Construction des Savoirs : Le visage des planètes

Formation continue – OSUG et Rectorat de Grenoble
Mercredi 15 octobre 2025

Eric Quirico – Professeur UGA IPAG



UGA Université Grenoble Alpes

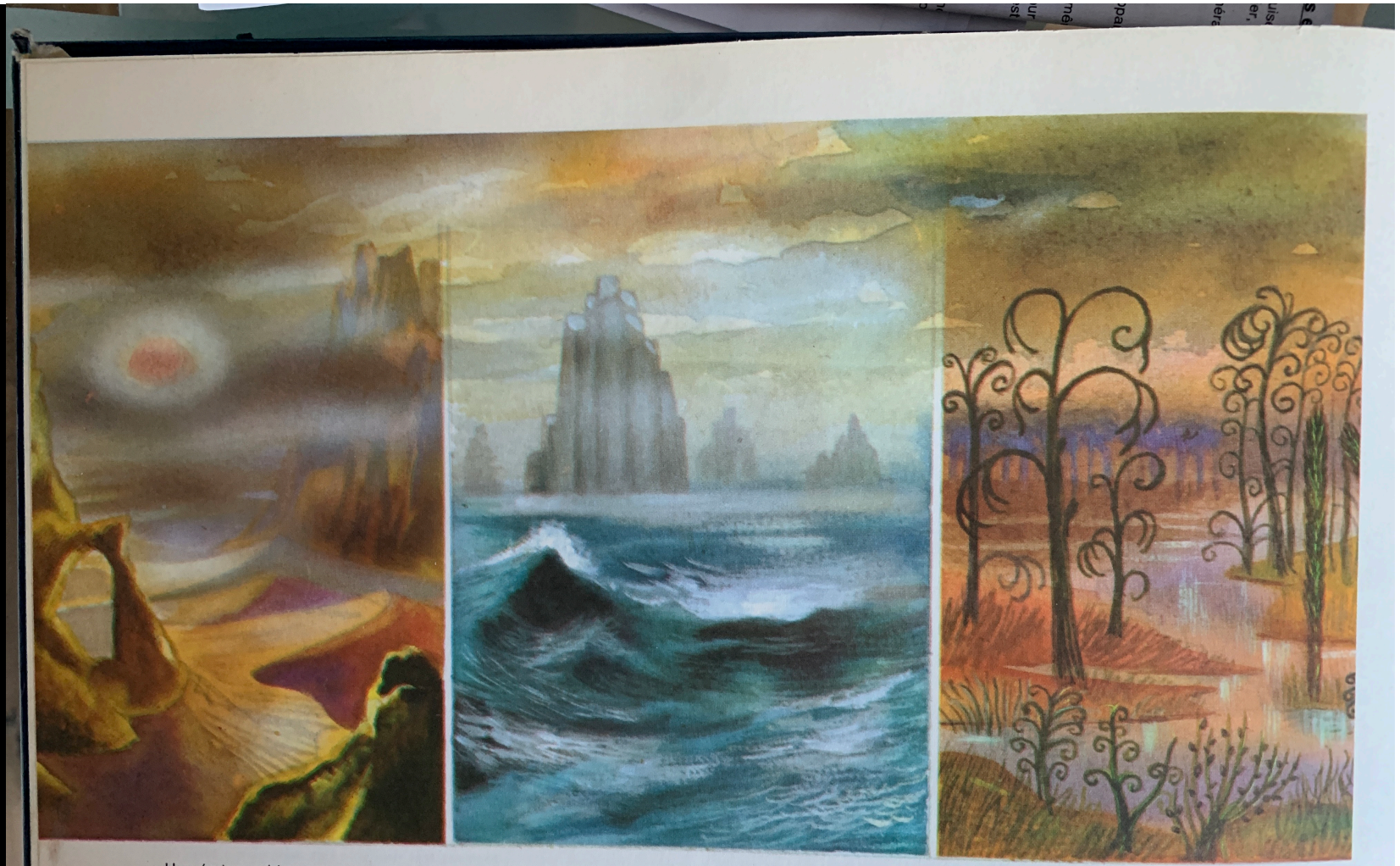
OSUG Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

Région académique Auvergne-Rhône-Alpes



1962

Vénus en 1962

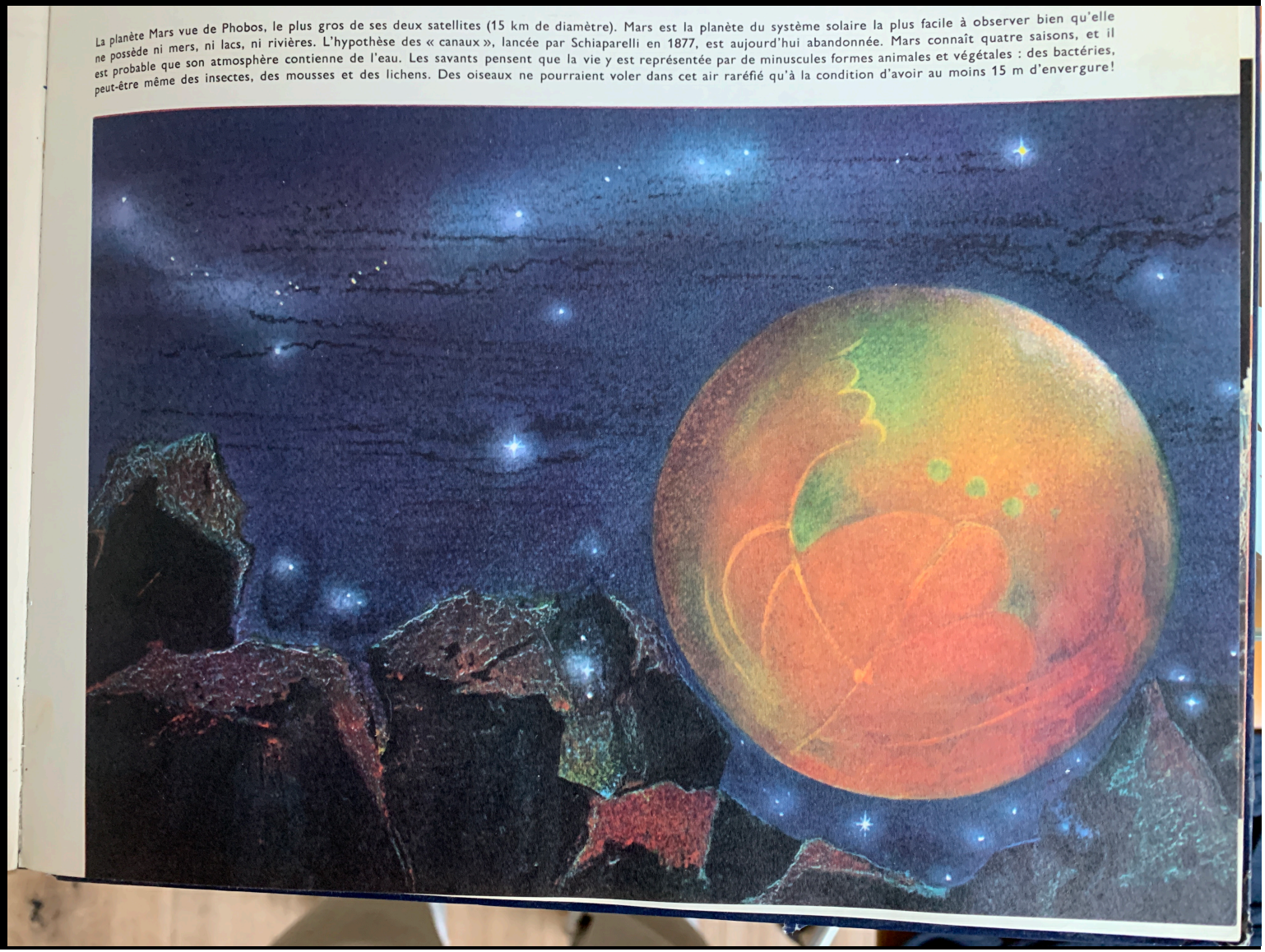


Une épaisse sphère nuageuse nous cache entièrement Vénus. Les savants se demandent si ce voile opaque est constitué par d'énormes masses de vapeur d'eau ou par des tourbillons de poussière. La surface vénusienne pourrait être un désert brûlant balayé par les vents (dessin de gauche), ou un océan semé d'îles (au centre). Selon une troisième hypothèse (à droite), le sol de Vénus serait recouvert par une jungle de fougères et d'arbustes géants, analogue à celle qui régnait sur notre planète à l'ère primaire.

De toute façon, il est probable que ces climats impitoyables n'auront pas permis qu'un être vivant, ressemblant physiquement à l'homme

Il existe une atmosphère martienne. Elle contient de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Des brumes

Mars en 1962

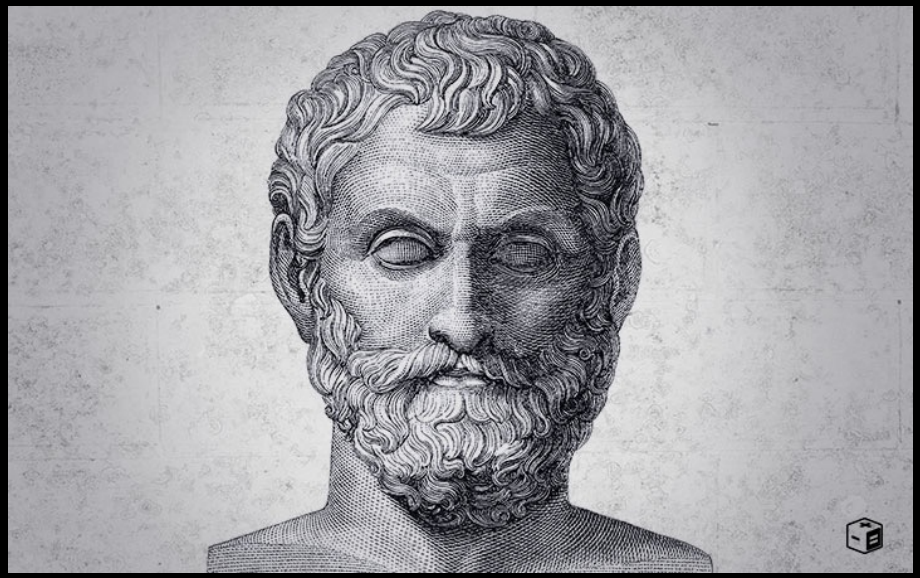


La planète Mars vue de Phobos, le plus gros de ses deux satellites (15 km de diamètre). Mars est la planète du système solaire la plus facile à observer bien qu'elle ne possède ni mers, ni lacs, ni rivières. L'hypothèse des « canaux », lancée par Schiaparelli en 1877, est aujourd'hui abandonnée. Mars connaît quatre saisons, et il est probable que son atmosphère contienne de l'eau. Les savants pensent que la vie y est représentée par de minuscules formes animales et végétales : des bactéries, peut-être même des insectes, des mousses et des lichens. Des oiseaux ne pourraient voler dans cet air raréfié qu'à la condition d'avoir au moins 15 m d'envergure!

Naissance de la philosophie Naturelle : Ecole de Milet

Thalès (~625-547) av JC

Hécatée de Milet (~550-476) av JC

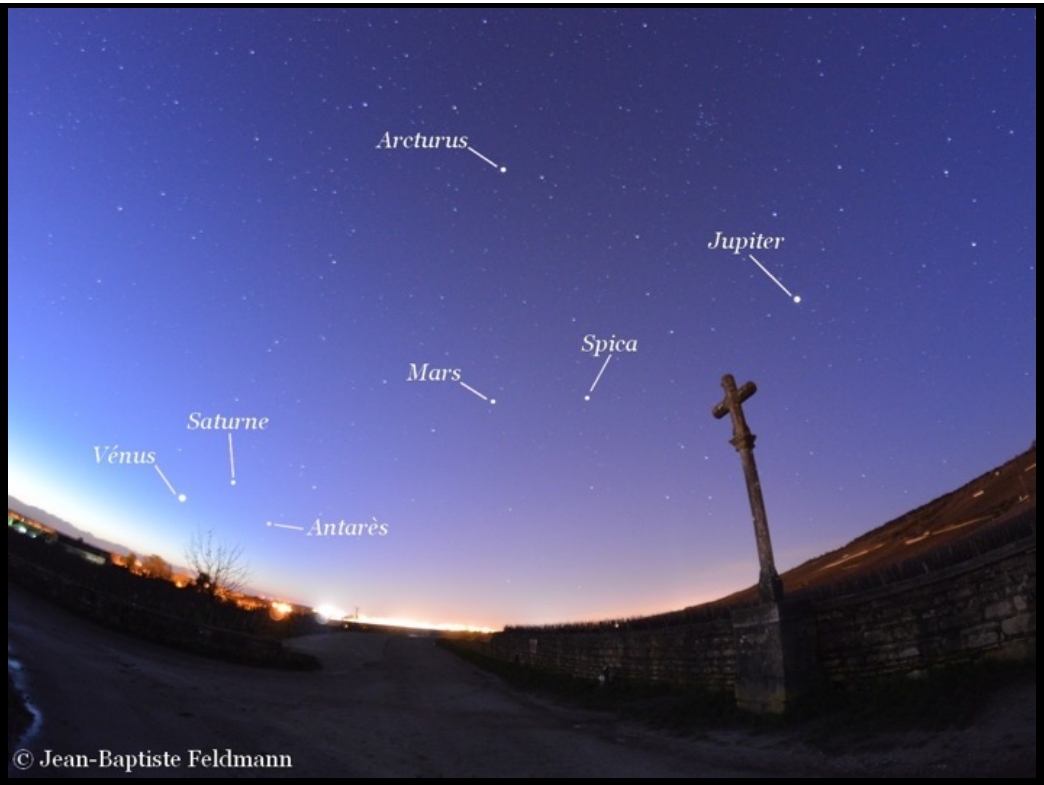




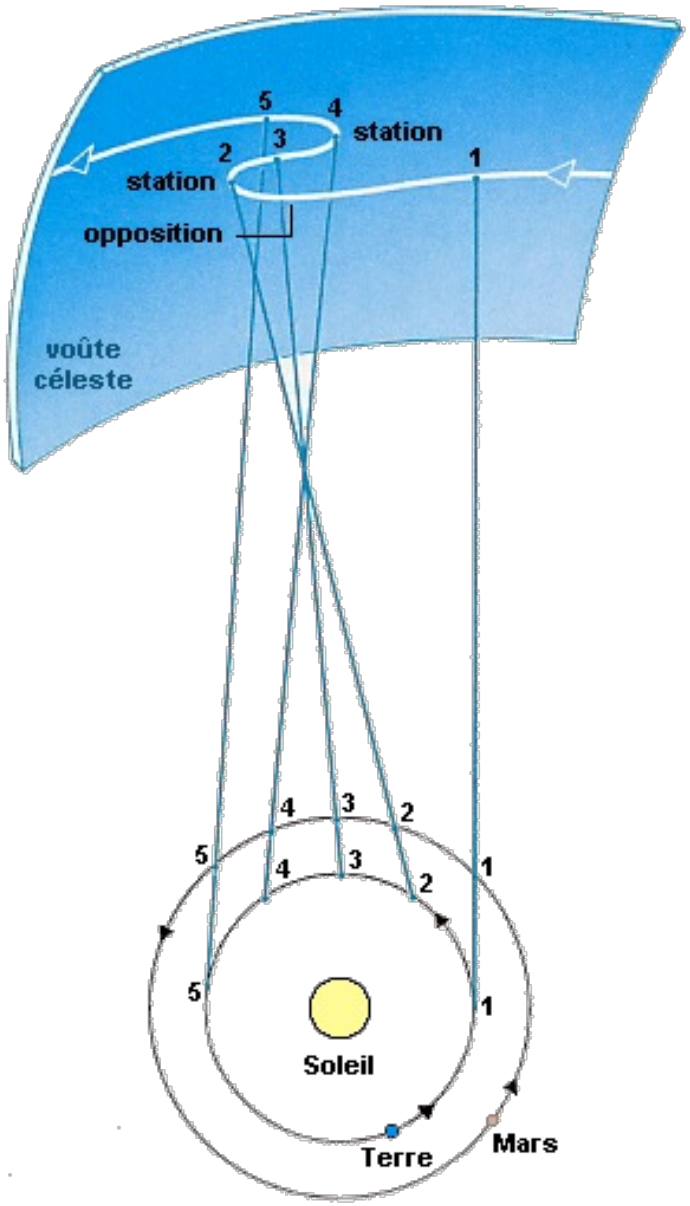
Le ciel observé à l'œil nu

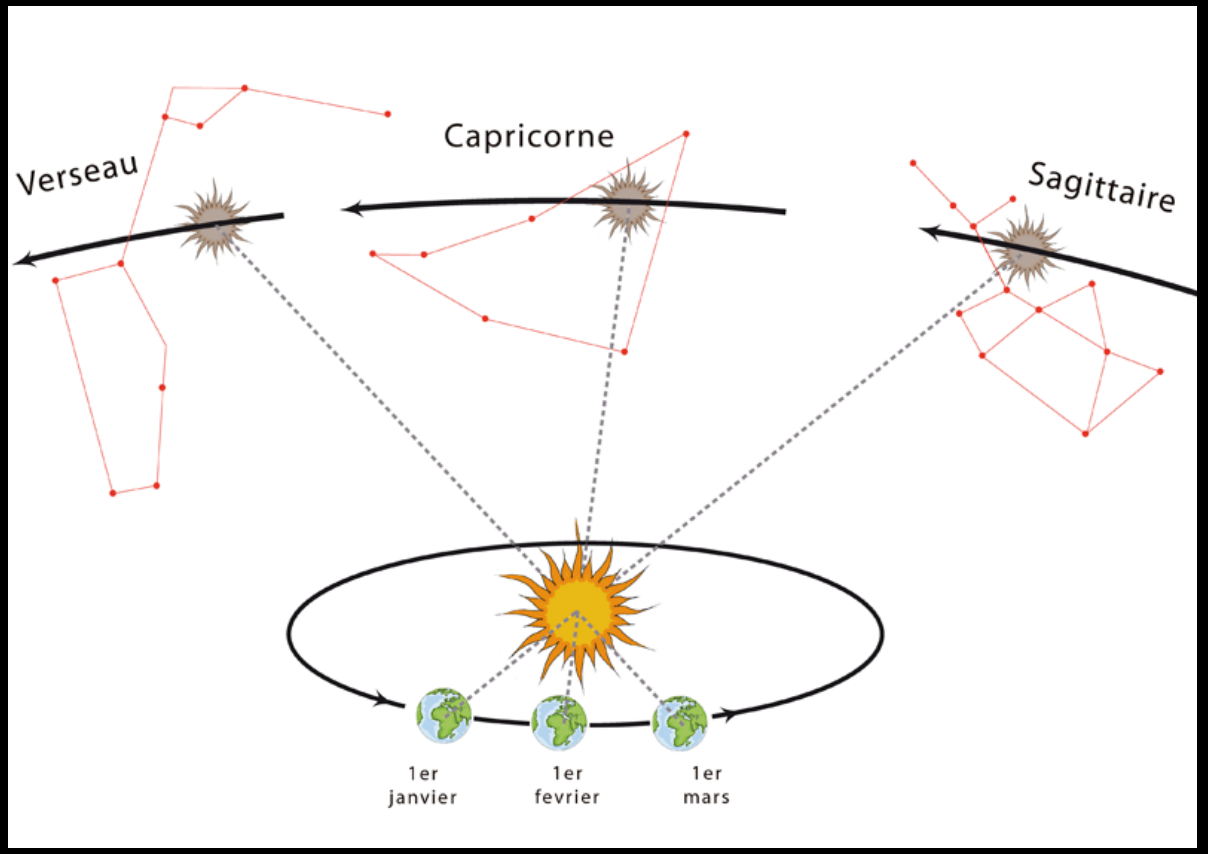
- Voûte étoilée
- Soleil et Lune
- Planètes = Astres errants
- Eclipses de Lune et de Soleil
- Comètes et Météores





- Mesure du temps: calendriers (lunaire, solaire)
- Horoscope
- A partir du VI^{ème} siècle: vers une description géométrique


5
4
station
3
2
station
1
opposition
voûte
céleste
4
3
2
5
4
3
2
1
5
1
Soleil
Terre
Mars


Verseau
Capricorne
Sagittaire
1er
janvier
1er
fevrier
1er
mars

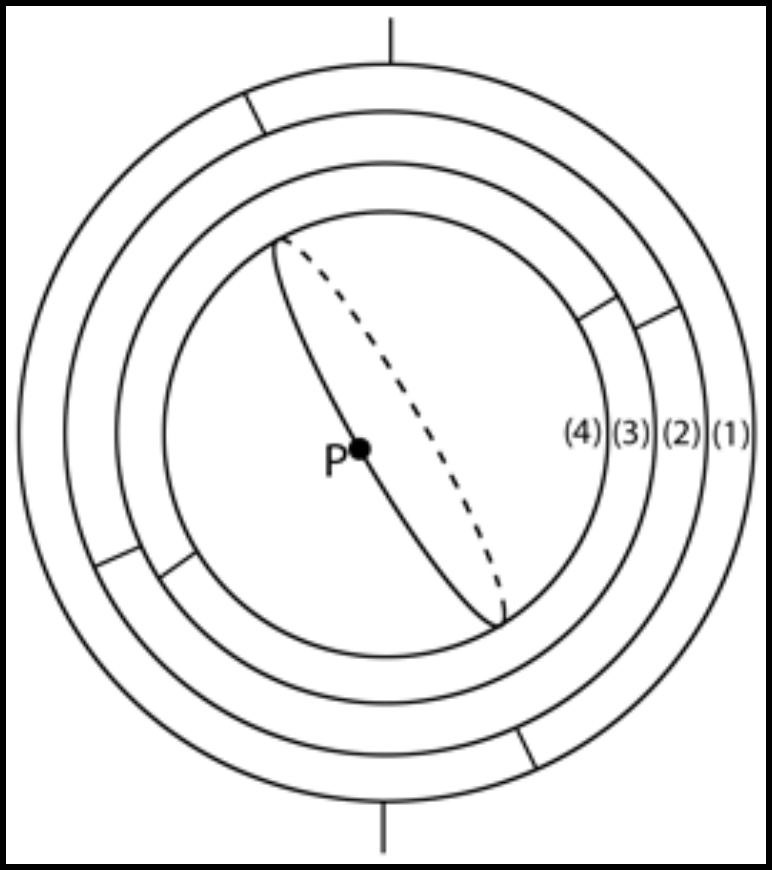
La théorie des sphères

Eudoxe de Cnide (v. 405-350 av JC)
Aristote (384-322 av J-C)
Ptolémée (v 90-160 ap JC)

(1)Mouvement du fond étoilé
(2)Mouvement relatif au Zodiaque
(3)(4) Errance des planètes

Jusqu'à 27 sphères!

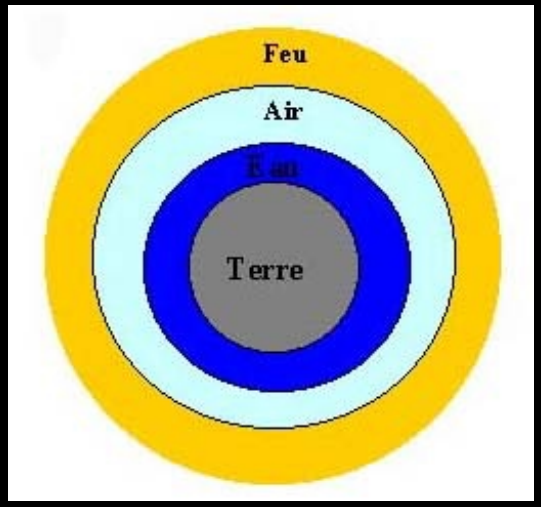
Terre immobile au centre
Mouvement circulaire = Idéal

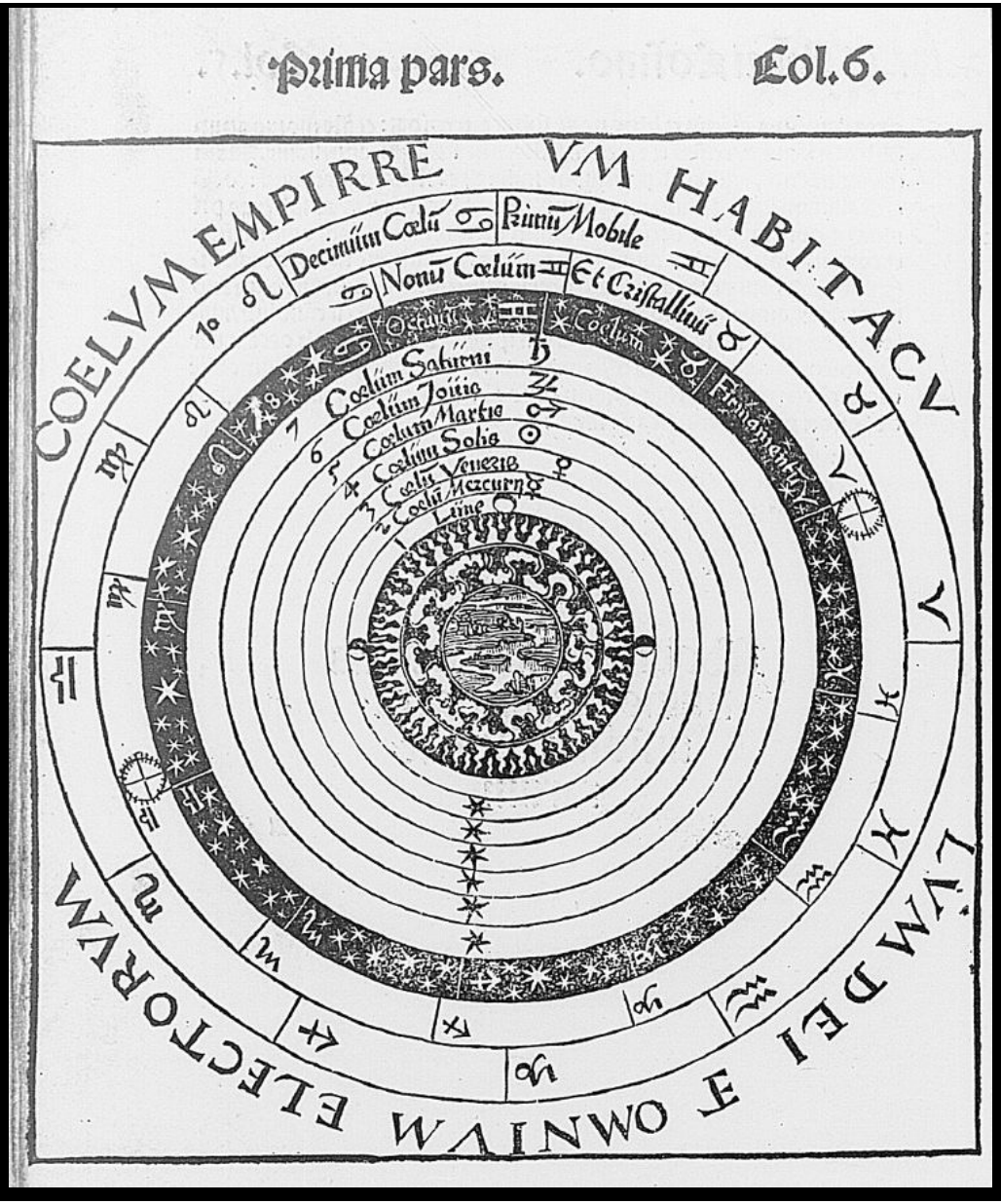


Le modèle Ptoléméen (géocentrique)

Eudoxe de Cnide (v. 405-350 avJC)
Aristote (384-322 av J-C)
Ptolémée (v 90-160 ap JC)

Monde sublunaire « corrompu »
=mélangé

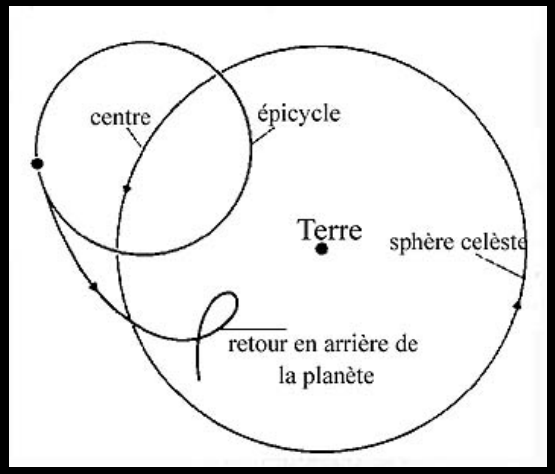


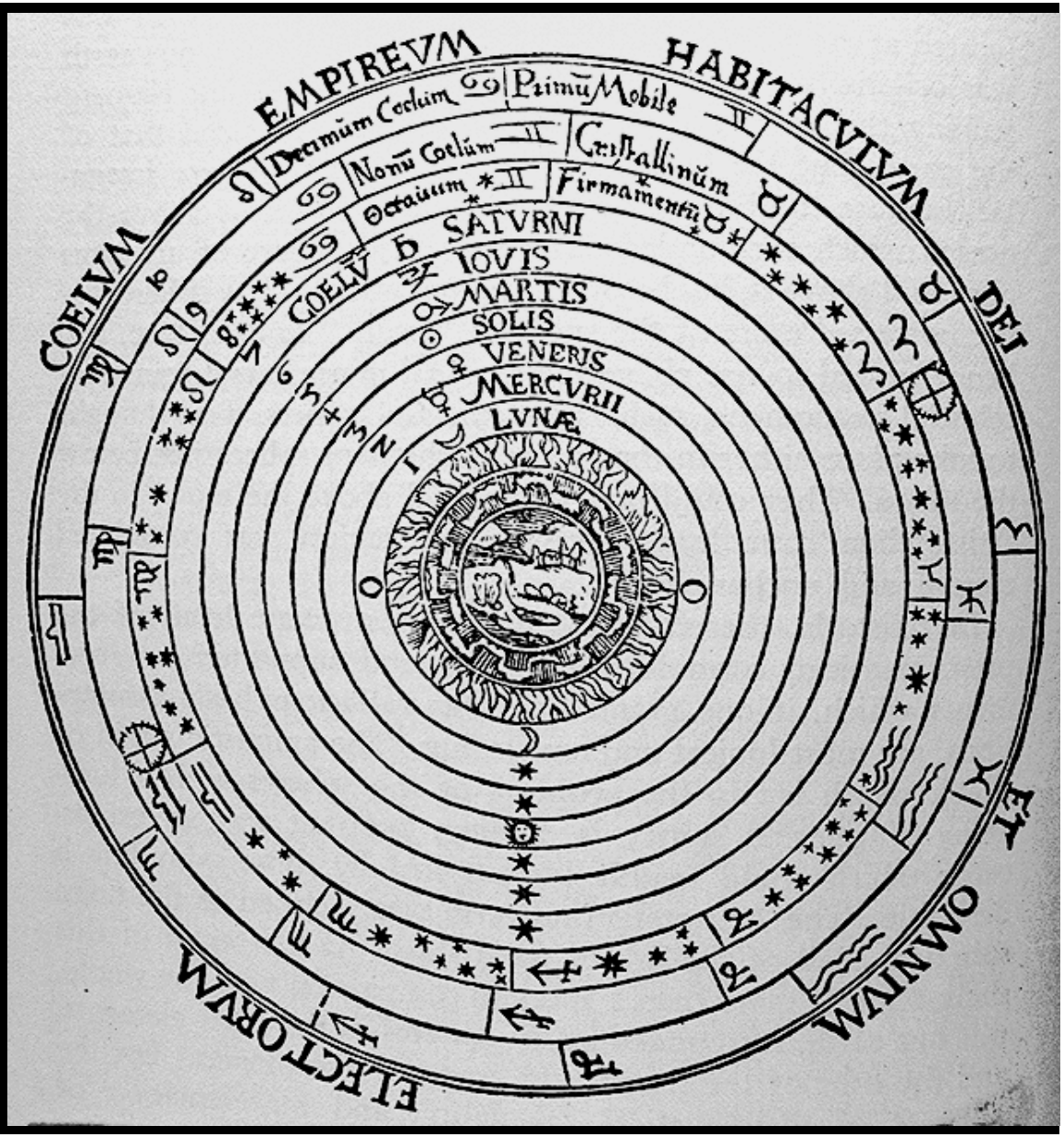


Le modèle Ptoléméen (géocentrique)

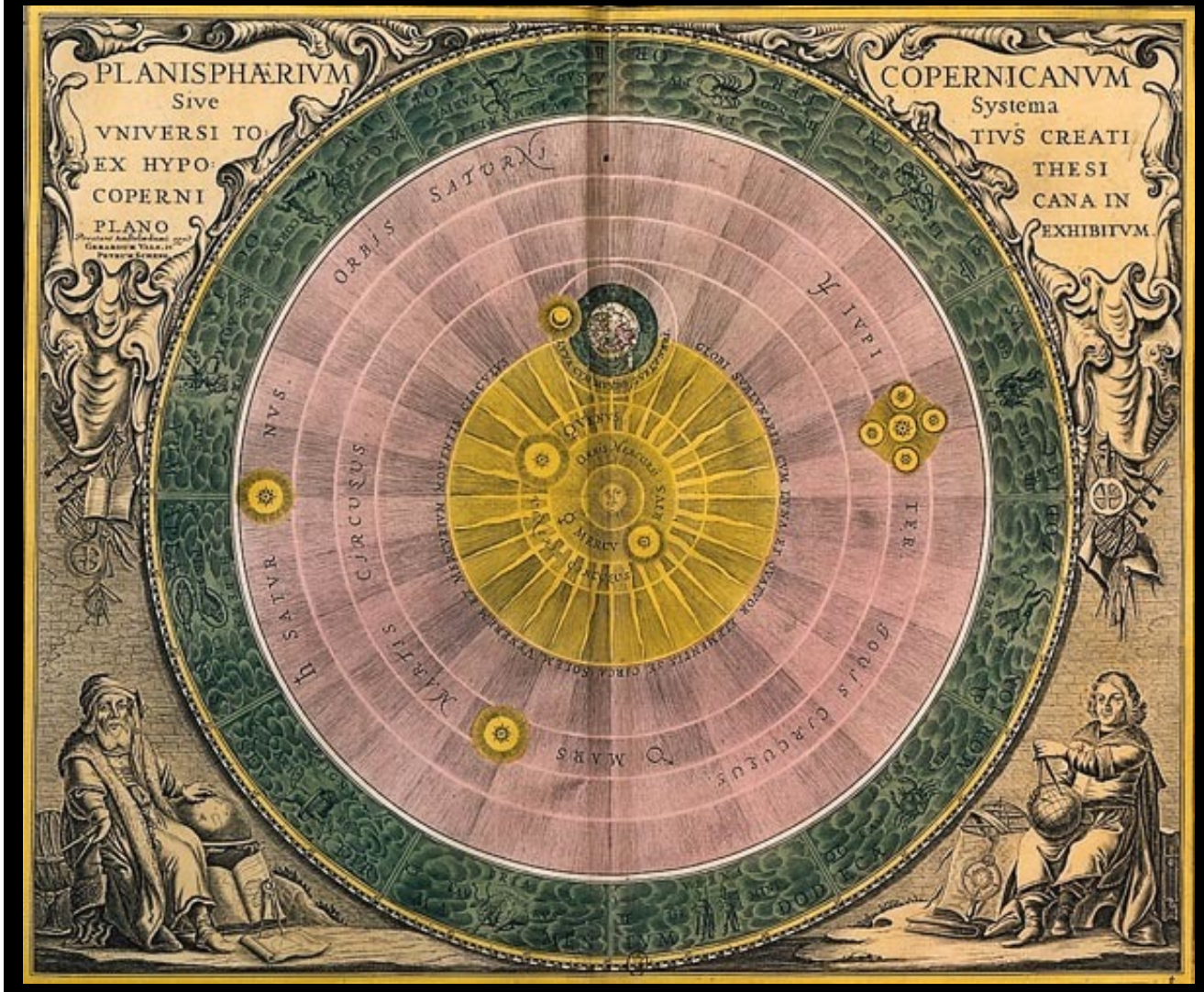
Eudoxe de Cnide (v. 405-350 avJC)
Aristote (384-322 av J-C)
Ptolémée (v 90-160 ap JC)

- Prévisions du mouvements des planètes
- Impose le modèle géocentrique à l'Occident pour 1700 ans…





La révolution Copernicienne



Système plus simple

Plus symétrique

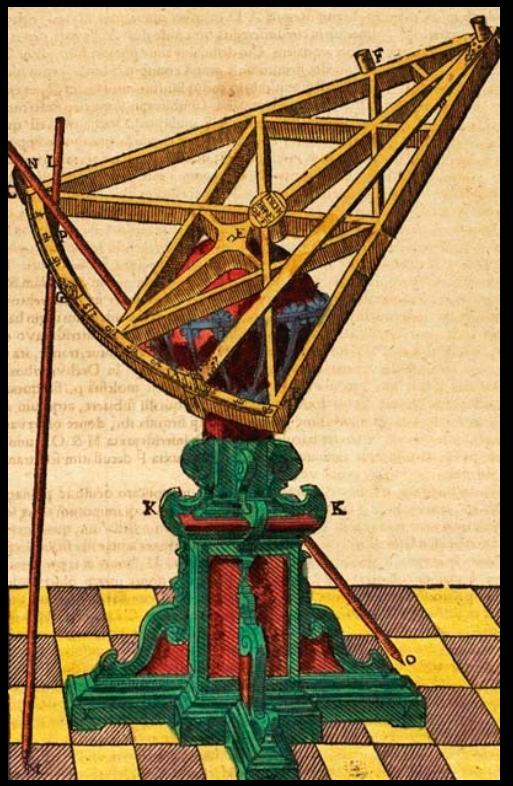
Les progrès de l'observation astronomique

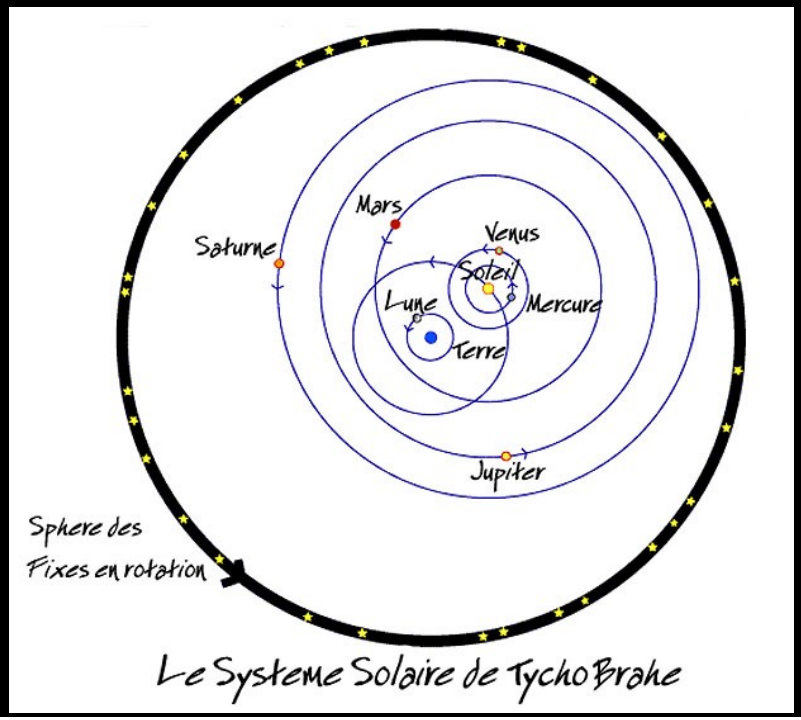
Palais Uraniborg (Ile de Ven)
Observateur exceptionnel (~ ' d'arc)

SN 1572
Comète 1577
=> Faillite du modèle Aristotélicien



Tycho Brahé (1546-1601)



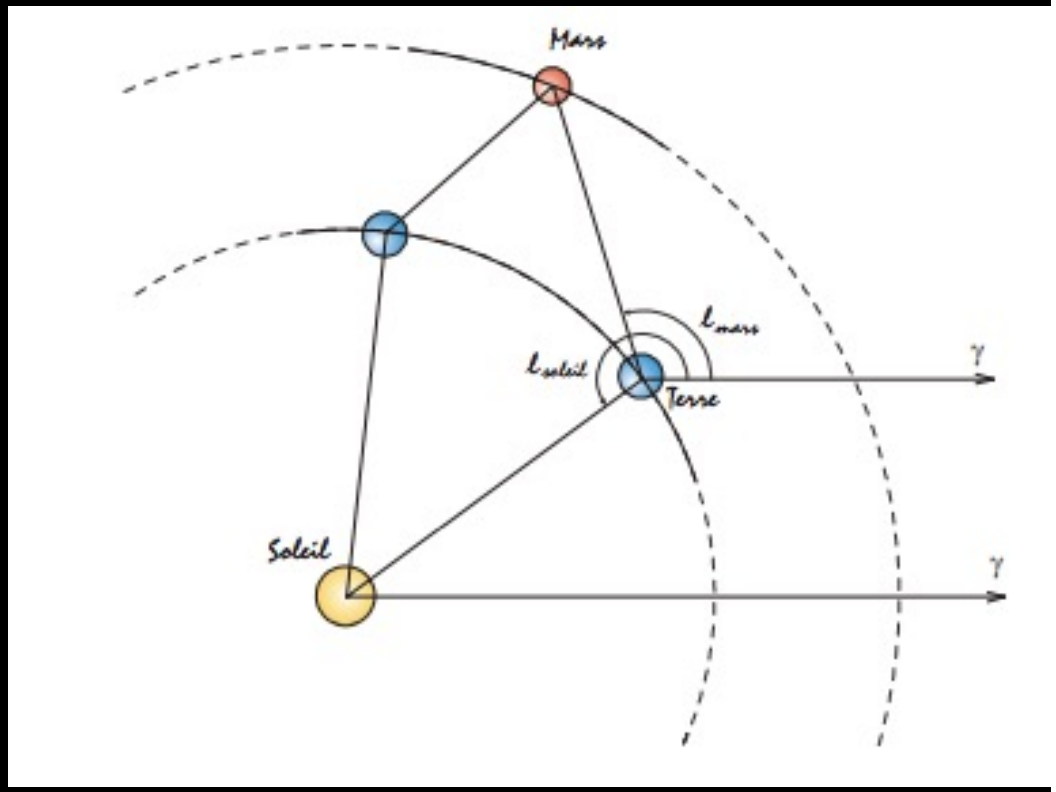


Kepler et l'apport des mathématiques

Disciple de T. Brahé
Mathématicien
Détermine l'orbite de Mars à partir des observations de T. Brahe



Johannes Kepler (1571-1630)

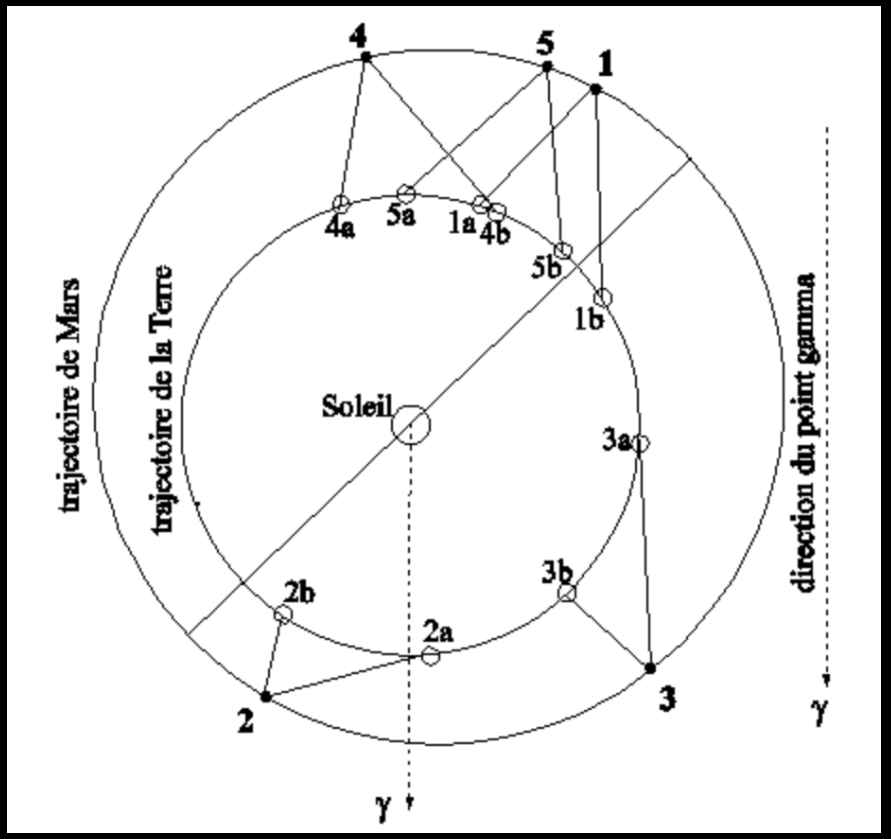


Kepler et l'apport des mathématiques

Astronomia Nova 1609

Système héliocentrique
L'orbite de Mars est elliptique
Les trajectoires circulaires idéales du modèle antique n'existent pas

