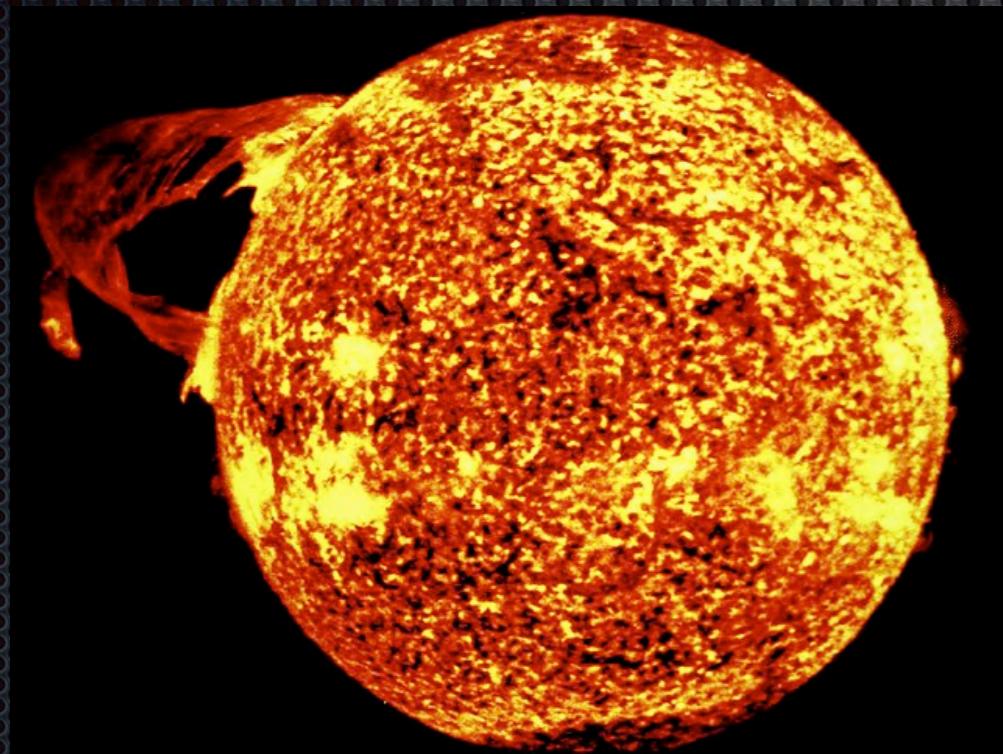


# LE SOLEIL AU COURS DU TEMPS



**François MERNIER - Superwallon**  
**Kevin TRÉFOIS - Maître Rat**  
**Judith BIERNAUX - Clopinette**

# Table des matières

- **Notre conception du Soleil**
- **Observation scientifique du Soleil**
- **Exercice 1 : Eratosthène**
  - **PAUSE 15'**
- **Aperçu : ligne de vie du Soleil**

# Table des matières

- Le présent
  - Fusion nucléaire
  - La structure du Soleil
  - Le Soleil dans toutes les couleurs
  - L'activité solaire
  - Diagramme HR et le Soleil
    - PAUSE 15'

# Table des matières

- **Le passé : naissance du Soleil**
  - **Des nuages moléculaires au proto-Soleil**
  - **L'enfance du Soleil**
  - **Vers la séquence principale**
- **Et demain ?**
  - **Suite du “parcours” dans le diagramme HR**
  - **Discussion, débats, insultes : la fin de l’Humanité ?**

# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## Les hommes du néolithiques



Mystérieux  
indices...



# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## Les hommes du néolithiques

- **Salle des Taureaux éclairée par le Soleil couchant au solstice d'été**
- **Newgrange, Irlande, 3200 ans AC : chambres éclairées au levant du solstice d'hiver**



panoramadelart.com

<http://www.archeociel.com/lascaux.htm>

**Astronomie ? Jalons routiers ? Emblème d'une tribu  
? Lieux de culte ?**

# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## Les hommes du néolithiques

### Étude de l'orientation de plusieurs momuments

- **Alexandre et Archibald Thom, 1930's**

*alignements vers les levers et couchers extrêmes  
du Soleil et de la Lune avec une précision d'une  
minute d'arc*

- **Clive Ruggles, 1980's**

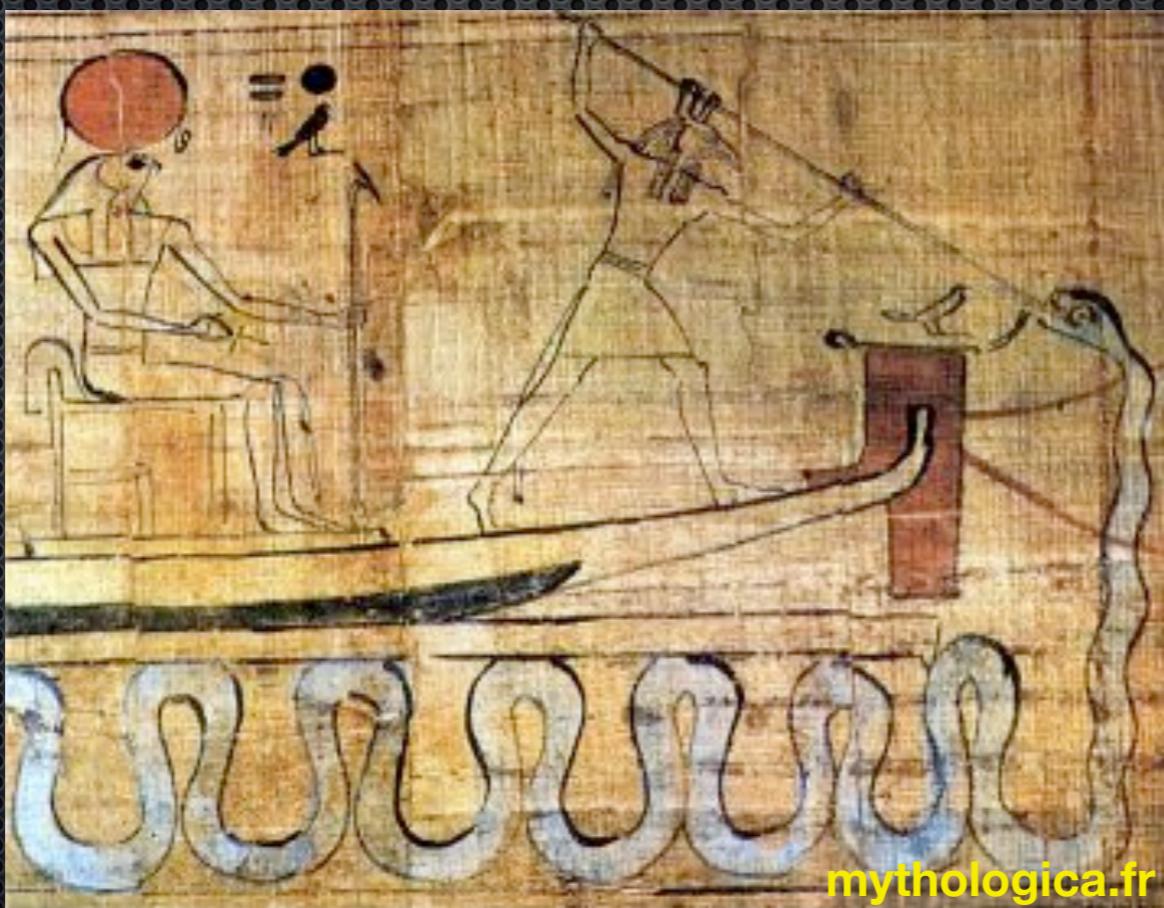
*alignements astronomiques d'une précision  
n'excédant pas 1°*

→ **Observation durable et minutieuse  
du Soleil**

# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## L'Égypte antique

- Origine du culte solaire dans l'orient
- Voyage de Rê sur sa barque solaire
- Notion de cycle - préoccupés par le temps



[mythologica.fr](http://mythologica.fr)



[mythologica.fr](http://mythologica.fr)

# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

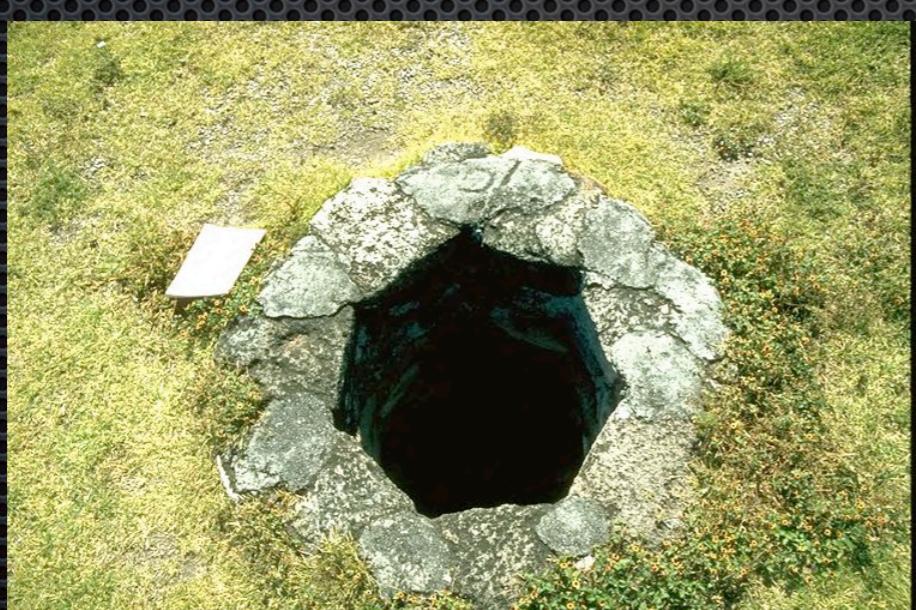
## L'Égypte antique

- Culte quasi-monothéiste voué au Dieu Soleil
- Akhenaton, XIV<sup>e</sup> siècle AC
- Ne parvient pas à s'imposer après la mort d'Akhenaton
- Origine contestée de nos cultes monothéistes



# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## Les Amérindiens



le.ac.uk

- Soleil = objet principal du ciel maya
- Dirigeant suprême
- Alignements, encore et toujours...

# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## Les Amérindiens

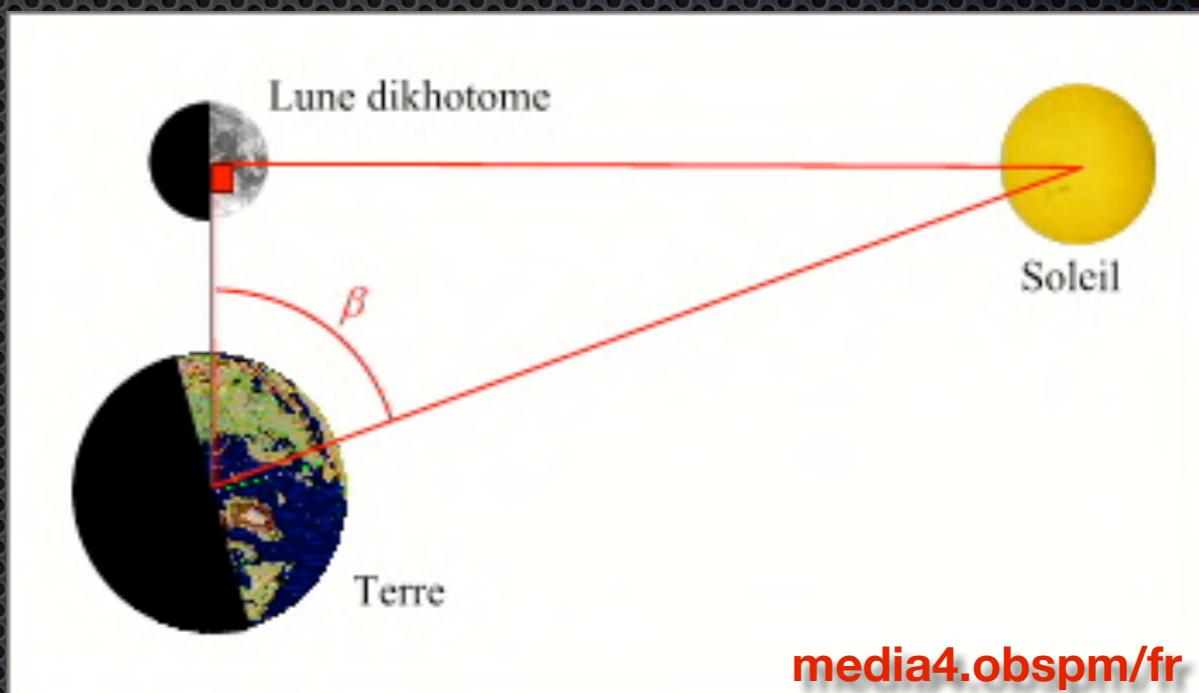
- Torreon du Machu Picchu
- Cerro Pichu, Cuzco : calendrier solaire observable depuis le centre ville



# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

## La Grèce antique

- Mesure du monde et de l'Univers - cf Ex. 1
- Observation scrupuleuse du ciel pour le “mettre en maths”
- Aristarque : héliocentrisme



[media4.obspm.fr](http://media4.obspm.fr)

# NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

La Rome antique

L'islam médiéval

La Mésopotamie

La Chine

...

# OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

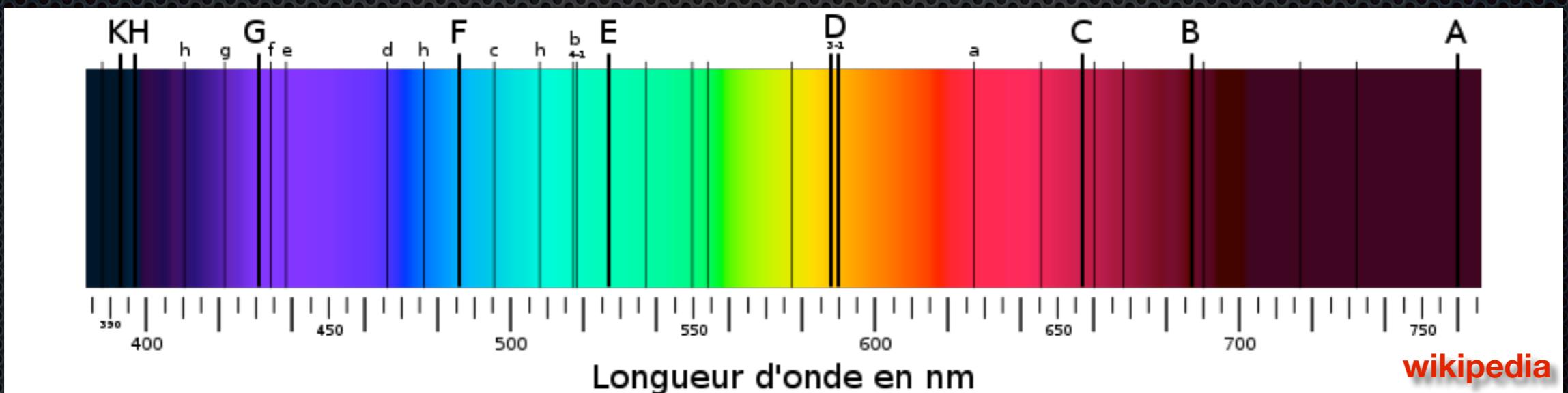
## Mieux comprendre la physique du Soleil

XVII<sup>e</sup> siècle : invention de la lunette

→ Observation taches solaires (Scheiner, Galilée)

**! DANGER**

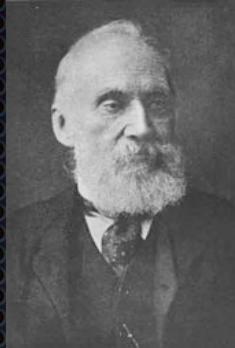
→ Étude spectroscopique : Fraunhofer, Wollaston



# OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

## Mieux comprendre la physique du Soleil

**Modèle de la “combustion” du Soleil**  
**D'où proviennent la chaleur et la lumière qu'il dégage ?**



**Lord Kelvin**

“Le Soleil tire son énergie de l'impact continual météorites” - **1854**

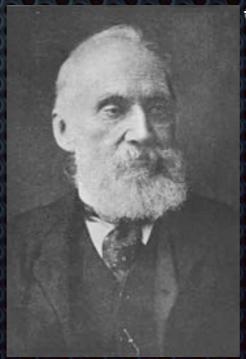


**Helmholtz**

“L'énergie rayonnée par le soleil provient de son effondrement gravitationnel” - **1854**

**Vous avez raison !**

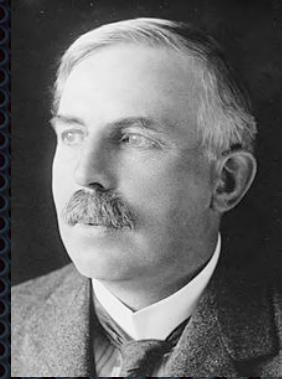
→ **Soleil serait alors plus jeune que preuves géologiques**



# OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

## Mieux comprendre la physique du Soleil

**Modèle de la “combustion” du Soleil**  
**D'où proviennent la chaleur et la lumière qu'il dégage ?**



**Rutherford**

“Les géologues ont raison quant à l’âge du Soleil”

“La source d’énergie du Soleil pourrait être  
de la décroissance radioactive” - **1904**



**Henry Norris Russel**

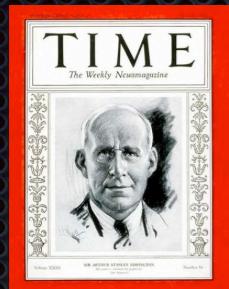
“La clé dans cette énigme, c'est la  
température du cœur du Soleil...” - **1919**

# OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

## Mieux comprendre la physique du Soleil

### Modèle de la “combustion” du Soleil

### D'où proviennent la chaleur et la lumière qu'il dégage ?



Eddington & Schwarzschild



Bethe

“Les conditions pour la fusion du protium en hélium sont réunies au sein du Soleil. Ces réactions pourraient être responsables de son émission d'énergie” - 1926

“Voici le détail des réactions au cœur du Soleil : la chaîne proton-proton” - 1938

[nobelprize.org](http://nobelprize.org) - how the sun shines

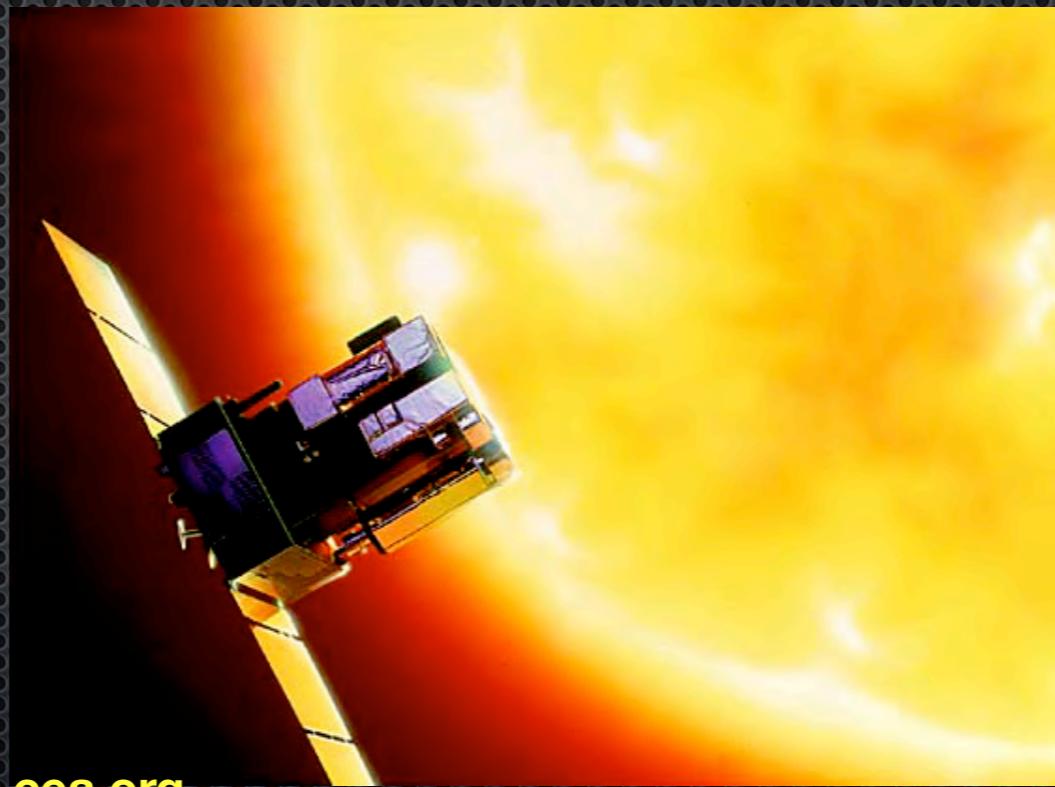
### Confirmations apportées au fur et à mesure par observations

# OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

Mieux comprendre la physique du Soleil

## Observations du Soleil *en toute sécurité*

- Grand nombre d'observatoires sur Terre
- Satellites de tous pays vers 1990's
- Observation dans toutes les longueurs d'ondes



# EXERCICE 1

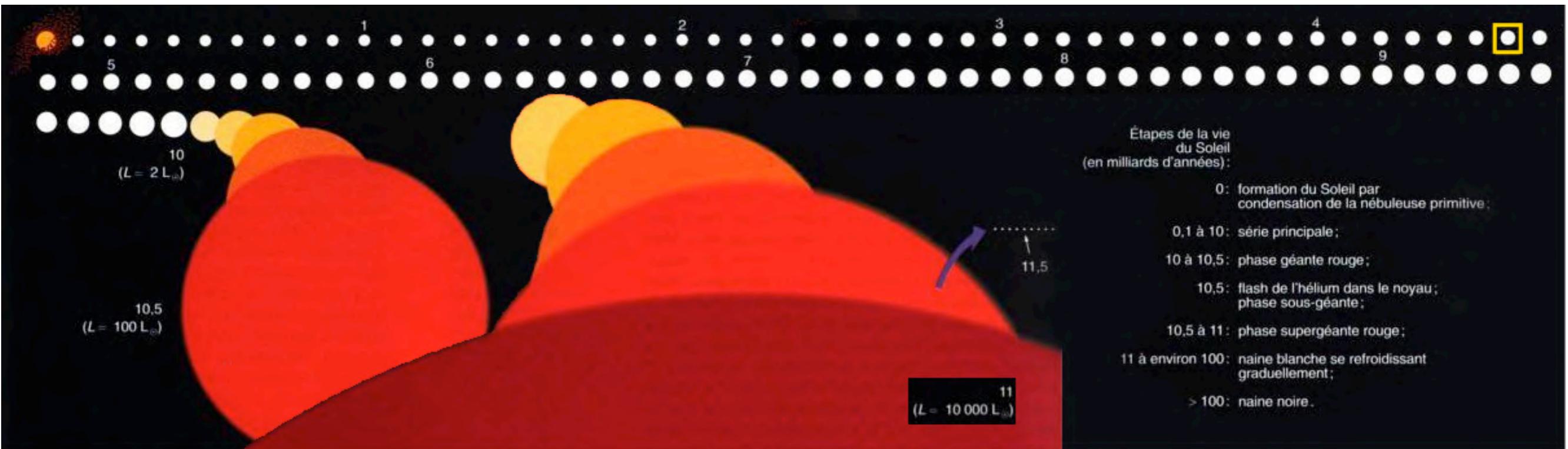
**Eratosthène**, mathématicien grec, calcula, au IIe siècle AC, le rayon de la Terre



# PAUSE !



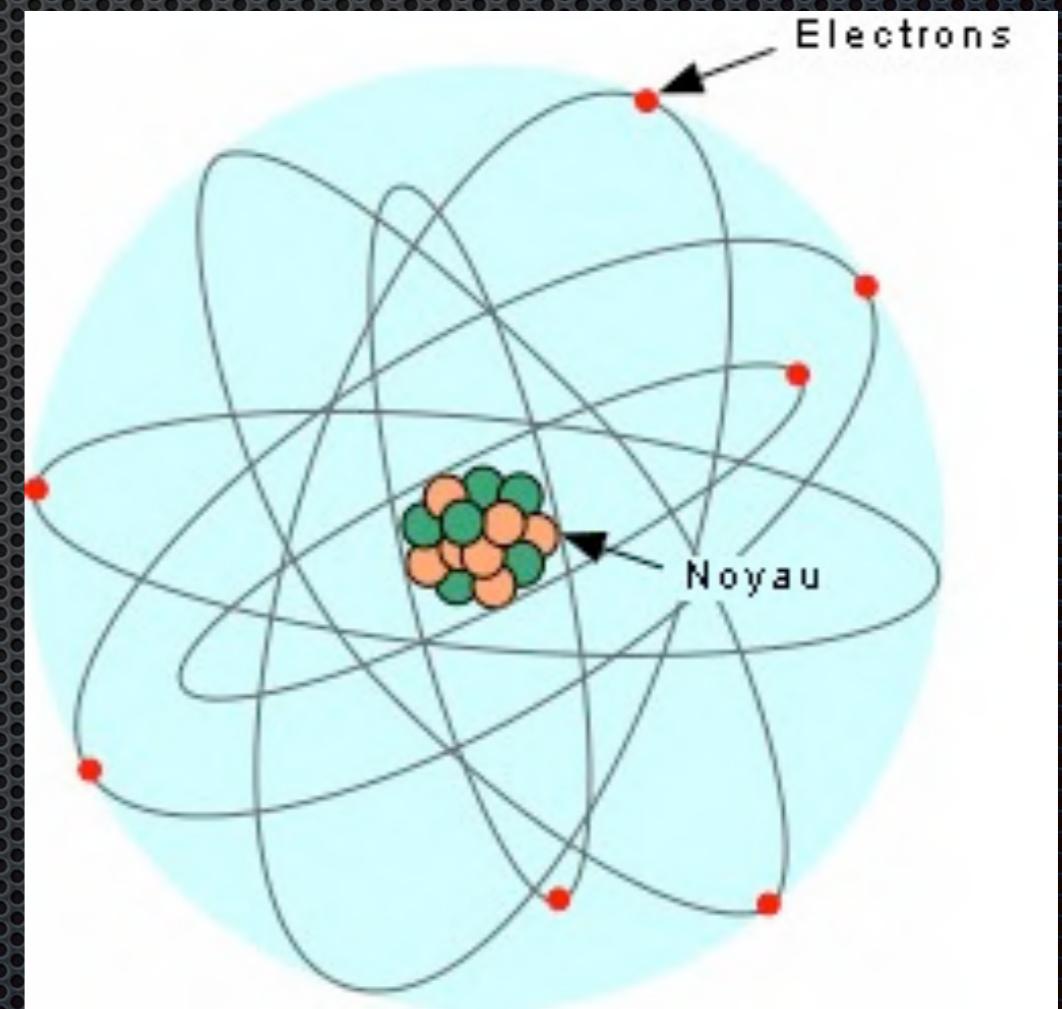
# LA LIGNE DE VIE DU SOLEIL



# FUSION NUCÉAIRE

## Le noyau

- Atome = noyau + électrons
- Noyau constitué de nucléons  
protons  
neutrons



# FUSION NUCLEAIRE

## Le noyau

- Nombre de protons définit élément



X = symbole chimique  
A = nombre de masse  
= nombre total de nucléons  
Z = nombre de protons

# Los Alamos National Laboratory Chemistry Division

1A 1 <b>H</b> hydrogen 1.008	2A 3 <b>Li</b> lithium 6.941	4 <b>Be</b> beryllium 9.012	2 <b>He</b> helium 4.003
11 <b>Na</b> sodium 22.99	12 <b>Mg</b> magnesium 24.31	3B 20 <b>Ca</b> calcium 40.08	4B 21 <b>Sc</b> scandium 44.96
19 <b>K</b> potassium 39.10	22 <b>Ti</b> titanium 47.88	23 <b>V</b> vanadium 50.94	5B 24 <b>Cr</b> chromium 52.00
37 <b>Rb</b> rubidium 85.47	38 <b>Sr</b> strontium 87.62	39 <b>Y</b> yttrium 88.91	40 <b>Zr</b> zirconium 91.22
55 <b>Cs</b> cesium 132.9	56 <b>Ba</b> barium 137.3	57 <b>La*</b> lanthanum 138.9	72 <b>Hf</b> hafnium 178.5
87 <b>Fr</b> francium (223)	88 <b>Ra</b> radium (226)	89 <b>Ac~</b> actinium (227)	104 <b>Rf</b> rutherfordium (257)
Lanthanide Series*	58 <b>Ce</b> cerium 140.1	59 <b>Pr</b> praseodymium 140.9	60 <b>Nd</b> neodymium 141.0
Actinide Series~	90 <b>Th</b> thorium 232.0	91 <b>Pa</b> protactinium (231)	92 <b>U</b> uranium (238)
3A 5 <b>B</b> boron 10.81	4A 6 <b>C</b> carbon 12.01	5A 7 <b>N</b> nitrogen 14.01	6A 8 <b>O</b> oxygen 16.00
13 <b>Al</b> aluminum 26.98	14 <b>Si</b> silicon 28.09	15 <b>P</b> phosphorus 30.97	16 <b>S</b> sulfur 32.07
31 <b>Ga</b> gallium 69.72	32 <b>Ge</b> germanium 72.58	33 <b>As</b> arsenic 74.92	34 <b>Se</b> selenium 78.96
30 <b>Zn</b> zinc 65.39	31 <b>Cd</b> cadmium 112.4	49 <b>In</b> indium 114.8	50 <b>Sn</b> tin 118.7
77 <b>Ir</b> iridium 190.2	78 <b>Pt</b> platinum 195.1	79 <b>Au</b> gold 197.0	80 <b>Hg</b> mercury 200.5
109 <b>Mt</b> meitnerium (266)	110 <b>Ds</b> darmstadtium (271)	111 <b>Uuu</b> (272)	112 <b>Uub</b> (277)
61 <b>Sm</b> samarium (150.4)	62 <b>Eu</b> europium 152.0	63 <b>Gd</b> gadolinium 157.3	64 <b>Tb</b> terbium 158.9
65 <b>Dy</b> dysprosium 162.5	66 <b>Ho</b> holmium 164.9	67 <b>Er</b> erbium 167.3	68 <b>Tm</b> thulium 168.9
93 <b>Np</b> neptunium (237)	94 <b>Pu</b> plutonium (242)	95 <b>Am</b> americium (243)	96 <b>Cm</b> curium (247)
97 <b>Bk</b> berkelium (247)	98 <b>Cf</b> berkelium (249)	99 <b>Es</b> einsteinium (254)	100 <b>Fm</b> fermium (253)
101 <b>Md</b> mendelevium (256)	102 <b>No</b> nobelium (254)	103 <b>Lr</b> lawrencium (257)	114 <b>Uuh</b> (298)
118 <b>Uuo</b> (?)			

