Magnitudes et Classification des étoiles

- Classification suivant la brillance :
  ==> ***Magnitude***

Autres critères de classification :

- ***Couleur*** ==> ***Température***
- ***Magnitude*** ==> ***Luminosité***

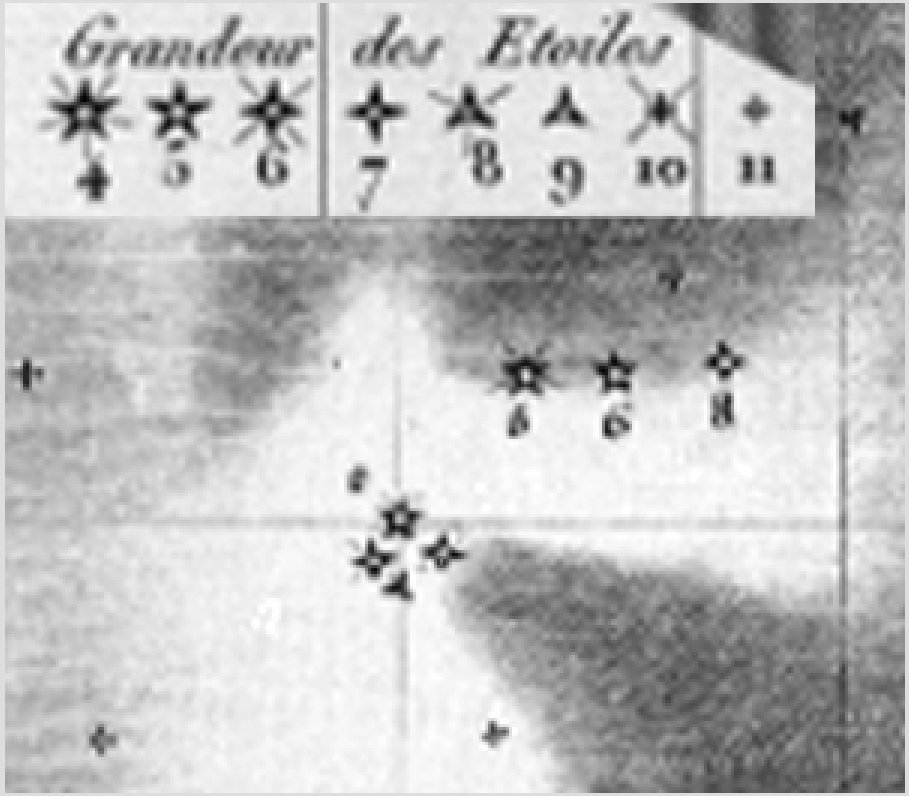
Diagrammes ***Couleur - Magnitude***

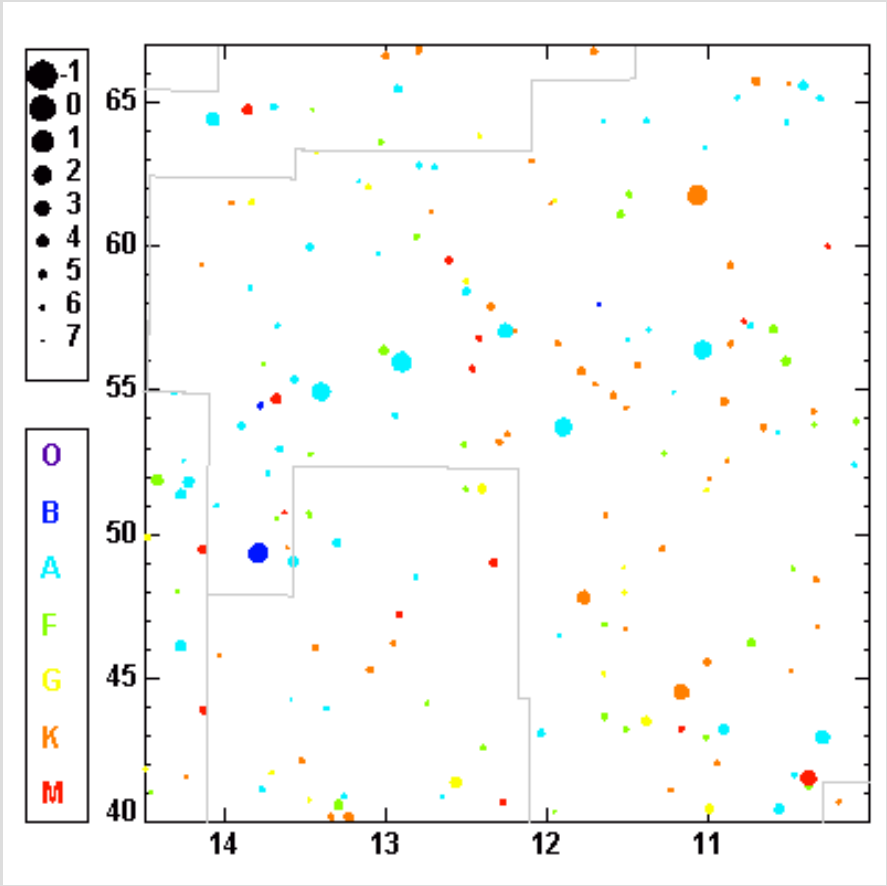
et ***Température - Luminosité***

Magnitudes : définition

Grandeurs des étoiles

Constellation de la Grande Ourse 1771





Magnitudes : définition

Grandeurs des étoiles

- Les anciens utlisaient l'éclat apparent des étoiles pour les grouper en 6 grandeurs
- Hipparque (2^{e} siècle avant J-C) : « étoiles de première grandeur » jusqu'aux "étoiles de sixième grandeur".

- Première grandeur = Etoiles les plus brillantes
- Sixième grandeur = Etoiles à la limite de visibilité à l'oeil nu

Magnitudes : définition
Grandeurs des étoiles

- 1856, Pogson : une étoile de première grandeur est 100 fois plus lumineuse qu'une étoiles de sixième grandeur.

- Adaptation moderne dans une échelle logarithmique suivant les propriétés de l'œil. Limite de détection à l'œil nu : m = 6

- $m = a \log (E) + b$

Magnitudes : définition
Grandeurs des étoiles

- $m = a \log (E) + b$
- $m_1 - m_2 = a \log(E_1/E_2)$
- Pogson : $E_1/E_2 = 100$, $m_1 = 1$ et $m_2 = 6$
- $-5 = a \log(100) = 2a$
- $m = -2.5 \log (E) + b$
- Valeur de la constante *b* : accord avec les catalogues des anciens
- m(*λ Umi*) = 6.55 (visible de tout le ciel nord, non variable)

Magnitudes : définition

• La magnitude est une grandeur qui permet de mesurer la luminosité des astres.

• Elle permet de comparer les étoiles les unes par rapport aux autres d'un point de vue énergétique

• La **magnitude apparente** (m) d'une étoile est définie à partir de son éclat (*E*) par la relation :

$$m = -2.5 \log (E) + \text{constante}$$

• Plus un objet est brillant, plus sa magnitude est petite

Magnitudes : définition

Quelques magnitudes apparentes

Objet	Magnitude apparente
Soleil	-26,7
Lune	-12,7
Vénus	-4,4
Sirus	-1,4
Véga	0
Antarès	1
Etoile polaire	2
Limite de perception à l'œil nu	6
Limite de perception aux jumelles	10
Limite de perception au sol	27
Limite de perception du télescope spatial Hubble	30

Magnitudes : définitions sur le rayonnement d'une étoile

- Luminosité : puissance totale rayonnée (en Watts)
- Eclairement ou flux : cette puissance par unité de surface
- Dépendance en fonction de : éclairement monochromatique
- Luminance ou Intensité : émission par unité d'angle solide

(loi de rayonnement du Corps Noir)

Magnitudes : définition

Définitions de grandeurs photométriques

Grandeur	(terme en radiométrie)	Définition	Unité*
Puissance, luminosité	(flux)	Puissance	W
Radiance	(émittance)	Puissance émise par unité de surface normale à la propagation	$W\ m^{-2}$
Eclairement, flux	(irradiance)	Puissance reçue par unité de surface normale à la propagation	$W\ m^{-2}$
Luminance, brillance	(radiance)	Puissance par unité de surface normale à la propagation, et par unité d'angle solide	$W\ m^{-2}sr^{-1}$
Eclairement monochromatique		Puissance par unité de surface et par unité spectrale	$W\ m^{-2}\mu m^{-1}$
Intensité, luminance monochromatique		Puissance transportée par unité spectrale, par unité d'angle solide, et par unité d'élément de surface	$W\ m^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$

Magnitudes : définition

- Différence de magnitudes de 2 étoiles A et B :

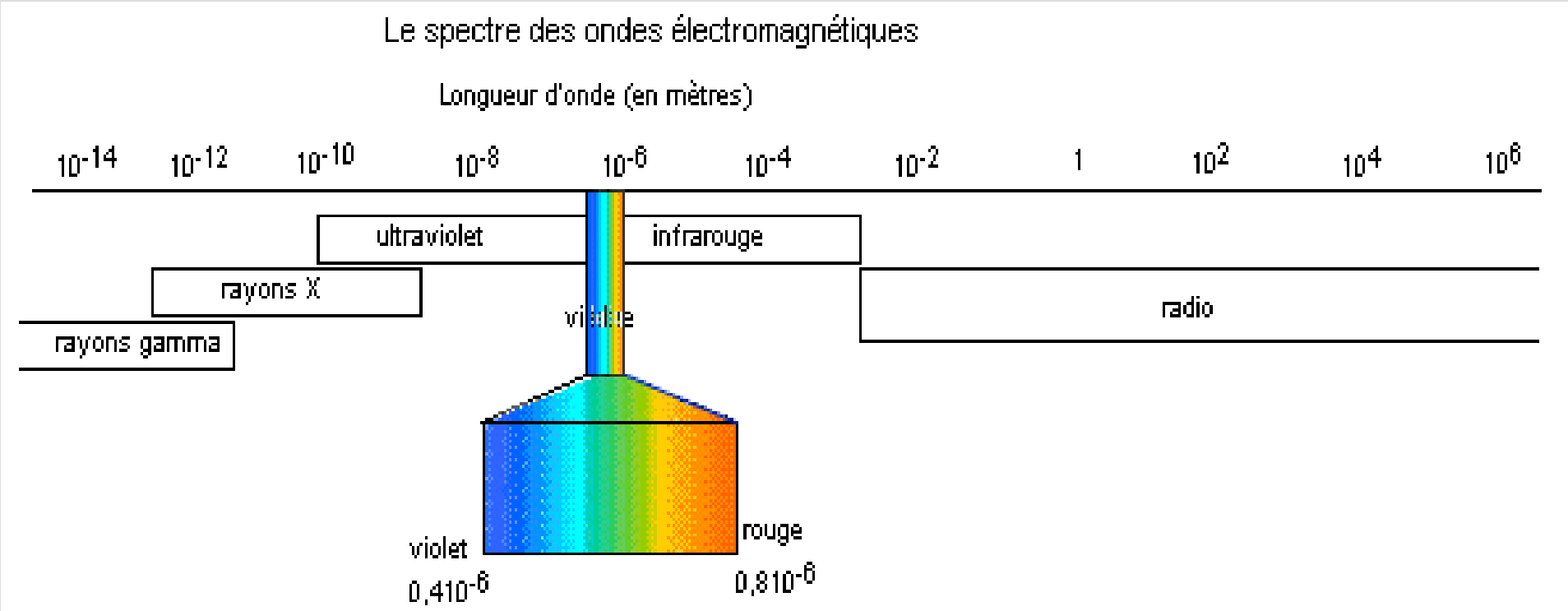
$$m_A - m_B = -2.5 \times \log (F_A/F_B)$$

- Plus un objet est brillant, plus sa magnitude est petite
- Différence de magnitude de 2.5

  <=> contraste de luminosité de 10
- Standard de référence : Véga => $m_{Véga} = 0$

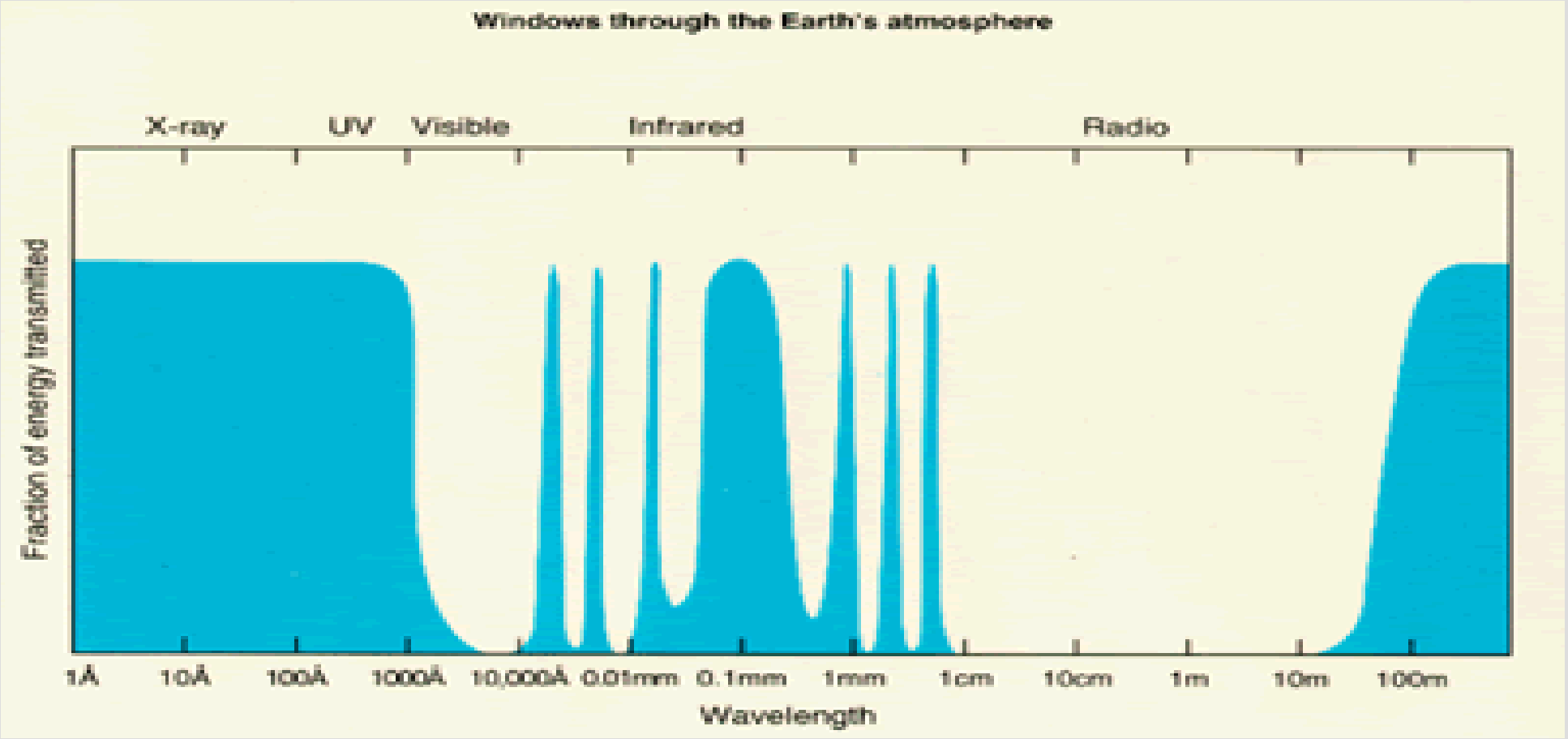
Magnitudes et Transmission atmosphérique

- La brillance d'une étoile varie en fonction de la longueur d'onde à cause de : son spectre, sensibilité récepteur, transmission atmosphérique,...
- Magnitude visuelle : m_V



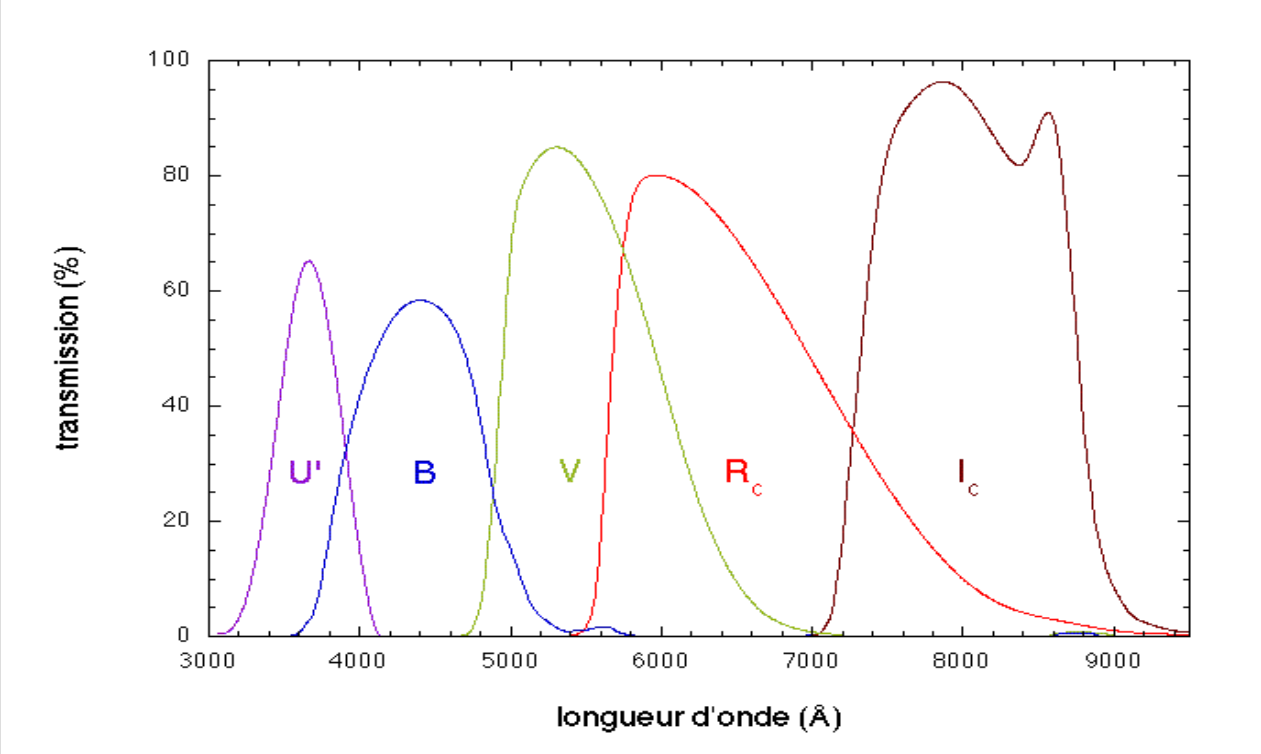
Magnitudes et Transmission atmosphérique

- Définition de la magnitude suivant les différentes fenêtres spectrales (visible, infrarouges,...)



