

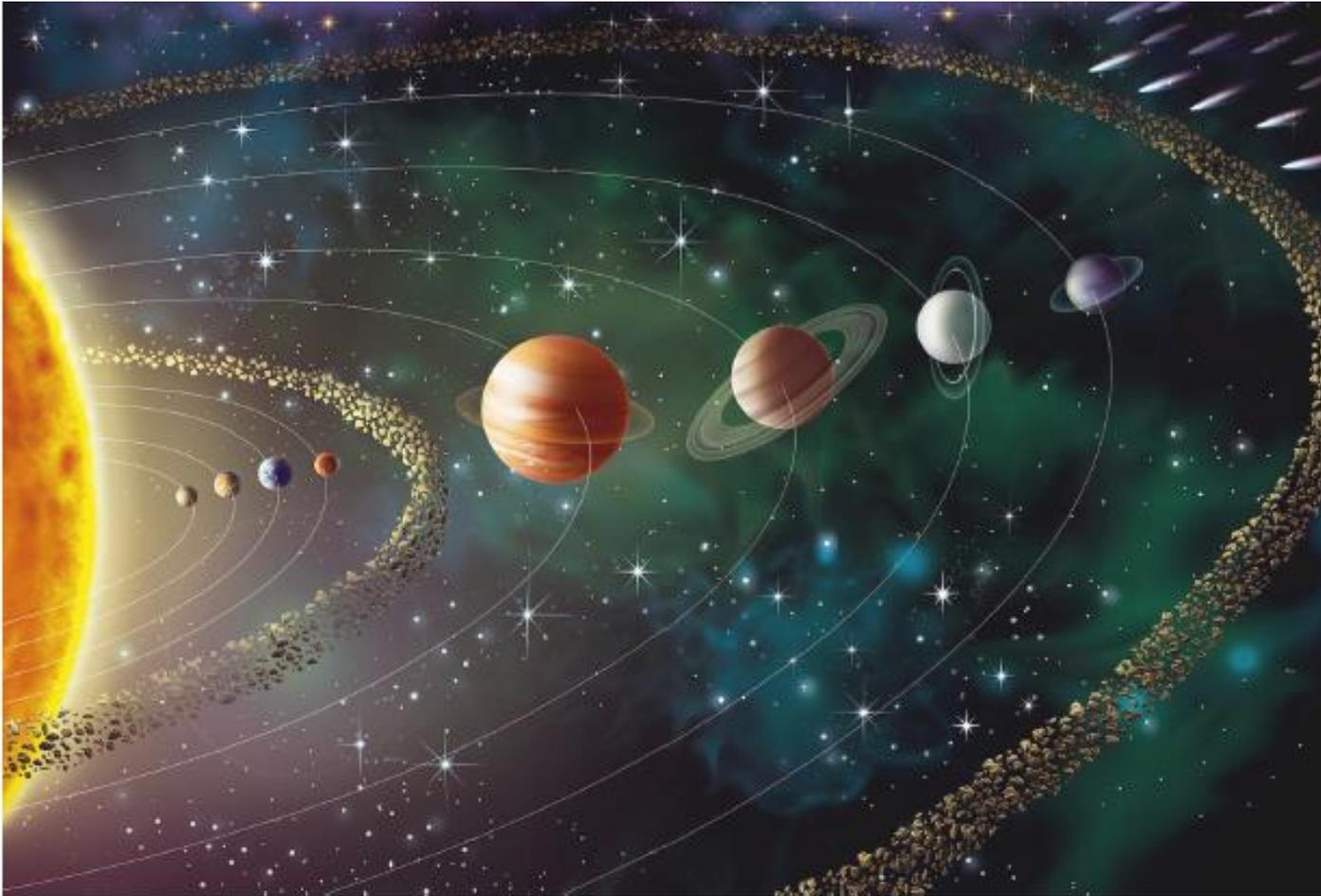
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY — 2023-2024

Phys 137 : séance 9

Formation des systèmes planétaires

zelia.dionnet@universite-paris-saclay.fr (IAS)

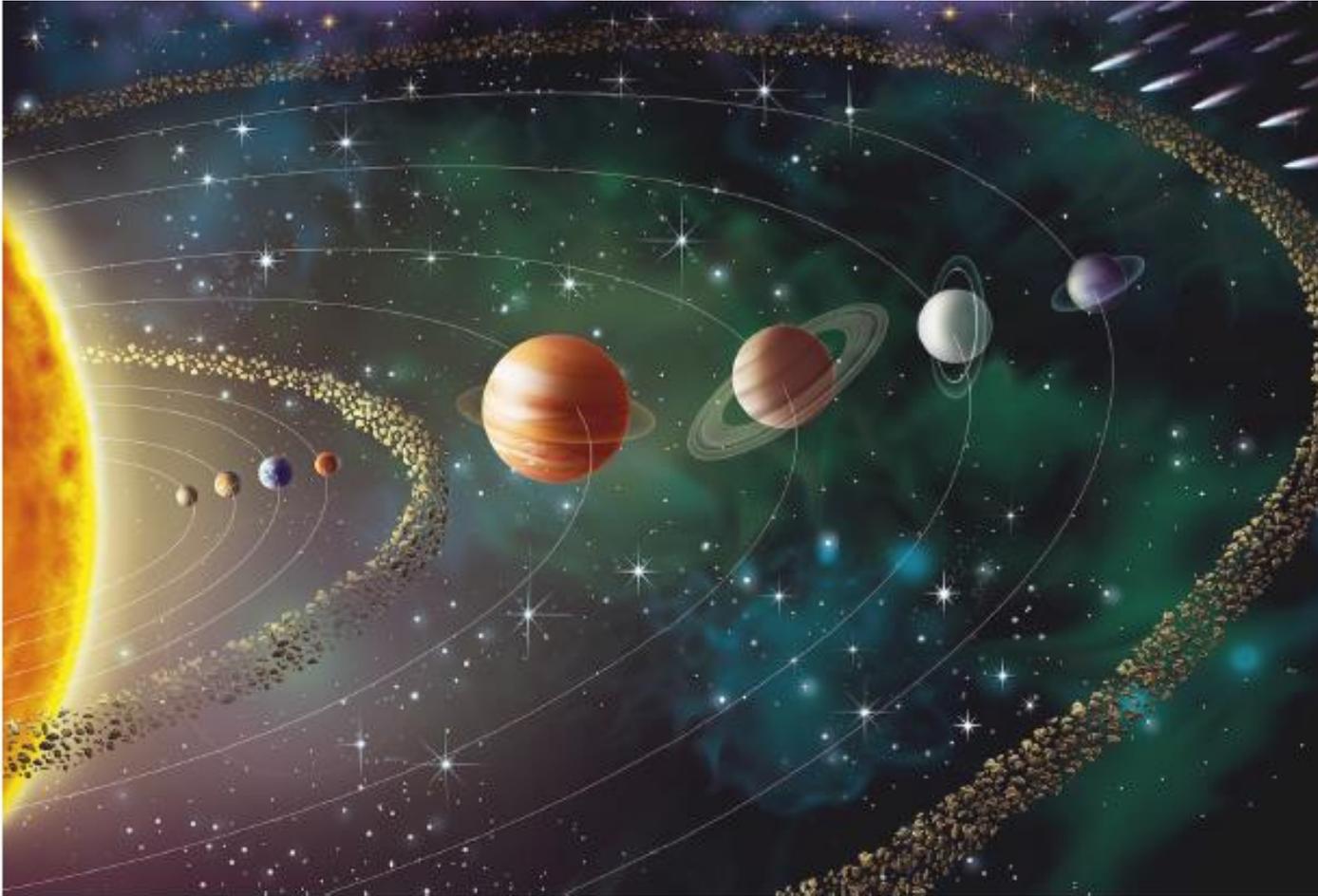
Observation de notre système Solaire



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

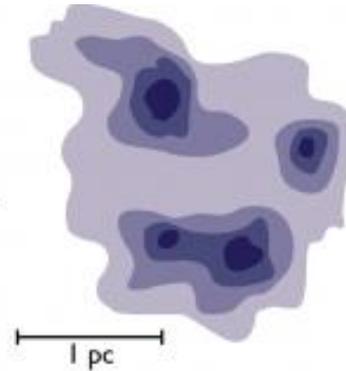
Point de départ : Les nuages interstellaires



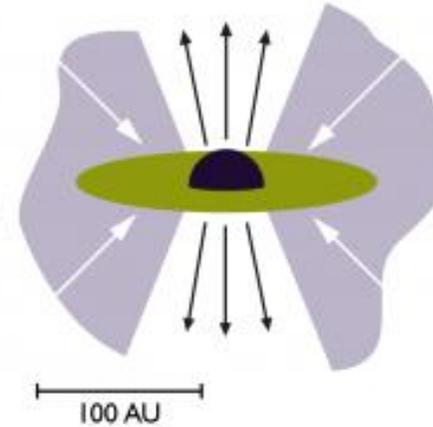
Nuage de gaz et de poussière

Scénario actuel de formation du système solaire

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



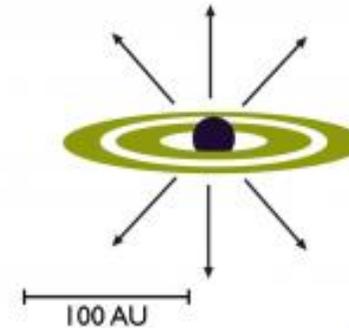
$\tau = 10^{**5} - 10^{**6}$ ans : phase T Tauri. Les réactions thermonucléaires démarrent au centre : l'étoile est née. Un jet bipolaire se forme le long de l'axe de rotation.



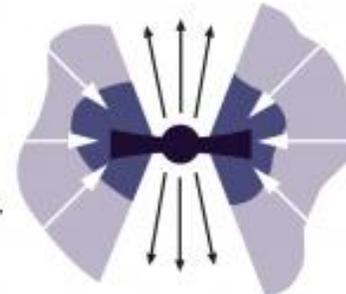
$t=0$: effondrement gravitationnel et fragmentation du Nuage. Au centre de chaque surdensité se forme un coeur dense.



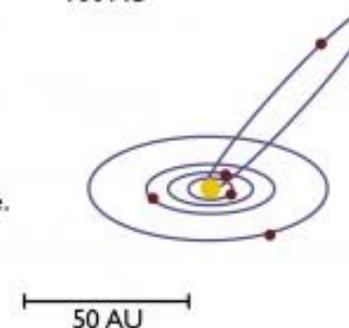
$\tau = 10^{**6} - 10^{**7}$ ans : condensation puis accrétion de matière solide dans le disque en refroidissement.



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



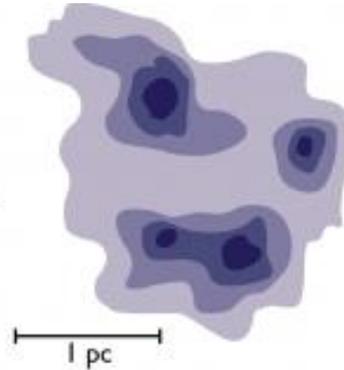
$\tau = 10^{**7} - 10^{**8}$: fin de la période d'accrétion. Formation des planètes et dispersion du gaz restant dans le disque.



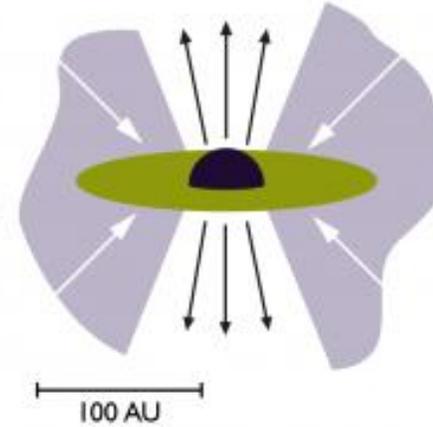
Scénario actuel de formation du système solaire

Pourquoi et comment survient cet effondrement ?

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



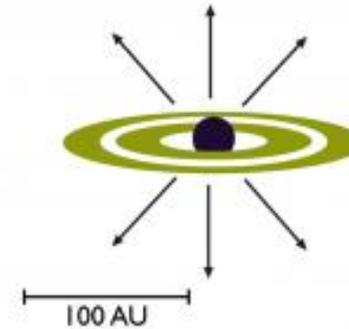
$\tau = 10^{**5} - 10^{**6}$ ans : phase T Tauri. Les réactions thermonucléaires démarrent au centre : l'étoile est née. Un jet bipolaire se forme le long de l'axe de rotation.



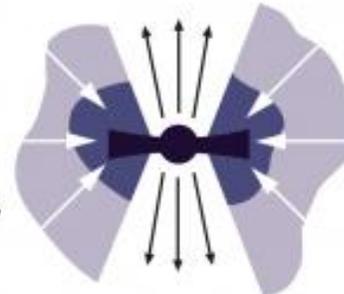
$t=0$: effondrement gravitationnel et fragmentation du Nuage. Au centre de chaque surdensité se forme un coeur dense.



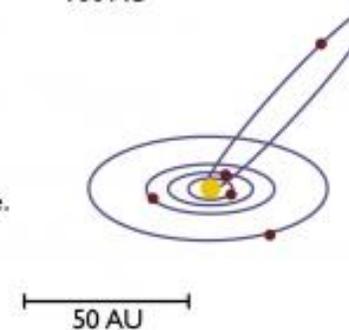
$\tau = 10^{**6} - 10^{**7}$ ans : condensation puis accréation de matière solide dans le disque en refroidissement.



$\tau = 10^{**4} - 10^{**5}$ 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 μ la masse volumique du nuage, que l'on supposera constante. Exprimez alors R en fonction de M_J et de μ . 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 $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ 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_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 $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹ 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.]

