

Origine et évolution de l'atmosphère et des océans

Bernard Marty

Institut Universitaire de France
Université de Lorraine

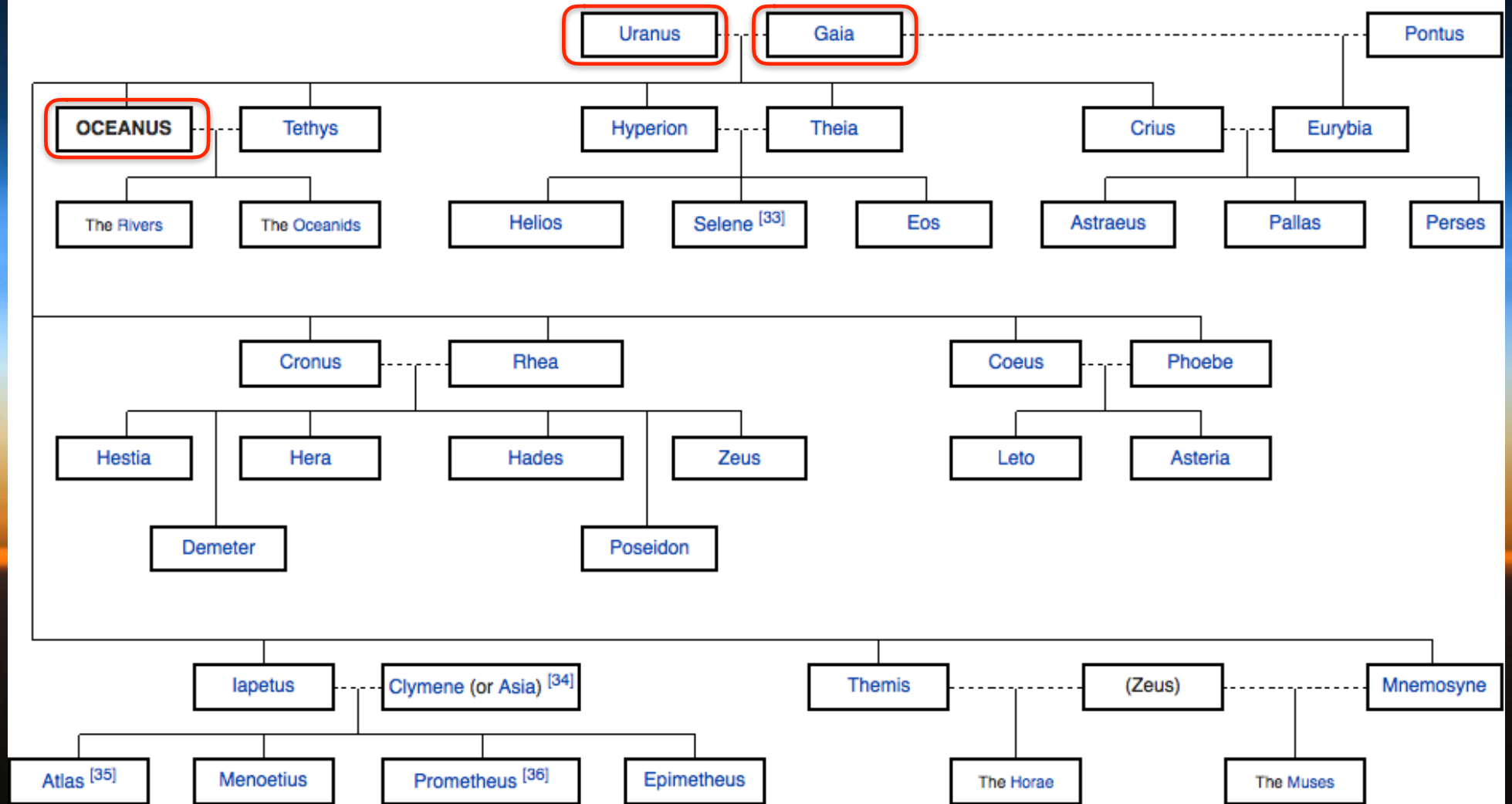
Académie Lorraine des Sciences - 10 Janvier 2019





Oceanus, fontaine de Trévi, Rome

Oceanus's family tree



Le déluge, événement fondateur dans la tradition judéo-chrétienne





Systema Ideale Quo Expremitur Aquarum
in: Mundus Subterraneus, Athanasius Kircher (1665)

Ignis centralis A. undiq; et undiq; per pyraeas canales exhalationes spiritus ignis diffundit; his hydrophylacae impactae, partim in thermas disponit partim in vapores attenuat; qui concavorum antroꝝ fornicibus illis, frigore loci condensati in aquas deniq; resoluti fontes rursus generant; partim in aliis divercorum mineralium succis factis matricis deripat; in metallica corpora coalescunt, aut in novam combustibilem materiam foeturam ad ignis nutrimentum defluunt. Haec hic quoq; quomodo. Mare ventis et aere pressum vel agitur, aquas per subterraneos cuniculos in altissima montium hydrophylacia gignitur. Sed Figura te melius docet omnia, quam ego fustibus verbis explicarem. Vide quoq; Subterraneum Orbem, in extrema superficie terra, mare camporum subcepit, et hinc aerem in schema docet. Reliqua exactius ac ipsa opera descriptione et rationibus patebunt.



Il ya très très longtemps.... plus de 4,5 milliards d'années



Crédits : Bill Saxton/NRAO/AUI/NSF

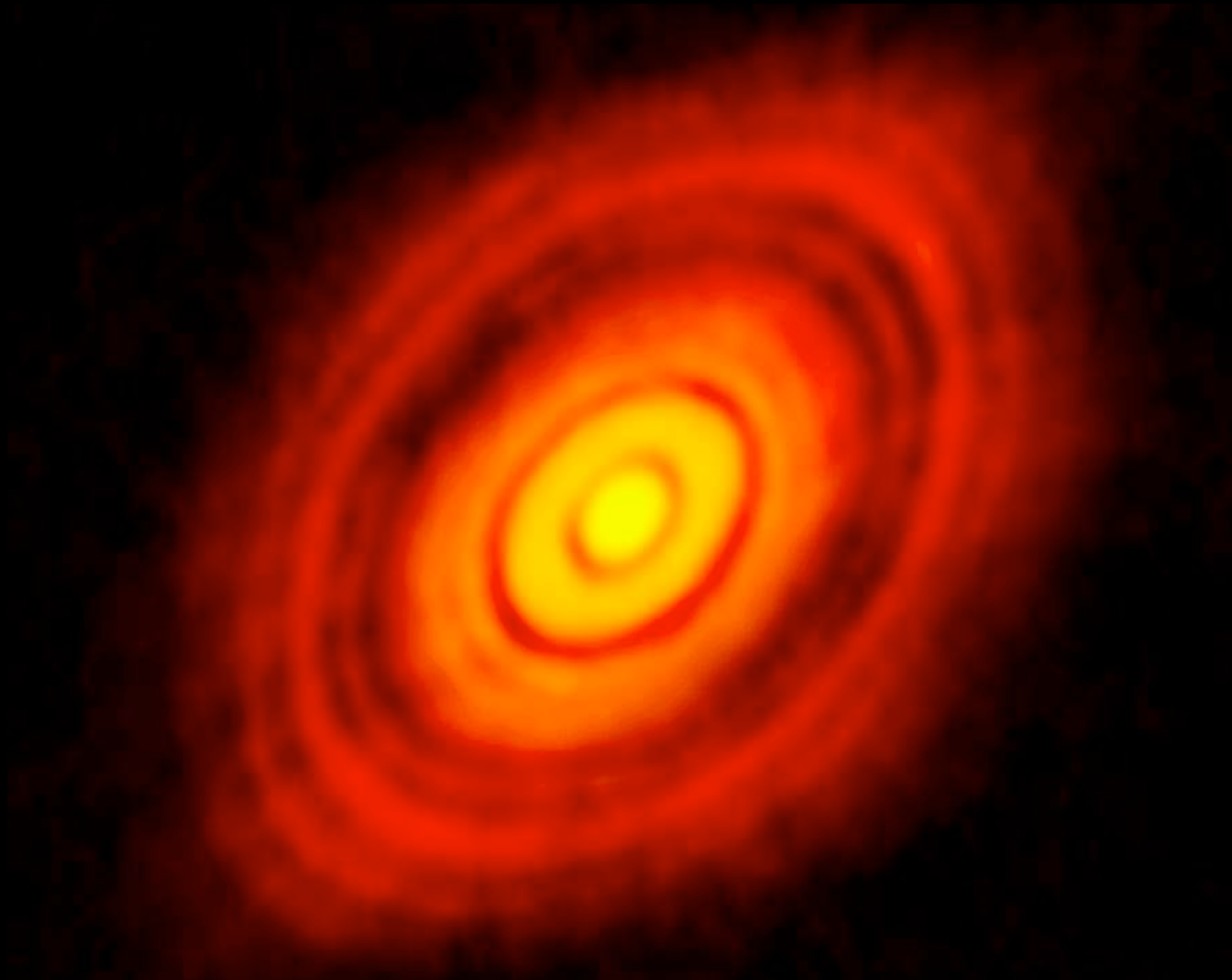


Il ya très très longtemps.... plus de 4,5 milliards d'années





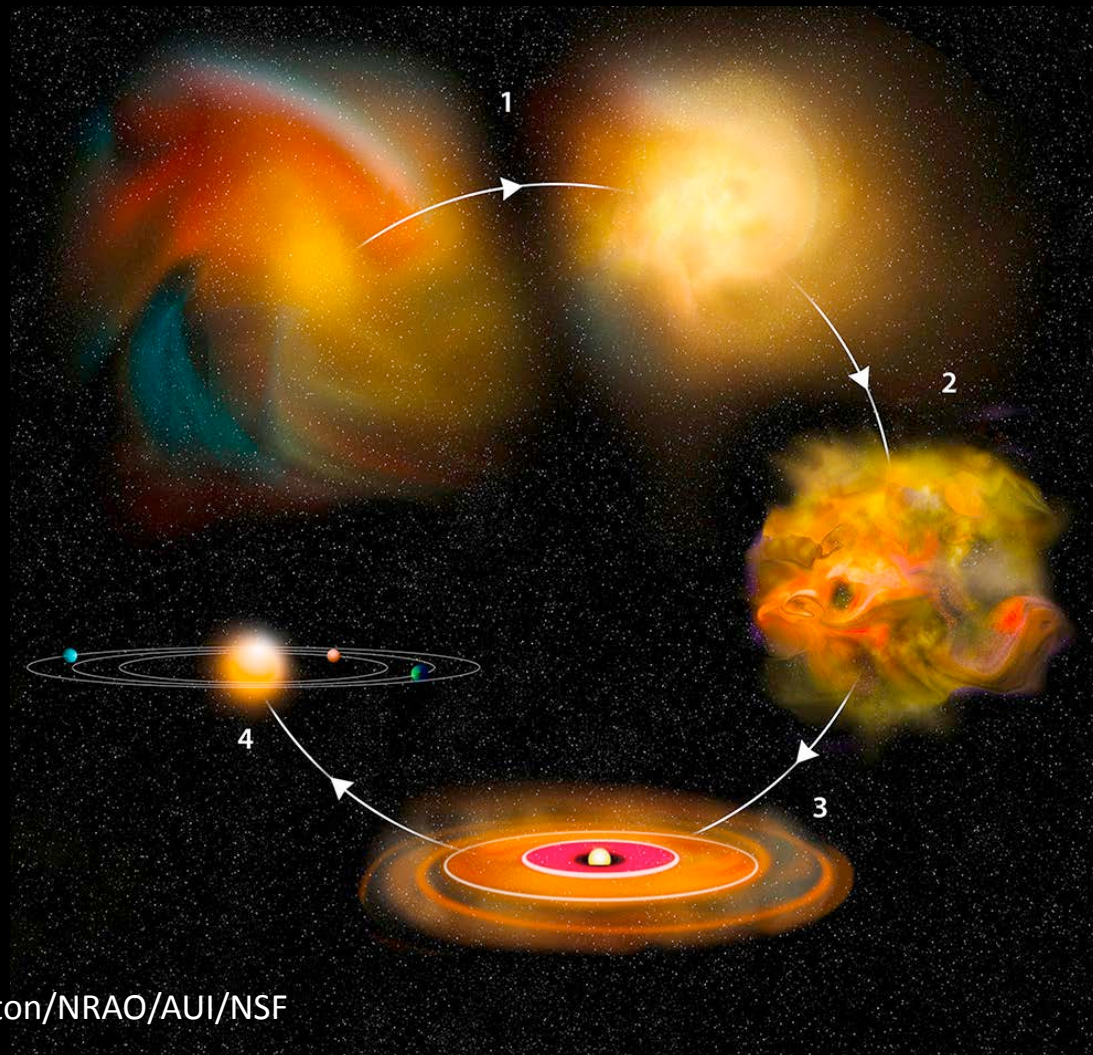
Image ALMA (système de télescopes au Chili) d'une jeune étoile T-Tauri
et de son disque protoplanétaire



Credit: ALMA (NRAO/ESO/NAOJ)

