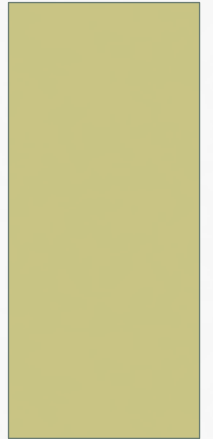


PLANÈTE BLEUE

PARTIE 1



LE SYSTÈME SOLAIRE

Ceinture de Kuiper
($\approx 1\,000\,000\,000$ objets > 1 km)

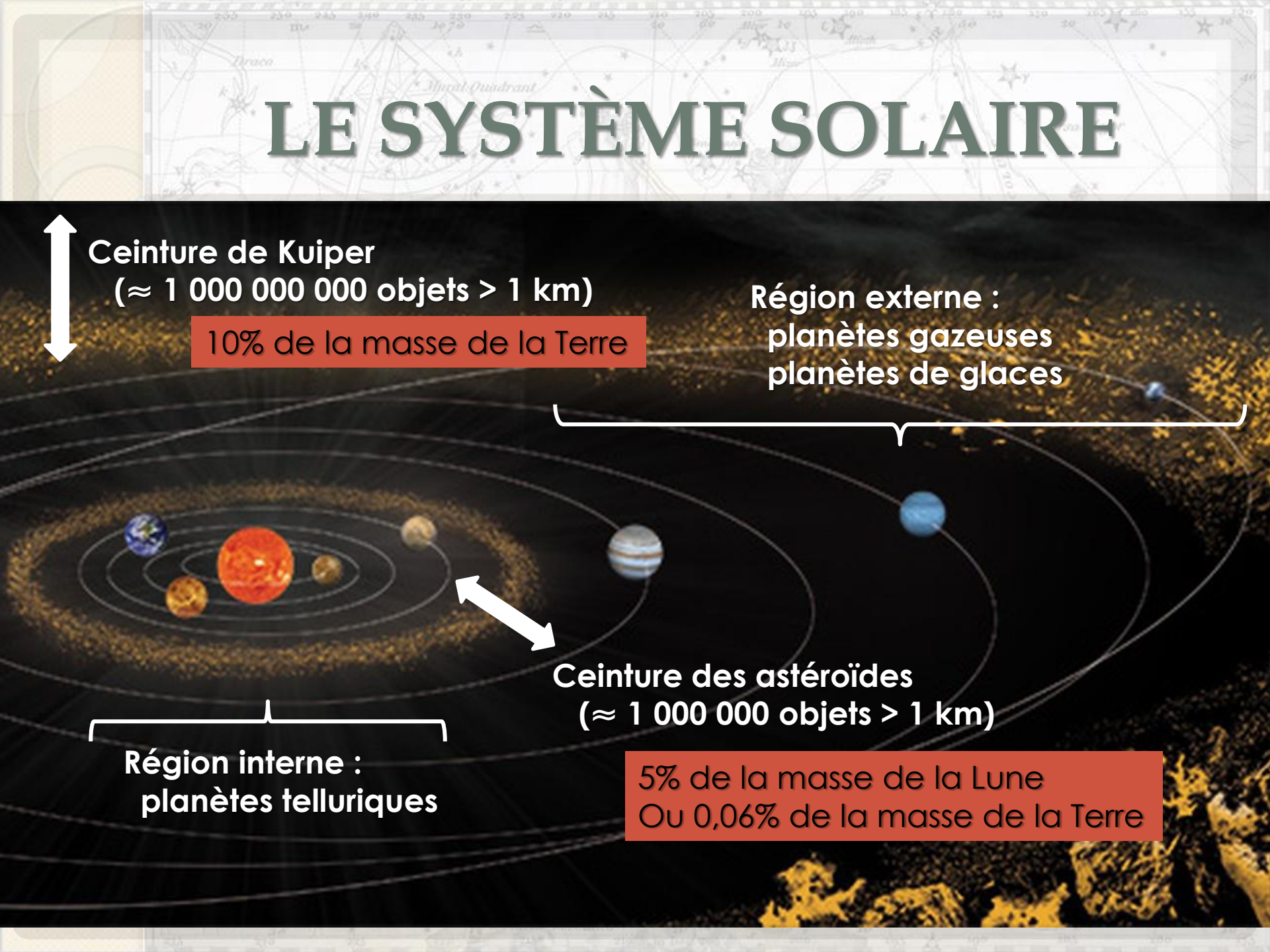
10% de la masse de la Terre

Région externe :
planètes gazeuses
planètes de glaces

Ceinture des astéroïdes
($\approx 1\,000\,000$ objets > 1 km)

Région interne :
planètes telluriques

5% de la masse de la Lune
Ou 0,06% de la masse de la Terre



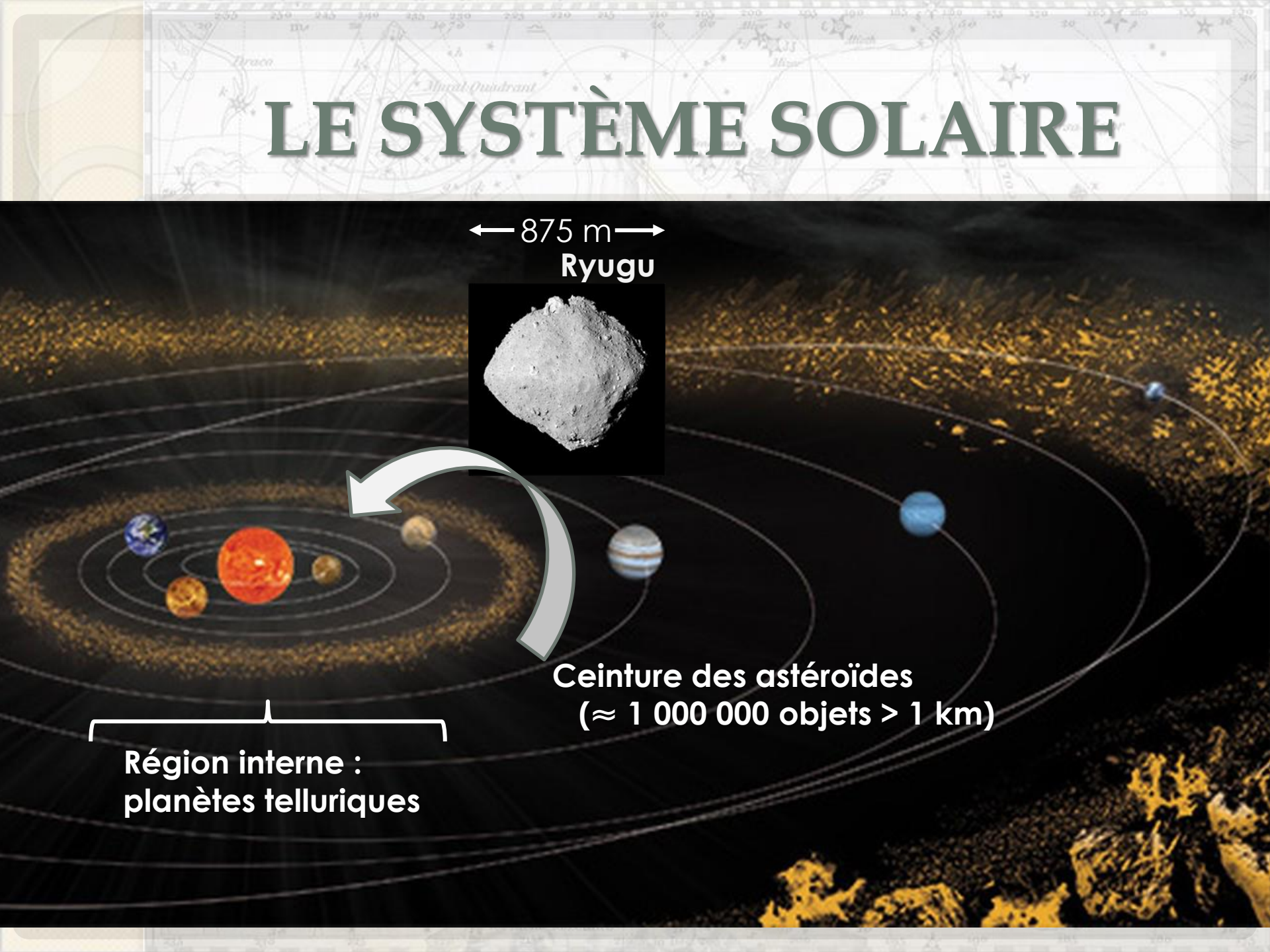
LE SYSTÈME SOLAIRE

← 875 m →
Ryugu



Ceinture des astéroïdes
($\approx 1\,000\,000$ objets > 1 km)

Région interne :
planètes telluriques



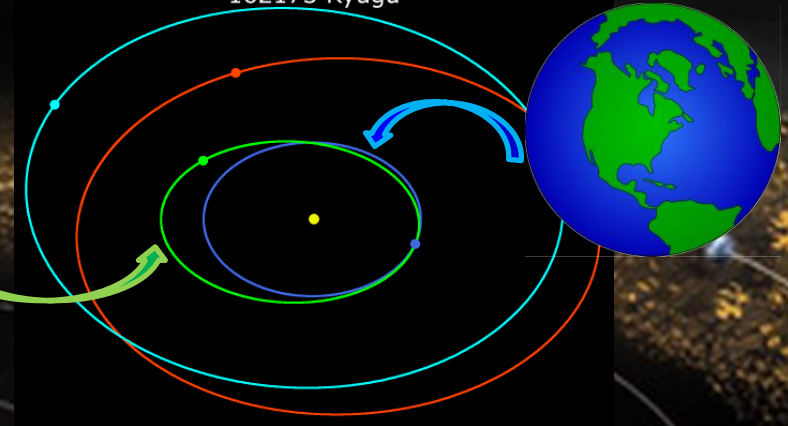
LE SYSTÈME SOLAIRE

← 875 m →
Ryugu



2014-12-03

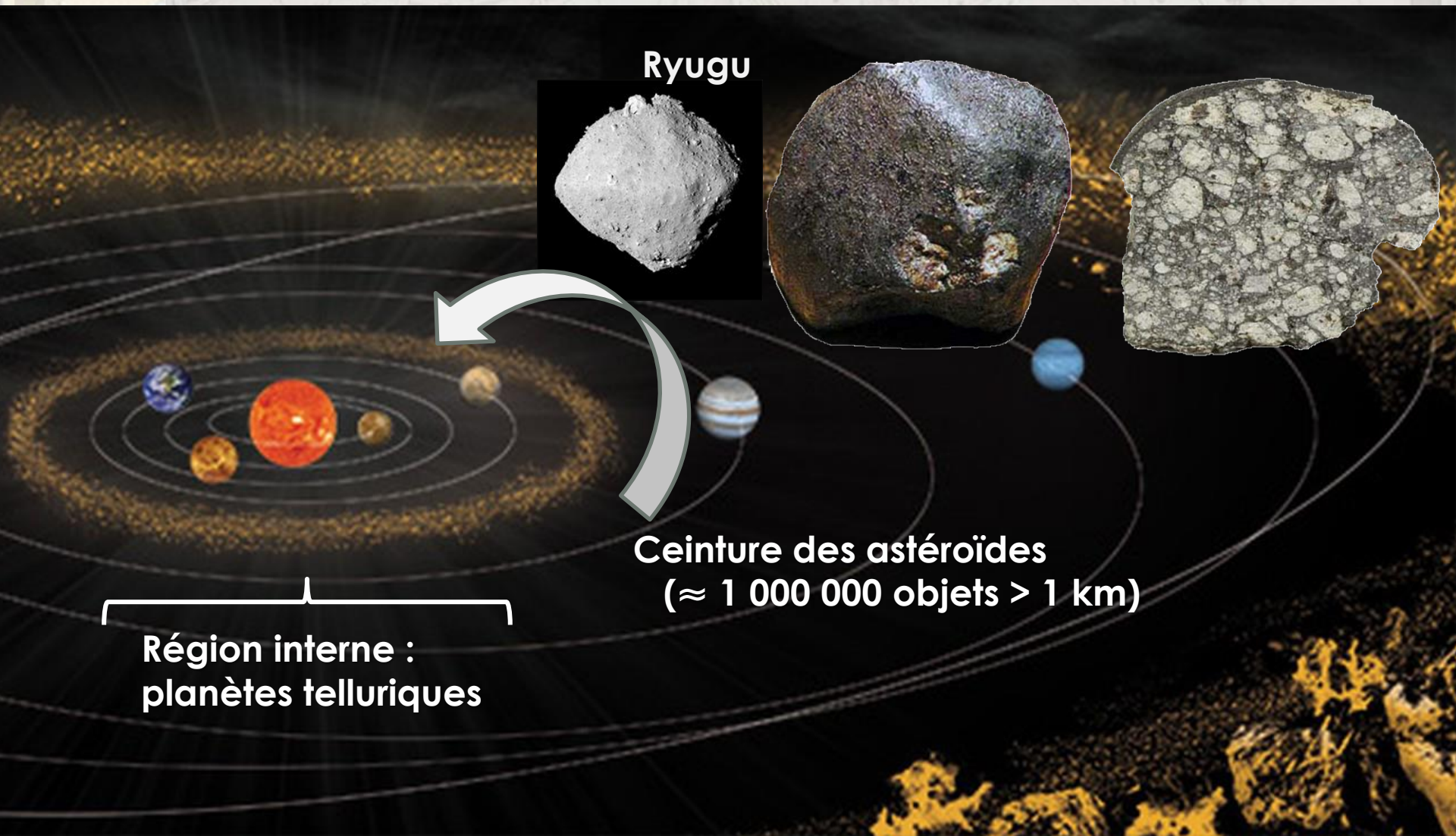
162173 Ryugu



Ceinture des astéroïdes
($\approx 1\,000\,000$ objets > 1 km)

Région interne :
planètes telluriques

LE SYSTÈME SOLAIRE



Ryugu

Ceinture des astéroïdes
($\approx 1\,000\,000$ objets > 1 km)

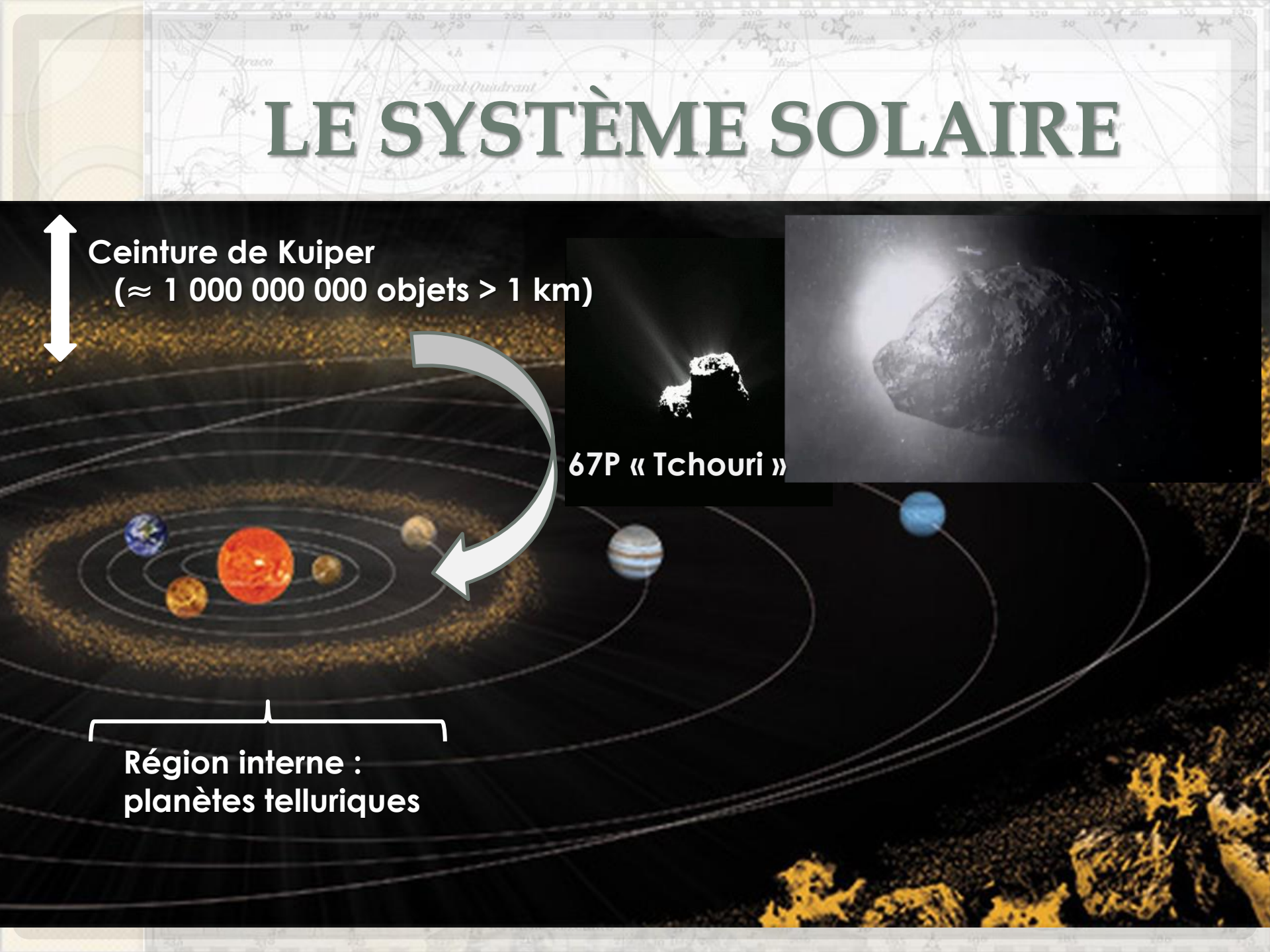
Région interne :
planètes telluriques

LE SYSTÈME SOLAIRE

Ceinture de Kuiper
($\approx 1\,000\,000\,000$ objets > 1 km)

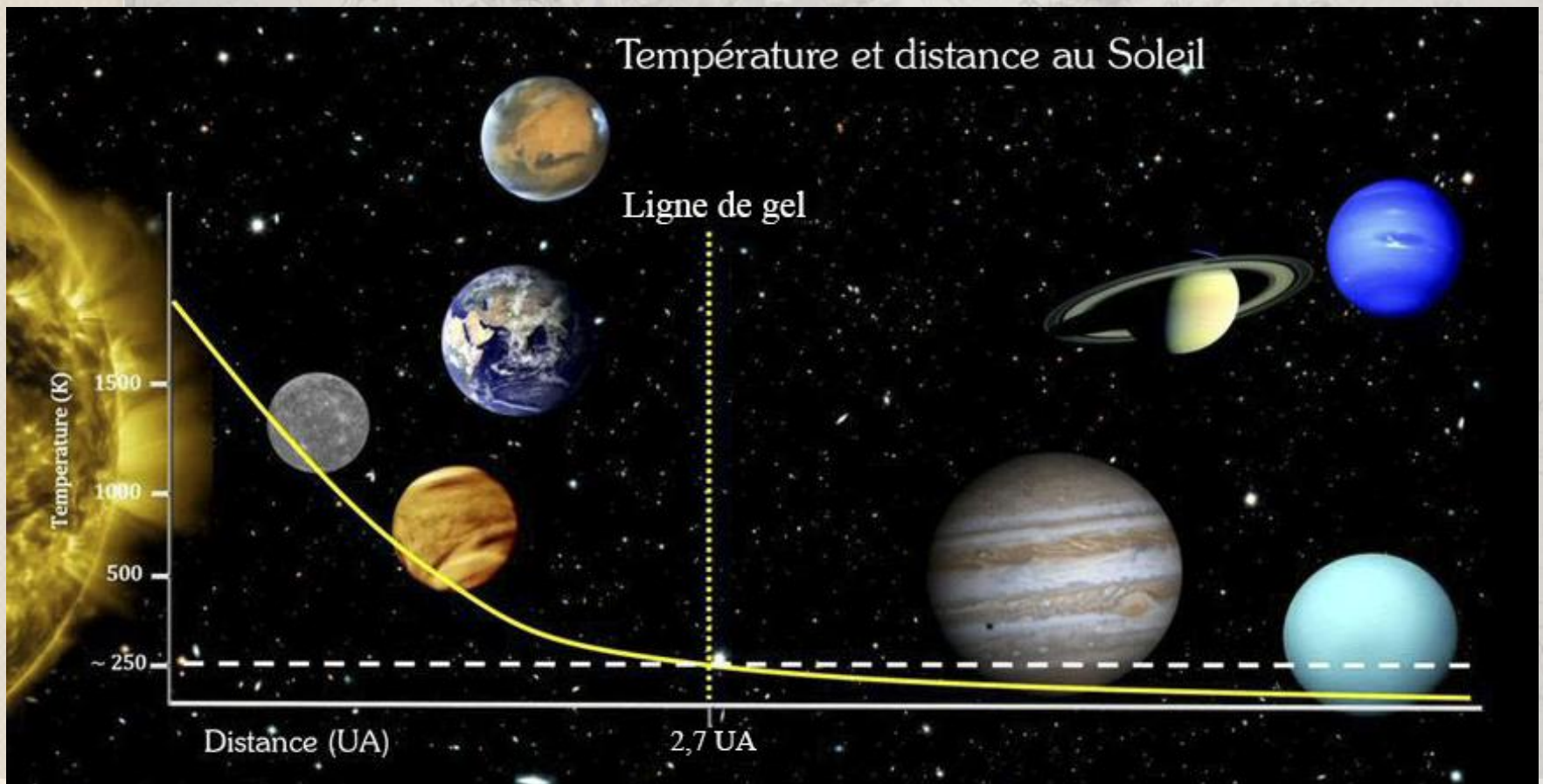
67P « Tchouri »

Région interne :
planètes telluriques



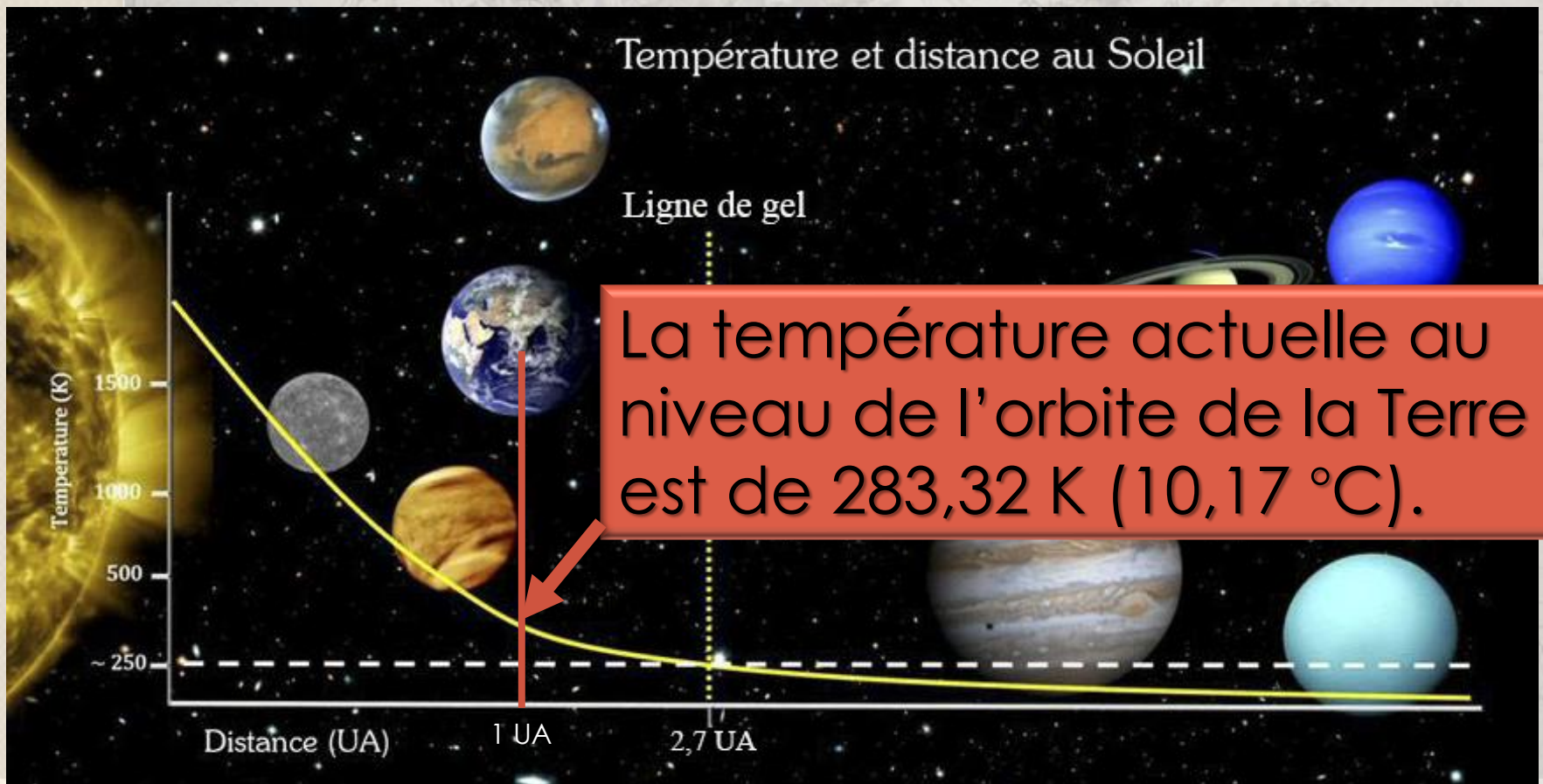
SELON LA THÉORIE

➤ Comment expliquer l'hétérogénéité du Système solaire ?



SELON LA THÉORIE

- Comment expliquer l'hétérogénéité du Système solaire ?