**CHEMISTRY**

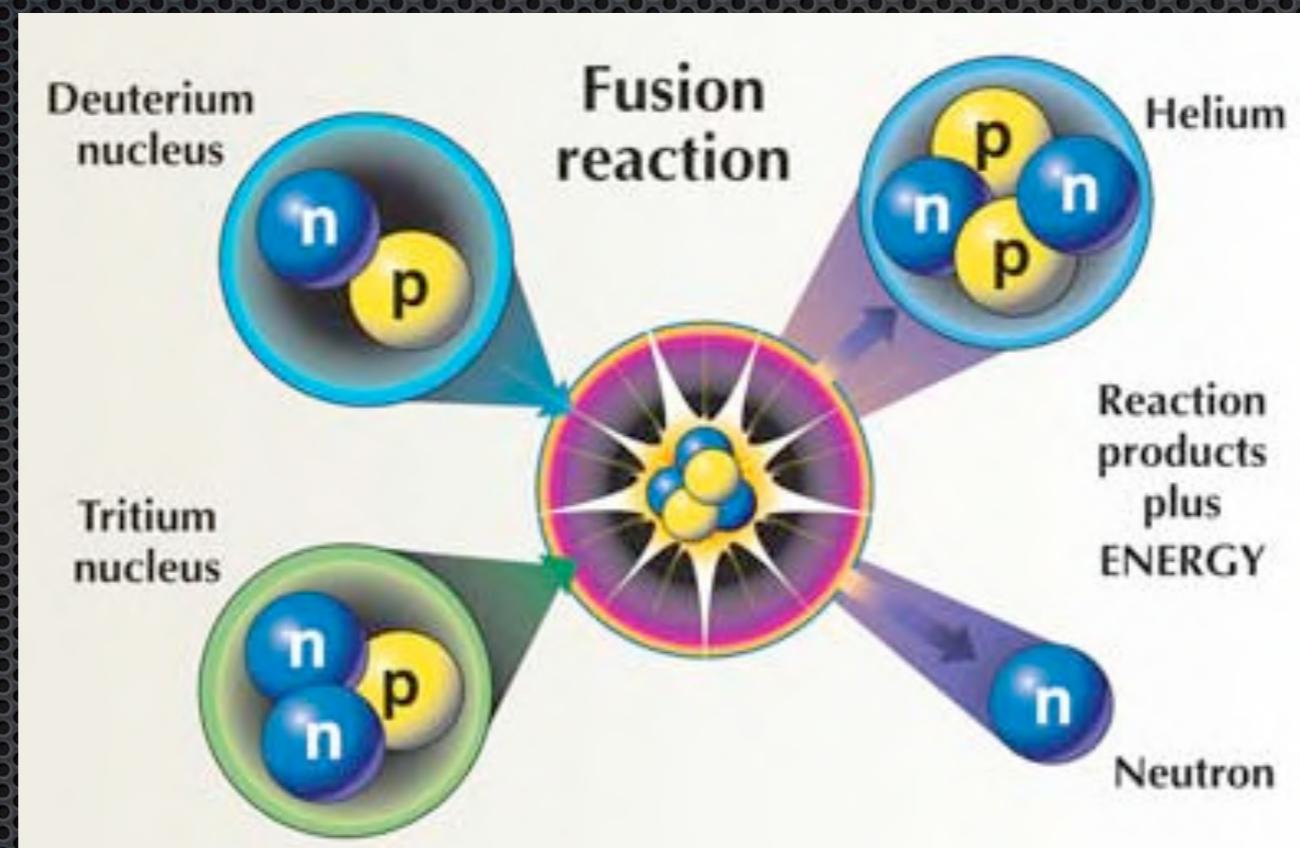


Los Alamos  
NATIONAL LABORATORY

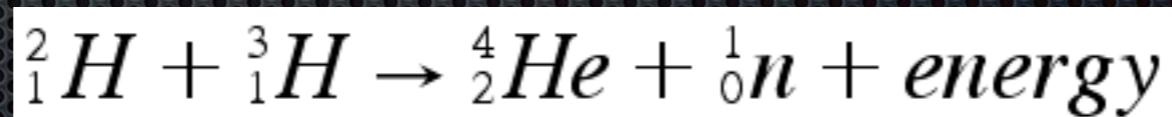
# FUSION NUCLÉAIRE

## Réaction de fusion

**FUSION = association de deux noyaux légers pour en former un plus lourd**

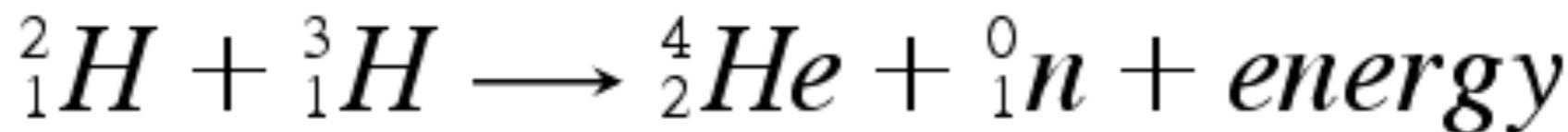
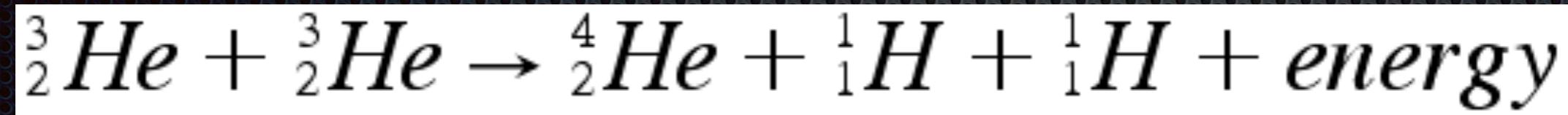


[pourquoilecielestbleu.blogspot.com](http://pourquoilecielestbleu.blogspot.com)



# FUSION NUCLEAIRE

## Réaction de fusion



Noyaux légers qui  
doivent s'interpénétrer

Noyau lourd et neutron  
avec une grande  
énergie cinétique

# FUSION NUCLÉAIRE

## Réaction de fusion

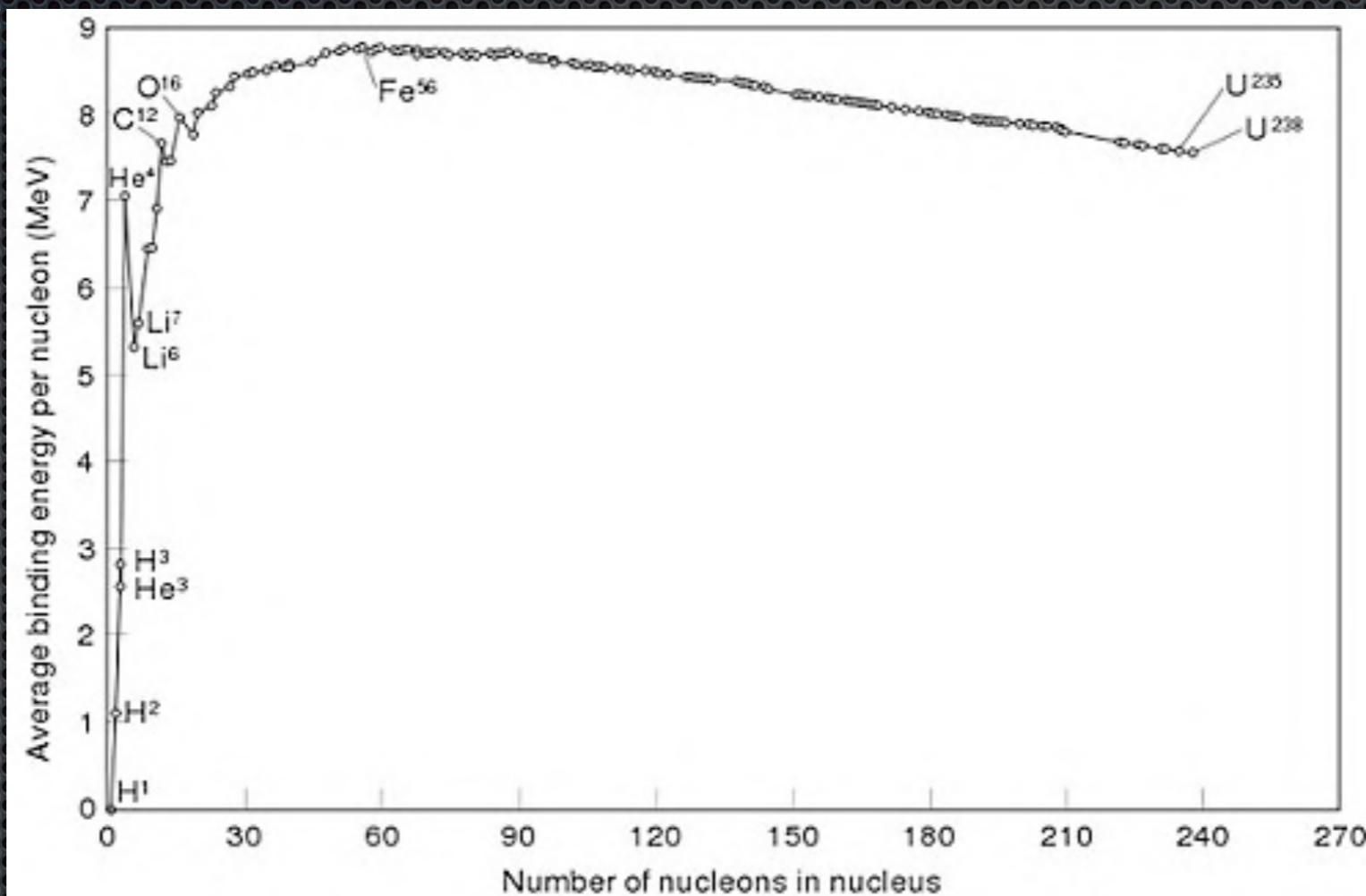
Pouvez-vous écrire les réactions suivantes de façon conventionnelle ?

- *Fusion d'un noyau d'hydrogène et d'un noyau de deutérium pour obtenir un noyau d'hélium 3*
- *Fusion de deux noyaux d'hélium 3 pour obtenir un noyau d'hélium 4 et deux noyaux d'hydrogène*

# FUSION NUCLÉAIRE

## Réaction de fusion

### D'où provient l'énergie libérée lors d'une réaction de fusion ?

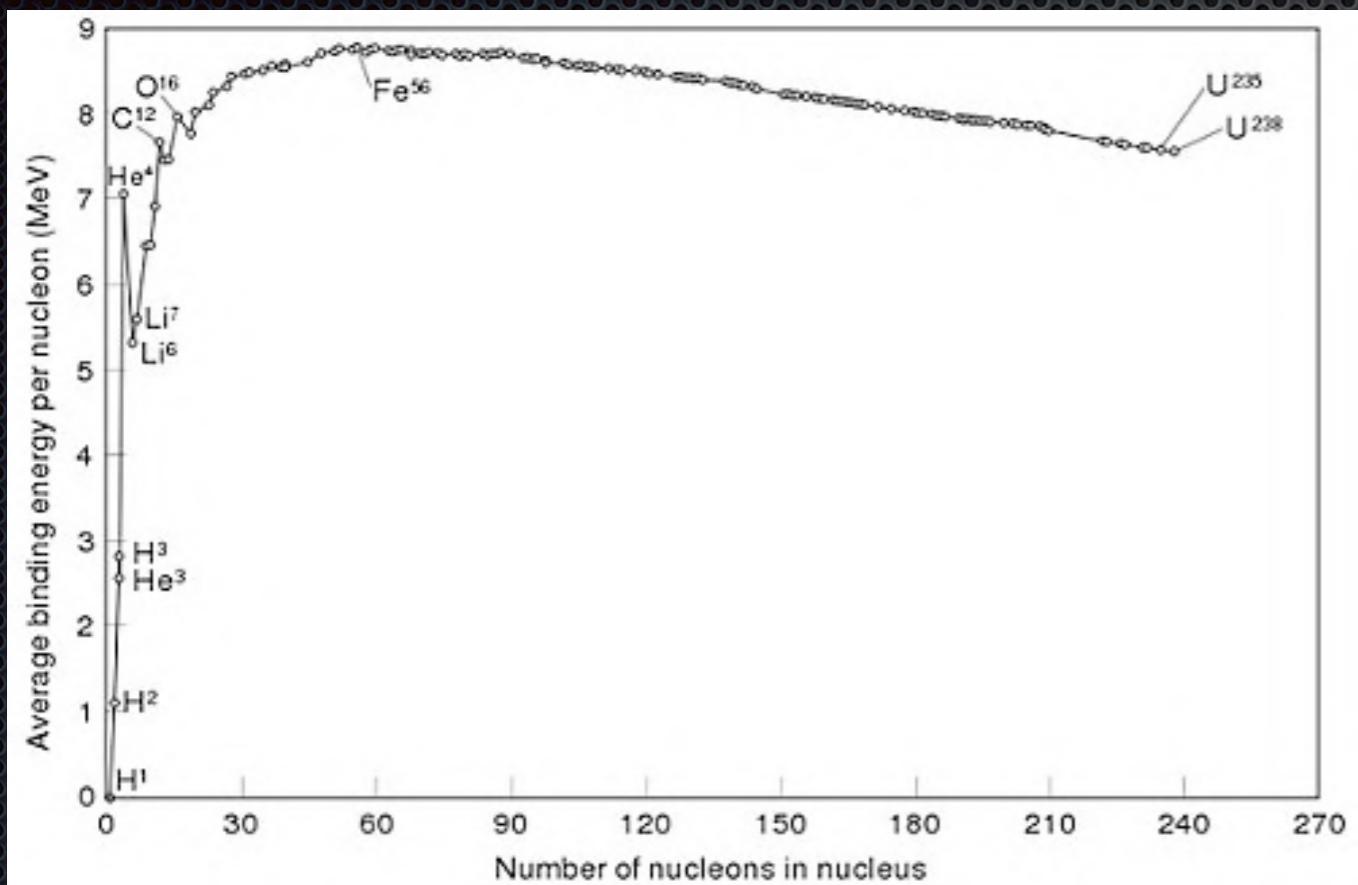


L. Dreesen, Ulg

... de l'énergie de liaison par nucléon

# FUSION NUCLÉAIRE

## Réaction de fusion

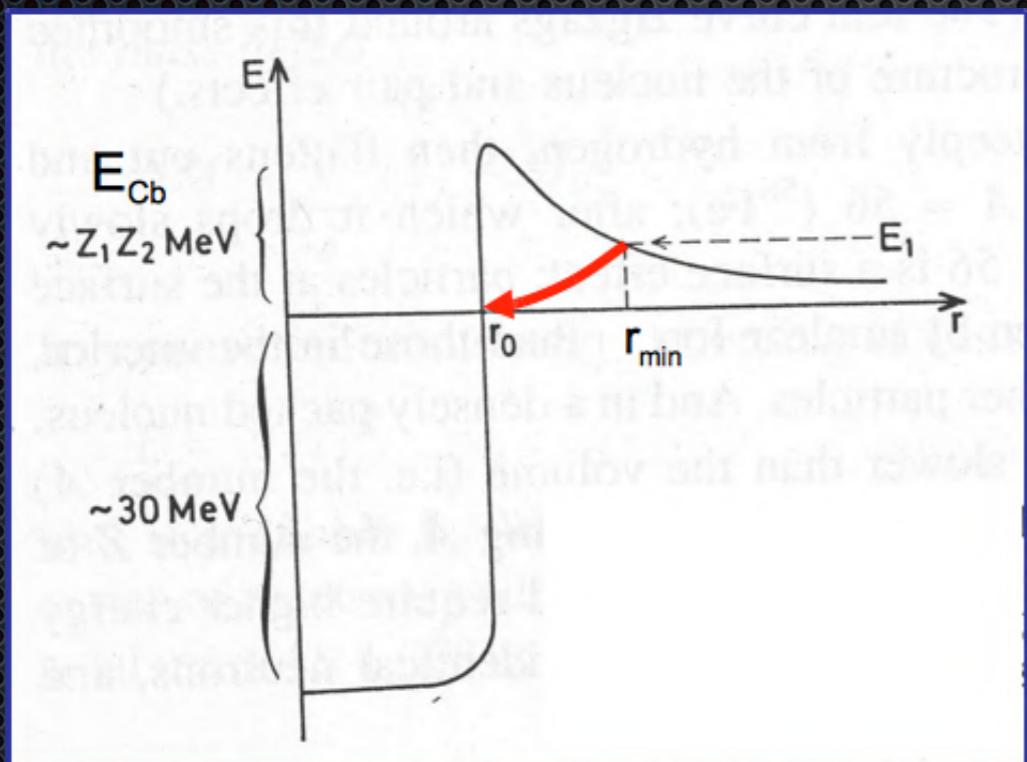


- Plus B/A est élevé, plus le noyau est stable
  - “Le plus stable” = Fe
  - Noyaux légers tendent à fusionner
  - Gain en stabilité = dégagement énergie

# FUSION NUCÉAIRE

## Conditions nécessaires

Noyaux légers qui doivent s'interpénétrer  
! répulsion électromagnétique, noyaux chargés



M.-A. Dupret, Ulg

**Solution existe en  
physique quantique  
= effet tunnel**

# FUSION NUCLÉAIRE

## Conditions nécessaires

- Nécessite bcp d'énergie - température et pression élevées
- Matière à l'état de plasma = “soupe” de noyaux et d'électrons libres

AU SEIN DU SOLEIL, CES CONDITIONS SONT VÉRIFIÉES - LE SOLEIL EST LE SIÈGE DE RÉACTIONS DE FUSION NUCLÉAIRE

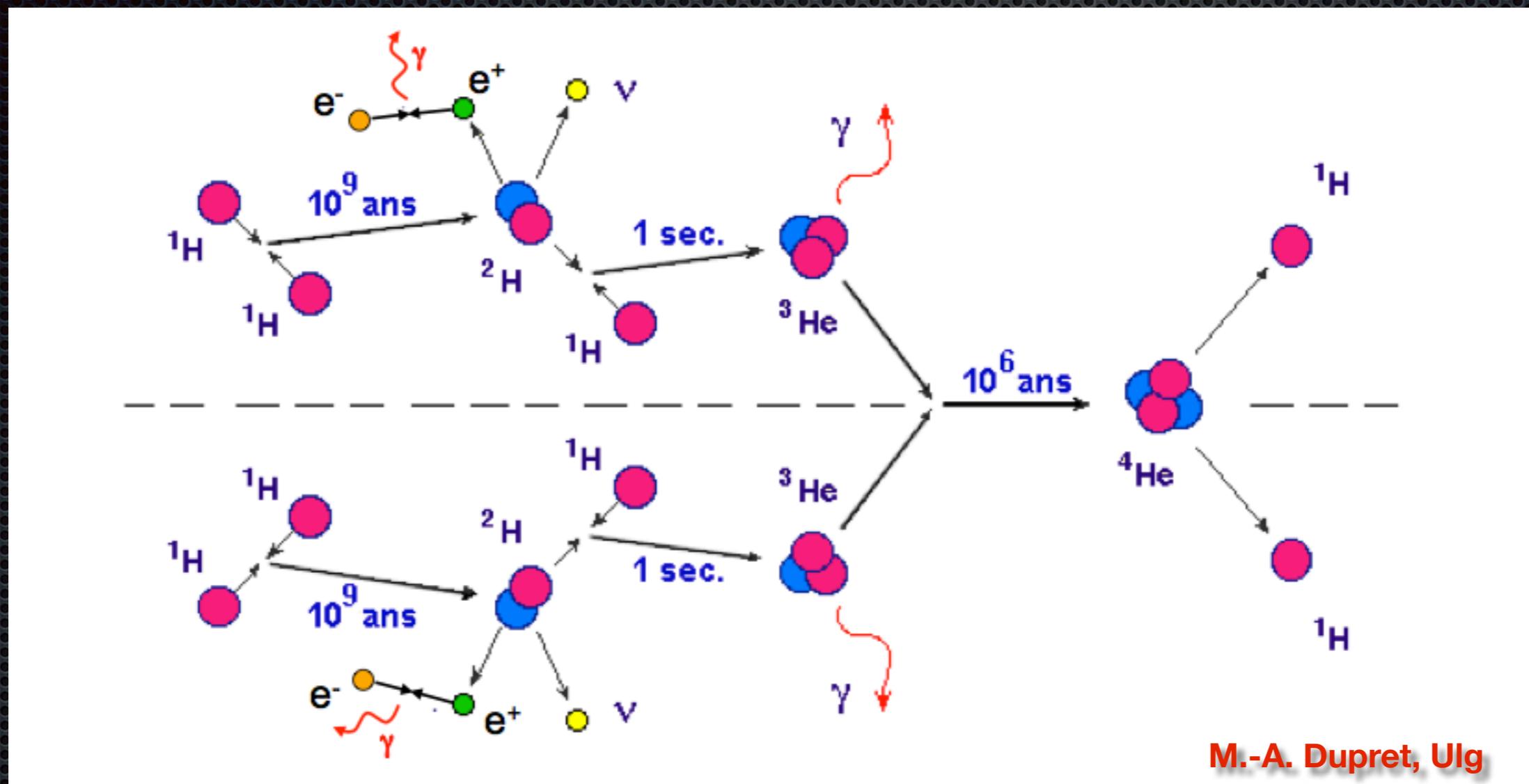
# FUSION NUCLÉAIRE

## Au sein du Soleil

- Pour des raisons d'équilibre hydrostatique, pression centrale du Soleil =  $10^{14}$  Pa
- Donc, température centrale du Soleil = 15 M K  
→ conditions ok
- Réactions nucléaires cycliques
- Cycle proton - proton

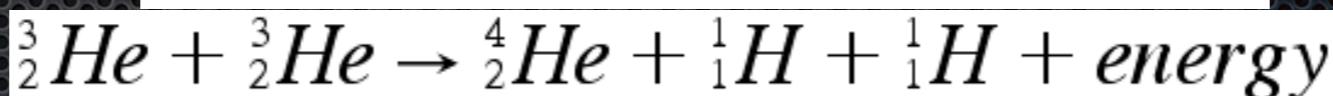
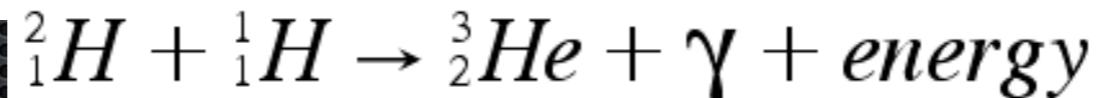
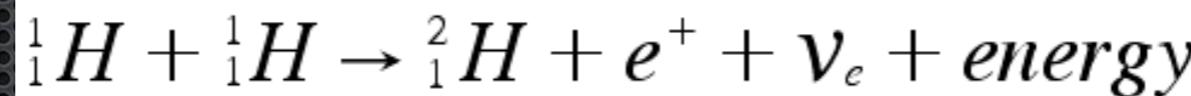
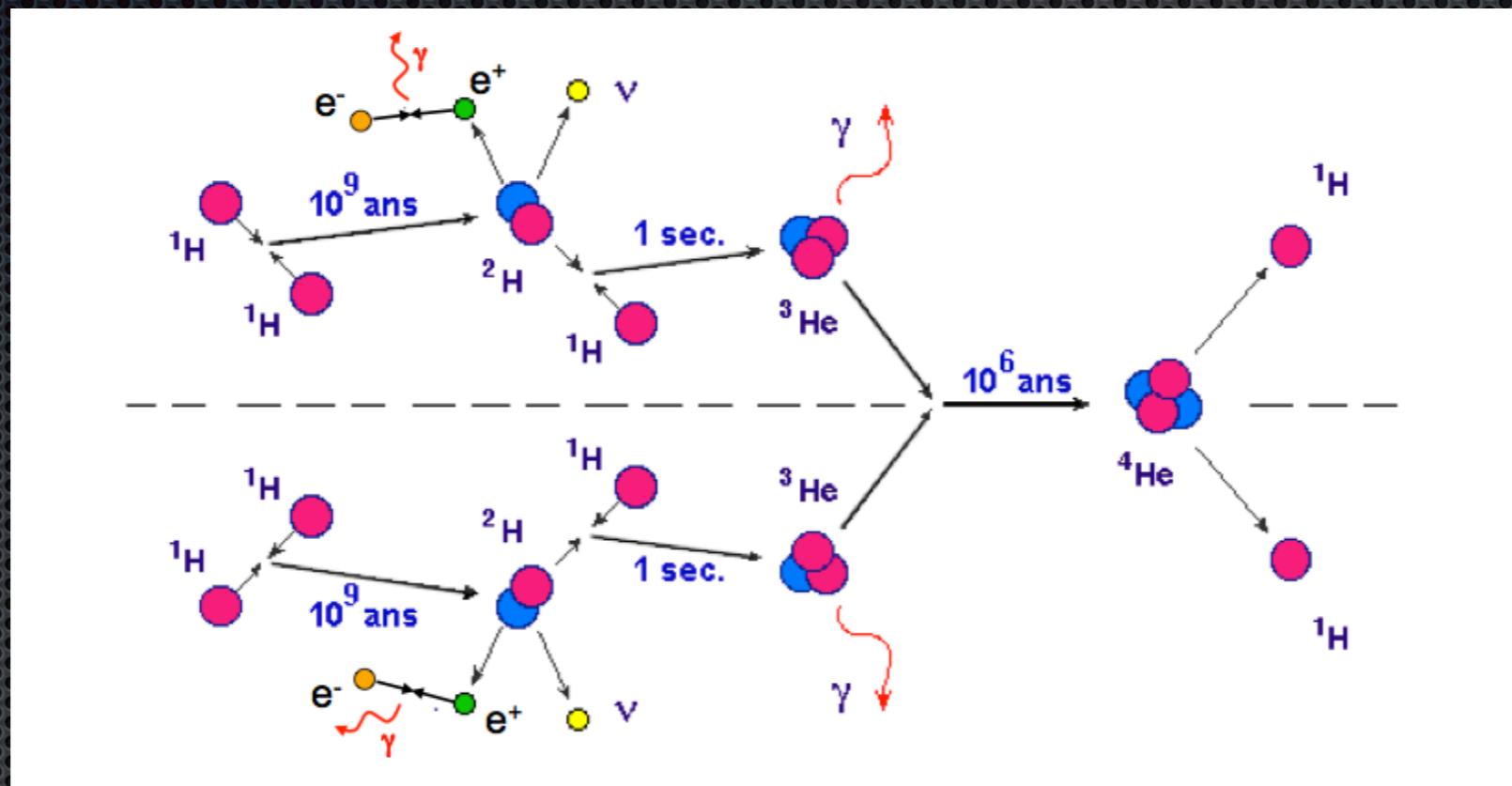
# FUSION NUCLÉAIRE

## Cycle proton - proton



# FUSION NUCLÉAIRE

## Cycle proton - proton



# FUSION NUCÉAIRE

Pour info : dans les étoiles plus massives

Il existe d'autres cycles

- CNO (présent aussi dans le Soleil)
- triple alpha
- carbone-carbone
- oxygène-oxygène
- ...

**Nucléosynthèse de tous les éléments de l'univers**

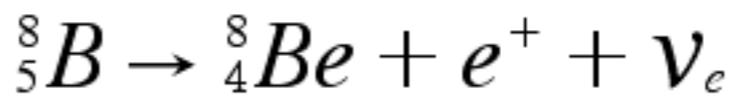
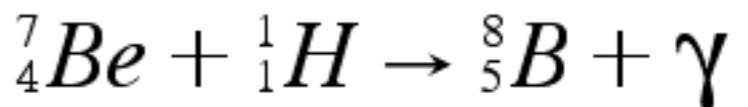
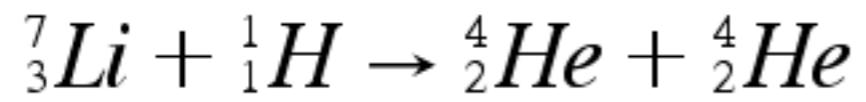
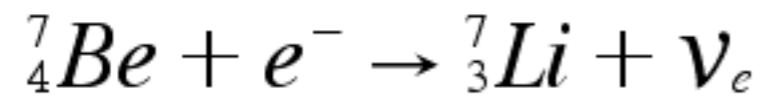
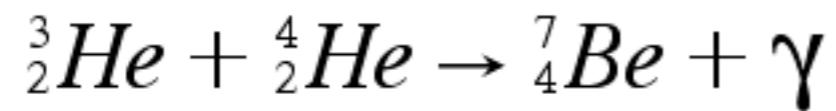
# FUSION NUCÉAIRE

Pour info : dans les étoiles plus massives

**Il existe d'autre cycles PP**

- PP2

- PP3



# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## Le soleil en chiffres

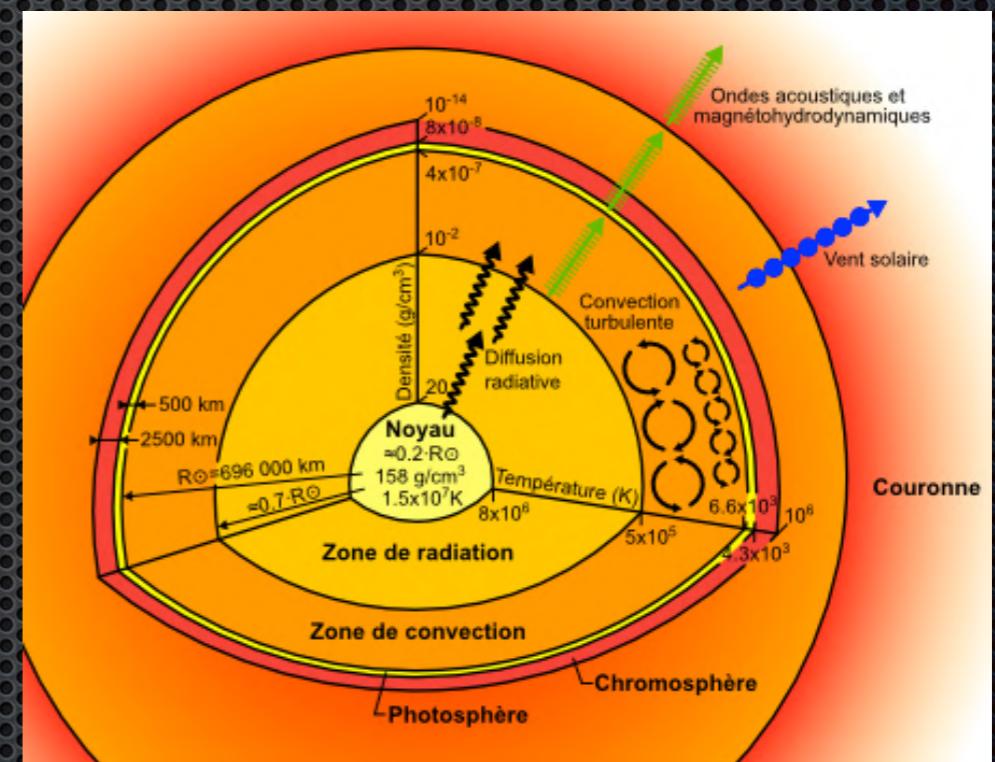
Âge: **4.6 milliards d'années**

Diamètre moyen: **1 392 000 km**

Masse:  **$1,9891 \times 10^{30}$  kg**

Il représente à lui seul **99,86%**  
de la masse du système  
solaire.

