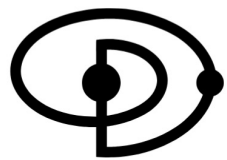


L'histoire de l'eau sur la Terre et les planètes



Thérèse Encrenaz



Observatoire
de Paris

LIRA, Observatoire de Paris – PSL
Montgeron, 6 décembre 2025

PSL 

Plan de l'exposé

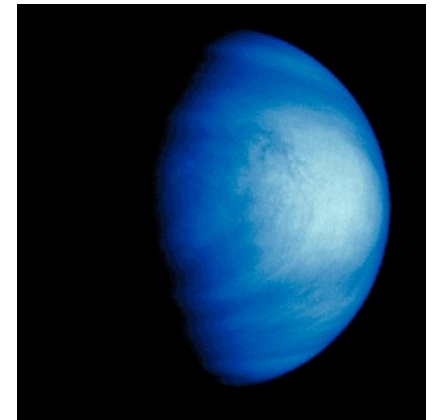
- **1. L'origine de l'eau sur la Terre**

- Le modèle de formation des planètes du Système solaire
- L'abondance du deutérium: un diagnostic de l'origine de l'eau
- L'eau dans les comètes et dans les météorites
- Une autre théorie: un disque de vapeur d'eau
- ... et une dernière hypothèse: une origine interne?



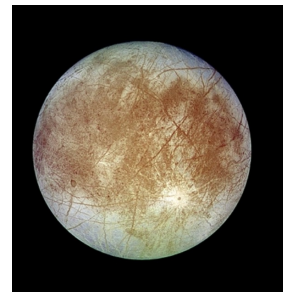
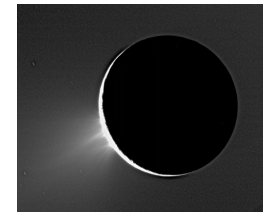
- **2. L'eau sur Mars et Vénus**

- À l'origine, un Soleil moins brillant qu'aujourd'hui
- Mars: des traces d'eau liquide dans le passé
- Les planètes terrestres: des destins divergents



- **3. L'eau dans les planètes géantes et les satellites extérieurs**

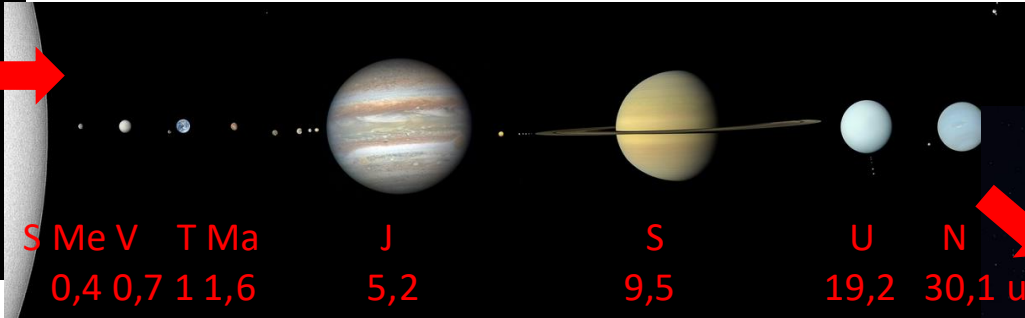
- Europe et Encelade: un océan interne en contact avec le noyau
- Titan et Ganymède: un océan piégé entre deux couches de glace



- **4. Conclusions sur l'habitabilité des planètes**



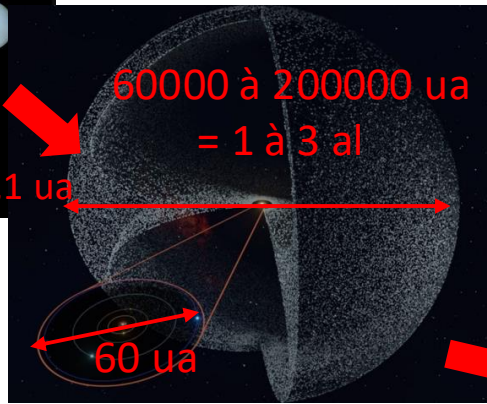
Les planètes du Système solaire



La Terre
R = 6400 km

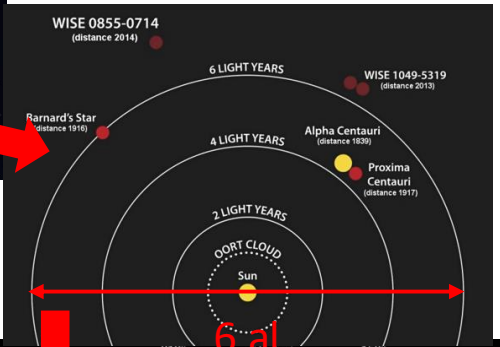
Distance Soleil-Terre = 1 unité astronomique (ua)

Le nuage de Oort

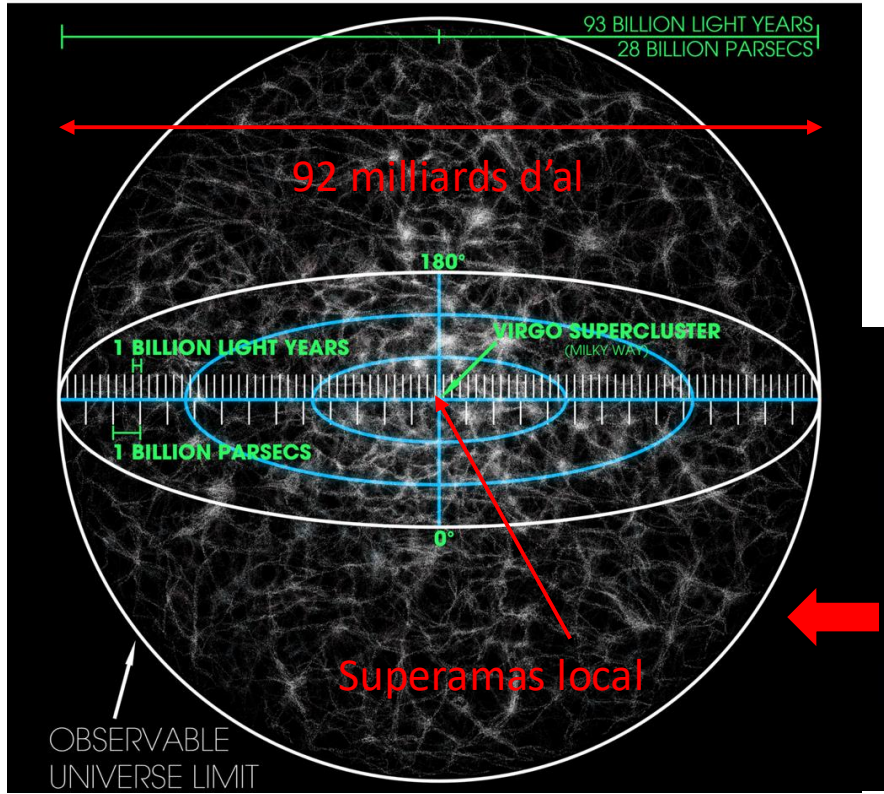


La Terre dans l'Univers

Les étoiles proches

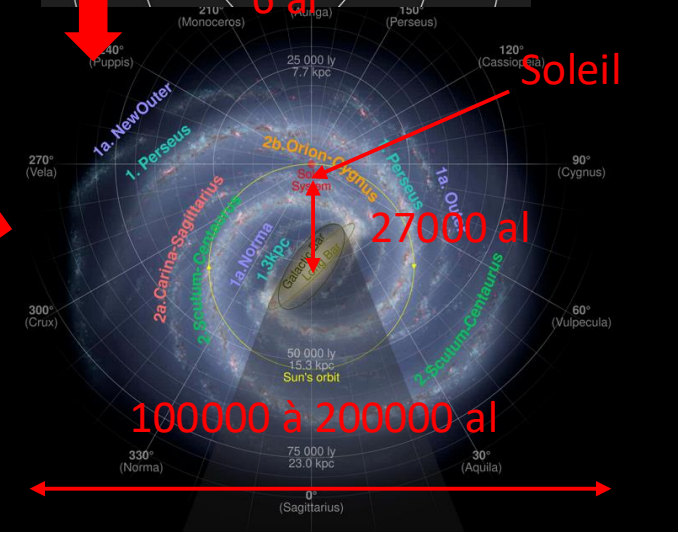


L'Univers observable

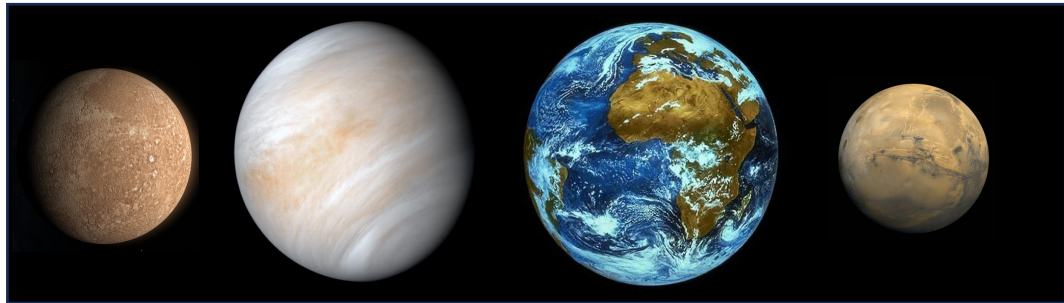


1 ua = 150 millions de km
1 année-lumière (al) = 63240 ua

Le Groupe local et les galaxies proches



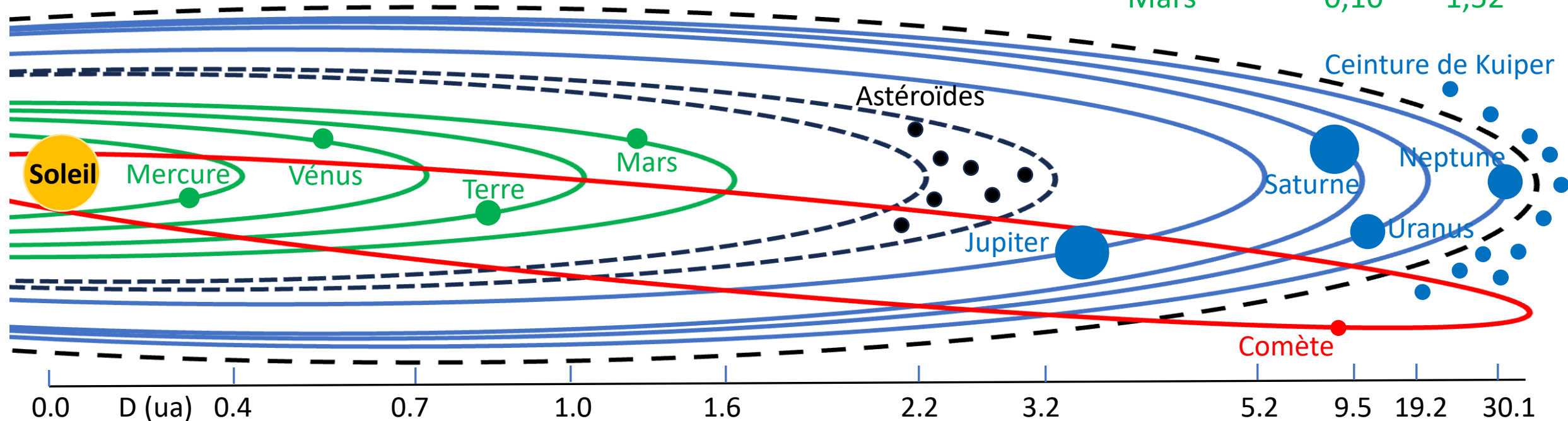
La Galaxie vue de dessus



Le Système Solaire

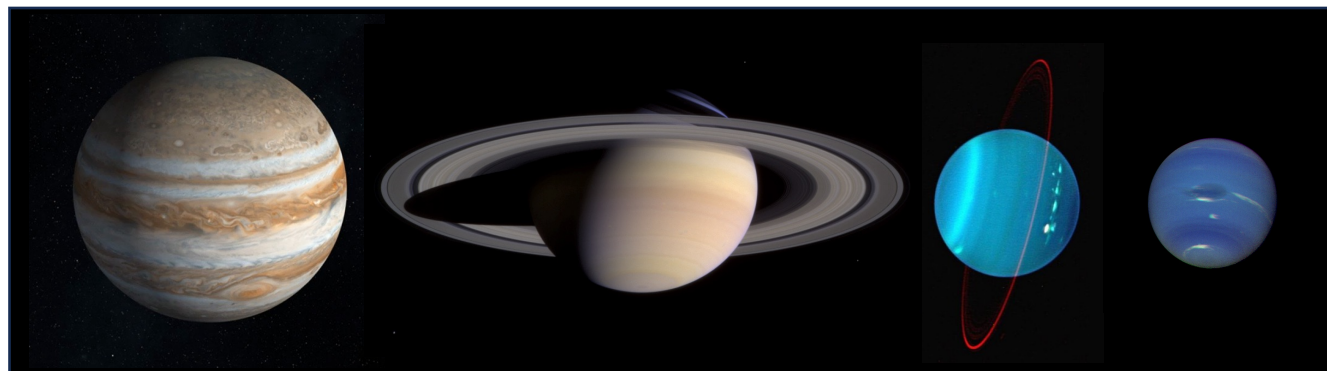
Planètes terrestres

	Masse (M_T)	D (ua)
Mercury	0,05	0,4
Venus	0,81	0,7
Terre	1,00	1,0
Mars	0,10	1,52



	Masse (M_T)	D (ua)
Jupiter	318	5,2
Saturne	95	9,5
Uranus	14	19,2
Neptune	17	30,1

Planètes géantes

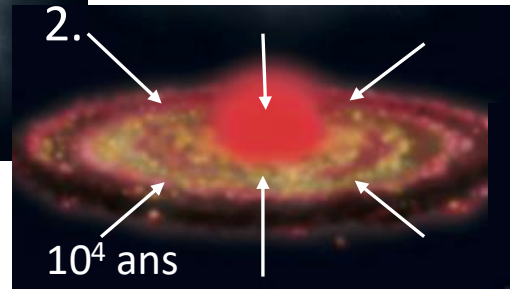


La formation des planètes du Système solaire (1)



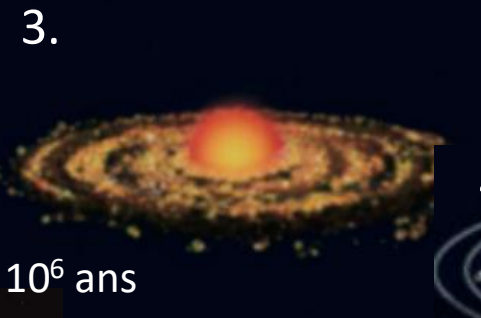
Nébuleuse en rotation
et en contraction

Effondrement
en un disque



10^4 ans

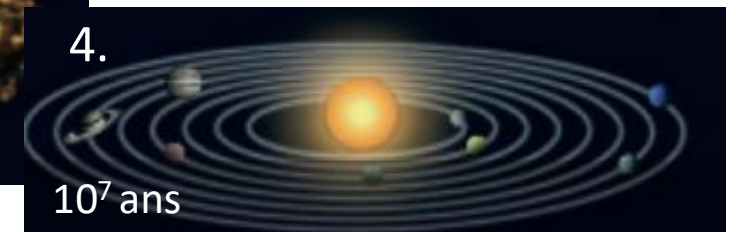
Formation d'une étoile
centrale et de sillons
dans le disque



10^6 ans

**Formation d'un
système planétaire**

Formation de planètes et
disparition du disque



10^7 ans



Nébuleuse de l'Aigle

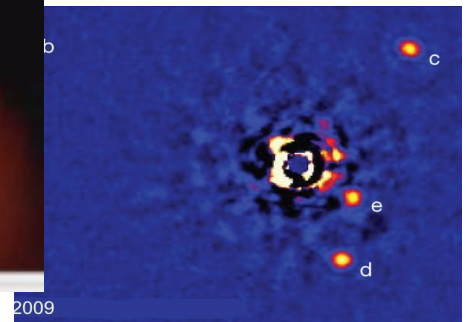
Disque de Beta Pictoris

A photograph of the Beta Pictoris disk, showing a bright, glowing disk of gas and dust surrounding a central star. The disk has a distinct ring-like structure and is tilted at an angle. The text "PDS 70" is written near the bottom left of the disk.

