

# ***ASTROPHYSIQUE***

## **12 – L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES**



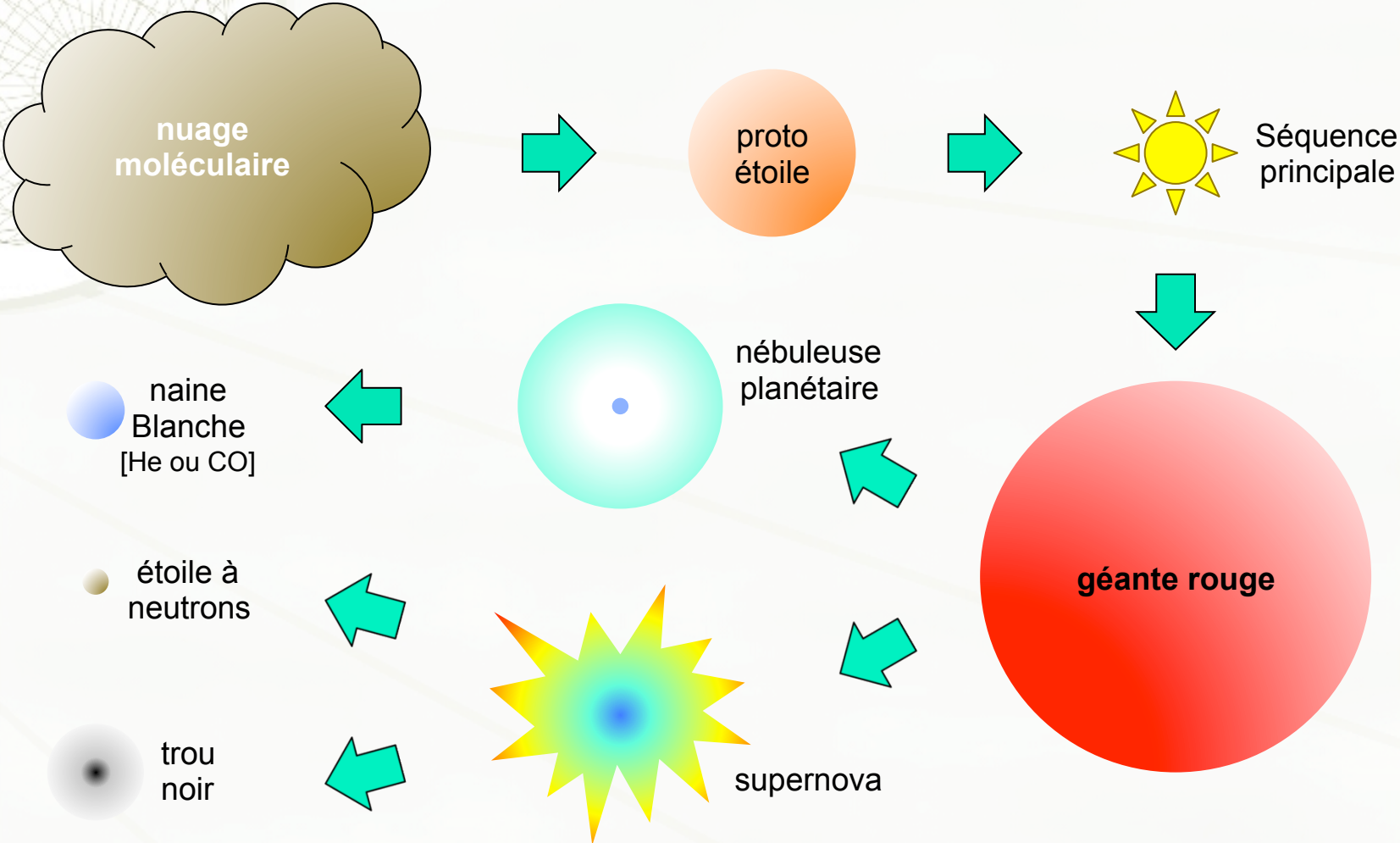
Alain Bouquet

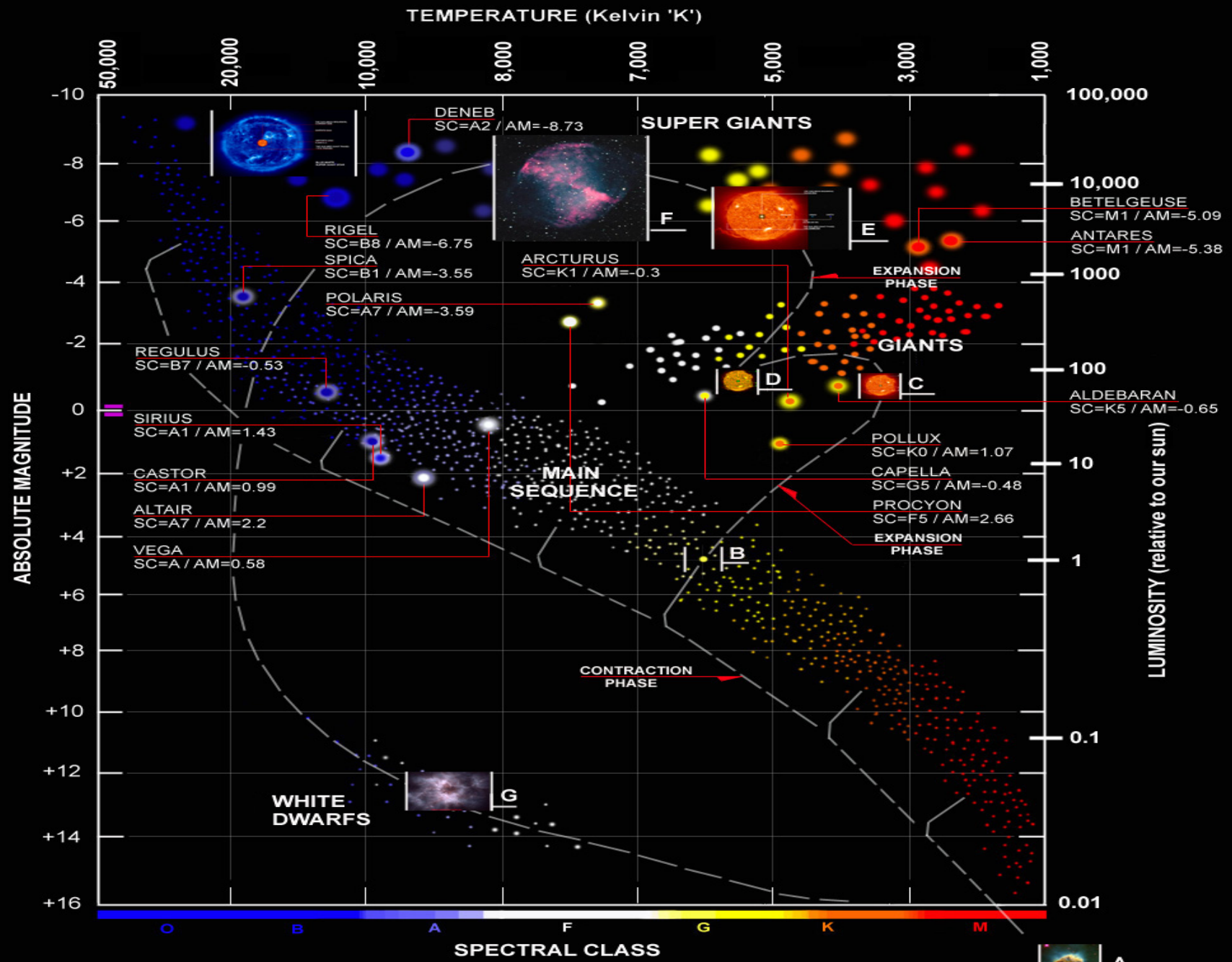
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

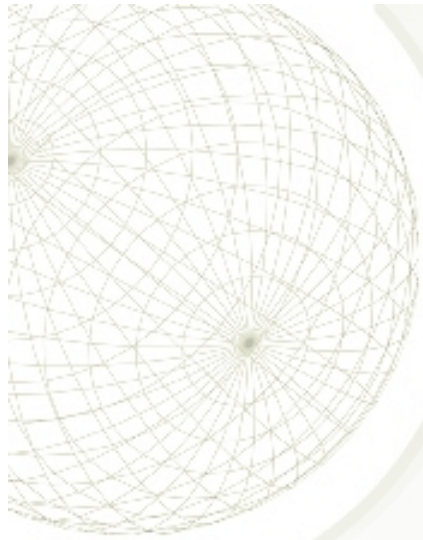


# L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES





A



# STRUCTURE INTERNE



# ÉQUILIBRE OU PAS ?

- Une étoile est en équilibre mais n'est pas statique

Le plus souvent métastable  
*Parfois instable (variables, supernovae)*

La composition chimique change du fait des fusions  
→ changement des densités, températures et pressions  
→ changement de la luminosité et du rayon  
→ changement éventuel de la masse (vent stellaire)

- Une question d'échelles de temps à comparer

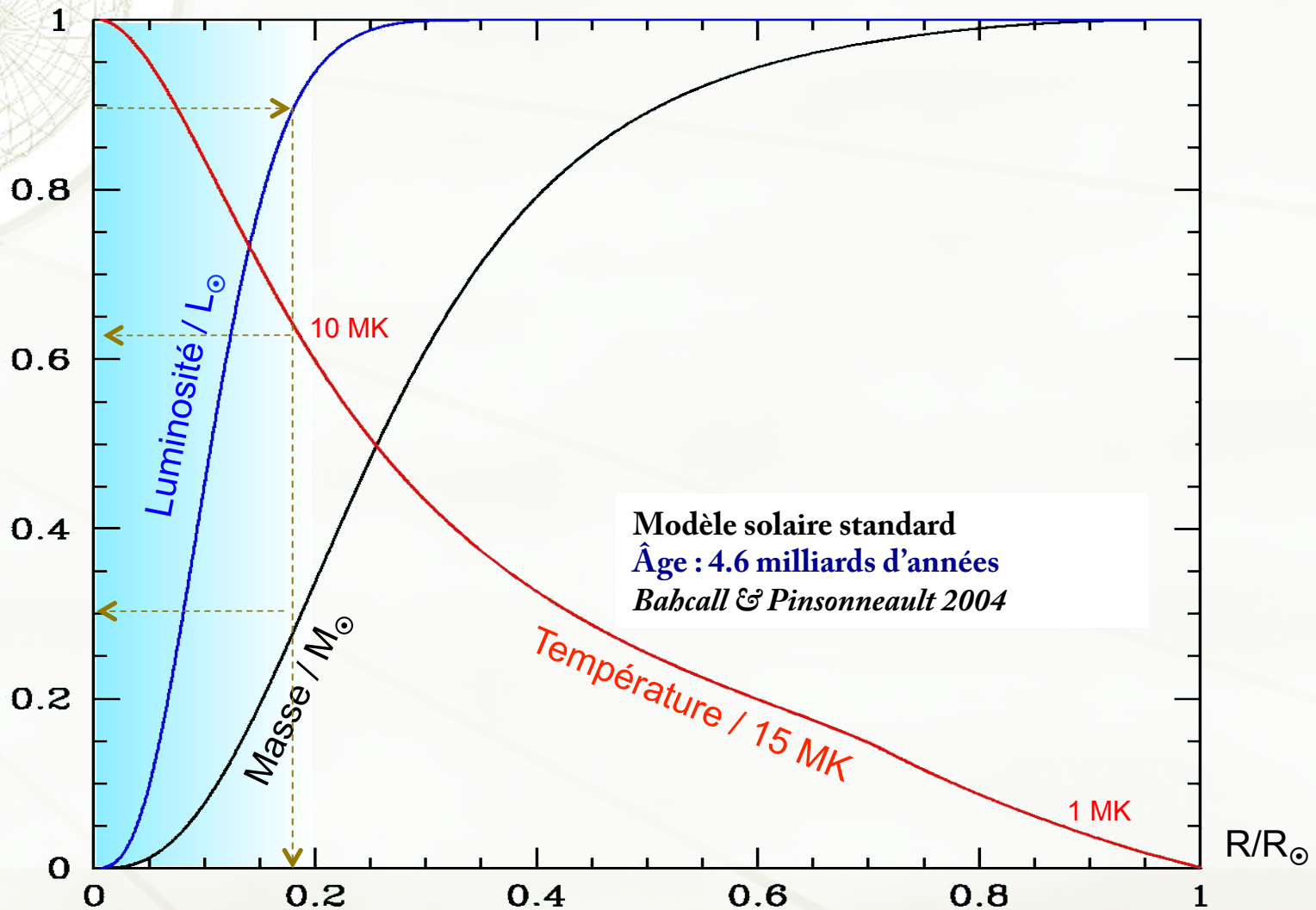
- Échelle gravitationnelle (temps de chute libre)  $t_g \sim 1/\sqrt{G\rho}$
- Échelle radiative (temps mis par un photon à quitter l'étoile)
- Échelle nucléaire (durée de fusion de H, He, C, etc.)

Dépend TRÈS fortement de la température  
→ donc de la masse de l'étoile  
→ fusion H de 1 million à 100 milliards d'années  
→ fusion He de 10 000 ans à 100 millions d'années  
→ fusion C de 1 an à 1000 ans

Dépend de l'opacité du milieu  
typiquement ~ million d'années

Durée d'un réajustement gravitationnel  
 $\sim 1 \text{ heure} / \sqrt{(\rho/1\text{g/cm}^3)}$

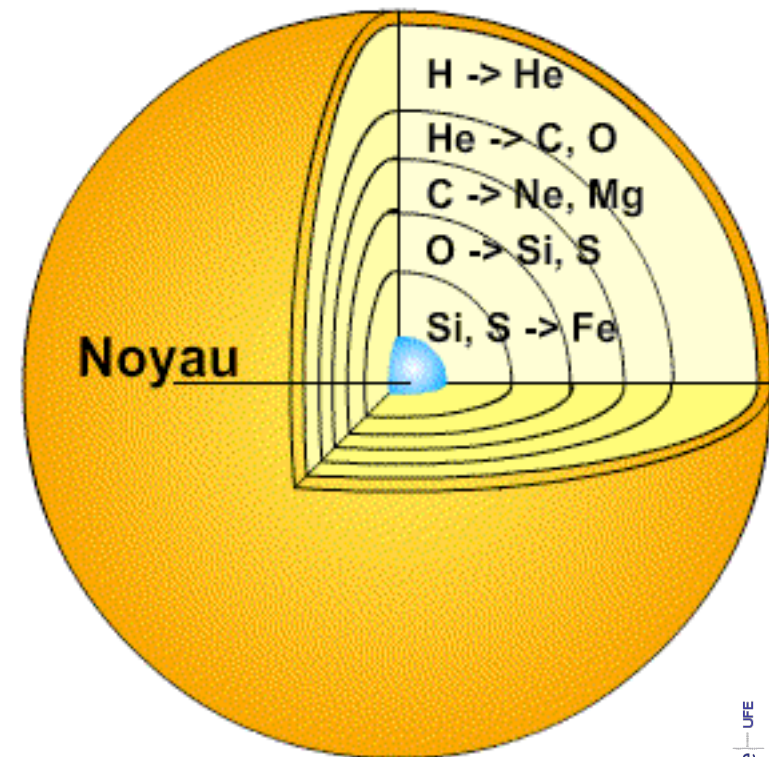
# PROFILS DE MASSE, DE LUMINOSITÉ ET DE TEMPÉRATURE



Modèle solaire standard  
Âge : 4.6 milliards d'années  
*Bahcall & Pinsonneault 2004*

