

UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY — 2023-2024

*Phys 137 : séance 9*

# Formation des systèmes planétaires

[zelia.dionnet@universite-paris-saclay.fr](mailto:zelia.dionnet@universite-paris-saclay.fr) (IAS)

# Observation de notre système Solaire

---



## Définition d'une planète :

- 
- 
-

# Observation de notre système Solaire

---



8 planètes qui orbitent autour d'une étoile

## Définition d'une planète :

- elle doit être en orbite autour d'une étoile;
- elle doit avoir une forme à peu près sphérique;
- elle doit avoir fait le vide autour d'elle, c'est-à-dire ne plus avoir de corps de taille comparable à la sienne sur une orbite proche, à l'exception de ses propres satellites

## Observation de notre système Solaire

---



**Comment en est-on arrivé là ?**

8 planètes qui orbitent autour d'une étoile

orbite autour d'une

elle doit avoir une forme à peu près sphérique;

- elle doit avoir fait le vide autour d'elle, c'est-à-dire ne plus avoir de corps de taille comparable à la sienne sur une orbite proche, à l'exception de ses propres satellites

## Point de départ : Les nuages interstellaires

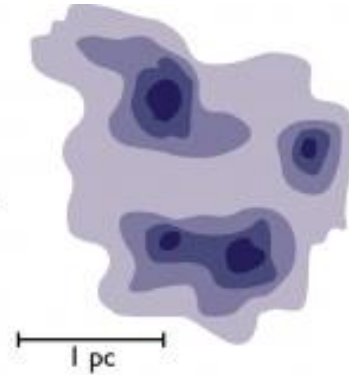
---



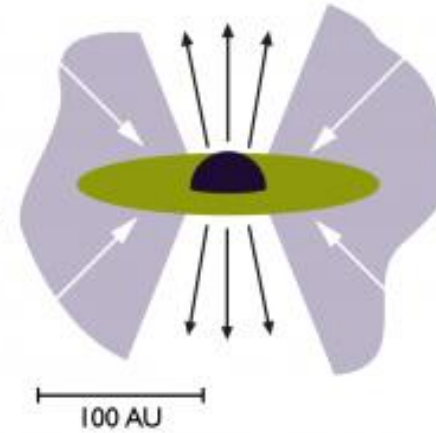
*Nuage de gaz et de poussière*

# Scénario actuel de formation du système solaire

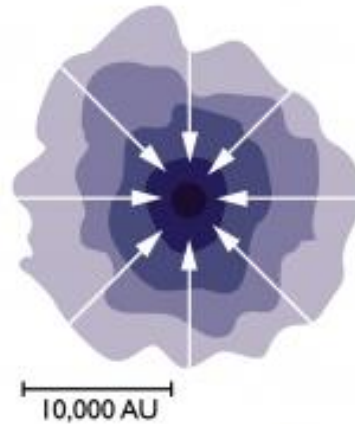
Etat initial : nuage de gaz initial avec plusieurs surdensités locales.



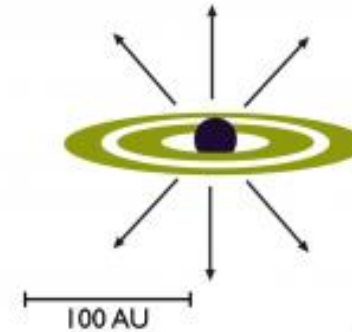
$\tau = 10^{**5} - 10^{**6}$  ans : phase T Tauri. Les réactions thermonucléaires démarrent au centre : l'étoile est née. Un jet bipolaire se forme le long de l'axe de rotation.



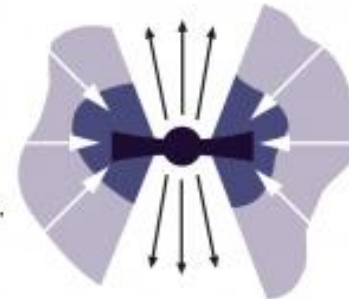
$t=0$  : effondrement gravitationnel et fragmentation du Nuage. Au centre de chaque surdensité se forme un coeur dense.



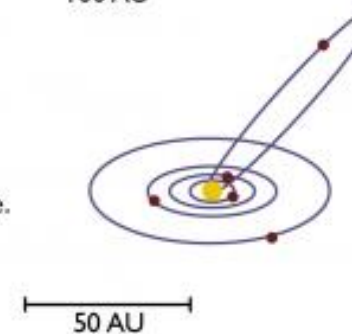
$\tau = 10^{**6} - 10^{**7}$  ans : condensation puis accréation de matière solide dans le disque en refroidissement.



$\tau = 10^{**4} - 10^{**5}$  ans : le coeur dense devient opaque et chauffe rapidement. Formation d'un disque d'accréation.



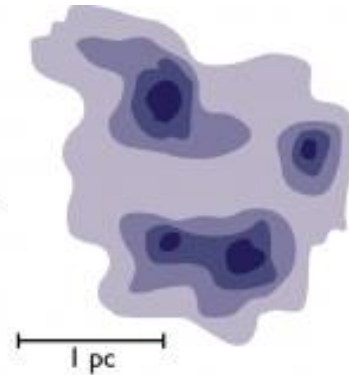
$\tau = 10^{**7} - 10^{**8}$  : fin de la période d'accréation. Formation des planètes et dispersion du gaz restant dans le disque.



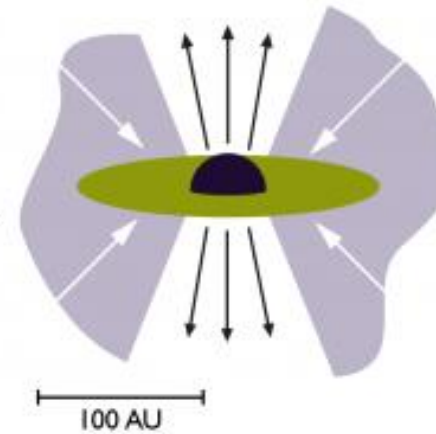
# Scénario actuel de formation du système solaire

Pourquoi et comment survient cet effondrement ?

Etat initial : nuage de gaz initial avec plusieurs surdensités locales.



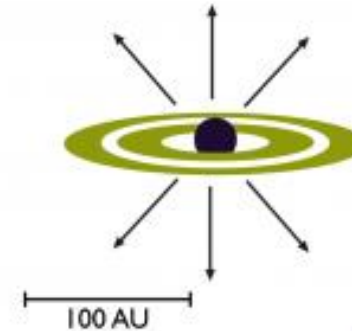
$\tau = 10^{**5} - 10^{**6}$  ans : phase T Tauri. Les réactions thermonucléaires démarrent au centre : l'étoile est née. Un jet bipolaire se forme le long de l'axe de rotation.



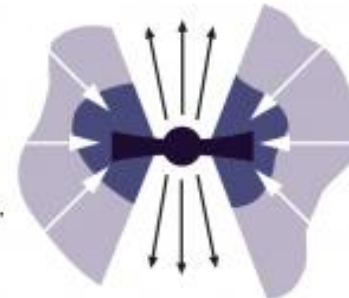
$t=0$  : effondrement gravitationnel et fragmentation du Nuage. Au centre de chaque surdensité se forme un coeur dense.



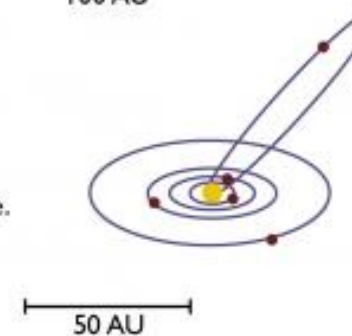
$\tau = 10^{**6} - 10^{**7}$  ans : condensation puis accréation de matière solide dans le disque en refroidissement.



$\tau = 10^{**4} - 10^{**5}$  ans : le coeur dense devient opaque et chauffe rapidement. Formation d'un disque d'accréation.



$\tau = 10^{**7} - 10^{**8}$  : fin de la période d'accréation. Formation des planètes et dispersion du gaz restant dans le disque.



## Étape 1 : Effondrement du disque protoplanétaire

---



Considérons un nuage moléculaire en rotation, dense et froid, situé dans notre Voie Lactée. Il est initialement à l'équilibre :

$$\text{Pression interne} = \text{Force gravitationnelle}$$

Cet équilibre peut être perturbé par

- Le passage par un **bras galactique** : passage du nuage dans une zone de haute densité de matière → forte compression
- Explosion **d'une supernova** : formidable onde de choc qui comprime violemment les régions qu'elle traverse



## Masse critique de Jeans

---

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ SI.}$ ]

1. Rappelez l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur  $E_{pG}$  en fonction de  $G$ ,  $M$  et  $R$ .
2. À quelle condition sur ces deux énergies, potentielle et cinétique, correspond le déclenchement de l'effondrement ? On notera alors  $M_J$  la masse de Jeans vérifiant cette condition.
3. En déduire l'expression de  $M_J$  en fonction de  $R$  et des constantes appropriées.
4. On note  $\mu$  la masse volumique du nuage, que l'on supposera constante. Exprimez alors  $R$  en fonction de  $M_J$  et de  $\mu$ . Donnez la nouvelle expression de la masse critique.
5. Faites une application numérique pour des valeurs typiques des nuages moléculaires froids, soit  $T = 20 \text{ °K}$  et  $\mu = 1,67 \cdot 10^{-17} \text{ kg.m}^{-3}$ . Que pensez-vous du résultat ? [Pour comparaison, la masse totale du Système Solaire est aujourd'hui d'environ  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg.}$ ]

## Masse critique de Jeans

---

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  SI.]

1. Rappelez l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur  $E_p$  en fonction de  $G$ ,  $M$  et  $R$ .

$$E_p = \frac{GM^2}{R}$$

## Masse critique de Jeans

---

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ SI.}$ ]

2. À quelle condition sur ces deux énergies, potentielle et cinétique, correspond le déclenchement de l'effondrement ? On notera alors  $M_J$  la masse de Jeans vérifiant cette condition.

Pour l'effondrement, on doit avoir  $E_p > E_c$

On déclenche l'effondrement à  $E_p = E_c$

## Masse critique de Jeans

---

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  SI.]

3. En déduire l'expression de  $M_J$  en fonction de  $R$  et des constantes appropriées.

$$E_p = E_c$$

Nous donne : 
$$\frac{GM^2}{R} = \frac{3}{2} k_B T \frac{M}{\mu_H}$$

## Masse critique de Jeans

---

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ SI.}$ ]

3. En déduire l'expression de  $M_J$  en fonction de  $R$  et des constantes appropriées.

$$E_p = E_c$$

$$\text{Nous donne : } \frac{GM^2}{R} = \frac{3}{2} k_B T \frac{M}{\mu_H}$$

$$\text{Donc : } M_J = \frac{3}{2} k_B T \frac{R}{G\mu_H}$$

## Masse critique de Jeans

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ SI.}$ ]

4. On note  $\mu$  la masse volumique du nuage, que l'on supposera constante. Exprimez alors  $R$  en fonction de  $M_J$  et de  $\mu$ . Donnez la nouvelle expression de la masse critique.

$$\mu = \frac{M_J}{V} = \frac{M_J}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad \text{donc } R = \left( \frac{M_J}{\mu} \frac{3}{4\pi} \right)^{1/3}$$

*En réinjectant cette équation dans le résultat de la question 3, on obtient :*

$$M_J = \frac{3k_B T}{2G\mu_H} \left( \frac{M_J}{\mu} \frac{3}{4\pi} \right)^{1/3} \quad \text{donne } M_J^{2/3} = \frac{3k_B T}{2G\mu_H} \left( \frac{3}{4\pi\mu} \right)^{1/3}$$

$$\text{donc : } M_J = \left( \frac{3k_B T}{2G\mu_H} \right)^{3/2} \left( \frac{3}{4\pi\mu} \right)^{1/2}$$

## Masse critique de Jeans

---

Soit un nuage interstellaire de masse totale  $M$ , supposé sphérique de rayon  $R$ , composé d'un gaz d'hydrogène à l'équilibre thermodynamique. On admettra que l'énergie cinétique totale du nuage peut alors s'écrire :  $E_C = (3k_B T / 2) * (M / \mu_H)$  avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température moyenne du nuage et  $\mu_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  la masse d'un atome d'hydrogène. [On rappelle la valeur de la constante de la gravitation universelle  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ SI.}$ ]

5. Faites une application numérique pour des valeurs typiques des nuages moléculaires froids, soit  $T = 20 \text{ °K}$  et  $\mu = 1,67 \cdot 10^{-17} \text{ kg.m}^{-3}$ . Que pensez-vous du résultat ? [Pour comparaison, la masse totale du Système Solaire est aujourd'hui d'environ  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg.}$ ]

$$M_J = \left( \frac{3 * 1,38 \cdot 10^{-23} * 20}{2 * 6,67 \cdot 10^{-11} * 1,67 \cdot 10^{-27}} \right)^{3/2} \left( \frac{3}{4\pi * 1,67 \cdot 10^{-17}} \right)^{1/2}$$

$$M_J = 2,71 \cdot 10^{31} \text{ kg} \sim 10 \text{ masse du système solaire}$$

À partir d'un nuage, plusieurs étoiles vont se former

# Tous les nuages ne s'effondrent pas

---

Un nuage de gaz ou une zone de celui-ci peut **devenir instable et s'effondrer sur lui-même** lorsque sa **pression interne ne contrebalance plus les effets gravitationnels** qui tendent à le contracter

Masse critique de Jeans :

$$M_J = \left(\frac{3}{2}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{3}{4\pi\rho}} \cdot \left(\frac{k_B T}{\mu_H G}\right)^{3/2}$$

**Au-delà de la mass de Jeans**, une série de processus de contractions gravitationnelles s'enclenchent



Le nuage s'effondre:

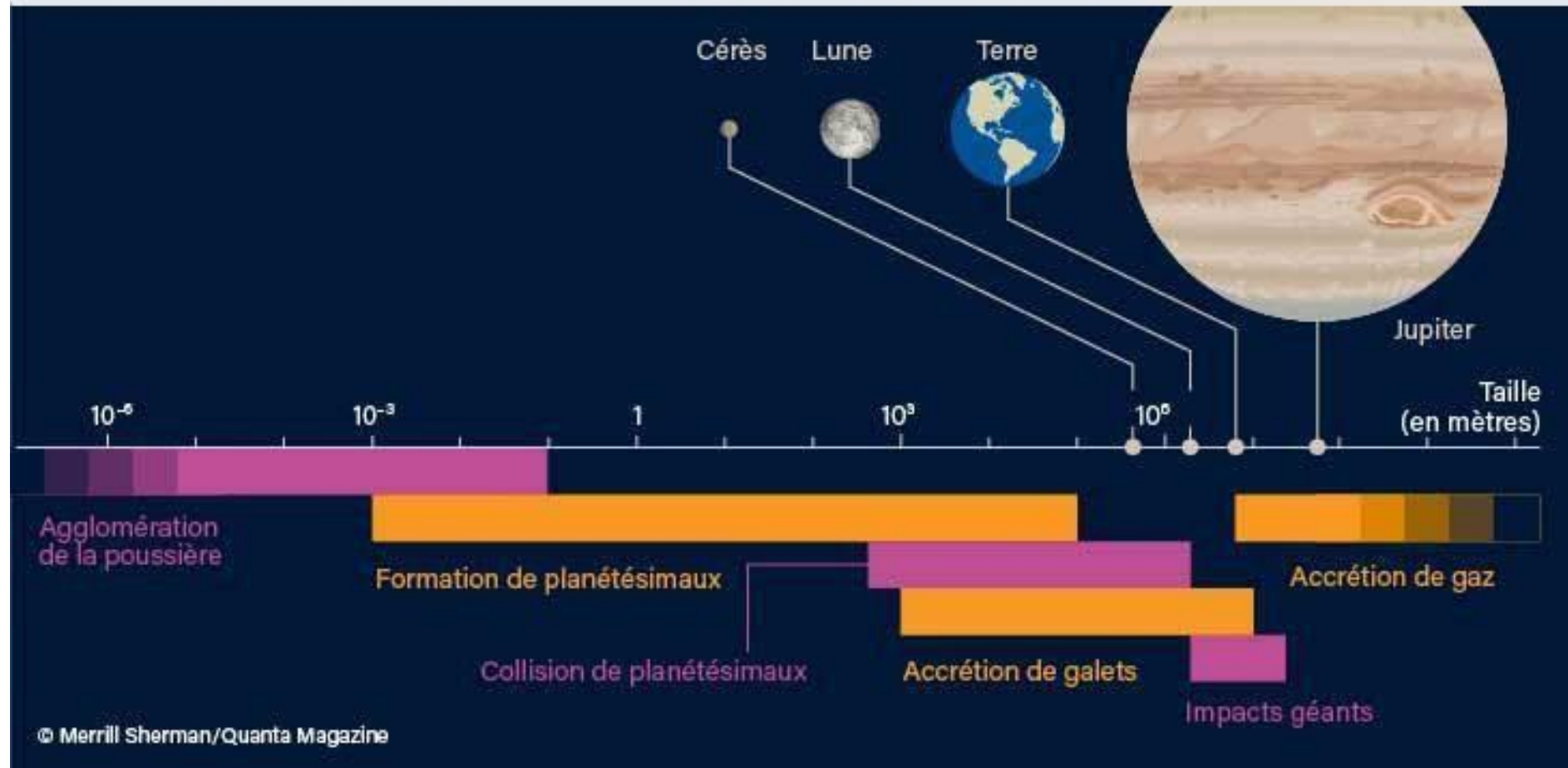
Le cœur dense devient opaque, les réactions thermonucléaires démarre : l'étoile est né  
Formation du disque d'accrétion



## Étape 2 : Formation des planétésimaux

### COMMENT LES PLANÈTES GRANDISSENT

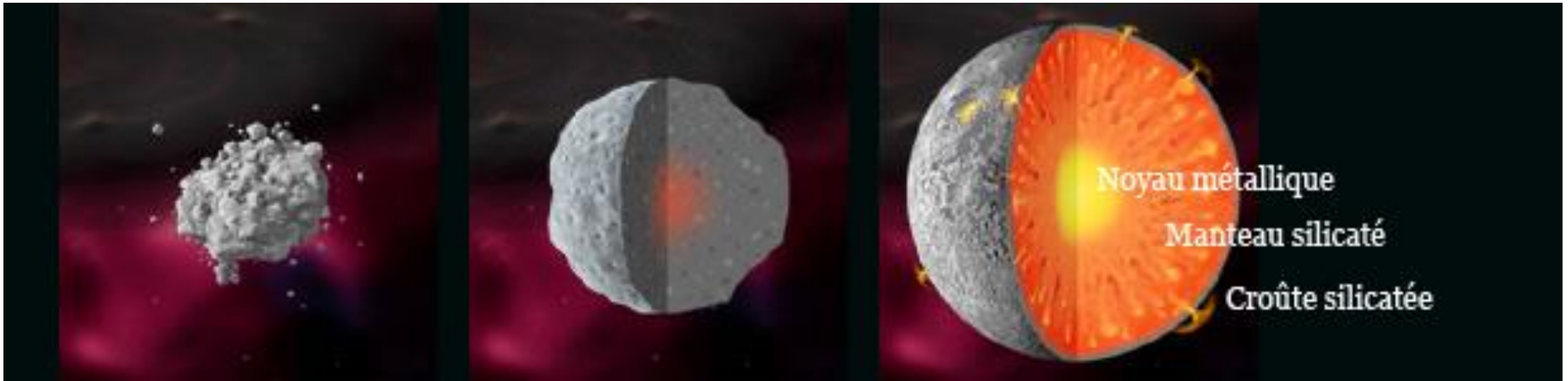
Les planètes se forment grâce à plusieurs processus qui opèrent sur différentes échelles.



