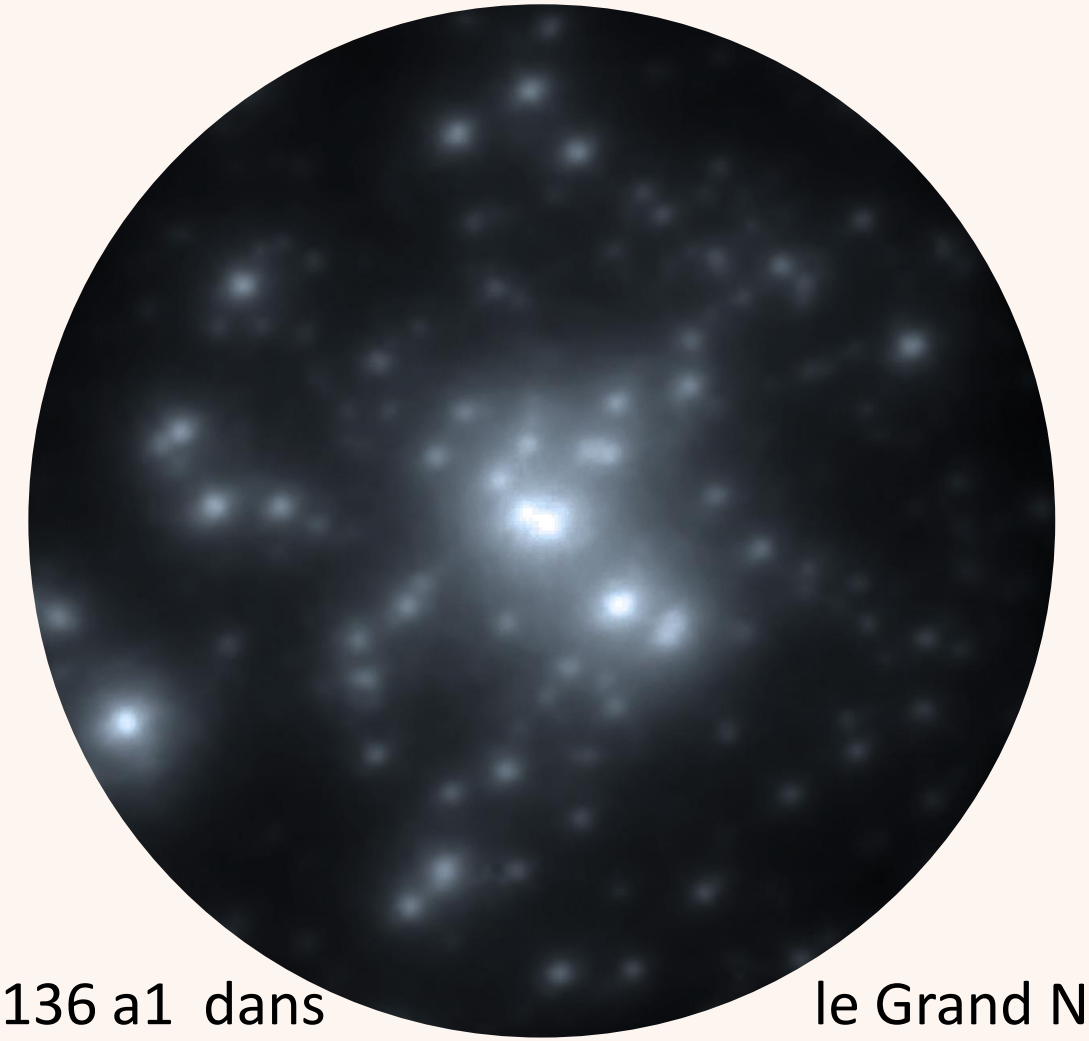
A propos des étoiles



Nicole Arthaud,
10 mars 2023

R136 a1 dans le Grand Nuage de Magellan

$170\ M_\odot < M < 230\ M_\odot$

Avant de commencer…

- Ceci est une présentation de niveau débutant, faite par une débutante. Rectifications ou compléments bienvenus.
- Il y aura beaucoup de simplifications et de généralisations, sachez-le.
  - La première partie parle des propriétés visibles des étoiles et de leurs causes,
  - La seconde de quelques phénomènes cachés
  - La troisième suit l'évolution de deux étoiles, une moyenne et une grosse.
- Ca se fera en deux fois.
- Pour aborder en douceur le sujet à partir de zéro : site astronomia.fr (vie des étoiles), merci à l'auteur **Jacques Gispert**. Les diagrammes sur fond vert pâle lui sont dus.

La prédestination des étoiles

La vie prénatale des étoiles en accéléré

https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2021/hubble-spots-a-cosmic-cloud-s-silver-lining

- Tout commence avec un gros nuage en rotation lente, composé de gaz moléculaires et de poussières.

- Sous certaines conditions, son **équilibre se rompt :**
  - onde de choc de supernova,
  - passage dans une zone dense …

- Le nuage commence à s**'effondrer** par paquets successifs sous l'action de la gravité, il produit de **multiples protoétoiles.**

La carte génétique de la protoétoile

Elle se compose de deux paramètres :

- M, la **masse initiale** du nuage, exprimée en fonction de la masse du soleil, notée $M_\odot$
- la **métallicité du nuage**, dont on va parler.

Le cycle de vie de l'étoile à venir se déduit de ces deux paramètres (**Théorème de Vogt-Russell**), enfin à peu près …

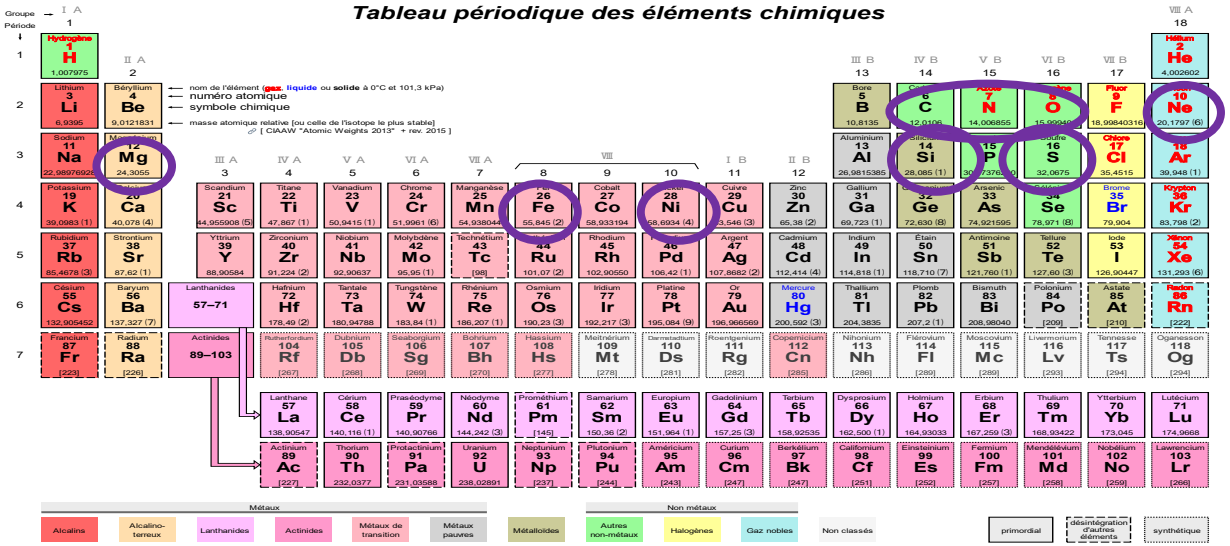
Le monde des étoiles est très organisé !

