/L_{\odot} avec $L_{\odot} = 3,846 \times 10^{26} \text{ W}$. Ainsi, le Soleil a une luminosité de 1 unité solaire.

Les étoiles passent 90 % de leur vie dans la séquence principale. C'est la diagonale allant du coin supérieur gauche (chaud et lumineux) au coin inférieur droit (froid et peu lumineux). On trouve ainsi le Soleil au milieu de la séquence principale.

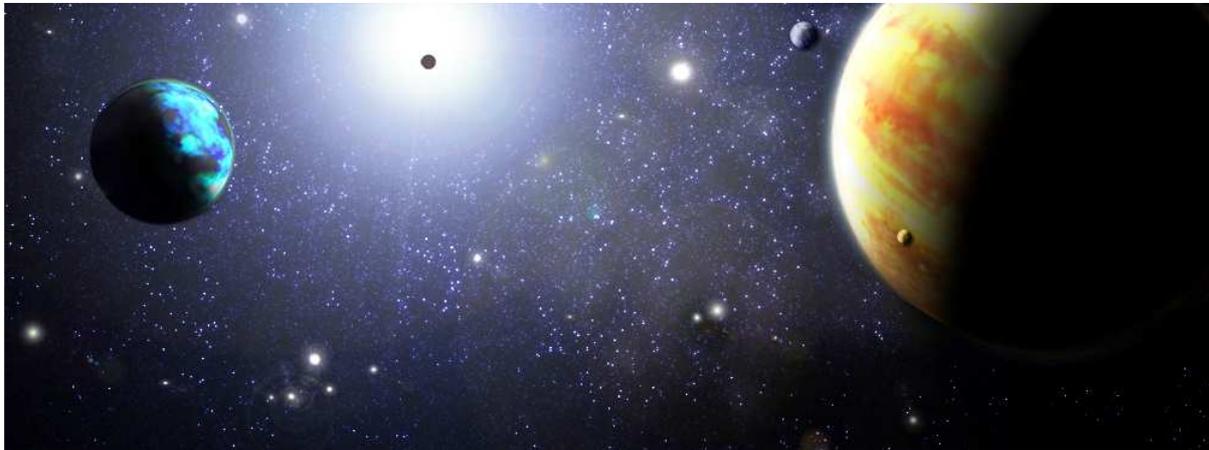
Puis les étoiles évoluent en géantes rouges (coin haut droit) avant d'éjecter leur enveloppe gazeuse et de devenir des naines blanches (coin bas gauche).



Document 5 - L'étoile Upsilon Andromedae

Upsilon Andromedae est un couple d'étoiles situé à 44 années-lumière du Soleil, dans la constellation d'Andromède. L'étoile principale, Upsilon Andromedae A, est une étoile naine de la séquence principale. Son compagnon, Upsilon Andromedae B, est une naine rouge.

Depuis 1997, quatre exoplanètes ont été découvertes autour d'Upsilon Andromedae A, dont une orbiterait dans la zone habitable de l'étoile.

