

**L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE**  
Le rôle des supernovae

Lausanne et Genève, 3-4 mai 2006

# Combien d'eau pour la planète Terre?

**Michel Grenon**  
Observatoire de Genève

L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE  
Le rôle des supernovae

**Le bon ordre des choses :**  
des océans, des terres émergées,  
des fleuves et des lacs



La Terre vue par Appollo 17

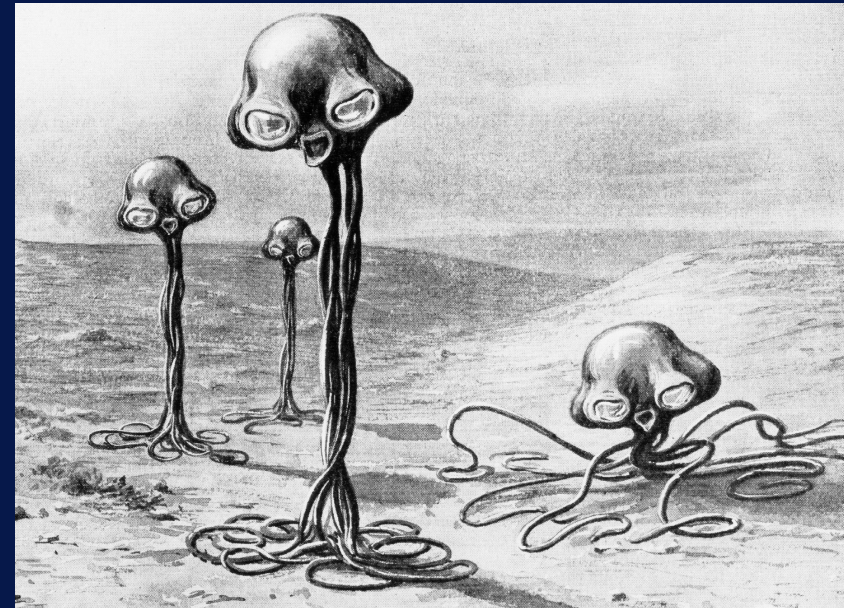


Le Baptême du Christ (Montreale)

L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE  
Le rôle des supernovae

# Mars, une planète rouge

avec océans. fleuves et continents



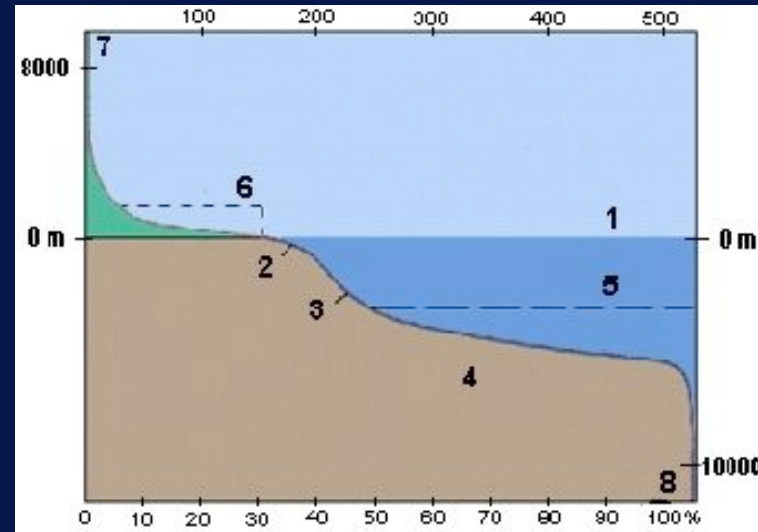
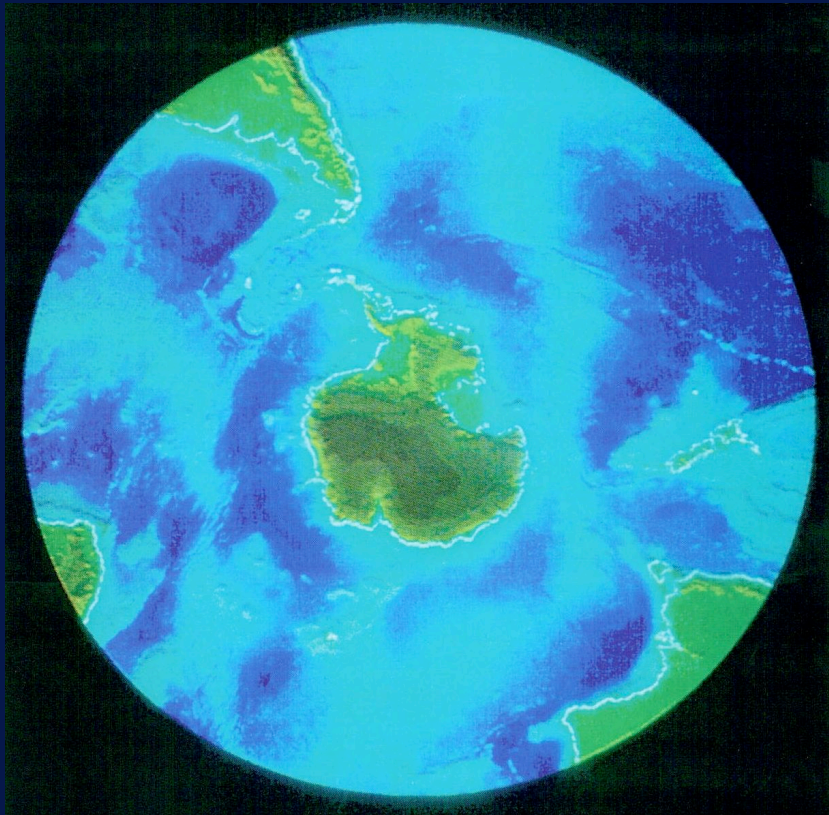
Martiens de Wells (1897)

Paysages de Mars pour Flammarion (1884)