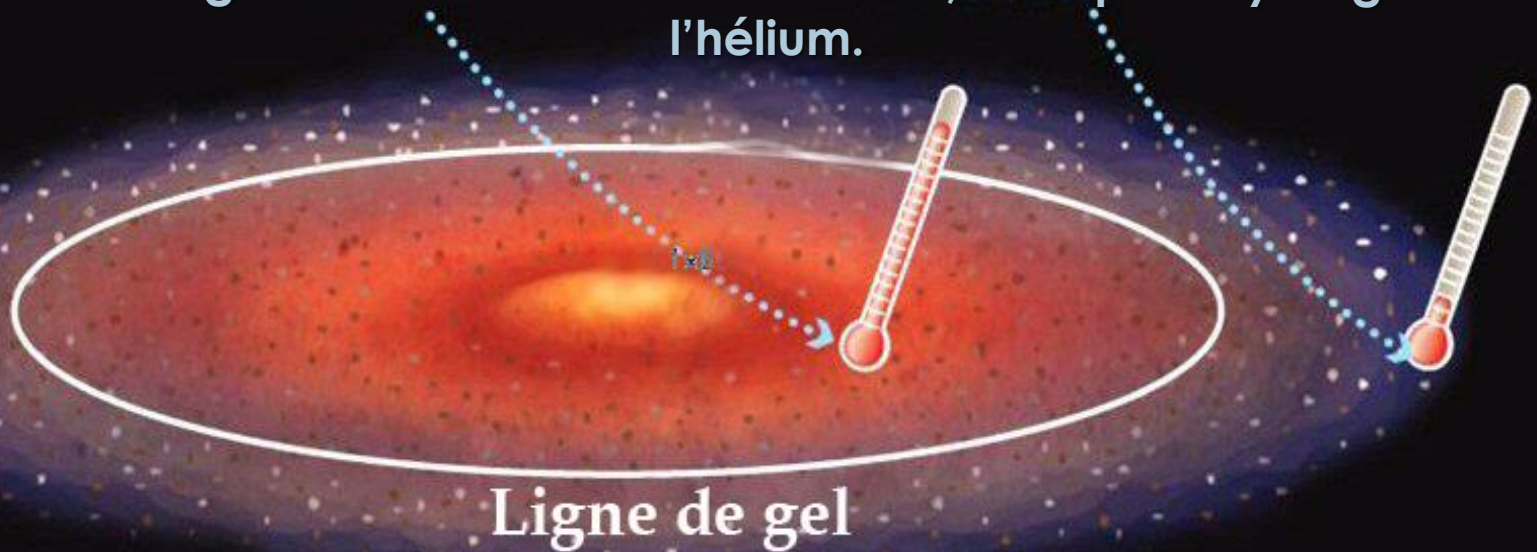
SELON LA THÉORIE

- La pression de lumière de l'étoile naissante souffle les matériaux du disque protoplanétaire vers l'extérieur du Système stellaire selon leurs masses et leur point de fusion respectifs.
- Le disque protoplanétaire se divise dès lors en deux parties :
 - Une partie interne chaude et sèche,
 - Une partie externe froide et mouillée,
 - ...Séparées par la **Ligne de gel**.

Ségrégation matérielle des disques protoplanétaires.

À l'intérieur de la ligne de gel, les **roches** et les **métaux** condensent. Les autres restent gazeux.

À l'extérieur de la ligne de gel, les roches, les métaux et les **volatiles** condensent, mais pas l'hydrogène et l'hélium.



- À l'intérieur de la ligne de gel, la chaleur vaporise H_2O , CH_4 , CO , CO_2 , N_2O , NH_3 .
- Les volatiles et les gaz sont soufflés par les vents stellaires au-delà de la ligne de gel.
- Éventuellement, il n'y aura plus de gaz et de volatiles < 3 U.A. (pour le Soleil)
- Au-delà de la ligne de gel, les volatiles condensent en glace qui persiste.

LES MATÉRIAUX DU DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

➤ Seuls les **solides** peuvent s'agglomérer par accrétion pour former des objets plus massifs (poussières, galets, planétésimaux, astéroïdes, comètes, planètes).

Hydrogène et
Hélium gazeux



Ne condensent pas
dans la nébuleuse



98%

Composés
d'hydrogène
(Volatiles)



Eau
(H₂O)
Méthane
(CH₄)
Ammoniaque
(NH₃)

< 150 K



1.4%

Roches



Minéraux
variés

500 -
1300 K



0.4%

Métaux



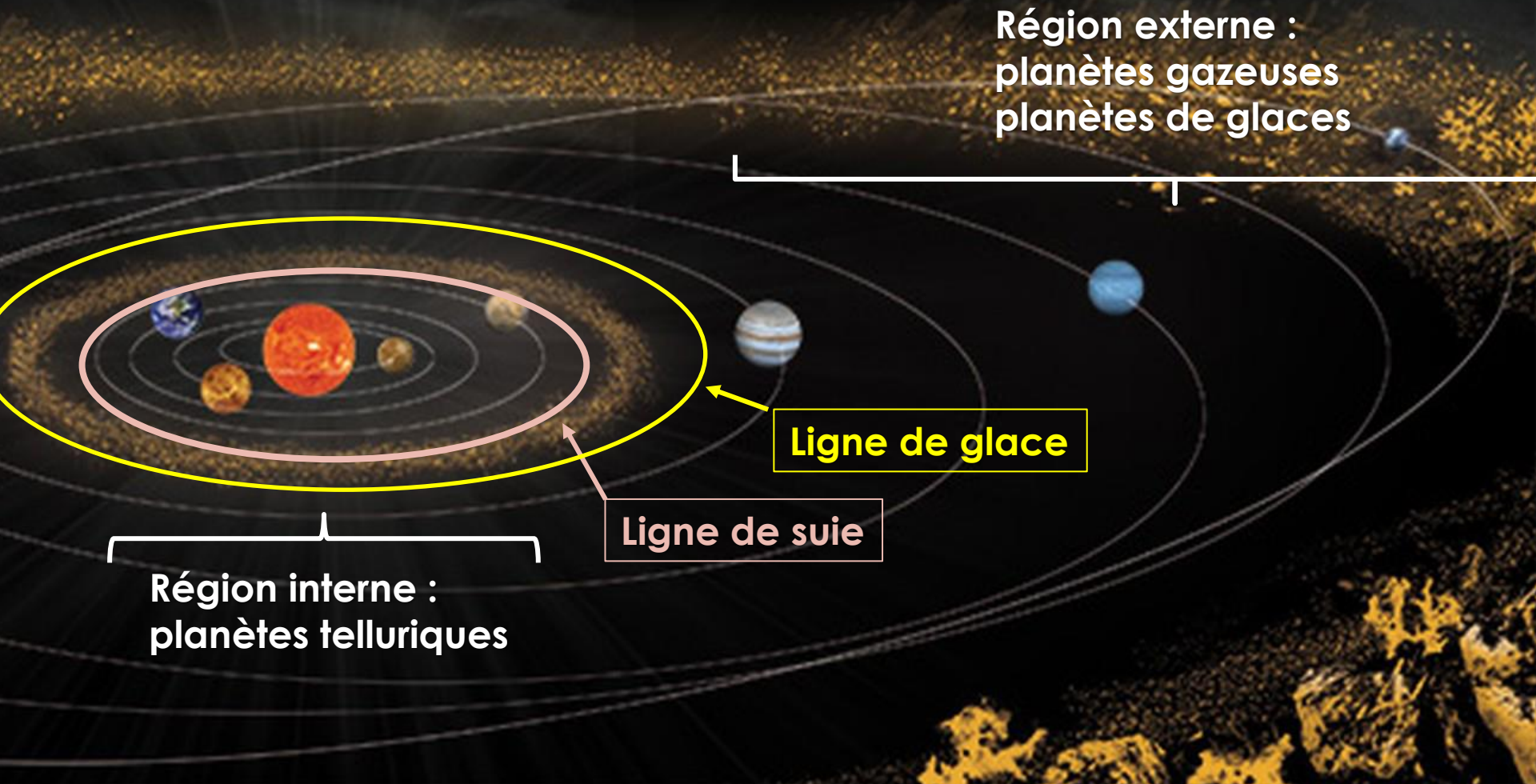
Fer, Nickel,
Aluminium

1000 -
1600 K



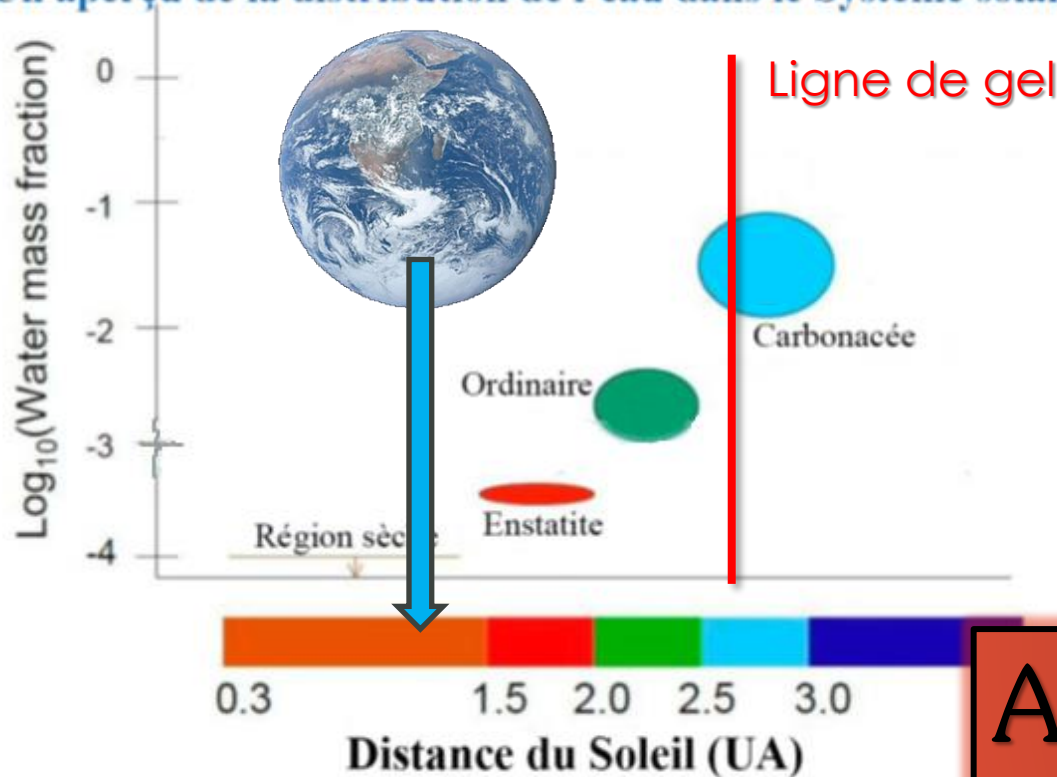
0.2%

DIVISIONS FONCTIONNELLES DU SYSTÈME SOLAIRE



DES CORPS CÉLESTES DE COMPOSITIONS DIFFÉRENTES

Un aperçu de la distribution de l'eau dans le Système solaire



➤ La Terre s'est formée dans une région particulièrement sèche du disque protosolaire.

Alors, comment se fait-il que...

L'eau recouvre **71** % de la surface de la Terre



L'eau recouvre **71** % de la surface de la Terre



PLANÈTE BLEUE

QUESTION

- On sait que la Terre s'est construite dans une région du disque protoplanétaire d'où les volatiles avaient été soufflés par les vents puissants de notre étoile naissante, avant même que la fusion thermonucléaire ne débute...
- ... Alors,

D'où vient l'eau sur Terre ?

QUESTION

➤ Mais d'abord,

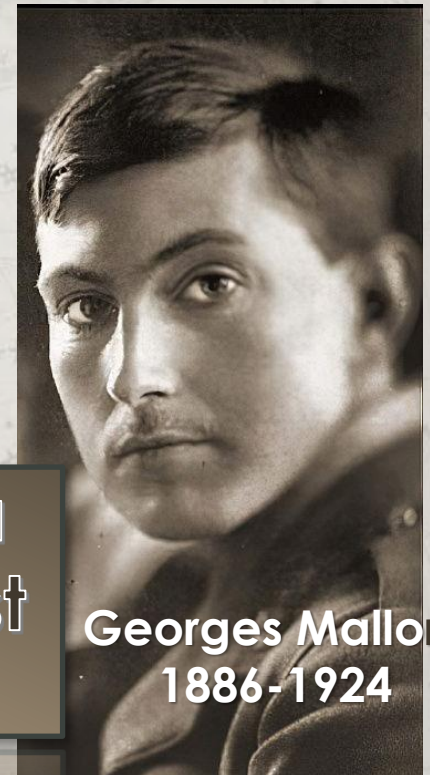
Pourquoi poser la question ?

➤ Parce que cette quête est accessible à l'investigation, donc à la science.

➤ Où tout simplement...

Pourquoi diable tenez-vous à tout prix à monter l'Everest au péril de votre vie ?

Parce que la montagne est là !

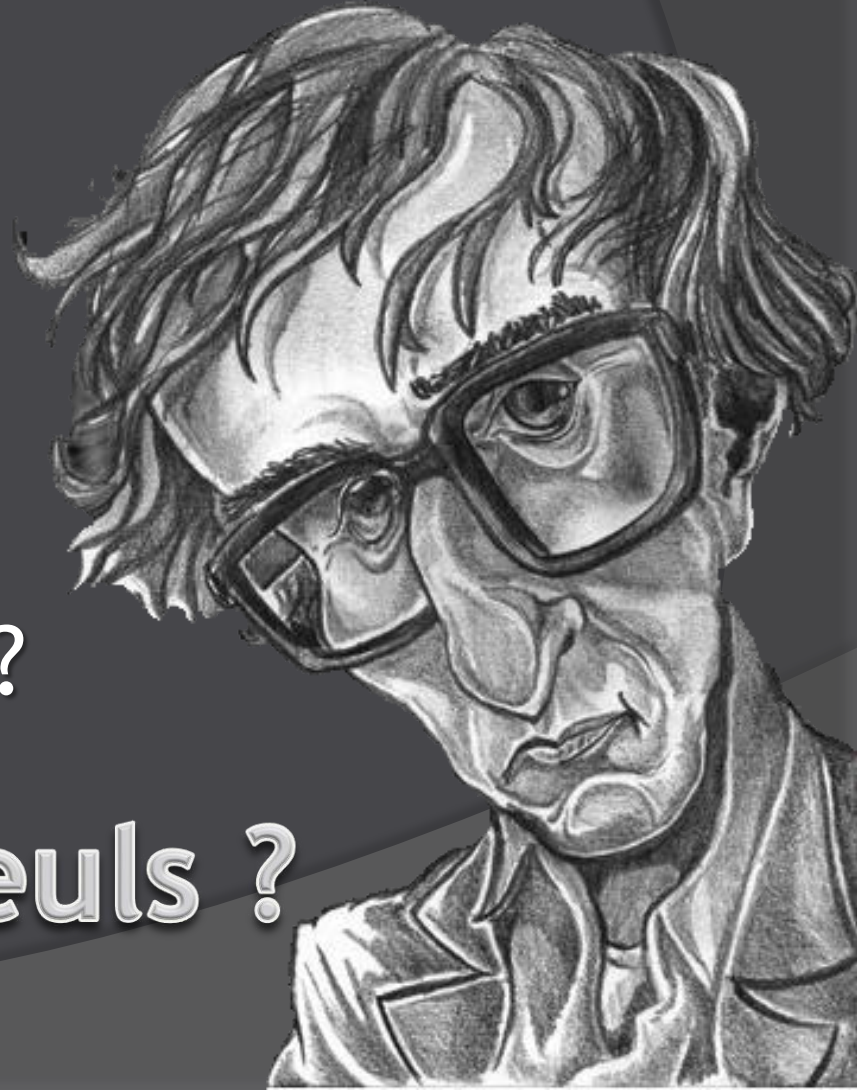


George Mallory
1886-1924

Mais aussi et surtout pour répondre à une question séculaire

- ◉ Qui suis-je ?
- ◉ D'où viens-je ?
- ◉ Où vais-je ?
- ◉ Qu'est-ce qu'on mange pour souper ?

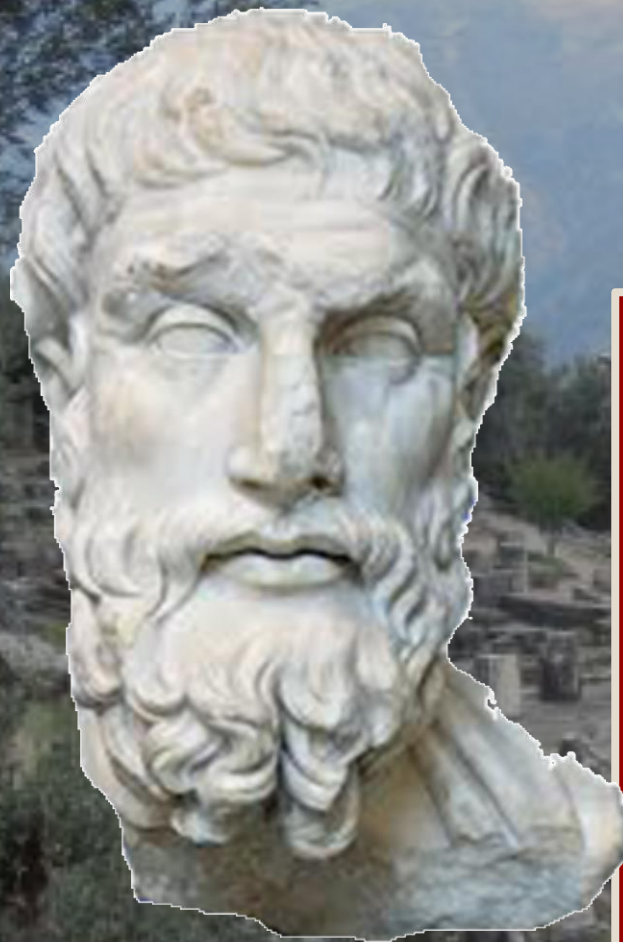
Sommes-nous seuls ?





➤ C'est Anaximandre de Milet qui le premier a évoqué la notion d'infini appliqué au monde avec le terme d'**απειρον**.

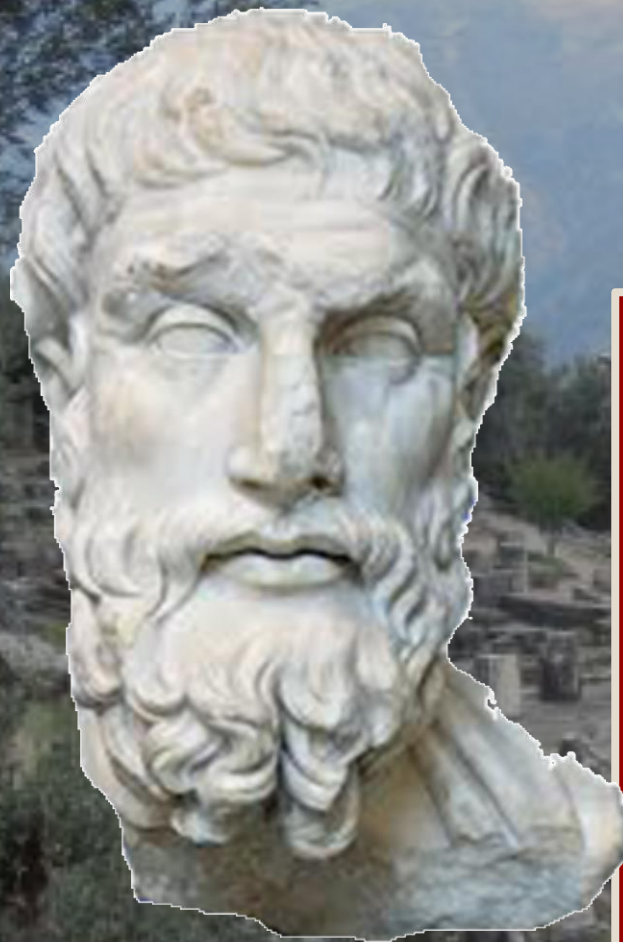
**Anaximandre
(610-546) AEC**



Épicure
(341-270) AEC

L'Univers est infini. Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'Univers. Il doit y avoir un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents.

Lettre à Hérodote



Épicure
(341-270) AEC

L'Univers est **infini**. Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est **infini** dans l'Univers. Il doit y avoir un nombre **infini** de mondes semblables au n^ôtre et un nombre **infini** de mondes différents.

Lettre à Hérodote

*“D’innombrables Soleils existent ; d’innombrables Terres sont en orbite autour de ces soleils de la même façon que les sept planètes tournent autour de notre Soleil. Des êtres vivants peuplent ces mondes. Je proclame l’espace **infini** parce qu’il n’y a aucune raison qu’il y ait une limite. Le monde est **infini** parce que Dieu est **infini**. Comment croire que Dieu, être **infini**, se serait limité lui-même en créant un monde fermé et obtus..”*



Giordano Bruno (1548-1600)

LA PLURALITÉ
DES
MONDES HABITÉS
ÉTUDE
OU L'ON EXPOSE LES CONDITIONS D'HABITABILITÉ
DES TERRES CÉLESTES
DISCUTÉES AU POINT DE VUE DE L'ASTRONOMIE, DE LA PHYSIOLOGIE
ET DE LA PHILOSOPHIE NATURELLE
PAR
CAMILLE FLAMMARION

Astronome, ancien membre de l'Observatoire de Paris, etc.

.... Au sein des ténèbres de l'espace
Notre terre flotte, petite île,
Deux le grand archipel des mondes.

VINGT-CINQUIÈME ÉDITION



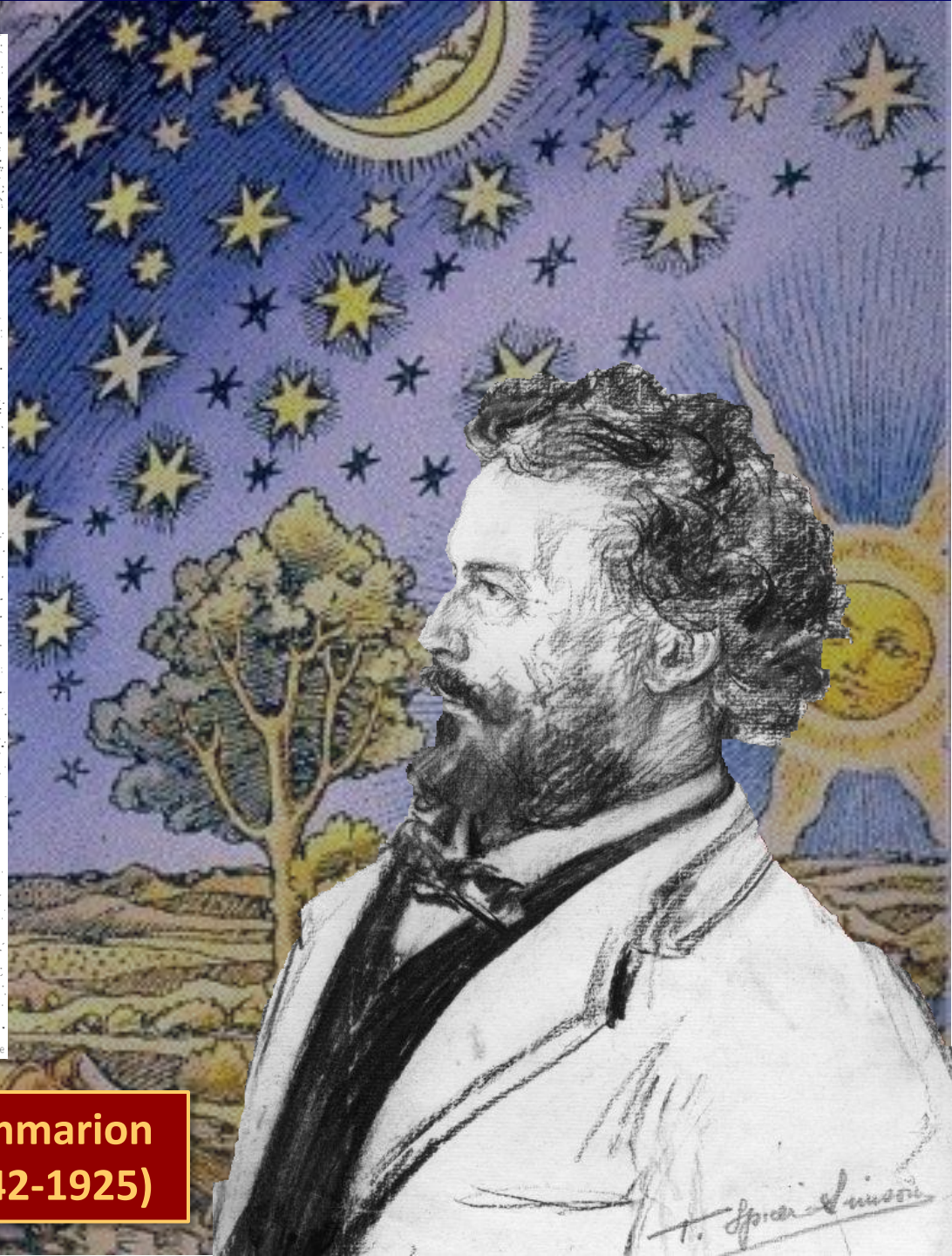
PARIS
LIBRAIRIE ACADÉMIQUE
DIDIER ET C^{ie}, LIBRAIRES-ÉDITEURS
35, QUAI DES AUGUSTINS, 35
GAUTHIER-VILLARS, IMP.-LIB. DE L'OBSERVATOIRE
55, QUAI DES AUGUSTINS, 55

1877

Tous droits réservés

Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Flammarion
(1842-1925)



Jean Heidmann
Alfred Vidal-Madjar
Nicolas Prantzos
Hubert Reeves

Sommes-nous seuls dans l'univers ?

Fayard

2000

Hubert Reeves
(1932- 2023)





LES POSTULATS

1. Les éléments constitutants de la vie sur Terre sont **simples** et **abondants**, mais leurs assemblages sont complexes.

LES POSTULATS

➤ Alors, admettons la vie comme ici :

➤ **CHON**

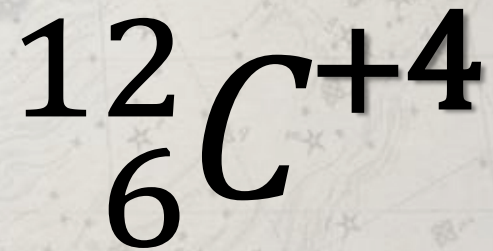
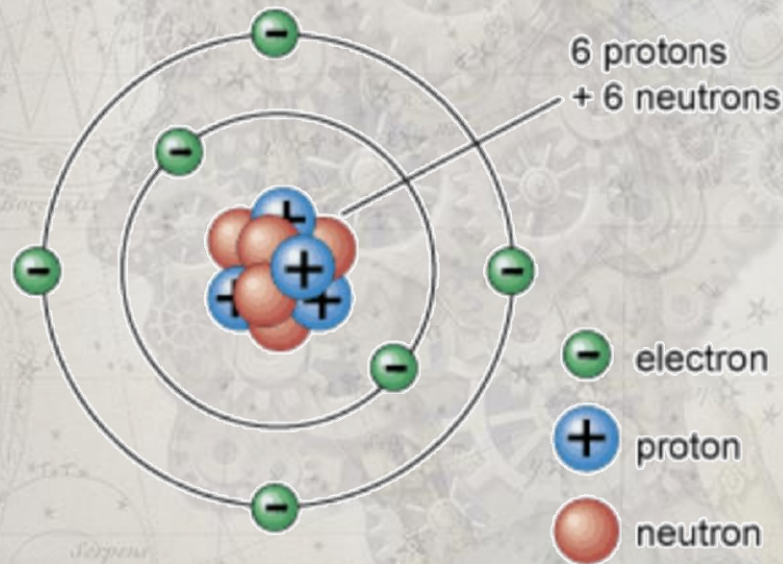
● H	1°000-000
He	80-000
● O	700°
● C	400°
● N	100°
Ne	100°
Si	40°
Fe	30°
Mg	30°
Si	20°
Al	3°
Na	2°
Ni	2°
Ca	2°
Autres	2°

LES POSTULATS

➤ Alors, admettons la vie comme ici :

➤ CHON

➤ À base de chimie du carbone



Tétravalent

LES POSTULATS

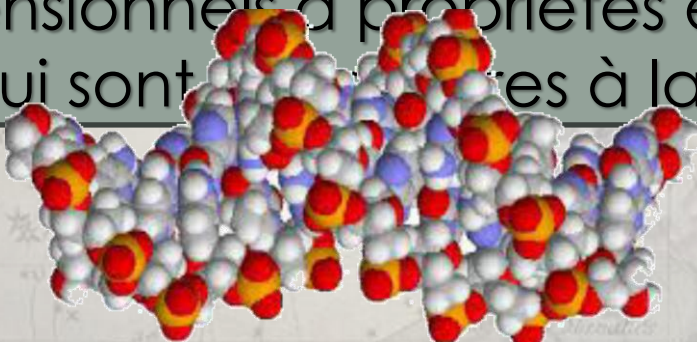
- Alors, admettons la vie comme ici :
- CHON
- À base de chimie du carbone

Le carbone sert de charpente à la formation de molécules ou d'assemblages complexes, souples, tridimensionnels à propriétés élaborées qui sont nécessaires à la vie.

