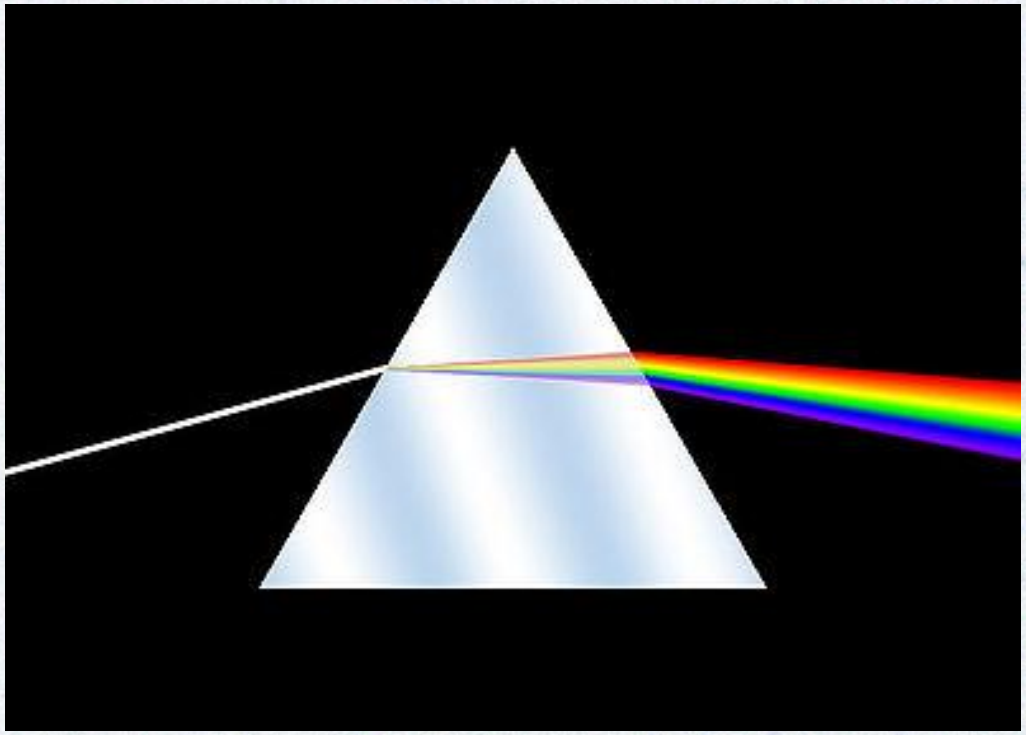
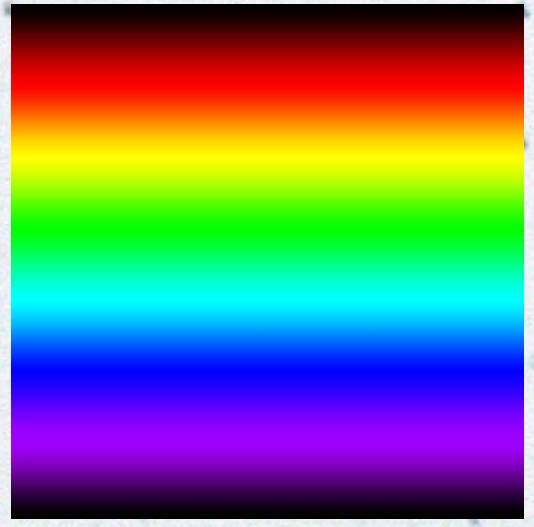
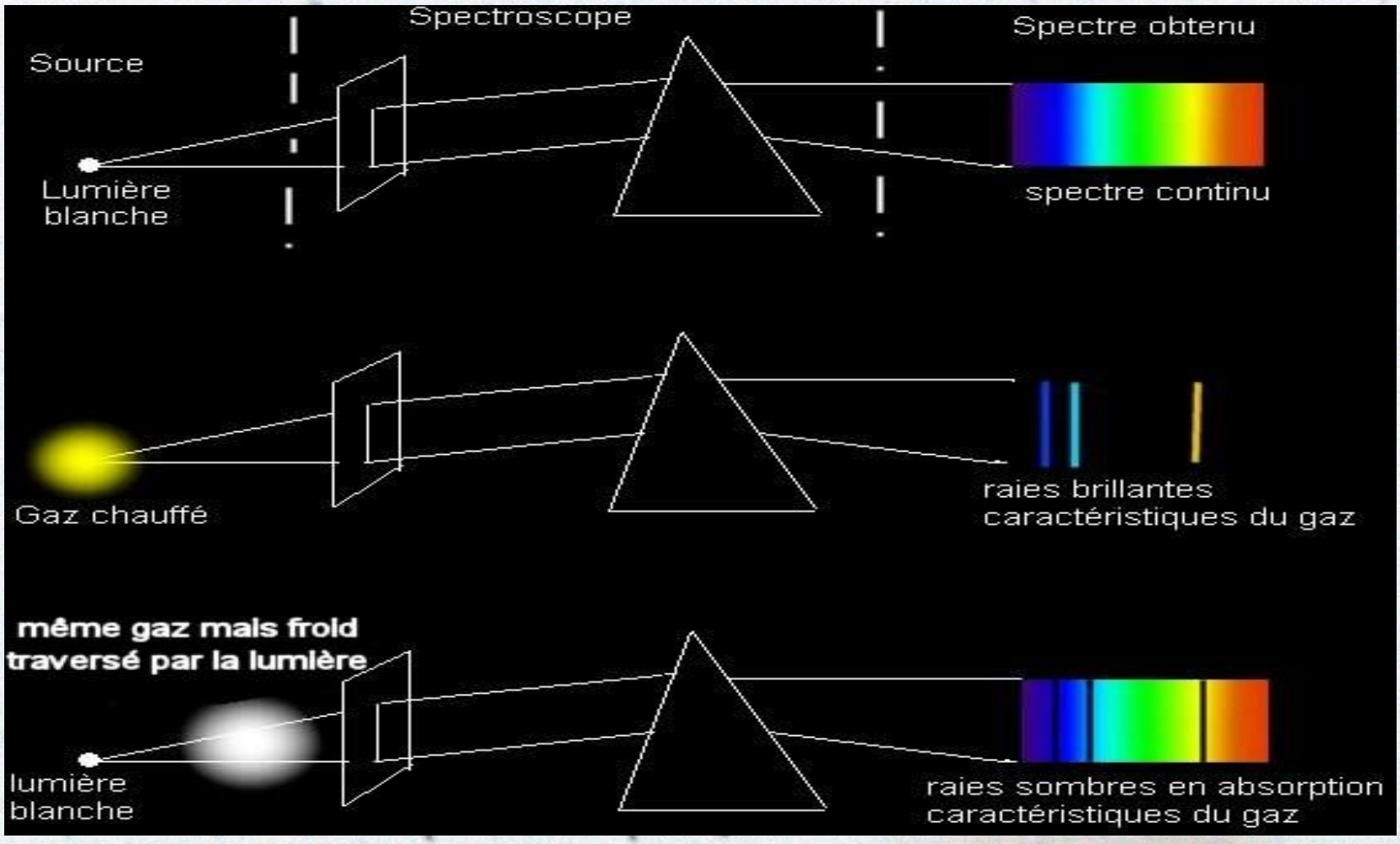




Newton (1642-1727) inventeur de la spectrographie : à partir de la décomposition de la lumière par un prisme.

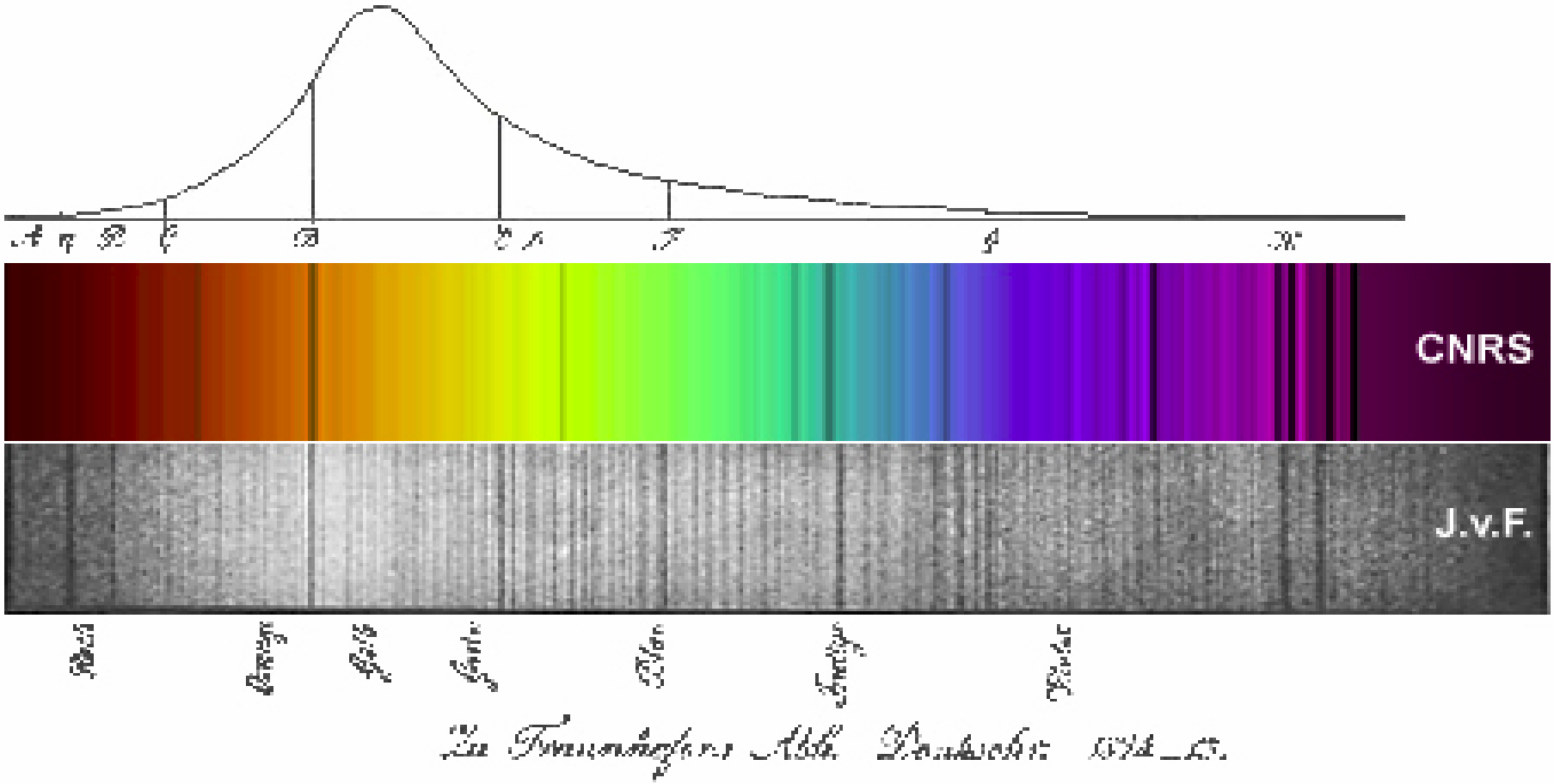
Les trois lois de Kirchhoff (1824-1887) (1859 ?)

