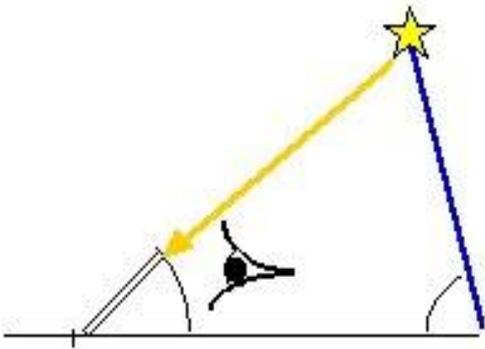


Mesure de distance des étoiles lointaines de la Galaxie.

Des outils:

- **Le diagramme H-R**
Une classification des étoiles par type
- **Le module de distance**
- *Transformation de la luminosité en distance*

**Pour estimer
la distance
d'une étoile,
on mesure
des angles
ou la
luminosité**



Quand l'étoile est proche les angles sont suffisamment grands pour que l'usage de la géométrie soit adaptée à l'outil de la mesure :

La parallaxe trigonométrique

Lorsque l'étoile est éloignée les angles sont trop petits (proche de l'horizontale ou de la verticale) et les erreurs de mesures deviennent supérieures aux mesures elles-mêmes.

On utilise alors

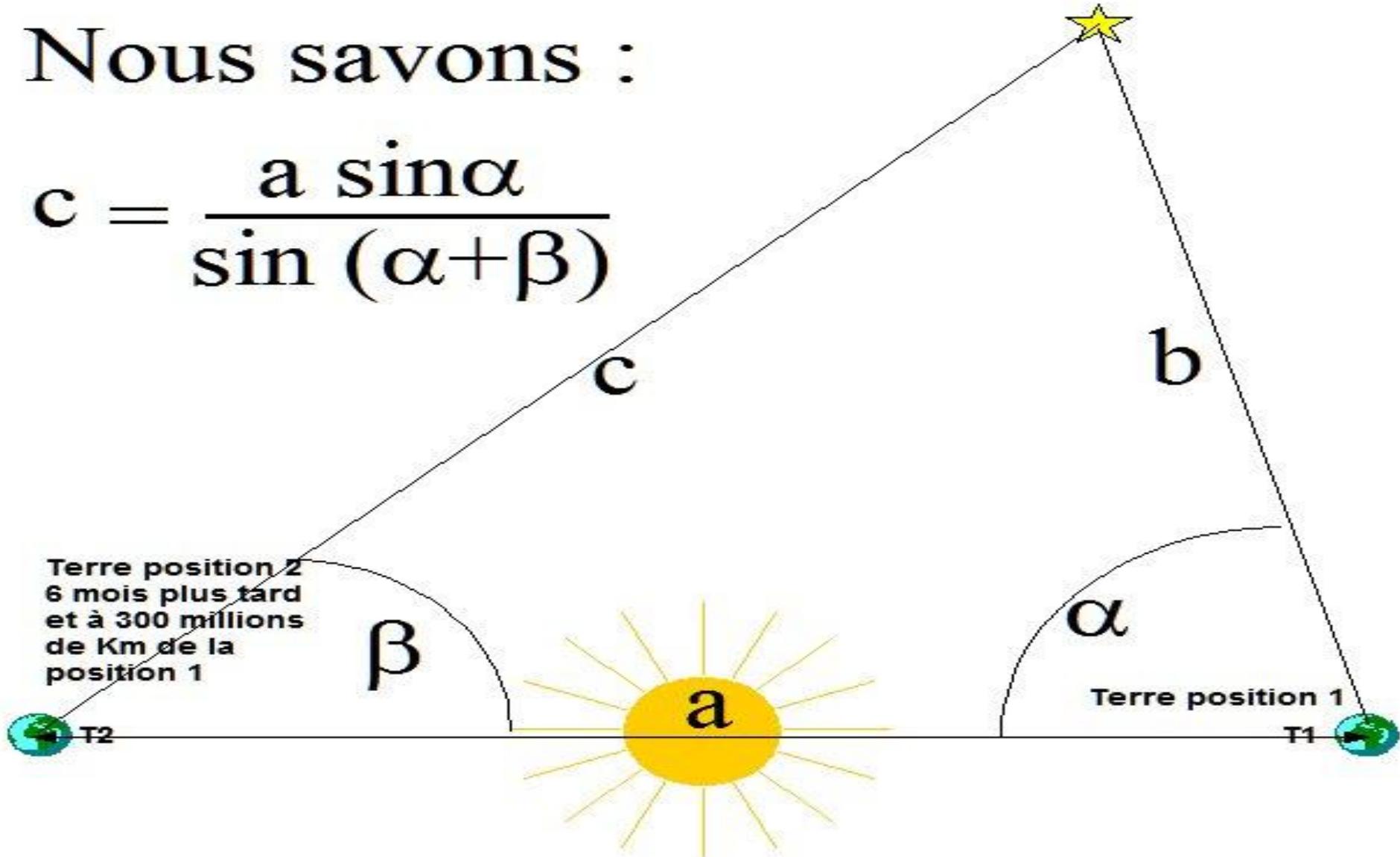
La parallaxe spectroscopique

Rappel sur les méthodes géométriques

Connaissant 3 éléments d'un triangle, dont au moins une longueur, on les détermine tous

