

# ***ASTROPHYSIQUE***

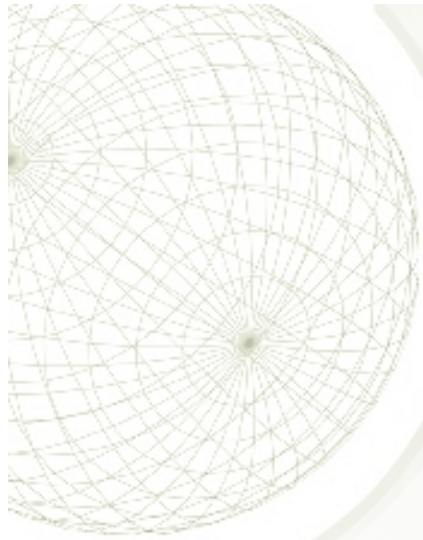
## **1 1 – LES ÉTOILES**



Alain Bouquet

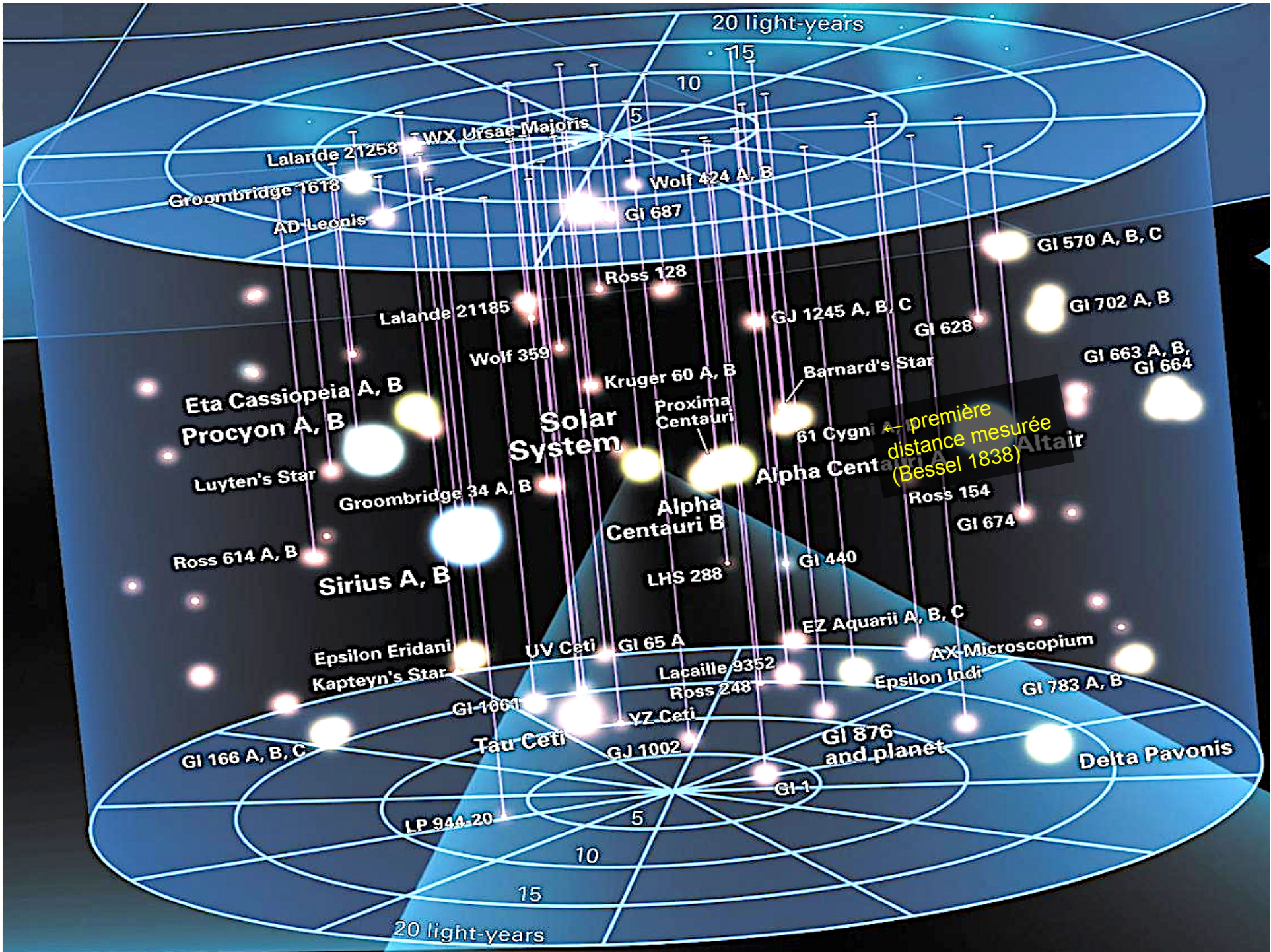
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie  
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



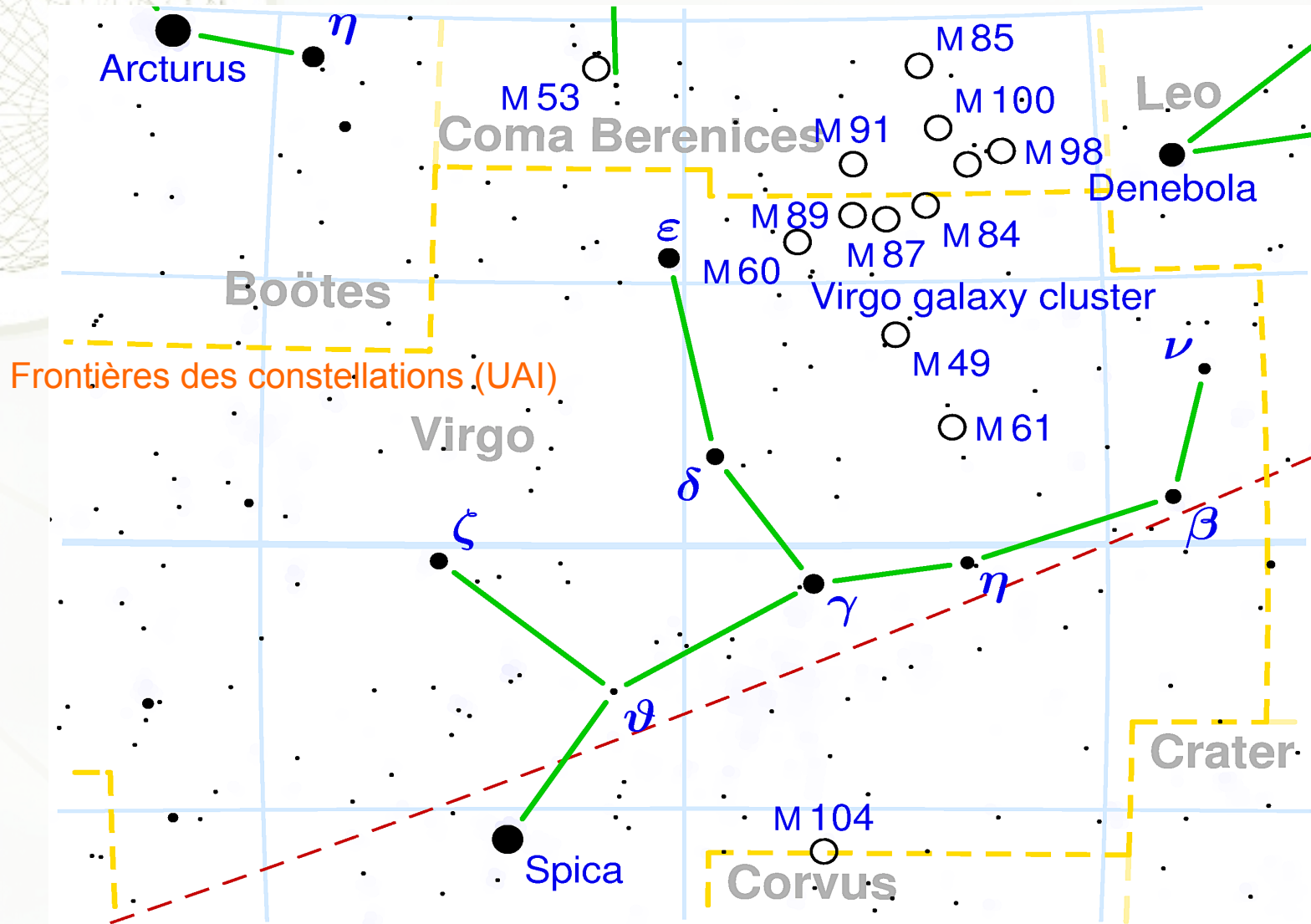


# UNE CARTE DES ÉTOILES



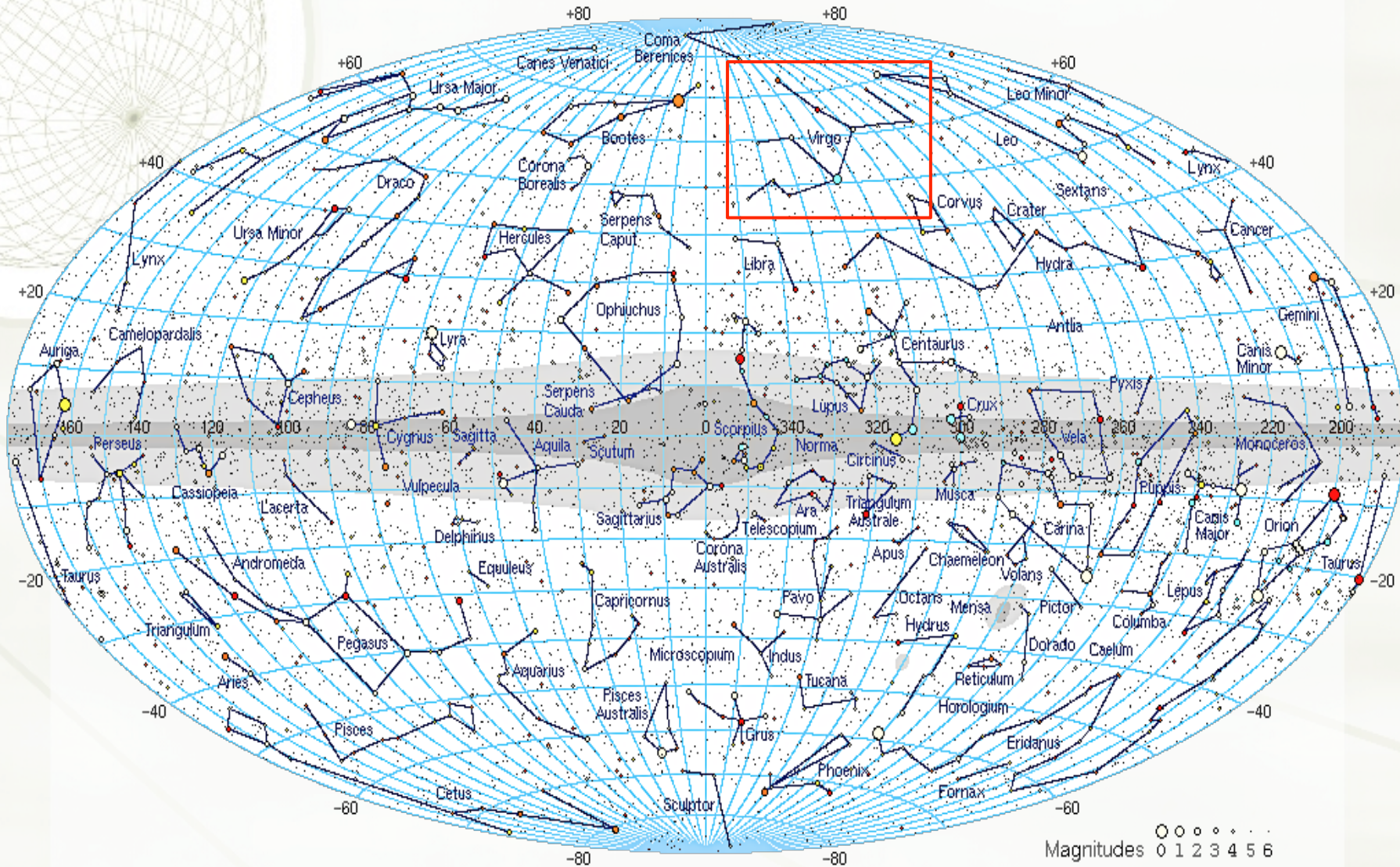


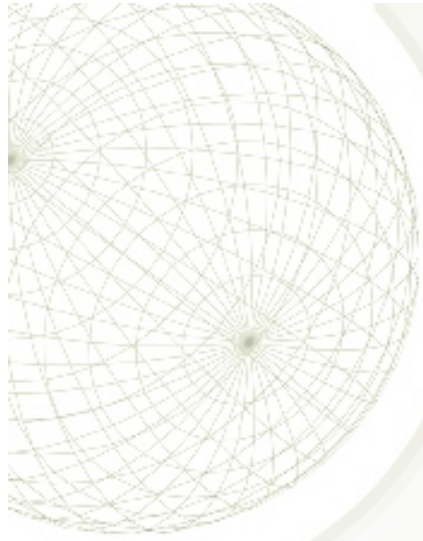
# LA CONSTELLATION DE LA VIERGE (VIRGO)