PDS 70

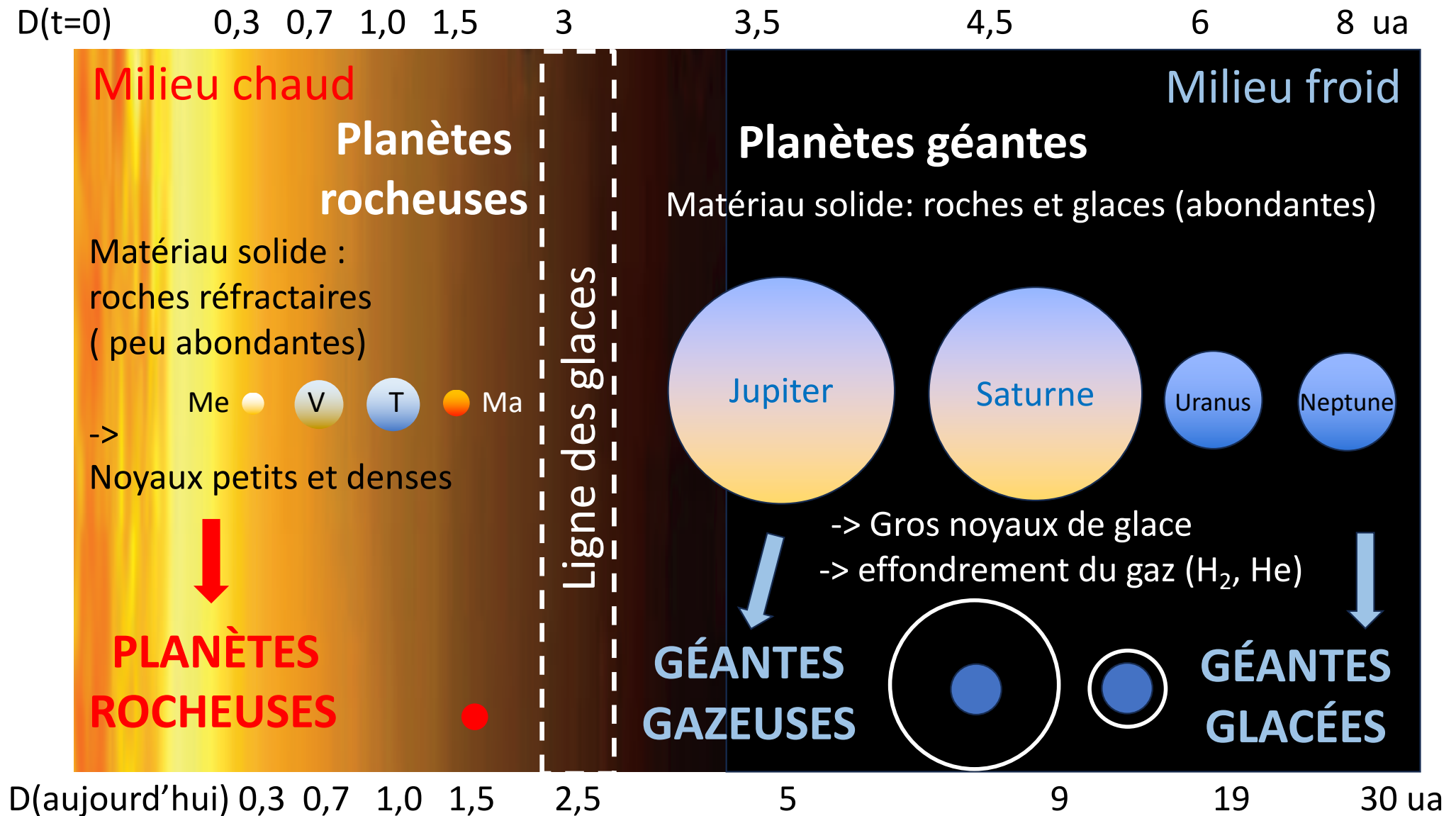


HR 8799



2009

La formation des planètes du Système solaire (2)



1. L'origine de l'eau sur Terre

La formation des océans terrestres

- **Date de formation:** < 150 Ma après la formation de la planète, d'après l'analyse des zircons les plus anciens (ZrSiO_4 , silicates de zirconium)
- L'impact de Théia qui a donné naissance à la Lune date de 100 Ma
- Les océans terrestres se sont-ils formés avant, pendant ou après l'impact de Théia?



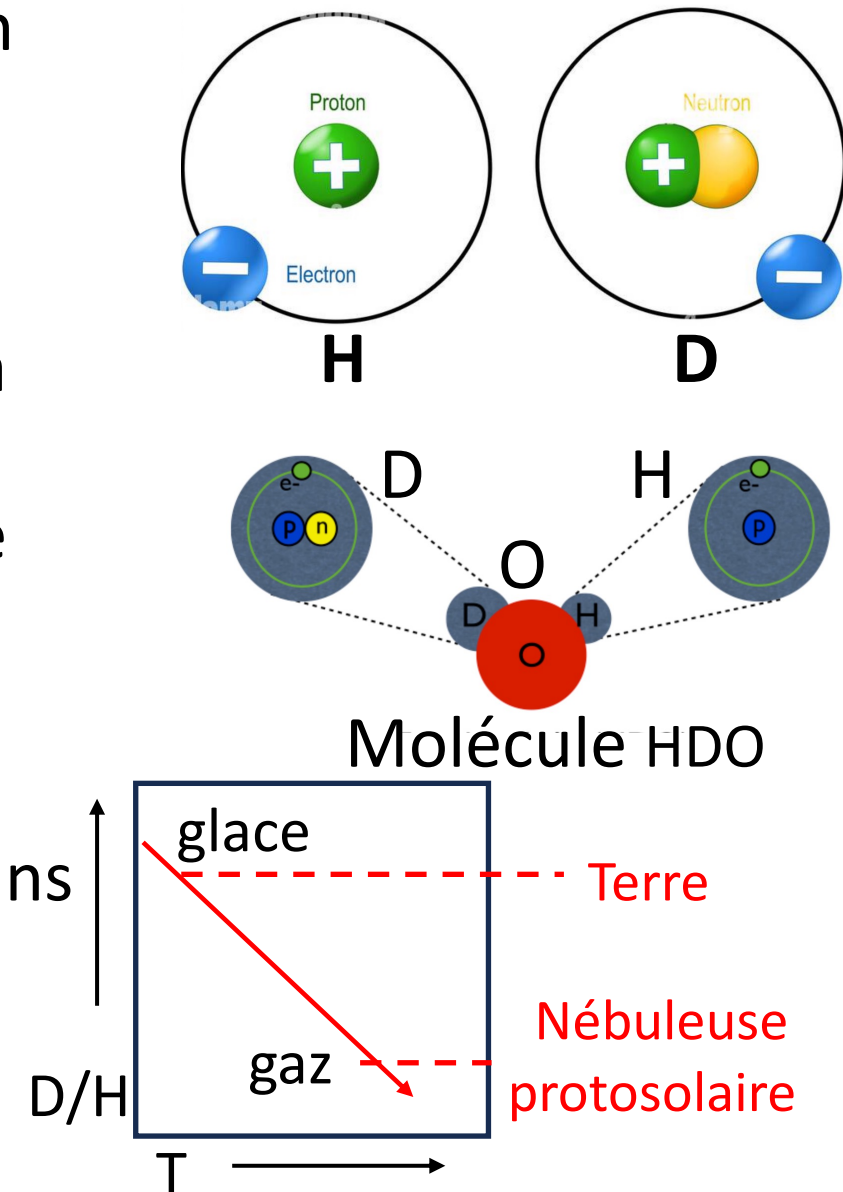
Cristal de zircon



Impact
de Théia
(image d'artiste)

Le rapport D/H : un diagnostic de la température de formation

- **Le deutérium (D)**: un atome d'hydrogène (H) avec un neutron -> 2 fois plus lourd
- Le deutérium est issu du Big Bang: $D/H = 2.5 \cdot 10^{-5}$, proche du D/H protosolaire
- Pour une molécule donnée, **D/H augmente quand la température diminue**
- Dans les **océans terrestres**, D/H (VSMOW, à partir de HDO/H_2O) est **6 fois la valeur protosolaire**
- Valeur typique des **corps glacés** formés au-delà de la ligne des glaces
- Le D/H terrestre semble donc favoriser pour les océans **une origine externe provenant du Système solaire extérieur**



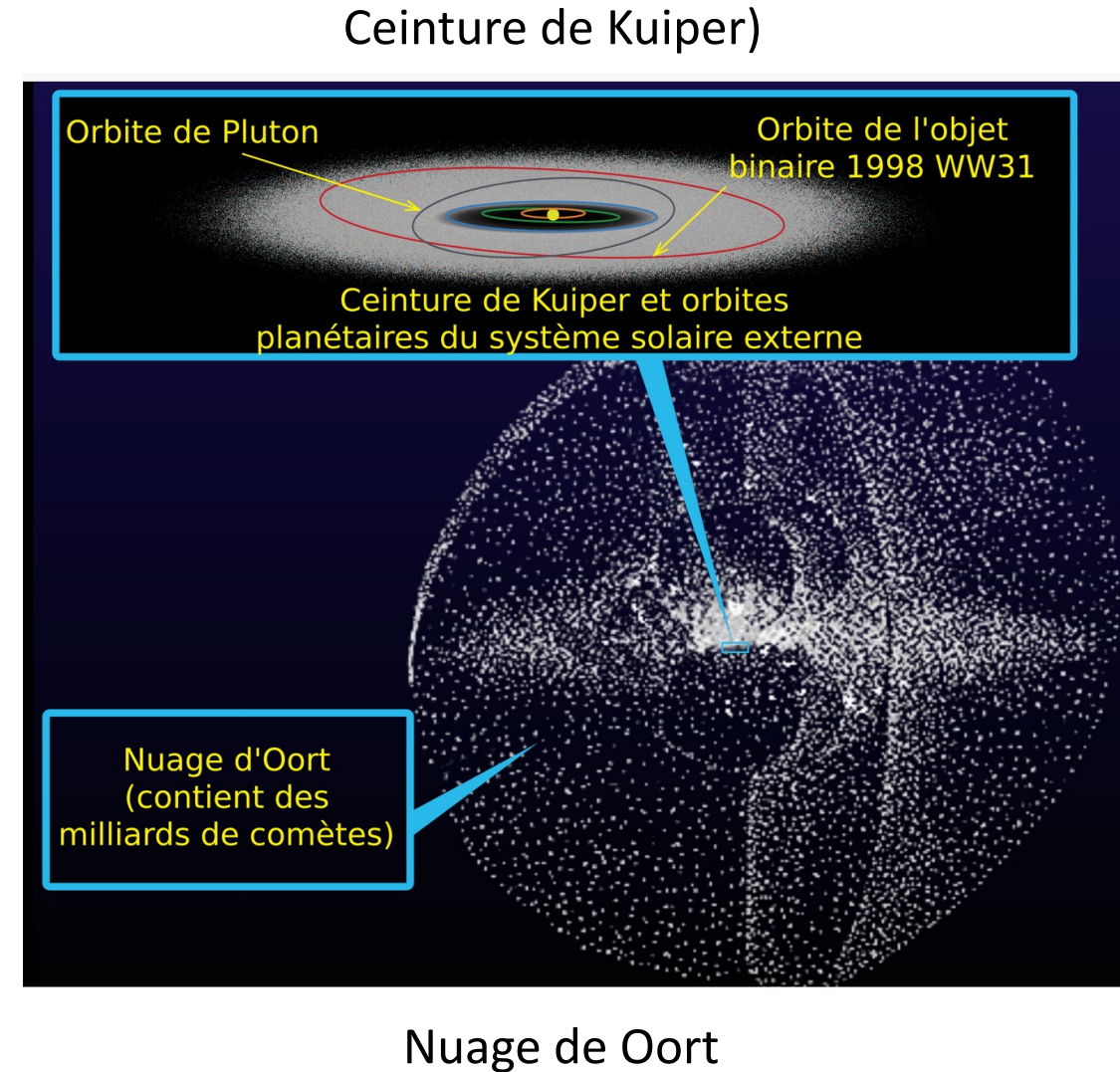
L'origine des comètes: deux réservoirs

- **Ceinture de Kuiper (30 - 100 ua)**

- Comètes à courte période et de faible inclinaison
- Forte interaction gravitationnelle avec Jupiter
- > « comètes de la famille de Jupiter » (P = 6 ou 12 ans)
- Nombreux passages -> Faible activité (46P/Wirtanen, 67P/Chury)

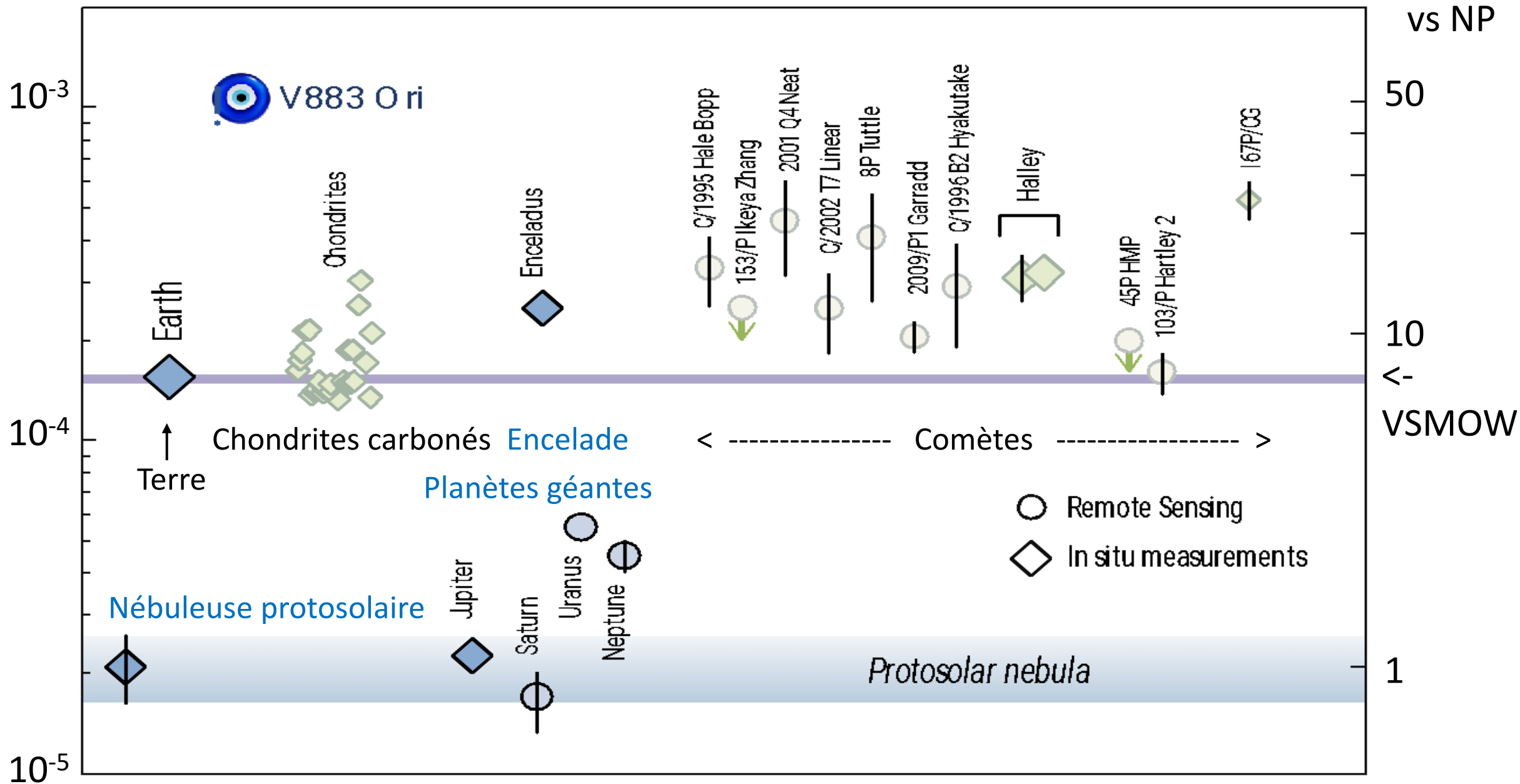
- **Nuage de Oort (30000 - 100000 ua)**

- Comètes d'inclinaison quelconque, nouvelles (C/1995 O1 Hale Bopp) ou de longue période (1P/Halley, P = 76 ans)
- Généralement très actives