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⁻¹ 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 $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹ 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.

$$E_p = E_c$$

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

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

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 μ la masse volumique du nuage, que l'on supposera constante. Exprimez alors R en fonction de M_J et de μ . 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:

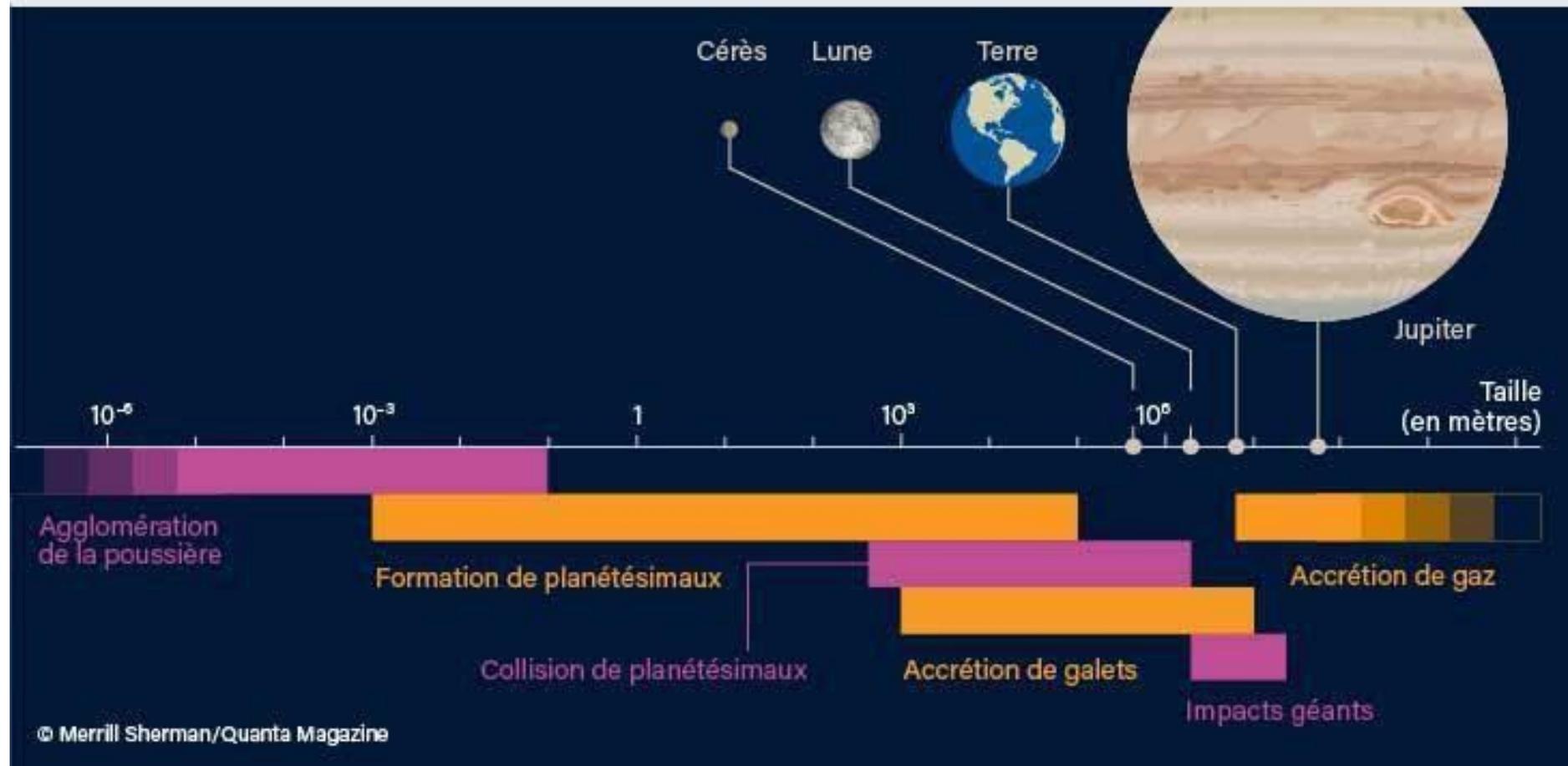
Le cœur dense devient opaque, les réactions thermonucléaires démarre : l'étoile est né

Formation du disque d'accrétion

Étape 2 : Formation des planétésimaux

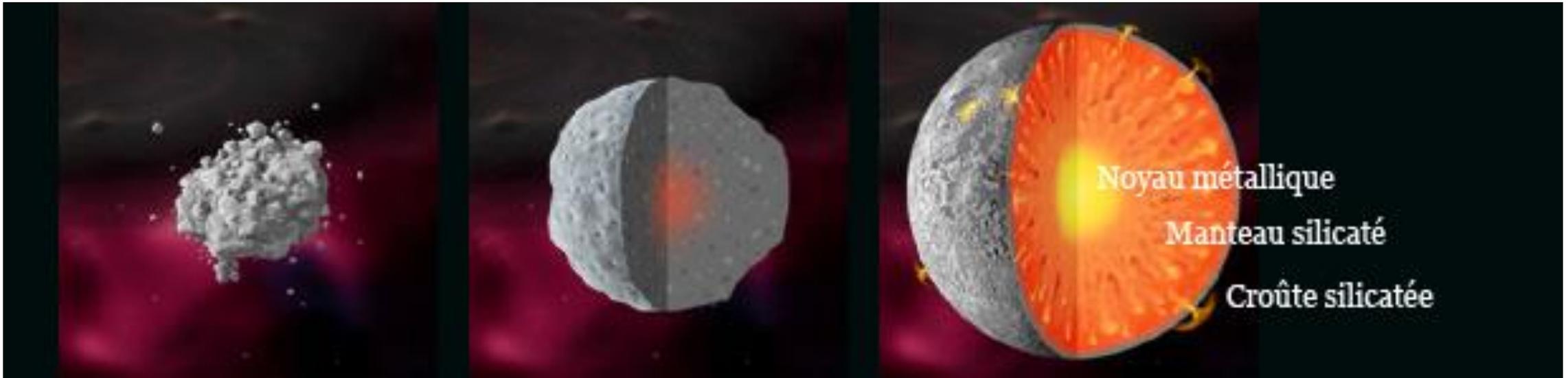
COMMENT LES PLANÈTES GRANDISSENT

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

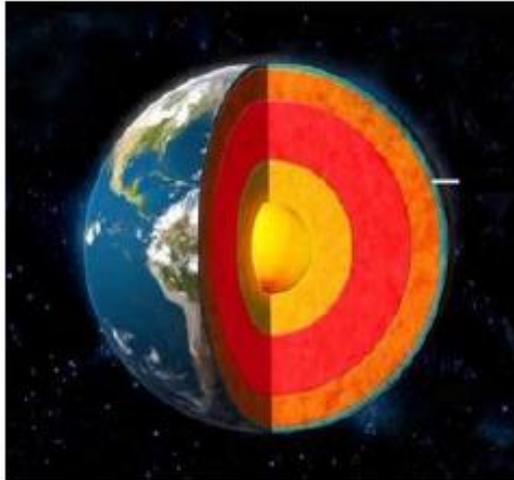


- Pour différencier une planète, le mieux c'est de la faire fondre :
- Chaleur d'accrétion (pour les corps plus grands que 800 km)
 - Effet radioactif : décroissance de ^{26}Al et ^{60}Fe

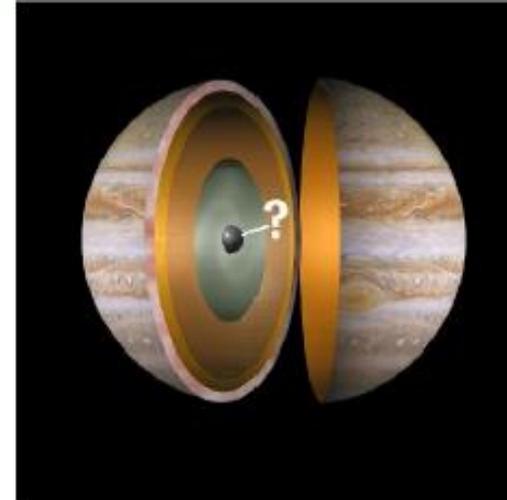
Planètes gazeuses VS planètes telluriques

Tellurique

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



Composition



Gazeuse

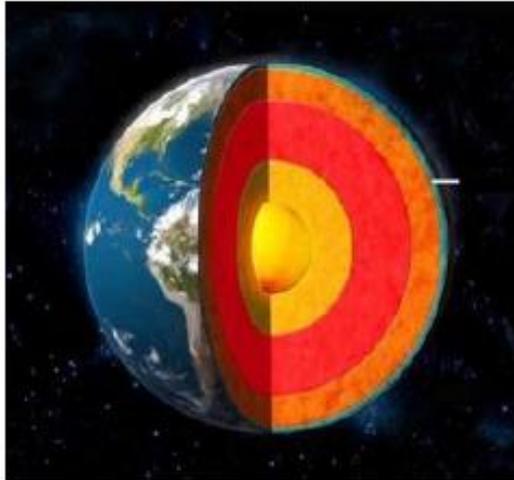
H / He, CH₄ / NH₃
 $M \sim M_{\text{Jup}} : 2 \cdot 10^{27} \text{ kg}$
 $\rho \sim 1 - 2$

Classez les planètes du Système Solaire

Planètes gazeuses VS planètes telluriques

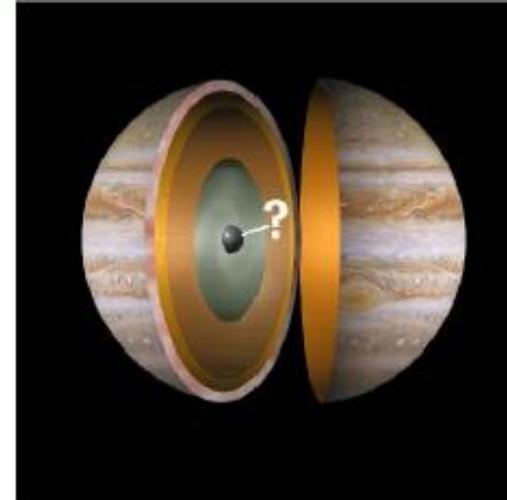
Tellurique

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



Mars
Terre
Venus
Mercure

Composition



Gazeuse

H / He, CH₄ / NH₃
 $M \sim M_{\text{Jup}} : 2 \cdot 10^{27} \text{ kg}$
 $\rho \sim 1 - 2$

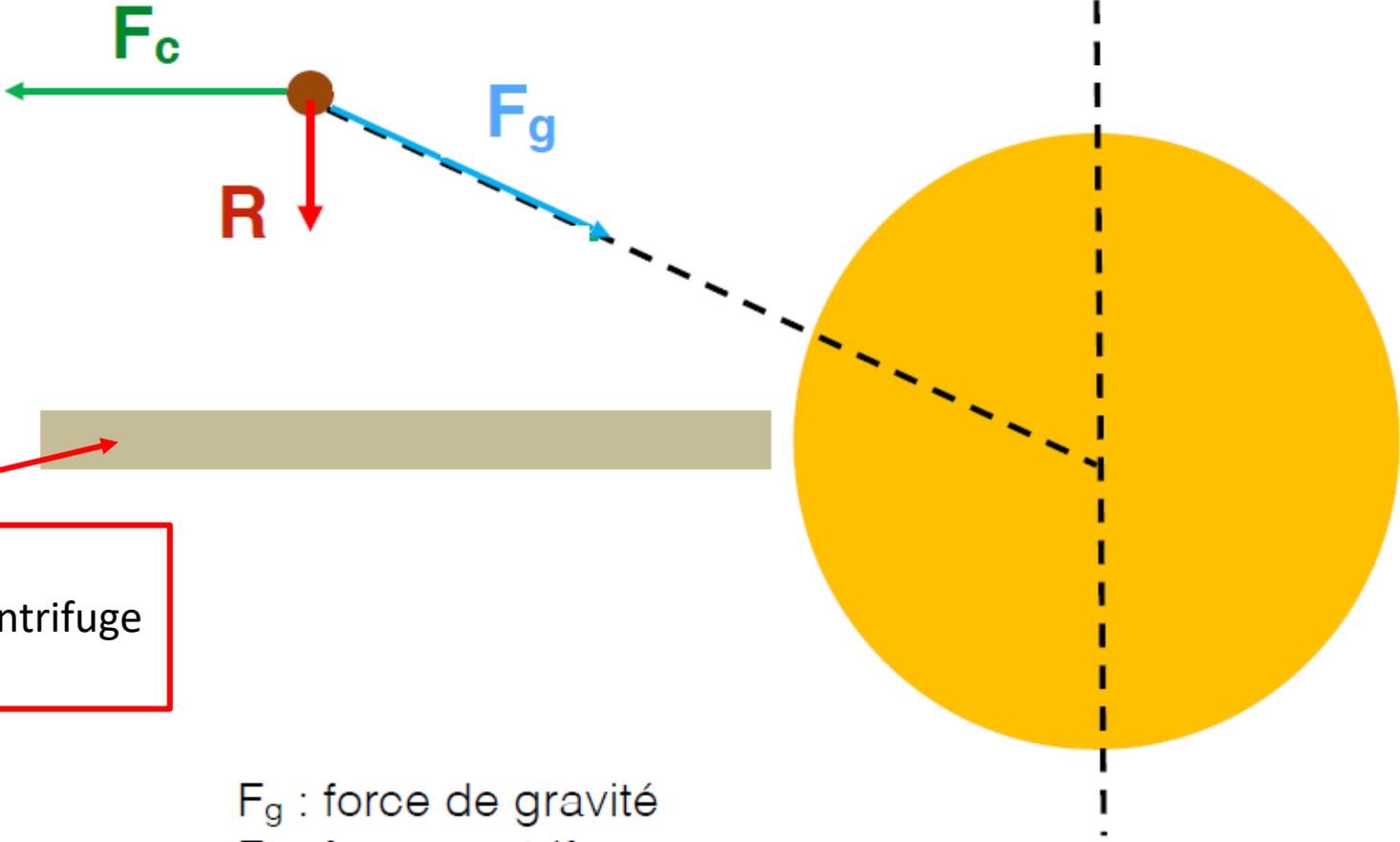
Jupiter
Saturne
Neptune
Uranus

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 ?

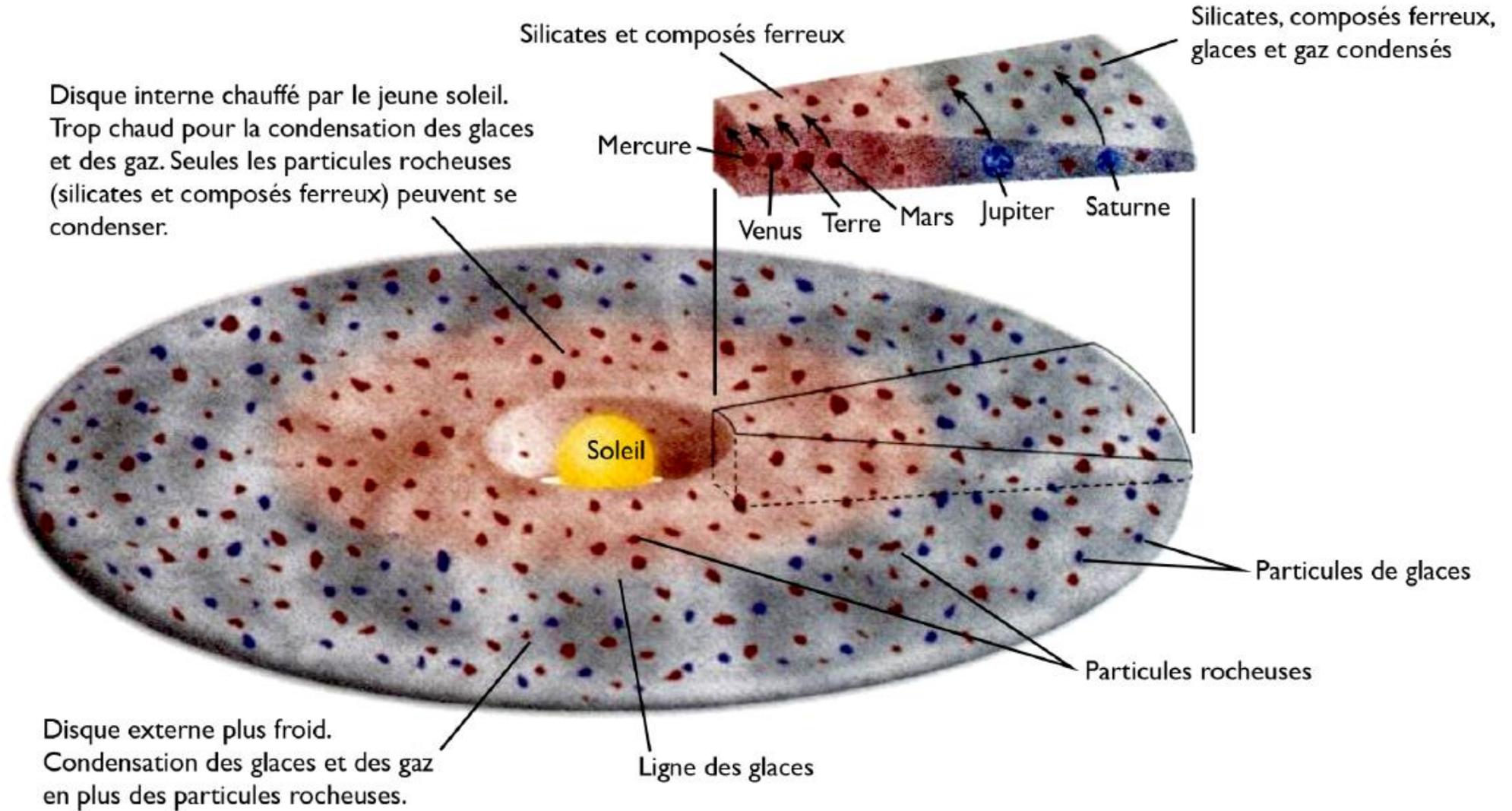
Si l'on considère $n=9$, on trouve $r = 77.2 \text{ UA}$.

