

L'eau dans l'Univers : du Big-bang à votre verre

Histoire d'eau et de poussière

François Sibille

Académie des Sciences, Belles-lettres et Arts de Lyon

Association Sélééné

Stage- Observatoire

16 mars 2016

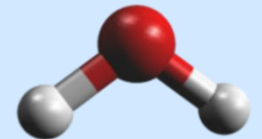


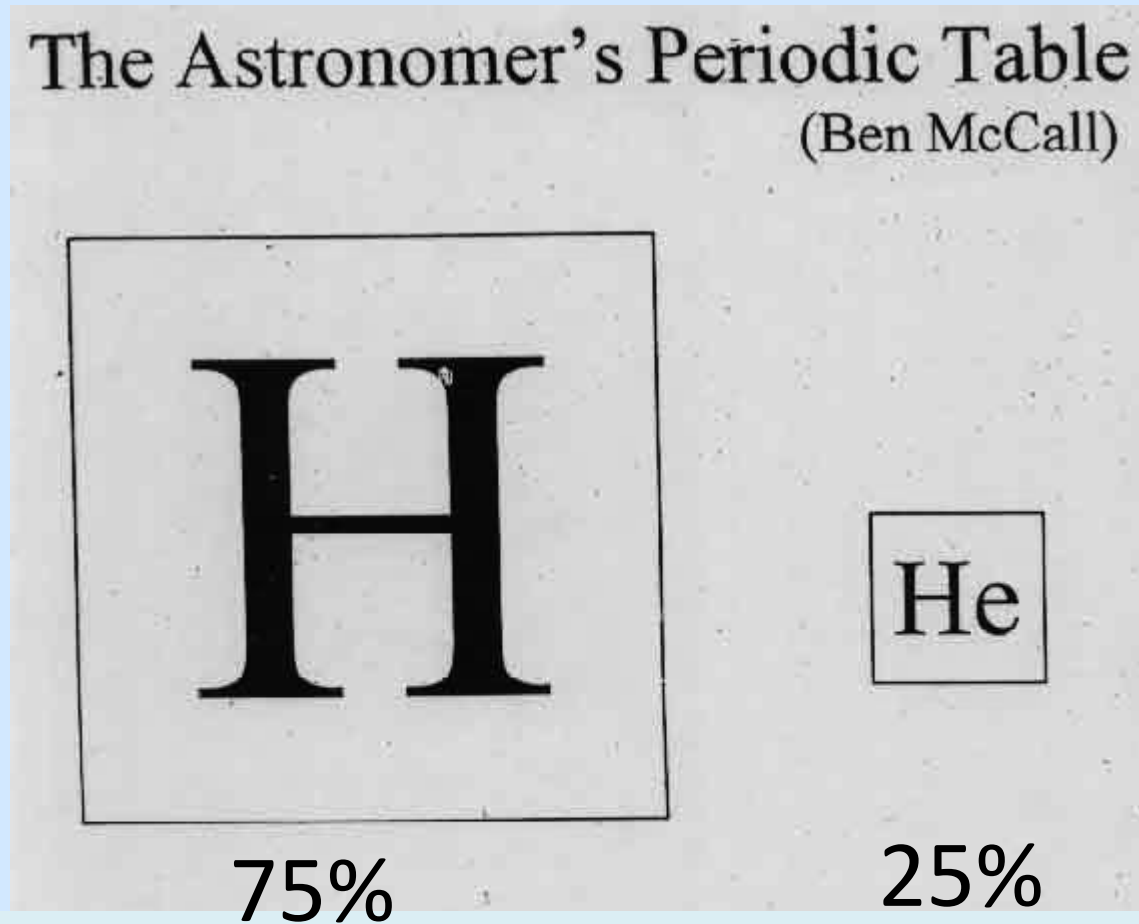
TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

| 1 | IA | | | | | | | | | | | 18 | VIIIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------------------|----|------------------|----|-----------------|-----|----------------------|-----|---------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|---------------------|-----|-------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|-------------------|
| 1 | 1,00794 | | | | | | | | | | | 2 | 4,0026 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H | <i>Hydrogène</i> | | | | | | | | | | | He | <i>Hélium</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 6,941 | 4 | 9,01218 | | | | | | | | | | | 10 | 20,1797 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | <i>Lithium</i> | Be | <i>Béryllium</i> | | | | | | | | | | | Ne | <i>Neon</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 22,9898 | 12 | 24,305 | | | | | | | | | | | 18 | 39,948 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na | <i>Sodium</i> | Mg | <i>Magnésium</i> | | | | | | | | | | | Ar | <i>Argon</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 39,0983 | 20 | 40,078 | 21 | 44,9559 | 22 | 47,867 | 23 | 50,9415 | 24 | 51,9961 | 25 | 54,9380 | 26 | 55,845 | 27 | 58,9332 | 28 | 58,6934 | 29 | 63,546 | 30 | 65,38 | 31 | 69,723 | 32 | 72,63 | 33 | 74,9216 | 34 | 78,96 | 35 | 79,904 | 36 | 83,798 |
| K | <i>Potassium</i> | Ca | <i>Calcium</i> | Sc | <i>Scandium</i> | Ti | <i>Titane</i> | V | <i>Vanadium</i> | Cr | <i>Chrome</i> | Mn | <i>Manganèse</i> | Fe | <i>Fer</i> | Co | <i>Cobalt</i> | Ni | <i>Nickel</i> | Cu | <i>Cuivre</i> | Zn | <i>Zinc</i> | Ga | <i>Gallium</i> | Ge | <i>Germanium</i> | As | <i>Arsenic</i> | Se | <i>Sélénium</i> | Br | <i>Brome</i> | Kr | <i>Krypton</i> |
| 37 | 85,4678 | 38 | 87,62 | 39 | 88,9058 | 40 | 91,224 | 41 | 92,9064 | 42 | 95,96 | 43 | [98] | 44 | 101,07 | 45 | 102,905 | 46 | 106,42 | 47 | 107,868 | 48 | 112,411 | 49 | 114,818 | 50 | 118,71 | 51 | 121,76 | 52 | 127,6 | 53 | 126,905 | 54 | 131,293 |
| Rb | <i>Rubidium</i> | Sr | <i>Strontium</i> | Y | <i>Yttrium</i> | Zr | <i>Zirconium</i> | Nb | <i>Niobium</i> | Mo | <i>Molybdène</i> | Tc | <i>Technétium</i> | Ru | <i>Ruthénium</i> | Rh | <i>Rhodium</i> | Pd | <i>Palladium</i> | Ag | <i>Argent</i> | Cd | <i>Cadmium</i> | In | <i>Indium</i> | Sn | <i>Étain</i> | Sb | <i>Antimoine</i> | Te | <i>Tellure</i> | I | <i>Iode</i> | Xe | <i>Xénon</i> |
| 55 | 132,905 | 56 | 137,327 | | | 72 | 178,49 | 73 | 180,948 | 74 | 183,84 | 75 | 186,207 | 76 | 190,23 | 77 | 192,217 | 78 | 195,084 | 79 | 196,967 | 80 | 200,59 | 81 | 204,383 | 82 | 207,2 | 83 | 208,98 | 84 | [209] | 85 | [210] | 86 | [222] |
| Cs | <i>Césium</i> | Ba | <i>Baryum</i> | | | Hf | <i>Hafnium</i> | Ta | <i>Tantale</i> | W | <i>Tungstène</i> | Re | <i>Rhénium</i> | Os | <i>Osmium</i> | Ir | <i>Iridium</i> | Pt | <i>Platine</i> | Au | <i>Or</i> | Hg | <i>Mercure</i> | Tl | <i>Thallium</i> | Pb | <i>Plomb</i> | Bi | <i>Bismuth</i> | Po | <i>Polonium</i> | At | <i>Astato</i> | Rn | <i>Radon</i> |
| 87 | [223] | 88 | [226] | | | 104 | [266] | 105 | [268] | 106 | [269] | 107 | [270] | 108 | [269] | 109 | [278] | 110 | [279] | 111 | [281] | 112 | [285] | 113 | [284] | 114 | [289] | 115 | [288] | 116 | [293] | 117 | [294] | 118 | [294] |
| Fr | <i>Francium</i> | Ra | <i>Radium</i> | | | Rf | <i>Rutherfordium</i> | Db | <i>Dubnium</i> | Sg | <i>Seaborgium</i> | Bh | <i>Bohrium</i> | Hs | <i>Hassium</i> | Mt | <i>Moscovium</i> | Ds | <i>Darmstadtium</i> | Rg | <i>Röntgenium</i> | Cn | <i>Copernicium</i> | Uut | <i>Ununtrium</i> | Fl | <i>Flerovium</i> | Uup | <i>Ununpentium</i> | Lv | <i>Livermorium</i> | Uus | <i>Ununseptium</i> | Uuo | <i>Ununoctium</i> |
| | | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 57 | 138,906 | 58 | 140,116 | 59 | 140,908 | 60 | 144,242 | 61 | [145] | 62 | 150,36 | 63 | 151,964 | 64 | 157,25 | 65 | 158,925 | 66 | 162,5 | 67 | 164,930 | 68 | 167,259 | 69 | 168,934 | 70 | 173,054 | 71 | 174,967 | | |
| | | | | La | <i>Lanthane</i> | Ce | <i>Cérium</i> | Pr | <i>Praseodyme</i> | Nd | <i>Néodyme</i> | Pm | <i>Prométhium</i> | Sm | <i>Samarium</i> | Eu | <i>Europium</i> | Gd | <i>Gadolinium</i> | Tb | <i>Terbium</i> | Dy | <i>Dysprosium</i> | Ho | <i>Holmium</i> | Er | <i>Érable</i> | Tm | <i>Thulium</i> | Yb | <i>Ytterbium</i> | Lu | <i>Lutécium</i> | | |
| | | | | 89 | [227] | 90 | 232,038 | 91 | 231,036 | 92 | 238,029 | 93 | [237] | 94 | [244] | 95 | [243] | 96 | [247] | 97 | [247] | 98 | [251] | 99 | [252] | 100 | [257] | 101 | [258] | 102 | [259] | 103 | [262] | | |
| | | | | Ac | <i>Actinium</i> | Th | <i>Thorium</i> | Pa | <i>Protactinium</i> | U | <i>Uranium</i> | Np | <i>Neptunium</i> | Pu | <i>Plutonium</i> | Am | <i>Americium</i> | Cm | <i>Curium</i> | Bk | <i>Berkélium</i> | Cf | <i>Californium</i> | Es | <i>Einsteinium</i> | Fm | <i>Fermium</i> | Md | <i>Mendelevium</i> | No | <i>Nobelium</i> | Lr | <i>Lauréncium</i> | | |

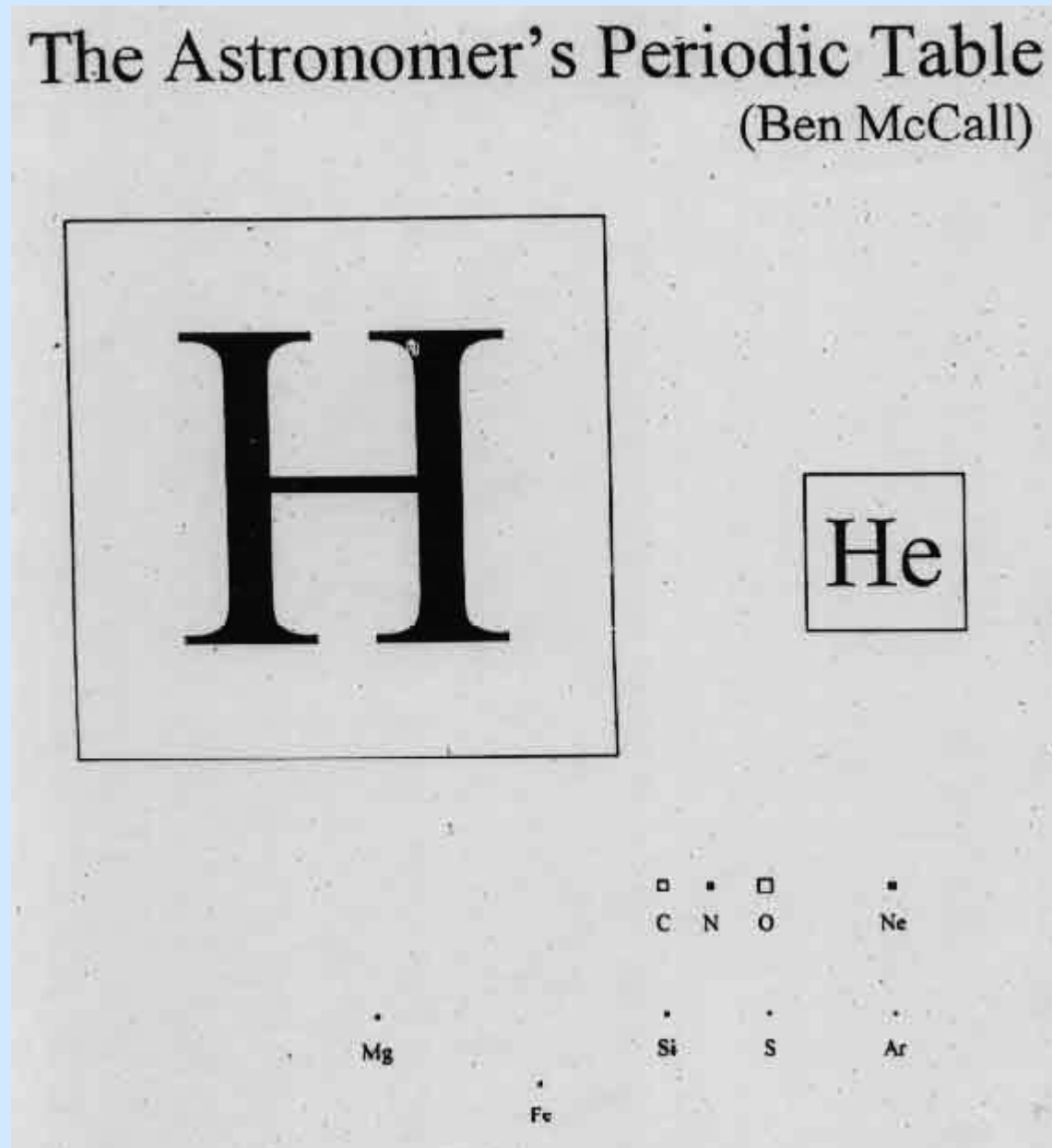
14 IVA
C
Carbone
 SYMBOLE : C
 NOM DE L'ÉLÉMENT : CARBONE
 NUMÉRO ATOMIQUE : 6
 MASSE ATOMIQUE : 12,0107
 GROUPE : 14 (IUPAC) - IVA (CAS)
 PÉRIODE : 2



Tableau périodique des éléments ... juste après le Big-bang ...



... Et après quelques dizaines de millions d'années



... Et après quelques centaines de millions d'années

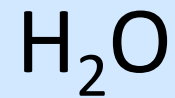
The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)

| | | | | | | |
|----|----|----|---|---|--|----|
| | | □ | ▪ | □ | | ▪ |
| | | C | N | O | | Ne |
| • | | | • | • | | • |
| Mg | | Si | | S | | Ar |
| | • | | | | | |
| | Fe | | | | | |

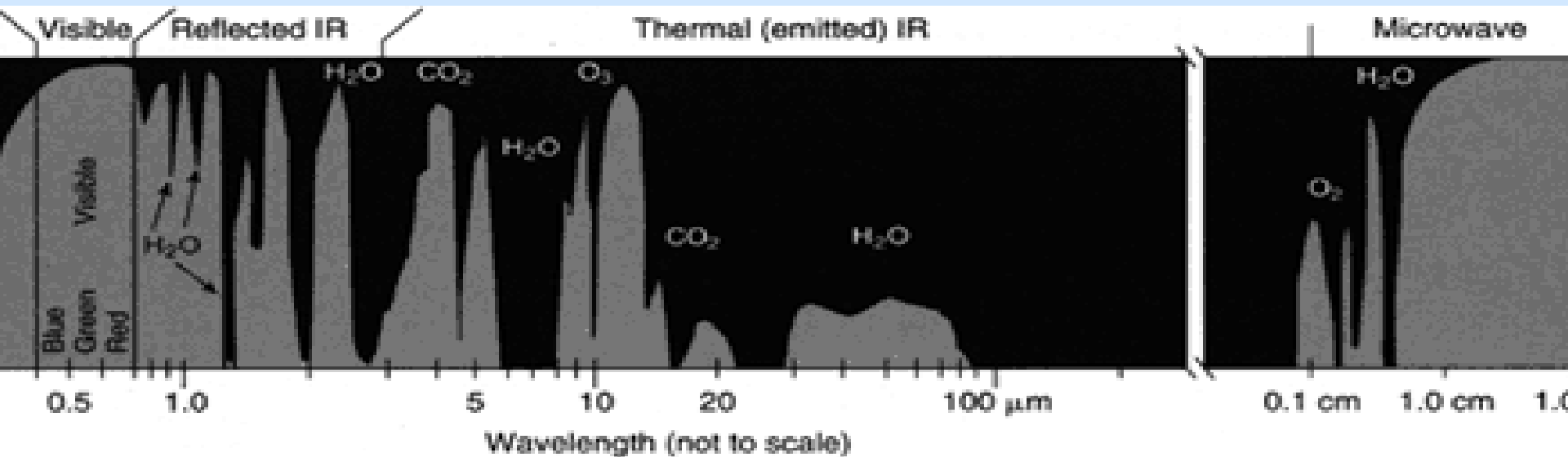
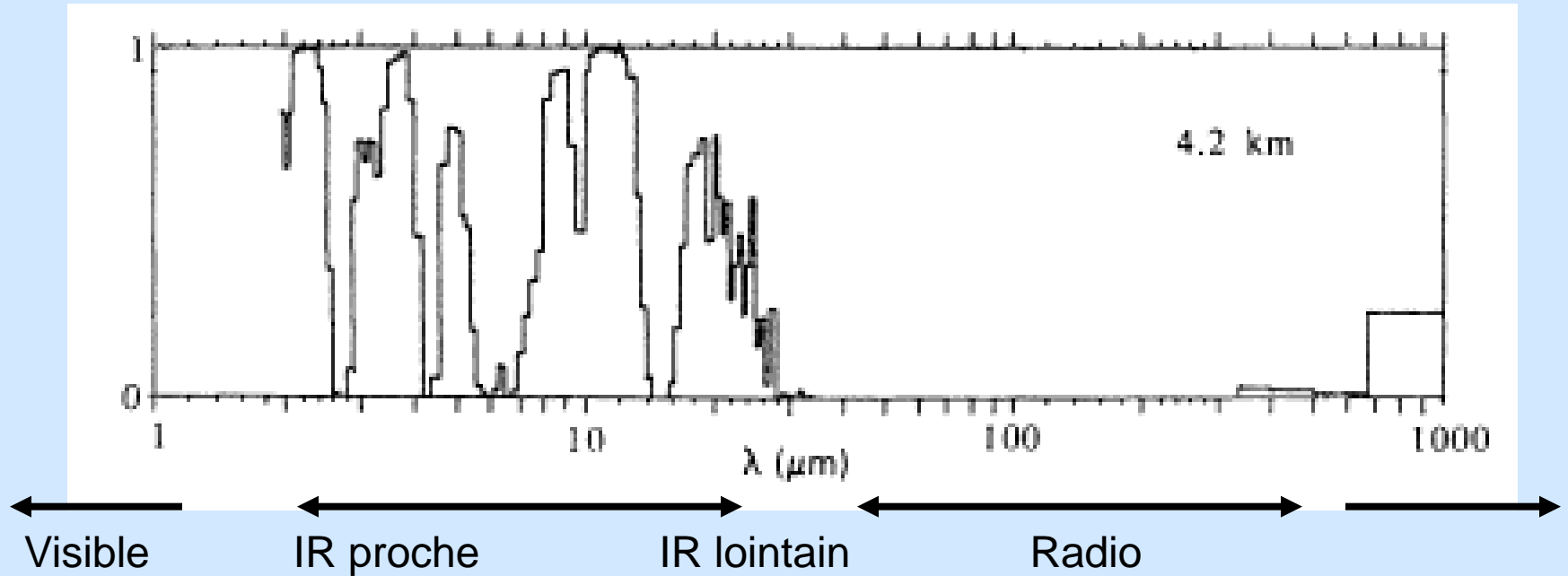
| | | | | | | |
|----|----|--|--|--|--|--|
| Mg | | | | | | |
| | Fe | | | | | |

De l'hydrogène et de l'oxygène : tout pour faire de l'eau



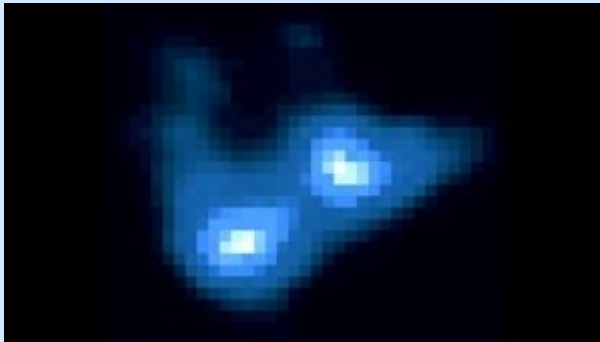
Qui apparait très tôt dans l'histoire de l'Univers

