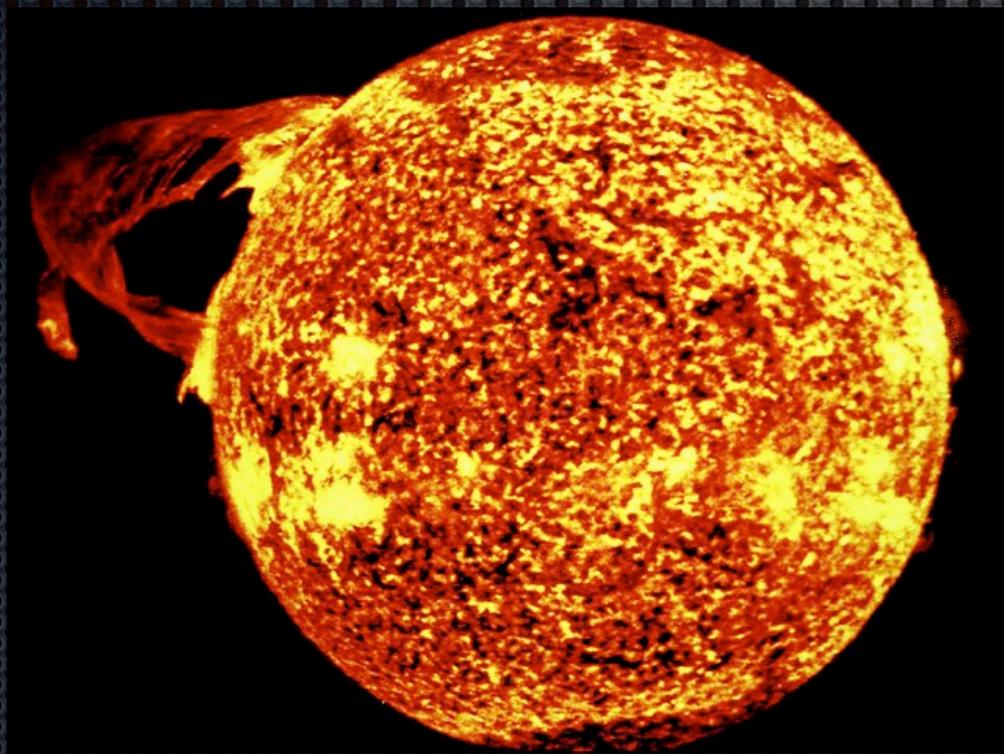


LE SOLEIL AU COURS DU TEMPS



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**

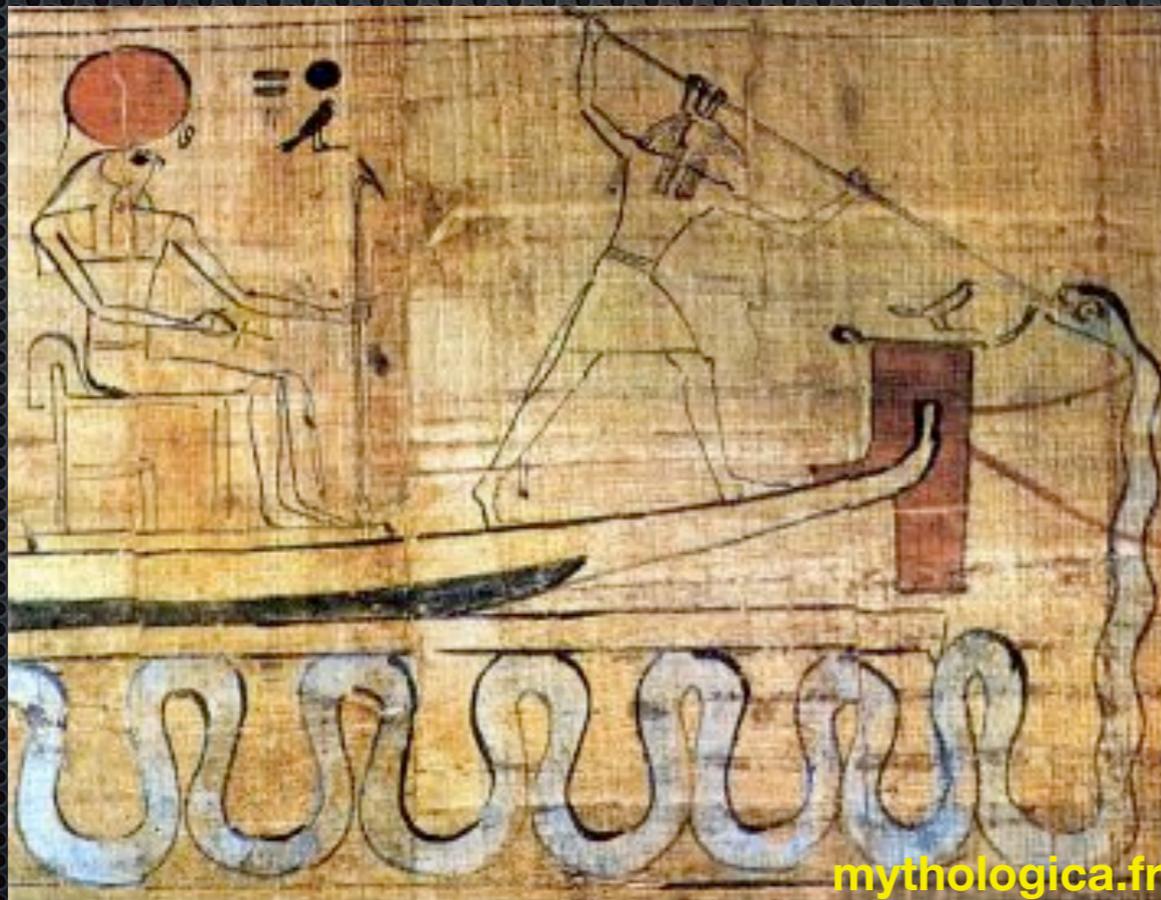
alignements astronomiques d'une précision n'excédant pas 1°

➔ **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

mythologica.fr

NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

L'Égypte antique

- **Culte quasi-monothéiste voué au Dieu Soleil**
- **Akhenaton, XIVe siècle AC**
- **Ne parvient pas à s'imposer après la mort d'Akhenaton**
- **Origine contestée de nos cultes monothéistes**

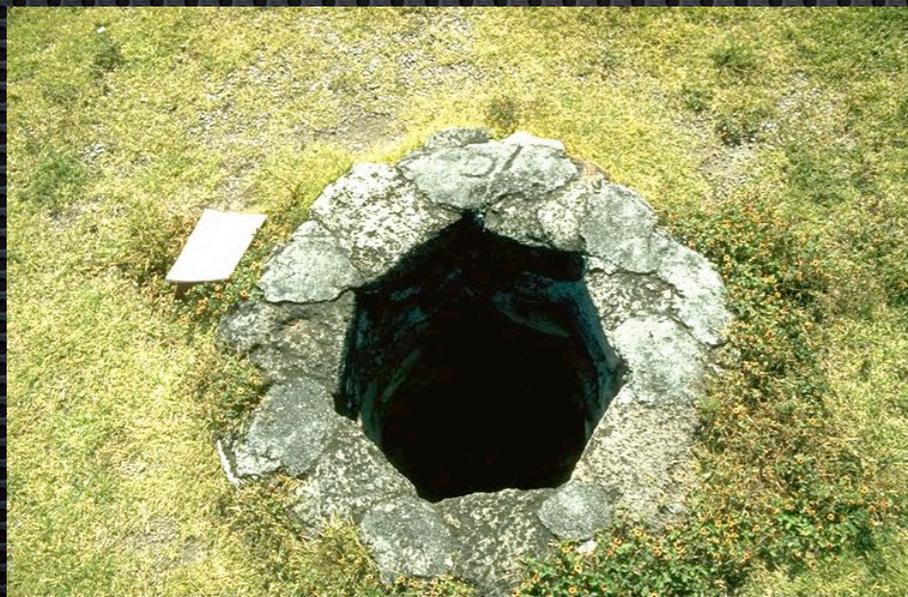


NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

Les Amérindiens



- **Soleil = objet principal du ciel maya**



wikipedia

- **Dirigeant suprême**
- **Alignements, encore et toujours...**

NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

Les Amérindiens

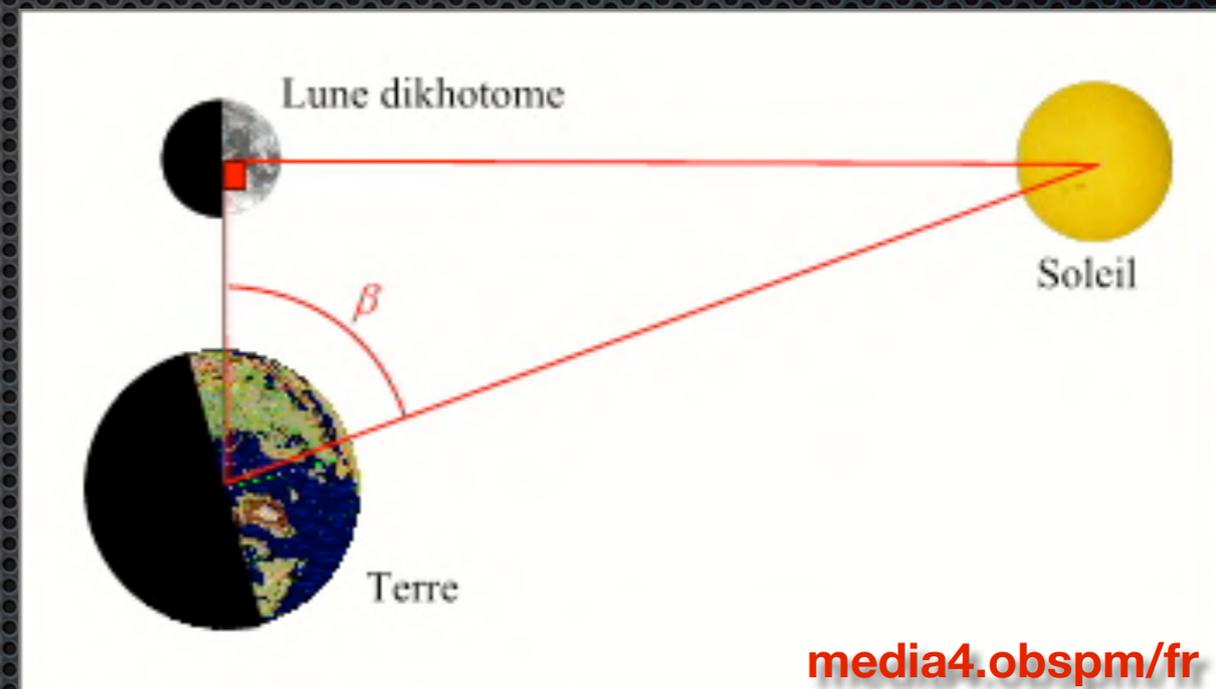
- **Torreón du Machu Picchu**
- **Cerro Pichu, Cuzco : calendrier solaire observable depuis le centre ville**



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



NOTRE CONCEPTION DU SOLEIL

La Rome antique

L'islam médiéval

La Mésopotamie

La Chine

...

OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

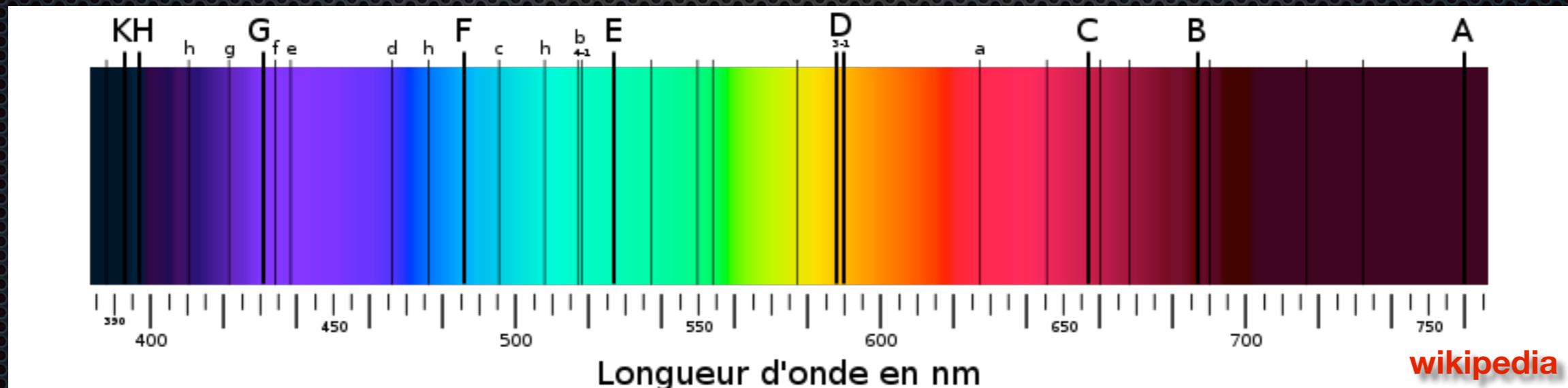
Mieux comprendre la physique du Soleil

XVIIe siècle : invention de la lunette

➔ **Observation taches solaires (Scheiner, Galilée)**

! DANGER

➔ **Étude spectroscopique : Fraunhofer, Wollaston**

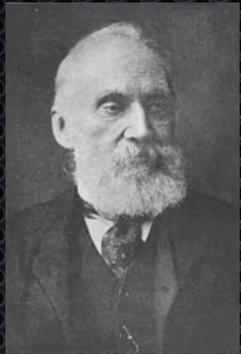


OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

Mieux comprendre la physique du Soleil

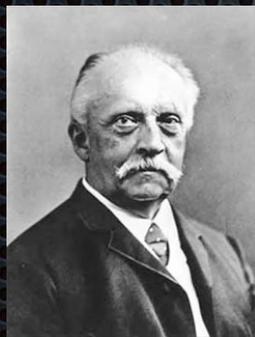
Modèle de la “combustion” du Soleil

D’où proviennent la chaleur et la lumière qu’il dégage ?



Lord Kelvin

“Le Soleil tire son énergie de l’impact continuels
météorites” - **1854**

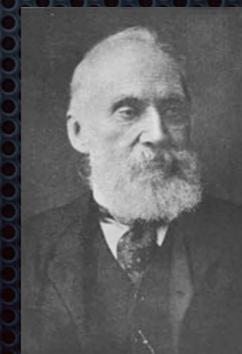


Helmholtz

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

Vous avez raison !

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

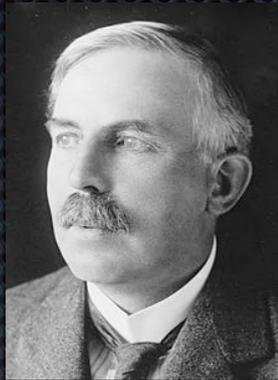


OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

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 coeur du Soleil...” - **1919**

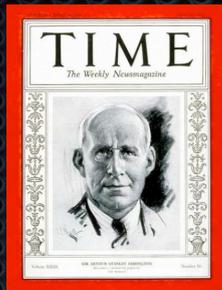
OBSERVATION SCIENTIFIQUE DU SOLEIL

Mieux comprendre la physique du Soleil

Modèle de la “combustion” du Soleil

D’où proviennent la chaleur et la lumière qu’il dégage ?

“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**



Eddington & Schwarzschild



Bethe

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

nobelprize.org - how the sun shines

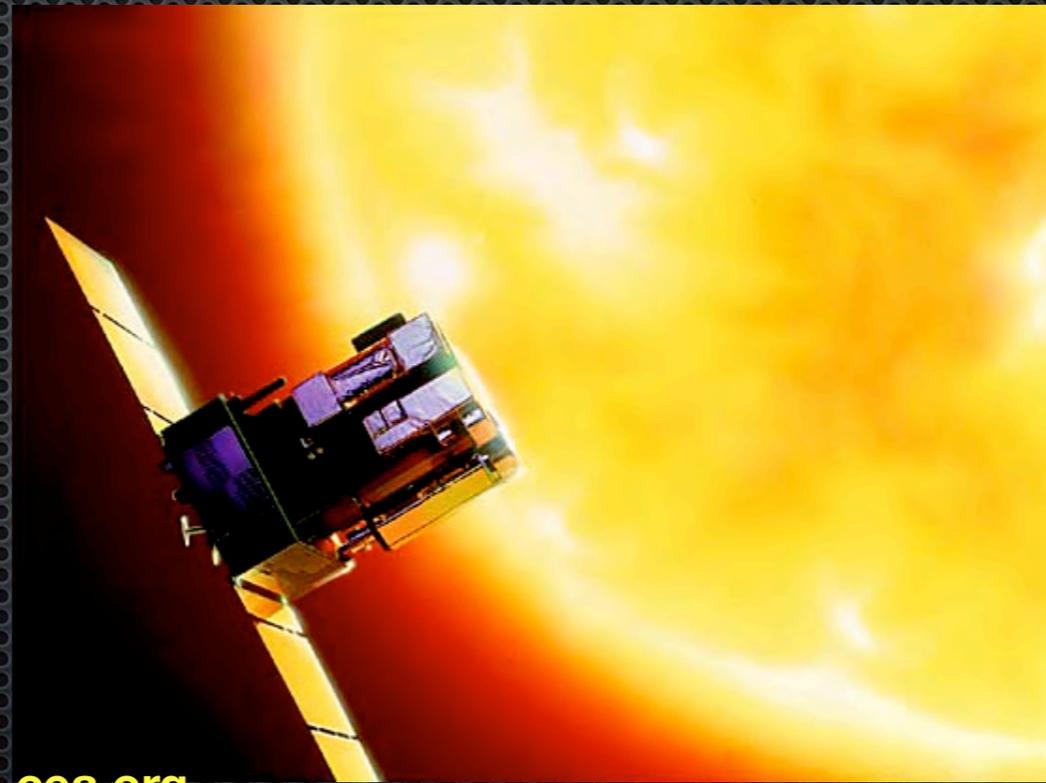
Confirmations apportées au fur et à mesure par observations

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**



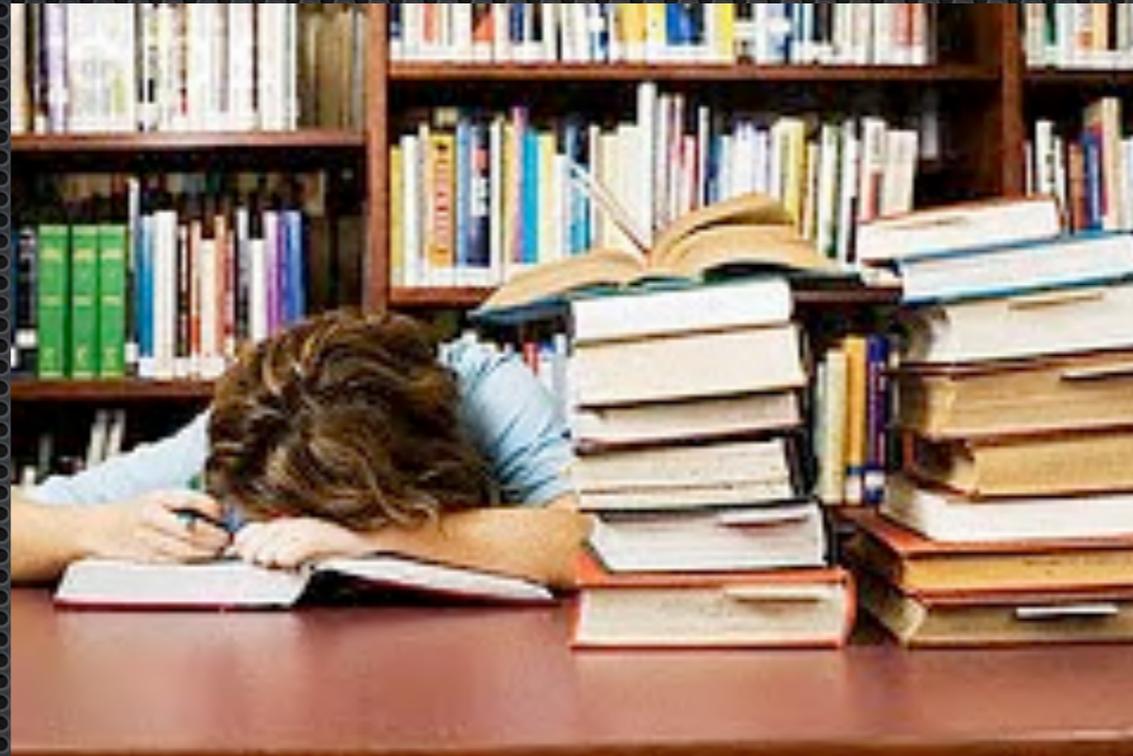
EXERCICE 1

Eratosthène, mathématicien grec, calcula, au III^e siècle AC, le rayon de la Terre

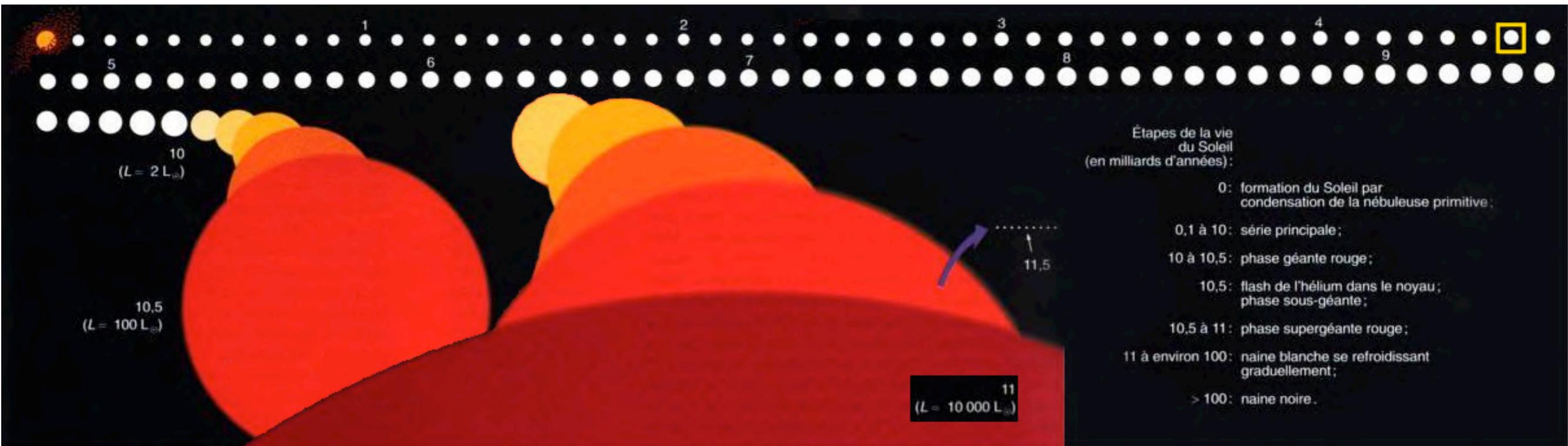
Serez-vous aussi
brillants que
moi ?



PAUSE !