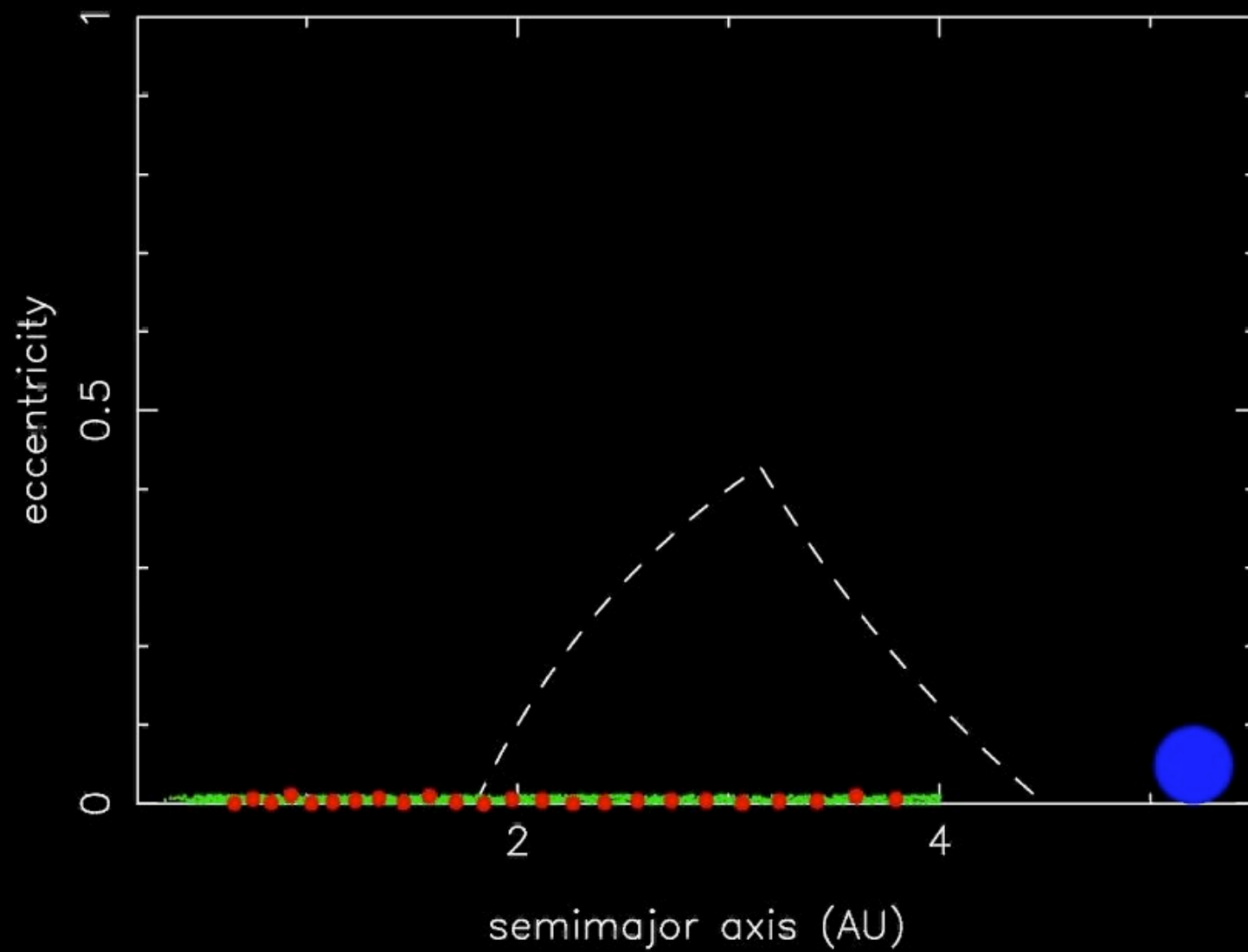


Il y a 4,5 milliards d'années



Crédits : Bill Saxton/NRAO/AUI/NSF

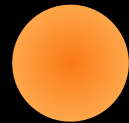
T= 0.0 My



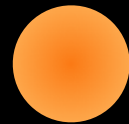
En résumé

Proto Soleil

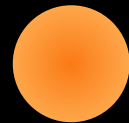
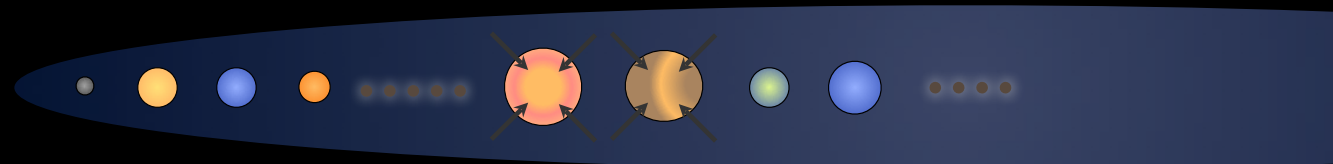
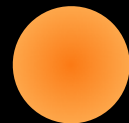
Disque proto-planétaire



