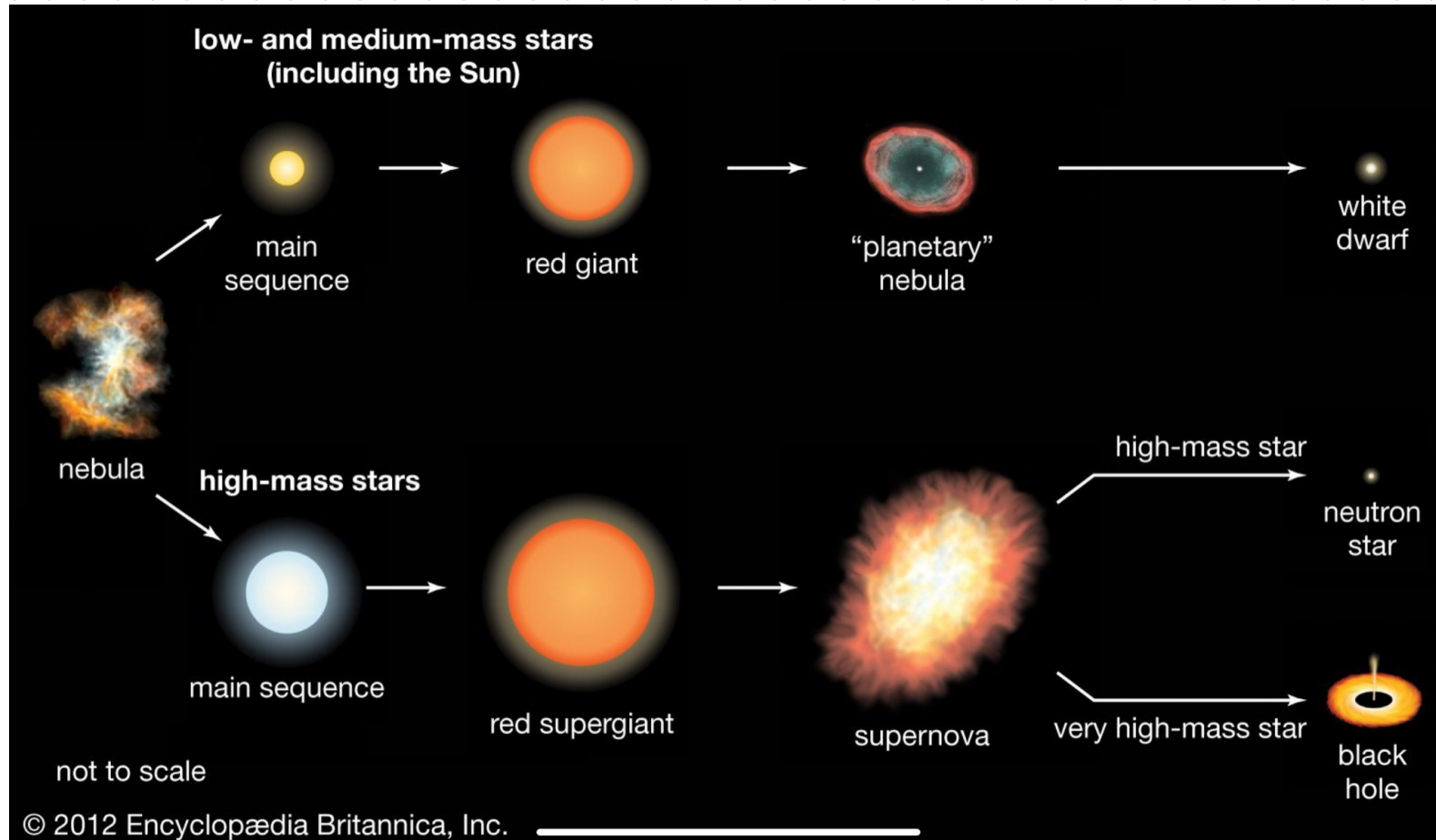


# L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES



A. Lançon - Février 2023

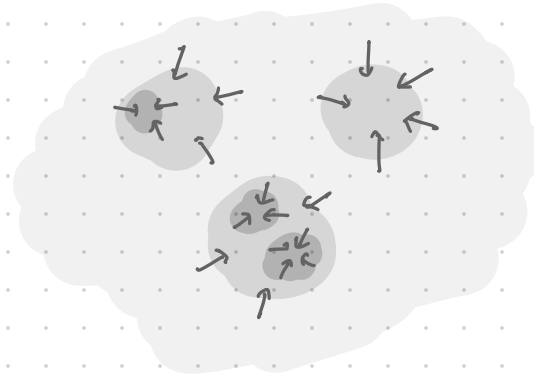
## LES QUATRE PRINCIPES À L'ŒUVRE :

• LA GRAVITÉ



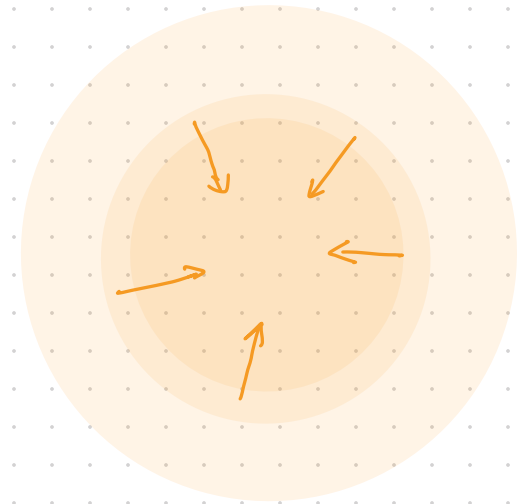
• LA PRESSION

- permet la formation d'étoiles
- assure que la matière stellaire ne se disperse pas dans l'espace
- tend à concentrer la matière



• LE RAYONNEMENT

• LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES



## LES QUATRE PRINCIPES À L'ŒUVRE :

• LA GRAVITÉ

• LA PRESSION

• LE RAYONNEMENT

• LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

• Tend à disperser les gaz dans l'espace et résiste à la compression

• Est due surtout aux mouvements des particules  
(+ rayonnement, + ...)

• Augmente quand  $T \uparrow$   
et/ou quand la densité augmente.

## LES QUATRE PRINCIPES À L'ŒUVRE :

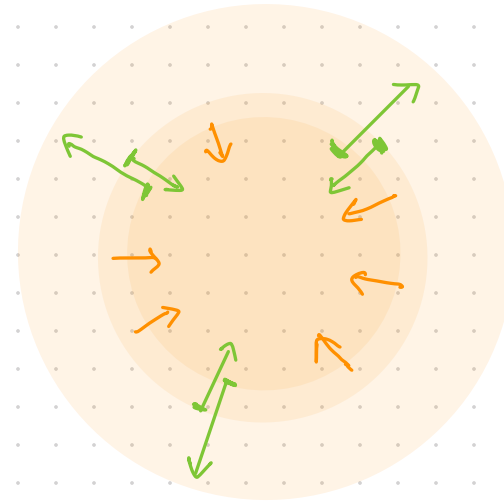
Assurent ensemble l'équilibre d'une étoile.

- LA GRAVITÉ

- LA PRESSION

- LE RAYONNEMENT

- LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES



La pression, la densité, la température augmentent avec la profondeur.

Equilibre rompu ?

↳ transition rapide vers une autre étape de l'évolution

## LES QUATRE PRINCIPES À L'ŒUVRE :

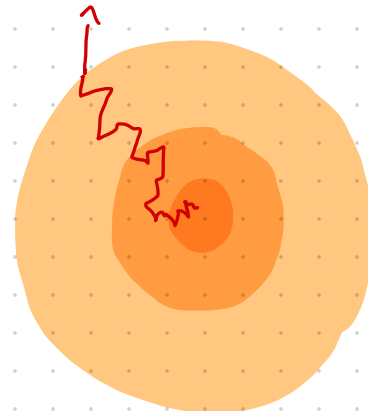
• LA GRAVITÉ

• LA PRESSION

• LE RAYONNEMENT

• LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- Nous permet de voir l'étoile.
- Est une perte d'énergie pour l'étoile.
- Est présent aussi dans l'étoile.
- Assure le transport d'énergie du chaud vers le froid (du cœur vers la surface).



## LES QUATRE PRINCIPES À L'ŒUVRE :

- LA GRAVITÉ

- LA PRESSION

- LE RAYONNEMENT

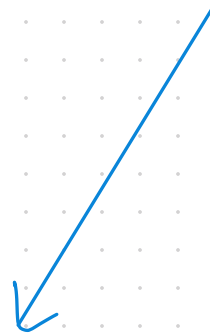
- LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- Elles n'ont lieu que là où il fait assez chaud : dans le cœur de l'étoile.

- Elles libèrent l'énergie nécessaire pour

- compenser les pertes par rayonnement

- maintenir la température et donc la pression dans l'étoile.



## LES QUATRE PRINCIPES À L'ŒUVRE :

- LA GRAVITÉ
- LA PRESSION

Contribuent à l'équilibre !