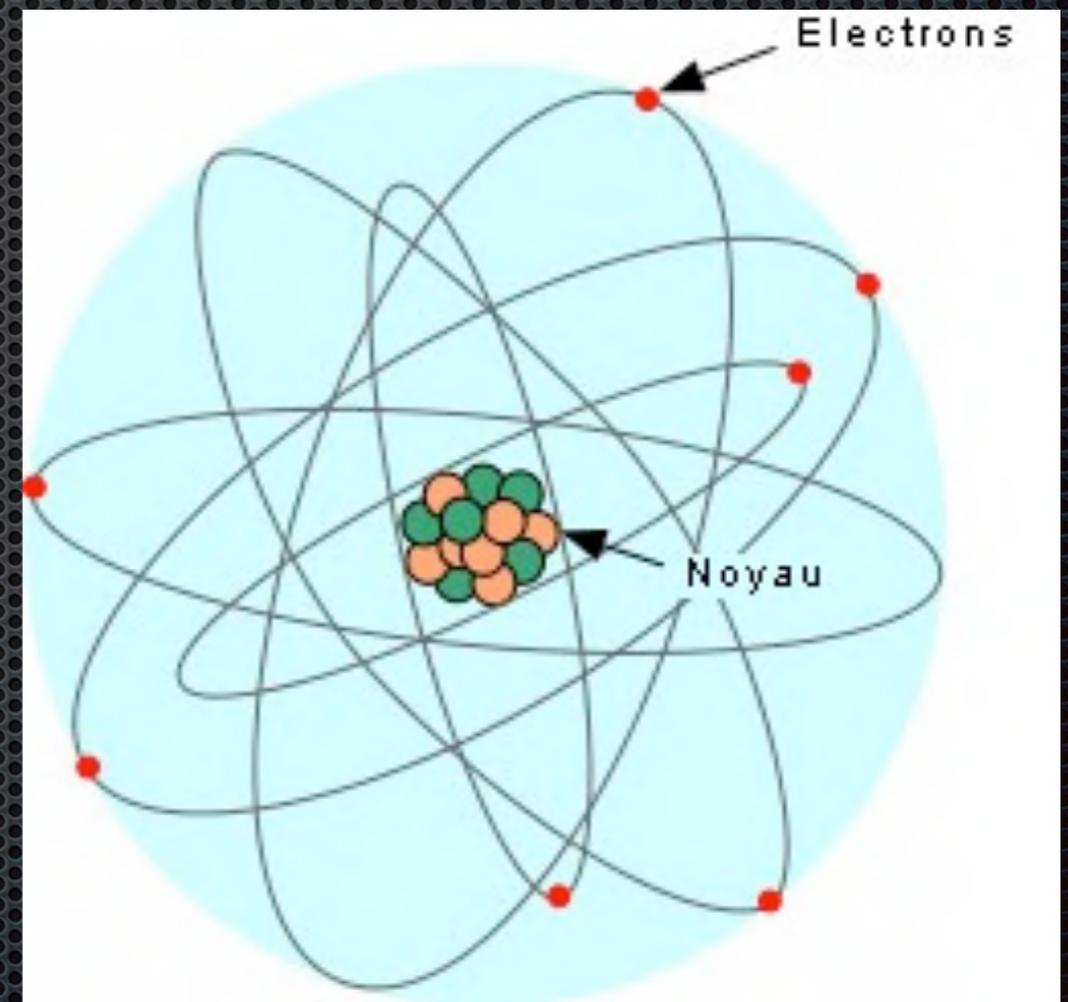
LA LIGNE DE VIE DU SOLEIL



FUSION NUCLÉAIRE

Le noyau

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



FUSION NUCLÉAIRE

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

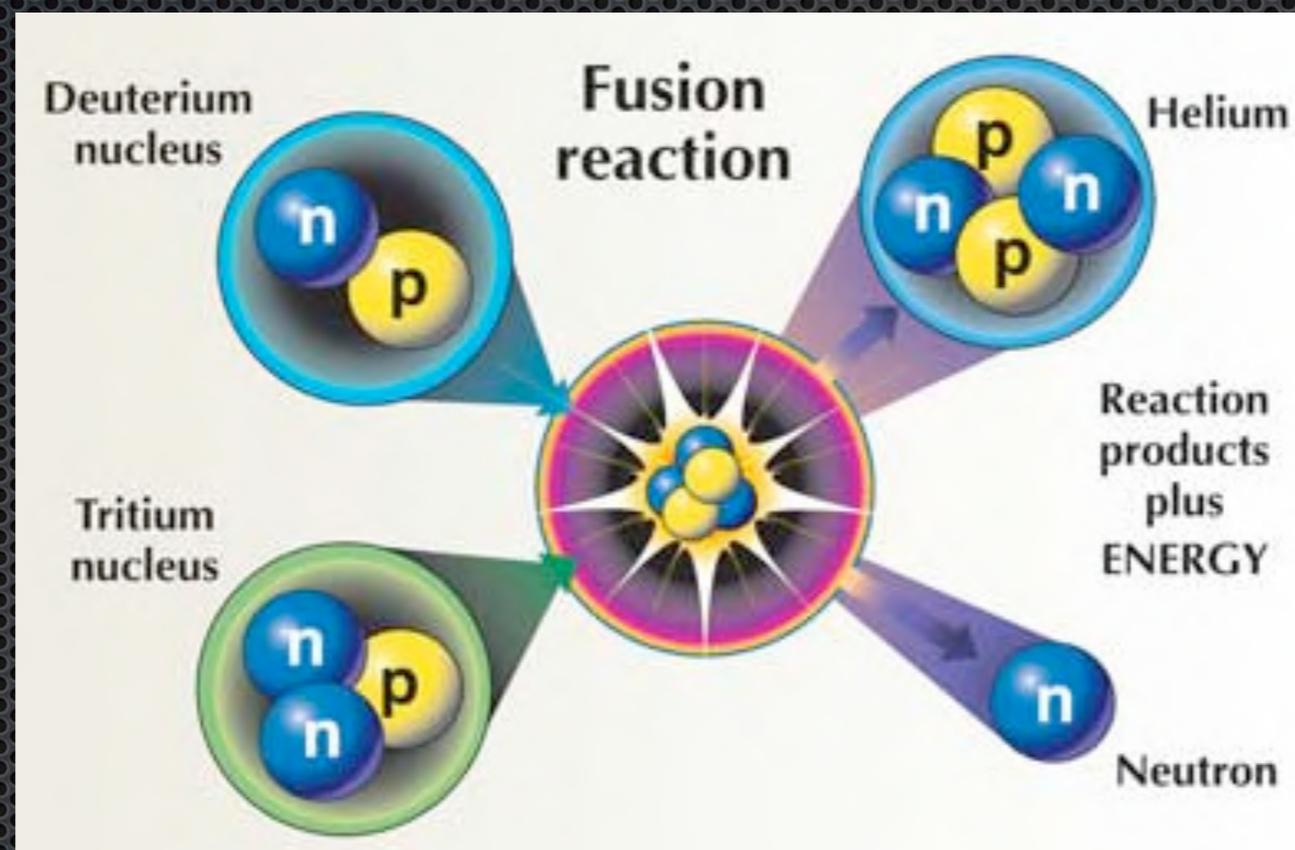
Periodic Table of the Elements

1A 1 H 1s ¹ hydrogen 1.008	2A 2 He 1s ² helium 4.003																
3 Li [He]2s ¹ lithium 6.941	4 Be [He]2s ² beryllium 9.012																
11 Na [Ne]3s ¹ sodium 22.99	12 Mg [Ne]3s ² magnesium 24.31	3B	4B	5B	6B	7B	8B			11B	12B	3A 5 B [He]2s ² 2p ¹ boron 10.81	4A 6 C [He]2s ² 2p ² carbon 12.01	5A 7 N [He]2s ² 2p ³ nitrogen 14.01	6A 8 O [He]2s ² 2p ⁴ oxygen 16.00	7A 9 F [He]2s ² 2p ⁵ fluorine 19.00	10 Ne [He]2s ² 2p ⁶ neon 20.18
19 K [Ar]4s ¹ potassium 39.10	20 Ca [Ar]4s ² calcium 40.08	21 Sc [Ar]4s ² 3d ¹ scandium 44.96	22 Ti [Ar]4s ² 3d ² titanium 47.88	23 V [Ar]4s ² 3d ³ vanadium 50.94	24 Cr [Ar]4s ¹ 3d ⁵ chromium 52.00	25 Mn [Ar]4s ² 3d ⁵ manganese 54.94	26 Fe [Ar]4s ² 3d ⁶ iron 55.85	27 Co [Ar]4s ² 3d ⁷ cobalt 58.93	28 Ni [Ar]4s ² 3d ⁸ nickel 58.69	29 Cu [Ar]4s ¹ 3d ¹⁰ copper 63.55	30 Zn [Ar]4s ² 3d ¹⁰ zinc 65.39	31 Ga [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ¹ gallium 69.72	32 Ge [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ² germanium 72.58	33 As [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ³ arsenic 74.92	34 Se [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁴ selenium 78.96	35 Br [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁵ bromine 79.90	36 Kr [Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶ krypton 83.80
37 Rb [Kr]5s ¹ rubidium 85.47	38 Sr [Kr]5s ² strontium 87.62	39 Y [Kr]5s ² 4d ¹ yttrium 88.91	40 Zr [Kr]5s ² 4d ² zirconium 91.22	41 Nb [Kr]5s ¹ 4d ⁴ niobium 92.91	42 Mo [Kr]5s ¹ 4d ⁵ molybdenum 95.94	43 Tc [Kr]5s ² 4d ⁵ technetium (98)	44 Ru [Kr]5s ¹ 4d ⁷ ruthenium 101.1	45 Rh [Kr]5s ¹ 4d ⁸ rhodium 102.9	46 Pd [Kr]4d ¹⁰ palladium 106.4	47 Ag [Kr]5s ¹ 4d ¹⁰ silver 107.9	48 Cd [Kr]5s ² 4d ¹⁰ cadmium 112.4	49 In [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ¹ indium 114.8	50 Sn [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ² tin 118.7	51 Sb [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ³ antimony 121.8	52 Te [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁴ tellurium 127.6	53 I [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁵ iodine 126.9	54 Xe [Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁶ xenon 131.3
55 Cs [Xe]6s ¹ cesium 132.9	56 Ba [Xe]6s ² barium 137.3	57 La* [Xe]6s ² 5d ¹ lanthanum 138.9	72 Hf [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ² hafnium 178.5	73 Ta [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ³ tantalum 180.9	74 W [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁴ tungsten 183.9	75 Re [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁵ rhenium 186.2	76 Os [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁶ osmium 190.2	77 Ir [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁷ iridium 190.2	78 Pt [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ⁹ platinum 195.1	79 Au [Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ gold 197.0	80 Hg [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ mercury 200.5	81 Tl [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ¹ thallium 204.4	82 Pb [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ² lead 207.2	83 Bi [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ³ bismuth 208.9	84 Po [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁴ polonium (209)	85 At [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁵ astatine (210)	86 Rn [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁶ radon (222)
87 Fr [Rn]7s ¹ francium (223)	88 Ra [Rn]7s ² radium (226)	89 Ac~ [Rn]7s ² 6d ¹ actinium (227)	104 Rf [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ² rutherfordium (257)	105 Db [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ³ dubnium (260)	106 Sg [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ⁴ seaborgium (263)	107 Bh [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ⁵ bohrium (262)	108 Hs [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ⁶ hassium (265)	109 Mt [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ⁷ meitnerium (266)	110 Ds [Rn]7s ¹ 5f ¹⁴ 6d ⁹ darmstadtium (271)	111 Uuu (272)	112 Uub (277)	114 Uuq (296)		116 Uuh (298)		118 Uuo (?)	
Lanthanide Series*		58 Ce [Xe]6s ² 4f ¹ 5d ¹ cerium 140.1	59 Pr [Xe]6s ² 4f ³ praseodymium 140.9	60 Nd [Xe]6s ² 4f ⁴ neodymium 144.2	61 Pm [Xe]6s ² 4f ⁵ promethium (147)	62 Sm [Xe]6s ² 4f ⁶ samarium (150.4)	63 Eu [Xe]6s ² 4f ⁷ europium 152.0	64 Gd [Xe]6s ² 4f ⁷ 5d ¹ gadolinium 157.3	65 Tb [Xe]6s ² 4f ⁹ terbium 158.9	66 Dy [Xe]6s ² 4f ¹⁰ dysprosium 162.5	67 Ho [Xe]6s ² 4f ¹¹ holmium 164.9	68 Er [Xe]6s ² 4f ¹² erbium 167.3	69 Tm [Xe]6s ² 4f ¹³ thulium 168.9	70 Yb [Xe]6s ² 4f ¹⁴ ytterbium 173.0	71 Lu [Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹ lutetium 175.0		
Actinide Series~		90 Th [Rn]7s ² 6d ² thorium 232.0	91 Pa [Rn]7s ² 5f ² 6d ¹ protactinium (231)	92 U [Rn]7s ² 5f ³ 6d ¹ uranium (238)	93 Np [Rn]7s ² 5f ⁴ 6d ¹ neptunium (237)	94 Pu [Rn]7s ² 5f ⁶ plutonium (242)	95 Am [Rn]7s ² 5f ⁷ americium (243)	96 Cm [Rn]7s ² 5f ⁷ 6d ¹ curium (247)	97 Bk [Rn]7s ² 5f ⁹ berkelium (247)	98 Cf [Rn]7s ² 5f ¹⁰ californium (249)	99 Es [Rn]7s ² 5f ¹¹ einsteinium (254)	100 Fm [Rn]7s ² 5f ¹² fermium (253)	101 Md [Rn]7s ² 5f ¹³ mendelevium (256)	102 No [Rn]7s ² 5f ¹⁴ nobelium (254)	103 Lr [Rn]7s ² 5f ¹⁴ 6d ¹ lawrencium (257)		

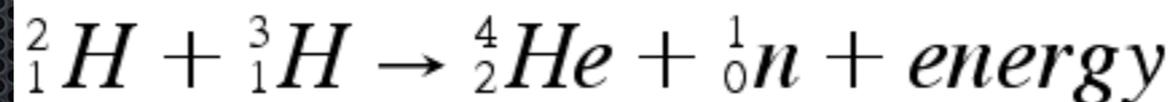
FUSION NUCLÉAIRE

Réaction de fusion

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

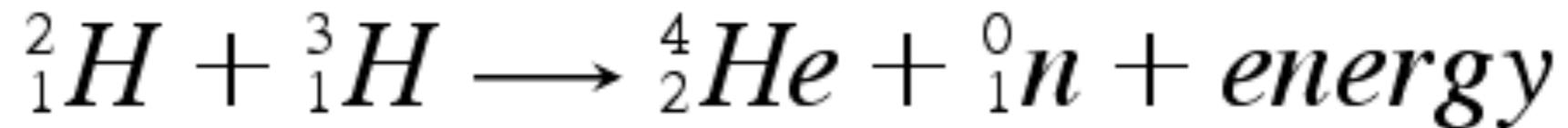
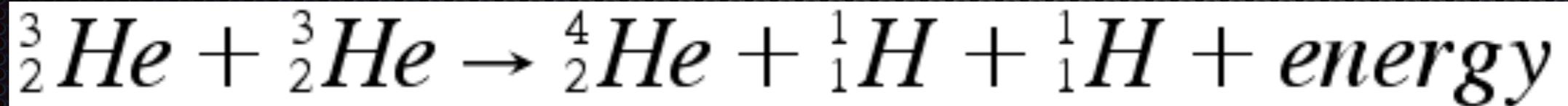


pourquoilecielbleu.blogspot.com



FUSION NUCLÉAIRE

Réaction de fusion



**Noyaux légers qui
doivent s'interpénétrer**



**Noyau lourd et neutron
avec une grande
énergie cinétique**

FUSION NUCLÉAIRE

Réaction de fusion

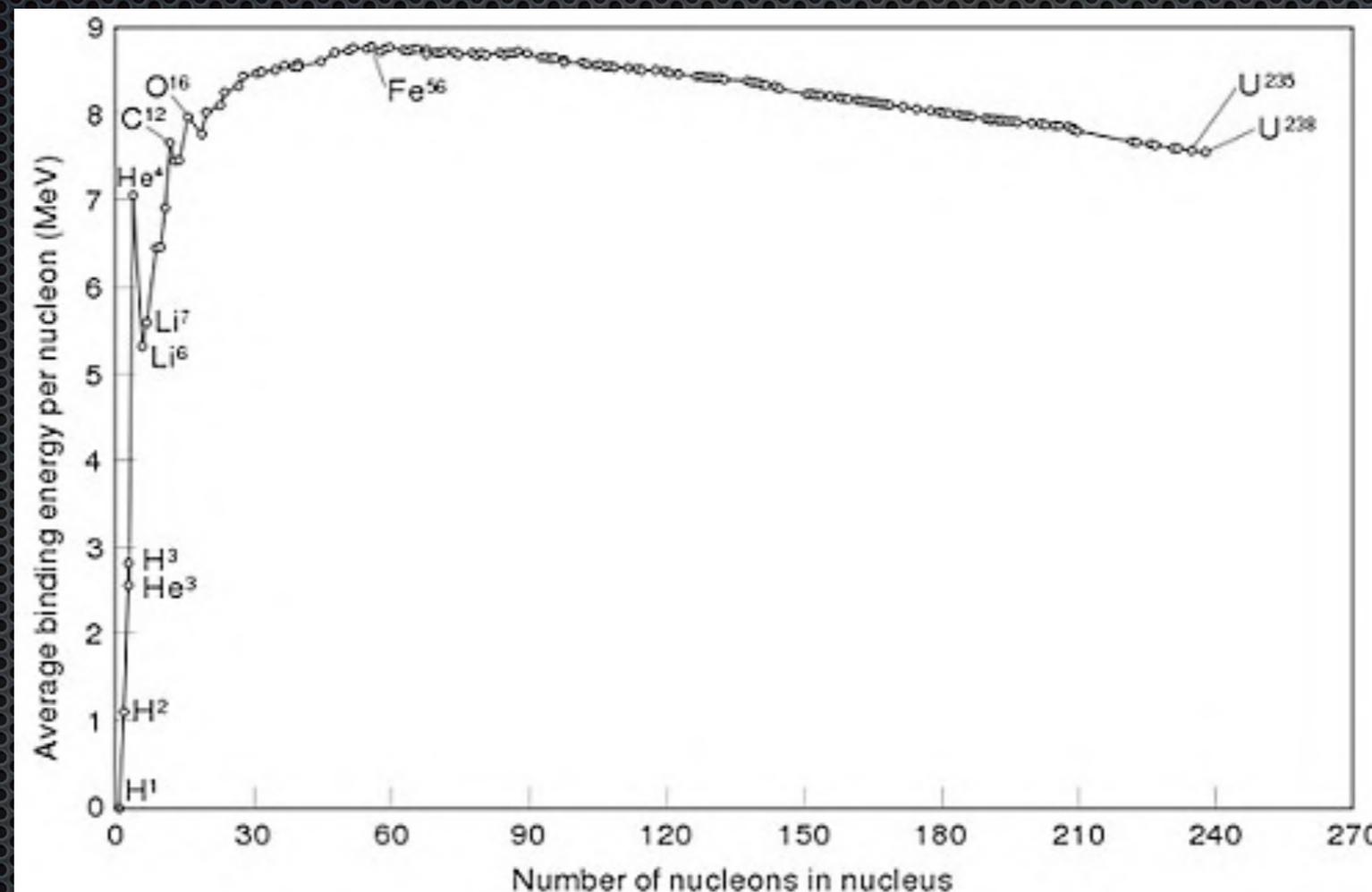
Pouvez-vous écrire les réactions suivantes de façon conventionnelle ?

- *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 ?

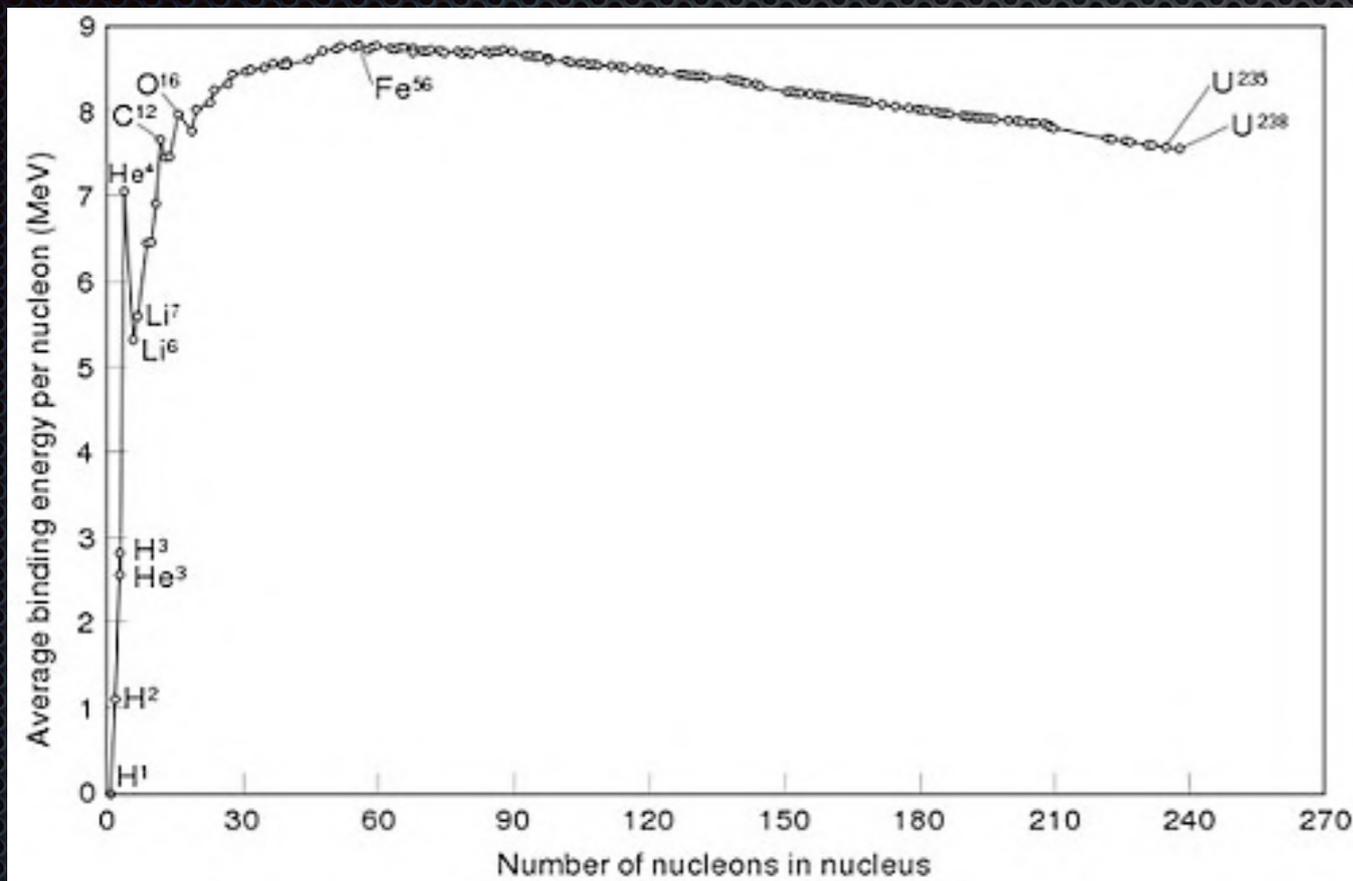


L. Dreesen, Ulg

... de l'énergie de liaison par nucléon

FUSION NUCLÉAIRE

Réaction de fusion



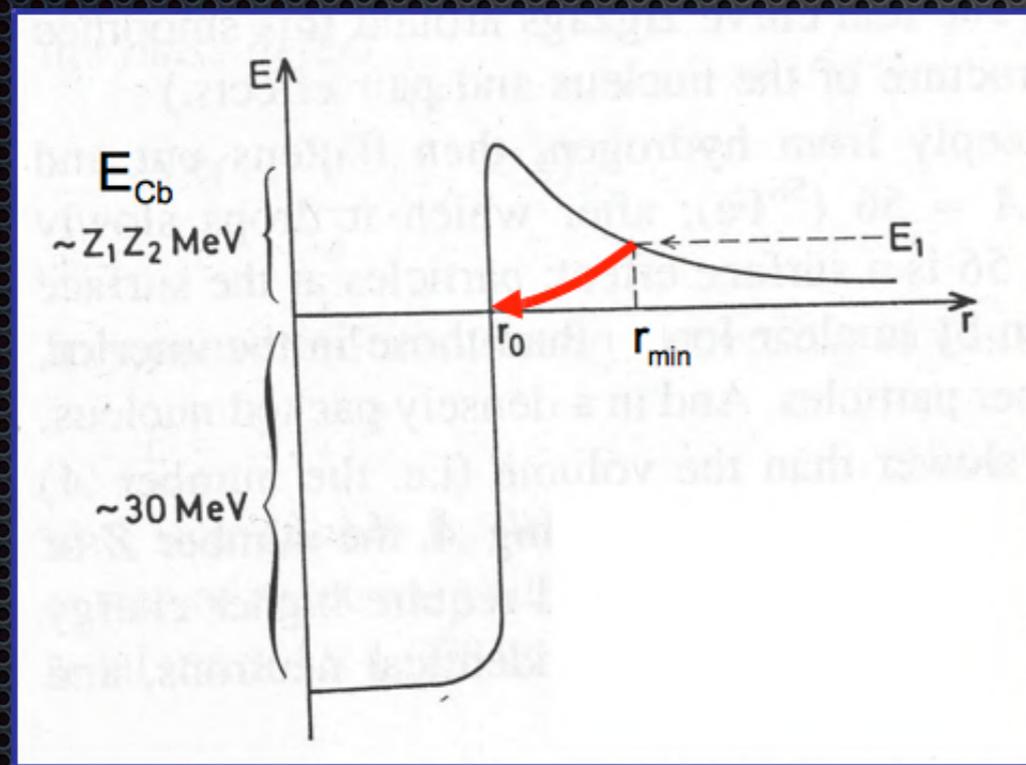
- Plus B/A est élevé, plus le noyau est stable
- “Le plus stable” = Fe
- Noyaux légers tendent à fusionner
- Gain en stabilité = dégagement énergie

L. Dreesen, Ulg

FUSION NUCLÉAIRE

Conditions nécessaires

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



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

M.-A. Dupret, Ulg

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

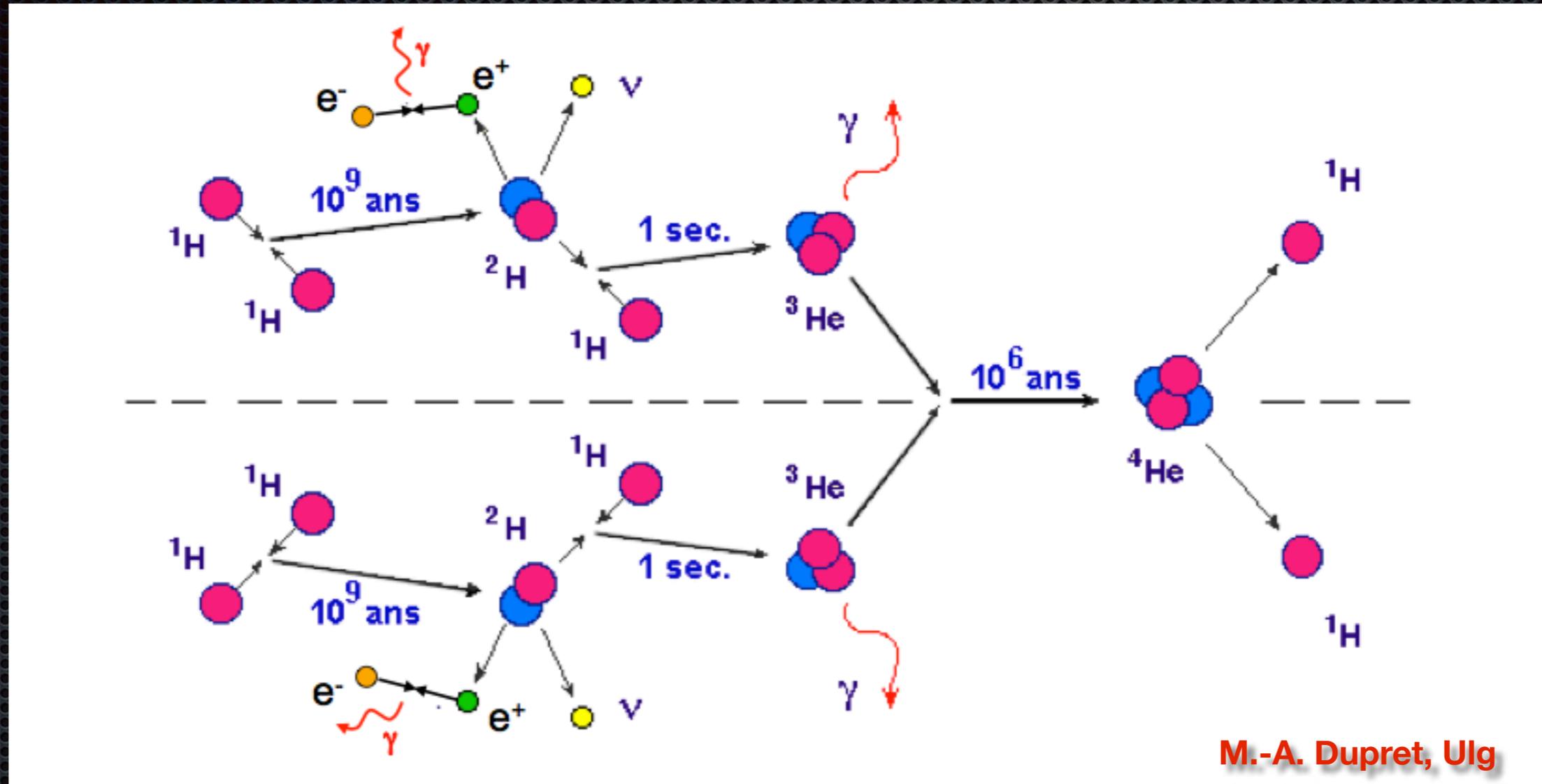
FUSION NUCLÉAIRE

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

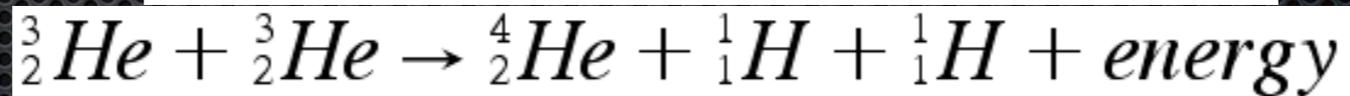
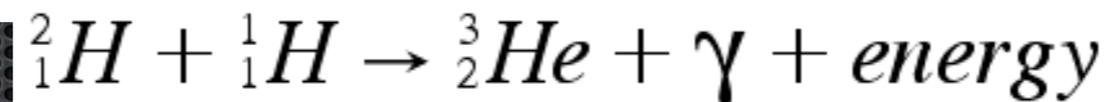
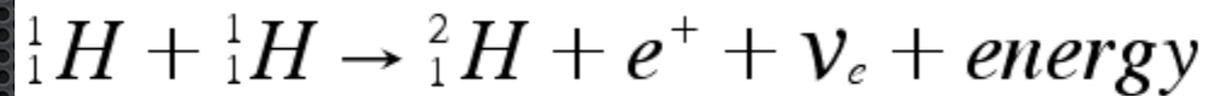
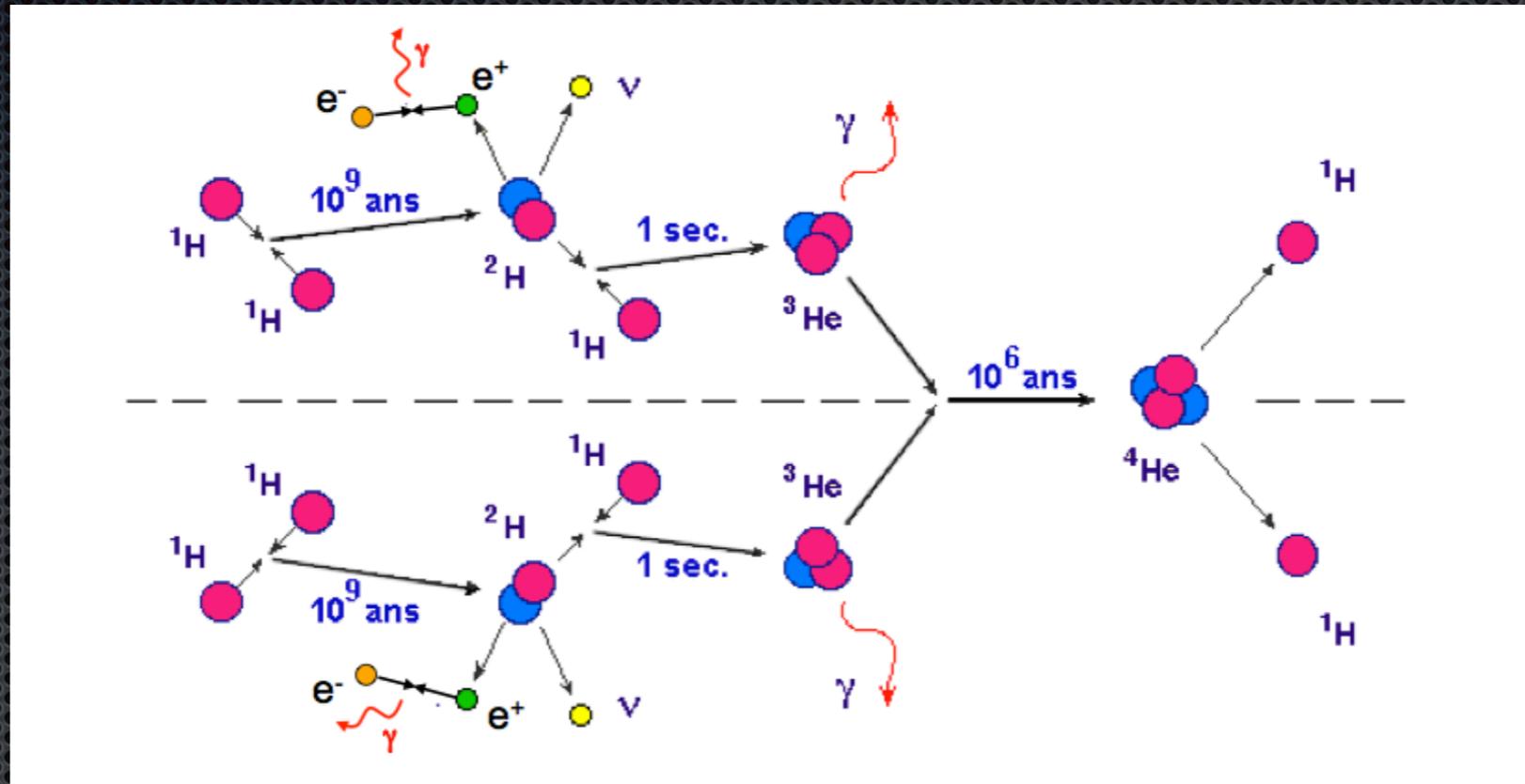
FUSION NUCLÉAIRE

Cycle proton - proton



FUSION NUCLÉAIRE

Cycle proton - proton



FUSION NUCLÉAIRE

Pour info : dans les étoiles plus
massives

Il existe d'autres cycles

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

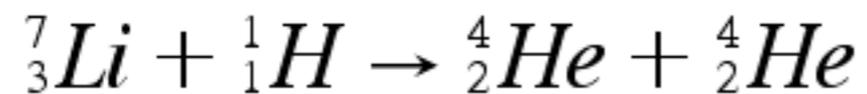
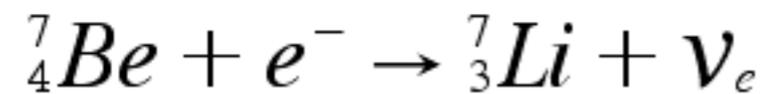
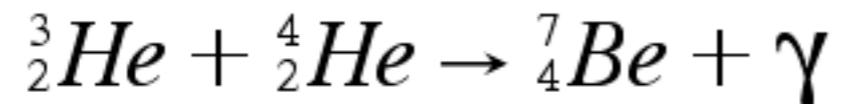
**Nucléosynthèse de tous les éléments de
l'univers**

FUSION NUCLÉAIRE

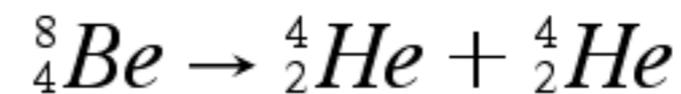
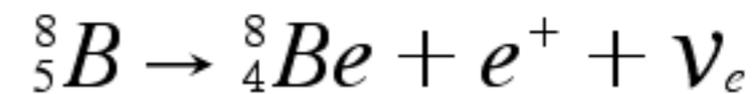
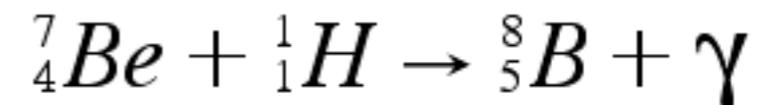
Pour info : dans les étoiles plus massives