# La différenciation planétaire

---

Pour les plus gros objets : structuration des planètes par couche  
-> DIFFERENCIATION



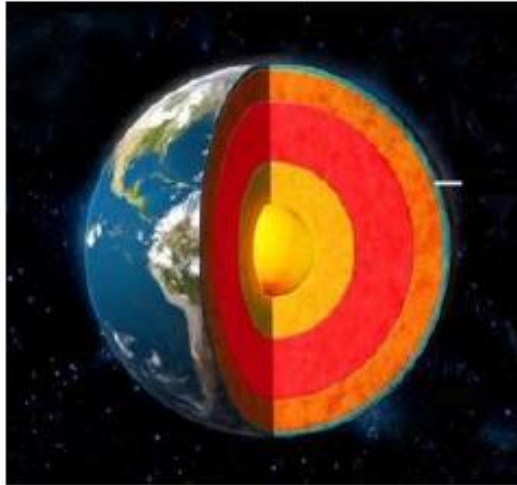
- Pour différencier une planète, le mieux c'est de la faire fondre :
- Chaleur d'accrétion (pour les corps plus grands que 800 km)
  - Effet radioactif : décroissance de  $^{26}\text{Al}$  et  $^{60}\text{Fe}$

# Planètes gazeuses VS planètes telluriques

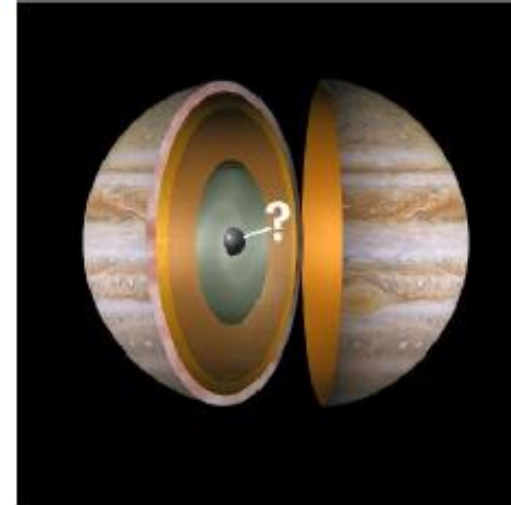
---

## Tellurique

SiO, Fe / Ni  
 $M \sim M_{\text{Terre}} : 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$   
 $\rho \sim 3 - 5$



## Composition



## Gazeuse

H / He, CH<sub>4</sub> / NH<sub>3</sub>  
 $M \sim M_{\text{Jup}} : 2 \cdot 10^{27} \text{ kg}$   
 $\rho \sim 1 - 2$

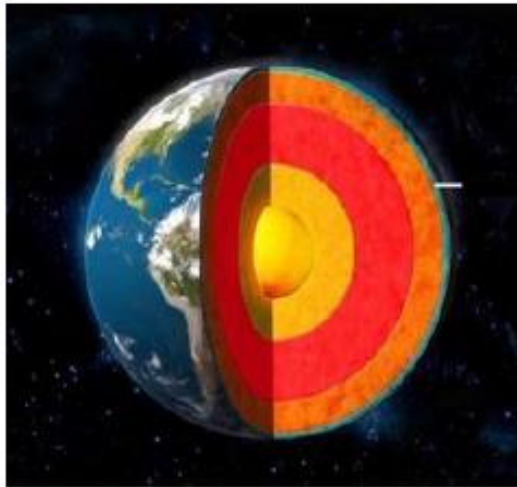
Classez les planètes du Système Solaire

# Planètes gazeuses VS planètes telluriques

---

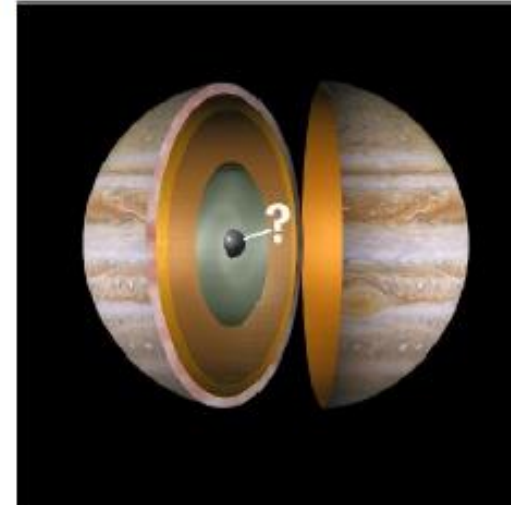
## Tellurique

SiO, Fe / Ni  
 $M \sim M_{\text{Terre}} : 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$   
 $\rho \sim 3 - 5$



**Mars**  
**Terre**  
**Venus**  
**Mercure**

## Composition



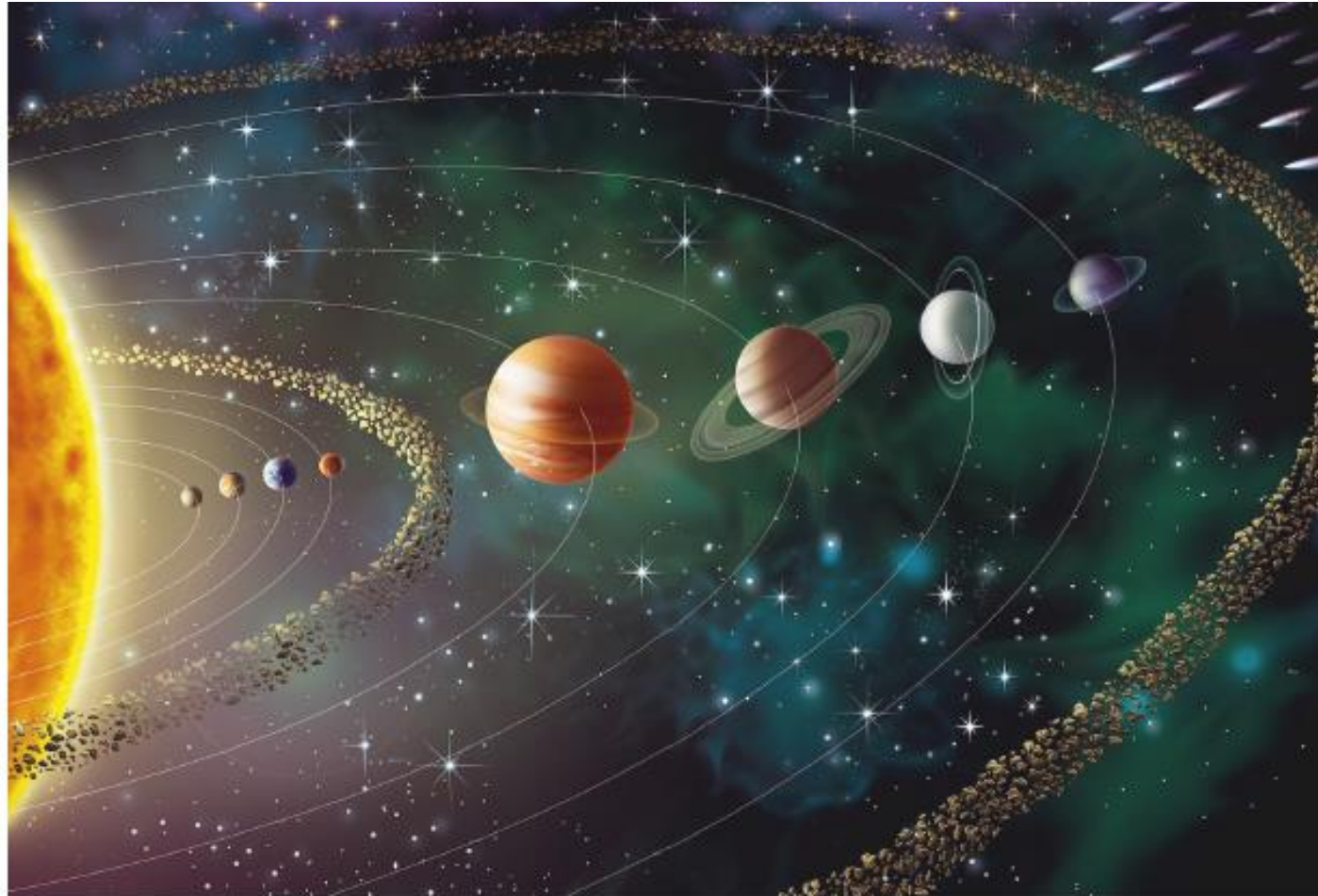
**Jupiter**  
**Saturne**  
**Neptune**  
**Uranus**

## Gazeuse

H / He, CH<sub>4</sub> / NH<sub>3</sub>  
 $M \sim M_{\text{Jup}} : 2 \cdot 10^{27} \text{ kg}$   
 $\rho \sim 1 - 2$

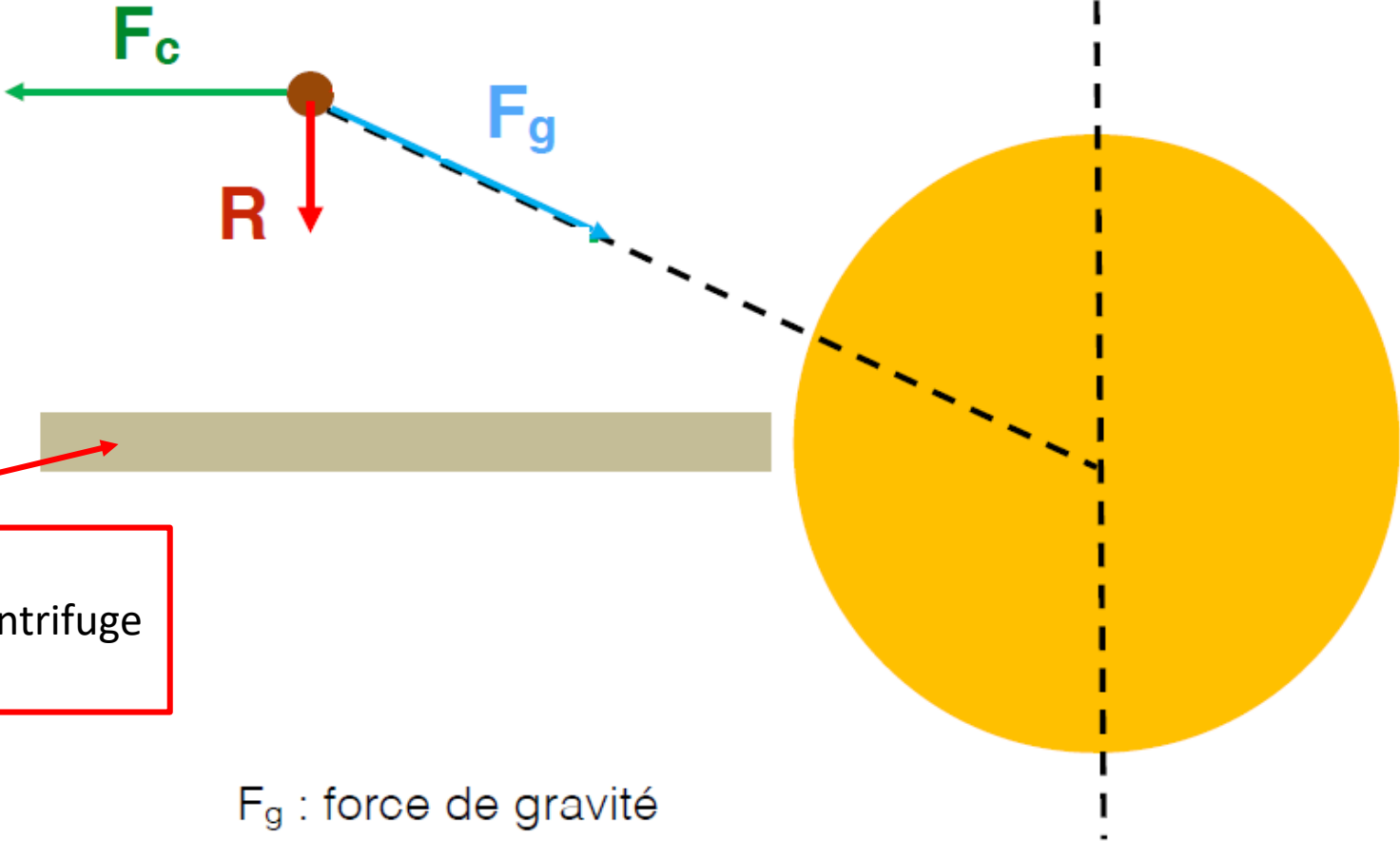
# Répartitions des corps planétaires

---



Toutes les planètes orbitent dans le plan équatorial

# Stabilité dans le plan équatorial



Plan équatorial :  
Force gravité devient // à la force centrifuge  
Équilibre atteint

$F_g$  : force de gravité  
 $F_c$  : force centrifuge  
 $R$  : résultante

# Répartitions des corps planétaires

---



Régularité géométrique ?

$$r = 0,4 + 0,3 \times 2^{n-1} \text{ [U.A.]}$$

Loi de Titius-Bode (1766/1772)

## Application de la loi de Titius Bode

---

On rappelle l'expression de la loi empirique de Titius-Bode :  $r = 0.4 + 0.3 * 2^{n-1}$ . Dans cette formule,  $r$  est la distance moyenne de la planète à son étoile en Unités Astronomiques (UA) et  $n$  est le numéro de la planète en comptant depuis Vénus à  $n=1$  ( $n=-\infty$  pour Mercure). On rappelle que  $1 \text{ UA} = 150.10^6 \text{ km}$ .

1. Calculez la distance à laquelle se trouve Mars d'après cette loi.
2. Une ceinture d'astéroïdes se trouve à 420 millions de kilomètre du Soleil, quel est son numéro  $n$  dans le Système solaire ? Qu'en pensez-vous ?
3. Que se passe-t-il pour Uranus ? et Neptune ? [Remarque : son demi-grand axe est  $\sim 30 \text{ UA}$ .]
4. Un objet Transneptunien nommé Sedna a son périhélie situé à 76 UA. Peut-on retrouver cette valeur ? Que pouvez-vous en dire ?



# Application de la loi de Titius Bode

---

On rappelle l'expression de la loi empirique de Titius-Bode :  $r = 0.4 + 0.3 * 2^{n-1}$ . Dans cette formule,  $r$  est la distance moyenne de la planète à son étoile en Unités Astronomiques (UA) et  $n$  est le numéro de la planète en comptant depuis Vénus à  $n=1$  ( $n=-\infty$  pour Mercure). On rappelle que  $1 \text{ UA} = 150.10^6 \text{ km}$ .

1. Calculez la distance à laquelle se trouve Mars d'après cette loi.

Pour Mars,  $n=3$

Donc  $r = 0.4 + 0.3 * 2^2 = 1.6 \text{ UA}$

## Application de la loi de Titius Bode

---

On rappelle l'expression de la loi empirique de Titius-Bode :  $r = 0.4 + 0.3 * 2^{n-1}$ . Dans cette formule,  $r$  est la distance moyenne de la planète à son étoile en Unités Astronomiques (UA) et  $n$  est le numéro de la planète en comptant depuis Vénus à  $n=1$  ( $n=-\infty$  pour Mercure). On rappelle que  $1 \text{ UA} = 150.10^6 \text{ km}$ .

2. Une ceinture d'astéroïdes se trouve à 420 millions de kilomètre du Soleil, quel est son numéro  $n$  dans le Système solaire ? Qu'en pensez-vous ?

La ceinture principale d'astéroïdes est à  $420. 10^6 \text{ km} = 2.8 \text{ UA}$  (on rappelle que  $150. 10^6 = 1 \text{ UA}$ )

On a donc  $2.8 - 0.4 = 0.3 * 2^{n-1}$

$$2,4 / 0.3 = 2^{n-1} \Rightarrow \ln(2,4 / 0.3) = \ln(2^{n-1}) \Rightarrow \ln(2,4 / 0.3) = (n-1) \ln(2) \Rightarrow \ln(8) = (n-1) \ln(2) \Rightarrow \ln(8)/\ln(2) = (n-1) = 3$$

Donc  $n=4$

Cela donne la position d'une planète, il y aurait du avoir une planète à la place de la ceinture principale, il y a en fait un objet Cérès, qui fait  $\sim 1000 \text{ km}$  de diamètre  $\Rightarrow$  planètes naine + entouré de 100 000 autres objets plus petits

# Application de la loi de Titius Bode

---

On rappelle l'expression de la loi empirique de Titius-Bode :  $r = 0.4 + 0.3 * 2^{n-1}$ . Dans cette formule,  $r$  est la distance moyenne de la planète à son étoile en Unités Astronomiques (UA) et  $n$  est le numéro de la planète en comptant depuis Vénus à  $n=1$  ( $n=-\infty$  pour Mercure). On rappelle que  $1 \text{ UA} = 150.10^6 \text{ km}$ .