D/H

D/H dans le Système solaire extérieur

Enrichissement
vs NP

D/H dans les comètes

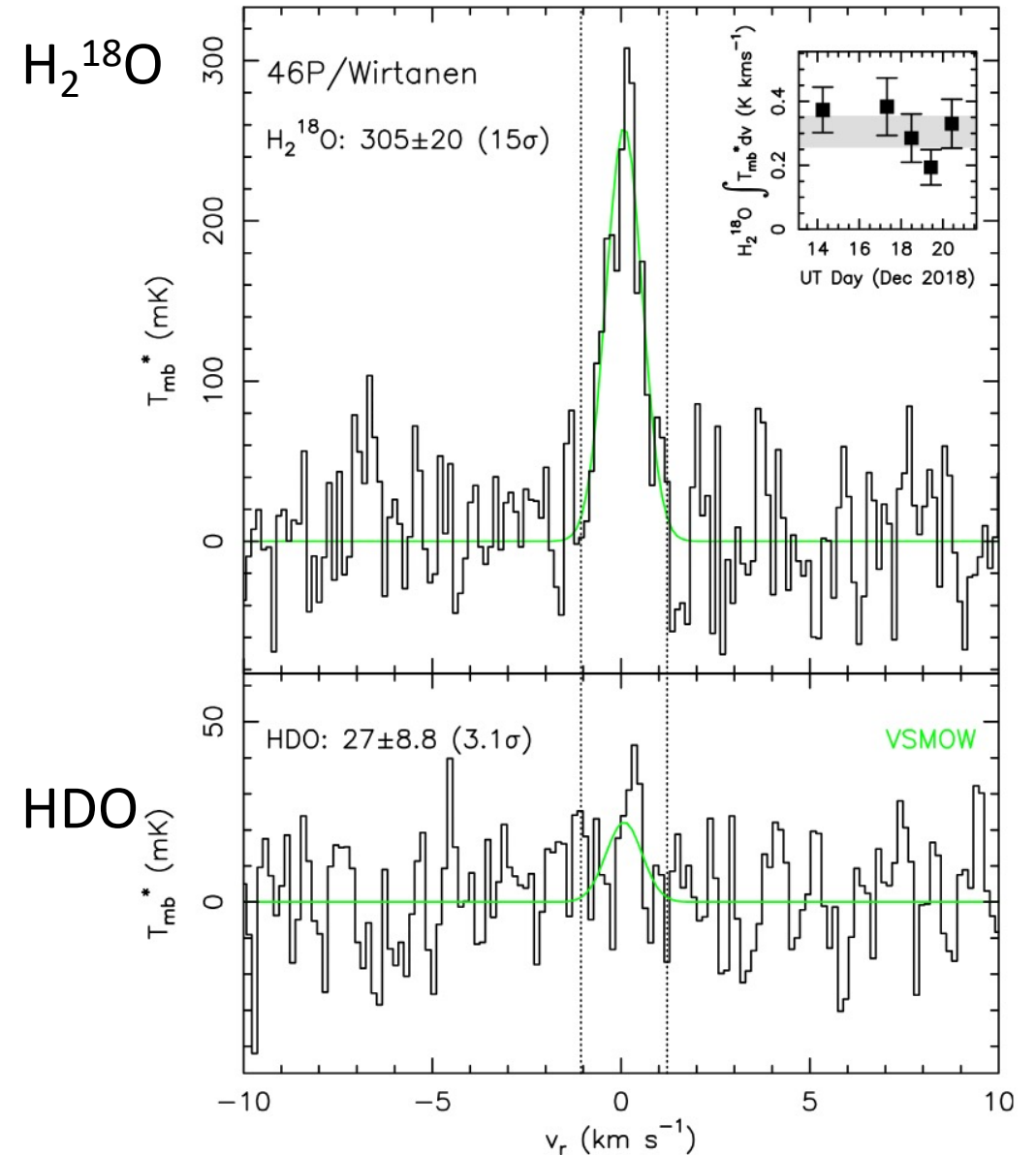
- **Deux méthodes:**

- à distance (spectroscopie hétérodyne submm: Herschel, SOFIA, Odin...)
- In situ (spectrométrie de masse): 1P/Halley, 67P/Chury

- **Résultats:**

- Une dizaine de mesures (comètes de Oort et comètes de la famille de Jupiter)
- Le D/H varie entre 1 à 3 fois la valeur terrestre, sans corrélation avec l'origine

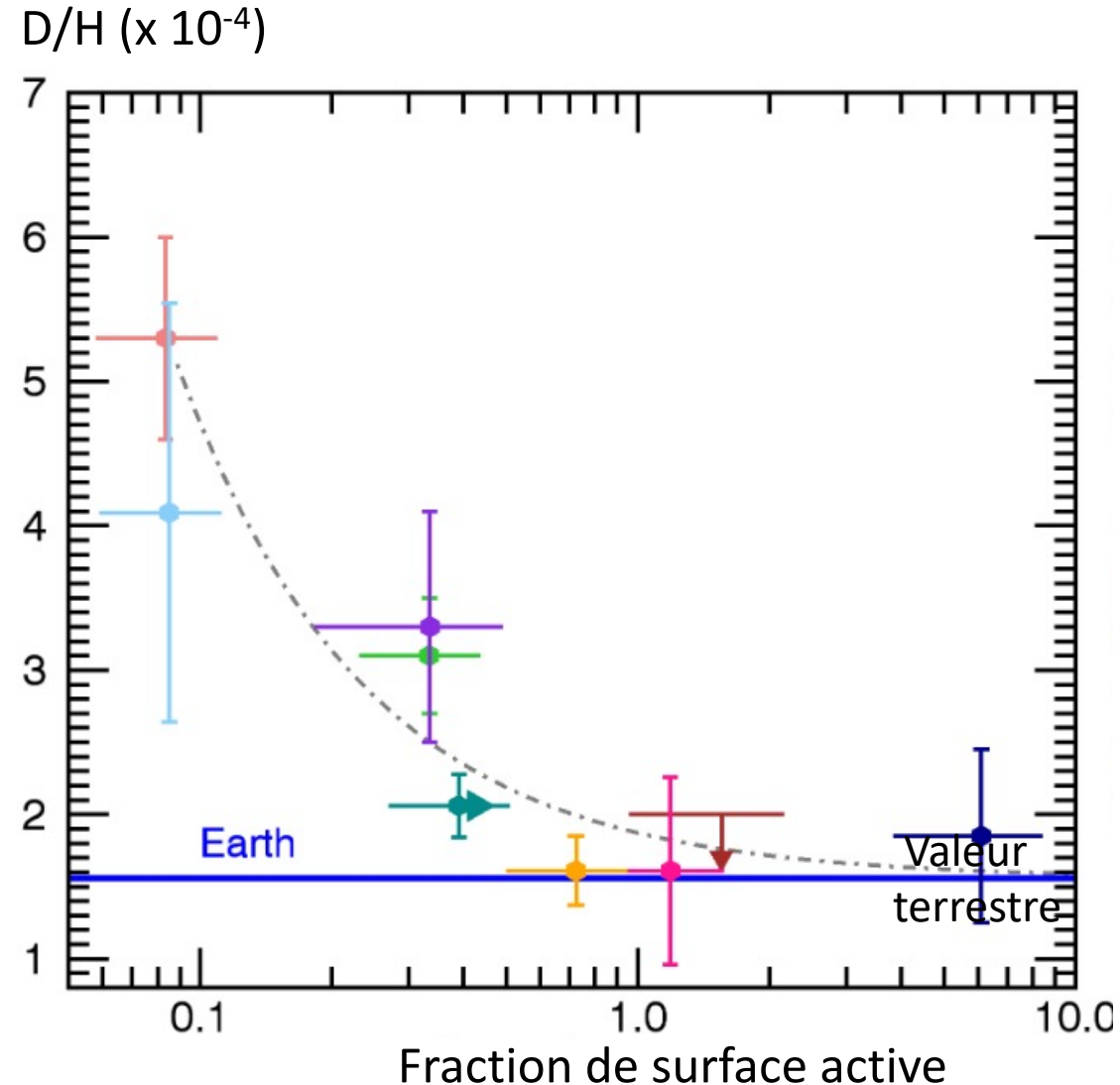
46P/Wirtanen



Une hypothèse nouvelle (Lis et al. 2019)

- Les **comètes hyperactives** (avec une fraction active de la surface élevée) ont un D/H proche de la **valeur terrestre**
- Hypothèse: D/H pourrait avoir 2 sources: le noyau (enrichi en D/H) et les grains de glace (D/H terrestre)
- L'enrichissement de D/H dans le noyau proviendrait d'effets de fractionnement liés à la sublimation

Dans ce cas, les **comètes** pourraient toutes avoir (avant fractionnement) un D/H terrestre et être à l'origine de l'eau des océans