# LES 88 CONSTELLATIONS

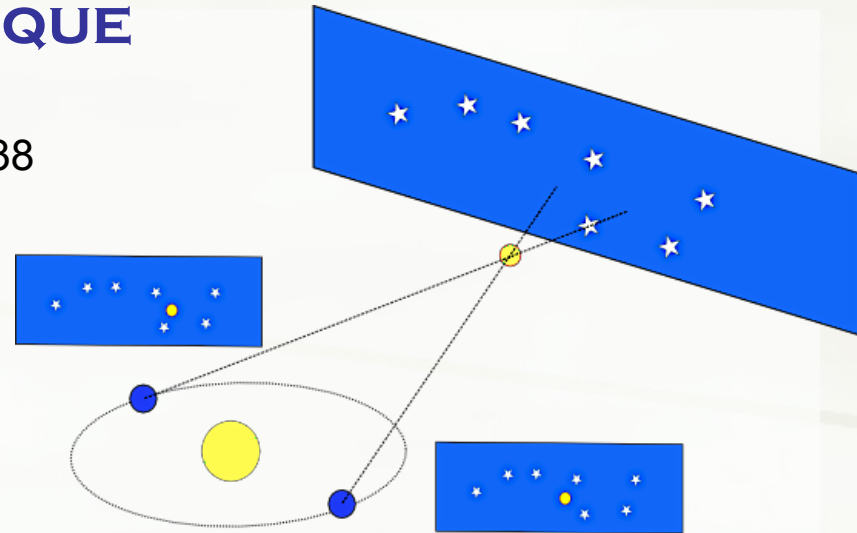




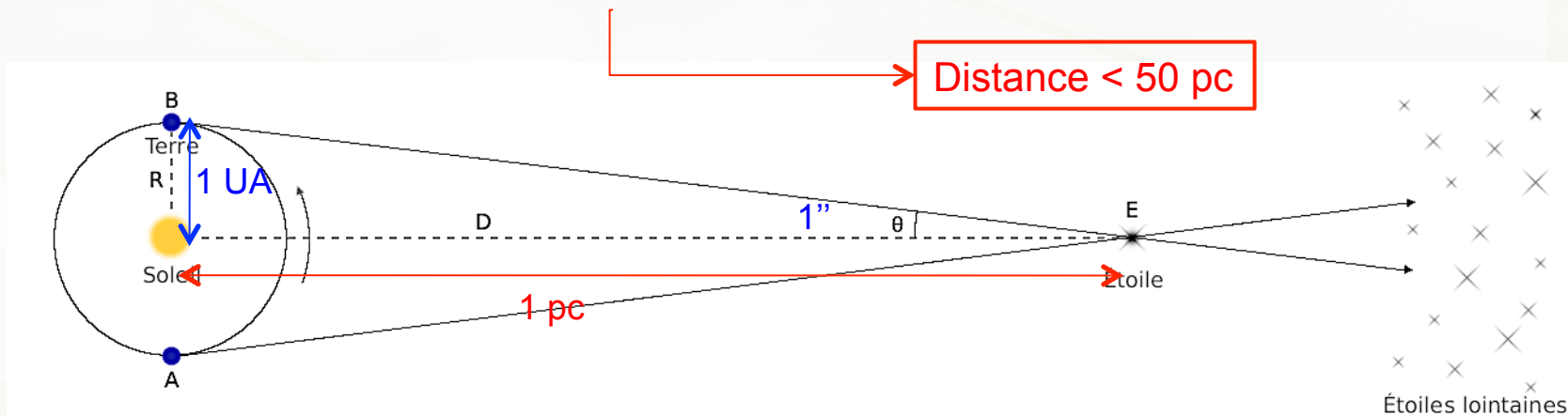
# **DISTANCES & LUMINOSITÉS**

# PARALLAXE TRIGONOMÉTRIQUE

- Première mesure : Friedrich Bessel en 1838



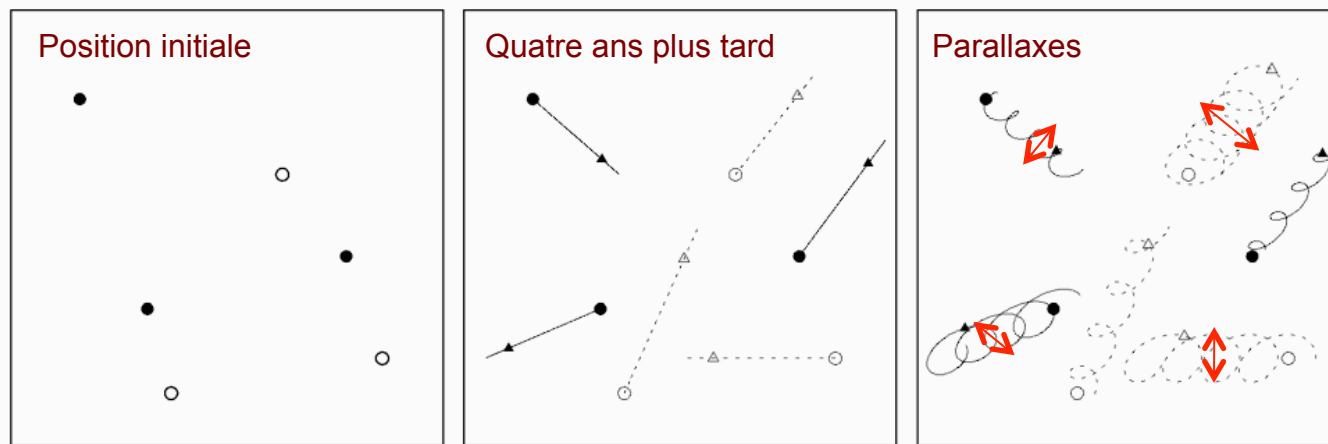
- Mais le déplacement  $< 1''$
- Définition : distance de 1 parsec  $\Leftrightarrow$  parallaxe de  $1''$
- Une seconde d'arc =  $1^\circ/3600$  : une tête d'épingle à 100 m
- Limite de précision (au sol)  $\sim 1/50$  de seconde d'arc  $\rightarrow$  8 000 étoiles vers 1990





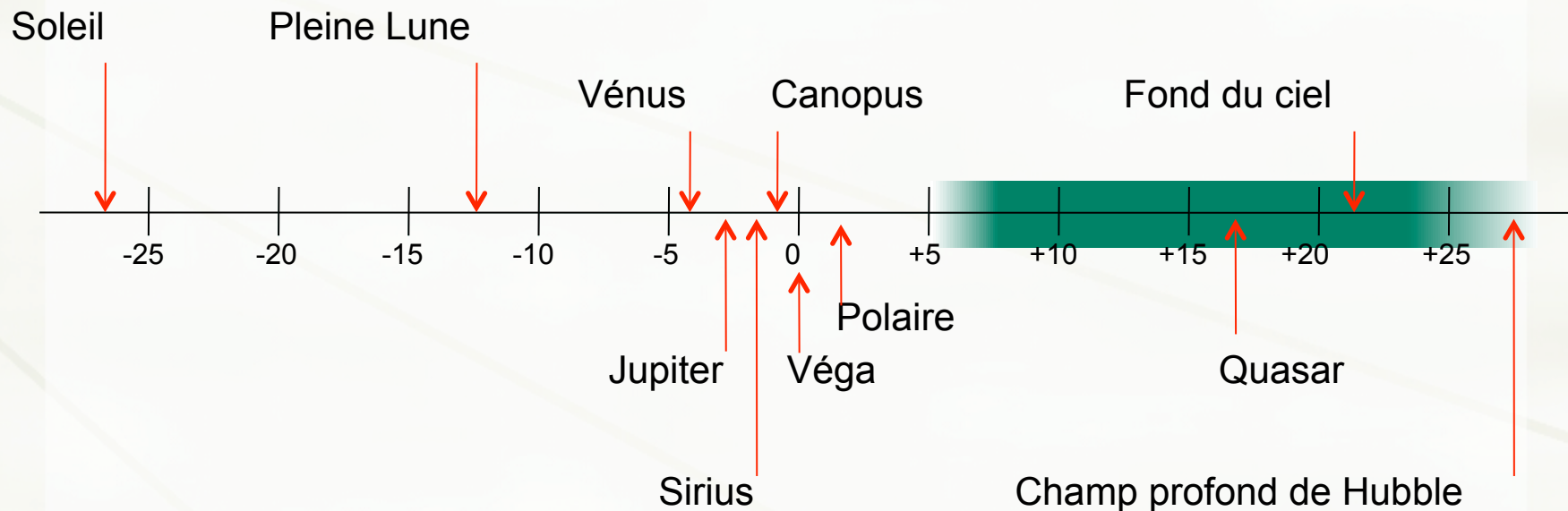
## LE SATELLITE HIPPARCOS

- Hipparque de Nicée (-190, -120) établit les dimensions et les distances de la Lune et du Soleil, ainsi qu'un catalogue donnant les positions et l'éclat de plusieurs milliers d'étoiles
- Le satellite *Hipparcos* (*High Precision PARallax COllecting Satellite*) de l'ESA mesura de 1989 à 1993 les positions de 118 000 étoiles avec une précision de 2 mas (*millisecondes d'arc*) → distances < 500 pc
- Il mesura aussi les positions de 2 500 000 étoiles avec une précision de 20 mas (catalogue *Tycho*)
- De 2013 à 2017, *Gaia* de l'ESA devrait cataloguer 20 millions d'étoiles en 3D avec une précision de 7  $\mu$ as




# MAGNITUDES

- Hipparque (encore lui) avait classé l'éclat des étoiles en 6 catégories («grandeurs»)
  - Première magnitude : les étoiles les plus brillantes
  - Sixième magnitude : les étoiles à peine visibles à l'œil nu
- L'échelle a été étendue depuis aux objets invisibles à l'œil nu
- Certaines valeurs des magnitudes ont également été révisées



# MAGNITUDE, PHOTOMÉTRIE ET LUMINOSITÉ

- Bouguer (1729) : estimations quantitatives de la luminosité du Soleil et de la Lune
- Loi de Weber-Fechner (1860) : *la sensation varie comme le logarithme de l'excitation*
  - → notion de décibel
  - un écart de 10 décibels  $\Leftrightarrow$  écart d'intensité sonore (puissance) d'un facteur 10
  - un écart de 20 décibels  $\Leftrightarrow$  écart d'intensité sonore d'un facteur  $10^2 = 100$
  - un écart de 30 décibels  $\Leftrightarrow$  écart d'intensité sonore d'un facteur  $10^3 = 1000$
- Un écart de 5 magnitudes  $\Leftrightarrow$  facteur 100 en intensité lumineuse (Pogson 1856)
  - $\Rightarrow$  1 magnitude  $\Leftrightarrow 100^{1/5} = 2,511886\dots$
-  redéfinition

Magnitude

$$m = -2,5 \log_{10} (\text{flux lumineux}) + \text{cte}$$

watts/m<sup>2</sup>

- Zéro des magnitudes
  - Étoile polaire ( $\alpha$  UMi)  $m = 2$  malheureusement variable de  $\pm 8\%$  sur 4 jours (Céphéide Pop I)
  - Véga ( $\alpha$  Lyr)  $m = 0$



# MAGNITUDE ABSOLUE

- Plus une étoile est éloignée et plus le flux lumineux reçu est réduit

$$F = F_0/D^2$$

- Conventionnellement, la magnitude absolue  $M$  d'une étoile est la magnitude apparente  $m$  qu'elle aurait **si elle était à 10 pc de l'observateur**

$$M = m - 5 \log_{10} \{D/10\text{pc}\}$$

-  « module de distance »  $M - m$

2,5 de la définition des magnitudes comme  $2,5 \log\{\text{flux}\}$   
2 de la variation du flux avec la distance en  $1/D^2$

- Distance et magnitude apparente connues  $\rightarrow$  magnitude absolue, propriété **intrinsèque** de l'étoile

- Soleil : distance 1 UA =  $1/206\,000$  pc et  $m = -26,74$   $\Rightarrow M_V = 4.83$
- Sirius :  $D = 2,6371$  pc (Hipparcos) et  $m = -1,44$   $\Rightarrow M = 1,45$  (OK type spectral)

- Magnitudes absolue **et** apparente connues  $\Rightarrow$  distance « photométrique » de l'étoile

- Bételgeuse :  $m = 0,42$  et  $M = -6,05$  (type spectral)  $\Rightarrow$  distance 197 pc (OK parallaxe 5,1 mas)

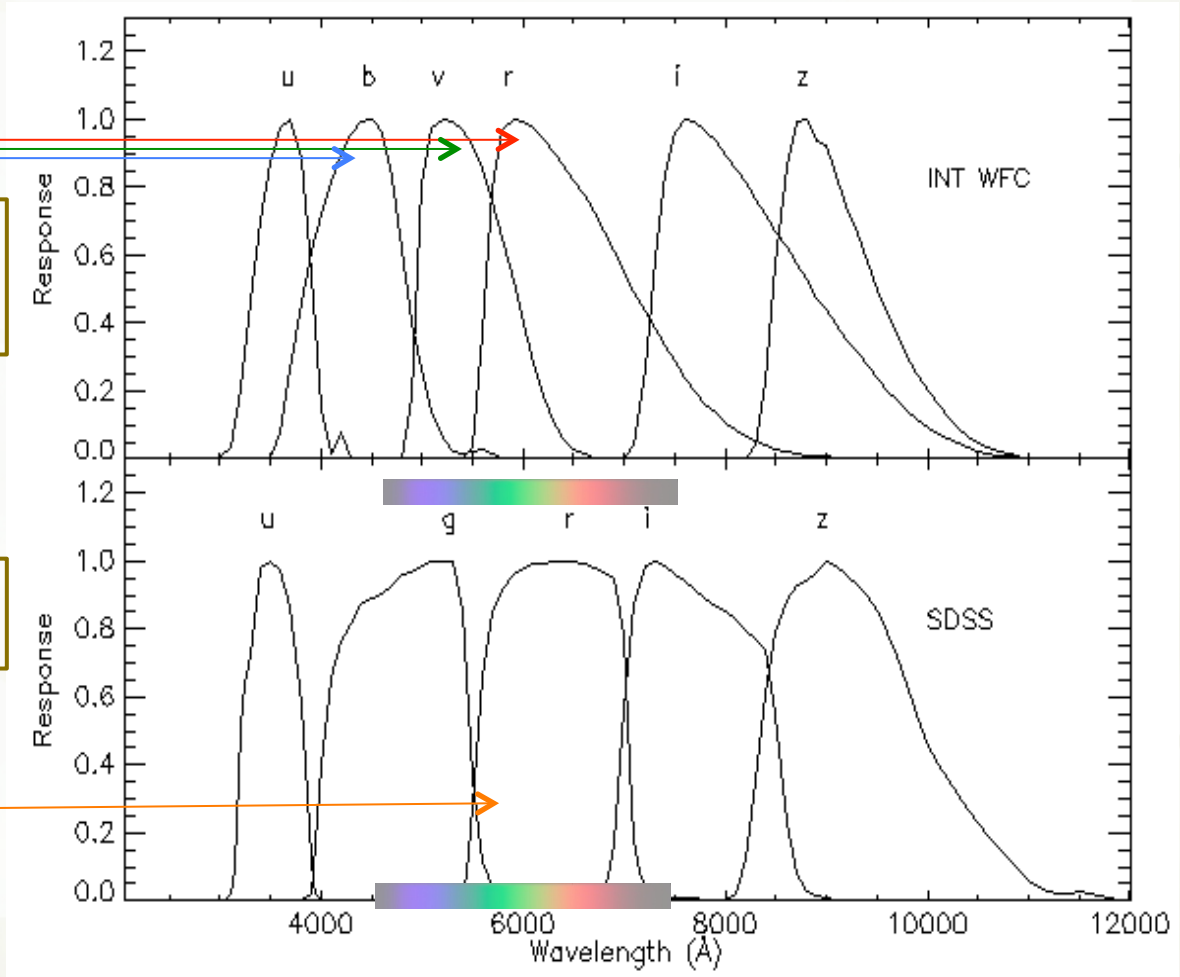
# FILTRES, BANDES PASSANTES, ETC.

