

Astrophysique

12 – Évolution des étoiles

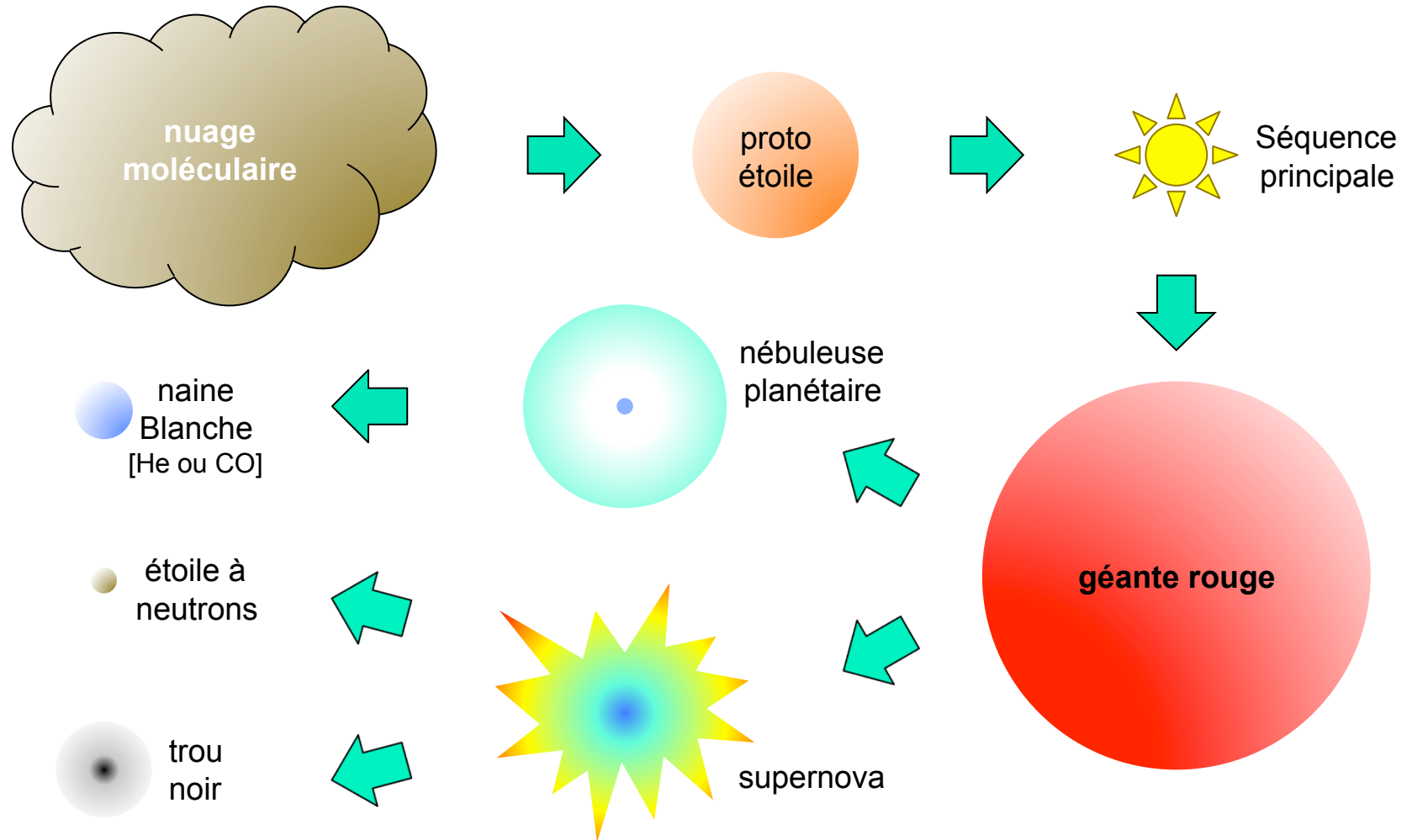


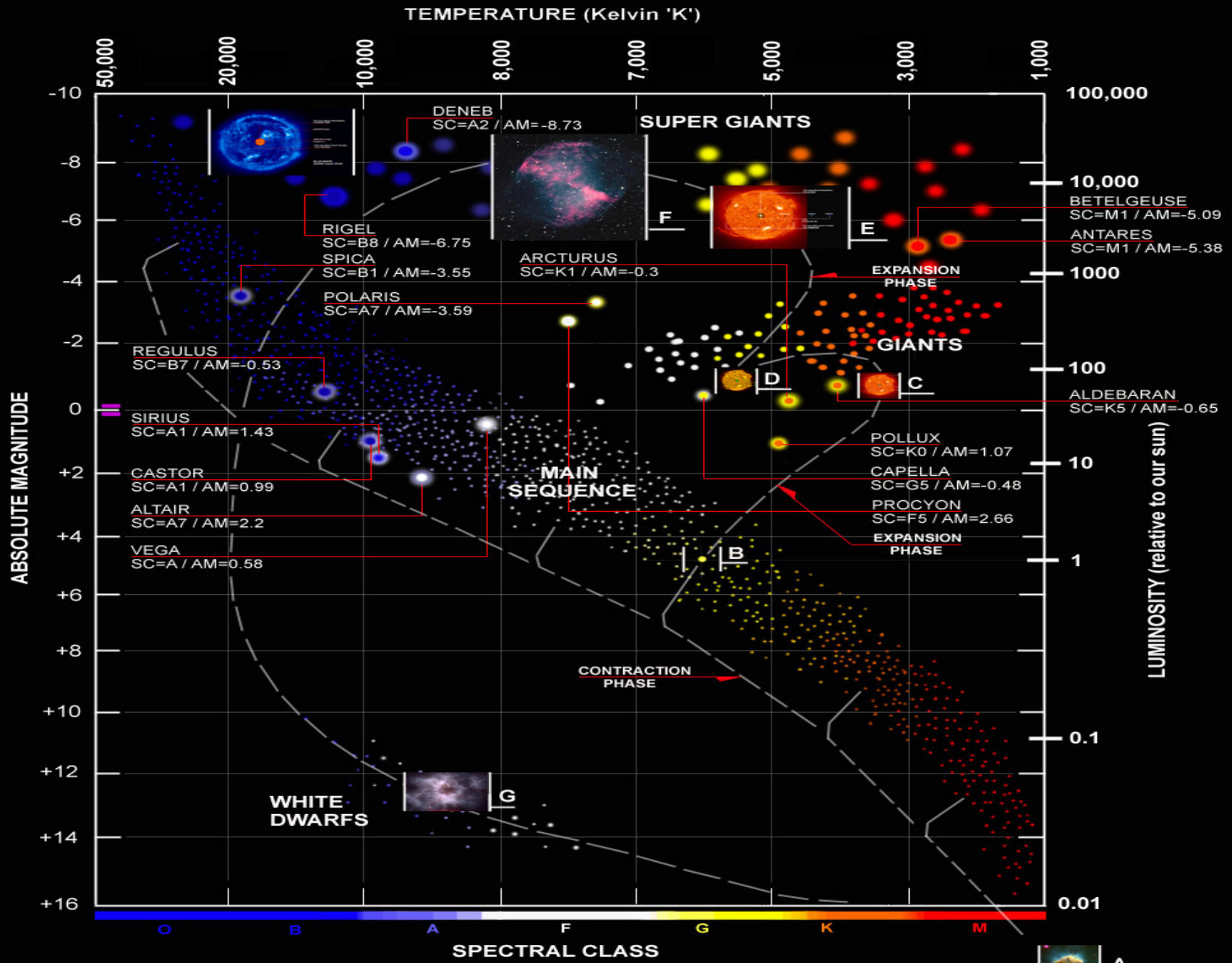
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

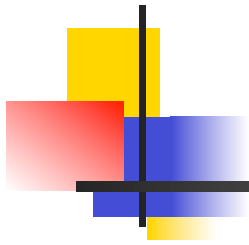
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

