

PHYS137

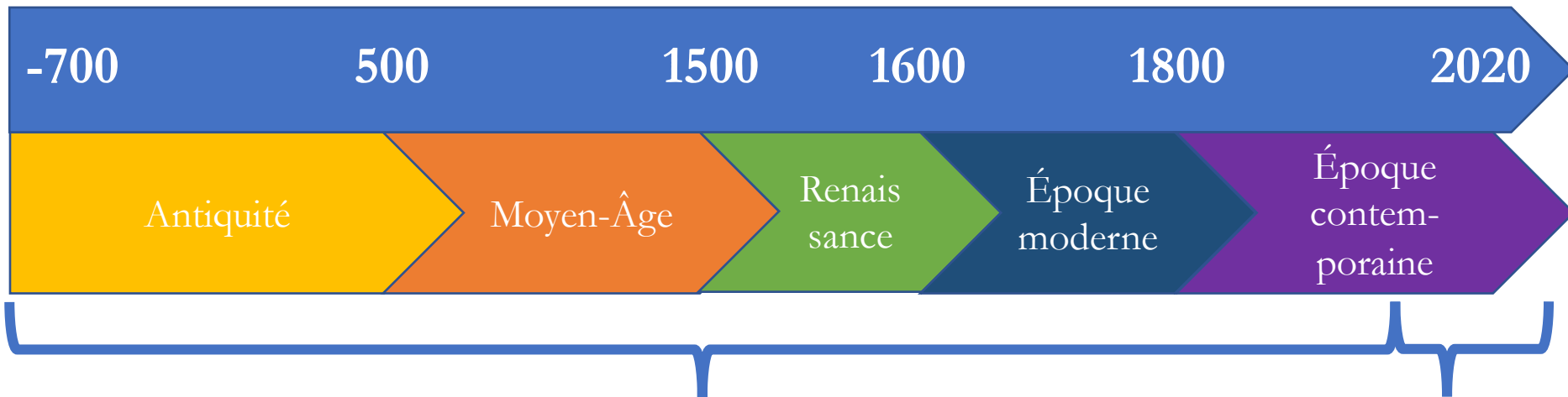
Cours 11 :

Vie et mort des étoiles

Dr. Barbara Perri

barbara.perri@universite-paris-saclay.fr

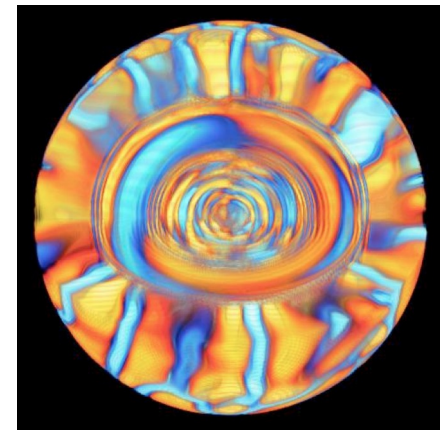
Introduction



Définition d'une étoile

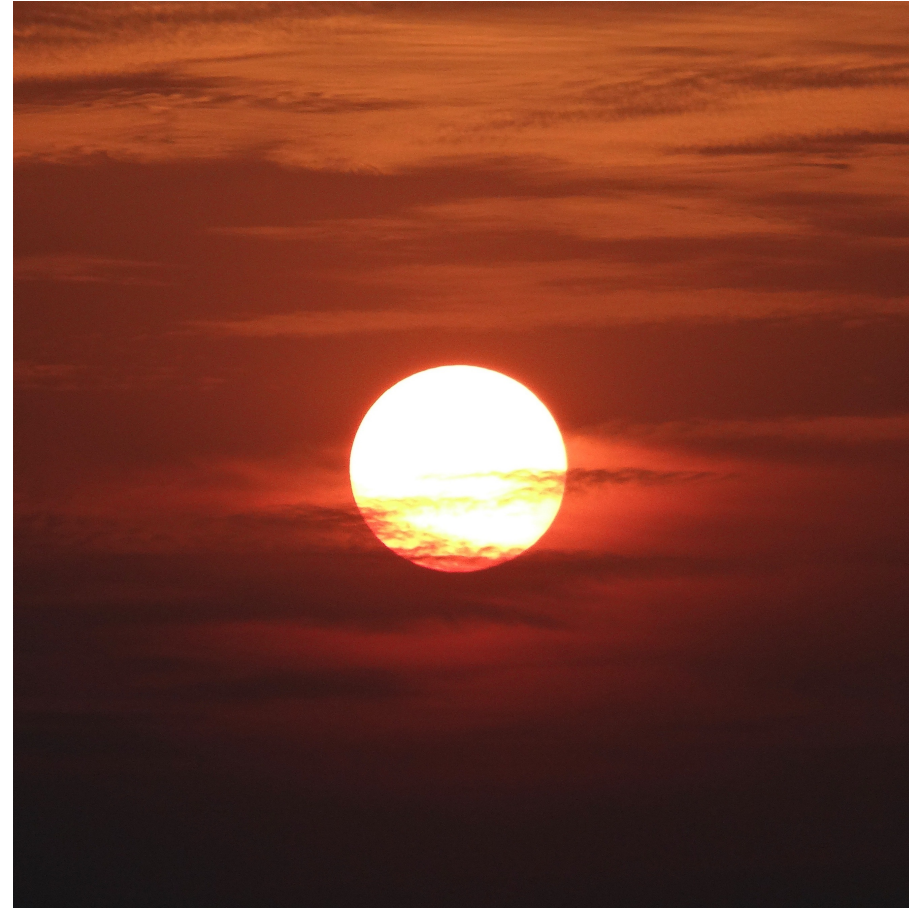


Physique stellaire



Définition d'une étoile

Qu'est-ce qu'une étoile ?



Quelles sont les quantités qui semblent varier ?

- La luminosité
- La couleur (distance ?)
- La taille

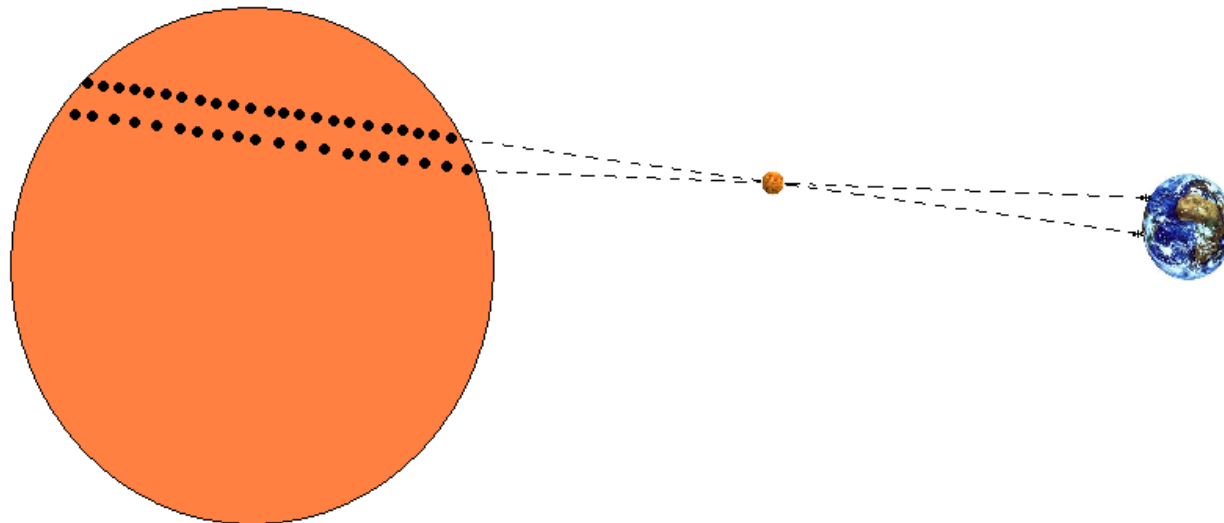
Le Soleil dans l'Antiquité

Première estimation du rayon du Soleil par Anaxagore : 56 km !

Première mesure de la distance Terre-Soleil par Aristarque de Samos (-250) :
19 fois la distance Terre-Lune (en réalité 400 fois !)

→ Par la géométrie, les Grecs réalisent que le Soleil est beaucoup plus grand que la Terre

→ Aujourd'hui, mesures par transit de Vénus ou Mercure



Mesures les plus récentes :

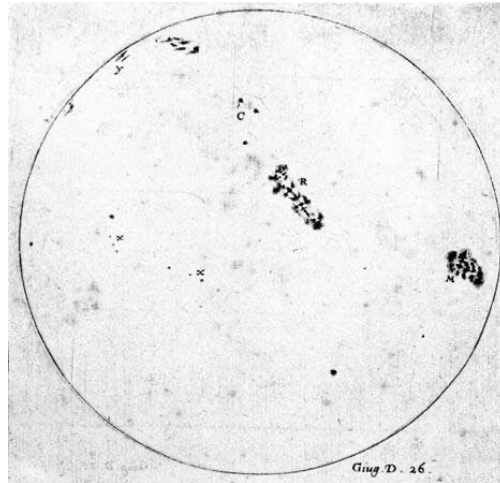
→ rayon du Soleil : 696 340 km \approx **100 fois celui de la Terre !**

→ distance Terre-Soleil : 149 597 870,7 km = **1 Unité Astronomique (UA)**

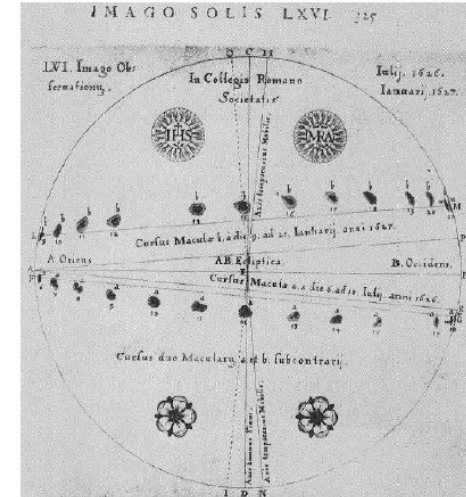


Les taches solaires

[Galilée, 1613]



[Christoph Scheiner, XVIIème siècle]



La première trace d'observation d'une tache solaire remonte à **800 av. J.-C. en Chine**

Il faudra cependant attendre l'invention de la **lunette astronomique** par **Galilée** pour avoir des observations détaillées et régulières