Heinrich Vogt
1890-1968
astronome allemand

Henry Norris Russell
1877-1957
astronome américain

La métallicité

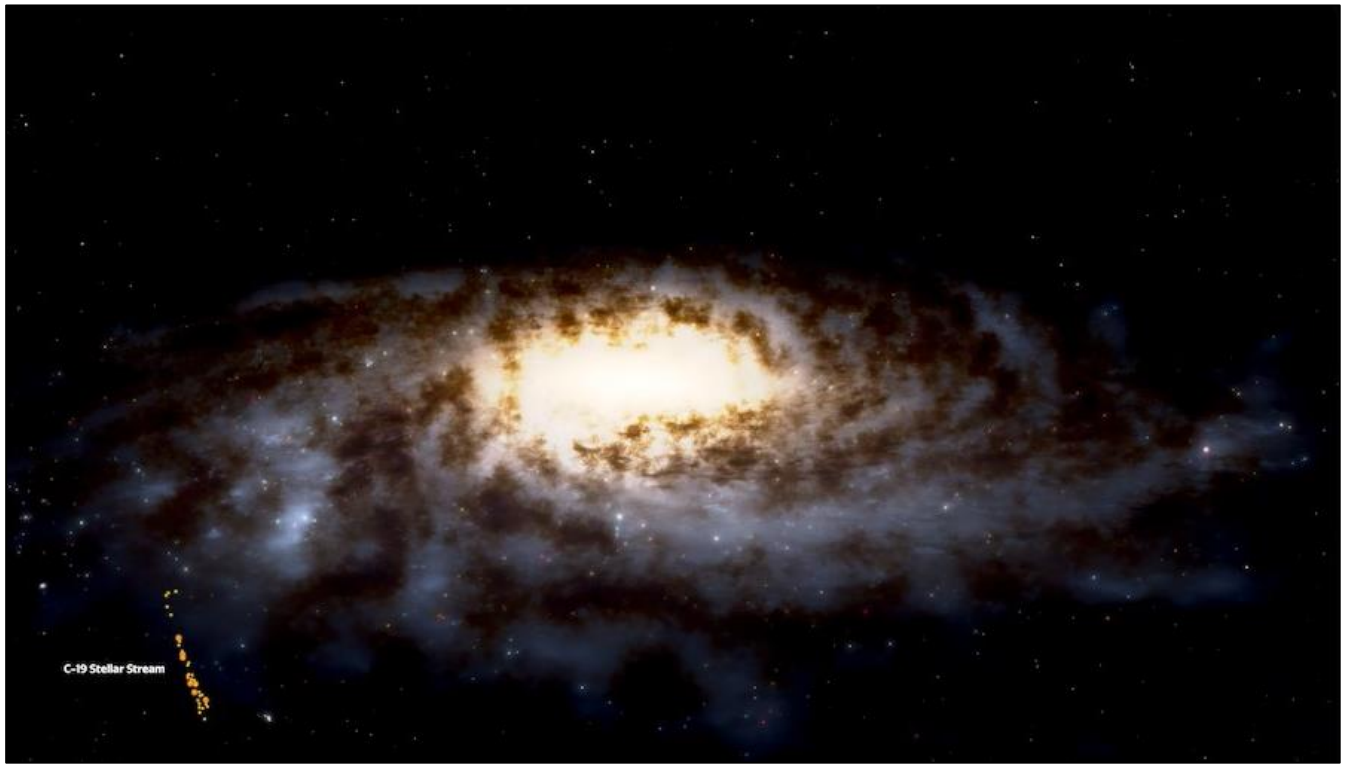
- Juste après le Big Bang le milieu interstellaire était composé d'environ trois quarts d'hydrogène et d'un quart d'hélium, les deux éléments les plus légers.

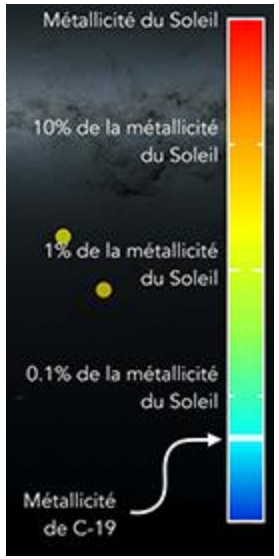


Le Soleil est composé à 98,5% d'hydrogène et d'hélium et à 1,5 % d'autres éléments plus lourds tels que le carbone, l'oxygène, le fer.

- Au fil du temps, les étoiles ont synthétisé des éléments plus lourds, que les astrophysiciens appellent des métaux. Elles les ont dispersés dans des *supernovae* par exemple.
- On distingue les étoiles de forte métallicité (cas du soleil) et de faible métallicité.
- La métallicité induit des réactions de fusion différentes.

Découverte de la structure stellaire la moins « métallique » de la Voie Lactée





05/01/2022

© N. Martin/Observatoire astronomique de Strasbourg/CNRS ; Canada-France-Hawaii Telescope / Coelum; ESA/Gaia/DPAC

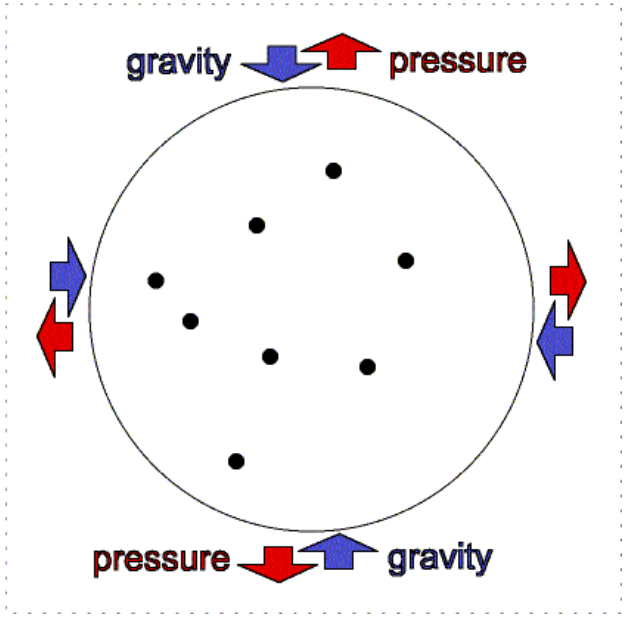
Les corps proches en composition du mélange initial sont en principe très anciens à supposer que tout soit bien brassé.
Très anciens + visibles aujourd'hui => très lointains.

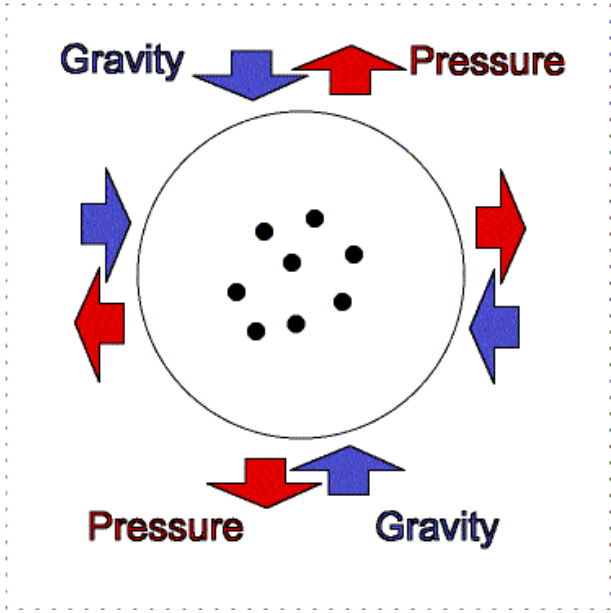
Les composantes de l’équilibre des étoiles, entre contraction et expansion

pression d’origine gravitationnelle
pression thermonucléaire
pression quantique

La pression thermique d'origine gravitationnelle

- De M, la masse du nuage, se déduit la **gravité de surface.** Le poids du nuage tend à le **contracter.** La gravité de surface augmente …
- La **contraction** libère une **énergie gravitationnelle** ce qui élève la **température T** du centre du nuage.
- La température agite les particules et crée une **pression thermique** qui **ralentit la contraction**.
- Cette pression thermique dure tant qu'il y a contraction et cesse dans les périodes d'équilibre.





https://www.astronomynotes.com/starsun/s7.htm

La pression due aux réactions thermonucléaires

Au départ, elles se déclenchent au cœur de l'étoile à partir de seuils de température, eux-mêmes atteints à partir de seuils de masse.

Production de particules de plus en plus lourds mais de moins en moins nombreuses

Types de fusion nucléaire	Seuil de Température au centre (en millions de degrés)	Seuil de Masse En $M_\odot$
deuterium => hélium	1 MK	0,008
hydrogène => hélium	10 MK	0,08
hélium => carbone, oxygène	100 MK	0,8
carbone => magnésium, oxygène, néon	800 MK	3
oxygène => soufre, silicium	1000 MK	5
néon => magnésium, oxygène	1200 MK	8
silicium => nickel, fer	2000 MK	15

De moins en moins d'énergie produite

De plus en plus rapidement

La fusion du fer consomme plus d'énergie qu'elle n'en produit

=> le fer ne fusionne pas

Ces réactions produisent une pression thermonucléaire suffisante pour s'opposer à la contraction => équilibre … tant qu'elles durent ! Les excès d'énergie sont dispersés autour.

Les réactions thermonucléaires différencient les étoiles et les objets de « type planétaire ».