Transmission de l'atmosphère

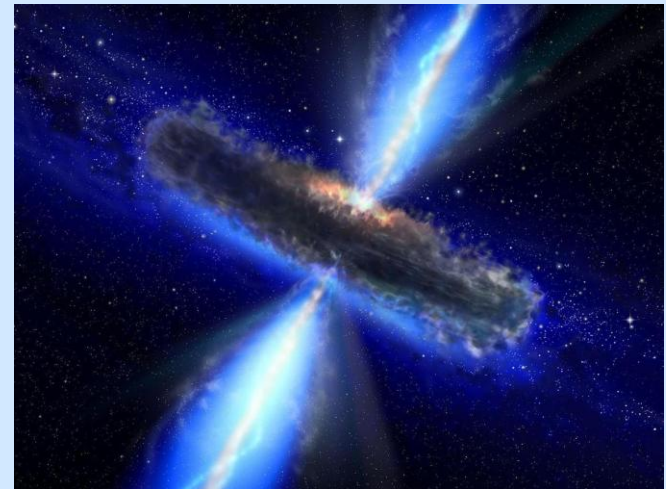


Un « quasar » très humide : APM 08279+5255

Seulement 1,7 milliard d'années après le Big-bang

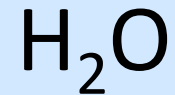


Tel qu'il apparaîât en rayons X



Concept « artistique »

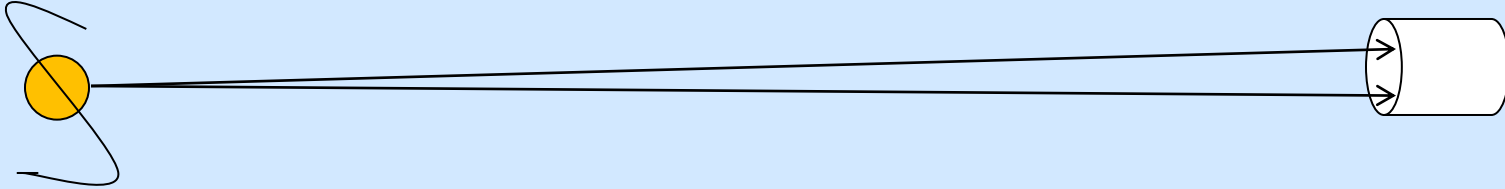
De l'hydrogène et de l'oxygène : tout pour faire de l'eau



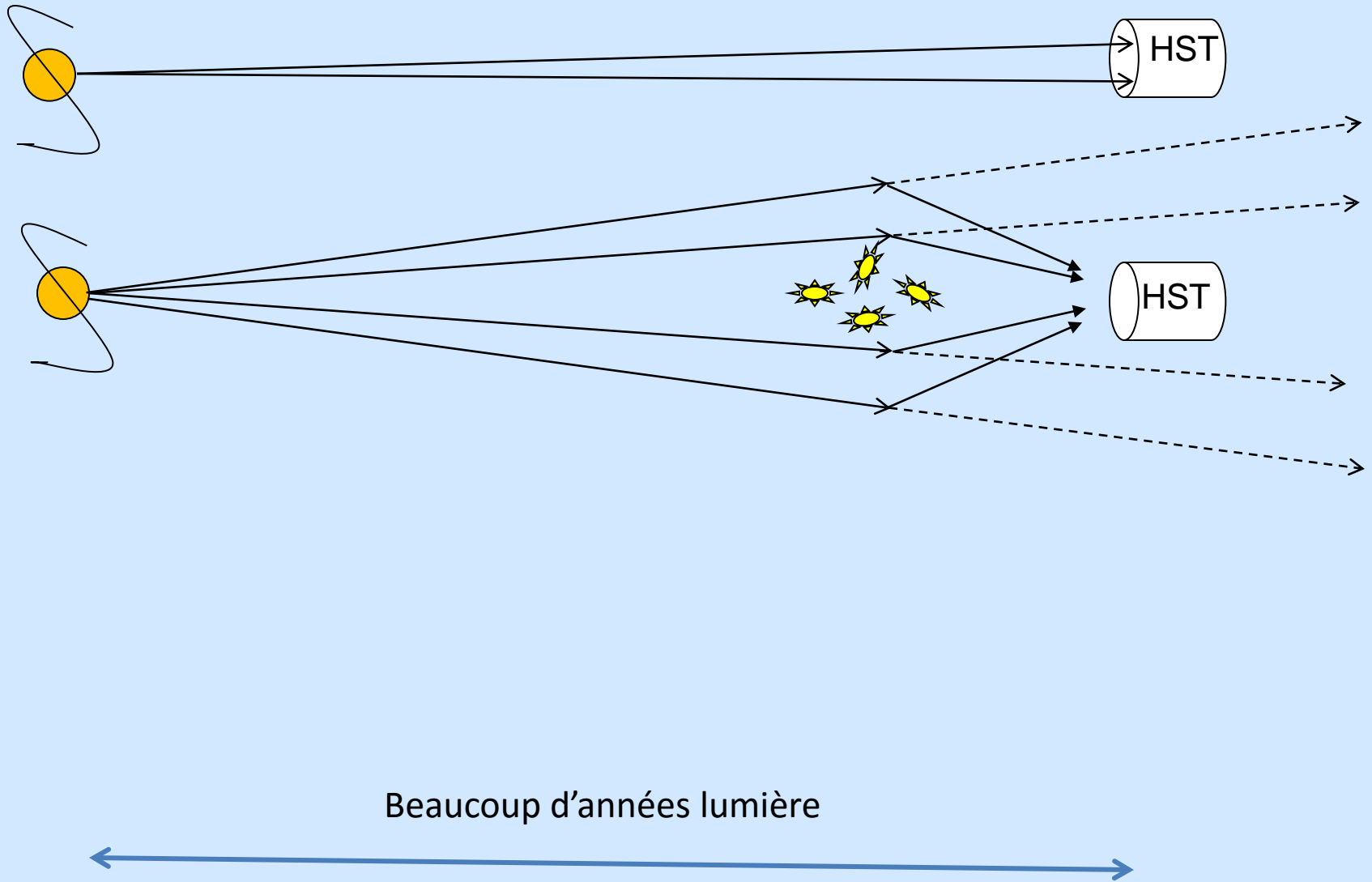
Qui apparait très tôt dans l'histoire de l'Univers

Mais comment observer des objets à
12 Milliards d'années lumière de nous ?

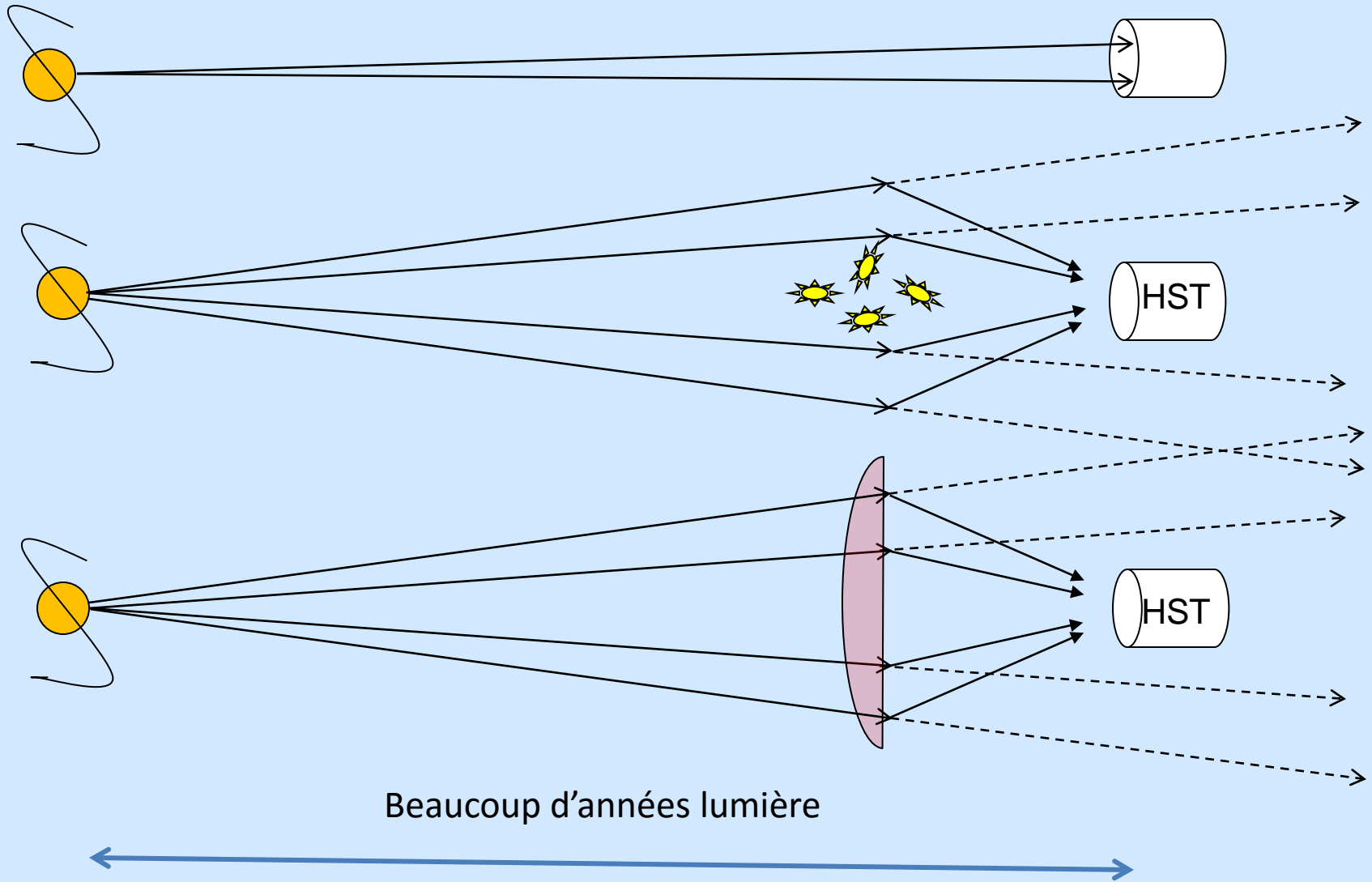
Mirage gravitationnel : un télescope géant, naturel et gratuit



Mirage gravitationnel : un télescope géant, naturel et gratuit



Mirage gravitationnel : un télescope géant, naturel et gratuit



MILIEU INTERSTELLAIRE (MIS) **DIFFUS**

Gaz raréfié : 10 atomes / cm³

Pas très froid : 100K (-173 °C)

75% H

24 % He ,

1% Traces C, N, O etc.

Atomes « lourds »

Fabriqués dans les étoiles

Diffusés dans le milieu



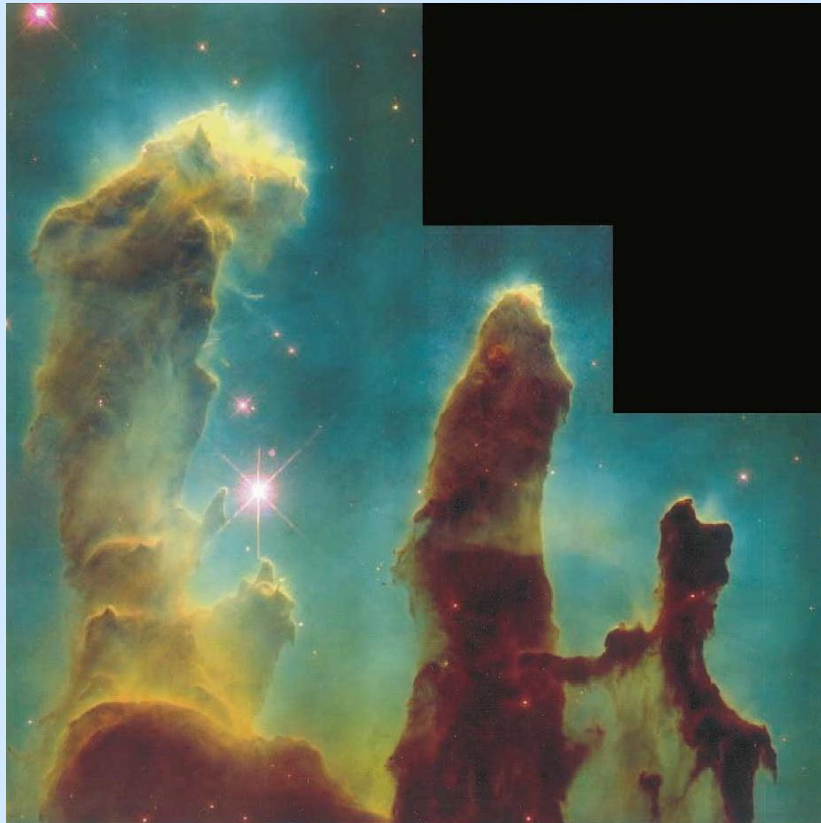
MIS = 50% de la masse d'une galaxie

Mais trop dilué pour former des molécules

Très inhomogène

Les nuages denses

Alias : Nuages moléculaires



Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

1000 à 10 000 atomes/cm³

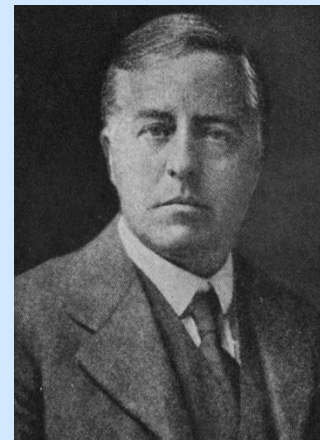
Rassemblement par la gravité

« Nuages »

10- 100 Années lumière

10 000-100 000 Masse du Soleil

Equilibre hydrostatique

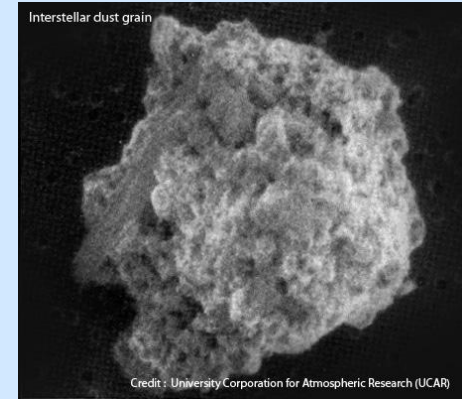


Sir James Hopwood
JEANS(1877 -1946)

Et la poussière !

Petits grains : ~ 1 micron

- Suie (graphite)
- Poussière de roche (Silicate)



Composant mineur : $< 1\%$ de la masse du Milieu interstellaire

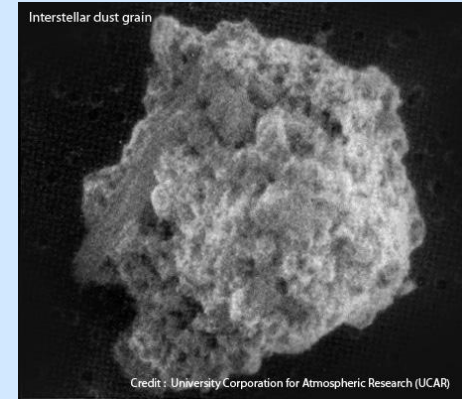
1 grain pour 10^{12} atomes

Rôles très importants en Astrophysique

Et la poussière !

Petits grains : ~ 1 micron

- Suie (graphite)
- Poussière de roche (Silicate)

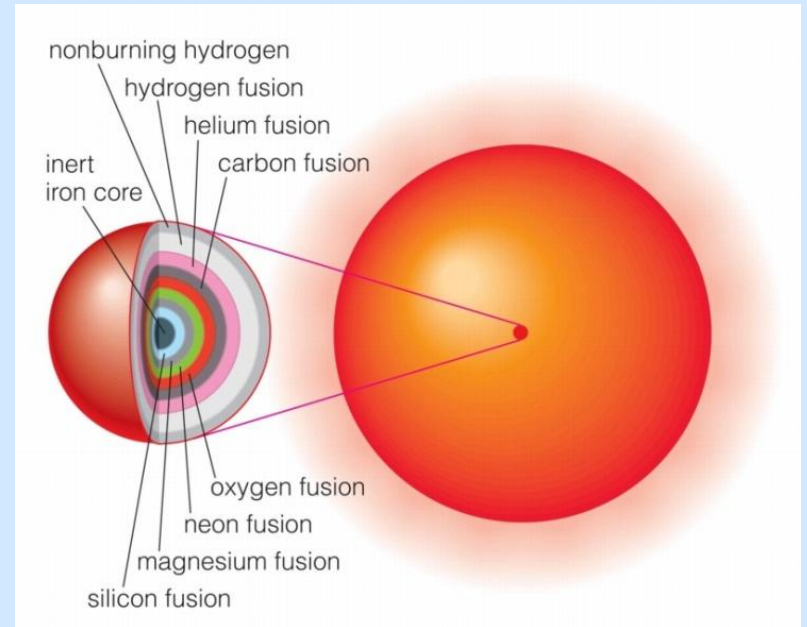
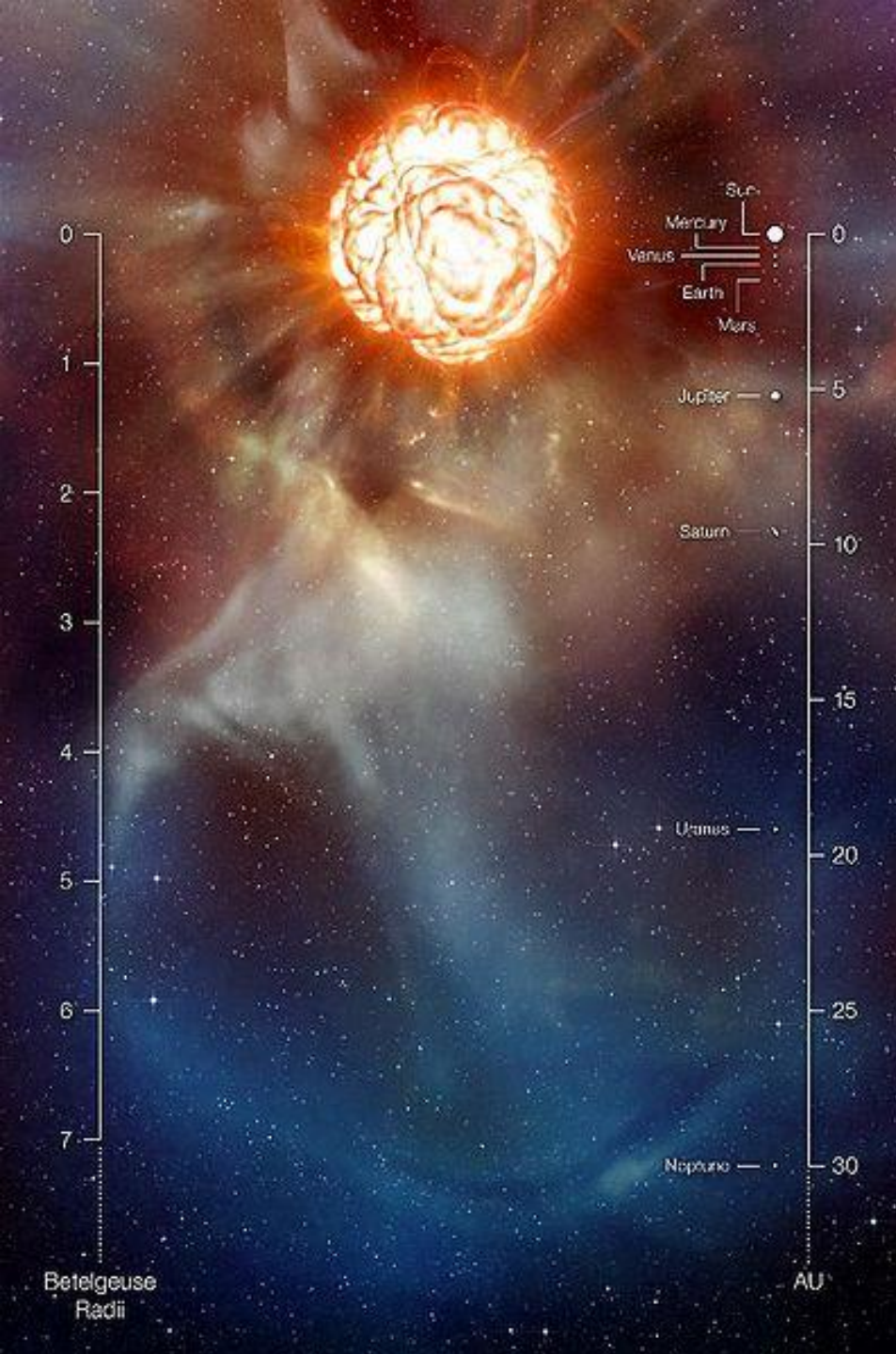


Composant mineur : $< 1\%$ de la masse du Milieu interstellaire

1 grain pour 10^{12} atomes

Rôles très importants en Astrophysique

Mais d'abord : d'où viennent ces grains ?