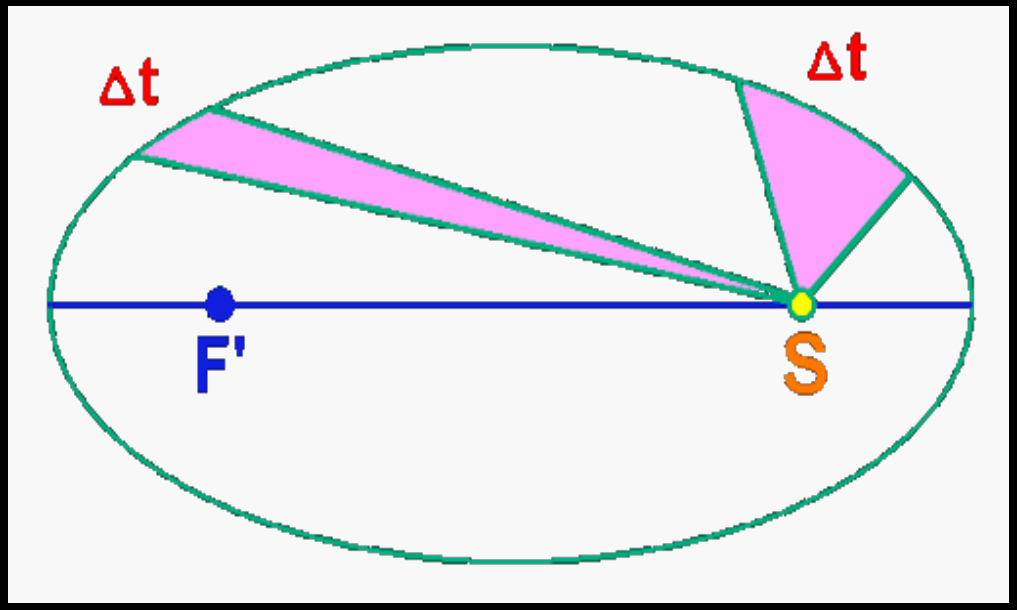
	date	l_{Soleil} (degrés)	l_{Mars} (degrés)
1a	17 Fev. 1585	339.38	135.20
1b	05 Jan. 1587	295.35	182.13
2a	19 Sep. 1591	185.78	284.30
2b	06 Aou.1593	143.43	346.93
3a	07 Déc. 1593	265.88	3.07
3b	25 Oct. 1595	221.70	49.70
4a	28 Mar. 1587	16.83	168.20
4b	12 Fev. 1589	333.70	218.80
5a	10 Mar. 1585	359.68	131.80
5b	26 Jan. 1587	316.10	184.70

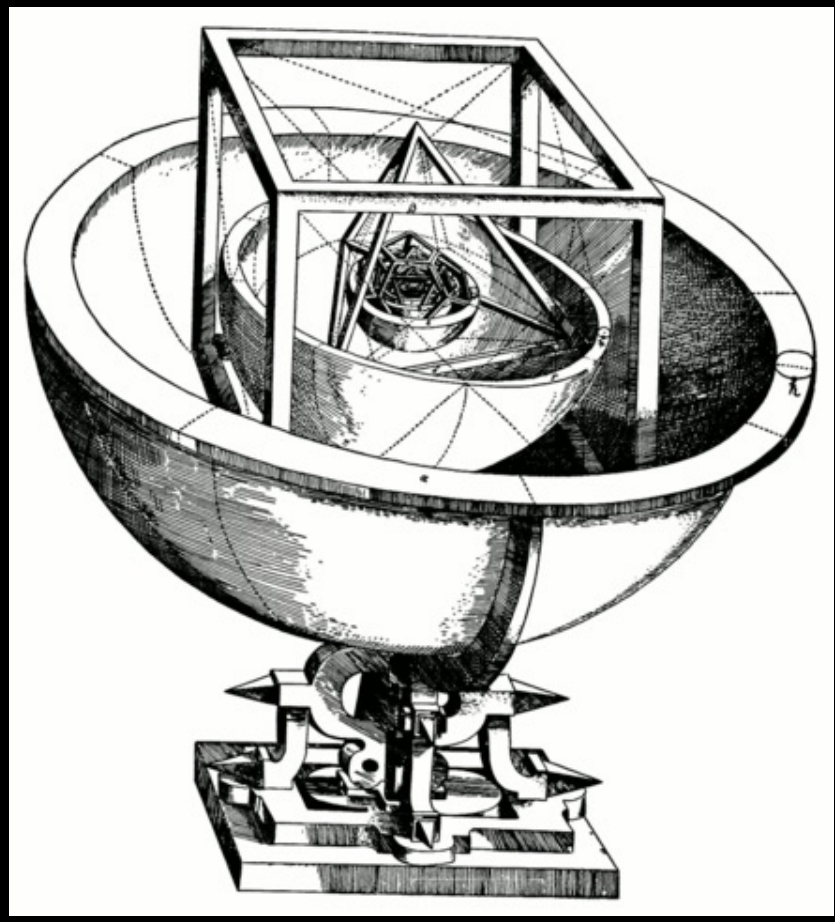


Kepler et l'apport des mathématiques

① Orbite = ellipse (conique)
② Balaie aires égales pendant temps égaux
③ T^2/a^3=constante

Les 3 lois de Kepler (1609 et 1619)



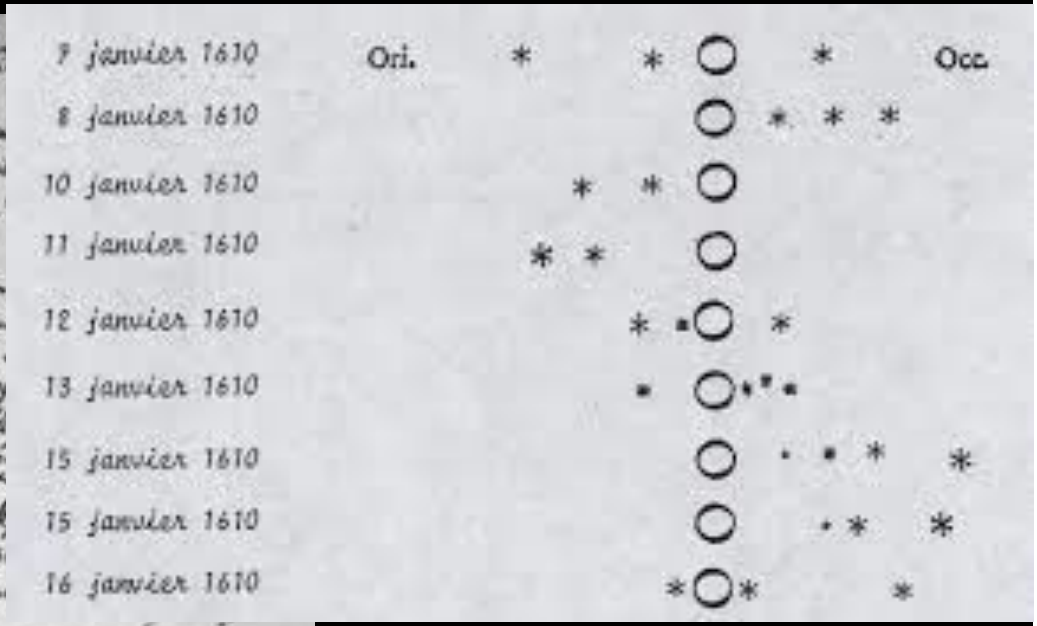


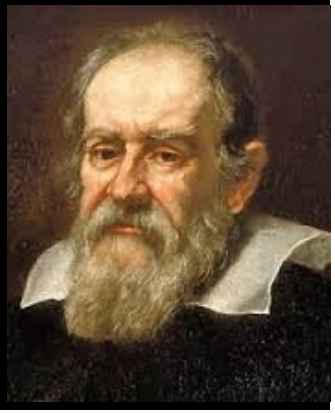
L’avènement de l’observation optique

Galileo Galilei (1564-1642)
1610 – Découverte des satellites Galiléens

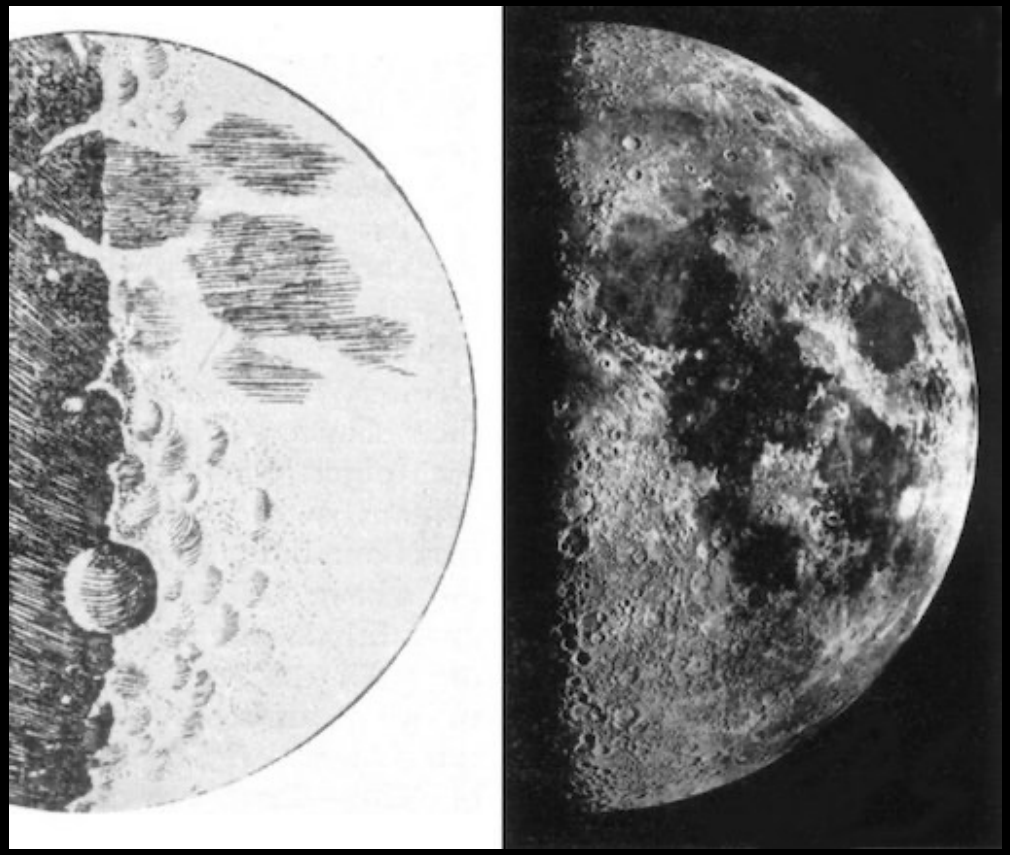


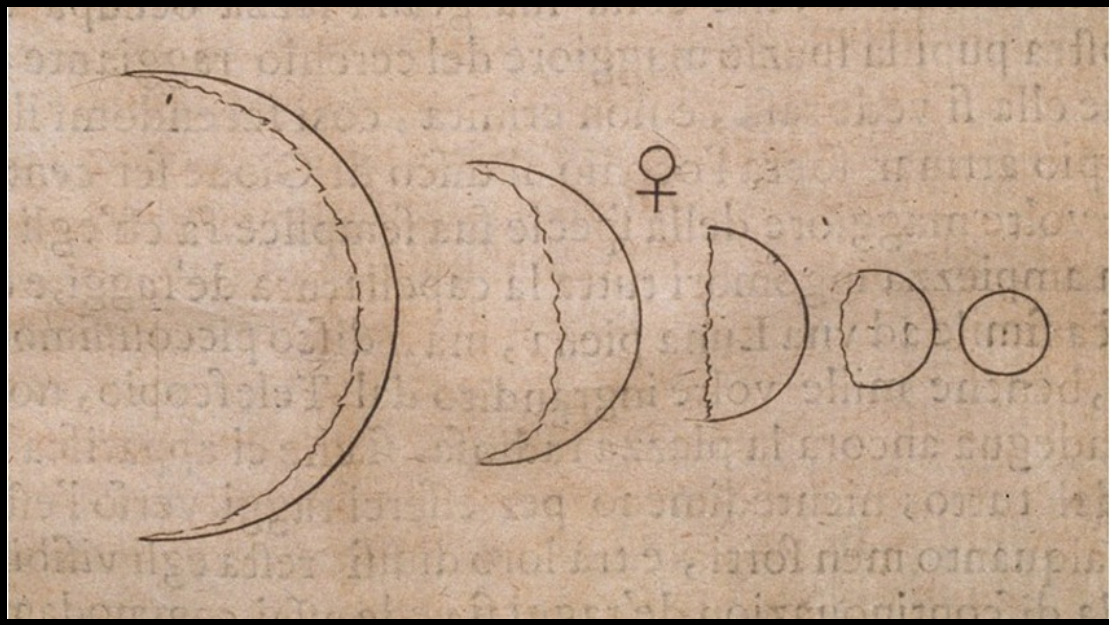






L’avènement de l’observation optique

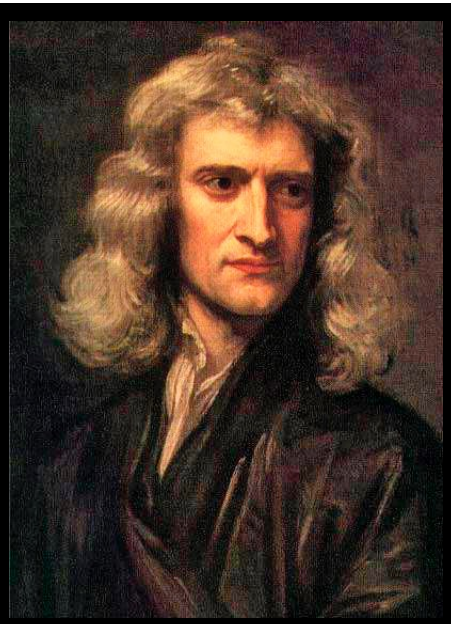


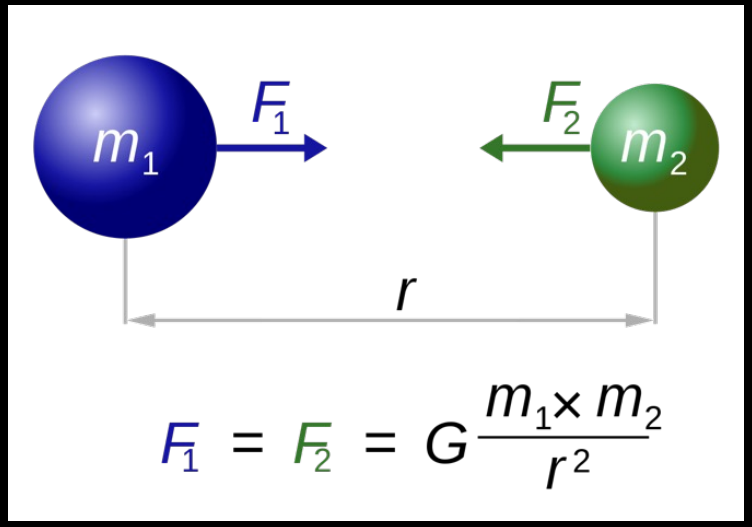


Isaac Newton (1642-1727)

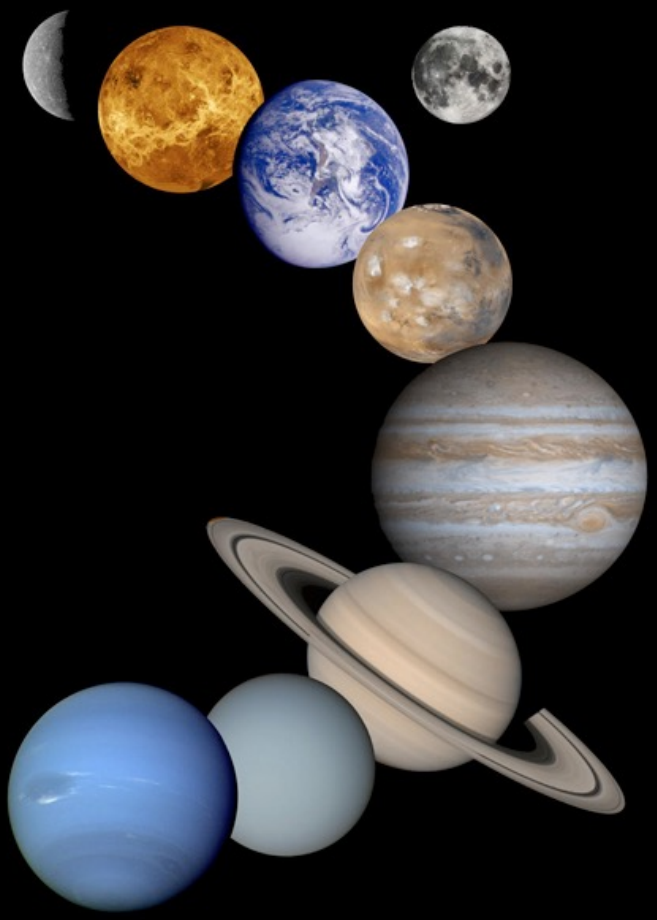
- Loi de la gravitation universelle
- co-developpeur du calcul infinitésimal

Formalise mathématiquement l'existence d'une force en $1/r^2$
Bénéficie de travaux antérieurs, notamment Robert Hooke, expérimentateur de génie et inventeur du microscope





- Puissance de l'approche théorique: force à distance contre-intuitive
- Les découvertes sont toujours faites plusieurs fois, elles sont issues d'un « terreau » d'idées



Développement de l’astronomie observationnelle à partir du XIXème siècle

- Uranus (1781 – Herschel, Observation téléscope)
- Neptune (1846 – Adams et Le Verrier- prédiction théorique)
- Pluton (1930)
- Ceres (1801)
- KBOs: années 1990s

Les astéoïdes et autres petits corps : ces mal-nés

- Découverte e Cérès en 1801 par G. Piazzi (Gauss situe l'objet entre Mars et Jupiter)
- Découverte de Pallas en 1802 par Olbers (observée antérieurement, attribué à une étoile)
- Junon 1804
- Vesta 1807 par Olbers

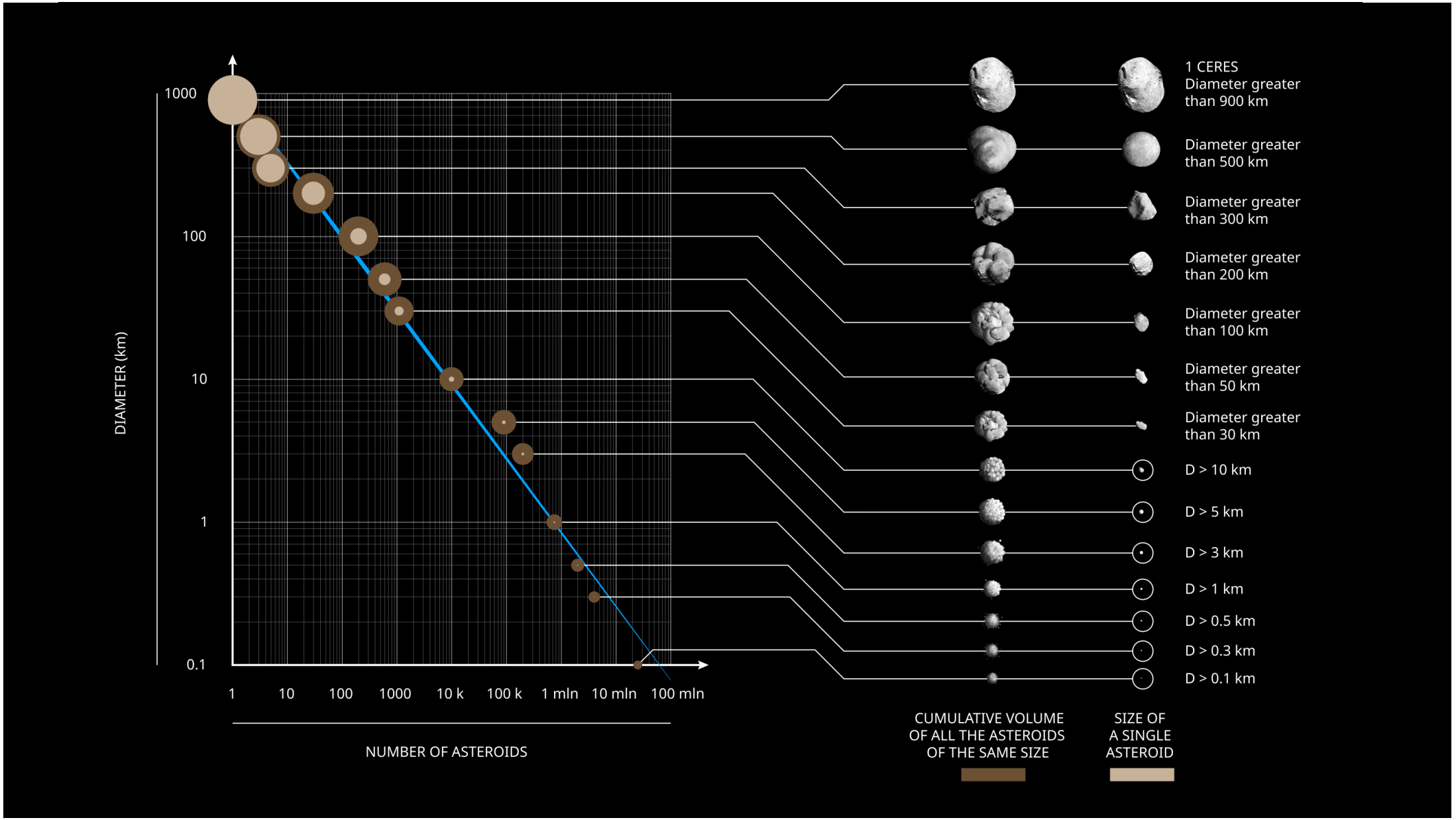
« Petites planètes » => Astéroïdes par Herschell = « en forme d'étoile »

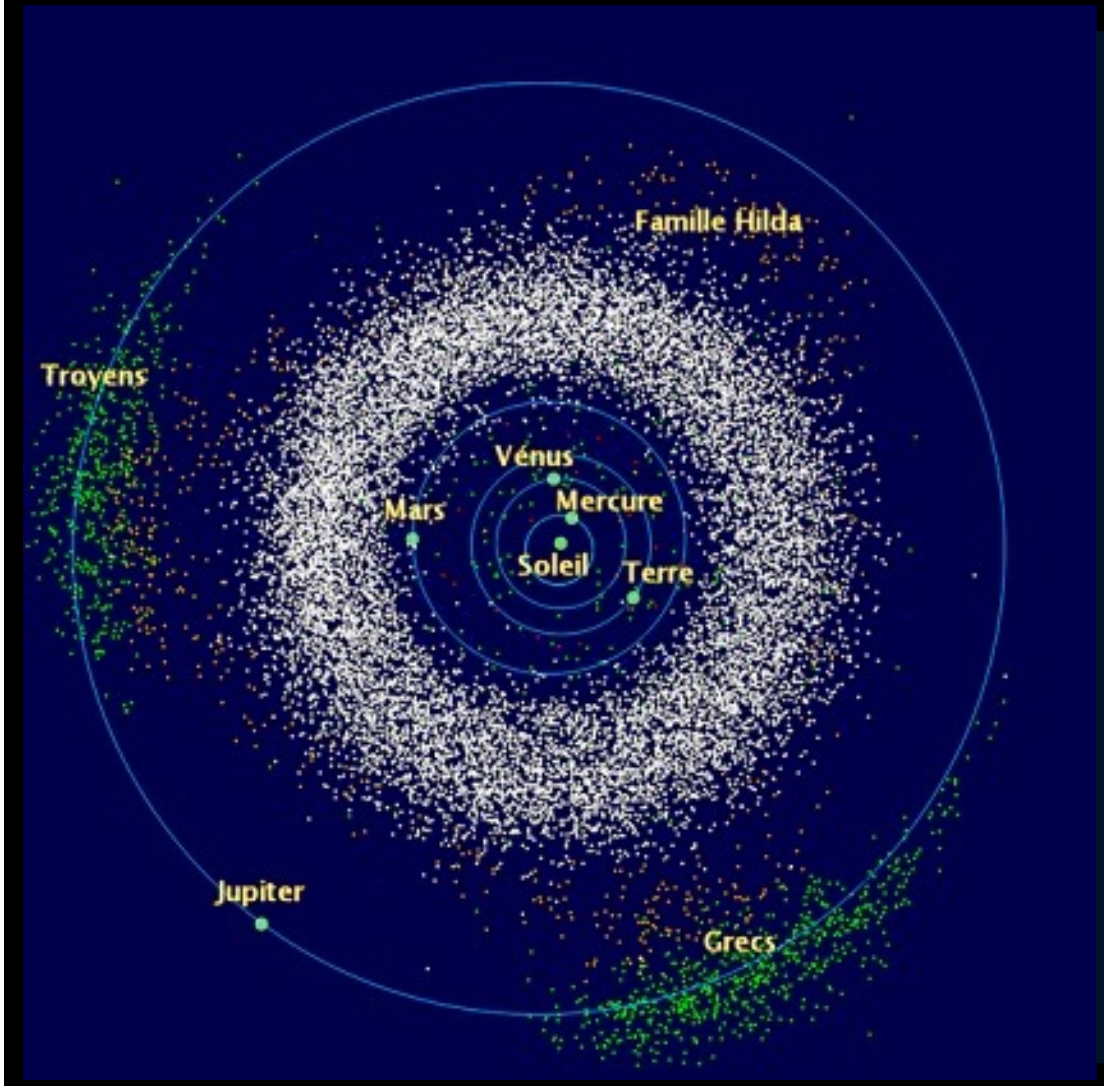
Puis 1845 : Astrée par Hencke
1868 : 100 astéroïdes sont connus.
1921 : 1000
1989 : 10000
2025 : de l'ordre de 1 million

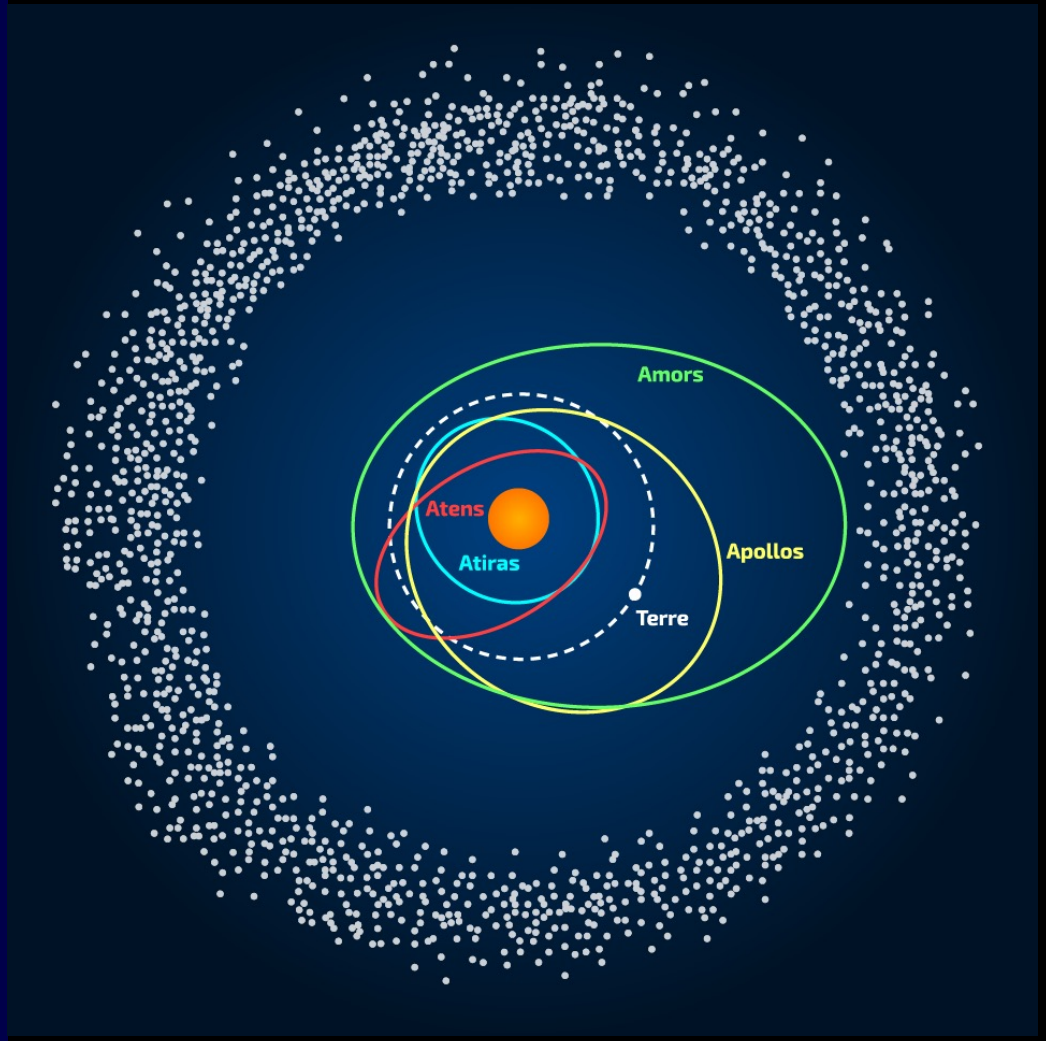
Taille : > ~ 1m. Sinon météoroïde. Pourssières : > 1 mm



Giuseppe Piazzi (1746-1826)

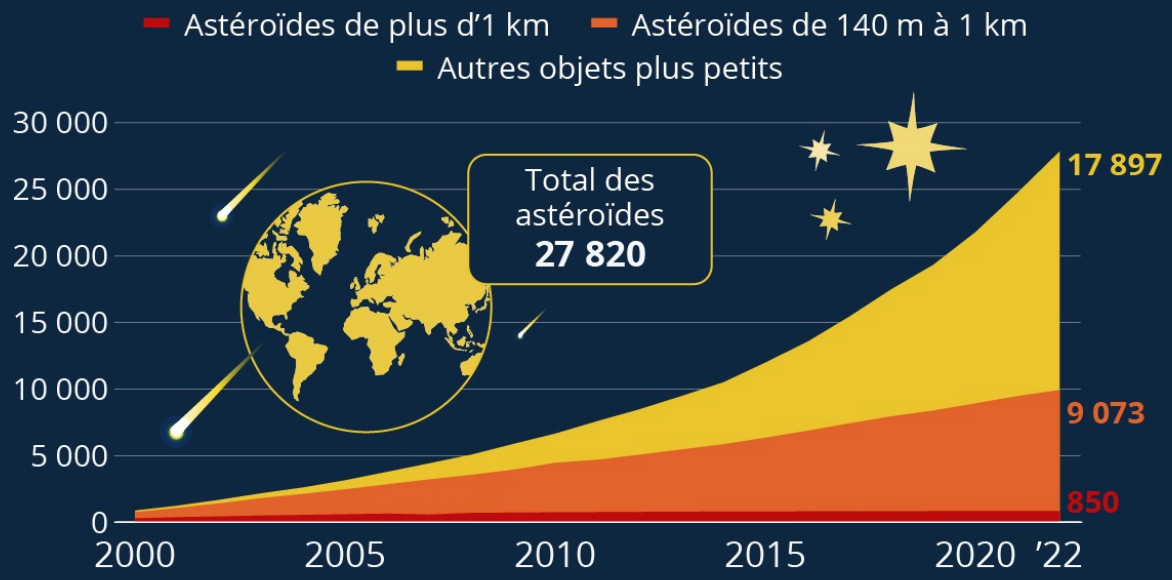

DIAMETER (km)
1000
100
10
1
0.1
1
10
100
1000
10 k
100 k
1 mln
10 mln
100 mln
NUMBER OF ASTEROIDS
1 CERES
Diameter greater than 900 km
Diameter greater than 500 km
Diameter greater than 300 km
Diameter greater than 200 km
Diameter greater than 100 km
Diameter greater than 50 km
Diameter greater than 30 km
D > 10 km
D > 5 km
D > 3 km
D > 1 km
D > 0.5 km
D > 0.3 km
D > 0.1 km
CUMULATIVE VOLUME OF ALL THE ASTEROIDS OF THE SAME SIZE
SIZE OF A SINGLE ASTEROID


Famille Hilda
Troyens
Vénus
Mercure
Mars
Soleil
Terre
Jupiter
Grecs


Amors
Atens
Atiras
Apollos
Terre

La chasse aux astéroïdes qui peuvent croiser la Terre

Évolution du nombre d'objets géocroiseurs détectés depuis 2000, selon le diamètre *



Au 1er janvier des années respectives

* Objets géocroiseurs : astéroïdes ou comètes dont l'orbite autour du Soleil approche ou croise celle de la Terre.

Source : CNEOS (NASA)

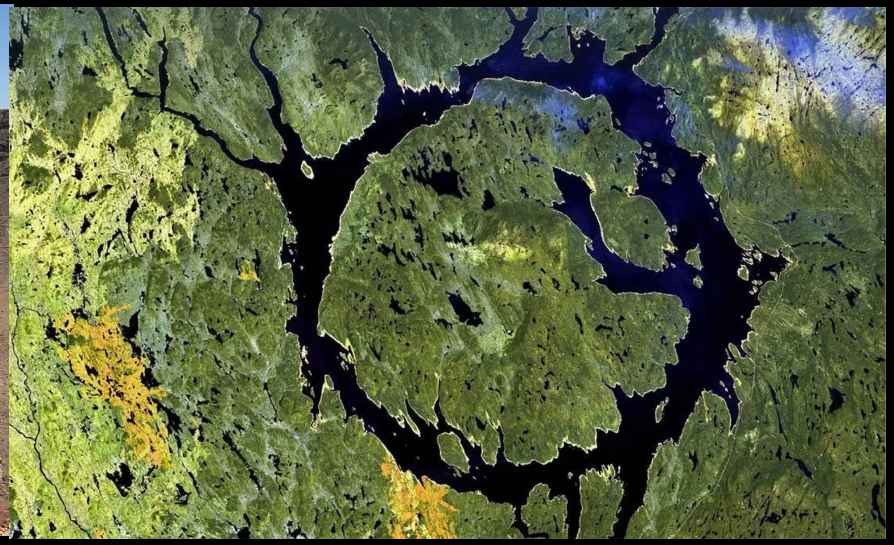
statista

Le cas des impacts géants

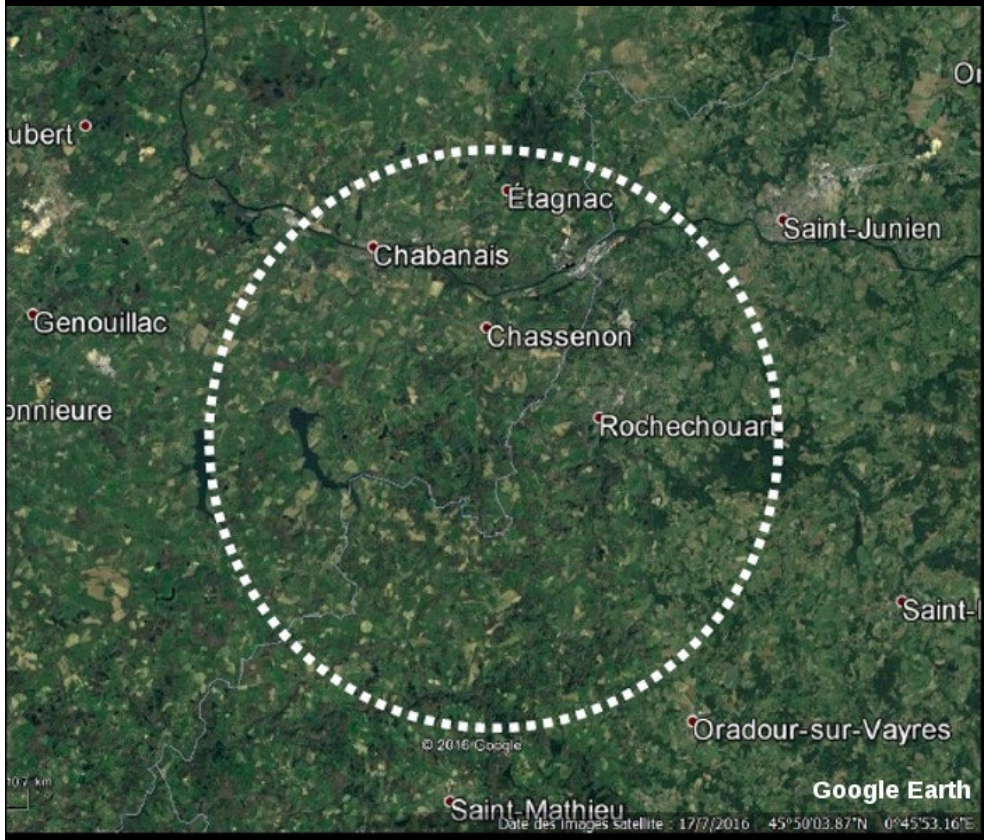
Les collisions avec des objets massifs sont rares actuellement, mais ont été très fréquents au début de la formation du système solaire (surface lunaire). Sur Terre, les cratères ont été effacés par l'érosion, et il ne reste que quelques rares reliques comme le Meteor Crater. Les timations d'impact sont les suivantes, sur la base d'une densité de 3,5 et d'une vitesse de 15 km/s :

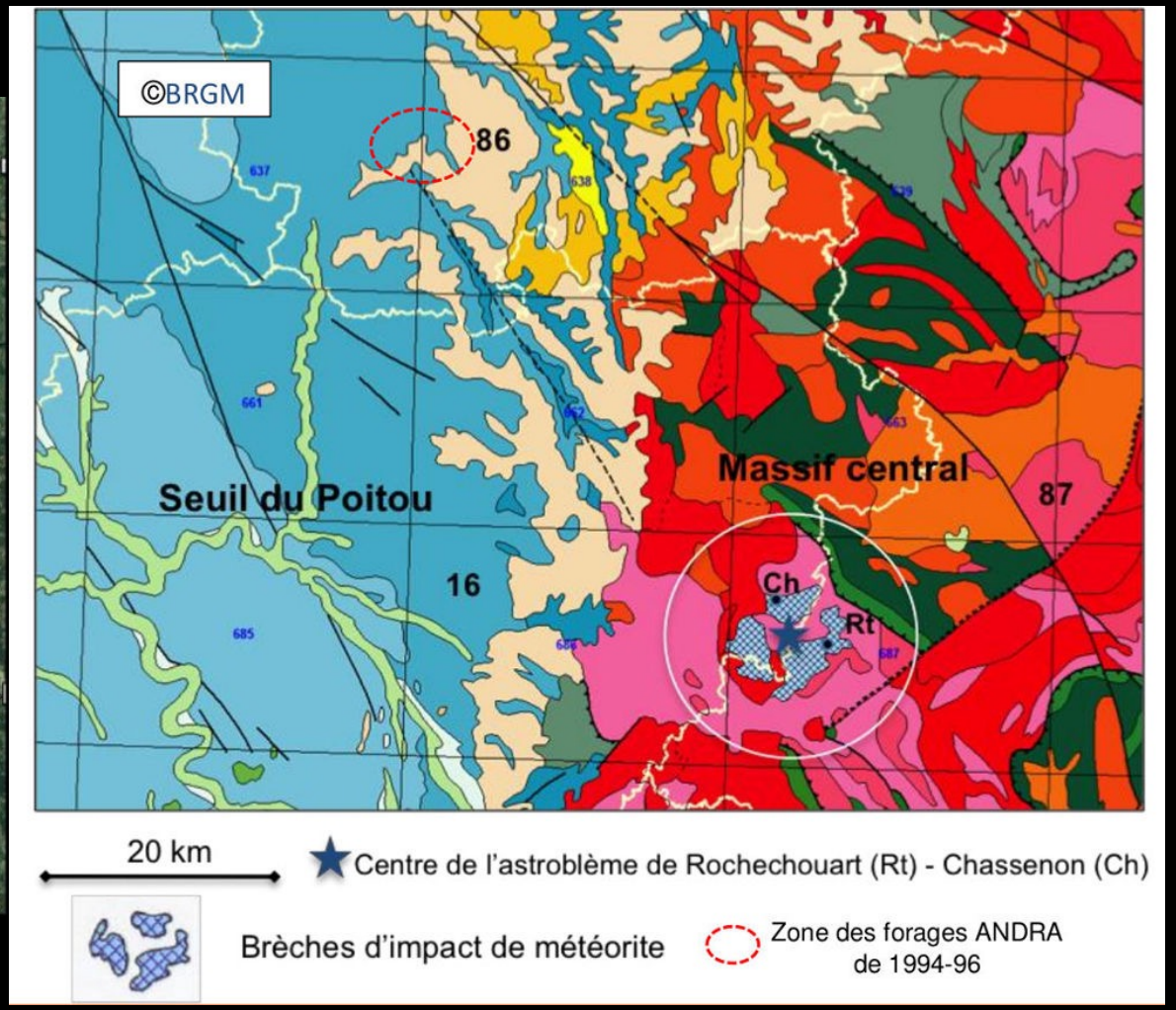
- **10 cm à 10 m : 2000 météorites par an. Accidents mortels restent rarissimes.**
- **30 m : une fois par siècle. Cataclysme local. Exemple : Meteor Crater (désert d'Arizona , impacteur de 45 mètres, diamètre de 1.2 km, âge 50 000 ans). 100 fois la bombe atomique Hiroshima. *Pertes humaines probables* : 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 Exemple : 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. Fin du crétacé 65 Ma.**





Tourisme scientifique : l'astroblème de Rochechouart



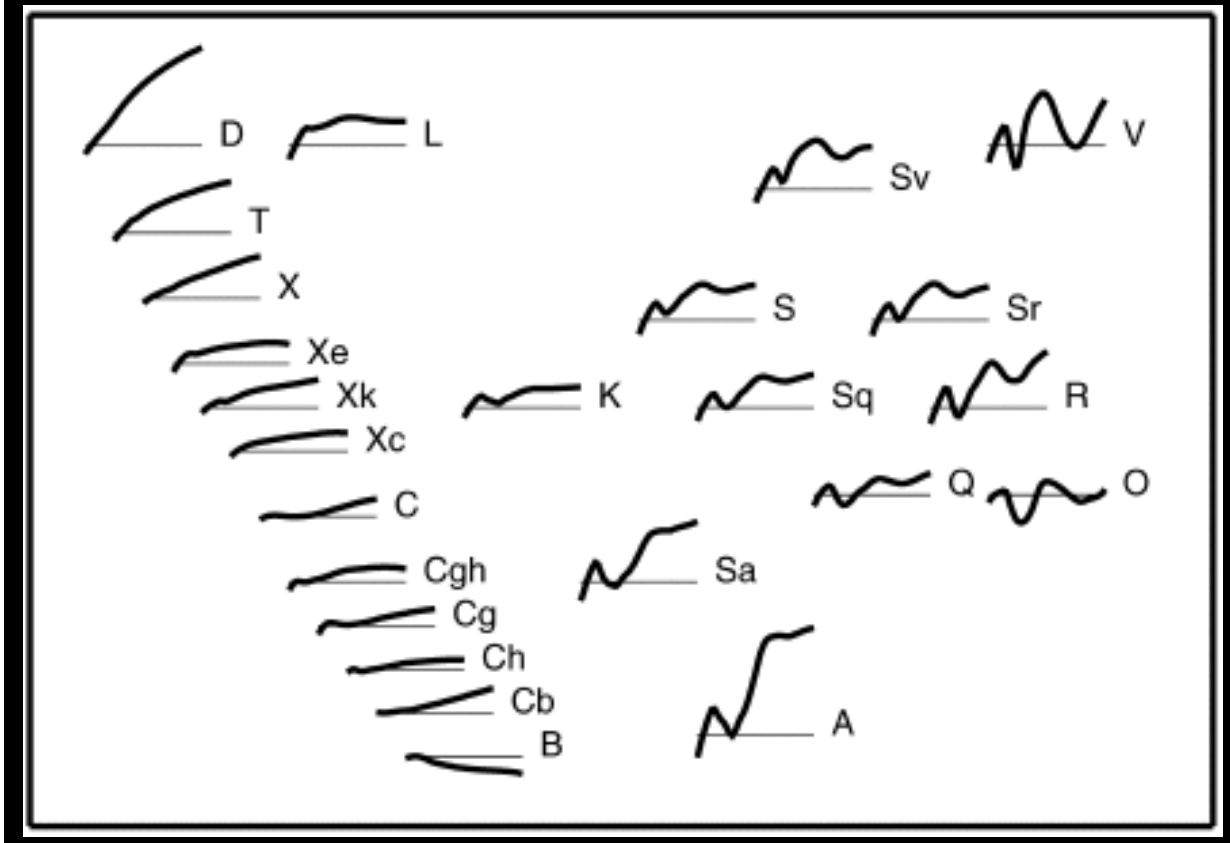


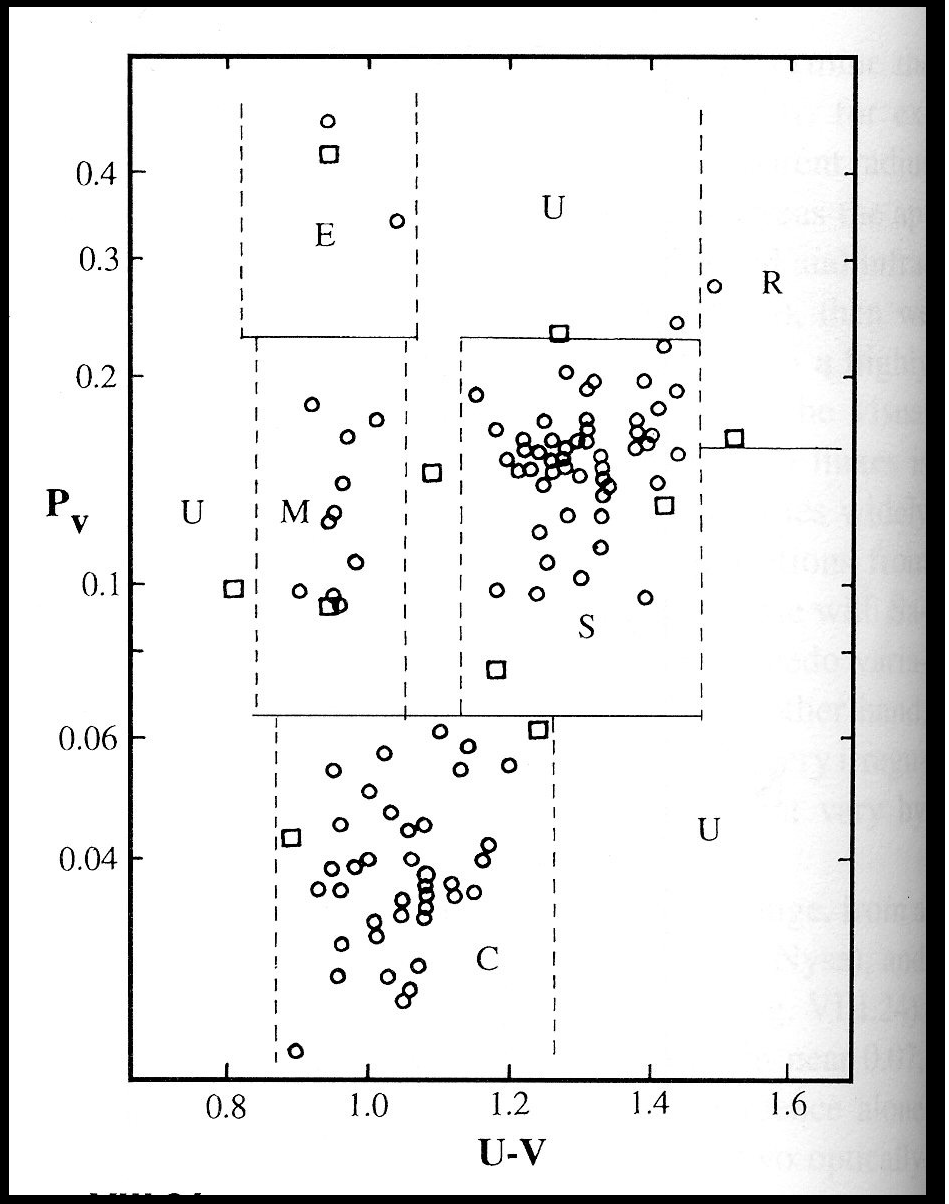
ATTENTION SPOILER

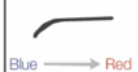
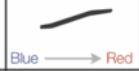
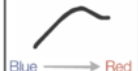
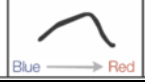
Alice in Borderland S2E8 Une météorite heurte le quartier de Shibuya (Japon). On estime (grossièrement) la taille du cratère à 200-600 m (diamètre impacteur entre ~ 10 et 25 m). On est plutôt dans un cataclysme local. L'ampleur du désastre est assez cohérent avec la science des impacts.



