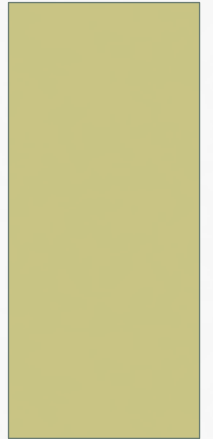


PLANÈTE BLEUE

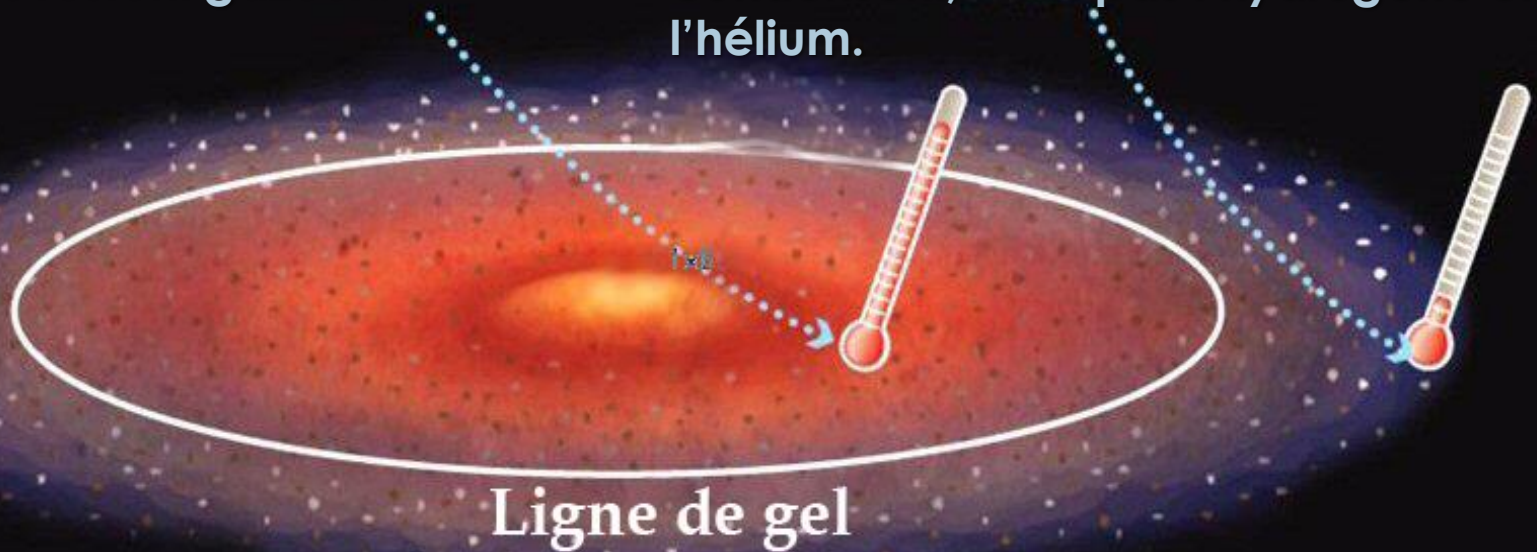
SUITE ET FIN



Ce que nous vîmes

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

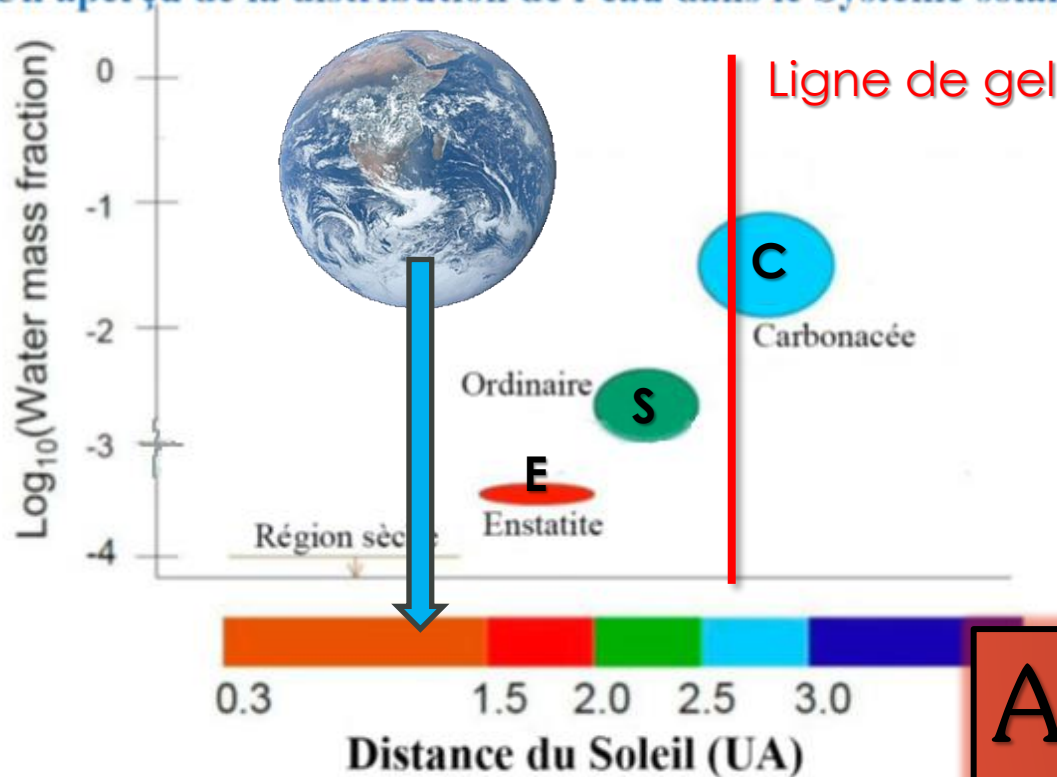
À l'extérieur de la ligne de gel, les roches, les métaux et les **volatiles** condensent, mais pas l'hydrogène et l'hélium.



- 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.

Ce que nous vîmes

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



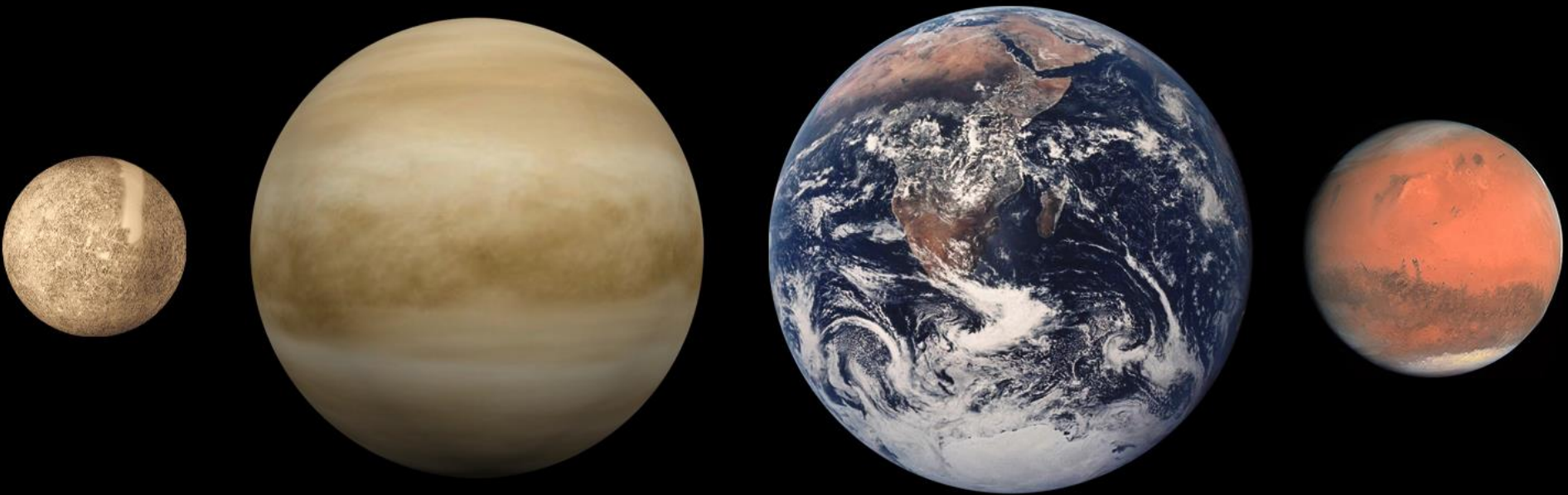
➤ La Terre s'est formée dans une région particulièrement sèche du disque protoplanétaire.

Alors, comment se fait-il que...

Que d'eau, que d'eau...



Une différence manifeste

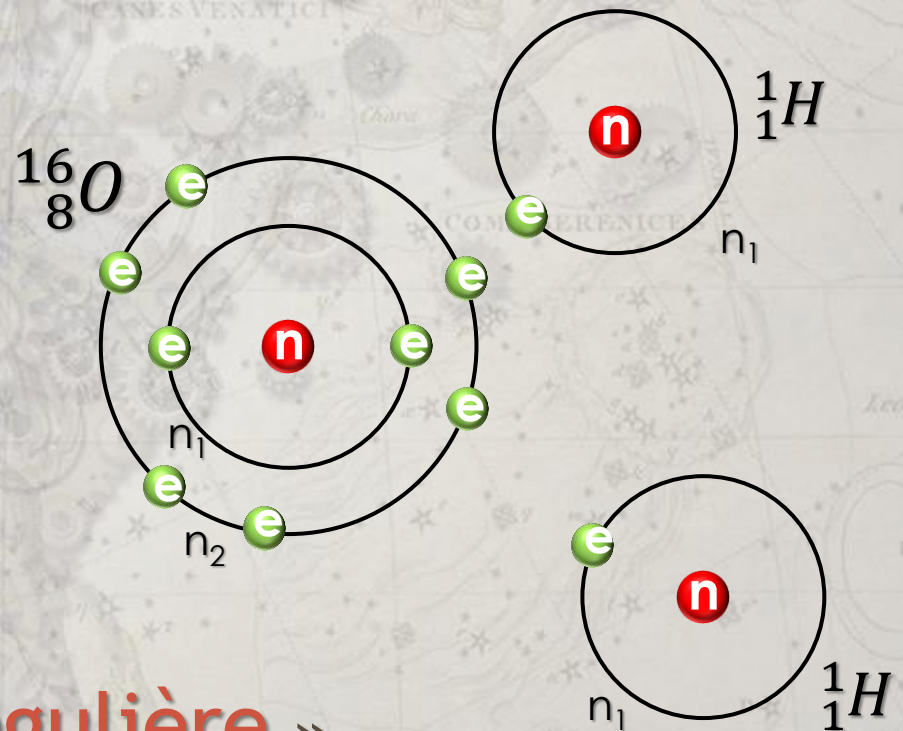
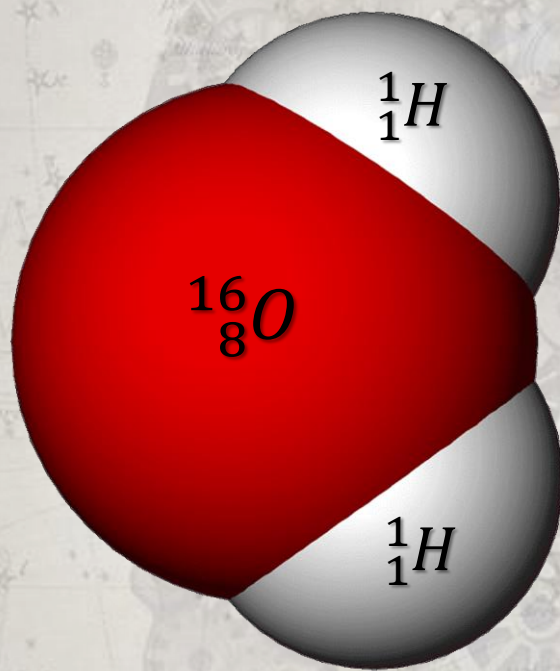


LES HYPOTHÈSES SE RÉPARTISSENT EN DEUX CATÉGORIES

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

ALORS, PARLONS UN PEU DE L'EAU

- Parce que de l'eau, c'est de l'eau...
- Ben ! Oui et non.



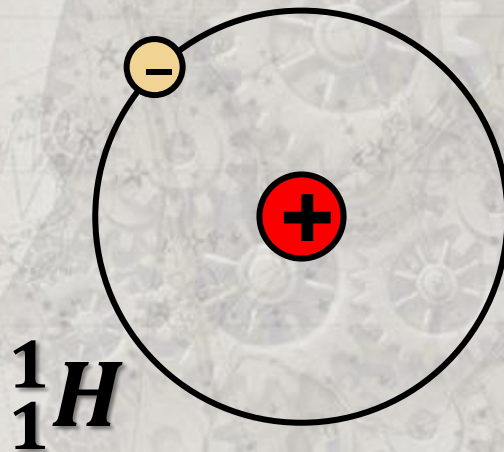
- C'est l'eau « régulière ».

DIVERSITÉ, INCLUSION

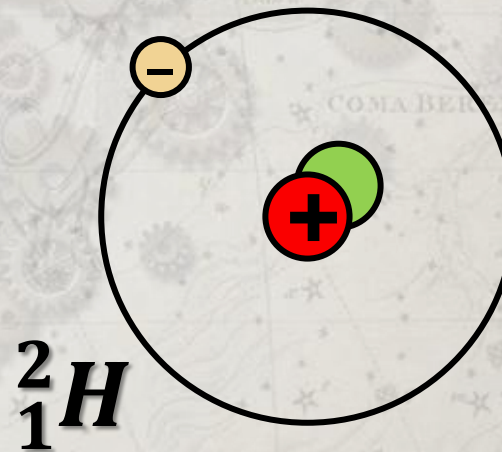


- Il y a plusieurs sortes d'hydrogène
 - L'hydrogène a 2 isotopes stables...

Protium



Deutérium



DIVERSITÉ, INCLUSION



➤ Il y a donc 3 types d'eau relativement à l'hydrogène.

➤ $\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{ protiums } ({}^1_1\text{H}) = 99,9675 \%$ de l'eau.

➤ $\text{HDO} \Rightarrow 1 \text{ protium } ({}^1_1\text{H}) \text{ et } 1 \text{ deutérium } ({}^2_1\text{H}) = 0,0325 \%$ de l'eau.

Soit 1/3 200 molécules d'eau

➤ $\text{D}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{ deutériums } ({}^2_1\text{H}) = 0,000\,005 \%$ de l'eau

Soit 1/20 000 000 molécules d'eau

➤ Chaque m^3 d'eau de mer contient
33 grammes de deutérium.

DIVERSITÉ, INCLUSION



- Le rapport initial du deutérium vs protium a été déterminé lors du Big Bang.
- L'abondance du deutérium (2_1H) :
 - Dans l'Univers = 0, 002 25 %
 - C'était le cas dans la nébuleuse protosolaire au début de son effondrement et c'est toujours le cas dans le Soleil.
 - C'est aussi le cas dans Jupiter et Saturne.
 - Sur Terre, il varie de 0,002 6 % à 0,018 4 %.
 - Dans l'océan, il est de 0,015 6 %.

DIVERSITÉ, INCLUSION



- On peut mesurer le deutérium dans des échantillons de gaz, de liquides et de solides.
- En pratique, on utilise un rapport **D/H** ou **δ^2H** .

$$\delta^2H_{\text{échan/réf}} \text{ (en ‰)} = \left(\frac{(2H/1H)_{\text{échan}}}{(2H/1H)_{\text{réf}}} - 1 \right) \times 1\,000$$

- La référence est l'eau de mer. Elle est appelée Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). Le rapport $^2H/^1H = 0,015\,6\%$
- Et le δ^2H de l'eau de mer = **0**
 - Par rapport à l'eau de mer, les valeurs du δ^2H peuvent être positives ou négatives.

DIVERSITÉ, INCLUSION



- Dans les nuages moléculaire galactiques, la T° est ≤ 50 K. Le rapport D/H est élevé.
 - $D/H_{inters} = 0,001$ à $0,08$ et $\delta^2H \cong 10\ 000\ \text{‰}$
 - Soit 1 2H pour 1 000 molécule d'eau

DIVERSITÉ, INCLUSION



- Mais lors de l'effondrement de la nébuleuse protostellaire, la $T^\circ \uparrow$ et un changement du rapport isotopique se produit par la réaction :

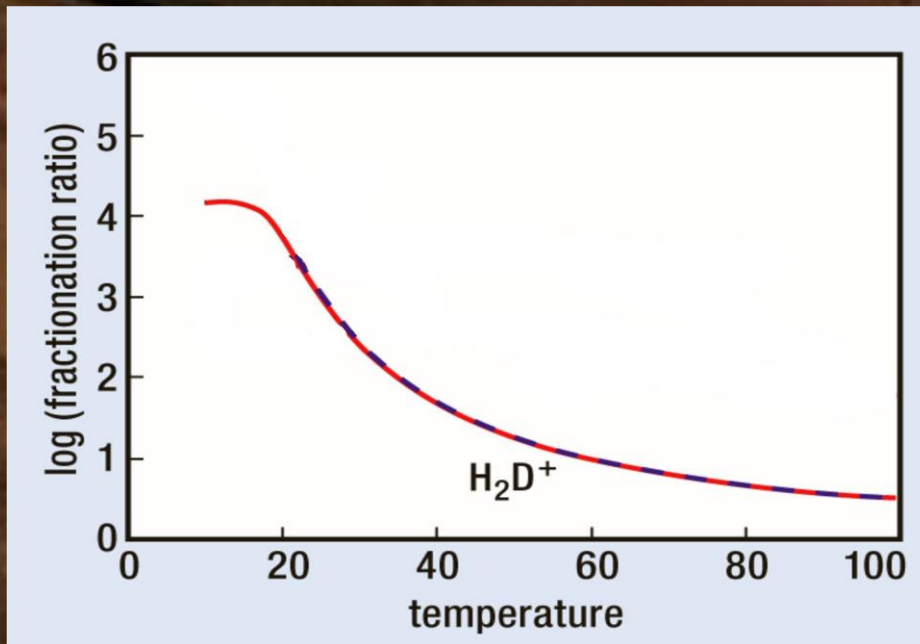


- $D/H_{\text{protos}} = 2 \times 10^{-5}$ et $\delta^2\text{H} \cong -870 \text{ ‰}$
- Soit 1 ^2H pour 50 000 molécule d'eau

DIVERSITÉ, INCLUSION



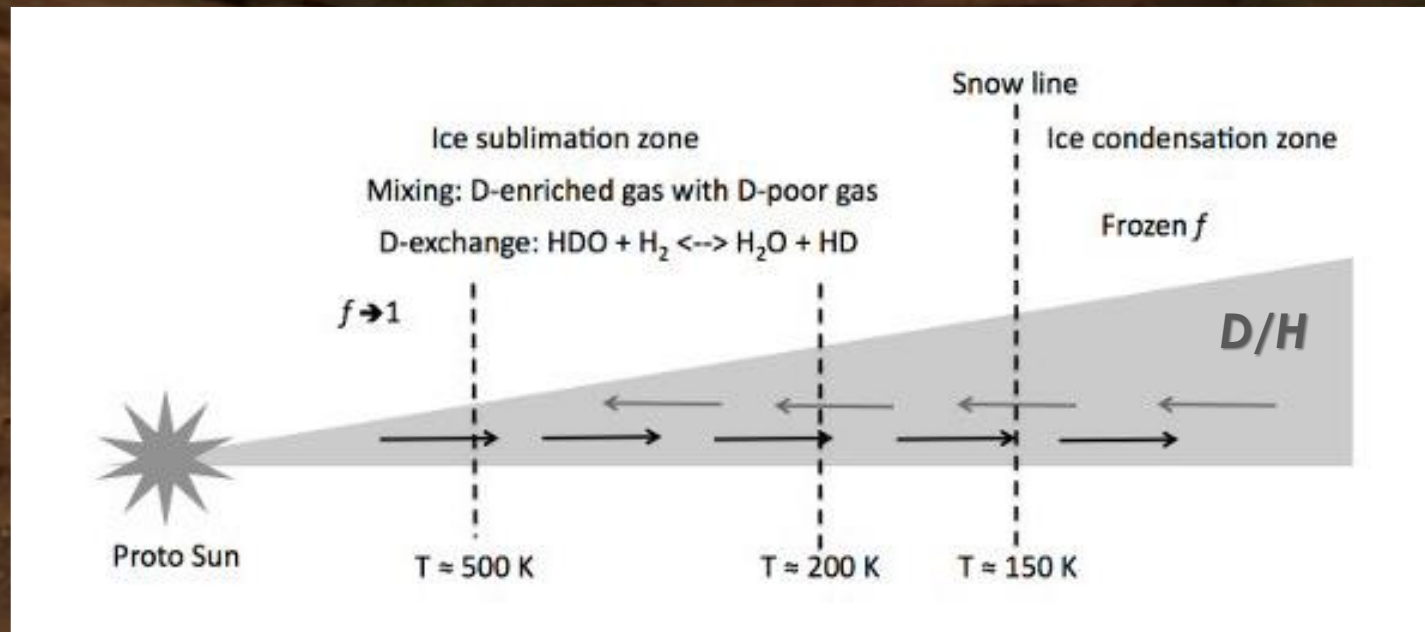
- La valeur du rapport D/H suit un gradient de T° à l'intérieur du disque protoplanétaire.
- Plus la T est froide, plus le rapport D/H est élevé



DIVERSITÉ, INCLUSION



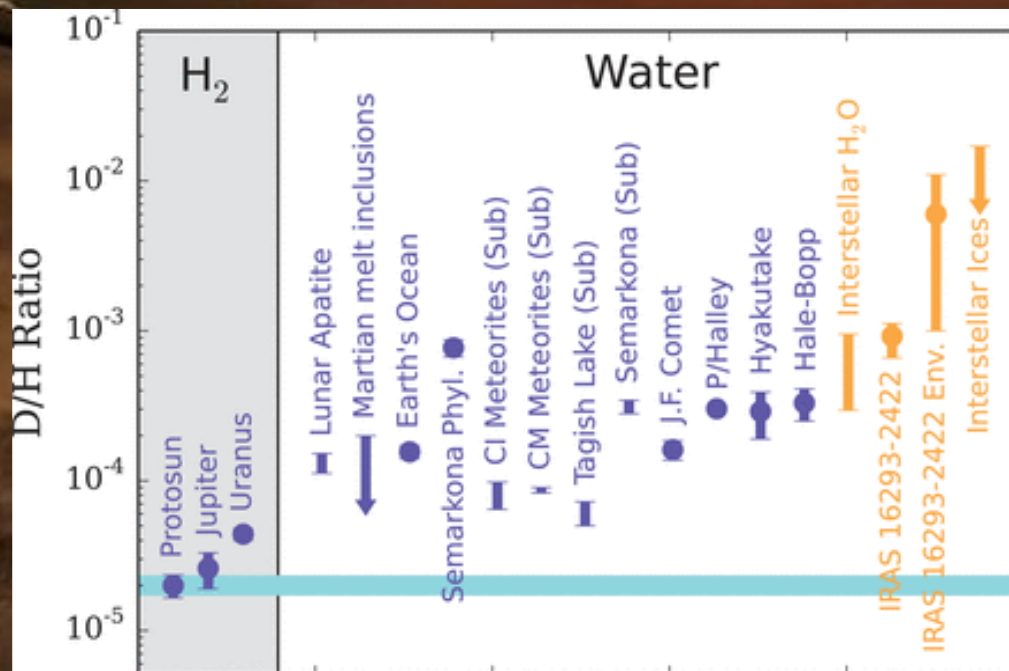
- La valeur du rapport D/H suit un gradient de T° à l'intérieur du disque protoplanétaire.
- Plus la T est froide, plus le rapport D/H est élevé



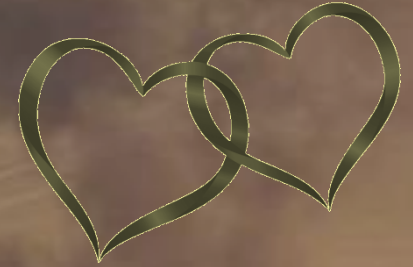
DIVERSITÉ, INCLUSION



- Il existe donc une ségrégation des objets en fonction de leur distance de formation par rapport au protosoleil quant à leur D/H .

