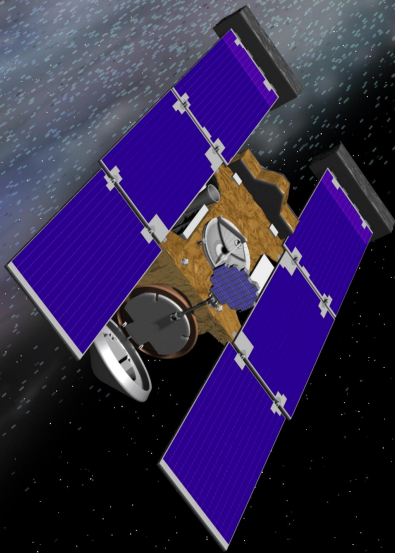


La microscopie électronique à balayage appliquée aux échantillons extraterrestres

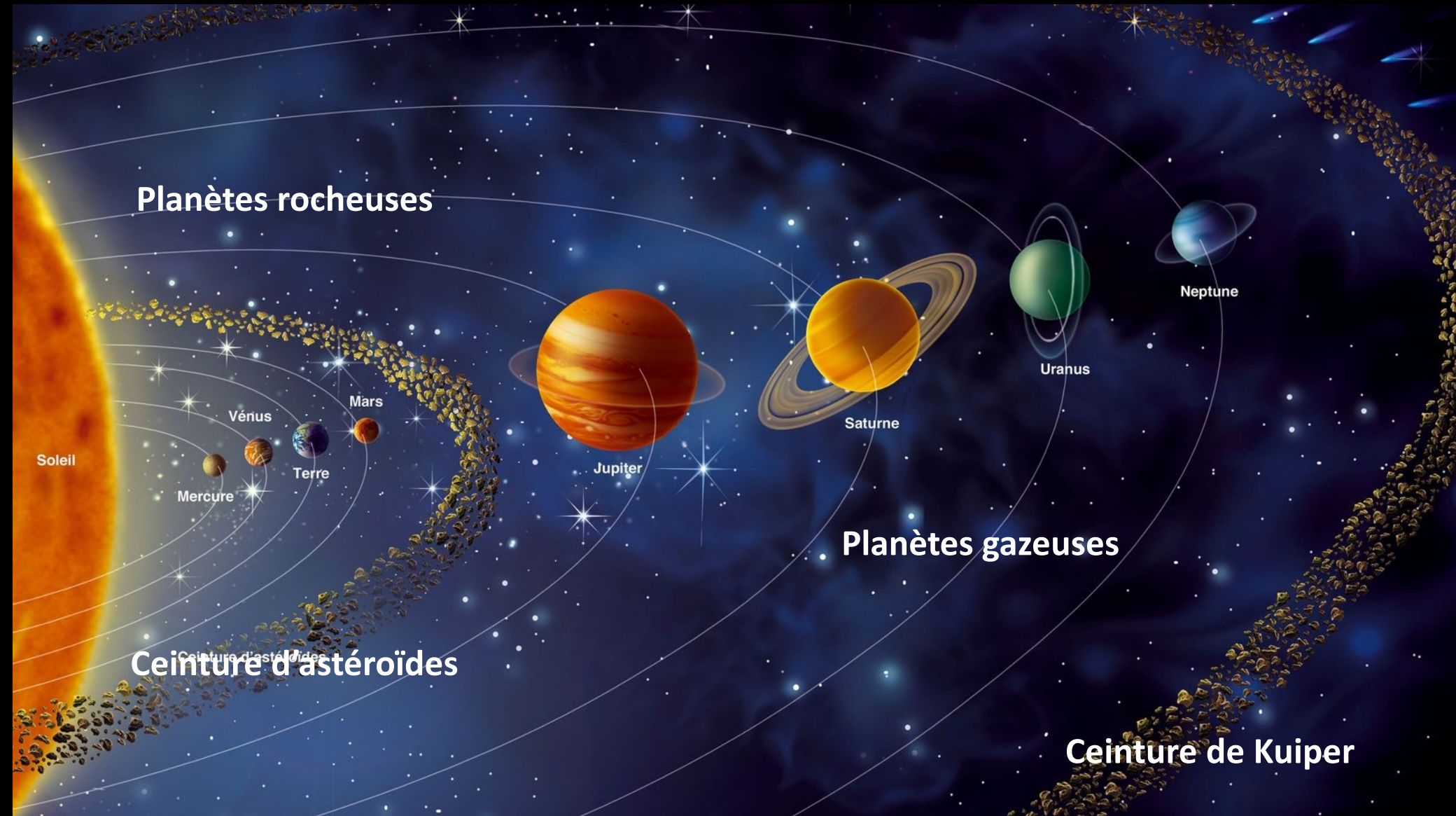
Alice Aléon-Toppani, IAS members, JAXA
members, Jérôme Aléon,
François Brisset, Eva Heripré, Maxime Vallet,
David Troadec, Louis Cornet, Julius Nouet

Institut d'Astrophysique Spatiale
Université Paris-Saclay

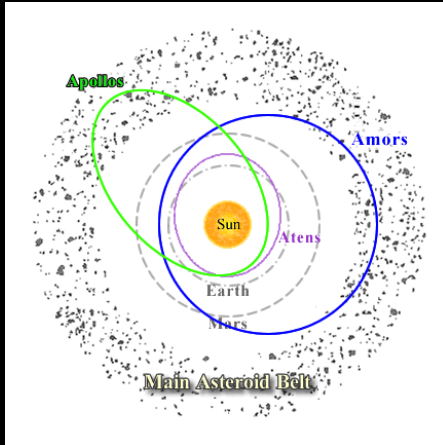


A quoi ressemble notre système solaire ?

Credit: BSIP SA / Alamy Banque D'Images



Corps rocheux de la ceintures d'astéroïdes

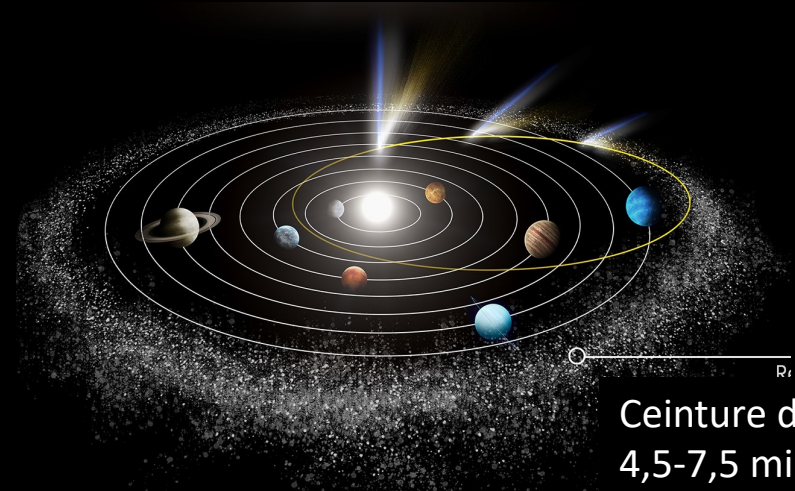


Ryugu, Hayabusa 2, 2018

Chocs \Rightarrow éjection \Rightarrow plupart des **météorites**
sur Terre + NEOs

Corps glacés de la ceintures de Kuiper

Comète 1P/Halley- période 76 ans



Ceinture de Kuiper
4,5-7,5 milliards km



Comète Tchouri
à son périhélie

Crédit:
ESA/Rosetta

Peu de matière cométaire sur Terre

Formation de notre système solaire – 4,5 Ga

Milieu interstellaire = 99% gaz + 1 % poussière (Glaces, silicates, oxydes, matières carbonées)

Naissance d'une étoile avec la formation de nouvelles poussières

T

Agglomération des poussières
= Formation des planètes et
des petits corps

Système solaire final < 100 Ma

Au départ,

MIS: 99% Gaz +

1% Solide

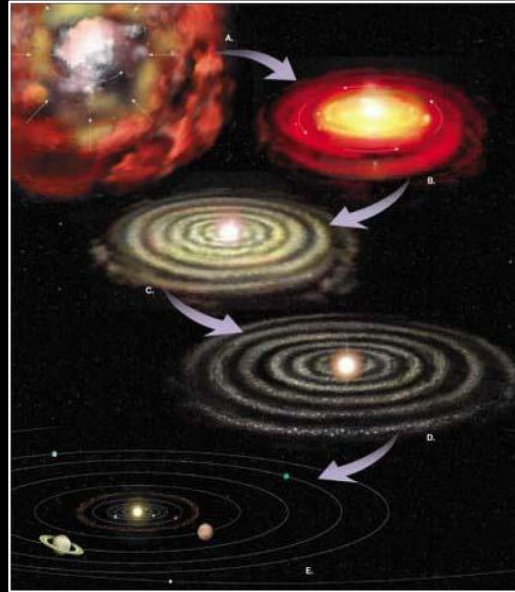
Matière carbonée

Glace (H_2O , NH_3 , CO_2 ,...)

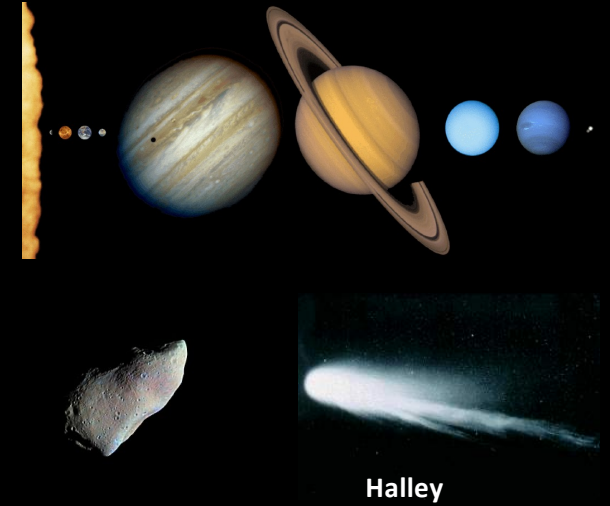
Oxydes métalliques: MgO , FeO

Silicates(Si , Mg , Fe , O .)

10 à 100 millions de formation



A la fin, une grande diversité de planètes et d'objets ...