Magnitudes et Photométrie

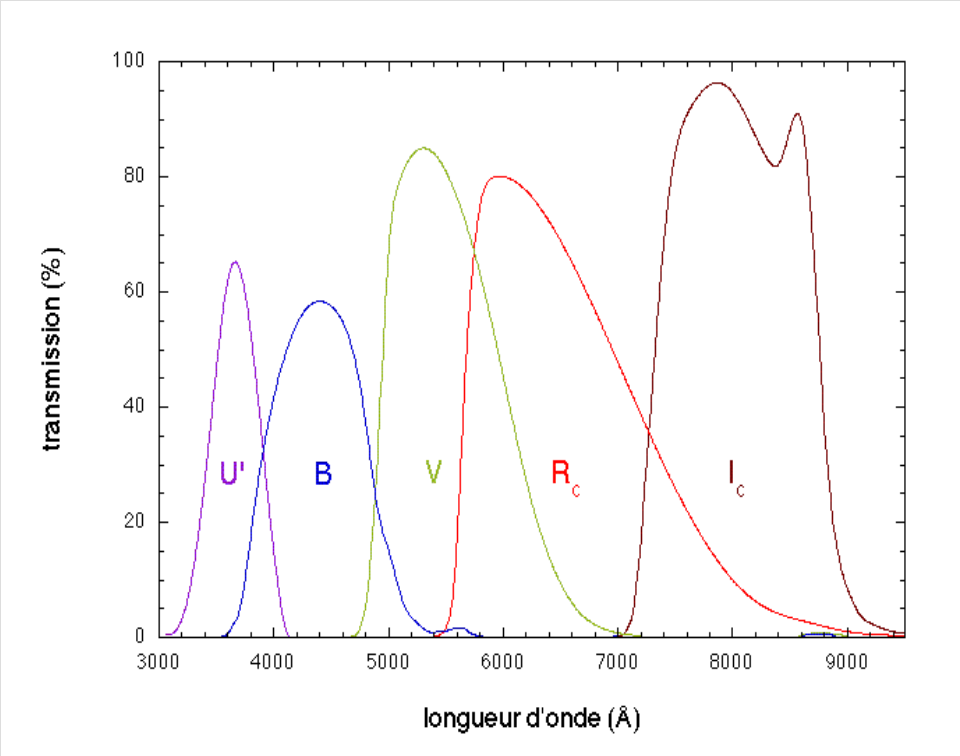
- Brillance d'une étoile à travers un filtre particulier.
- Dans le visible : m_U, m_B, m_V, m_R, ... (ou U, B, V, R,...)

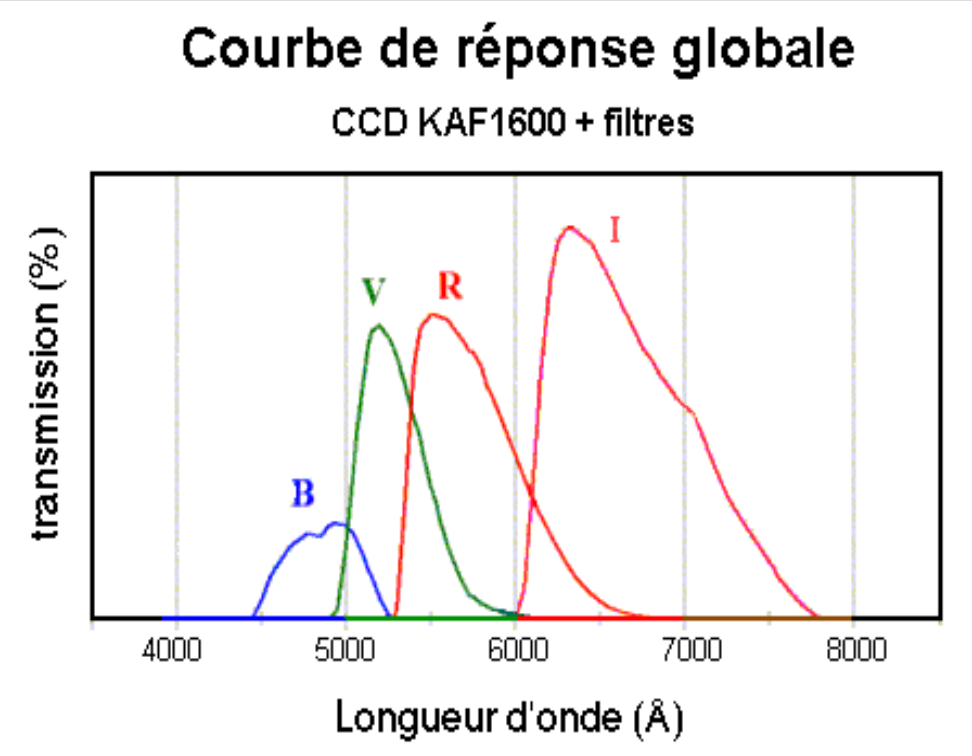


- En Infrarouge : J(1.25mic), H, K(2.2mic), L, M, N(10mic),...

Magnitudes et Photométrie

- Flux observé dépend de : transmission atmosphérique + transmission du filtre + sensibilité récepteur + ...





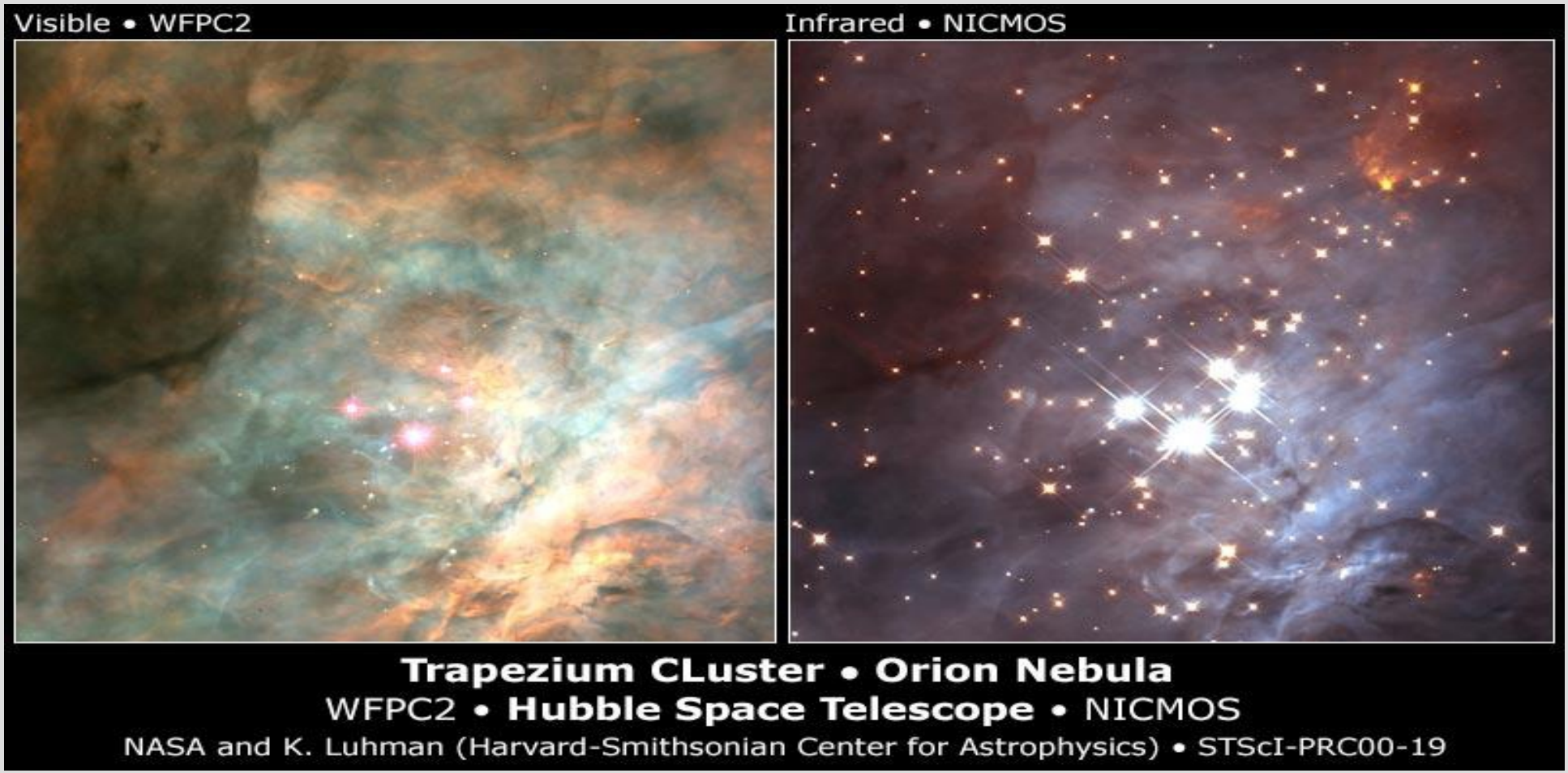
Magnitudes et Photométrie

Photométrie standard

domaine spectral	indice de couleur X	λ (μ m	$\Delta\lambda$ (μ m)	Référence (W m^{-2} μm^{-1})
UV	U	0.36	0.068	$4.35\ 10^{-8}$
bleu	B	0.44	0.098	$7.20\ 10^{-8}$
visible	V	0.55	0.089	$3.92\ 10^{-8}$
rouge	R	0.70	0.22	$1.76\ 10^{-8}$
proche IR	I	0.90	0.24	$8.3\ 10^{-9}$
proche IR	J	1.25	0.30	$3.4\ 10^{-9}$
IR	H	1.65	0.35	$7.0\ 10^{-10}$
IR	K	2.20	0.40	$3.9\ 10^{-10}$
IR	L	3.40	0.55	$8.1\ 10^{-11}$
IR	M	5.0	0.3	$2.2\ 10^{-11}$

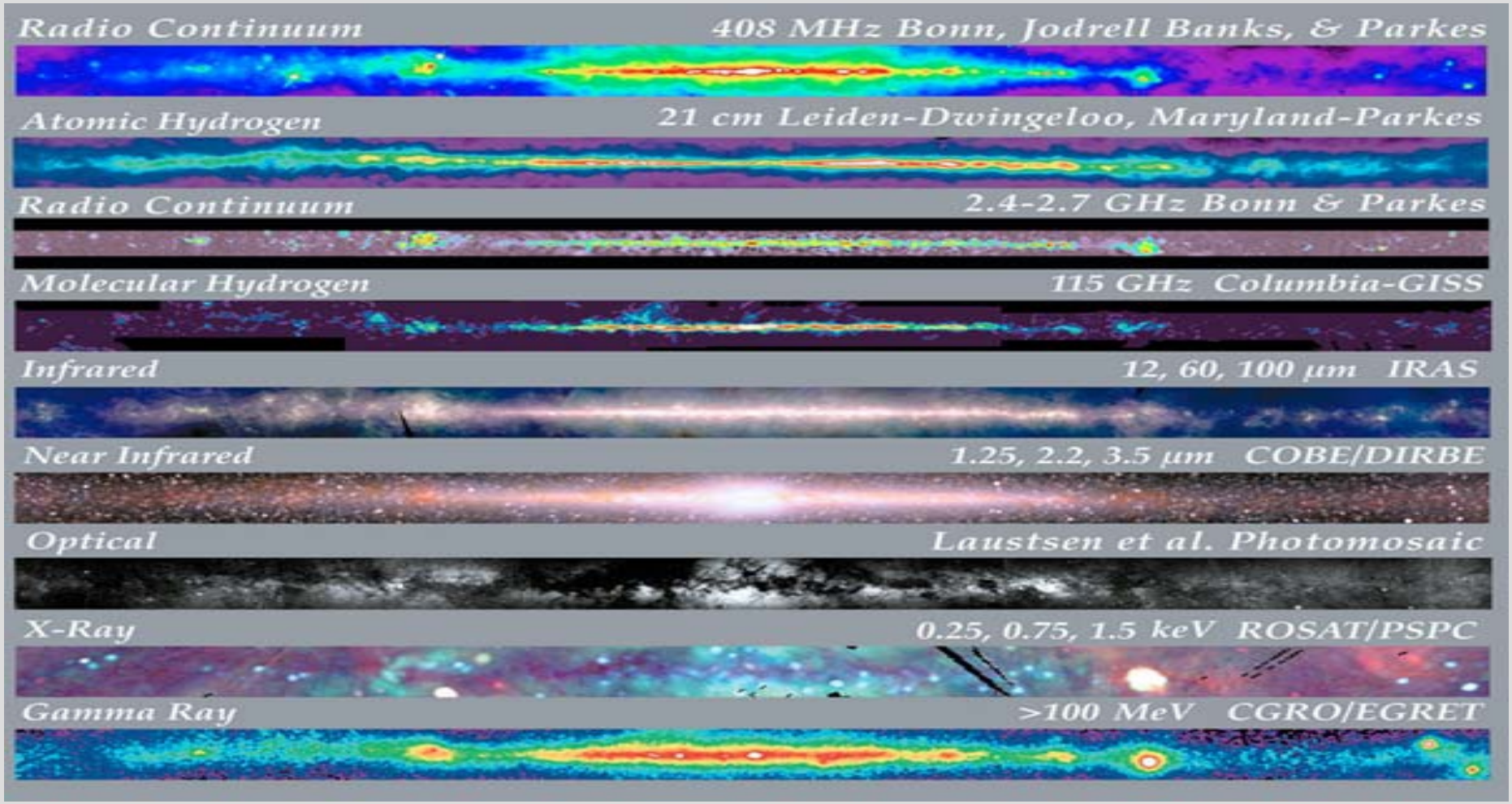
Magnitudes et Photométrie

- Nébuleuse d'Orion en visible et IR



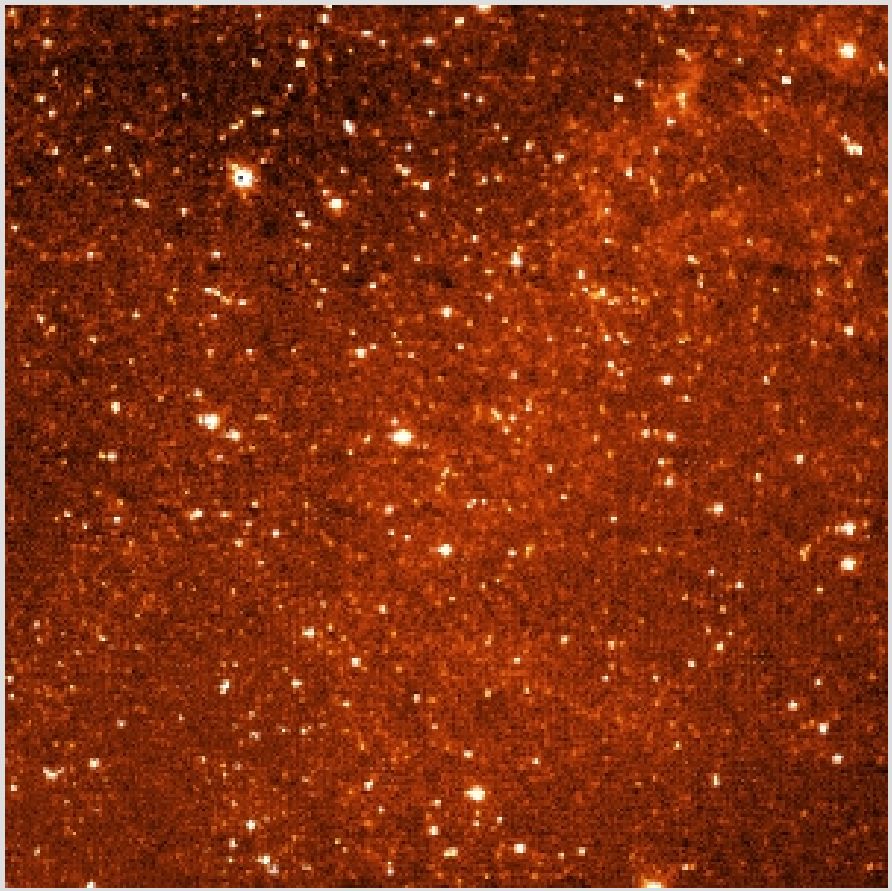
Magnitudes et Photométrie

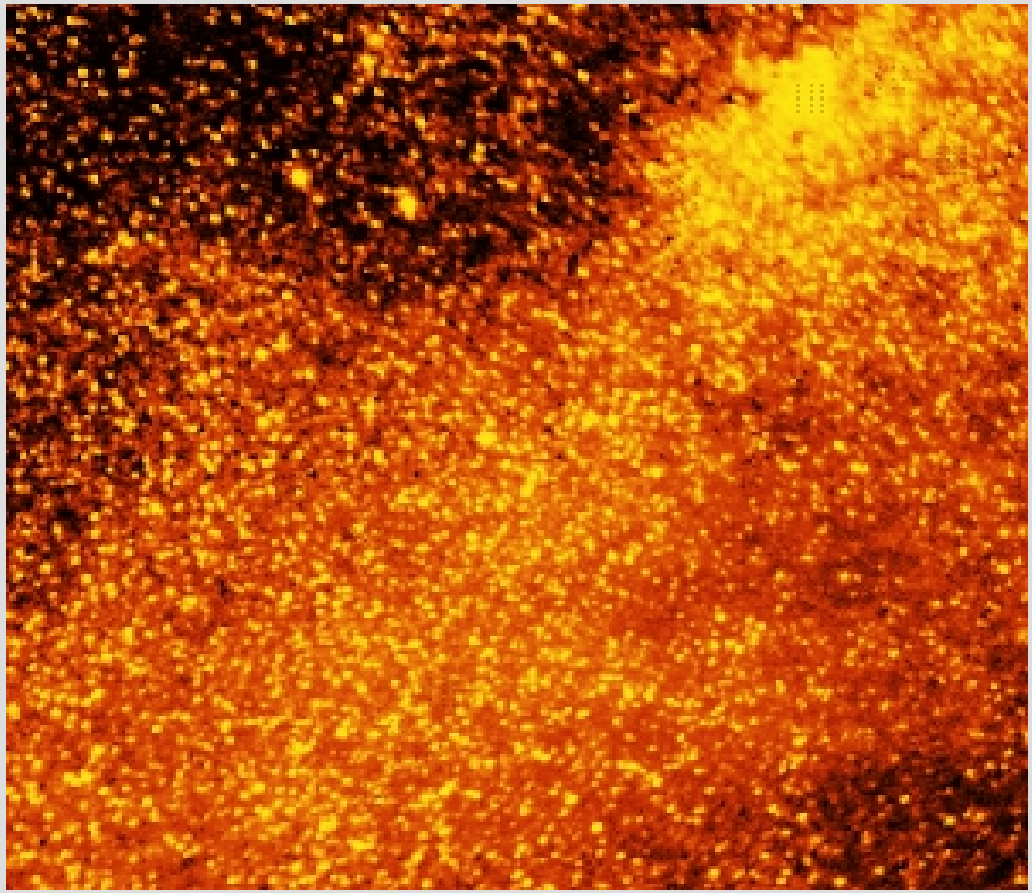
- La Voie Lactée vue à travers différents filtres