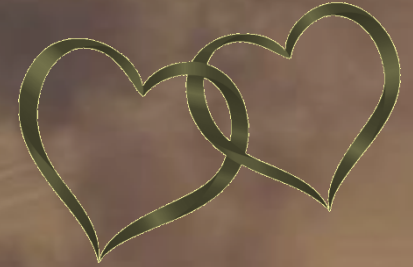


DIVERSITÉ, INCLUSION



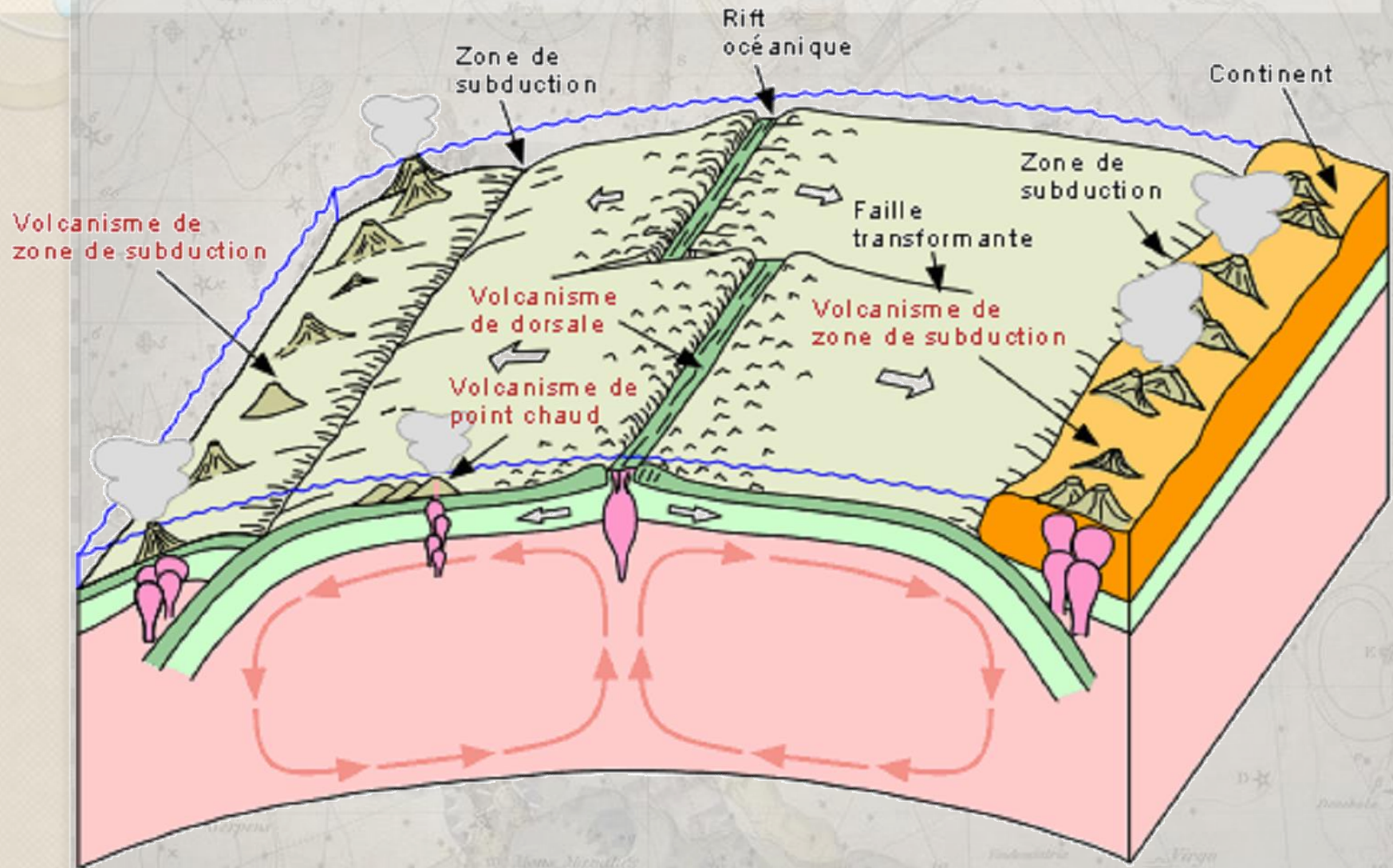
- Ainsi, on peut penser que le rapport D/H pourrait permettre de connaître l'origine des matériaux impliqués dans la formation de la Terre par accrétion.

DIVERSITÉ, INCLUSION

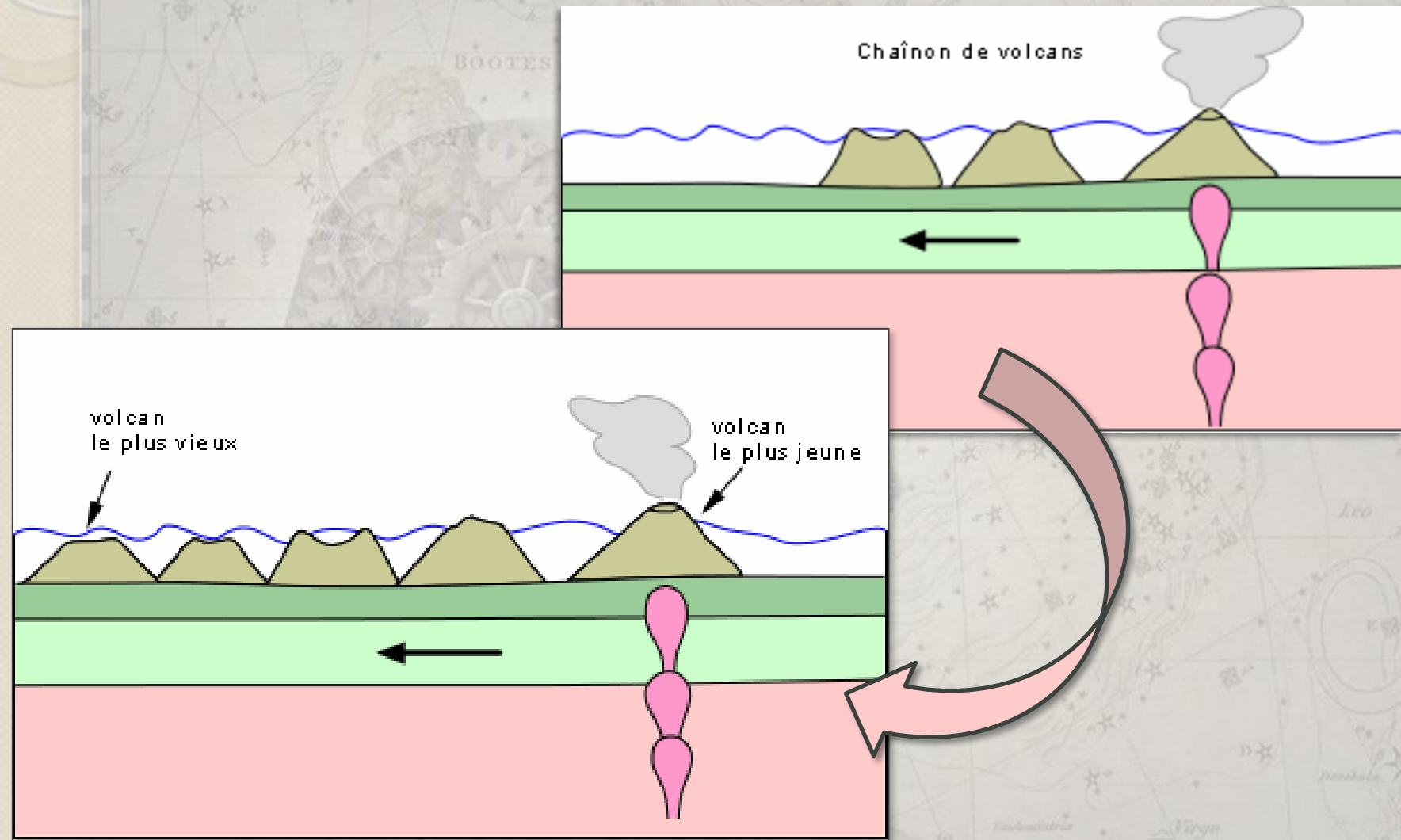


- Les conditions de surface (Atmosphère, tectonique, etc.) peuvent modifier le *D/H*.
- Il nous faut donc chercher des échantillons qui proviennent des « entrailles » de la planète pour mesurer le *D/H* des matériaux d'accrétion de la Terre primitive.
- On peut trouver ces matériaux d'origine par l'analyse des minéraux issus du **volcanisme de point chaud**.

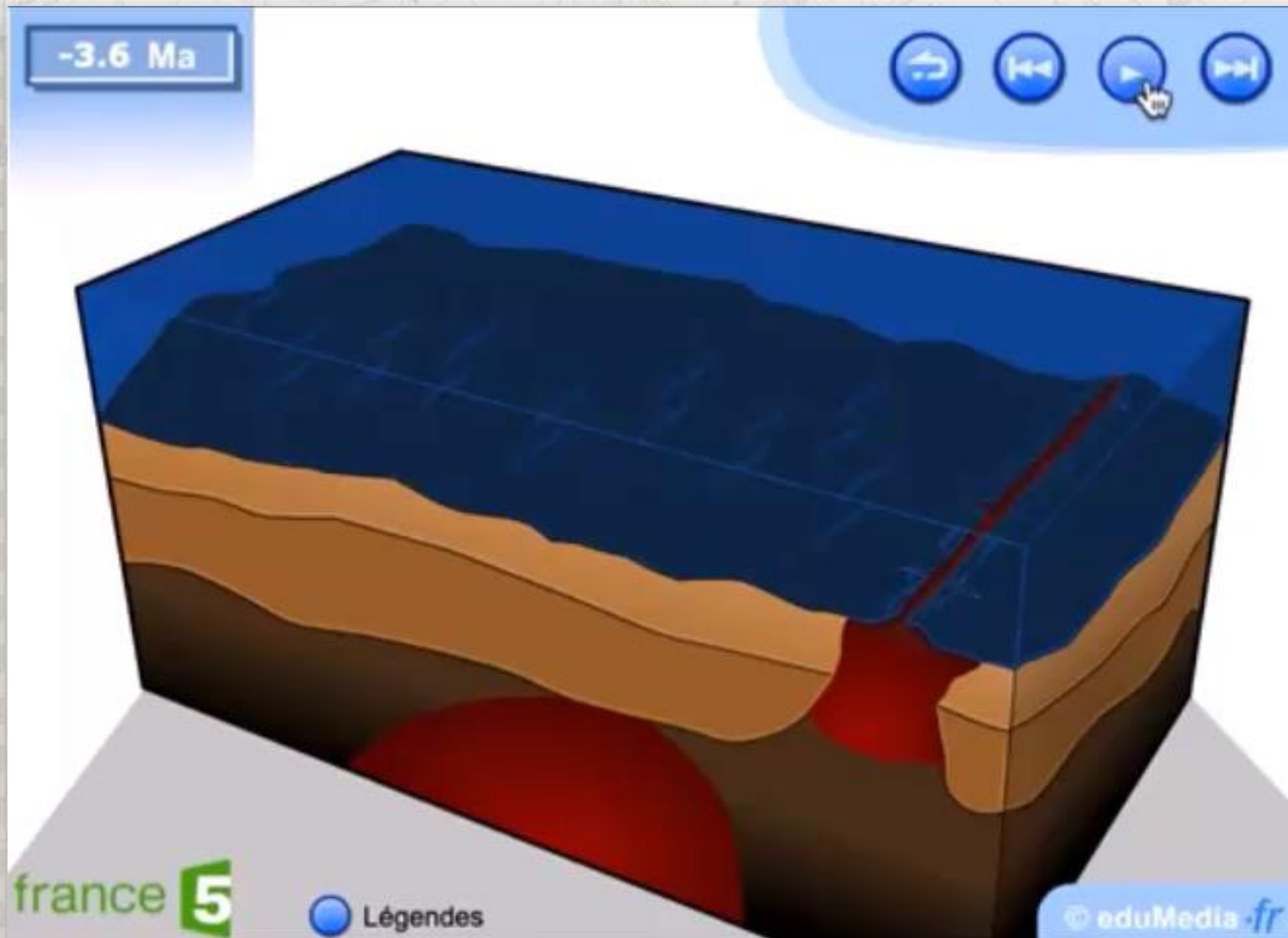
UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD



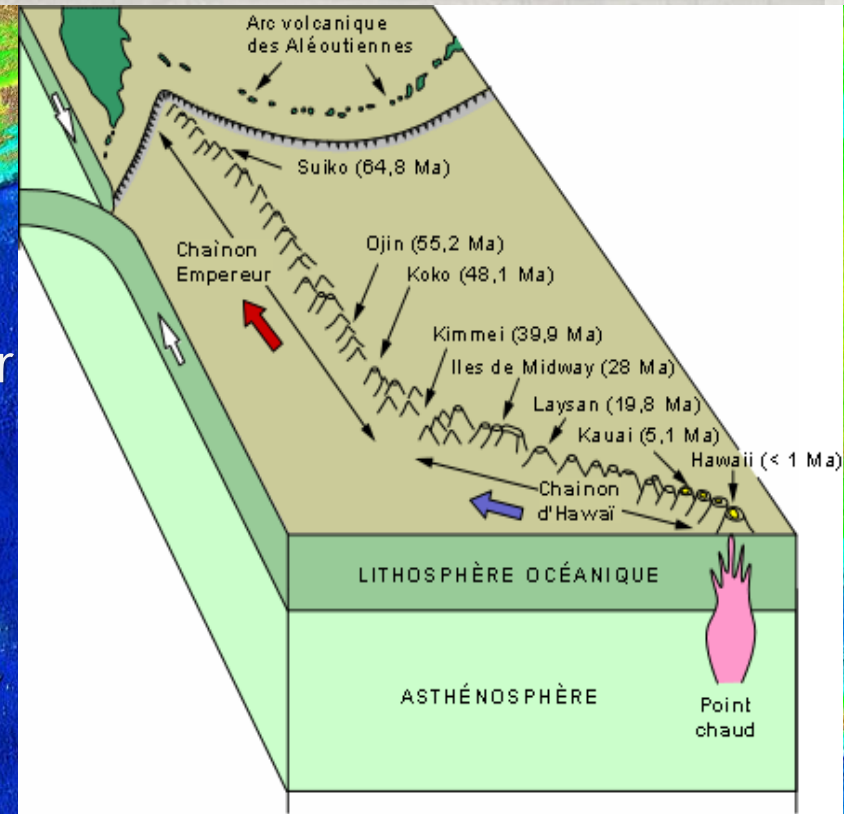
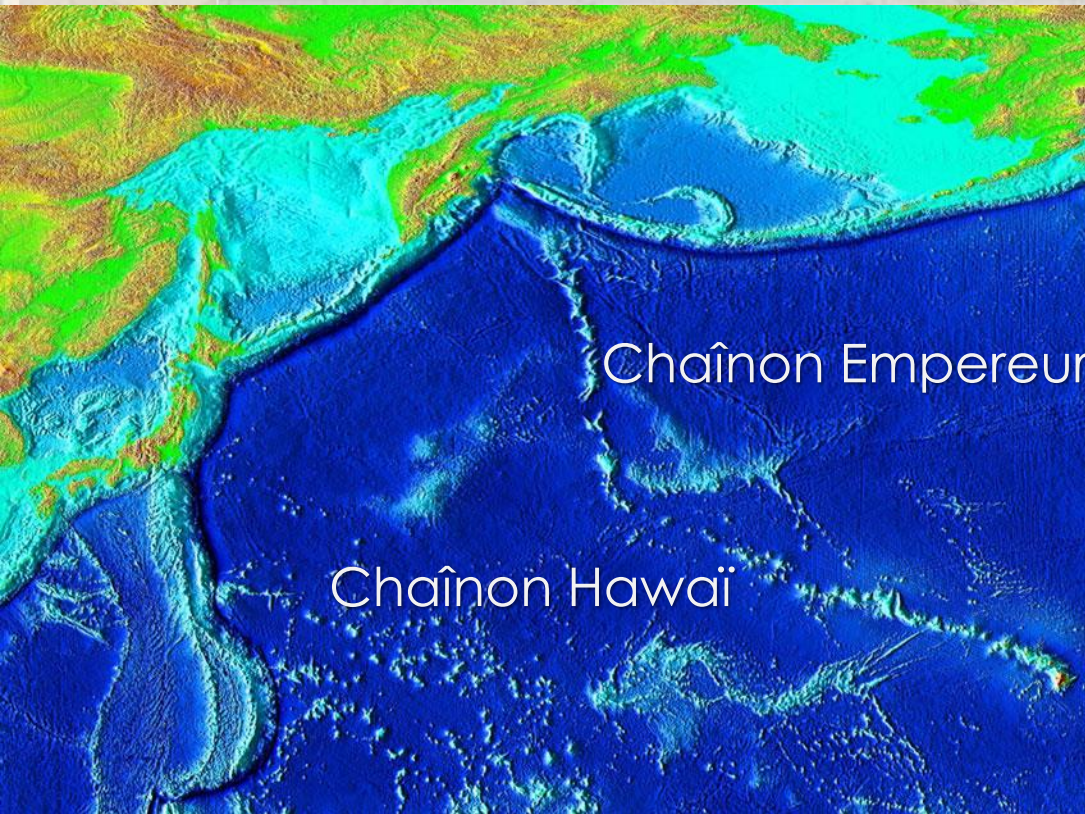
UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD



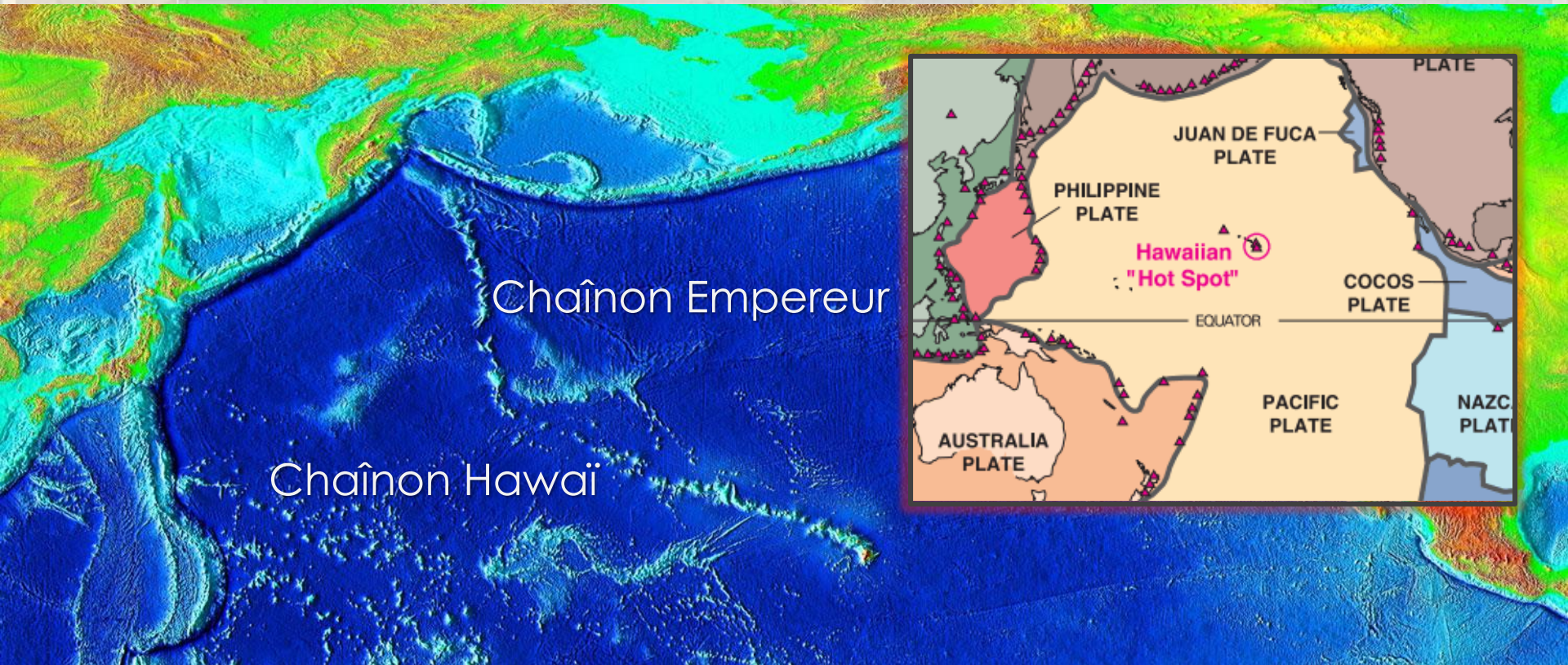
UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD



UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

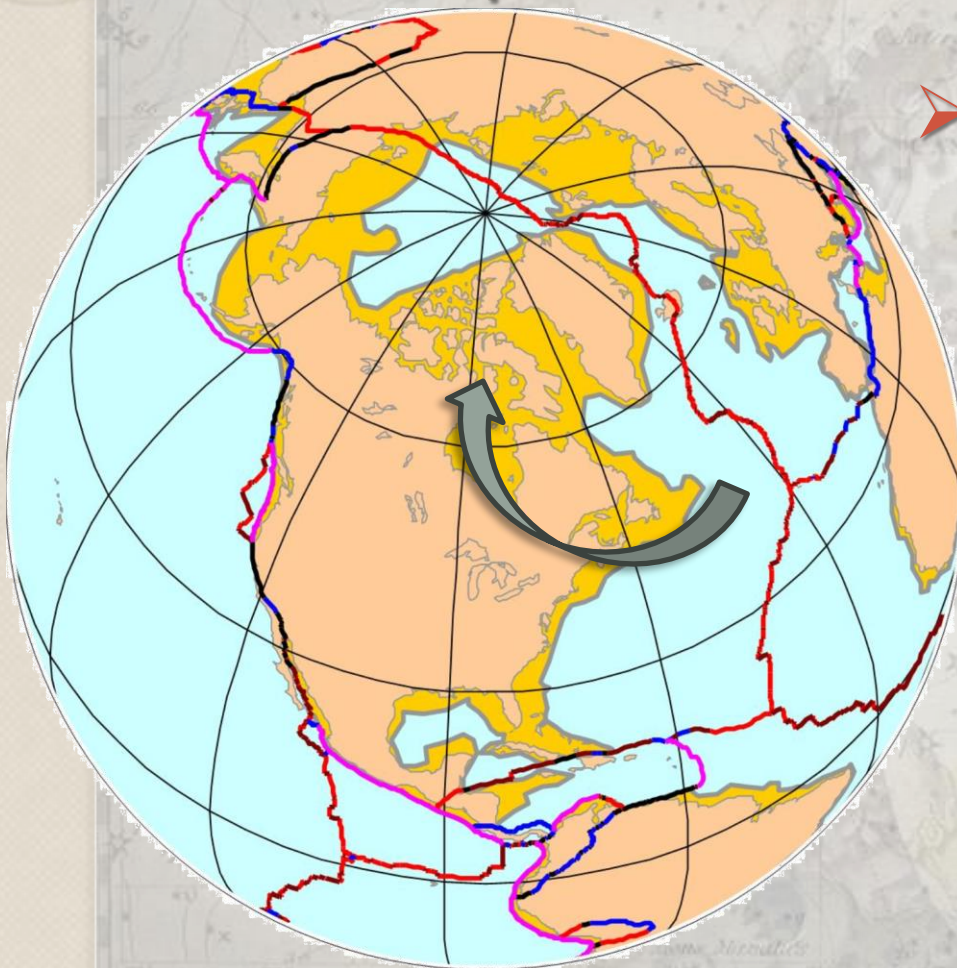


UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD



UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

➤ Le complexe Baffin-Islande.



➤ Déplacement de la plaque nord-américaine avec l'ouverture de l'Atlantique

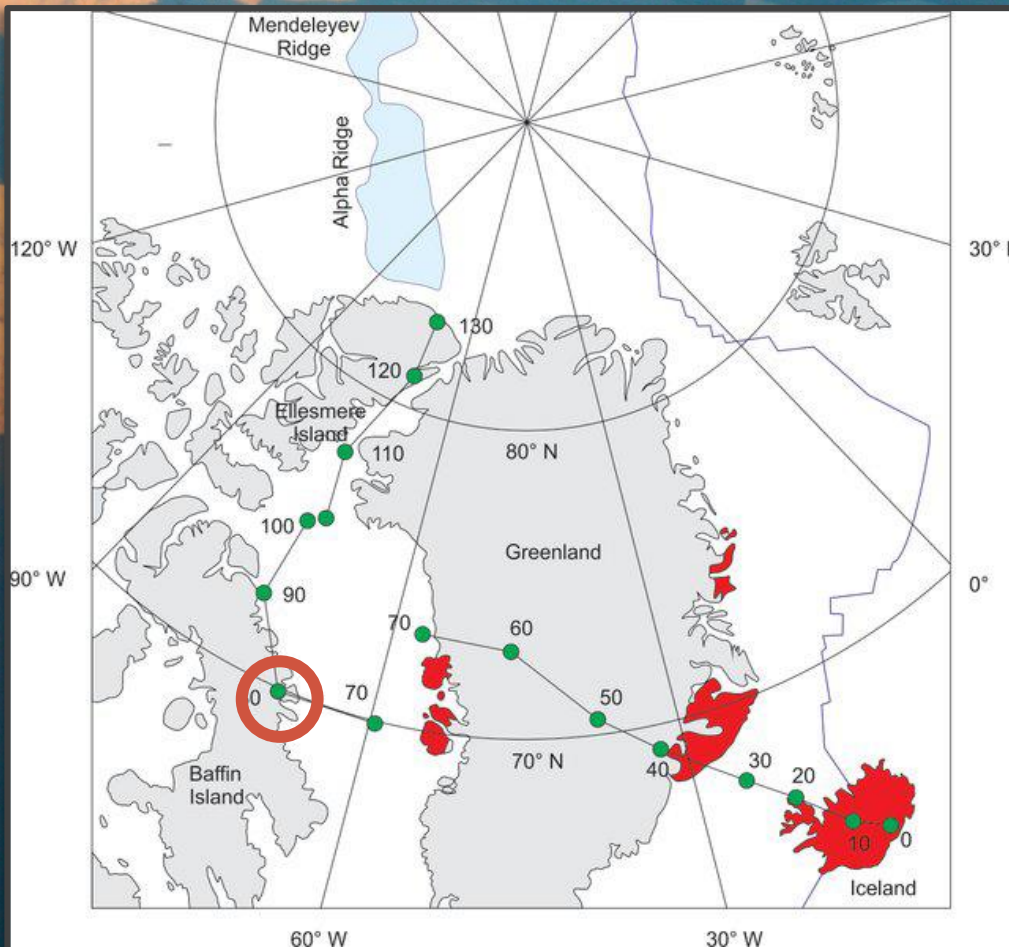
➤ Volcanisme islandais :

➤ Dorsale ou divergence

➤ Point chaud

UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

➤ Le complexe Baffin-Islande.

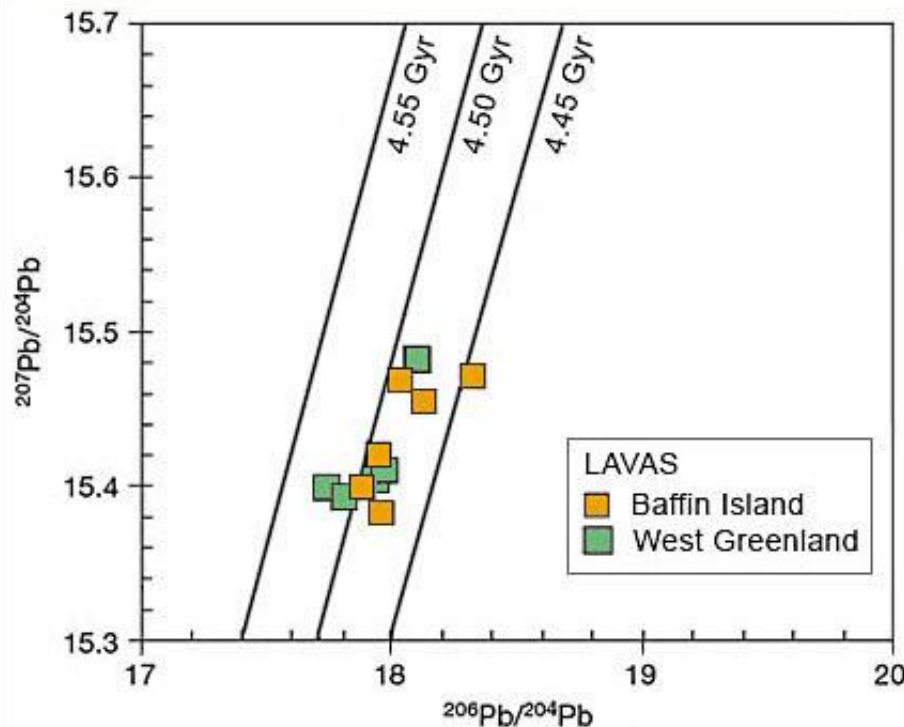


➤ L'émergence sur l'île Padloping, terre de Baffin, d'une effusion de basalte issue d'un panache de point chaud.

UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

➤ Le complexe Baffin-Islande.

Lead isotopic compositions for Baffin Island and West Greenland Basalts



(From Jackson *et al.*, 2015, *Nature*, v. 466, p. 853-856, doi: 10.1038/nature09287.)

➤ L'émergence sur l'île Padloping, terre de Baffin, d'une effusion de basalte issue d'un panache de point chaud.

➤ Âgé de **4,5 Ga** !

UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

➤ Le complexe Baffin-Islande.



Phénocristaux d'olivine

- L'émergence sur l'île Padloping, terre de Baffin, d'une effusion de basalte issue d'un panache de point chaud.
- Âgé de 4,5 Ga !

UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

- Le complexe Baffin-Islande.
 - Fait des matériaux d'accrétion de la Terre au tout début de sa formation.
 - L'échantillonnage provient du manteau profond à sa jonction avec le noyau externe et **son profil isotopique est resté inchangé depuis l'origine.**

UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

➤ Le complexe Baffin-Islande.

GEOCHEMISTRY Science 2015; 350 : 795-797

Evidence for primordial water in Earth's deep mantle

Lydia J. Hallis,^{1,2*}† Gary R. Huss,^{1,2} Kazuhide Nagashima,² G. Jeffrey Taylor,³ Sæmundur A. Halldórsson,³† David R. Hilton,³ Michael J. Mottl,⁴ Karen

The hydrogen-isotope [deuterium/hydrogen (D/H)] ratio of Earth can be used to determine the origin of its water. However, the most accessible reservoir, Earth's oceans, may not represent the original (primordial) D/H ratio, owing to changes caused by water loss from the surface and the interior. Thus, a reservoir completely isolated from surface processes is required to define Earth's original D/H signature. Here we present data for Baffin Island lavas, which suggest that the deep mantle has a low D/H ratio ($\delta D = -218$ per mil). Such strongly negative values indicate the existence of a component in Earth's interior that inherited its D/H ratio directly from the protosolar nebula.



2018 Nier Prize for Lydia J. Hallis - Lee - 2019 - Meteoritics & Planetary Science

$$\delta^2\text{H} = -218 \text{ ‰}$$

UN PEU DE GÉOLOGIE : LE VOLCANISME DE POINT CHAUD

- Le complexe Baffin-Islande.
 - Ce $\delta^2\text{H}$ est **beaucoup plus élevé qu'attendu** en regard de la position de la Terre lors de sa formation dans le disque protoplanétaire.
 - Sa valeur est représentative des régions beaucoup **plus externe** du disque protoplanétaire.

$$\delta^2\text{H} = -218 \text{ ‰}$$

IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS AVEC LE MODÈLE

➤ Mais on ne le savait pas
encore en 2014 lorsque...



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.



IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS AVEC LE MODÈLE

➤ Le complexe Baffin-Islande.

➤ Cette publication a fait autorité et a remis en question les modèles de composition de la région interne du disque protoplanétaire.

GEOCHEMISTRY Science 2015; 350 : 795-797

Evidence for primordial water in Earth's deep mantle

Lydia J. Hallis,^{1,2*}† Gary R. Huss,^{1,2} Kazuhide Nagashima,² G. Jeffrey Taylor,^{1,2} Sæmundur A. Halldórsson,^{3,†} David R. Hilton,³ Michael J. Mottl,⁴ Karen J. Meech^{1,5}

The hydrogen-isotope [deuterium/hydrogen (D/H)] ratio of Earth can be used to constrain the origin of its water. However, the most accessible reservoir, Earth's oceans, may no longer represent the original (primordial) D/H ratio, owing to changes caused by water cycling between the surface and the interior. Thus, a reservoir completely isolated from surface processes is required to define Earth's original D/H signature. Here we present data for Baffin Island and Icelandic lavas, which suggest that the deep mantle has a low D/H ratio (δD more negative than -218 per mil). Such strongly negative values indicate the existence of a component within Earth's interior that inherited its D/H ratio directly from the protosolar nebula.

$$\delta^2H = -218 \text{ ‰}$$

IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

1. Nous savons que le manteau de la Terre est plus riche en eau qu'anticipé.

- Ringwoodite (OH^-)
- Enstatite (H^+)

Il y aurait l'équivalent de plusieurs océans dans le manteau de la Terre.

COSMOCHEMISTRY

Science 2020; 369 : 1100-1113

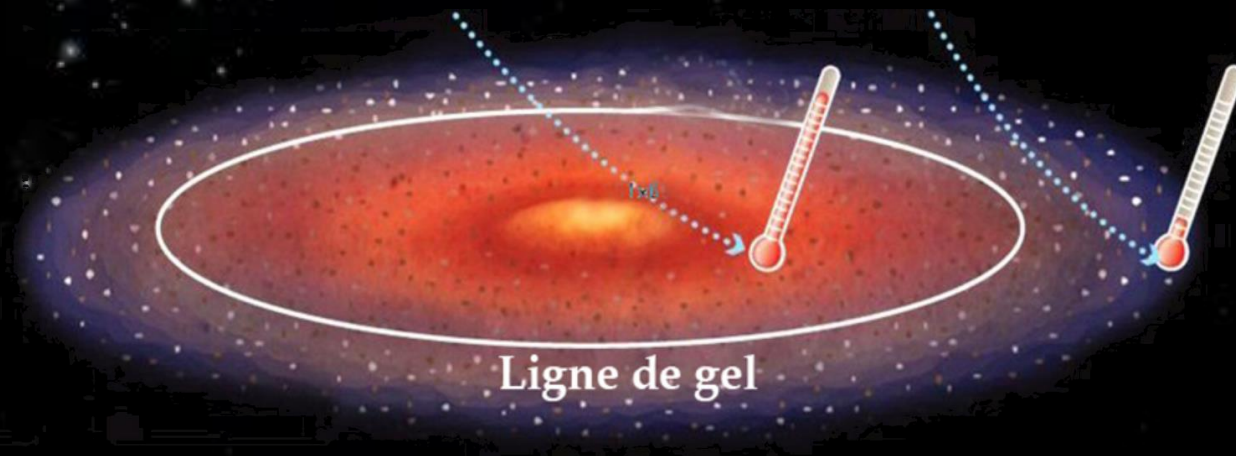
Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites

Laurette Piani^{1*}, Yves Marrocchi¹, Thomas Rigaudier¹, Lionel G. Vacher^{1,2}, Dorian Thomassin¹, Bernard Marty¹

The origin of Earth's water remains unknown. Enstatite chondrite (EC) meteorites have similar isotopic composition to terrestrial rocks and thus may be representative of the material that formed Earth. ECs are presumed to be devoid of water because they formed in the inner Solar System. Earth's water is therefore generally attributed to the late addition of a small fraction of hydrated materials, such as carbonaceous chondrite meteorites, which originated in the outer Solar System where water was more abundant. We show that EC meteorites contain sufficient hydrogen to have delivered to Earth at least three times the mass of water in its oceans. EC hydrogen and nitrogen isotopic compositions match those of Earth's mantle, so EC-like asteroids might have contributed these volatile elements to Earth's crust and mantle.

IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

2. On pense que la Terre s'est formée dans une région sèche du disque protoplanétaire d'où l'eau volatile avait été soufflée au-delà de la ligne de gel.



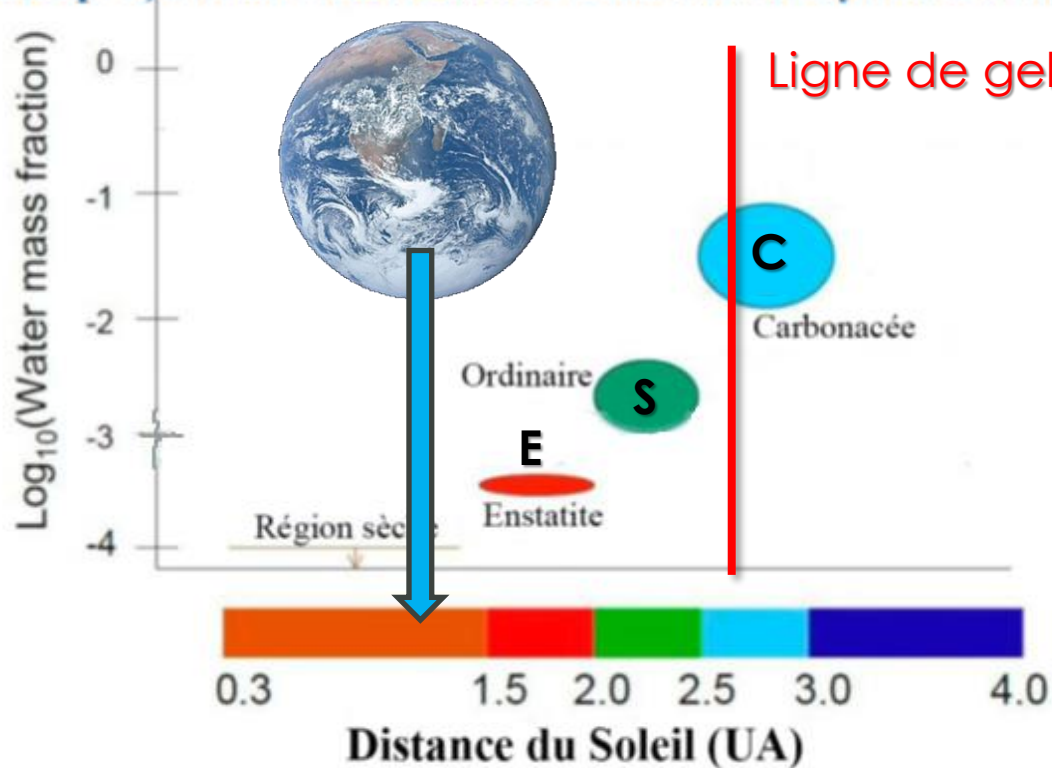
IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

3. Les matériaux restants disponibles pour l'accrétion semblent avoir été plus riches en eau qu'anticipé, à voir la composition du manteau.



IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

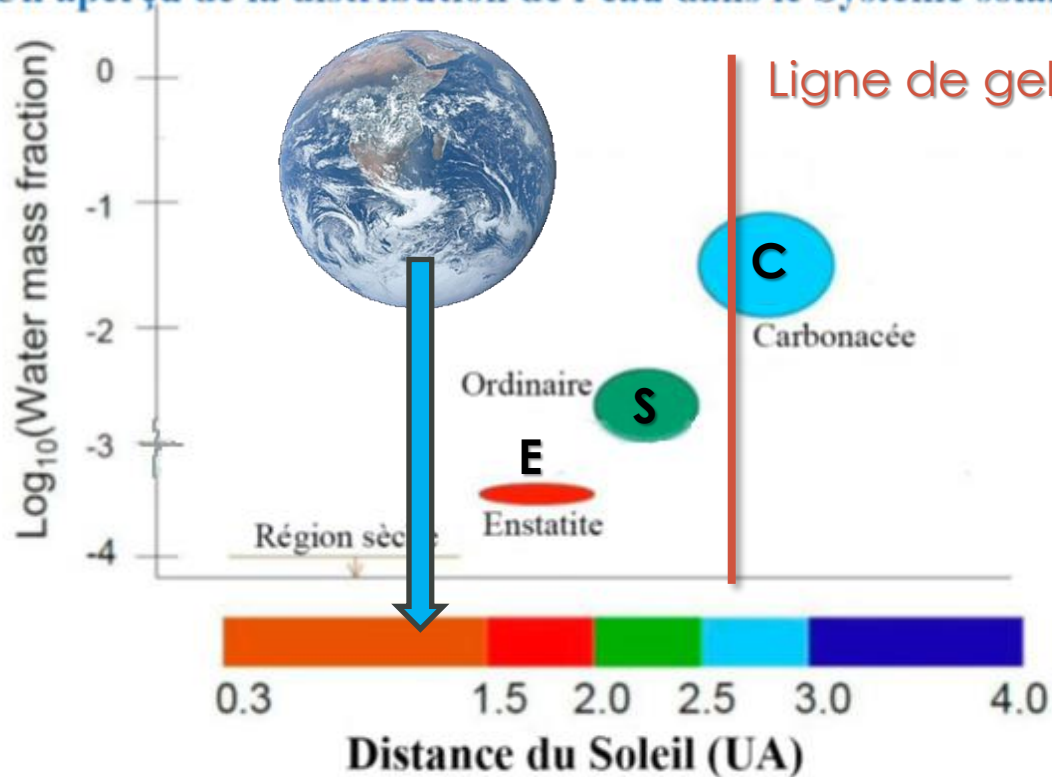
Un aperçu de la distribution de l'eau dans le Système solaire



- On a dit que la Terre s'était formée dans une région particulièrement sèche du disque protosolaire.
- Le $\delta^2\text{H}$ des matériaux d'accrétion devrait y être beaucoup plus bas.

IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

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

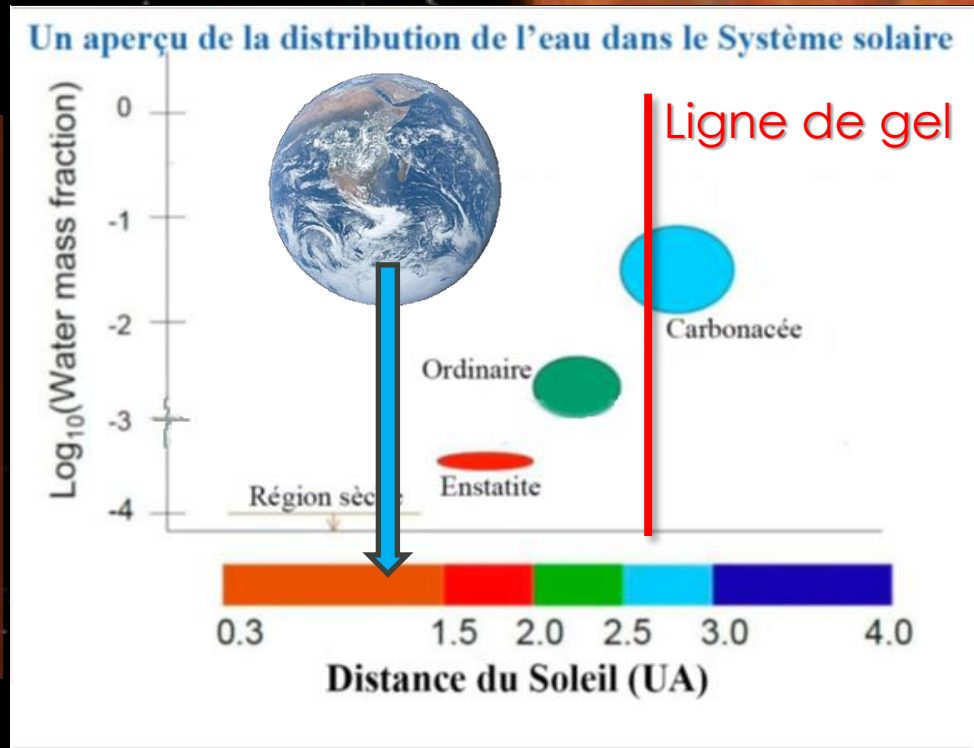


Source	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Nuage moléculaire galactique	5 400
Disque protosolaire	-865
Terre (manteau)	-218
Chondrite-E	-103
Chondrite-S	-152 à -455
Chondrite-C	-380 à -590
Comètes nuage d'Oort	800 à 2 400

IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

3. Il y a une homogénéité inattendue dans le $\delta^2\text{H}$ des objets du Système solaire interne.

Le $\delta^2\text{H}$ oscille entre -103‰ à -590‰ , ce qui est peu et non prédit par les postulats de la ségrégation initiale.



IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

➤ Comment l'expliquer sinon par une approche novatrice.



This homogeneity is in accord with the 'Grand tack' model of Solar System formation, where giant planet migration causes the S- and C-type asteroids to be mixed within 1 AU to eventually form the terrestrial planets.

PHILOSOPHICAL
TRANSACTIONS A

rsta.royalsocietypublishing.org

Review



Cite this article: Hallis LJ. 2017 D/H ratios of the inner Solar System. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375: 20150390. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0390>

hydrogen isotopes, water, meteorites, terrestrial planets, asteroid belt

Author for correspondence:

L. J. Hallis

e-mail: lydia.hallis@glasgow.ac.uk

D/H ratios of the inner Solar System

L. J. Hallis

School of Geographical and Earth Sciences, Gregory Building, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK

 [LJH, 0000-0001-6455-8415](https://orcid.org/0000-0001-6455-8415)

The original hydrogen isotope (D/H) ratios of different planetary bodies may indicate where each body formed in the Solar System. However, geological and atmospheric processes can alter these ratios through time. Over the past few decades, D/H ratios in meteorites from Vesta and Mars, as well as from S- and C-type asteroids, have been measured. The aim of this article is to bring together all previously published data from these bodies, as well as the Earth, in order to determine the original D/H ratio for each of these inner Solar System planetary bodies. Once all secondary processes have been stripped away, the inner Solar System appears to be relatively homogeneous in terms of water D/H, with the original water D/H ratios of Vesta, Mars, the Earth, and S- and C-type asteroids all falling between δD values of -100% and -590% . This homogeneity is in accord with the 'Grand tack' model of Solar System formation, where giant planet migration causes the S- and C-type asteroids to be mixed within 1 AU to eventually form the terrestrial planets.

This article is part of the themed issue 'The origin, history and role of water in the evolution of the inner Solar System'.

IL Y A QUELQUE CHOSE QUI NE FONCTIONNE PAS...

➤ Comment l'expliquer sinon par une approche novatrice.



PHILOSOPHICAL
TRANSACTIONS A

rsta.royalsocietypublishing.org

Review



Cite this article: Hallis LJ. 2017 D/H ratios of the inner Solar System. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375: 20150309

D/H ratios of the inner Solar System

L. J. Hallis

School of Geographical and Earth Sciences, Gregory Building,
University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK

 LJH, 0000-0001-6455-8415

Cette homogénéité est en accord avec le modèle du Grand Tack de la formation du Système solaire où la migration des planètes géantes a mélangé les astéroïdes de type S et de type C jusqu'à moins de 1 UA pour éventuellement former les planètes terrestres.

The original hydrogen isotope (D/H) ratios of different planetary bodies may indicate where each body formed in the Solar System. However, geological and atmospheric processes can alter these ratios through time. Over the past few decades, D/H ratios in meteorites from Vesta and Mars, as well as from S- and C-type asteroids, have been measured. The aim of this article is to bring together all previously published data from these bodies, as well as the Earth, in order to determine the original D/H ratio for each of these inner Solar System planetary bodies. Once all secondary processes have been stripped away, the inner Solar System appears to be relatively homogeneous in terms of water D/H, with the original water D/H ratios of Vesta, Mars, the Earth, and S- and C-type asteroids all falling between δD values of -100% and -590% . This homogeneity is in accord with the 'Grand tack' model of Solar System formation, where giant planet migration causes the S- and C-type asteroids to be mixed within 1 AU to eventually form the terrestrial planets.

This article is part of the themed issue 'The origin, history and role of water in the evolution of the inner Solar System'.

Author for correspondence:

L. J. Hallis

e-mail: lydia.hallis@glasgow.ac.uk

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- 
- Vu de même, le Système solaire nous apparaît paisible, presque ennuyant...

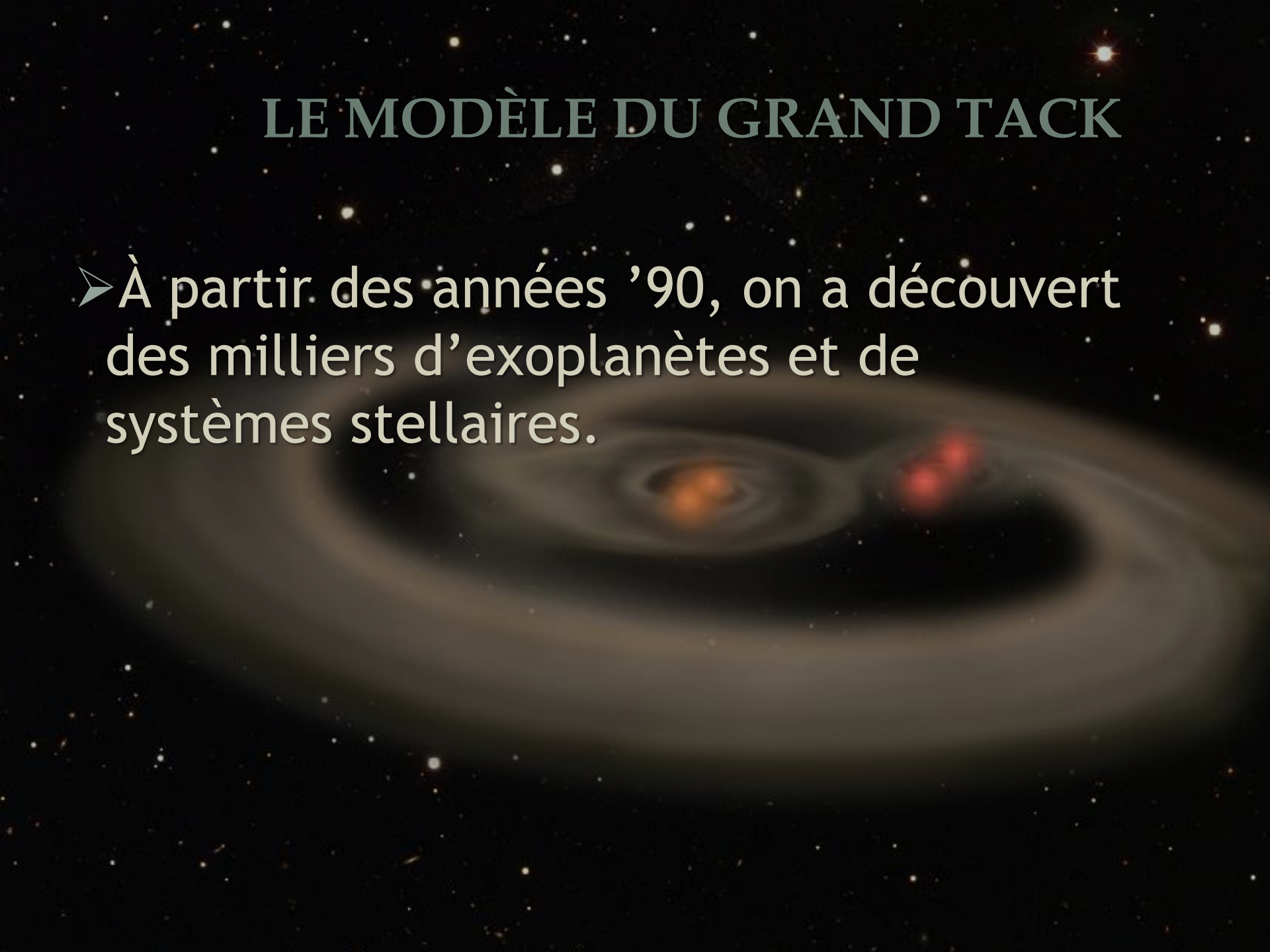
LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Mais peut-être n'en a-t-il par toujours été ainsi, qui sait !



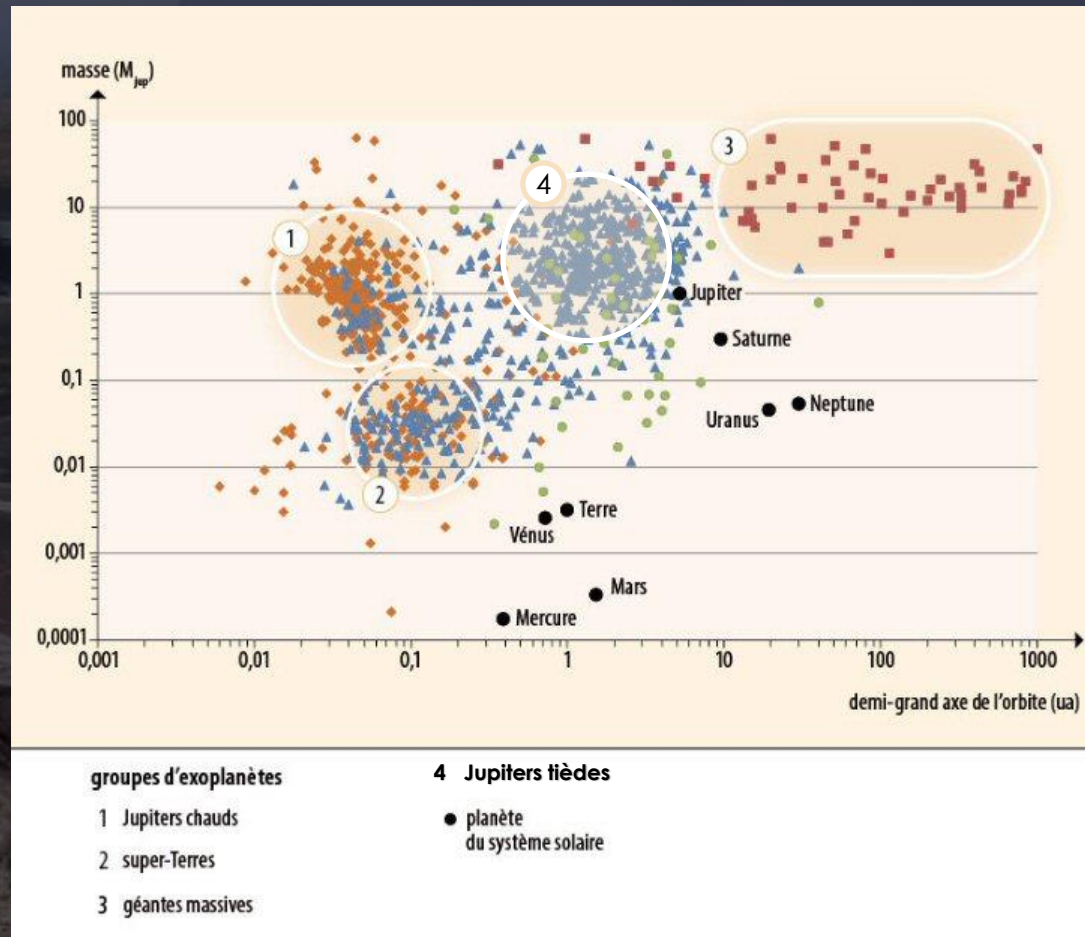
LE MODÈLE DU GRAND TACK

- À partir des années '90, on a découvert des milliers d'exoplanètes et de systèmes stellaires.



LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Que remarque-t-on des exoplanètes que nous connaissons.
- Les exoplanètes se regroupent en certains types dominants.



LE MODÈLE DU GRAND TACK

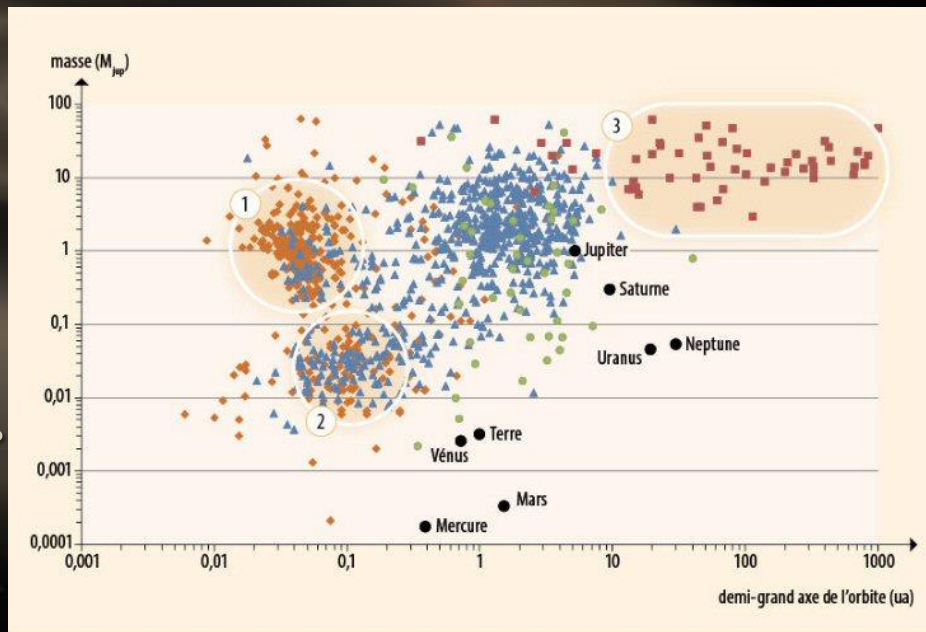
- On trouve que 10 % des étoiles sont de type solaire dans la galaxie :
 - 50 % de ces étoiles possèdent des super-Terres.
 - 1 % ont un Jupiter chaud.
 - 10 % ont un Jupiter tiède.
 - Parmi ces Jupiters tièdes, seulement 10 % ont une orbite comparable à celle de notre Jupiter.
 - La probabilité de trouver un couple Soleil-Jupiter n'est que de **1 %**.

LE MODÈLE DU GRAND TACK

➤ Nos modèles de formation et d'évolution des systèmes stellaires sont fondés sur notre étude du Système solaire.

➤ Or, nous n'avons jamais trouvé jusqu'à maintenant un système stellaire qui ressemble au nôtre.

➤ Et si le Système solaire était une **illusion temporelle...**



groupes d'exoplanètes

1 Jupiters chauds

2 super-Terres

3 géantes massives

● planète
du système solaire

LE MODÈLE DU GRAND TACK

➤ Nos modèles de formation et d'évolution des systèmes stellaires sont fondés sur notre étude du Système solaire.

➤ Or, nous n'avons jamais trouvé jusqu'à maintenant un système stellaire qui

➤ Et sol

illusion temporelle...

Peut-être faudrait-il envisager les choses différemment.



groupes d'exoplanètes

- 1 Jupiters chauds
- 2 super-Terres
- 3 géantes massives

• planète
du système solaire

LE MODÈLE DU GRAND TACK

➤ Et si l'évolution de notre Système solaire avait été au tout début plus mouvementée, plus chaotique que l'image tranquille qu'il nous renvoie maintenant.

Et nous arrivons au modèle
du **Grand Tack**.

LETTER

Nature 2011; **475**: 206-209

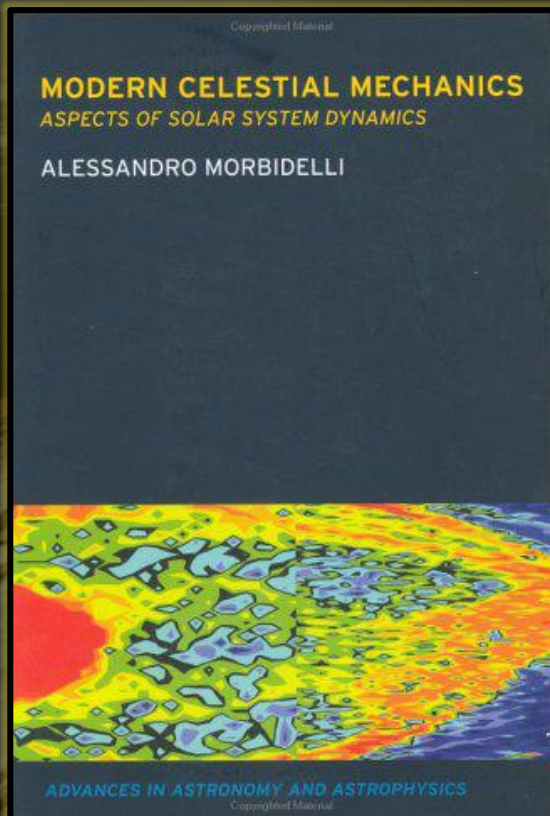
doi:10.1038/nature10201

A low mass for Mars from Jupiter's early
gas-driven migration

Kevin J. Walsh^{1,2}, Alessandro Morbidelli¹, Sean N. Raymond^{3,4}, David P. O'Brien⁵ & Avi M. Mandell⁶

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Développé au cours des années 2010 par la même équipe d'astrophysiciens qui nous a donné le *Modèle de Nice*.



Alessandro Morbidelli

Astronome et planétologue

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Pour répondre aux questions suivantes :
 - Pourquoi le Système solaire ne contient-il pas de Superterres en orbite rapprochée ou de Jupiter chaudes comme on en voit souvent autour d'étoiles de type G ?
 - Pourquoi les planètes telluriques sont-elles si peu massives ?
 - Et en particulier la planète Mars.

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Ils ont développé des modèles informatiques pour expliquer l'état actuel du Système solaire.
- Il existe quand même des incertitudes...
- Mais comme le disait Lydia Hallis, la nature de l'eau sur Terre s'accorde avec le modèle du Grand Tack.

PHILOSOPHICAL
TRANSACTIONS A

rsta.royalsocietypublishing.org

Review



Cite this article: Hallis LJ. 2017 D/H ratios of the inner Solar System. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375: 20150390.
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0390>

Accepted: 12 October 2016

One contribution of 9 to a Theo Murphy meeting issue 'The origin, history and role of water in the evolution of the inner Solar System'.