L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE  
Le rôle des supernovae

# Océans et continents :

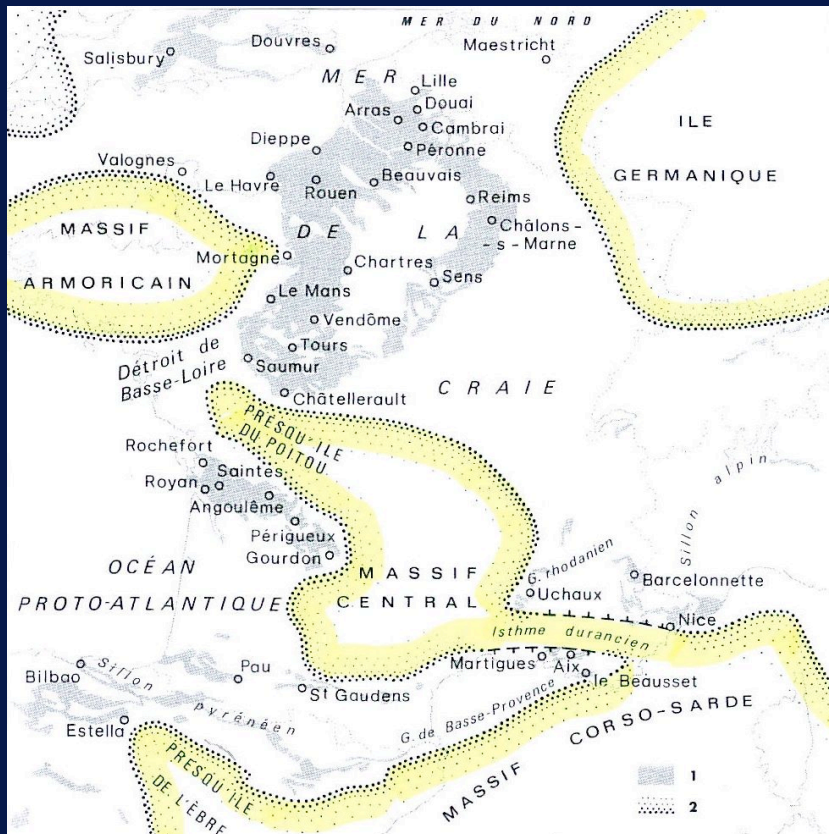
un équilibre subtil entre érosion et surrection



**Surface :**  
continents : 29.2 % ; océans : 70.8 %  
**Altitudes moyennes :**  
continents : +840 m ; océans : -3710 m  
**Epaisseur moyenne de l'eau : 2.4 km**  
**Continents régénérés par la tectonique**  
**(moteur : isotopes radioactifs  $^{40}\text{K}$  ...**

# Transgressions marines

des marges continentales fragiles



**Au Crétacé supérieur (-100 Ma)**

- une expansion océanique rapide
- un taux de CO<sub>2</sub> 12x plus élevé

Élévation majeure du niveau des océans

**L'Europe est noyée jusqu'à l'Oural  
sauf trois îles**

L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE  
Le rôle des supernovae

# L'eau

une molécule surabondante



Le nuage moléculaire Barnard 68, imagé par le VLT Antu 8.2m

**H<sub>2</sub>O condense en givre amorphe dans les nuages moléculaires de basse T (30°K)**

La condensation d'eau lourde est favorisée:

**60 x plus d'HDO à 30°K que dans un milieu à l'équilibre à T ≥ 500 °K :**



**La masse d'H<sub>2</sub>O égale celle des silicates**

Pour la Terre, sans tri chimique :

**Épaisseur océanique de 900 km !**

- Pas de continents
- Planète et vie (?) océanes

# La naissance

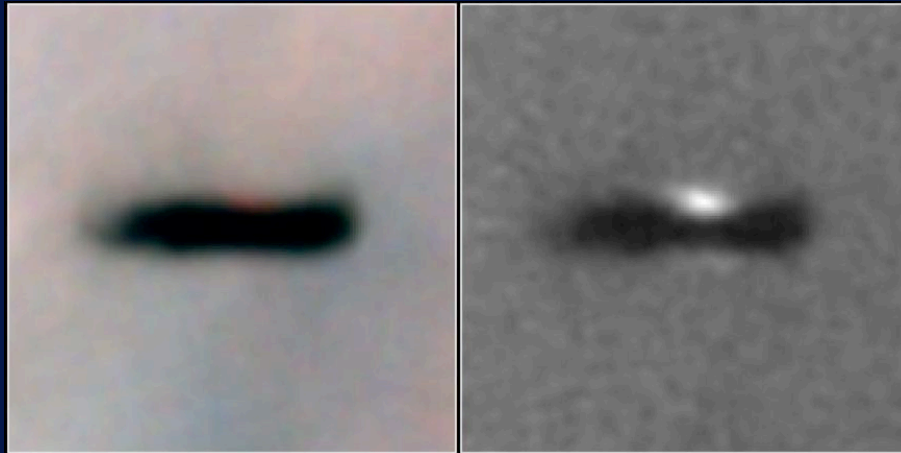
des systèmes planétaires



**La Nébuleuse d'Orion, à 1500 AL :**  
**une pouponnière d'étoiles et planètes**

- 157 disques protoplanétaires visibles en absorption, sur fond lumineux
- disques épais, opaques au rayonnement UV et visible
- 98% H et He
- 2% de grains et molécules produits par les SNe en 10 Ga

