

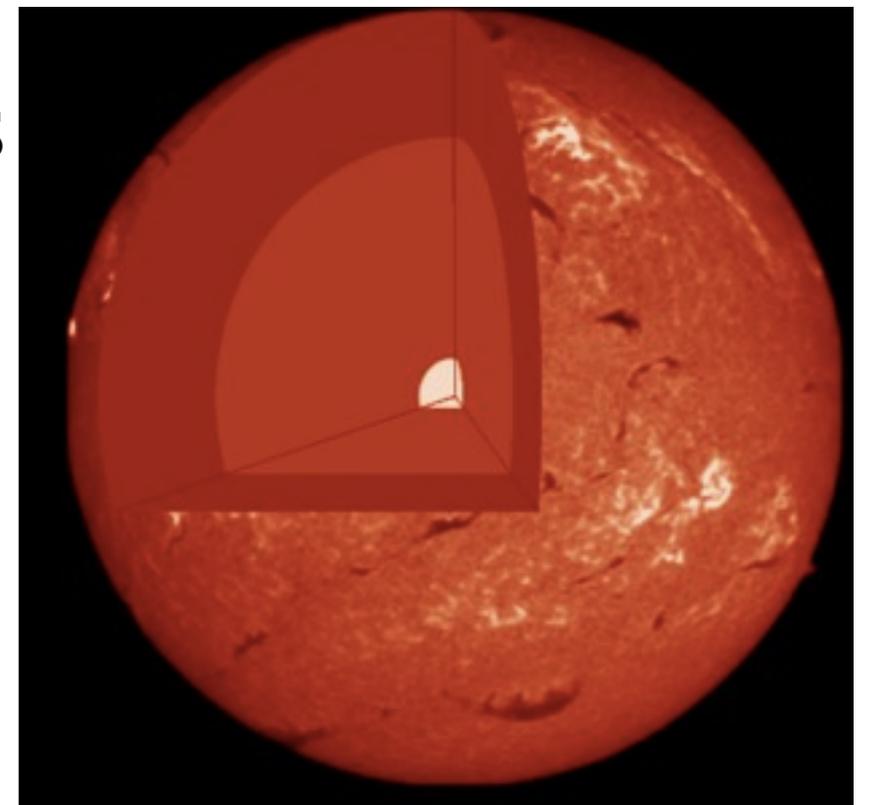
# Les étoiles et leur évolution (la suite!)

C. Bot, formation pour les documentalistes, Strasbourg  
le 10/09/2013

# L'intérieur des étoiles

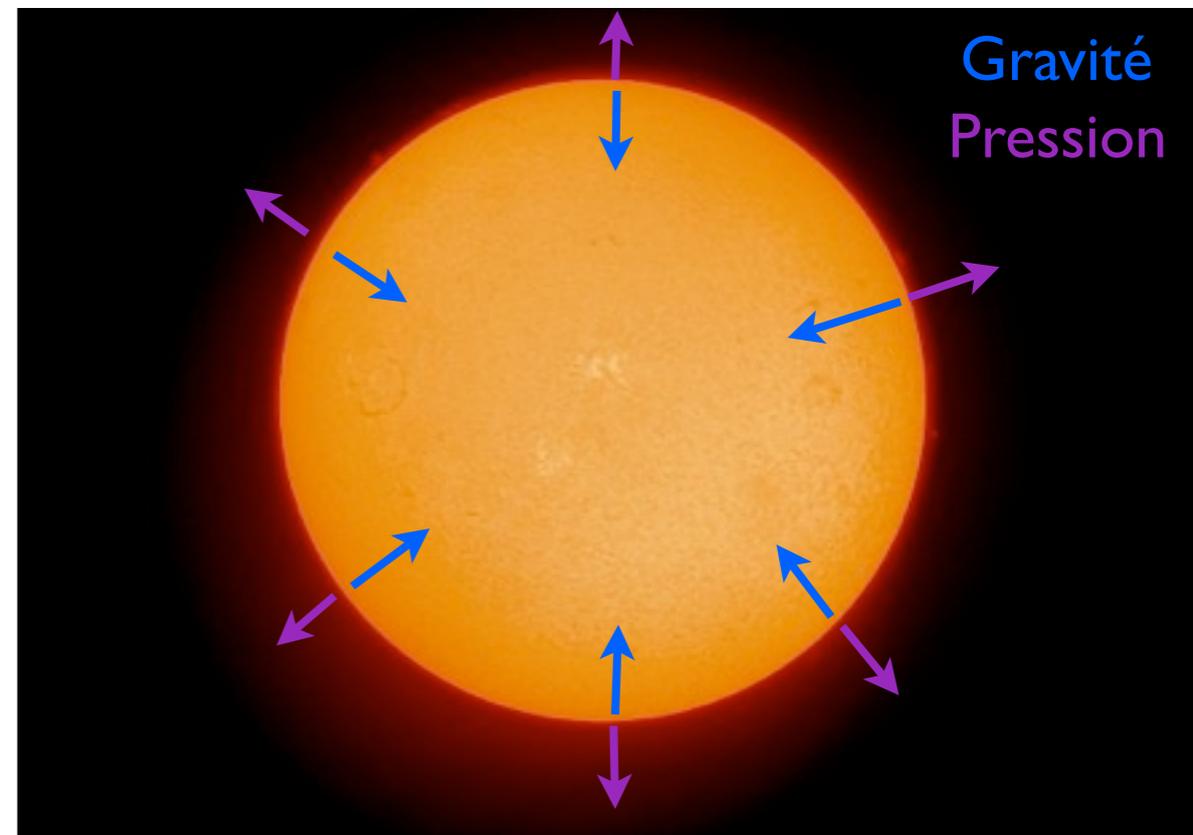
# L'intérieur des étoiles

- Non accessible aux observations
  - sauf pour les neutrinos du soleil ou SNI 1987A
- Pour déduire la structure interne des étoiles il faut des modèles
  - cohérents avec les lois de la physique
  - en accord avec les observations de la surface



# Pression contre gravité

- Les étoiles évoluent car elles perdent de l'énergie et la source d'énergie n'est pas infinie
- l'évolution stellaire est une bataille permanente contre la gravité.
- **équilibre hydrostatique**  
Pour qu'une étoile puisse être statique, la pression doit être + grande à l'intérieur de l'étoile

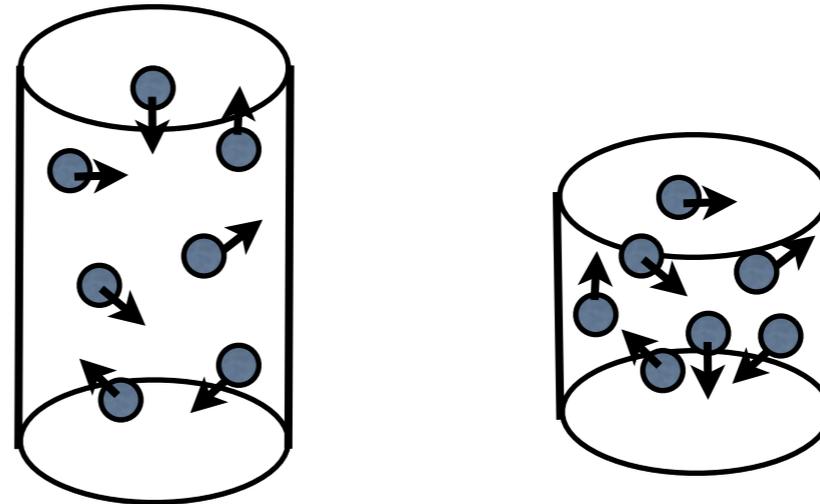
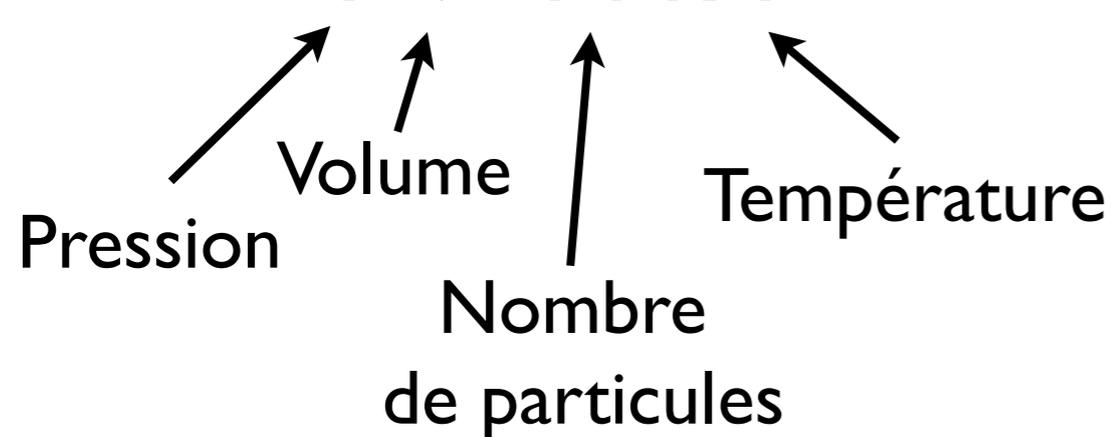


- équation de conservation de la masse:

- $dM/dr = 4\pi r^2 \rho$

- équation d'état d'un gaz parfait:

- $PV = N k T$



- dans certaines étoiles, on ne peut pas parler de gaz parfait (étoiles à neutrons, naines brunes,...)

# Source d'énergie des étoiles

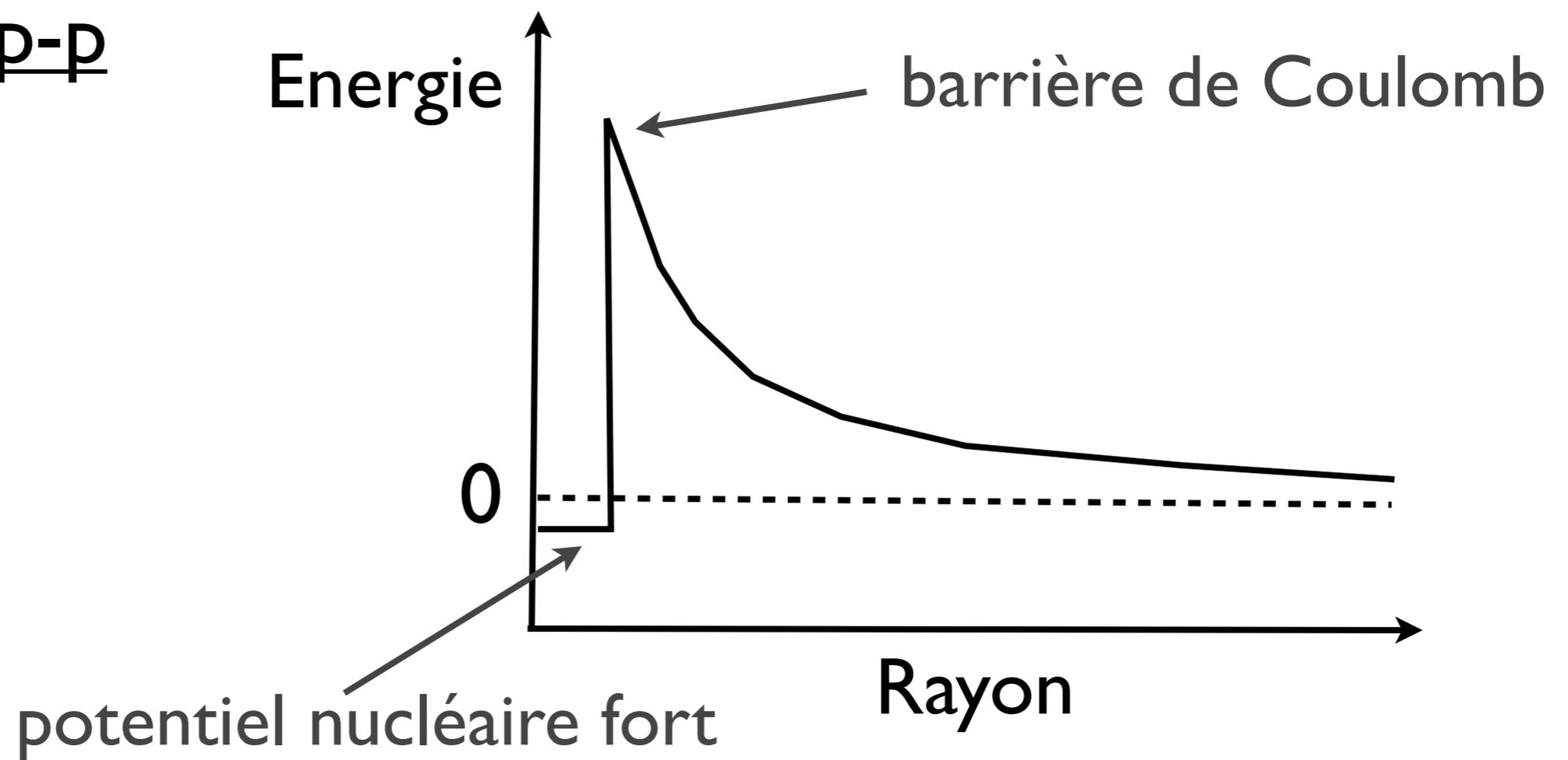
- potentiel gravitationnel?
- si on fait le calcul pour notre Soleil, on trouve un temps de vie de  $10^7$  ans (roches lunaires estimées à  $10^{10}$ ans)
- Réaction nucléaires
- changent un type de noyau en un autre

- atome d'H: 1 proton + 1 electron
- $m_H < m_{p^+} + m_{e^-}$  !!
  - La différence est de 13.6eV
  - C'est l'énergie de liaison de l'atome (masse et énergie sont équivalents:  $E=mc^2$ )
- Quand on combine des nucléons ( $p^+$  ou  $e^-$ ) pour former un atome, on crée de l'énergie et on perd de la masse
- $4 H \rightarrow He +$  particule de faible masse
- Ce sont des réactions de fusion nucléaire
  - $4H \rightarrow He$  se fait par des chaines de réactions

# Source d'énergie des étoiles

- potentiel gravitationnel?
- si on fait le calcul pour notre Soleil, on trouve un temps de vie de  $10^7$  ans (roches lunaires estimées à  $10^{10}$ ans)
- **Réaction nucléaires**
  - changent un type de noyau en un autre
  - si on suppose que le Soleil est 100% d'H et que 10% est converti en He → temps de  $10^{10}$  ans

# interaction p-p



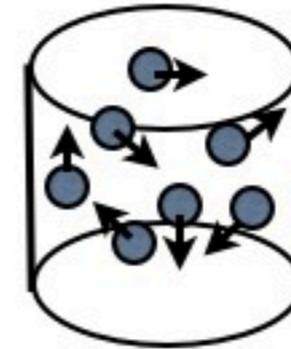
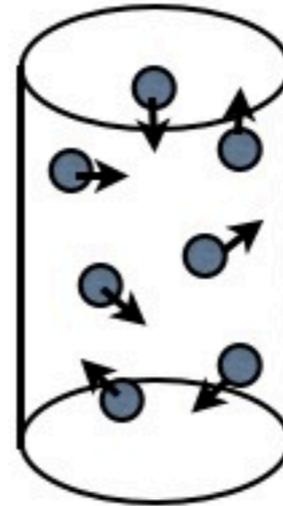
- Si l'énergie vient des mouvements du gaz, il faudrait une température de  $10^{10}$  K au centre de l'étoile pour obtenir la collision entre 2 protons
- température centrale du soleil  $\sim 10^7$  K!
- Les réactions de fusions nucléaires se font par **effet tunnel** → impact sur le taux de réactions

- **équation d'état d'un gaz parfait:**

- $PV = N k T$

Diagram illustrating the variables in the ideal gas equation  $PV = N k T$ :

- Pressure (Pression) points to  $P$
- Volume (Volume) points to  $V$
- Number of particles (Nombre de particules) points to  $N$
- Temperature (Température) points to  $T$