Nous savons :

$$c = \frac{a \sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)}$$



Mais au-delà d'une certaine distance en fonction de la précision des instruments, la méthode géométrique n'est plus applicable

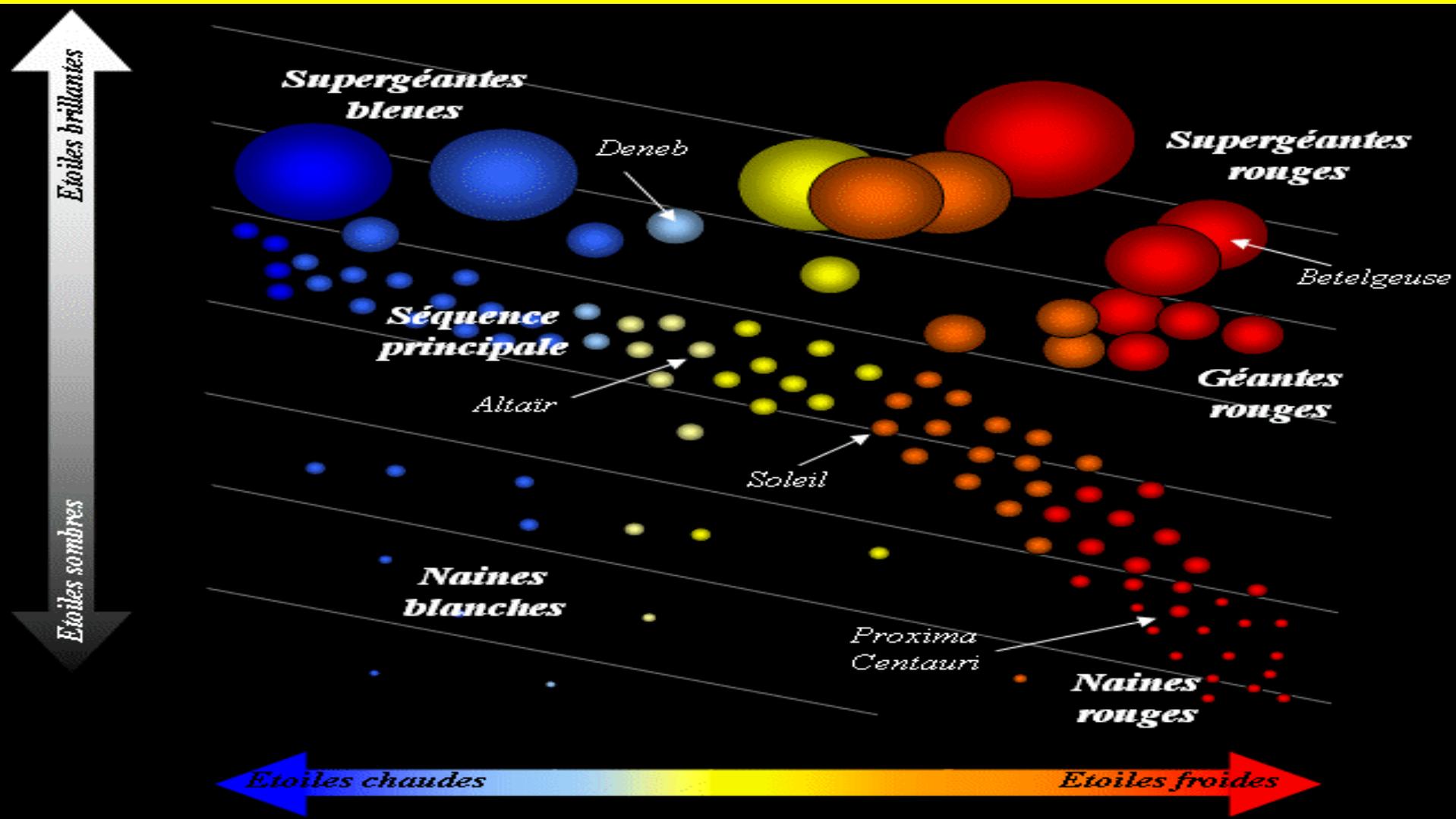
- On lui substitue une mesure de l'atténuation de la luminosité de l'objet dont on veut connaître l'éloignement. C'est un indicateur secondaire.
- L'atténuation correspond à la différence de luminosité entre celle qu'il aurait à une distance connue (10 parsecs par convention) et celle qu'il affiche réellement à la distance depuis laquelle on l'observe.
- Comment peut-on connaître la luminosité d'un objet à une distance de 10 parsecs si on ne s'en éloigne pas de cette distance ?