D/H ratios of the inner Solar System

L. J. Hallis

School of Geographical and Earth Sciences, Gregory Building, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK

LJH, 0000-0001-6455-8415

The original hydrogen isotope (D/H) ratios of different planetary bodies may indicate where each body formed in the Solar System. However, geological and atmospheric processes can alter these ratios through time. Over the past few decades, D/H ratios in meteorites from Vesta and Mars, as well as from S- and C-type asteroids, have been measured. The aim of this article is to bring together all previously published data from these bodies, as well as the Earth, in order to determine the original D/H ratio for each of these inner Solar System planetary bodies. Once all secondary processes have been stripped away, the inner Solar System appears to be relatively

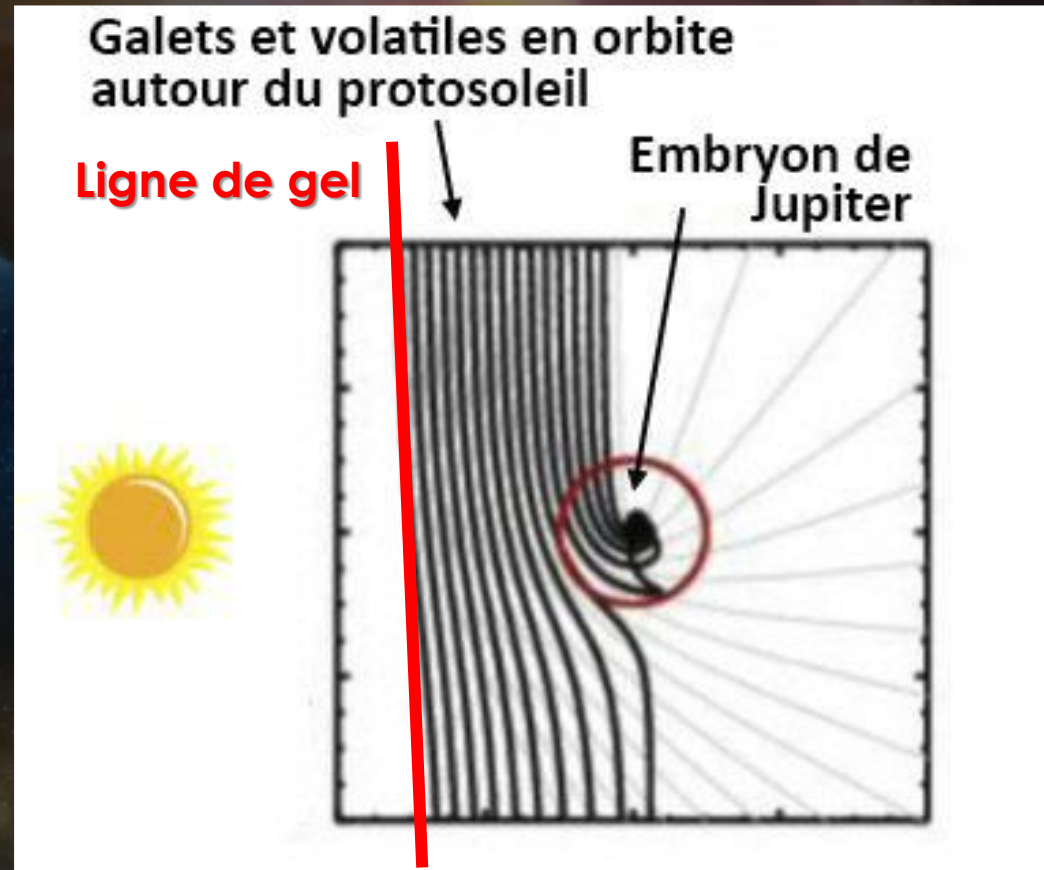
This homogeneity is in accord with the 'Grand tack' model of Solar System formation, where giant planet migration causes the S- and C-type asteroids to be mixed within 1 AU to eventually form the terrestrial planets.

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Effondrement de la nébuleuse protosolaire
 - La zone centrale s'allume (énergie électromagnétique).
 - $L_{\text{protoétoile}} \gg L_{\odot}$ actuel.
 - La pression de lumière (vents) pousse les volatiles vaporisés au-delà de la ligne de gel ou ils se métamorphosent en glace solide, disponibles pour l'accrétion.

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- C'est là, tapie sans l'ombre, que se tient la prédatrice Jupiter.
- Disposant d'une grande quantité de matière, elle s'enfle vite.



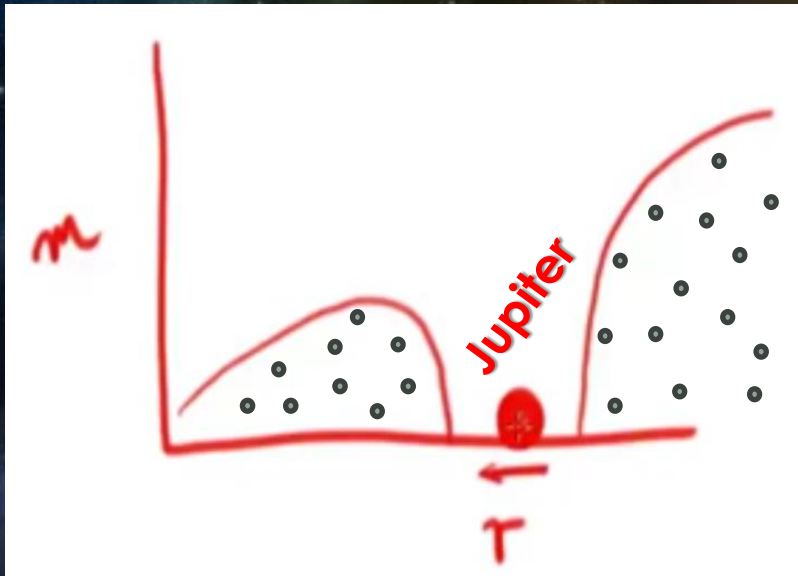
LE MODÈLE DU GRAND TACK

- C'est là, tapie sans l'ombre, que se tient la prédatrice Jupiter.
- Disposant d'une grande quantité de matière, elle s'enfle vite.



LE MODÈLE DU GRAND TACK

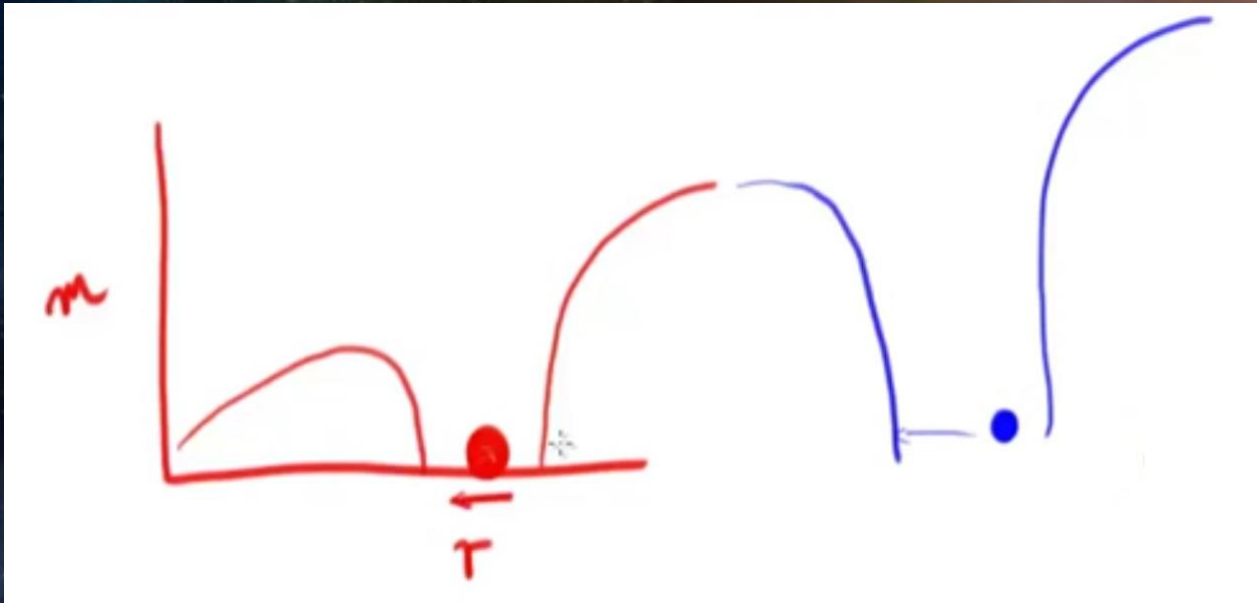
- Et tout commence à s'animer dans le juvénile disque protoplanétaire...



- Jupiter libère l'espace autour d'elle, créant des vides.
- Né à 3 à 5 UA, elle débute une migration rapide vers le protosoleil.
- Et comme un chien dans un jeu de quilles, elle disperse les petits corps à qui mieux mieux, tout en cannibalisant le plus possible.

LE MODÈLE DU GRAND TACK

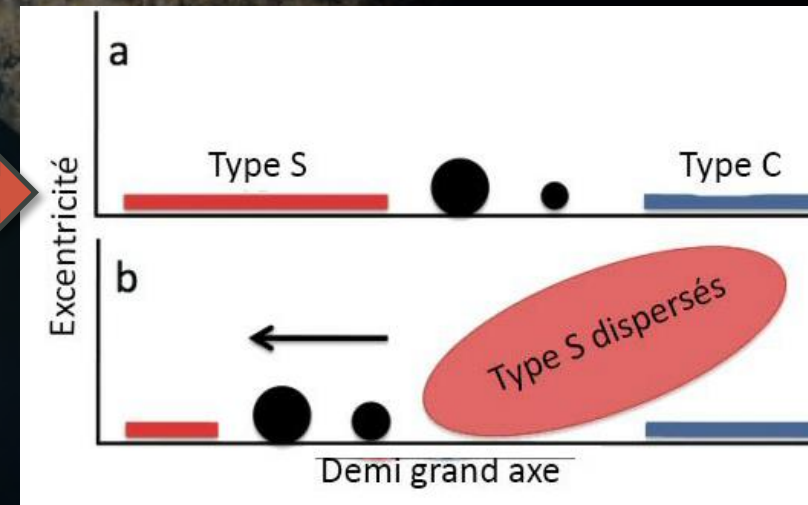
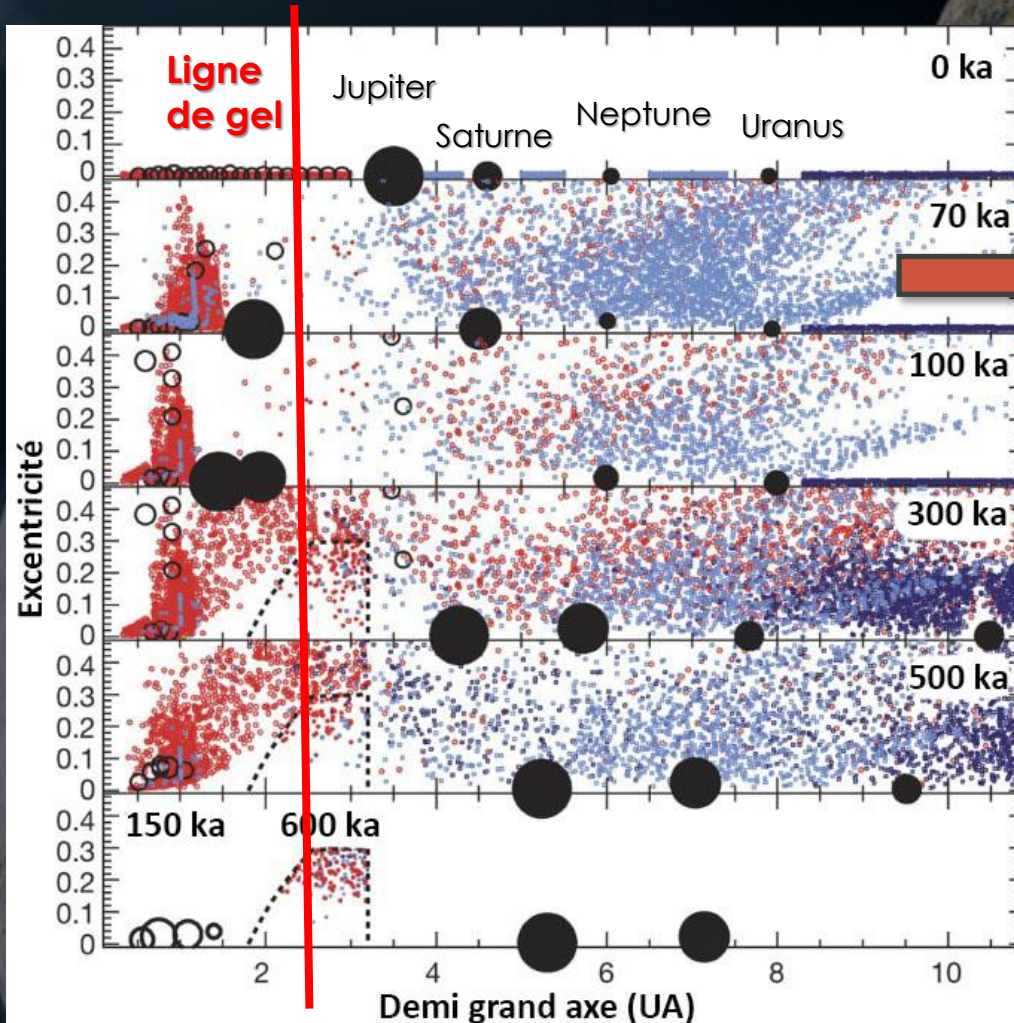
- Un peu derrière elle, Saturne s'est formée aussi, à plusieurs UA de distance.



- Et comme Ulysse, elle entreprend, encore plus vite, un long voyage à la poursuite de Jupiter, le fils volage.

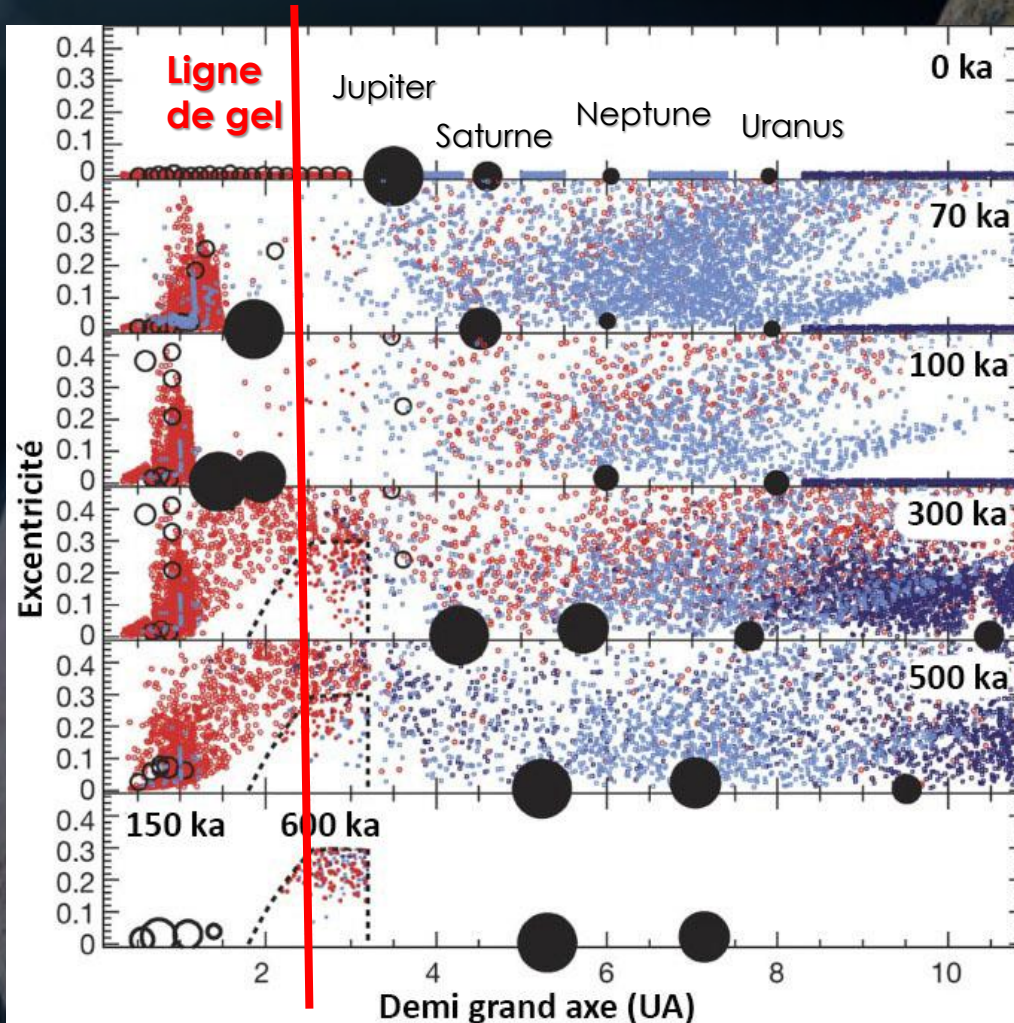
LE MODÈLE DU GRAND TACK

➤ Comment résumer...



LE MODÈLE DU GRAND TACK

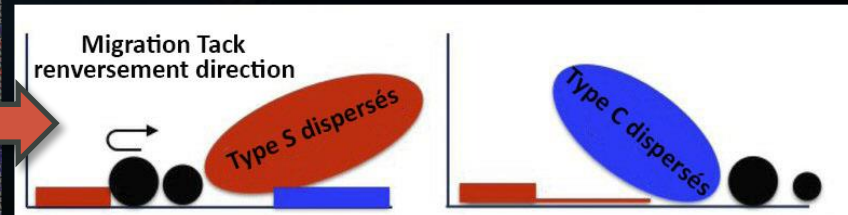
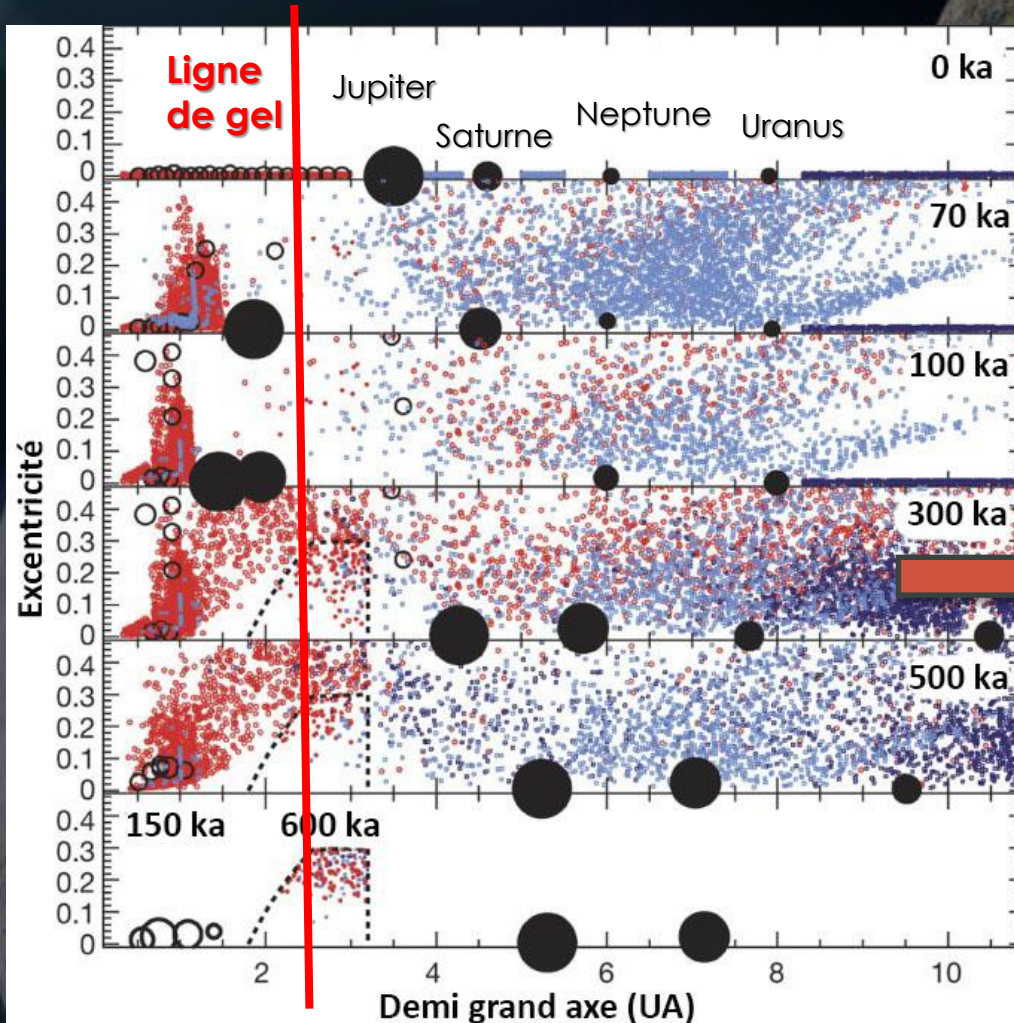
➤ Comment résumer...



- Saturne rattrape Jupiter
- Résonnance 1:2 ou 2:3
- Disparition de possibles Superterres ?