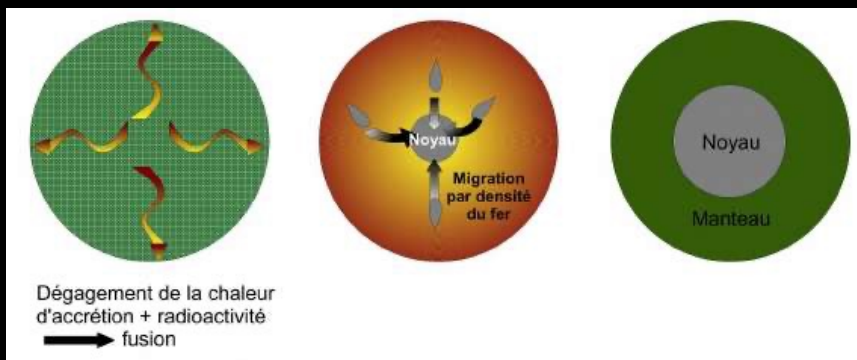
Qu'est-ce qui s'est passé dans le disque au début de sa formation ?

- Histoire des poussières solides dans le disque proto-planétaire ?
- Distribution des poussières dans le disque ?
- Agrégation de toutes ces poussières ?
- Nature du matériel initial de notre planète Terre ?

Encore beaucoup d'inconnues...

Qu'est-ce qui est à notre disposition pour répondre à toutes ces questions

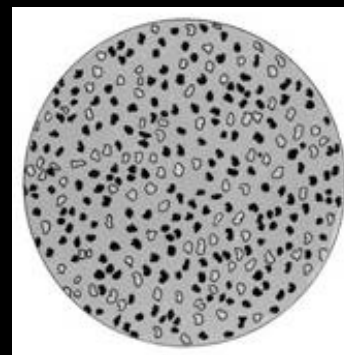
Les corps formés dans le système solaire ont évolué différemment depuis leur formation il y a 4.5 Ga



Les plus gros et les plus anciens: processus de différenciation planétaire: **perte de la mémoire des matériaux de départ**



©getty - mark garlick/



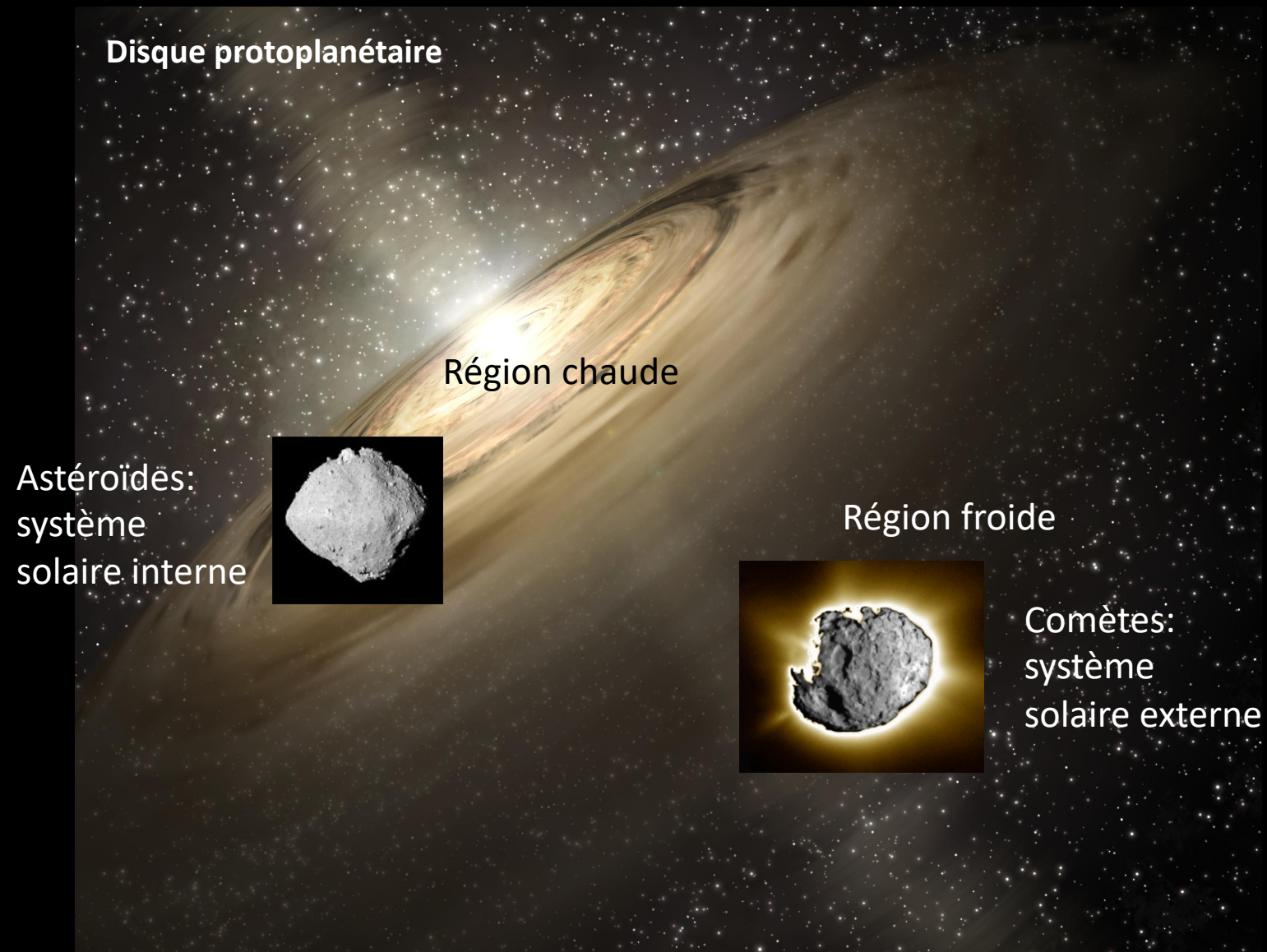
<http://www.geol.um.d.edu/~jmerck/geol212/lectures/10.htm>

Les petits corps ou ceux formés tardivement ont subi peu de modifications depuis 4,5 milliards d'années...!!!

= agrégats de poussières du disque !!!



Les astéroïdes primitifs et les comètes sont des résidus du système solaire primitif : témoins de ce qui s'est passé il y a 4,5 Ga à divers endroits du disque protoplanétaire.



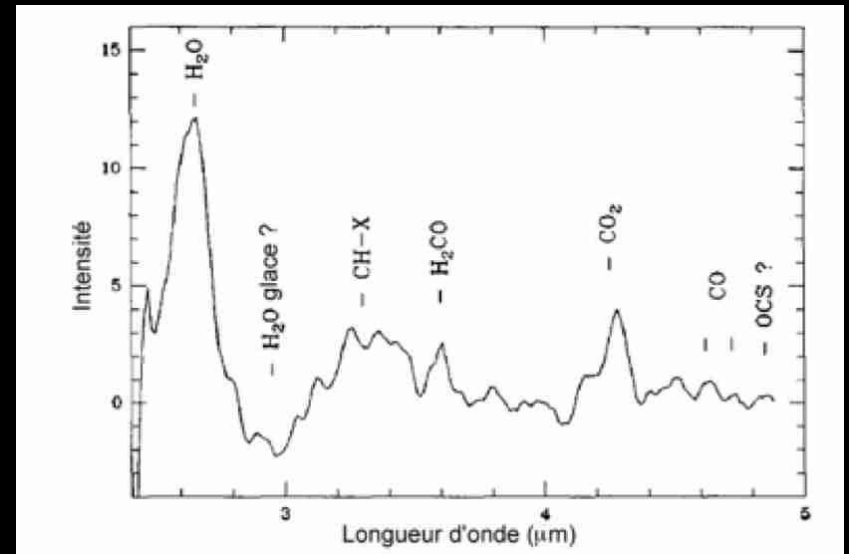
Les comètes

agrégats de solides glacés principalement issues des régions froides ?



Credit: ESA/MPS

Photo du noyau de la comète de Halley
prise par la sonde spatiale Giotto- 1985
(distance de 2000 kilomètres).

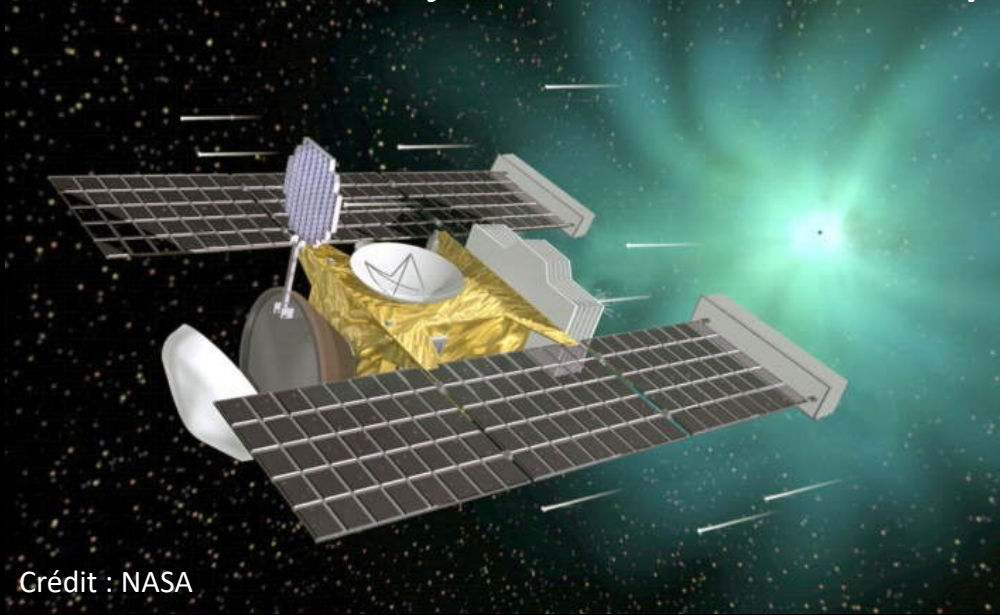


Crédit :CNRS- Combes et al, 1988.

Spectre du gaz obtenu lors du survol de la
comète de Halley par la sonde Vega - 1985.

Les noyaux cométaires sont riches en glace d'eau, CO₂ et CO. Ils montrent des molécules carbonées complexes mais également une fraction minérale.