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

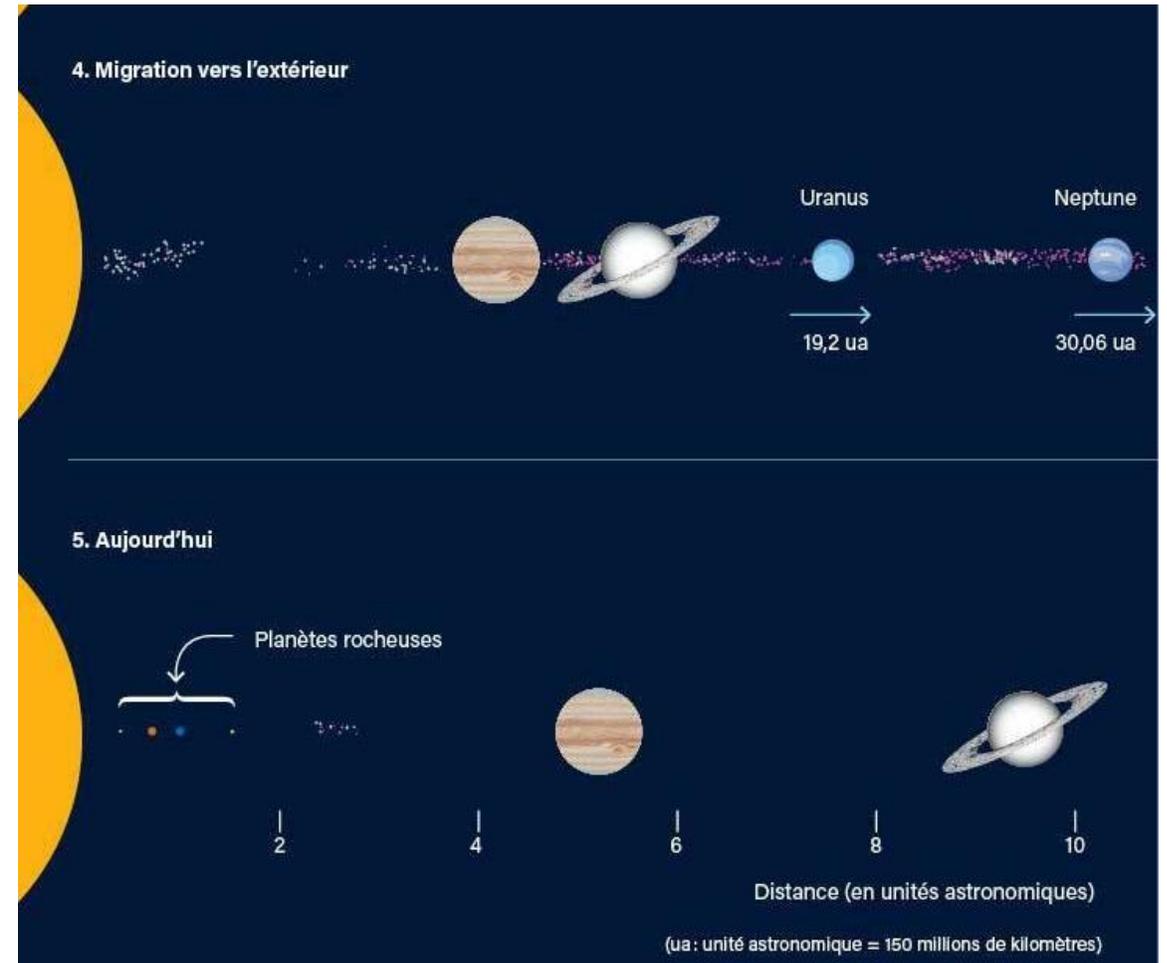
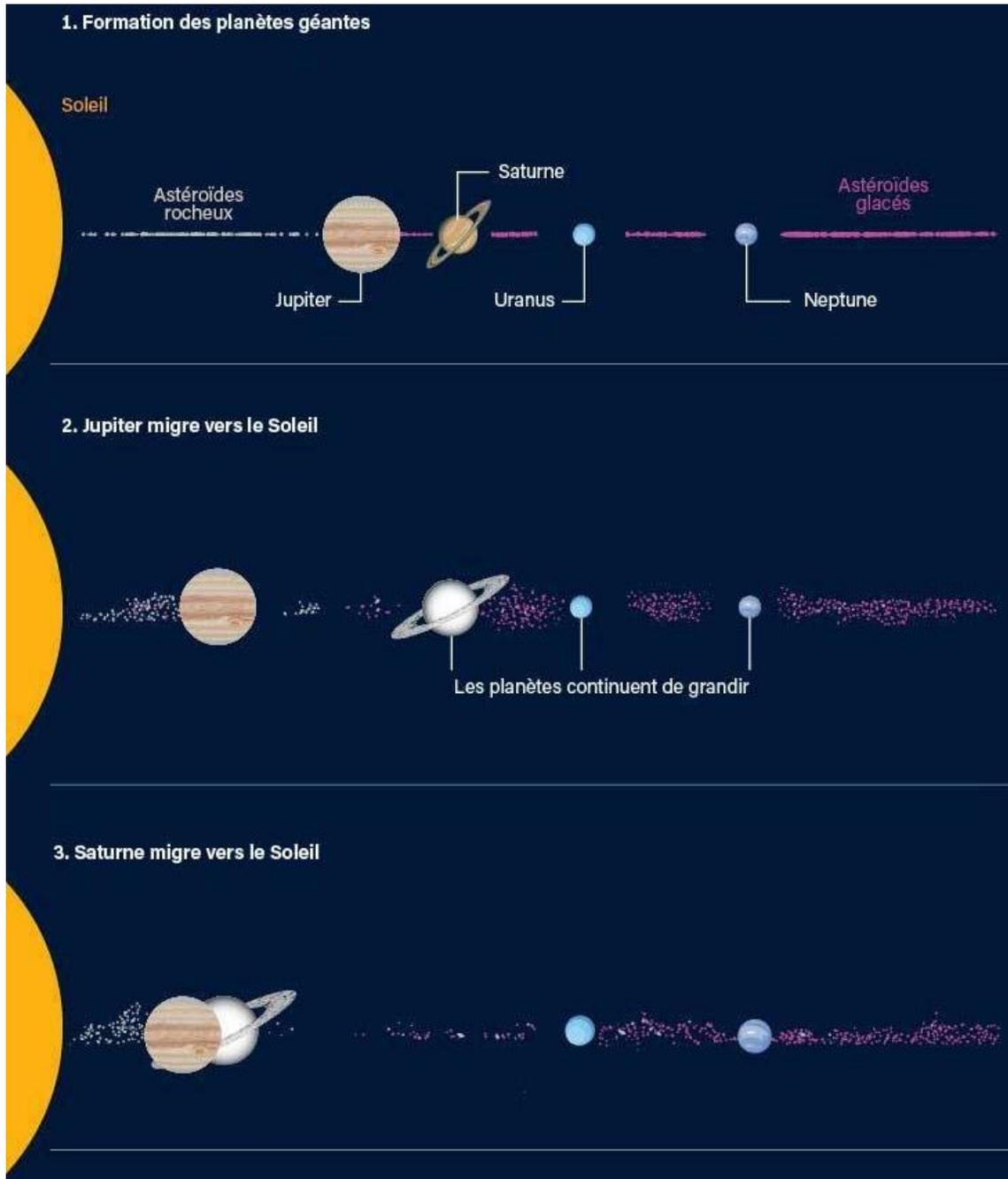
Présence de Jupiter => parapluie contre impacts géants

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

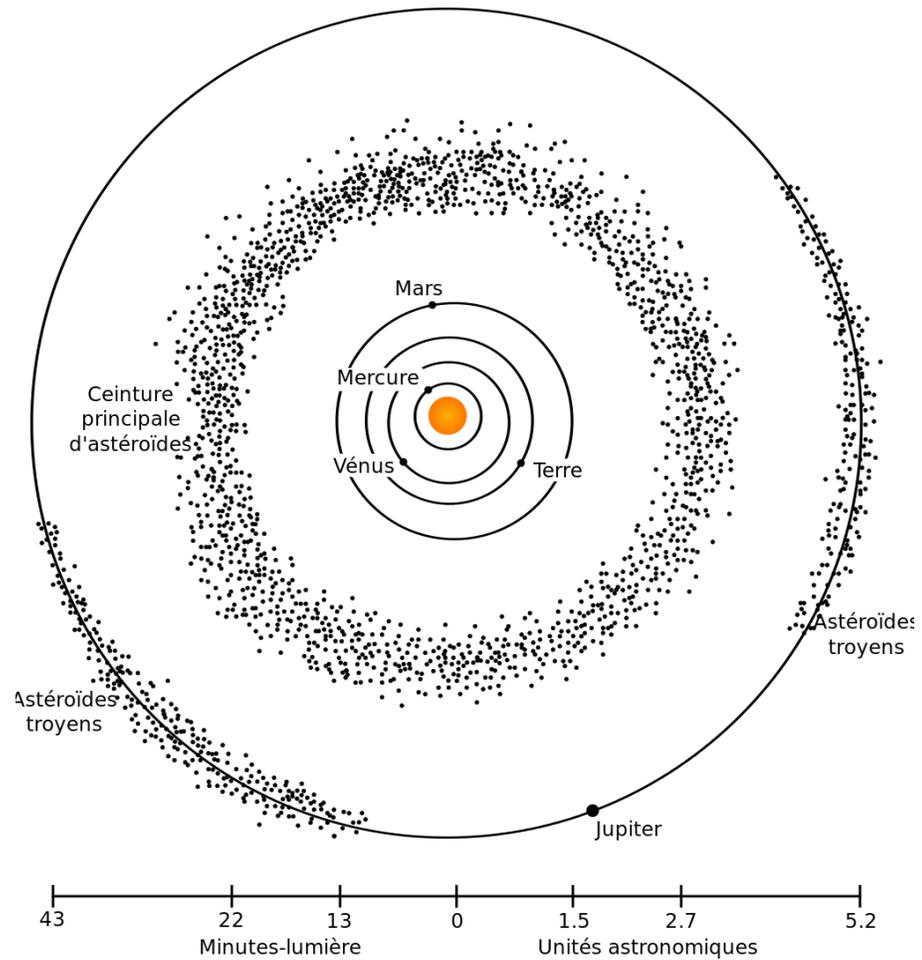


Vue d'artiste

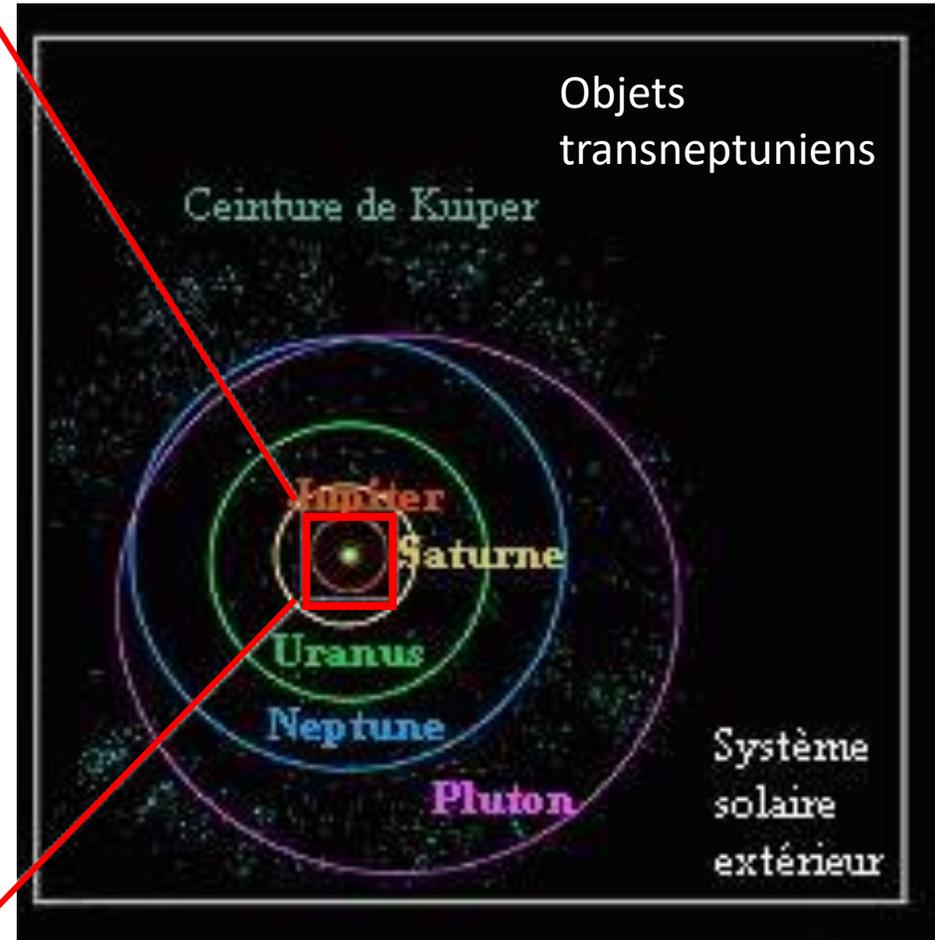
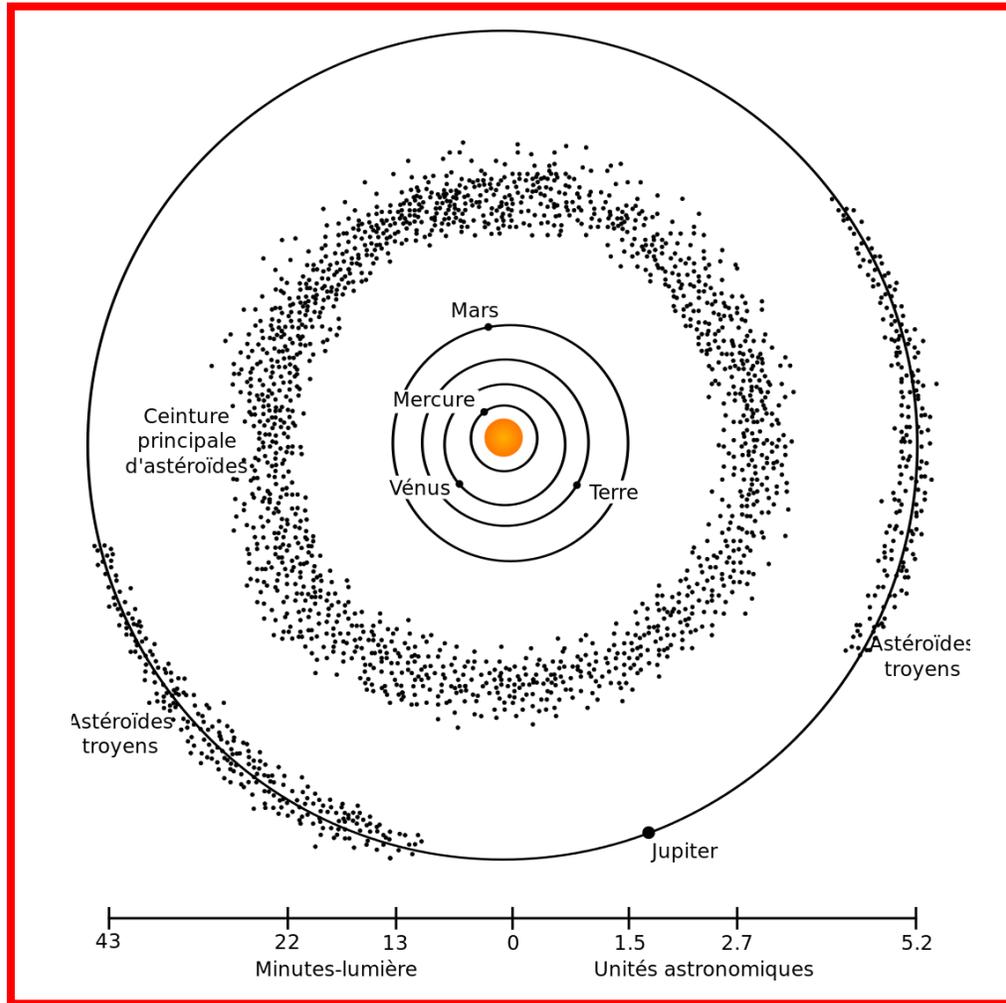
Les petits corps du système solaire