Il existe d'autres cycles PP

- PP2



- PP3



LA STRUCTURE DU SOLEIL

Le soleil en chiffres

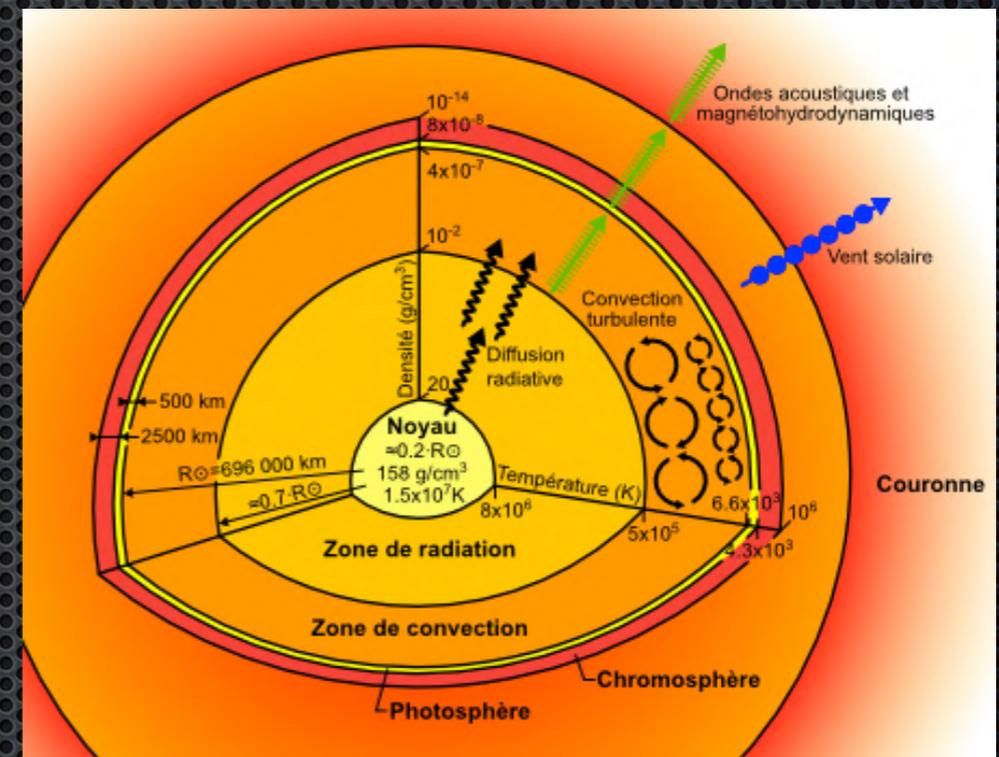
Âge: **4.6 milliards d'années**

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/s²

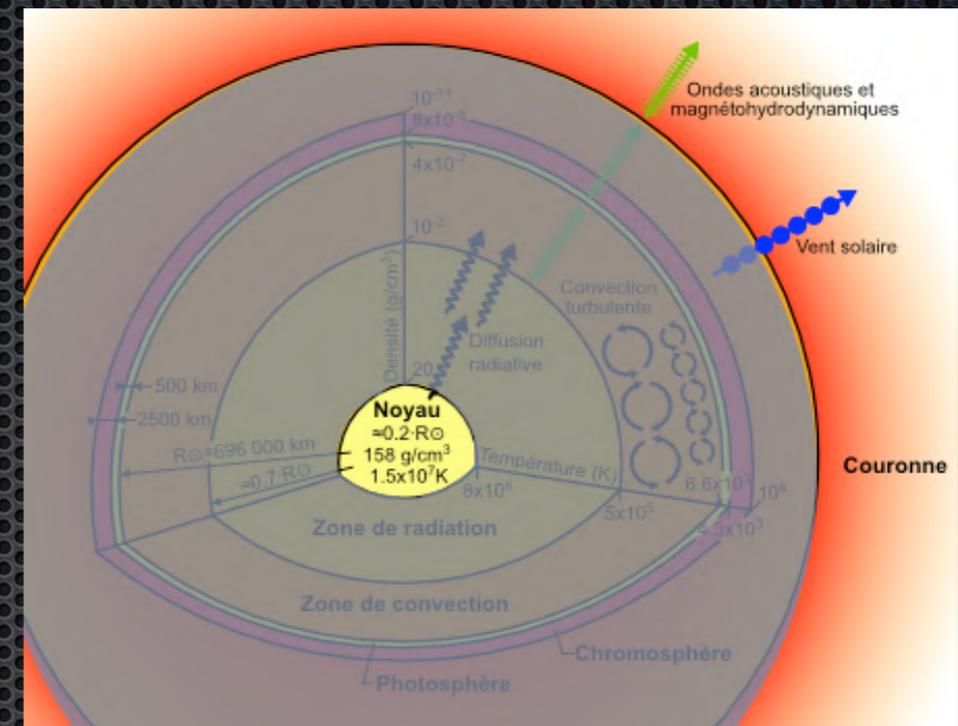


<http://ayearinboston.canalblog.com>

LA STRUCTURE DU SOLEIL

Le noyau

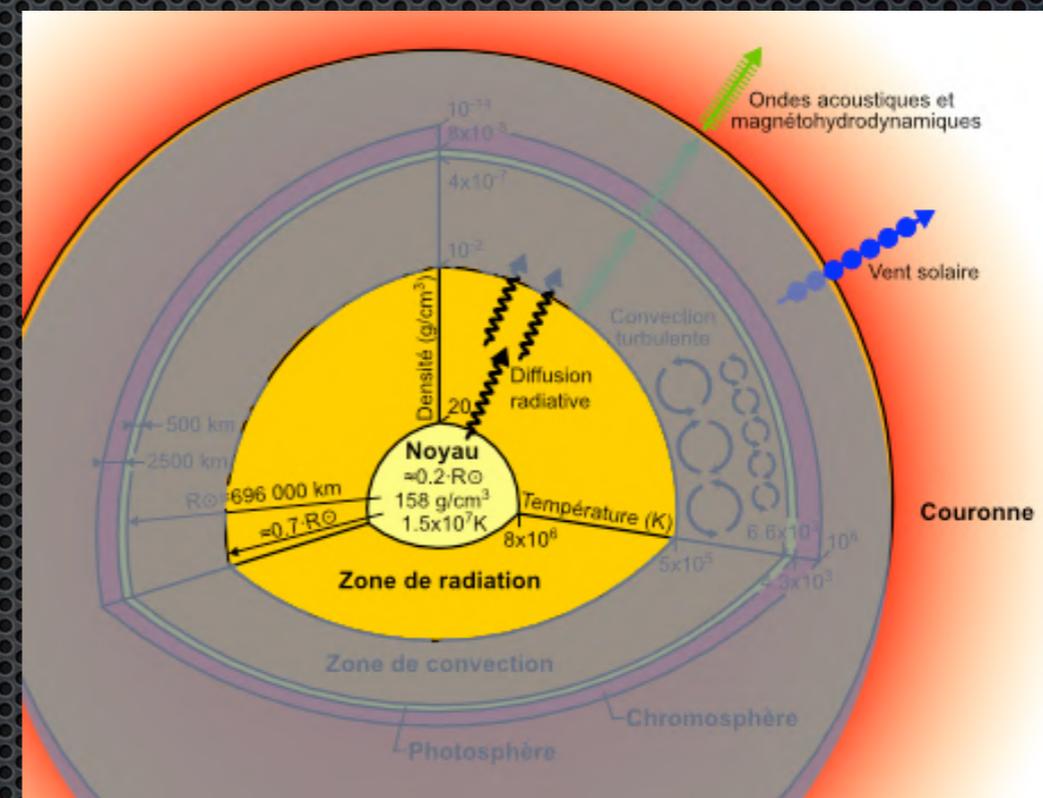
- De **0 à 0,25 rayons solaires**
- Température **15 560 000 K**
- Energie pp + CNO (1,5%)
- 619 millions de tonnes d'hydrogène converties en 614 millions de tonnes d'hélium chaque seconde, soit **$3,83 \times 10^{26}$ J/s.**



LA STRUCTURE DU SOLEIL

La zone de Radiation

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



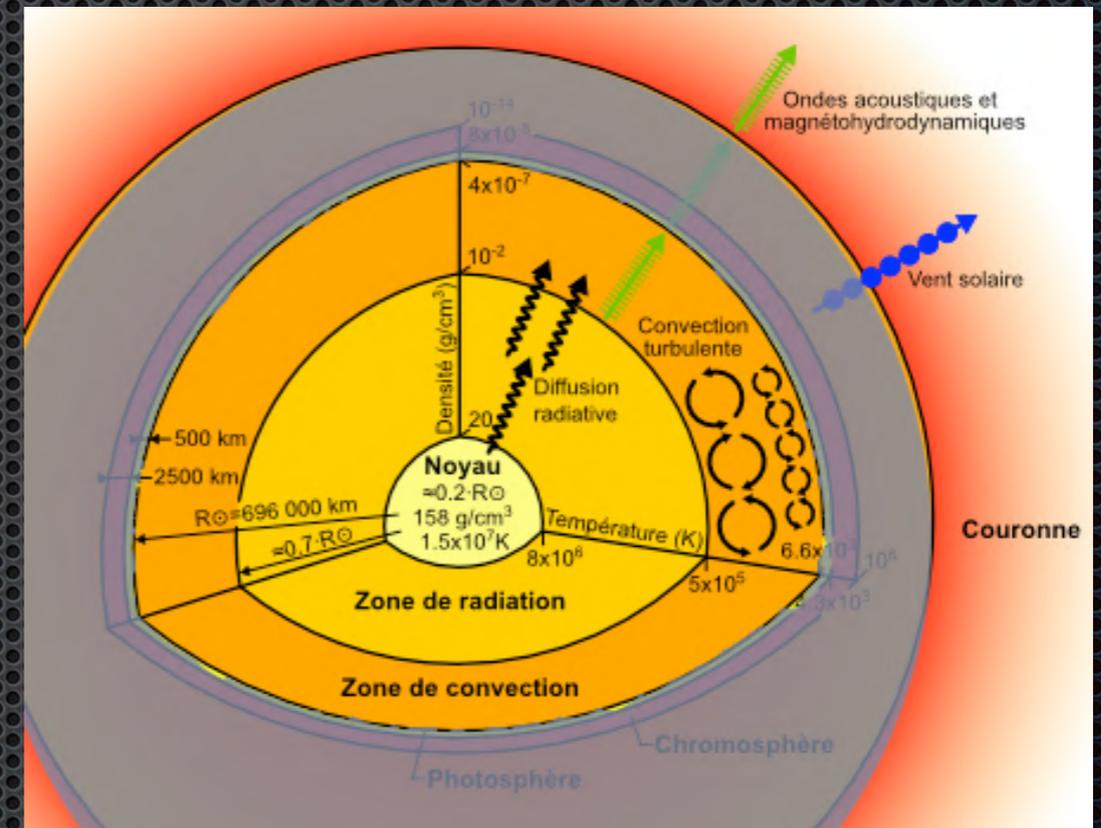
LA STRUCTURE DU SOLEIL

La Tachocline

- Épaisse de **3000 km**

La zone de convection

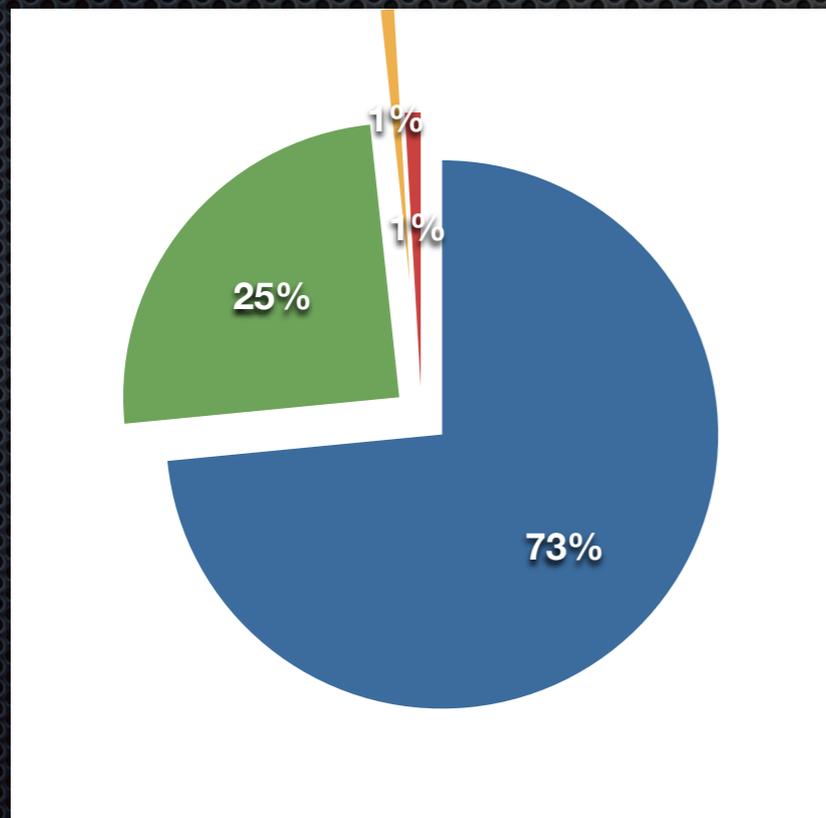
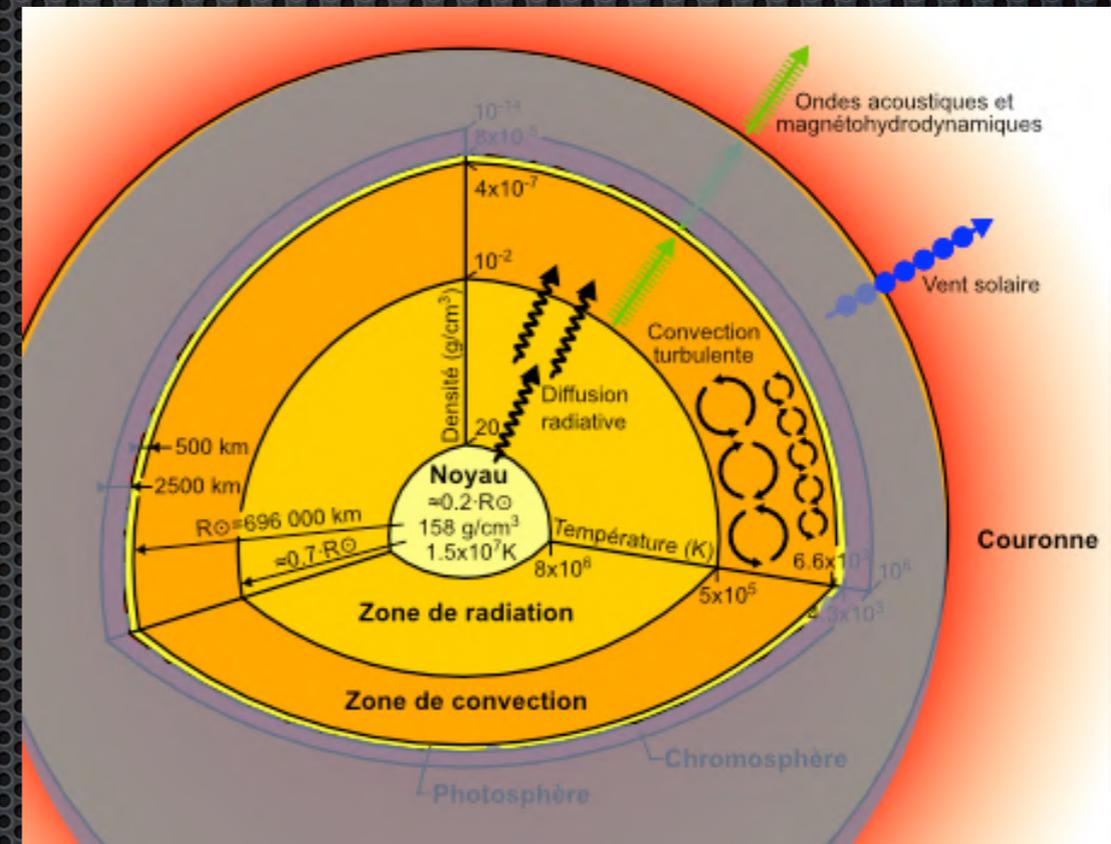
- De **0,7 rayons solaires** à la surface visible du soleil
- Température de **2 MK** à **5,8 MK**



LA STRUCTURE DU SOLEIL

La photosphère

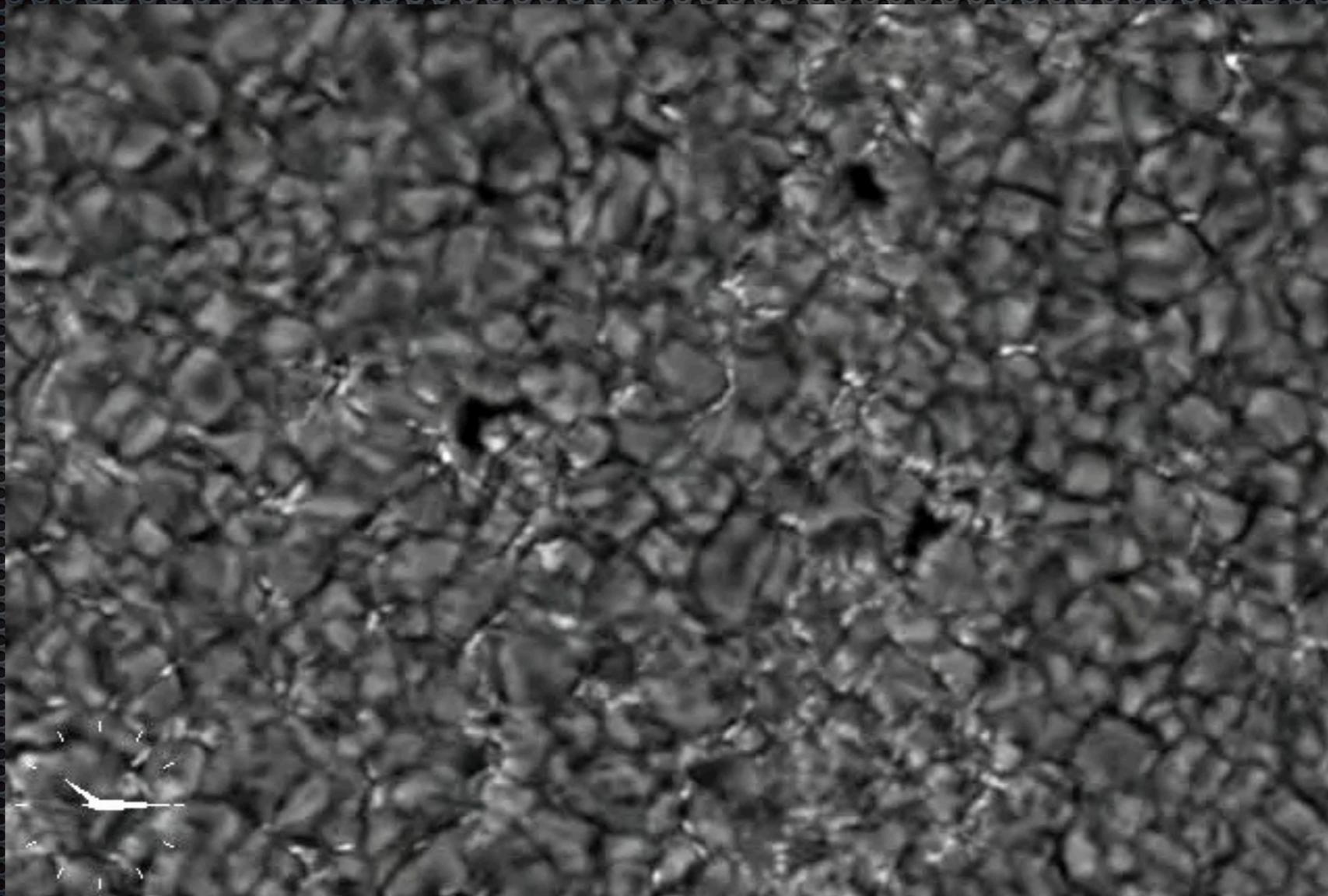
- Épaisse d'environ **400 km**
- Température d'environ **5750 K**
- Granulation



LA STRUCTURE DU SOLEIL

La photosphère

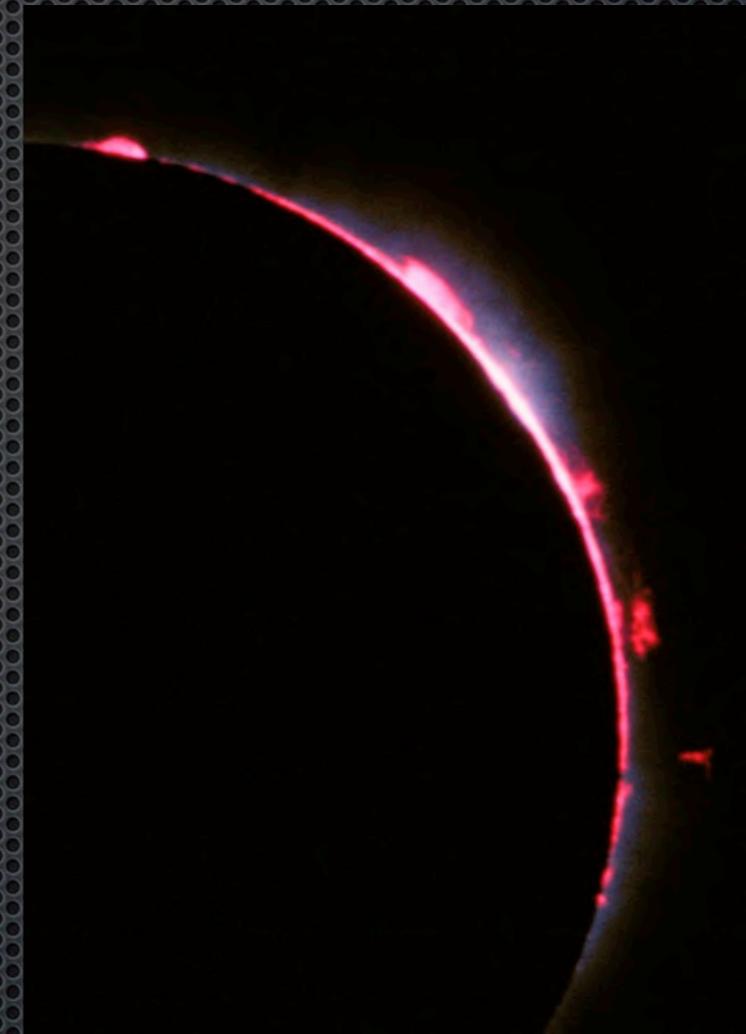
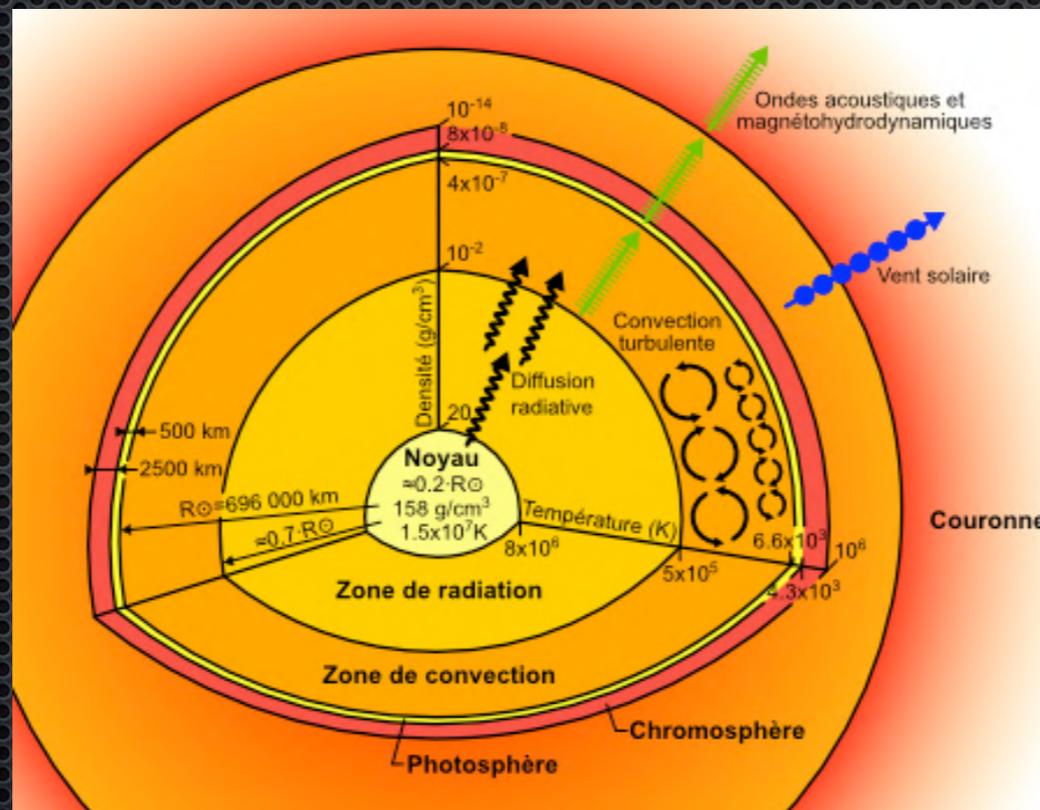
- Granulation



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

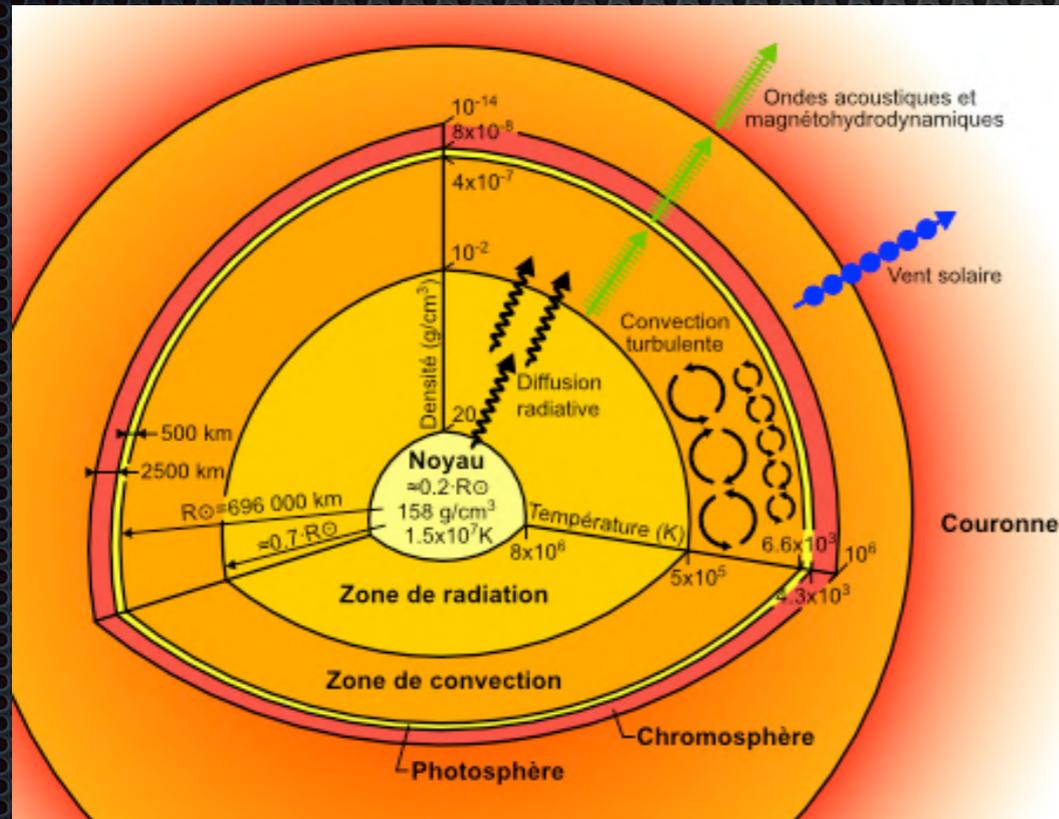


<http://www.math.nus.edu.sg>

LA STRUCTURE DU SOLEIL

La couronne

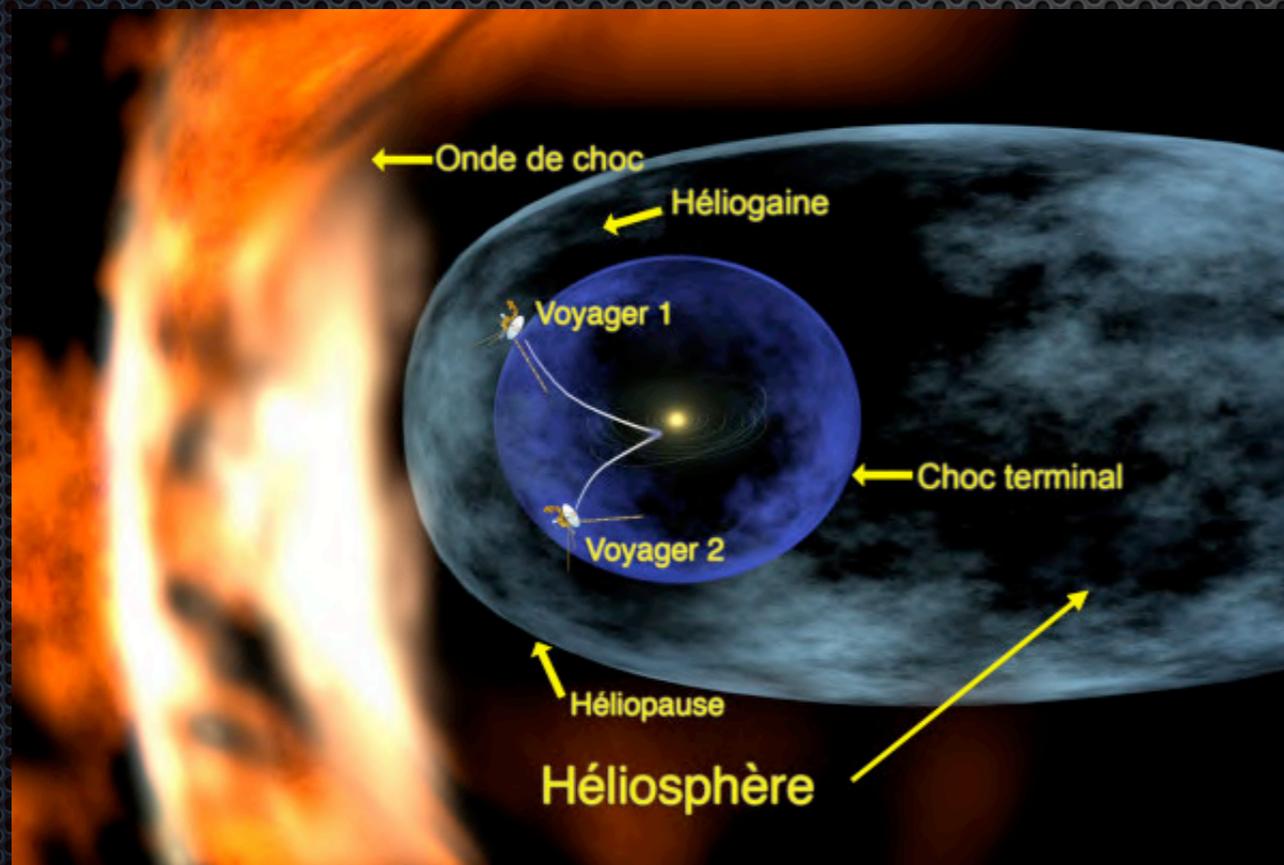
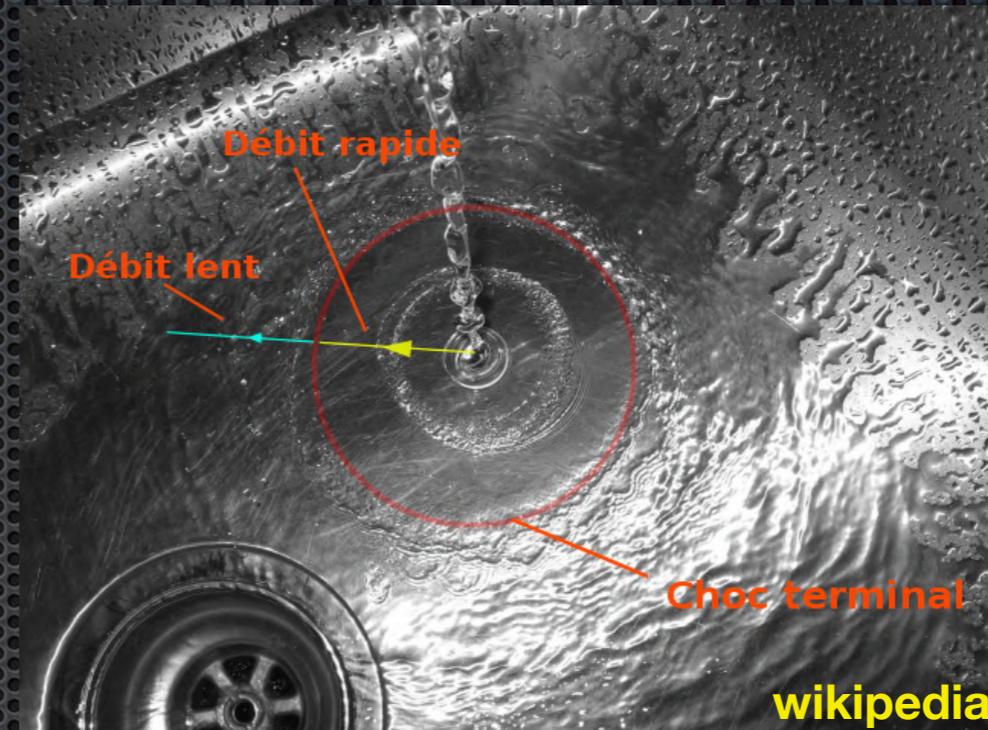
Jusqu'à environ 20 rayons solaires (0,1 UA)