3. Que se passe-t-il pour Uranus ? et Neptune ? [Remarque : son demi-grand axe est  $\sim 30 \text{ UA}$ .]

Pour Uranus,  $n=7$

Donc  $r = 0.4 + 0.3 * 2^6 = 19.6 \text{ UA}$

et pour Neptune,  $n=8$  donne  $r = 38.8 \text{ UA}$

Cela ne fonctionne plus

## Application de la loi de Titius Bode

---

On rappelle l'expression de la loi empirique de Titius-Bode :  $r = 0.4 + 0.3 * 2^{n-1}$ . Dans cette formule,  $r$  est la distance moyenne de la planète à son étoile en Unités Astronomiques (UA) et  $n$  est le numéro de la planète en comptant depuis Vénus à  $n=1$  ( $n=-\infty$  pour Mercure). On rappelle que  $1 \text{ UA} = 150.10^6 \text{ km}$ .

4. Un objet Transneptunien nommé Sedna a son périhélie situé à 76 UA. Peut-on retrouver cette valeur ? Que pouvez-vous en dire ?

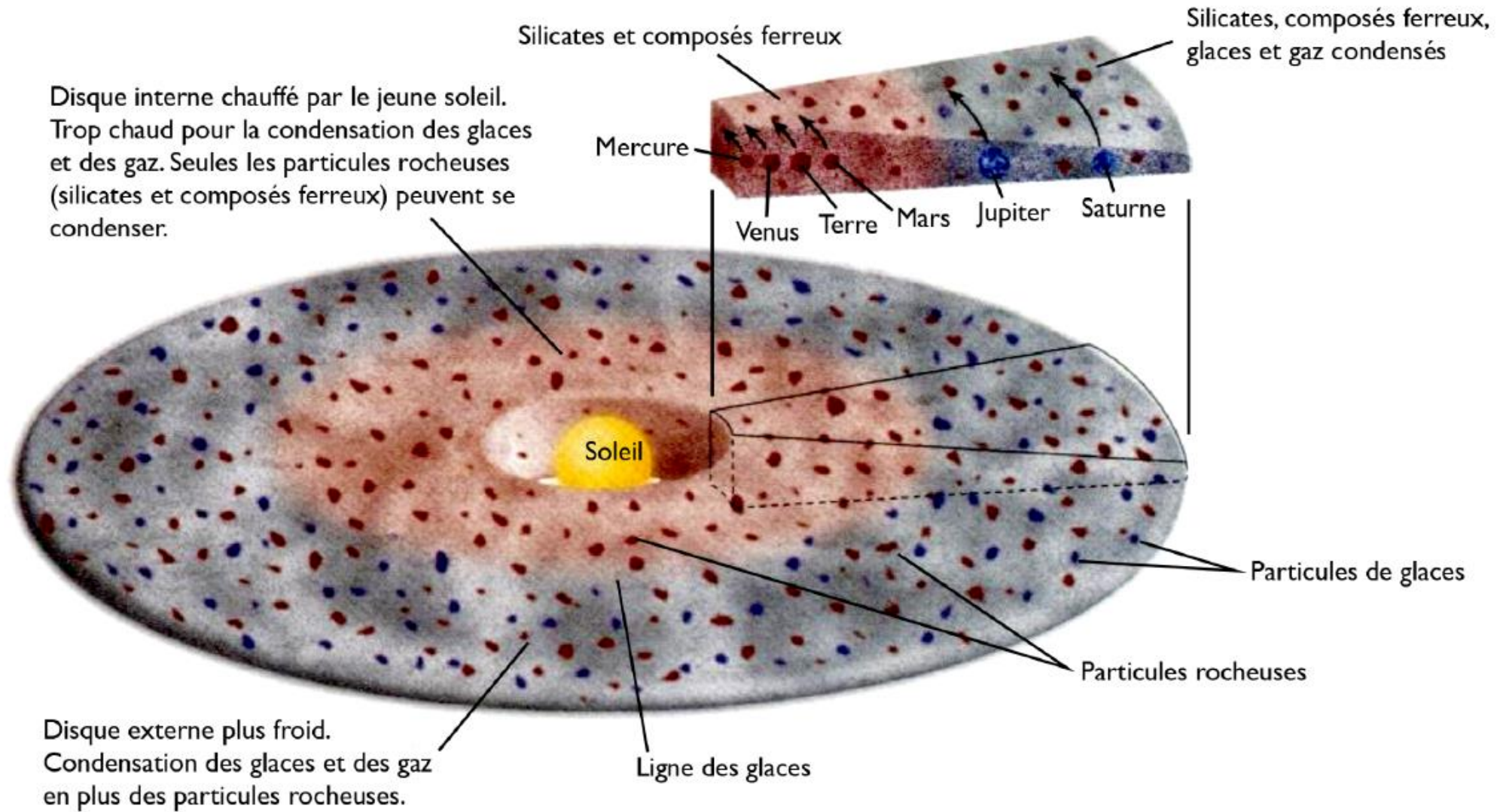
Si l'on considère  $n=9$ , on trouve  $r = 77.2 \text{ UA}$ .

Cela pourrait donc marcher pour Sedna

Mais – aphélie a 526 UA

- il y a Pluton à 39,4 UA donc avant Sedna

# Ligne de glace



## Zone d'habitabilité / Conditions de la vie sur Terre

---



La zone habitable circumstellaire est une **sphère théorique entourant une étoile et où la température à la surface des planètes y orbitant permettrait l'apparition d'eau liquide**

# Zone d'habitabilité / Conditions de la vie sur Terre



La zone habitable circumstellaire est une **sphère théorique entourant une étoile** et où la température à la surface des planètes y orbitant permettrait l'apparition d'eau liquide

## Vie sur Terre

Distance au Soleil => eau liquide

Masse => retenir l'atmosphère

Composition => magnétosphère

Lune => climat stable

Migration des géantes => apport de glace

Soleil de type G2 => rayonnement peu ionisant

Présence de Jupiter => parapluie contre impacts géants

## Le problème des Jupiters chauds

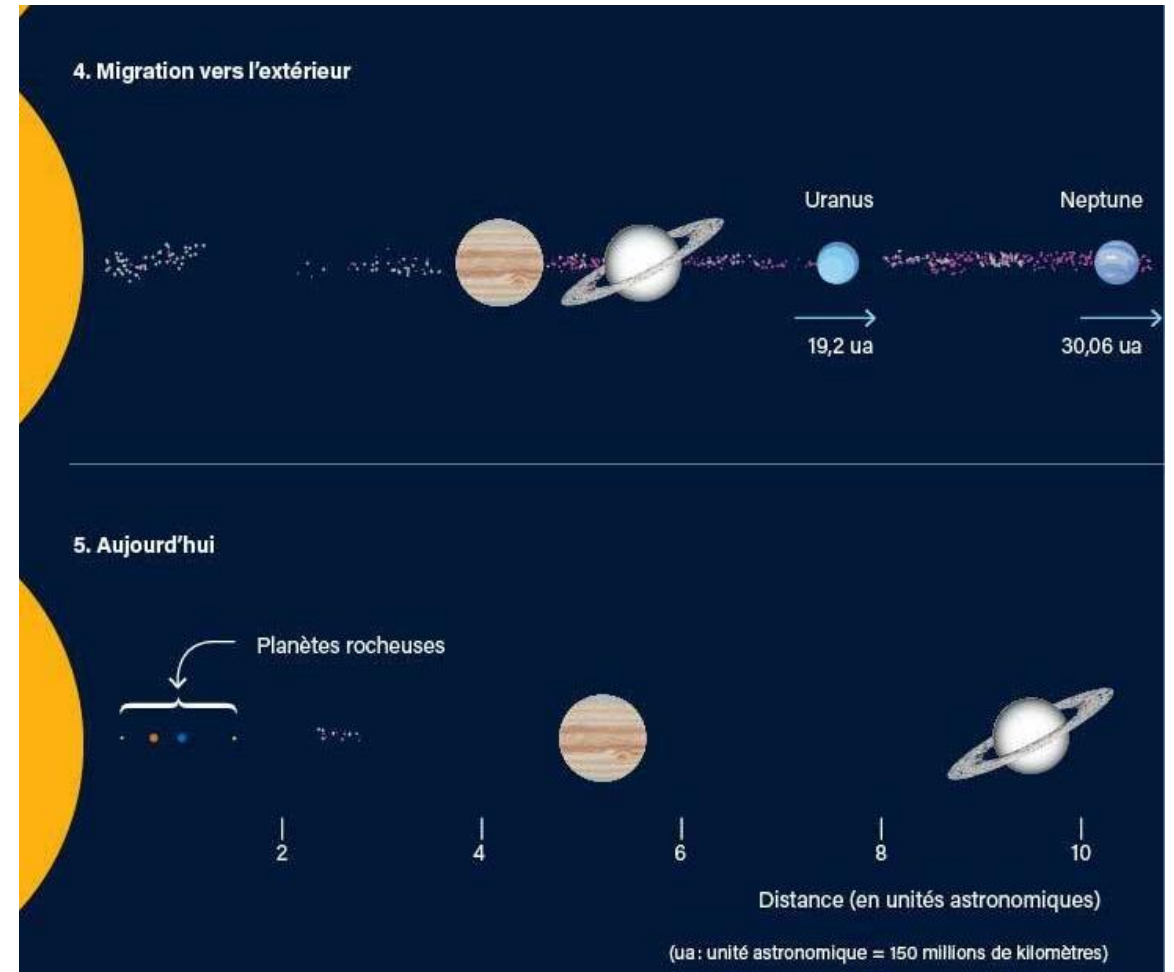
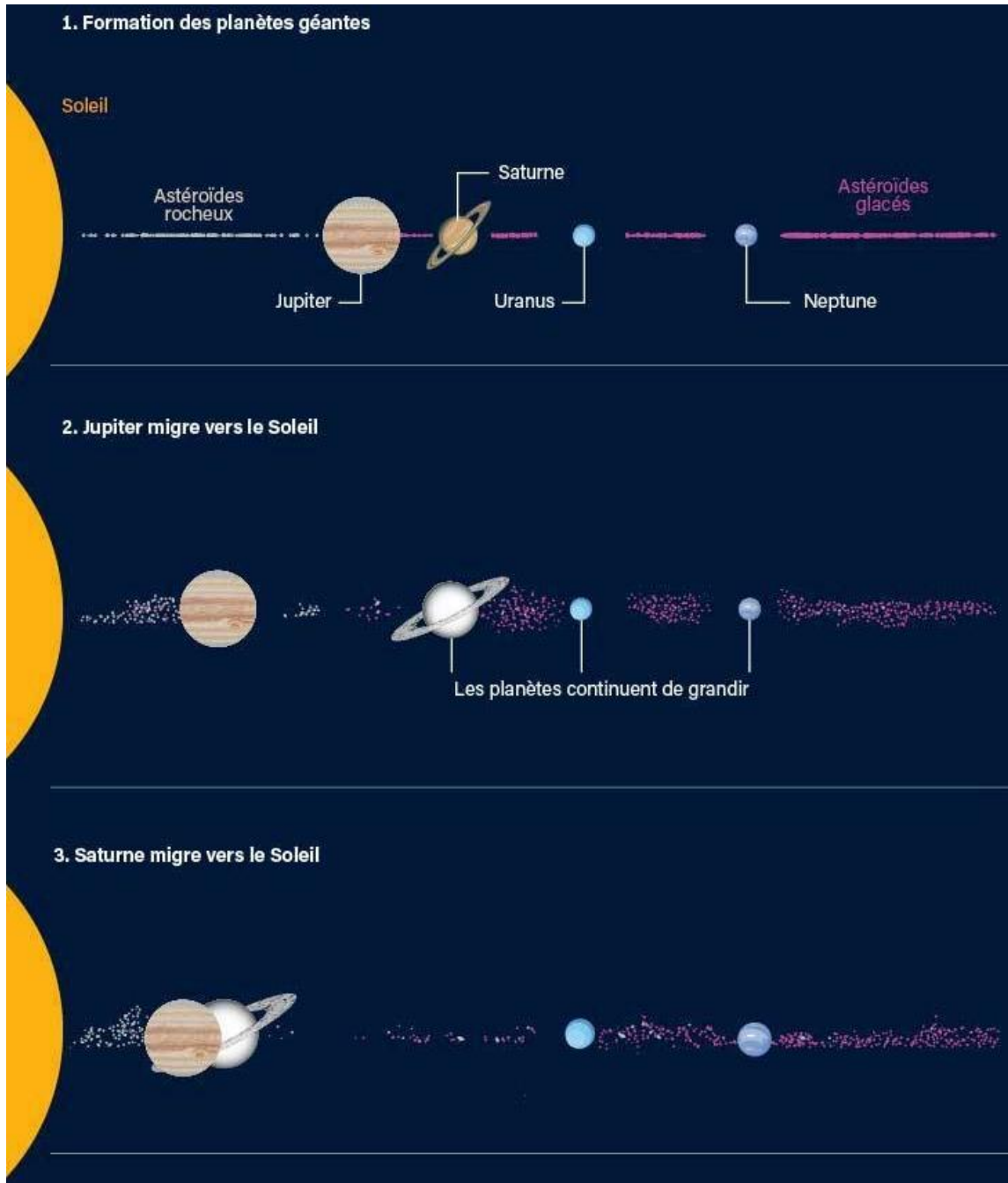
---



- Planète gazeuse de masse comparable ou supérieur à celle de Jupiter mais dont la température dépasse 1000 K.
- Formé plus loin et migration planétaire pour expliquer leur place actuelle