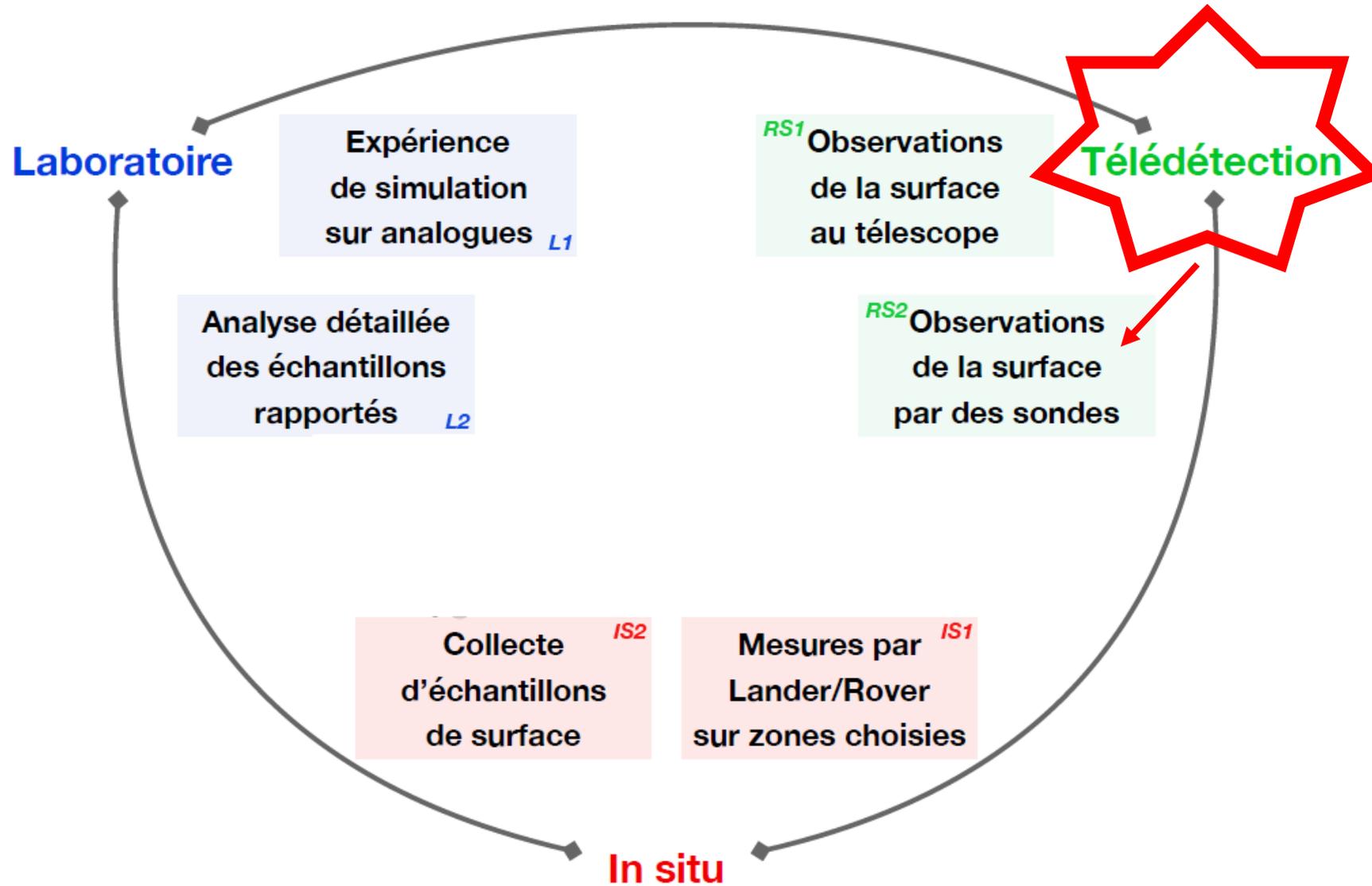
Où sont – ils situés ?



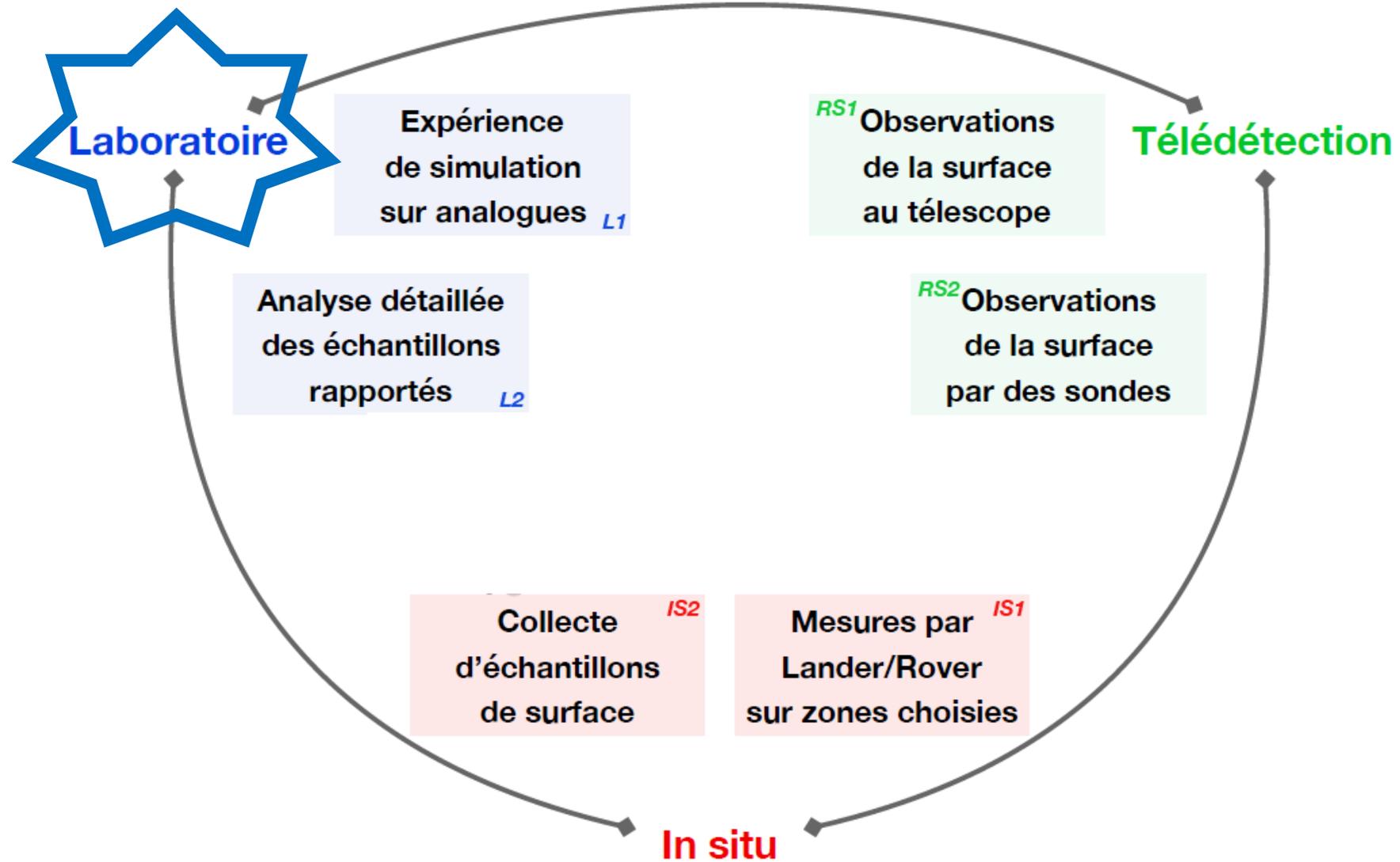
Où sont – ils situés ?