1. Un corps rayonnant, solide ou liquide, émet de la lumière sur toutes les longueurs d'ondes. Il présentera un spectre continu.
2. Un gaz lumineux, incandescent, émet de la lumière sous forme de raies brillantes appelées spectre d'émission discontinu ou de raies auquel se superpose quelquefois un spectre continu.
3. Si la lumière blanche d'une source lumineuse traverse un gaz, celui-ci peut éteindre certaines longueurs d'ondes du spectre continu et les remplacer par des raies sombres qui se superposent au spectre continu de la source lumineuse, c'est le spectre d'absorption.

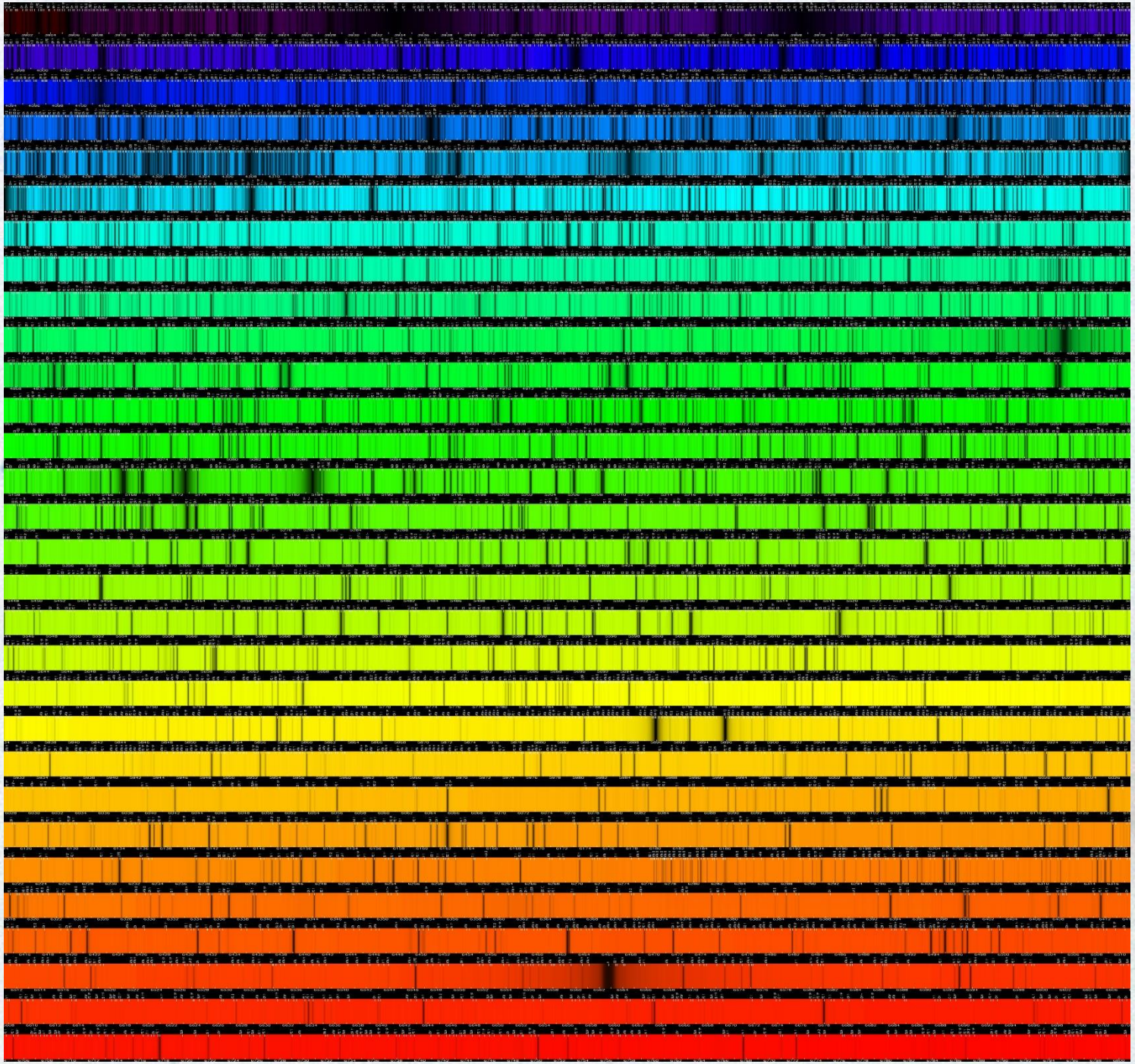


Les lois de Kirchhoff en images :

- **Spectre continu,**
- **Spectre d'émission,**
- **Spectre d'absorption.**



Le premier spectre solaire obtenu par J.von Fraunhofer en 1817 et un spectre contemporain. La courbe représente son estimation de la brillance visuelle relative des différentes couleurs car pour mettre les raies en évidence Fraunhofer dut compresser l'échelle dynamique sans quoi nous n'aurions pas distingué les raies sombres aux extrémités du spectre. Document J.Fraunhofer scanné et composé par l'auteur et CNRS/BASS2000.



Le spectre du Soleil… Aujourd’ hui !

Le rayonnement du corps noir

Dans le cas d'un corps absolument opaque, parfaitement isolé et à température constante, la distribution spectrale est strictement liée à la seule température. Ce cas théorique est appelé « corps noir ». **En première approximation, une étoile peut être assimilée à un corps noir (presque) parfait** ; la perte en énergie rayonnée restant négligeable devant celle contenue à l'intérieur de l'étoile.

Les lois déterminant l'état de la matière dans un corps noir s'appuient sur des études théoriques et expérimentales. Elles définissent :

- la distribution de la luminance en fonction de la longueur d'onde (**loi de Planck**) ;
- la longueur d'onde à laquelle la luminance est maximale (**loi de Wien**) ;
- l'énergie totale du rayonnement (**loi de Stefan**).

La loi de Planck

Max PLANCK (1858 - 1947) est l'auteur d'une théorie des quanta d'énergie (1900) et l'applique avec succès à l'explication du rayonnement du corps noir. Il suppose que l'échange d'énergie entre matière et rayonnement se fait de façon discontinue, par *quanta*. Ces quanta (ε) sont proportionnels aux fréquences (ν) du rayonnement :

$$\varepsilon = h\nu$$

avec *h*, une constante de proportionnalité (constante de Planck) valant : 6.62×10^{-34} joules·s^{-1}.

La loi de Planck permet de donner la distribution de l'énergie selon la longueur d'onde (ou couleur). Les courbes décrivant cette distribution se retrouvent toujours sous une même forme « en cloche » et incluses les unes dans les autres. Pour chaque longueur d'onde, la luminance augmente avec la température.

Avec son quantum d'énergie introduit de façon arbitraire, cette théorie de quantification de l'énergie, vue comme simple artifice de calcul à ses débuts, permet d'intégrer les lois précédentes et deviendra vite une pièce maîtresse de la mécanique quantique.

Loi de Wien

En analysant des spectres de corps noirs à différentes températures, Wilhelm WIEN (1864 - 1928) découvre, en 1893, que la distribution de leurs émissions passe par un maximum, ce dernier étant inversement proportionnel à la température. Plus la température devient élevée, plus la longueur d'onde du pic d'émission diminue (la fréquence et l'énergie augmentent). Cette relation « température-couleur » s'exprime ainsi :

$$\lambda_{max} = (2.90 \times 10^{-3}) / T \quad ou \quad \lambda_{max} x\ T = Constante$$

Pour le Soleil, le maximum d'émission se situe vers 500 nm (lumière jaune-verte), sa température de surface vaut : $T = (2.90 \times 10^{-3}) / (0.50 \times 10^{-6}) = 5\,800$ kelvins.

