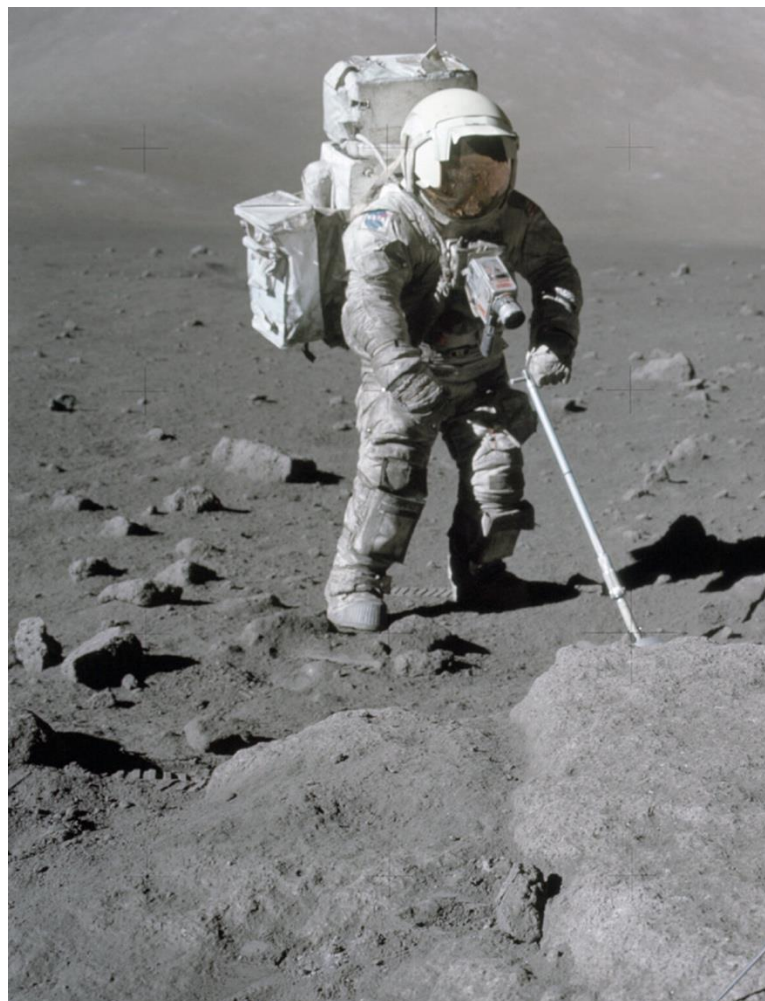


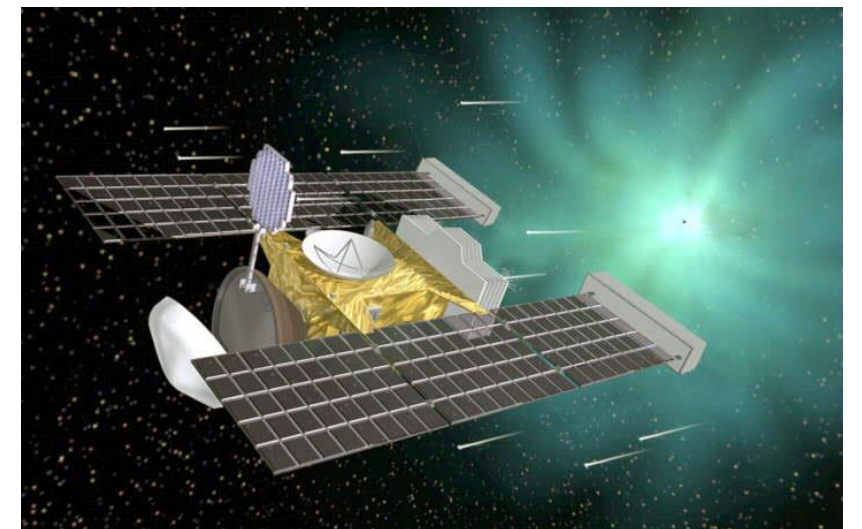
Analyse des échantillons extraterrestres des missions spatiales

Bernard Marty

Professeur émérite, Université de Lorraine
Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CNRS et Université de Lorraine)



Source : NASA & JAXA



Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Vandoeuvre lès Nancy



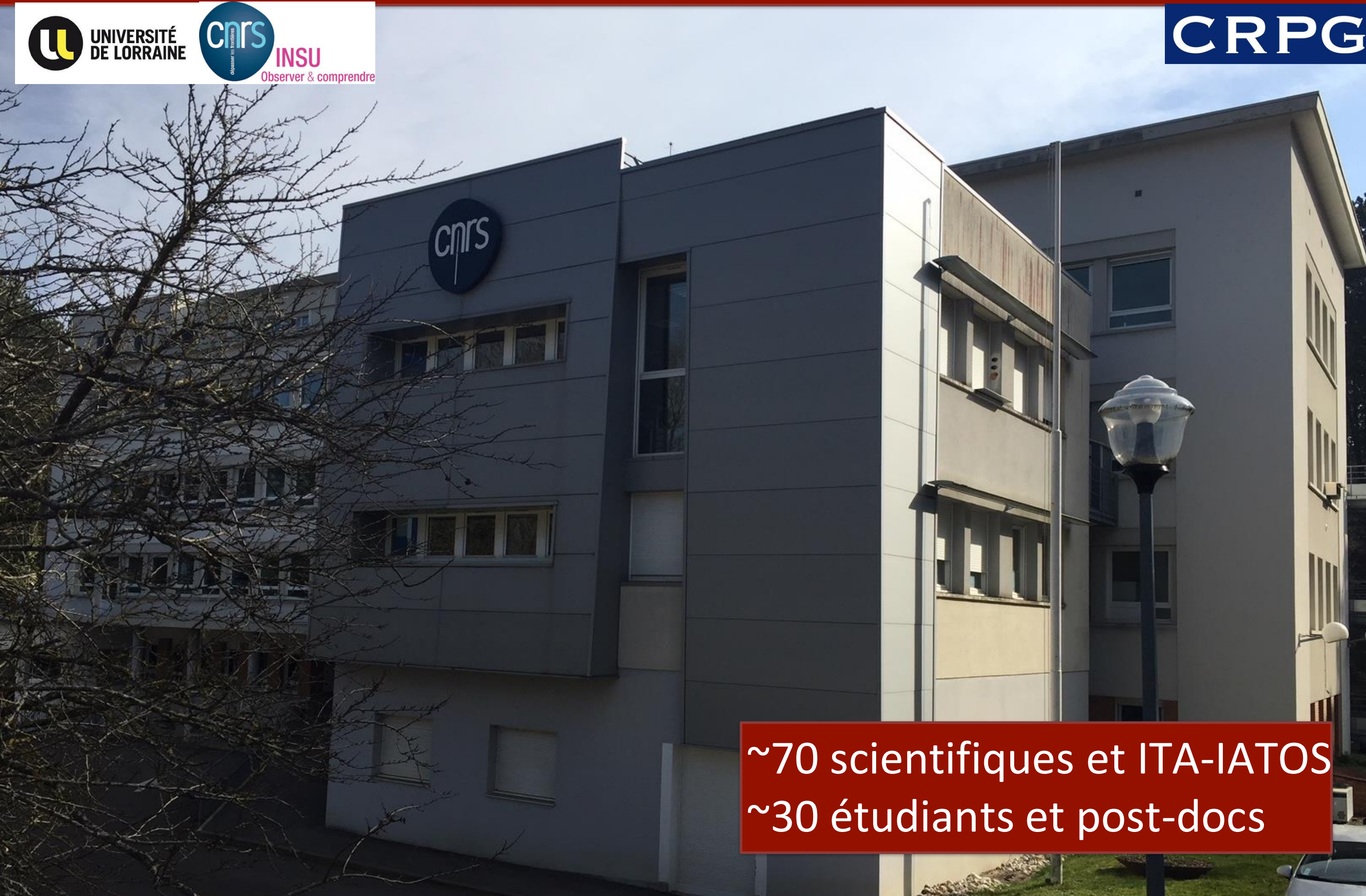
UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



INSU

Observer & comprendre

CRPG

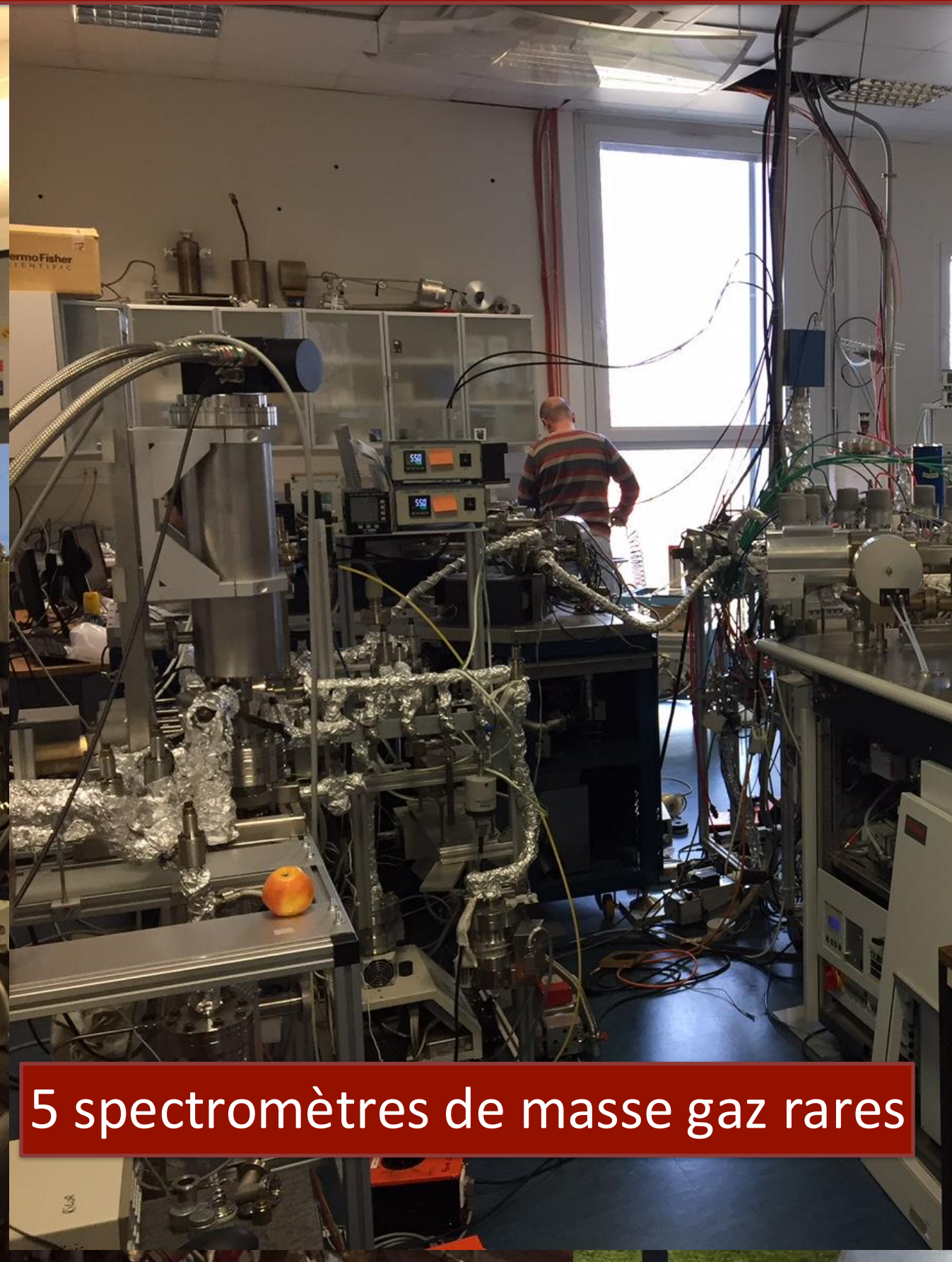


~70 scientifiques et ITA-IATOS
~30 étudiants et post-docs

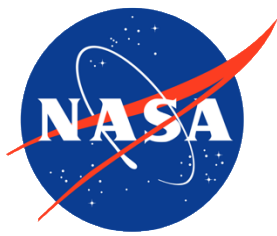
Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Vandoeuvre lès Nancy



2 sondes ioniques Cameca ims 1280



5 spectromètres de masse gaz rares



Motivations

❖ Quête des origines

- comment s'est formé le système solaire, d'où vient la matière
- pourquoi la vie est apparue sur la planète Terre

❖ Géopolitique

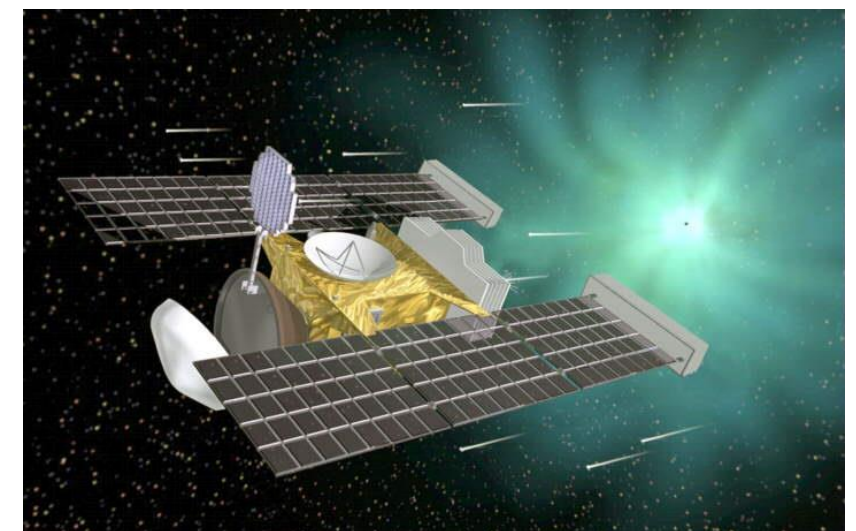
- compétition entre superpuissances (ex: Lune, Mars)
- La science est une retombée