Atteint 1 MK
deuterium => hélium

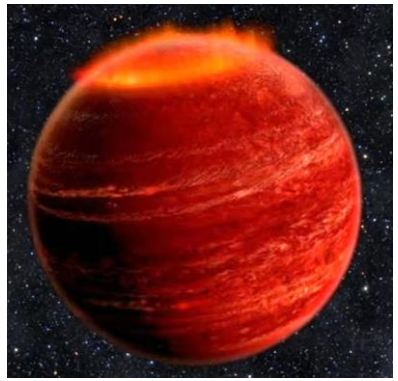
Atteint 10 MK
hydrogène => hélium

Objets de type planétaire

Jupiter
M=env. 0,001 $M_\odot$

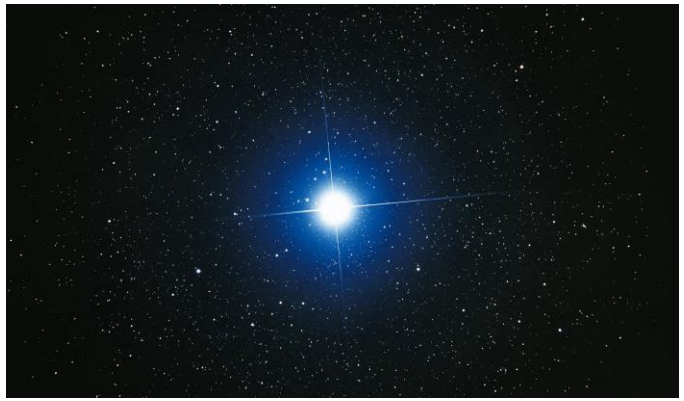
Objets de type substellaire

La naine brune LSRJ
1835+3259, vue d'artiste



Etoiles

Sirius



0,008 $M_\odot$

0,08 $M_\odot$

Masse initiale M

James-Webb. © Nasa, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; image processing by Judy Schmidt.

. © Chuck Carter Gregg Hallinan, Caltech

© Akira Fuji

Pression de Fermi ou pression quantique

Quand le cœur de l'étoile est « dégénéré » par une très forte densité, les électrons que la contraction tend à rapprocher se fuient les uns les autres de plus en plus vite.

Ceci crée **une pression** qui ne provoque **ni augmentation de température, ni augmentation de volume.**

Elle peut équilibrer la contraction.

L'étoile peut donc atteindre **l'équilibre de Fermi,** très durable. C'est le cas pour les naines blanches d'hélium ou de carbone, et pour les étoiles à neutrons qu'on verra plus tard.

Enrico Fermi
1901-1954
Prix Nobel 1938
Physicien italo-américain

Les limites de la pression de Fermi

MAIS les électrons ne peuvent dépasser la vitesse de la lumière.

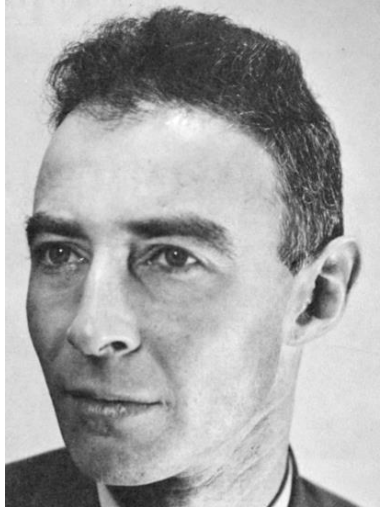
La pression de Fermi atteint alors sa limite. Cela correspond à la **masse de Chandrasekhar,** soit 1,4 $M_\odot$.

De même pour les neutrons avec la masse limite d'**Oppenheimer-Volkov**, soit 3 $M_\odot$.

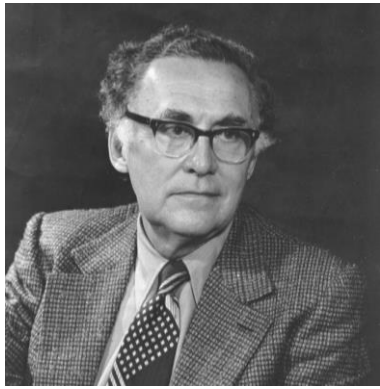
Il s'agit ici de masses à l'instant T. On ne sait pas très bien relier cette masse à la masse du nuage initial, car on ne maîtrise pas bien les déperditions de masse durant la vie de l'étoile.

L'équilibre de Fermi ne peut se produire que si cette limite n'est pas atteinte. Si c'est le cas, la contraction reprend sauf si un phénomène extérieur intervient.

R. Oppenheimer
Prix Enrico-Fermi
1963



George Volkoff
(1914-2000)
Physicien
russo-canadien

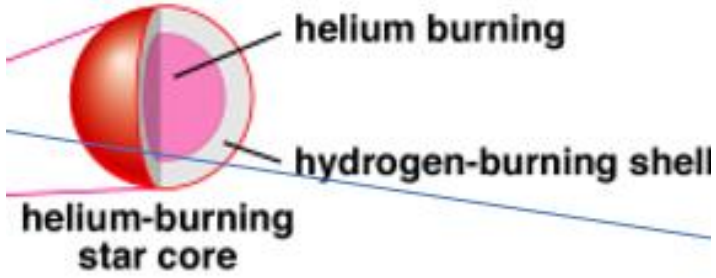


Subrahmanyan
Chandrasekhar
1910-1995
Prix Nobel 1983
Astrophysicien
indo-américain

Co existence des différents types de pression

Différents types de pression peuvent co-exister dans différentes zones de l'étoile si la matière et les températures sont devenues hétérogènes. Par exemple :

- Fusion simultanée de l'hydrogène et de l'hélium, mais pas au même endroit



- Matière dégénérée dans une zone et réaction nucléaire déclenchée dans une zone adjacente. La fusion élève alors la température et peut ramener la zone dégénérée à un état non dégénéré. En effet le taux de dégénérescence augmente
  - si la densité augmente
  - si la température baisse
- Le cœur peut se contracter (et se réchauffer) et le pourtour se dilater (et refroidir)..
- Le cœur peut être inerte et une coquille concentrique adjacente en fusion

Les phases de la vie d’une étoile

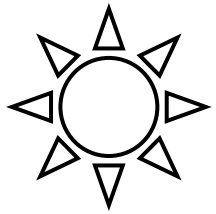
Alternance :

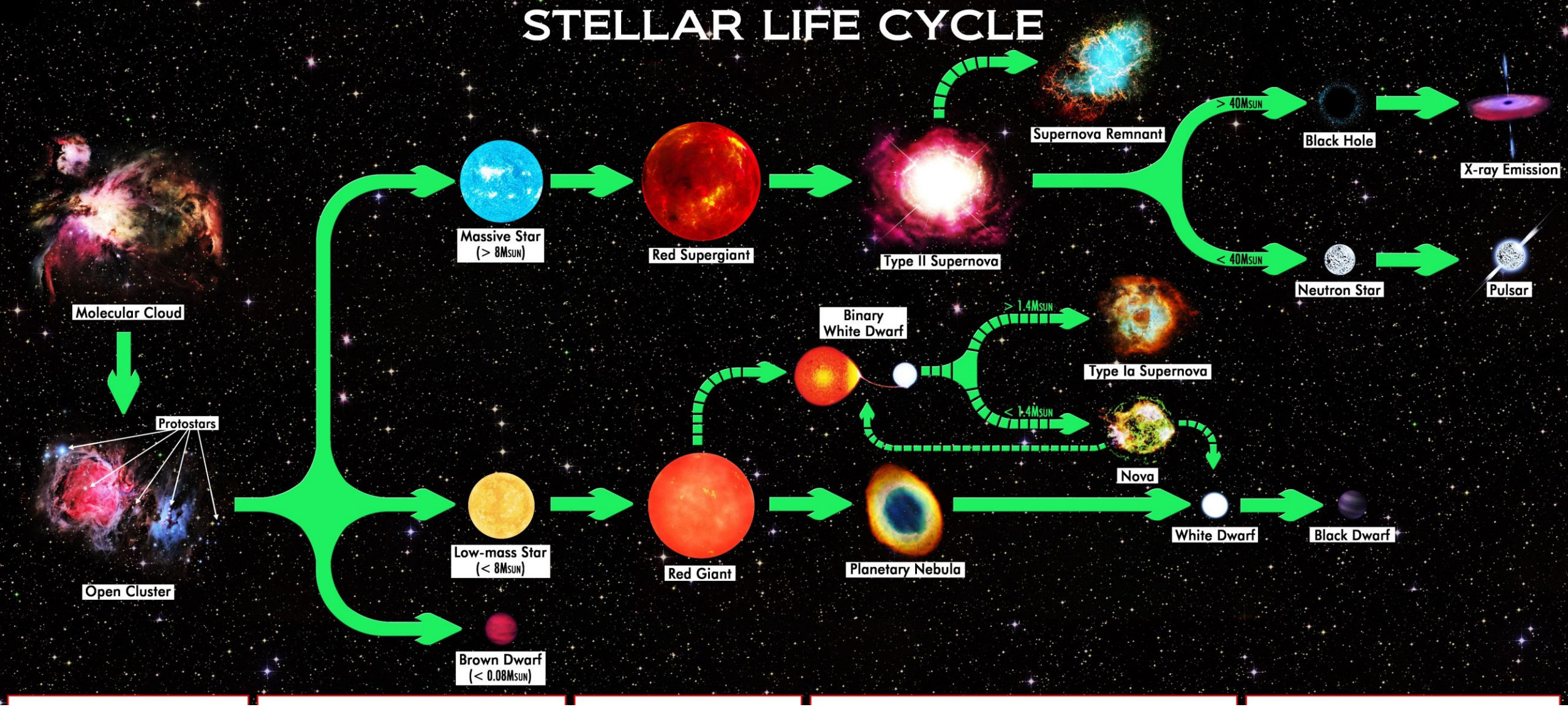
- rapides périodes de **transition**
- période(s) d’**équilibre** au cours desquelles les forces de contraction et d’expansion se compensent.