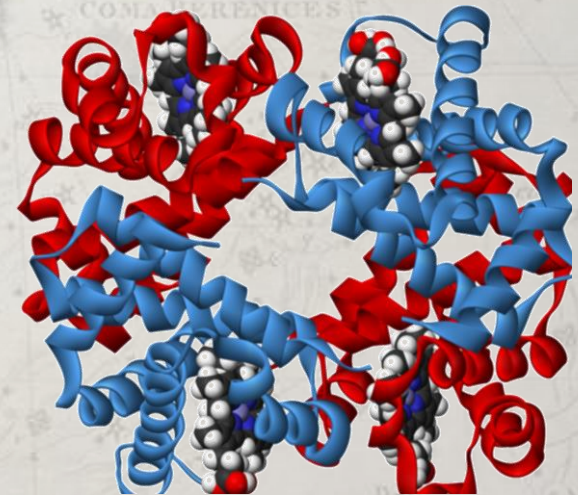
LES POSTULATS

- Alors, admettons la vie comme ici :
- CHON
- À base de chimie du carbone

Le carbone sert de charpente à la formation de molécules ou d'assemblages complexes, souples, tridimensionnels à propriétés élaborées qui sont essentielles à la vie.



Acide
Désoxyribo
Nucléique



Hémoglobine

- Alors, admettons la vie comme ici :
- CHON
- Pourquoi pas le silicium ?

Tableau périodique des éléments

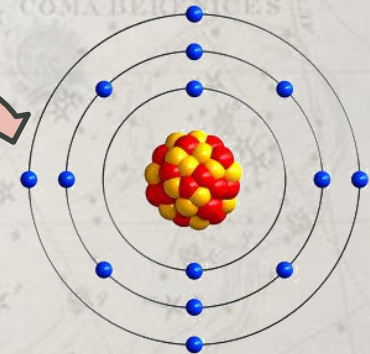
Numéro atomique: Z
Proton
 (Le plus fréquent est en gras)
Norme: N
Caractère: C
Symbole de l'élément
Masses atomiques
 Electronegativité
 (2): deux électrons orbitaires
 (3): trois paires d'électrons

1 IA
2 IIA
3 IIIA
4 IVA
5 VA
6 VIA
7 VIIA
8 VIIIA
9 VIIIA
10 VIIIA
11 VIIIA
12 VIIIA
13 IIIA
14 IVA
15 VA
16 VIA
17 VIIA
18 VIIIA

1 H
2 He
3 Li
4 Be
5 B
6 C
7 N
8 O
9 F
10 Ne
11 Na
12 Mg
13 Al
14 Si
15 P
16 S
17 Cl
18 Ar
19 K
20 Ca
21 Sc
22 Ti
23 V
24 Cr
25 Mn
26 Fe
27 Co
28 Ni
29 Cu
30 Zn
31 Ga
32 Ge
33 As
34 Se
35 Br
36 Kr
37 Rb
38 Sr
39 Y
40 Zr
41 Nb
42 Mo
43 Tc
44 Ru
45 Rh
46 Pd
47 Ag
48 Cd
49 In
50 Sn
51 Sb
52 Te
53 I
54 Xe
55 Cs
56 Ba
57 La
58 Ce
59 Pr
60 Nd
61 Pm
62 Sm
63 Eu
64 Gd
65 Tb
66 Dy
67 Ho
68 Er
69 Tm
70 Yb
71 Lu
72 Hf
73 Ta
74 W
75 Re
76 Os
77 Ir
78 Pt
79 Au
80 Hg
81 Tl
82 Pb
83 Bi
84 Po
85 At
86 Rn
87 Fr
88 Ra
89 Ac
90 Th
91 Pa
92 U
93 Np
94 Pu
95 Am
96 Cm
97 Bk
98 Cf
99 Es
100 Fm
101 Md
102 No
103 Lr

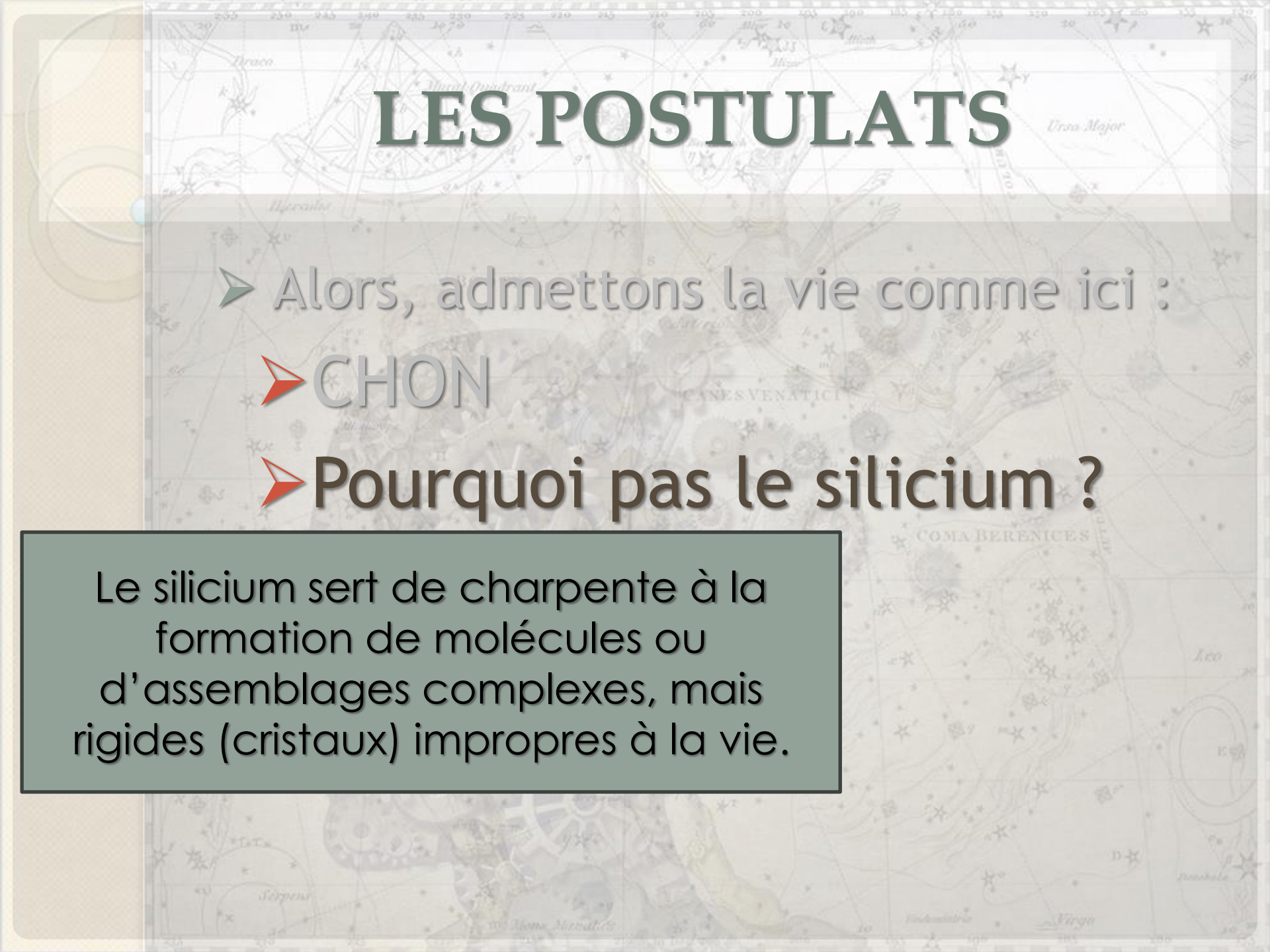
Métaux **Métaux de transition** **Non-métaux** **Gaz rares et halogènes**

☆ Signifie élément radioactif (instable)



● 14 Protons ● 14 Neutrons ● 14 Electrons

$${}^{28}_{14}\text{Si}^{+4}$$

A detailed background image of a celestial constellation map, likely from a historical or scientific source. It features various constellations such as Draco, Ursa Major, Canes Venatici, Coma Berenices, Leo, and Virgo, with stars connected by lines and labeled with names and symbols. The map is overlaid with a semi-transparent white box containing the title and a list of points.

LES POSTULATS

➤ Alors, admettons la vie comme ici :

➤ CHON

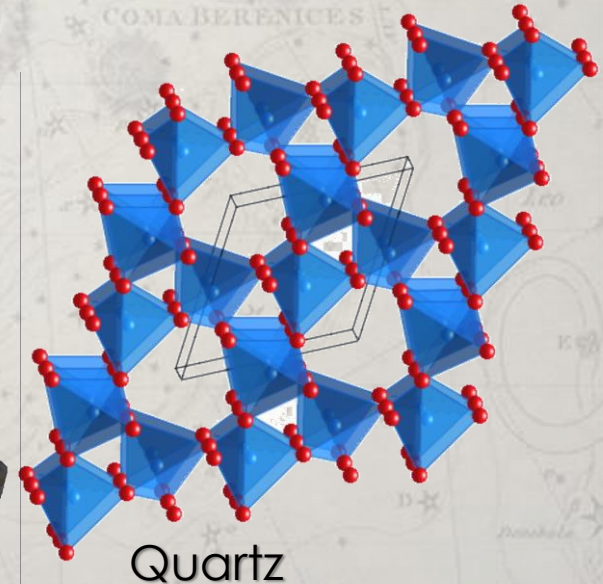
➤ Pourquoi pas le silicium ?

Le silicium sert de charpente à la formation de molécules ou d'assemblages complexes, mais rigides (cristaux) impropres à la vie.

LES POSTULATS

- Alors, admettons la vie comme ici :
- CHON
- Pourquoi pas le silicium ?

Le silicium sert de charpente à la formation de molécules et d'assemblages complexes rigides (cristaux) impr



Quartz

LES POSTULATS

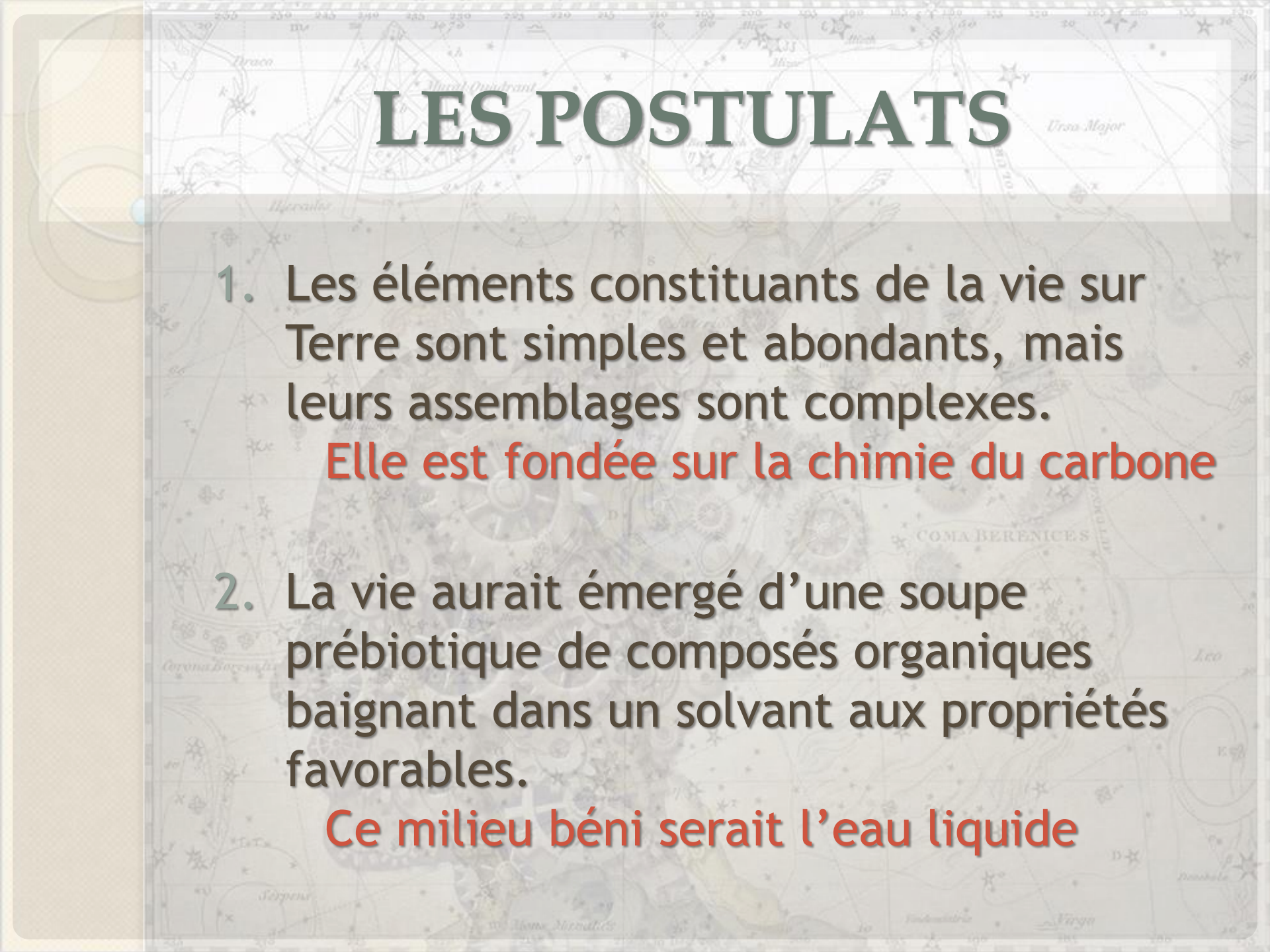
- La vie est apparue très tôt sur Terre
 - Début de formation de la Terre = $4,564 \times 10^9$ années
 - Apparition de la vie $\cong 4 \times 10^9$ années
- On peut penser que la vie est apparue au sein d'une opulente soupe prébiotique constituée de molécules organiques complexes.

LES POSTULATS

- La vie est apparue très tôt sur Terre
 - Début de formation de la Terre = $4,54 \times 10^9$ années
 - Apparition de la vie $\cong 4 \times 10^9$ années
- On peut penser que la vie est apparue au sein d'une opulente soupe prébiotique constituée de molécules organiques complexes.
- En solution dans l'eau liquide.

LES POSTULATS

- La vie est apparue très tôt sur Terre
 - Début de formation de la Terre = $4,54 \times 10^9$ années
 - Apparition de la vie $\cong 4 \times 10^9$ années
- On peut penser que la vie est apparue au sein d'une opulente soupe prébiotique constituée de molécules organiques complexes.
- En solution dans l'eau liquide.
- Baignant les grands **fumeurs noirs**.

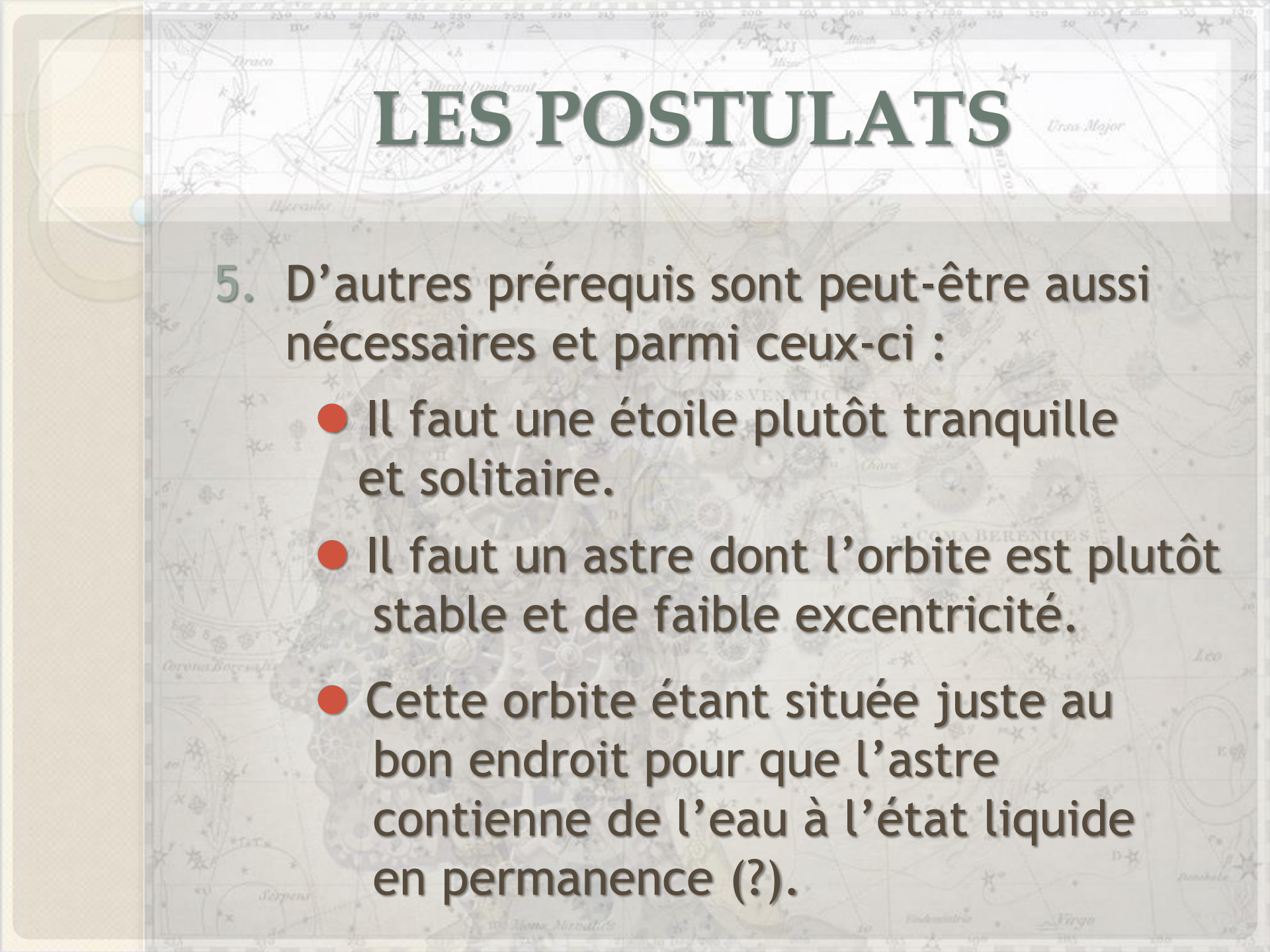


LES POSTULATS

1. Les éléments constitutants de la vie sur Terre sont simples et abondants, mais leurs assemblages sont complexes.
Elle est fondée sur la chimie du carbone
2. La vie aurait émergé d'une soupe prébiotique de composés organiques baignant dans un solvant aux propriétés favorables.
Ce milieu béni serait l'eau liquide

LES POSTULATS

3. Ainsi, la Terre qui aurait possédé simultanément ces deux conditions *sine qua non* aurait vu la vie émerger à sa surface dans sa tendre jeunesse.
4. D'où l'idée qu'il nous faut rechercher des astres qui paraissent posséder ces caractéristiques anticipées si on espère trouver la vie *ailleurs*.



LES POSTULATS

5. D'autres prérequis sont peut-être aussi nécessaires et parmi ceux-ci :
- Il faut une étoile plutôt tranquille et solitaire.
 - Il faut un astre dont l'orbite est plutôt stable et de faible excentricité.
 - Cette orbite étant située juste au bon endroit pour que l'astre contienne de l'eau à l'état liquide en permanence (?).

État de la situation de l'eau sur Terre



L'eau recouvre

71 % de la surface de notre planète.

État de la situation de l'eau sur Terre



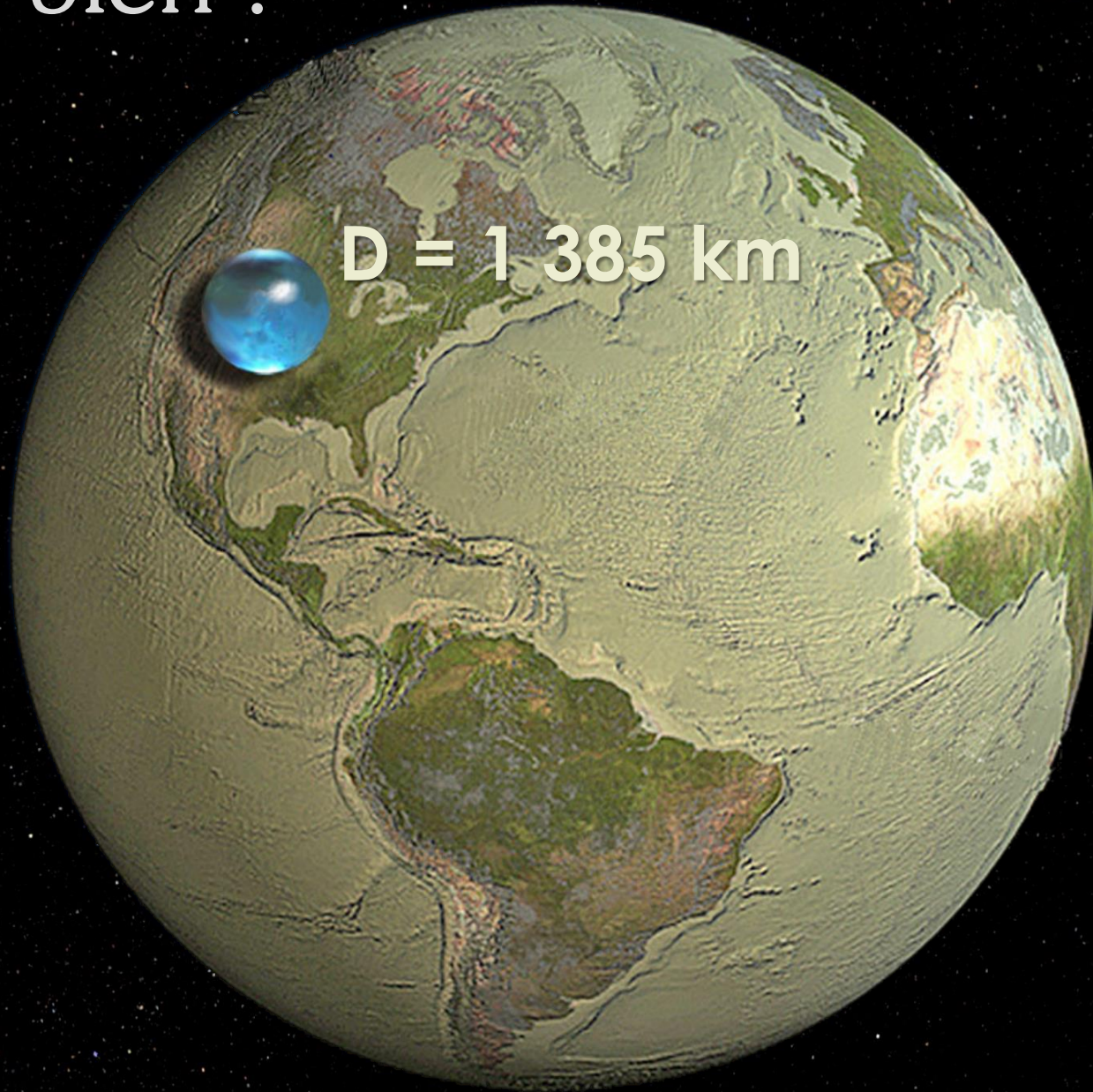
Ce qui peut donner l'impression
que l'eau est un **élément dominant** sur Terre.

État de la situation de l'eau sur Terre



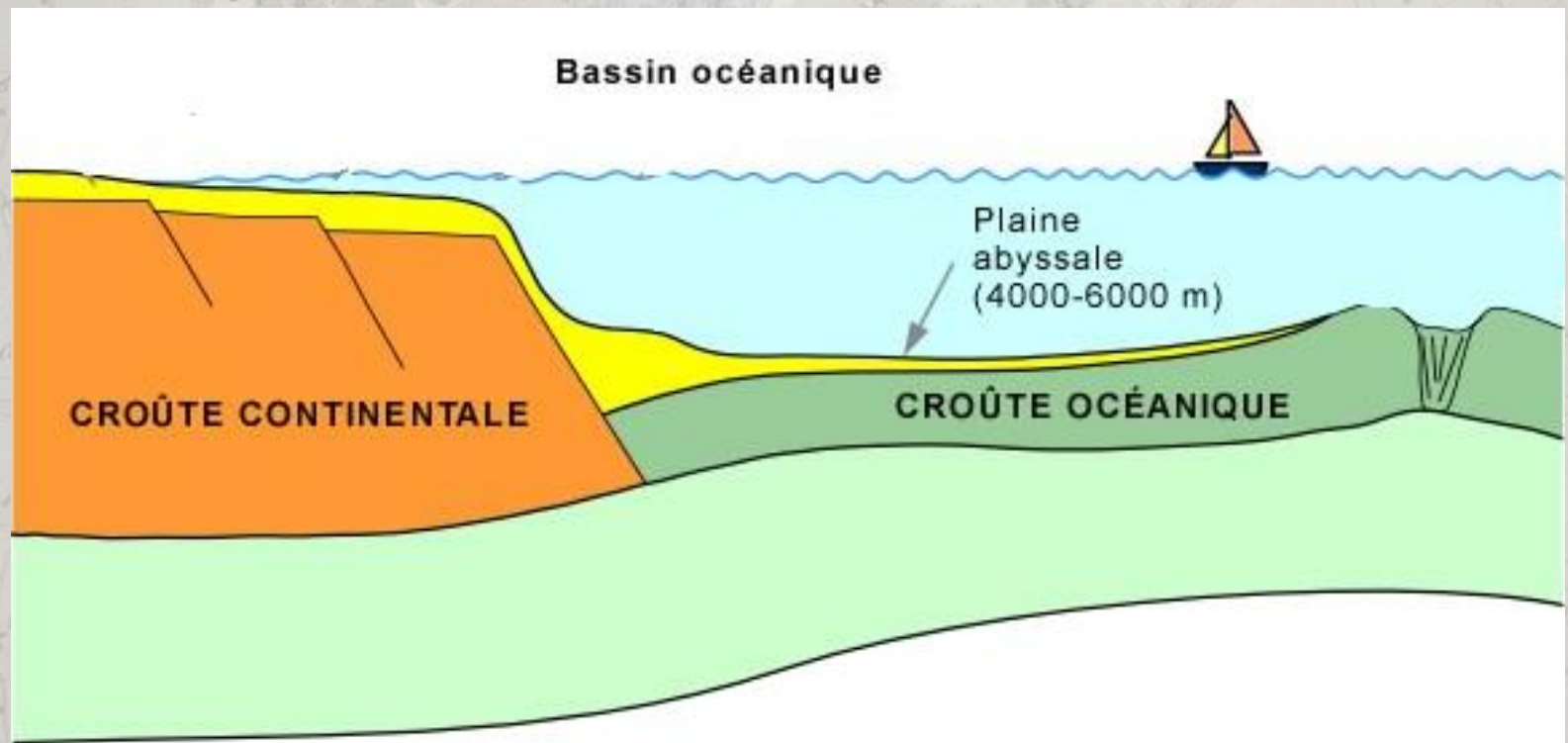
Alors, faisons une boule avec toute l'eau qu'on retrouve en surface le la planète.