# La condensation verticale



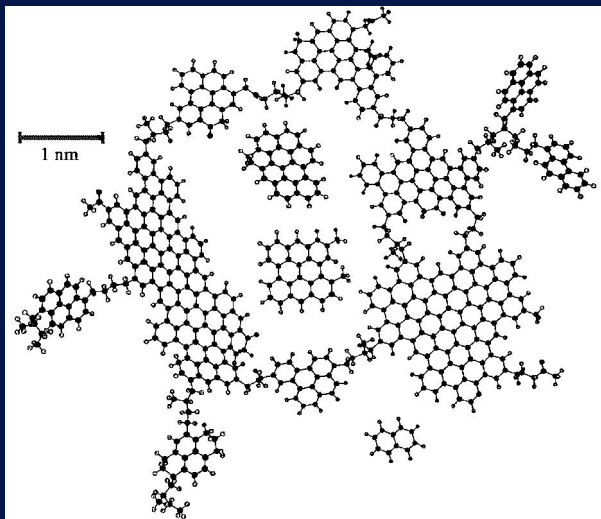
## Physique des disques

Epaisseur :  $H \sim 0.1$  Rayon

Extension :  $R \sim 50 - 100$  UA

Masse :  $M \sim 0.1 - 1.0 M_{\odot}$

Température :  $T$  de 2000 K à  $\sim 40$  K



## Sédimentation des grains

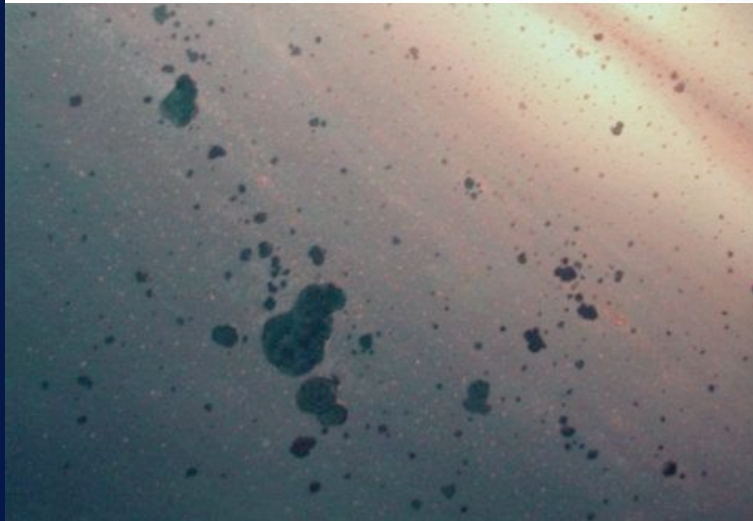
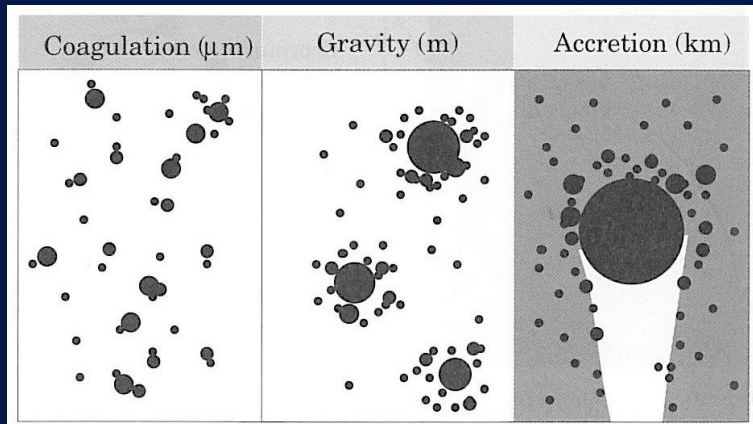
Gaz est en équilibre hydrostatique, supporté par des gradients de  $P$  et de  $T$ .

Chute libre des solides vers la plan du disque, // à l'axe de rotation, en avalanche de "neige noire". Les gros flocons tombant plus vite cannibalisent les plus petits.

Par **floculation** la taille passe de 10 à 100  $\mu\text{m}$

# Des agrégats aux planétésimes

dans le plan du disque



## Accroissement par coagulation

Le gaz, visqueux, tourne moins vite que les solides autour du Soleil (60m/s à 1 UA). Les agrégats les plus massifs, moins freinés, agglutinent les plus petits. L'accroissement de taille est rapide:

- 1cm à 100 m en quelques 1000 a

## Accroissement par collisions

A partir de 100 m, la gravitation induite par les agrégats eux-mêmes devient le facteur de croissance dominant. Le diamètre des agrégats atteint :

- 10 km en  $10^4$  a, 1000 km en  $10^5$  a.

Ces corps sont les **planétésimes**.

Il faut 2000 planétésimes de 1000 km pour former une Terre!

# L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE

## Le rôle des supernovae

# Le tri des éléments chimiques

**Composés réfractaires** Métaux et oxydes Fe, Ni, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, condensables partout. A l'origine des planètes telluriques et des noyaux des planètes géantes.

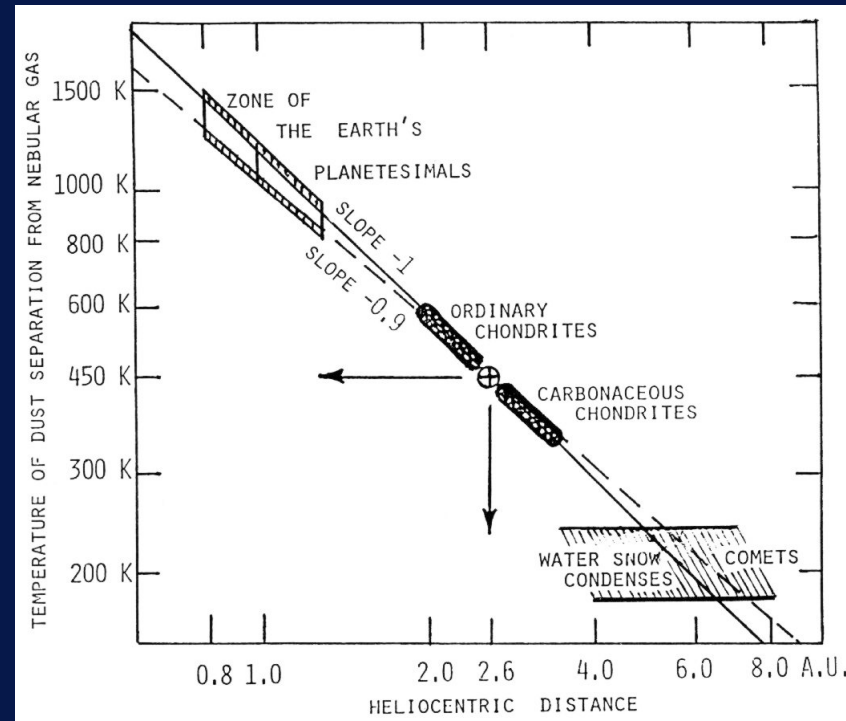
**Carbonates, sulfures, composés organiques** condensables au delà de l'orbite de Mars, à plus de 2 UA.

**H<sub>2</sub>O** givre au delà de 5.2, puis 2.6 UA.

**H et He** gazeux à toute distance.

**Zone de formation de la Terre :**

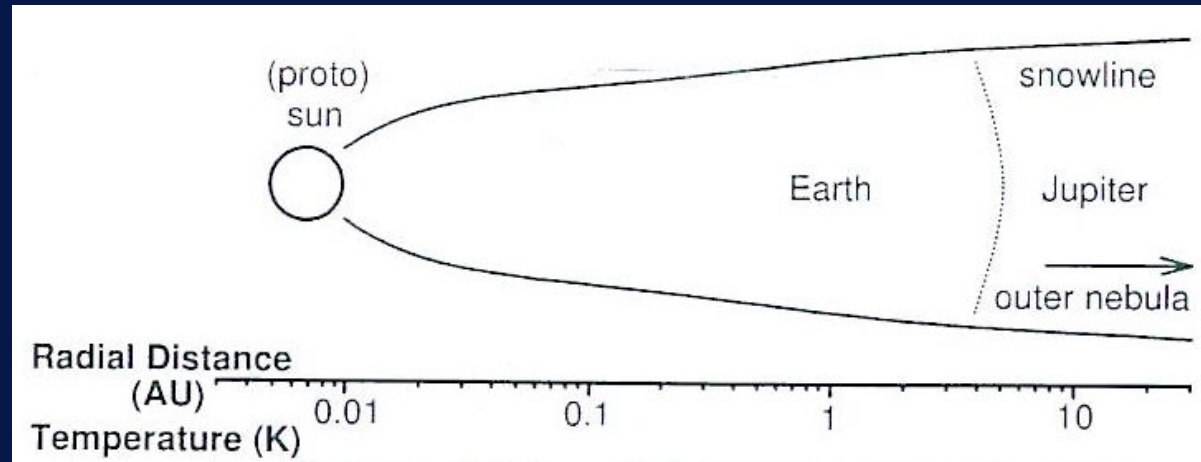
**Matière non-hydratée, dégazée avant son inclusion dans les planétésimes.**