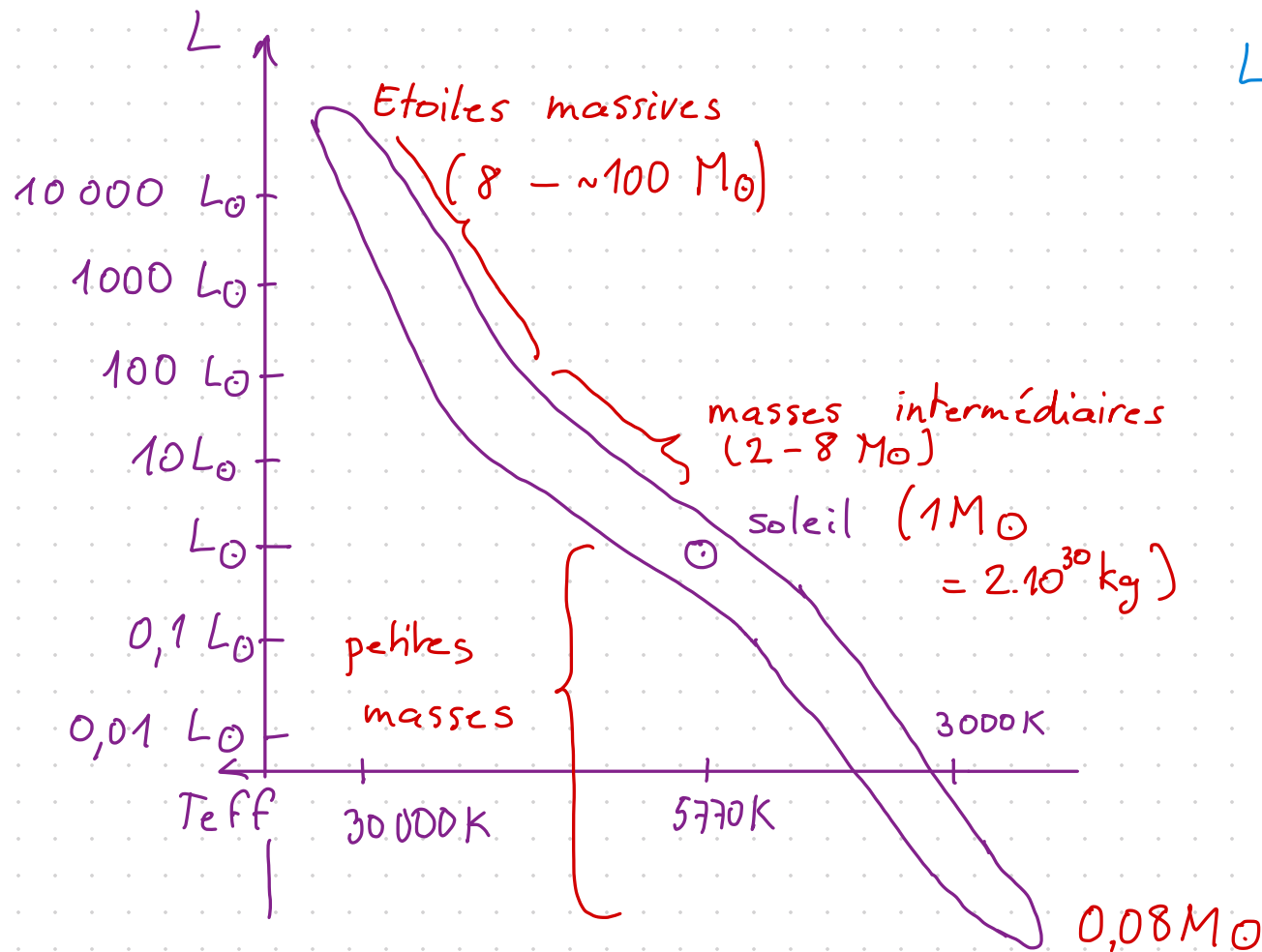
- 
- LE RAYONNEMENT
  - LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

- Arrêt des réactions nucléaires ?  
La température donc la pression chutent  
→ la gravité l'emporte  
→ le cœur se contracte
- Le rayonnement ne suffit plus pour transporter l'énergie vers la surface ?  
→ la convection s'enclenche  
→ l'enveloppe gonfle.

L'ÉTAPE LA PLUS LONGUE DE LA VIE STELLAIRE :

la séquence principale

(Main Sequence ; MS.)



$L$  = luminosité de l'étoile  
= énergie émise par unité de temps  
(= luminosity  $\neq$  brightness.)

Observation d'une distance  $d$  :  
brillance perçue  $\sim \frac{L}{d^2}$

$T_{\text{eff}}$  = température effective  
(effective temperature)  
 $\simeq$  température de la surface

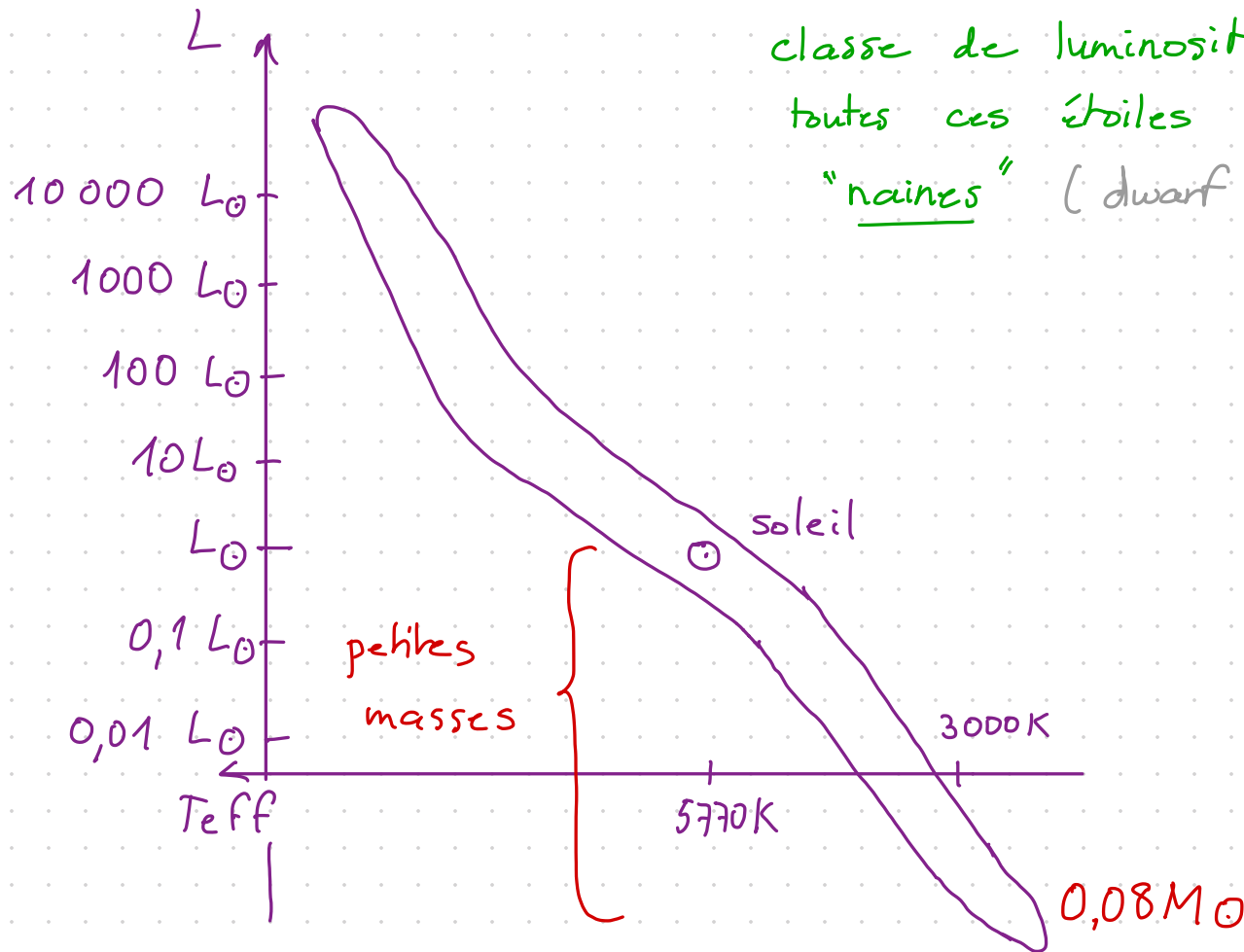


L'ÉTAPE LA PLUS LONGUE DE LA VIE STELLAIRE :

la séquence principale (Main Sequence ; MS)

(  
Simbad: MS\*  
(dont Be\*, BS\*...))

classe de luminosité ; V  
toutes ces étoiles sont dites  
"naines" (dwarf stars)



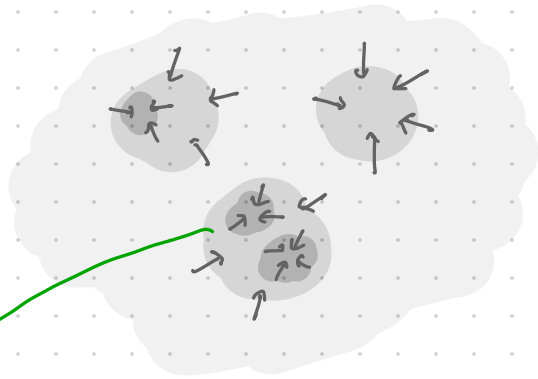
⚠ • Les naines brunes (brown dwarfs) sont des astres intermédiaires entre étoiles et planètes géantes (Jupiters)

• Les naines blanches (white dwarfs) n'ont rien à voir avec tout ceci !!