❖ Exploration humaine

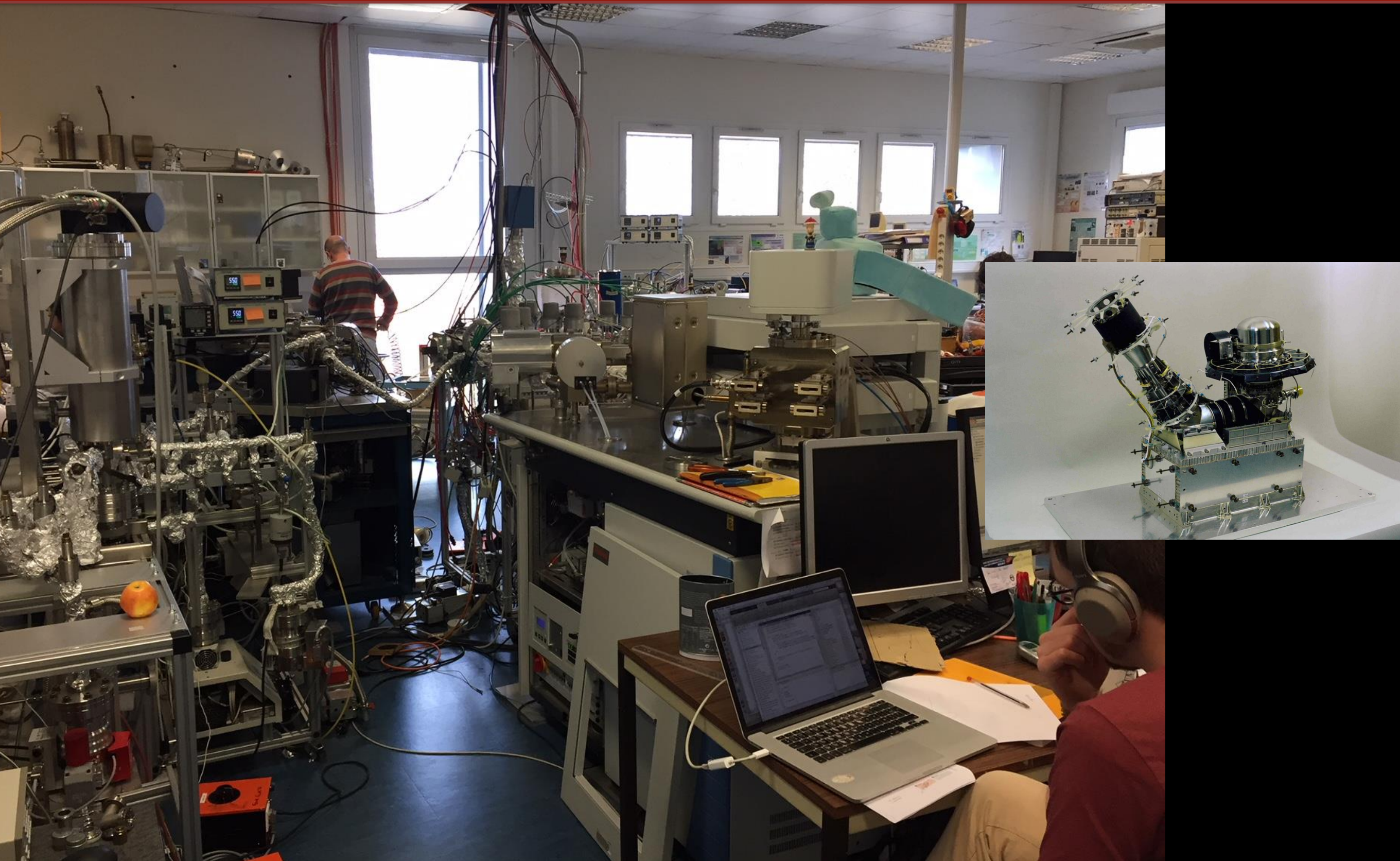
- Ressources, résilience etc



Source : NASA & JAXA

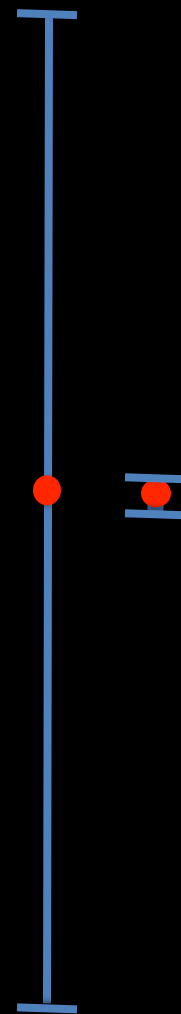


- Dans l'espace: mesures in situ possibles mais mauvaise précision
- Au laboratoire: grande précision mais les systèmes sont difficilement spatialisables



- Dans l'espace: mesures in situ possibles mais mauvaise précision
- Au laboratoire: grande précision mais les systèmes sont difficilement spatialisables

5 %: barre d'erreur sur
les rapports isotopiques
du xénon mesuré par
l'instrument Rosina sur la
mission Rosetta



0.2 %: barre d'erreur sur
les rapports isotopiques
du xénon mesuré en
laboratoire

Pourquoi ramener des échantillons d'autres mondes ?

“c'est compliqué, ça coûte cher, on pourrait analyser sur place”

❖ **Chronologie**

- Déterminer l'âge des autres corps du système solaire
- On ne peut pas (encore) le faire in situ avec suffisamment de précision

❖ **Elements traces et isotopes: l'ADN de la matière**

- Déterminer l'origine de la matière. Ex: relation entre comètes et océans; grains présolaires
- Processus de formation et fractionnements isotopiques. Ex: origine de la Lune, des astéroïdes, evolution de Mars...
- Relations génétiques entre différents objets. Ex: météorites et astéroïdes

❖ **Habitabilité**

- Déterminer les conditions d'habitabilité sur d'autres planètes. Ex: Mars Sample Return (programme qui a du plomb dans l'aile)

❖ **Missions Apollo (NASA, 1969-1974)**

- Echantillonnage humain de la Lune (6 missions)



❖ **Missions Luna (Roscosmos, 1970-1976)**

- Echantillonnage automatique de la Lune (3 missions)



ROSCOSMOS

❖ **Mission Genesis (NASA, 1995-2006)**

- Echantillonnage de la matière solaire



❖ **Mission Stardust (NASA, 1999-2011)**

- Echantillonnage d'une comète (comet Wild2)



❖ **Mission Hayabusa (JAXA, 2003-2010)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Itokawa, type S)



❖ **Hayabusa2 Mission (JAXA (+CNES), 2020)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Ryugu, riche en carbone)



❖ **Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Bennu, riche en carbone)



❖ **Mission Chang'e 5, 2021)**

- *Echantillonnage de la Lune*

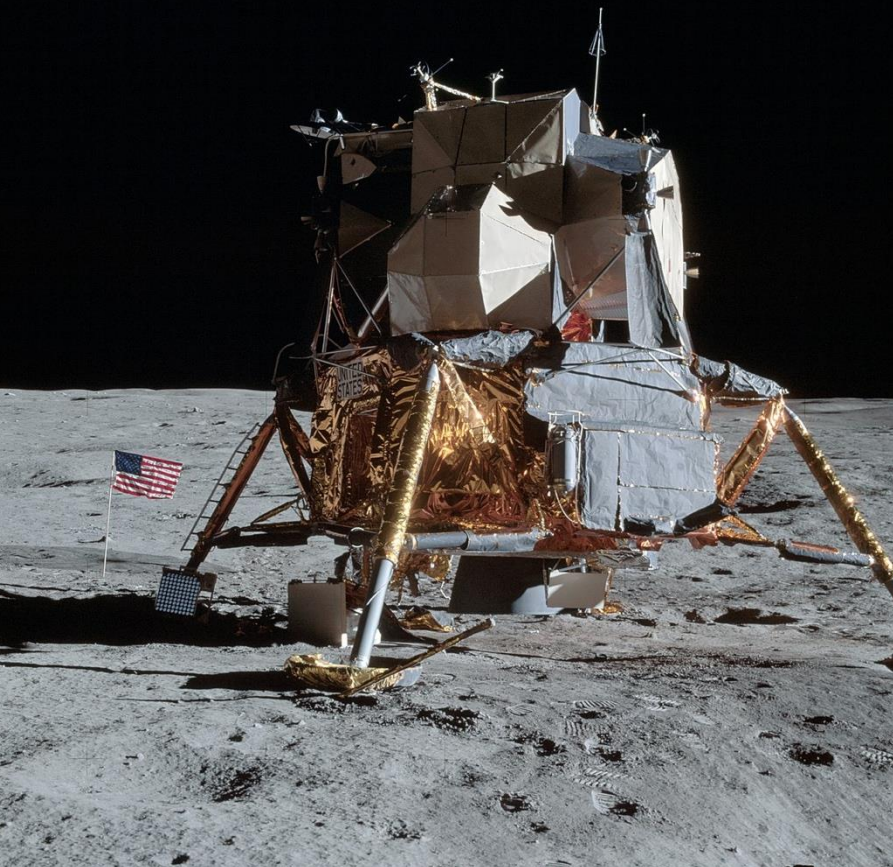


❖ **Mission Chang'e 6, 2024)**

- *Echantillonnage de la face cachée de la Lune*



Apollo



Source : NASA

Le Monde
Une étape dans l'histoire de l'humanité
DEUX HOMMES ONT FOULÉ LE SOL DE LA LUNE
devant des centaines de millions de téléspectateurs
Oui, mais pourquoi ? • Avec une apparente facilité, Armstrong et Aldrin ont rempli pendant plus de deux heures toutes les tâches prévues

LA PRESSE DE LA MANCHE
Après leur fabuleuse conquête sur la Lune : **MISSION ACCOMPLIE**
pour Armstrong et Aldrin

LA FANTASTIQUE DANSE
France 7 Soir **SUR LA LUNE**

LA TRAGÉDIE DE JUIGNE
OUEST France
BRETAGNE - NORMANDIE - MAINE - ANJOU - POITOU
LE GOUVERNEMENT
fait ses condoléances
aux familles et amis
"Un petit pas pour l'homme, mais un grand bond pour l'humanité"
21 h 36 SUR LA LUNE
"MON DIEU COMME C'EST BEAU !"

Daily Mirror
The two Moon heroes rejoin the command ship safely after their faultless lift-off
LINK-UP! THEY'RE TOGETHER AGAIN

Woman JP on jail hunger strike
Mystery of 'landing' by Luna 15
FLAG DAY

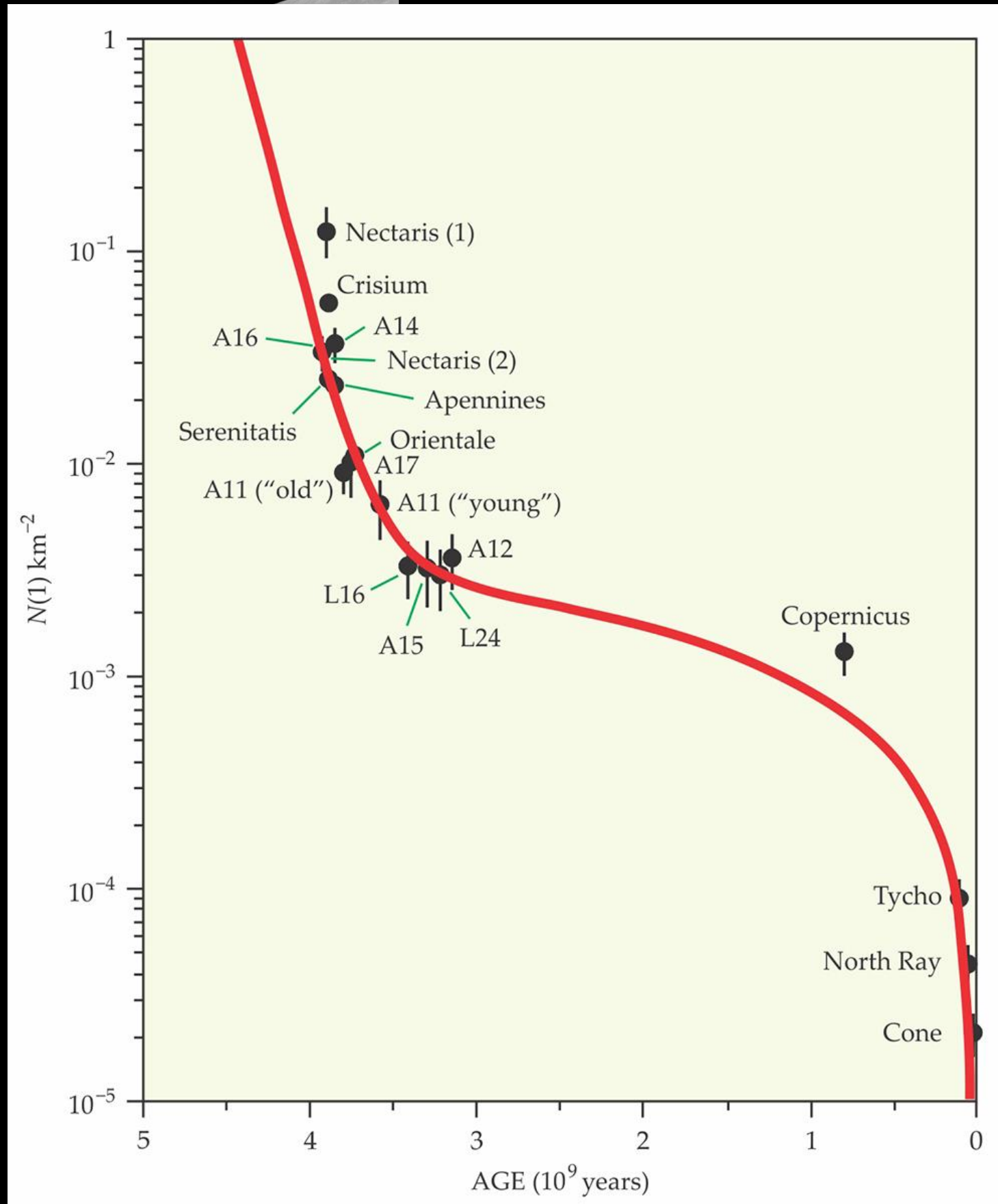
Deux hommes ont marché cette nuit sur la Lune
Armstrong et Aldrin qui ont réalisé ce fantastique exploit avaient posé leur module lunaire sur le satellite de la Terre à 21 h. 17
La sortie a eu lieu cinq heures plus tôt que prévu

2 MORTS (par asphyxie) DANS UN INCENDIE
Le Parisien libéré
LE PLUS FORT TIRAGE DES QUOTIDIENS FRANÇAIS DU MATIN
"ILS" RENTRENT DE LA LUNE AVEC DES RICHESSES INESTIMABLES