- Magnitude **bolométrique** : énergie totale reçue de l'étoile (à toutes les longueurs d'onde)
- Magnitudes **B, V, R, I** : énergie reçue dans une bande passante (assez large en fait)

Une partie des filtres disponibles au télescope Isaac Newton aux Canaries

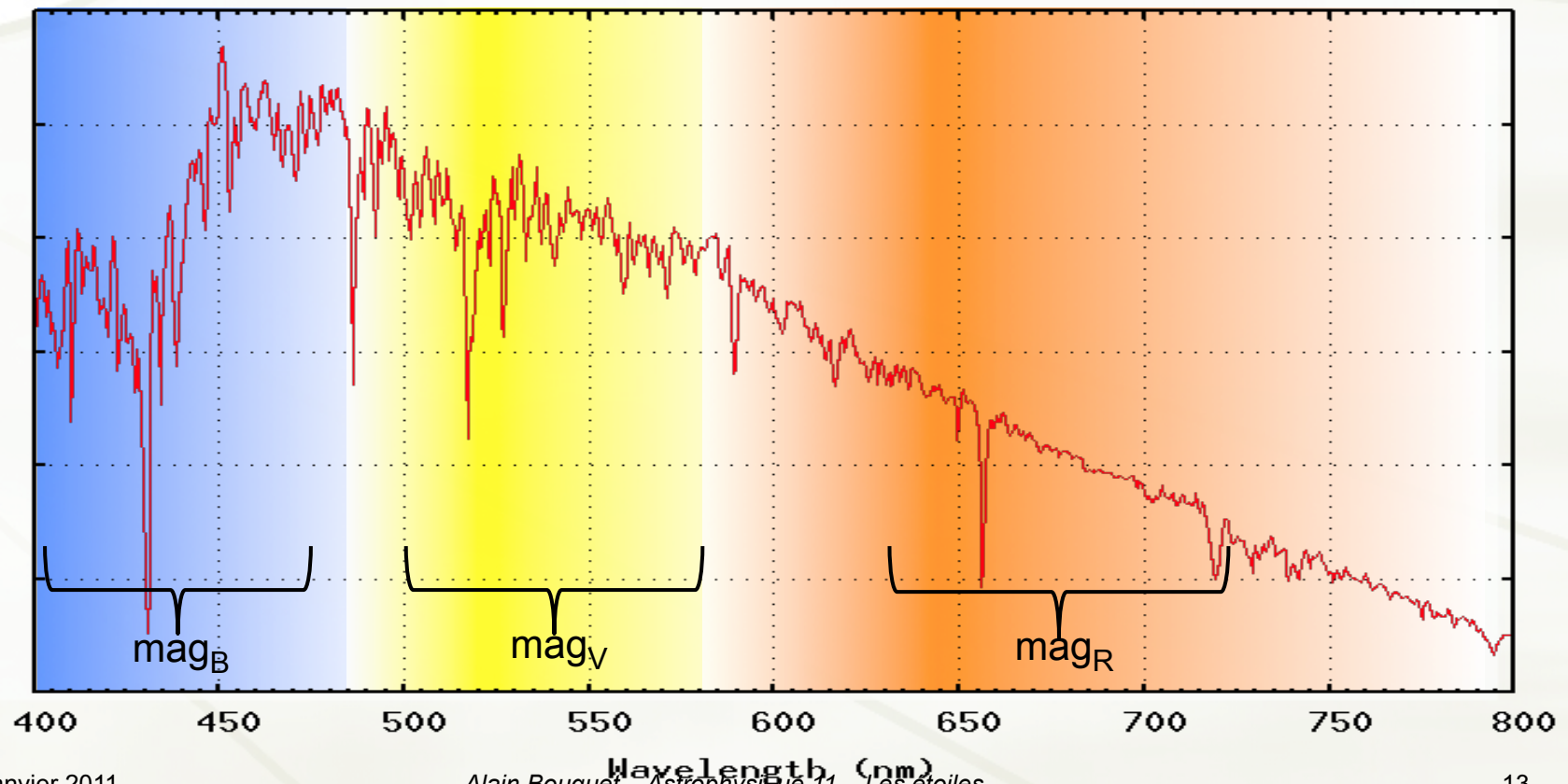
Les filtres de base du Sloan Digital Sky Survey (APO)

1 - Plus rectangulaires  
2 - Évitent ± les raies atmosphériques

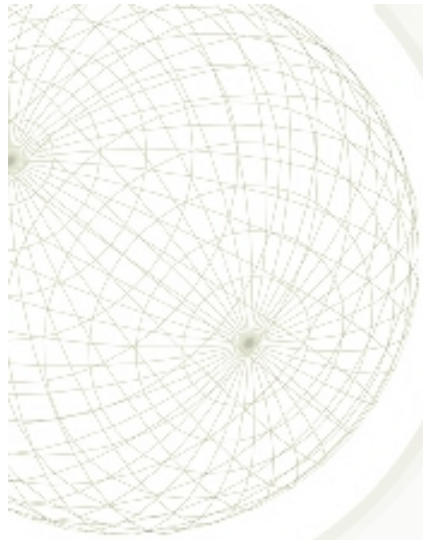


# COULEUR ET TEMPÉRATURE

- Couleur  $\leftrightarrow$  Température [ loi de Wien  $\lambda_{\max} = 0,2898 \text{ m} / T(\text{K})$  ]
- Indice de couleur B – V =  $\text{mag}_B - \text{mag}_V$
- Autres indices : U-B, R-I, etc.



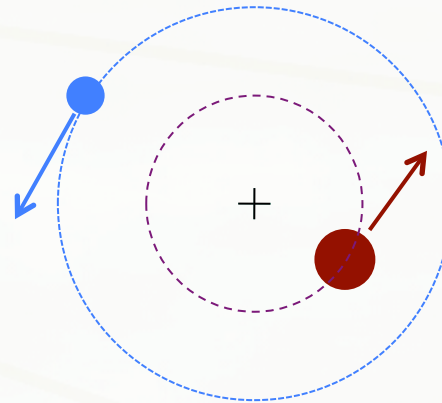




# **MASSES**

# SYSTÈMES BINAIRES

- Beaucoup d'étoiles appartiennent à des systèmes binaires dans lesquels 2 étoiles sont en orbite autour de leur centre de gravité commun (barycentre)



- Si  $M_1$  et  $M_2$  sont les masses des deux étoiles (en  $M_\odot$ ) et  $D_1$  et  $D_2$  leurs distances au barycentre (en UA), la 3<sup>e</sup> loi de Kepler est

$$T^2 = [D_1 + D_2]^3 / [M_1 + M_2]$$

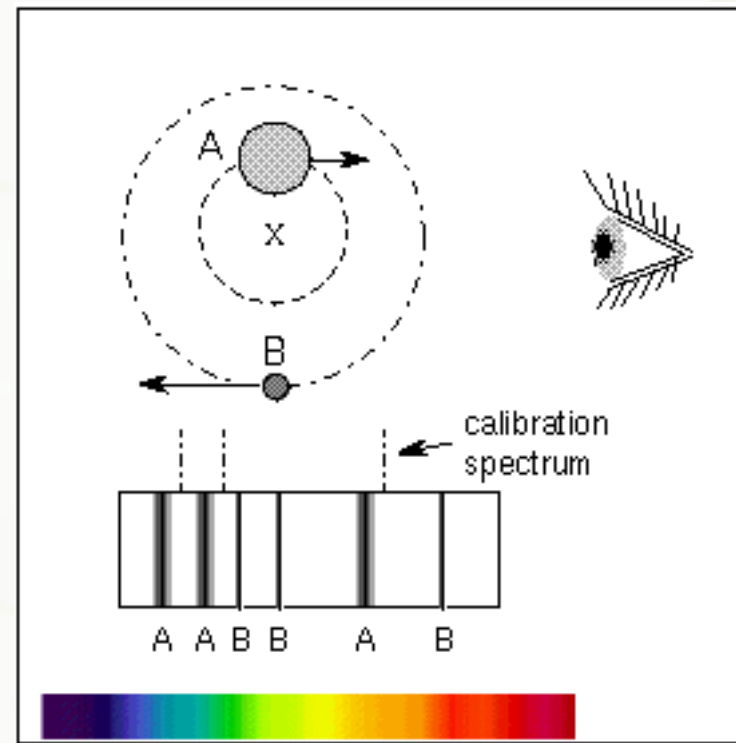
où  $T$  est la période orbitale (en années)

- Par définition du barycentre,  $D_1 M_1 = D_2 M_2 \Rightarrow M_1/M_2 = D_1/D_2$

}  $\Rightarrow M_1$  et  $M_2$

# SYSTÈMES BINAIRES

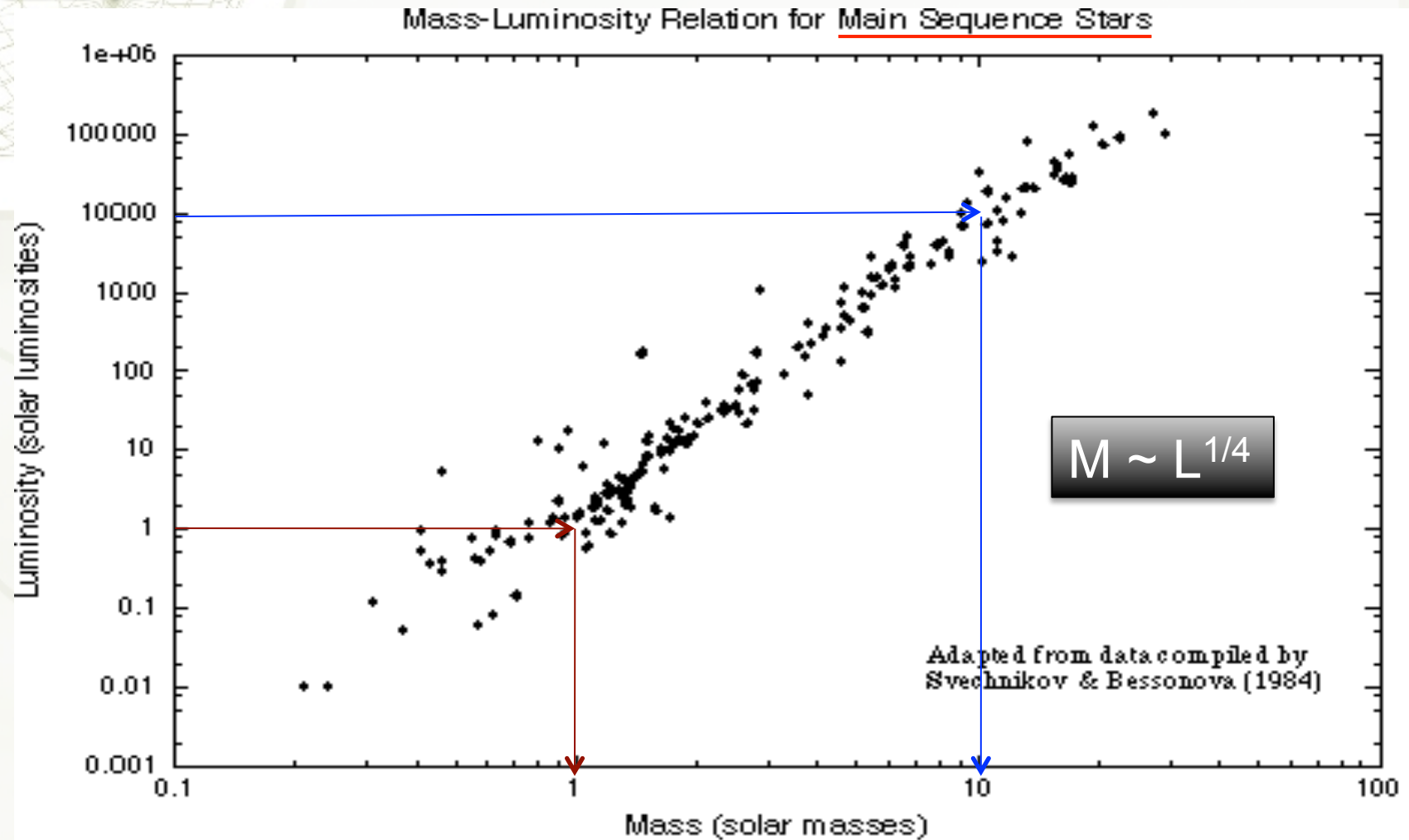
- La plupart du temps on ne sépare *pas* les images des deux étoiles  $\Rightarrow$  on ne peut pas mesurer les distances  $D_i$  des deux étoiles
- Par contre leur spectre
  - indique la présence de *deux* étoiles
  - montre des raies dédoublées (effet Doppler différent pour les deux étoiles)
  - $\Rightarrow$  mesure de la **vitesse**  $V_i$  de chaque étoile
- Vitesse  $V_i$  x Période  $T = 2\pi$  rayon orbital  $D_i$
- Complications
  - plan orbital incliné sur la ligne de visée  $\Rightarrow$  vitesses sous-estimées  $\Rightarrow$  rayons sous-estimés  $\Rightarrow$  masses sous-estimées
  - orbites elliptiques
  - systèmes triples ou quadruples