Classification taxonomique





Major Taxonomic Types	Reflectance Spectrum (0.4-0.9 um)	Spectral Features	Visible Albedo	Suspected Composition
D (D,T)		Relatively featureless spectrum Steep red slope	0.02-0.06	Primitive carbonaceous Organic-rich compounds Hydrated minerals
C (C,B,F,G)		Slight bluish to slight reddish slope Shallow to deep absorption blueward of 0.5 μm Hydrated asteroids with absorption at 0.7 and 3.0 μm	0.03-0.10	Hydrated minerals Silicates Organics
X (E,M,P)		Slightly reddish spectrum E: absorption features at 0.5 and 0.6 μm	E: 0.18-0.40 M: 0.10-0.18 P: 0.03-0.10	E: Enstatite-rich M: metallic, Nickel-Iron P: Carbonaceous, Organics
S (S,Q,A,K,L)		Moderately steep red slope (λ < 0.7 μm) Shallow to deep absorption at 1.0 and 2.0 μm	0.10-0.22	Stony composition Magnesium Iron silicates
V		Moderate to steep red slope (λ < 0.7 μm) Very deep absorption at 1.0 μm	0.20-0.60	Volcanic basalts Plutonic rocks

Class	Mass (kg)	Fraction (%)	Largest Removed (%)
A	9.93×10^{18}	0.37	0.37
B	3.00×10^{20}	**11.10**	**3.55**
C	1.42×10^{21}	**52.53**	**14.41**
D	5.50×10^{19}	2.03	2.03
K	2.56×10^{19}	0.95	0.95
L	1.83×10^{19}	0.68	0.68
S	2.27×10^{20}	**8.41**	**8.41**
V	2.59×10^{20}	**9.59**	**0.01**
E	1.46×10^{18}	0.05	0.05
M	8.82×10^{19}	3.26	3.26
P	2.98×10^{20}	**11.02**	**11.02**
Total	2.70×10^{21}	100	45

Largest: Ceres, Vesta, Pallas, Hygiea

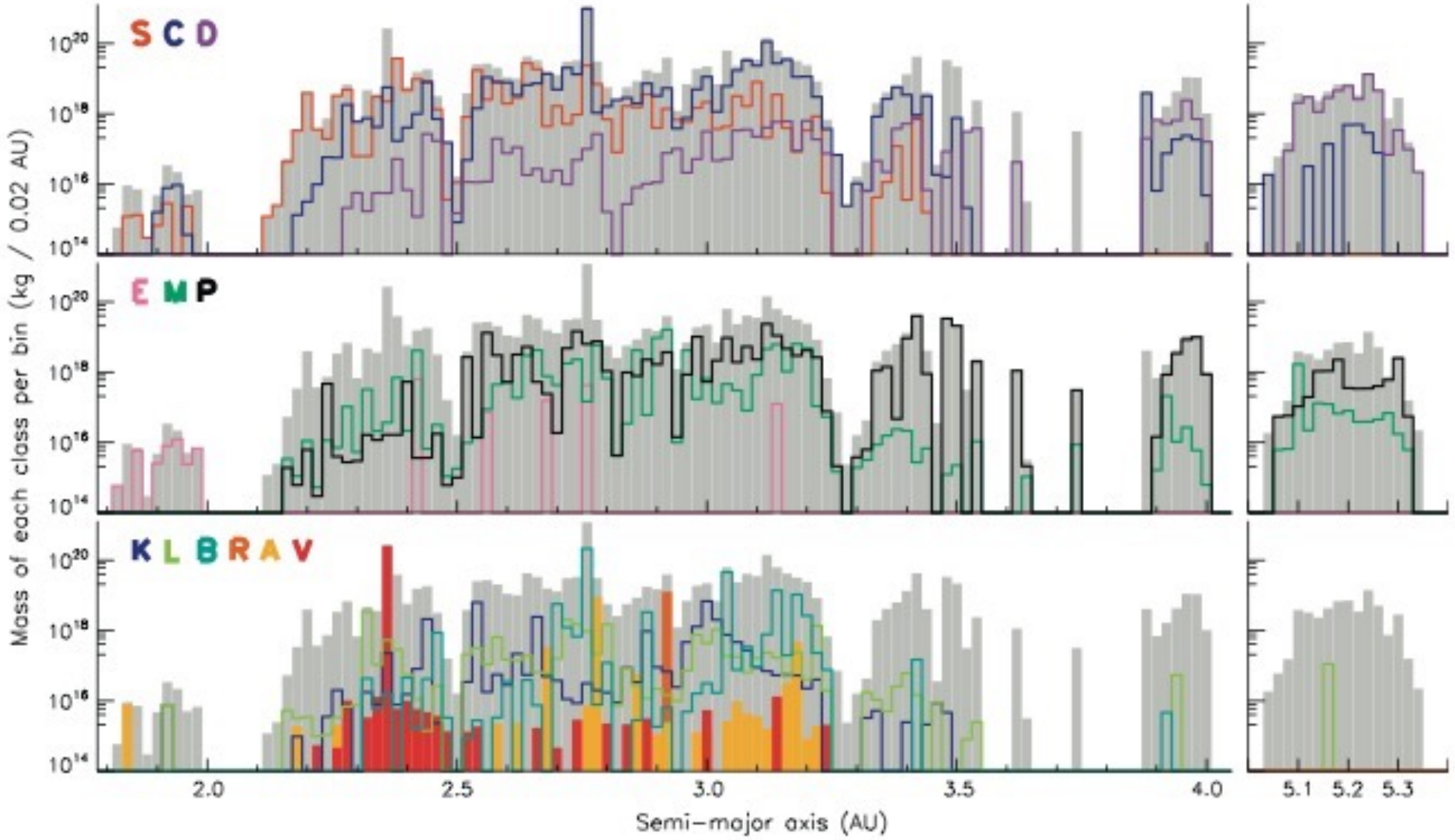
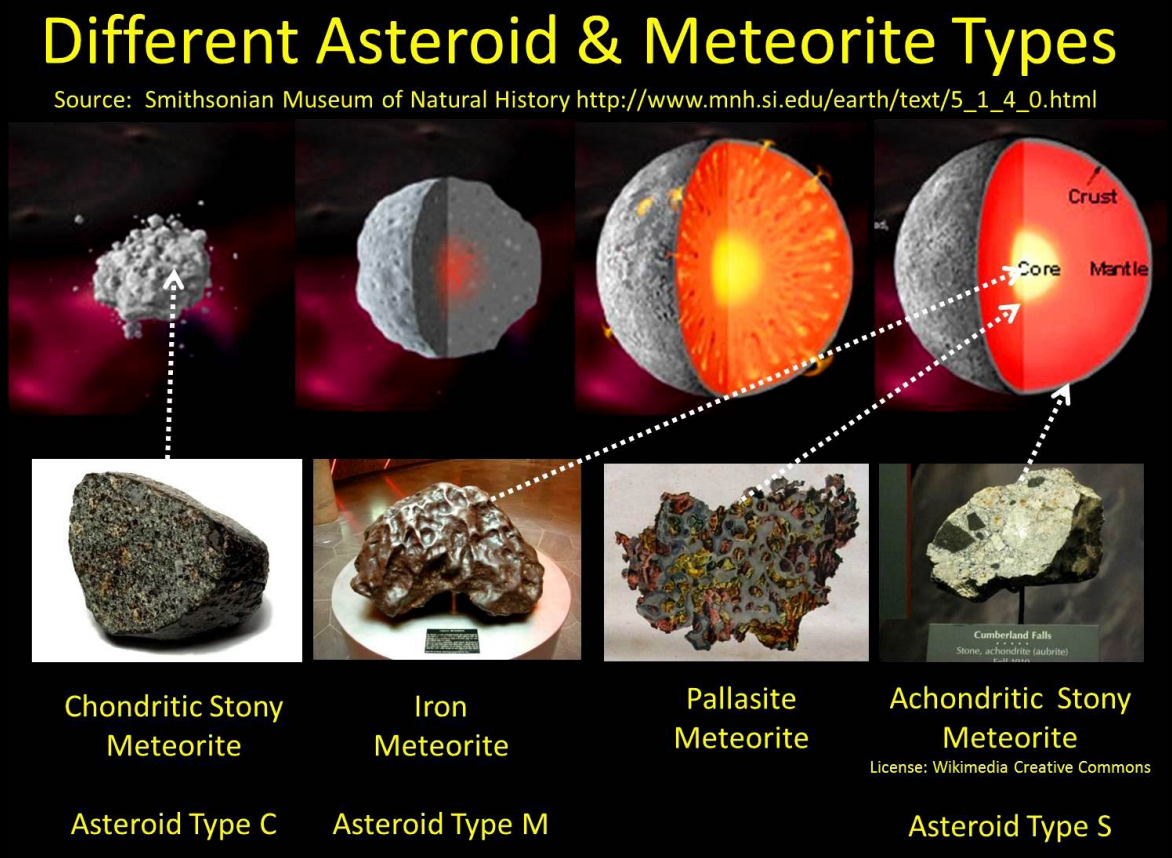


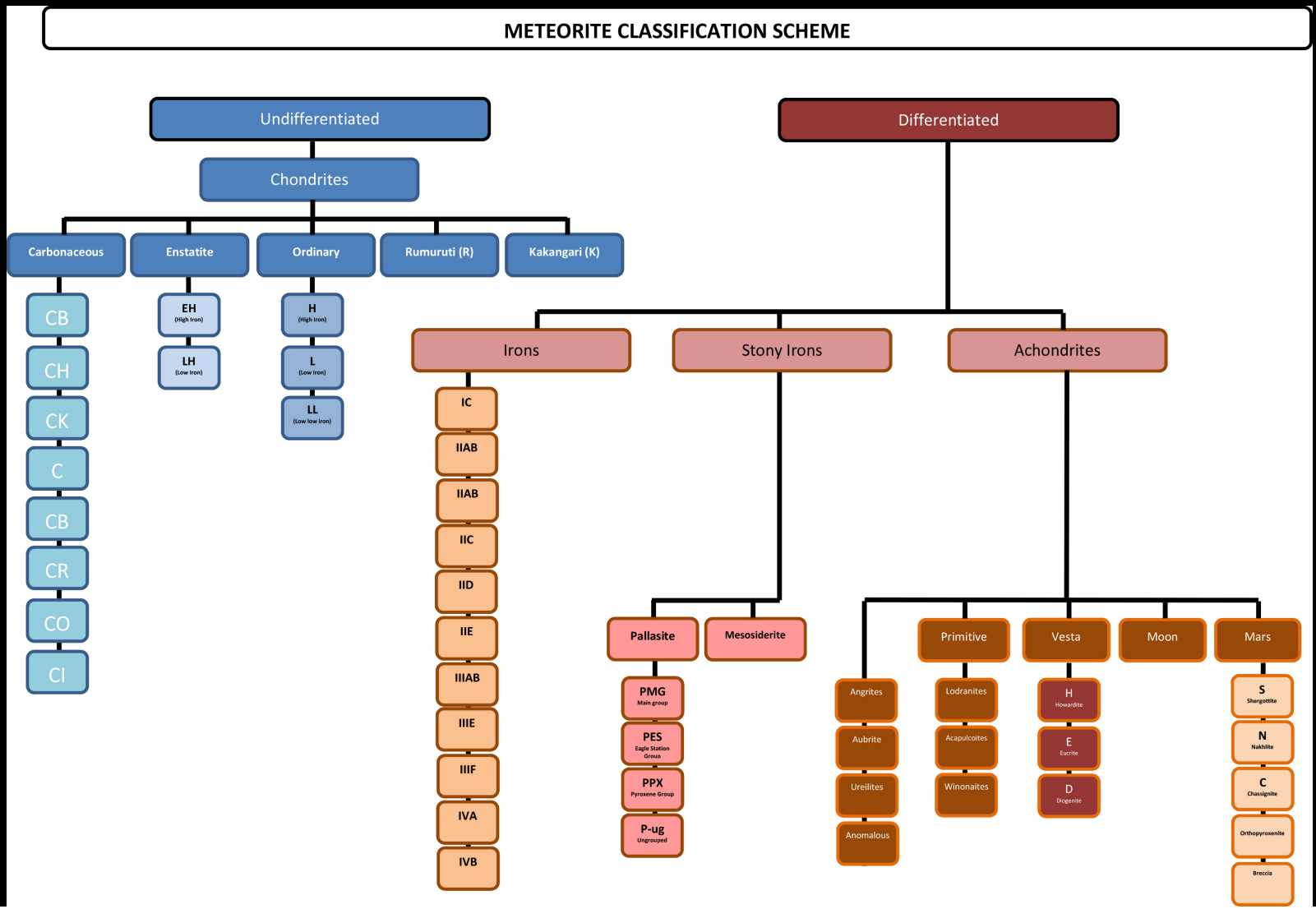
Fig. 14. The mass (kg) of each taxonomic class in each 0.02 AU bin. All objects are 5 km or larger.

Liens avec les météorites

Ces différentes familles s'interprètent au premier ordre par l'histoire thermique de l'astéroïde parent. Plus celui-ci est volumineux, plus il contient une **espèce radiogénique, ^{26}Al**, de courte durée de vie (demi-vie ~700000 ans). Sa désintégration génère de la chaleur qui, au delà d'un certain seuil va conduire à la différenciation de l'objet avec une **structure noyau-manteau**. Un astéroïde non-différencié génère des chondrites, suite à des processus de collisions. Un astéroïde différencié a généré des sidérites, achondrite (manteau ou croûte) ou des pallasites à l'interface noyau-manteau.



Liens avec les météorites

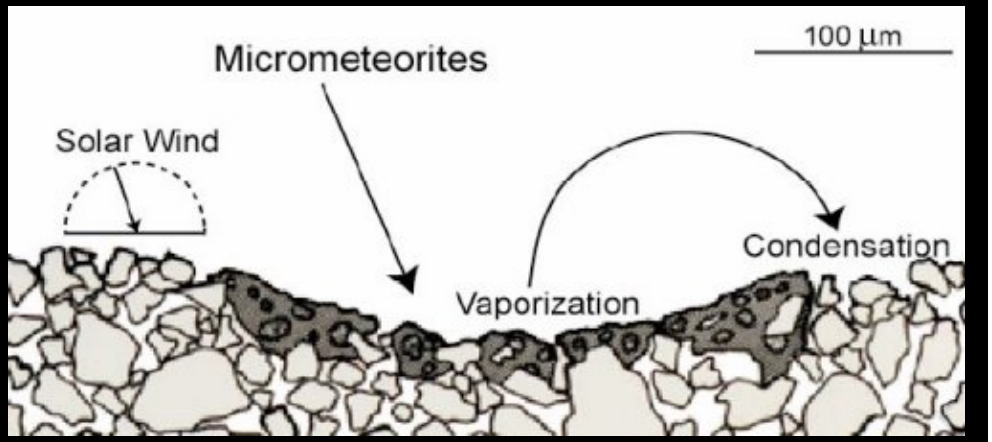


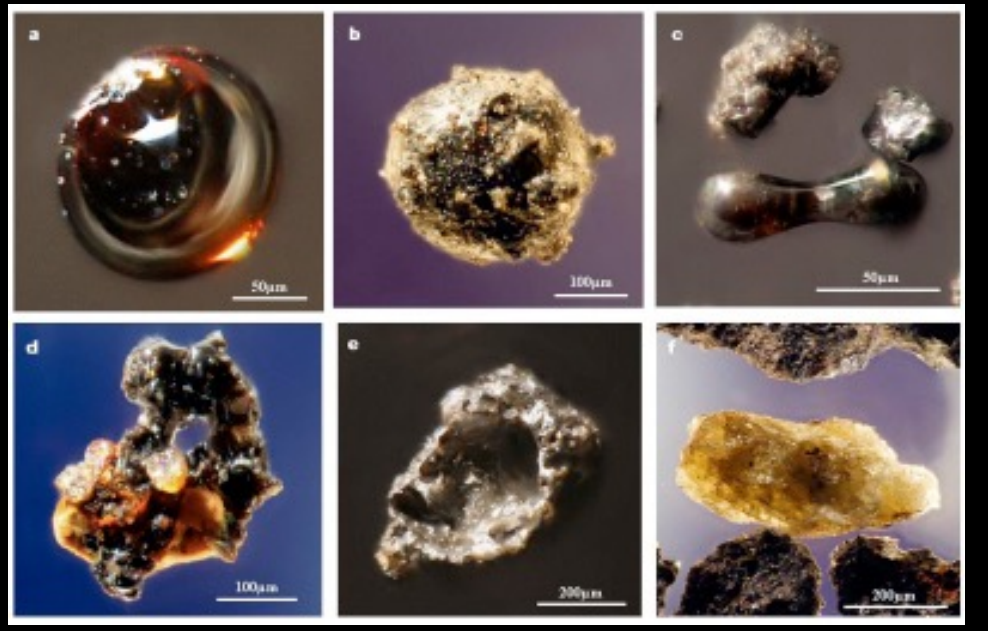
Liens avec les météorites

Table 6.3: Asteroid types, meteorite analogues, and mineral identifications

Type	Number	Albedo	Meteorite analogue	Possible mineral identifications
A	4	high	olivine-rich achondrites, pallasites (stony-irons)	olivine, olivine-metal
B, C, F, G	6, 88, 13, 5	low	CI and CM carbonaceous chondrites	hydrated silicates, carbon, organic materials
D, P	26, 23	low	organic-rich CI and CM carbonaceous chondrites?	carbon- and organic-rich silicates?
E	8	high	aubrites (enstatite-rich achondrites)	enstatite or other iron-free silicates
M	21	middle	irons, perhaps also enstatite chondrites	iron-nickel, perhaps metal and enstatite
Q	1	high	ordinary (not carbonaceous) chondrites	olivine, pyroxene, and metal
R	1	high	pyroxene-olivine achondrites	pyroxene and olivine
S	144	middle	pallasites, olivine-rich stony-irons, ureilites (olivine-rich achondrites), CV and CO carbonaceous chondrites	combinations of metal, olivine, and pyroxene
T	4	low		similar to types P and D?
V	1	high	basaltic achondrites	pyroxene and/or feldspar

Source: M. J. Gaffey, J. F. Bell & D. P. Cruikshank 1989, in *Asteroids II*, ed. R. P Binzel, T. Gehrels & M. S. Matthews (Tucson: Univ. of Arizona Press), p. 98.





L’exploration spatiale des petits corps

Année	Astéroïde	Origine	Type	Mode opératoire	Sonde spatiale	Agence
1991	(951) Gaspra	Ceinture principale	S	Survol	Galileo	NASA
1993	(243) Ida et Dactyle	Ceinture principale	S	Survol	Galileo	NASA
1997	(253) Mathilde	Ceinture principale	C	Survol	NEAR Shoemaker	NASA
1999	(9969) Braille	Croiseur de Mars	Q	Survol	Deep Space 1	NASA
2000-2001	(433) Éros	Géocroiseur / Amor	S	Orbiteur + Atterrissage	NEAR Shoemaker	NASA
2002	(5535) Annefrank	Ceinture principale	S	Survol	Stardust	NASA
2005	(25143) Itokawa	Géocroiseur / Apollon	S	Orbiteur + Sample return (2010)	Hayabusa	JAXA
2008	(2867) Šteins	Ceinture principale	E	Survol	Rosetta	ESA
2010	(21) Lutèce	Ceinture principale	M	Survol	Rosetta	ESA
2011-2012	(4) Vesta	Ceinture principale	V	Orbiteur	Dawn	NASA
2012	(4179) Toutatis	Géocroiseur / Apollon	S	Survol	Chang'e 2	CNSA
2015-2018	(1) Cérès	Ceinture principale	C	Orbiteur	Dawn	NASA
2018-2019	(162173) Ryugu	Géocroiseur / Apollon	C	Orbiteur + 2 Rovers + Atterrisseur + Impacteur + sample return (2020)	Hayabusa 2	JAXA
2019-2021	(101955) Bénou	Géocroiseur / Apollon	B	Orbiteur + Retour échantillon (2023)	OSIRIS-REx	NASA
2022	(65803) Didymos et Dimorphos	Géocroiseur / Apollon	S	Survol + Impact	DART	NASA
2023	(152830) Dinkinesh et satellite	Ceinture principale	S	Survol	Lucy	NASA

GASPRA

Survol en 1991 (GALILEO)
Ceinture d’astéroïde
Famille de Flore
19x12x11 km
Type spectral S
Pv=0.22
Collision récente ?
Petits cratères d’impact
Régolithe
Densité ~2.7 g/cm3



IDA

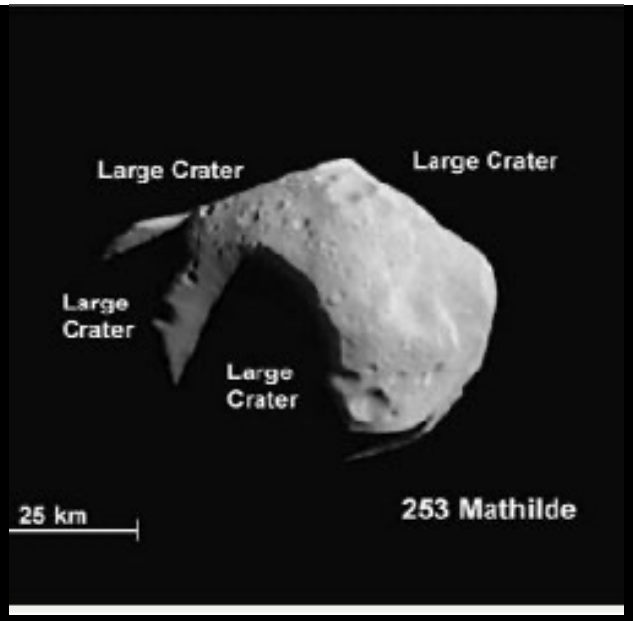
Découverte 1884
Survol en 1993 (GALILEO)
Ceinture d'astéroïde
Famille de Coronis
56x24x21 km
Type spectral S
Pv=0.24
Collision récente ?
Petits cratères d'impact
Régolithe
Densité 2.5 g/cm3

DACTYL
Satellite
~1.4 km

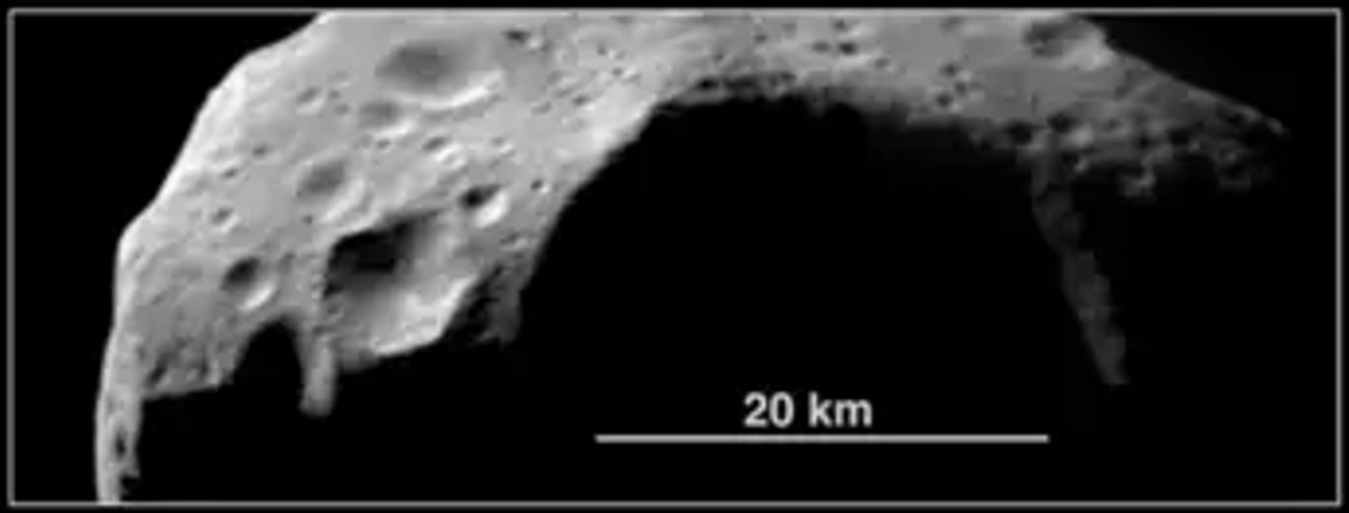


MATHILDE

Découverte 1885
Survol en 1997 (NEAR)
Ceinture d'astéroïde
66x48x46 km
Type spectral C
Pv=0.044
Petits cratères d'impact
4 grands cratères
Régolithe
Densité ~1.3 g/cm3
Orbite excentrique
Longue période de rotation







BRAILLE

Découvert 1992
Survol en 1999 (DEEP SPACE 1)
Ceinture principale, Mars-croiseur
2.1x1x1 km
Type spectral Q
Pv=0.34
Densité 3.9 g/cm3



EROS

Découverte 1885
Orbite (NEAR)
Amor
33x13x30 km
Type spectral S
Pv=0.16
Grands et petits cratères
Régolithe
Densité 2.67 g/cm3
Régolithe



ANNEFRANCK

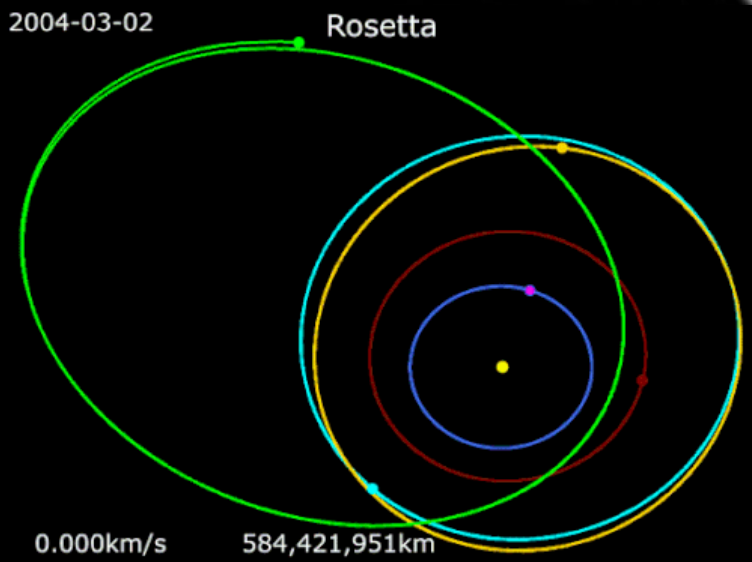
Découverte 1942
Survol en 2002 (STARDUST)
Ceinture d’astéroïde
6.6 x 5.0 x 3.4 km
Type spectral S
Pv=0.24



STEINS

Découverte 1969
Survol en 2008 (ROSETTA)
Ceinture d'astéroïde
6.83x5.70x4.42 km
Type spectral E?
Pv=0.34-40
Petits cratères d'impact
Régolithe
Densité ~2.7 g/cm3





Animation of *Rosetta*'s trajectory from 2 March 2004 to 9 September 2016

Rosetta · 67P · Earth · Mars · 21 Lutetia · 2867 Šteins

LUTETIA

Découverte 1852
Survol en 2010 (ROSETTA)
Ceinture d’astéroïde
121x101x75 km
Type spectral M
Pv=0.19 ± 0.01
Petits cratères d’impact
Régolithe
Densité 3.4 ± 0.3 g/cm3



VESTA

Survol en 2011-2015 (DAWN)
Ceinture d’astéroïde
560 x 544 x 454 km
Type spectral V (différencié)
Pv=0.42
Densité ~ 3.46 g/cm3



CERES

Survol en 2011-2015 (DAWN)
Ceinture d'astéroïde
Planète naine ≠ astéroïde
Radius 470 km
Type spectral C
Pv=0.09
Densité ~ 2.16 g/cm3



La mission NEAR sur ^{433}Eros (1999-2001)



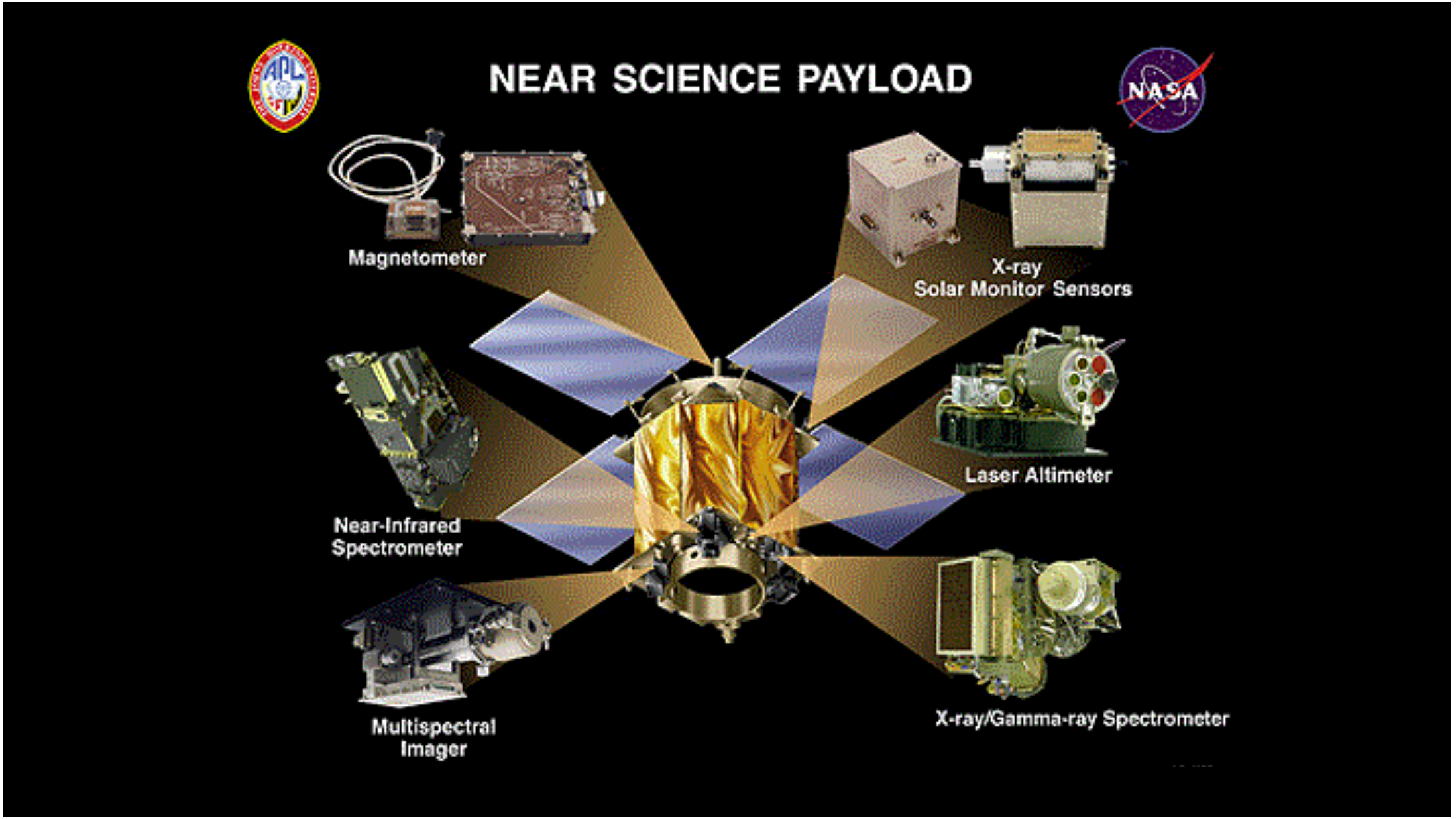
NEAR

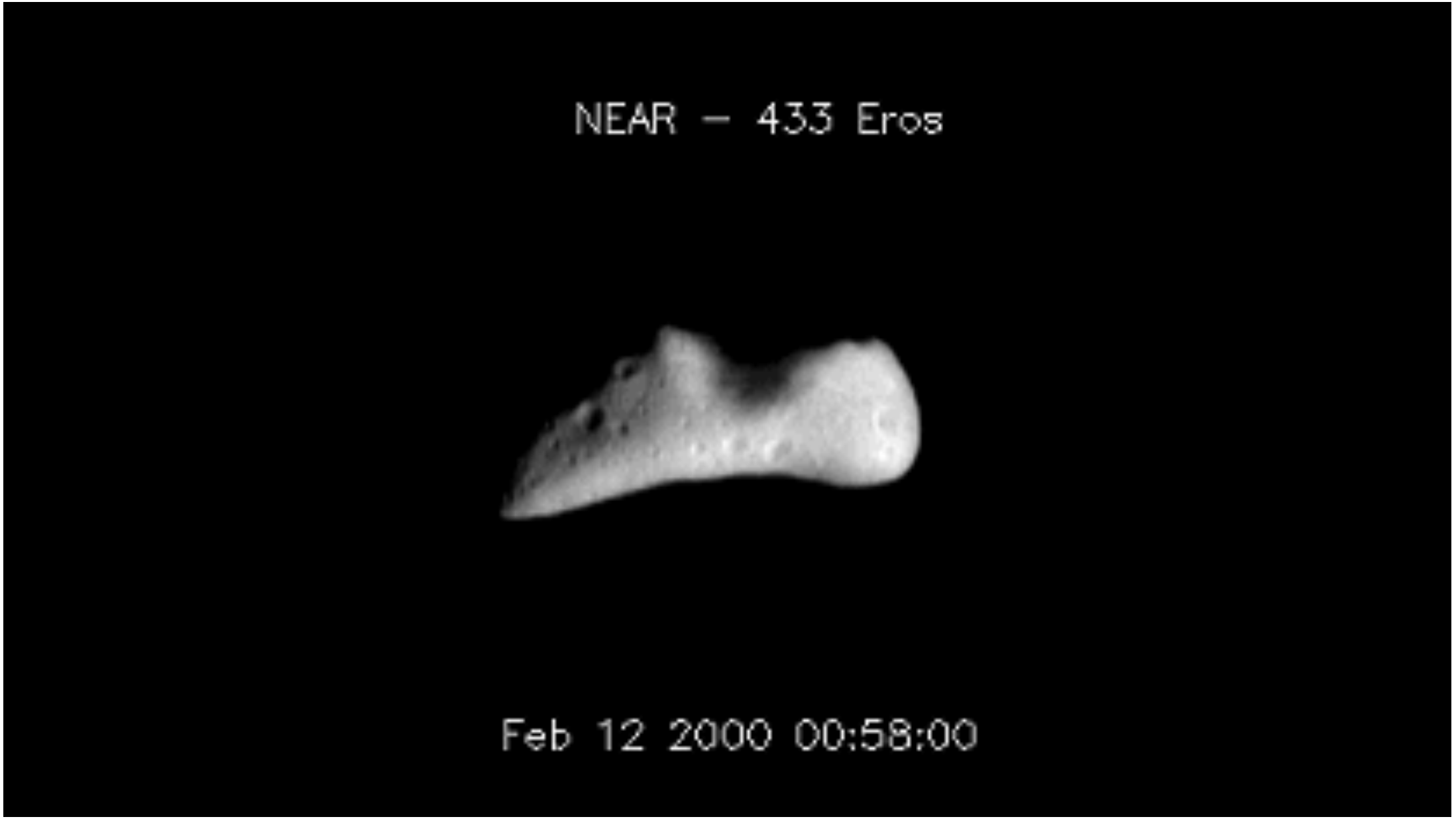
Near Earth Asteroid Rendez-vous

Généralités

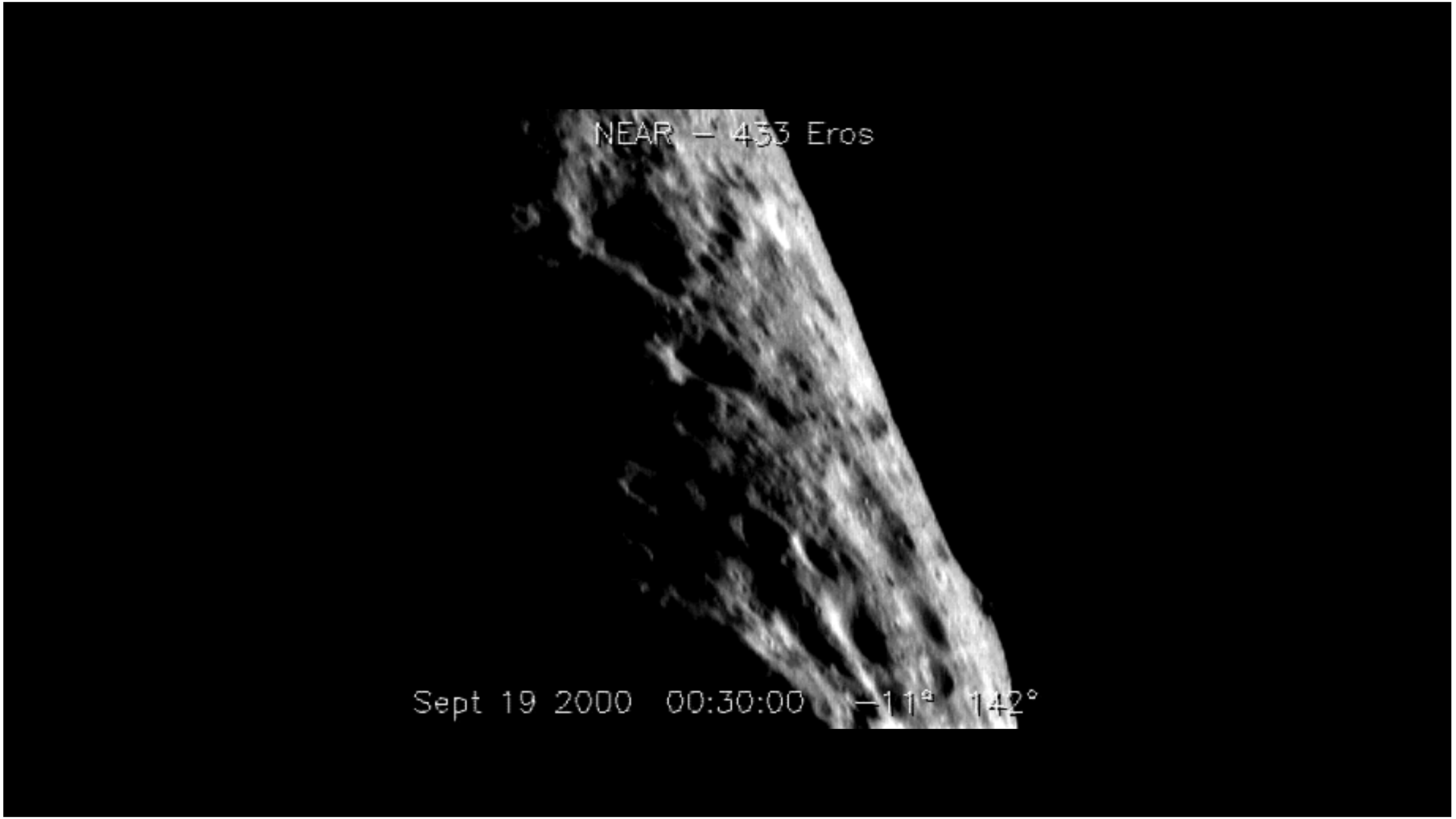
- Masse de la sonde : 805 kg
- Conception : Johns Hopkins University – Applied Physics Laboratory (APL) – NASA

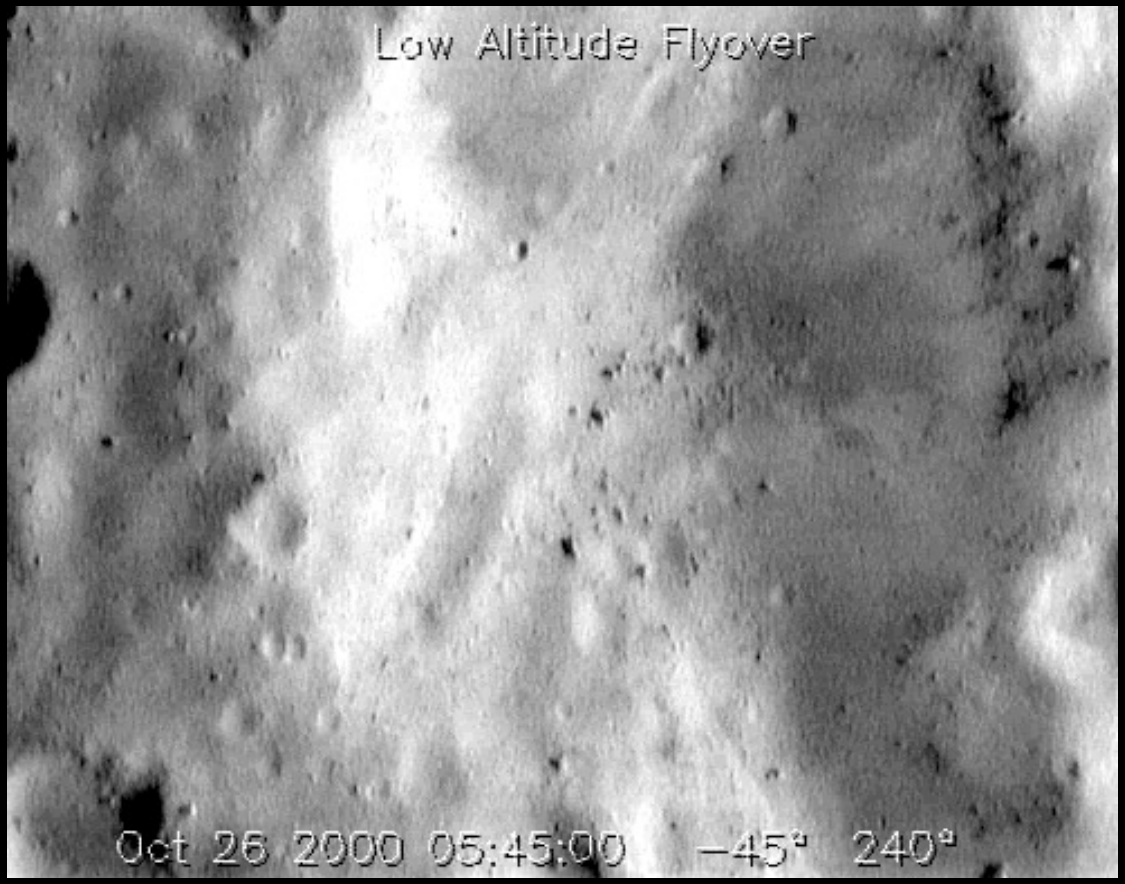
- Lancement le 17 février 1996
- Survol de l'astéroïde Mathilde (27 juin 97)
- Survol de l'astéroïde 433 Eros (23 décembre 98)
- Insertion orbitale sur 433 Eros : 14 février 2000.
- Atterrissage sur Eros : 12 février 2001