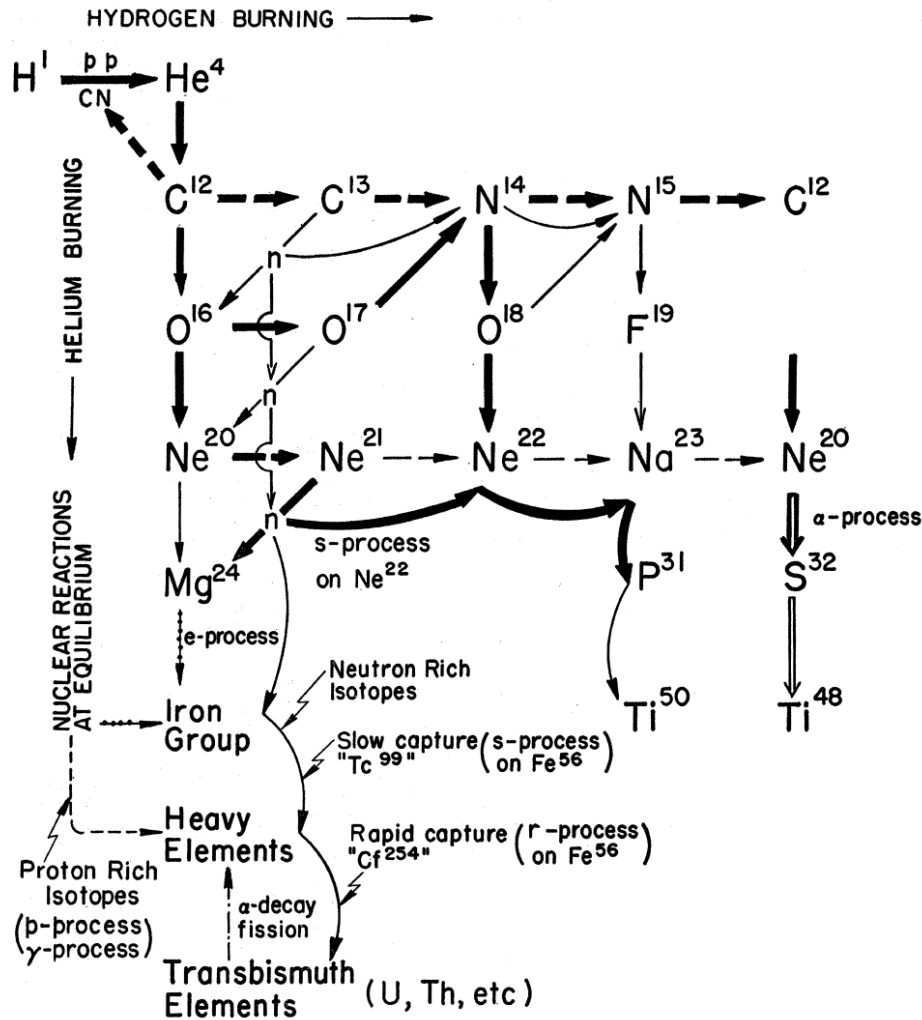
# LA NUCLÉOSYNTÈSE STELLAIRE

- Un réseau complexe de réactions de fusion
- En parallèle et en compétition les unes avec les autres
- Et avec les réactions de désintégration (bêta surtout)
- Avec un taux de réaction très sensible à la température (donc à la masse de l'étoile)
  - Schématiquement, il faut des températures de plus en plus élevées pour synthétiser des éléments de plus en plus lourds
  - Et aux abondances des réactifs → forte sensibilité à la présence ou à l'absence de convection qui mélange les éléments
  - Peu de convection → stratification en couches concentriques des éléments





# NUCLÉOSYNTÈSE STELLAIRE



Fusion	Température	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
hydrogène	10 MK	5
hélium	200 MK	700
carbone	600 MK	200 000
oxygène	1 500 MK	10 000 000
silicium	2 700 MK	30 000 000

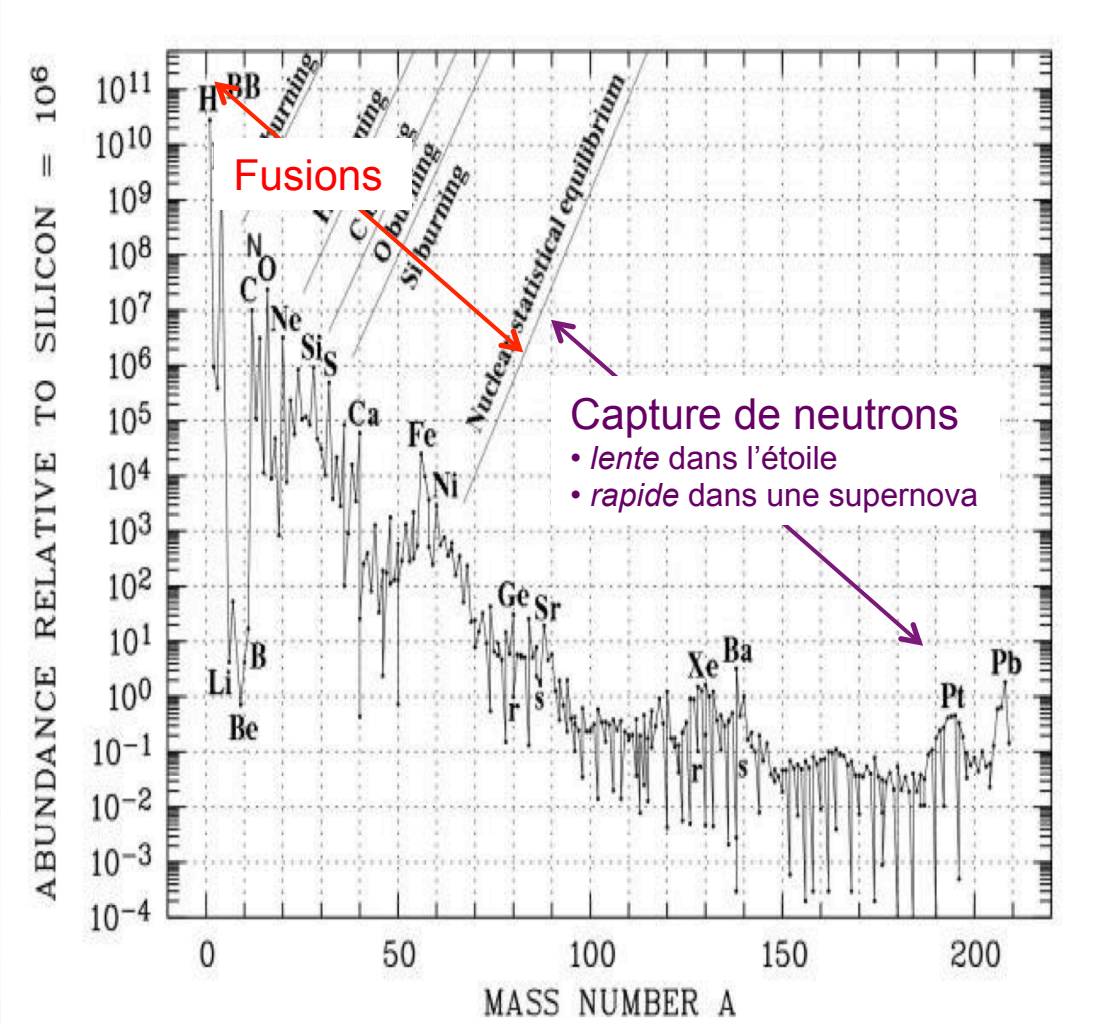
$$T_{\text{fusion}}(Z_1, Z_2) \sim Z_1 Z_2 T_{\text{fusion}}(H, H)$$

TRÈS approximativement

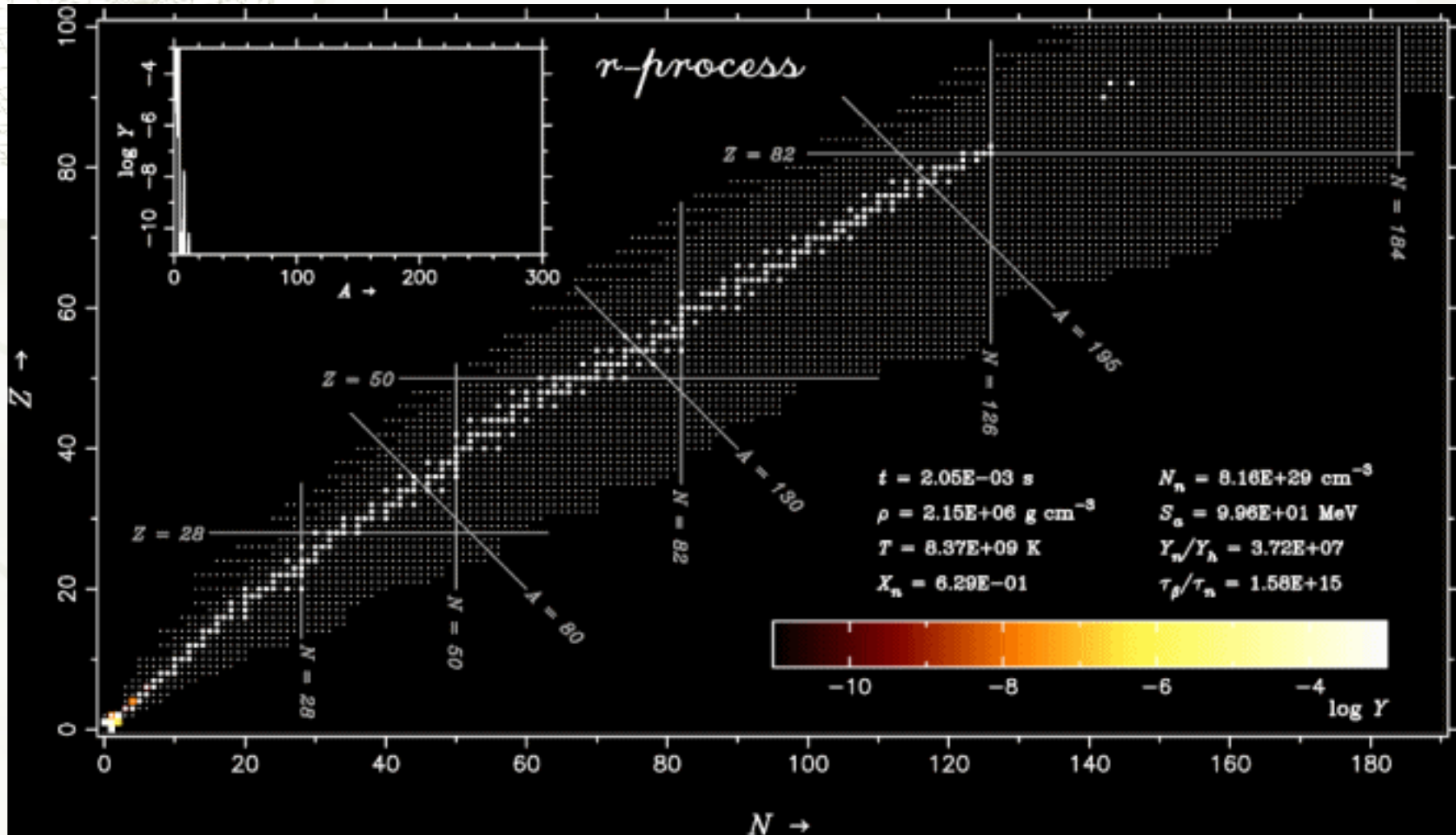


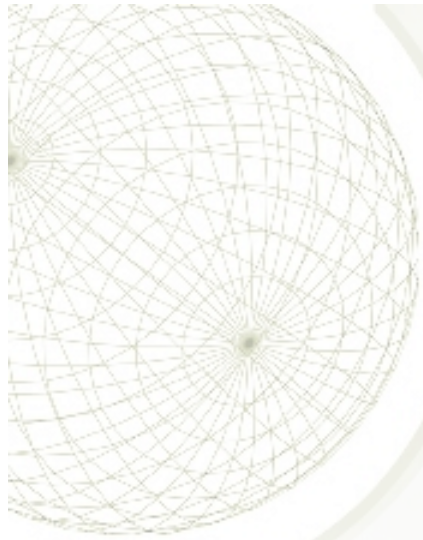
# FUSIONS DU CARBONE AU FER

- $3 \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$
- ${}^{12}_6\text{C} + \alpha \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$
- ${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \alpha$
- ${}^{16}_8\text{O} + \alpha \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne}$
- ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si} + \alpha$
- ${}^{20}_{10}\text{Ne} + \alpha \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg}$
- ${}^{24}_{12}\text{Mg} + \alpha \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si}$
- ${}^{28}_{14}\text{Si} + \alpha \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S}$
- ...
- ${}^{52}_{26}\text{Fe} + \alpha \rightarrow {}^{56}_{28}\text{Ni}$