Gravité « à la surface »: **273,95**  
**m/s<sup>2</sup>**

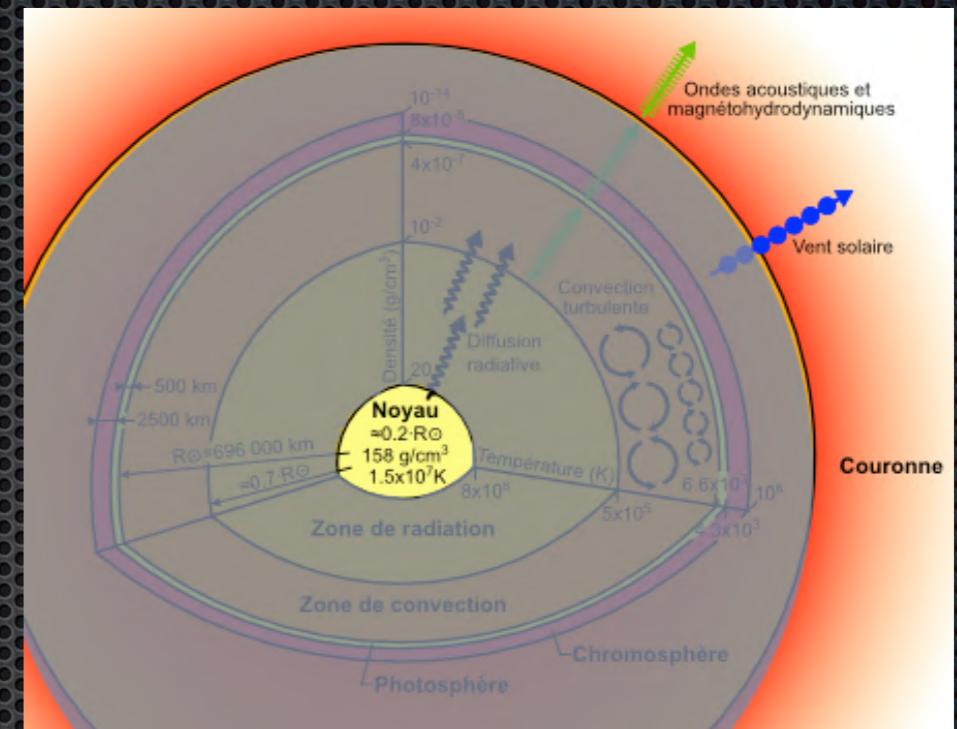


<http://ayearinboston.canalblog.com>

# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## Le noyau

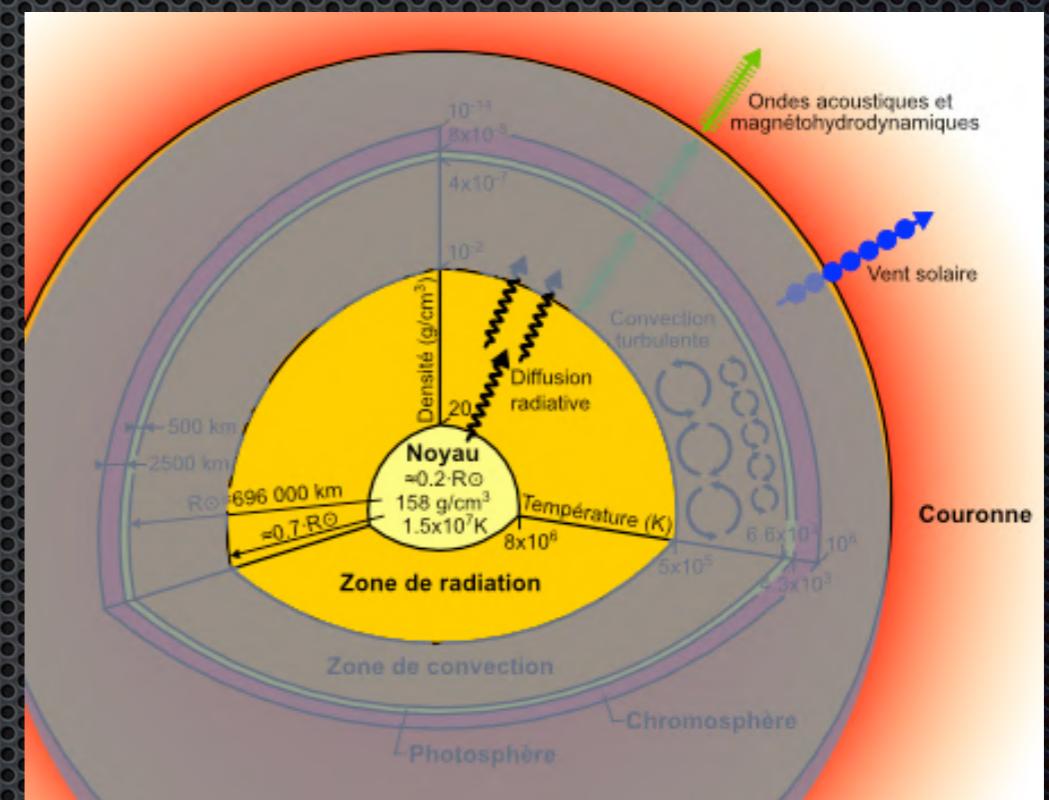
- De 0 à 0,25 rayons solaires
- Température 15 560 000 K
- Energie pp + CNO (1,5%)
- 619 millions de tonnes d'hydrogène converties en 614 millions de tonnes d'hélium chaque seconde, soit  $3,83 \times 10^{26}$  J/s.



# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## La zone de Radiation

- De 0,25 à 0,7 rayons solaires
- Température: 2 MK



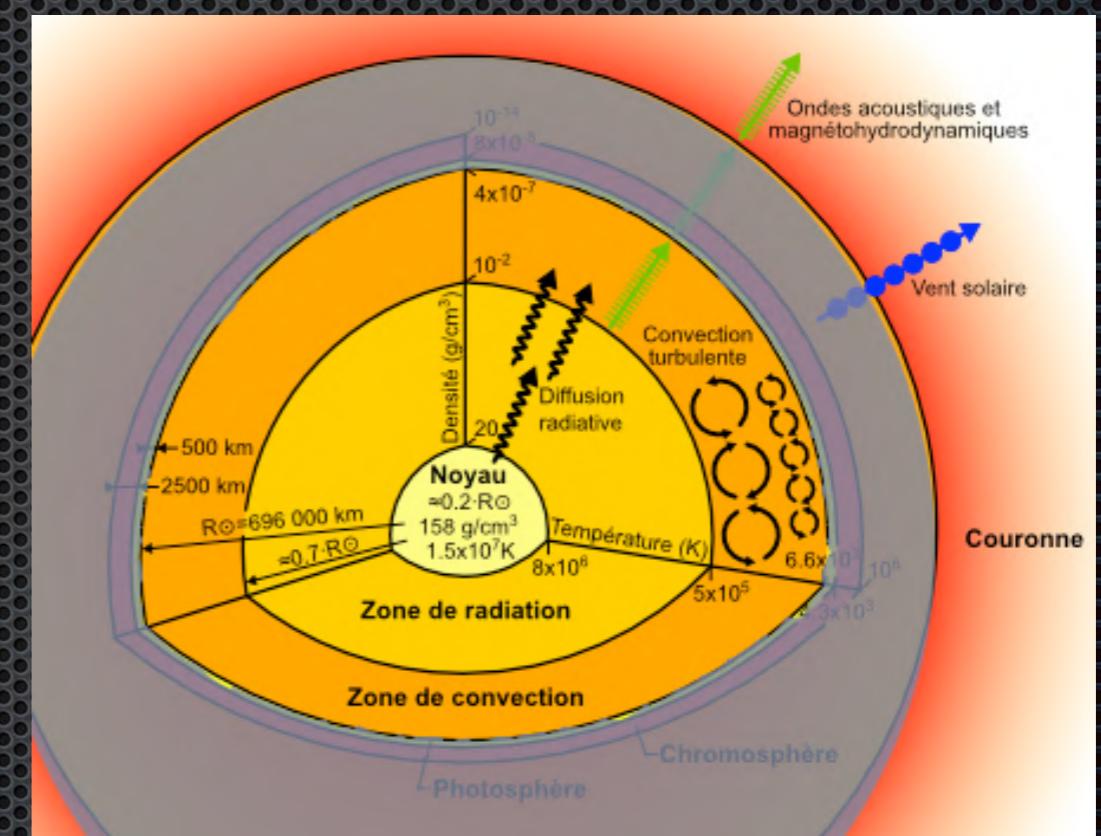
# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## La Tachocline

- Épaisse de 3000 km

## La zone de convection

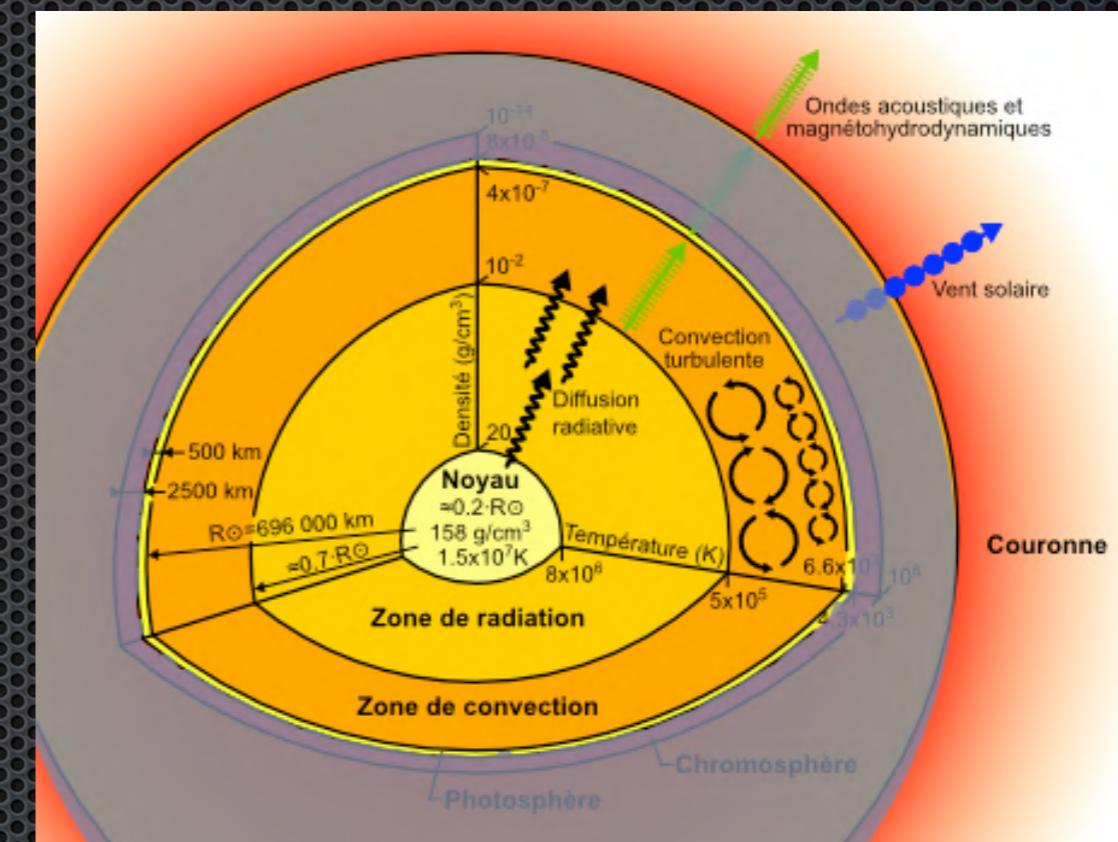
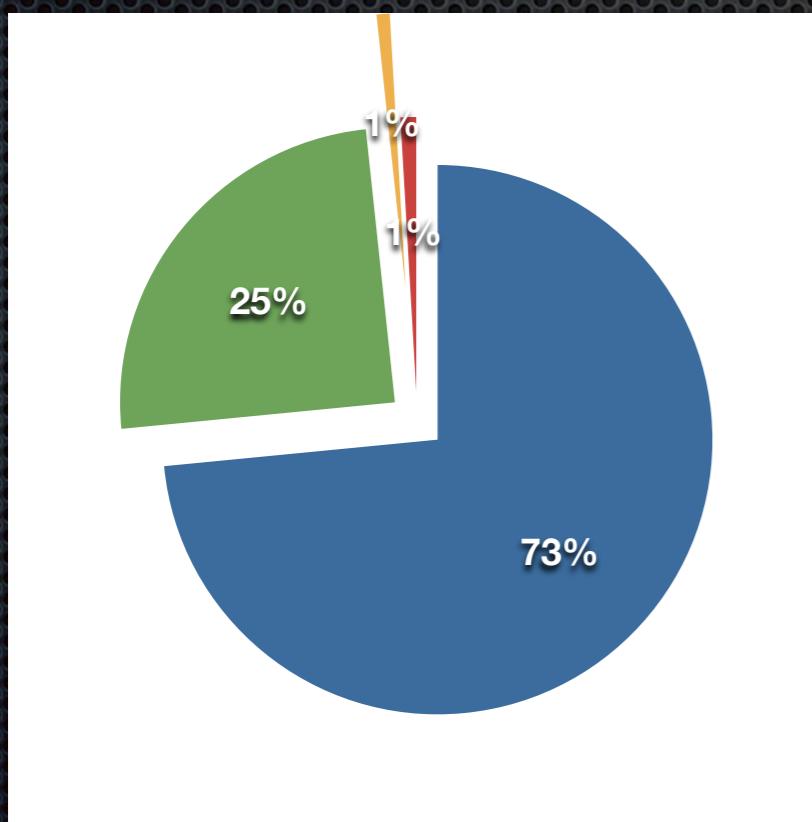
- De 0,7 rayons solaires à la surface visible du soleil
- Température de 2 MK à 5,8 MK



# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## La photosphère

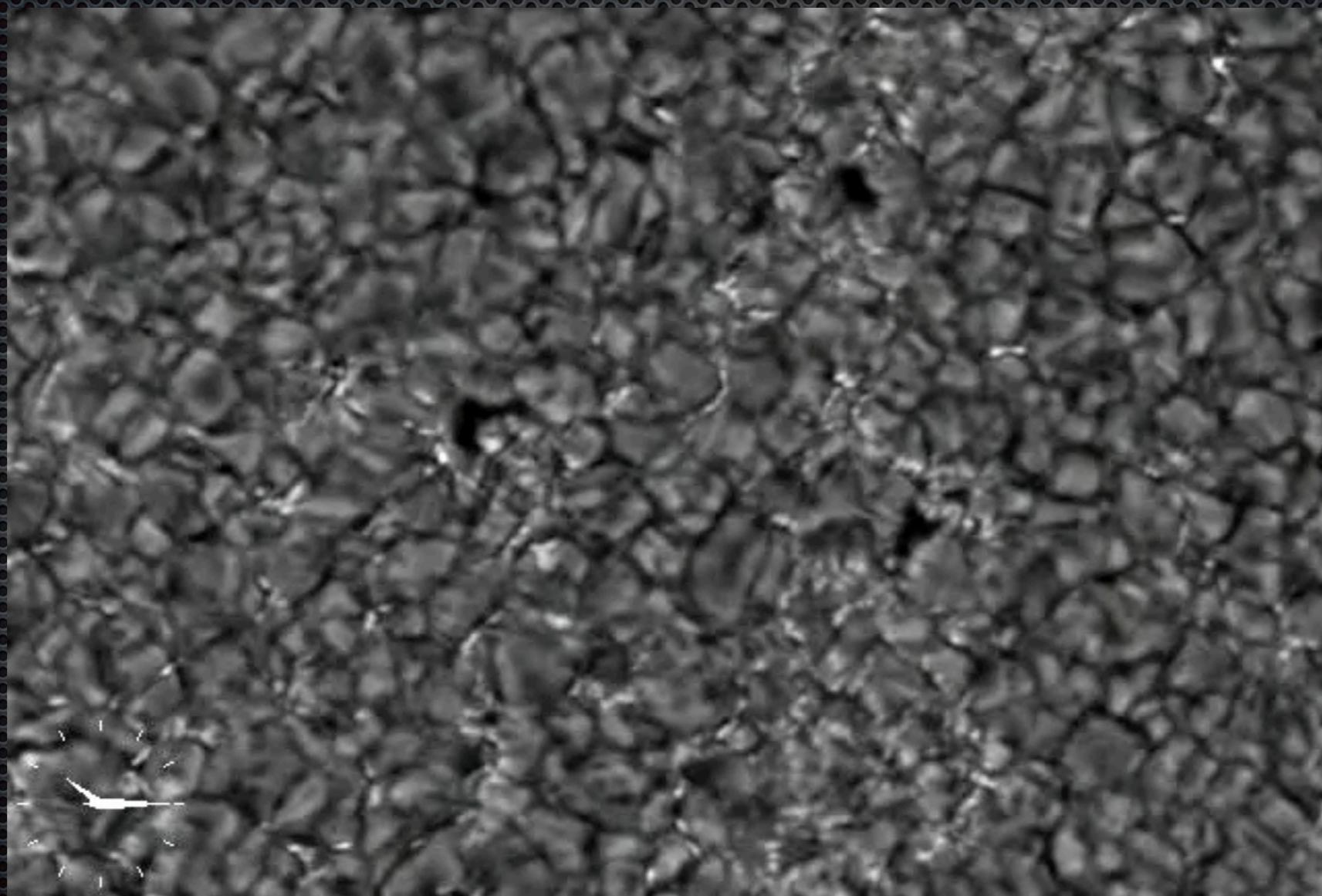
- Épaisse d'environ **400 km**
- Température d'environ **5750 K**
- Granulation



# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## La photosphère

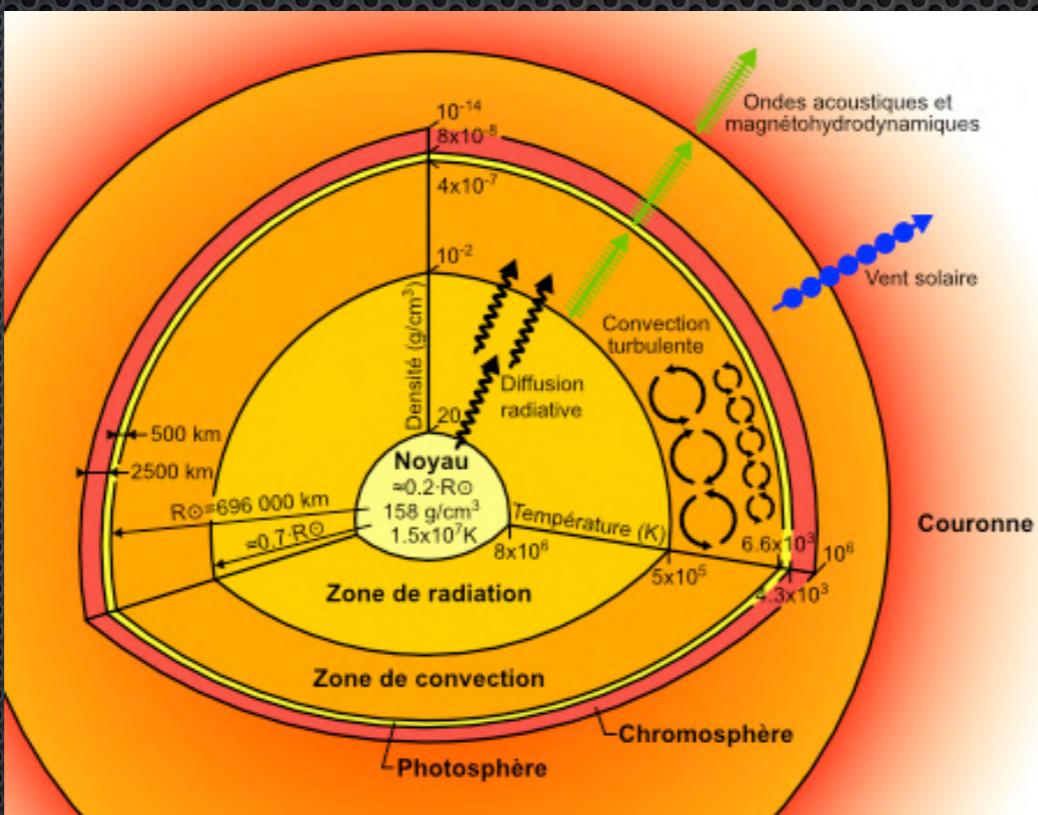
- Granulation



# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## La chromosphère

- Épaisse d'environ **2000 km** au dessus de la photosphère
- Température de **4000 K** à la base jusqu'à **10 000 K** au-dessus

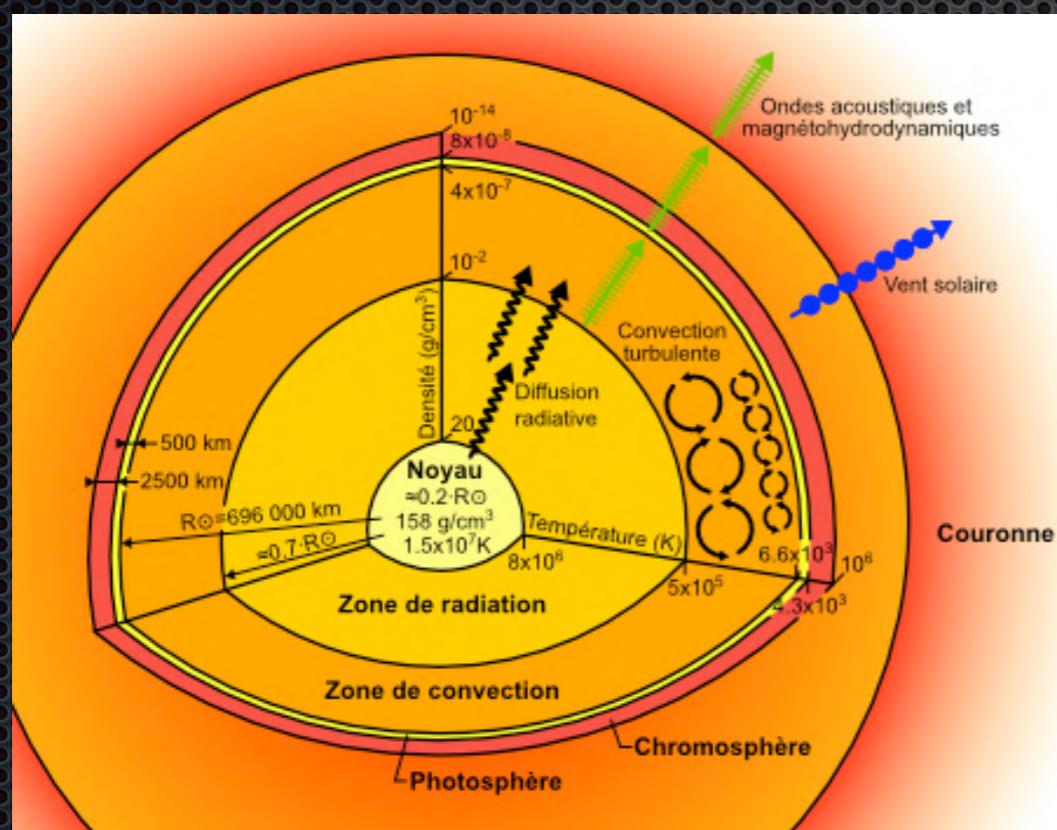


<http://www.math.nus.edu.sg>

# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## La couronne

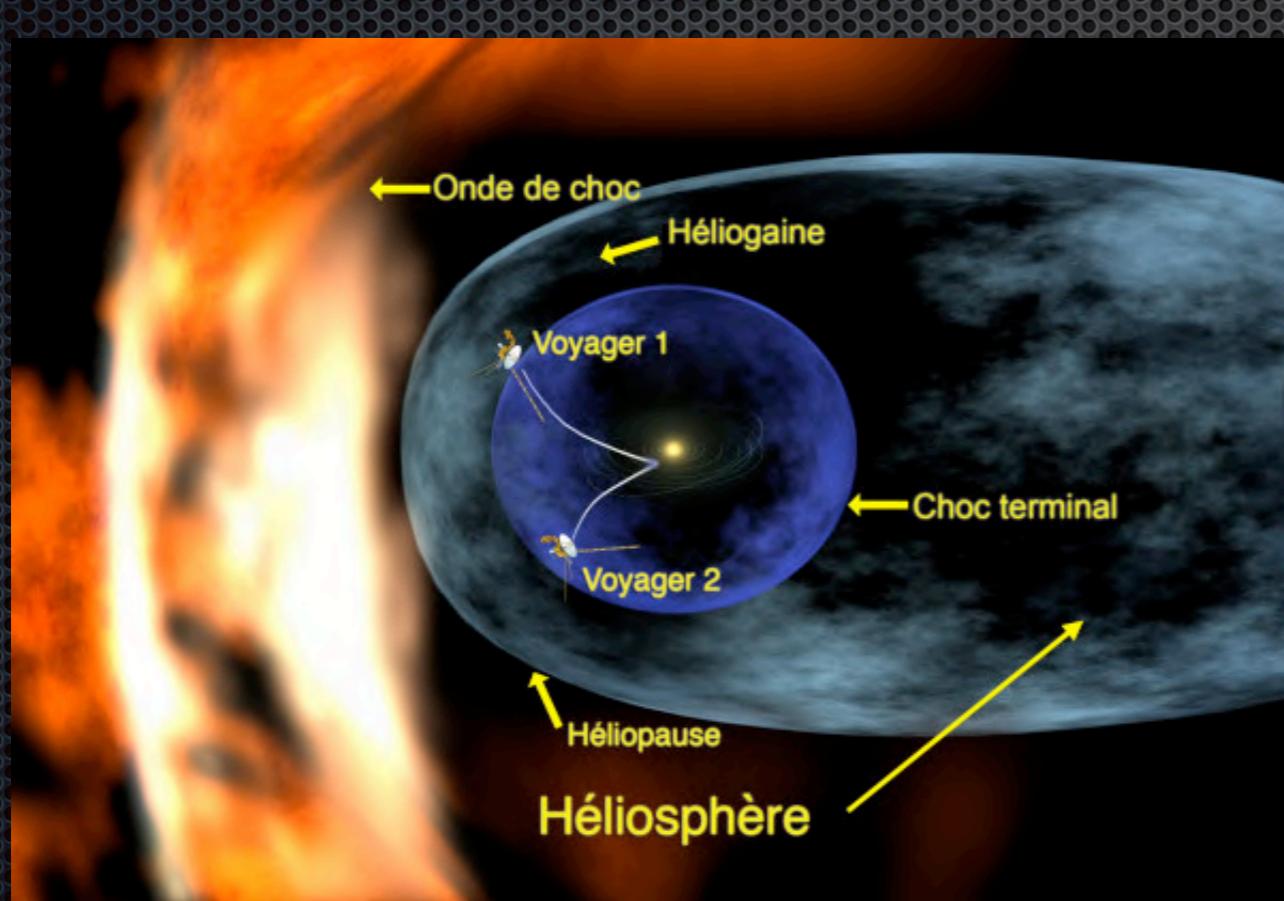
Jusqu'à environ 20  
rayons solaires (0,1 UA)



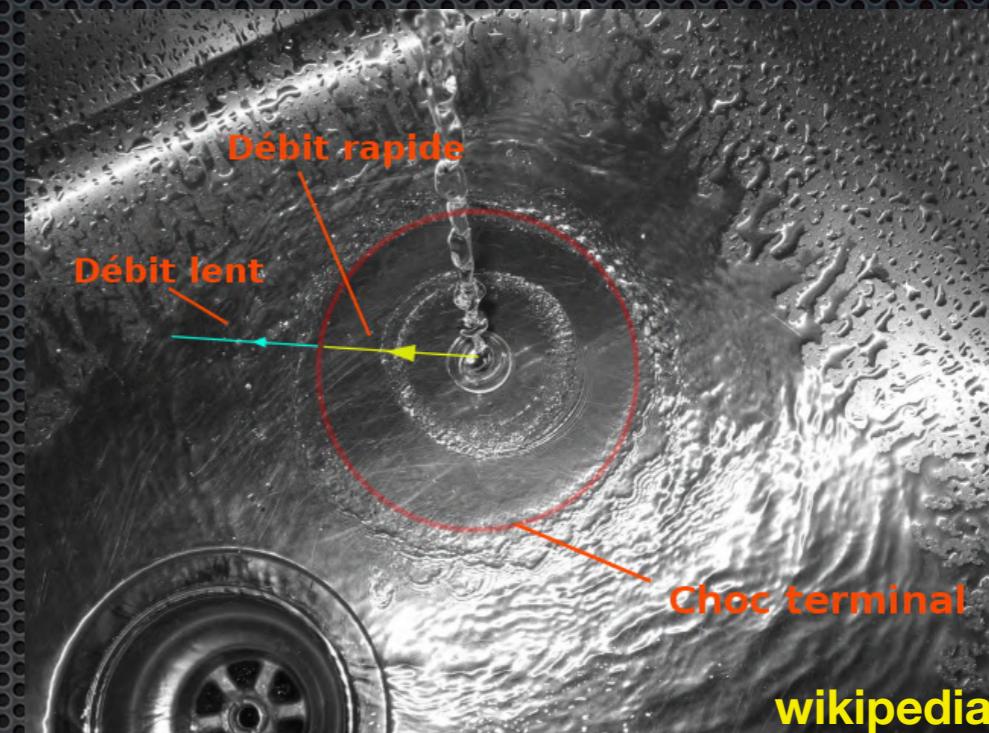
# LA STRUCTURE DU SOLEIL

## L'héliosphère

- De 20 UA à 80-100 UA
  - Choc terminal à 75-90 UA
- Contesté !