Gaz + poussière

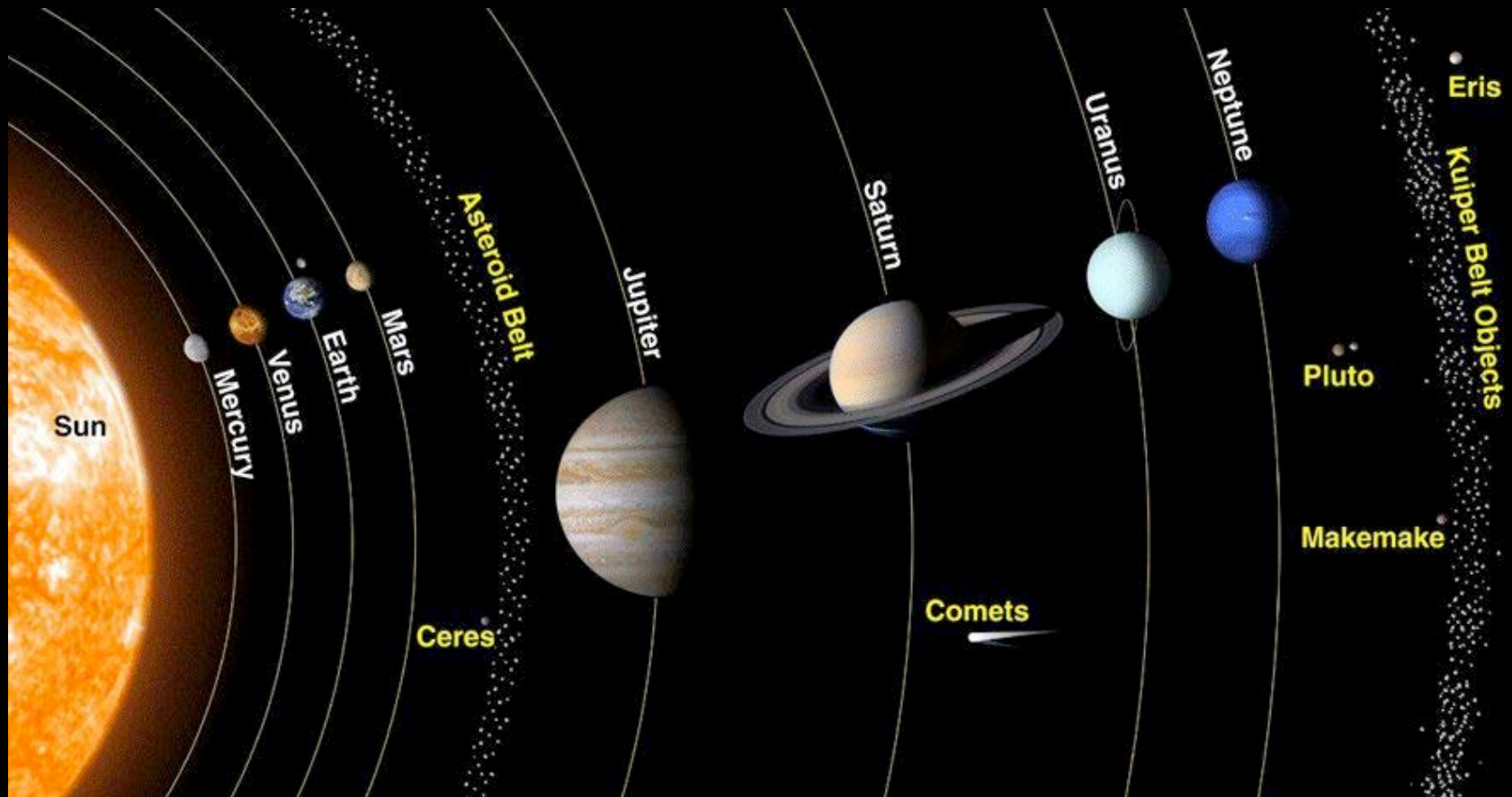


Planétésimaux

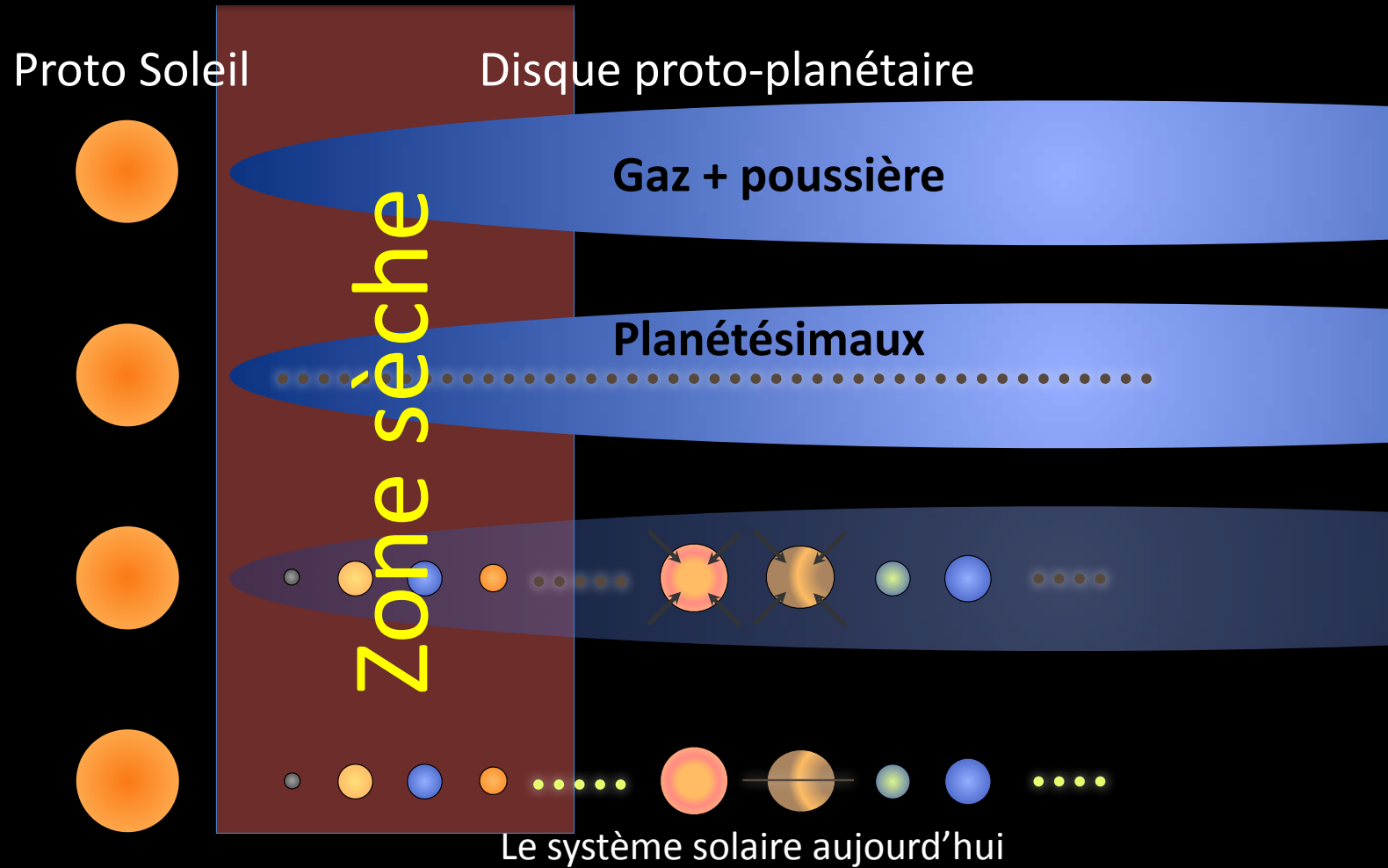


Le système solaire aujourd'hui

Courtesy : S. Tachibana



Origine des éléments volatils (eau, halogènes) sur Terre



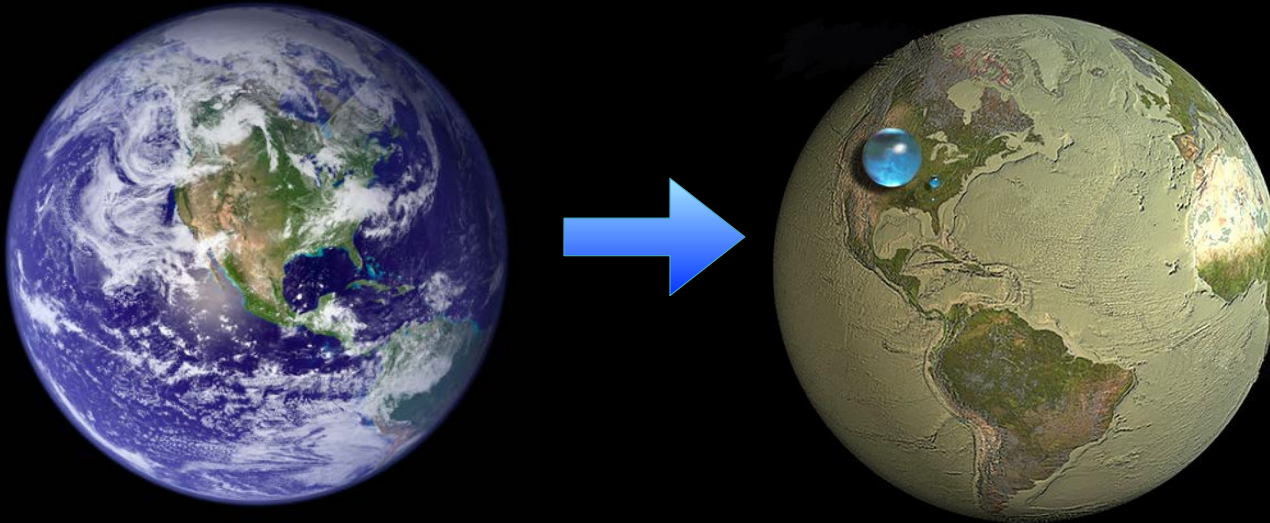
Courtesy : S. Tachibana

La Terre n'est pas très humide

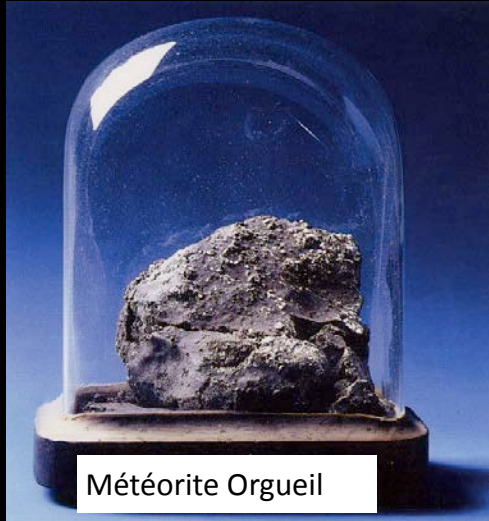
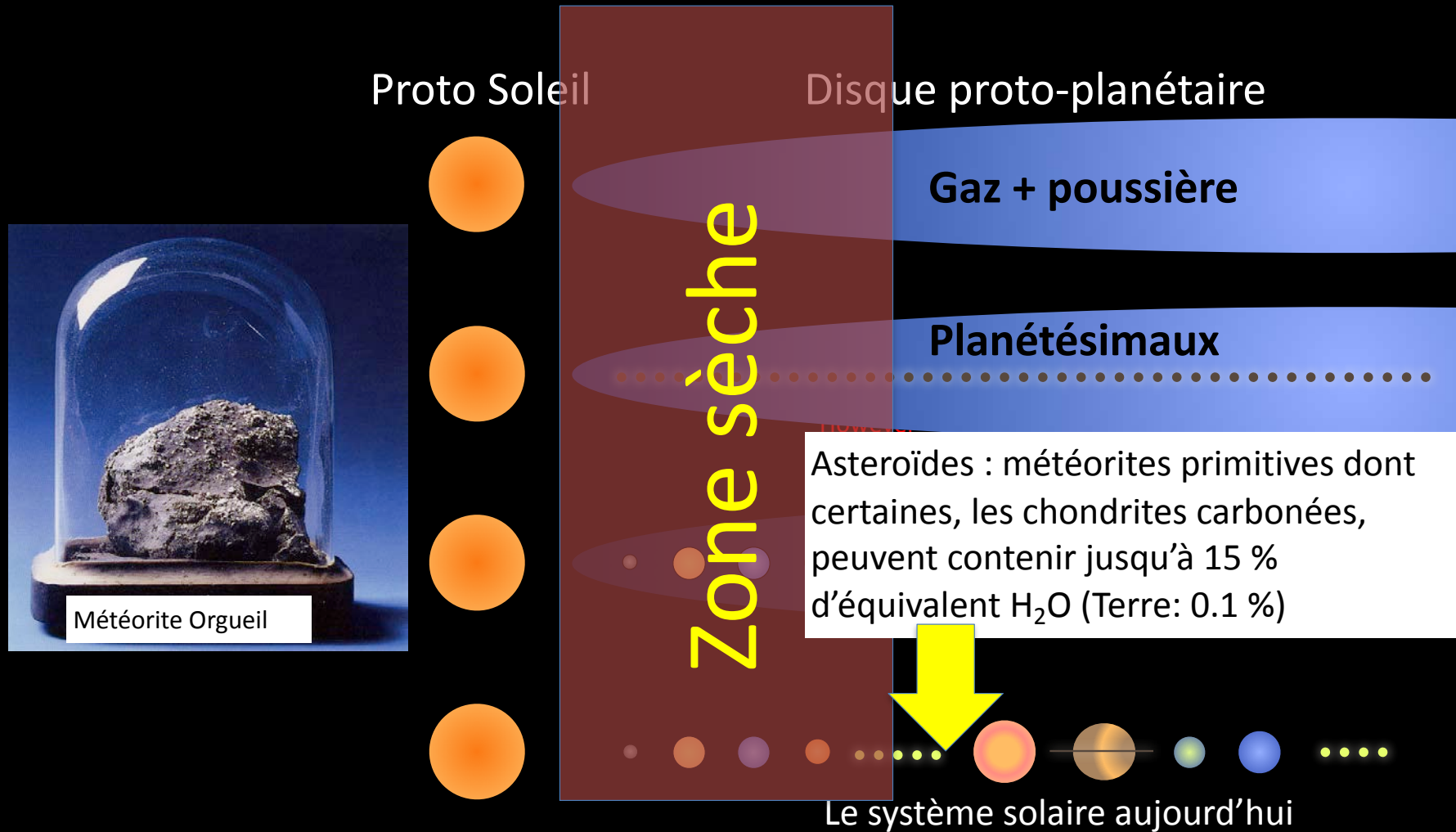
Masse de la Terre: $6 \times 10^{27} \text{ g}$

Masse des océans: $1,5 \times 10^{24} \text{ g}$

soit 0,03 % en masse d'eau sur Terre

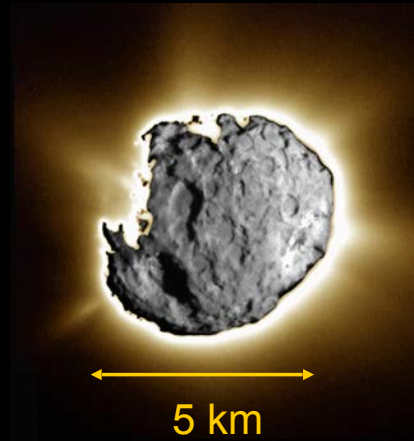
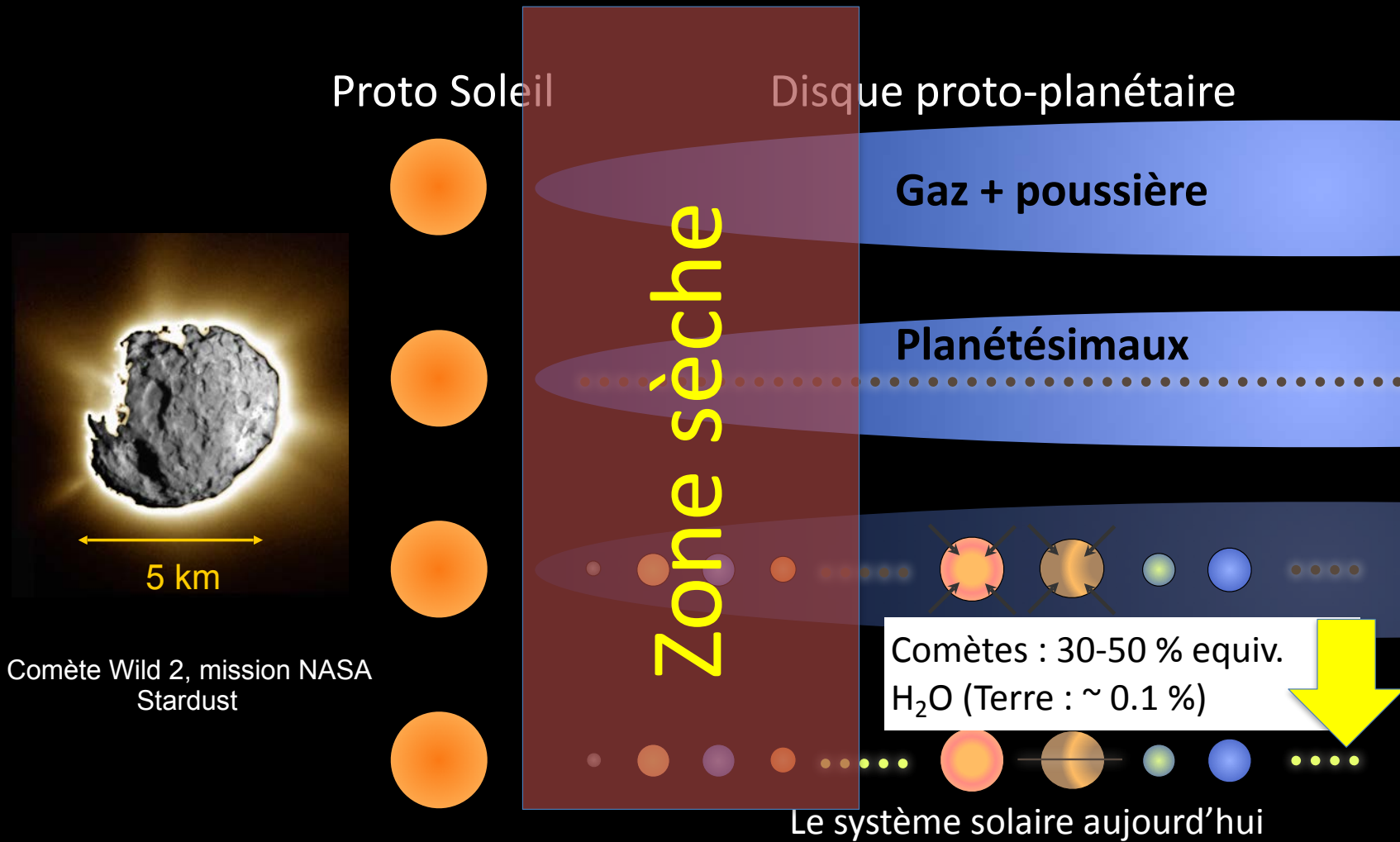