Ce problème serait facile à résoudre si toutes les étoiles affichaient la même luminosité (la même magnitude).

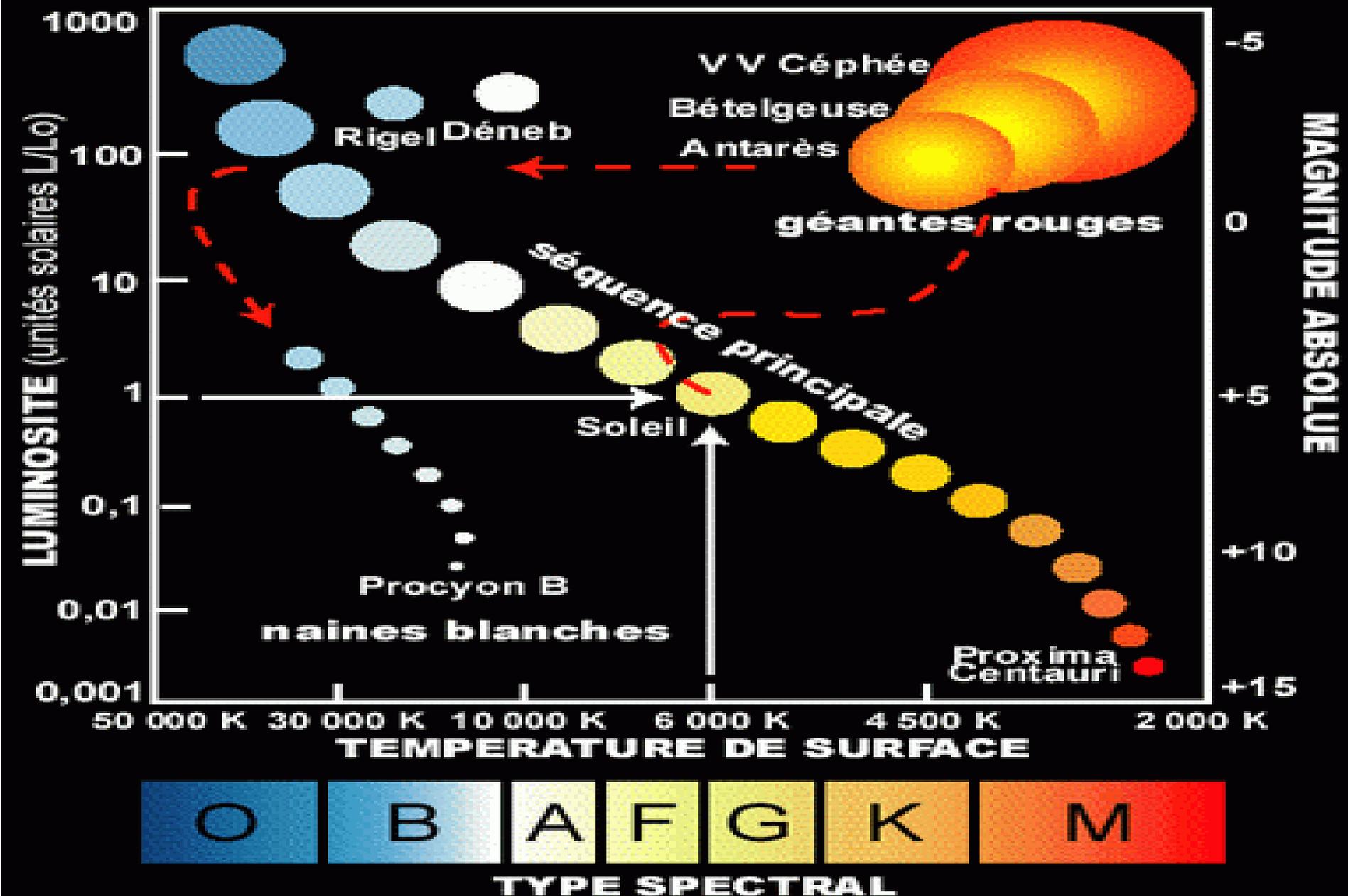


Une étoile peut-elle avoir une magnitude intrinsèque (absolue) quelconque ?