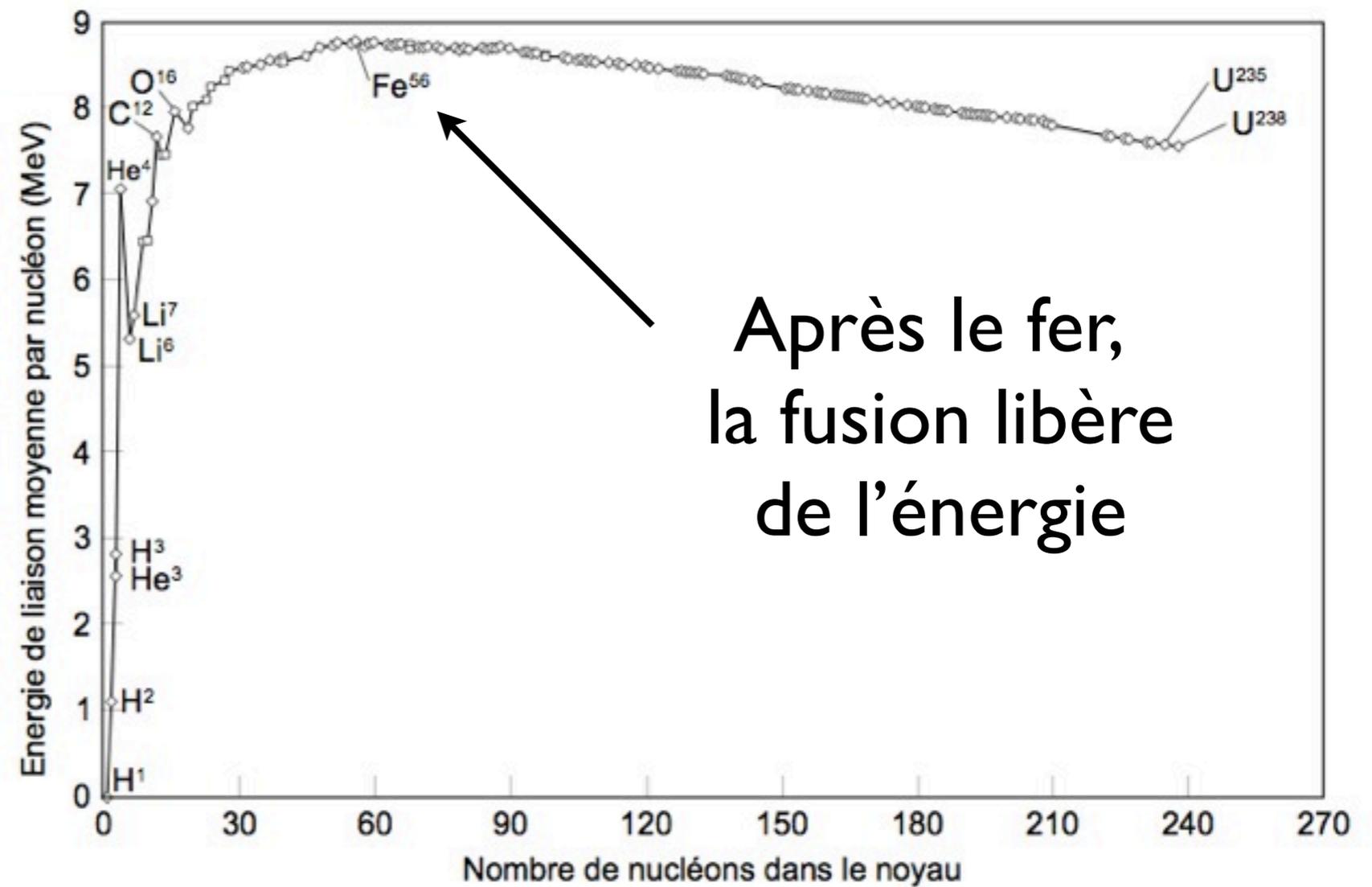
- si ni le volume, ni la température ne changent, alors la pression centrale va diminuer
- L'étoile n'est alors plus en équilibre hydrostatique et commence à s'effondrer, augmentant la température
- Si la température augmente 64 fois, on commence à "bruler" l'He (et donner du C)

# Nucléosynthèse stellaire

- Dans un environnement de haute température de combustion de l'He:
  - $C + He \rightarrow O$
  - $O + He \rightarrow Ne$
- Si une étoile est suffisamment massive, on peut avoir la combustion du C ou la combustion de l'O
- Dans l'Univers primordial: H et He
- L'étude de la nucléosynthèse suggère que tous les éléments lourds ont été générés dans les étoiles

*“nous sommes tous de la poussière d'étoile”*

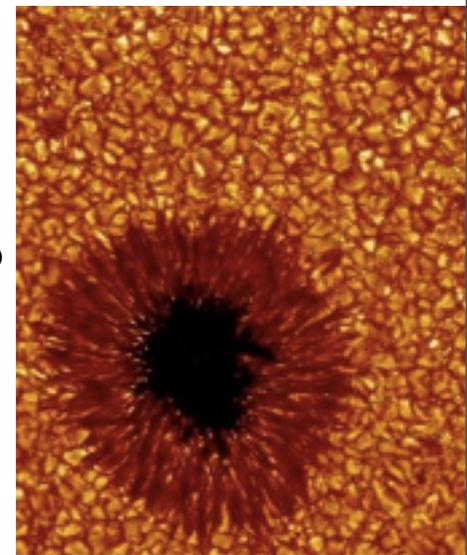
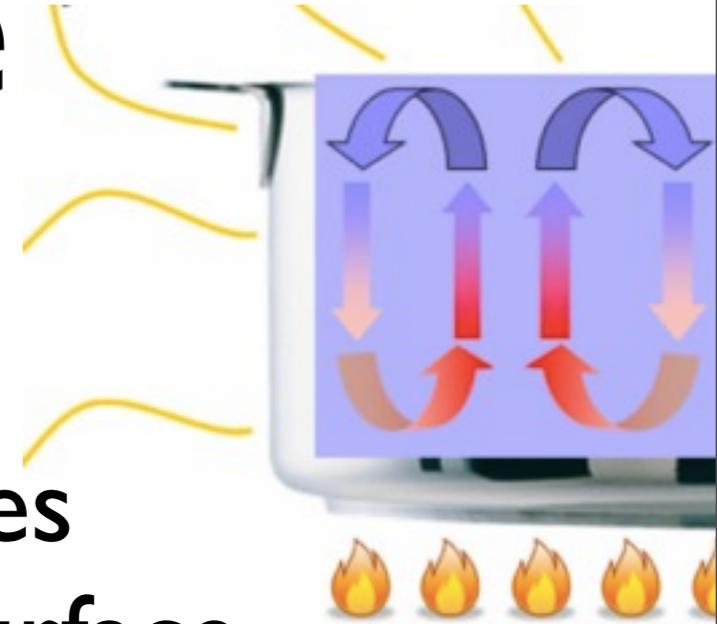
pic du fer



- le résultat ultime des réactions nucléaires dans les étoiles est le Fe
- Les éléments les plus abondants dans le cosmos:
  - H, He, O, C, Ne, N et Fe (résultat des processus nucléaires dominants)

# Transport d'énergie et thermodynamique

- 3 mécanismes:
- **rayonnement**: l'énergie produite par les réactions nucléaires est portée à la surface par les photons
- **convection**: les éléments chauds portent une énergie en excès vers l'extérieur et les éléments froids tombent vers le centre
- conduction (généralement négligeable)

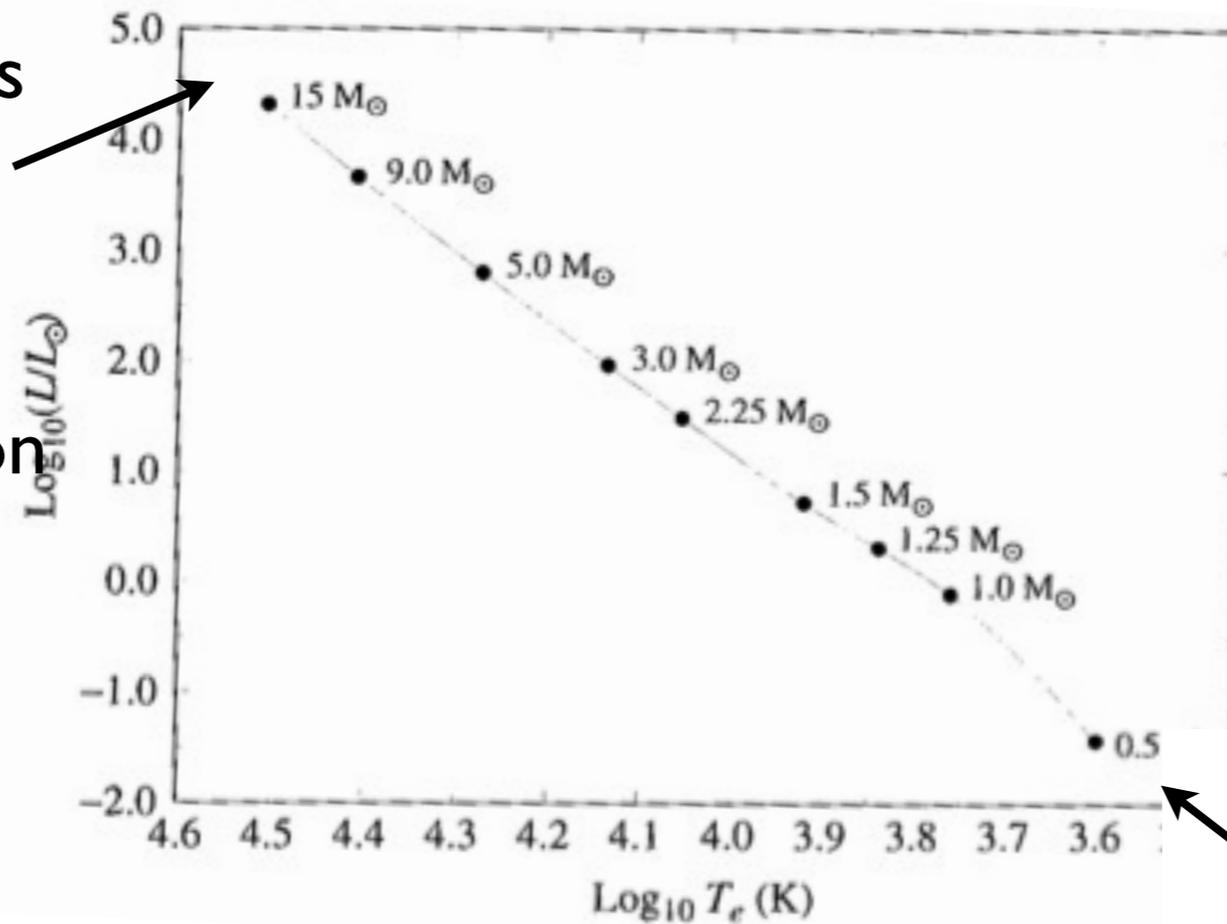


# Théorème de Vogt-Russell

- La masse et la composition d'une étoile déterminent de manière unique son rayon, sa luminosité, sa structure interne, et son évolution
- C'est la conséquence du changement de composition dû à la combustion nucléaire  
(mais aussi champs magnétiques, rotation)

# La séquence principale

oscillations thermiques  
au centre, variations  
taux nucléaires  
en qq heures  
→ empêche la formation  
d'étoiles stables



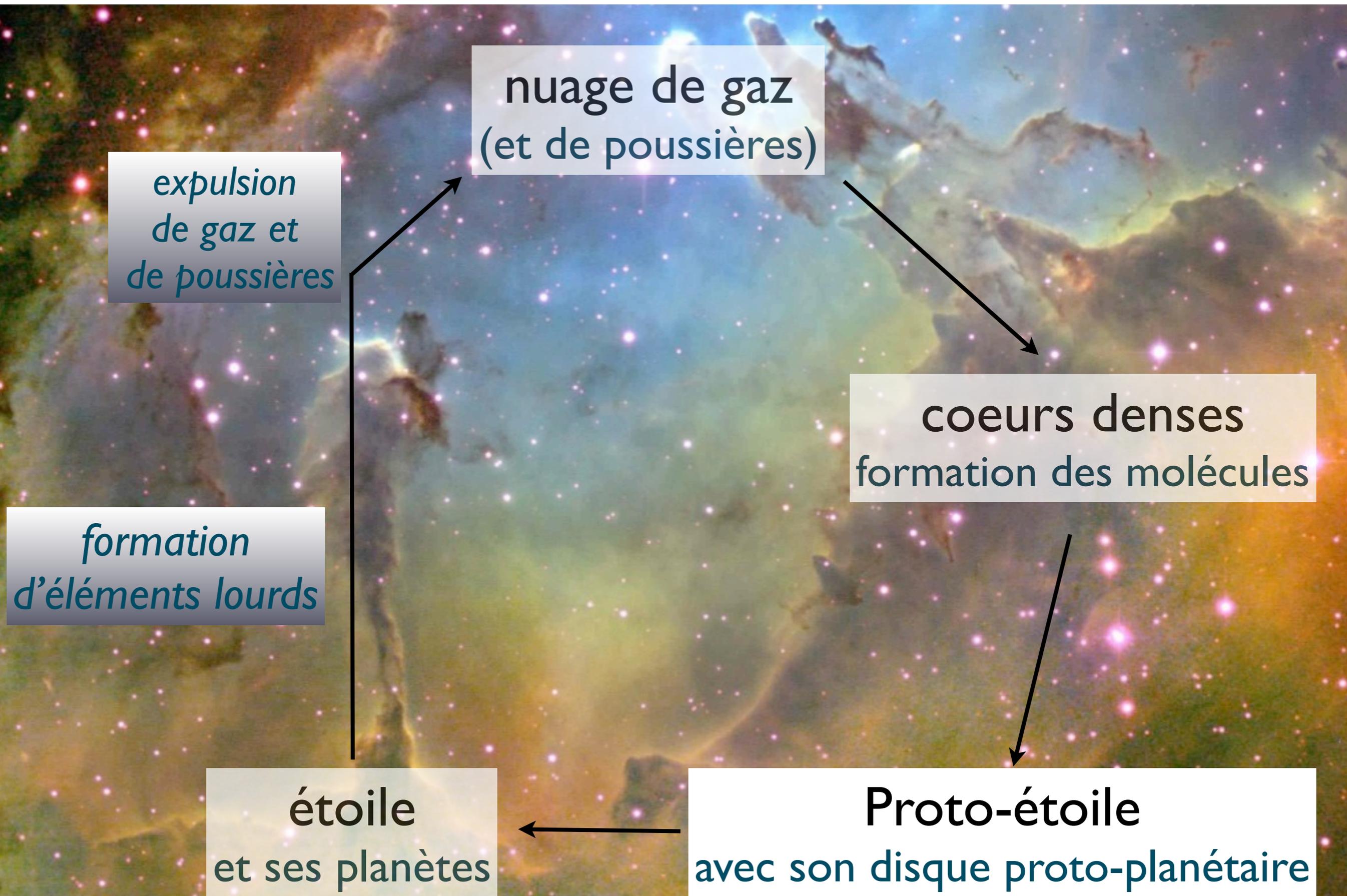
température centrale  
trop faible pour  
des réactions nucléaires

variations de 3 ordres de grandeur en masse pour 9 ordres de grandeur en luminosité

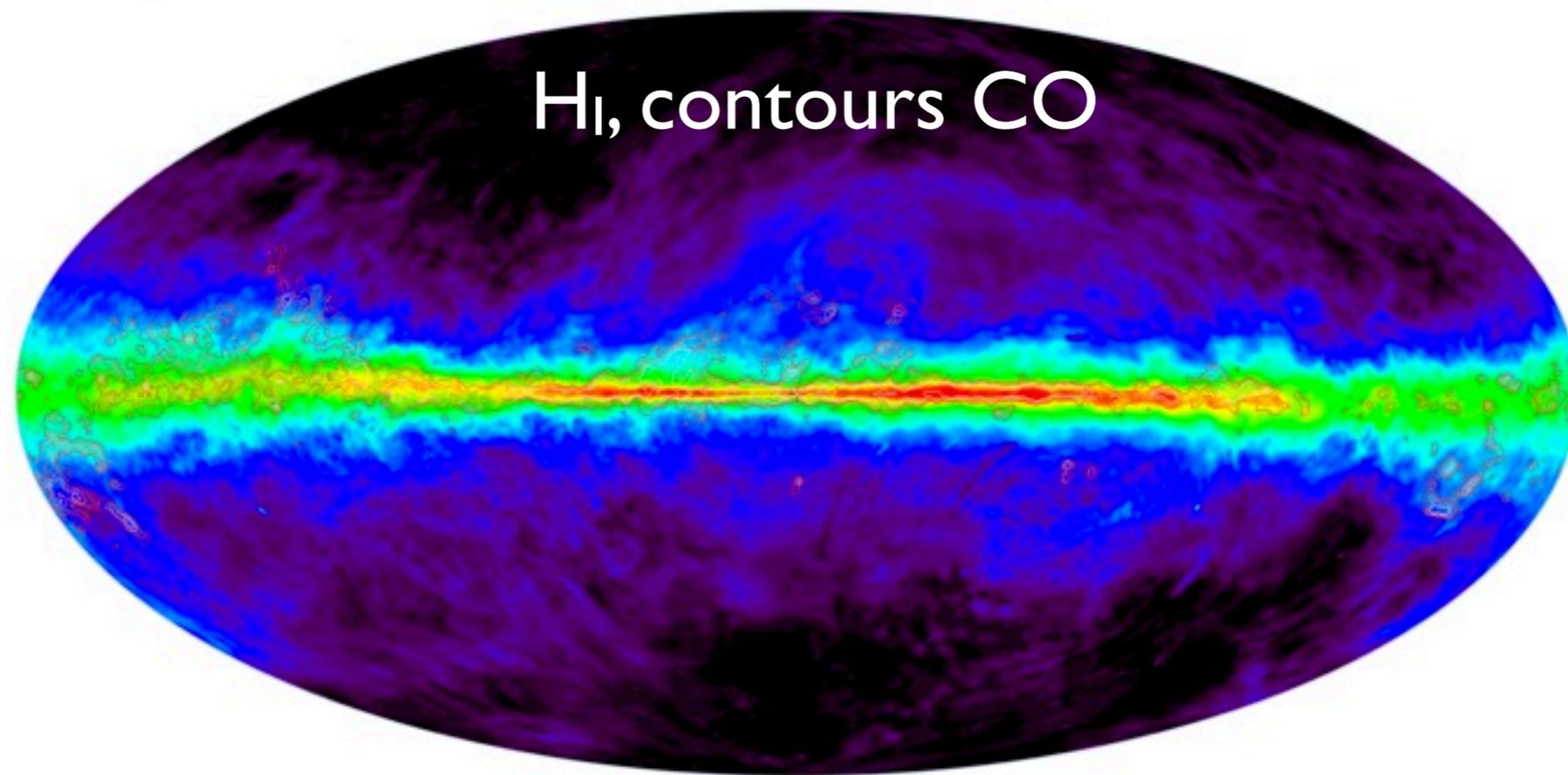
→ les étoiles les plus massives consomment leur gaz plus vite que les étoiles les moins massives