Représentation traditionnelle !

Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace

Bételgeuse

Image du disque
par interférométrie au VLT

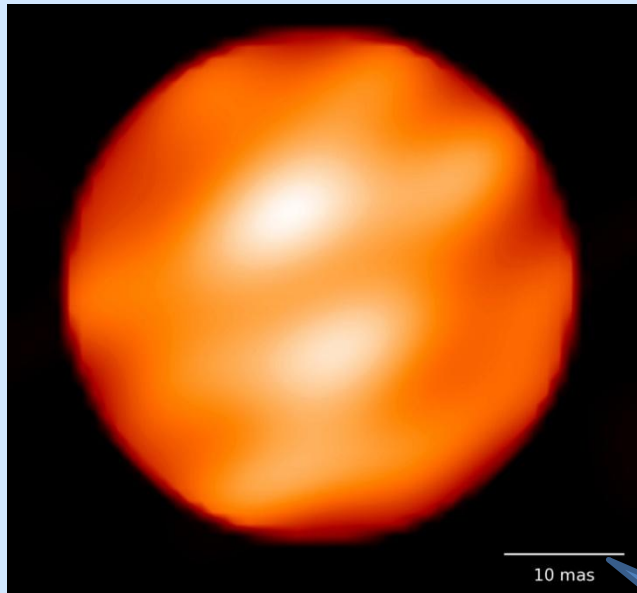


image : Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

Première historique

Première image du disque

D'une étoile autre que le Soleil

2 cm à 200 km

Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace

Bételgeuse (α Orionis)

Image du disque
Par interférométrie au VLT

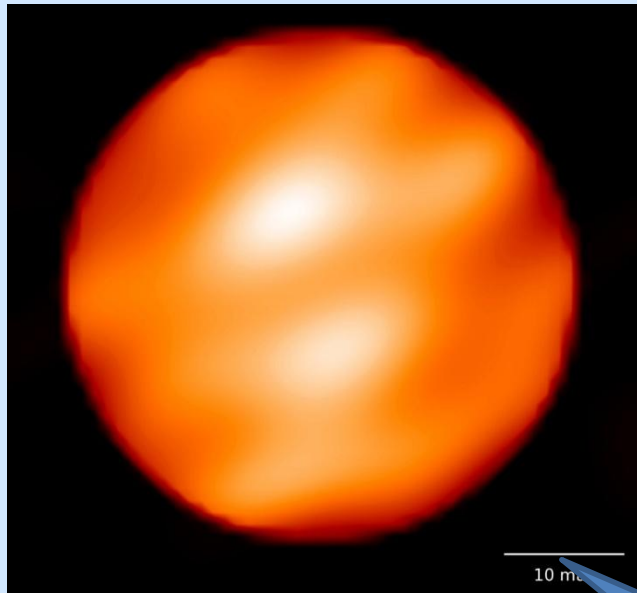
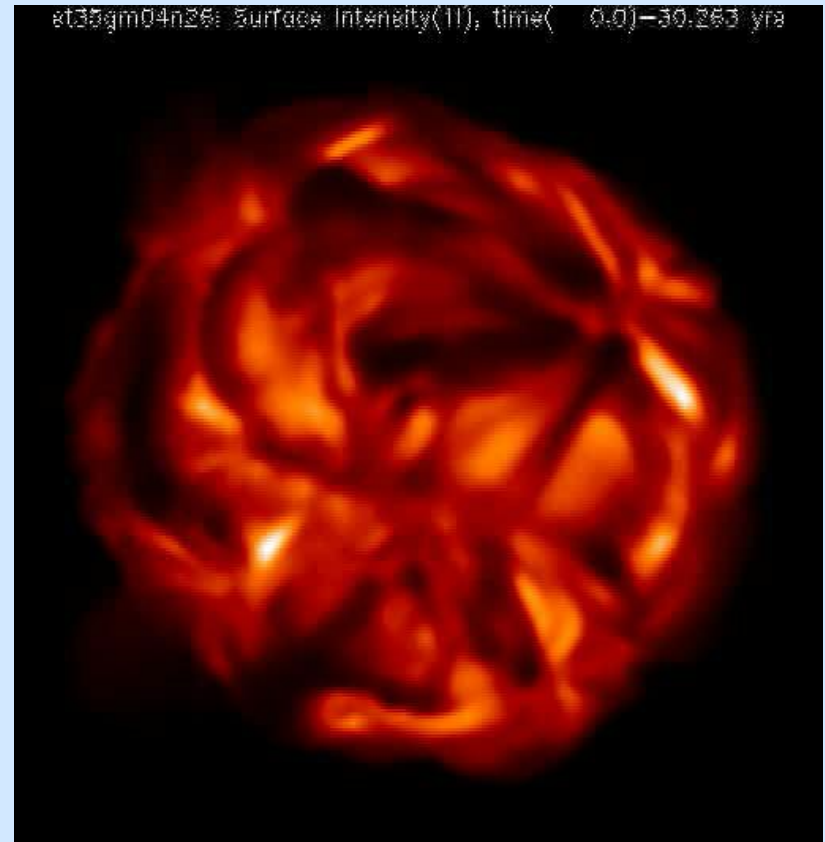


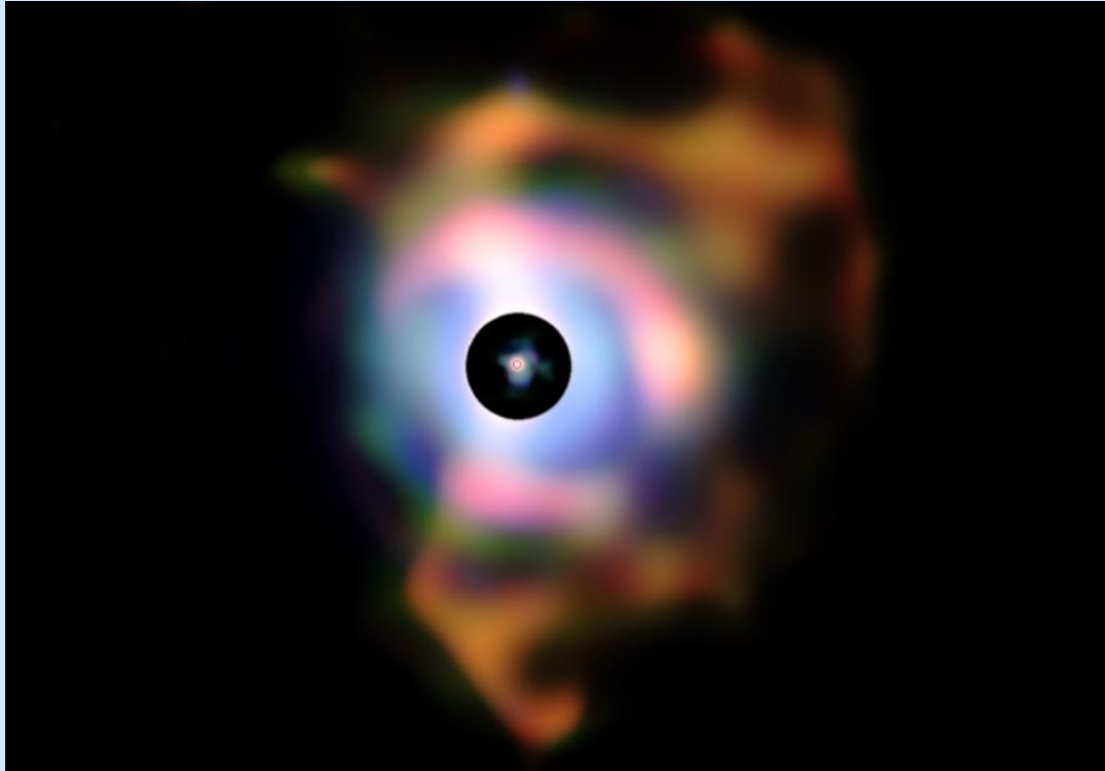
image : Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.



Simulation numériques
par Bernd Freytag (CRAL-ENSL)
très accéléré : épisode de 7 ans

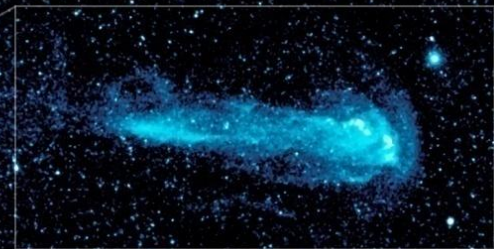
2 cm à 200 km

Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace



Bételgeuse, l'étoile masquée par « Coronographie »

Trainée de poussière derrière l'étoile géante MIRA (o Ceti)



Mira's Turbulent Tail

GALEX • NUV • FUV

Rôles de la poussière

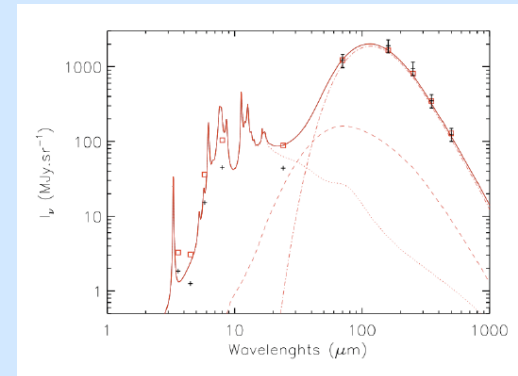
Agent rougissant :

- Absorbe plus le bleu que le rouge
- Transparent à l'infrarouge

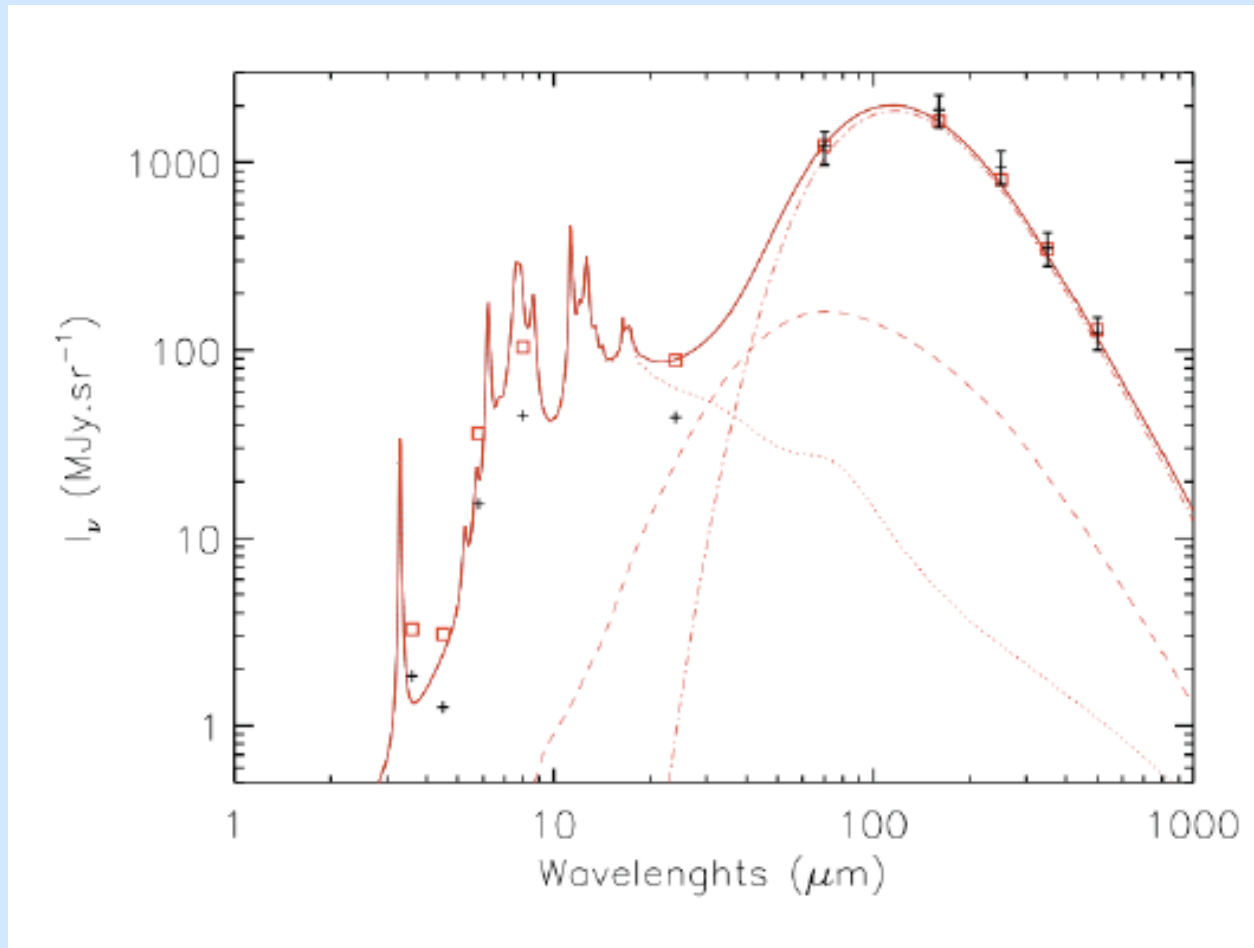


Agent refroidissant :

- Par émission de photons infrarouges

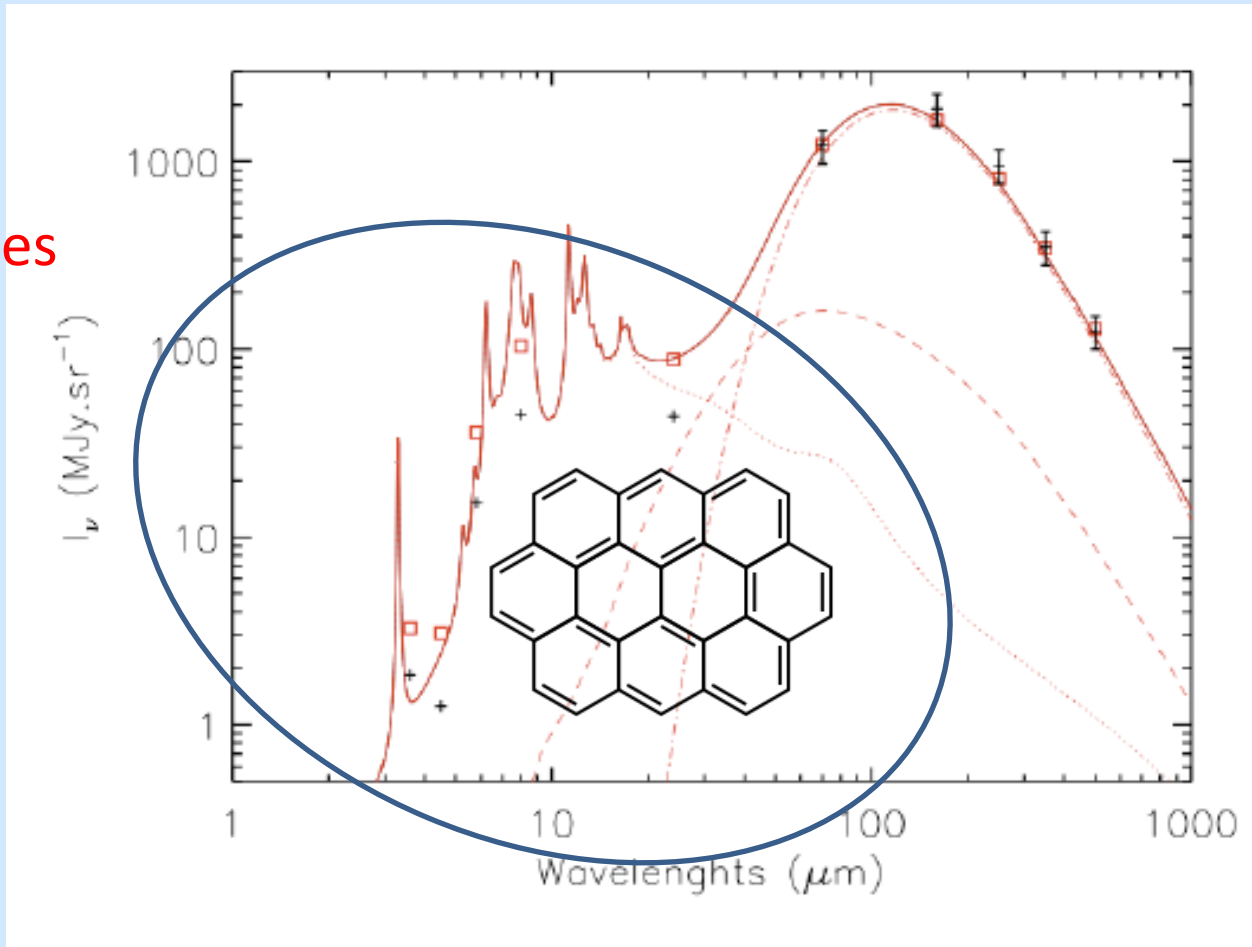


Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge



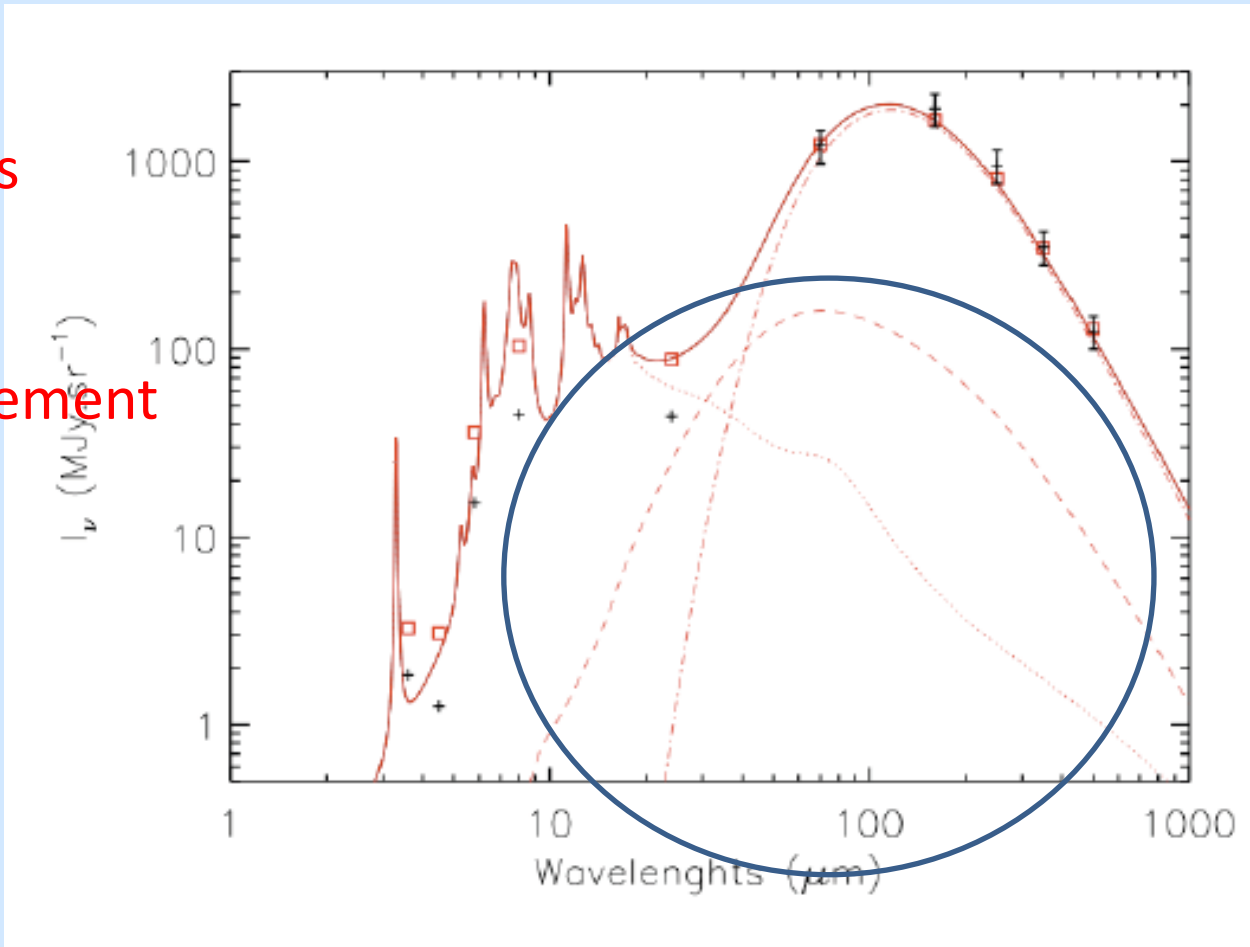
Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge

PAH
100 atomes

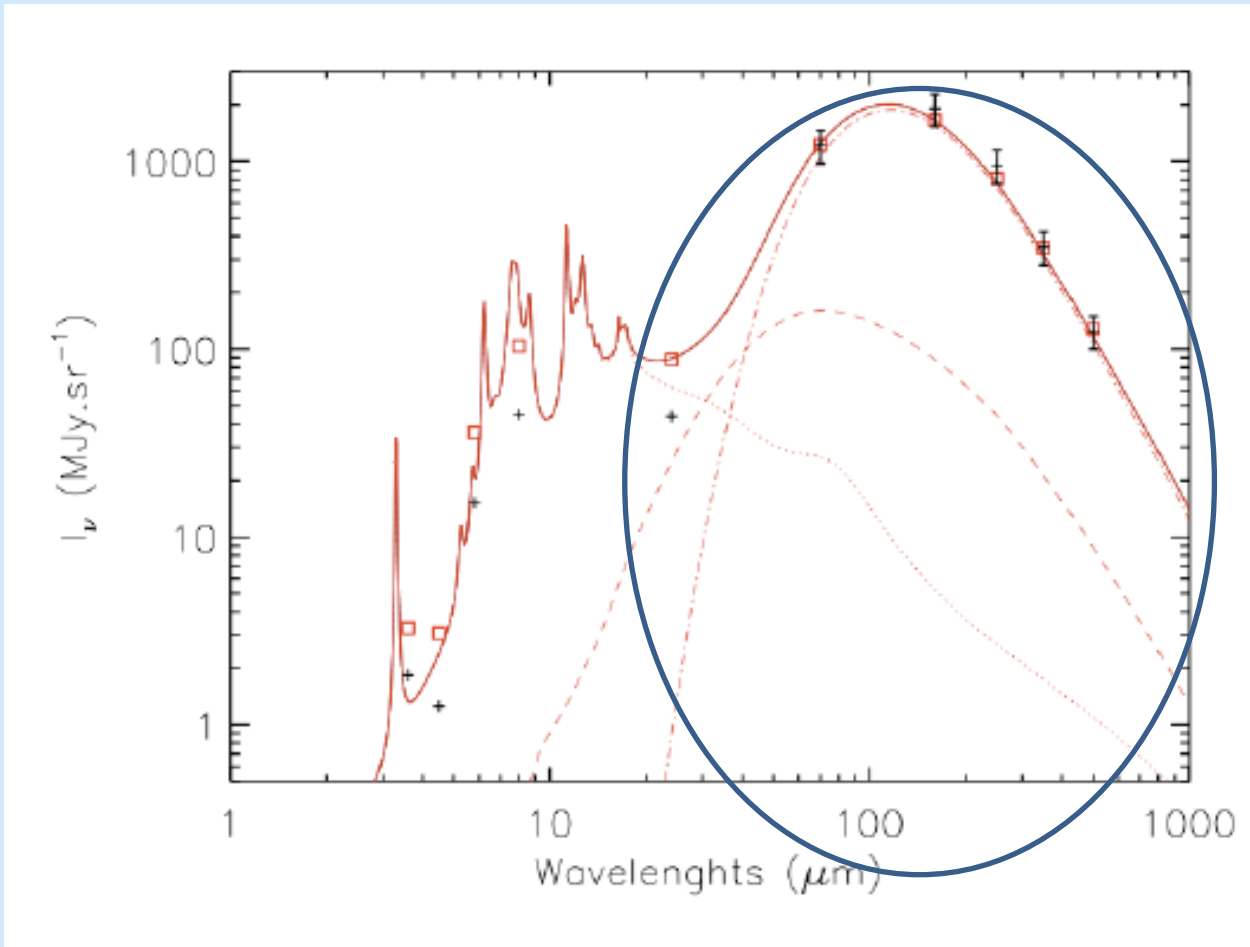


Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge

Très petits
grains
chauffés
transitoirement

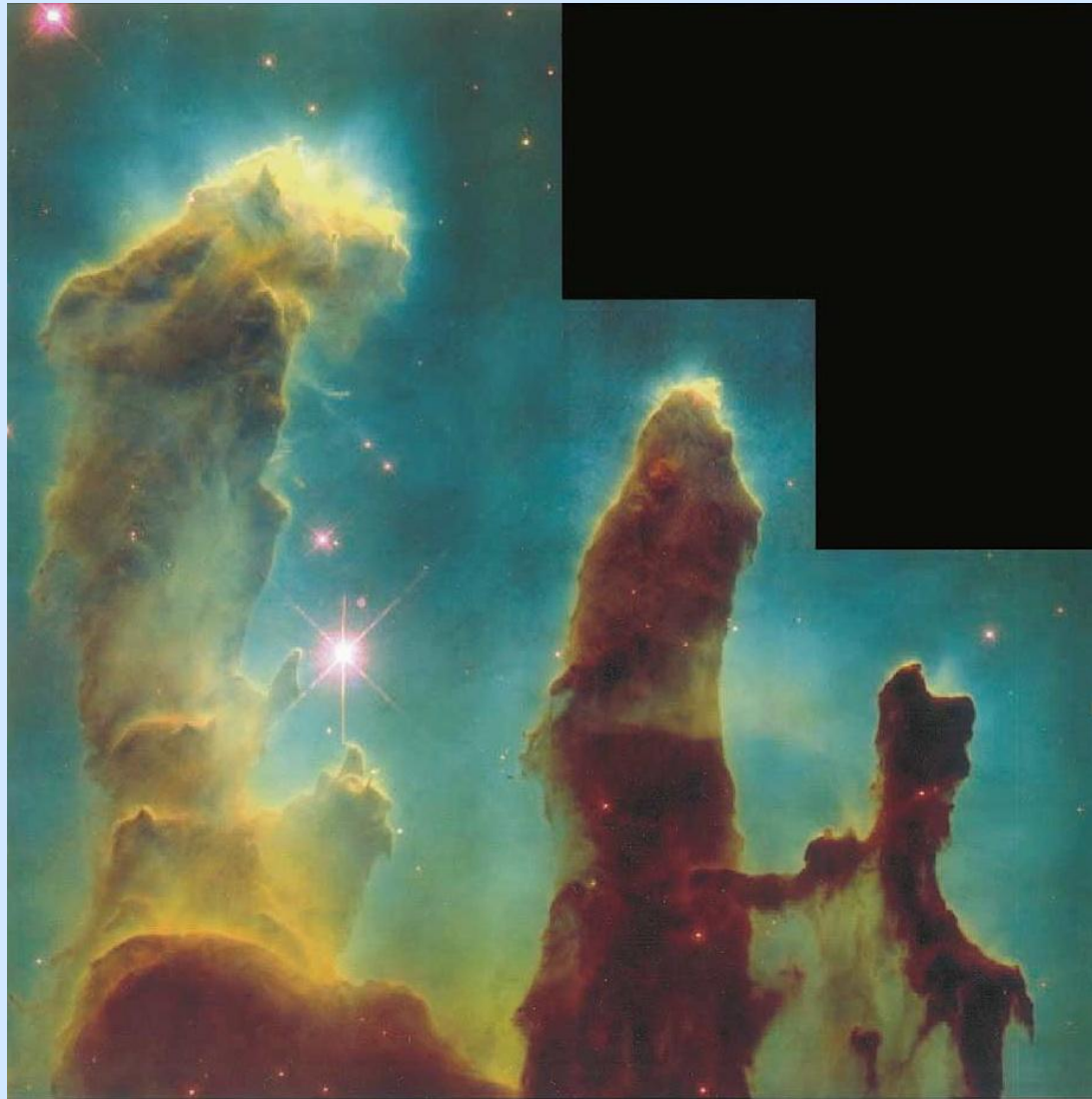


Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge



Gros
grains
20-30 K

RETOUR AU MILIEU INTERSTELLAIRE DENSE

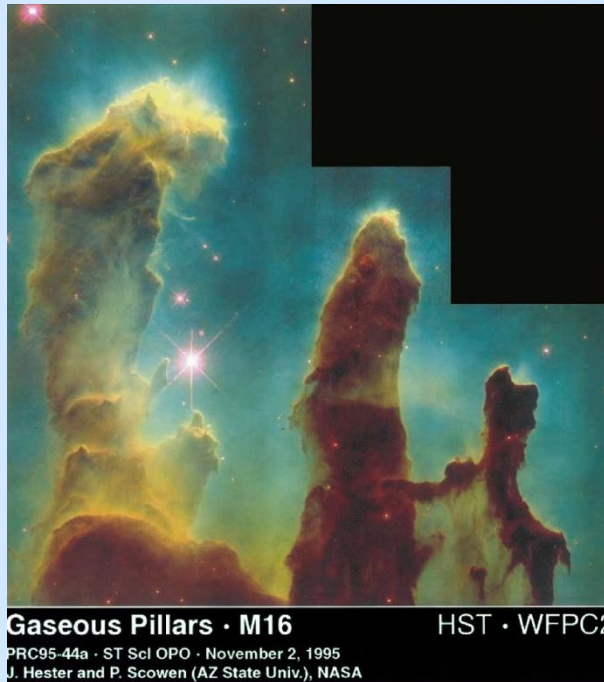


Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

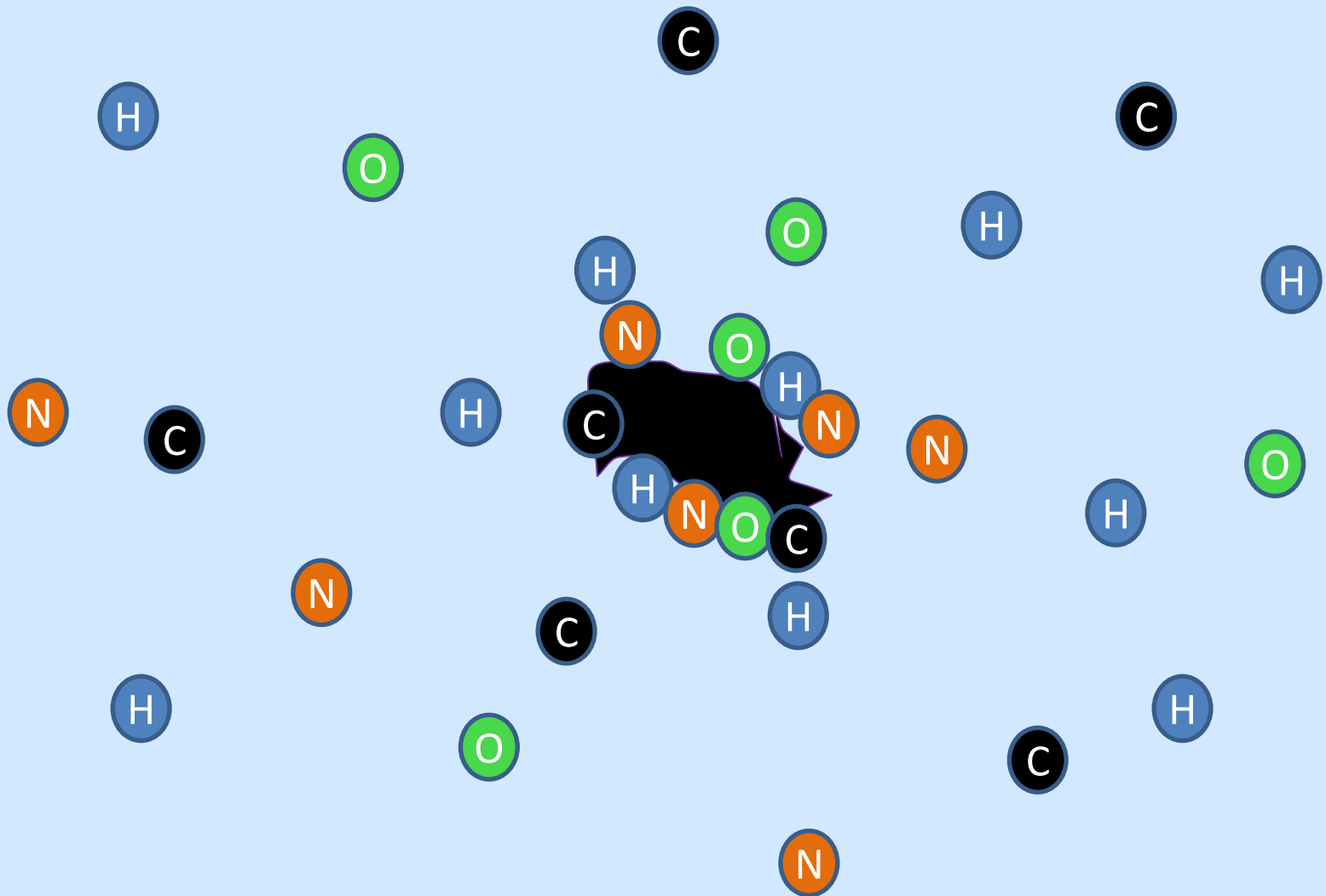
Nuages denses :
Complètement opaques
Très froids : 10K (-263 °C)



Chimie dans les nuages denses :

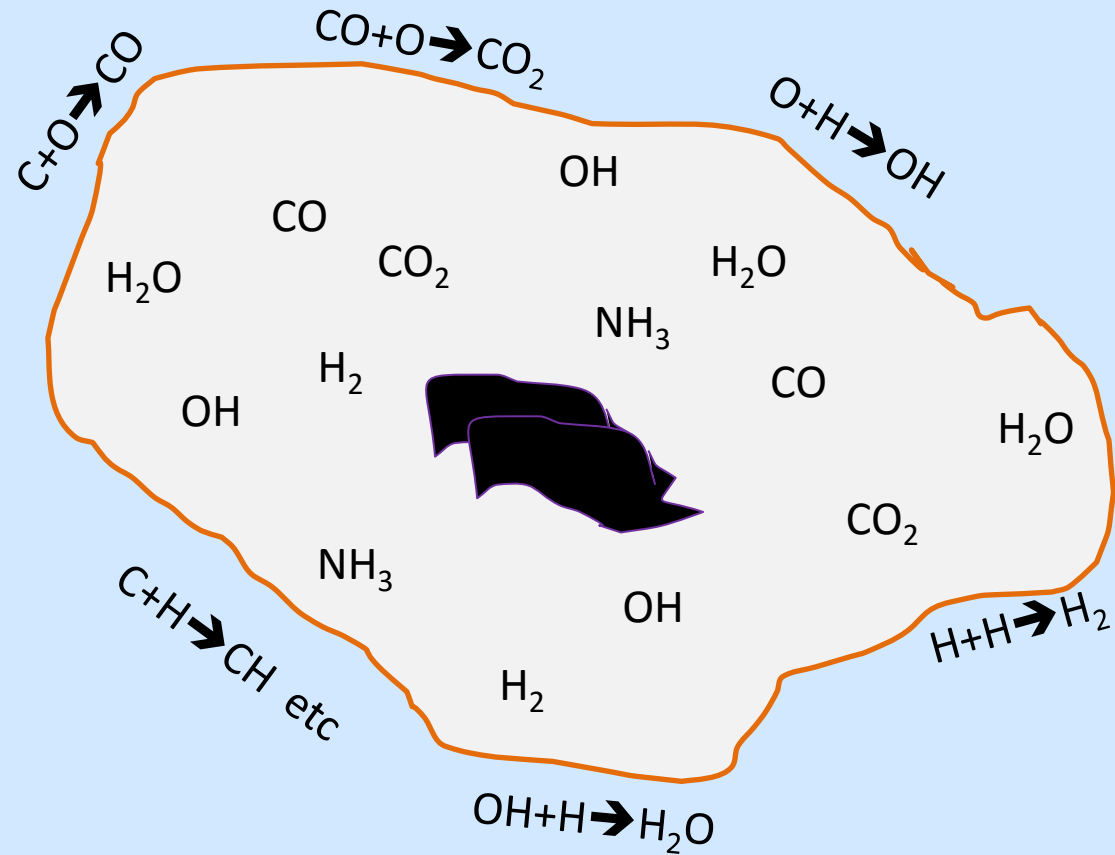
WWW.Meetic_à_molécules.com

Les atomes du gaz se collent à la surface des grains



Adsorption + Formation de molécules → couche de glace

→ Croissance des grains

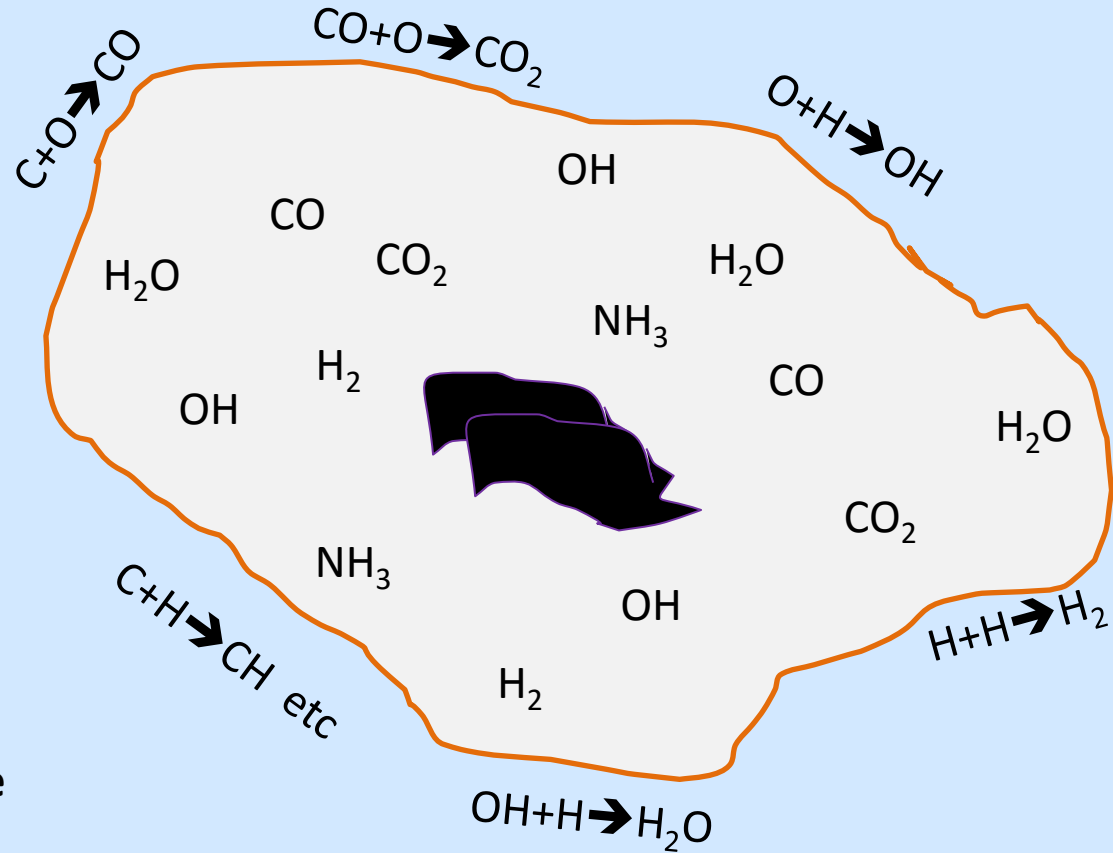


Adsorption + Formation de molécules → couche de glace

→ Croissance des grains



$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$
alcool éthylique

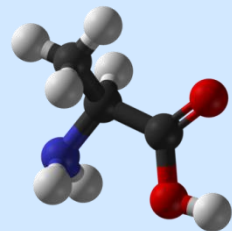


Adsorption + Formation de molécules → couche de glace

→ Croissance des grains

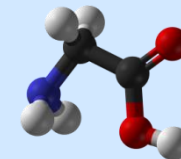


CH3-CH2-OH
alcool éthylique

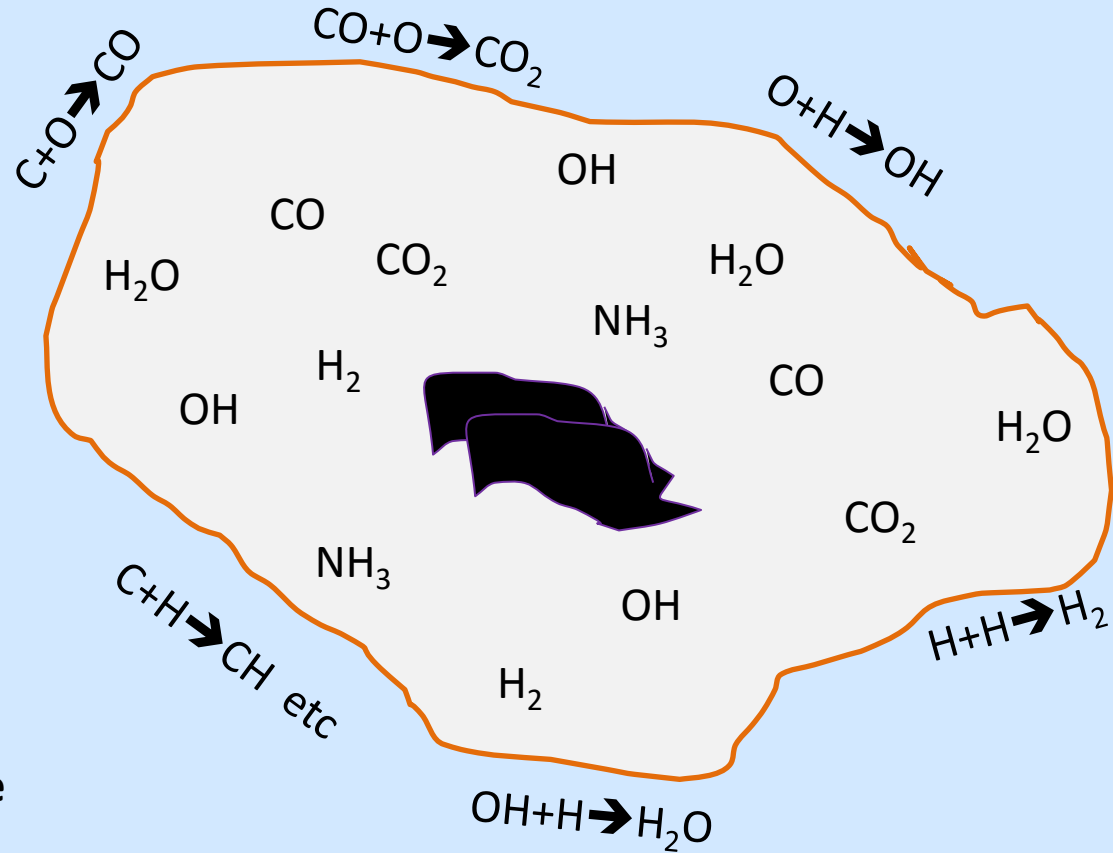


Alanine

Acides aminés
Briques des protéines



Glycine



Quand un grain sort du nuage ...