# NUCLÉOSYNTHÈSES EXPLOSIVES

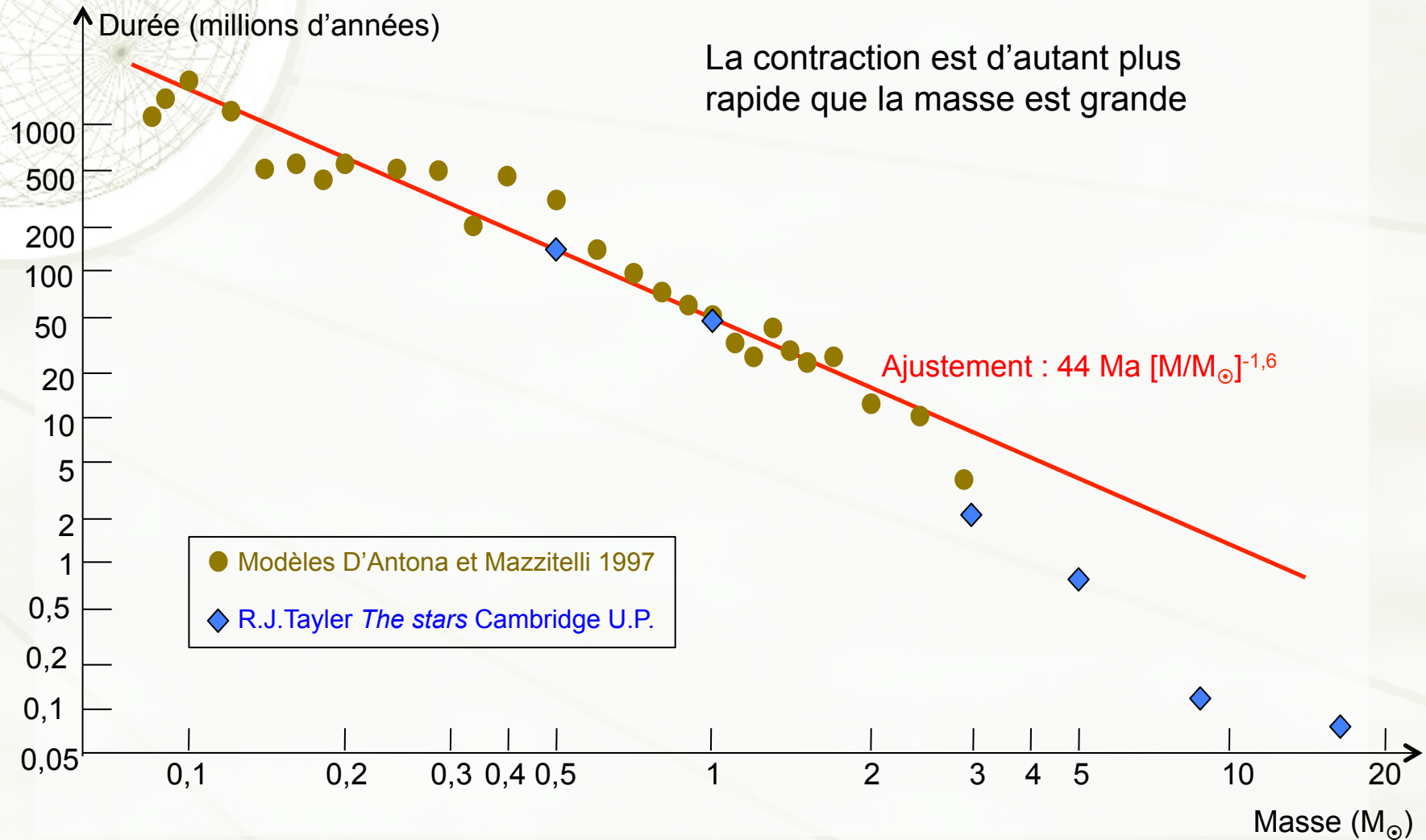




# LES DÉBUTS

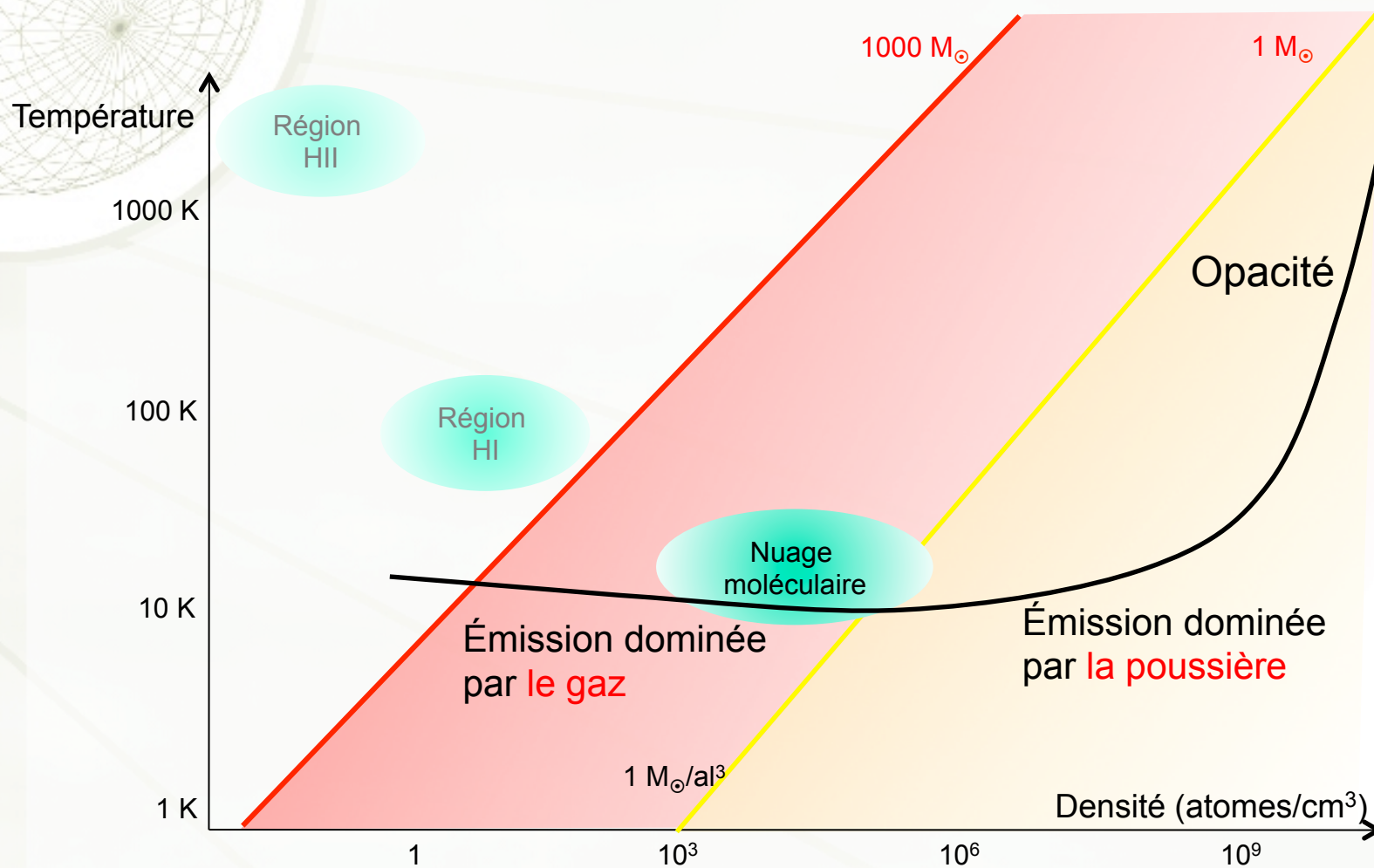


# DURÉES DE LA CONTRACTION

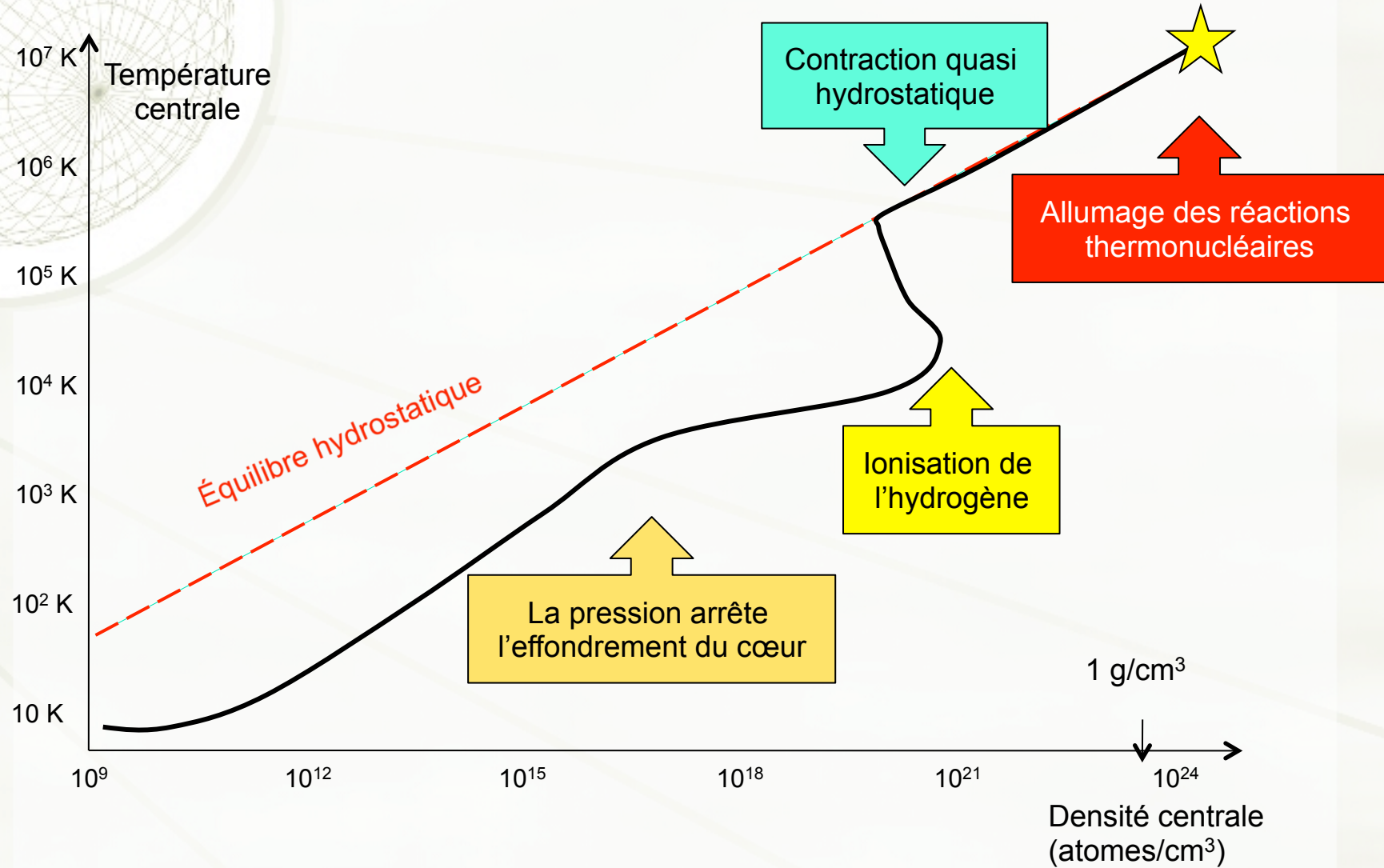




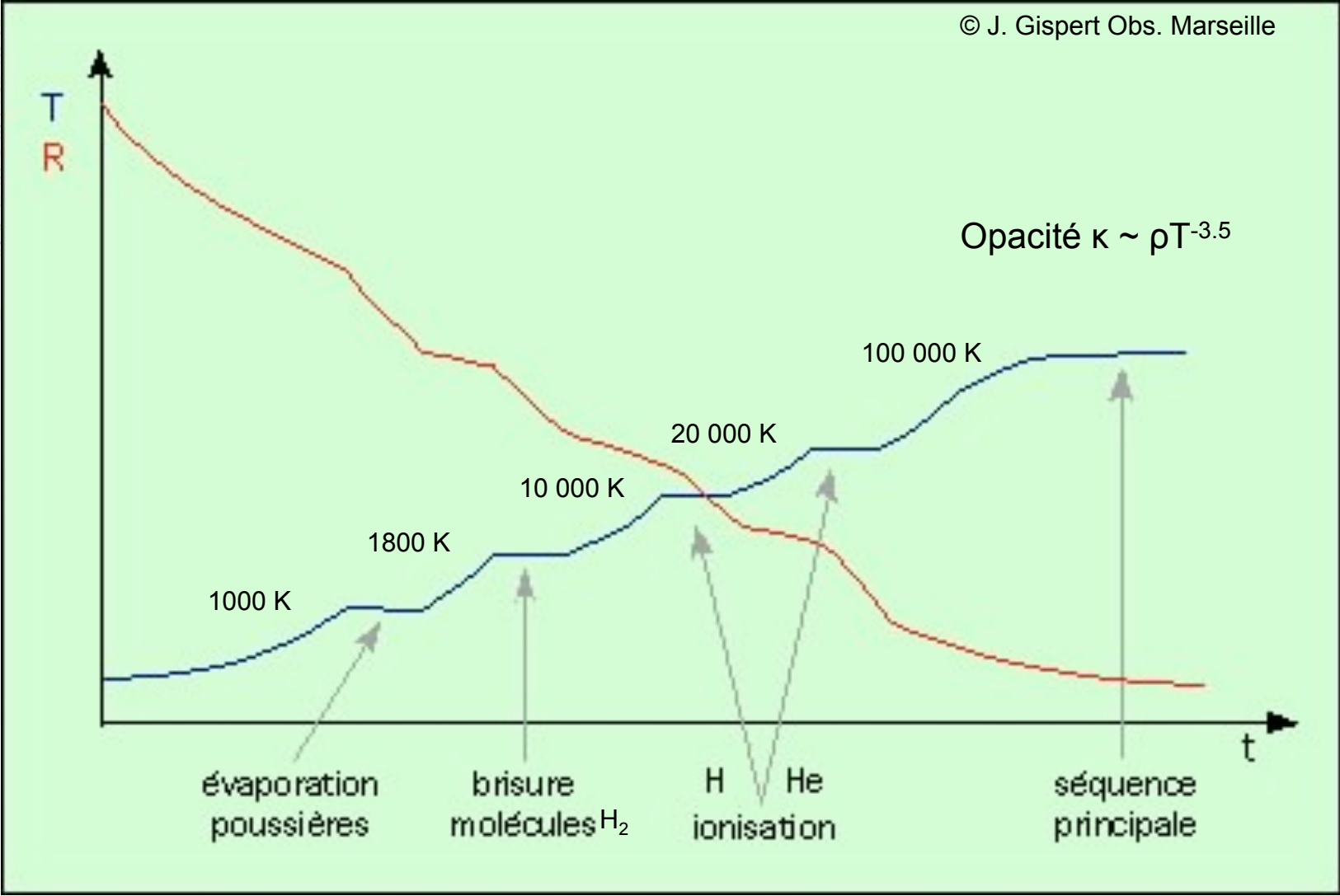
# CONTRACTION D'UN NUAGE



# ENSUITE



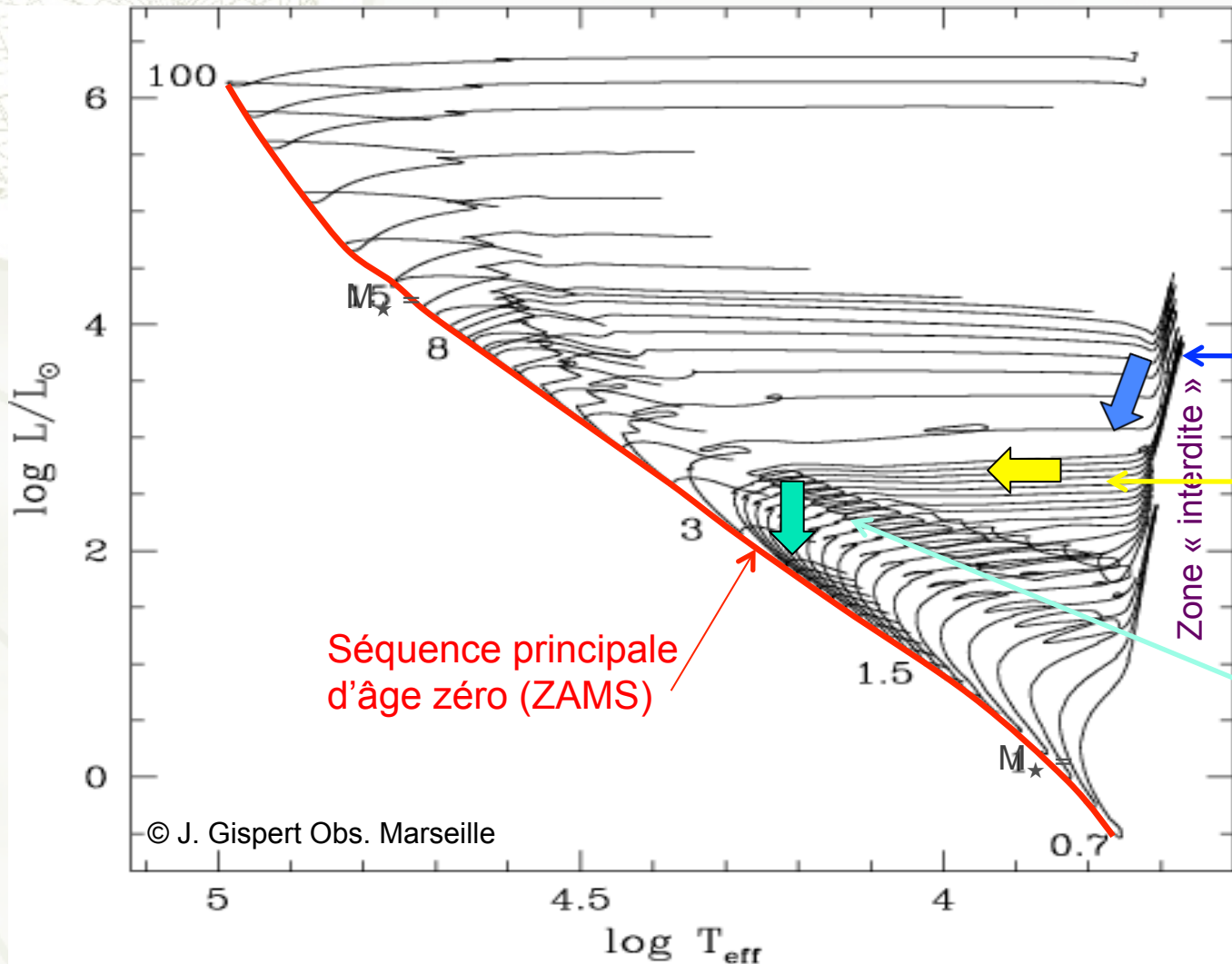
# CONTRACTION D'UNE PROTOÉTOILE



# TRAJETS DE HAYASHI

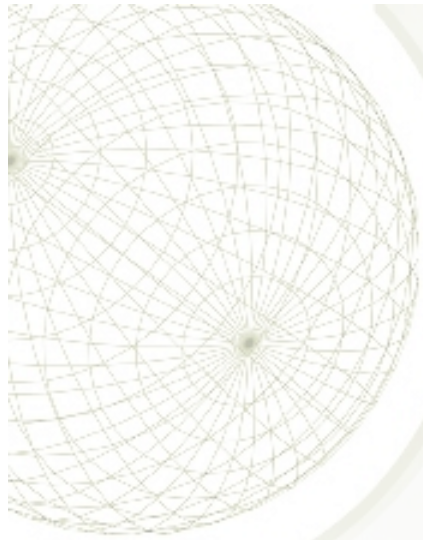


Chushiro Hayashi



- Contraction
  - T augmente
  - R diminue
  - L diminue
- Allumage fusion
  - T augmente +
  - R diminue
  - L ~ stable
- Équilibre hydro
  - T ~ stable
  - R ~ stable
  - L diminue