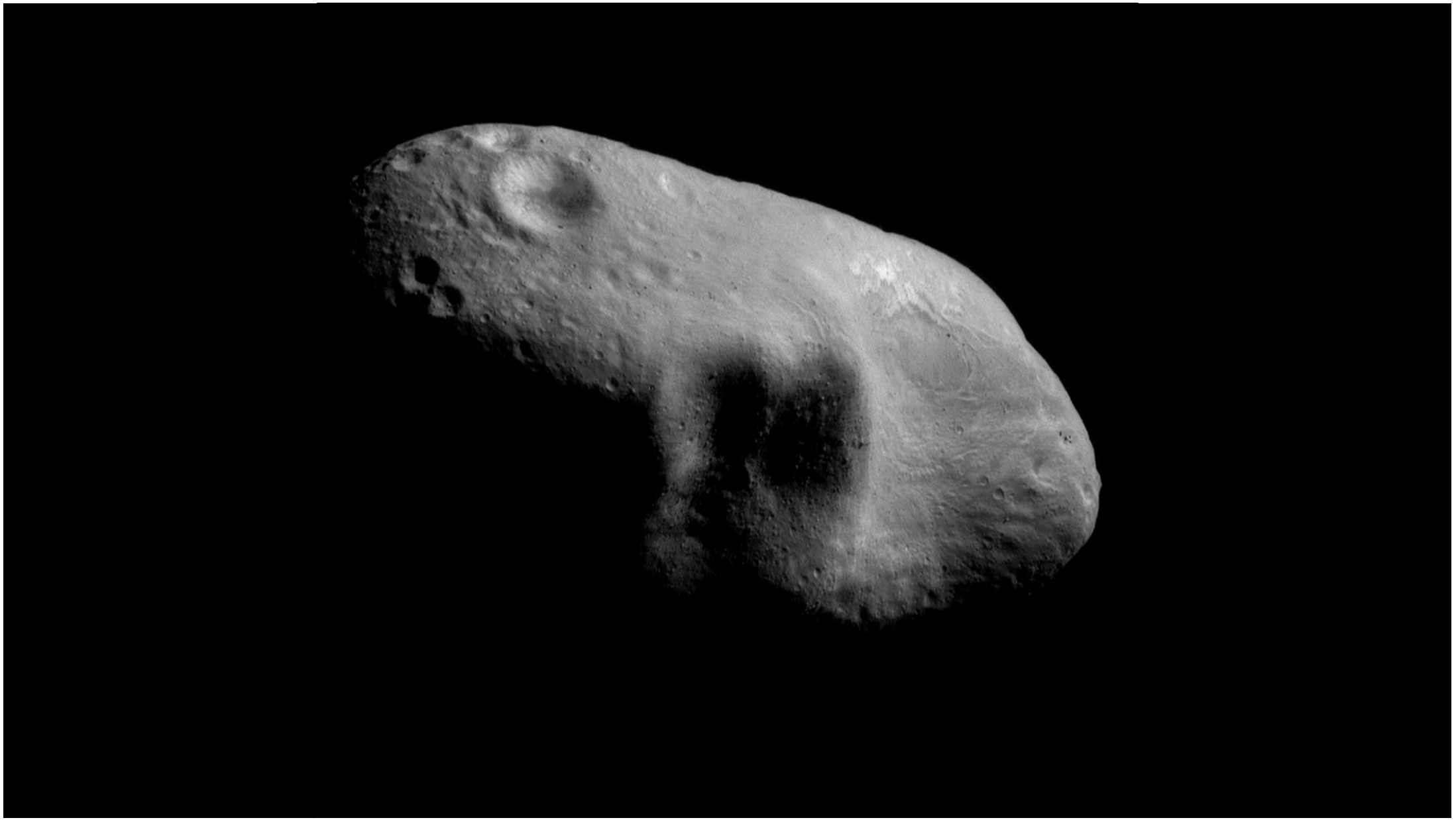

NEAR SCIENCE PAYLOAD
APL
NASA
Magnetometer
X-ray
Solar Monitor Sensors
Laser Altimeter
Near-Infrared
Spectrometer
Multispectral
Imager
X-ray/Gamma-ray Spectrometer