L'évolution des étoiles





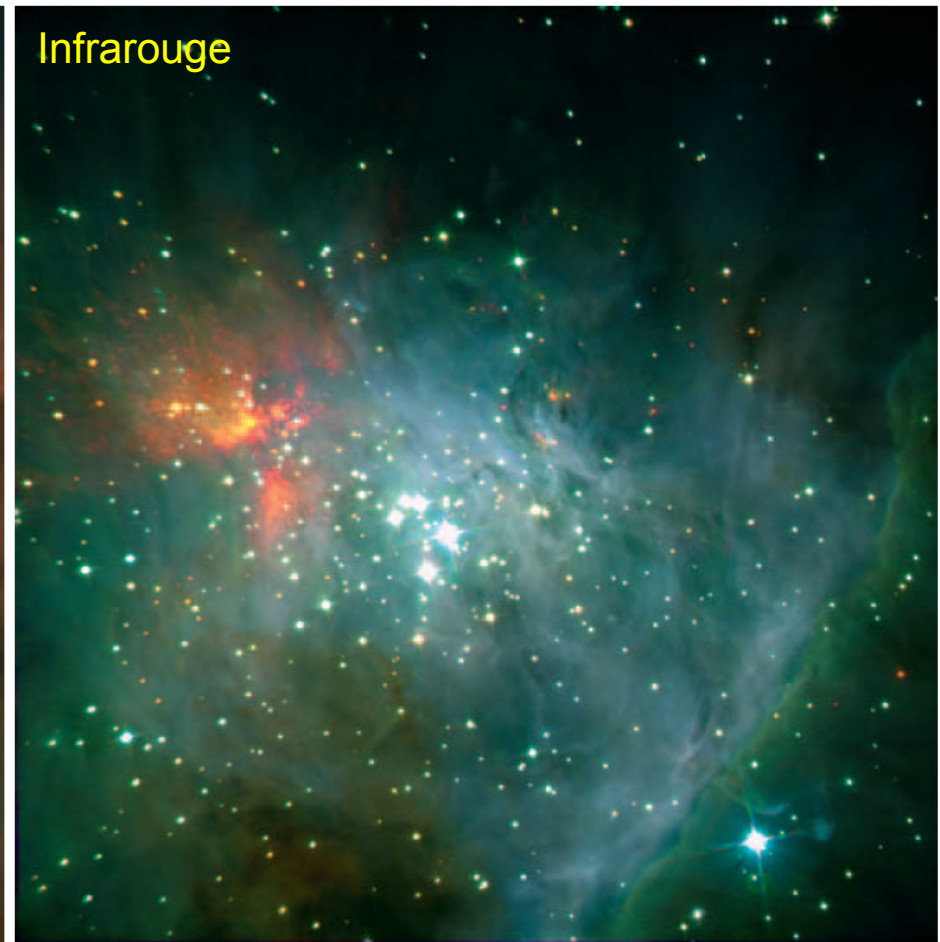
A



LES DÉBUTS

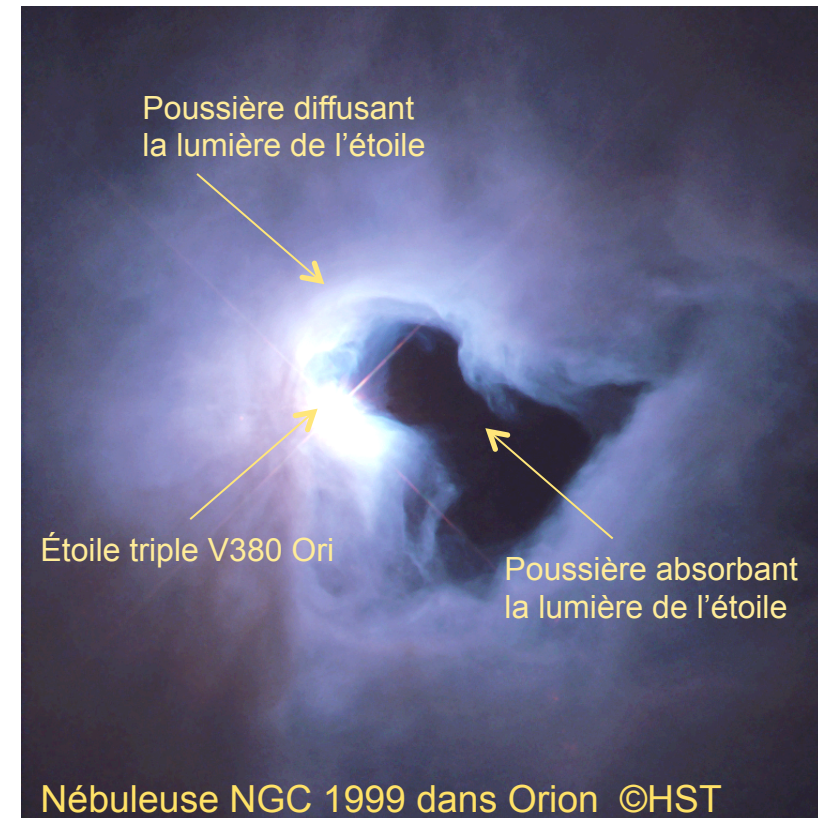


Une nursery d'étoiles: le Trapèze dans Orion



Du nuage moléculaire à la proto-étoile

- Milieu interstellaire
 - Nuages d'hydrogène atomique HI
 - Régions d'hydrogène ionisé HII (← sources de chaleur = étoiles chaudes)
 - Nuages moléculaires H₂
 - Globules de Bok
 - Objets de Herbig-Haro
- Naissance d'une étoile
 - Effondrement par instabilité gravitationnelle
 - Densité ↗
 - Pression ↗ (ralentit l'effondrement)
 - Fragmentation
 - Opacité ↗
 - Température ↗
 - Passage de 1 à 10²⁴ atome/cm³ (et de températures de 10 K à plus de 1000 K)



→ simulations numériques TRÈS difficiles

Instabilité gravitationnelle

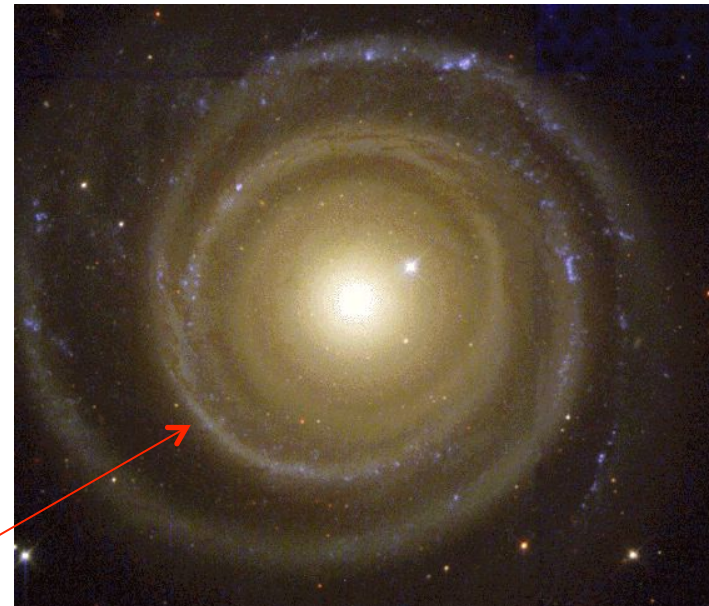
- Équilibre entre pression et gravitation

$$kT \sim GM\mu/R \sim GM\mu/(M/\rho)^{1/3}$$

$$\rightarrow T_{\text{équilibre}} \sim \rho^{1/3} M^{2/3}$$

(dépend de la masse M du nuage)

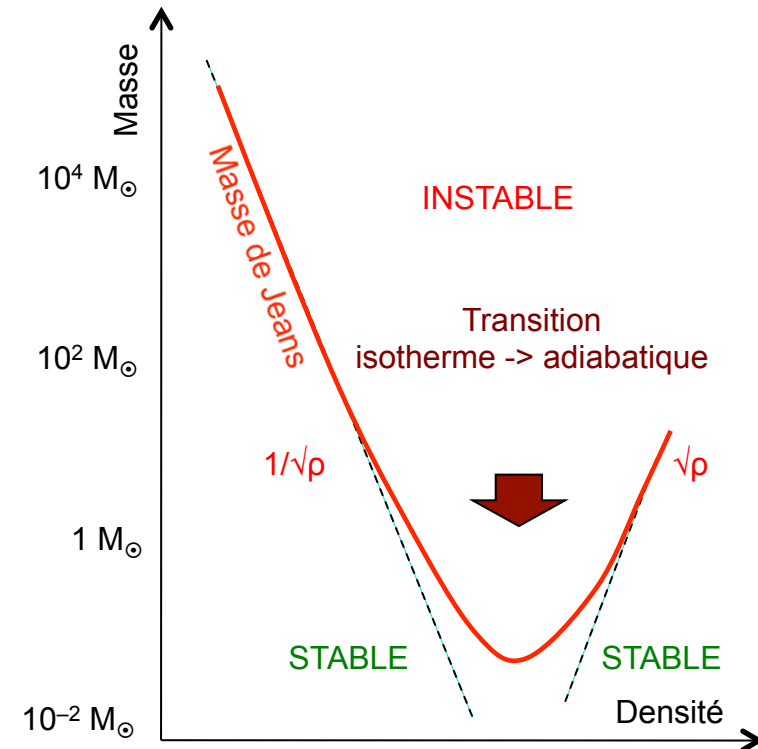
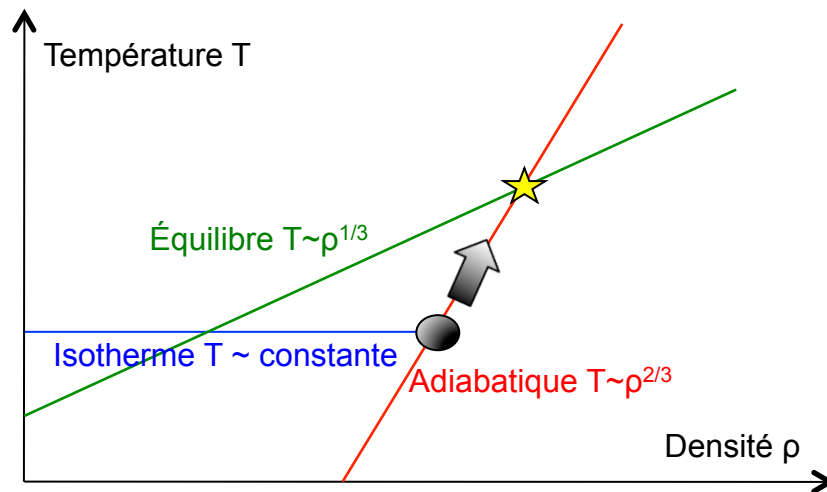
- Causes possibles d'une instabilité
 - Passage d'une onde de densité (bras spiraux des galaxies) $\rightarrow \rho$ augmente sans compensation de température
 - Onde de choc d'une supernova
 - Refroidissement du nuage par rayonnement $\rightarrow T$ chute



- \rightarrow Compétition entre
 - Perte d'énergie par rayonnement (refroidissement)
 - Gain d'énergie par contraction gravitationnelle
 - Puis gain d'énergie par fusion thermonucléaire

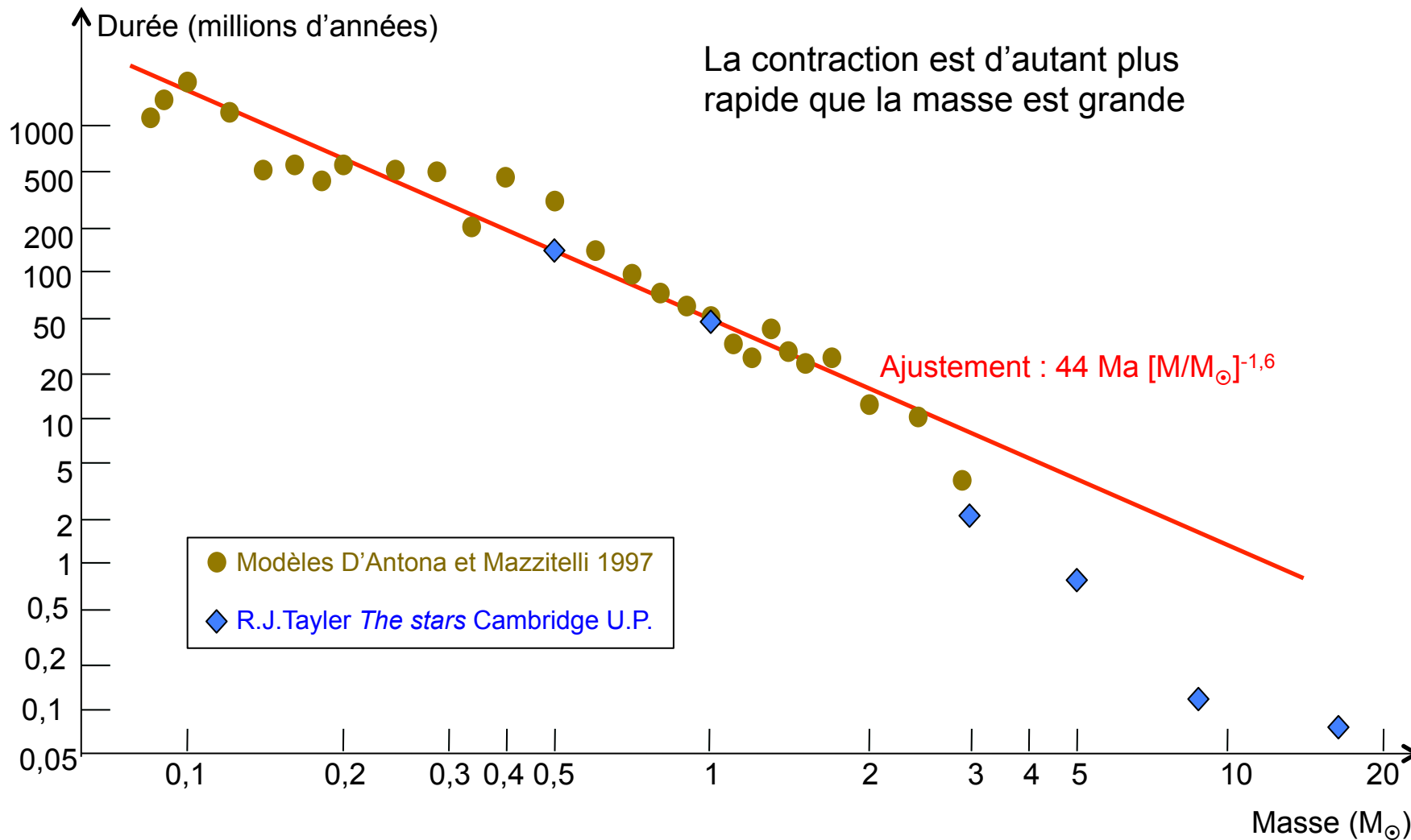
Fragmentation et transition isotherme - adiabatique