Magnitudes et Photométrie

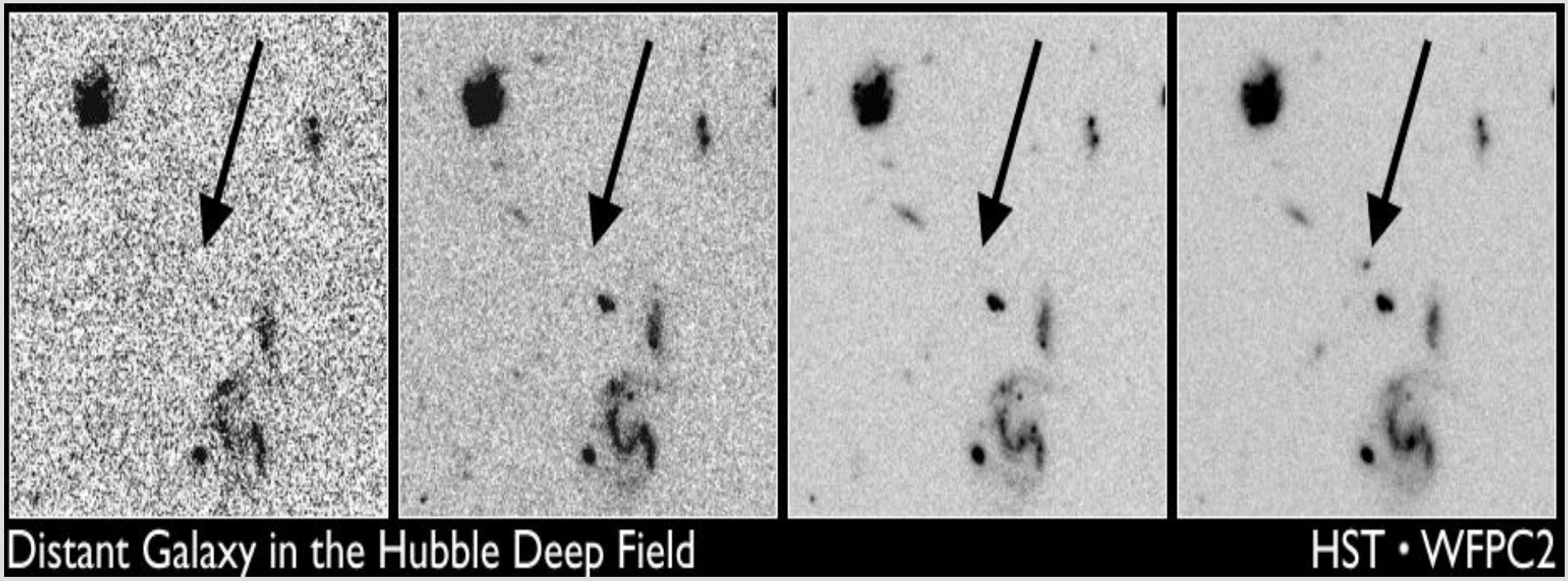
- Centre Galactique en bandes J et K





Magnitudes et Photométrie

- Une galaxie distante détectée dans des filtres U, B, R et I



Magnitudes : définition

- Différence de magnitudes de 2 étoiles A et B :

$$m_A - m_B = -2.5 \times \log (F_A/F_B)$$

- Plus un objet est brillant, plus sa magnitude est petite
- Différence de magnitude de 2.5

  <=> contraste de luminosité de 10
- Standard de référence : Véga => $m_{Véga} = 0$

Magnitudes Apparente et Absolue

- La **magnitude apparente** (m) ne donne aucune indication sur la brillance intrinsèque d'un astre
- Problème du à la **distance** (*d*) qui est inconnue
- On s'affranchit de ce problème avec la **magnitude absolue** (M) : c'est la magnitude qu'aurait l'astre étudié si il se trouvait à

$$d = 10 \text{ parsecs } (1\text{pc} \sim 3.26\text{a.l.})$$

- On peut alors comparer la **luminosité** des astres

Magnitudes Apparente et Absolue

Magnitudes apparente et absolue

Objet	m	M	d (pc)
soleil	-26.7	4.9	
Sirius	-1.45	1.4	2.7
Véga	0.00	0.5	8.1
Antarès	1.00	-4.8	130
Mimosa	1.26	-4.7	150
Adhara	1.50	-5.0	200

Magnitudes Apparente et Absolue

- Une étoile de magnitude absolue donnée apparaît à une magnitude apparente d'autant plus grande (= moins lumineuse) qu'elle est plus éloignée.

- S'il est possible d'attribuer une magnitude absolue à une étoile, à partir de critères d'observation, on peut déterminer sa distance en mesurant sa magnitude apparente et en la comparant à la magnitude absolue

  ==> Notion de **module de distance**

Magnitude Absolue et Module de distance

- Sur Terre, nous mesurons l'éclat apparent (ou flux reçu F) d'une étoile dont la distance est d
- La luminosité (L) de l'étoile est sa puissance totale rayonnée : $F = L / (4\pi d^2)$
- Relation entre magnitudes absolue et apparente :

$$(m\text{-}M) = -2.5 \log (L / 4\pi d_{pc}^2) + 2.5 \log (L / 4\pi\, 10_{pc}^2)$$

$$= -2.5 \log (10_{pc}/d_{pc})^2 = -5 + 5 \log (d_{pc})$$

- (m-M) est le **module de distance**

Magnitude Absolue et Module de distance

- (m-M) est le **module de distance** et est une fonction de la distance
- En reliant la distance à une différence de magnitude, (m-M) indique la distance en échelle logarithmique
- (m-M) = 0 pour d = 10 pc (par définition)

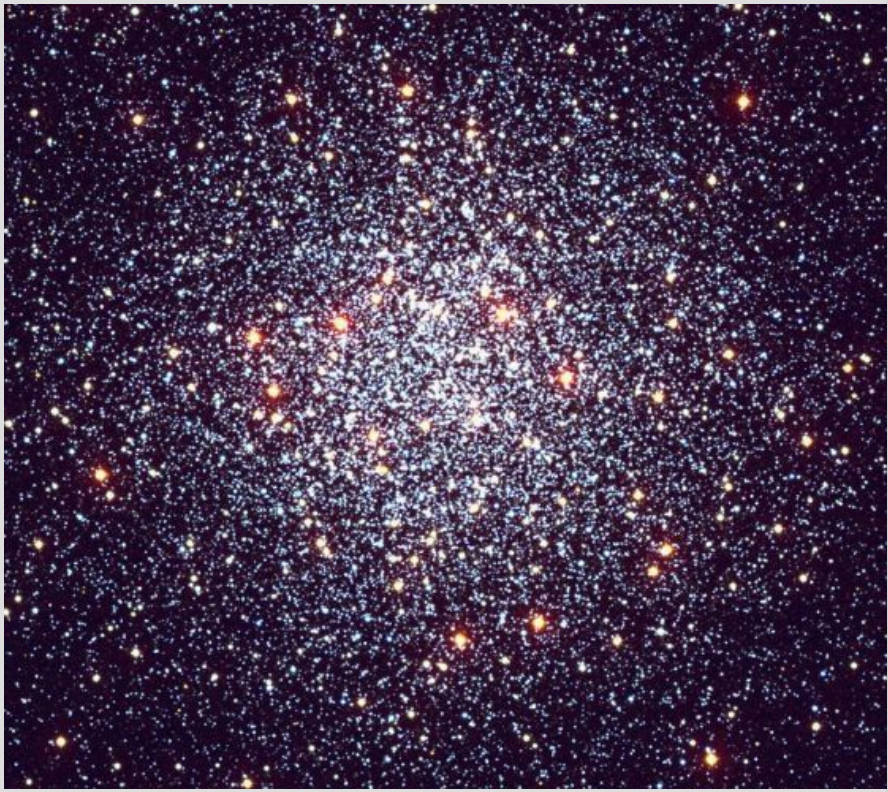
  (m-M) = 5 pour d = 100 pc

  (m-M) = 10 pour d = 1000 pc.

- **Voir cours sur les distances pour la suite !**

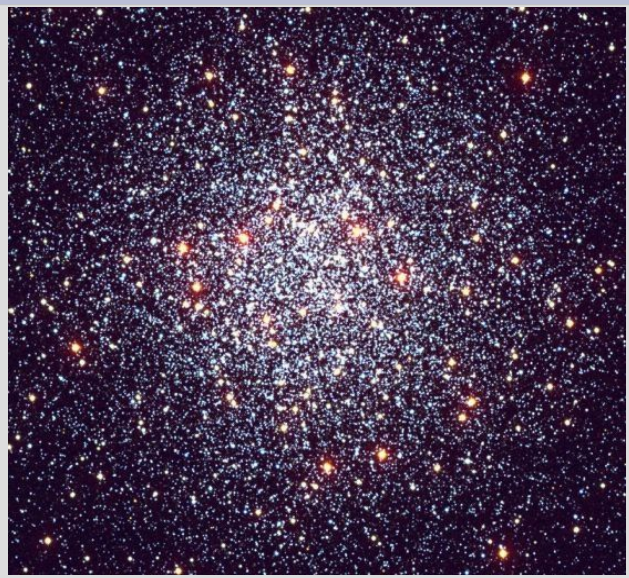
Magnitudes et Indices de Couleur

- Les étoiles n'ont pas toutes la même couleur => effet sur la magnitude
- Indice de couleur = différence de magnitude d'un même astre dans 2 filtres différents (à 2 λ différents)
- $m_U - m_B = (U-B)$



Magnitudes et Indices de Couleur

- $m_U - m_B = (U-B)$, $m_V - m_K = (V-K)$, ...



- Etoiles chaudes (bleues) ont (B-V) négatif
- Etoiles froides (rouges) ont (B-V) positif
- Standard de référence : Véga

$$m_{Véga}(\lambda) = 0 = (U-B) = (B-I) = (J-K) = ...= 0$$

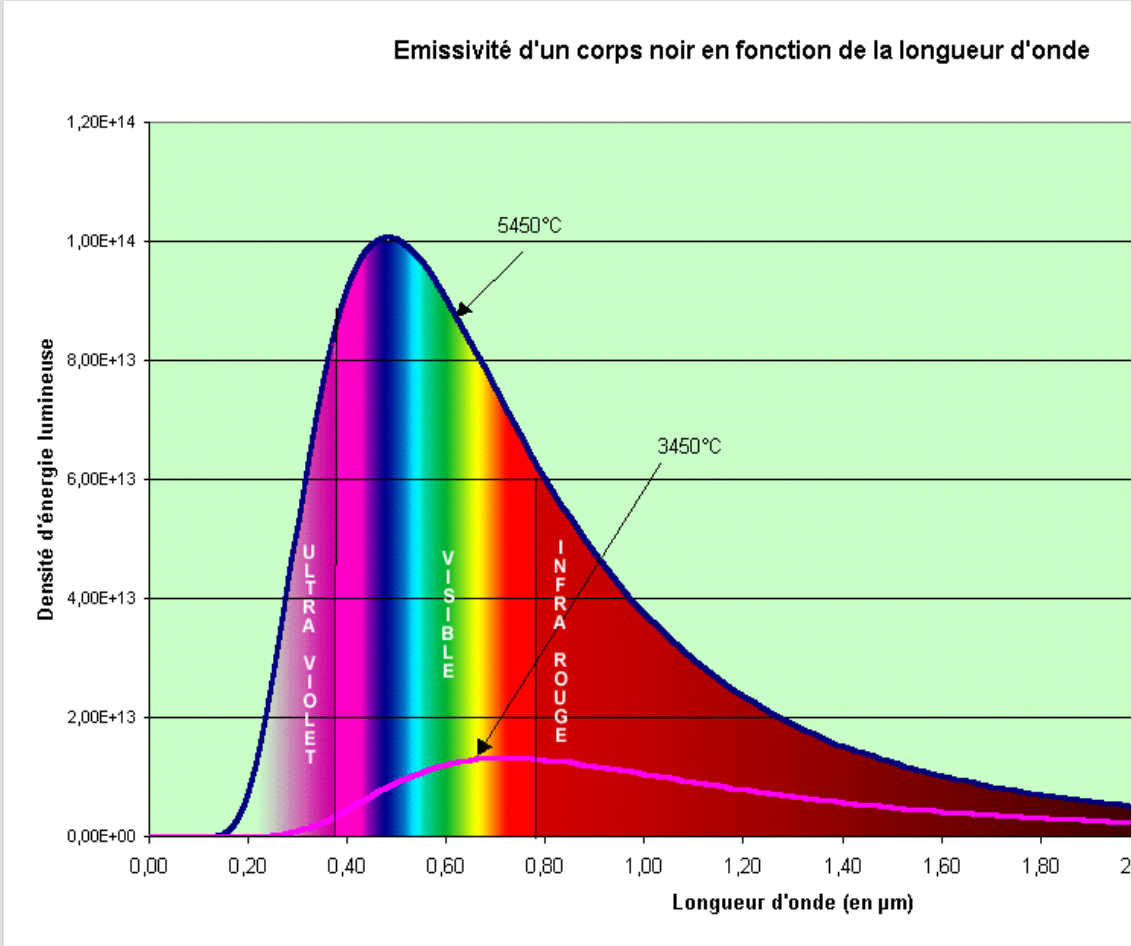
Magnitudes et Indices de Couleur

Indices de couleur

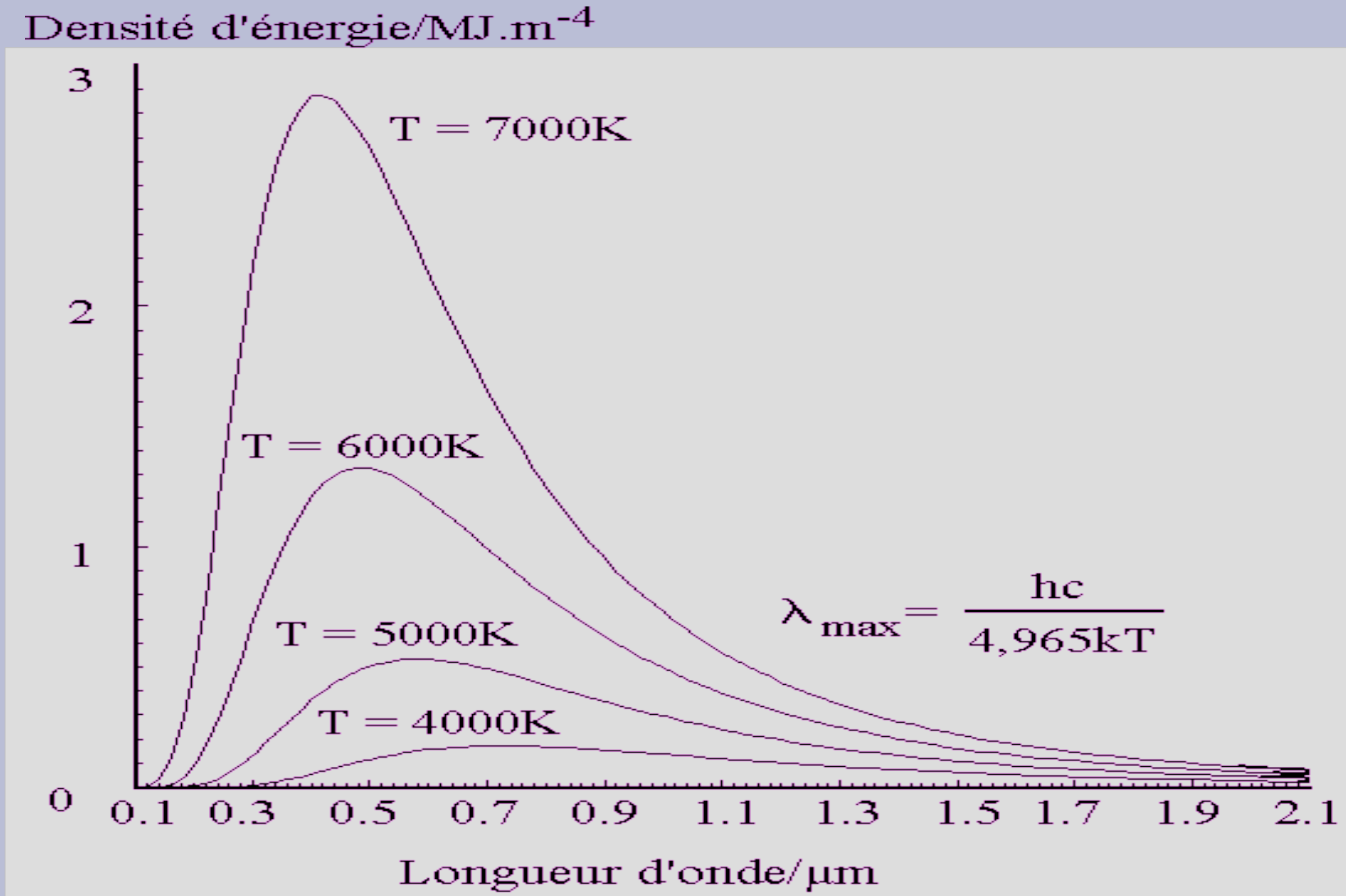
Objet	m_v	$B - V$
soleil	-26.7	0.65
Sirius	-1.45	0.00
Véga	0.00	0.00
Antarès	1.00	1.80
Mimosa	1.26	-0.24
Adhara	1.50	-0.22

Indice de Couleur et Température des étoiles

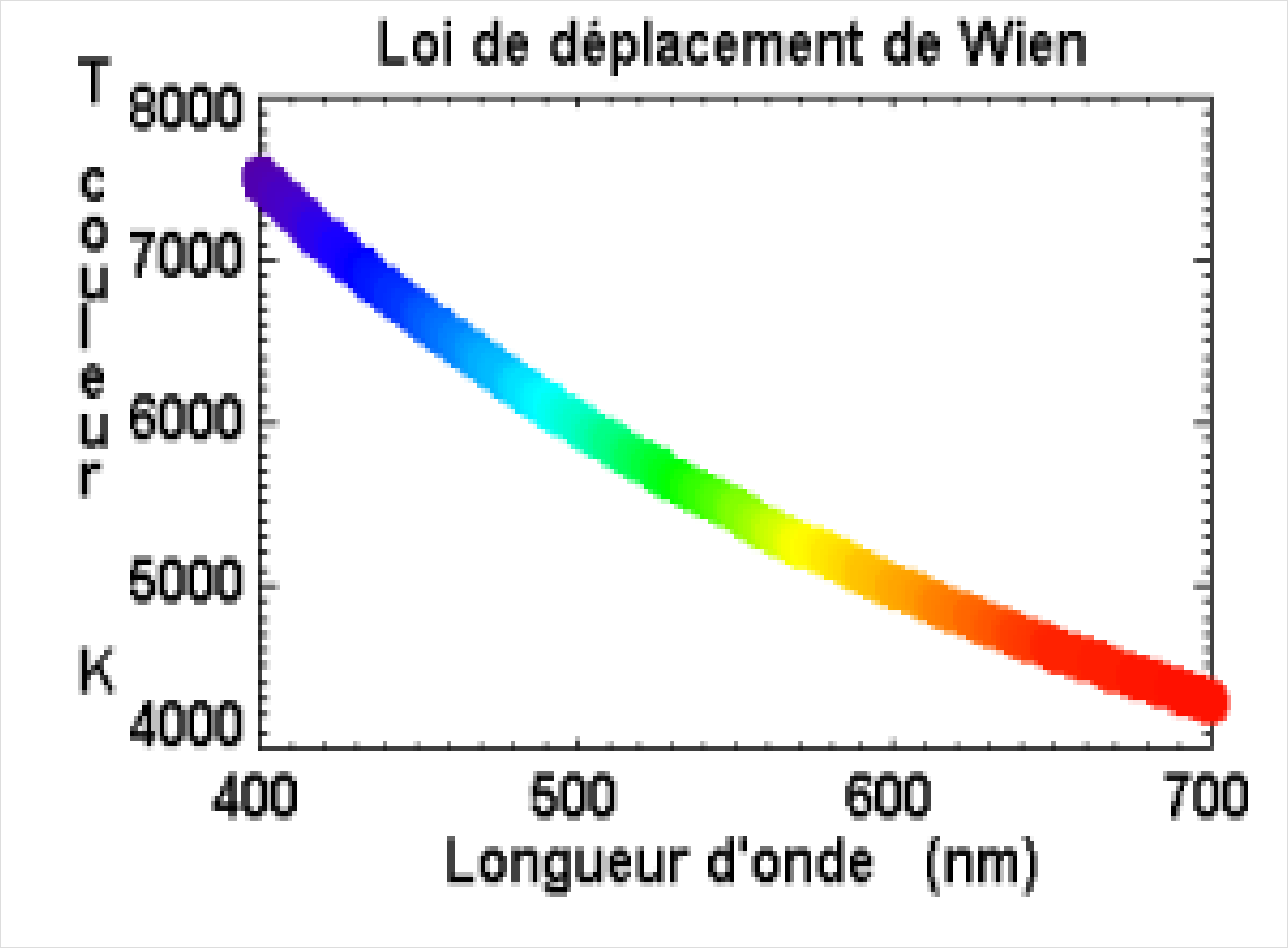
- Mesurer un indice de couleur permet d'estimer la **<u>température effective</u>** d'une étoile
- Température effective = Température qu'aurait un corps noir rayonnant autant d'énergie



