

# Naines blanches, pulsars et autres objets compacts

## 1. Généralités sur les étoiles.

Fabrice Mottez

LUTH, Observatoire de Paris, CNRS, et Univ. Paris Diderot

Festival d'Astronomie de Haute Maurienne, août 2007.

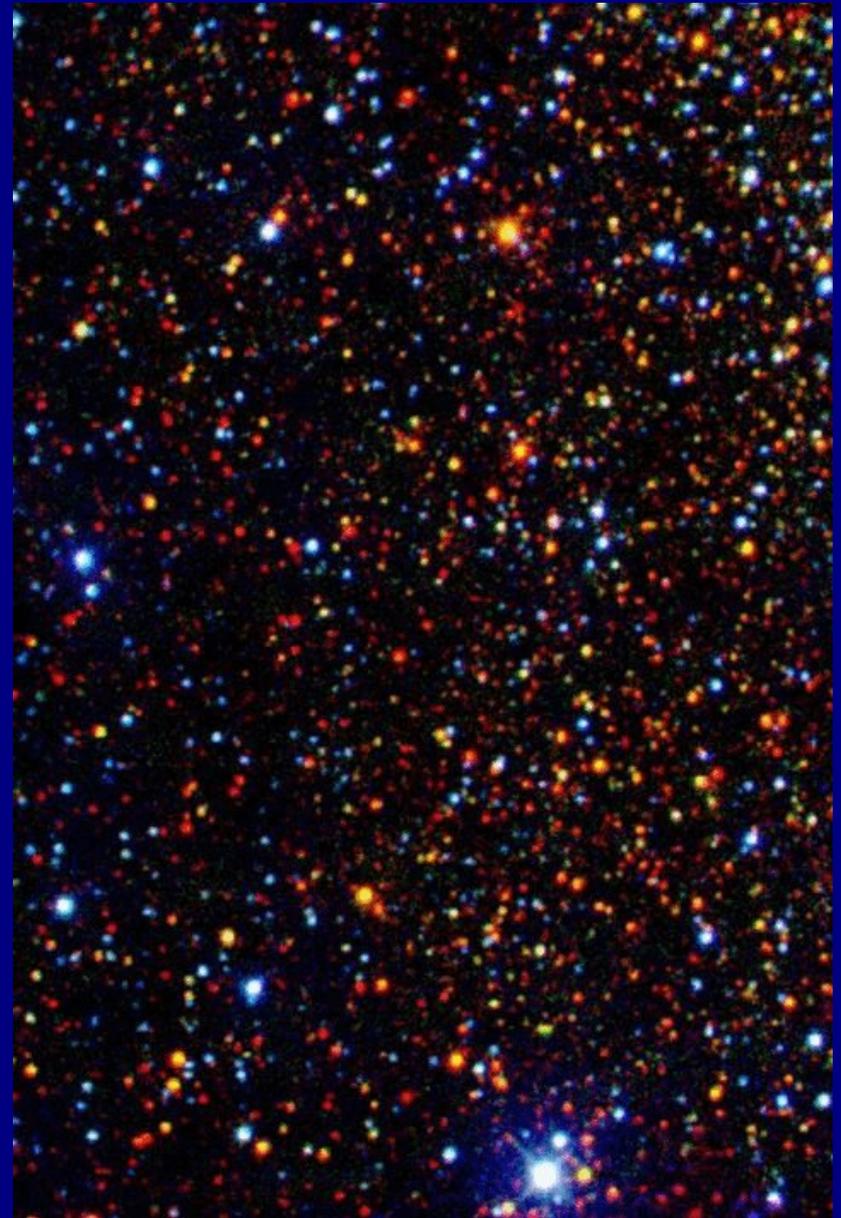
# étudier des points lumineux.

Les étoiles paraissent comme des points... jusqu'à l'invention de l'interférométrie optique.

Les petites étoiles apparaissent toujours comme des points.

Que peut-on observer ?

champ d'étoile, plan galactique,  
vu par Denis, en bandes I, J,  
et K (proche IR).  
En K, le milieu interstellaire  
est plus transparent.

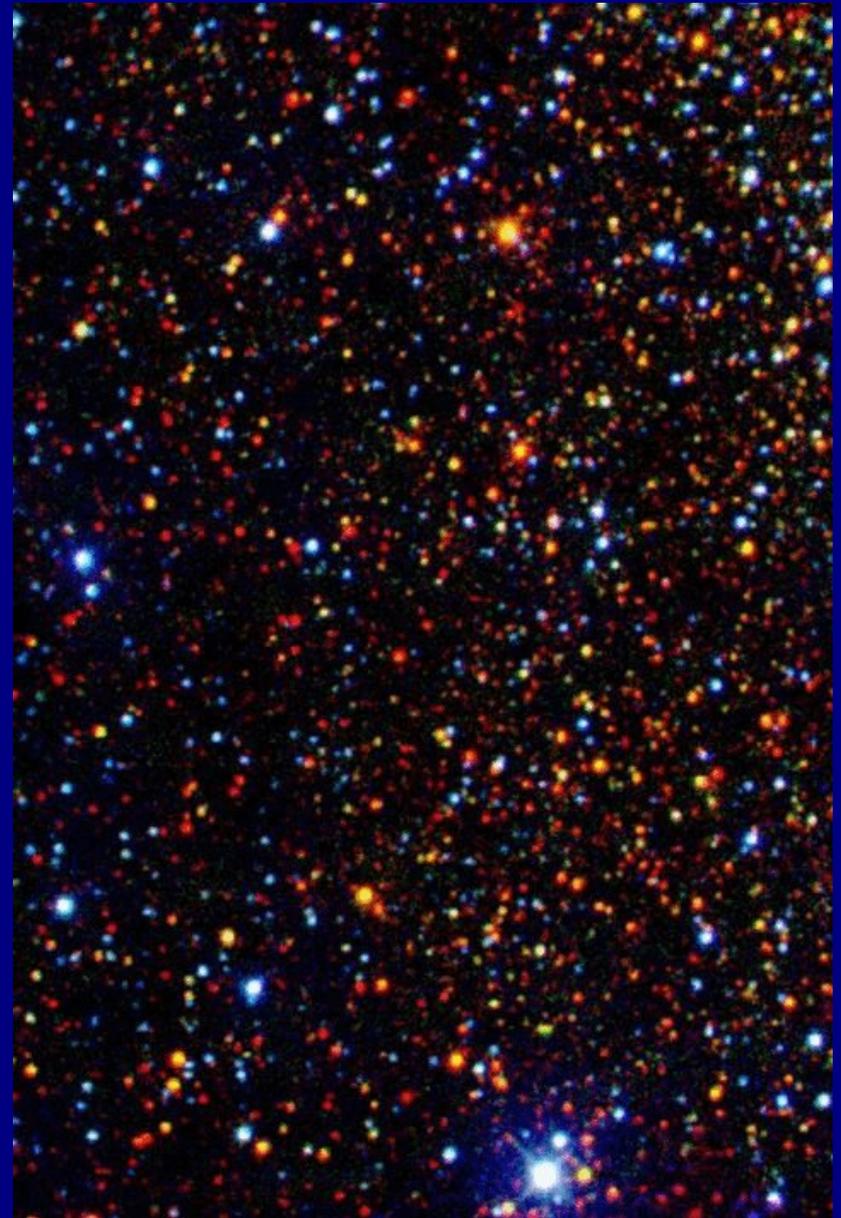


# étudier des points lumineux.

On peut mesurer la quantité de lumière venant d'étoiles (isolées ou en amas).

On peut mesurer la couleur/le spectre de la lumière.  
Il faut entendre « lumière » au sens large : de la radio jusqu'aux rayons gamma.

champ d'étoile, plan galactique, vu par Denis, en bandes I, J, et K (proche IR).  
En K, le milieu interstellaire est plus transparent.



# Mesurer la quantité de lumière

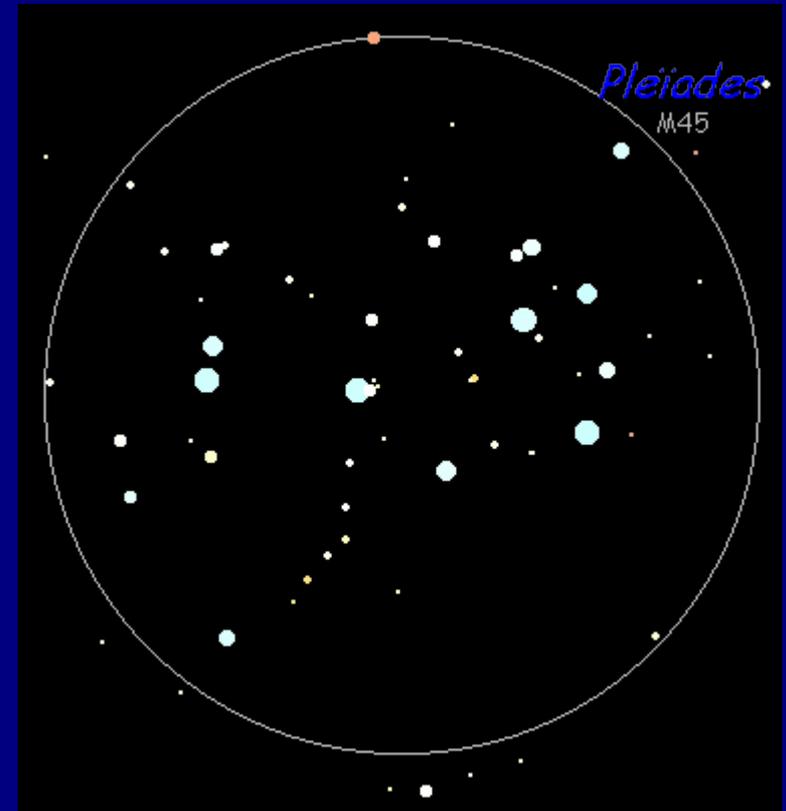
Depuis les grecs, on mesure le flux radiant **s** = quantité de lumière reçue par unité de surface à chaque seconde en magnitude :

$$m - m_0 = -2.5 \log(s/s_0)$$

Pourquoi en magnitude. Pourquoi ce logarithme ?

Parce que l'oeil est sensible au logarithme de la quantité de lumière reçue : peu sensible quand il y a beaucoup de lumière, plus sensible quand il y en a peu. Cela permet à l'oeil de ne pas saturer (être ébloui) malgré des conditions d'éclairement pouvant très fortement varier.

(En plus, il y a deux régimes de vision...)



Sur une carte du ciel, le diamètre des étoiles est proportionnel à leur magnitude.

# Avec la magnitude et la distance, on connaît (presque) la luminosité

La luminosité **L** émise par un astre est conservée au cours de son cheminement.