## ET POUR LES AUTRES ?

- Relation masse – luminosité *calibrée sur les étoiles de masse connue*

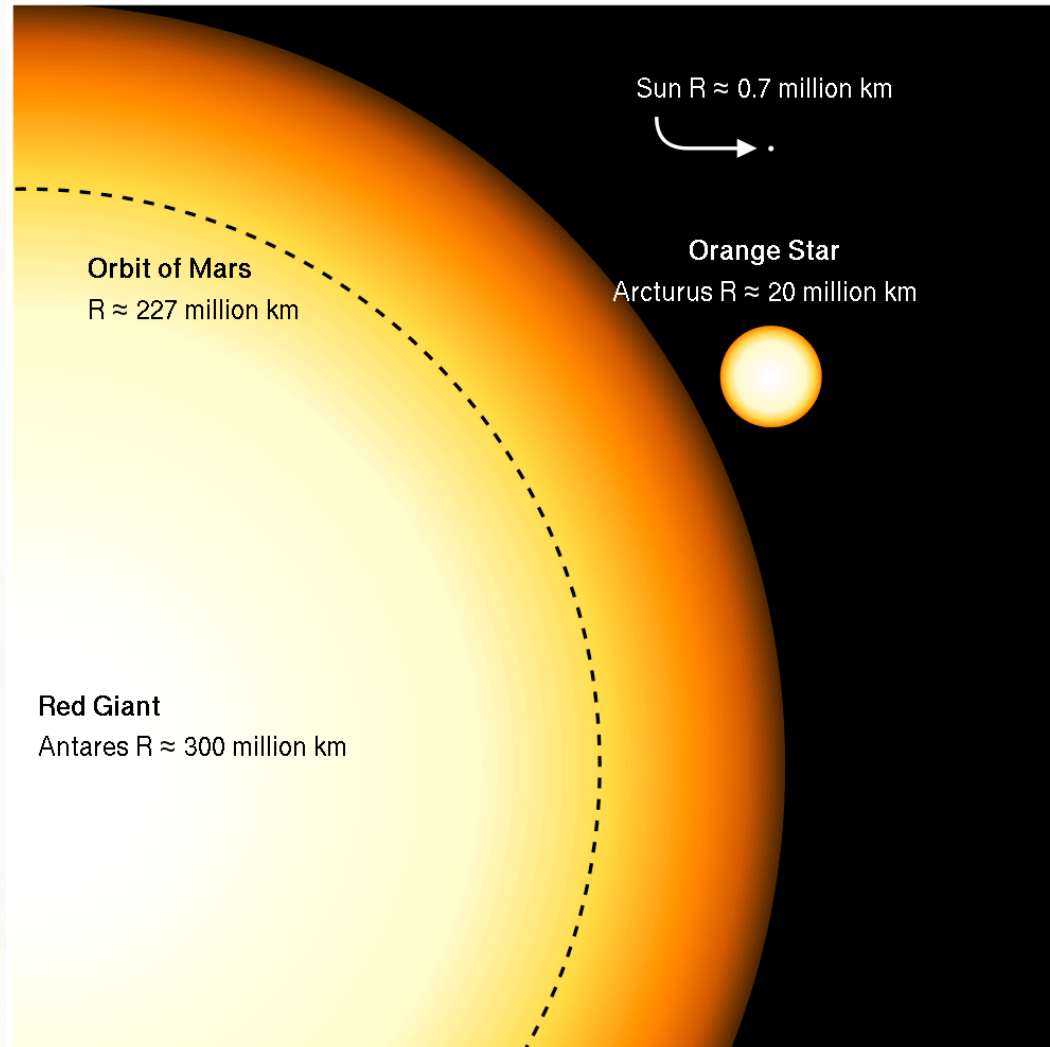
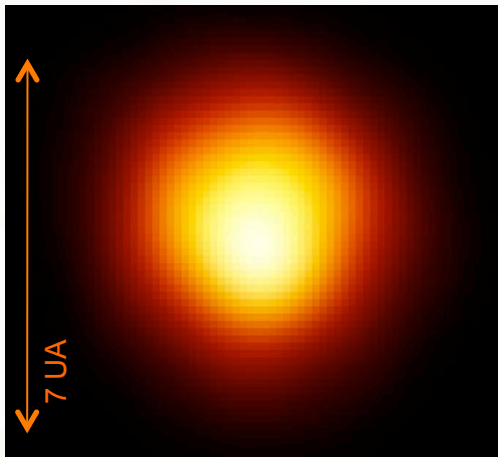


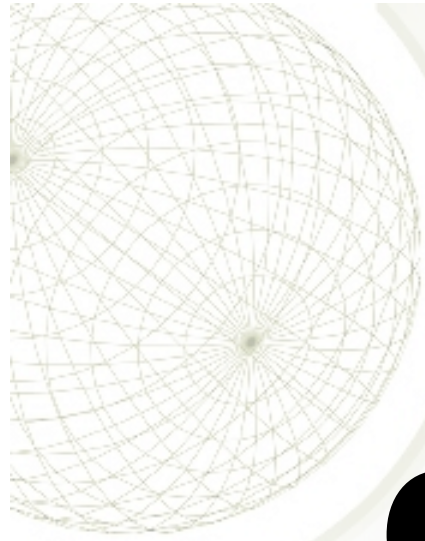
## ET LE RAYON ?

- Rayon photométrique
  - Mesure de la luminosité  $L$
  - Mesure de la température  $T$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$
$$\Rightarrow R$$

- Mesures directes du rayon
  - Binaires à éclipses
  - Interférométrie
  - Imagerie ( $\alpha$  Ori @HST) :

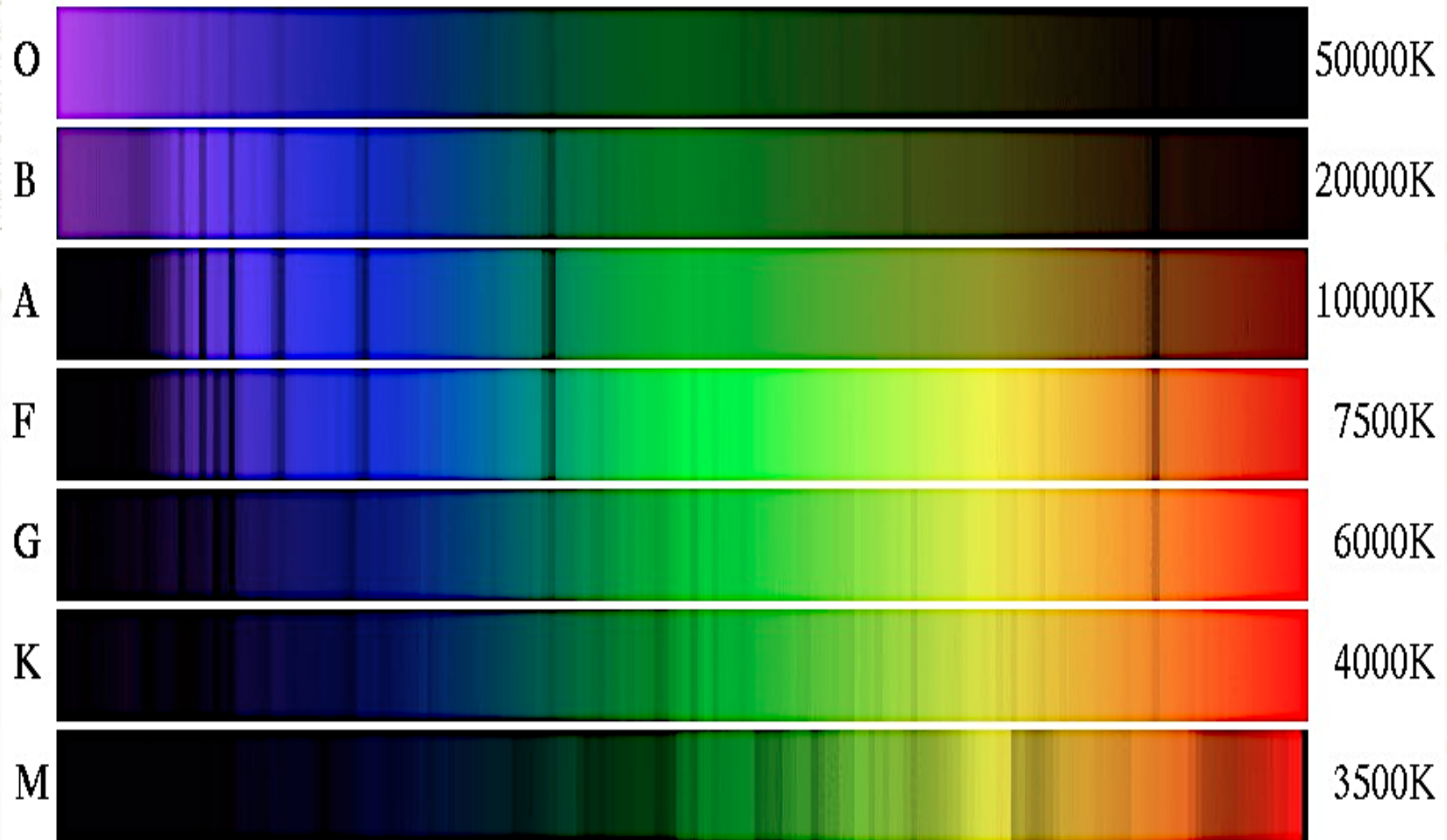




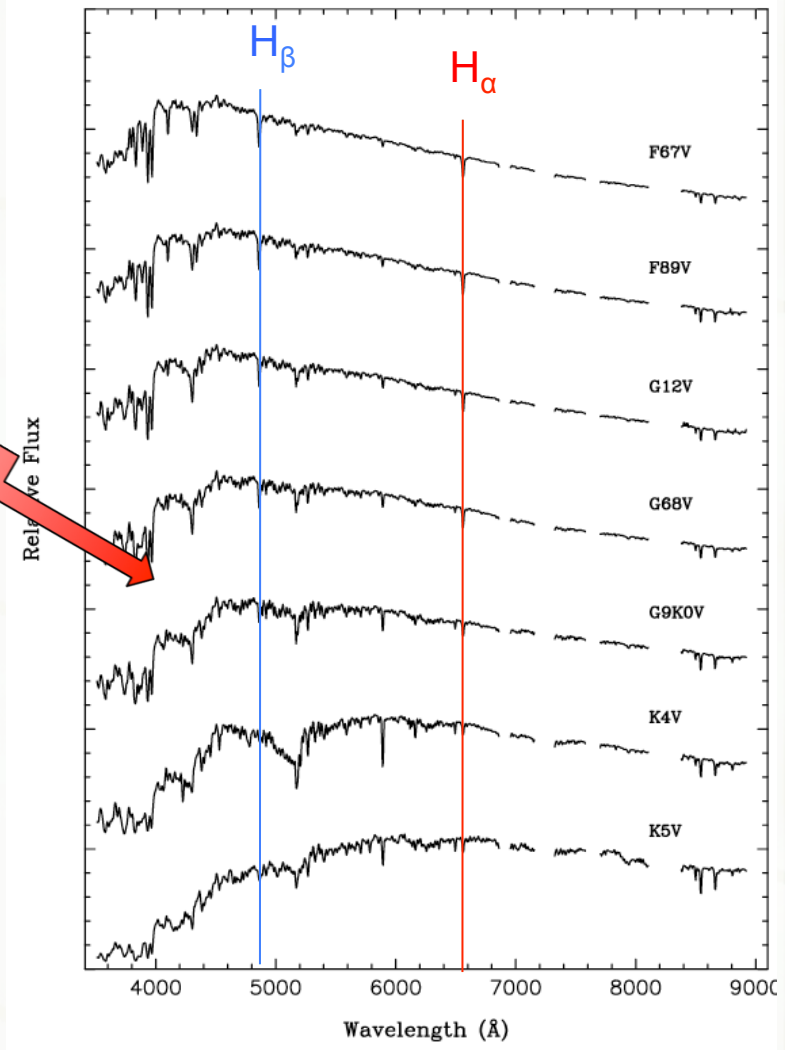
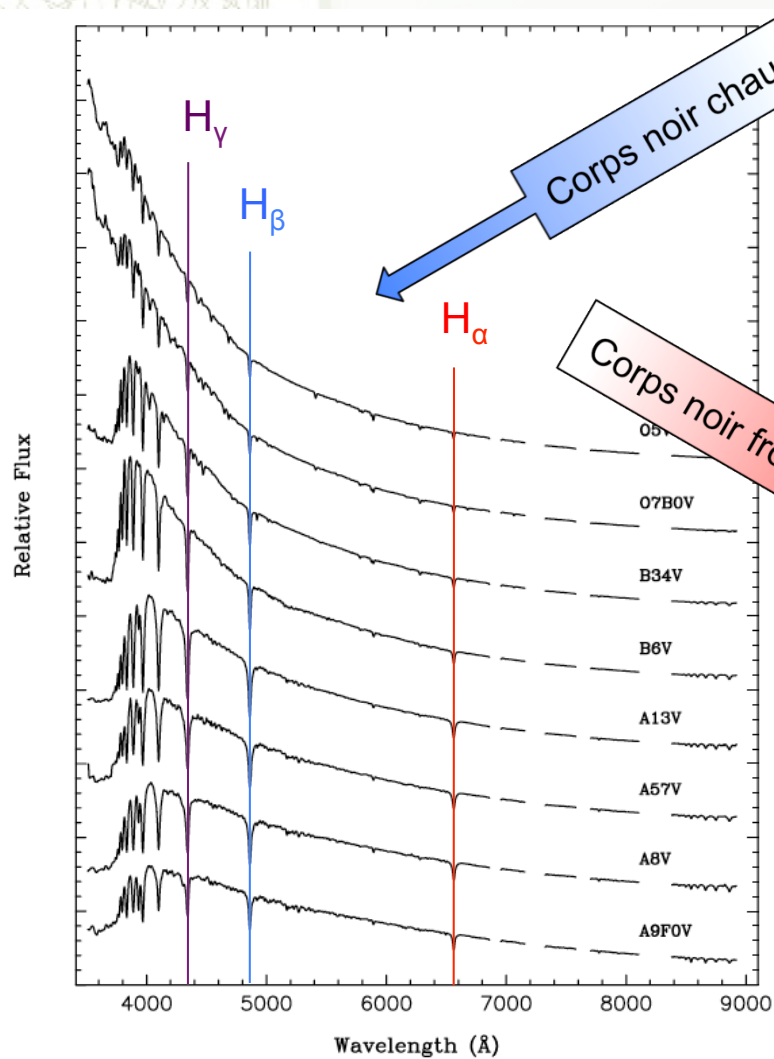
# **COMPOSITION CHIMIQUE ET TEMPÉRATURE**