Température des étoiles
Loi de Wien (1893)



Température des étoiles
Loi de Wien (1893)



$$\lambda_{max}\, T = 2.89\ 10^{-3}\ \mathrm{K\,m}$$

Classification des étoiles et température effective

- Mesure d'un indice de couleur ou de λ_{max}
- Estimation de la **Température effective** (T_{eff})

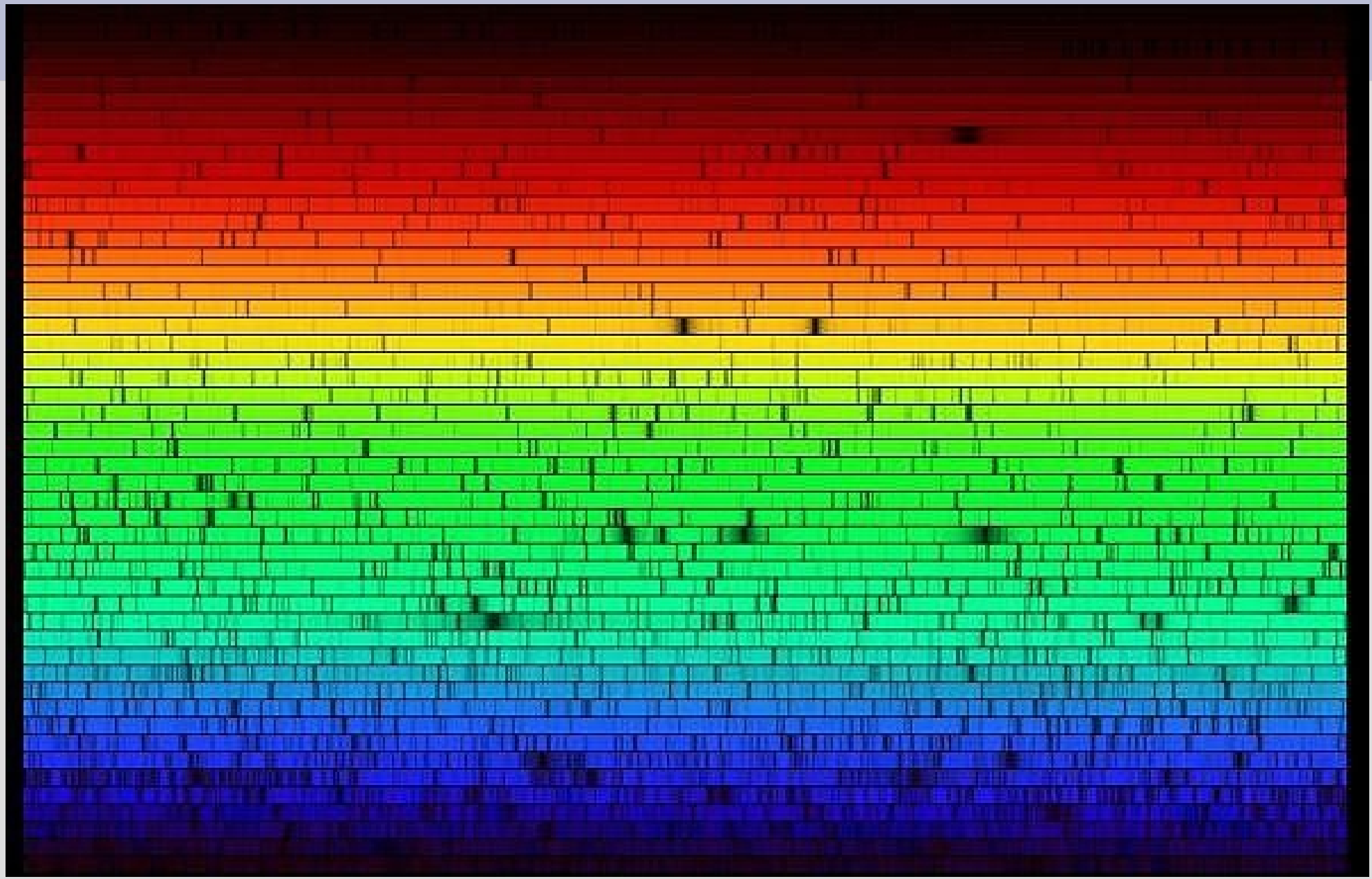
- Etoiles chaudes (bleues) ont un indice de couleur négatif
- Etoiles froides (rouges) ont un indice de couleur positif

- Classification des étoiles en fonction de leur T_{eff}

Classification spectrale des étoiles

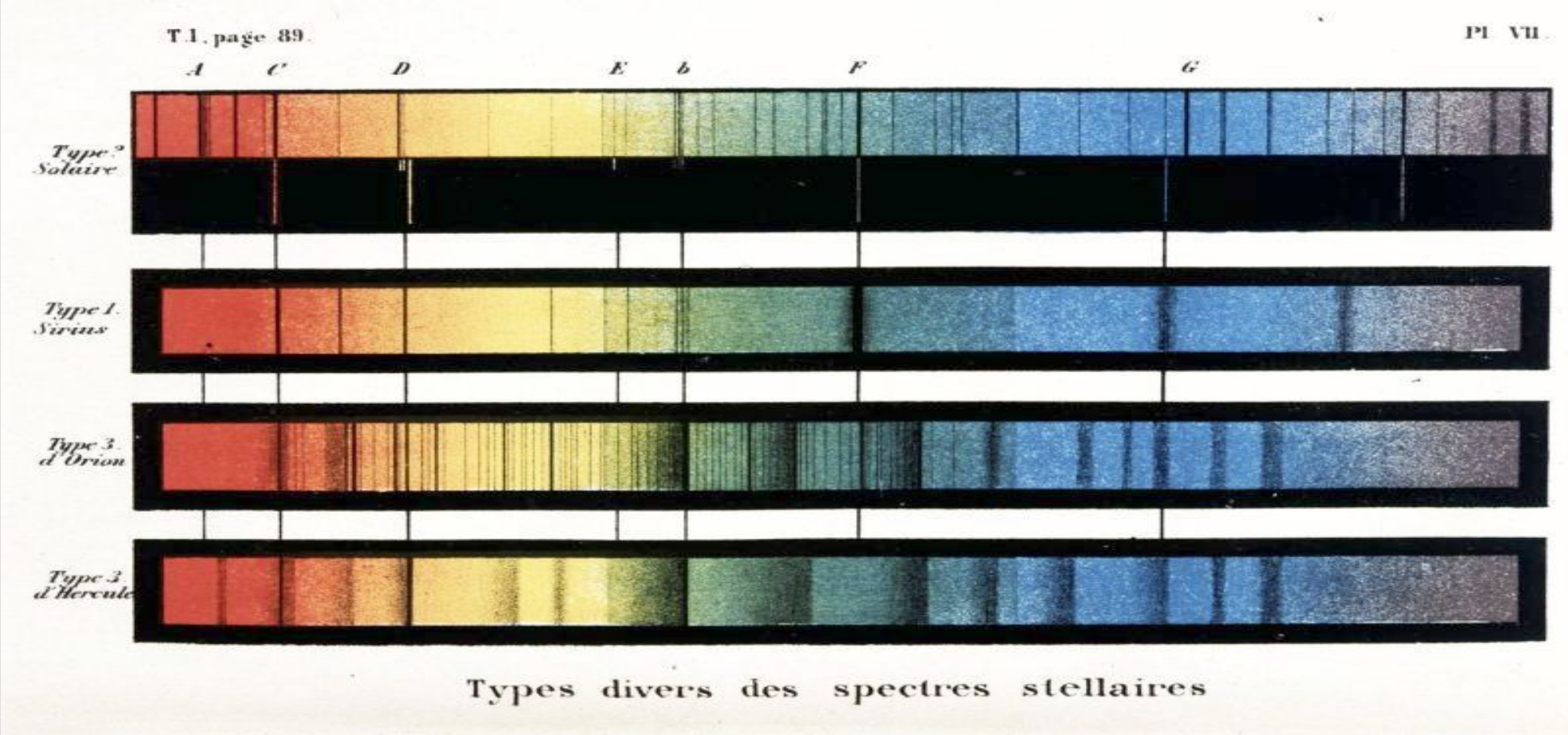
- On peut également classer les étoiles à partir de leur spectre (dans le visible historiquement)
- Classification spectrale : analyse qualitative des spectres stellaires (basée sur les raies d'absorption) et regroupement en quelques familles
- Notion de **Type Spectral** d'une étoile

Spectre du Soleil : > 50000raies et 67 éléments



Classification spectrale des étoiles

- Premières classes spectrales (4 seulement) : Secchi (1863)



Types divers des spectres stellaires

Classification spectrale des étoiles

- Classes actuelles basées sur le système de Harvard (1901) : **O B A F G K M**
- Subdivision décimale (de 0 à 9) pour différencier les spectres d'une même famille.
- Par ex. : .. A8, A9, F0, F1, F2 ... F8, F9, G0, G1...

  avec le type spectral F9 présentant des caractères plus proches de ceux du type G0 que de ceux du type F0.

Classification spectrale des étoiles

• **Caractéristiques du spectre stellaire utilisées :** présence ou absence de raies de certains éléments (non due à des différences de composition chimique mais à des différences de T_{eff})

• **Les raies de l'hydrogène :** abondance à peu près la même dans toutes étoiles et nombreuses raies pour $T_{eff} \sim 10\,000$ K

Classification spectrale des étoiles

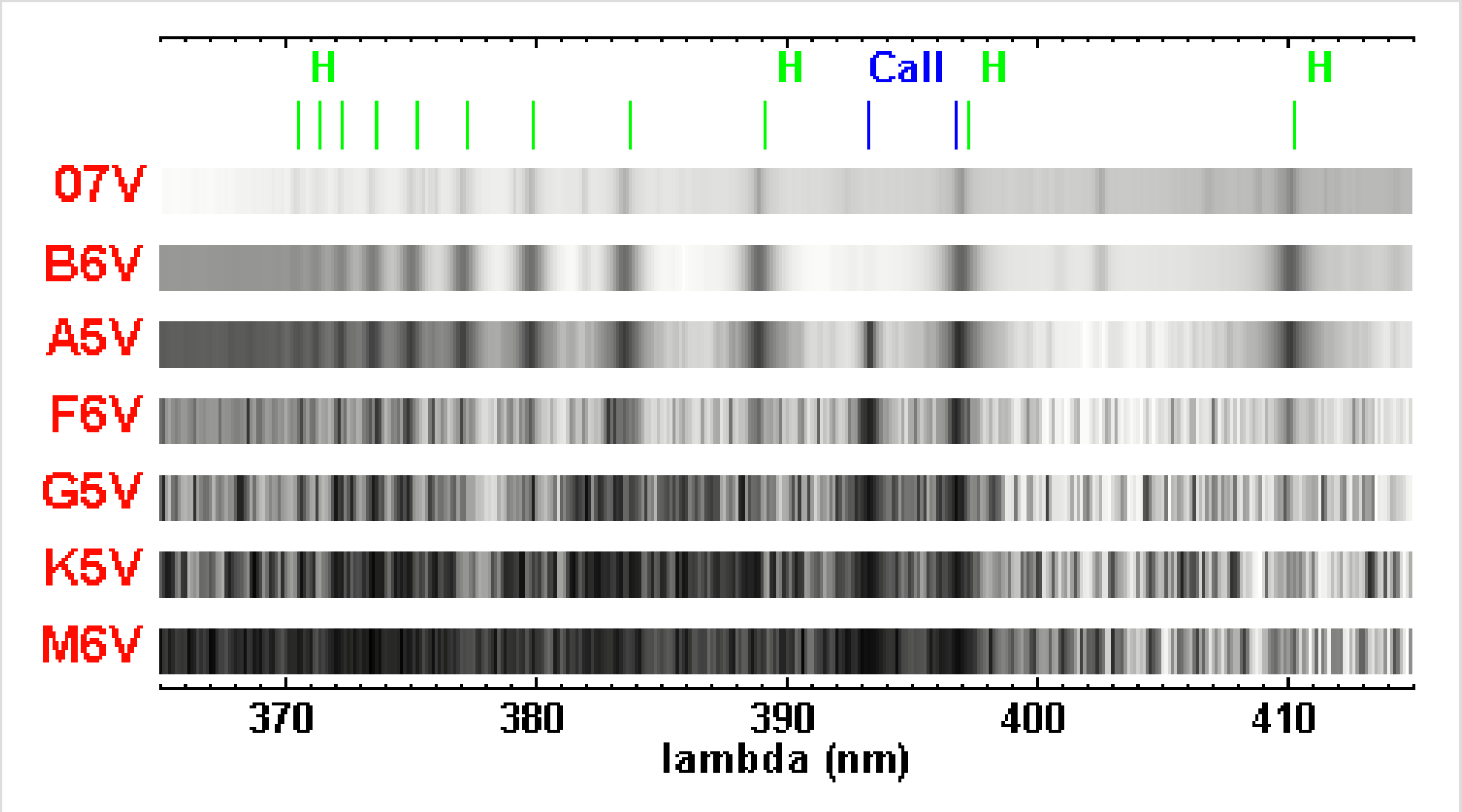
- **Etoiles chaudes :**
  - O = raies d'hélium ionisé mais pas de raies de H
  - B0 à A0 : intensité des raies de He décroit et celle des raies de H augmente progressivement pour atteindre un maximum vers le type A0.
  - Au-delà de A0 : Intensité des raies de l'H décroit alors que celle des raies dues aux métaux augmente

Classification spectrale des étoiles

- **Etoiles froides :**
  - H est neutre et dans le niveau fondamental => raies très faibles.
  - Raies des métaux neutres deviennent de plus en plus intenses alors que les bandes caractéristiques des molécules apparaissent.
  - En 2000, deux nouvelles classes spectrales : **L** et **T**

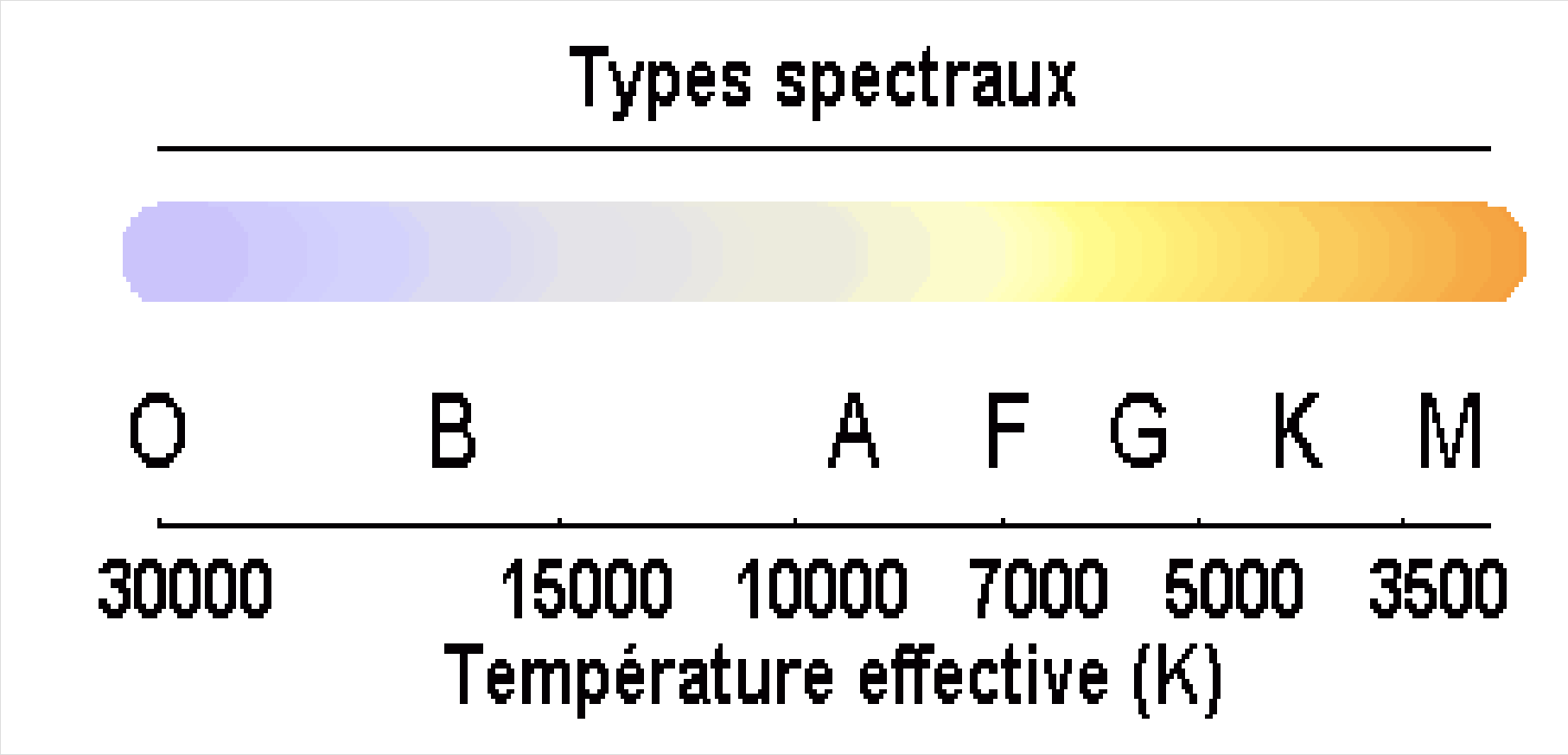
    Décrivent les spectres des étoiles les plus froides (T_{eff} entre 1000 et 2000 K) ne comportant quasiment que des raies moléculaires

Classification spectrale des étoiles



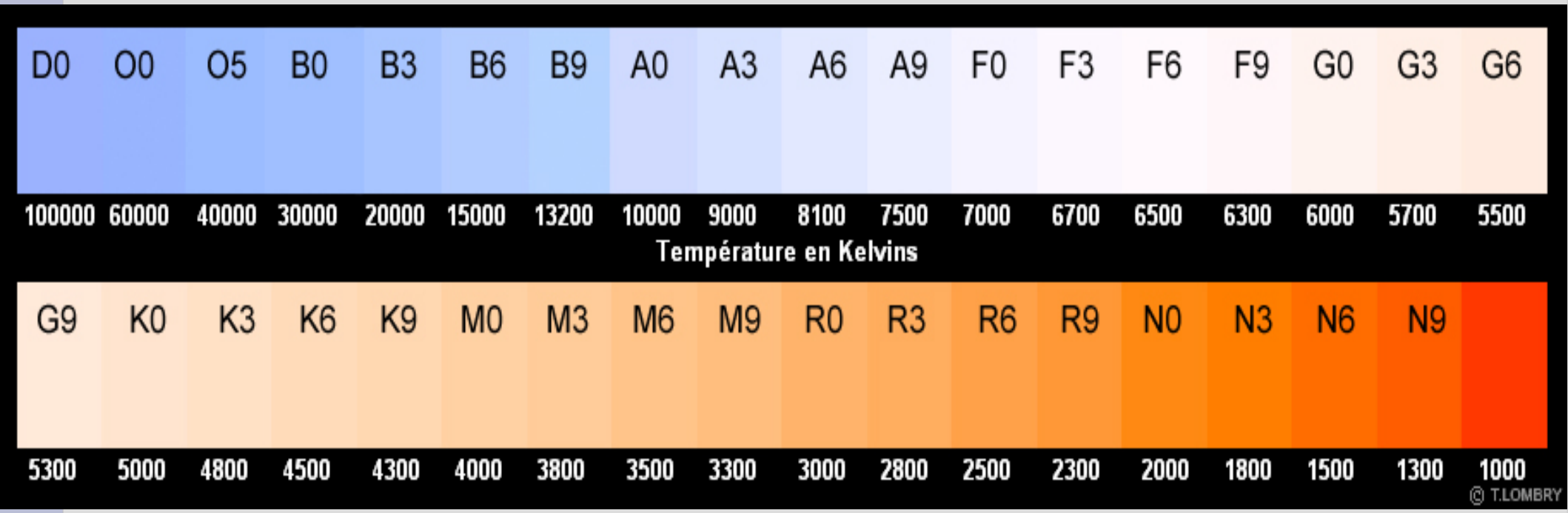
Classification spectrale et Température Effective