La loi de Stefan

en 1879, à partir de résultats expérimentaux, Josef STEFAN (1838 - 1893) détermine une loi empirique décrivant que l'énergie totale (E) émise par seconde et par unité de surface (S) d'un corps noir est proportionnelle à la puissance quatre de sa température (T) :

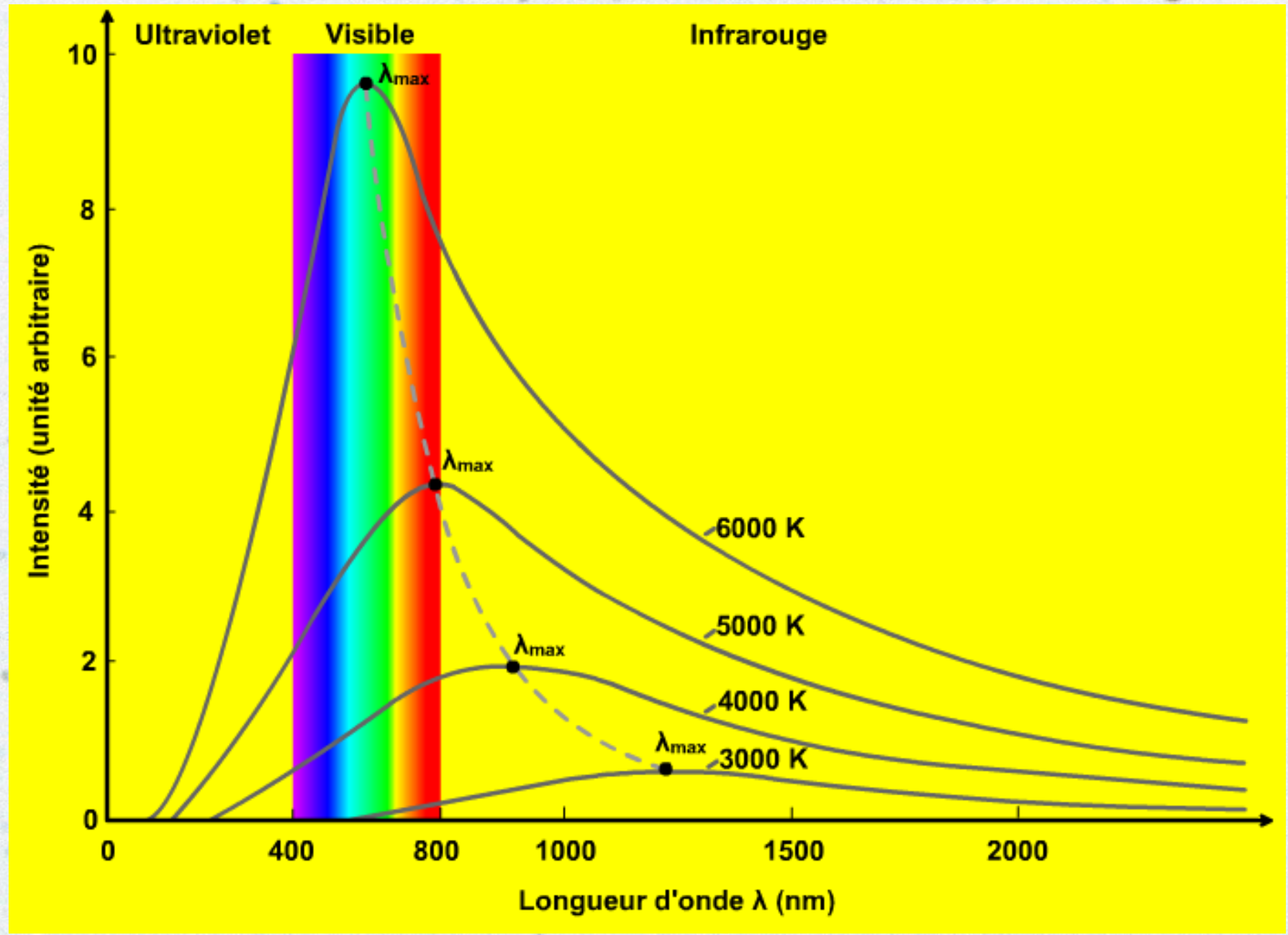
$$E = S \sigma T^4$$

où σ est la constante de Stefan et vaut : 5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4}.

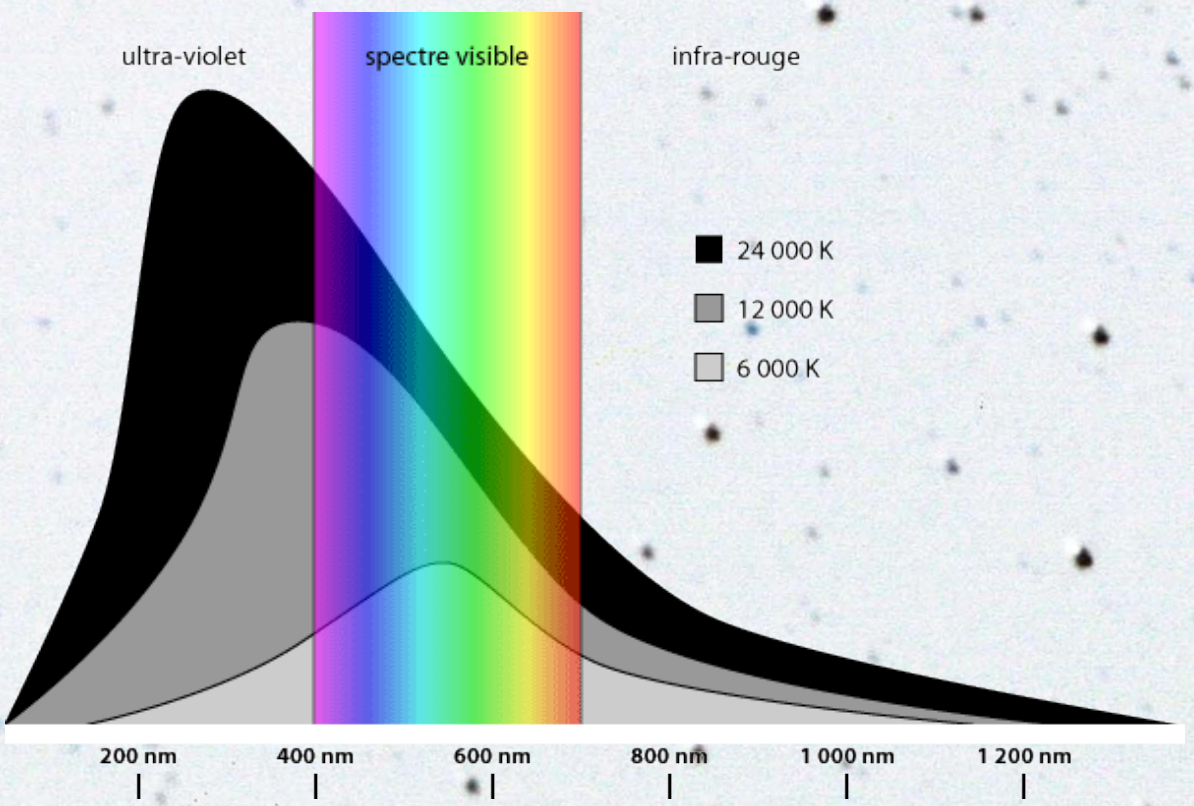
En considérant une étoile sous la forme d'une sphère rayonnant comme un corps noir, cette relation devient :

$E = 4\pi R^2 \sigma T^4$, avec $S = 4\pi R^2$.

Pour deux étoiles présentant la même température de surface, la plus grosse émettra plus d'énergie. Pour une variation double de la température, une étoile émettra seize fois plus d'énergie à rayon égal. La loi de Stefan permet donc de retrouver la dimension d'une étoile, il faut cependant mesurer la puissance de l'énergie sur toute la bande spectrale, une étoile émettant bien au-delà du spectre visible.



http://www.afhalifax.ca/magazine/wp-content/sciences/Planck/Le%20corps%20noir.htm



En fonction de la température et de la longueur d'onde, le schéma ci-dessus montre pour trois étoiles :

- la forme caractéristique « en cloche » de la distribution de luminance
- (loi de Planck) ;
- le déplacement du pic d'émission (loi de Wien) ;
- l'énergie totale rayonnée représentée par l'aire sous la courbe (loi de Stefan).