**R** : rayon de l'astre

**d**: distance de l'observateur

$$L(R) = L(d) = L$$

On se ramène à un flux par unité de surface, c'est le flux radiant **s**

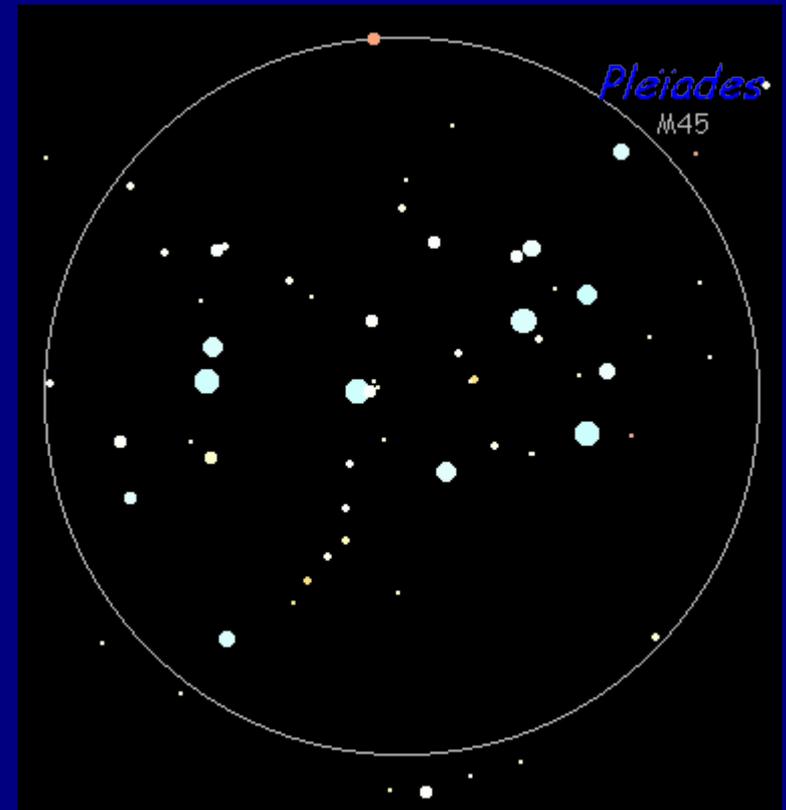
$$L = s(R) 4 \pi R^2 = s(d) 4 \pi d^2$$

du point de vue de l'observateur

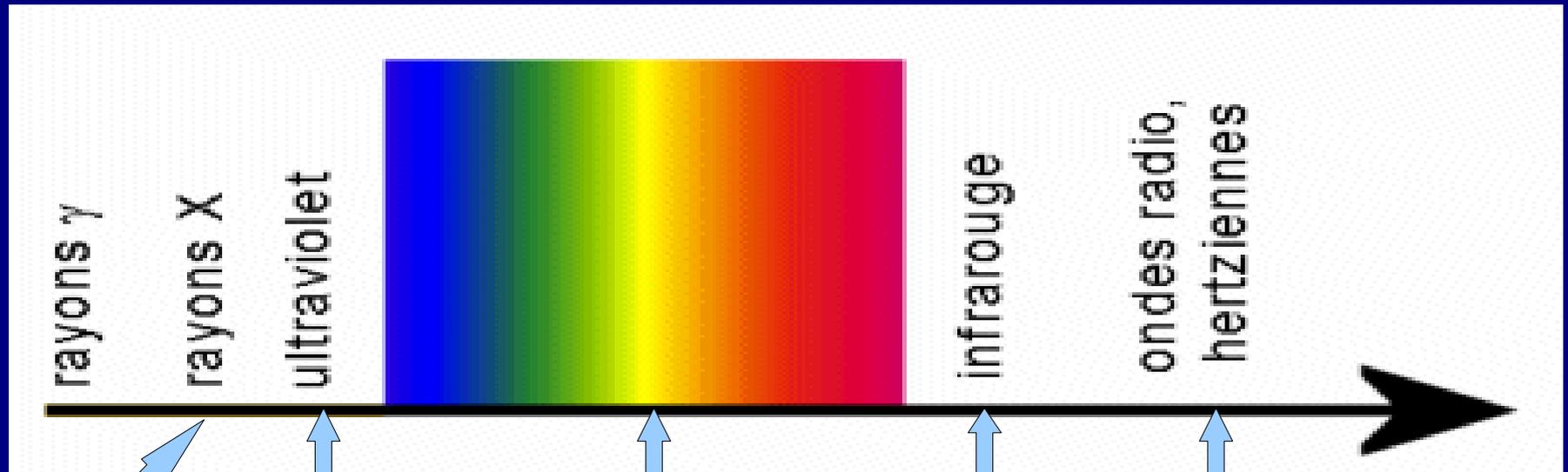
$$s(d) = L / 4 \pi d^2.$$

**s(d)** est une grandeur mesurable (objet de la photométrie, pas facile.)

Tout cela est juste à condition que l'espace soit transparent.



# Les domaines du spectre



Le corps est transparent aux rayons X, mais pas les os. Radiographies médicales.

Coups de soleil

Poissons, abeilles, tortues voient les ultraviolets

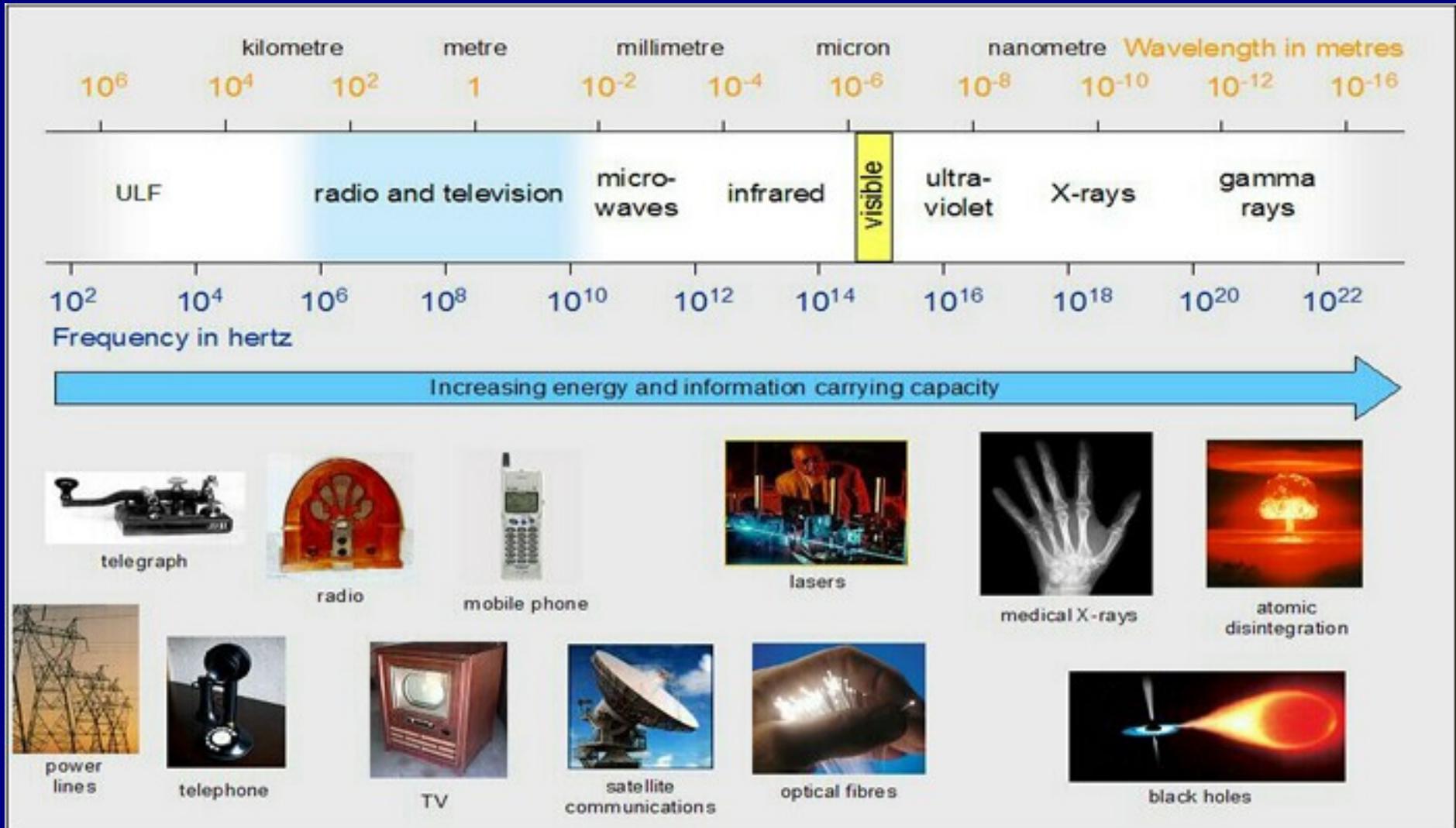
Ce qu'on voit avec nos yeux.

Chauffe.

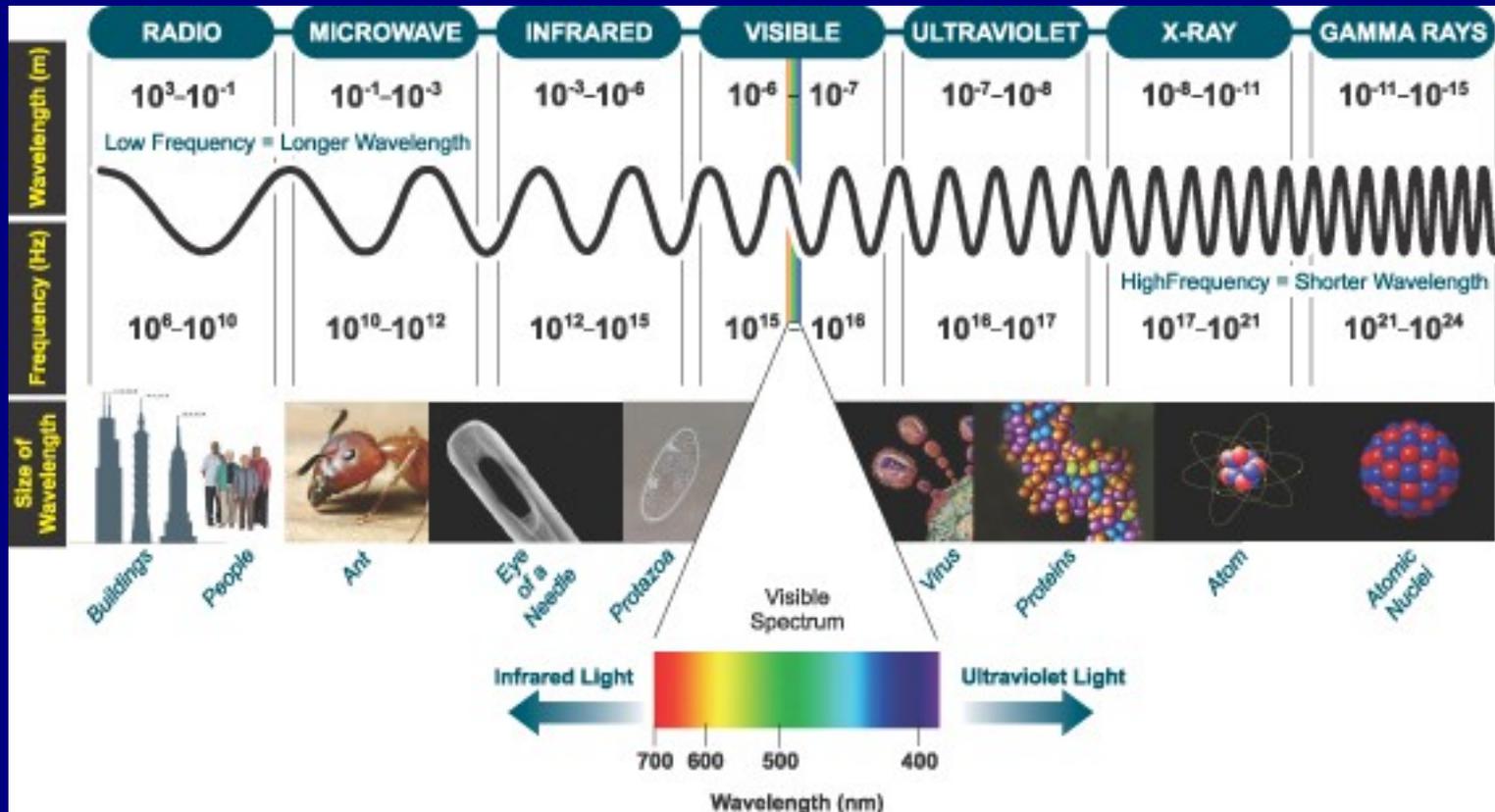
Certains serpents « détectent » les infrarouges.

écouter la radio, regarder la télévision.