D'autre manière d'étudier notre univers

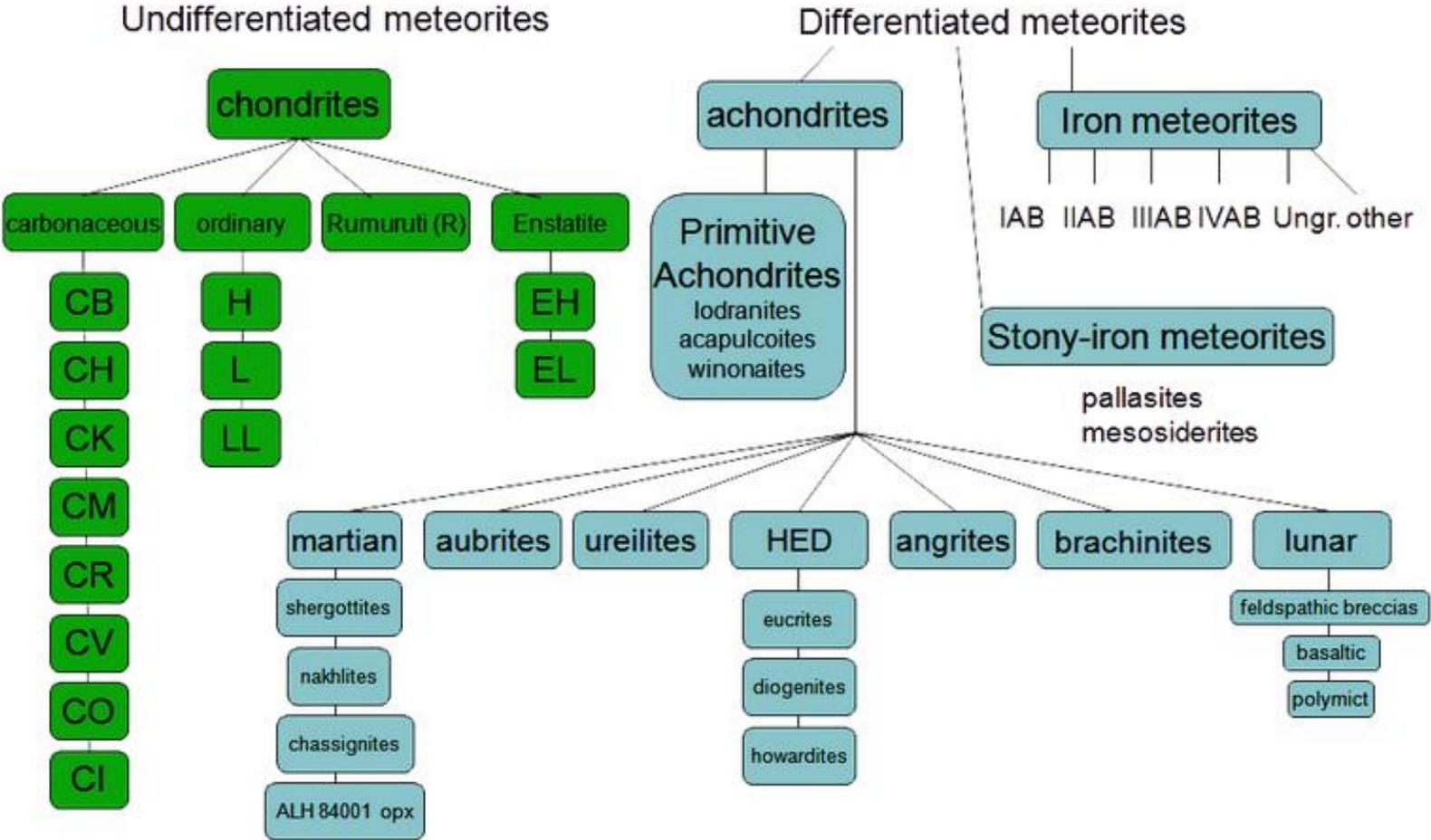


D'autre manière d'étudier notre univers

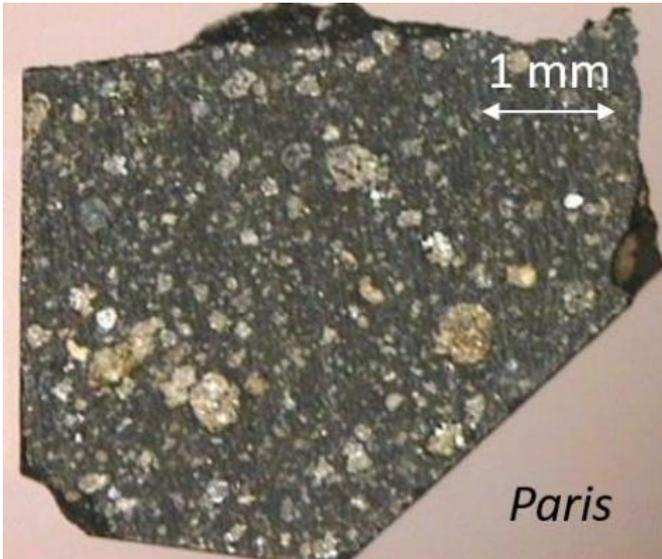


Des vestiges du début du Système Solaire

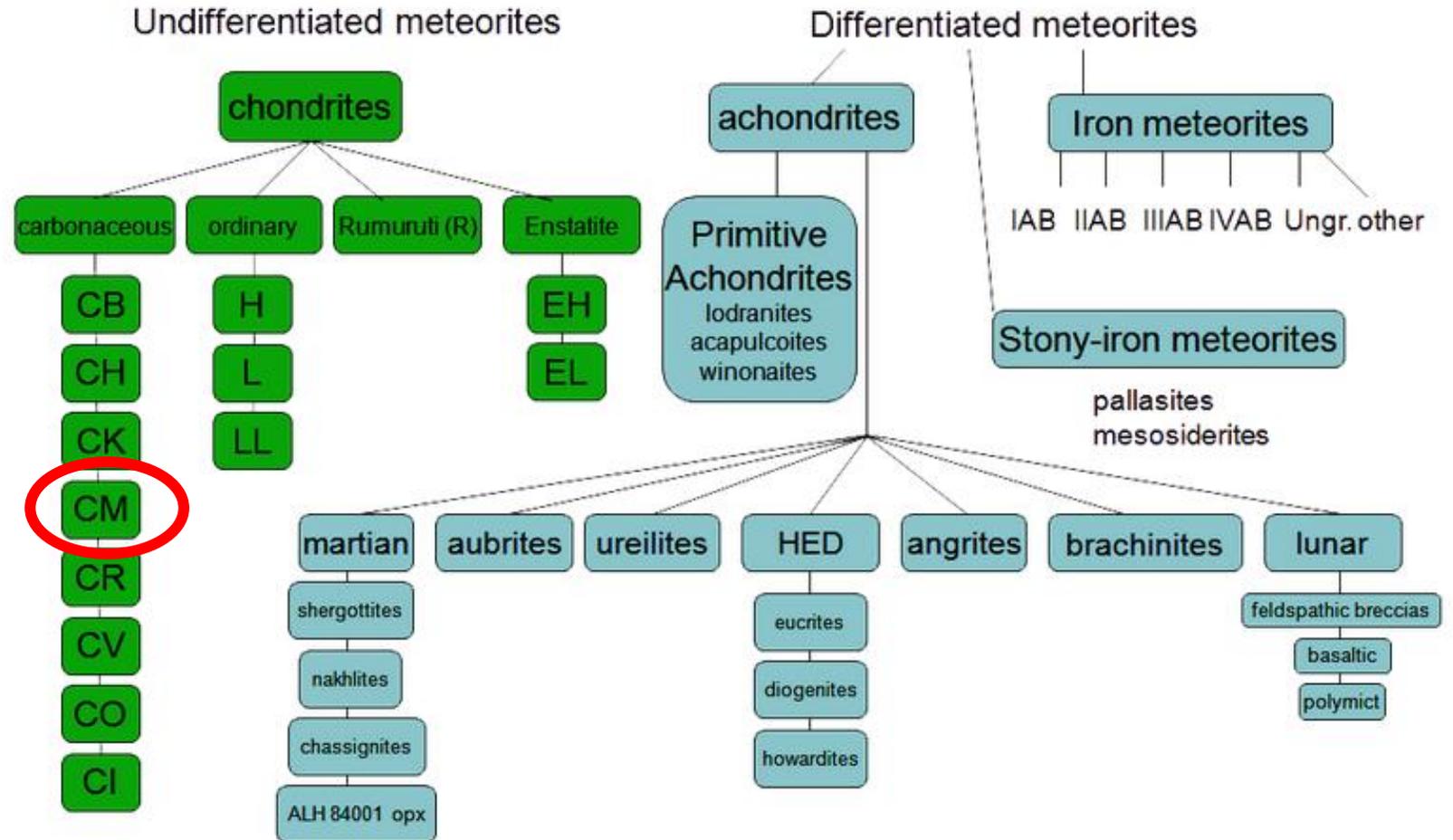
Étude des météorites



Des vestiges du début du Système Solaire

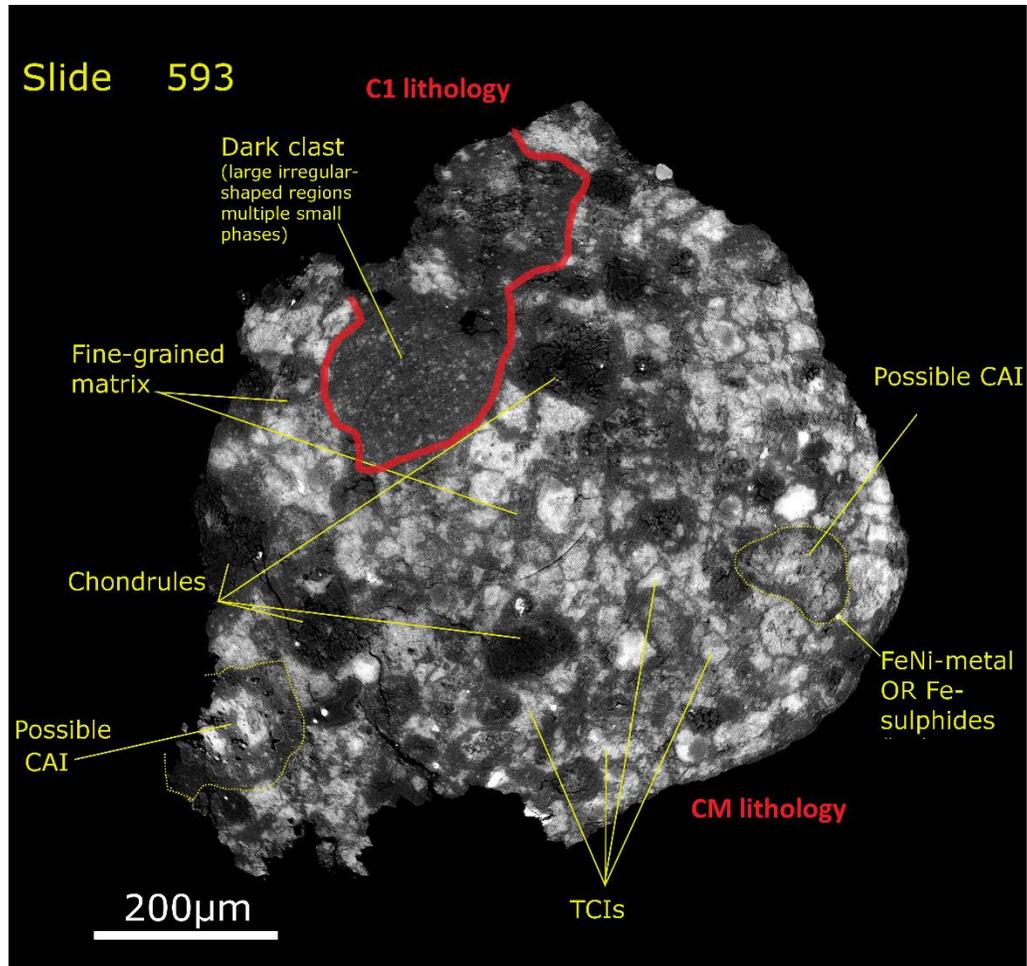


~ 5% de matière organique



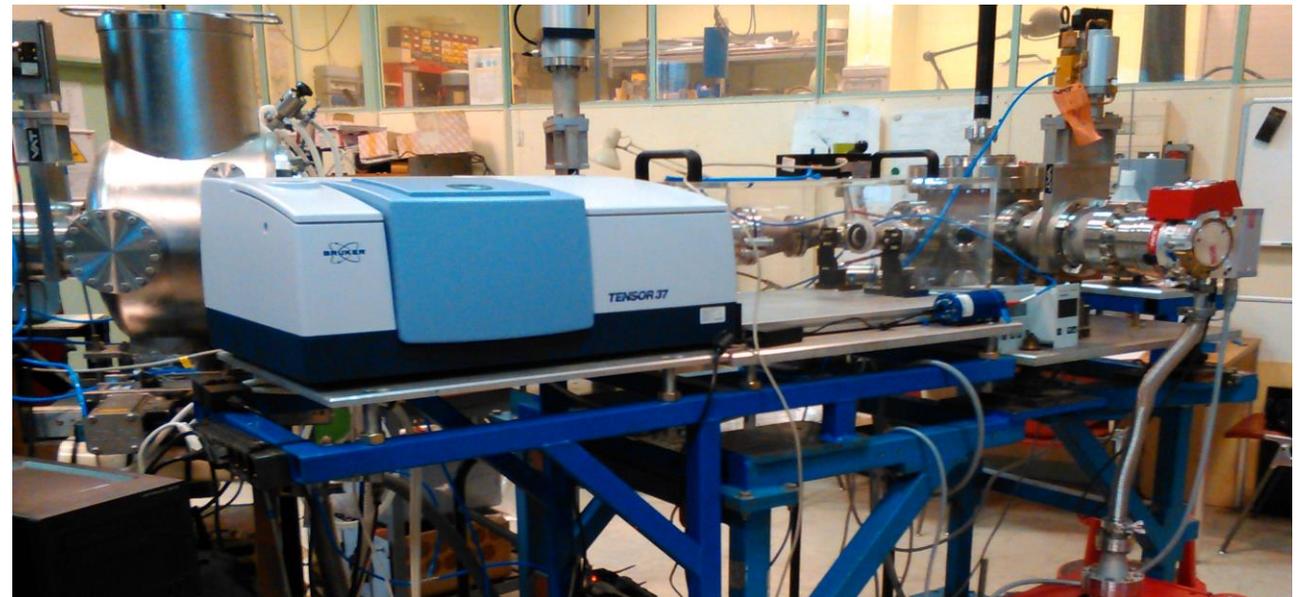
Étude des météorites en laboratoire

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



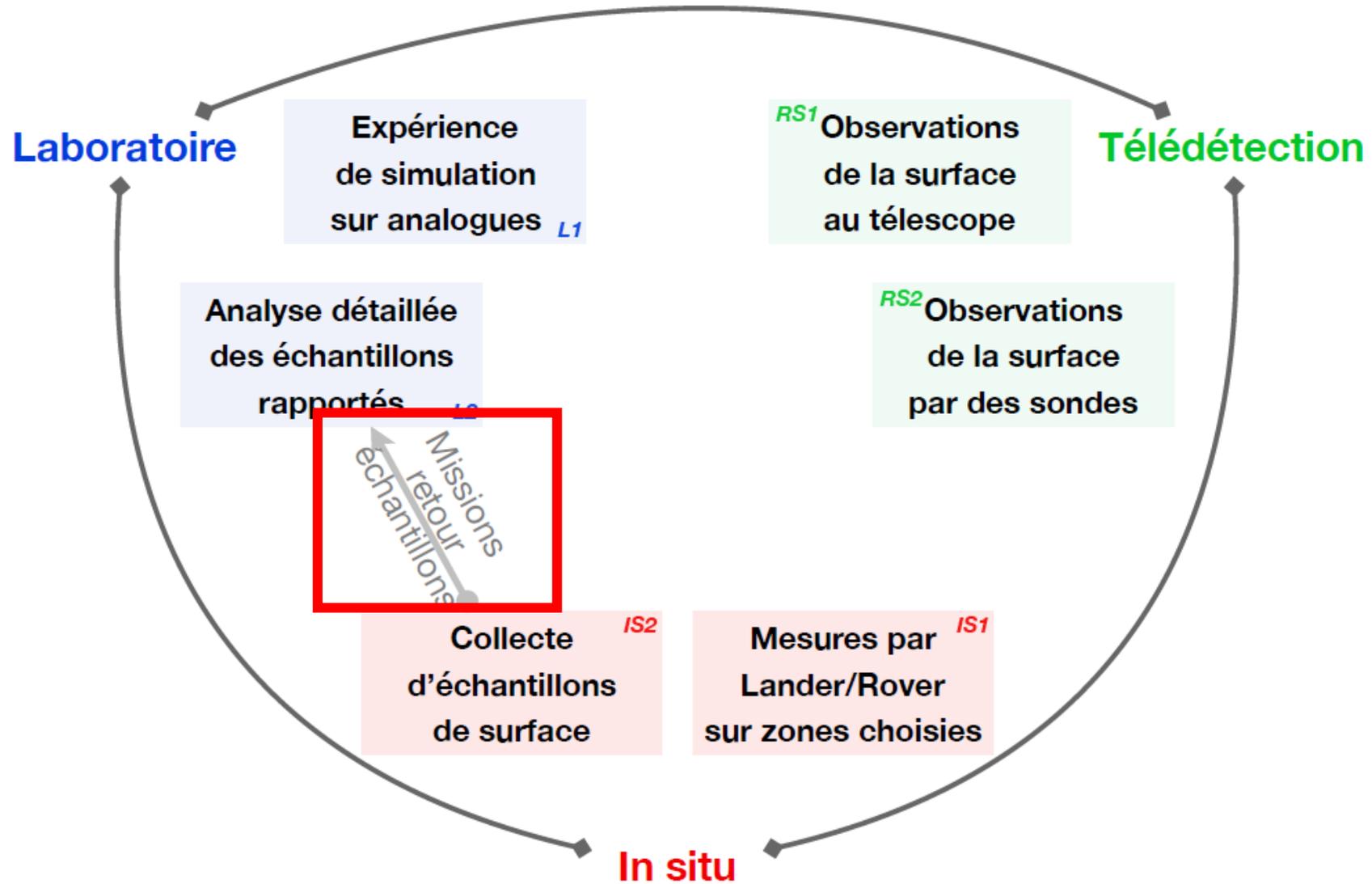
X-CT @IAS, hétérogénéité micrométrique de météorites