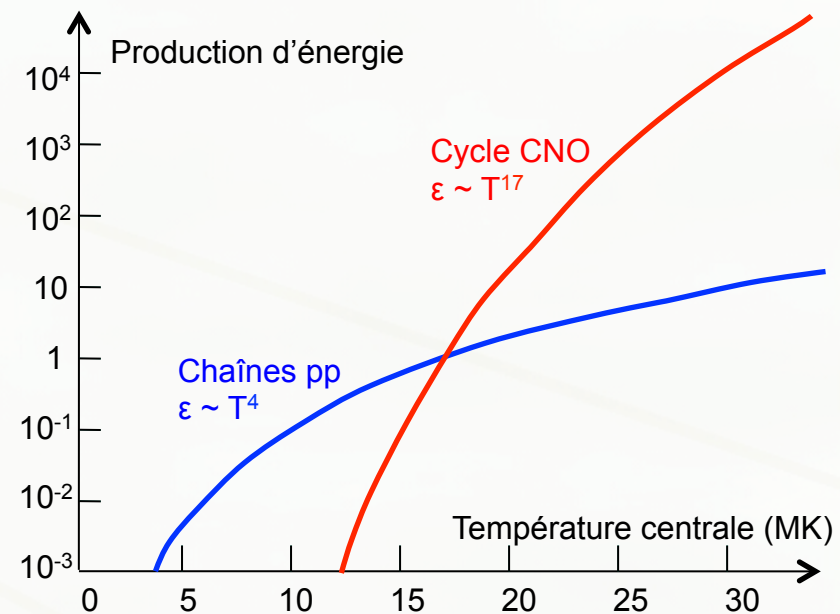
# LA MATURITÉ

# SÉQUENCE PRINCIPALE: IL NE SE PASSE RIEN, OU PRESQUE...

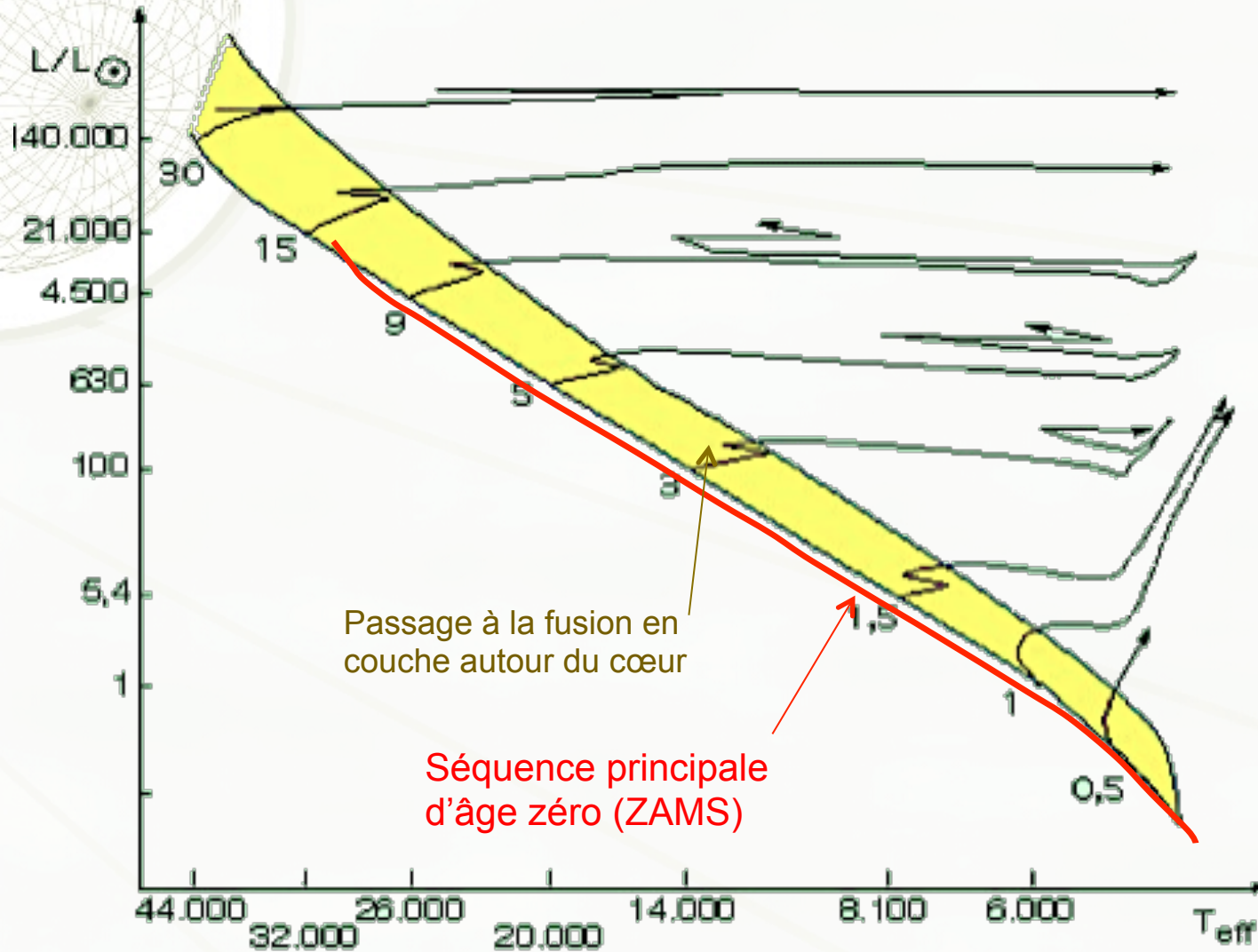
- La fusion de l'hydrogène en hélium peut se faire selon deux mécanismes
  - chaînes proton-proton
    - dépendance modérée avec la température ( $\sim T^4$ ) → zone de fusion étendue
  - cycle catalytique CNO
    - forte dépendance avec la température ( $\sim T^{17}$ ) → zone de fusion restreinte

## ■ Changements de composition

- $4 \text{ H} \rightarrow ^4\text{He}$
- → le nombre de particules diminue
- → la température **centrale** augmente lentement
- → la luminosité augmente (plus rapidement)
- → le rayon augmente
- → la température **de surface** diminue
- → **déplacement vers le haut et la droite dans le diagramme HR**



# ÉVOLUTION SUR LA SÉQUENCE PRINCIPALE



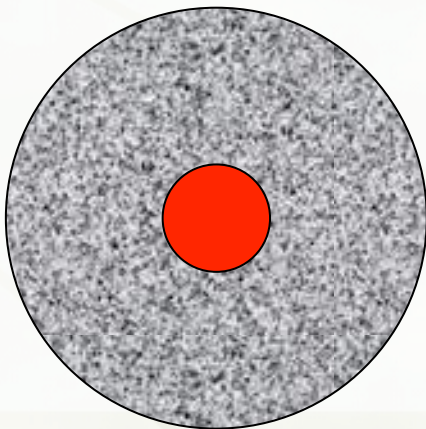
© J. Gispert Obs. Marseille



# SÉQUENCE PRINCIPALE

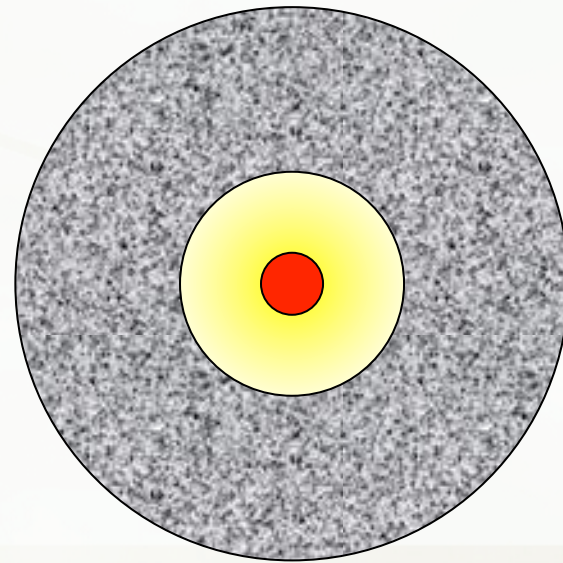
## ■ Petites masses ( $< 0,3 M_{\odot}$ )

- température centrale  $< 6$  MK
- → fusion de l'hydrogène par chaînes pp
- **structure entièrement convective**
- → brassage
- → tout l'hydrogène est converti en hélium
- → augmentation de la densité
- → de la température centrale
- → de la luminosité
- → augmentation faible de la température de surface



## ■ Masse intermédiaire ( $0,3$ à $1,5 M_{\odot}$ )

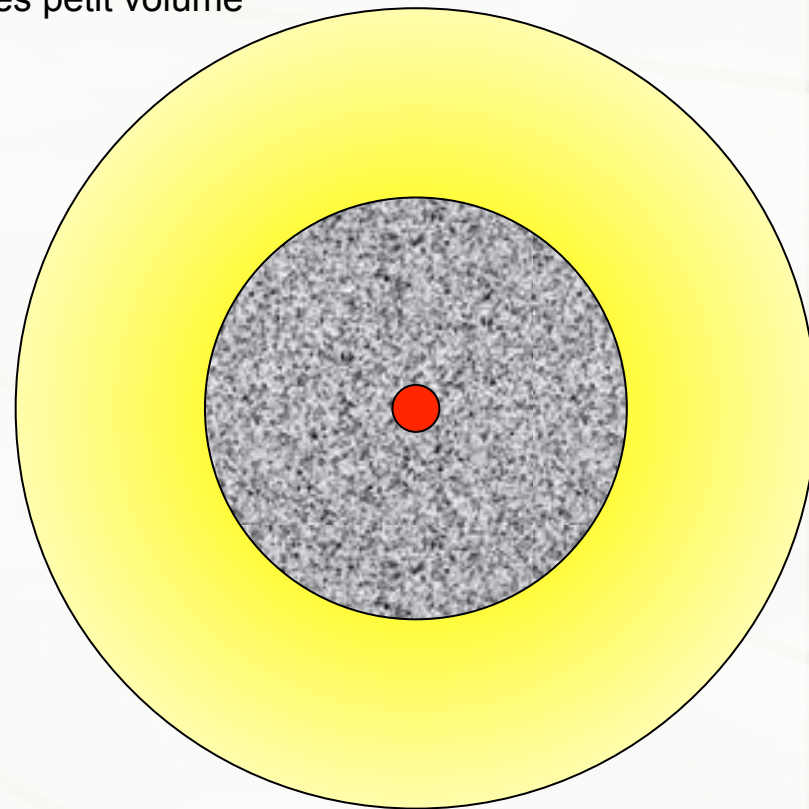
- fusion de l'hydrogène par chaînes pp (+ contribution de plus en plus importante du cycle CNO)
- → production moyenne d'énergie dans une zone étendue
- → **cœur radiatif**, enveloppe convective
- → l'hydrogène ne fusionne que dans le cœur
- puis dans une couche autour du cœur

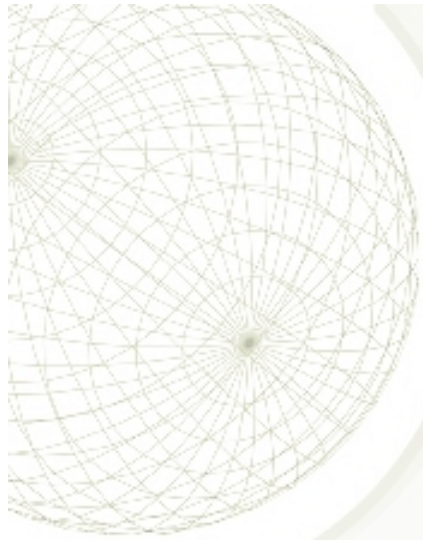




## SÉQUENCE PRINCIPALE

- Forte masse ( $> 1,5 M_{\odot}$ )
  - fusion de l'hydrogène par cycle CNO
  - → très forte production d'énergie dans un très petit volume
  - → cœur convectif, enveloppe radiative
  - → brassage
  - → lente contraction du cœur
  - → augmentation de luminosité
  - → lente dilatation de l'enveloppe
  - → rougissement