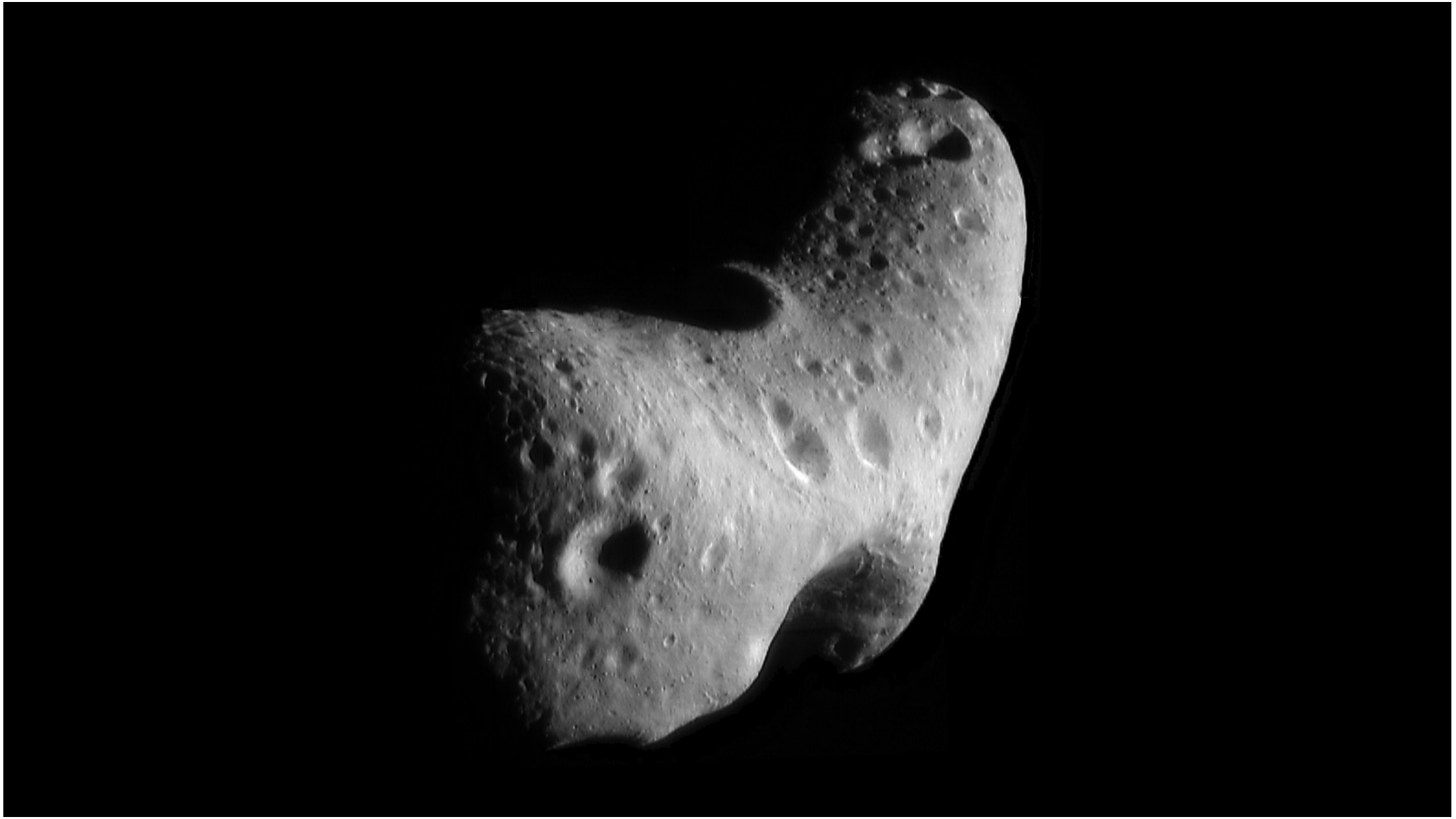

NEAR – 433 Eros
Feb 12 2000 00:58:00

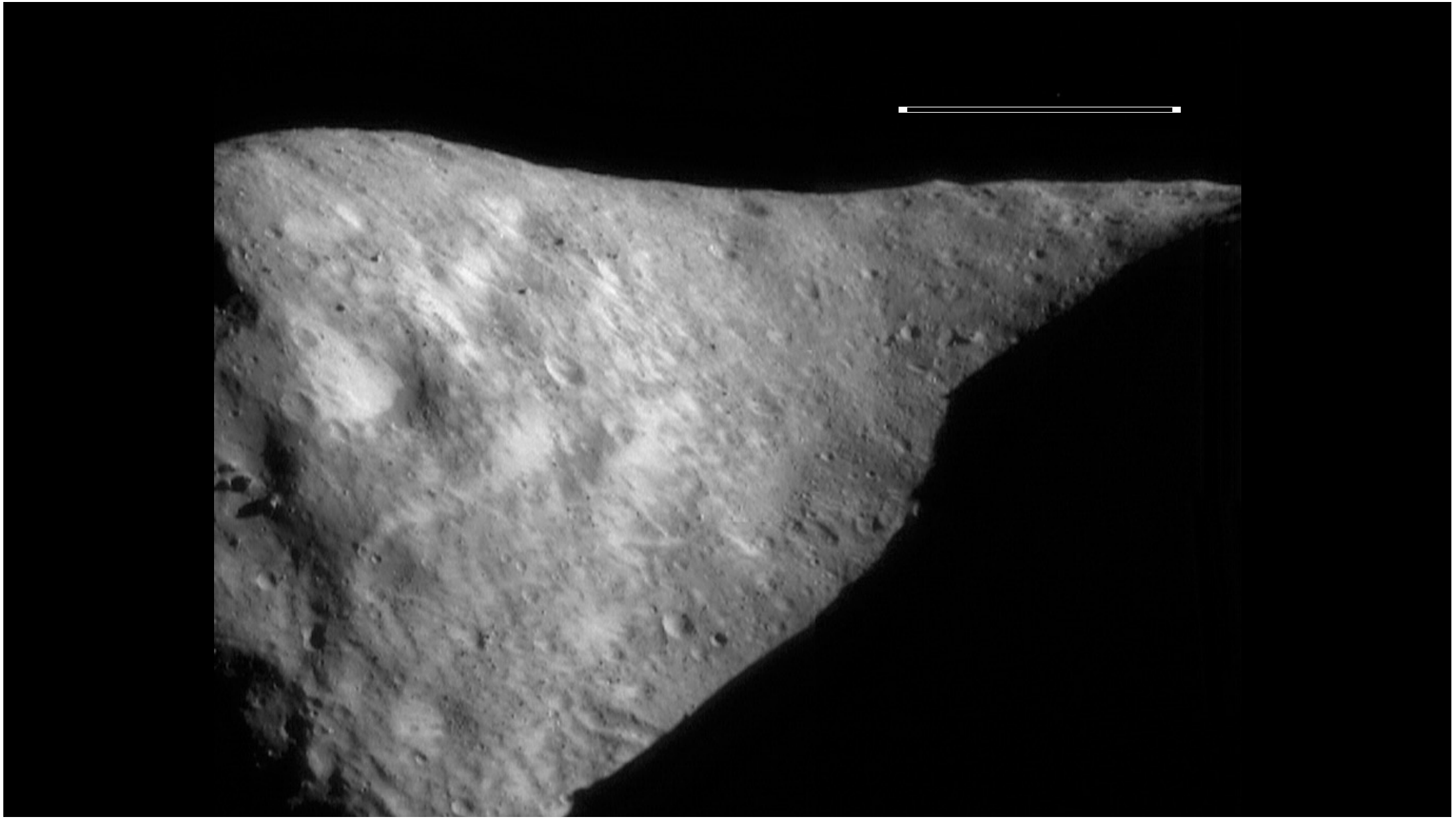



NEAR – 433 Eros
Sept 19 2000 00:30:00 –11° 142°

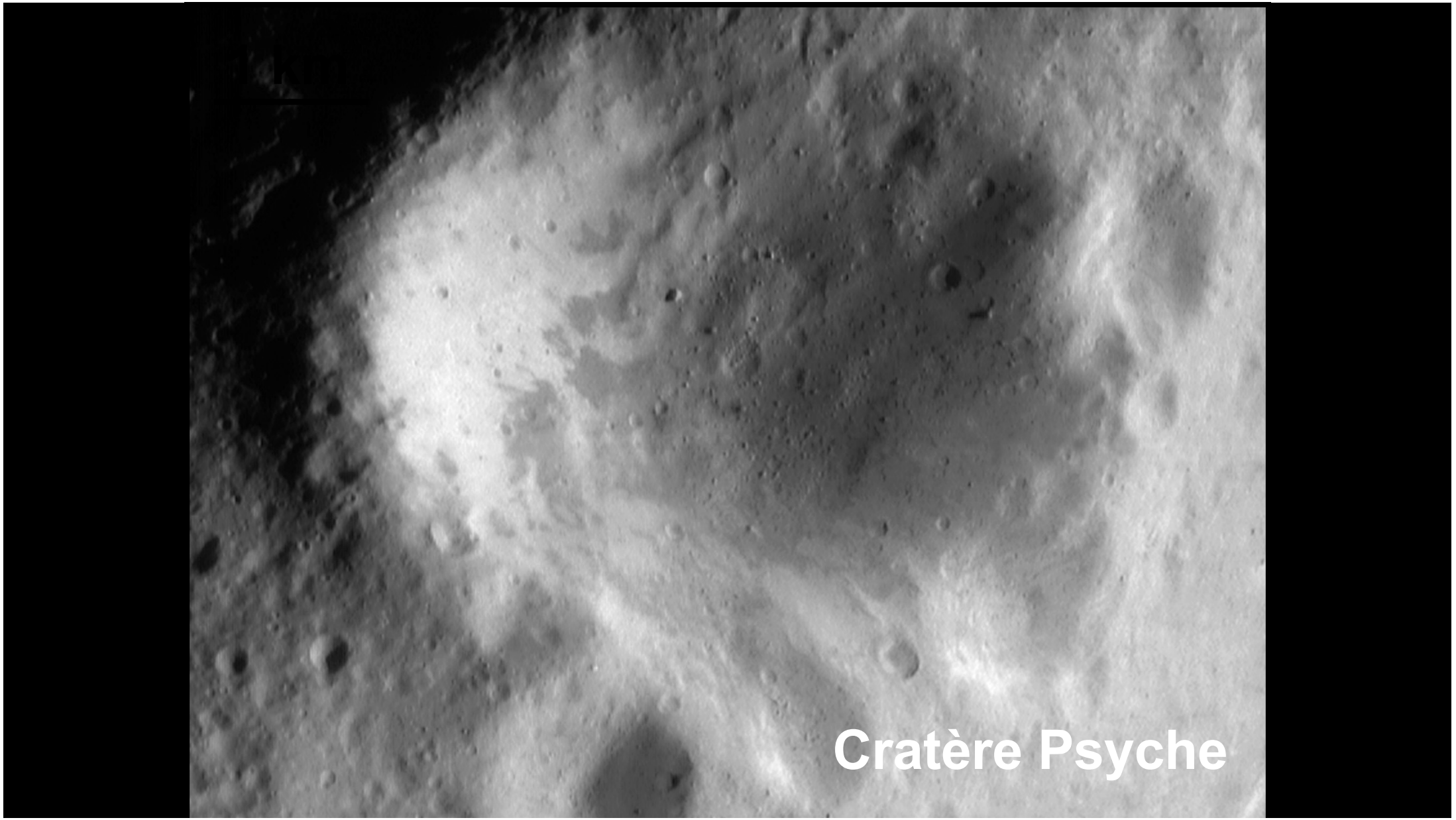

Low Altitude Flyover
Oct 26 2000 05:45:00 −45° 240°

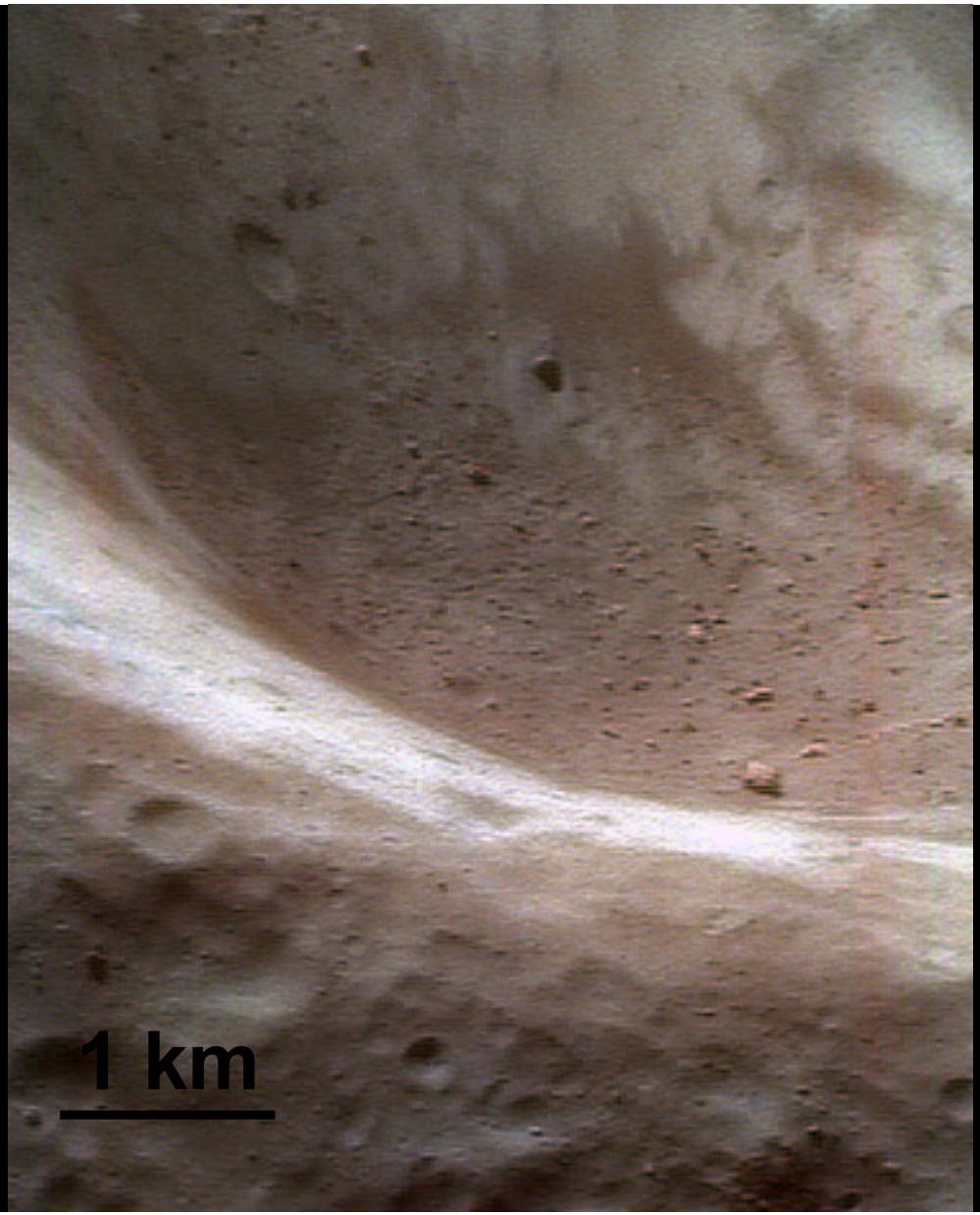


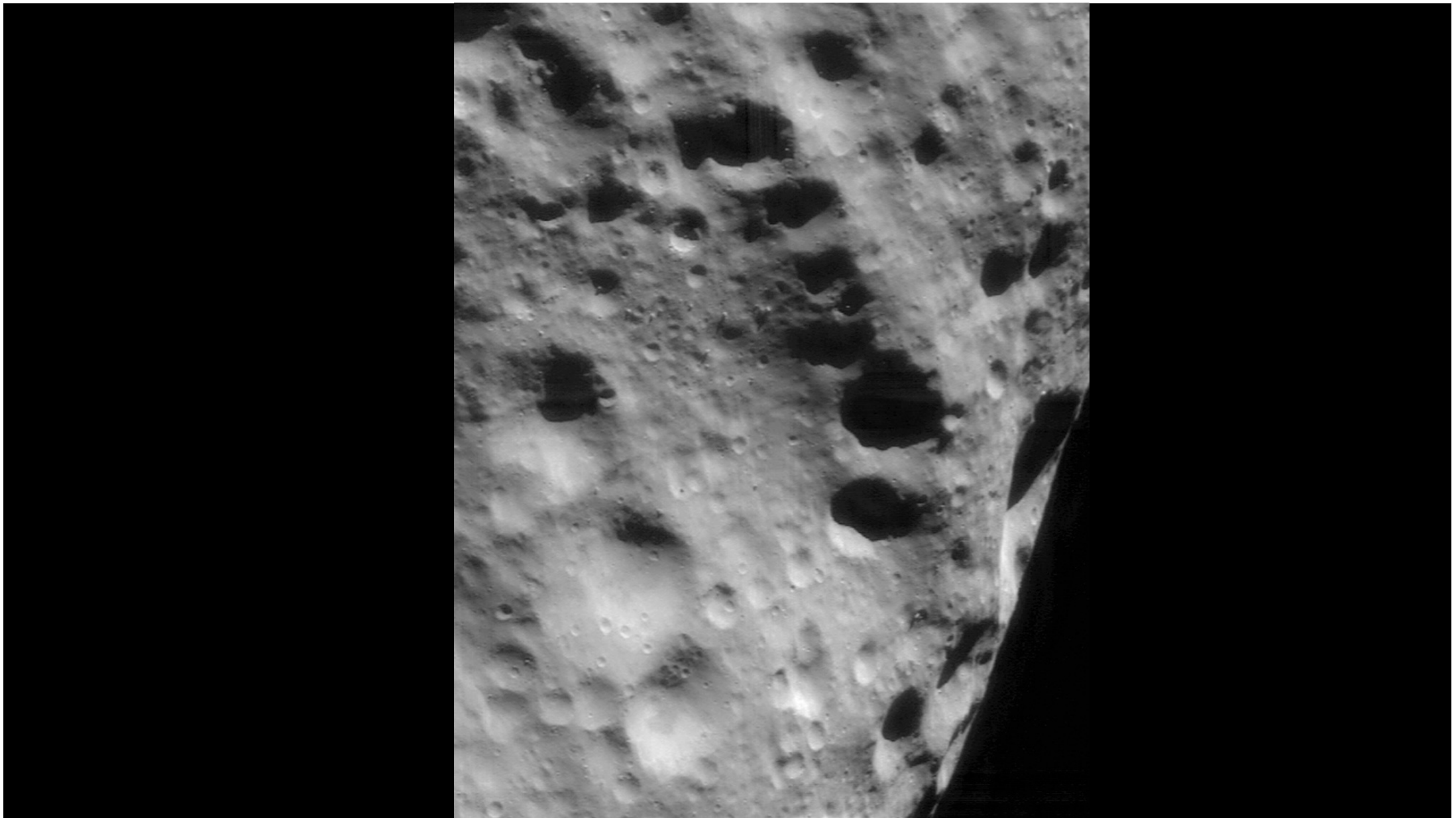


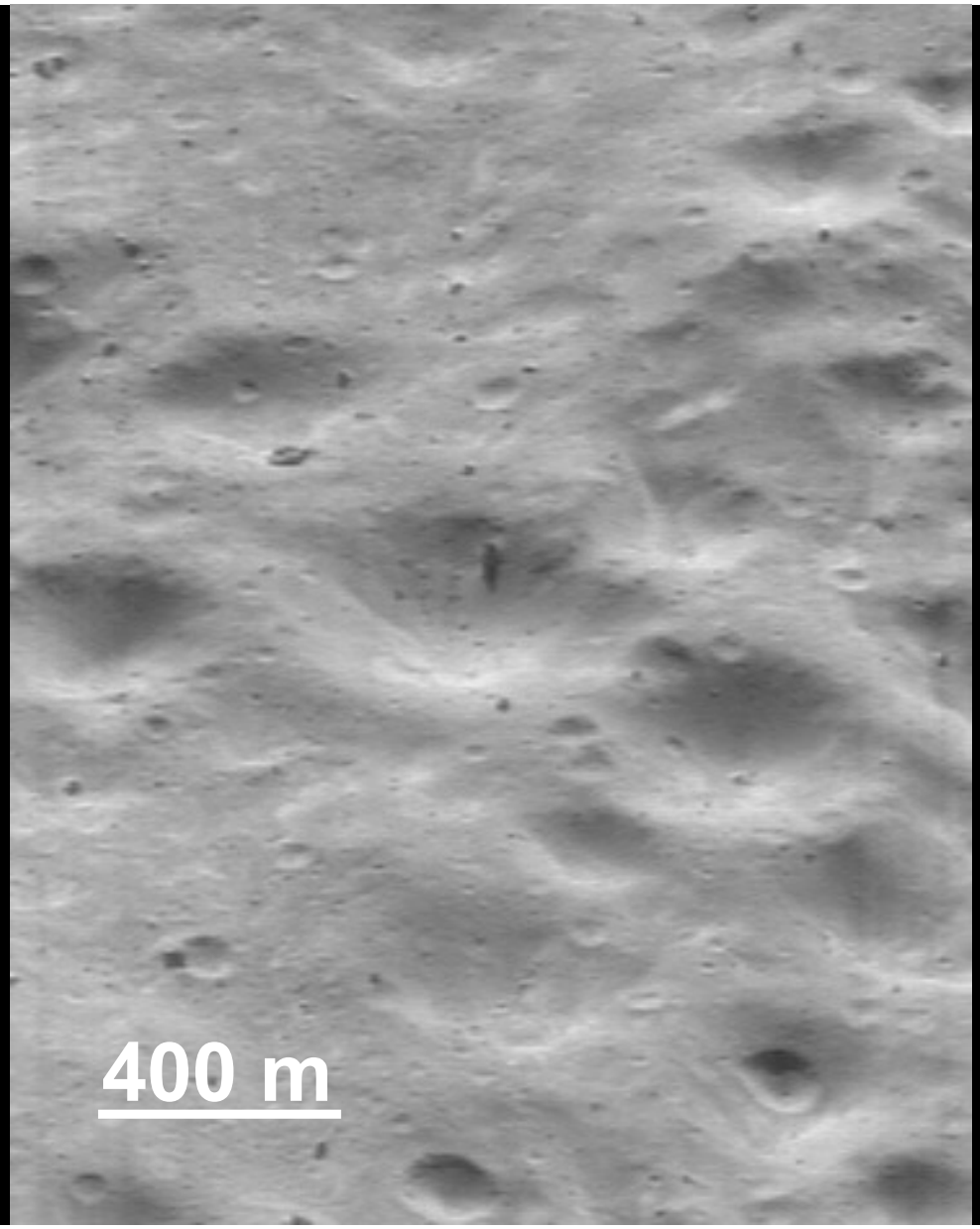


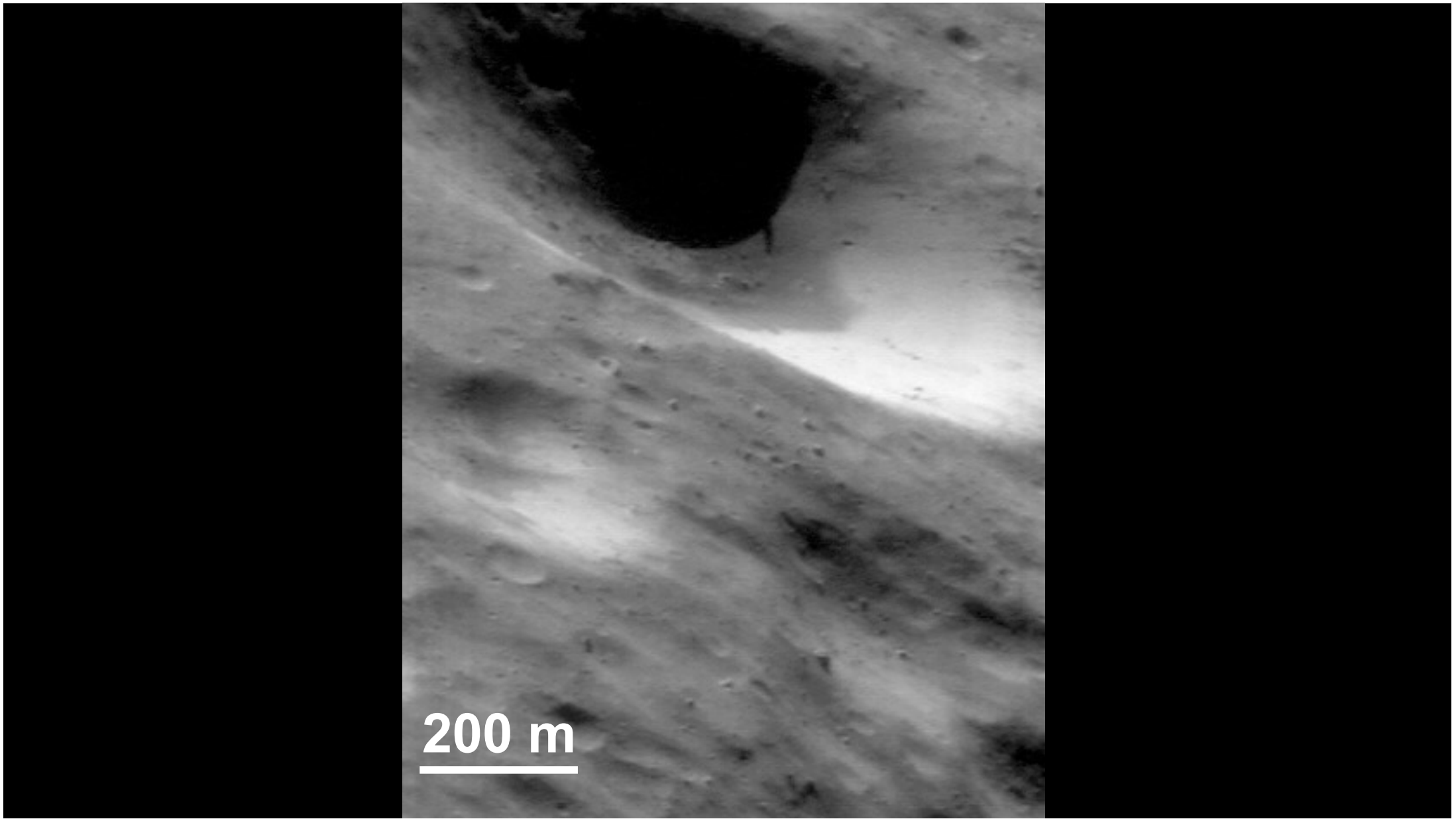


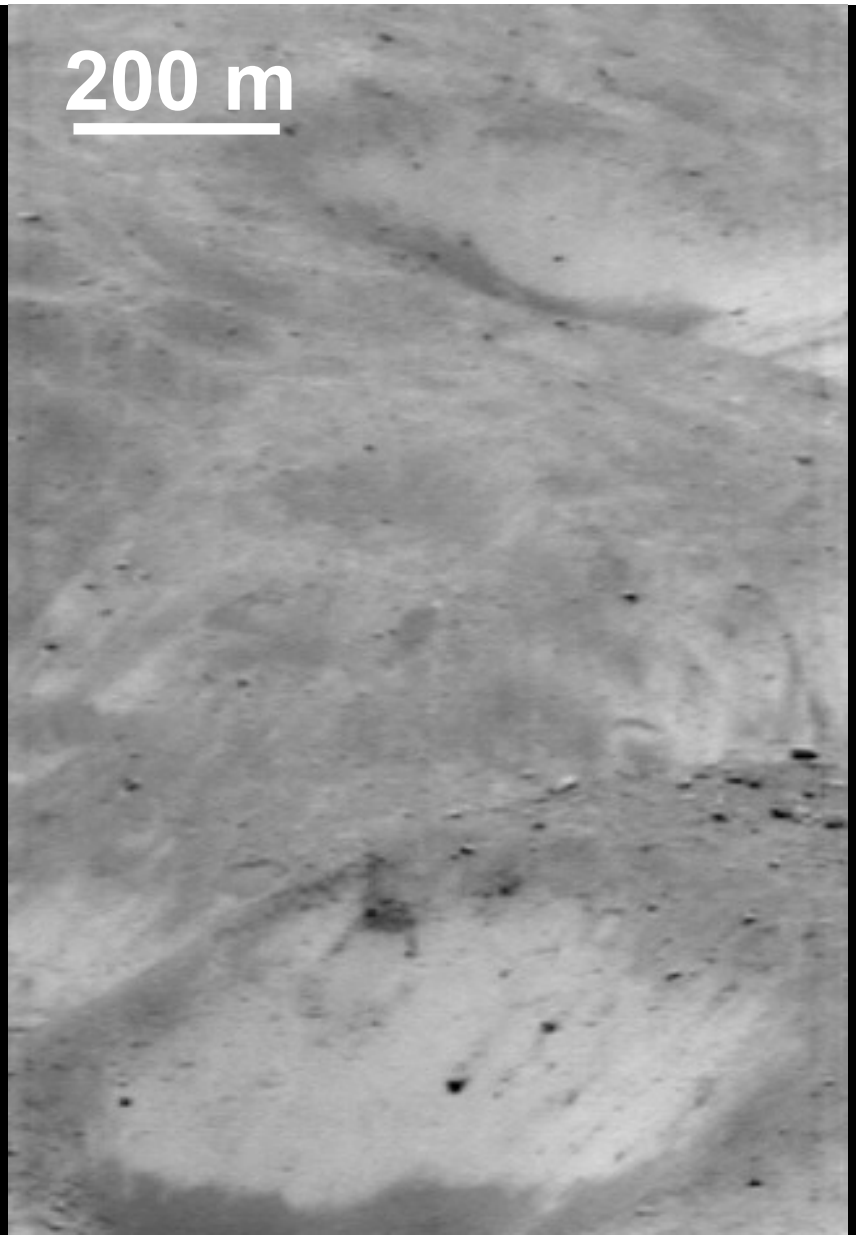

Cratère Psyche

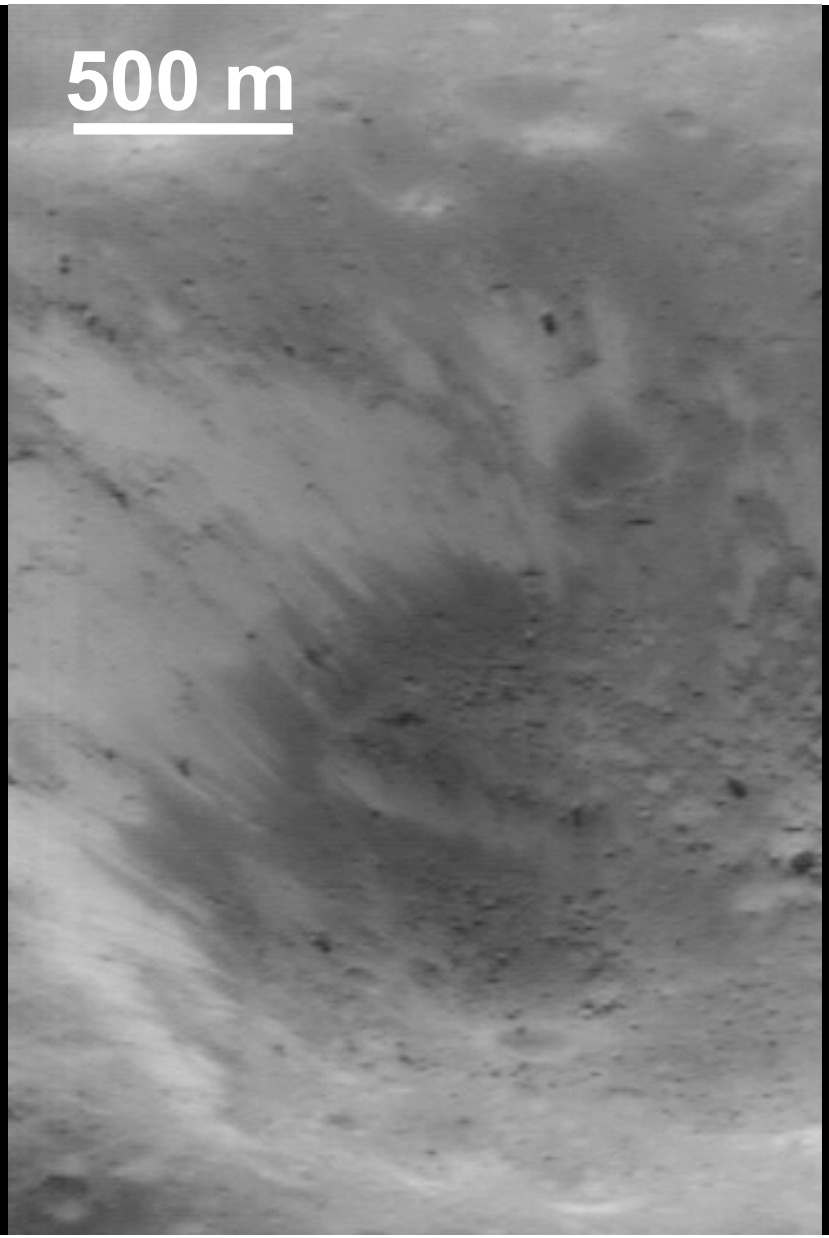

1 km

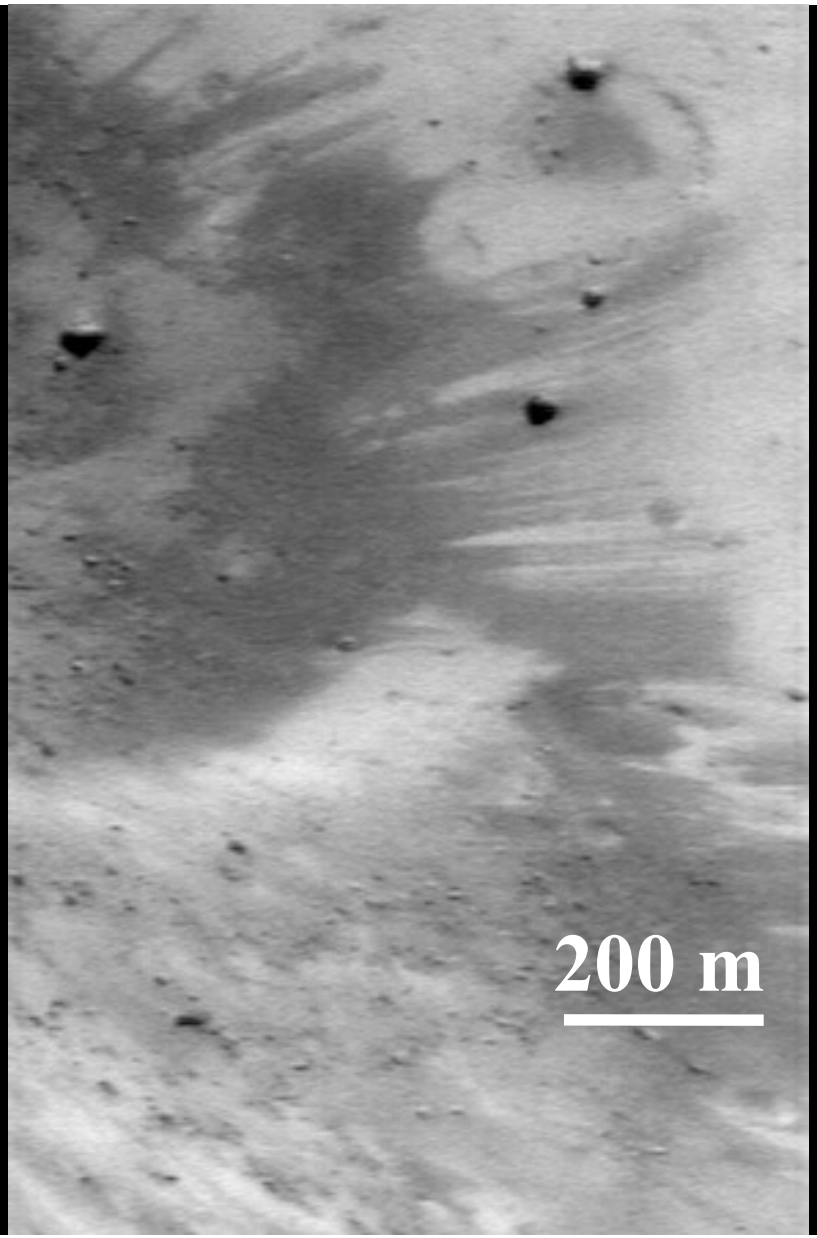



400 m

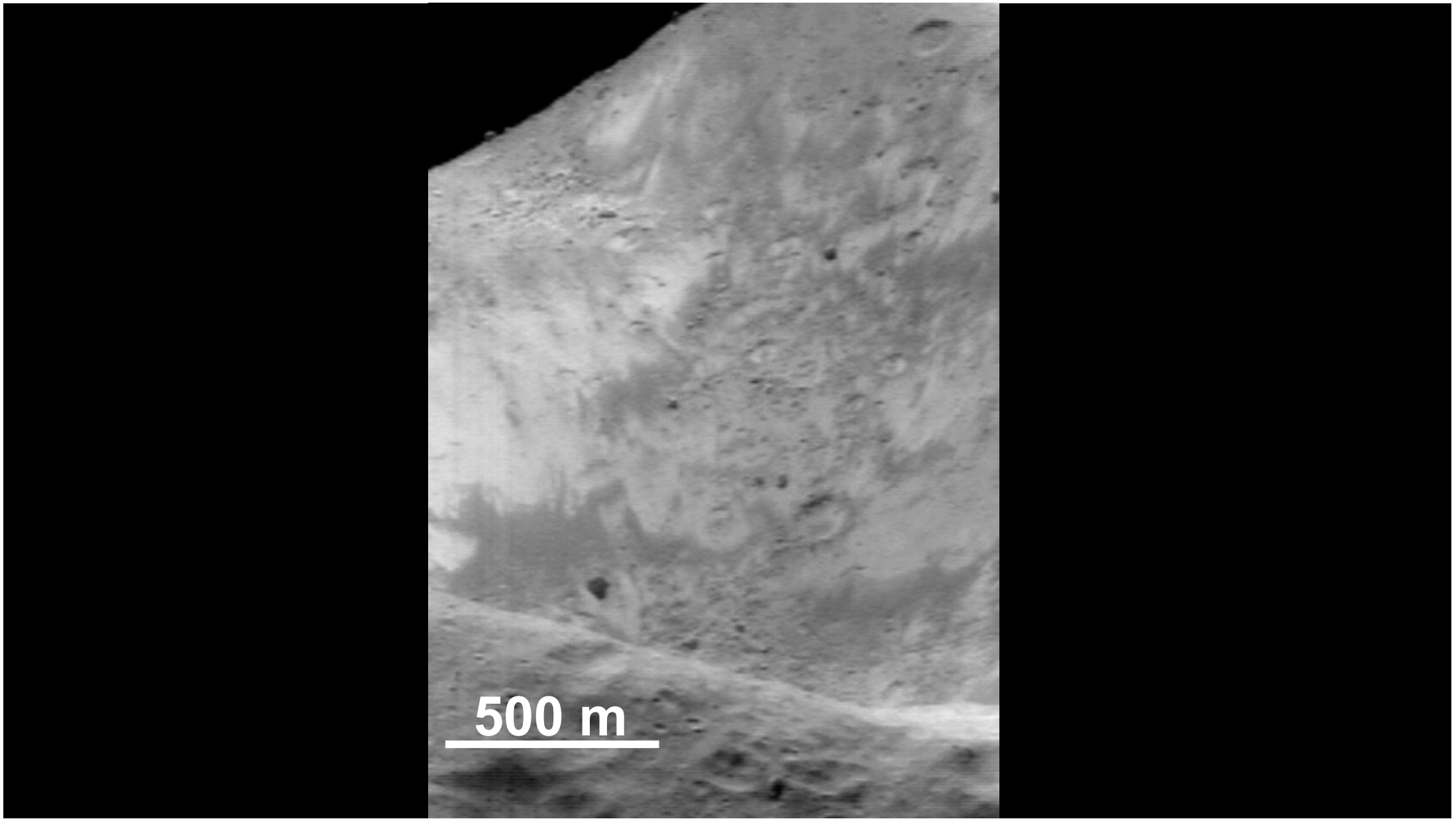

200 m

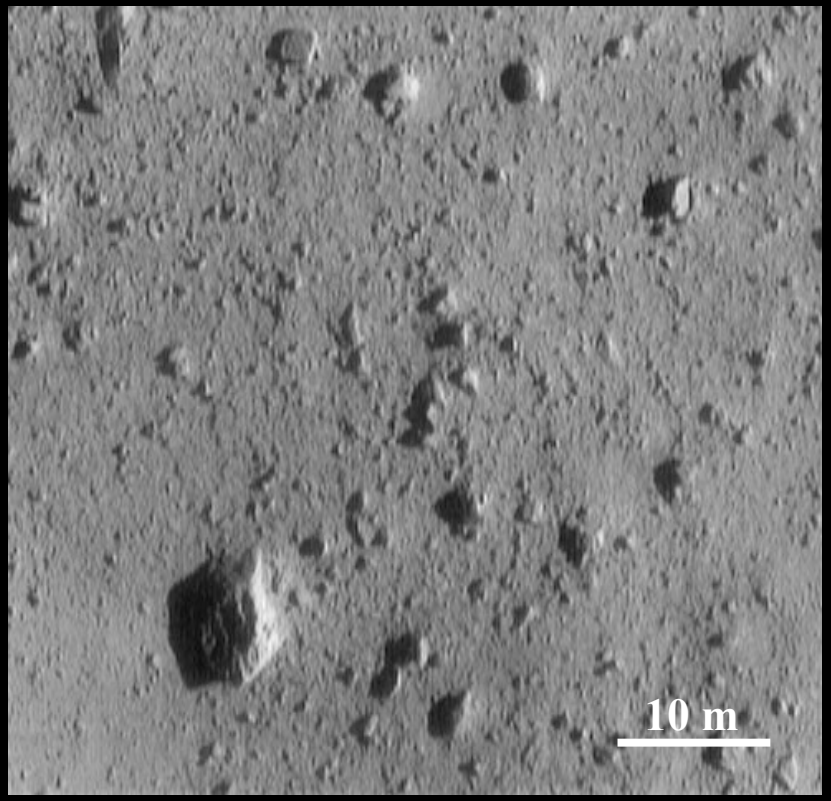

200 m

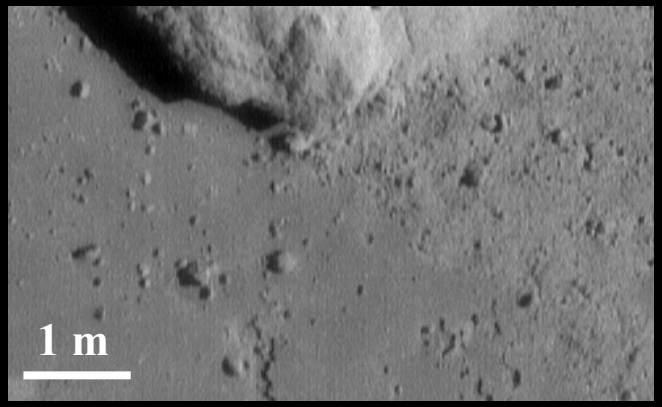

500 m

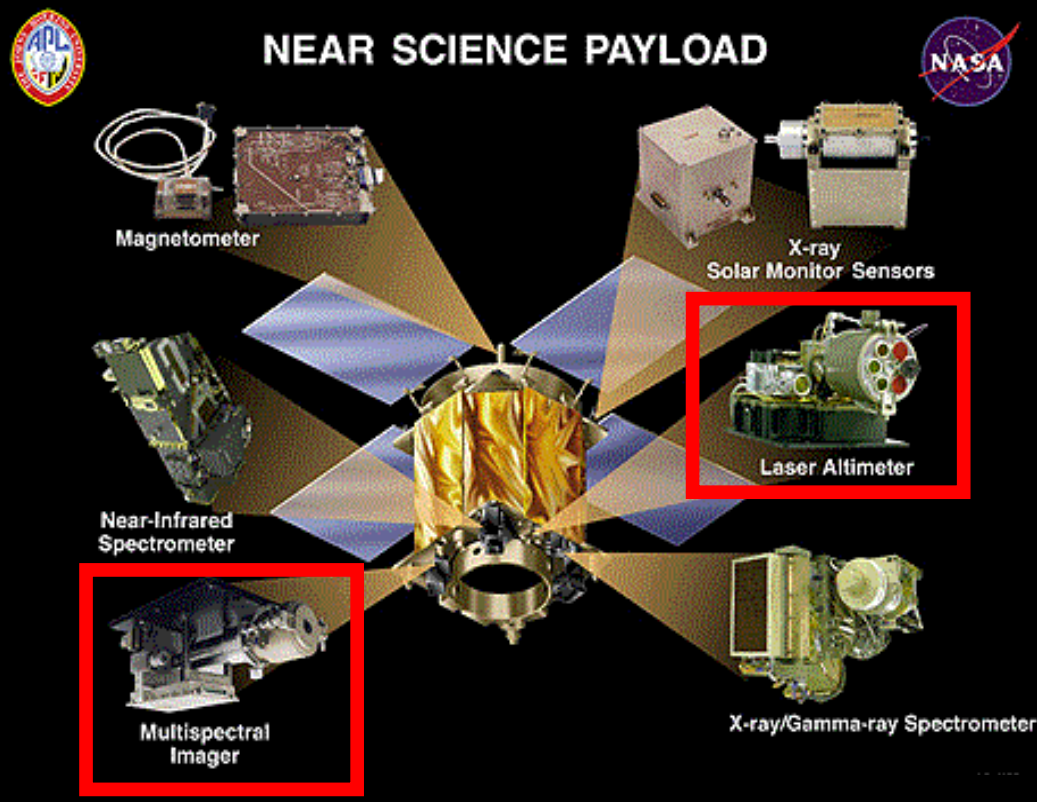

200 m


400 m

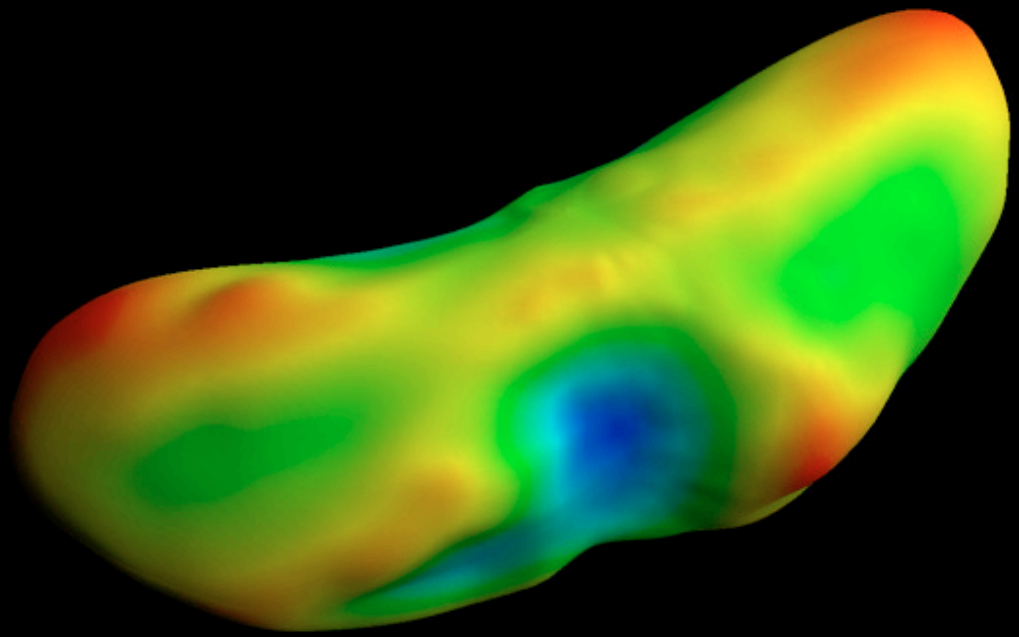

500 m

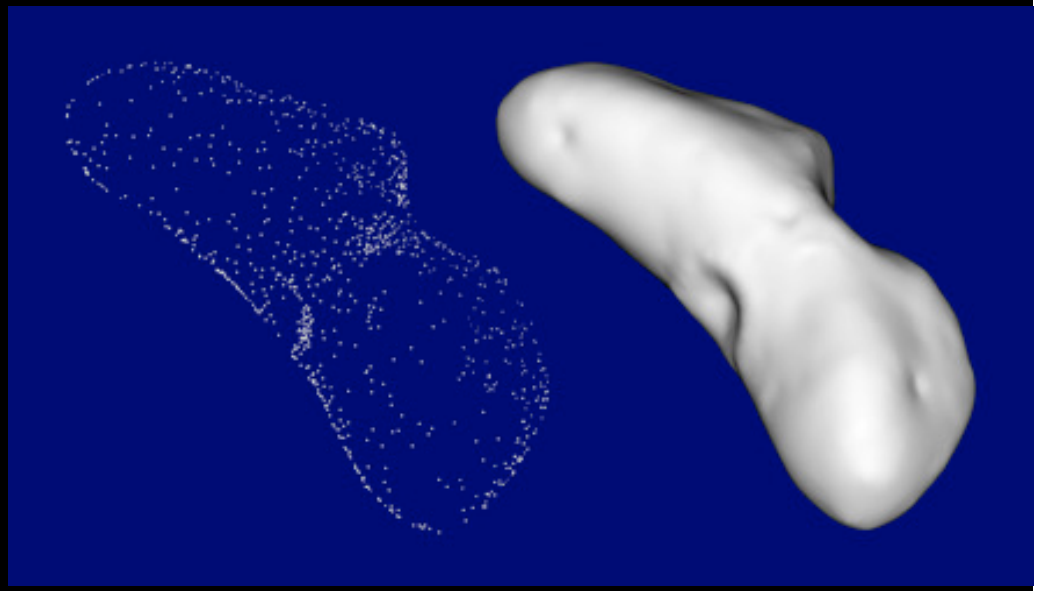

10 m


1 m


NEAR SCIENCE PAYLOAD
APL
NASA
Magnetometer
X-ray
Solar Monitor Sensors
Laser Altimeter
Near-Infrared
Spectrometer
Multispectral
Imager
X-ray/Gamma-ray Spectrometer

Topographie et forme





Variations topographiques fines, obtenues avec l'altimètre laser NRL. Bleu : valeur la plus basse ; Rouge : hauteur la plus élevée.

Topographie et forme

Les mesures gravimétriques permettent de déterminer le centre de masse. A partir des relevés topographiques, le centre de figure est déterminé. **Centre de figure et centre de masse sont quasi-confondus.**

X=31000 m	Y=13000 m	Z=13000 m
Xcg=-9.7 m	Ycg=2.4 m	Zcg=32.6 m

$$|Xcg / X| = 9.7 / 31000 = 0.03\ \%$$

$$|Ycg / Y| = 2.4 / 13000 = 0.02\ \%$$

$$|Xcg / X| = 32.6 / 13000 = 0.25\ \%$$

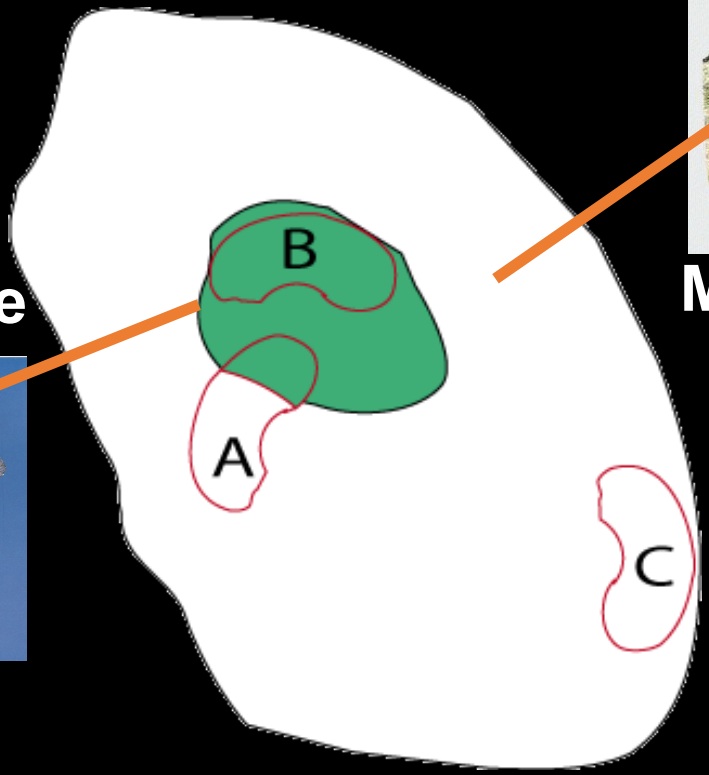
Topographie et forme

2 cas :

- Objet homogène (non différencié)
- Objet différencié



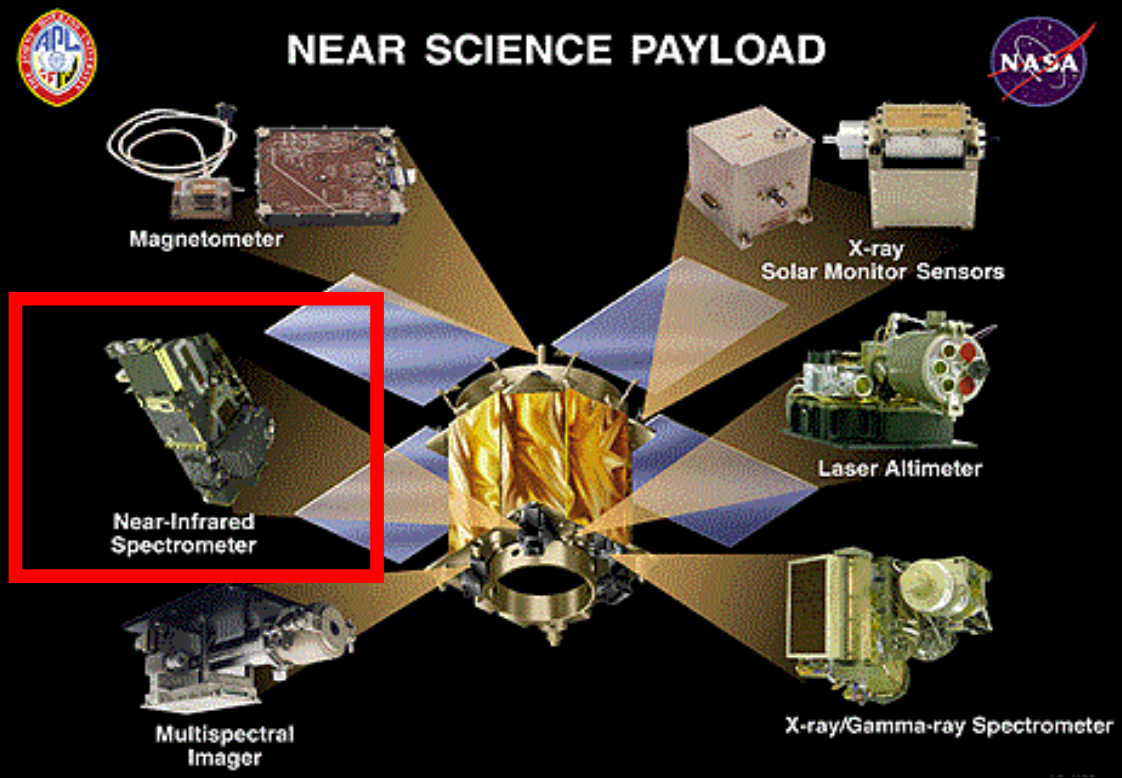
Noyau métallique



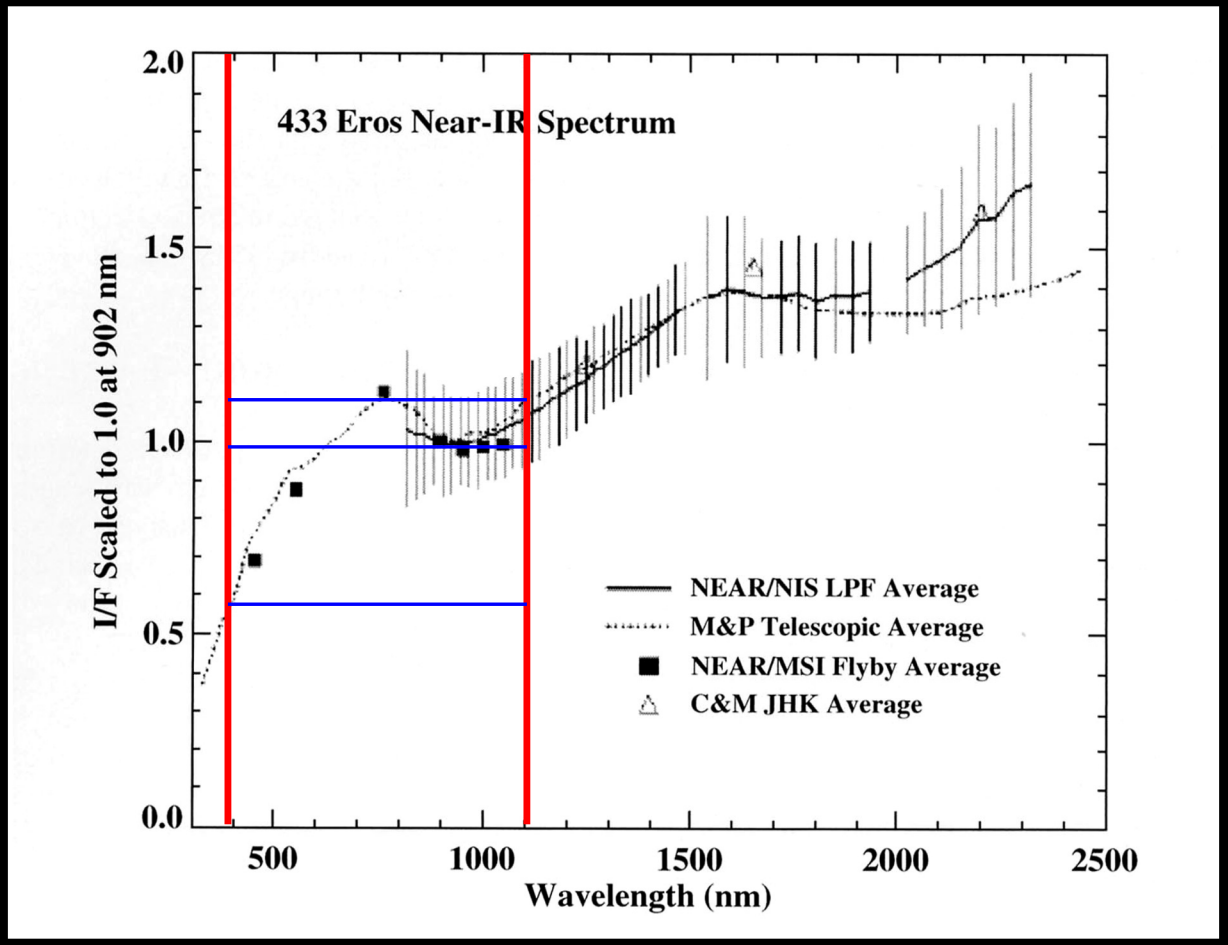


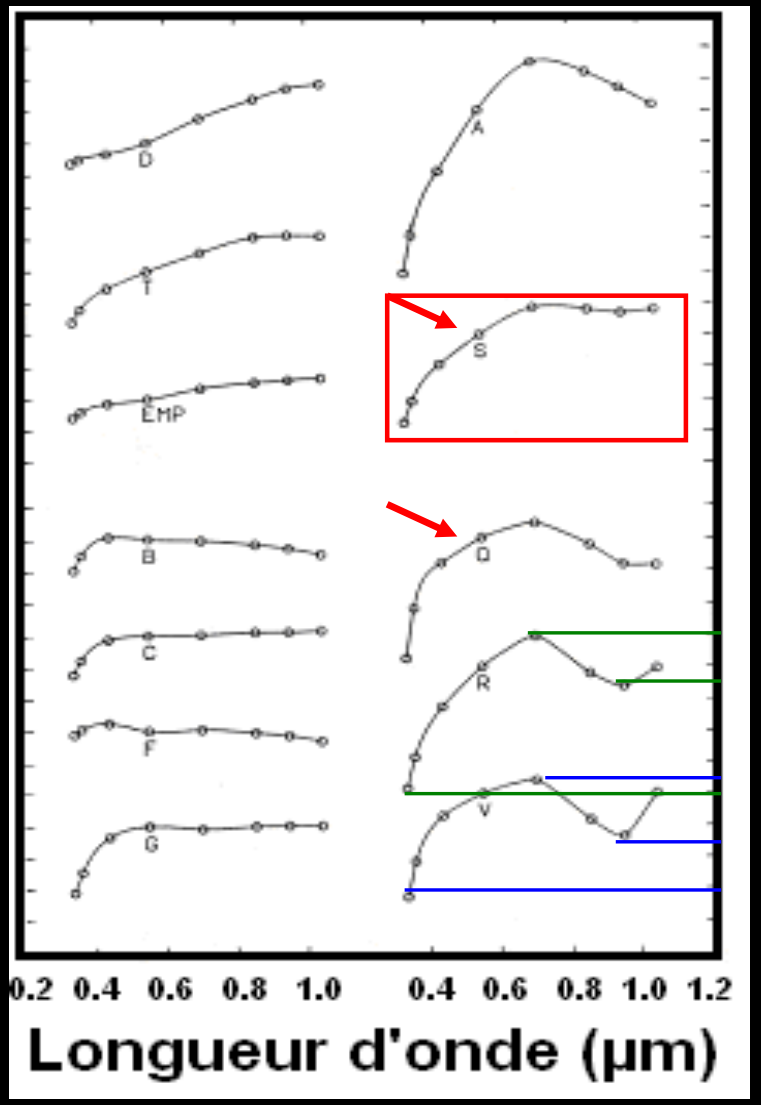
Manteau silicaté

Spectroscopie de la surface

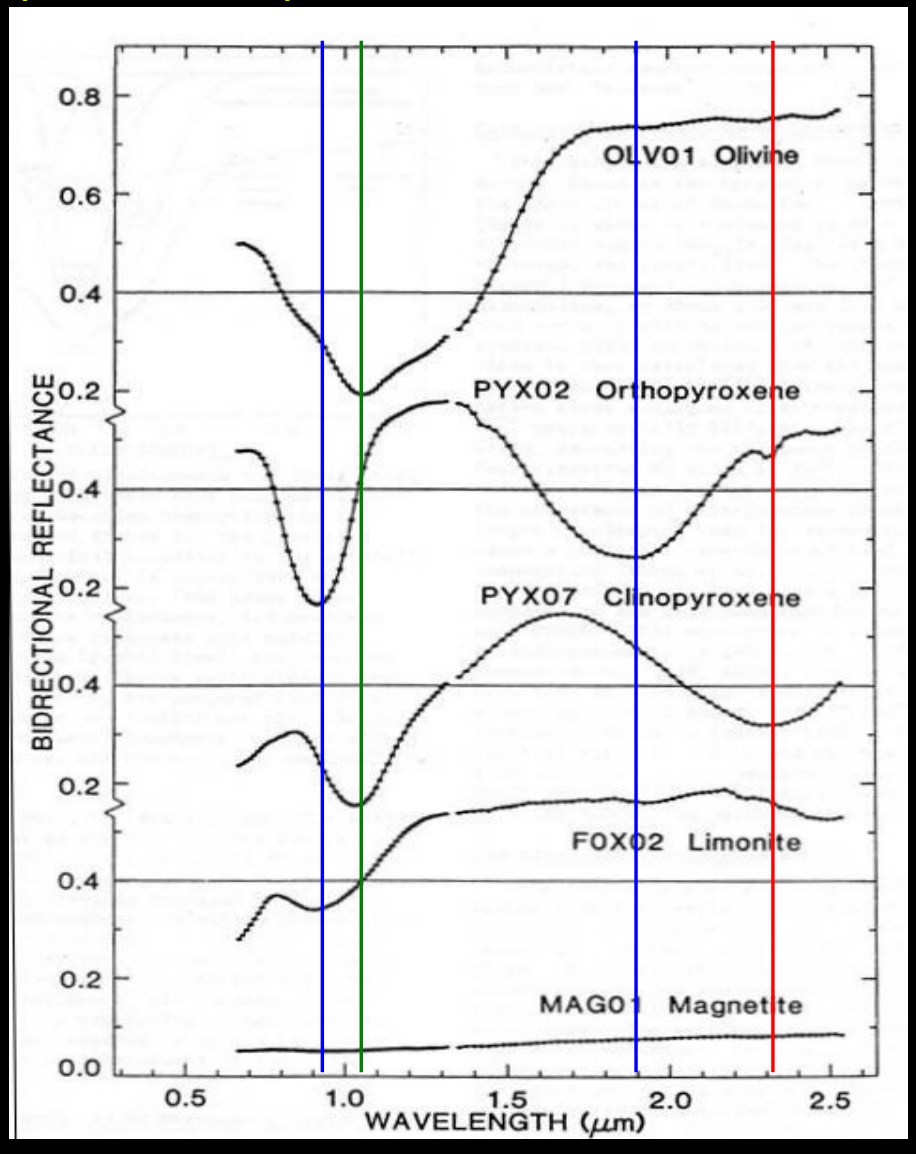


Spectroscopie de la surface

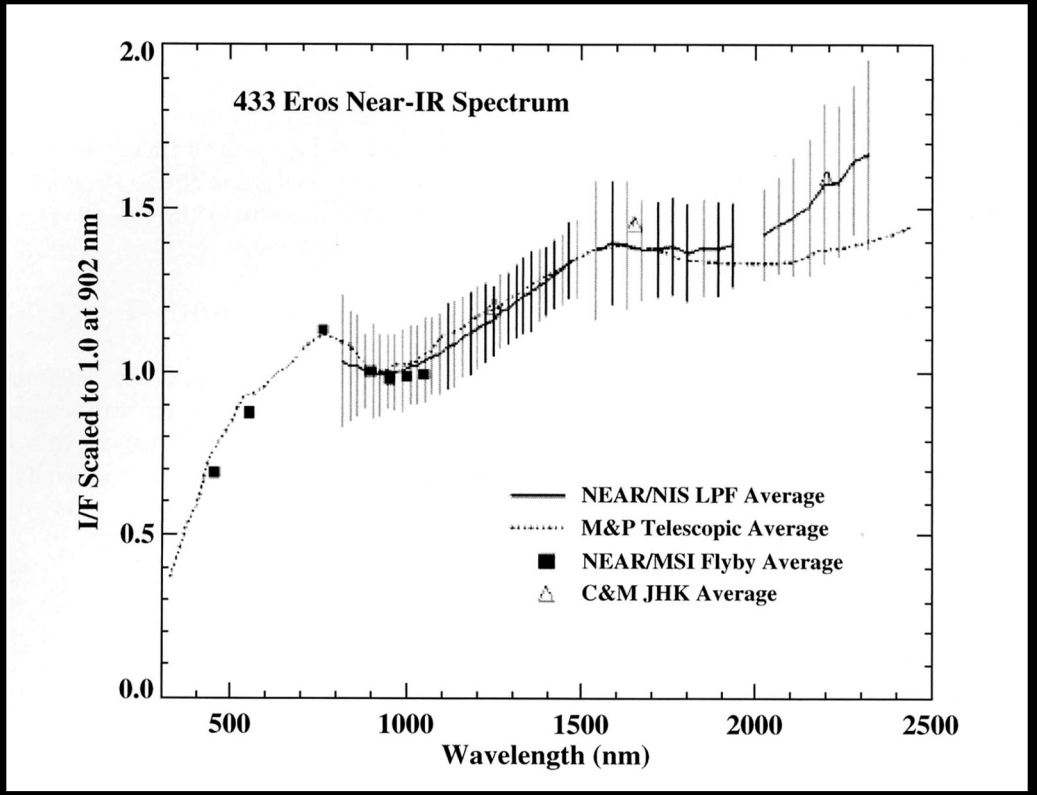




Spectroscopie de la surface



	Bande 1	Bande 2
Olivine	1.05	---
Opx	0.9	1.9
Cpx	1.0	2.3



Spectroscopie de la surface

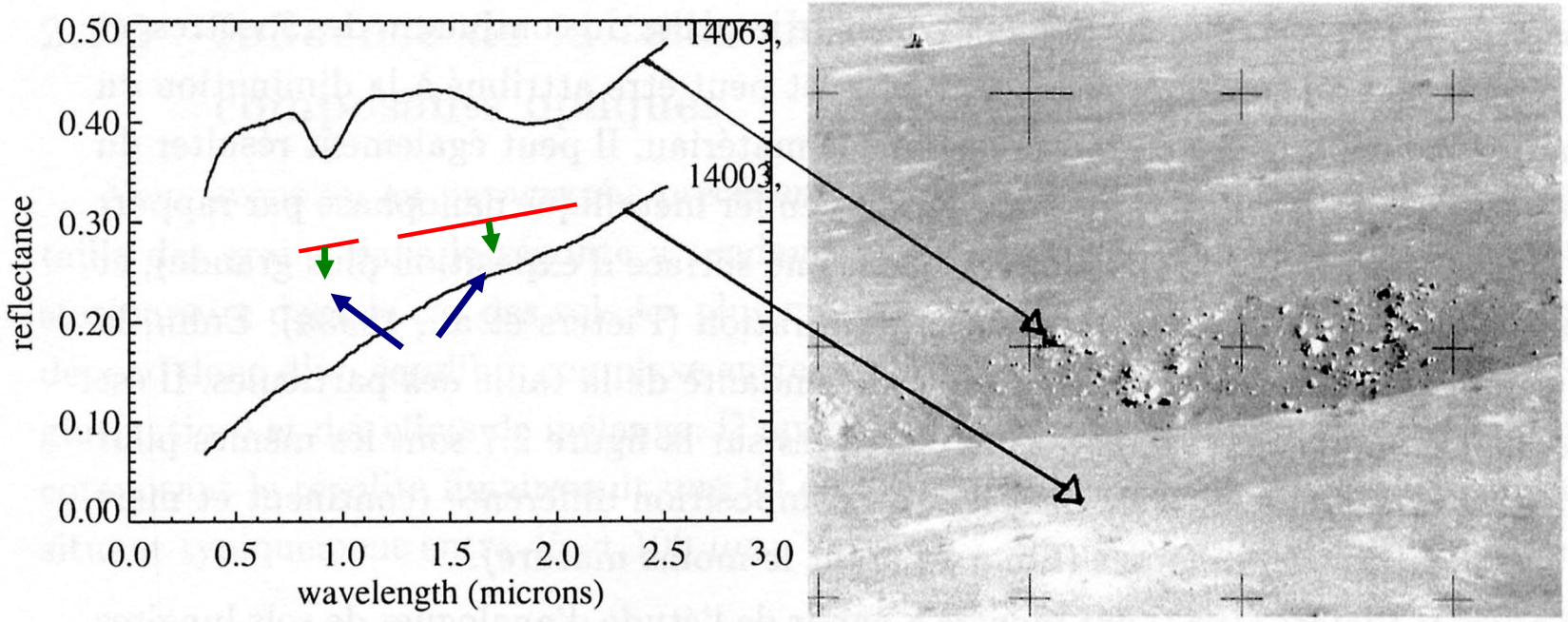
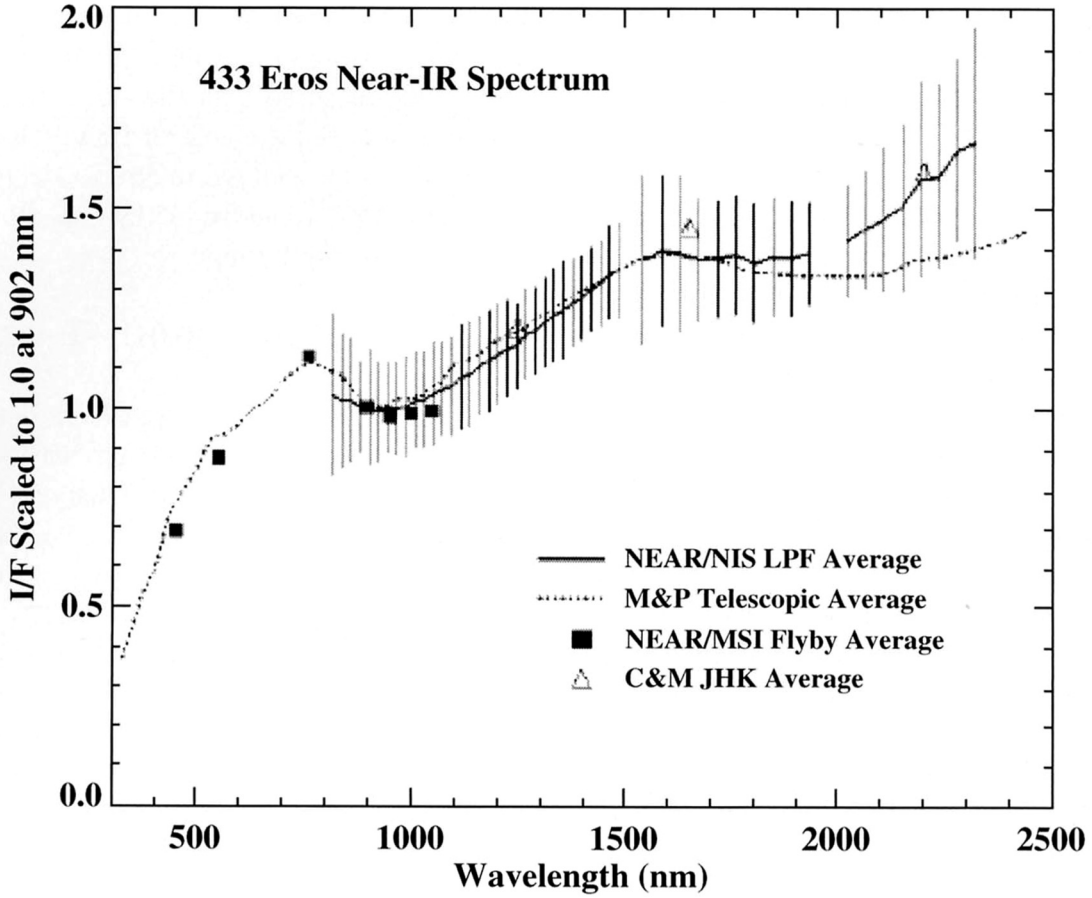
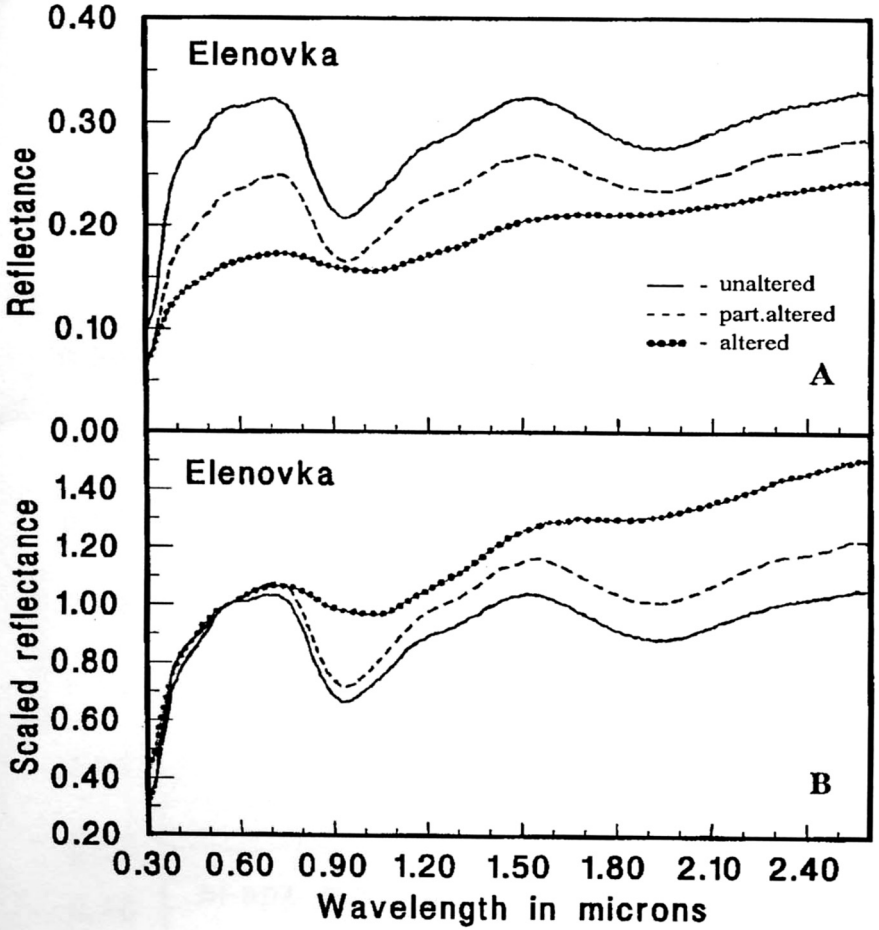


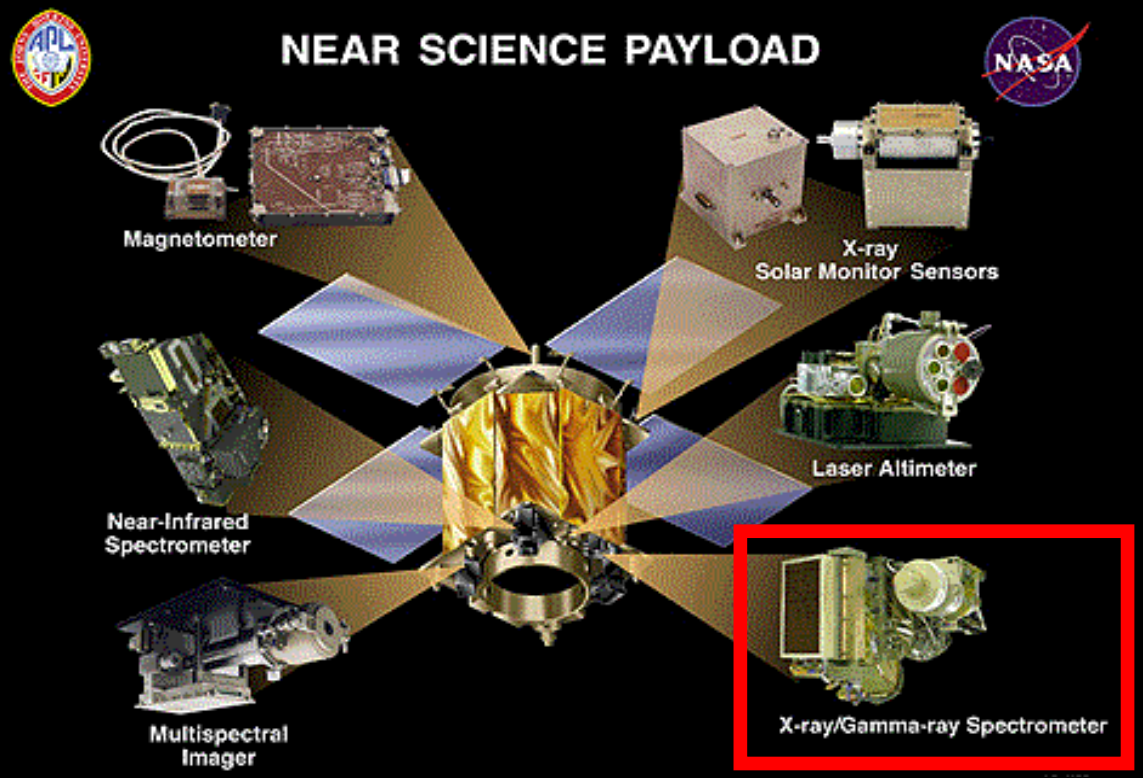
FIG. 2.8: A gauche : spectres d'échantillons de sol (14003) et de roche (14063) prélevés sur le site Apollo 14. Les sols ont des bandes d'absorption peu profondes par rapport aux roches (constituées de minéraux peu altérés) dont ils sont issus. Sur une échelle de quelques centaines de mètres un spectre moyen de cratère frais sera un mélange de spectres de type roches et de spectres de sol (à droite).