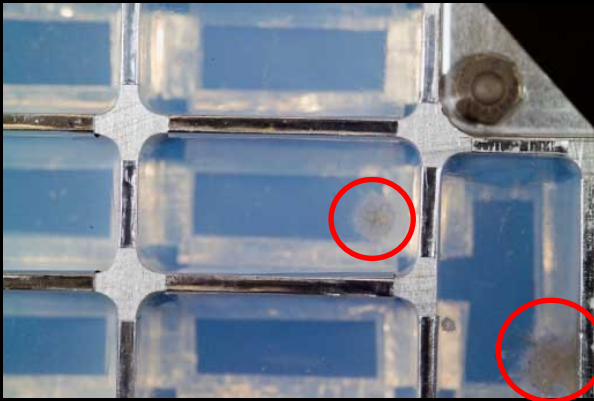
Mission Stardust : objectif comète 81P/Wild 2 – premier retour d'échantillon cométaire 2006



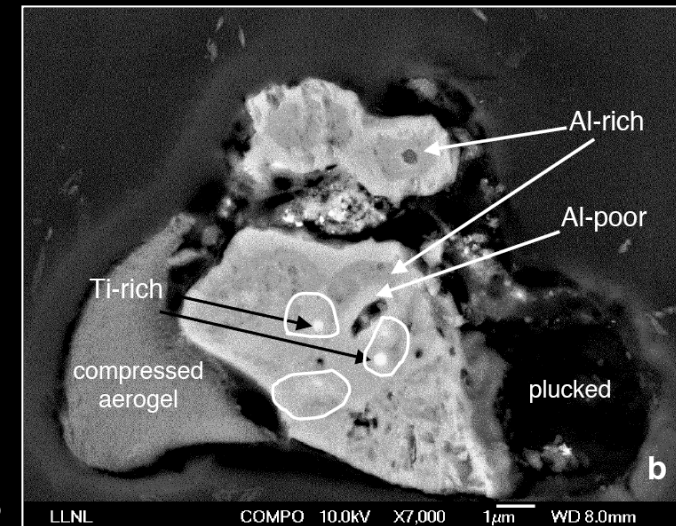
Crédit : NASA



2 jan 2004 : survol à
234 km @ 1.86 UA



Crédit : NASA



Zolensky et al., 1006

**La comète Wild 2 contient des poussières formées près du Soleil=
mélange à grande échelle lors de la formation de notre système solaire**

Astéroïdes et météoroïdes

- 50000 à 100000 tonnes/an
- d'une dizaine de mètre à qqs microns.



Meteor Crater en Arizona



Peekskill



Qu'est-ce qu'une météorite ?



Alby-sur-Chéran

Une roche particulière !

Croûte de fusion

Abondance du fer métal

Assemblage de minéraux différent des roches terrestres

Composition chimique/isotopique

Deux grandes classes de météorites
qui échantillonnent les deux grandes
classes d'astéroïdes

Météorites non différenciées

Météorites différenciées

Météorites différenciées

Fers



Mixtes



Achondrites



Howardite
Eucrites
Diogénites



Météorites planétaires
(Lune, Mars)



Evolution précoce des petits corps
Différenciation des planètes

Météorites non différenciées

Chondrites ordinaires

Les plus communes

Chondrites à enstatite

Minéraux très particuliers réduits

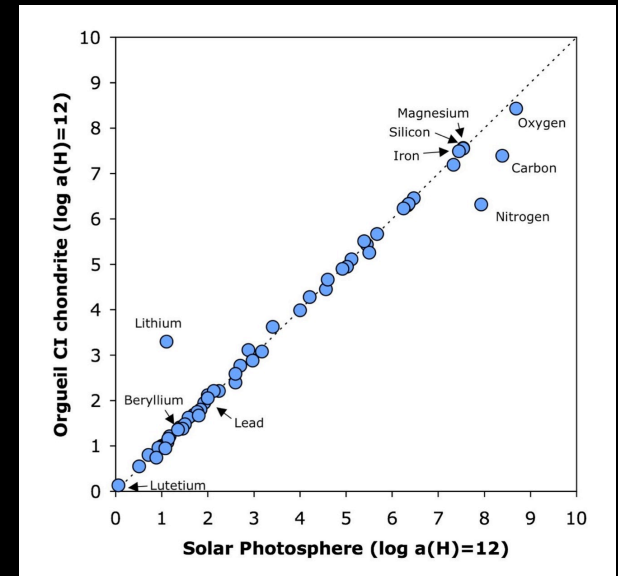
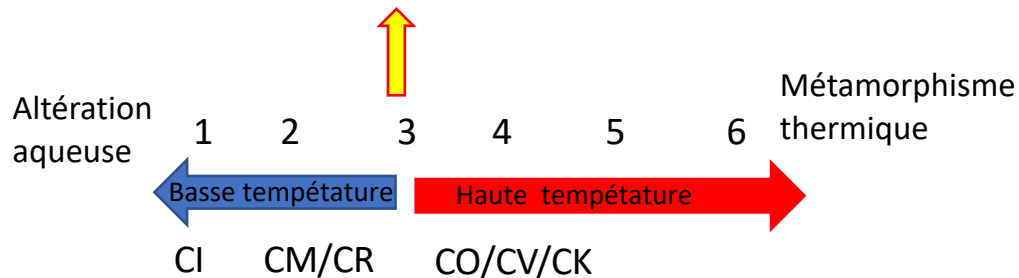
Chondrites carbonées

Riche en carbone 5% masse

Orgueil



Très peu altéré: matériaux de départ: peu courant



Soleil = 99,8 % de la masse du système solaire

Composition chimique du Soleil = matériau de départ

Les météorites non différenciées = agglomération de poussières formées dans des conditions très différentes = sédiments cosmiques non équilibrés



CHONDRE : Billes de roches fondues

+

INCLUSION REFRACTAIRE: les plus vieilles roches du système solaire

+

MÉTAL/SULFURE

+

CIMENT/MATRICE plus ou moins hydratée

+

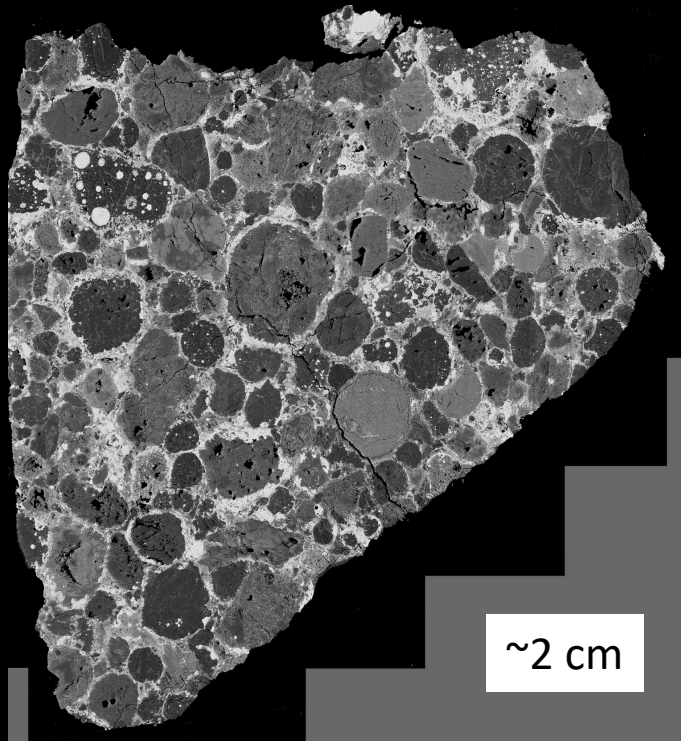
MATIÈRE ORGANIQUE

= CHONDRITES

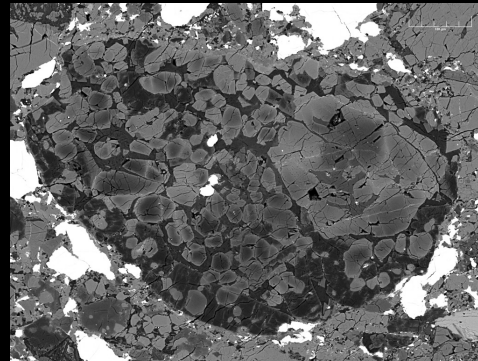
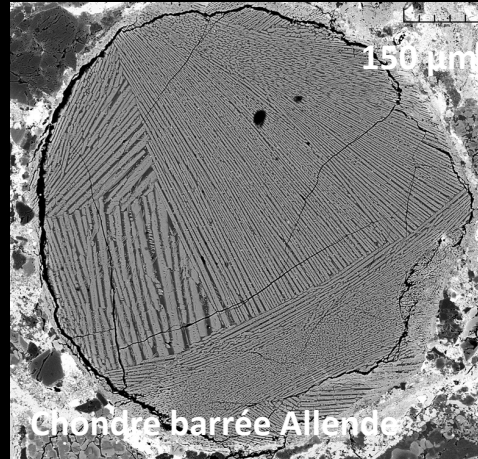


Allende, perso data

Les chondrites ordinaires



Très riches en chondres
Peu de « matrice » ou « ciment »



Bille liquide dans laquelle ont cristallisé des minéraux:

- Olivine, pyroxène
- Épisode Haute Température $T > 1500^{\circ}\text{C}$
+ Refroidissement rapide pour avoir de telles textures (entre 10K/h et 1000 K/h)

⇒ Épisode de chauffe de poussière au sein de la nébuleuse:

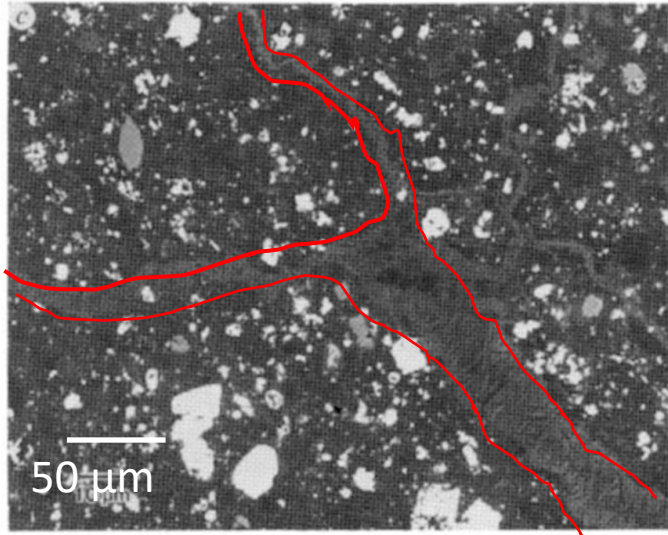
Activité stellaire : réchauffement par absorption du rayonnement

Onde de choc : réchauffement par friction

Décharge électrique (frottement des grains)

Manteau de planétésimaux ?