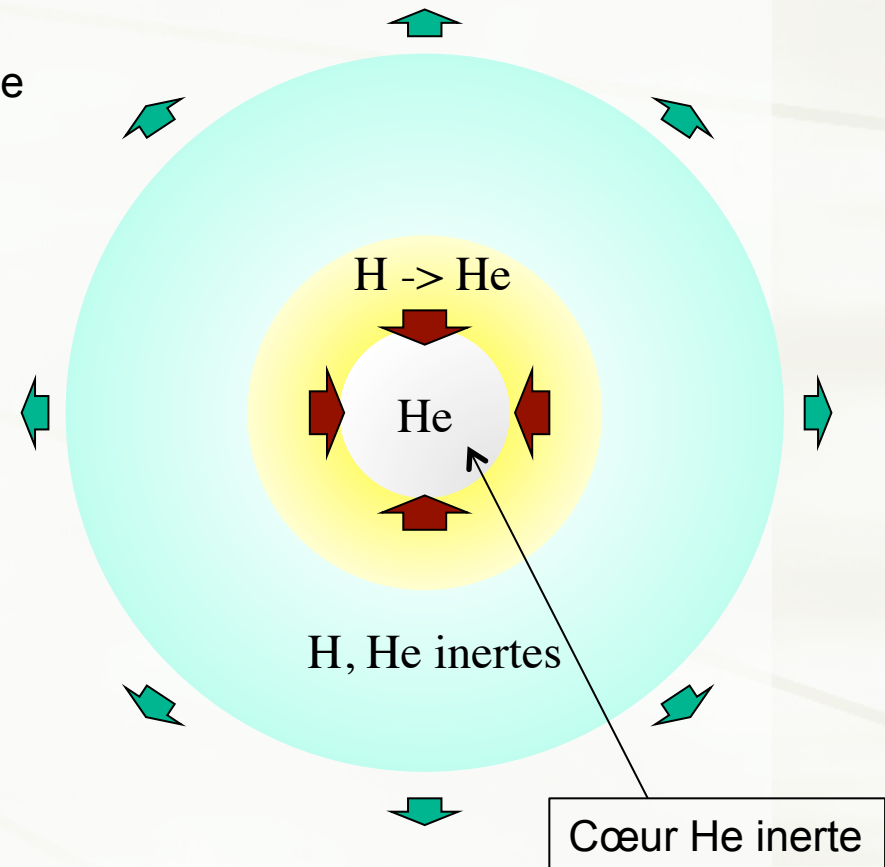




# LE GRAND ÂGE

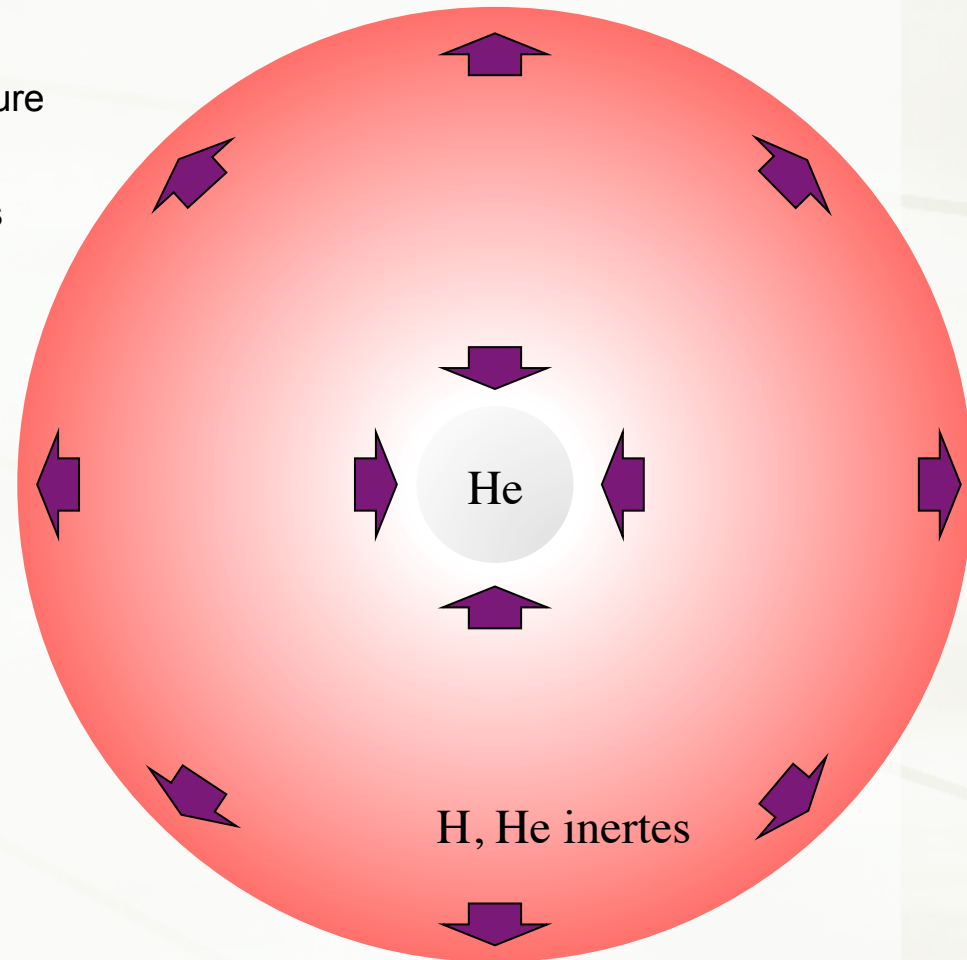
## FUSION DE L'HYDROGÈNE EN COUCHE AUTOUR DU CŒUR

- Épuisement de l'hydrogène au cœur (10 à 20% de la masse de l'étoile)
- ⇒ le cœur ne contient plus que de l'hélium
- Température inférieure au seuil de fusion de l'hélium (triple  $\alpha$ )
  - → arrêt des réactions de fusion
  - → le cœur commence à se refroidir
  - → moins de pression
  - → contraction du cœur
  - → contraction de la couche autour
  - → elle se réchauffe
  - → fusion de l'hydrogène en couche
  - → augmentation du rayon de l'étoile
  - mais luminosité moindre que sur la SP
- ⇒ déplacement vers le bas et la droite du diagramme HR



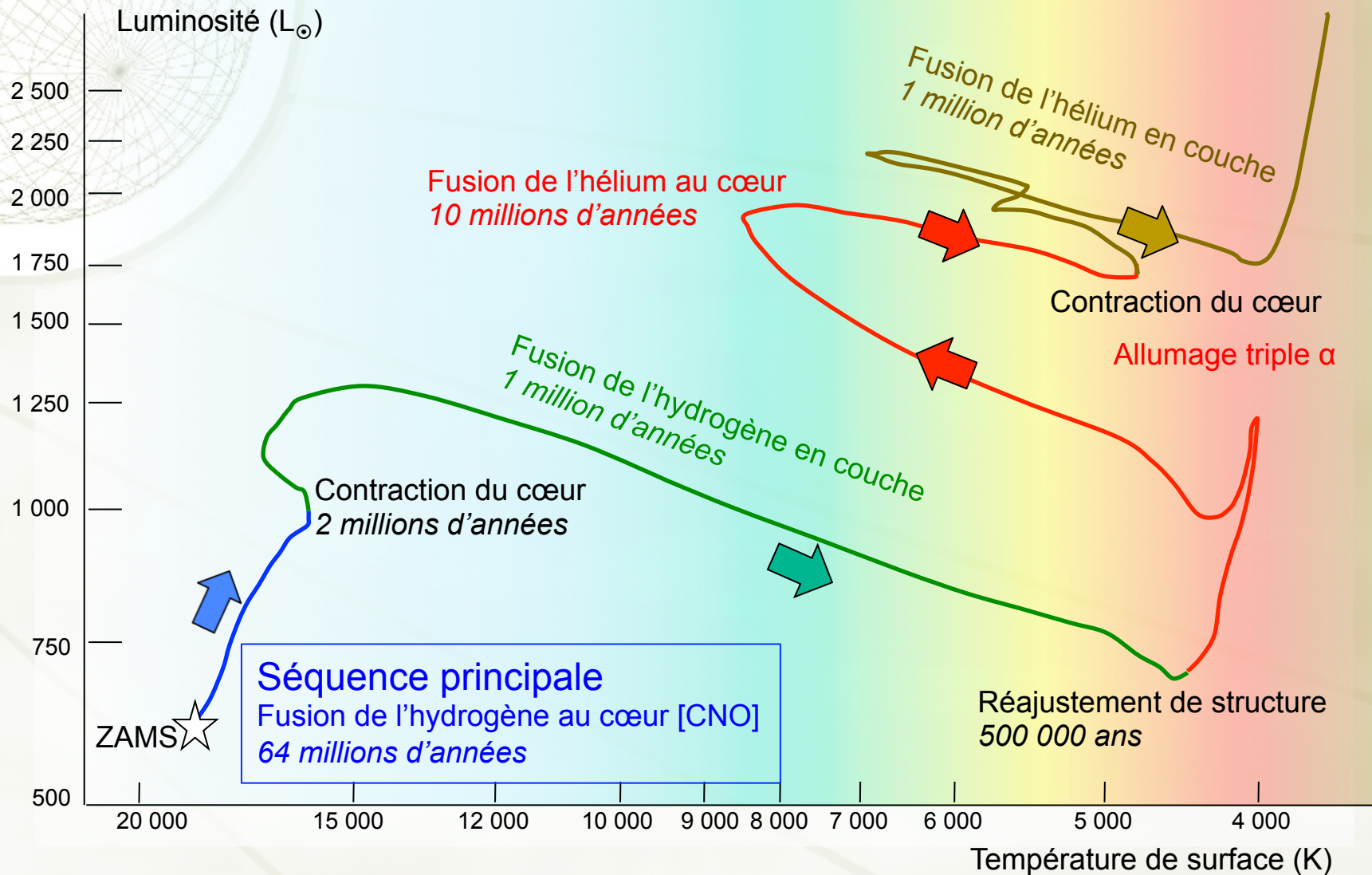
## FUSION DE L'HÉLIUM $\Rightarrow$ RÉAJUSTEMENT DE STRUCTURE

- Fusion de l'hélium en carbone (processus triple  $\alpha$ )
  - $\rightarrow$  très forte dépendance en température ( $\sim T^{30}$ )
  - $\rightarrow$  très petite zone produisant une très grande quantité d'énergie
  - $\rightarrow$  très forte luminosité
  - $\rightarrow$  forte pression de rayonnement
- Gradient adiabatique
  - $\rightarrow$  dilatation de l'enveloppe
  - $\rightarrow$  refroidissement
  - $\rightarrow$  chute de la température de surface
- $\Rightarrow$  géante + rouge

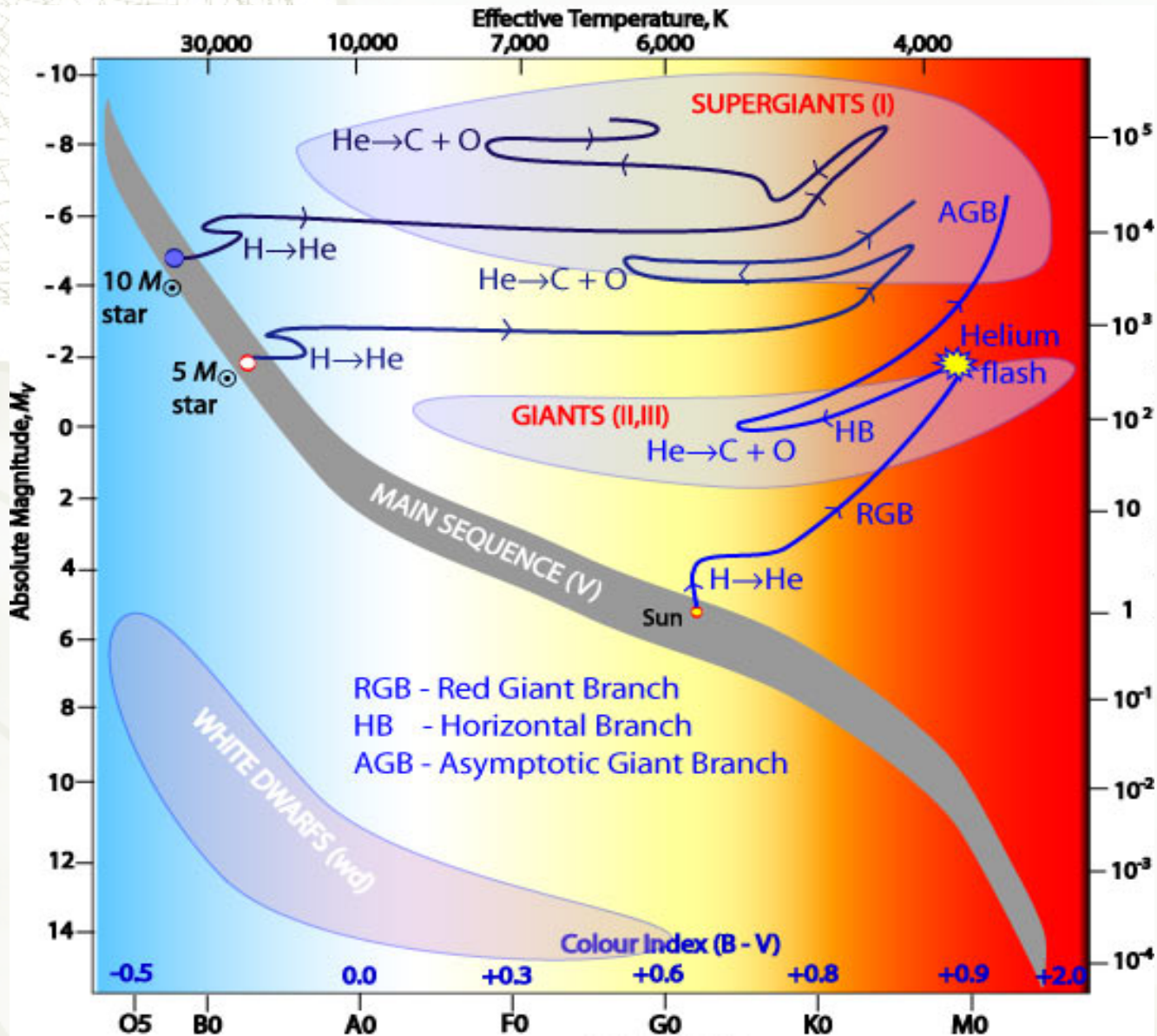




# ÉVOLUTION D'UNE ÉTOILE DE 5 M<sub>⊙</sub>



# TRAJETS DANS LE DIAGRAMME HR



Branche asymptotique  
des géantes  
*Fusion He en couche*

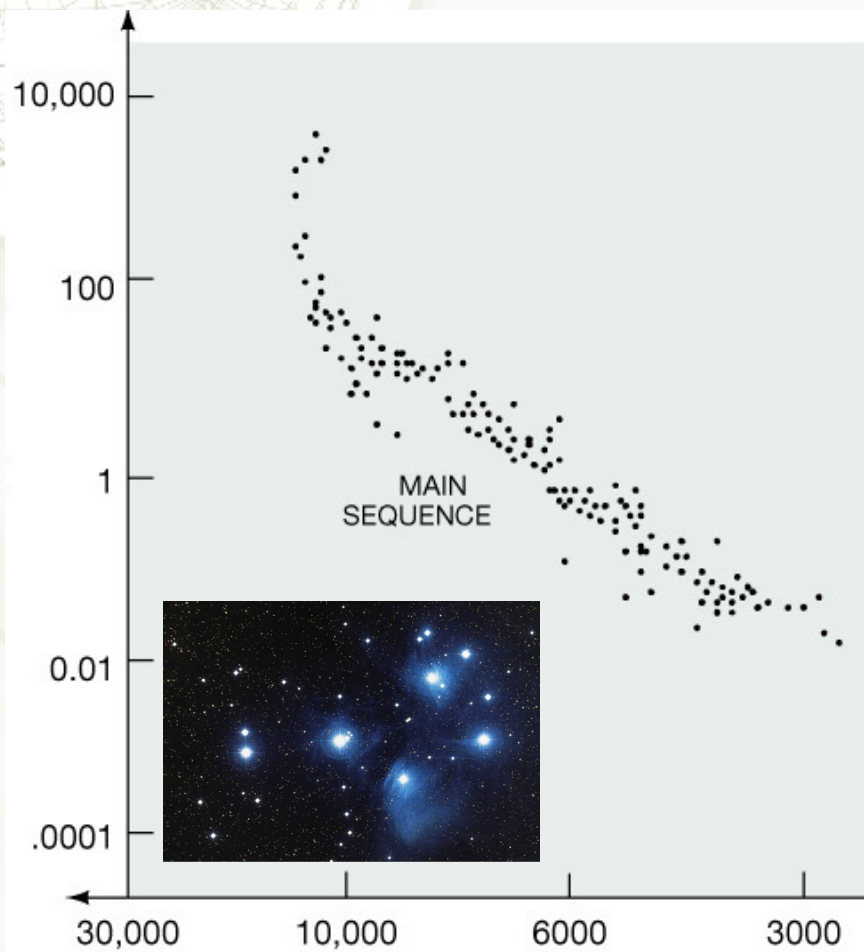
Branche horizontale  
des géantes  
*Fusion He au cœur*

Branche des géantes  
*Fusion H en couche*

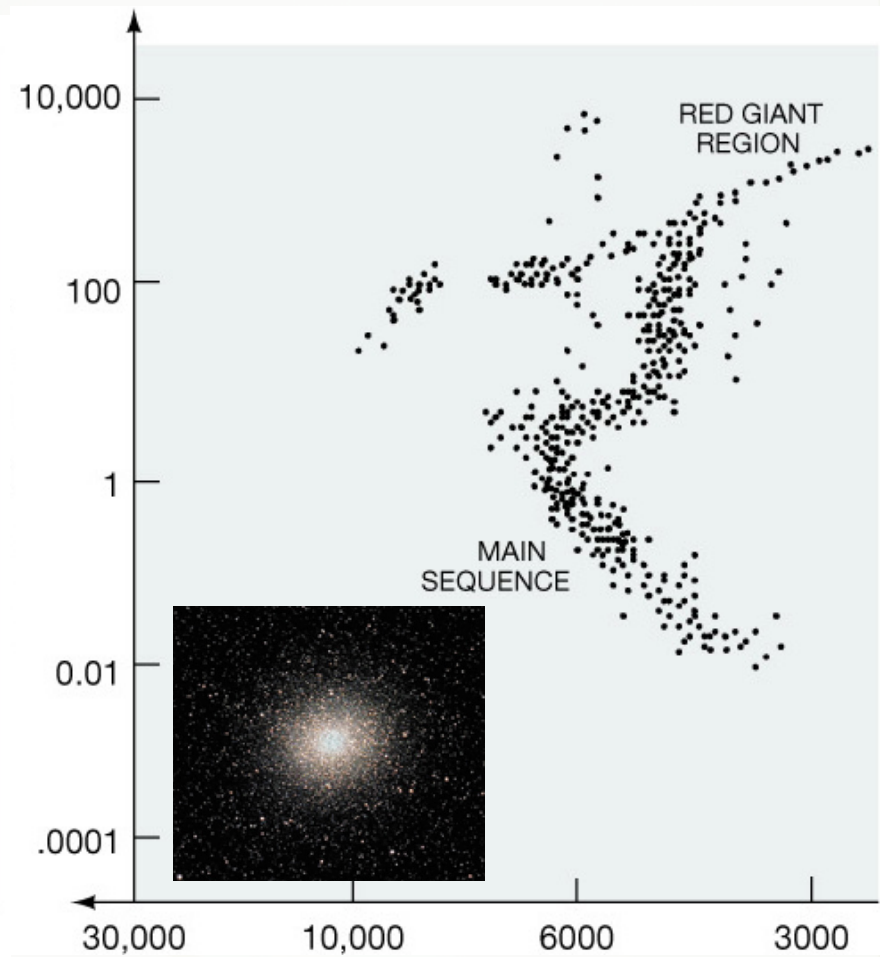
Séquence principale  
*Fusion H au cœur*