} 0,01 - 0,08 M<sub>⊙</sub> :  
naines brunes

# FORMATION DES ÉTOILES :

Initialement, gaz interstellaire dilué et froid

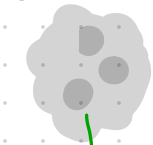


Hasard des perturbations... des régions sont plus denses que d'autres...

Si la gravité l'emporte sur la pression, il se forme des nuages, puis ceux-ci se fragmentent.

Composition : surtout H (hydrogène), He (hélium)  
quelques autres éléments, dits "métaux" (<3% de la masse)

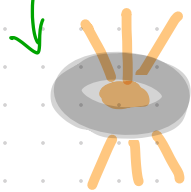
Fragmentation, contraction → molécules ( $H_2$ , CO, puis plus grosses) + poussières



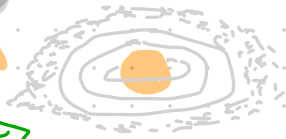
proto-étoile (dans un nuage opaque)



étoile pré-séquence principale

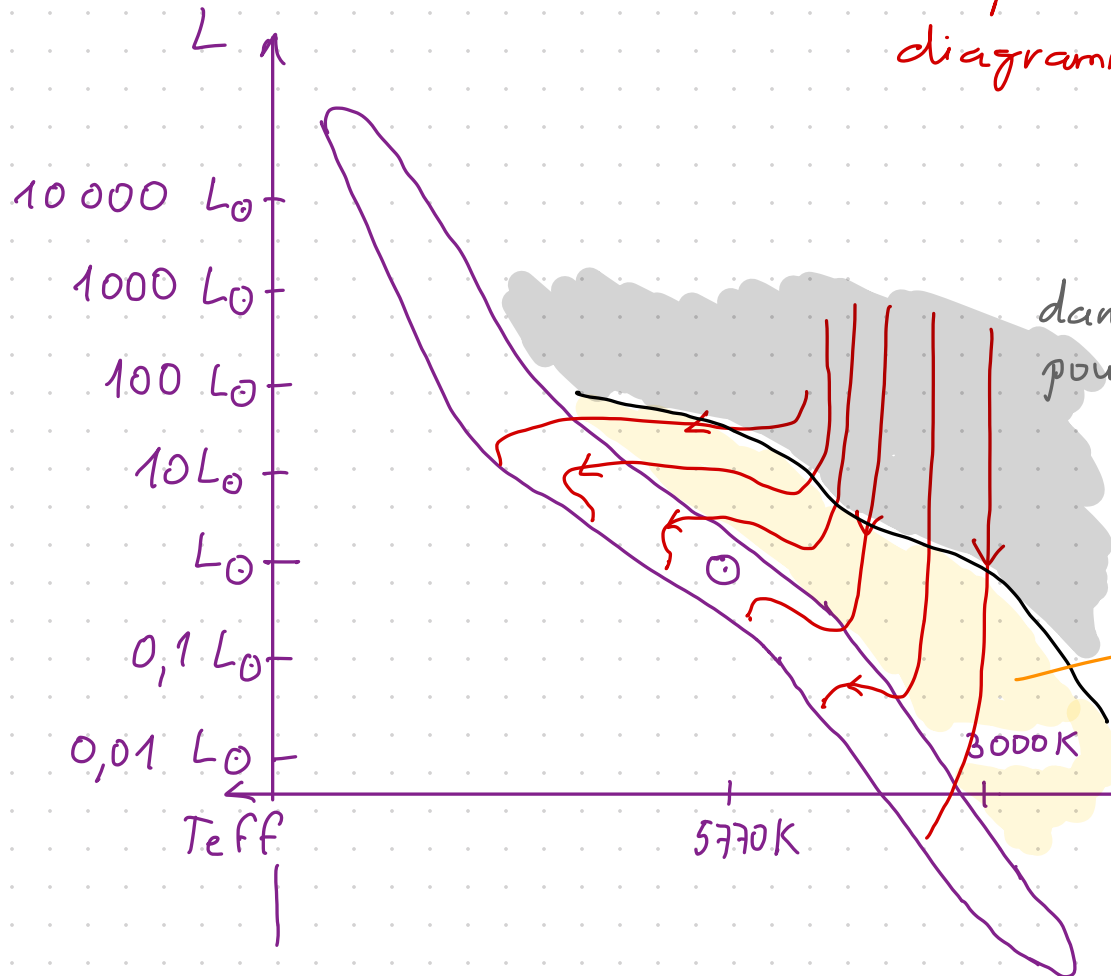


étoile et système planétaire



} (Young stellar objects; YSO)

Localisation des étoiles pré-séquence principale par rapport à la séquence principale dans le diagramme  $L$ - $T_{\text{eff}}$  (diagramme "HR" pour Hertzsprung-Russell)



dans la  
poussière

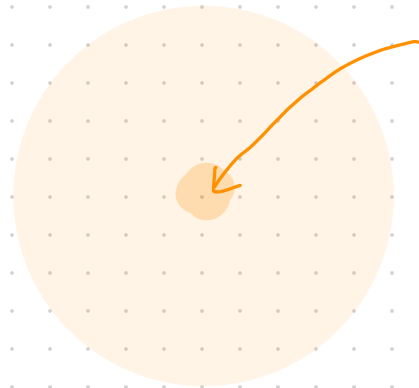
étoiles pré-séquence principale  
(YSO)

dont les étoiles dites T Tauri  
et les étoiles Ae/Bc de Herbig,...

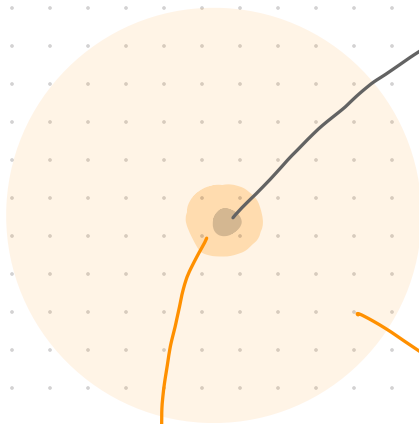
Simbad: YxO, dont TT\*, Ae\*,...

## SEQUENCE PRINCIPALE ... ET APRES ?

Simbad: EV\*



$H \rightarrow He$  (plus précisément :  $4H \rightarrow 1He$   
+ neutrinos + énergie  
par plusieurs étapes intermédiaires)



Fin de la séquence principale : cœur d'hélium  
inerte  $\rightarrow$  défaut d'énergie, donc de pression  
 $\rightarrow$  contraction du cœur

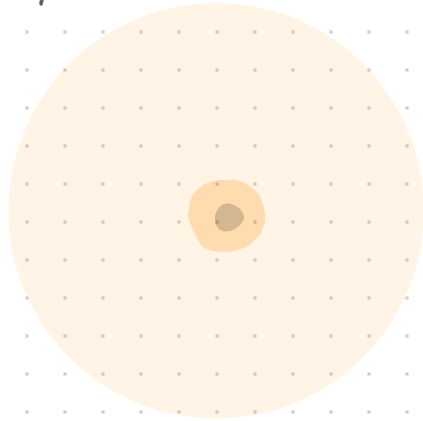
La contraction permet un réchauffement.