- 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

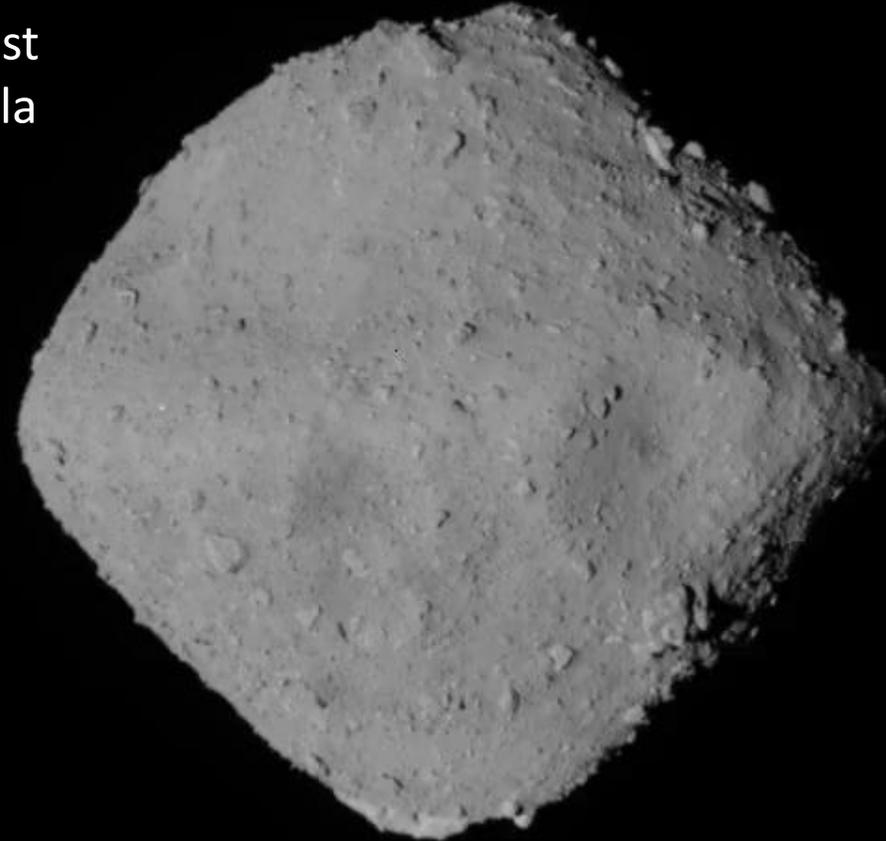


Hayabusa 2 : En route vers Ryugu

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

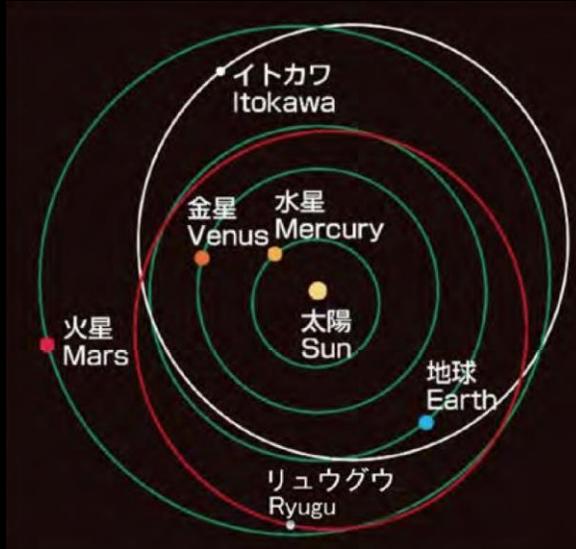


Objectif : ramener 0.1 g de Ryugu sur Terre





Propriétés générales de Ryugu



Distance Ryugu-Soleil: 0.96–1.41 AU

période = 474 jours;

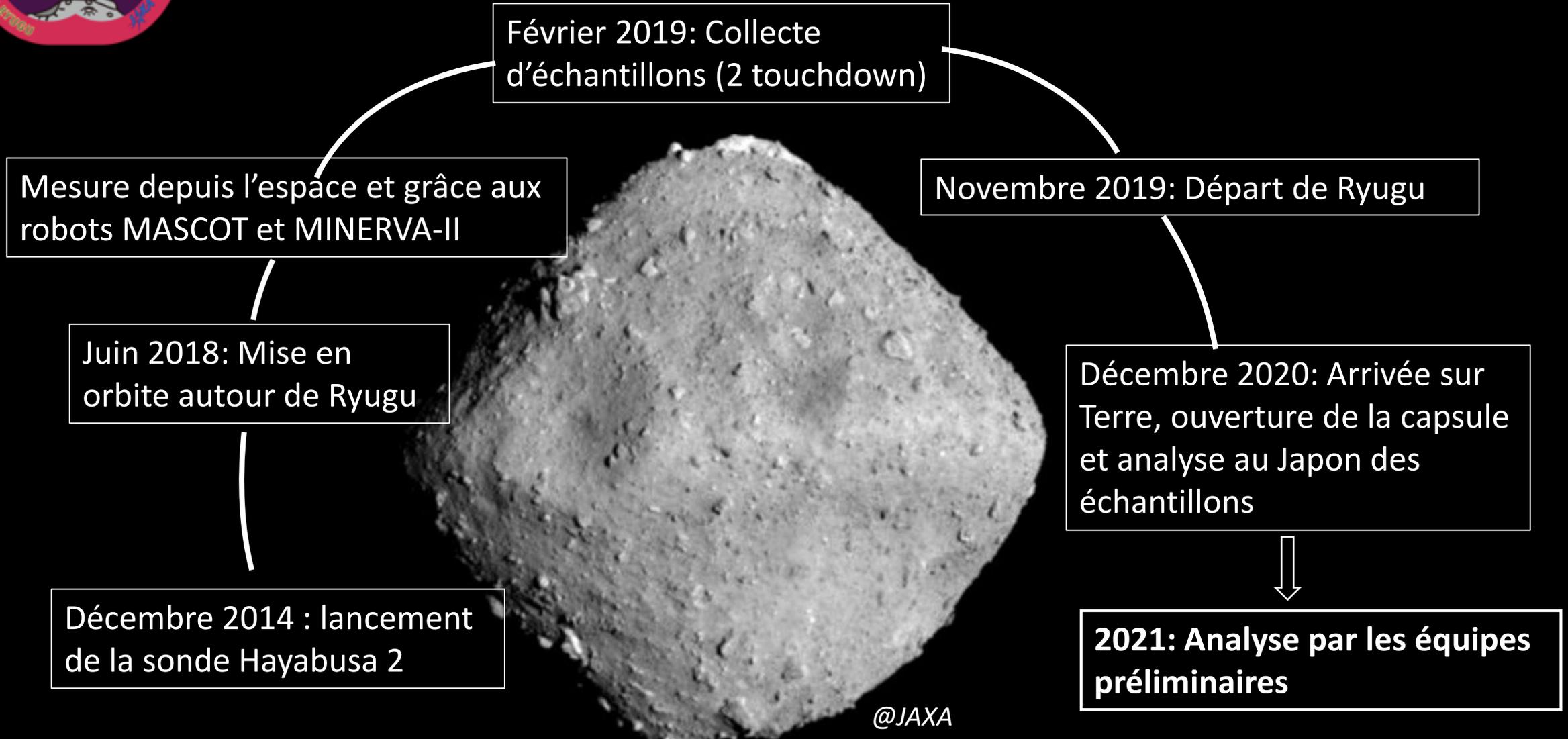
$a = 1.19$ AU ; $e = 0.19$; $i = 6^\circ$

- 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/cm³) et haute porosité (>50%)
- Grande abondance de gros rochers
- Astéroïde de type C

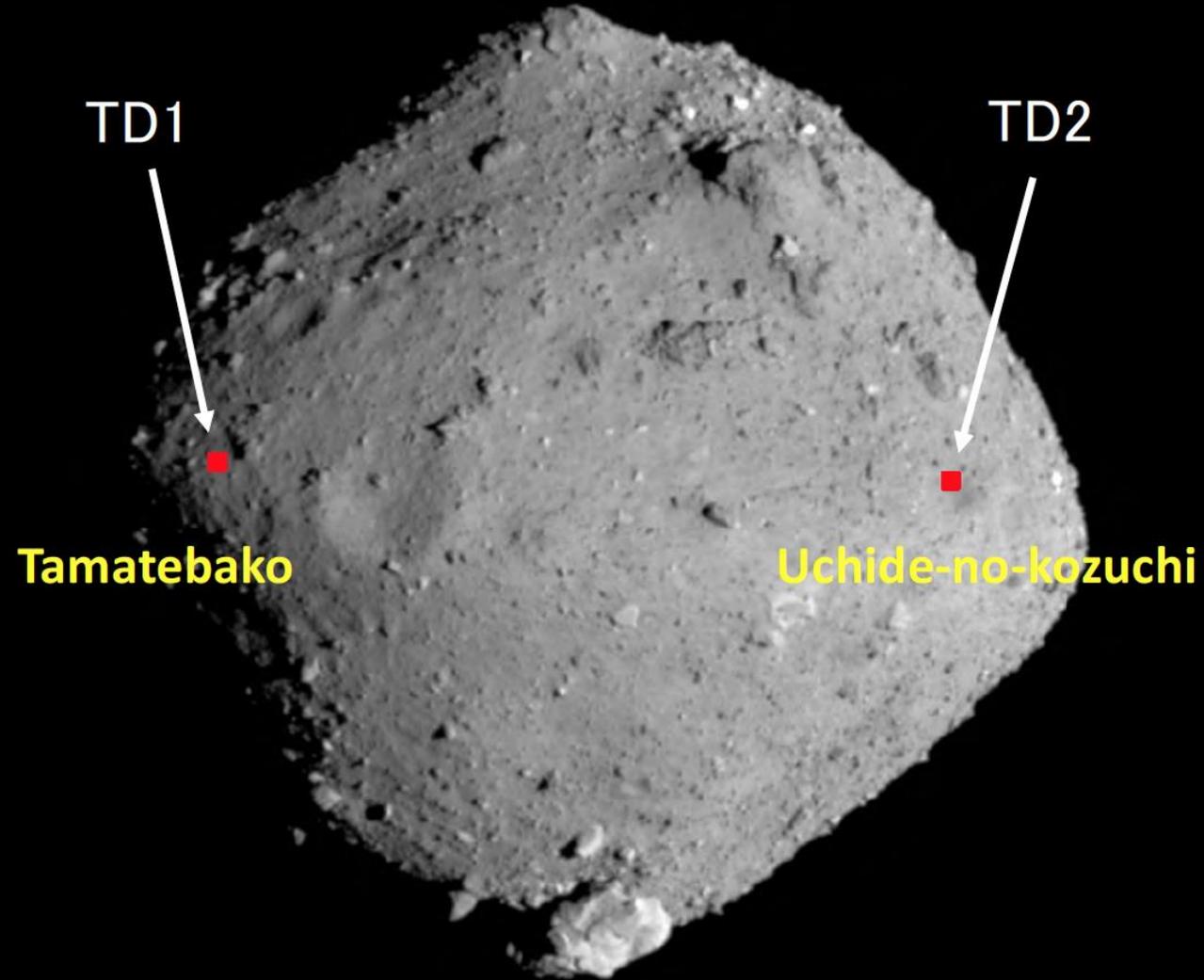




Déroulé de la mission Hayabusa 2

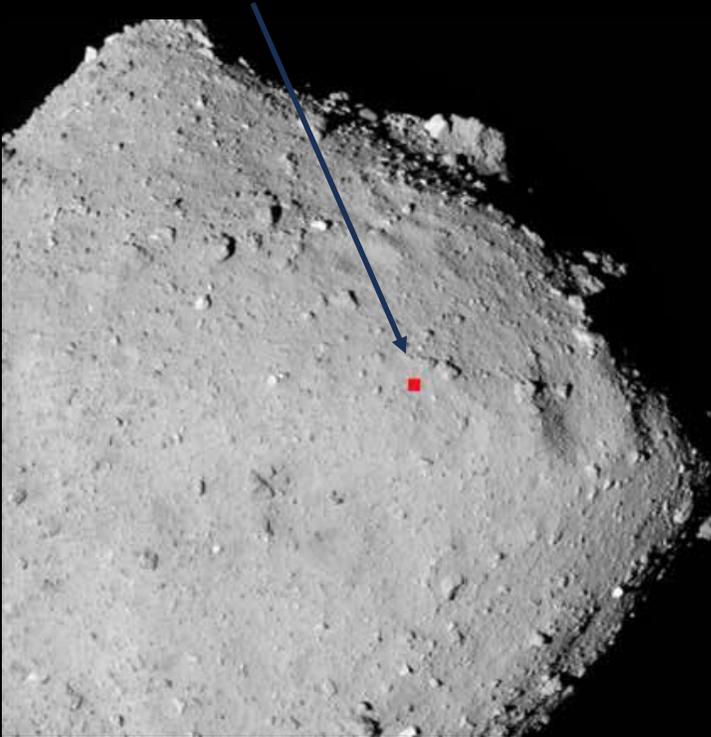


Collecte des échantillons

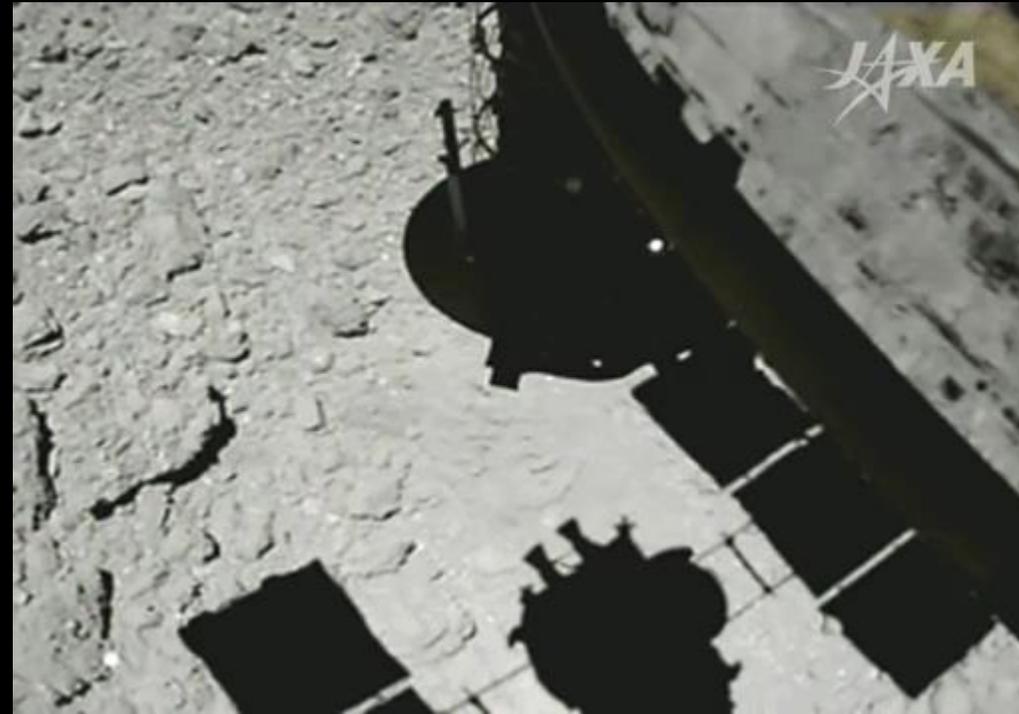


Premier site de collecte

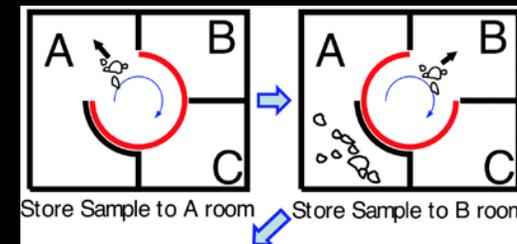
Le point de collecte d'Hayabusa2 a été surnommé « Tamatebako »



CAM-H (petite caméra moniteur)