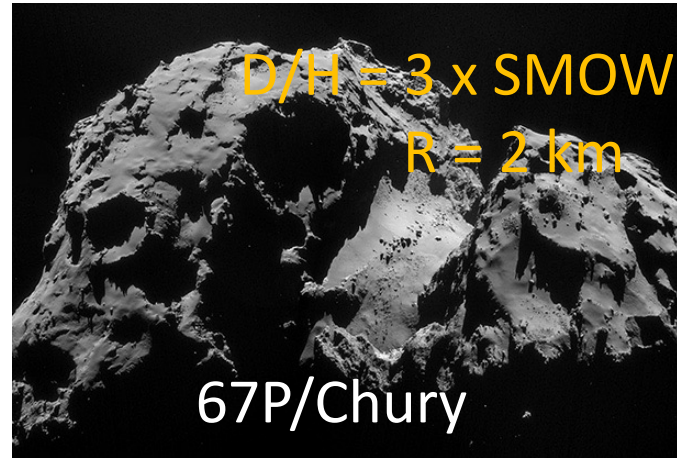


-> Hypothèse à tester sur un plus grand nombre de comètes

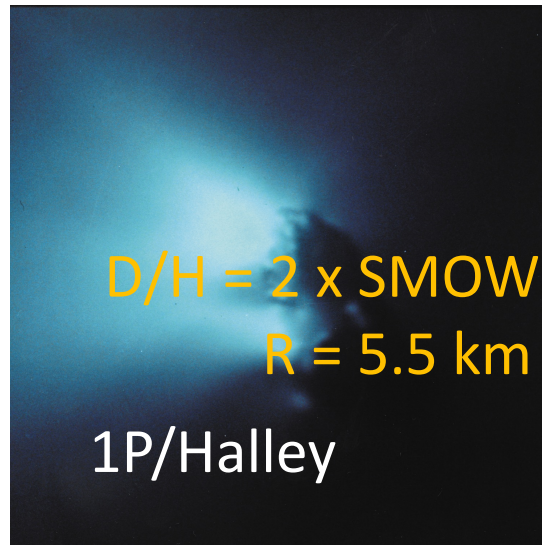
D/H dans les comètes

Origine

Ceinture de Kuiper



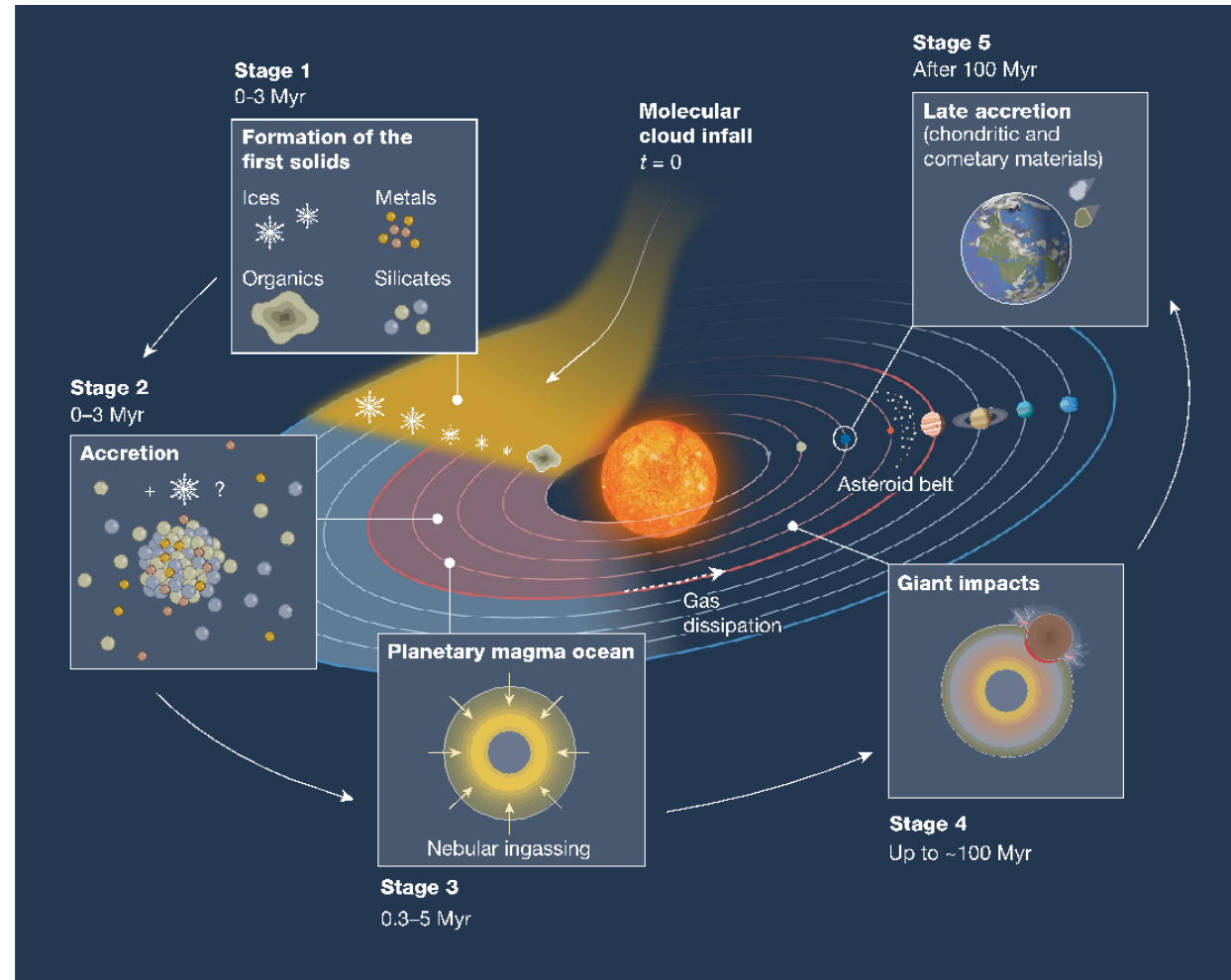
Nuage de Oort



-> Le rapport D/H ne dépend pas de l'origine des comètes

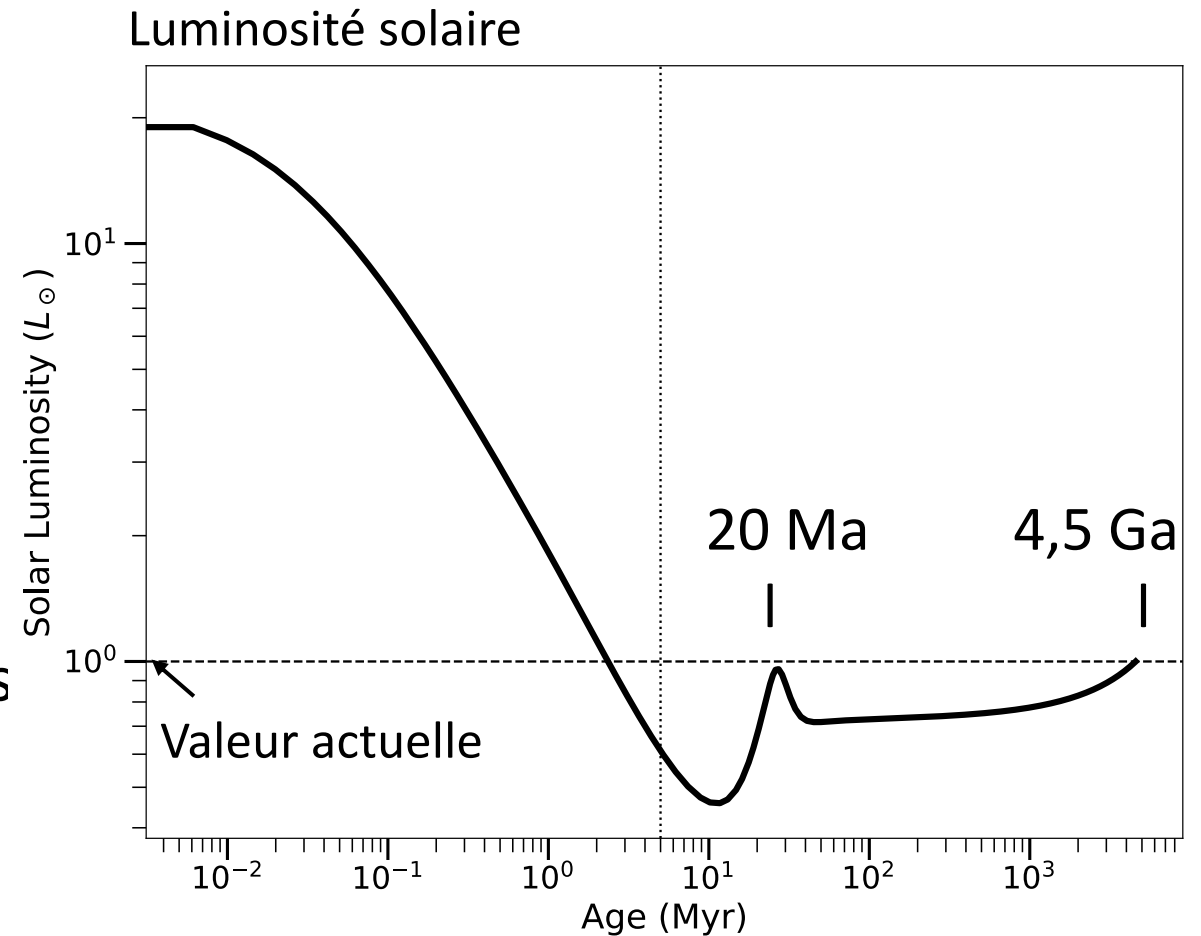
Une autre origine possible: les astéroïdes hydratés

- Les astéroïdes riches en eau de la ceinture principale (corps parents des chondrites carbonées qui ont aussi un D/H terrestre) pourraient être à l'origine des océans terrestres

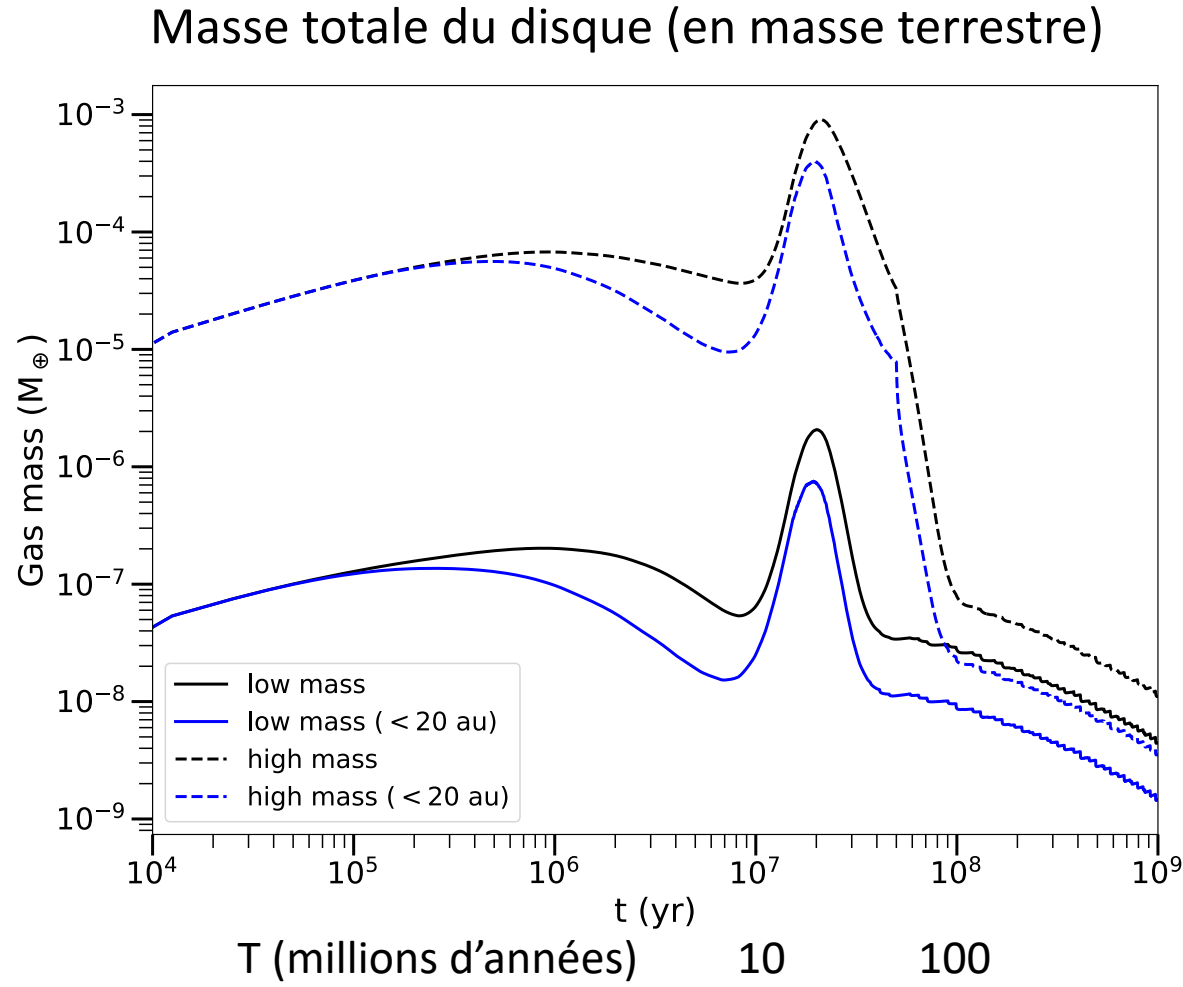


Une autre hypothèse externe: un disque de vapeur d'eau produit lors d'une phase éruptive du jeune Soleil

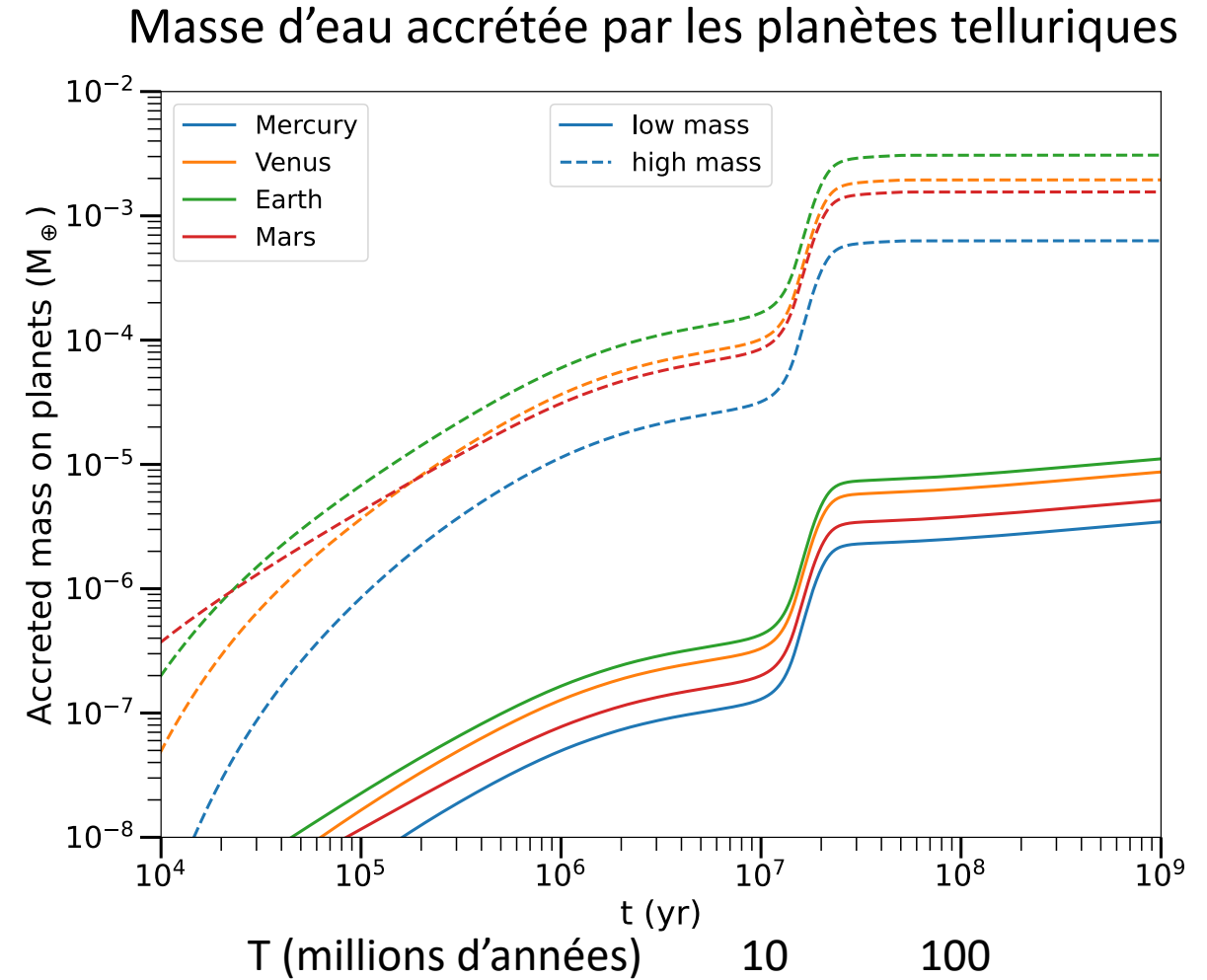
- La clé de l'explication: les variations d'activité du jeune Soleil
- Celui-ci présente un pic d'activité autour de 20 à 30 millions d'années
- -> sublimation des corps glacés de la ceinture principale
- -> formation d'un disque de vapeur d'eau qui va s'étendre par diffusion visqueuse et alimenter les atmosphères des planètes telluriques
- Ce modèle pourrait s'appliquer aux systèmes exoplanétaires



Modèle de sublimation de l'eau des astéroïdes de la ceinture principale



Modèle de transport par diffusion visqueuse



La quantité d'eau apportée sur la Terre serait compatible avec la masse des océans terrestres

Une dernière origine possible: le globe terrestre lui-même?

- Certaines météorites primitives (les « chondrites à enstatite ») se sont avérées riches en hydrogène, ce qui pourrait impliquer qu'elles contenaient de l'eau
- Ces météorites sont considérées comme représentatives de l'intérieur de la Terre
- Dans ce cas, l'eau de la Terre pourrait-elle provenir du globe lui-même?
- Cependant, le rapport D/H (conforme à celui du manteau terrestre) est inférieur au VSMOW....



-> L'eau des océans pourrait avoir plusieurs origines, interne et externes

2. L'eau dans les planètes terrestres



Vénus

$P_s = 93 \text{ bar (CO}_2\text{)}$
 $T_s = 730\text{K (}457^\circ \text{ C)}$

Terre

$P_s = 1 \text{ bar (N}_2\text{,O}_2\text{)}$
 $T_s = 288\text{K (}15^\circ \text{ C)}$

Mars

$P_s = 6 \text{ mbar(CO}_2\text{)}$
 $T_s = 220 \text{ K (-}43^\circ \text{ C)}$

Des atmosphères primitives comparables....
Mais où est passée l'eau de Mars et de Vénus ?

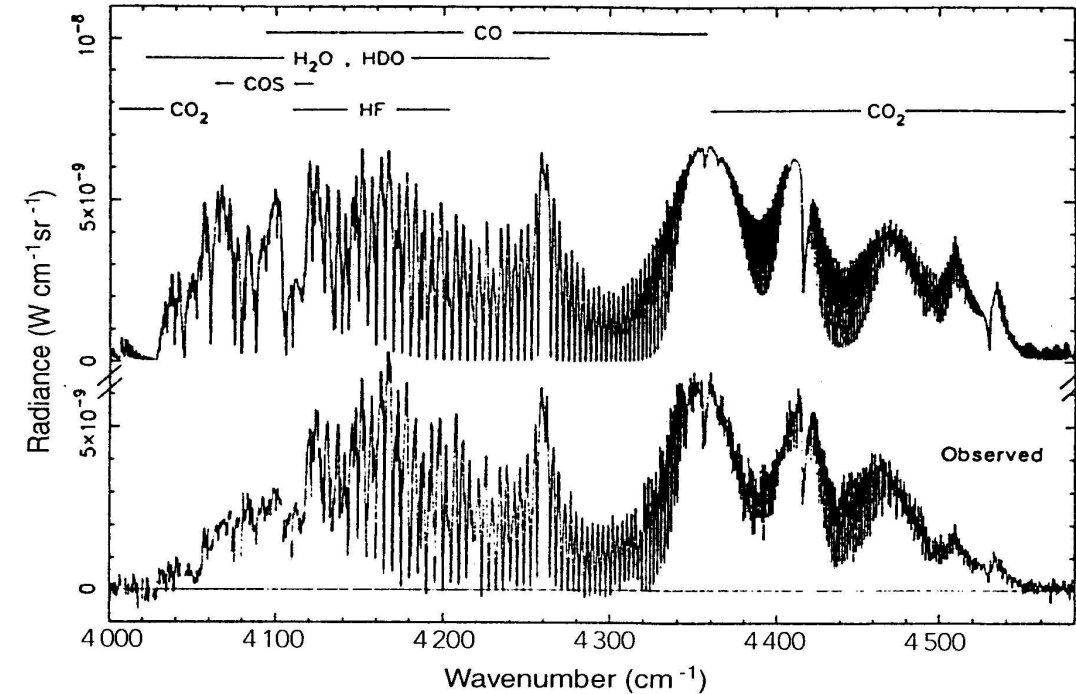
Le deutérium dans l'atmosphère de Vénus: un indice de son histoire passée

Dans la basse atmosphère de Vénus:
signatures spectrales de HDO et H₂O
dans l'infrarouge proche (2,35 μm)

->

$$[D/H]_V = 120 \times [D/H]_T !$$

Implication: L'eau a été très
abondante dans l'atmosphère primitive de Vénus.
Elle s'est échappée massivement, les atomes D
s'échappant moins facilement que les atomes H.