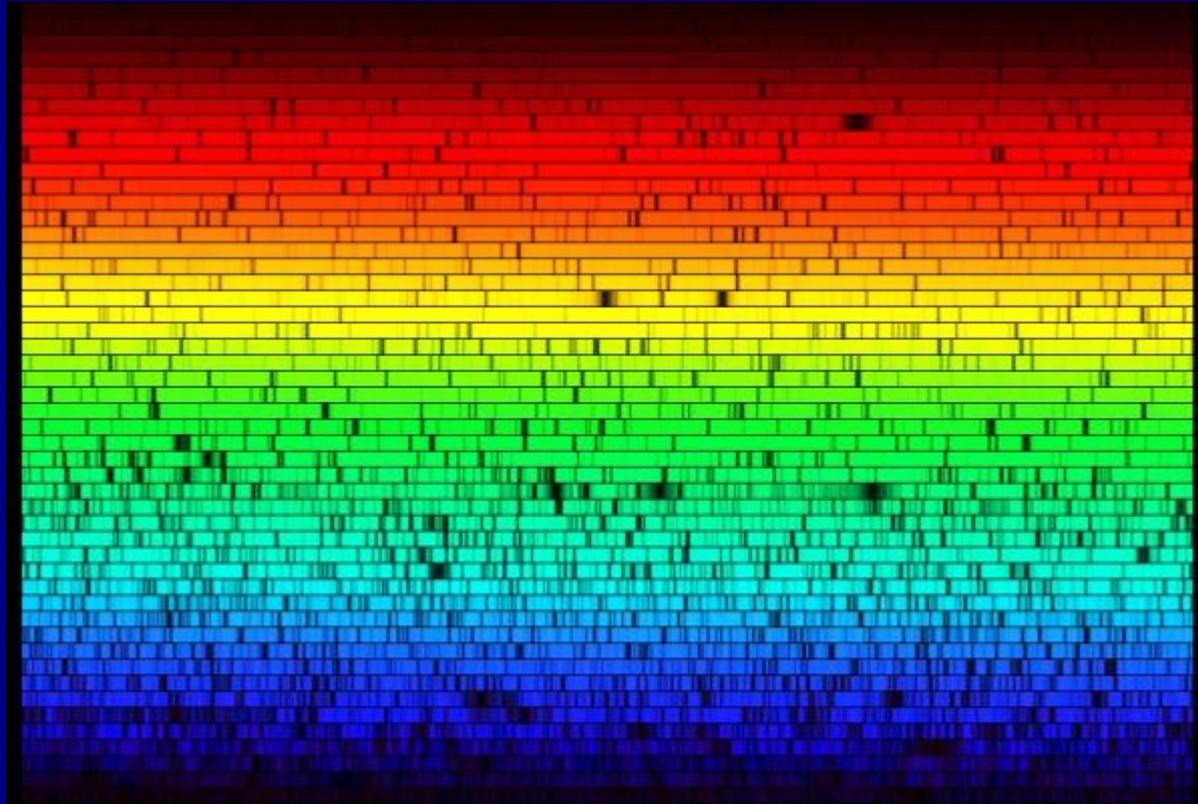
# Les domaines du spectre



# Les domaines du spectre

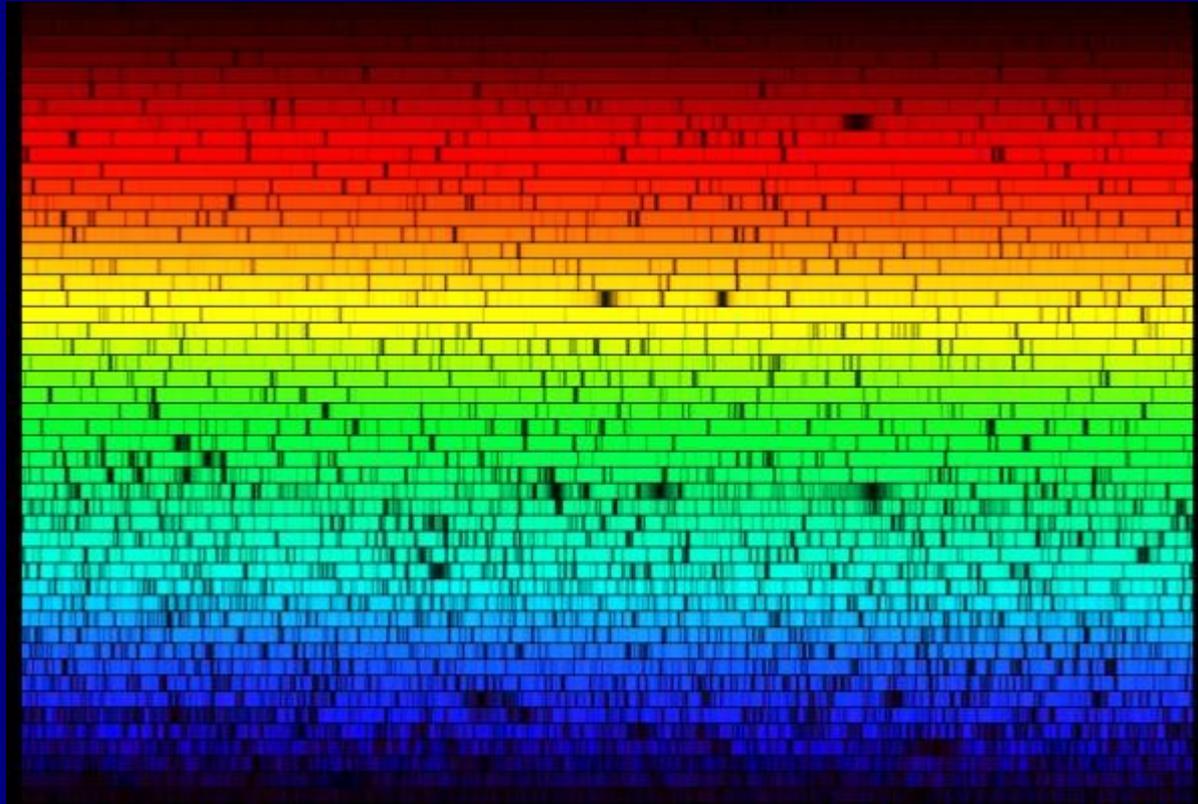


# étudier le spectre des étoiles



Spectre haute résolution en visible et proche IR  
de l'étoile Arcturus (Bouvier). Type KIII. [Hinkle et al, 1995]  
Kitt Peak National Observatory, near Tucson, Arizona

# étudier le spectre des étoiles

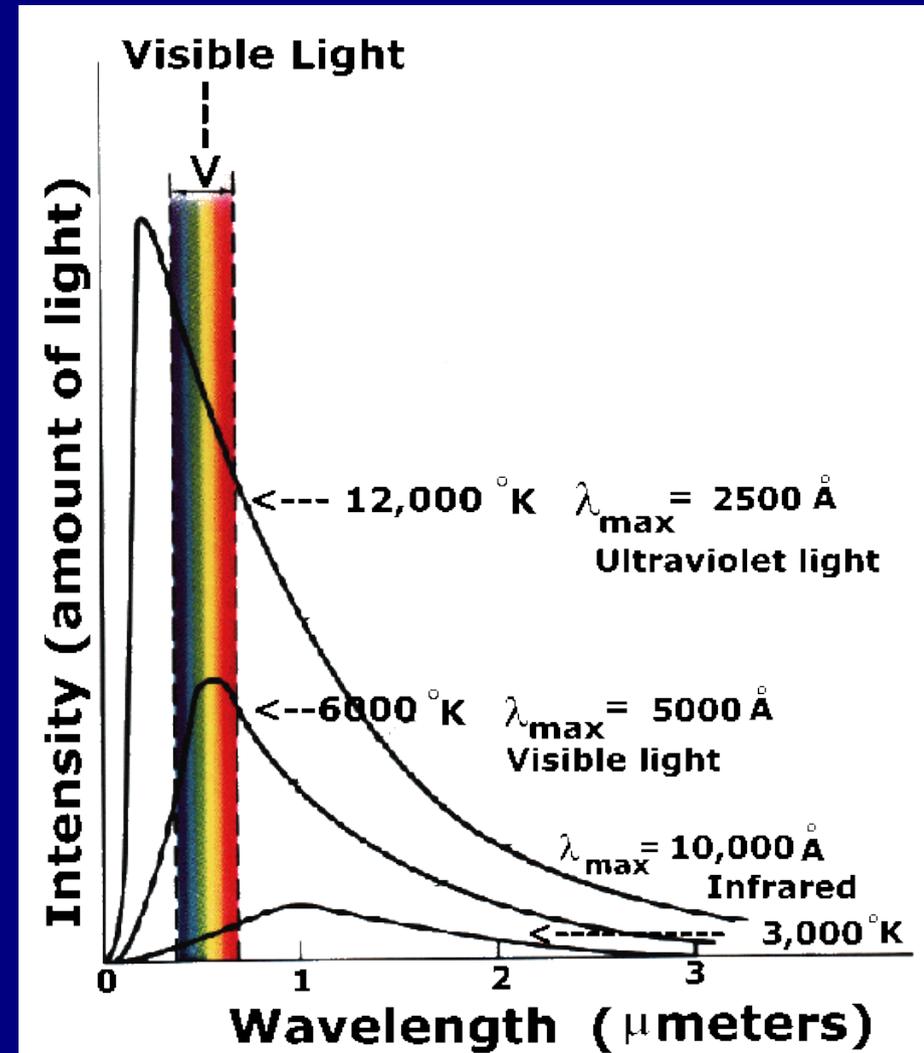


Etudier la position des raies les unes par rapport aux autres, et par rapport à la fréquence/longueur d'onde/couleur. Etudier leur largeur, leur forme.



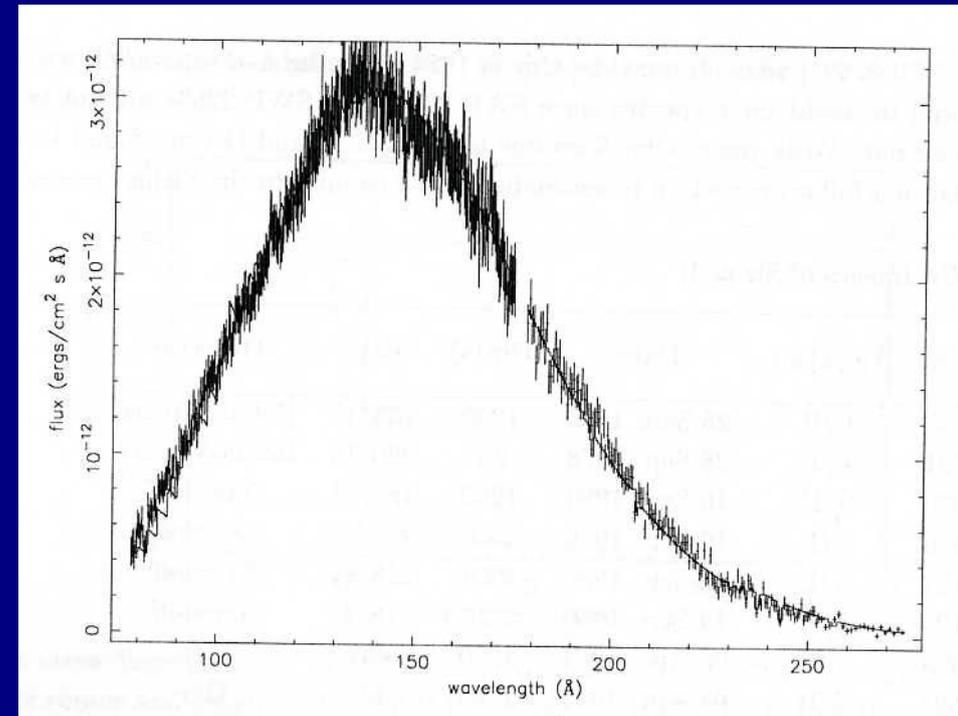
# La luminosité des objets opaques

- Si on ne s'occupe pas des raies...
- Physique et statistiques sur une assemblée de photons. On considère des photons confinés dans une boîte, c'est à dire en pratique, qu'il y a peu de photons émis par rapport à ce qu'il y a en réserve. Corps noir. (dénomination paradoxale.)
- C'est le cas dans une étoile.
- Loi de Planck, nombre de photons de chaque fréquence/ longueur d'onde/couleur en fonction de la température de l'astre.



# Une étoile est-elle un corps noir ?

- Si on ne s'occupe pas des raies...
- Physique et statistiques sur une assemblée de photons. On considère des photons confinés dans une boîte, c'est à dire en pratique, qu'il y a peu de photons émis par rapport à ce qu'il y a en réserve. Corps noir. (dénomination paradoxale.)
- C'est le cas dans une étoile. (on le verra plus loin.)
- Loi de Planck, nombre de photons de chaque fréquence/ longueur d'onde/couleur en fonction de la température de l'astre.



Spectre de l'étoile Sirius B

# Une étoile est-elle un corps noir ?

- Il faut comparer la quantité d'énergie lumineuse en réserve à la quantité qui sort à chaque seconde.
- Un exemple : un photon (gamma) produit au centre du Soleil interagira (disparition du photon, création d'un ou plusieurs autres photons). Les photons résultant de ce photon initialement produit sortiront du Soleil un million d'années plus tard.

# Une étoile est-elle un corps noir ?

- Il faut comparer la quantité d'énergie lumineuse en réserve à la quantité qui sort à chaque seconde.
- Un autre exemple, sur lequel on reviendra. Supposons que les réactions nucléaires cessent. Combien de temps ce qui reste de l'étoile mettra à refroidir ? Si ce temps est long, l'étoile est bien un corps noir.

# La luminosité des objets opaques

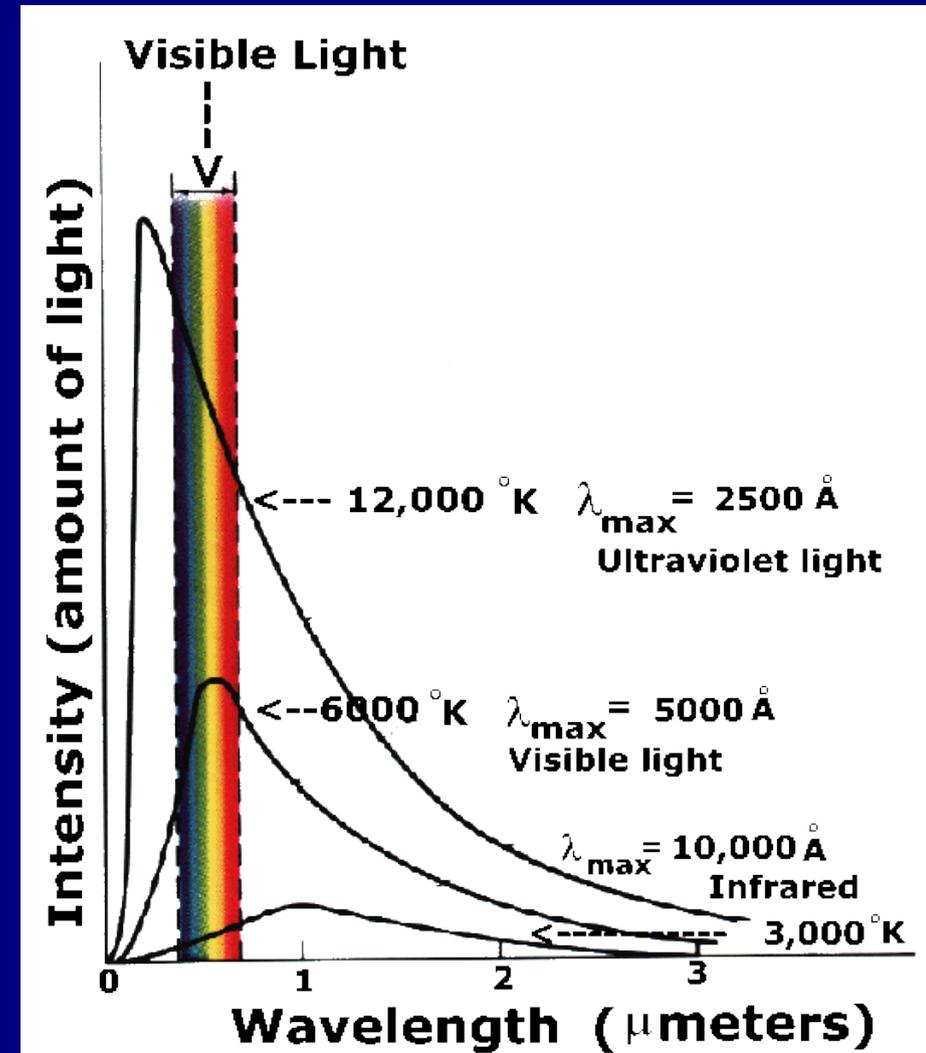
Loi de Wien [1894] :

Le maximum d'émission se produit à

$$\lambda_{\max} = 0.28 / T$$

avec  $T$  en Kelvin et  $\lambda_{\max}$  en cm.