Pendant les phases de contraction la température du centre s’élève.

Le nombre de phases stables se déduit de la masse initiale du nuage. Il est limité par la présence du fer qui ne peut fusionner. Elles sont de moins en moins longues.

A la toute fin du processus trois situations possibles, mais plusieurs chemins pour y arriver :

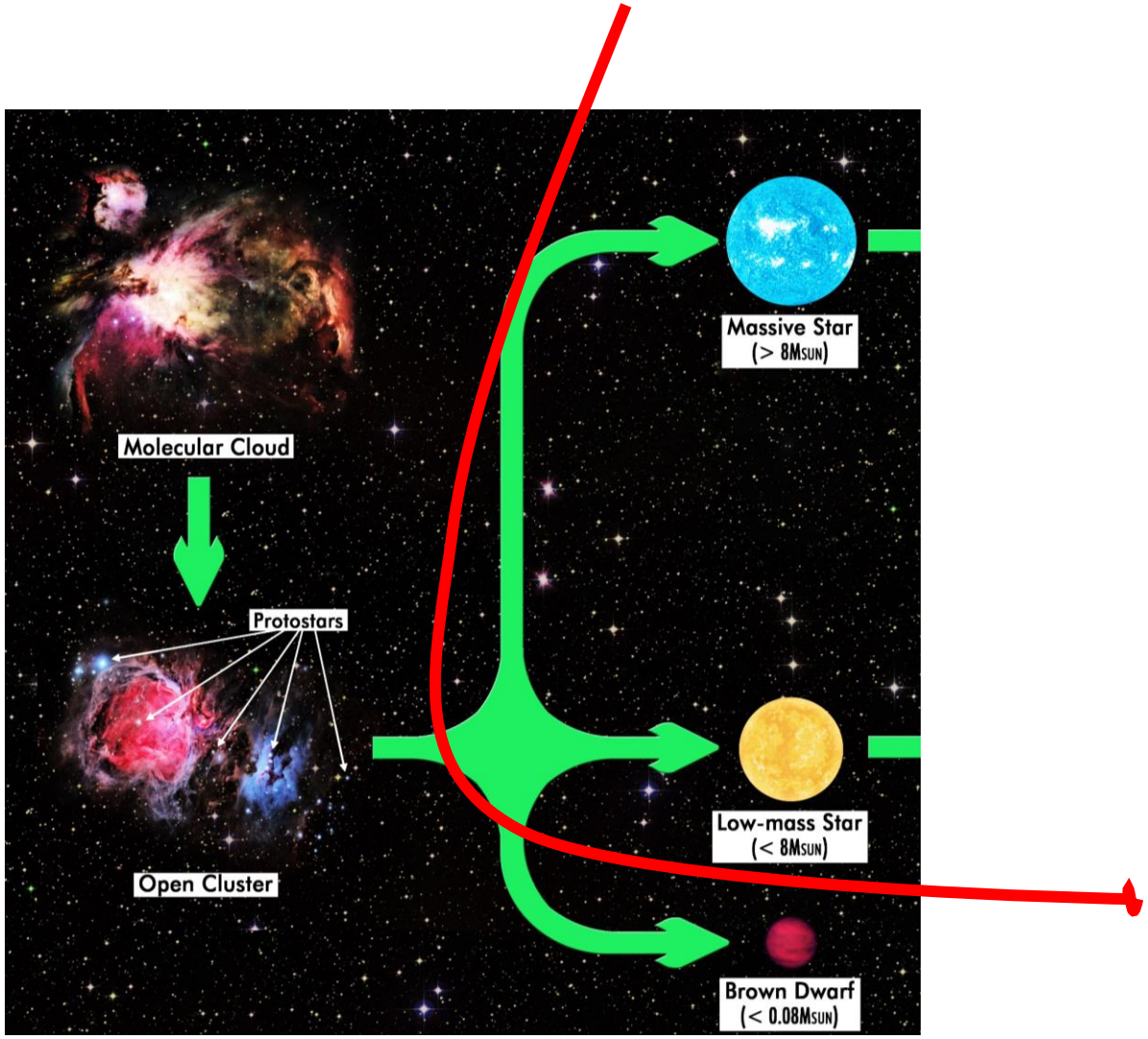
- contraction complète => trou noir
- équilibre de Fermi => naines blanches / étoiles à neutrons 
- désintégration => supernova



Vie prénatale | **Séquence principale** | **Vieillesse** | **Fin de vie** | **Dépouilles mortelles**

By R.N. Bailey - Own work, CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59672008

Moins que l’étoile …



La protoétoile
La naine brune

La proto-étoile

The Enduring Stellar Lifecycle in 30 Doradus
James Webb ST.

Effondrement du nuage de gaz, 10 à 100 millions de fois plus vaste que la future étoile.
La pression thermique gravitationnelle ralentit sa contraction. Elle se met à briller comme une braise.
Durée : quelques milliers d'années.

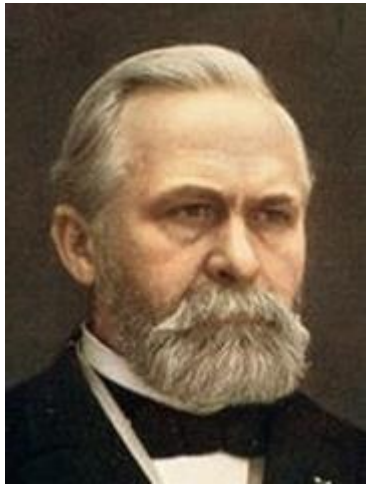
SOIT entrée en SEQUENCE PRINCIPALE (étoiles) si M > 0,08 $M_\odot$

SOIT le corps est une naine brune (objet substellaire)

Naine brune, plus qu'une planète, moins qu'une étoile

$M < 0{,}08\ M_\odot$

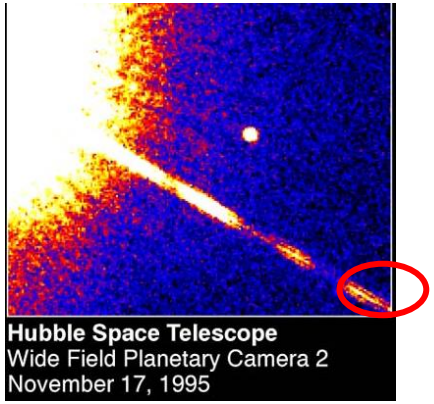
Le deutérium, isotope de l'hydrogène est présent en faible quantité dans l'univers, et donc dans la protoétoile.
Il fusionne en un peu d'hélium (1 MK lui suffisent !)
Ce corps substellaire brille faiblement.



Wilhelm Gleise, 1915-1993
Catalogue d'étoiles proches

Température de surface basse => couleur rougeâtre
Petite masse => petite taille

Gliese 229B



Les classifications des étoiles, sur la base des apparences

Par type spectral

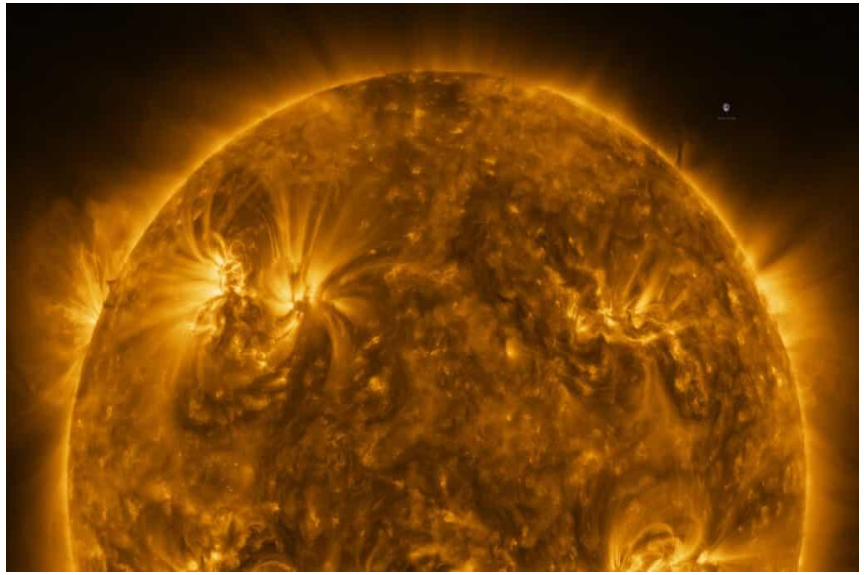
Par luminosité

Séquence principale (SP)

La SP est une **phase de la vie de l'étoile**, la première et la plus longue. Les 4/5 des étoiles visibles seraient en SP.