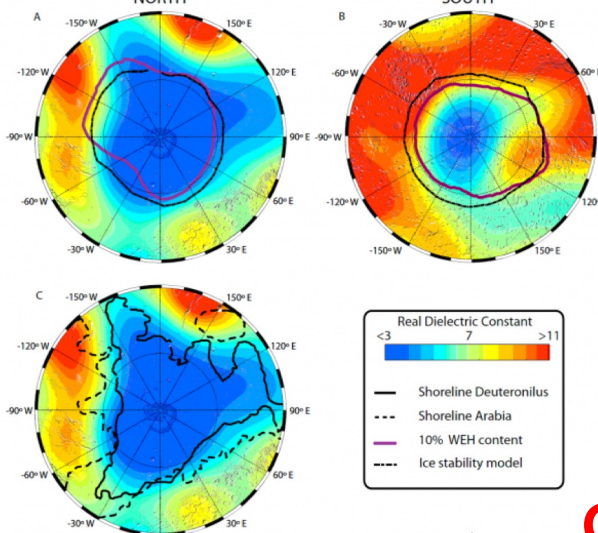
Bézard et al. 1990

Sur Mars, beaucoup d'indices de la présence d'eau dans le passé

Comme sur Vénus, un excès de deutérium ($[D/H]_M = 5 \times [D/H]_T$) mais aussi:

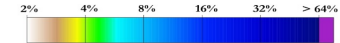


Réseaux de vallées ramifiées [Viking, 1976](#)

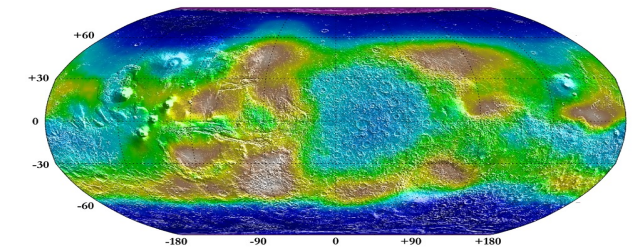


Un océan boréal il y a 3 millions d'années?
[MGS altimetry, 2000 + MARSIS/Mex 2012](#)

Fraction d'eau en masse->

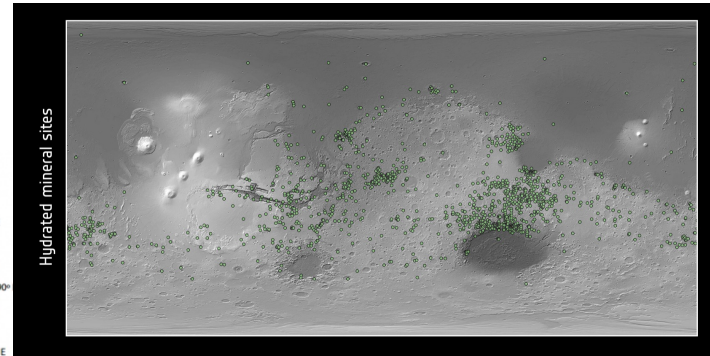


De l'eau sous les pôles
(glace ou pergélisol)
[GRS, Mars Odyssey, 2001](#)

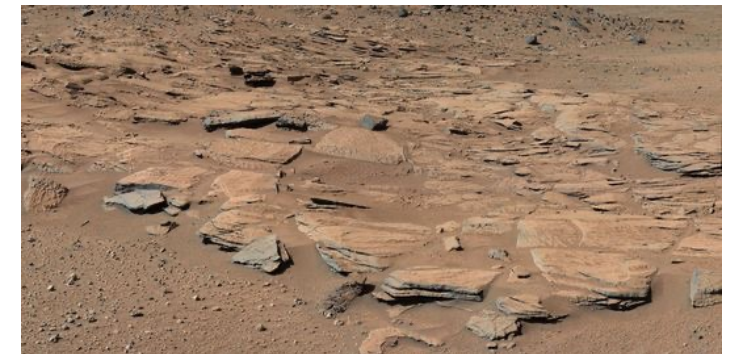


De l'argile dans les anciens plateaux
du sud

[OMEGA/ Mars Express, 2006](#)



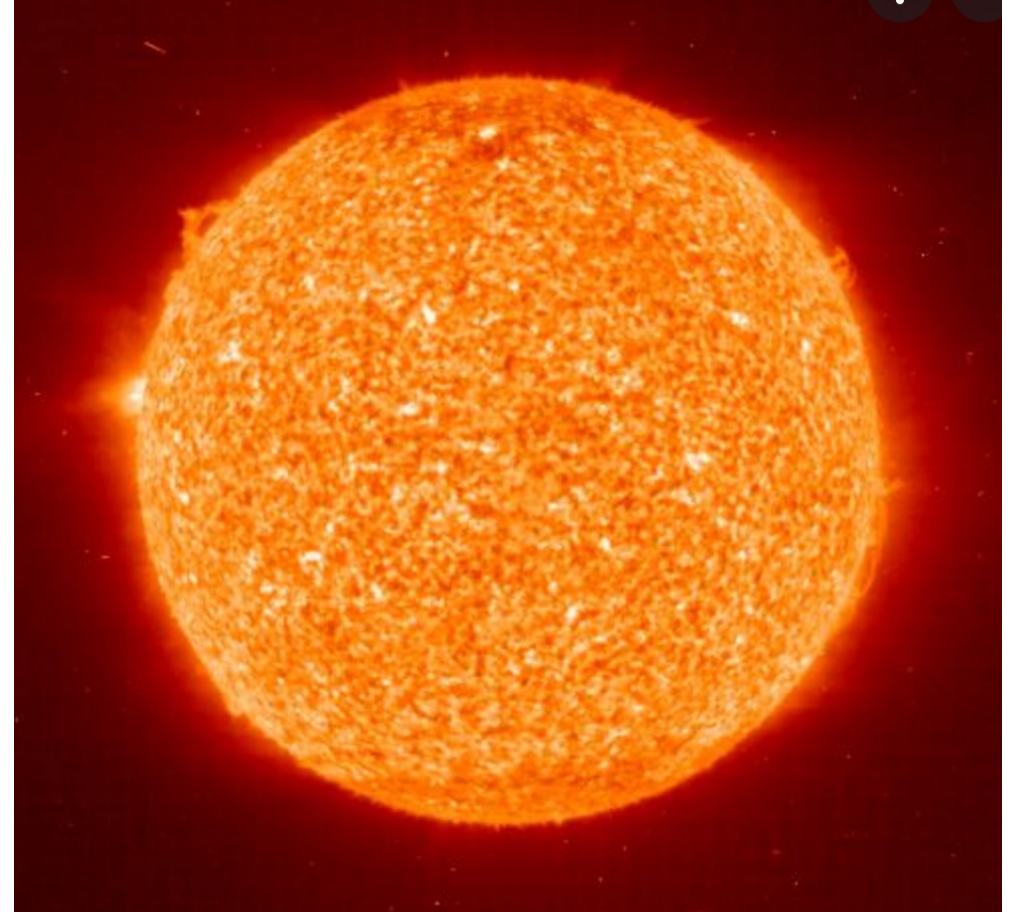
Un site « habitable » à
Yellowknife Bay
[Curiosity, 2014](#)



Grande incertitude sur le volume du réservoir d'eau initial :
30 -> 1000 m GEL (profondeur moyenne équivalente)

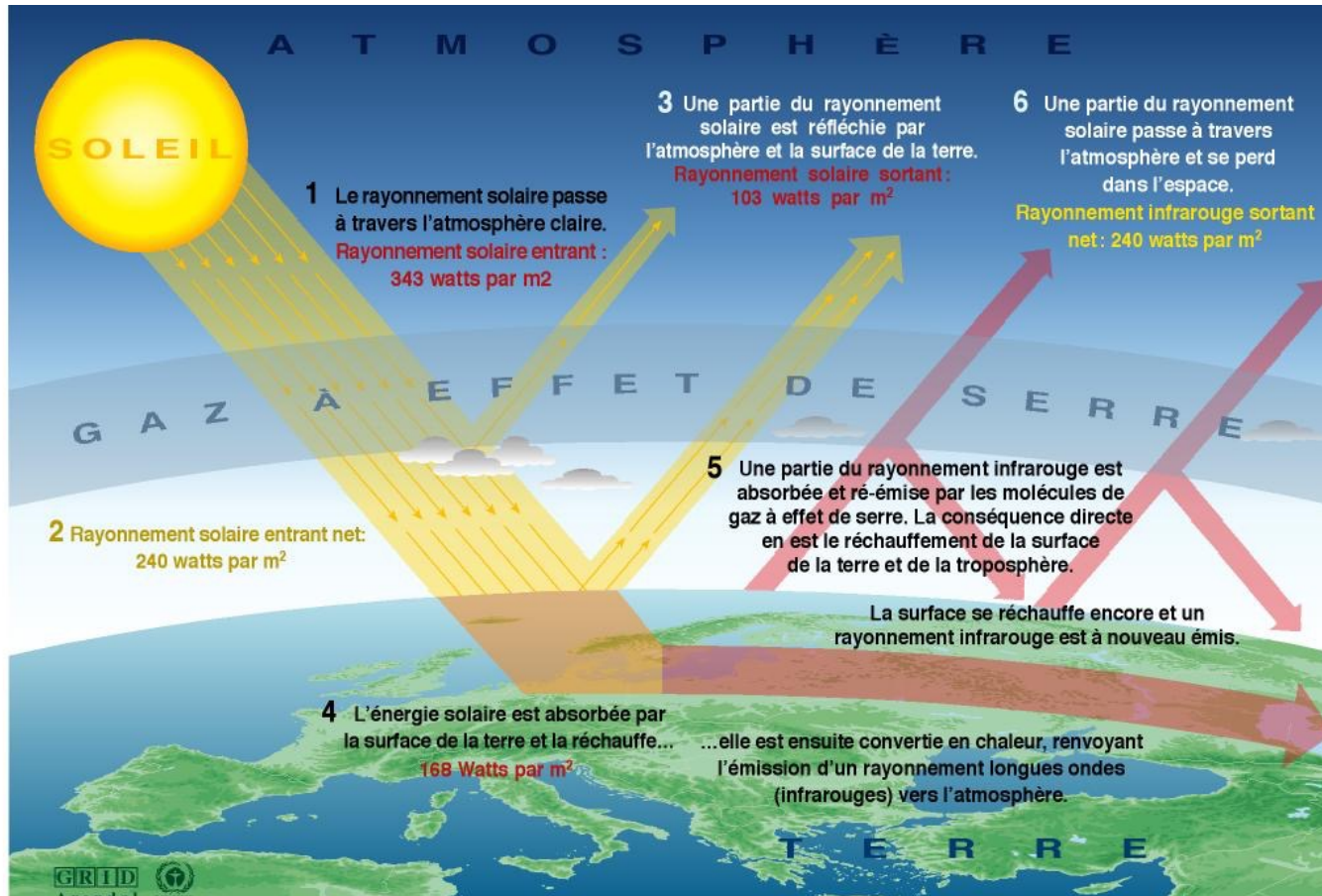
Le paradoxe du Soleil jeune

- **Il y a 4 Ga, le Soleil était moins lumineux**
(70% de sa valeur actuelle)
 - -> L'eau sur Terre aurait dû être gelée
 - -> Comment la Terre a-t-elle échappé à une glaciation totale (la « Terre boule de neige ») ?
- **Implications pour Mars et Vénus :**
 - Vénus à l'origine pourrait-elle avoir eu un océan d'eau liquide ?
 - Sur Mars à l'origine, l'eau aurait dû être gelée -> Pourquoi des traces passées d'eau liquide ?



Dans le cas de la Terre, une explication: l'effet de serre

- Le rayonnement solaire visible chauffe la surface qui émet dans l'infrarouge
- Les gaz atmosphériques absorbent ce rayonnement et chauffent à leur tour -> la température de surface augmente et l'effet s'amplifie



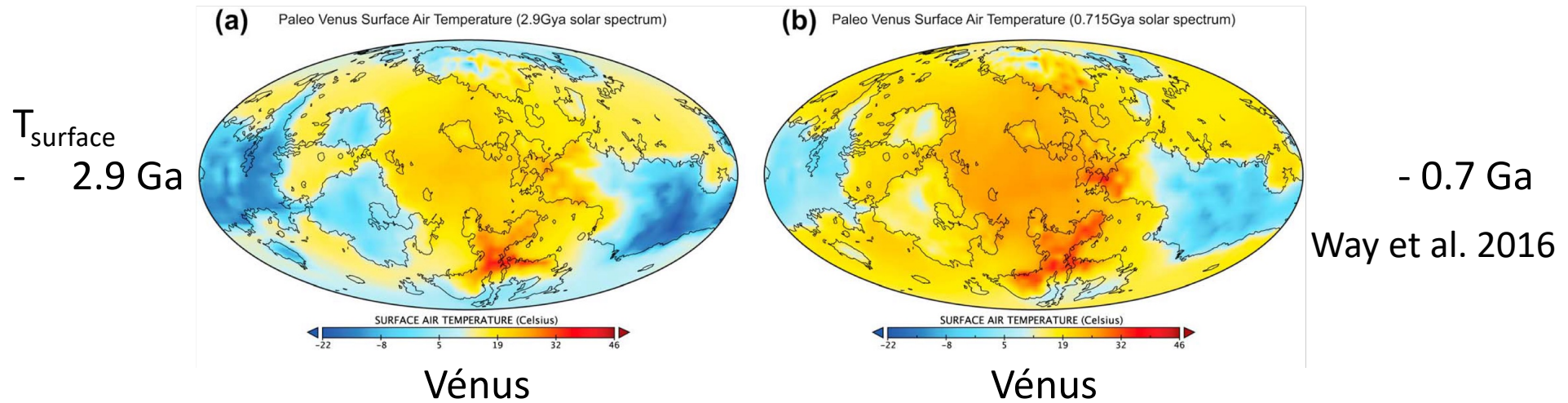
Les gaz à effet de serre les plus efficaces:
CO₂, H₂O et CH₄
(bandes spectrales fortes dans l'infrarouge proche)

NB: **N₂ et O₂** ne sont pas des GES
-> l'effet de serre sur la Terre est modéré

L'évolution divergente des planètes terrestres

A. Sur Vénus, un effet de serre galopant

- La température de surface de Vénus à l'origine peut avoir été compatible avec la présence d'océans (Way et al. 2016)...