Spectroscopie de la surface

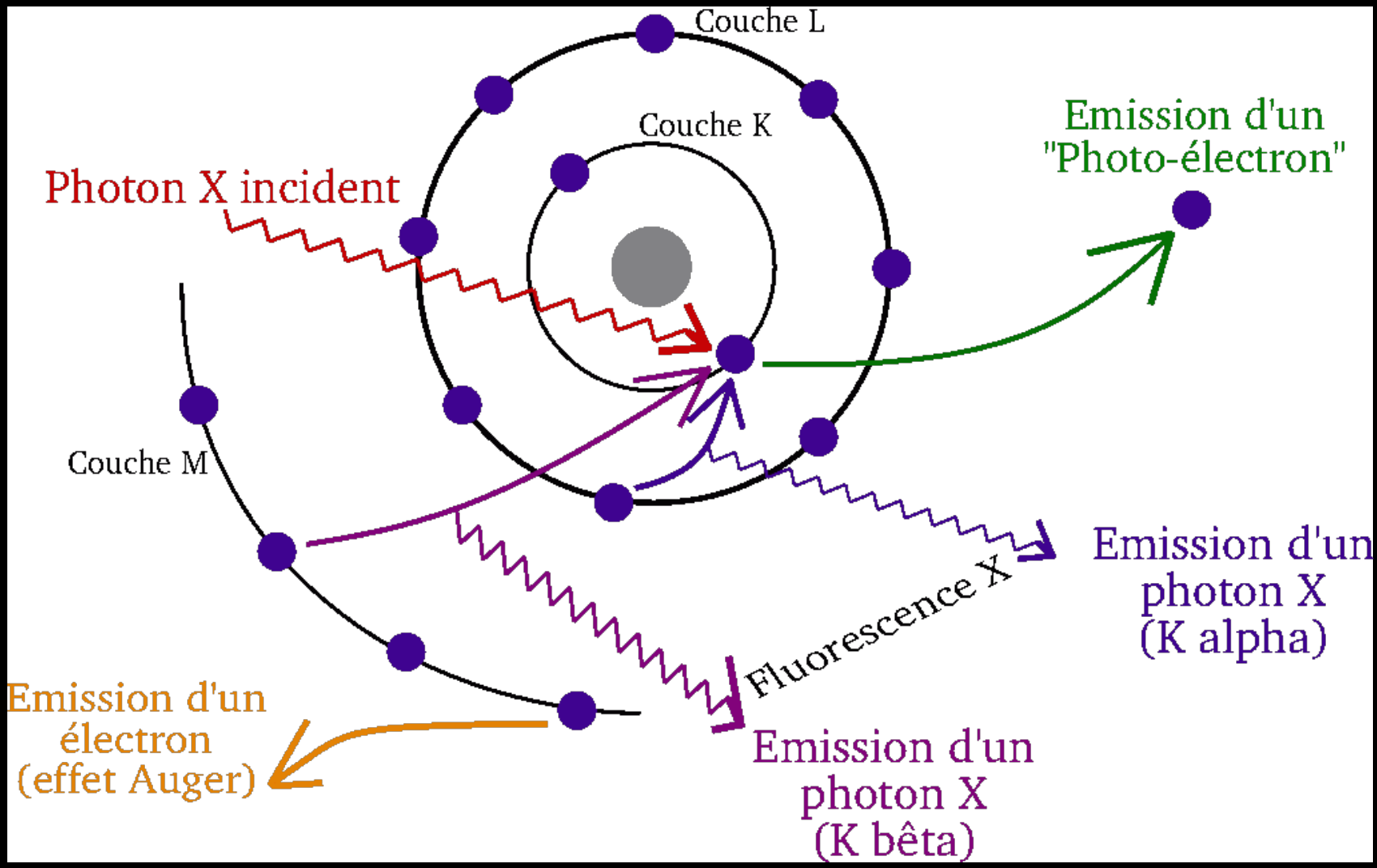




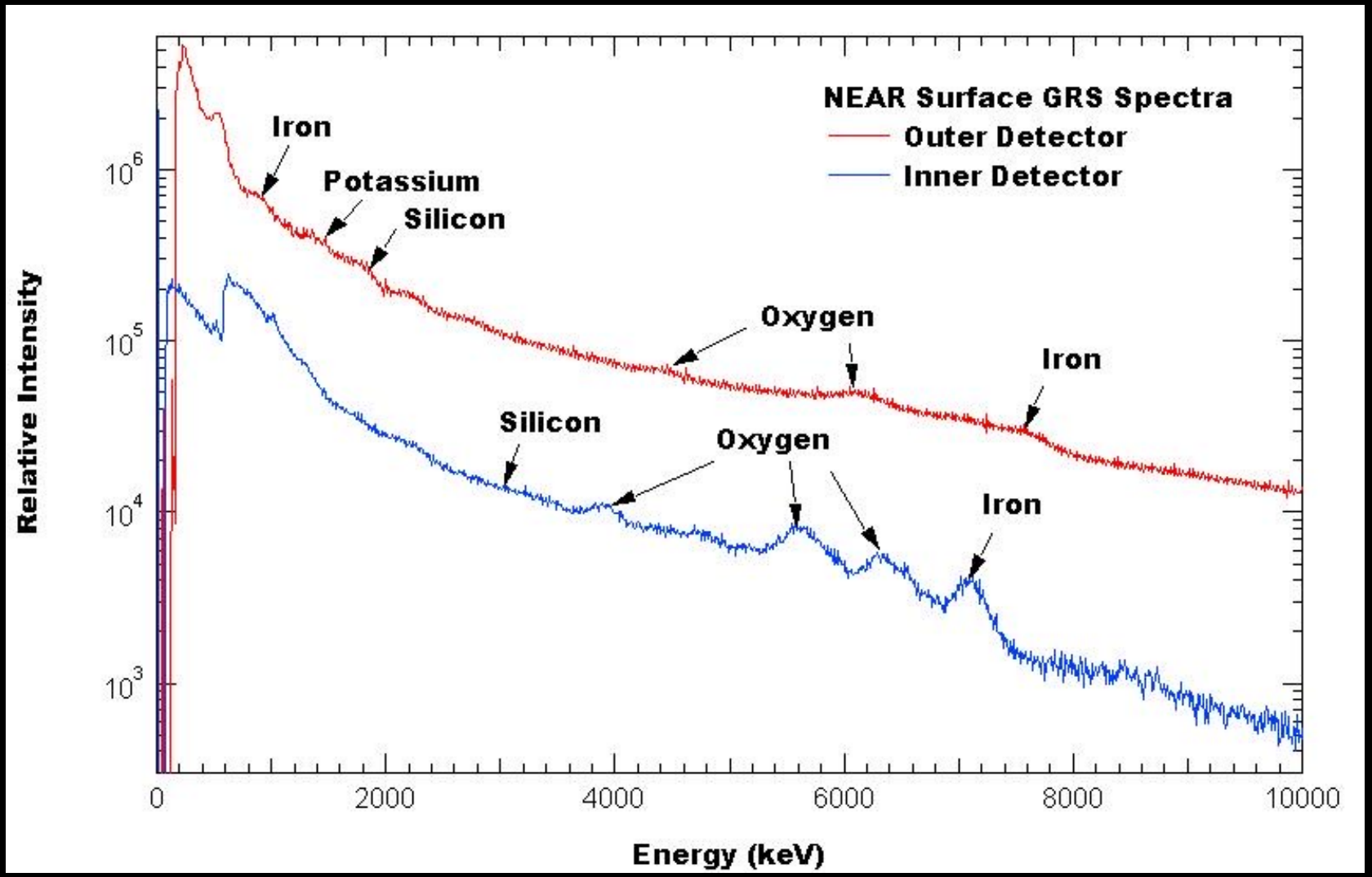
Fluorescence X avec le soleil



Fluorescence X avec le soleil



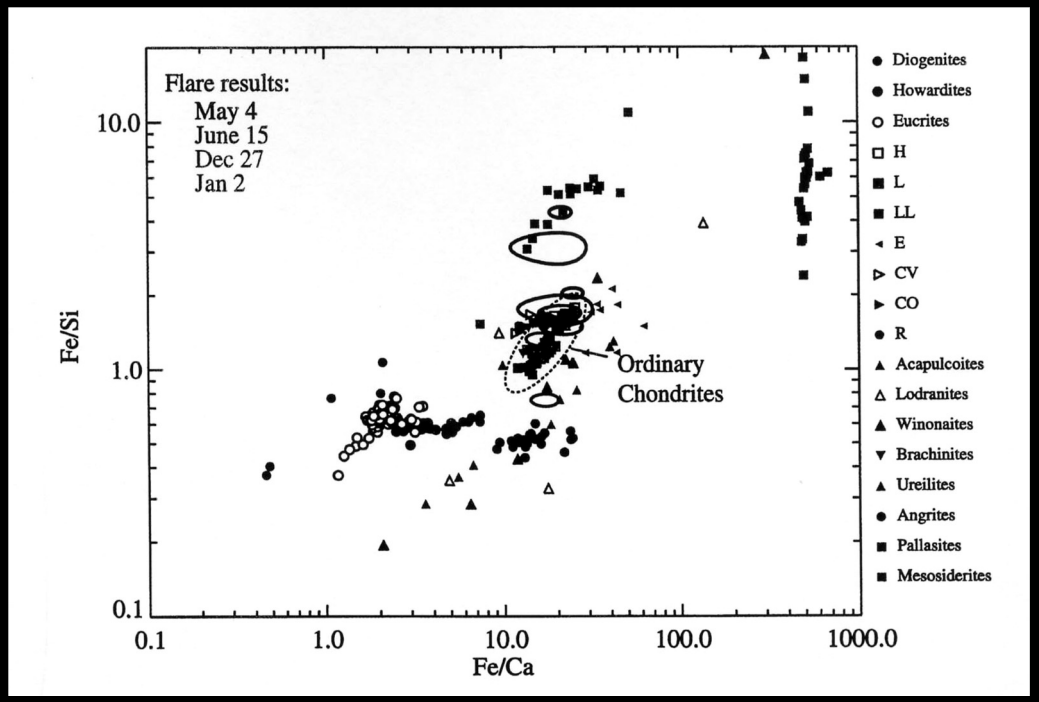
Fluorescence X avec le soleil

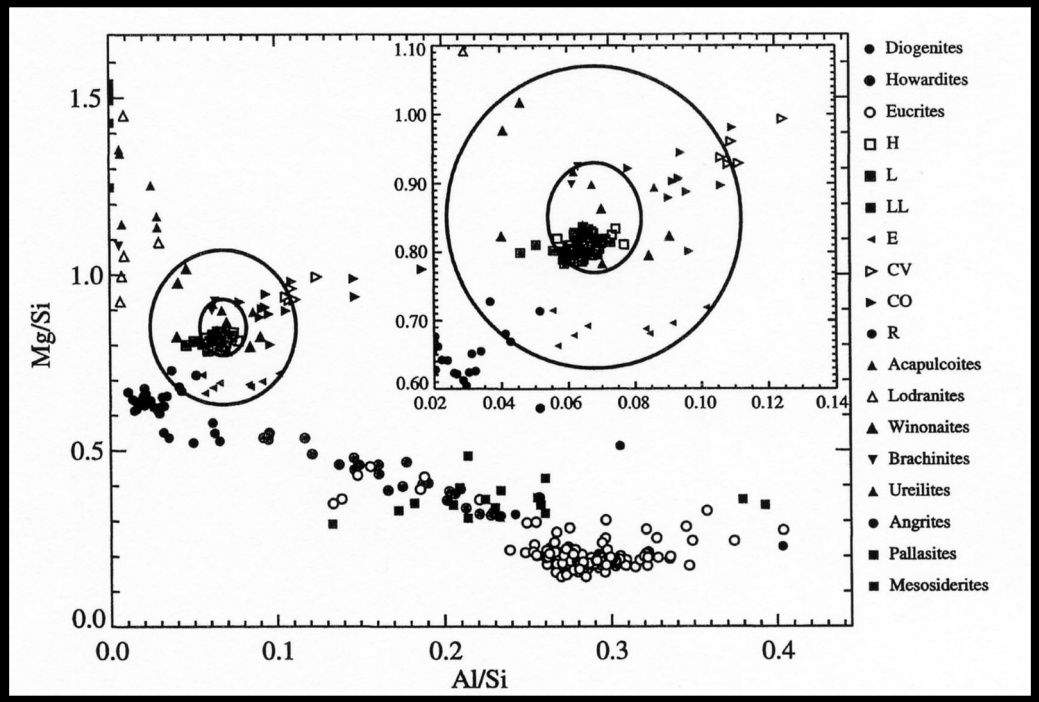


Fluorescence X avec le soleil

Eros est lié génétiquement aux chondrites ordinaires.

Les données de l'instrument XRGS ont permis de déterminer la composition élémentaire de la zone la plus superficielle de la surface de 433 Eros. Les diagrammes ci-dessous représentent des rapports d'éléments tracés en fonction d'autres. Les points y figurant sont relatifs à des météorites de types variés. Les données NEAR sur 433 Eros sont représentées par deux formes ellipsoïdales. Elles représentent la valeur moyenne avec une erreur à 1-s. Le traitement des données XRGS est très difficile et fait appel à beaucoup d'hypothèses. Les valeurs indiquées correspondent en fait à deux hypothèses effectuées lors de la réduction des données, sans qu'il soit possible de discriminer l'une de l'autre.

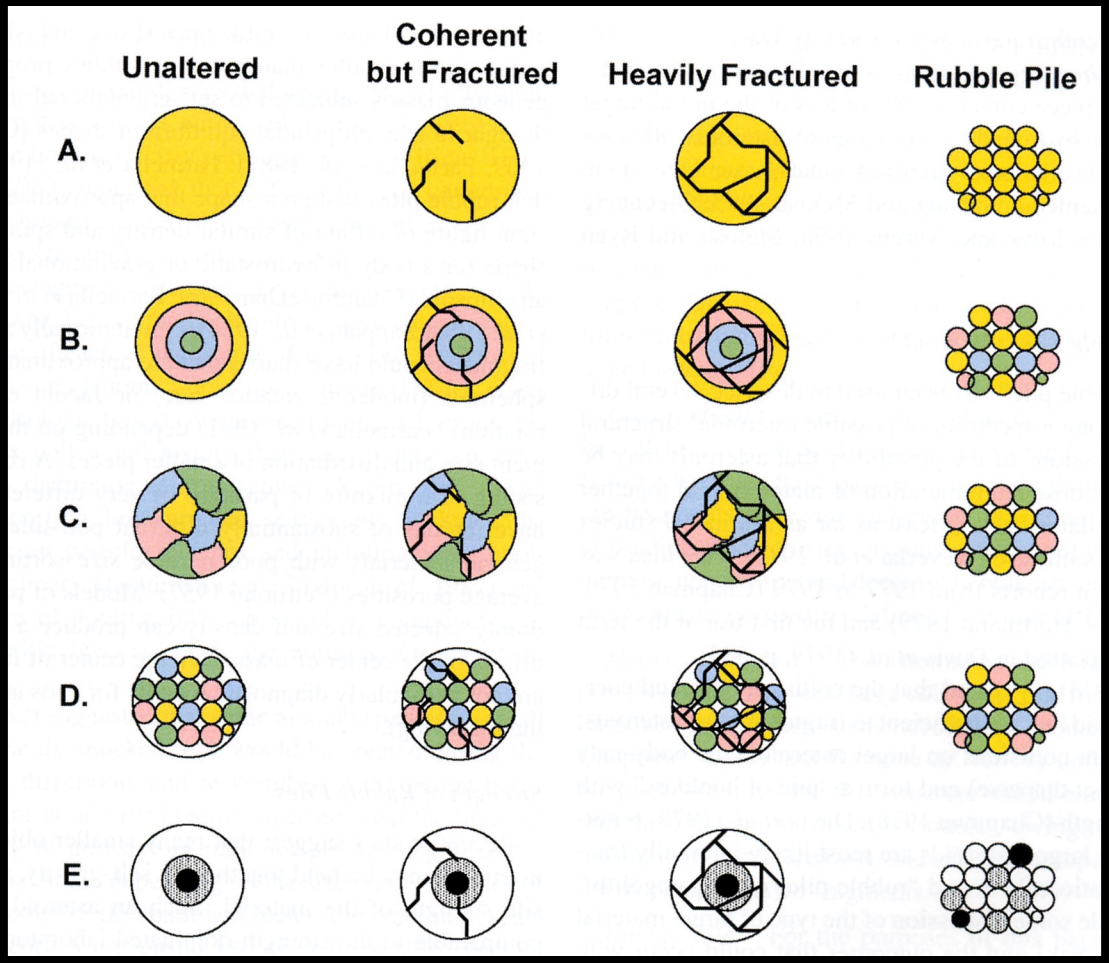




La structure interne de 433Eros

Les modèles de structure interne comprennent une double entrée : la composition et la distribution spatiale initiale des différents composants de l'astéroïde ; l'évolution de cet assemblage, sous l'effet des chocs dus aux collisions inter-astéroïdes.

	Unaltered	Coherent but fracturated	Heavily fracturated	Rubble pile
Porosité totale	0-15 %	0-15 %	15-30 %	> 30 %
Etat structural	Fracturation négligeable	Fracturé	Très fortes fracturations	Objet dispersé et réassemblé
Forces de cohésion	Ionique/Covalent	Ionique/Covalent	Ionique/Covalent	Gravitation



Etats post-accrétion initiaux :
A : modèle homogène, le même matériau chondritique est réparti de manière homogène
B : modèle en oignon, différentes couches de matériaux chondritiques de degré pétrographique décroissant du centre vers la périphérie (température radialement décroissante)
C : modèle de chauffage hétérogène, le matériau a été chauffé de manière hétérogène, conduisant à la coexistence de différents types pétrographiques (e.g. chauffage inductif)
D : modèle des planétésimaux métamorphisés, de petits planétésimaux ont été accrétés et métamorphisés
E : Modèle différentié, non chondritique.

Jaune = Type pétrographique 3 ; Rose = 4 ; Bleu = 5 ; Vert = 6

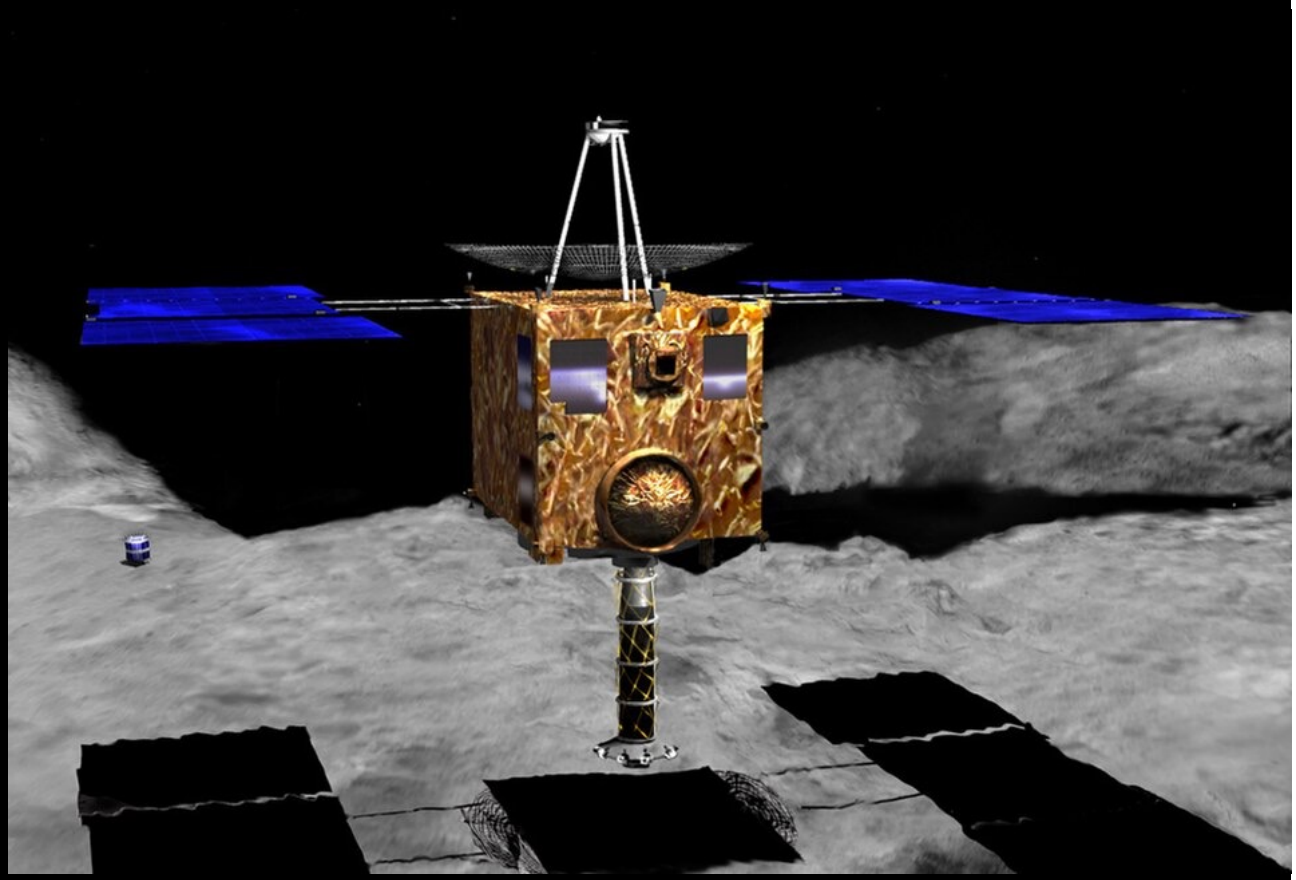
La structure interne de 433Eros

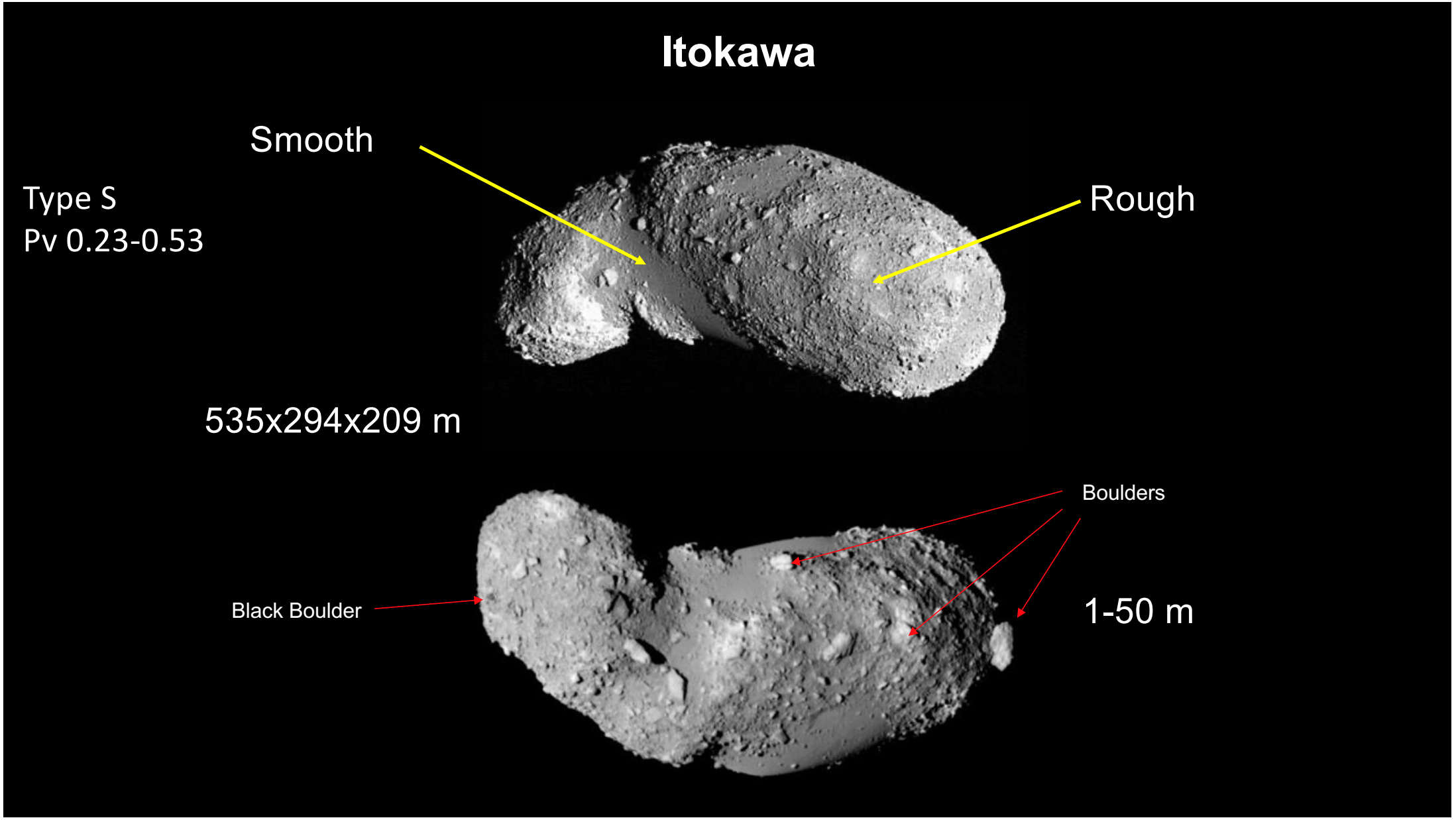
	Unaltered	**Coherent but fracturated**	**Heavily fracturated**	**Rubble pile**
Porosité totale	0-15 %	0-15 %	15-30 %	> 30 %
Etat structural	Fracturation négligeable	Fracturé	Très fortes fracturations	Objet dispersé et réasemblé
Forces de cohésion	Ionique/Covalent	Ionique/Covalent	Ionique/Covalent	Gravitation

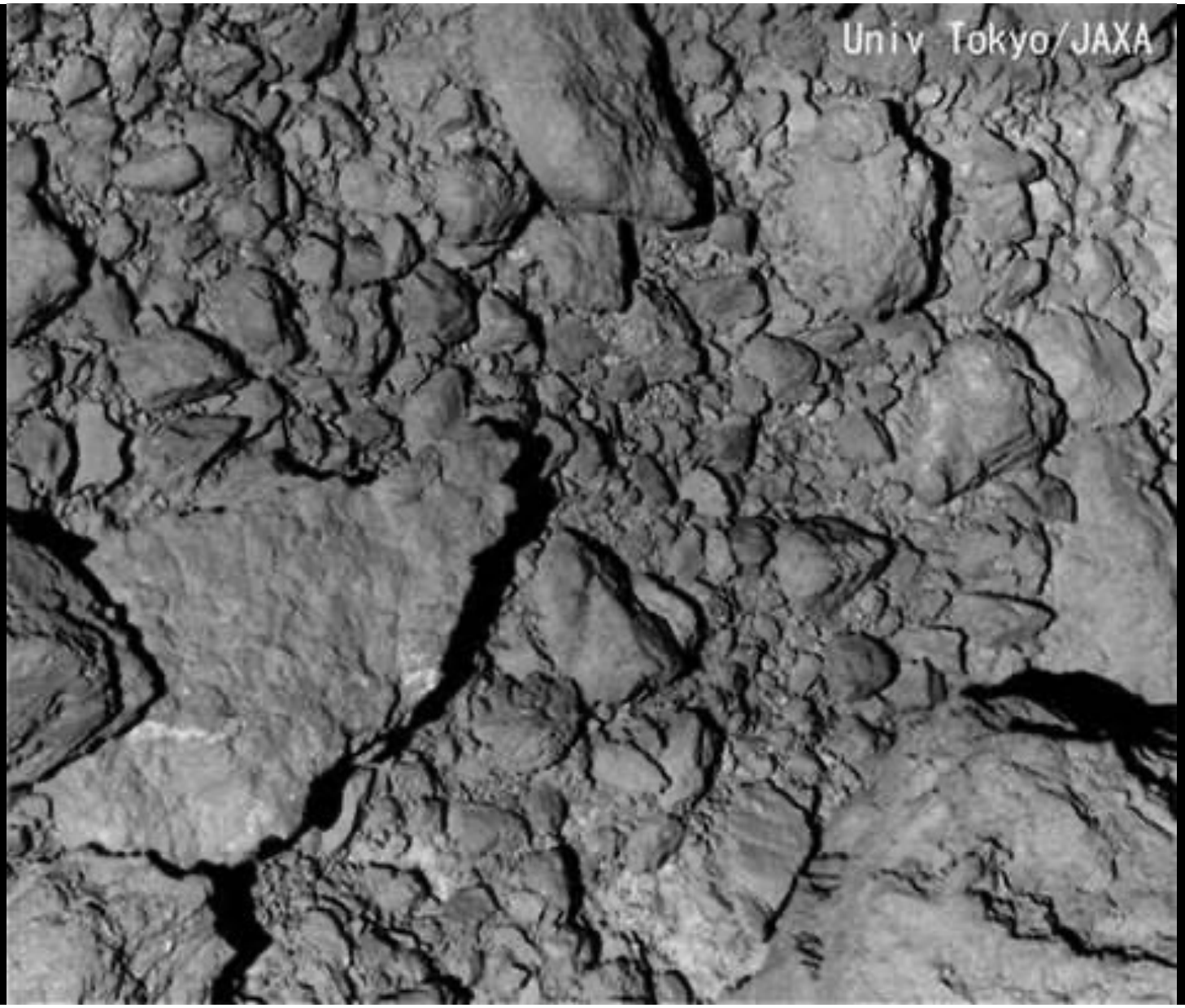
La densité d'une chondrite ordinaire est de l'ordre de 3.4 g/cm3. la densité de Eros étant de 2.67, la porosité est de l'ordre de 30%, soit un objet de type Rubble Pile.

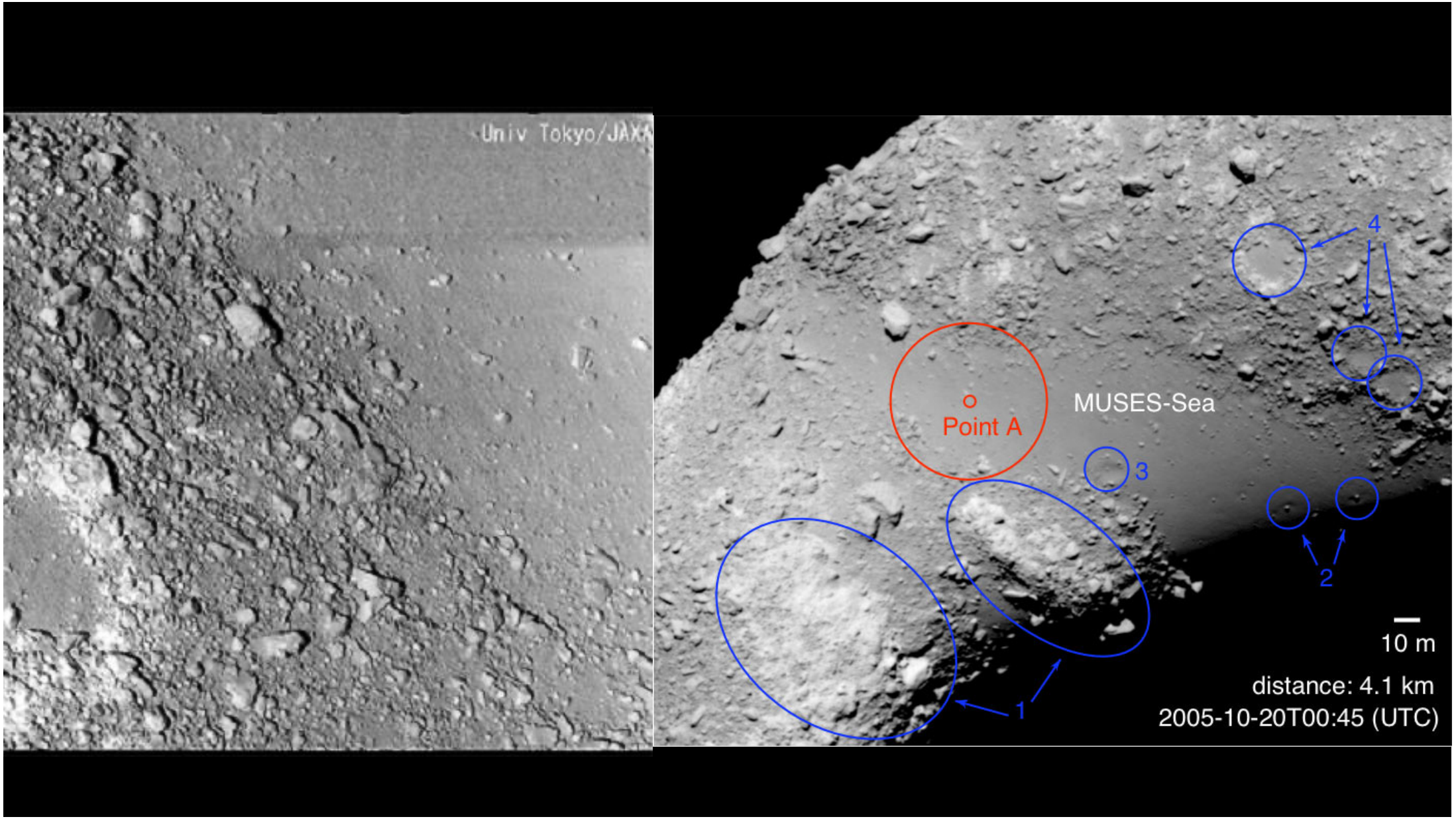
La mission HAYABUSA sur Itokawa (2003-2010)

HAYABUSA




Itokawa
Smooth
Rough
Type S
Pv 0.23-0.53
535x294x209 m
Boulders
Black Boulder
1-50 m


Univ Tokyo/JAXA


Univ Tokyo/JAXA
Point A
MUSES-Sea
1
2
3
4
10 m
distance: 4.1 km
2005-10-20T00:45 (UTC)

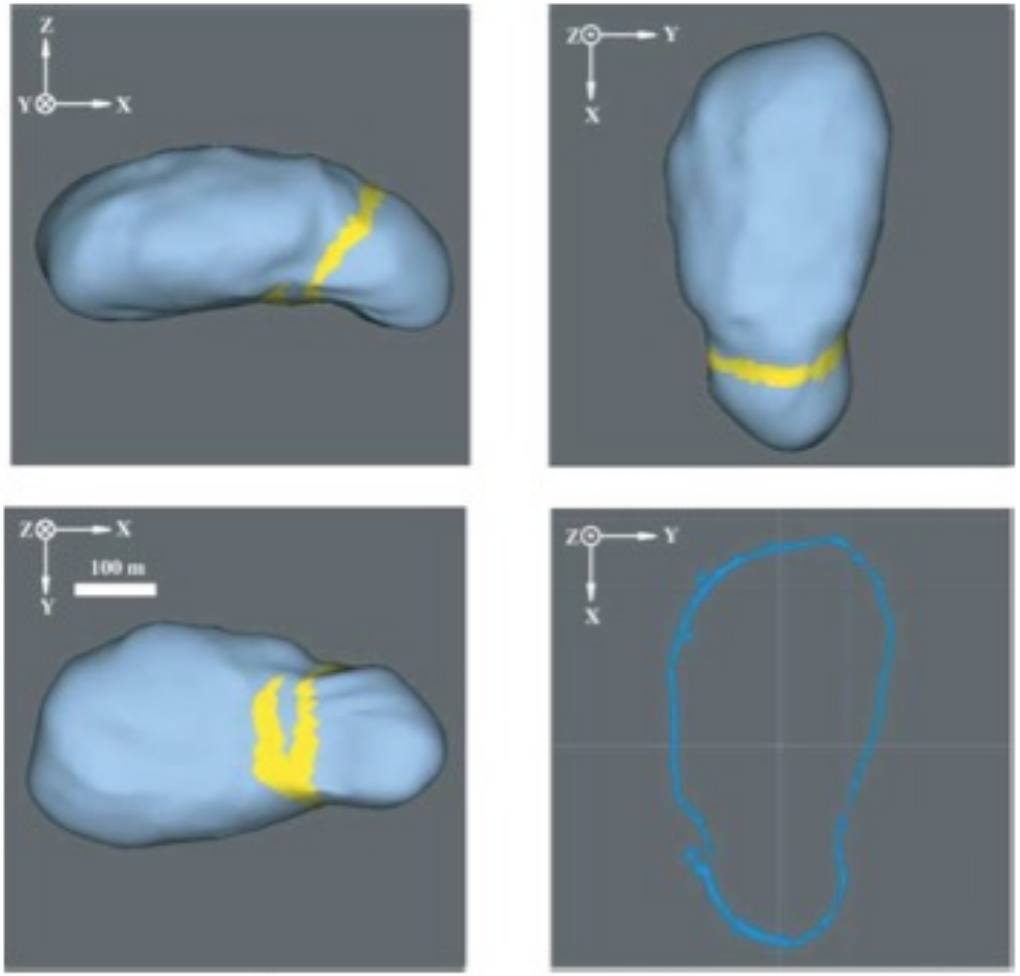


Fig. 1. Three views of Itokawa's shape model and a detailed cross section along the equator. The *z* direction is north of Itokawa, and the *x* direction is the prime meridian. The most substantial structure is two pieces (head and body) separated by a circular concave structure (neck). To help guide the eye, a headward slope of the neck is colored in yellow; this region is defined by surface texture of deposits and mass movements derived from the head. A quasi-eyeballed feature of southern polar region shows a local hill (named Yatsugatake in Fig. 3) surrounded by the deposits, but the hill might be an emplacement.

Analyse par fluorescence X : lien vers chondrite ordinaire

Fig. 2. (A) Elemental ratios of Itokawa (shaded area) plotted as Mg/Si versus Al/Si, together with typical compositions of stony and stony iron meteorites. (B) Enlargement of shaded area in (A). The dashed and dotted lines in (A) denote the best-fit values and their 2σ uncertainties, respectively.

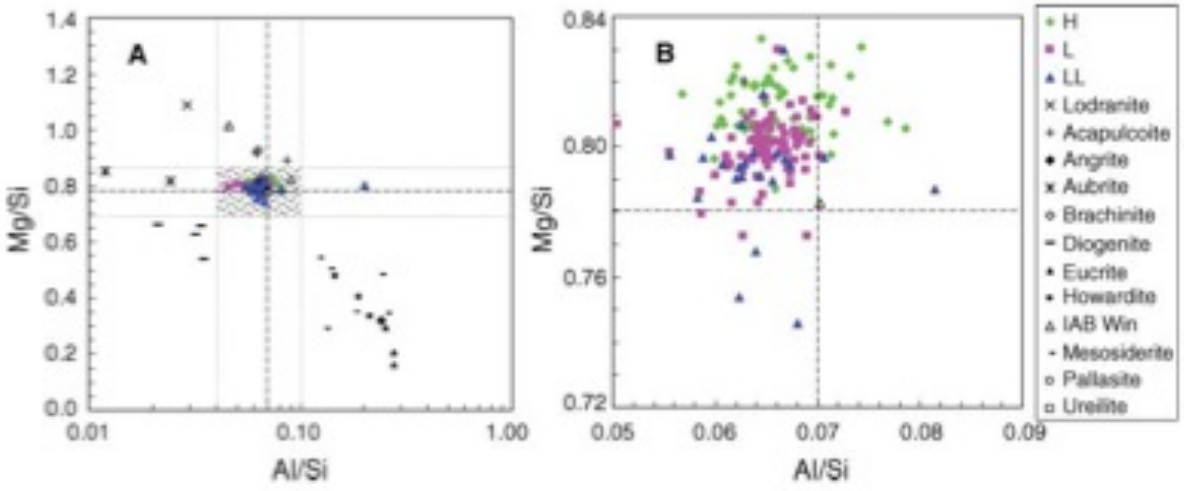
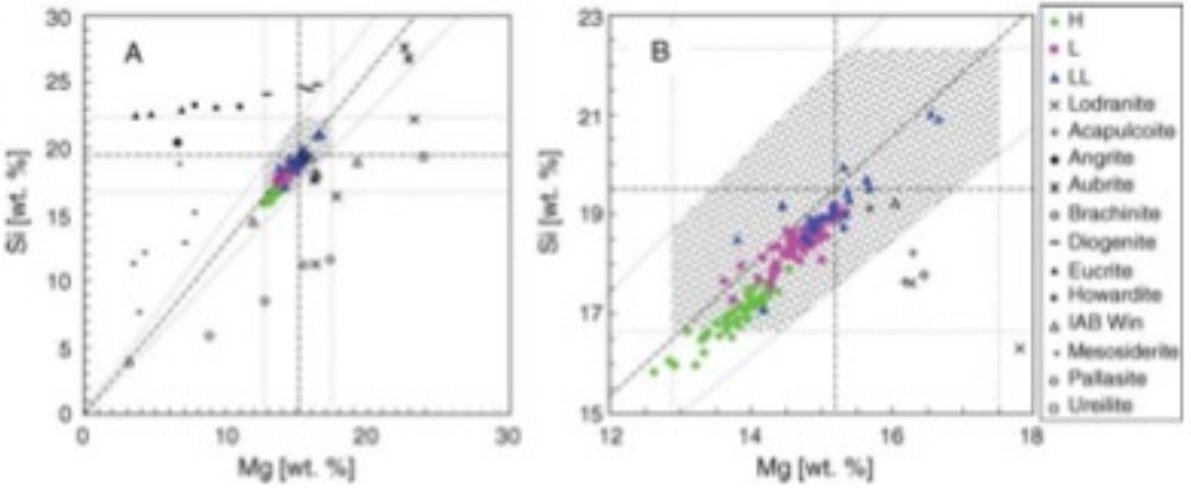
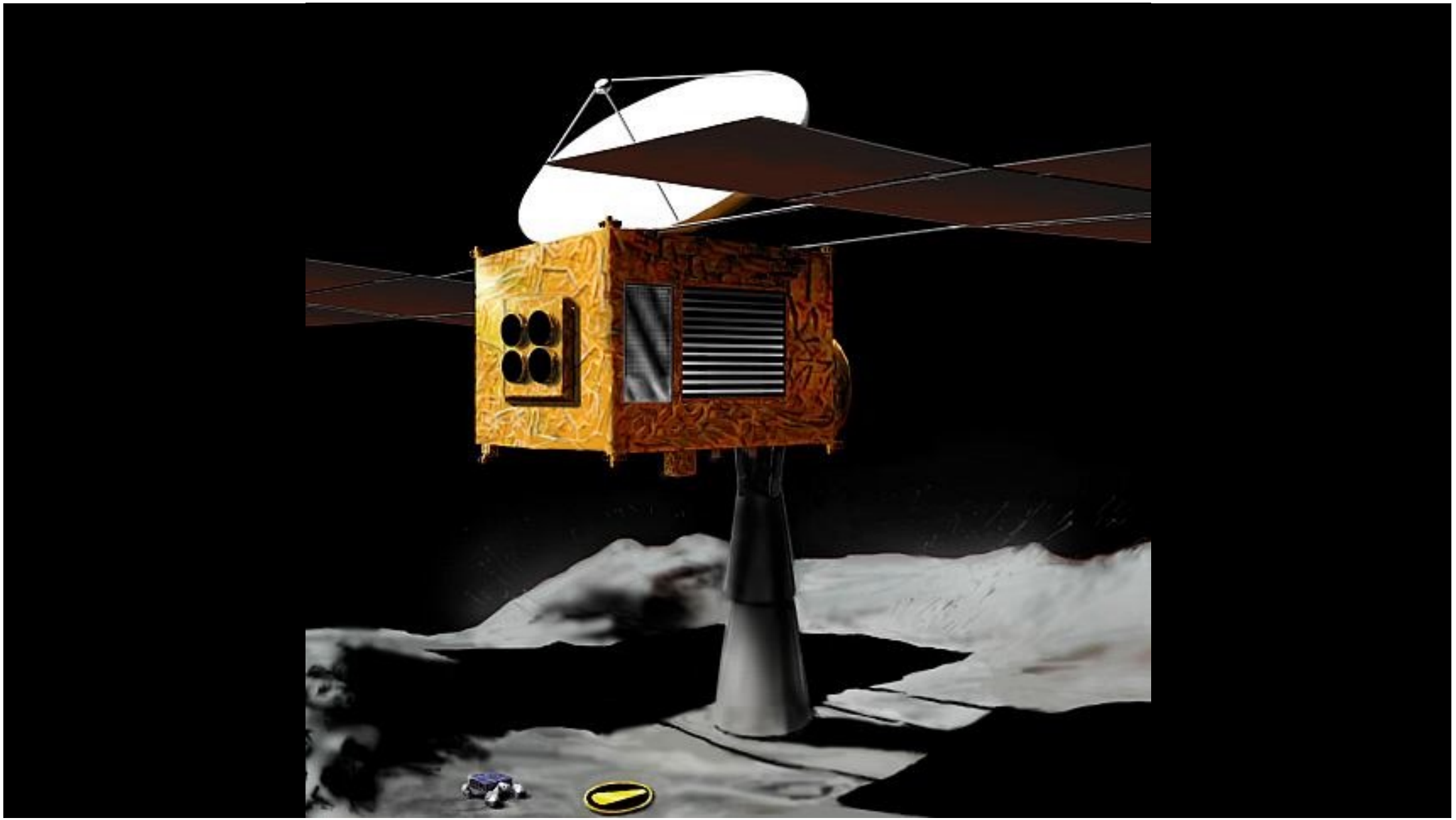


Fig. 3. (A) Elemental composition of Itokawa (Si/Mg) plotted as in Fig. 2. (B) Enlargement of the shaded area in (A). Ordinary chondrites, acapulcoites, and IAB winonaites appear closest in composition, and Itokawa appears to be more like an LL- or L-chondrite in composition than an H-chondrite.