Galilée constate alors que **les taches solaires évoluent dans le temps**

→ elles changent de **position** et de **nombre**

→ le Soleil est un astre **variable**, et non figé

1600

Renaissance

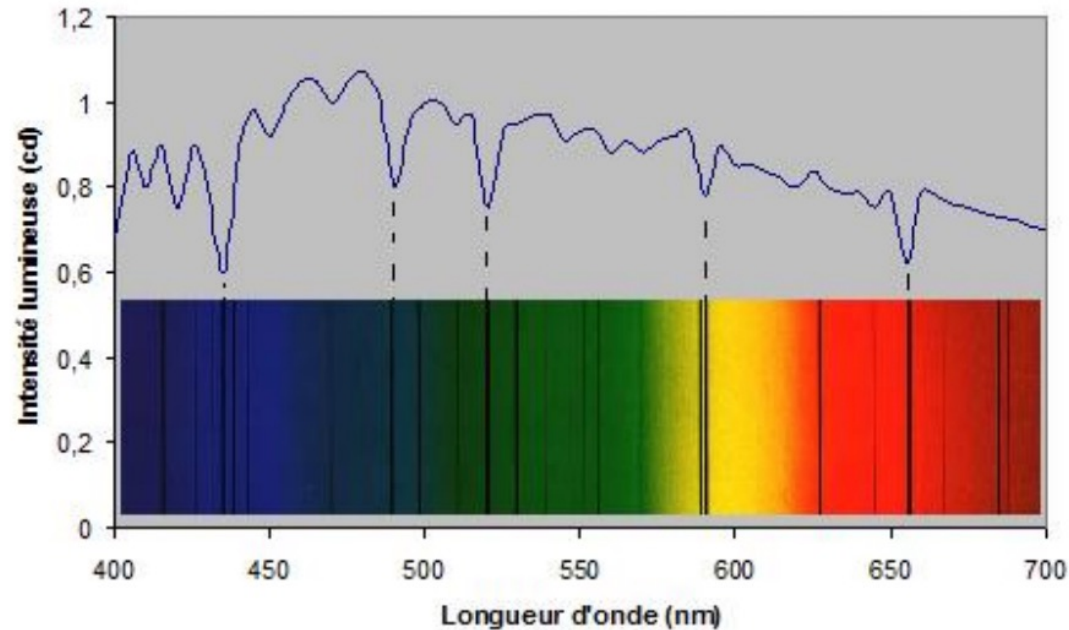
1500

Analyses spectrales

Au XIX^{ème} siècle, Joseph von Fraunhofer observe le **spectre du Soleil**

→ il voit des raies noires = **raies d'absorption**

→ à partir de la lumière du Soleil, il détermine sa **température** et sa **composition**



Mesures les plus récentes :

→ température du Soleil (surface) : 5770 degrés Kelvin \approx **5500 degrés Celsius**

→ composition chimique :

essentiellement de l'hydrogène (74%) et de l'hélium (25%)

2020

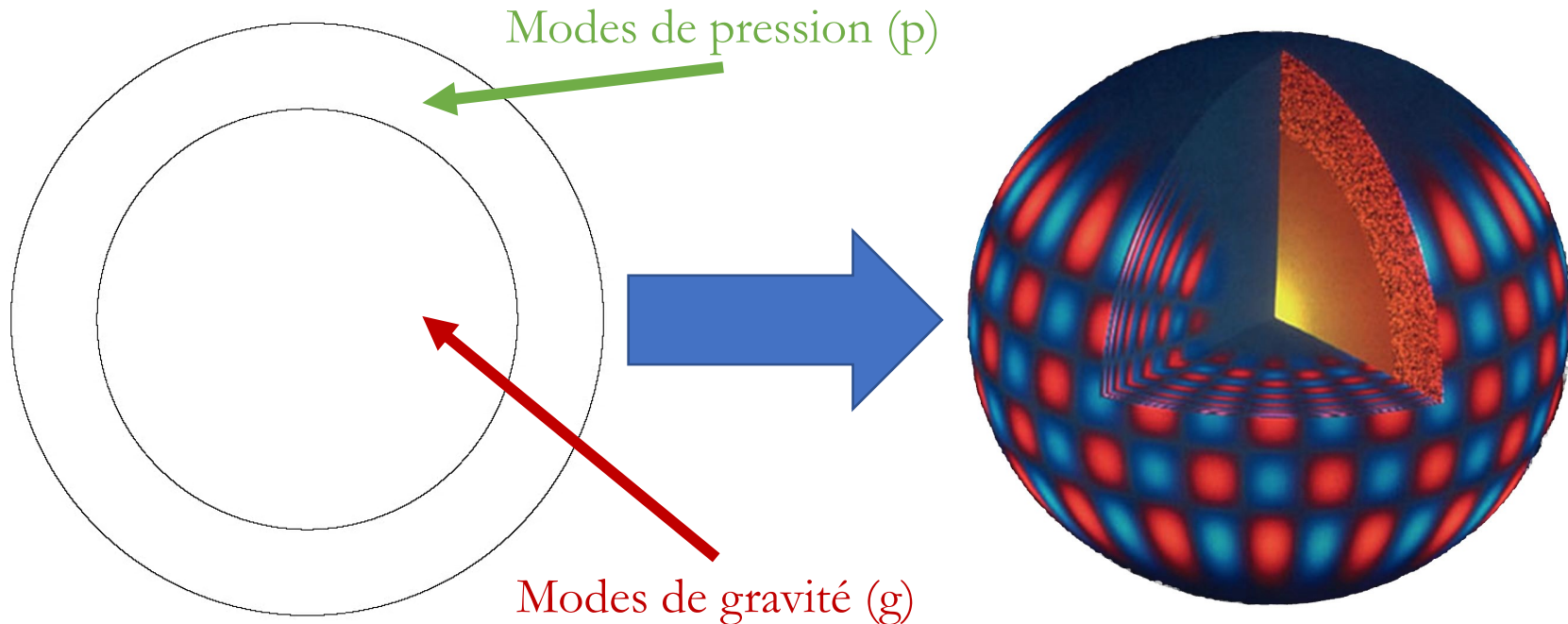
Époque contemporaine

1800 1814

L'héliosismologie

Pour sonder l'intérieur du Soleil, on utilise les ondes sismiques !

→ C'est ce qu'on appelle **l'héliosismologie**



→ En analysant la lumière du Soleil (et en particulier ses périodicités), on peut remonter aux ondes et à leurs trajets, et déterminer ainsi la structure interne du Soleil

2020

1960

Époque contemporaine

1800

La source d'énergie du Soleil

Le Soleil émet une quantité d'énergie de $3,85 \cdot 10^{26}$ J par seconde
 → D'où provient toute cette énergie ? Quelle réaction permet de la générer ?

Le charbon ?

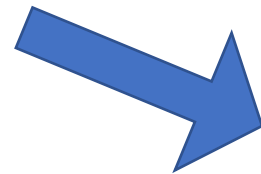
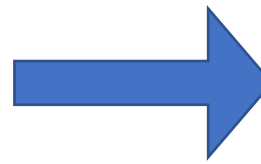
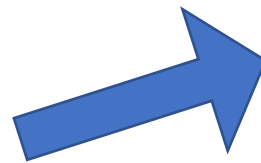
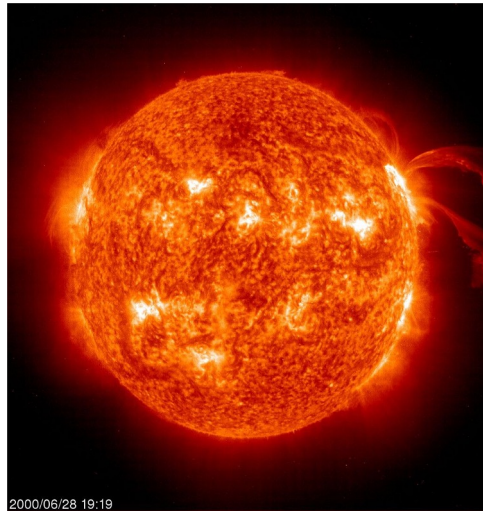
(1860, Lord Kelvin et H. von Helmholtz)
 → Le Soleil = 5000 ans !

Contraction gravitationnelle ?

(1880, Lord Kelvin et H. von Helmholtz)
 → Le Soleil = 10 millions d'années

La masse ?

(1905, A. Einstein)
 → Le Soleil = plusieurs milliards d'années



→ La solution réside en réalité dans les réactions nucléaires

2020

1860

1800

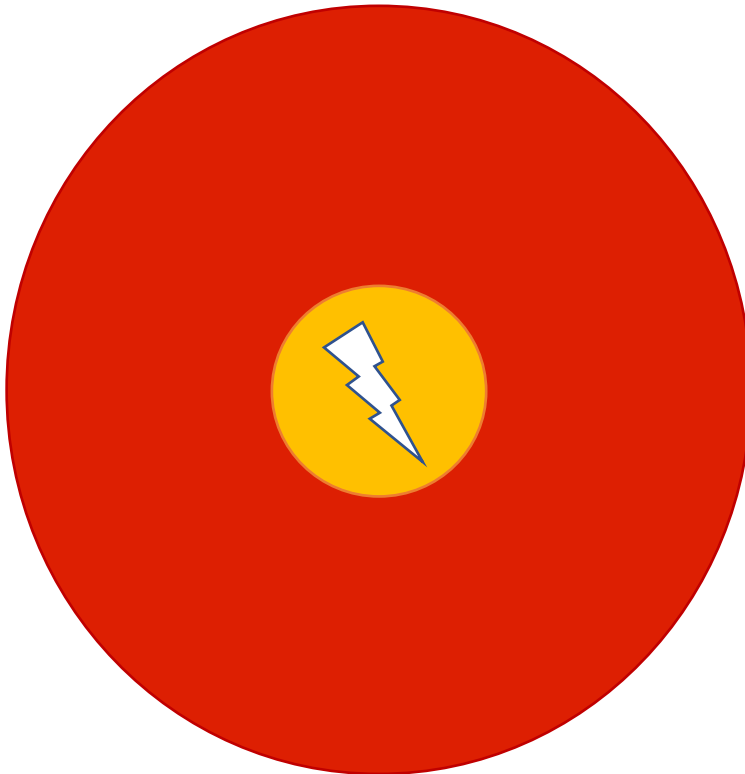
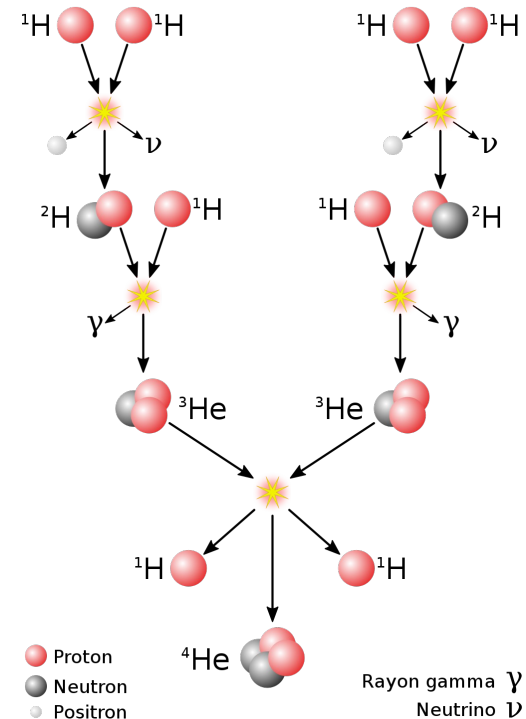
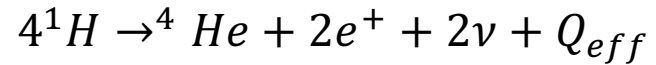
Époque contemporaine

Le noyau du Soleil

Comment le Soleil se chauffe-t-il ?