Eh bien !



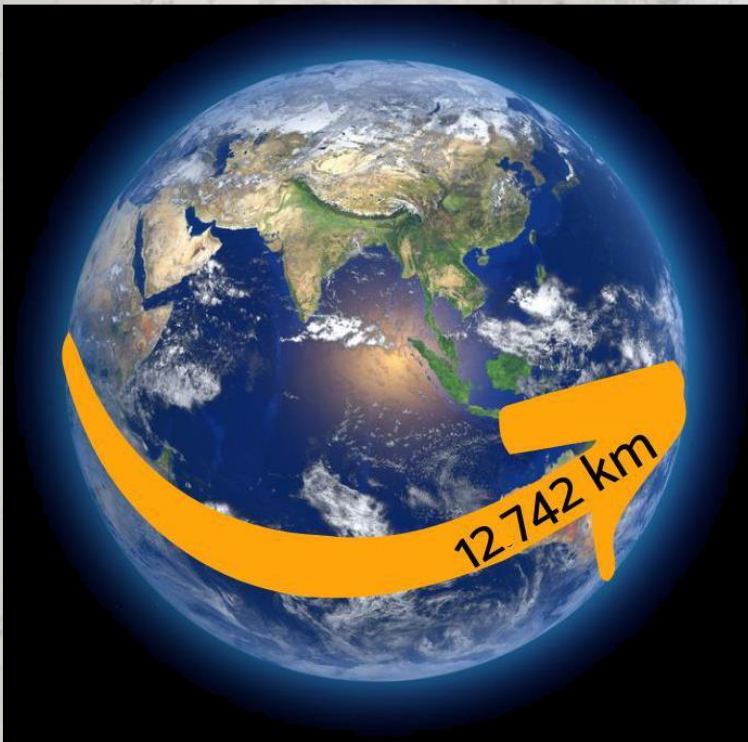
MAIS ALORS, VOUS ALLEZ DIRE...

- Cela ne fait aucun sens,
Les plaines abyssales ont une profondeur moyenne de 5 km.



MAIS ALORS, VOUS ALLEZ DIRE...

- Cela ne fait aucun sens,
Les plaines abyssales ont une profondeur moyenne de 5 km.



- La profondeur des océans = **0,08** % du diamètre de la Terre.
- La masse de toute l'eau ne représente que **0,023** % de la masse de la Terre.

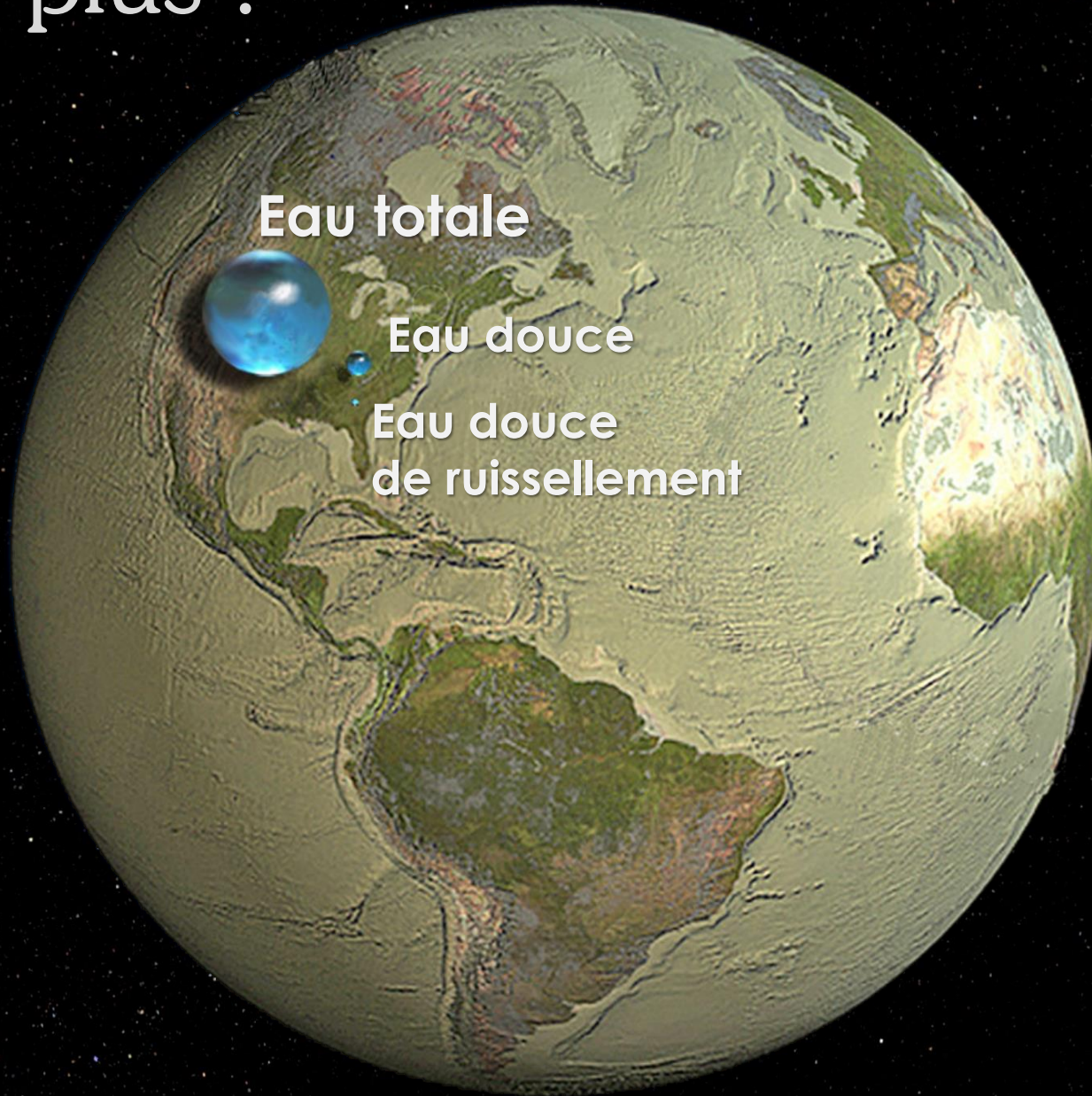
IL Y A PEU D'EAU SUR TERRE

IL Y A PEU D'EAU SUR TERRE



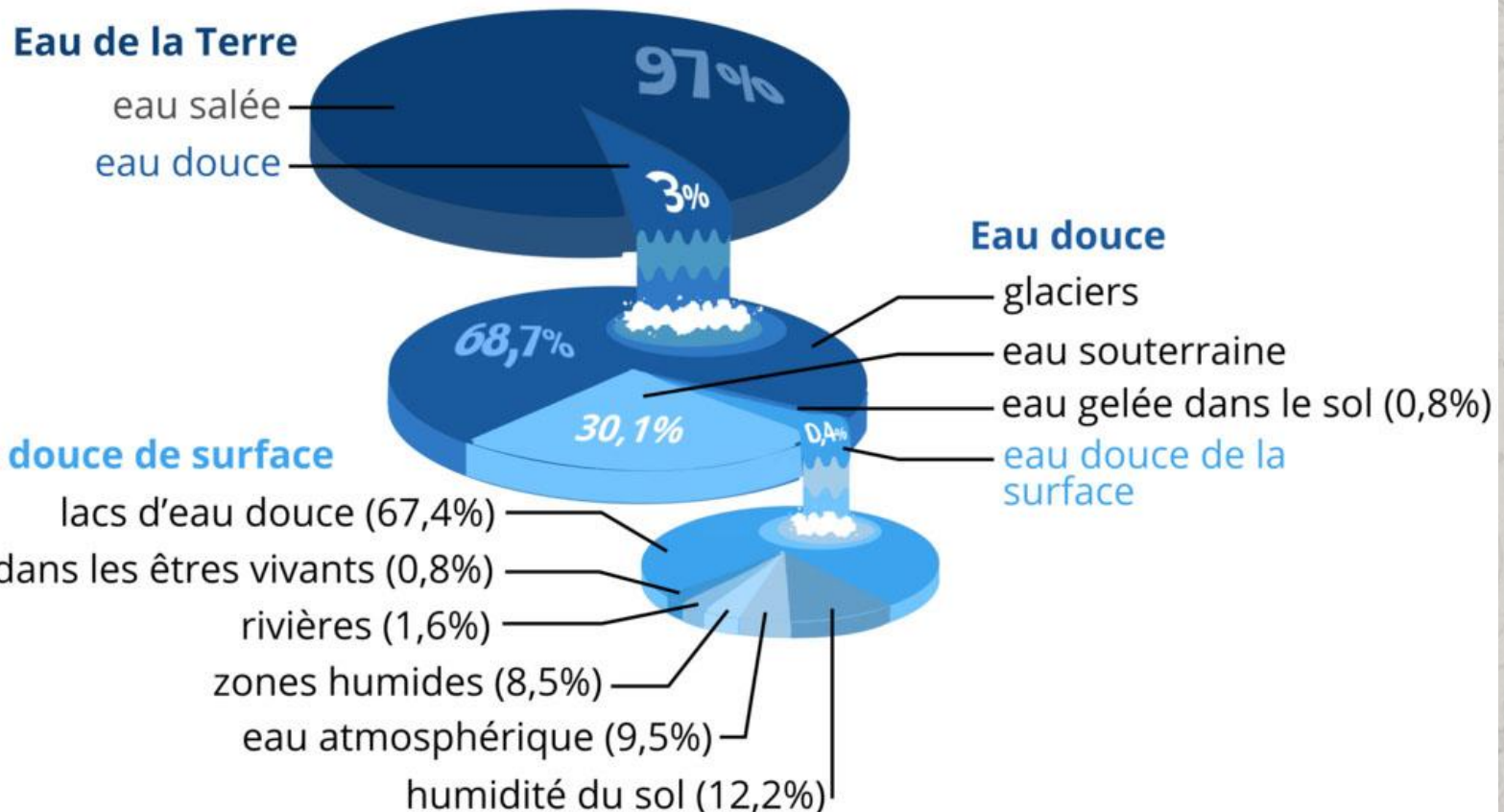
TAILLES À L'ÉCHELLE

En plus !



CE N'EST PAS JUSTE

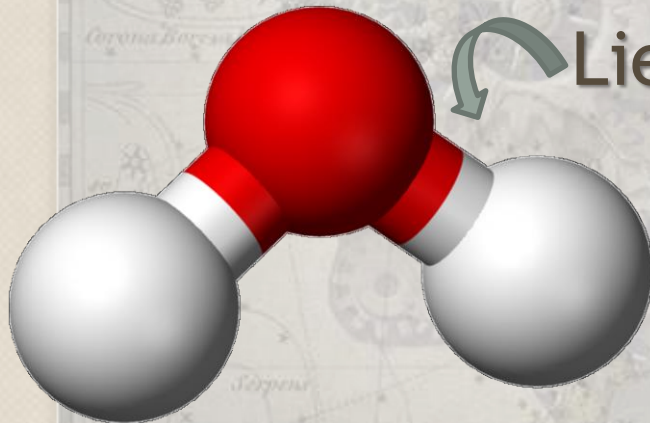
Répartition de l'eau sur Terre



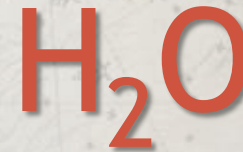
UNE QUANTITÉ FIXE ET STABLE

- La masse d'eau totale de l'hydrosphère n'évolue pas au cours du temps et reste infiniment constante.
- Et ce, depuis plus de 3 milliards d'années.

L'eau est un oxyde (monoxyde de dihydrogène)



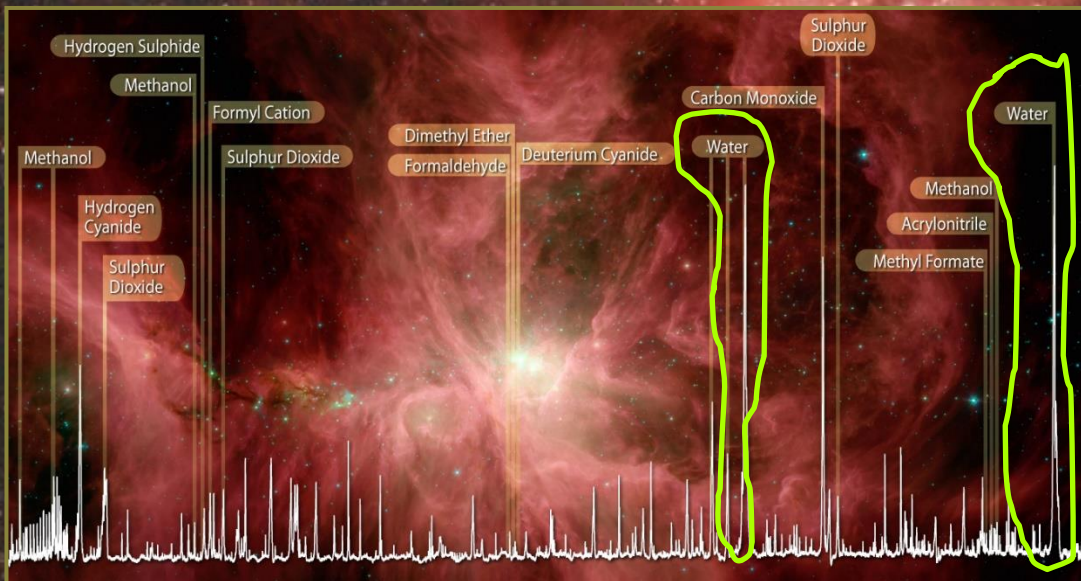
Lien covalent



- Les liaisons covalentes sont les plus stables de toutes les liaisons chimiques.

D'OÙ VIENT L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE ?

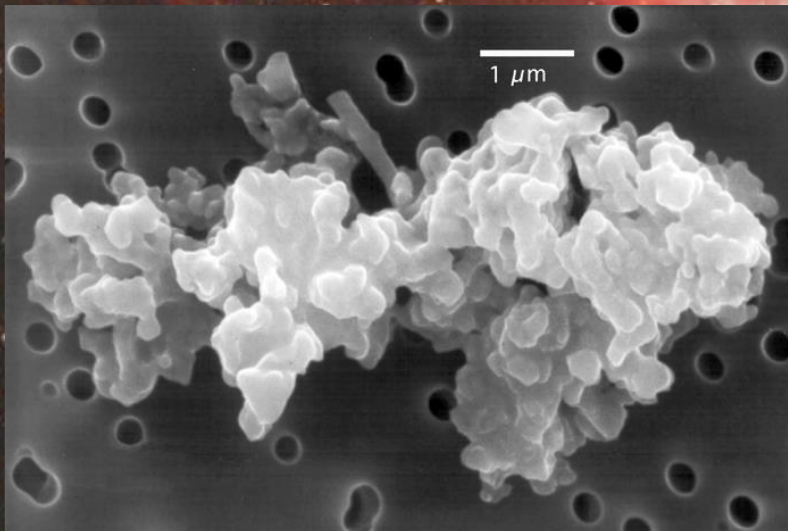
- L'eau est une molécule abondante dans les grands nuages moléculaires froids qui parsèment le disque de la Voie Lactée.
- L'effondrement gravitationnel de ces nuages créent les Systèmes stellaires.



- On y décèle d'importants pics spectroscopiques d'eau.

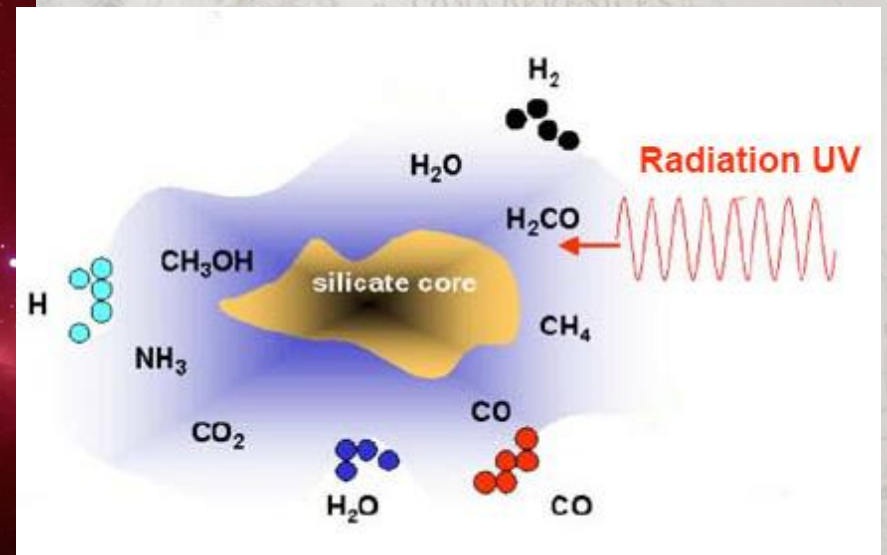
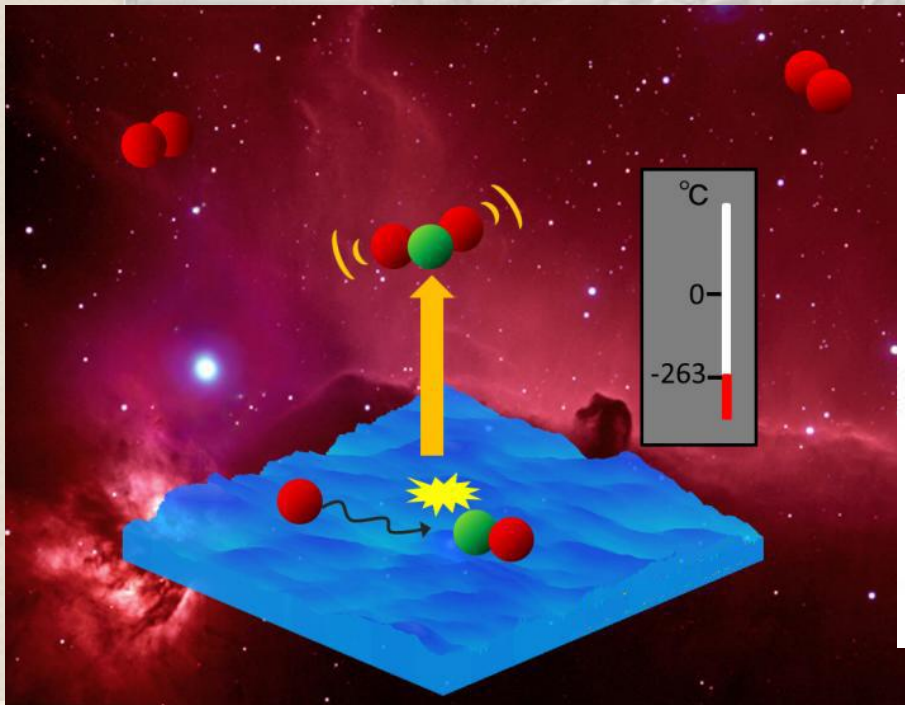
D'OÙ VIENT L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE ?

- On trouve dans ces nuages des grains de poussière interstellaires composés de :
 - Glaces diverses en manteaux de surface,
 - De carbonés, surtout sous forme d'hydrocarbures aromatiques polycycliques,
 - de silicates variés



D'OÙ VIENT L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

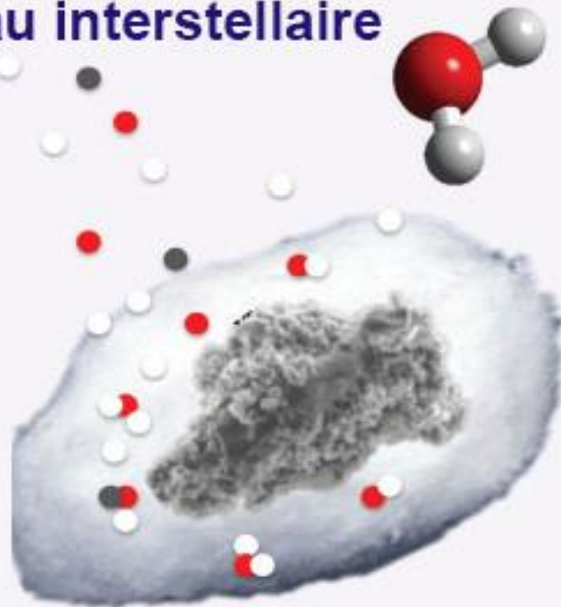
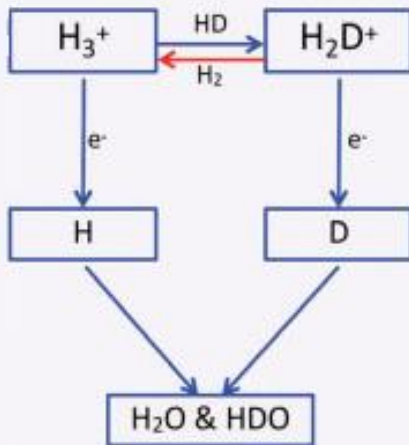
- En surface de ces grains :
 - Les atomes d'Oxygène se fixent puis se lient à l'Hydrogène grâce à l'énergie des rayons UV venus des étoiles massives de type O, B et A.



D'OÙ VIENT L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

- En surface de ces grains :
 - Les atomes d'Oxygène se fixent puis se lient à l'Hydrogène grâce à l'énergie des rayons UV venus des étoiles massives de type O, B et A.

Formation de l'eau interstellaire



- Types de molécules d'eau :
 - 2 Protiums + 1 Oxygène = H_2O
 - 1 Protium + 1 Deutérium + 1 Oxygène = HDO

D'OÙ VIENT L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

- On estime que l'eau représente **un millionième** de la masse totale d'un nuage interstellaire.
- Un nuage interstellaire peut représenter plusieurs millions de fois la masse du Soleil.
- La masse de l'eau dans ces nuages est gigantesque, astronomique...

D'OÙ VIENT L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

- Ainsi, la quasi-totalité de l'eau qu'on retrouve dans le système solaire et, par conséquent, l'eau sur Terre, s'est formée dans un nuage moléculaire galactique il y a des milliards d'années.
- La molécule d'eau est stable, presque indestructible, virtuellement éternelle...

Pensez-y !



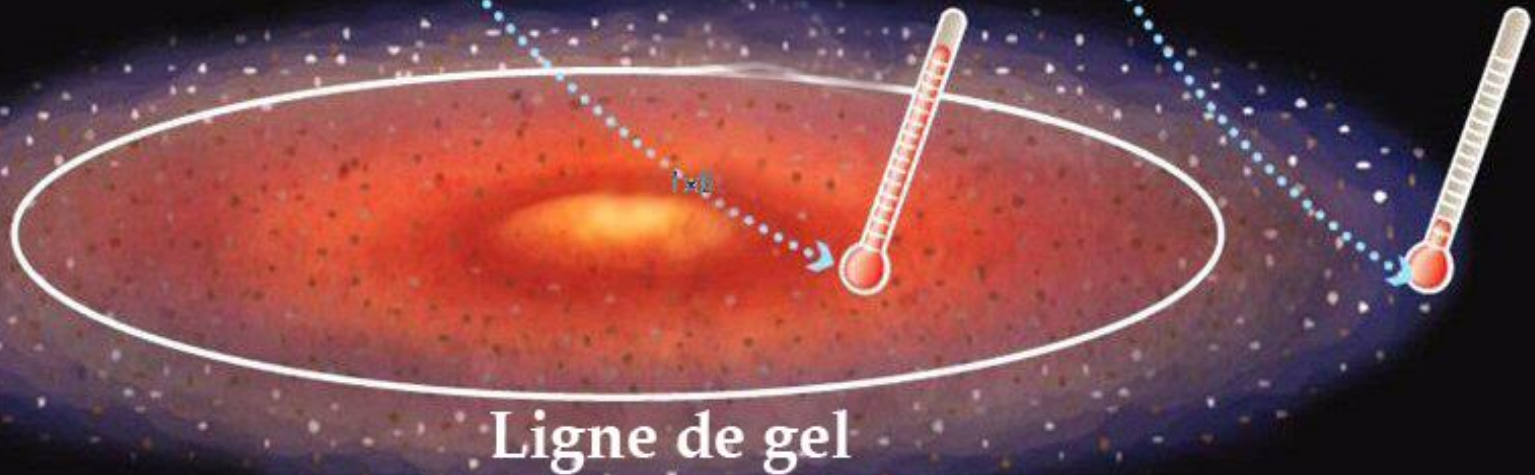
D'OÙ VIENT L'EAU SUR LA TERRE

- Si on connaît plutôt bien la provenance de l'eau dans le Système solaire,
- Sachons que les volatiles (comme l'eau à l'état gazeux) ont fait l'objet d'une ségrégation lors de la différenciation de la nébuleuse protosolaire.
- Rappelons aussi que seuls les éléments à l'état solide font l'objet d'accrétion.

Ségrégation matérielle des disques protoplanétaires.

À l'intérieur de la ligne de glace, les **roches** et les **métaux** condensent. Les autres restent gazeux.

À l'extérieur de la ligne de glace, les roches, les métaux et les **volatiles** condensent, mais pas l'hydrogène et l'hélium.

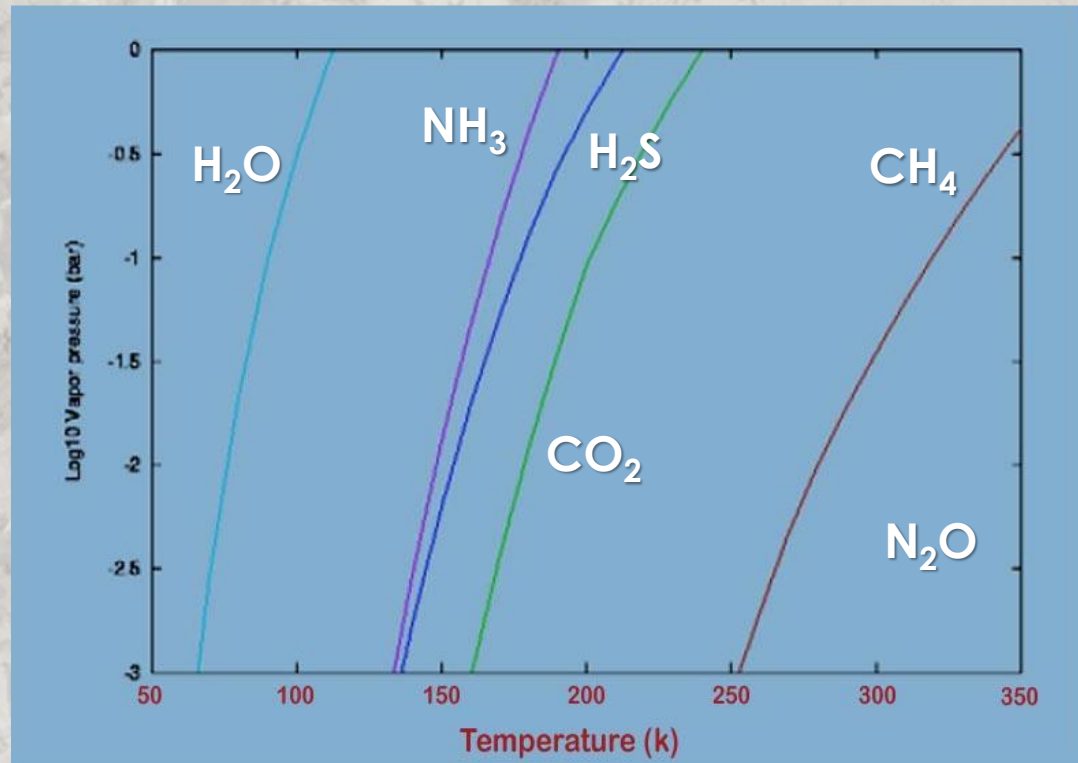


- À l'intérieur de la ligne de glace, la chaleur vaporise H_2O , CH_4 , CO , CO_2 , NH_3 .
- Les volatiles et les gaz sont soufflés par les vents stellaires au-delà de la ligne de glace.
- Éventuellement, il n'y aura plus de gaz et de volatiles < 3 U.A. (pour le Soleil)
- Au-delà de la ligne de glace, les volatiles condensent en glace qui persiste.