Refractaires : \*\*\*\*\*  
Carbonates : \*\*\*\*\*  
Givre H<sub>2</sub>O : \*\*\*\*\*

# La nébuleuse protoplanétaire

## et la limite des neiges



Gradient de T : 1500°K	600°K	60°K
Gradient de P : $4 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-8}$ bar

Deux régimes pour H<sub>2</sub>O vapeur :

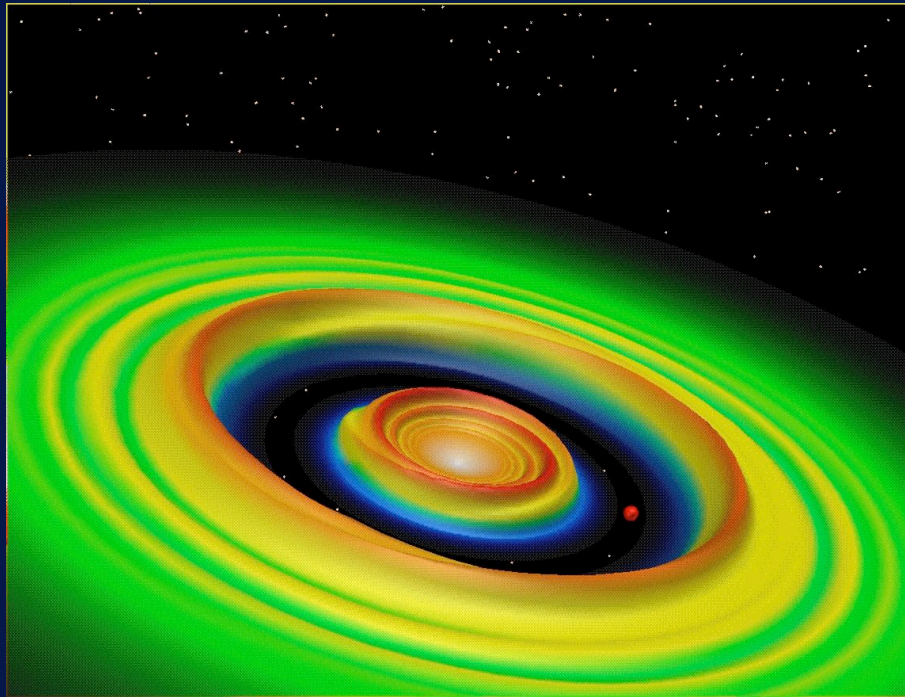
Dissociée, forme des oxydes  
FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  
H<sub>2</sub> non condensable, perdu

Givre sur les grains,  
hydrate les silicates de Mg  
en Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> (serpentine)  
et Mg(OH)<sub>2</sub> (brucite)

Planétésimes avec glace 3x plus massifs que les secs. Jupiter formée à la limite des neiges.

# La formation

des embryons de Jupiter et des planètes



Après sédimentation des grains dans le plan et formation des planétésimes

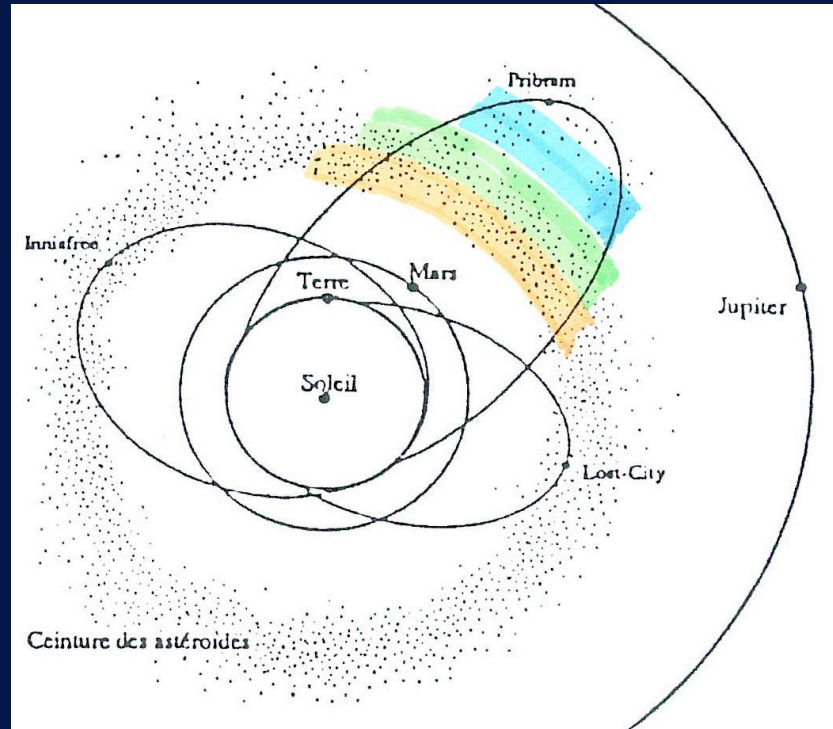
- perturbation gravitationnelle du disque
- formation de l'embryon le plus massif
- formation d'un vide et d'ondes de matière
- formation de deux planètes adjacentes si les vitesses relatives le permettent

Terre formée en 40 Ma

Nébuleuse dissipée en 20 Ma

# La planète avortée

la ceinture des astéroïdes



Orbites des planétésimes entre Mars et Jupiter perturbées par la masse de Jupiter. A grande excentricité, les vitesses relatives des planétésimes excèdent la vitesse de rupture en cas de collision (1 km/s).

Au lieu de former une planète entre Mars et Jupiter, les planétésimes se sont détruits par collision. La ceinture des astéroïdes est formée en majorité de leurs débris.