LA STRUCTURE DU SOLEIL

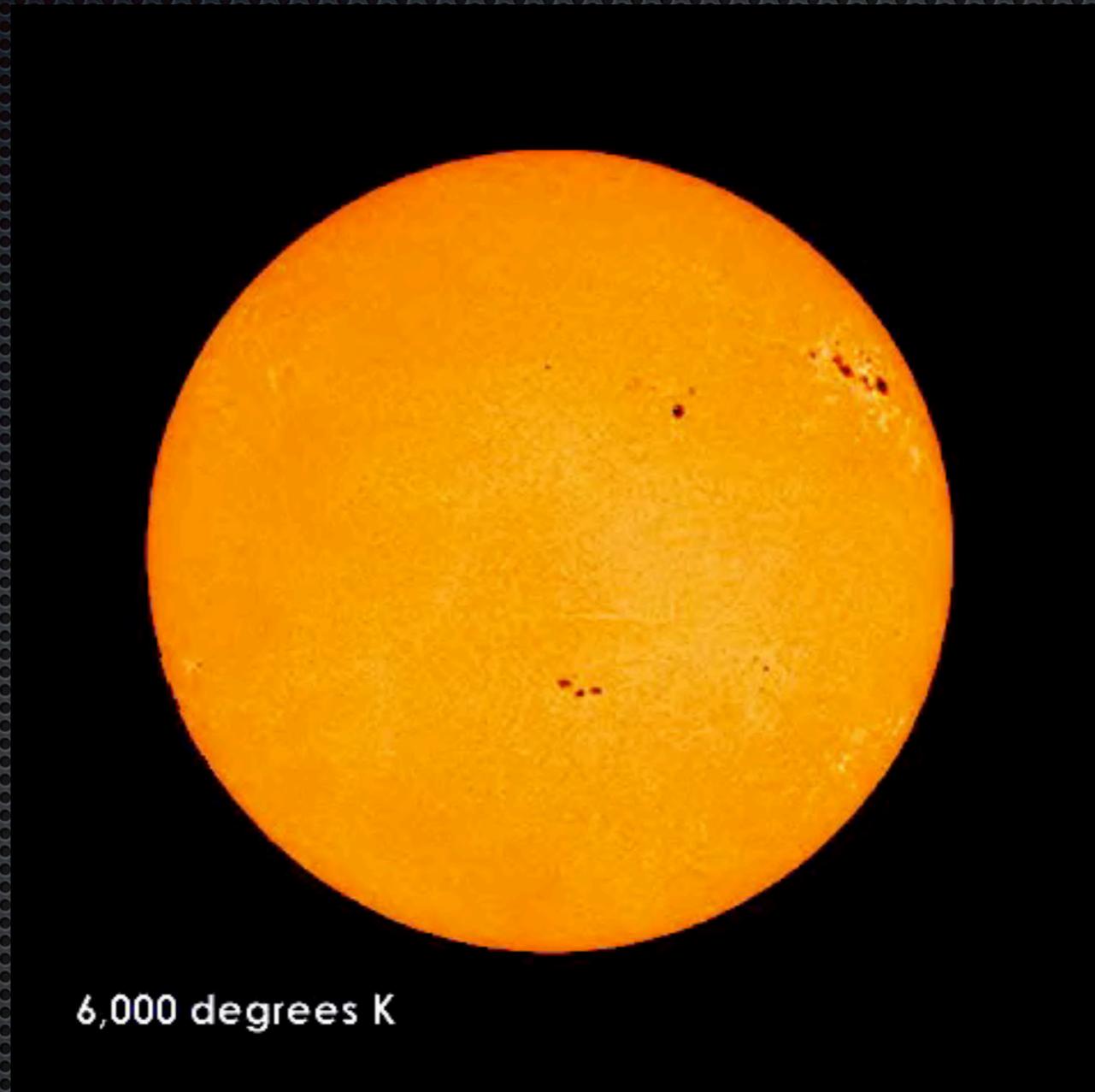
L'héliosphère

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



http://www.spacedaily.com/reports/The_Heliosphere_Bow_Shock_Does_Not_Exist_999.html

LE SOLEIL DANS TOUTES LES COULEURS



F. Clette

LE SOLEIL DANS TOUTES LES COULEURS



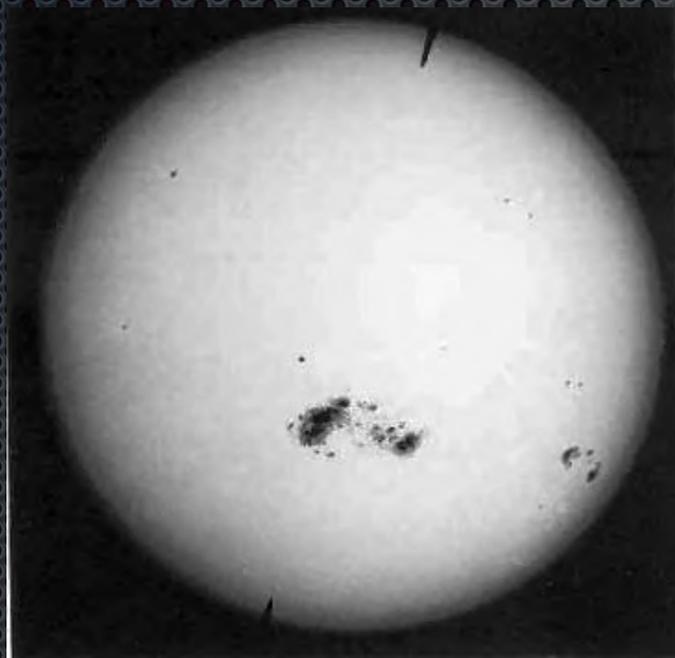
Apr 17 2002 23:59:32

F. Clette

L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les taches solaires

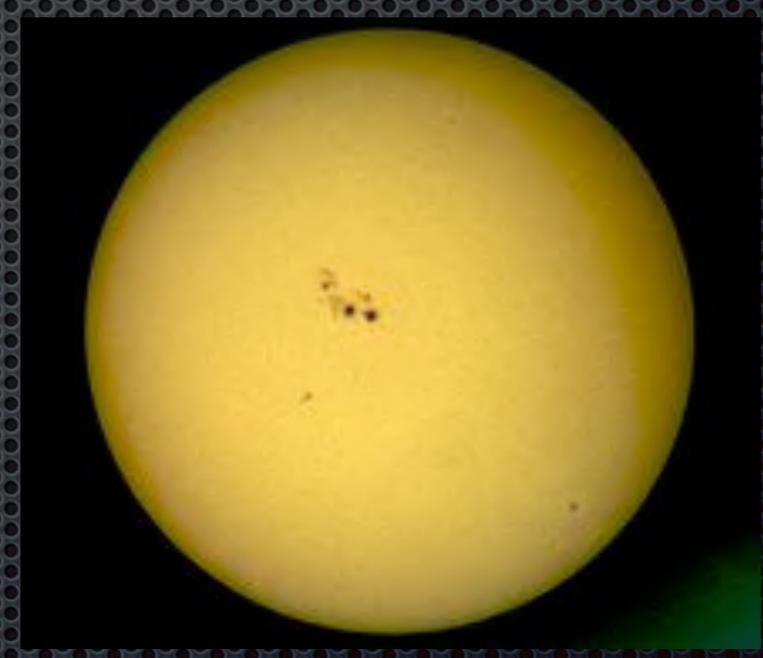
- Observées depuis -28 en Chine
- Température d'environ 4000K



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



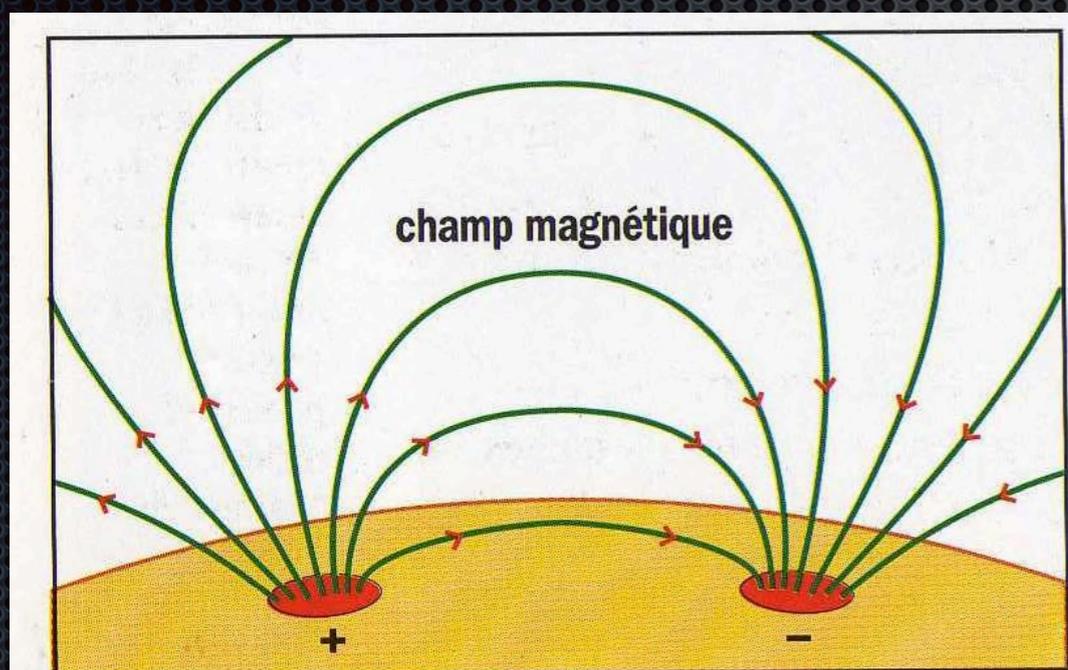
[http://
www.linternaute.com/
science/espace/dossiers/
06/portrait-soleil/7.shtml](http://www.linternaute.com/science/espace/dossiers/06/portrait-soleil/7.shtml)



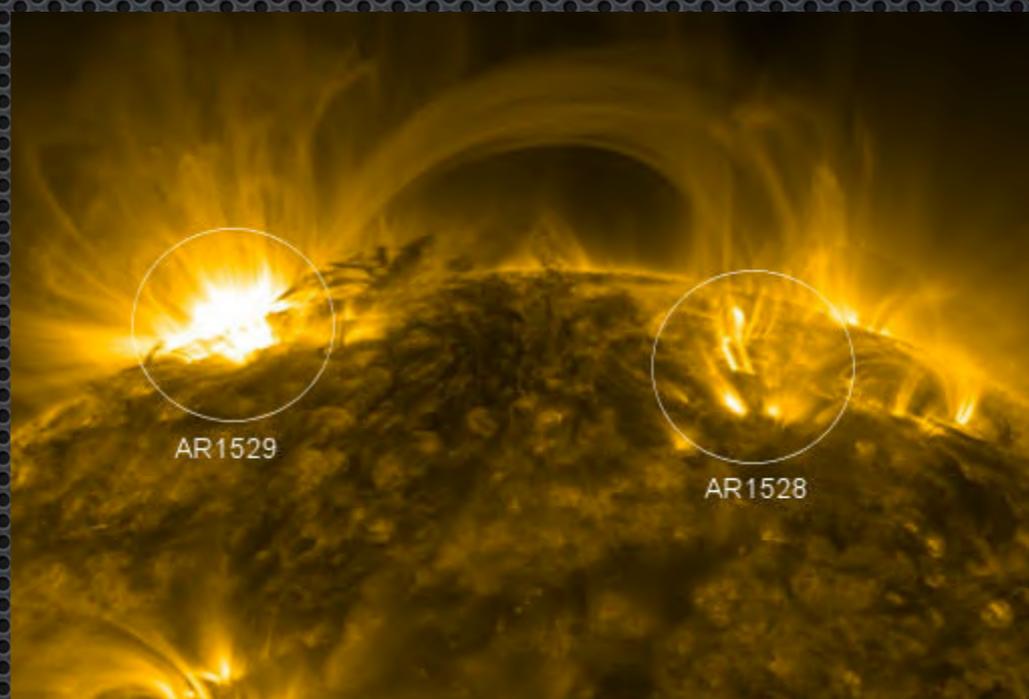
<http://museumvictoria.com.au>

L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les lignes de champ magnétique



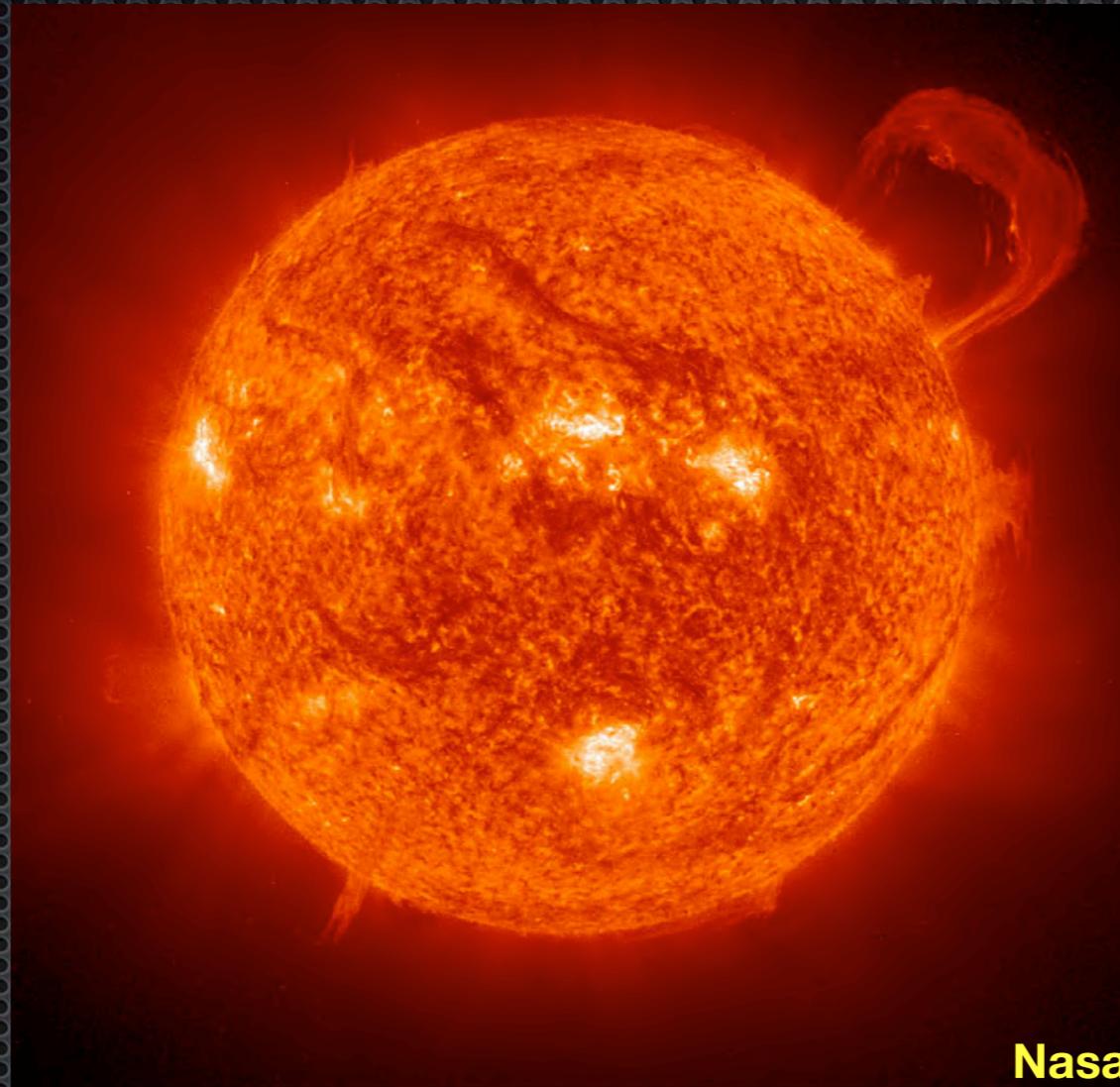
<http://tpesoleil.e-monsite.com/pages/comme-des-representations-negatives/le-soleil-tout-en-fusion.html>



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

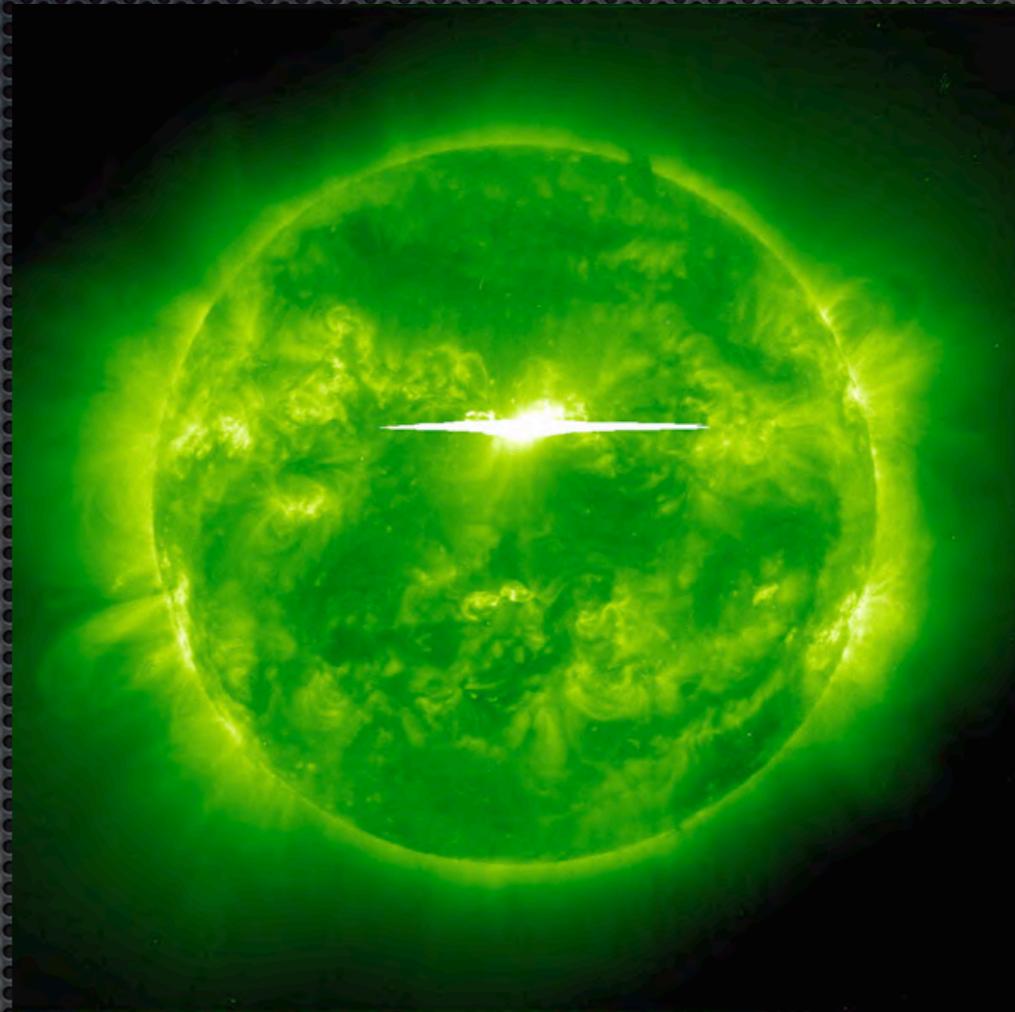
L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les protubérances



L'ACTIVITÉ SOLAIRE

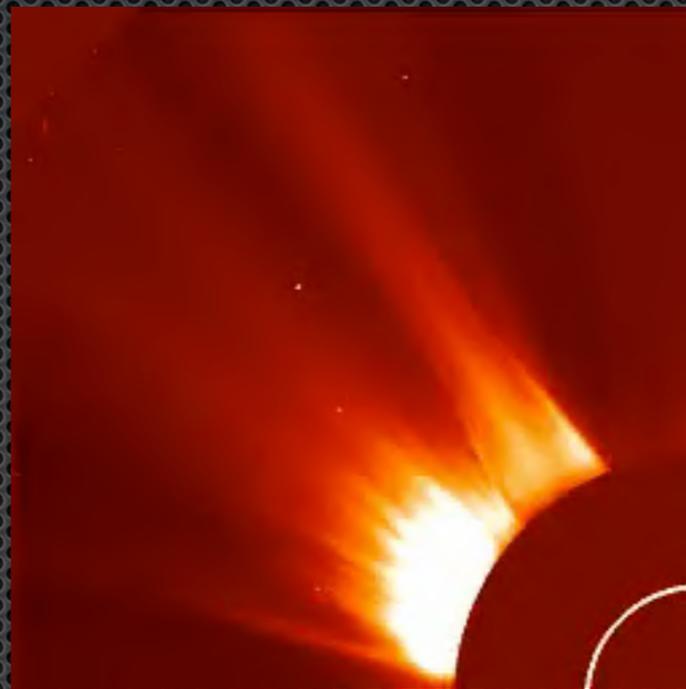
Les éruptions solaires



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

L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les éjections de masse coronale



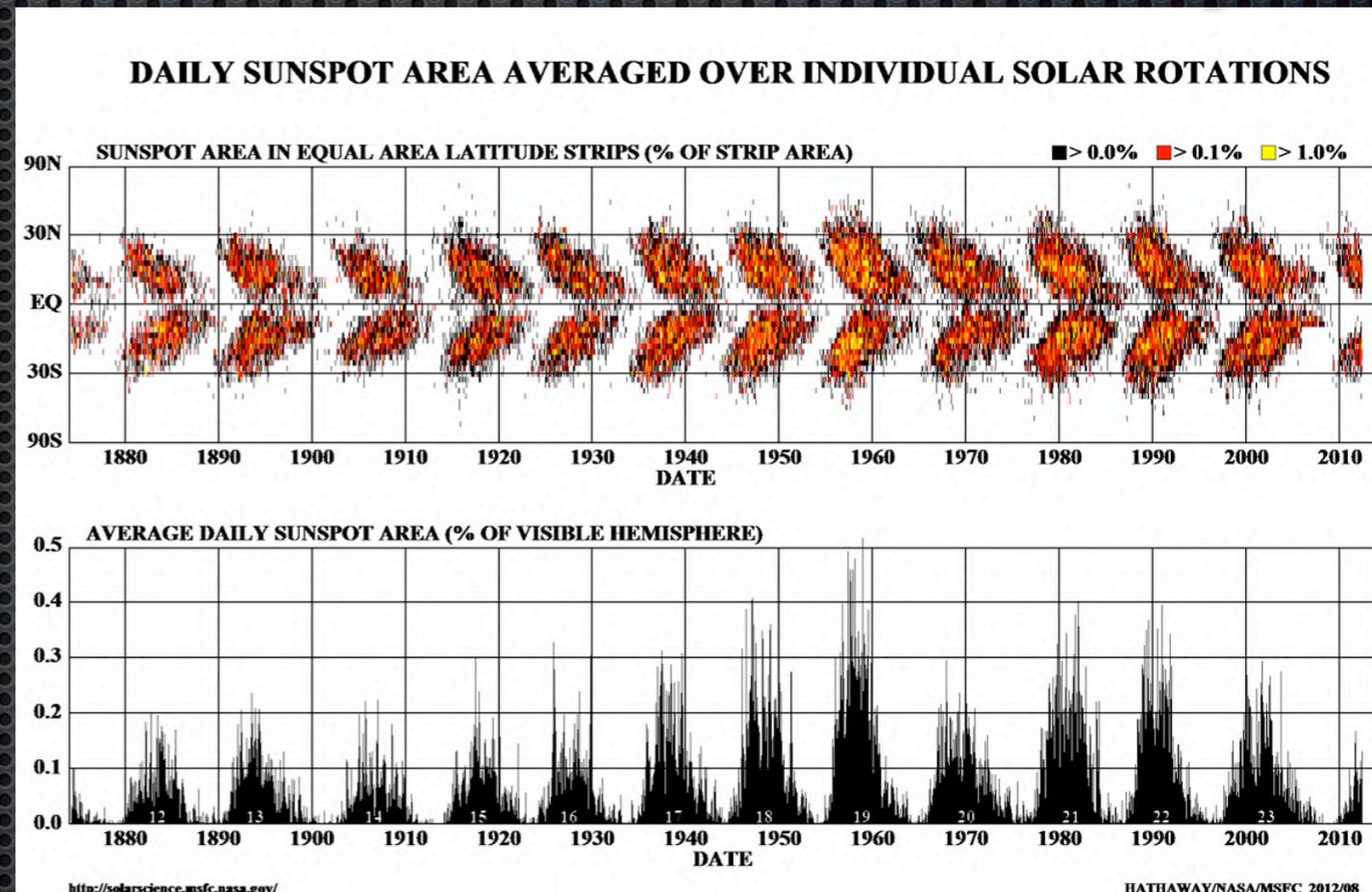
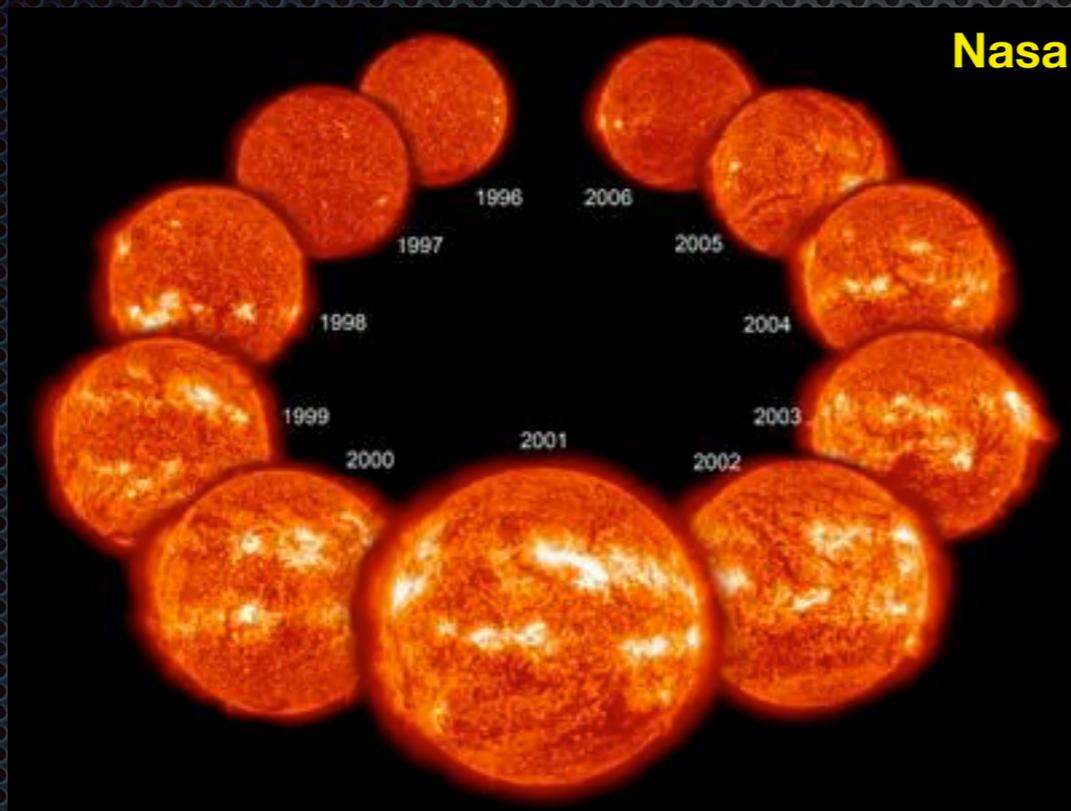
F. Clette

