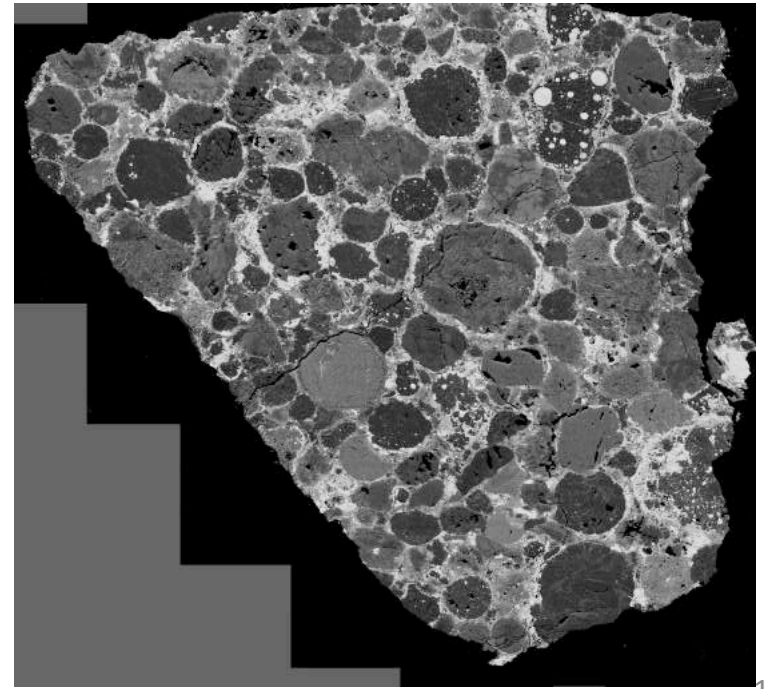
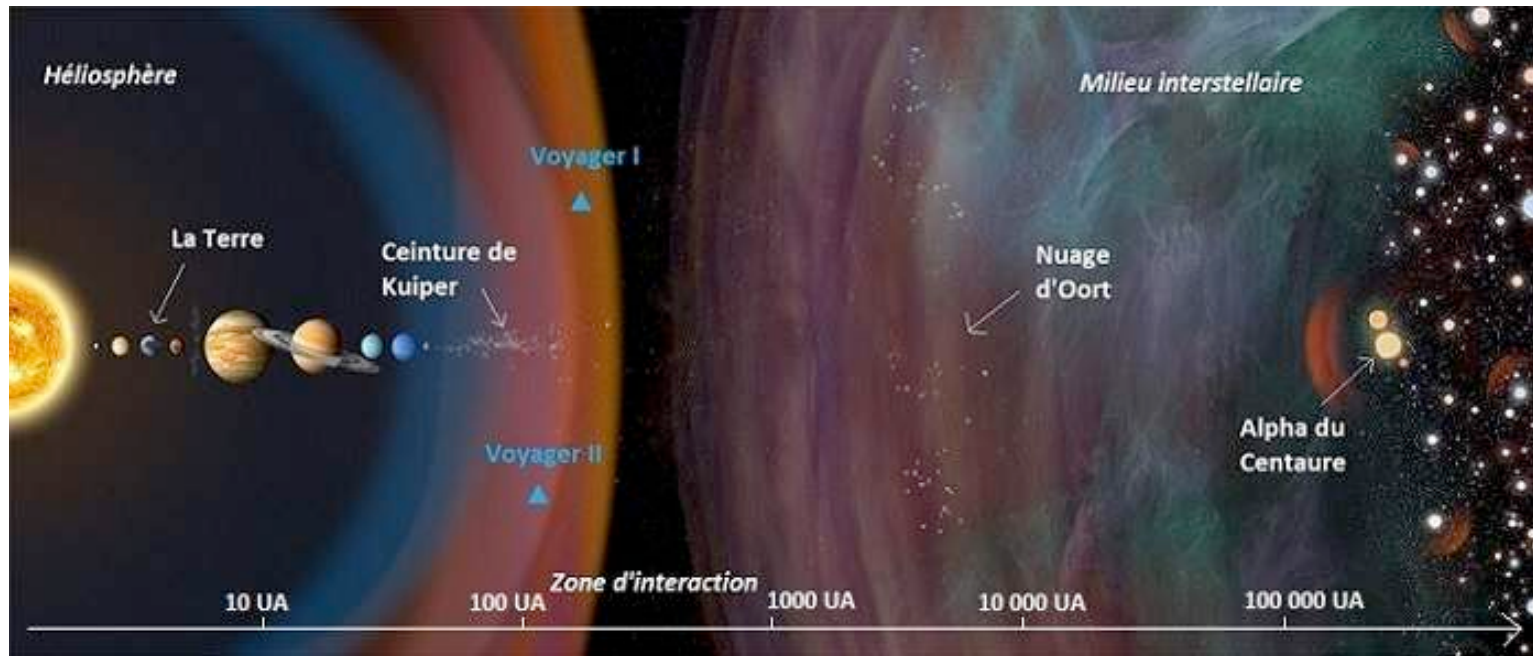