Ségrégation matérielle des disques protoplanétaires.

➤ Quels sont ces volatiles qui ont 3 phases :

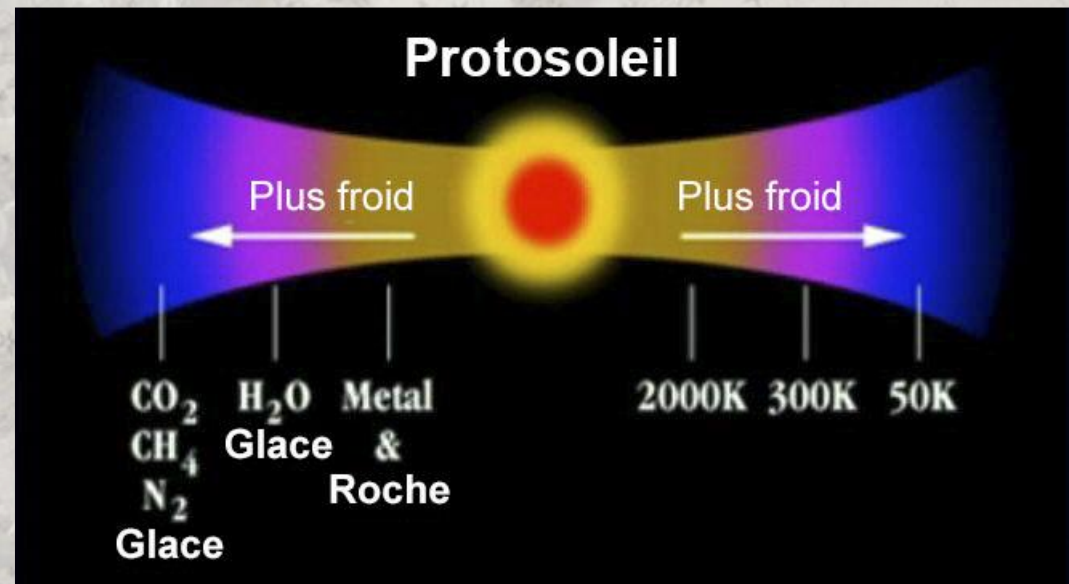
- Gazeuse
- Liquide
- Solide (glace)



Ségrégation matérielle des disques protoplanétaires.

➤ Quels sont ces volatiles qui ont 3 phases :

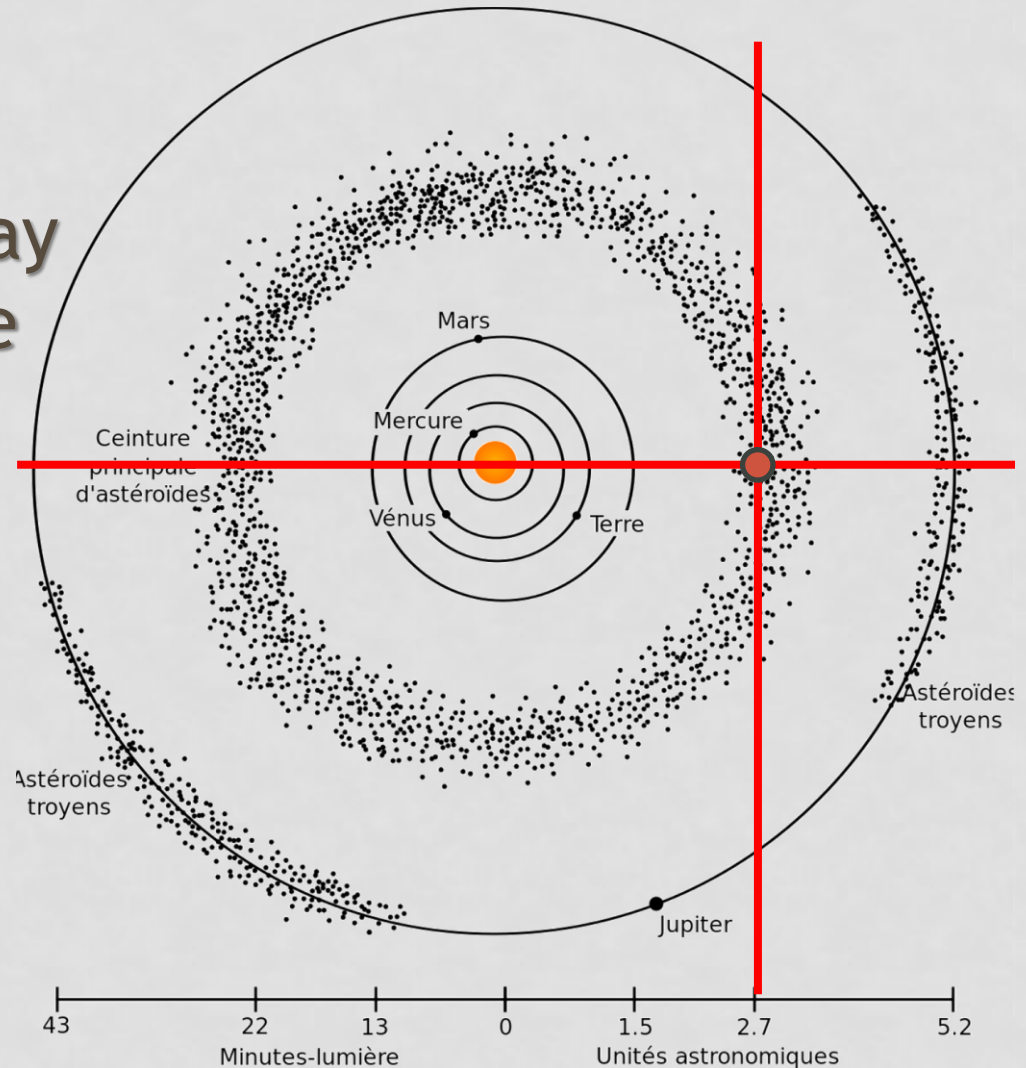
- Gazeuse
- Liquide
- Solide (glace)



➤ Pour **H₂O** la ligne de gel se situe à $\pm 2,7$ U.A.

Ségrégation matérielle des disques protoplanétaires.

- L'astéroïde (10284) Damienlemay a un demi grand axe de 2,8 U.A.
- Il se situe sur la ligne de glace.

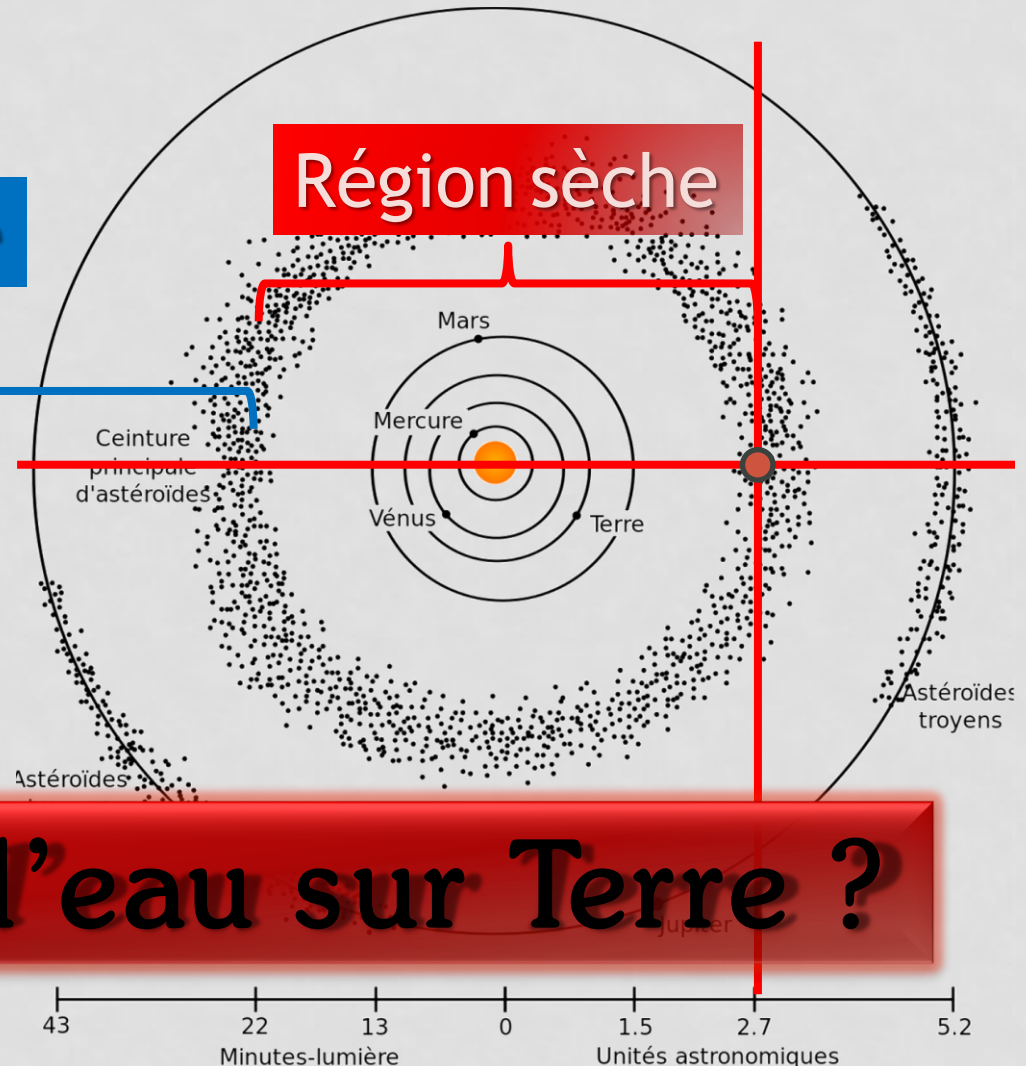


Ségrégation matérielle des disques protoplanétaires.

Région mouillée

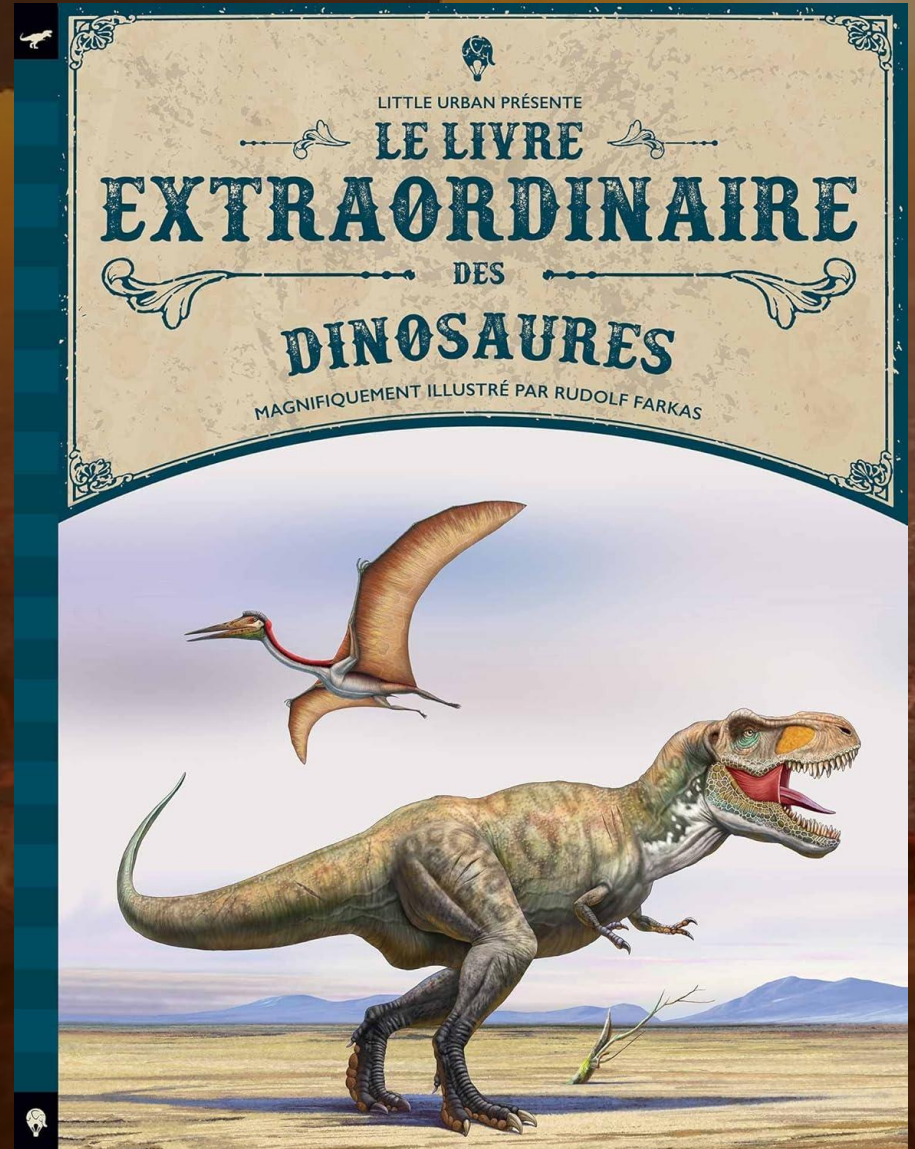
Région sèche

➤ La Terre s'est formée en région sèche.



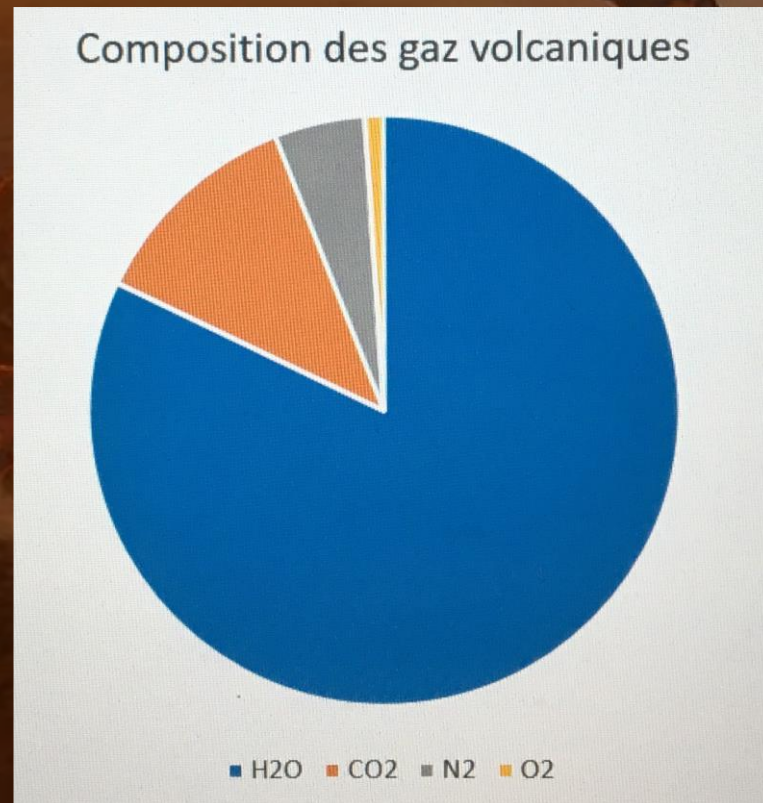
QUAND J'ÉTAIS TOUT PETIT...

➤ On nous parlait de la Terre primitive.



QUAND J'ÉTAIS TOUT PETIT...

- On nous disait que l'eau et l'atmosphère venaient du dégazage volcanique de la Terre primitive.



QUAND J'ÉTAIS TOUT PETIT...

- L'eau s'était accumulée dans l'atmosphère alors que la Terre était encore chaude.
- Puis, la Terre s'étant refroidie...

QUAND J'ÉTAIS TOUT PETIT...

- S'en était suivi un grand *Déluge*.
- Qui avait crée toute les mers du globe.
- Durée du Déluge :
des milliers, voire
des millions
d'années.



BIEN DE LA SCIENCE PLUS TARD LE 23 SEPTEMBRE 2014...

➤ Jean-René Roy est venu donner une conférence au Cegep de Rimouski.

➤ *D'où vient l'eau sur Terre ?*

➤ La réponse était claire, nette et non équivoque :
L'eau sur Terre est venue à bord d'astéroïdes lors du **Grand bombardement tardif** survenu il y a 4,2 à 3,8 milliards d'années.



LA PLANÉTOLOGIE EN ÉBULLITION

- L'opinion de Jean-René Roy est le fruit d'une sous-discipline de l'astronomie qu'on appelle la **planétologie**.
- Son intérêt a été ravivé par la découverte et la mise en évidence des **exoplanètes**.



LA PLANÉTOLOGIE EN ÉBULLITION

- Depuis 1995, plus de 5 500 exoplanètes ont été confirmées
- Et $\pm 10\ 000$ sont en attente de confirmation.



LA PLANÉTOLOGIE EN ÉBULLITION

- Des sommes et des moyens *astronomiques* sont mis à la disposition de cette discipline,
- Parce que cette quête nous rapproche de la résolution de la question fondamentale :
Sommes-nous seuls ?
- En effet, la vie se passe sur les planètes ou, peut-être, sur certains satellites qui les entourent.

Claude Lévi-Strauss

de l'Académie française

Tristes tropiques



Terre humaine
Poche

POCKET

Le grand livre de l'ethnologie
contemporaine

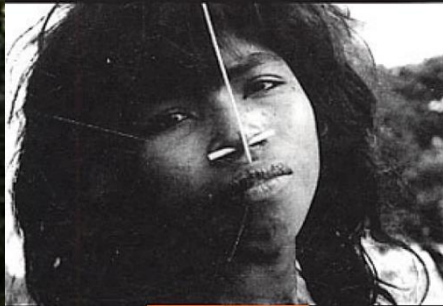
Une sagesse toute simple

Un, deux...

Claude Lévi-Strauss

de l'Académie française

Tristes tropiques



Terre humaine
Poche

POCKET

Le grand livre de l'ethnologie
contemporaine

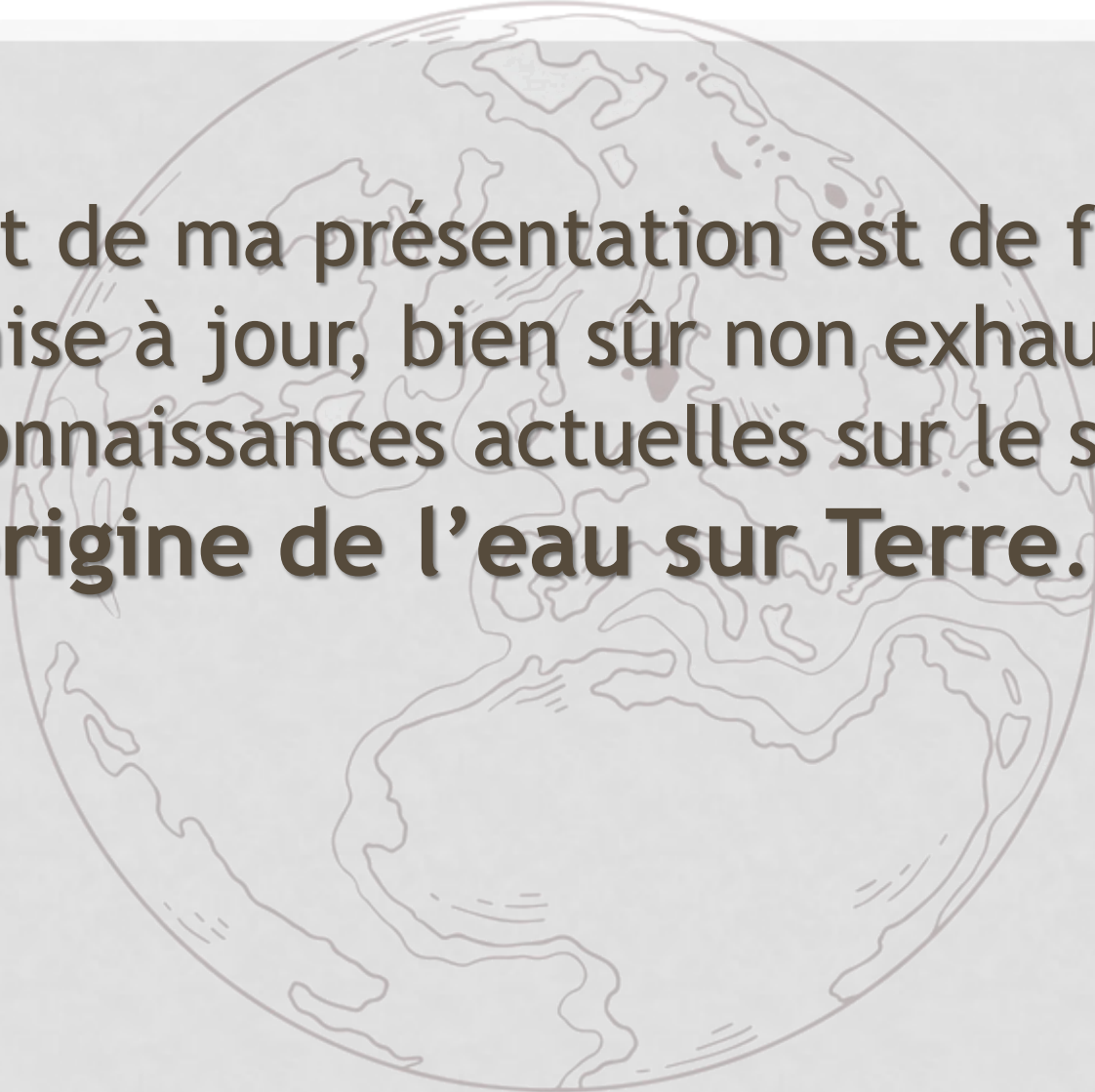
Une sagesse toute simple

Il ne suffit que d'une de plus...

Un, deux... beaucoup

LA PLANÉTOLOGIE EN ÉBULLITION

- Le but de ma présentation est de faire une mise à jour, bien sûr non exhaustive, des connaissances actuelles sur le sujet de **l'origine de l'eau sur Terre.**

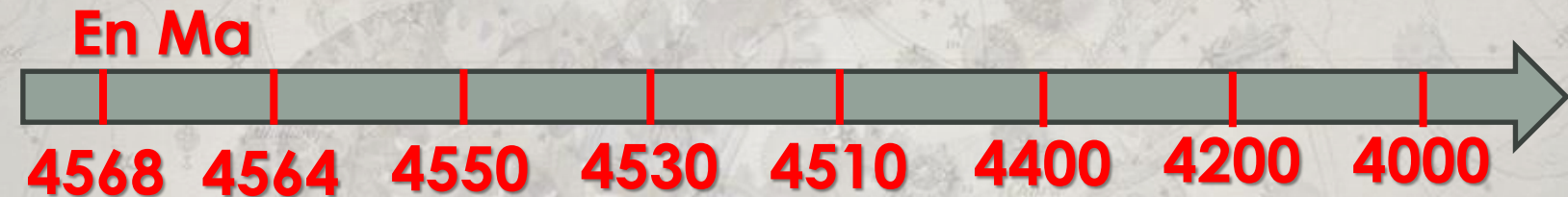


LES HYPOTHÈSES SE RÉPARTISSENT EN DEUX CATÉGORIES

- De sources endogènes :
 - Dégazage du magma originel
- De sources exogènes :
 - Les comètes
 - Les astéroïdes
- Un amalgame de tout un chacun

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

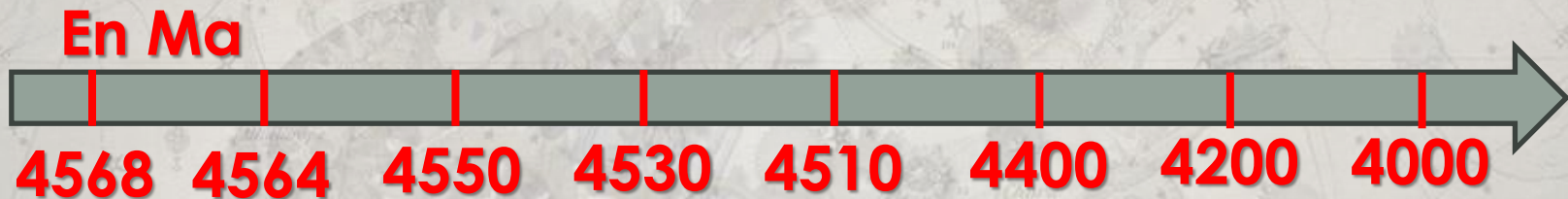
➤ Dessinons une flèche du temps



- Effondrement de la nébuleuse protoplanétaire.
Début d'accrétion et formation des premières
météorites chondritiques retrouvées.

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

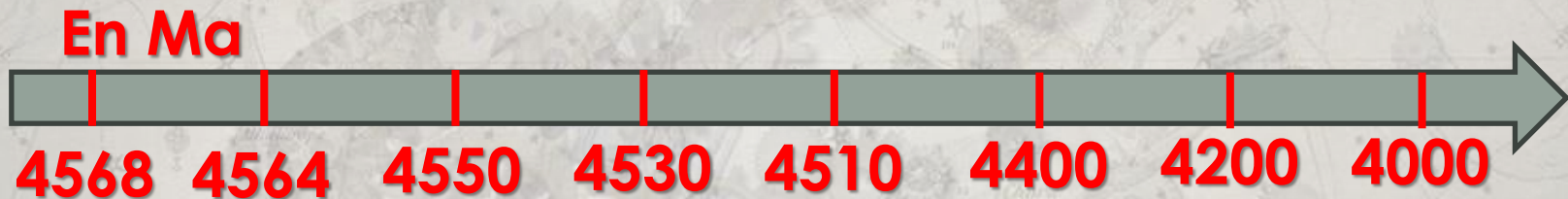
➤ Dessinons une flèche du temps



➤ Accrétion bien en progrès.
Présence de planétoïdes à T° de surface élevée,
magmatiques.