Les chondrites carbonnée CI

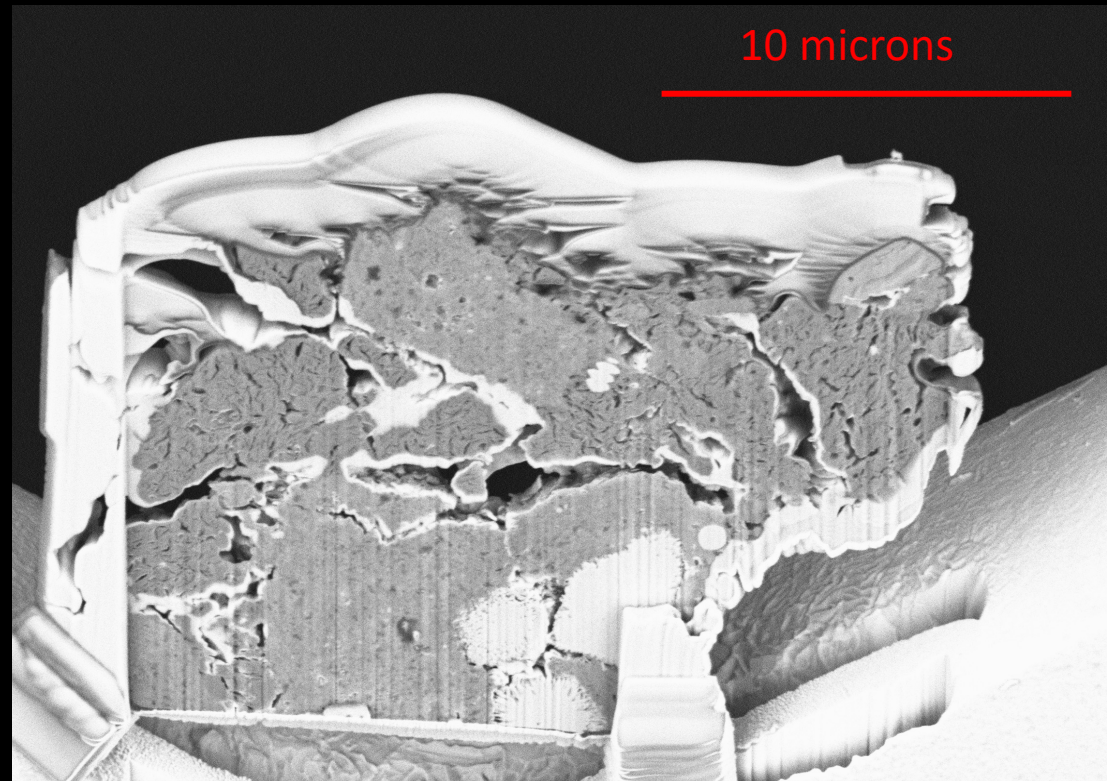


Tomeoka, 1990

Présence d'argiles en très grande quantité
= formation de ces minéraux en présence d'un fluide aqueux sur le corps parent de la météorite autour de 30 à 100 °C

Présence de matière organique: origine / formation ?

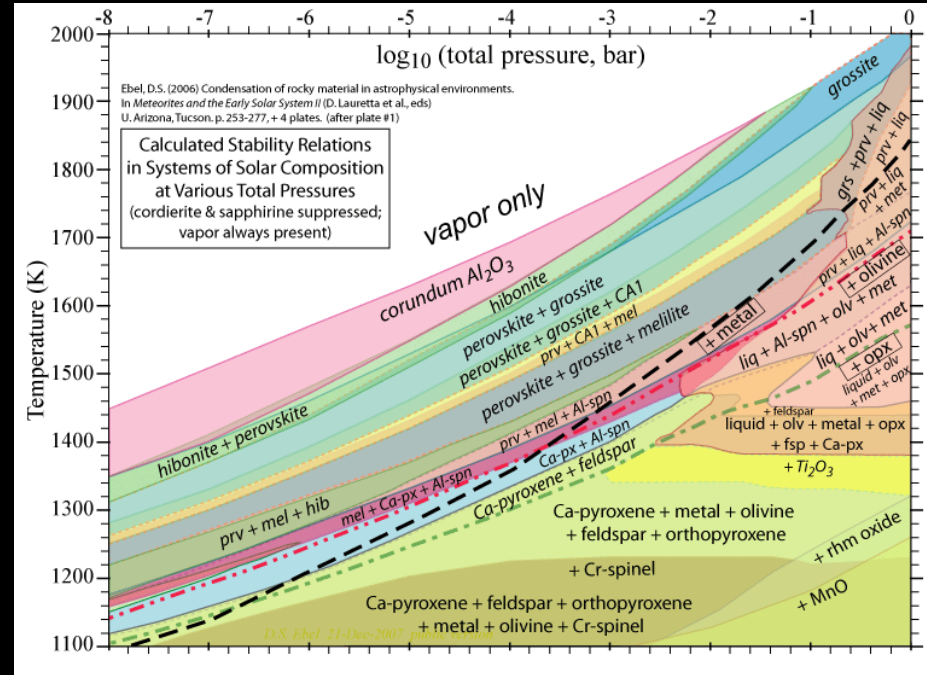
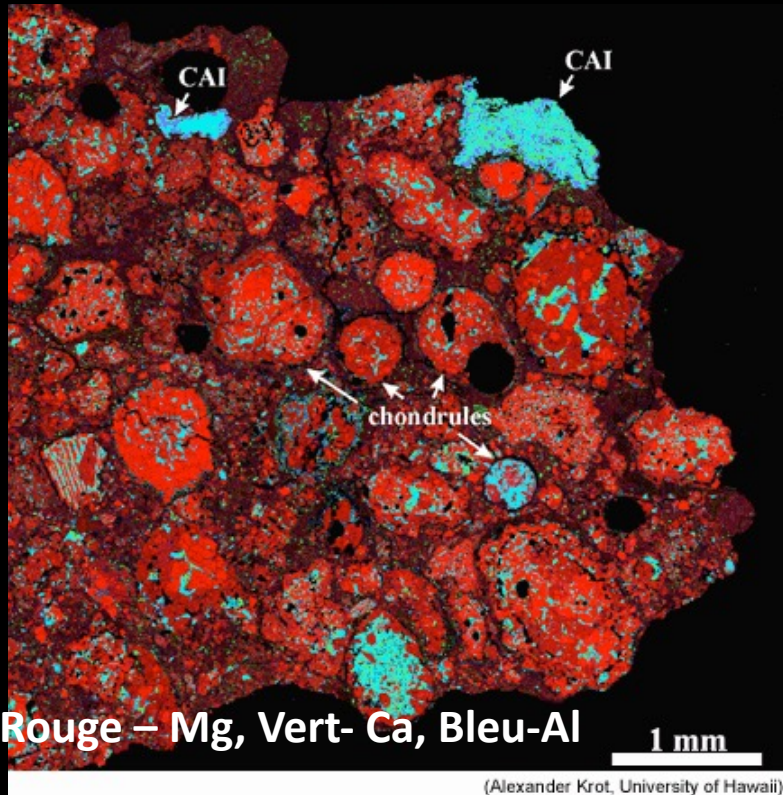
Sections FIB extraite très hétérogène !
La préparation de ces échantillons extrêmement friables et hétérogènes est un challenge!



Les chondrites carbonées CV

Les chondrites les plus riches en inclusions réfractaires !

Inclusions riches en Ca et Al



Minéraux prédits par les calculs de condensation d'un gaz solaire à haute température

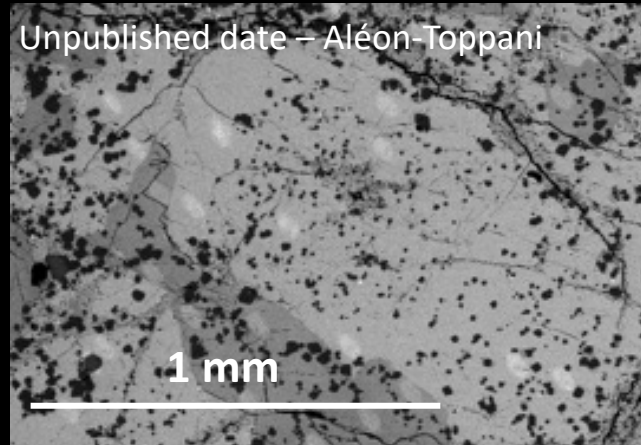
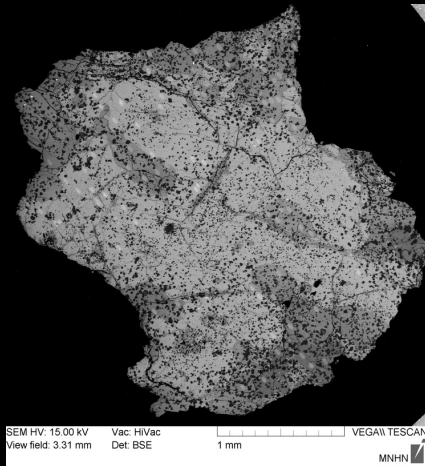
= Inclusions formés à moins de 0,1 AU du Soleil

+ Datation U/Pb : 4,56 Ga- Plus vieux objets du système solaire

CAIs= premiers solides formés près du jeune soleil= Témoins des premiers instants du SS

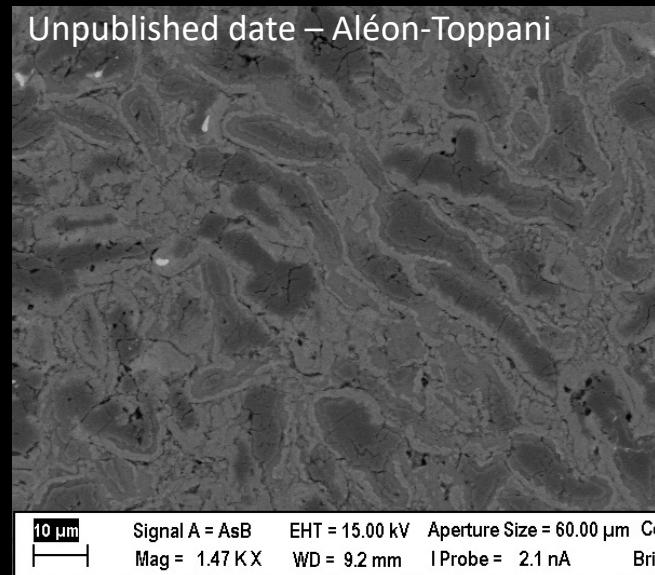
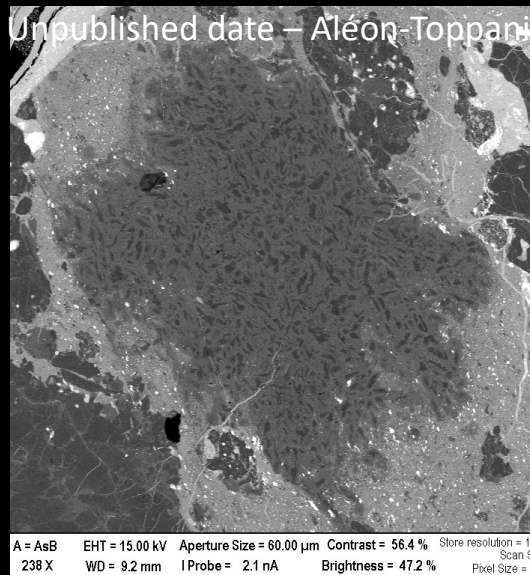
Une très grande variété de ces inclusions réfractaires = conditions variables de formation ?