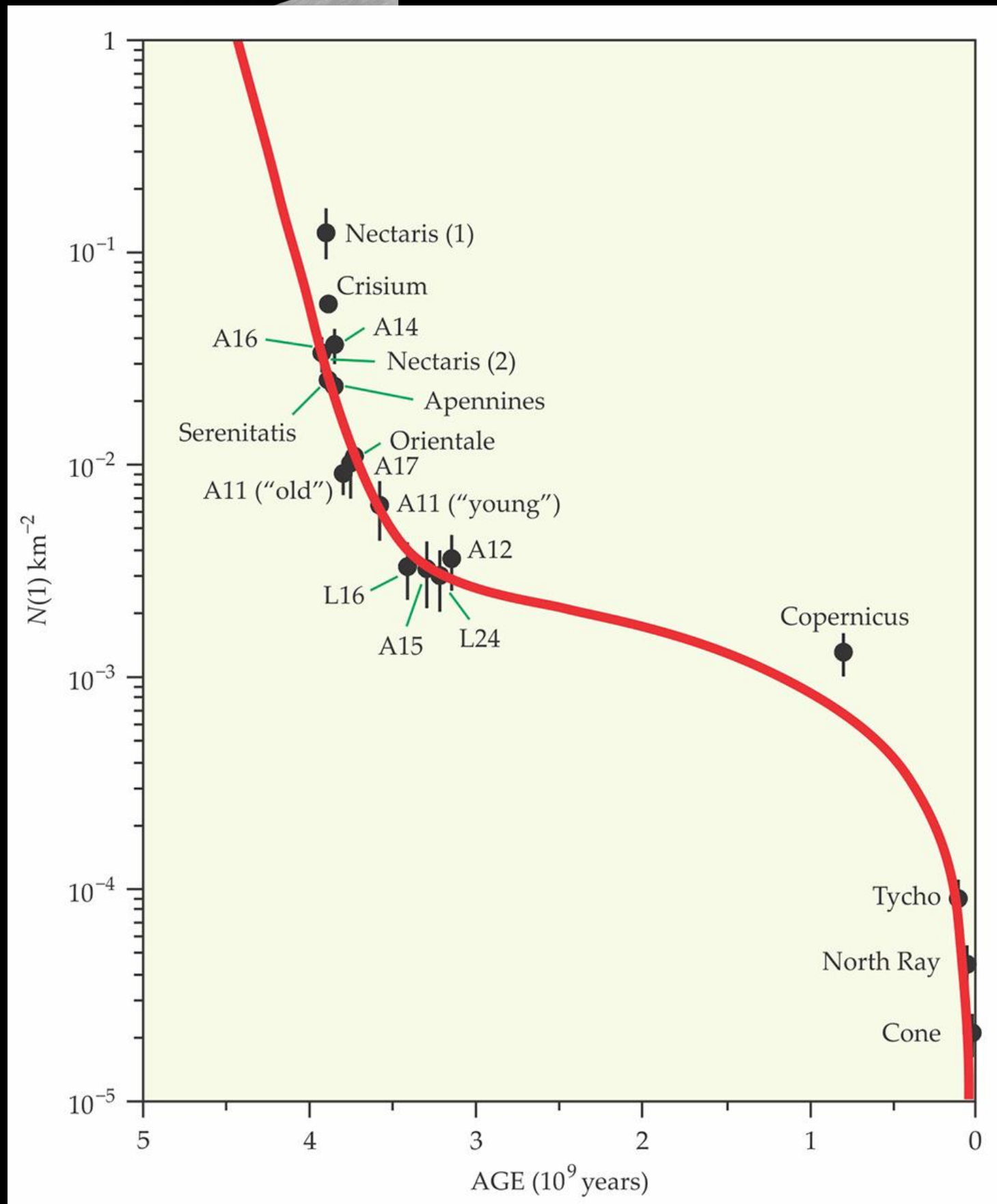
France Soir
ILS ONT QUITTÉ L'ORBITE LUNAIRE
Dernier danger : l'amerrissage jeudi



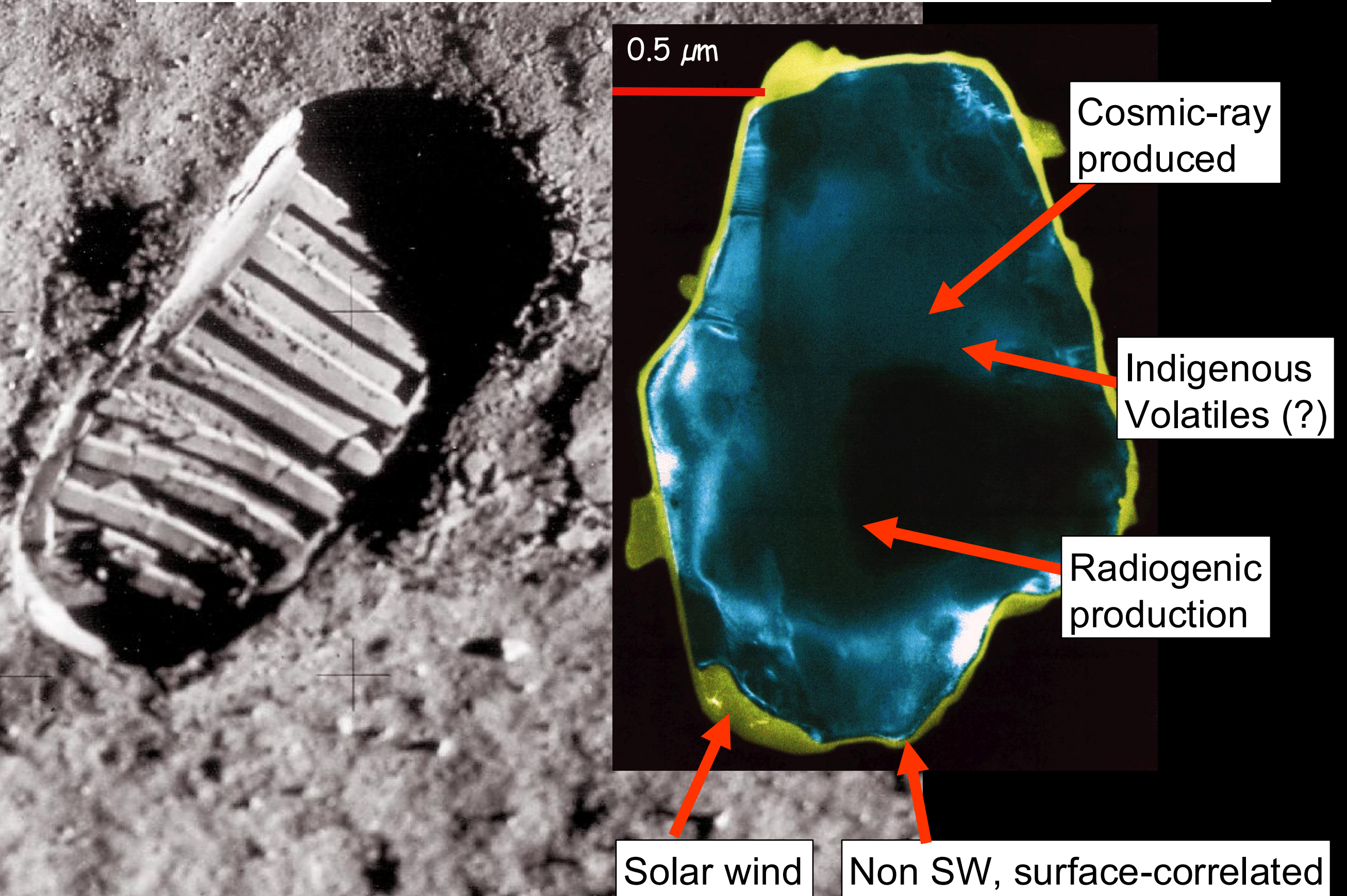
1. The moon is not a primordial object.
2. The moon is ancient and still preserves an early history.
3. The youngest moon rocks are virtually as old as the oldest Earth rocks.
4. The moon and Earth are genetically related.
5. The moon is lifeless.
6. All moon rocks originated through high-temperature processes with little or no involvement with water.
7. Early in its history, the moon was melted to great depths to form a "magma ocean."
8. The lunar magma ocean was followed by a series of huge asteroid impacts that created basins which were later filled by lava flows.
9. The moon is slightly asymmetrical.
10. The surface of the moon is covered by a rubble pile of rock fragments and dust.

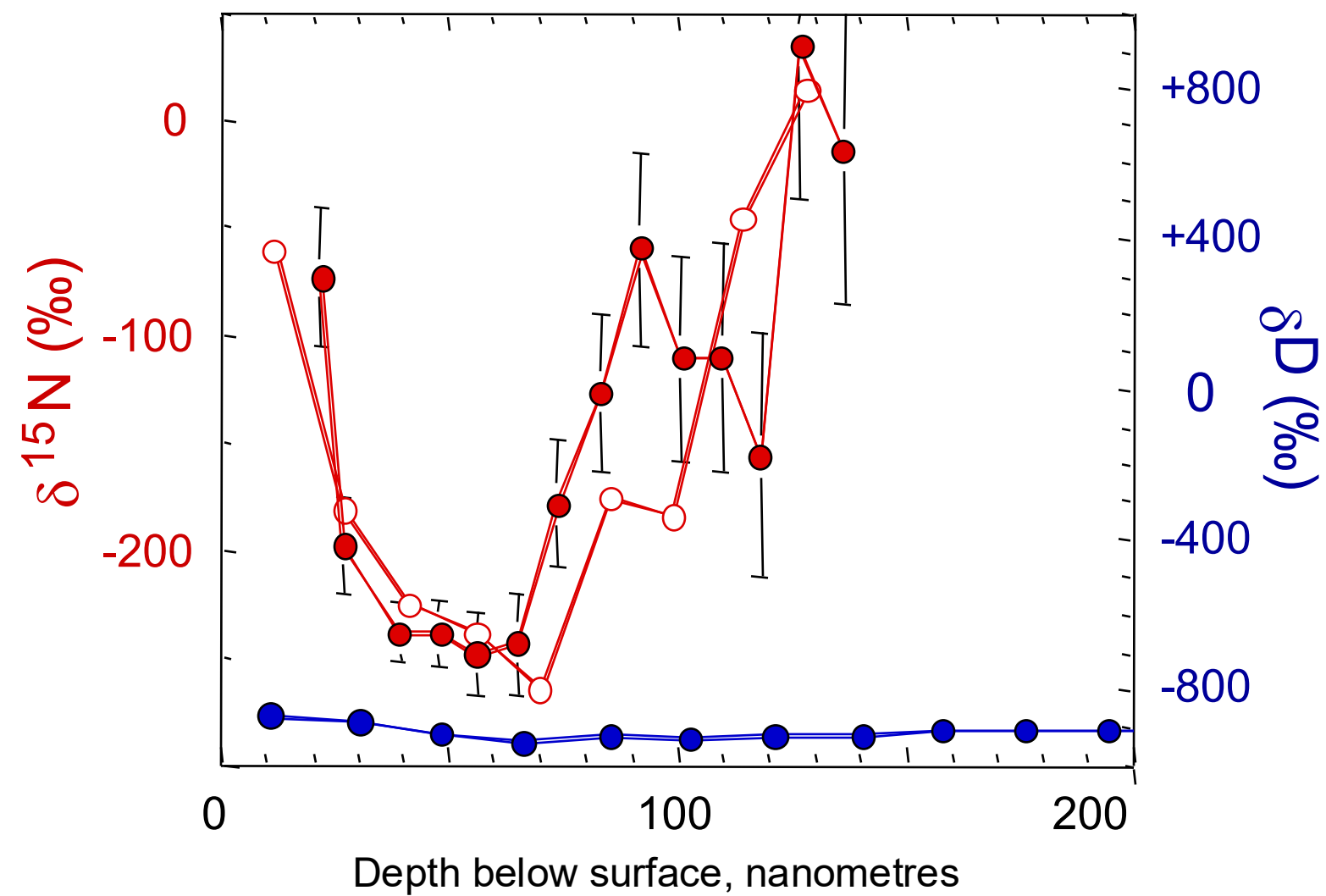
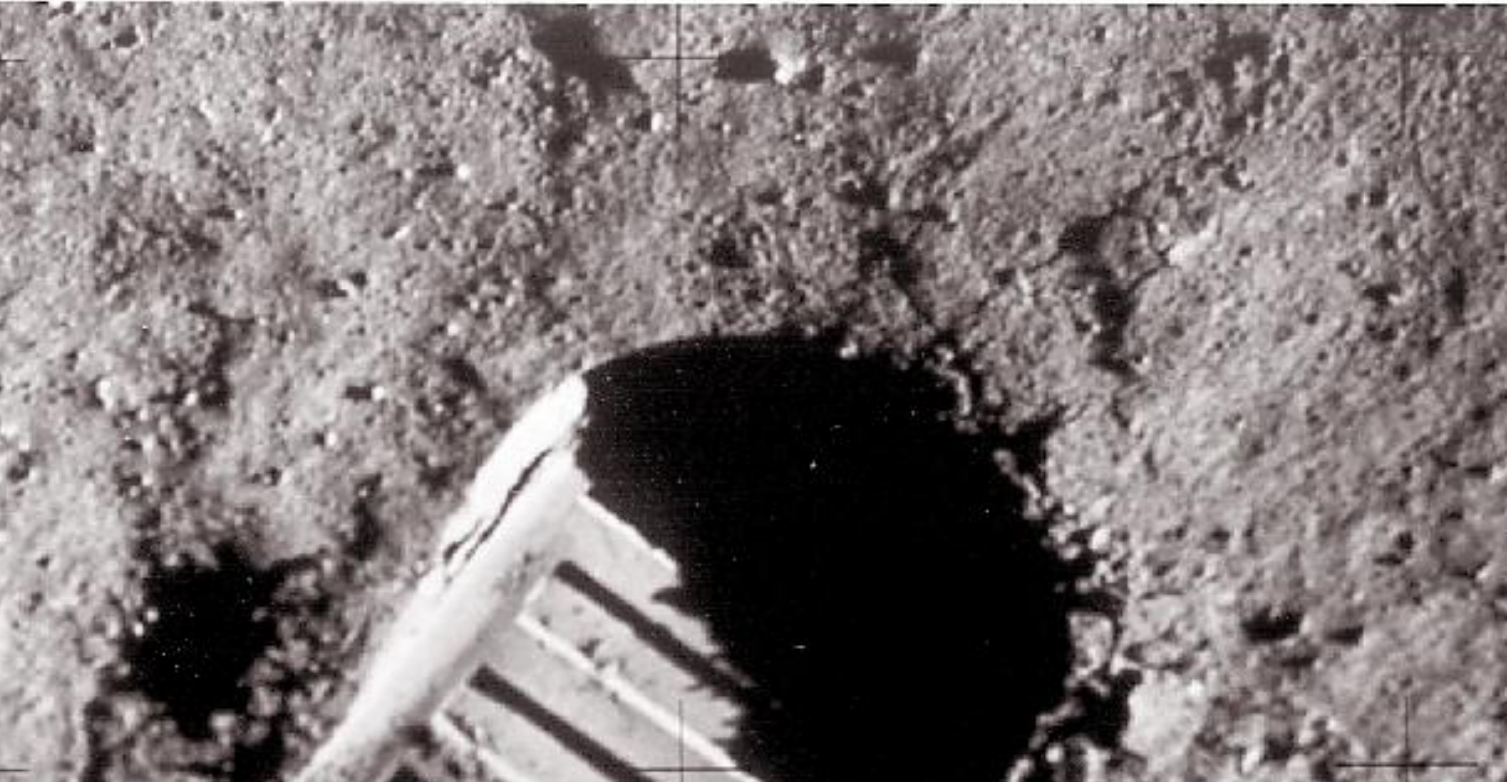


1. The moon is not a primordial object.
2. The moon is ancient and still preserves an early history.
3. The youngest moon rocks are virtually as old as the oldest Earth rocks.
4. The moon and Earth are genetically related.
5. The moon is lifeless.
6. All moon rocks originated through high-temperature processes with little or no involvement with water.
7. Early in its history, the moon was melted to great depths to form a "magma ocean."
8. The lunar magma ocean was followed by a series of huge asteroid impacts that created basins which were later filled by lava flows.
9. The moon is slightly asymmetrical.
10. The surface of the moon is covered by a rubble pile of rock fragments and dust.