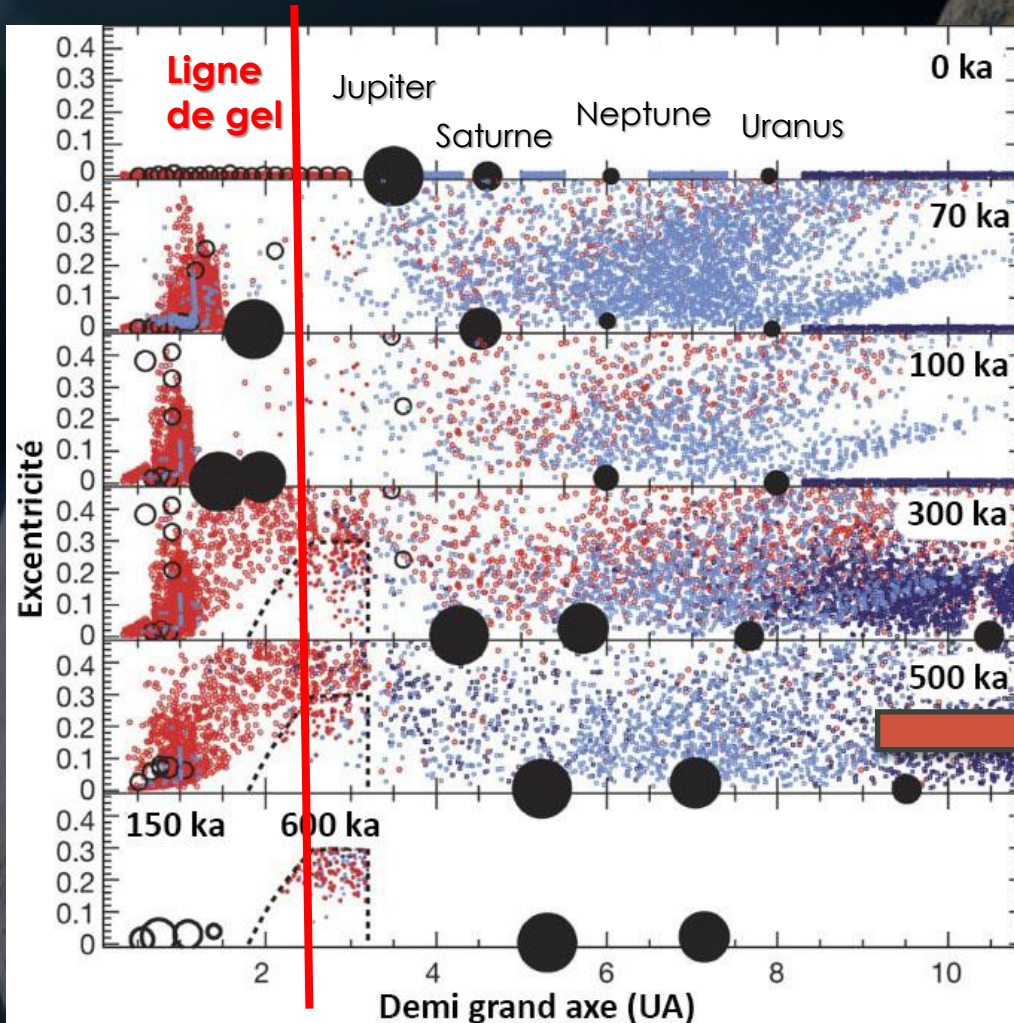
LE MODÈLE DU GRAND TACK

➤ Comment résumer...



LE MODÈLE DU GRAND TACK

➤ Comment résumer...



- Formation des planètes telluriques en ± 100 Ma avec moins de matériaux disponibles. Elles restent petites.
- Mais les matériaux sont **homogénéisés**, diversifiés, plus riches en minéraux hydratés ou hydroxylés.

LE MODÈLE DU GRAND TACK

THE GRAND TACK

Jupiter's zigzagging path through the fledgling Solar System

APPROX 4.6 BILLION YEARS AGO: T=0

Jupiter forms near the 'ice line' in the protoplanetary disc, between its rocky inner parts and icy outer parts. The other large planets are also beginning to condense out.

T = 70,000 YEARS

The 'drag' of the protoplanetary material causes Jupiter to migrate inwards, pushing much of the rocky material into the Sun.

T = 100,000 YEARS

Saturn follows Jupiter inwards, almost catching up with it and halting their inward movement. In the process, some icy asteroids are dragged into the inner solar system.

T = 300,000 YEARS

Jupiter and Saturn migrate back outwards, leaving behind a mixture of rocky and icy debris from which the inner planets will form.

T = 500,000 YEARS

At the end of the Grand Tack, Jupiter is near its present position - but the outer planets are still much closer to the Sun than they are today.

APPROX 4.5 BILLION YEARS AGO

Now the inner planets have formed too, close to their present positions. After another half a billion years, Uranus and Neptune will migrate outwards to their final positions.

1,364

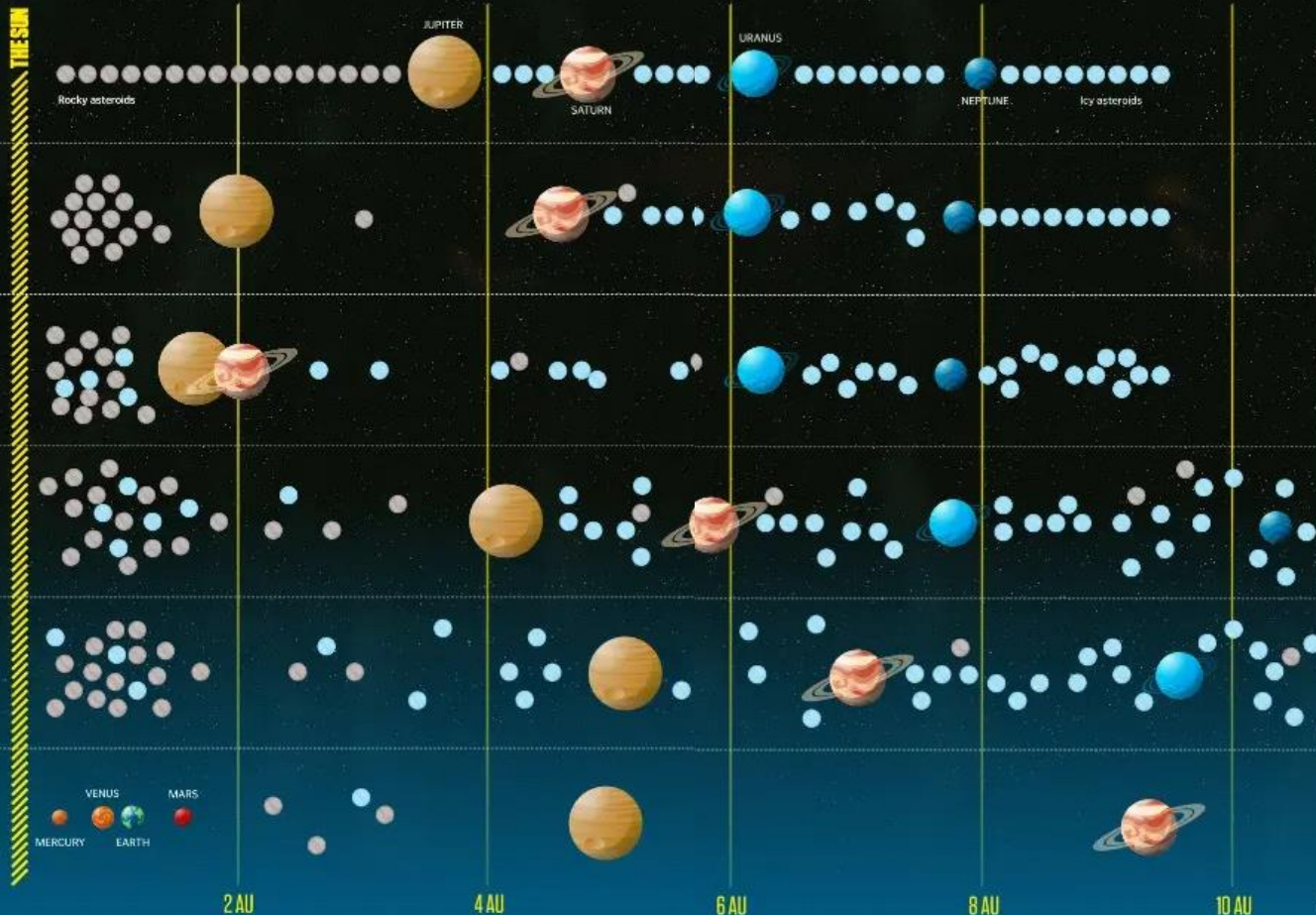
Number of super-Earths discovered by Kepler space telescope

22,000

Number of asteroids hitting Earth in the Late Heavy Bombardment

3.5

Ratio of Jupiter's furthest and closest distances to the Sun



LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Des mesures isotopiques faites à partir des échantillons lunaires des missions Apollo 15 et 17 ont montré que des matériaux d'accrétion riches en eau ont présidé à la formation de la Terre.
- Ces matériaux semblaient être des chondrites carbonées provenant d'au-delà de la ligne de gel.
- Ce qui conforte le modèle du Grand Tack.

Science

Hydrogen Isotopes in Lunar Volcanic Glasses and Melt Inclusions Reveal a Carbonaceous Chondrite Heritage

ALBERTO E. SAAL, ERIK H. HAURI, JAMES A. VAN ORMAN, AND MALCOLM J. RUTHERFORD

SCIENCE • 9 May 2013 • Vol 340, Issue 6138 • pp. 1317-1320 • DOI: [10.1126/science.1235142](https://doi.org/10.1126/science.1235142)

LE MODÈLE DU GRAND TACK

- Ainsi, la Terre se serait formée à partir de matériaux enrichis en eau,
- Elle n'aurait jamais été sèche.
- La plus grande part de l'eau qu'elle contient dort dans le manteau à l'abri des regards,
- Mais elle participe à un cycle long que l'esprit humain peut difficilement appréhender.

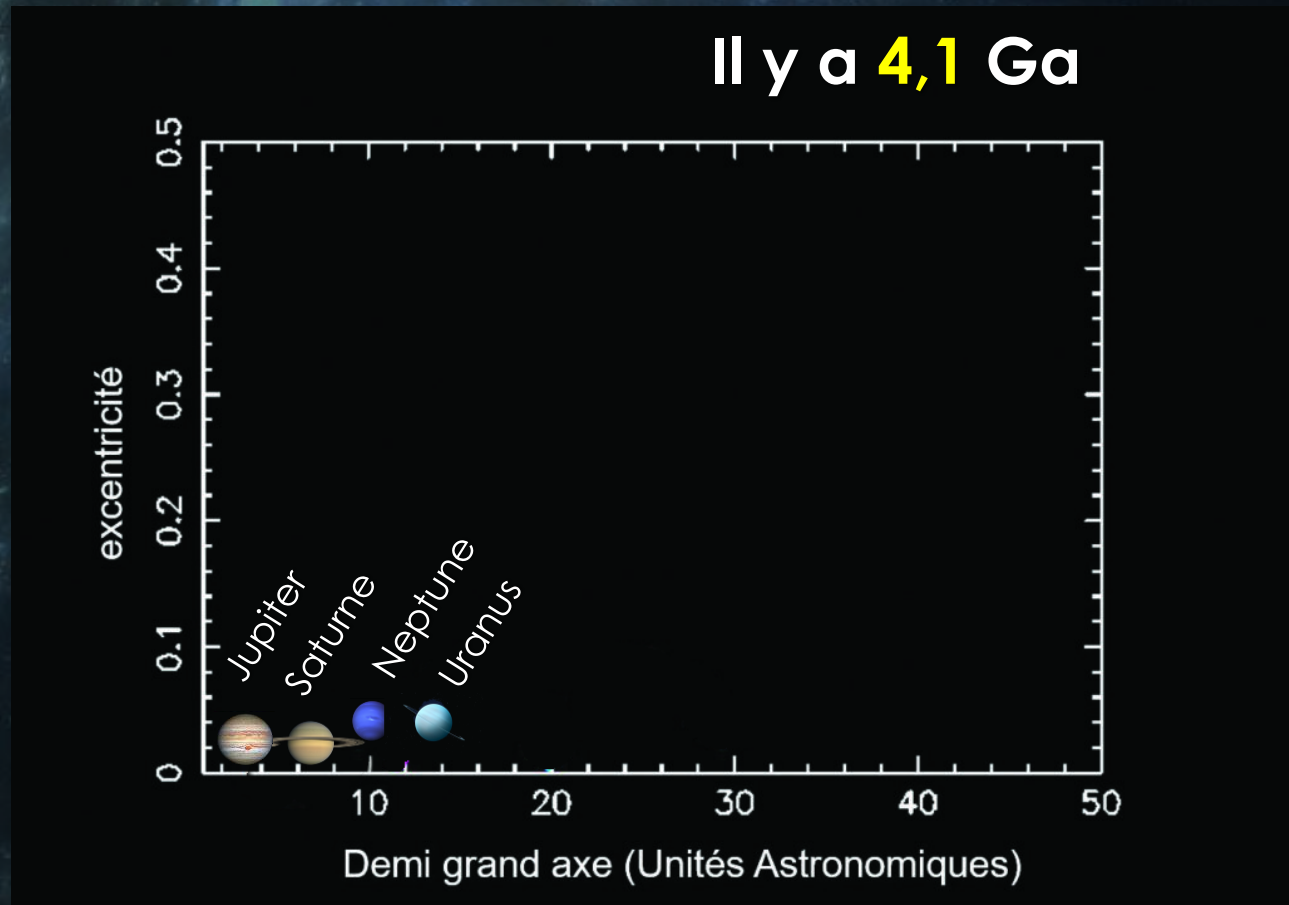
Tout un monde de mystères

MAIS CE N'EST PAS TOUT

- **500 Ma** après le Grand Tack, un autre événement survenant bien loin de la Terre est venu chambouler à nouveau le Système solaire interne.
- Mais cette fois-ci, l'action se passe dans le Système solaire externe.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ L'état des lieux...



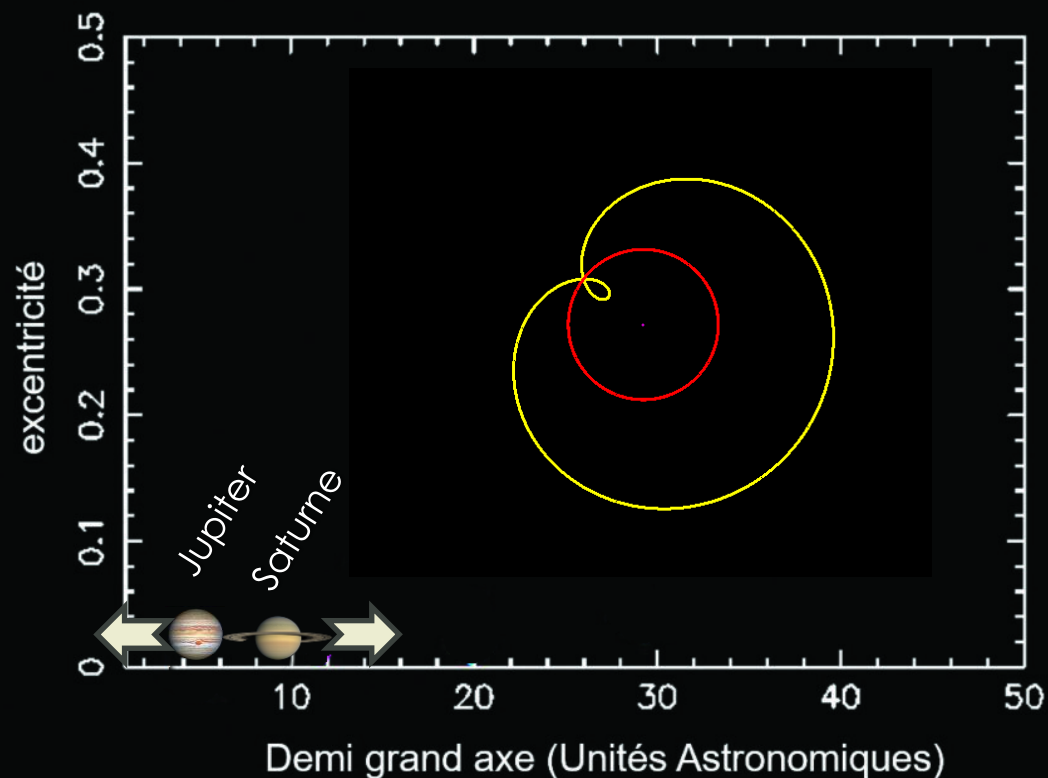
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- L'état des lieux...
 - Les orbites des 4 géantes sont quasi circulaires.
 - Elles sont rapprochées les unes des autres.
 - Jupiter et Saturne ont un partage orbital inconfortable.
 - Jupiter se déplace vers l'intérieur du Système,
 - Saturne se déplace vers l'extérieur...

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ A la recherche d'une résonance 2:1

Il y a **4,1 Ga**



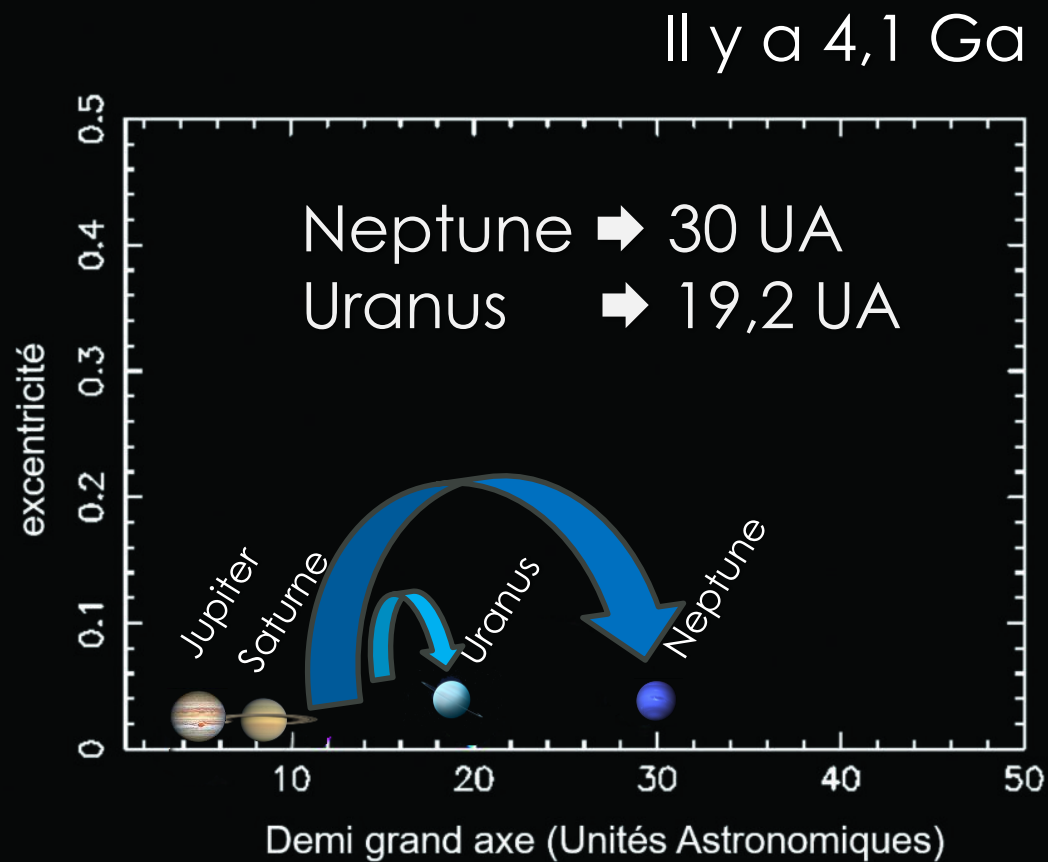
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ L'état des lieux...

➤ Ce faisant, Saturne exerce un effet de fronde sur Neptune et Uranus, mais
>> sur Neptune que sur Uranus.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

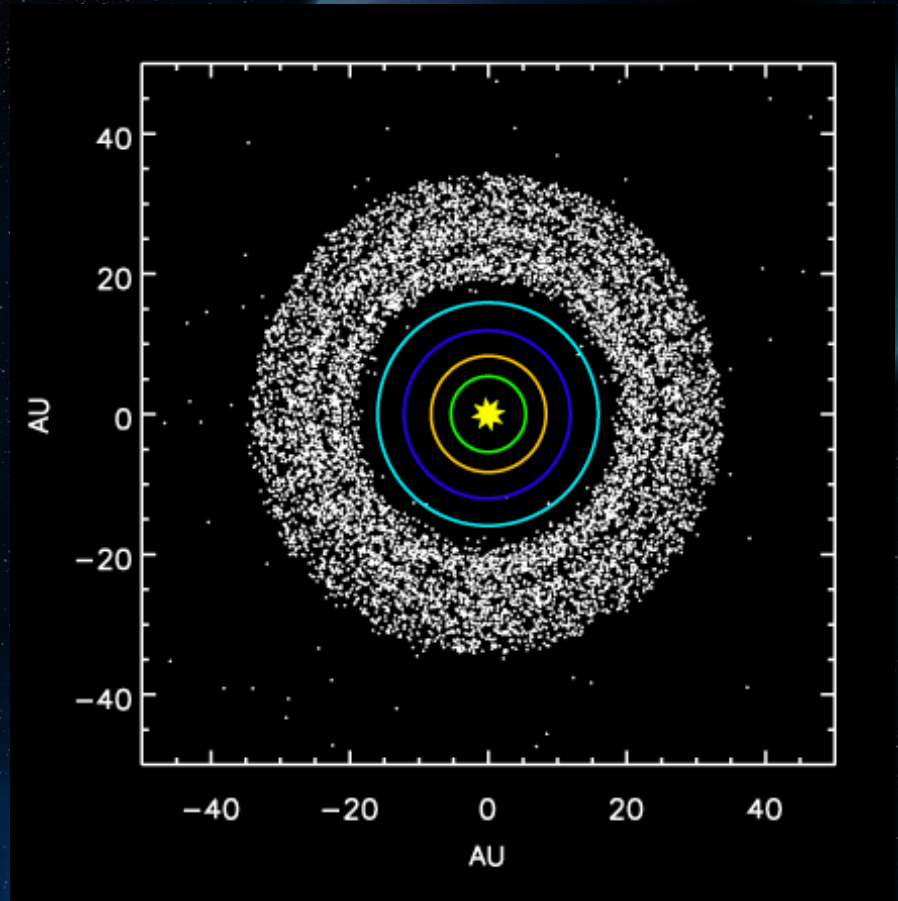
➤ L'état des lieux...