# La formation des étoiles

# le cycle de vie du milieu interstellaire

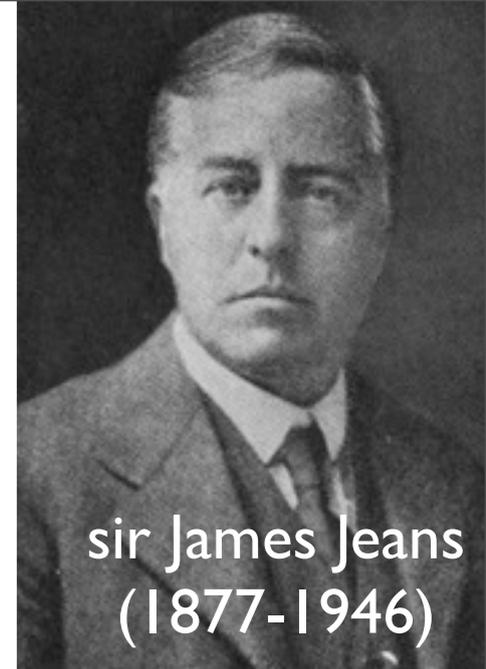


# des nuages neutres à moléculaires



- Les étoiles se forment dans les nuages moléculaires
- Composition des nuages de gaz: H, puis d'He et quelques % pour les métaux comme C, Si, ... qui forment la poussière
- La plupart des nuages sont diffus (hydrogène neutre=H<sub>I</sub>) mais quand l'extinction devient assez grande (la densité devient grande) alors on peut former des molécules (H<sub>2</sub>, traceur=CO)

# Effondrement des nuages moléculaires



énergie cinétique interne  
(mouvements)

énergie potentielle  
(gravité)



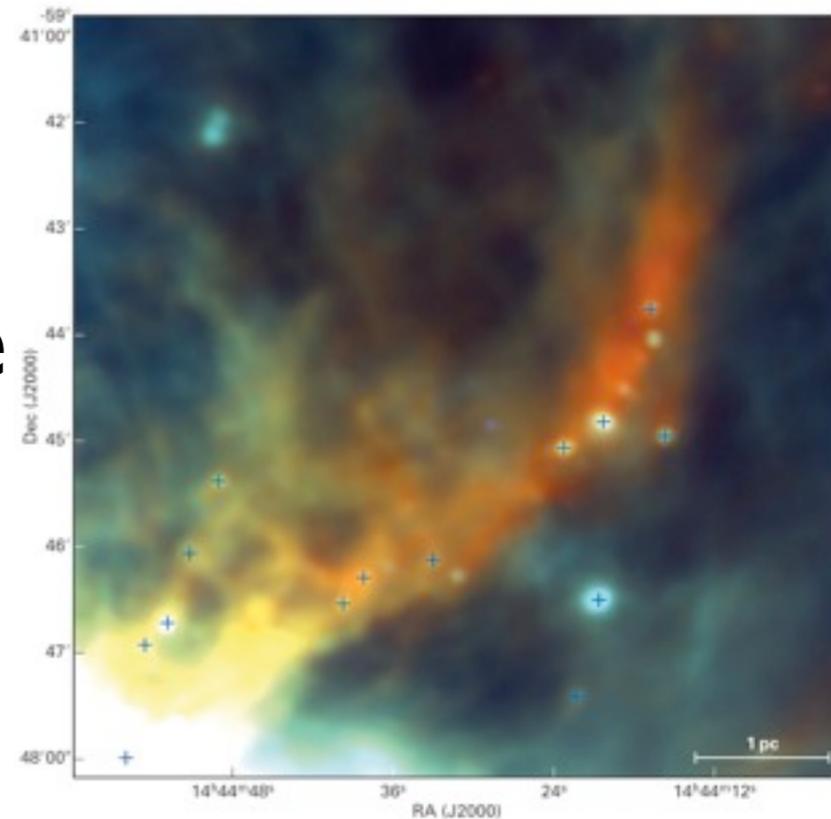
- Théorème du viriel:  $2K + U = 0$
- Si l'énergie cinétique interne est trop faible, le nuage va s'effondrer
- **Masse de Jeans, Rayon de Jeans** définissent la masse minimum ou le rayon minimum pour qu'un nuage de densité définie s'effondre

# Processus de fragmentation

- Les observations montrent que **les étoiles se forment en groupes** (étoiles binaires, amas d'étoiles)
- Quand l'effondrement d'un nuage a commencé, les petites inhomogénéités en densité vont satisfaire le critère de Jeans indépendamment et s'effondrer localement
- **La fragmentation s'arrête** quand l'énergie due à l'effondrement n'est plus rayonnée efficacement en dehors du nuage (=limite adiabatique)

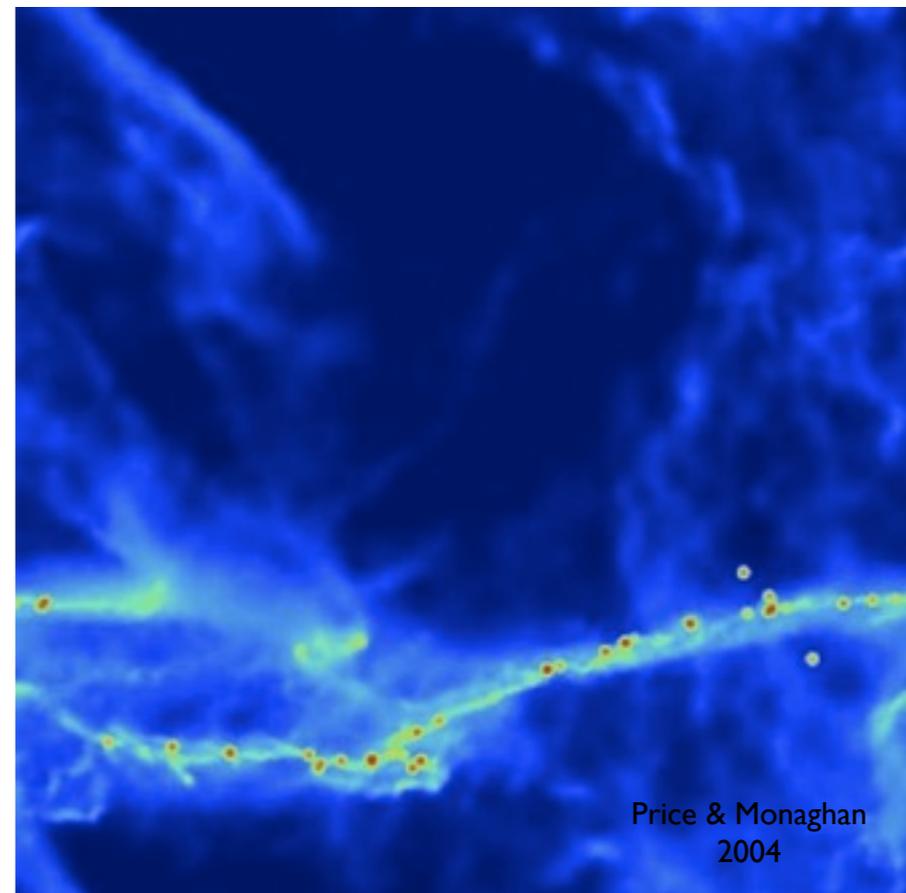
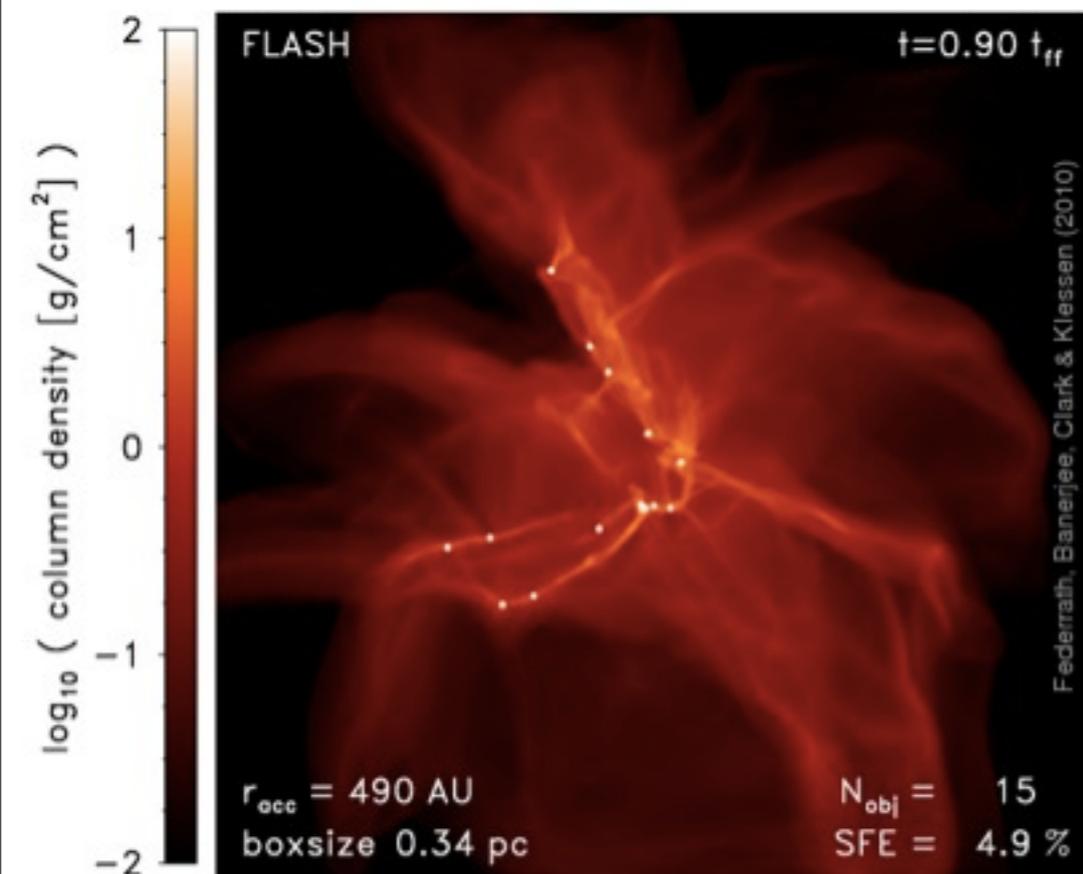
# Proto-étoiles

- Si l'énergie ne sort plus du coeur moléculaire, alors la pression augmente et on obtient un état d'équilibre de la région centrale. C'est la **proto-étoile**
- Au dessus du coeur protostellaire, la matière est toujours en chute libre
  - **ondes de choc** à la surface
  - la matière est **supersonique**
  - la matière perd beaucoup d'énergie par chauffage et c'est ce qui produit la plupart de la luminosité



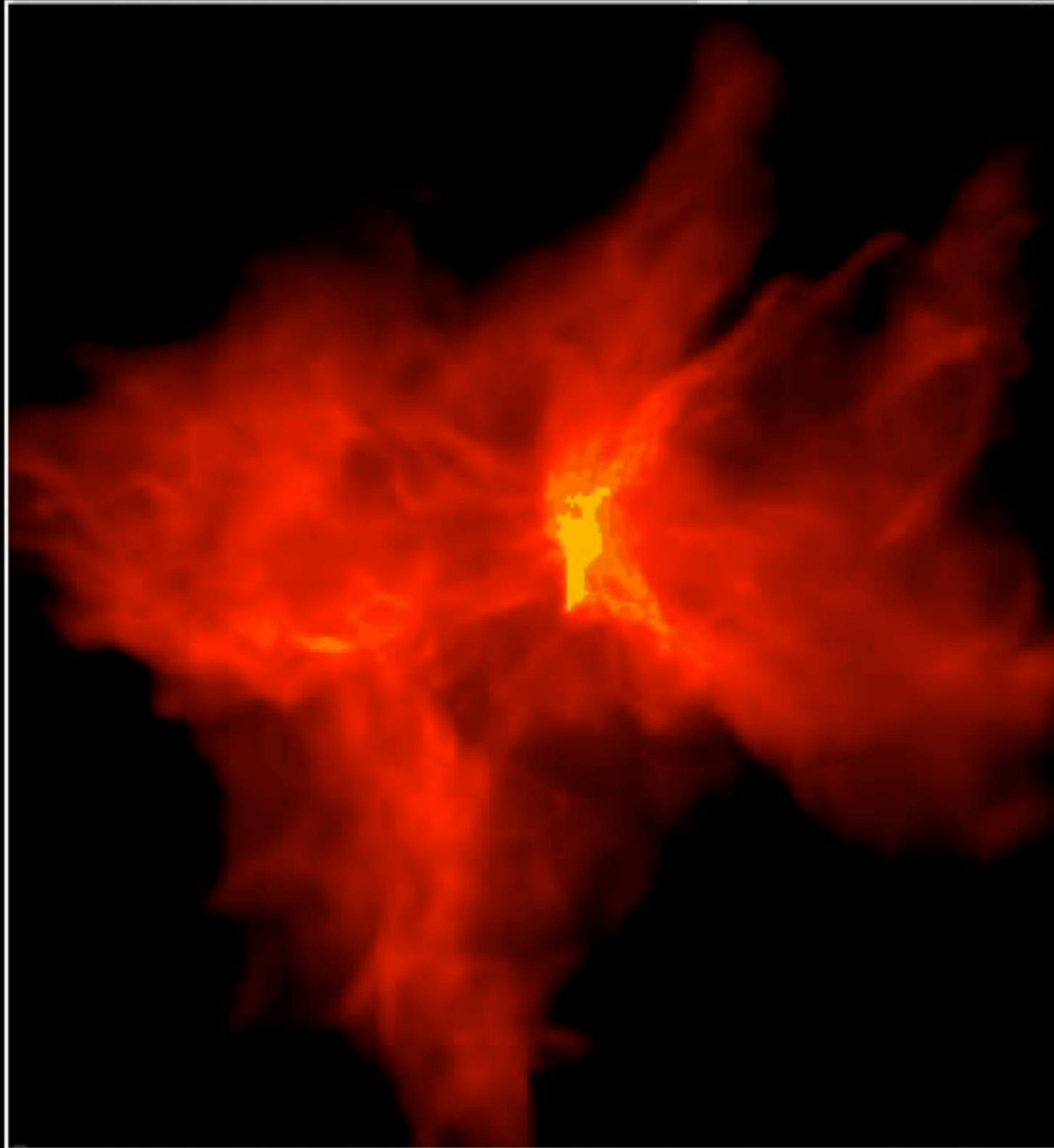
# Simulations de formation d'étoiles

- Mais il y a aussi: la vitesse initiale des nuages, les chocs, la rotation, la symétrie qui n'est pas sphérique, le champ magnétique
- Résolution numérique d'équations hydrodynamiques



Dimensions: 82500. AU

Time: 197220. yr



-1.5

-1.0

-0.5

0.0

0.5

1.0

Log Column Density [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]

Matthew Bate

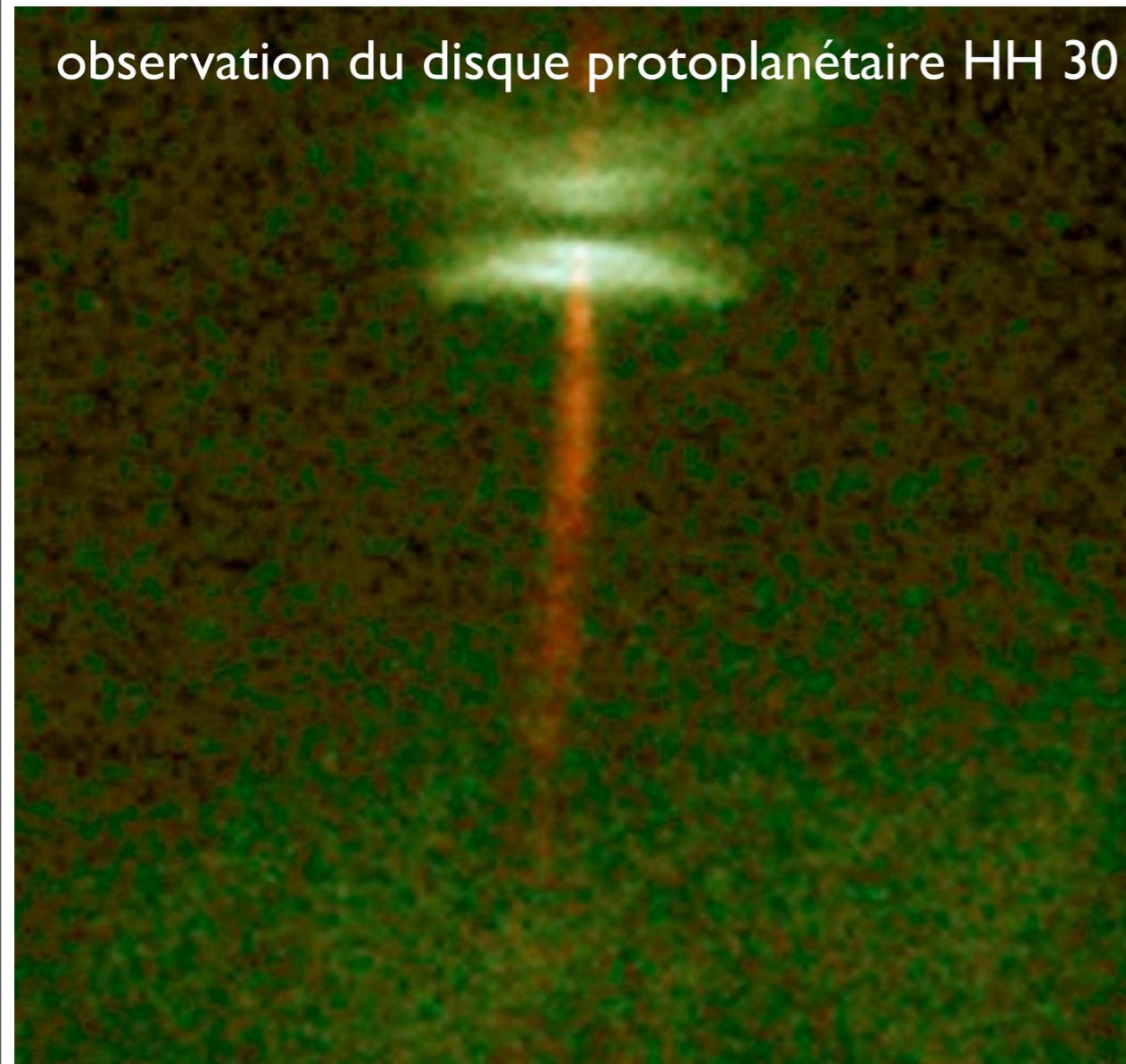
# Evolution pré-séquence principale

- processus beaucoup plus lent que l'effondrement
- la température centrale continue d'augmenter, les niveaux d'ionisation augmentent et l'opacité diminue : un coeur radiatif se développe
- La source principale d'énergie est gravitationnelle
  - Premières réactions nucléaires mais pas d'équilibre au début