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

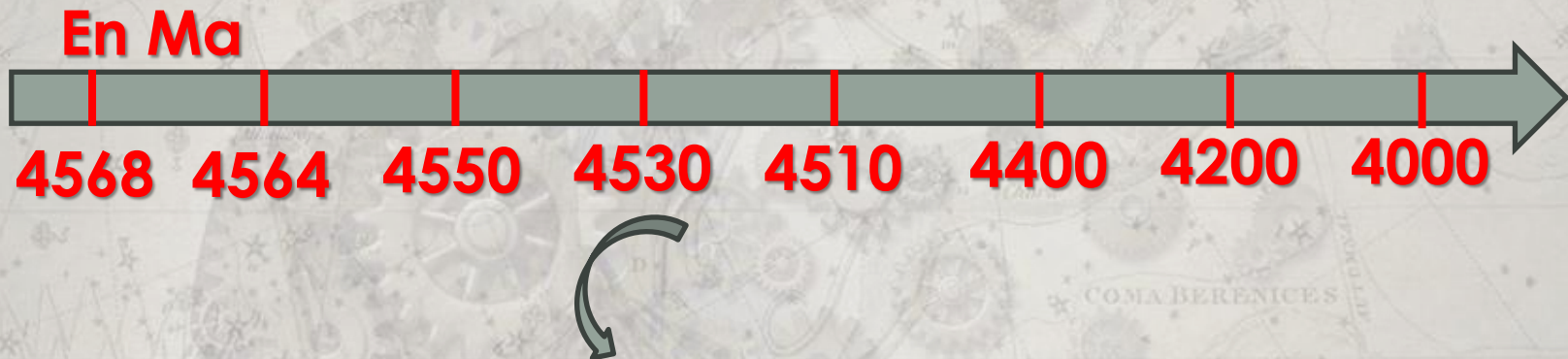
➤ Dessinons une flèche du temps



➤ La Terre a acquis 60 % de sa masse actuelle.

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

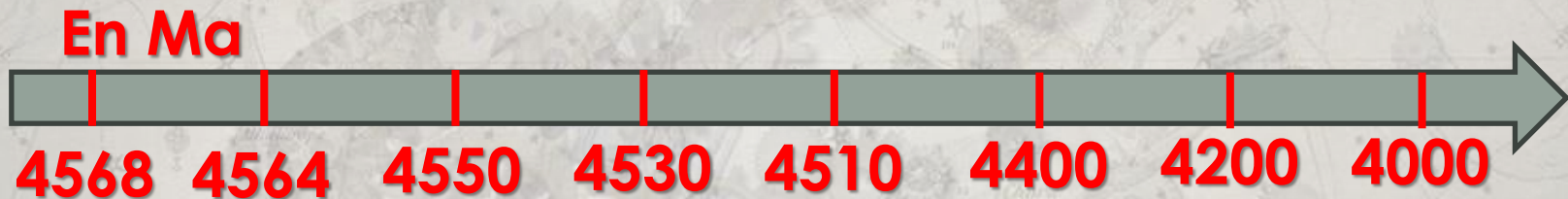
➤ Dessinons une flèche du temps



- Le Soleil s'allume. Début des réactions thermonucléaires. Le Soleil est une étoile.
- Choc Terre-Théia ➡ Formation de la Lune.
- T° de la Terre en surface = 10 000 °C,
- Atmosphère de roches vaporisées.

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

➤ Dessinons une flèche du temps



➤ T° de surface de la Terre $\approx 500^{\circ}\text{C}$.

● Dégazage du manteau durant ≈ 150 Ma.

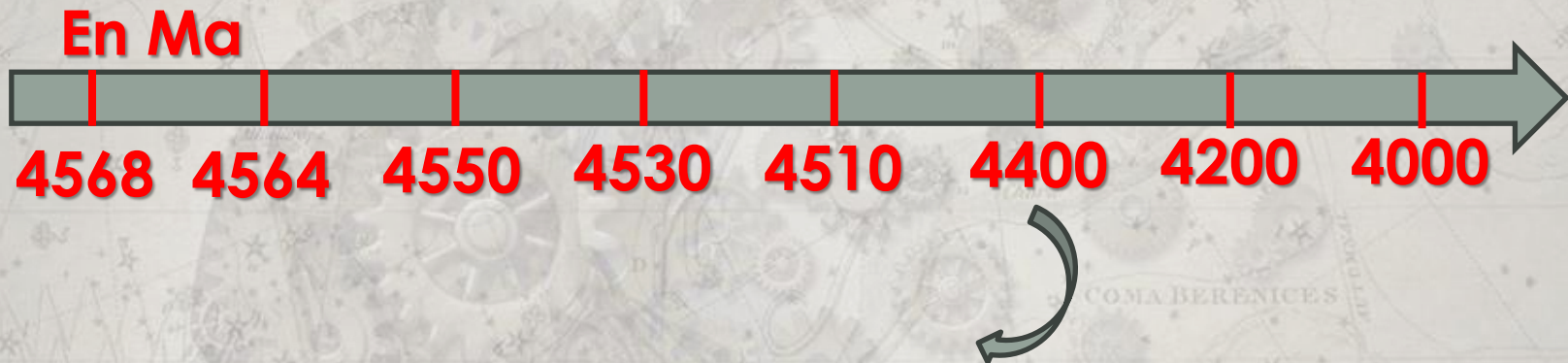
Atmosphère ➔ H_2O 85 %

CO_2 15 %

Pression atmosphérique : 260 bar

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

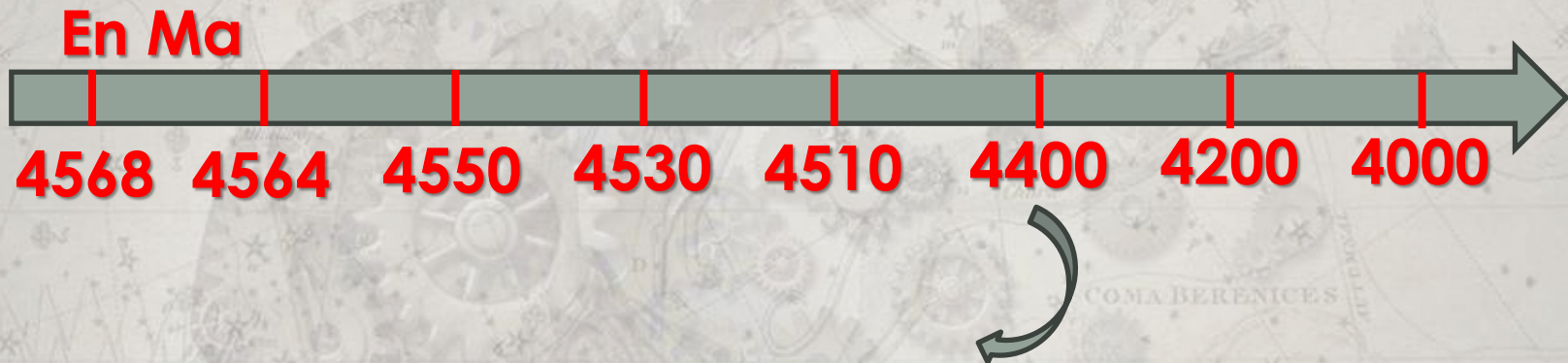
➤ Dessinons une flèche du temps



- Pluie diluvienne d'une durée de plusieurs milliers d'années recouvrant la planète d'une eau bouillante surmontée d'une atmosphère de CO_2 .
 - La pluie entraîne le CO_2 qui se lie au Ca(OH)_2 pour former du calcaire CaCO_3 .
 - L'effet de serre ↓.

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

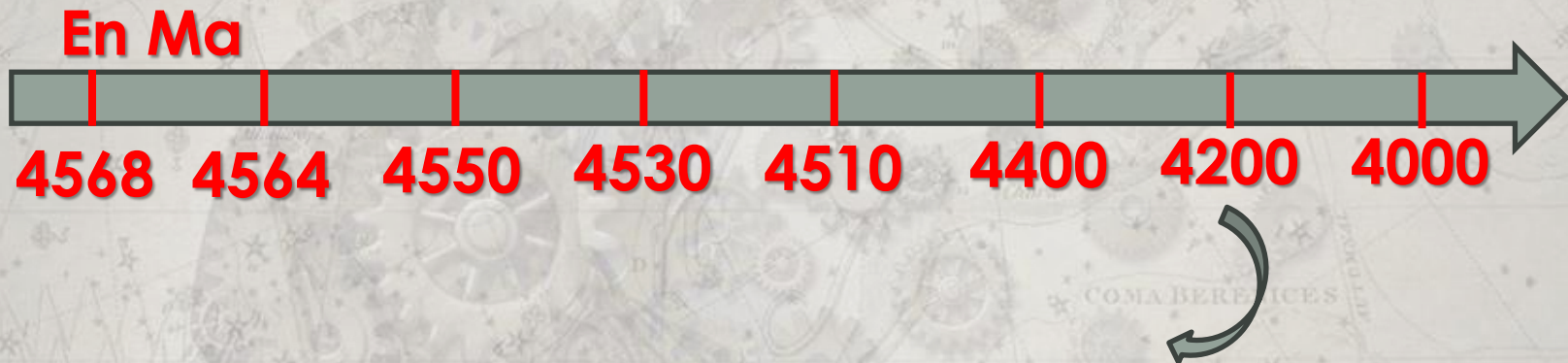
➤ Dessinons une flèche du temps



- On a retrouvé des cristaux de zircons datés de 4400 Ma avec $\delta^{18}\text{O}$ élevés indiquant une cristallisation au contact d'eau liquide.
- Un **océan** semble avoir existé à cette période.

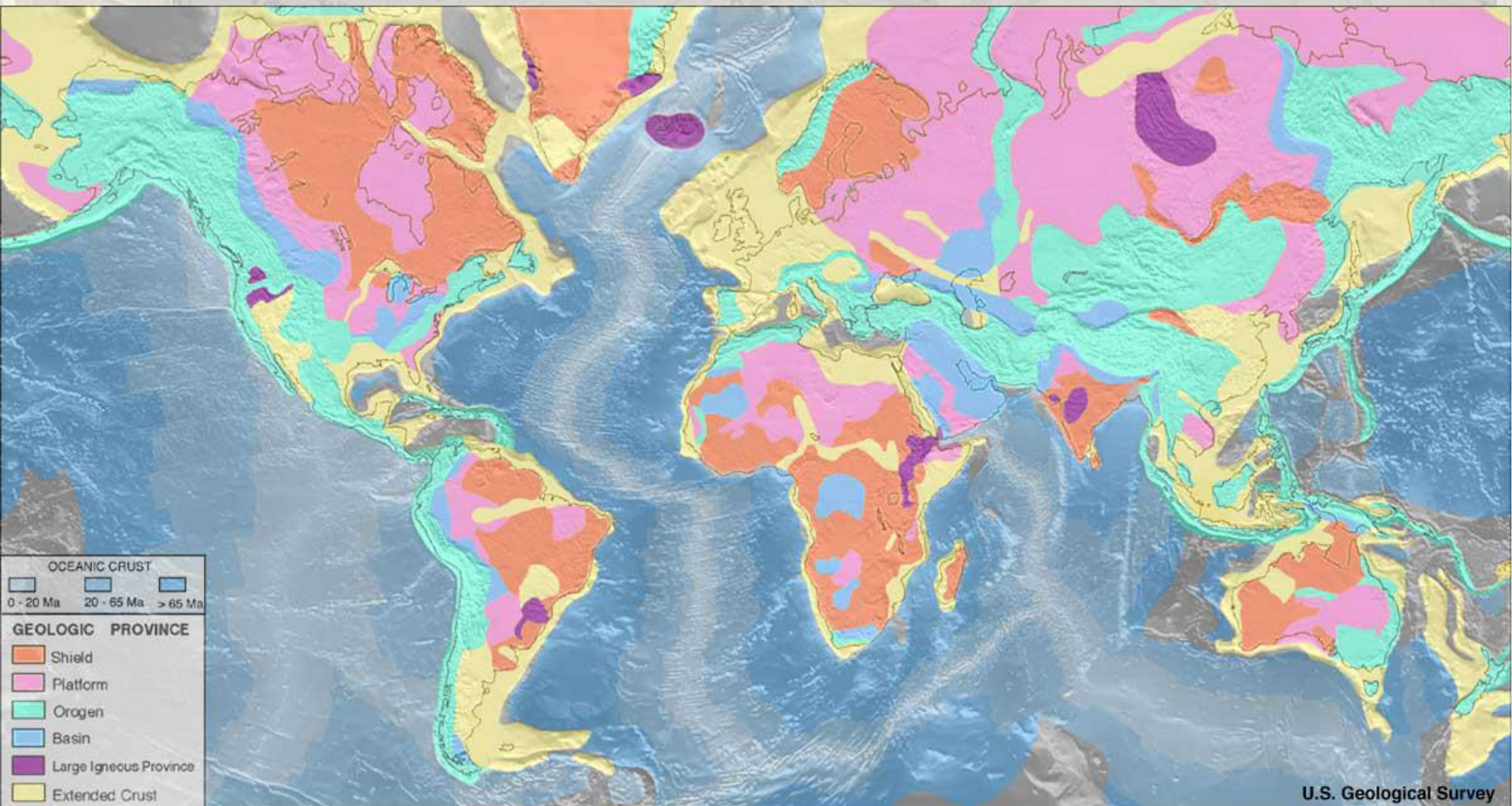
CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

➤ Dessinons une flèche du temps



➤ Apparition des premiers cratons.

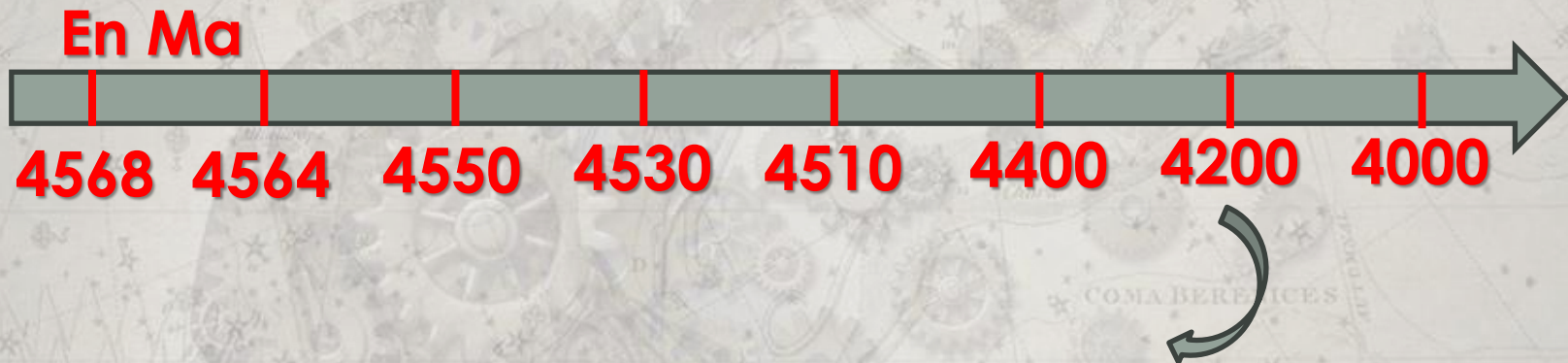
CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS



U.S. Geological Survey

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

➤ Dessinons une flèche du temps

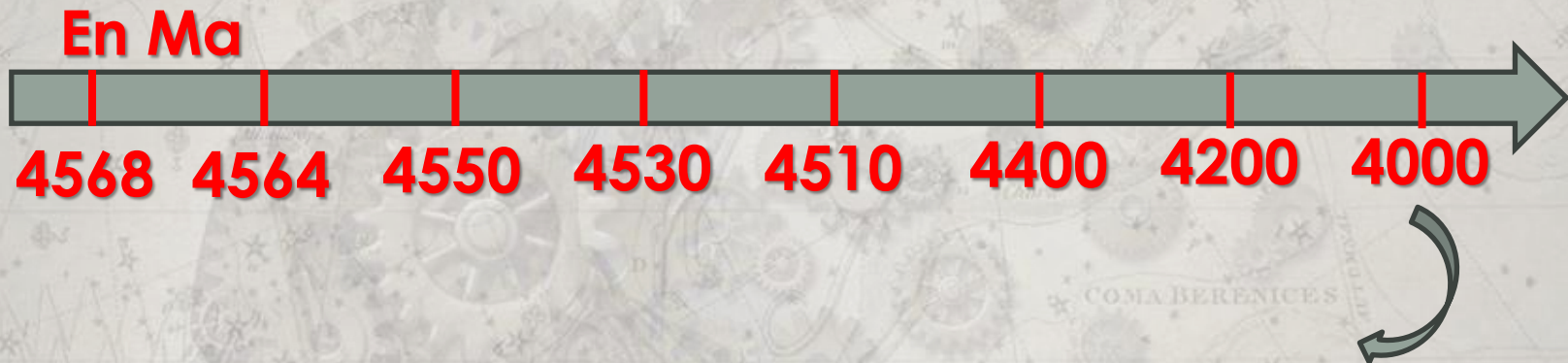


➤ Apparition des premiers cratons.

➤ Début de la tectonique des plaques.

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS

➤ Dessinons une flèche du temps



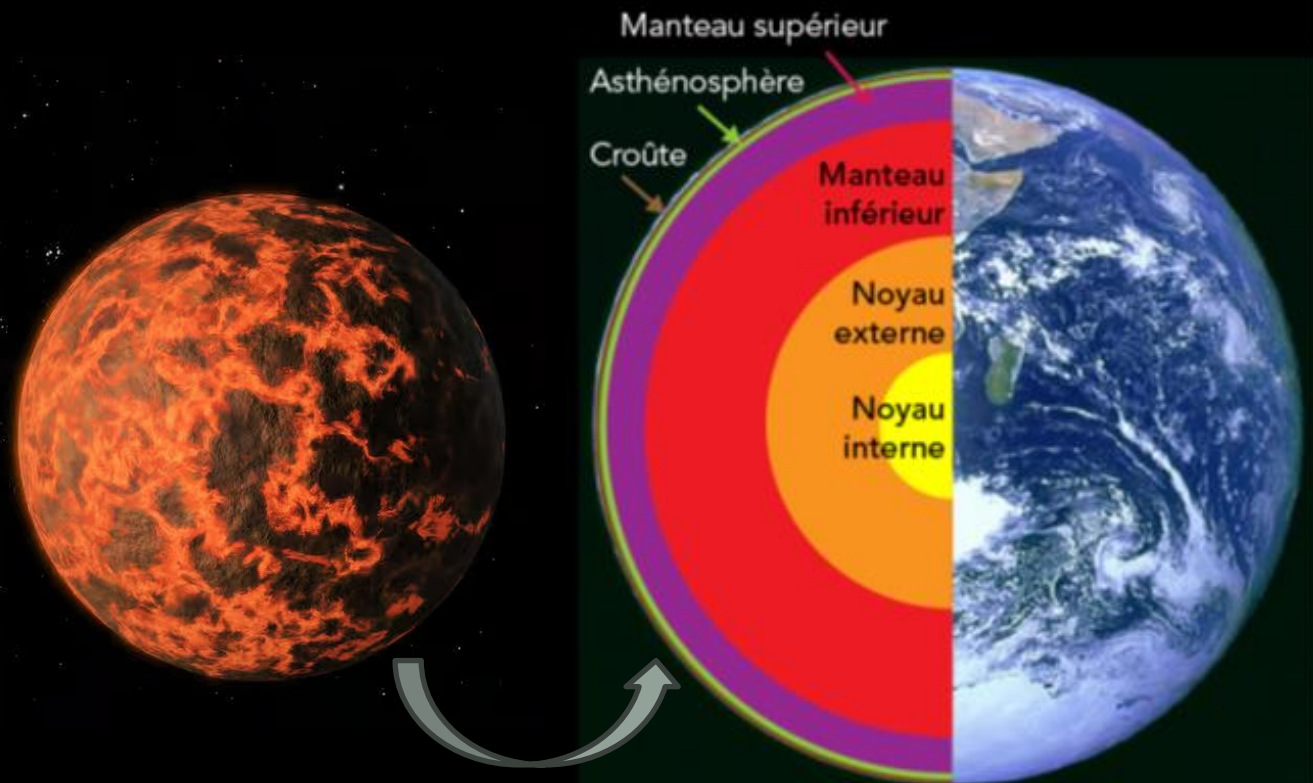
➤ La T° des océans est de 70 °C.

- L'atmosphère ressemble à celle d'aujourd'hui avec $N_2 \approx 80 \%$.

- Il n'y a cependant pas d'O₂.

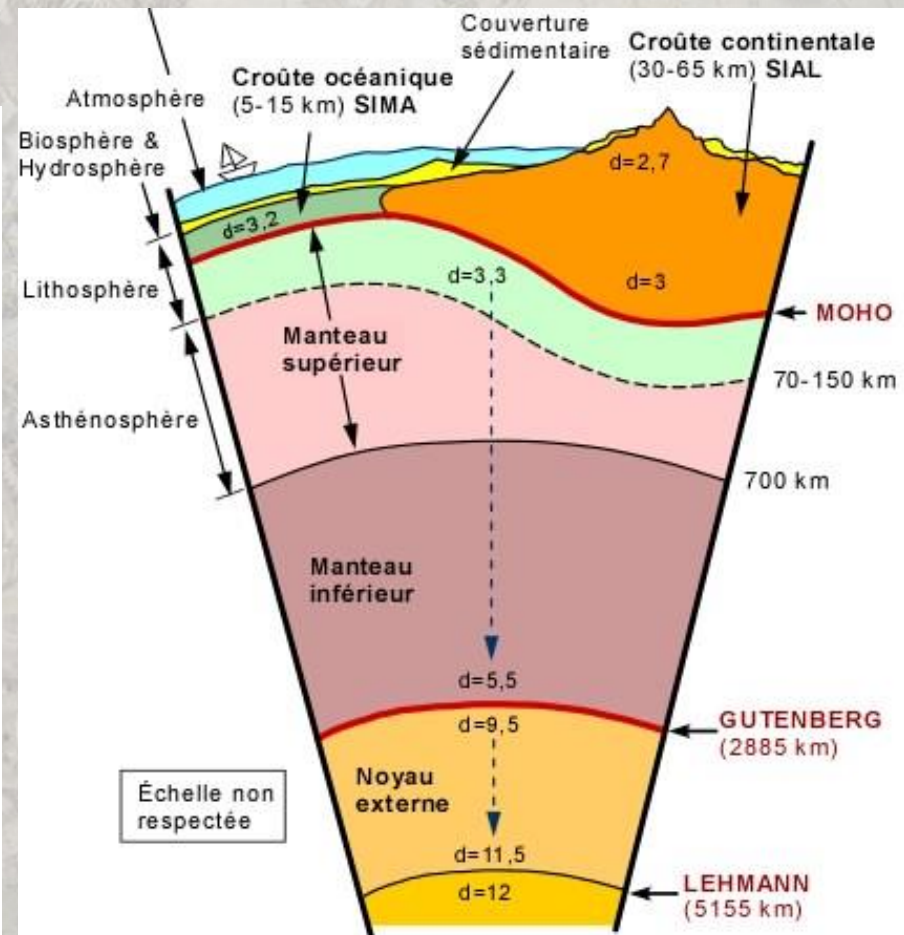
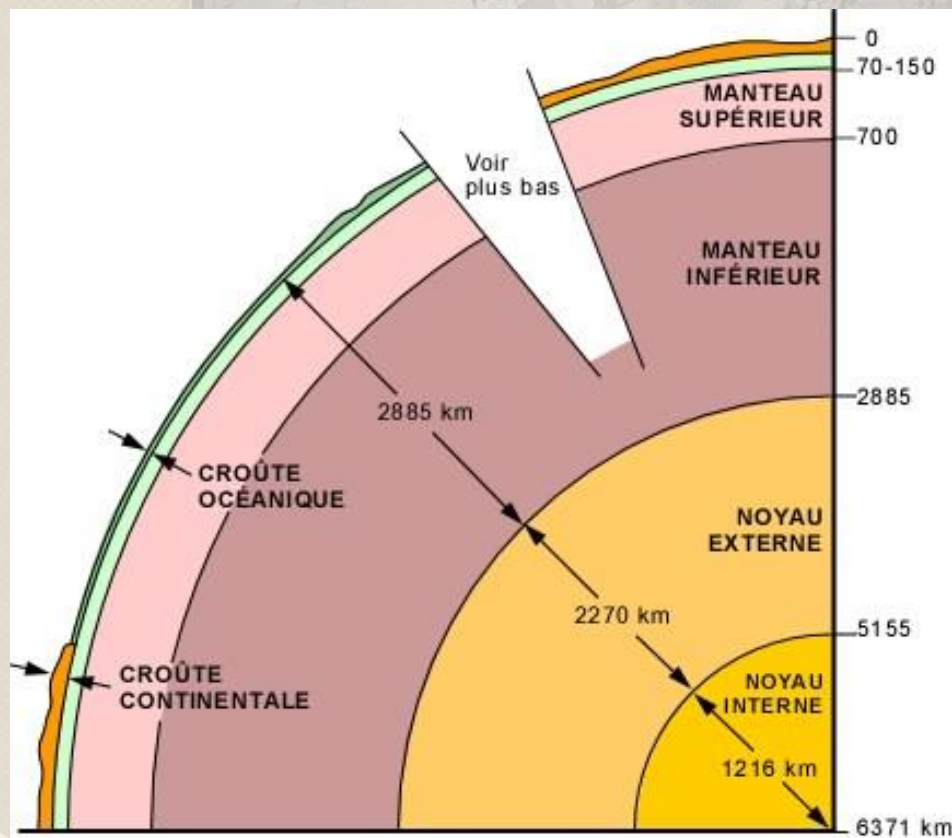
STRUCTURE DE LA TERRE

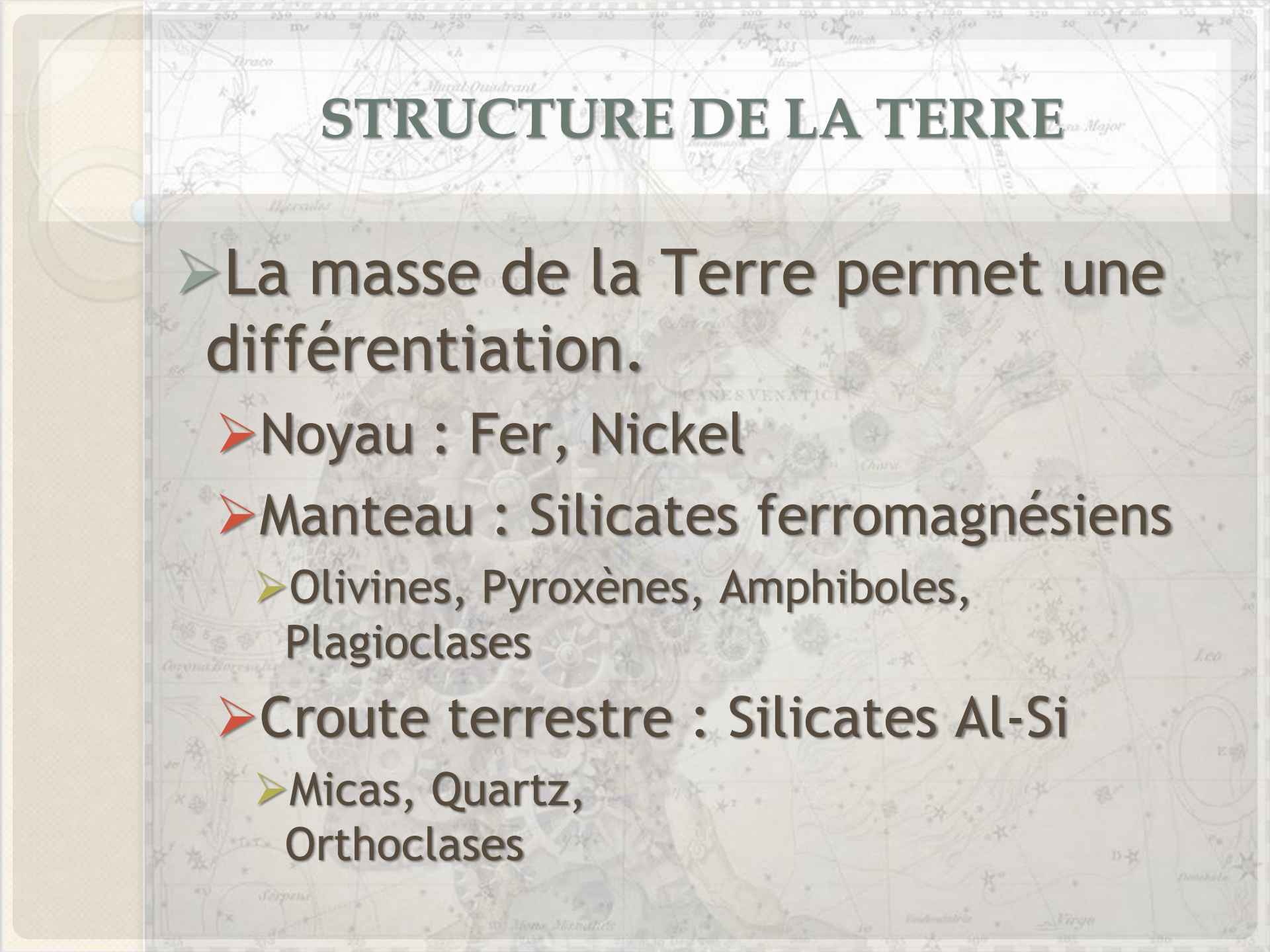
- La masse de la Terre permet une différenciation.