Astéroïdes



Courtesy : S. Tachibana

Les comètes

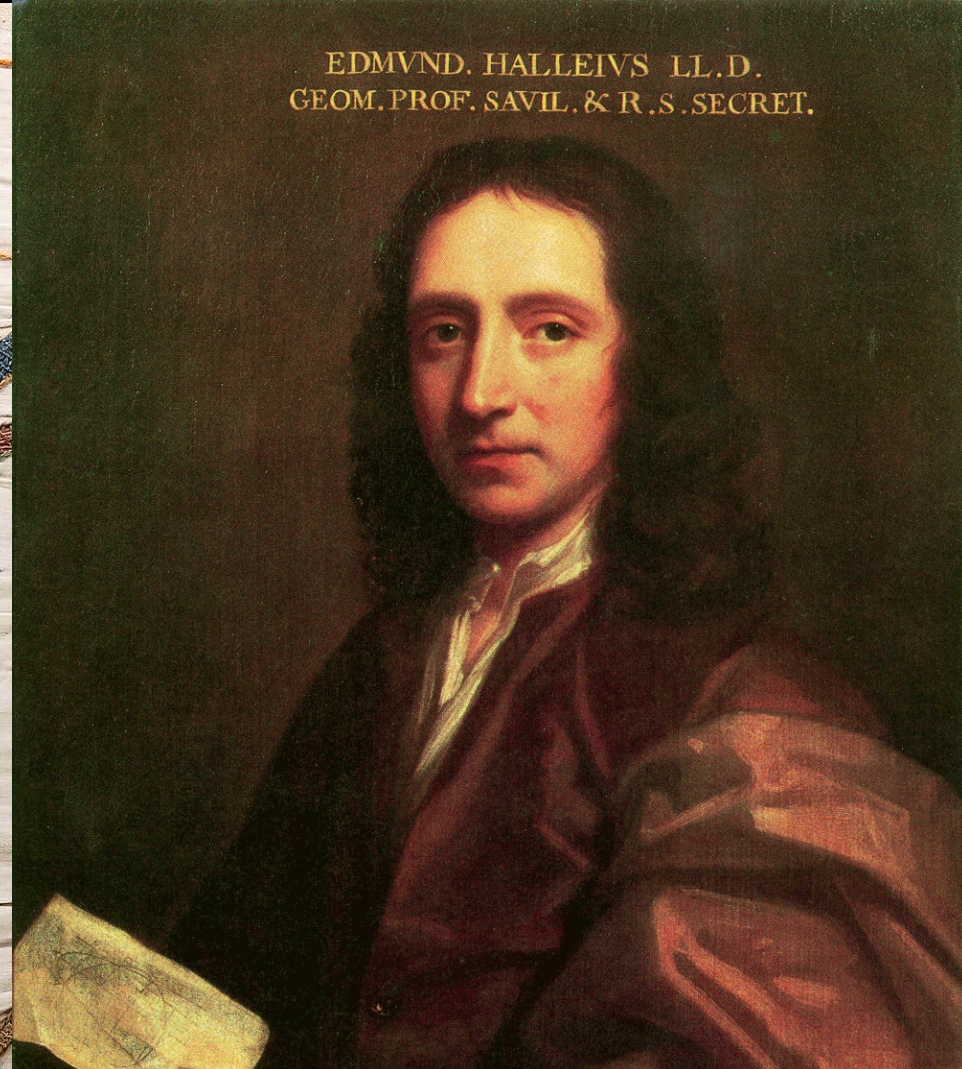


Comète Wild 2, mission NASA
Stardust

Courtesy : S. Tachibana

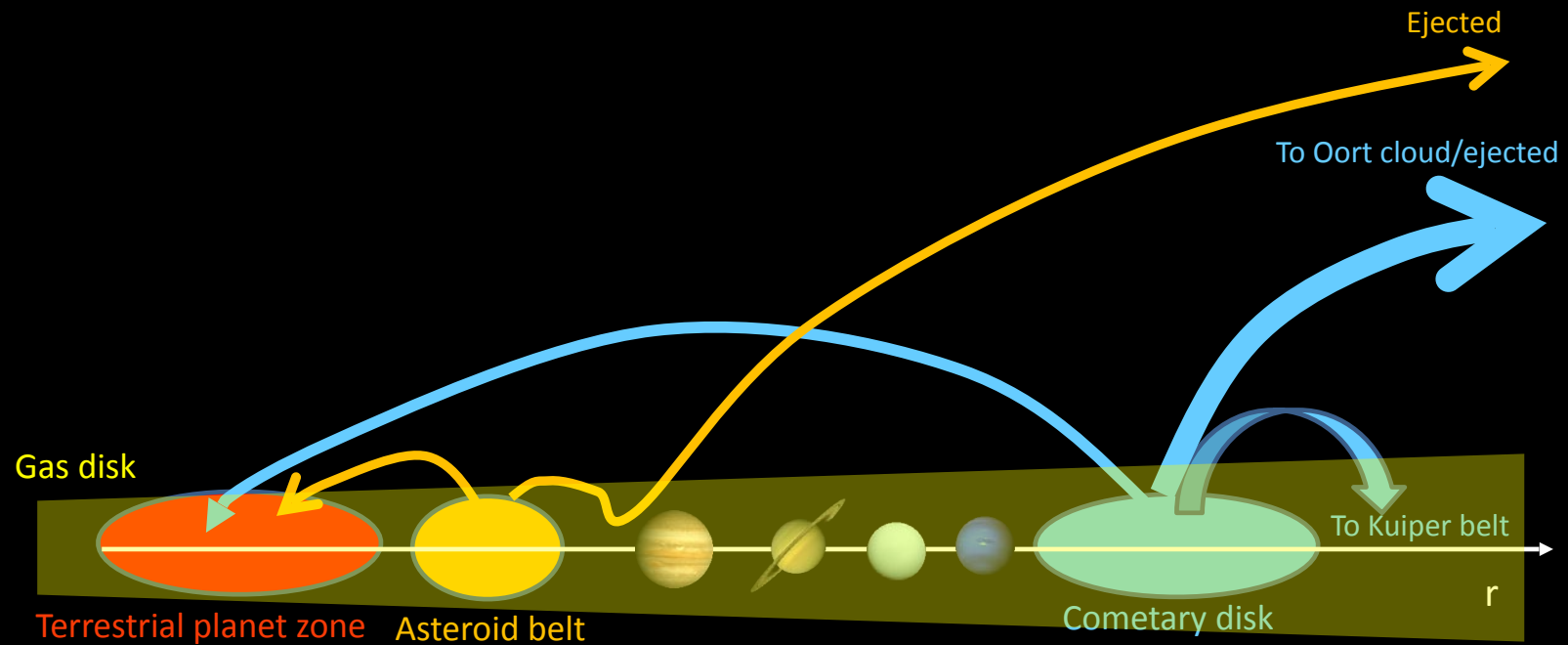


Les comètes



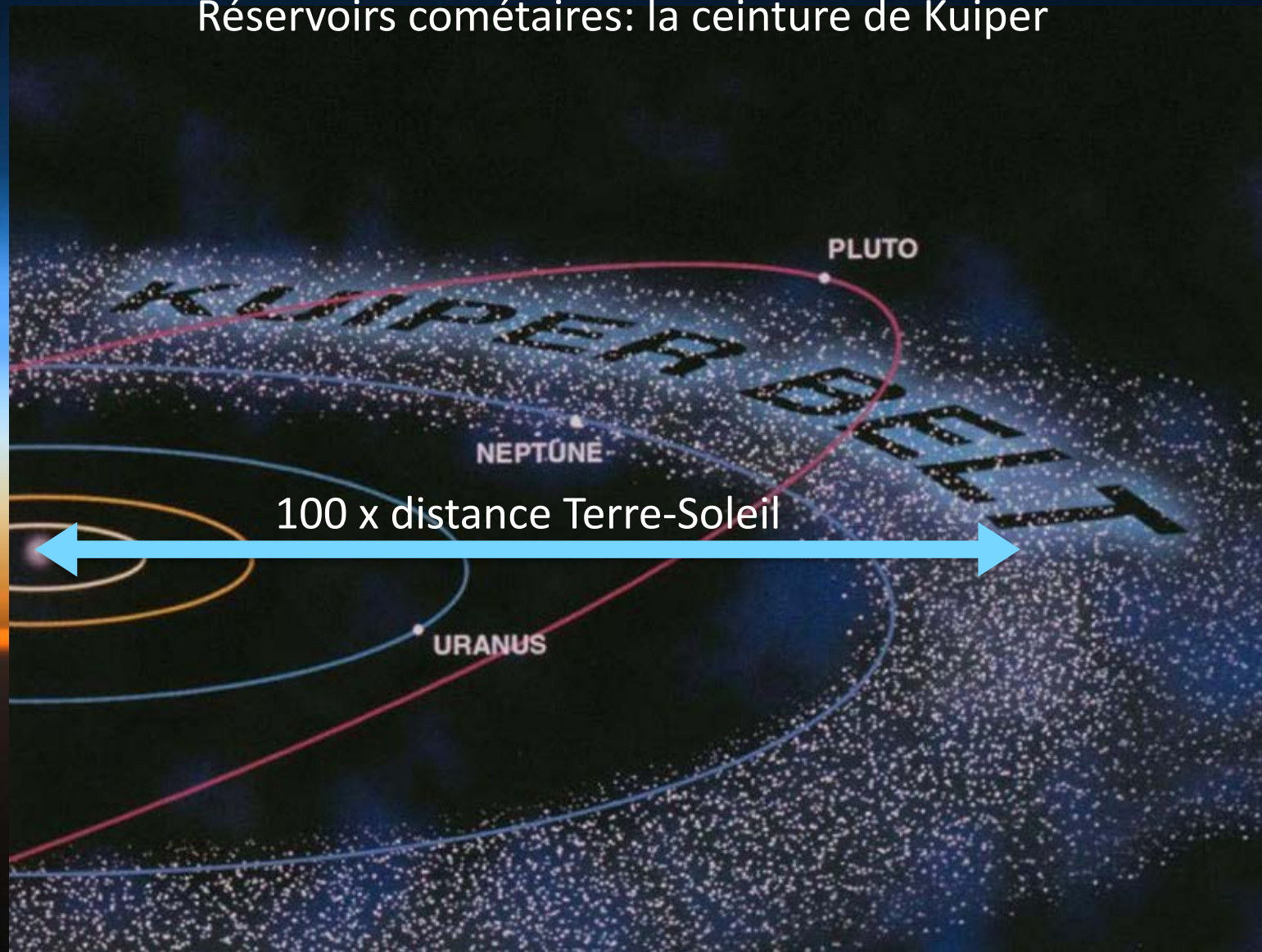


Les astéroïdes et mes comètes ont été déstabilisés durant la migration des planètes géantes

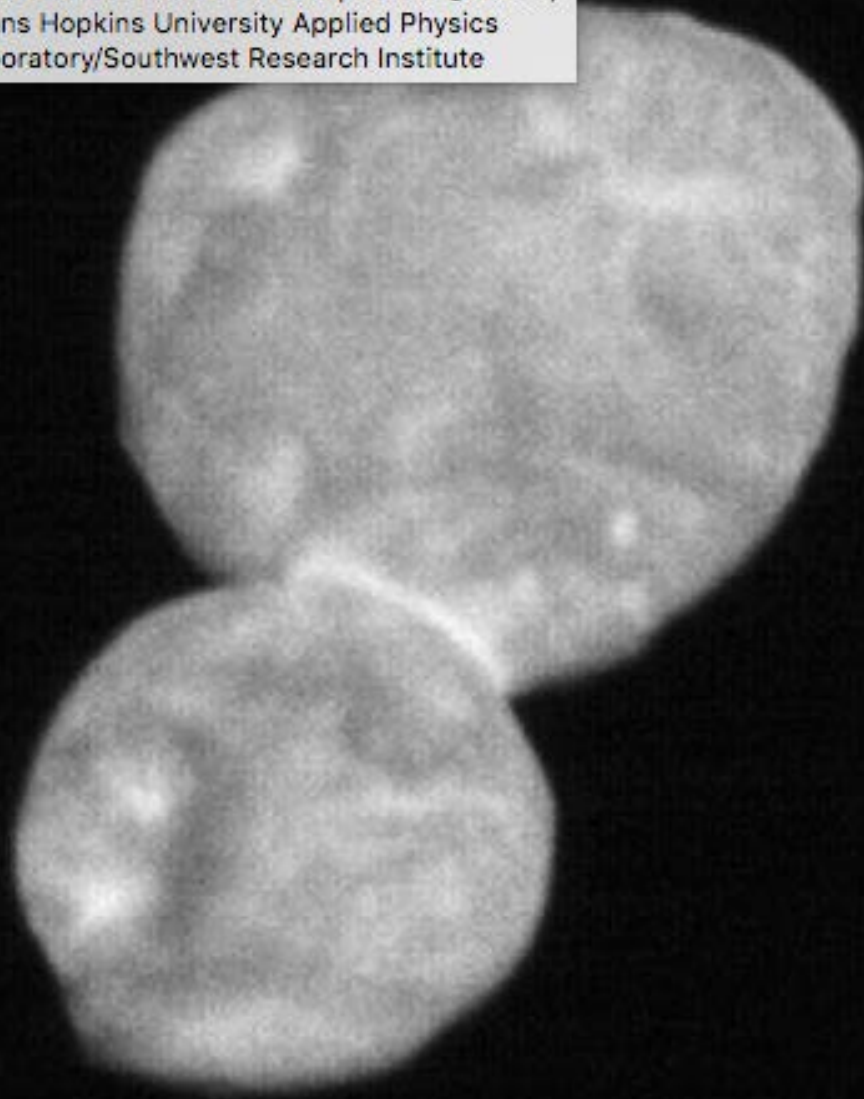


Courtesy: A. Morbidelli

Réservoirs cométaires: la ceinture de Kuiper



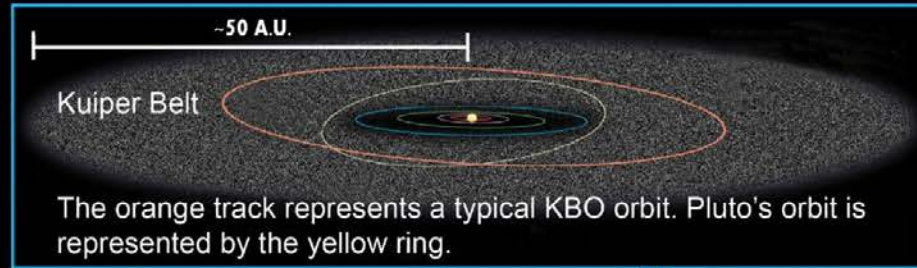
Un astéroïde formé de deux sphères. © NASA/
Johns Hopkins University Applied Physics
Laboratory/Southwest Research Institute



Mission NASA New Horizons

Après une cartographie détaillée de Pluton, la sonde a survolé 2014 MU69, surnommé Ultima Thulé, l'objet visité le plus éloigné de la Terre à ce jour: 6,4 milliards de km, les signaux mettent 6 heures pour nous parvenir

Réservoirs cométaires: le nuage de Oort



50 000 fois distance Terre-Soleil

~50,000 A.U.

Oort Cloud

Today

**Scholz's Star and
companion Brown Dwarf**
~20 Light Years away
Constellation Monoceros

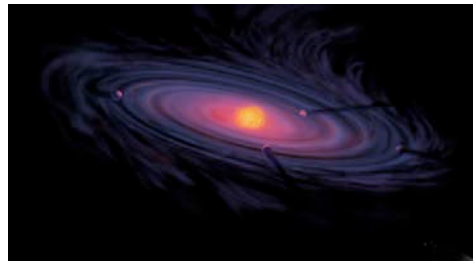
70,000 years ago
Scholz's Star
passed through the outer
reaches of the Oort Cloud



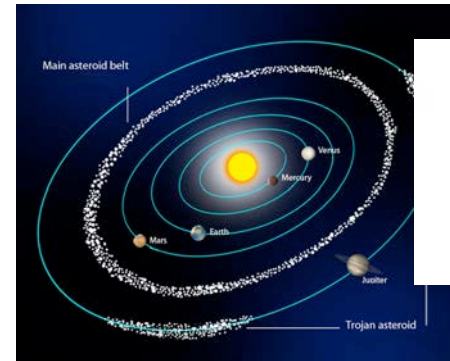
Origine des éléments volatils (eau, halogènes) sur Terre



Contributeurs potentiel de volatils aux planètes terrestres



Gaz solaire (nébuleuse proto-solaire),
(mission NASA Genesis)



Astéroïdes – météorites, chondrites carbonées (AVCC-Xe, Q-gases)
Missions JAXA Hayabusa, Hayabusa2, et NASA Osiris-Rex



NASA/Dan Burbank



Comètes: les moins connus
Mission ESA Rosetta

La mission Rosetta: analyse in-situ d'une comète pendant 2 ans



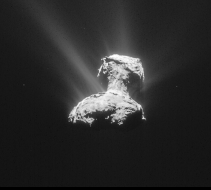
- Mission de l'European Space Agency avec participation NASA
- 1.4 milliards d'Euros, lancée en 2004, 10 ans de voyage
- A survolé 3 planètes et 3 astéroïdes
- Rendez-vous à l'été 2014
- 11 instruments + 1 atterrisseur
- Fin de mission le 20 Octobre 2016

ESA

Comète 67P/Churyumov-Gerasimenko



La mission Rosetta



Formation de la galaxie il y a 12 Ga

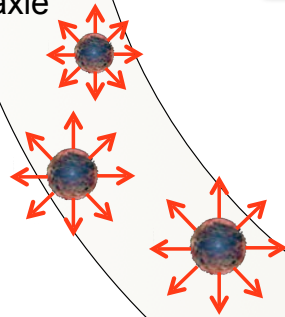


Evolution chimique de la galaxie

Origine de l'atmosphère, des océans et de la matière pré-biotique



contribution cométaire ?



Formation du système solaire il y a 4.567 Ga

Formation des planètes, évolution planétaire, développement de la vie etc...