$\rightarrow H \rightarrow He$  en périphérie immédiate  
du cœur

H partiellement  
converti en He

enveloppe : composition  
comme à la naissance

Fin de la  
séquence  
principale



Taille  $\times 100$

Autour du cœur  
compact, inerte,  
la quantité d'H  
transformé en He  
par seconde  
augmente car

Géante rouge  
de la "branche des géantes"



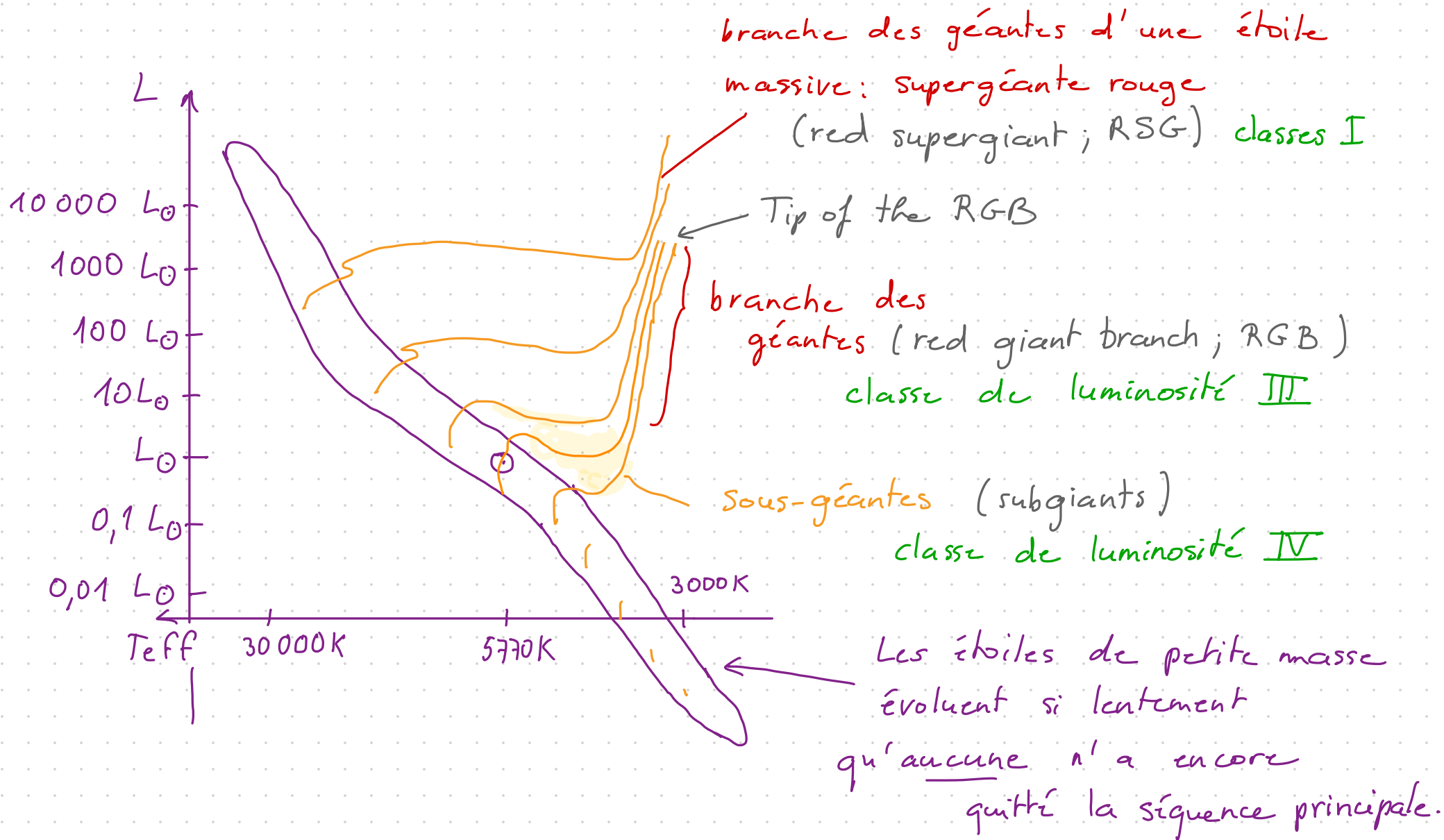
$T$  est plus élevée,  
dans une région un peu  
plus importante qu'avant.

→ L'étoile gonfle pour évacuer cette énergie

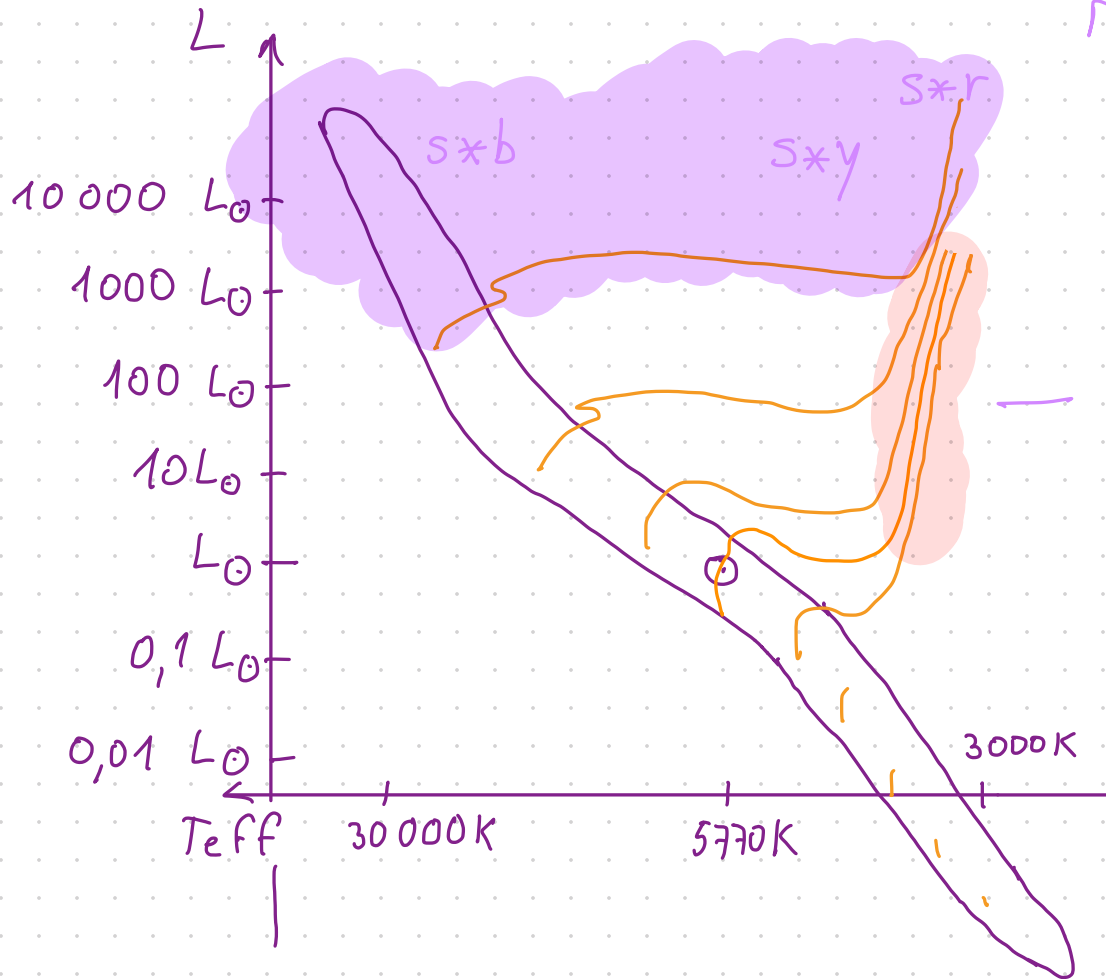
(ou plutôt : elle gonfle parce que la pression centrale est grande)

→ Sa surface devient plus froide

→ Sa luminosité est plus grande que sur la séquence principale.



