

Le Système Solaire

Origine et Evolution
Diversité et Composition

Eric Quirico

Université Grenoble Alpes, CNRS, Institut de Planétologie et Astrophysique de Grenoble (IPAG), UMR
5274, Grenoble F-38041, France

1. Chimie des corps planétaires
2. Petits Corps et Origines
3. Complexité chimique des météorites et des comètes



Le Système Solaire

Origine et Evolution

Diversité et Composition

1. Chimie des corps planétaires

2. Petits Corps et Origines

3. Complexité chimique des météorites et des comètes

Définition d'une planète

RESOLUTION 5: Définition d'une Planète dans le Système Solaire

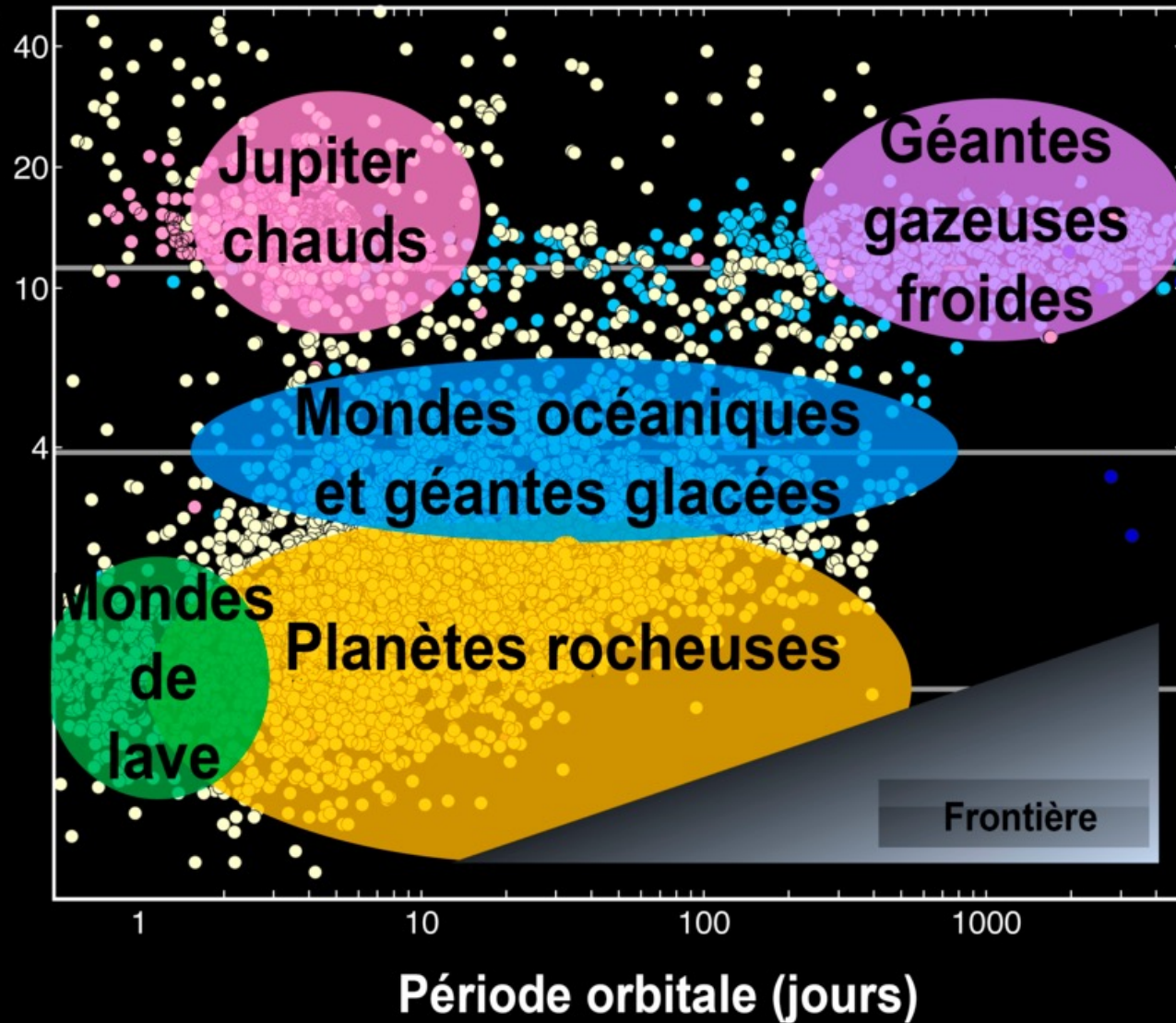
En conséquence, l'Union Astronomique Internationale (U.A.I.) décide de répartir les planètes et autres corps du système solaire en trois catégories de la manière suivante:

- (1) une planète¹ est un corps céleste qui
 - (a) est en orbite autour du Soleil,
 - (b) a une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique,
 - (c) a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche.
- (2) une "planète naine" est un corps céleste qui
 - (a) est en orbite autour du Soleil,
 - (b) a une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme² presque sphérique,
 - (c) n'a pas éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche,
 - (d) n'est pas un satellite.
- (3) tous les autres objets³ en orbite autour du Soleil sont appelés "petits corps du Système Solaire".



4082 planètes au 1^{er} Juin 2019

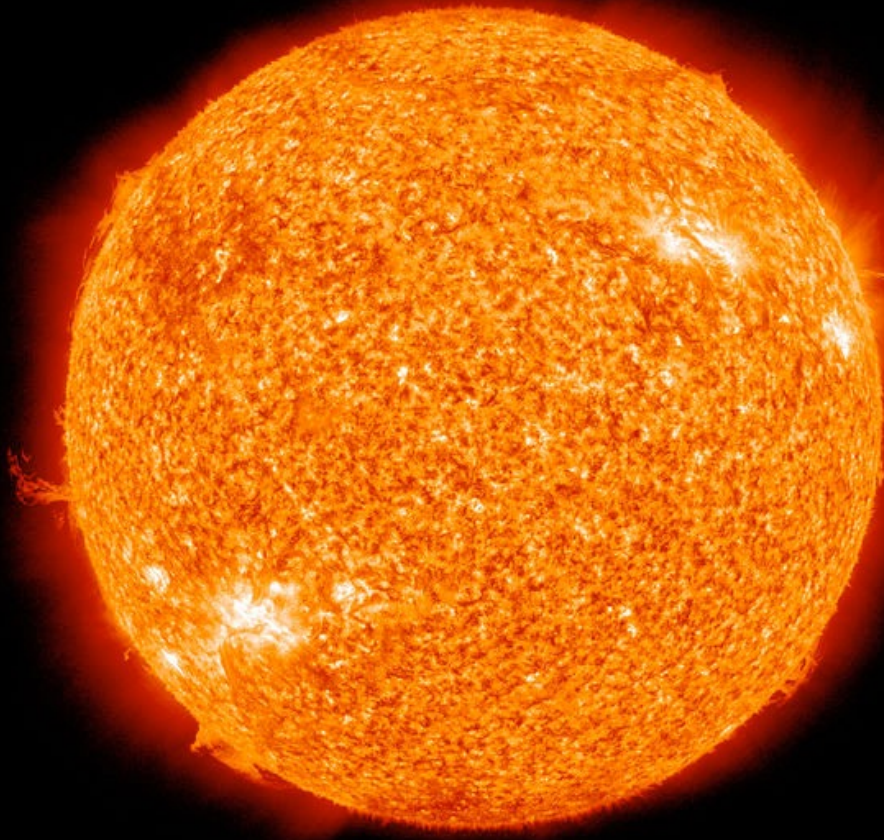
Rayons
terrestres





- Soleil (99% masse du s. sol.)
- 4 Planètes telluriques dont la structure est semblable à la Terre, c'est à dire un noyau métallique entouré de couches minérales solides
- 4 Gazeuses (joviennes) atmosphère gazeuse qui entoure un noyau
- Satellites des planètes
- Pluton, KBOs, Astéroïdes = Petits corps et planètes naines

Notre étoile: Le Soleil

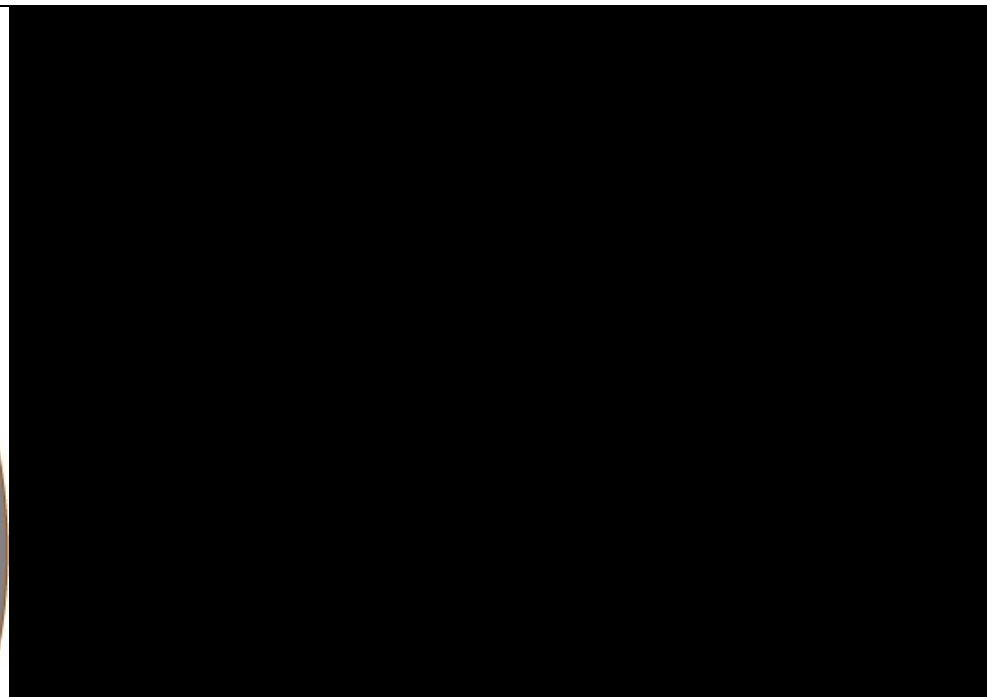
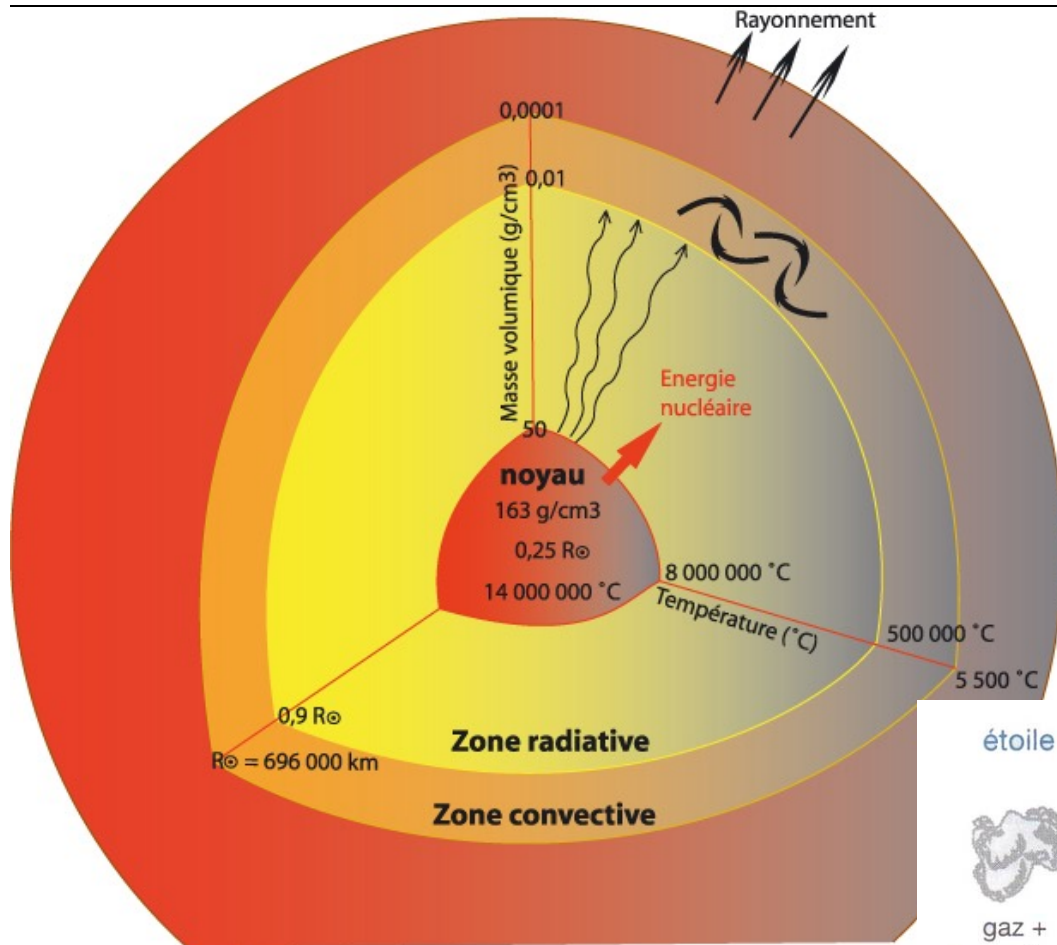


Diamètre = 1 392 000 km
100 x plus que la terre

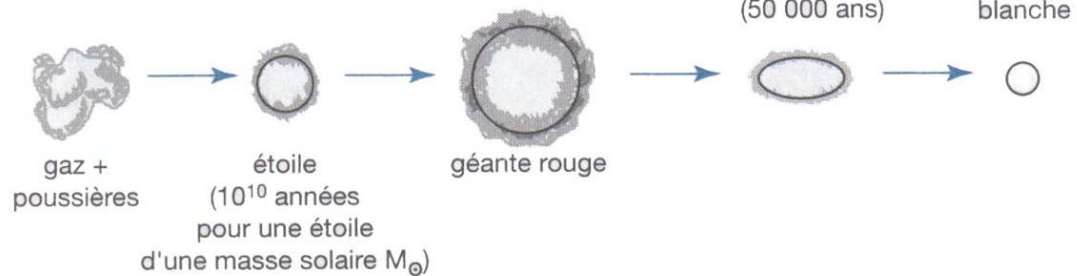
Masse= $2 \cdot 10^{30}$ kg
300 000 plus que la Terre

Température de surface= 5700°C

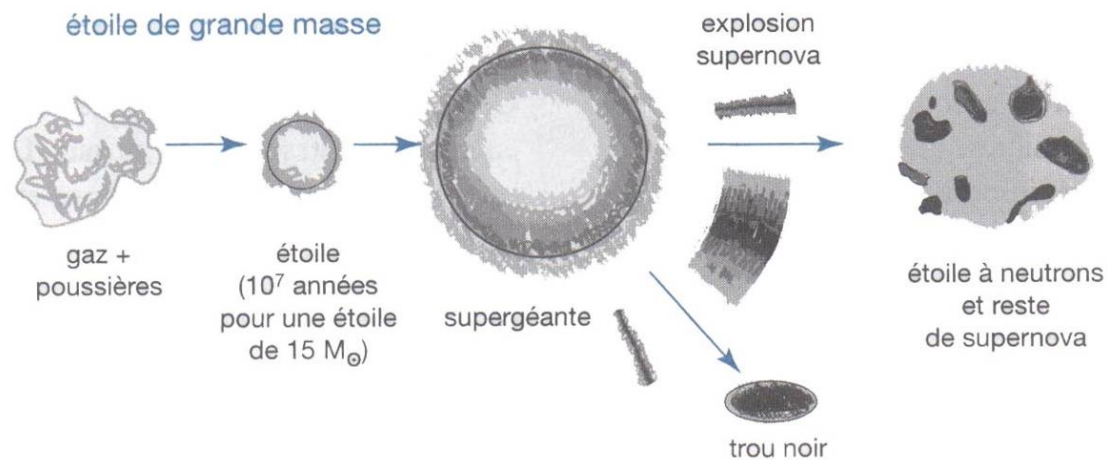
Puissance = $3.8 \cdot 10^{26}$ W



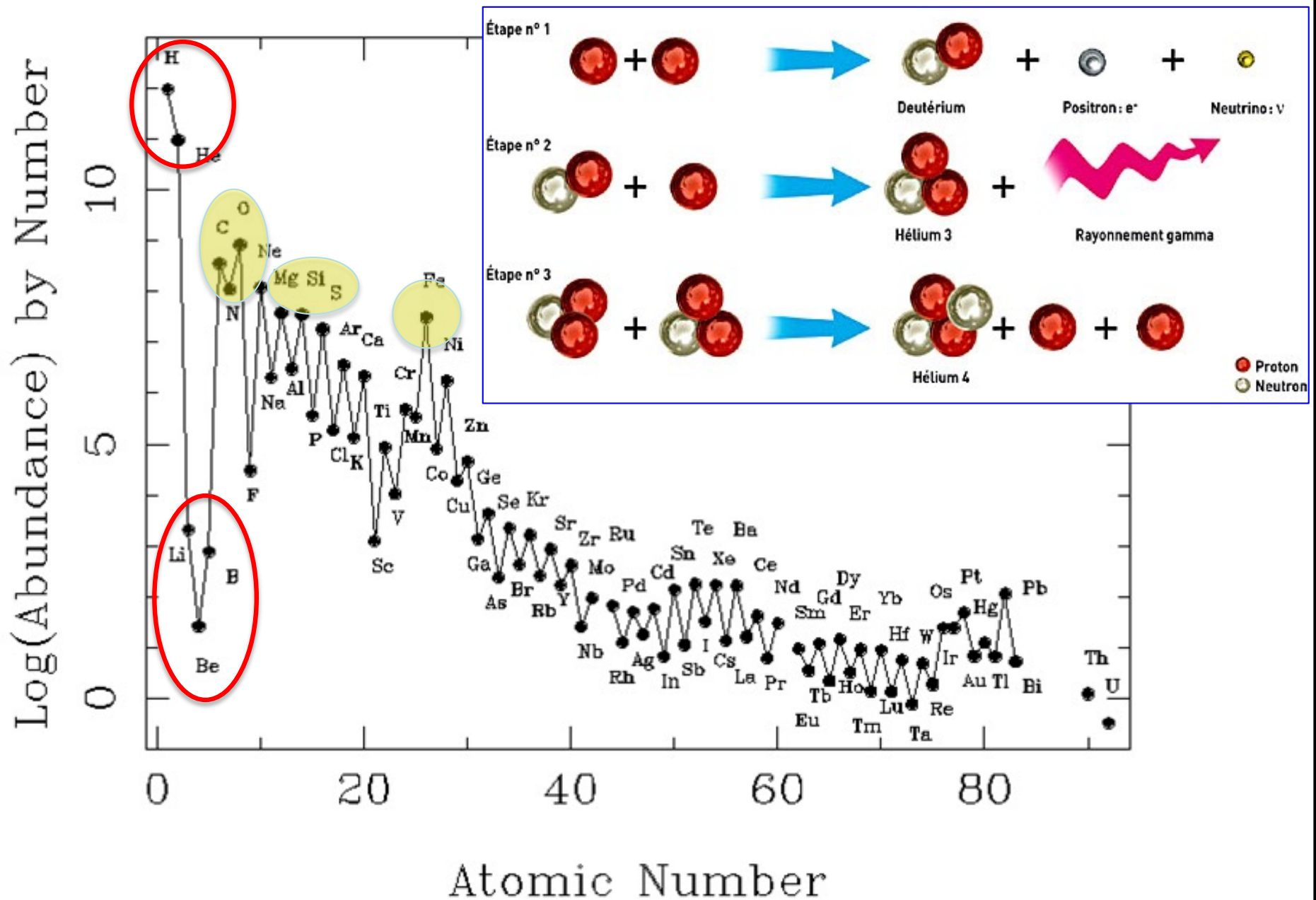
étoile de faible masse



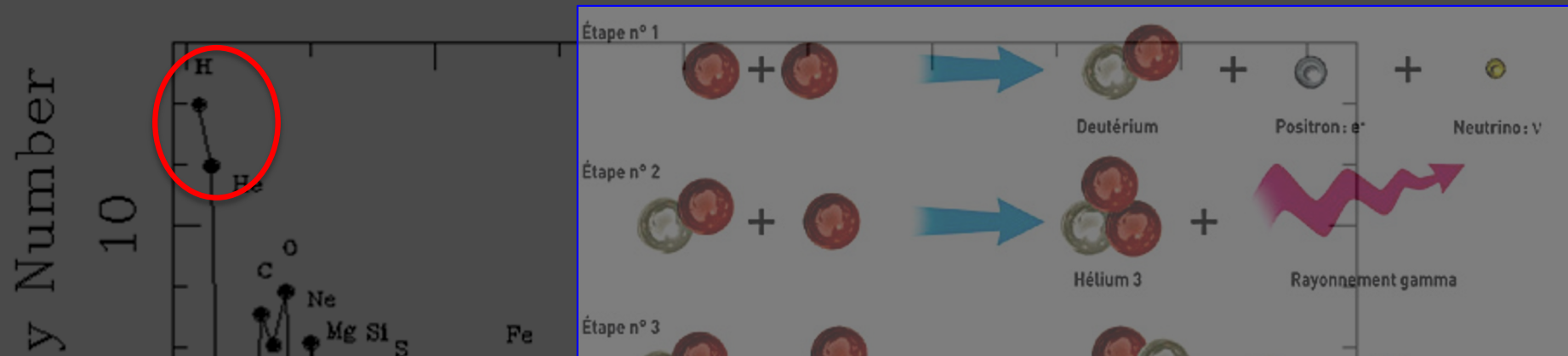
étoile de grande masse



Logarithmic SAD Abundances: $\text{Log}(H) = 12.0$



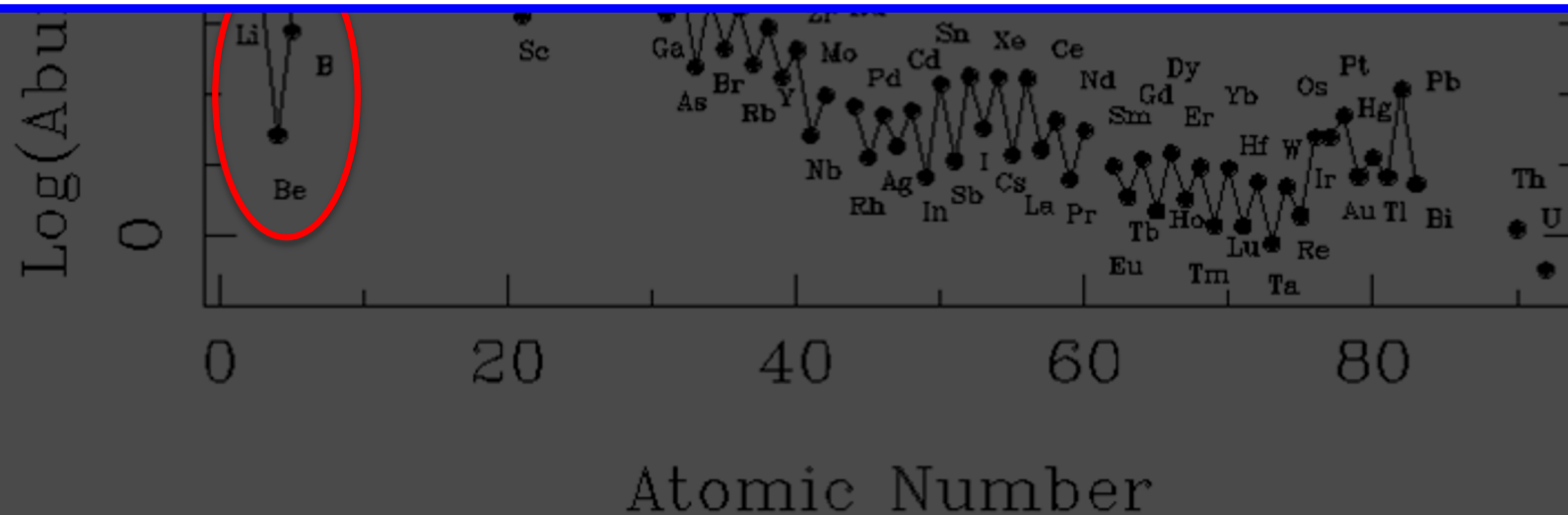
Logarithmic SAD Abundances: $\text{Log}(H) = 12.0$



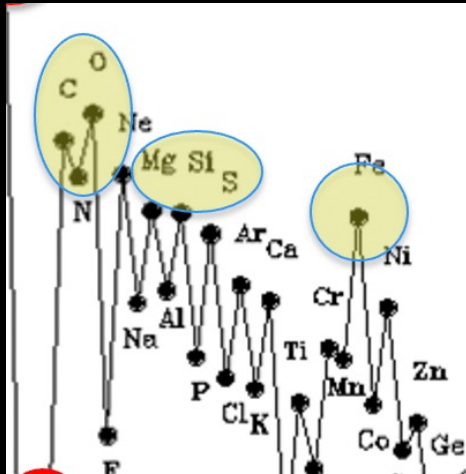
A partir du carbone, tous les éléments chimiques sont synthétisés dans les étoiles

Il a fallu plusieurs générations d'étoiles pour générer des planètes

A ses débuts, l'univers est essentiellement composé d'hydrogène et d'hélium



Roches magmatiques: minéraux essentiels

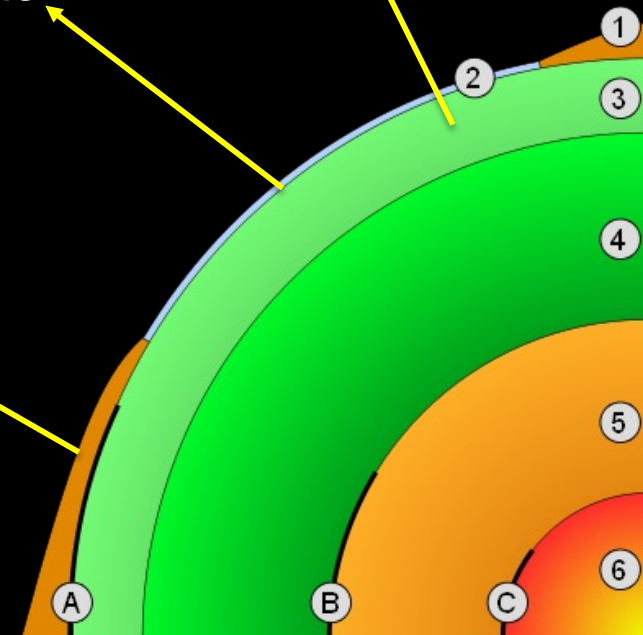


Manteau: Si, O, Fe, Mg
Olivine, Pyroxene
Péridot
Ultrabasique

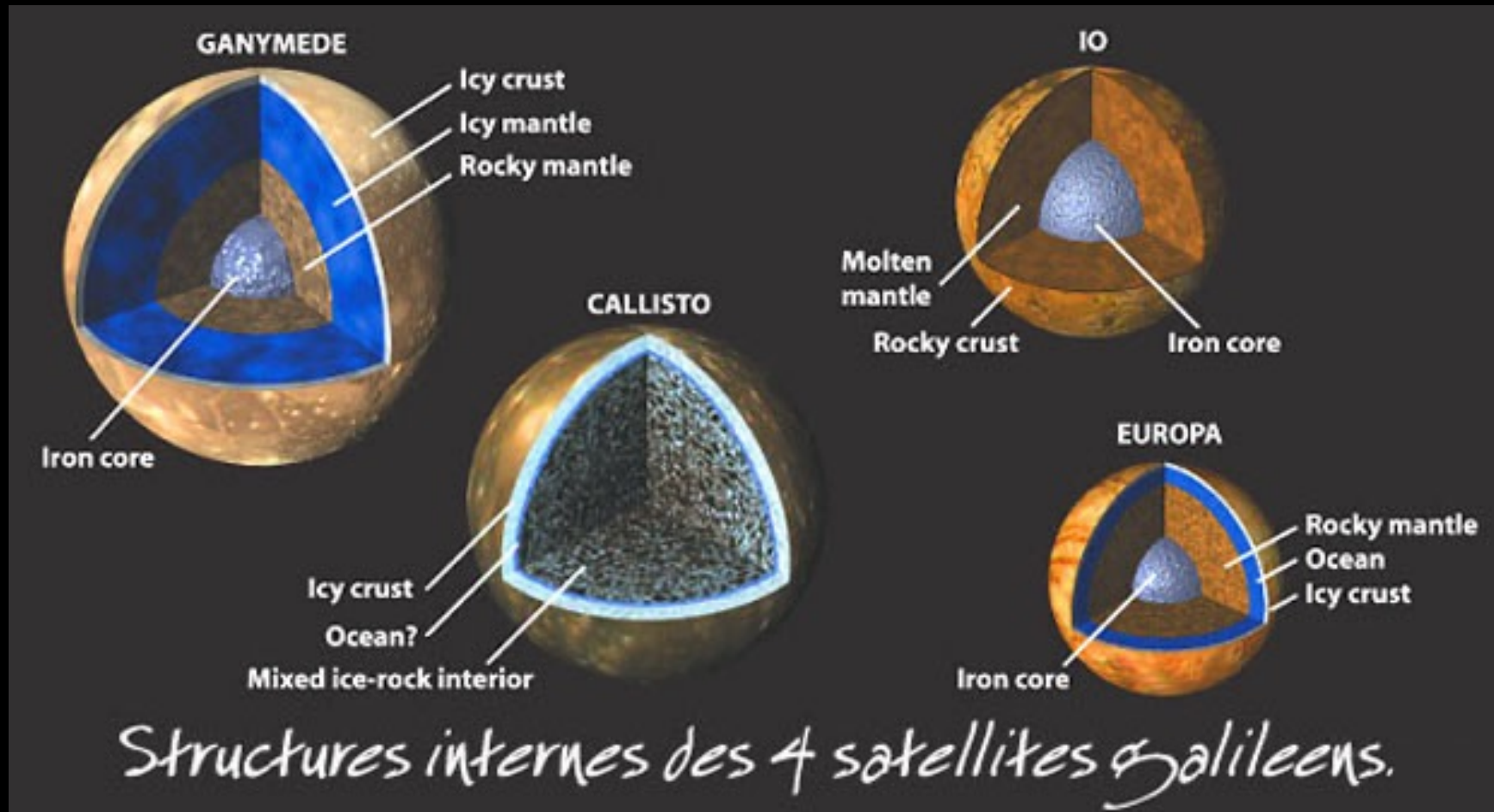
Croûte océanique: O, Si, Al, Ca, Na, K, Fe, Mg
Plagioclases, Pyroxenes, Feldspaths alcalins
Basaltes, Gabbros
Basique

Croûte continentale: O, Si, Al, Ca, Na, K, Fe, Mg
Quartz Feldspaths, Pyroxenes
Granite, Diorite, ...
Acide/Intermédiaire