- La classification de Harvard (OBAFGKM) correspond à un séquence de T_{eff} décroissante



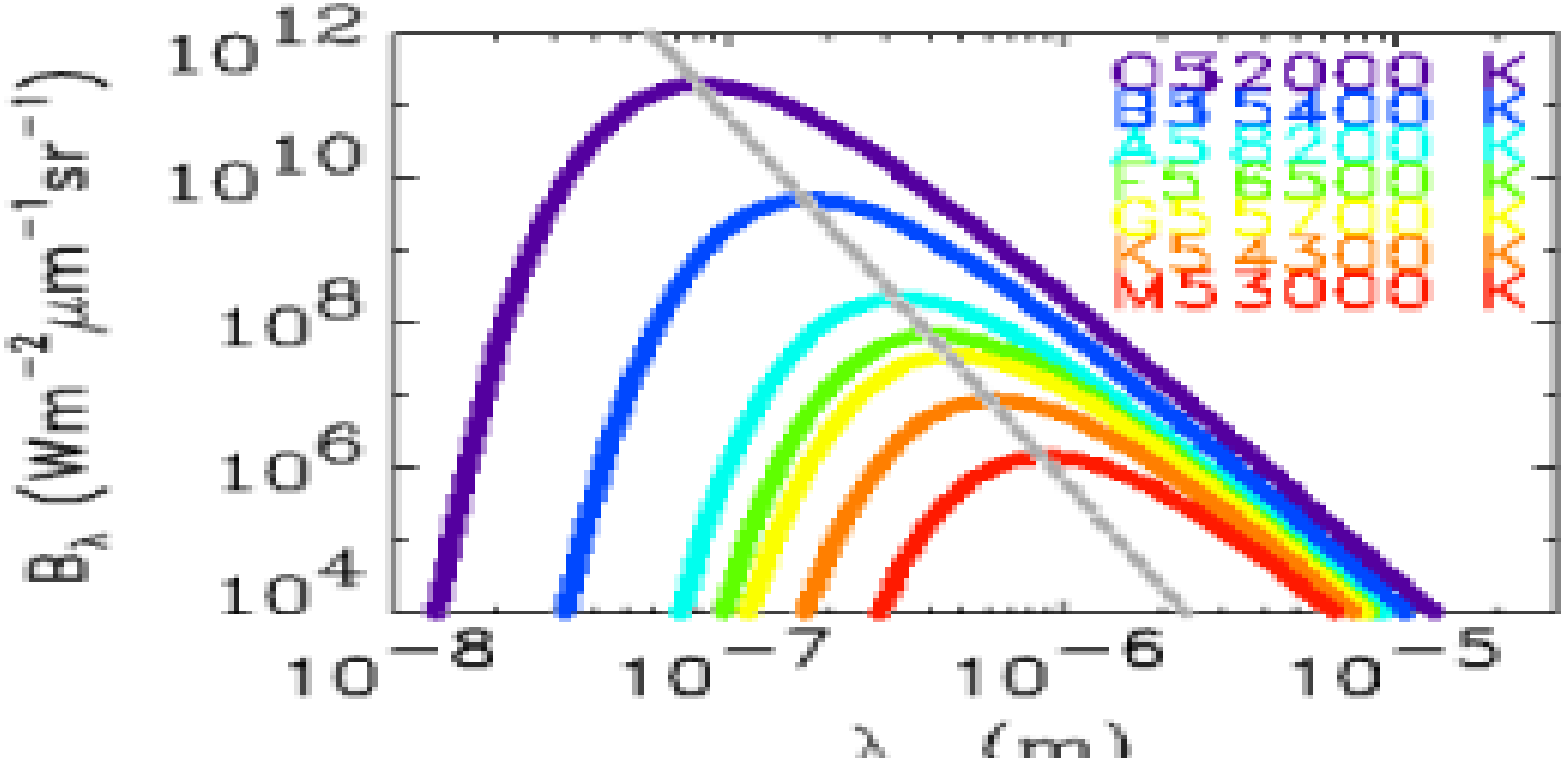
Classification spectrale et Température Effective

- La classification de Harvard (OBAFGKM) correspond à un séquence de T_{eff} décroissante



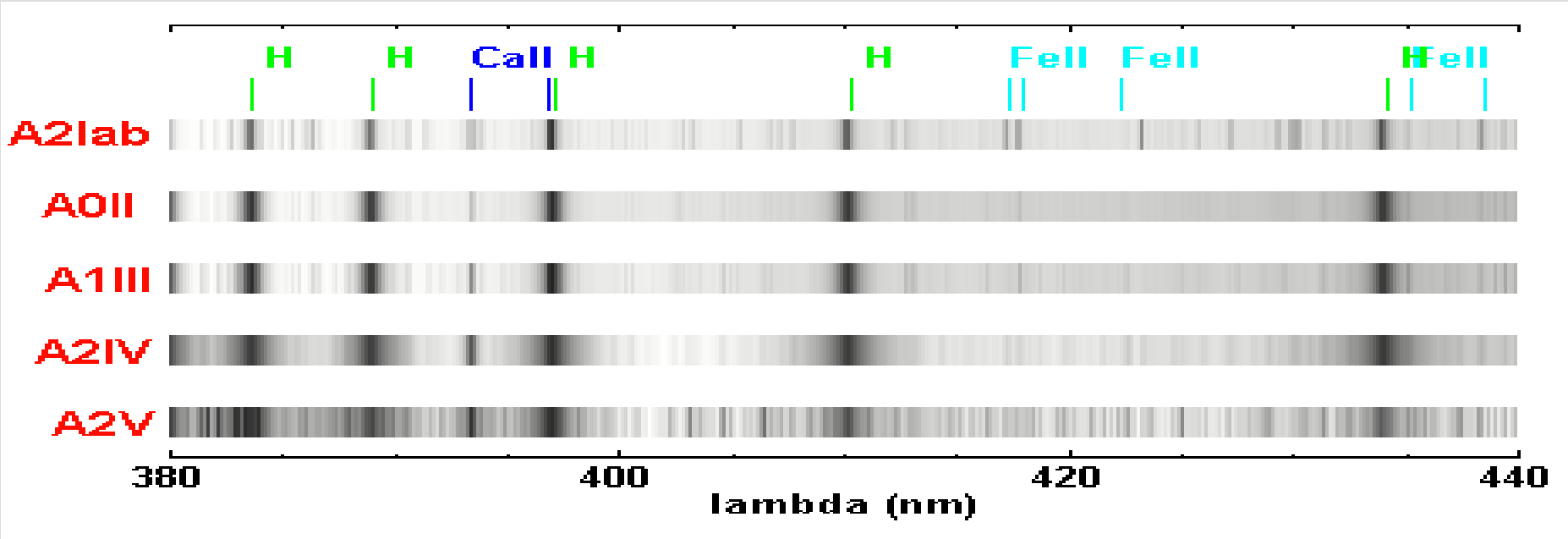
Classification spectrale et Température Effective

- La classification de Harvard (OBAFGKM) correspond à un séquence de T_{eff} décroissante



Classes de Luminosité des étoiles

- T_{eff} seul ne permet pas de bien classer
- Des étoiles de même Type Spectral peuvent avoir des spectres relativement différents :
  - Présence de raies larges ou fines



Classes de Luminosité des étoiles

- En 1913, Hertzsprung et Russell montrent que les différentes largeurs de raies au sein d'un même Type Spectral correspondent à des différences de luminosité pour des étoiles de même T_{eff}
- Cette différence est due à une différence de rayon ==> Propriété d'un corps noir

Classes de Luminosité des étoiles

Energie émise par seconde à toutes les fréquences par un corps noir :

$$\boldsymbol{E} = \int B_{\square}(T) \, . \, d\Omega \, . \, d\lambda$$

$$= \sigma T^4 \qquad \text{(Loi de Stephan-Boltzman 1879-1884)}$$

$\sigma = 5.67\ 10^{-8}$ $W/m^2/K^4$ Constante de Boltzman

Luminosité (en W) totale d'un corps noir :

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{E} \, . \, \boldsymbol{S}$$

Classes de Luminosité des étoiles

- Luminosité totale d'une étoile de rayon *R* :

$$L = E \cdot S$$
$$= \sigma T_{eff}^4 \times 4\pi R^2$$

- Si 2 étoiles ont la même Teff et $L_1 > L_2$,

alors $R_1 > R_2$

Classes de Luminosité des étoiles

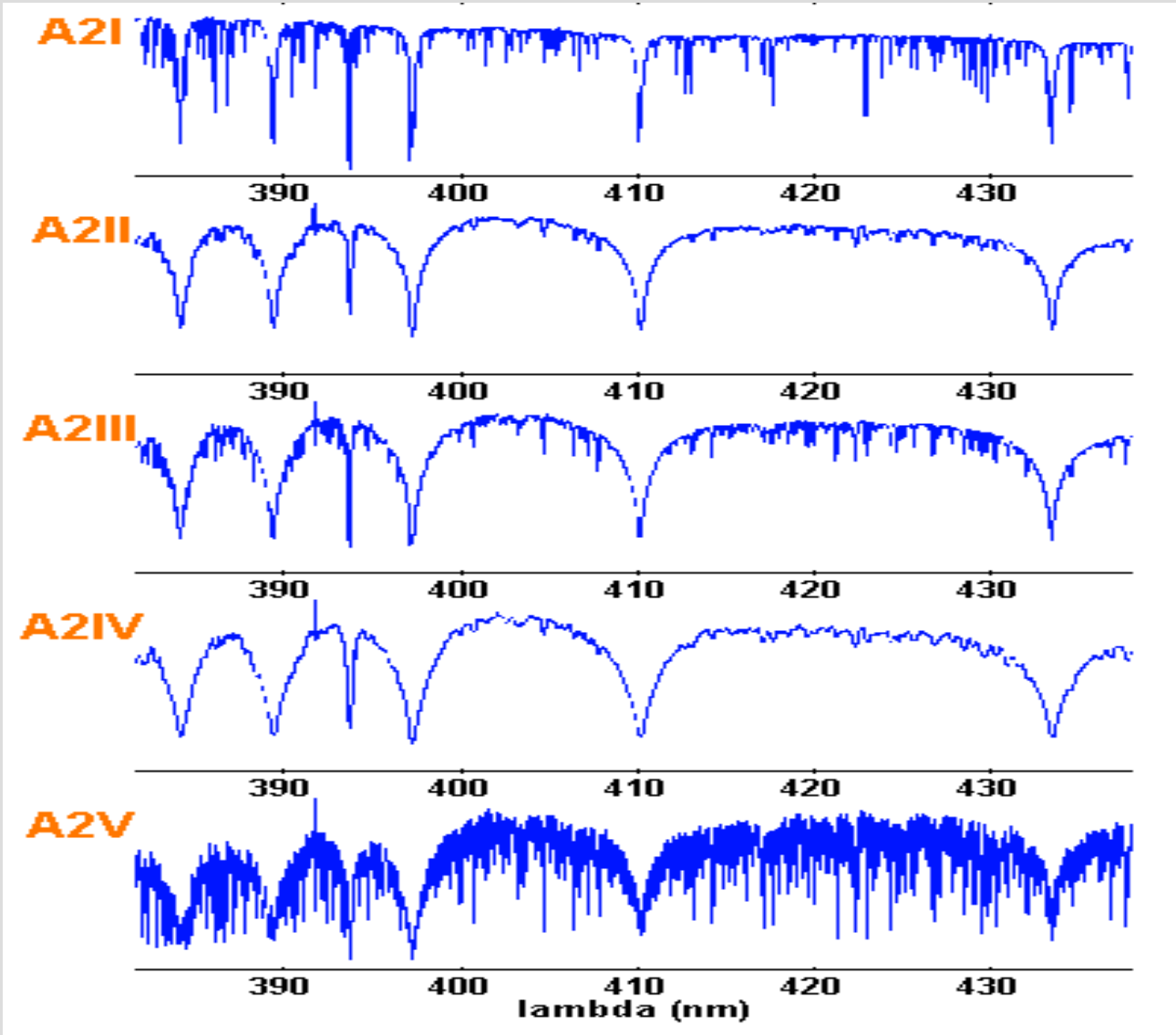
- Deuxième paramètre :

Classes de luminosité

- 5 classes :

  I, II, III, IV, V

- Liées au rayon des étoiles



Classes de Luminosité des étoiles

- **Ia** et **Ib** : étoiles supergéantes (raies les + fines)
- **II** : étoiles géantes brillantes
- **III** : étoiles géantes
- **IV** : étoiles sous-géantes
- **V** : étoiles naines (raies les + larges)

- Le Soleil est une étoile de type spectral **G2V**

Classification des étoiles

- On peut donc classer les étoiles à partir de différents critères.
- Critères directement observables :
  - **magnitude** (attention à la distance) et **couleur**
- Critères déduits :
  - **luminosité** (magnitude absolue) et $\mathbf{T_{eff}}$ (type spectral)

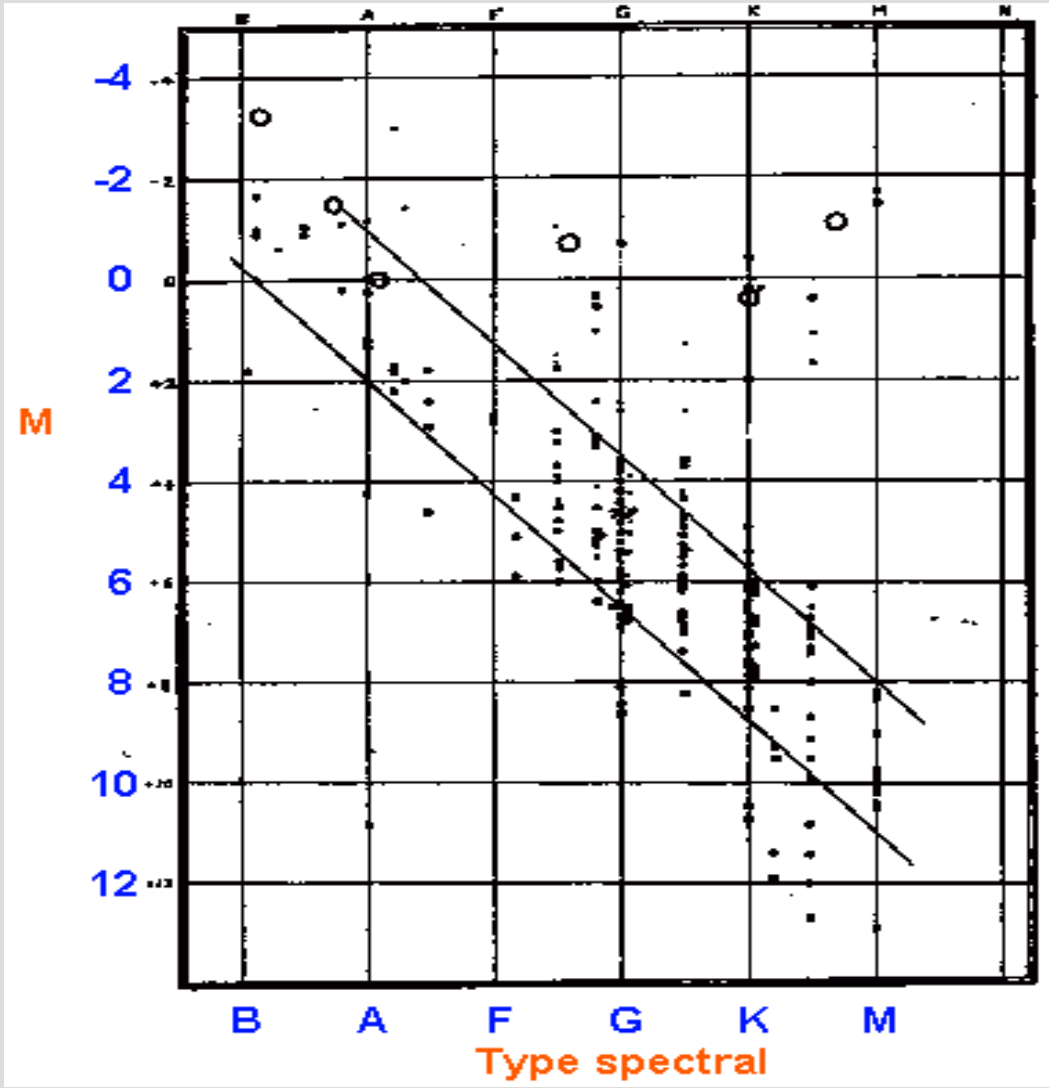
Classification des étoiles

- Diagrammes **Couleur-Magnitude**
  Température-Luminosité

• En 1911, l'ingénieur et astronome amateur danois Ejnar Hertzsprung traçait un diagramme type spectral-magnitude absolue pour des étoiles appartenant à un même amas stellaire. Il remarqua que les points ne se répartissaient pas de manière aléatoire.