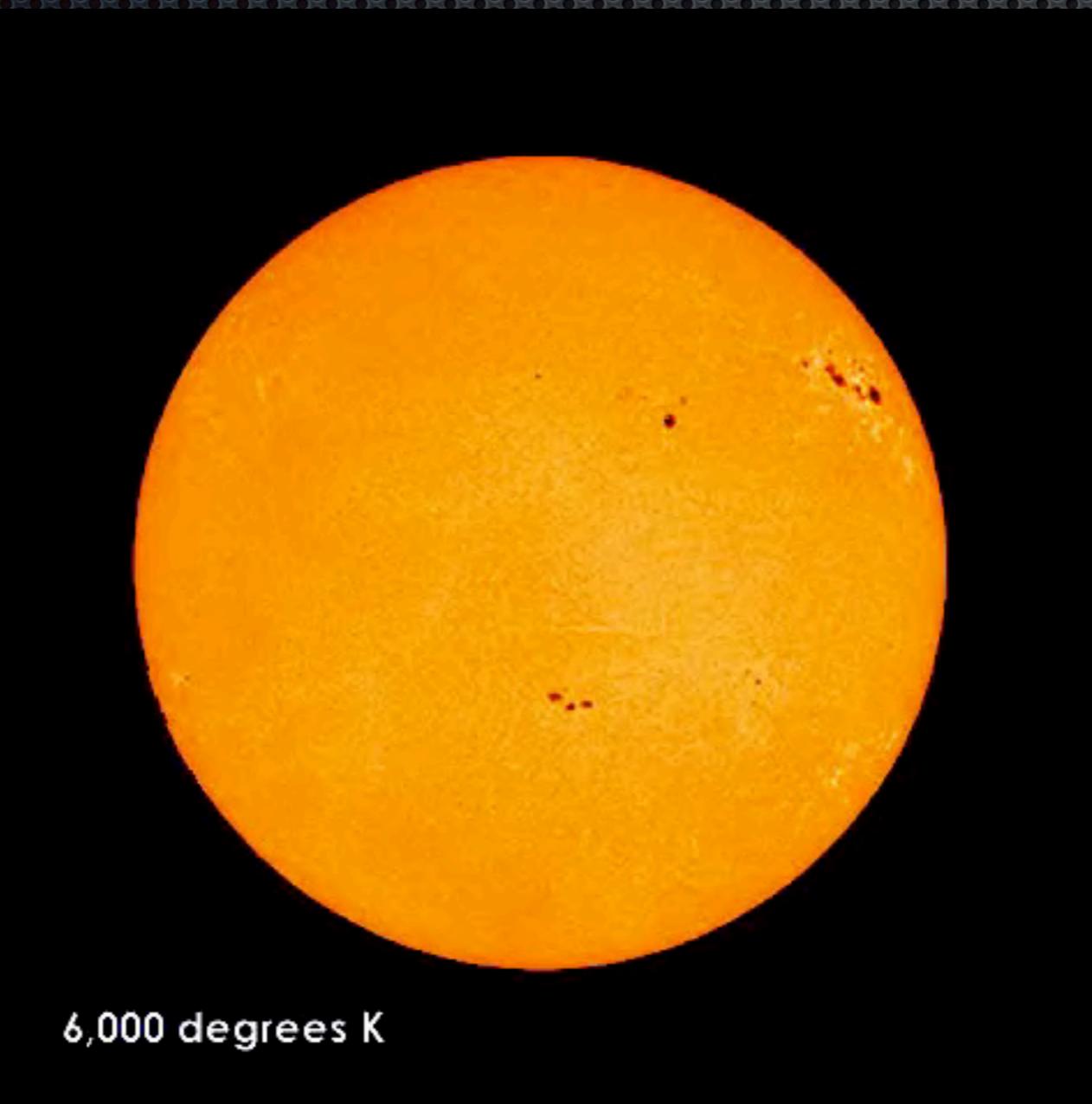


le-systeme-solaire.net



[http://www.spacedaily.com/reports/The\\_Heliosphere\\_Bow\\_Shock\\_Does\\_Not\\_Exist\\_999.html](http://www.spacedaily.com/reports/The_Heliosphere_Bow_Shock_Does_Not_Exist_999.html)

# LE SOLEIL DANS TOUTES LES COULEURS



6,000 degrees K

F. Clette

# LE SOLEIL DANS TOUTES LES COULEURS



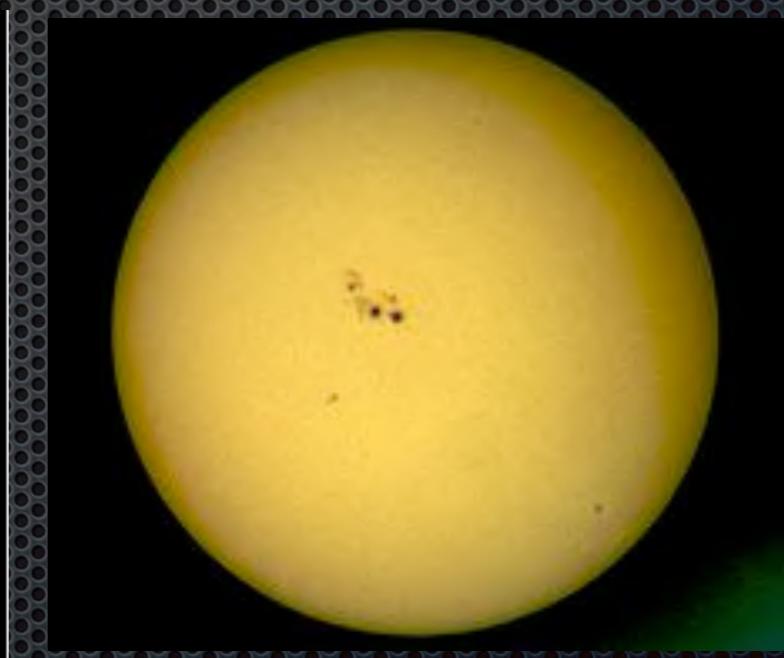
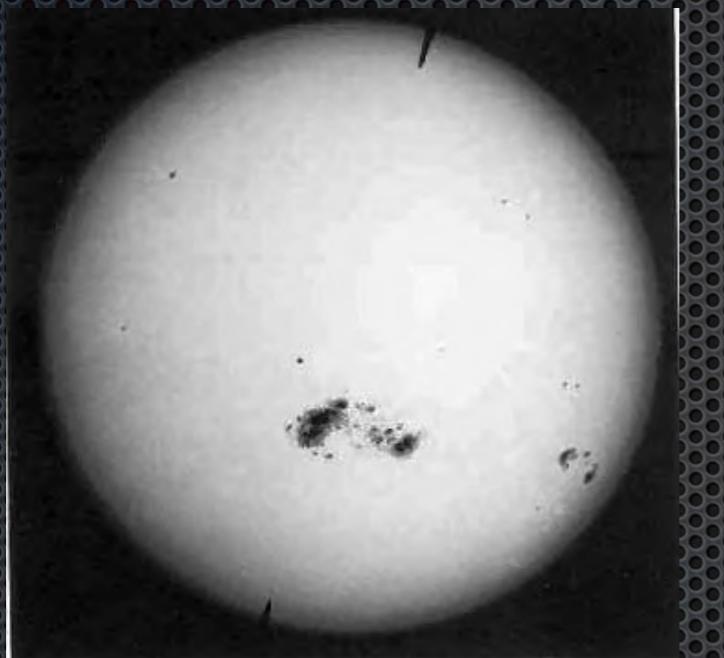
Apr 17 2002 23:59:32

F. Clette

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les taches solaires

- Observées depuis -28 en Chine
- Température d'environ 4000K



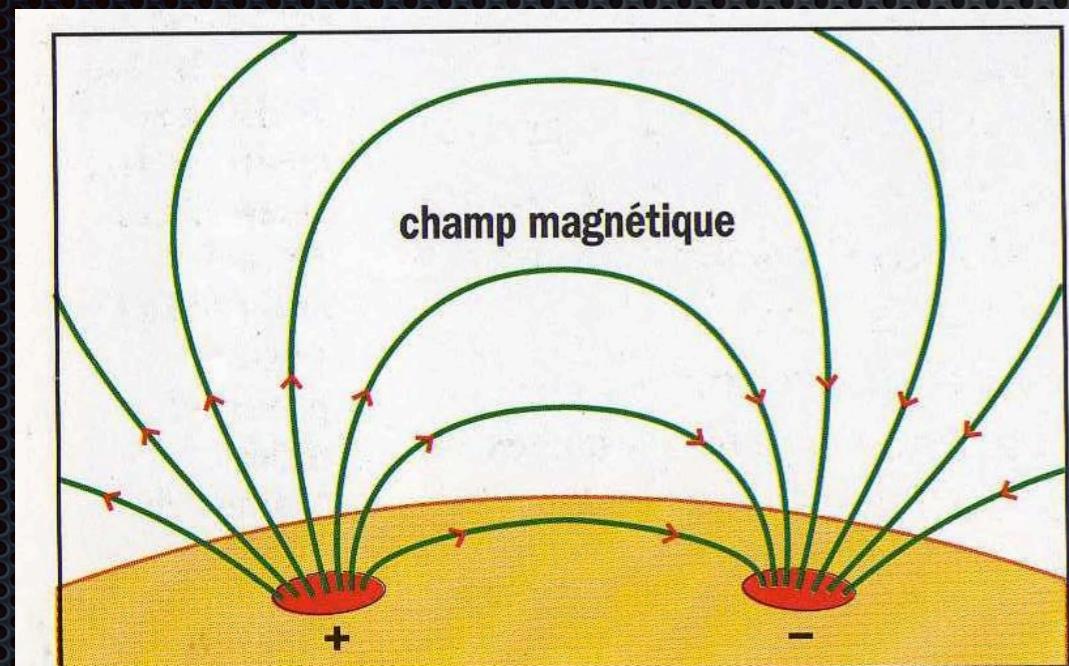
<http://www.eaas.co.uk>

[http://  
www.linternaute.com/  
science/espace/dossiers/  
06/portrait-soleil/7.shtml](http://www.linternaute.com/science/espace/dossiers/06/portrait-soleil/7.shtml)

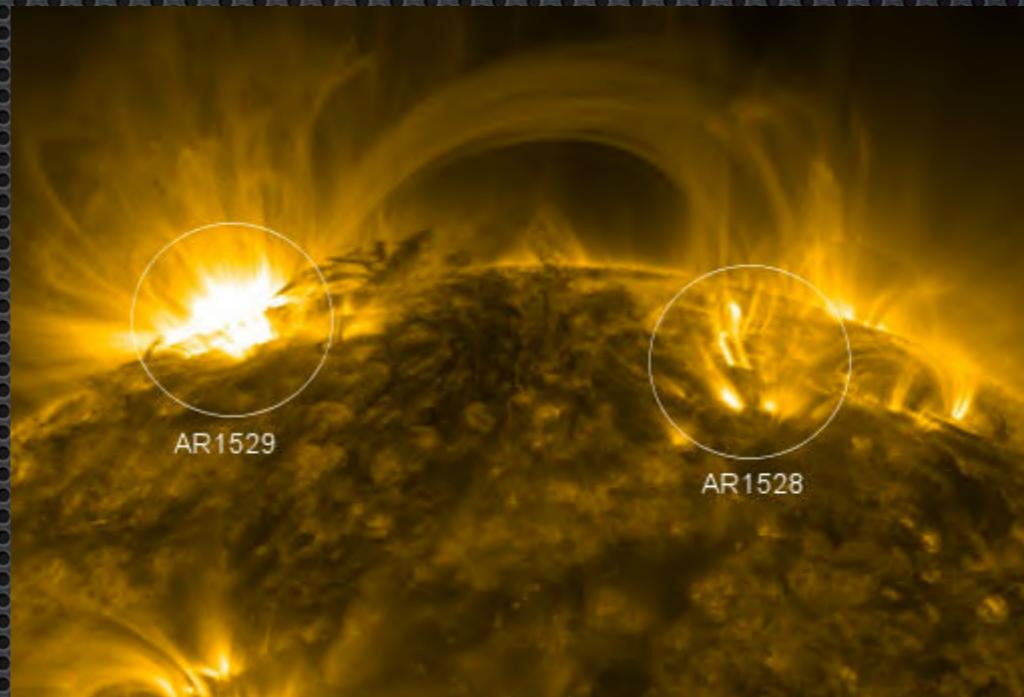
<http://museumvictoria.com.au>

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les lignes de champ magnétique



<http://tpesoleil.e-monsite.com/pages/comme-des-representations-negatives/le-soleil-tout-en-fusion.html>



<http://www.makeitbuzz.fr/un-flux-de-vent-solaire-se-dirige-vers-la-terre/>

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

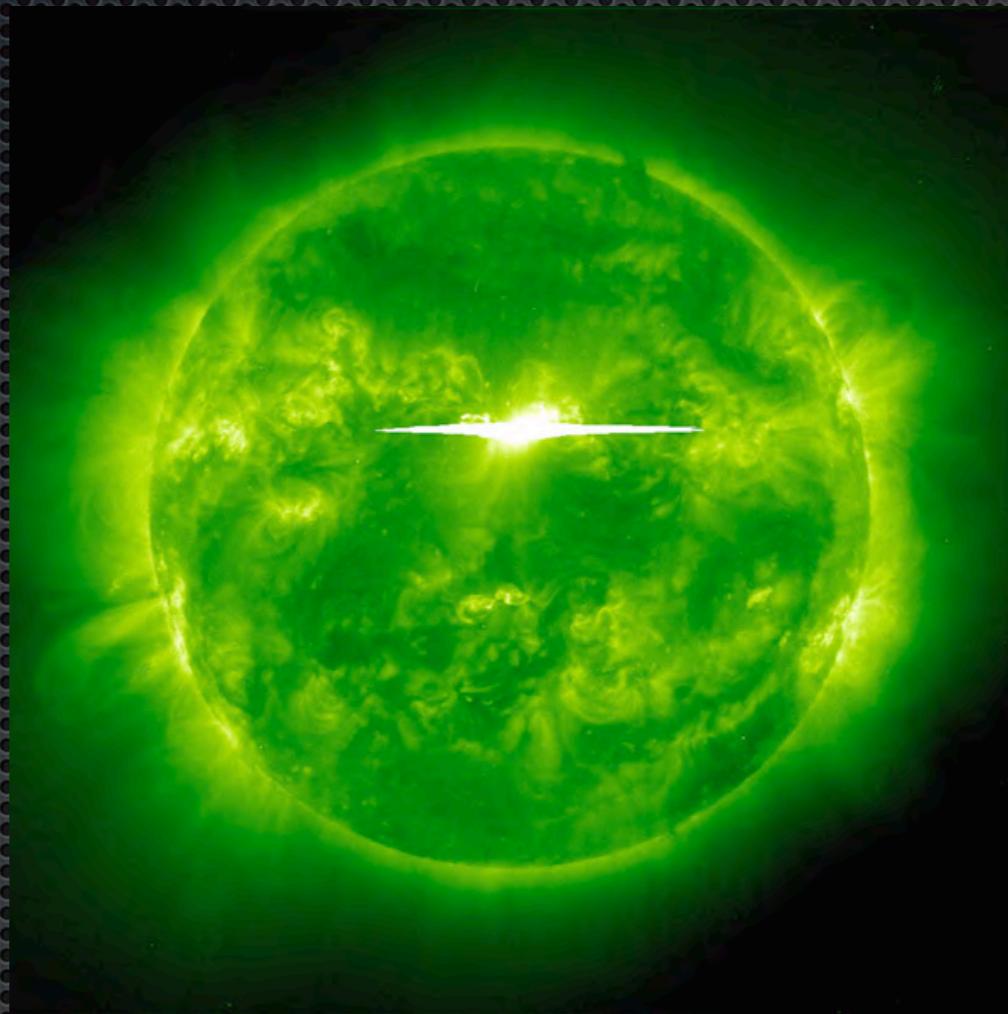
## Les protubérances



Nasa

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les éruptions solaires



<http://www.asc-csa.gc.ca>

L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les éjections de masse coronale



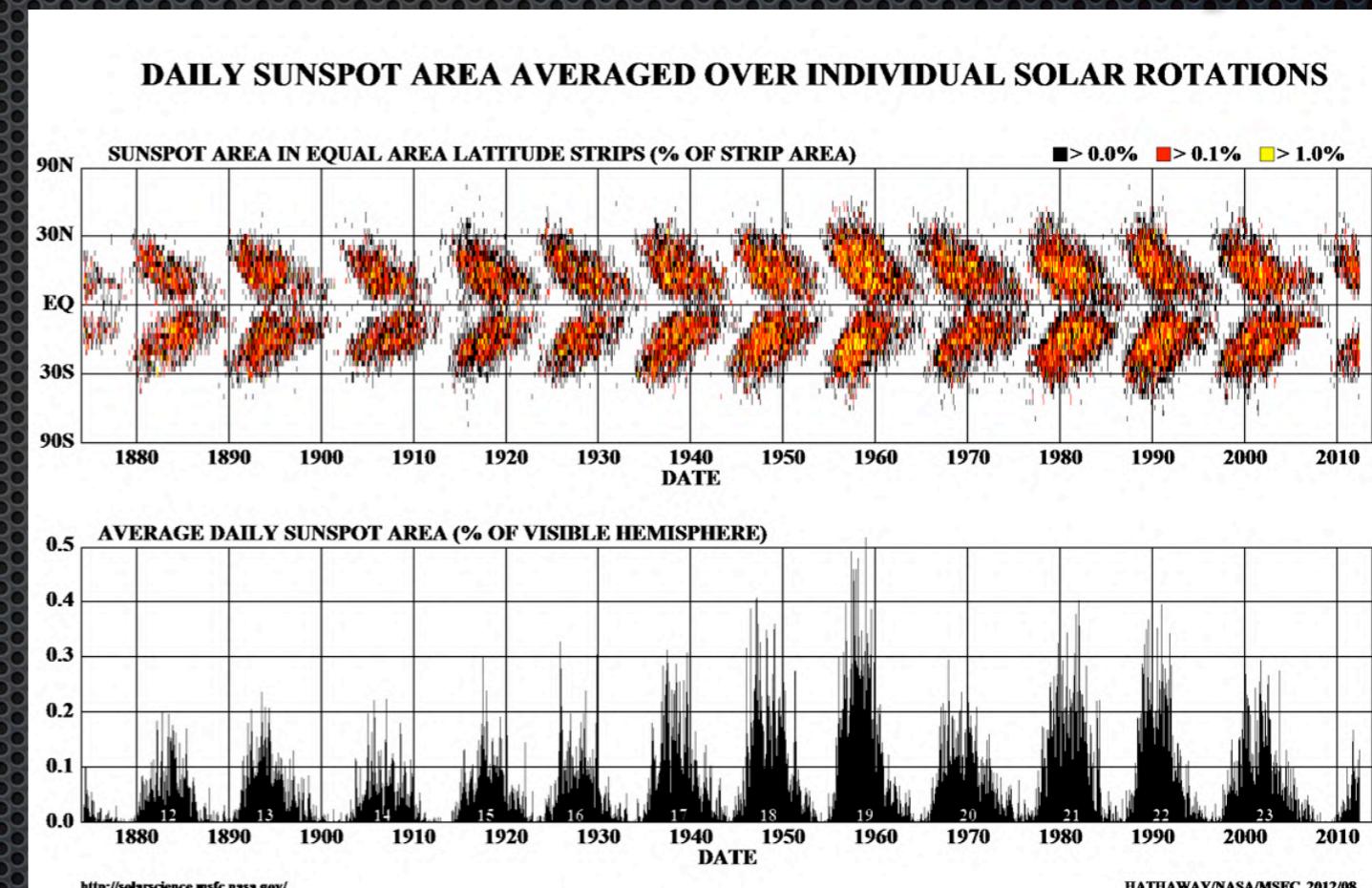
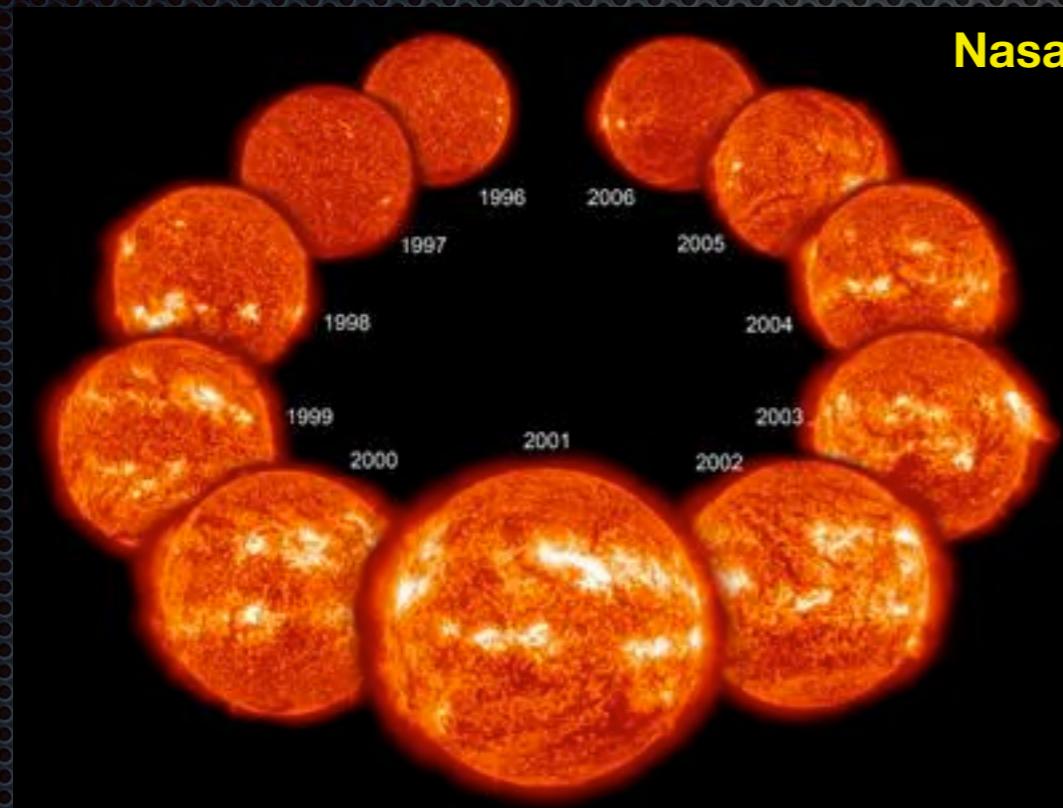
F. Clette

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les cycles solaires

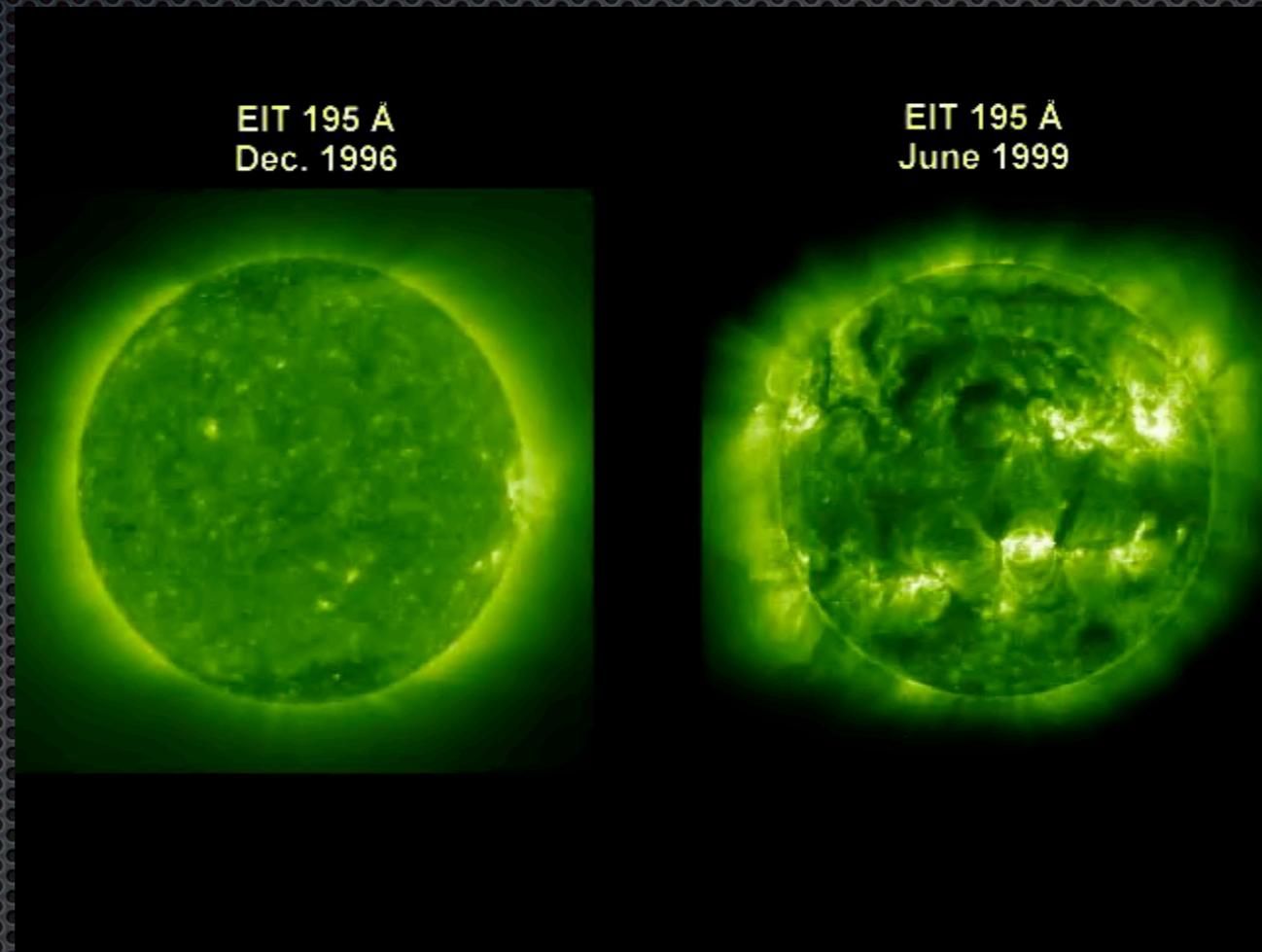
Cycle de Schwabe : 11 ans

[la.climatologie.free.fr](http://la.climatologie.free.fr)



# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les cycles solaires



F. Clette

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les cycles solaires

Cycle magnétique : 22 ans



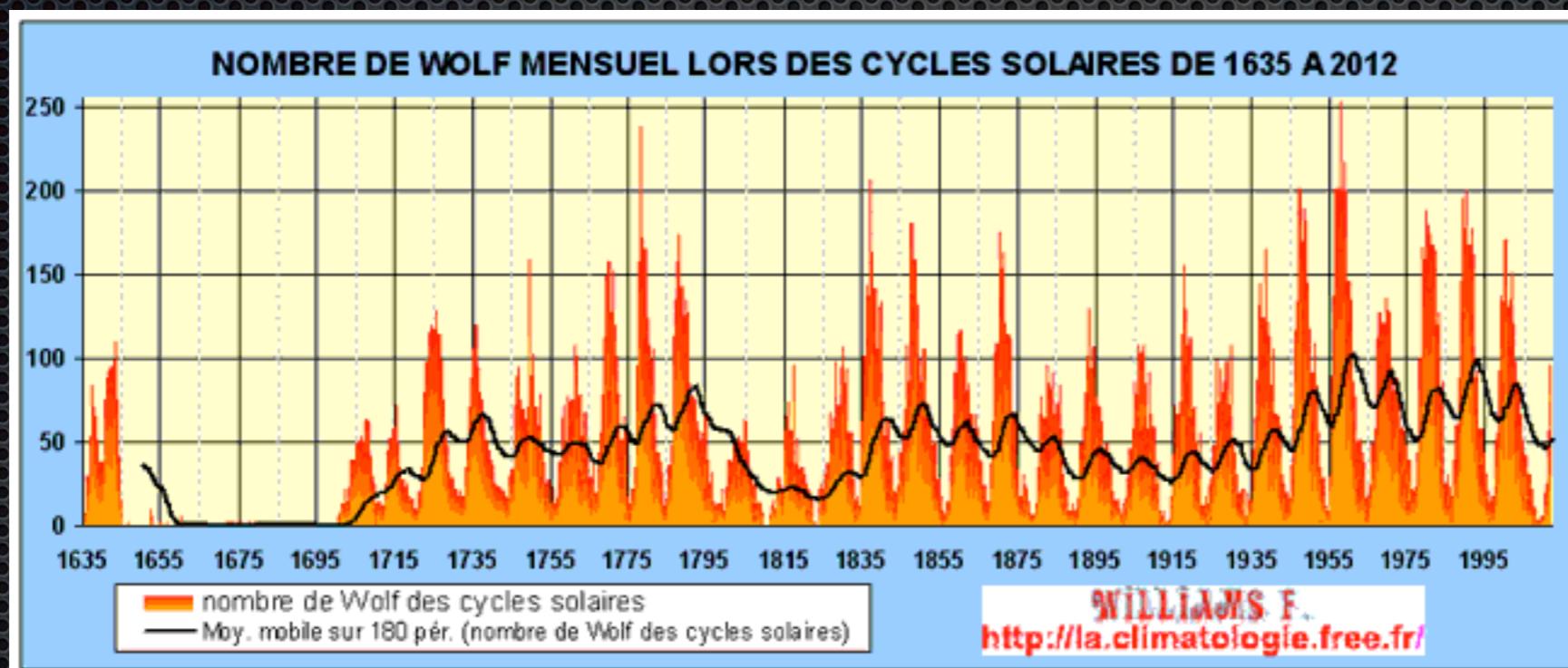
F. Clette

# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les cycles solaires

Cycle de Gleissberg

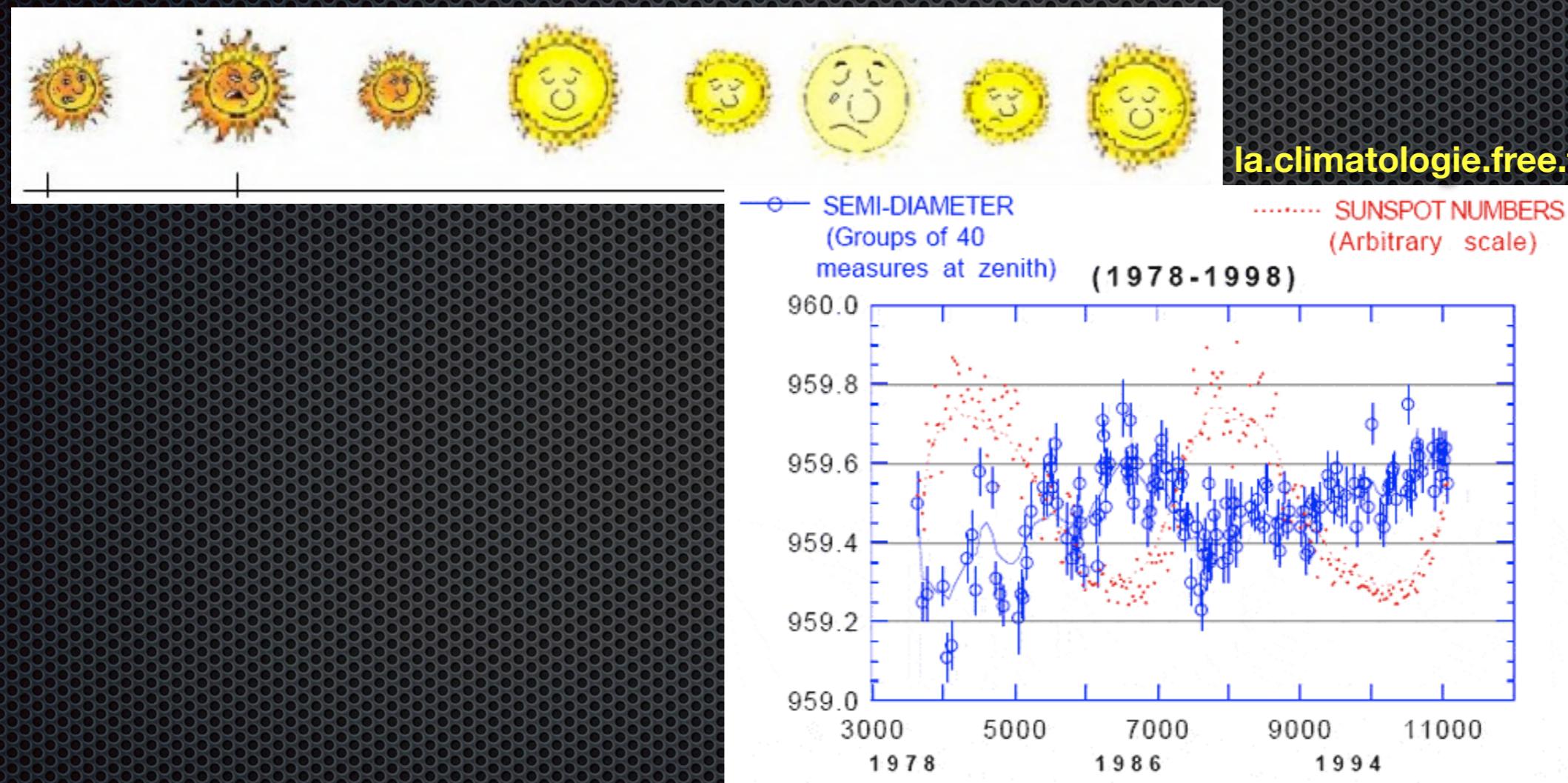
Cycle de Sess ou de Vries



# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

## Les cycles solaires

### Cycle de l'évolution du diamètre solaire

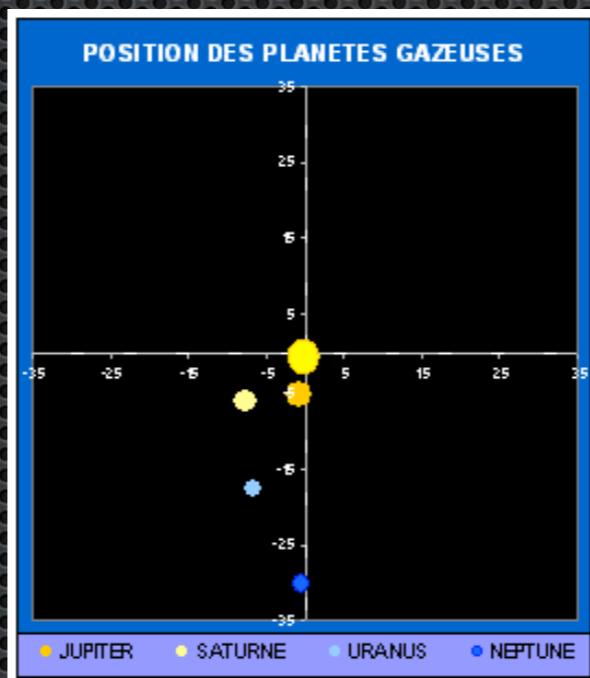
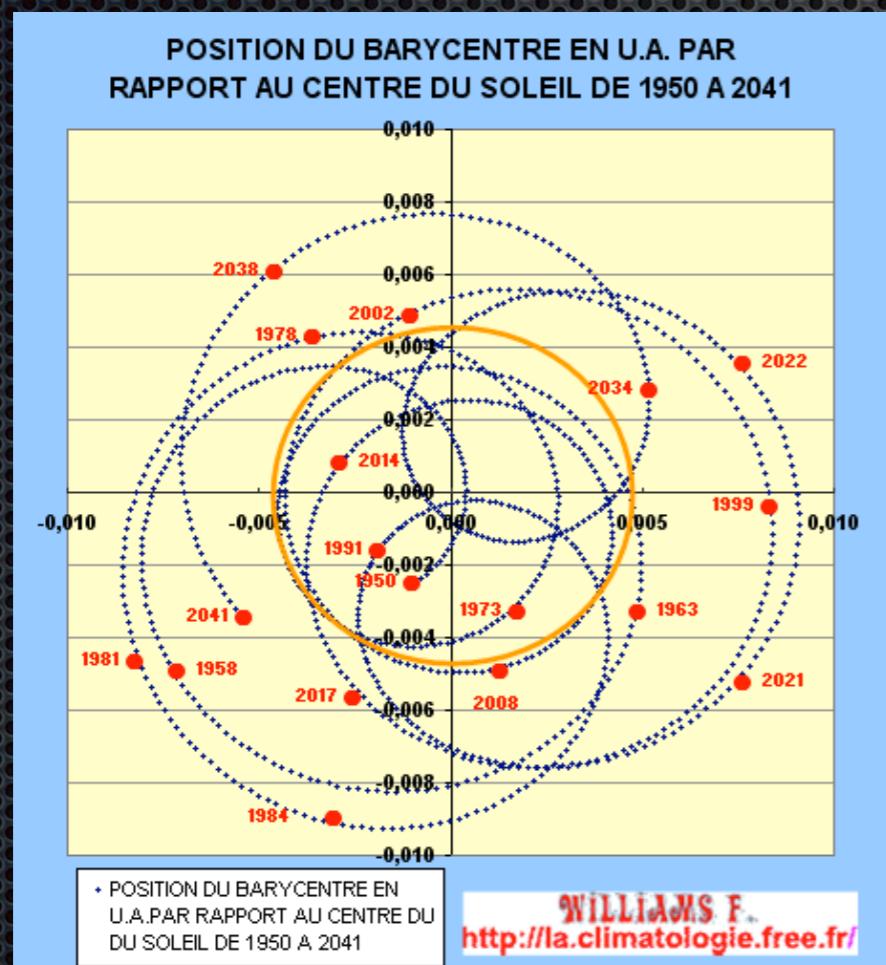


# L'ACTIVITÉ SOLAIRE

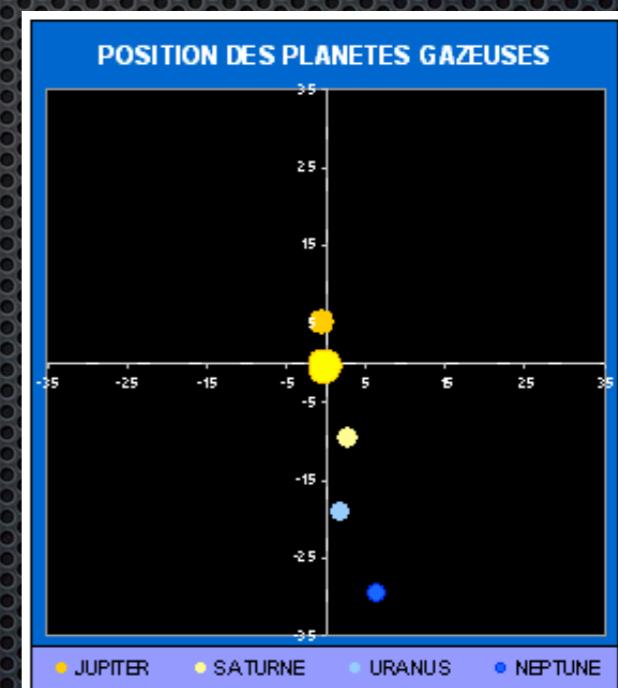
## Les cycles solaires

Cause probable des cycles = mouvement du Soleil autour du barycentre

[la.climatologie.free.fr](http://la.climatologie.free.fr)



1984

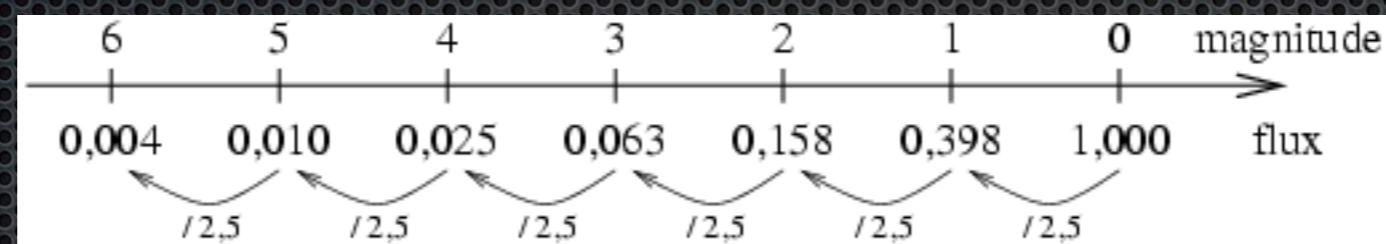


1990

# LE DIAGRAMME HR

## Classification des étoiles

### Magnitude apparente



wikipedia

### Magnitude absolue

$$m - M = 5 \log(D) - 5$$

# LE DIAGRAMME HR

## Classification des étoiles

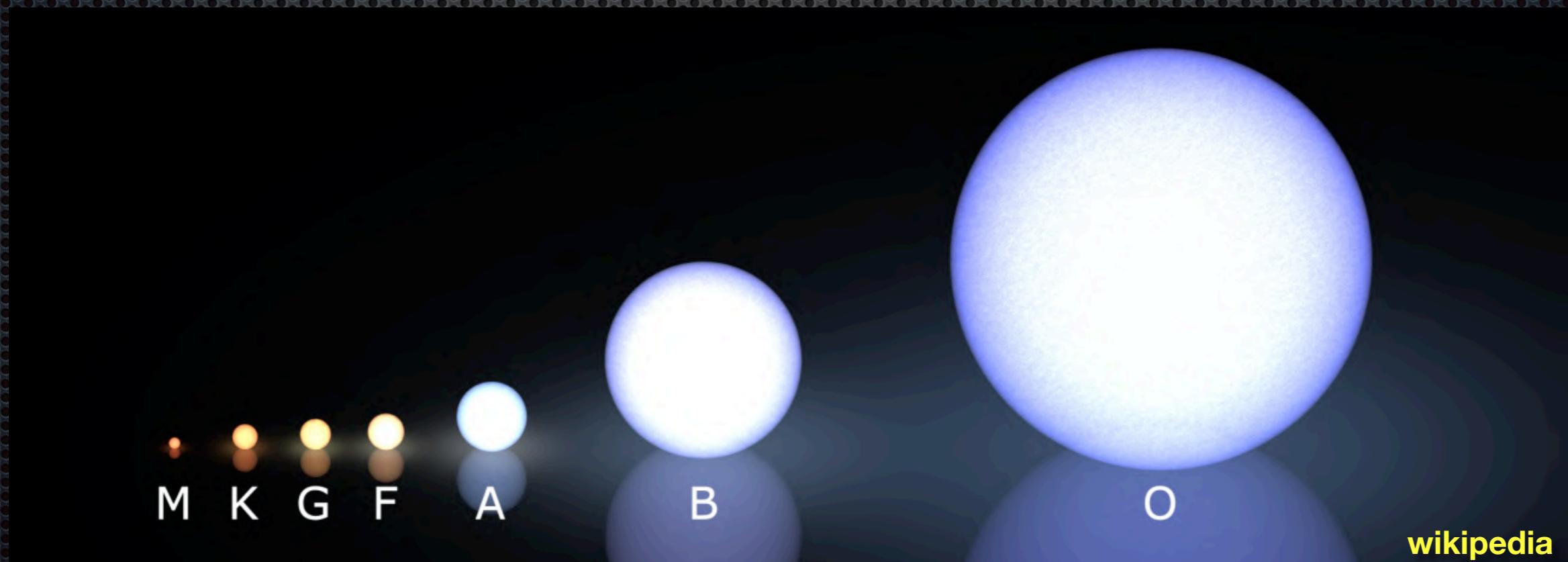
Type spectral : classification de Harvard

Couleur	Temperature °K	Type spectral
Bleue	+ 25000	O
Bleue	10 000 – 25 000	B
Blanche	7 500 – 10 000	A
Jaune	6 000 – 7 500	F
Jaune	5 000 – 6 000	G
Orange	3 500 – 5 000	K
Rouge	2 000 – 3 500	M
Rouge	1 300 – 2 000	L
(Infra)Rouge	600 – 1300	T

# LE DIAGRAMME HR

## Classification des étoiles

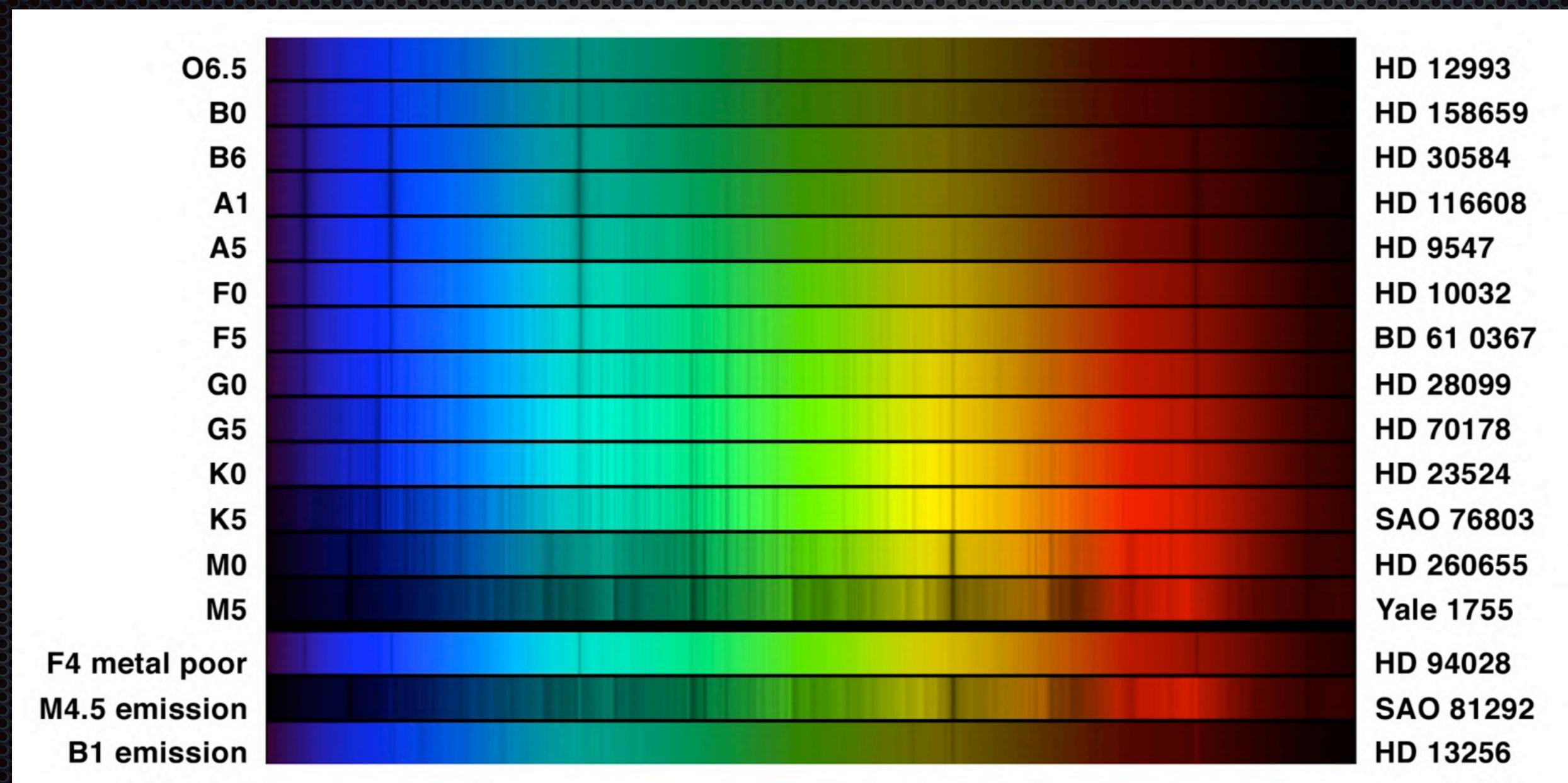
Type spectral : classification de Harvard - lettres et numéros



# LE DIAGRAMME HR

## Classification des étoiles

### Exemple



# LE DIAGRAMME HR

## Classification des étoiles

Truc pour retenir l'ordre des lettres des types spectraux les plus lumineux.

**Oh Be A Fine Girl, Kiss Me !**

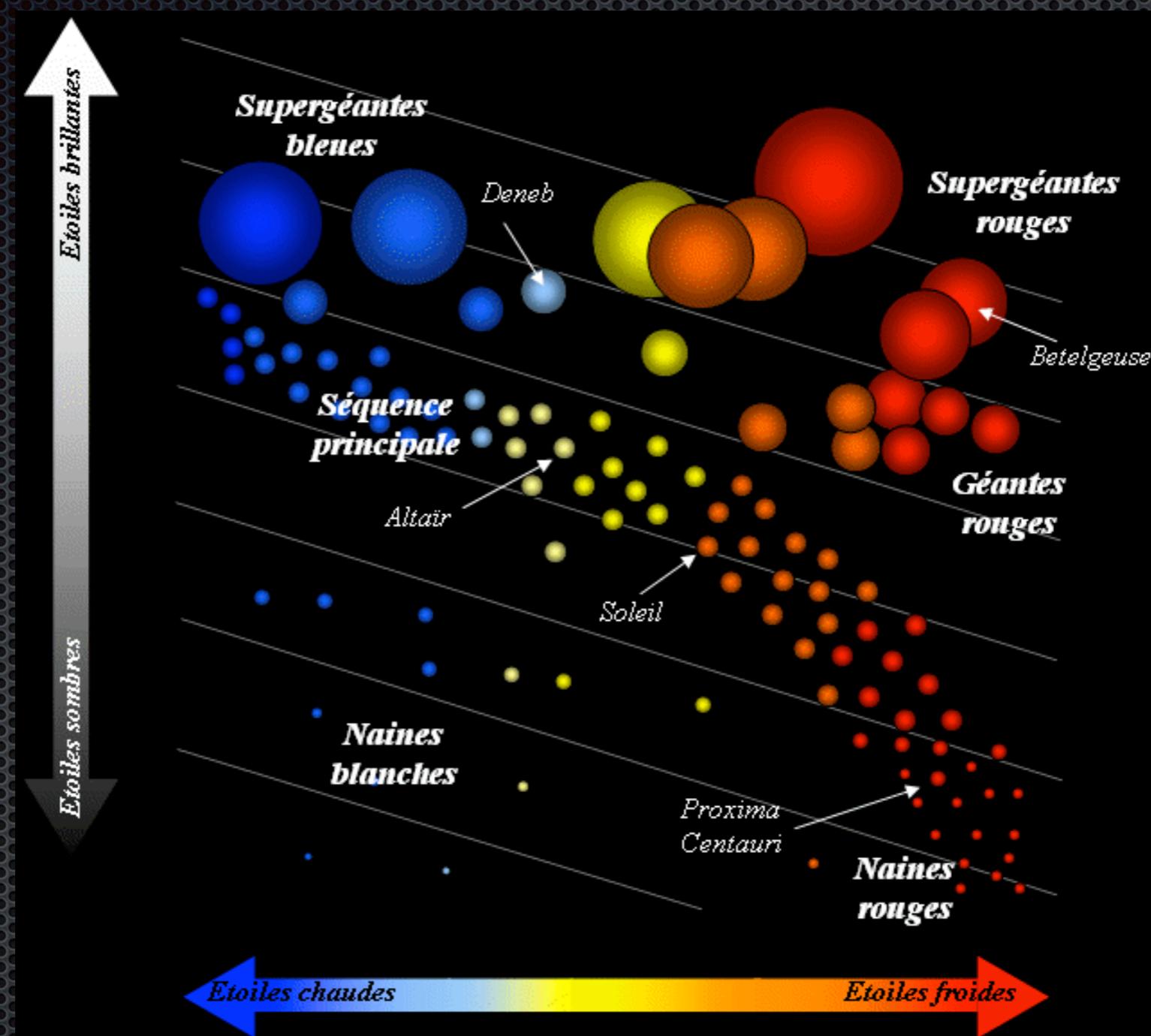
Oh soit une gentille fille, embrasse moi !

Ou

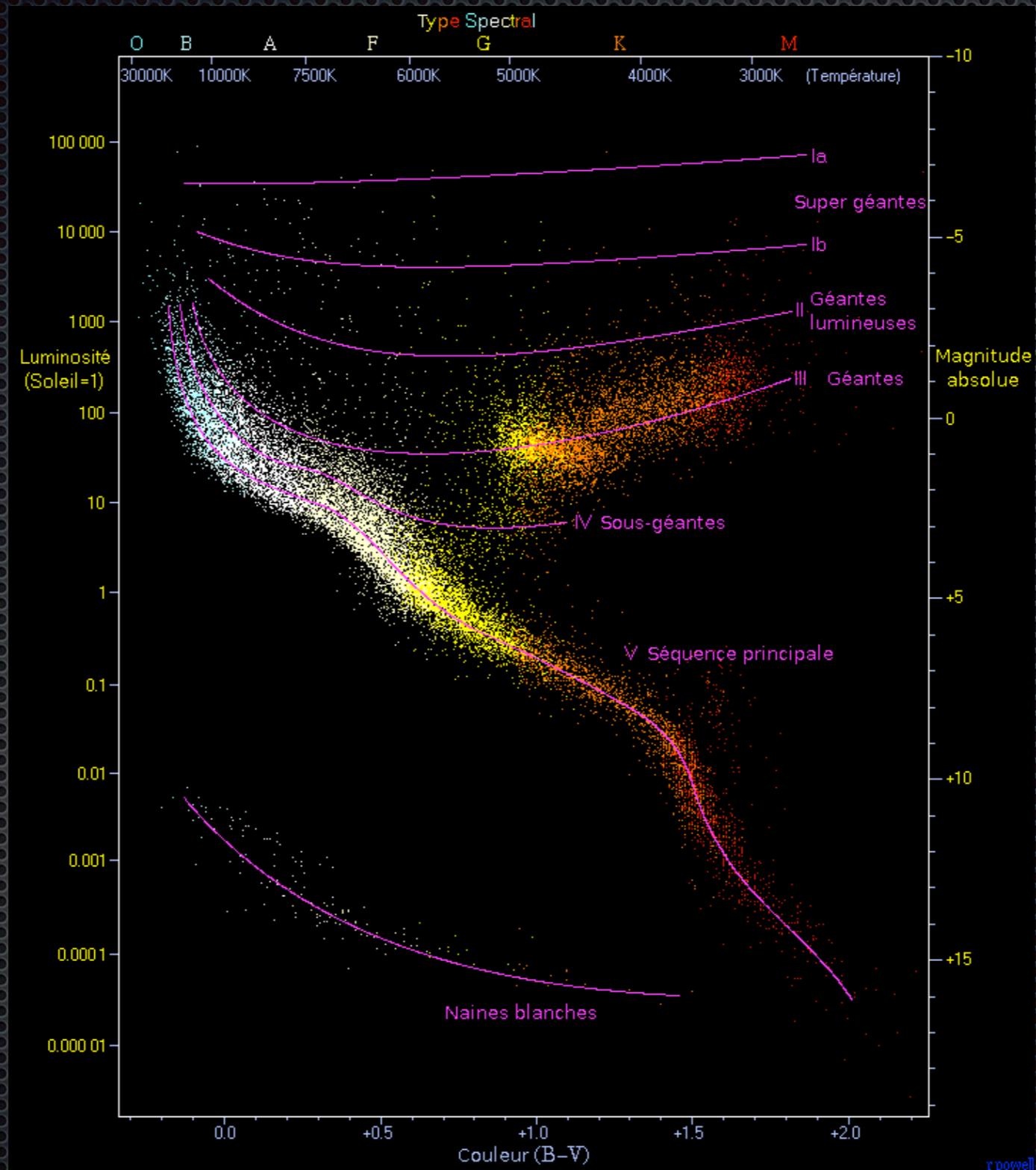
**Oh Be A Fine Girl, Kiss My Lips !**

Oh soit une gentille fille, embrasse mes lèvres !

# LE DIAGRAMME HR

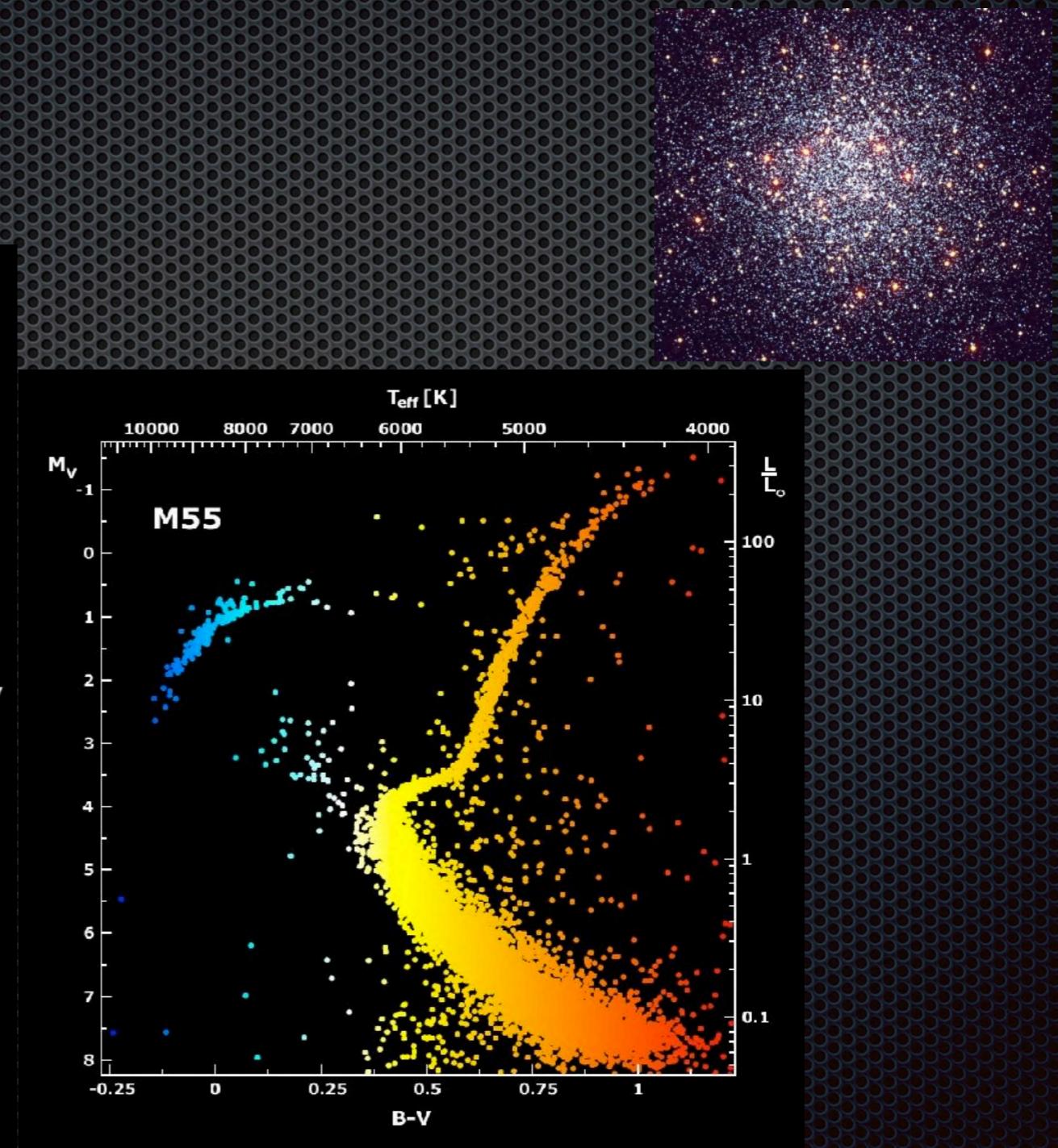
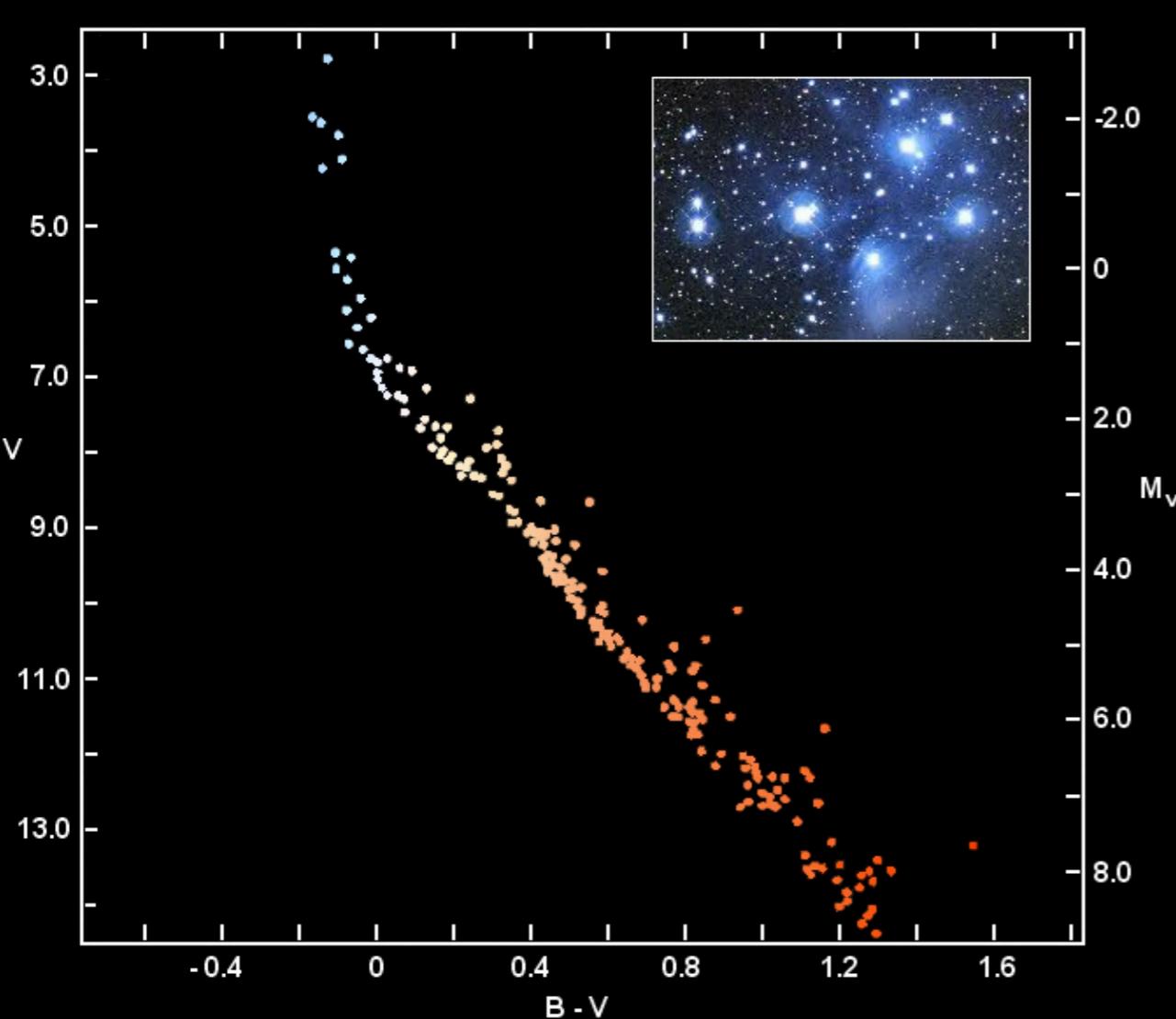