1- Inclusions réfractaires à gros grains: cristallisation de ces CAIs à partir d'un liquide

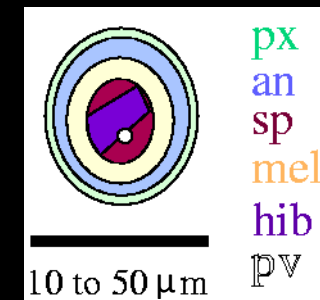


25 min at 1600 °C . E.g. Mendybaev et al., 2021

2. Inclusion à grains fins: condensation directe dans la nébuleuse à partir de gaz « solaire » ?

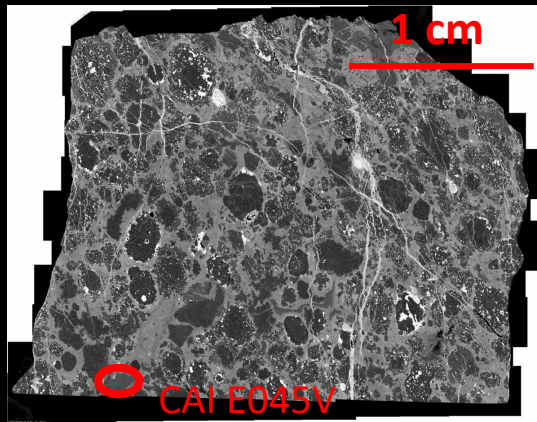


Agrégats de
nodules à texture
concentrique



Etude du CAI particulier E45V (météorite Efremovka)

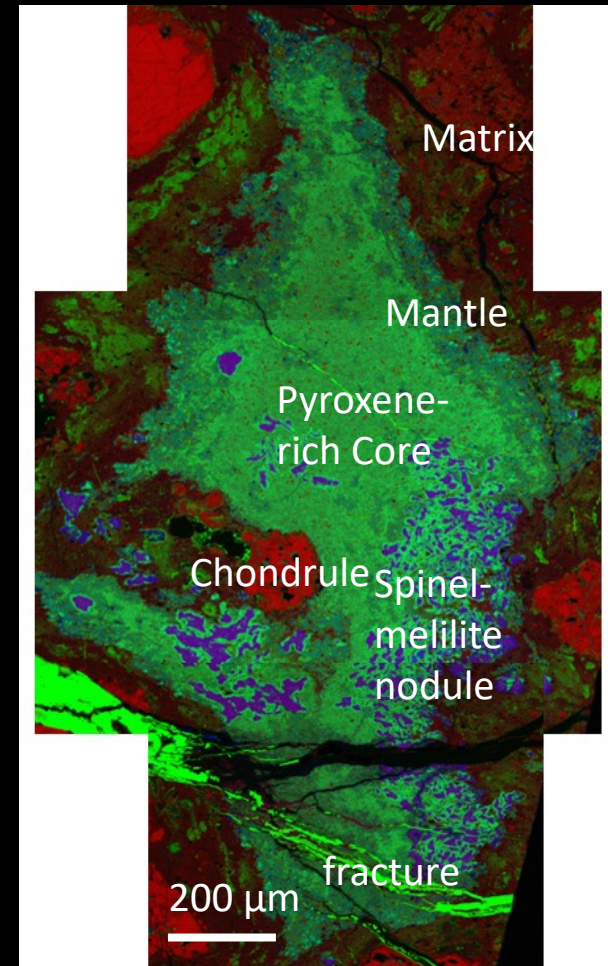
1. Repérage du CAI sur de grandes sections polies/ cartographie à grande échelle



Préparation de sections polies métallisée au carbone (matériaux non conducteurs) – utilisation de résine non conductrice polymérisant à basse température (présence de matériaux hydratés)



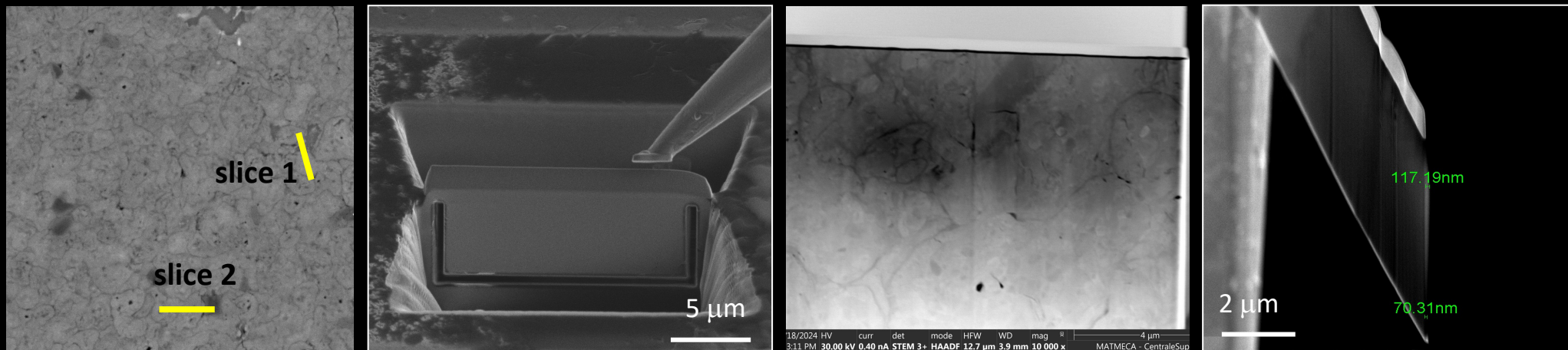
MEB BSE



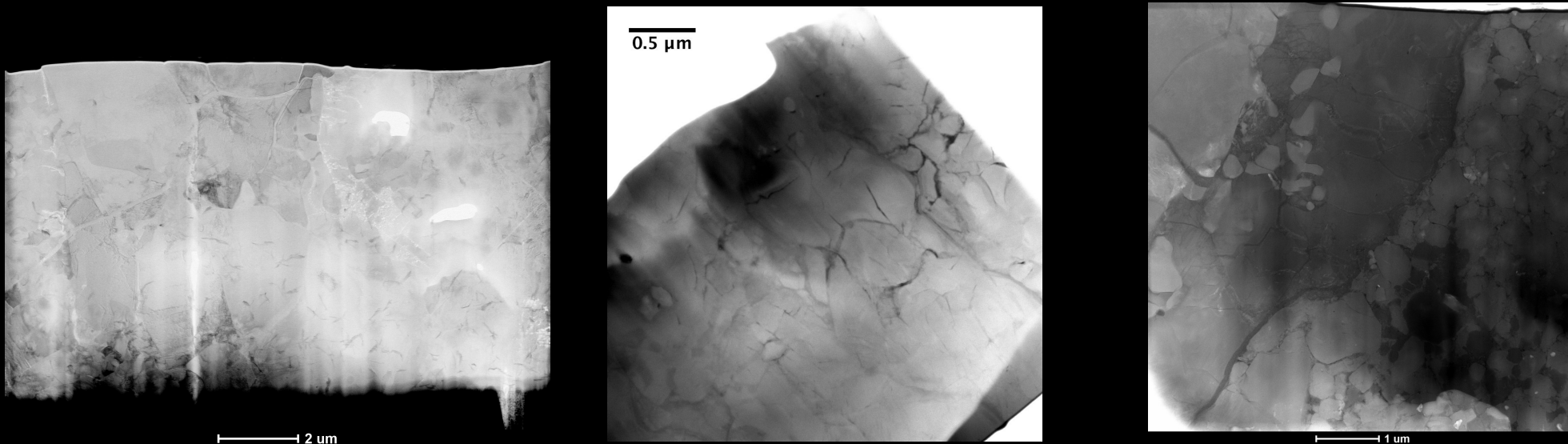
Cartographie X : Si, Mg, Al, Ca, Fe, ect... avec une variation au nm/μm près données chimiques – compromis résolution/taille

Aléon-Toppani et al, 2019

Préparation de sections ultra-minces pour le MET aux endroits sélectionnés



Matériel très hétérogène (matériaux très « durs » ou « mous », matériaux très fragiles) –
difficulté de préparer les lames



Observation des sections par MET

Carte composée Ca-Al-Mg/RGB

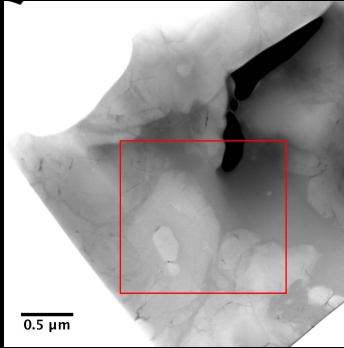
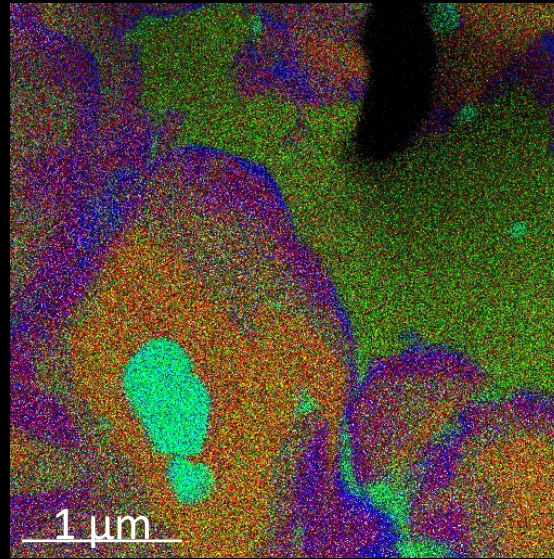


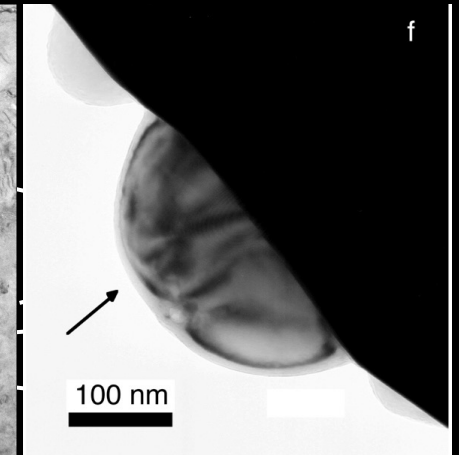
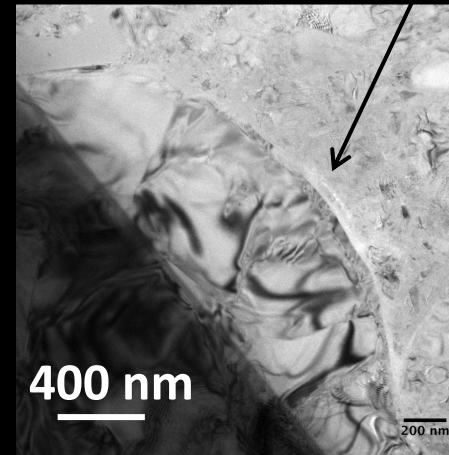
Image en champ clair (MET)