Simbad

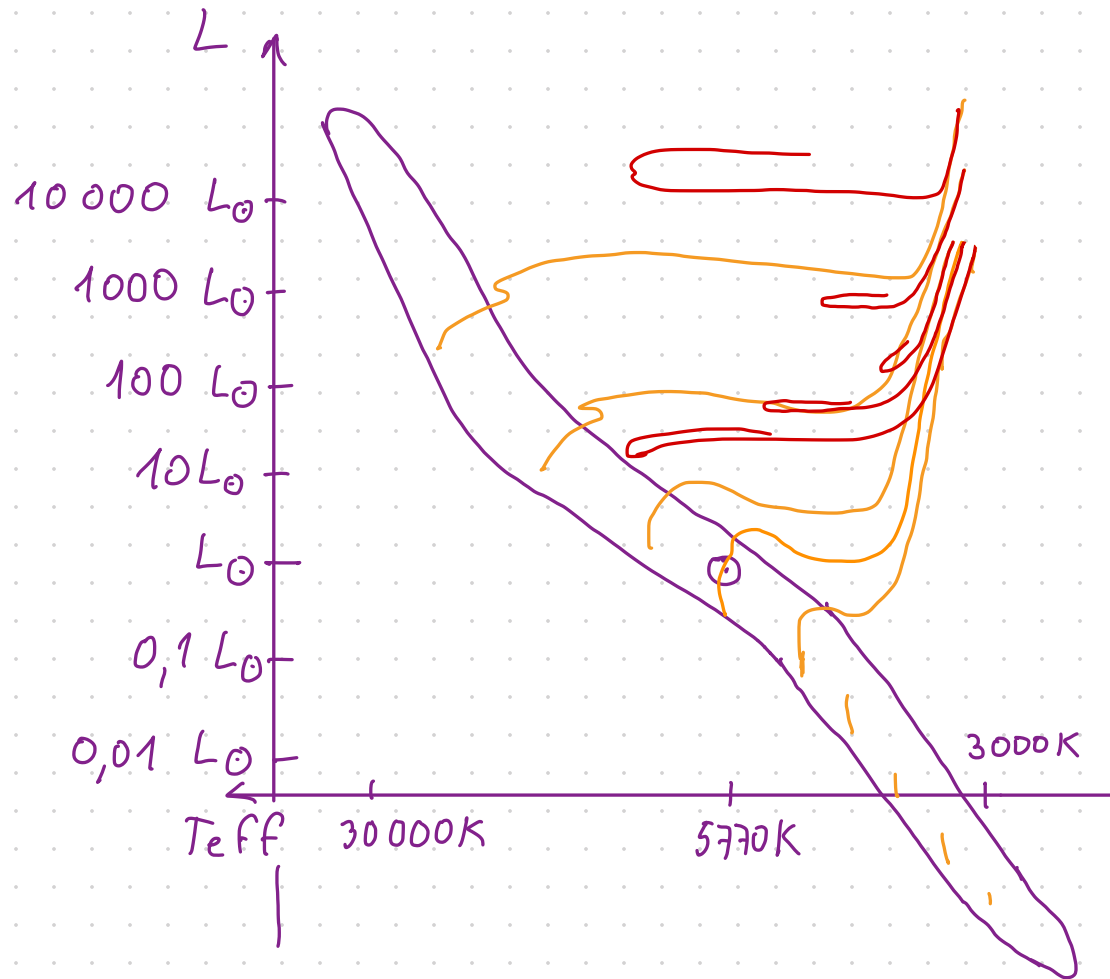


Massive stars :  $M_{*}$   
( $M > 8-10 M_{\odot}$ )

$\approx$  supergiant stars :  $sg*$

RG\*

Quand le cœur d'hélium est suffisant et assez chaud,  
 nouvelles réactions nucléaires:  $\text{He} \rightarrow \text{C}$  (carbone)  
 $\text{O}$  (oxygène)



(en fait  $3\text{He} \rightarrow 1\text{C}$   
 et  $\text{C} + \text{He} \rightarrow \text{O}$   
 + énergie et particules)

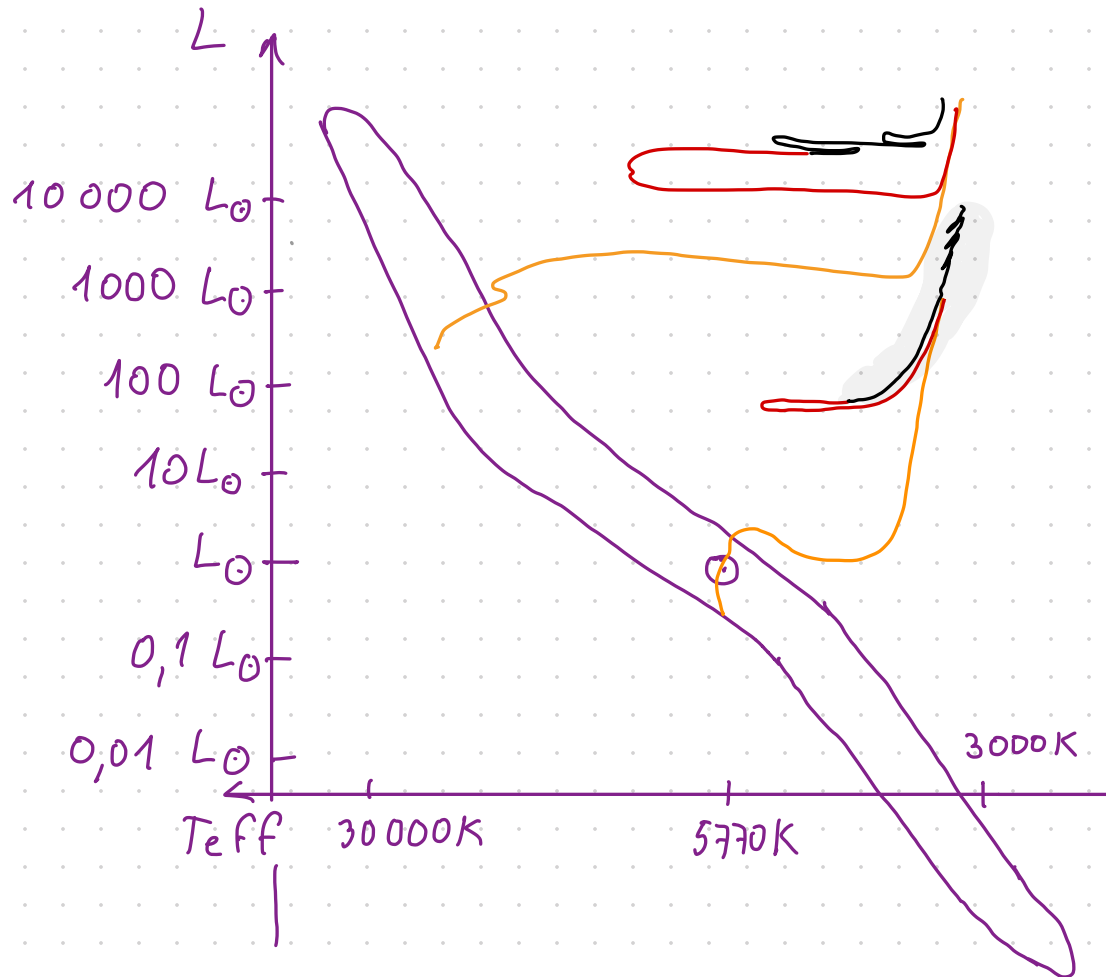
→ Nouvelle phase assez  
 longue: la branche  
horizontale

(Horizontal branch: HB;  
 red clump)

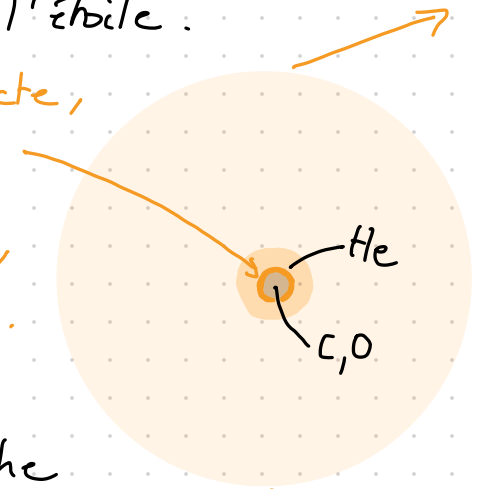
L'aspect dans le diagramme  
 n'est pas toujours horizontal.



Fin de la branche horizontale : hélium épuisé dans le centre de l'étoile.



Le cœur se contracte,  
 $\text{He} \rightarrow \text{C, O}$  en  
 périphérie du cœur,  
 l'enveloppe s'étend.

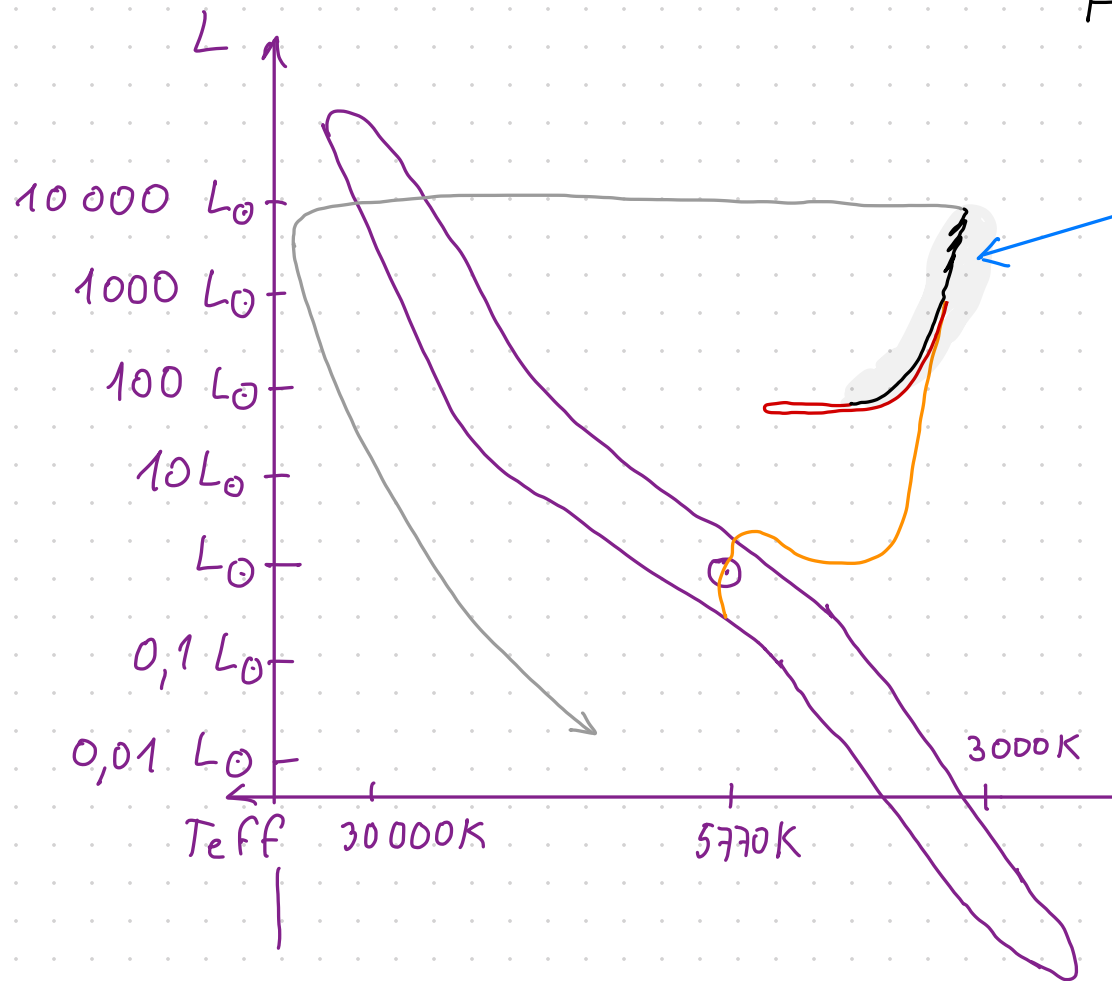


C'est la branche  
asymptotique des géantes  
 (asymptotic giant branch ; AGB.)