Turbulences → Retour du grain au milieu diffus



- Les étoiles le réchauffe
- Sublime la glace
- Photodissociation des molécules :



Autre scénario possible ...

Fragmentation du nuage

Collapsé des fragments

Formation d'un groupe de nouvelles étoiles

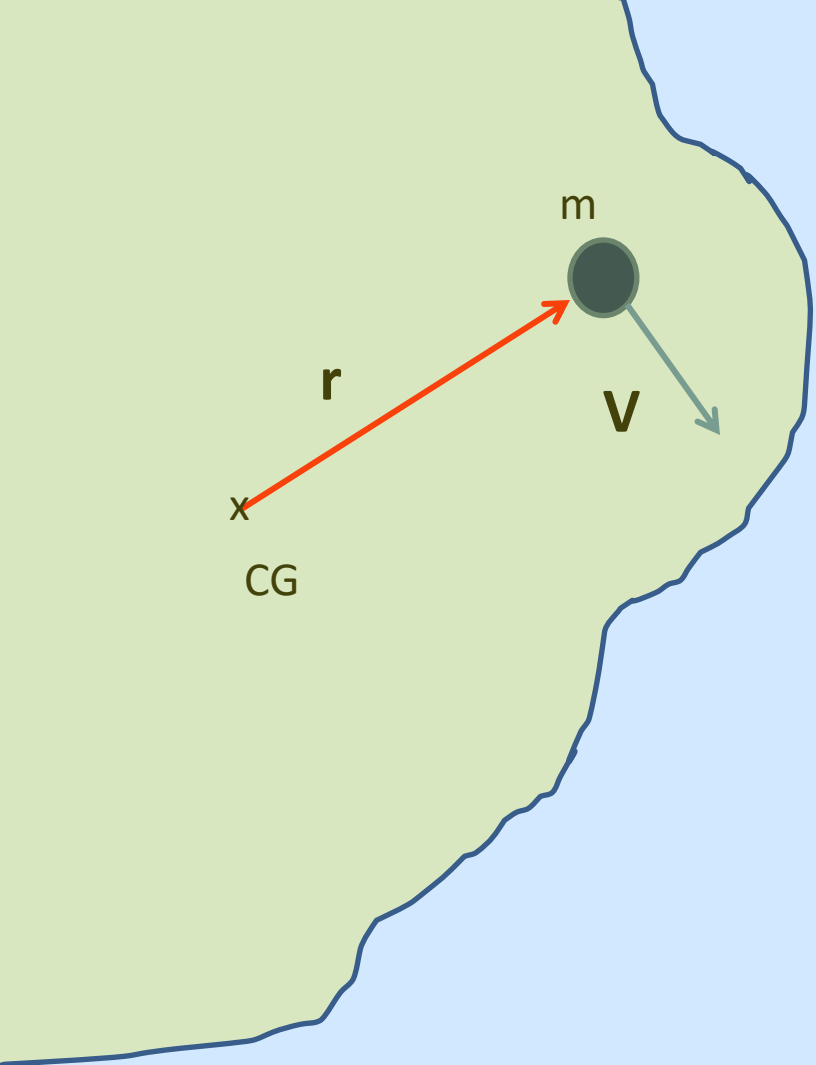


Amas des Pléiades

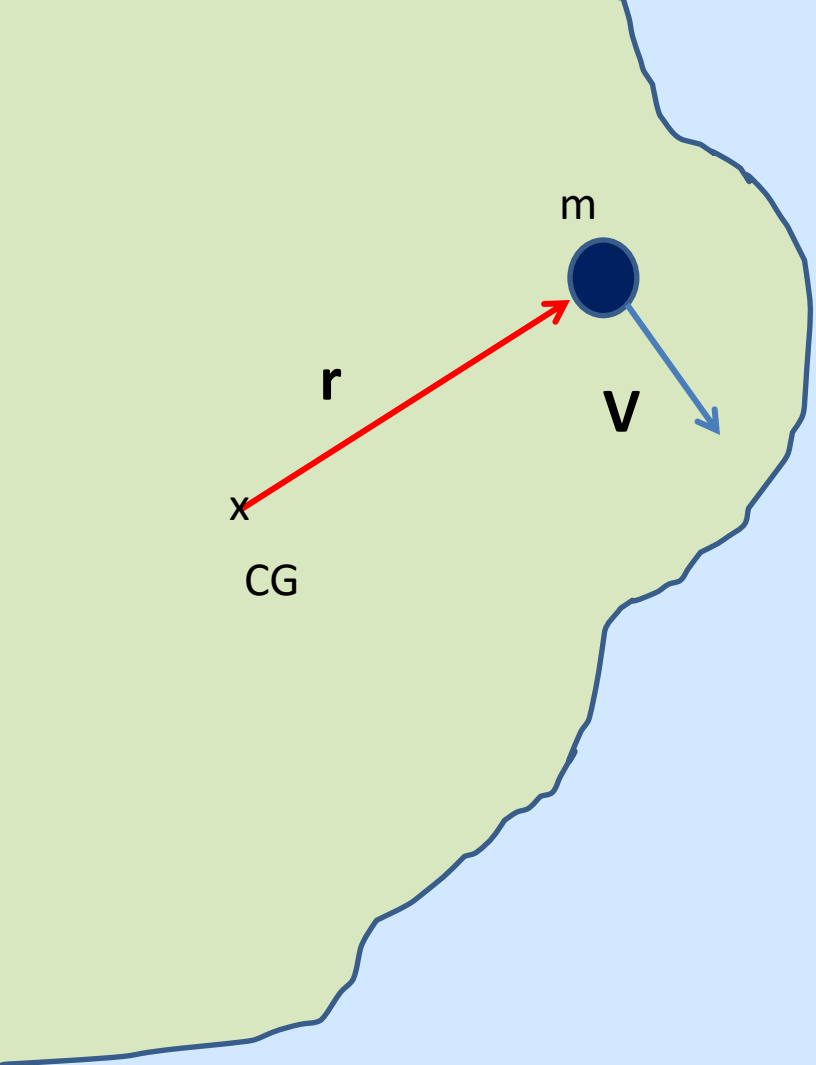




Retour sur l'effondrement d'un fragment

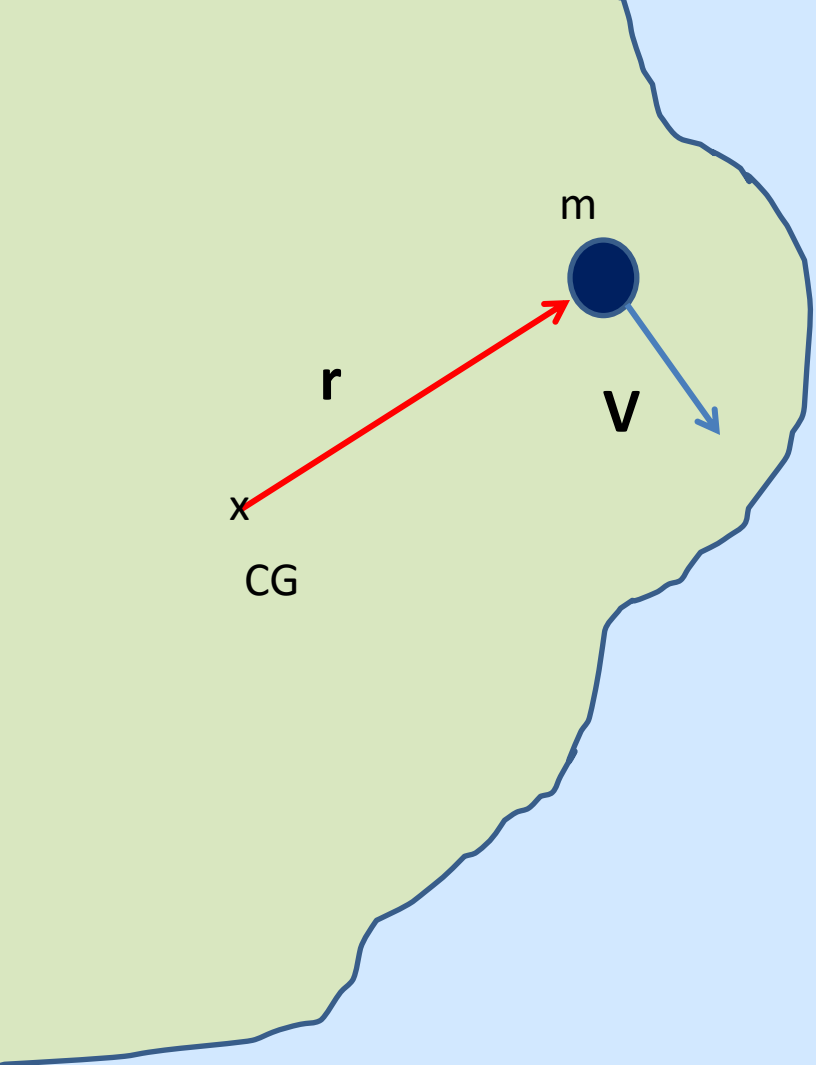


$m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'une particule



$m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'une particule

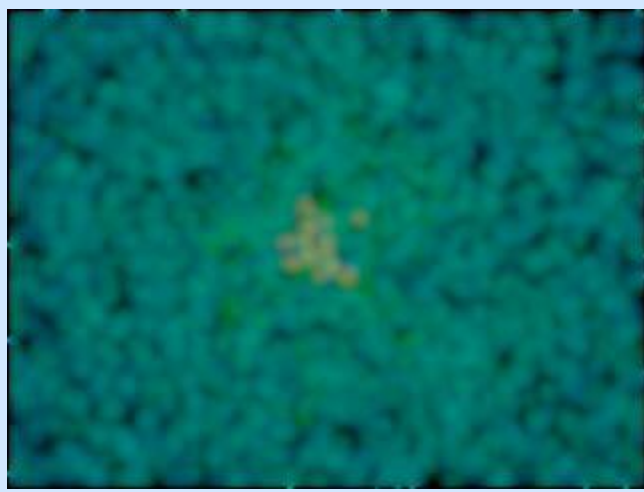
$\Sigma m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'un fragment



$m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'une particule

$\sum m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'un fragment

Conservation de $\sum m \mathbf{V} \times \mathbf{r}$



L'essentiel de la masse va dans l'étoile : nouvel équilibre hydrostatique

Le reste va dans un disque en orbite autour de l'étoile

Le disque «absorbe» le moment cinétique

Le disque refroidit et « coagule » en planètes

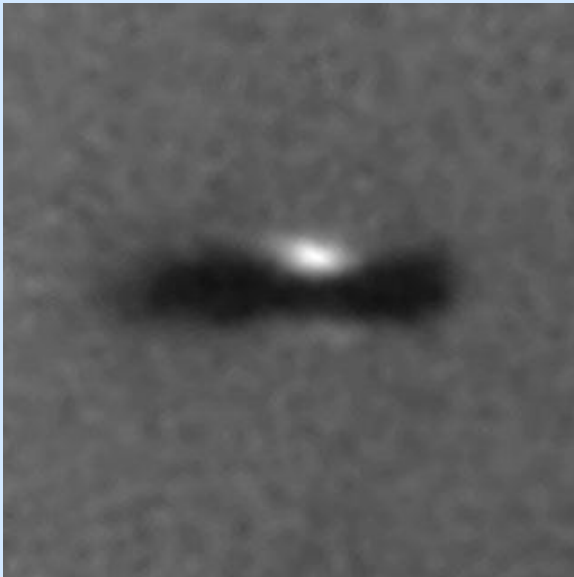
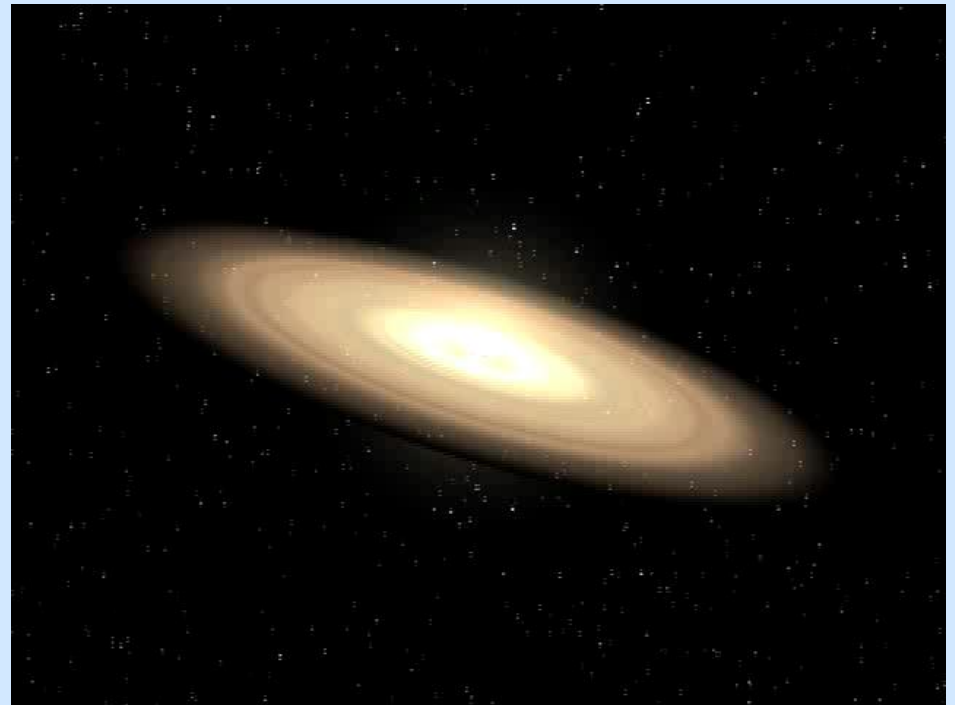
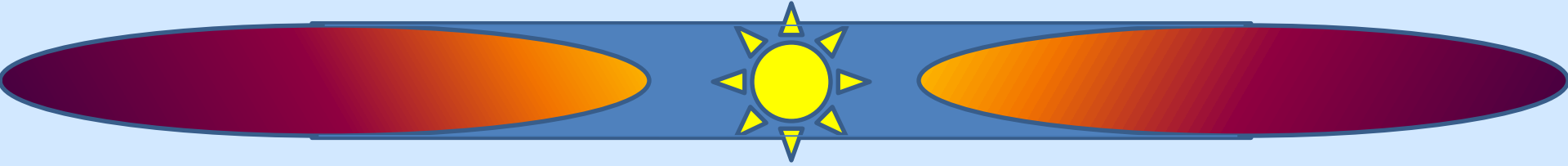