→ À l'aide de **fusion nucléaire** :

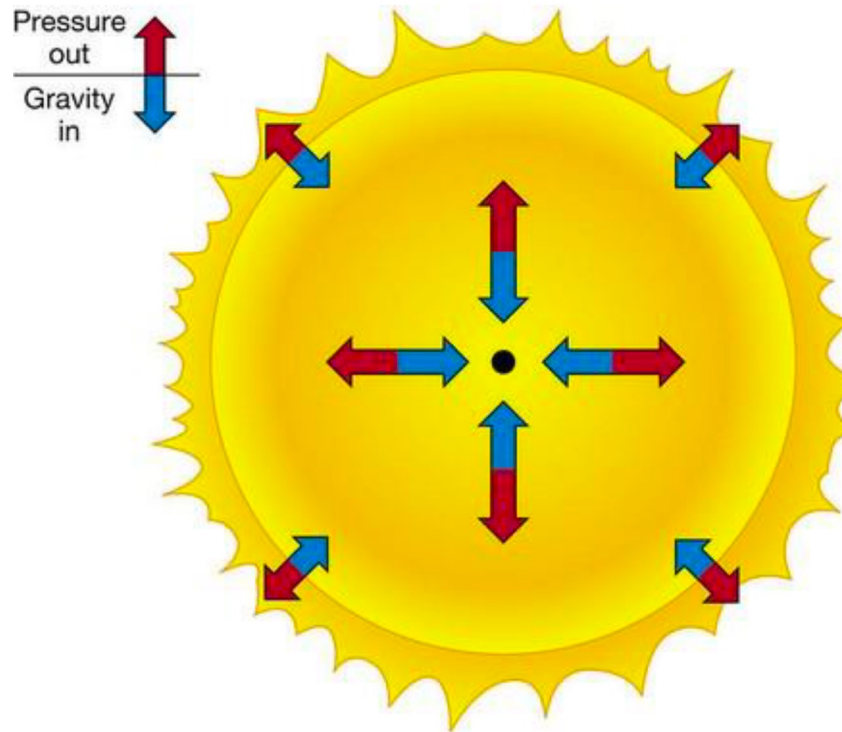
[Clayton 1968]



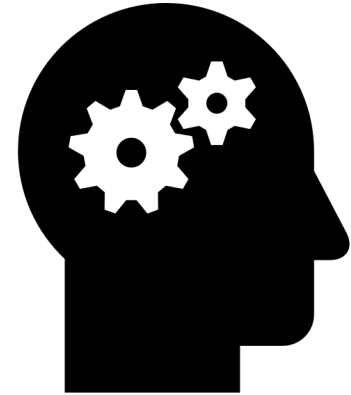
→ Pour permettre à de telles réactions d'avoir lieu,
le noyau du Soleil est chauffé à près de **15 millions de degrés** !

Qu'est-ce qu'une étoile ? (réponse)

Pour comprendre comment se forment les étoiles, il faut revenir à la définition physique d'une étoile :



→ **Équilibre** hydrostatique entre **effondrement interne par gravité** et **pression** due aux réactions nucléaires internes



Exercices et TDs





La naissance d'une étoile

Les pouponnières d'étoiles



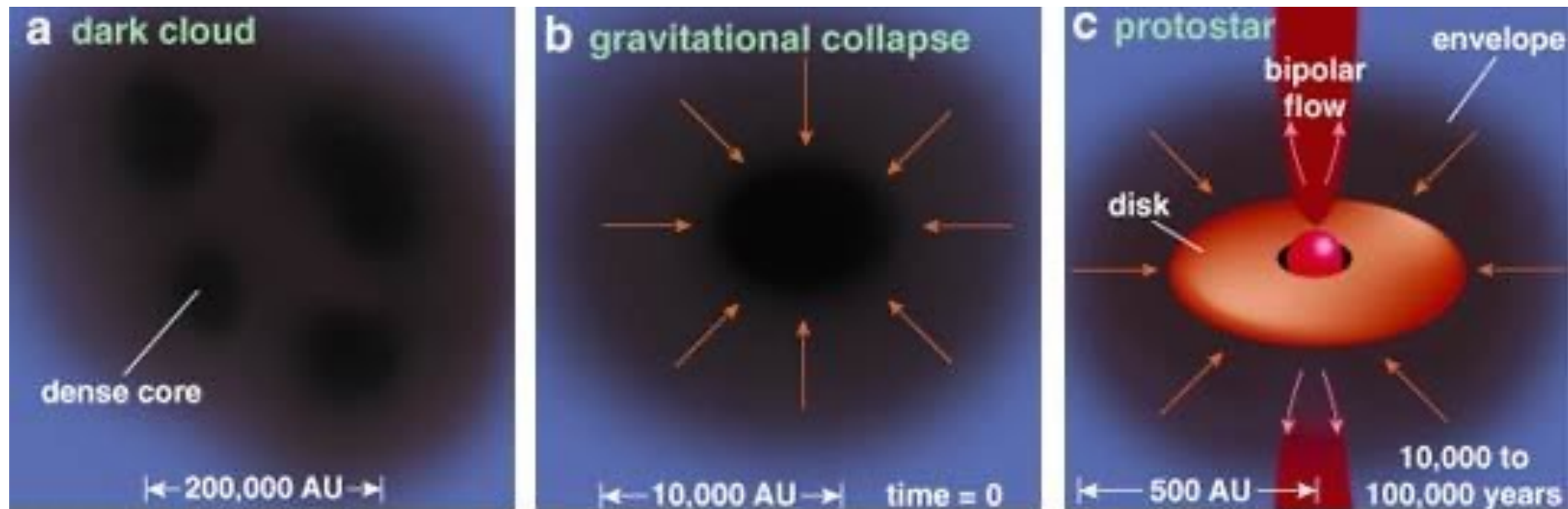
Où naissent les étoiles ?

→ Dans de vastes nuages de gaz et de poussières (**nébuleuses**)

→ Les nouvelles étoiles naissent souvent là où les anciennes sont mortes (milieu plus riche en éléments divers + surdensités créées par les chocs)

Effondrement gravitationnel

Le nuage de gaz va finir par se fragmenter et s'effondrer localement sous son propre poids
→ il forme alors des proto-étoiles

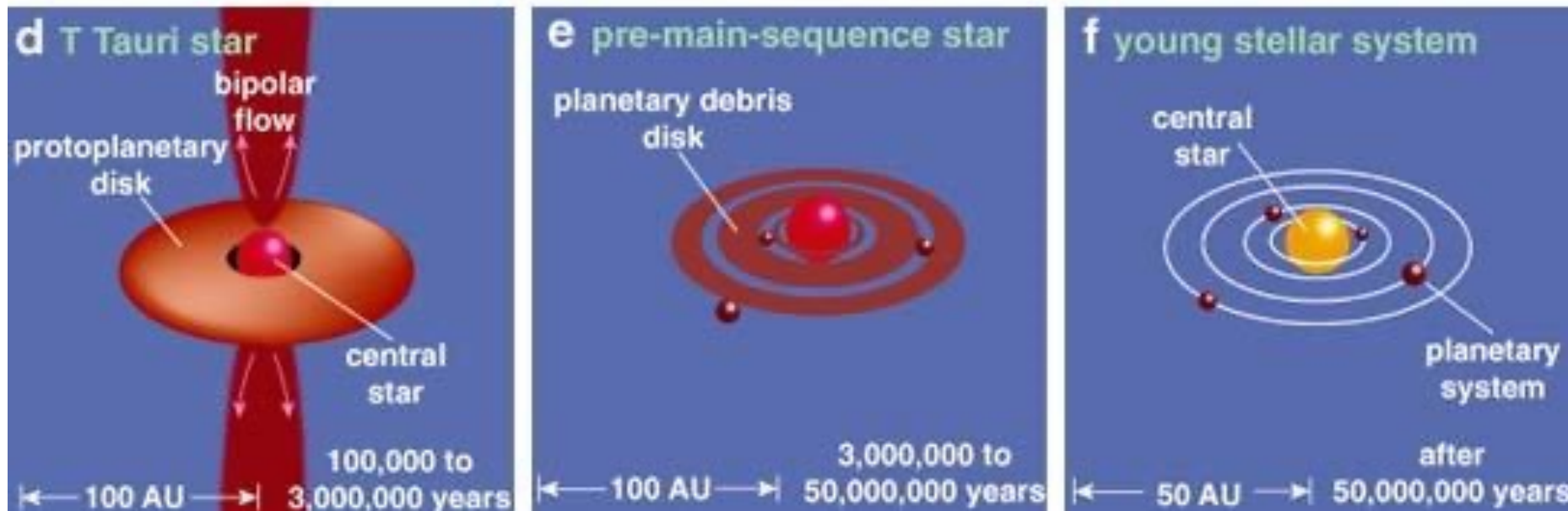


→ La masse limite d'effondrement est appelée la masse de Jeans


Les proto-étoiles et leurs disques

Autour de la proto-étoile se forme un disque de poussière = disque d'accrétion

→ Ce disque se fragmentera à son tour pour donner des planétésimaux = futures planètes



→ En fonction de la quantité de planétésimaux, on obtient un système stellaire plus ou moins éloigné du système solaire