ASL



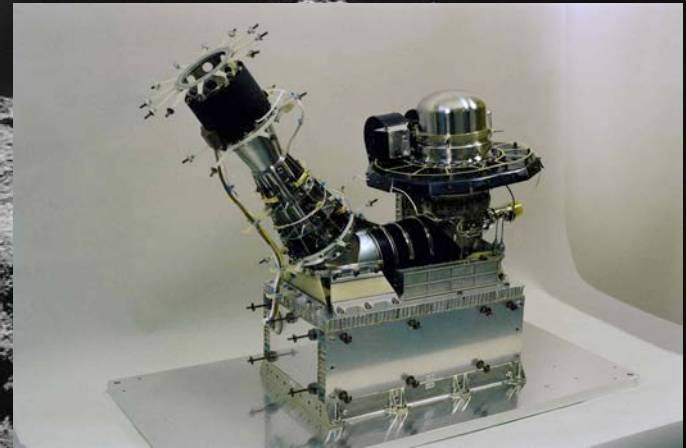
Photo: Alex Cherney

artwork: F. Tissot

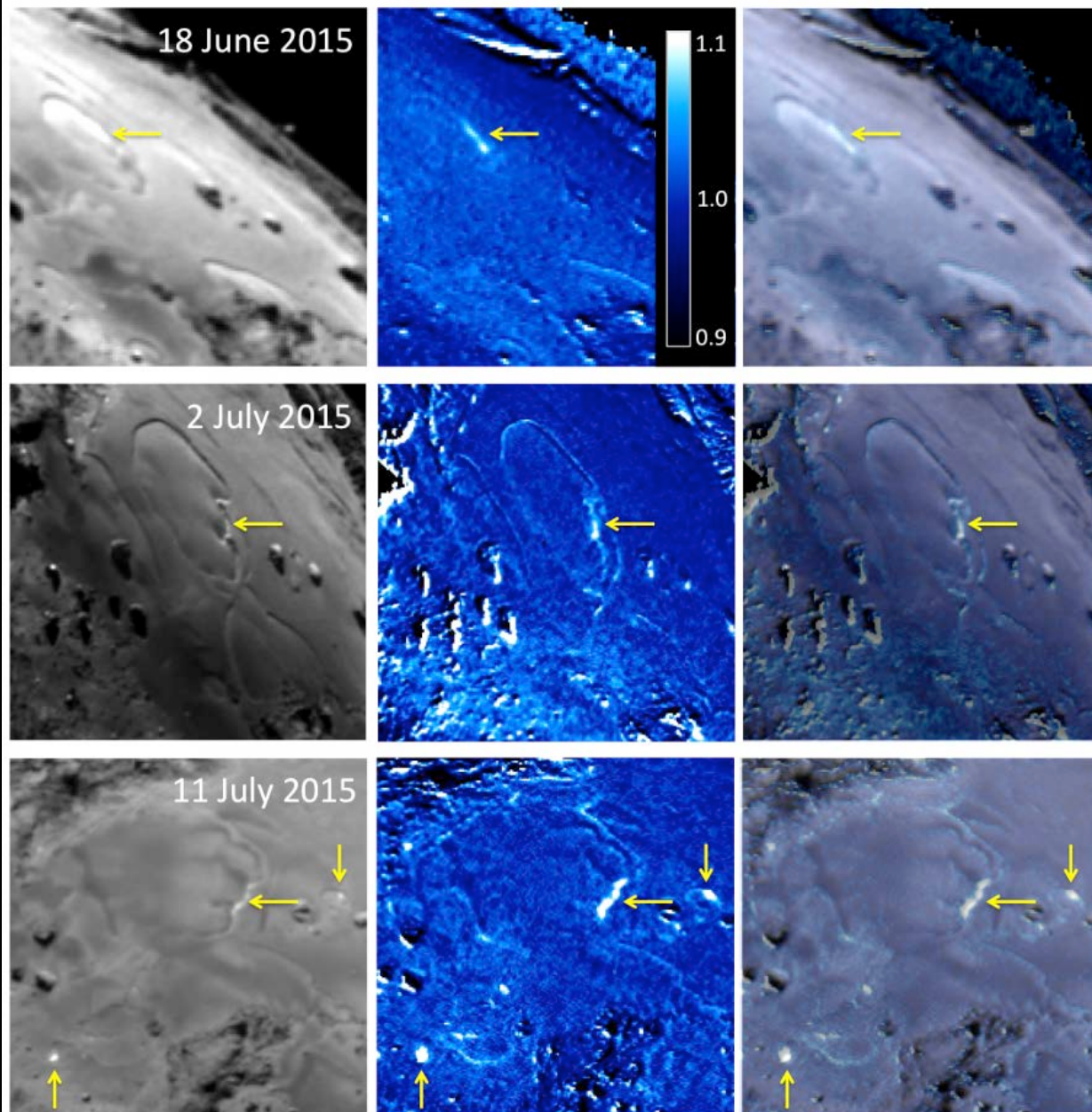
Le spectromètre ROSINA à bord de la sonde ROSETTA

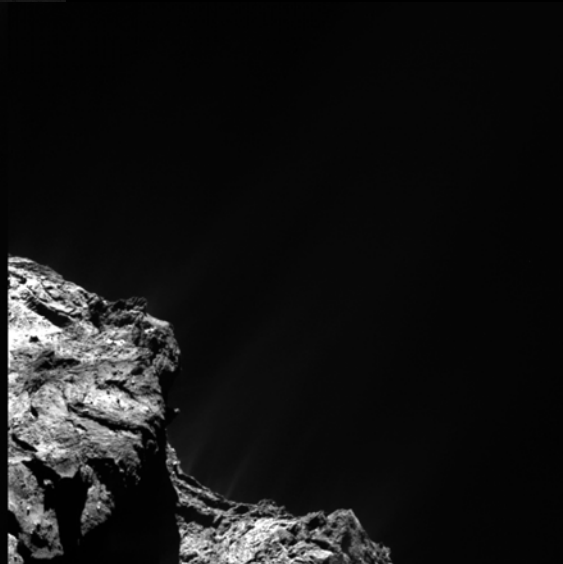
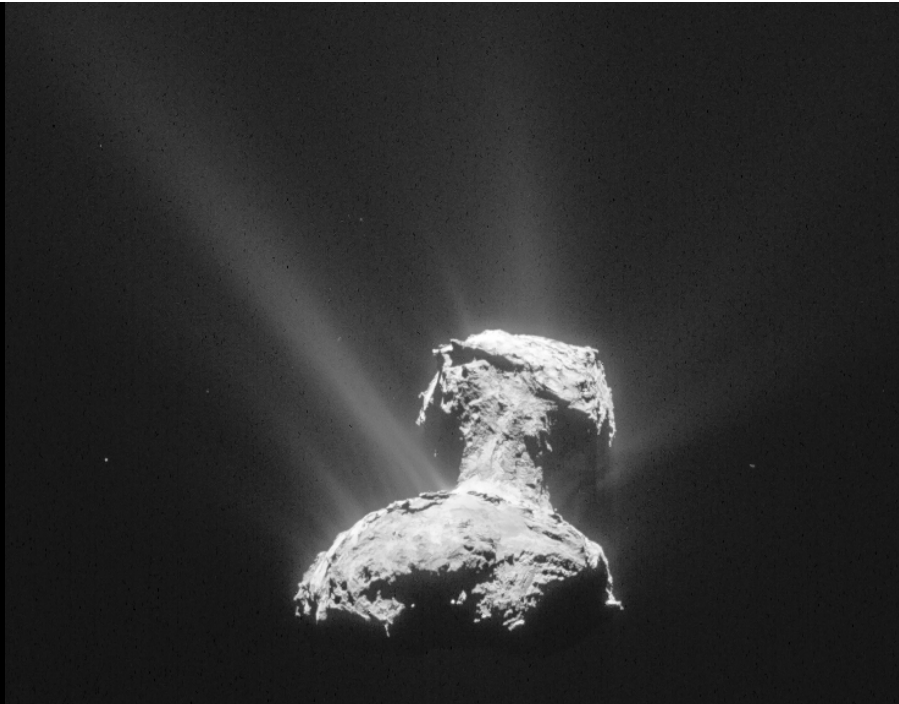


PI: Kathrin Altwegg, Université de Berne, et le team Rosina



Osiris
camera

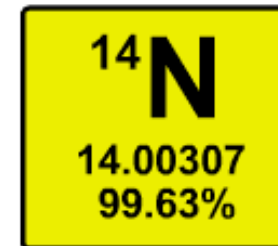
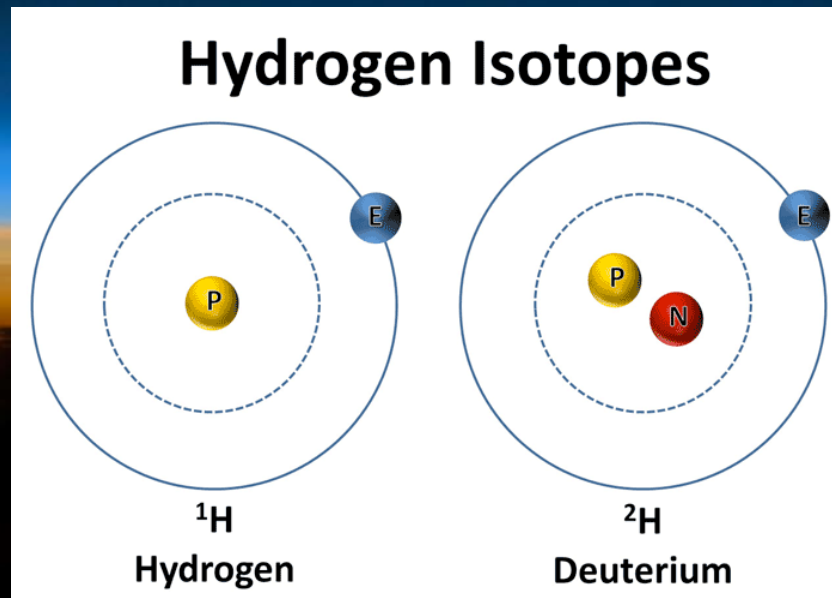




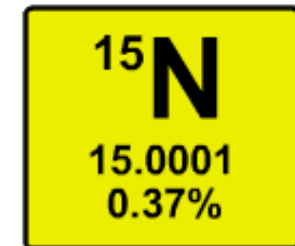
Les isotopes: l'ADN de la matière

Azote et hydrogène: très large
variations dans le système solaire :

D/H ~500 %
 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} < 10 \%$
 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} \sim 500 \%$



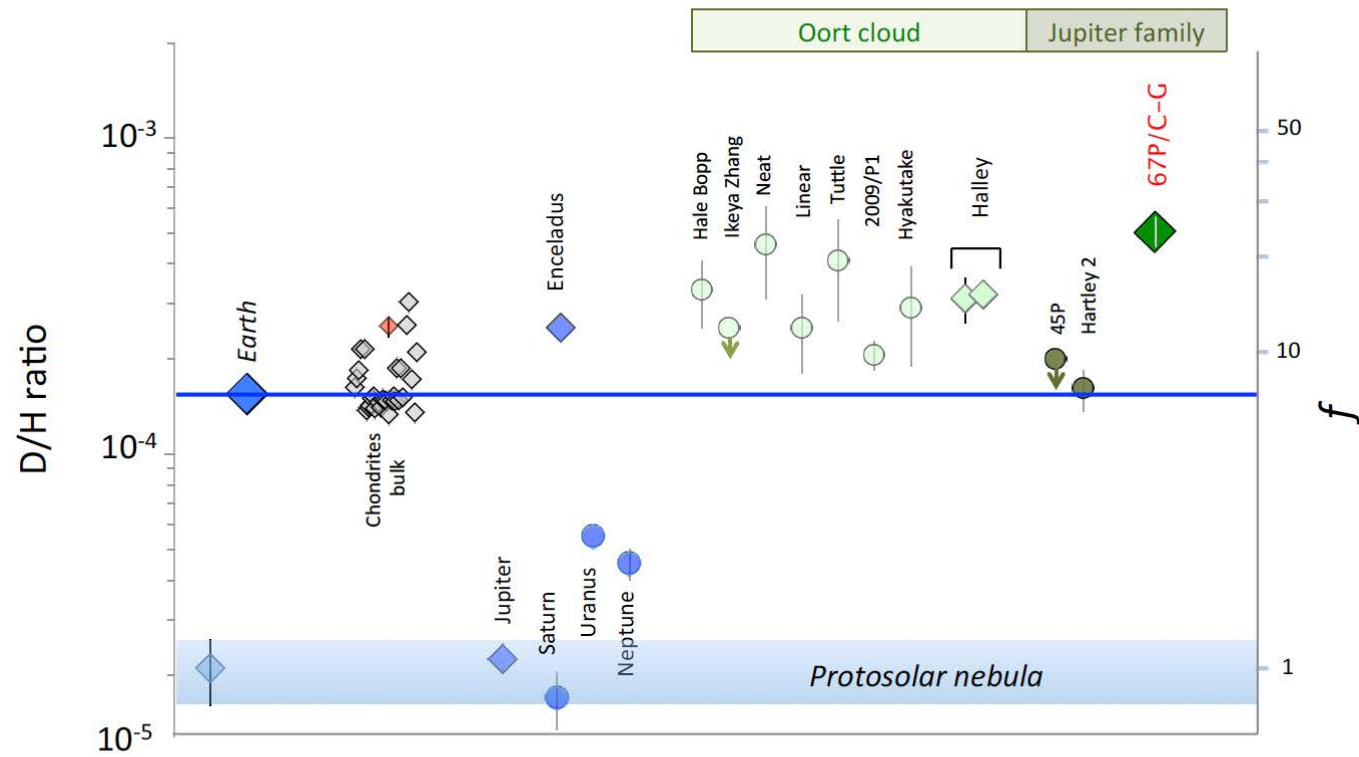
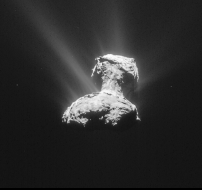
Stable



Stable



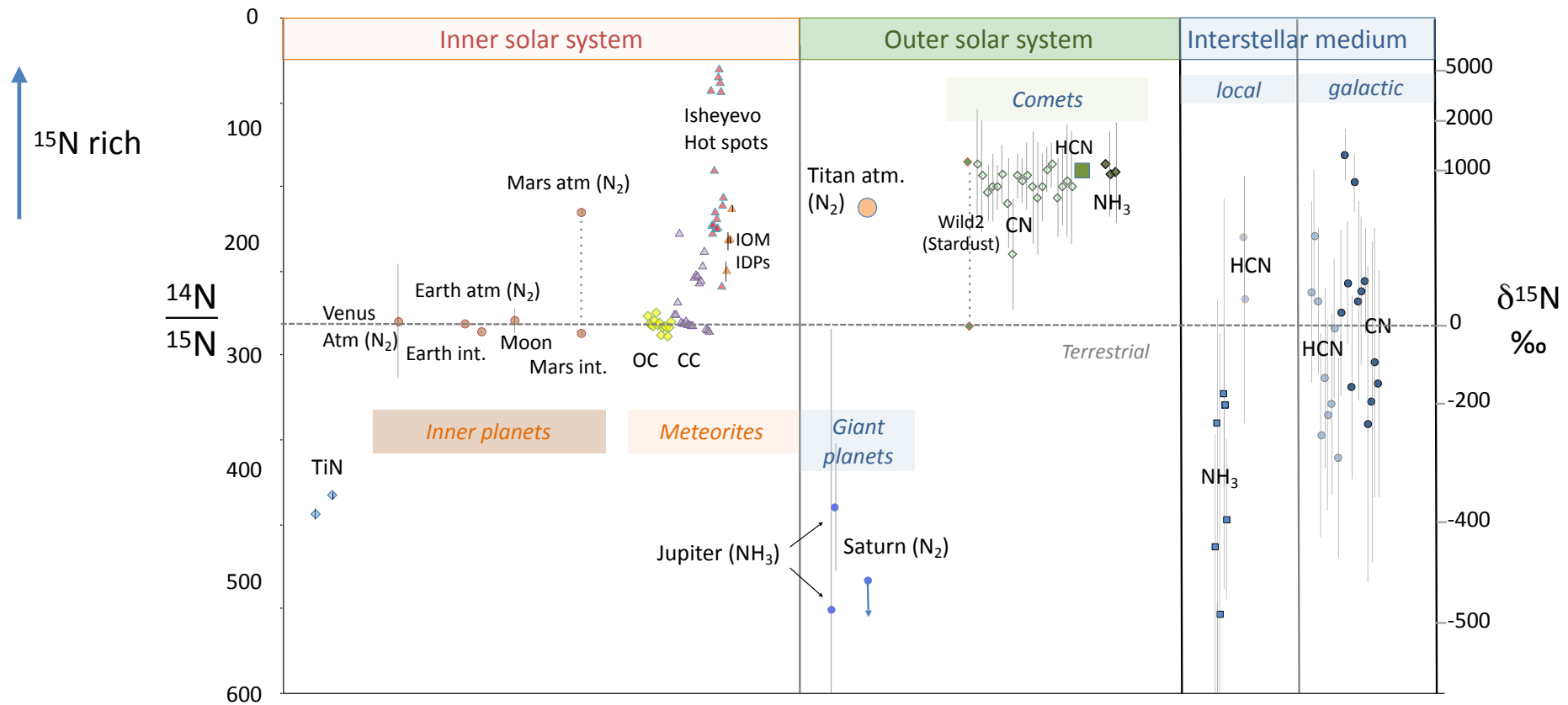
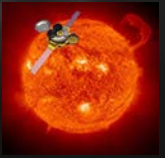
Variations isotopiques de l'hydrogène dans le système solaire



67C-G a trois fois plus de Deuterium que la Terre.