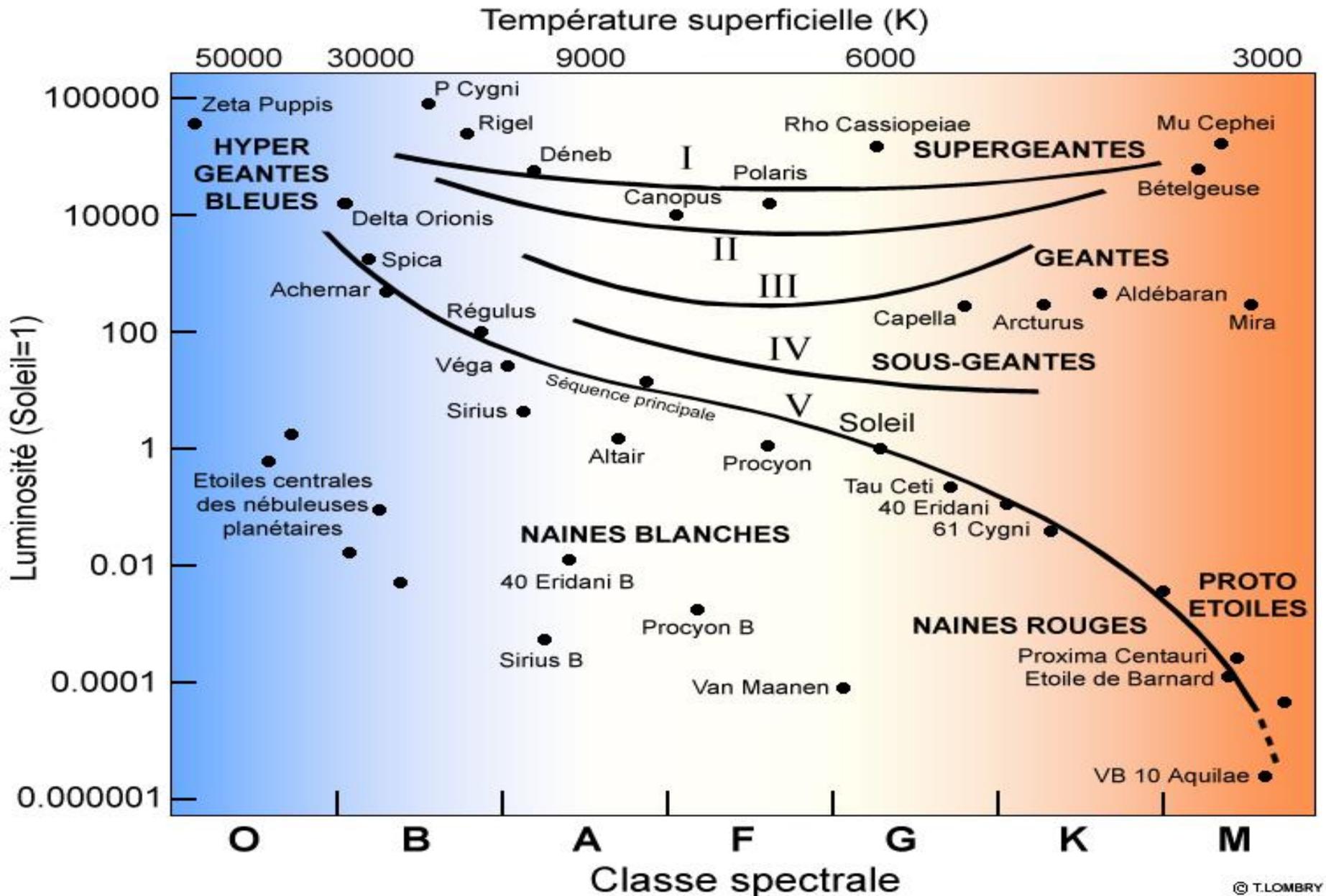
NON, Si la nature ne sait pas faire deux étoiles rigoureusement identiques, ce qui importe dans leur magnitude ce n'est que leur température et leur surface d'émission, et sur ces seuls critères la nature a fait beaucoup d'étoiles identiques.



Représentation Luminosité Type spectral



On isole la classe de luminosité de I à V



Les classes de luminosité

Classification de Yerkes des classes de luminosité.