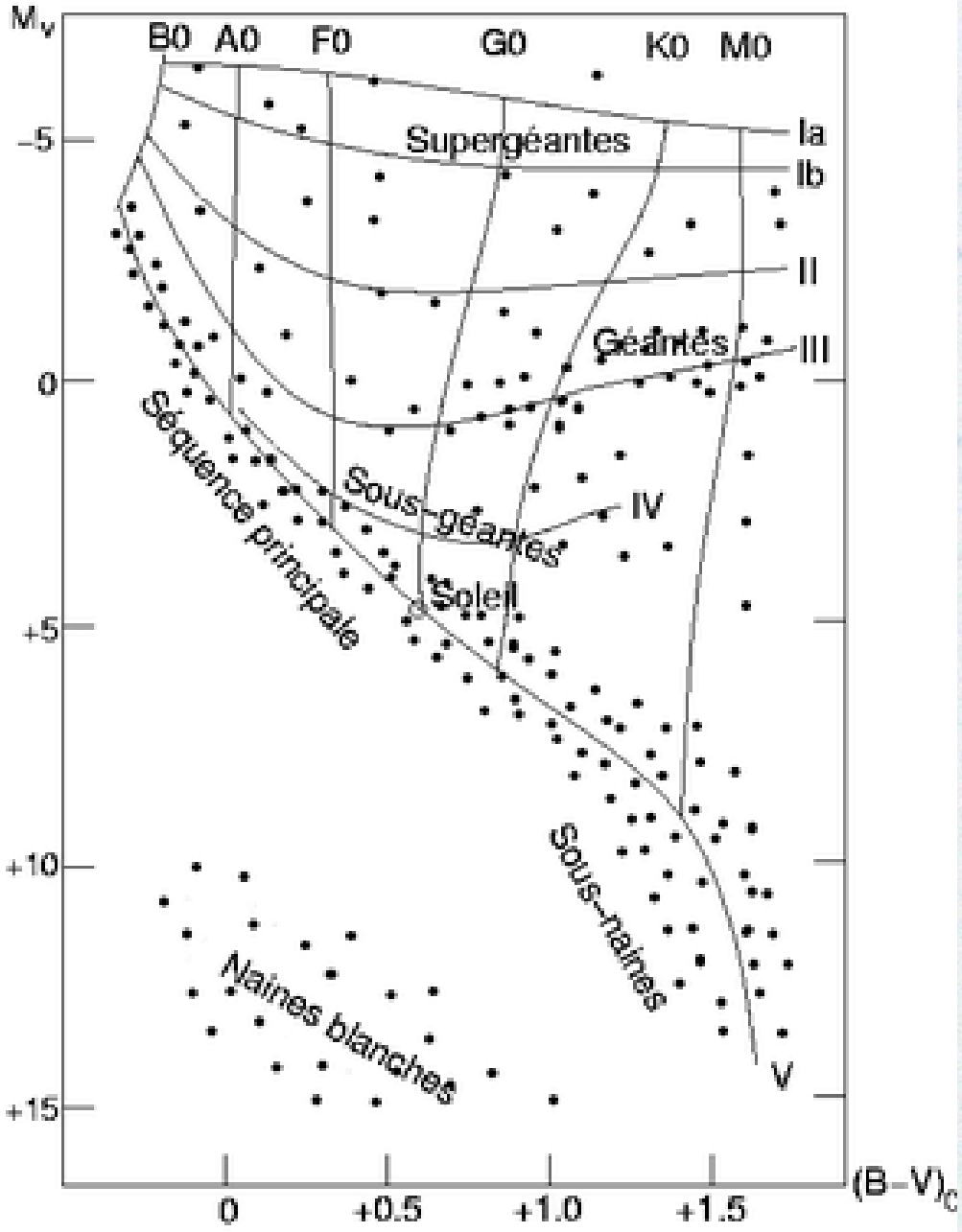
http://www.astro-rennes.com/initiation/corps_noir.php

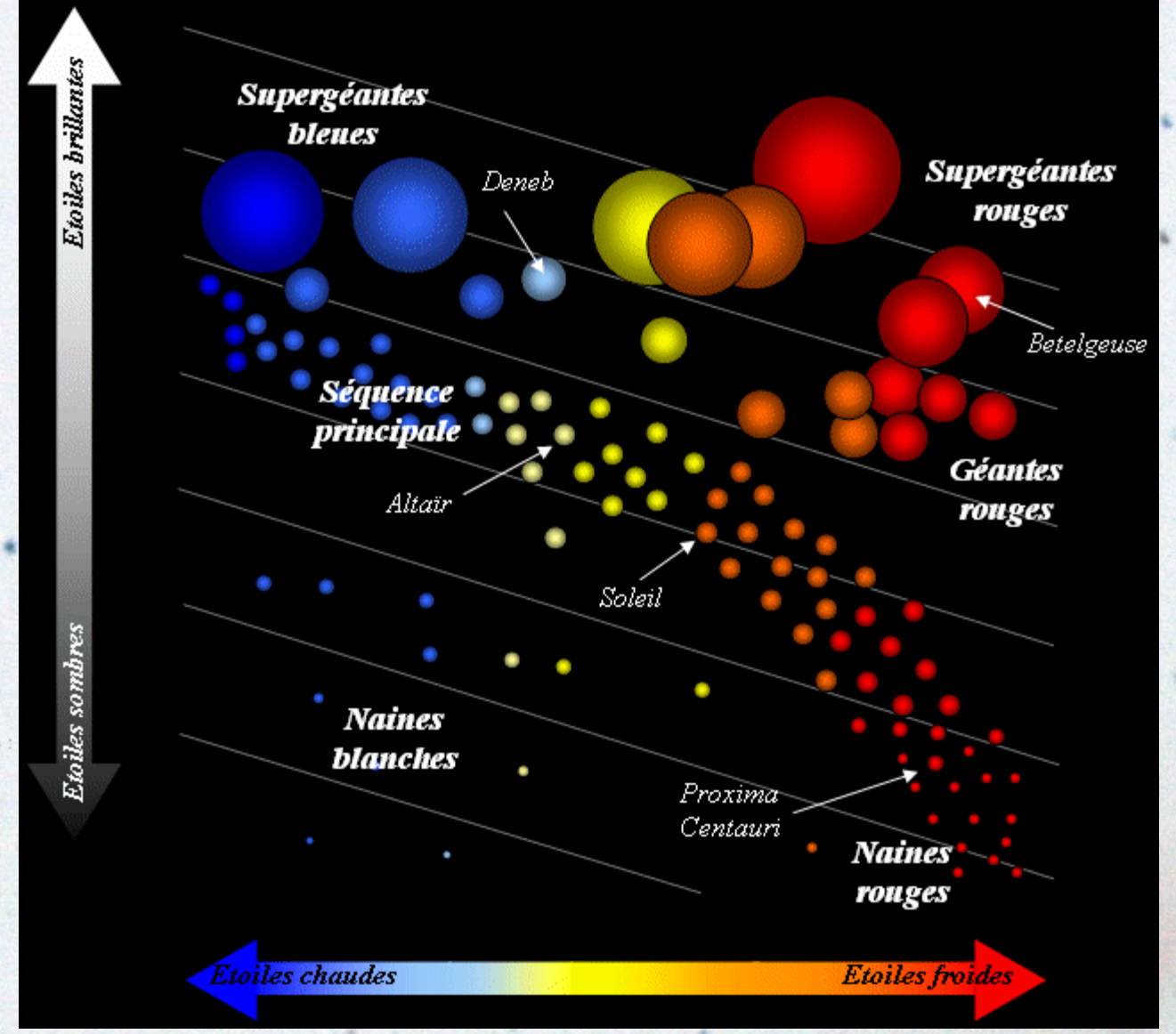
Diagrammes HR (ou RH)

En pointant dans un plan les étoiles suivant deux critères : couleur, intensité lumineuse, deux astronomes : Hertzsprung et Russell (indépendamment l'un de l'autre) constatent une distribution particulière, (les étoiles ne forment pas un nuage plus ou moins uniforme).

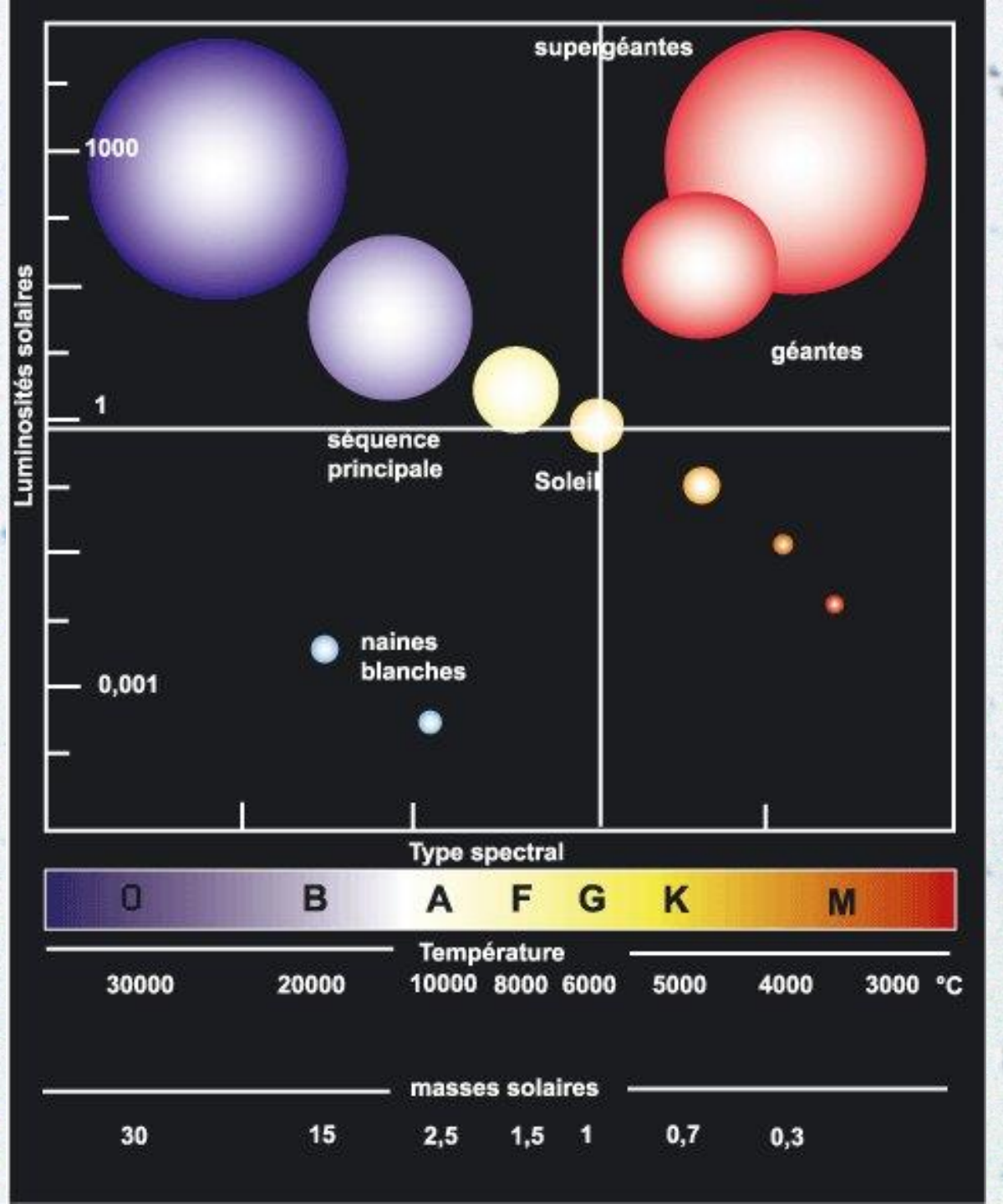
Les diagrammes, qui suivent, montrent :