## → ÂGE DES AMAS D'ÉTOILES

- Amas ouvert des Pléiades

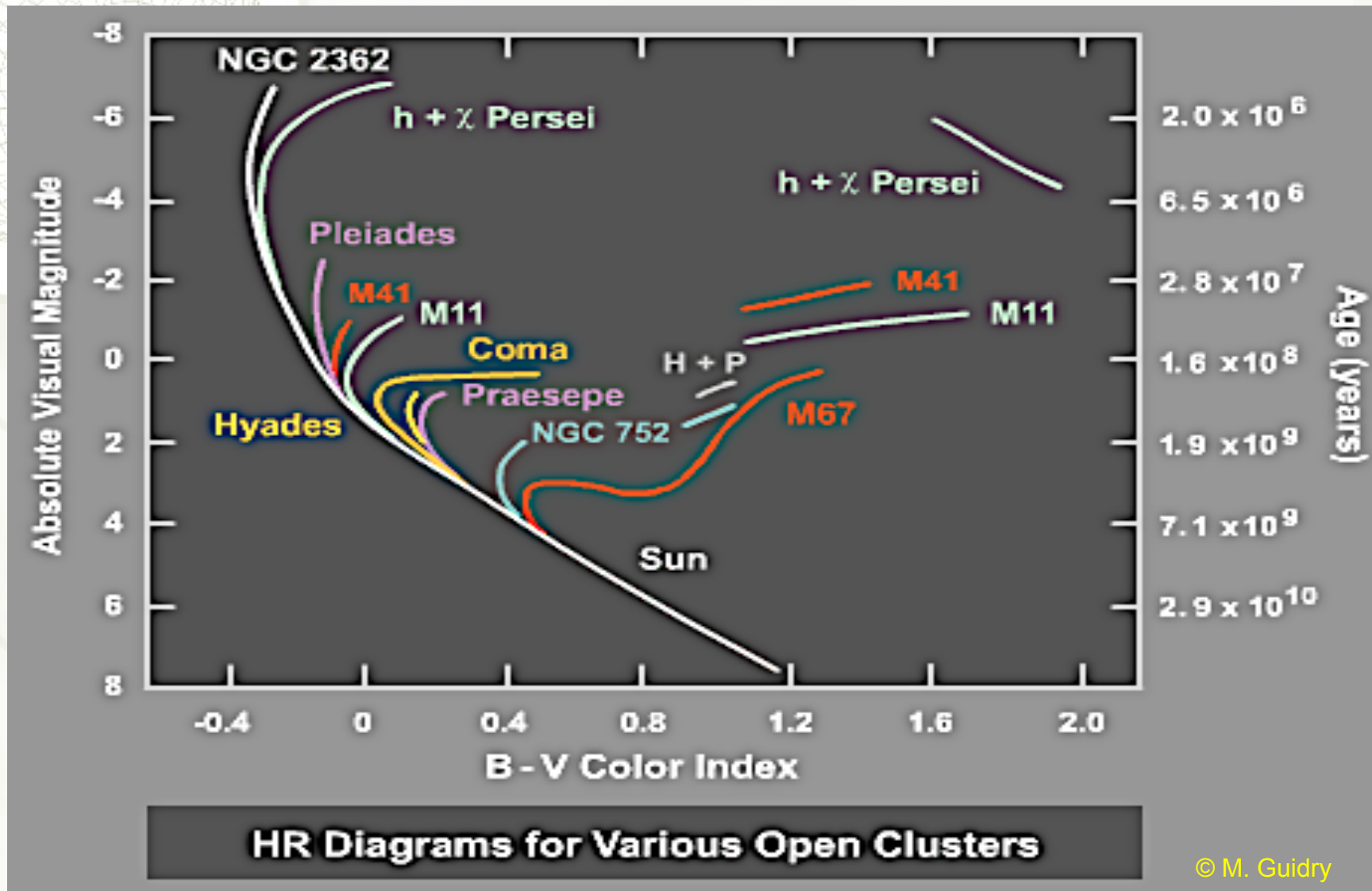


- Amas globulaire Omega Centauri

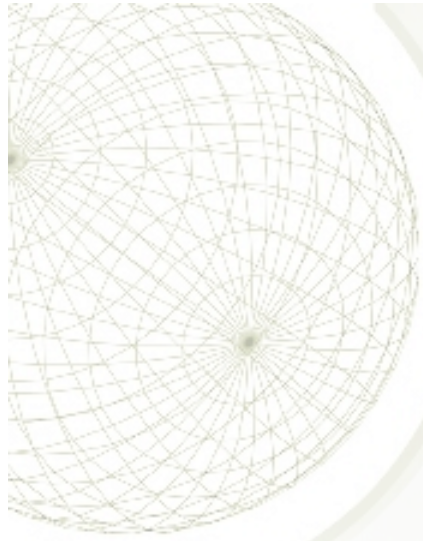




# COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS AMAS OUVERTS



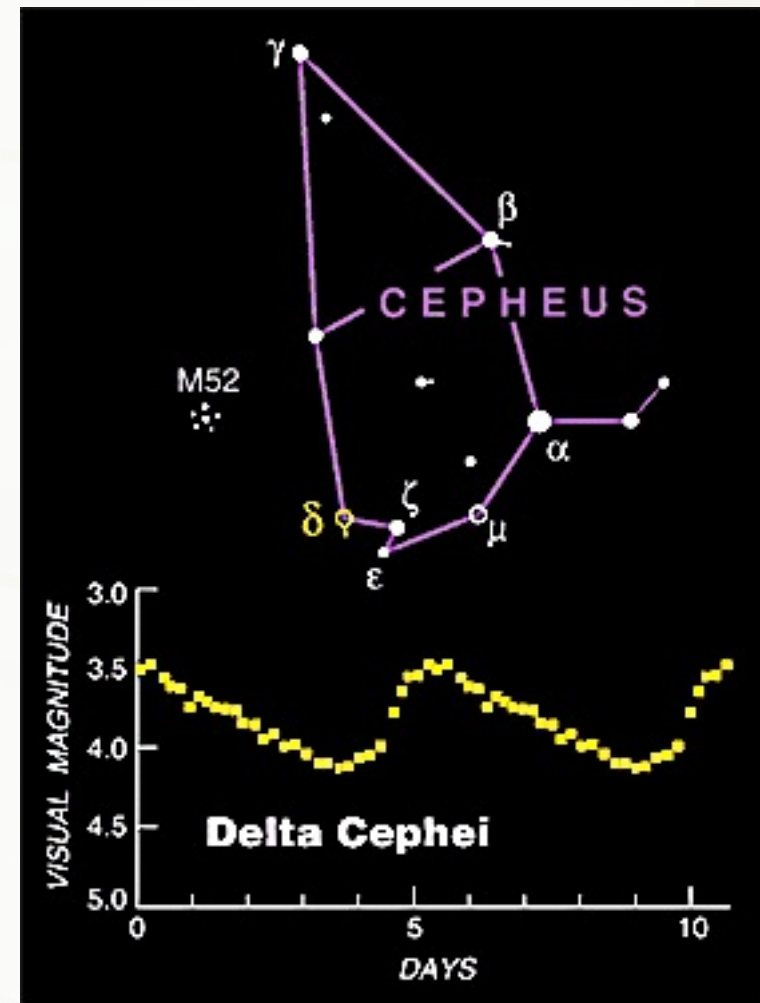




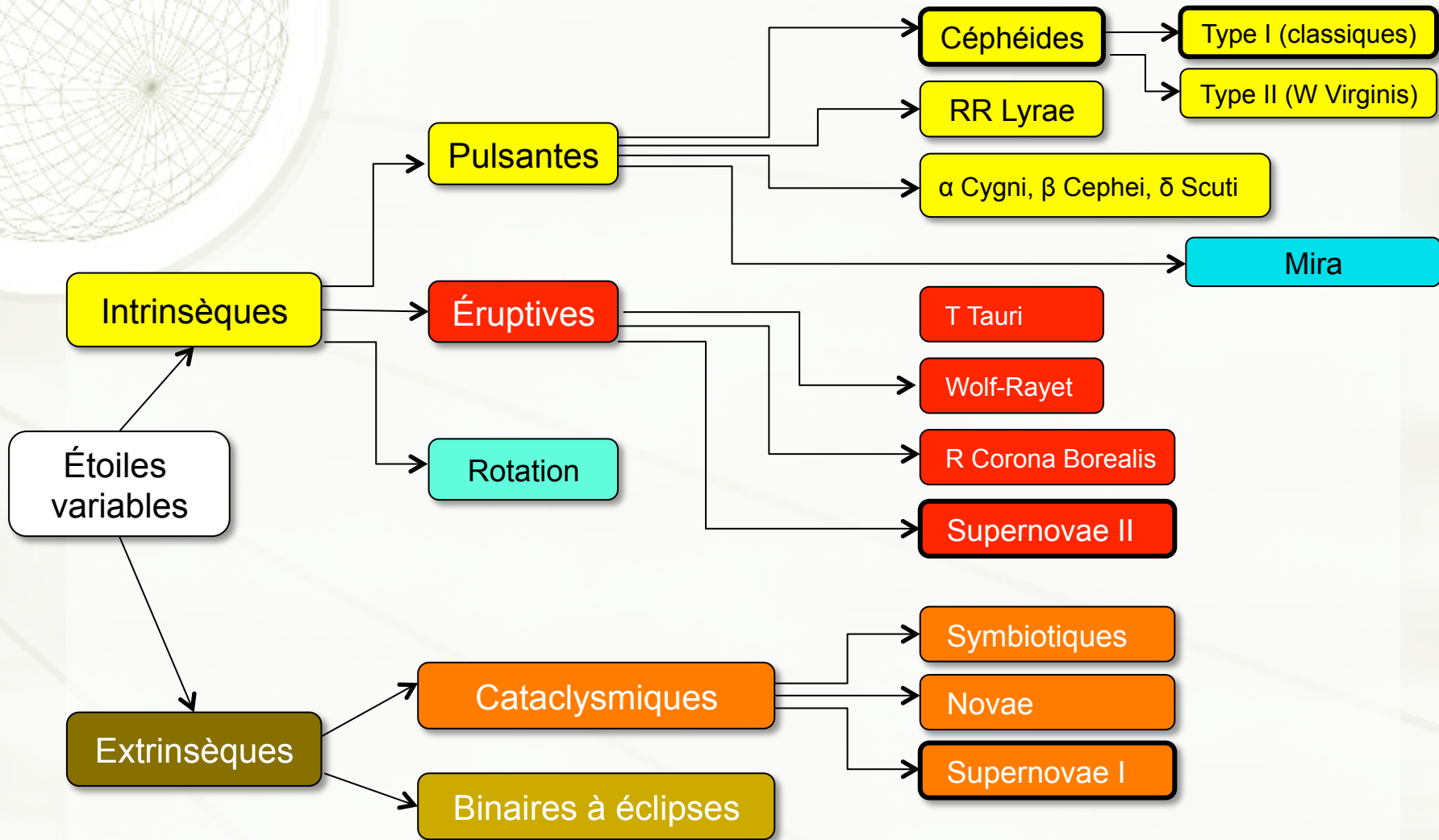
# LES ÉTOILES VARIABLES

## DES ÉTOILES QUI NE SONT PAS IMMUABLES...

- Novae [et supernovae]
  - Observations répétées d'étoiles « invitées »
  - *Qui disparaissent ensuite*
- 1638 :  $\alpha$  Ceti (Mira)
  - varie de plusieurs magnitudes (1 à 4) sur une période de 11 mois
  - Supergéante rouge (AGB)
- 1669 :  $\beta$  Persei (Algol)
  - Système triple où Algol B éclipe tous les 3 jours Algol A pendant ~10 h
  - Paradoxe : Algol A, plus massive, est sur la Séquence principale alors qu'Algol B est déjà une géante rouge → transfert de masse entre les 2
- 1784 :  $\delta$  Cephei
  - Magnitude variant de 3,6 à 4,3 tous les 5 jours
  - Type spectral passant de F5 à G3

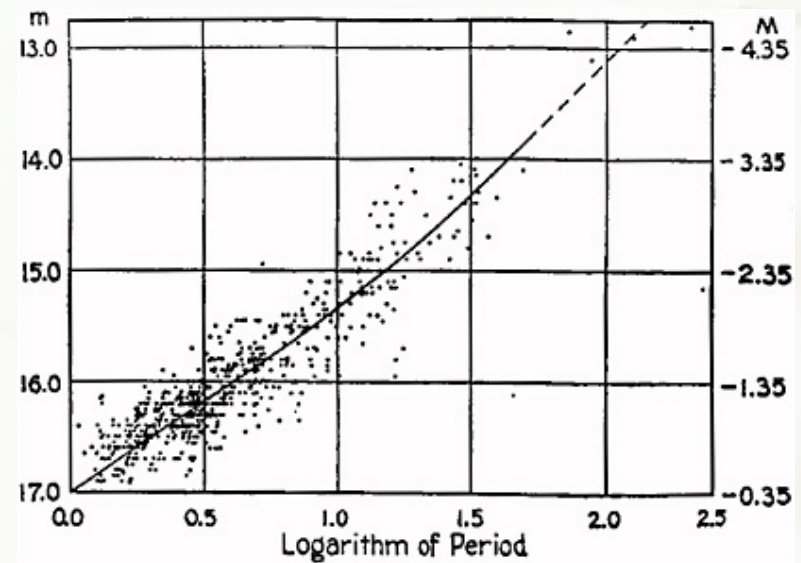
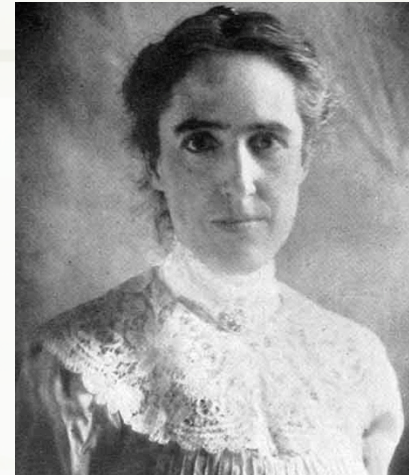


# LES PRINCIPAUX TYPES D'ÉTOILES VARIABLES



# CÉPHÉIDES

- Les céphéides sont des supergéantes jaunes (type spectral F6-K2)
- Relation période-luminosité (Henrietta Leavitt 1908)
  - observation des étoiles des Nuages de Magellan
  - toutes à peu près à la même distance
  - $\Rightarrow$  magnitude apparente  $\Leftrightarrow$  magnitude absolue
- Étalon de distance précieux
  - une fois la relation période-magnitude calibrée
  - période  $\Rightarrow$  magnitude absolue  $\Rightarrow$  distance
  - étoiles brillantes  $\Rightarrow$  visibles de loin



- Harlow Shapley 1915 : structure de la Voie lactée et position **excentrée** du Soleil
- Edwin Hubble 1924 : distance de la « nébuleuse » d'Andromède  $\rightarrow$  **extragalactique**