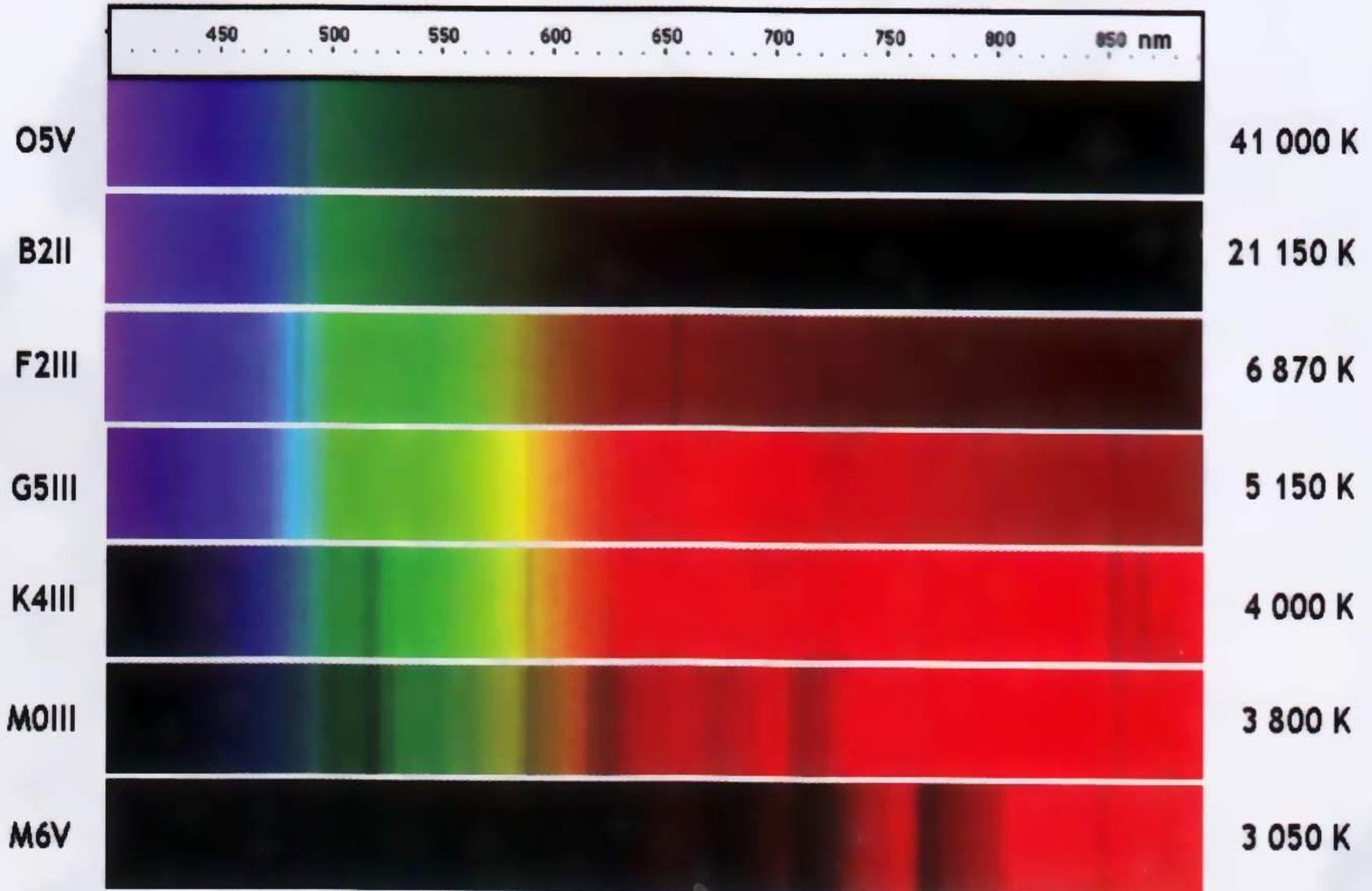
- ▶ Ia et Ib : étoiles supergéantes ;
- ▶ II : étoiles géantes brillantes ;
- ▶ III : étoiles géantes ;
- ▶ IV : étoiles sous-géantes ;
- ▶ V : série principale (étoiles naines) ;
- ▶ VI : étoiles sous-naines ;
- ▶ VII : naines blanches.

Plus de 95% des étoiles

Une étoile est donc caractérisée par son type spectral et sa classe de luminosité (système de Morgan et Keenan, MK).

Exemple pour le Soleil : G2V.

Spectres caractéristiques de différents types d'étoiles avec leur classe de luminosité



La séquence principale couvre plus de 95% des étoiles des galaxies dont on peut isoler la lumière individuellement et pour lesquelles le diagramme HR permet d'obtenir les relations suivantes