Grains de sol lunaire irradiés : composition du Soleil





Hashizume & Chaussidon 2000

Source : NASA & CRPG

❖ **Missions Apollo (NASA, 1969-1974)**

- Echantillonnage humain de la Lune (6 missions)

❖ **Missions Luna (Roscosmos, 1970-1976)**

- Echantillonnage automatique de la Lune (3 missions)



ROSCOSMOS

❖ **Mission Genesis (NASA, 1995-2006)**

- Echantillonnage de la matière solaire

❖ **Mission Stardust (NASA, 1999-2011)**

- Echantillonnage d'une comète (comet Wild2)

❖ **Mission Hayabusa (JAXA, 2003-2010)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Itokawa, type S)

❖ **Hayabusa2 Mission (JAXA (+CNES), 2020)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Ryugu, riche en carbone)

❖ **Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Bennu, riche en carbone)

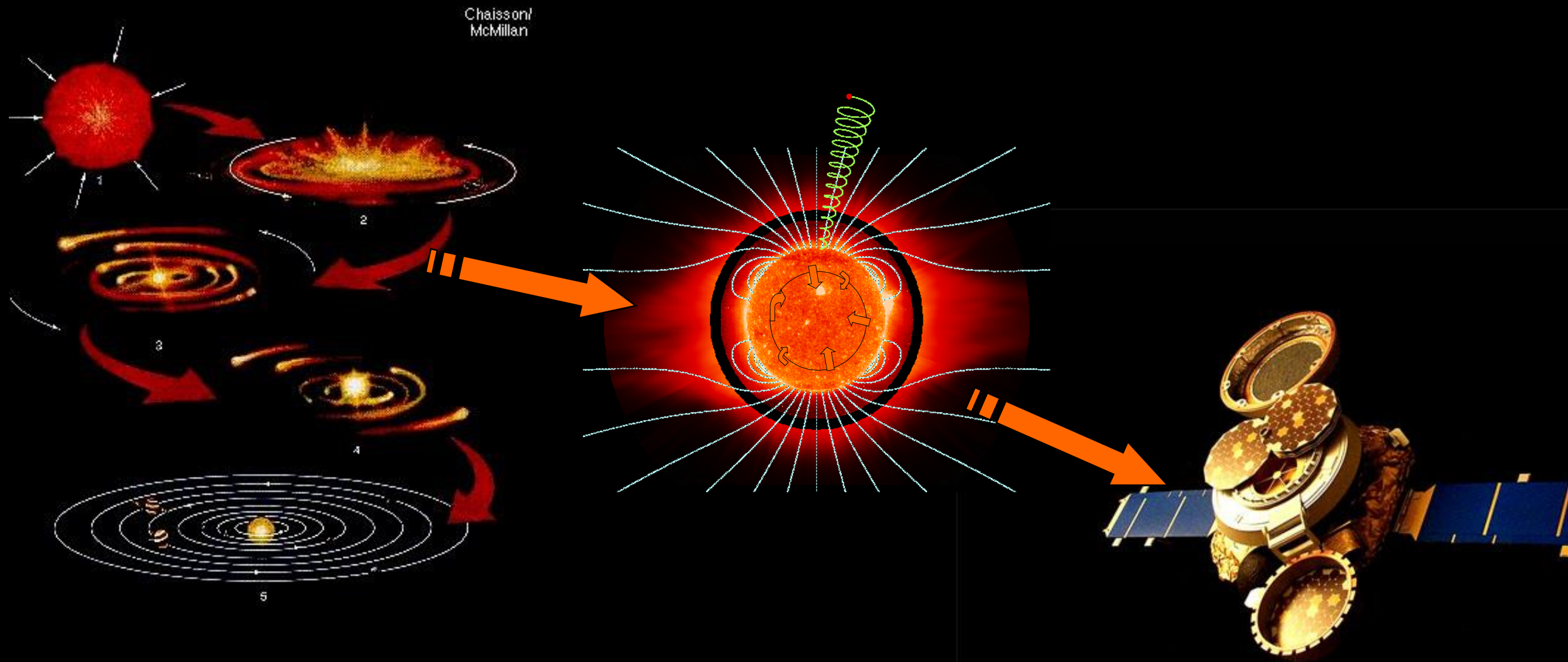
❖ **Mission Chang'e 5, 2021)***Echantillonnage de la Lune*❖ **Mission Chang'e 6, 2024)***Echantillonnage de la face cachée de la Lune*

Quelle est la composition du Soleil ?

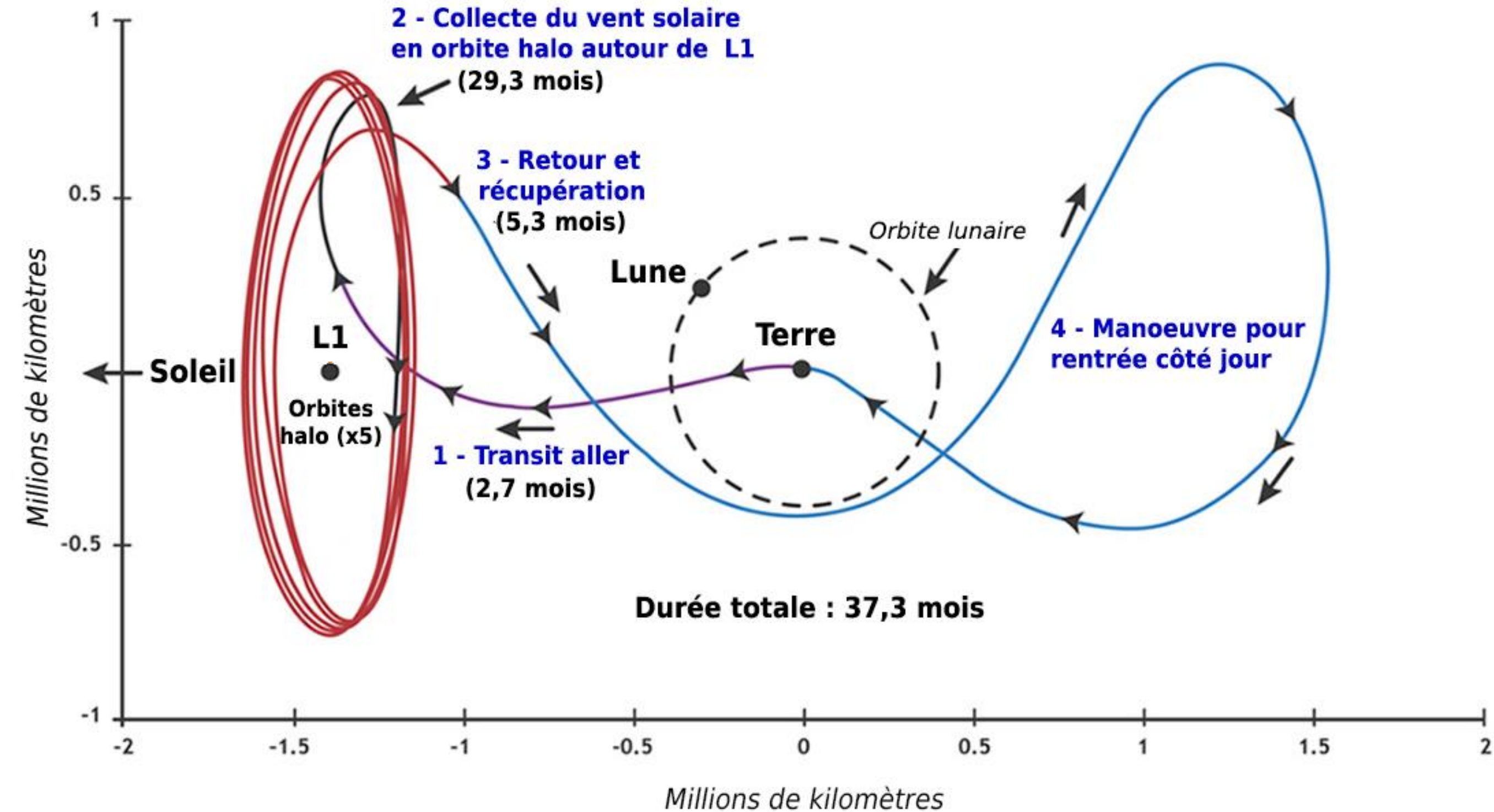


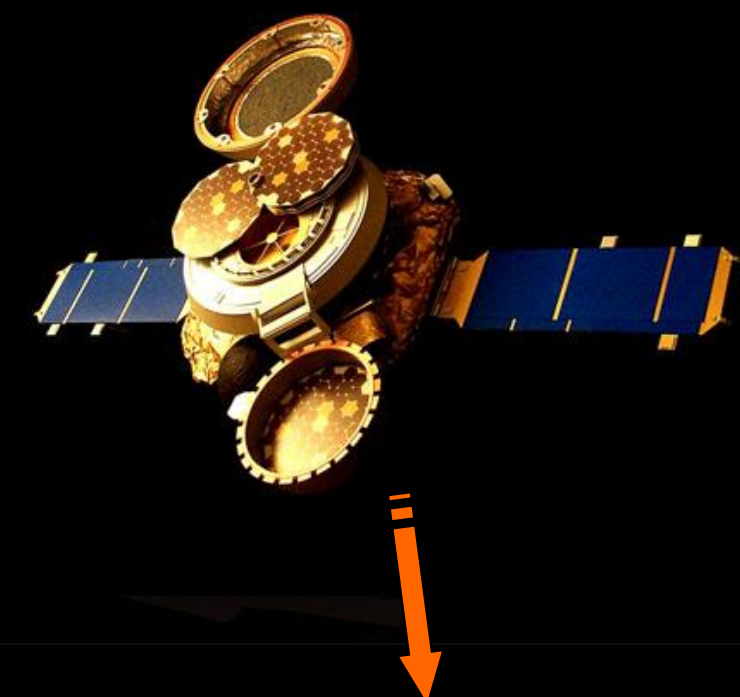
Mission priorities

- 1- oxygen isotopes
- 2- nitrogen isotopes
- 3- ...



Quelle est la composition du Soleil ?





L'EST RÉPUBLICAIN

ÉVÉNEMENTS

Genesis : le choc !

La capsule contenant les particules solaires s'est écrasée dans l'Utah. Effroi chez les chercheurs nancéiens associés à la mission. Mais tout n'est peut-être pas perdu...

Marc Jucia et Bernard Marty sont catastrophés.

Il est 18 h... Sur les images assez mauvaises, mais retransmises en direct par la NASA sur internet, une sorte de soucoupe volante folle tournoie dans le ciel américain de l'Utah. Dans une salle du CRPG (Centre de recherche pétrogra-

préparés à l'analyse de ces échantillons.

Et justement : la capsule, pendant de longues secondes, poursuit sa chute. Sans que les parachutes ne s'ouvrent, sans qu'il ne soit du coup possible aux

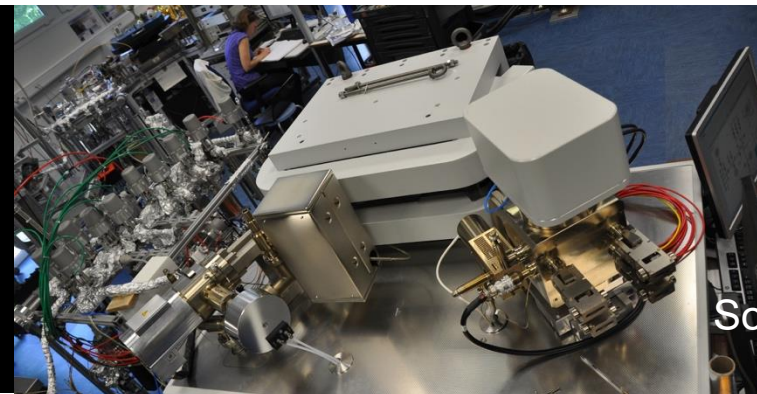
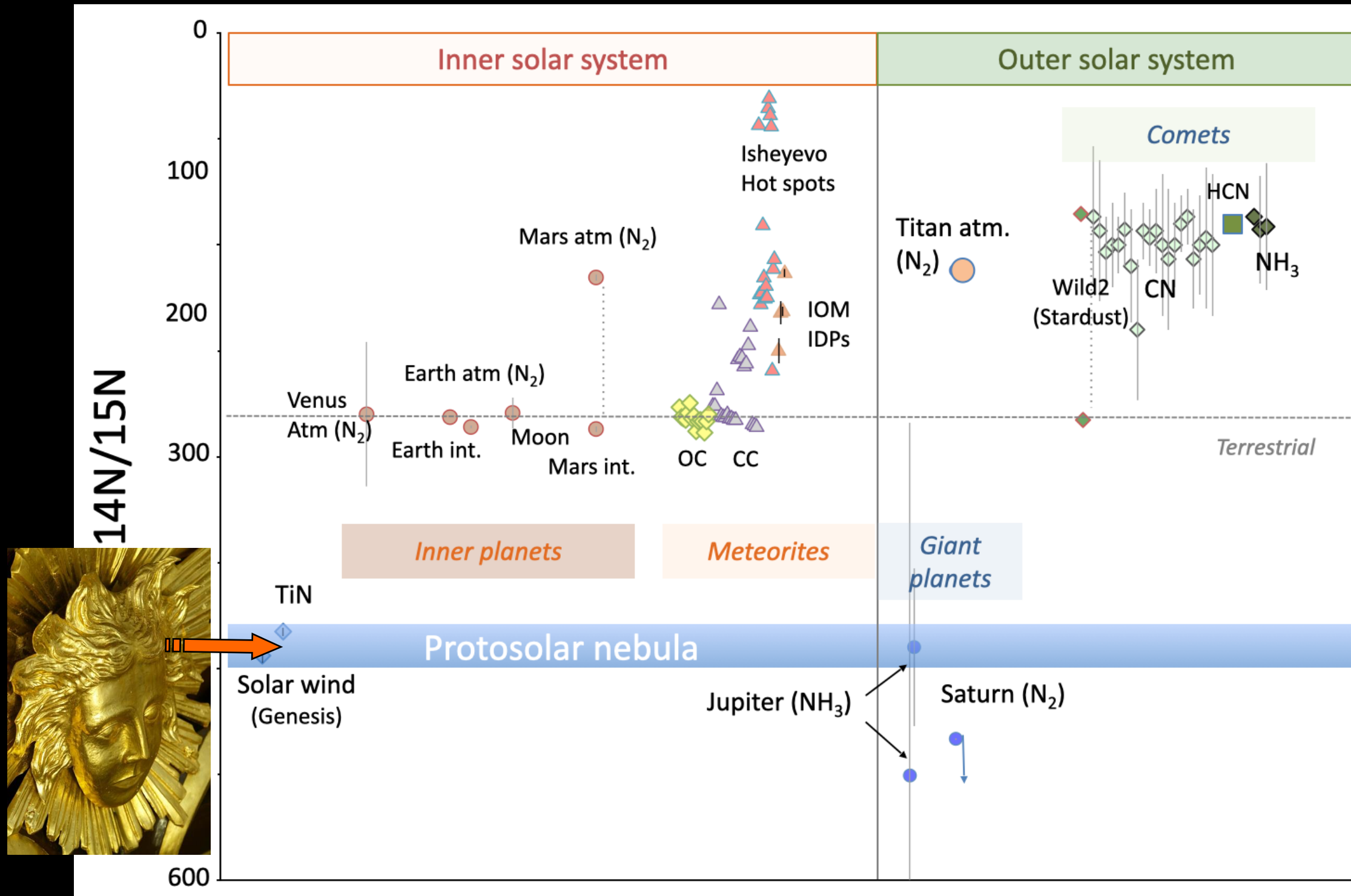
Instant d'effroi pour les scientifiques nancéiens.