1. Nodules montrant les minéraux prévus par la sequence de condensation

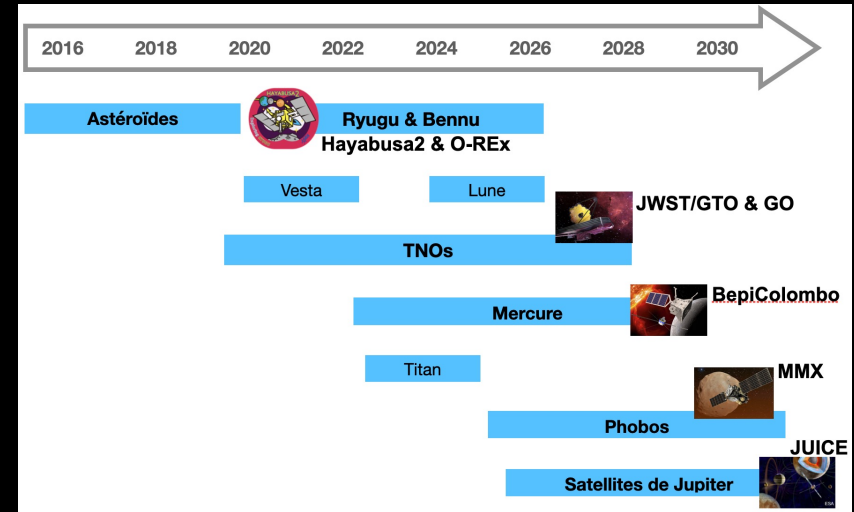
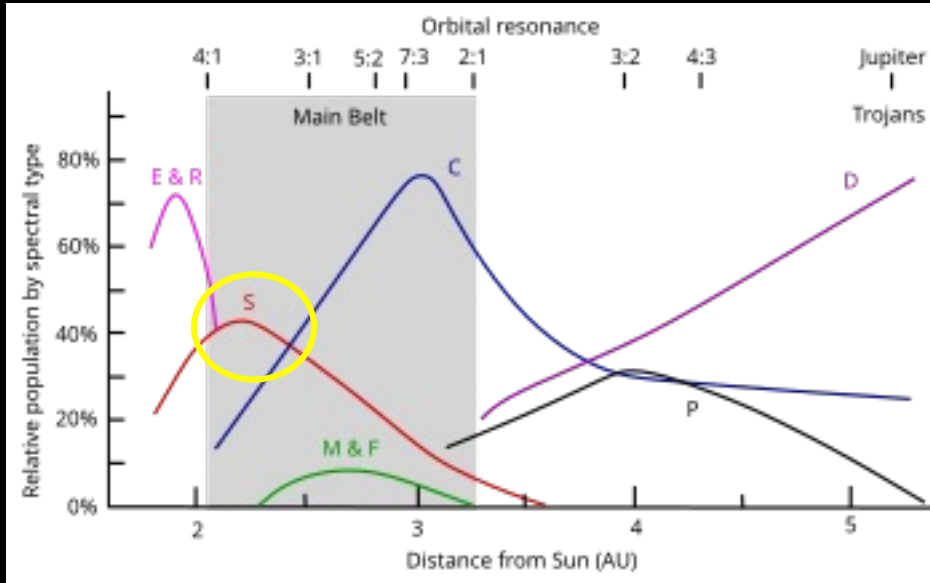
2. Structure à très fine échelle en faveur d'une formation de ces inclusions par condensation directe d'un gaz

Bordure amorphe



Bordure amorphe sur un cristal condensé à partir d'un gaz solaire.
Toppani et al. 2006

Représentativité des météorites ?

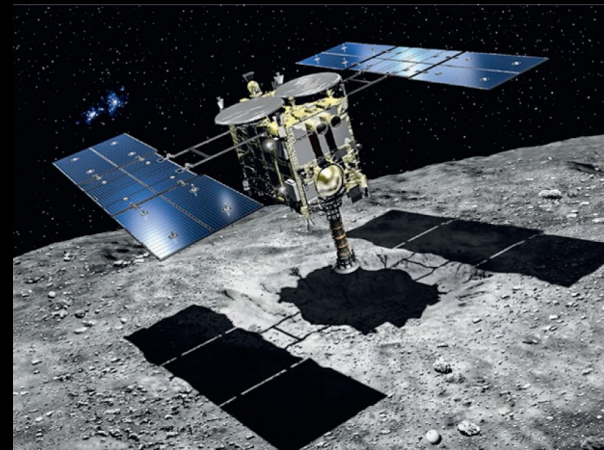


On va maintenant les collecter dans l'espace car peu d'astéroïdes sont échantillonnés et on ne connaît pas bien l'effet de l'atération terrestre sur ces objets très particuliers!

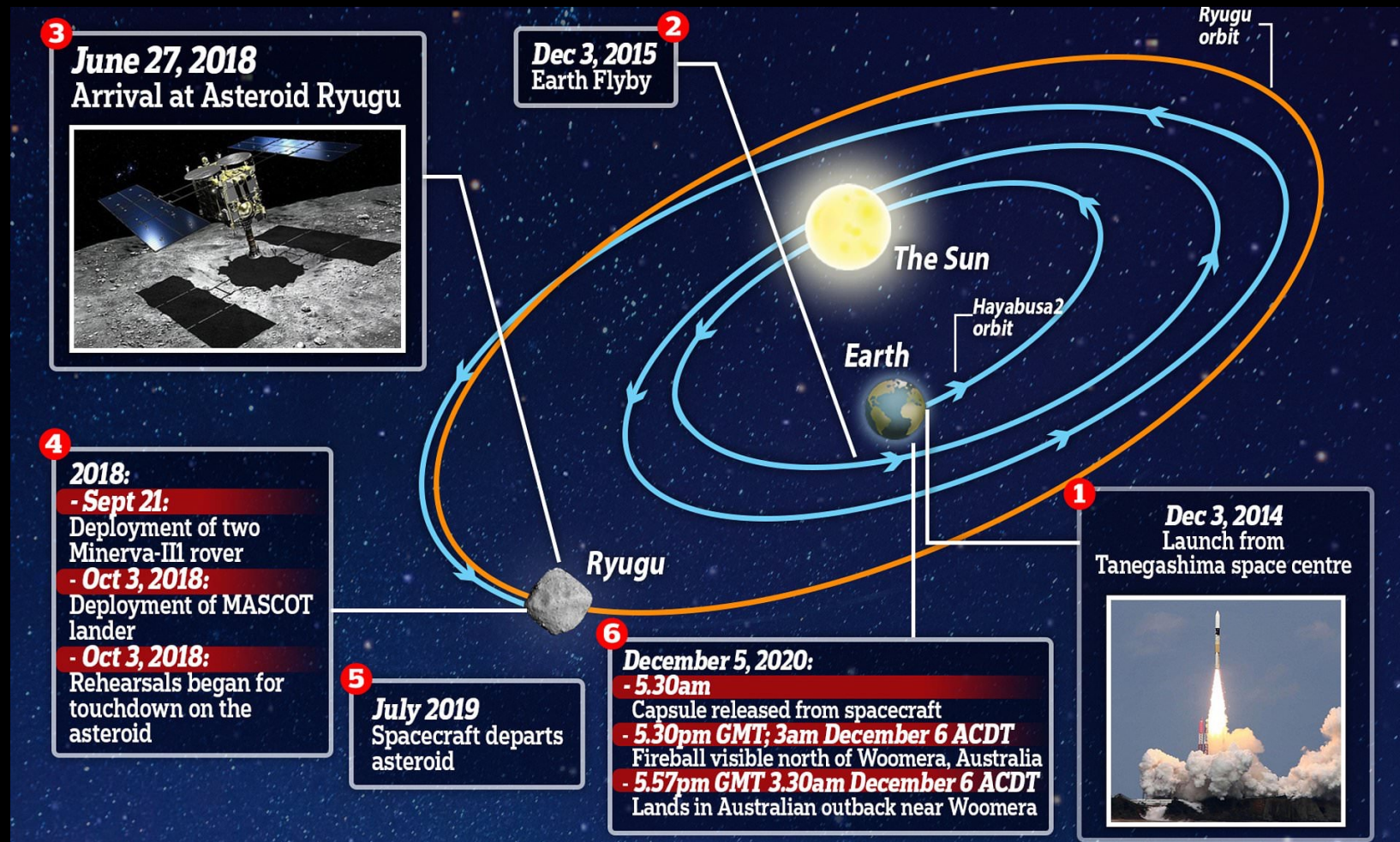
Exemple de Hayabusa 2/ Ryugu

- Corps riche en matière carbonée et en eau
- Grande ressemblance aux CI ?

5,4 g ramené sur Terre. On en a eu qqs grains!