Deux parties :

- Early AGB (E-AGB)
- Thermally pulsing AGB (TPAGB)

Etoiles massives : comportement plus complexe.



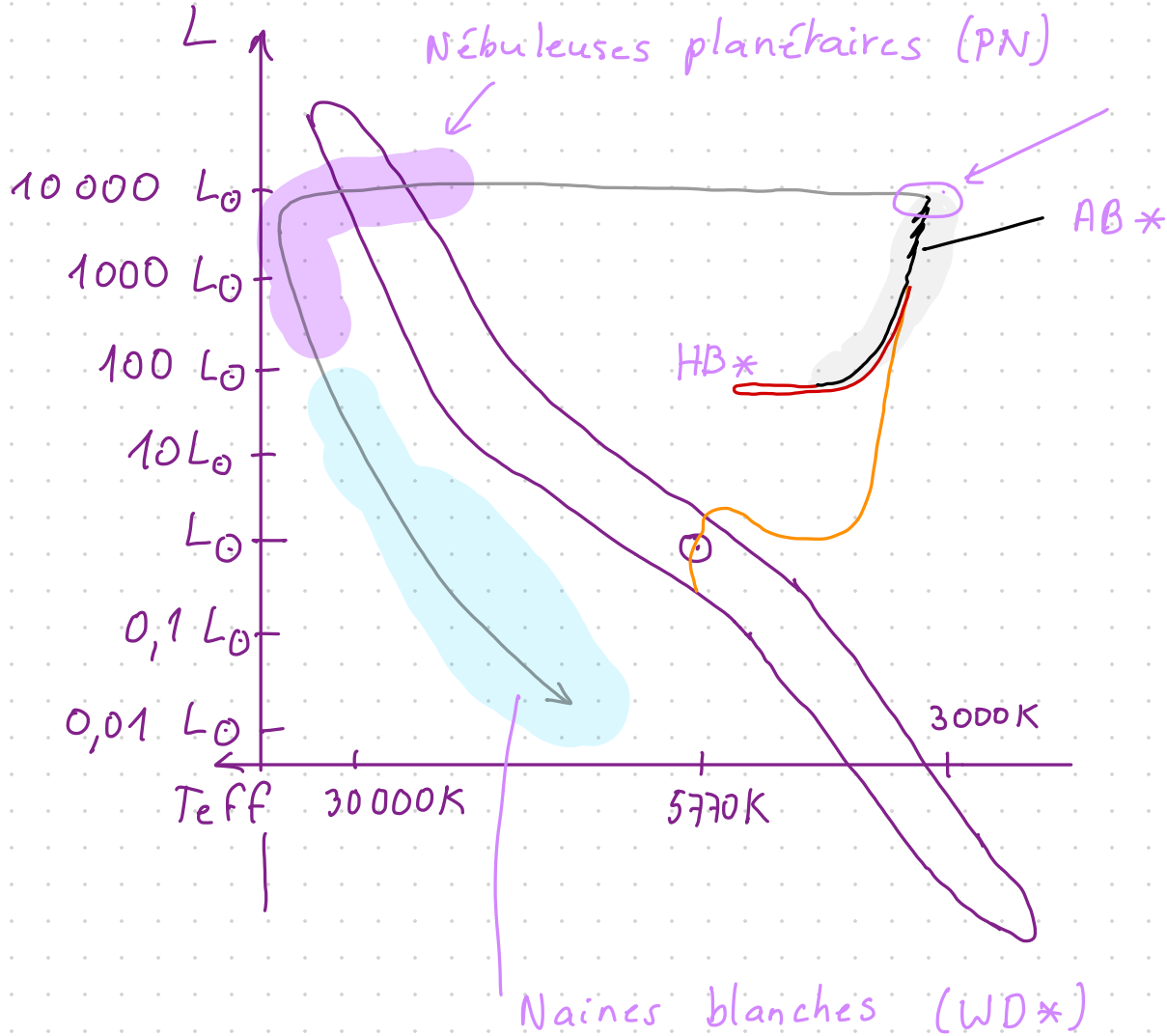
Fin de vie des étoiles de masses faibles et intermédiaires ( $< \sim 8 M_{\odot}$ ):

- pulsés thermiques : alternance entre  $H \rightarrow He$  et  $He \rightarrow C, O$  dans les régions centrales, tous les  $\sim 10\,000$  ans.
- pulsations de l'enveloppe : variations de luminosité, taille,  $T_{eff}$  en cycles de 100 - 1000 jours. ("long period variables"; LPV; "Miras" si la variation est grande)
- Parfois transformation en étoile S puis étoile carbonée

- Vents stellaires riches en poussières et molécules diverses (parfois OH/IR)
  - Nébuleuse planétaire (planetary nebula; PN)
  - Naine blanche (white dwarf; WD)

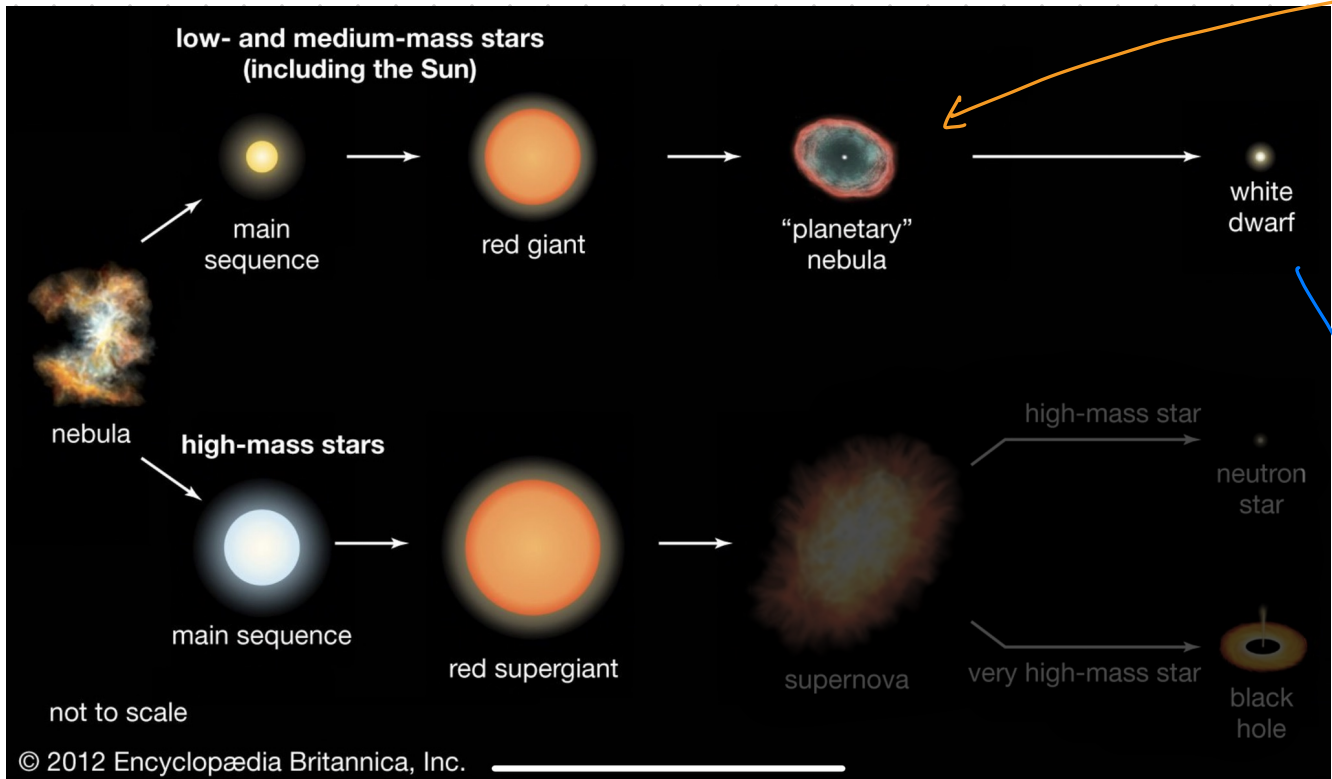
Simbad :