# Migration planétaire : Modèle de Nice



# Scénario de formation de la Lune



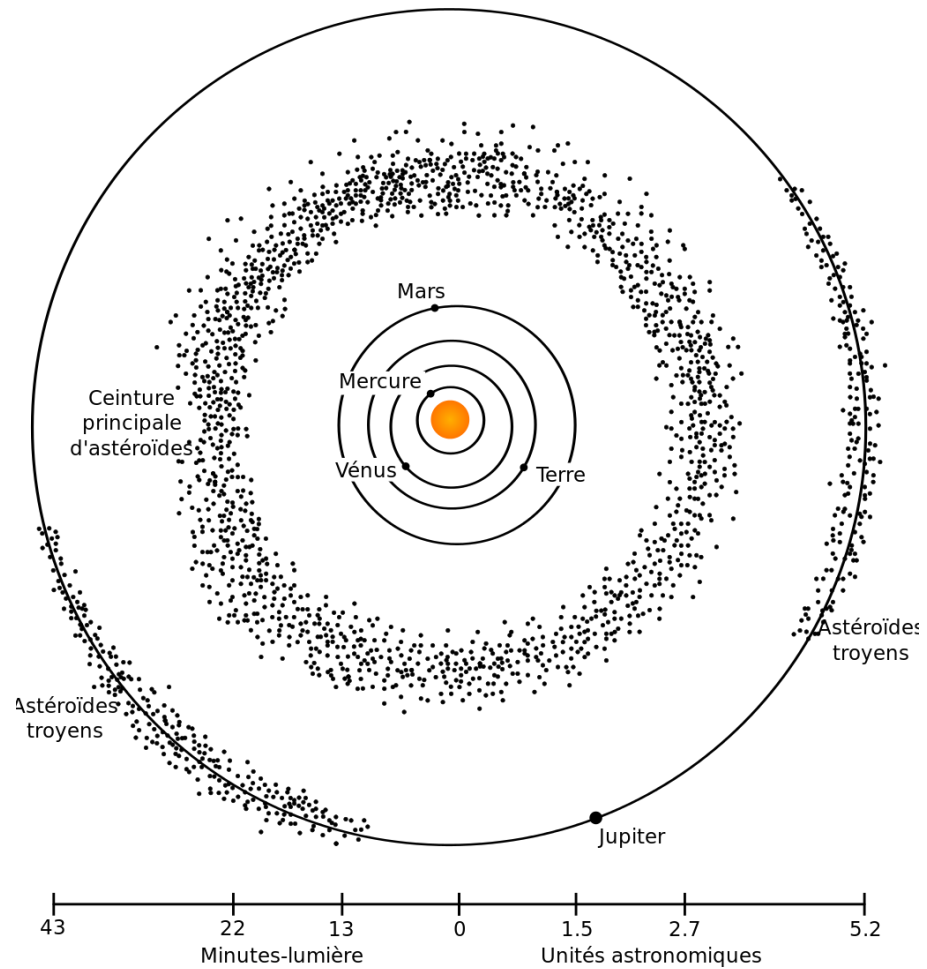
Vue d'artiste

# Les petits corps du système solaire

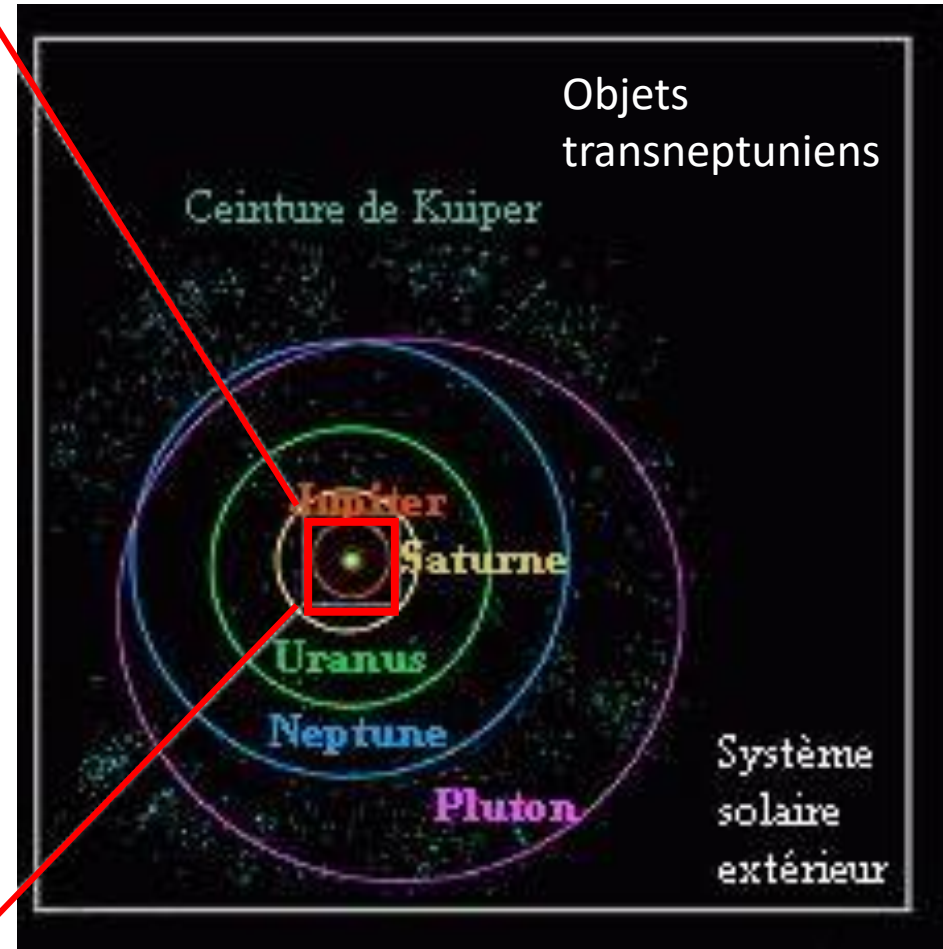
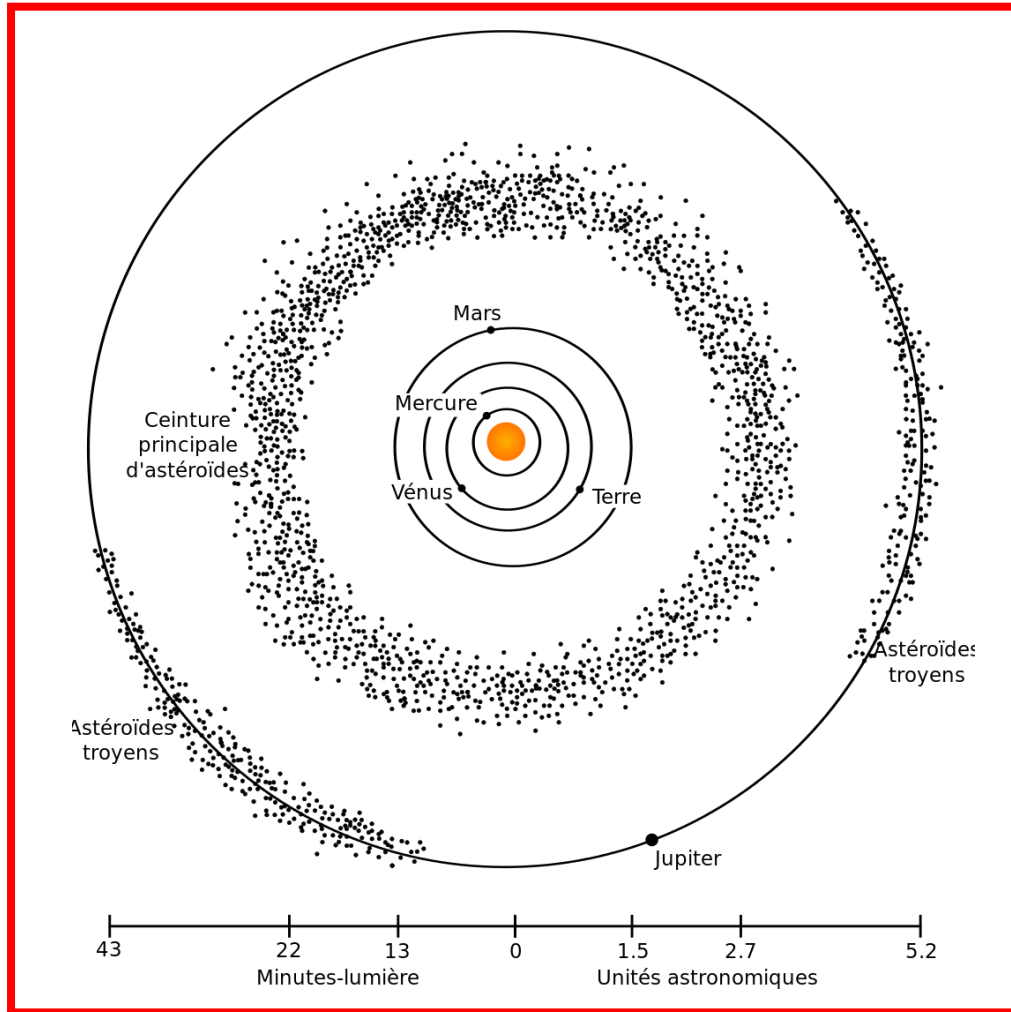
---



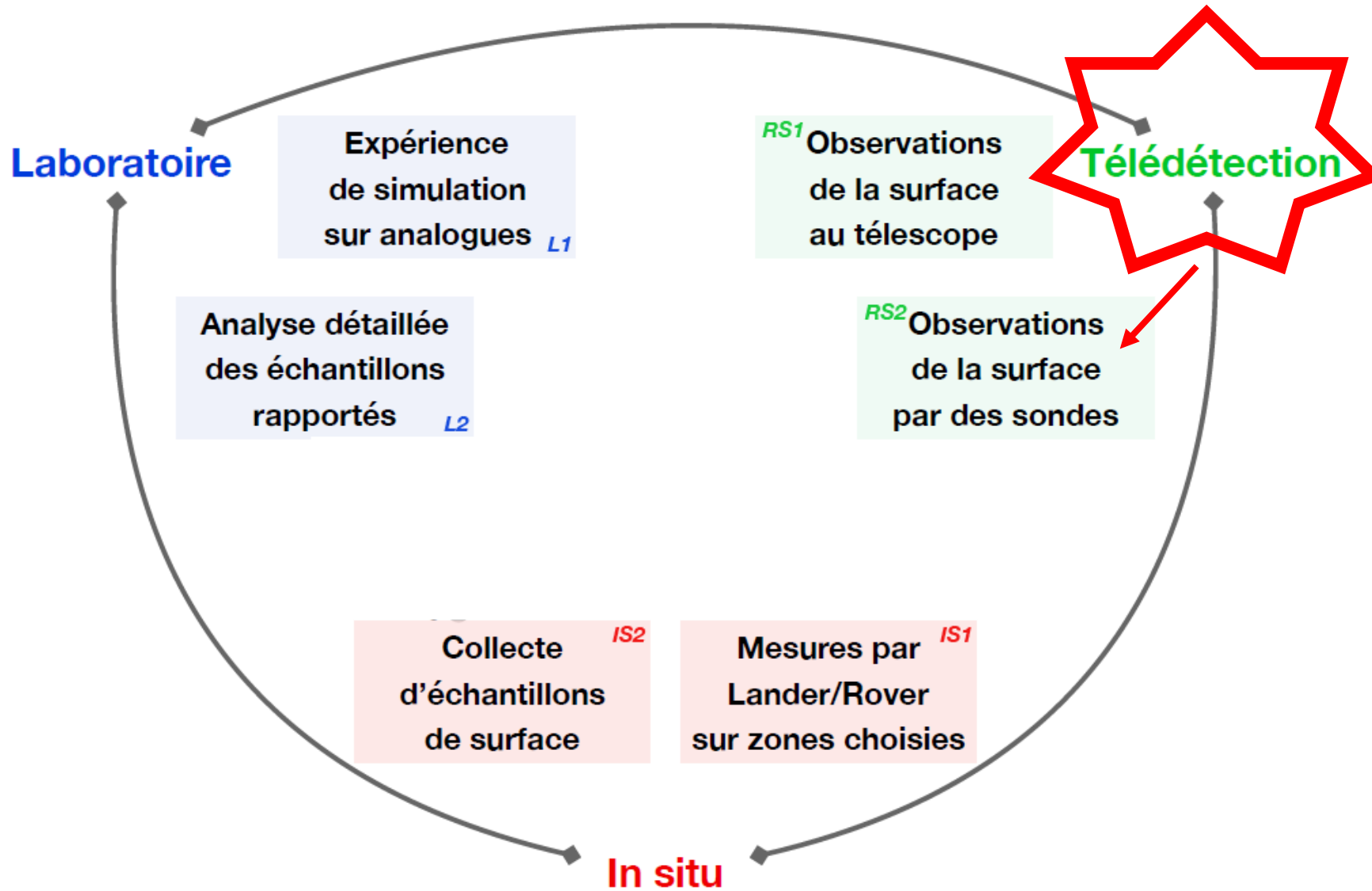
# Où sont – ils situés ?



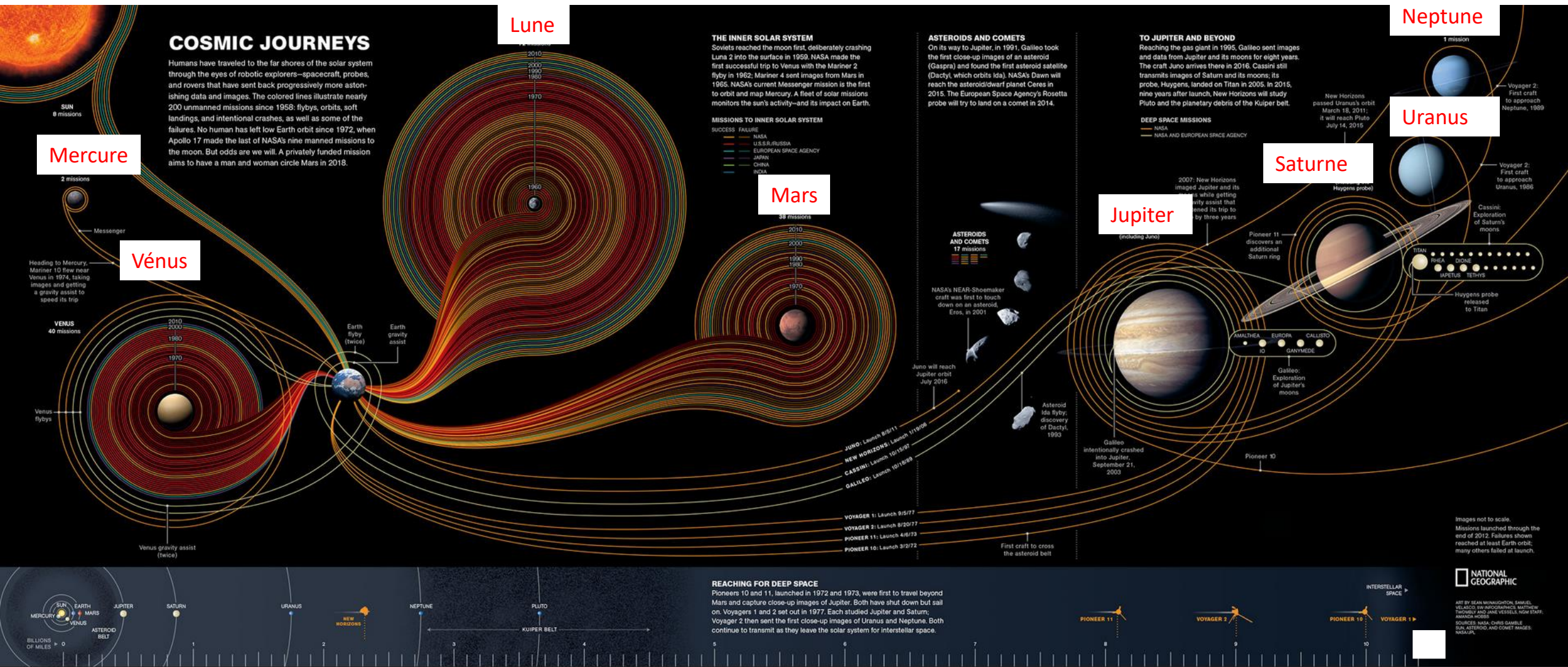
# Où sont – ils situés ?



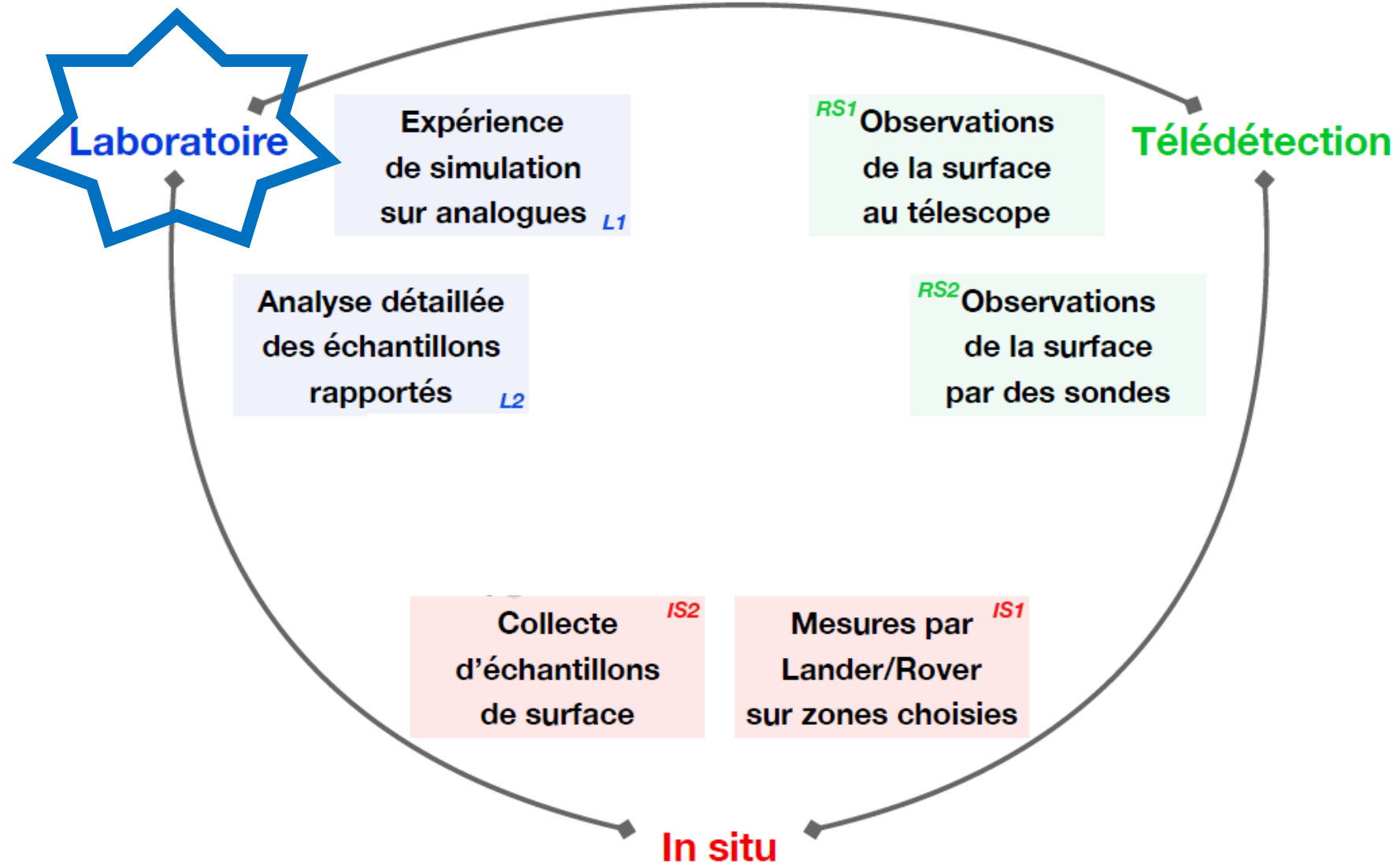
# D'autre manière d'étudier notre univers



# Quels sont les corps les plus visités de notre système solaire ?



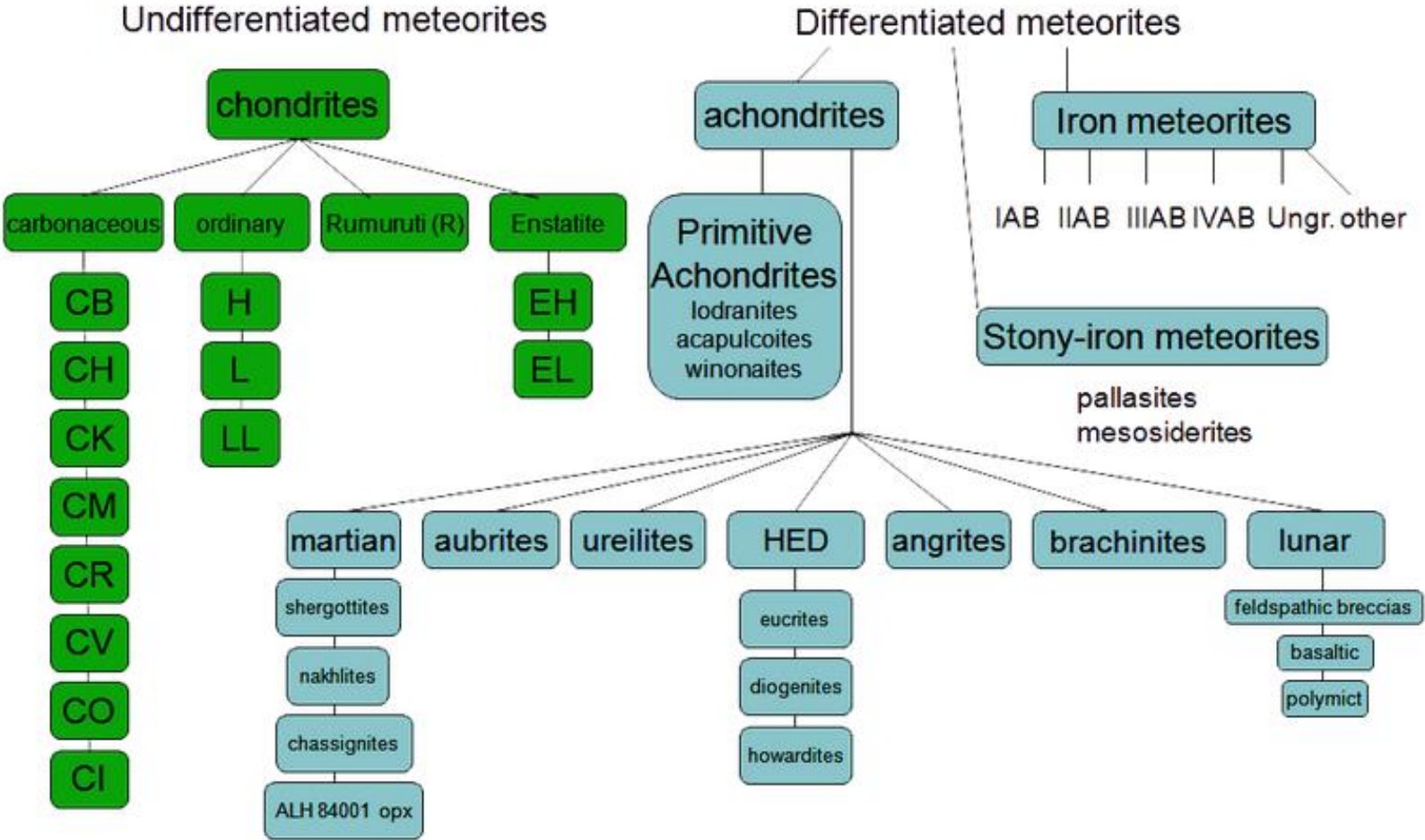
# D'autre manière d'étudier notre univers