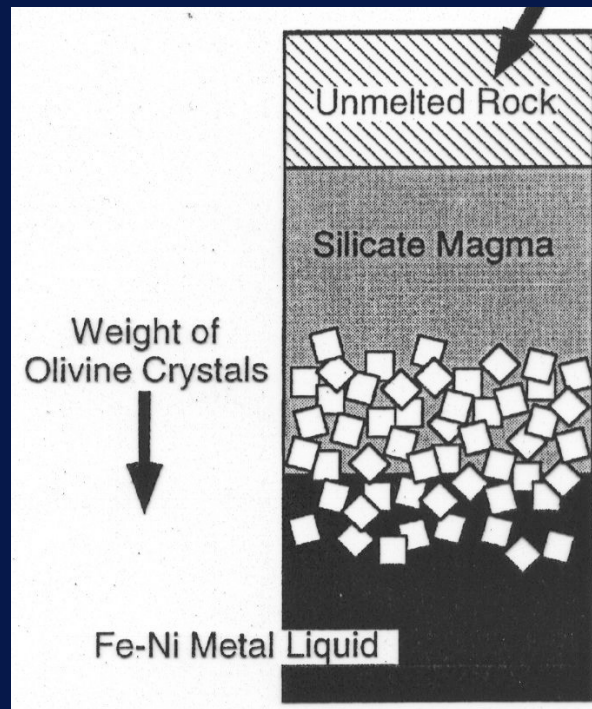
Fragments défléchis vers l'intérieur, dont la Terre, et l'extérieur du système solaire.

Susceptibles de transporter l'eau.

220'000 astéroïdes connus, dont 50'000 de taille  $\geq 1$  km.

# La différenciation

des planétésimes de la zone interne (2.5 UA)



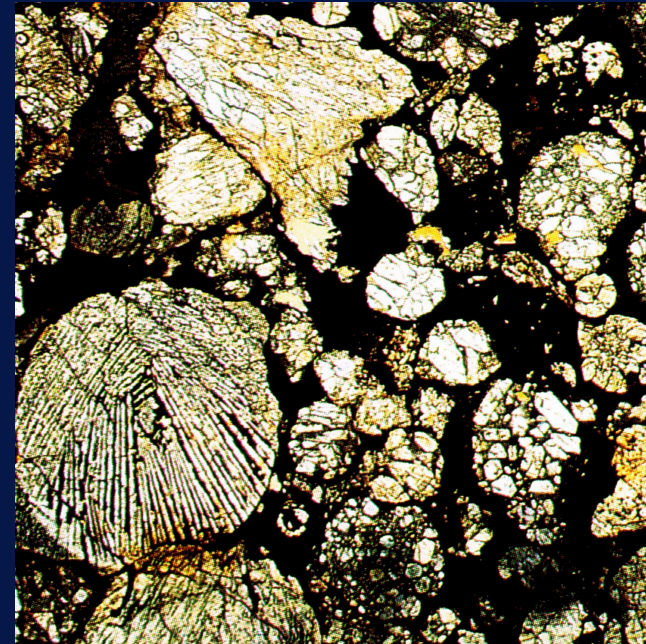
Fusion partielle, ou totale, des planétésimes de la ceinture principale ( $\leq 2.5$  UA), de diamètre supérieur à 120 km, par l'énergie de fission d'isotopes de courte vie :



- plongée par gravité de Fe, Ni et éléments sidérophiles
- montée des éléments lithophiles
- noyau métallique et manteau rocheux
- interface métal-roches avec olivine  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$
- régolithe possible en surface
- perte des volatiles



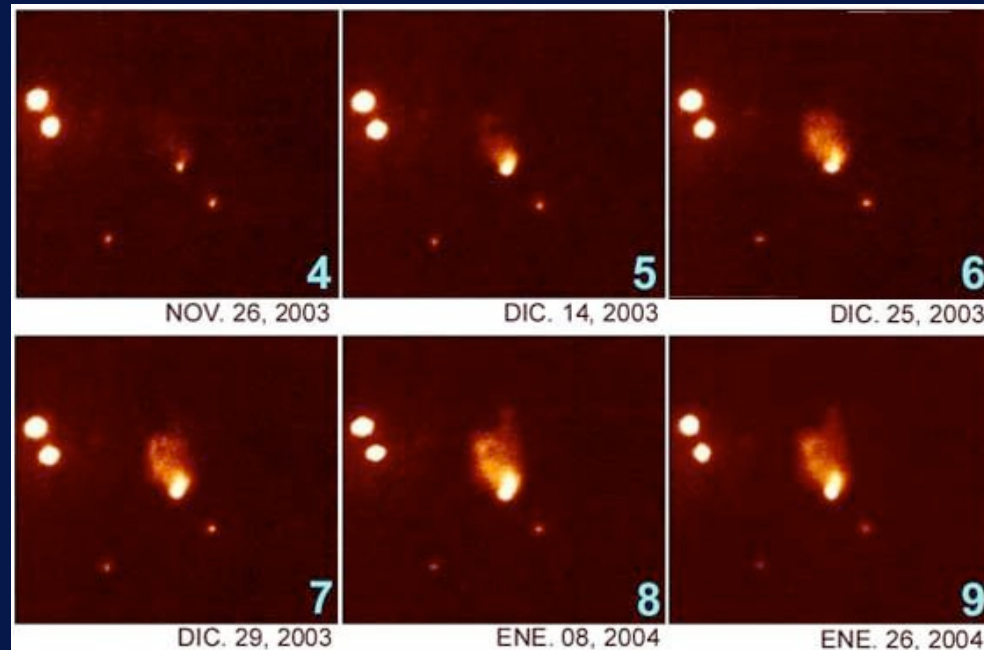
## Chondrites et chondrules



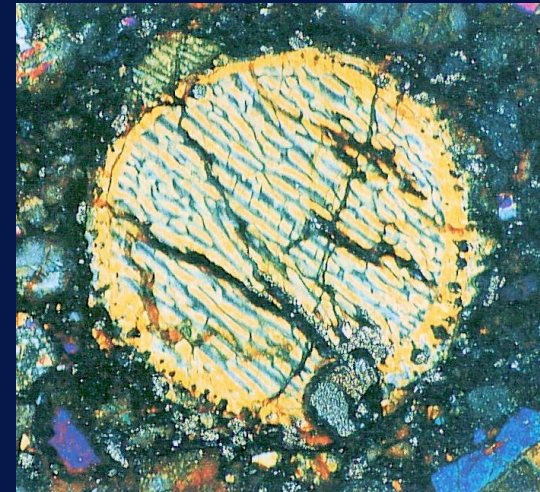
Astéroïdes chondritiques : agrégats de roches et métaux, avec inclusion de sphérules métamorphiques (chondrules) fondues, vitrifiées, cristallines et d'éléments brisés, le tout lié par une matrice microcristalline, avec ou sans minéraux hydratés. Membres de la ceinture externe.