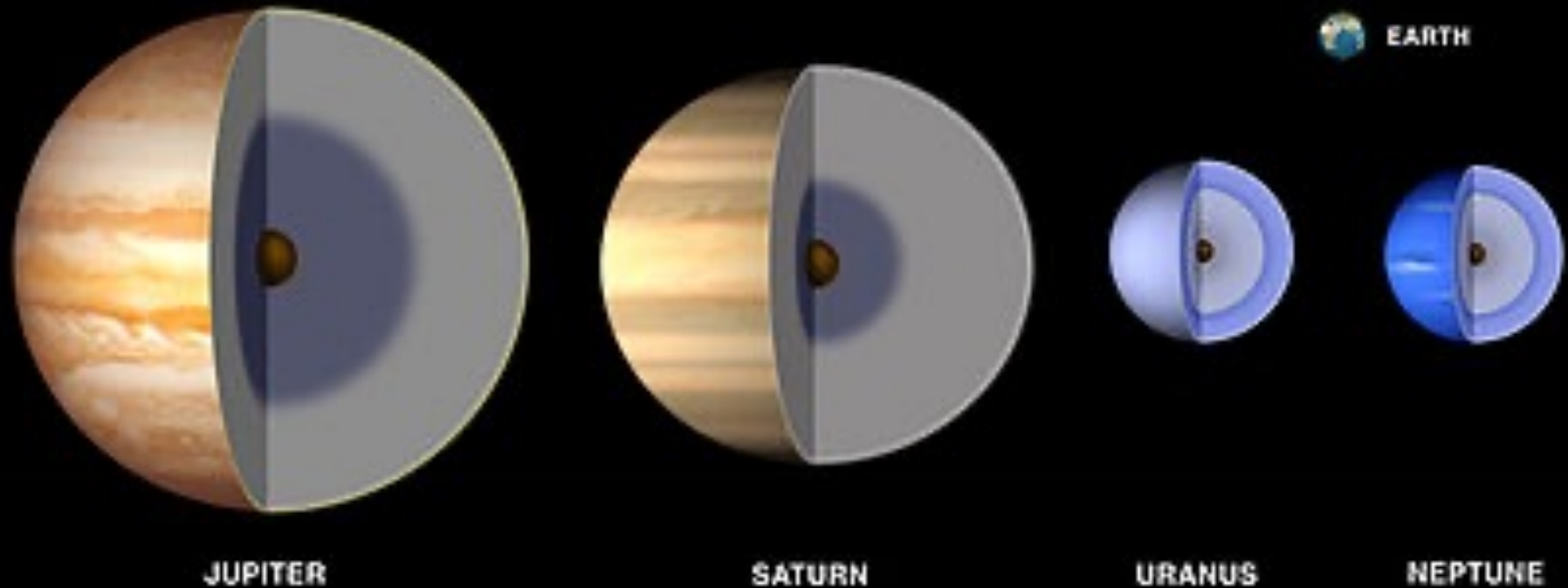
Minéralogie dominée par les silicates



Objets froids: la glace d'eau comme une roche



Objets froids: la glace d'eau comme une roche



■ Molecular hydrogen
■ Metallic hydrogen

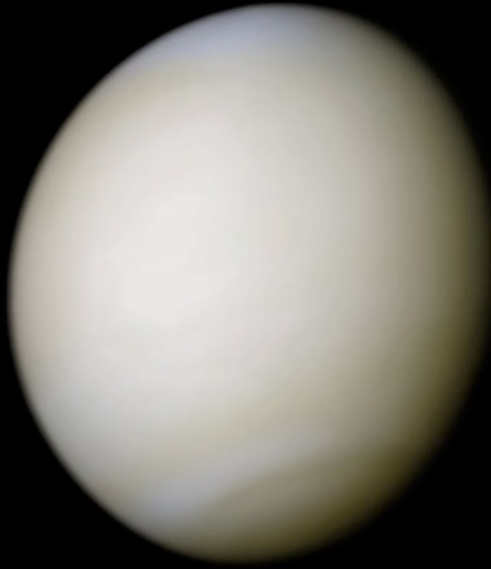
■ Hydrogen, helium, methane gas
■ Mantle (water, ammonia, methane ices)
■ Core (rock, ice)

Planètes Telluriques



Mercure
5,45

JS: 59j – RS: 88j



Vénus
5,26

JS: 243j – RS: 225j



Terre
5,52

JS: 24h – RS:
365,25j

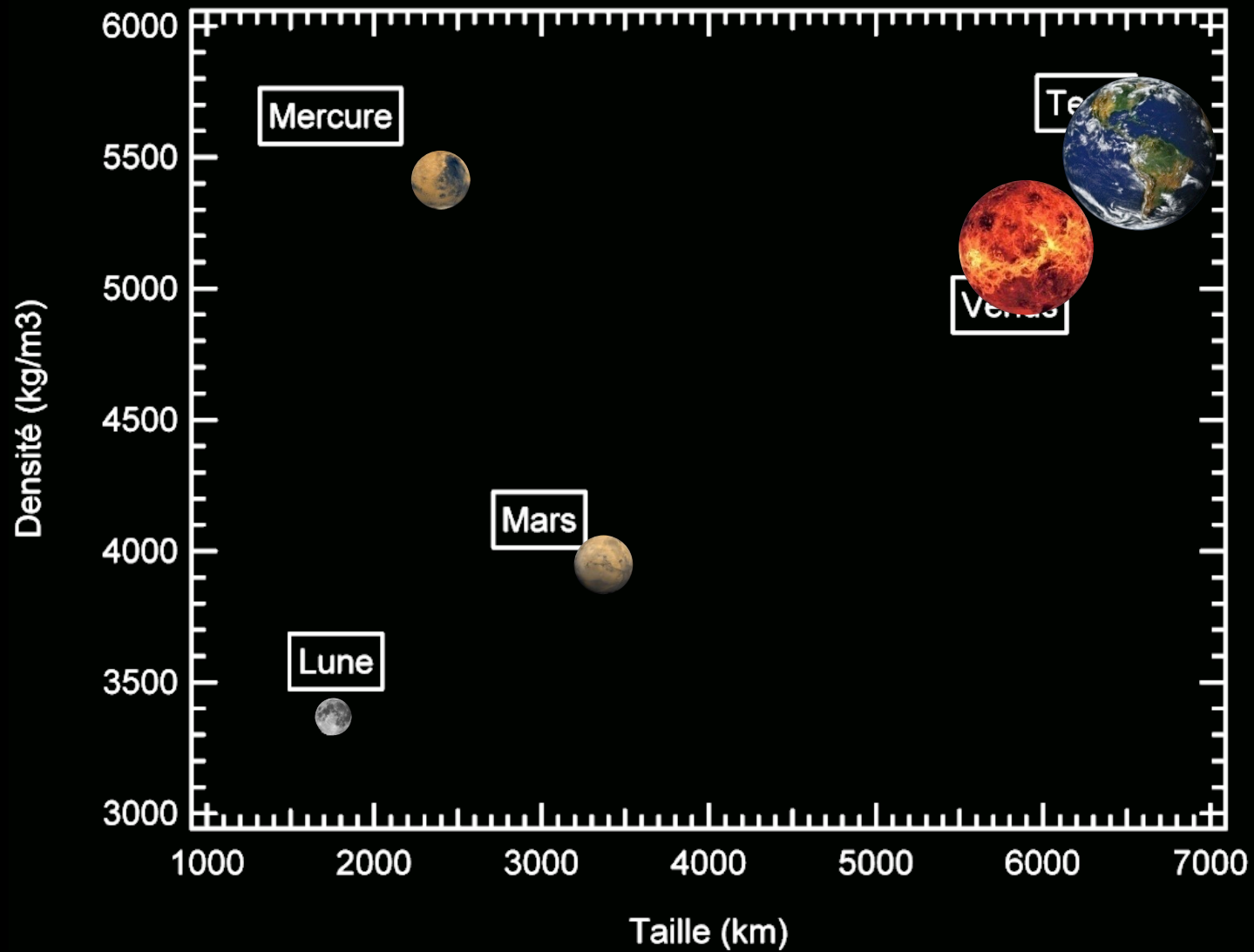


Mars
3,94

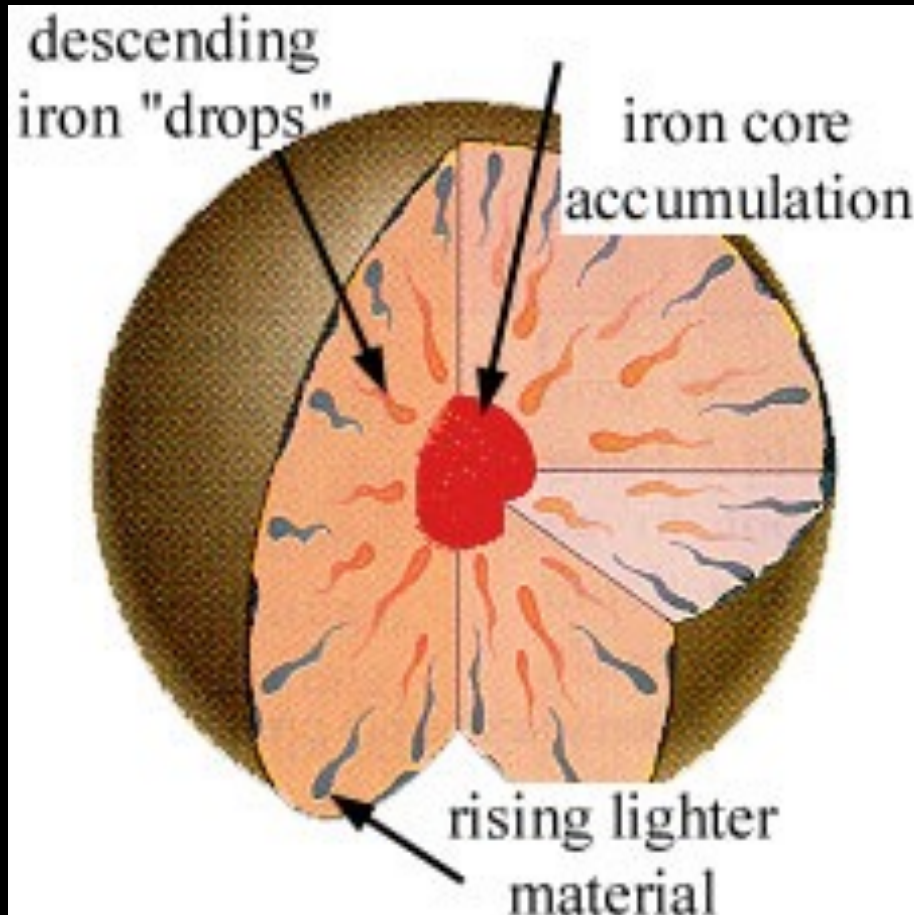
JS: 24h30
– RS: 687j

Atmosphère secondaire
Densité importante
Structure planétaire différenciée

Planètes Telluriques



Différenciation planétaire

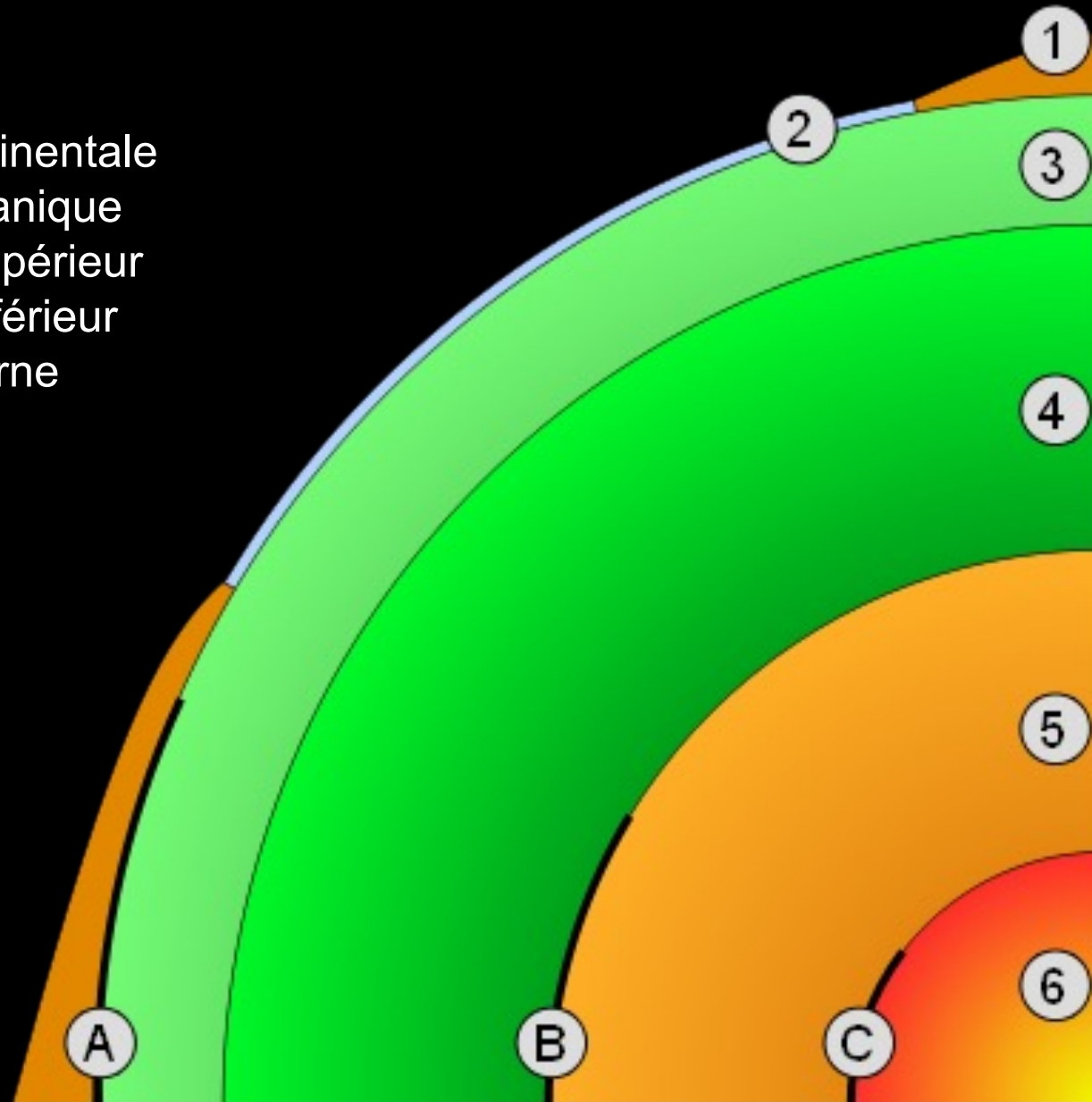


- chaleur accrétion
- énergie gravitationnelle
- énergie radiogénique



Différenciation planétaire

- (1) Croûte continentale
- (2) Croûte océanique
- (3) Manteau supérieur
- (4) Manteau inférieur
- (5) Noyau externe
- (6) Graine

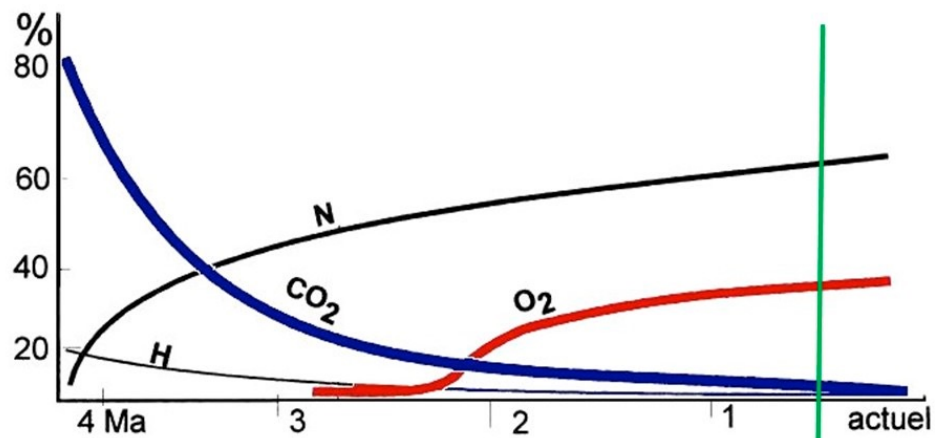






Atmosphère secondaire

Évolution de la composition chimique relative de l'atmosphère terrestre
(Doc université de Poitiers)

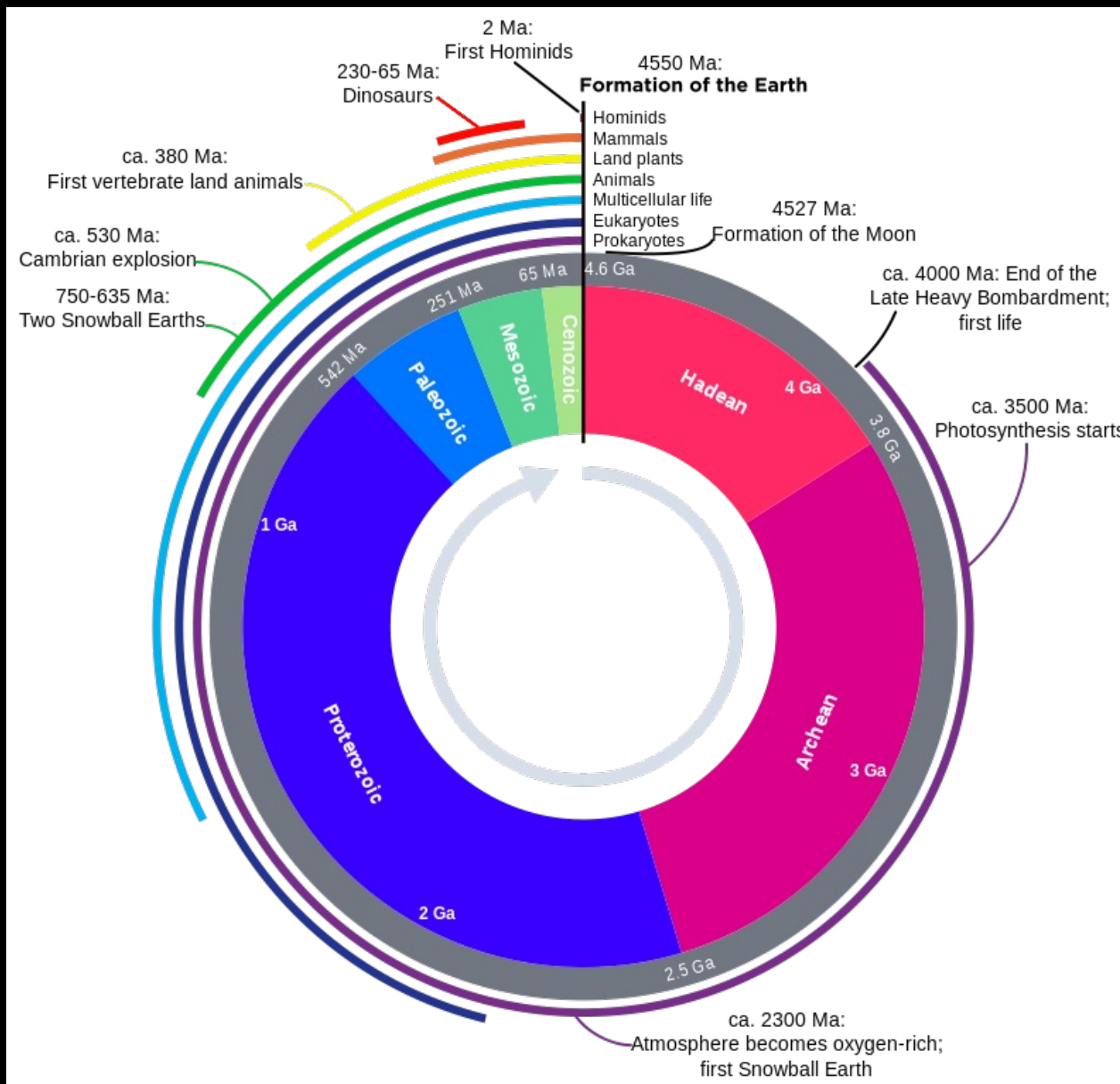


pression atmosphérique Hadéen ~200 bar



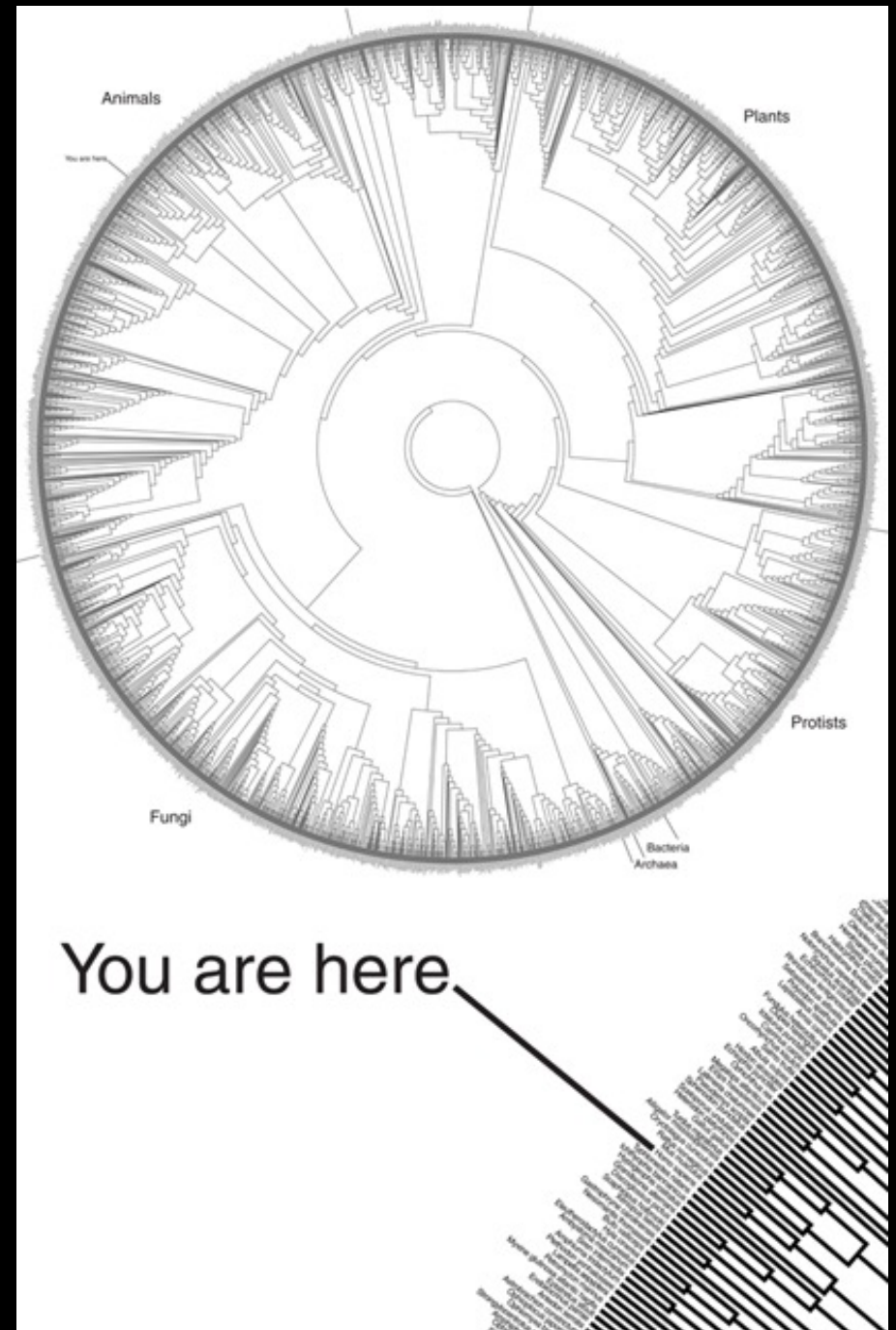
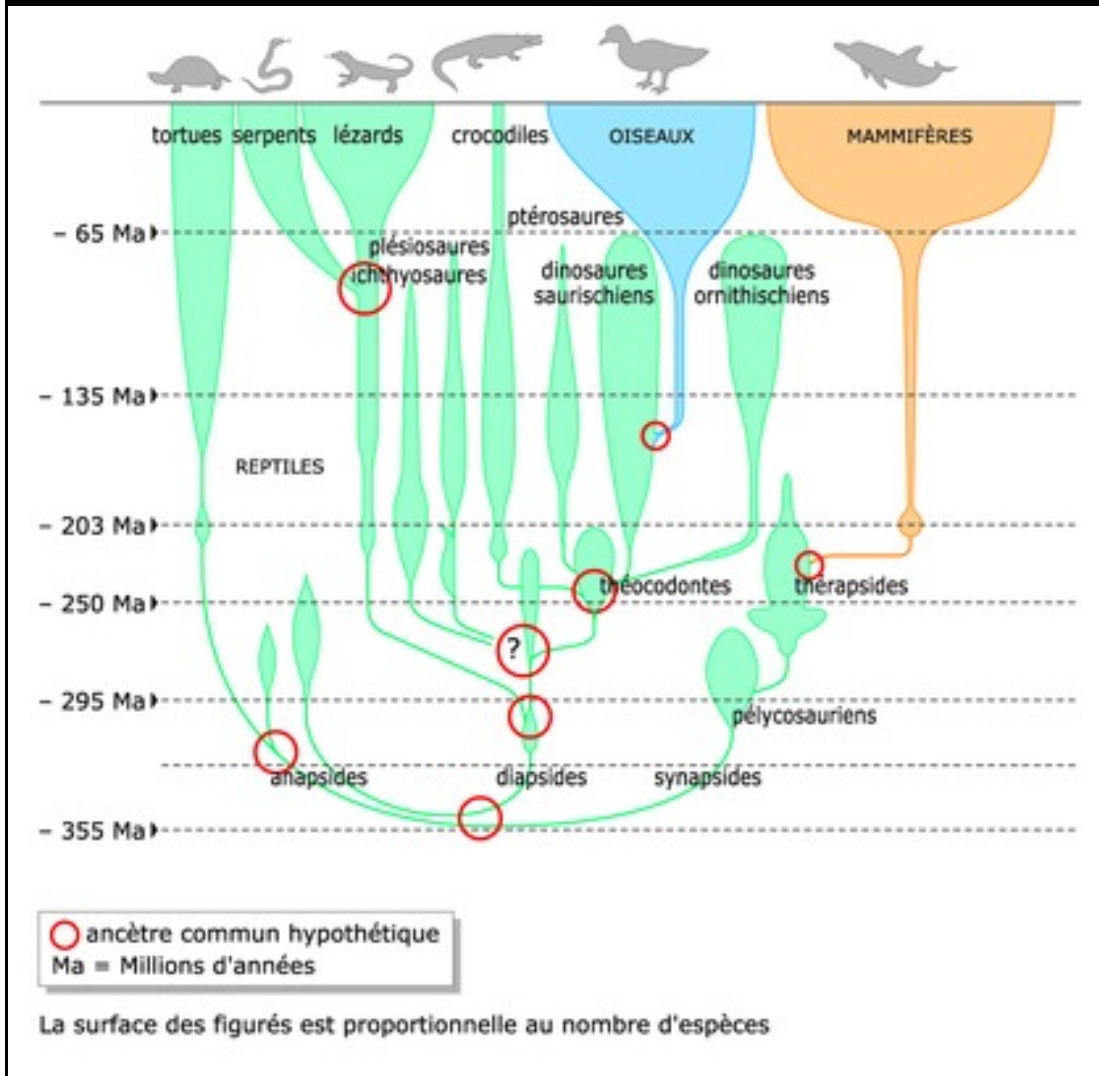
Terre primitive à l'Hadéen

Histoire de la Terre et Evolution Chimique



Terre Teneur en Carbone:
0.02 wt%

Photosphère solaire:
20 wt% [CNSiOMgFeS]

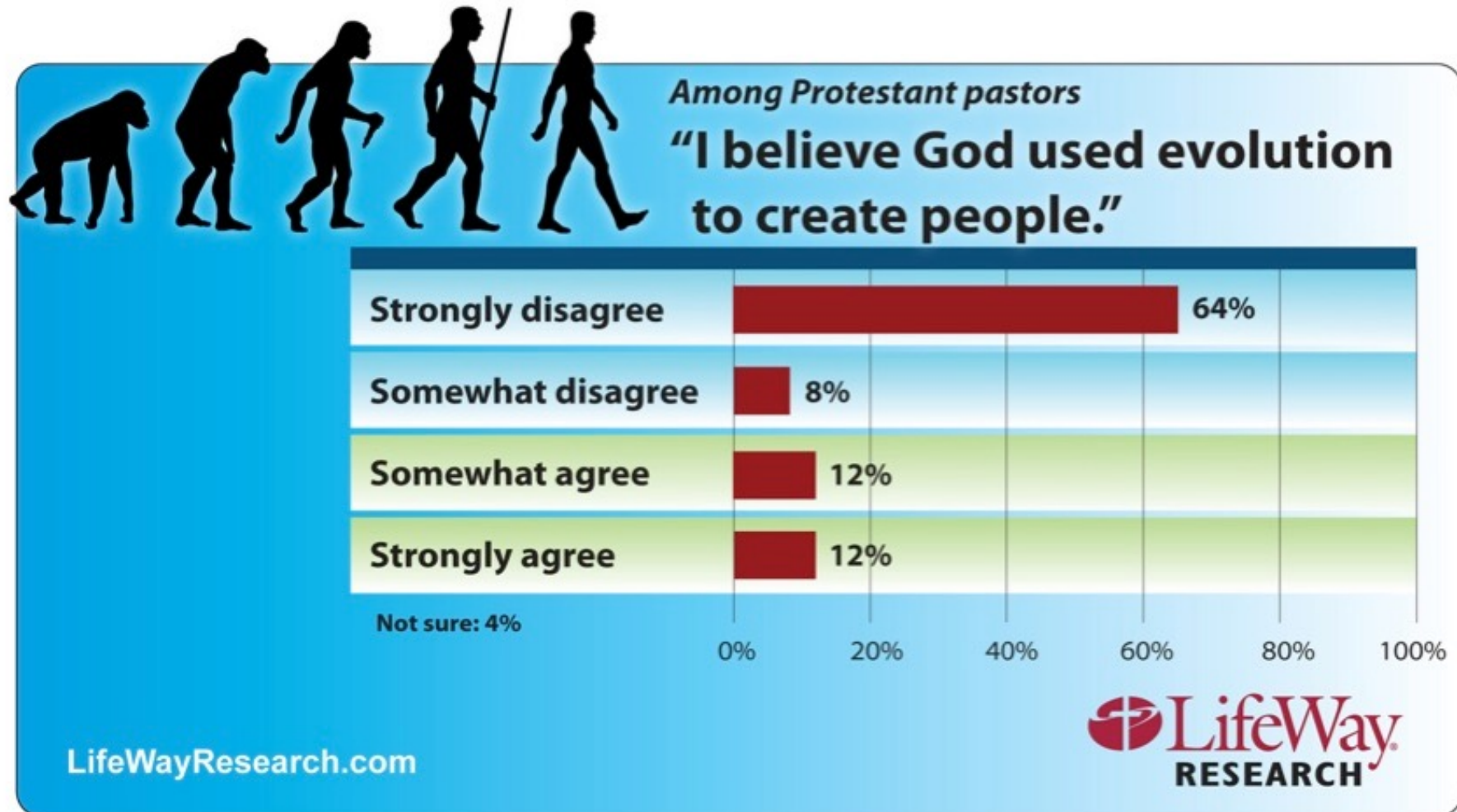


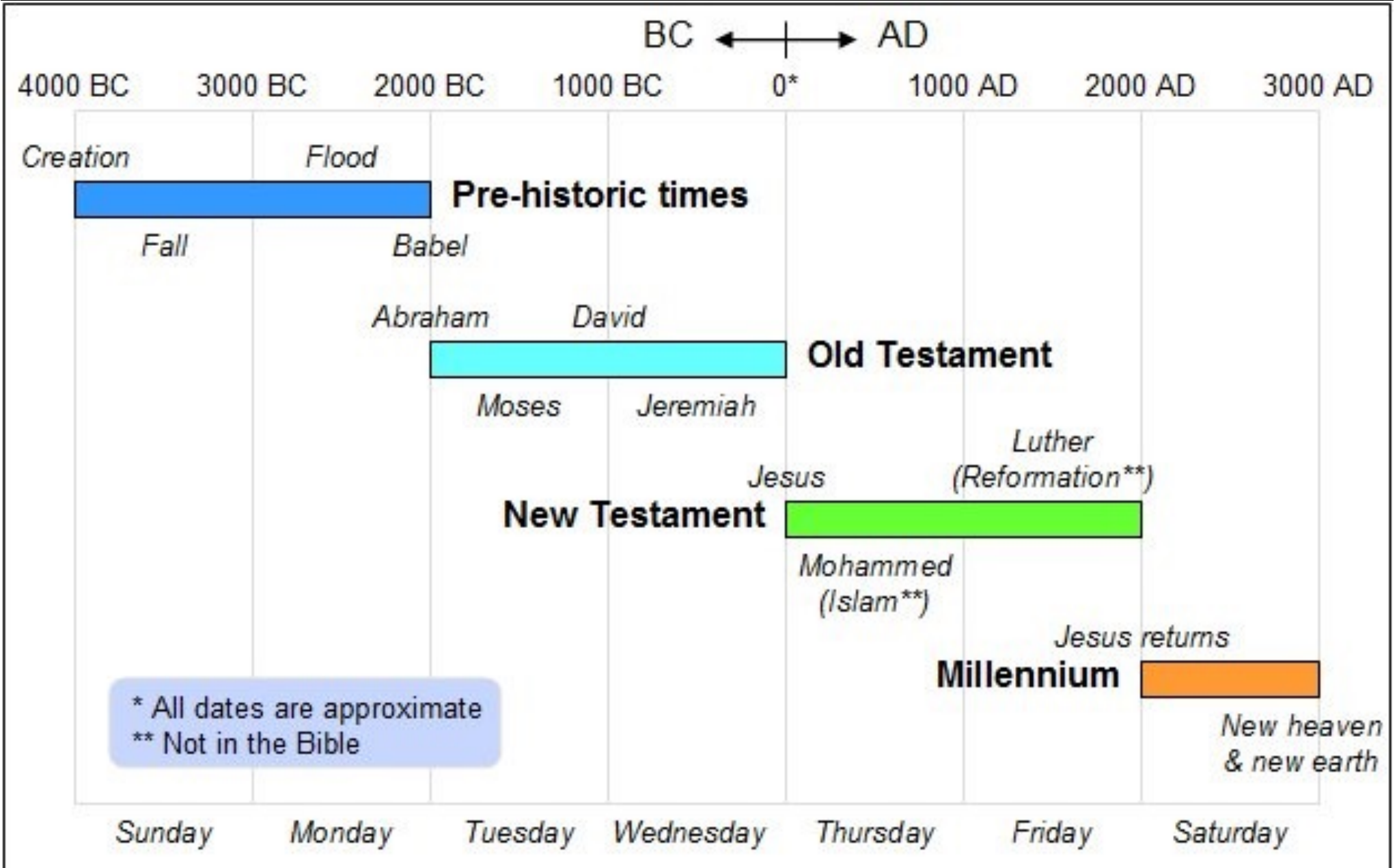
La parenthèse Fake News



The Problem

2) Pastors/Church Leaders Perpetuate the Problem









NAUTILUS

Age: 114 million years old

Size: 55 millimeters (2.1 in)

Location: Madagascar

Period: Cretaceous, Albian Stage

The nautilus has dealt a severe blow to the theory of evolution, having undergone no change in 300 million years. The 114-million-year-old nautilus shown here is completely identical to present-day specimens.