# YSOs

- Young Stellar Objects
  - proto-étoiles
  - étoiles pré-séquence principale

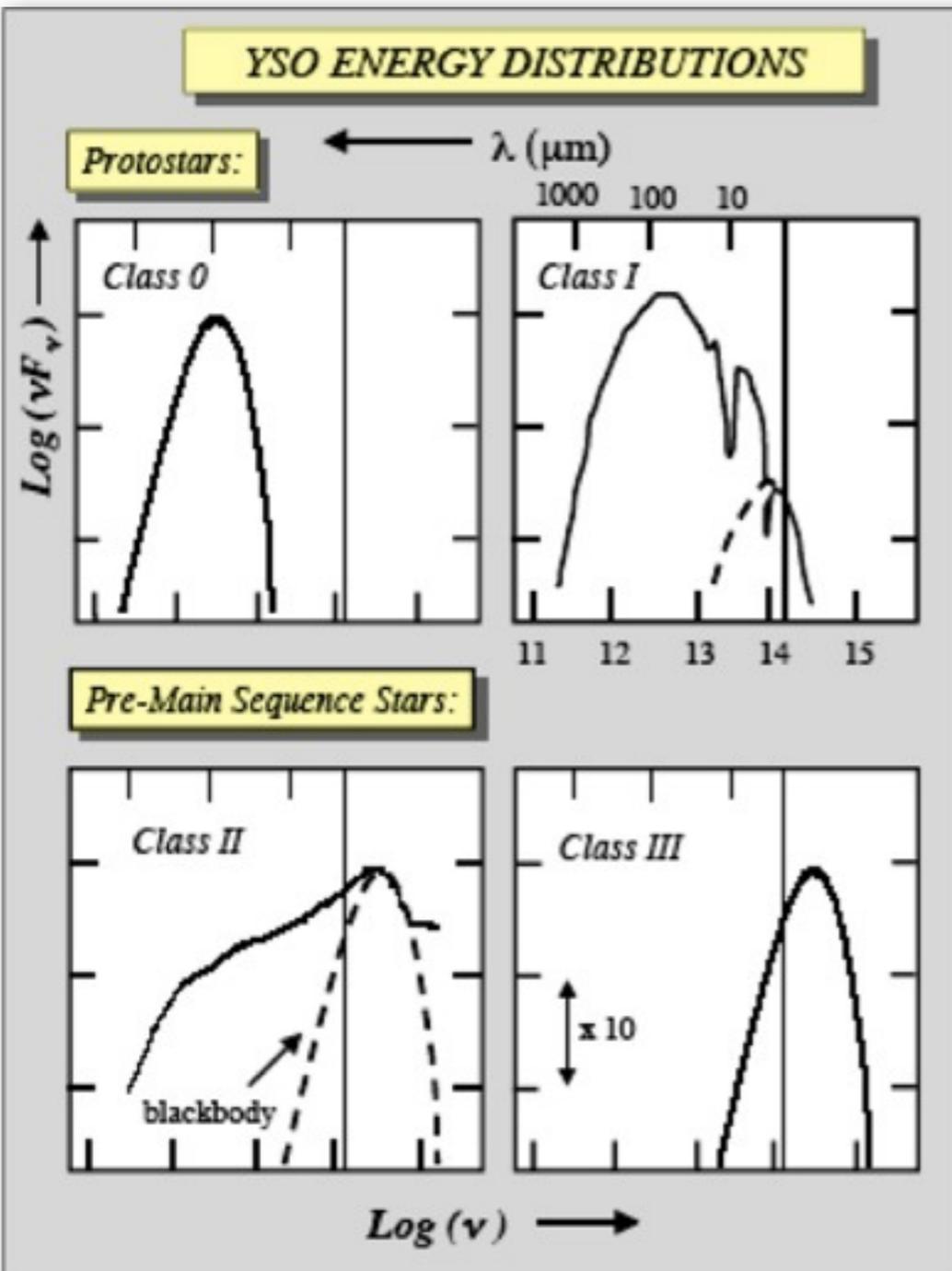
observation du disque protoplanétaire HH 30



vue d'artiste d'une protoétoile dans un globule de Bok

# Classification

Basées sur leur indice spectral (Lada et al. 1987):

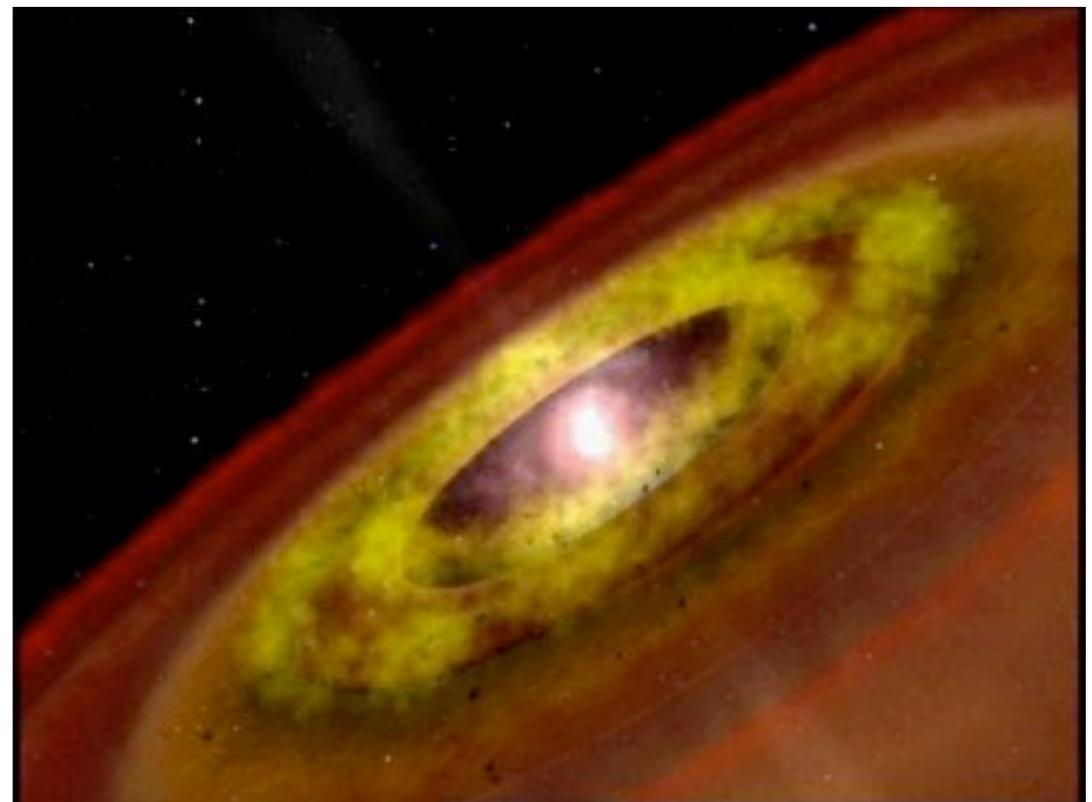
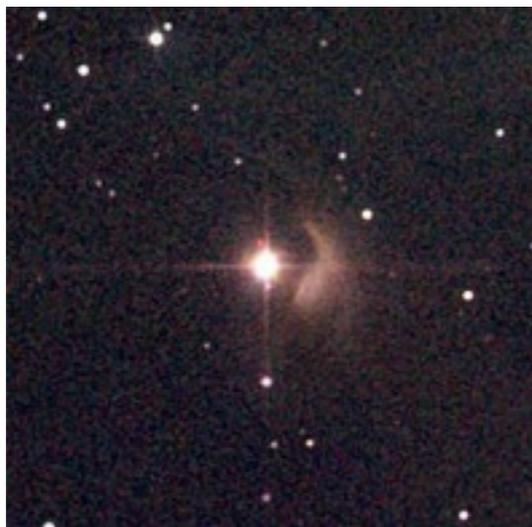


- **Class 0** sources – undetectable at  $\lambda < 20\mu\text{m}$
- **Class I** sources have  $\alpha > 0.3$
- **Flat spectrum** sources have  $0.3 > \alpha > -0.3$
- **Class II** sources have  $-0.3 > \alpha > -1.6$
- **Class III** sources have  $\alpha < -1.6$

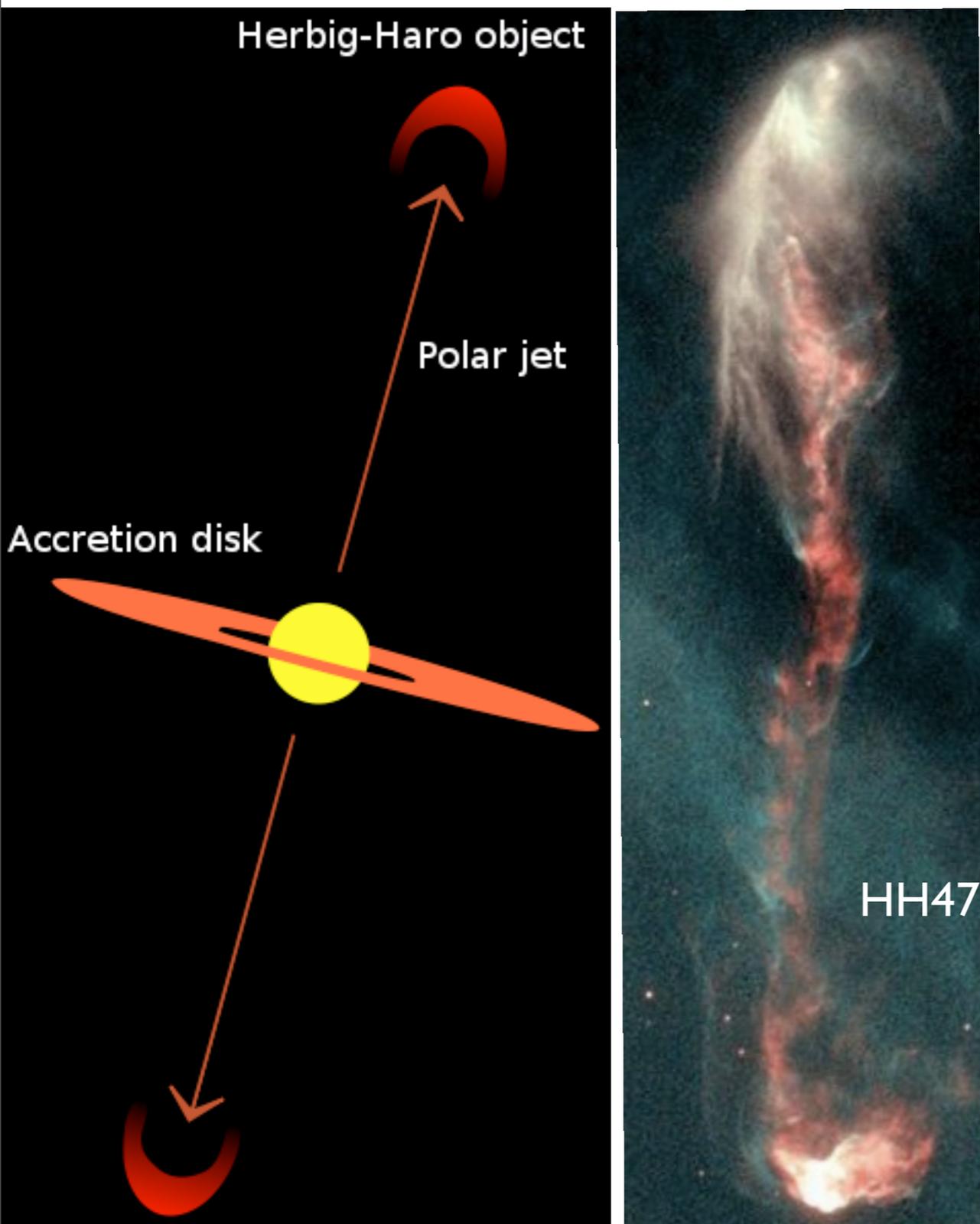
Class	peak emission	duration (Years)	description
0	submillimeter	$10^4$	early accretion
I	far-infrared	$10^5$	main accretion phase
II	near-infrared	$10^6$	classic T Tauri star
III	visible	$10^{7[2]}$	'weak line' T Tauri star

# étoiles T Tauri

- détection dans le visible d'étoiles jeunes ou pré-séquence principale
- nom donné à partir du prototype de ces étoiles T Tau
- remarquables par leur variabilité + raies (Balmer + Call)



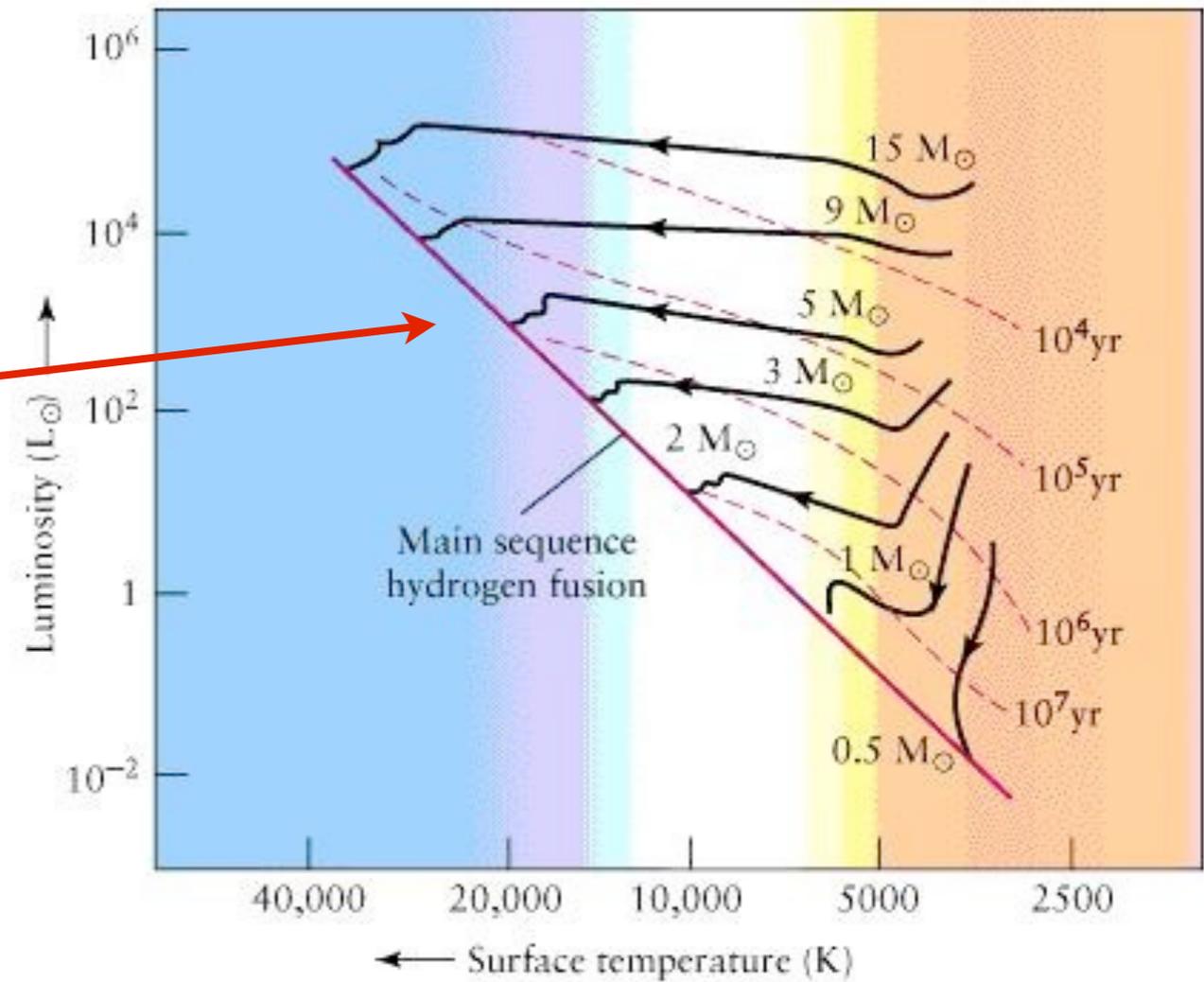
# caractéristiques des YSOs



- au moins la moitié des étoiles T-Tauri ont un **disque circumstellaire/ protoplanétaire**
- **jets, objets Herbig-Haro**