Les inclusions les plus primitives (CAIs) datent de  $4576.2 \pm 0.6$  Ma. Elles donnent l'âge 0 du disque.

# Eruptions et chondrules



Une éruption de FU Ori à fin 2003

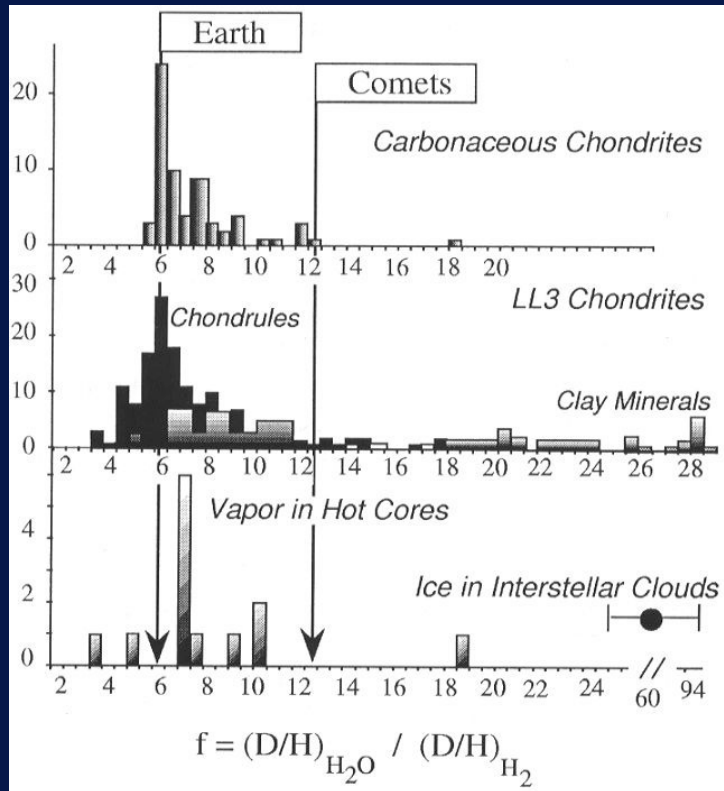


Durant les éruptions du Soleil primitif (phase FU Ori), des agrégats de roches et métaux sont fondus à haut T (1600°C), puis cristallisés.

**Episodes entre -4563 et -4561 Ma**

# L'eau lourde

## et l'origine de l'eau sur Terre



Le rapport  $[D/H]$  dans l'eau relativement au gaz  $H_2$ .

Dans les zones chaudes de la nébuleuse la vapeur d'eau lourde HDO échange D contre H. Le rapport  $[D/H]$  baisse vers le centre

La valeur de  $[D/H]$  repère la distance au Soleil de condensation des corps.

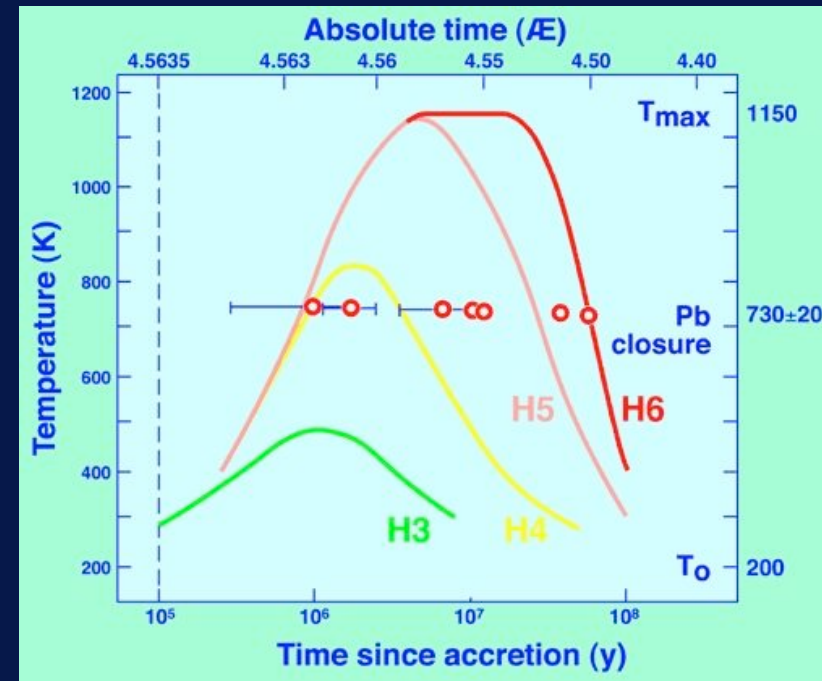
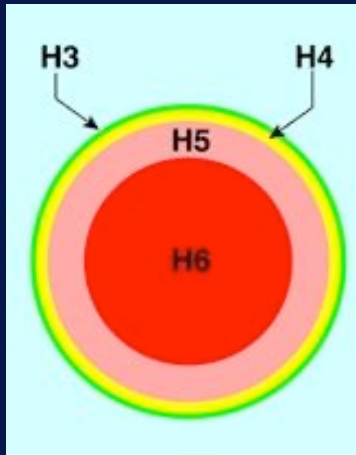
Sur Terre,  $[D/H]$  vaut 6 x celui du Soleil et du centre de la nébuleuse.

**L'eau sur Terre est donc exotique.**

$[D/H]$  et les % de gaz  $CO_2$  et  $N_2$  donnent une origine pour l'eau sur Terre de :

- 97% par les météorites chondritiques
- 3% par les comètes.