# SPECTRES D'ÉTOILES



# SPECTRES D'ÉTOILES



# TYPES SPECTRAUX

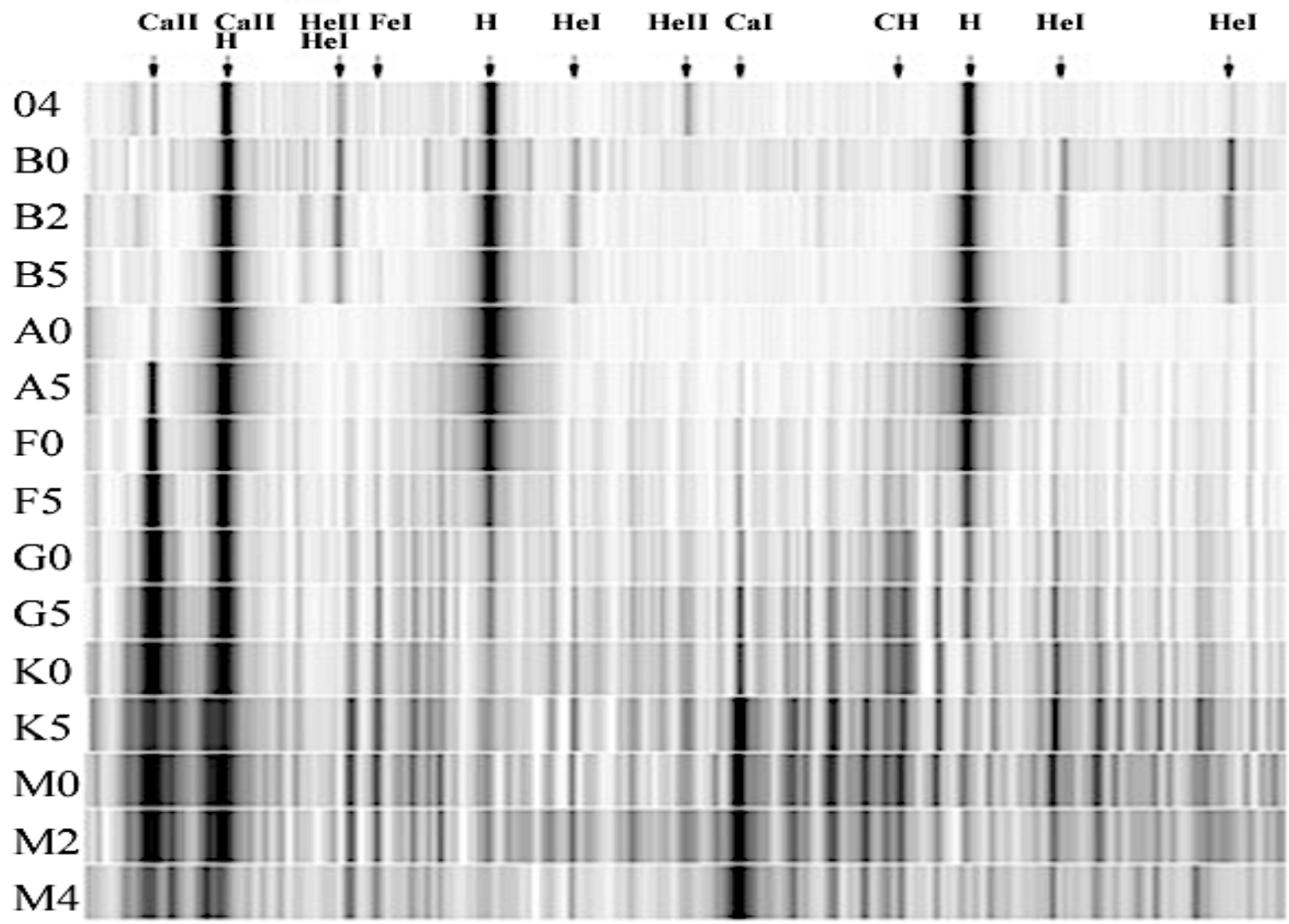
- Angelo Secchi S.J. (1818-1878)
  - → 3 classes (I ~ A-B-F, II ~ F-G-K, III ~ M-N)
- Annie Jump Cannon (1863-1941)
  - → Séquence « de Harvard » O-B-A-F-G-K-M-N



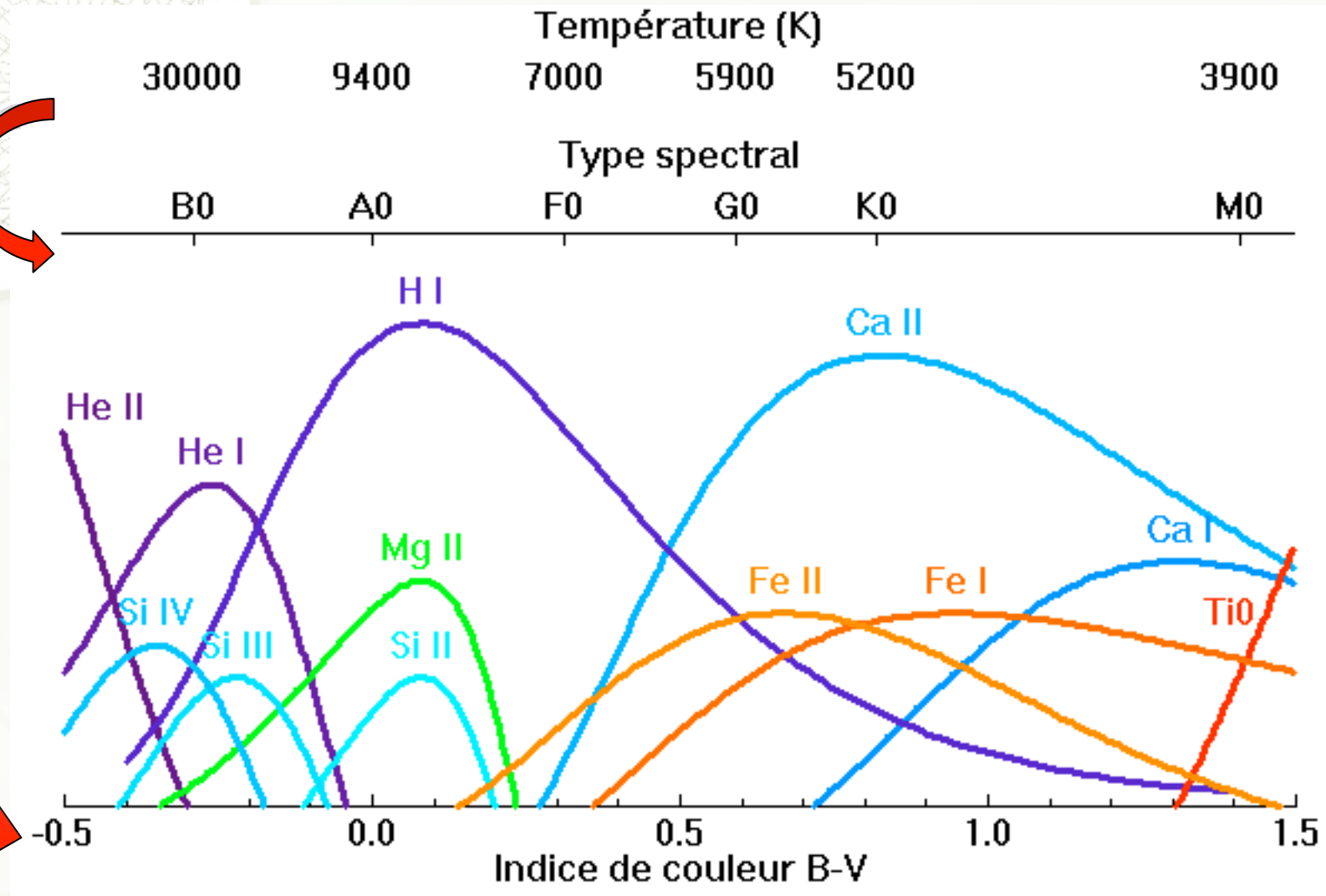
O	Hydrogène faible, hélium et métaux ionisés	Alnitak ( $\zeta$ Ori)
B	Hydrogène fort, hélium neutre, métaux ionisés	Rigel ( $\beta$ Ori)
A	Hydrogène très fort, métaux ionisés une fois	Sirius ( $\alpha$ CMa)Vega ( $\alpha$ Lyr)
F	Hydrogène fort, métaux neutres	Canopus ( $\alpha$ Car) Procyon ( $\alpha$ CMi)
G	Hydrogène faible, calcium, métaux neutres	Soleil $\alpha$ Cen
K	Hydrogène absent, métaux neutres, raies moléculaires	Arcturus ( $\alpha$ Boo)
M	Hydrogène absent, métaux neutres, raies moléculaires dominantes	Bételgeuse ( $\alpha$ Ori)
N	Hydrogène absent, métaux neutres, raies moléculaires CH, CN	