Nébuleuses planétaires (PN)



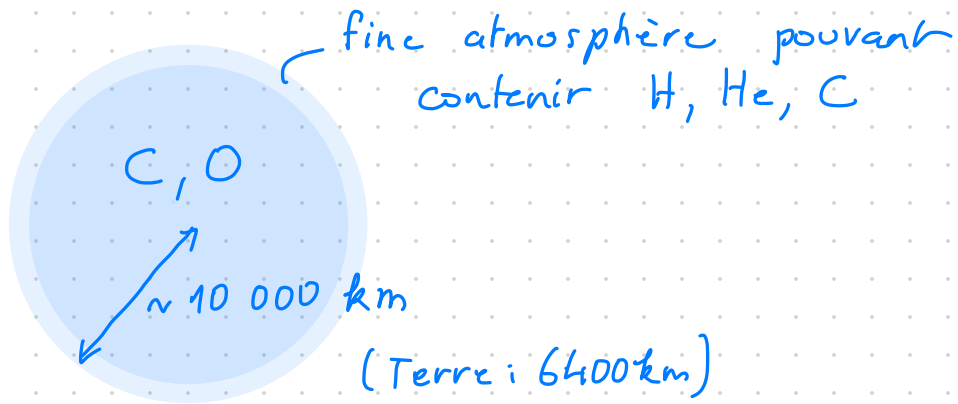
Si une étoile passe par le stade OH/IR, cela se passe ici (OH\*)

La majorité des S\*, C\* sont sur la branche asymptotique (AB\*)

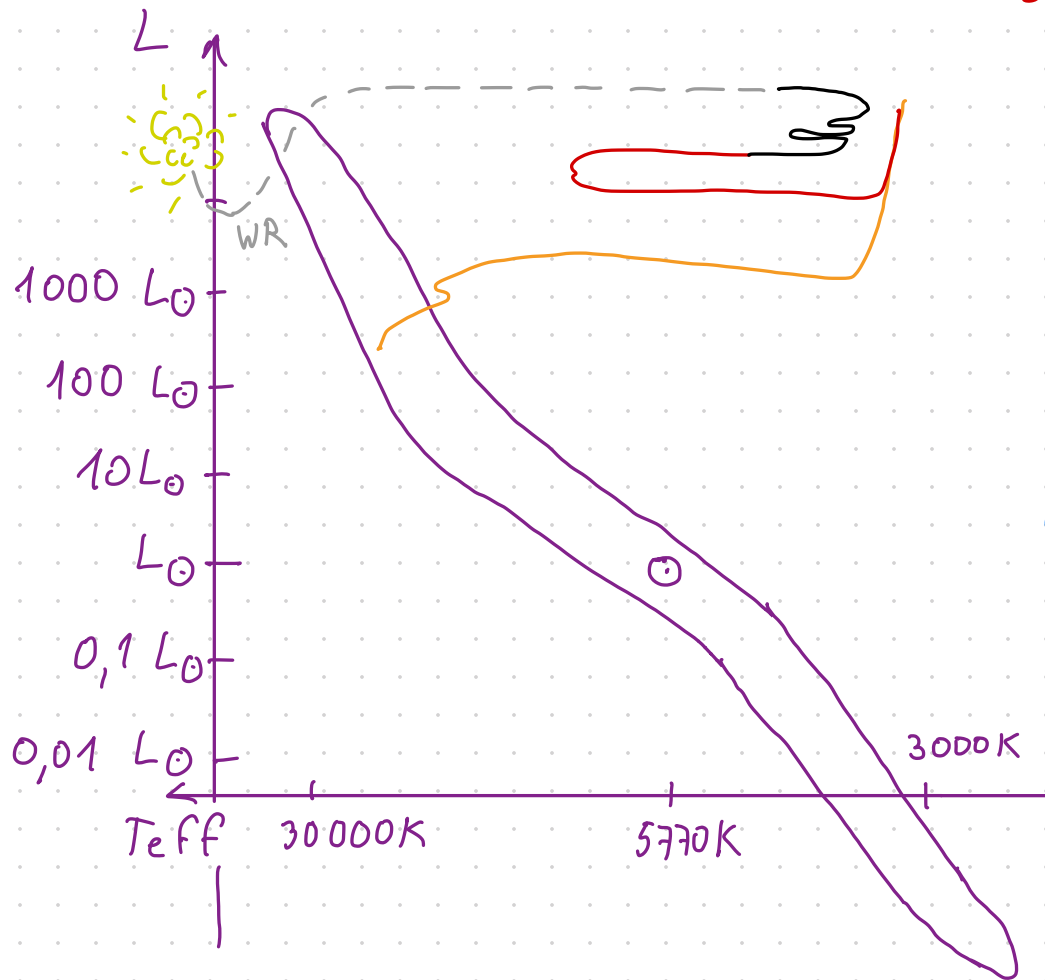


La nébuleuse planétaire est constituée de gaz dilués, excités par l'ancien cœur stellaire mis à nu (chaud!).

La naine blanche est un "objet compact": masse du soleil mais taille de la Terre (approx.)



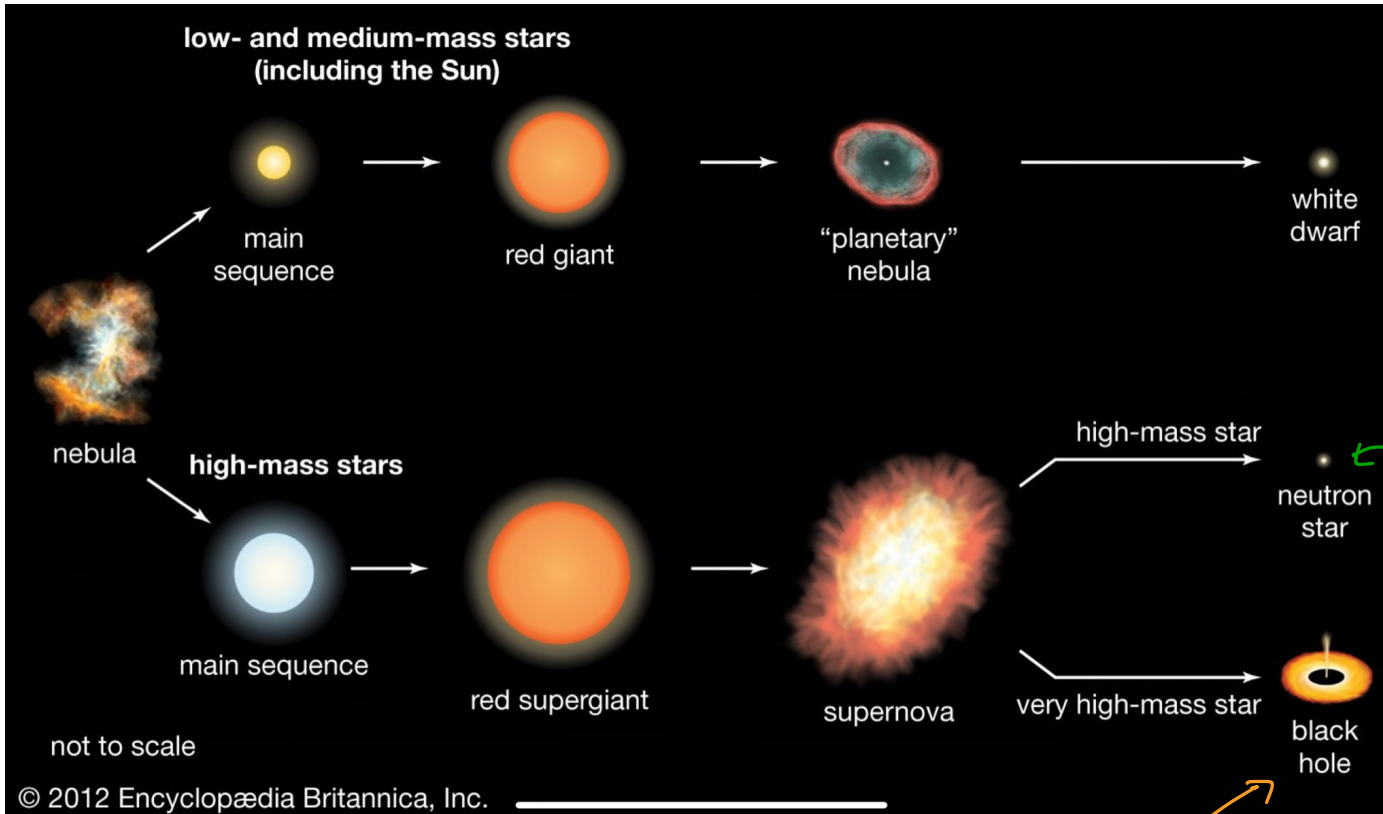
Pas de réactions nucléaires  
 → refroidissement progressif  
 → la pression qui assure la stabilité vient de phénomènes quantiques (ok à basse températures)



Etoiles massives : des évolutions variées conduisent à une explosion en supernova (SN II, SN Ib, SN Ic mais pas SN Ia.)