- $M_{\text{Jeans}} = T^{3/2}/\rho^{1/2}$
- Contraction
 - $\rightarrow \rho$ augmente
 - $\rightarrow M_{\text{Jeans}}$ diminue à T constant
 - \rightarrow fragmentation
 - jusqu'à ce que le nuage devienne opaque, permettant à la température d'augmenter (adiabatique $T \sim \rho^{2/3}$)

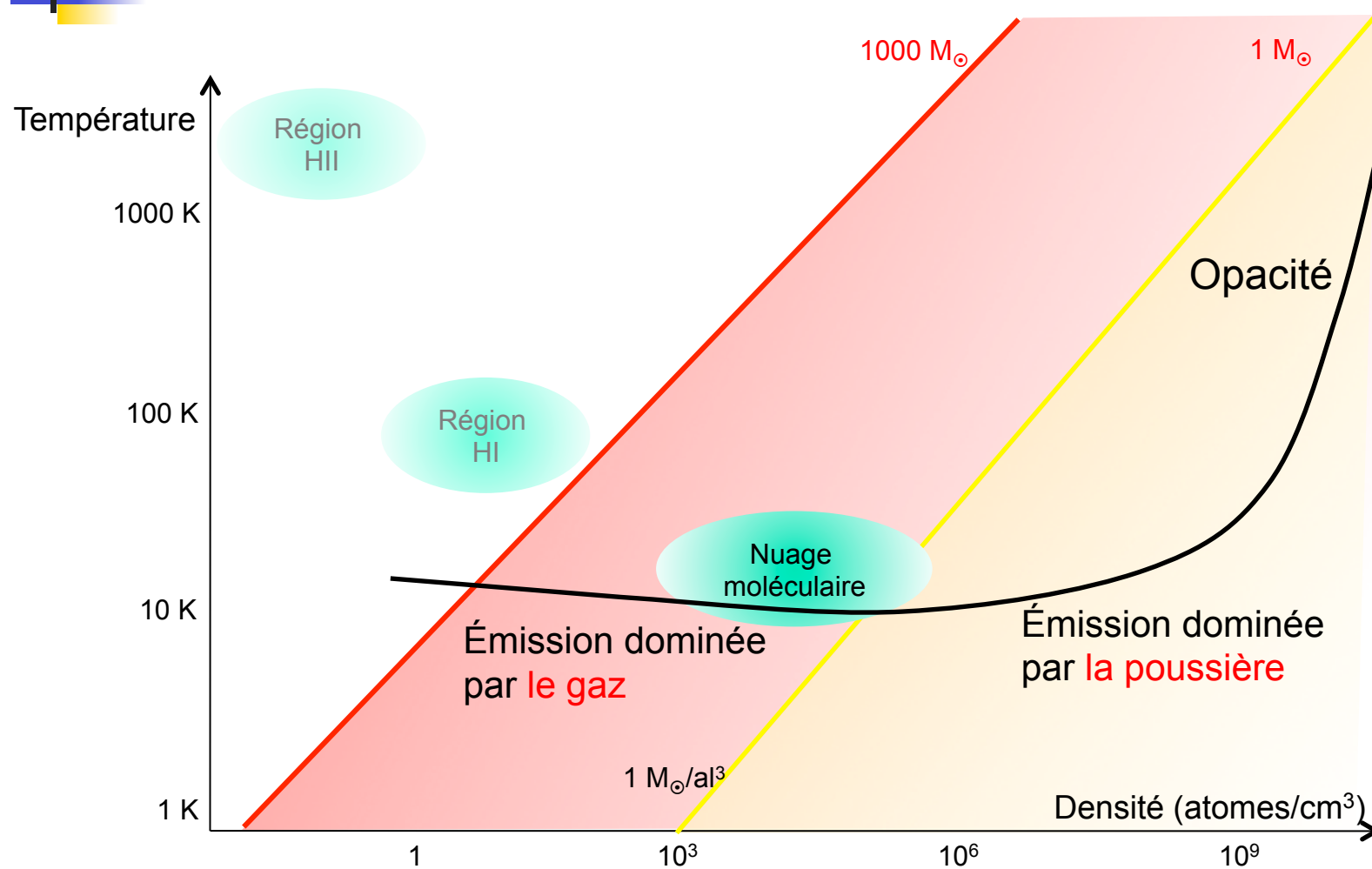


- \rightarrow distribution de masse des proto-étoiles, de $\sim 10^{-2} M_{\odot}$ à $10^2 M_{\odot}$
- La proto-étoile continue à accréter le gaz du nuage (donc sa masse augmente)