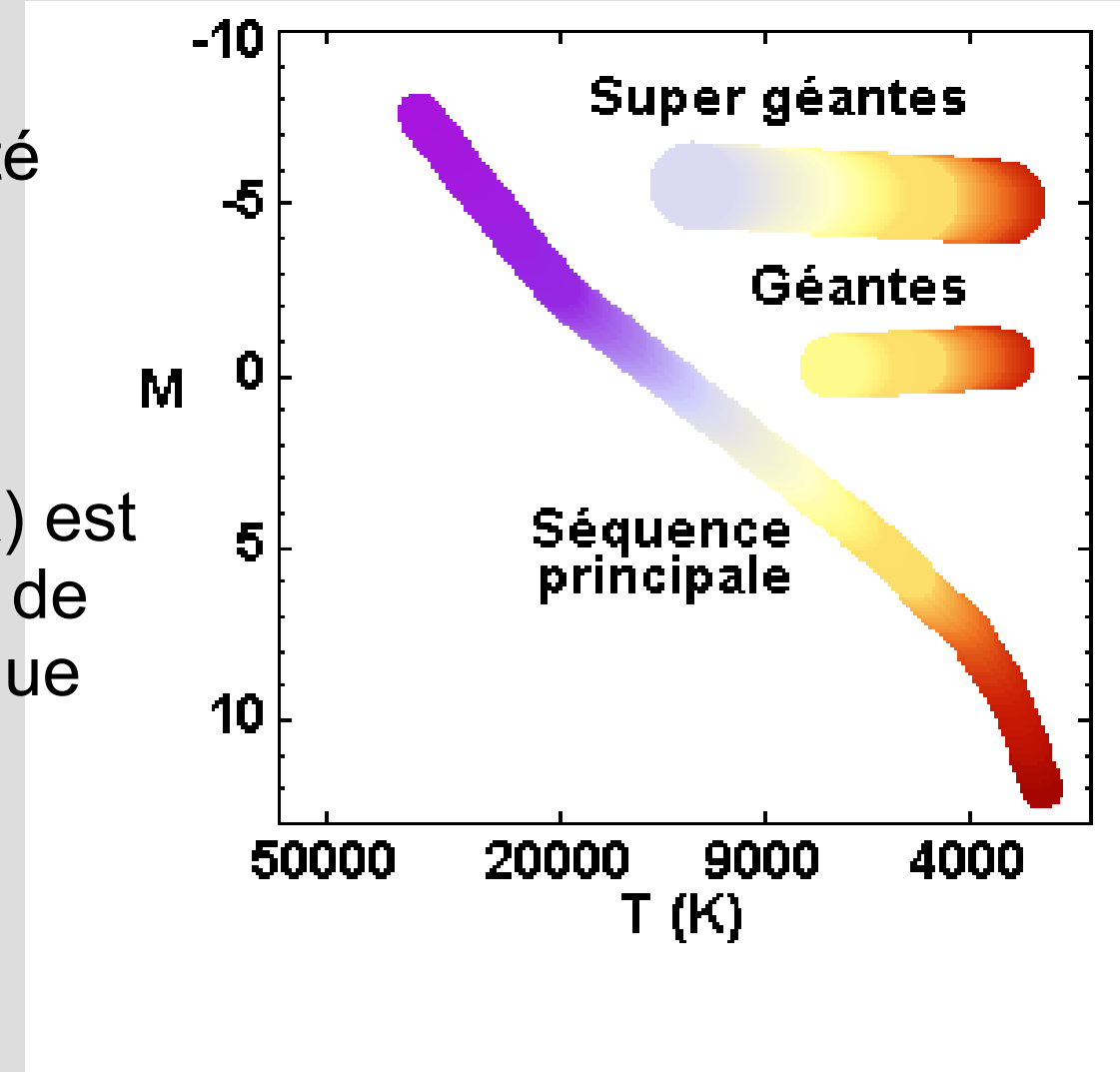
Classification des étoiles

- 1914 : l'astronome américain Henry Norris Russell construisait, indépendamment, un diagramme similaire en utilisant un échantillon d'étoiles dont il connaissait la magnitude absolue (grâce à leur parallaxe)



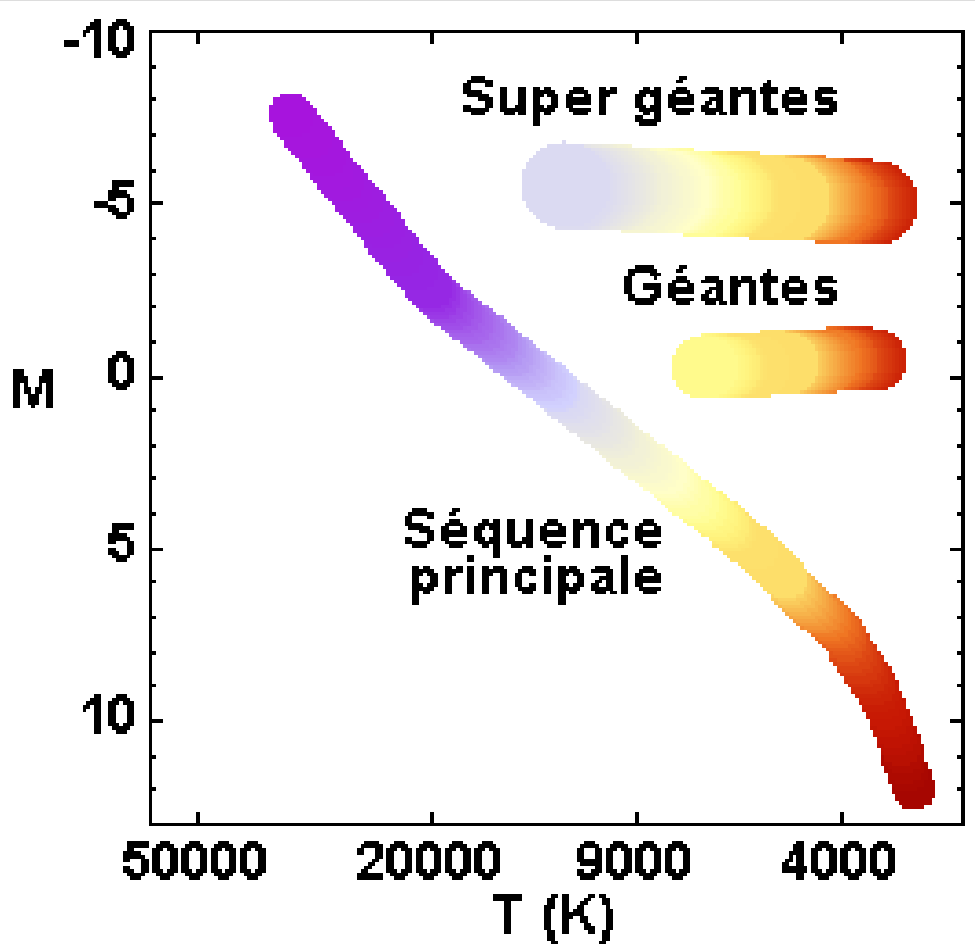
Classification des étoiles : Diagramme HR

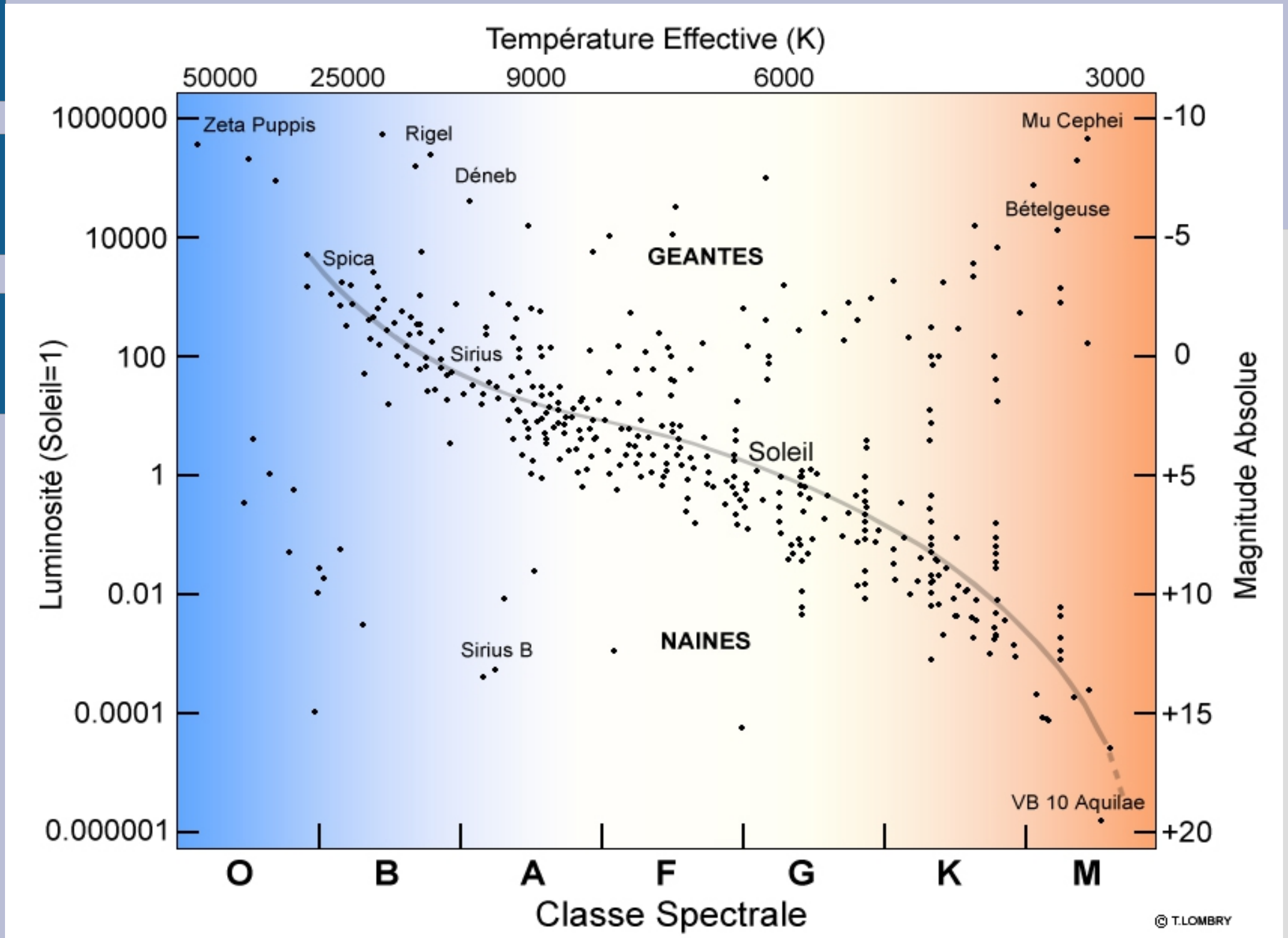
- Mise en évidence d'une relation entre la luminosité intrinsèque et la T_{eff} des étoiles.
- Le diagramme de Hertzsprung-Russell (HR) est fondamental pour l'étude de l'évolution et de la physique stellaire.



Classification des étoiles : Diagramme HR

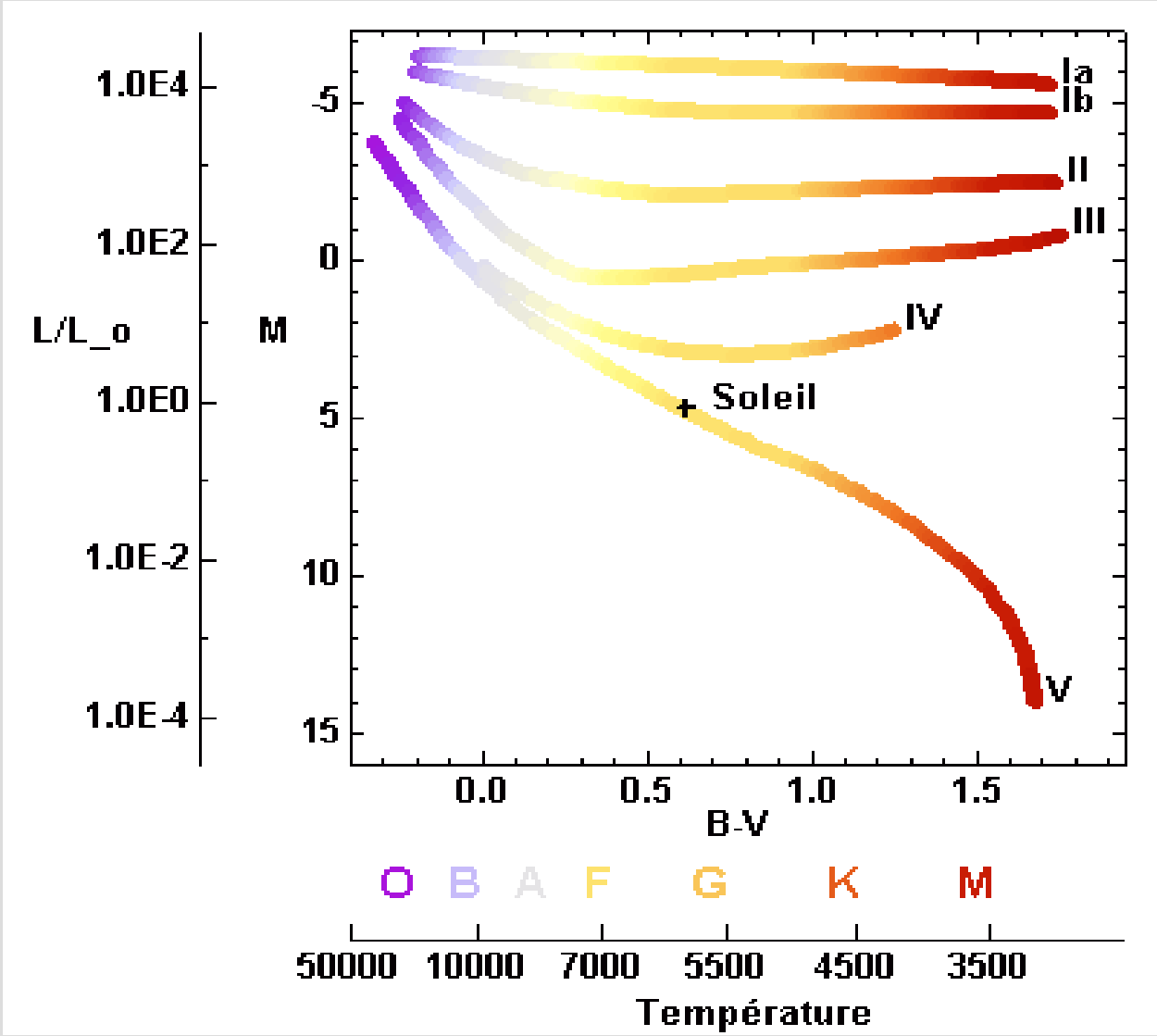
- Séquence principale : bande diagonale s'étirant des étoiles lumineuses et chaudes (bleues) vers les étoiles peu brillantes et froides (rouges)
- En dessous : étoiles chaudes mais très peu lumineuses, les naines blanches.
- Branches des géantes et des supergéantes




Température Effective (K)
50000
25000
9000
6000
3000
1000000
10000
100
1
0.01
0.0001
0.000001
Luminosité (Soleil=1)
-10
-5
0
+5
+10
+15
+20
Magnitude Absolue
Zeta Puppis
Rigel
Déneb
Mu Cephei
Bételgeuse
Spica
GEANTES
Sirius
Soleil
NAINES
Sirius B
VB 10 Aquilae
O
B
A
F
G
K
M
Classe Spectrale
© T.LOMBRY

Classification des étoiles : Diagramme HR

- Les classes de luminosité dans le diagramme HR.



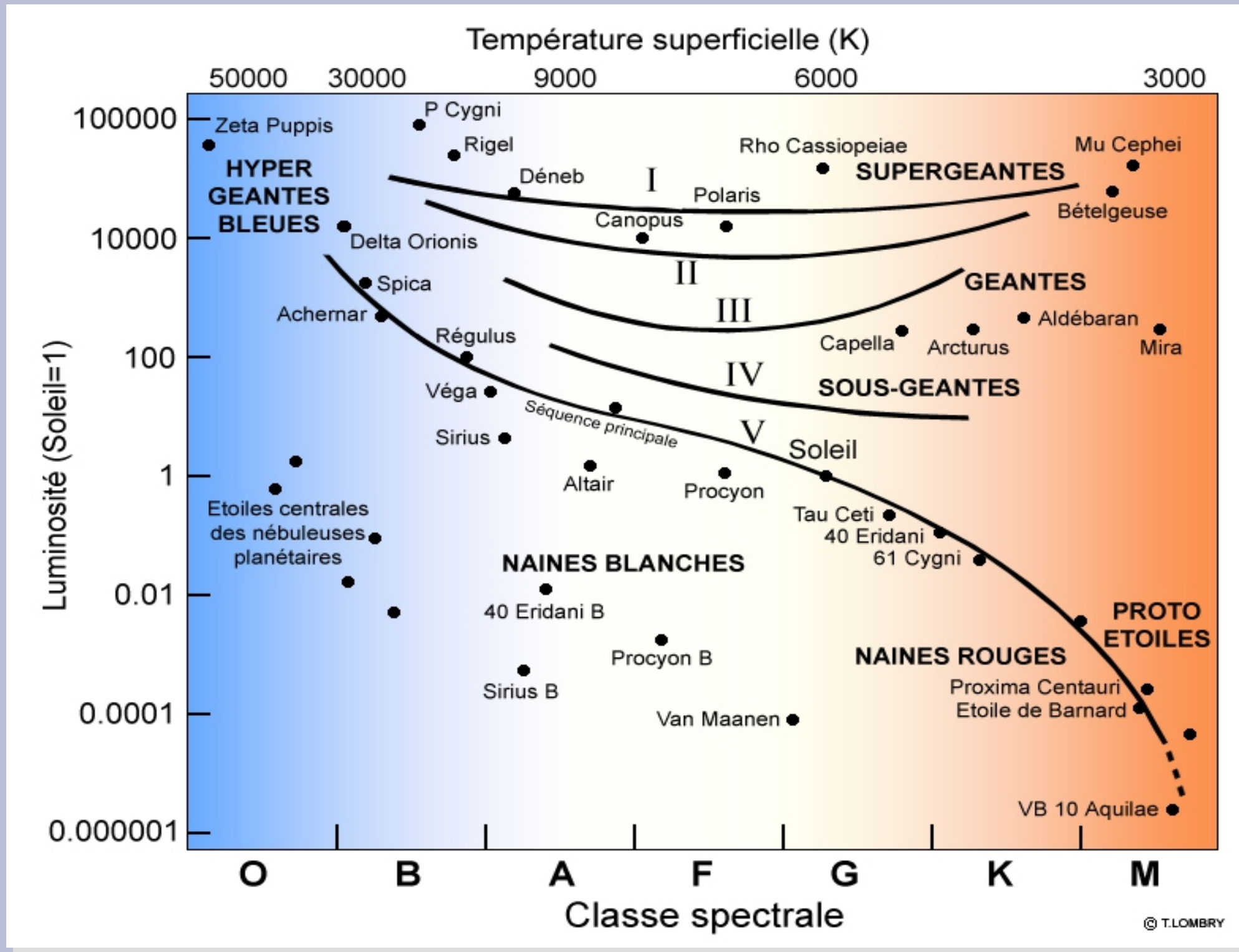

Température superficielle (K)
50000
30000
9000
6000
3000
Luminosité (Soleil=1)
100000
10000
100
1
0.01
0.0001
0.000001
Zeta Puppis
P Cygni
Rigel
Déneb
Rho Cassiopeiae
Mu Cephei
HYPER GEANTES BLEUES
I
SUPERGEANTES
Polaris
Bételgeuse
Canopus
Delta Orionis
II
Spica
GEANTES
III
Achernar
Aldébaran
Régulus
Capella
Arcturus
Mira
IV
SOUS-GEANTES
Véga
Séquence principale
V
Sirius
Soleil
Altair
Procyon
Etoiles centrales des nébuleuses planétaires
Tau Ceti
40 Eridani
61 Cygni
NAINES BLANCHES
40 Eridani B
PROTO ETOILES
Procyon B
NAINES ROUGES
Proxima Centauri
Etoile de Barnard
Sirius B
Van Maanen
VB 10 Aquilae
O
B
A
F
G
K
M
Classe spectrale
© T.LOMBRY

Diagramme HR et Rayons des étoiles

- $\boldsymbol{L} = \sigma \mathbf{T_{eff}}^4 \times 4\pi \boldsymbol{R}^2$
- Si $L_1 = L_2$, alors $R_1/R_2 = (T_{eff\ 1} / T_{eff\ 2})2$