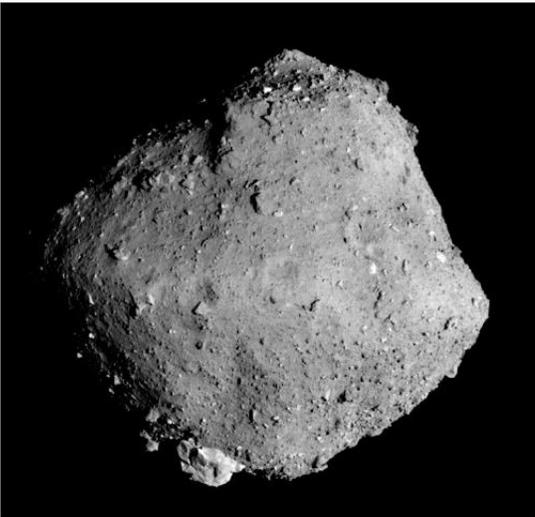


- Touch down collecte : éjection de poussières après impact
- Remplissage de la chambre A



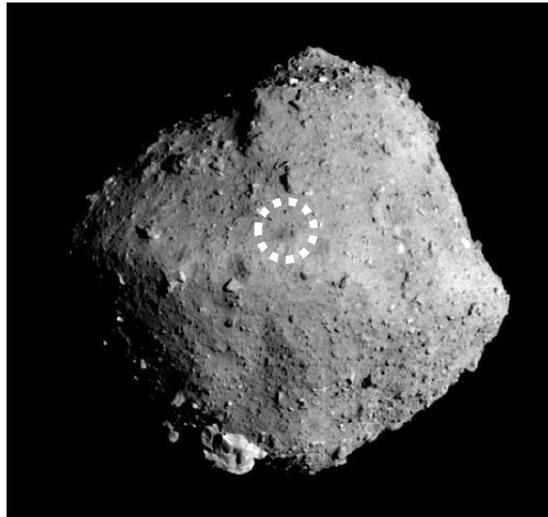
Deuxième site de collecte

Before SCI collision



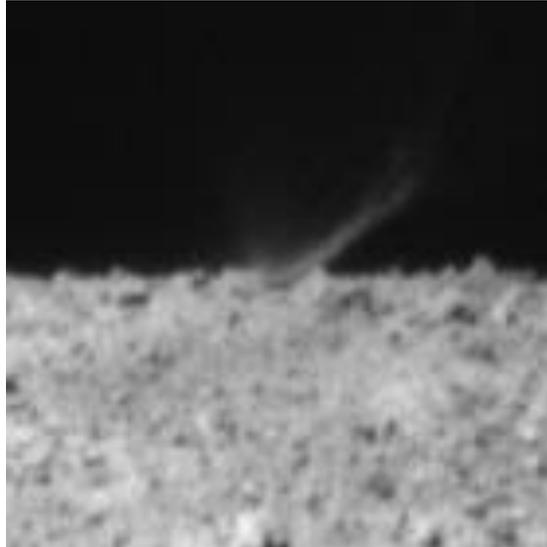
2019-03-21 13:03 (JST) altitude 14 km

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

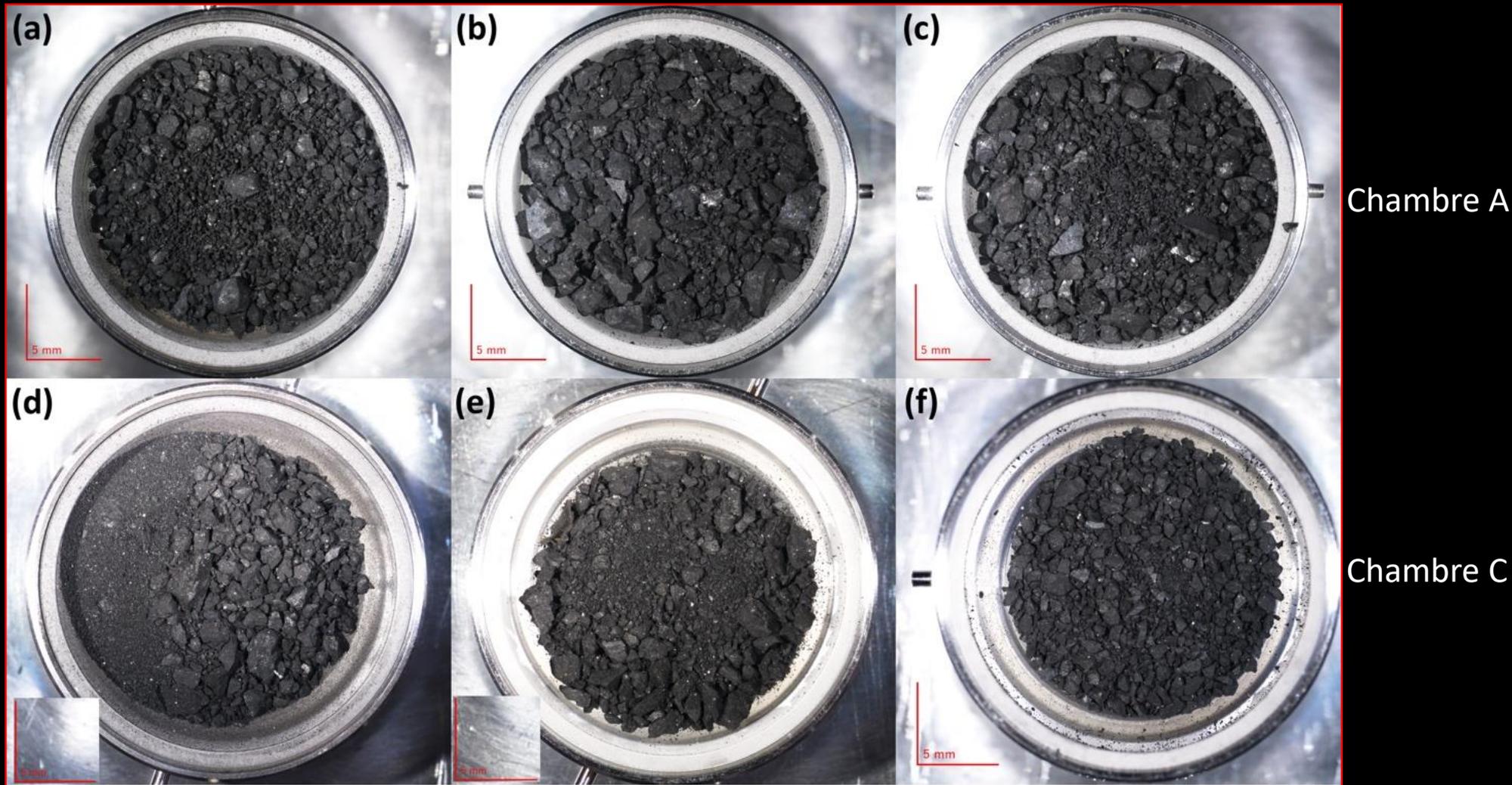
Atterrissage en Australie

5 décembre 2021



Mission rempli ?

5.4 g collectés



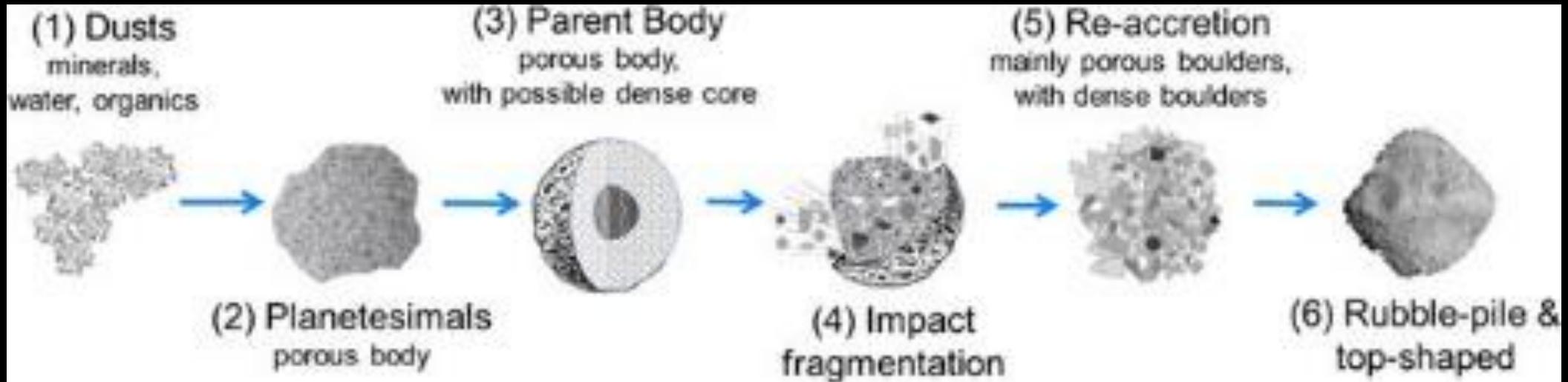
Grains de Ryugu à l'installation de conservation de l'ISAS

Un travail international impliquant ~250 chercheurs

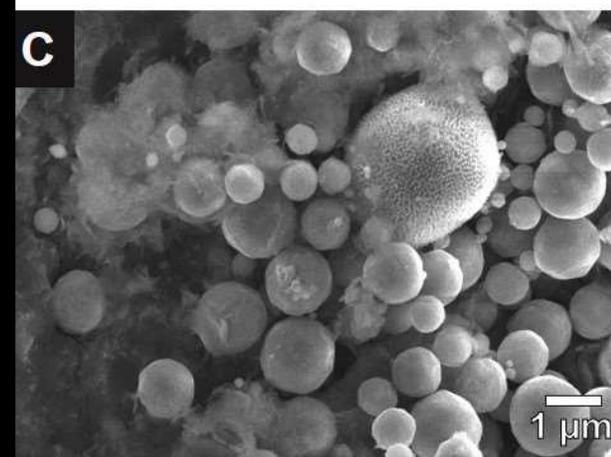
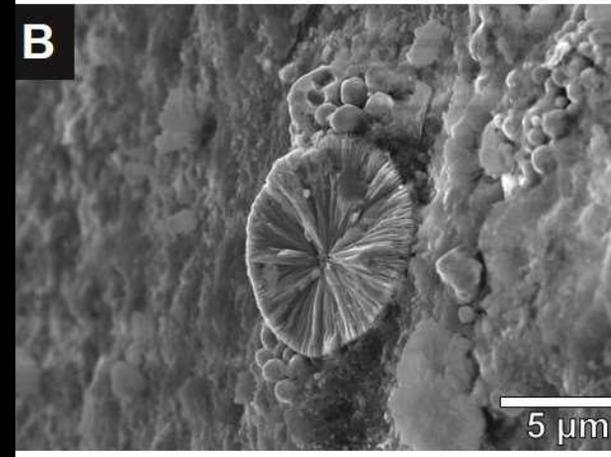
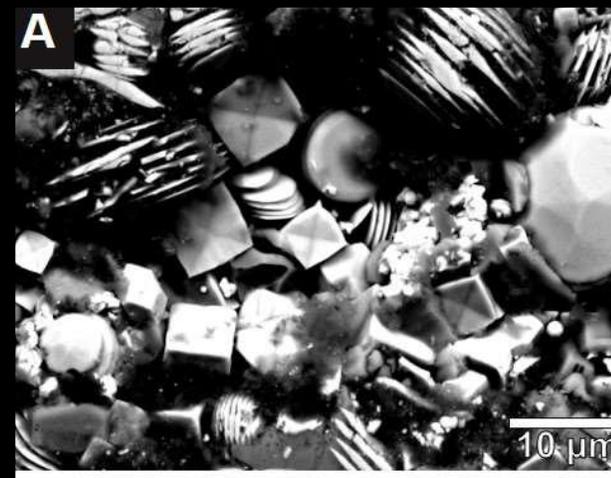
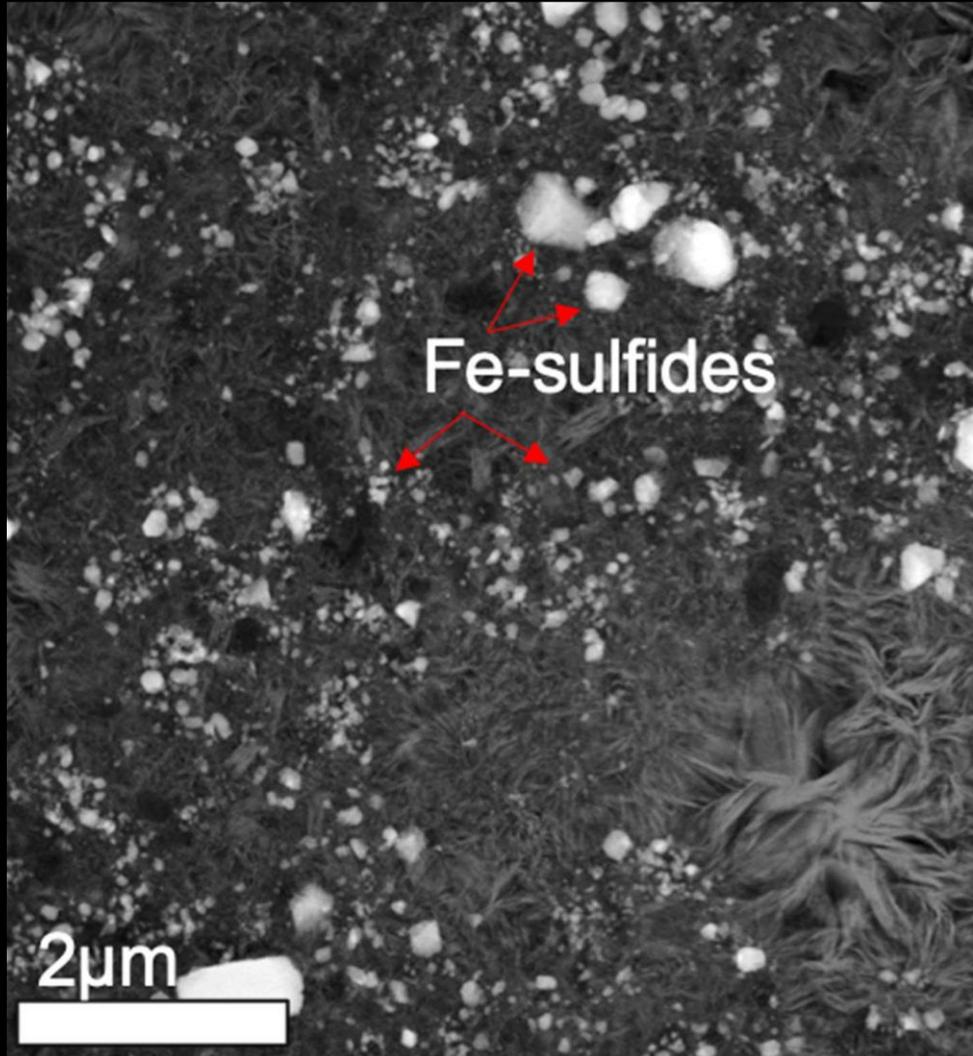


Que nous a appris cette mission ?