- ...mais peut-être pas, d'après d'autres calculs... (Turbet et al. 2022)
- ...En tout cas, toute trace a disparu, puisque la surface de Vénus est entièrement renouvelée par volcanisme toutes les quelques centaines de millions d'années !

L'effet de serre sur Vénus

Augmentation continue du flux solaire :

- > **Evaporation des océans**

- > Augmentation de l'effet de serre (CO_2 , H_2O)

- > **Dissociation de l'eau**

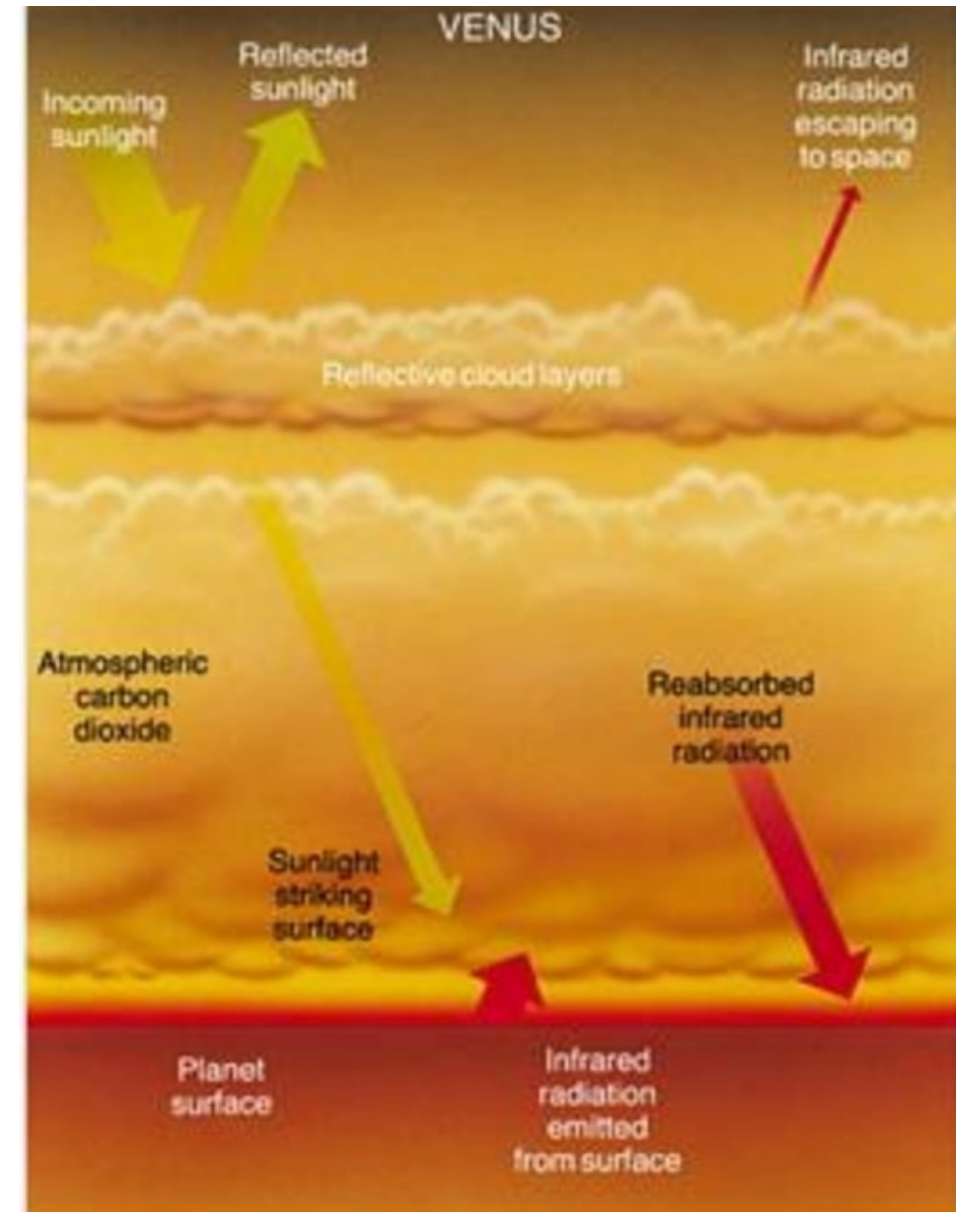
- > Echappement de l'hydrogène

- > Augmentation du rapport D/H

Resurfaçage global par volcanisme :

- > Dégazage de CO_2 (+ SO_2 + H_2O)

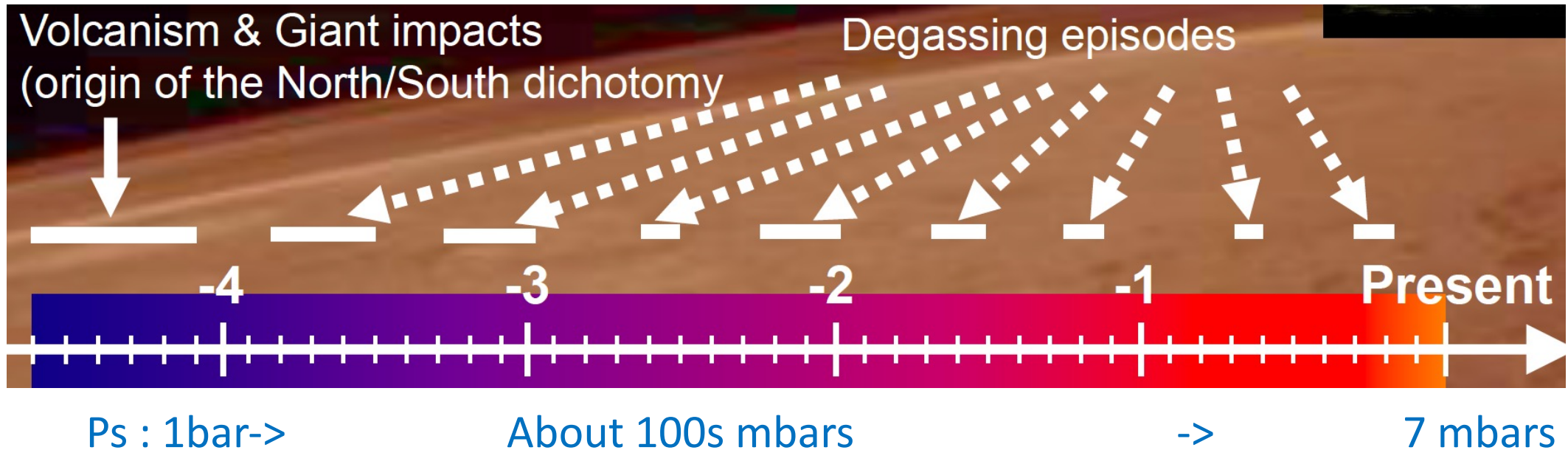
- > **Alimentation de l'effet de serre**



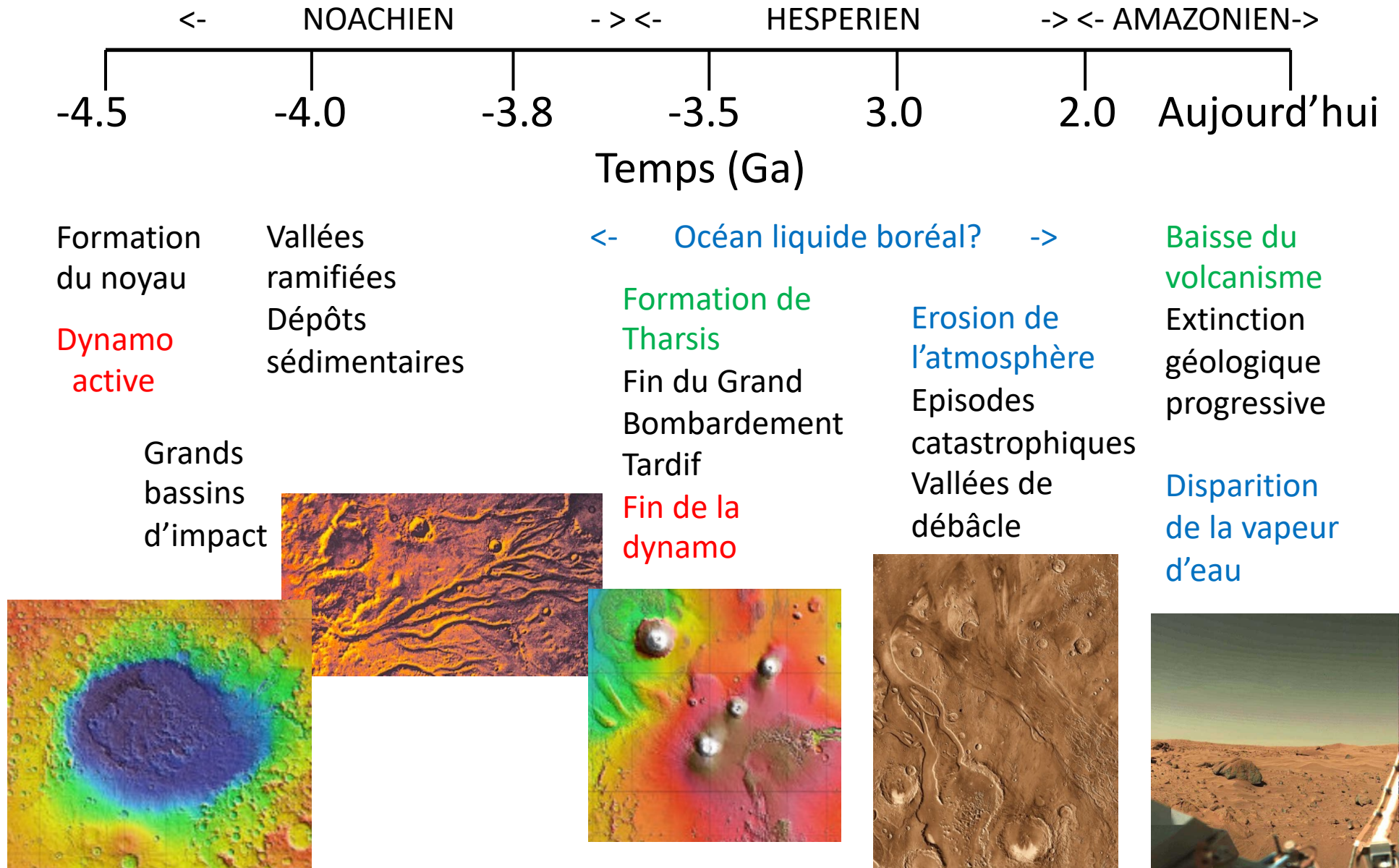
Comment expliquer le climat initial de Mars ?

- $T_{eq} < 200$ K au départ... Comment augmenter la température?
- Un effet de serre plus fort qu'aujourd'hui? -> Difficile à expliquer
- **Un climat froid avec des épisodes transitoires chauds?**
 - Épisodes chauds dus à des impacts?
 - Épisodes volcaniques brefs?

© F. Leblanc 2022



Une reconstitution de l'histoire de Mars



Entre ces deux extrêmes, la Terre...

- Au départ, une température inférieure à 0°C → **risque de glaciation totale**
- Les **épisodes volcaniques/météoritiques** réchauffent l'atmosphère (**CO₂ + CH₄ ?**)
- -4,2 Ga: **Formation des océans** → Piégeage du CO₂ en carbonates CaCO₃ → **CO₂ diminue**
- -3,8 Ga: Apparition de la **vie microbienne** (capable de survie, d'échange avec le milieu et de réplication) → **CH₄ augmente**
- -3,4 Ga: photosynthèse → **Grande Oxydation** (-2,4 Ga) → **O₂ augmente, CH₄ diminue**
- -2,4 → -0,6 Ga: Episodes glaciaires/cycles de CO₂
- -0,5 Ga: Formation de la **couche d'ozone**, explosion cambrienne → **O₂ augmente à nouveau**



Vue d'artiste

Terre – Boule de neige



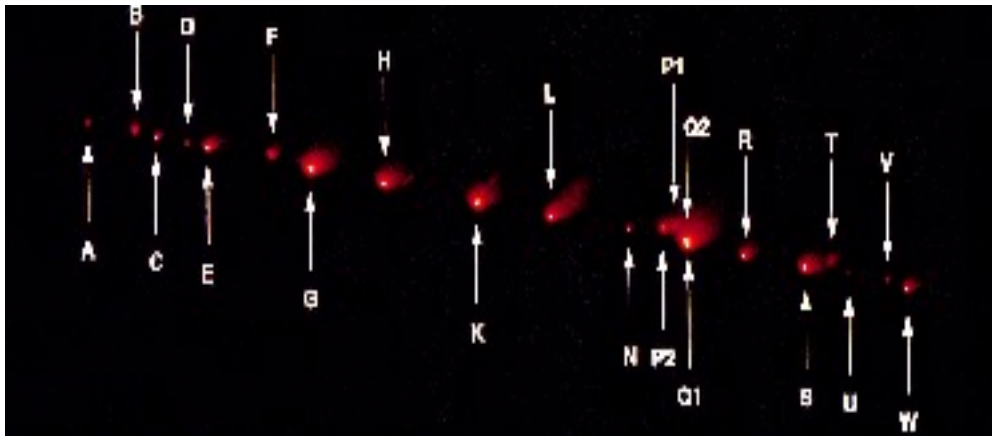
Les points clés:

- **Une distance au Soleil compatible aujourd'hui avec la présence d'eau liquide**
- **Une masse suffisante permettre une forte activité interne et une magnétosphère**

3. L'eau dans les planètes géantes et leur système

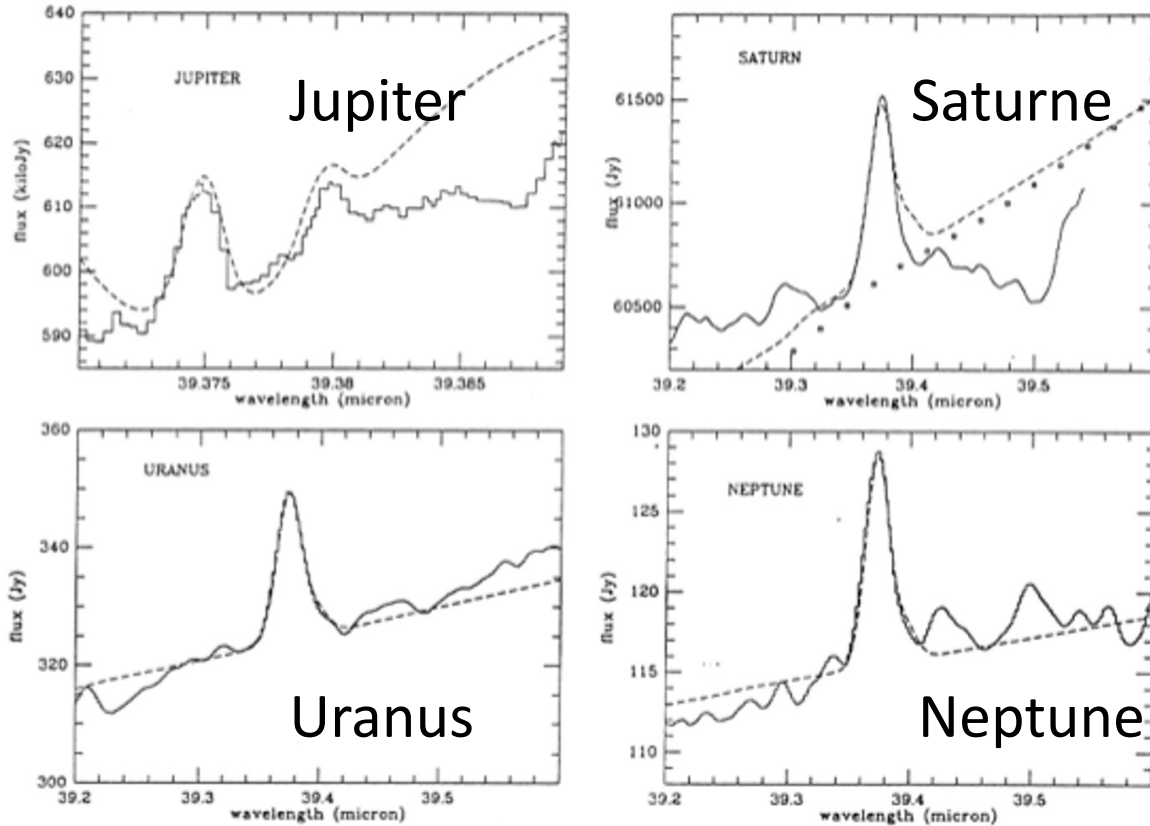
Les planètes géantes: de l'eau à l'intérieur... et à l'extérieur !