teurs qui ont emprisonné les poussières de soleil sont fragiles comme de la

tude : le calendrier scientifique sera retardé et les protocoles d'analyses bou-

Photos Patrice SAUCOURT

« Ces échantillons seront peut-être souillés mais il



❖ **Missions Apollo (NASA, 1969-1974)**

Echantillonnage humain de la Lune (6 missions)

❖ **Missions Luna (Roscosmos, 1970-1976)**

Echantillonnage automatique de la Lune (3 missions)



ROSCOSMOS

❖ **Mission Genesis (NASA, 1995-2006)**

Echantillonnage de la matière solaire

❖ **Mission Stardust (NASA, 1999-2011)**

- Echantillonnage d'une comète (comet Wild2)

❖ **Mission Hayabusa (JAXA, 2003-2010)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Itokawa, type S)

❖ **Hayabusa2 Mission (JAXA (+CNES), 2020)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Ryugu, riche en carbone)

❖ **Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Bennu, riche en carbone)

❖ **Mission Chang'e 5, 2021)**

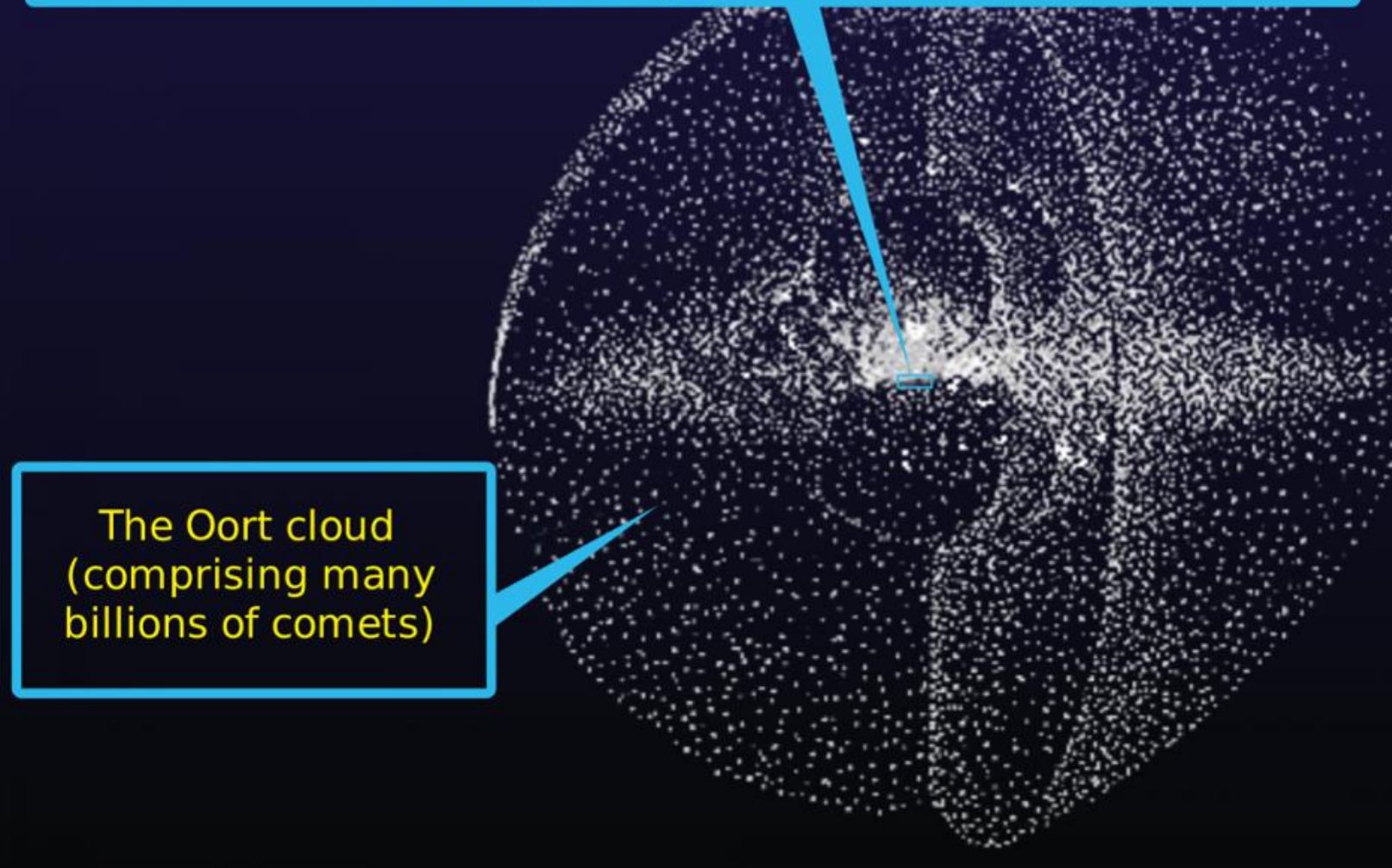
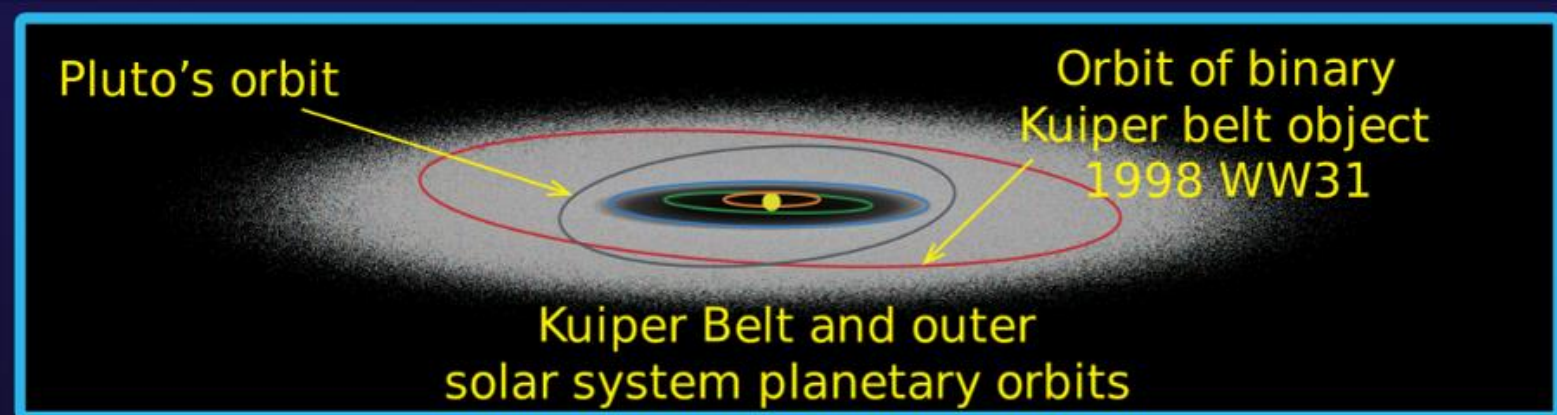
- Echantillonnage de la Lune

❖ **Mission Chang'e 6, 2024)**

- Echantillonnage de la face cachée de la Lune



Stardust Mission (NASA, 1999-2011) sampling a comet

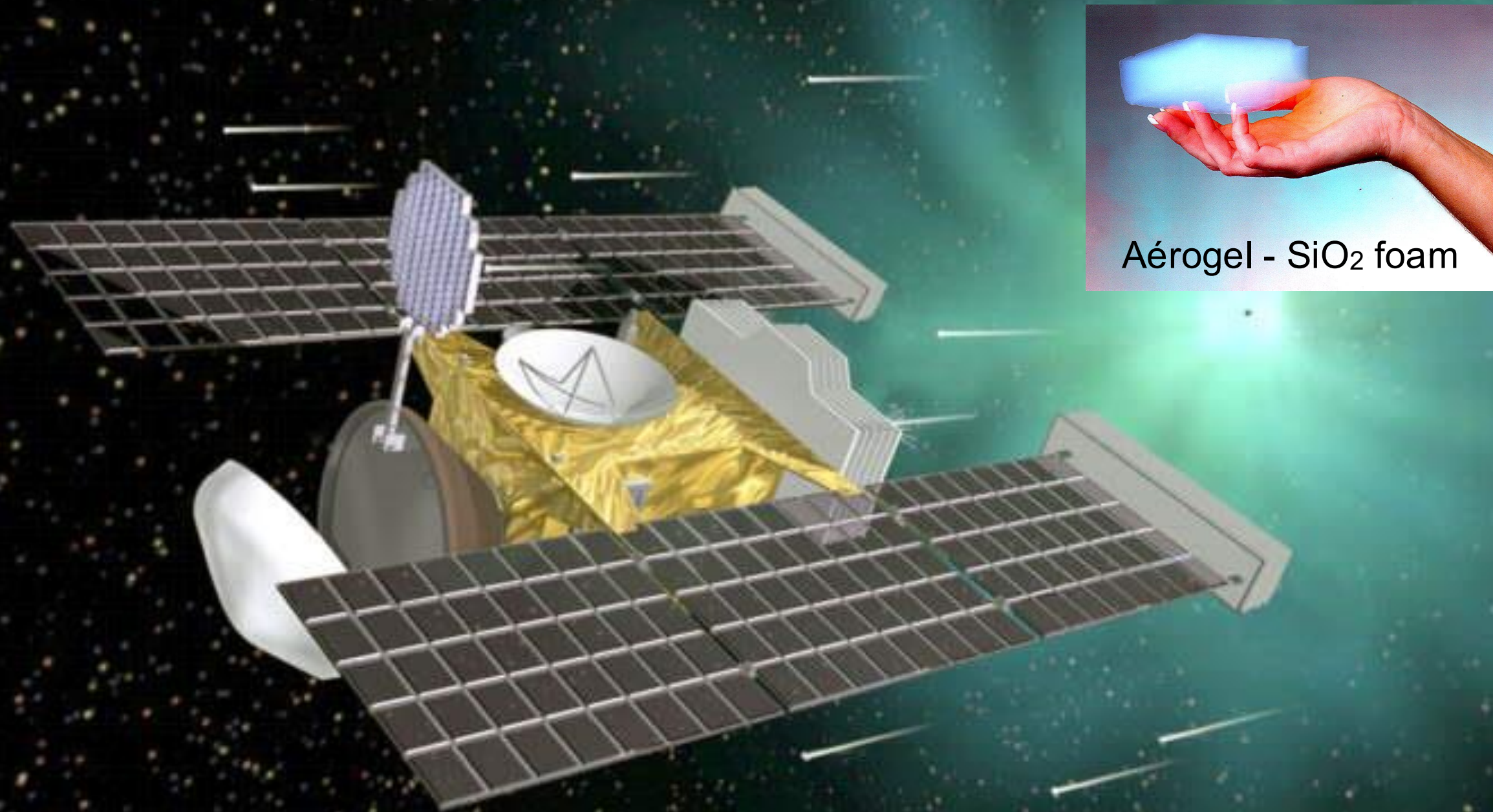


The Oort cloud
(comprising many
billions of comets)