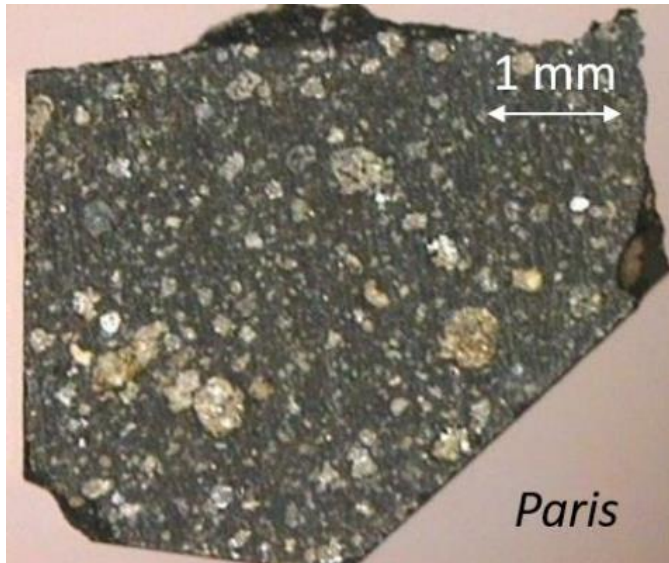


# Des vestiges du début du Système Solaire

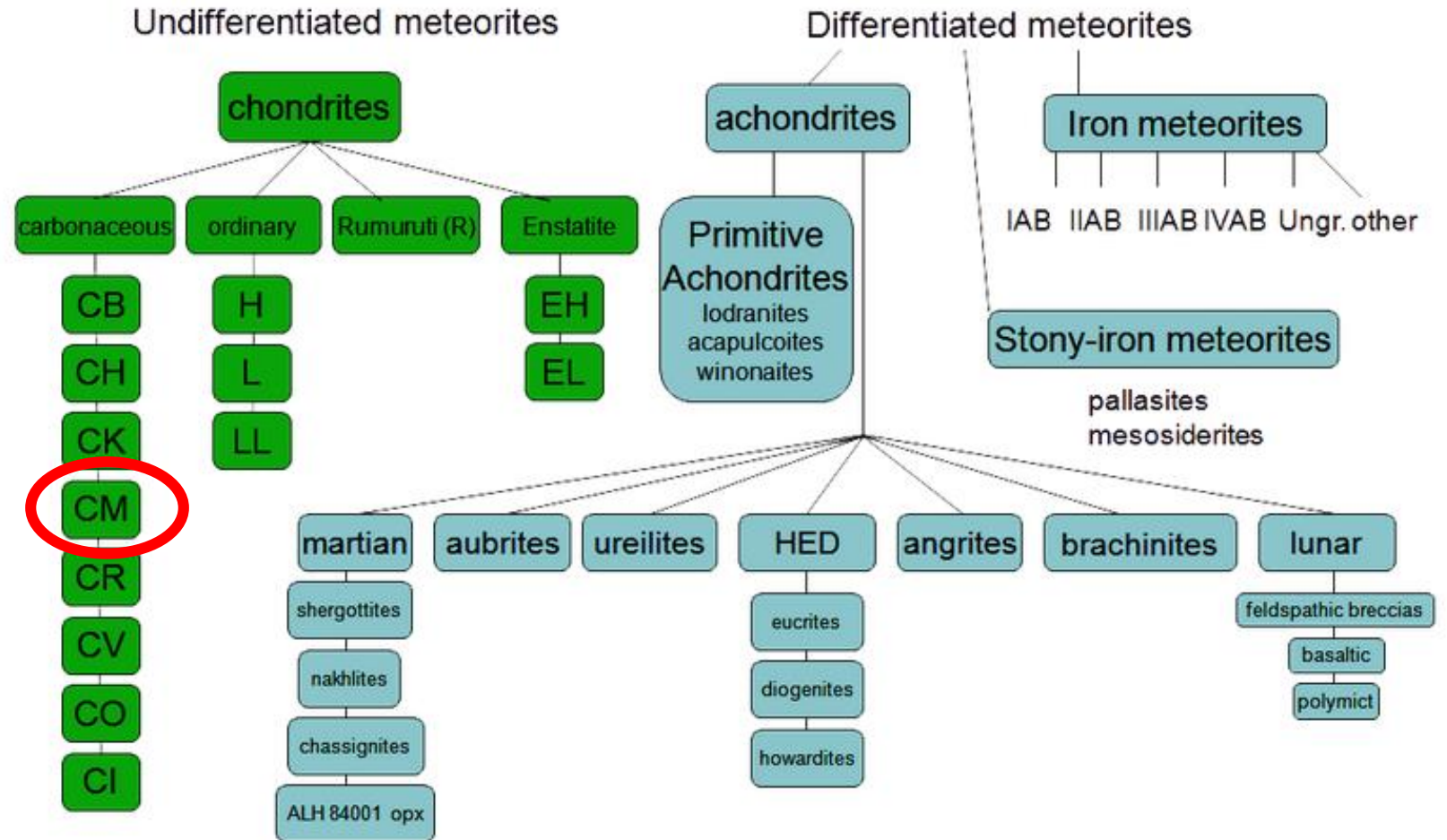
Étude des météorites



# Des vestiges du début du Système Solaire

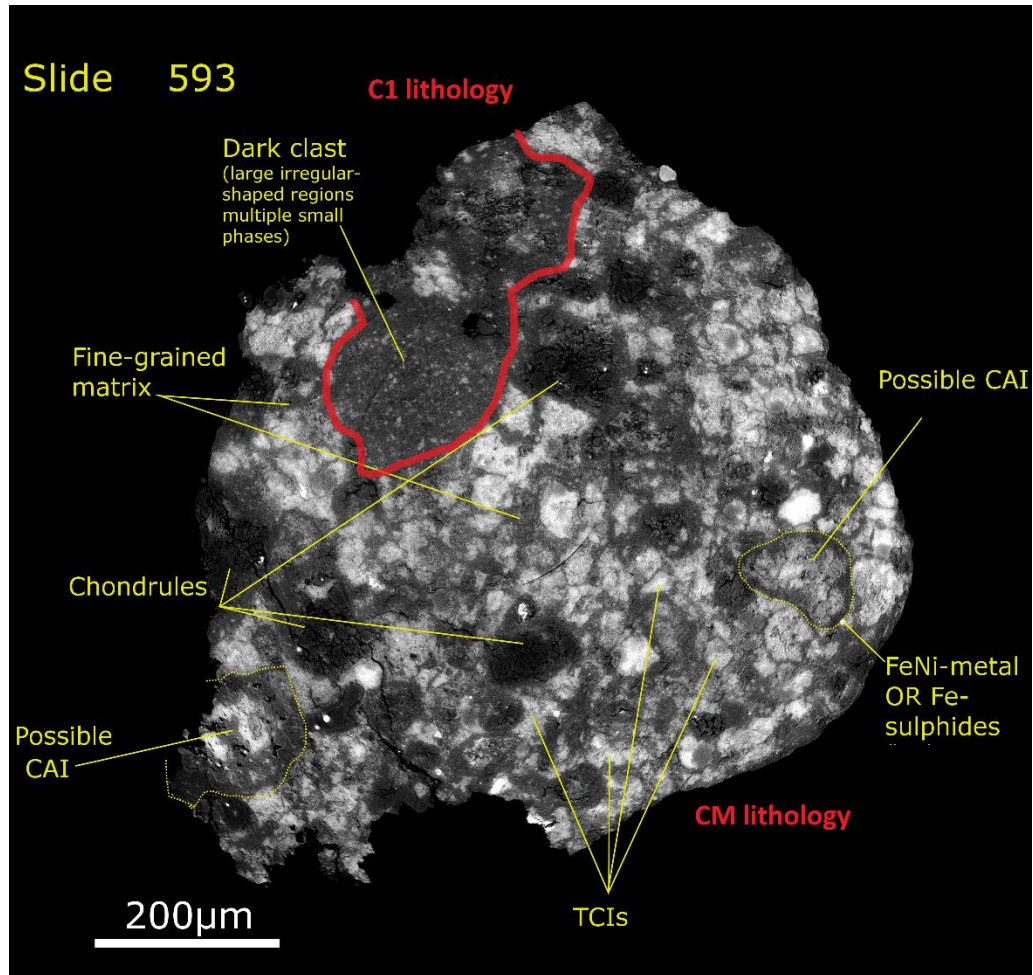


~ 5% de matière organique



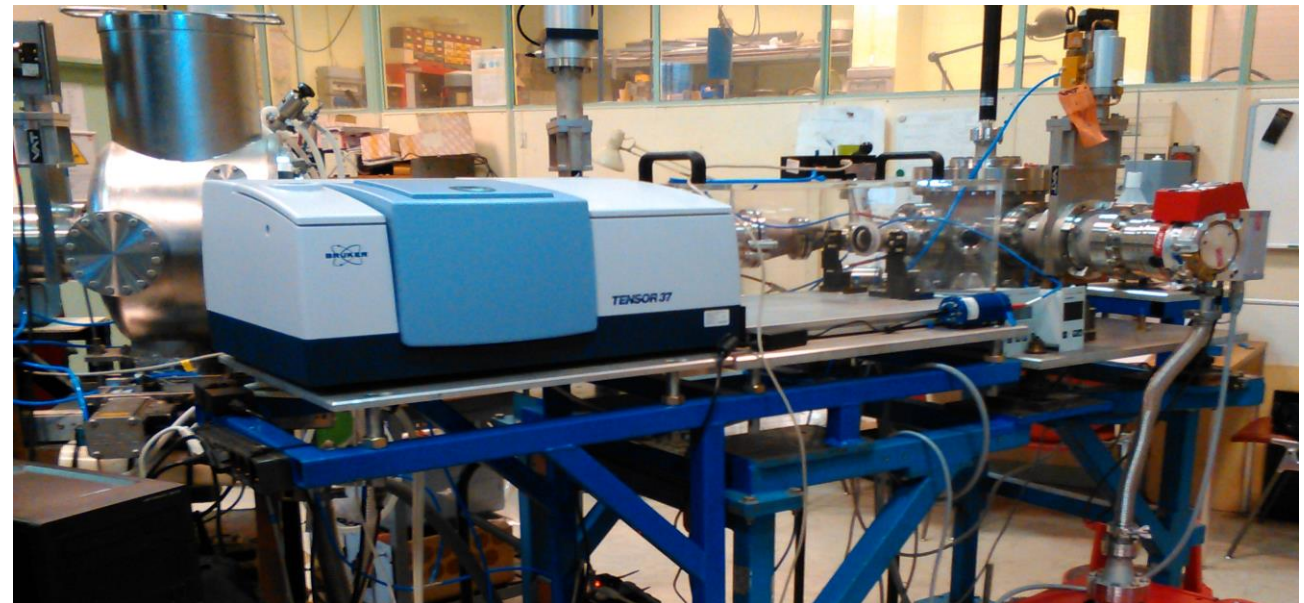
# Étude des météorites en laboratoire

- Caractérisation à très petites échelles grâce à des technologies de pointes non spatialisables



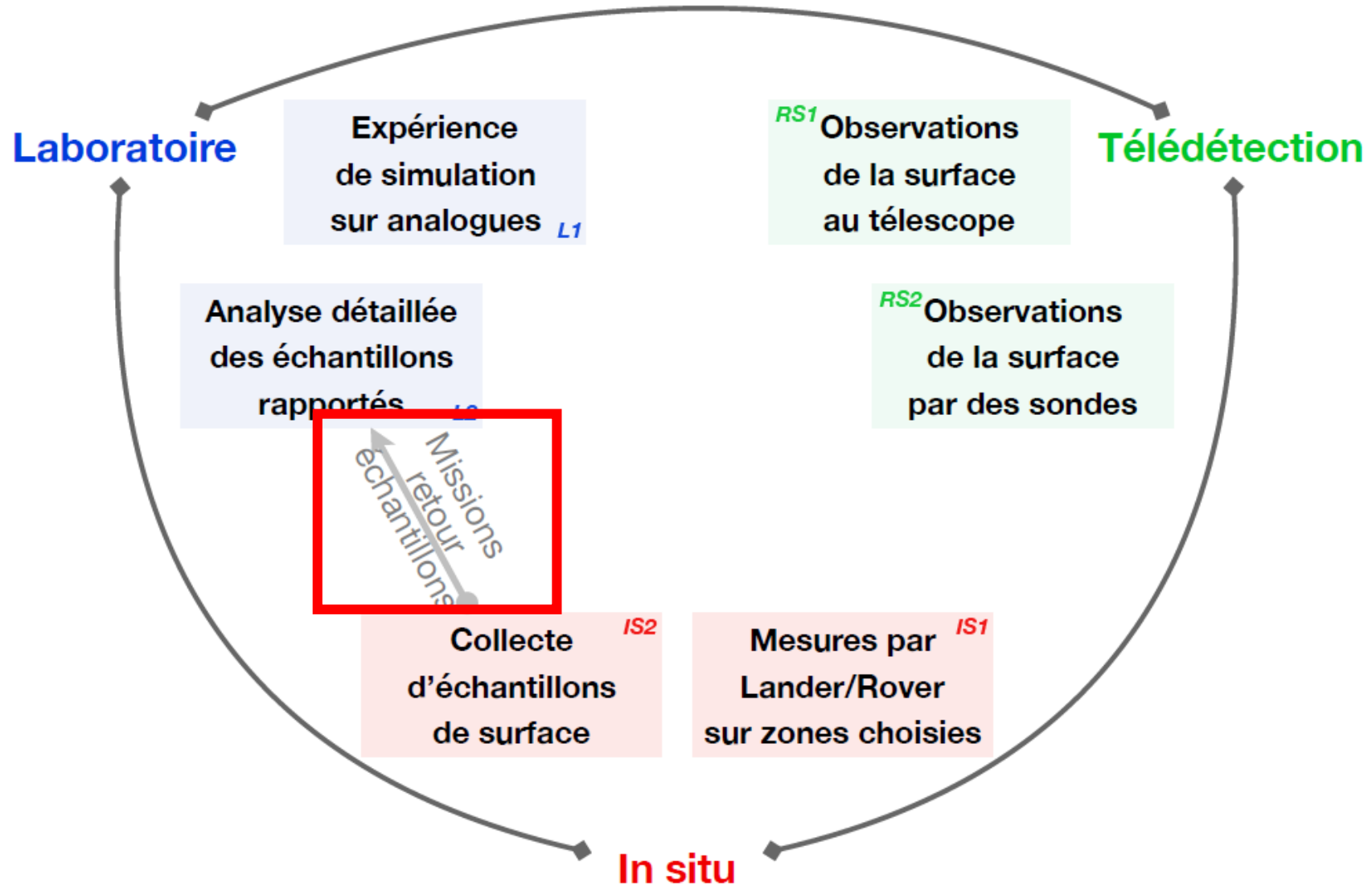
X-CT @IAS, hétérogénéité micrométrique de météorites

- Simulation des processus astrophysique en laboratoire



IGMAR @IAS, irradiation de météorites par le vent solaire

# Une nouvelle ère avec les missions de retour d'échantillons

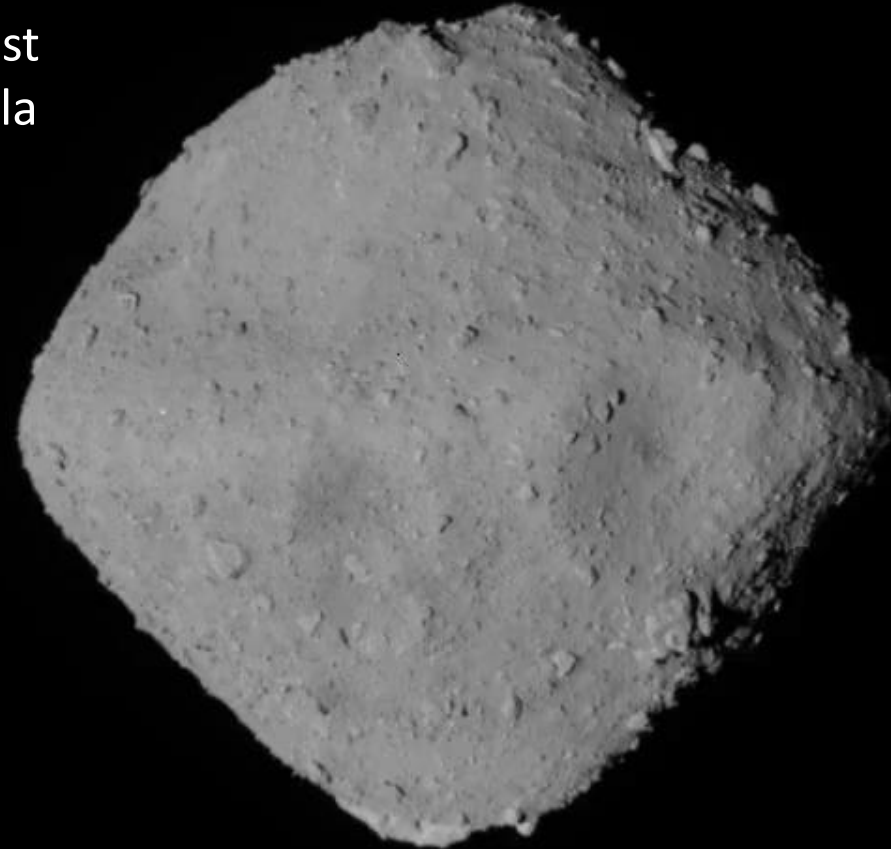


# Hayabusa 2 : En route vers Ryugu

## Ryugu

Référence au Ryūgū-jō (le palais du dragon) qui est le palais sous-marin de Ryūjin, le dieu dragon de la mer.