En mesurant quelle est la couleur la plus brillante d'une étoile (de longueur d'onde  $\lambda_{\max}$ ), on peut en déduire la température de surface de l'étoile.



# La luminosité des objets opaques

Loi de Wien [1894] :

Le maximum d'émission se produit à

$$\lambda_{\max} = 0.28 / T$$

avec  $T$  en Kelvin et  $\lambda_{\max}$  en cm.

Exemples :

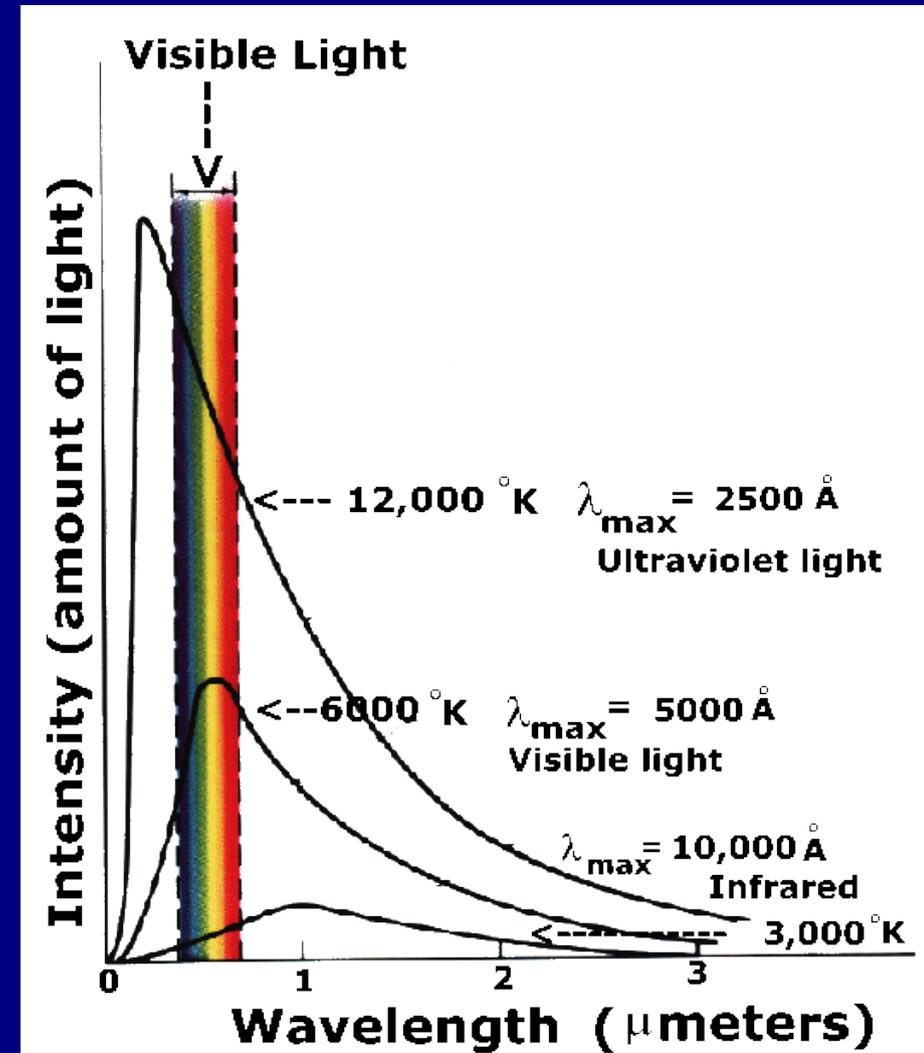
1000K : infrarouge,

3000 K : rouge,

6000K jaune,

8000 -2 000 000 K : UV

15 000 000 K : X



# La luminosité des objets opaques

Loi de Stephan-Boltzmann [1879-84] :

la **luminosité**  $L/S$  émise par unité de surface est

$$L/S = \sigma T^4$$

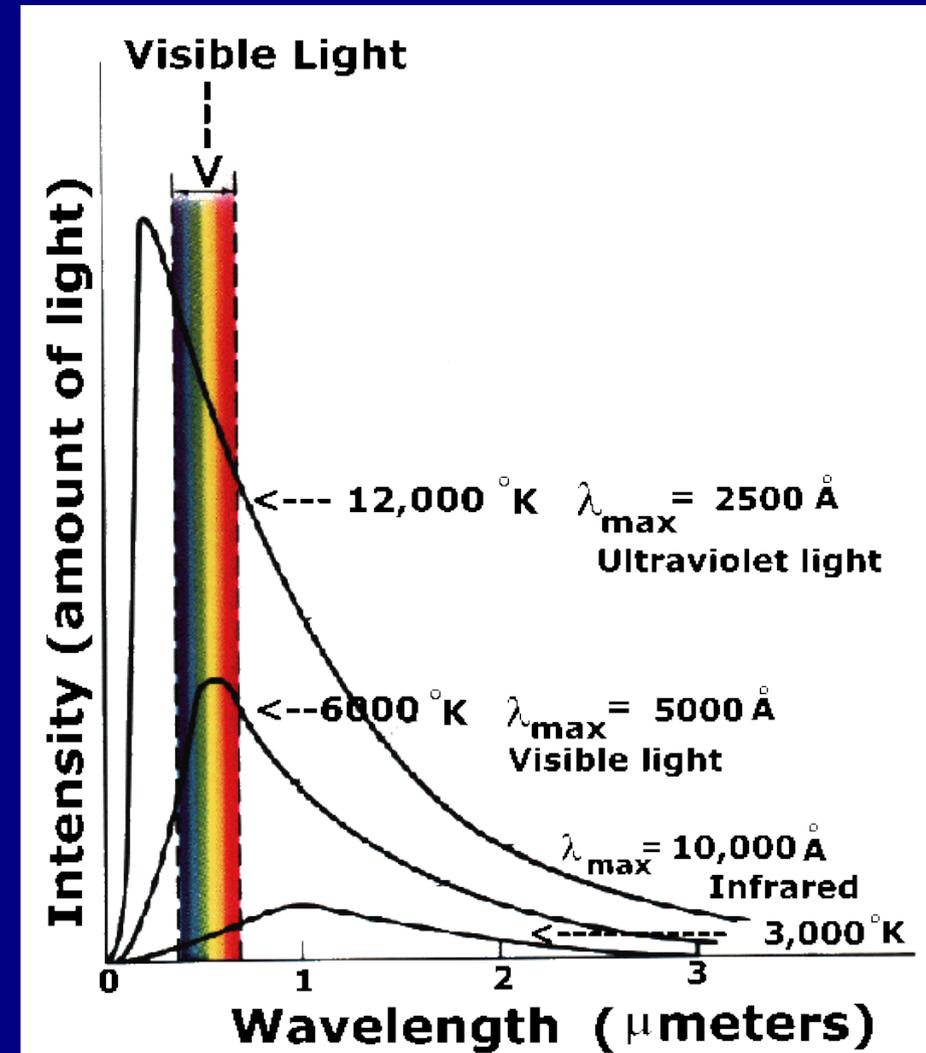
où  $\sigma$  est une constante.

Pour une étoile de rayon  $R$ , la surface

$$S = 4 \pi R^2$$

et

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



# Peut-on connaître le rayon des étoiles ?

- Sauf très récemment, les étoiles paraissent comme des points au télescope... mais, en connaissant  $\lambda_{\max}$  et  $s$  (ou la magnitude) ...
- En analysant leur couleur, on peut connaître leur température de surface  $\lambda_{\max} = 0.28... / T$
- La physique indique la quantité de lumière émise en fonction de la température et de la surface de l'étoile  $L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$
- En comparant la lumière émise à la lumière reçue  $s = L / 4 \pi d^2$ , si on connaît la distance  $d$  de l'étoile, on déduit le rayon  $R$  de l'étoile.
- On fait ce genre d'opération depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. C'est la méthode fondamentale pour estimer des diamètres d'étoiles.



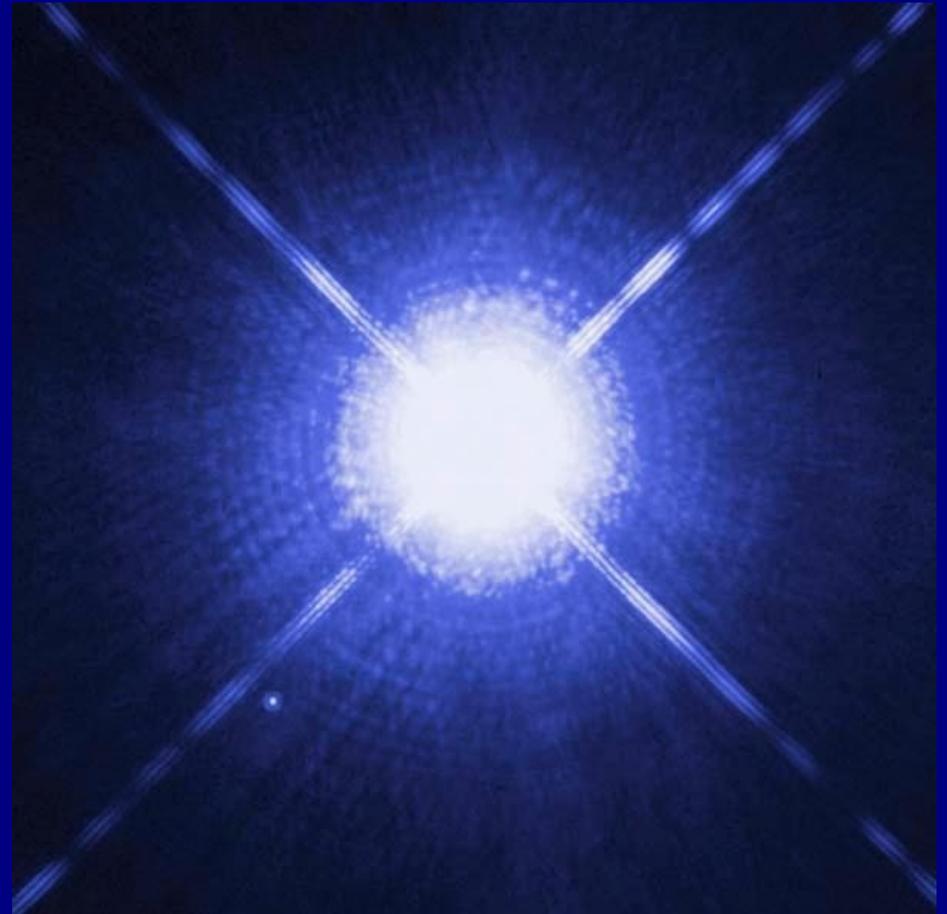
# La découverte d'une étoile curieusement peu brillante.

- Sirius est une des étoiles les plus proches.
- Bessel (1841) étudie le mouvement propre de Sirius : perturbation périodique.
- Sirius est un système double.



# La découverte d'une étoile curieusement peu brillante.

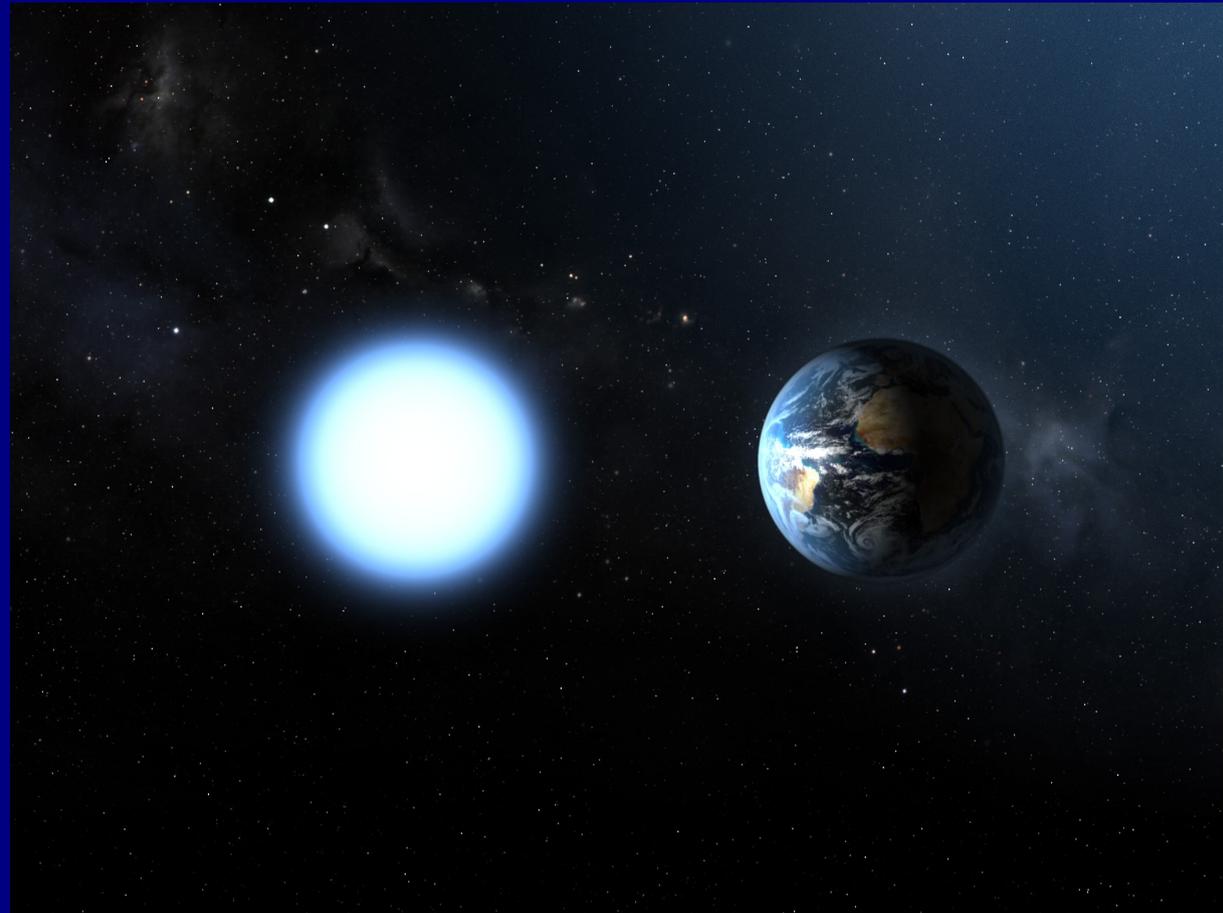
- Sirius est une des étoiles les plus proches.
- Bessel (1841) étudie le mouvement propre de Sirius : perturbation périodique.
- Sirius est un système double.
- Malgré sa proximité de la Terre, on ne la voit pas facilement.  
Première observation en 1862.