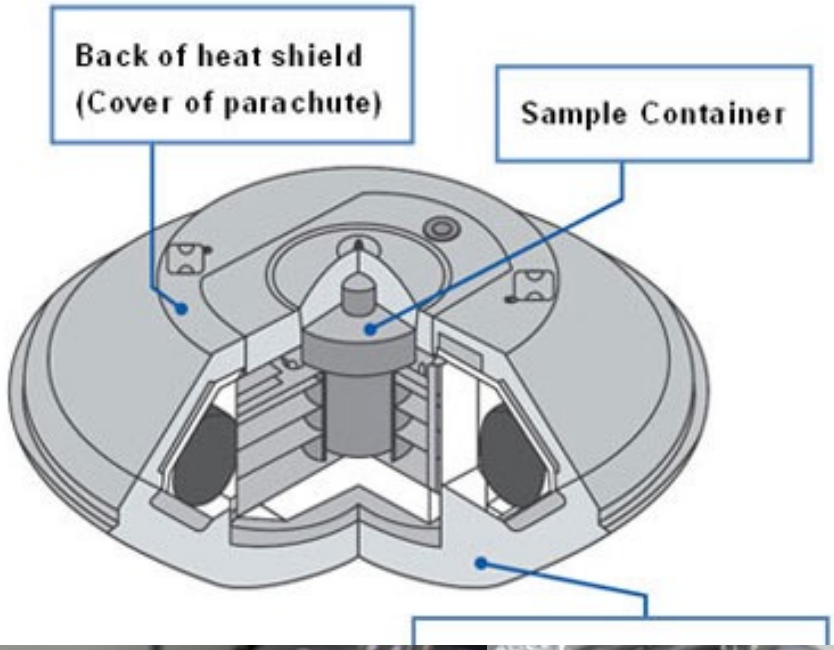
Porosité ~ 50%

Rubble pile

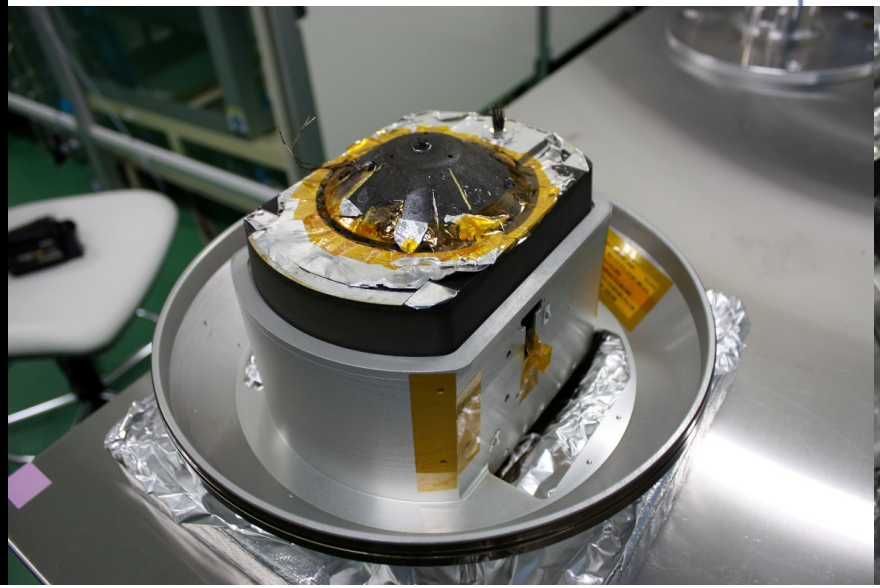


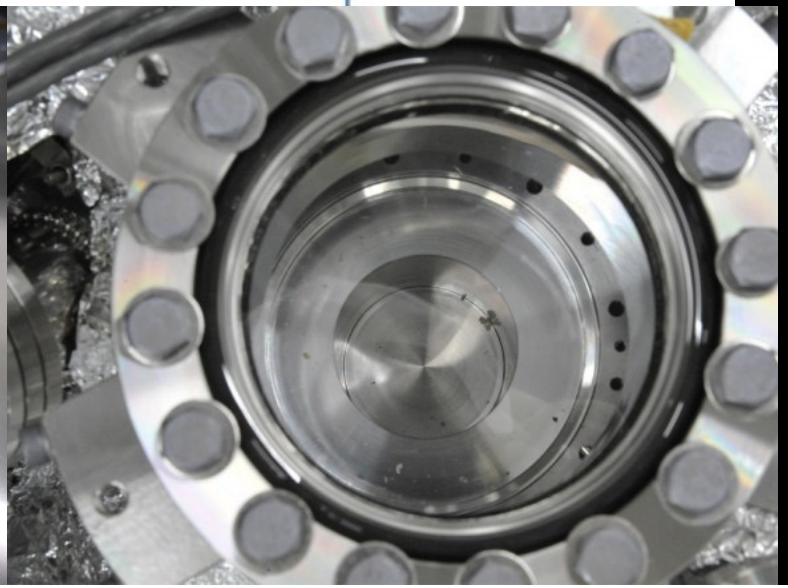




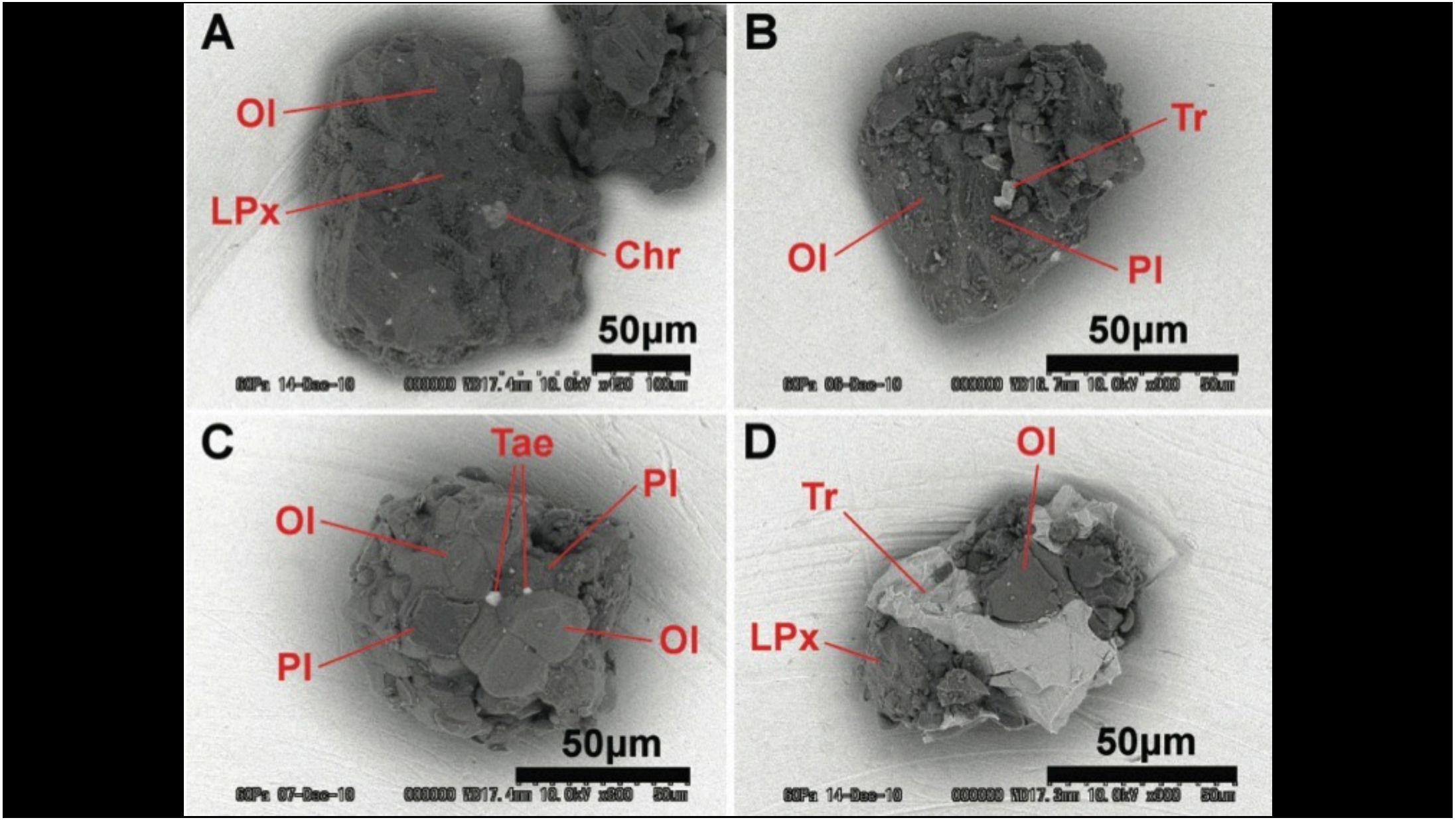


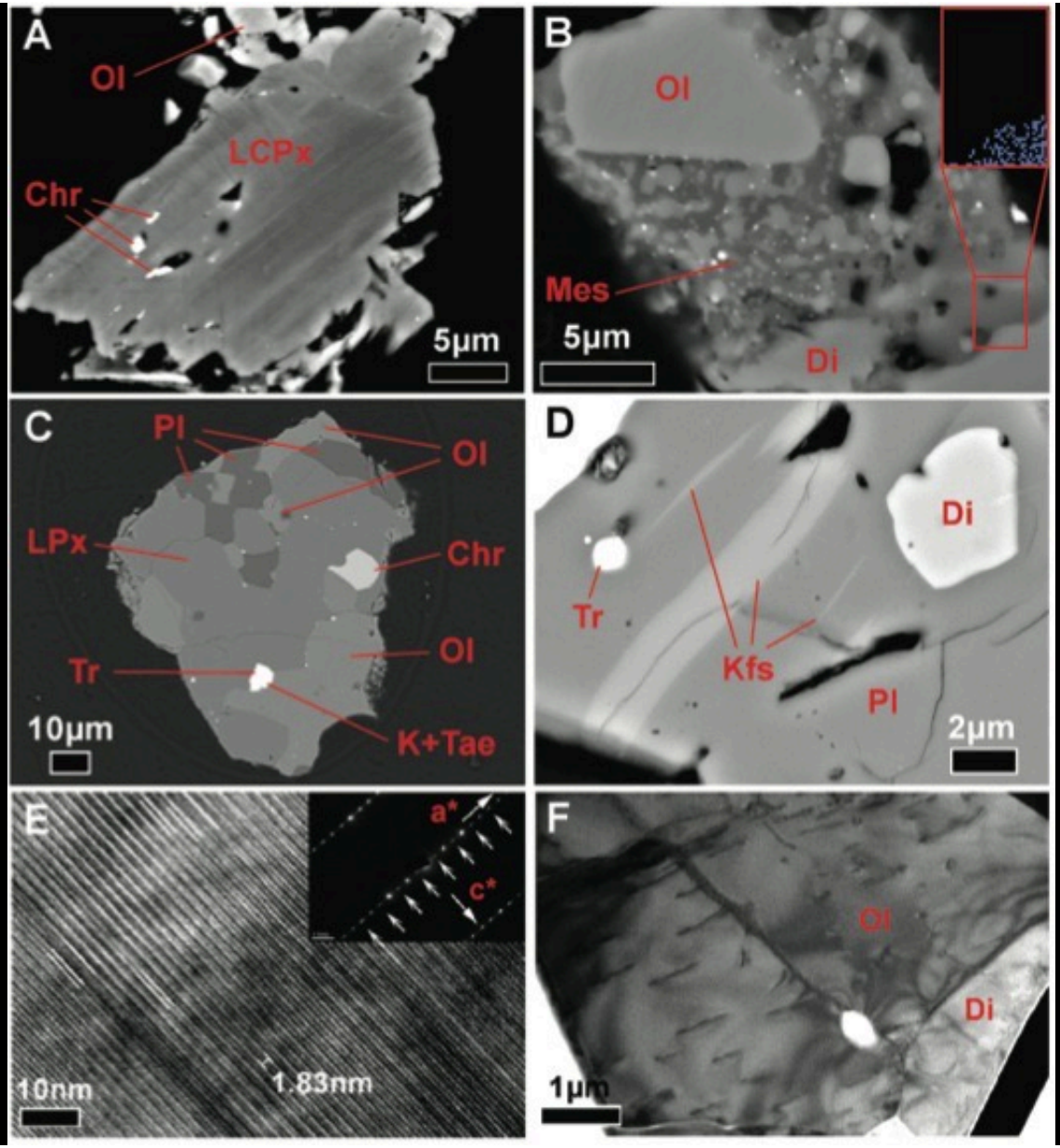
~µg !

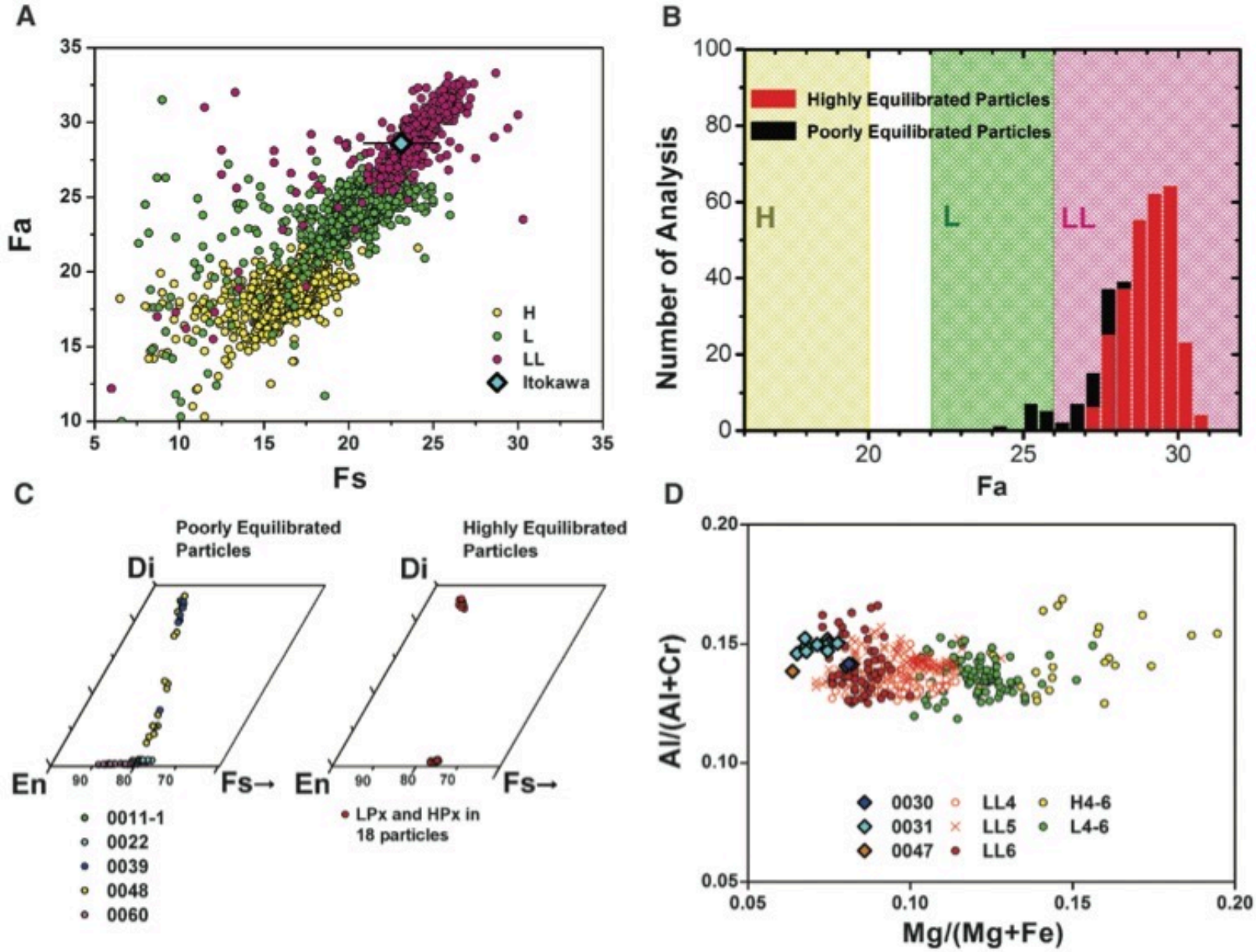




Itokawa ⇔ S class ⇔ LL 4-6


A
Ol
LPx
Chr
50µm
B
Tr
Ol
Pl
50µm
C
Tae
Pl
Ol
Pl
Ol
50µm
D
Ol
Tr
LPx
50µm


A
Ol
LCPx
Chr
5μm
B
Ol
Mes
5μm
Di
C
Pl
Ol
LPx
Chr
Ol
Tr
10μm
K+Tae
D
Di
Tr
Kfs
Pl
2μm
E
a*
c*
10nm
1.83nm
F
Ol
Di
1μm


A
Fa
Fs
H
L
LL
Itokawa
B
Number of Analysis
Fa
Highly Equilibrated Particles
Poorly Equilibrated Particles
H
L
LL
C
Poorly Equilibrated Particles
Highly Equilibrated Particles
Di
En
Fs→
0011-1
0022
0039
0048
0060
LPx and HPx in 18 particles
D
Al/(Al+Cr)
Mg/(Mg+Fe)
0030
0031
0047
LL4
LL5
LL6
H4-6
L4-6

La mission HAYABUSA2 sur Ryugu (2003-2010)



HAYABUSA2

Coût = 120 M€



Budget 2022 Olympique Lyonnais = 250 M€



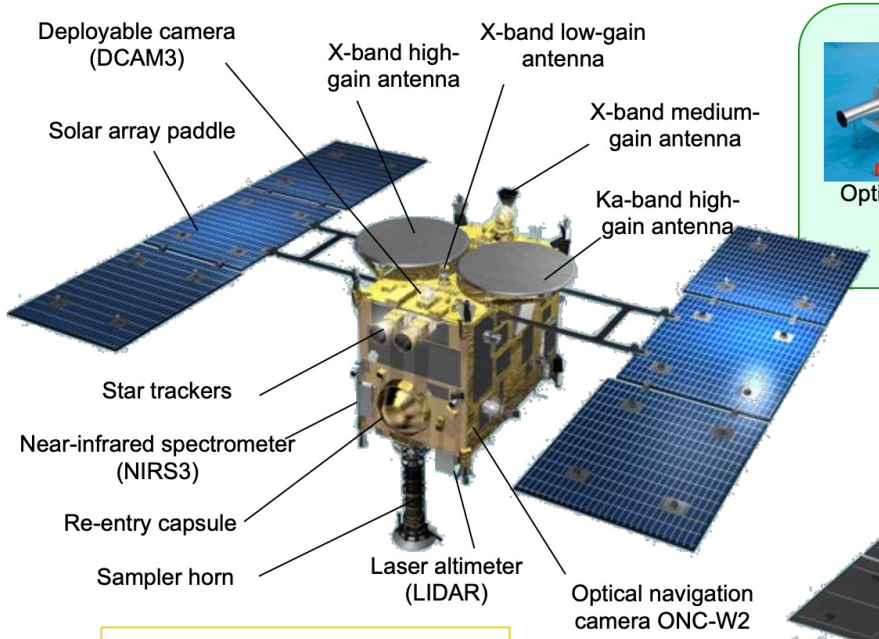
150 G$
=

1000 missions Hayabusa

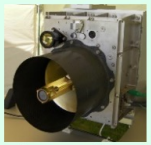


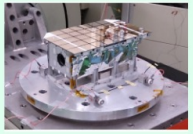
Amadea, yacht d’oligarche Russe = 300 M$

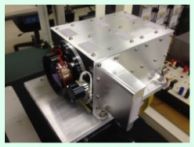
Primary spacecraft components



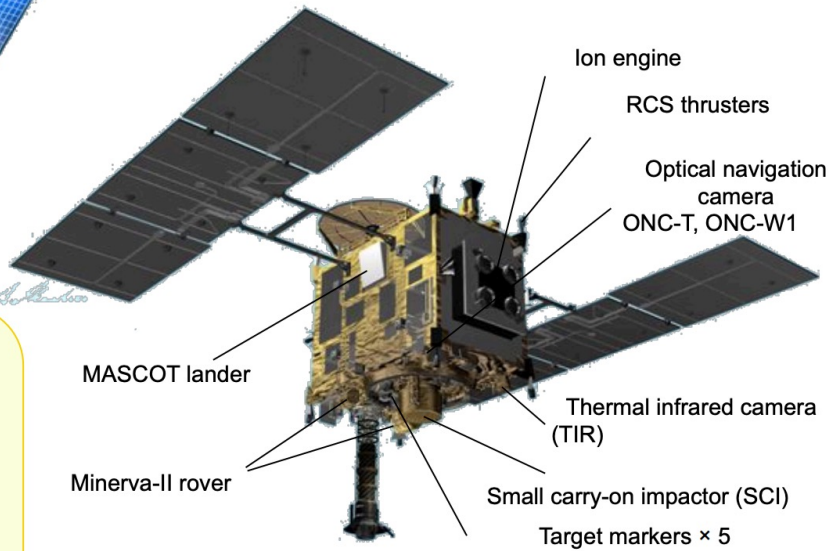

Optical navigation camera ONC-T


Laser altimeter LIDAR


Near-infrared spectrometer NIRS3


Thermal infrared camera TIR

Scientific observation equipment

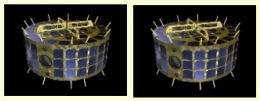


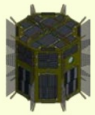
Small lander & rover

MASCOT


Created by DLR and CNES

Minerva 2


II-1A II-1B


II-2

II-1: By the JAXA Minerva-II team

II-2: By Tohoku Univ. & the Minerva-II Consortium

Size: 1 ×1. 6×1. 25 m (main body)
Solar paddle deployed width 6 m
Mass : 609 kg (incl. fuel)

(© JAXA)



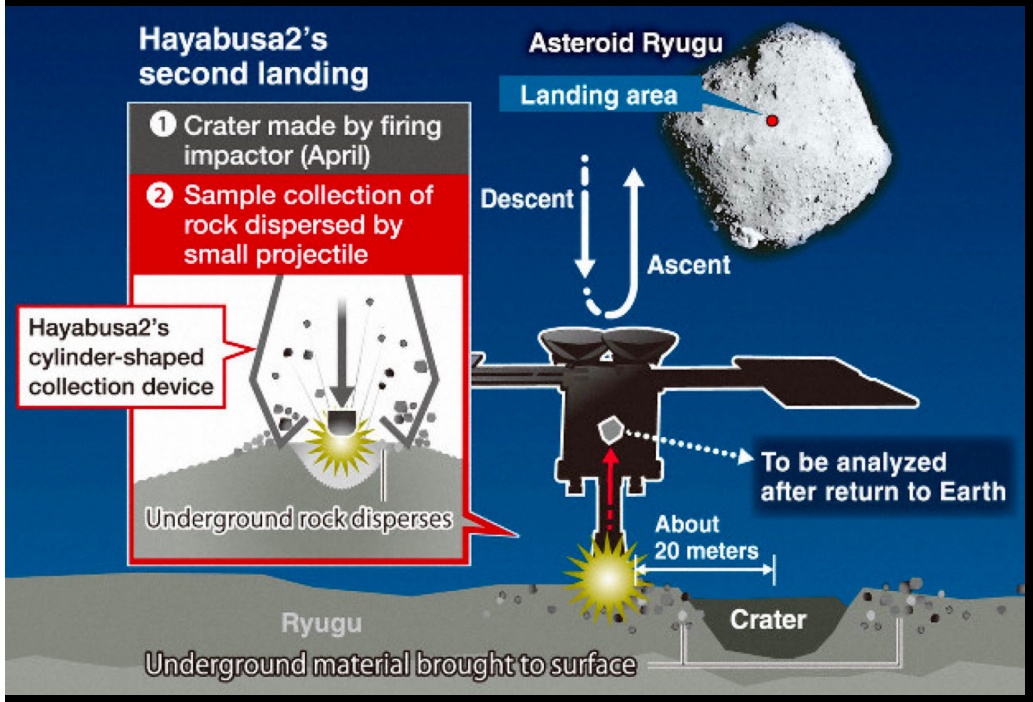
25143 Itokawa
Hayabusa
2005

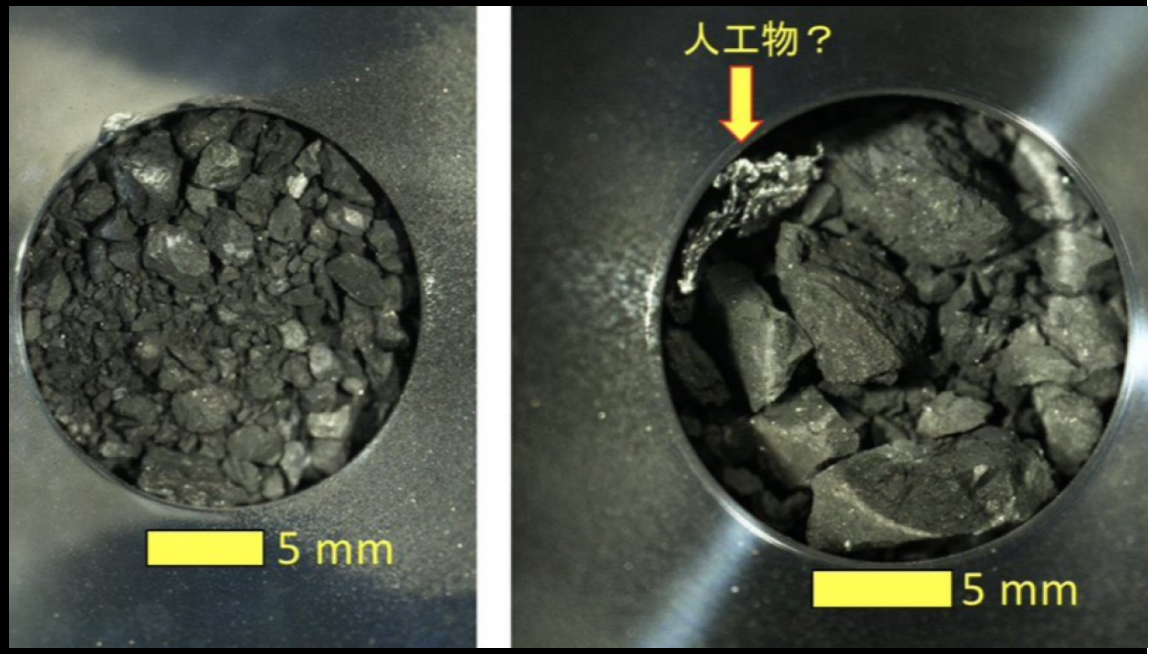


162173 Ryugu
Hayabusa 2
2018

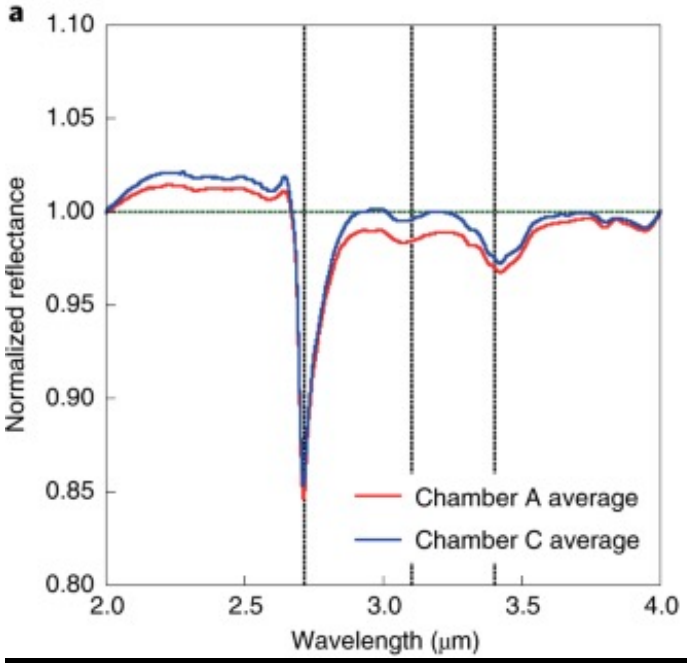
Type C
Famille Apollon
Polar radius 438
Equatorial radius 502
Density 1.2 g/cm3
pV ~ 0.04

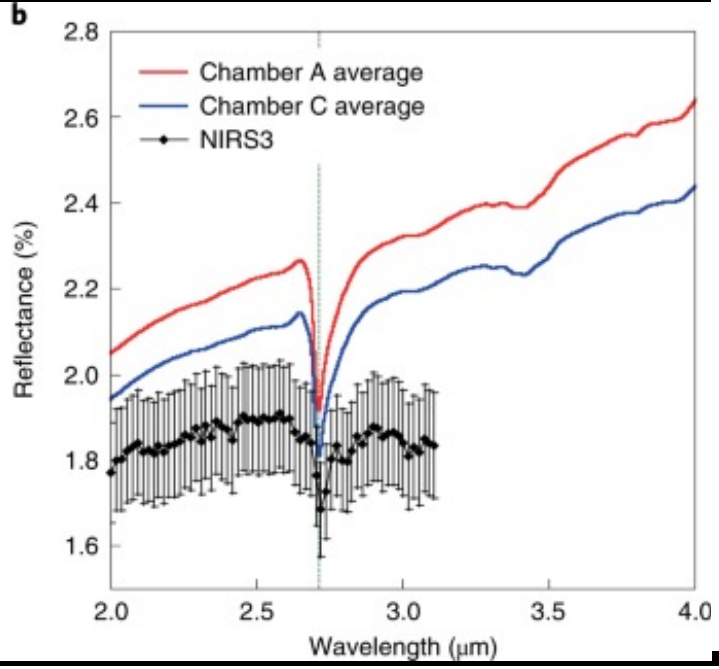
Retour échantillon 5 g

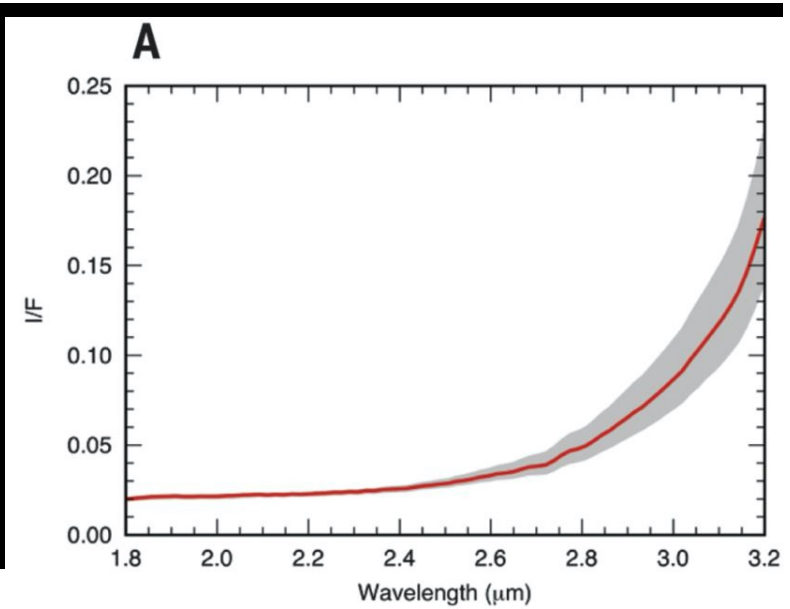


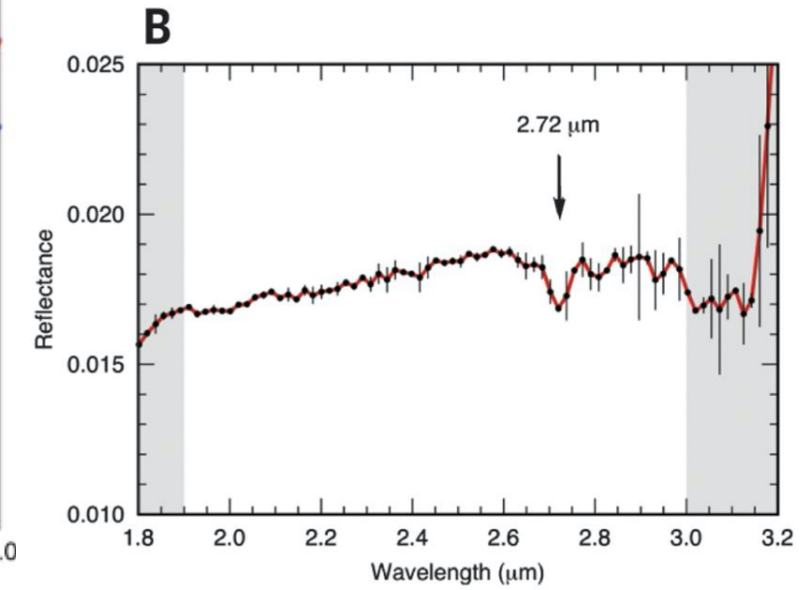


Spectroscopie de la surface de Ryugu





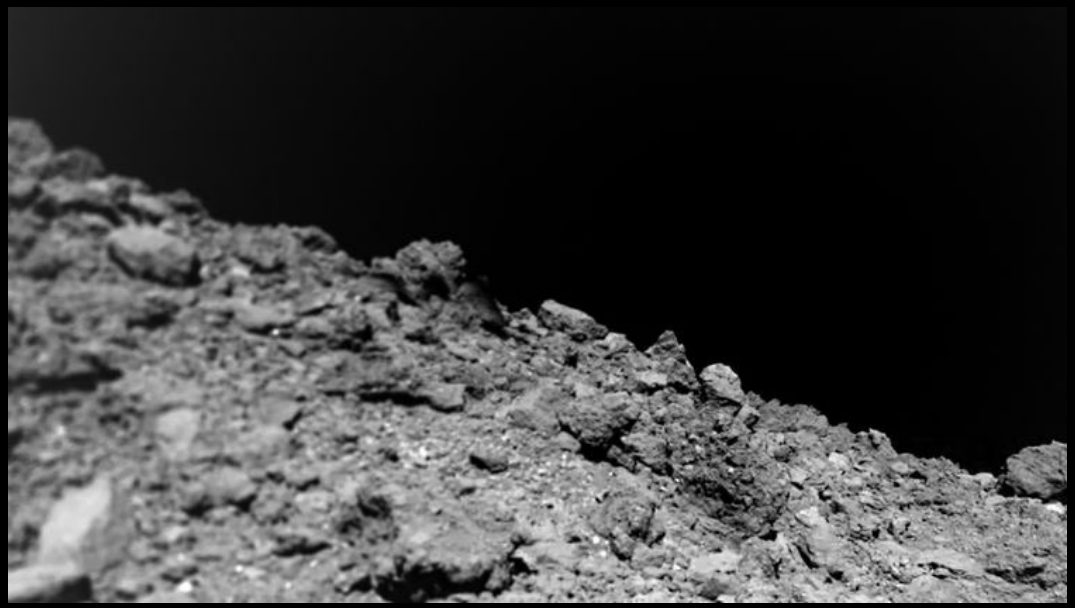




Ryugu = chondrite CI

Very rare chondrites:

Alais (1806 - France)
Orgueil (1864 - France)
Tonk (1911 – India)
Ivuna (1938 – Tanzania)





- Pisani (1864) Etude chimique et analyse de l'aérolithe d'Orgueil
- Berthelot (1868), Sur la matière charbonneuse des météorites. Comptes rendus de l'académie des sciences 67, 849.

3 projets de missions spatiales
HAYABUSA 2 – OSIRIS-REX – MARCOPOLO-R

3 retours d’ échantillon

5 explorés

~10 survolés

~20 de densité connue

~2000 diamètres mesurés

~600000 astéroïdes détectés

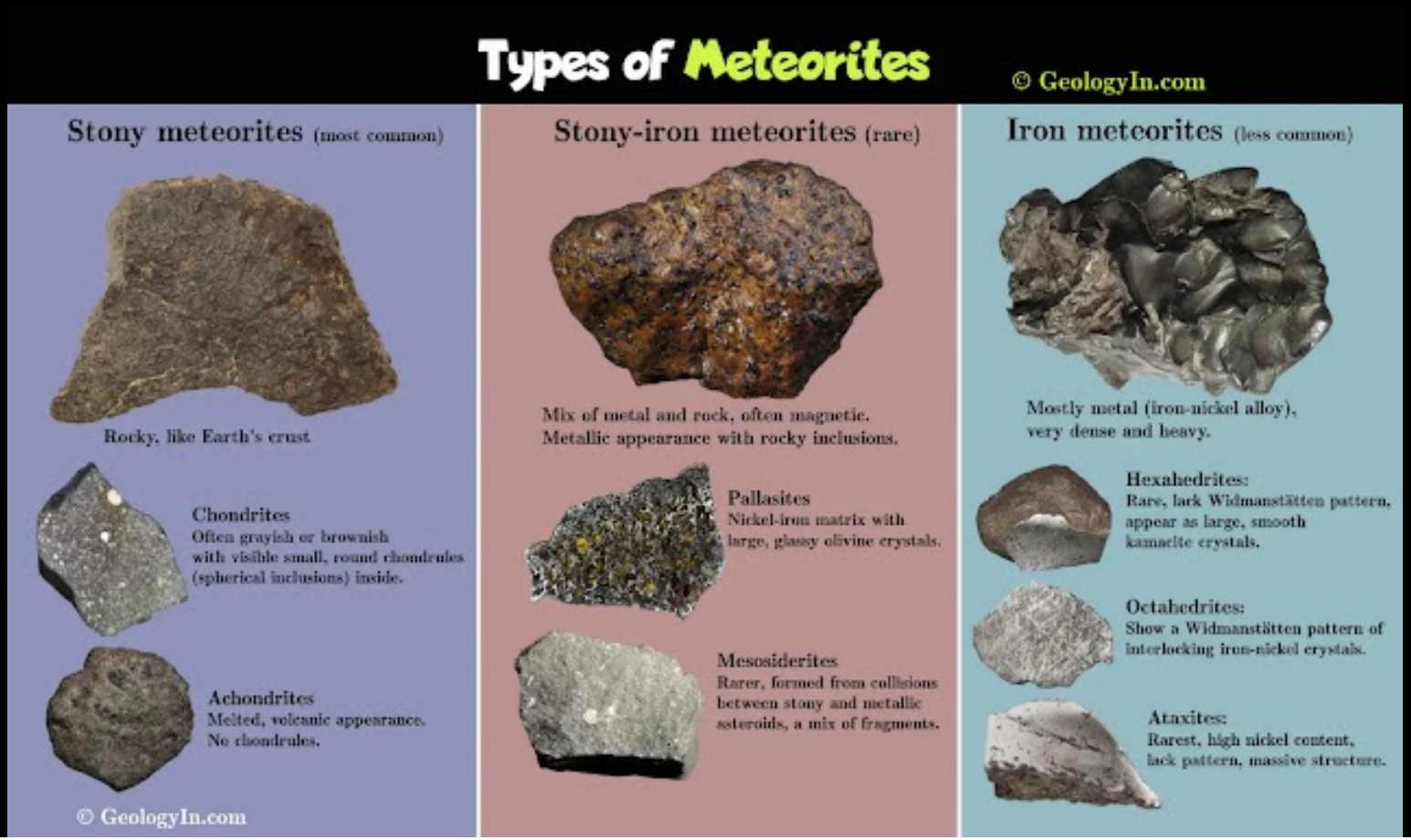
Millions d’astéroïdes estimés

Fin partie 1 - Visage des planètes

Les principales familles de météorites

Les météorites sont classées en différentes familles. On en distingue trois principales avec des sous-familles. On distingue :

- Les météorites rocheuses (stony meteorites), avec deux sous-familles : les **chondrites** et les **achondrites**.
- Les **sidérites** (Irom meteorites), avec plusieurs sous-familles (qu'on ne détaillera pas ici)
- Les météorites métallo-pierreuses (stony-iron meteorites), incluant les **pallasites** et les **mésosidérites**)

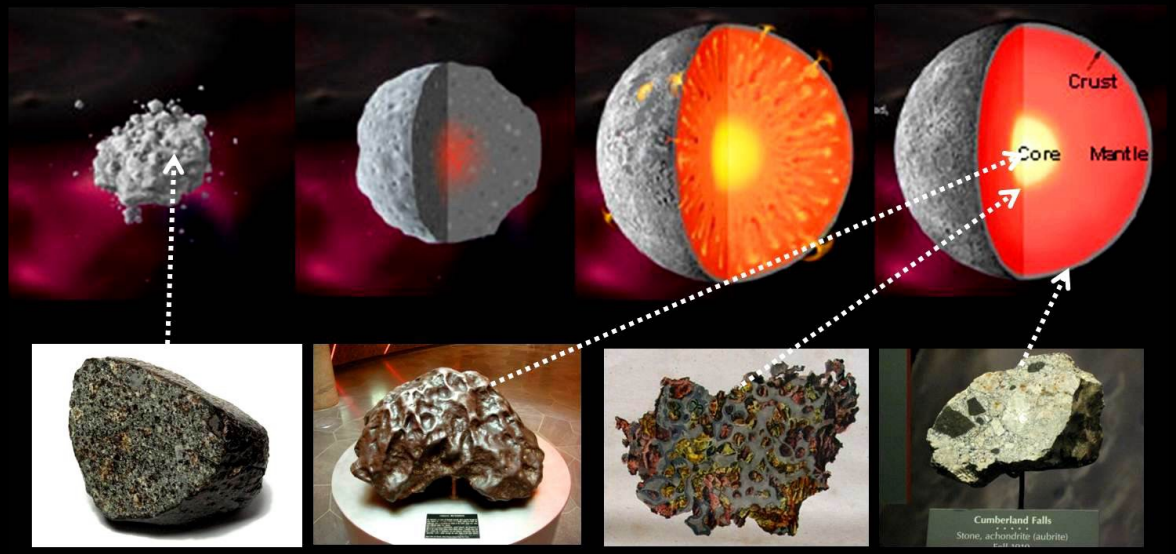


Lien entre les familles et l'histoire interne de l'astéroïde parent

Ces différentes familles s'interprètent au premier ordre par l'histoire thermique de l'astéroïde parent. Plus celui-ci est volumineux, plus il contient une **espèce radiogénique, ^{26}Al**, de courte durée de vie (demi-vie ~700000 ans). Sa désintégration génère de la chaleur qui, au delà d'un certain seuil va conduire à la différenciation de l'objet avec une **structure noyau-manteau**. Un astéroïde non-différencié génère des chondrites, suite à des processus de collisions. Un astéroïde différencié a généré des sidérites, achondrite (manteau ou croûte) ou des pallasites à l'interface noyau-manteau.

Different Asteroid & Meteorite Types

Source: Smithsonian Museum of Natural History http://www.mnh.si.edu/earth/text/5_1_4_0.html



Chondritic Stony Meteorite

Iron Meteorite

Pallasite Meteorite

Achondritic Stony Meteorite

License: Wikimedia Creative Commons

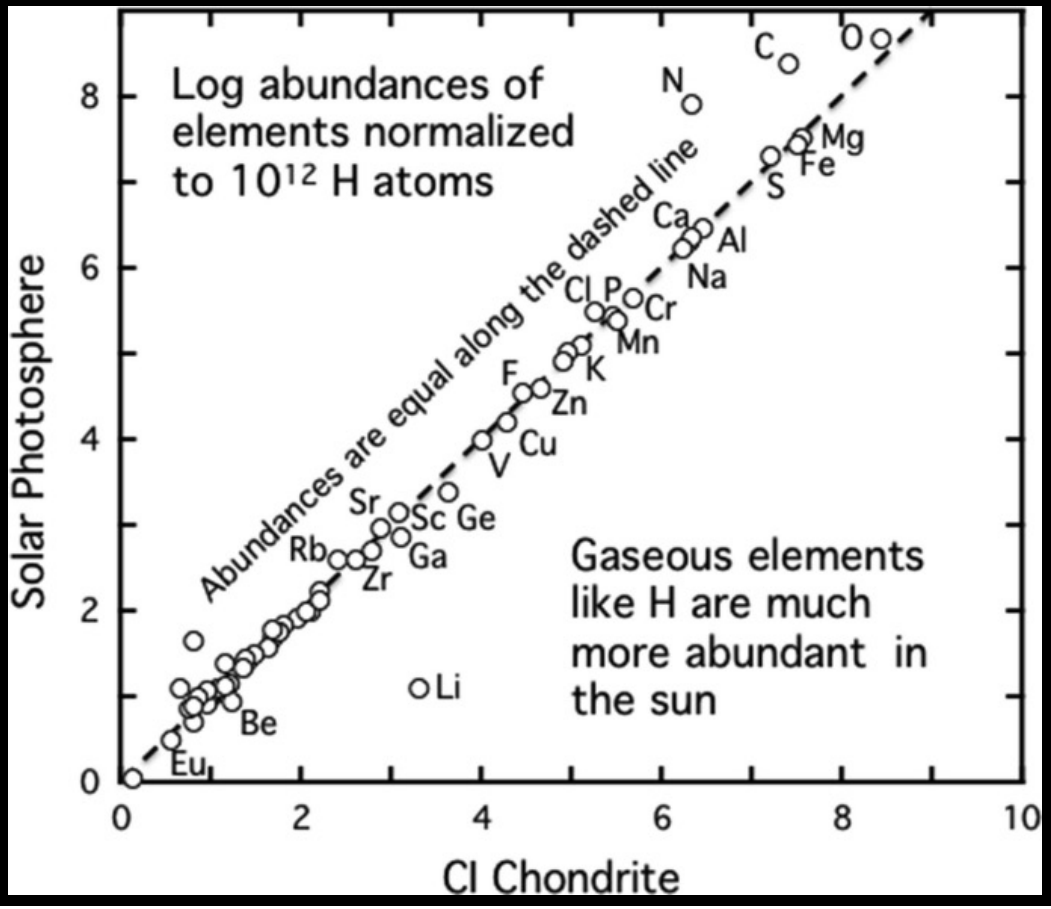
Asteroid Type C

Asteroid Type M

Asteroid Type S

Composition des chondrites

Les chondrites sont des météorites non différenciées et leur composition reflète la composition moyenne locale du disque protosolaire où elles se sont formées. Si on trace la composition des éléments chimiques dans la photosphère du soleil (sa partie la plus superficielle) en fonction de celle de ces éléments dans une chondrite, on observe une excellente corrélation linéaire (à l'exception d'éléments légers comme H, He, Li, C et N. Les chondrites les plus primitives selon ce critère son celles de la sous-famille CI, dont un spécimen emblématique est la chondrite Orgueil, tombée en France près de Montauban en 1864.

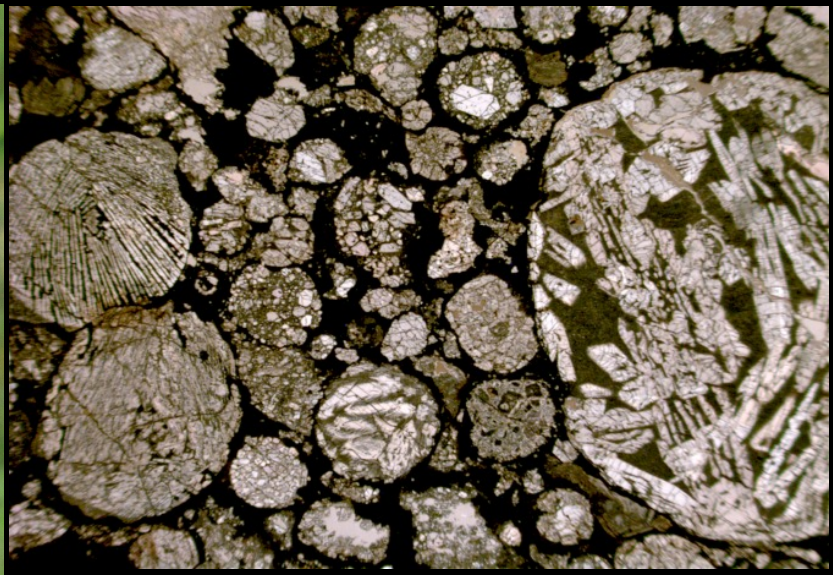


Composition des chondrites

Les chondrites sont des roches détritiques composées de différentes phases qui étaient présentes dans le disque proto-solaire :

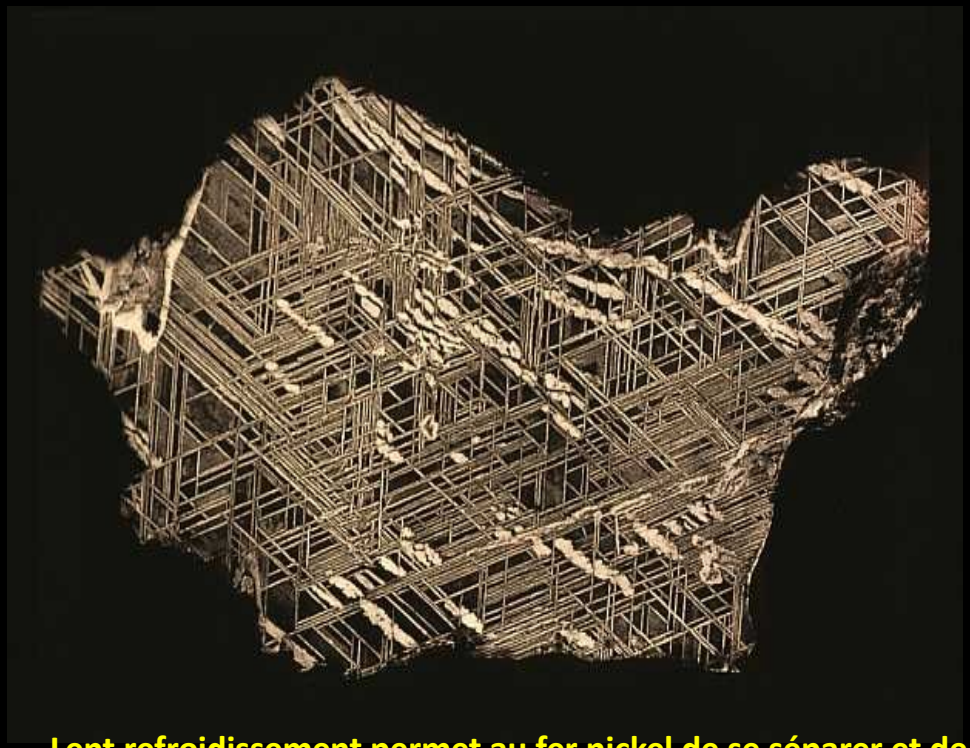
- Les chondrites : il s'agit d'inclusions sphéroïdales, formée par le refroidissement de goutelettes silicatées
- Différents sulfures et oxydes métalliques
- Des inclusions réfractaires (CAIs) riches en Ca et Al. Celles-ci sont présentes uniquement dans certains types de chondrites et contiennent les premiers minéraux formés dans le disque. Ils définissent l'âge modèle du système solaire 4.567 Ga
- La matrice, un milieu finement divisé qui contient des grains minéraux submicrométriques et dans certains cas de la matière organique abiotique, c'est à dire qui n'est pas dérivée du vivant.