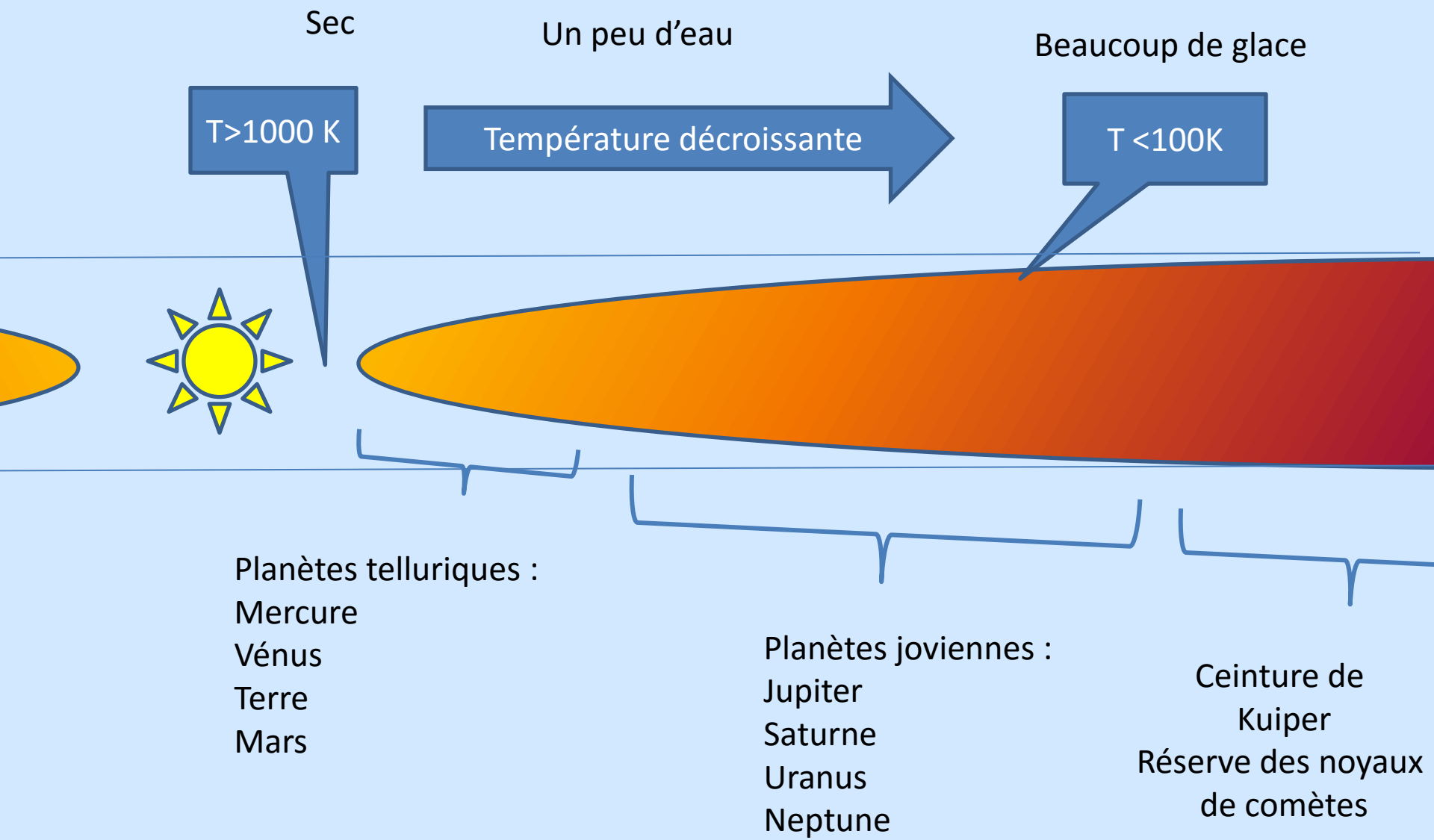
image NASA/ESA



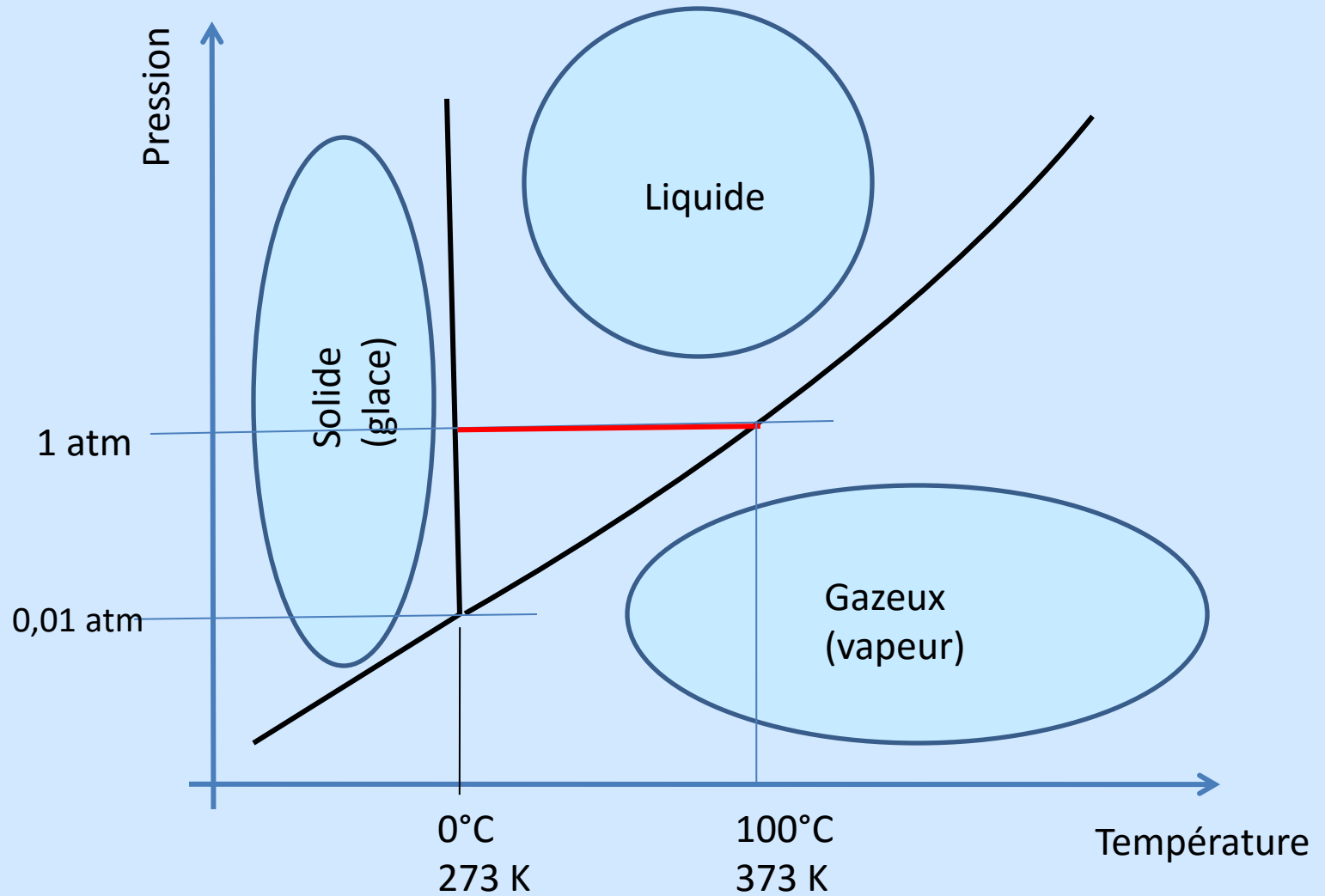
Video JPL/NASA



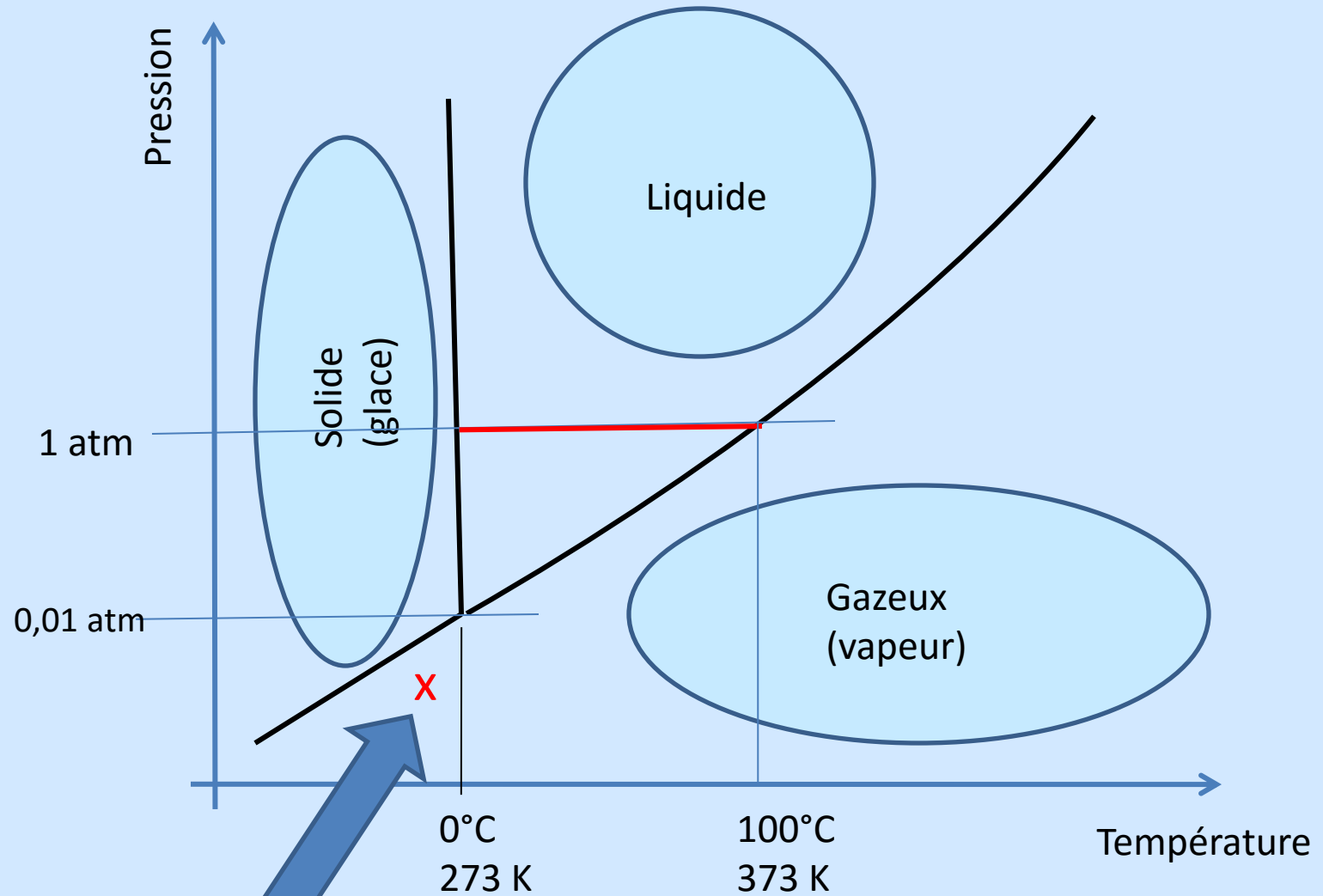




Les états de l'eau

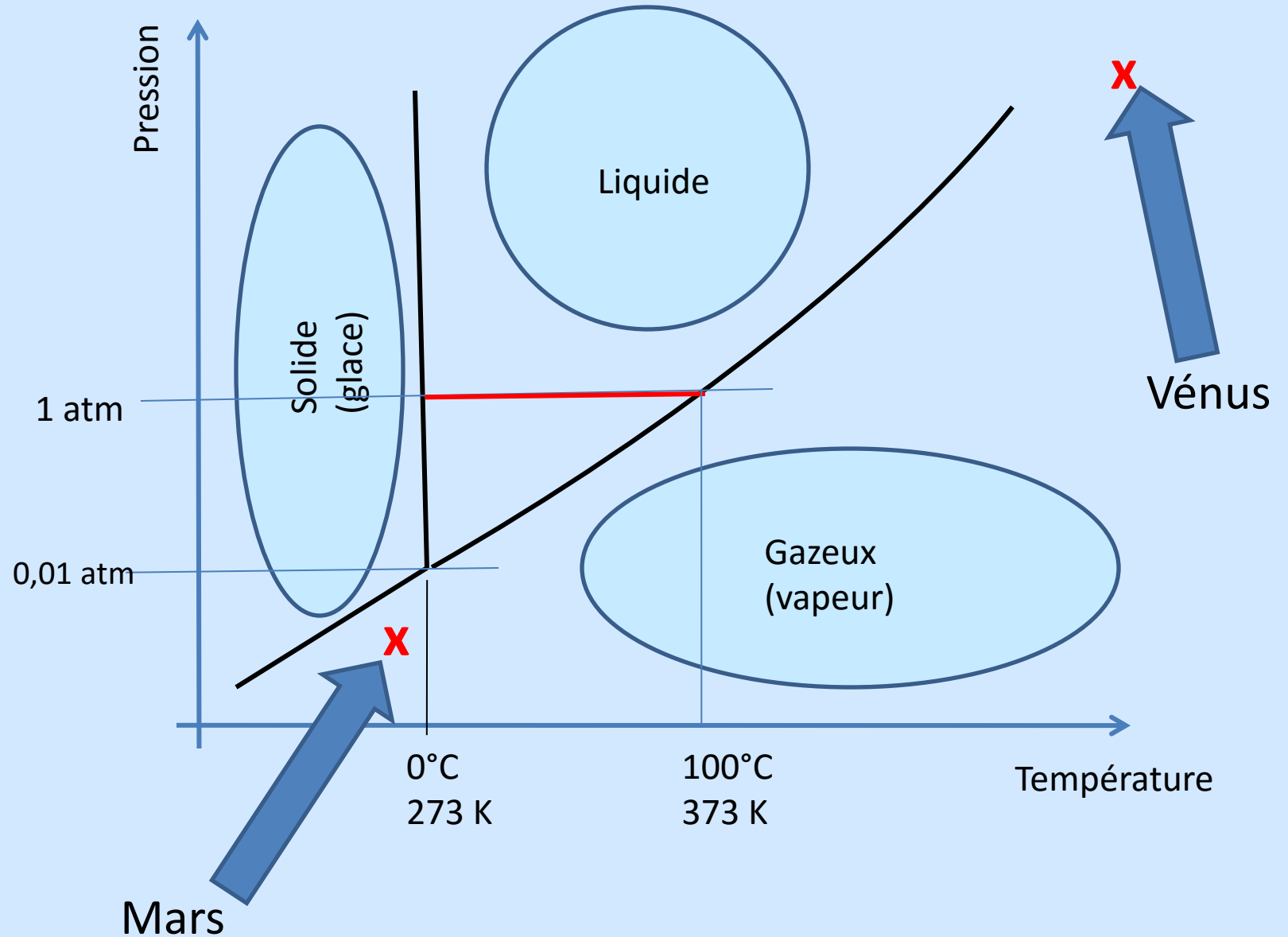


L'eau à la surface des planètes

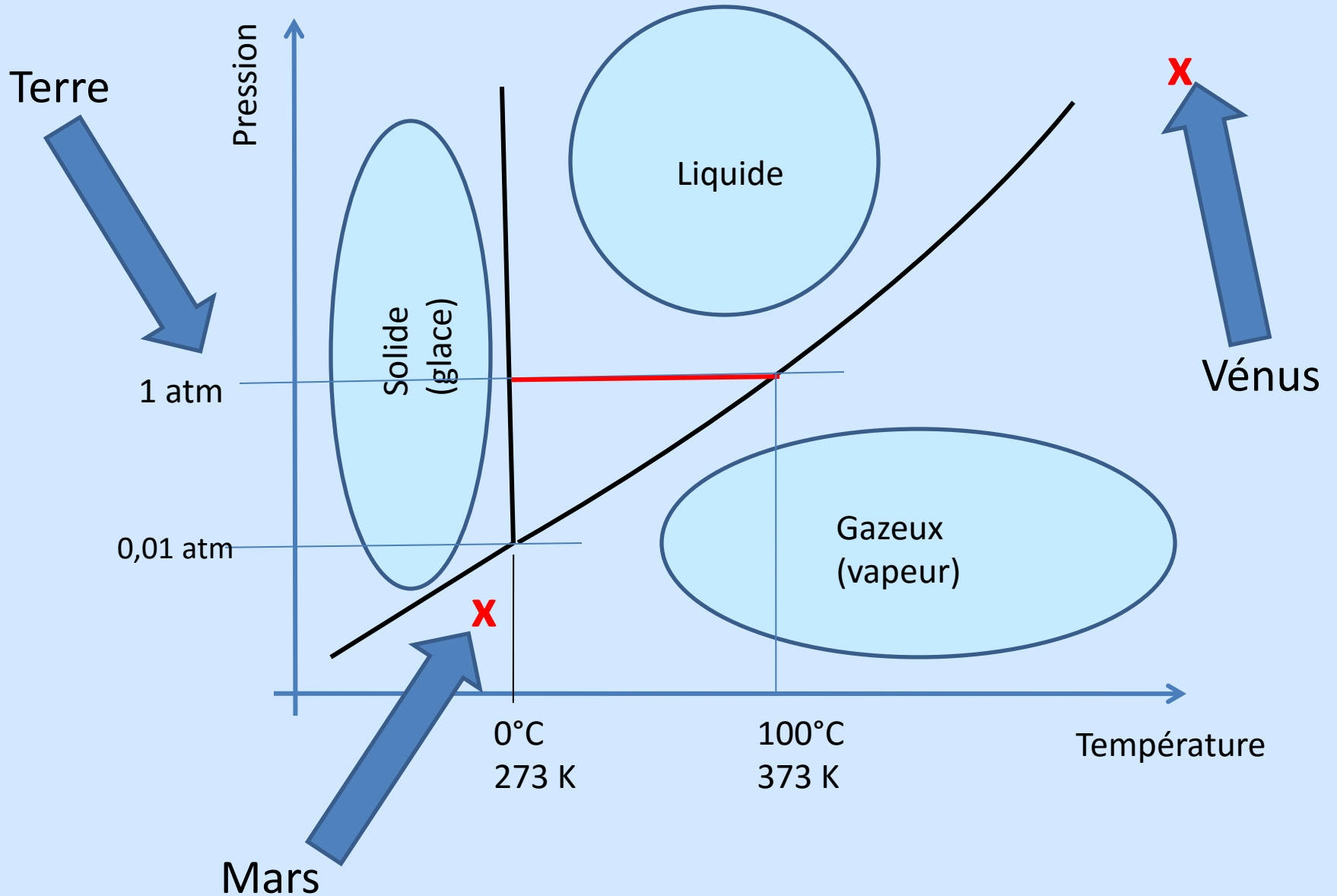


Mars

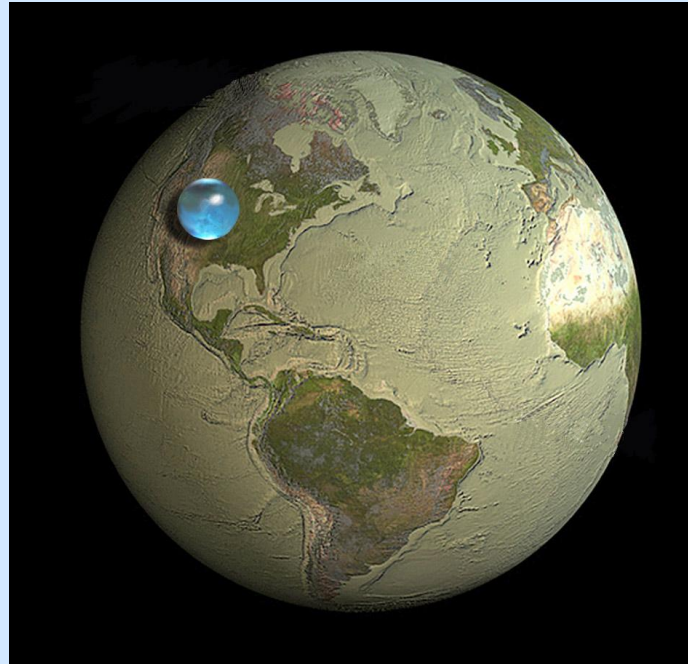
L'eau à la surface des planètes



L'eau à la surface des planètes



Eau de surface : 0,02% de la masse de la Terre

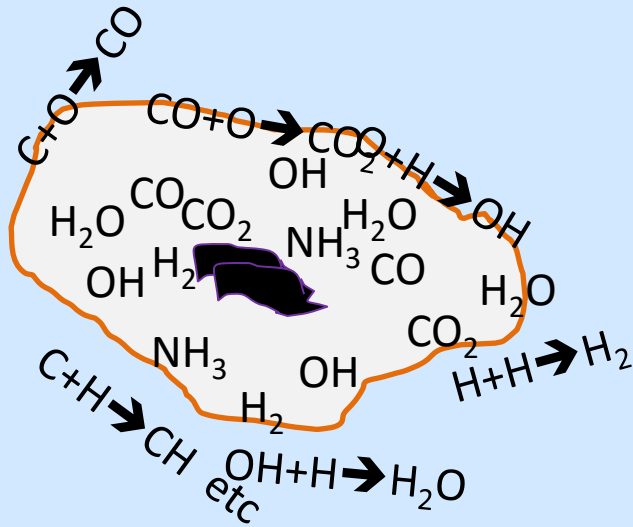


Toute cette eau est elle d'origine ?

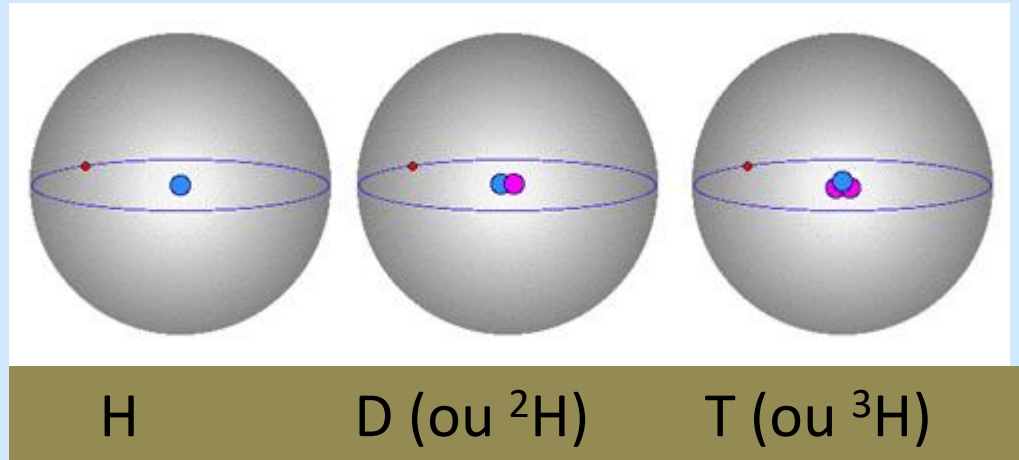
A-t-elle été apportée par des comètes ?

Ou bien par des astéroïdes ?