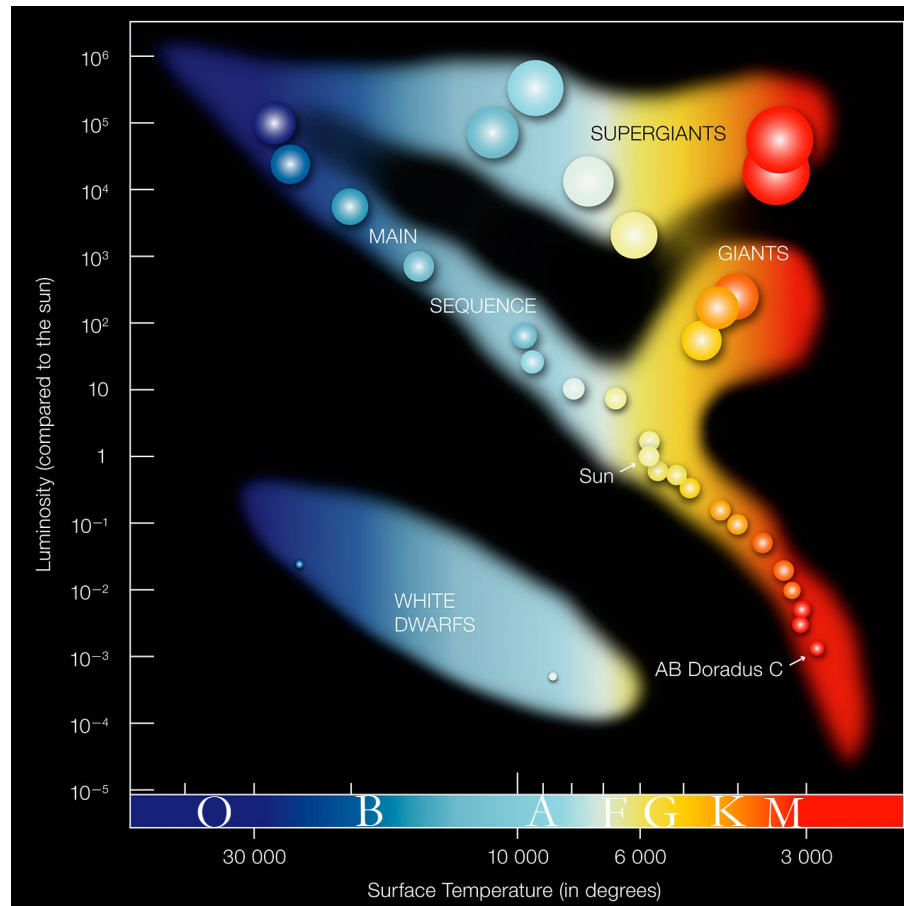
La vie d'une étoile

Le diagramme de Hertzsprung-Russell

Un diagramme qui permet de classer les étoiles en groupes :

Étoiles brillantes

Étoiles faibles



Étoiles chaudes

Étoiles froides

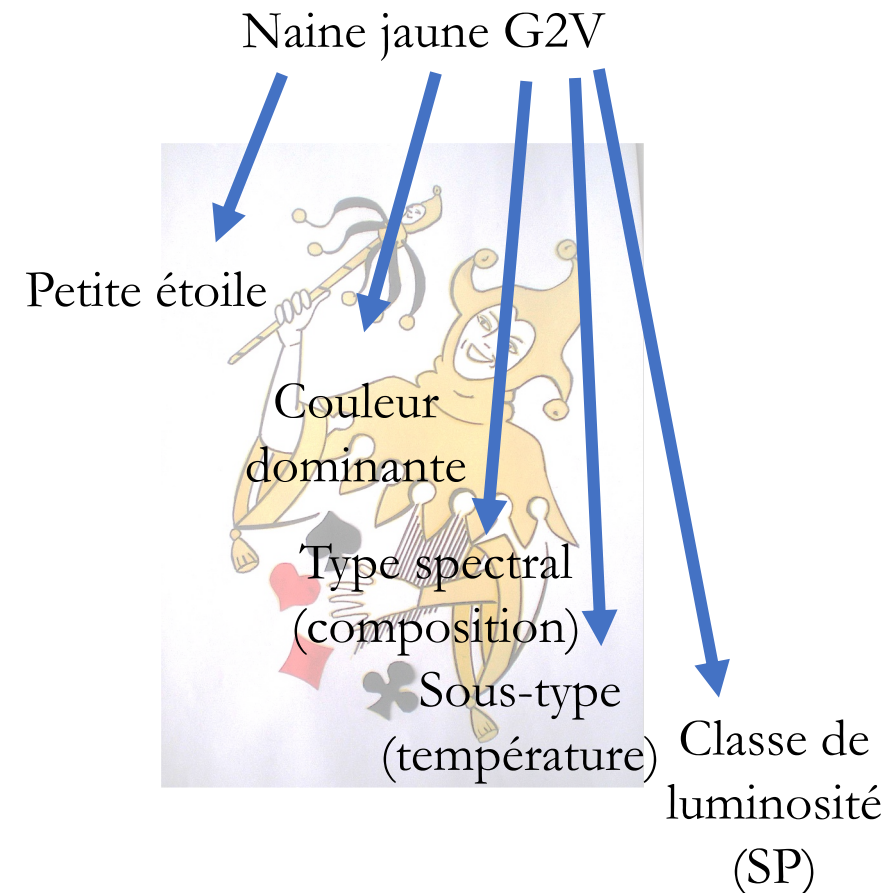
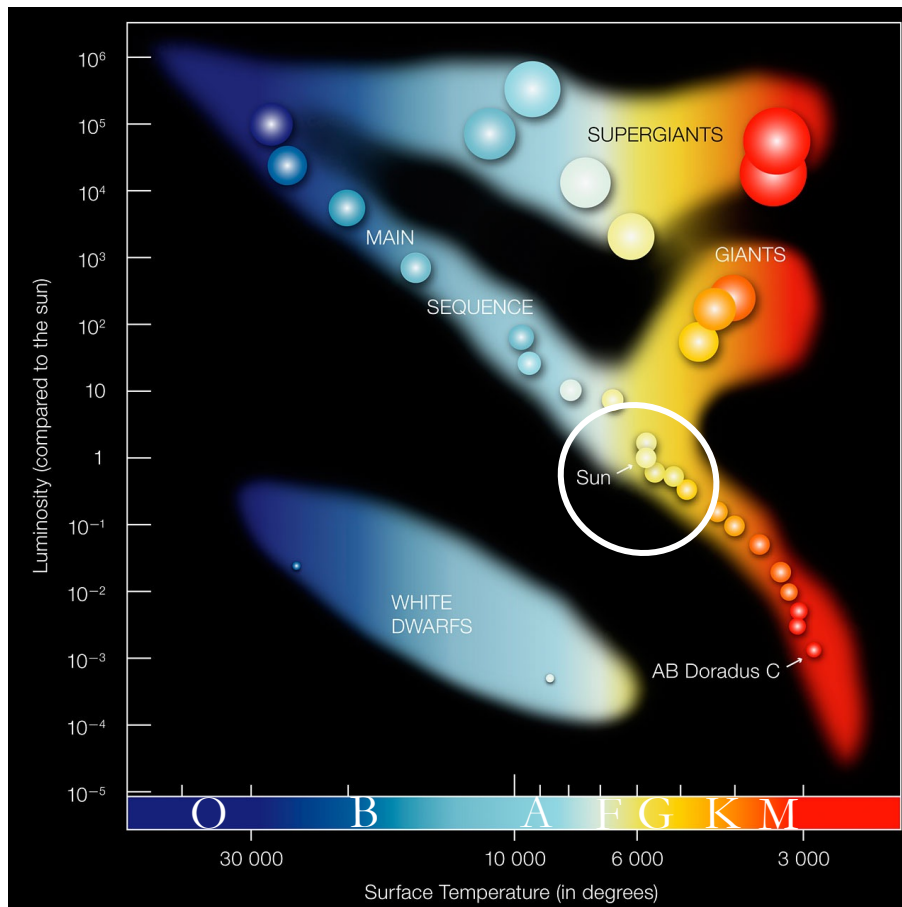
La séquence principale (SP) correspond à l'essentiel des étoiles au cours de leur vie

Les étoiles chaudes sont grandes et brillantes, les étoiles froides petites et faibles

Il existe des étoiles dites géantes = grandes, lumineuses mais froides

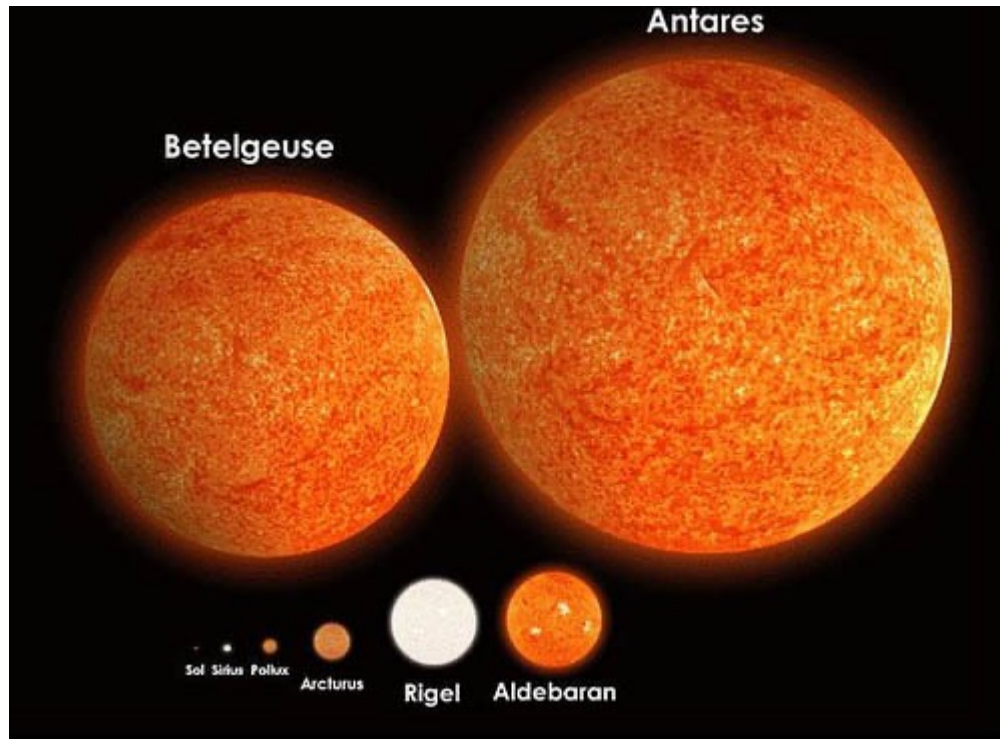
À l'inverse, il existe des étoiles très chaudes mais peu brillantes = naines blanches

De quel type est le Soleil ?



On estime qu'environ 7,6% des étoiles de l'univers sont comme le Soleil !

Taille et structure



Par rapport au reste du système solaire, le Soleil paraît très massif...

→ Mais en réalité, c'est plutôt une petite étoile !
ex : Antarès a un rayon 800 fois plus grand !