Dans l'histoire, le pêcheur Urashima Tarō voyage jusqu'au palais sur le dos d'une tortue et, lors de son retour, rapporte avec lui une mystérieuse boîte

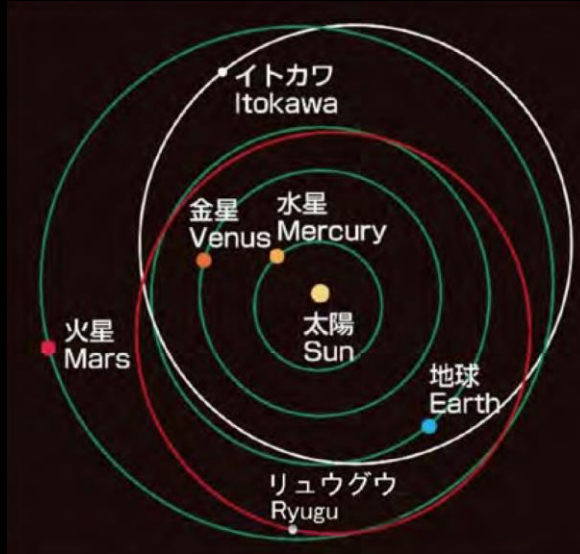


**Objectif : ramener 0.1 g de Ryugu sur Terre**





# Propriétés générales de Ryugu



Distance Ryugu-Soleil: 0.96–1.41 AU

période = 474 jours;

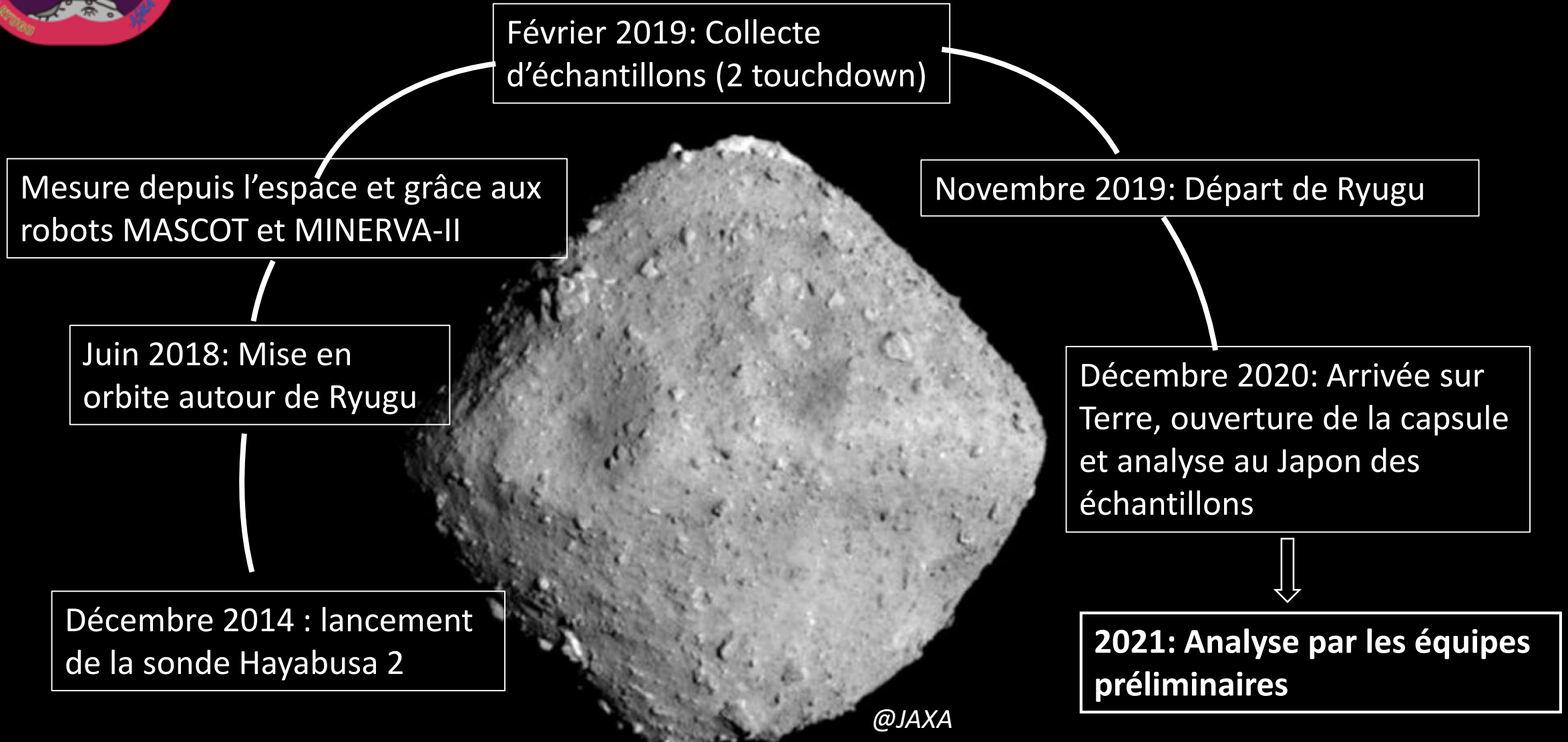
$a = 1.19$  AU ;  $e = 0.19$  ;  $i = 6^\circ$

- Forme à toupie
- Rayon moyen 447 m
- Période de rotation  $P = 7,63262$  h = 0,318026 jour
- Agglomérat lâche (pile de débris), faible densité ( $1,19$  g/cm<sup>3</sup>) et haute porosité (>50%)
- Grande abondance de gros rochers
- Astéroïde de type C

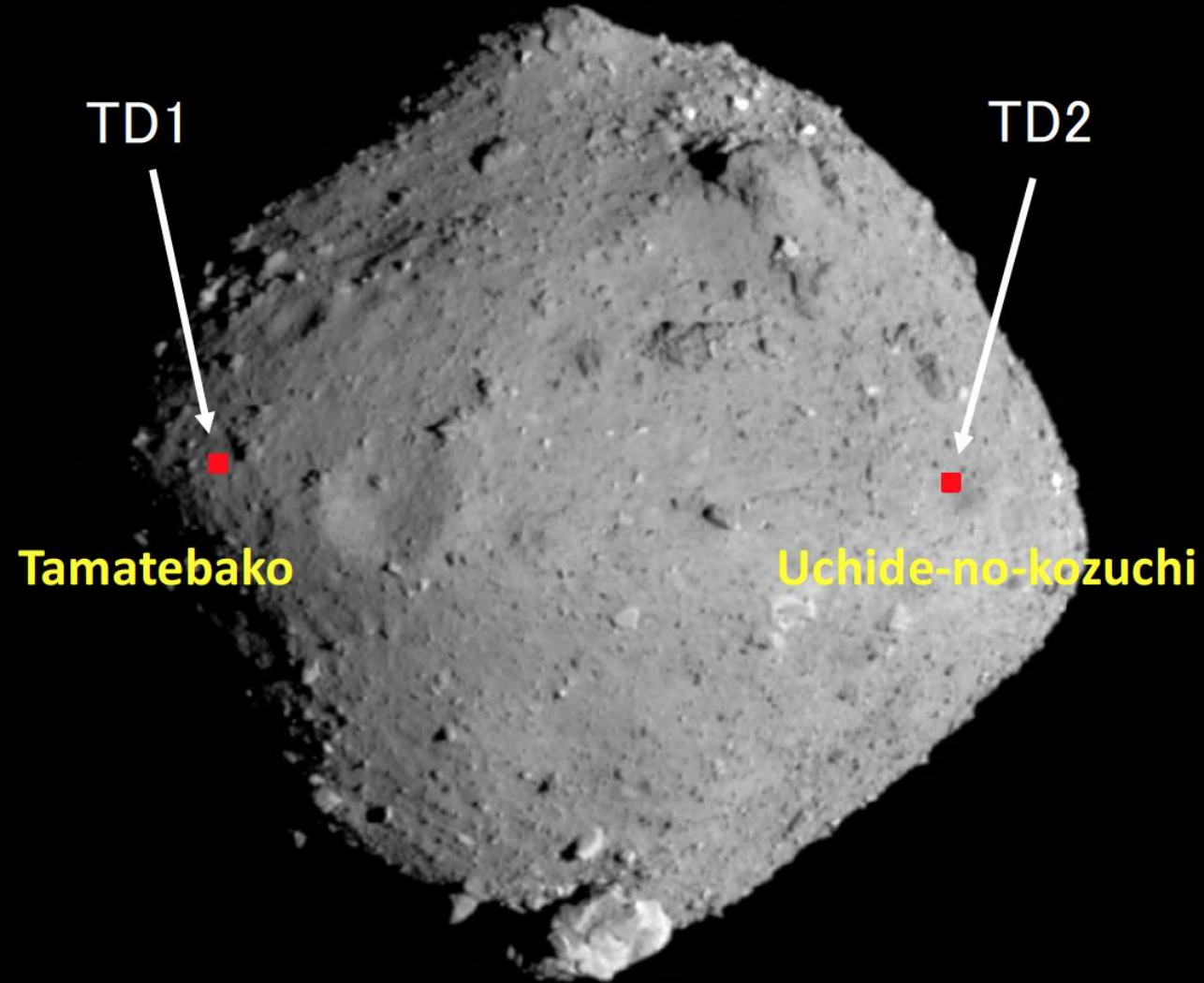




# Déroulé de la mission Hayabusa 2



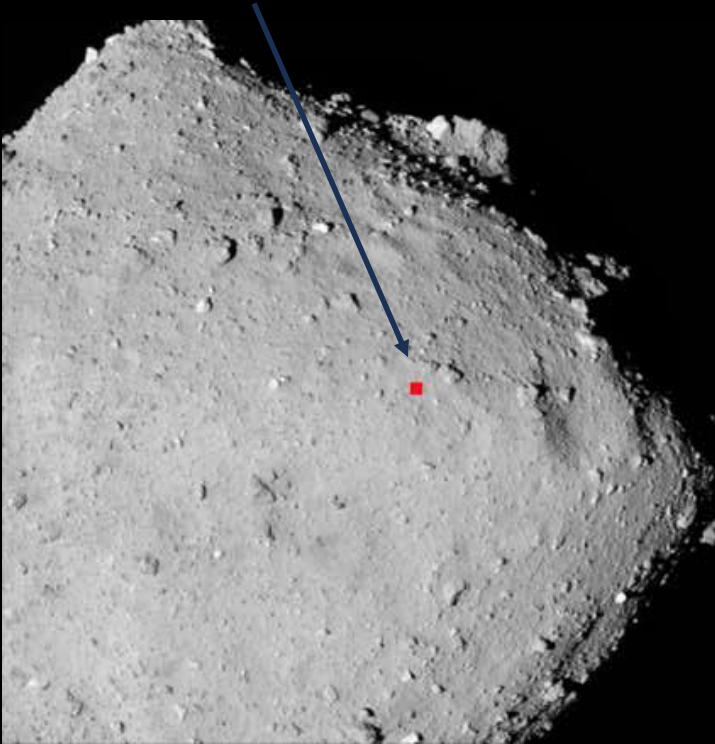
# Collecte des échantillons



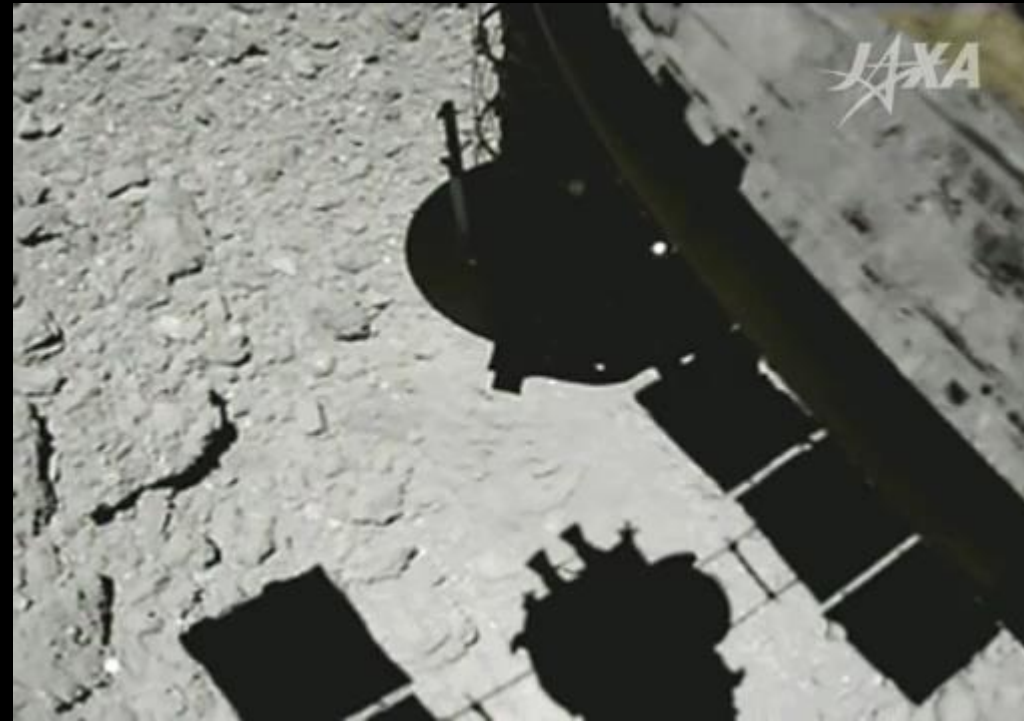


# Premier site de collecte

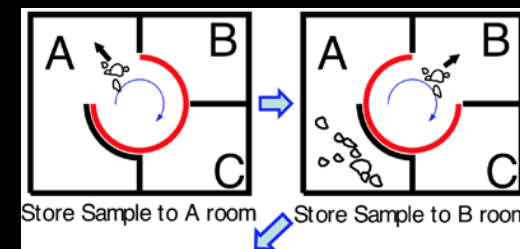
Le point de collecte d'Hayabusa2 a été surnommé « Tamatebako »



CAM-H (petite caméra moniteur)

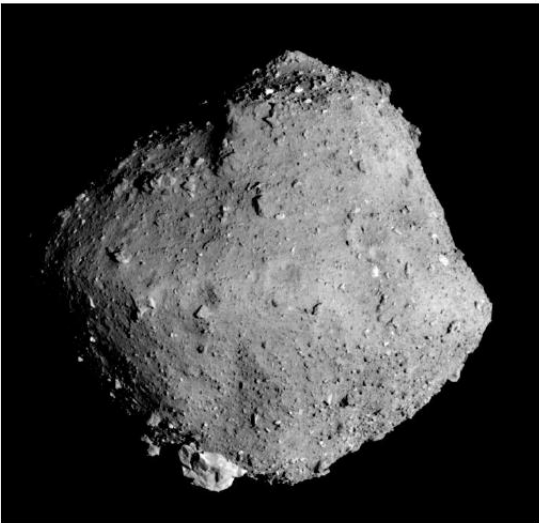


- Touch down collecte : éjection de poussières après impact
- Remplissage de la chambre A



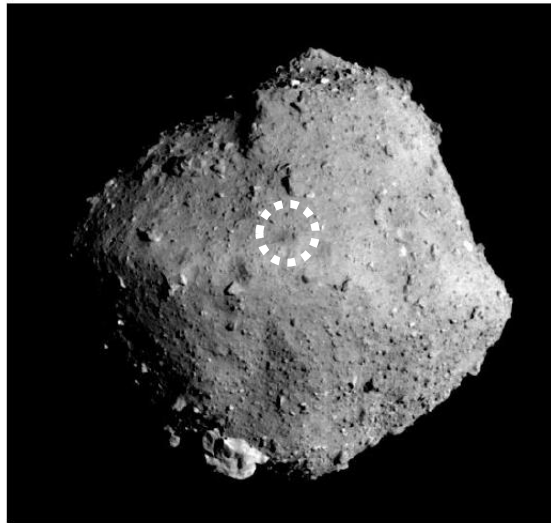
# Deuxième site de collecte

Before SCI collision



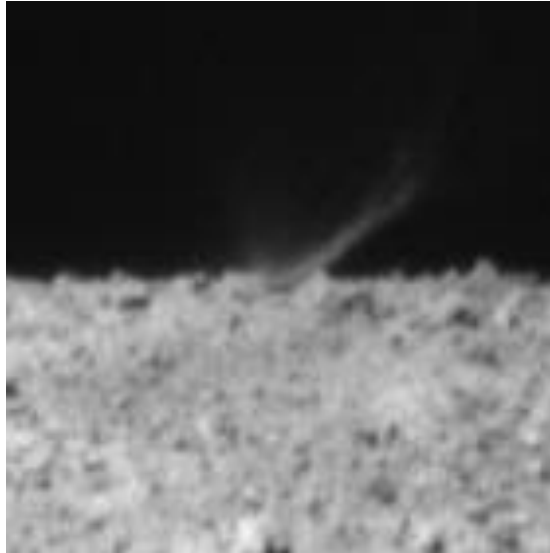
2019-03-21 13:03 (JST) altitude 14 km

After SCI collision



2019-04-17 21:04 (JST), altitude 19 km

After SCI collision (labelled)



- Impact SCI : projectile en cuivre  
 $v_i = 2 \text{ km/s}$ ,  $m_p = 2 \text{ kg}$
- Remplissage de la chambre B