STRUCTURE DE LA TERRE

➤ La masse de la Terre permet une différenciation.



A detailed background image of a celestial constellation map, likely from a historical astronomical atlas. It features various constellations such as Draco, Hercules, and Corona Borealis, with stars of different magnitudes and lines connecting them to form the constellation patterns. The map is overlaid with a semi-transparent white box containing the title and a semi-transparent grey box containing the list.

STRUCTURE DE LA TERRE

- La masse de la Terre permet une différenciation.
 - Noyau : Fer, Nickel
 - Manteau : Silicates ferromagnésiens
 - Olivines, Pyroxènes, Amphiboles, Plagioclases
 - Croute terrestre : Silicates Al-Si
 - Micas, Quartz, Orthoclases

CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ D'où viennent-ils ?

- La Terre est née dans une régions sèche du Système solaire.
- Peut-on conclure que l'eau était automatiquement absente de la liste des matériaux primitifs constitutifs de la Terre ?
 - L'eau libre qui est un volatile ➡ **Oui !**
 - Mais l'eau peut se lier chimiquement à des composés silicatés...

- Les **Hydrates** ou silicates hydratés.
- Exemple : le gypse

CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ Les Hydrates ou minéraux hydratés.

➤ Exemple : le gypse



Sulfate de calcium hydraté



CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

- Les Hydrates ou minéraux hydratés.
- Il existe aussi des silicates hydratés
 - Silicate de calcium hydraté



CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ Les Hydrates ou minéraux hydratés.

<i>n</i>	Adjectif
1/2	hémihydraté
1	monohydraté
3/2	sesquihydraté
2	dihydraté
3	trihydraté
4	tétrahydraté
5	pentahydraté
6	hexahydraté
7	heptahydraté
8	octahydraté
9	nonahydraté
10	décahydraté
12	dodécahydraté
18	octadécahydraté

Formule générale



CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ Les minéraux hydroxylés.

➤ Exemple : la Cummingtonite

Amphibole métamorphisée



CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

- Les minéraux hydroxylés.
- Ils peuvent retenir l'eau en surface par liaison faible



The Journal of Chemical Physics

Volume 155, Issue 6

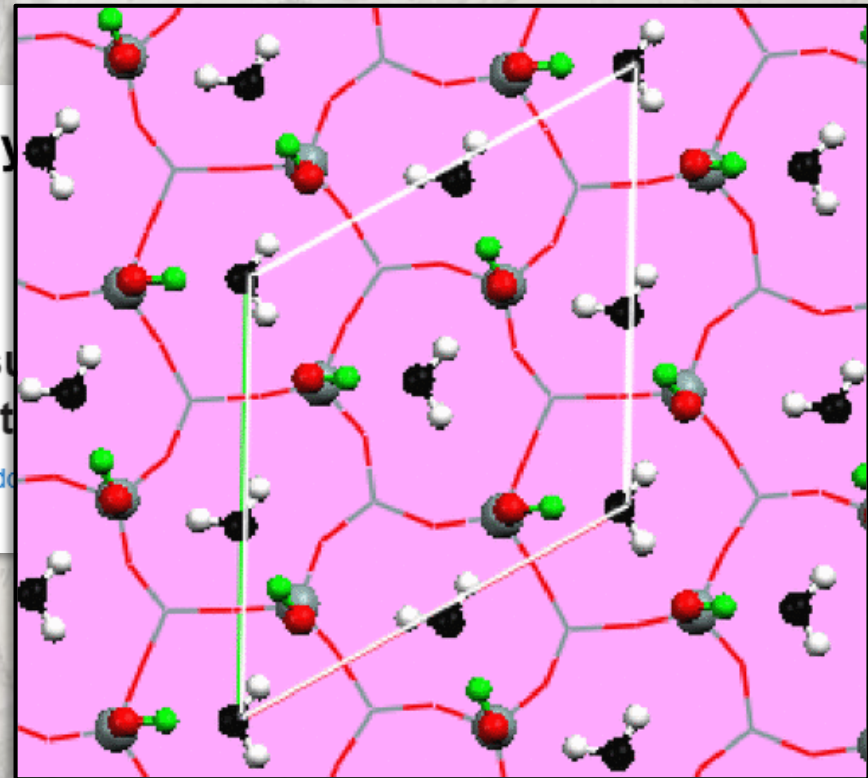
14 August 2021

RESEARCH ARTICLE | AUGUST 12 2021

Water on hydroxylated silica surface: Interfacial entropy, and droplet formation

Carlos Bistafa ; Donatas Surblys ; Hiroki Kusudo

Liens hydrogène



CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ Les minéraux hydroxylés.

➤ Ils peuvent retenir l'eau en surface par liaison faible

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 897:L37 (8pp), 2020 July 10

© 2020. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab919e>



Hydroxylated Mg-rich Amorphous Silicates: A New Component of the 3.2 μm Absorption Band of Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko

V. Mennella¹ , M. Ciarniello² , A. Raponi² , F. Capaccioni², G. Filacchione² , T. Suhasaria¹, C. Popa¹, D. Kappel^{3,4} , L. Moroz⁴, V. Vinogradoff⁵ , A. Pommerol⁶, B. Rousseau², I. Istiqomah⁷, D. Bockelee-Morvan⁸, R. W. Carlson⁹, and C. Pilorget¹⁰

¹ INAF—Osservatorio Astronomico di Capodimonte, via Moirariello 16, I-80131 Napoli, Italy; vito.mennella@inaf.it

² IAPS–INAF, Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Area di Ricerca di Tor Vergata, Via del Fosso del Cavaliere, 100, I-00133 Rome, Italy

³ Institute of Physics and Astronomy, University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24-25, D-14476 Potsdam, Germany

⁴ Institute for Planetary Research, German Aerospace Center (DLR), Rutherfordstr. 2, D-12489 Berlin, Germany

⁵ Aix-Marseille Université, Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires PIIM UMR CNRS, 7345, Avenue Escadrille Normandie-Niémen, F-13397 Marseille Cedex 20, France

⁶ Physikalisches Institut, Sidlerstrasse 5, University of Bern, CH-3012 Bern, Switzerland

⁷ Université Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, F-38000 Grenoble, France

⁸ LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne, Université, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, F-92195 Meudon, France

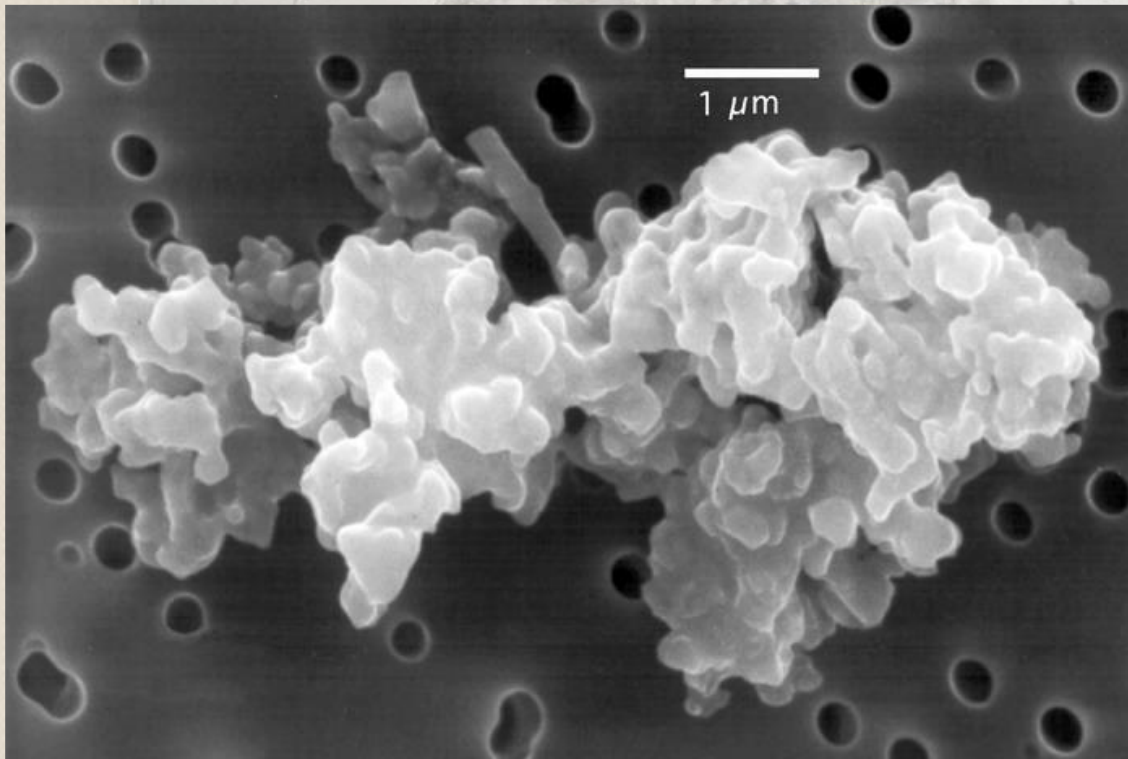
⁹ Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA

¹⁰ Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris Sud, Orsay, France

Received 2020 February 19; revised 2020 April 29; accepted 2020 May 9; published 2020 July 14

CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

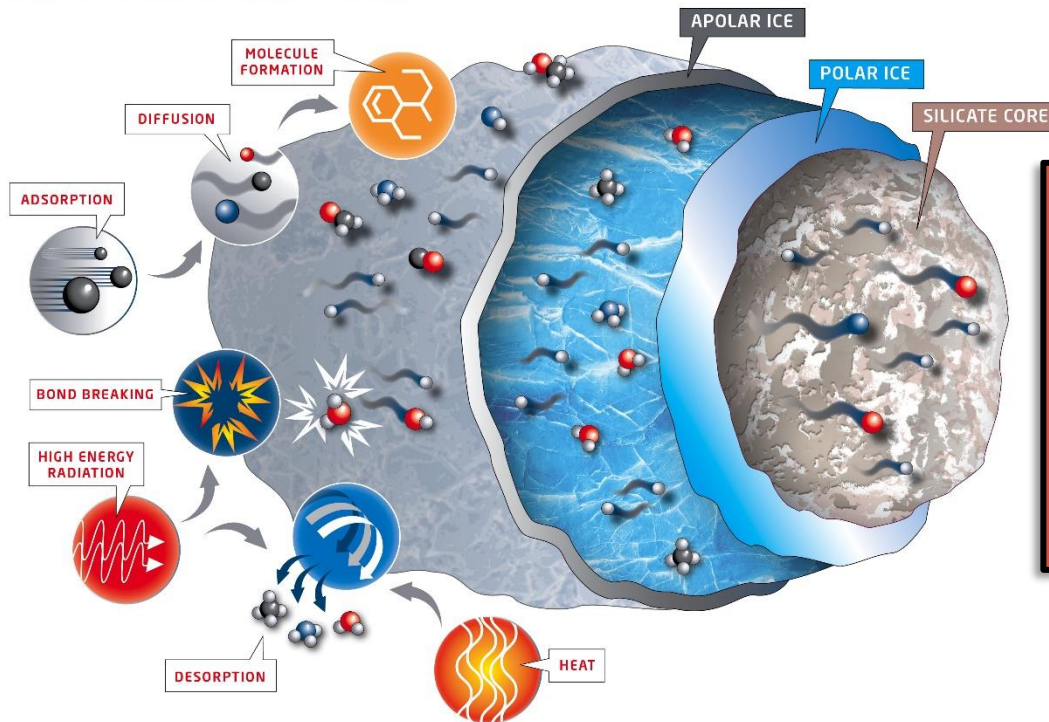
➤ L'eau, les minéraux propices, les poussières des nuages moléculaires.



CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ L'eau, les minéraux propices, les poussières des nuages moléculaires.

Interstellar Grain Surface Chemistry



Des molécules d'eau liées à des minéraux variés sous forme d'hydrates ou d'hydroxyles

CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

- L'eau, les minéraux propices, les poussières des nuages moléculaires.
 - Des molécules d'eau liées à des minéraux variés sous forme d'hydrates ou d'hydroxyles sont incluses au sein des solides susceptible d'accrétion.
 - Ces molécules d'eau liées aux minéraux au sein des poussières interstellaires ne sont pas soufflées par les vents des étoiles naissantes comme l'eau libre vaporisée.

CES MATÉRIAUX QUI FORMENT LA TERRE

➤ Question :

➤ Était-il essentiel que de l'eau sous forme de volatiles (eau en phase gazeuse) soit présente dans l'environnement spatial de formation de la Terre pour qu'il y ait de l'eau sur notre planète ?

➤ **Peut être pas après tout**

UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES

- La croûte terrestre ne forme pas un coque rigide.
- Elle est fragmentée en plaques qui sont indépendantes et mobiles les unes par rapport aux autres.

UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES



UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES



UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES

- La croute terrestre ne forme pas un coque rigide.
 - Elle est fragmentée en plaques qui sont indépendantes et mobiles les unes par rapport aux autres.
- Le moteur de déplacement des plaques sont les courants de convection du manteau qui cherchent à évacuer la chaleur interne de la Terre.

UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES



UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES

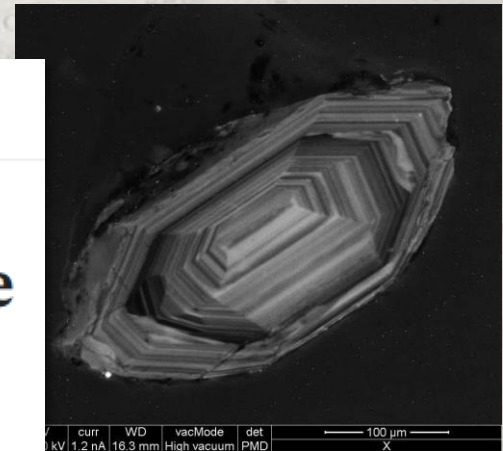
- La tectonique s'est mise en route très tôt dans l'histoire de la Terre il y a **4,2** milliards d'années.
- Zircons de Jack Hills, Australie.

nature communications

Article | [Open access](#) | [Published: 28 February 2023](#)

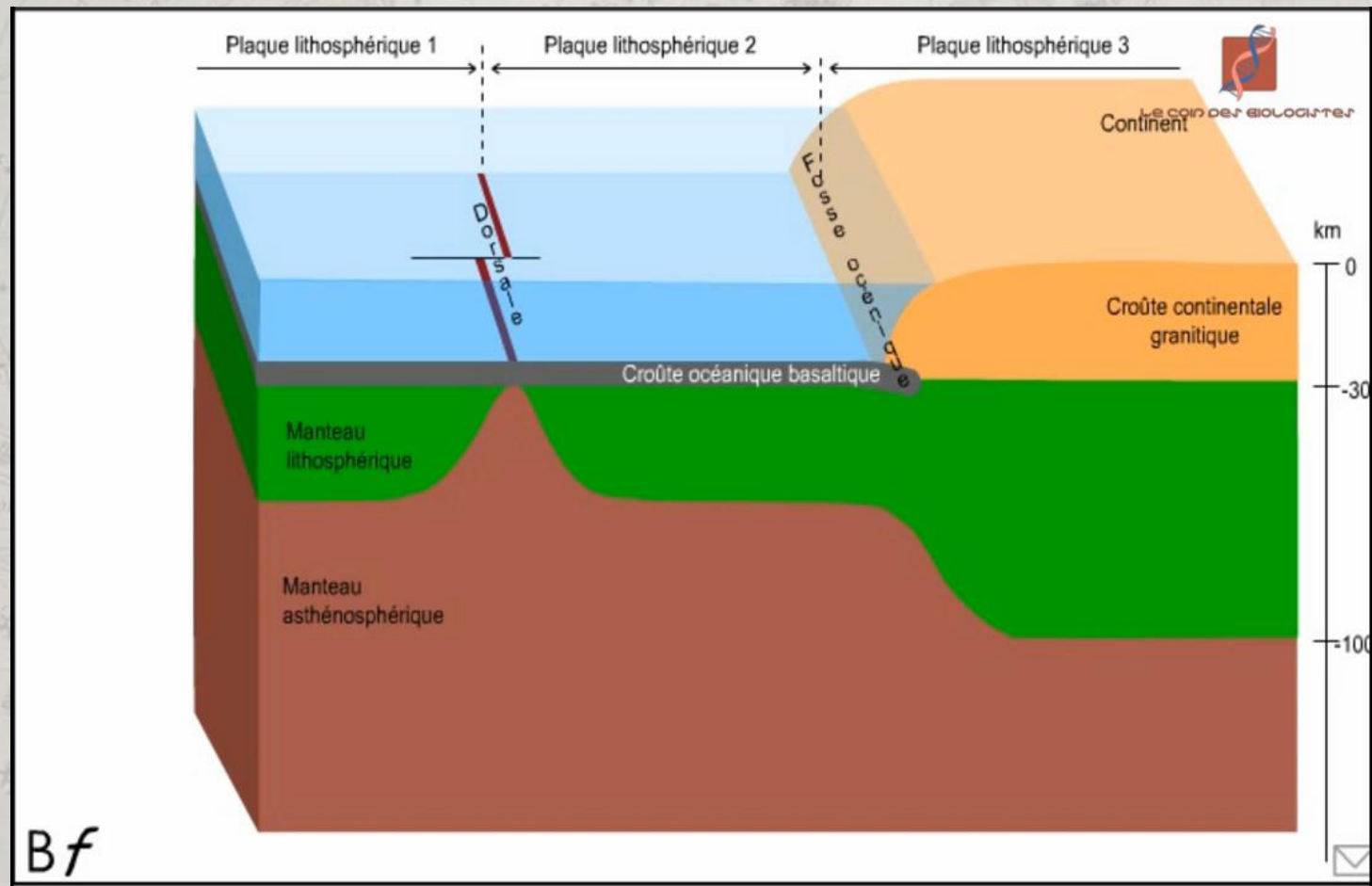
Eoarchean and Hadean melts reveal arc-like trace element and isotopic signatures

[Wriju Chowdhury](#) , [Dustin Trail](#), [Martha Miller](#) & [Paul Savage](#)



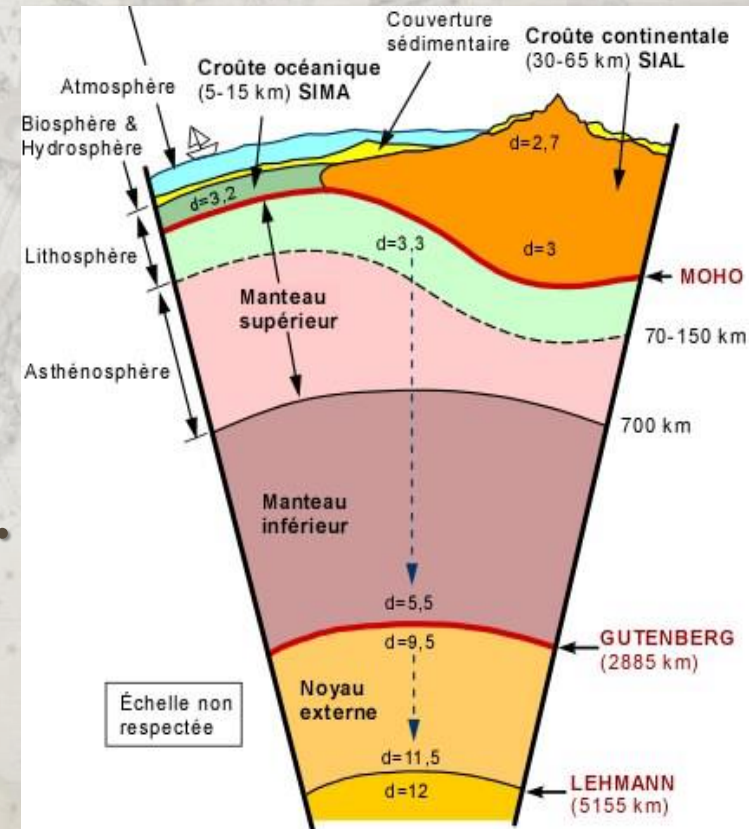
UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES

➤ Les zones de contact entre les plaques :



UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES

- Le manteau de la Terre :
 - Représente 82 % du volume de la Terre.
 - Il est structuré en couches de densité croissante vers la profondeur, chacune comprenant des matériaux différenciés.



UN PEU DE GÉOLOGIE : LA TECTONIQUE DES PLAQUES

➤ Le manteau de la Terre :

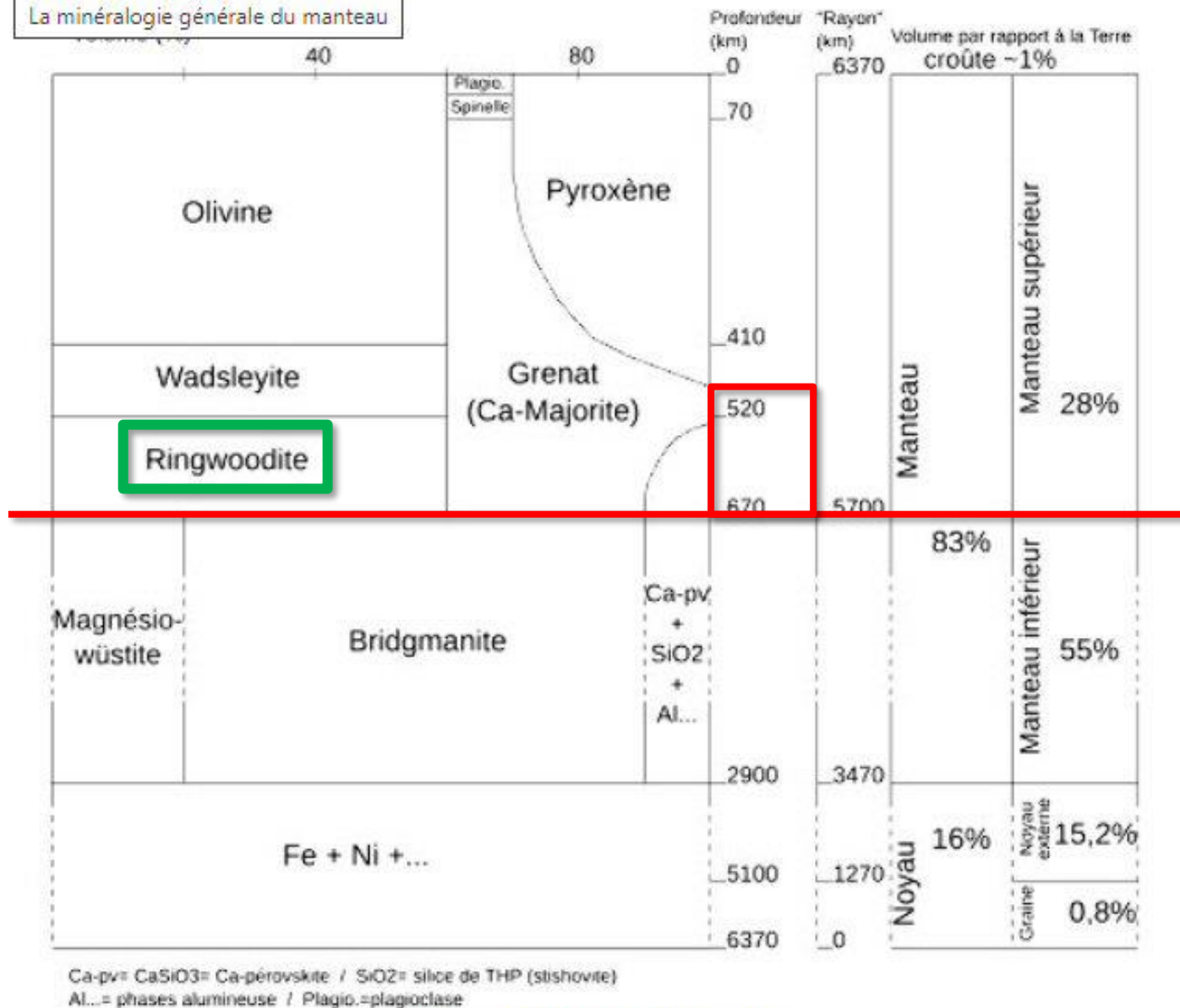
➤ La roche du manteau est la **péridotite**,
faite surtout des minéraux suivants :

- Les Olivines
- Les Pyroxènes
- Les Plagioclases

➤ La serpentine
du Mont Albert
est une roche
métamorphique de la péridotite.