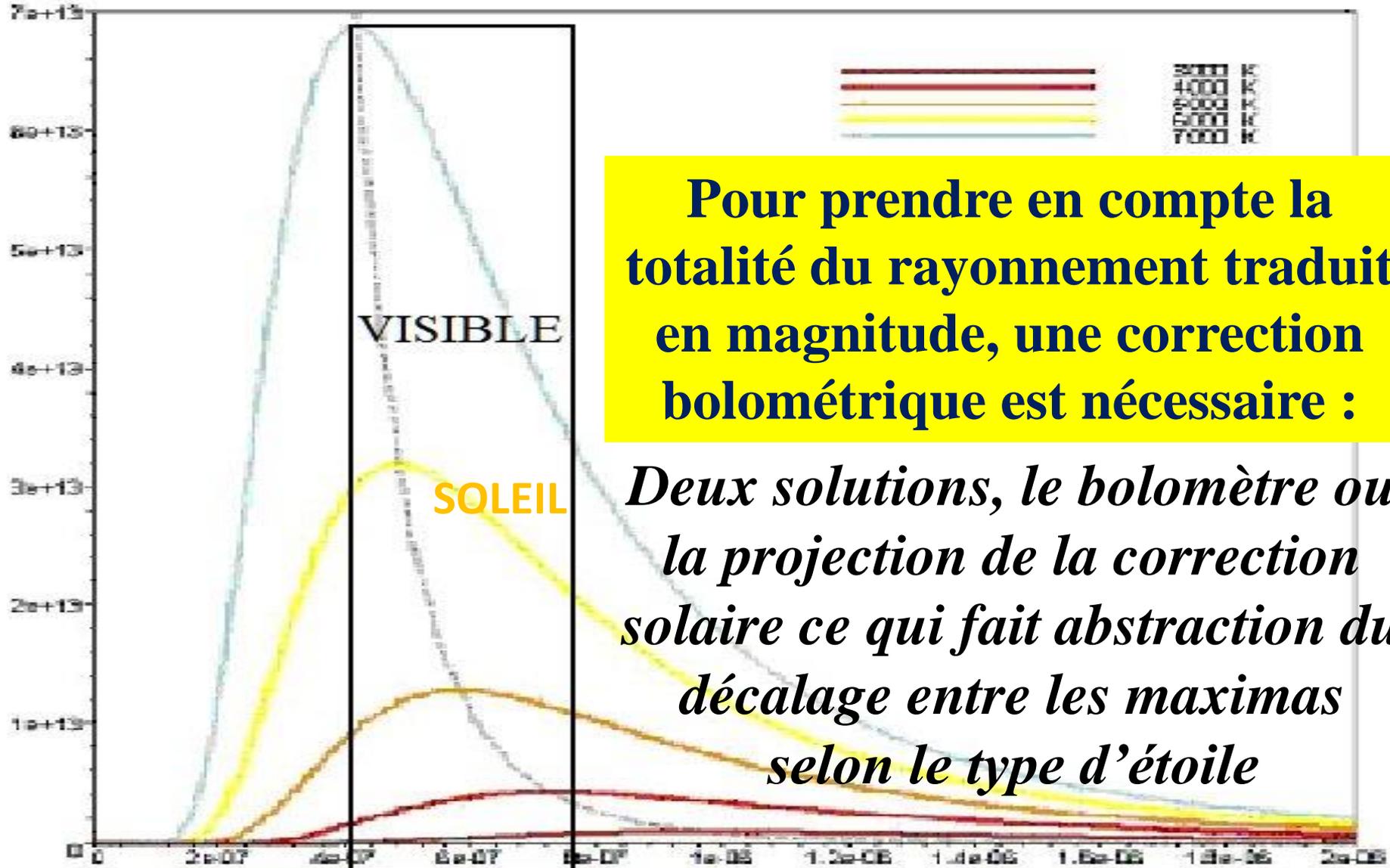


Etoiles de la séquence principale

	O	B	A	F	G	K	M
Type spectral :	O	B	A	F	G	K	M
Température :	40 000K	20 000K	8500K	6500K	5700K	4500K	3200K
Rayon (Soleil=1) :	10	5	1.7	1.3	1.0	0.8	0.3
Masse (Soleil=1) :	50	10	2.0	1.5	1.0	0.7	0.2
Luminosité :	100 000	1000	20	4	1.0	0.2	0.01
Durée(Millions ans) :	10	100	1000	5000	10 000	50 000	100 000
Abondance :	0.00001%	0.05%	0.3%	1.5%	4%	9%	80%