Juillet 1994: Collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter (20 fragments)

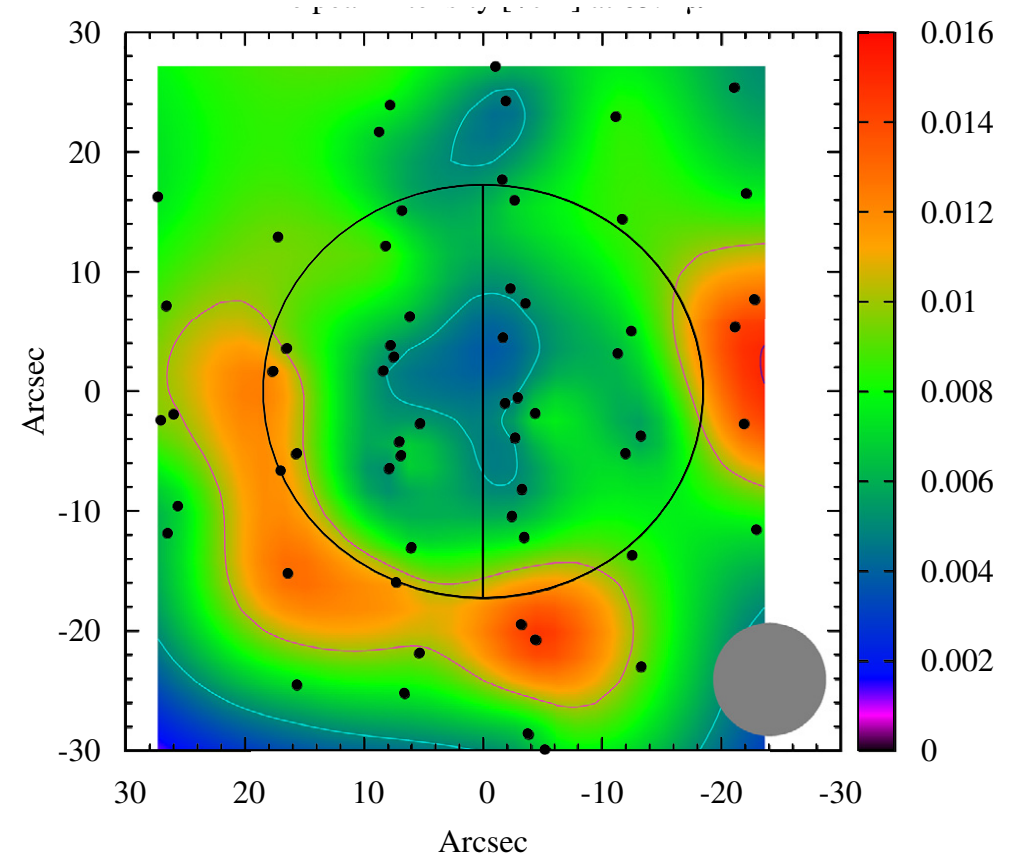


-> Injection de l'eau dans la haute atmosphère
Observée par les observatoires spatiaux ISO et Herschel

Toutes les planètes géantes reçoivent un flux extérieur de particules de glace d'eau



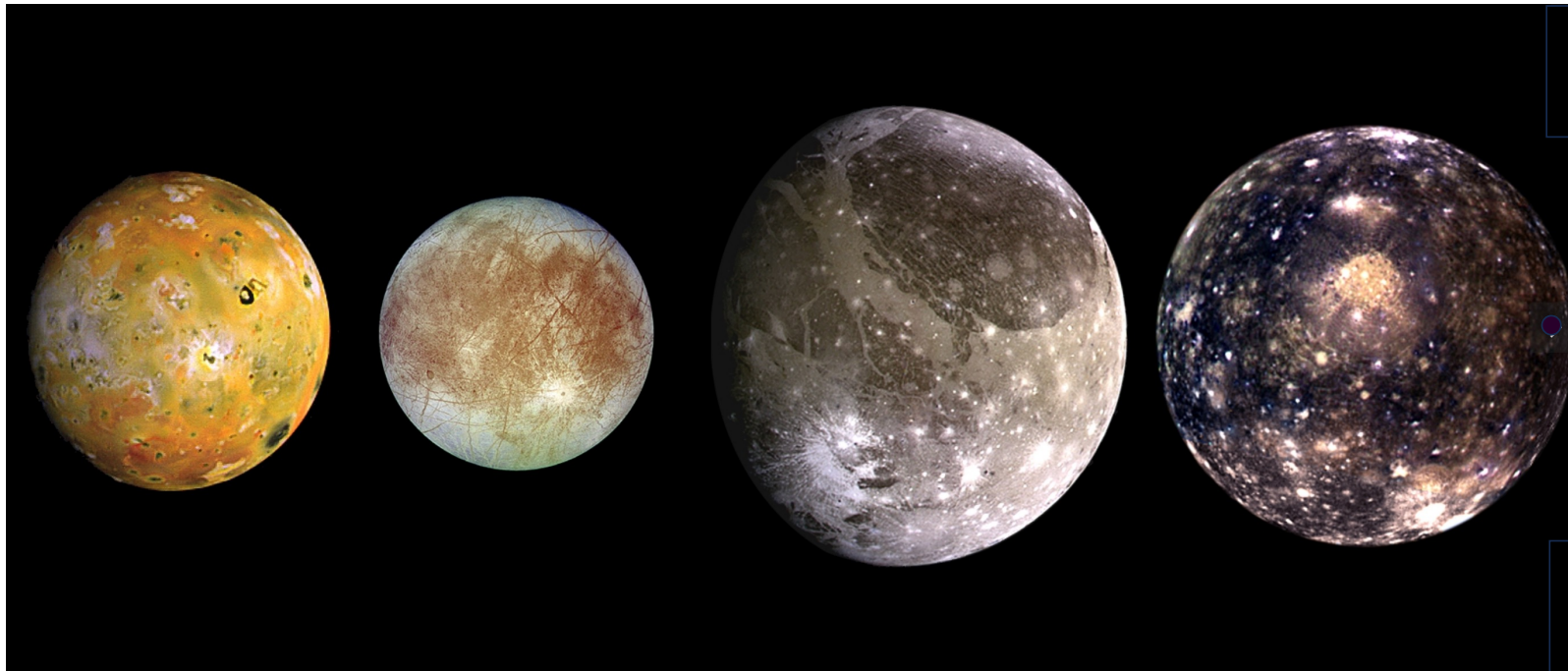
H₂O à 39 μm dans la stratosphère
des planètes géantes (ISO)



Carte de H₂O sur Jupiter
à 65 μm (Herschel)

Les satellites galiléens de Jupiter

- Découverts par Galilée en 1610, étudiés par les sondes Voyager et Galileo
- Io (le plus proche de Jupiter) est le siège d'un volcanisme actif
- Les trois autres (Europe, Ganymède, Callisto) sont essentiellement composés de glace d'eau



Io

Europe

Ganymède

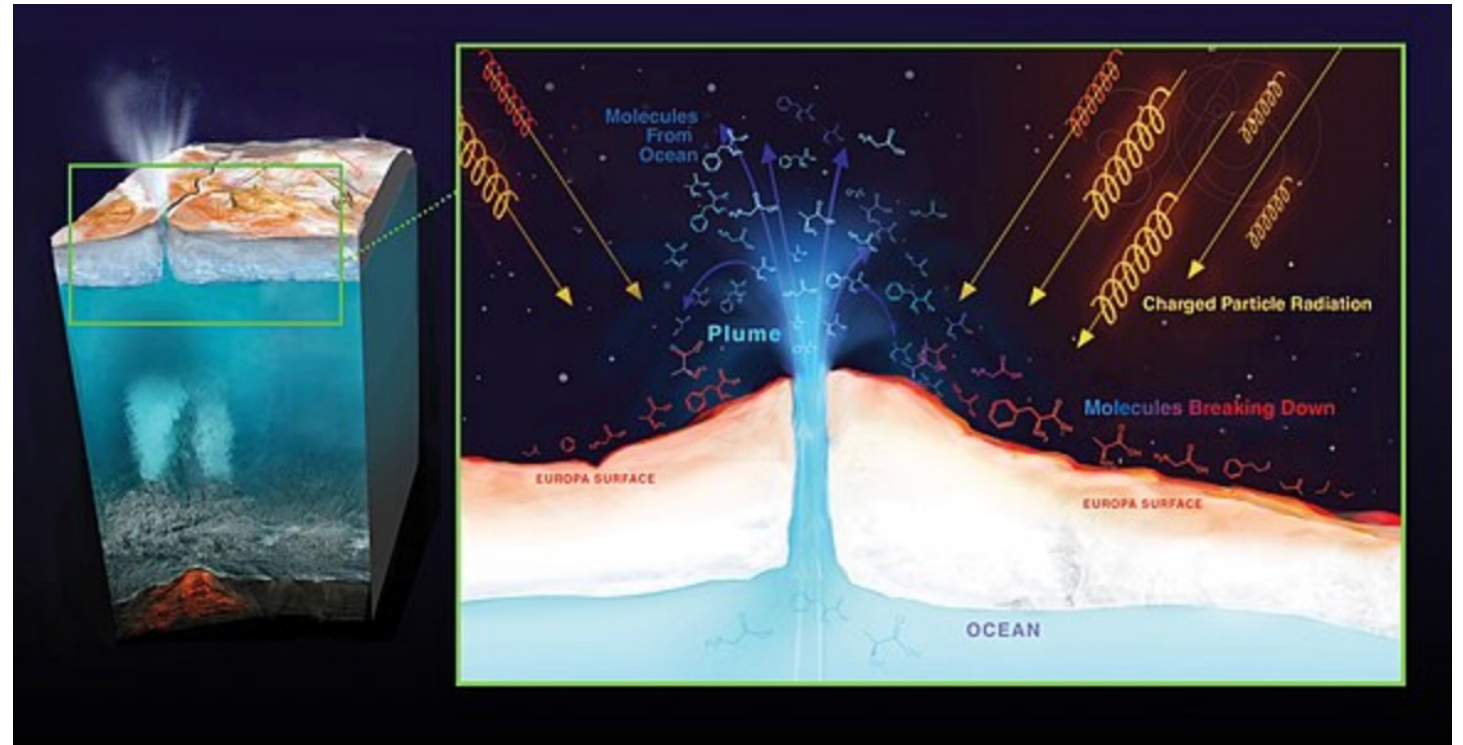
Callisto

Un océan sous la surface d'Europe...

Europe: un océan d'eau salée probable sous la surface (Voyager, Galileo)

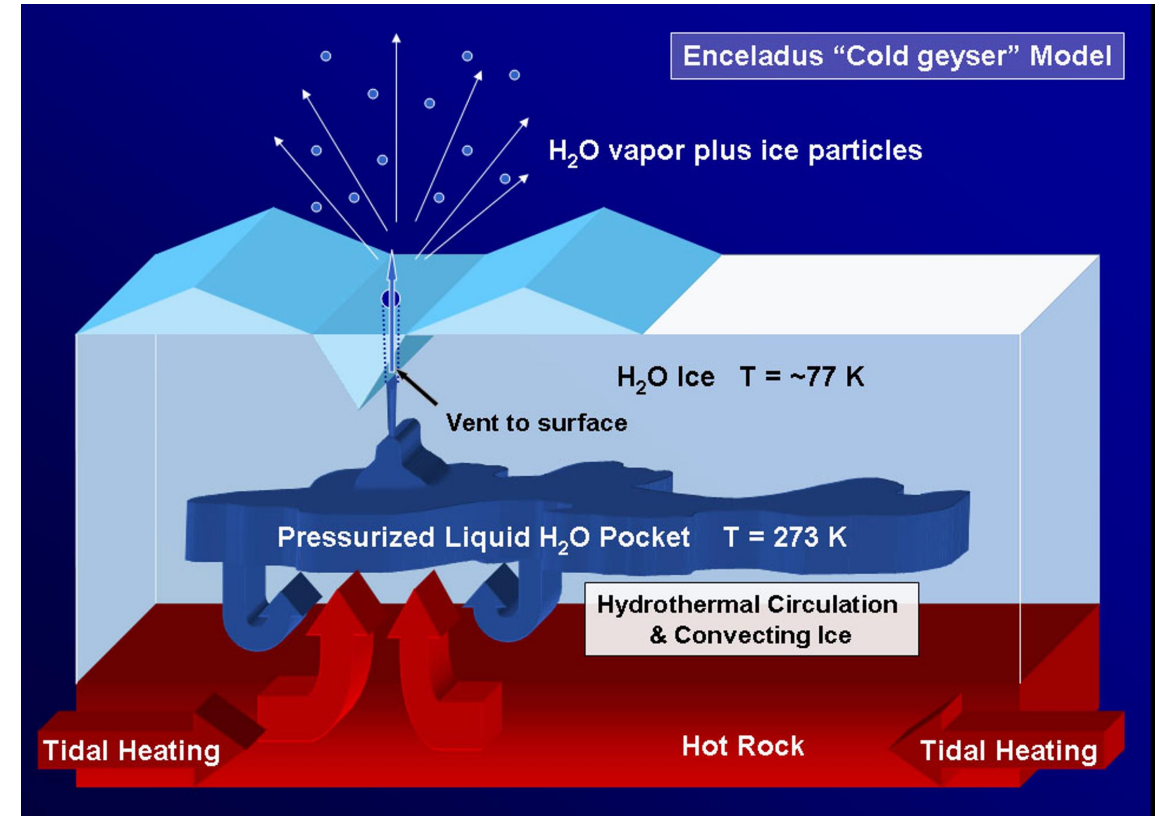
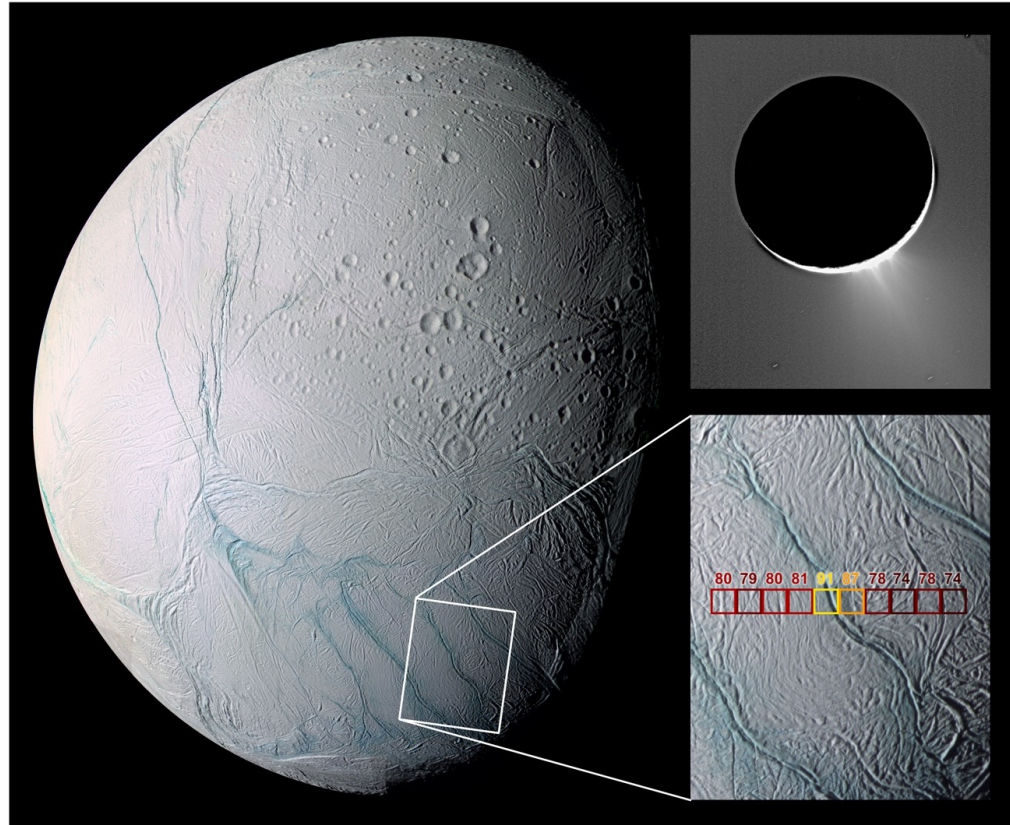
L'océan pourrait être en contact direct avec le noyau rocheux -> possibilité de sources hydrothermales?