Un bandeau bien chargé, en écharpe, concentrant 80% des étoiles : la série principale
Diverses « concentrations » géantes rouges, géantes bleues, naines blanches
…


M_V
B0
A0
F0
G0
K0
M0
−5
0
+5
+10
+15
Supergéantes
Ia
Ib
II
Géantes
III
IV
Séquence principale
Sous-géantes
Soleil
Sous-naines
V
Naines blanches
0
+0.5
+1.0
+1.5
$(B-V)_C$

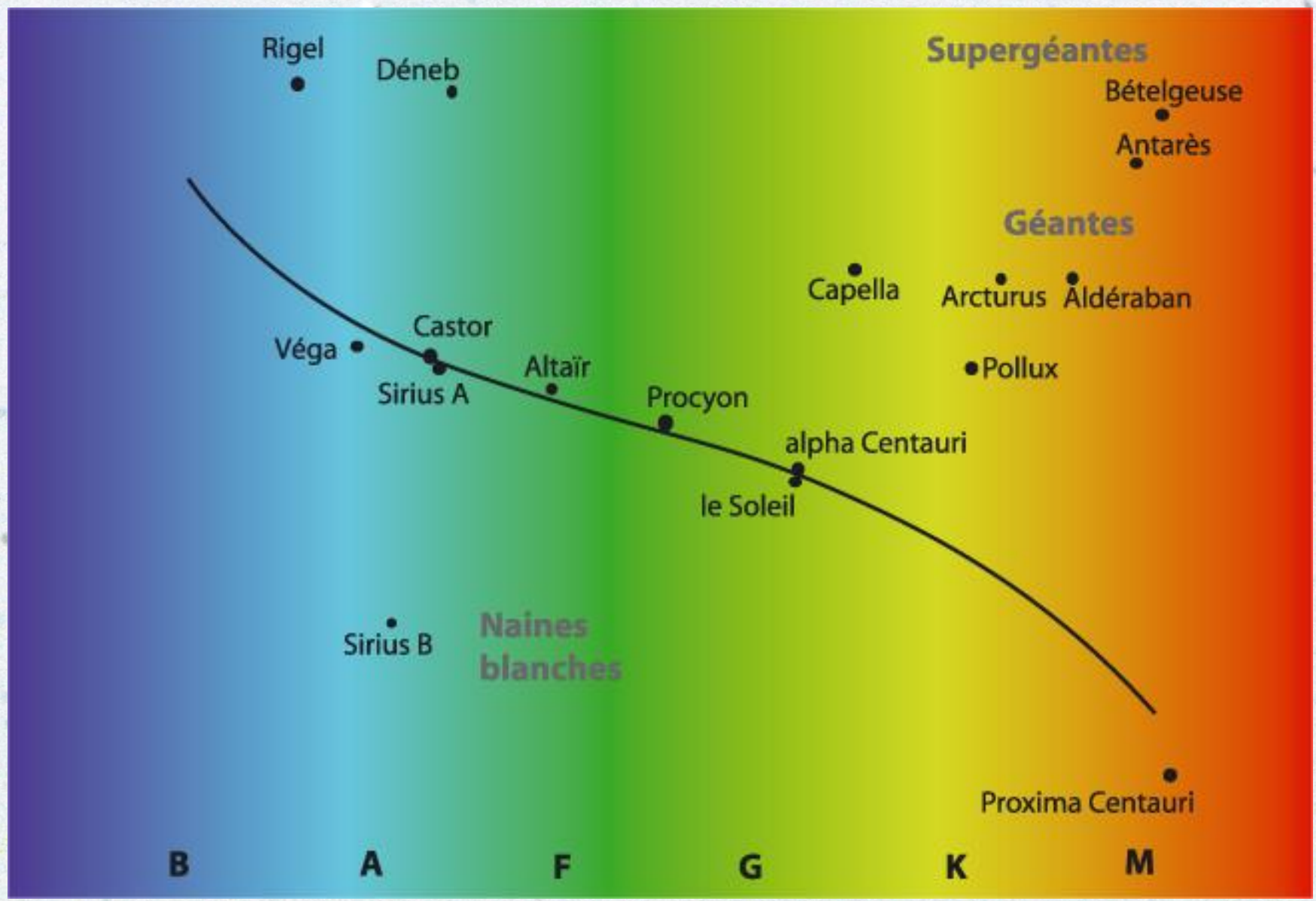


Le diagramme Hertzsprung-Russell



Le même diagramme illustré différemment

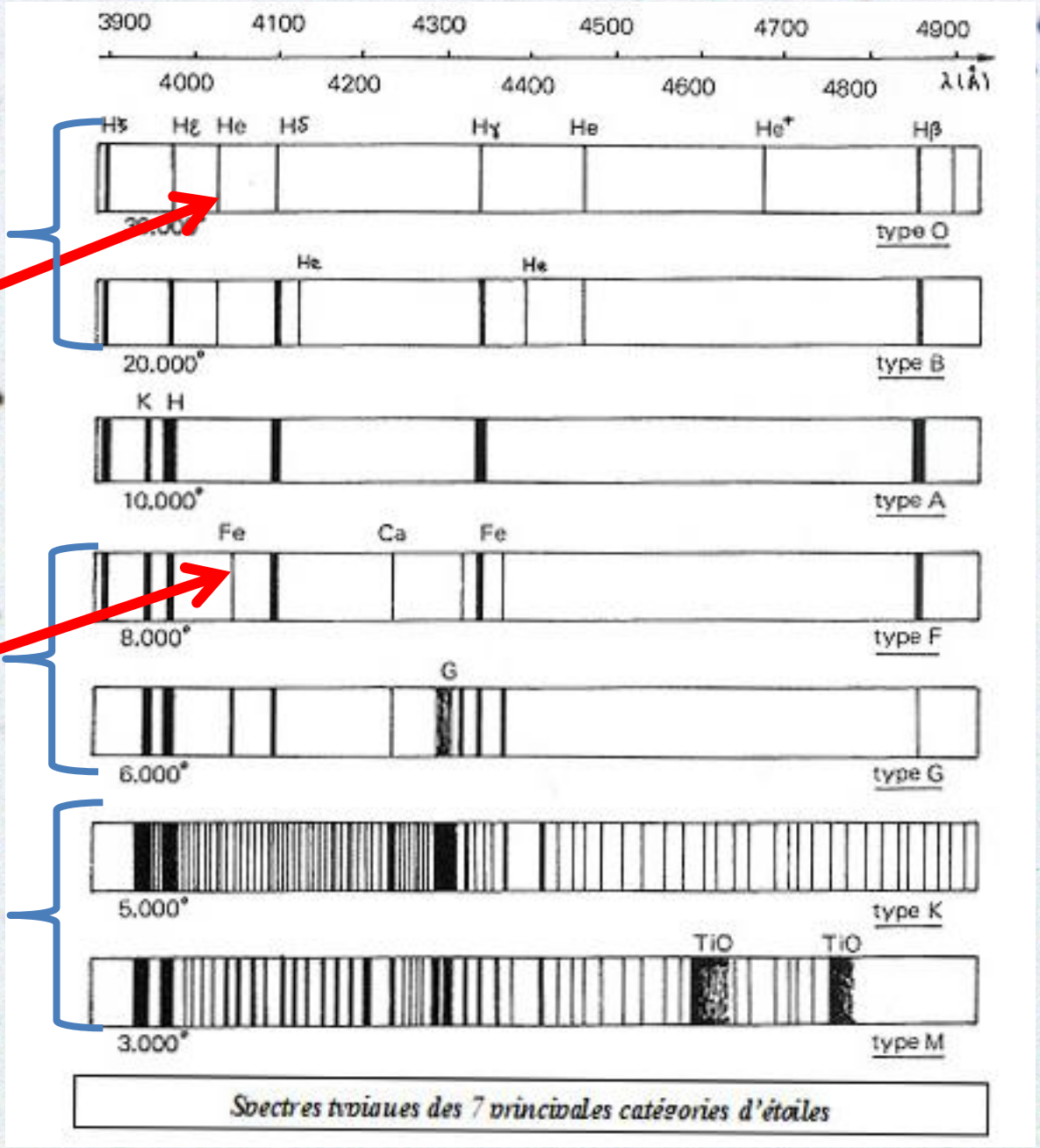
http://lunap.obs-besancon.fr/lunap/Niveau1/soleiletoiles/Textes/classification.htm



Dans ces lignes on voit des raies de l'hélium

Ici, apparaissent les raies du fer

Et là… !!!