Diamètre ~ 17,6 m  
Profondeur 1,7-2,7 m

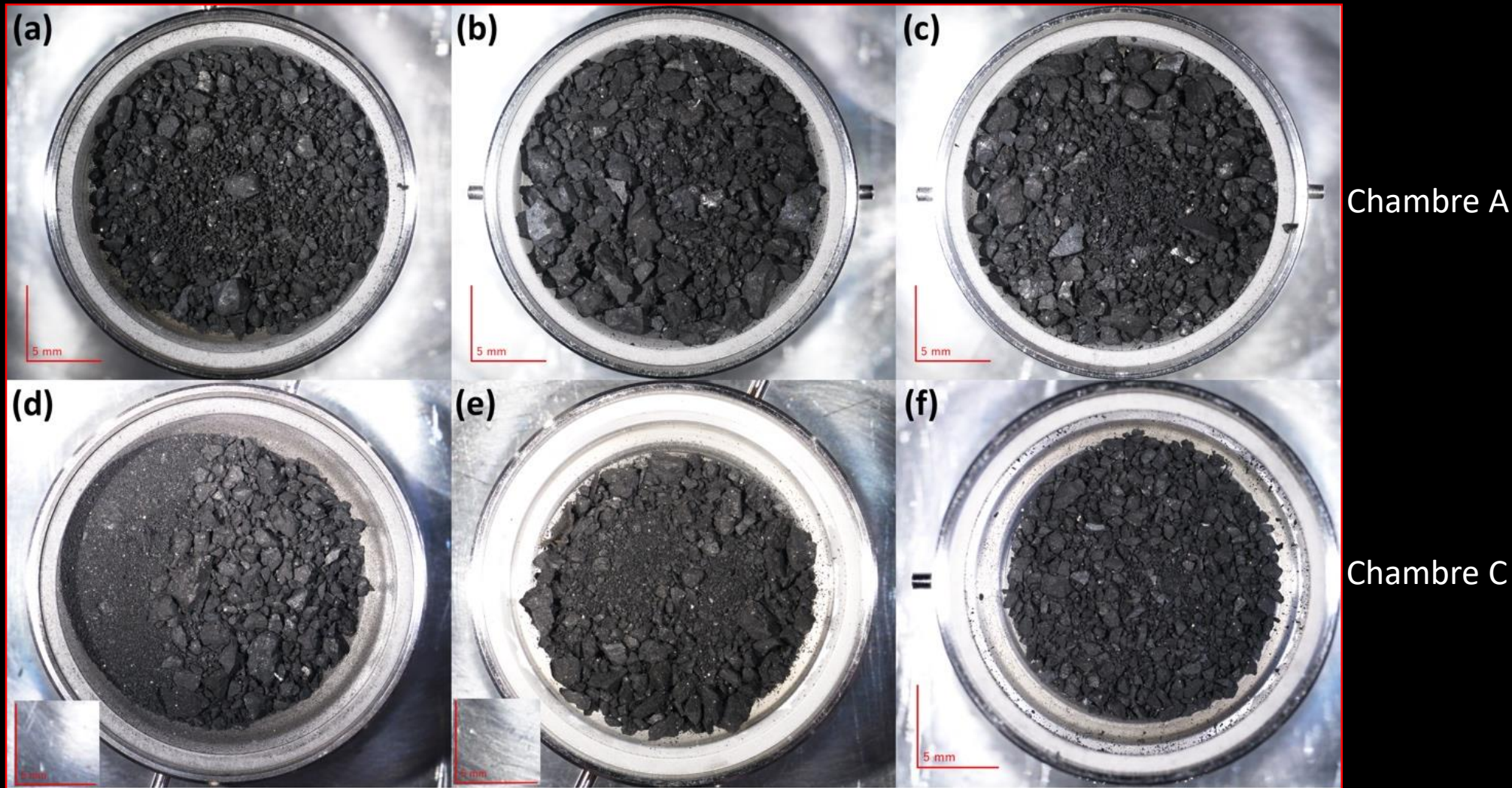
# Atterrissage en Australie

5 décembre 2021



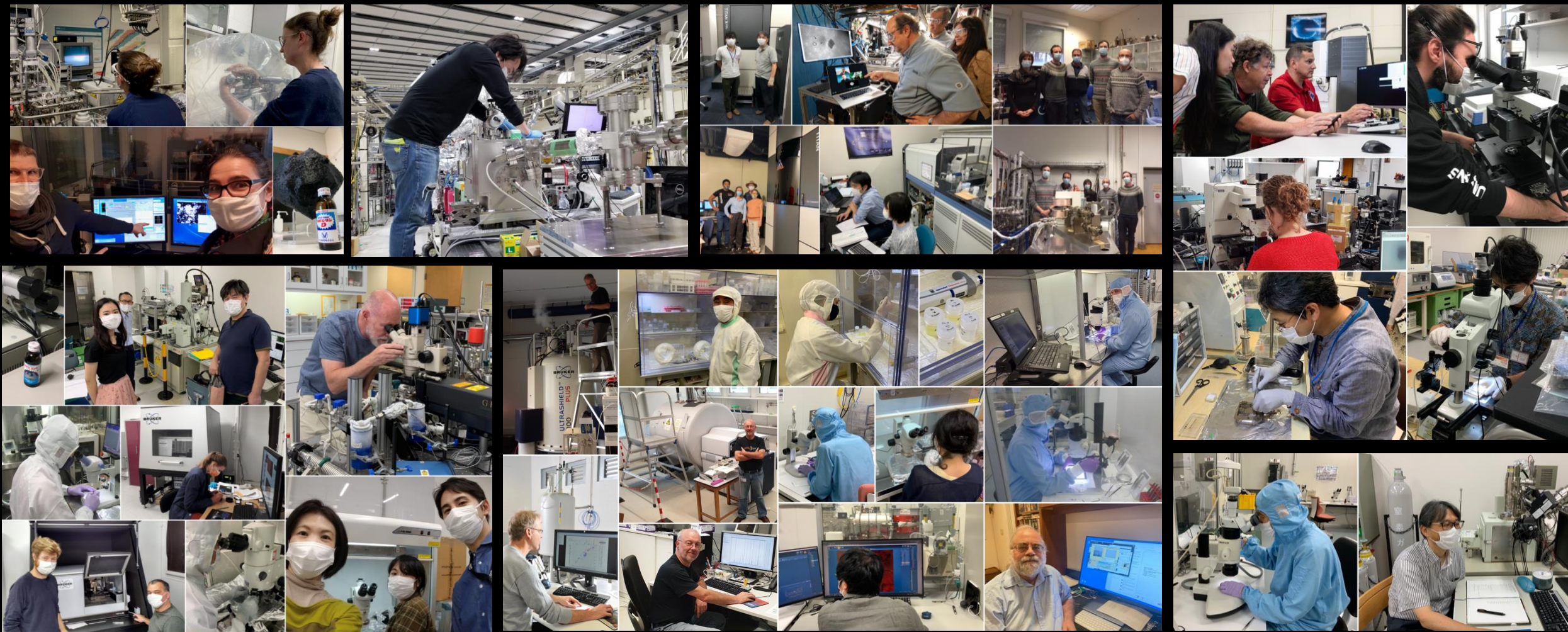
# Mission rempli ?

5.4 g collectés



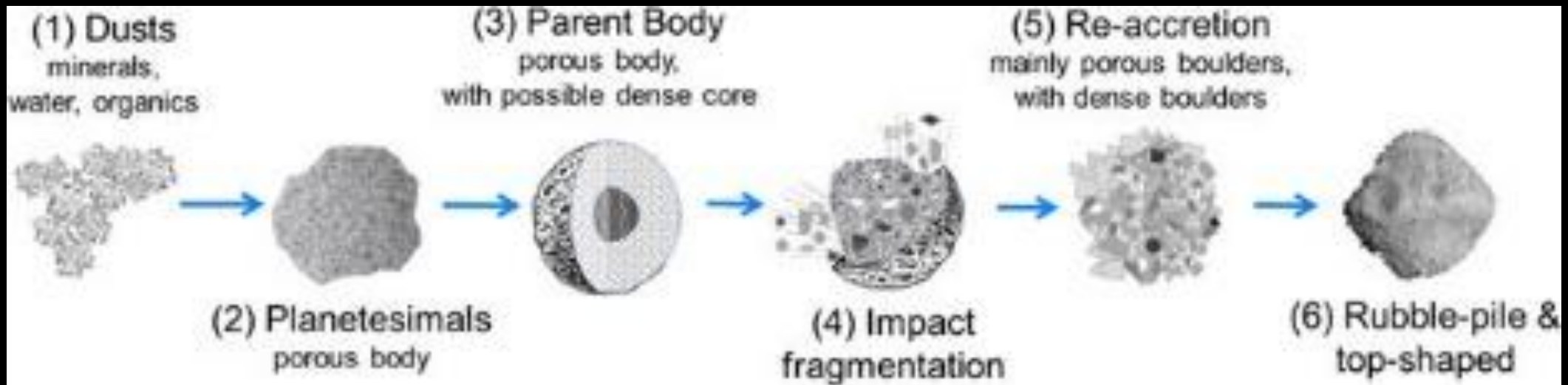
Grains de Ryugu à l'installation de conservation de l'ISAS

# Un travail international impliquant ~250 chercheurs

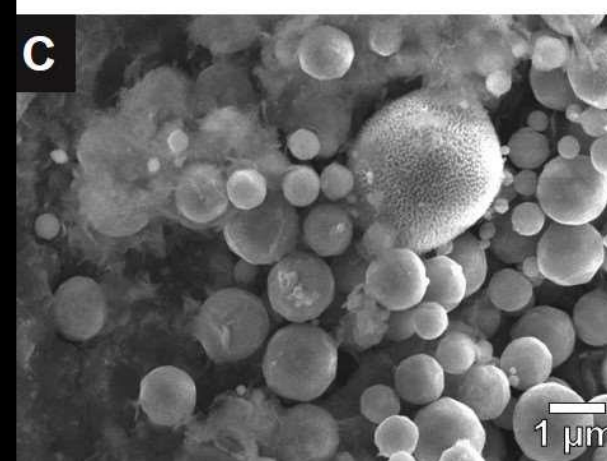
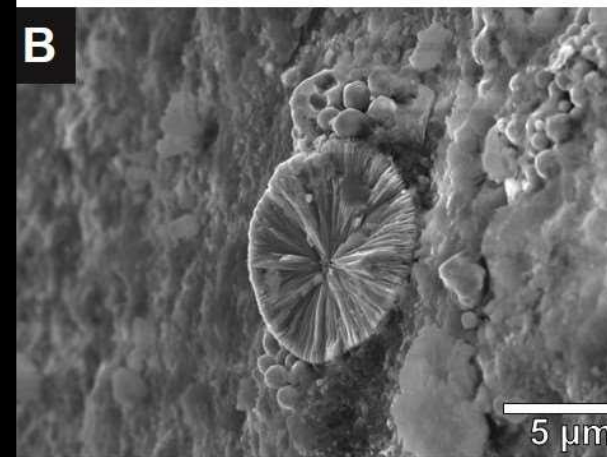
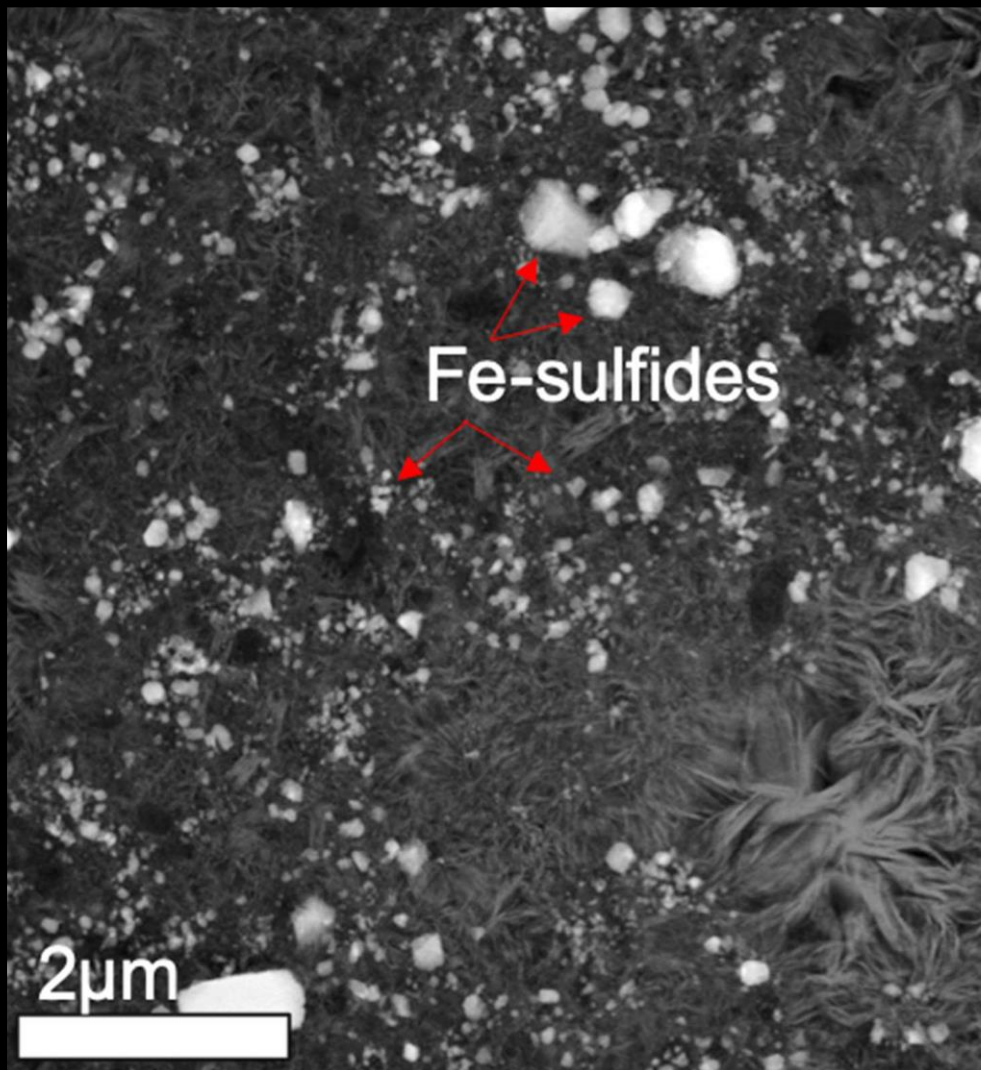


# Que nous a appris cette mission ?

- Lien avec la collection de météorites dans nos laboratoires
  - > astéroïde de type C / CI
  - > échantillon sans altération terrestre et unique : différent des CIs (seulement 5 CIs sur Terre)
- Scénario de formation complexe de Ryugu
  - > astéroïde de seconde génération
  - > contrainte sur l'altération aqueuse et le chauffage subit



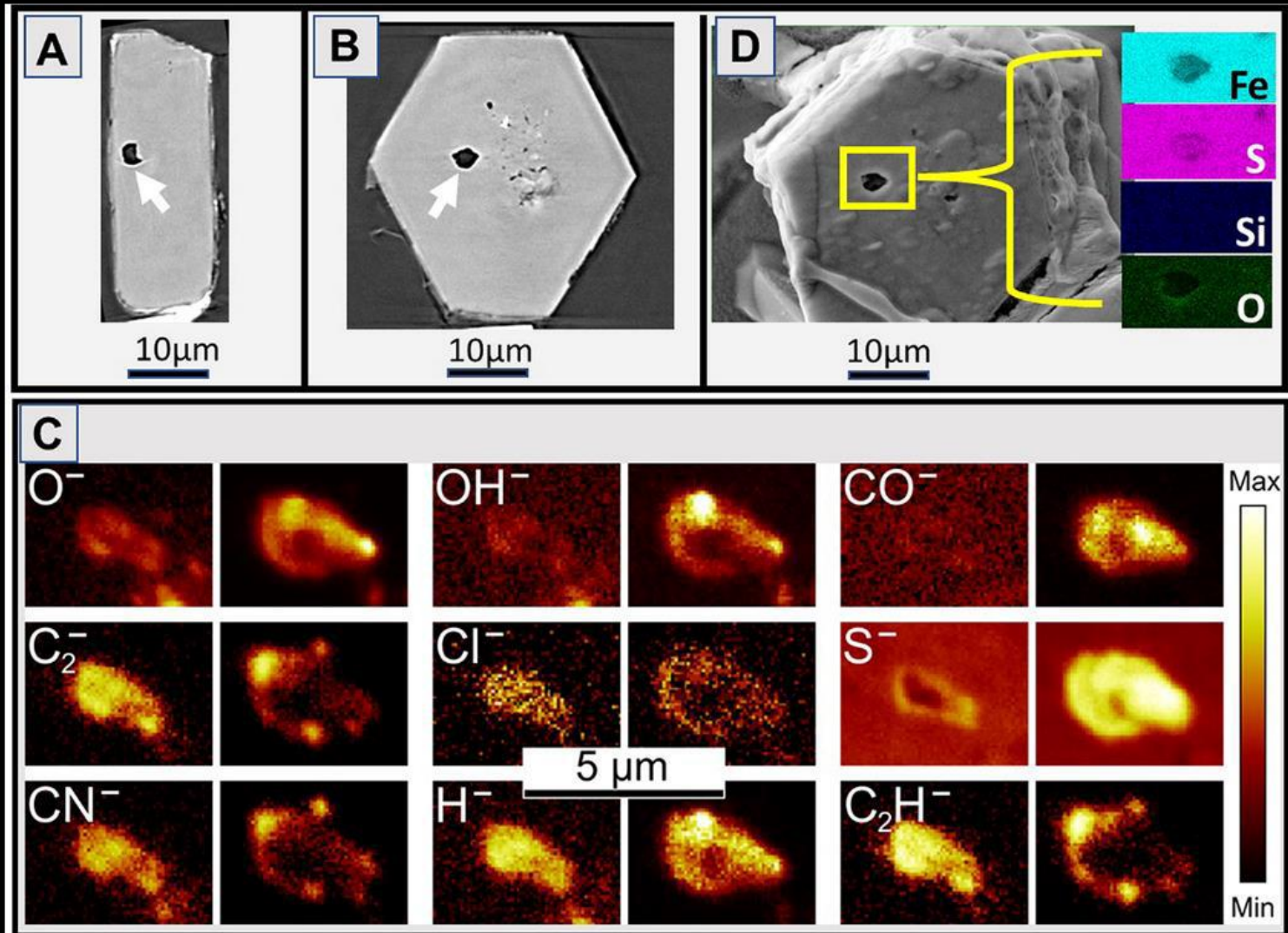
# Un assemblage minéralogique complexe



Différents types de magnétite (oxyde de Fer)

*Nakamura et al. Science  
septembre 2022*

# Que nous a appris cette mission ?



- Présence d'inclusions fluides au sein de pyrrhotite (sulfure de fer)

-> Formation de Ryugu au delà de la ligne des glaces d' $H_2O$  et de  $CO_2$ , possiblement au-delà de l'orbite de Jupiter