Sirius A et B (en bas à gauche),  
[HST, Bond et al.]

# La découverte d'une étoile curieusement peu brillante.

- Si on calcule son rayon avec la méthode précédente, on trouve le rayon de la Terre, bien que sa masse soit celle d'une étoile.
- 1 Tonne/cm<sup>3</sup>.
- Question (vers 1896) est-ce possible ?

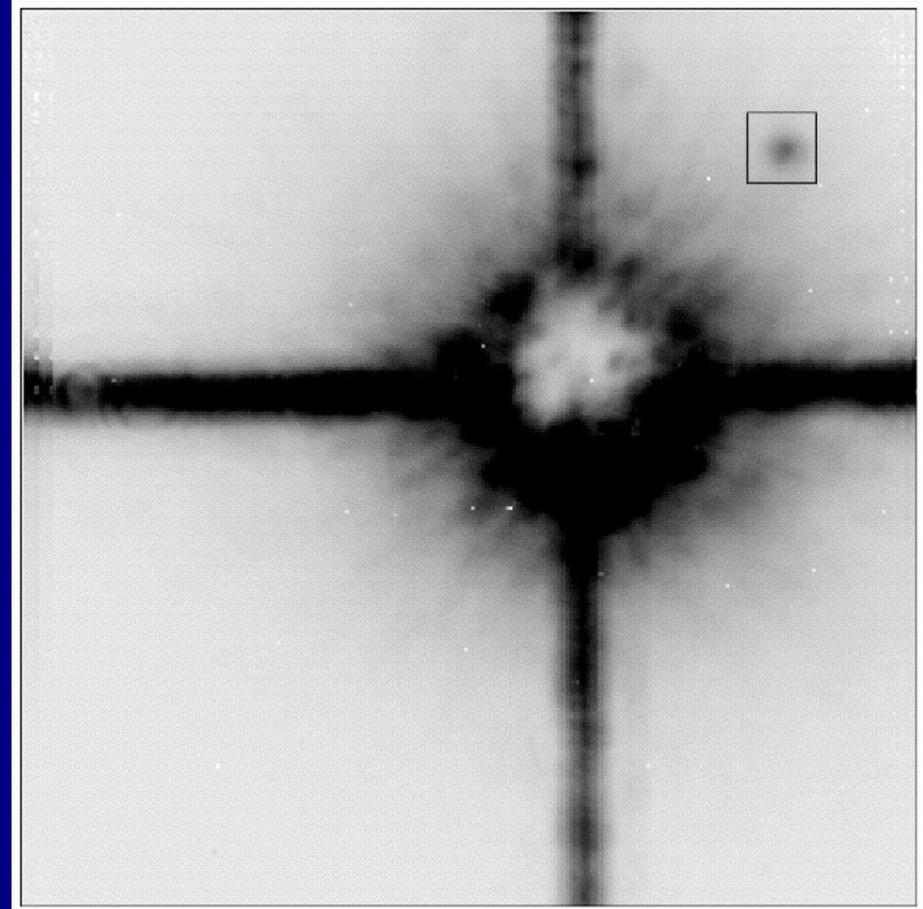


Comparaison des dimensions de Sirius B et de la Terre  
[Sky and Telescope]

# La situation s'aggrave avec Procyon B.

- Bessel découvre Procyon B.
- Observé en 1896 par Schaeberle, Lick Observatory .
- Mesures analogues.
- Même problème.

On n'a pas affaire à un « cas isolé ».



Procyon B (en haut à droite).  
Procyon A est masqué. IR en bande K.  
[NASA, telescope IRTF, 3 mètres]

# La situation s'aggrave avec Procyon B.

Question ouverte jusqu'en 1925 où on montra que de telles étoiles sont possibles.

# Que peut-on connaître des étoiles ?

- Si on connaît la **distance**... (sondes Hipparcos, Gaïa)...
- Photométrie : **luminosité** de l'étoile.
- Avec le continuum du spectre : **température de surface**.
- D'où on déduit le **rayon**.
- **La masse : problème difficile**, sauf pour des systèmes d'étoiles doubles.
- Gravitation  $g$  à la surface ( $g = GM/R^2$ ) à partir de certaines raies spectrales, si  $g$  est très fort.
- Effet Zeeman (sur raies spectrales) : champ magnétique.
- Variations de luminosité (astérosismologie) : sondage de l'intérieur de l'étoile. (Sonde Corot.)
- etc.

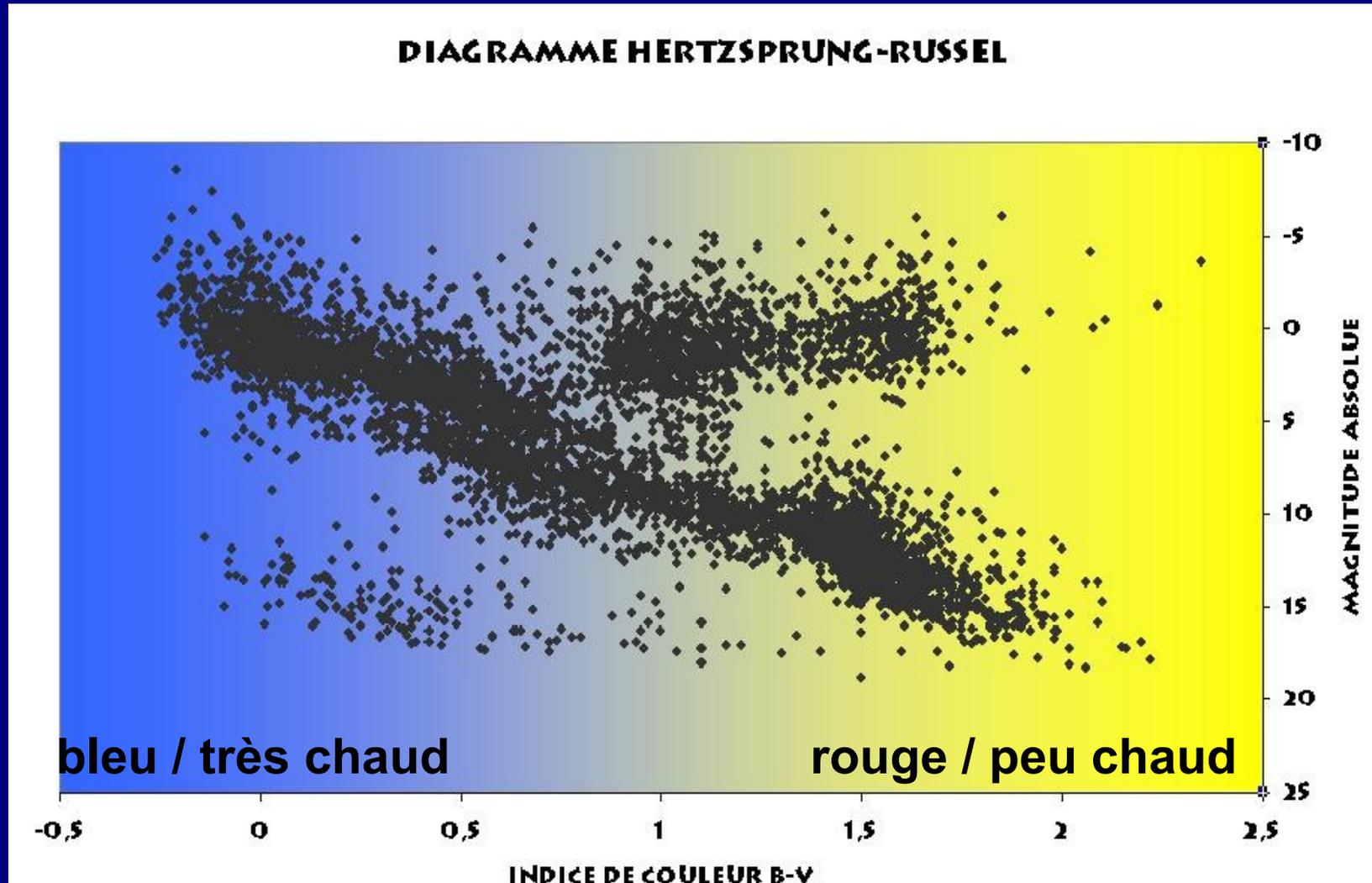
# Théorie des étoiles

- Pourquoi brillent-elles tant ? Quelle source d'énergie ?
- Helmholtz (1854) : énergie gravitationnelle. Contraction du Soleil 100m/an => brille 30 millions d'années.
- 1912 : datation de roches terrestres indique plusieurs milliards d'années.

# Un peu d'ordre dans le monde des étoiles : diagramme HR.

- Hertzsprung-Russell, 1912.
- axe horizontal : indice couleur / température de surface /  $\lambda$  max
- axe vertical : magnitude absolue / luminosité