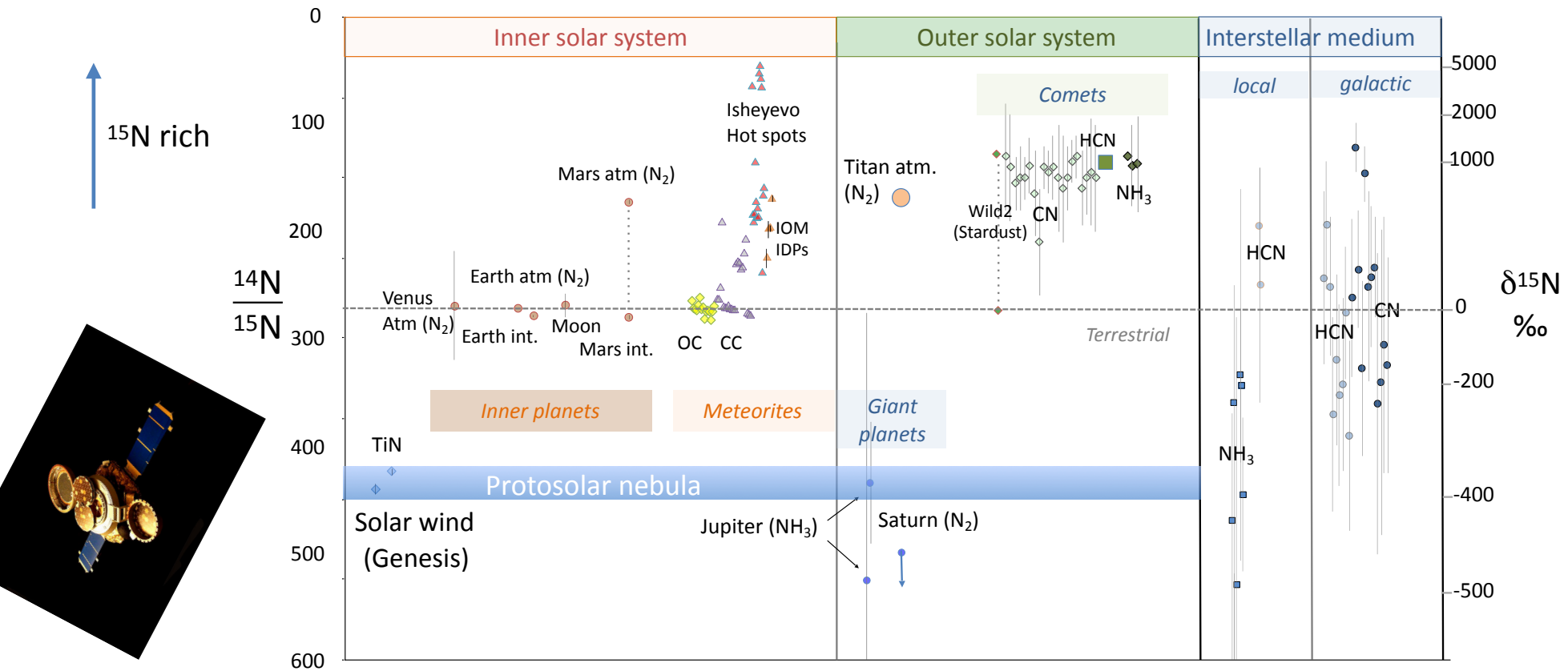
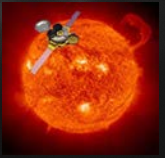


Variations isotopiques de l'azote dans le système solaire



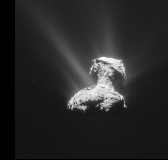


Variations isotopiques de l'azote dans le système solaire

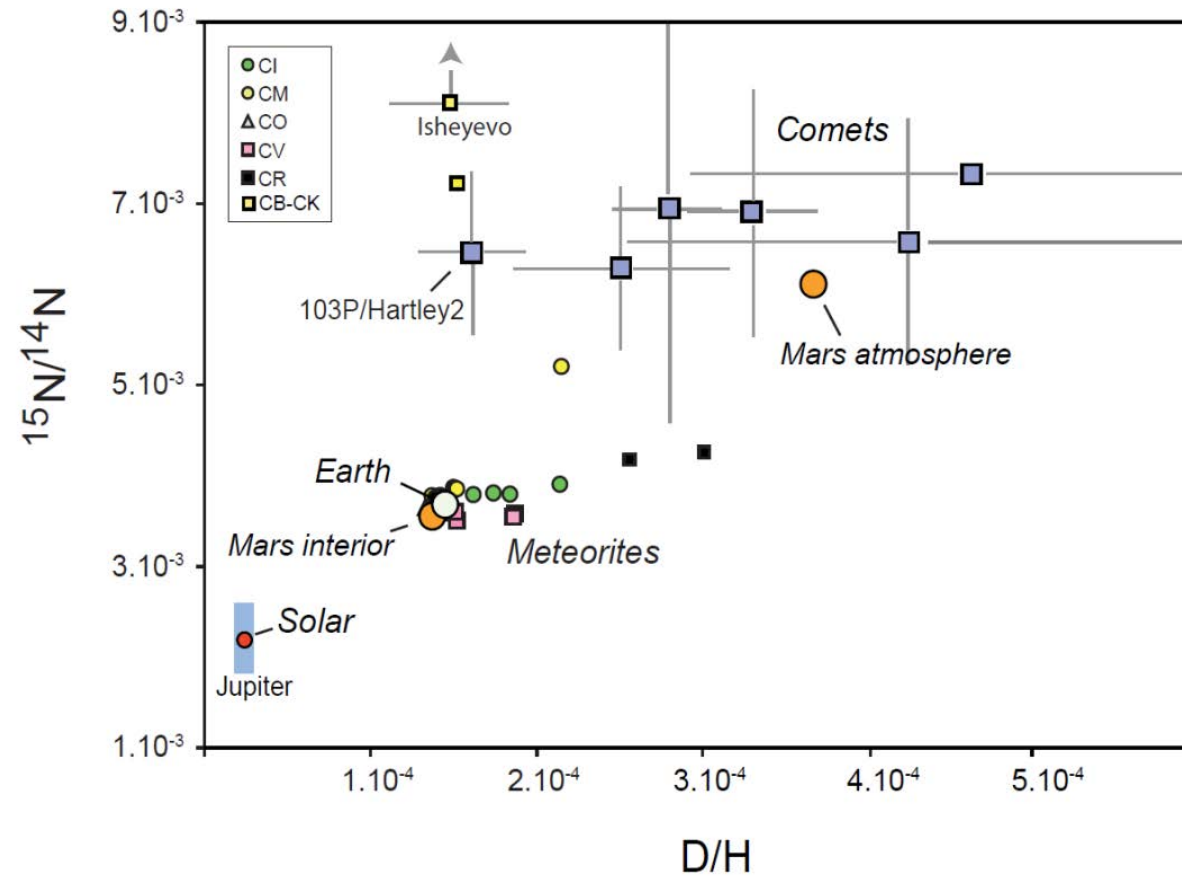




Les isotopes stables: origine des volatils dans le système solaire interne



Météorite Orgueil



18

2	He	Helium	4.003
---	----	--------	-------

10
Ne
Neon
20.180

18	Ar	Argon	39.948
----	----	-------	--------

36	Kr	Krypton	84.798
----	----	---------	--------

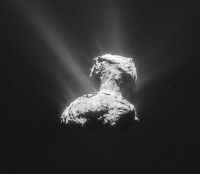
54	Xe	Xenon	131.294
----	----	-------	---------

86
Rn
Radon
222.018

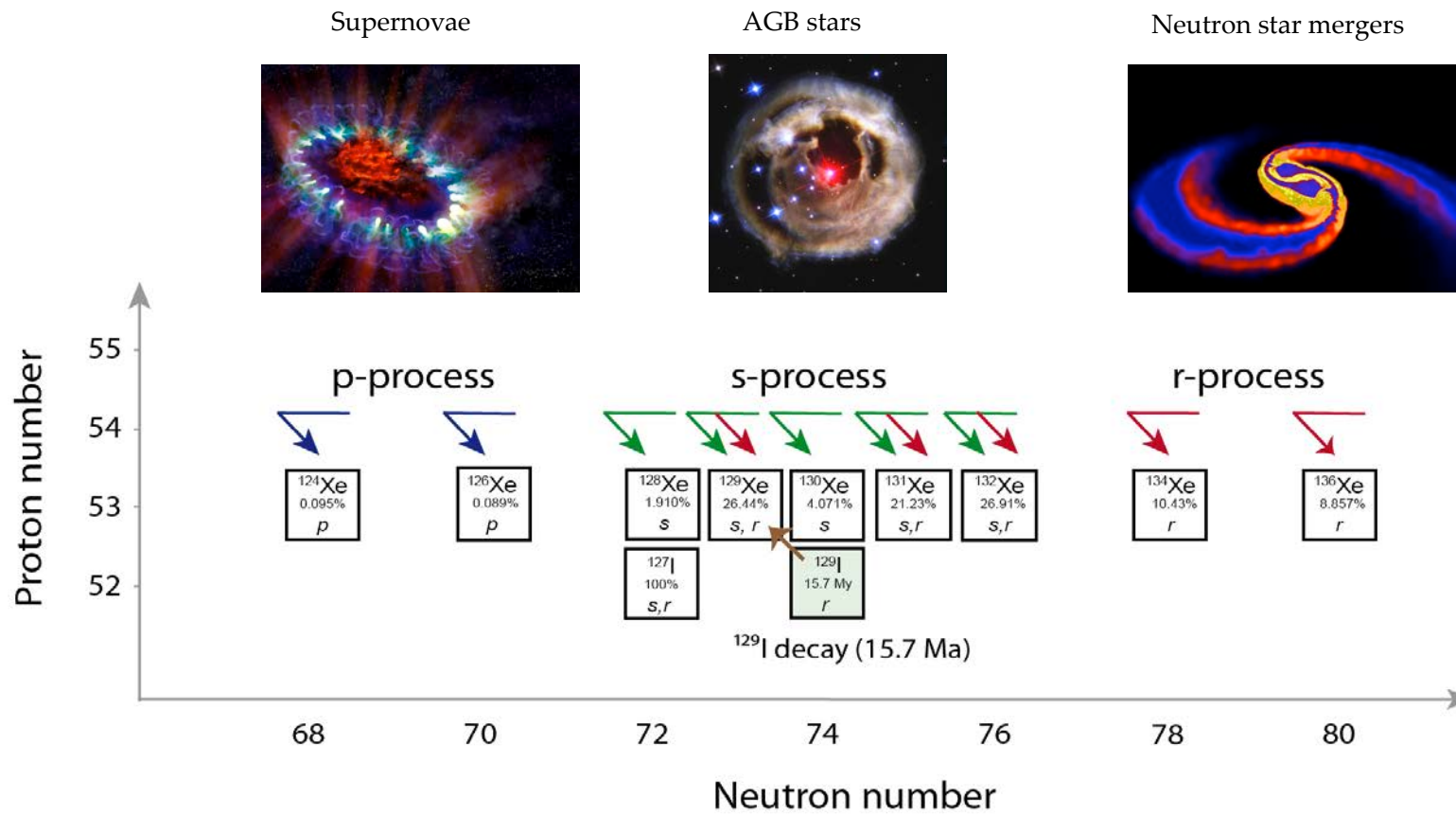
118	Uuo	Ununoctium	unknown
-----	-----	------------	---------