Stardust Mission (NASA, 1999-2011) sampling a comet



Januray 2004 - collection of dust in the coma - at 237 km from the nucleus

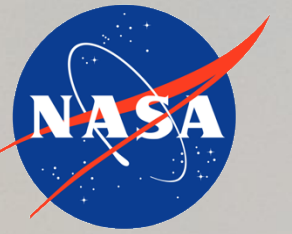




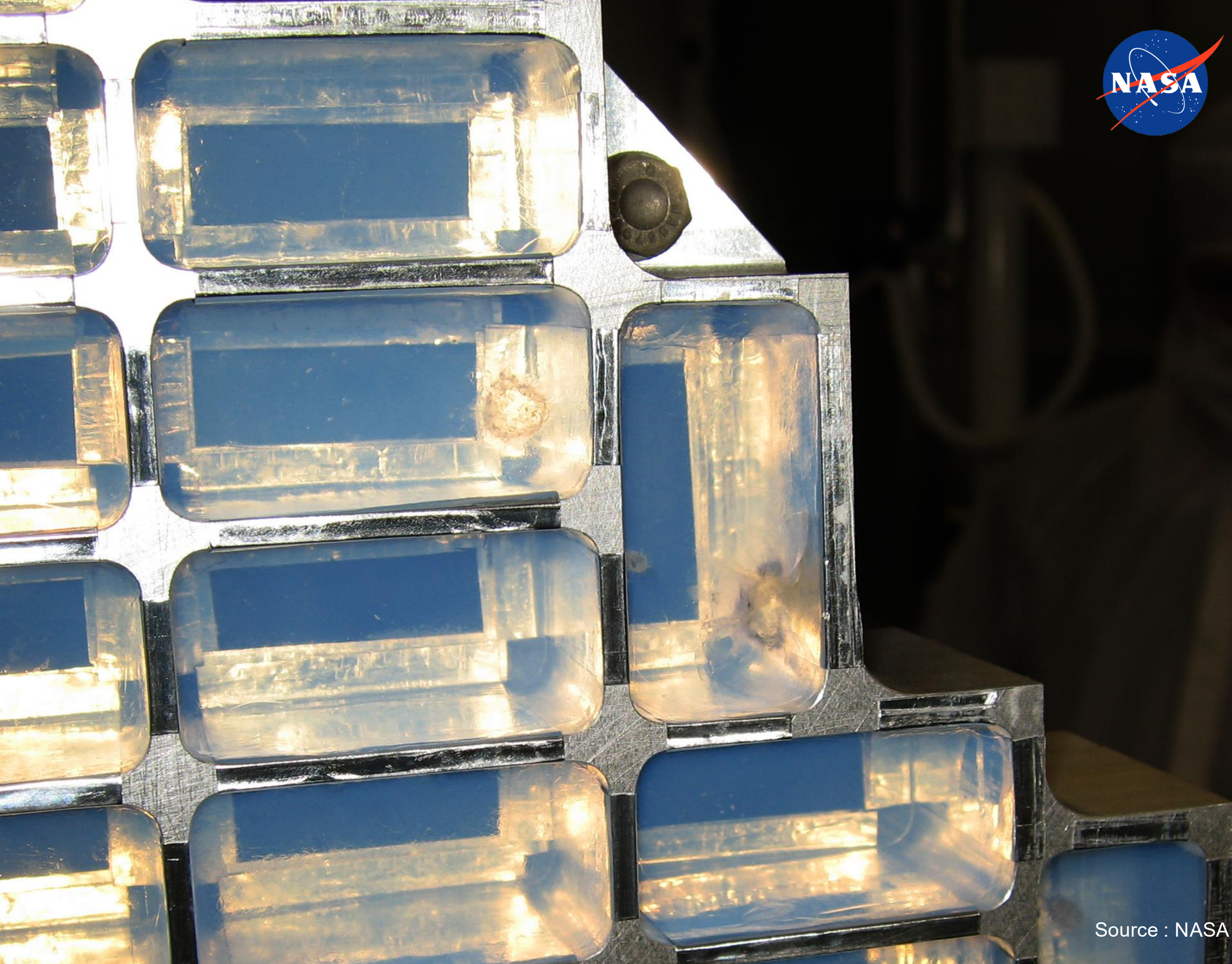
Source : NASA



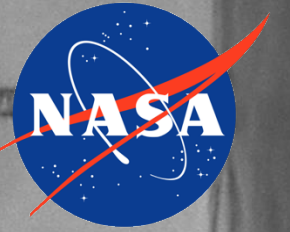
Jan. 15, 2006



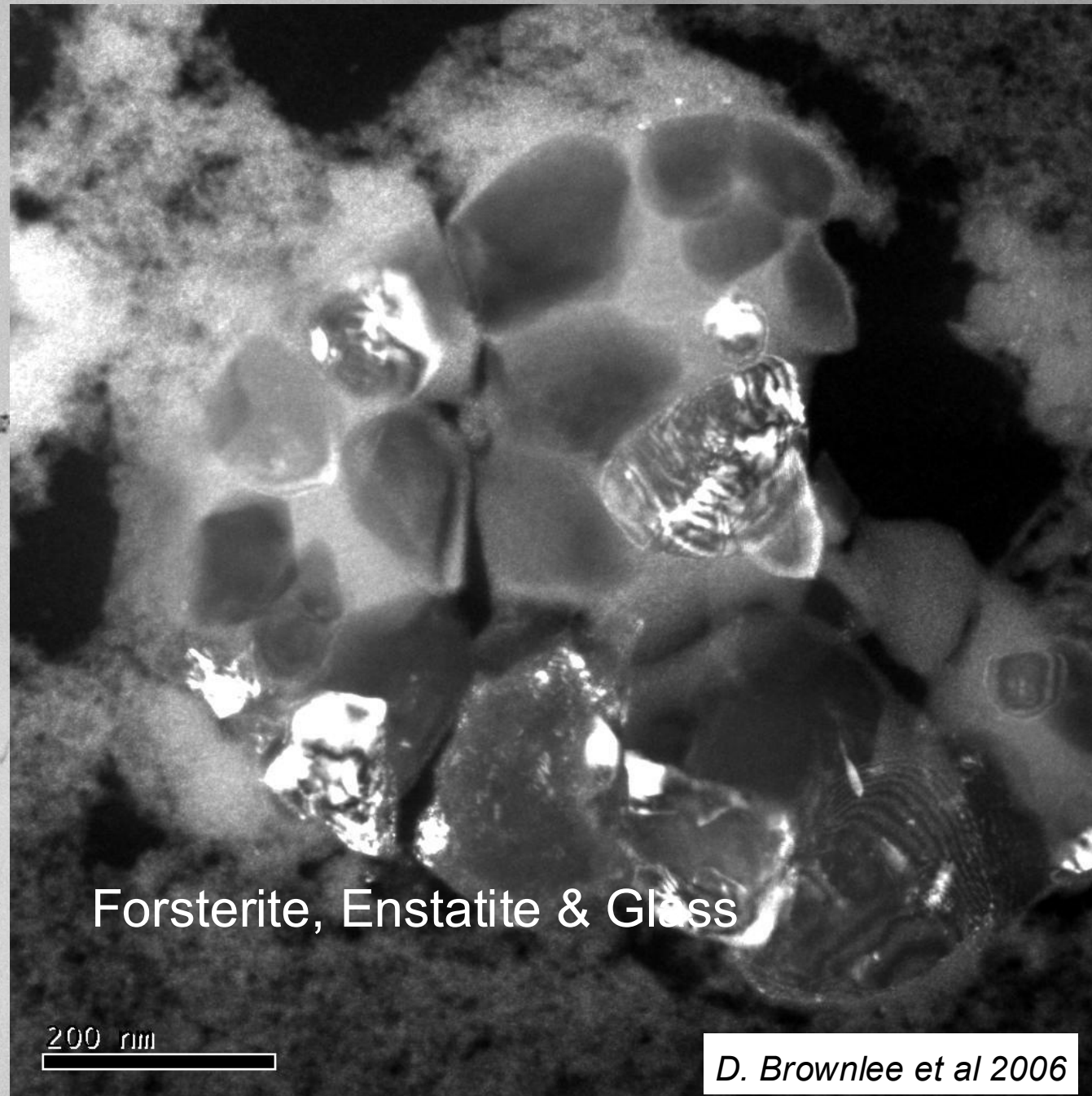
Source : NASA



Source : NASA



Rocks!
($>10\ \mu\text{m}$)



More than 1000 particles between 5 and 300 μm
were collected !



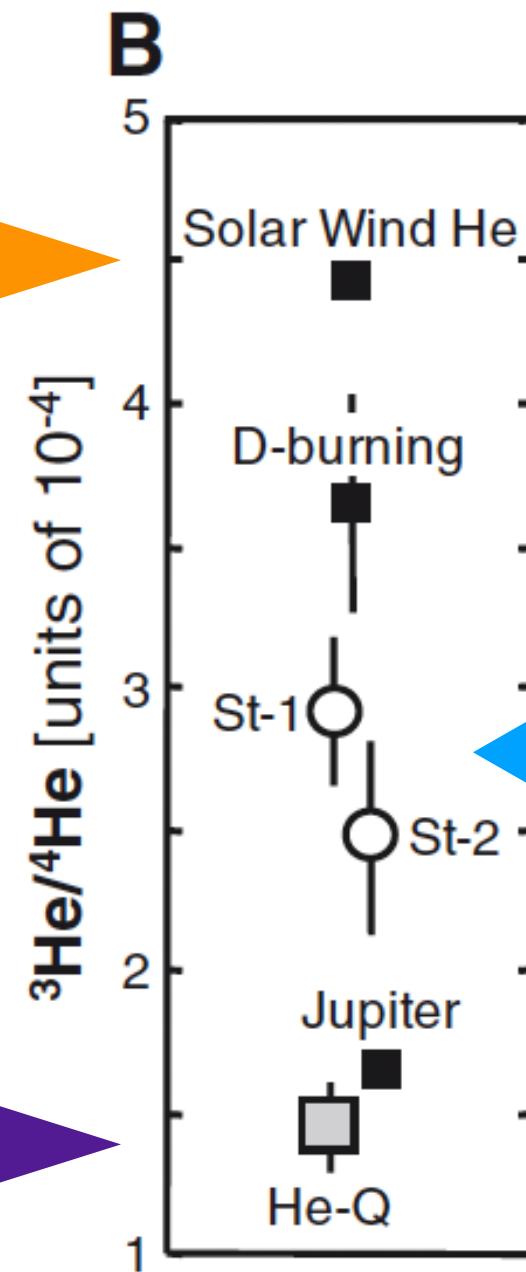
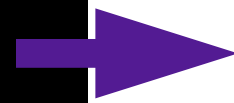
modern solar wind



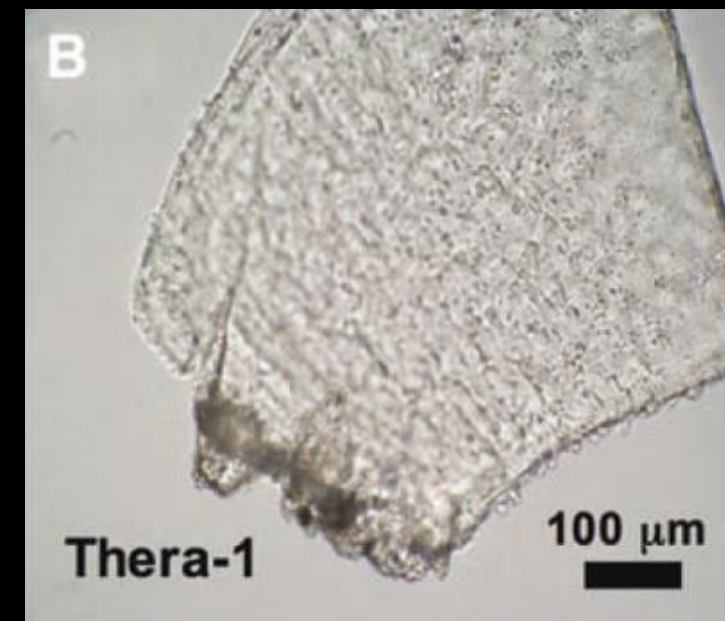
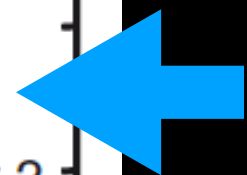
deuterium burning



Solar nebula



Stardust



❖ **Missions Apollo (NASA, 1969-1974)**

- Echantillonnage humain de la Lune (6 missions)

❖ **Missions Luna (Roscosmos, 1970-1976)**

- Echantillonnage automatique de la Lune (3 missions)



ROSCOSMOS

❖ **Mission Genesis (NASA, 1995-2006)**

- Echantillonnage de la matière solaire

❖ **Mission Stardust (NASA, 1999-2011)**

- Echantillonnage d'une comète (comet Wild2)

❖ **Mission Hayabusa (JAXA, 2003-2010)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Itokawa, type S)

❖ **Hayabusa2 Mission (JAXA (+CNES), 2020)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Ryugu, riche en carbone)

❖ **Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Bennu, riche en carbone)

❖ **Mission Chang'e 5, 2021)**

- Echantillonnage de la Lune

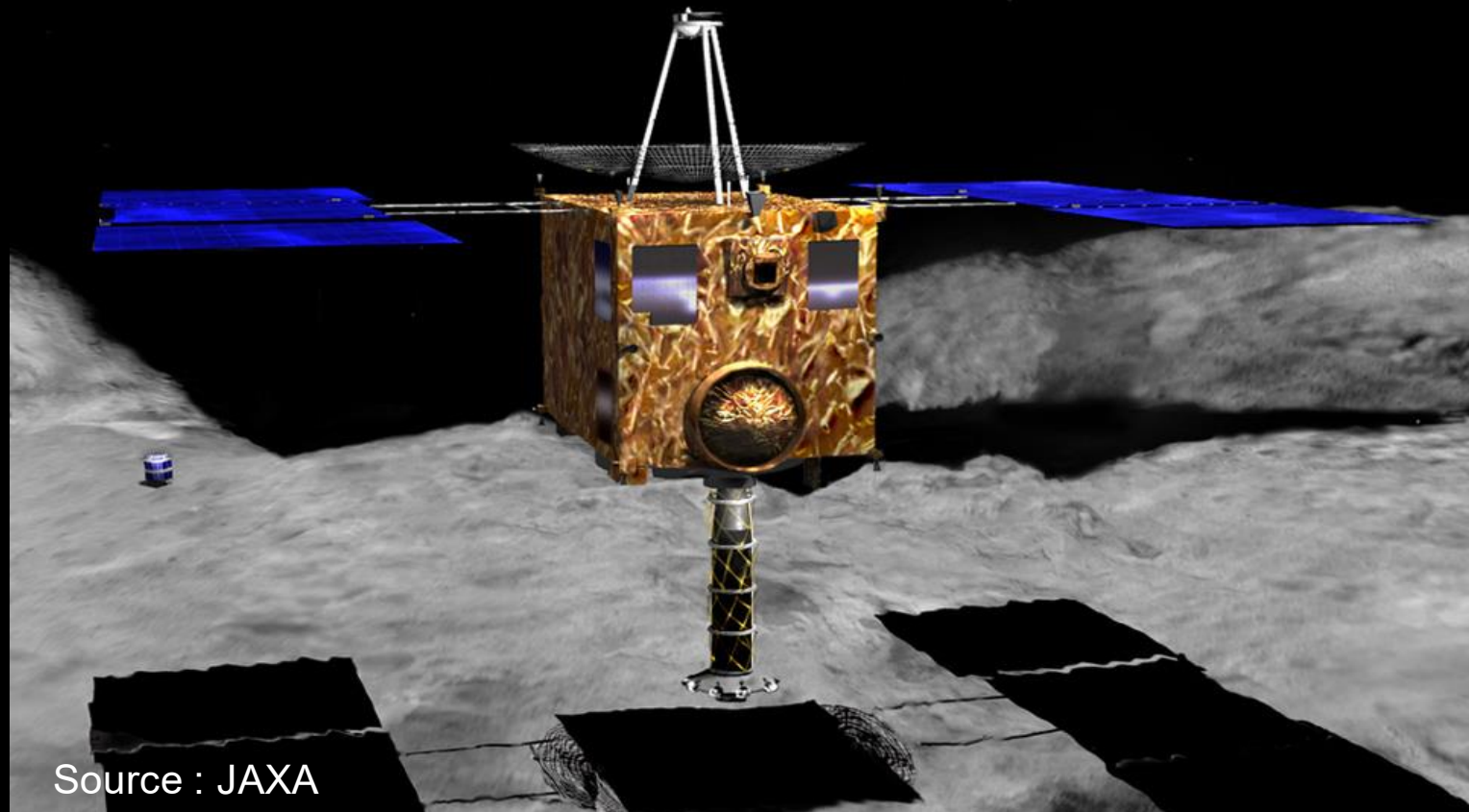
❖ **Mission Chang'e 6, 2024)**

- Echantillonnage de la face cachée de la Lune





Hayabusa Mission (JAXA, 2003-2010)



First sample return from an asteroid

Key innovations: ion engine, autonomous and optical navigation, deep space communication, and close movement on



Mission cost = \$100 million

\$200 million for Stardust - \$1,400 million for Rosetta - Apollo program ~\$200 billion

Target of the Hayabusa mission: asteroid 25143Itokawa



Asteroid Itokawa

Near-Earth object

Several problems encountered during the mission such as altitude control, automatic control problems, stay 30 min at the surface, projectile not sent, problem for departure from Itokawa, problems to control the return trajectory etc.

Multiple solutions found by the team on real time

→ *more than 1500 regolith dust particles (< 1 mg)*
Mostly 10 μm in size - Biggest particle = 300 μm

540m

Two lobes
Lack of impact craters
Rough surface with boulders
→ rubble pile

Source: NASA & JAXA

S-type asteroid → rocky and 'dry'

Hayabusa Mission (JAXA, 2003-2010)



HAYABUSA はやぶさ

大ヒット
上映中!!