Ces étoiles très lumineuses ont des vents puissants. Parfois ceux-ci dégagent le cœur chaud qui devient visible : étoile de type Wolf-Rayet (WR star)

[confusion possible avec certains coeurs de nébuleuses planétaires]



Une supernova peut former : - une étoile à neutrons

- un trou noir

- rien du tout

Objet très compact :  
masse du soleil  
dans  $\sim 10$  km.

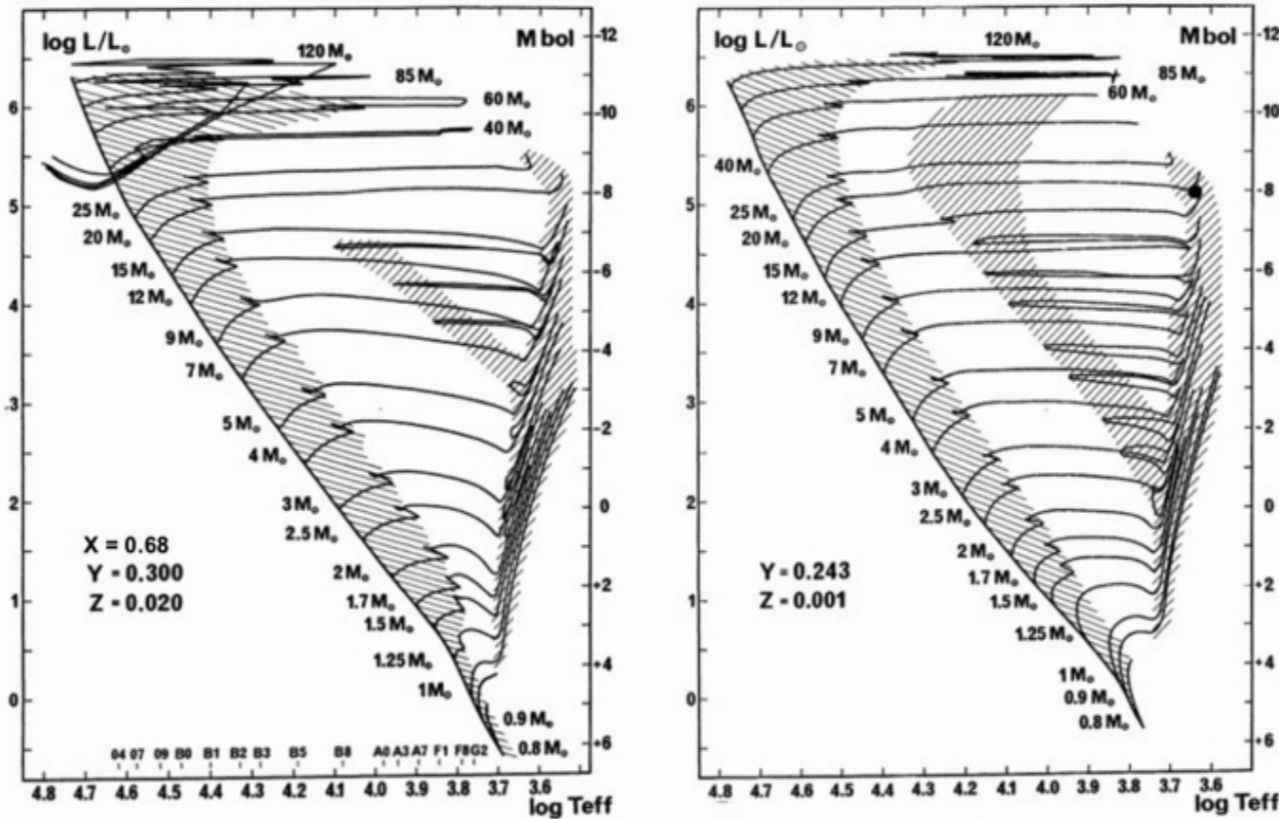
Constitué surtout de  
neutrons ( $p + e^- \rightarrow n$ ).  
Densité  $\sim 10^9$  tonnes/cm<sup>3</sup>.

Trou noir : objet plus petit que son "Rayon de Schwarzschild"

$$(R_{Sch} = \frac{2GM}{c^2} ;$$

3 km pour le soleil → si le soleil était comprimé dans moins de 3 km de rayon, il serait un trou noir)

Les étoiles massives évoluent vite ( $< 100$  millions d'années)  
 Les étoiles peu massives évoluent lentement ( $\sim 9$  milliards d'années pour le soleil)



composition  $\sim$  solaire

moins de "métaux"

La composition chimique change un peu l'évolution.

Phases hachurées  
 = les plus longues

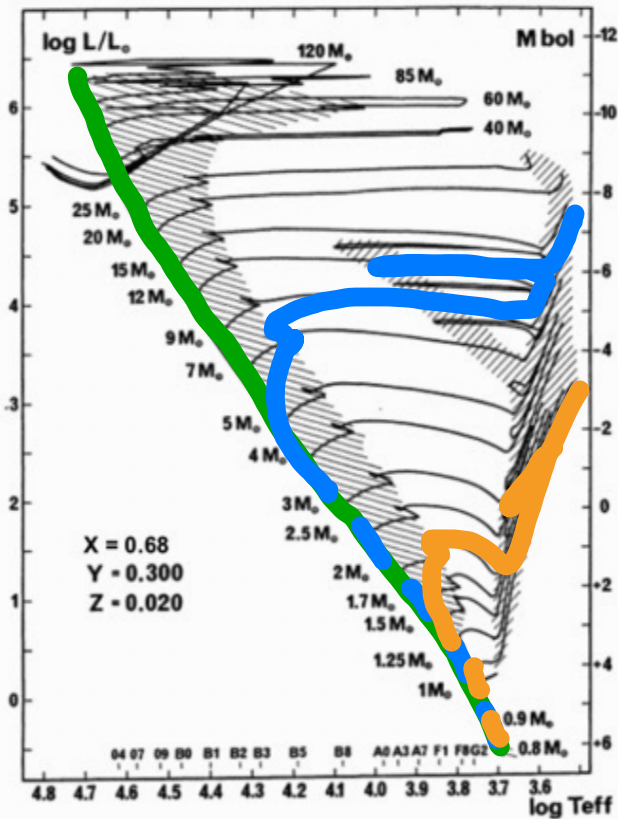
Séquence principale :  
 $\sim 90\%$  de la vie  
 stellaire

Autres phases hachurées :  
 $\sim 10\%$

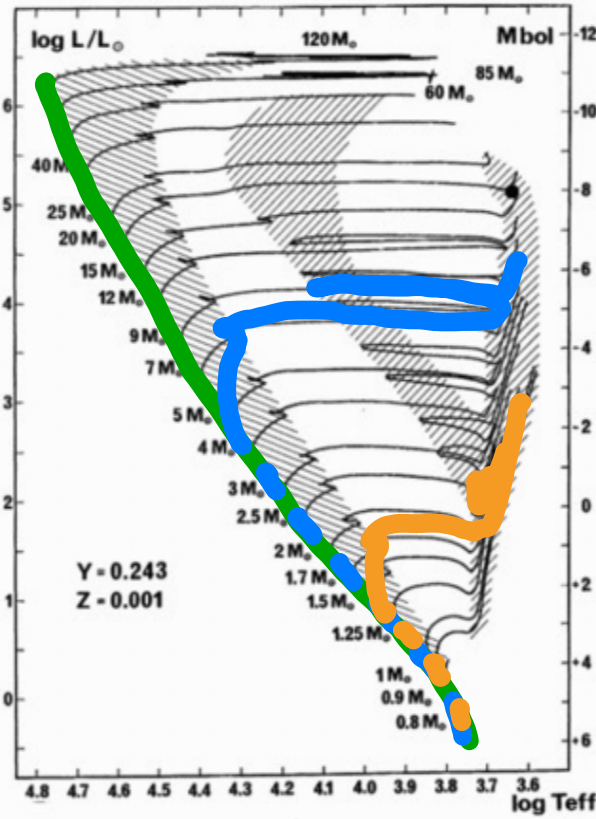
Le reste : très court

[NB: comme souvent, les branches horizontales pour les petites masses ne sont pas représentées]

Quand une galaxie a un épisode de formation d'étoiles, elle forme des étoiles de toutes les masses possibles.  
 Ces étoiles vieillissent ensuite. Les plus massives évoluent et meurent vite.



composition  $\sim$  solaire



composition adaptée aux petites galaxies

→ Isochrones = lieux des étoiles ayant un âge donné  
 "Zero age main sequence"

[ici: sans prendre en compte la pré-séq. principale]

— Âge  $\sim$  100 millions d'années

— Âge  $\sim$  2 milliards d'années