Le xénon

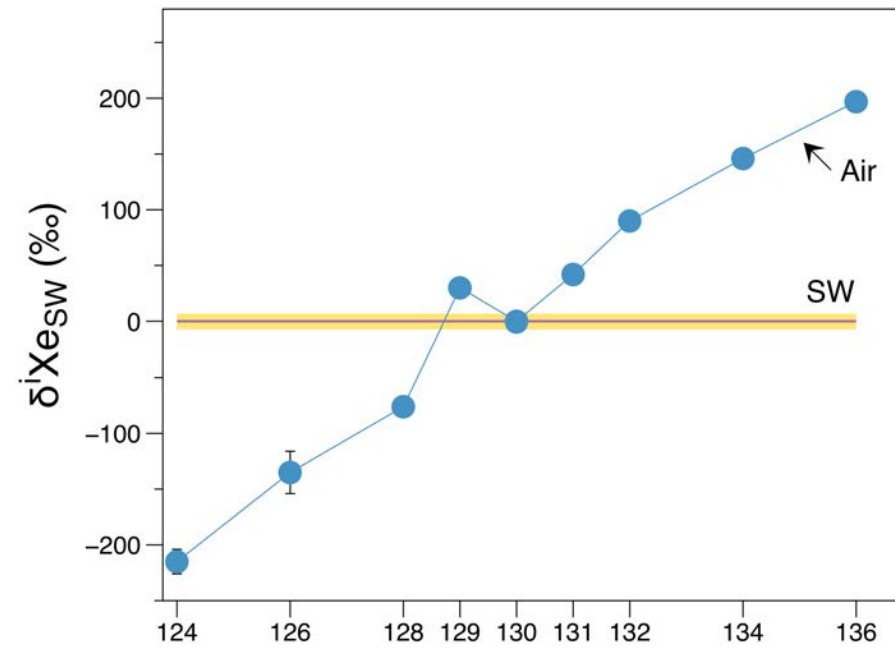
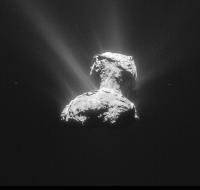


Xénon: 9 isotopes, formés dans des étoiles différentes selon des processus p-, s-, et r-



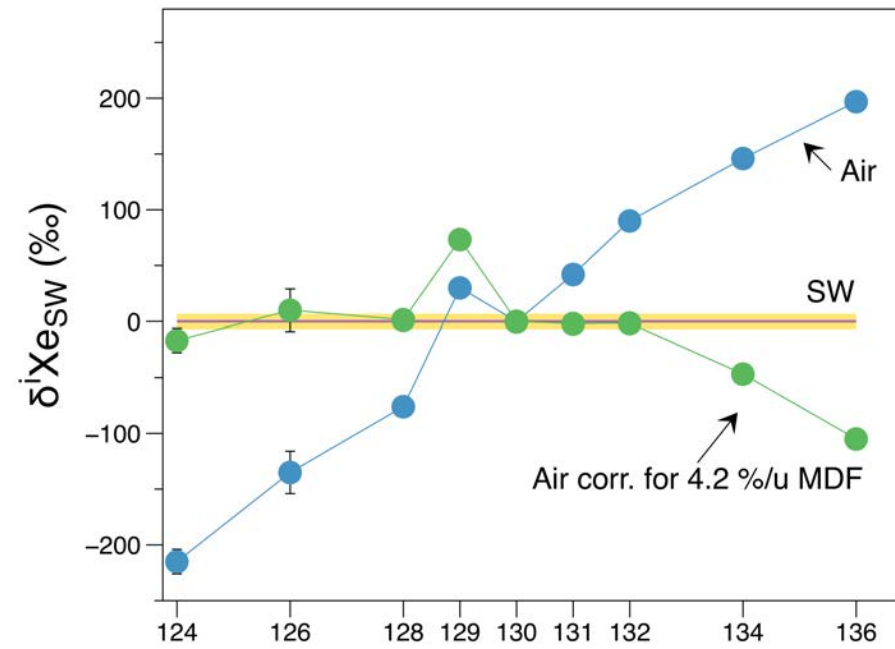
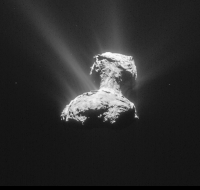


Xénon atmosphérique



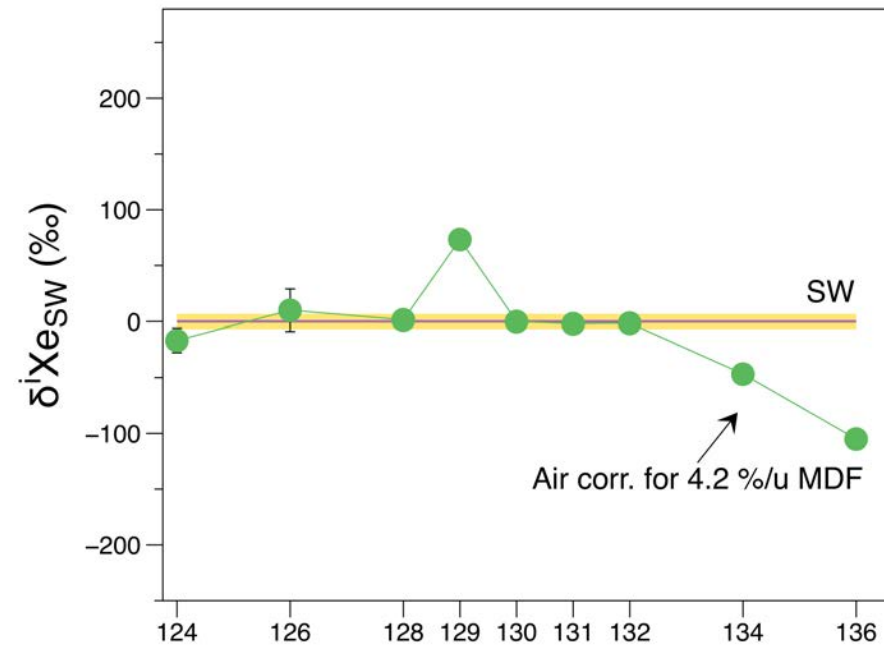
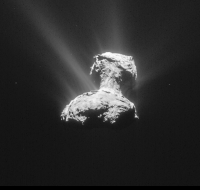


Xénon atmosphérique



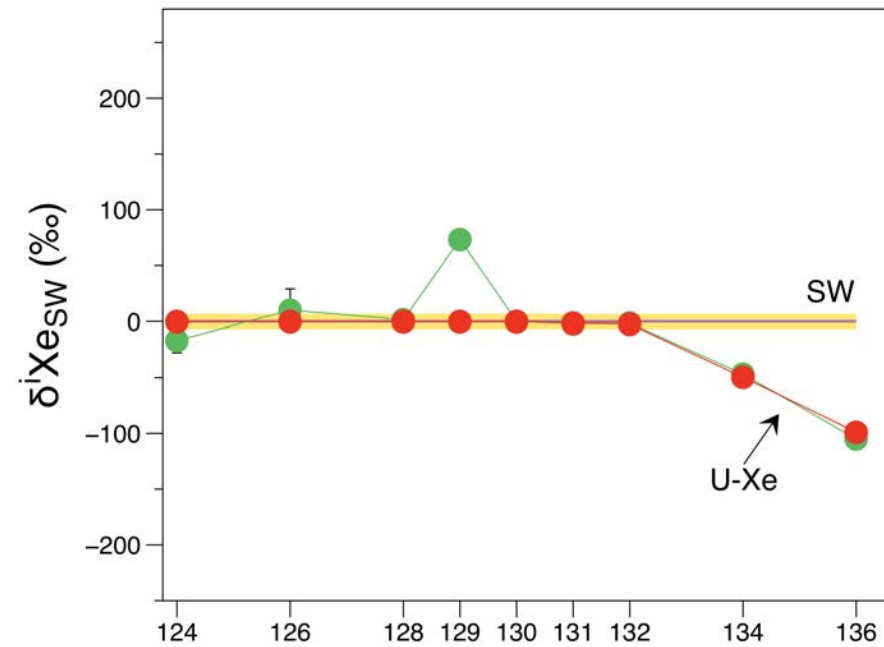
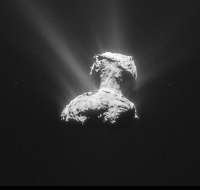


Xénon atmosphérique



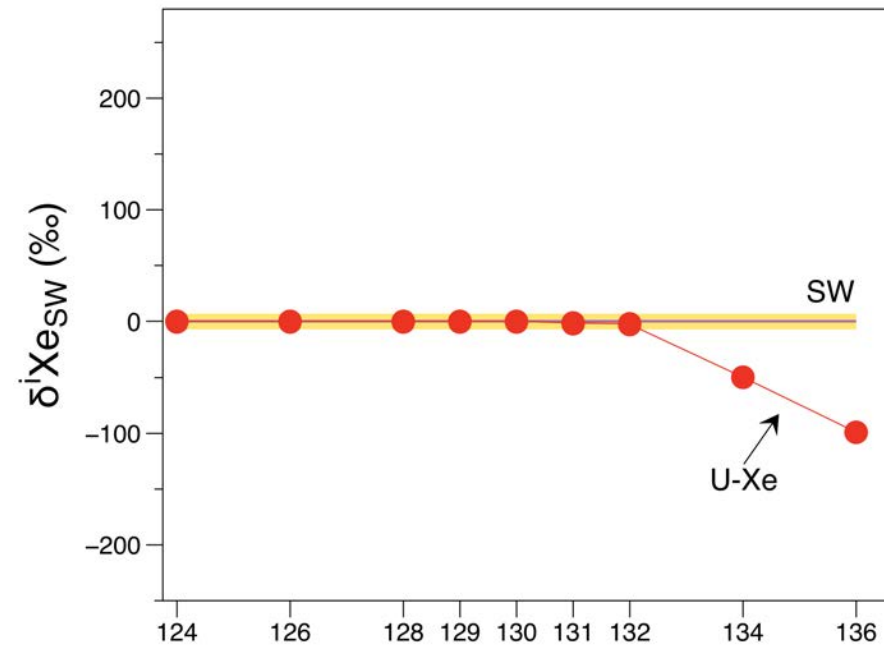
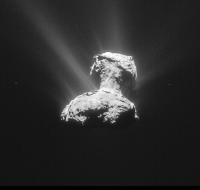