Les spectres diffèrent suivant la température

Un peu d'histoire.

1°) Au 19ème siècle, on a commencé par **classer les étoiles en fonction de l'intensité décroissante des raies d'absorption** de l'hydrogène H : de la plus forte à la moins forte absorption. Ce qui a donné par ordre alphabétique A B C ... jusqu'à P. Par la suite, on a gardé les lettres données, mais la classification a porté sur les raies de l'ensemble des éléments chimiques. Cette classification s'est avérée trop précise, on a donc regroupé plusieurs spectres et on a gardé les catégories A B F G K M et O.

http://www.astrosurf.com/adaes/expo-energie-et-lumiere-4.html

2°) Au début du 20ème siècle, **on comprend le rapport entre température et intensité des raies d'absorptions**, on constate que l'ordre des lettres n'est pas le même que celui des températures, on doit donc inverser A et B, et amener O en début pour que la classification corresponde à une classification en fonction de la **température** de surface de l'étoile (et en conséquence en fonction de **sa couleur**). Ce qui a donné par ordre décroissant de température : O B A F G K M et cette phrase bien connue (en anglais) :

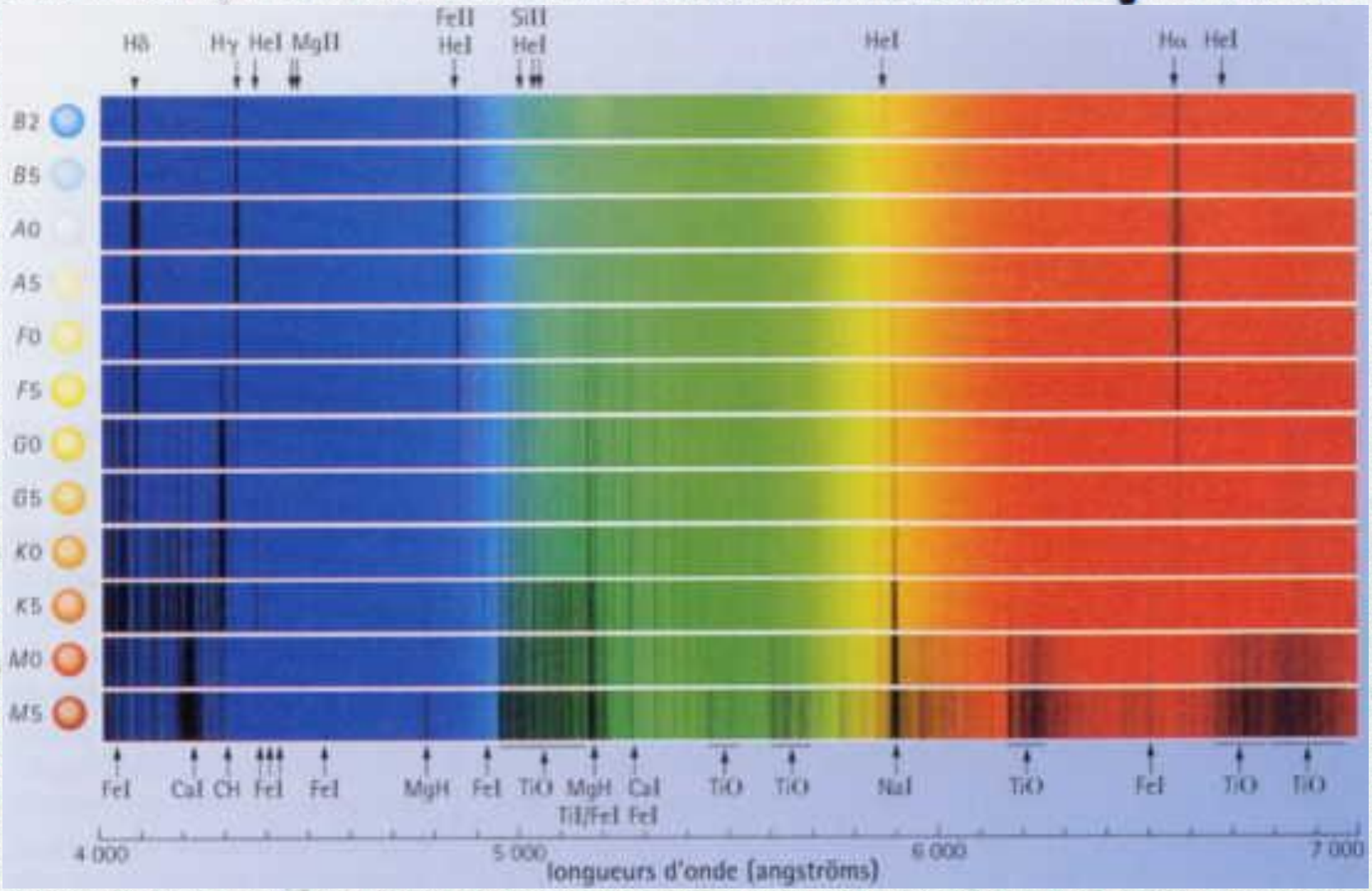
Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me!

Classification des étoiles

Classe	T° (en °C)	couleur	spectre
O	De 30 000 à 60 000	bleue	
B	De 10 000 à 30 000	Bleue-blanche	
A	De 7 500 à 10 000	blanche	
F	De 6 000 à 7 500	Jaune-blanche	
G	De 5 000 à 6 000	Jaune (Soleil)	
K	De 3 500 à 5 000	Jaune-orange	
M	Jusqu'à 3 500	rouge	

http://www.astrosurf.com/leo_astro/vie_etoiles/etoiles.htm

Classification de Haward



Classe	Caractère de différenciation
O	présence de raies de l'hélium ionisé
B	présence de raies de l'hélium neutre
A	prédominance des raies de l'hydrogène
F	présence de raies nombreuses de métaux ionisés
G	présence simultanée de raies de métaux neutres et de métaux ionisés
K	prédominance des raies de métaux neutres
M	présence des raies de l'oxyde de titane
L	
W	présence de nombreuses raies d'émission
C	riche en raies d'absorption de molécules carbonées
S	riche en raies d'oxyde de zirconium

Type d'étoiles	*Durée de vie*	*Pourcentage*	*Remarques*
Supergéantes	-	**1,2 pour 1 000 000**	*Ces deux catégories d'étoiles sont les plus rares car elles n'existent que dans des conditions particulières.*
Géantes	-	**0,58 %**	
Série pricipale: O	3 Ma	**0,3 pour 1 000 000**	
Série pricipale: B	15 Ma	**1,16 %**	
Série pricipale: A	500 Ma	**2,31 %**	
Série pricipale: F	2,5 Ga	**3 47 %**	
Série pricipale: G	10 Ga	**6,94 %**	*Ces 5 types d'étoiles représentent à elles seules 92 % de la population des étoiles de notre galaxie.*
Série pricipale: K	13 Ga	**10,4 %**	
Série pricipale: M	200 Ga	**57,8 %**	
Série principale: L	> 200 Ga		
Naines blanches	-	**17,3 %**	