# Un peu d'ordre dans le monde des étoiles : diagramme HR.

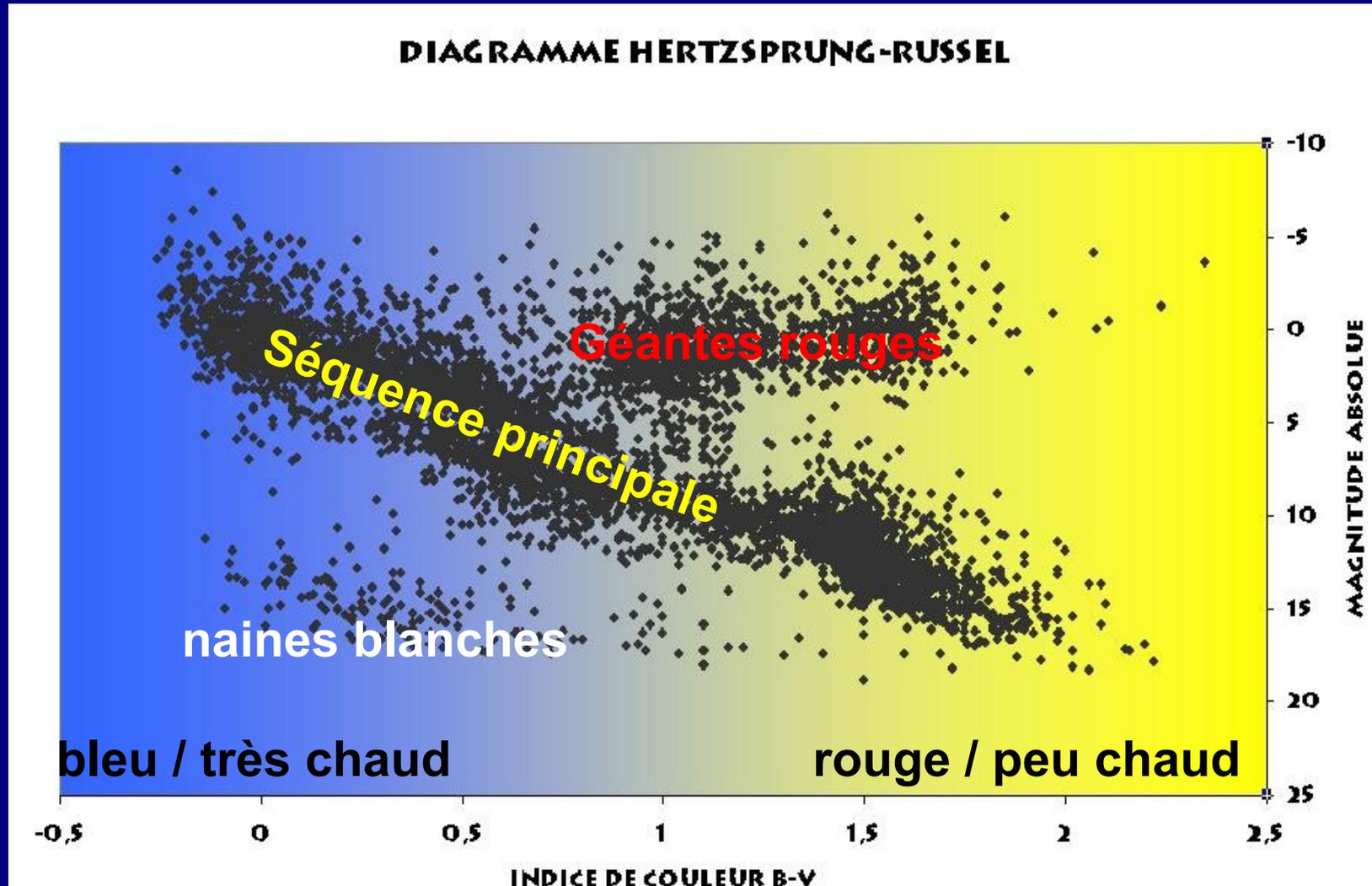


très  
brillant

peu  
brillant

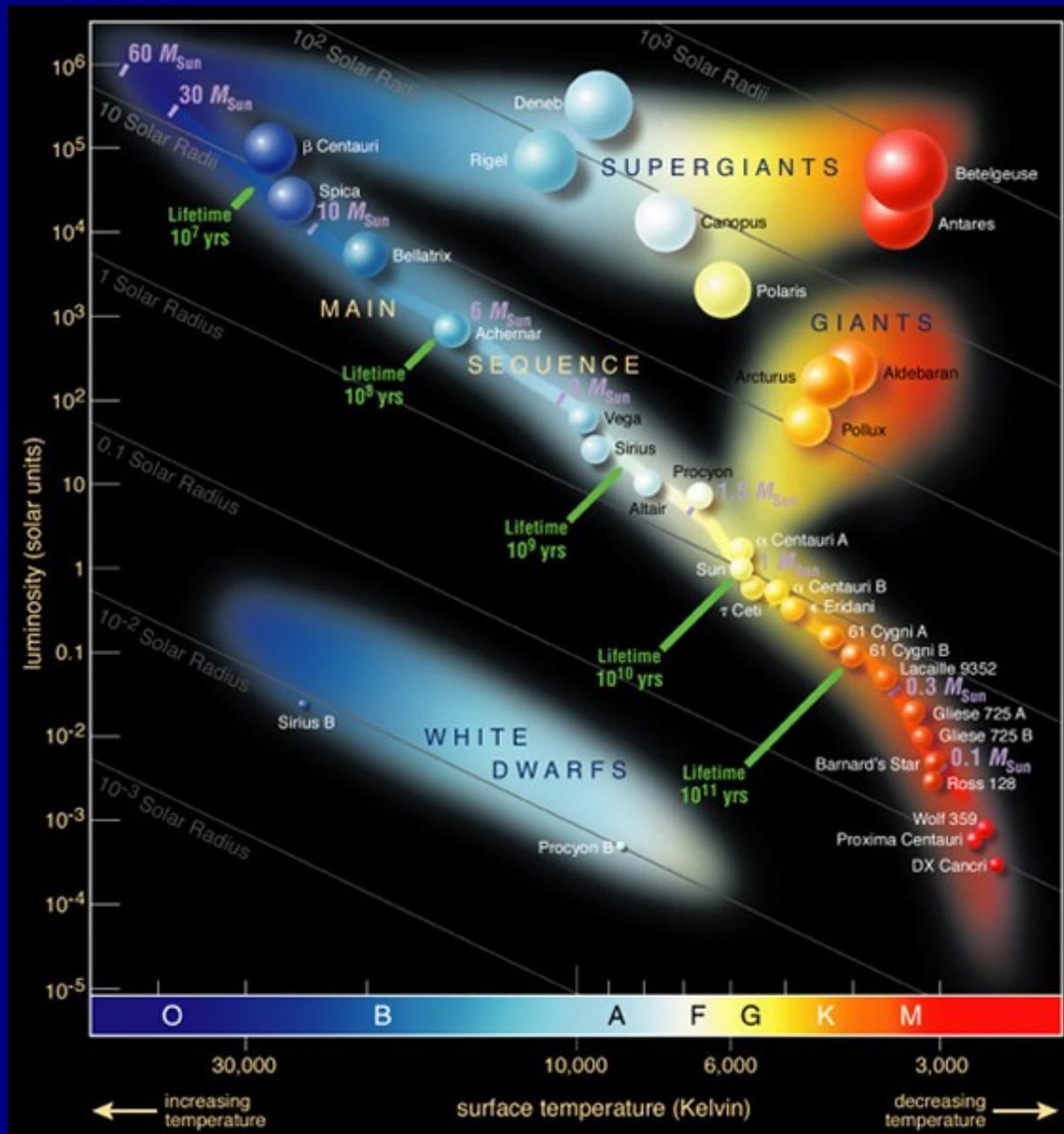
catalogues Gliese (des étoiles proches) et étoiles les plus brillantes.

# Les grandes familles d'étoiles.



catalogues Gliese (des étoiles proches) et étoiles les plus brillantes.

# Les grandes familles d'étoiles.

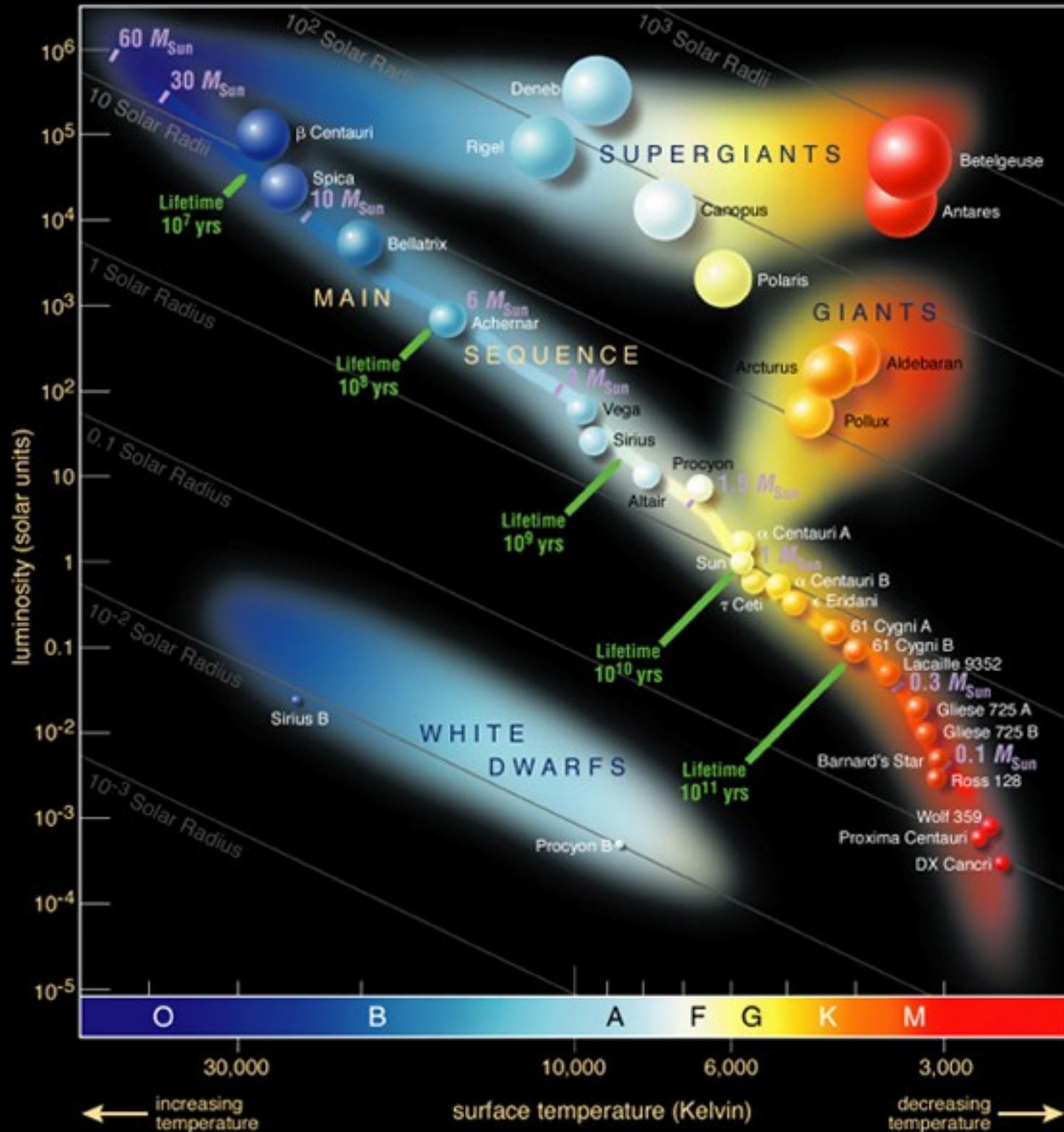


très  
brillant

peu  
brillant

# Comment interpréter les familles du HR

- Pas interprété en 1912.
- On peut nommer les familles (rayon, couleur). Les noms actuels viennent après. (naines blanches : nom inventé par Luyten en 1922.)
- Il faut construire les théories sur la structure interne des étoiles pour comprendre le diagramme HR.
- 1905, Einstein :  $E=mc^2$ .
- Théorie de la combustion nucléaire, proposée par Jean Perrin (1919), puis Eddington.
- Controverse Eddington / Jeans.
-

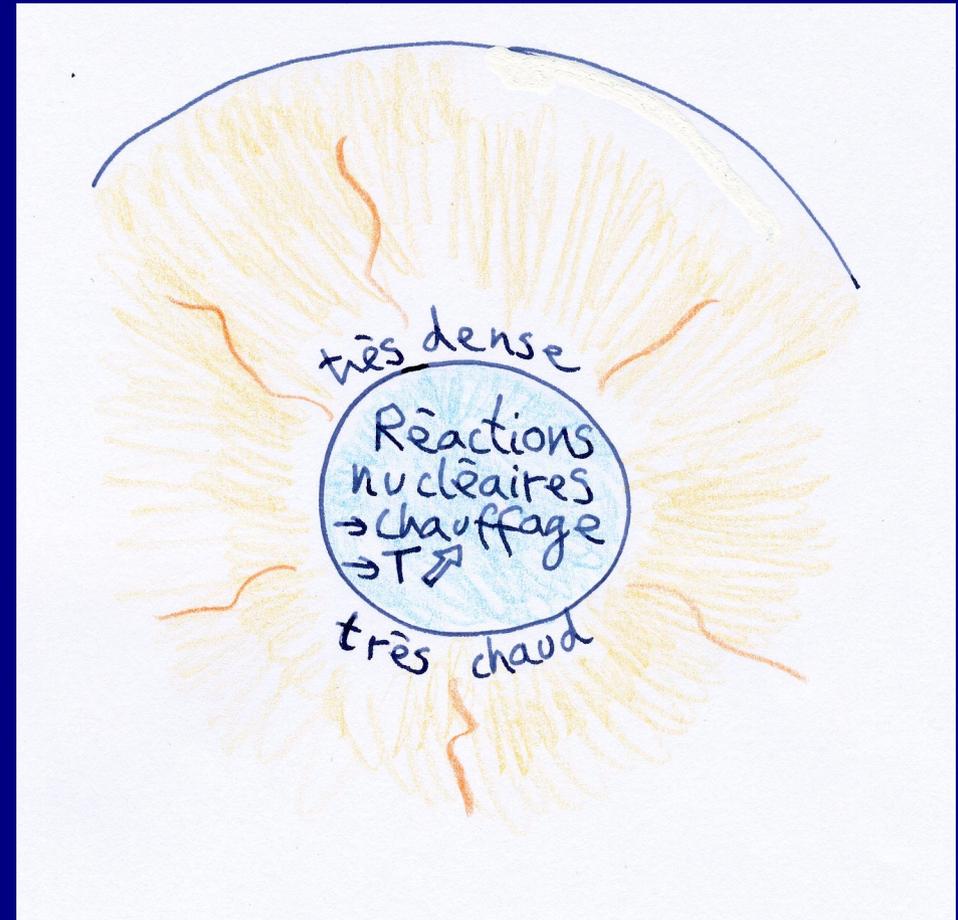


# Théorie des étoiles

- Pourquoi brillent-elles tant ? Quelle source d'énergie ? = Combustion nucléaire. Débat clos avec ...
- Théorie de la nucléosynthèse établie par Hans Boethe (1938).
- On établi alors un lien évolutif entre les diverses familles du diagramme HR.
- deux cycles possibles, p-p et CNO de la transformation de H en He. Le second utilise le C comme matériau intermédiaire, nécessite plus forte température, est plus rapide.
- Combustion subséquente de l'He en C et O. etc.