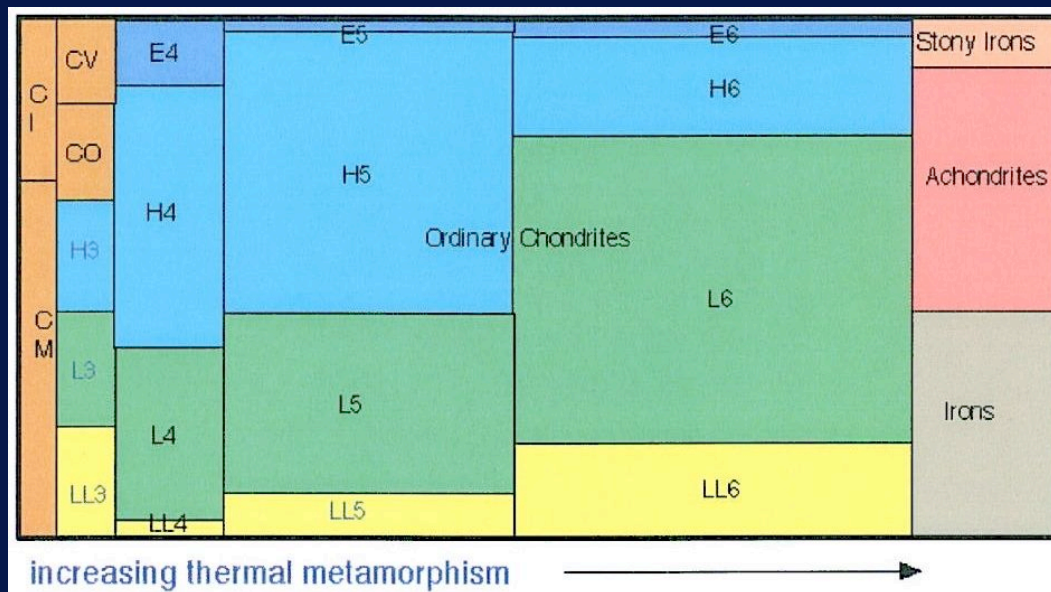
# Le métamorphisme des chondrites



Les planétésimes chondritiques sont chauffés par fission nucléaire. Les T atteintes et la durée de la phase chaude dépendent de la taille et de la profondeur. Les cristaux de feldspath se ferment quand T passe sous 730°K. L'âge radiométrique est celui de la "fermeture" (les particules filles restent avec les mères eg. <sup>26</sup>Mg avec <sup>26</sup>Al).

Les débris des planétésimes donnent des météorites de type H3, H4, H5, H6 selon la profondeur d'origine, à teneur en eau décroissante.

# Le chauffage des astéroïdes et l'eau résiduelle



Le dégazage des volatiles  $H_2O$ ,  $CO$  est nul sans chauffage, total à haute  $T$

3% des météorites ont entre 10.5 et 17% d'eau (en masse)

6% ont entre 3 et 0.5% d'eau

38% ont moins de 0.5% d'eau

57% sont sans eau ni gaz

Sans métamorphisme des chondrites, par radioactivité et collisions :

~15x plus d'eau sur Terre, soit 36 km au lieu de 2.4 km

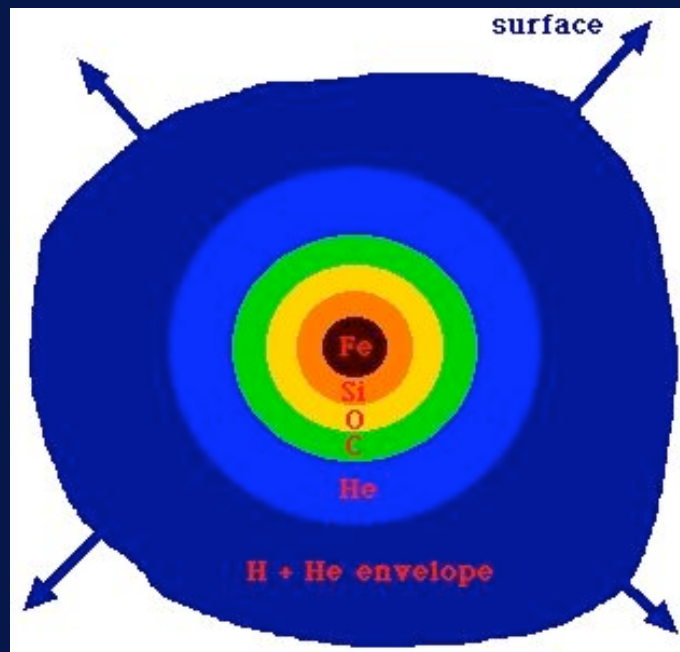
11% 1.5%

≤0.5%

0% d' $H_2O$ /masse

# Le progéniteur

des éléments  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Fe}$



De vieux atomes pour un jeune système solaire  
créés par le SNe durant les 5 milliards d'années  
précédant la naissance du Soleil :

âge moyen : 2.5 Ga

Isotopes de courte vie :

$^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Fe}$   
0.72, 0.30, 0.10, 1.50 Ma

tous éteints!

Etoile massive, stade PRE-SUPERNOVA

L'injection d'une fraction :

$f_i = 1/20000$

de sa coquille externe dans la nébuleuse solaire  
fournit les abondances initiales en isotopes de  
courte vie si la matière est émise :

environ 0.9 Ma

avant la formation des grains dans le disque.

# Un équivalent contemporain :

WR 136 et la nébuleuse du Croissant



Emission d'une enveloppe

âge = 250000 a

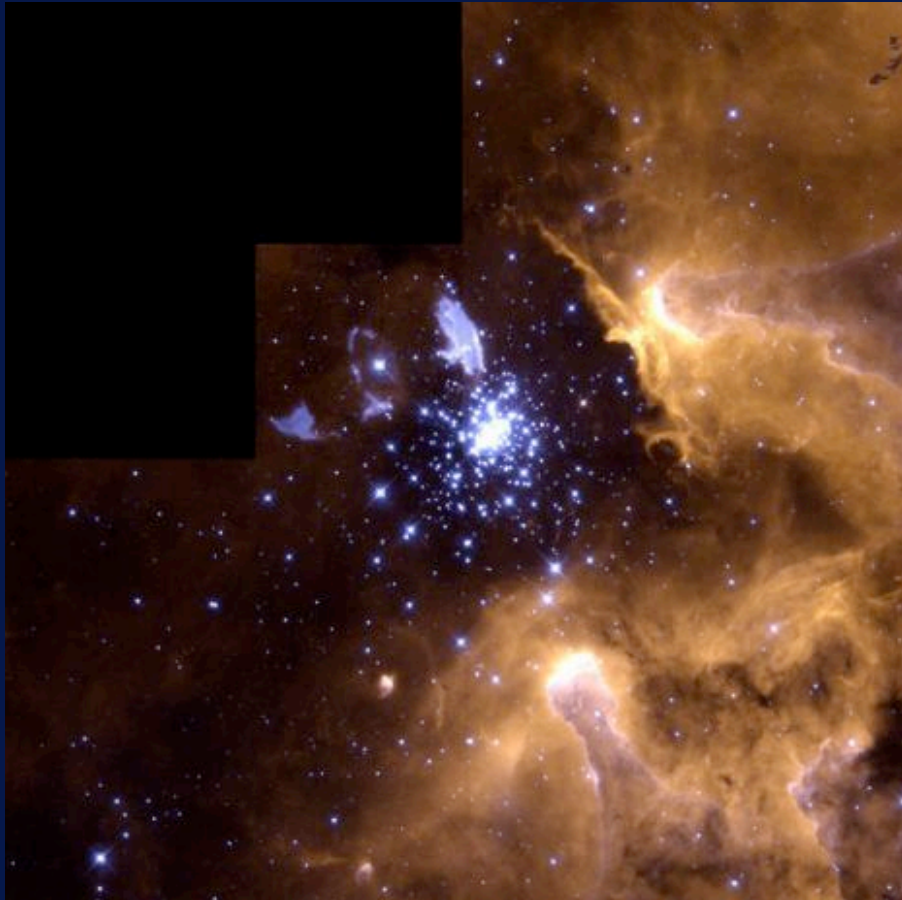
L'étoile centrale devenue une Wolf-Rayet perd sa masse sous forme de vent de particules au rythme de :