# LE DIAGRAMME HR



# LE DIAGRAMME HR

## Exemples de population



# LE DIAGRAMME HR

## Exercice - Les populations

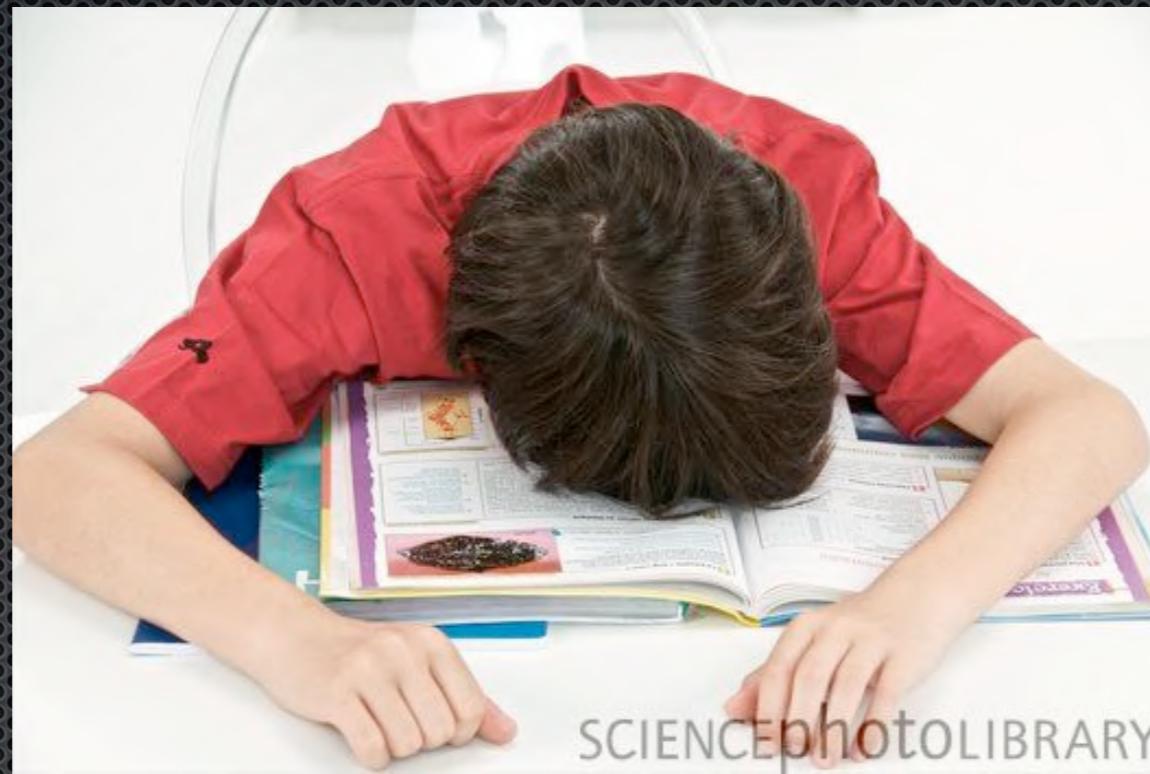
Laurent Zimmerman (le seul, l'unique !)

Pearson Practice Hall, 2005

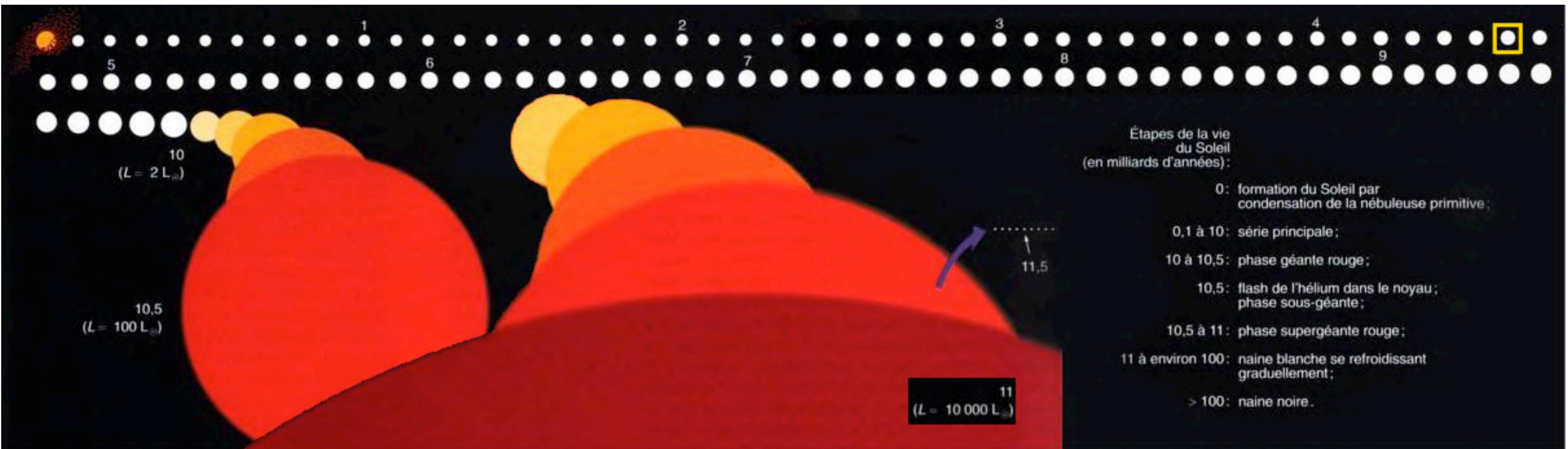
### Le soleil dans le diagramme HR

- Magnitude apparente : -26,8
- Magnitude absolue: +4,83
- Type spectral: G2 V

# PAUSE !



# LA LIGNE DE VIE DU SOLEIL



# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Un astre éternel ?

- Modèles de combustion d'énergie du Soleil
- Âge de l'Univers (Big Bang)
- Conservation de l'énergie,...

**LE SOLEIL N'A PAS TOUJOURS BRILLÉ : IL A EU  
UN DÉBUT, ET DONC UNE FORMATION**

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Le milieu interstellaire

Poussières

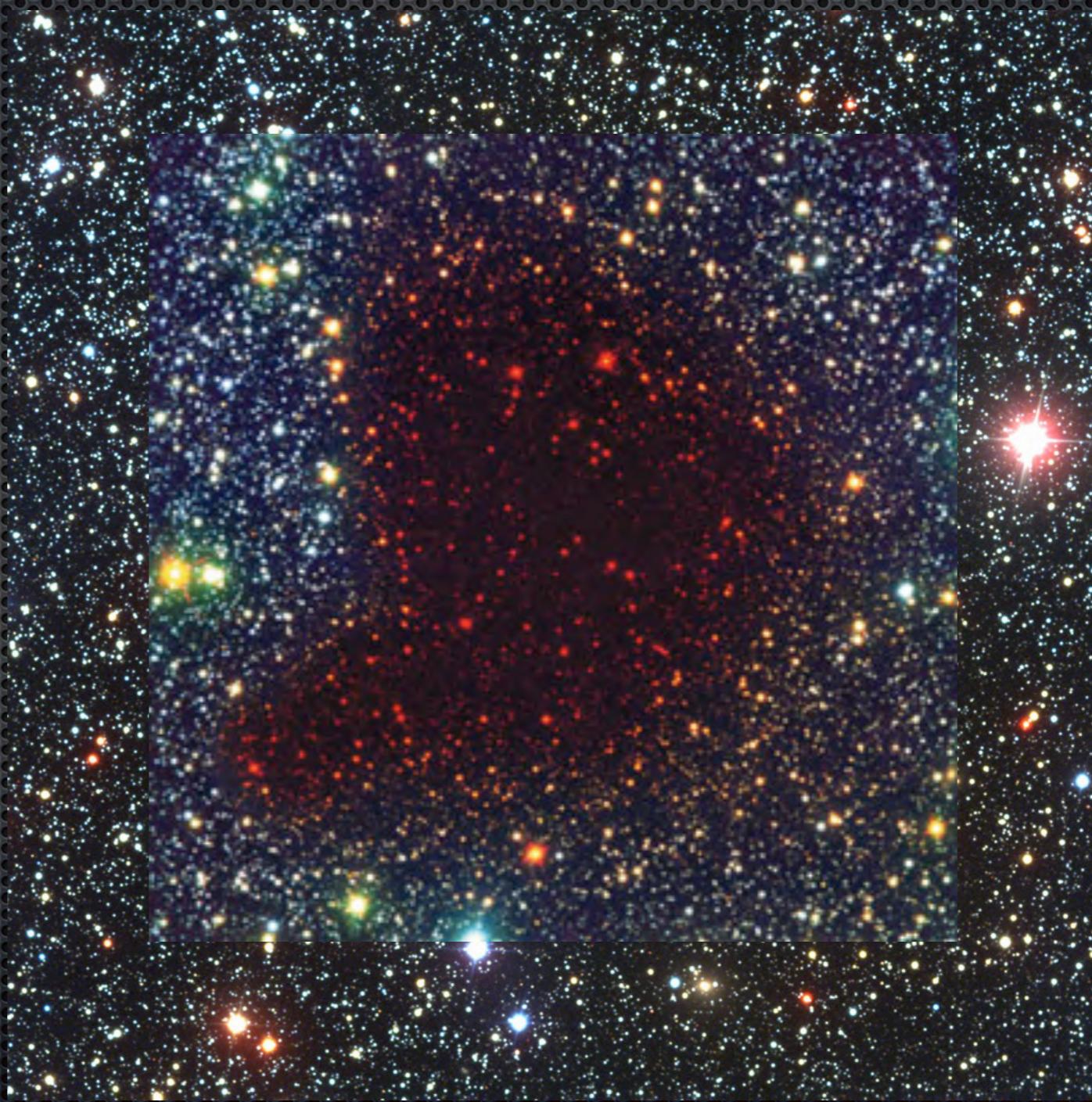


Nuage M68  
(ESO)  
VISIBLE

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Le milieu interstellaire

Poussières



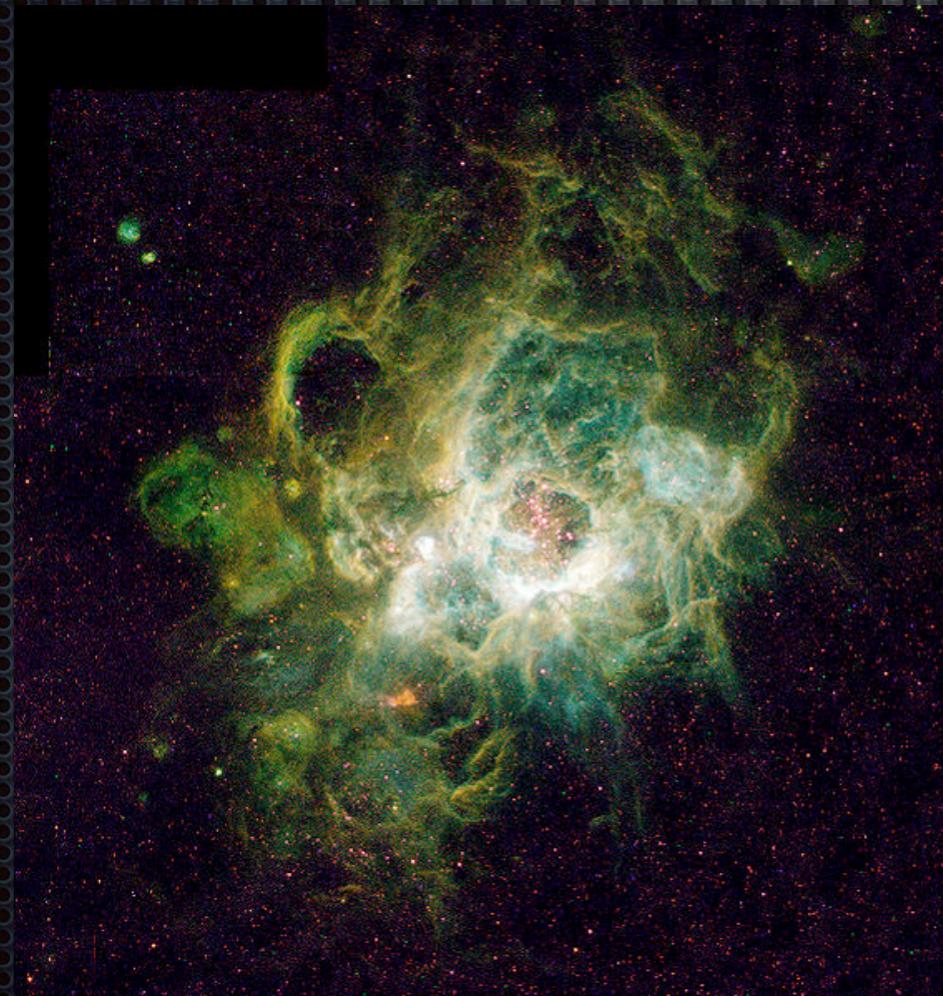
Nuage M68  
(ESO)  
**INFRAROUGE**

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Le milieu interstellaire

**Gaz : neutre (HI) ou ionisé (H II)**  
**Nuages moléculaires**

Nébuleuse de la Tarentule (<http://www.astronomy-education.com>)



NGC 604 (<http://en.wikipedia.org>)



# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Le milieu interstellaire



**Nébuleuse d'Orion (NASA/ESA)**

**M17 ou la Nébuleuse Oméga (NASA/ESA)**

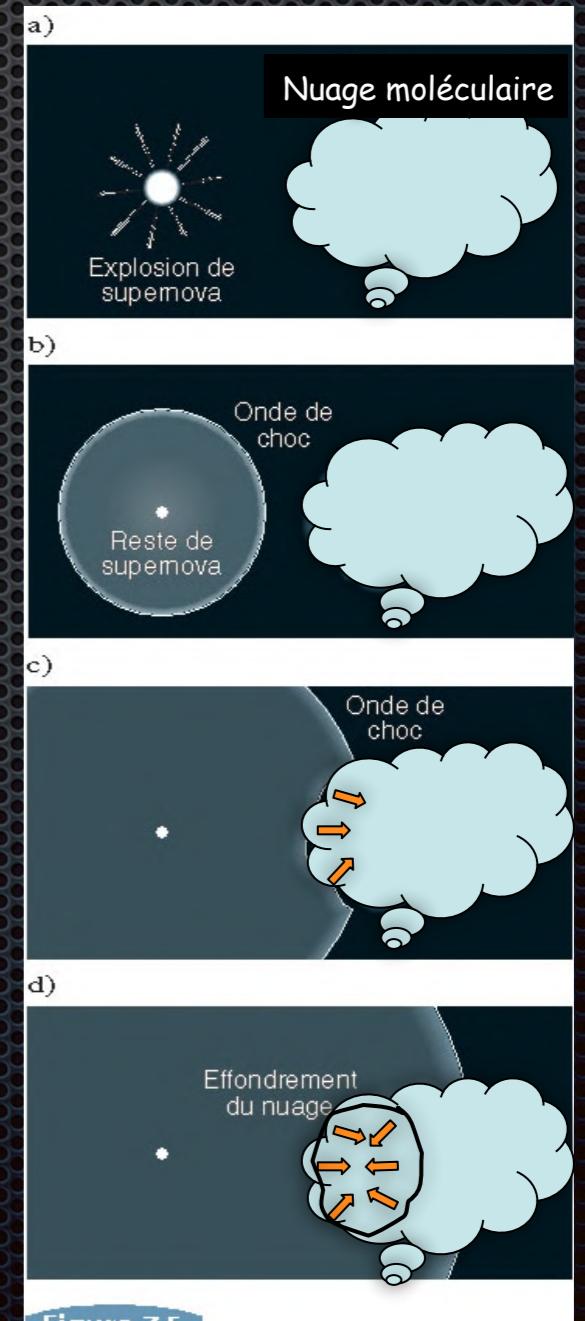
# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**

**COMMENT S'EST FORMÉ NOTRE SOLEIL ?**  
→ **COMMENT SE FORMENT LES ÉTOILES EN GÉNÉRAL ?**

- Mécanisme clé : **effondrement**
- Mais comment un **nuage moléculaire** peut-il s'effondrer ?
  - 1) Supernova
  - 2) Vents stellaires
  - 3) Pression de radiation
  - 4) Passage dans une zone de densité



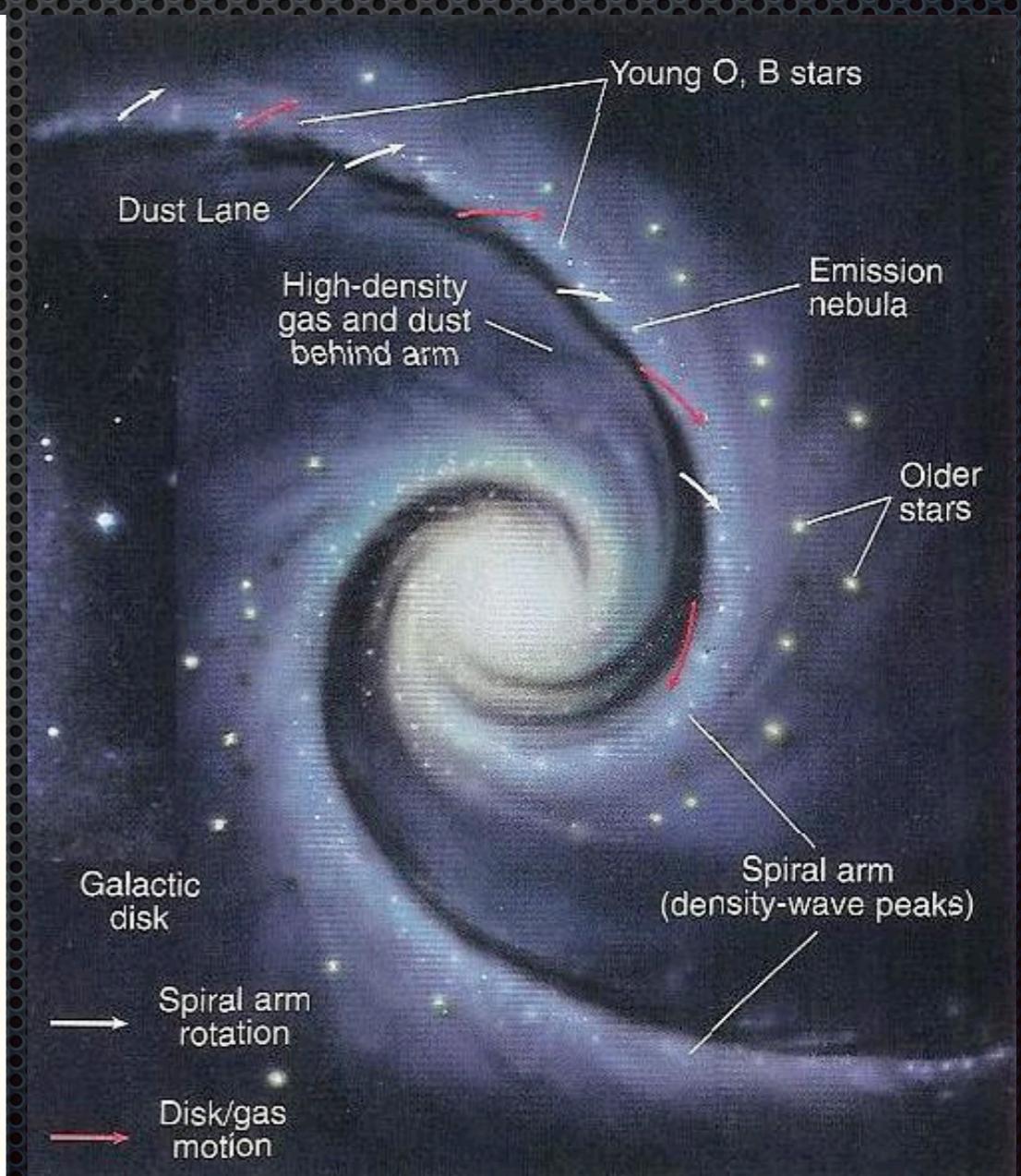
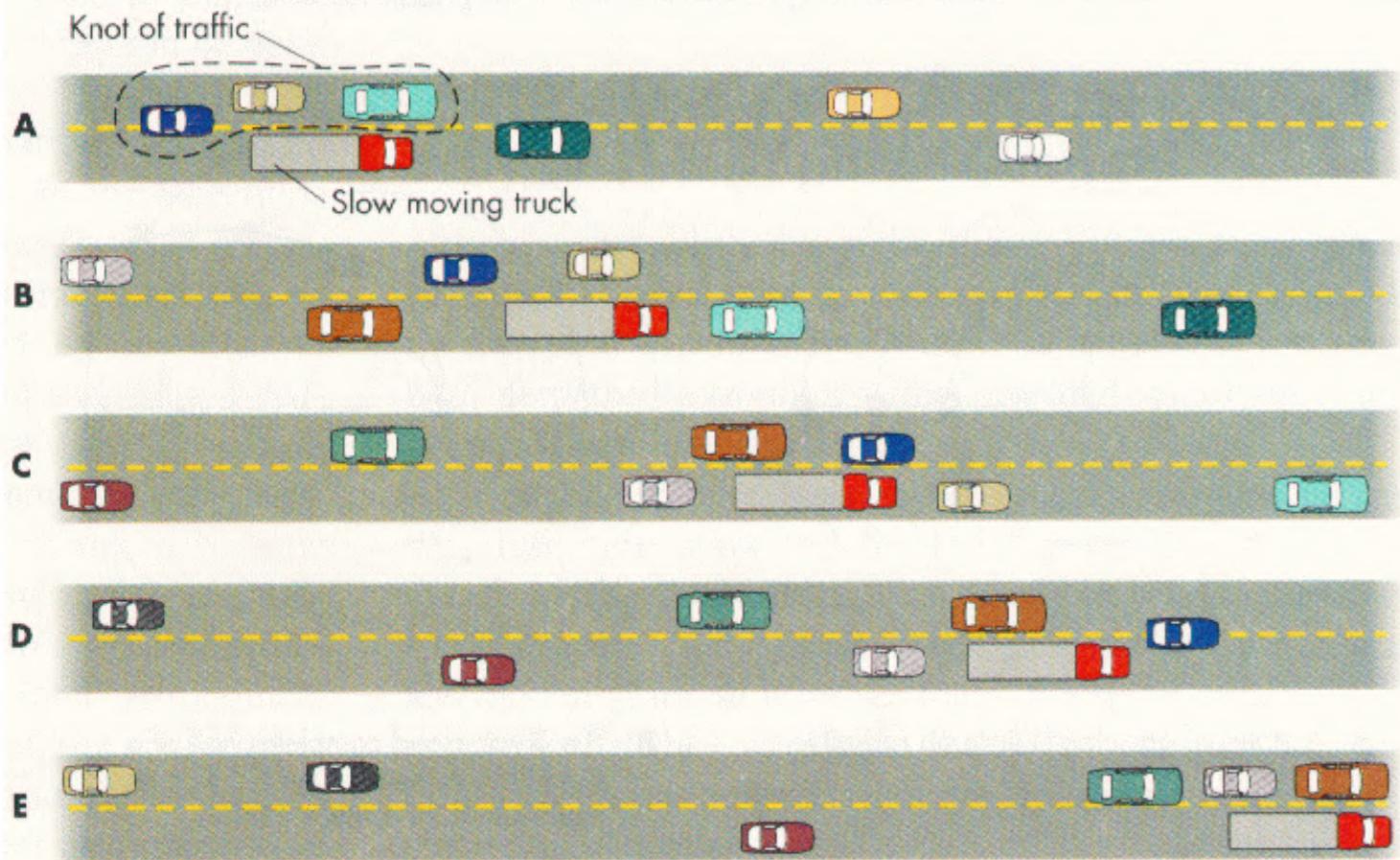
# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

-4,6 Ga

### Density Wave

A slow moving truck causes a knot of traffic that moves along the highway at the speed of the truck. Individual cars approach the traffic knot, slow down as they move carefully through the knot, and then resume speed as they leave the knot. As a result, the traffic knot consists of different cars at different times.

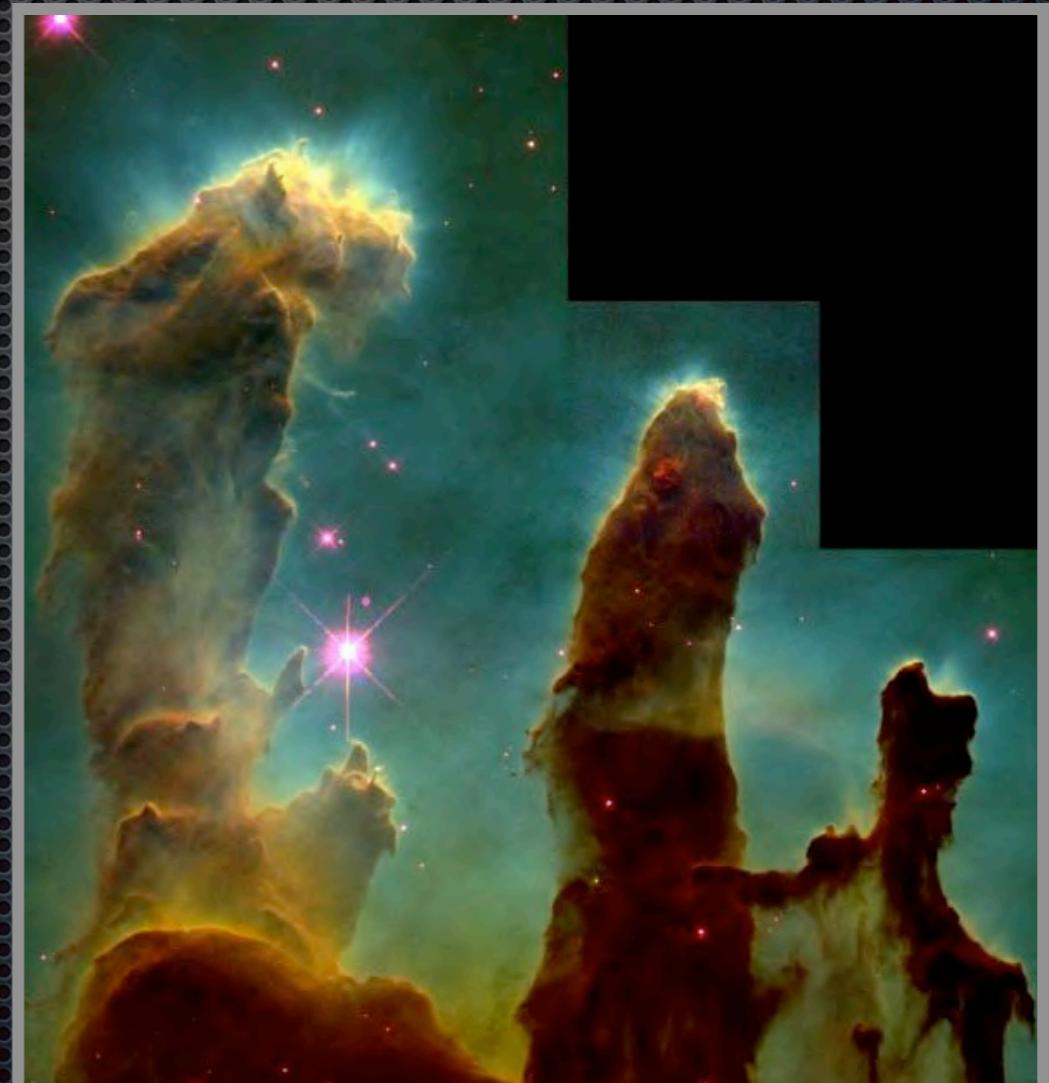


# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**

- Globules
- Zones de plus grande densité
- Les plus denses se contractent vite
  - ➡ Les étoiles massives se forment d'abord
- Pour les autres : compétition gravitation -vs- pression de radiation



«Piliers de la Création» - Nébuleuse de l'Aigle (Hubble Space Telescope)

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**

- Contraction gravifique
- Contraction de Kelvin -Helmholtz (cf. prev.)
  - libération d'énergie
  - T et L //
- A ce stade du proto-Soleil :  $500 L_{\odot}$
- Mais pendant un temps assez bref !