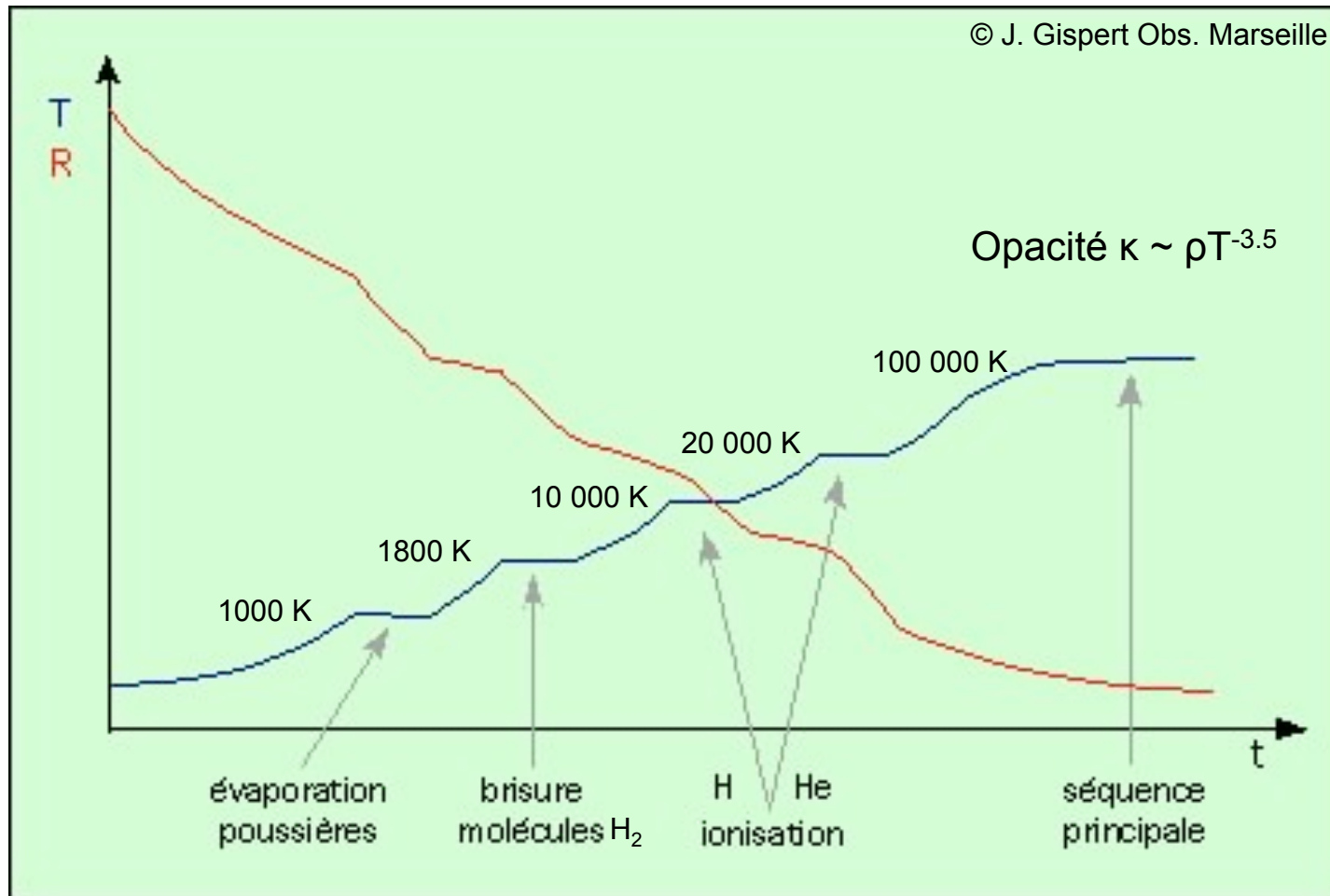
Durées de la contraction



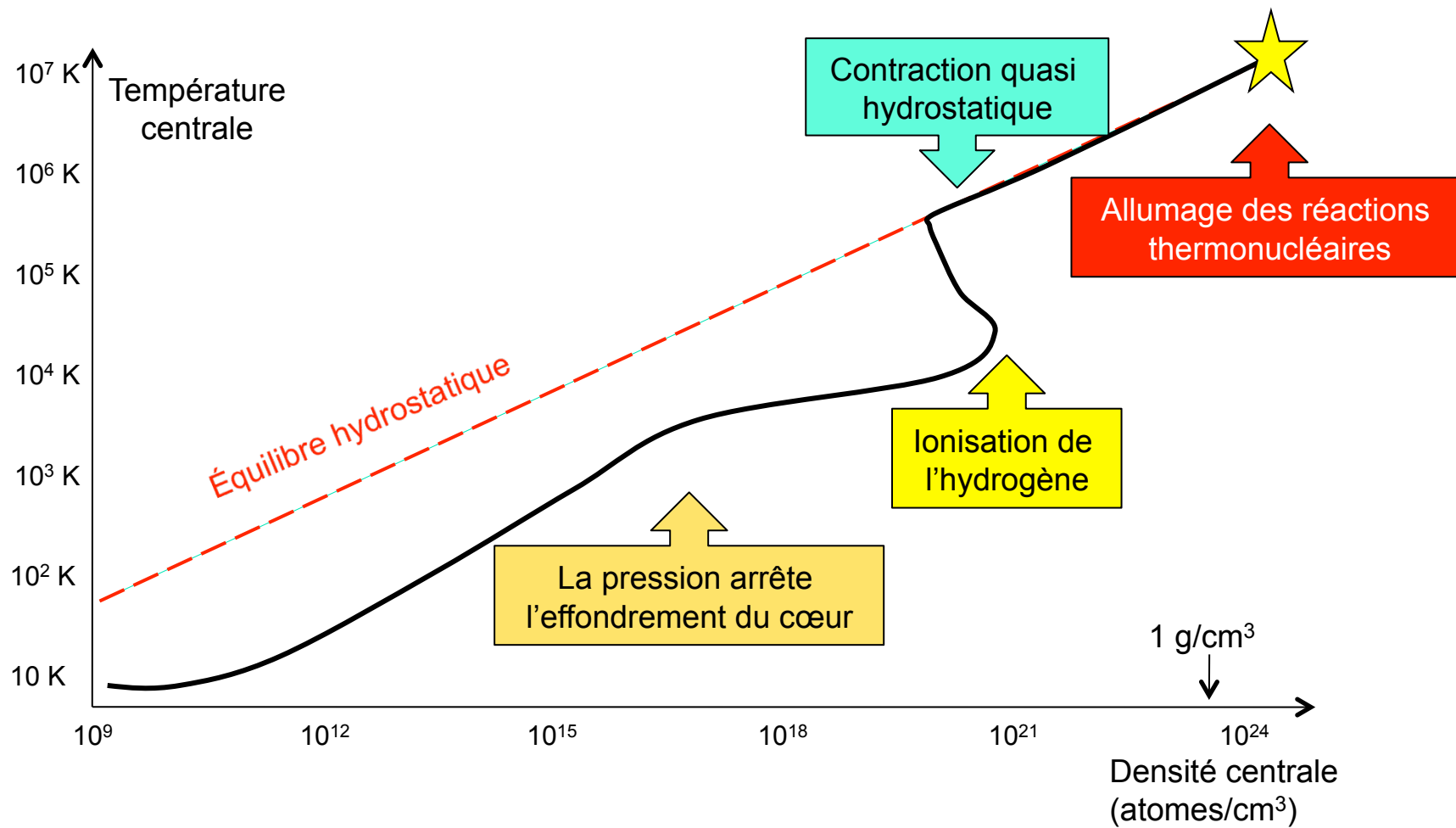
Contraction d'un nuage



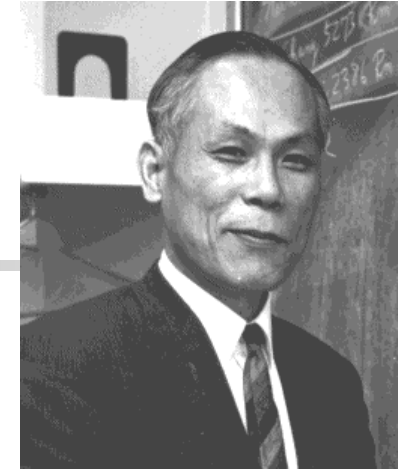
Contraction d'une protoétoile



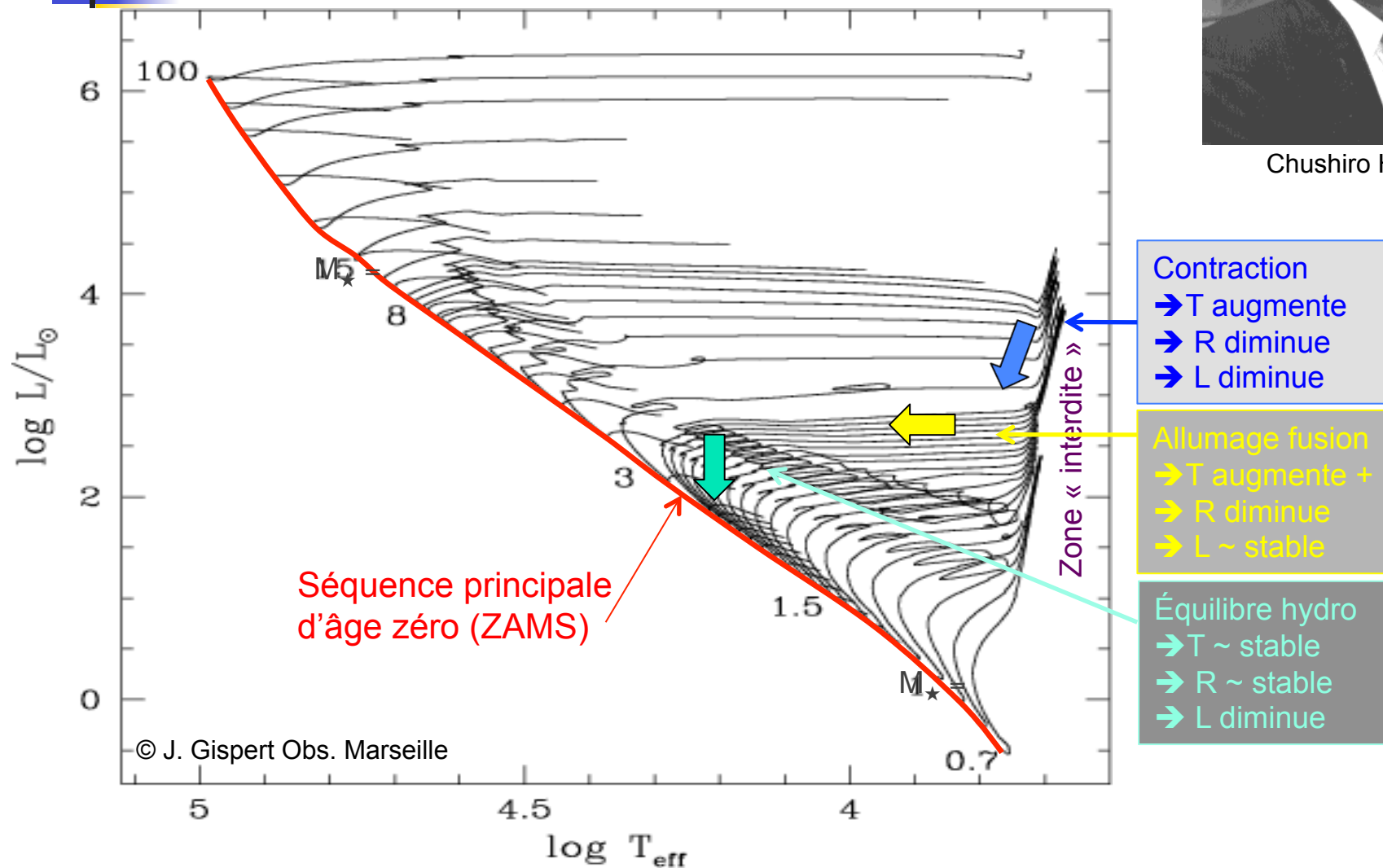
Ensuite



Trajets de Hayashi



Chushiro Hayashi



T Tauri et associations d'étoiles

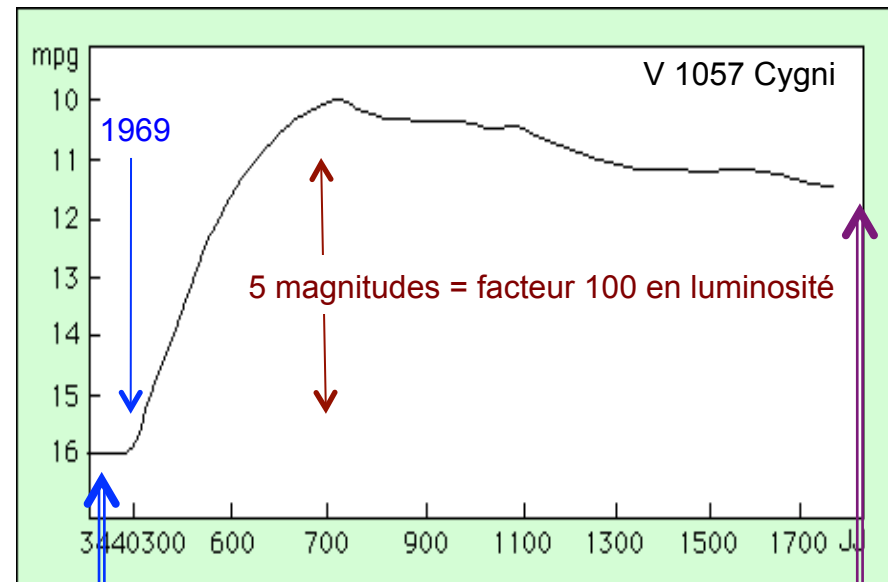
■ Étoiles T Tauri

- plutôt rouges (types F à M)
- lumineuses ($> SP$)
- présence de lithium
- variables de façon erratique
- vents stellaires intenses
- masses $< 1,5 M_{\odot}$

■ Associations

- \neq amas ouverts (Ambartsumian, 1949)
- associations T
 - plusieurs centaines étoiles T Tauri
 - diamètre de 5 à 100 al
- Associations OB
 - dizaines d'étoiles de type O et B (mais pas uniquement)
 - diamètre de 500 al

- FU Orionis, V 1057 Cygni, des naissances en direct?

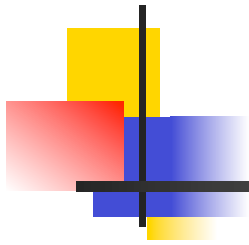


Énergie = réactions thermonucléaires?

Énergie = contraction gravitationnelle ?

T Tauri et la nébuleuse variable de Hind (NGC 1554)