La structure interne du Soleil n'est possible que parce qu'elle est moyenne

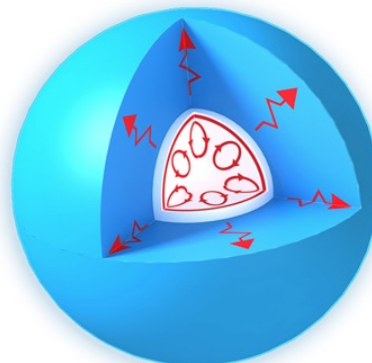
→ plus petite = entièrement convective

→ plus grande = cœur radiatif

< 0.5 solar masses

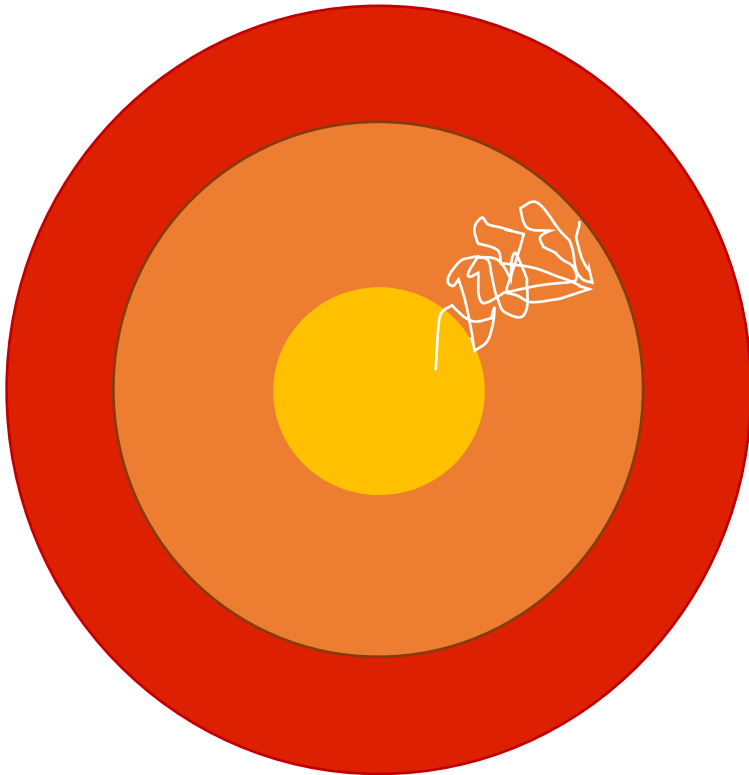
0.5 - 1.5 solar masses

> 1.5 solar masses



La zone radiative du Soleil

Elle ne va que jusqu'à **0.7** rayons solaires, mais elle représente **98% de la masse du Soleil**



Dans cette zone, l'énergie due à la fusion nucléaire du cœur est transportée par **transfert radiatif**

= majoritairement par les **photons** qui sont absorbés puis ré-émis

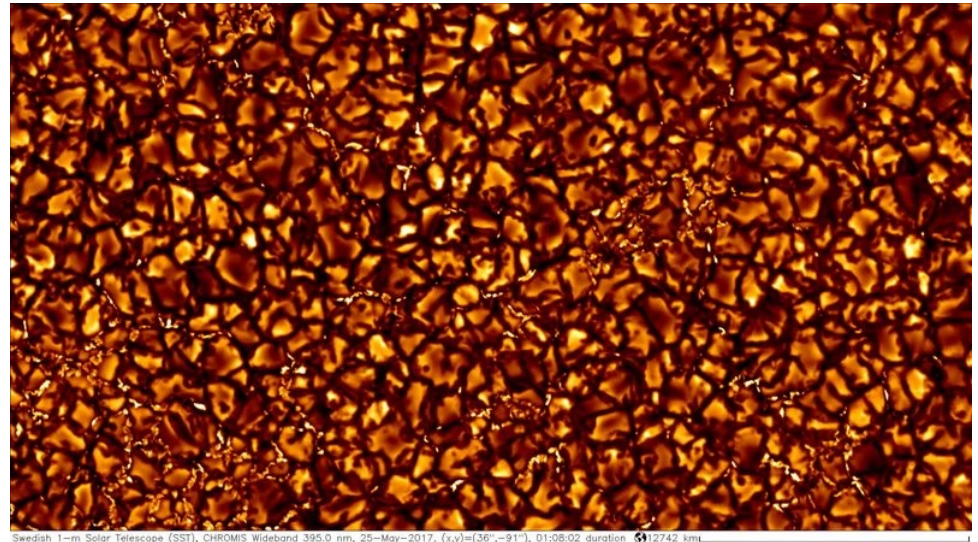
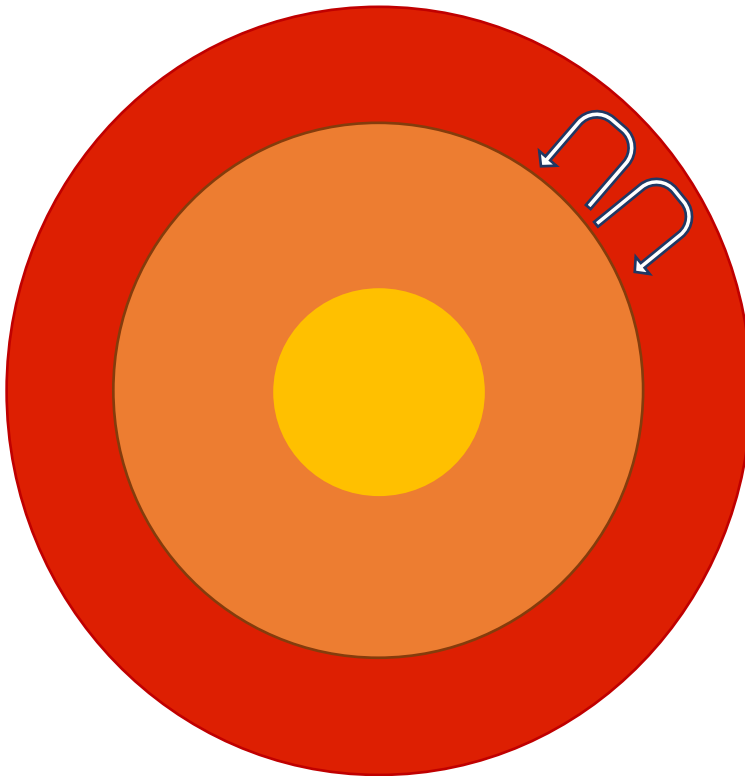
C'est un transport **peu efficace**

→ un photon émis dans le noyau met **entre 10 000 et 170 000 ans à atteindre la surface !**

La zone convective du Soleil

À partir de 0.7 rayons solaires, la matière n'est plus assez chaude ou dense pour permettre le transfert radiatif

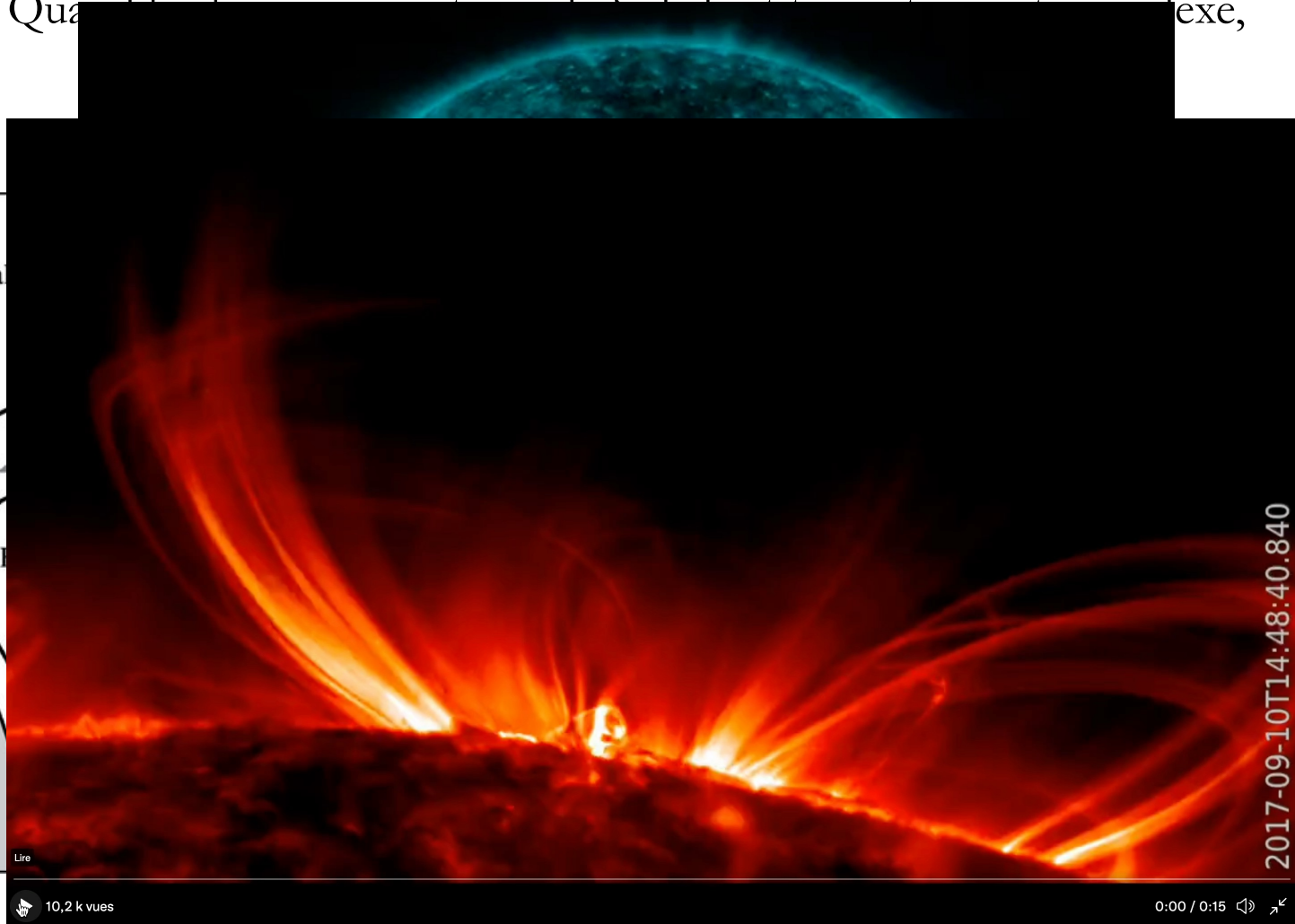
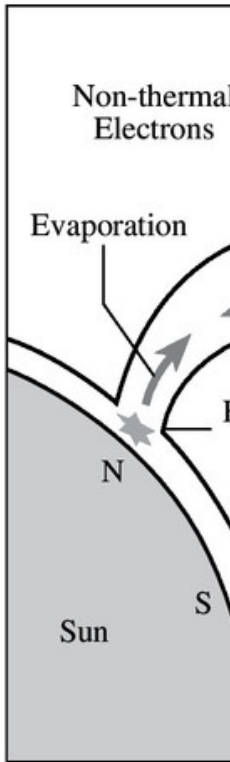
→ c'est désormais par **convection** que l'énergie est évacuée



La matière chaude remonte au centre car elle est plus légère, puis refroidit et redescend sur les bords

Les éruptions solaires

Quand une éruption solaire se produit, elle est associée à un flux de particules, appelé éruption de particules solaires (SEP), qui se propage à travers le système solaire.