La minéralogie générale du manteau



Source - © 2014 Olivier Dequincey

Figure 5. Évolution minéralogique d'une péridotite en fonction de la profondeur

P. Gillet, 2005, *Chimie et minéralogie du manteau*.

LE MANTEAU ET L'EAU

nature

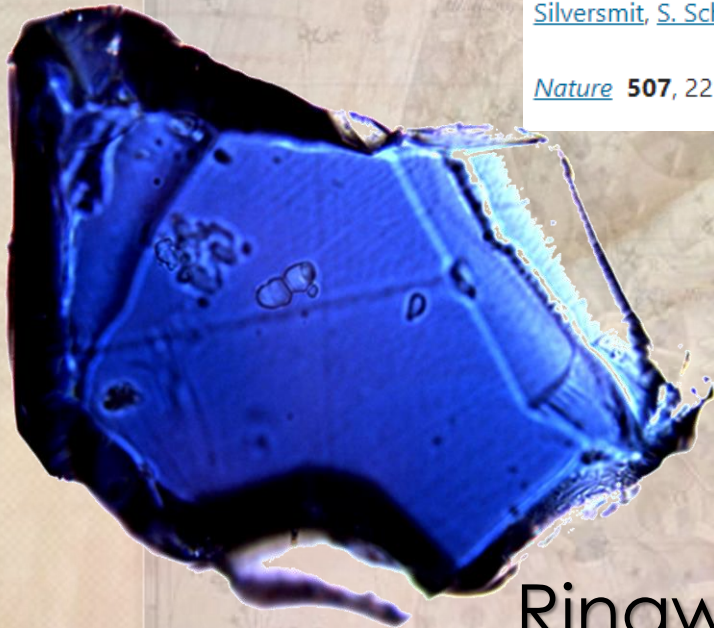
➤ 2014...

Letter | [Published: 12 March 2014](#)

Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond

[D. G. Pearson](#) , [F. E. Brenker](#), [F. Nestola](#), [J. McNeill](#), [L. Nasdala](#), [M. T. Hutchison](#), [S. Matveev](#), [K. Mather](#), [G. Silversmit](#), [S. Schmitz](#), [B. Vekemans](#) & [L. Vincze](#)

[Nature](#) **507**, 221–224 (2014)



Formule :



Ringwoodite hydroxylée

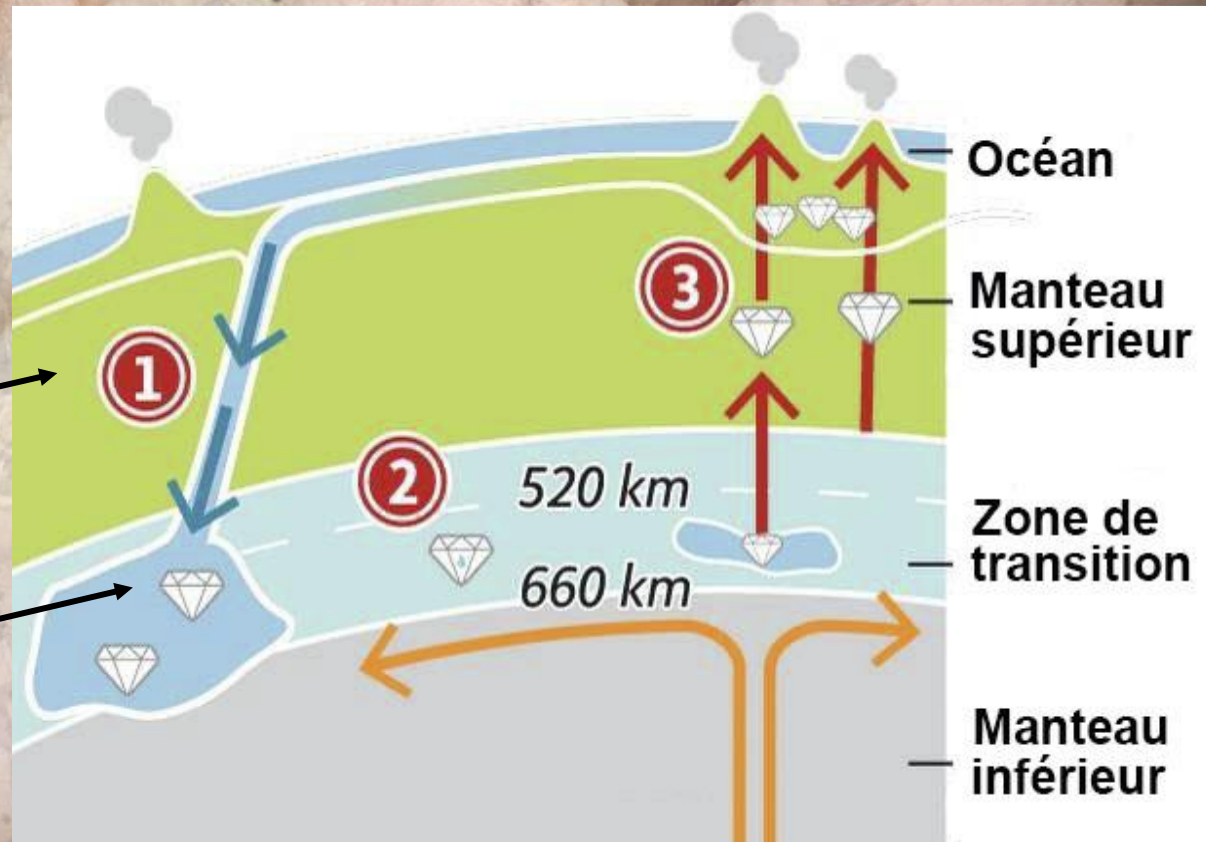
Contient 2,5 % de son poids en H₂O

LE MANTEAU ET L'EAU

- Les diamants contenant la Ringwoodite sont produits en profondeur en zone de transition

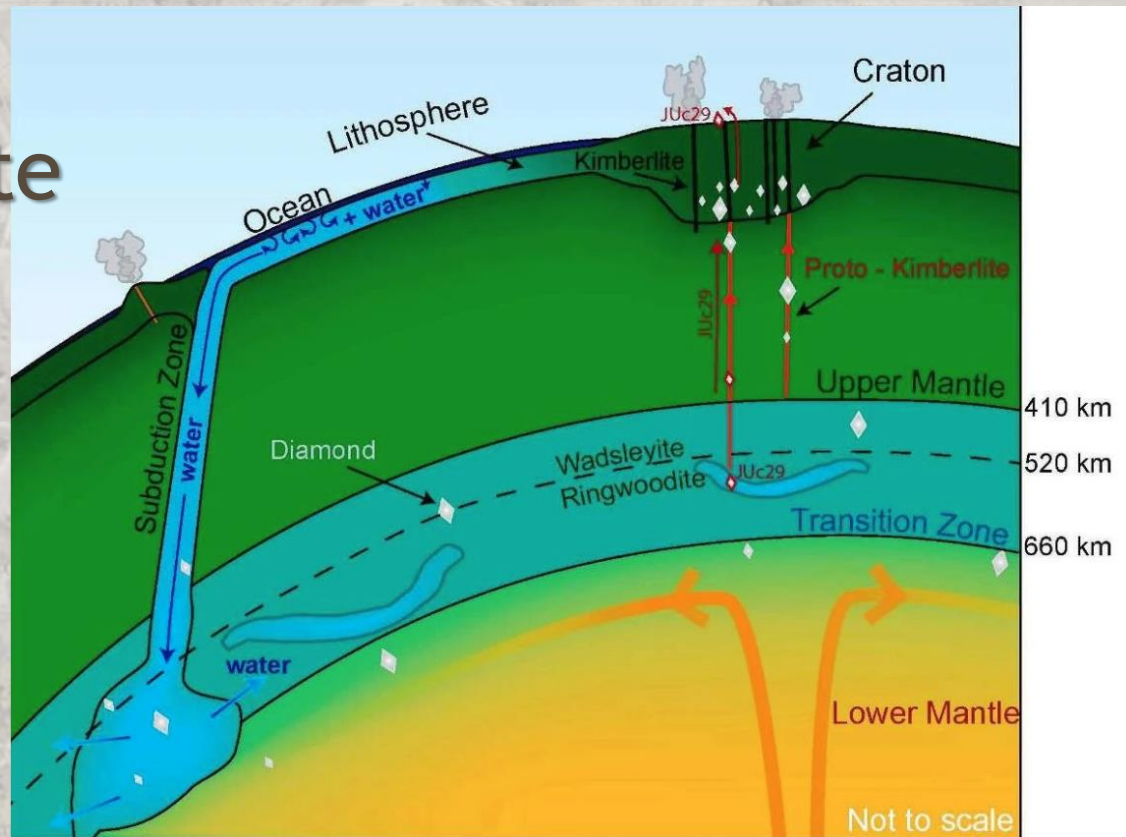
Kimberlite

Ringwoodite



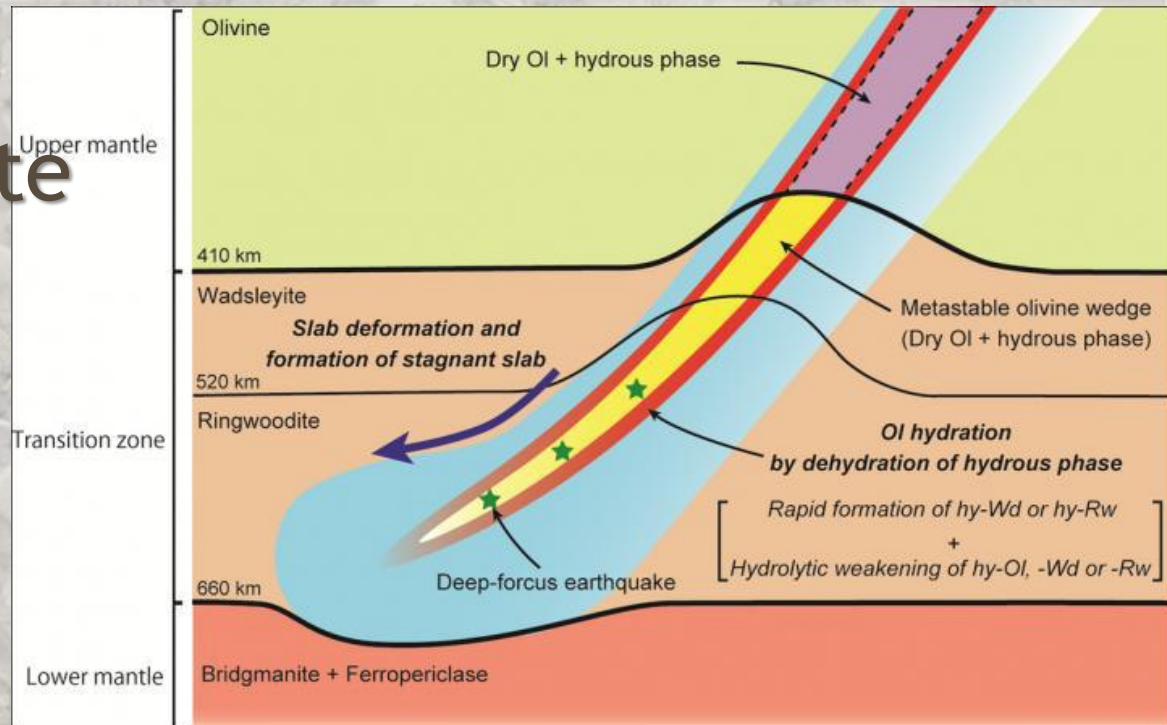
LE MANTEAU ET L'EAU

- L'eau des océans est déposée en zone de transition par les languettes de subduction.
- Elle remonte en surface par les différents types de volcans.



LE MANTEAU ET L'EAU

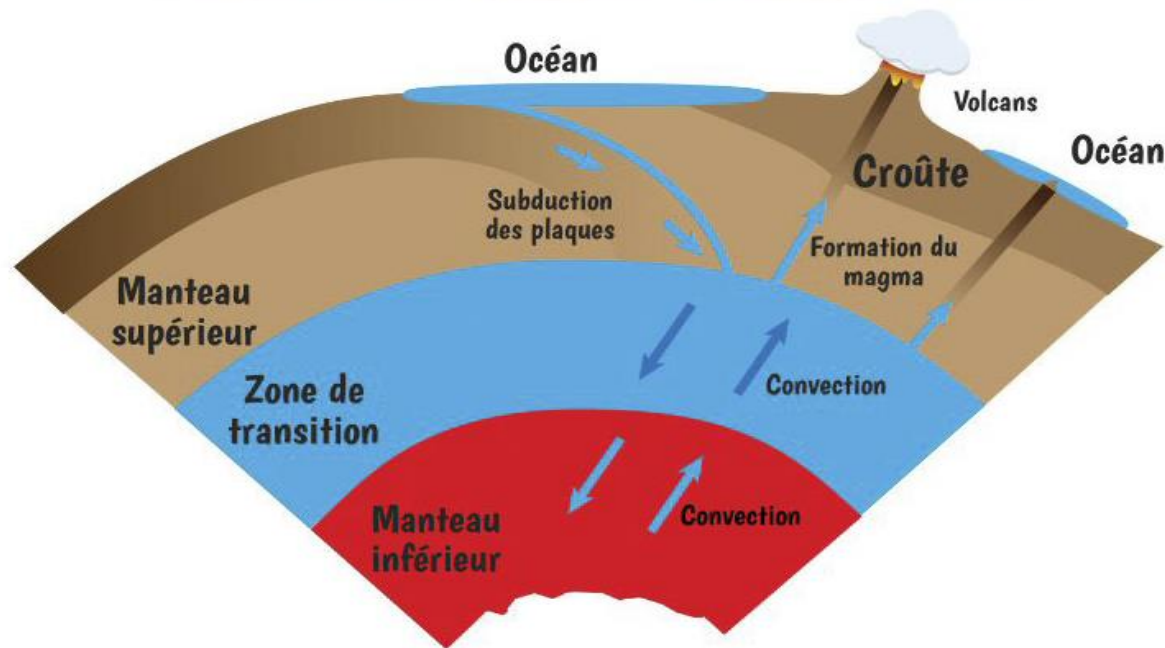
- L'eau des océans est déposée en zone de transition par les languettes de subduction.
- Elle remonte en surface par les différents types de volcans.



LE MANTEAU ET L'EAU

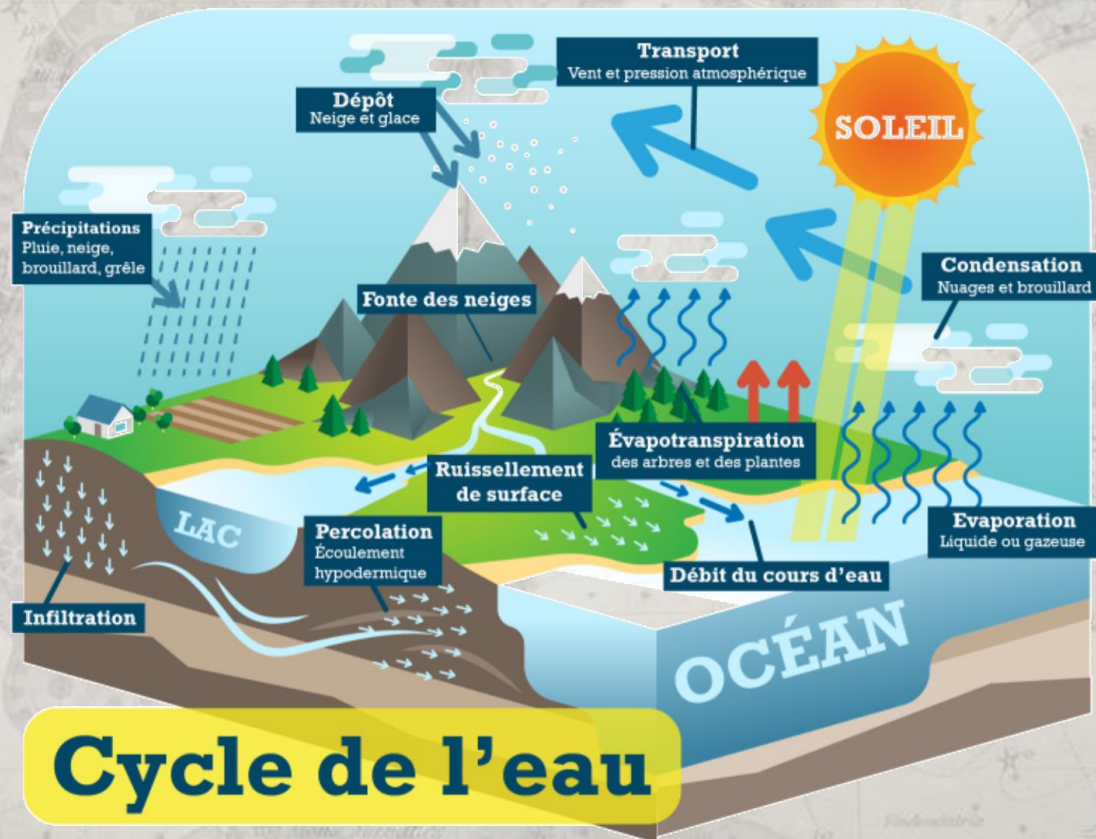
- Ainsi se crée un **cycle profond** de recirculation de l'eau.

Cycle des eaux profondes simplifié



LE MANTEAU ET L'EAU

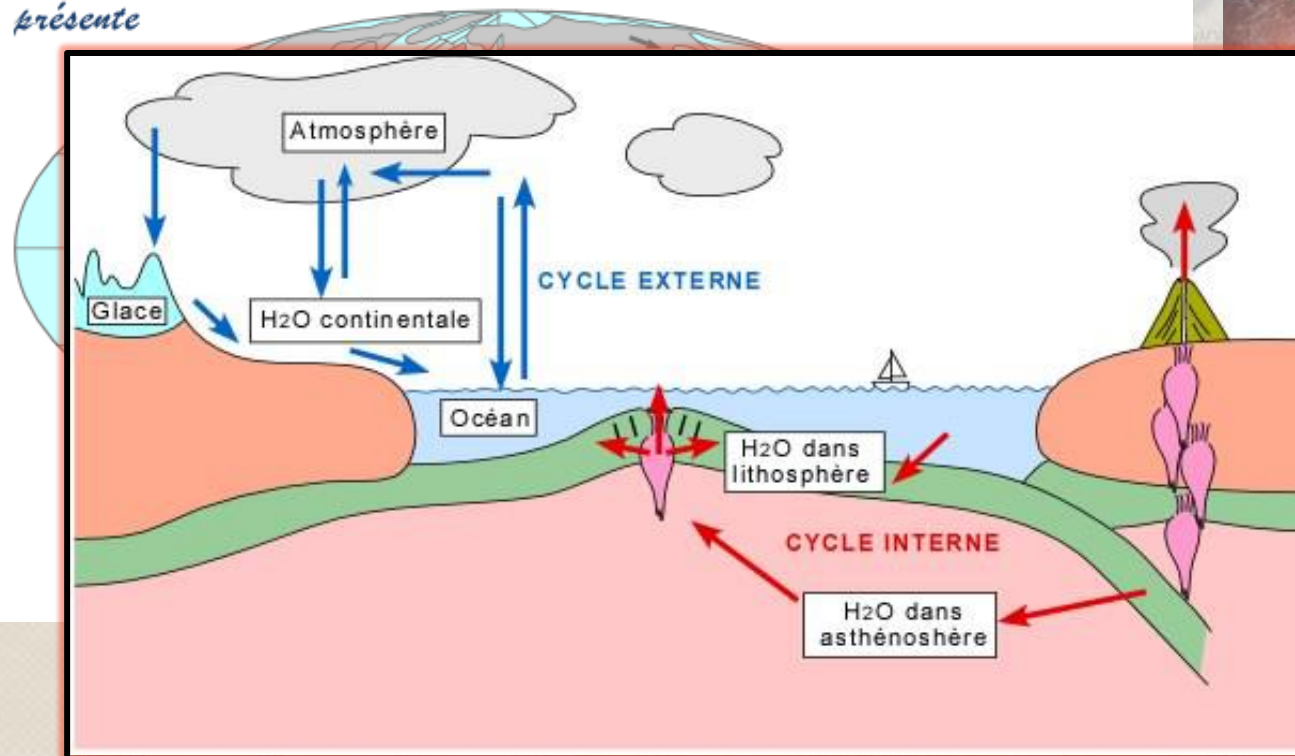
- En opposition au cycle classique et superficiel de l'eau.



LE MANTEAU ET L'EAU

➤ Déjà anticipé...

*Le Département de Géologie
et de Génie géologique de
l'Université Laval, Québec
présente*



LE MANTEAU ET L'EAU

- On estime que le manteau pourrait ainsi contenir l'équivalent de **1,5** à **11** fois le volume des océans.



Répartition de l'eau sur Terre

Article

On estime que 1,5 à 11 fois la quantité d'eau dans les océans se trouve à des centaines de kilomètres de profondeur à l'intérieur de la Terre, mais pas sous forme liquide. Le [noyau externe](#) aussi pourrait contenir de l'eau (dissoute dans le fer fondu), voire constituer le principal réservoir de l'eau terrestre².

contenir de l'eau (dissoute dans le fer fondu), voire constituer le principal réservoir de l'eau terrestre⁵.
profondeur à l'intérieur de la Terre, mais pas sous forme liquide. Le [noyau externe](#) aussi pourrait
On estime que 1,5 à 11 fois la quantité d'eau dans les océans se trouve à des centaines de kilomètres de

LE MANTEAU ET L'EAU

➤ Mais que d'incertitude !

NewScientist

Earth

There's as much water in Earth's mantle as in all the oceans

By [Andy Coghlan](#)

7 June 2017

Quelque part entre **1** et **70**
fois le volume des océans !

FUTURA

SCIENCES ▾

SANTÉ ▾

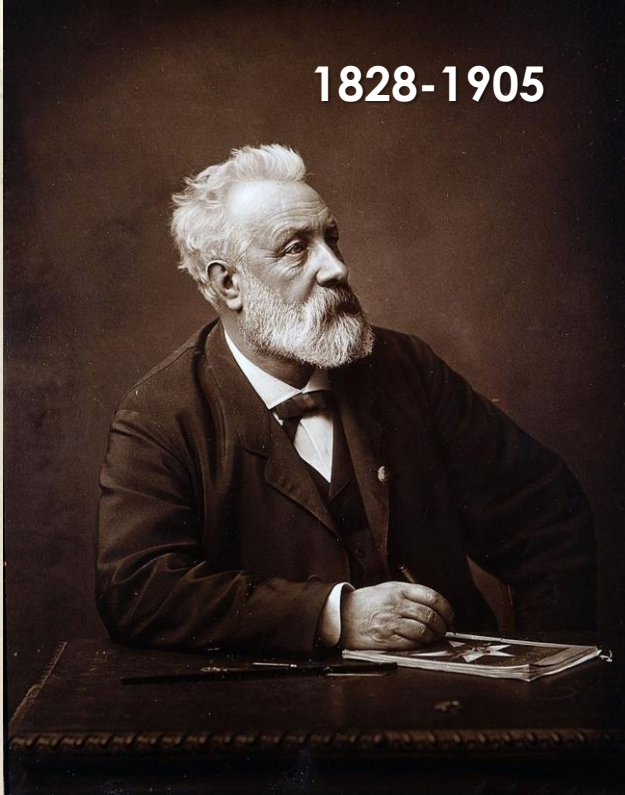
TECH ▾

**Le cœur de la Terre pourrait contenir les restes de l'équivalent de
70 océans**

Article de [Laurent Sacco](#) publié le 18/05/2021

LE MANTEAU ET L'EAU

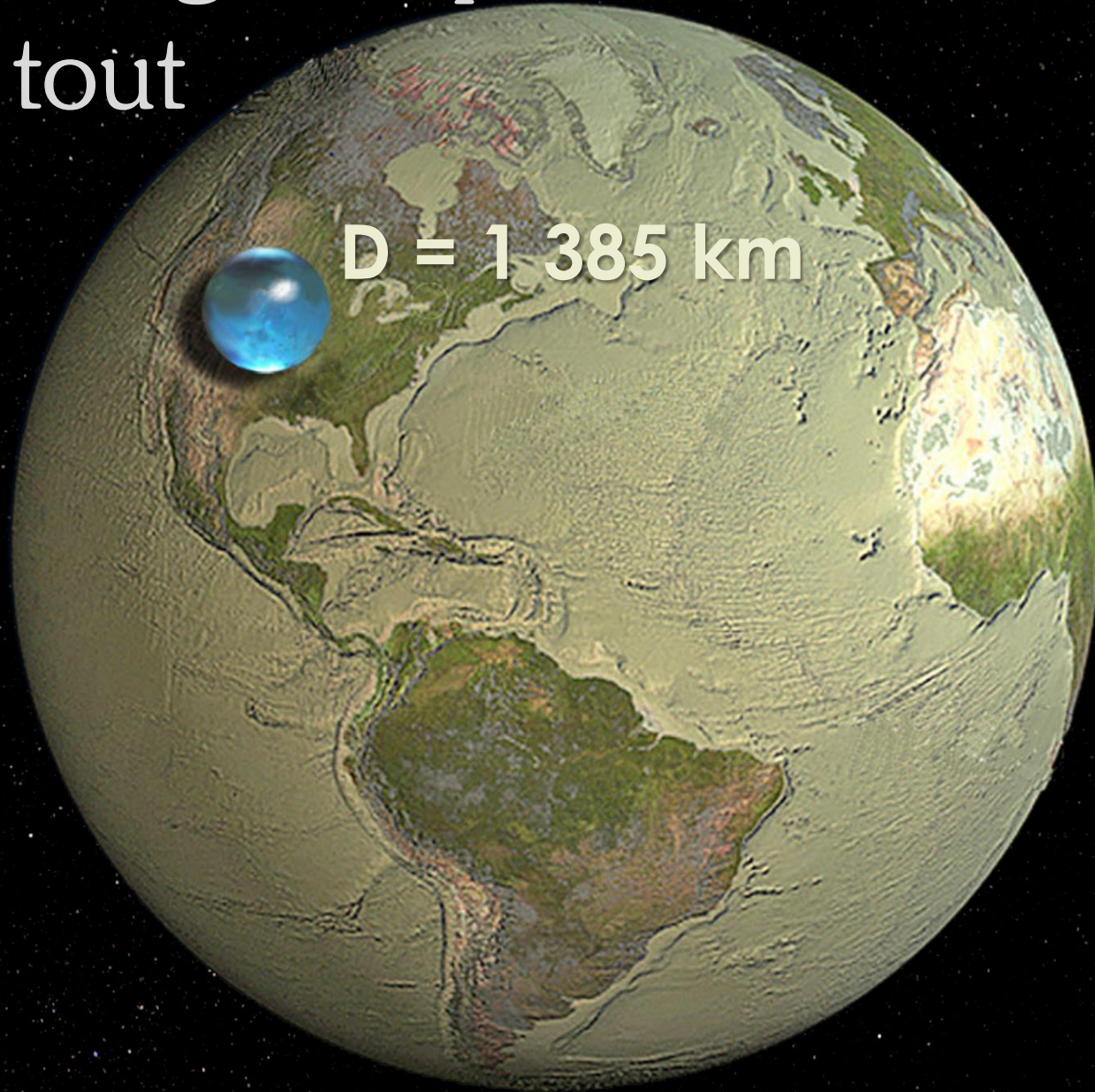
1828-1905



- Avait anticipé la présence d'un océan au centre de la Terre.



Cette image est peut-être fausse
après tout



TOUT ÇA EST BIEN BEAU, MAIS...

D'où vient l'eau sur Terre ?

➤ La réponse au prochain épisode...