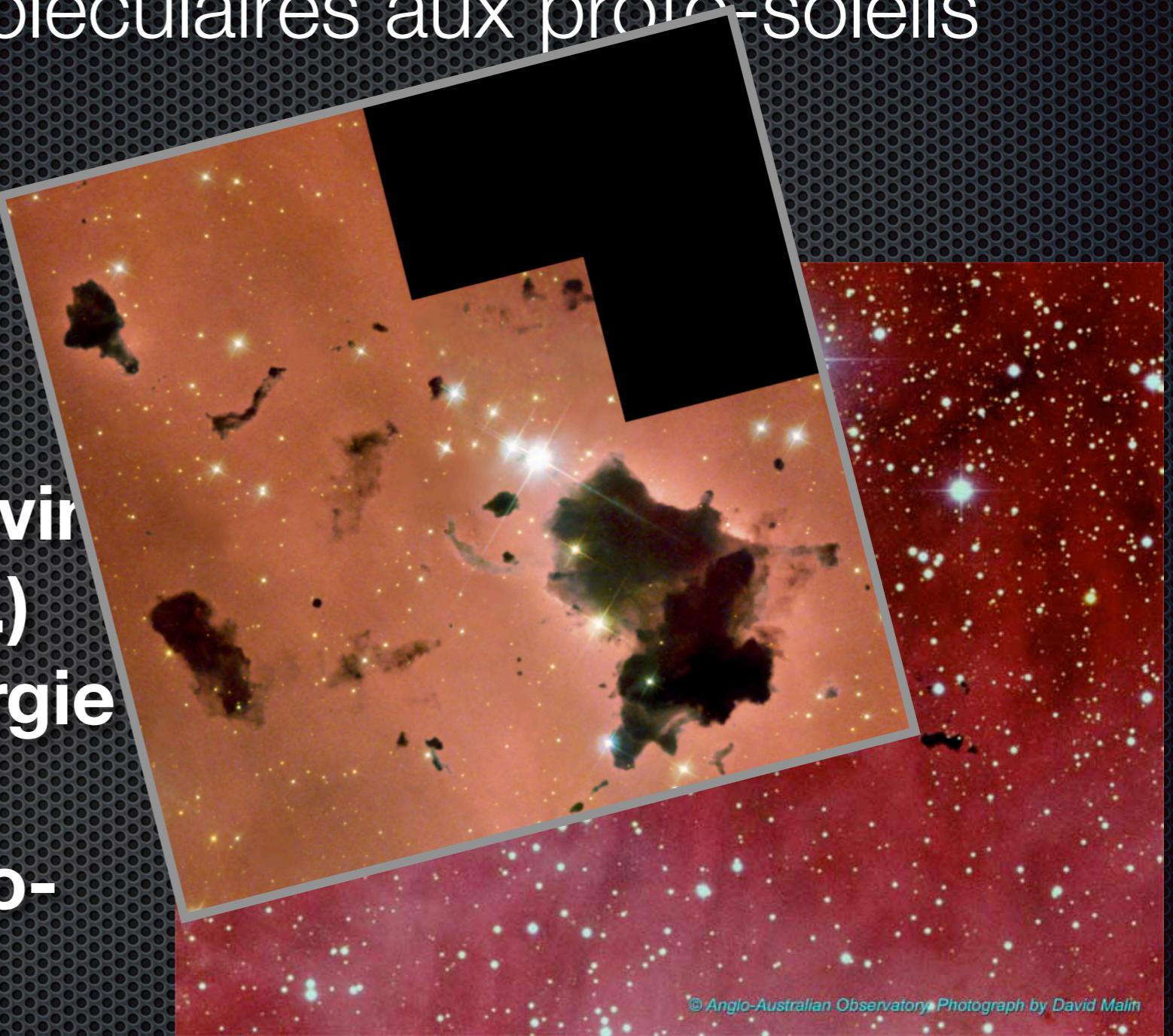
IC 2944 (Hubble Space Telescope)

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**

- Contraction gravifique
- Contraction de Kelvin-Helmholtz (cf. prev.)
  - libération d'énergie
  - T et L //
- A ce stade du proto-Soleil :  $500 L_{\odot}$
- Mais pendant un temps assez bref !



© Anglo-Australian Observatory. Photograph by David Malin

**IC 2944 (Hubble Space Telescope)**

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**

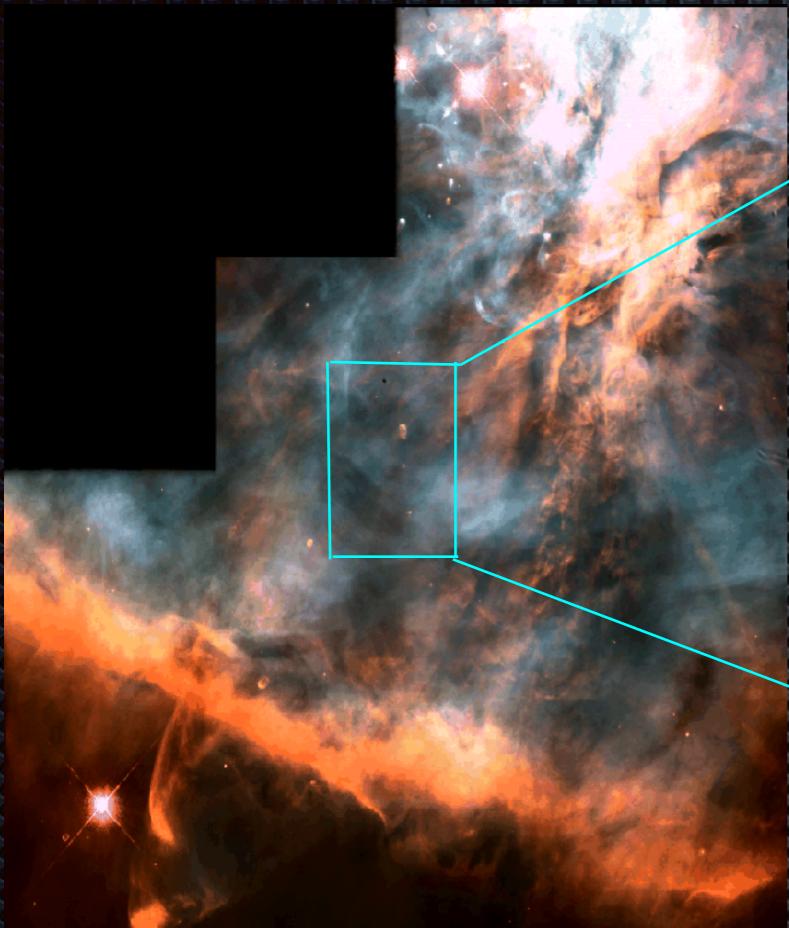
- Naissance de l'étoile...
- ...uniquement si  $M > 0,08 M_{\odot}$
- Autrement, pas de réactions nucléaires possibles  
**(fusion de  $^1H$ )**  
→ naine brune



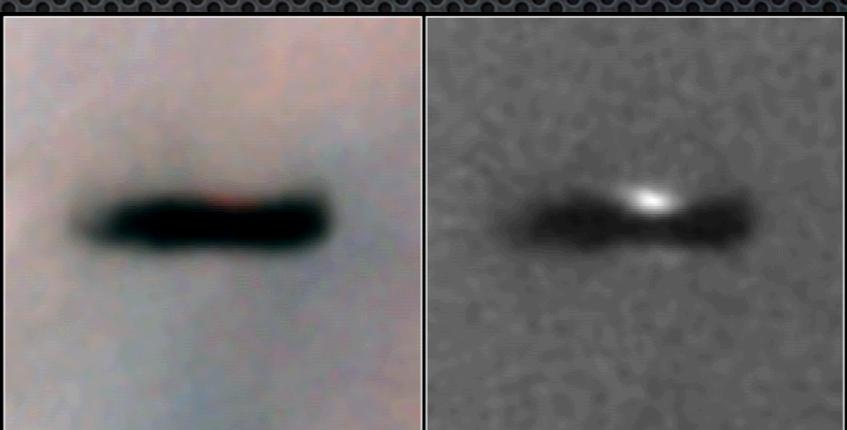
# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**

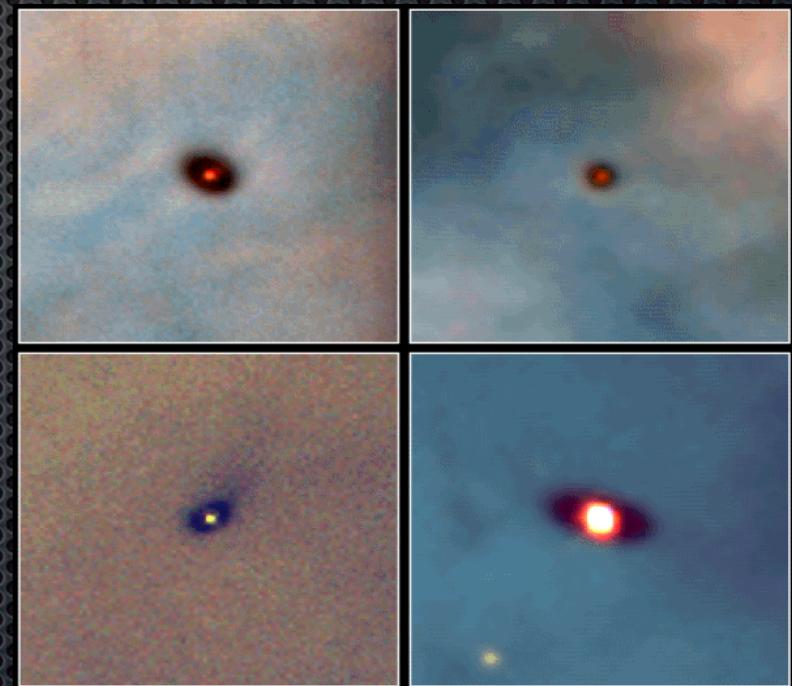


**Nébuleuse d'Orion (Hubble Space Telescope)**



**Edge-On Protoplanetary Disk  
Orion Nebula**

PRC95-45c · ST Scl OPO · November 20, 1995  
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



**Protoplanetary Disks  
Orion Nebula**

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST Scl OPO · November 20, 1995  
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

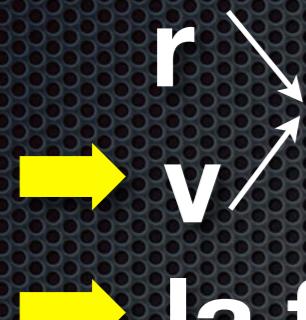
# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

-4,6 Ga

- Conservation du moment cinétique

$$rMv_{\text{avant}} = rMv_{\text{après}}$$

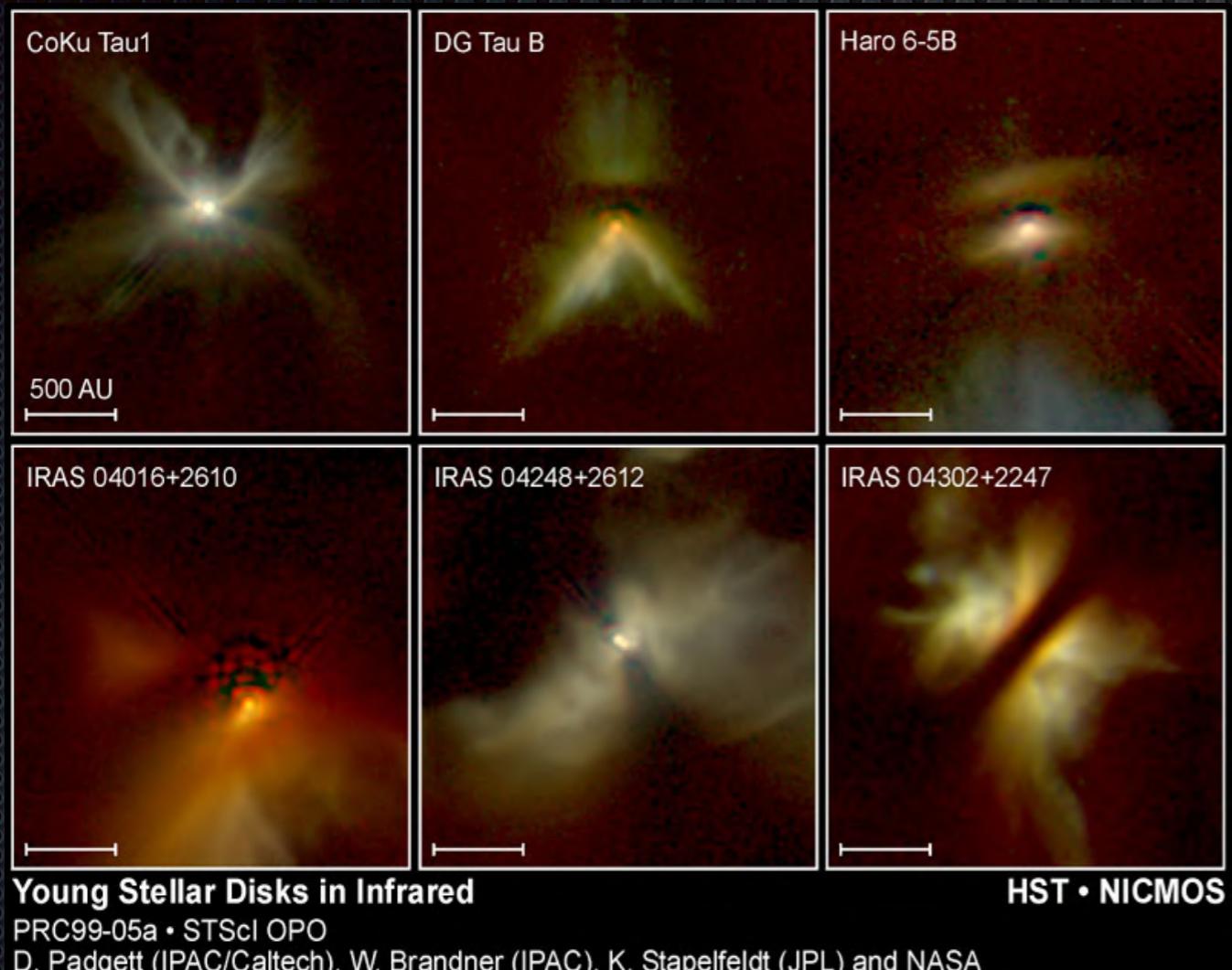


- la force centrifuge augmente
- le globule s'aplatit
- Nuage protoplanétaire
- Formation des **planètes** ! (au même moment que formation du Soleil)

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## Des nuages moléculaires aux proto-soleils

**-4,6 Ga**



- Parfois : jets lumineux perpendiculaires au disque proto-planétaire
- Dus à la pression de radiation de la nouvelle étoile sur la matière environnante

**Hubble Space Telescope**

# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

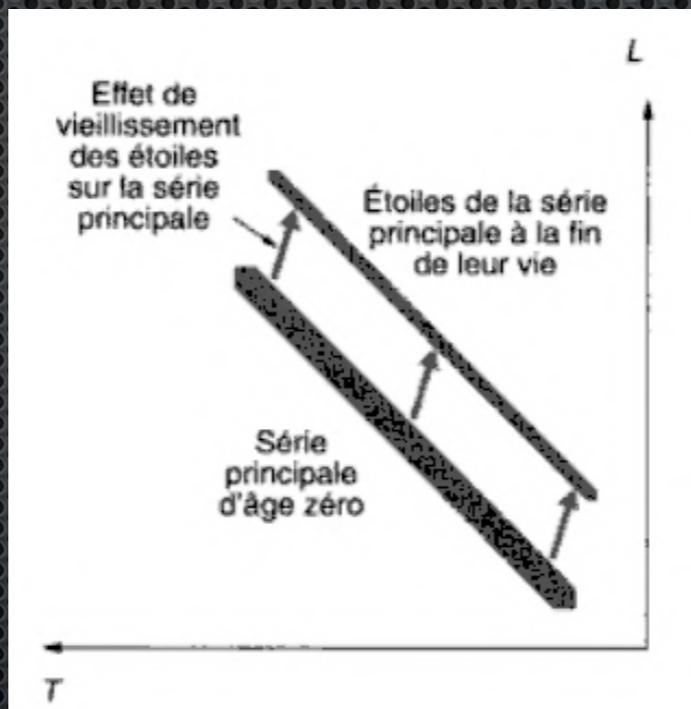
## L'enfance du Soleil

**-4,6 Ga**

- Le Soleil commence sa vie dans la séquence principale, cf. “Le Présent”
- MAIS : même sur la séquence principale, les paramètres physiques changent (lentement) !
- À l'époque :

$$L = 0,7 L_{\odot}$$

$$D = 0,9 D_{\odot}$$

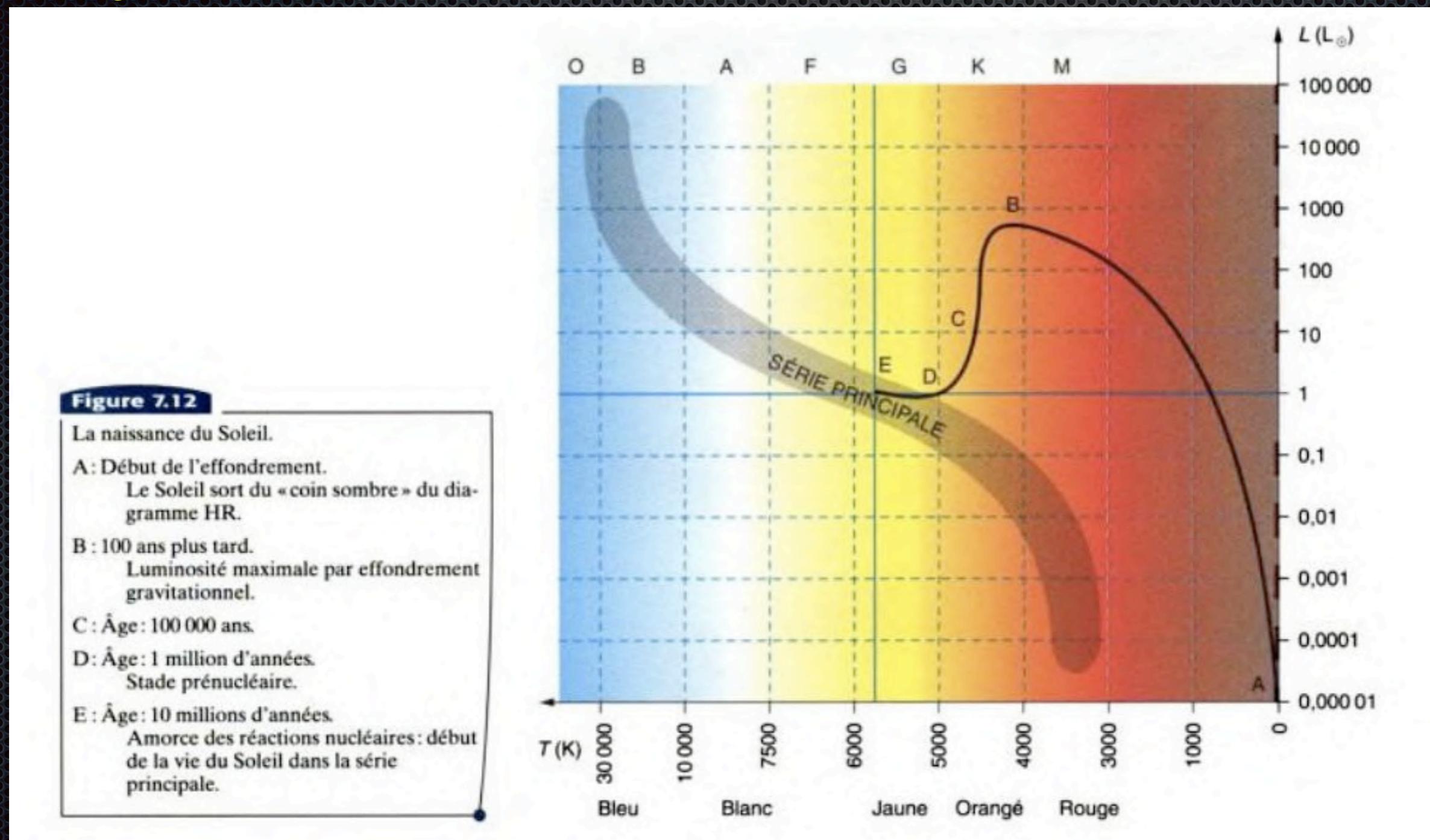


M. Seguin - B. Villeneuve

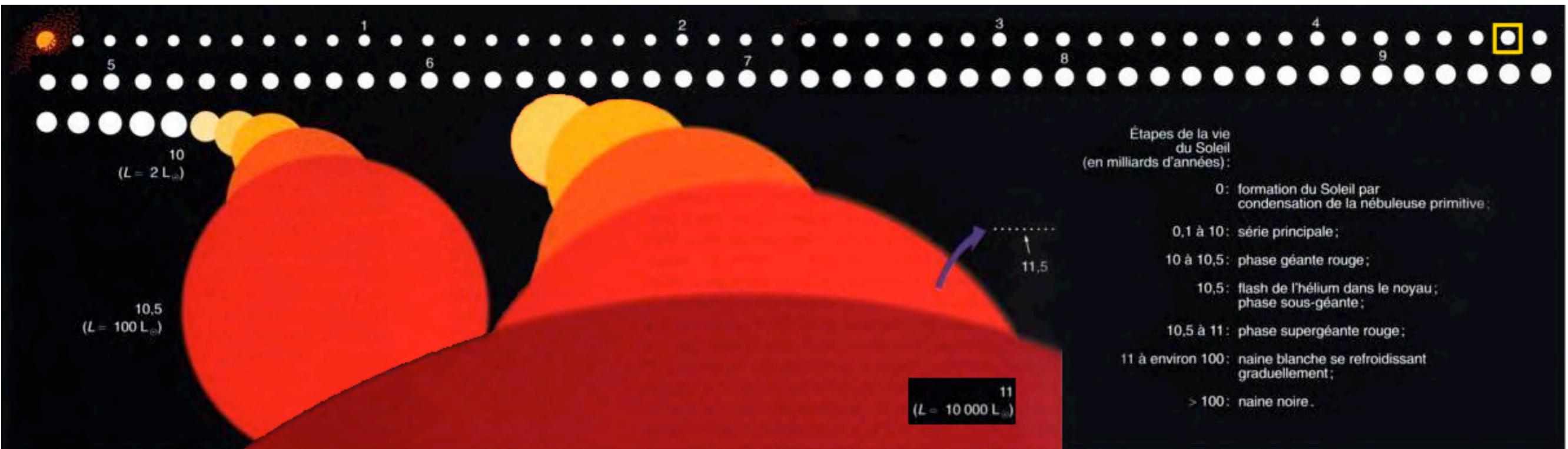
# NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

## En résumé...

M. Seguin - B. Villeneuve



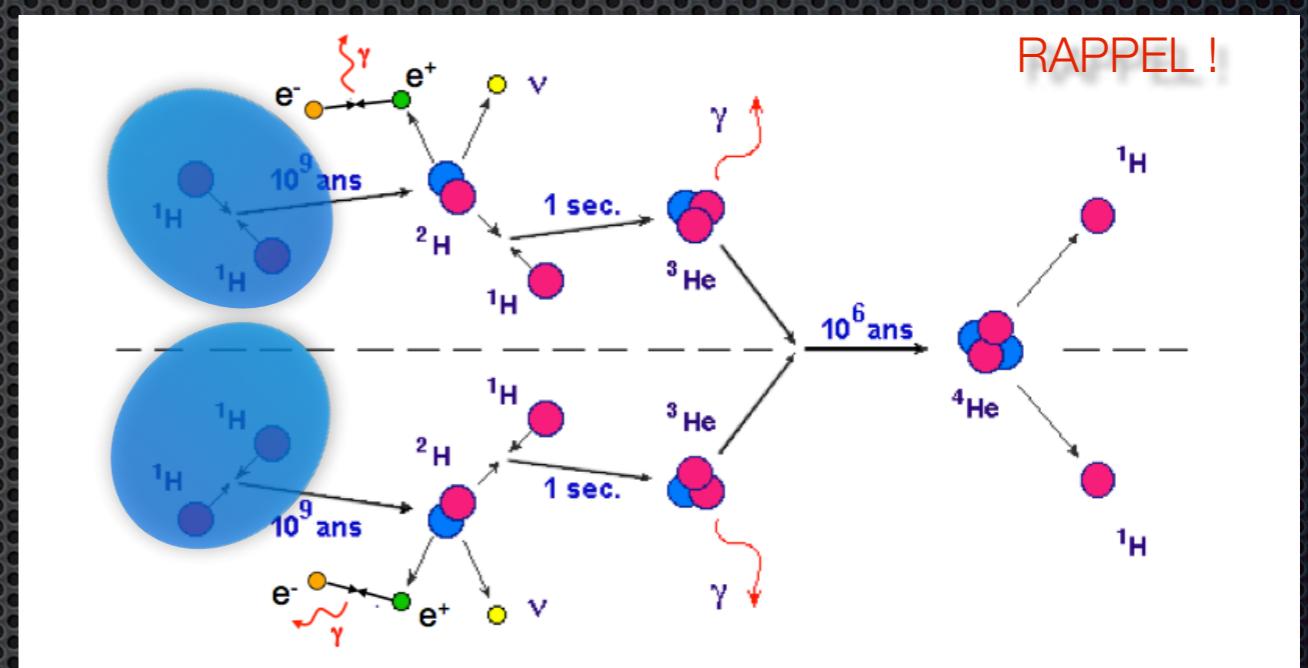
# LA LIGNE DE VIE DU SOLEIL



# ...ET DEMAIN ?

## Le Soleil a-t-il une fin ?

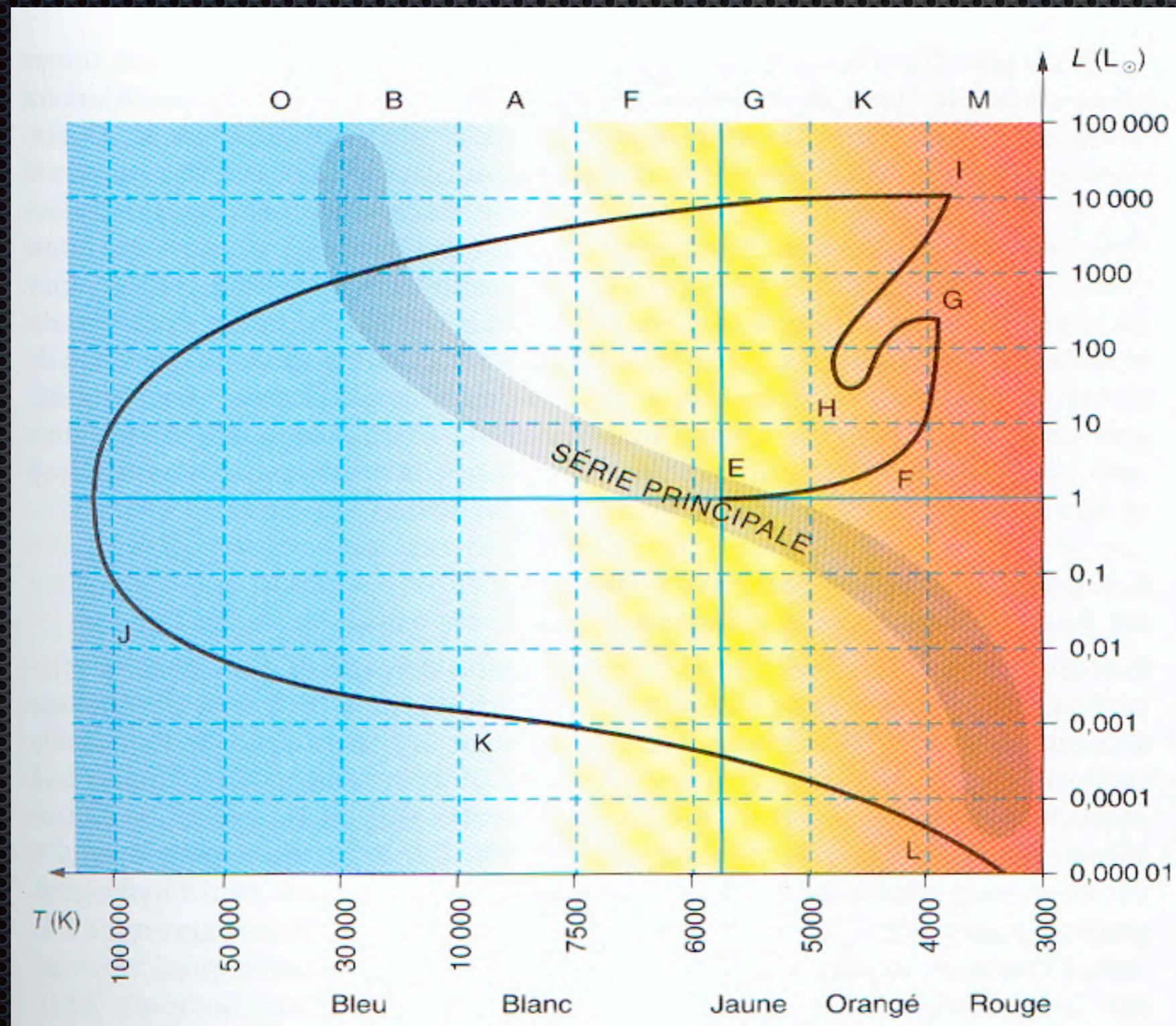
- Réactions nucléaires = «moteur» du Soleil
- «Carburant» = réserves d'hydrogène



Ce carburant s'épuisera un jour ➔ mort du Soleil !  
Mais que se passera-t-il précisément ?