L'ATLAS de la CREATION



HARUN YAHYA



ترکی کا سب سے بڑا مبلغ ایک جنسی درندہ نکلا!
نابالغ لڑکیوں کے ریپ پر 1 ہزار سال کی سزا

Sentenced to 1075 years of prison for sexual assault



Un débat scientifique du XIXe siècle : fixisme et transformisme



Carl von Linné
1707-1778



Georges-Louis Leclerc de Buffon
1707-1788



Georges Cuvier
1769-1832

Fixisme & Catastrophes

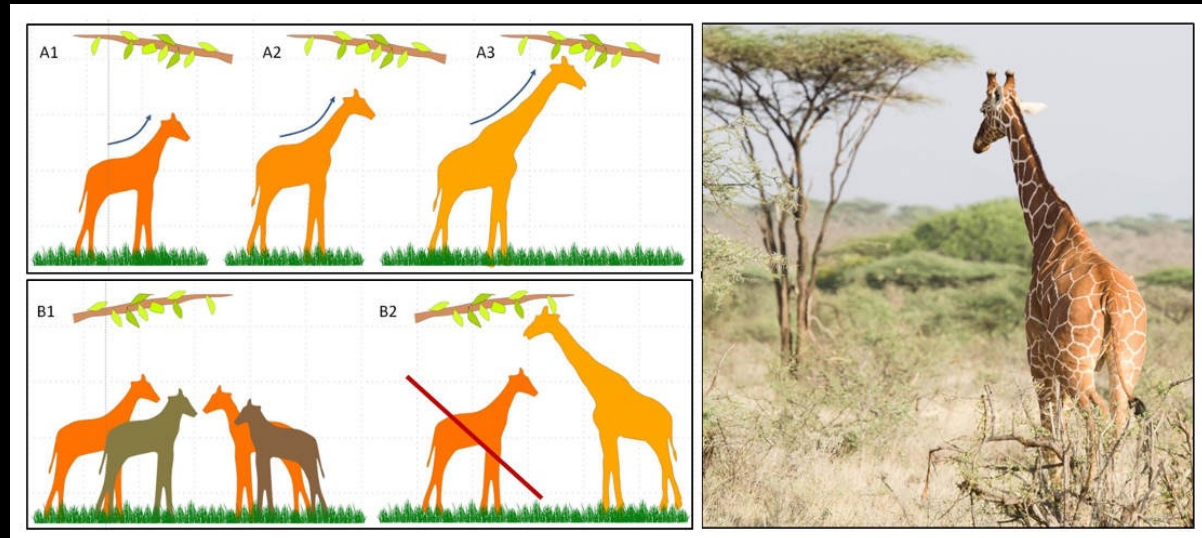
Les espèces sont créées et n'évoluent pas
Disparition suite à des catastrophes
Evolution naturelle discontinue

Transformisme

Caractères acquis et transmis entre génération
Enregistrement fossile: complexification du vivant



Jean-Baptiste de Lamarck
1744-1829



Le Système Solaire

Origine et Evolution

Diversité et Composition

1. Chimie des corps planétaires

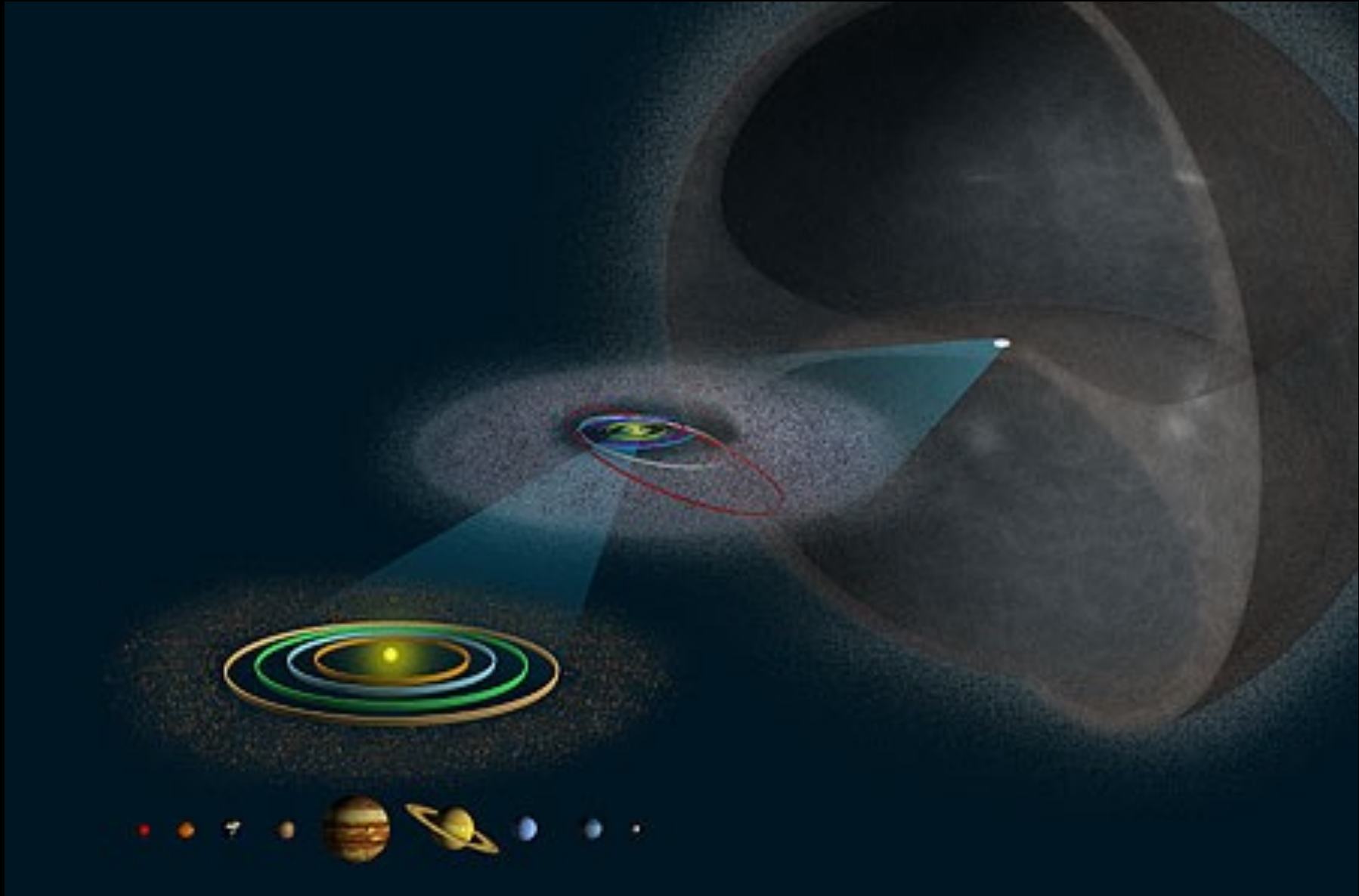
2. Petits Corps et Origines

3. Complexité chimique des météorites et des comètes

Ceinture d'astéroïdes

Ceinture de Kuiper

Nuage de Oort



Mesurer la composition des petits corps

Spectro-photométrie à distance

- Observations sols
- Satellitaires (e.g. ISO, JWST)

Sonde spatiale

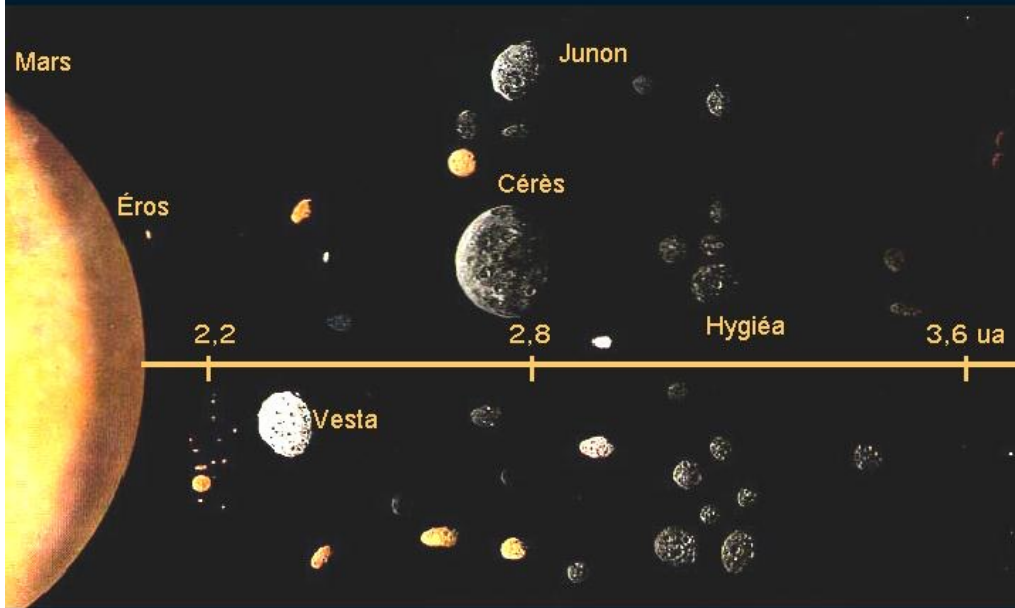
- Giotto/Vega
- Rosetta
- New Horizons

Etudier les cosmomatériaux

- Météorites et micrométéorites
- Poussières interplanétaires
- Collecte par des sondes spatiales (Lune, 3 astéroïdes, 1 comète)

Les astéroïdes

Diversité de forme, de taille et de composition

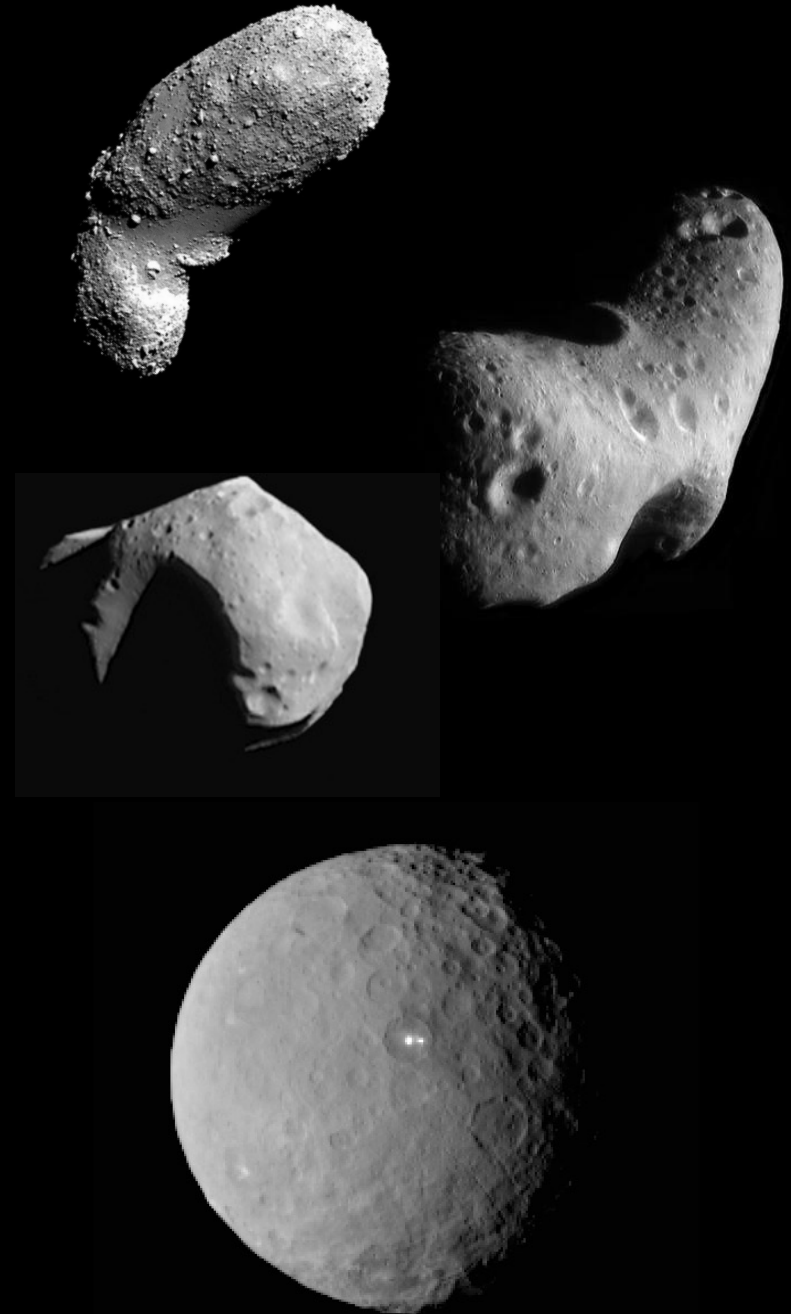
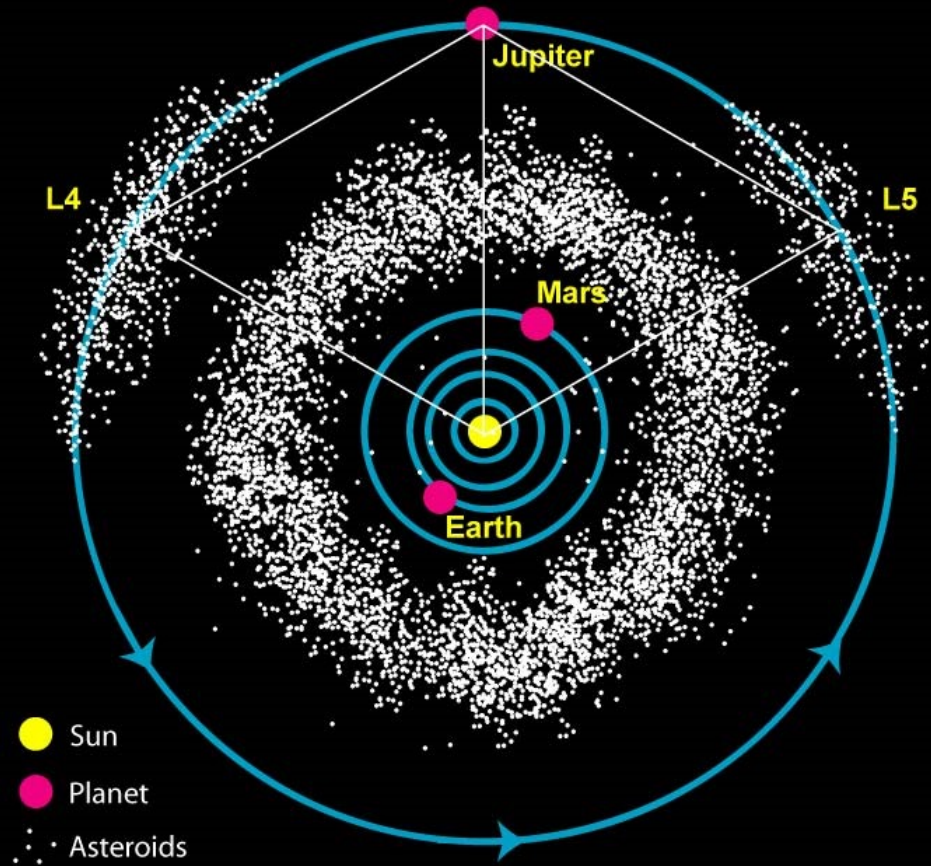


6
Aurélie Le Bras, thèse 9/10/2001 (DESPA/IAS)

Entre Mars et Jupiter



Les astéroïdes



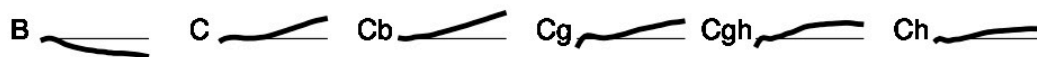
Des surfaces planétaires très discrètes

Bus-DeMeo Taxonomy Key

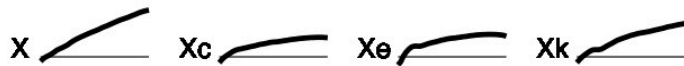
S-complex



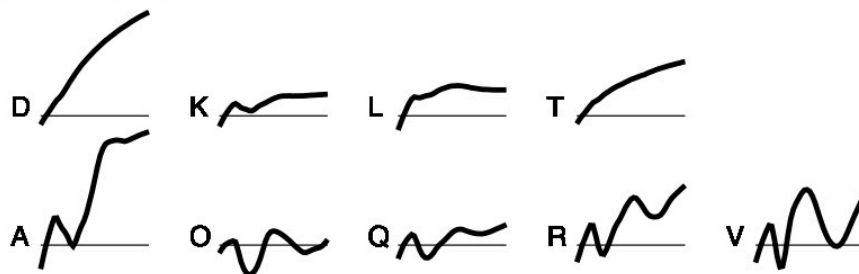
C-complex



X-complex



End Members



<http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>

F. E. DeMeo, R. P. Binzel, S. M. Slivan, and S. J. Bus. Icarus 202 (2009) 160-180

Type	Sous-groupe	Minéraux de surface
D	D	Organique + silicates amorphes (+ glace ?)
X	Xe, Xc, Xk	Métaux + transitions entre P, M, E
X	P	Silicates anhydres + organique ? (+ glace ?)
X	M	Métaux, enstatite
X	E	Mg-pyroxène
G	Cg, Cgh	Argiles, carbone, organique
C	Ch, Cb	Sèche: Olivine, pyroxène, carbone (+ glace ?) Humide: argiles, carbone, organique
C	B	Argiles, carbone, organiques
C	F	Carbonées anhydres
S	Sa, Sq, Sr, Sk, Sl	Olivine, pyroxène, métaux
S	K	Olivine, orthopyroxène
S	Ld	Silicates standards
S	Q	Olivine, pyroxène, métal
S	R	Olivine, pyroxène
S	A	Olivine
V	-	Pyroxène, feldspath
T	-	Troilite ?
O	-	Olivine, pyroxène, métaux
W	-	Argiles, (sels ?)

Des surfaces planétaires très discrètes

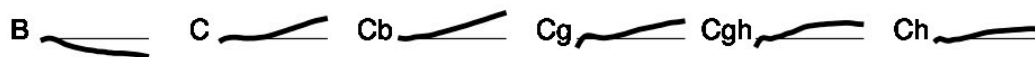
Très sujet à caution...

Bus-DeMeo Taxonomy Key

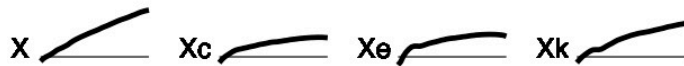
S-complex



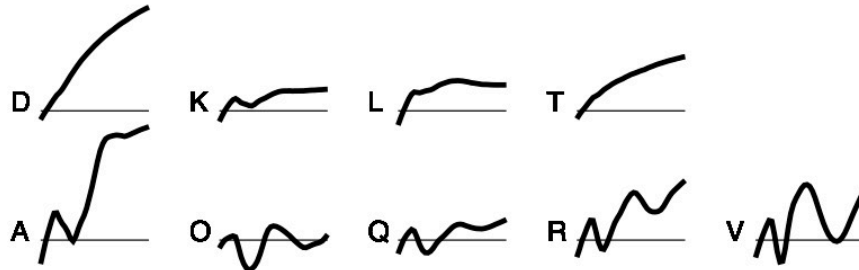
C-complex



X-complex



End Members

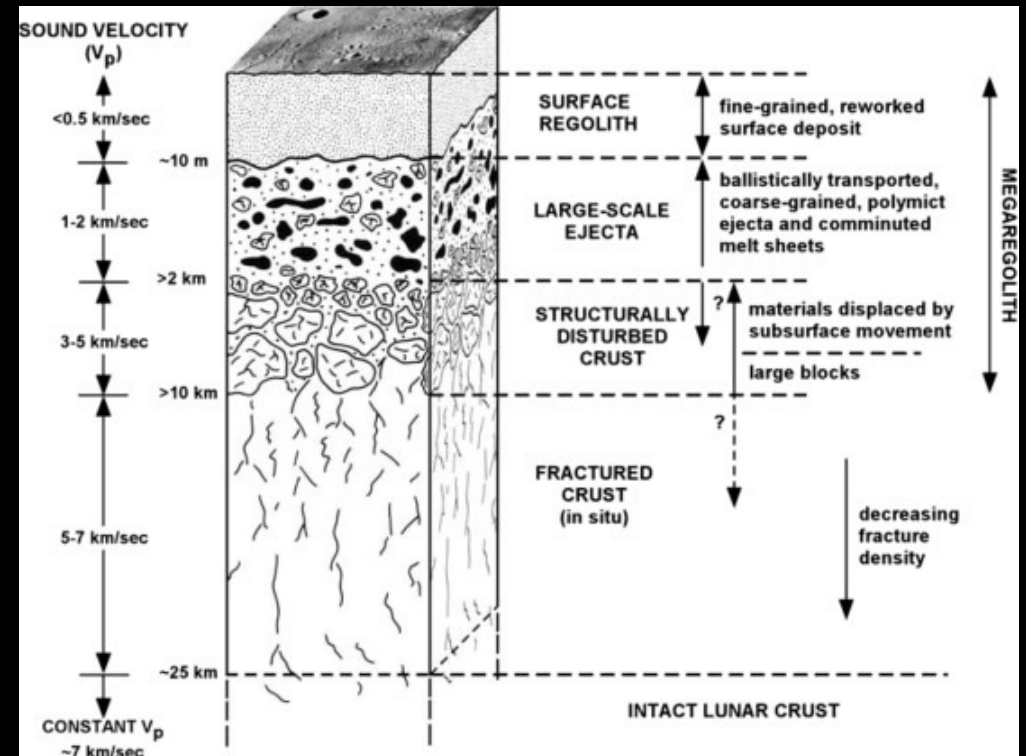
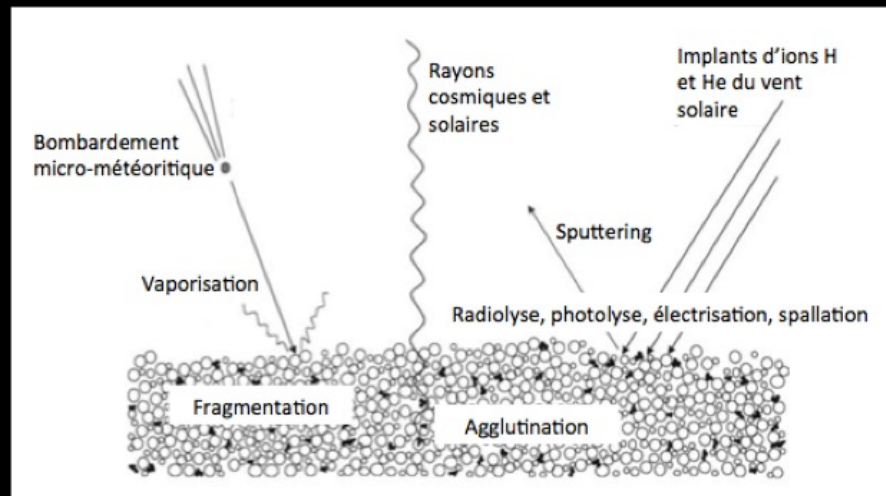


<http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>

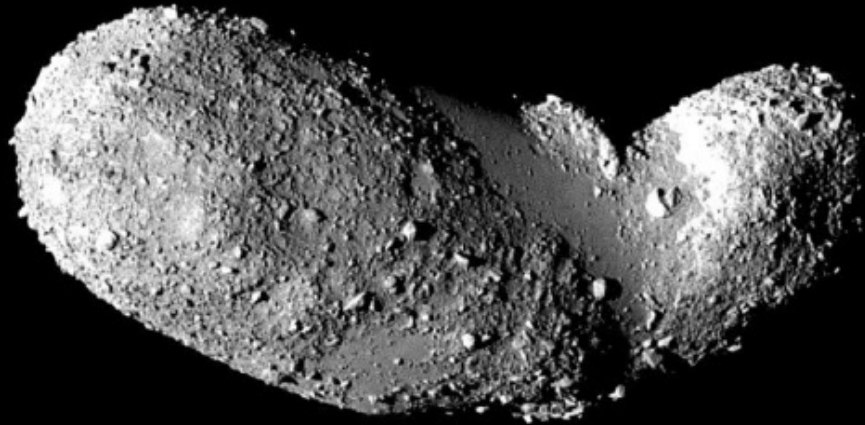
F. E. DeMeo, R. P. Binzel, S. M. Slivan, and S. J. Bus. Icarus 202 (2009) 160-180

Type	Sous-groupe	Minéraux de surface
D	D	Organique + silicates amorphes (+ glace ?)
X	Xe, Xc, Xk	Métaux + transitions entre P, M, E
X	P	Silicates anhydres + organique ? (+ glace ?)
X	M	Métaux, enstatite
X	E	Mg-pyroxène
G	Cg, Cgh	Argiles, carbone, organique
C	Ch, Cb	Sèche: Olivine, pyroxène, carbone (+ glace ?) Humide: argiles, carbone, organique
C	B	Argiles, carbone, organiques
C	F	Carbonées anhydres
S	Sa, Sq, Sr, Sk, Sl	Olivine, pyroxène, métaux
S	K	Olivine, orthopyroxène
S	Ld	Silicates standards
S	Q	Olivine, pyroxène, métal
S	R	Olivine, pyroxène
S	A	Olivine
V	-	Pyroxène, feldspath
T	-	Troilite ?
O	-	Olivine, pyroxène, métaux
W	-	Argiles, (sels ?)