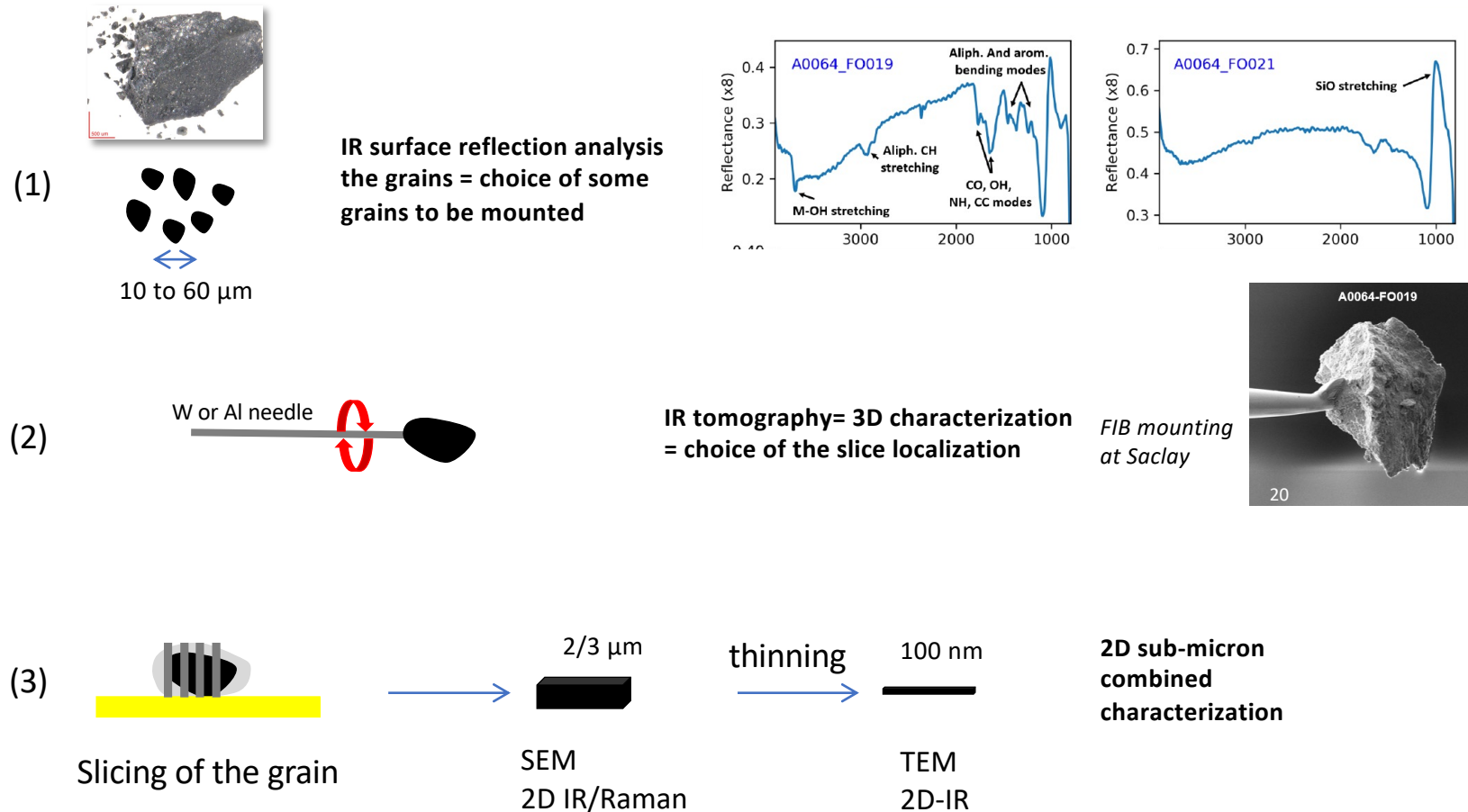
Mission Hayabusa 2





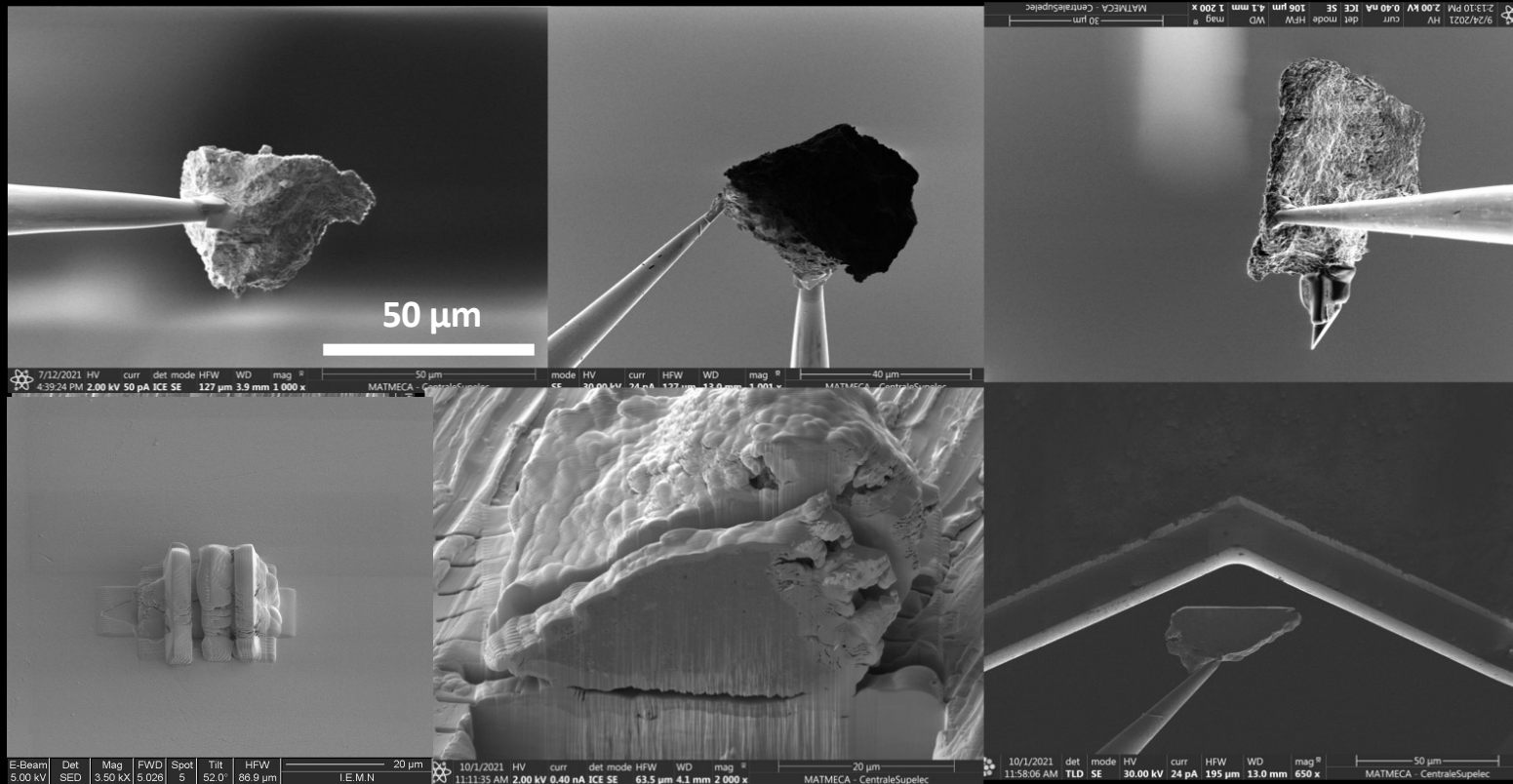
Vers une étude combinée MEB/IR/Nanosims/MET pour les échantillons précieux

Obtention de 20 grains de 20 à 80 microns : optimiser la séquence de préparation et d'analyse pour maximiser les résultats!



Préparation des grains dans un microscope SEM à faisceau d'ions focalisés

Aleon-Toppani et al., 2021, 2024



FIB CENTRALE-SUPELEC

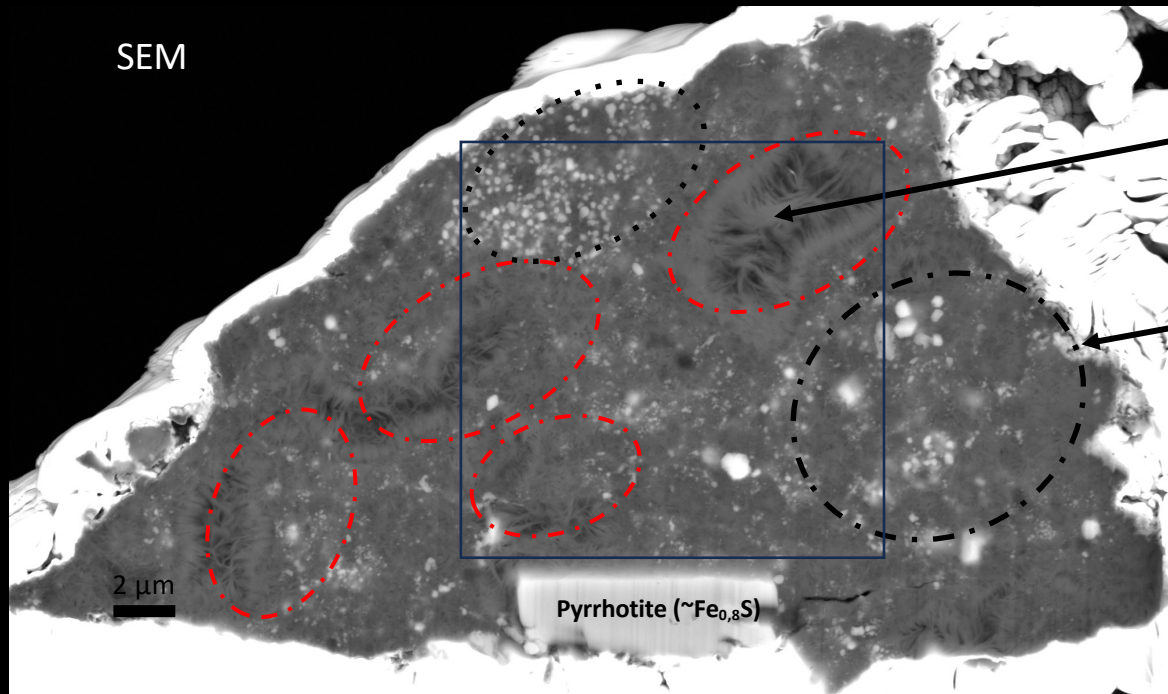
Récupération des grains après analyse 3D, dépôt sur wafer d'or et tronçonnage du grain



Parmi les nombreuses difficultés rencontrées : charge des grains non conducteurs , grains très poreux et friables

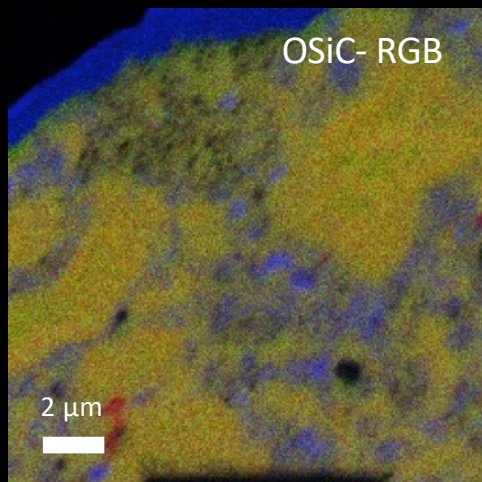
Etude par MEB de trois grains aux signatures spectrales différentes

Grain A0064-019: ressemble au chondrite CI – très riche en argile



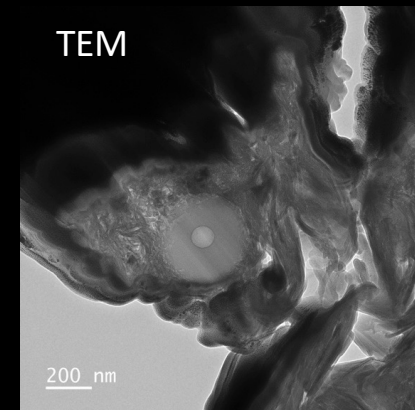
Phyllosilicates à “gros” grains bien cristallisés