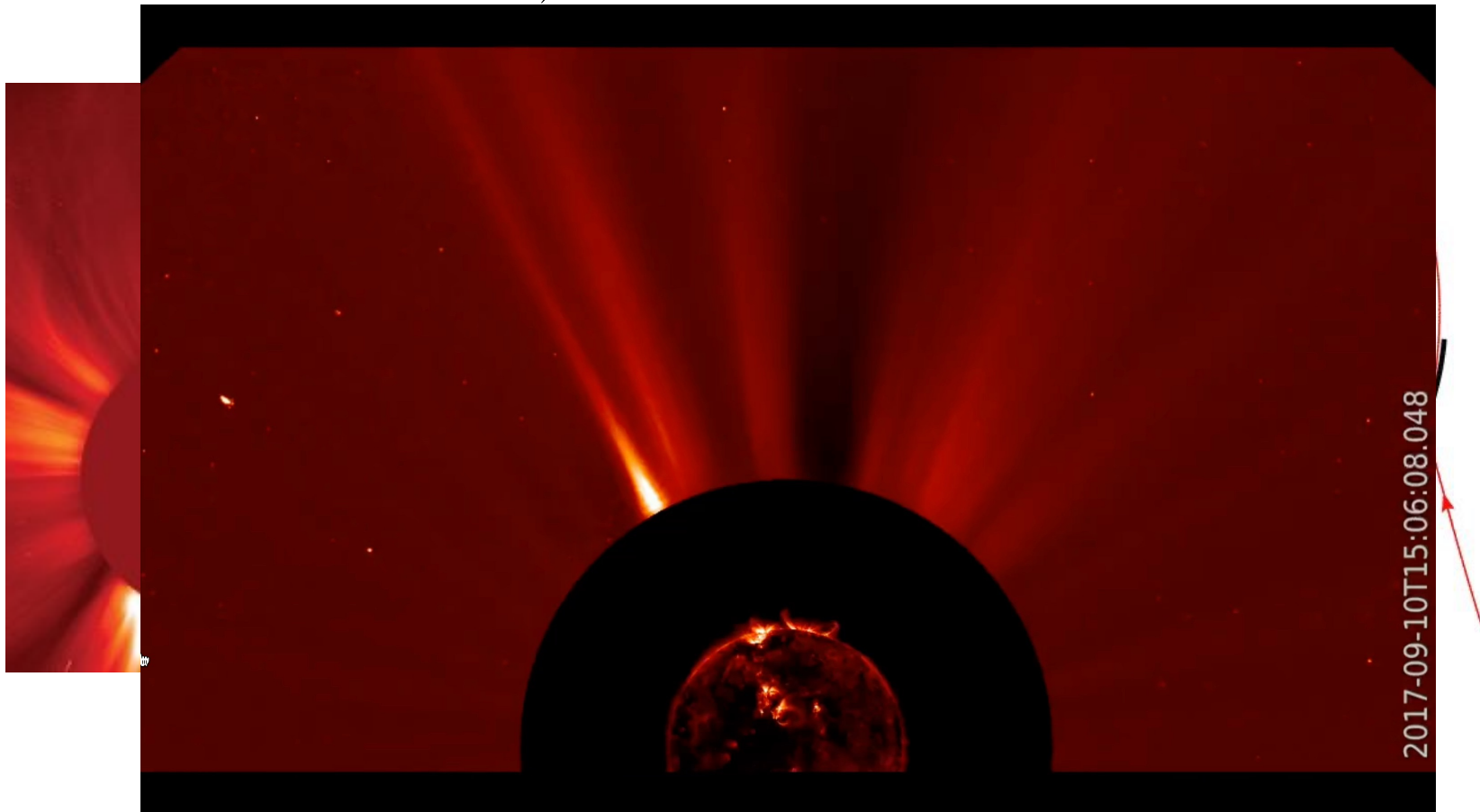
→ Ceci libe

SDO/AIA 131 2017-09-06 00:27:56 UT

s particules

Les éjections de masse coronales (CMEs)

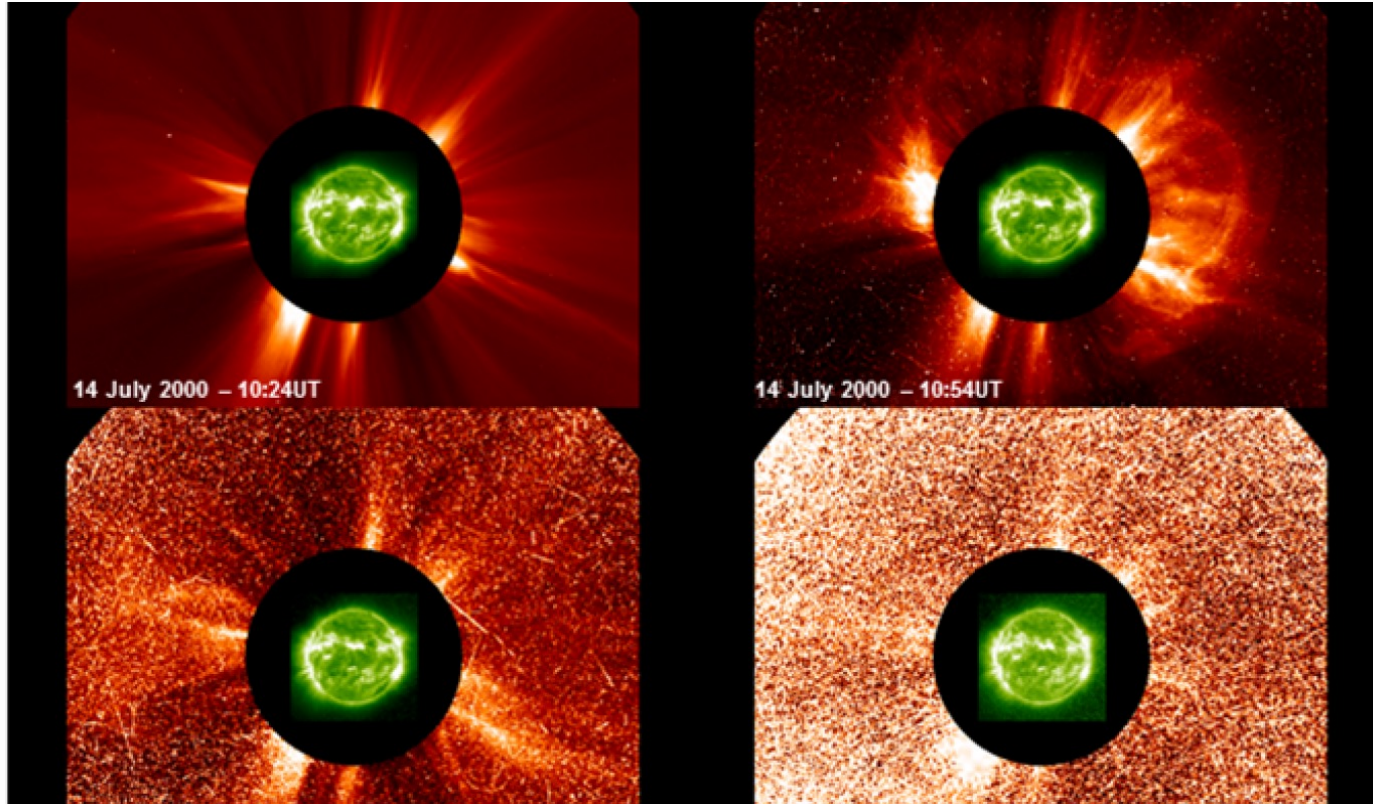
Au cours de ces reconnexion, de la matière peut être éjectée et accélérée
= éjections de masse coronales




- Au niveau du Soleil, elles sont caractérisées par un choc, une cavité et un cœur
- Au niveau de la Terre, elles sont caractérisées par un choc, une gaine et un éjectat

Les événements solaires à particules (SEPs)

Les particules du Soleil peuvent être accélérées jusqu'à atteindre des vitesses proches de la vitesse de la lumière → elles deviennent alors dangereuses (dépôt d'énergie) !



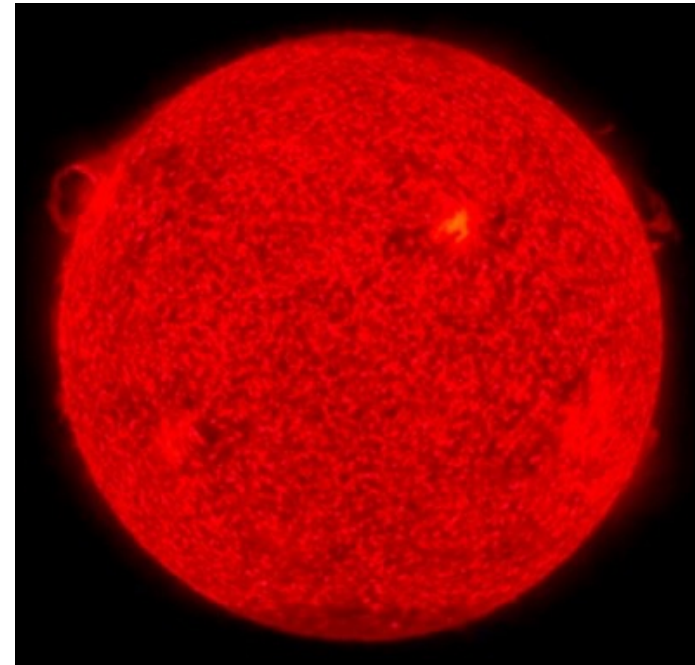
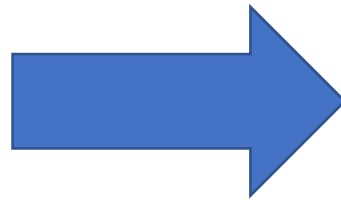
Les SEPs peuvent atteindre la Terre en dix minutes et endommager les satellites, mais également la santé humaine (ex : yeux des astronautes)