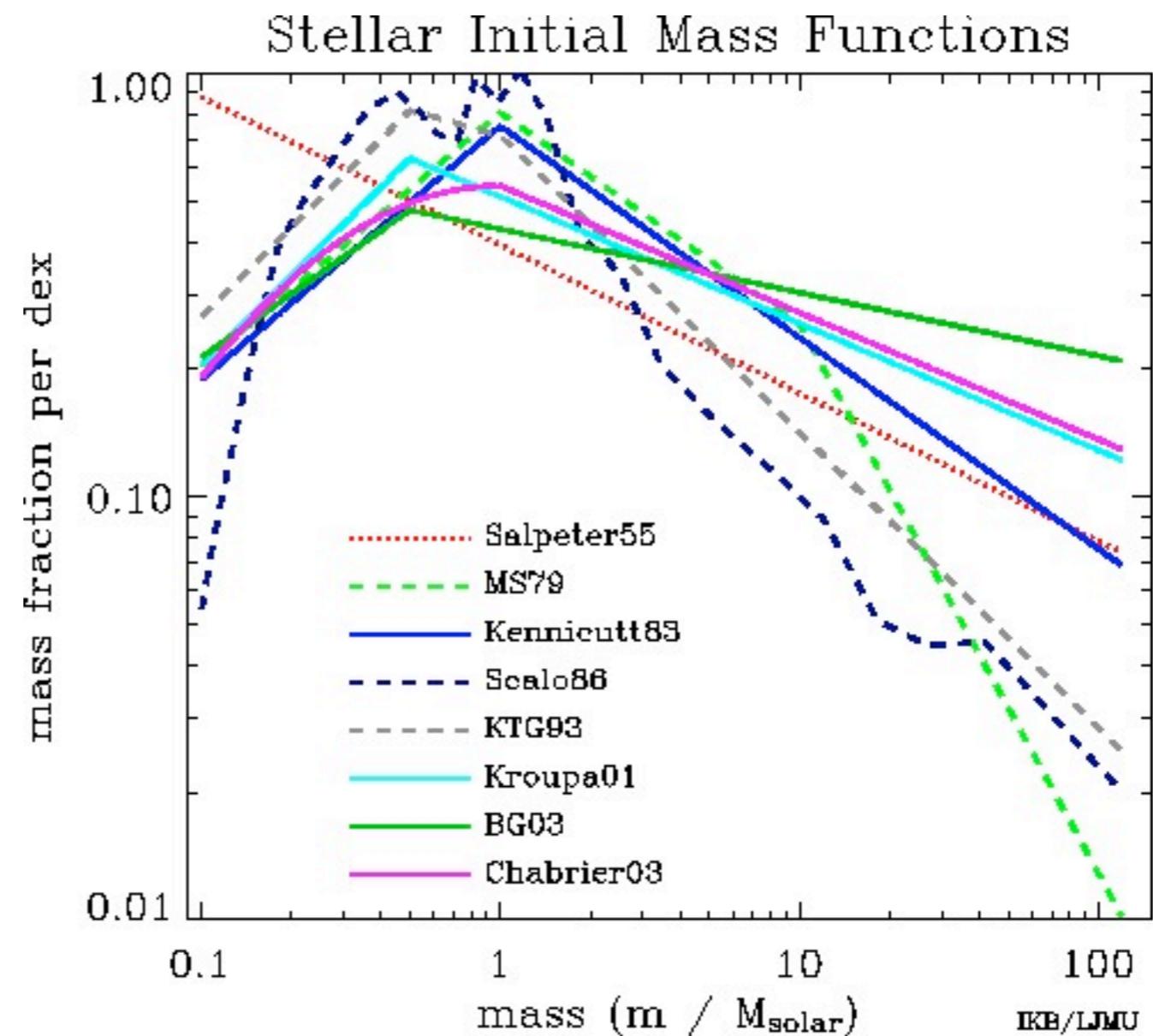


**ZAMS**  
= Zero Age Main Séquence



- Le temps mis par une étoile pour atteindre la ZAMS est inversement proportionnel à leur masse

# IMF



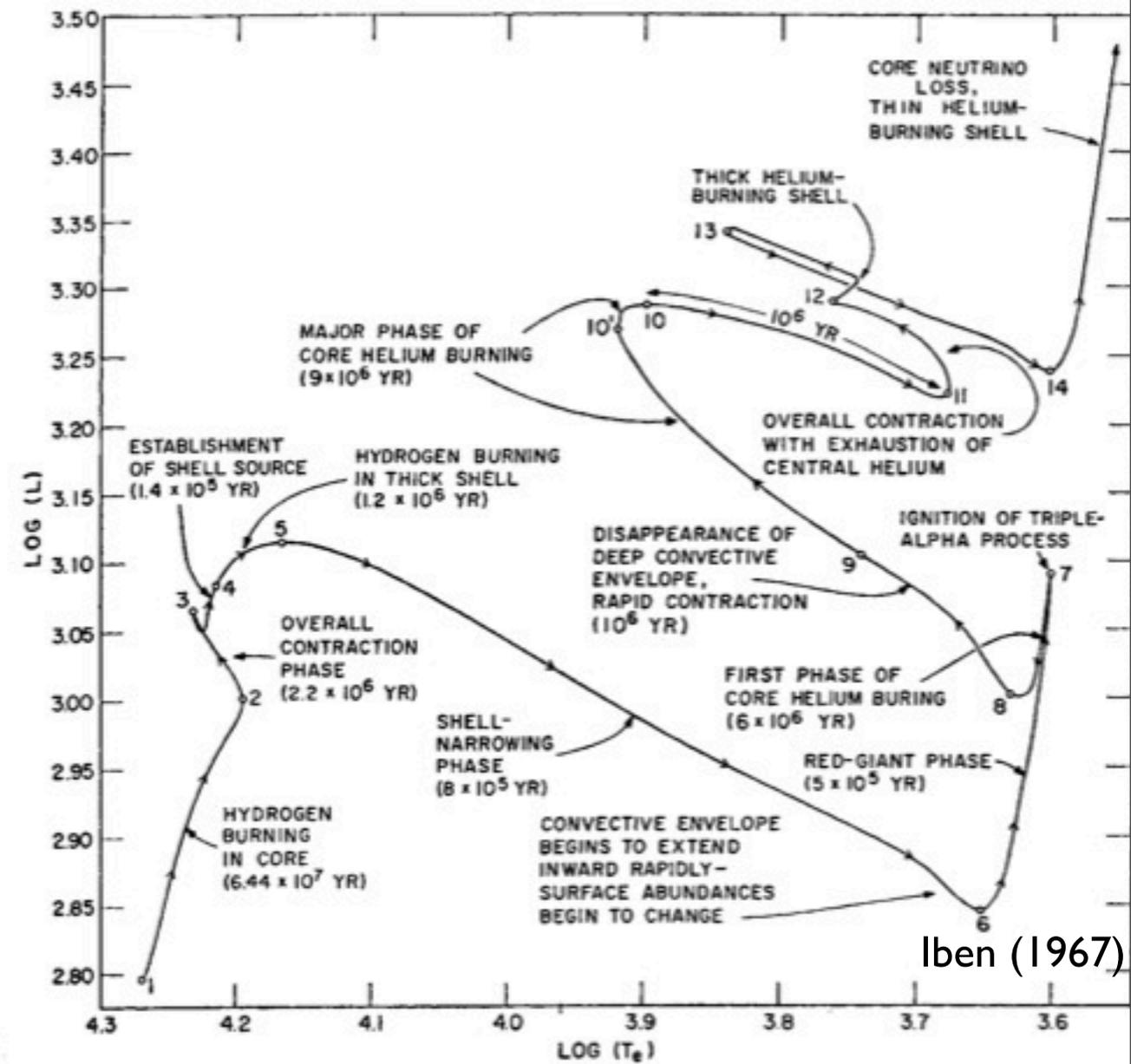
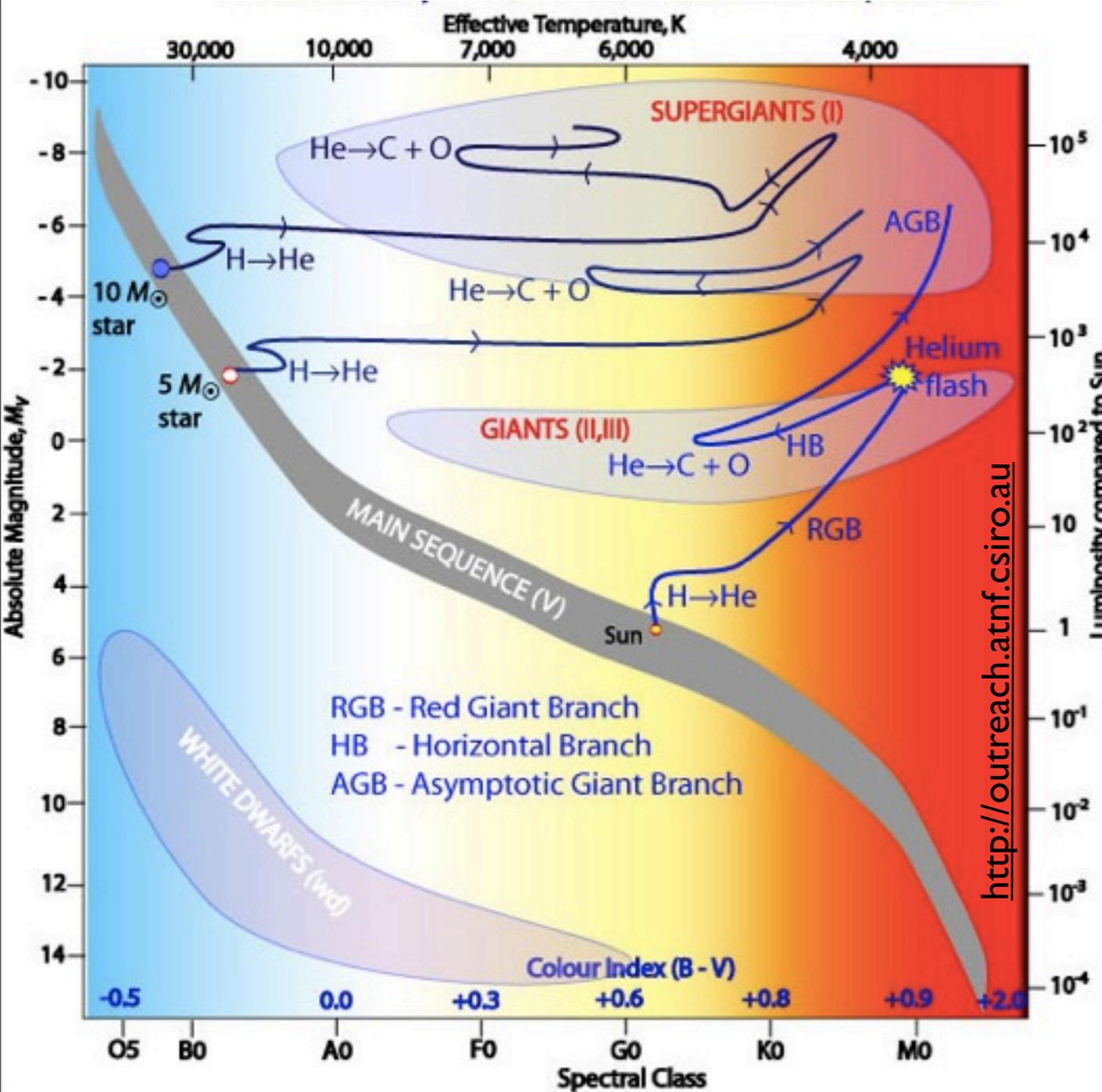
- “Initial Mass Function” = nombre d’étoiles qui se forment par intervalle de masse
- Quand un nuage se fragmente, on forme plus d’étoiles de faible masse que d’étoiles de forte masse

# Evolution sur la séquence principale et après

# Evolution sur la séquence principale

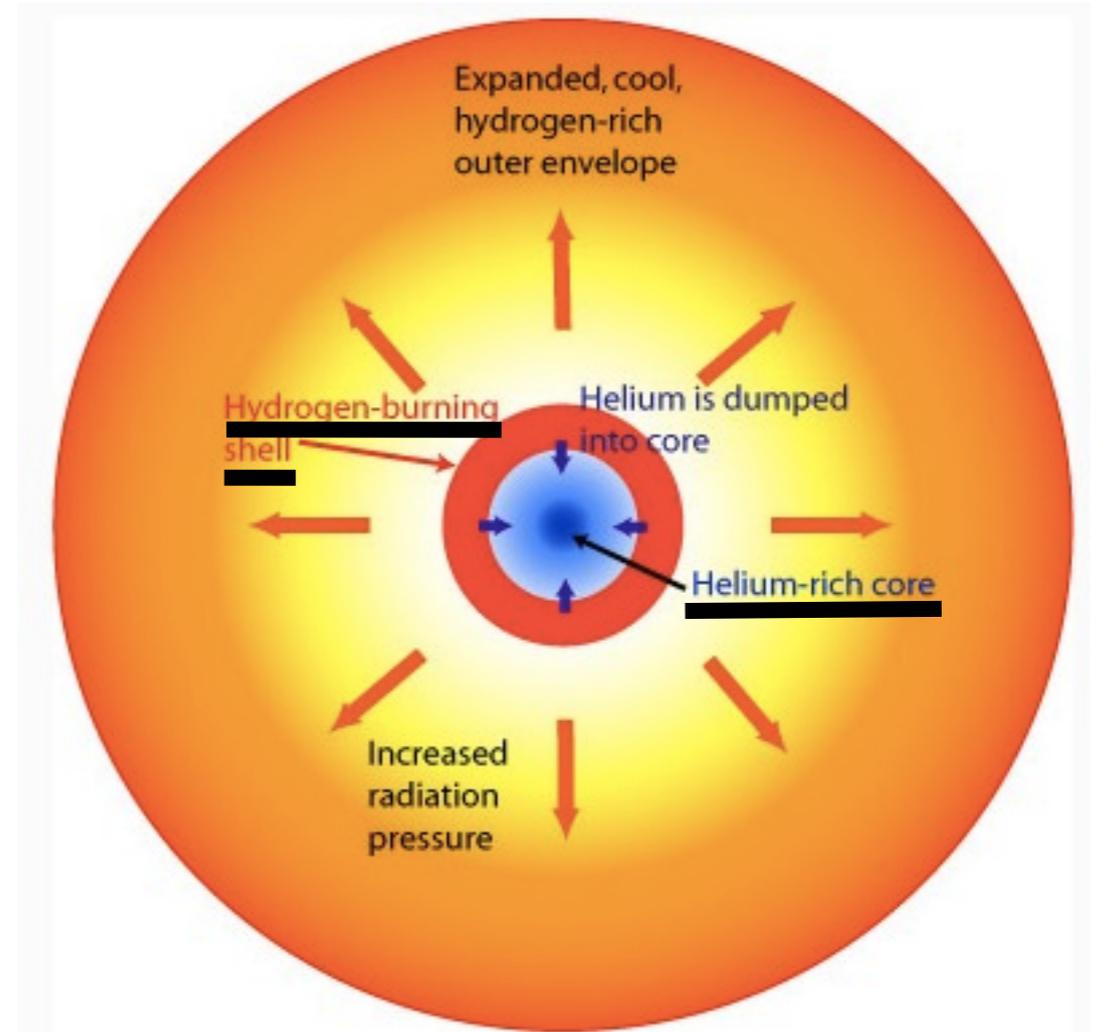
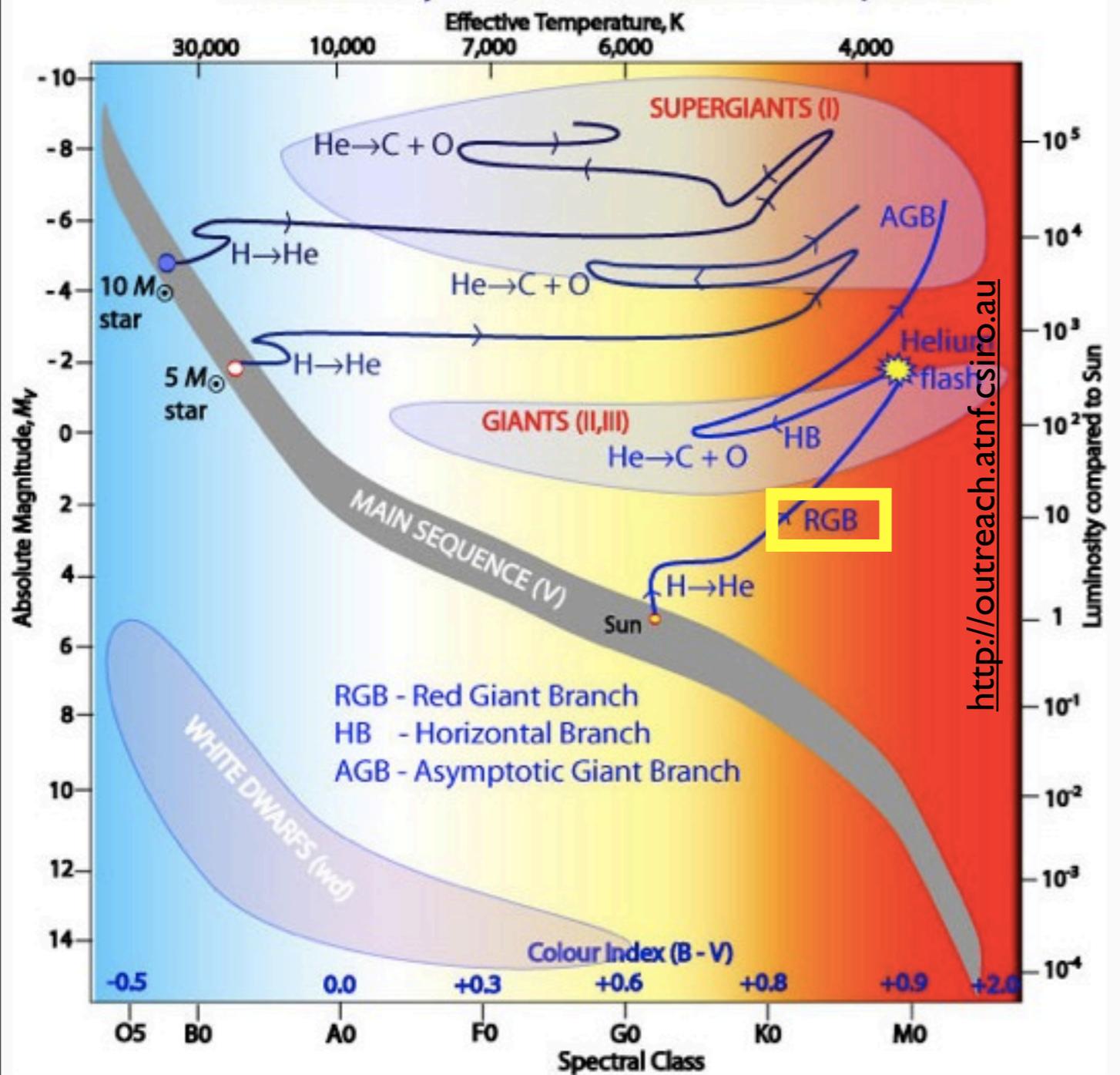
- C'est là que l'on trouve le plus d'étoiles car c'est là que les étoiles passent le plus de temps
- **Source d'énergie principale:**
  - avant la séquence principale: **gravitation**
  - pendant la séquence principale: **réactions nucléaires**
  - après la séquence principale: **alternance des 2**