*Nakamura et al. Science septembre 2022*



# Lien entre mesures depuis l'orbite et mesures en laboratoire : le cas de Hayabusa 2

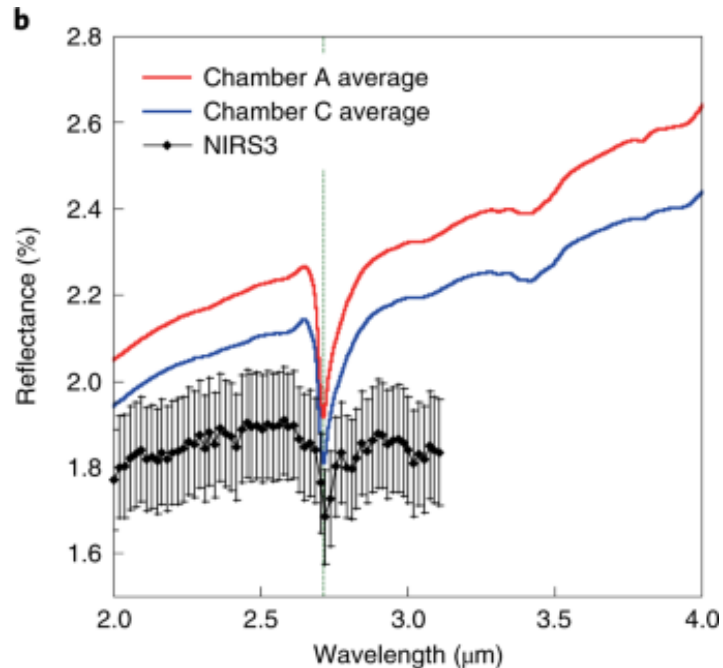


Figure 1 : Mesure du spectre de Ryugu depuis l'orbite grâce à NIRS3 (en noir) et en laboratoire (en rouge et bleue). Extrait de Yada et al. 2022

En décembre 2022, la mission Hayabusa 2 a ramené sur Terre des échantillons récoltés sur l'astéroïde Ryugu permettant de lier les études faites depuis l'orbite de l'astéroïde à des mesures à plus petite échelle en laboratoire. Les mesures dans la gamme de l'infrarouge sont utiles car elles peuvent être faites à la télédétection et en laboratoire, permettant de relier les objets étudiés en laboratoires et les mesures faites sur les petits corps du Système Solaire. À bord de la sonde Hayabusa 2, l'instrument NIRS3 était chargé de récolter des spectres en réflectance dans le visible et proche infrarouge (de 1800 à 3200 nm) (cf figure 1). Dans le domaine du proche infrarouge, deux bandes d'absorption sont particulièrement étudiées par la communauté scientifique : la bande à 2.7 μm qui va sonder la présence de silicate hydratés et la bande à 3.4 μm indicatrice de la présence potentielle de matière organique.

- 1) Basé seulement sur les mesures faites depuis la sonde, que peut-on conclure sur l'hydratation et la présence de matière organique dans l'astéroïde Ryugu ?
- 2) Donner deux avantages des mesures en laboratoire par rapport aux mesures faites depuis l'espace avec NIRS3 ? À l'inverse quel est le biais principal des mesures en labo

# Lien entre mesures depuis l'orbite et mesures en laboratoire : le cas de Hayabusa 2

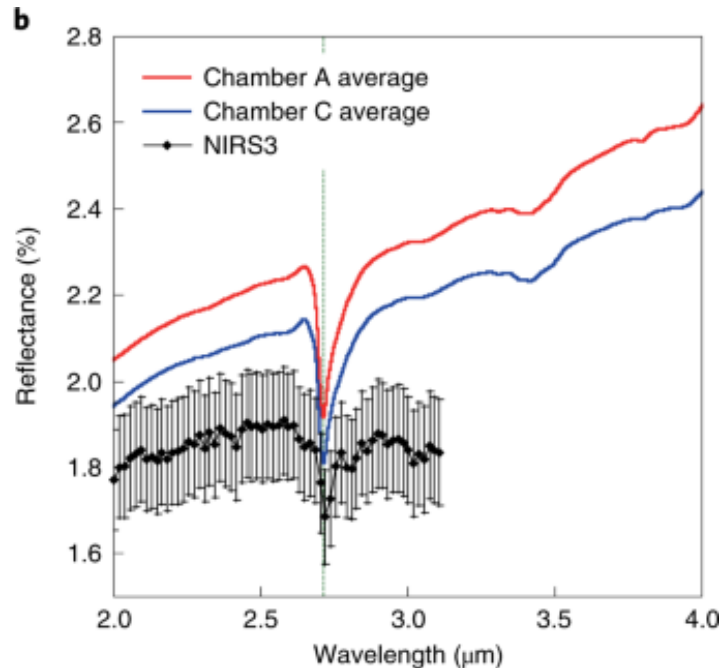


Figure 1 : Mesure du spectre de Ryugu depuis l'orbite grâce à NIRS3 (en noir) et en laboratoire (en rouge et bleue). Extrait de Yada et al. 2022

En décembre 2022, la mission Hayabusa 2 a ramené sur Terre des échantillons récoltés sur l'astéroïde Ryugu permettant de lier les études faites depuis l'orbite de l'astéroïde à des mesures à plus petite échelle en laboratoire. Les mesures dans la gamme de l'infrarouge sont utiles car elles peuvent être faites à la télédétection et en laboratoire, permettant de relier les objets étudiés en laboratoires et les mesures faites sur les petits corps du Système Solaire. À bord de la sonde Hayabusa 2, l'instrument NIRS3 était chargé de récolter des spectres en réflectance dans le visible et proche infrarouge (de 1800 à 3200 nm) (cf figure 1). Dans le domaine du proche infrarouge, deux bandes d'absorption sont particulièrement étudiées par la communauté scientifique : la bande à 2.7  $\mu\text{m}$  qui va sonder la présence de silicate hydratés et la bande à 3.4  $\mu\text{m}$  indicatrice de la présence potentielle de matière organique.

1) Basé seulement sur les mesures en orbite, que peut-on conclure sur l'hydratation et la présence de matière organique dans l'astéroïde Ryugu ?

Astéroïde hydraté car présence de la bande à 2.7 mais impossible de conclure sur la présence de MO car la bande à 3.4 n'est pas dans la gamme spectrale de NIRS3

# Lien entre mesures depuis l'orbite et mesures en laboratoire : le cas de Hayabusa 2

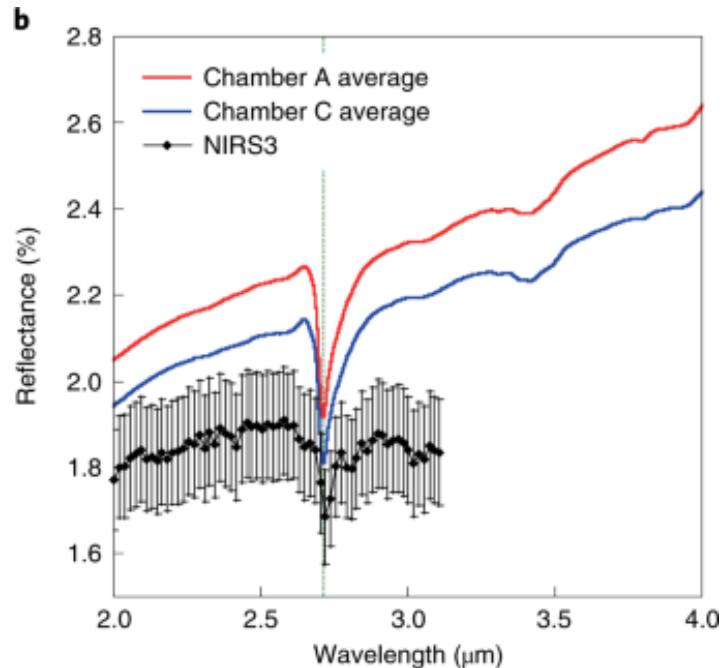


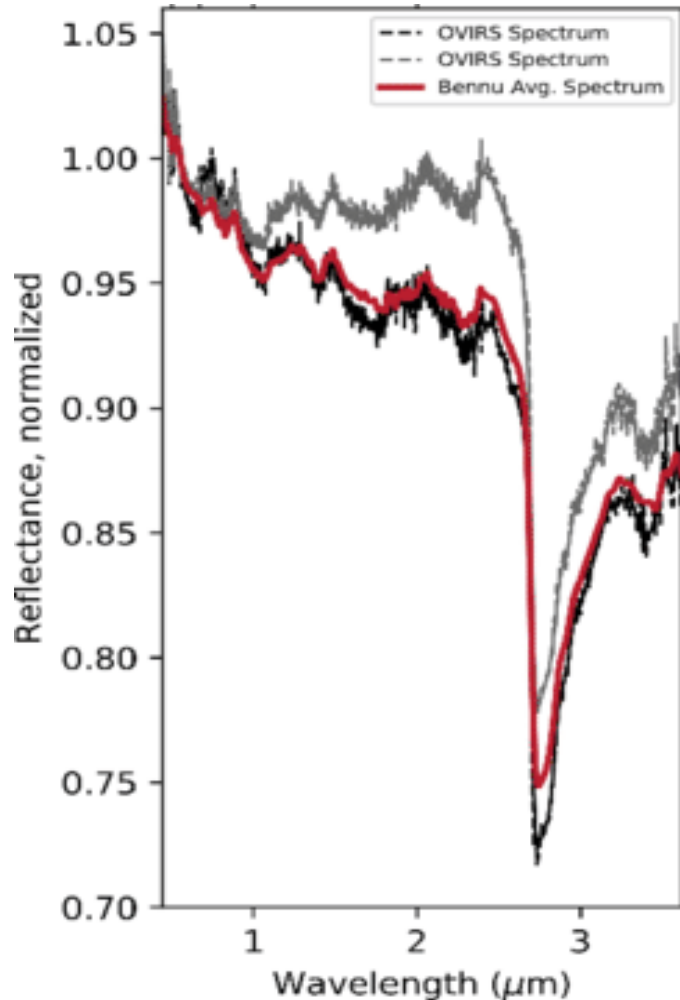
Figure 1 : Mesure du spectre de Ryugu depuis l'orbite grâce à NIRS3 (en noir) et en laboratoire (en rouge et bleue). Extrait de Yada et al. 2022

En décembre 2022, la mission Hayabusa 2 a ramené sur Terre des échantillons récoltés sur l'astéroïde Ryugu permettant de lier les études faites depuis l'orbite de l'astéroïde à des mesures à plus petite échelle en laboratoire. Les mesures dans la gamme de l'infrarouge sont utiles car elles peuvent être faites à la télédétection et en laboratoire, permettant de relier les objets étudiés en laboratoires et les mesures faites sur les petits corps du Système Solaire. À bord de la sonde Hayabusa 2, l'instrument NIRS3 était chargé de récolter des spectres en réflectance dans le visible et proche infrarouge (de 1800 à 3200 nm) (cf figure1). Dans le domaine du proche infrarouge, deux bandes d'absorption sont particulièrement étudiées par la communauté scientifique : la bande à 2.7 μm qui va sonder la présence de silicate hydratés et la bande à 3.4 μm indicatrice de la présence potentielle de matière organique.

2) Donner deux avantages des mesures en laboratoire par rapport aux mesures depuis l'espace faite avec NIRS3 ? A l'inverse quel est le biais principal des mesures en labo

Avantage - mesure moins bruité, - spectre d'étude plus large  
Biais : échantillonne seulement une petite partie de la matière

## Lien entre mesures depuis l'orbite et mesures en laboratoire : le cas de Hayabusa 2



Une autre mission a pour but d'aller étudier un astéroïde et de ramener des échantillons sur Terre. Il s'agit de la mission OSIRIS-REx, qui a pour cible l'astéroïde Bennu et pour laquelle un retour sur Terre est prévu en 2024. À bord de la sonde, se trouve l'instrument OVIRS qui mesure les spectres proche infrarouge (cf figure 2).

3) L'instrument OVIRS a mesuré le spectre suivant depuis la sonde d'OSIRIS REx. S'attend-on à ramener sur Terre des échantillons hydratés ? contenant de la matière organique ?

On s'attend à voir aussi des échantillons hydratés et carbonés comme pour Ryugu.

Figure 2 : Spectre de OVIRS observé à deux endroits différent de l'orbite de Bennu, extrait de Kaplan et al. 2021.

# Lien entre mesures depuis l'orbite et mesures en laboratoire : le cas de Hayabusa 2

4) On a de plus étudié les spectres dans le moyen IR (cf figure 3). Dans cette gamme, les larges bandes autour de 10  $\mu\text{m}$  et de 20  $\mu\text{m}$  donnent des indications sur la matière minérale présente dans les phases étudiées. La forme ainsi que la largeur et la position de ces bandes donnent des informations sur la composition et la structuration de la matière minérale. En comparant les deux spectres de Bennu et Ryugu. Peut-on toujours conclure que les grains de Ryugu et Bennu seront identiques lors des analyses en laboratoire ?

Différence sur la bande à 10 et 20  $\mu\text{m}$ , variabilité entre Ryugu et Bennu

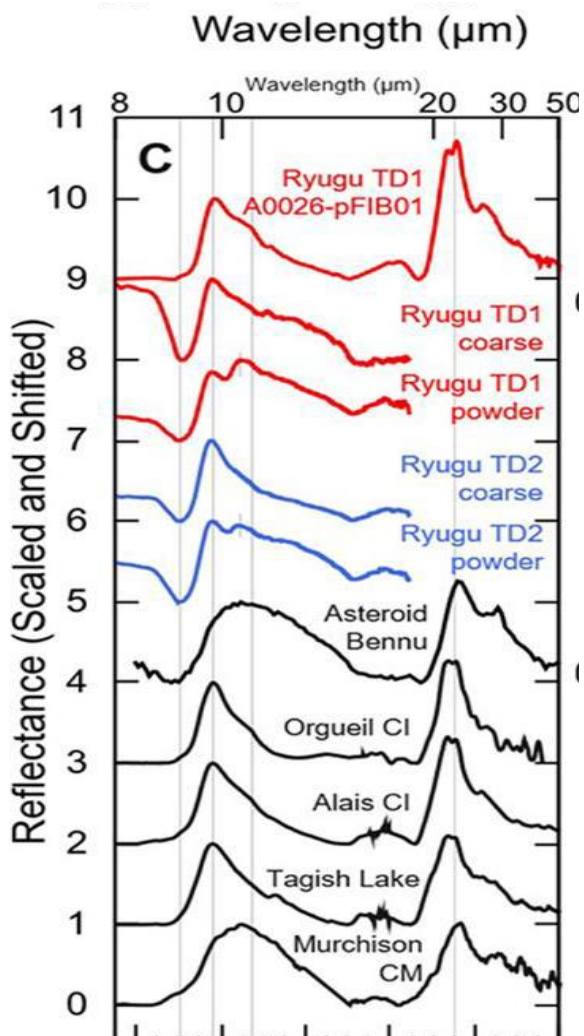
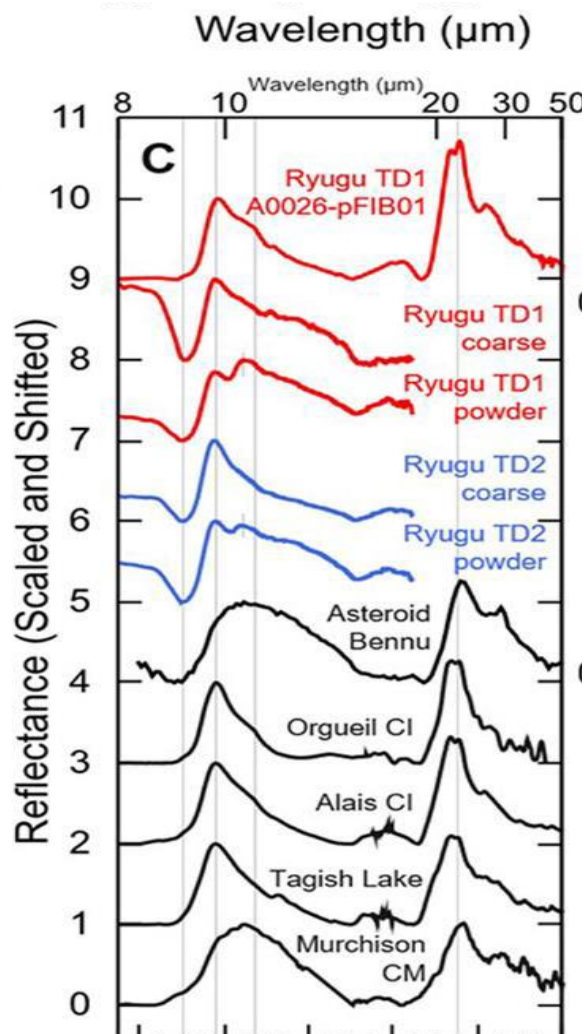


Figure 3 : Spectre dans l'infrarouge moyen de l'astéroïde Bennu mesuré par et spectres de l'astéroïde Ryugu ainsi que de diverses météorites mesurées en laboratoire (IAS @Paris Saclay). Extrait de Nakamura et al. 2022

# Lien entre mesures depuis l'orbite et mesures en laboratoire : le cas de Hayabusa 2



4) On a de plus étudié les spectres dans le moyen IR (cf figure 3). Dans cette gamme, les larges bandes autour de 10 μm et de 20 μm donnent des indications sur la matière minérale présente dans les phases étudiées. La forme ainsi que la largeur et la position de ces bandes donnent des informations sur la composition et la structuration de la matière minérale. En comparant les deux spectres de Bennu et Ryugu. Peut-on toujours conclure que les grains de Ryugu et Bennu seront identiques lors des analyses en laboratoire ?

5) On place sur ce graphe des spectres de météorites (Orgueil, Alais, Tagish Lake et Murchison). Orgueil et Alais sont classées comme des échantillons de type CI alors que Murchison est classé comme un échantillon de type CM. Identifié quelles météorites sont des meilleurs analogues pour Ryugu ? et pour Bennu ? En sachant que les météorites sont classées suivant leur histoire (formation puis altération au sein de l'astéroïde parent), faites une hypothèse sur Ryugu et Bennu ?

Ryugu = CI, Bennu = CM, scénario de formation et d'évolution différents pour ces deux corps