# ..ET DEMAIN ?

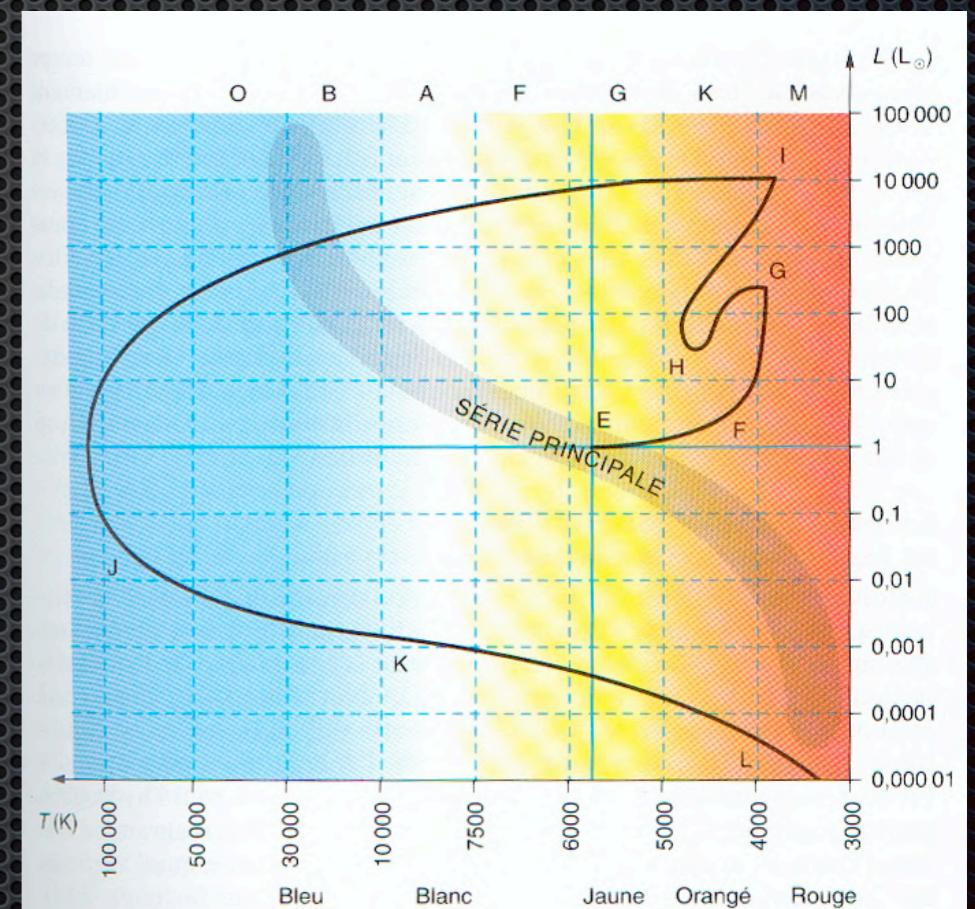
## Diagramme Hertzsprung-Russel



# ...ET DEMAIN ?

## Diagramme Hertzsprung-Russel

- **E** : fin de la séquence principale
- **F** [+200 Ma] : début de la phase géante rouge
- **G** [+300 Ma] : flash de l'He
- **H** [+100 Ma] : branche horizontale
- **I** [+400 Ma] : supergéante rouge
- **J** [qqes Ma] : nébuleuse planétaire et naine blanche
- **K** [+100 000 Ma] : naine blanche se refroidit lentement...



...ET DEMAIN ?

Etape E : Fin de la séquence principale

5 Ga

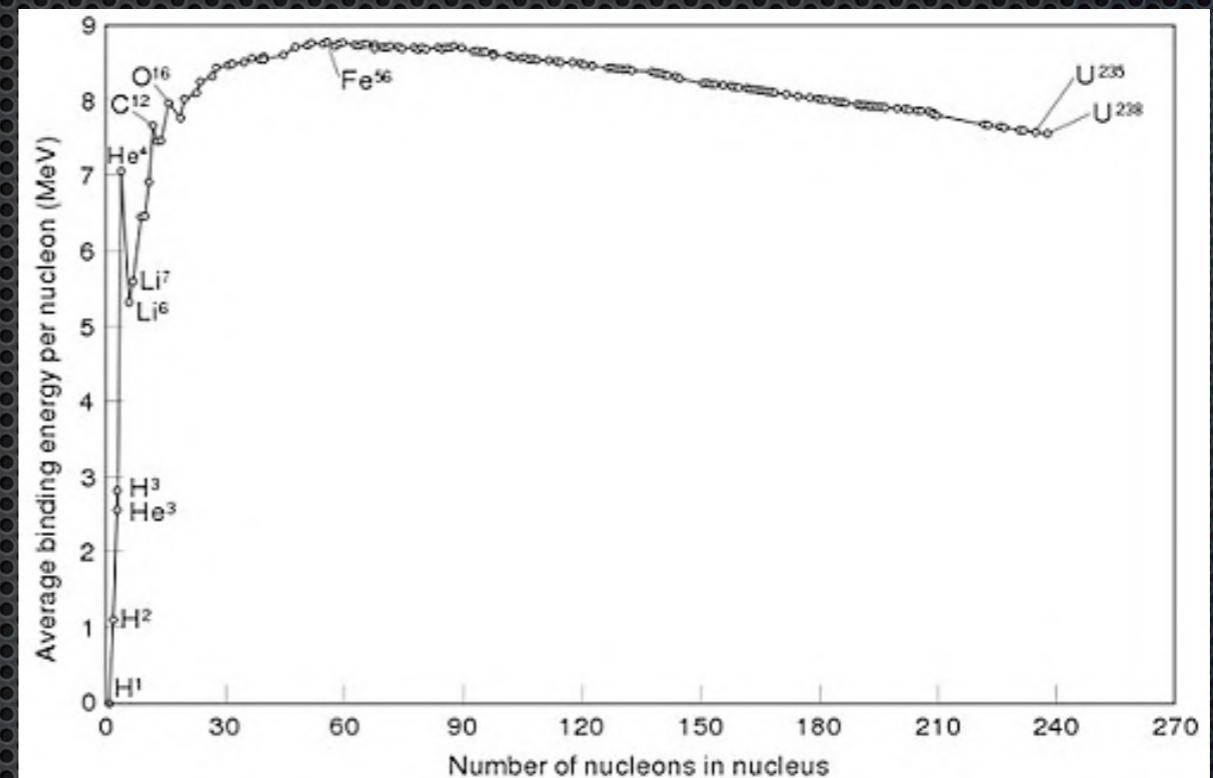
- Valable pour  $M < 8 M_{\odot}$
- Temps de vie dépend **FORTEMENT** de  $M$ 
  - ➡  $1 M_{\odot} \Rightarrow 10 \text{ Ga}$
  - ➡  $0,1 M_{\odot} \Rightarrow 6 \,000 \text{ Ga !}$
- He s'accumule au cœur... (**pourquoi ?**)
- ...mais il ne peut pas fusionner ! (**re-pourquoi ?**)
  - ➡ gêne la fusion de l'H au cœur

...ET DEMAIN ?

Etape E : Fin de la séquence principale

5 Ga

- Valable pour  $M < 8 M_{\odot}$
- Temps de vie dépend **FORTEMENT** de  $M$ 
  - ➡  $1 M_{\odot} \Rightarrow 10 \text{ Ga}$
  - ➡  $0,1 M_{\odot} \Rightarrow 6 \text{ 000 Ga !}$



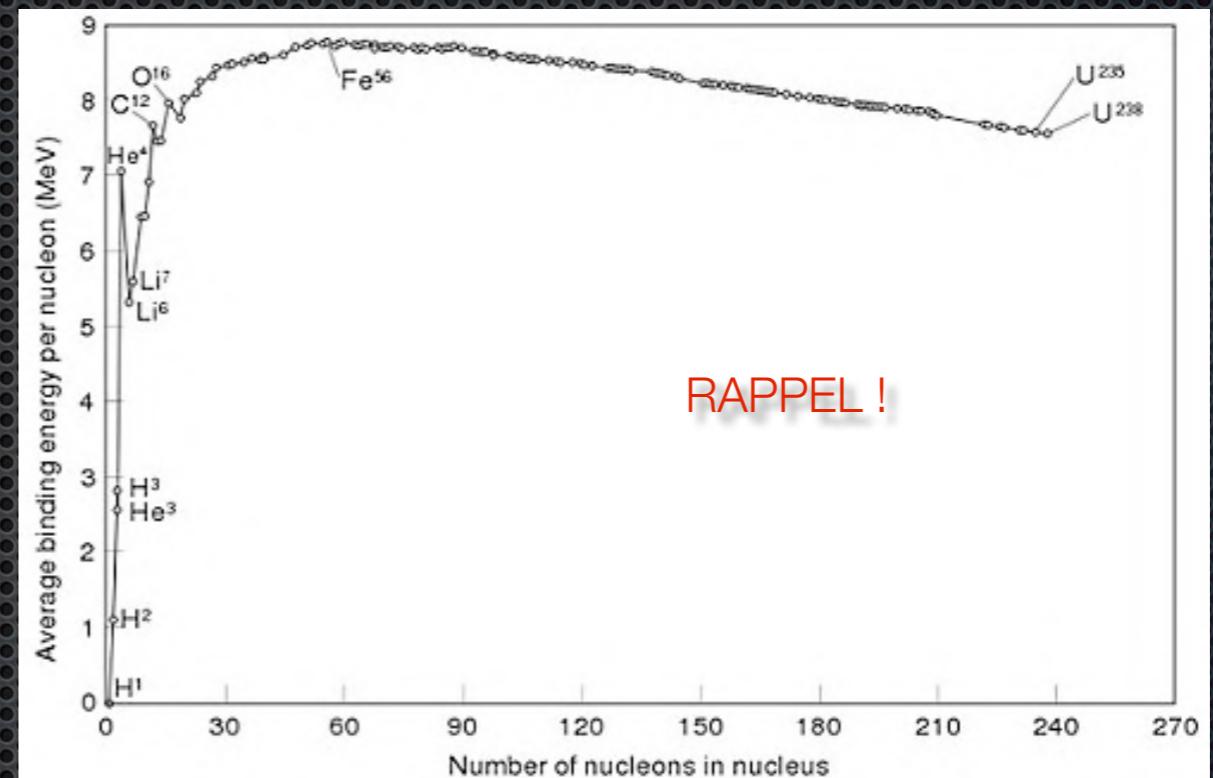
- He s'accumule au cœur... (**pourquoi ?**)
- ...mais il ne peut pas fusionner ! (**re-pourquoi ?**)
  - ➡ gêne la fusion de l'H au cœur

...ET DEMAIN ?

Etape E : Fin de la séquence principale

5 Ga

- Valable pour  $M < 8 M_{\odot}$
- Temps de vie dépend **FORTEMENT** de  $M$ 
  - ➡  $1 M_{\odot} \Rightarrow 10 \text{ Ga}$
  - ➡  $0,1 M_{\odot} \Rightarrow 6 \text{ 000 Ga !}$



- He s'accumule au cœur... (**pourquoi ?**)
- ...mais il ne peut pas fusionner ! (**re-pourquoi ?**)
  - ➡ gêne la fusion de l'H au cœur

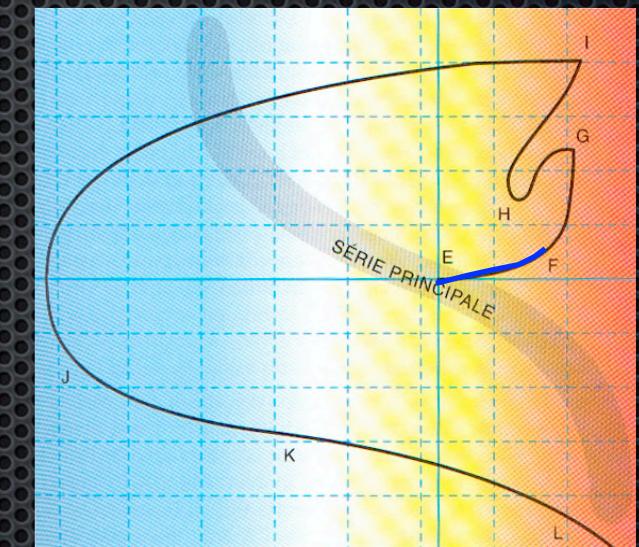
...ET DEMAIN ?

Etape E-F : Vers la phase géante rouge

**5,2 Ga**

- He accumulé au cœur gêne fusion de H
  - ▶ pression centrale
  - ▶ contraction du cœur
  - ▶  $T_{\text{coeur}}$
  - ▶ + de matière au centre et taux de réaction ↑
- Accumulation d'énergie au cœur : couches externes se dilatent  $\rightarrow T_{\text{surf}} \searrow$
- Mais cette augmentation d'énergie est trop brusque : elle n'arrive pas tout de suite à la surface

→ L constante



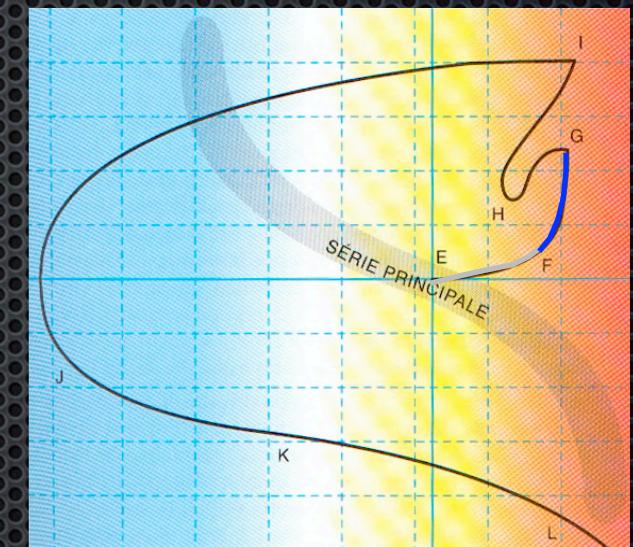
...ET DEMAIN ?

Etape F-G : La phase géante rouge

**5,5 Ga**

- L'énergie continue à s'accumuler au cœur...
- Le transport d'énergie par radiation n'est plus efficace
- Transport par convection
- Le surplus d'énergie arrive enfin à la surface

→ L //



**LE SOLEIL EST UNE  
GÉANTE ROUGE...**

# ...ET DEMAIN ?

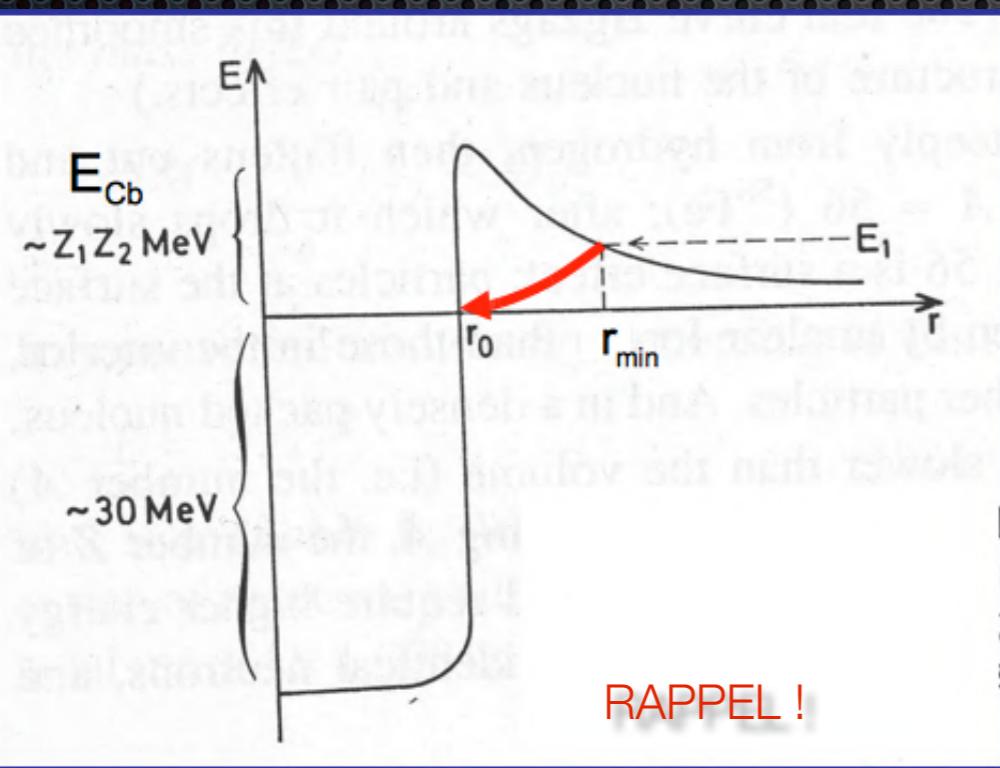
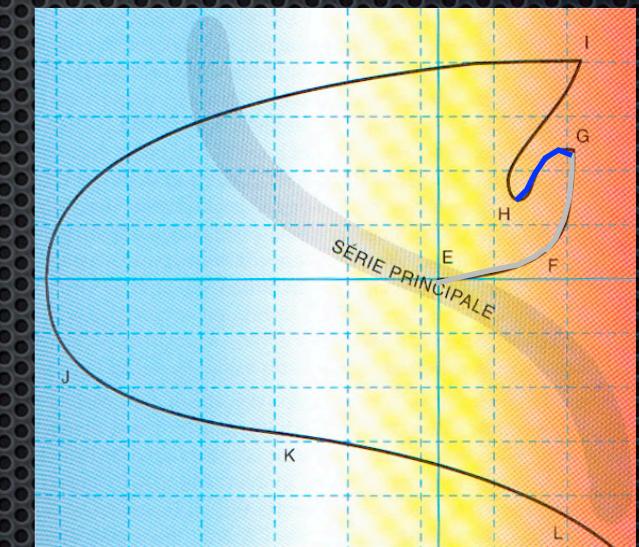
## Etape G-H : Le flash de l'hélium

5,6 Ga

- Le cœur se contracte toujours

→  $T_{\text{coeur}}$  ↗

→  $T_{\text{coeur}}$  atteint 100 000 000 K



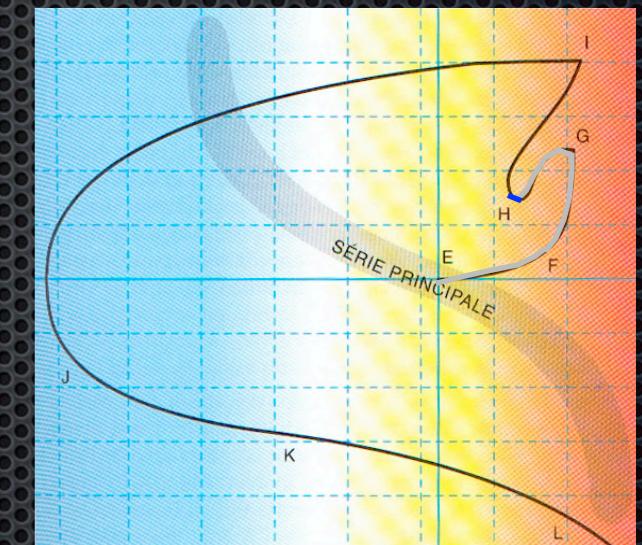
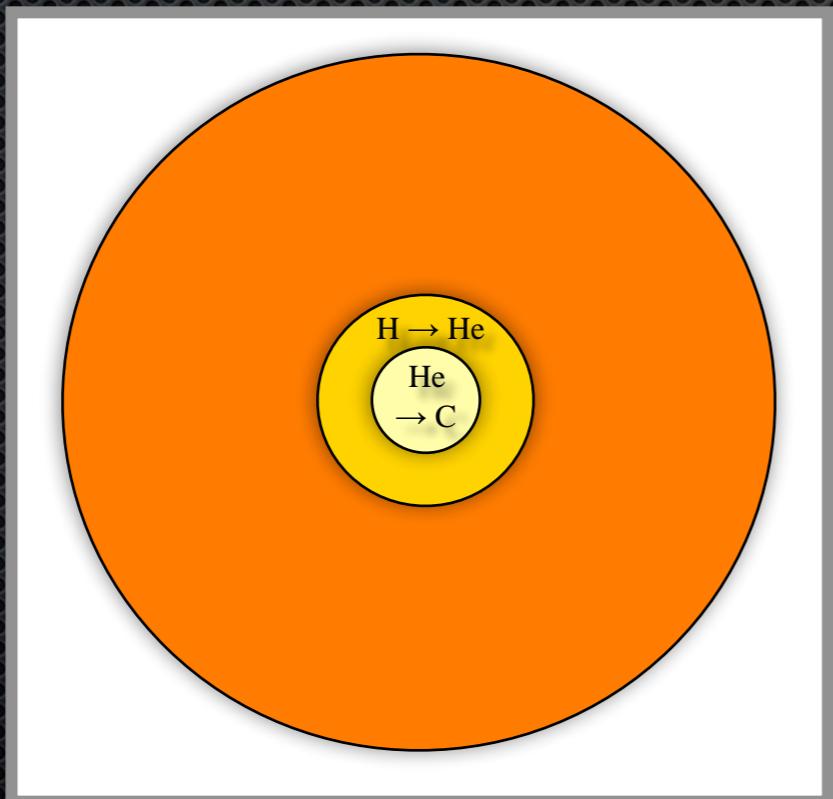
- La fusion de l'He se déclenche brusquement !
- **FLASH DE D'HÉLIUM**
- Éjection des couches externes

...ET DEMAIN ?

Etape H : La phase de sous-géante

5,6 Ga

- Le Soleil retrouve un équilibre
- Structure en couches
- Fusion «tranquille» de l'H et de l'He



BRANCHE HORIZONTALE

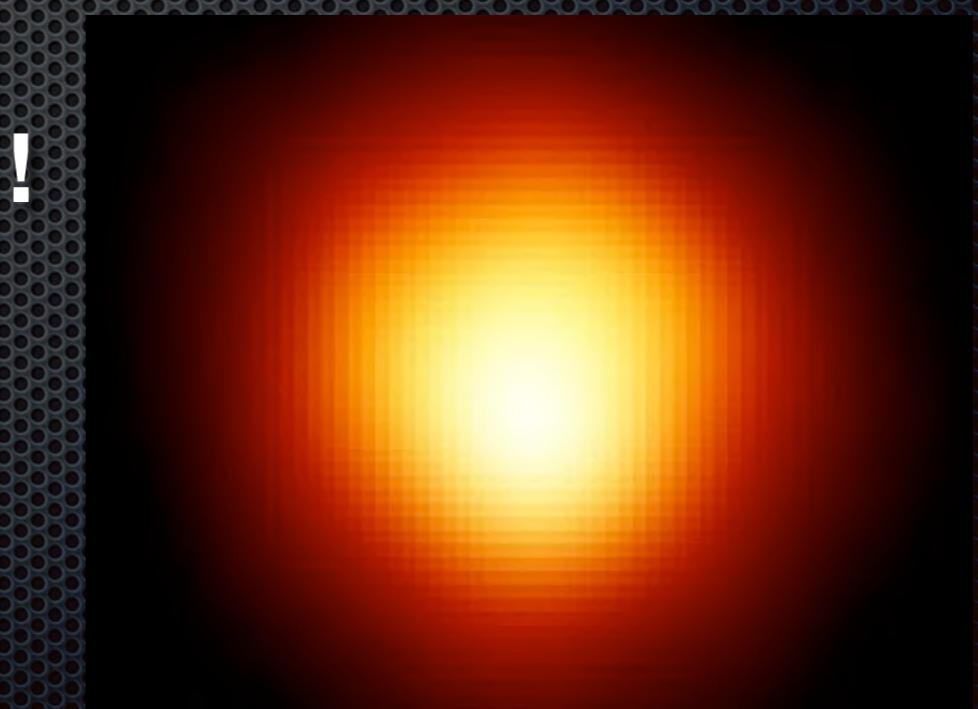
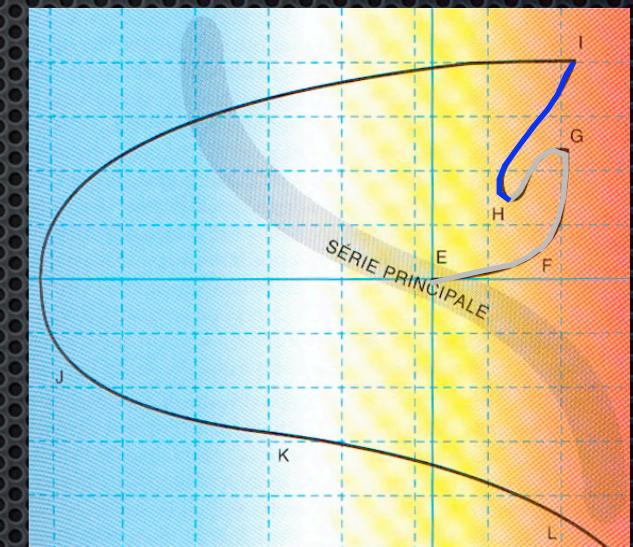
# ...ET DEMAIN ?

## Etape H-I : Vers la phase supergéante rouge

6 Ga

- Même chose que précédemment...
- ...mais cette fois, c'est le carbone qui gêne
- $T_{\text{coeur}}$  et  $L \nearrow$
- $T_{\text{surf}} \searrow$
- Enveloppe extrêmement dilatée !

**LE SOLEIL EST UNE  
SUPRGÉANTE  
ROUGE...**



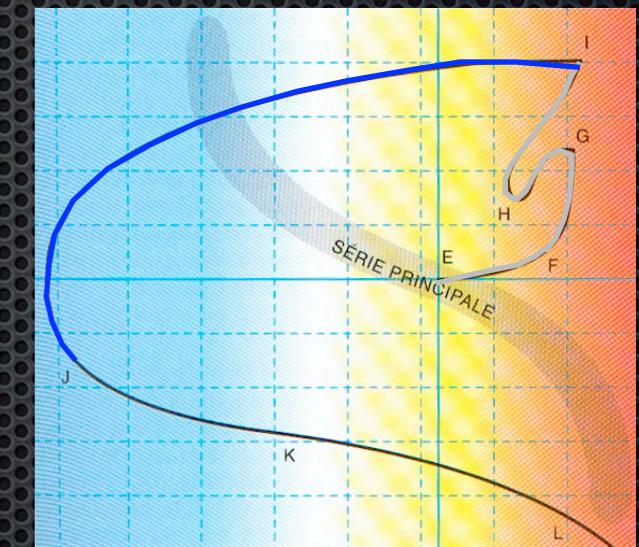
Bételgeuse ( $15 M_{\odot}$ !) (NASA)

# ...ET DEMAIN ?

## Etape I-J : La phase nébuleuse planétaire

6 Ga

- Le Soleil est tellement dilaté que la gravité n'arrive plus à le maintenir...
- Gigantesques pulsations avec éjection de matière



$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$   
 $R \approx 5800 \text{ km}$   
 $V_{\text{esc}} \approx 0.02c$

- Il ne reste que le cœur compact très chaud : **NAINE BLANCHE**

...ET DEMAIN ?

Etape I-J : La phase nébuleuse planétaire

**6 Ga**



Nébuleuse de la Lyre (Hubble Space Telescope)



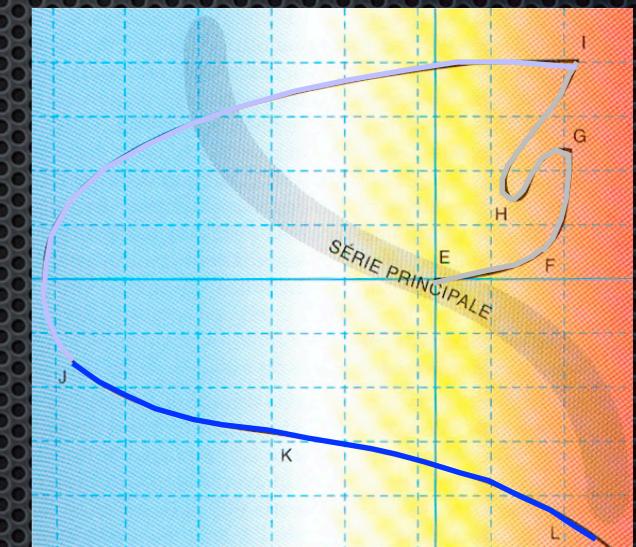
Nébuleuse MyCn18  
(Hubble Space Telescope)

# ...ET DEMAIN ?

## Etape J-K-L : Refroidissement...

**100 Ga**

- Le cœur du Soleil se refroidit de plus en plus...
- La naine blanche devient naine noire
- Mais l'univers est trop jeune pour en contenir !

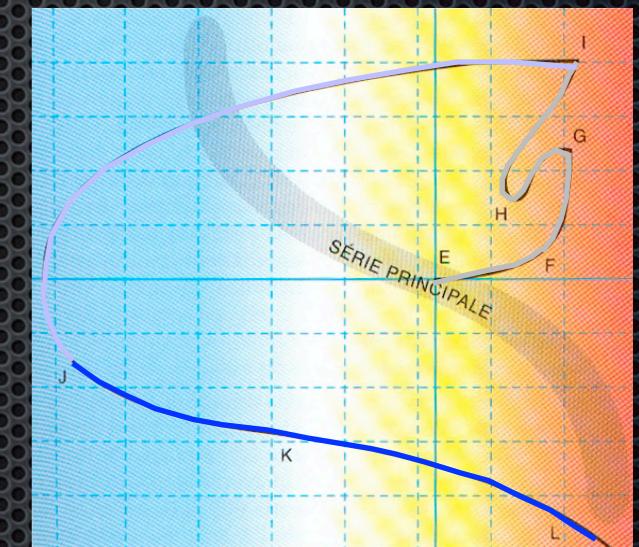


..ET DEMAIN ?

Etape J-K-L : Refroidissement...

**100 Ga**

- (À moins que...)



# ...ET DEMAIN ?

Discussion, débat, insultes : fin de l'Humanité ?

**À votre avis, pour quand doit-on prévoir la fin du Monde ?**

- a) Le 21 décembre 2012, car les Mayas l'ont dit !
- b) Dans 1 milliard d'années, lorsque le Soleil sera 10% plus lumineux
- c) Dans 5 milliards d'années, lorsque le Soleil sortira de la séquence principale
- d) Dans 5,5 milliards d'années, lorsque le Soleil sera une géante rouge
- e) Dans 6 milliards d'années, lorsque le Soleil sera une supergéante rouge, puis une nébuleuse planétaire
- f) Dans 100 milliards d'années, lorsque la naine blanche résultante sera devenue froide
- g) La réponse g...



...ET DEMAIN ?

Discussion, débat, insultes : fin de l'Humanité ?

## Réponse...

- a) Pas très scientifique... ;-)
- b) BONNE RÉPONSE ! Avec à peine 10% de luminosité en plus, l'effet de serre sera devenu beaucoup trop important pour que l'Homme survive (+feedbacks...)
- c) Uniquement si on acquiert une technologie pour refroidir l'atmosphère...
- d)  $L = 200 L_{\odot}$ , toute vie sur Terre disparaît
- e) Le Soleil englobera l'orbite ACTUELLE de la Terre... Mais perte de masse ➔ la Terre s'éloignera ! Sans doute pile à la limite du diamètre du Soleil. Terre = océan de roches en fusion
- f) Trop tard
- g) ...

# Merci de votre attention !