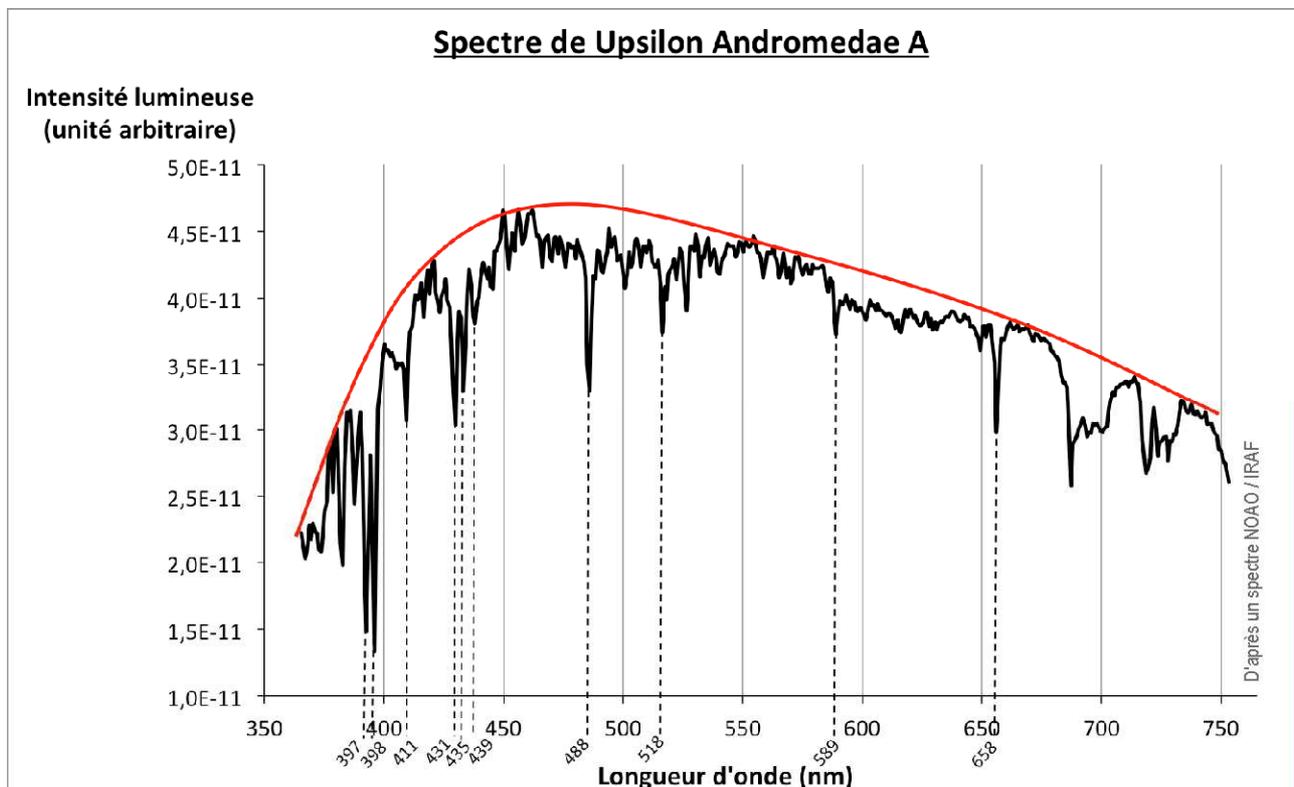


crédit : Sylvia Waleys, Northwestern University

Simulation d'artiste du système planétaire de Upsilon Andromedae

La courbe en noir ci-dessous est un spectre de l'étoile Upsilon Andromedae A acquis à l'observatoire du Mont Hopkins (Etats-Unis). La courbe rouge correspond au spectre de la lumière émise par la photosphère de l'étoile. La longueur d'onde des principales raies d'absorption est indiquée en abscisse.

À partir de ces données, les astrophysiciens ont pu déterminer que la luminosité de l'étoile Upsilon Andromedae A est $L = 1,308 \times 10^{27}$ W.



Document 6 - Base de données spectrales

Le tableau ci-dessous regroupe les longueurs d'onde des raies d'absorption des éléments chimiques fréquemment rencontrés dans la chromosphère des étoiles.

Élément chimique	Longueur d'onde des raies d'absorption (nm)
He	439, 471, 505, 706
Fe	431, 467, 496, 527
Mg	518
Na	589
Ca	397, 423
C	597, 581
O	556

La chromosphère des étoiles contient également des atomes d'hydrogène dont l'énergie du niveau n est donné par la relation $E_n = -E_0 / n^2$ où n est un entier strictement positif et $E_0 = 13,6$ eV.

On note $H\alpha$ le passage d'un atome d'hydrogène du premier vers le deuxième niveau excité, $H\beta$ le passage d'un atome d'hydrogène du premier vers le troisième niveau excité, et ainsi de suite avec $H\gamma$, $H\delta$ et $H\epsilon$.

Données :

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹
- 1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J

Consignes :

À l'aide des documents fournis et de vos connaissances, vous rédigerez la **carte d'identité de l'étoile Upsilon Andromedae A**. Cette carte d'identité doit comprendre :

- La température de l'étoile ;
- Le rayon de l'étoile ;
- La classe de l'étoile (exemple pour le Soleil : G V) ;
- La composition chimique de la chromosphère de l'étoile ;
- La place de l'étoile dans le diagramme de Hertzsprung-Russell et l'évolution que va suivre cette étoile.

Vos réponses doivent être justifiées. Une comparaison entre l'étoile Upsilon Andromedae A et le Soleil sera la bienvenue.

Extrait d'un devoir d'élève (1^{ère} S).

	Étoile Upsilon Andromedae A	Soleil
Température	6 095 K L'étoile est donc plus chaude que le soleil	5 780 K
Rayon	$1,153 \times 10^9$ m L'étoile a donc un rayon plus important que le soleil.	$6,980 \times 10^8$ m
Classe	Type FV	Type GV
Diagramme H-R	Les deux étoiles se situent dans la séquence principale.	
Composition chimique	Propre à l'étoile Sodium, Calcium	En commun Hydrogène, Fer, Magnésium
	Propre à l'étoile Hélium, oxygène, carbone, azote, silicium, soufre	
Photo		