# TYPES SPECTRAUX (AVEC SOUS-TYPES DE 0 À 9)

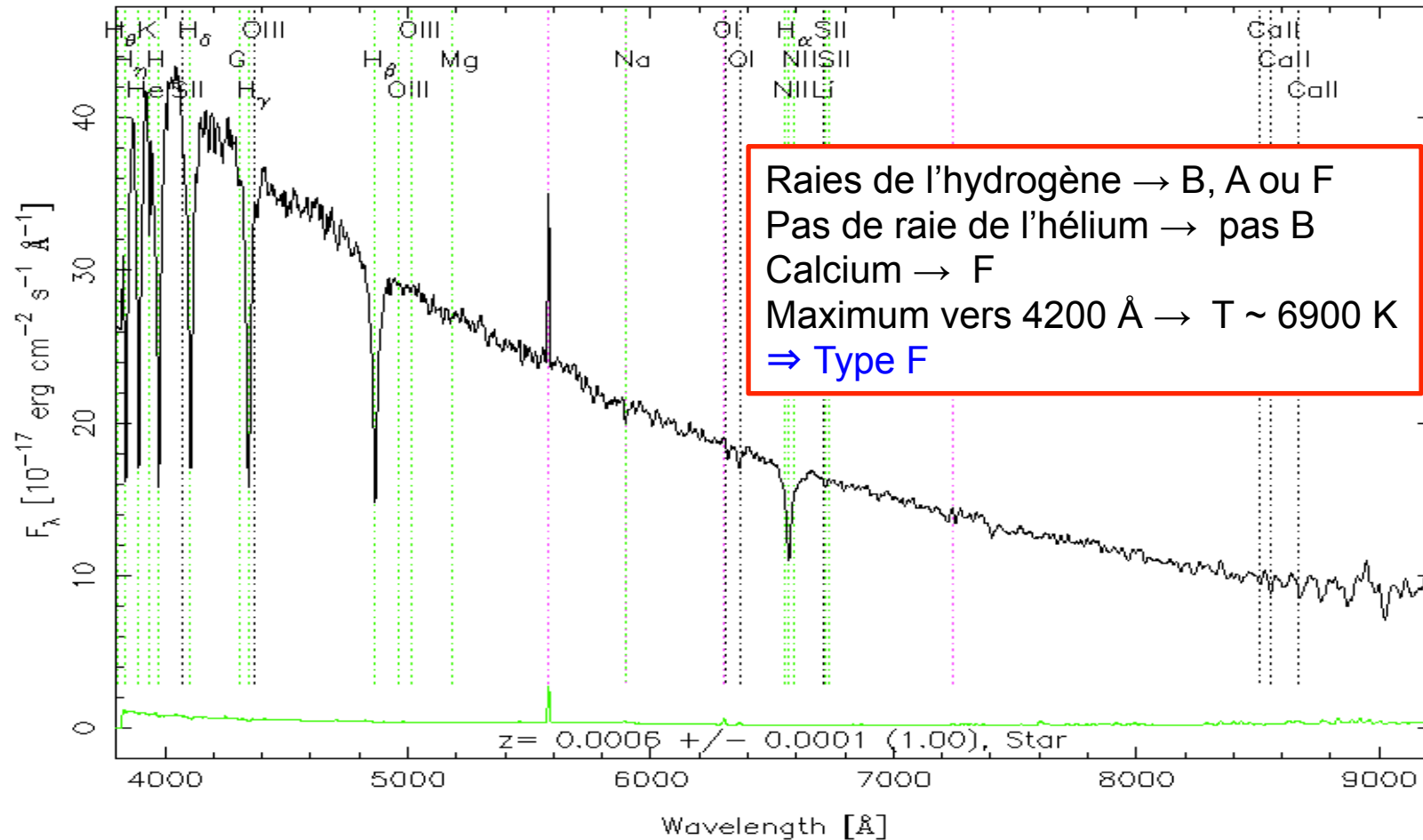


# ÉVOLUTION DES RAIES AVEC LA TEMPÉRATURE



# SPECTRE STELLAIRE (© SLOAN DIGITAL SKY SURVEY)

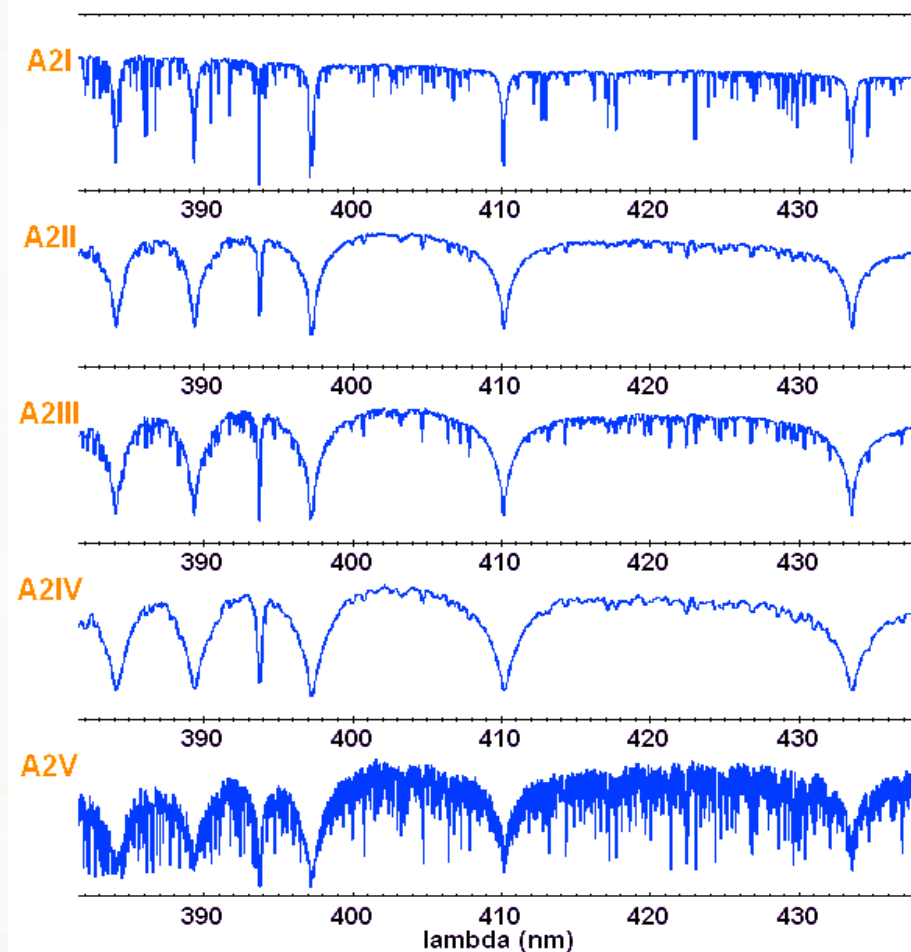
RA=146.91375, DEC=-0.64448, MJD=51630, Plate= 266, Fiber= 15

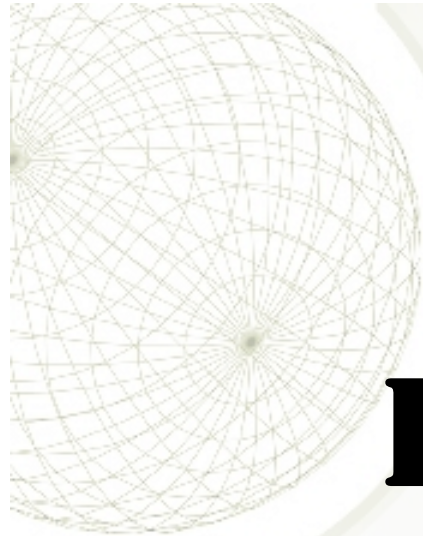




# CLASSES DE LUMINOSITÉ

- Des étoiles de même type spectral (par exemple de type A2) présentent – par définition – les mêmes raies dans leur spectre
- Mais ces raies sont parfois
  - très fines
  - fines
  - moyennes
  - larges
  - très larges
- Corrélation
  - raies fines  $\Leftrightarrow$  forte luminosité
  - [grand rayon, faible densité]
  - raies larges  $\Leftrightarrow$  faible luminosité
  - [petit rayon, forte densité]
- $\rightarrow$  5 classes (I à V)
  - Supergéantes (I)
  - Géantes (III)
  - Naines (V)

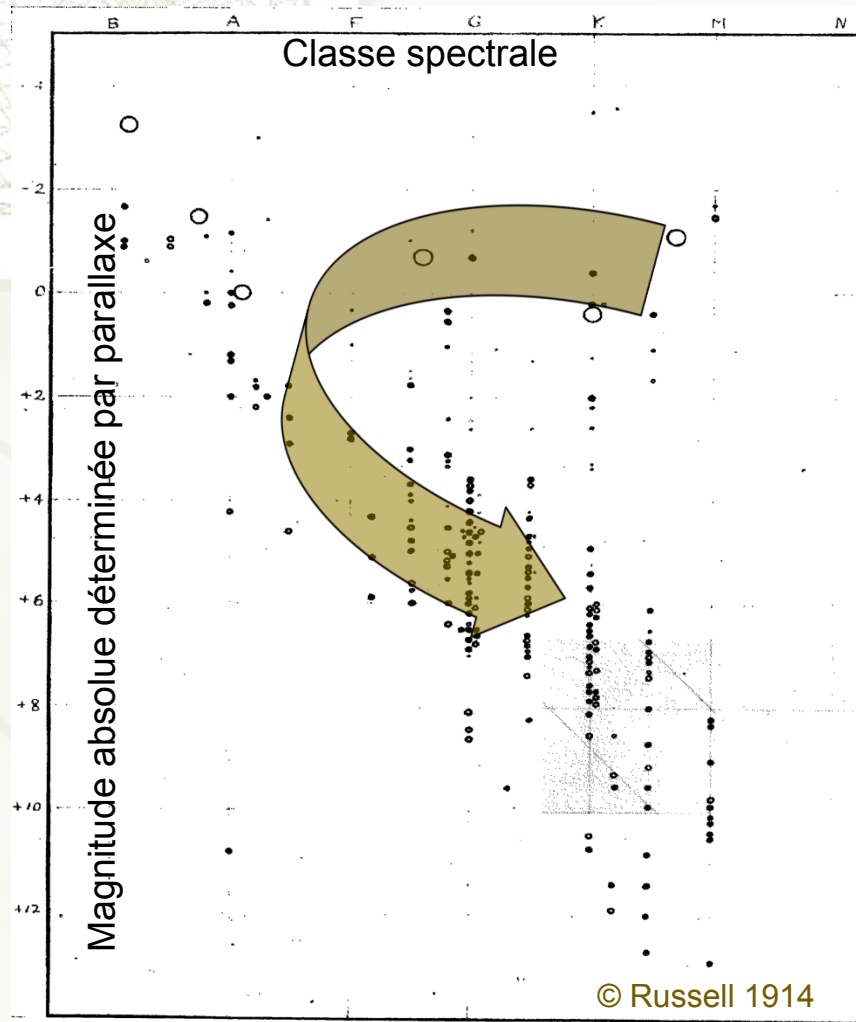




# **DIAGRAMME DE HERZSPRUNG-RUSSELL**

## **DIAGRAMME COULEUR-MAGNITUDE**

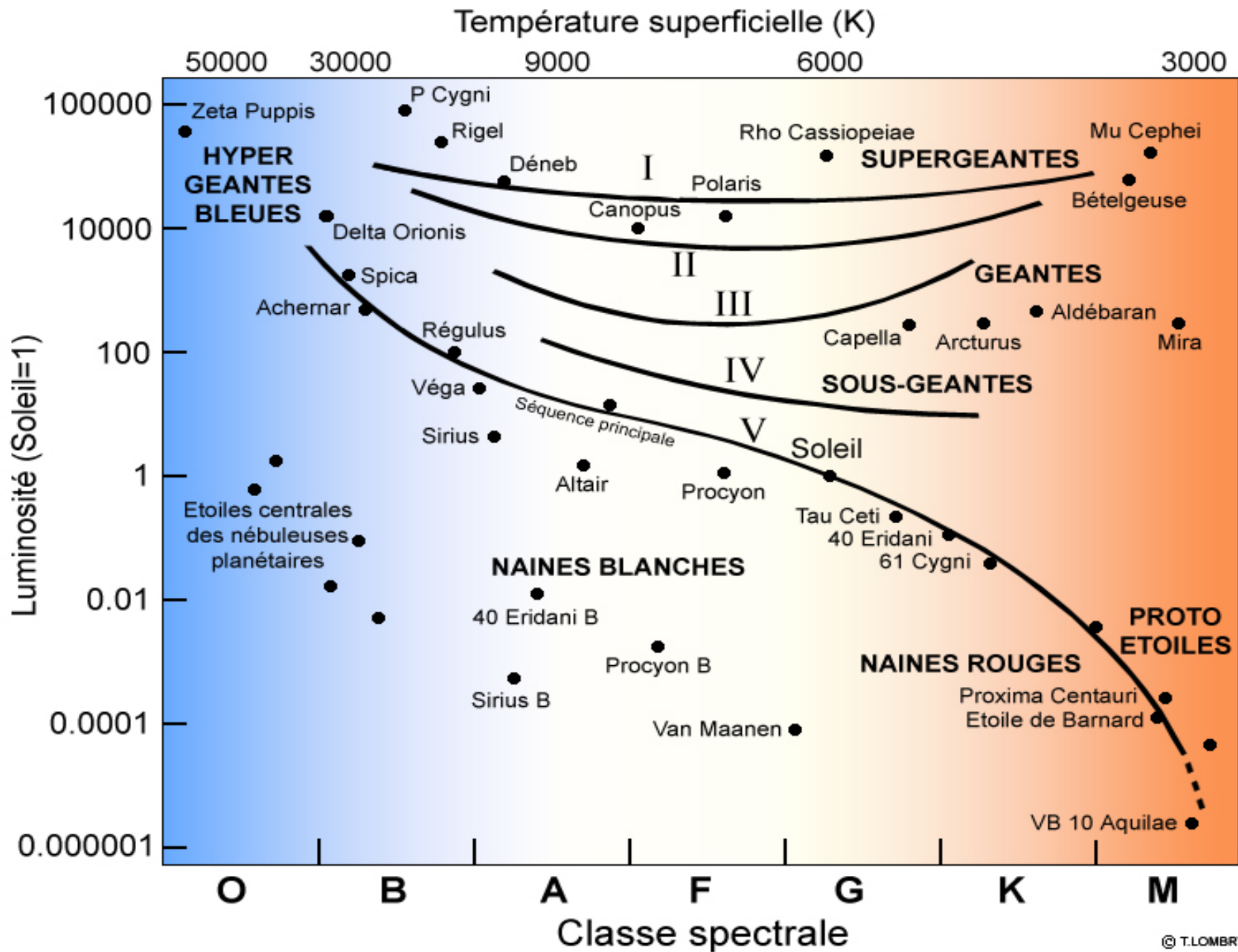
# HERZSPRUNG ET RUSSELL



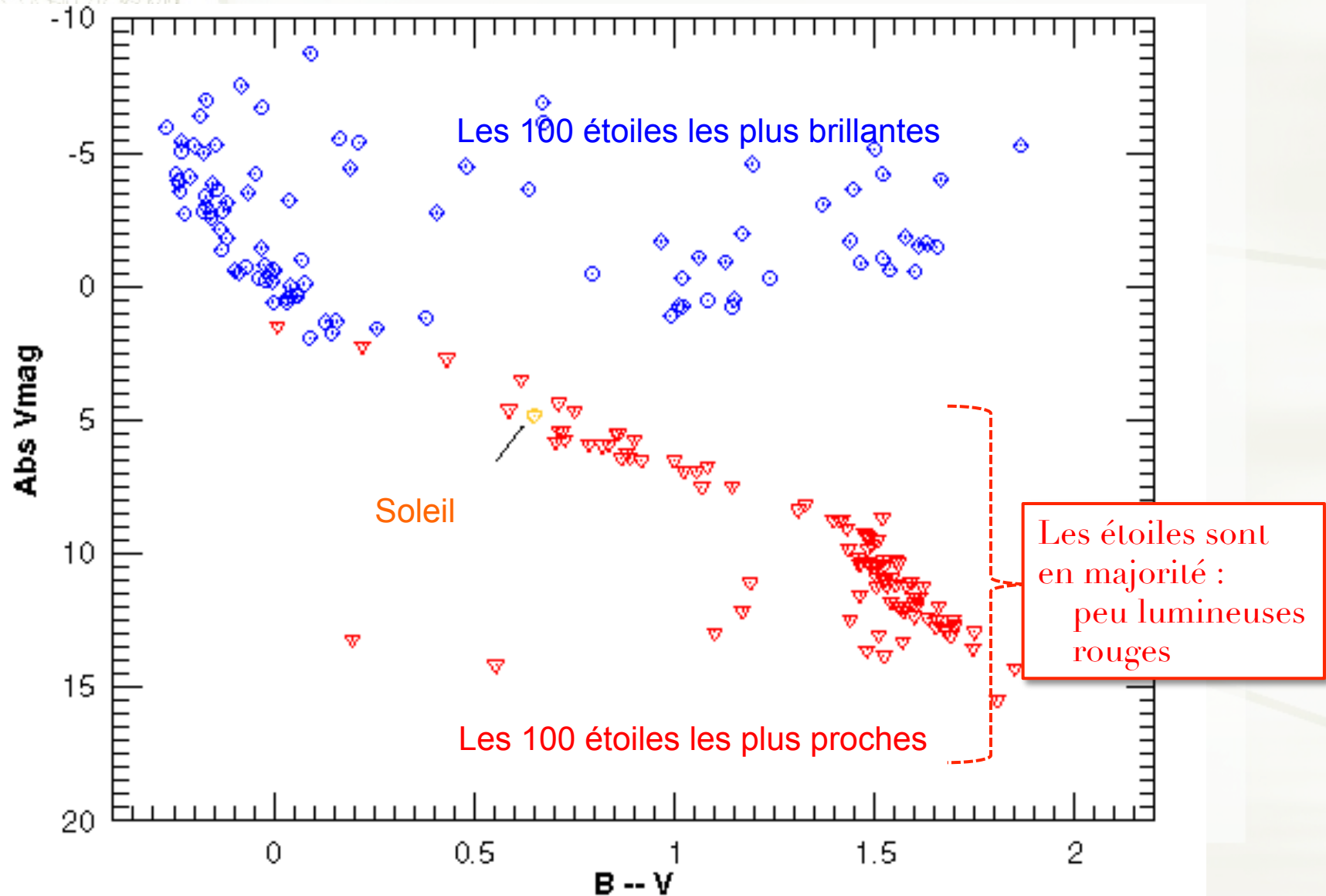
- Henry Norris Russell (1877-1957)
  - Corrélation entre luminosité absolue (connue par parallaxes) et types spectraux
  - Distinction entre géantes et naines
- Séquence évolutive ?
  - (des géantes aux naines par contraction K-H, en fait, c'est plutôt l'inverse)