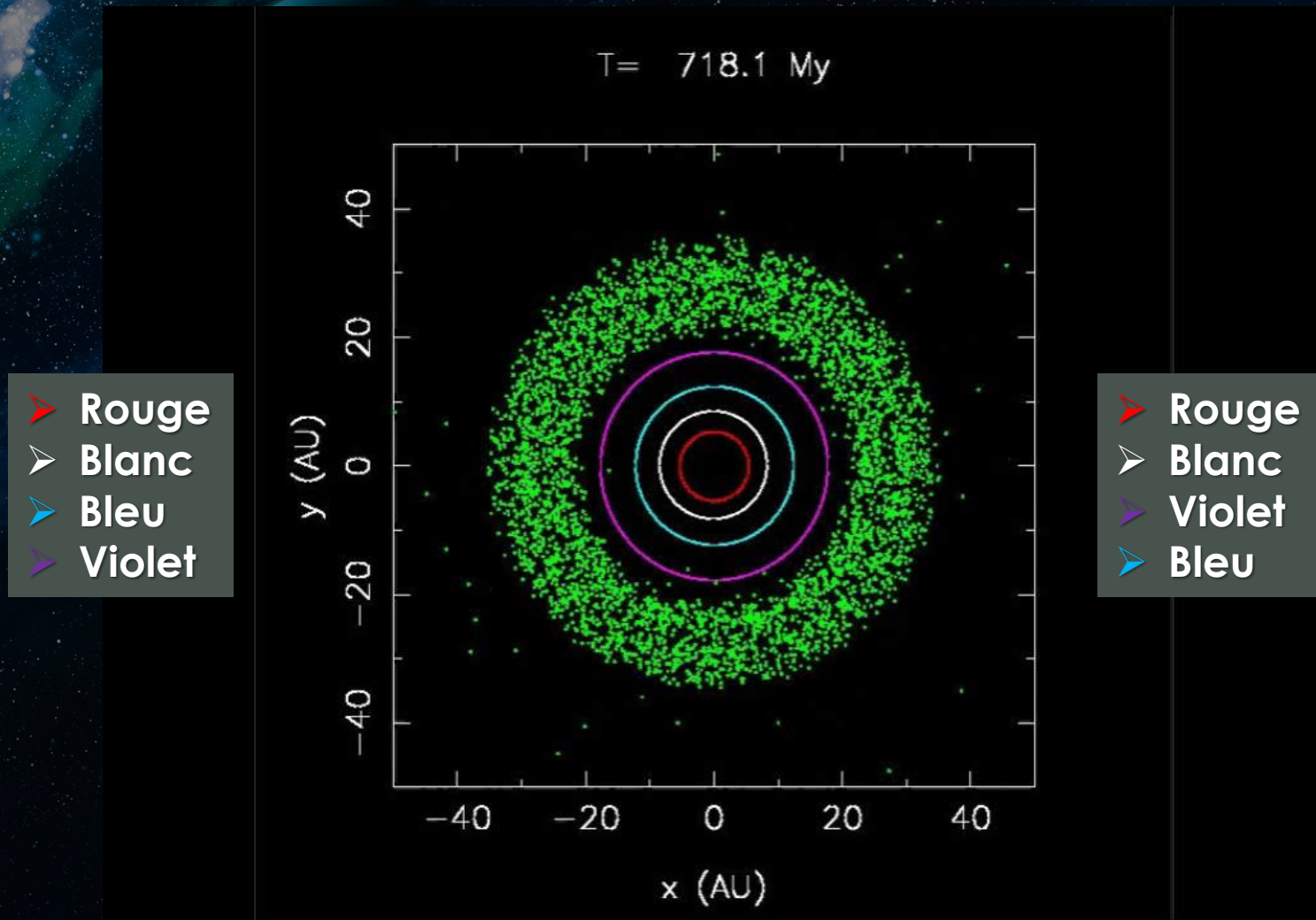
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ L'état des lieux...

- Neptune et Uranus vont inverser leurs orbites.
- Finalement, Jupiter et Saturne vont trouver une résonance stable de 5:2
- Les distance orbitales sont (en UA):
 - Jupiter = 5,2
 - Saturne = 9,5
 - Uranus = 19,2
 - Neptune = 30



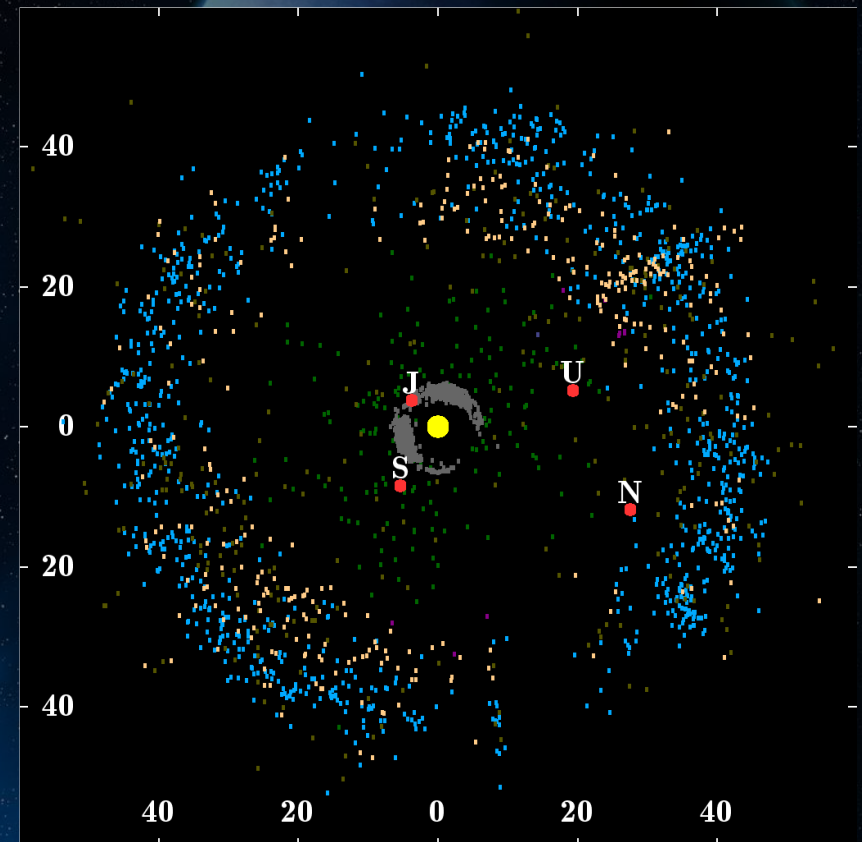
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- L'état des lieux...
 - Mais les planètes géantes ne sont pas seules dans ce recoin de l'espace.
 - Entre 2 et 35 UA, il y a nombre de petits corps et de planétésimaux.

La masse totale des
« petits objets » $\sim 35 M_{\oplus}$

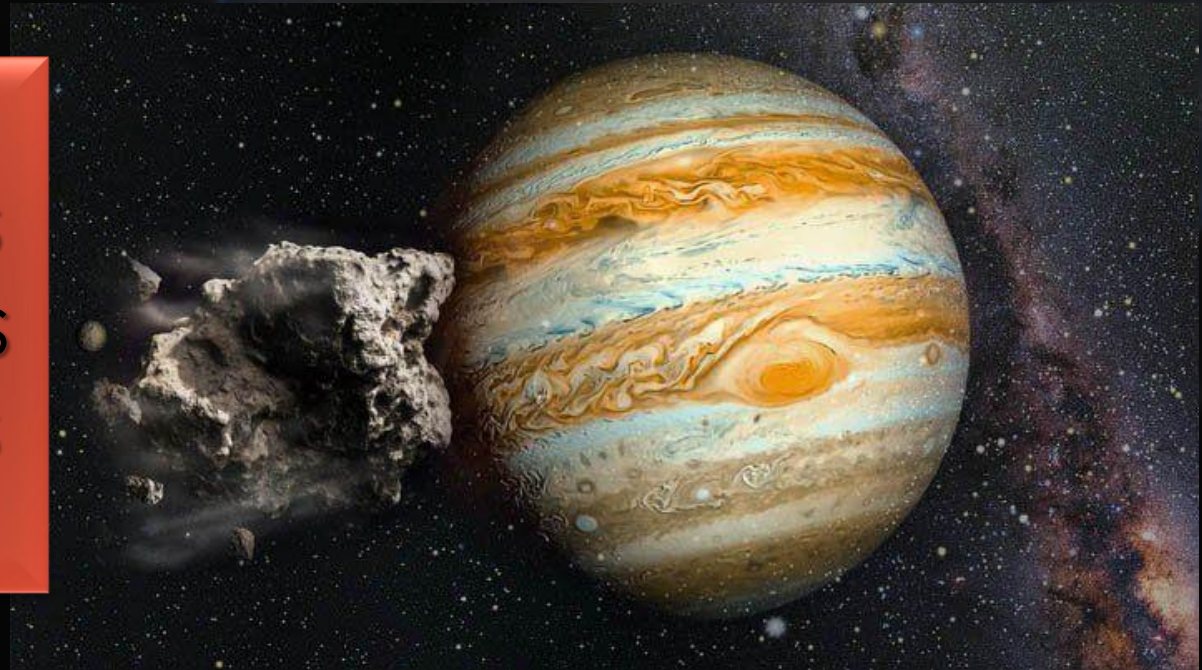


LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ L'état des lieux...

- Jupiter va perturber les orbites et précipiter mains astéroïdes (surtout des chondrites carbonées) vers l'intérieur du Système solaire.

Ces
chondrites
carbonées
sont riches
en eau.



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ L'état des lieux...

- Quant à Uranus et Neptune, elles vont entrer comme des chiens dans un jeu de quilles et précipiter des corps célestes riches en glaces de toutes sortes à qui mieux mieux dans tous les sens.
 - En perturbant les orbites de tout un chacun
 - En expulsant certains du Système solaire
 - En précipitant certains sur le Soleil

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF



ALL NEW
MYTHBUSTERS
WEDNESDAY 9P



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

➤ L'état des lieux...

- En se précipitant les uns vers le Système solaire interne, ces corps célestes riches en eau vont engendrer maintes cicatrices sur les planètes et satellites dont on voit toujours la trace.
- Ce **Grand bombardement** aurait duré ≈ 150 Ma.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

*Bel astre solitaire qui meurt
quand revient le jour.*

Luc Plamondon



© Russell Croman

*Je viens voir à la brune,
Sur le clocher jauni,
La lune
Comme un point sur un i.
Alfred de Musset*

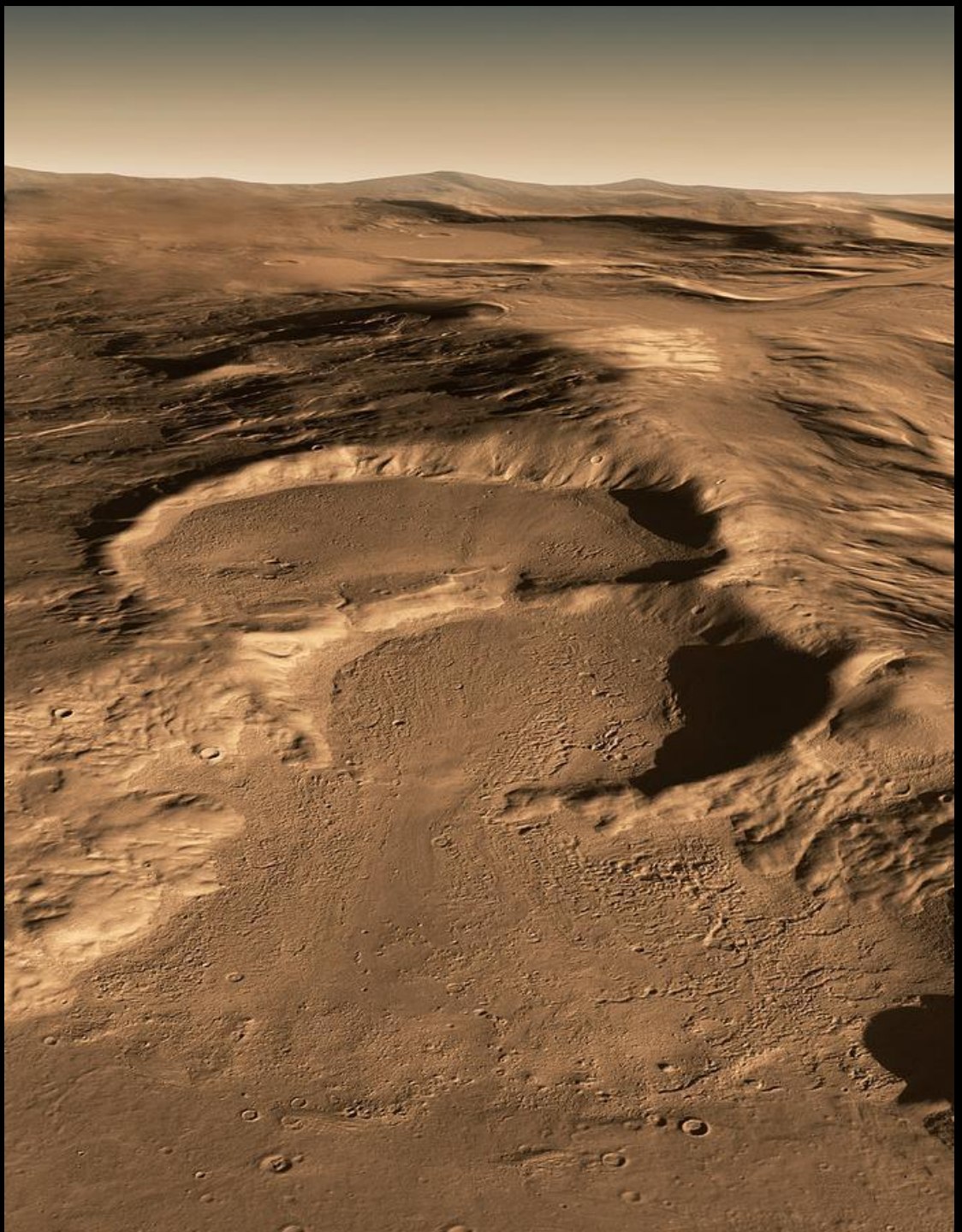


*On ne fait de tout bois
l'image de Mercure,
Dit le proverbe vieil.
Joachim du Bellay*



*Planète tu parais nager
dans un sang rouge.*

Albert Lozeau





*Le jour pousse la nuit,
Et la nuit sombre
Pousse le jour qui luit
D'une obscure ombre.*

Albert Lozeau

➤ Il est difficile
d'estimer le
nombre
d'astéroïdes qui
ont frappé la
Terre au cours
du Grand
bombardement
tardif.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Et s'il n'en reste pas de trace, c'est que la tectonique des plaques et l'érosion en ont effacé l'outrage.

214 Ma

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Le rythme du bombardement est estimé à $\pm 20\,000$ fois celui actuellement observé sur Terre.
- Soit l'impact d'un objet de plus d'un kilomètre tous les 20 ans.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- D'où provenaient tous ces objets qui ont frappé la Terre,
- Et de quelle nature étaient-ils ?



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

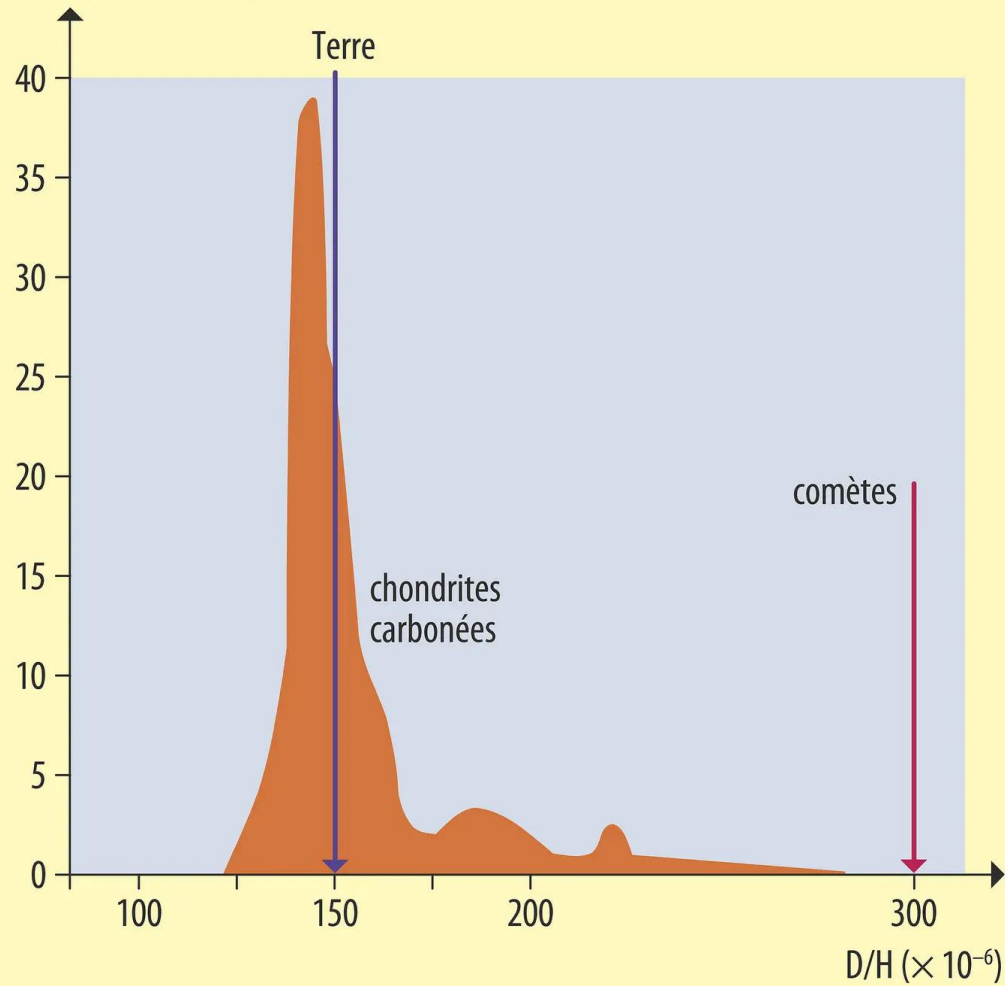
- La grande majorité d'entre eux semble avoir été des chondrites carbonées.
- Jusqu'à 20 % de leur masse en eau.
- Un $\delta^2\text{H}$ semblable à celui des matériaux terrestres

Source	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Terre (manteau)	-218
Chondrite-C	-380 à -590
Chondrite-S	-152 à -455



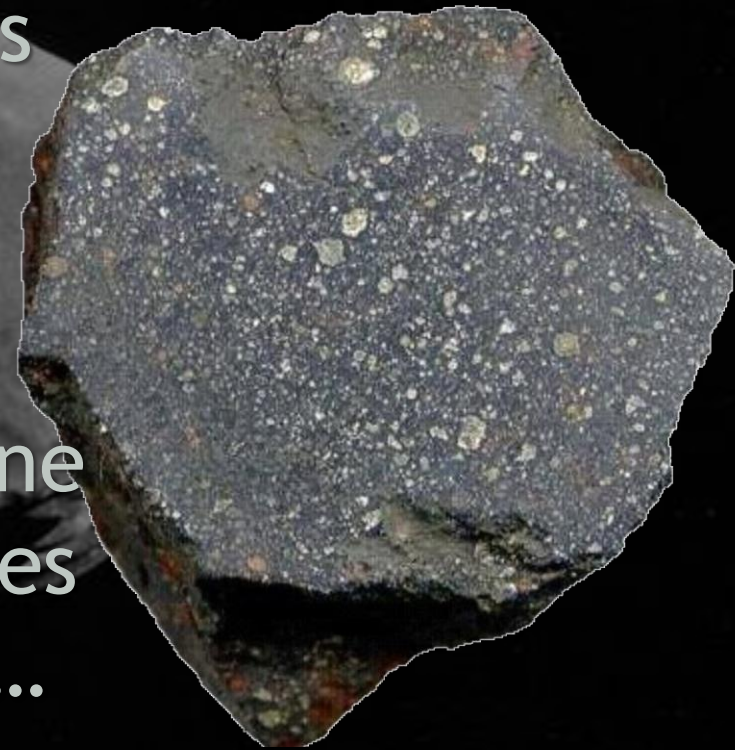
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

nombre de météorites



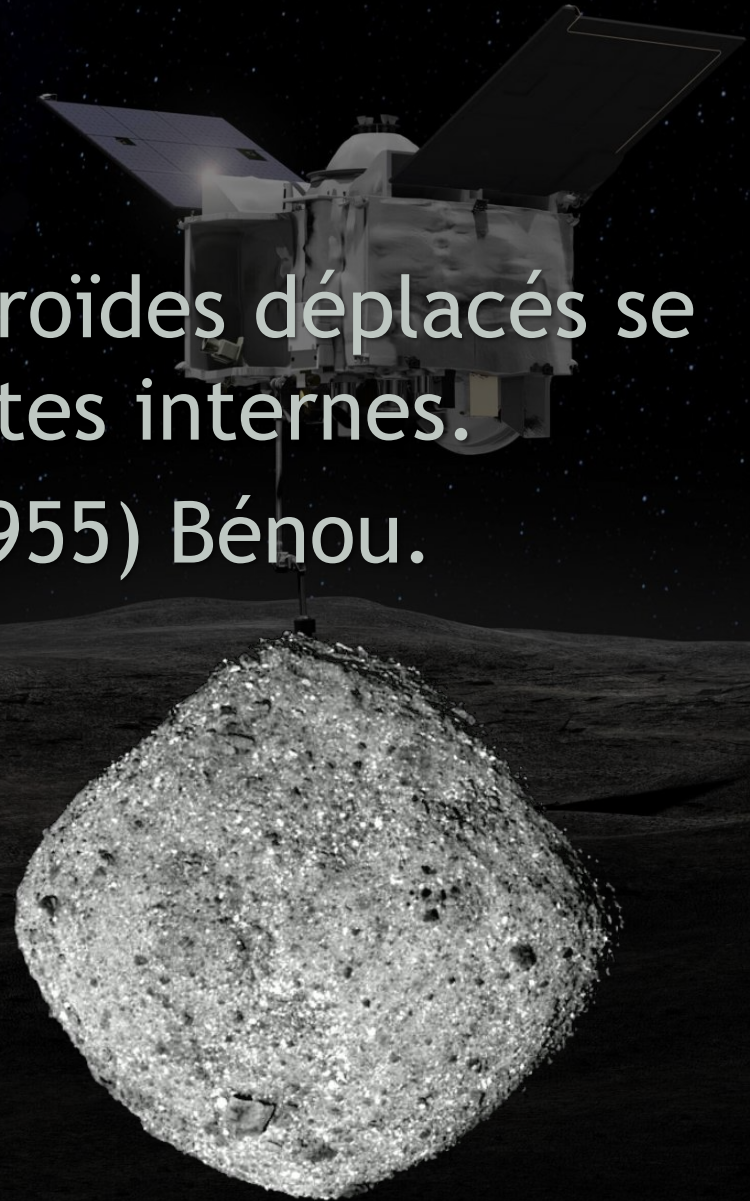
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Ainsi, une partie de l'eau fut livrée à notre planète par des cargos de l'espace pour que nous puissions exister.
- Et ces transporteurs étaient de plus alourdis d'une cargaison de carbone et de molécules organiques assurant la vie, notre vie...