Adsorption + Formation de molécules → couche de glace



Les isotopes de l'hydrogène
Hydrogène Deutérium Tritium

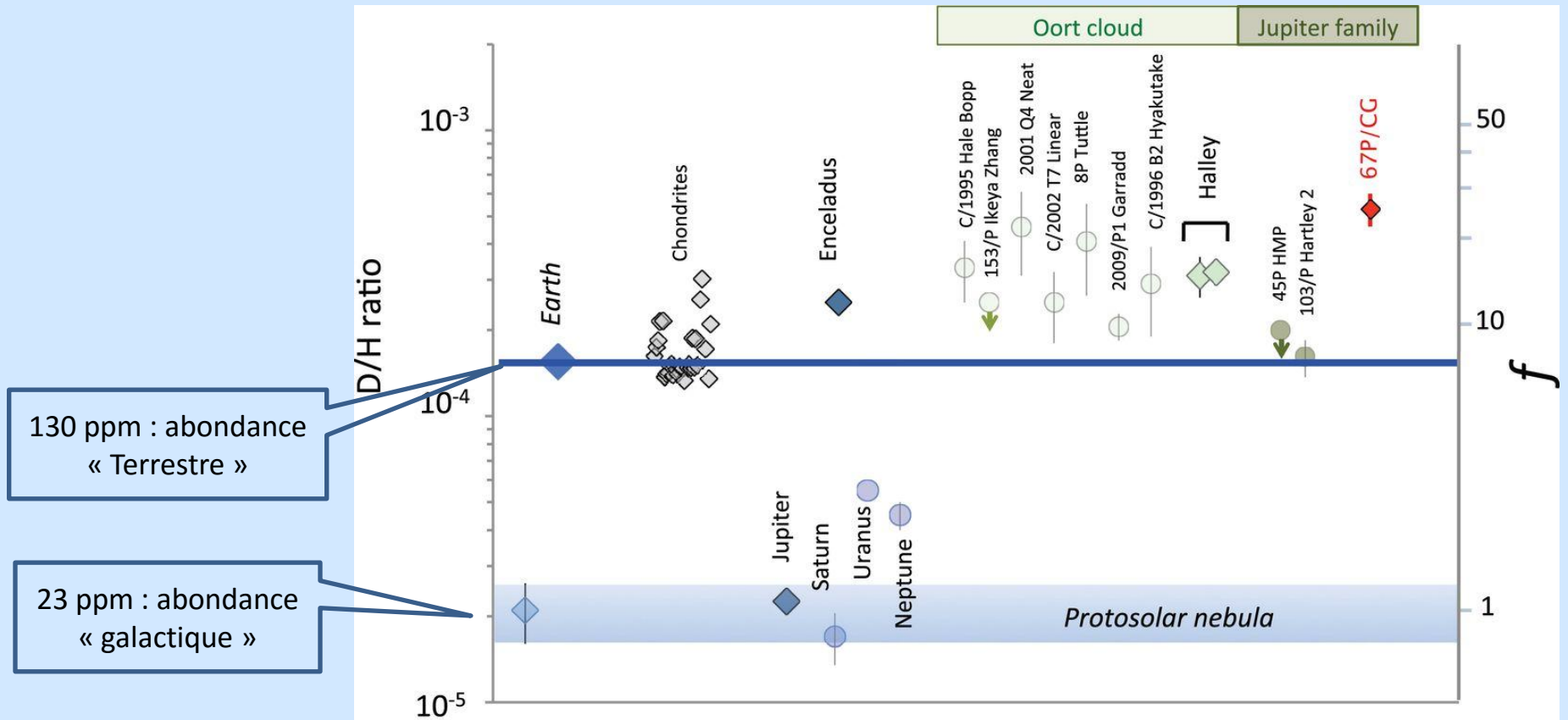


« Deutération » : D remplace H dans une molécule



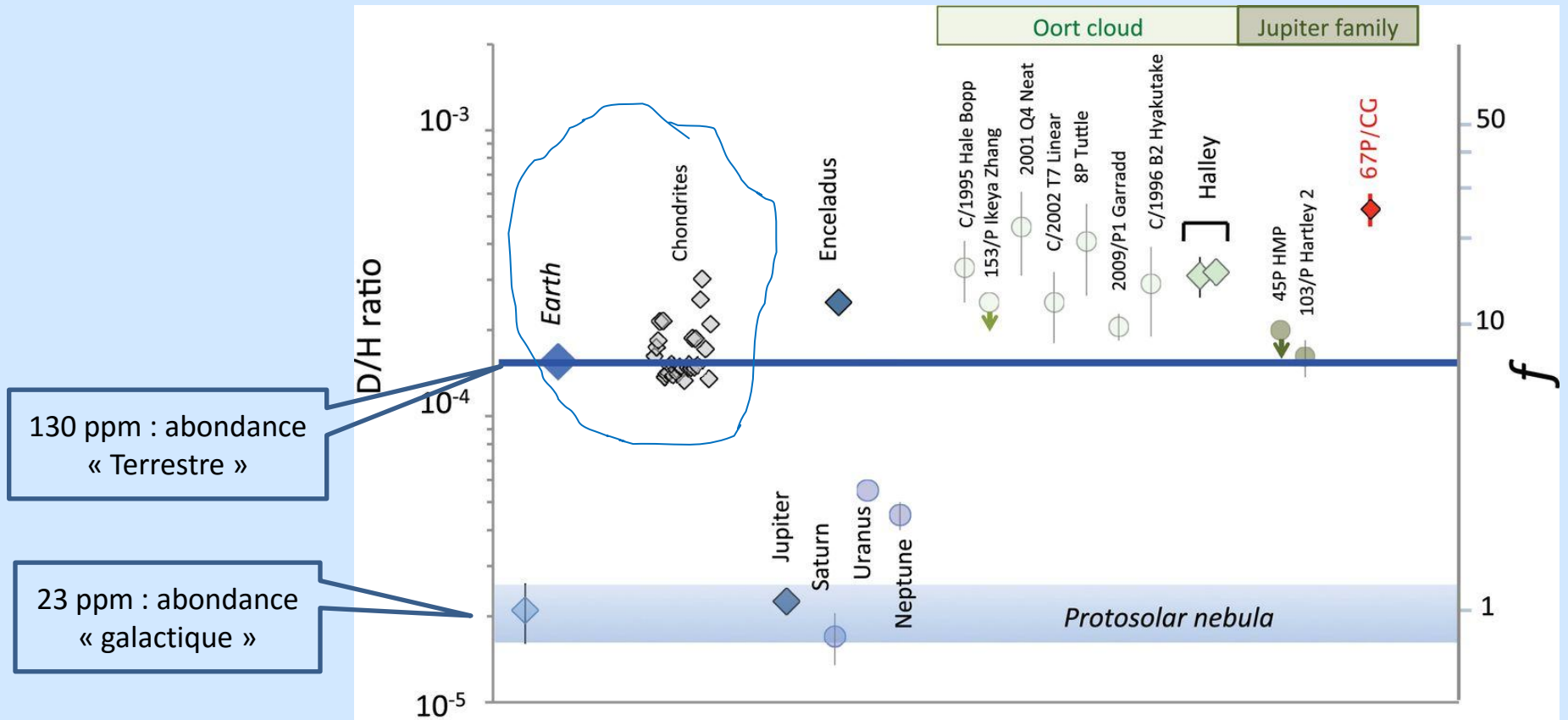
L'origine de l'eau sur Terre et l'affaire du deutérium

Le dosage de l'eau lourde des océans donne l'abondance du deutérium sur Terre



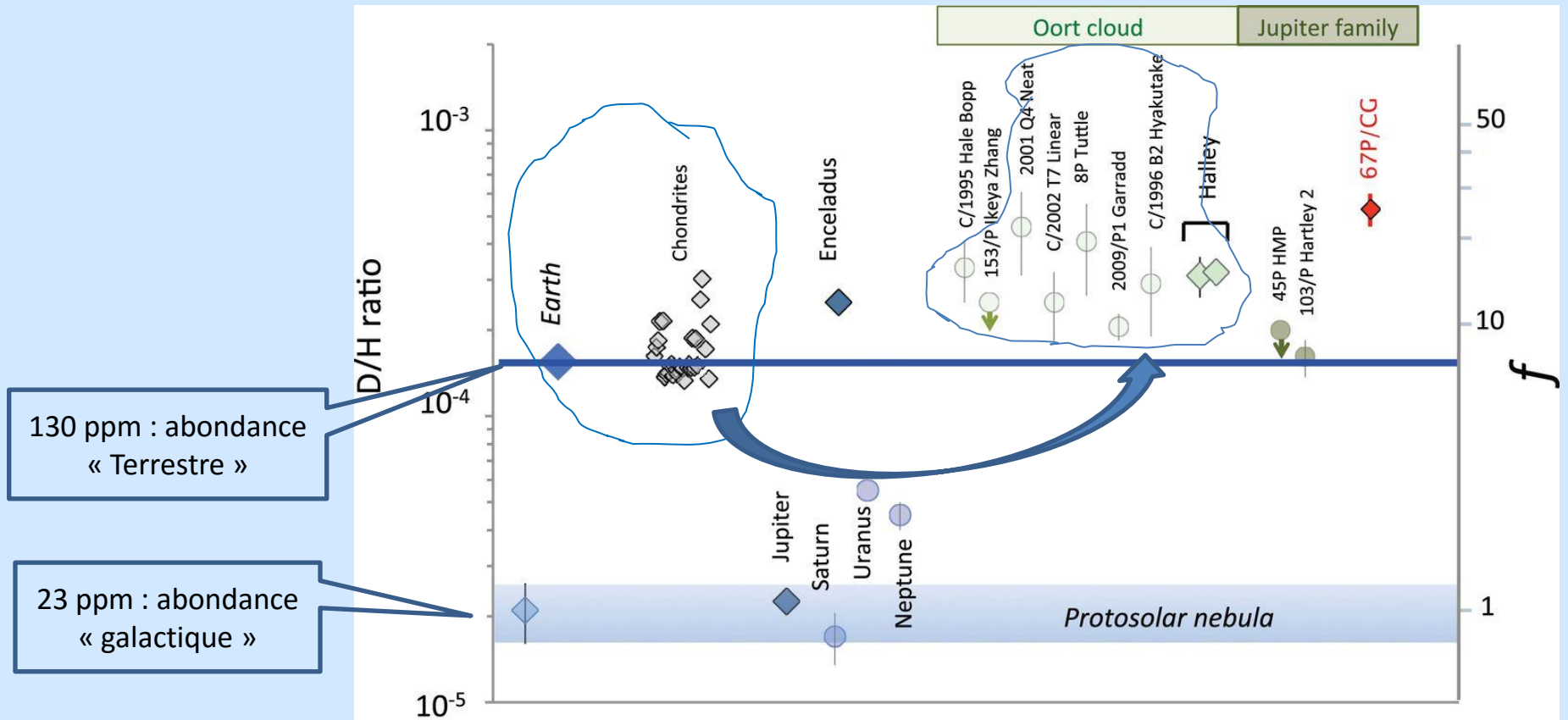
L'origine de l'eau sur Terre et l'affaire du deutérium

Les météorites ont la même deutériation que l'eau de mer
→ L'eau à l'air d'avoir été apportée par les astéroïdes



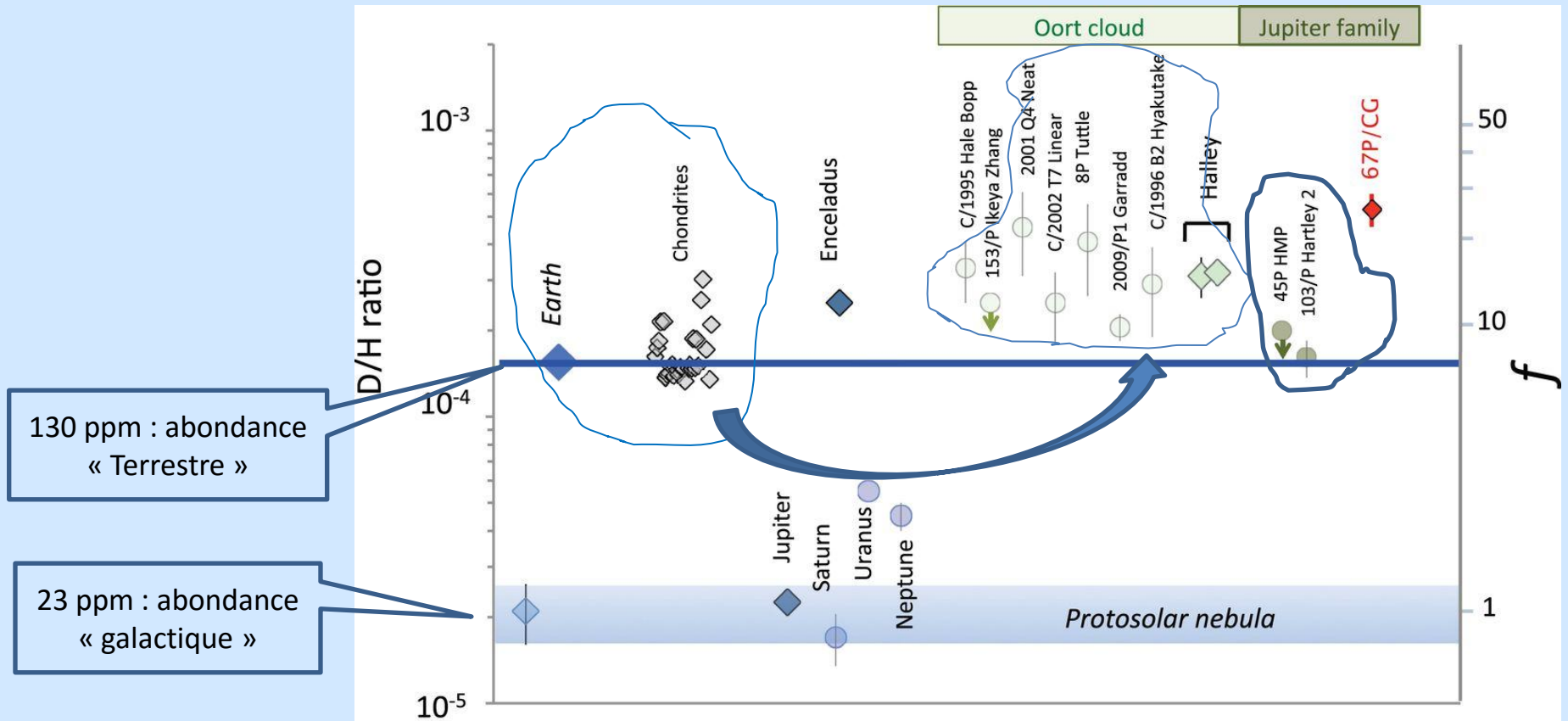
L'origine de l'eau sur Terre et l'affaire du deutérium

Les comètes du nuage d'Oort sont nettement plus deutérées
→ L'eau vient des astéroïdes, pas des comètes



L'origine de l'eau sur Terre et l'affaire du deutérium

Deux comètes de la famille de Jupiter ont des abondances « terrestres »
➔ L'eau viendrait peut-être aussi des comètes de cette famille !



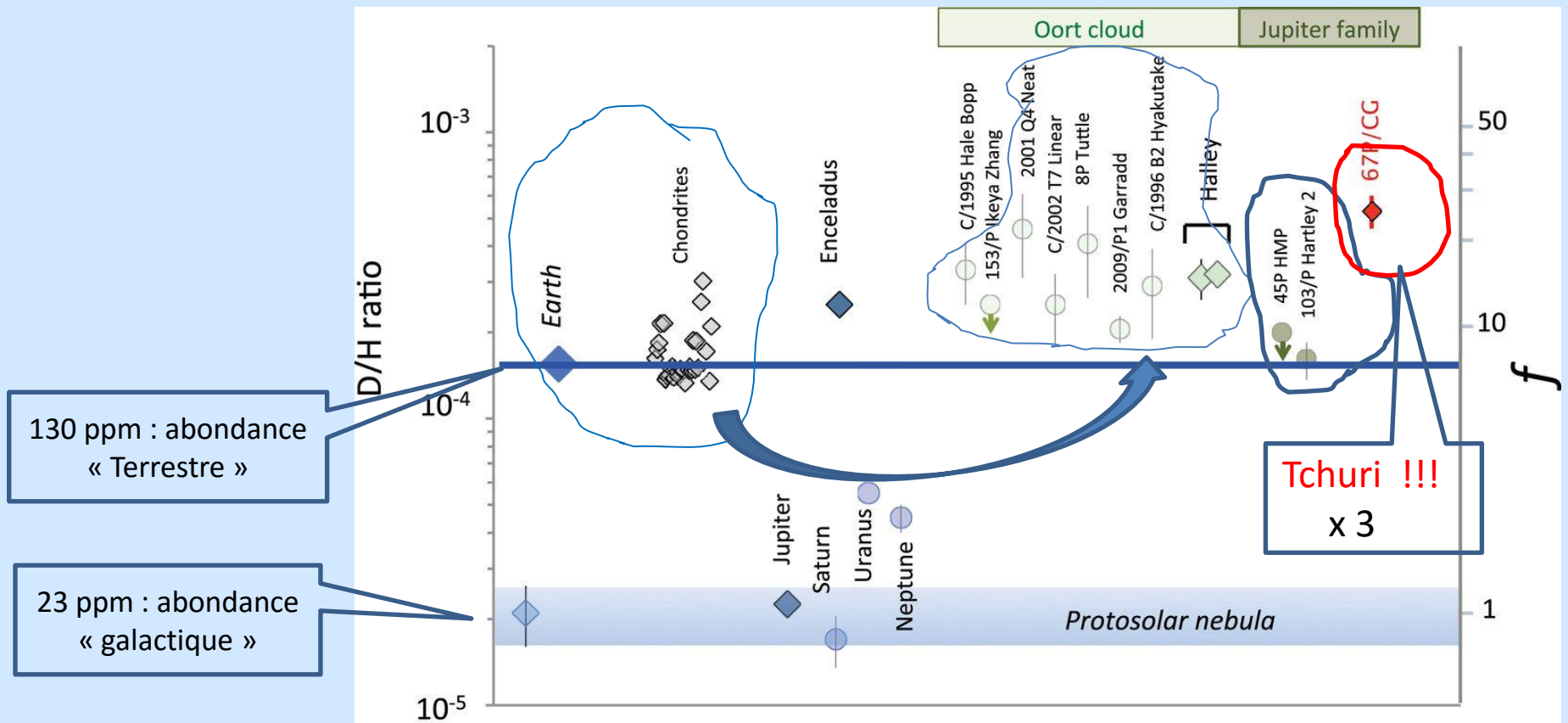
130 ppm : abondance « Terrestre »

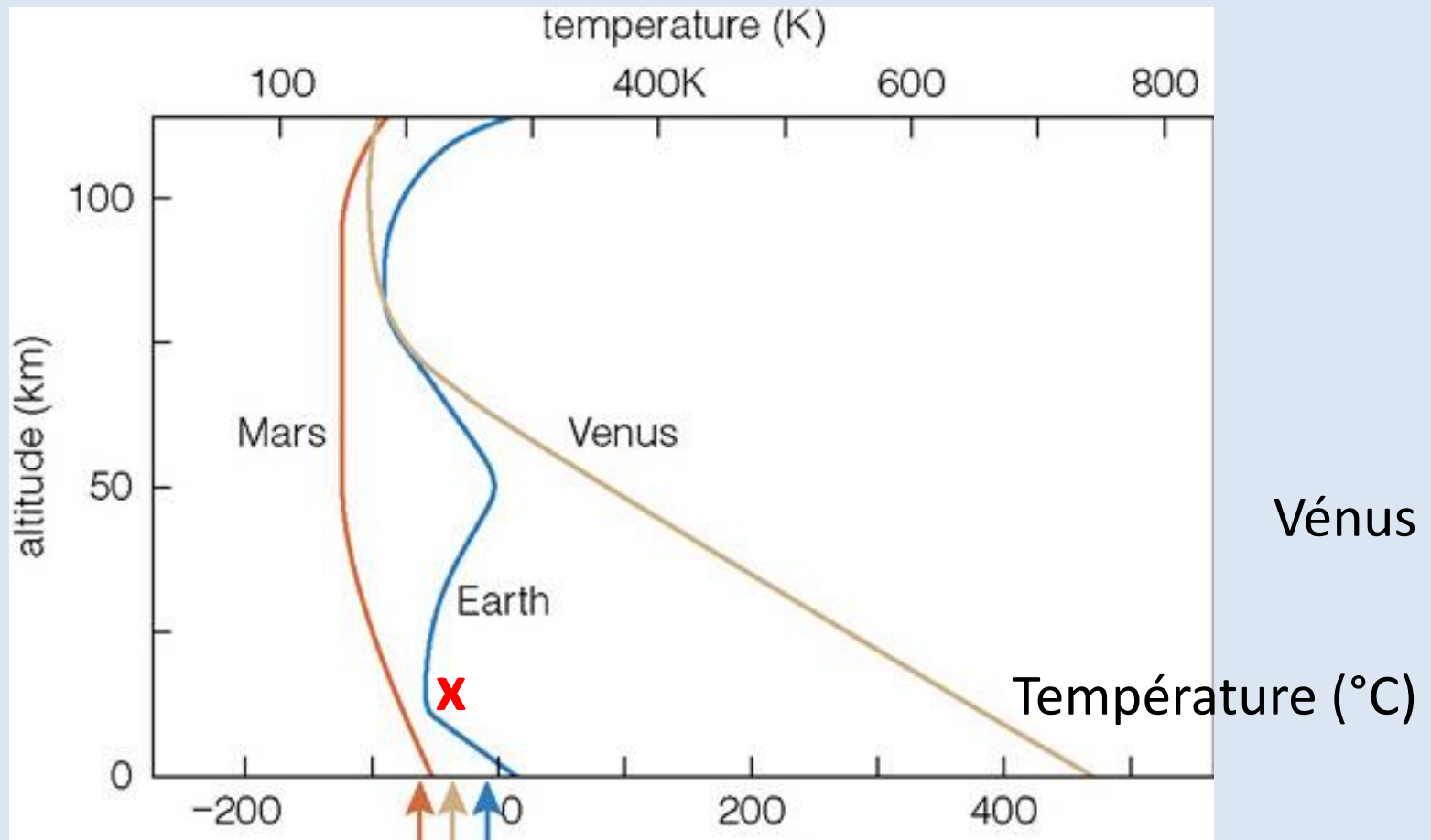
23 ppm : abondance « galactique »

L'origine de l'eau sur Terre et l'affaire du deutérium

Tchuri est trois fois plus deutérée que les océans

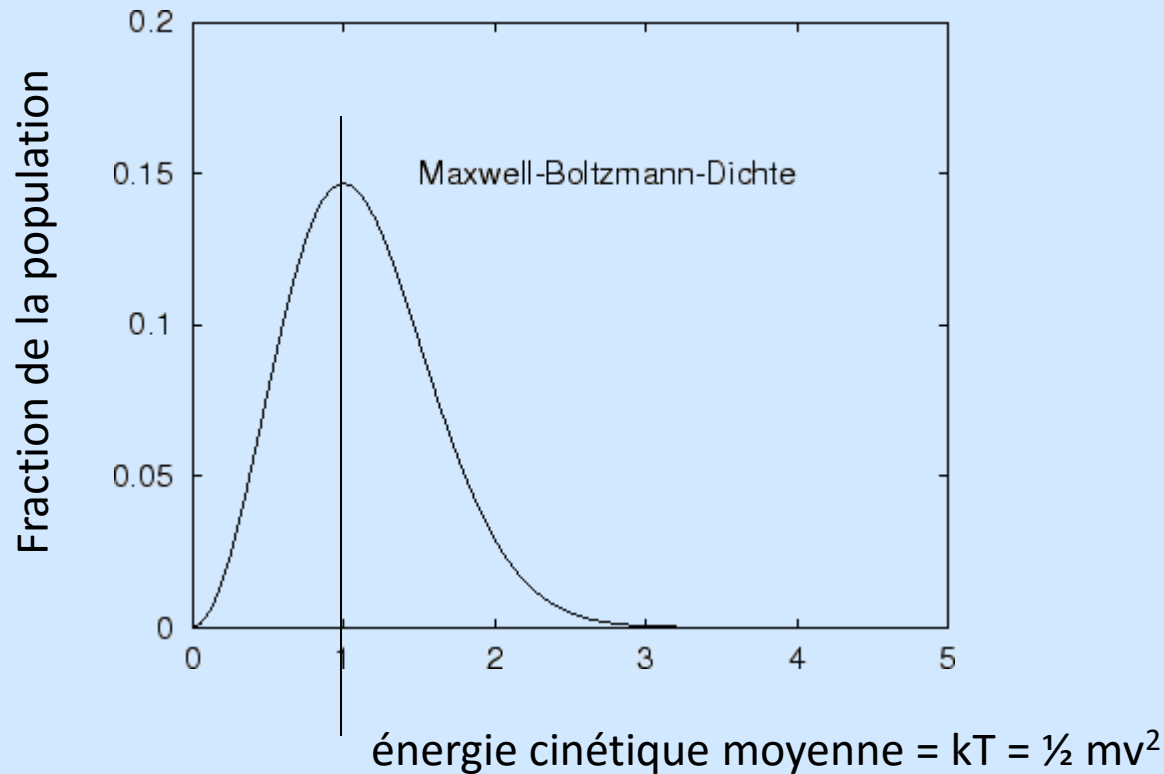
→ Ca doit être plus compliqué que ce que l'on croyait !