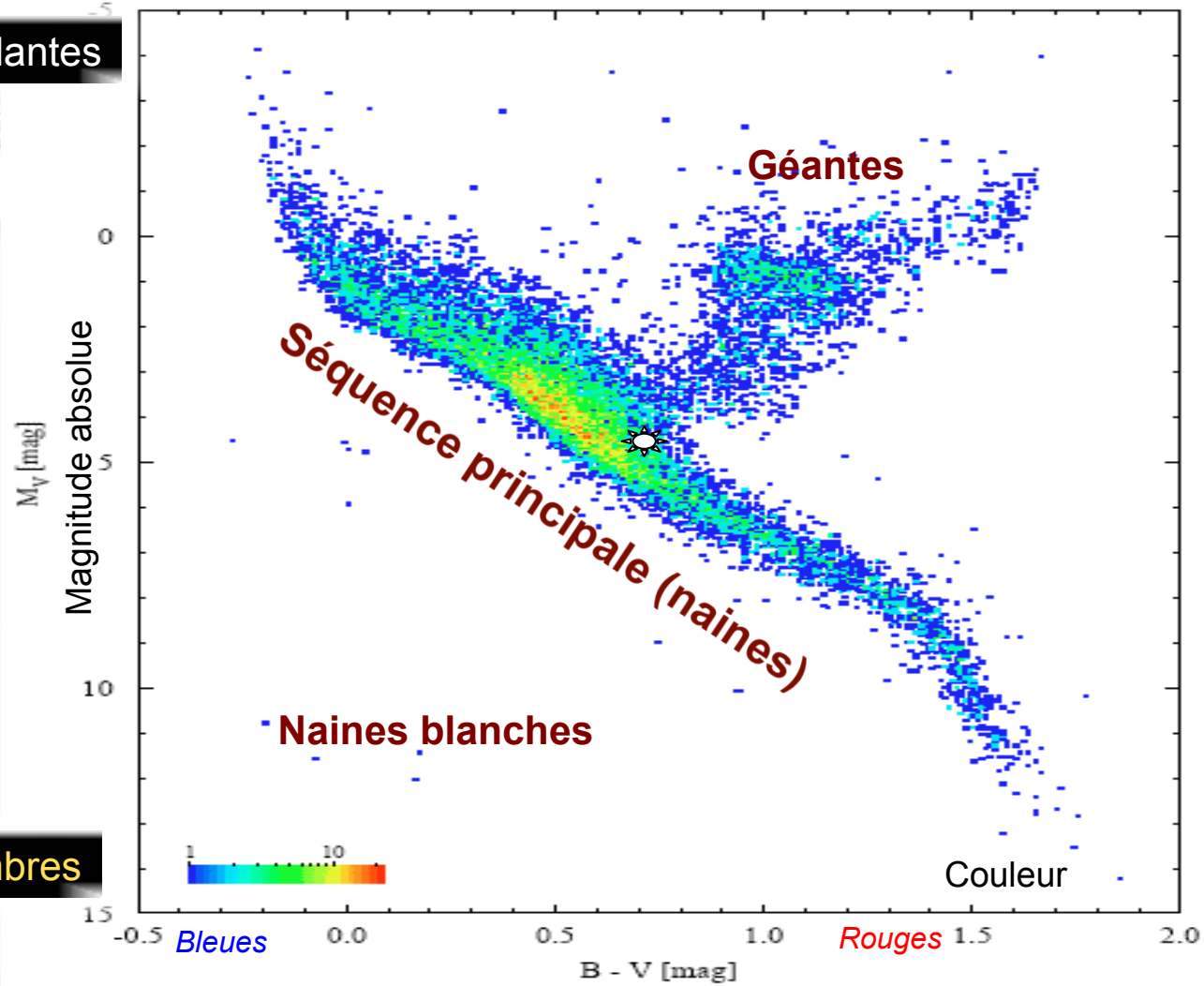


# ÉTOILES PROCHES OU BRILLANTES



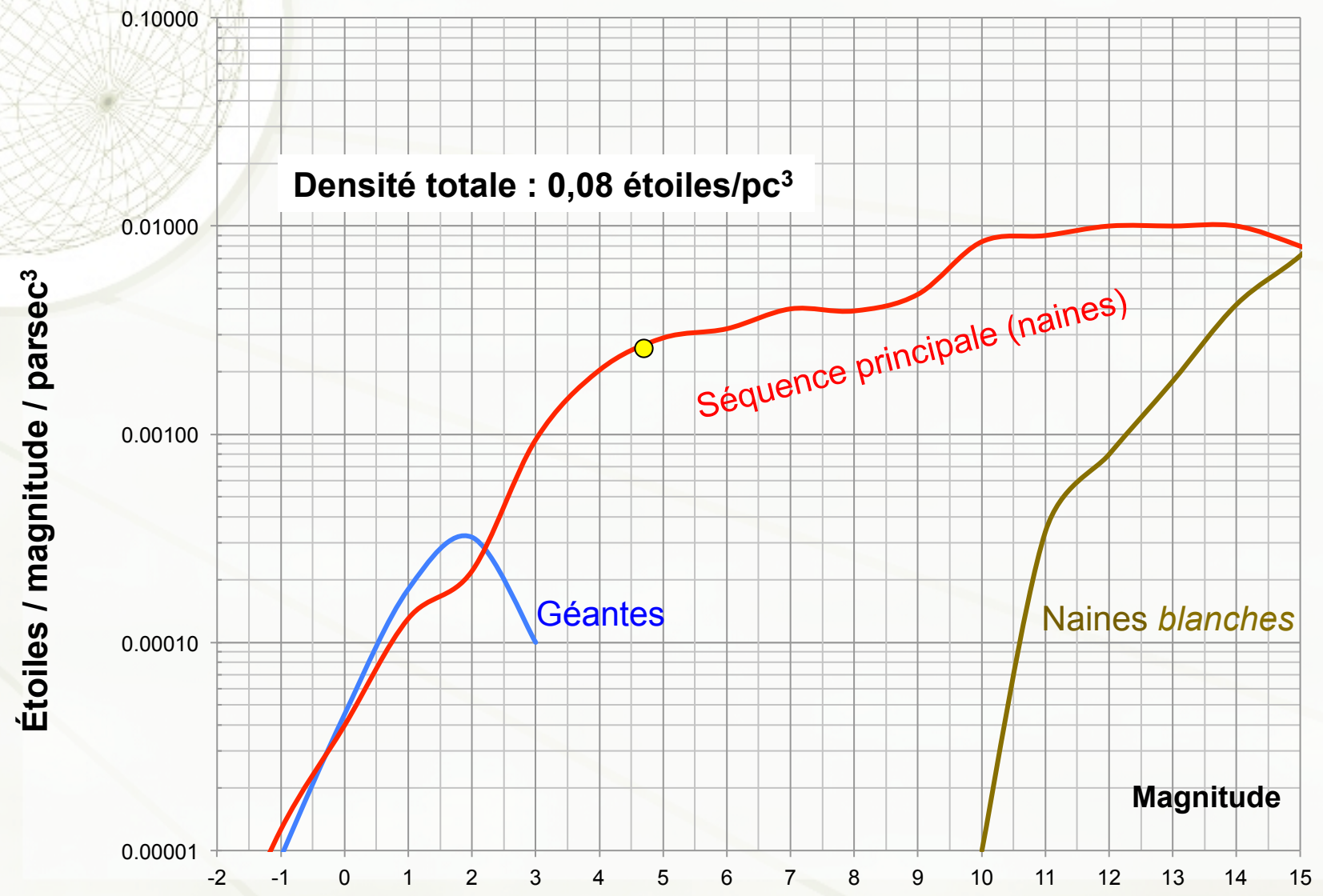
# DIAGRAMME HR (120 000 ÉTOILES D'HIPPARCOS)

Brillantes



Sombres

# POURQUOI LA SÉQUENCE PRINCIPALE EST ...PRINCIPALE



Densité totale : 0,08 étoiles/pc<sup>3</sup>

Séquence principale (naines)

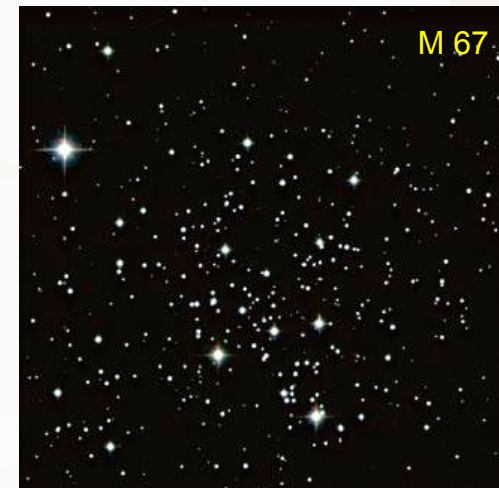
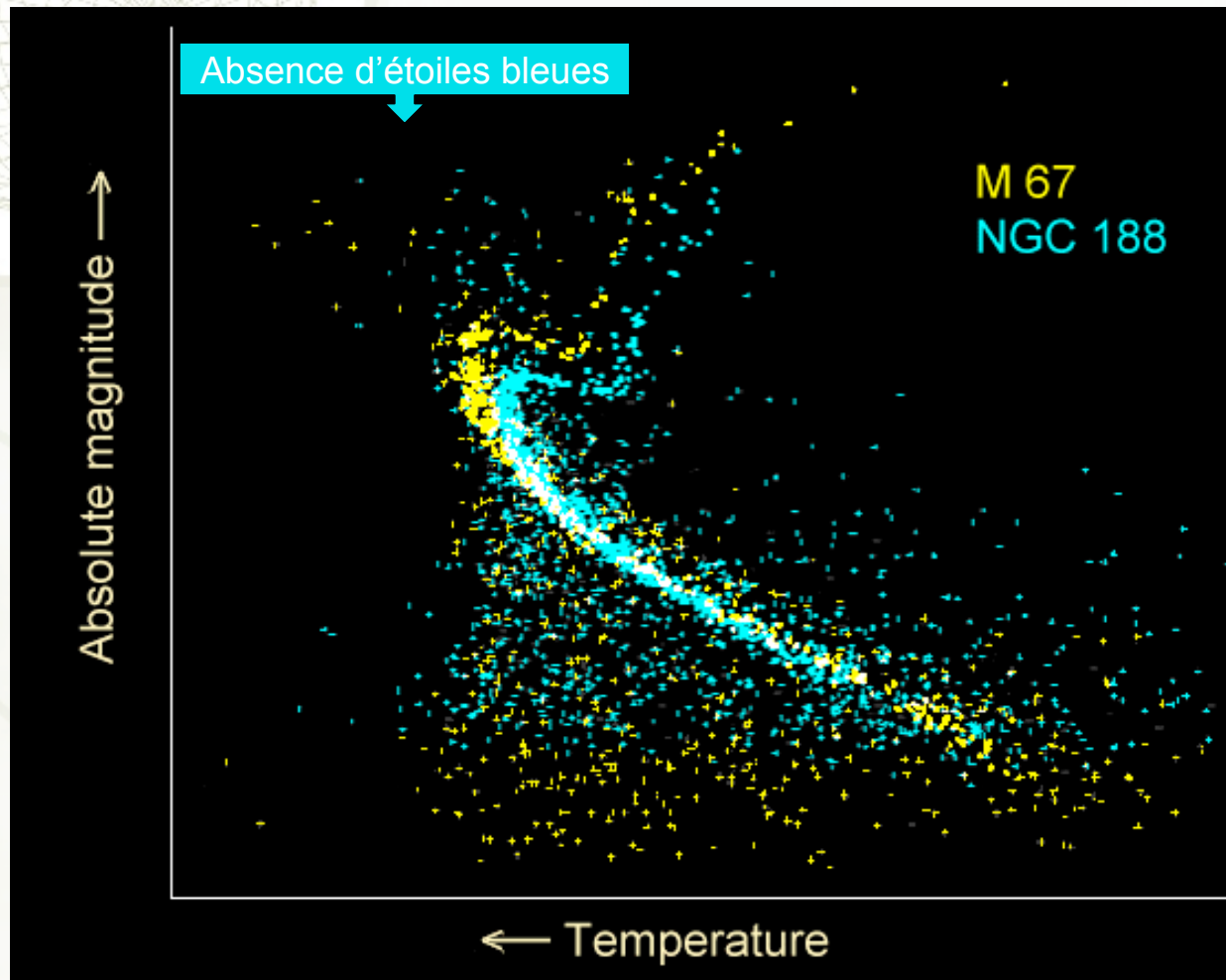
Géantes