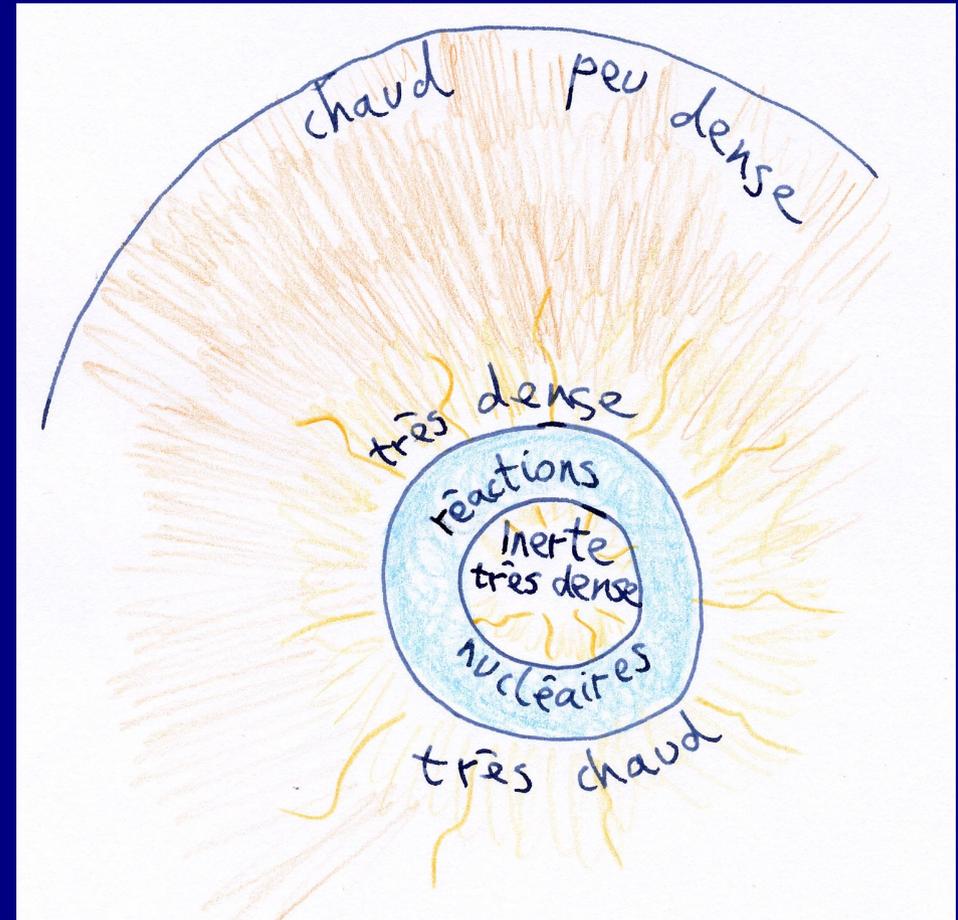
# Les étoiles de la séquence principale

- La séquence principale : combustion de l'hydrogène (H) en Hélium (He) **dans** le noyau. Séquence longue, « phase tranquille ».
- Cycle p-p (lent) pour les étoiles légères (Soleil)
- Tant qu'il y a assez d'H dans le noyau



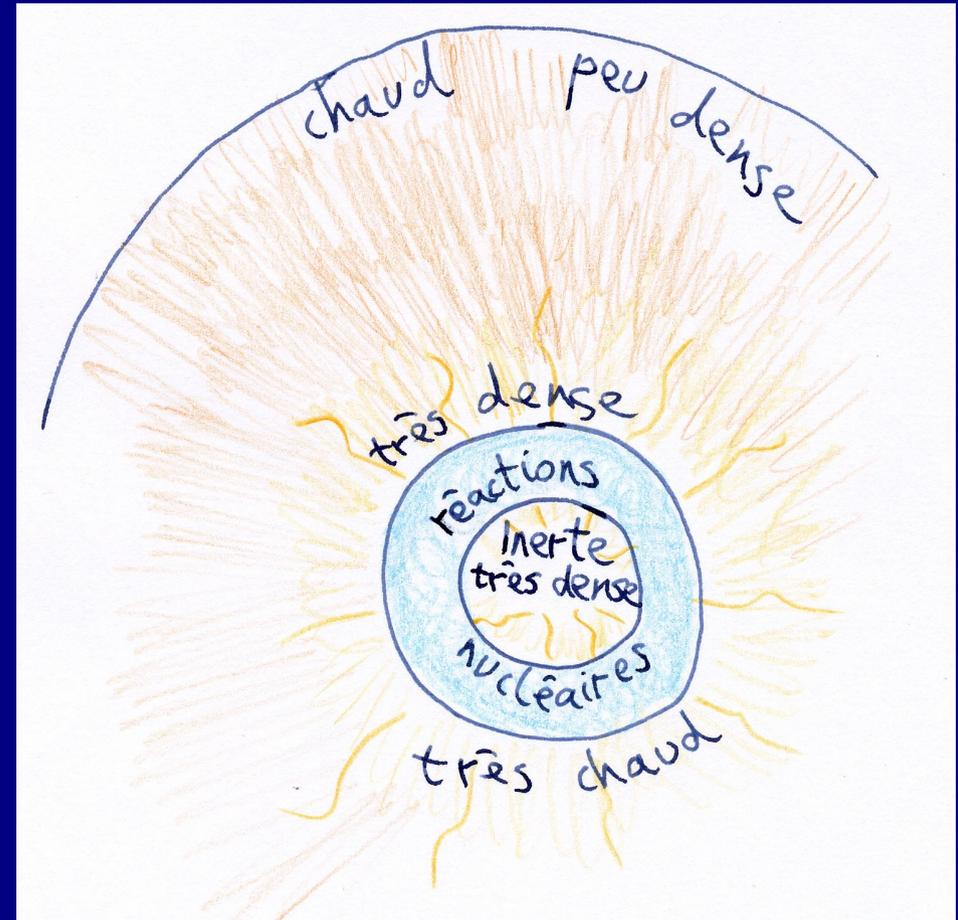
# Les étoiles géantes rouges

- La séquence principale : combustion de l'hydrogène (H) en Hélium (He) **autour** du noyau.
- Tant qu'il y a assez d'H autour du noyau.
- Flash de l'hélium (AGB).



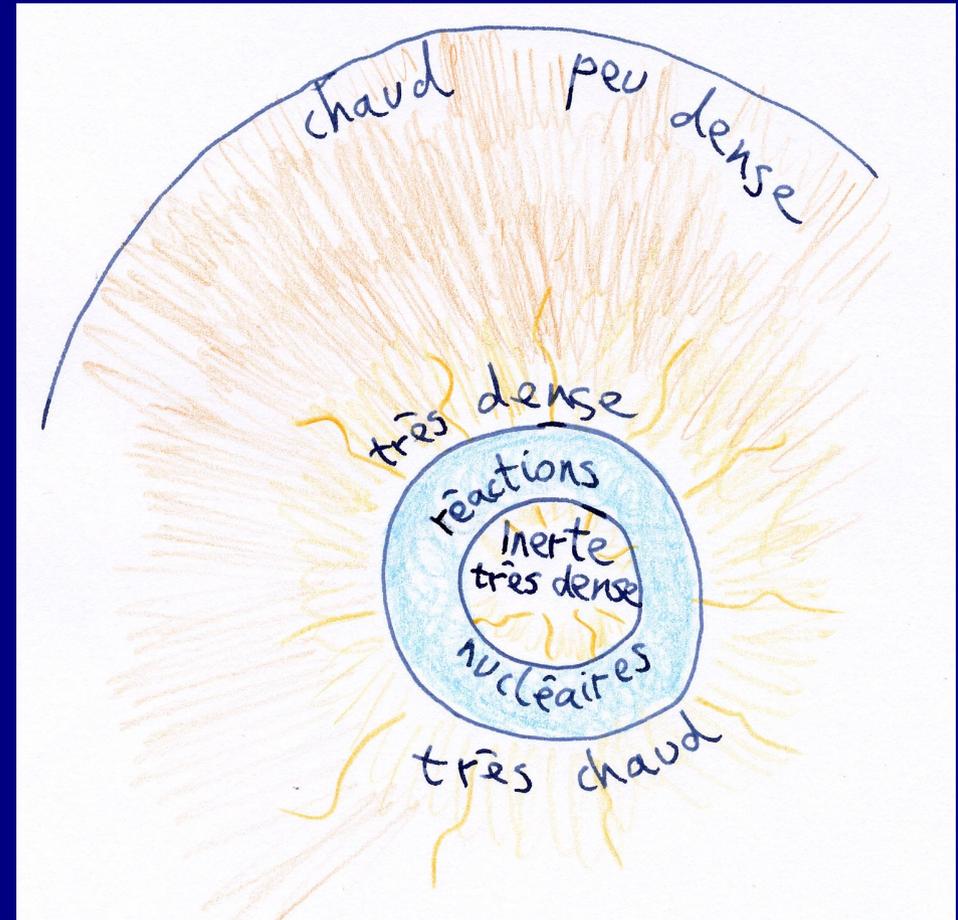
# Les étoiles géantes rouges

- Si l'étoile est assez massive, d'autres cycles de combustion dans le noyau, puis autour.
- Réactions plus rapides, phases plus courtes.
- Production d'oxygène (O), carbone (C)... et parfois métaux  $\rightarrow$  Fer (Fe) pour les plus massives



# Les étoiles géantes rouges

- Les géantes rouges ont une enveloppe très grande.
- Donc grande surface, donc brillantes.
- Peu chaudes (en surface), donc rouges.

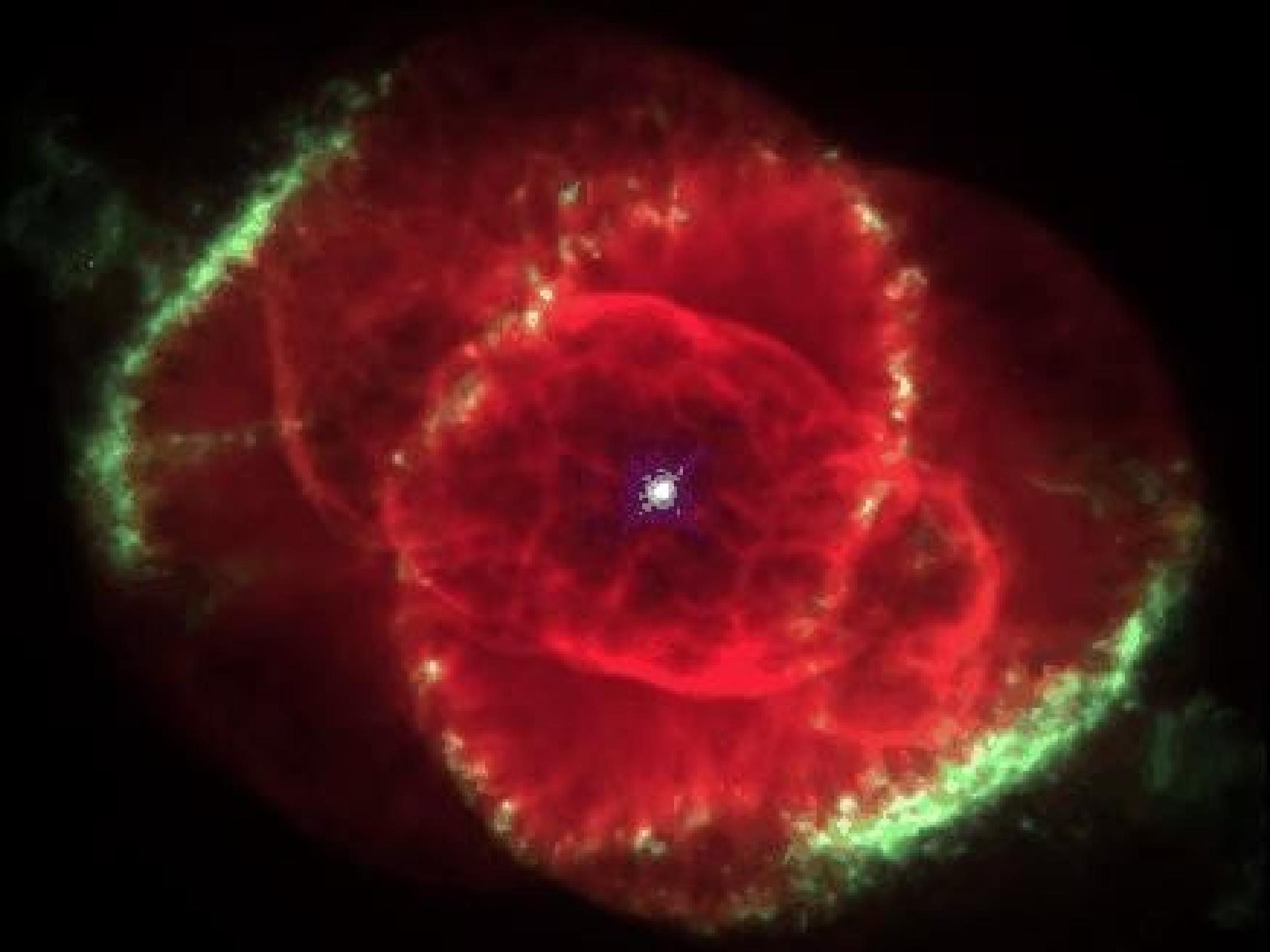


# géantes rouges et nébuleuses planétaires

- Expulsent leur enveloppe. Vent stellaire.
- A un certain stade, l'étoile (effeuillée) devient très brillante. vers le bleu et l'UV. Les UV éclairent le gaz chassé.
- Nébuleuse planétaire.



Nébuleuse planétaire NGC6543 « oeil du chat ». Age 1000 ans environ. [HST]



# géantes rouges et nébuleuses planétaires

- Expulsent leur enveloppe. Vent stellaire.
- A un certain stade, l'étoile (effeuillée) devient très brillante. vers le bleu et l'UV. Les UV éclairent le gaz chassé.
- Nébuleuse planétaire.