Des surfaces planétaires modifiées



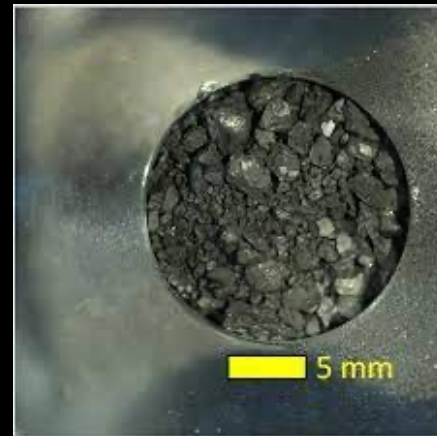
Itokawa & Ryugu: explorations JAXA



607x287x264 m



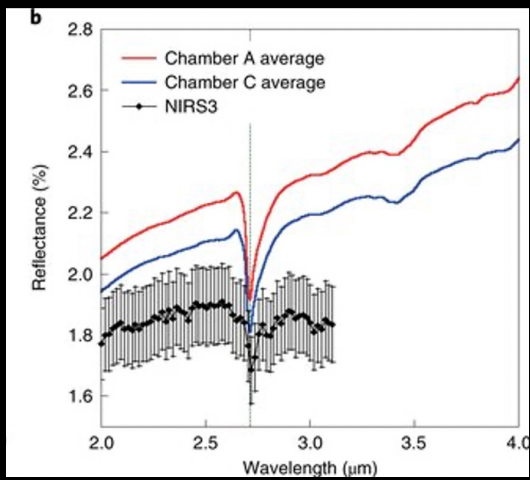
435 m



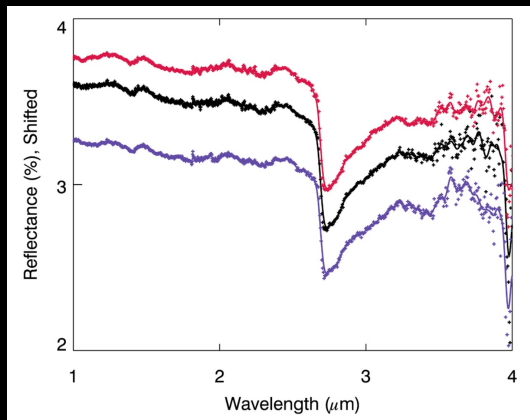
Spectroscopie embarquée

Remote sensing

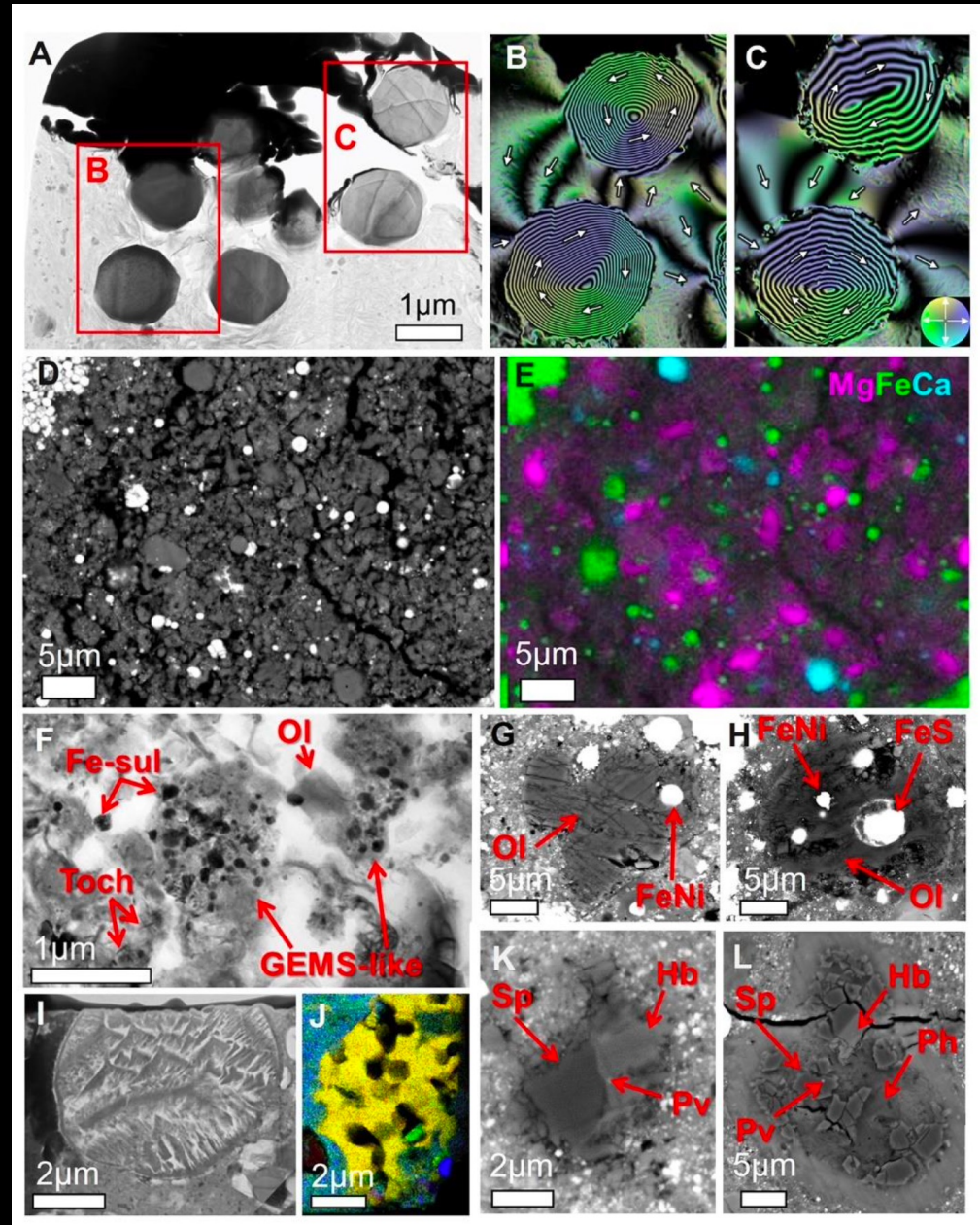
Ryugu



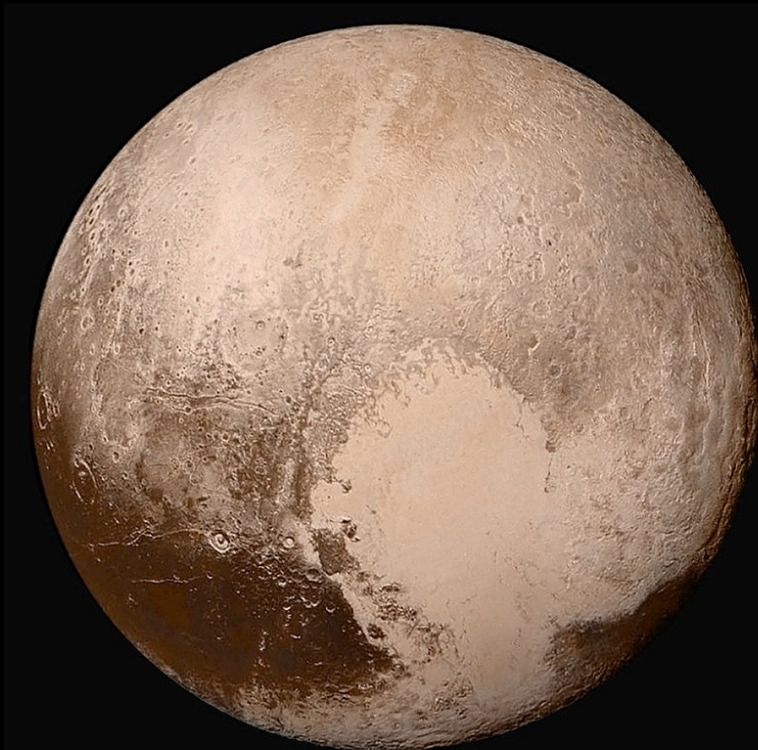
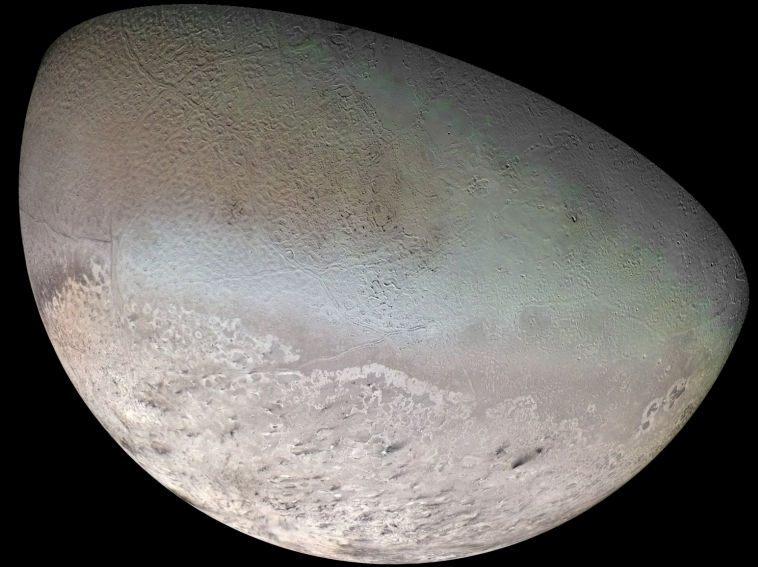
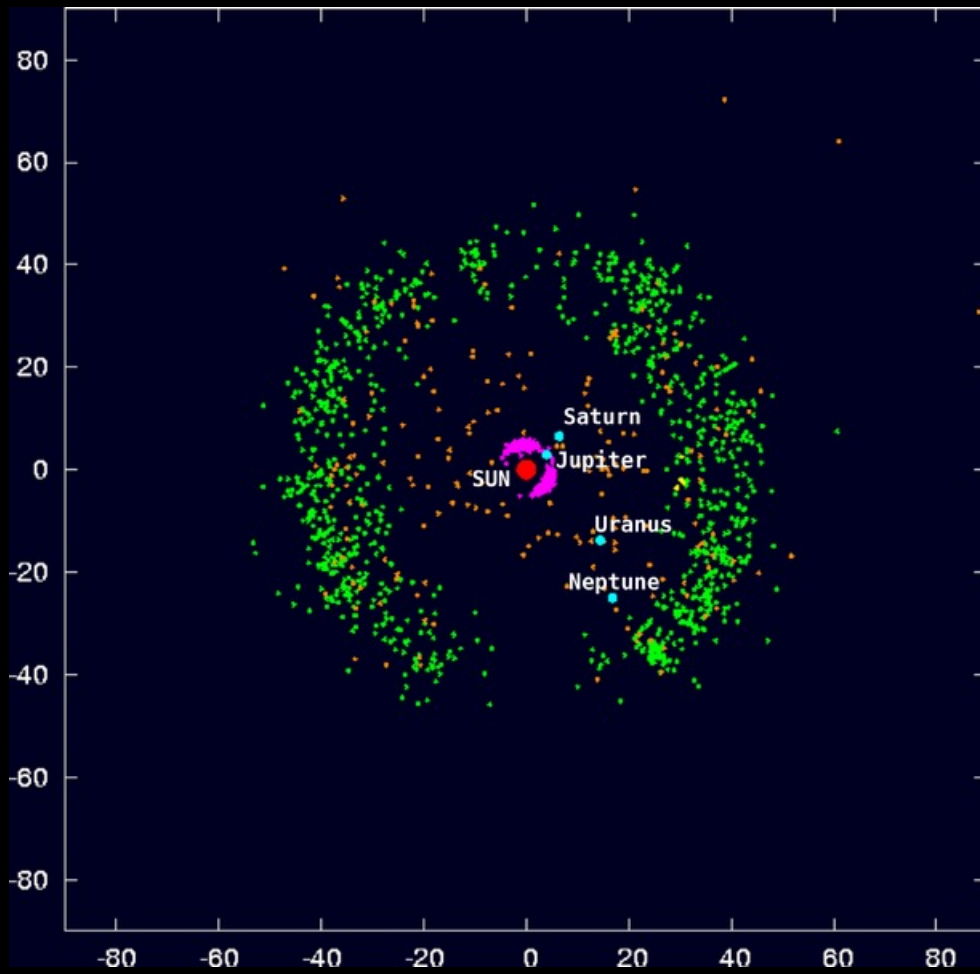
Bennu



Sample

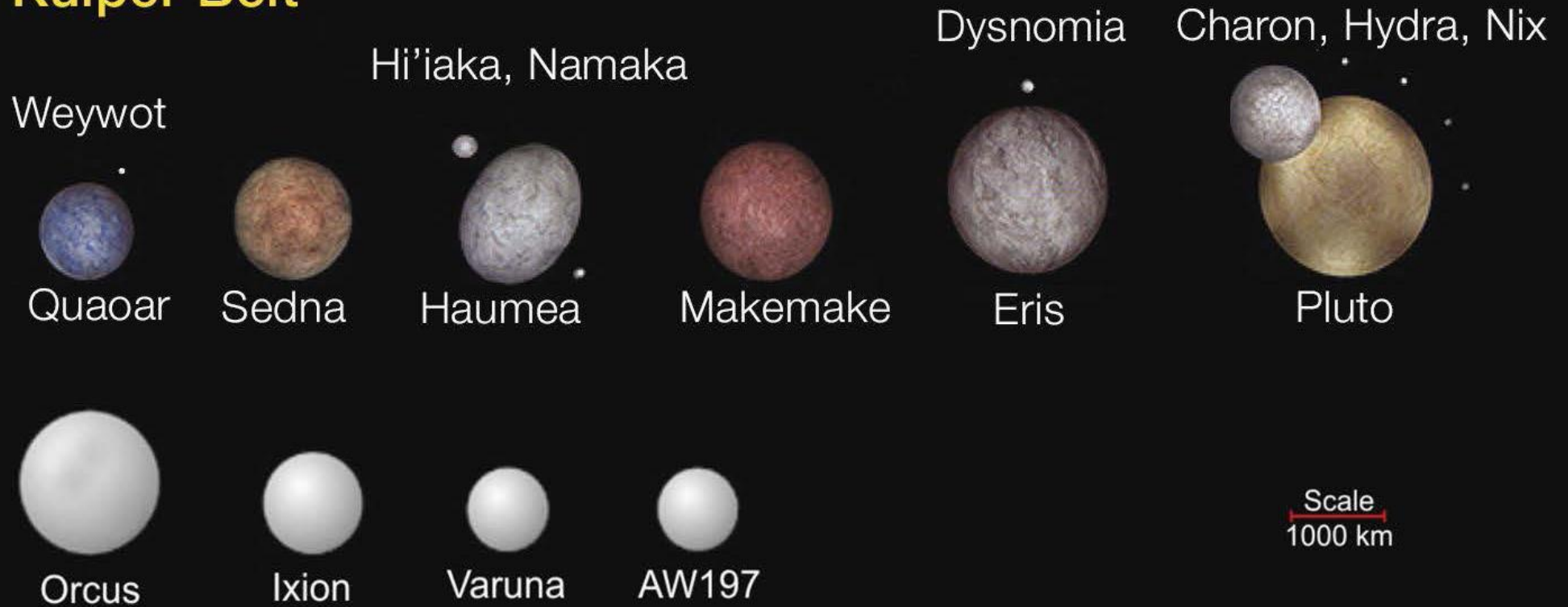


La ceinture de Kuiper



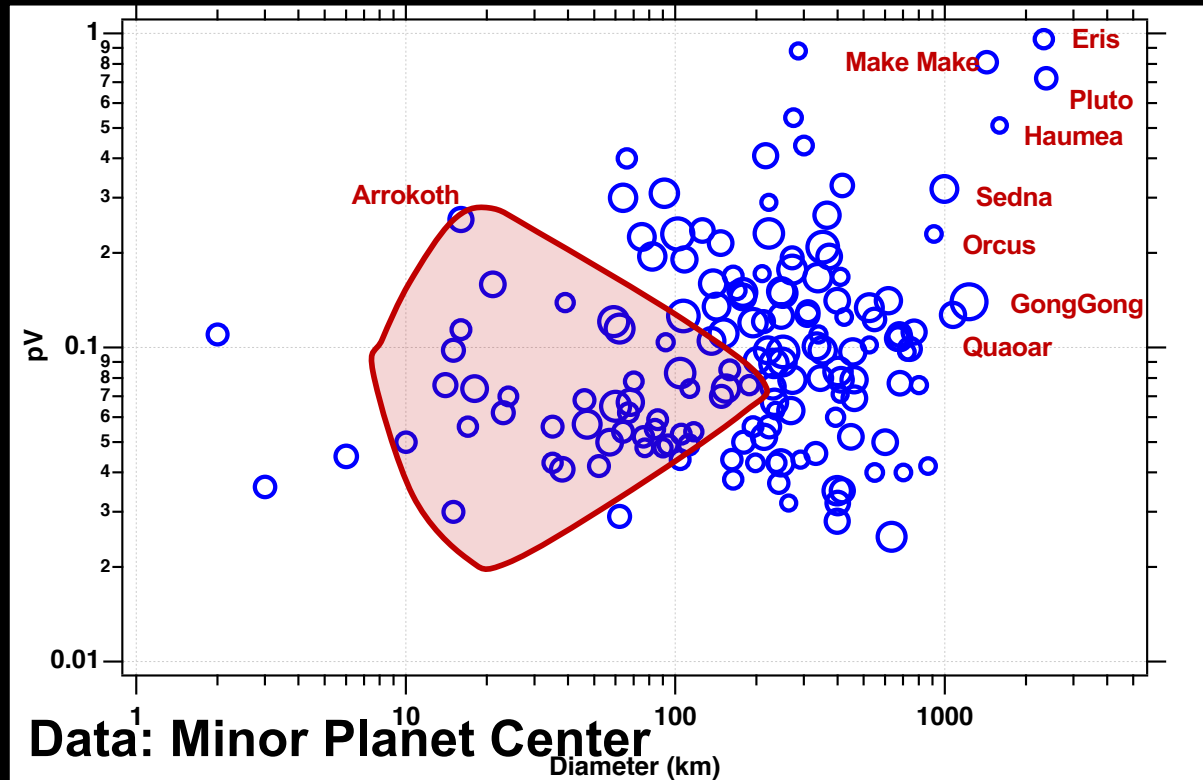
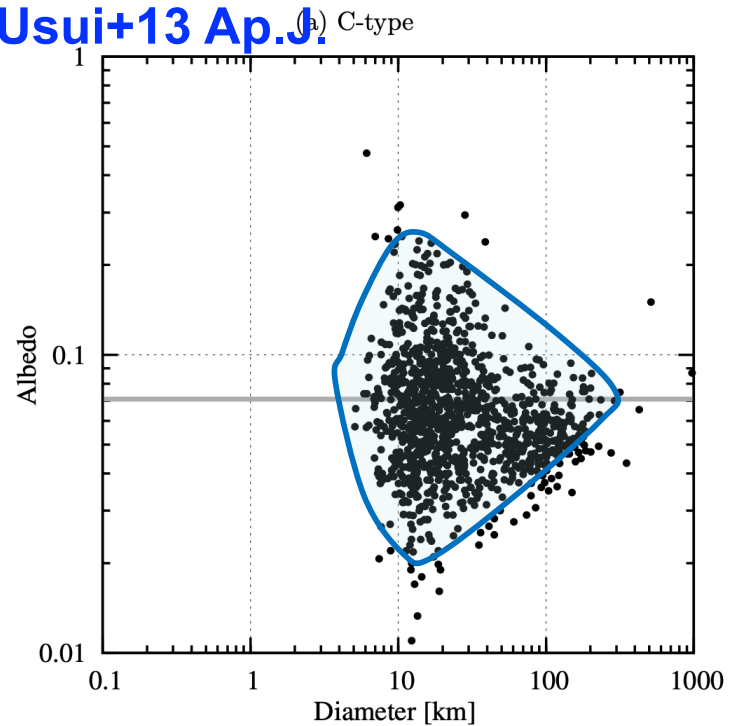
La ceinture de Kuiper et ses planètes naines

Kuiper Belt

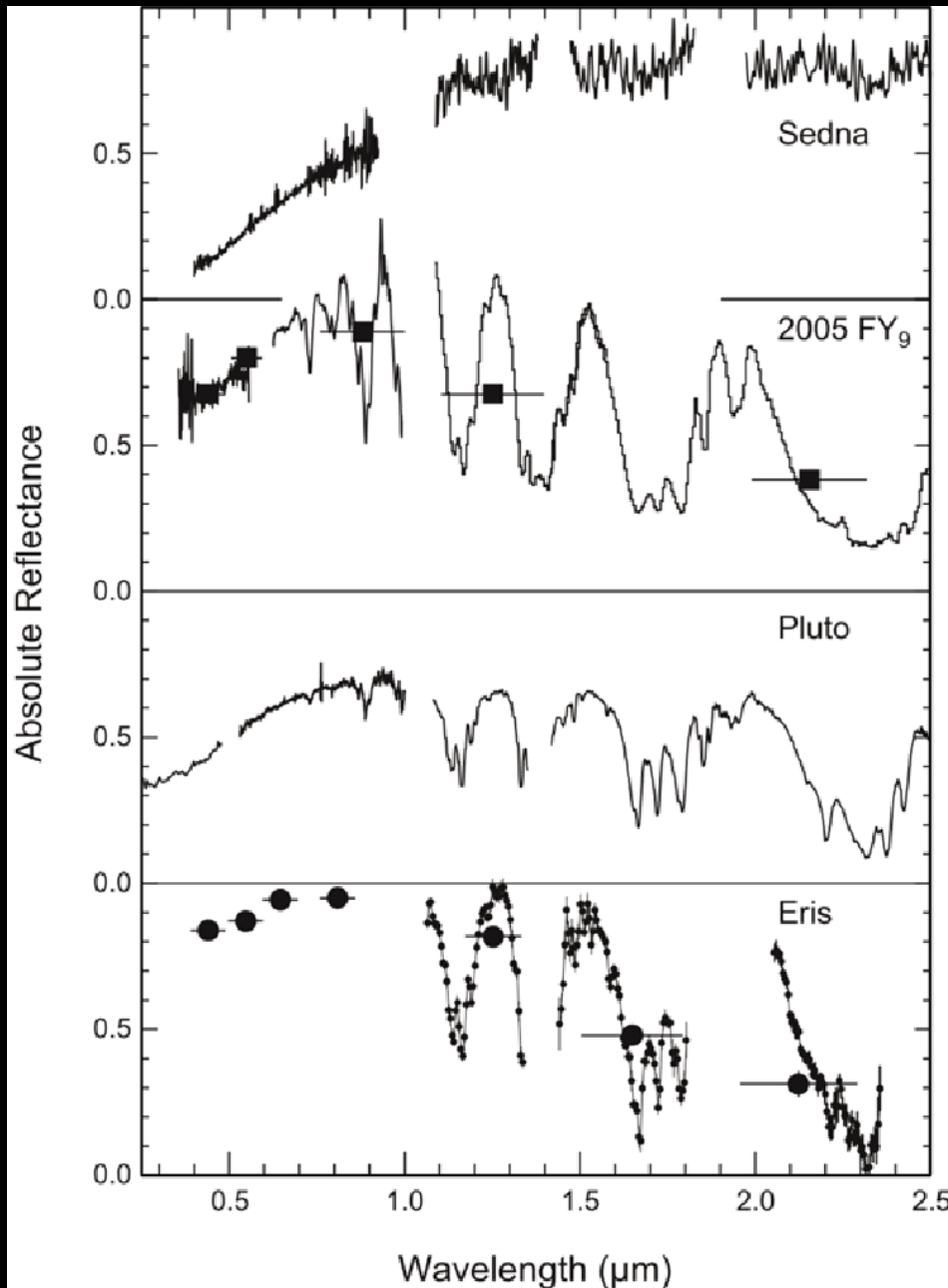


Portrait de famille: Taille versus Albedo

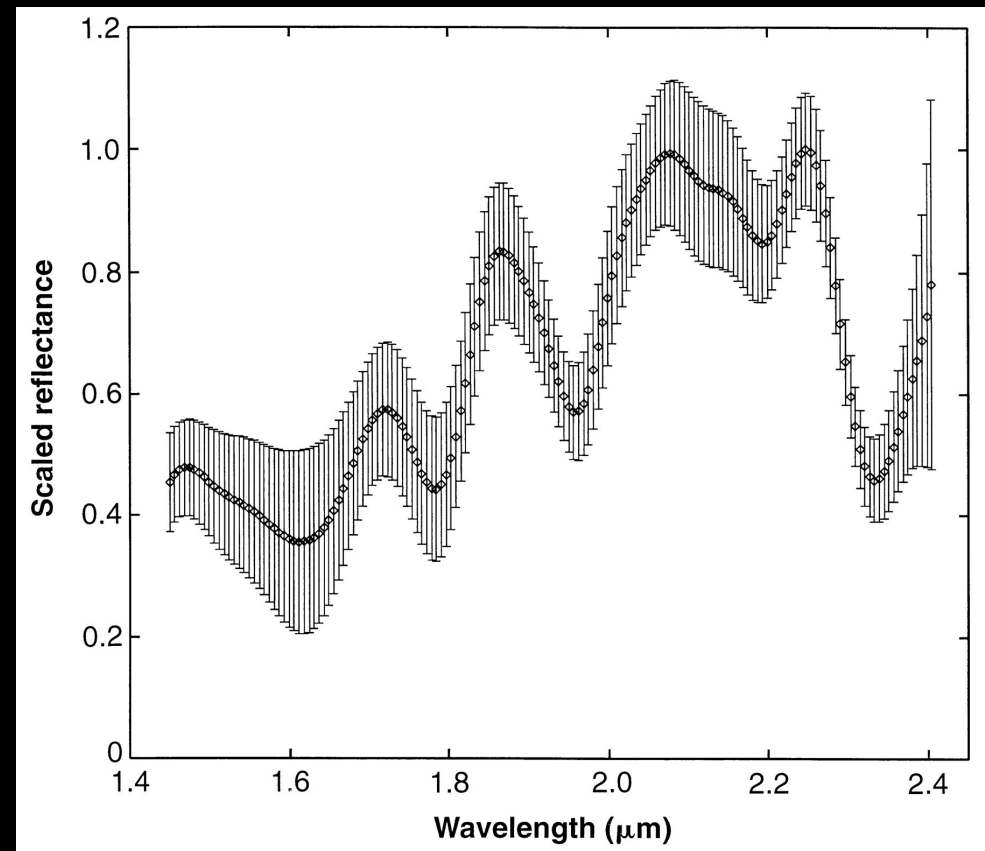
Usui+13 Ap.J.



Des surfaces glacées plus bavardes



- H₂O ice
- N₂
- CO, CO₂
- CH₄
- CH₃OH
- Composés organiques ?
- Minéraux ?

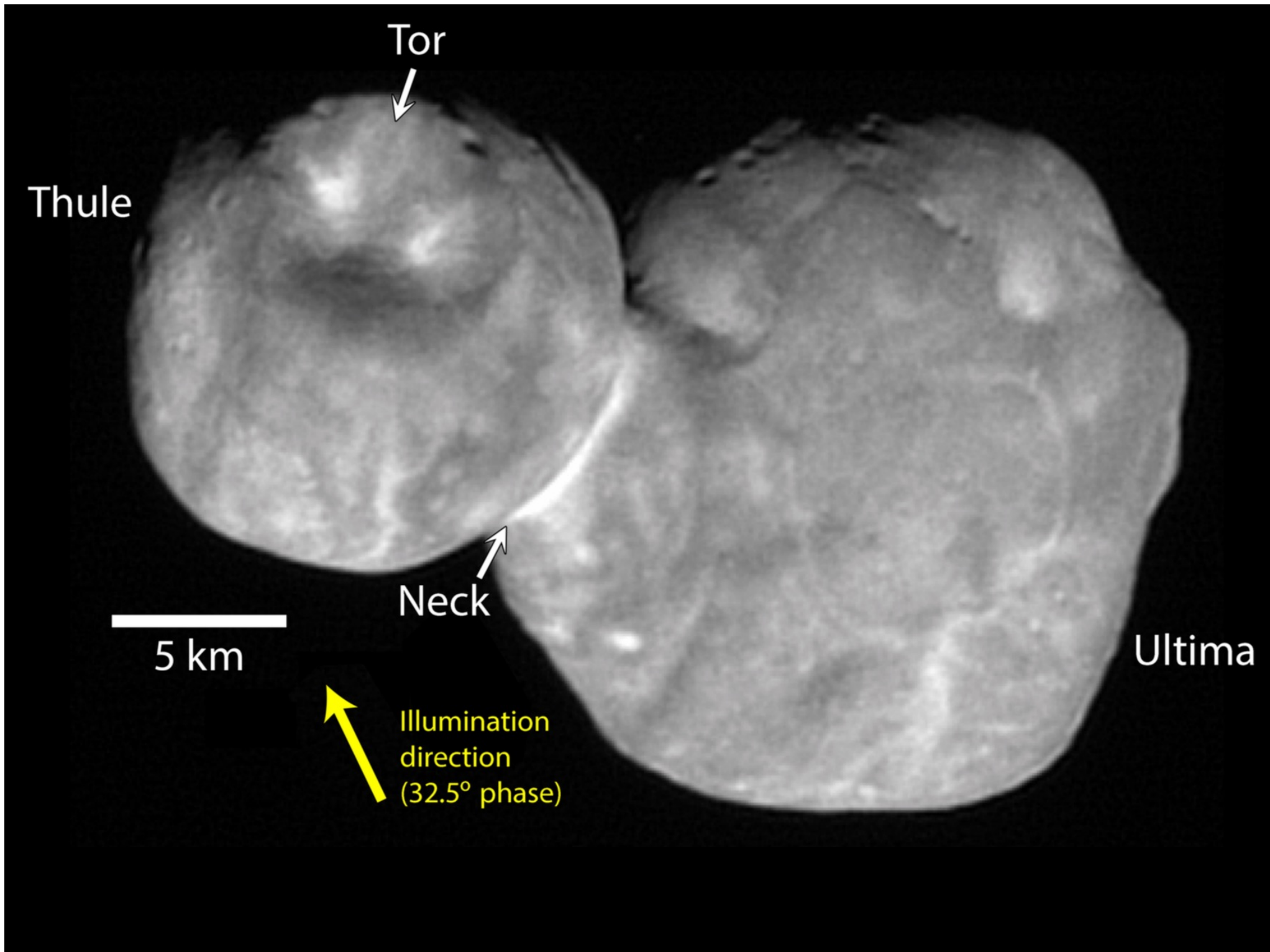


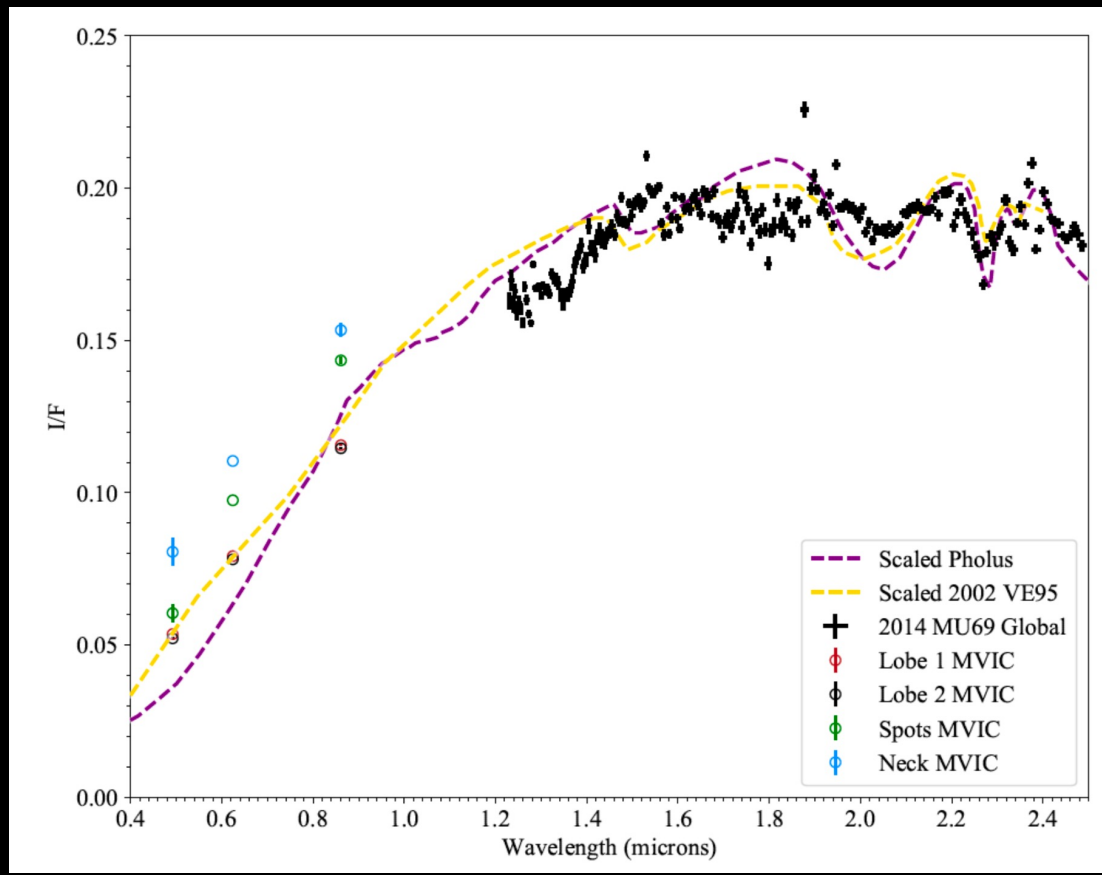
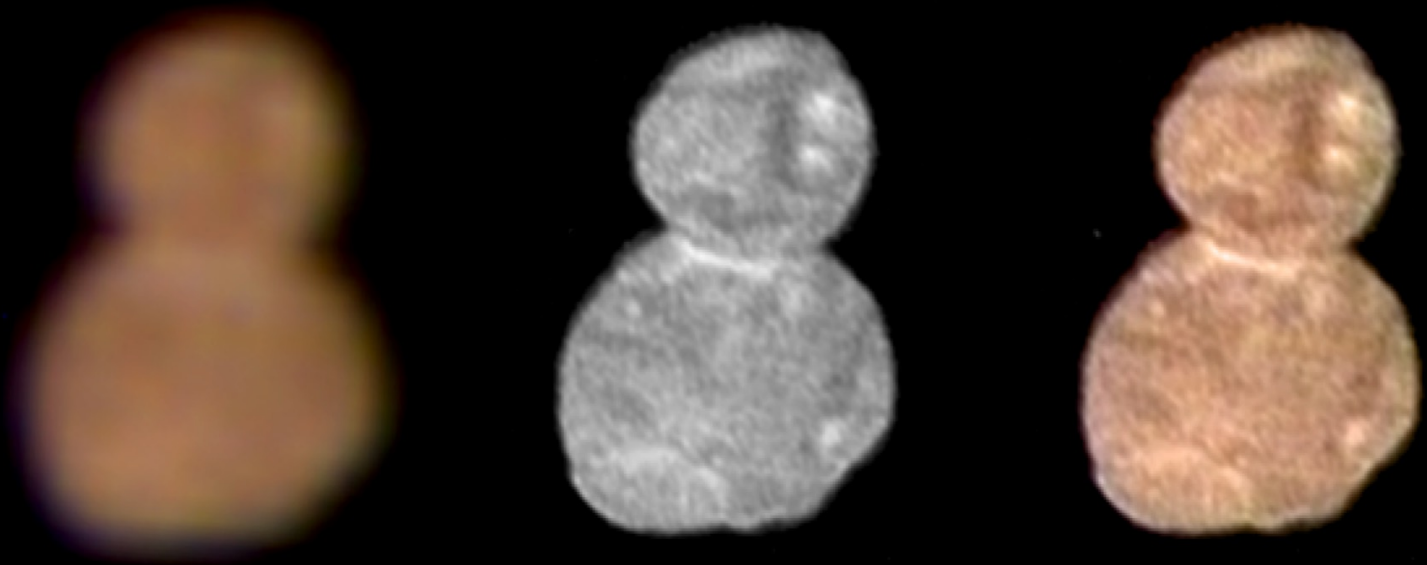
Arrokoth: 1^{er} survol le 1er janvier 2019