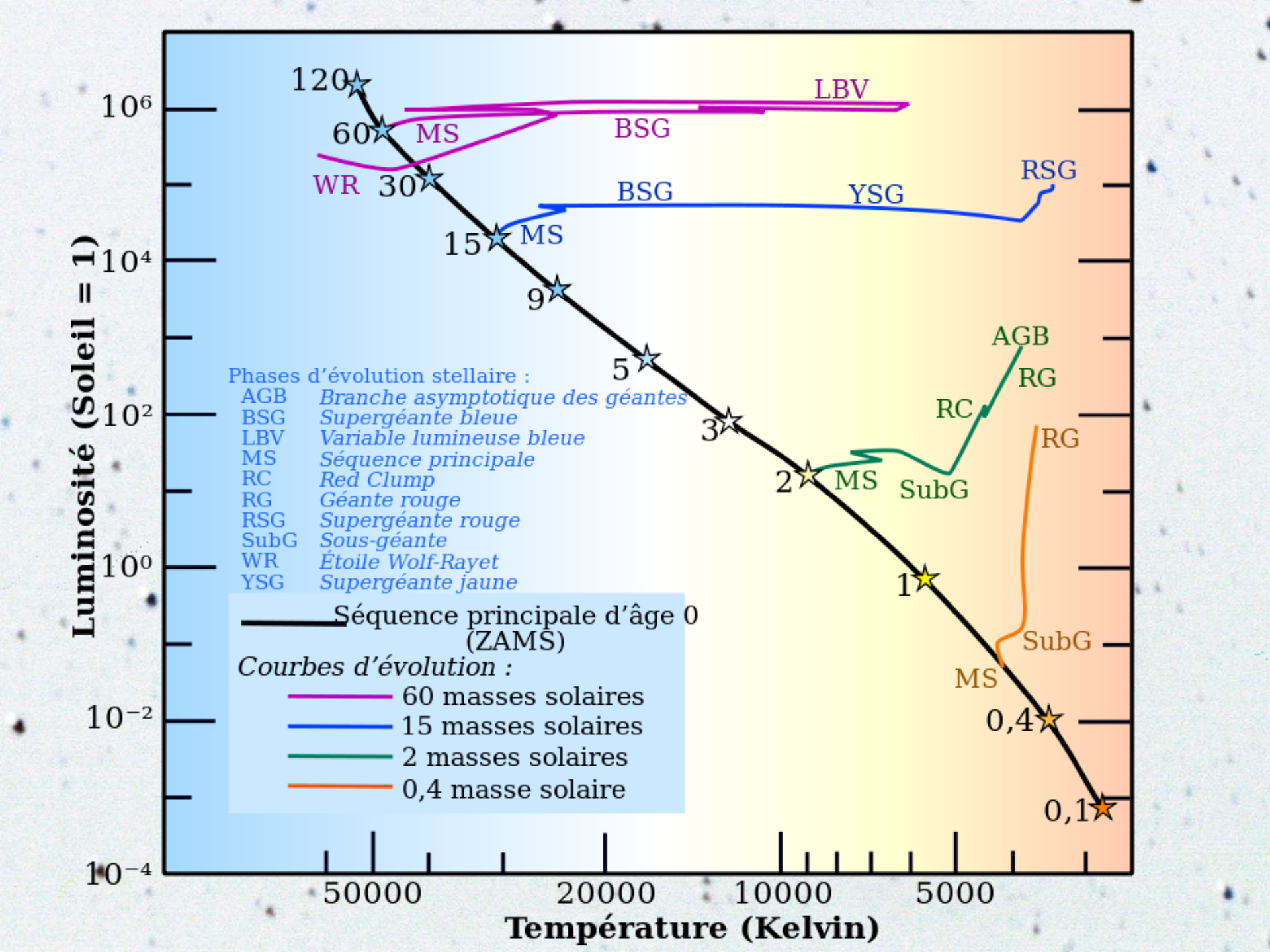
Aujourd'hui on utilise une autre série (plus complète) :

W O B A F G K M L T Y et **R N C S**, où **W** sont les étoiles Wolf-Rayet, **L**, **T** et **Y** représentent des étoiles extrêmement froides, des naines brunes, et **R N C S** sont utilisés pour les étoiles carbonées.

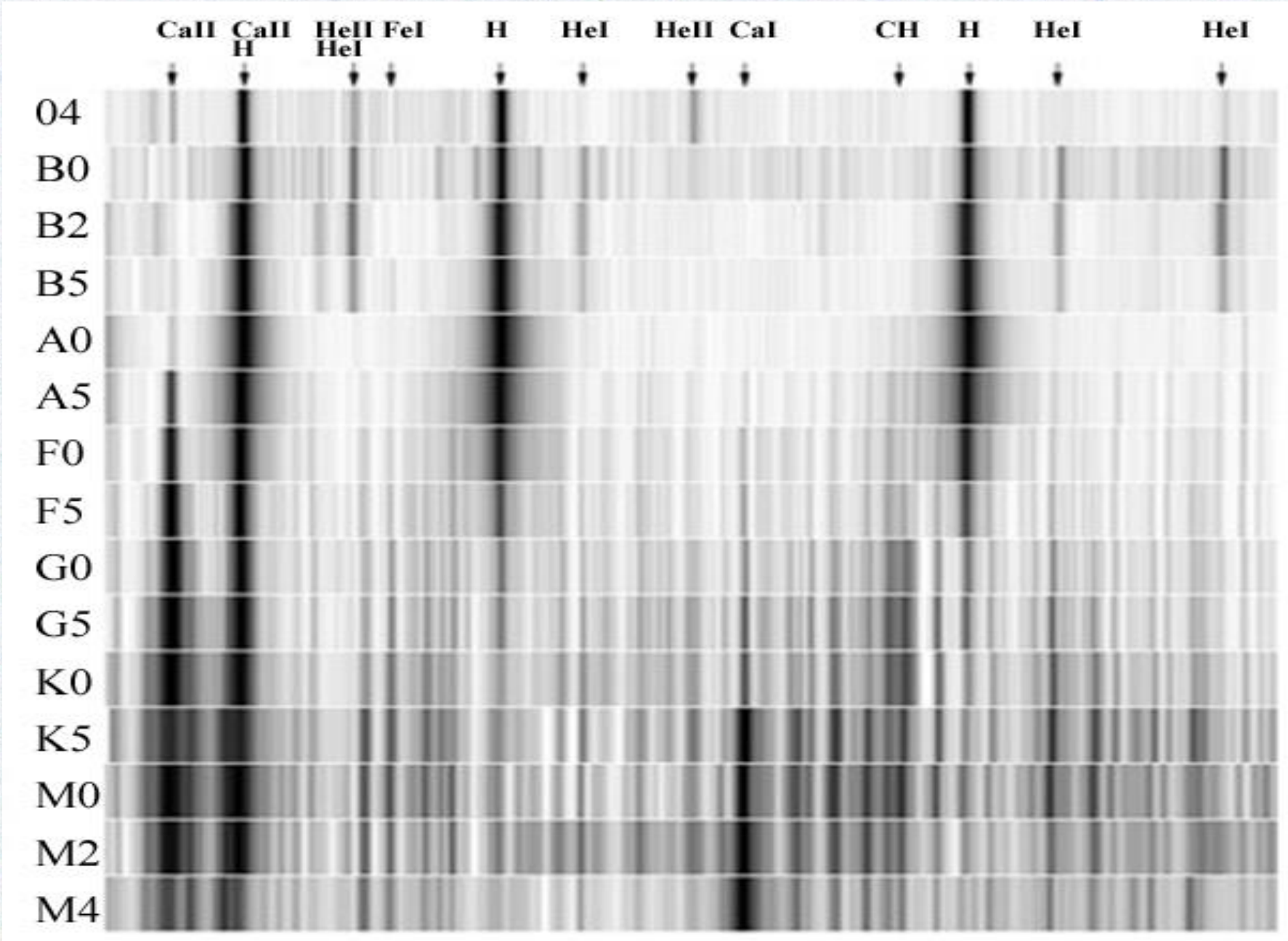
Etoiles Wolf-Rayet : voir une bonne encyclopédie !

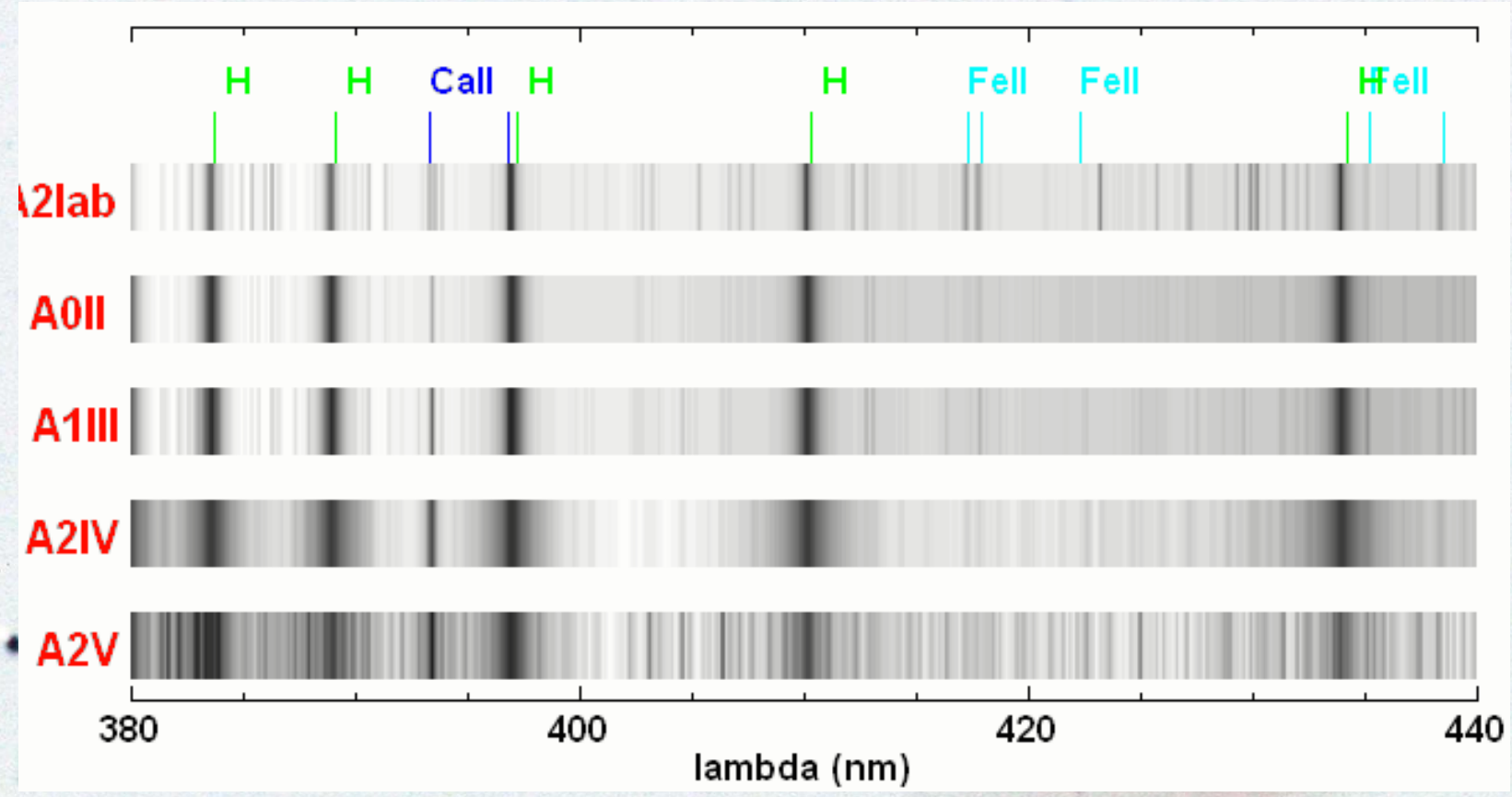
Je ne vous ai pas dit (je n'ose pas),

- chaque classe est divisée en 10 ! (A0 à A9, G0 à G9, le Soleil est G2).
- Les étoiles changent de classe au cours de leur vie. Voir http://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_evolutionstellaire/evolution-stellaire-hr_impression.html