Phyllosilicate à grains fins riches en sulfure

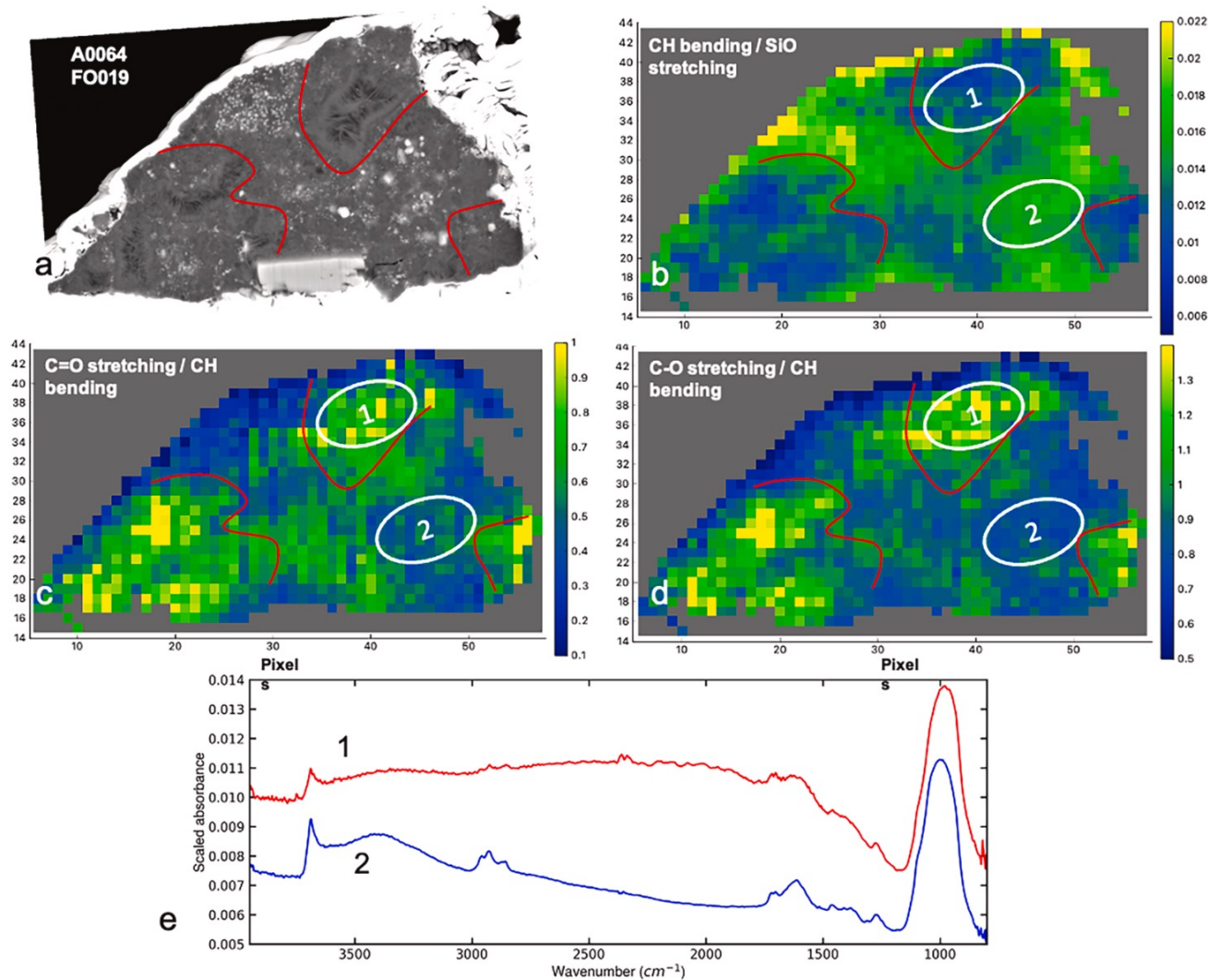


Distribution du carbone

- Présence de nodule riche en C ($\sim 200\text{ nm}$)
- Présence de carbone mélangé à très petite échelle avec les phyllosilicates à grains fins



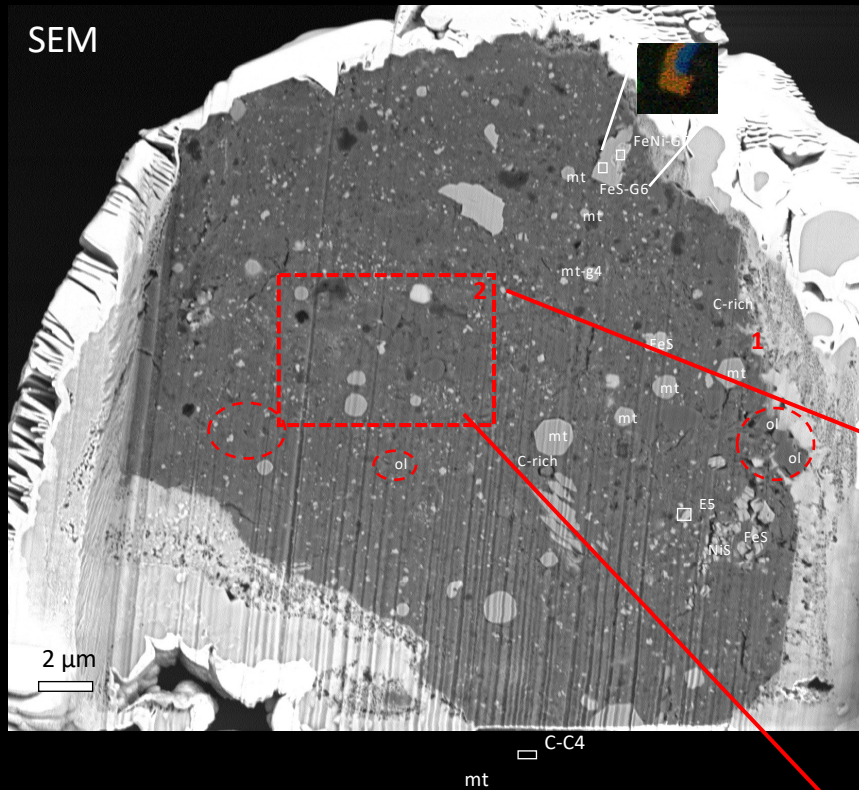
Cartographie infrarouge corrélée avec l'image MEB de A0064 FO019



1/ Faible abundance de la matière organique dans les phyllo à gros grains

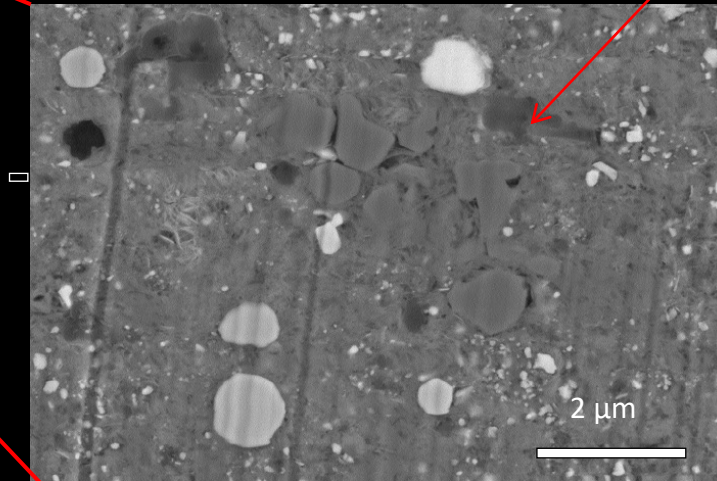
2/ Matière organique des phyllosilicates à gros grain plus riche en fonctionnalités riches en oxygène : Formation des cg-phyllo dans un milieu plus oxydant

Grain C0002-FO019

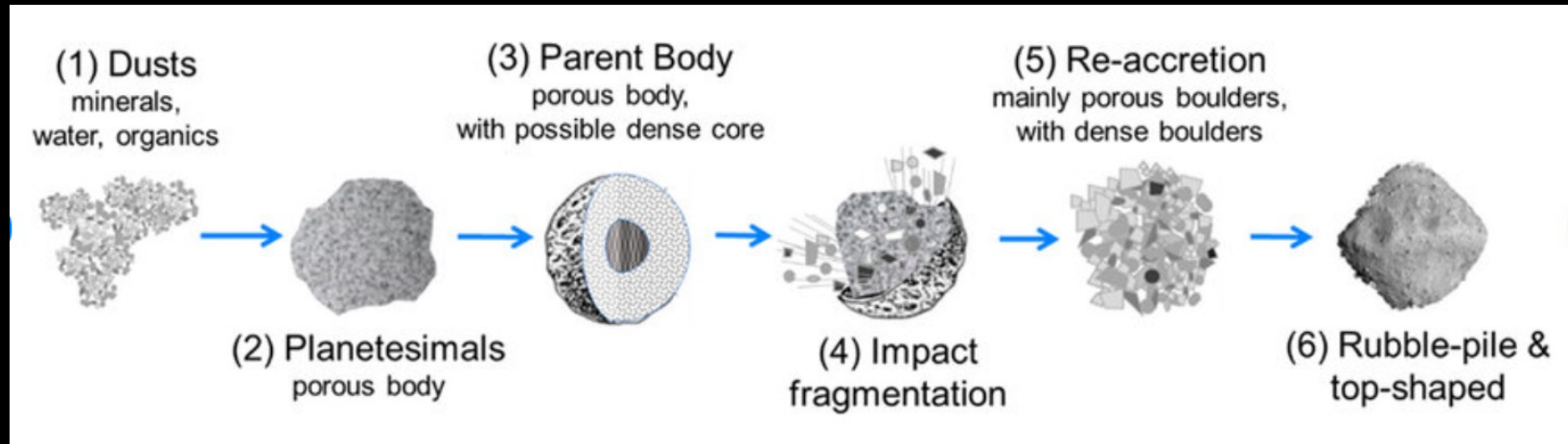


- Matrice à grain très fins ou mal cristallisée
- Olivines : de 200 nm à 1,5 μm

Zone riche en olivines



= minéralogie complètement différente : minéralogie plus proche de celle des comètes ou des météorites très primitives



Okada et al., 2020

Quelques résultats clés ...

Ryugu est une brèche : Association de fragments provenant sûrement d'un corps de plus grand taille et montrant des degrés d'alteration aqueuse différent

Ryugu montre de nombreuses similarités avec les météorites CI et les comètes/météorites très primitives