NEW HORIZONS
ULTIMA
1 JANUARY

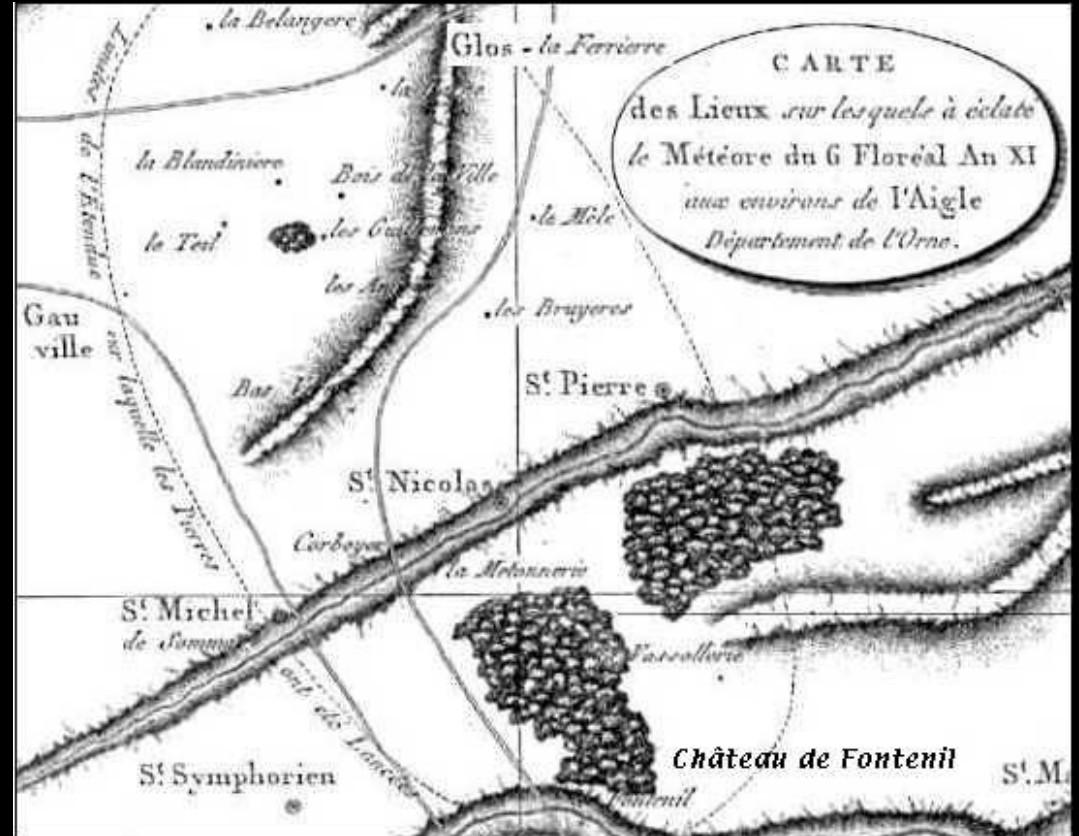
CLOSE FLYBY OF
THULE
2 0 1 9







Météorites et poussières interplanétaires: fragments de petits corps



1803: chute de l'Aigle

Les probabilités d'une collision avec un géocroiseur

Estimations sur la base d'une densité de 3,5 et d'une vitesse de 15 km/s.

10 cm à 10 m 2000 météorites par an

Accident local Elles brûlent en général dans l'atmosphère. Elles peuvent toutefois endommager des objets comme une voiture ou un toit. Les accidents mortels restent rarissimes.

30 m une fois par siècle

Cataclysme local. Meteor Crater (désert d'Arizona , mét. diamètre 45 mètres , diamètre de 1.2 km, âge 50 000 ans)
100 fois la bombe atomique Hiroshima.

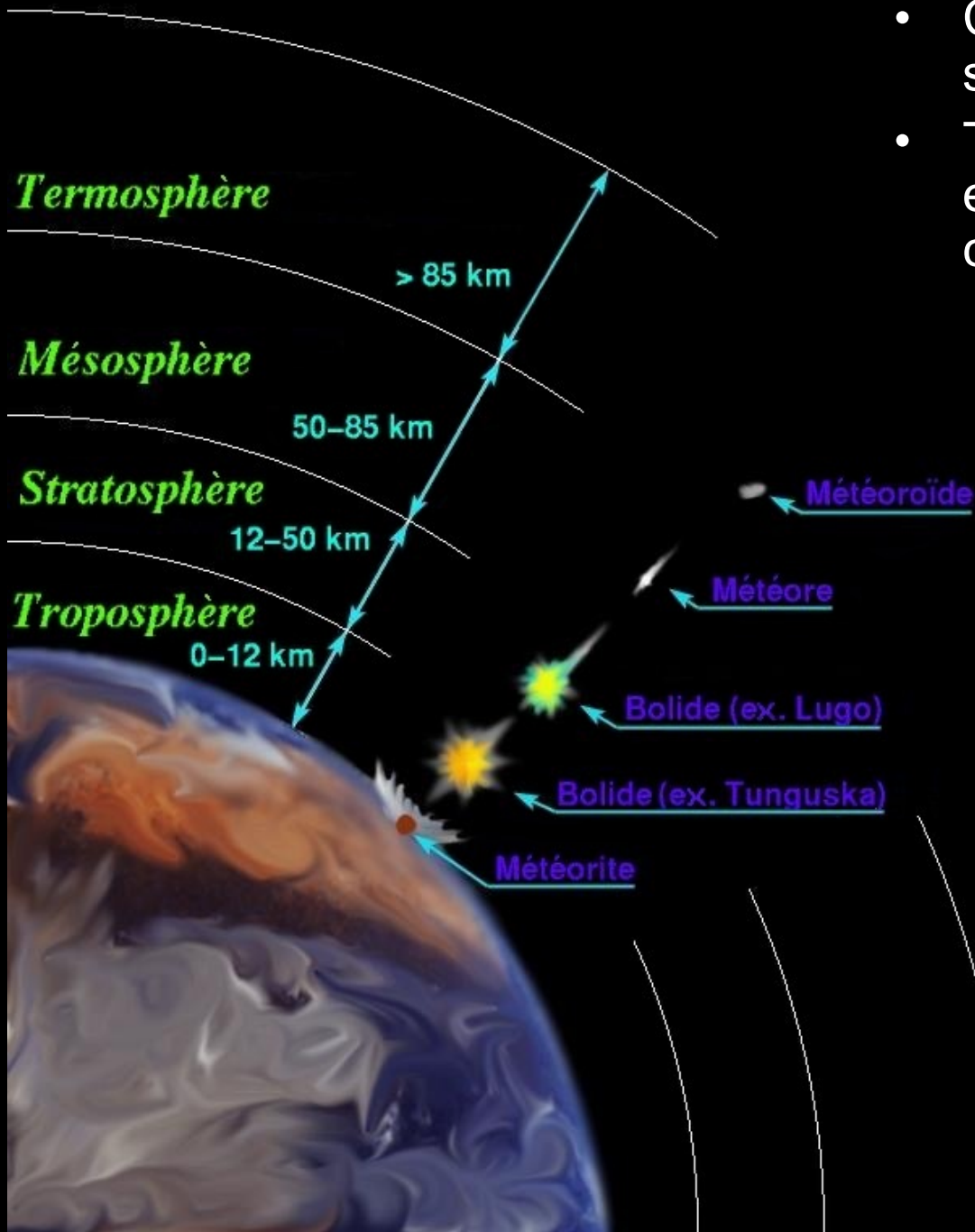
Pertes humaines probables : équivalentes à une inondation ou à un tremblement de terre majeurs (destruction de villes)

1 km Une fois tous les 30 000 ans

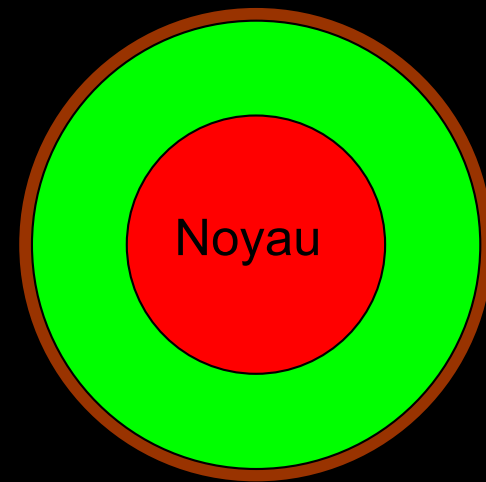
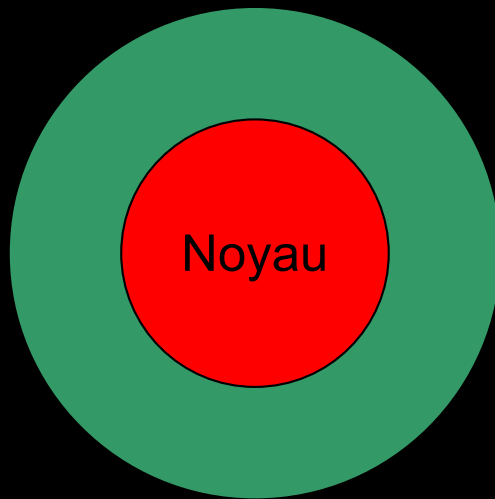
Cataclysme régional *Pertes humaines probables* : 100 millions de morts
Le cratère de Rochechouart, France une météorite de 1,5 km de diamètre, cratère de 20 kilomètres de diamètre, 200 millions d'années
Le cratère de Manicouagan, Québec une météorite de 5 km de diamètre, cratère de 100 kilomètres de diamètre, 214 millions d'années



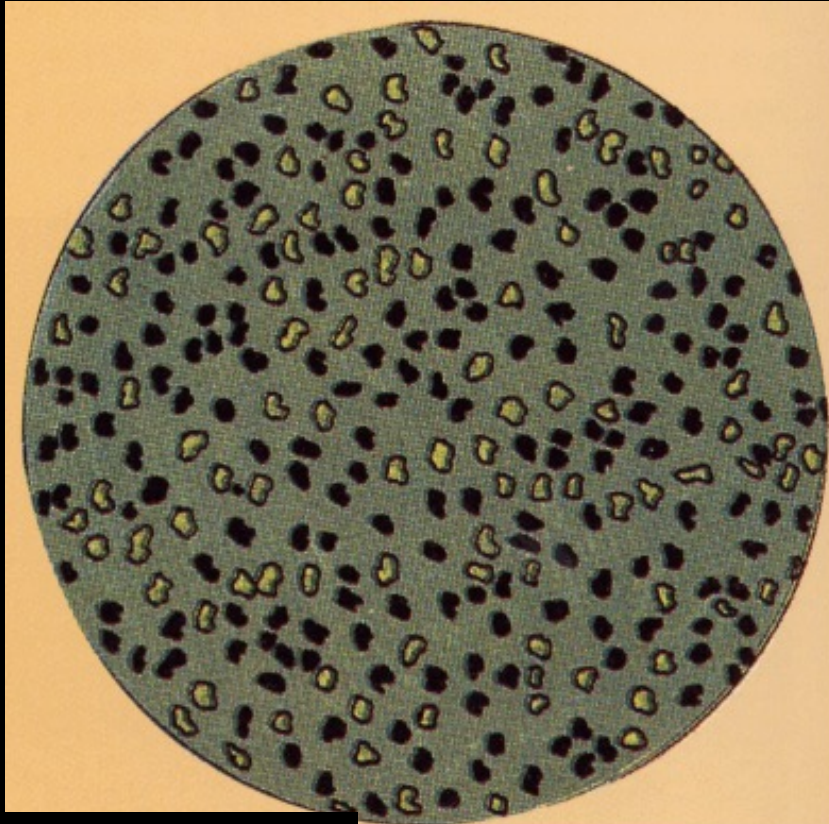
10 km Une fois tous les 100 millions d'années Cataclysme planétaire



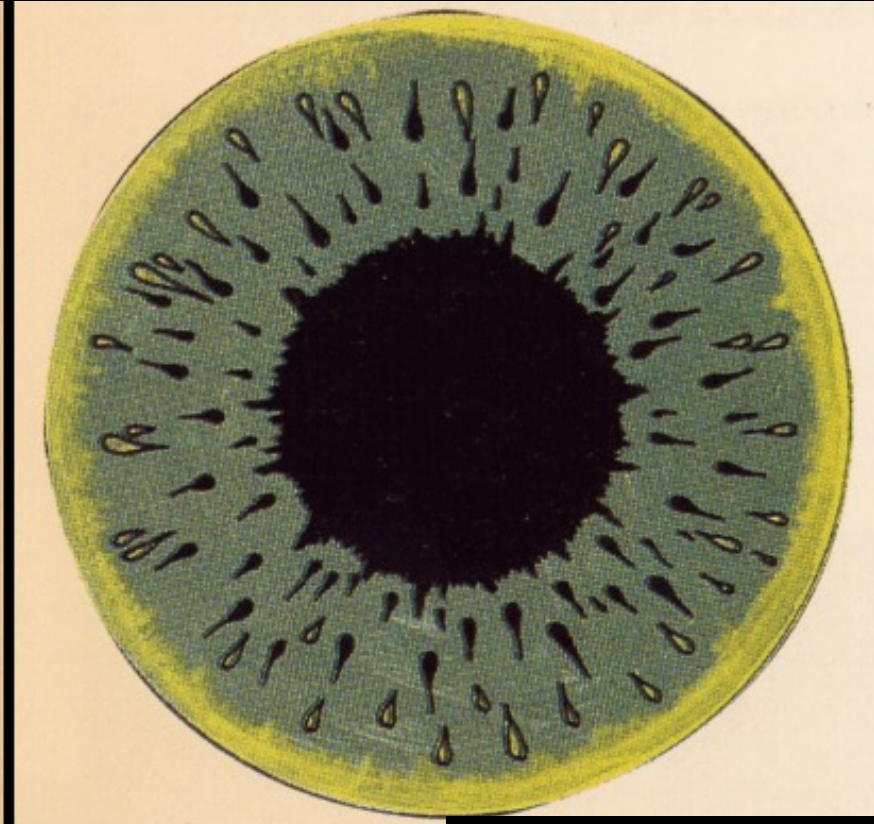
- Chute : observée au cours de sa chute et ramassé peu après
- Trouvaille : caractère extraterrestre déterminé sur critères



Les processus de différenciation : fusion et gravité

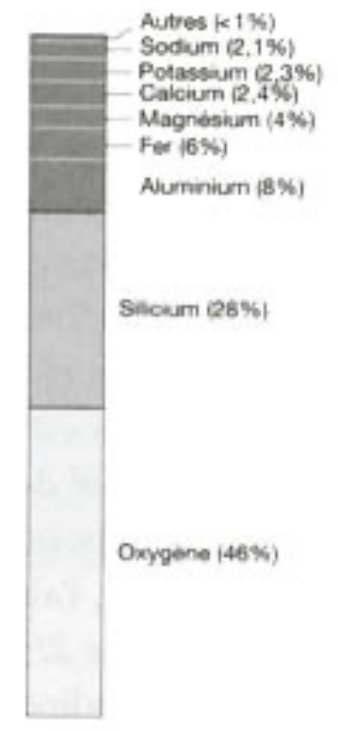
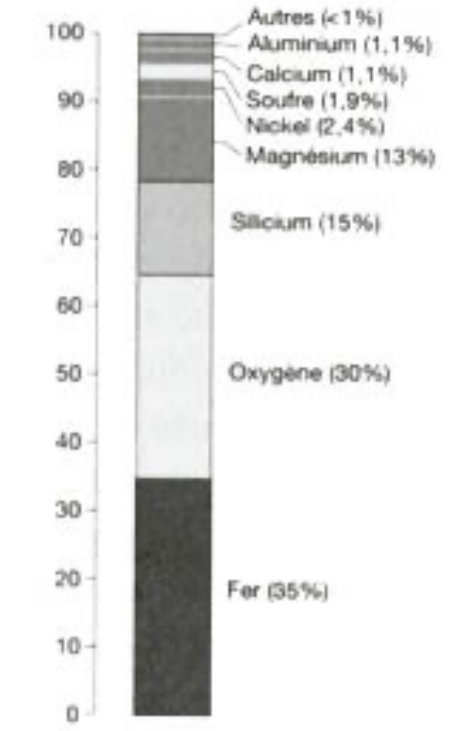
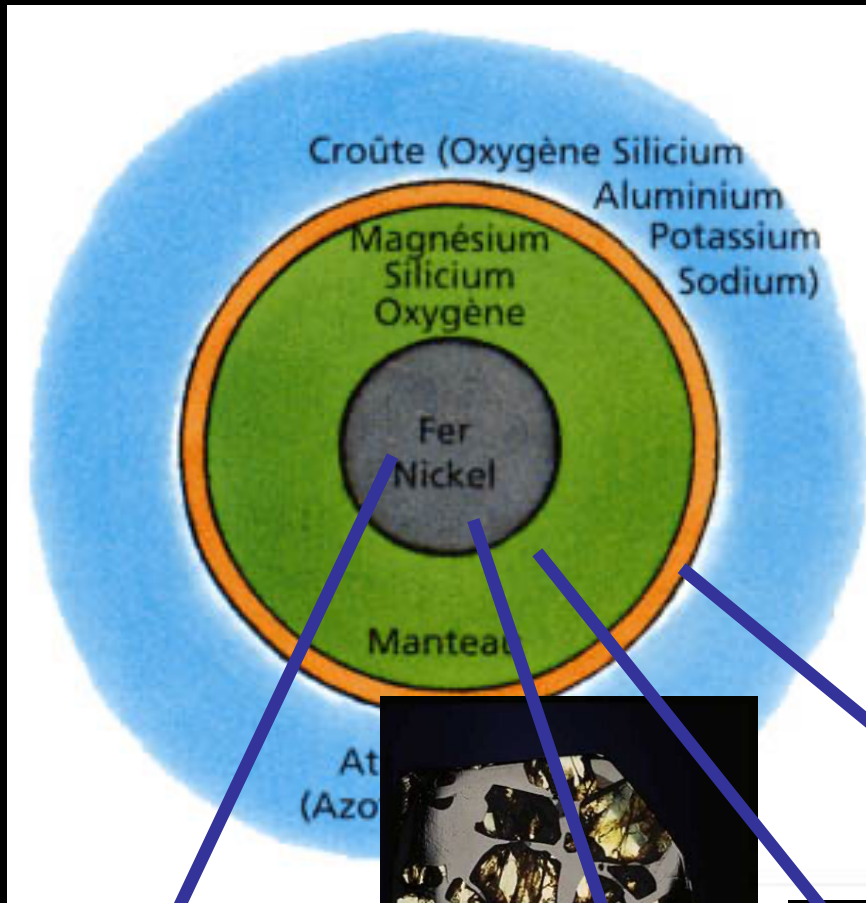


Objet de nature chondritique



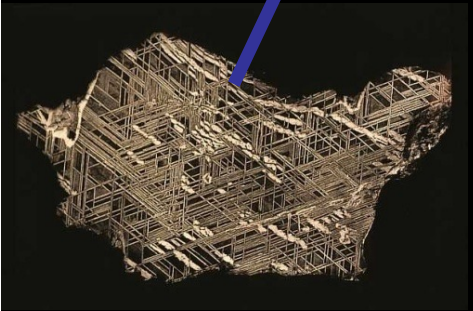
Objet en voie de différenciation

- 1-un résidu de chaleur d'accrétion : chocs entre planétésimaux (chocs inélastiques : En cinétique -> chaleur)
- 2-la conversion d'énergie gravitationnelle en chaleur, sous l'effet d'un processus de contraction
- 3-la présence d'effets de marées si astres proches
- 4-la présence d'éléments radioactifs, dont la désintégration provoque l'échauffement



La composition de la Terre dans son ensemble

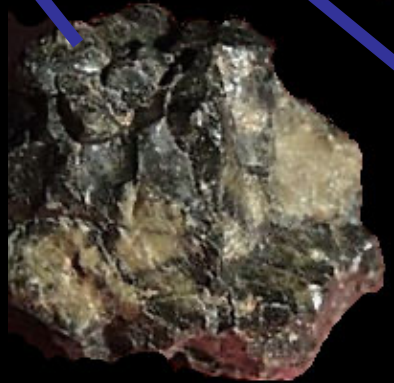
La composition de la croûte terrestre



Metalliques (Sidérite) alliage fer-Nickel



Lithosidérite (Pallasite)
Olivine incluse dans l'alliage Fer + Nickel

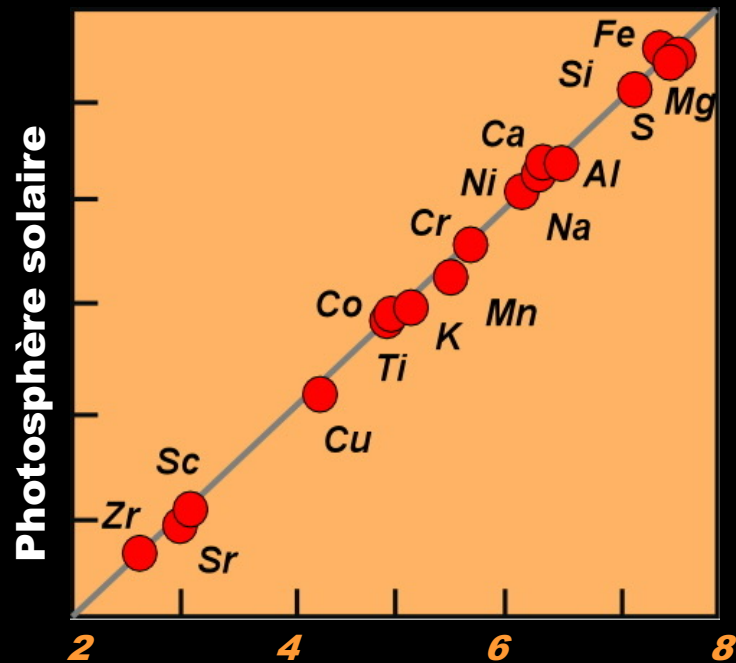


Achondrite (Aubrites)
Pyroxène -olivine



Achondrite (Eucrites) : Pyroxènes + Feldspaths

CHONDRITES: non-différenciées, détritiques, ultra-mafiques



Chondrites type CI
Météorite d'orgueil 1864 France

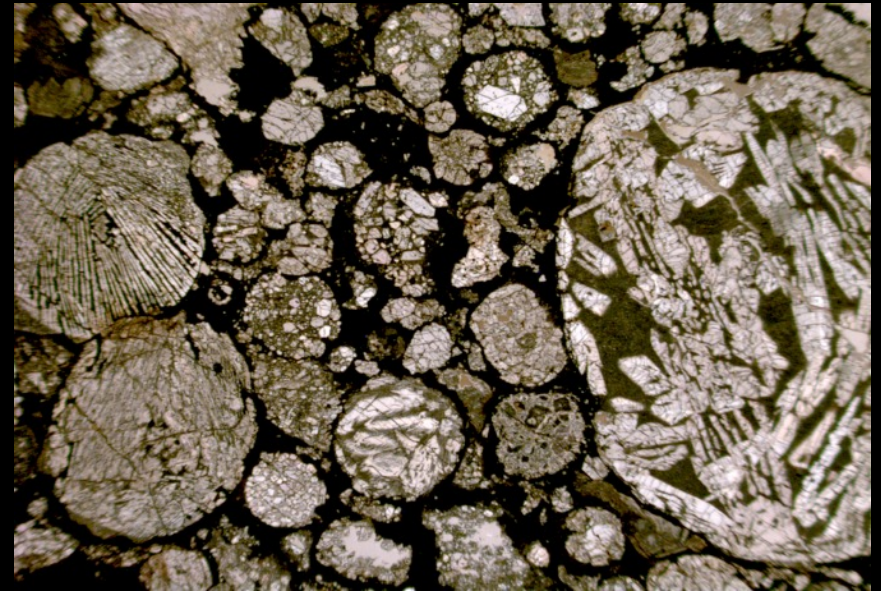
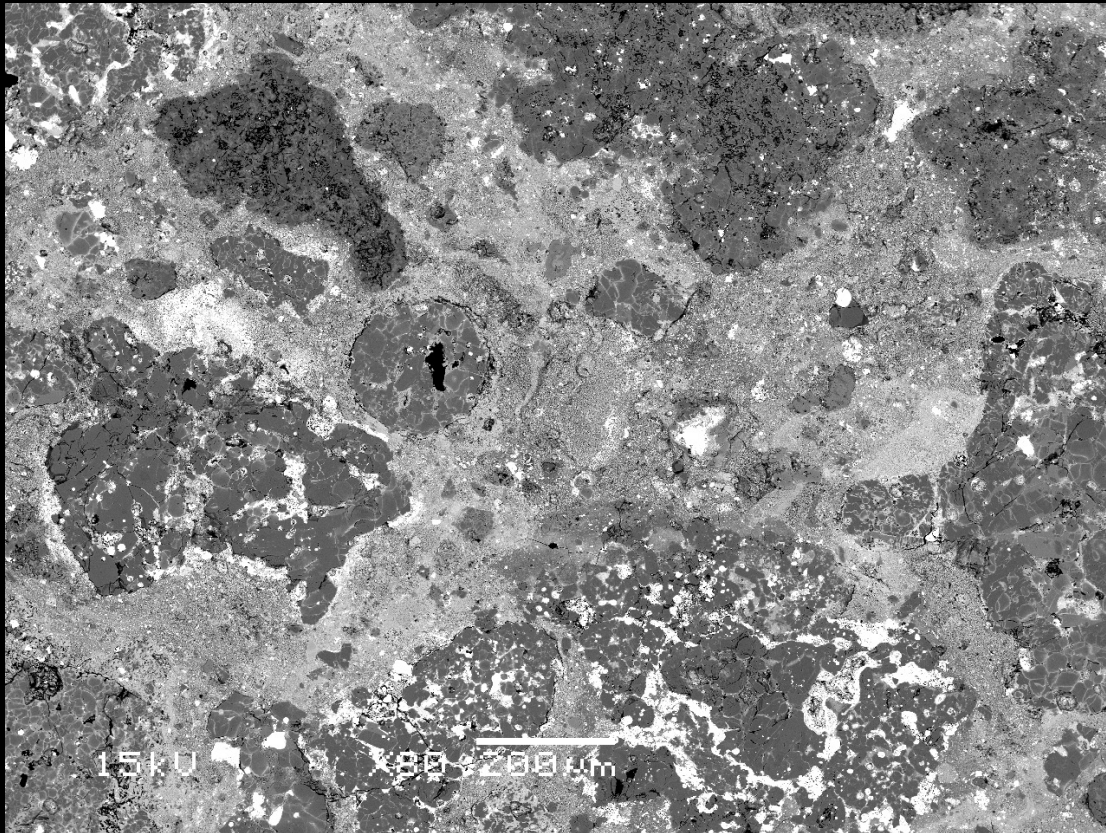
➔ Représentatives de la nébuleuse solaire

➔ Représentatives du chimisme moyen de la Terre

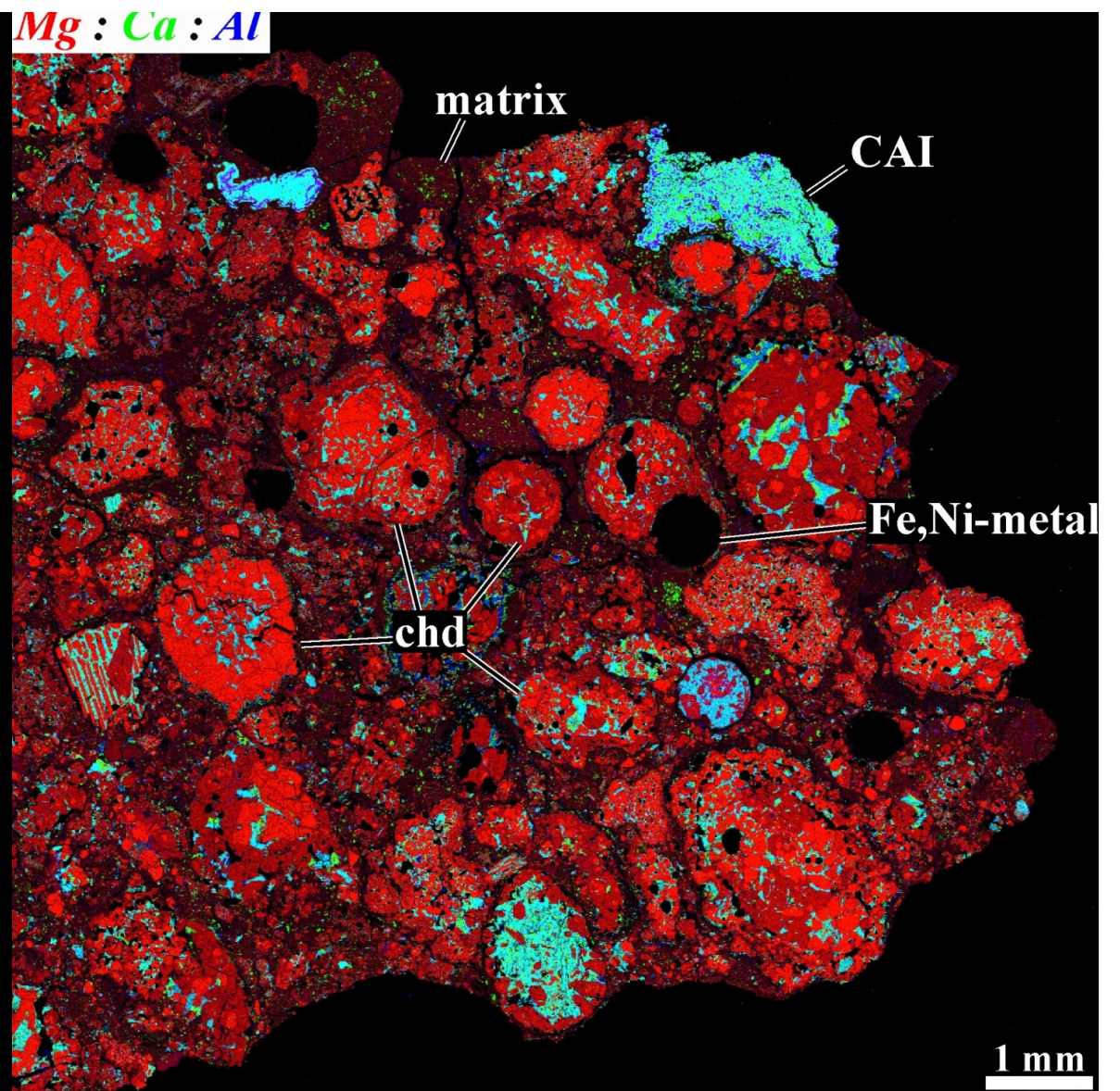
	soleil	Chondr. CI
Na	0,067	0,057
Mg	1,089	1,074
Al	0,0837	0,0849
Si	1	1
P	0,0049	0,0010
S	0,242	0,0515
K	0,0039	0,0038
Ca	0,082	0,061
Fe	1,270	0,900
Ti	0,0049	0,0024
Ni	0,0465	0,0493

Abondances atomiques solaires et météoritiques normalisées à Si sans H, He

Matrice = contient composés organiques et volatiles



LES CHONDRITES



Le Système Solaire

Origine et Evolution

Diversité et Composition

1. Chimie des corps planétaires
2. Petits Corps et Origines
3. Complexité chimique des météorites et des comètes

Extra-Terrestrial Organic Matter: a long standing issue.