$1 M_{\odot}/10000 \text{ a}$

Explosion SN dans  $\leq 1 \text{ Ma}$

# Une situation comparable

l'amas NGC 3603 et l'étoile Sher 25



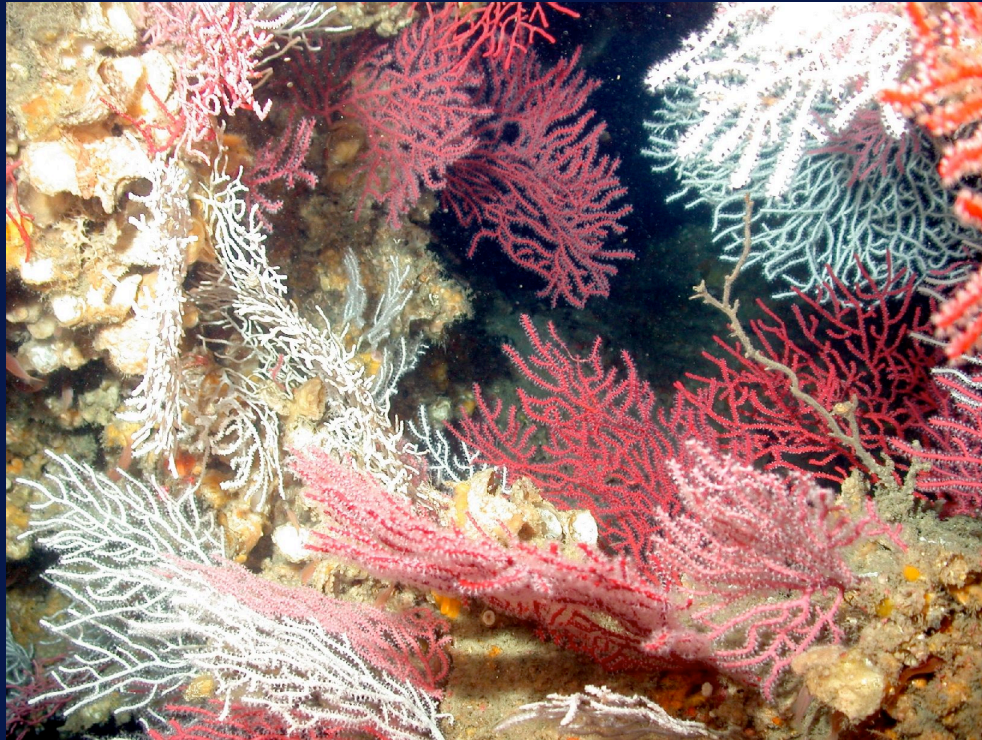
Le flux UV des étoiles massives de l'amas NGC 3603 a créé une cavité dans le nuage moléculaire d'origine

La formation stellaire se poursuit sur les bords, dans les piliers et les globules de Bok

L'étoile Sher 25, en phase pré-SN, émet des coquilles qui vont polluer nucléairement le gaz résiduel

L'explosion de la SN favorisera la condensation en étoiles.

# Une contamination nucléaire bien dosée



## Si l'étoile pré-Supernova

- avait émis son enveloppe  
1.5 Ma plus tôt
- ou avait été située 2x plus loin

Pollution nucléaire 4x plus faible  
 $\geq$  4x plus d'eau sur Terre

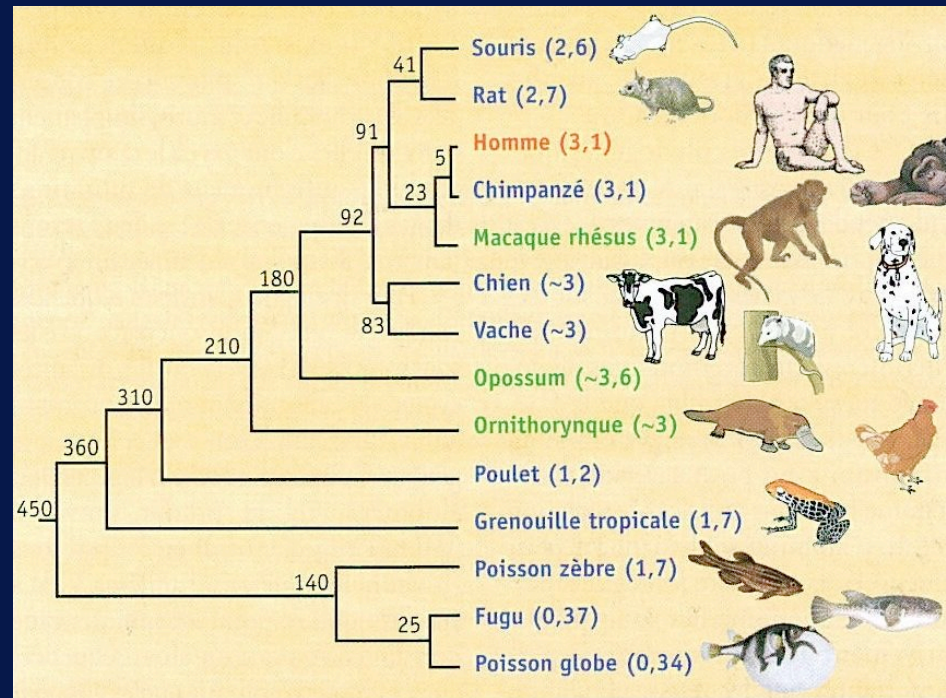
Vie éventuelle confinée dans les  
océans

L'émergence de la vie sur les  
continents résulte d'un heureux  
accident nucléaire

L'HISTOIRE DE L'EAU SUR TERRE  
Le rôle des supernovae

# La Supernova de -4'575'000

à l'origine des organismes continentaux



La phylogénie de l'homme (taille du génome en Gb)

Grace à SN -4'575'000

Plantes et animaux conquièrent les continents dès le Cambrien (-550 Ma).

La lignée de l'homme se sépare de celle des poissons vers -450 Ma, de celle des rats vers -91 Ma.

Nous pouvons célébrer le

1000<sup>e</sup> anniversaire

de SN 1006