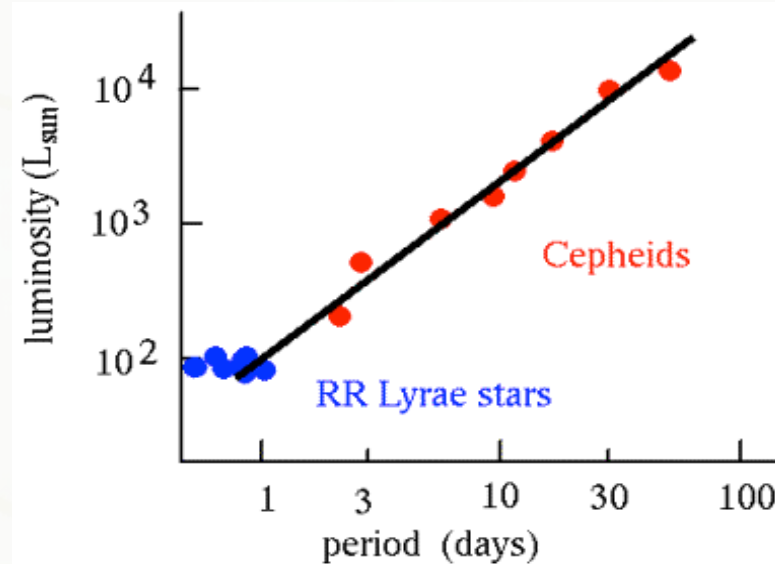


# CÉPHÉIDES II (W VIR), RR LYR ET AUTRES PULSANTES

- 1942-1952 : Walter Baade découvre que toutes les « céphéides » ne sont pas des céphéides
  - il existe **deux** populations d'étoiles
    1. des étoiles de métallicité solaire et relativement jeunes (**population I**) dans le disque des galaxies
    2. des étoiles de faible métallicité et plutôt âgées (**population II**) dans le bulbe des galaxies
  - Et les « céphéides » de Pop II sont 4 fois moins lumineuses que celles de Pop I
  - ⇒ réexamen de l'échelle de distance galactique

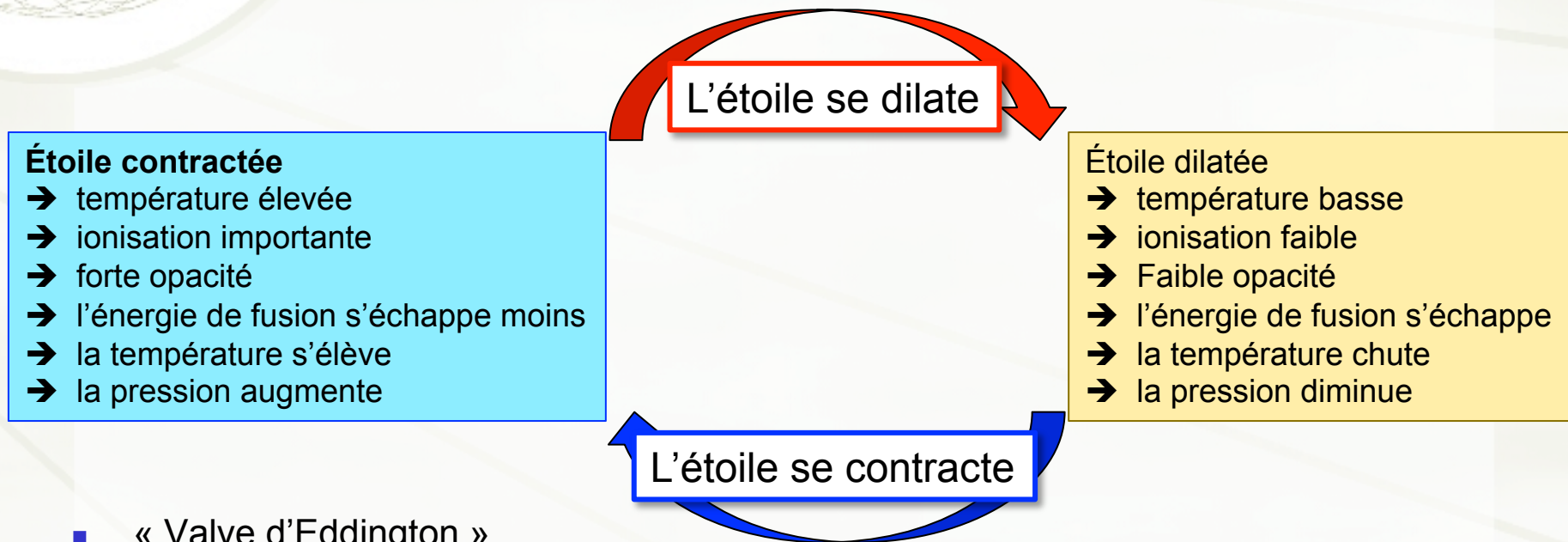
- Les céphéides ne sont pas les seules étoiles pulsantes

- Céphéides naines ( $\delta$  Scuti)
- RR Lyrae (Pop II, géantes de petite masse)
- ...



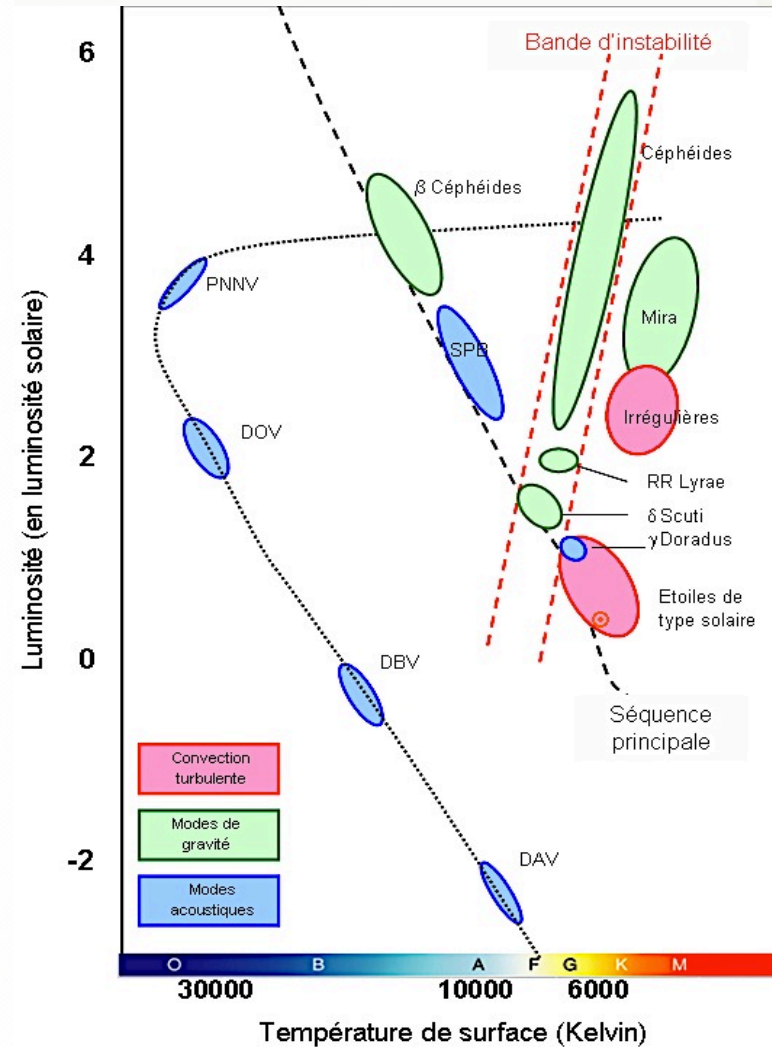
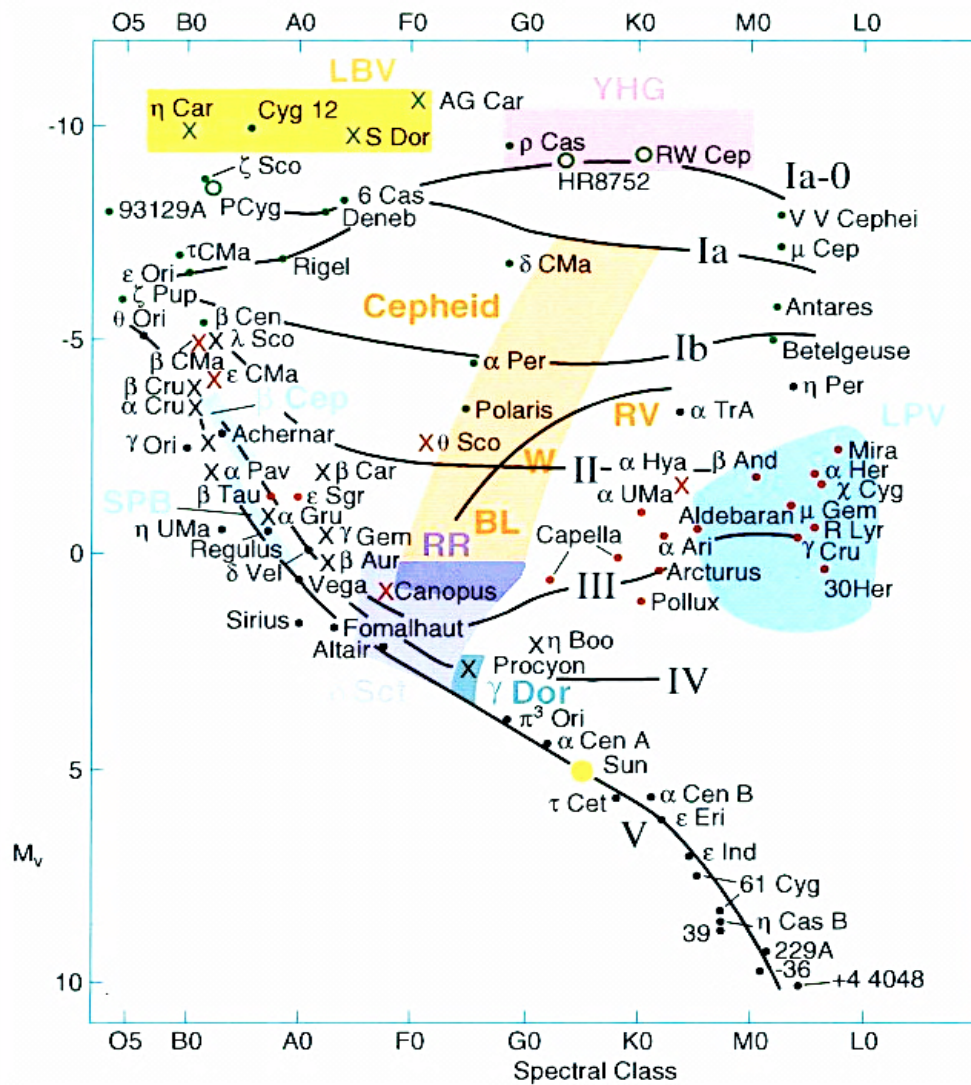
# LE MÉCANISME DES PULSATIONS

- La faute de l'hélium
  - $T \sim 25\,000\text{ K}$  : ionisation de l'hélium (He II)
  - $T \sim 40\,000\text{ K}$  : seconde ionisation de l'hélium (He III)
  - L'opacité de He III est beaucoup plus grande que celle de He II



- « Valve d'Eddington »
- Mira : opacité de l'hydrogène

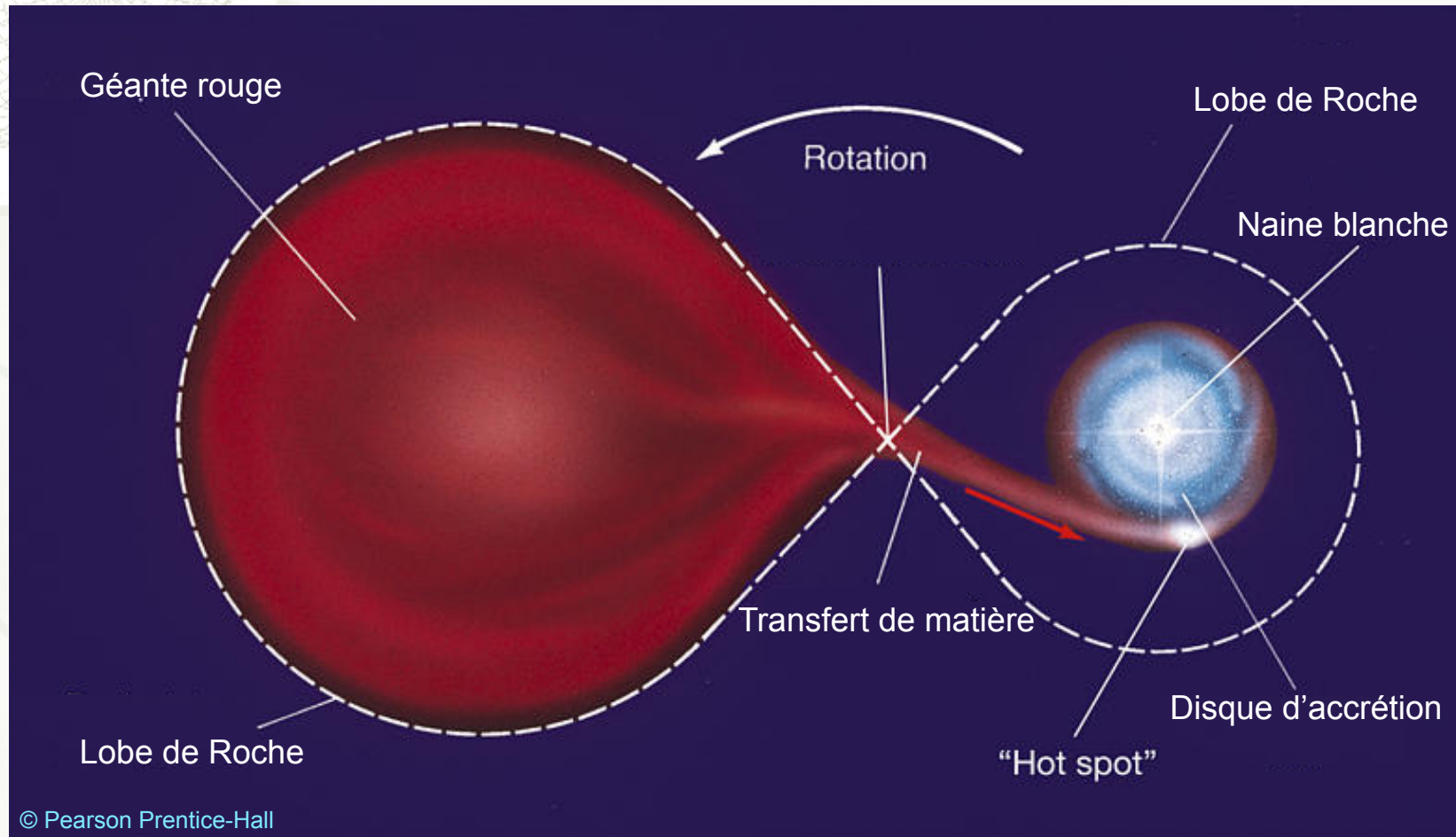
# DIAGRAMME HR DES ÉTOILES VARIABLES





# VARIABLES CATAclysmIQUES

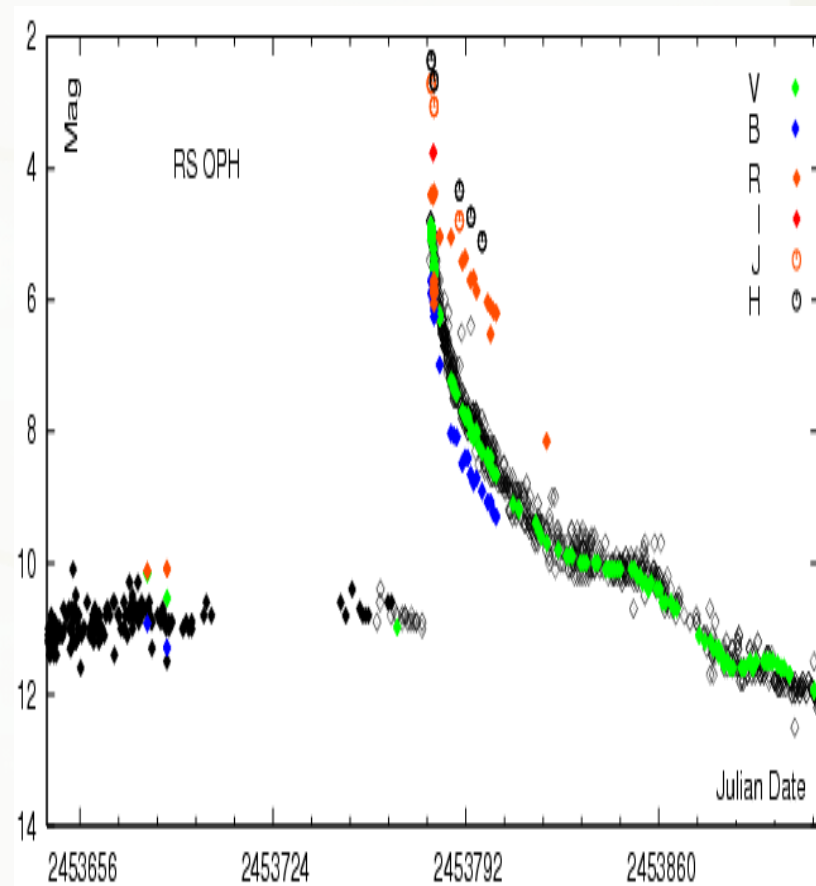
- Système binaire : géante rouge et naine blanche





# NOVAE

- Naine blanche [C-O] accrétant régulièrement de la matière [H-He] d'une géante rouge proche
  - matière accélérée et comprimée par la gravité de la naine blanche
  - température  $> 10$  MK  $\rightarrow$  fusion de l'hydrogène
  - naine blanche dégénérée  $\rightarrow$  pression indépendante de la température
  - $\rightarrow$  température augmente sans régulation (*runaway*)  $\rightarrow$  explosion
  - $\rightarrow$  augmentation brutale de la luminosité (facteur 100 à 10 000)
  - éjection du gaz accrété restant
  - diminution progressive de la luminosité (facteur 10 en 100 à 300 jours)
- Le processus peut recommencer
  - RS Oph : 1898, 1933, 1958, 1967, 1985, 2006
  - ou pas...