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, Tome 67, 1868 (p. TdM).



Fig. 3. Chute du bolide du 14 mai 1864.

1806 – Alais

L. Thénard identify a peat-like material.

1864 – Orgueil

Travaux de Berthelot (1868)

Extra-Terrestrial Organic Matter: a long standing issue.

MASS SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF THE ORGUEIL METEORITE: EVIDENCE FOR BIOGENIC HYDROCARBONS

Bartholomew Nagy*, Warren G. Meinschein†, and Douglas J. Hennessy*

**Department of Chemistry, Fordham University, New York, N. Y.*

†Esso Research and Engineering Company, Linden, N. J.

not subjected to further fractionation, the mass spectrometric analyses reveal that hydrocarbons in the Orgueil meteorite resemble in many important aspects the hydrocarbons in the products of living things and sediments on earth. Based on these preliminary studies, the composition of the hydrocarbons in the Orgueil meteorite provide evidence for biogenic activity.

Extra-Terrestrial Organic Matter: a long standing issue.

Organic Particles embedded in Minerals in the Orgueil and Ivuna Carbonaceous Chondrites

By PROF. BARTHOLOMEW NAGY

Department of Chemistry, Fordham University, New York

DR. GEORGE CLAU

New York University, Medical Center, New York

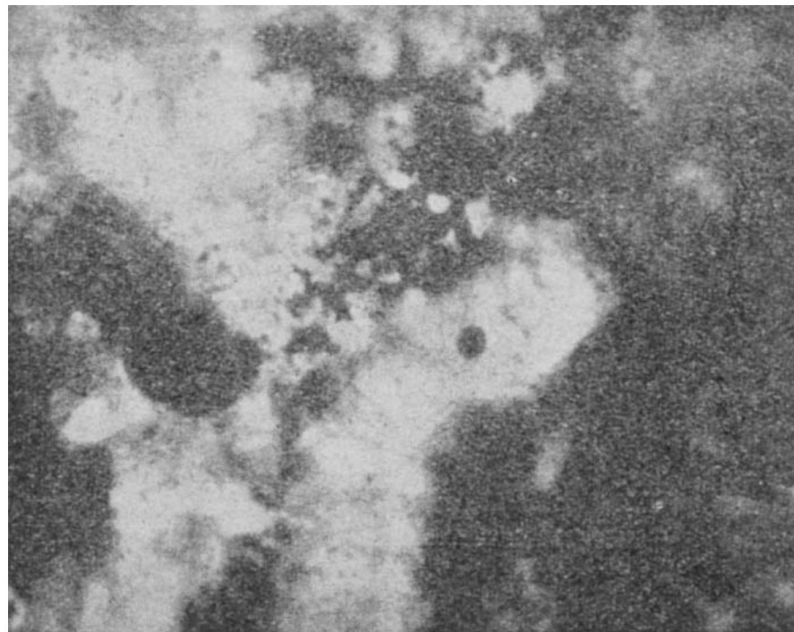
Nature, 1962

AND

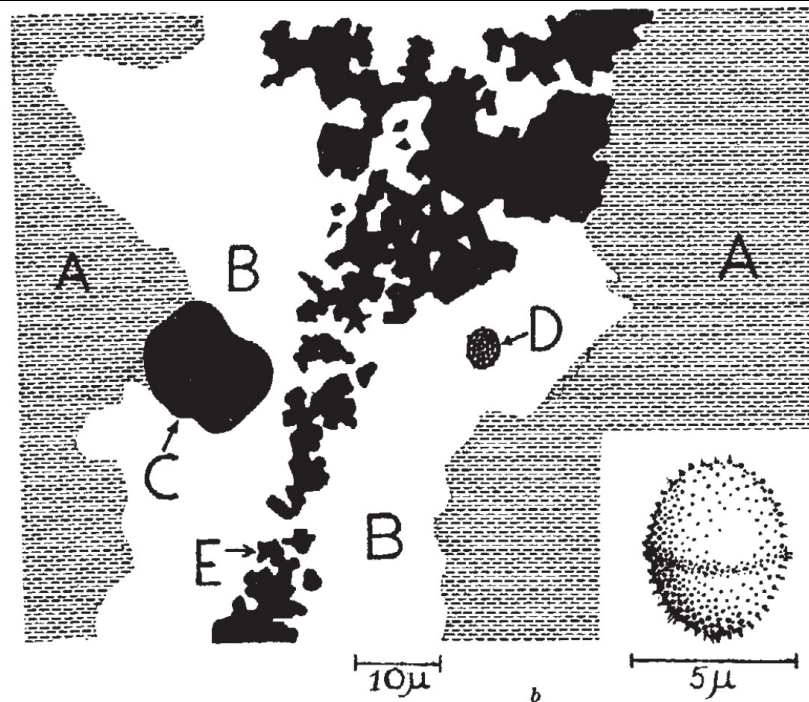
PROF. DOUGLAS J. HENNESSY

Department of Chemistry, Fordham University, New York

elements, although, undoubtedly, additional experiments must yet be performed. The experiments seem to indicate that these microscopic particles are fossilized, organic, organized structures, which are not likely to be minerals, organic artefacts or terrestrial, microbiological contaminations. Recently, Staplin examined a sample of the Orgueil meteorite¹¹ using standard palynological techniques, confirmed the presence of organized elements and referred to them as "microfossils of unknown affinities or age". At present, we are of the opinion that the organized elements are microfossils apparently indigenous to the meteorite parent body.



10 μ



10 μ

5 μ

Figs. 4a and b. Photomicrograph and sketch of a thin section of the Orgueil meteorite, showing mineral paragenesis in a salt vein. A, micaceous matrix; B, salt crystals in the vein; C, opaque particle; D, organized element; and E, opaque minerals (probably magnetite). This organized element (D) was covered with spines (as shown, in enlargement, at the lower right corner of Fig. 4b) and it fluoresced with greenish-yellow light in ultra-violet light



Extra-Terrestrial Organic Matter: a long standing issue.

Murchison
CM2
September 28th, 1969
Victoria, Australia

- *Chondrite CM2 – primitive (100 kg)*
- *Fresh fall*
- *Safe storage*

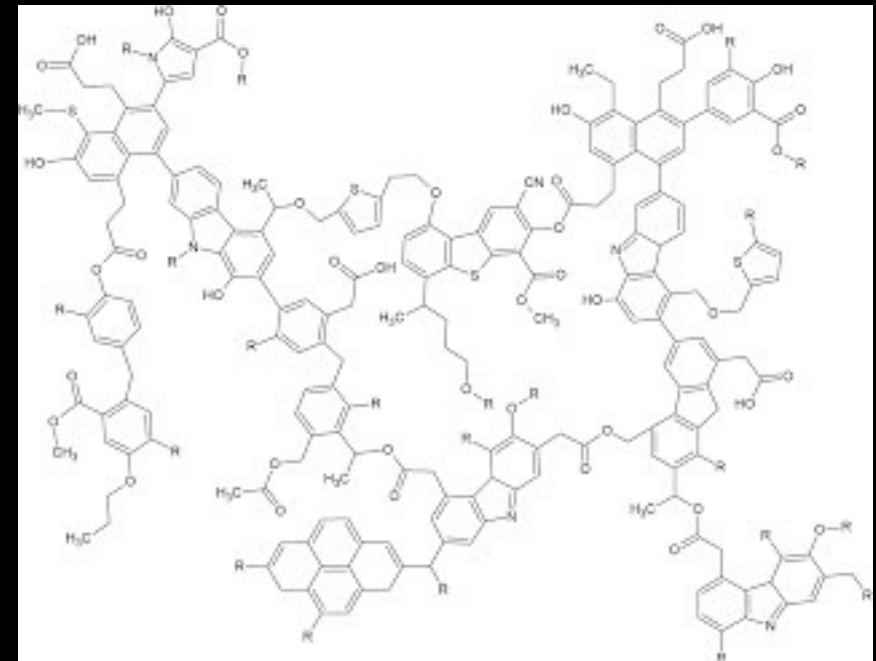
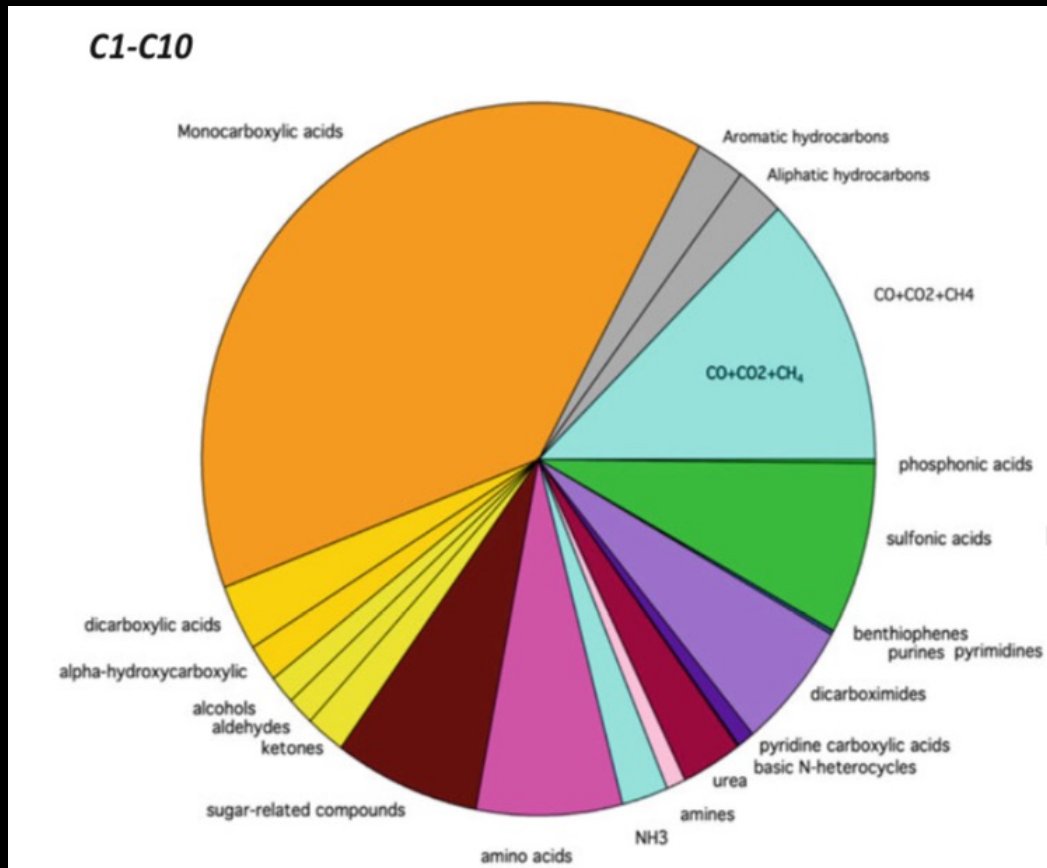


- ★ **Non terrestrial amino acids + bases**
- ★ **Racemic mixture**
- ★ **D and 15N enrichments**

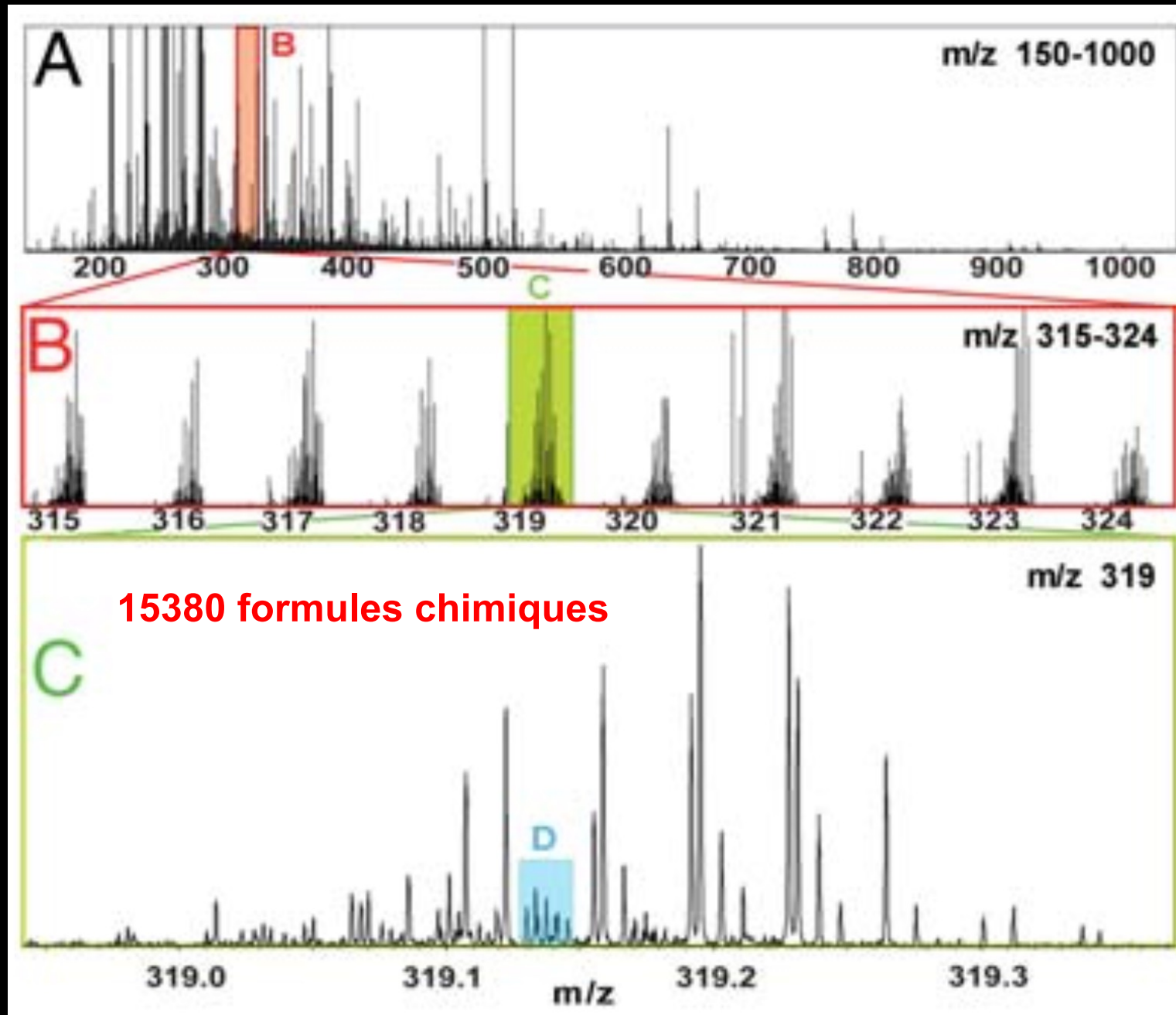
AMINO ACID	MURCHISON METEORITE
GLYCINE	• • • •
ALANINE	• • • •
α -AMINO-N-BUTYRIC ACID	• • •
α -AMINOISOBUTYRIC ACID	• • • •
VALINE	• • •
NORVALINE	• • •
ISOVALINE	• •
PROLINE	• • •
PIPECOLIC ACID	•
ASPARTIC ACID	• • •
GLUTAMIC ACID	• • •
β -ALANINE	• •
β -AMINO-N-BUTYRIC ACID	•
β -AMINOISOBUTYRIC ACID	•
γ -AMINOBUTYRIC ACID	•
SARCOSINE	• •
N-ETHYLGLYCINE	• •
N-METHYLALANINE	• •

Meteoritic Organic Matter in carbonaceous chondrites

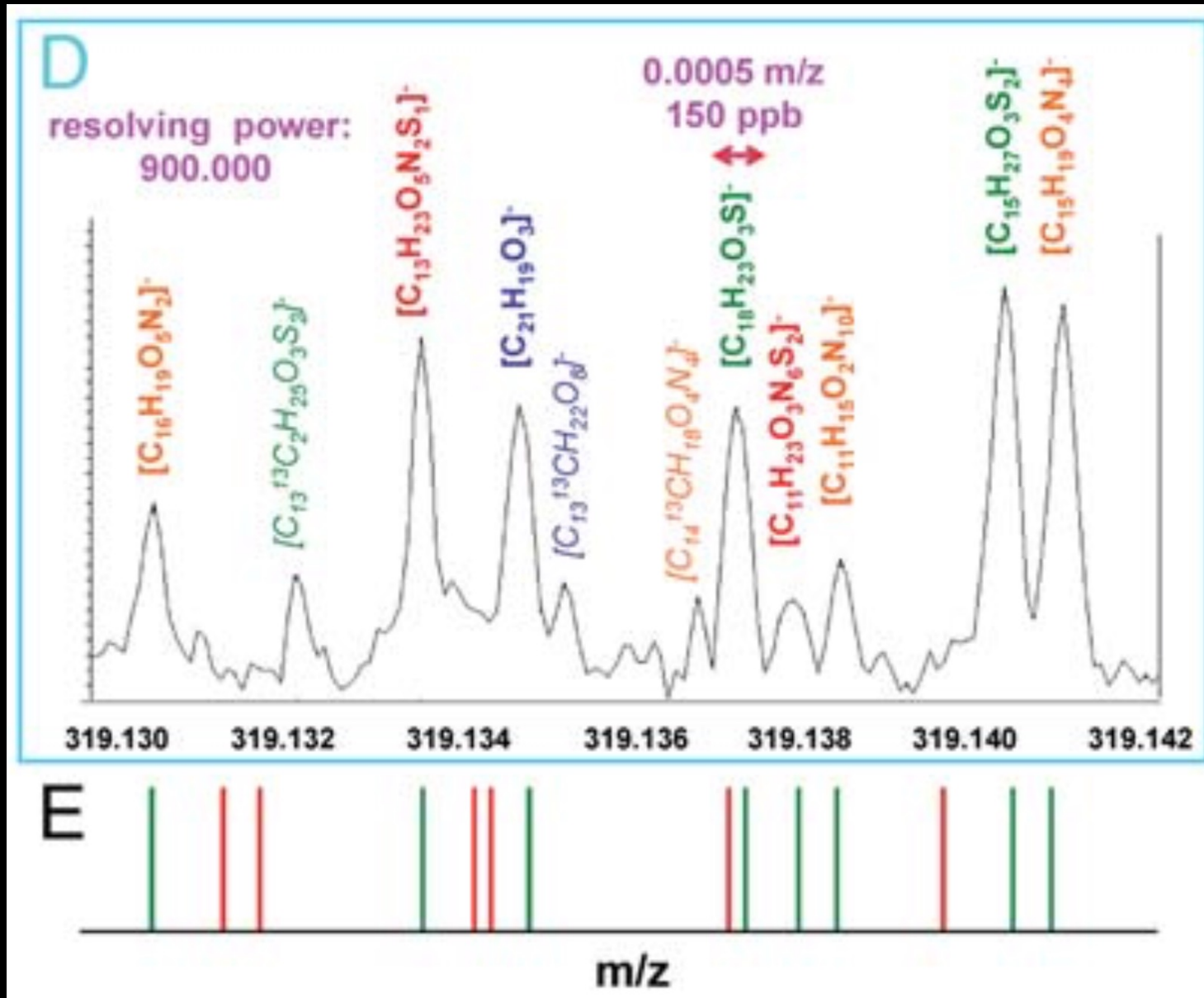
Soluble versus Insoluble = Analytical definition



Spectrométrie de Masse Ultra-Haute Résolution

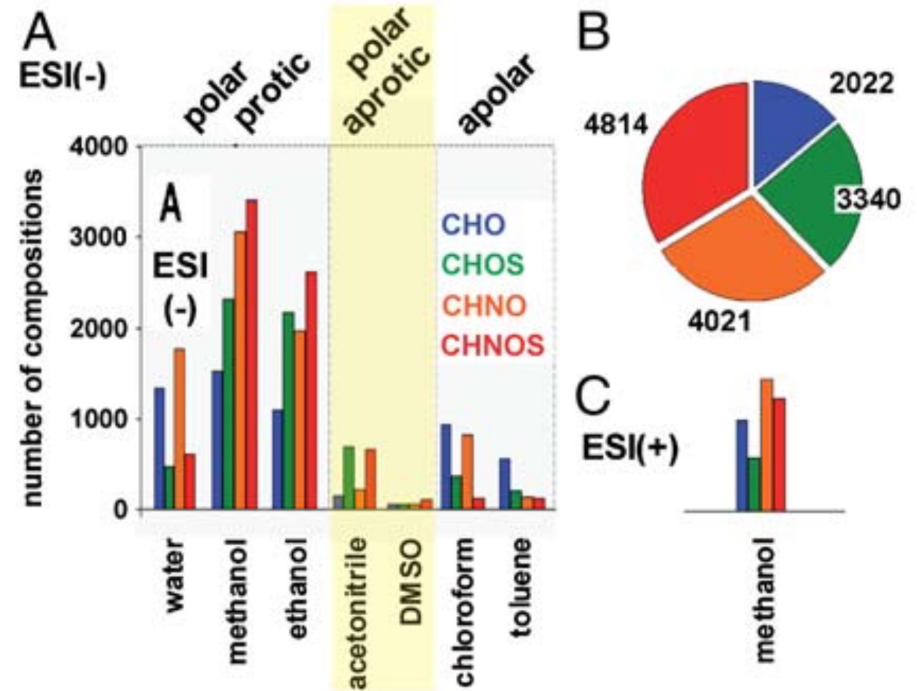
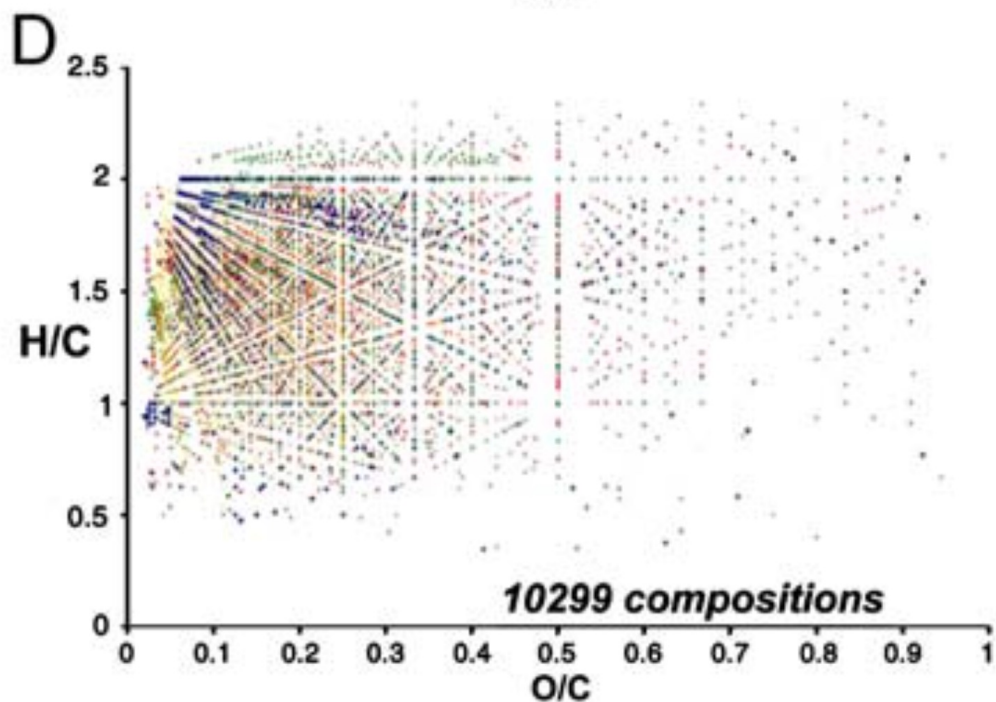
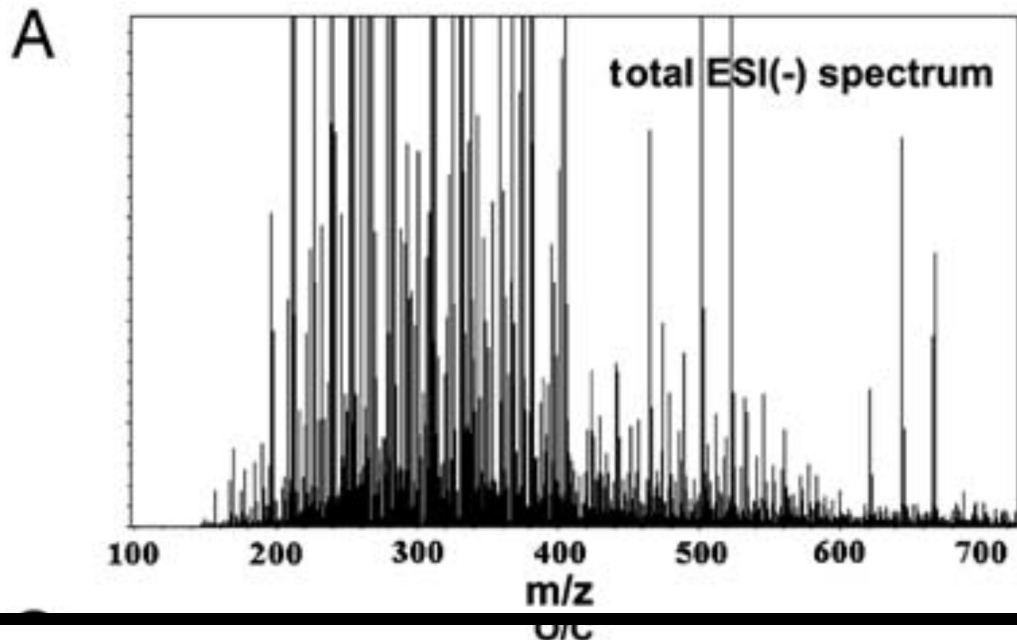


Spectrométrie de Masse Ultra-Haute Résolution



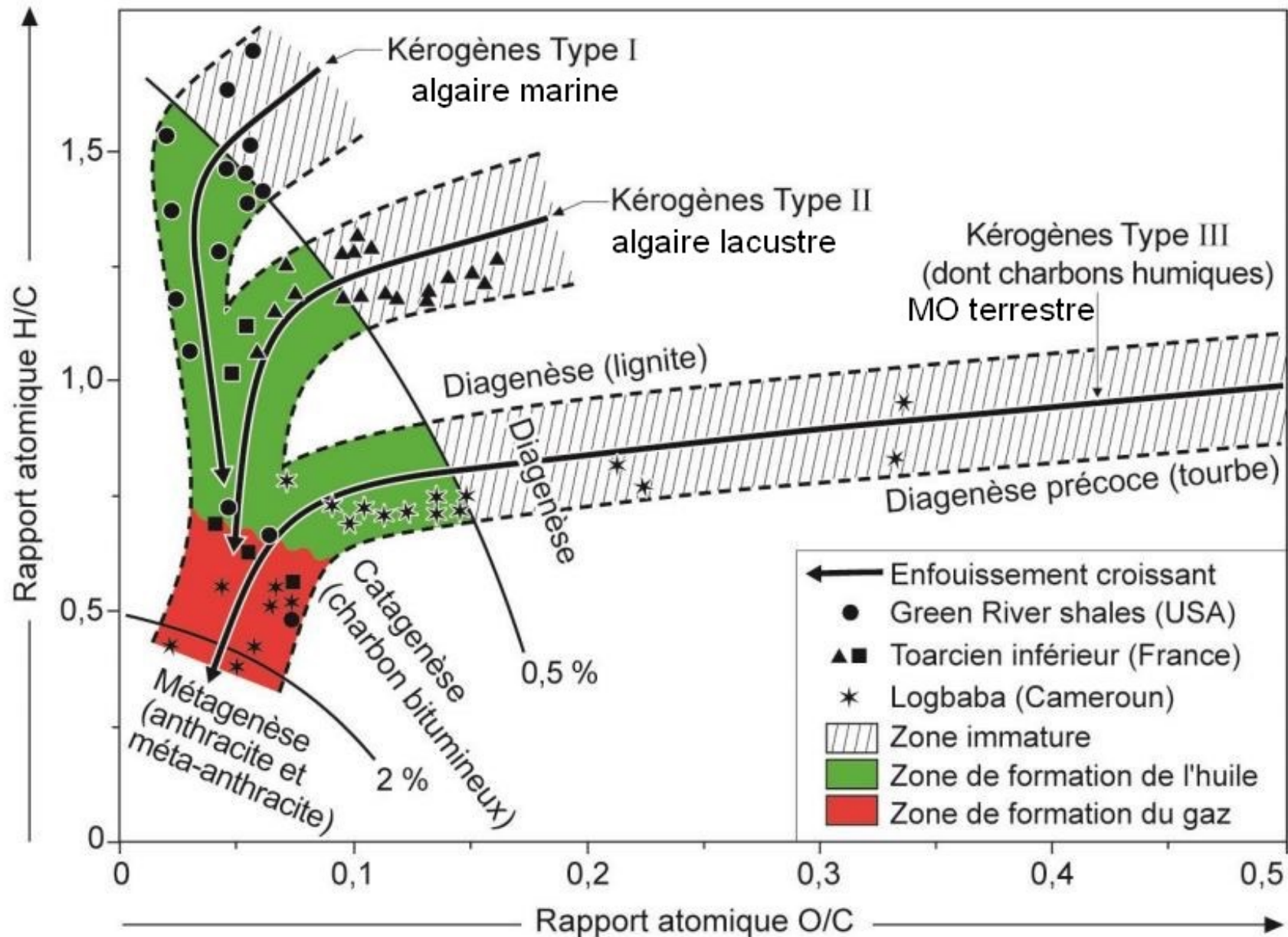
Spectrométrie de Masse Ultra-Haute Résolution

- > 100000 molécules
- Nombreux isomères
- Complexité >> Vivant
- Chimie non sélective