# Evolution dans le diagramme HR



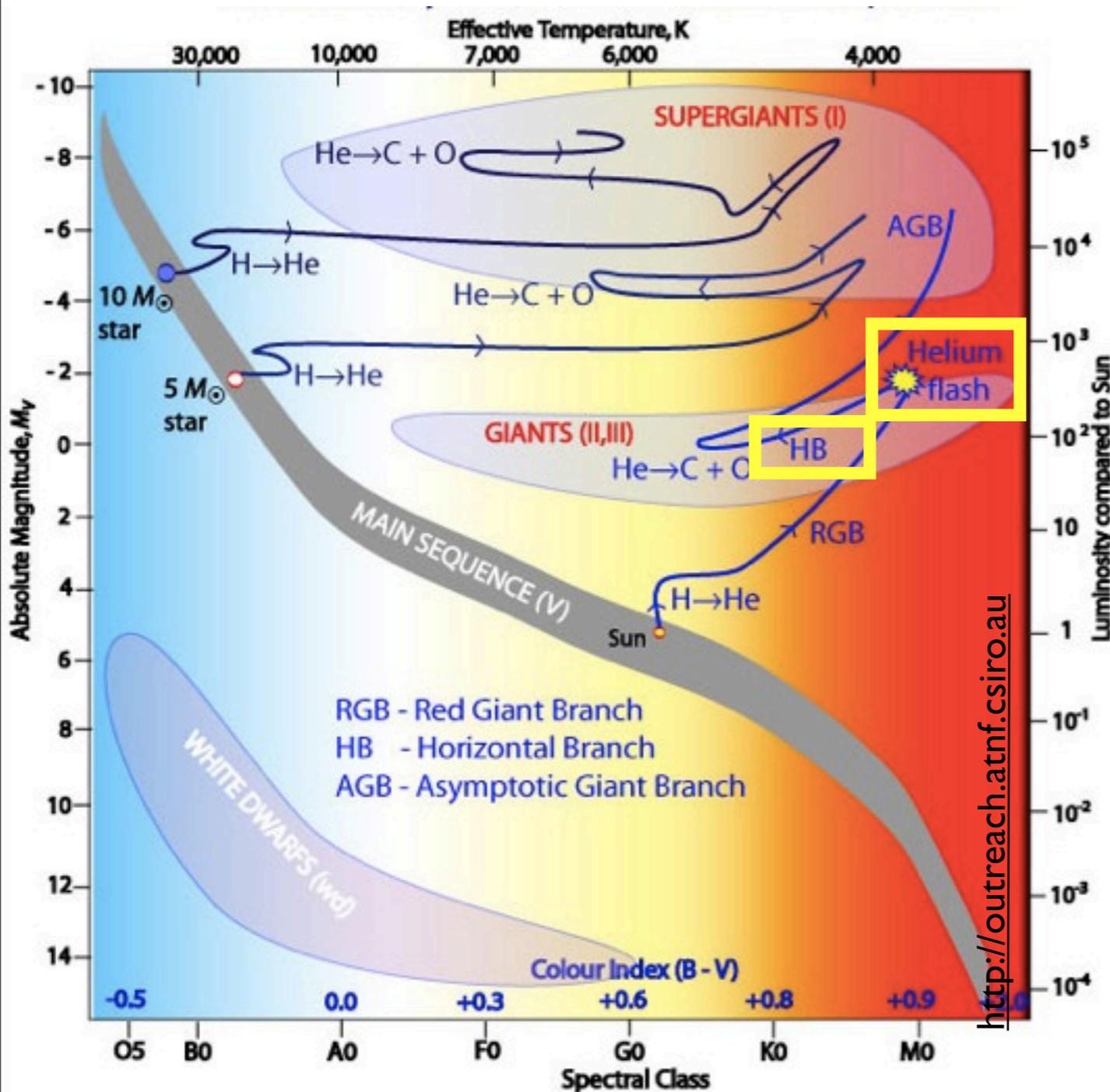
Une suite complexe de contraction, expansion, formation de différentes coquilles à chaque changement de “combustible”

# Evolution d'une étoile comme le Soleil ( $<2M_{\odot}$ )



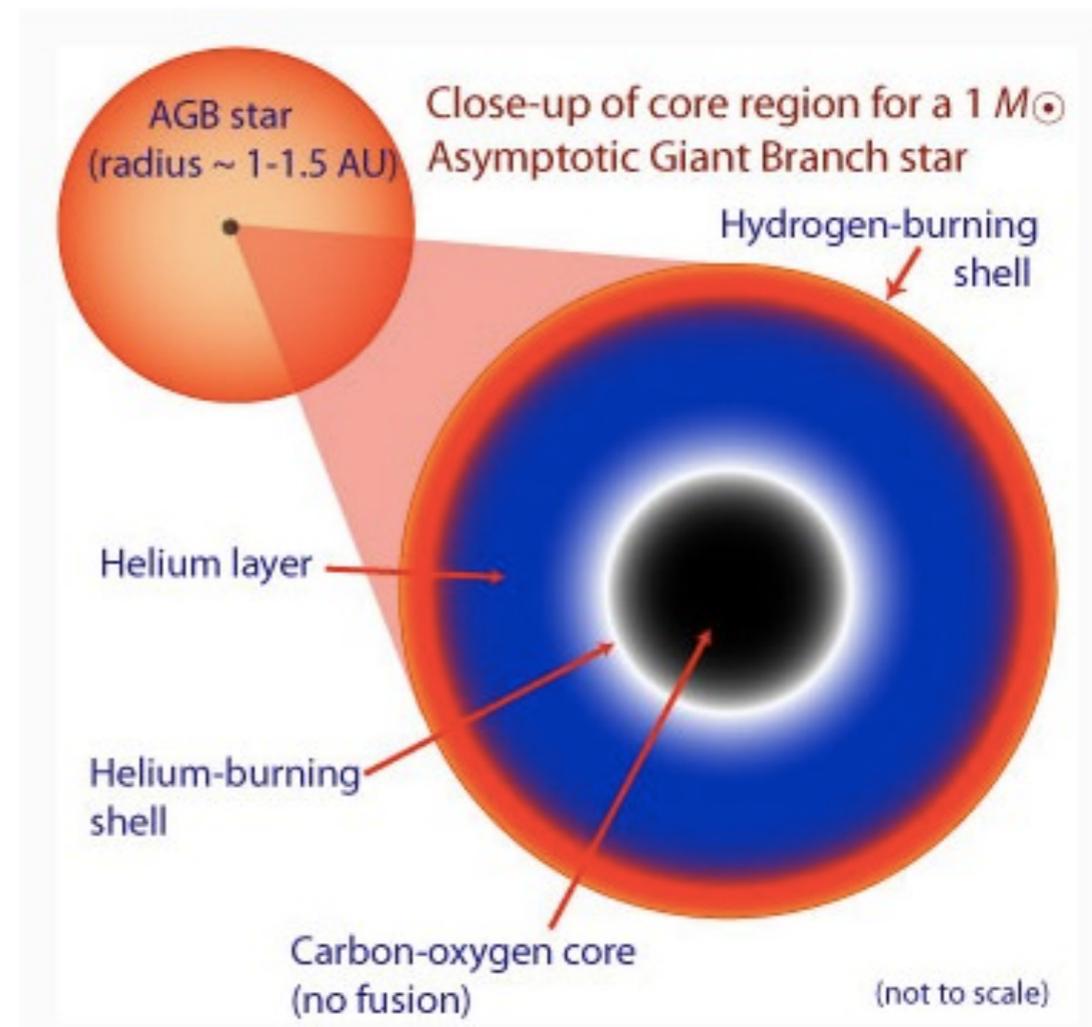
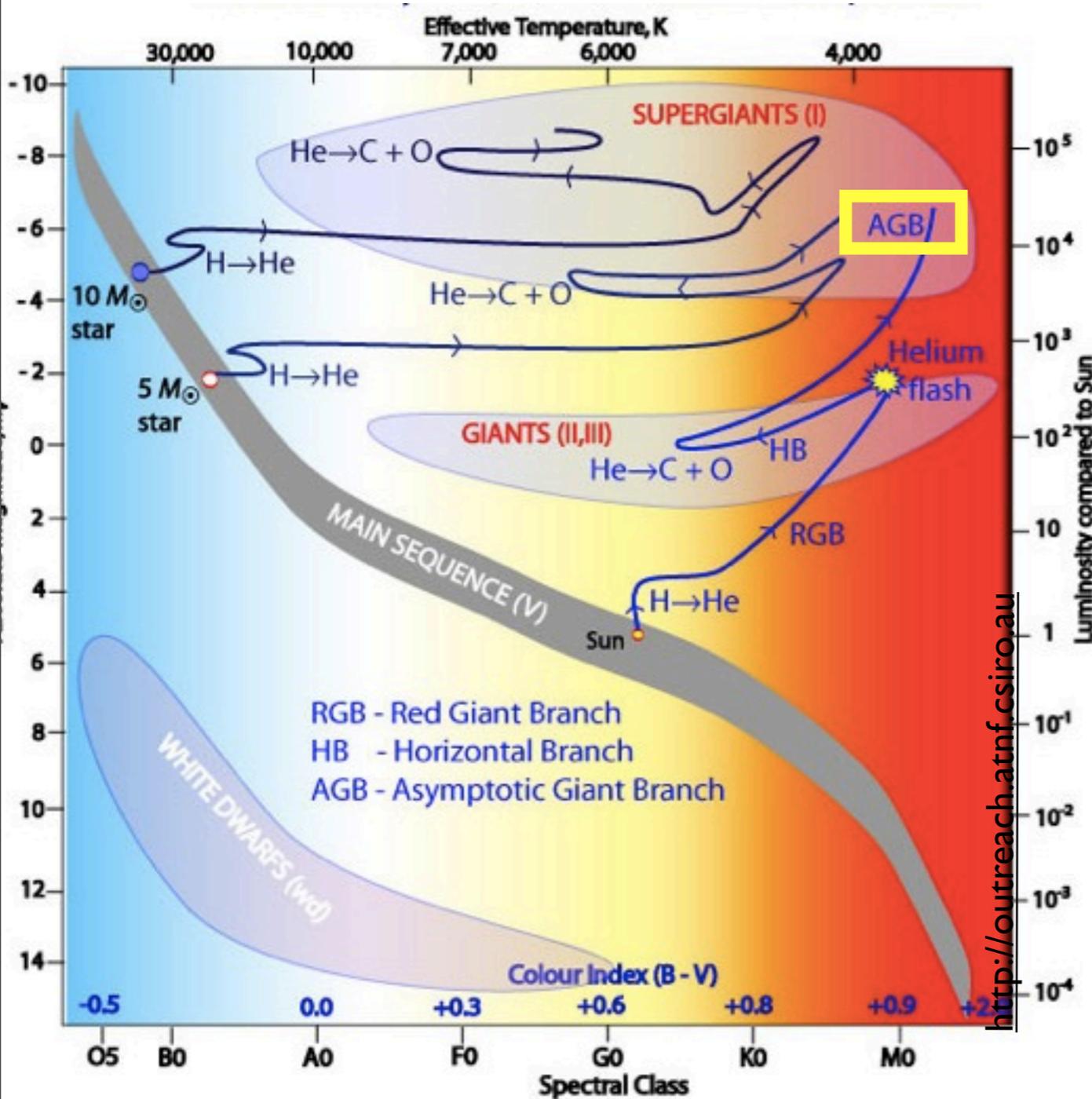
étoiles RGB

“red giant branch”



**flash de l'Hélium:**  
effondrement du coeur  
 -> très grosse source d'énergie (~ à une galaxie) mais qui n'atteint pas la surface

Pendant leur passage par la **branche horizontale**, beaucoup d'étoiles développent des instabilités dans leurs enveloppes externes qui donnent des pulsations observables



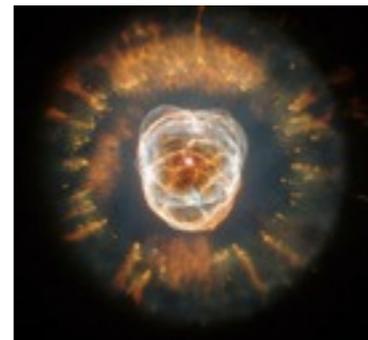
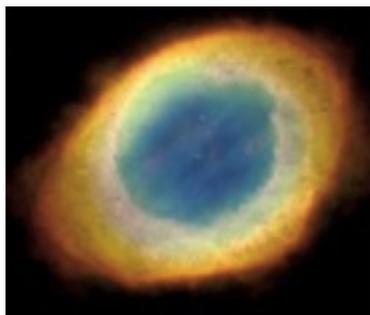
## Etoiles AGB

“Asymptotic Giant Branch”

Les étoiles dans la phase AGB peuvent perdre beaucoup de masse (jusqu'à  $10^{-4} M_{\odot}/\text{an}$ ), ce qui va enrichir le milieu interstellaire

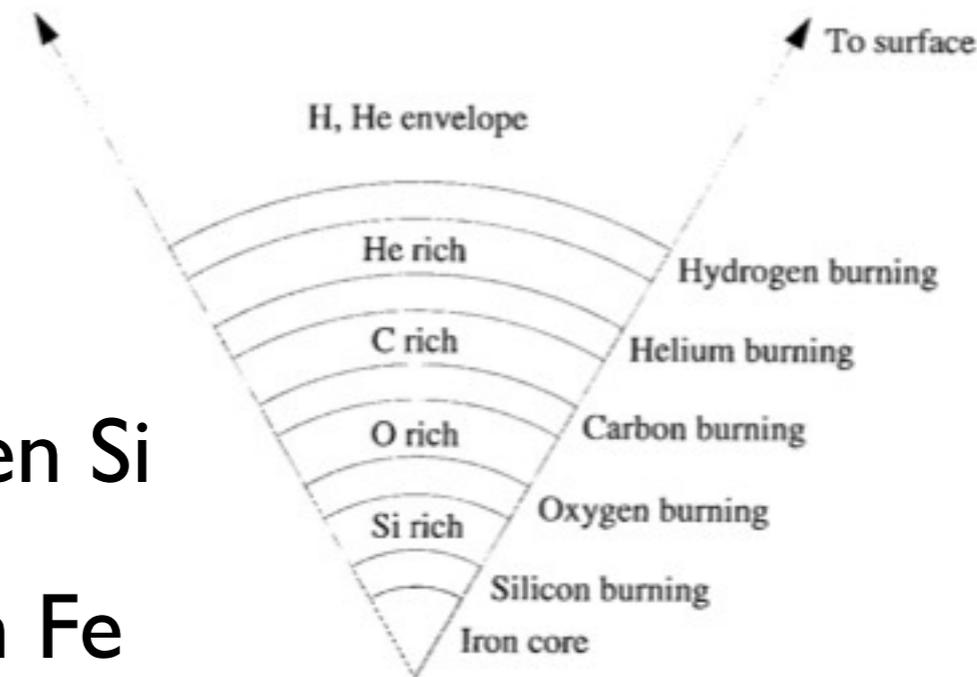
# Evolution après le stade AGB

- Dépend de la masse
- Cas des étoiles  $M^{(ZAMS)} < 8M_{\odot}$ :
  - coeur de C et O qui va se contracter
  - grosses pertes de masse, super-vents, **sources OH/IR**
  - le nuage s'étend, il expose l'étoile centrale. Puisqu'il n'y a plus de couches au dessus, la combustion d'H et d'He s'éteint, l'objet se refroidit et devient une **naine blanche**
  - couche de gaz en expansion -> **nébuleuse planétaire**