Naines blanches

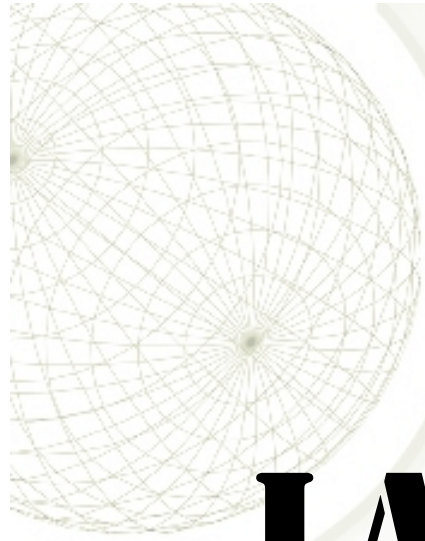
Magnitude



# AMAS D'ÉTOILES



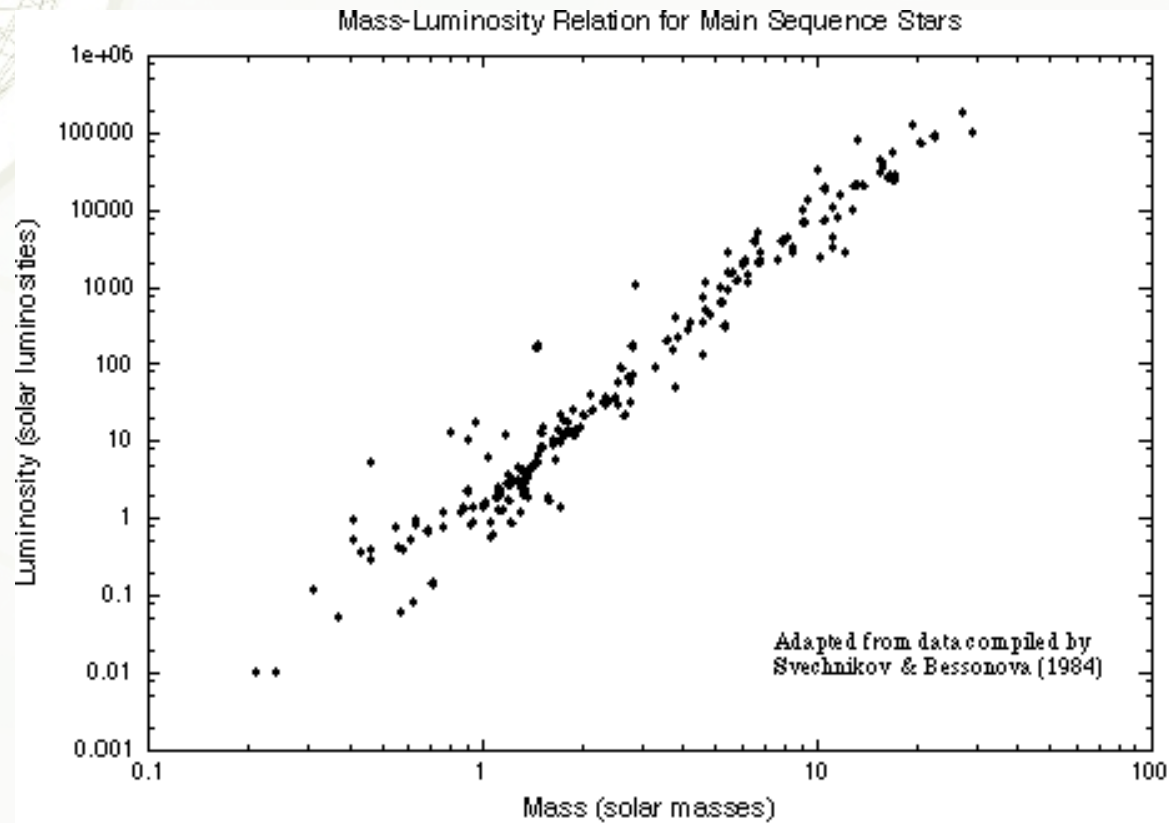
Effet d'évolution :  
les étoiles chaudes  
ont une vie courte et  
brillante  
☞ cela permet de  
dater l'amas



# **LA MASSE EST LE PREMIER PARAMÈTRE**

# ÉTROITE CORRÉLATION ENTRE MASSE ET LUMINOSITÉ

- $L \sim M^4$  sur la séquence principale



- Conséquence de la forte dépendance des réactions nucléaires avec la température

## COROLLAIRE : DURÉE DE VIE APPROXIMATIVE DES ÉTOILES

- Les étoiles ne sont pas éternelles
- $L/L_{\odot} = (M/M_{\odot})^4 \Rightarrow t/t_{\odot} = (M/M_{\odot})^{-3}$
- Numériquement

Masse ( $M_{\odot}$ )	Durée de vie (millions d'années)	Type spectral
0,1	1 000 000	M7
1	10 000	G2
1,5	3 000	F5
3	370	A5
10	32	B4
30	11	O7
60	3	O3

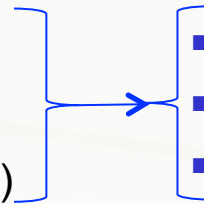
- Approximatif car
  - La relation masse - luminosité n'est pas réellement une loi de puissance (l'exposant 4 devient  $\sim 3$  pour les masses  $> 20 M_{\odot}$ )
  - Une fraction seulement de la masse d'hydrogène peut être convertie en hélium



# THÉORÈME DE VOGT-RUSSELL

## ■ *Si*

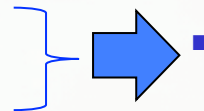
- Température  $T(r)$
- Densité  $\rho(r)$
- Composition chimique  $X(r)$ ,  $Y(r)$  et  $Z(r)$



- Pression  $P(r)$
- Opacité  $\kappa(r)$
- Taux d'énergie produite  $\epsilon(r)$

## ■ *Alors*

- **Masse initiale**
- Et composition chimique initiale

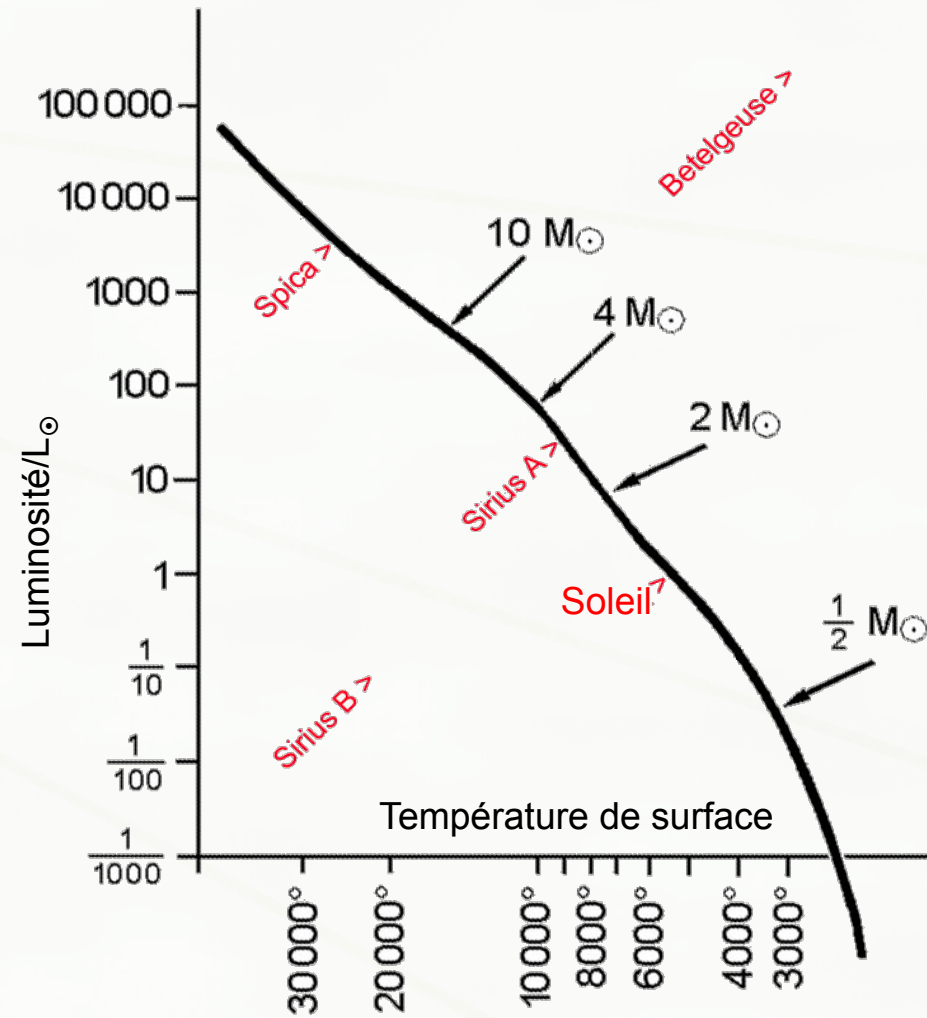


- Structure de l'étoile
  - Profil de température
  - Profil de densité
  - Profil de composition chimique
    - → température de surface
    - → rayon total
    - → luminosité totale

- → relation masse - rayon
- → relation masse - luminosité

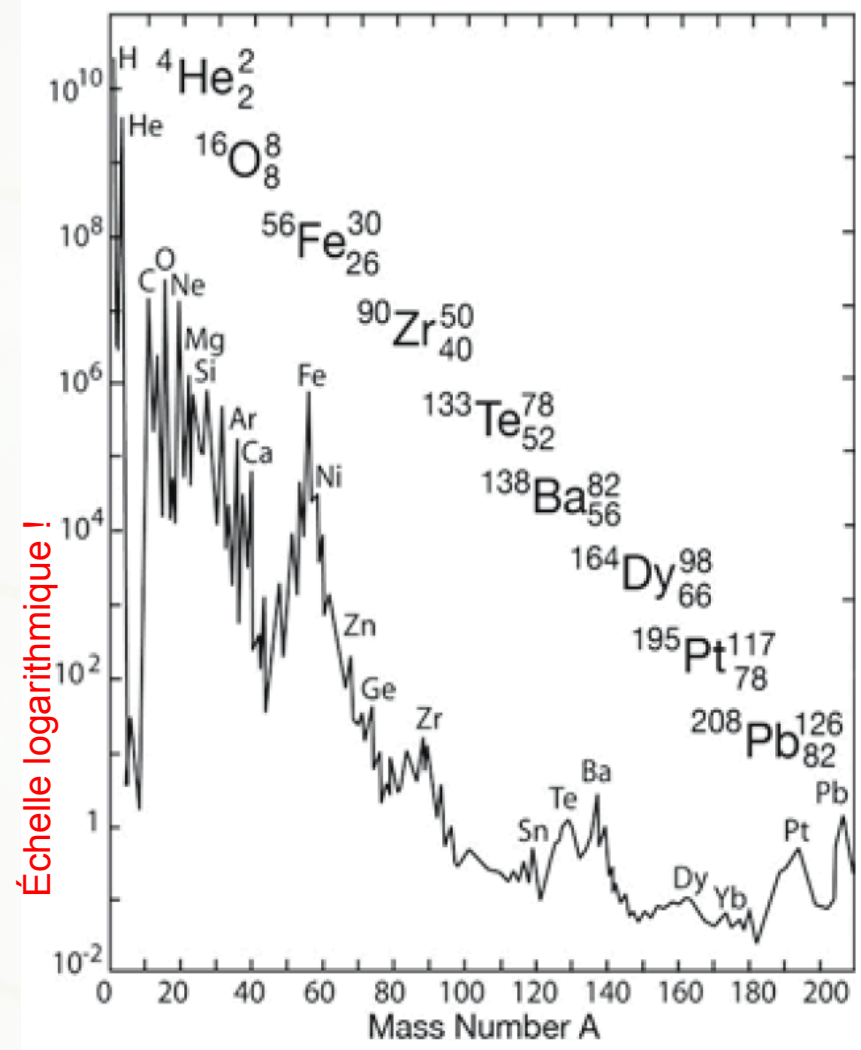
- et toute son évolution

## → DIAGRAMME HR THÉORIQUE

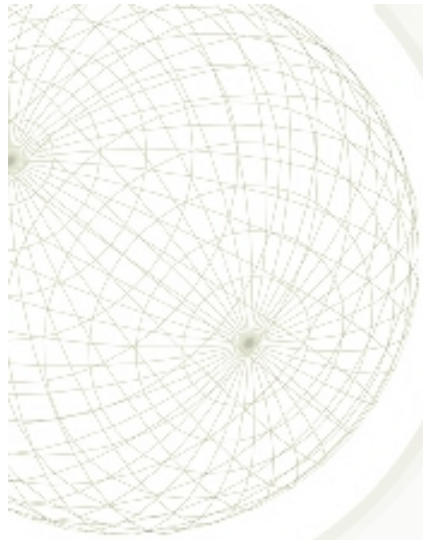


# LA « MÉTALLICITÉ » EST LE SECOND PARAMÈTRE

- Les étoiles sont essentiellement formées
  - d'hydrogène à 90% (73% en masse)
  - d'hélium à 9% (25% en masse)
- et d'éléments plus lourds, les « métaux »
  - Carbone
  - Azote
  - Oxygène
  - Néon
  - Magnésium
  - Silicium
  - Fer et nickel
- en proportions TRÈS variables
  - Étoiles « riches »  $Z \sim 0,02$
  - Étoiles « pauvres »  $Z \ll 0,001$







Merci de votre attention !