作品紹介 “はやぶさ”メッセージボード

最新情報 予告編 劇場情報 [twitter](#)

竹内結子 西田敏行
高嶋政宏 佐野史郎 山本耕史 鶴見辰吾
監督:堤 幸彦



あきらめない勇気を与えてくれたのは、君——。

❖ **Missions Apollo (NASA, 1969-1974)**

Echantillonnage humain de la Lune (6 missions)

❖ **Missions Luna (Roscosmos, 1970-1976)**

Echantillonnage automatique de la Lune (3 missions)



ROSCOSMOS

❖ **Mission Genesis (NASA, 1995-2006)**

Echantillonnage de la matière solaire

❖ **Mission Stardust (NASA, 1999-2011)**

Echantillonnage d'une comète (comet Wild2)

❖ **Mission Hayabusa (JAXA, 2003-2010)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Itokawa, type S)

❖ **Hayabusa2 Mission (JAXA (+CNES), 2020)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Ryugu, riche en carbone)

- **Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Bennu, riche en carbone)

- **Mission Chang'e 5, 2021)**

- Echantillonnage de la Lune

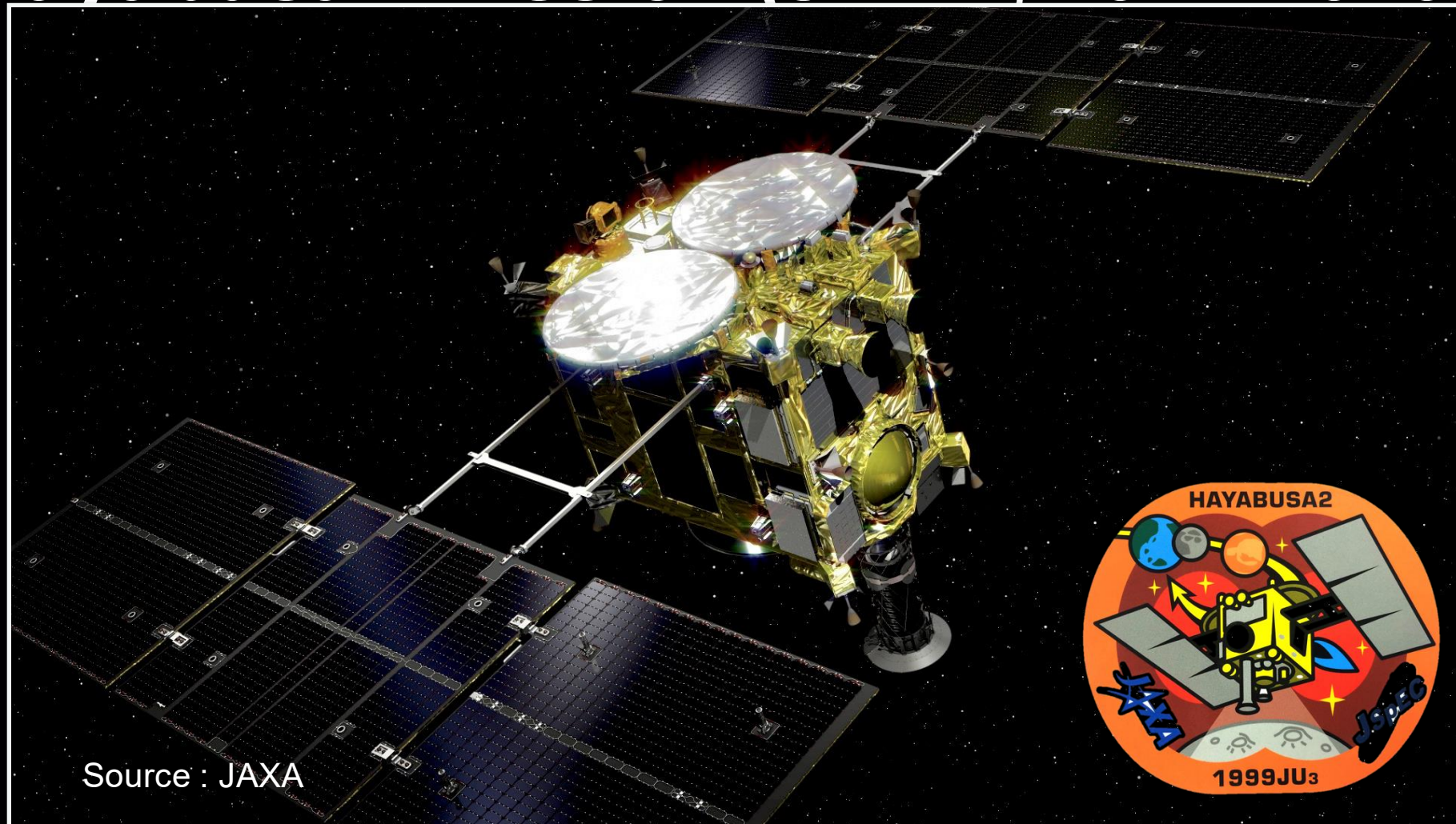
- **Mission Chang'e 6, 2024)**

- Echantillonnage de la face cachée de la Lune





Hayabusa2 Mission (JAXA, 2014-2020)



First sample return from a carbonaceous asteroid: C_B type

Objectives: Bring back at least 100 mg of sample



Mission cost = \$150 million

\$200 million for Stardust - \$1,200 million for Osiris REx - Apollo program ~\$200 billion



はやぶさ2

2195日の軌跡

HAYABUSA2 A 2195 DAY ODYSSEY

Astéroïde Ryugu: riche en volatils (type carboné)



2 small rovers landed on September 21, 2018



First images taken by the rovers



Hayabusa2 Mission (JAXA, 2014-2020)

A first successful sampling on February 2019



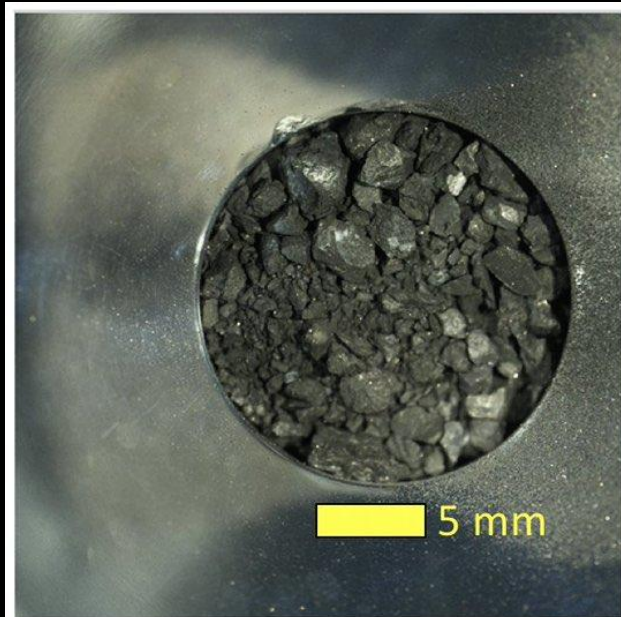
Hayabusa2 Mission (JAXA, 2014-2020)



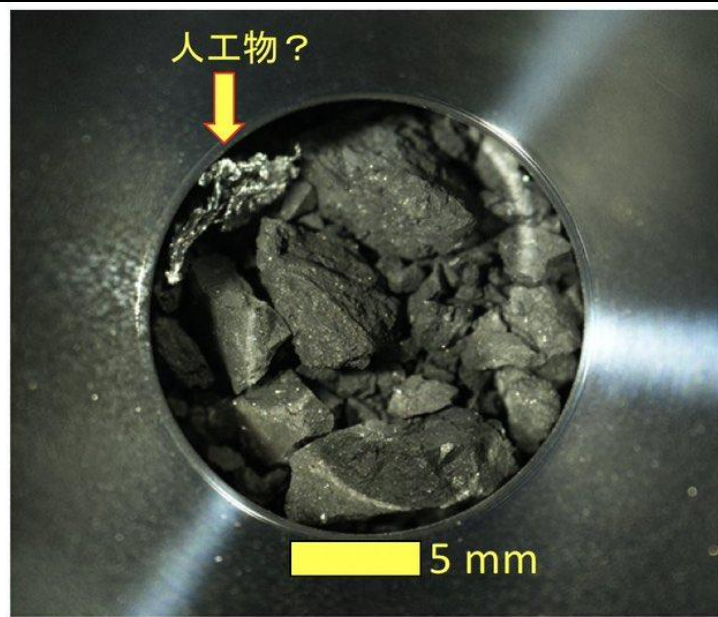
Small Carry-on Impactor (SCI) = 2kg copper projectile / velocity of 2 km.s⁻¹
to form an artificial impact crater on the surface of Ryugu.

Hayabusa2 Mission (JAXA, 2014-2020)

Premier retour d'échantillon d'un astéroïde carboné

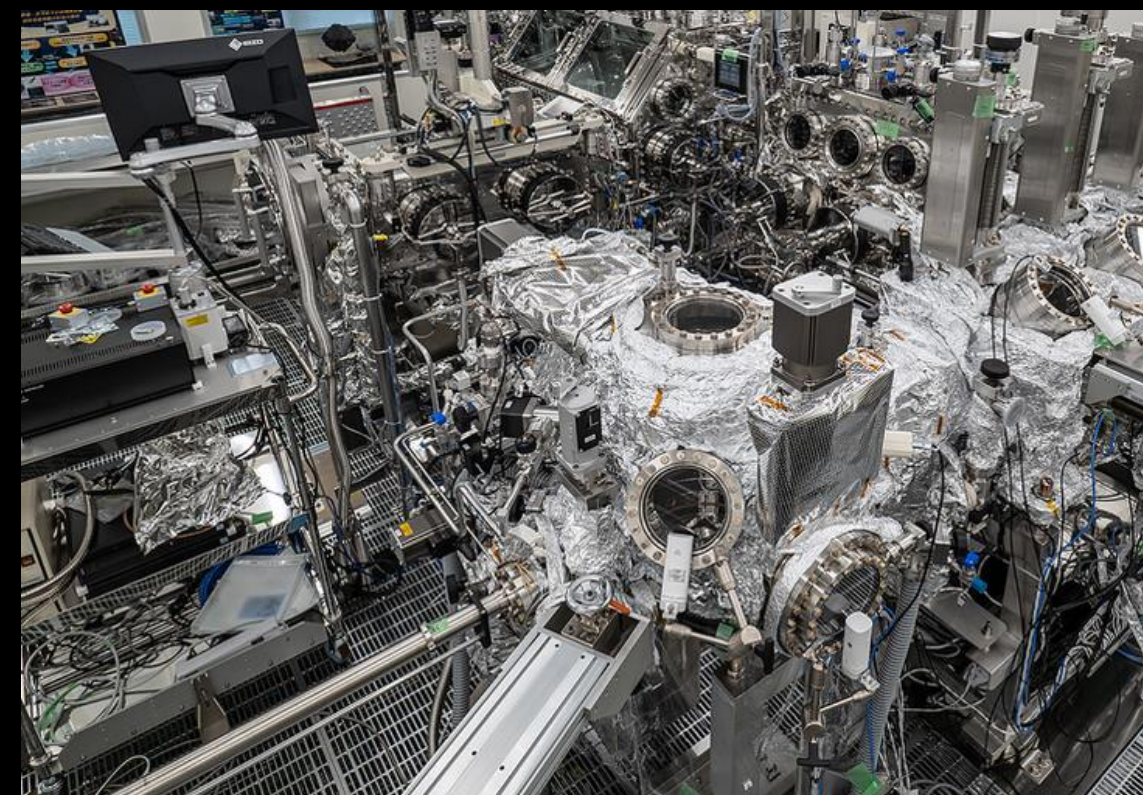


A室(回収容器内)の光学顕微鏡像

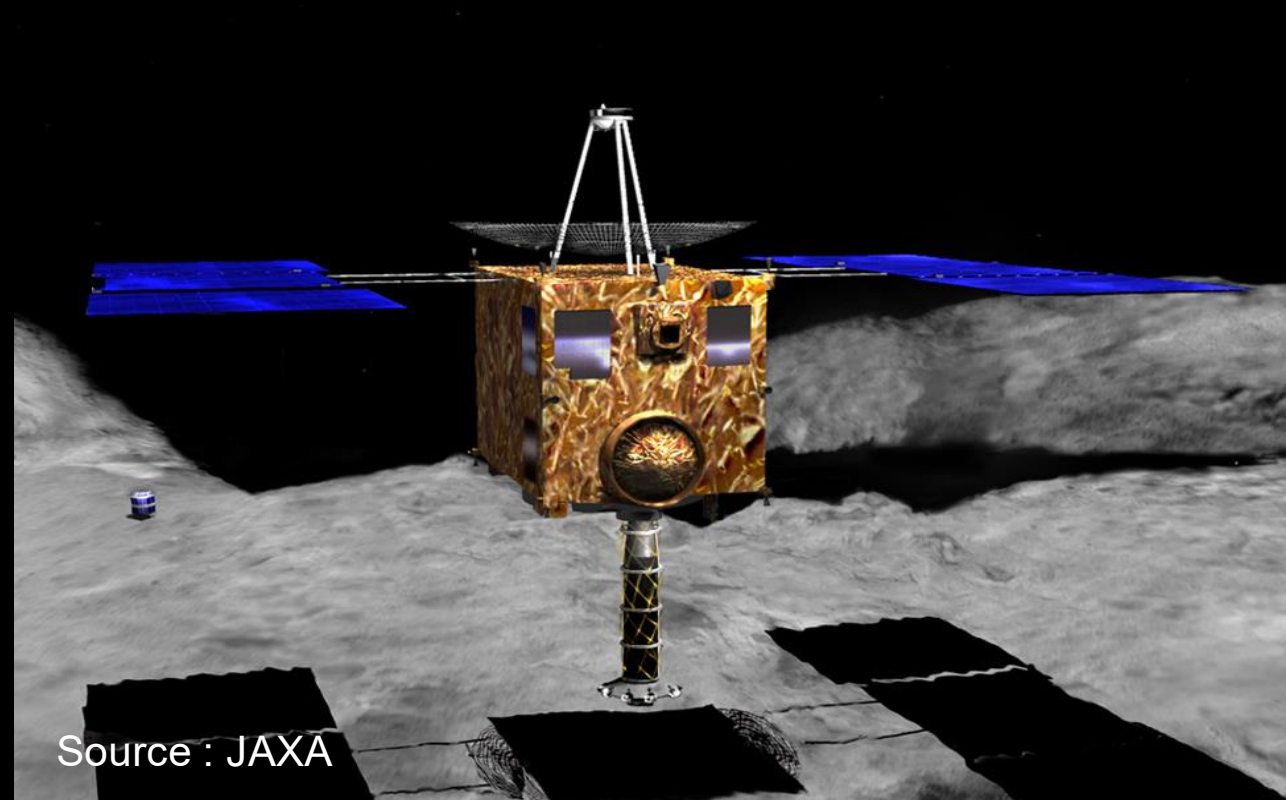


C室(回収容器内)の光学顕微鏡像

→ 5.4 grammes d'échantillons solides et gazeux
pris sur 2 sites
Présence de grains de plusieurs mm



Hayabusa2 Mission (JAXA, 2014-2020)