-> Missions Juice (ESA) et Europa Clipper (NASA) à l'horizon 2030



... et aussi autour de Saturne!

Le petit satellite Encelade est à l'origine de l'anneau E



L'océan pourrait être en contact avec le sol rocheux
-> Possibilité de sources hydrothermales?

En conclusion: l'eau et la vie...

L'eau liquide, une condition essentielle

- L'eau est présente sur la Terre sous ses trois formes: solide, liquide, vapeur
- Liquide sur un large intervalle de températures
- Excellent solvant, favorise les réactions chimiques
- -> Rôle essentiel dans le développement de la vie

Mais d'autres éléments sont aussi nécessaires:

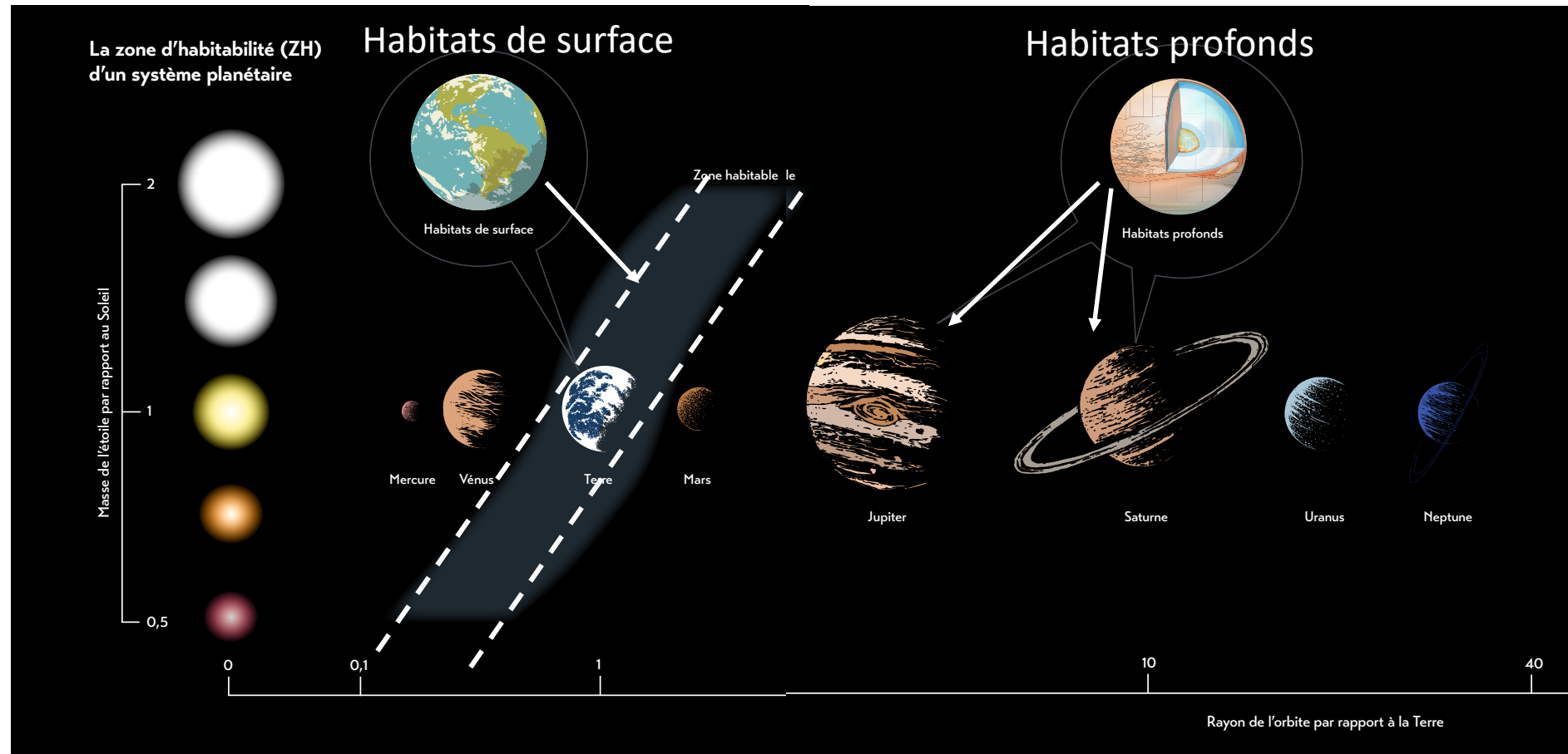
- Une source d'énergie
- Des nutriments, à commencer par le carbone (CHNOPS)



Où rechercher la vie dans le Système solaire?

La zone d'habitabilité

Deux pistes: les habitats de surface et les habitats profonds



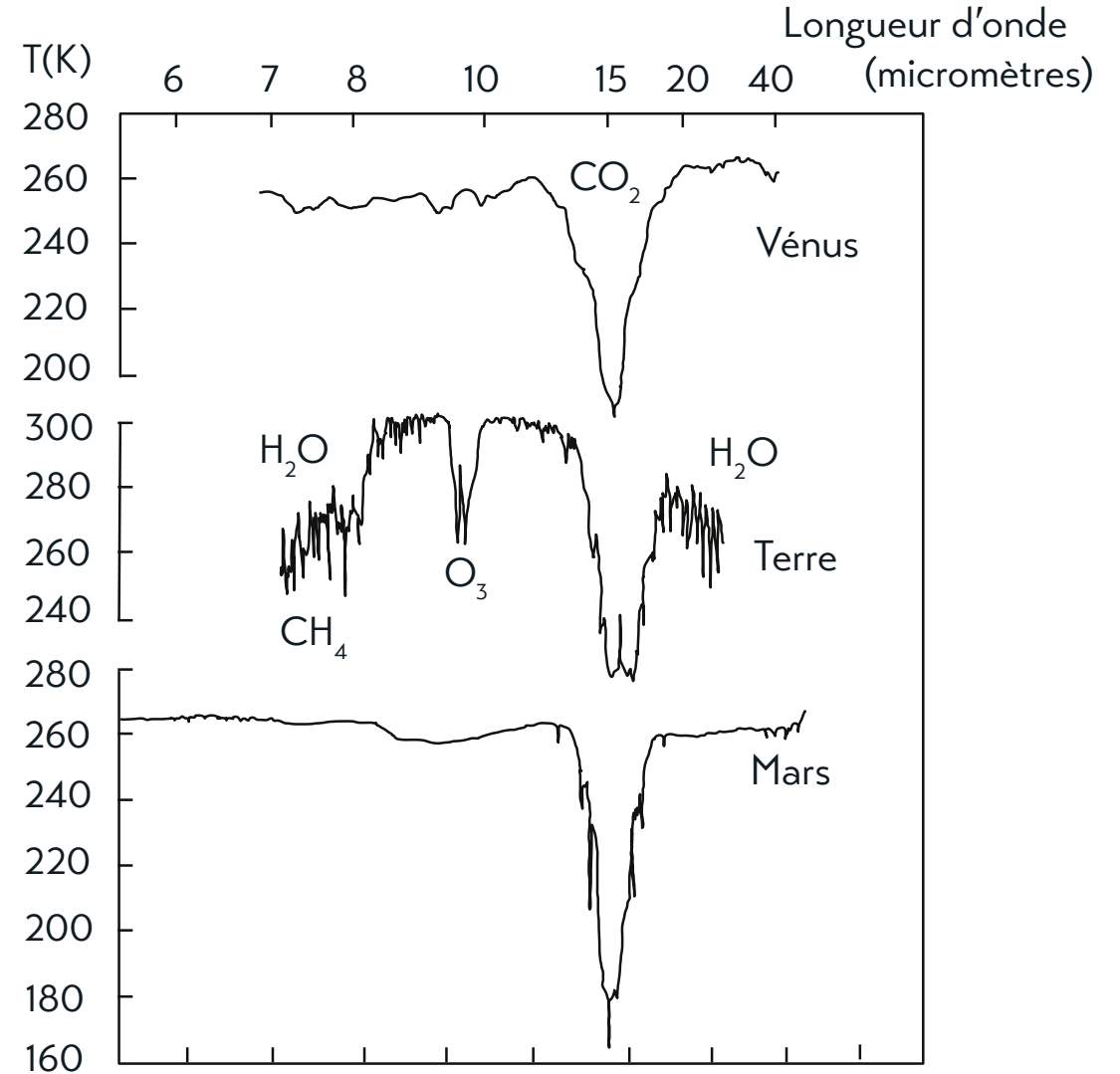
Des sites habitables dans les exoplanètes?

- On connaît aujourd'hui plus de 7800 exoplanètes, dans plus de 1000 systèmes multiples, dont un grand nombre de planètes rocheuses (les « super-Terres »)
- Les plus intéressantes sont celles qui sont situées dans la zone habitable de leur étoile (environ une centaine)

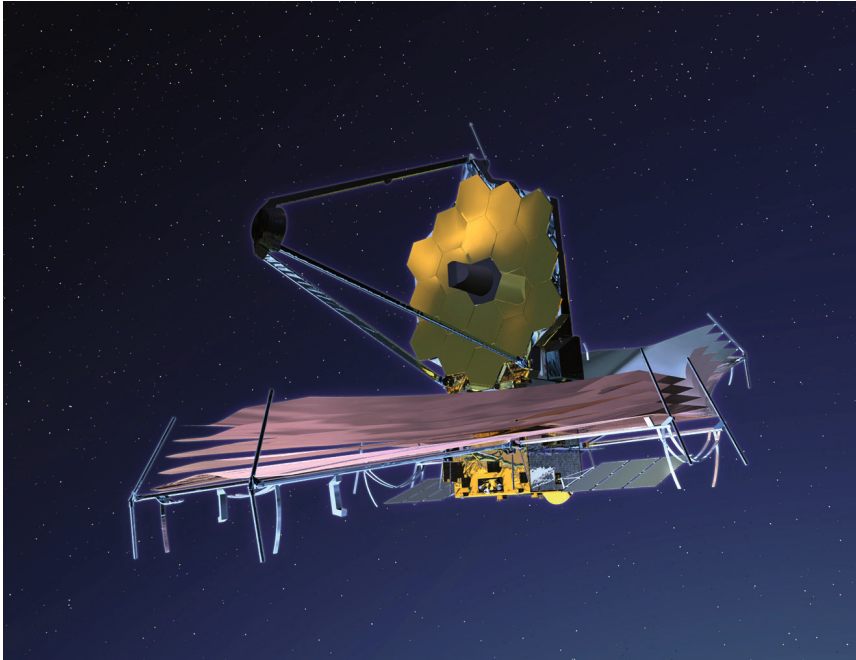


Comment rechercher la vie sur une exoplanète?

- Rechercher des molécules typiques de la présence de vie (« bio-marqueurs »)
- L'une d'entre elle est l'oxygène (dans le cas d'une forme de vie analogue à la nôtre)
- On peut rechercher la signature de l'oxygène et de l'ozone dans l'atmosphère des exoplanètes

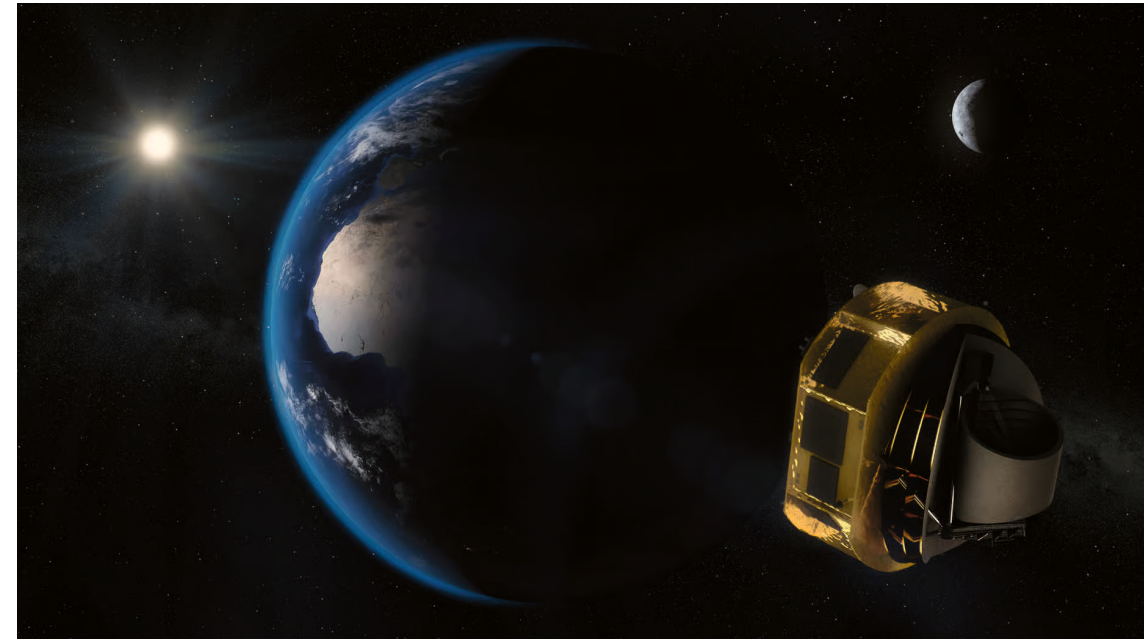


Pour cette recherche, un observatoire spatial: le JWST....



← Télescope spatial de 6m de diamètre, en opération depuis 2022, étudie par spectroscopie l'atmosphère des exoplanètes

→ ... et plus tard la mission ARIEL
(étude systématique de l'atmosphère des exoplanètes, lancement 2029)



Merci de votre attention!



... et merci à Athéna Coustenis

->