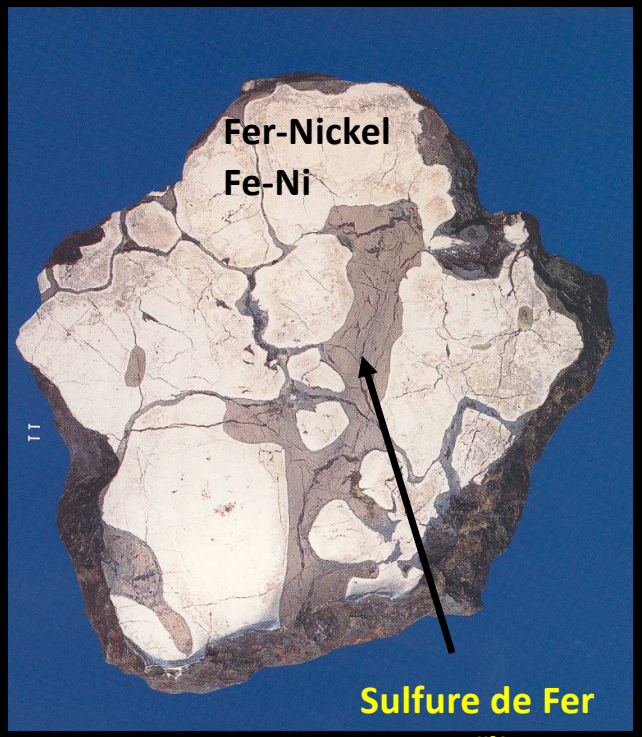


Composition des sidérites

Les sidérites sont des fragments de noyaux d'astéroïdes. Elles sont composés d'alliages Fe-Ni, la **taénite** et la **kamacite**. La kamacite est une phase à basse teneur en Ni (<7-10%), la taénite au delà jusqu'à ~50%. Une sidérite montre une intrication de rubans de ces deux alliages, formant une texture dite de Widmanstäten. Ce texture est formée lors du refroidissement du noyau, initialement totalement liquide. En effet, la solubilité du Ni dépend de la température. La kamacite est une phase cubique centrée (I) et la taénite est cubique faces centrées (F). Vous êtes invités à vous reporter au **cours CHI101/102** pour approfondir ces notions et la structure des métaux. **Pour les étudiants en STE**, il s'agit d'une **démixiton**, que l'on observe par ailleurs dans les feldspaths alcalins (perthites).



Lent refroidissement permet au fer nickel de se séparer et de former des figures de Widmanstäten



Composition des lithosidérites

Parmi les litho-sidérites figurent les pallasites, qui constituent un échantillonnage de l'interface noyau-manteau. Elles sont composées de métal et cristaux d'olivine. Les mésosidérites ont un origine plus complexe, liées à un processus de collision avec le matériau de surface de l'astéroïde.

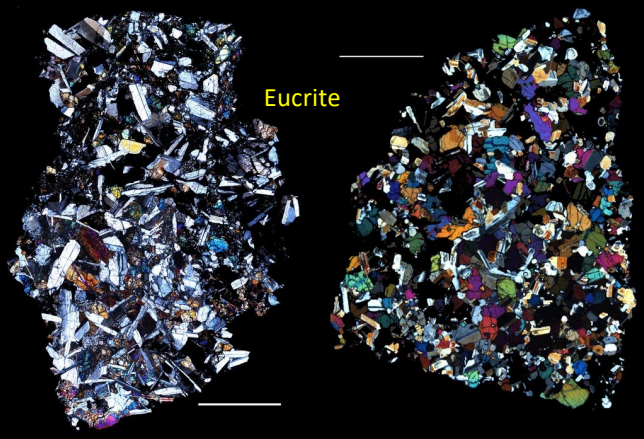


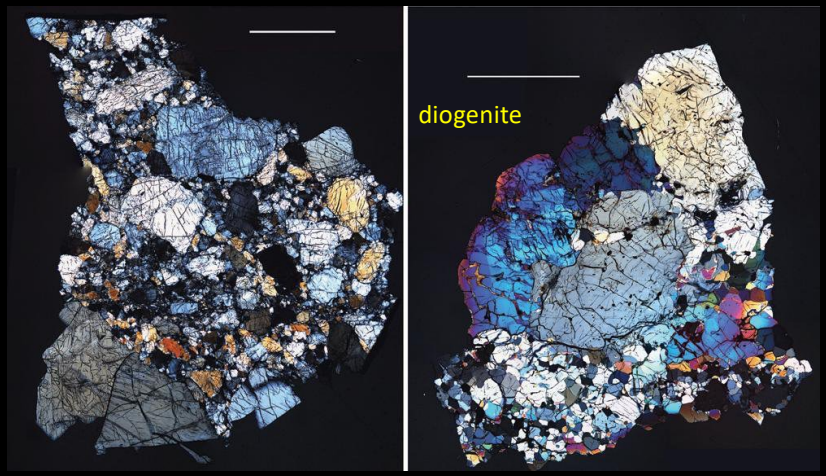
Pallasite

Composition des achondrites

Les achondrites sont des météorites qui sont issues de la croûte ou du manteau. Il est proposé dans la littérature que le corps parent est l'astéroïde Vesta. On distingue 3 sous-familles :

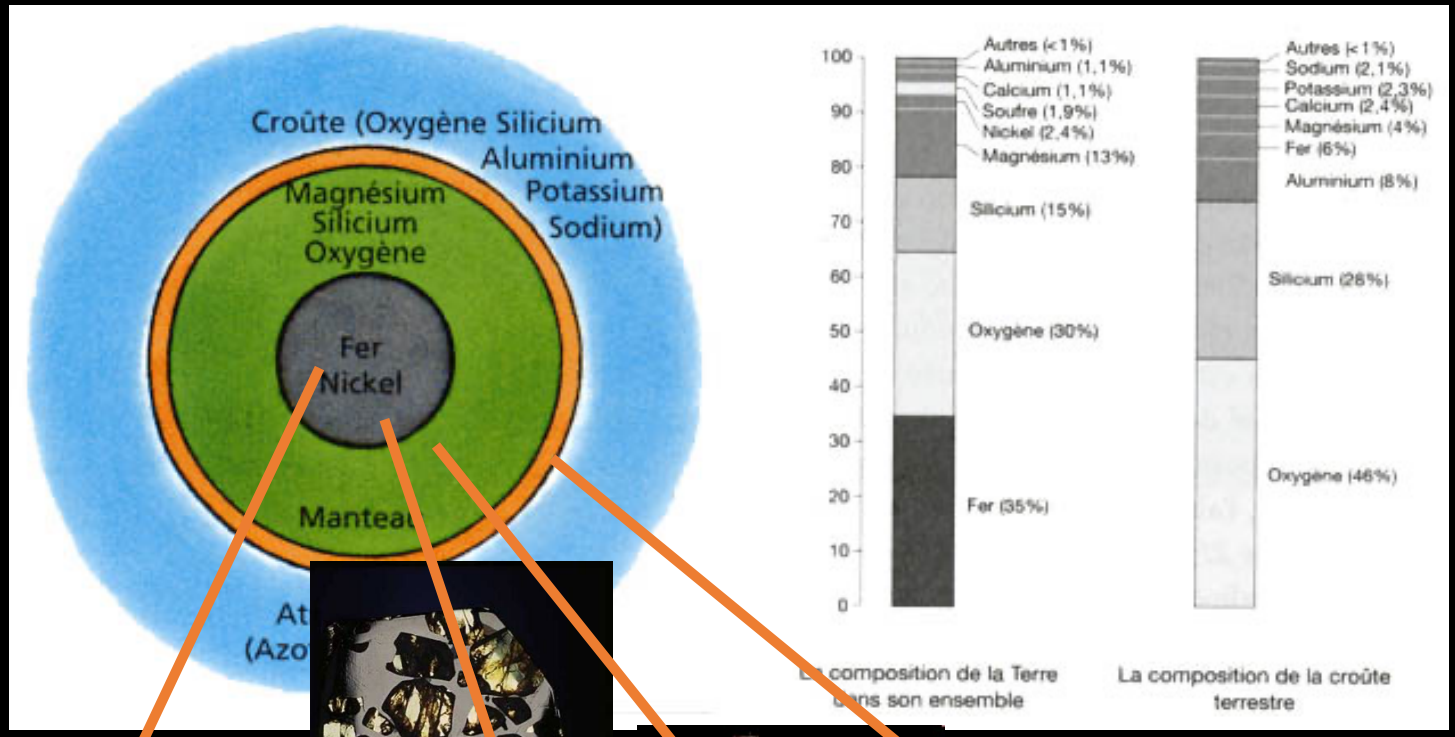
- Les Eucrites : il s'agit de basaltes compséses de pyroxène et de plagioclases, présentant de fortes similitudes avec les basaltes terrestres. Un basalte est une roche issu d'un refroidissement rapide d'une lave basique. Les basaltes recouvrent le plancher océanique.
- Les Diogénites : elles sont composées de minéraux similaires mais avec des tailles très supérieures, évoquant un refroidissement plus lent en profondeur.
- Les Howardites : elles constituent un mélange des deux précédentes (ce que l'on appelle une brèche).

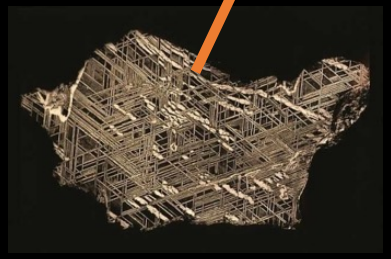






Les météorites éclairent la composition internes des planètes telluriques





Metalliques
(Sidérite) alliage fer-Nickel



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



Achondrite
(Aubrites)
Pyroxène -olivine

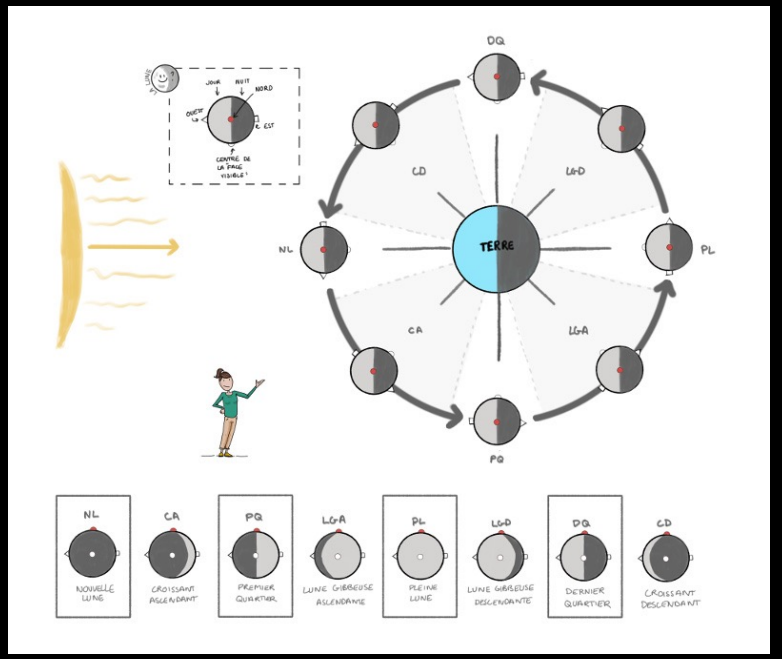


Achondrite
(Eucrites) : Pyroxènes + Feldspaths

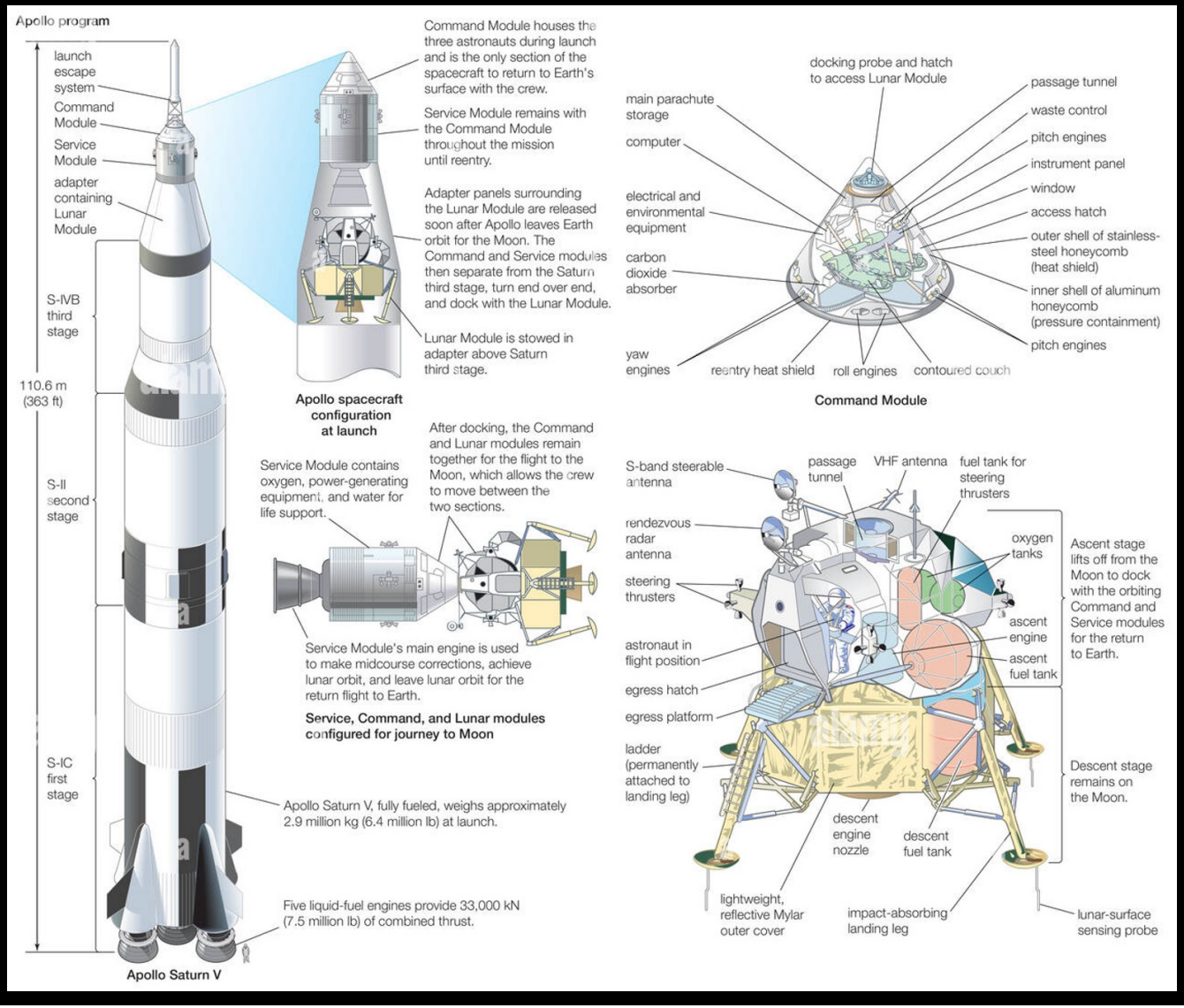
La Lune

La Lune est le seul satellite de la Terre. Son orbite presque circulaire et inclinée de XX° par rapport au plan de l'écliptique. La distance Terre Lune est de 380000 km. L'objet est synchrone, c'est à dire que la période rotation autour de la Terre est égale à la période de rotation autour d'elle-même. Elle présente donc toujours la même face. La Lune est objet géologiquement éteint depuis près de 3.5 Ga, aussi sa surface très cratérisée fournit des informations importantes sur la fréquence des impacts au début de la formation du système solaire. Sa surface présente une dichotomie entre terrains clairs (les continents) et terrains sombres (les mers), ces termes ayant été donnés par Galilée.



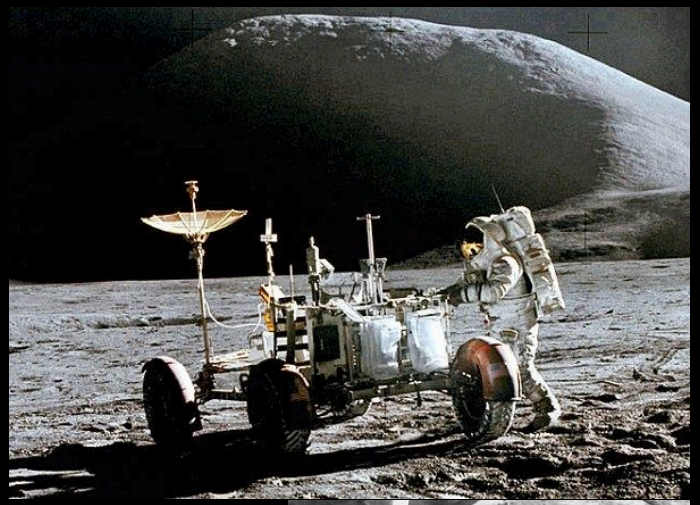


La Lune : le programme Apollo (1961-1972)



La Lune : le programme Apollo (1961-1972)

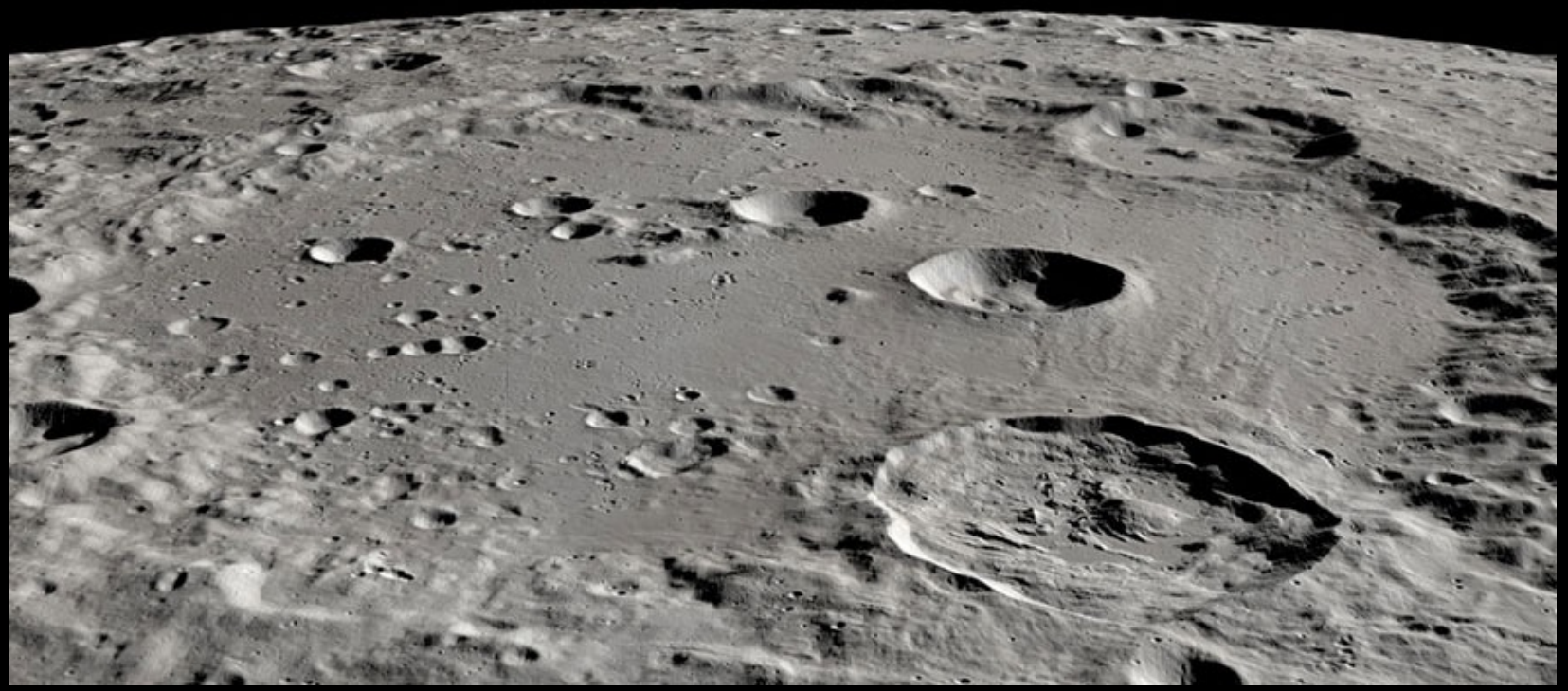








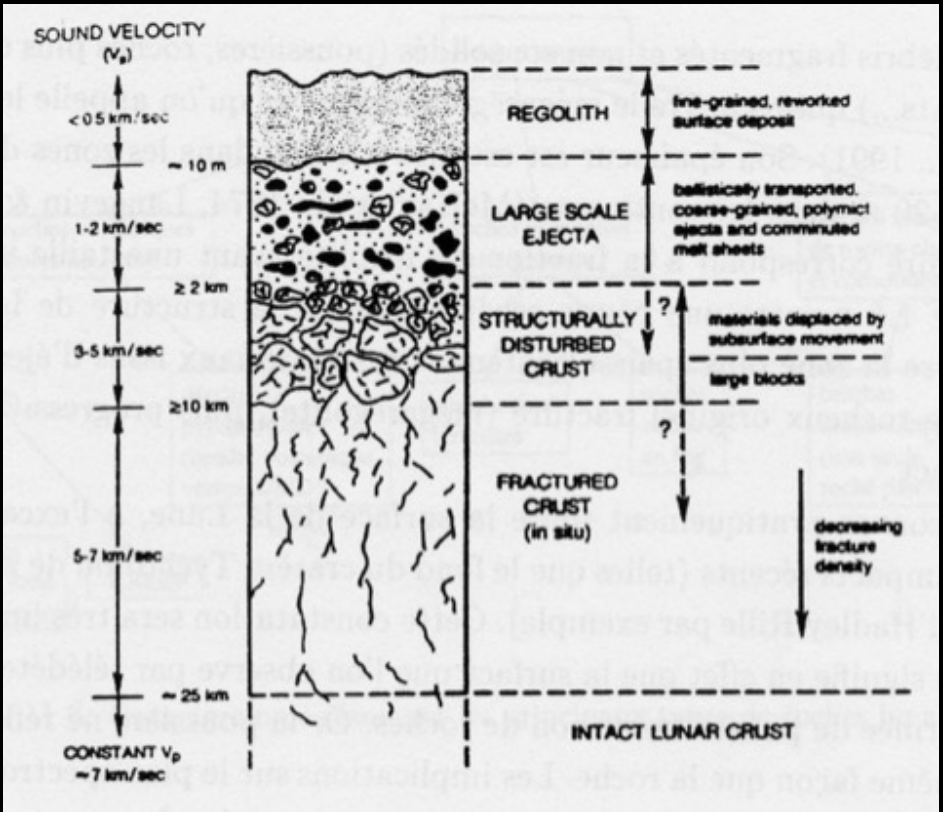


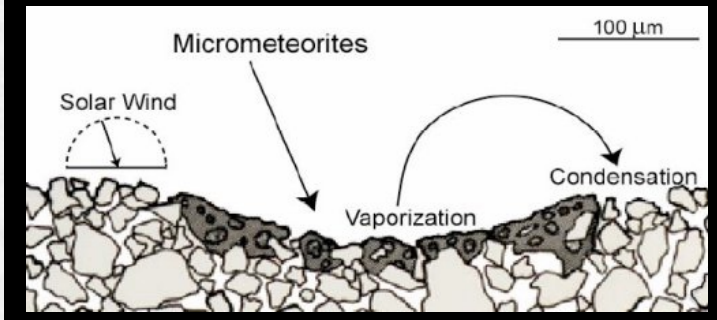




La Lune : surface et subsurface

Les missions Apollo ont permis de caractériser la surface et la subsurface de la Lune, grâce à des sondages acoustiques et des prélèvements d'échantillons. Des mesures de flux thermiques ont également été effectuées, ainsi que des relevés sismologiques. L'histoire collisionnelle de la lune, attestée par sa cratérisation, est perfectible jusqu'à une profondeur de 25 km. A partir de 10 km en se rapprochant de la surface, des fragments volumineux sont présents jusqu'à 2 km et sont des morceaux des produits de fragmentation. Au delà de 2 km, la subsurface contient de nombreux éjecta formés lors des impacts. Enfin, sur une épaisseur de l'ordre de 10 m, la surface est composé d'un milieu à grains fins : le régolithe. Il est essentiellement formé par les impacts d'origine micrométéoritique.





La Lune : Un retour de 387 kg d'échantillons

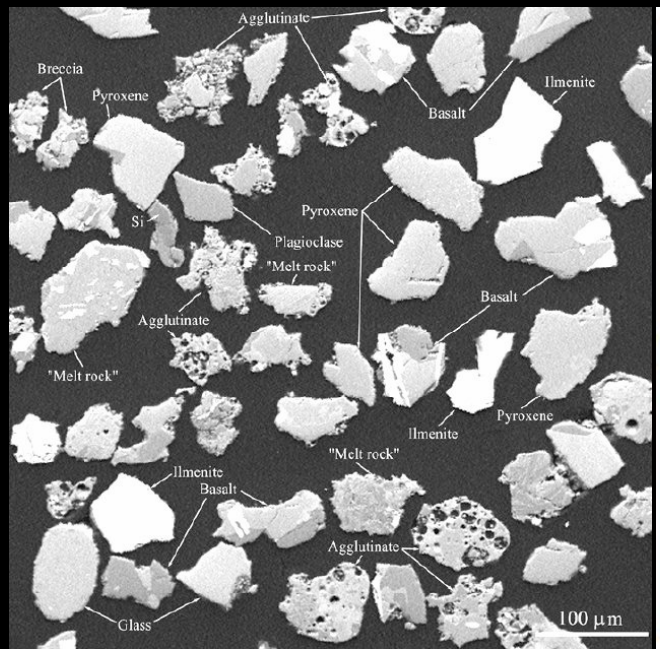
Un apport fondamental des missions Apollo est le retour de 387 kg d'échantillon. La surface lunaire présente des roches et un sol composé d'un milieu finement divisé. La taille moyenne des grains est 60-80 µm. Ce sol est issu de la décomposition des roches de surface. Sur terre, les sols sont aussi issus du socle rocheux, mais sous l'effet de l'érosion aqueuse et éolienne, et le biotope joue un rôle fondamental dans la nature d'un sol. La formation du sol lunaire est essentiellement contrôlée par des processus exogènes : 1) les impacts par les astéroïdes et les micrométéorites, qui fragmentent la roche, et aussi la transforme par fusion et changement de phase; 2) les effets des ions issus du vent solaire.

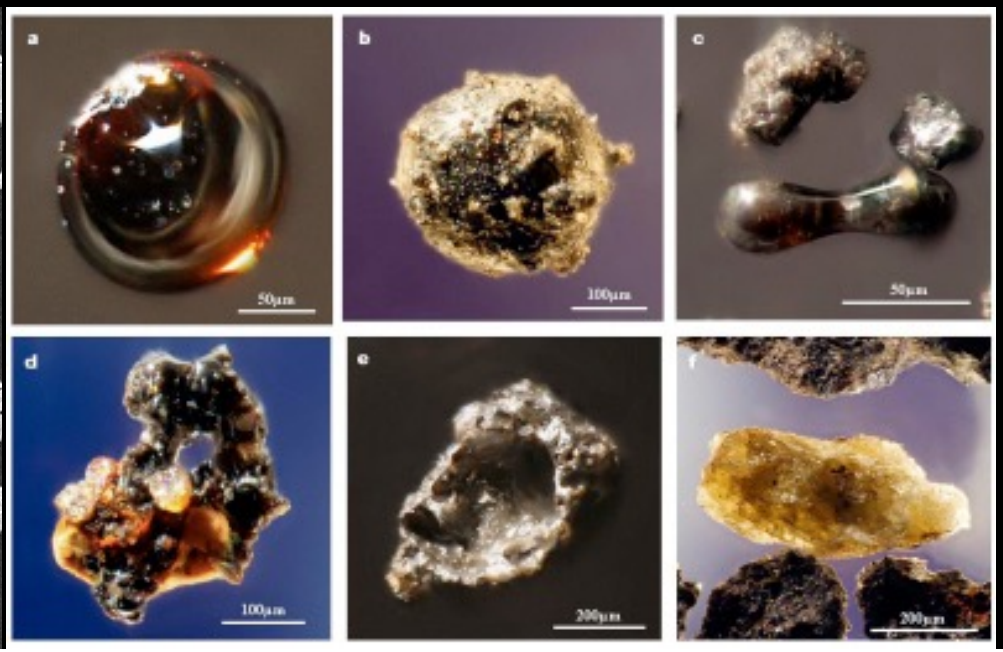




La Lune : sol et roche

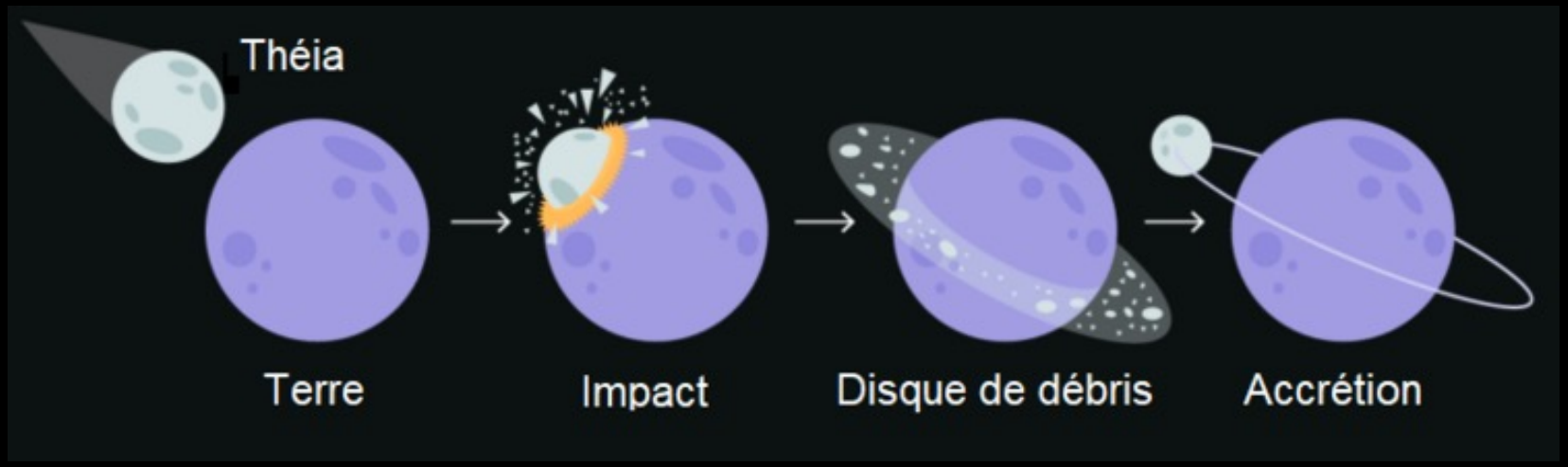
L'analyse du régolithe montre différents types de grains : clastique (issus directement des minéraux de la roche mère), sphérules cosmiques, agluttinats, matériau fondu et trempés. 2% environ sont des matériaux d'origine météoritique. La Lune apparaît comme un laboratoire précieux pour comprendre l'évolution des surfaces d'objets dépourvus d'atmosphère, qui sont exposées en permanence au milieu interplanétaires. Sur Terre, les ions du vent solaire sont déviés par le champ magnétique (sauf au niveau des pôles) et les micrométéorites sont consumées dans l'atmosphère.





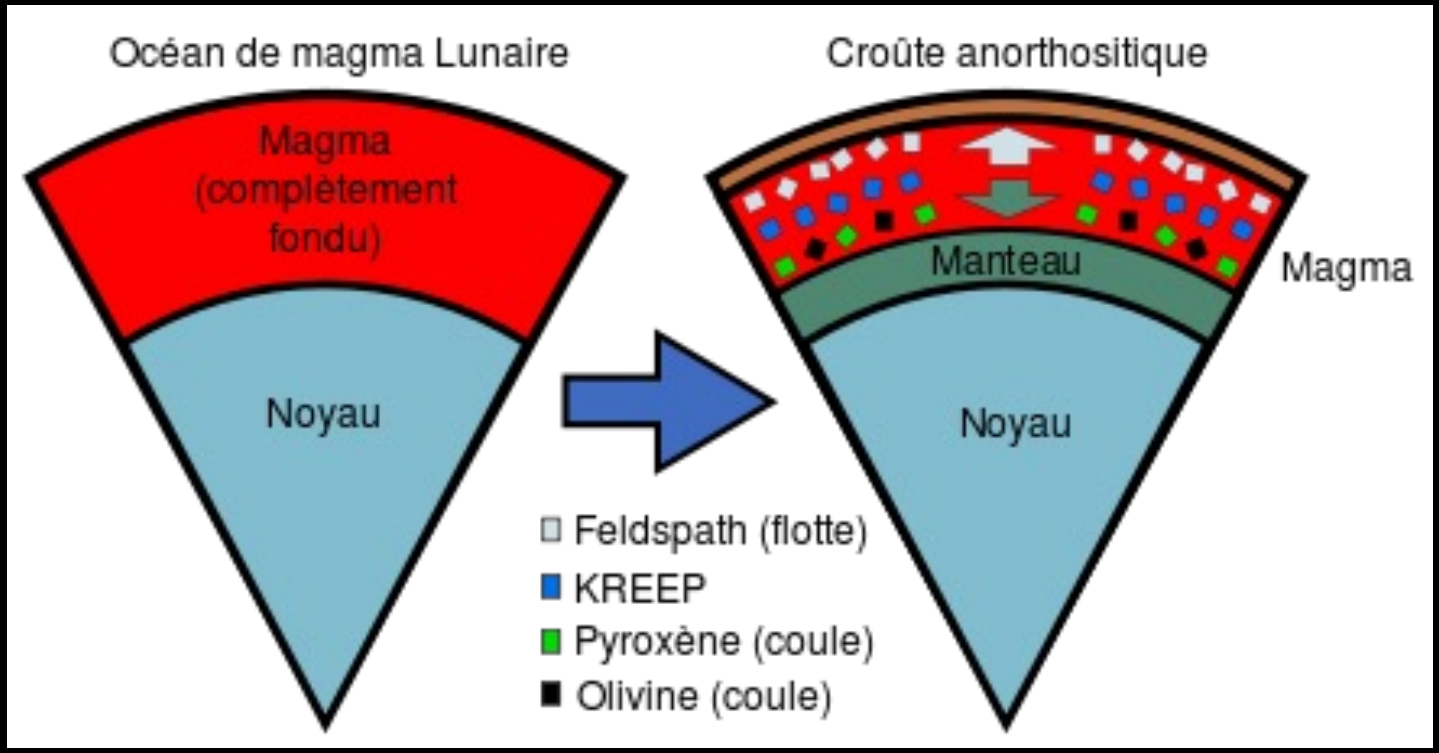
La Lune : formation

La Lune est née d'un impact géant avec la Terre. Le planétésimal; Théia, a été absorbé par la Terre plus massive et a créé un disque de débris. Ces débris se sont progressivement coagulés pour former la Lune. Suite à cet impact, on estime que environ 30 % de la Terre a été réchauffée à près de 7000 °C et une grande partie a été fondue, créant un océan magmatique. L'impact a aussi généré l'angle de 23° du plan de l'orbite lunaire par rapport à l'écliptique. La Lune a pu être datée à partir de basaltes aires et des anorthosites de la croûte continentale. L'âge de cristallisation des minéraux des basaltes est de 4.33 Ma, et 4.44 Ma pour les anorthosites. La Lune est donc logiquement un peu plus jeune que la Terre, mais pas beaucoup plus.



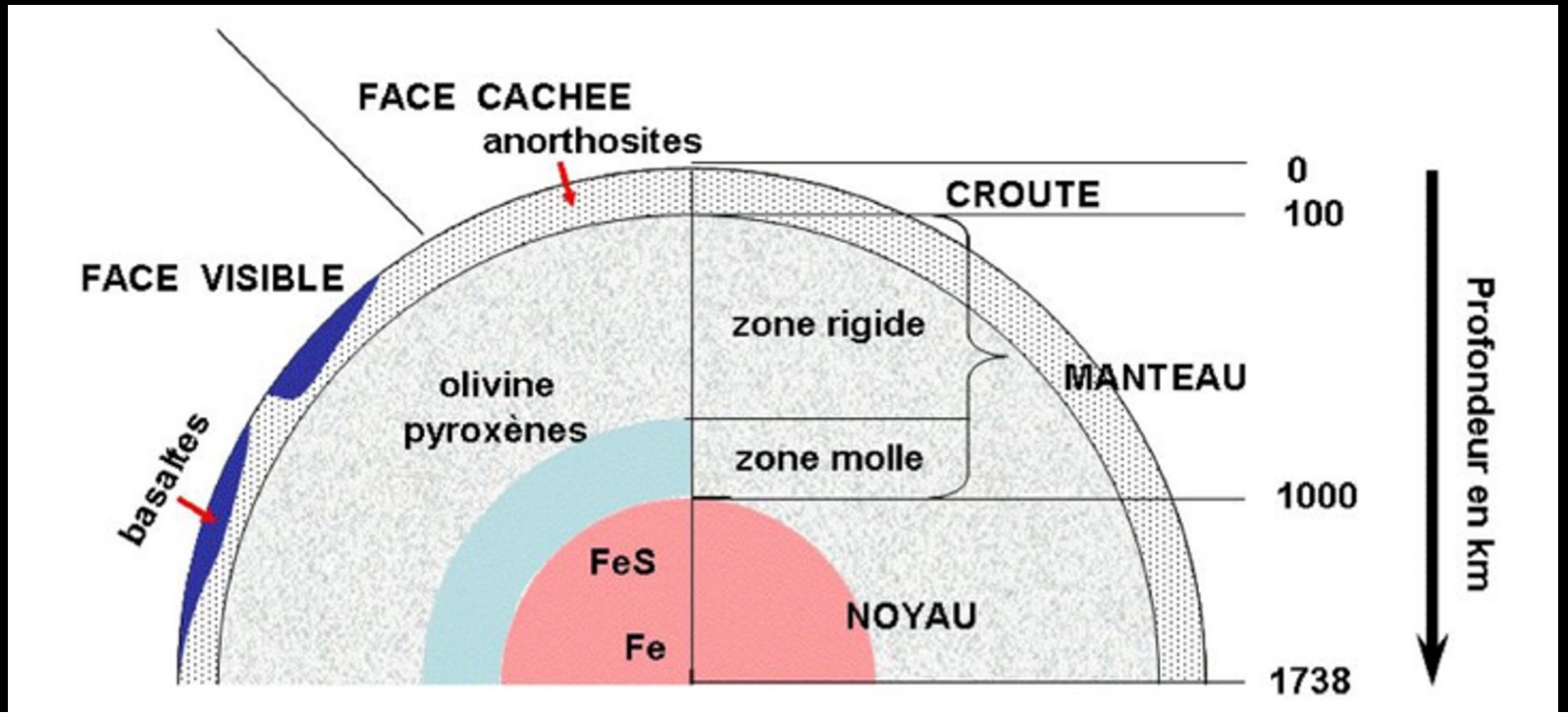
La Lune : différentiation et structure interne

La mise en place de la structure interne de la Lune s'estfaite en plusieurs étapes. Après la formation du noyau, le refroidissement de l'océan magmatique a formé des minéraux de densités variées : olivine > pyroxène > KREEP > feldspaths (KREEPS = minéraux enrichis en K, terres rares et phosphores). Les plus denses ont sédimenté pour former des cumulats, tandis que les felspaths ont flotté et formé la croûte lunaire anorthositique. L'anorthosite est une roche composée pour 90 % de plagioclases, et < 10 % de pyroxène et ilménite. Les plagioclases étant des minéraux clairs, cette croûte est claire.



La Lune : différentiation et structure interne

La structure actuelle de la lune est celle d'une planète différenciée. Elle possède un noyau, dont la partie centrale est vraisemblablement liquide. La partie inférieure du manteau est partiellement fondue. L'épaisseur de la cro^te varie entre 35 et 45 km. L'épaisseur des épanchements basaltiques dans les bassins d'impact est en moyenne de 1-2 km, atteignant des valeurs de l'ordre de 10 km pour les bassins les plus profonds.

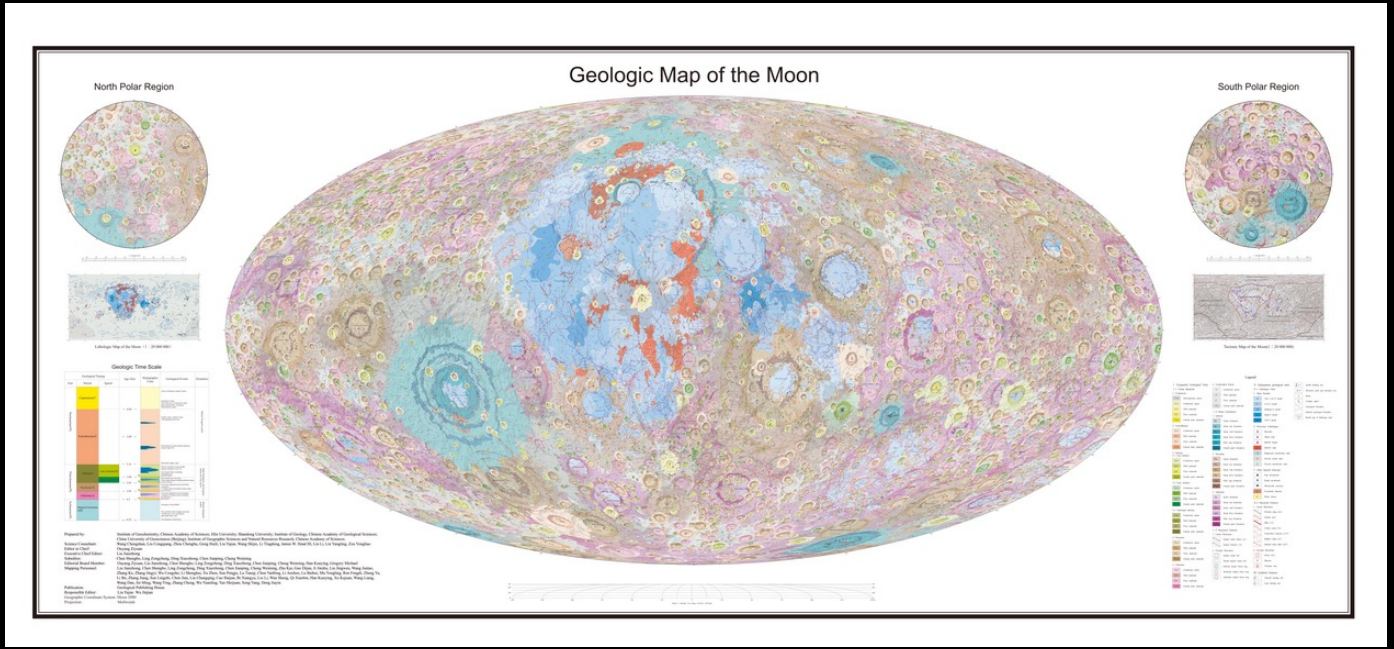


La Lune : géologie

Cette carte géologique de la Lune montre l'extrême complexité. La comprendre dans le détail est du ressort des géologues lunaires. Mais ici on peut en extraire quelques informations simples et éclairantes. La morphologie et la géologie de la lune sont marquées par plusieurs étapes :

- Les impacts liés à un **bombardement intense entre – 4.3 et 3.8 Ga**, notamment le Grand Bombardement Tardif. C'est à cette époque que se sont formés les grands bassins d'impact comme Imbrium, Serenitatis. La surface devient également très crâtérisée.
- Formation des mers basaltiques par **épanchements volcaniques (entre 3.9 et -1.2 Ga, très marqué entre 3.8 et 3.0 puis déclin**).
- Un **vocanisme résiduel, local et tardif entre 1 Ga et ~100 Ma**. Des basaltes jeunes ont été daté à 200 Ma (Chang'e-5, 2020)
- De ~100 Ma à aujourd'hui : l'évolution est dominée par les impacts météoritiques et concerne essentiellement la production de régolithe.

La carte ci-dessous distingue des processus **exogènes** (impacts essentiellement) et **endogènes** (volcanisme). Le code de couleur bleu traduit à la fois de la présence de bassins et de roches basaltiques. Le reste est dominée par la croûte anorthositique et une morphologie dominée par les impacts (cratérisation, éjecta, etc…).



La Lune : cratérisation et datation

Ce graphique représente l'un des apports les plus fertiles des missions Apollo (et plus récemment de la mission Change E-5). Il trace la densité de cratères (corrigée de processus de saturation) en fonction de l'âge de roches représentatives des zones géographiques à partir desquelles les comptages ont été effectués. Entre -4.1 et -3.8 Ga, on observe une densité de cratère très élevée, liée au Grand Bombardement Tardif. Le taux de collision diminue ensuite de façon marquée jusqu'à -3 Ga , puis linéairement jusqu'à aujourdhui. Ce graphique est à la base de toutes les méthodes de datation de surface des corps planétaires. Il n'aurait pas été possible de l'établir sans le retour d'échantillons des missions Apollo et la datation en laboratoire des roches.