La SP est caractérisée par la **fusion de l'hydrogène dans le cœur (en hélium).**

Pendant la SP, l'étoile est en équilibre (rayon, température de surface relativement constants) : c'est la **pression thermique nucléaire** qui équilibre la contraction



Crédit : ESA

Quand le cœur de la protoétoile atteint **10 MK**

=> début de la fusion de l'hydrogène

=> **naissance** de l'étoile et entrée en SP

La fusion dégage des photons, l'étoile **brille**.

.

https://astrobackyard.com/types-of-stars/

Nomenclature des étoiles en séquence principale (SP)

MAIN SEQUENCE STARS

Age de l'univers : 13700 M années

Soleil

Spectral Type:	O	B	A	F	G	K	M
Temperature:	40 000K	20 000K	8500K	6500K	5700K	4500K	3200K
Radius (Sun=1):	10	5	1.7	1.3	1.0	0.8	0.3
Mass (Sun=1):	50	10	2.0	1.5	1.0	0.7	0.2
Luminosity (Sun=1):	100 000	1000	20	4	1.0	0.2	0.01
Lifetime (million yrs):	10	100	1000	3000	10 000	50 000	200 000
Abundance:	0.00001%	0.1%	0.7%	2%	3.5%	8%	80%

M

De droite à gauche, couleurs conventionnelles :

rouges, oranges (petites)
jaunes, blanc-jaunes, blanches (moyennes)
bleu-blanches et bleues (massives)

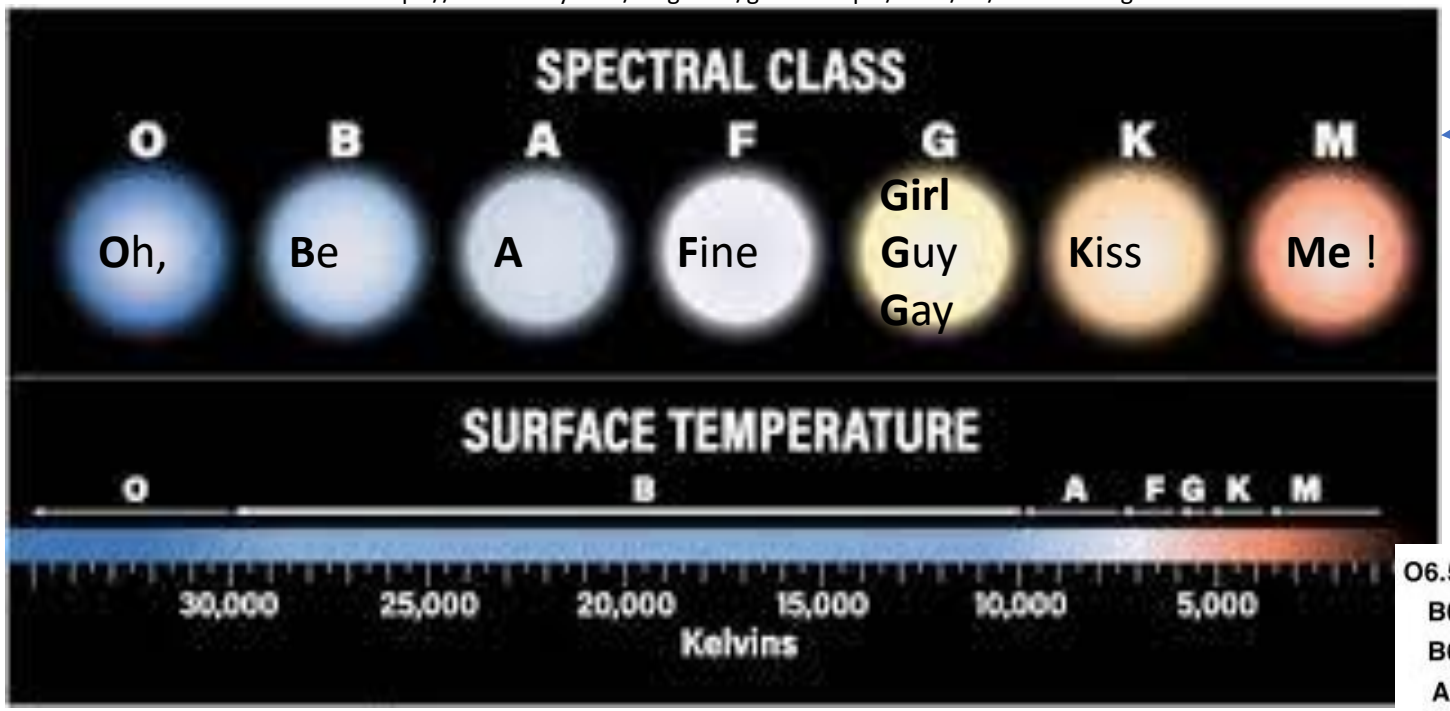
Pour les étoiles de la SP,

La masse initiale
la température de surface
le rayon
la luminosité

croissent en même temps.

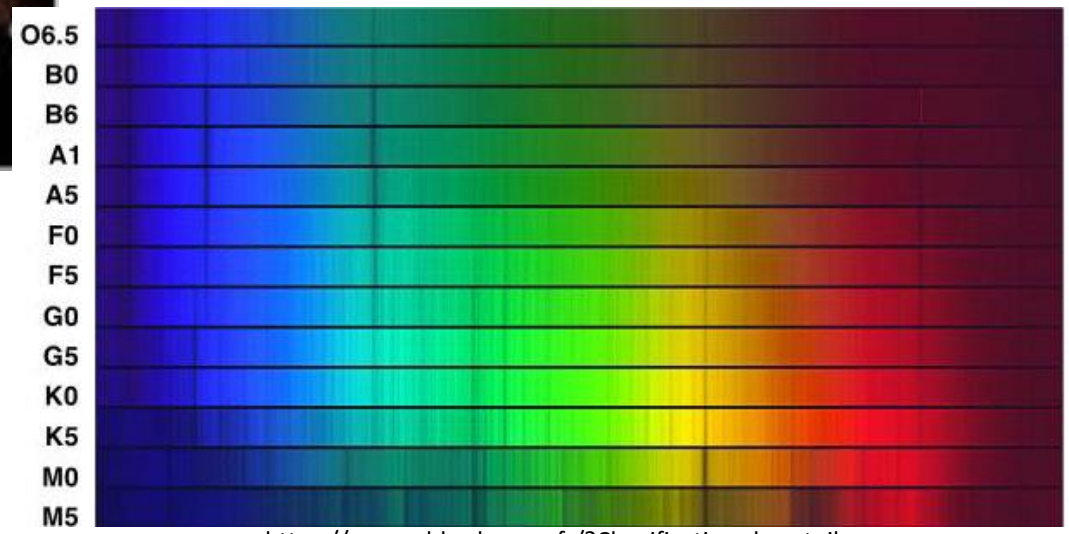
Un bref mot sur les types spectraux …

https://astronomy.com/magazine/glenn-chaple/2021/04/color-coding-stars



Ce sont les types spectraux qui permettent de connaître la température de surface des étoiles **même hors SP.**
Ils donnent lieu à une classification des étoiles (au faciès).

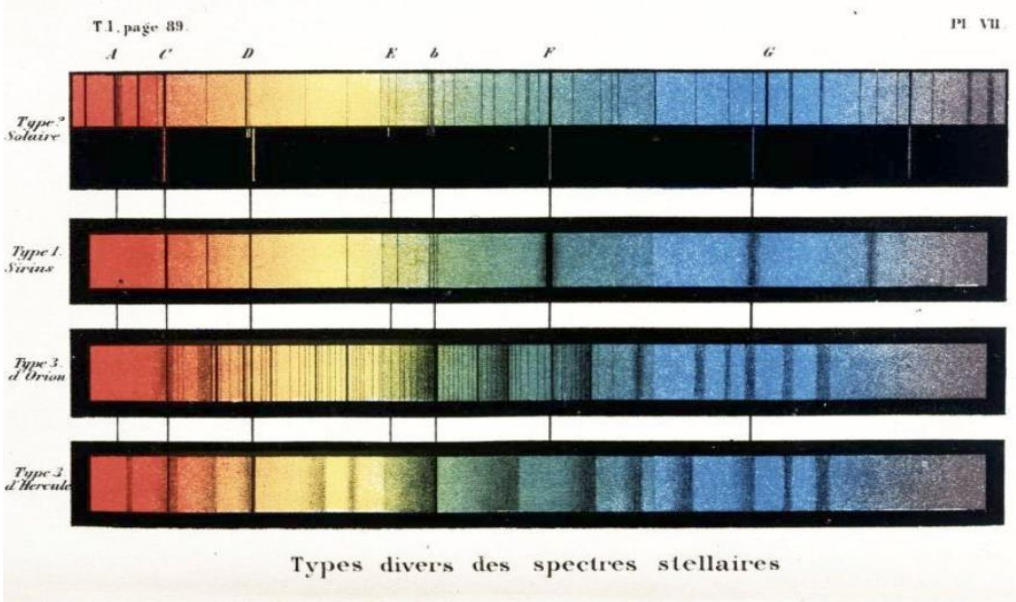
Le code-barre des étoiles



https://www.old.cala.asso.fr/?Classification-des-etoiles

Aux types sont associés des sous-types, de 0 à 9, du plus chaud au plus froid.