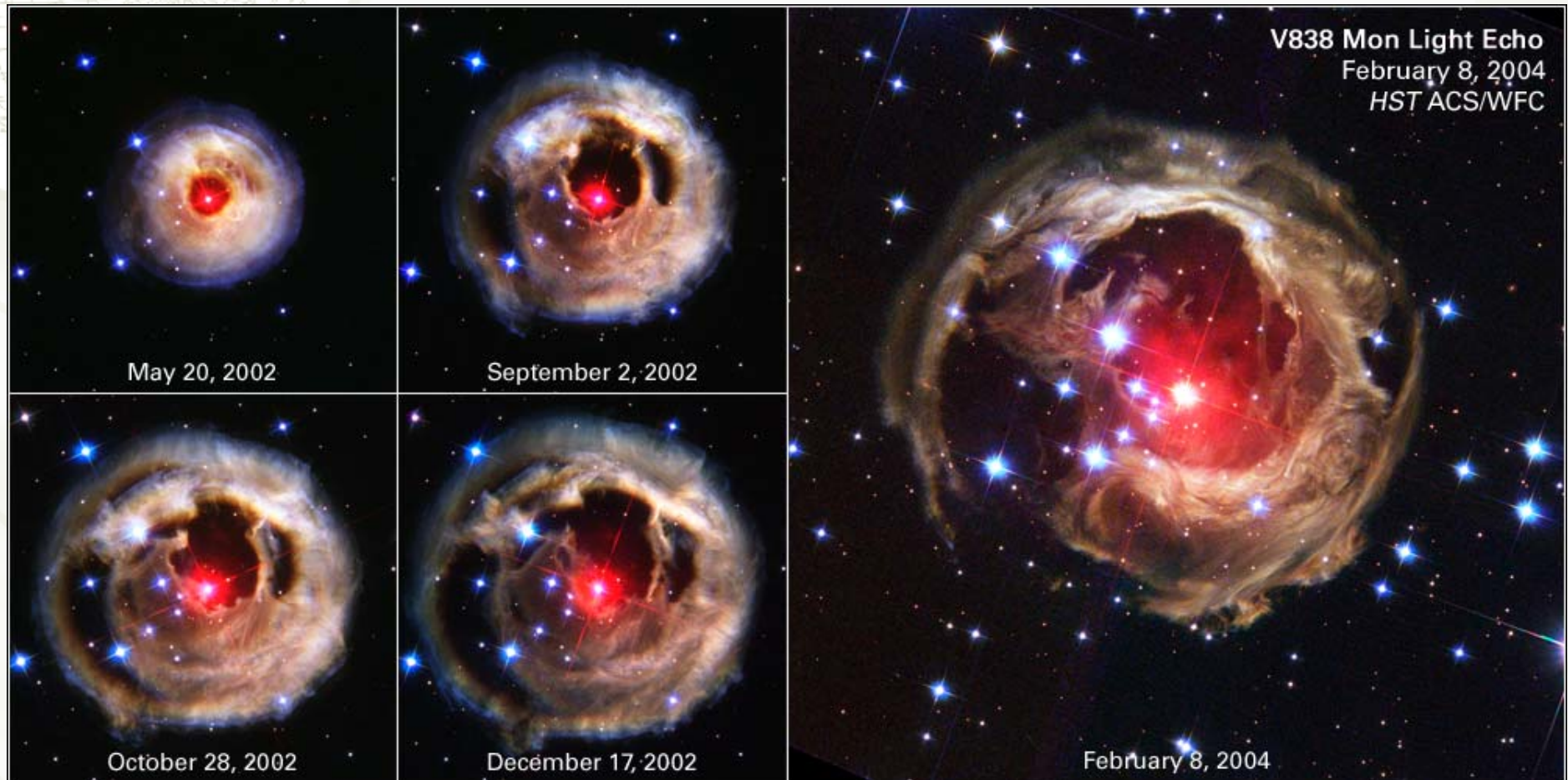
Courbe de lumière de RS Ophiuchi en 2005-2006 ©AAVSO

# V 838 MONOCEROTIS

- ~~Nova ?~~

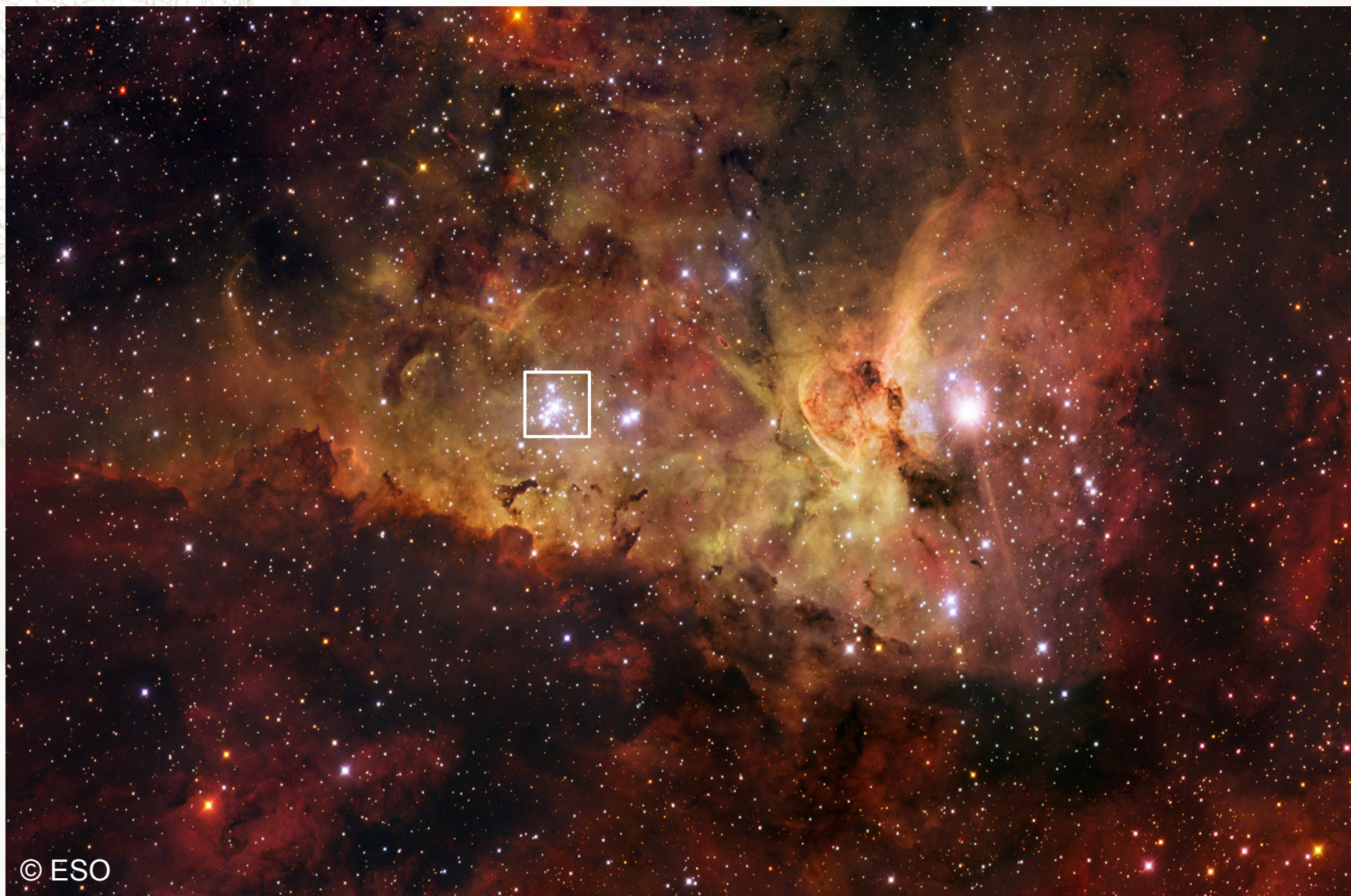
Flash de l'hélium d'une supergéante ?

Fusion de deux étoiles ?





# LA NÉBULEUSE D'ETA CARINAE

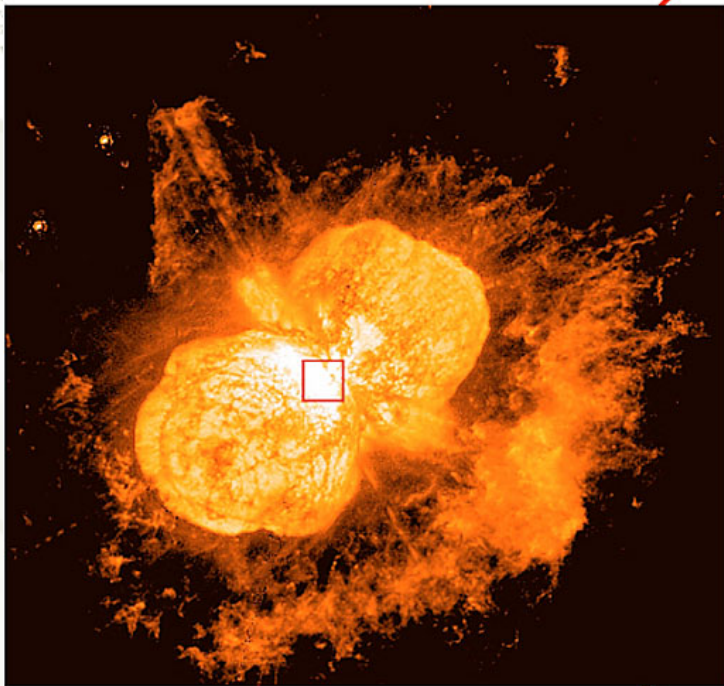


© ESO

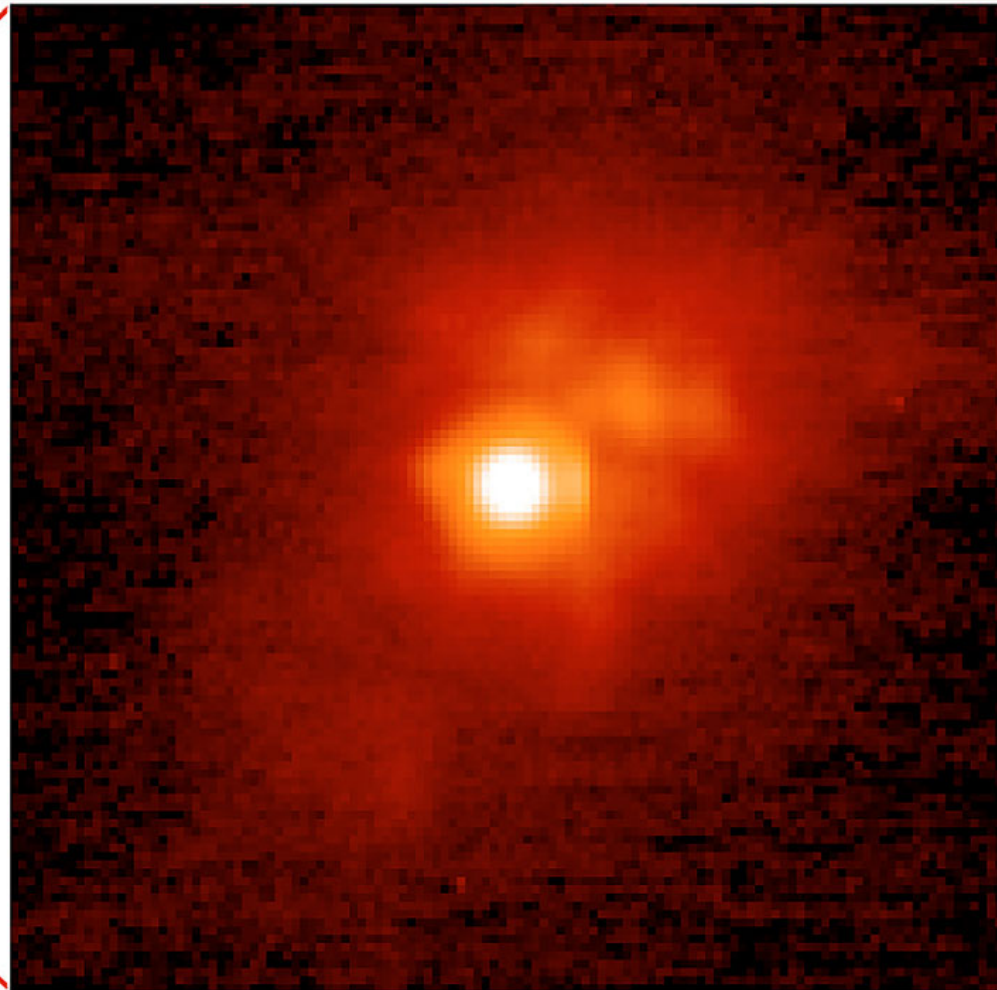


## LA NÉBULEUSE *HOMONCULUS* AUTOUR DE L'ÉTOILE $\eta$ CARINAE

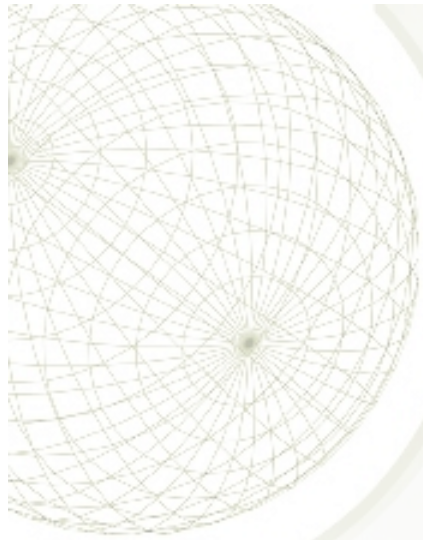
Eta Car est passée de la mag 4 en 1677 à la mag -0,8 en 1843, la mag 8 en 1900, et la mag 4,5 actuellement



Étoile de 100 à 150  $M_{\odot}$  à 8 000 al : bientôt SN?







Merci de votre attention !