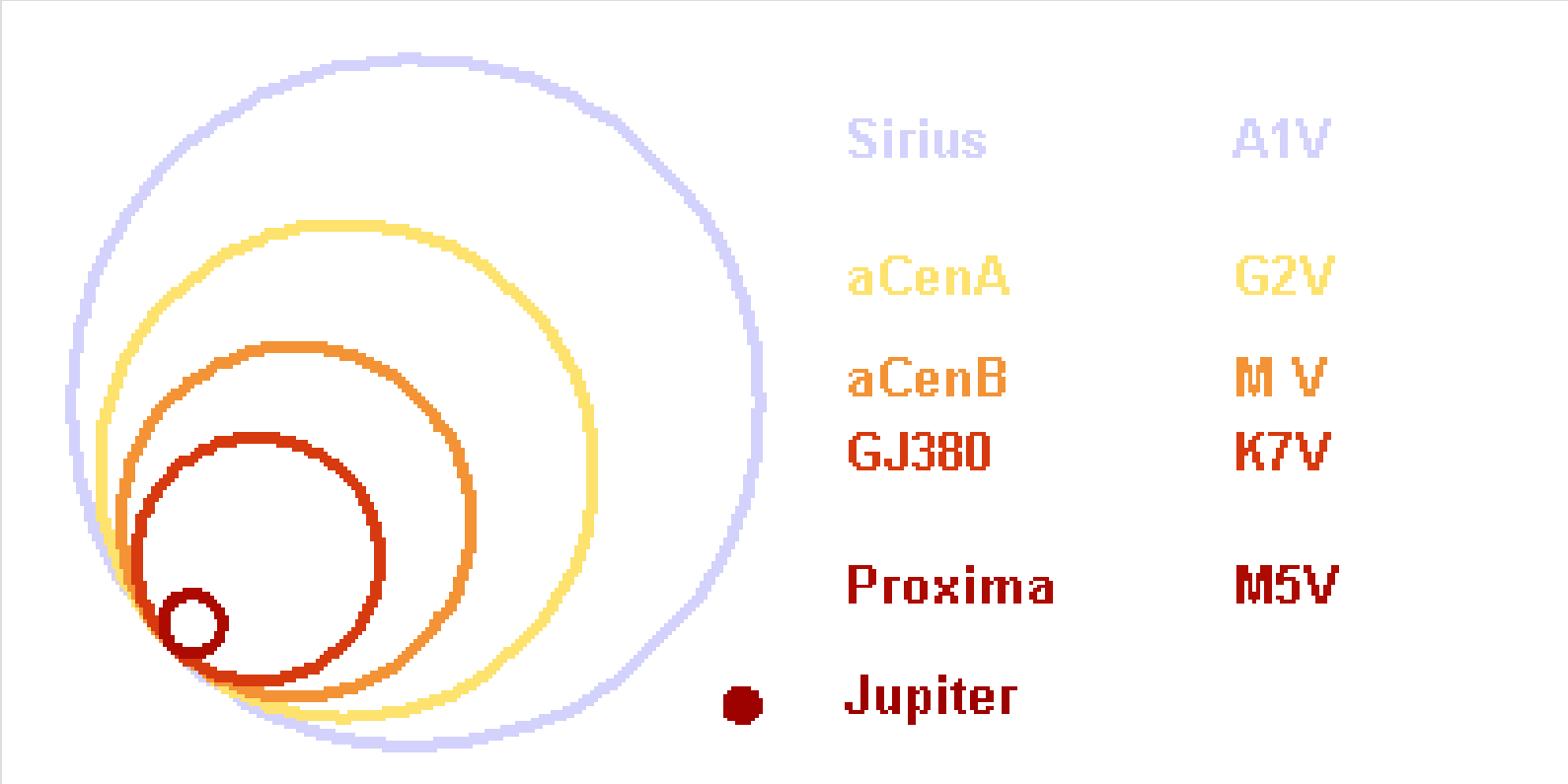
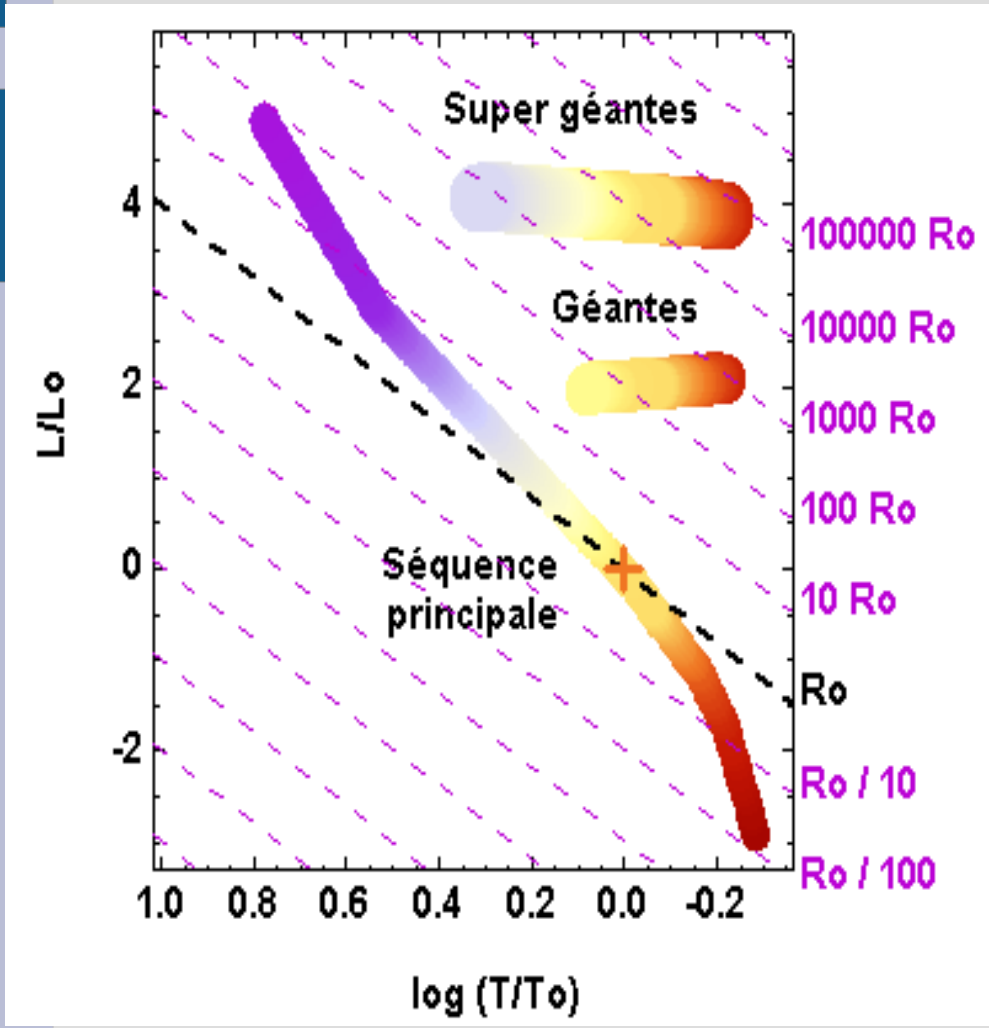


Diagramme HR et Rayon des étoiles



- $L \sim T_{eff}^{4} R^{2}$
- $\log L = 2\log R + 4\log T_{eff}$
- Pour R fixé (courbes d'iso-rayons) :

$$Y = 4X + Cte$$

Diagramme HR et Age des étoiles

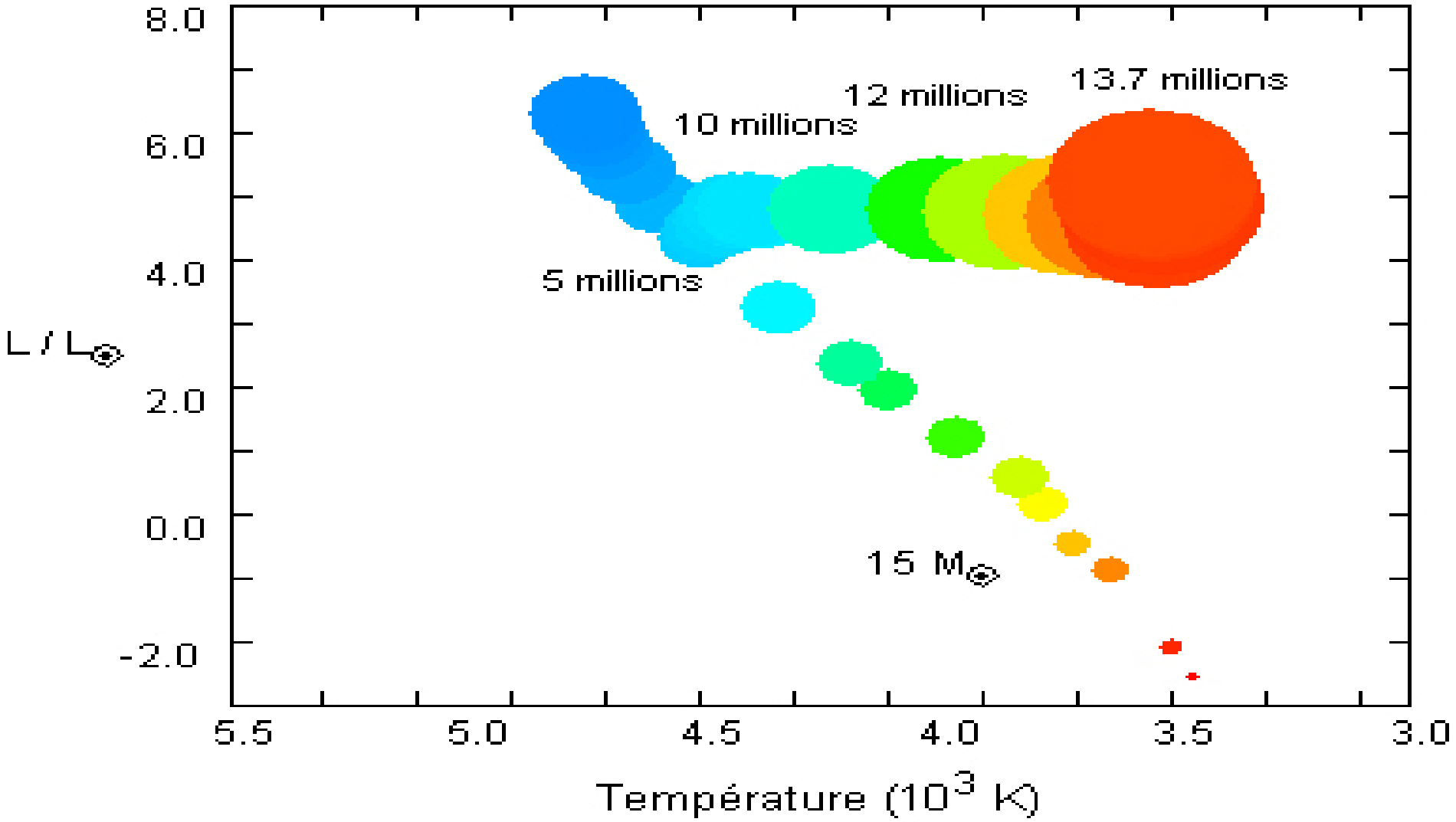
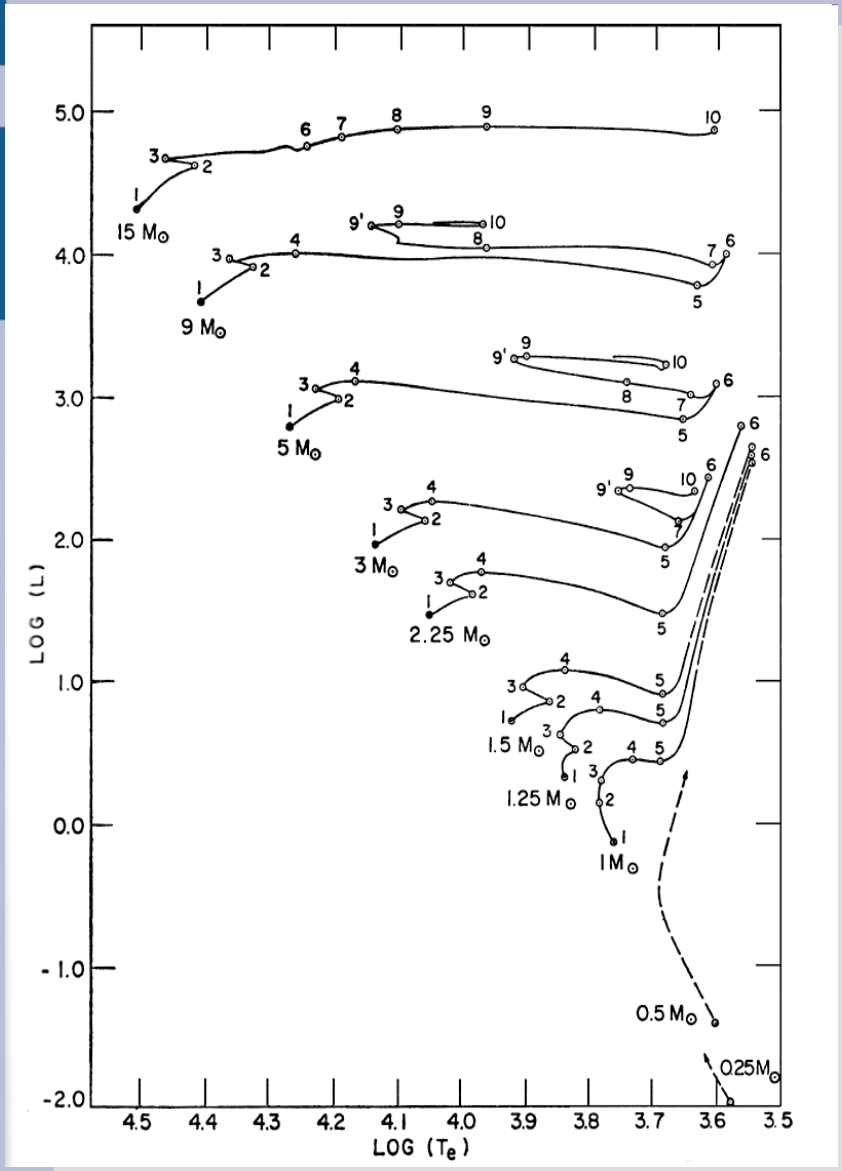
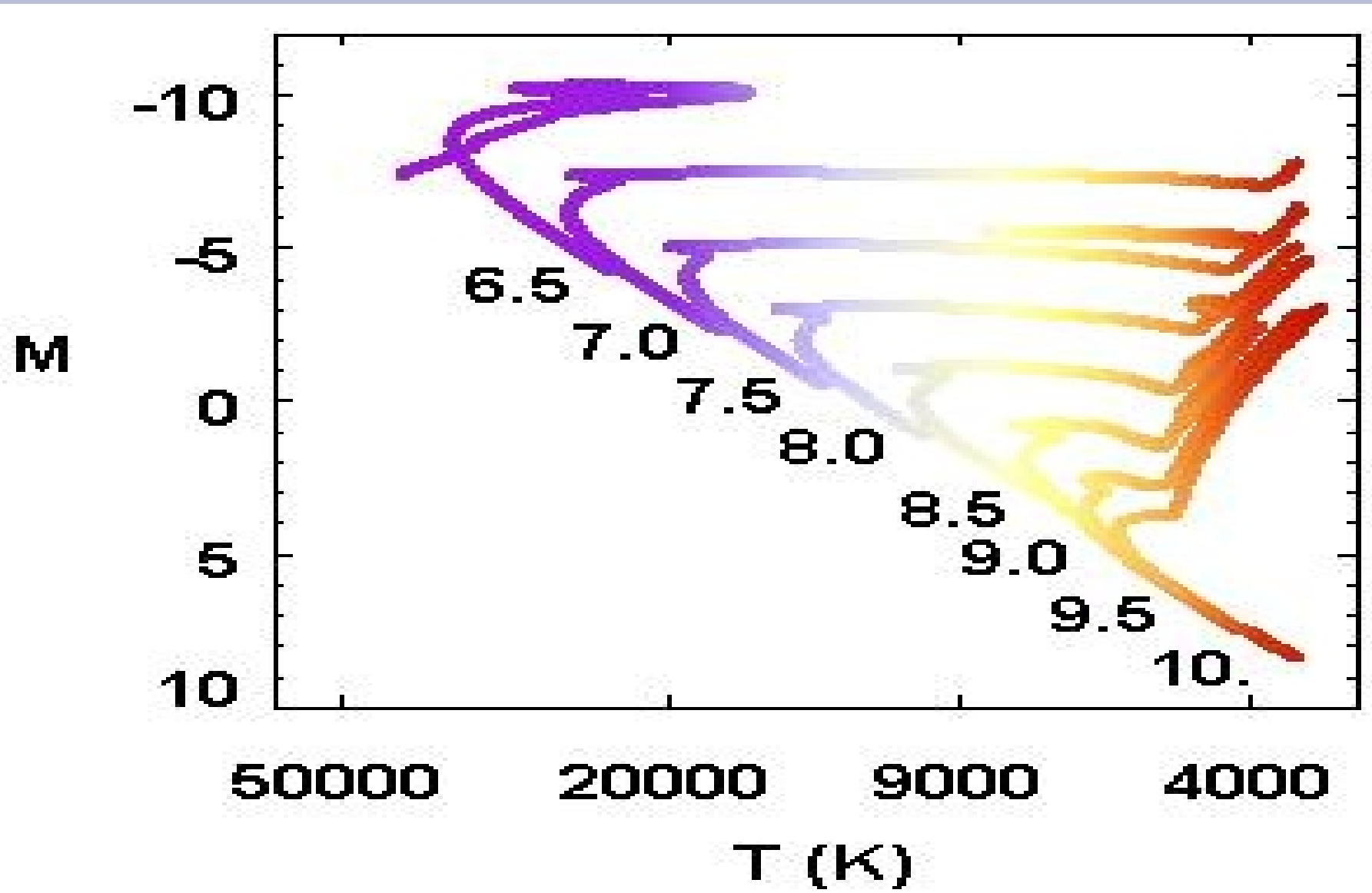


Diagramme HR et Age des étoiles

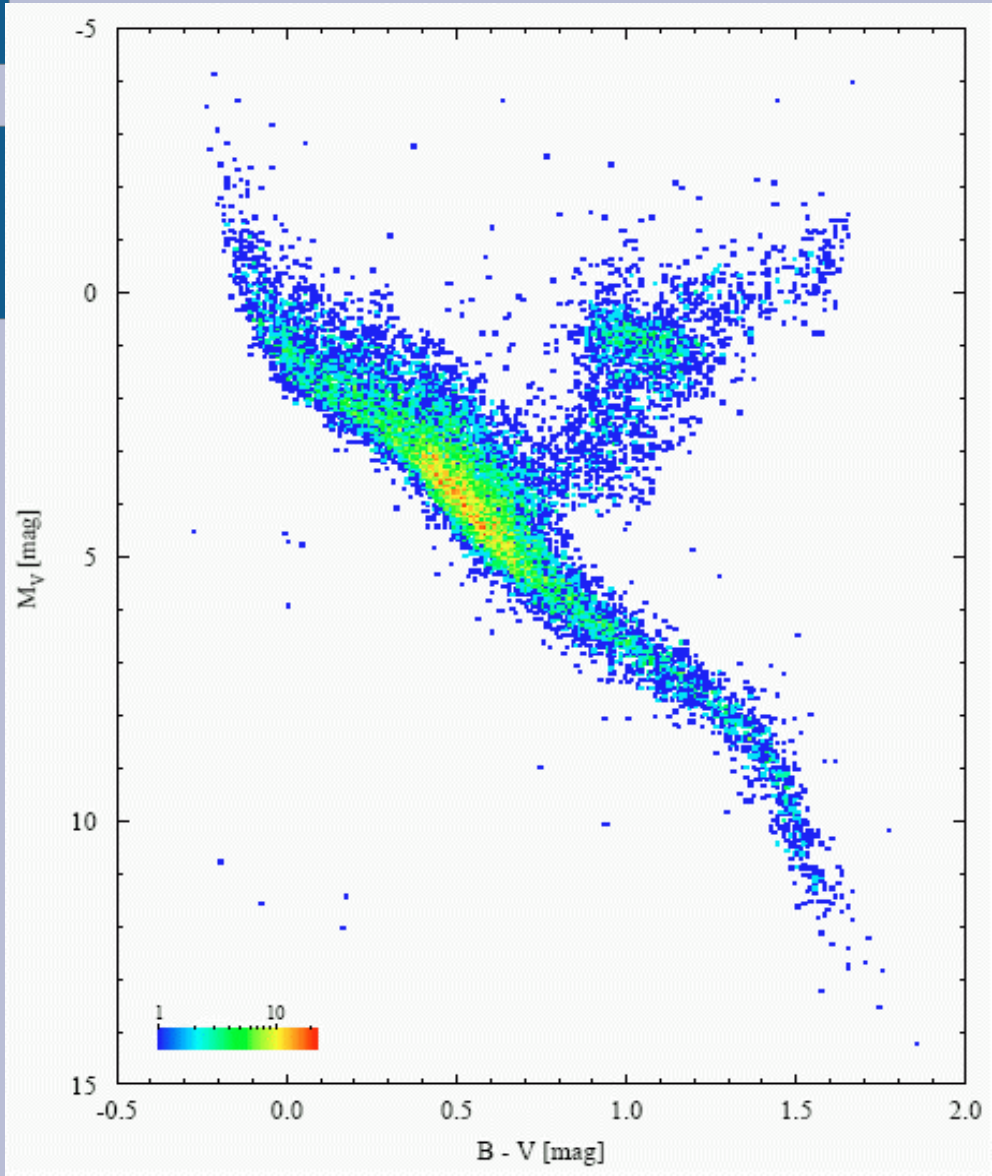


- L'évolution d'une étoile dépend essentiellement de sa masse et de sa composition chimique initiale.
- 1 M_0 : 10 milliards d'années sur la séquence principale
- 0.1 M_0 : 20 à 30 milliards d'années
- 50 M_0 : quelques millions d'années