La minute culturelle

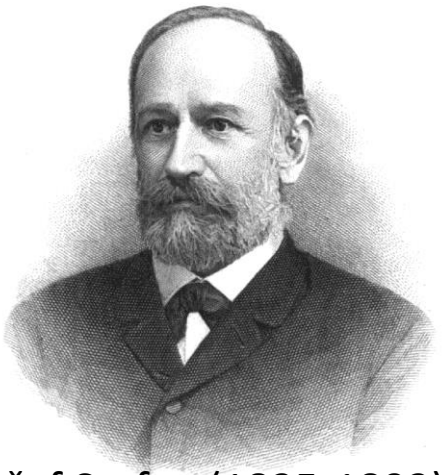


La Lumière pour Goûter les Planètes - CultureSciences-Chimie
https://culturesciences.chimie.ens.fr
Crédit : Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Père Angelo Secchi
1818-1878

Eglise saint Ignace de Loyola

Lien entre température, rayon et luminosité



Jožef Stefan (1835-1893)
physicien slovène.

En SP deux étoiles ayant même température auront même rayon et même luminosité (énergie rayonnée par surface totale par unité de temps) etc…

Mais les étoiles, hors SP, ne répondent plus à cette correspondance biunivoque

Une bonne **approximation** de la relation entre les trois grandeurs est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann

$$\textbf{Luminosité} = (4\,\pi\ \textbf{Rayon}^2)(\textbf{Température}^4)(\boxed{\sigma})$$

Leur constante

Ludwig Boltzmann (1844-1906)
physicien autrichien

Donc à température égale, le rayon n'est pas fixé, la luminosité non plus.

Le diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

Ce diagramme permet de situer une population d'étoiles visibles aujourd'hui, grâce à leur température et leur luminosité.

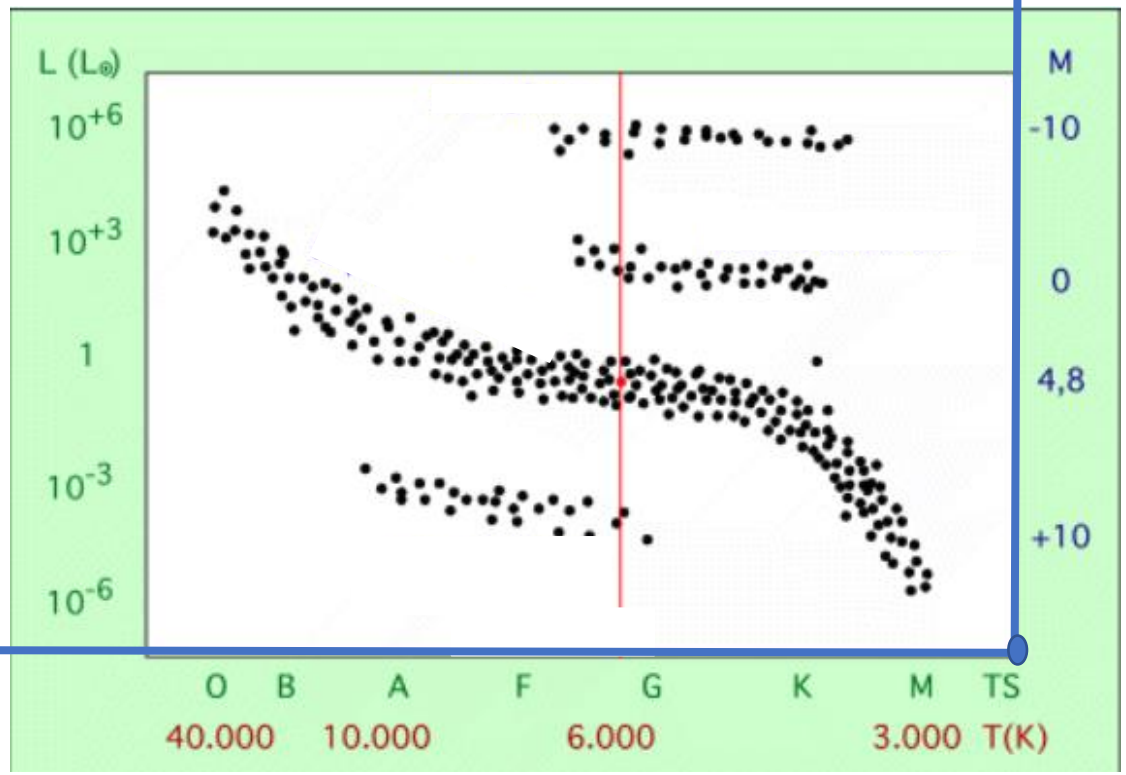
Sur l'axe horizontal les températures (ou de façon équivalente les types spectraux)

Sur l'axe vertical les luminosités croissantes (exprimées en multiples de la luminosité du soleil, $L_\odot$, ou en magnitudes absolues)