# Le destin des étoiles massives

- $M_{(ZAMS)} > 8M_{\odot}$  vont pouvoir démarrer la combustion du C et O
- combustion du C  $\rightarrow$  O, Ne, Na, Mg
- **structure** de l'étoile **en onion**
- combustion de l'O  $\rightarrow$  coeur riche en Si
- combustion du Si  $\rightarrow$  coeur riche en Fe
- La combustion des carburants successifs donne des éléments de + en + proches du pic du Fe  $\rightarrow$  de - en - d'énergie produite par unité de fuel  $\rightarrow$  **le temps entre chaque étape est de plus en plus court**



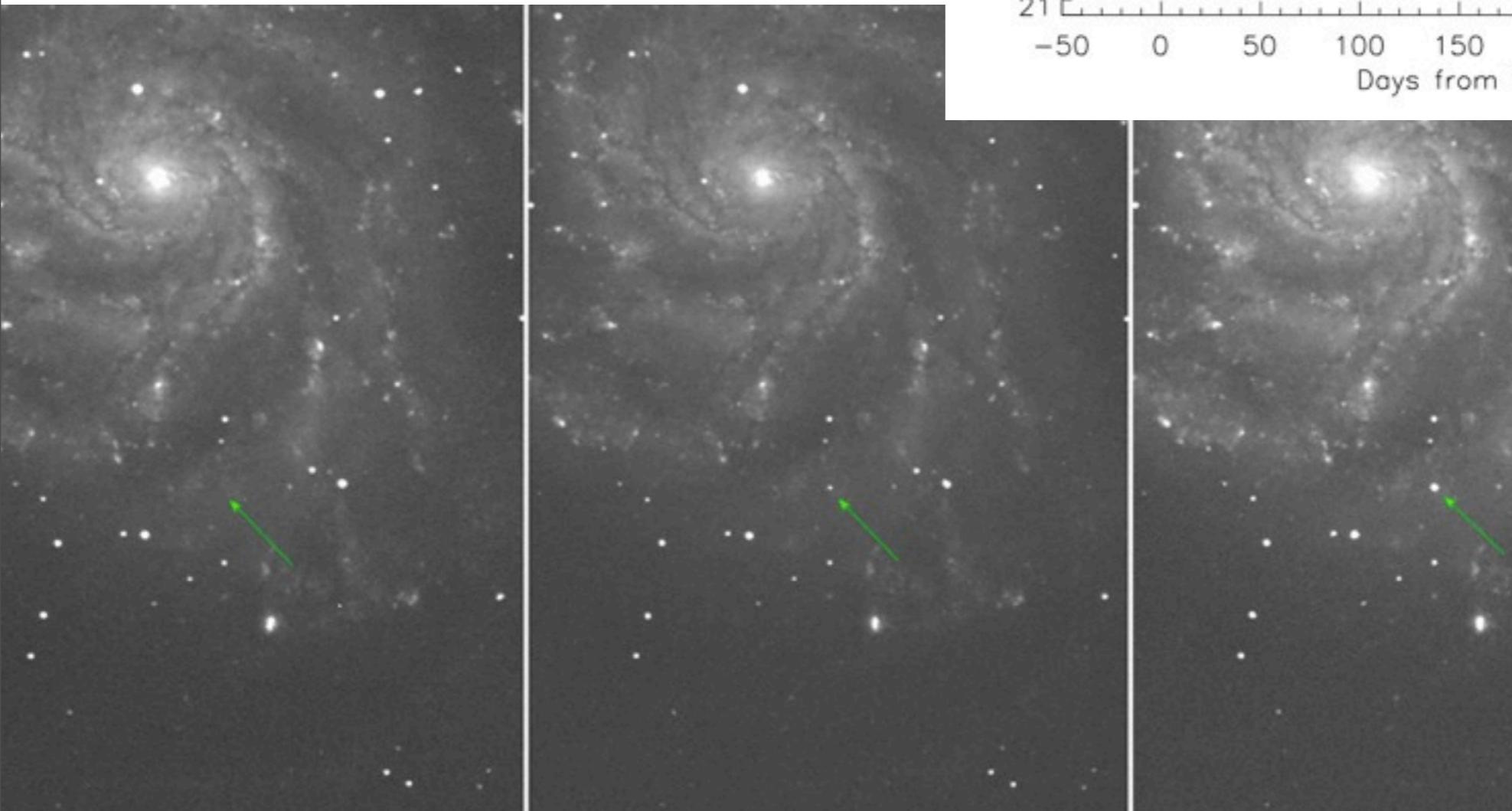
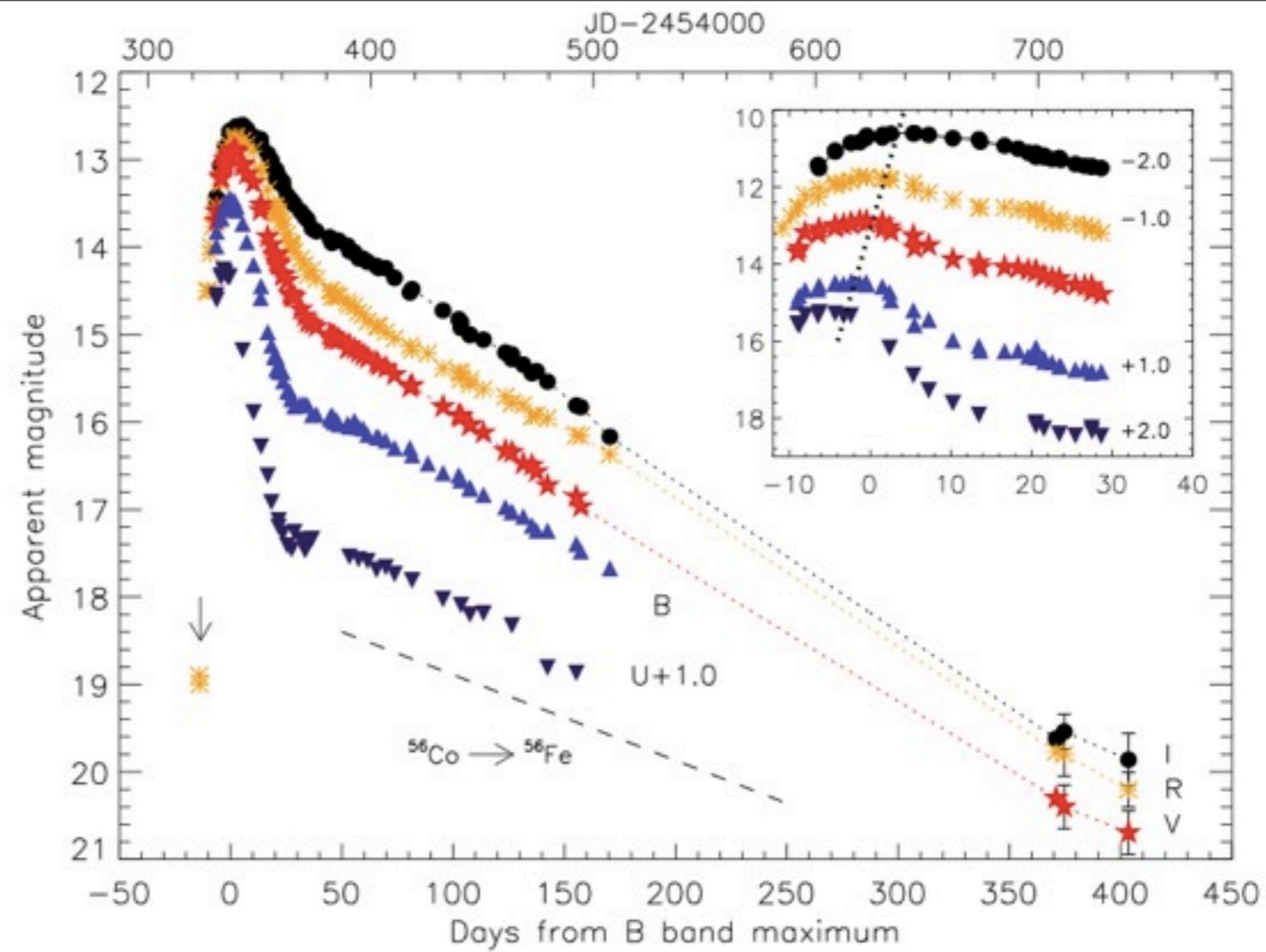
- On a alors des conditions de températures et de pression extrêmes. Les  $e^-$  qui aidaient à la pression sont capturés (par les éléments lourds ou par des protons)
- le coeur s'effondre soudainement

*En  $\sim 1$  seconde, un volume de la taille de la Terre se retrouve comprimé à un rayon de 50km!*

- Si la masse initiale n'est pas trop grande ( $< 25M_{\odot}$ ), le reste de coeur interne va se stabiliser (pression des neutrons) et devient une **étoile à neutron**
- Si la masse était importante, l'effondrement est total, produisant un **trou noir**
- Dans les deux cas: grande source de neutrinos

- **Ondes de choc** se propageant vers l'extérieur (dus à la force forte qui devient répulsive, les atomes "rebondissent")
- **Ejection de l'enveloppe** de l'étoile
  - quand la matière devient optiquement mince, l'énergie est relachée sous forme de photons, ce qui peut être aussi lumineux qu'une galaxie
- c'est le mécanisme des **Supernovae à effondrement de coeur**
  - SN de type II, de type Ib (perte de l'enveloppe d'H) ou de type Ic (perte de l'enveloppe d'H+He)
  - (Les SNe de type Ia - SNe thermonucléaires- impliquent une naine blanche dans un système binaire serré)

- Observations:
- augmentation rapide de luminosité
- mag limite de -18
- décroissance de 6-8 mag/an



- Les SN visibles à l'oeil nu sont rares:

- SN 1006

- SN 1054 (Crabe)

- SN 1572  
détectée par Tycho

- SN 1604  
détectée par Kepler

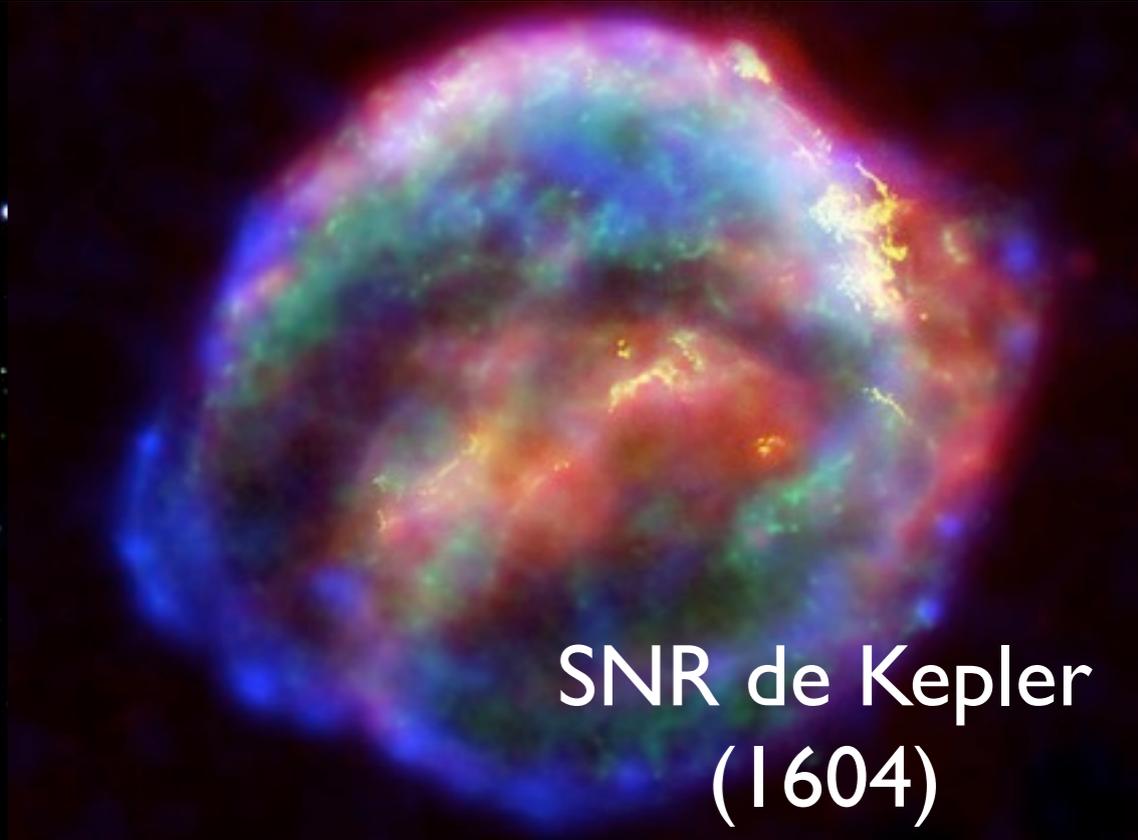
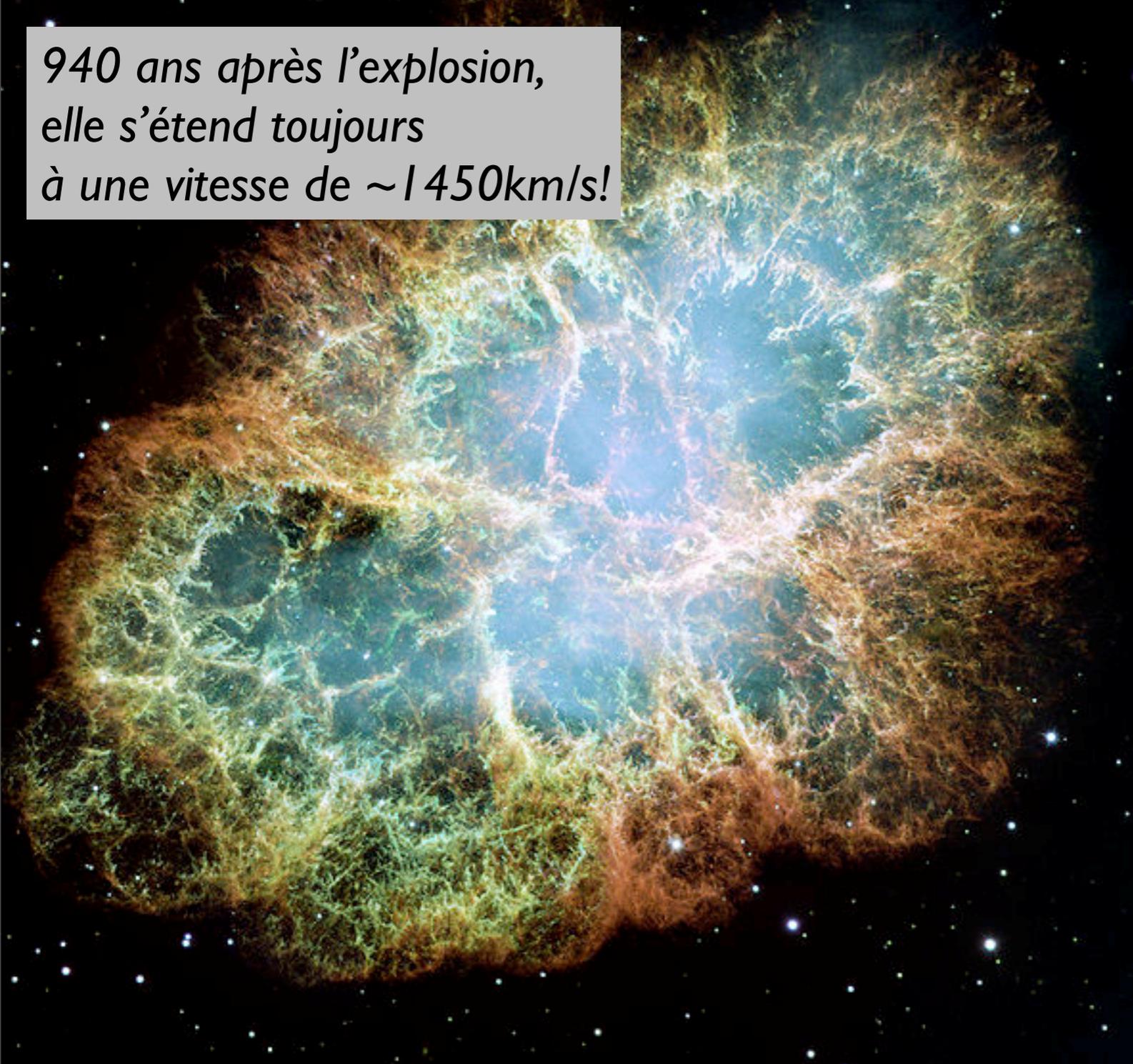
- SN 1987A  
dans le LMC