Diagramme HR et Age des étoiles

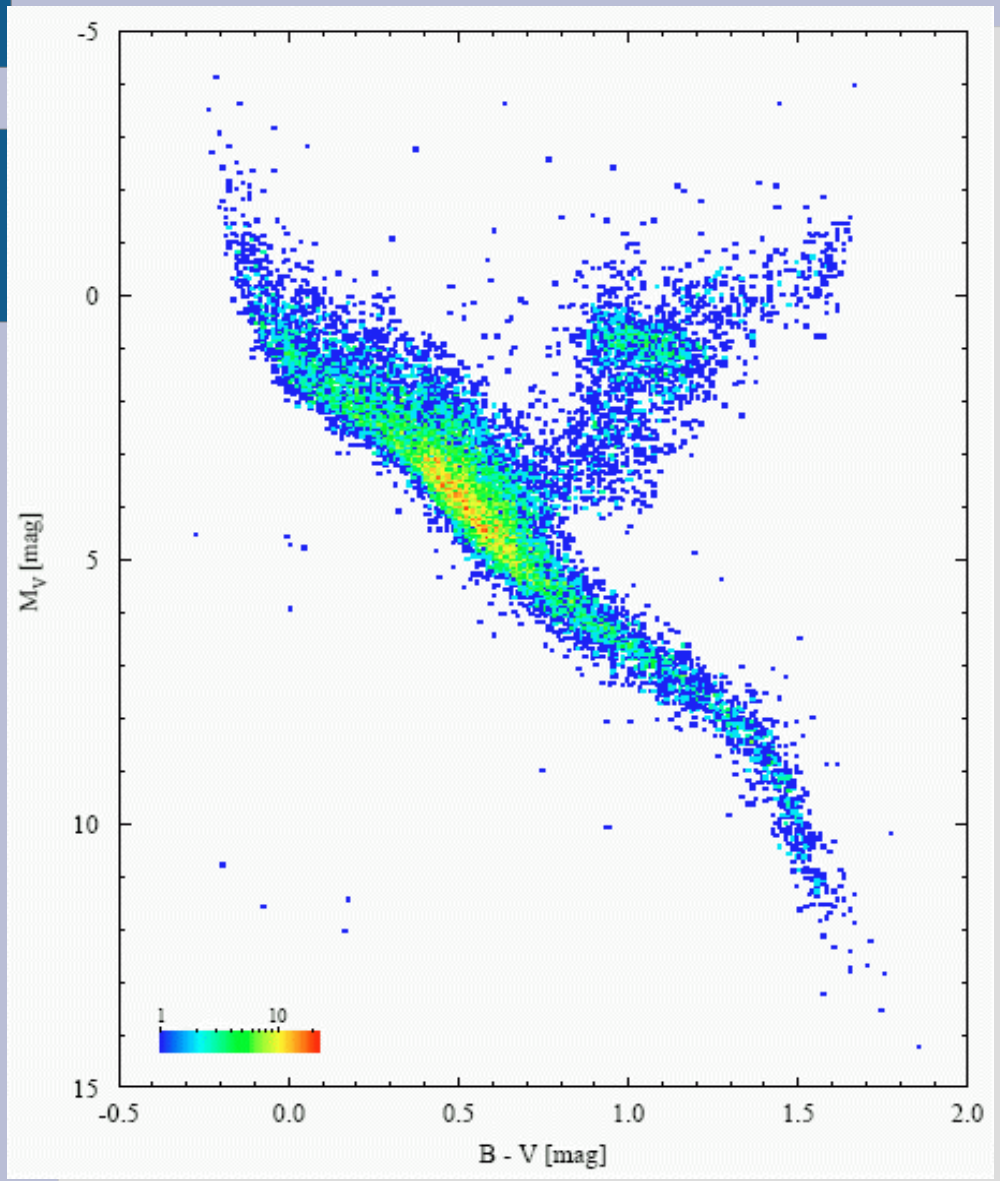


Classification des étoiles : Diagramme HR



- Diagramme HR des étoiles les plus proches du Soleil (*d* < 1kpc)
- Distance connue par parallaxe (Hipparcos)

Classification des étoiles : Diagramme HR



- **Séquence principale** : étoiles de classe V

  Dans le cœur : H -> He

  Les étoiles justes formées sont situées sur l'extrémité inférieure de la séquence.

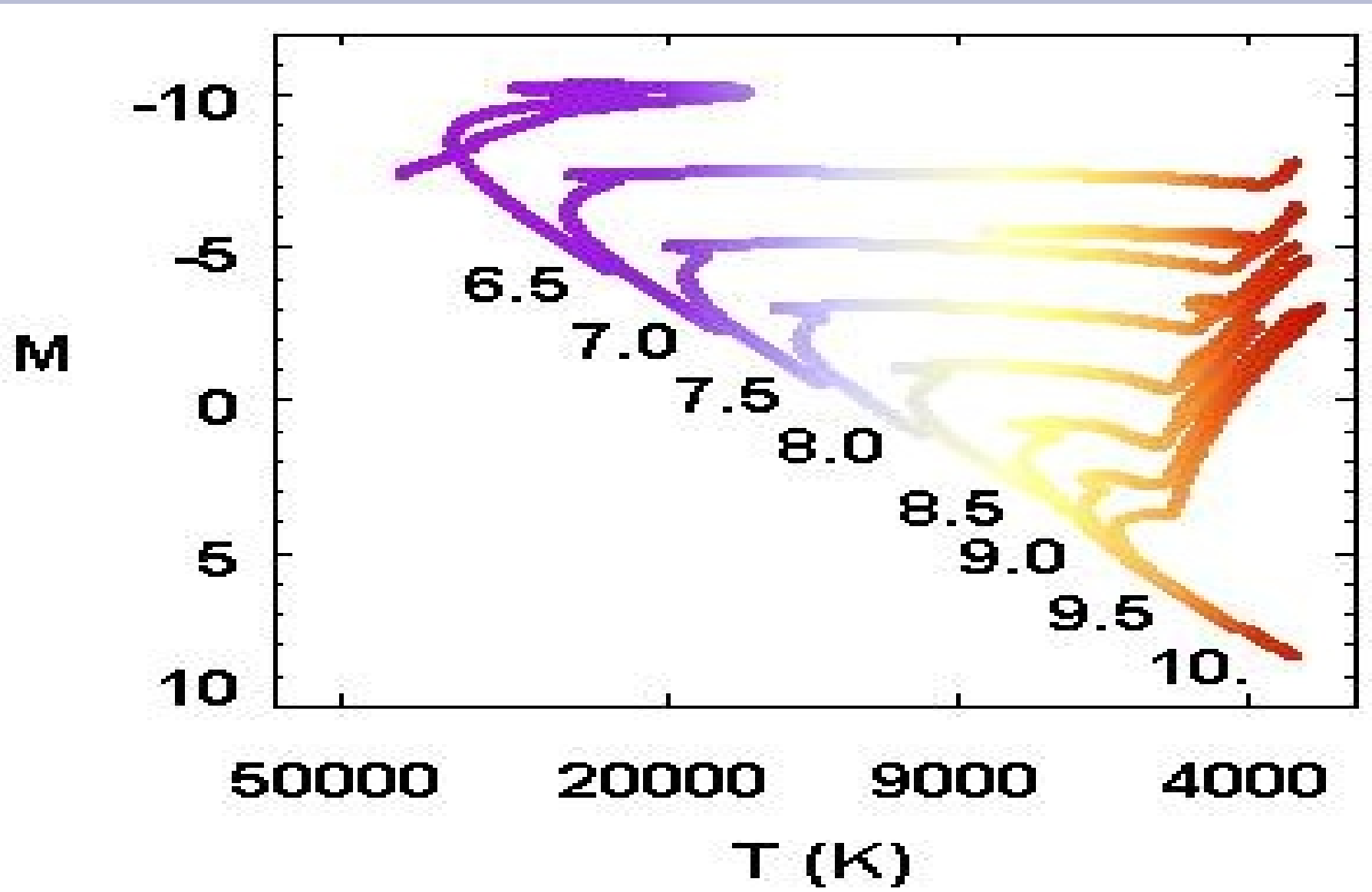
Classification des étoiles : Diagramme HR et âge des amas

- Amas d'étoiles : toutes se trouvent à la même distance

  => Diagramme couleur-magnitude apparente
- Toutes les étoiles ont le même âge
- Les étoiles les plus massives (chaudes) ont déjà quitté la séquence principale

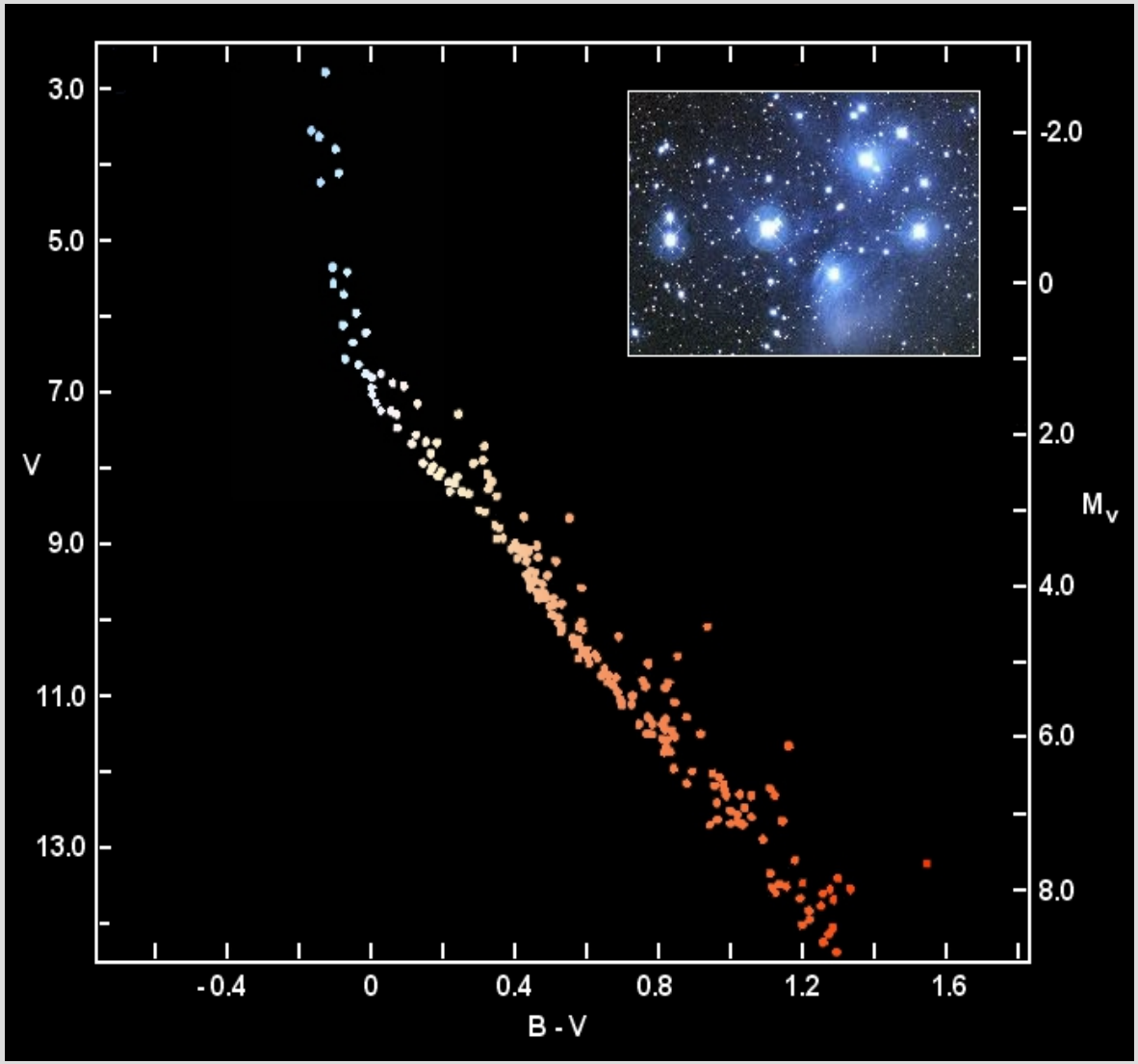
  => possibilité de dater un amas d'étoiles

Classification des étoiles : Diagramme HR et âge des amas

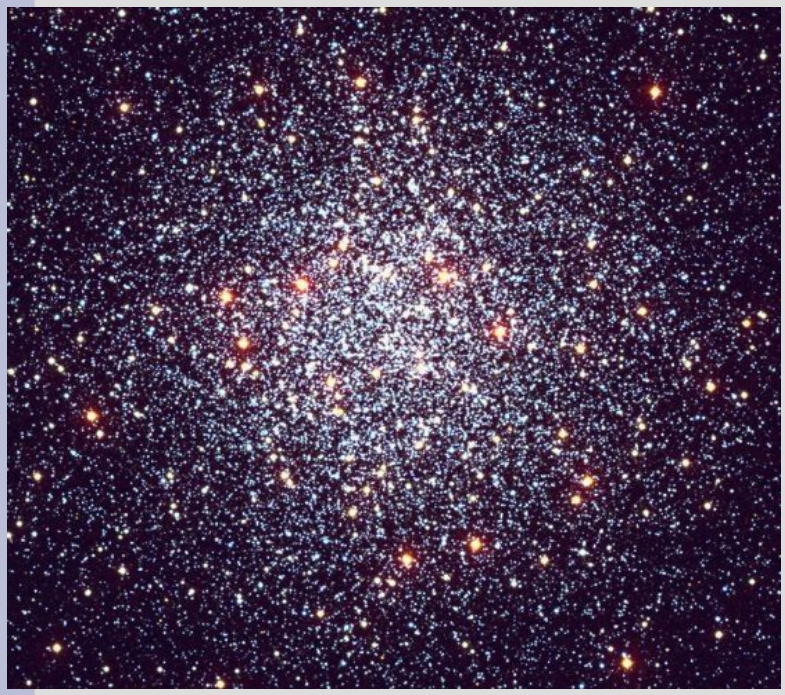


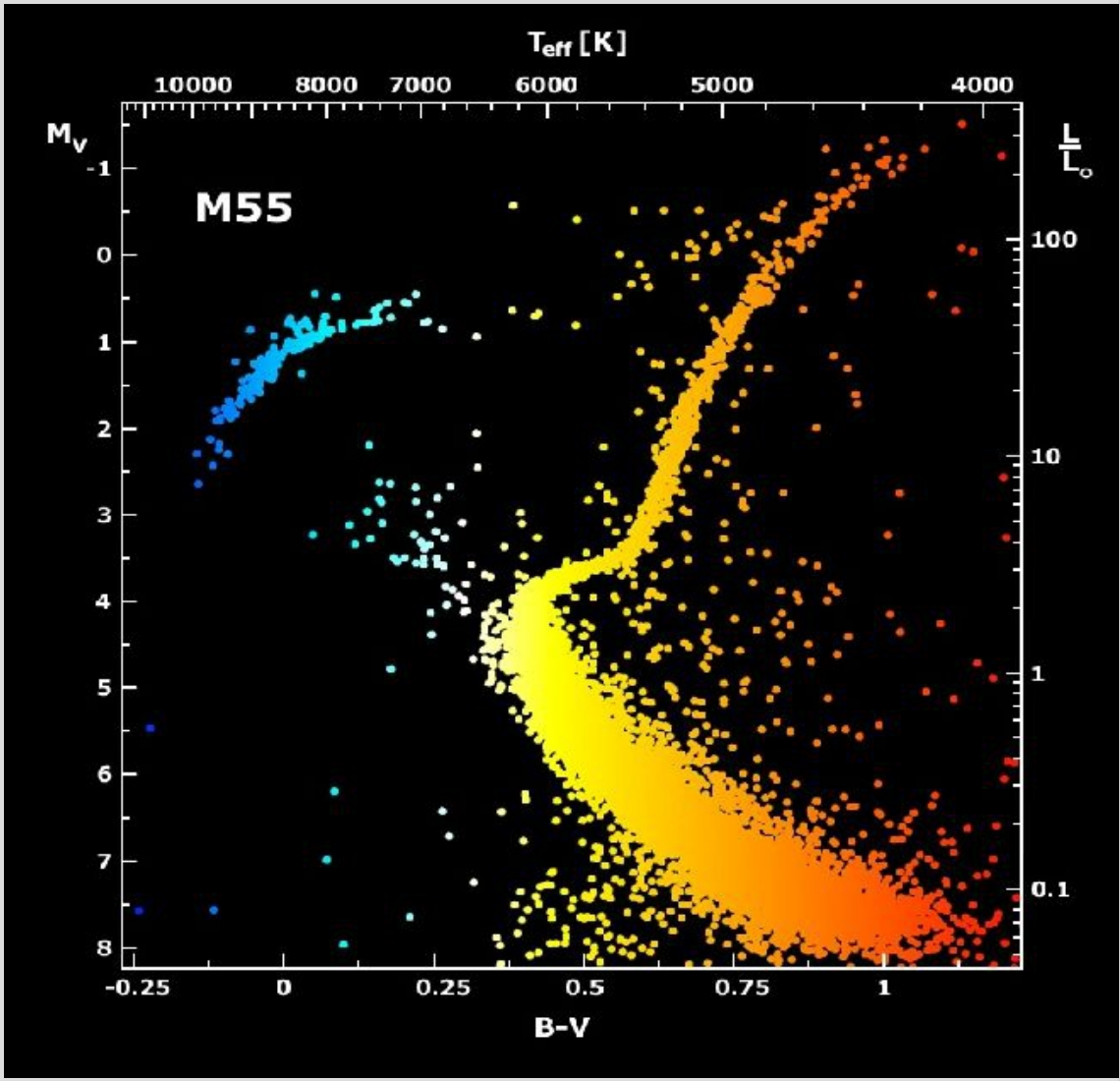
Classification des étoiles : Diagramme HR et âge des amas

- Amas ouvert des Pleiades
- d = 135 pc
- Age ~ 80 x10^6 ans



Classification des étoiles : Diagramme HR et âge des amas





- Amas Globulaire M55
- *d* = 5.3kpc
- Age ~ 14×10^9ans

Magnitudes et Classification des étoiles

FIN

- Piquer qq transparents dans cours 1er Philippe Mathias