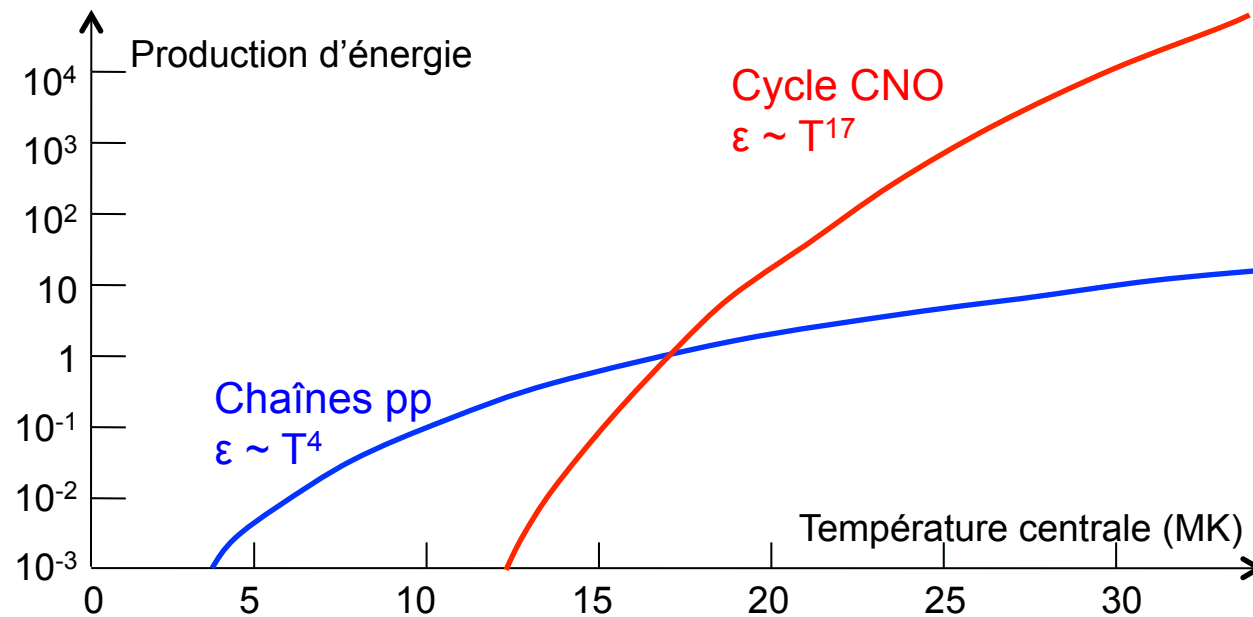




MATURITÉ

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

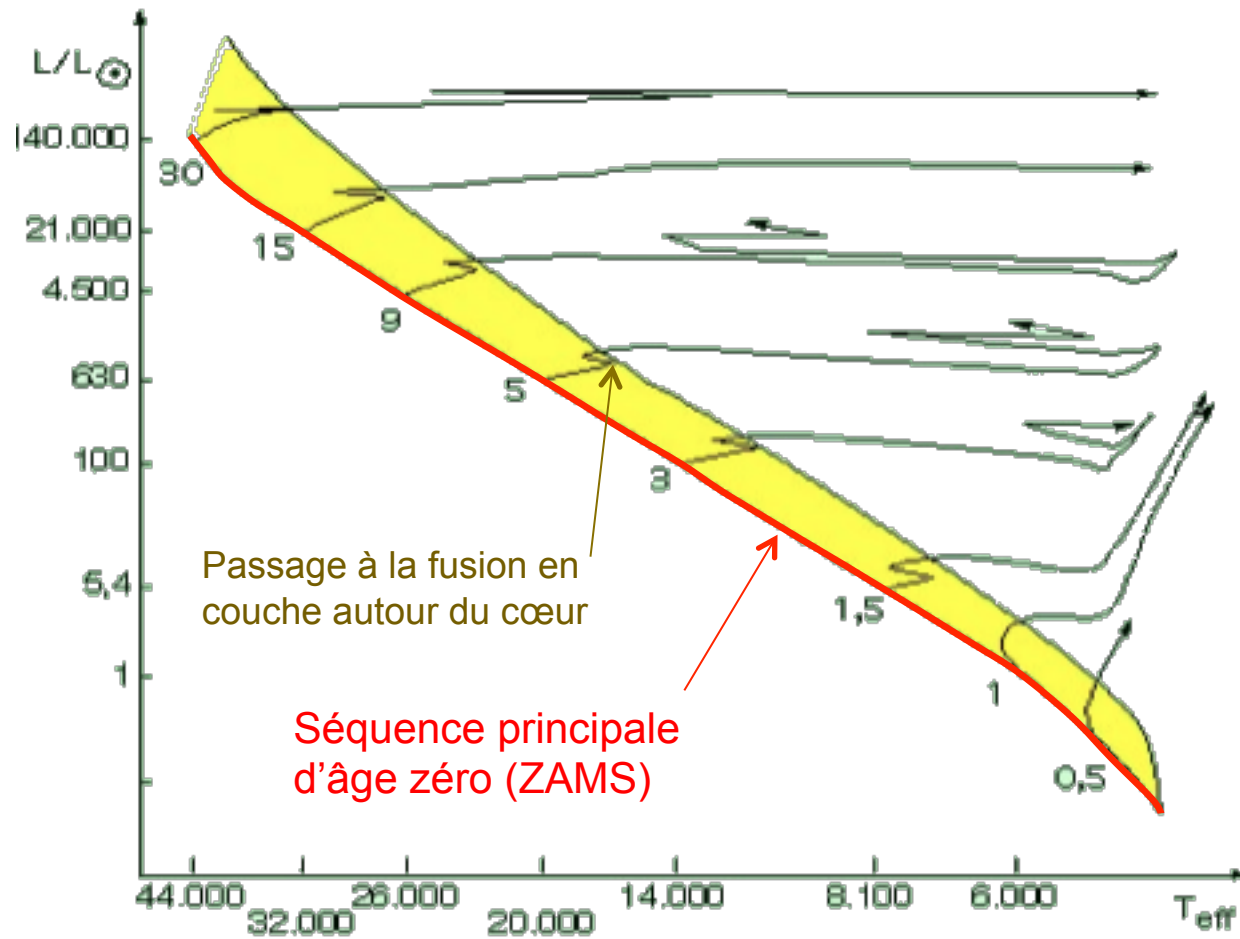




Séquence principale: il ne se passe rien, ou presque...

- Température \Leftrightarrow équilibre cinétique (énergie cinétique = $\frac{1}{2}$ énergie potentielle)
 - $\frac{3}{2} kT \sim \frac{1}{2} GM_{\star} \mu / R_{\star}$
 - $\rightarrow T \sim 10 \text{ MK } \mu (M_{\star} / M_{\odot}) / (R_{\star} / R_{\odot}) \rightarrow T_{\text{centrale}} \sim 3 \text{ à } 30 \text{ MK selon } M_{\star} \rightarrow$ } Chaînes pp ou CNO
- Changements de composition
 - $4 \text{ H} \rightarrow {}^4\text{He}$
 - \rightarrow le nombre de particules diminue
 - \rightarrow la masse moyenne μ par particule augmente de 1,3 [= $0,7 \cdot 1 + 0,3 \cdot 4$] à 4
 - \rightarrow la température **centrale** augmente lentement
 - \rightarrow la luminosité augmente (plus rapidement)
 - \rightarrow le rayon augmente
 - \rightarrow la température **de surface** diminue} Déplacement vers le haut et la droite dans le diagramme HR

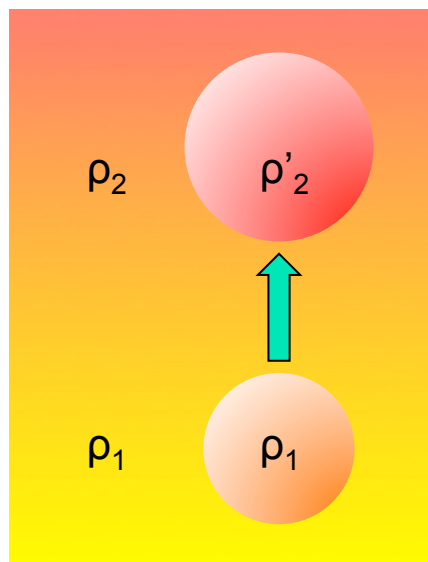
Évolution sur la Séquence principale



© J. Gispert Obs. Marseille

Transferts d'énergie par rayonnement ou convection ?

- La question n'est pas simple
 - Emden (1907) : transport d'énergie dans les étoiles par convection
 - Schwarzschild (1906) montre l'importance du transfert radiatif → Eddington (1926) en fait l'unique mécanisme de transfert
 - En fait les deux sont présents, l'un ou l'autre dominant **selon le gradient de température**
- Critère de Schwarzschild



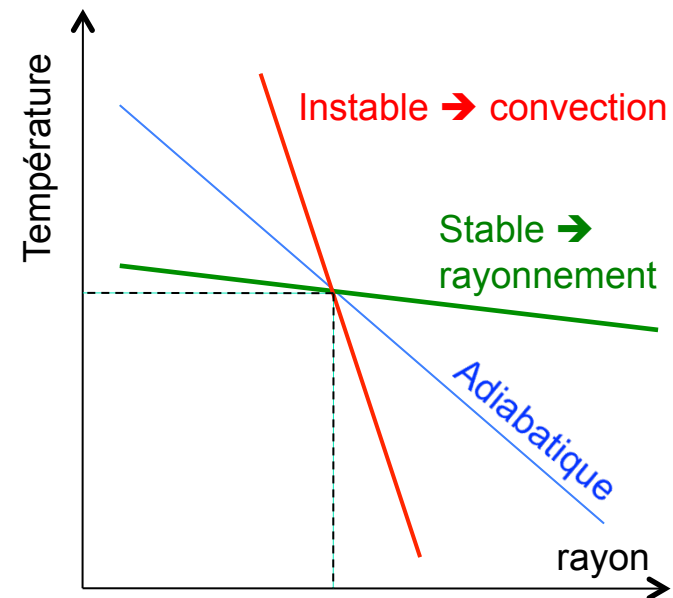
Petite bulle de gaz déplacée

Sa densité passe de ρ_1 à ρ'_2 dans un milieu qui lui passe de ρ_1 à ρ_2

Si $\rho'_2 < \rho_2 \rightarrow$ instabilité \rightarrow convection

Relation **adiabatique** $T = \rho^{2/3}$ entre température et densité

\rightarrow instabilité si la température varie « trop » vite

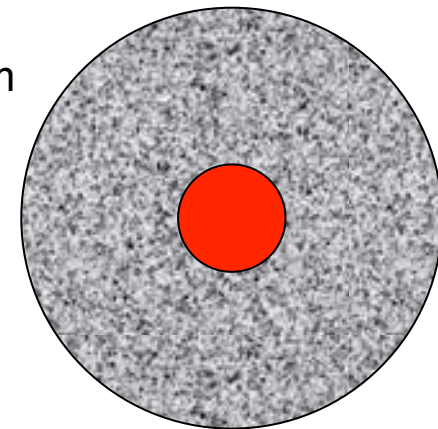
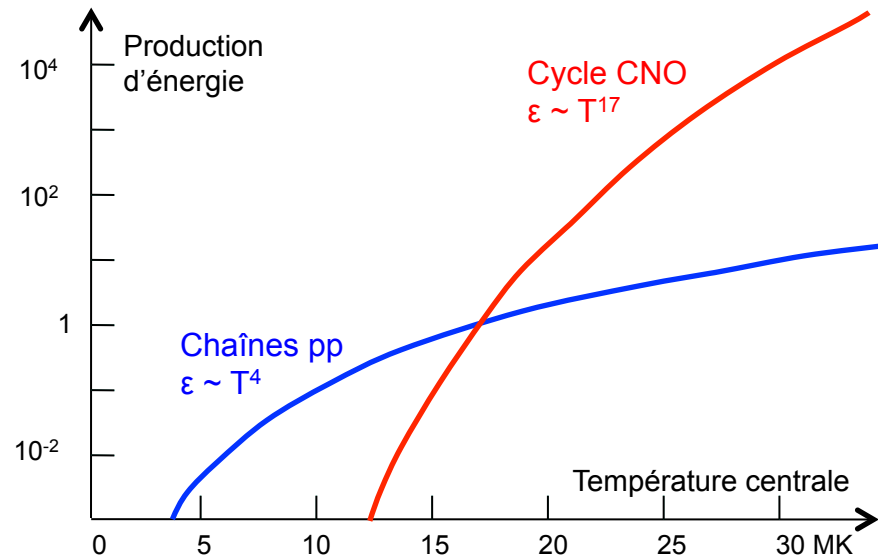


Séquence principale : petites masses ($< 0,3 M_{\odot}$)