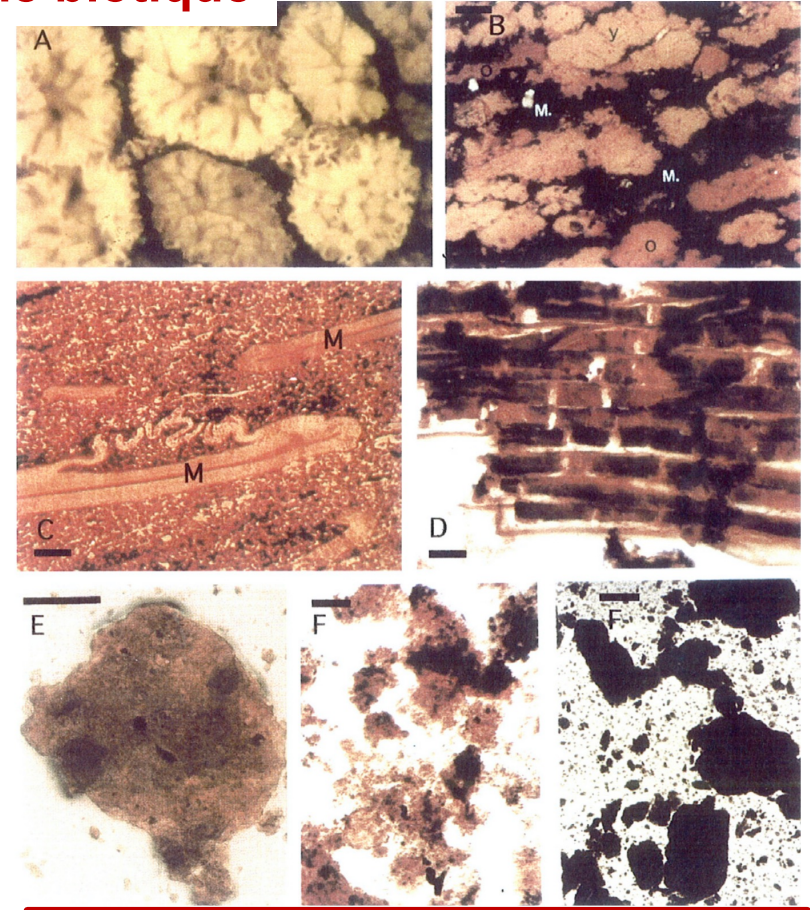
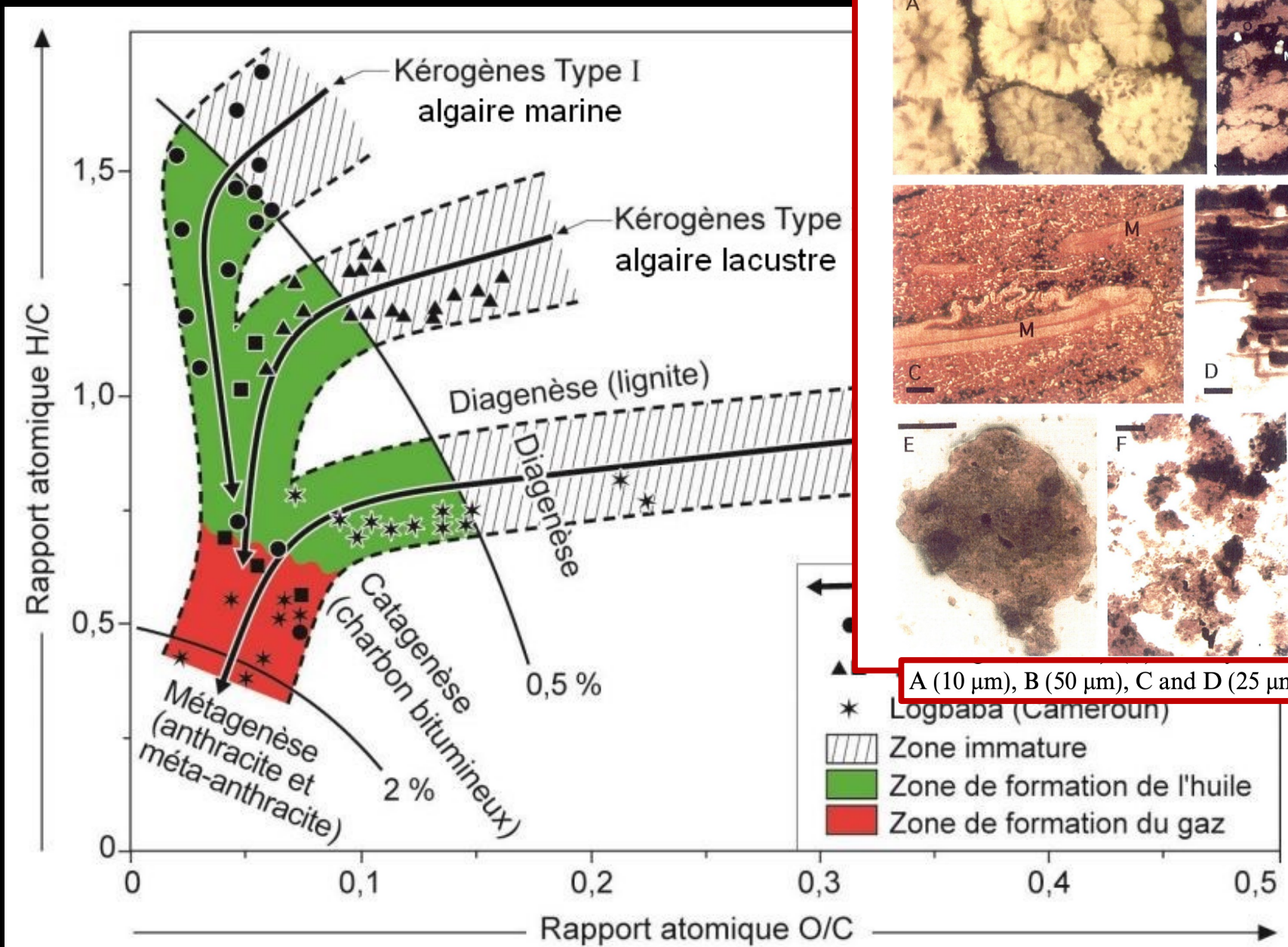
Matière Organique Insoluble

Kérogènes
Charbons
Origine biotique



Matière Organique Insoluble

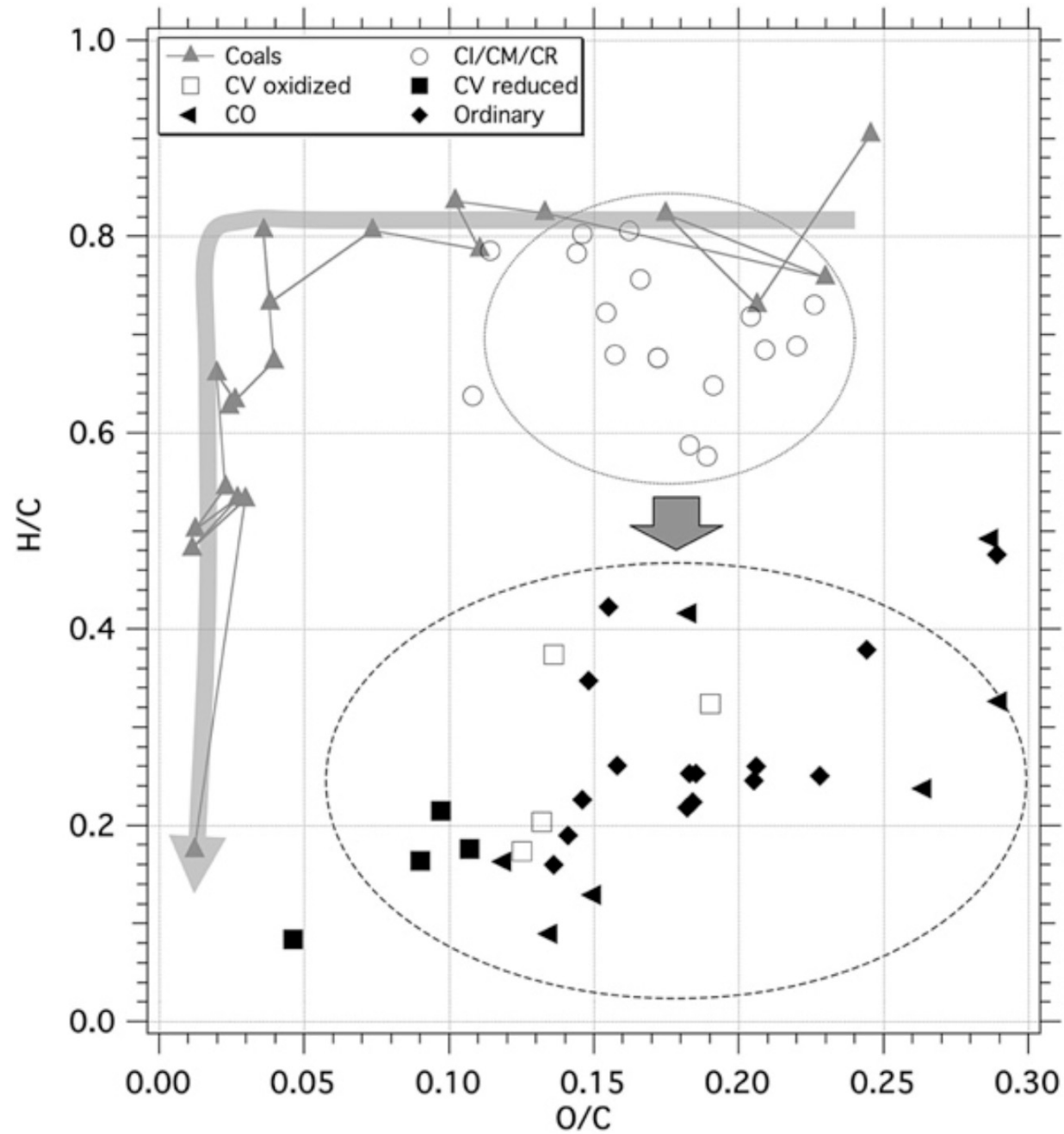
Kérogènes
Charbons
Origine biotique



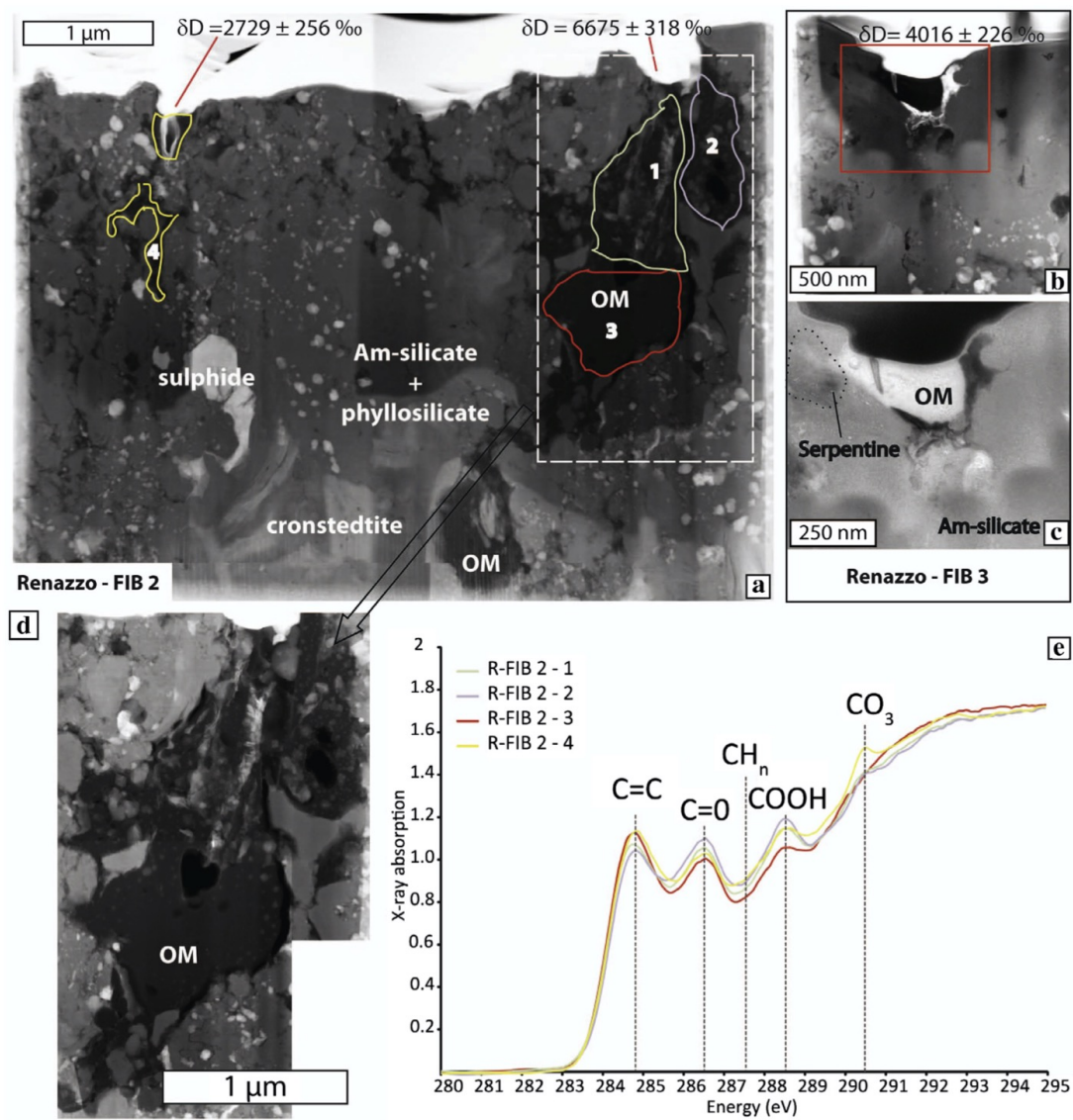
A (10 μm), B (50 μm), C and D (25 μm), E and F (75 μm)

- * Logbaba (Cameroun)
- ▨ Zone immature
- Zone de formation de l'huile
- Zone de formation du gaz

Matière Organique Insoluble



Analyses in-situ IOM+SOM



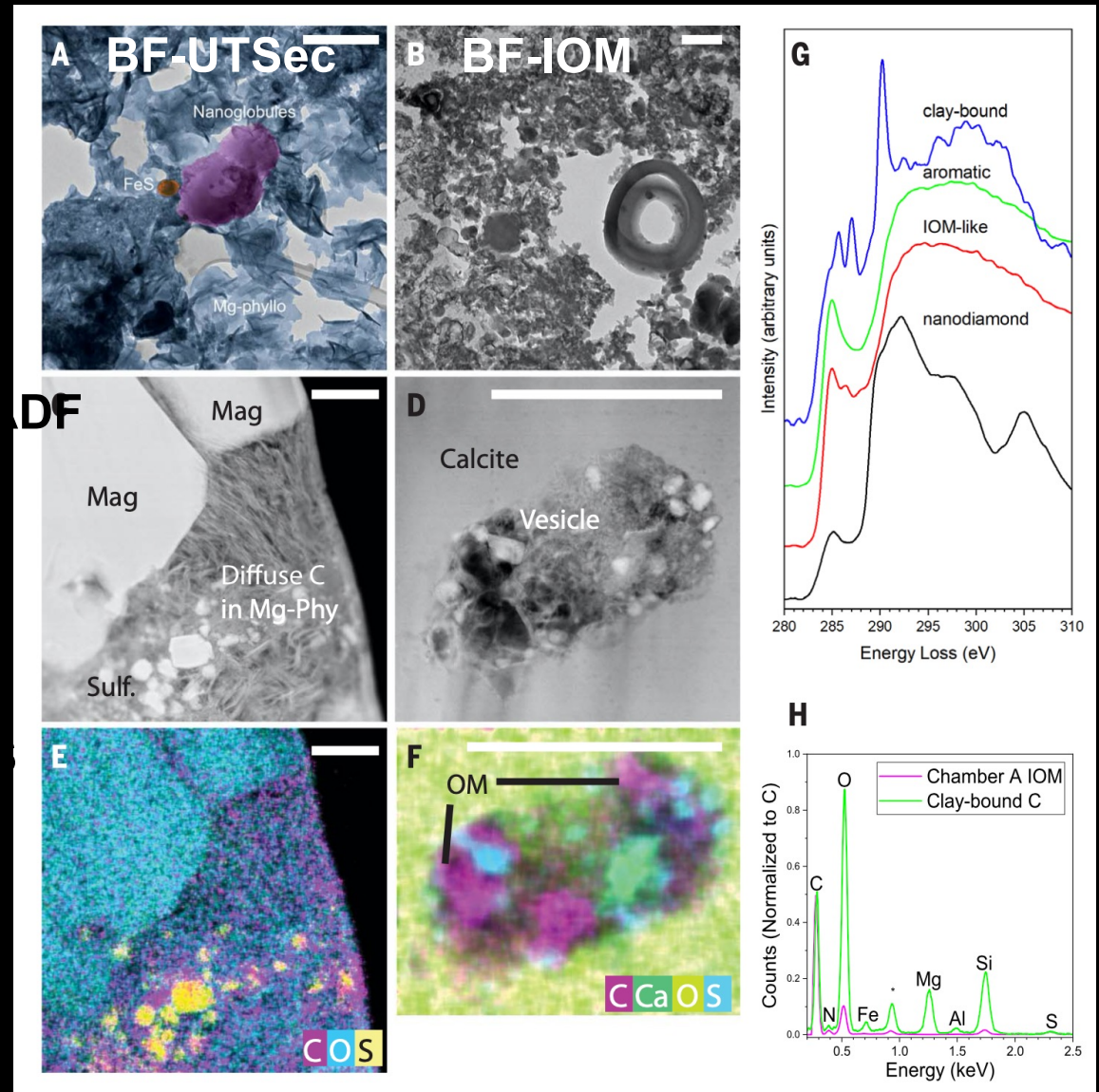
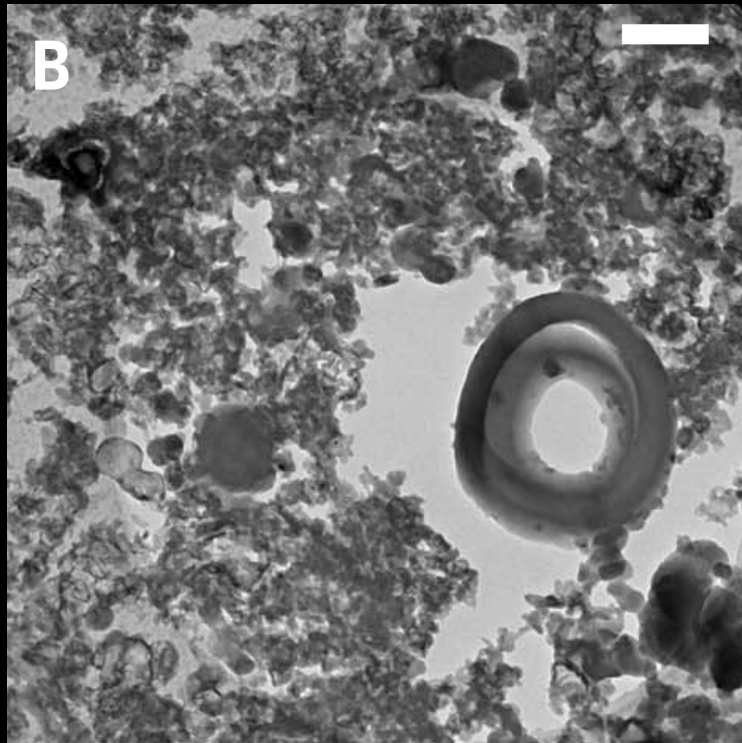
- ✓ **Individual grains** (insoluble materials)
- ✓ **Diffuse organic matter** (dispersed at the nm-scale in phyllosilicates or in nano-carbonates), dominated by Soluble Organic Matter

Renazzo (CR2):
 Dominated by Individual grains
 Chemical homogeneity

Analyses in-situ IOM+SOM: Ryugu samples

STEM-EELS-EDS

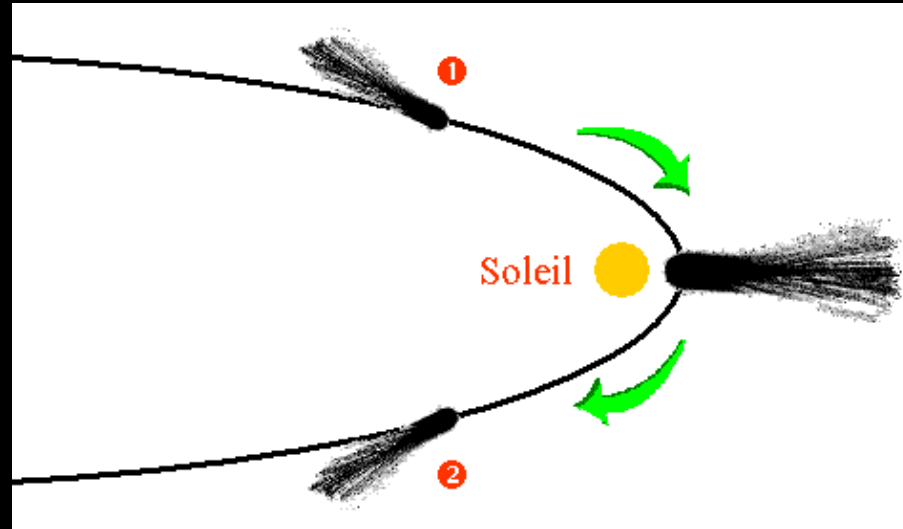
Yabuta+23 Science



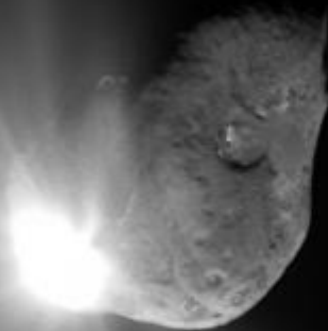
Les comètes



Comète Bennett



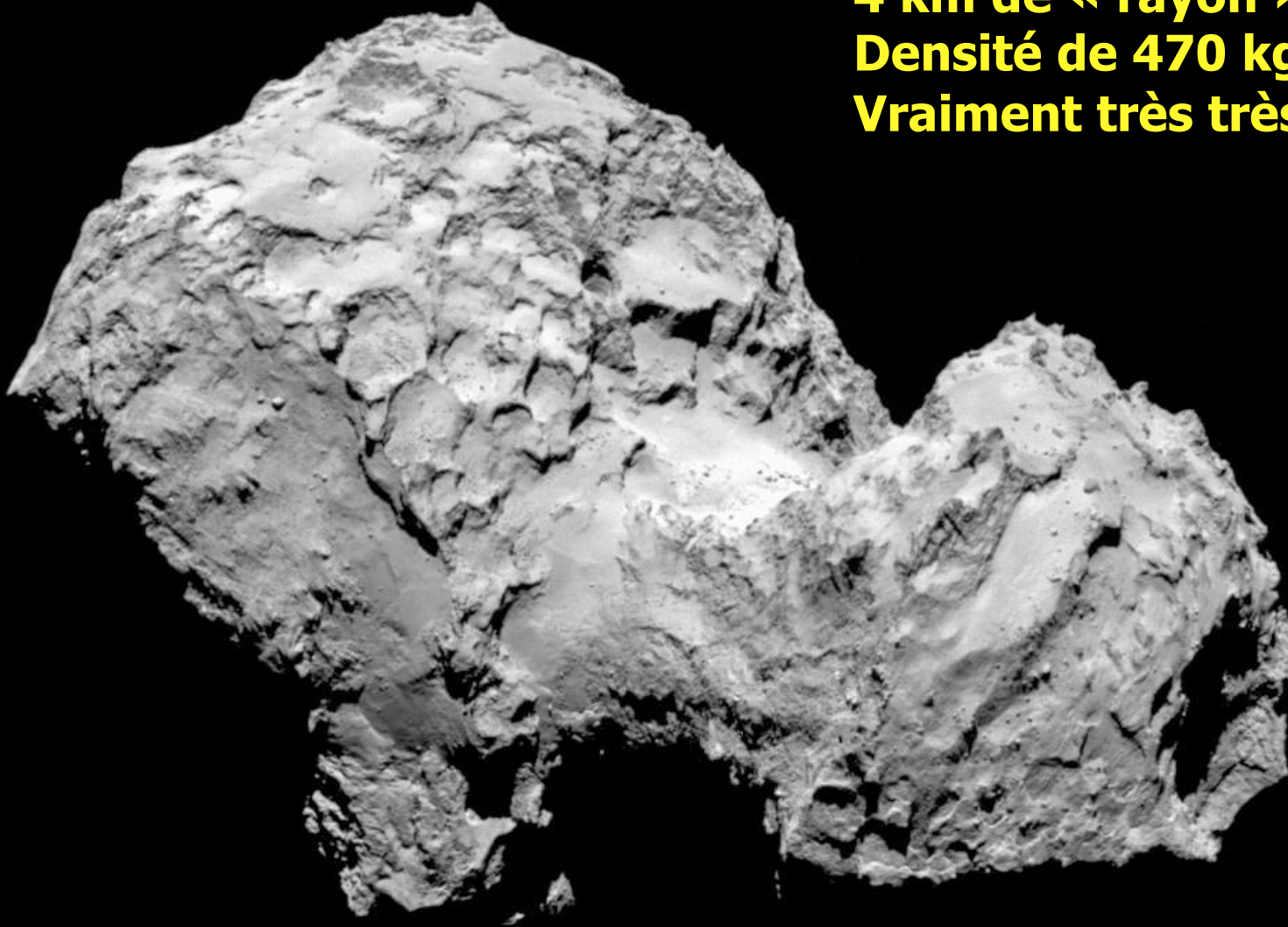
Comètes = objet glacé; matière organique C
Ceinture de Kuiper (proche or. Neptune)
Nuage de Oort (50 000 U.A. du soleil)





Mission ESA Rosetta 2014-2016

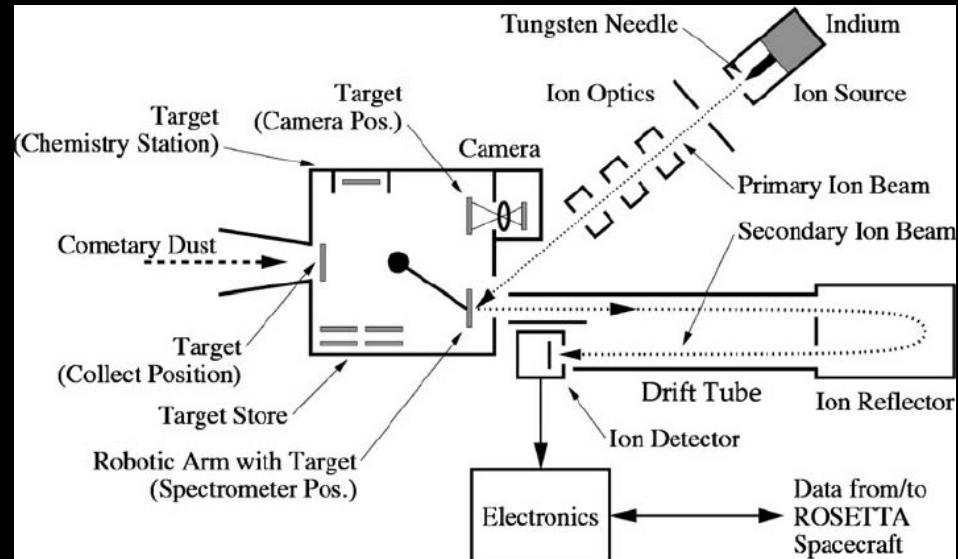
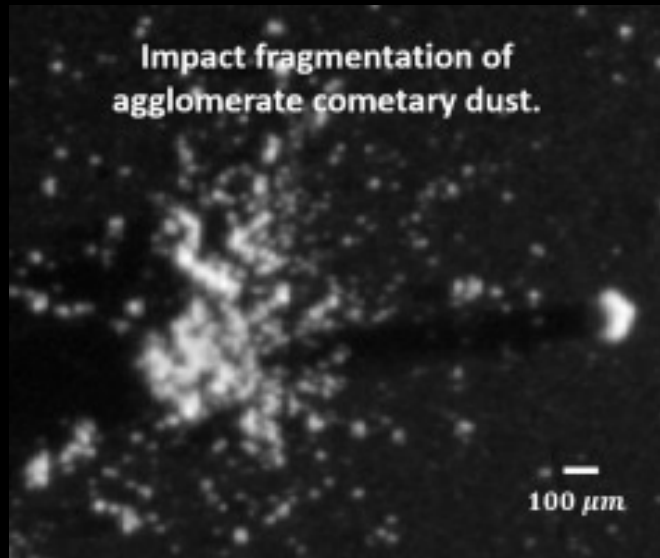
4 km de « rayon »
Densité de 470 kg/m³
Vraiment très très sombre



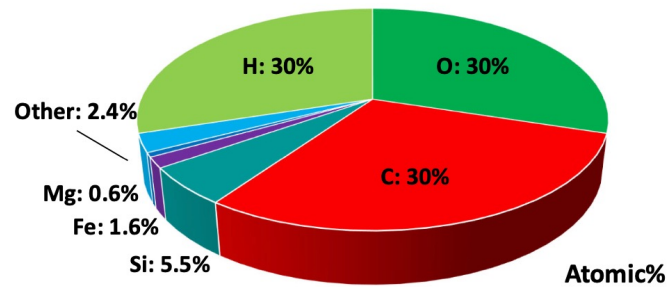


Organic materials in comets

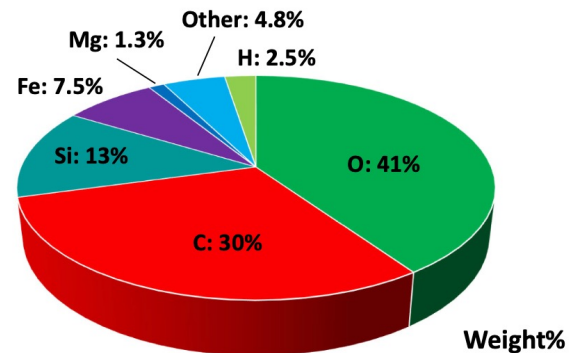
COSIMA/Rosetta TOF-SIMS



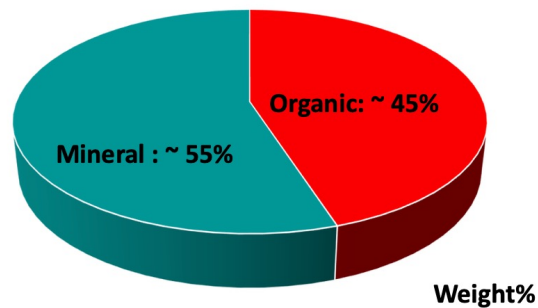
(A)



(B)



(C)