L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les cycles solaires

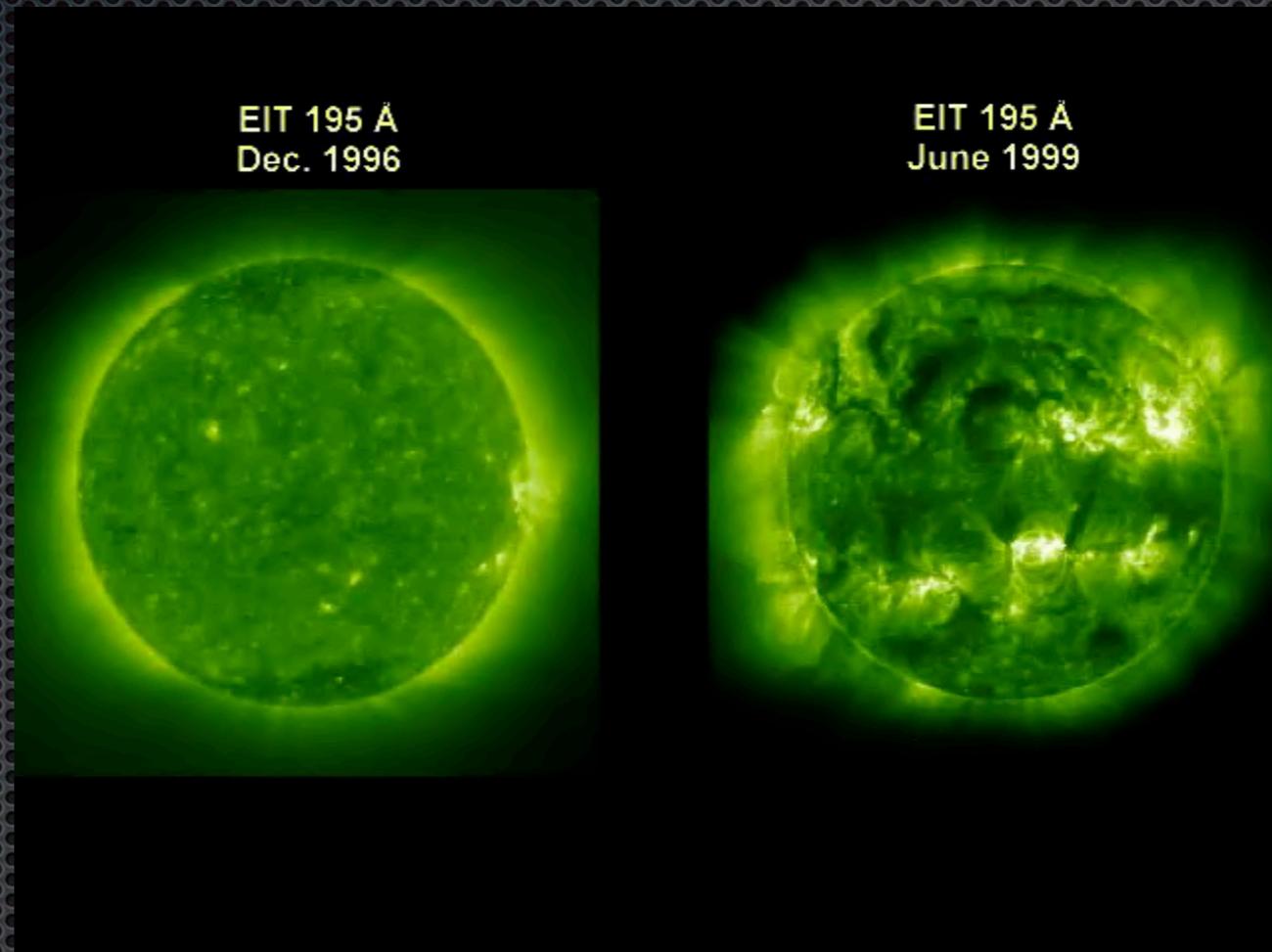
Cycle de Schwabe : 11 ans

la.climatologie.free.fr



L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les cycles solaires



F. Clette

L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les cycles solaires

Cycle magnétique : 22 ans

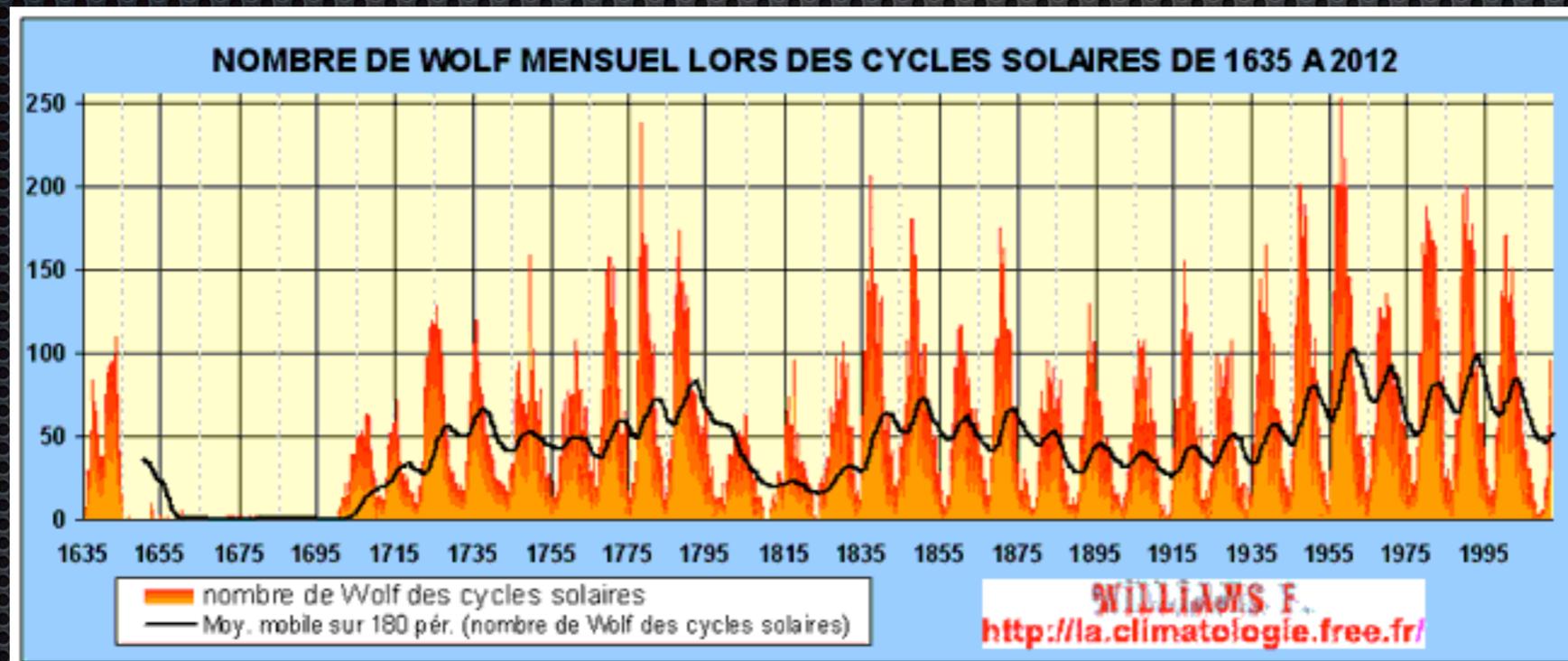


L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les cycles solaires

Cycle de Gleissberg

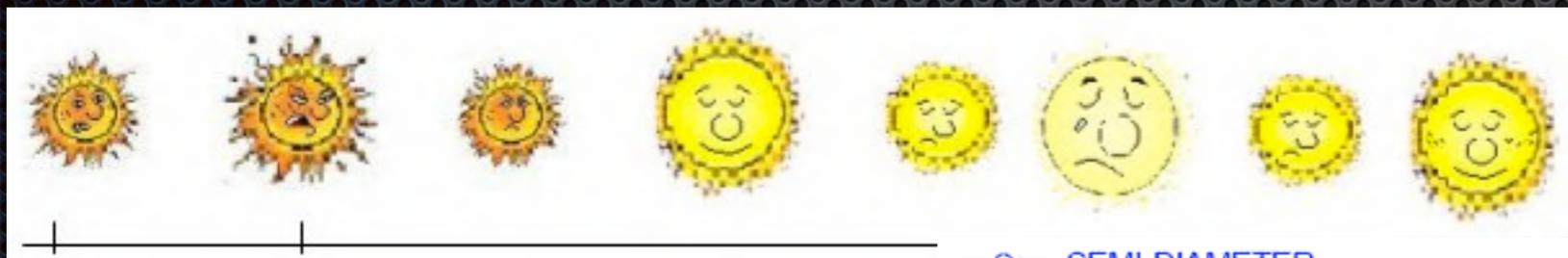
Cycle de Sess ou de Vries



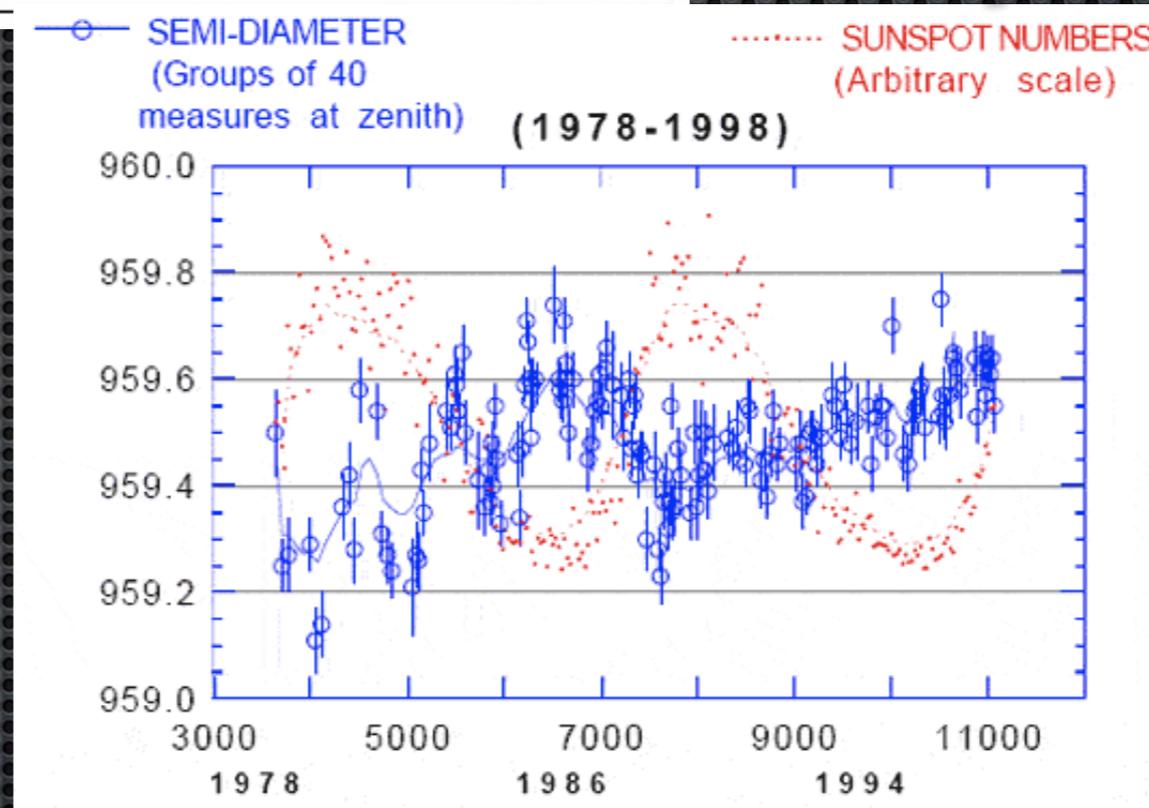
L'ACTIVITÉ SOLAIRE

Les cycles solaires

Cycle de l'évolution du diamètre solaire



la.climatologie.free.fr

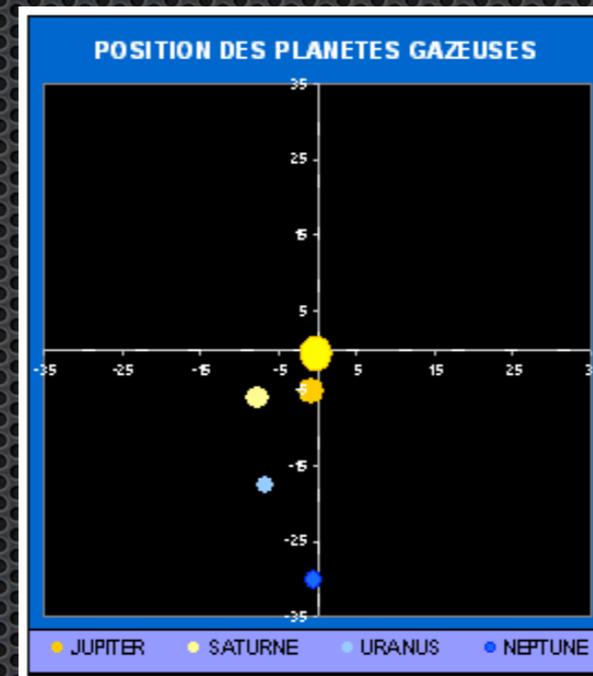
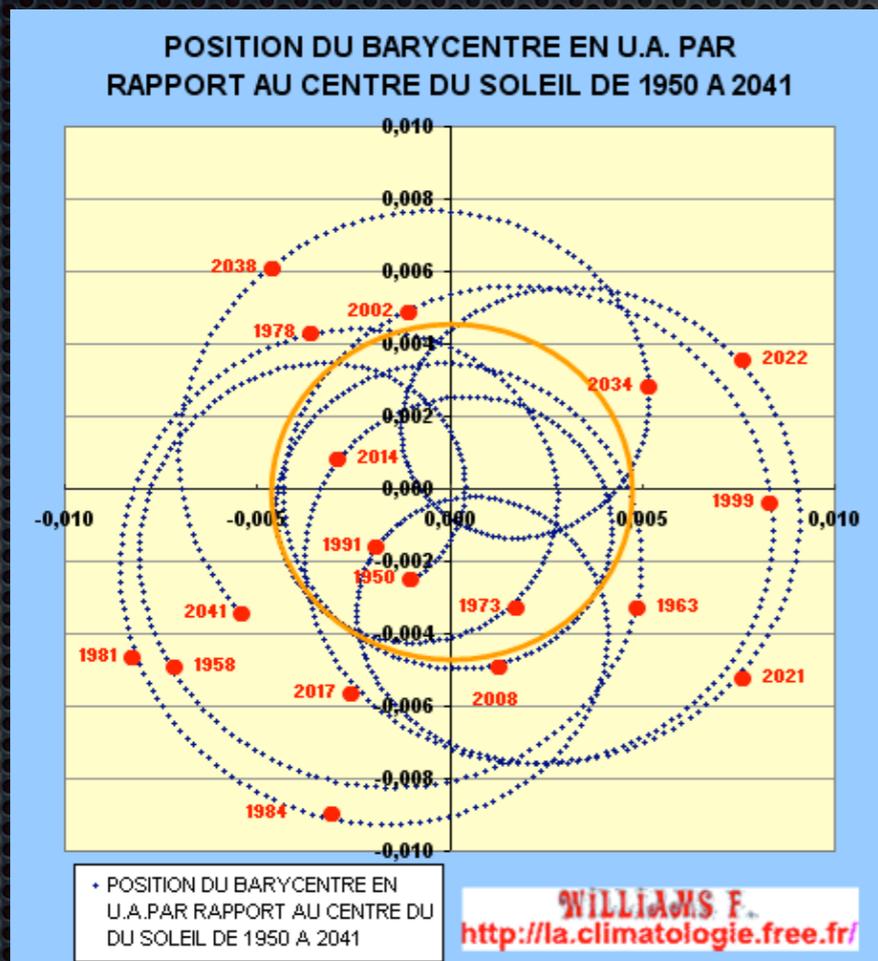


L'ACTIVITÉ SOLAIRE

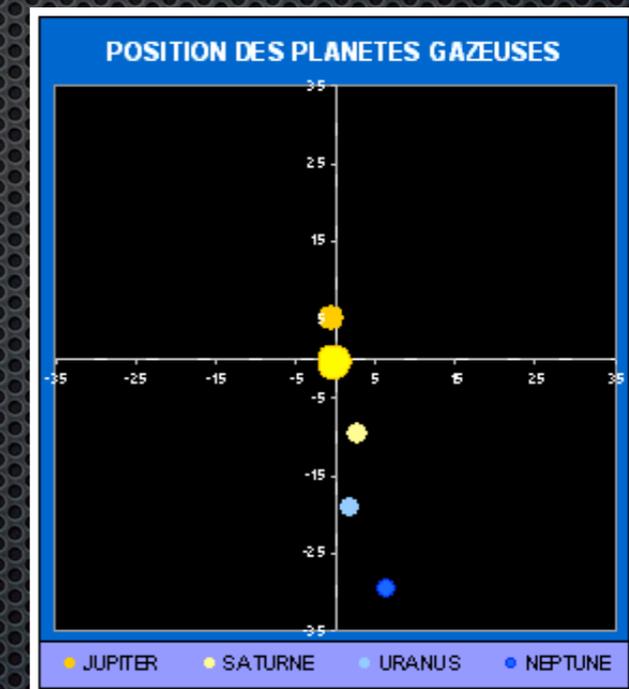
Les cycles solaires

Cause probable des cycles = mouvement du Soleil autour du barycentre

la.climatologie.free.fr



1984

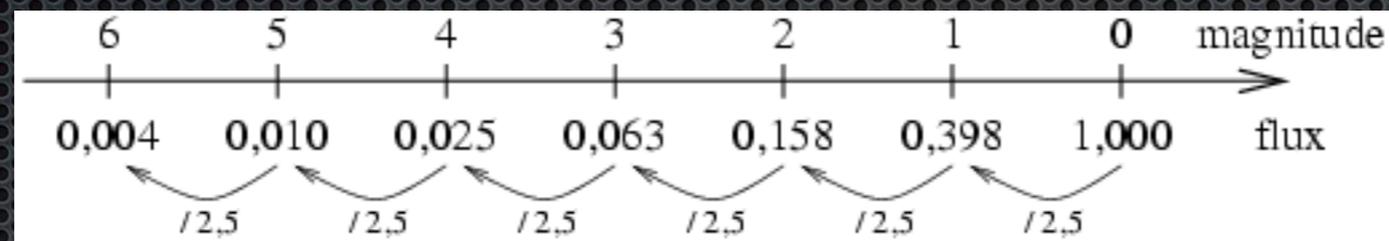


1990

LE DIAGRAMME HR

Classification des étoiles

Magnitude apparente



wikipedia

Magnitude absolue

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

LE DIAGRAMME HR

Classification des étoiles

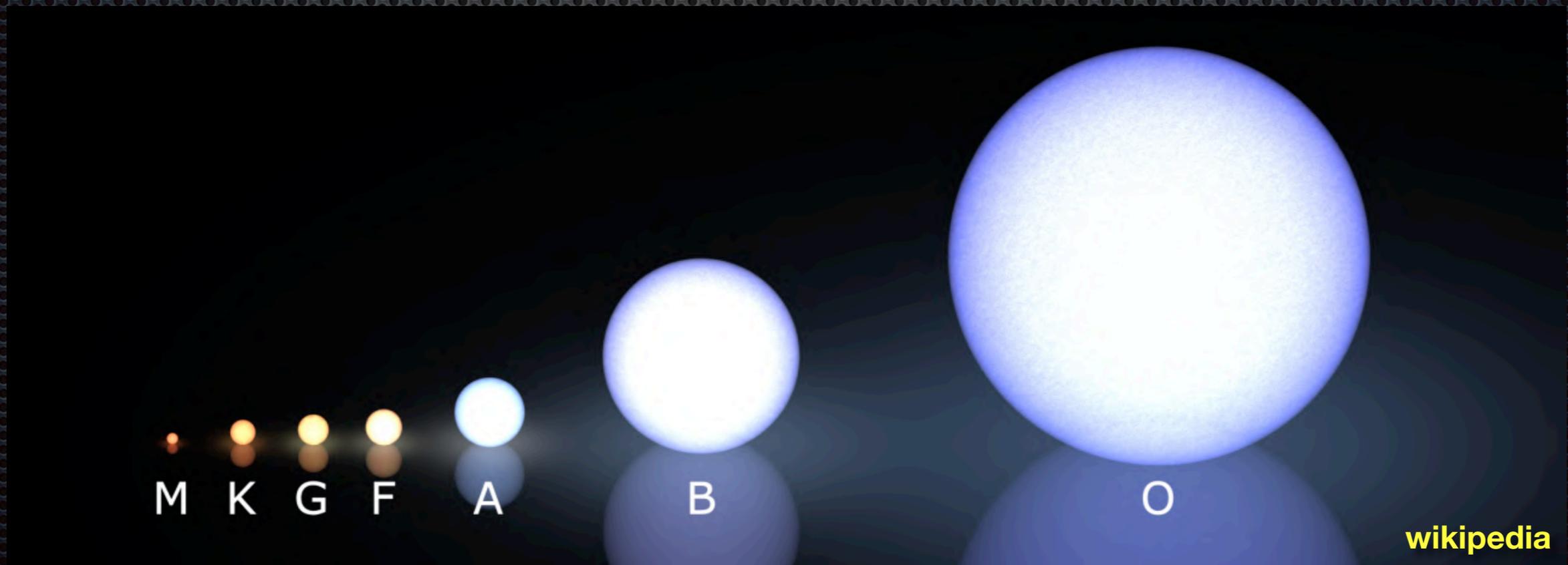
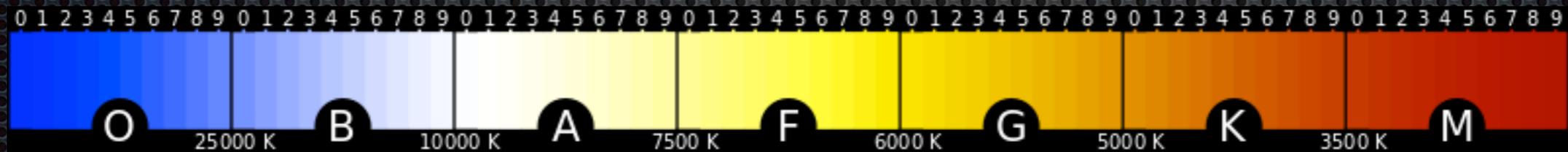
Type spectral : classification de Harvard

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

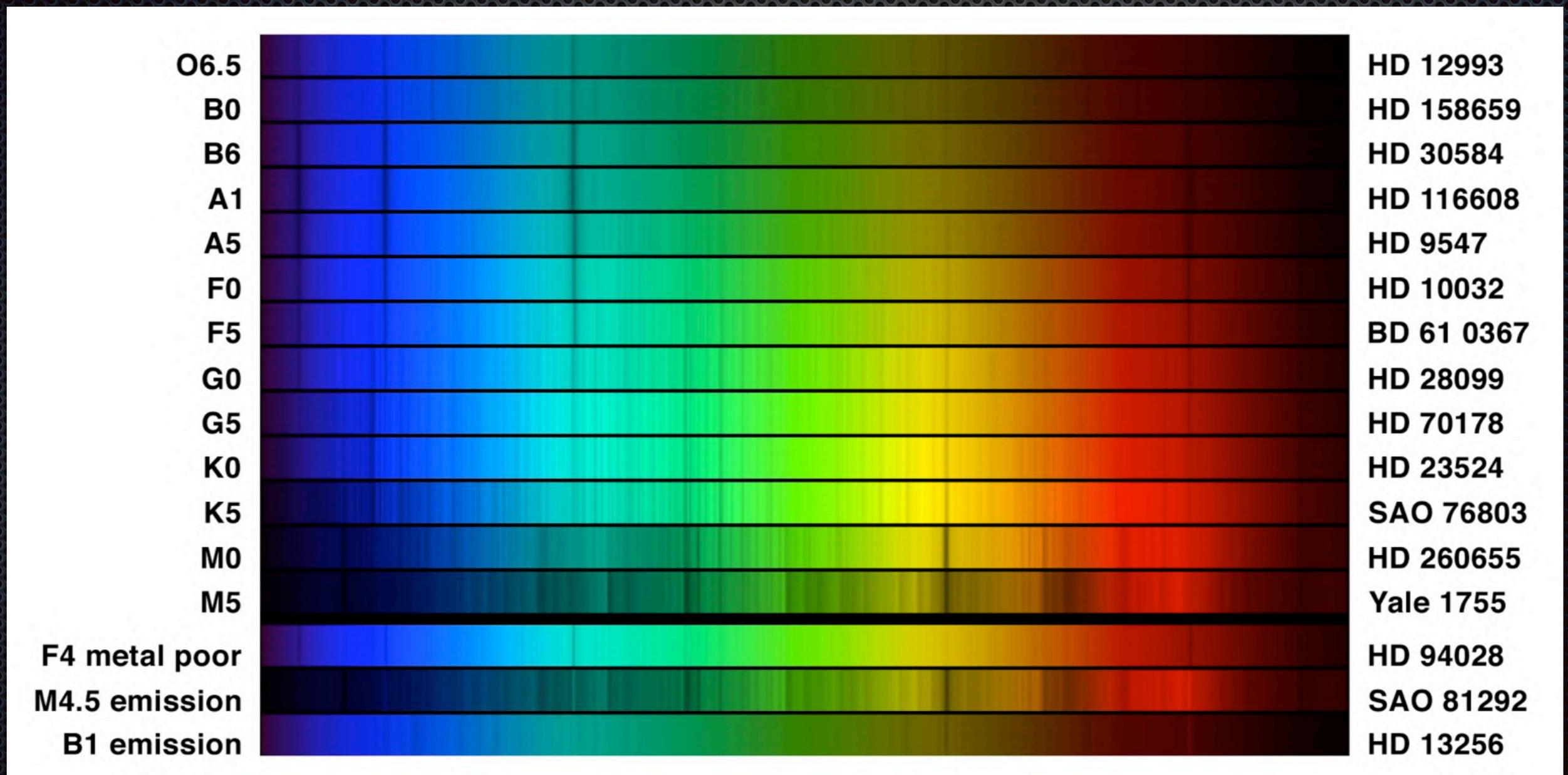
Type spectral : classification de Harvard - lettres et numéros



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 !

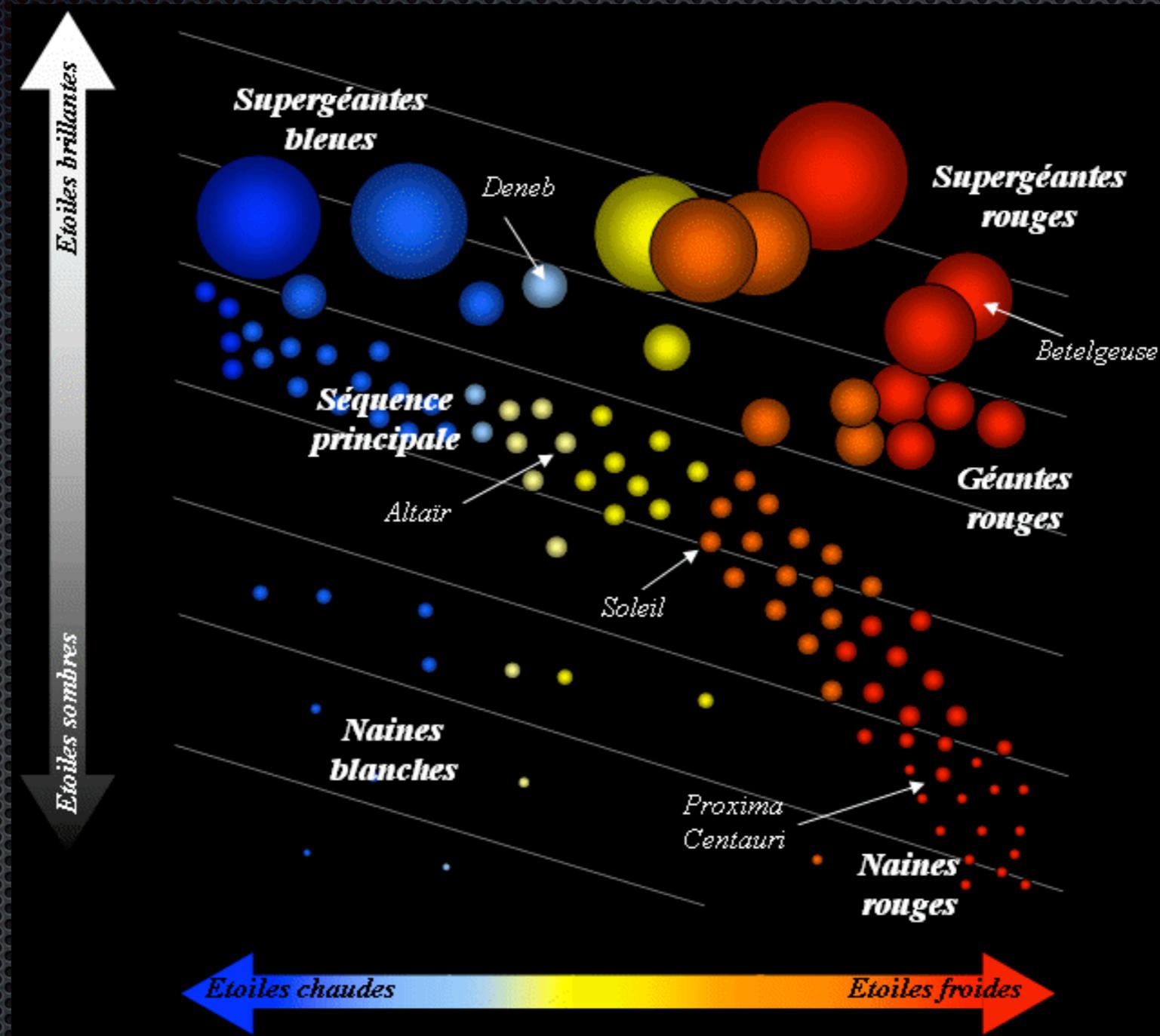
Oh soit une gentille fille, embrasse moi !

Ou

Oh Be A Fine Girl, Kiss My Lips !

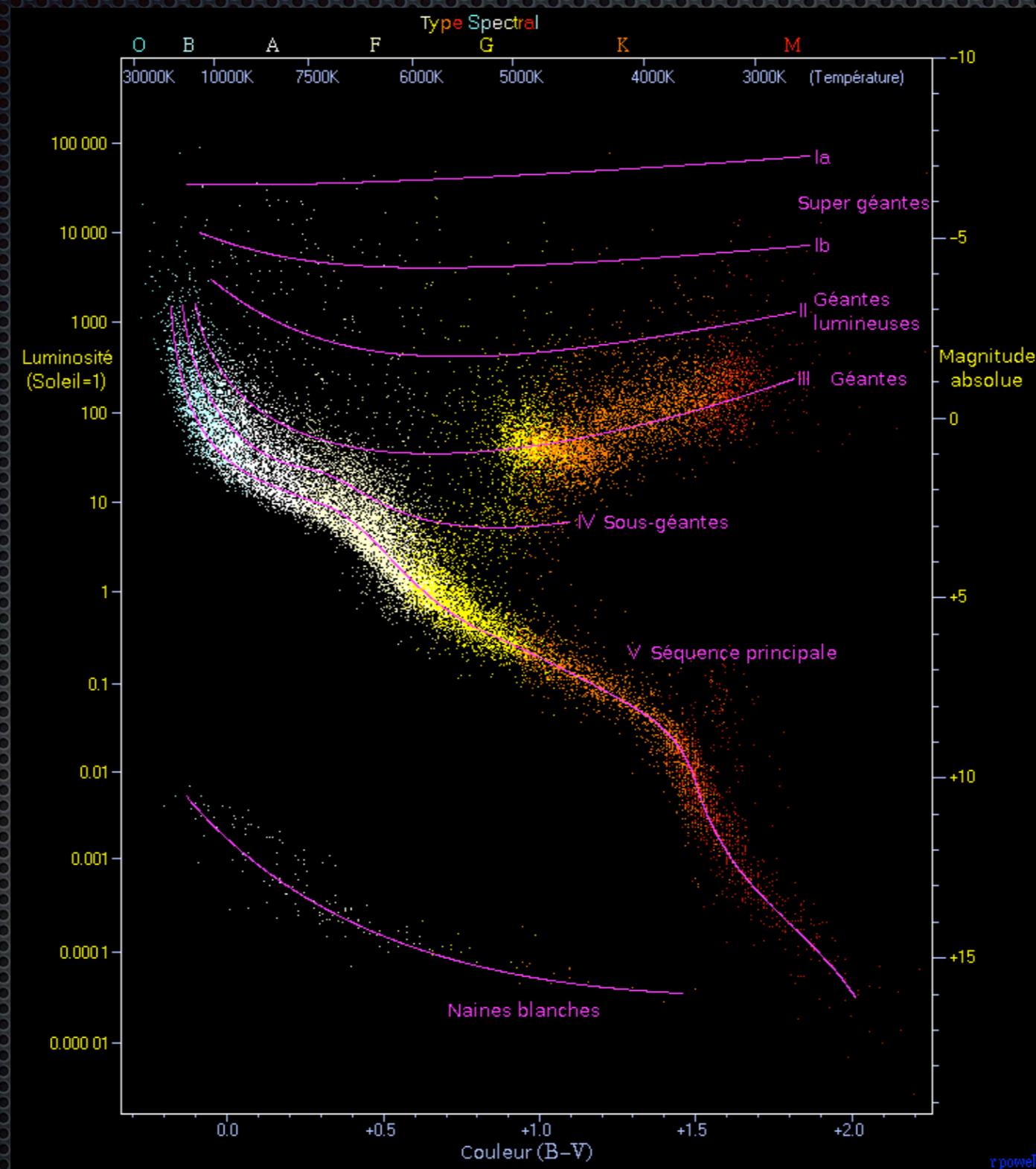
Oh soit une gentille fille, embrasse mes lèvres !

LE DIAGRAMME HR



<http://astronomie-exploration.skyrock.com/>

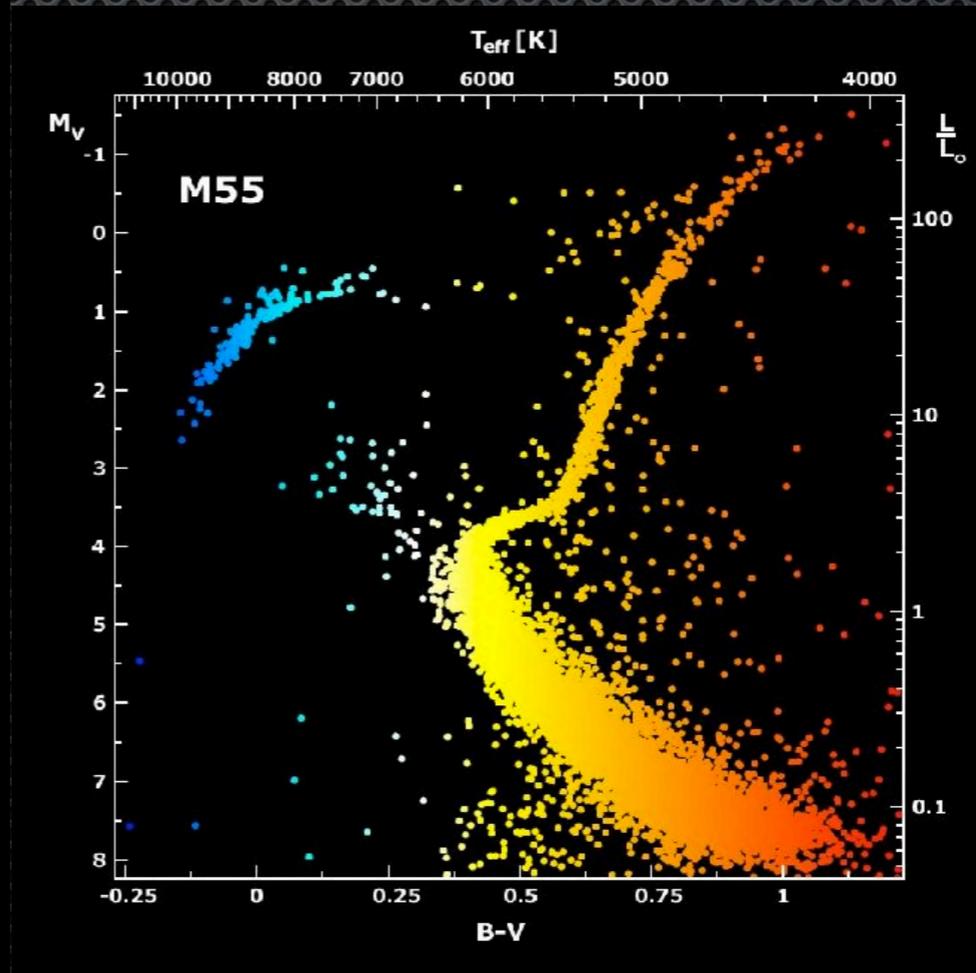
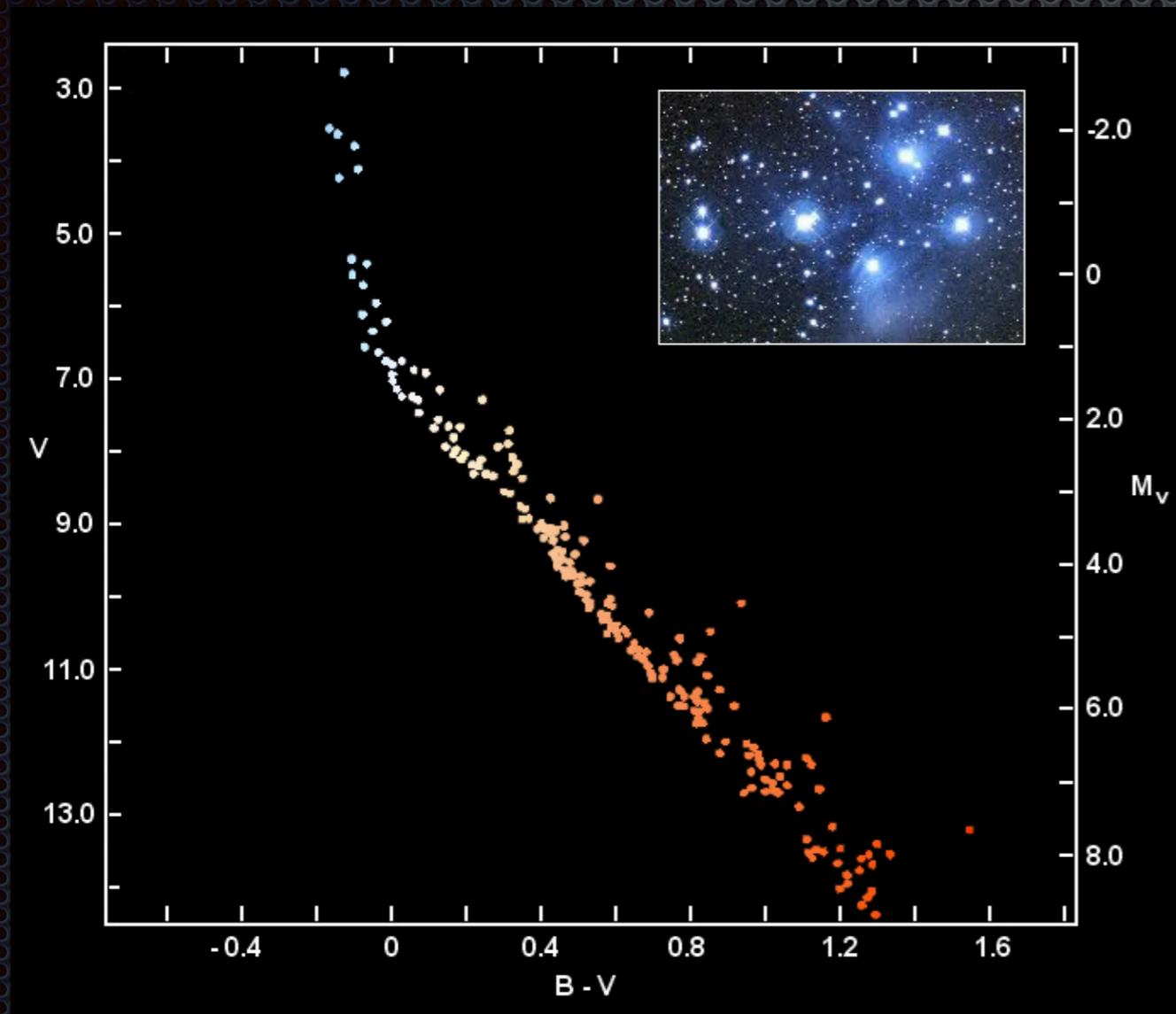
LE DIAGRAMME HR



r.powell

LE DIAGRAMME HR

Exemples de population



LE DIAGRAMME HR

Exercice - Les populations

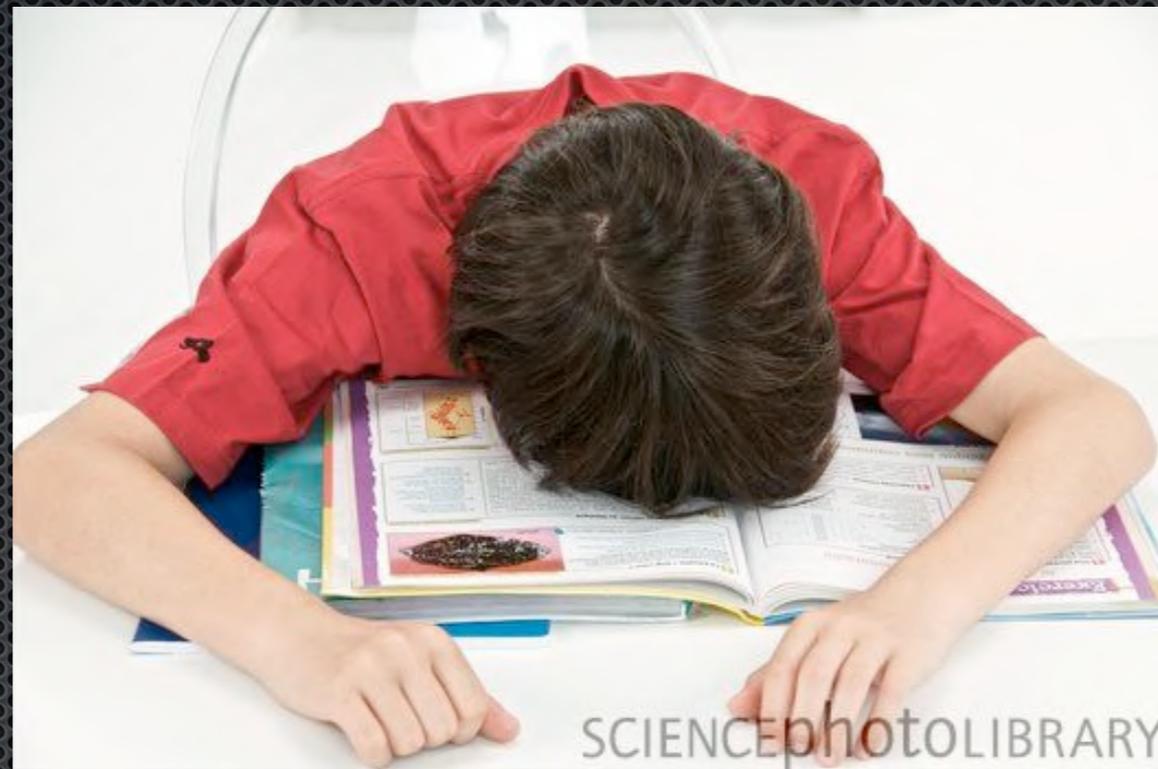
Laurent Zimmermann (le seul, l'unique !)

Pearson Practice Hall, 2005

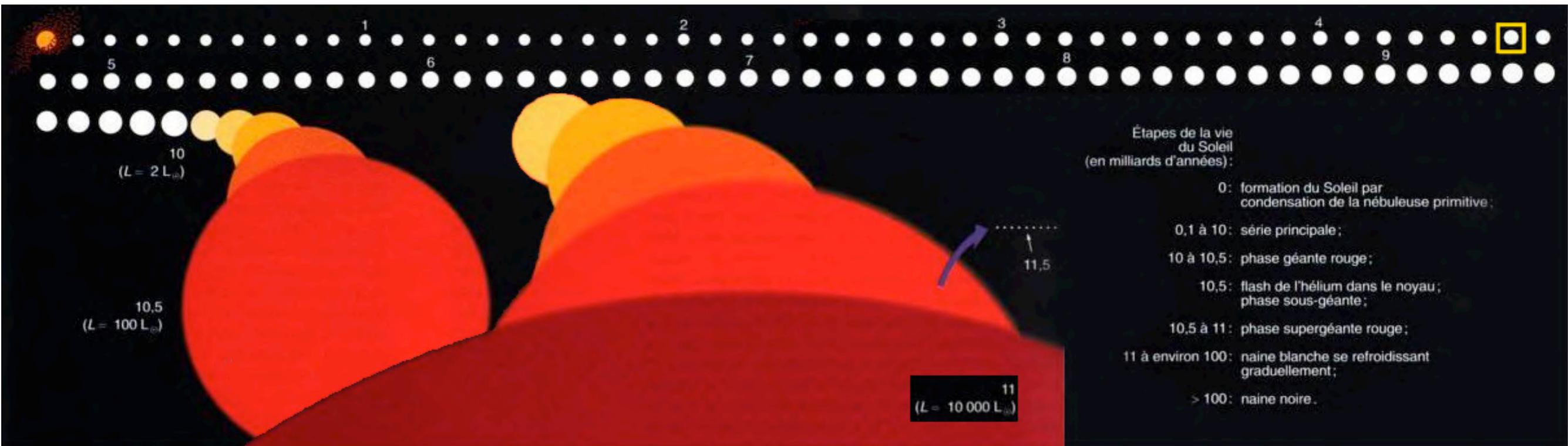
Le soleil dans le diagramme HR

- 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 ?

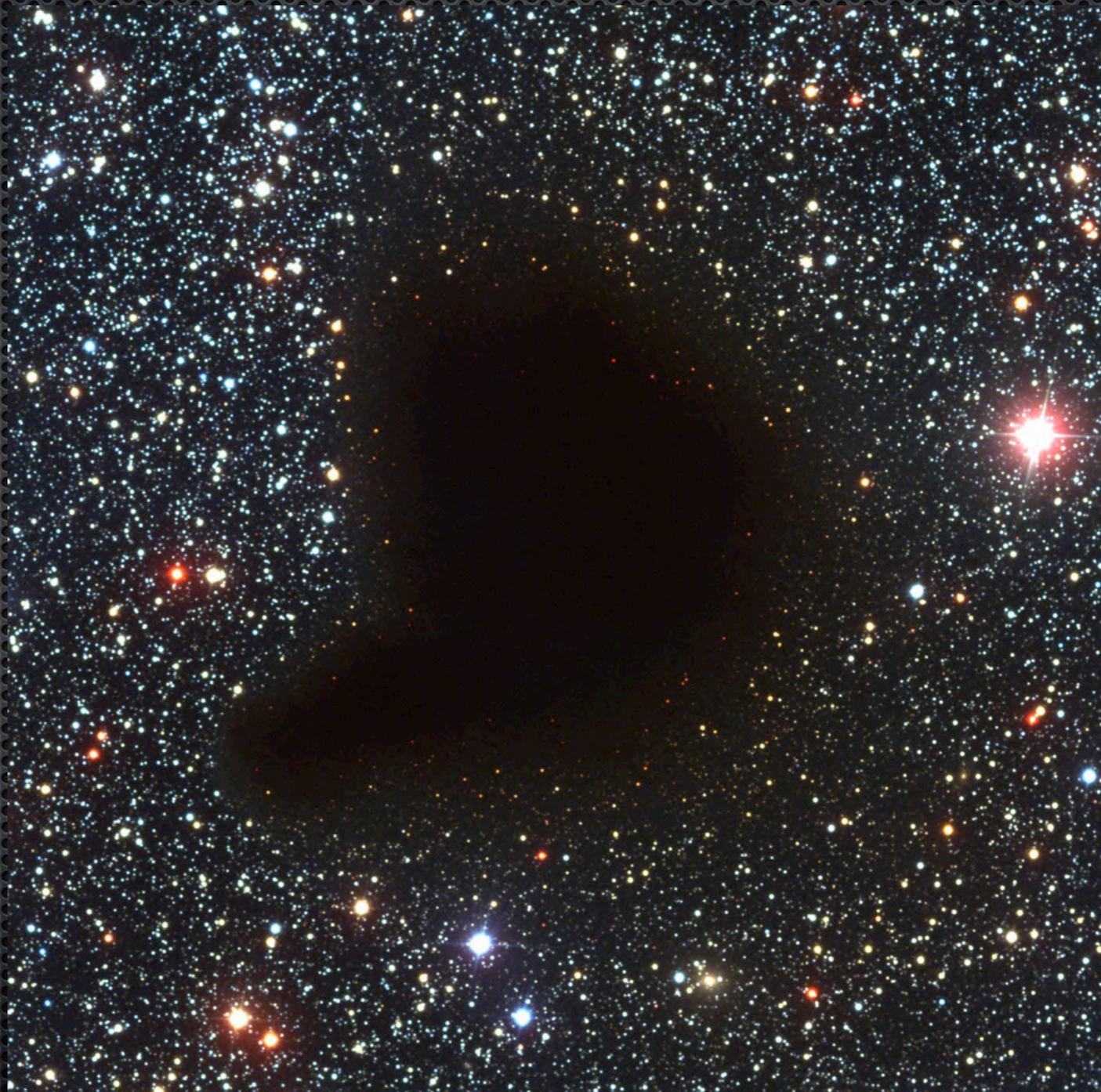
- **Modèles de combustion d'énergie du Soleil**
- **Âge de l'Univers (Big Bang)**
- **Conservation de l'énergie,...**

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

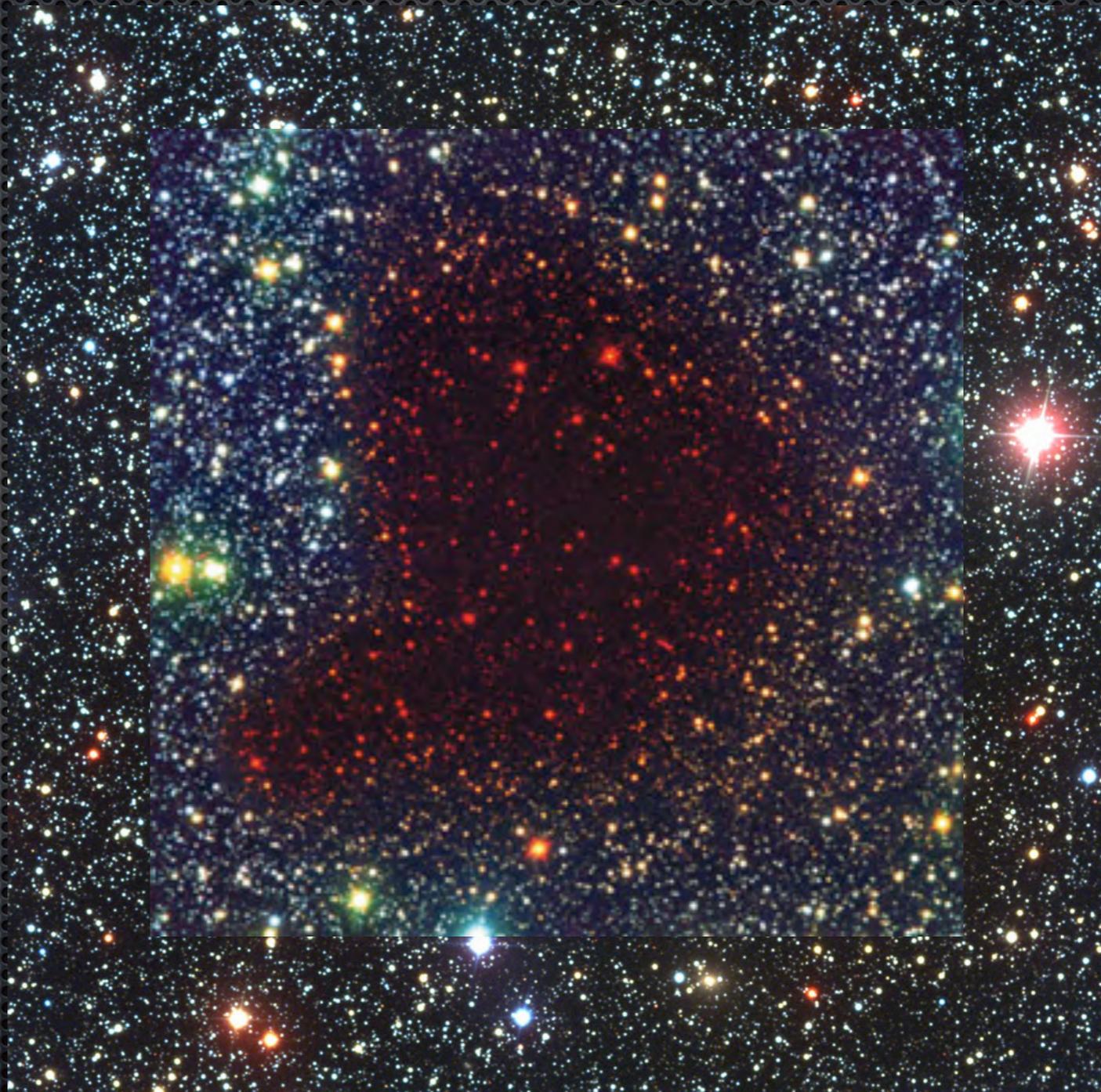


**Nuage M68
(ESO)
VISIBLE**

NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Le milieu interstellaire

Poussières



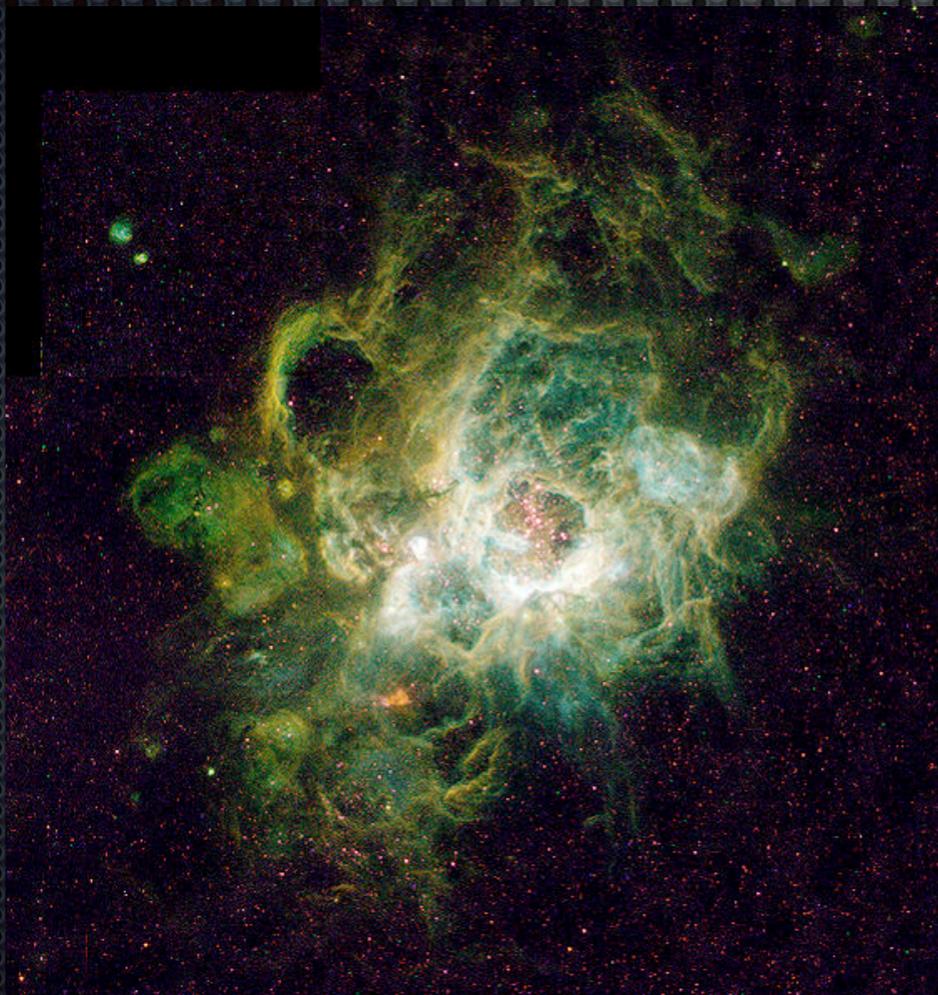
**Nuage M68
(ESO)
INFRAROUGE**

NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Le milieu interstellaire

Gaz : neutre (H I) ou ionisé (H II)
Nuages moléculaires

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

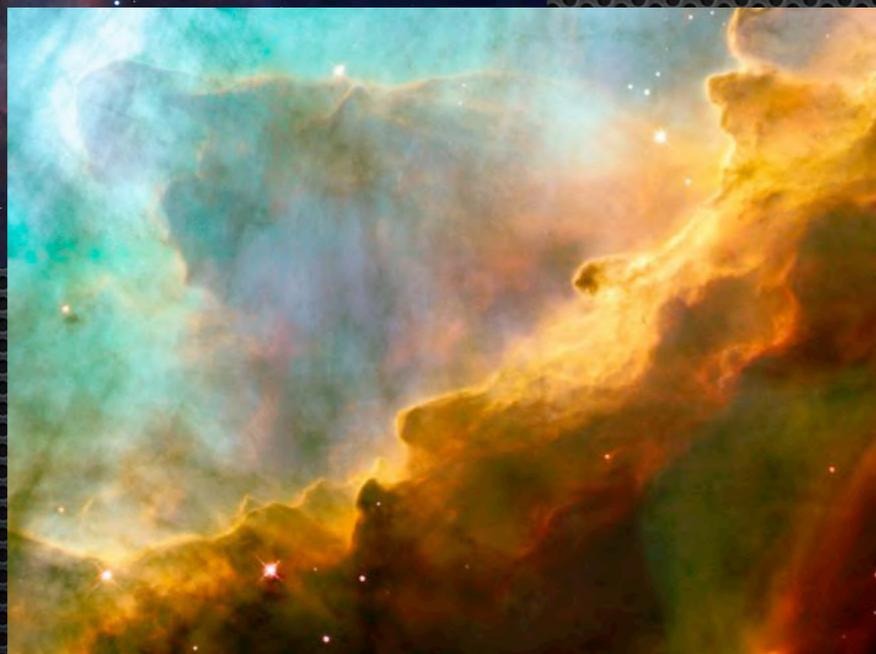


NGC 604 (<http://en.wikipedia.org>)



NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Le milieu interstellaire



M17 ou la Nébuleuse Oméga (NASA/ESA)



Nébuleuse d'Orion (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

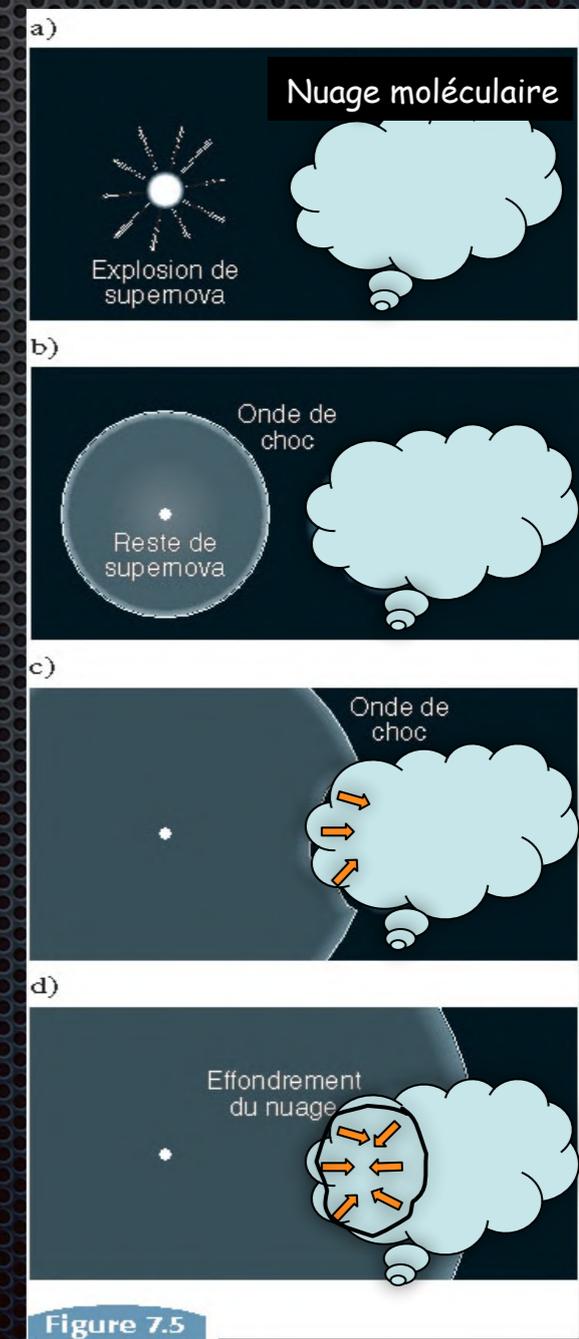


Figure 7.5

M. Seguin - B. Villeneuve

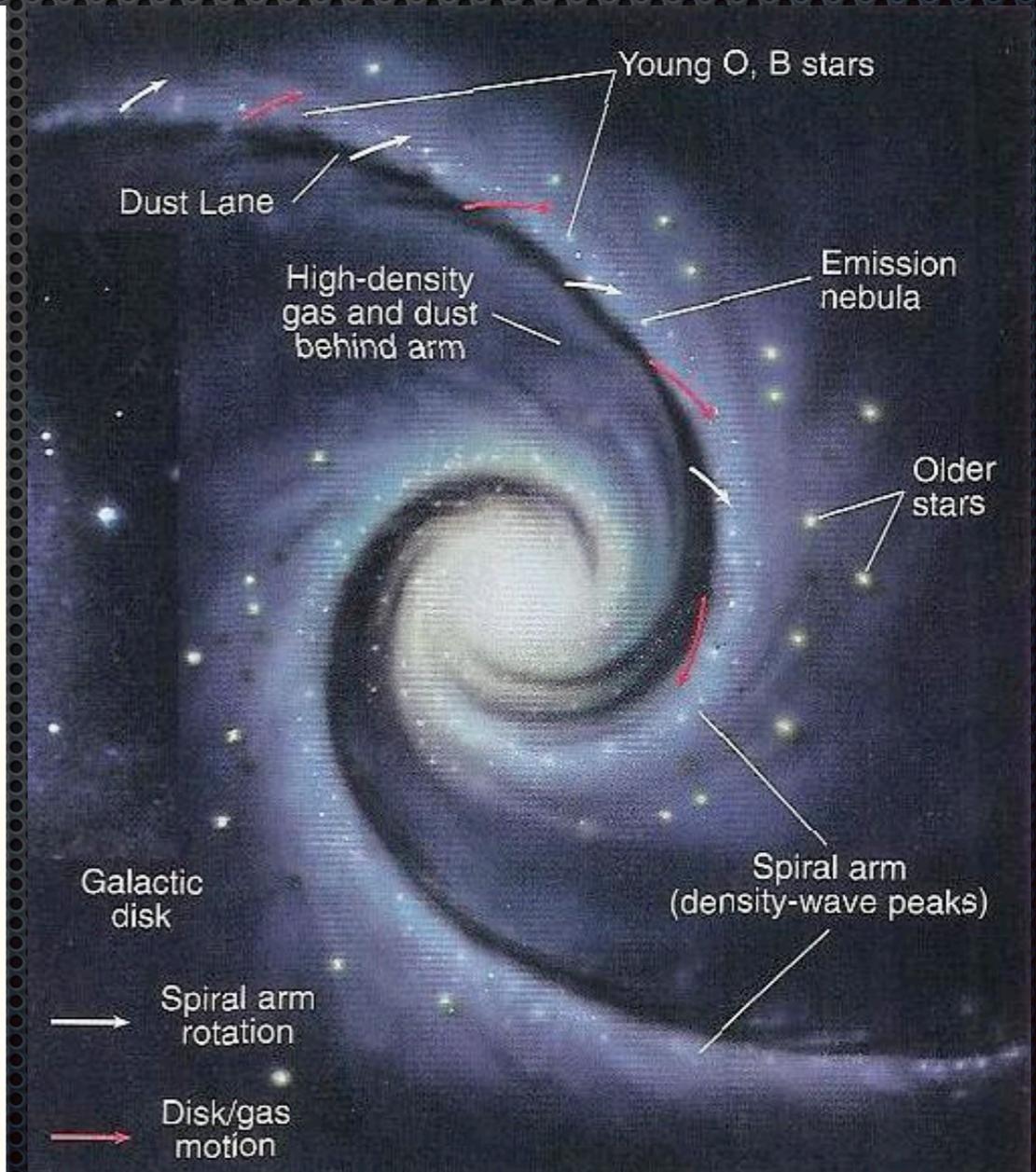
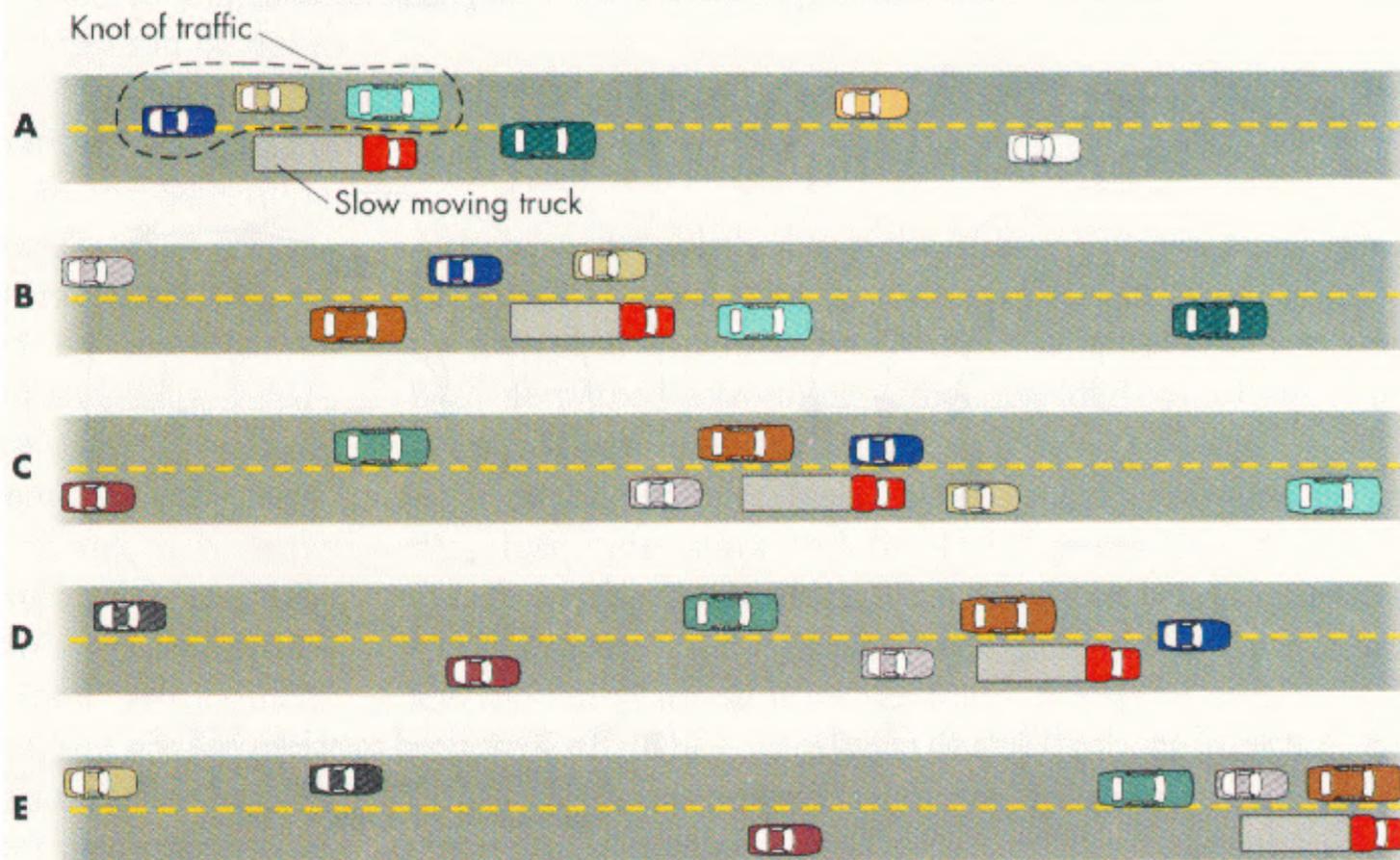
NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

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.

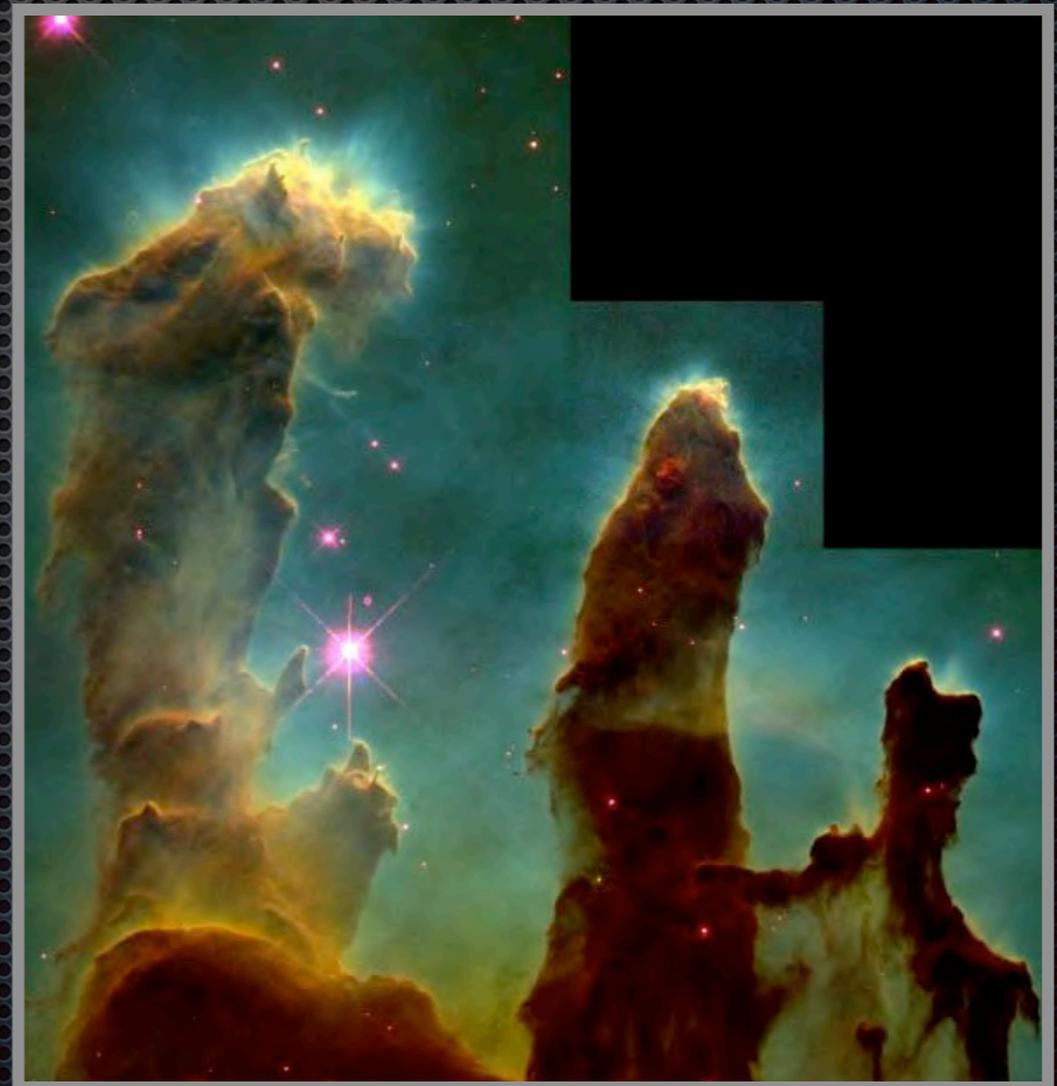


NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

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_☉**
- **Mais pendant un temps assez bref !**



© Anglo-Australian Observatory. Photograph by David Malin

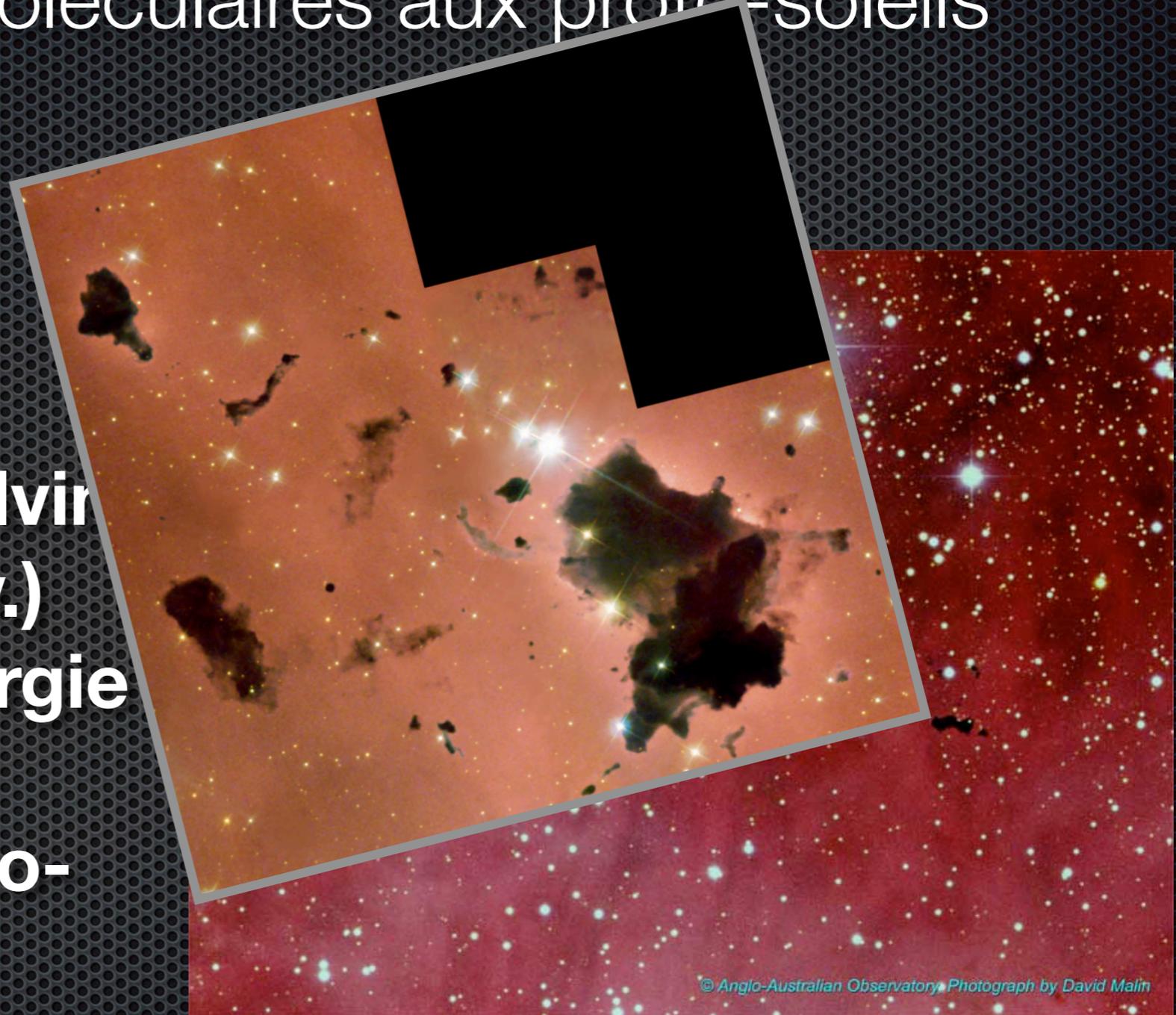
IC 2944 (Hubble Space Telescope)

NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Des nuages moléculaires aux proto-soleils

-4,6 Ga

- **Contraction gravifique**
- **Contraction de Kelvin-Helmholtz (cf. prev.)**
 - ➔ **libération d'énergie**
 - ➔ **T et L** ↗ ↗
- **A ce stade du proto-Soleil : 500 L_☉**
- **Mais pendant un temps assez bref !**



© Anglo-Australian Observatory. Photograph by David Malin

IC 2944 (Hubble Space Telescope)

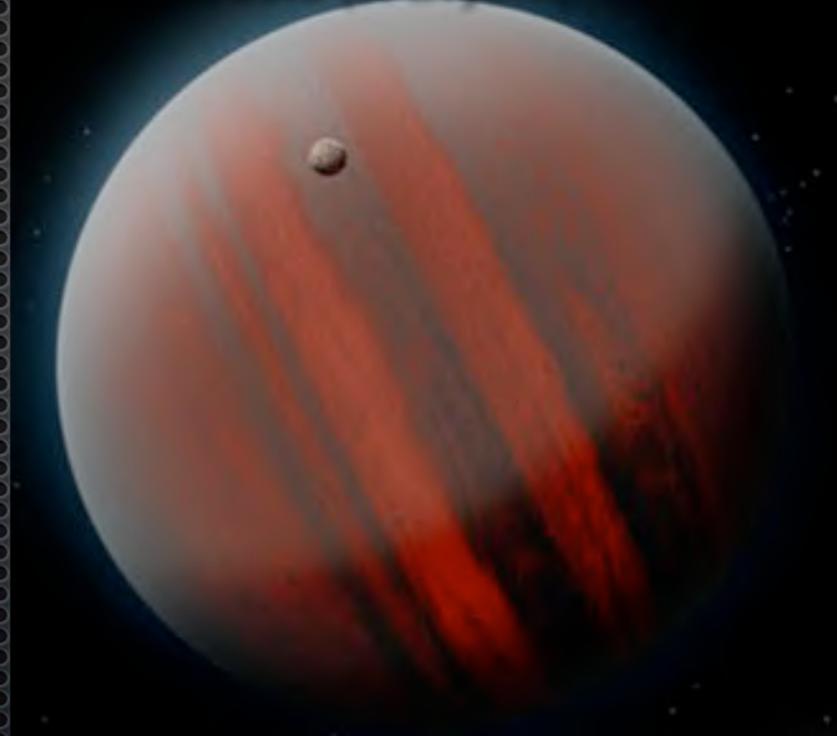
NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

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

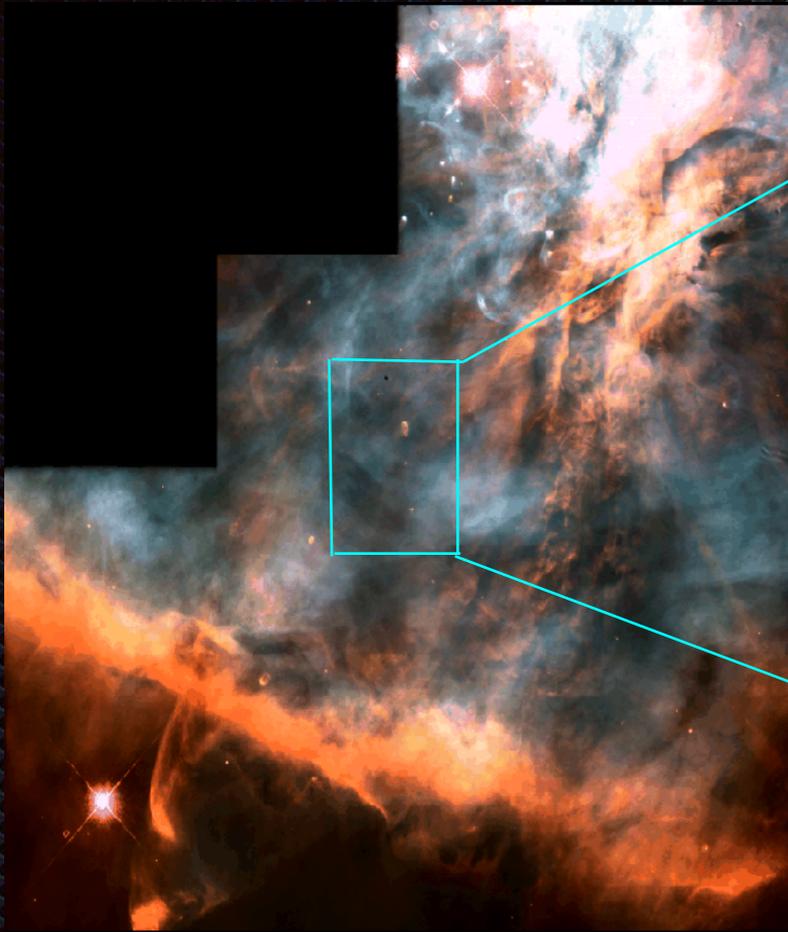
Vue d'artiste (J. Bryant)



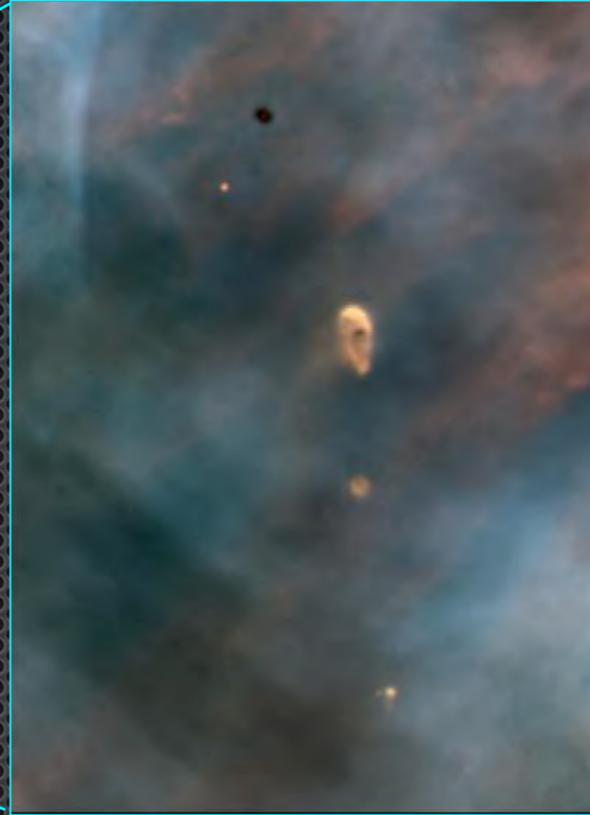
NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Des nuages moléculaires aux proto-soleils

-4,6 Ga



Nébuleuse d'Orion (Hubble Space Telescope)



**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

HST · WFPC2

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



**Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula**

HST · WFPC2

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

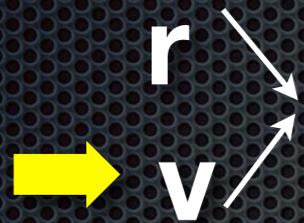
NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Des nuages moléculaires aux proto-soleils

-4,6 Ga

- **Conservation du moment cinétique**

$$rMv_{avant} = rMv_{après}$$

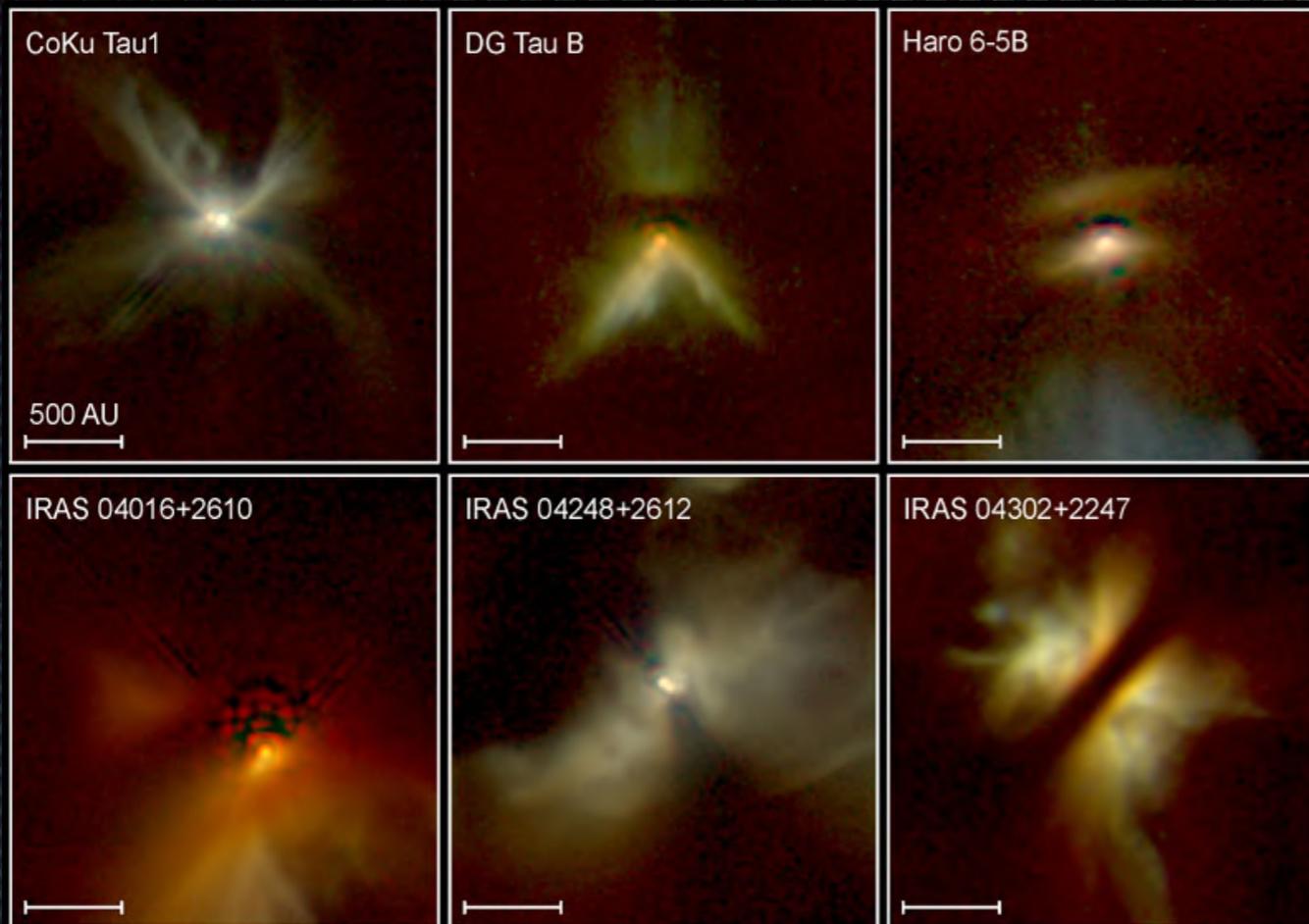


- la force centrifuge augmente
- le globule s'aplatit
- Nuage protoplanétaire
- Formation des **planètes** ! (au même moment que formation du Soleil)

NAISSANCE ET FORMATION DU SOLEIL

Des nuages moléculaires aux proto-soleils

-4,6 Ga



Young Stellar Disks in Infrared

HST • NICMOS

PRC99-05a • STScI OPO

D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA

- **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

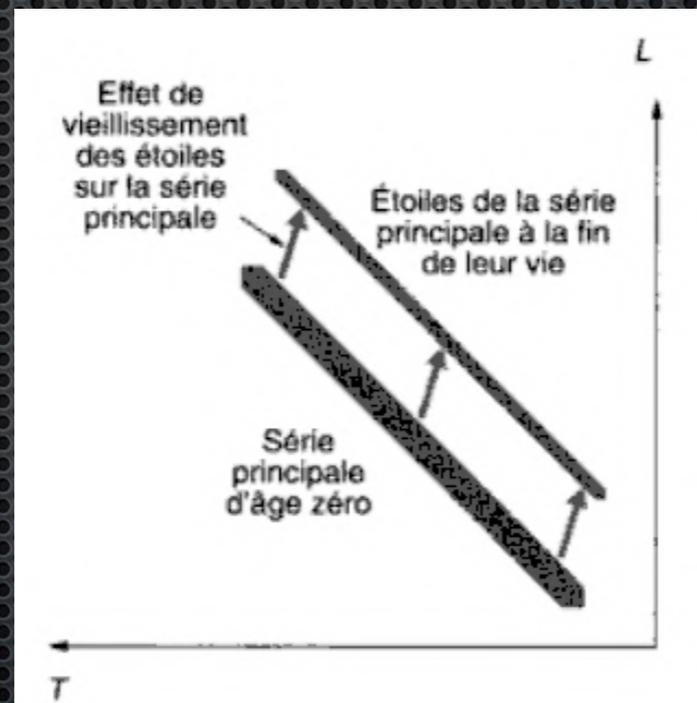
-4,6 Ga

- 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

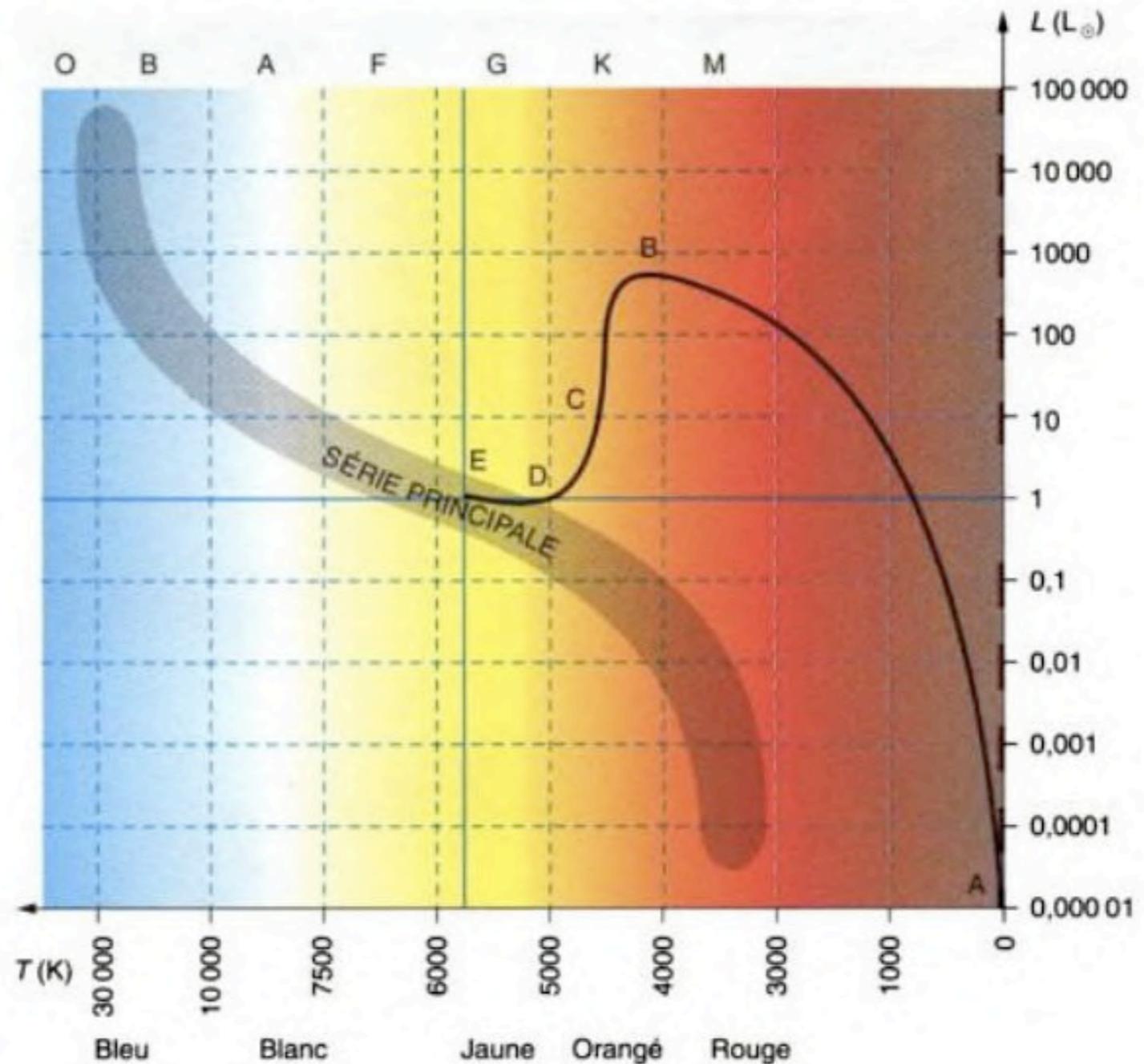
En résumé...

M. Seguin - B. Villeneuve

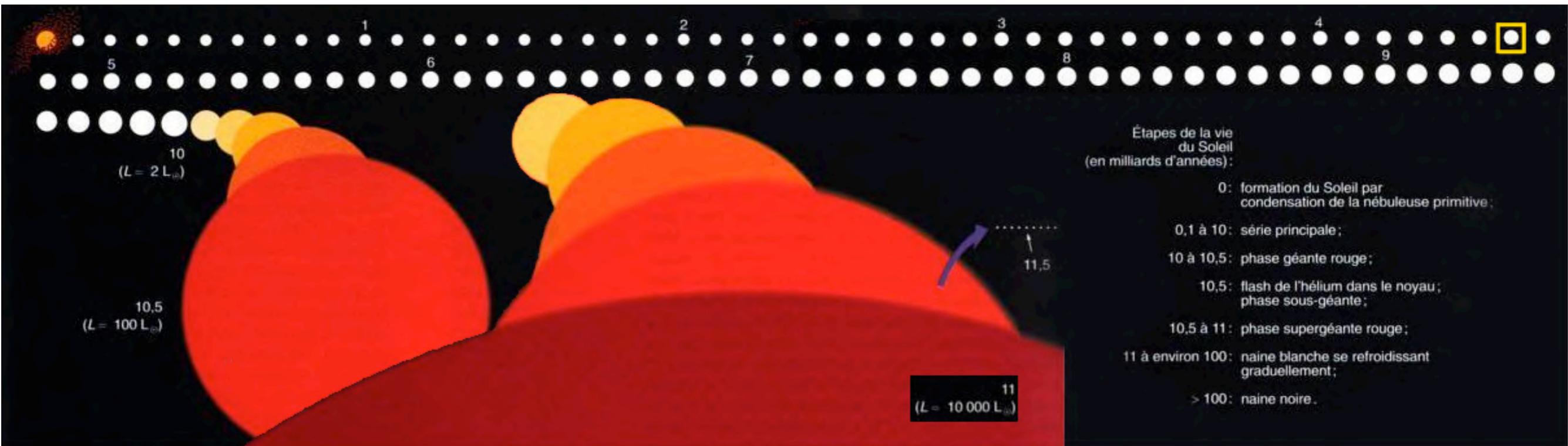
Figure 7.12

La naissance du Soleil.

- A: Début de l'effondrement.
Le Soleil sort du « coin sombre » du diagramme HR.
- B: 100 ans plus tard.
Luminosité maximale par effondrement gravitationnel.
- C: Âge: 100 000 ans.
- D: Âge: 1 million d'années.
Stade prénucléaire.
- E: Âge: 10 millions d'années.
Amorce des réactions nucléaires: début de la vie du Soleil dans la série principale.

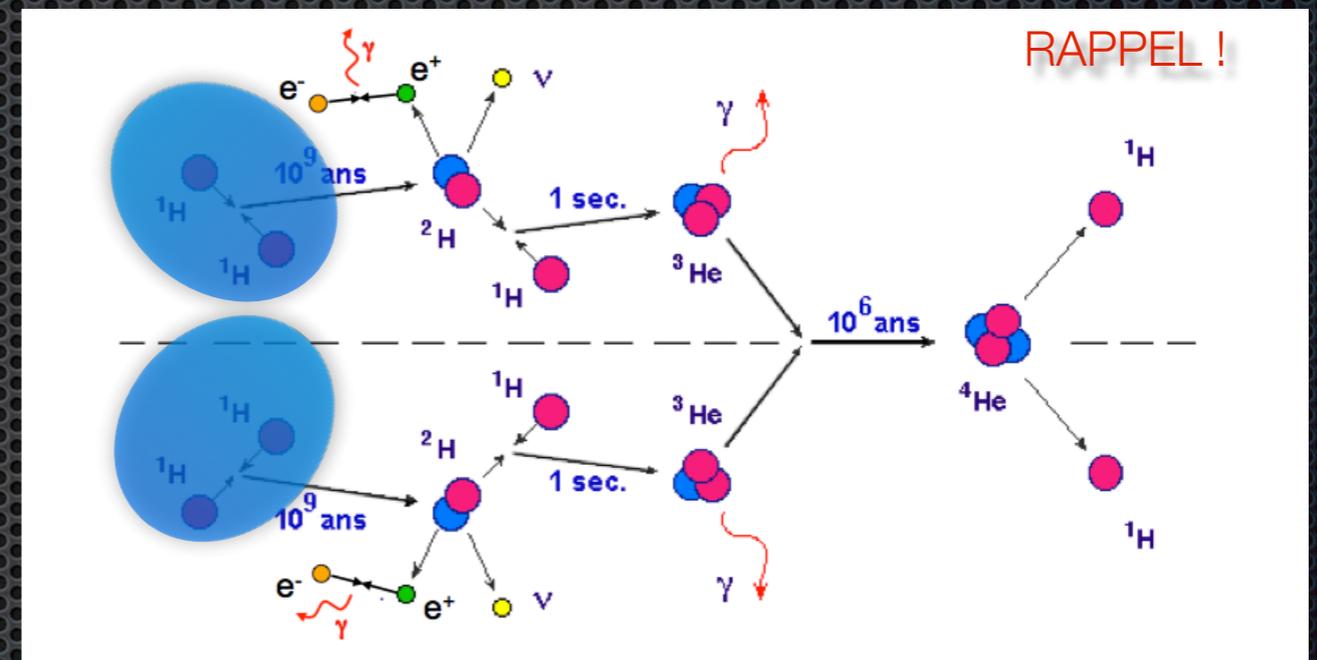


LA LIGNE DE VIE DU SOLEIL



...ET DEMAIN ? Le Soleil a-t-il une fin ?

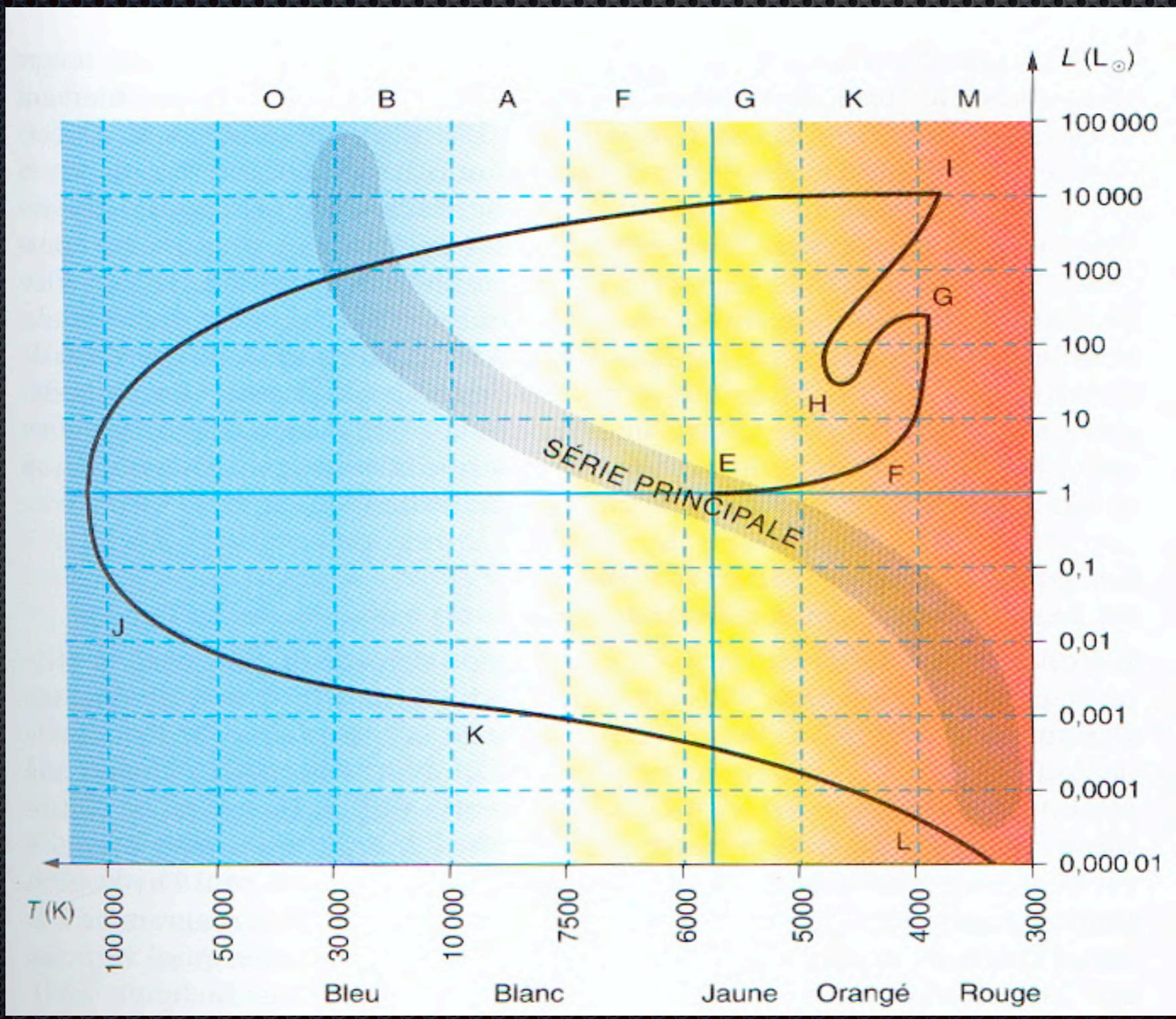
- Réactions nucléaires = «moteur» du Soleil
- «Carburant» = réserves d'hydrogène



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

...ET DEMAIN ?

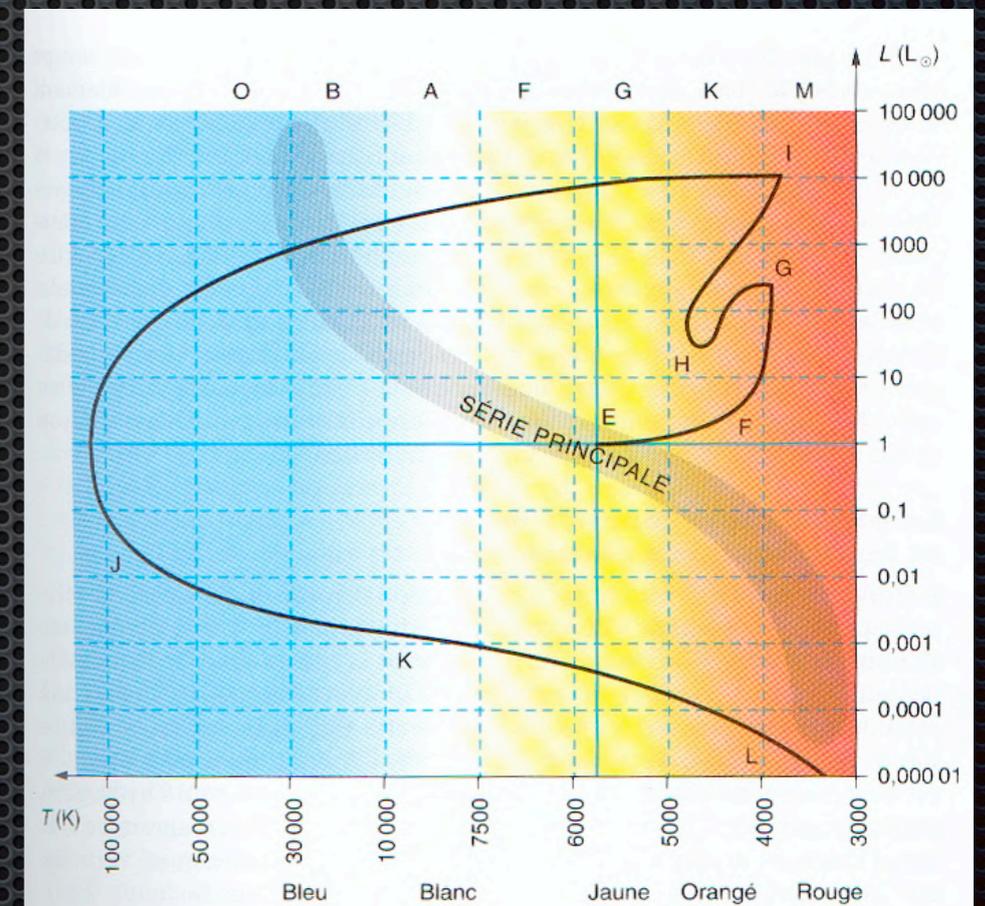
Diagramme Hertzsprung-Russel



...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** [qques 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

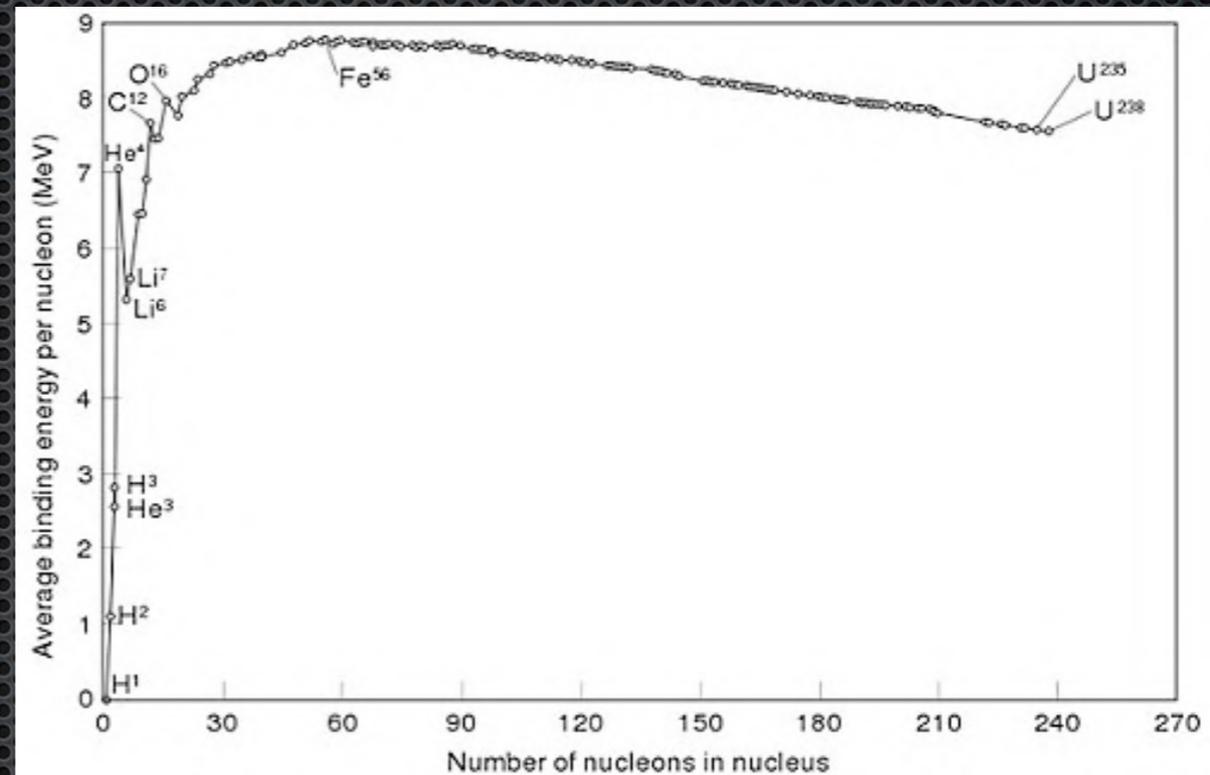
- Valable pour $M < 8 M_{\odot}$
- Temps de vie dépend **FORTEMENT** de M
 - ➔ $1 M_{\odot} \Rightarrow 10 \text{ Ga}$
 - ➔ $0,1 M_{\odot} \Rightarrow 6 \text{ 000 Ga} !$
- He s'accumule au coeur... (**pourquoi ?**)
- ...mais il ne peut pas fusionner ! (**re-pourquoi ?**)
 - ➔ gêne la fusion de l'H au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

...ET DEMAIN ?

Etape E : Fin de la séquence principale

5 Ga

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



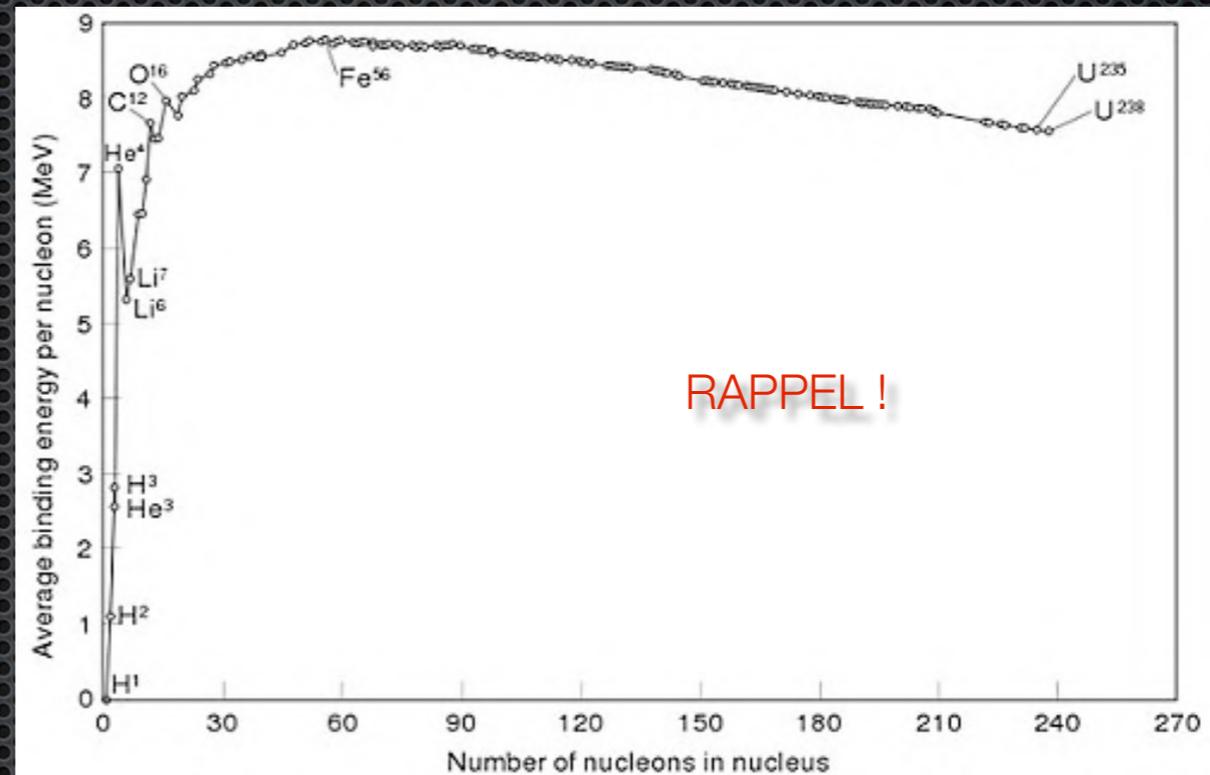
- He s'accumule au coeur... (**pourquoi ?**)
- ...mais il ne peut pas fusionner ! (**re-pourquoi ?**)
 - ➔ gêne la fusion de l'H au coeur

...ET DEMAIN ?

Etape E : Fin de la séquence principale

5 Ga

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



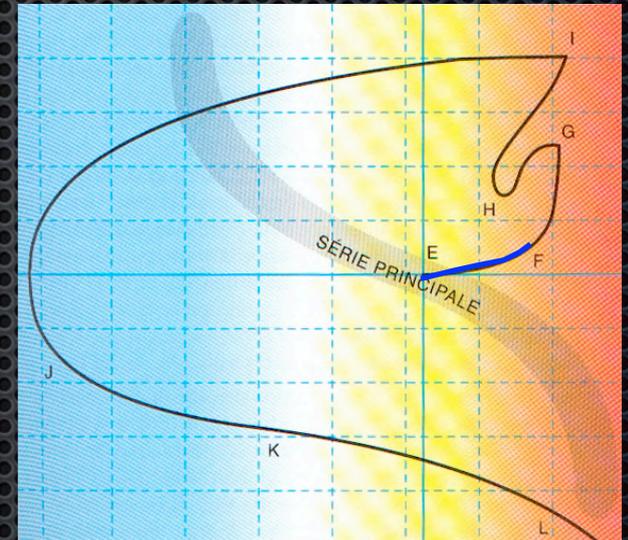
- He s'accumule au coeur... (**pourquoi ?**)
- ...mais il ne peut pas fusionner ! (**re-pourquoi ?**)
 - ➔ gêne la fusion de l'H au coeur

...ET DEMAIN ?

Etape E-F : Vers la phase géante rouge

5,2 Ga

- He accumulé au coeur gêne fusion de H
 - ➔ pression centrale ↘
 - ➔ contraction du coeur
 - ➔ T_{coeur} ↗
 - ➔ + de matière au centre et taux de réaction ↗
- Accumulation d'énergie au coeur : couches externes se dilatent ➔ T_{surf} ↘
- Mais cette augmentation d'énergie est trop brusque : elle n'arrive pas tout de suite à la surface
 - ➔ L constante

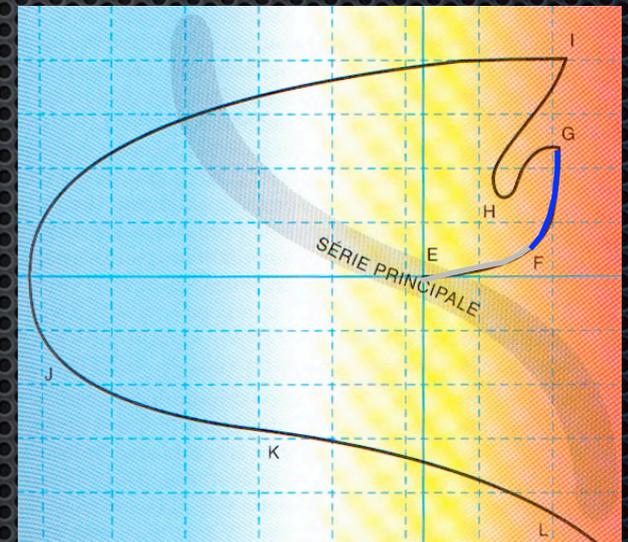


...ET DEMAIN ?

Etape F-G : La phase géante rouge

5,5 Ga

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



<http://ajir.org>

**LE SOLEIL EST UNE
GÉANTE ROUGE...**

...ET DEMAIN ?

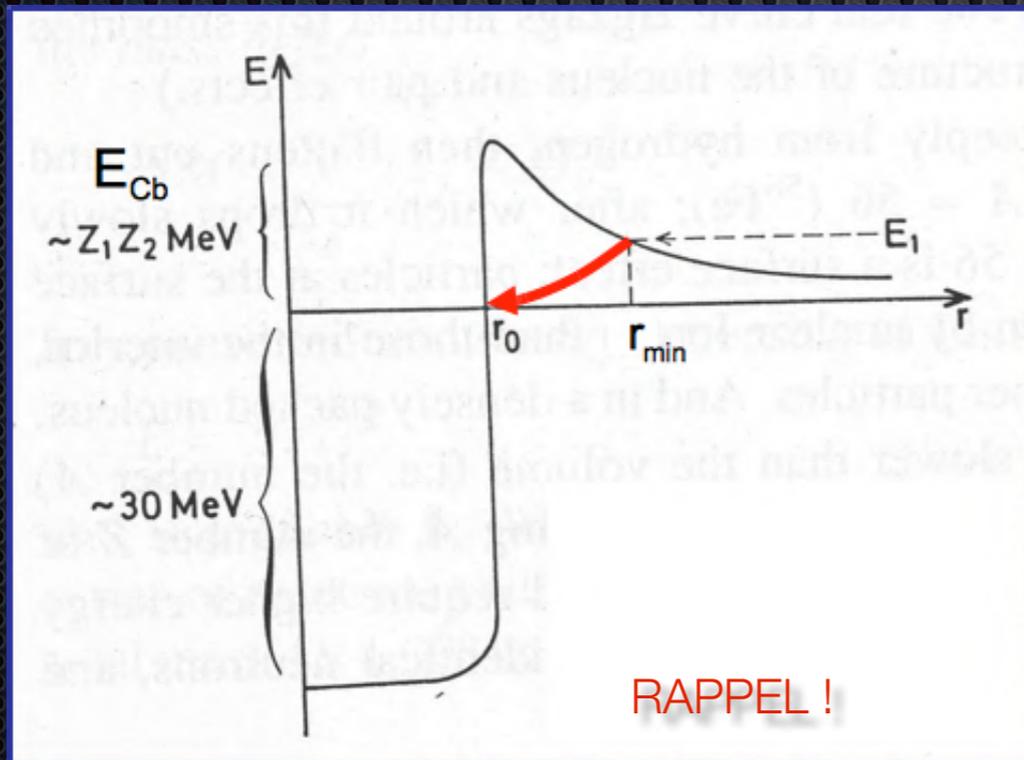
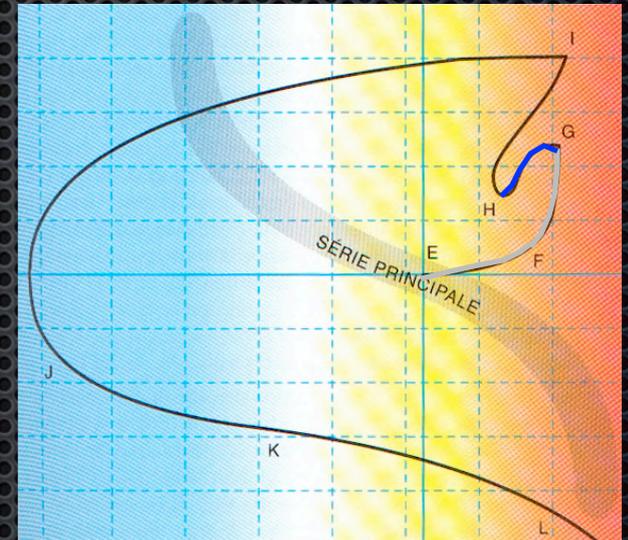
Etape G-H : Le flash de l'hélium

5,6 Ga

• Le coeur se contracte toujours

→ $T_{\text{coeur}} \nearrow$

→ T_{coeur} atteint 100 000 000 K



• La fusion de l'He se déclenche brusquement !

• **FLASH DE D'HÉLIUM**

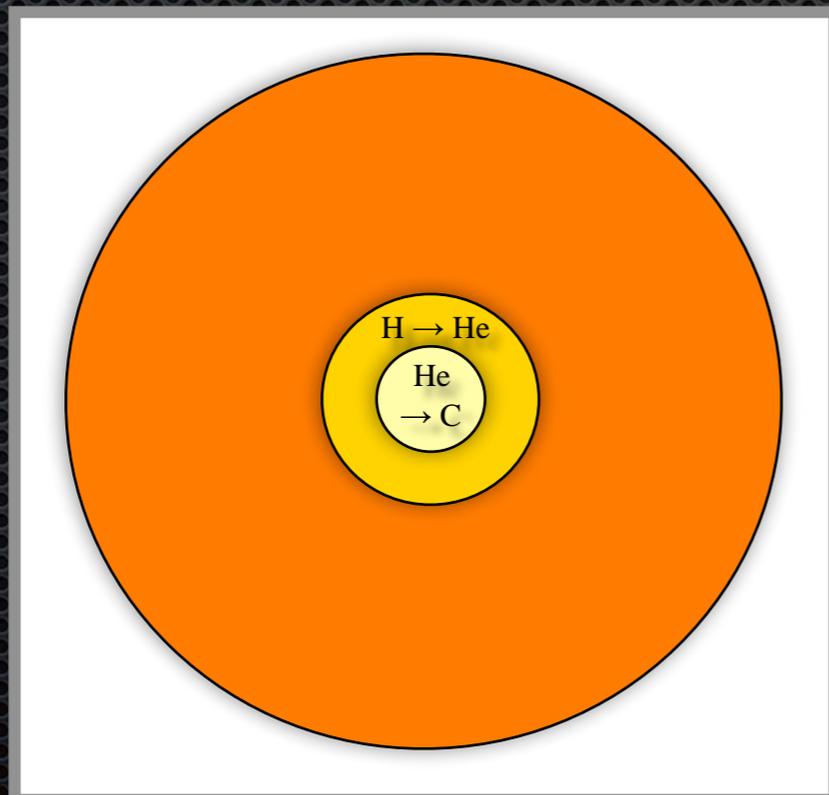
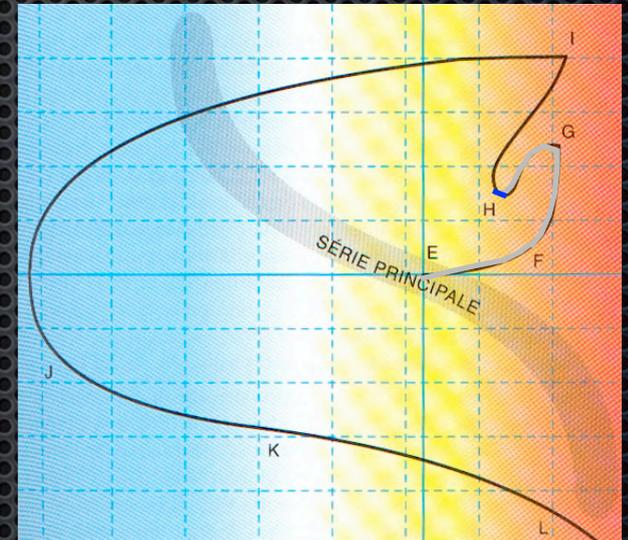
• Éjection des couches externes

...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



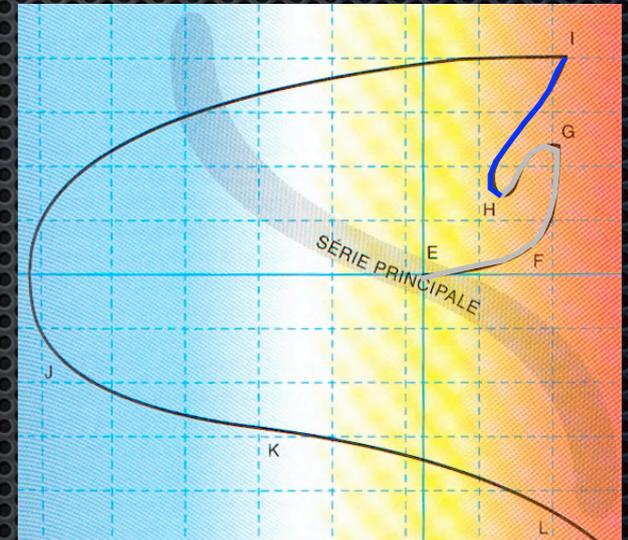
BRANCHE HORIZONTALE

...ET DEMAIN ?

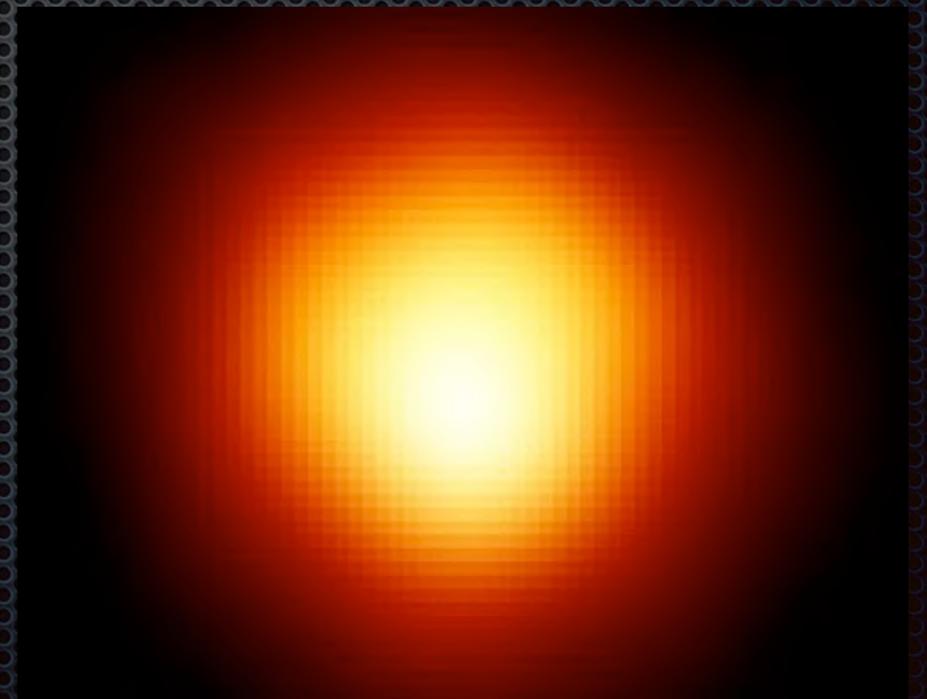
Etape H-I : Vers la phase supergéante rouge

6 Ga

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



**LE SOLEIL EST UNE
SUPERGÉANTE
ROUGE...**



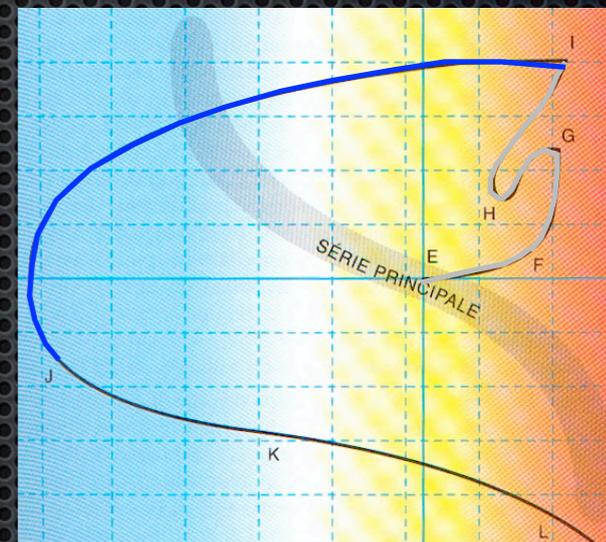
Bételgeuse ($15 M_{\odot}$!) (NASA)

...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 coeur compact très chaud : **NAINE BLANCHE**

...ET DEMAIN ?

Etape I-J : La phase nébuleuse planétaire

6 Ga



Nébuluse de la Lyre (Hubble Space Telescope)



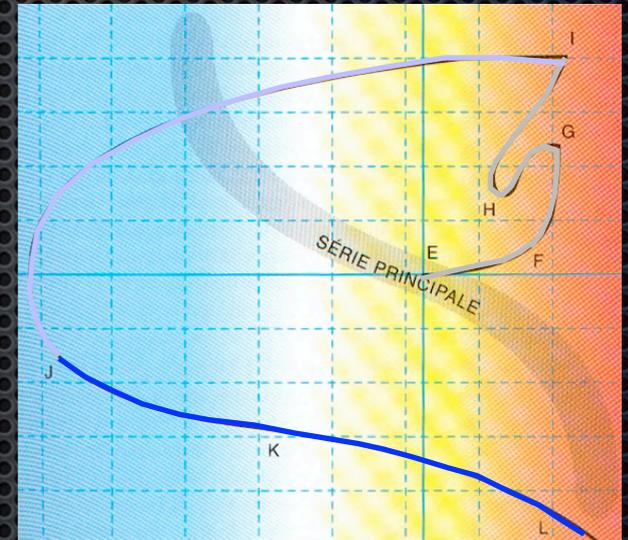
**Nébuluse MyCn18
(Hubble Space
Telescope)**

...ET DEMAIN ?

Etape J-K-L : Refroidissement...

100 Ga

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

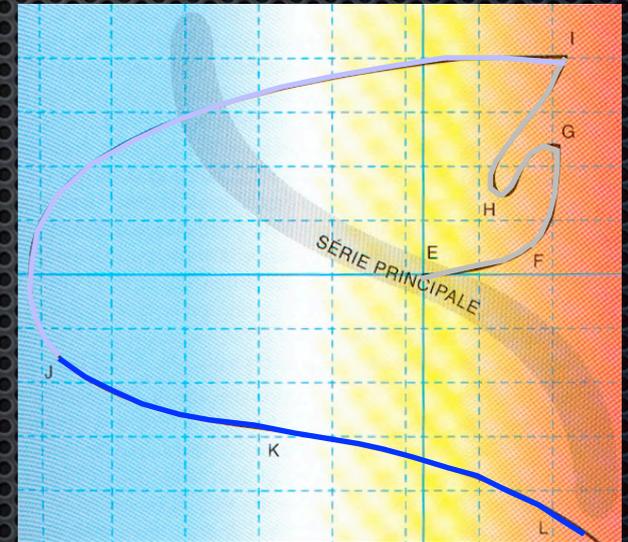


...ET DEMAIN ?

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 !