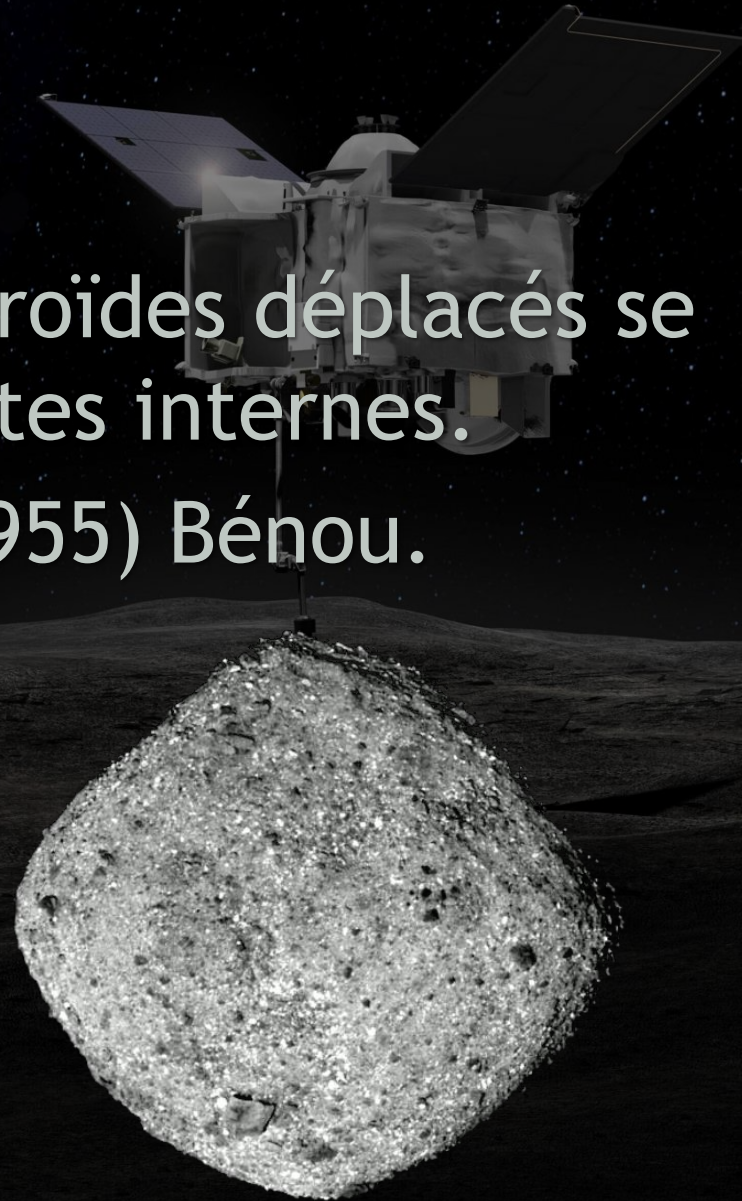
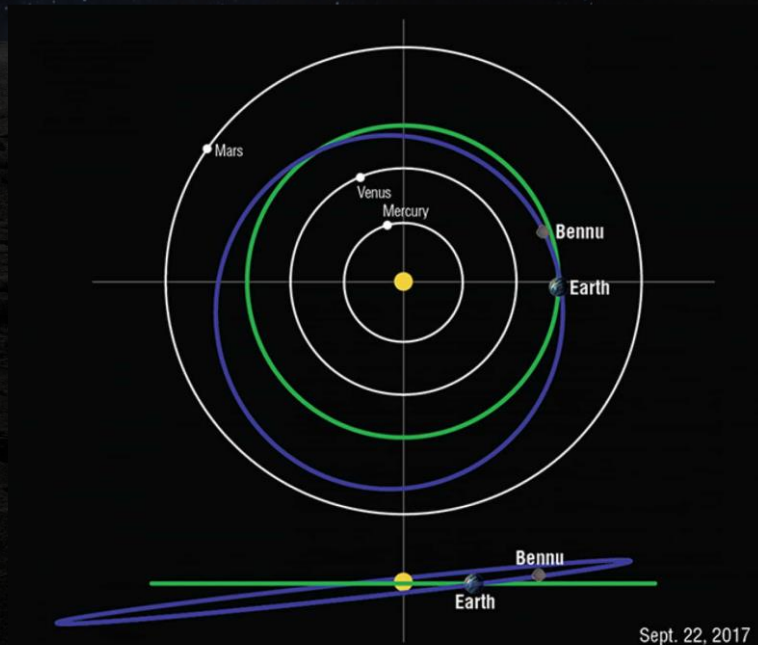
LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Certains de ces astéroïdes déplacés se sont mis sur des orbites internes.
- C'est le cas de (101955) Bénéou.
 - Diamètre = 500 m
 - Orbite 1,2 ans



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Certains de ces astéroïdes déplacés se sont mis sur des orbites internes.
- C'est le cas de (101955) Bénéou.



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Certains de ces astéroïdes déplacés se sont mis sur des orbites internes.
- C'est le cas de (101955) Bénéou.
 - Diamètre = 500 m
 - Orbite 1,2 ans
 - C'est un géocroiseur de type Apollo



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF



- Certains de ces astéroïdes déplacés se sont mis sur des orbites internes.
- C'est le cas de (101955) Bénéou.

➤ Sonde Osiris-Rex

- Arrivée à Bénéou en 2018
- Collecte d'échantillons en 2020
- Retour du Terre le 24 septembre 2023 avec 60 gr de matériel.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

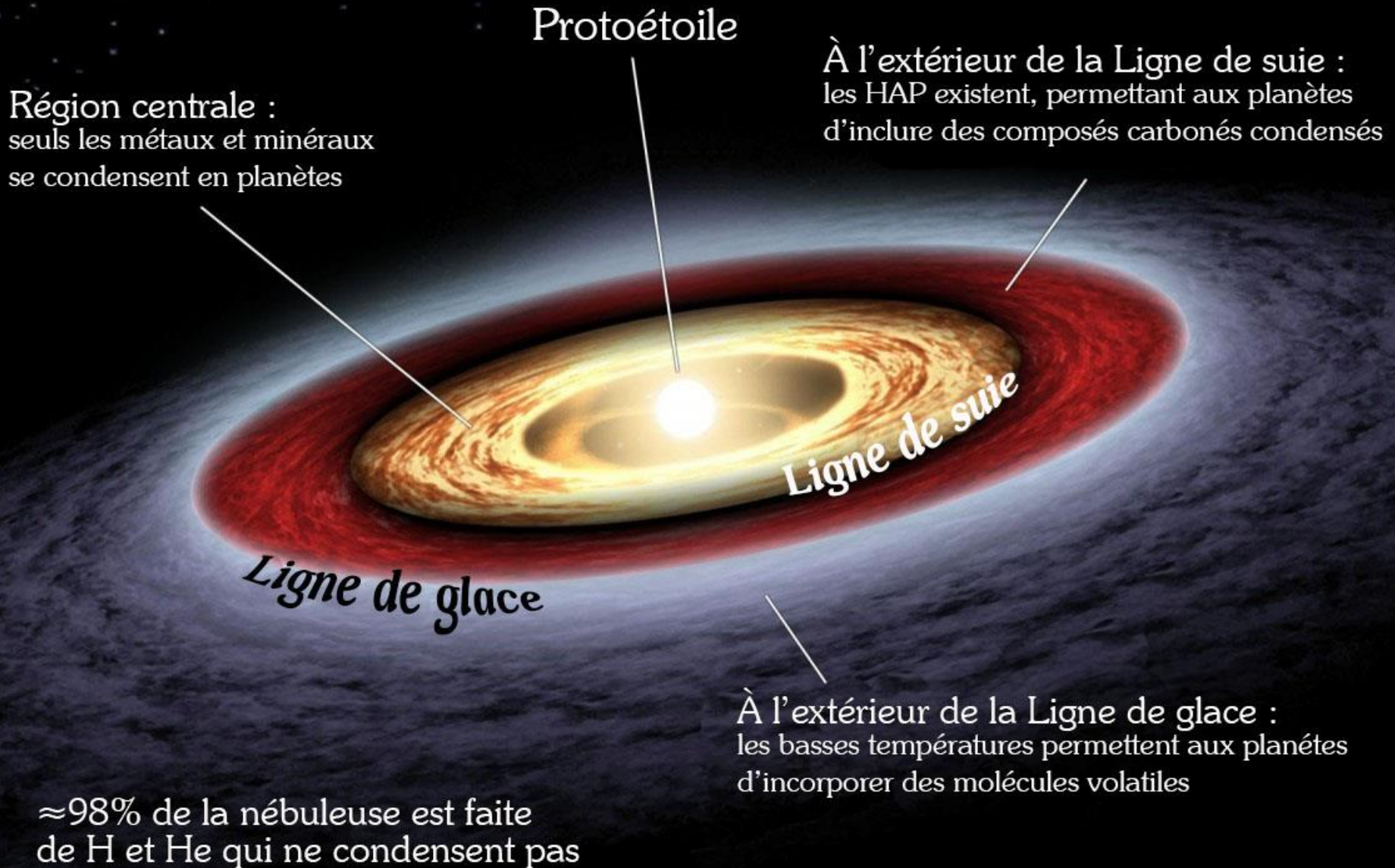
- 
- A satellite with two large solar panels is shown in orbit against a starry background.
- Bénéou est une chondrite carbonée.
 - On y a trouvé de bonnes quantités de composés organiques complexes.

Composition of Organics on Asteroid (101955)

Bennu

H. H. Kaplan¹, A. A. Simon¹, V. E. Hamilton², M. S. Thompson³, S. A. Sandford⁴, M. A. Barucci⁵, E. A. Cloutis⁶, J. Brucato⁷, D. C. Reuter¹, D. P. Glavin¹, B. E. Clark⁸, J. P. Dworkin¹, H. Campins⁹, J. P. Emery¹⁰, S. Fornasier^{5, 11}, X. D. Zou¹², and D. S. Lauretta¹³

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF



D'où vient l'eau sur Terre ?

- On estime que les apports *exogènes* en eau représentent l'équivalent d'une fois le volume total de l'eau des océans.
- On estime que les apports *endogènes* en eau pourraient représenter environ quatorze fois le volume total de l'eau des océans.

LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Quel a pu être l'apport des comètes et des objets du Système solaire lointain ?
- Le $\delta^2\text{H}$ des comètes varie beaucoup, mais est le plus souvent >>> que celui de la Terre.



LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Le $\delta^2\text{H}$ de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko est de $5,3 \times 10^{-4}$, soit 3 fois plus grand que celui retrouvé sur Terre.
- On estime que moins de **10 %** de l'eau terrestre provenant de sources exogènes est venue des comètes.

Science

67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio

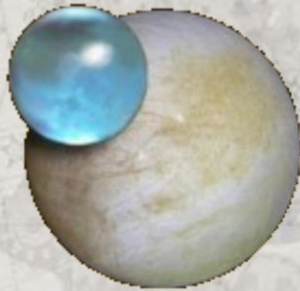
K. ALTWEGG, H. BALSIGER, A. BAR-NUN, J. J. BERTHELIER, A. BIELER, P. BOCHSLER, C. BRIOIS, U. CALMONTE, M. COMBI, [...], AND P. WURZ

+22 authors

SCIENCE • 11 Dec 2014 • Vol 347, Issue 6220 • DOI: [10.1126/science.1261952](https://doi.org/10.1126/science.1261952)

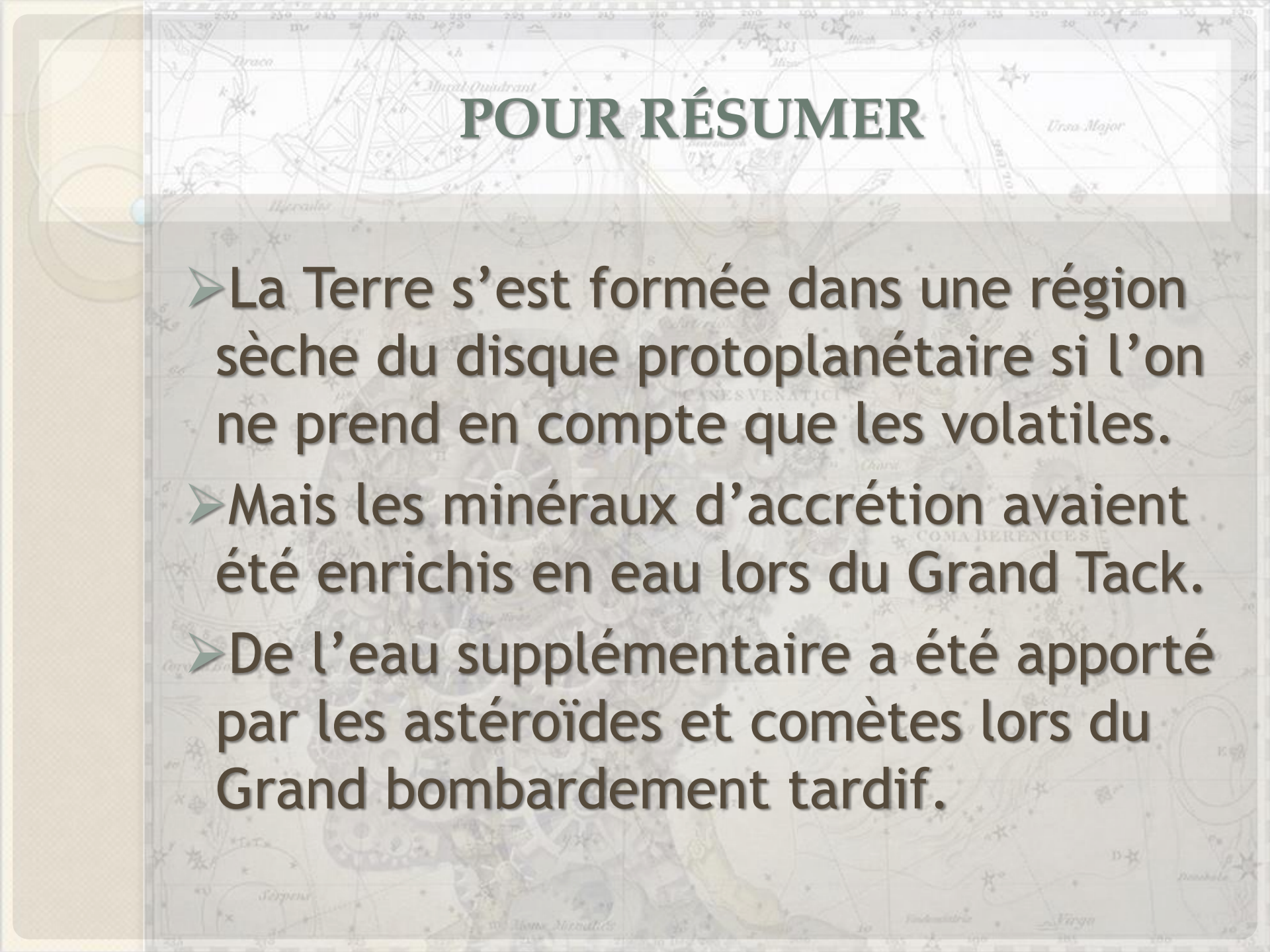
REPRÉSENTATION BOITEUSE

- L'eau ne ferait que 0,34 % de la masse de la Terre



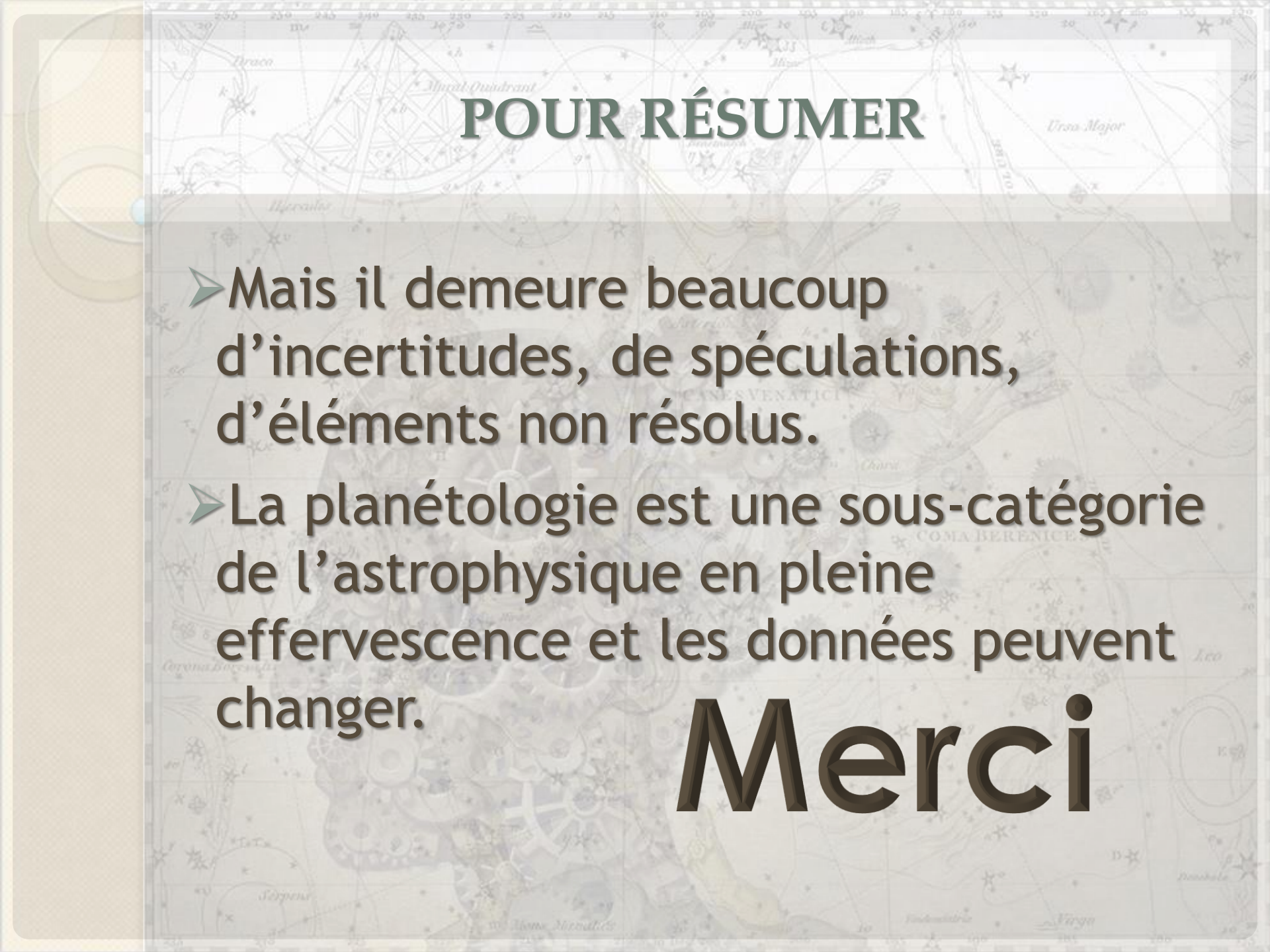
Même si on ↑ le volume de la sphère d'eau par **15**

- L'eau fait 6,85 % de la masse d'Europe



POUR RÉSUMER

- La Terre s'est formée dans une région sèche du disque protoplanétaire si l'on ne prend en compte que les volatiles.
- Mais les minéraux d'accrétion avaient été enrichis en eau lors du Grand Tack.
- De l'eau supplémentaire a été apporté par les astéroïdes et comètes lors du Grand bombardement tardif.



POUR RÉSUMER

- Mais il demeure beaucoup d'incertitudes, de spéculations, d'éléments non résolus.
- La planétologie est une sous-catégorie de l'astrophysique en pleine effervescence et les données peuvent changer.

Merci