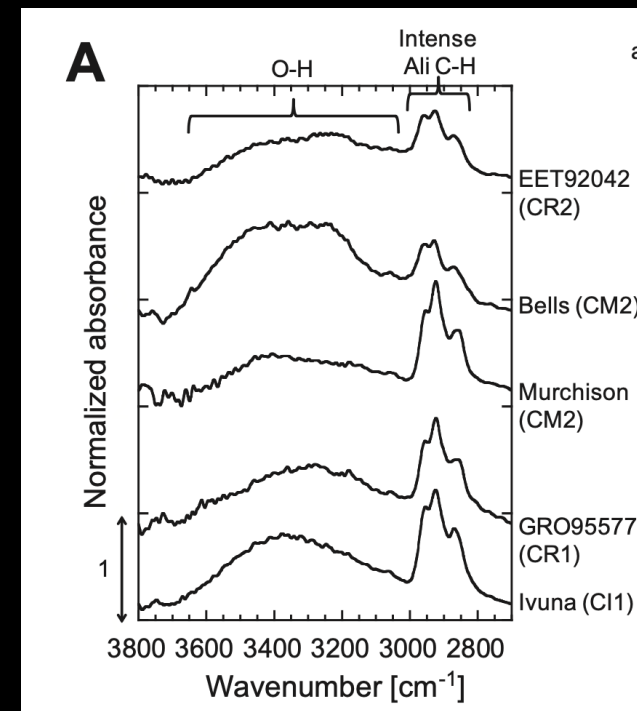
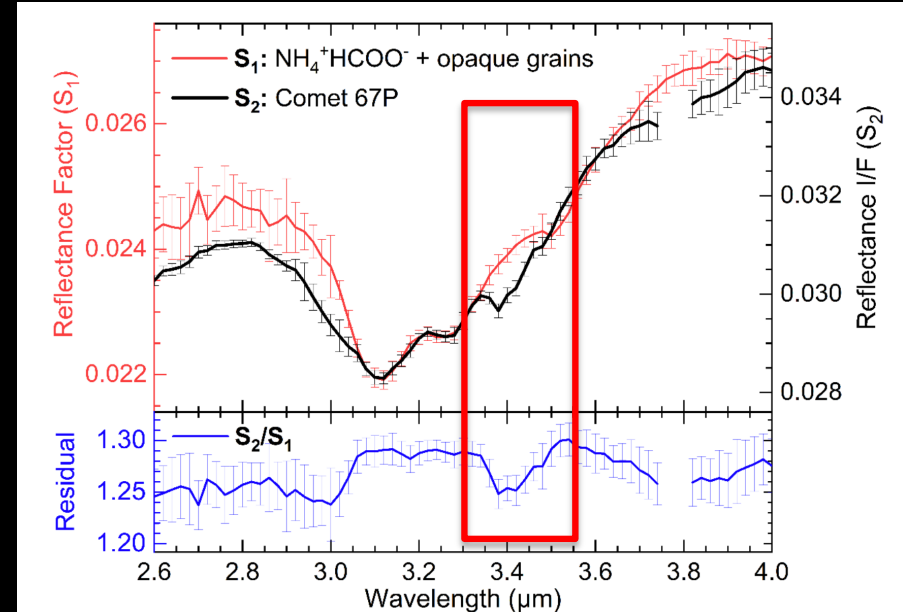
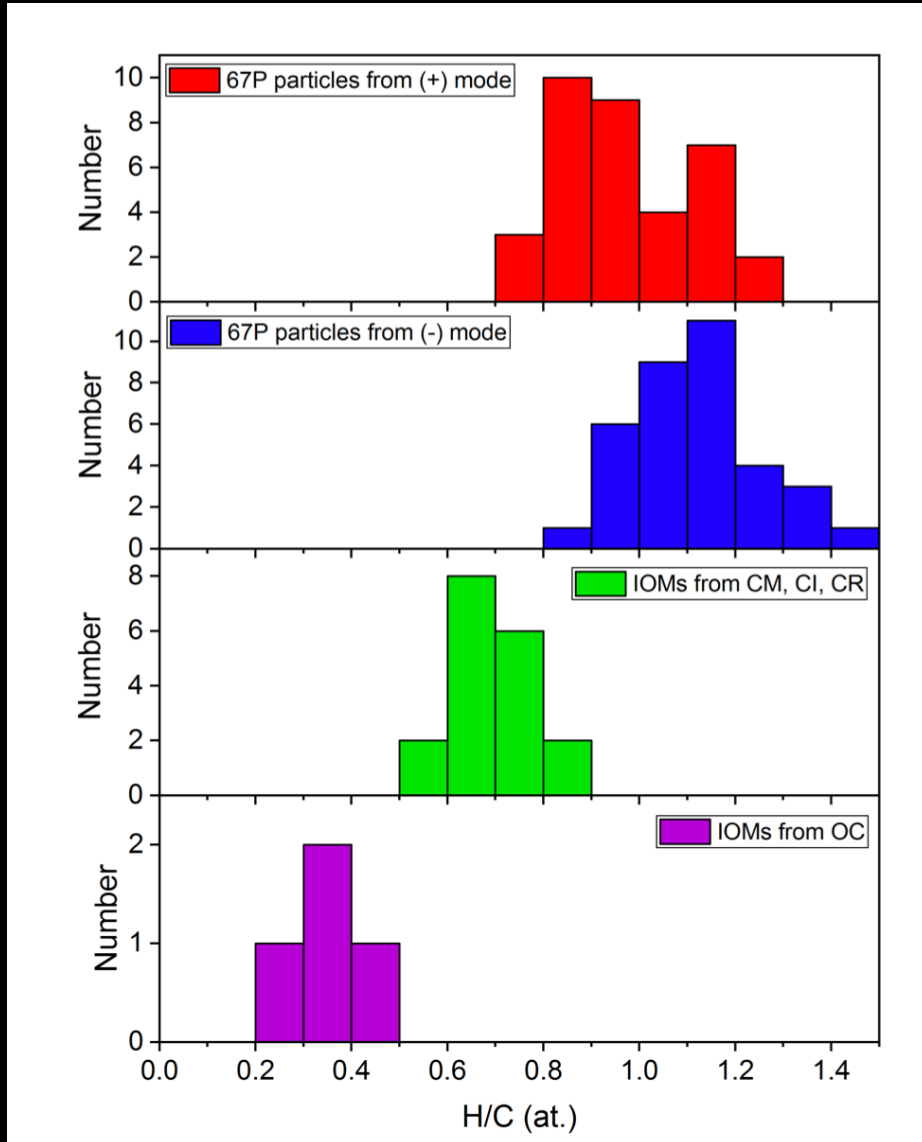


Organic materials in comets

H/C = 1.04 ± 0.16

Alexander+07; Isnard+19

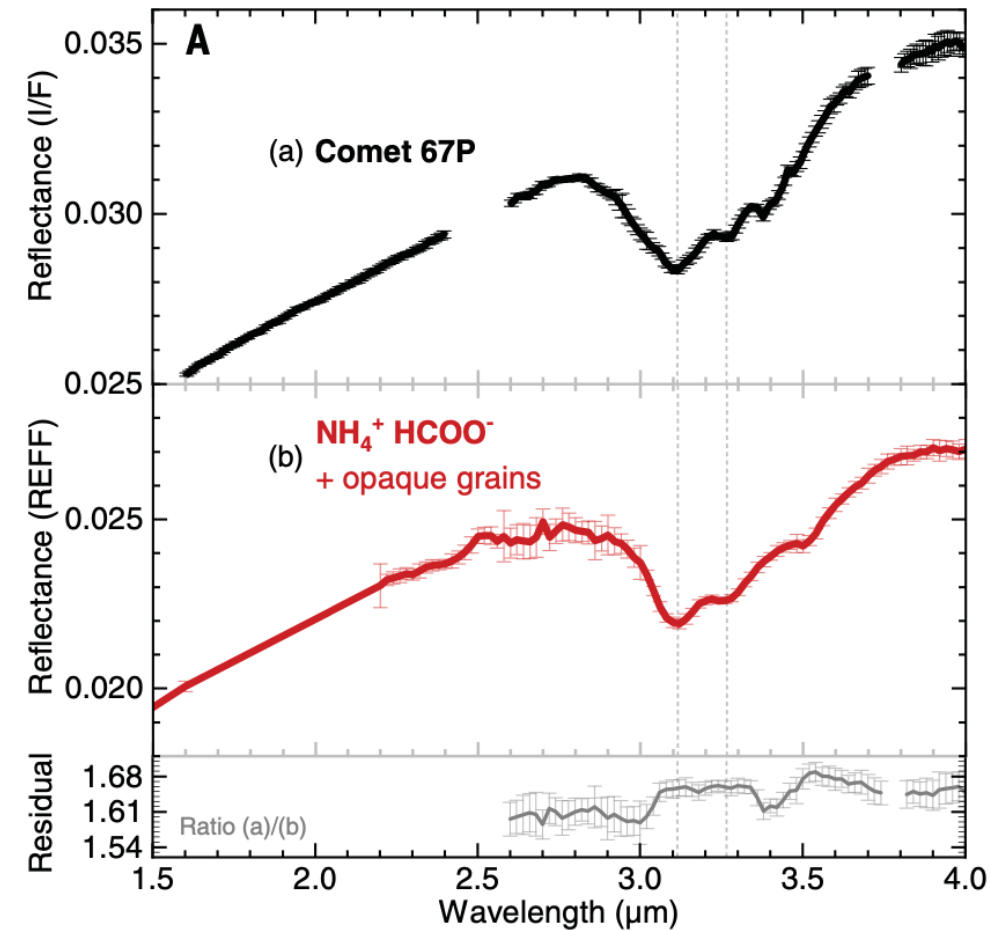
Raponi+20; Poch+20



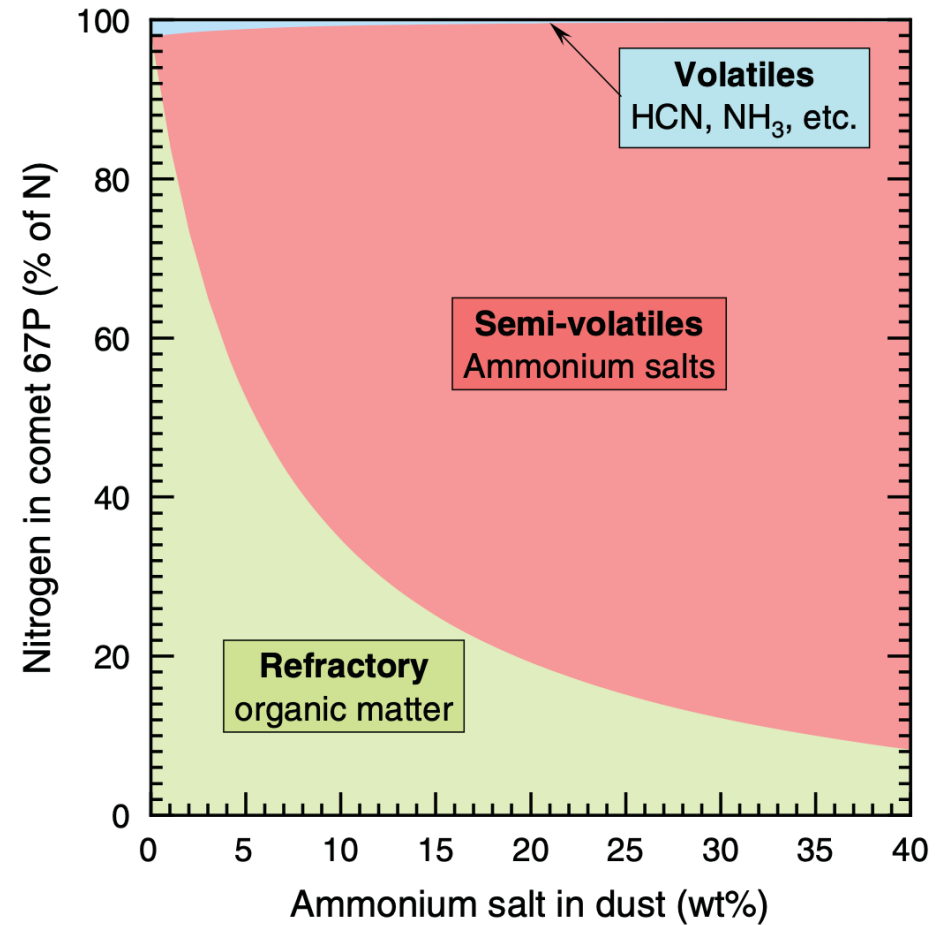
Organic materials in comets

NH_4HS salts at comet 67P

VIRTIS and ROSINA instruments



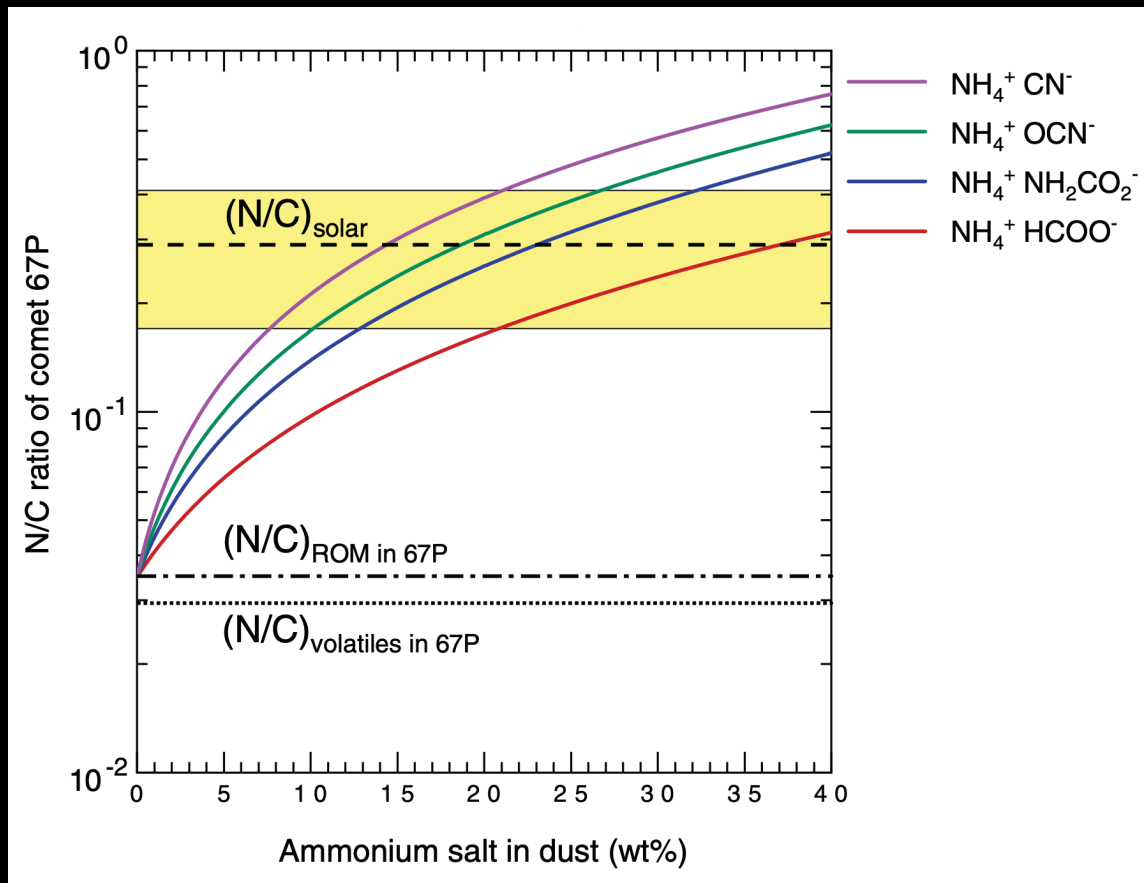
Nitrogen budget



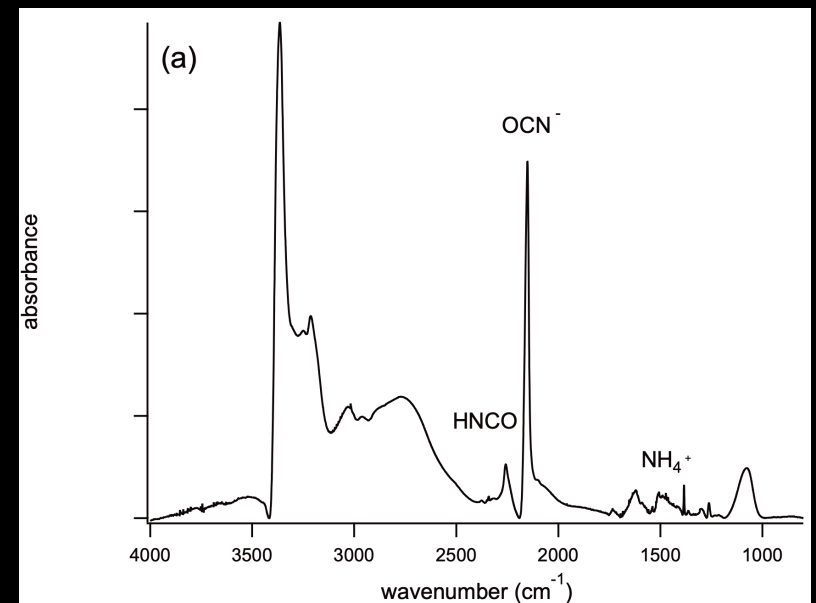
Altwegg+19, 22; Poch+20

Organic materials in comets

Solving the underabundance of N in comets? Original carrier of NH_3 ?



- $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{S}:\text{X}$ mixture
- Thermal and/or radiolytic activation
- Post-accretion chemistry?
- Disk? Local ISM cloud?



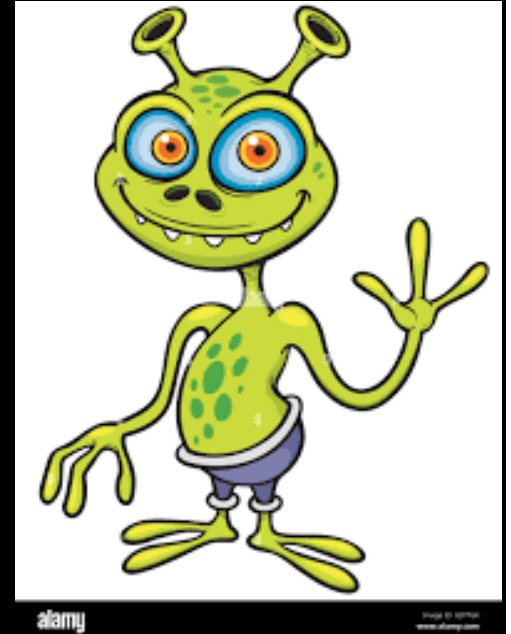
Poch+20

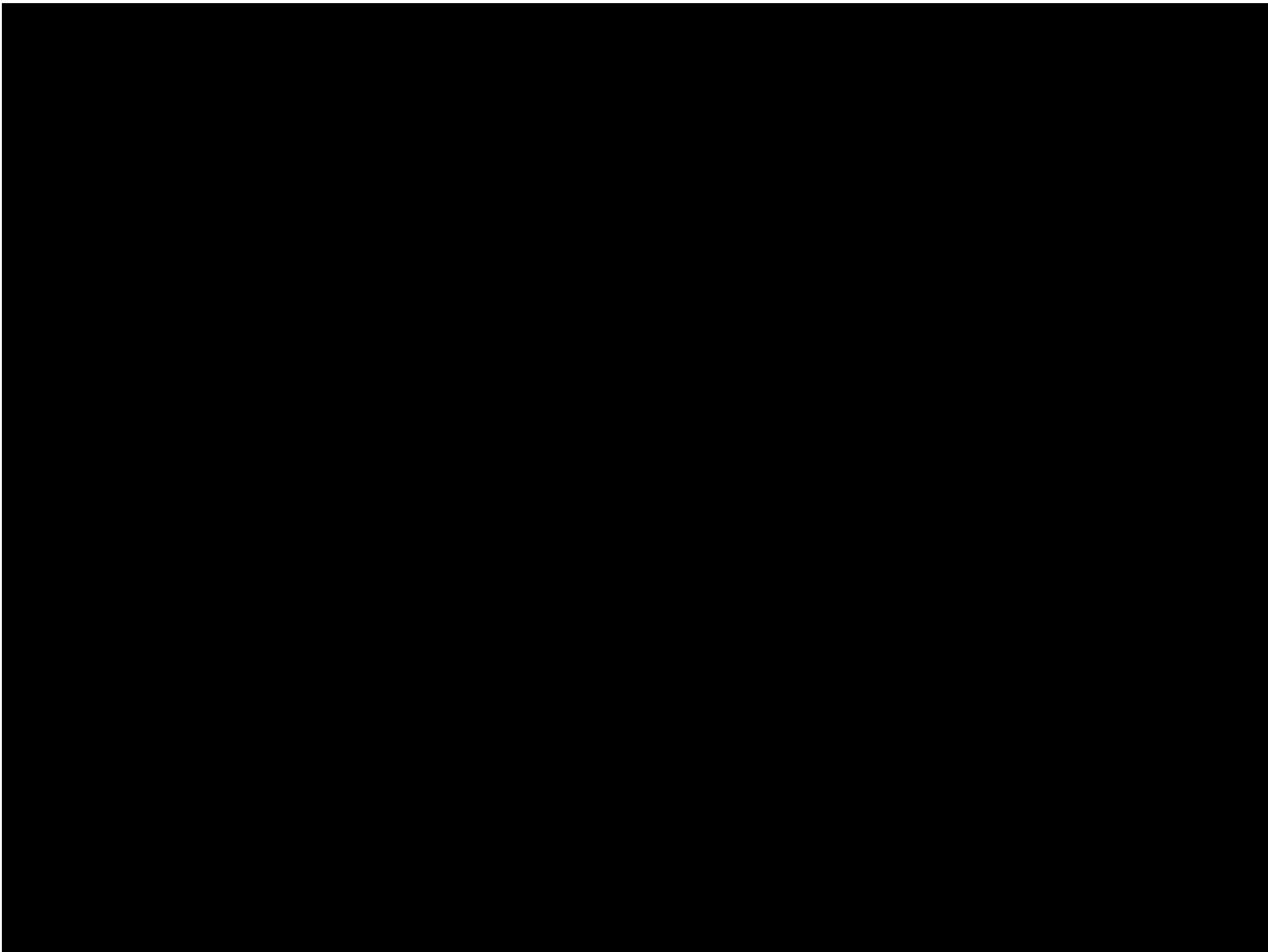
Theule+12

Origine de la MO météoritique ?

Une énigme toujours actuelle

- Héritage des poussières carbonées du Milieu Interstellaire ?
- Synthèse dans le disque proto-solaire ?
- Synthèse dans le corps parent ?
- Mécanismes chimiques non-sélectif
- Matériau détritique hétérogène = sources multiples
- Mais pas de ET !





DEFI !

Identifier les glaces à la surface de Triton

SINFONI - Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared

Near-infrared (1.1 -- 2.45 μm) integral field spectrograph

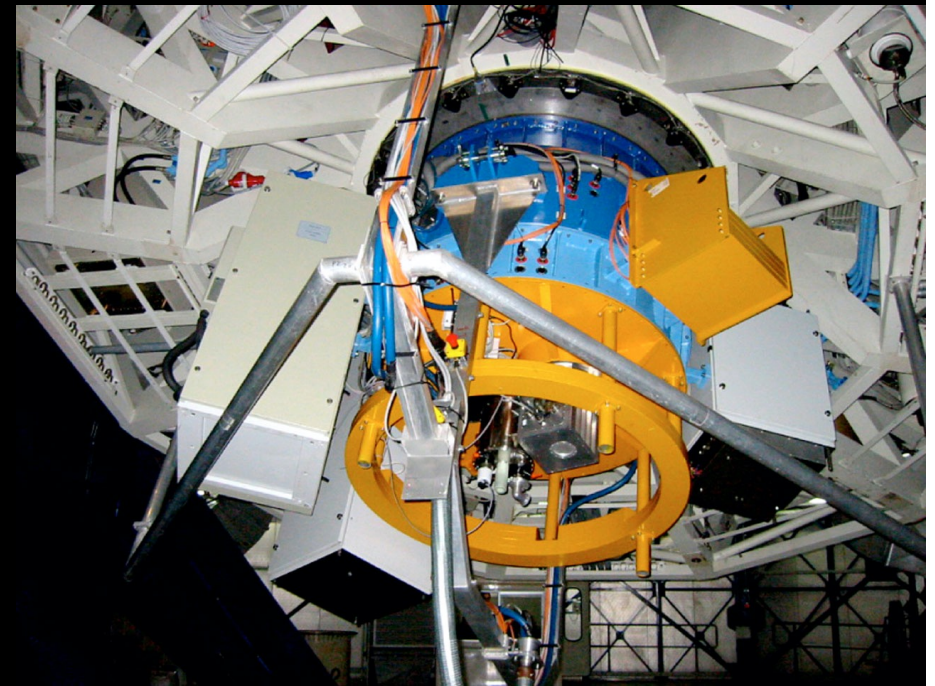
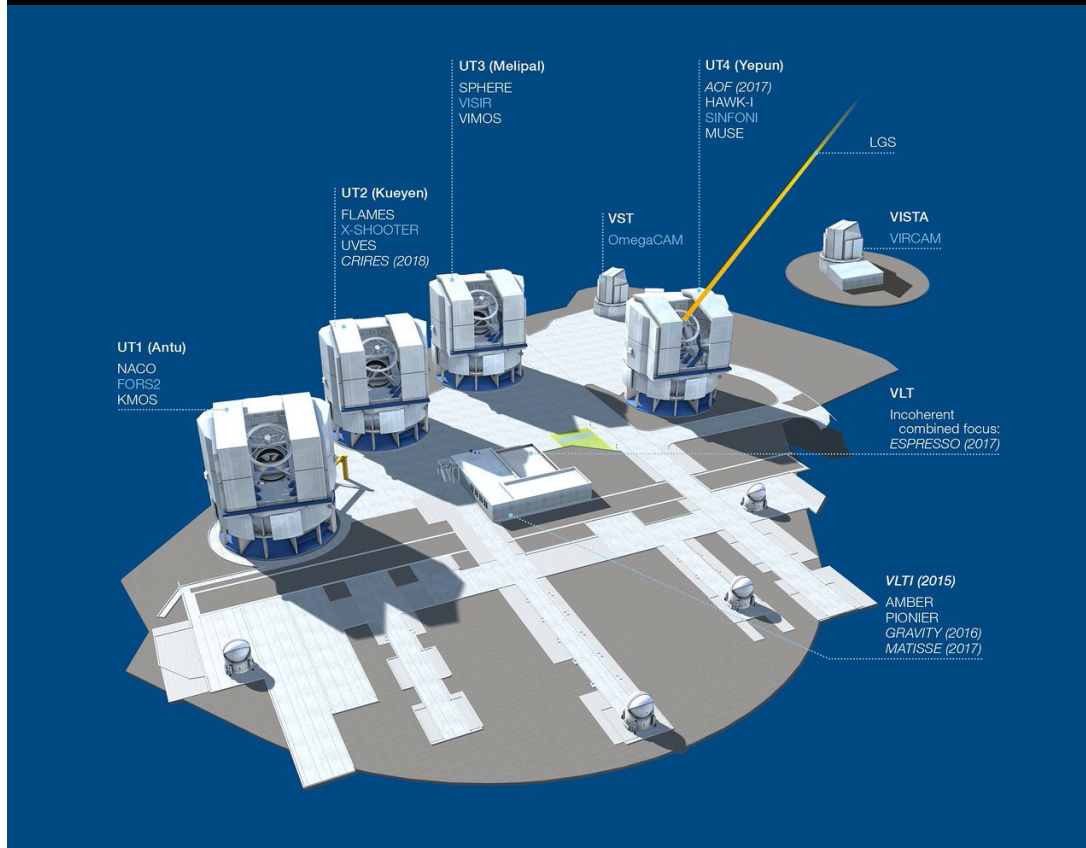


Table 1

Observational circumstances.

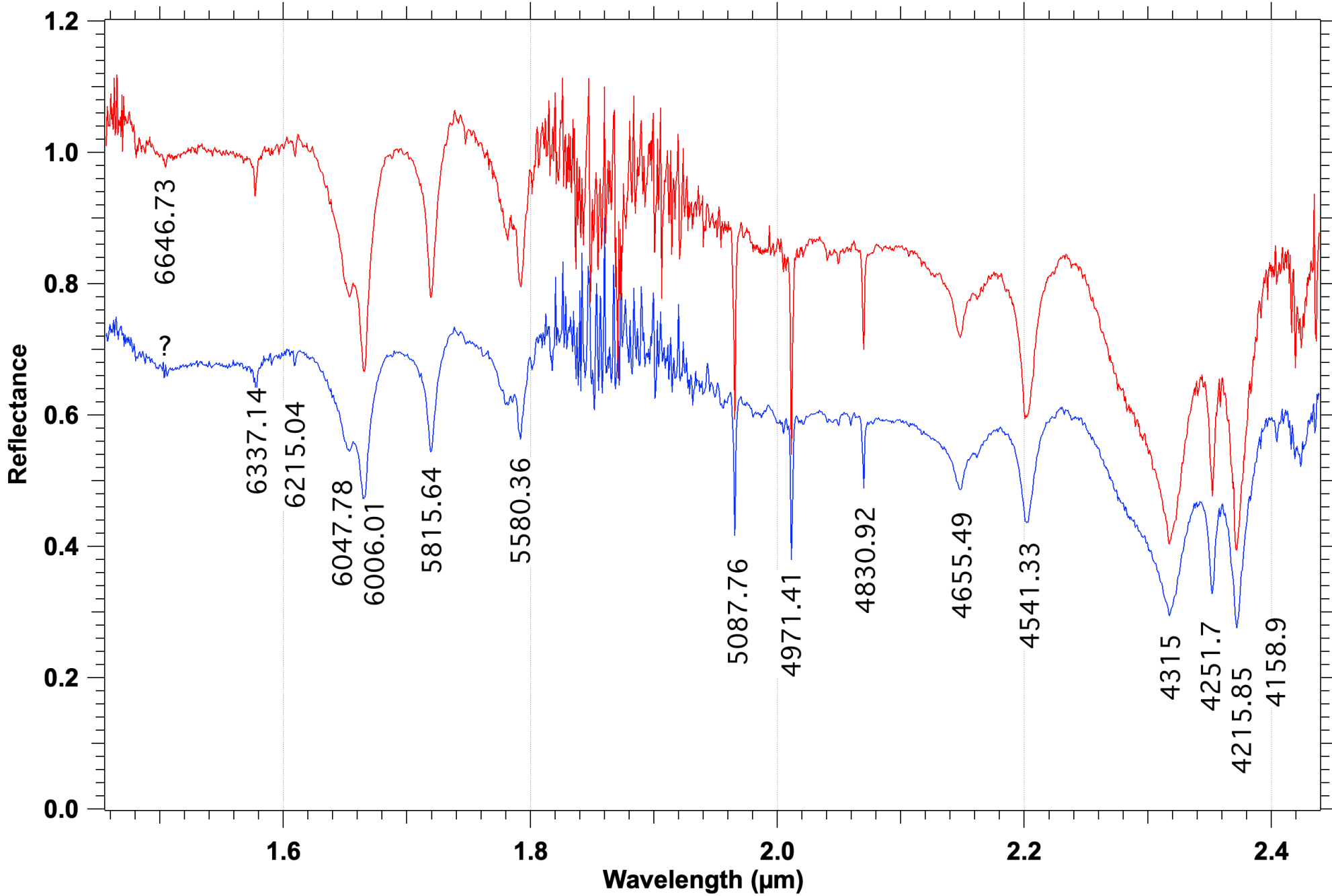
Date Band (R^α)	Start Time (UT)	Exp. Time	East.Long. /Latitude*	Airmass (analog)
2010.09.28 K (4000)	00:59	55 min	352°/– 44°	1.01–1.06 (1.09)
2011.09.07 H (3000)	03:50	40 min	332°/– 43°	1.02–1.10 (1.13)
2011.09.27 H (3000)	01:07	40 min	194°/– 43°	1.02–1.08 (1.03)
2013.08.28 <i>H + K</i> (1500)	04:25	52.5 min	87°/– 41°	1.03–1.06 (1.02–1.11)
2013.08.30 <i>H + K</i> (1500)	04:40	52.5 min	209°/– 41°	1.03–1.07 (1.03–1.13)

*Of sub-observer point. α : Spectral resolution.

Triton: plus gros satellite de Neptune



- Orbite rétrograde (capture)
- $T \sim 36 \text{ K}$
- Fine atmosphère (μBar)
- Plutôt Planète Naine



DEFI: identifier les bandes aux positions mentionnées

On utilisera pour cela la base de données SSHADE:

<https://www.sshade.eu/>



Solid Spectroscopy Hosting Architecture of Databases and Expertise



Write your keywords here or leave it empty to get all the data...

 Search spectra

 Search band lists

 Search bands

 Search publications

 News

  @sshade_eu

Cette base de données est libre d'accès et peut être utilisée pour vos cours

Les observations, une fois publiée, sont libres de droit. Elles peuvent être utilisées à des fins pédagogiques.