La Terre retient bien son eau : barrière du froid

Vitesse moyenne des molécules à la température T : distribution de Boltzmann

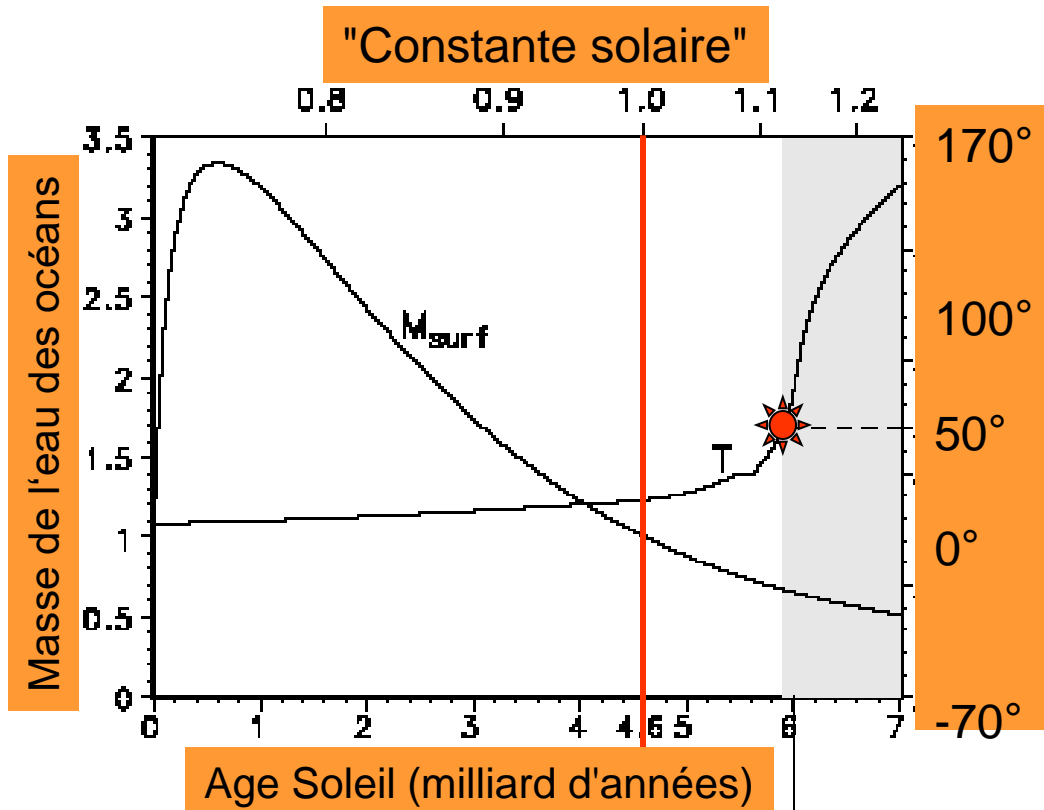


Vitesse de libération : $v_{ech} = (2GM/(a+h))^{1/2}$

Si $v_{mol} > v_{ech}$ une molécule de mouvement dirigé vers le haut peut s'échapper dans l'espace

Mais ça ne durera pas toujours

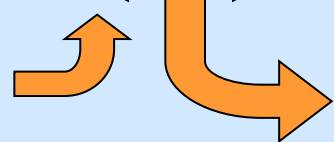
Croissance de la « Constante solaire »
Le Soleil chauffe de plus en plus !



L'effet de serre s'emballe
Température moyenne
dépasse 50 °C

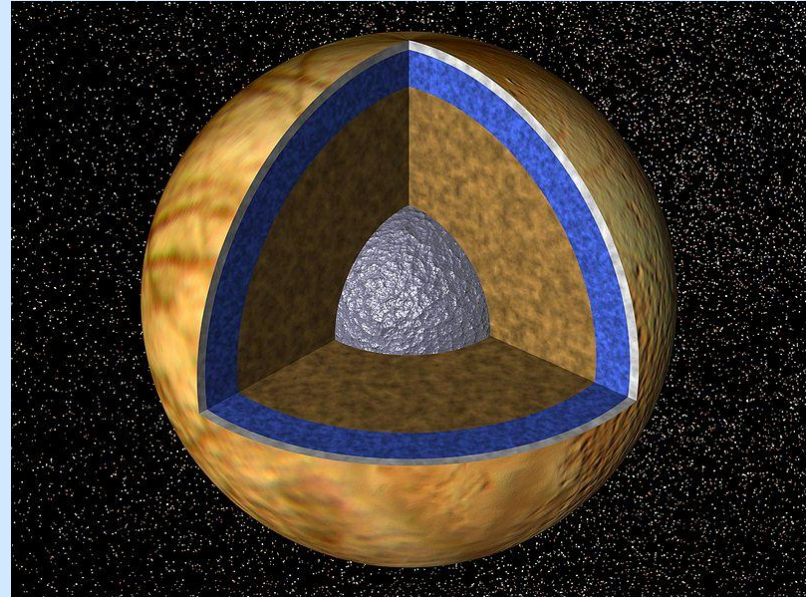
L'eau des océans
s'évapore

2014

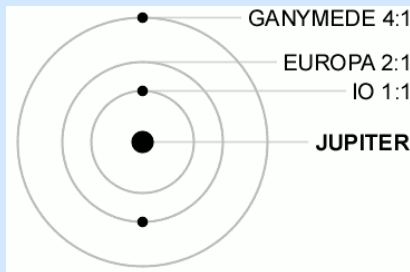


1,5 Milliard d'années

L'eau ailleurs : les planètes (lunes) banquises

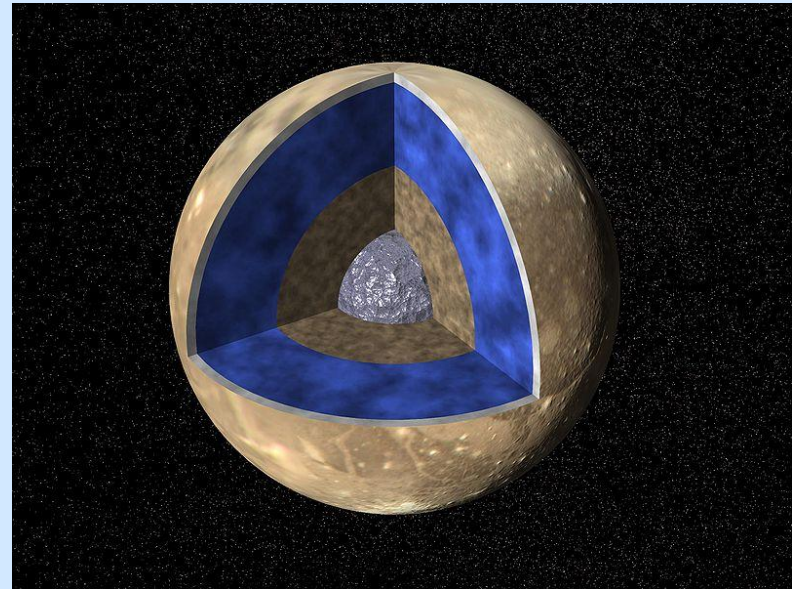
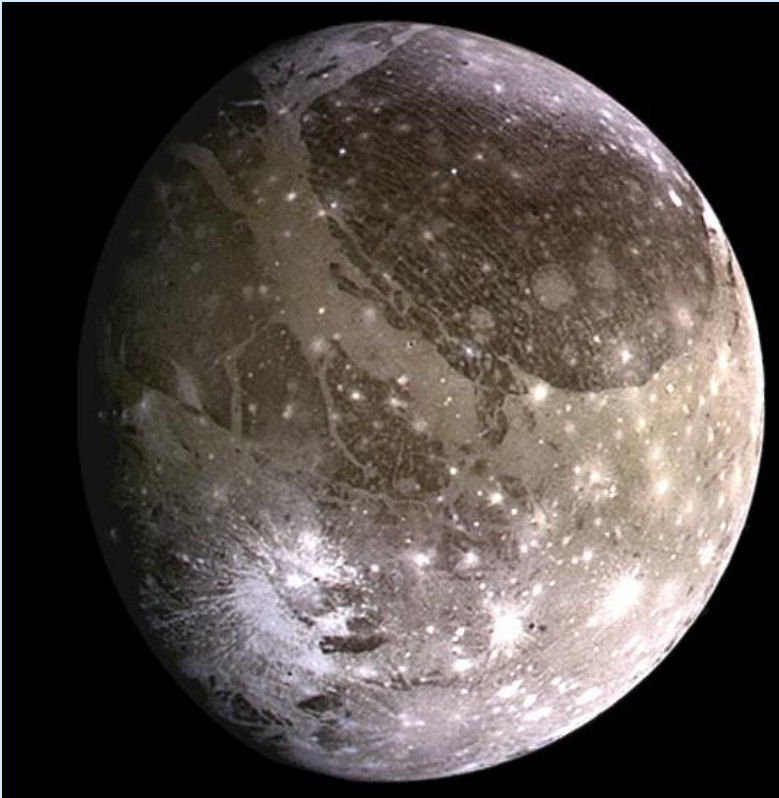


Europa



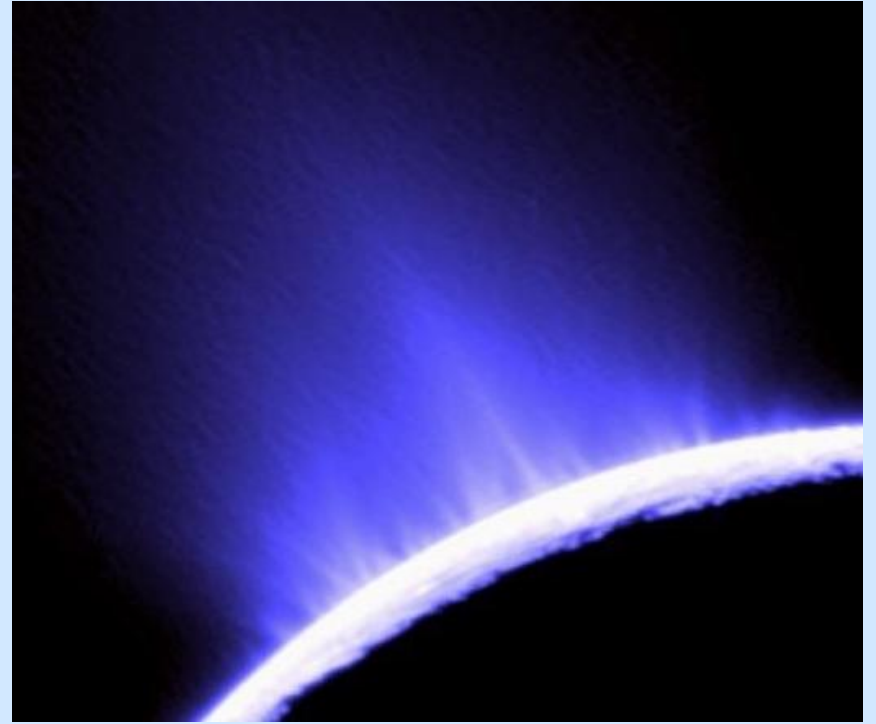
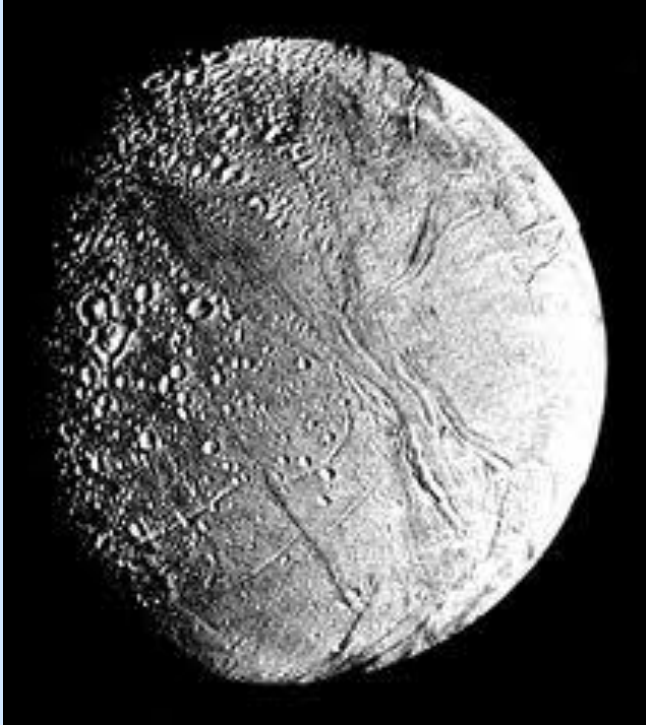
L'eau ailleurs : les planètes (lunes) banquises

Ganymède



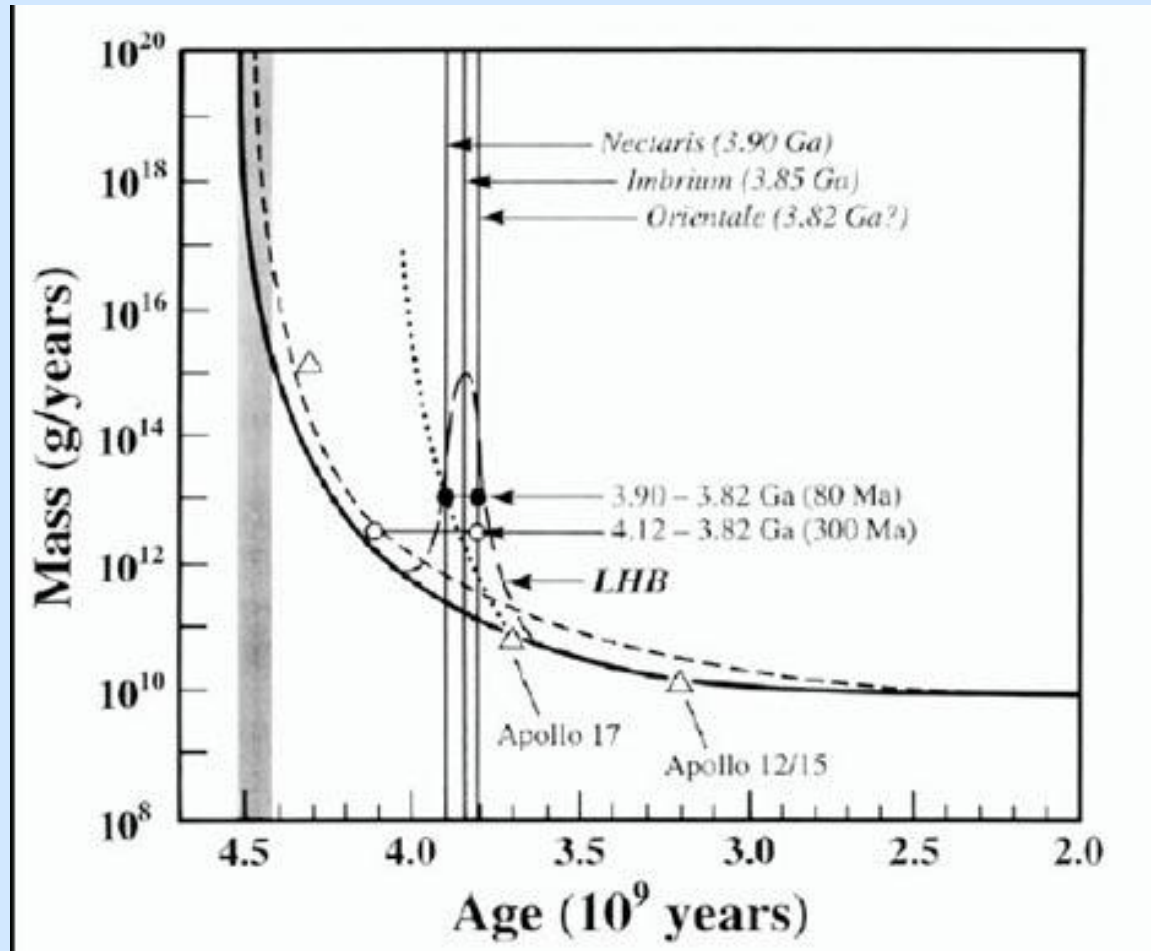
L'eau ailleurs : les planètes (lunes) banquises

Encelade (Saturne)

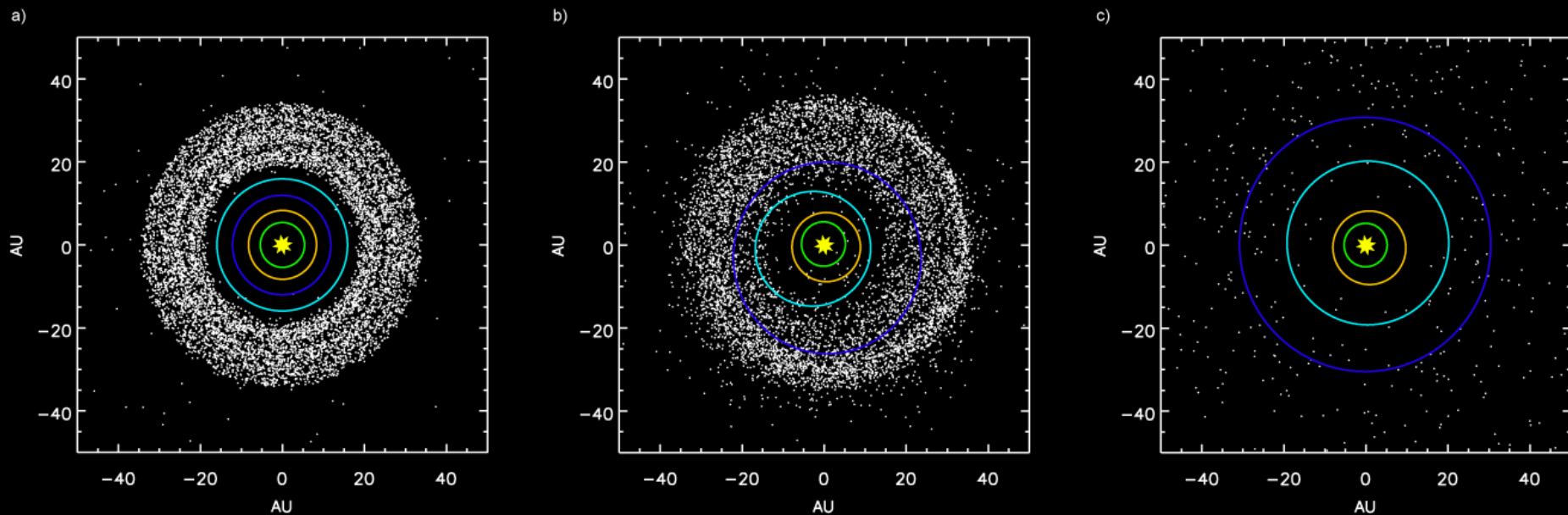


Geysers d'Encelade

Le « Modèle de Nice » ou « Grand Bombardement tardif » (LHB)



Restructuration du Système solaire



Neptune (en bleu) passe au-delà d'Uranus (en vert)
Le nuage des planétésimaux « glaçons » est dispersé
Les planètes sont moins serrées



Seule au monde ?