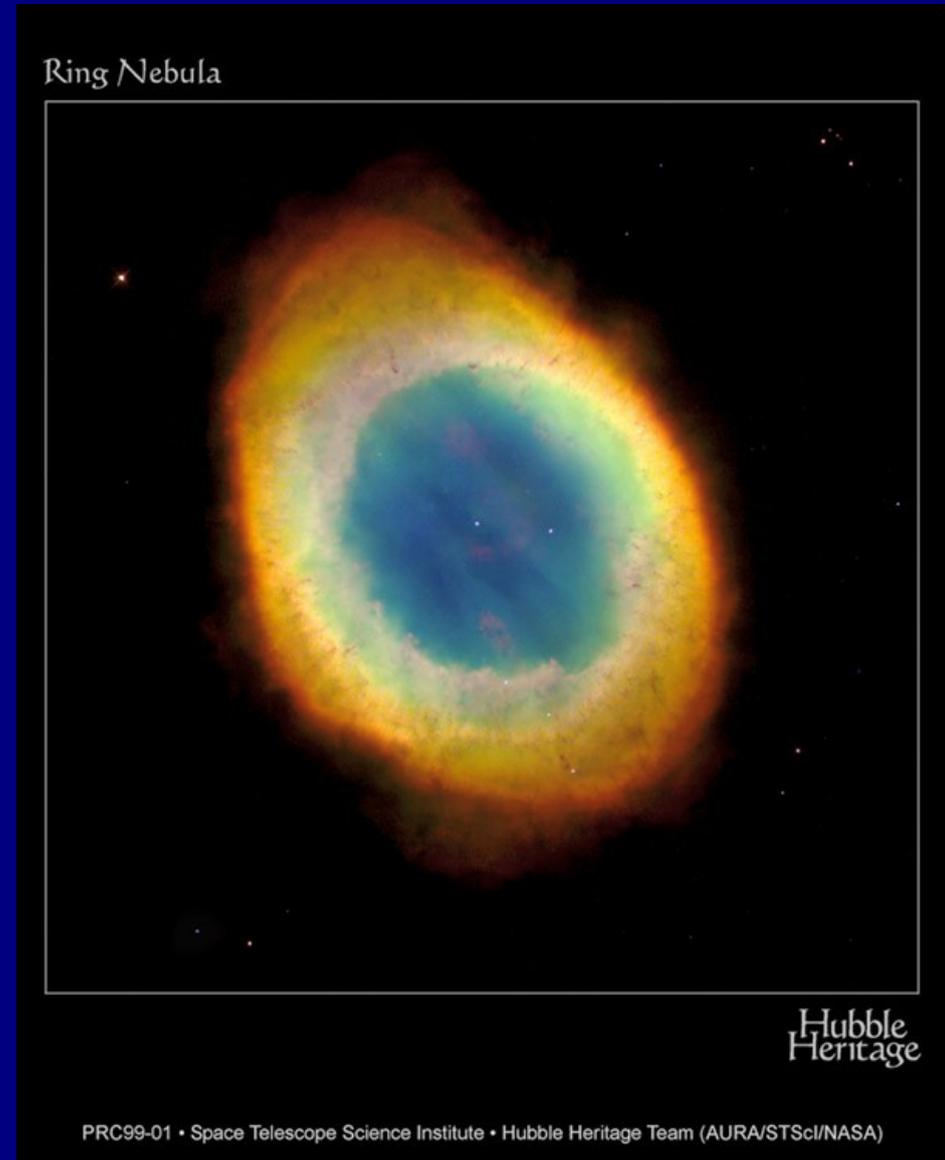
Nébuleuse planétaire M27 « dumbbell ».



# géantes rouges et nébuleuses planétaires

- Expulsent leur enveloppe. Vent stellaire.
- A un certain stade, l'étoile (effeuillée) devient très brillante. vers le bleu et l'UV. Les UV éclairent le gaz chassé.
- Nébuleuse planétaire.

Nébuleuse planétaire M57, dans l'Aigle.  
[HST]



# géantes rouges et nébuleuses planétaires

- Expulsent leur enveloppe. Vent stellaire.
- A un certain stade, l'étoile (effeuillée) devient très brillante. vers le bleu et l'UV. Les UV éclairent le gaz chassé.
- Nébuleuse planétaire.

Nébuleuse planétaire M57, dans l'Aigle.  
L'exposition est longue afin de mettre en évidence d'autres filaments plus faibles.  
Plusieurs phases d'expulsion.

[Jakoby KPNO]



# géantes rouges et nébuleuses planétaires

- Expulsent leur enveloppe. Vent stellaire.
- A un certain stade, l'étoile (effeuillée) devient très brillante. vers le bleu et l'UV. Les UV éclairent le gaz chassé.
- Nébuleuse planétaire.

Nébuleuse planétaire NGC 650.  
Image composite a partir de 3 couleurs liées à l'émission de gaz ionisés (par l'étoile centrale).  
[Jakoby KPNO]



Planetary Neb NGC 650-1

R:G:B=[N II]300s:[O III]600s:He III 000s

KPNO 2.1m, Ref: Balick 1987 AJ 94 671



# géantes rouges et nébuleuses planétaires

- Expulsent leur enveloppe. Vent stellaire.
- A un certain stade, l'étoile (effeuillée) devient très brillante. vers le bleu et l'UV. Les UV éclairent le gaz chassé.
- Nébuleuse planétaire.

Nébuleuse planétaire NGC 650.  
[Jakoby KPNO]

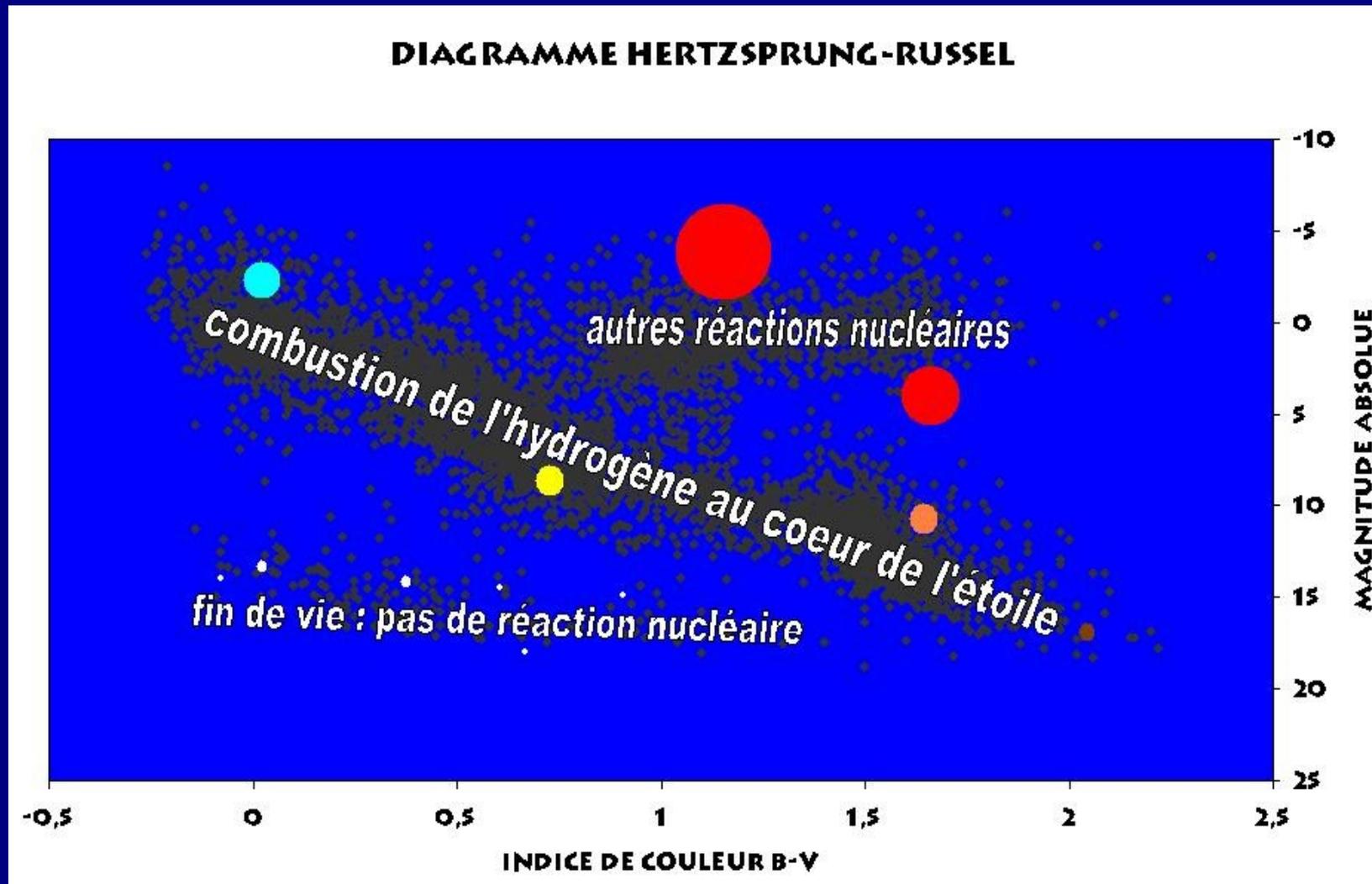




# Que reste-t-il après l'expulsion de l'enveloppe ?

- L'enveloppe a été expulsée presque entièrement.
- Il reste un noyau très dense, très chaud, très petit.
- Il n'y a plus de réaction nucléaire (faute de combustible).
- Donc les étoiles vont se refroidir.
- Naines blanches.

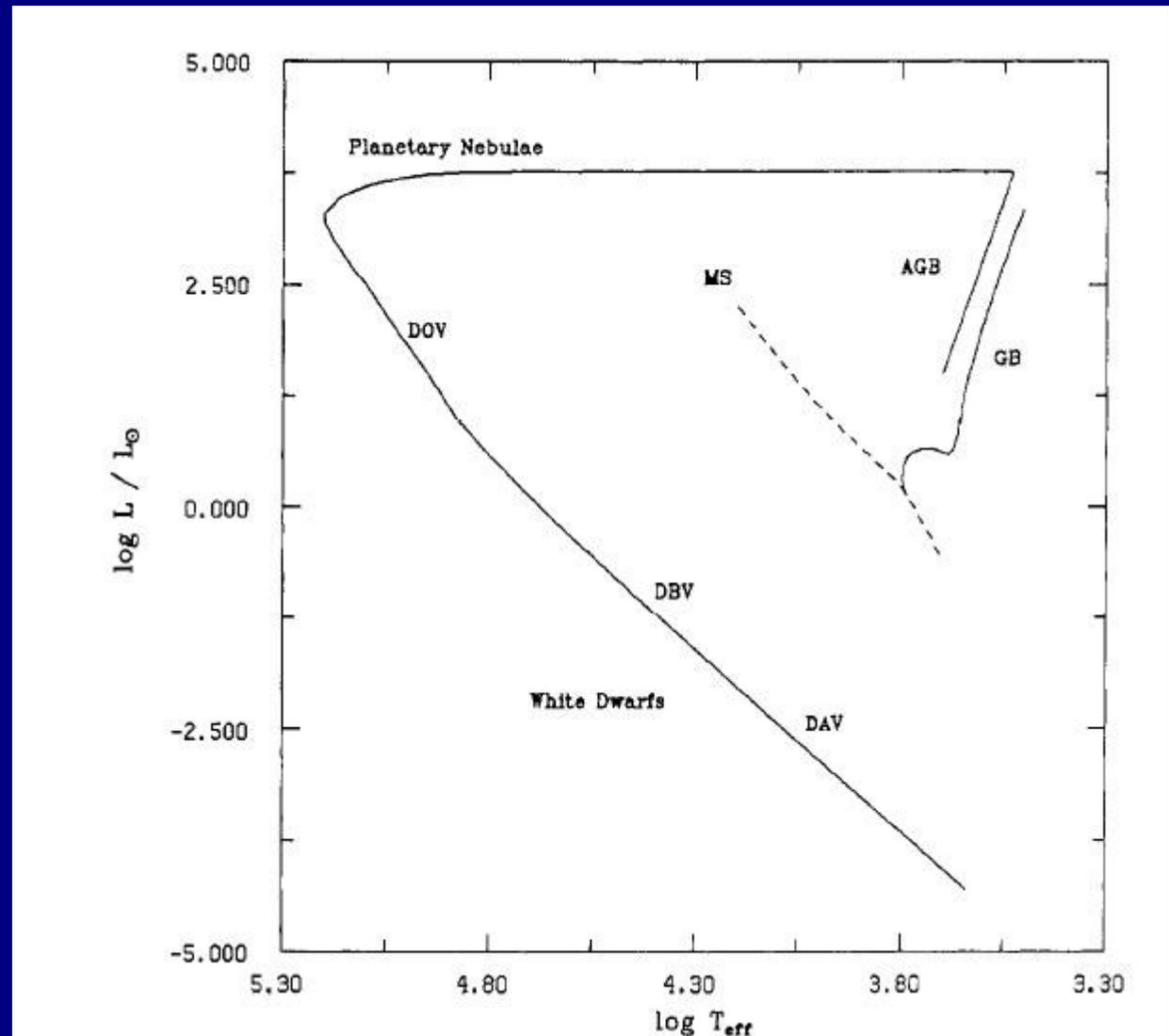
# Un peu d'ordre dans le monde des étoiles : diagramme HR.



catalogues Gliese (des étoiles proches) et étoiles les plus brillantes.

# Evolution stellaire dans le diagramme HR.

- MS ; séquence principale
- GB : géantes
- AGB : branche asymptotique
- Nébuleuse planétaire
- DOV, DBF, DAV : naine blanche.



Evolution (calculs théoriques) d'une étoile de masse solaire [revue Koester]

# Toutes les familles apparaissent-elles dans le diagramme HR ?

- Quid des étoiles très très peu brillantes ?
- Etoiles brillantes mais pas en lumière visible (IR lointain , UV, X...)

## Réponse actuelle sur les étoiles absentes du diag. HR

- Etoiles très peu massives, naines brunes, à droite de la séquence principale.
- Restes d'étoiles très massives : brillantes à d'autres fréquences, ou obscures. **Thème (avec les naines blanches) de cet atelier.**
- Trous noirs (stellaires)