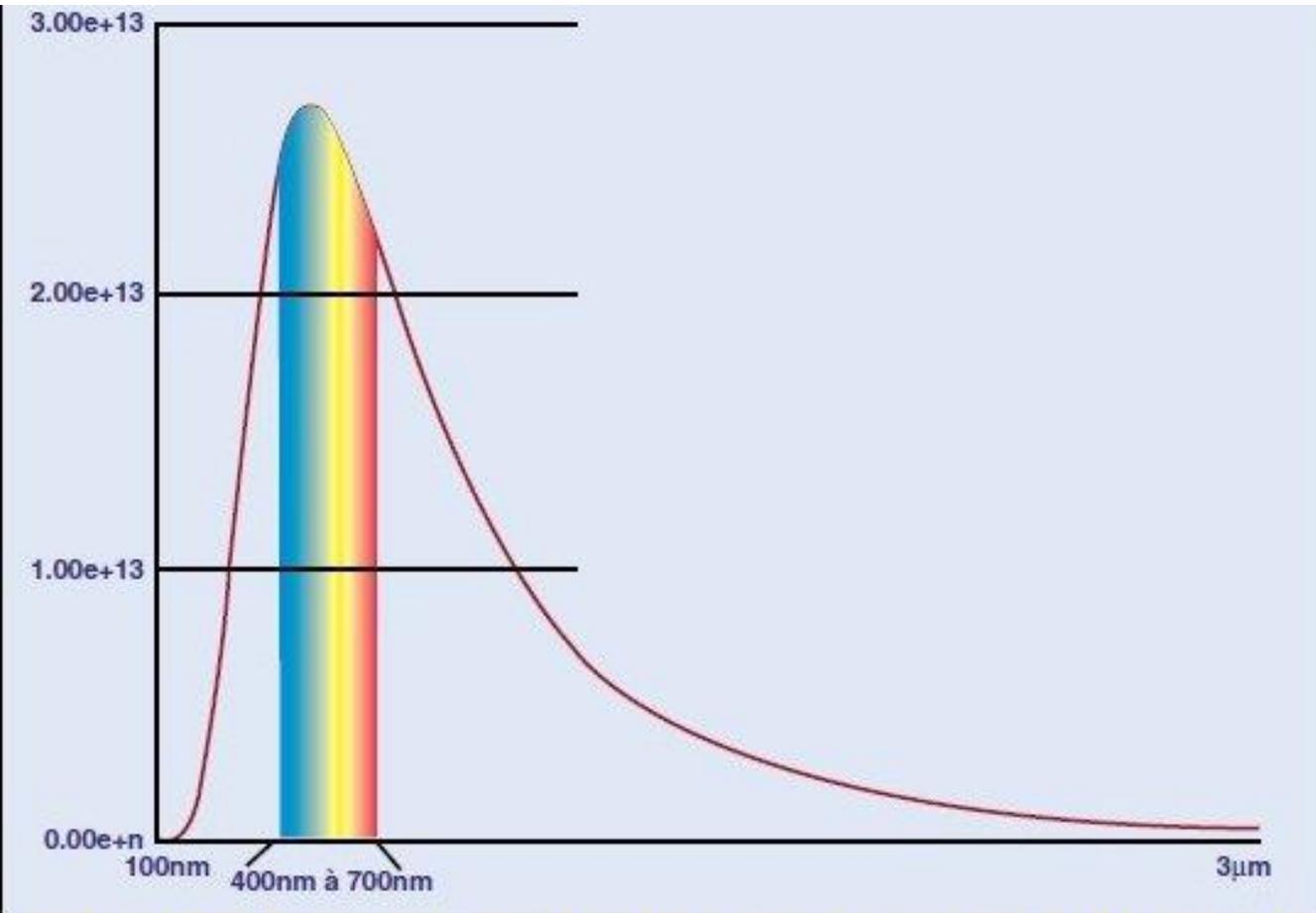
Magnitude et magnitude

Visuelle, photographique, ..., bolométrique



Pour prendre en compte la totalité du rayonnement traduit en magnitude, une correction bolométrique est nécessaire :

Deux solutions, le bolomètre ou la projection de la correction solaire ce qui fait abstraction du décalage entre les maximas selon le type d'étoile



Courbe de luminance spectrale énergétique du Soleil pour les longueurs d'onde (λ) de 100 nm à 3 μ m, par pas de 10 nm. Le domaine du spectre visible, allant du violet au rouge, est mis en évidence par une zone colorée. L'ordonnée relativise la luminance par longueur d'onde. La courbe résulte de l'application de la loi de Planck restreinte aux conditions solaires :

$$b(\lambda) = \frac{1,19 \cdot 10^{-16}}{\lambda^5 (2,718^{2,48} \cdot 10^{-6} / \lambda - 1)}$$

Pour dresser, point par point la courbe de luminance d'une étoile en fonction de sa température T (en Kelvins), reportez-vous à la relation ci-dessous qui traduit la loi de Planck :

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{[e^{hc/\lambda kT} - 1]}$$

e est la base des logarithmes népériens de valeur approchée

2,71828

h, c, et k sont des constantes universelles de la physique de valeurs approchées :

h (constante de Planck) :
6,62.10⁻³⁴ js

k (constante de Boltzmann) :
1,38 ;10⁻²³ Jk

c (vitesse de la lumière dans le vide) : 3,108 ms

Comment obtenir la Magnitude

M ?