# Restes de supernova (SNR)

Nébuleuse du crabe: reste de SN 1054

*940 ans après l'explosion,  
elle s'étend toujours  
à une vitesse de  $\sim 1450\text{km/s}$ !*



SNR de Kepler  
(1604)

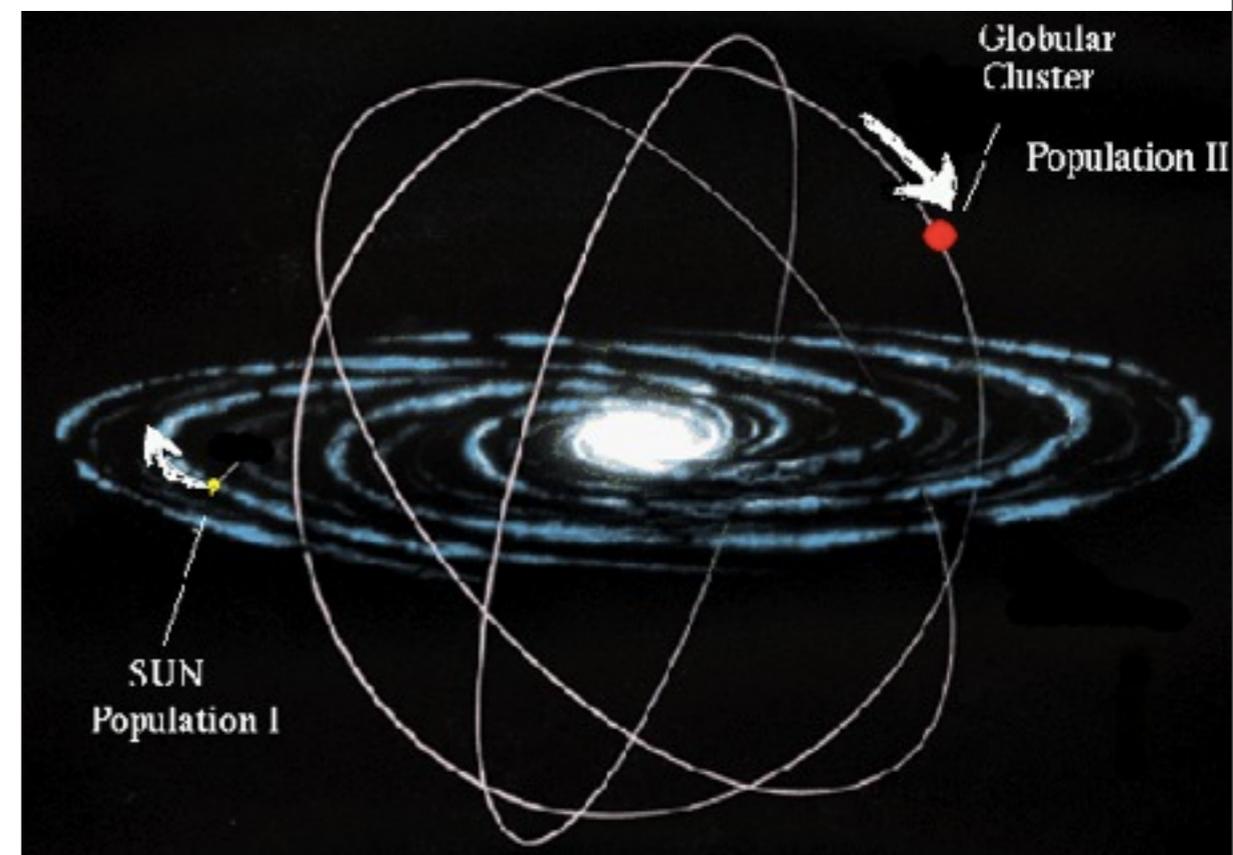


SNR de Tycho  
(1572)

# Les amas d'étoiles

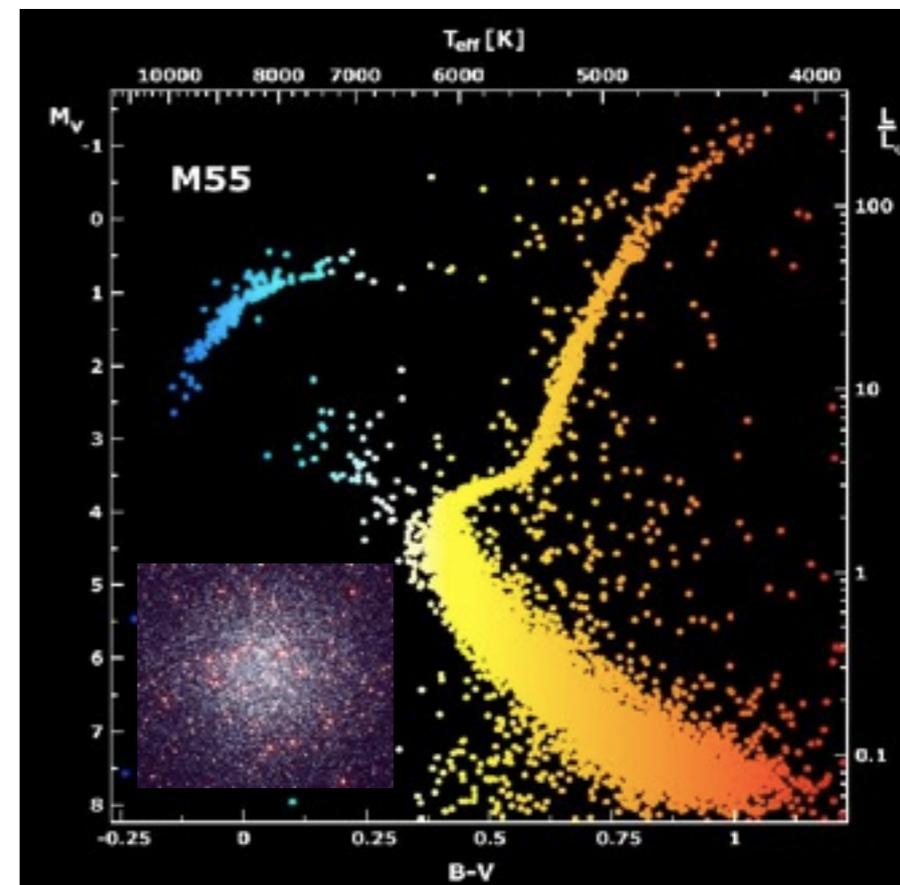
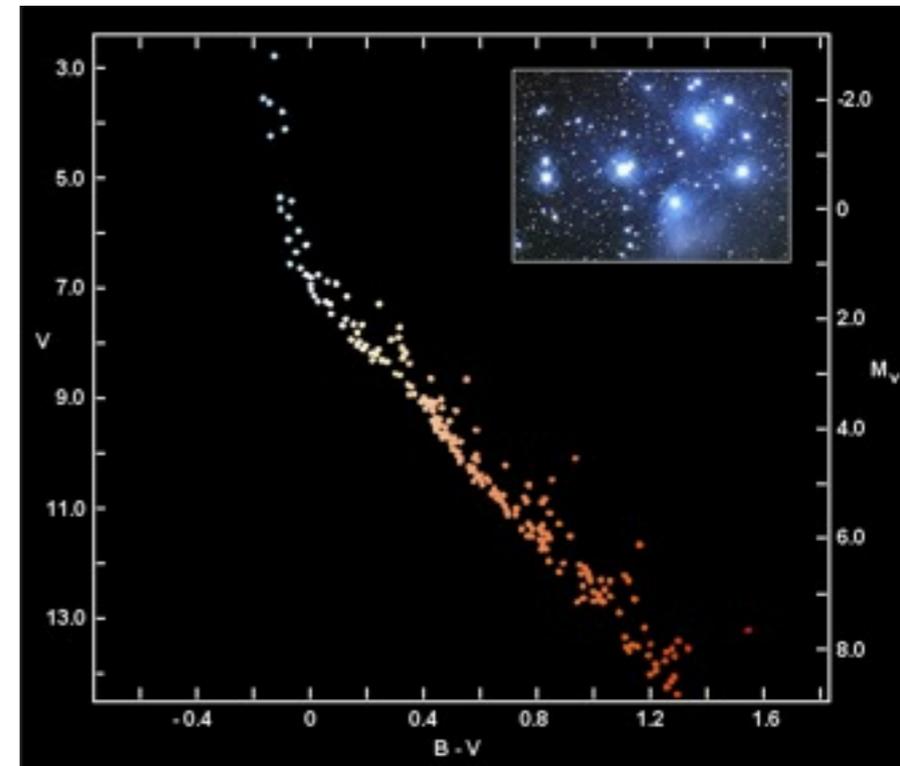
# Populations d'étoiles

- Au départ: H et He. Enrichissement en métaux à chaque génération d'étoiles
- étoiles pauvres en métaux: **Population II**
- étoiles riches en métaux: **Population I**
- Les étoiles de **population III** sont une population hypothétique d'étoiles aujourd'hui éteintes, quasiment sans métaux, déduites de la cosmologie



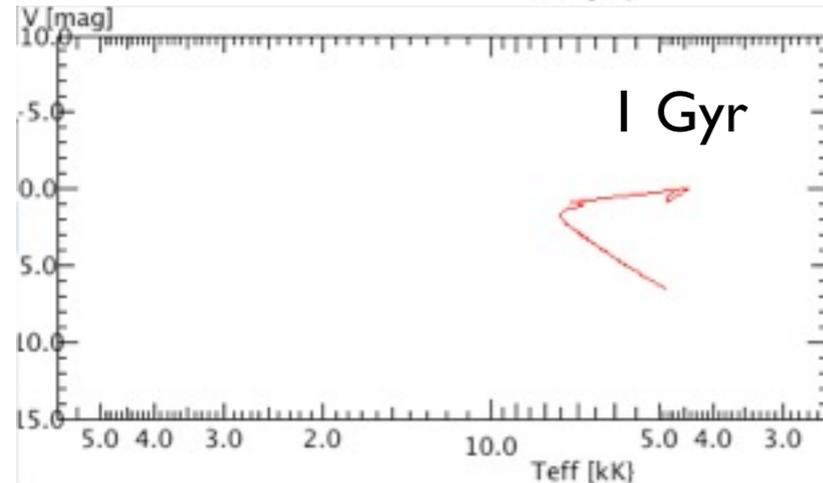
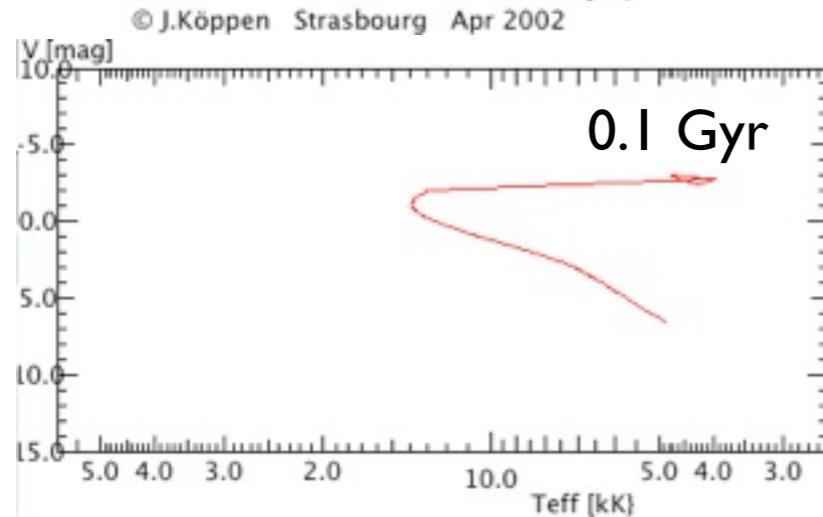
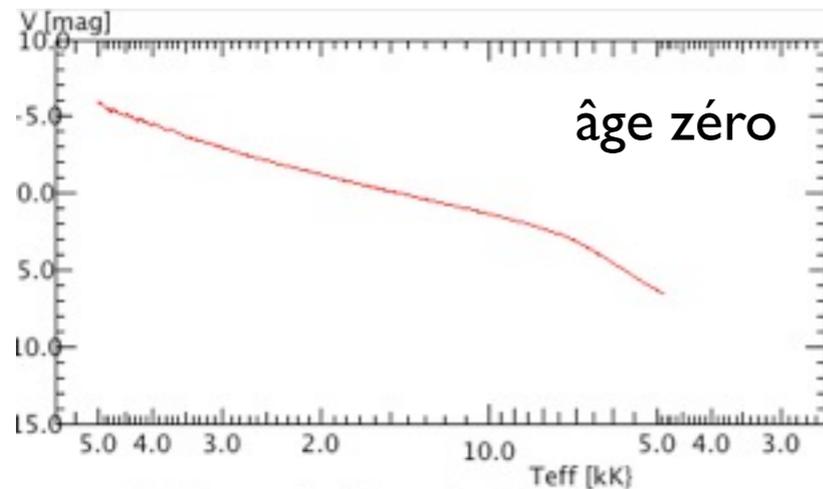
# Etoiles d'un amas

- Effondrement d'un nuage. Processus de fragmentation  
→ création d'un amas d'étoiles
- Chaque étoile membre d'un amas vient du **même nuage**, a le **même âge** et la **même composition chimique**
- étoiles à la même distance → on peut utiliser la *magnitude apparente* pour construire un diagramme HR
- Ajustement d'un modèle sur la séquence principale → distance par **“Main-sequence fitting”**



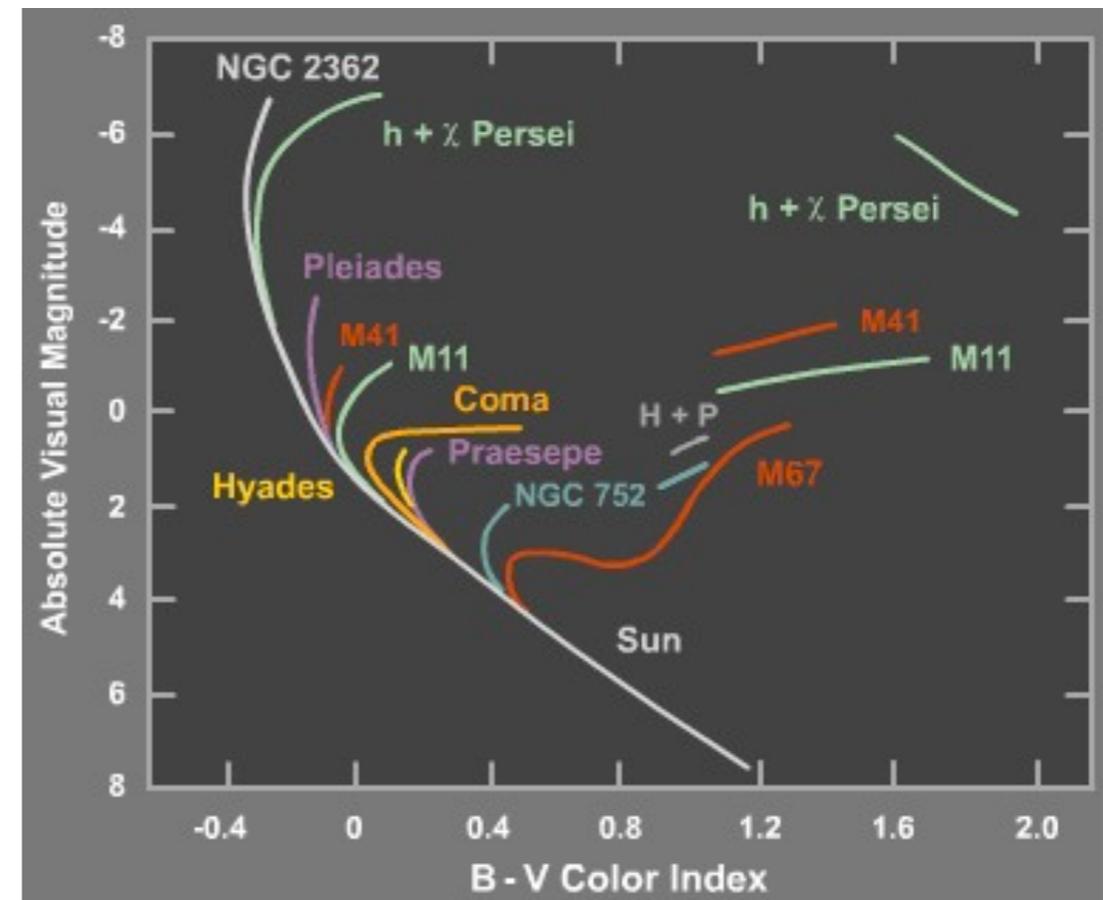
# Age des amas

## Isochrones



...

- “Main sequence turn-off”
- c’est le point où les étoiles quittent la séquence principale
- devient plus rouge et moins lumineux avec le temps



crédit: e-education.psu.edu

# Bilan

- La réussite de la comparaison entre théorie et observations dans les amas montre que notre représentation de l'évolution stellaire est assez complète
- Nombreux succès des théories d'évolution stellaire: explications des abondances observées, compréhension des différents types d'étoiles en terme de masse et d'évolution dans le temps
- Il reste de la place pour beaucoup de "rafinements" (convection, rotation, champs magnétiques, ...) + quelques objets "bizarres" (étoiles WR,  $\eta$  Carinae, ...)

Ce cours a été en grande partie inspiré par le livre:

