

les éléments chimiques

La Terre dans l'Univers 1

évolution stellaire - le cycle de la matière

évolution stellaire

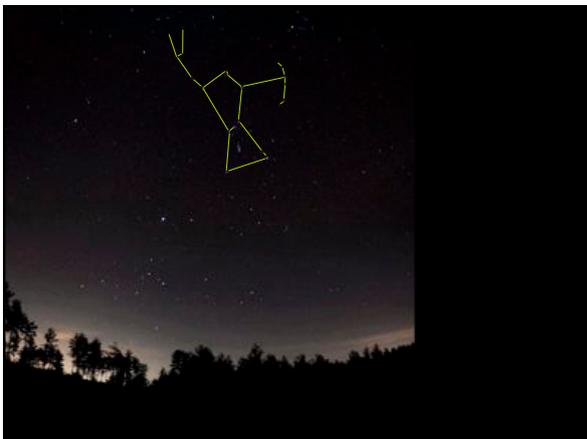
La Terre dans l'Univers 1

les raies spectrales - 1814 Josef Fraunhofer

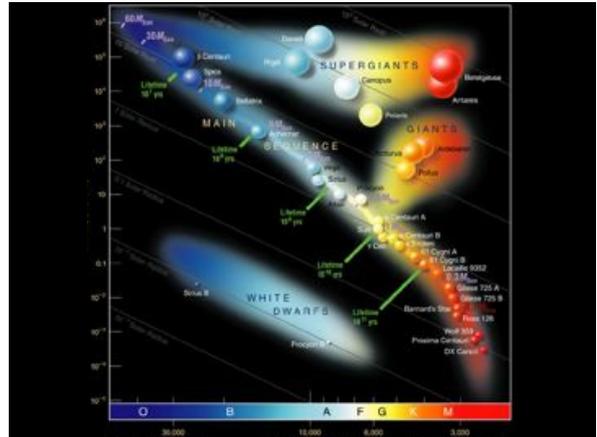
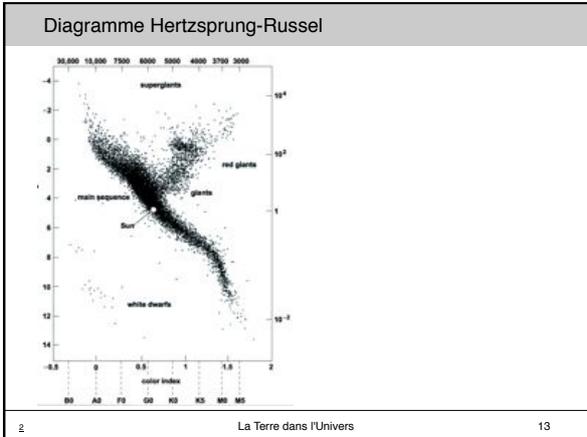
spectre visible du soleil

spectroscopie atomique  
-> chimie et physique moderne !

La Terre dans l'Univers 4







### La fusion H → He dans le Soleil

$4 \text{ H} \rightarrow 4 \text{ He} + 2 \nu + \text{énergie}$

### Le diagramme de Hertzsprung-Russel

Luminosité de l' étoile

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

Surface de l' étoile      Luminosité du "corps noir" par unité de surface

Diagramme de Hertzsprung-Russel

La Terre dans l'Univers 16



### conditions initiales pour la formation d' une étoile

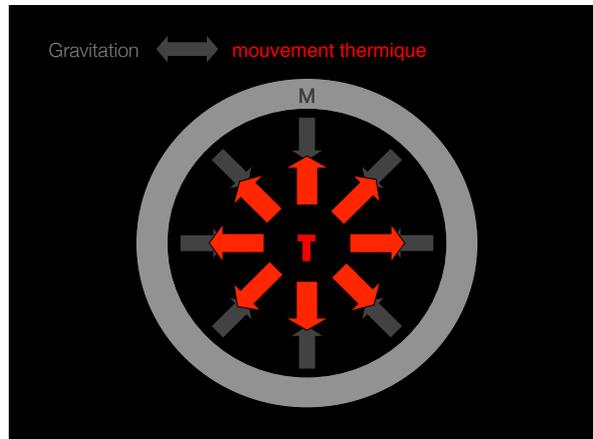
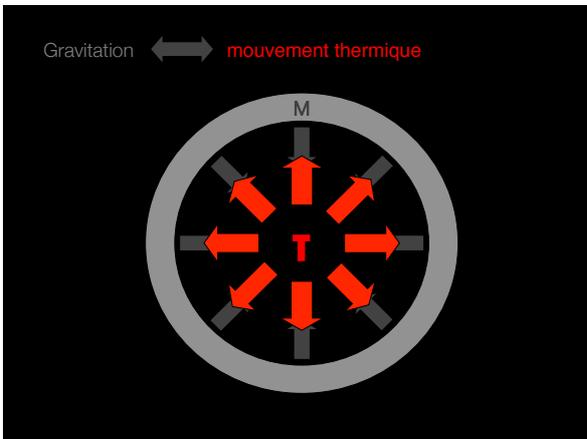
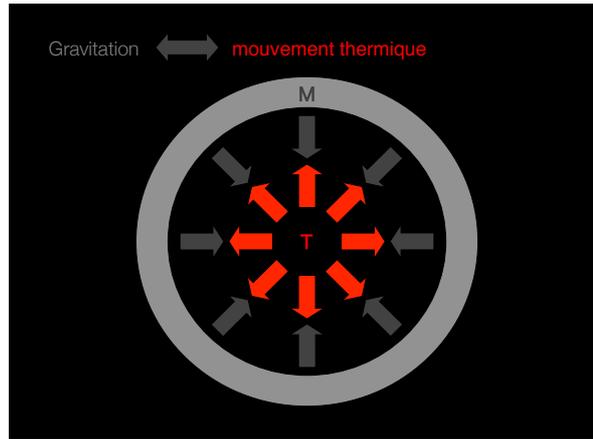
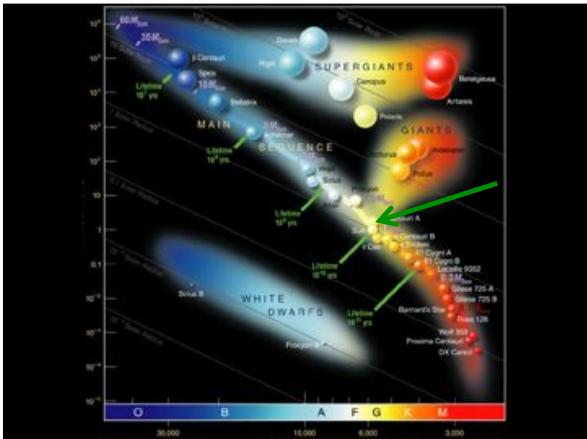
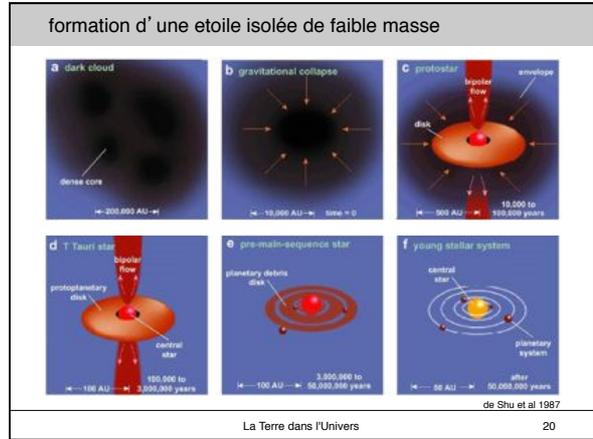
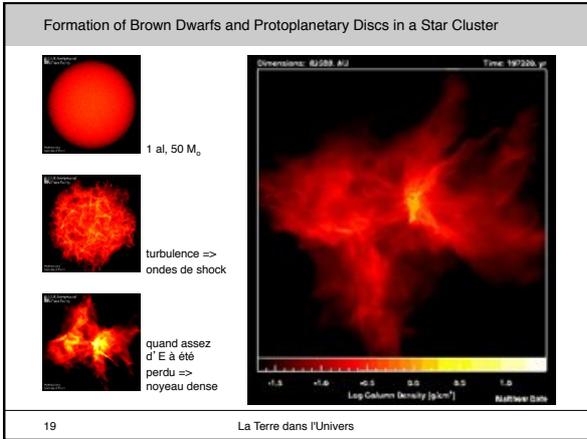
nuage d' atomes d' hydrogène (90 % des atomes dans le MIS)  
 masse :  $10^{57}$  atomes d' H ~ 1Mo  
 $T \sim 0^\circ$   
 $R \sim \infty$

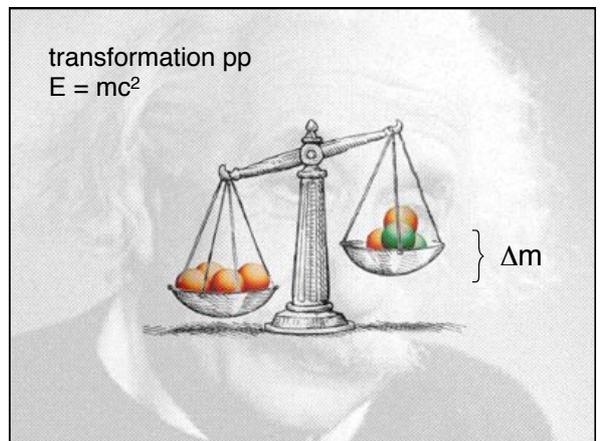
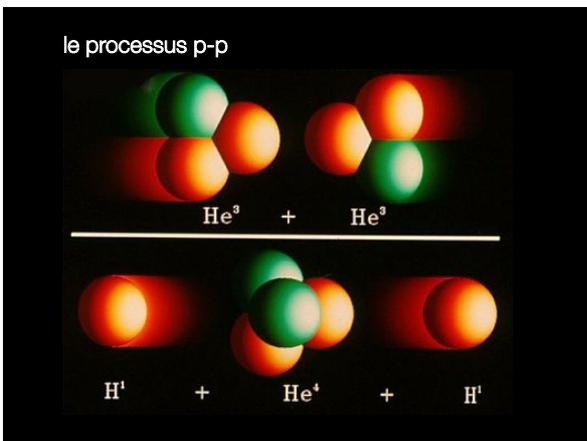
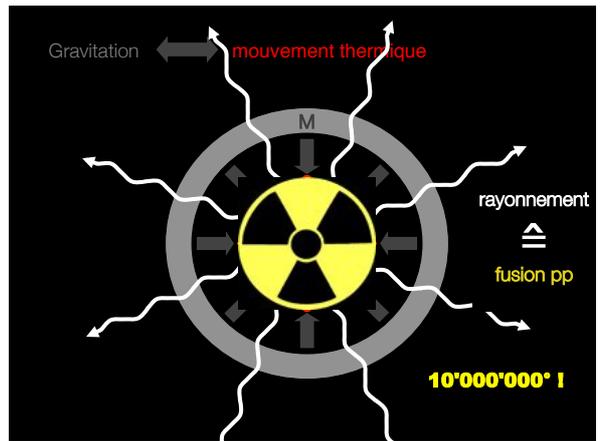
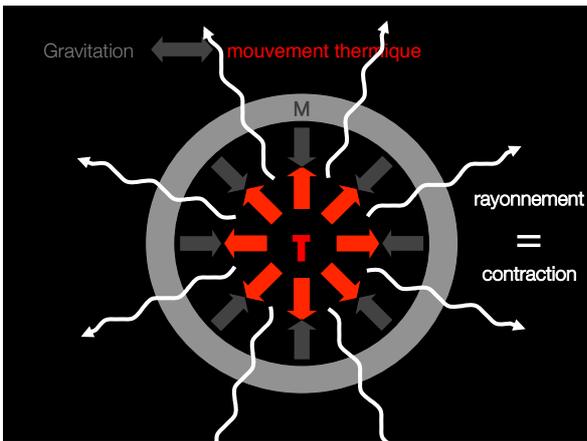
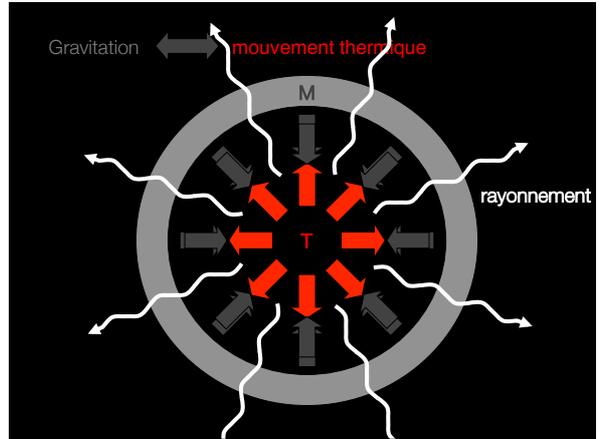
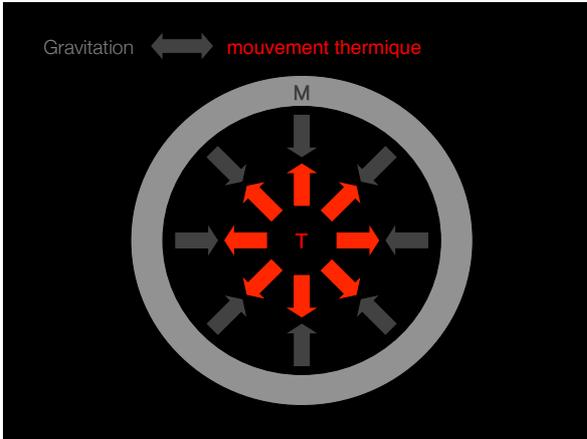
pour le nuage de gaz

$E_{\text{grav}}$	=	0 (max.)
$E_{\text{cin}}$	=	0
$E_{\text{nuc}}$ (pot)	=	938 MeV / nucleon

forces fortes, faibles & EM ~ inactives pour les conditions initiales ci-dessus

La Terre dans l'Univers 18





Réaction p-p				
		énergie libérée*	$\nu$ 's	$\tau$ moyen
${}^1\text{H} + {}^1\text{H}$	$\rightarrow$	${}^2\text{D} + e^+ + \nu$	+ 1.44 MeV - 0.26 MeV	$14 \cdot 10^9$ ans
${}^1\text{H} + {}^2\text{D}$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + \gamma$	+ 5.49 MeV	6 s
puis p.e.				
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$	+ 12.86 MeV	$9 \cdot 10^5$ ans
$4{}^1\text{H}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + 2\gamma + 2e^+ + 2\nu$	26.72 MeV - 0.52 MeV	

energie produit par H :  $E \approx 26 \text{ MeV} / 4 \approx 10^{-12} \text{ J}$

La pression augmente  $\rightarrow$  la contraction (gravitation) s'arrête

la combustion de l'H en He est le plus important reservoir d'energie d'une étoile  
 $\Rightarrow$  le soleil reste  $\sim 10 \text{ Ga}$  sur la séquence principale

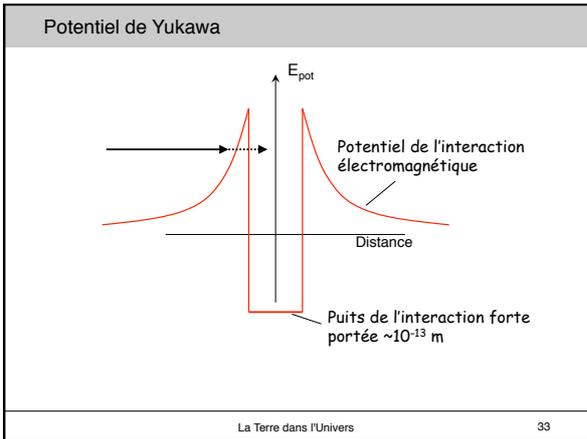
31

La Terre dans l'Univers

Introduction aux Sciences de la Terre et de l'Univers	
<a href="http://www.cesr.fr/~pvb/f/L1Terre">www.cesr.fr/~pvb/f/L1Terre</a>	
A. La Terre dans l'Univers	
B. La structure du globe et son exploration	
C. Tectonique des plaques	

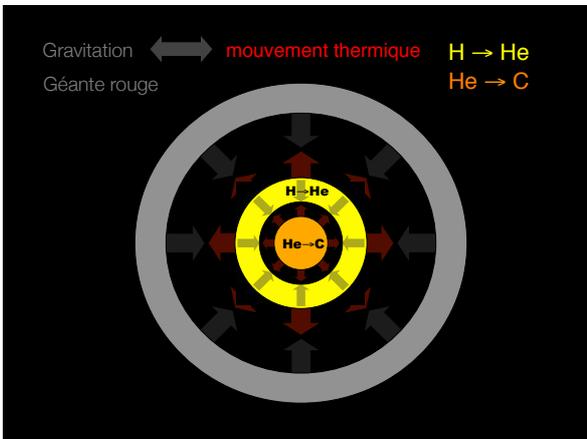
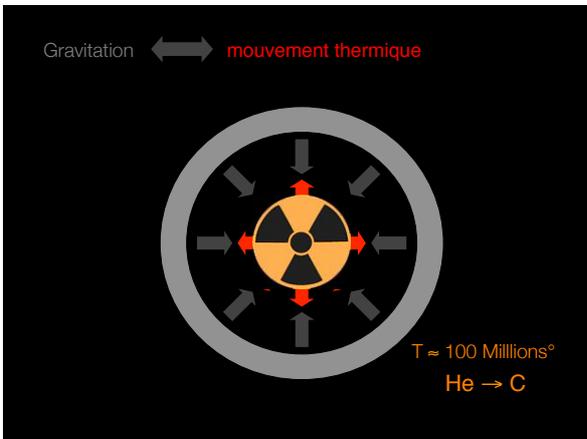
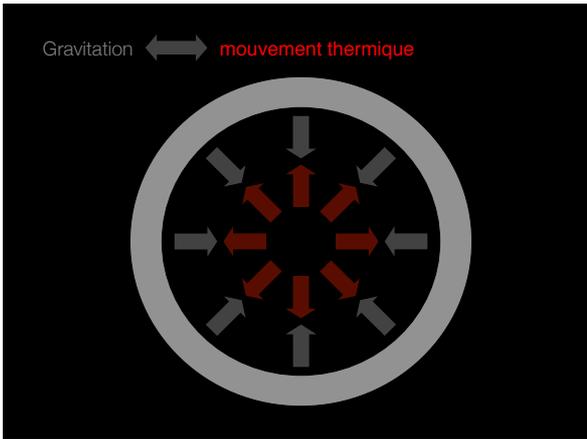
La Terre dans l'Univers

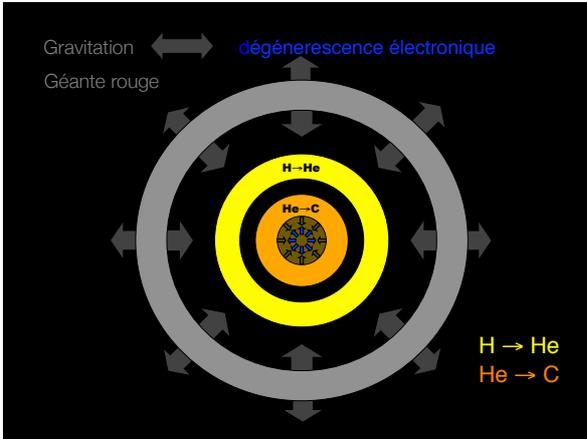
32



La Terre dans l'Univers

33





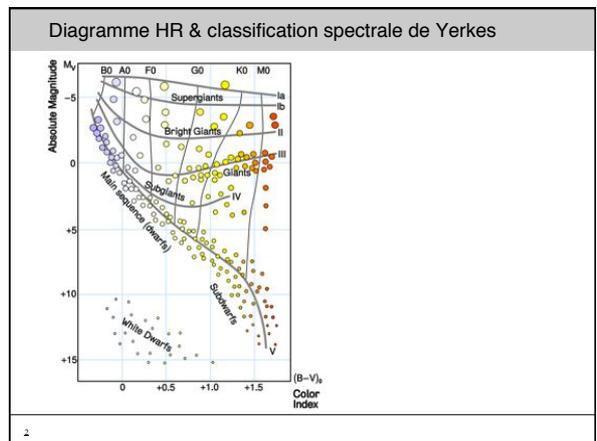
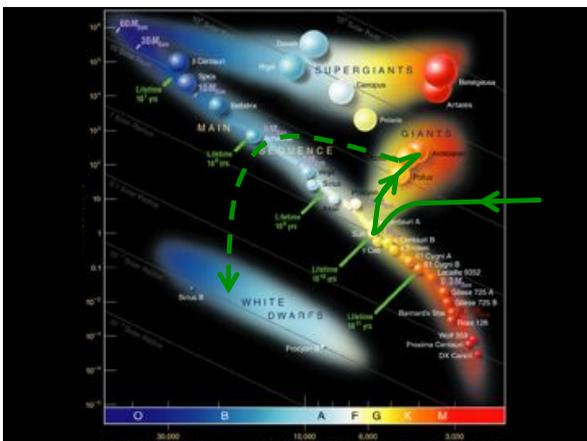
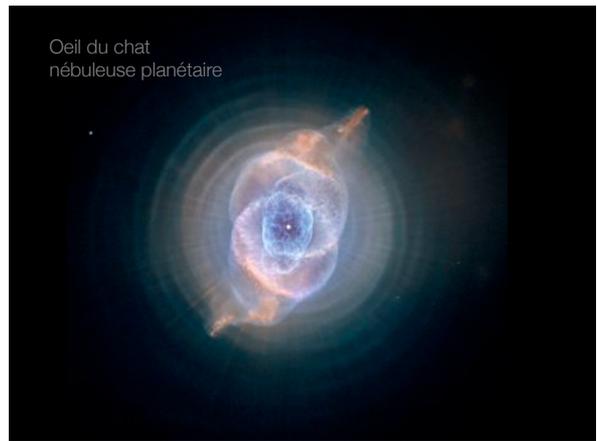
**Nébuleuse planétaire**

→ contraction du cœur et expulsion des couches externes  
 Entre le stade de la GR et de la dernière phase (p.e. NB).  
 Les Géantes Rouges oscillent -> enveloppe peut recevoir assez d' $E_{cin}$  pour se libérer  
 $V_{exp(GR)} \approx 20-30$  km/s (vitesse d'expansion observée dans des nébuleuses planétaires)

→ Nébuleuse planétaire :



La Terre dans l'Univers 39



### Evolution stellaire : Géante Rouge

- contraction du cœur : T monte dans le cœur
- augmentation de la température / densité autour du cœur : taux pp monte
- luminosité monte de 1000 - 10000
- dilatation et refroidissement de l'enveloppe externe

Si la masse est suffisante ( $0.5 M_{\odot}$ ) :

→ le cœur peut atteindre  $\approx 10^8 \text{K}$  ( $d = 10^5 \text{kg/cm}^3$ ) :

**réaction triple  $\alpha$ , et capture de particules  $\alpha$  (noyaux  $^4\text{He}$ )**

$$^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be}$$

$$^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}^*$$

$$^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$$

→ combustion lente de l'He jusqu'à (presque) épuisement....

$$^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma \dots$$

43 La Terre dans l'Univers

### évolution stellaire et diagramme HR - $M < 1.5 M_{\odot}$

1-2 **séquence principale**  
H → He au noyau par p-p, noyau s' enrichit en H

2-3 **contraction du noyau**,  $T_{\gamma}$  augmente,  
H → He continue dans enveloppe

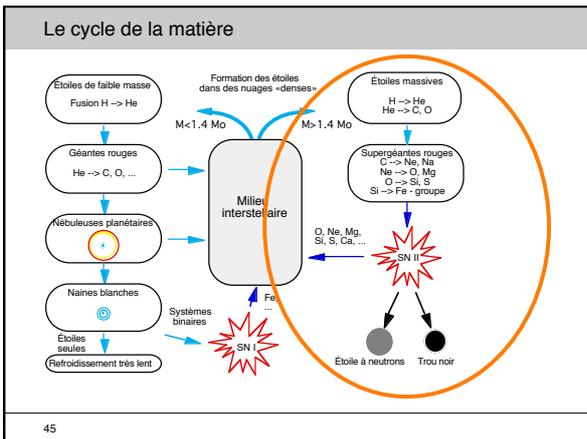
3-5 **vers la géante rouge**  
source d'énergie dans l'enveloppe,  $T_{\text{noyau}}$  augmente,  
enveloppe en expansion,  $T_{\text{surf}}$  diminue ⇒ L ~ const.

5-6 **contraction gravitationnelle du noyau fait augmenter**  
 $T_{\text{noyau}}$  jusque  $T_{\text{noyau}} \sim 10^8 \text{K}$ ,  $R_{\text{enveloppe}}$  et L **augmentent**

6 **flash hélium**  
processus  $3\alpha$  au noyau (He → C)  
expansion du noyau diminue combustion de l'H dans enveloppe,  $R_{\text{enveloppe}}$  et L diminuent

7-10 **processus  $3\alpha$  d'abord dans le noyau, plus tard**  
deux couches de combustion : H → He, processus  $3\alpha$  ...

La Terre dans l'Univers 44



### Evolution stellaire : Supergéantes

→ contraction  
→ augmentation de la température et de la densité du cœur :

**combustion du carbone  $T > 8 \cdot 10^8 \text{K}$**   
(après épuisement de la combustion de l'He -  
les noyaux prédominants (qui sont le C et le O ) prennent le relais

$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$$

**combustion de l'oxygène**

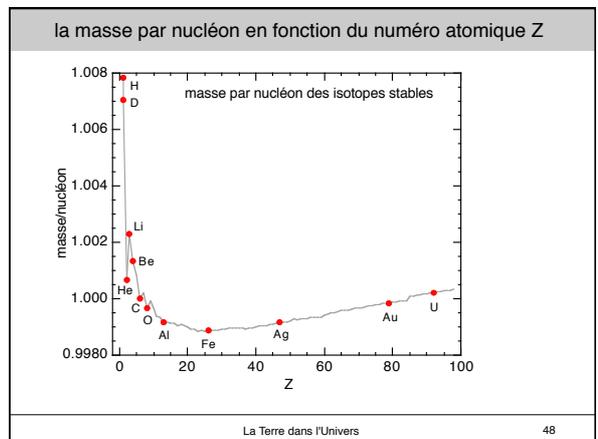
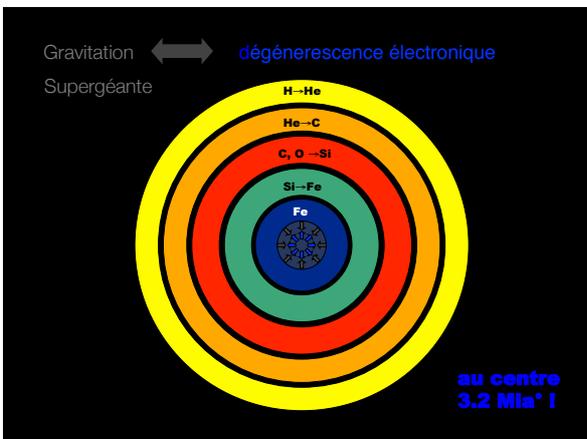
$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{32}\text{S} + \gamma \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$$

**combustion du silicium**

$$^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni} + \gamma$$

$$^{56}\text{Ni} \text{ (CE } t_{1/2} = 6.4 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Co} \text{ (} t_{1/2}^* = 77.3 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$$

46 La Terre dans l'Univers



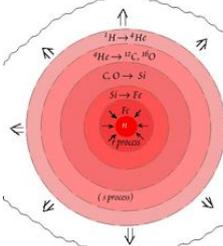
Evolution stellaire : Supernova 1987A



© Anglo-Australian Observatory

La Terre dans l'Univers 49

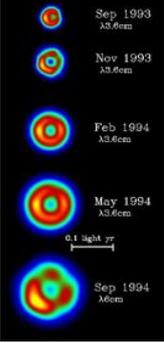
Evolution stellaire : Supernova !



$^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni}$   
 $^{56}\text{Ni} \text{ (CE } t_{1/2}=6.4 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Co} \text{ (}\beta^+ t_{1/2}=77.3 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$   
 à  $T > 3 \cdot 10^9 \text{ K} \Rightarrow$  nouvelles **pertes d'énergie** :  
**photodésintégration** à  $T \approx 5 \cdot 10^9 \text{ K}$   
 $\gamma + ^{56}\text{Fe} \rightarrow 13^4\text{He} + 4 \text{ n} + 2.2 \text{ MeV/nuc}$   
**production de paires**  
 $\gamma \rightarrow e^- + e^+$   
**échappement de neutrinos**  
 $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$   
 $e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$  (branchement  $10^{-20}$ )

La Terre dans l'Univers 50

Evolution stellaire : Supernova !



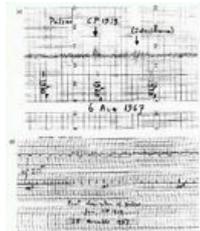
Sep 1993  $\lambda 3.6 \mu\text{m}$   
 Nov 1993  $\lambda 3.6 \mu\text{m}$   
 Feb 1994  $\lambda 3.6 \mu\text{m}$   
 May 1994  $\lambda 3.6 \mu\text{m}$   
 Sep 1994  $\lambda 6 \mu\text{m}$   
 0.1 light yr

$\Rightarrow$  refroidissement devient effet volumique !  
 $\Rightarrow$  noyau en contraction rapide  
 capture des  $e^-$  par les protons  
 $p + e^- \rightarrow n + \nu$   
 processus inverse n'a pas lieu : les  $\nu$  s'échappent  
 les **neutrons** interagissent avec les **noyaux** présents pour former les **éléments plus lourds que le fer**  
 $\rightarrow$  la **matière est éjectée** dans l'espace interstellaire

2 La Terre dans l'Univers 51

découverte de la matière neutronique

découverte du pulsar CP1919 (période  $T=1.333 \text{ s}$ ) en 1967 par Bell, Hewish avec le radiotélescope de Cambridge

52 La Terre dans l'Univers

Crabe  
nébuleuse du pulsar



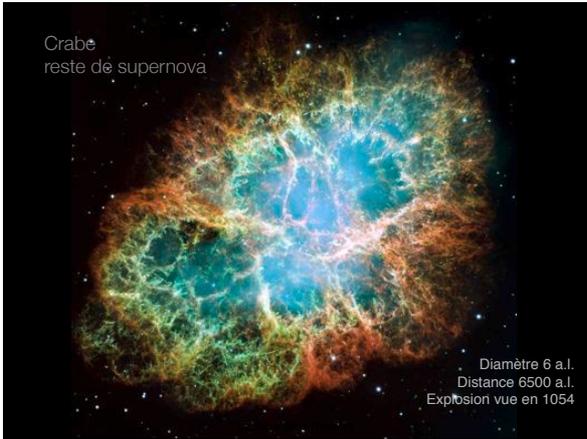
La Terre dans l'Univers

effondrement d'une étoile massive - supernova type II

```

    Effondrement du noyau
    ↓
    Chute libre
    ↓
    Rebondissement du cœur
    ↓
    Onde de choc
    ↓
    L'étoile se sépare en deux
    /      \
  Implosion  Explosion
  /         \
Le noyau   Les restes
 /         \
< 2.5 Mo  > 2.5 Mo
Étoile à neutrons  Trou noir
  
```

54 La Terre dans l'Univers



### Supernova de 1054

Visible en journée pendant 23 jours !

orion  
lune  
supernova  
pléiades

Pétroglyphes indiens relatant l'événement

La Terre dans l'Univers 56