- Température centrale < 6 MK
- → fusion uniquement par chaînes pp

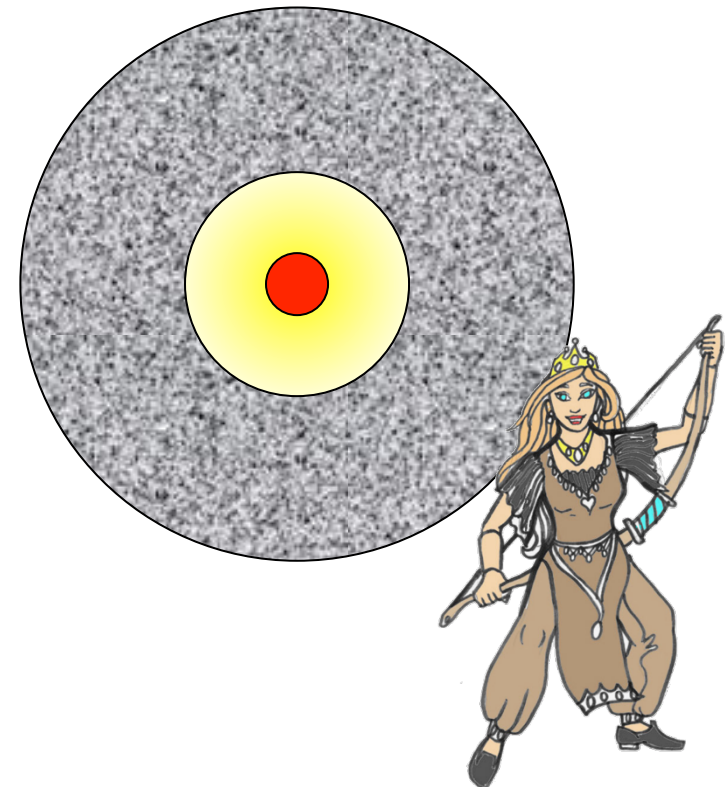
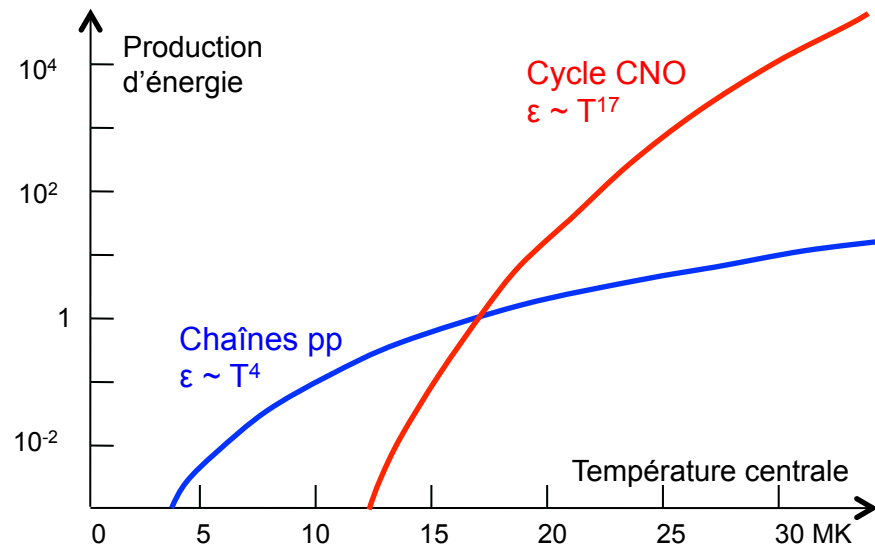
- **Structure entièrement convective**

- → brassage
- → **tout** l'hydrogène est – très lentement – converti en hélium
- → augmentation de la densité
- → de la température centrale
- → de la luminosité
- → augmentation faible de la température de surface

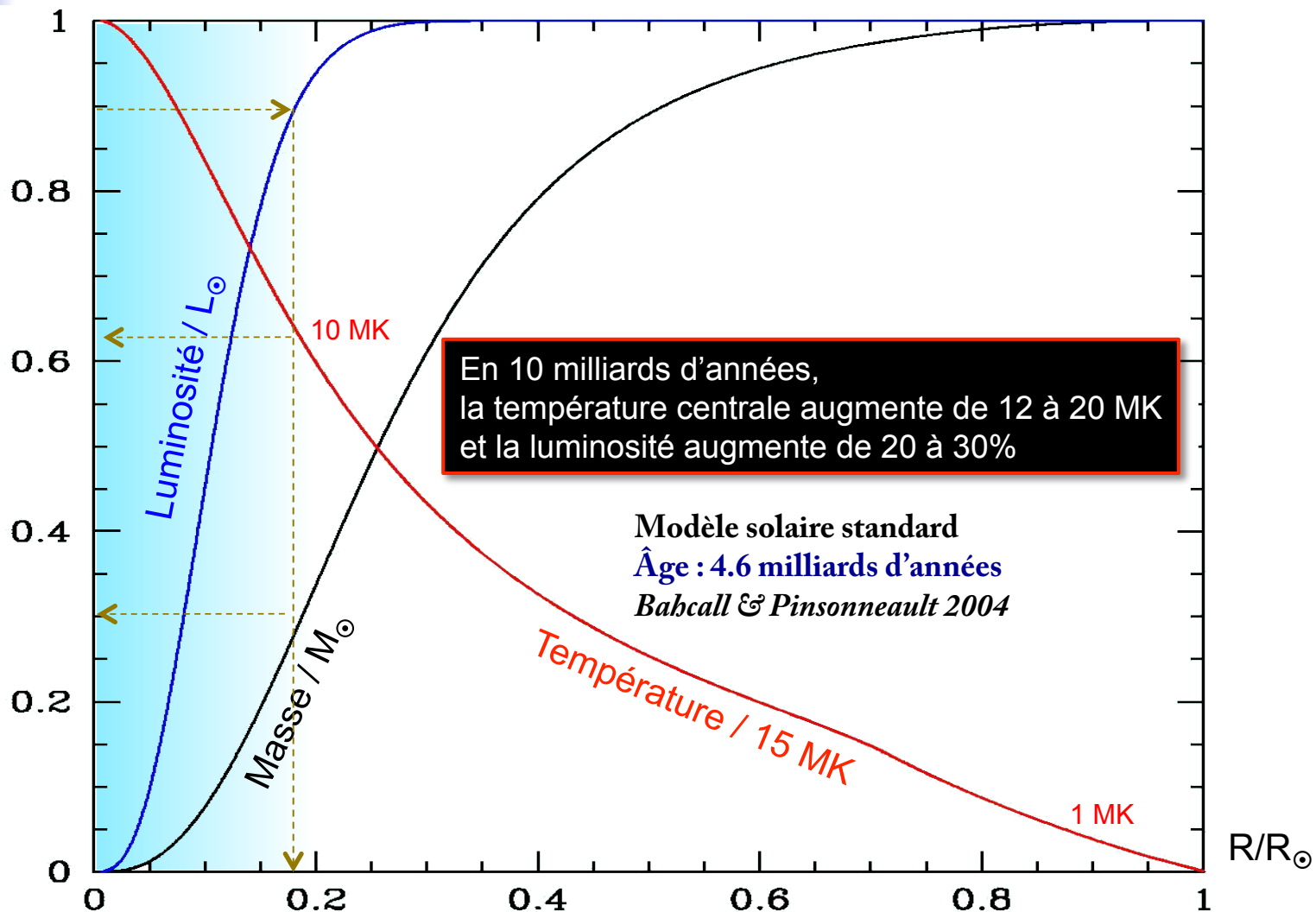


Séquence principale : masse intermédiaire (0,3 à 1,5 M_{\odot})

- 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

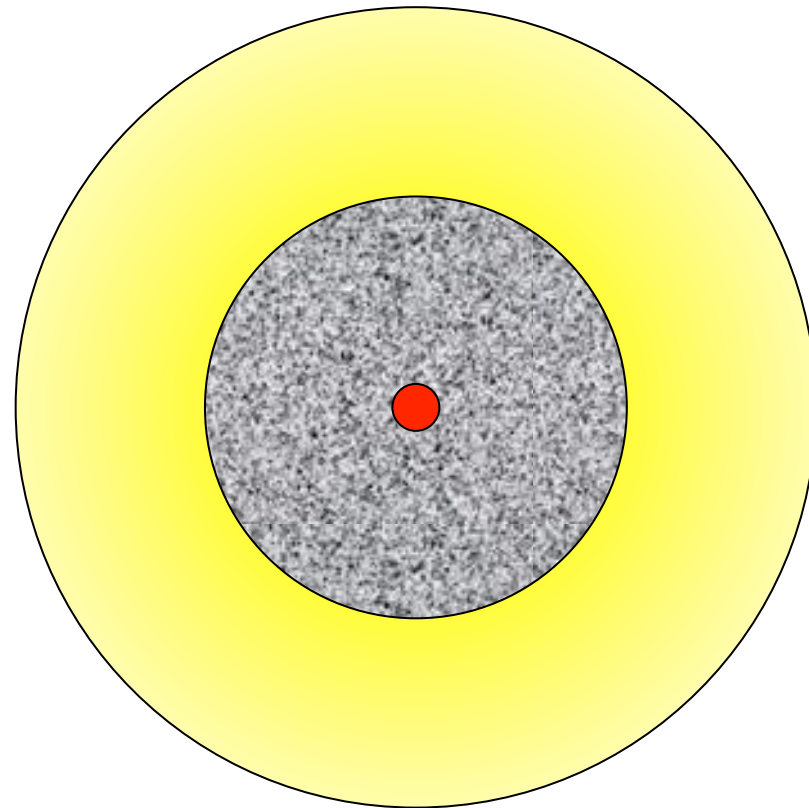


Profils de masse, de luminosité et de température



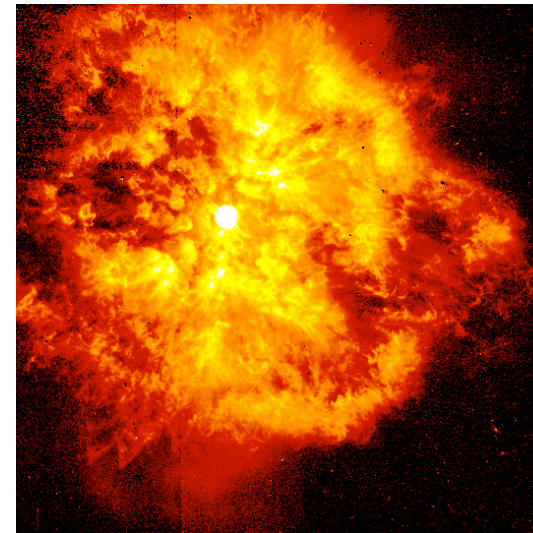
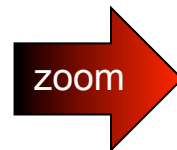
Séquence principale : forte masse ($> 1,5 M_{\odot}$)

- 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



Étoiles de Wolf-Rayet

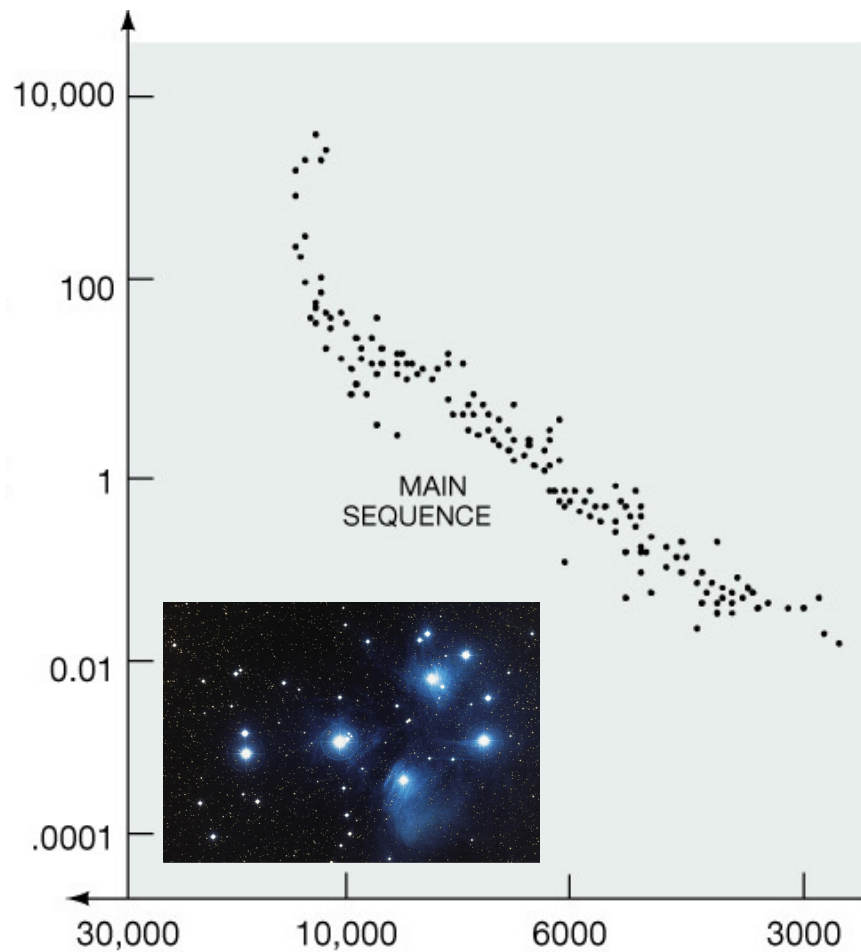
- Les étoiles de très forte masse ($> 15 M_{\odot}$) se distinguent par
 - leur évolution très rapide
 - leur luminosité très forte ($> 10^4 L_{\odot}$)
 - \rightarrow très forte pression de rayonnement \rightarrow vents stellaires intenses \rightarrow perte de masse importante ($10^{-5} M_{\odot}/\text{an}$ pour les étoiles de Wolf-Rayet)
 - raies en **émission** (He et aussi C, N, O) \rightarrow phase **terminale** des étoiles O et B ?