La mort d'une étoile

La mort du Soleil : Géante rouge

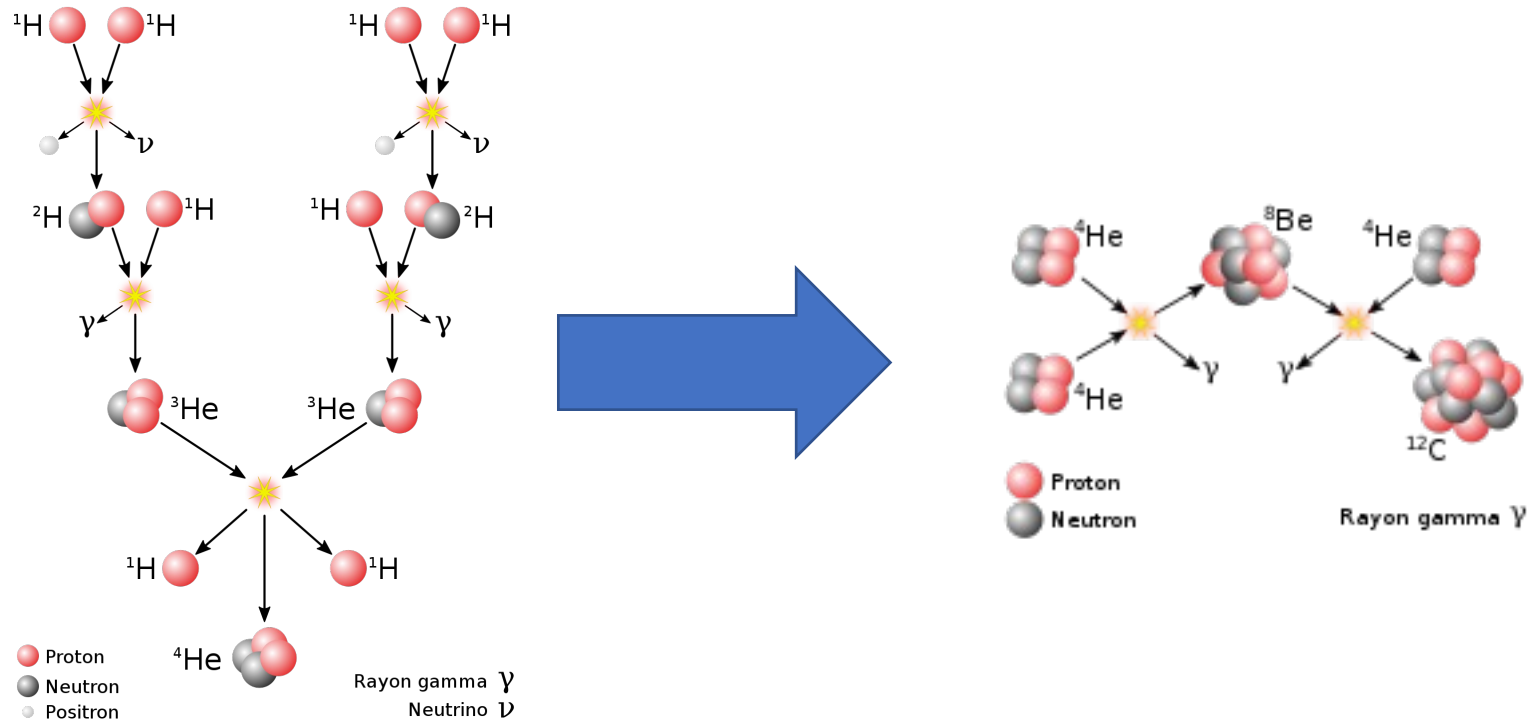
Quand le Soleil atteindra environ 10,5 milliards d'années, il aura épuisé tout son hydrogène
→ il va alors se transformer en géante rouge



Son rayon sera multiplié par 100, mais il perdra $1/3$ de sa masse
Il engloutira Mercure et Vénus, et la Terre finira par tomber par gravité
Cette transformation lui prendra 1 milliard d'années

Changement de combustible

Quand le Soleil aura brûlé tout son hydrogène, il brûlera son hélium pour faire du carbone
 → Il passera de la chaîne proton-proton à la réaction triple alpha



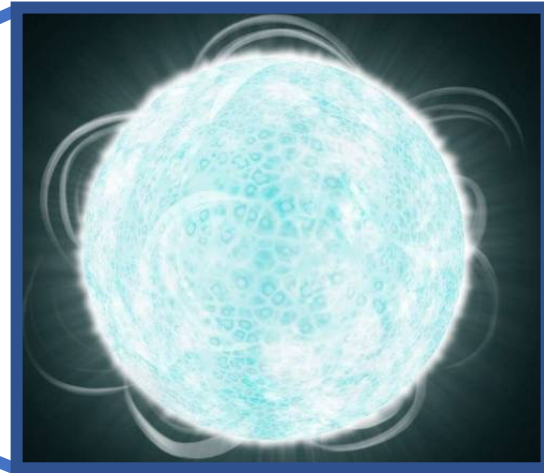
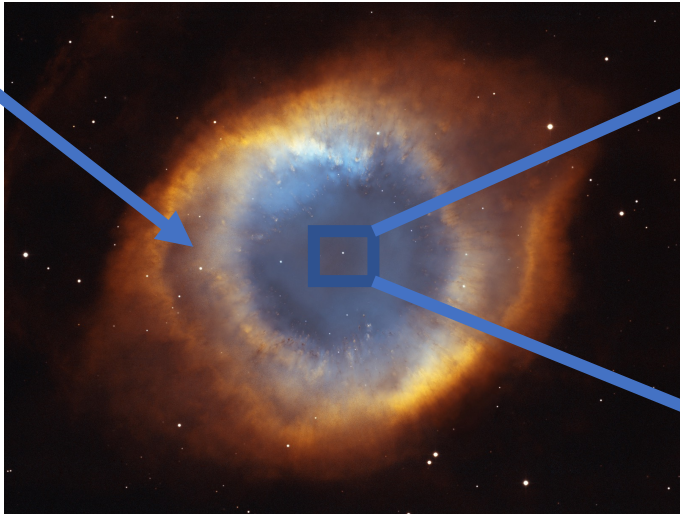
Cette phase durera environ 100 millions d'années

Naine blanche

Le Soleil n'est pas assez massif pour entamer les réactions de fusion du carbone (600 millions de degrés nécessaires !)

→ il va peu à peu expulser ses couches les plus externes (**nébuleuse planétaire**), tandis que son cœur va s'effondrer sur lui-même jusqu'à devenir une **naine blanche**

Nébuleuse planétaire



Naine blanche

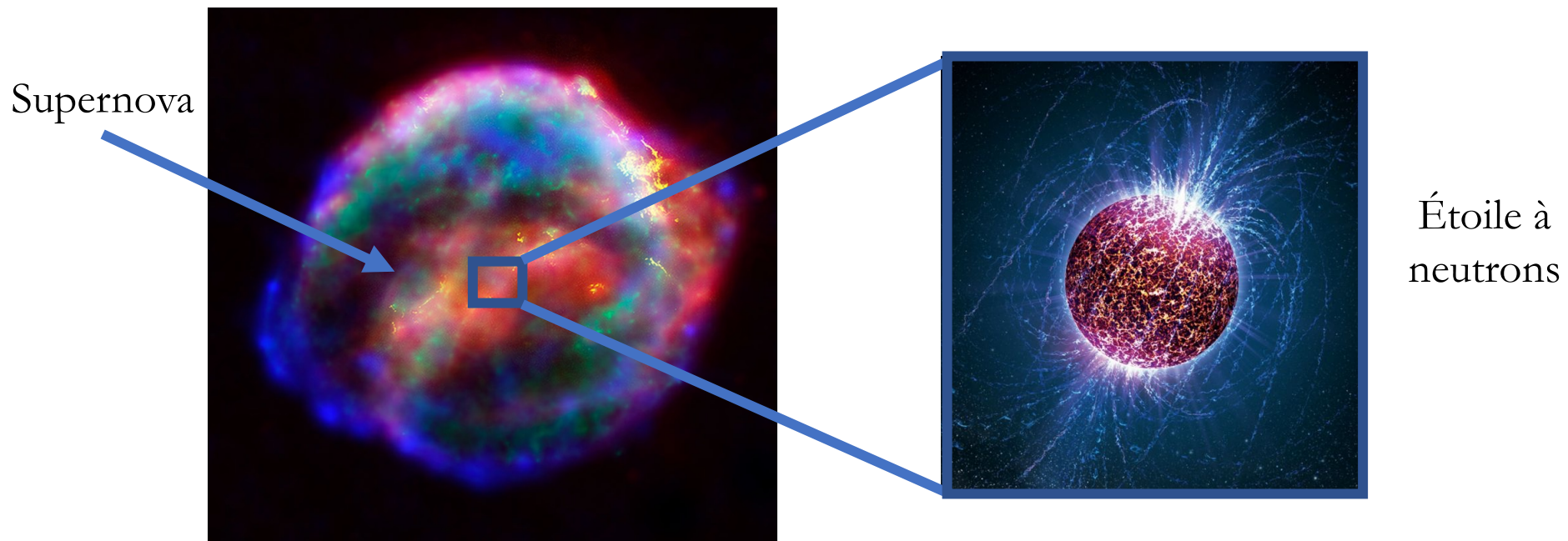
→ La naine blanche aura approximativement la taille de la Terre mais la masse du Soleil
→ Une **cuillère à café** de naine blanche pèse environ **une tonne** !