1) Calculer la luminosité de l'étoile avec l'équation de Stefan. Elle est proportionnelle à la surface de l'étoile et à la puissance quatrième de la température et traduite en watts par la constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8}$) : $L = S\sigma T^4$

2) Convertir la luminosité en Magnitude en appliquant la correction bolométrique avec la « constante » correspond à la correction de Magnitude $M_{(bol)}$ du Soleil

$$\text{Correction } M_{bol} = 4.75 - 2.5 \log_{10}(L / L_0)$$

Calcul de la magnitude bolométrique M

Détermination de M(étoile) à partir du rayon, de la température, de M Soleil, du rapport étoile/Soleil, et de la constante de Stephan

TYPE	O	B ₅	A ₅	F ₅	G2 Soleil	K ₅	M ₉
Rayon S=1	7	5	1,7	1,5	1	0,8	0,1
température K	25000	14000	7800	7500	5700	4800	2000

$$K \text{ Steph} = 5,67 \cdot 10^{-8} = \sigma$$

$$\text{Luminosité directionnelle } W = \pi R^2 \sigma T^4$$

Luminosité. directionnelle W	1,65161E+30	8,28714E+28	9,23057E+26	6,14299E+26	9,1086E+25	2,93155E+25	1,38061E+22
------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	------------	-------------	-------------

La projection de la répartition de l'ensemble du spectre pour les Soleil sur toutes les catégories d'étoiles entraîne

4,75

une erreur qui dépend du type d'étoile

$$\text{Magnitude bolométrique de l'étoile} = \text{Magn. Bol Soleil} - 2,5 \log(\text{luminosité.étoile} / \text{luminosité du Soleil})$$

M bolométrique calculée	-5,90	-2,65	2,24	2,68	5,69	5,98	14,30
-------------------------	-------	-------	------	------	------	------	-------

$$\text{Correction Mbol} = 4.75 - 2.5 \log_{10}(L / L_s)$$

Tau Ceti Lum W →

3,83004E+25

R_e=0,81 et T_k=5100

Étoile	<i>Delta Orionis</i>	<i>Achernar</i>	<i>Altaïr</i>	<i>Procyon</i>	<i>Tau Ceti</i>	<i>40 Eridani</i>	<i>Proxima</i>
Classe	O9	B3	A7	F5	G8	K1	M5
magnitude bol M réel	-4,99	-2,76	2,21	2,65	5,70	6,00	15,49
Sens de variation de l'erreur	>	>	>	>	≈	<	<

A partir des magnitudes m et M connues, calculons la distance par le module de distance

$$\delta = 10^{((m - M + 5) / 5)}$$

Etoile	Achernar	Altaïr	Procyon	tau ceti	40 eridani	Proxima
classe	B3	A7	F5	G8	K1	M5
magnitude m	0,46	0,77	0,37	3,5	4,5	11,05
<i>distance réelle en AL</i>	<i>144</i>	<i>17</i>	<i>11,5</i>	<i>12</i>	<i>16,5</i>	<i>4,2</i>
magnitude bol M réel	-2,76	2,21	2,65	5,70	6,00	15,49

$$\delta = 10^{((m - M + 5) / 5)}$$

Calcul de l'exposant de

exposant	1,644	0,712	0,544	0,56	0,7	0,112
<i>Distance calculée en Parsecs 10^{ex}</i>	<i>44,06</i>	<i>5,15</i>	<i>3,50</i>	<i>3,63</i>	<i>5,01</i>	<i>1,29</i>
<i>Distance calculée en AL (Une AL = 3,2616)</i>	<i>143,7</i>	<i>16,8</i>	<i>11,4</i>	<i>11,8</i>	<i>16,3</i>	<i>4,2</i>

L'estimation que nous venons de voir implique que la lumière émise par l'étoile dont on cherche à connaître la distance ne soit pas polluée par celle des étoiles voisines. Ce procédé limite la mesure aux étoiles de notre Galaxie et situées du même côté du disque ou dans son halo.

Les étoiles des autres Galaxies, à part certains astres situés dans les galaxies naines satellites de la voie Lactée, sont trop éloignées pour que leur lumière puisse être analysée individuellement.

D'autres indices secondaires sont alors utilisés.

Ce sont des chandelles dont ce qui est observable est une caractéristique qui les différencie de leur environnement : Fréquence de pulsations pour les étoiles variables (RR-Lyra, céphéides) ou courbe de lumière caractéristique d'un phénomène connu (Supernovæ)

Ces chandelles sont étalonnées à partir de celles de même type qui sont accessibles par la parallaxe trigonométrique.

Merci de votre attention

Des questions?