Xénon atmosphérique



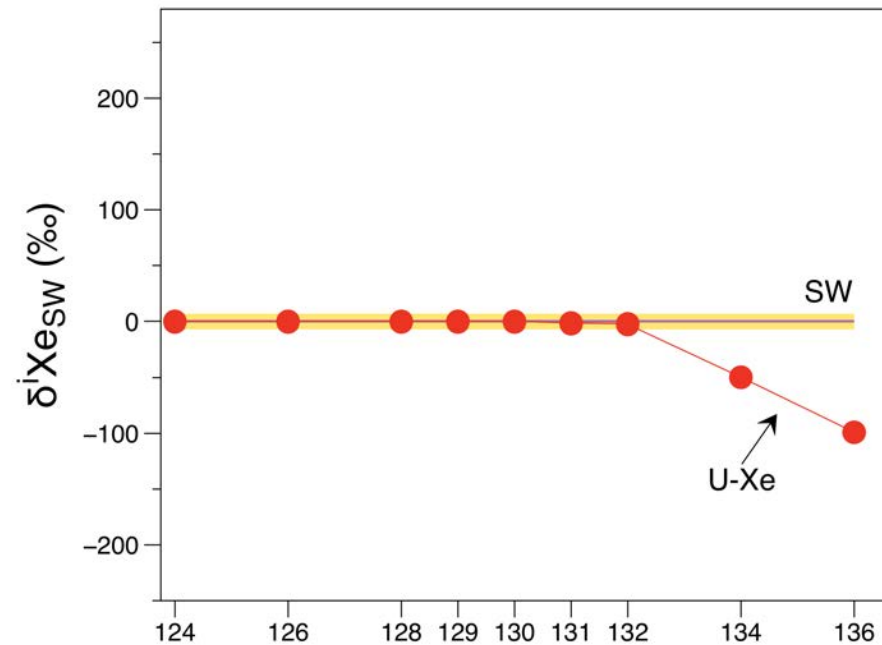


Xénon atmosphérique





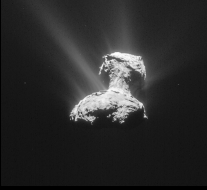
Xénon atmosphérique



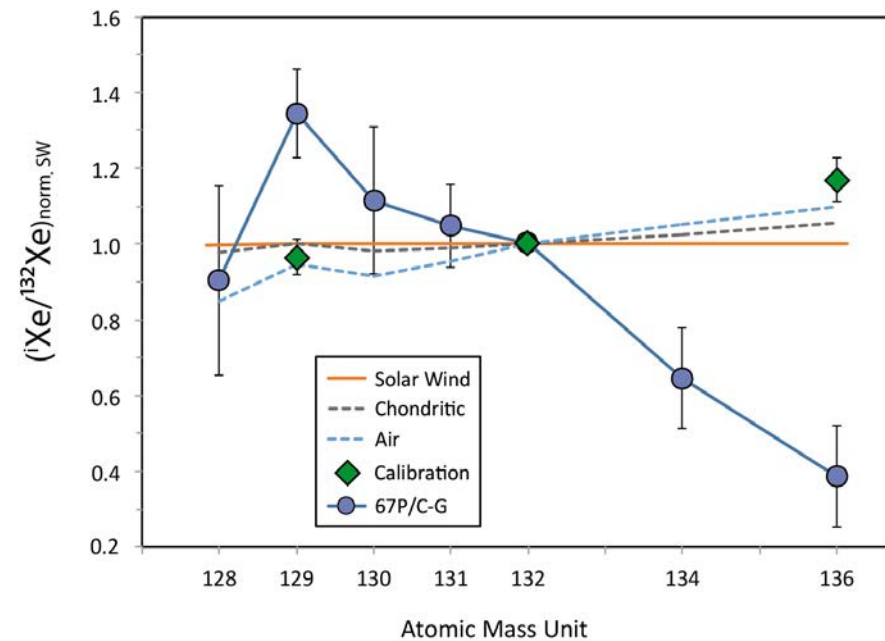
U-Xe : l'ancêtre du xénon atmosphérique



Xénon cométaire

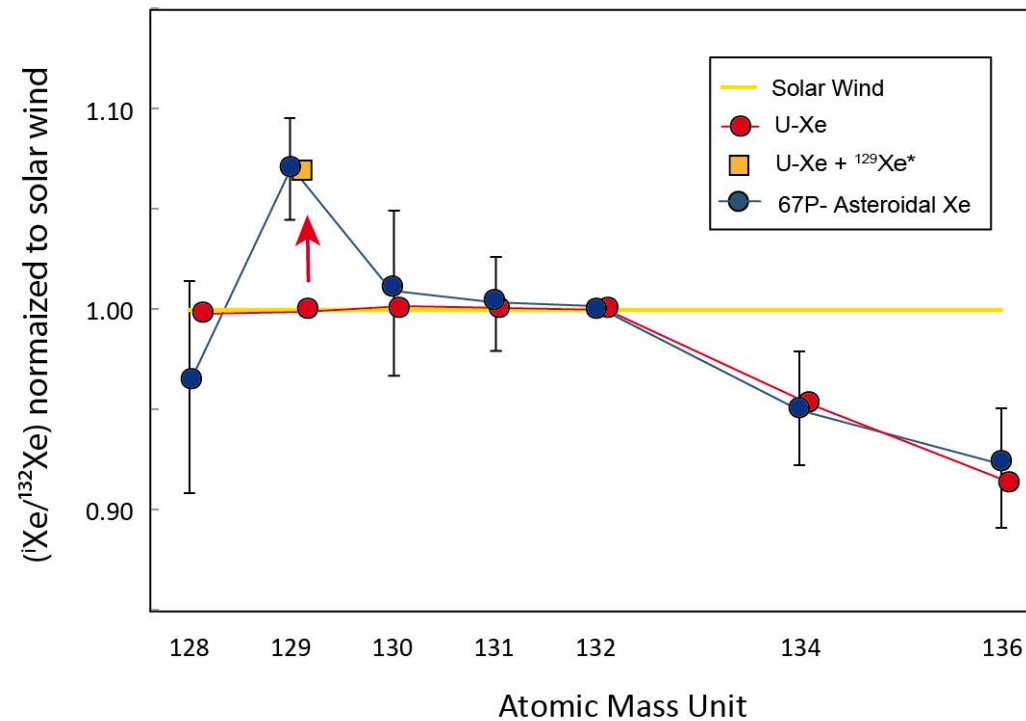
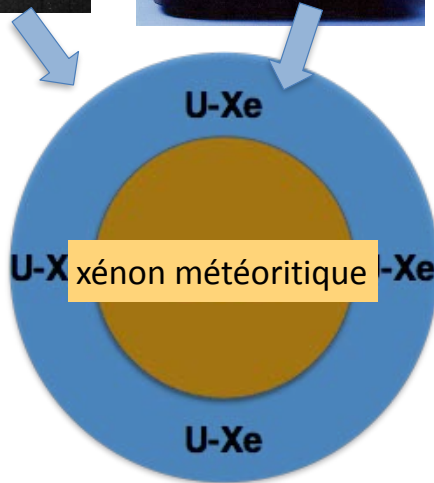
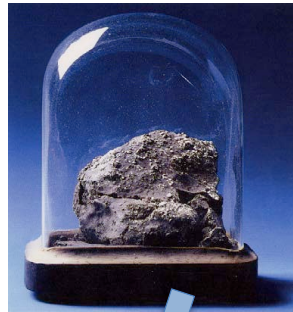
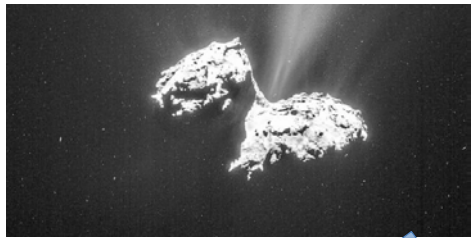
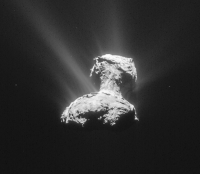


- Moyenne de 500 spectres mesurés durant 3 semaines
- Calibration en vol avec du xénon terrestre
- Le xénon de la comète est non-solaire, non-chondritique, non-météoritique
- Il est fortement appauvrie ^{134}Xe (40%) et en ^{136}Xe (60%)
- Deficit d'isotopes produits par le processus de nucléosynthèse s
- Suggère que les grains de glace de cette comète sont présolaires





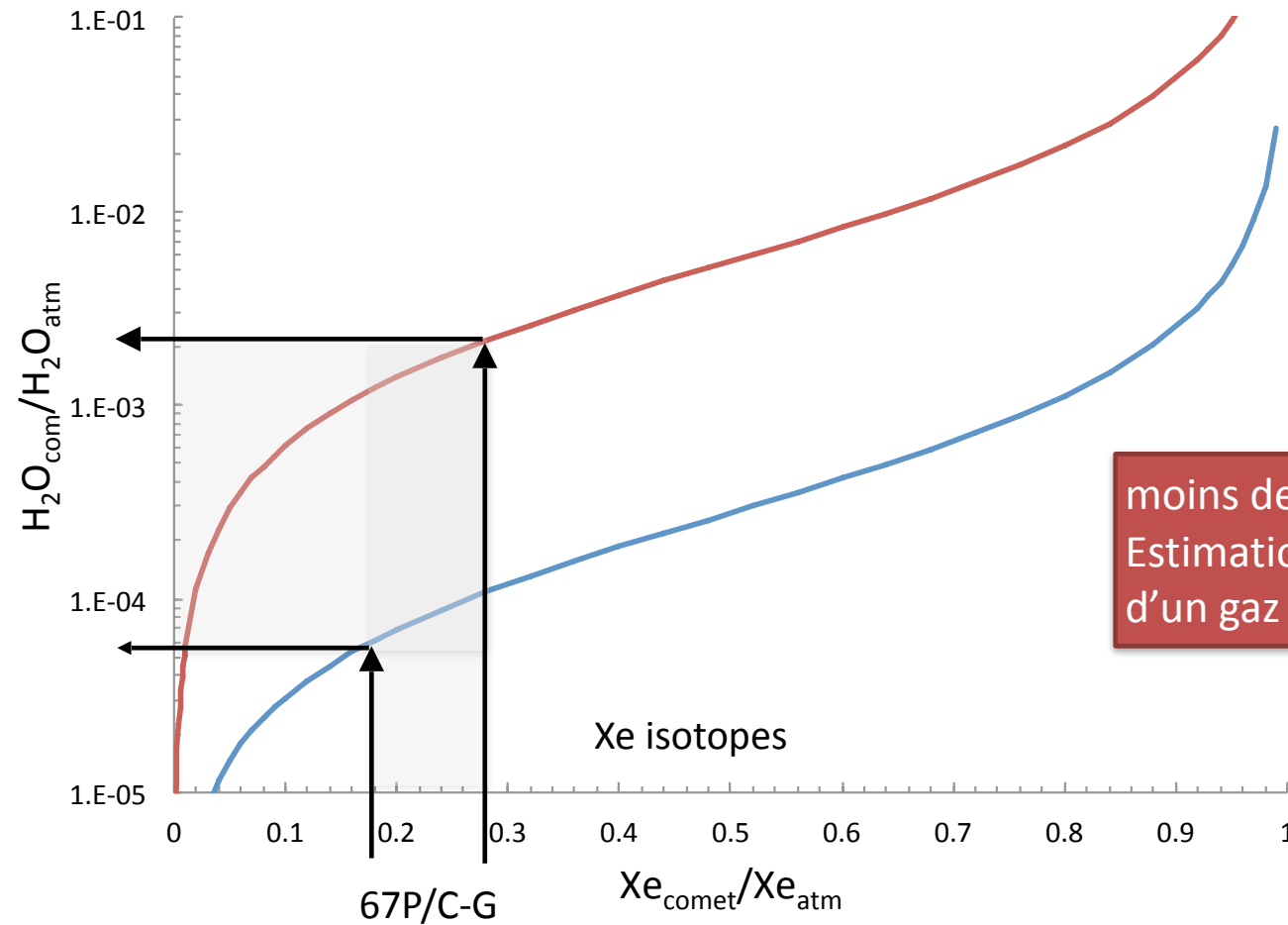
Contribution des comètes à l'atmosphère



L'atmosphère contient 22 ± 5 % de xénon cométaire
Première évidence de la contribution des comètes à la Terre



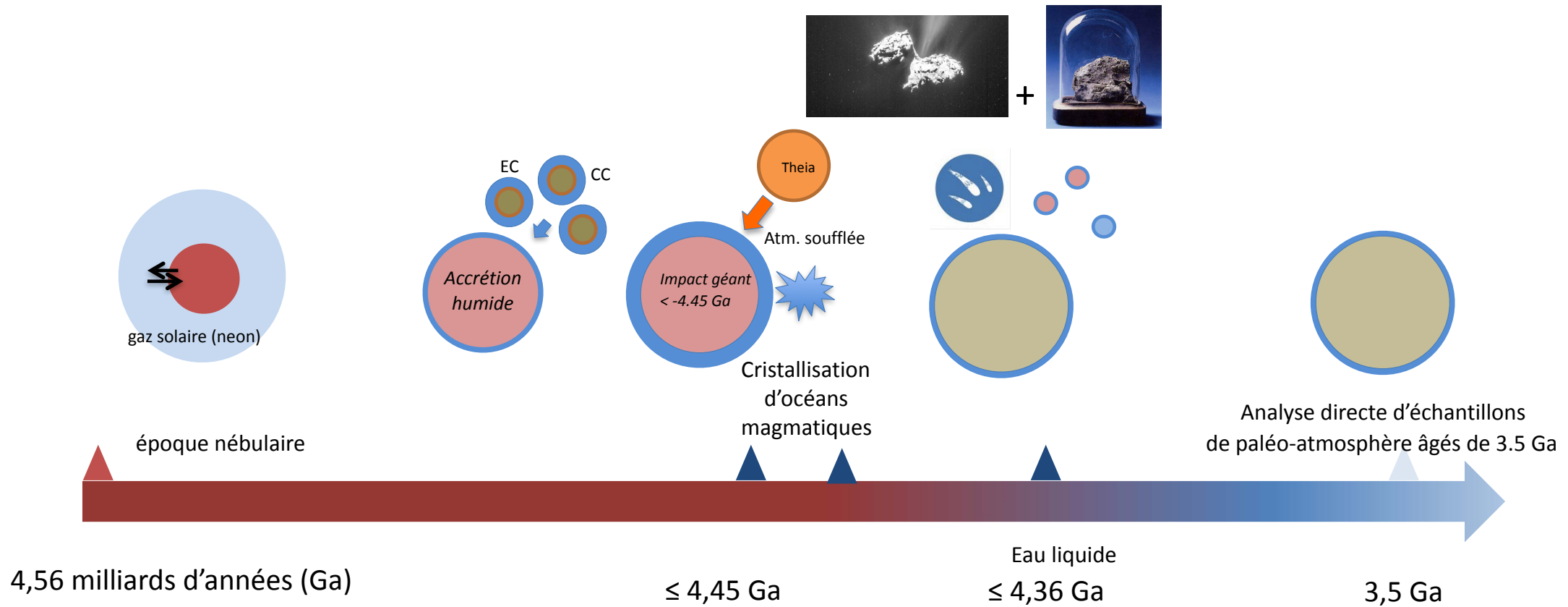
Contribution cométaire d'eau aux océans négligeable



moins de 1 % de l'eau des océans
Estimation obtenue grâce à la mesure
d'un gaz rare (xénon) dans la comète



Chronologie des apports de volatils terrestres



Temps par rapport au présent (pas à l'échelle)



Il y a > 4 milliards d'années



ASTROBIOLOGY.COM



Des échantillons de paléo-atmosphère piégés dans des roches anciennes



Séquence volcano-sédimentaire de la formation Dresser archéenne (3.45 Ga), North Pole, Pilbara, Australie du Nord-ouest



Des échantillons de paléo-atmosphère piégés dans des roches anciennes



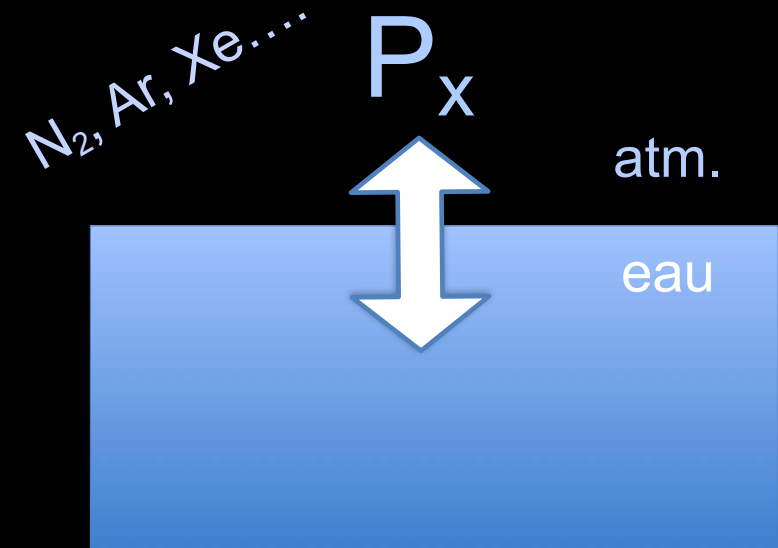
Inclusions fluides dans des
quartz hydrothermaux



Pujol et al *EPSL* 2011, Avice et al, *nature Comm*, 2017, GCA 2018



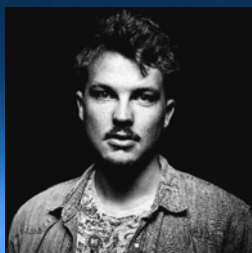
Message dans une bulle



Elements : $[X/Y]_{\text{water}} \propto (P_x/P_y)_{\text{atm}}$

Isotopes : $[iX/jY]_{\text{water}} \approx (iX/jY)_{\text{atm}}$

David BEKAERT



Laurette PIANI



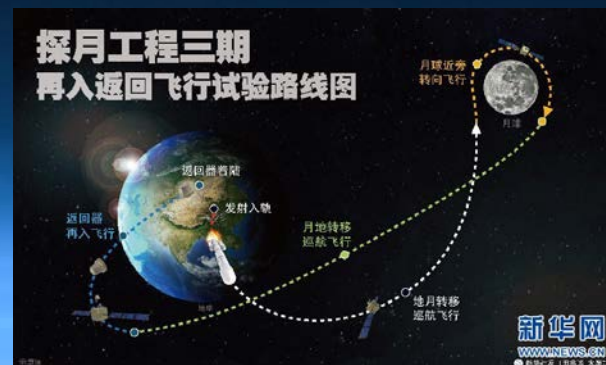
Evelyn FÜRI



Michael
BROADLEY



Jessica Flahaut



Chang'e 5, CNSA (Chine): retour
d'échantillons lunaires, 2019



Hayabusa 2, JAXA (Japon) : retour
d'échantillon d'un astéroïde, en
cours, retour 2020



Osiris Rex NASA, retour d'échantillon
d'astéroïde, en cours, 2022

NASA-ESA, 2028 ?