Quand la naine blanche finit de refroidir (plusieurs milliards d'années), elle deviendra une **naine noire** = un cadavre d'étoile qui ne brille plus

Autre scénario : L'étoile à neutrons

Si une étoile fait plus de **8 fois la masse du Soleil**, elle peut fusionner son carbone, mais elle ne peut pas fusionner son fer

→ elle explose en **supernova** et laisse une **étoile à neutrons**



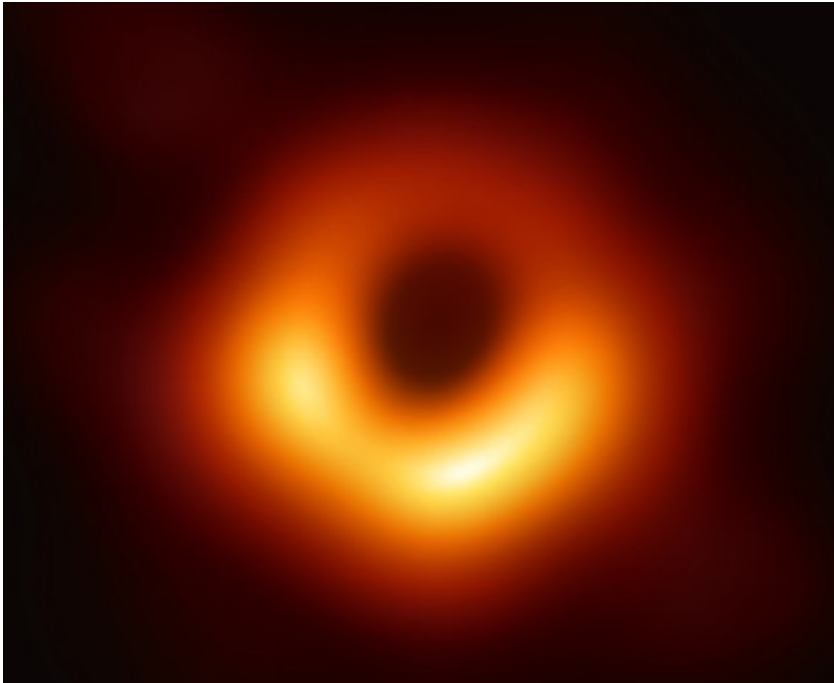
L'explosion ne dure que quelques millisecondes, mais la supernova peut rester visible plusieurs mois

L'étoile à neutrons est encore plus dense que la naine blanche

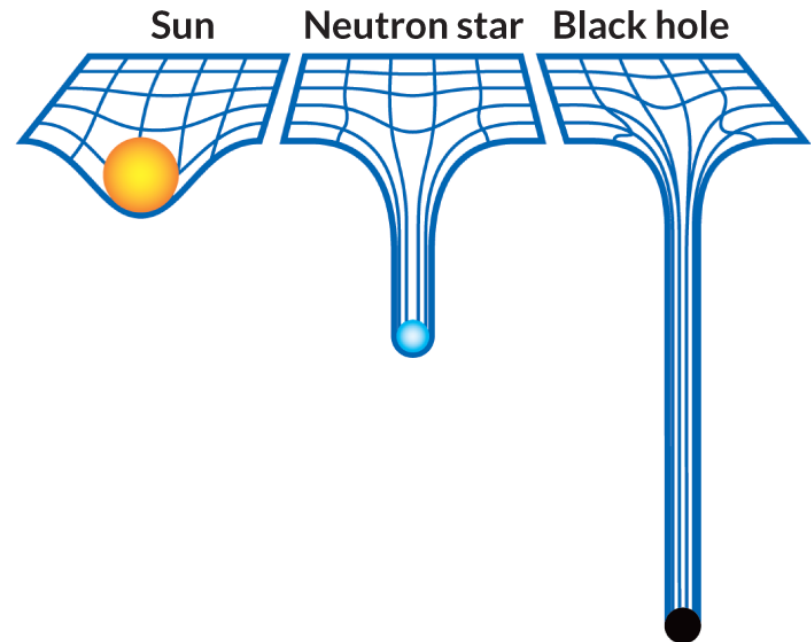
→ une cuillère à café = la masse du mont Everest !

Autre scénario : Le trou noir

Si une étoile fait plus de **25 fois la masse du Soleil**,
l'étoile à neutrons s'effondre sur elle-même jusqu'à former **un trou noir**

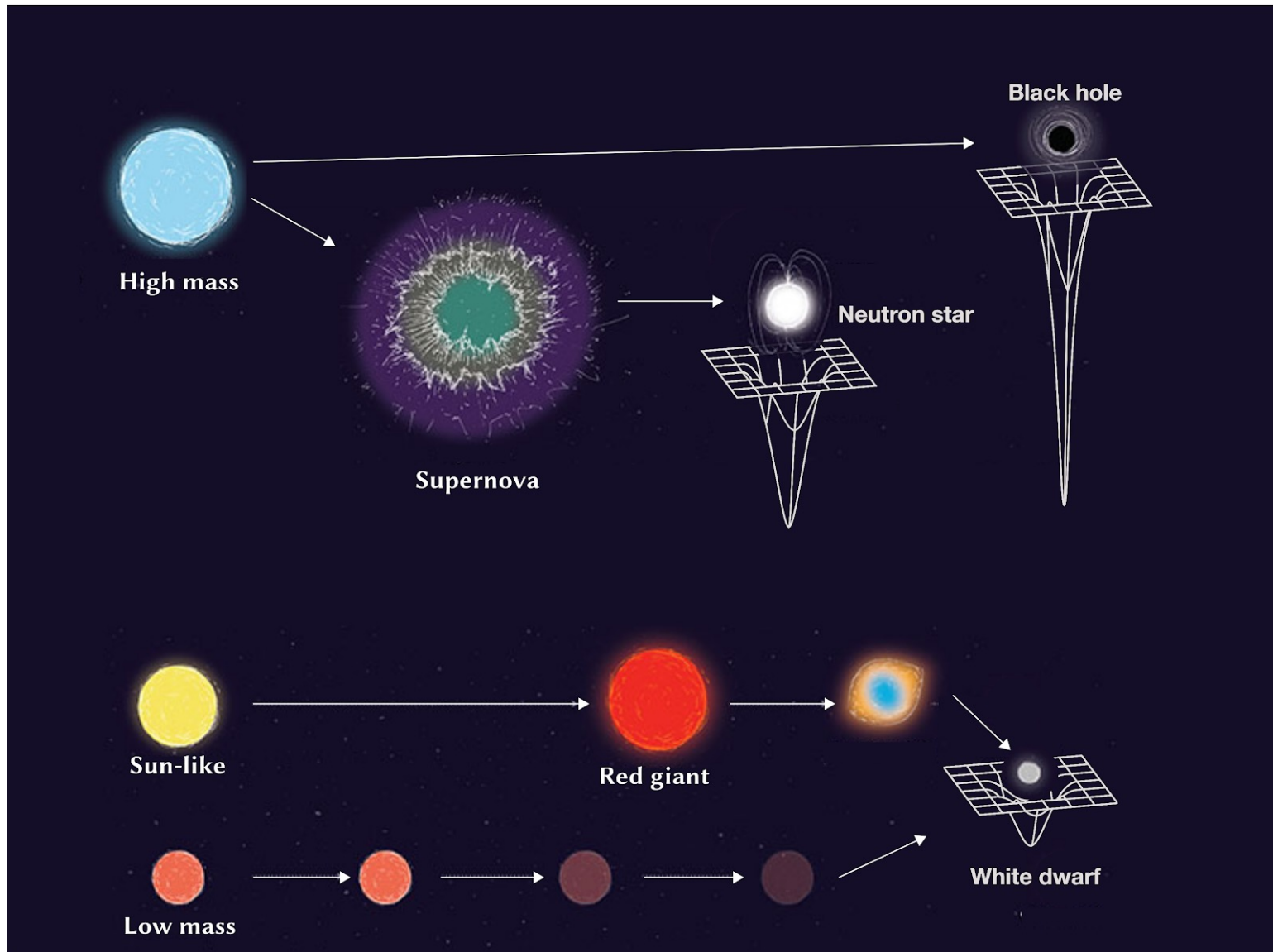


[EHT]



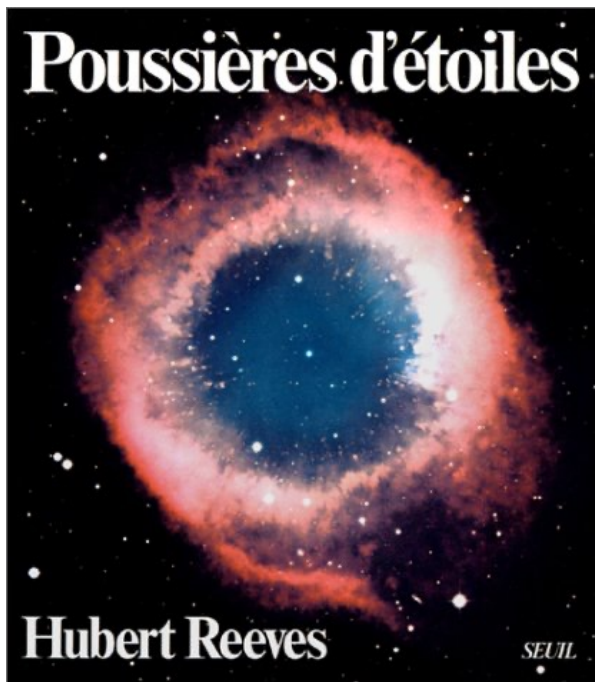
Un trou noir est un **trou dans l'espace-temps** causé par une masse trop compacte
→ il est appelé ainsi car il absorbe tout ce qui est trop proche, même la lumière

Résumé des évolutions stellaires possibles



« Poussière d'étoile »

En 2014, l'astrophysicien Hubert Reeves dit que nous sommes tous composés de « poussière d'étoile »



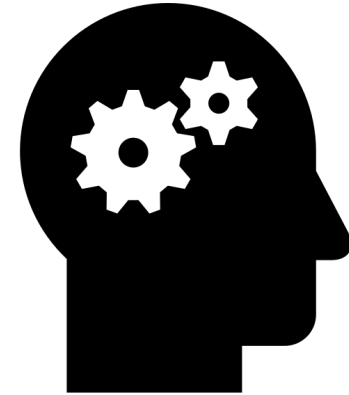
H B																		He B															
Li C	Be C																	B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L										
Na L	Mg L																	Al \$ L	Si \$ L	P L	S S L	Cl L	Ar L										
K L	Ca L	Sc L	Ti \$ L	V \$ L	Cr L	Mn L	Fe \$ L	Co \$	Ni \$	Cu L	Zn L	Ga \$	Ge \$	As L	Se \$	Br \$	Kr \$																
Rb \$	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo \$ L	Tc L	Ru \$ L	Rh \$	Pd \$ L	Ag \$ L	Cd \$ L	In \$ L	Sn \$ L	Sb \$	Te \$	I \$	Xe \$																
Cs \$	Ba L																	Hf \$ L	Ta \$ L	W \$ L	Re \$	Os \$	Ir \$	Pt \$	Au \$	Hg \$ L	Tl \$ L	Pb \$	Bi \$	Po \$	At \$	Rn \$	
Fr \$	Ra \$																																
		La L	Ce L	Pr \$ L	Nd \$ L	Pm \$ L	Sm \$ L	Eu \$	Gd \$	Tb \$	Dy \$	Ho \$	Er \$	Tm \$	Yb \$ L	Lu \$																	
		Ac \$	Th \$	Pa \$	U \$	Np \$	Pu \$	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M																	

Legend:

- Big Bang (B)
- Large stars (L)
- Supernovae (\$)
- Cosmic rays (C)
- Small stars (s)
- Man-made (M)

Credit: Wikipedia: Cmglee

→ C'est parce que la mort des étoiles vieilles et massives permet de créer de nouveaux éléments qui permettent ensuite de créer la vie !



Exercices et TDs