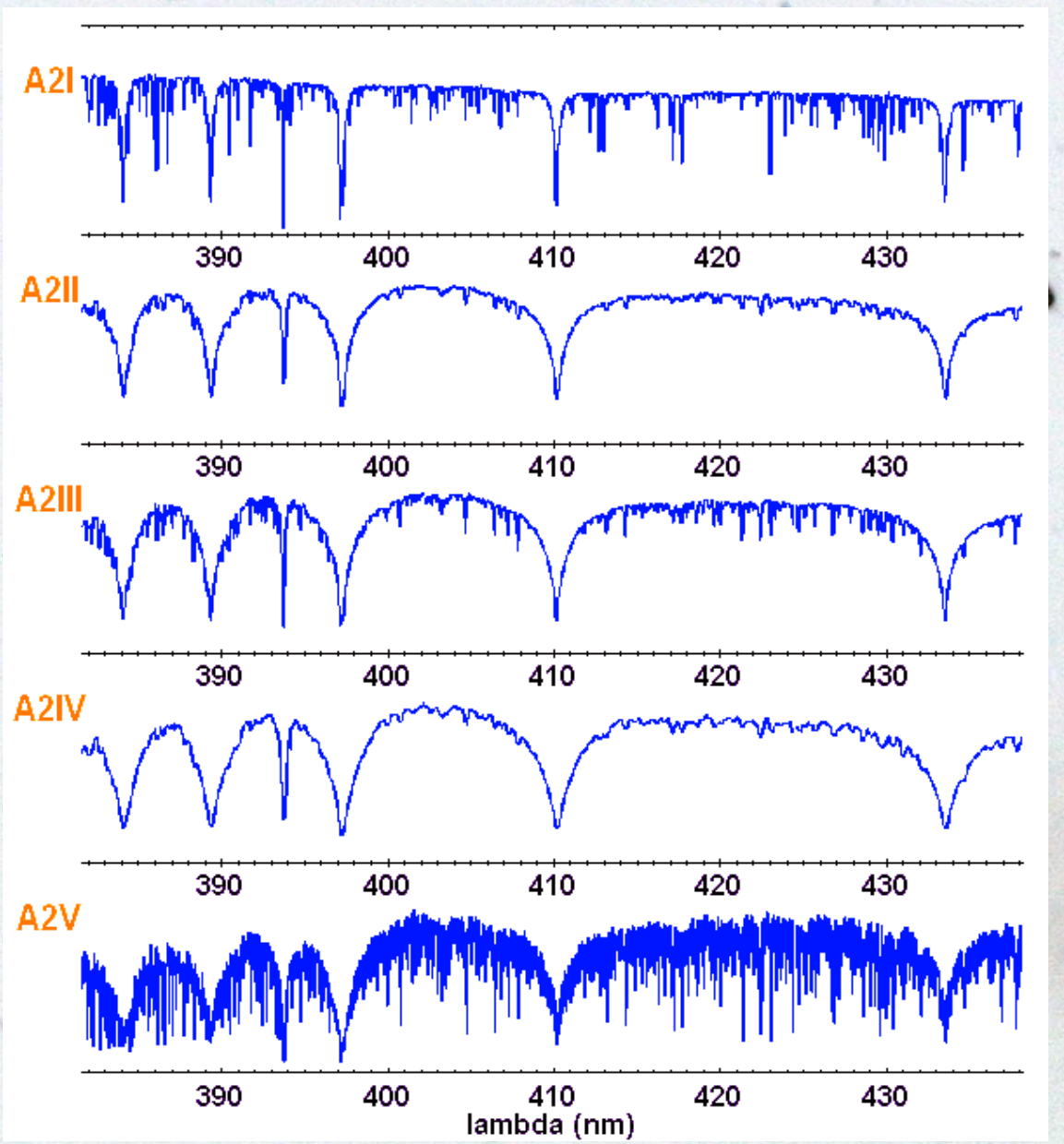

Luminosité (Soleil = 1)
10^6
10^4
10^2
10^0
10^{-2}
10^{-4}
50000
20000
10000
5000
Température (Kelvin)
120
60
30
15
9
5
3
2
1
0,4
0,1
MS
WR
LBV
BSG
BSG
YSG
RSG
MS
AGB
RG
RC
RG
MS
SubG
SubG
MS
Phases d'évolution stellaire :
AGB Branche asymptotique des géantes
BSG Supergéante bleue
LBV Variable lumineuse bleue
MS Séquence principale
RC Red Clump
RG Géante rouge
RSG Supergéante rouge
SubG Sous-géante
WR Étoile Wolf-Rayet
YSG Supergéante jaune
Séquence principale d'âge 0 (ZAMS)
Courbes d'évolution :
60 masses solaires
15 masses solaires
2 masses solaires
0,4 masse solaire

https://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_classification-spectrale/impression.html



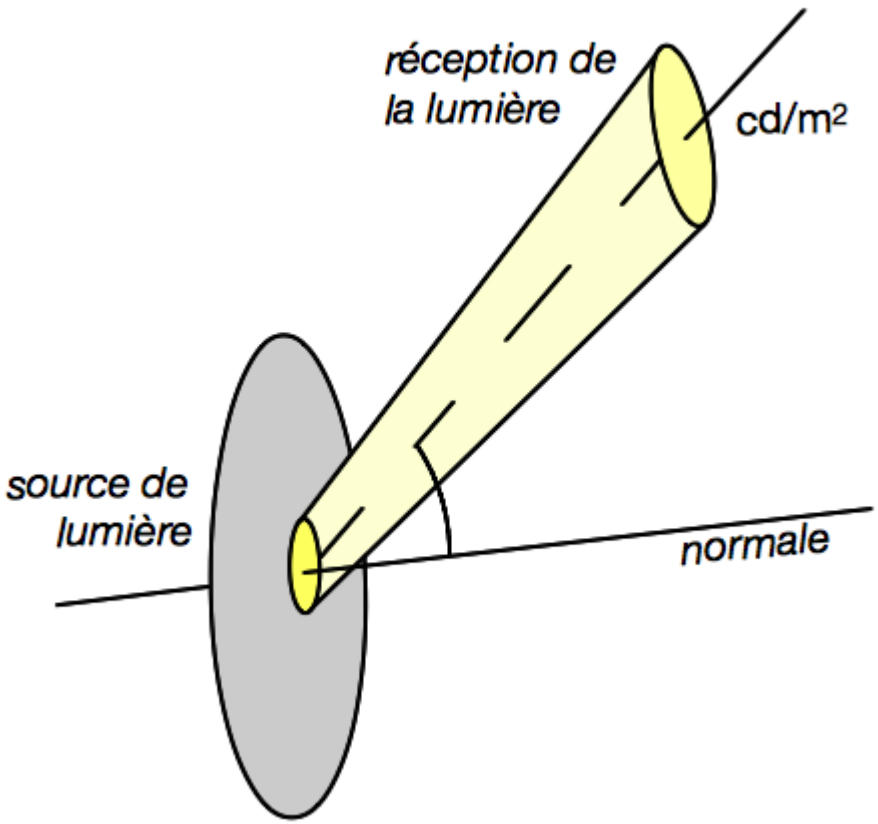


http://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_classification-spectrale/classe-de-luminosite_impression.html


A2I
390
400
410
420
430
A2II
390
400
410
420
430
A2III
390
400
410
420
430
A2IV
390
400
410
420
430
A2V
390
400
410
420
430
lambda (nm)

Classe	température[1]	couleur	raies d'absorption
O	> 25 000 K	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène
B	10 000 - 25 000 K	bleue-blanche	hélium, hydrogène
A	7 500 - 10 000 K	blanche	hydrogène
F	6 000 - 7 500 K	jaune-blanche	métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium
G	5 000 - 6 000 K	jaune (comme le Soleil)	calcium, hélium, hydrogène et métaux
K	3 500 - 5 000 K	jaune-orange	métaux et monoxyde de titane
M	< 3 500 K	rouge	métaux et monoxyde de titane

Luminance L_v



En photométrie, la **luminance** est la grandeur mesurable correspondant à la sensation visuelle de luminosité ou de brillance d'une surface.

http://planete.gaia.free.fr/astronomie/etoiles/vie/naine.brune.html#18

Le lien ci-dessus vous renvoie vers « les naines brunes » des classes M, L

http://fr.wikipedia.org/wiki/Type_spectral

http://www.astrosurf.com/adaes/expo-energie-et-lumiere-4.html

http://astronomia.fr/3eme_partie/variables.php