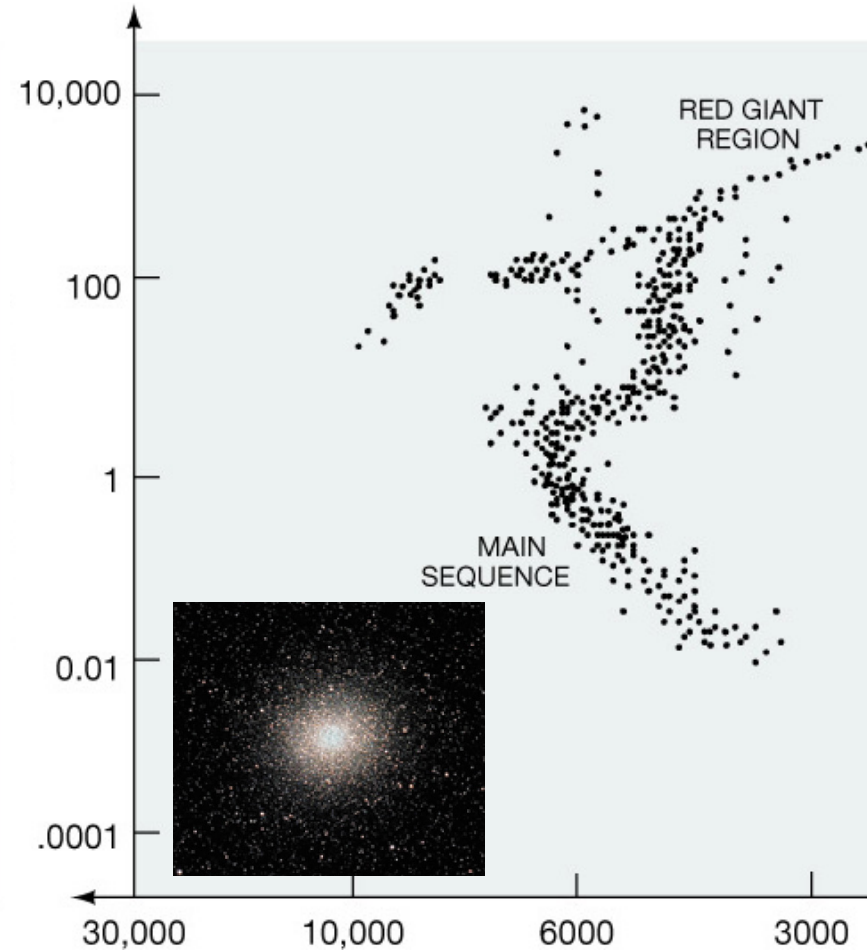
→ âge des amas d'étoiles

■ Amas ouvert des Pléiades



26 janvier 2011

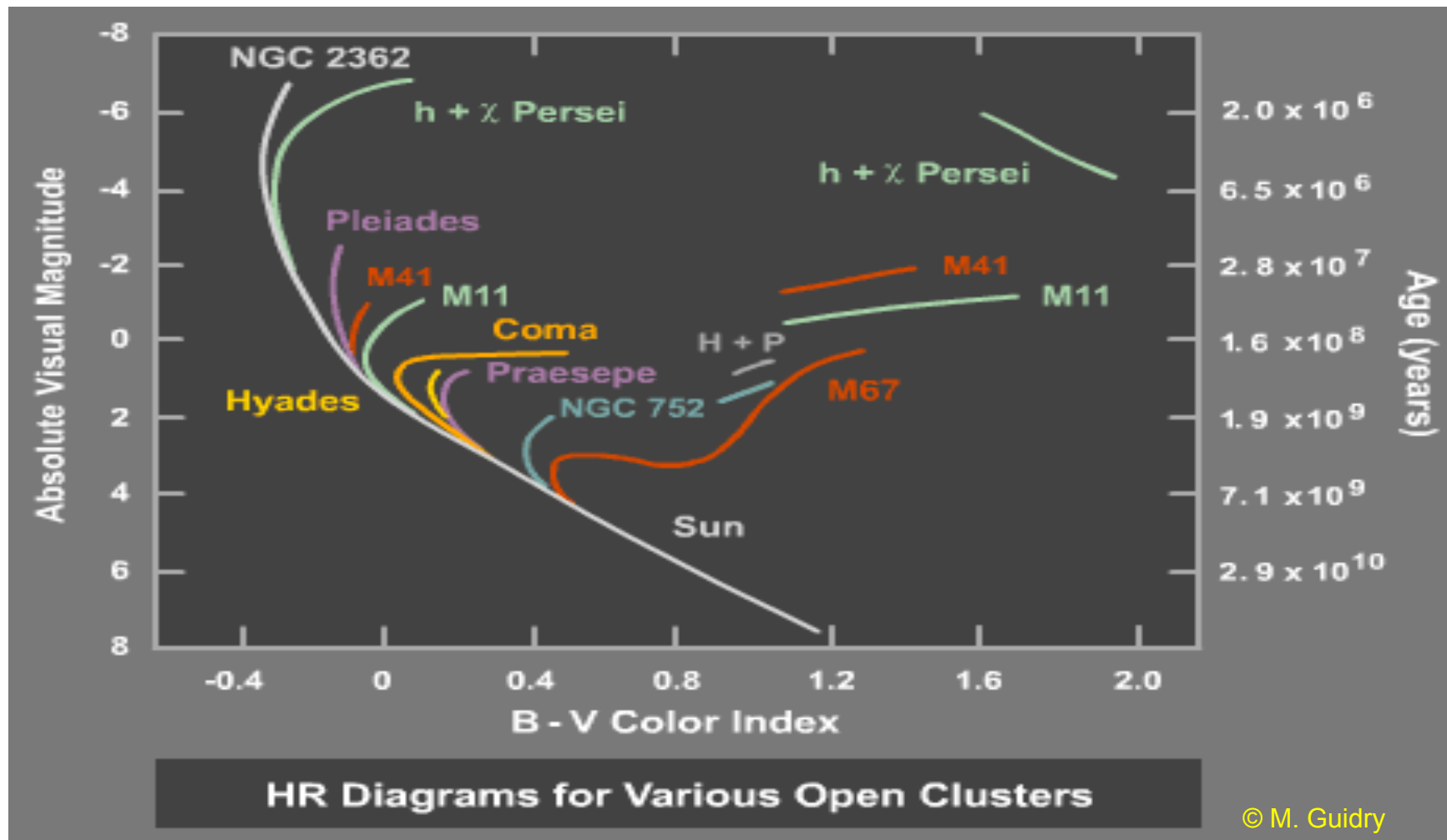
■ Amas globulaire Omega Centauri

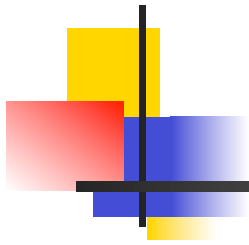


Alain Bouquet – Astrophysique 12 – Évolution des étoiles

26

Comparaison entre différents amas ouverts

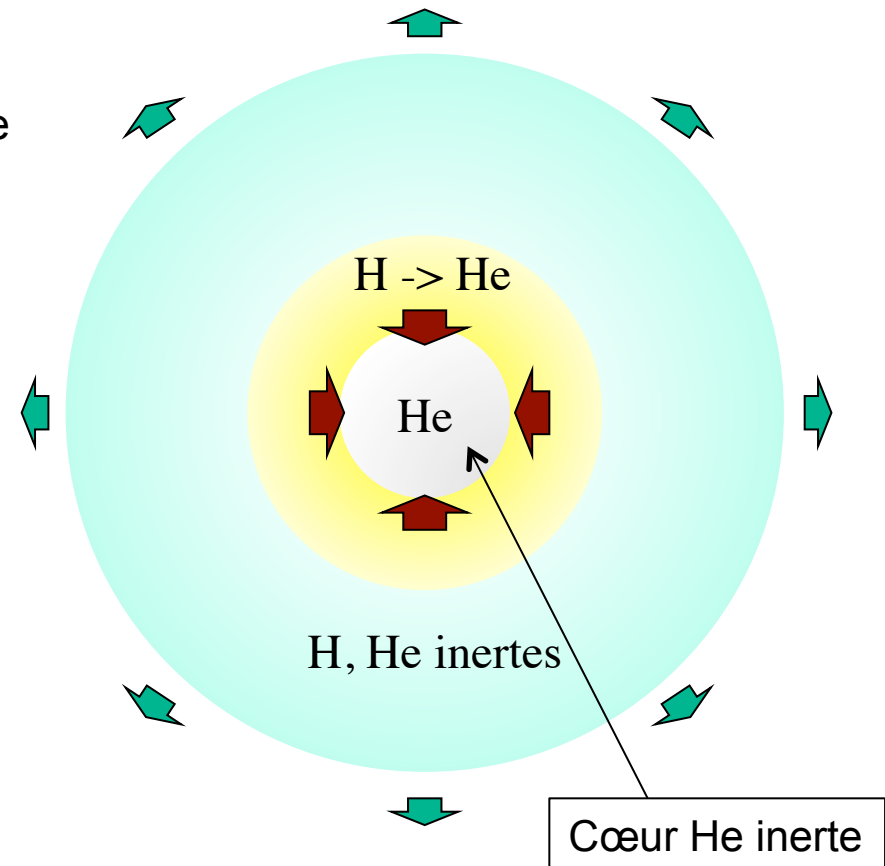




LE GRAND ÂGE

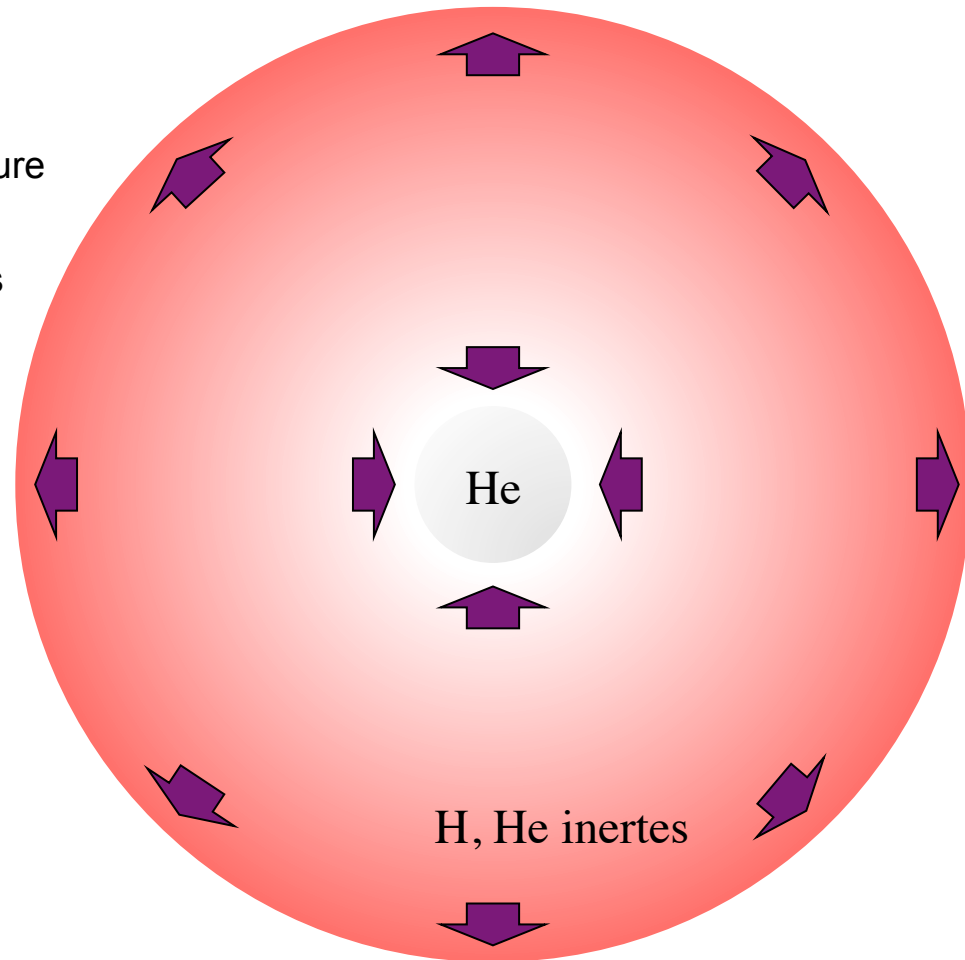
Fusion de l'hydrogène en couche autour du cœur

- 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 α)
- → 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

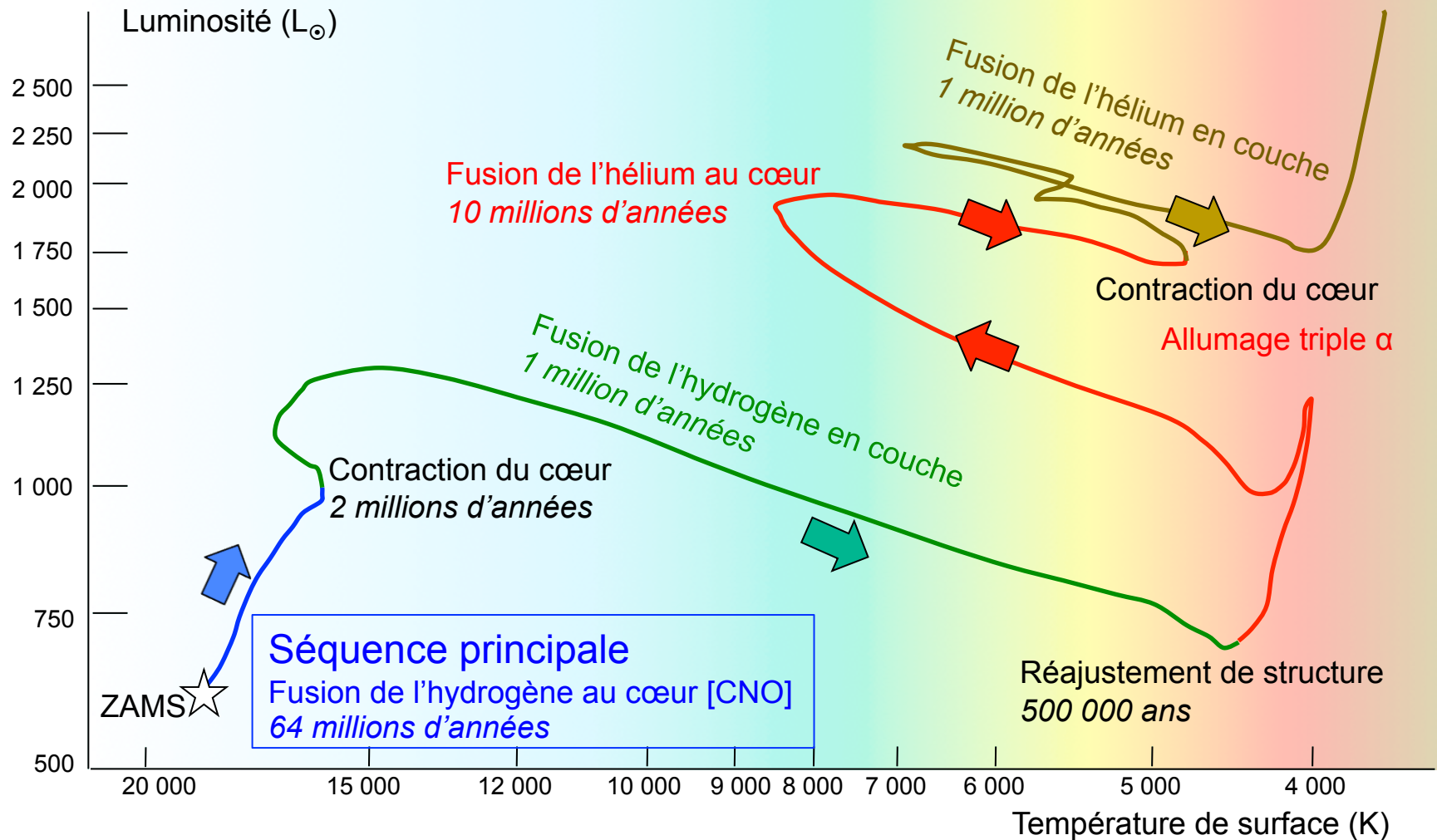


Fusion de l'hélium → réajustement de structure

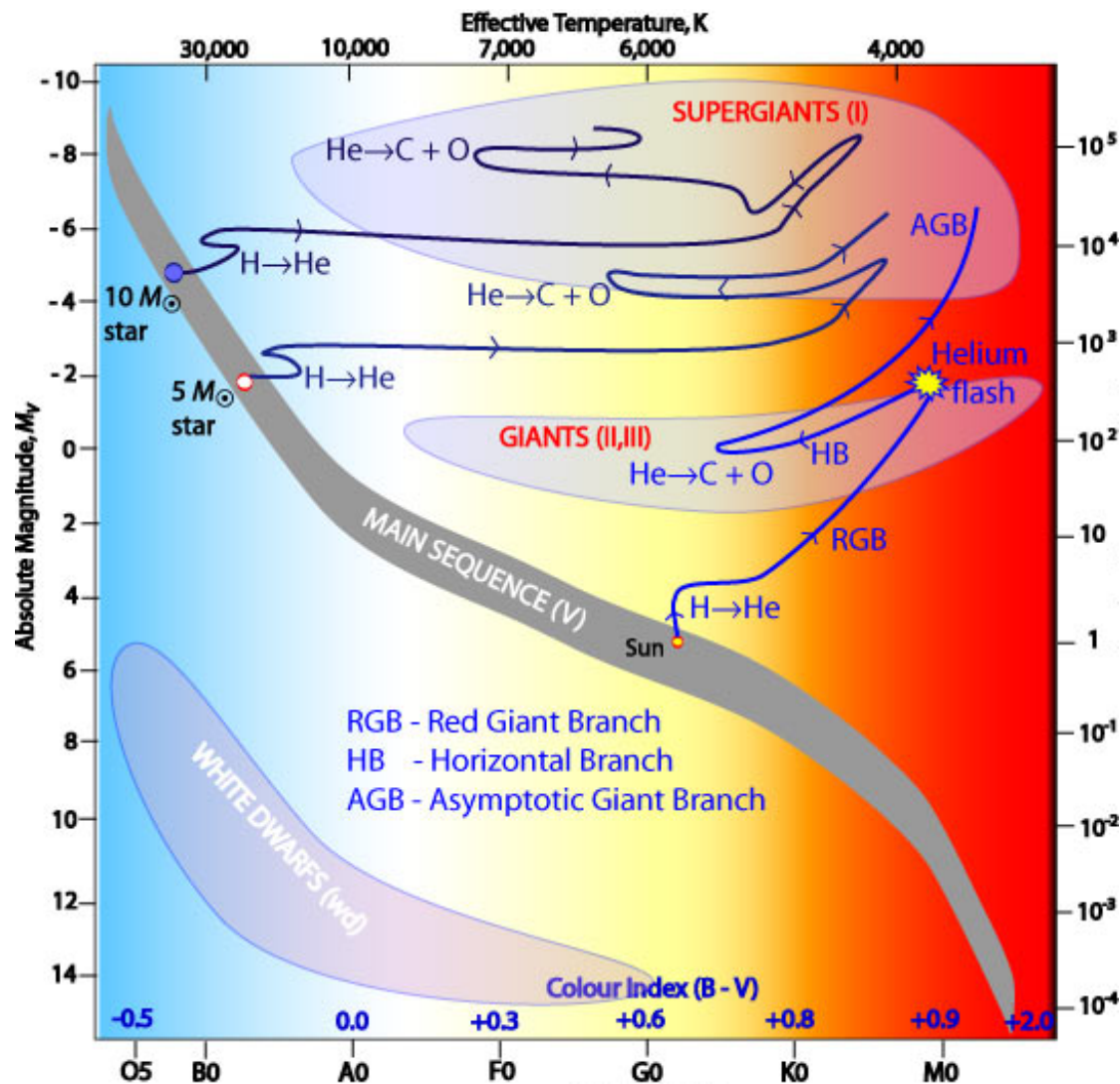
- Fusion de l'hélium en carbone (processus triple α)
 - → très forte dépendance en température ($\sim T^{30}$)
 - → très petite zone produisant une très grande quantité d'énergie
 - → très forte luminosité
 - → forte pression de rayonnement
- Gradient adiabatique
 - → dilatation de l'enveloppe
 - → refroidissement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



Évolution d'une étoile de 5 M_☉



Trajets dans le diagramme HR



Branche asymptotique des géantes
Fusion He en couche

Branche horizontale des géantes
Fusion He au cœur

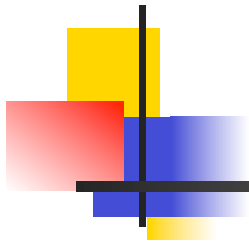
Branche des géantes
Fusion H en couche

Séquence principale
Fusion H au cœur

Et après ?



Nébuleuse du Crabe M1



Merci de votre attention !