Ejnar Hertzsprung
(1873-1967)
chimiste danois

Population : étoiles visibles aujourd'hui

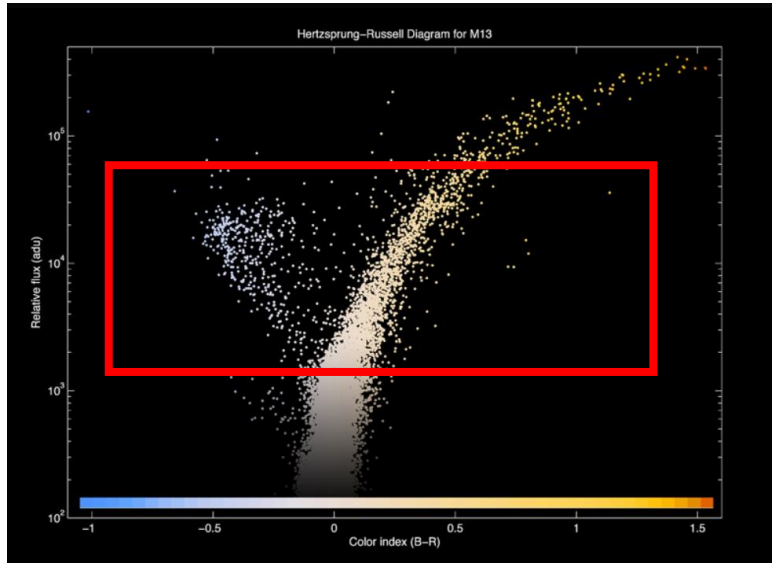
Luminosité



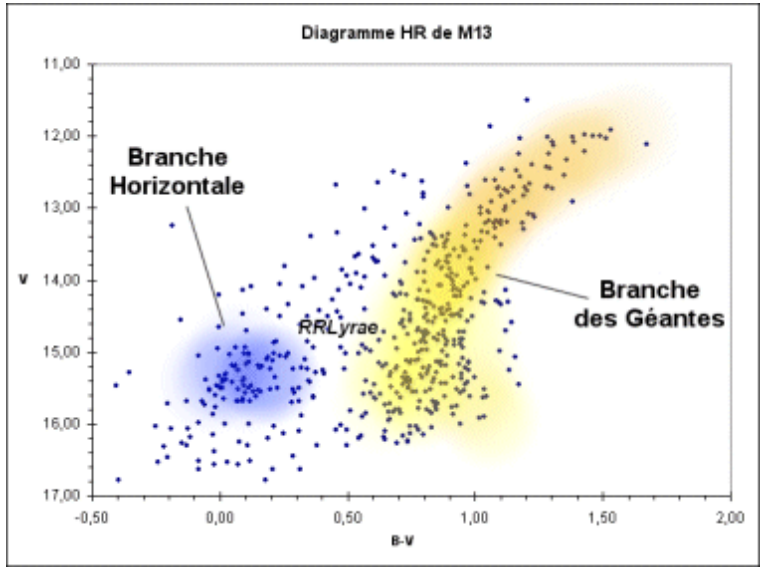
Type spectral/
Température

Exemple : Diagramme HR de M13

Le grand amas d'Hercule



https://vanderbei.princeton.edu/images/NJP/HRdiagMatlab.html



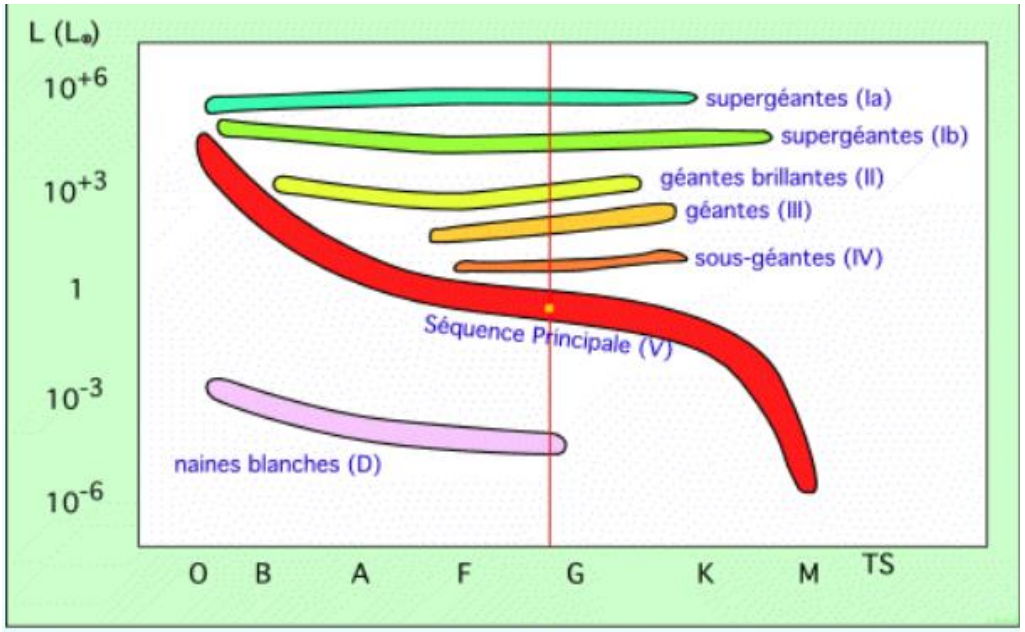
http://www.astrosurf.com/rondi/racalenillor2/hr/hr.htm

La classification des étoiles par luminosité

En disposant la totalité des étoiles visibles sur le diagramme on a pu repérer des zones peuplées (équilibre) et des zones vides (transition). Ceci a permis de définir des classes abstraites.

- Classe V : la séquence principale
- Classe IV : les sous-géantes
- Classe III : les géantes
- Classe II : les géantes brillantes
- Classe Ia, Ib : les super géantes
- Classe D : les naines blanches hors SP

Il y en a d'autres classes mais ça suffit ici.

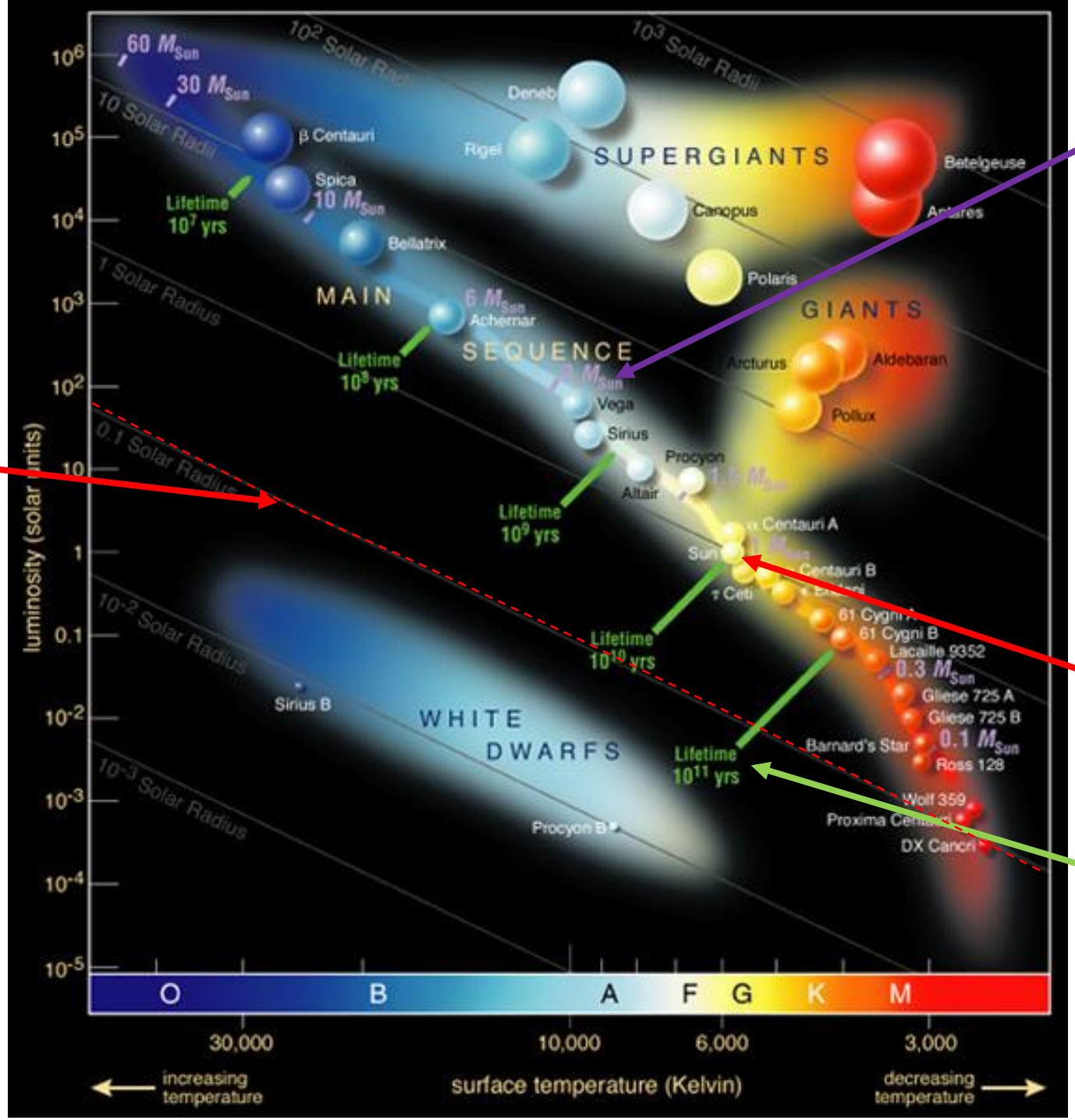


Les classes de luminosité

Cet outil de classification s'applique à n'importe quelle population d'étoiles.
On peut aussi y tracer la courbe de changement d'état d'une étoile donnée au fil de sa vie. Toutes les étoiles transitent par la classe V puis les évolutions diffèrent.

Courbes de niveau à rayon constant, en multiples du rayon solaire, $R_\odot$

Plus on monte vers le coin en haut à droite, plus le rayon augmente



Intervalles de masse séparés par des tirets violets

Soleil : 1 $R_\odot$, 1 $L_\odot$
Type G,
temp. de surface env. 5700K

Durée de vie en SP
Traits verts

$L = R^2T^4$Const
Trois variables corrélées

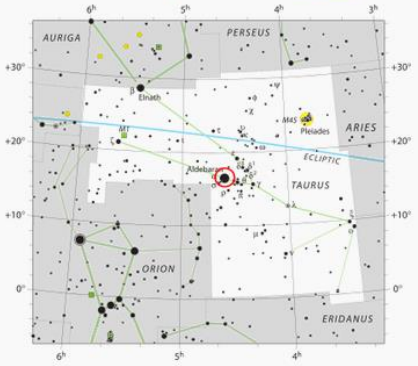
http://omsj.info/index.php/activites/chroniques/110-le-diagramme-de-hertzsprung-russell

Identification des étoiles
par type et sous-type spectraux, classe de luminosité

Image d'Aldébaran (ESA, NASA et STScI).

Données d'observation (époque J2000.0 – équinoxe 2000)	
Ascension droite	$04^h\ 35^m\ 55{,}239^s$ [1]
Déclinaison	+16° 30′ 33,49″ [1]
Constellation	Taureau [2]
Magnitude apparente	+0,87 (0,75-0,95) [3]

Localisation dans la constellation : Taureau

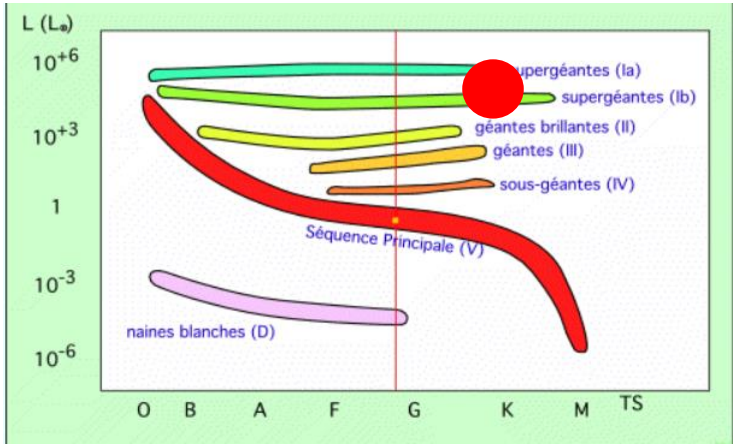


Présentation wikipédia :

Des données d'observations liées à notre position sur terre

La classification

Les caractéristiques physiques que nous avons étudiées



Caractéristiques	Classification
Type spectral	K5 III [1, 4]
Indice U-B	1,90
Indice B-V	1,54
Variabilité	Pulsante (Lb)