Météorite de type CI tombée à Orgueil (82) en 1864

- ❑ Lien entre astéroïde carboné et météorites CI riches en volatils
- ❑ Matériau potentiellement à l'origine de l'atmosphère et des océans
- ❑ Ryugu contient plus de gaz nobles et moins d'eau que les météorites CI
- ❑ Matériau plus primitif, non altéré comme le sont les météorites

❖ **Missions Apollo (NASA, 1969-1974)**

Echantillonnage humain de la Lune (6 missions)

❖ **Missions Luna (Roscosmos, 1970-1976)**

Echantillonnage automatique de la Lune (3 missions)



ROSCOSMOS

❖ **Mission Genesis (NASA, 1995-2006)**

Echantillonnage de la matière solaire

❖ **Mission Stardust (NASA, 1999-2011)**

Echantillonnage d'une comète (comet Wild2)

❖ **Mission Hayabusa (JAXA, 2003-2010)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Itokawa, type S)

❖ **Hayabusa2 Mission (JAXA (+CNES), 2020)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Ryugu, riche en carbone)

- **Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)**

- Echantillonnage d'un astéroïde (Bennu, riche en carbone)

- **Mission Chang'e 5, 2021)**

- Echantillonnage de la Lune

- **Mission Chang'e 6, 2024)**

- Echantillonnage de la face cachée de la Lune

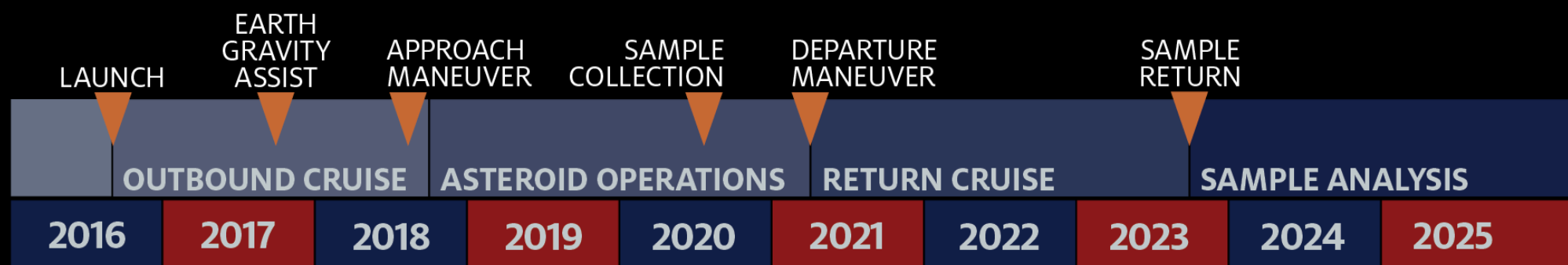




Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)



OSIRIS-REx MISSION OPERATIONS TIMELINE

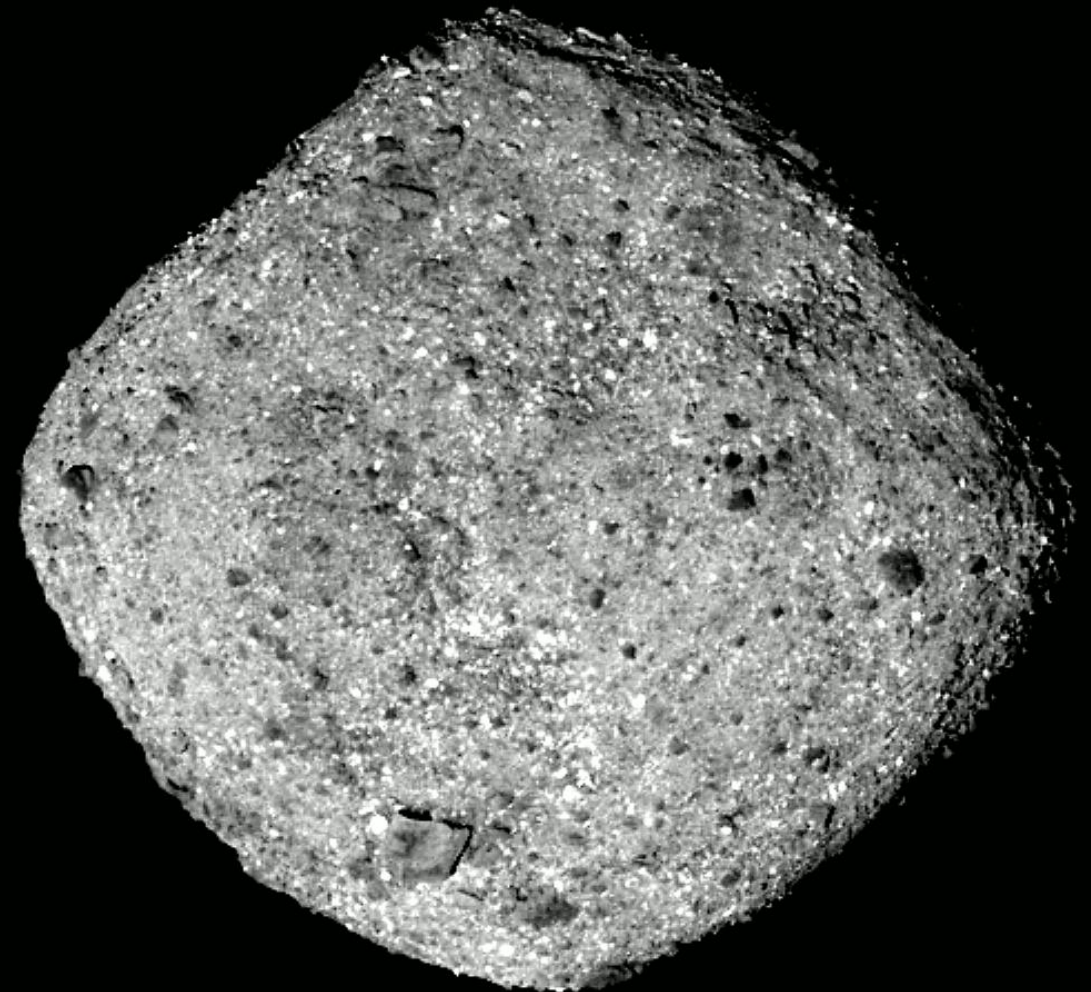
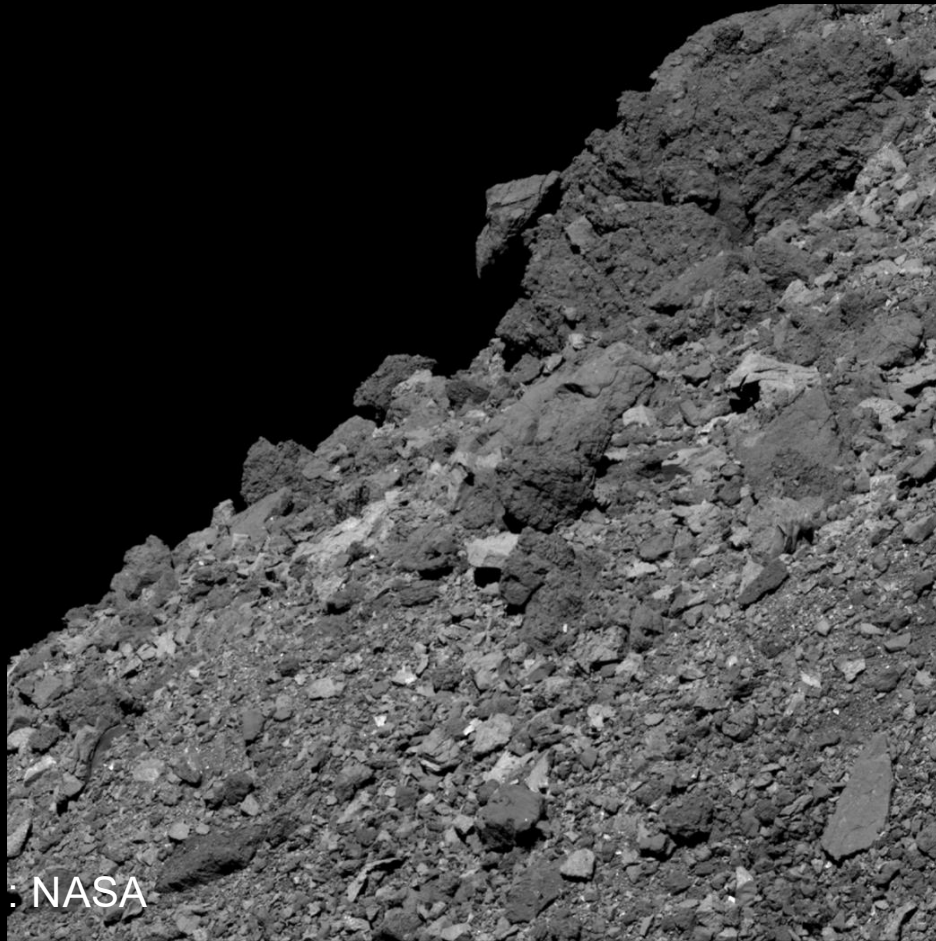


Source : NASA



Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)

- Echantillonnage de Bennu, un astéroïde de type B (B comme bleu)
 - ~500 m
 - carboné (comme Ryugu)

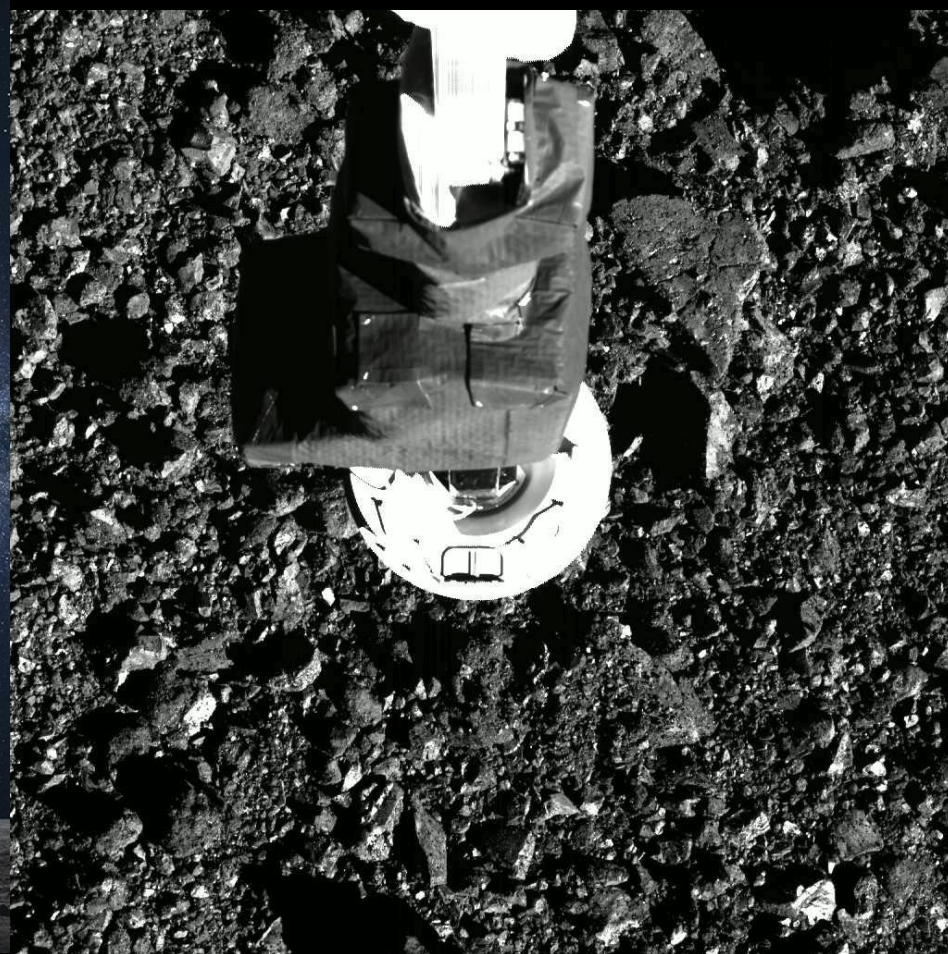


Source : NASA

Mission OSIRIS-REx (NASA, 2016-2023)



Lancement 2006



26 Octobre 2020



24 Septembre 2023

121,6 g ramenés (Hayabusa2: 5.8 g)

1,2 milliards \$ (Hayabusa2: 150 millions \$)

Matériau type CI (comme Hayabusa2)

CRPG



sonde ionique, gaz rares (comme Hayabusa2)



Les missions futures de retour d'échantillons



- ❖ **Mission Chang'e 5, 2021**
 - Echantillonnage de la Lune
- ❖ **Mission Chang'e 6, 2024**
 - Echantillonnage de la face cachée de la Lune
- ❖ **Mission Tianwen-2 2025 ?**
 - Retour d'échantillons d'astéroïdes + visite comète
- ❖ **Mission Tianwen-3 2030 ?**
 - Retour d'échantillons martiens
- ❖ **Mission lunaire habitée 2030 ?**
 - Retour d'échantillons martiens

Les missions futures de retour d'échantillons



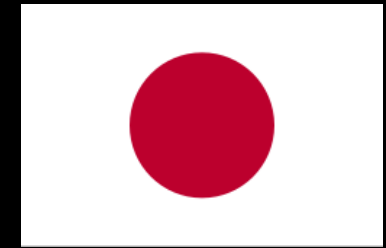
- ❖ **Mission Chang'e 5, 2021**
 - Echantillonnage de la Lune
- ❖ **Mission Chang'e 6, 2024**
 - Echantillonnage de la face cachée de la Lune
- ❖ **Mission Tianwen-2 2025 ?**
 - Retour d'échantillons d'astéroïdes + visite comète
- ❖ **Mission Tianwen-3 2030 ?**
 - Retour d'échantillons martiens
- ❖ **Mission lunaire habitée 2030 ?**
 - Retour d'échantillons martiens



Mars Sample Return (NASA avec collab. ESA)

Programme Artemis 2027
?(NASA avec collab. Canada, Europe, Japon). Retour d'humains sur la Lune. En reconfiguration.

Les missions futures de retour d'échantillons



- ❖ **Mission Chang'e 5, 2021**
 - Echantillonnage de la Lune
- ❖ **Mission Chang'e 6, 2024**
 - Echantillonnage de la face cachée de la Lune
- ❖ **Mission Tianwen-2 2025 ?**
 - Retour d'échantillons d'astéroïdes + visite comète
- ❖ **Mission Tianwen-3 2030 ?**
 - Retour d'échantillons martiens
- ❖ **Mission lunaire habitée 2030 ?**
 - Retour d'échantillons martiens



Mars Sample Return (NASA avec collab. ESA), annulé

Programme Artemis 2027 ? (NASA avec collab. Canada, Europe, Japon). Retour d'humains sur la Lune. En reconfiguration.



European Space Agency



- MMX 2024-2029**
- Echantillonnage de l'une des deux lunes de Mars (Phobos/Deimos).
- Héritage de Hayabusa2
- Collaboration