- 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



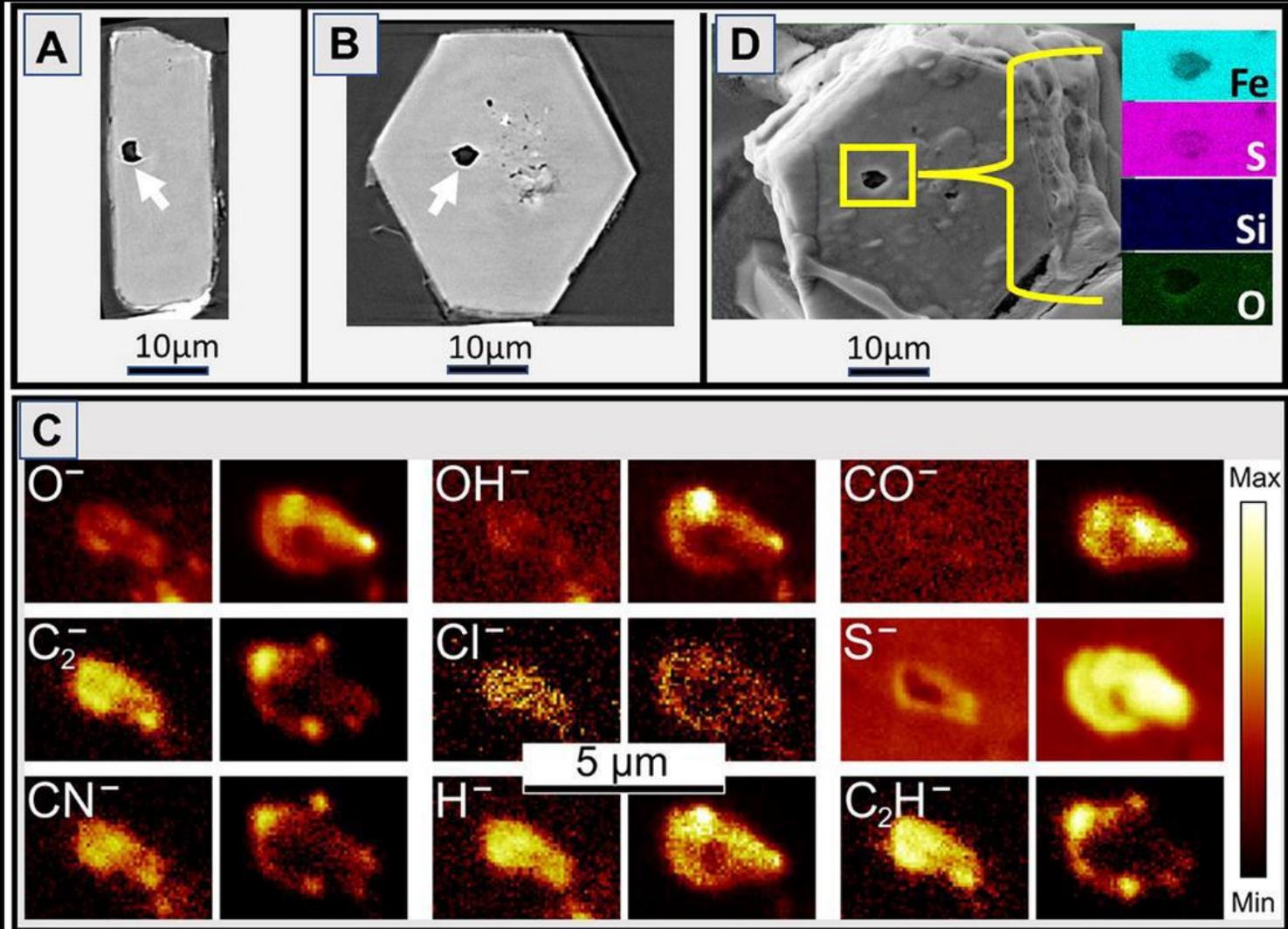
Un assemblage minéralogique complexe



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'H₂O et de CO₂, 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

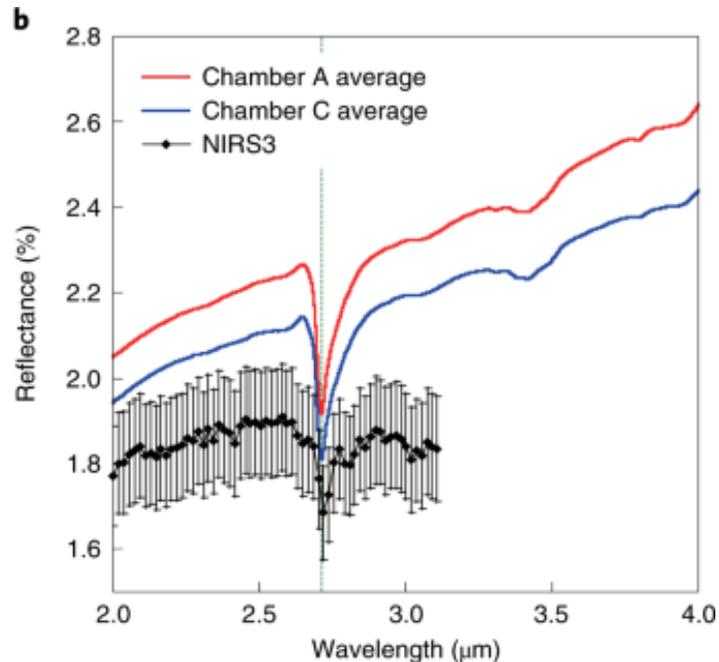


Figure 1 : Mesure du spectre de Ryugu depuis l'orbite grâce à NIRS3 (en noir) et en laboratoire (en rouge et bleue). Extrait de Yada et al. 2022

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

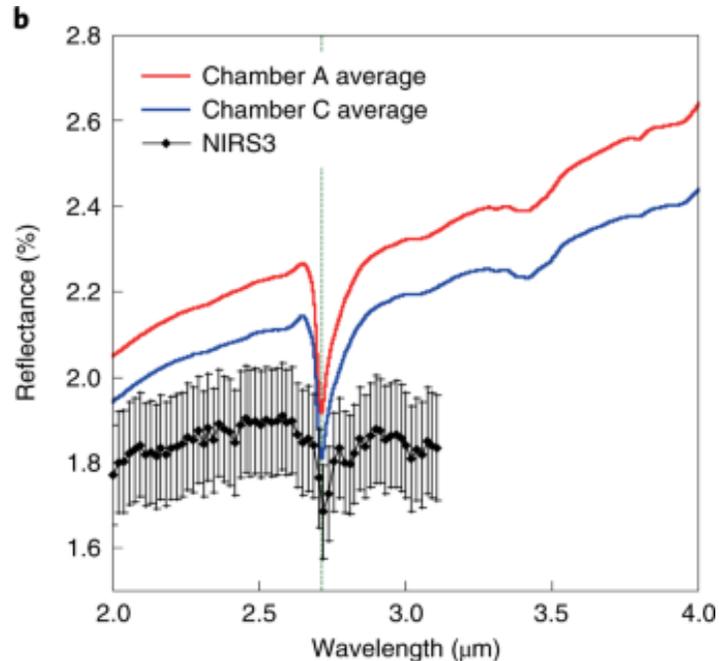


Figure 1 : Mesure du spectre de Ryugu depuis l'orbite grâce à NIRS3 (en noir) et en laboratoire (en rouge et bleue). Extrait de Yada et al. 2022

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 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 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

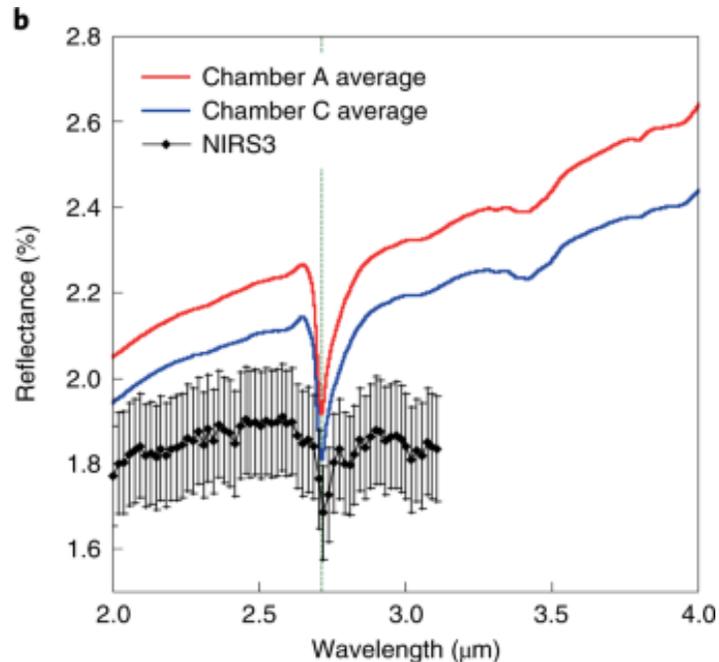


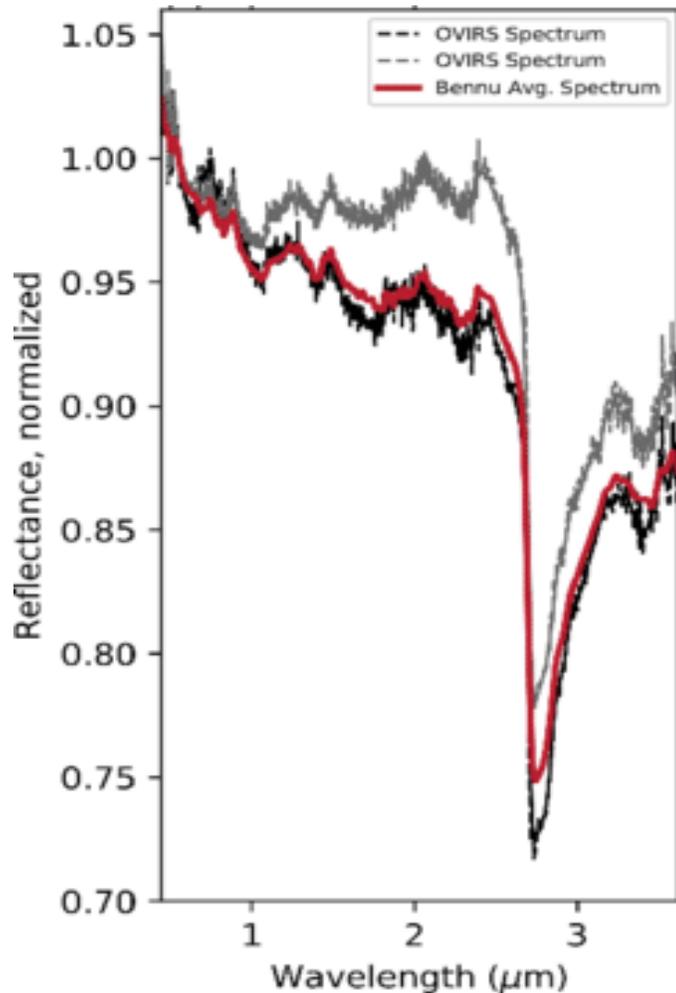
Figure 1 : Mesure du spectre de Ryugu depuis l'orbite grâce à NIRS3 (en noir) et en laboratoire (en rouge et bleue).
Extrait de Yada et al. 2022

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 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 ?

Différence sur la bande à 10 et 20 μm , variabilité entre Ryugu et Bennu

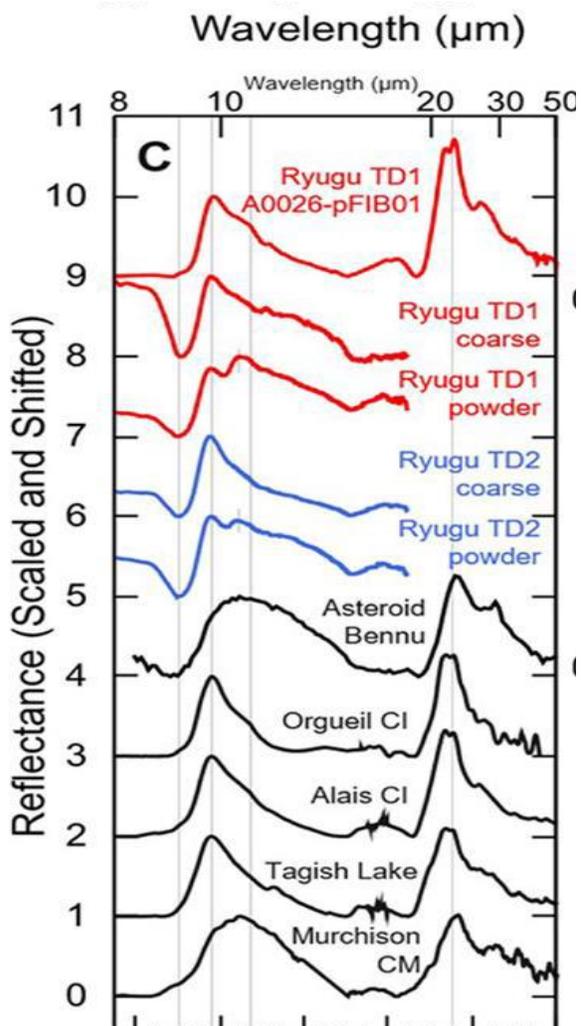
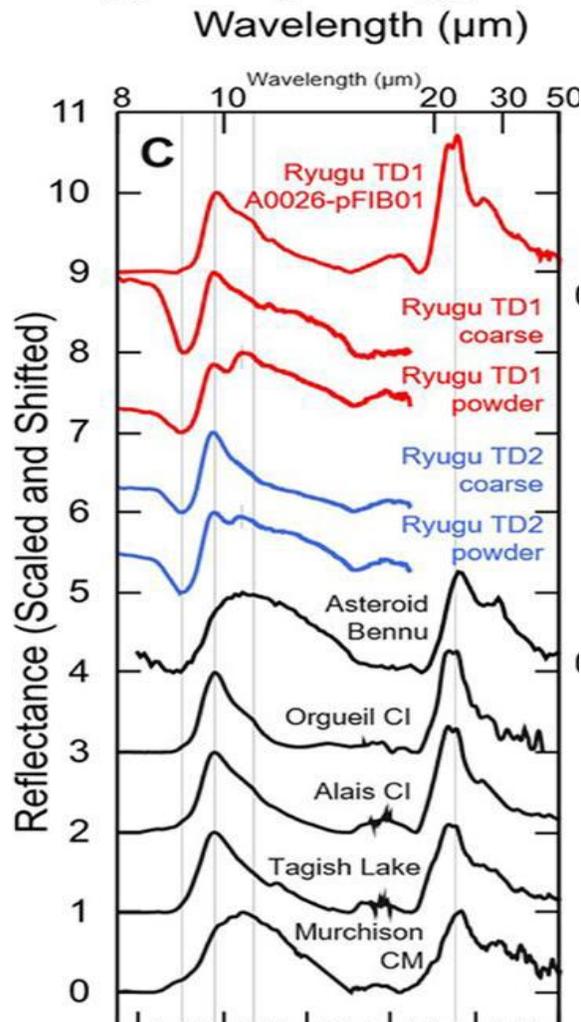


Figure 3 : Spectre dans l'infrarouge moyen de l'astéroïde Bennu mesuré par et spectres de l'astéroïde Ryugu ainsi que de diverses météorites mesurées en laboratoire (IAS @Paris Saclay). Extrait de Nakamura et al. 2022

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