Astrométrie	
Vitesse radiale	54,26 ± 0,03 km/s [1, 5]
Mouvement propre	μ_α = 63,45 ± 0,84 mas/a [1] μ_δ = −188,94 ± 0,65 mas/a [1]
Parallaxe	48,94 ± 0,77 mas [1]
Distance	66,6 ± 1,2 al (20,43 ± 0,32 pc)
Magnitude absolue	−0,65 ± 0,041 [3]

Caractéristiques physiques	
Masse	1,13 ± 0,11 $M_\odot$ [6, 3]
Rayon	45,1 ± 0,1 $R_\odot$ [6, 3]
Gravité de surface (log g)	1,2 ± 0,1 [3]
Luminosité	518 $L_\odot$ [7]
Température	3 910 K [7]
Métallicité	[Fe/H] = −0,27 ± 0,05 [6, 3]
Âge	6,6 ± 2,4 × 10^9 a [6, 3]

Application avec Aldébaran

Loi de Stefan Boltzmann : $L \approx R^2 T^4 (4 \pi \sigma)$ avec $\sigma \approx 5{,}67\ 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$

Valeurs pour Aldébaran :

Rayon	45,1 $R_\odot$	$\approx 45 \times 6{,}957\ 10^8$ m $\approx 3{,}13\ 10^{10}$ m
Luminosité	518 $L_\odot$	$\approx 518 \times 3{,}828\ 10^{26}$ W $\approx 1{,}98\ 10^{29}$ W
Température	3 910 K	$= 3{,}91\ 10^3$ K

Application :

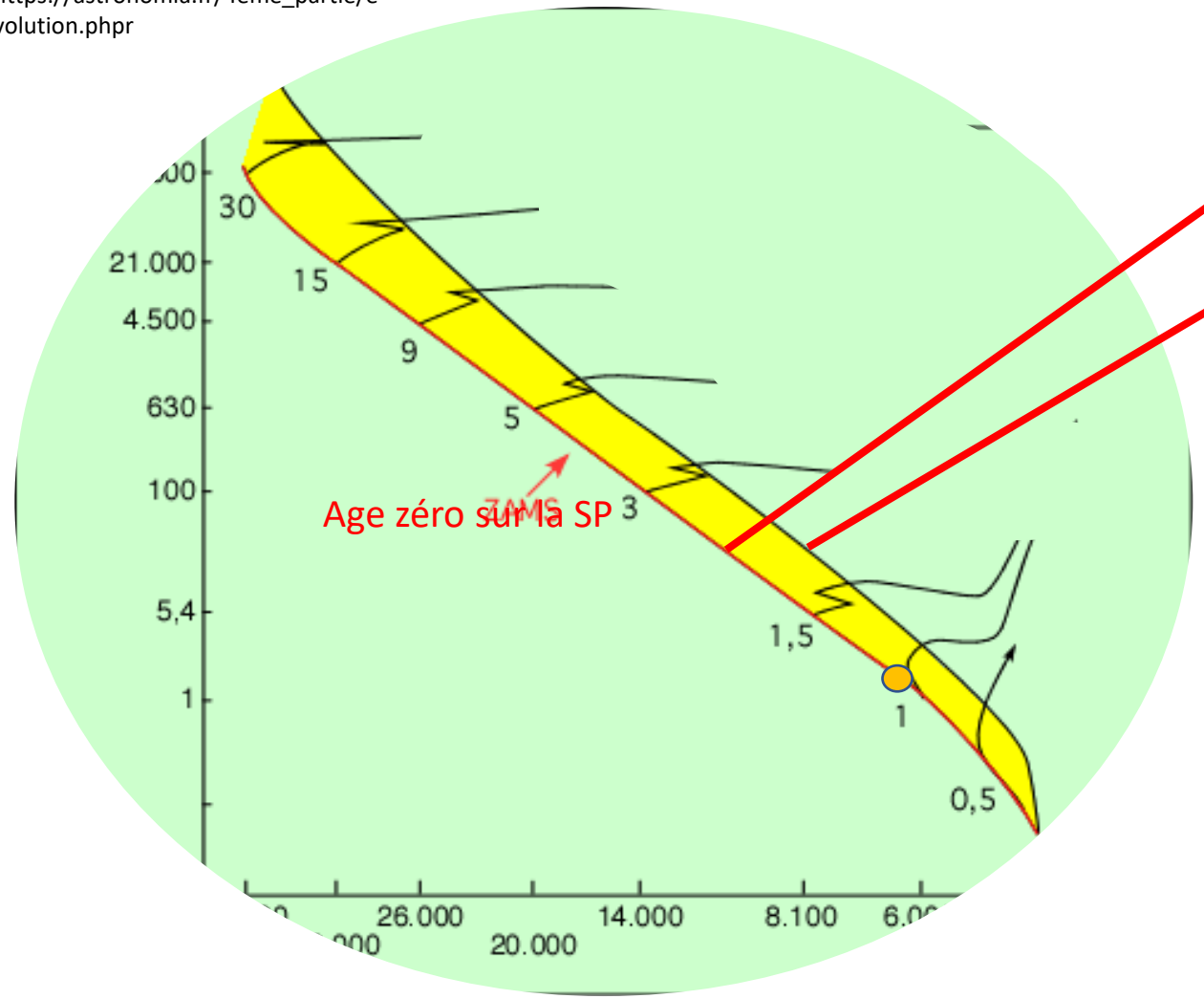
$R^2 T^4 (4 \pi \sigma) \approx 9{,}8\ 10^{20} \times (2{,}4\ 10^2)\ 10^{12} \times (4 \times 3{,}14 \times 5{,}67)\ 10^{-8}$

$R^2 T^4 (4 \pi \sigma) \approx 1675\ 10^{20\ +2\ +\ 12\ -\ 8}$

$R^2 T^4 (4 \pi \sigma) \approx 1{,}675\ 10^{29}$

En fait, pendant la SP …

https://astronomia.fr/4eme_partie/evolution.phpr



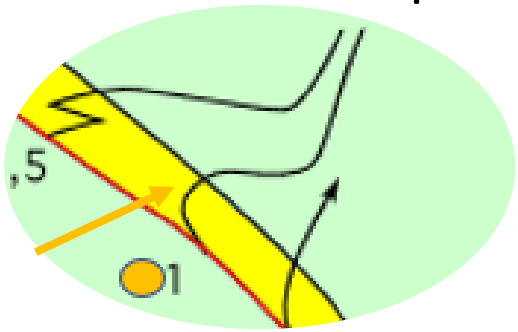
- **Naissance** = lorsque l'hydrogène commence à brûler **dans le cœur**.
- **Sortie de SP** = lorsque tout l'hydrogène **du cœur** est consommé.
- **Entre entrée et sortie** la luminosité augmente, le rayon aussi, l'étoile refroidit un peu.

En fait, qu’est-ce que le cœur ?

- **En SP, on définit** le cœur comme la « zone centrale » où a lieu la fusion. Il contient de l’hydrogène en fusion et de l’hélium inerte. Sa température atteint au moins les 10 MK..
- Cette zone est évolutive en température, en densité, en composition. En effet,
  - La fusion de l’hydrogène transforme par exemple **quatre protons** (noyaux d’hydrogène) en **un seul noyau d’hélium** => le nombre de particules libres au centre du cœur de l’étoile décroît
  - Moins de particules dans le cœur => pression plus faible car il n’y a plus de fusion nucléaire pour compenser cela.
  - Pour résister au poids des couches externes, le cœur doit rétablir une pression suffisante => il se contracte légèrement => la pression interne augmente => il retrouve son équilibre mais produit de la chaleur.
  - En se contractant, le cœur entraine la coquille d’hydrogène adjacente, cela libère de l’énergie gravitationnelle et la réchauffe elle aussi. La coquille entre en fusion et rejoint le cœur. Et ainsi de suite, la fusion se propage vers des couches de plus en plus extérieures. Le cœur est de plus en plus chaud, de plus en plus dense, de plus en plus lumineux.

Et jusqu'où grossit-il?

- L'augmentation de luminosité du cœur chauffe les couches externes qui ne sont pas en fusion => elles se dilatent un peu, leur densité baisse, le rayon de l'étoile augmente un peu, la photosphère se refroidit un peu et l'étoile rougit un peu.
- Le processus ne dure pas indéfiniment : à un moment la contraction chauffe une coquille dont la densité est trop faible pour allumer la fusion de l'hydrogène.
- Le cœur a fini sa croissance, il est constitué d'hélium pur, inerte, et devient graduellement isotherme.
- L'étoile est privée de sa source d'énergie, et son équilibre est rompu. C'est le moment où elle quitte la Séquence Principale.



Soleil	Naissance	Maintenant	Sortie de SP
Température	5500 K	5770 K	
Luminosité	70 % $L_\odot$	$L_\odot$	2 $L_\odot$

II Et derrière les apparences ?

https://fr.freepik.com/photos-vecteurs-libre/rideaux-theatre

Fin de la première partie
Merci de votre attention !
A vous la parole !