# "Les premières roches du système solaire au microscope électronique".

**Alice Aléon-Toppani**, J. Aléon, D. Troadec, F. Brisset (Université d'Orsay/ IEMN Villeneuve d'Ascq/ MNHN, Paris)



# La matière solide dans notre galaxie



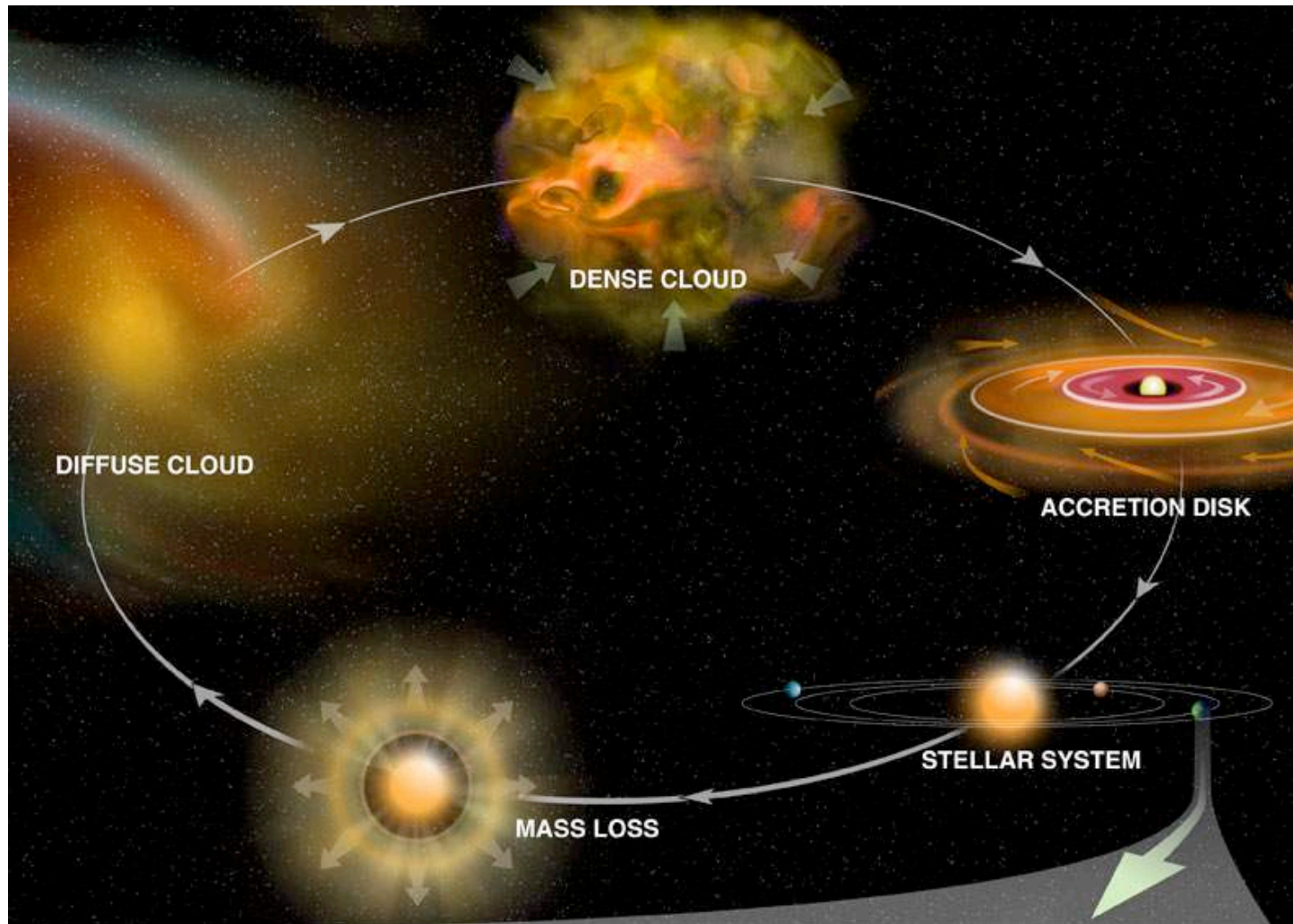
Nébuleuse planétaire de l'oeil de chat



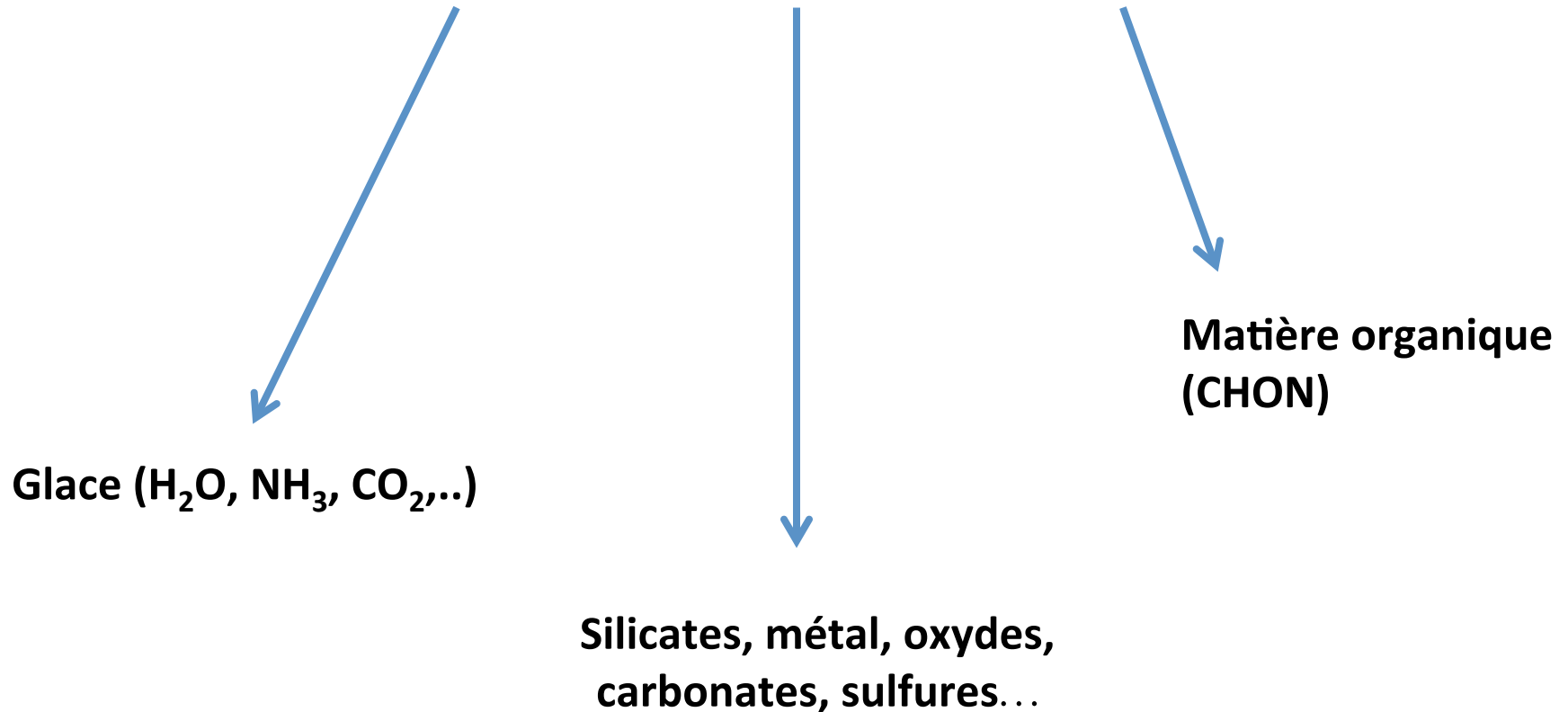
Tête de cheval dans le nuage moléculaire dense de Barnard 33



# Formation et évolution de ces poussières

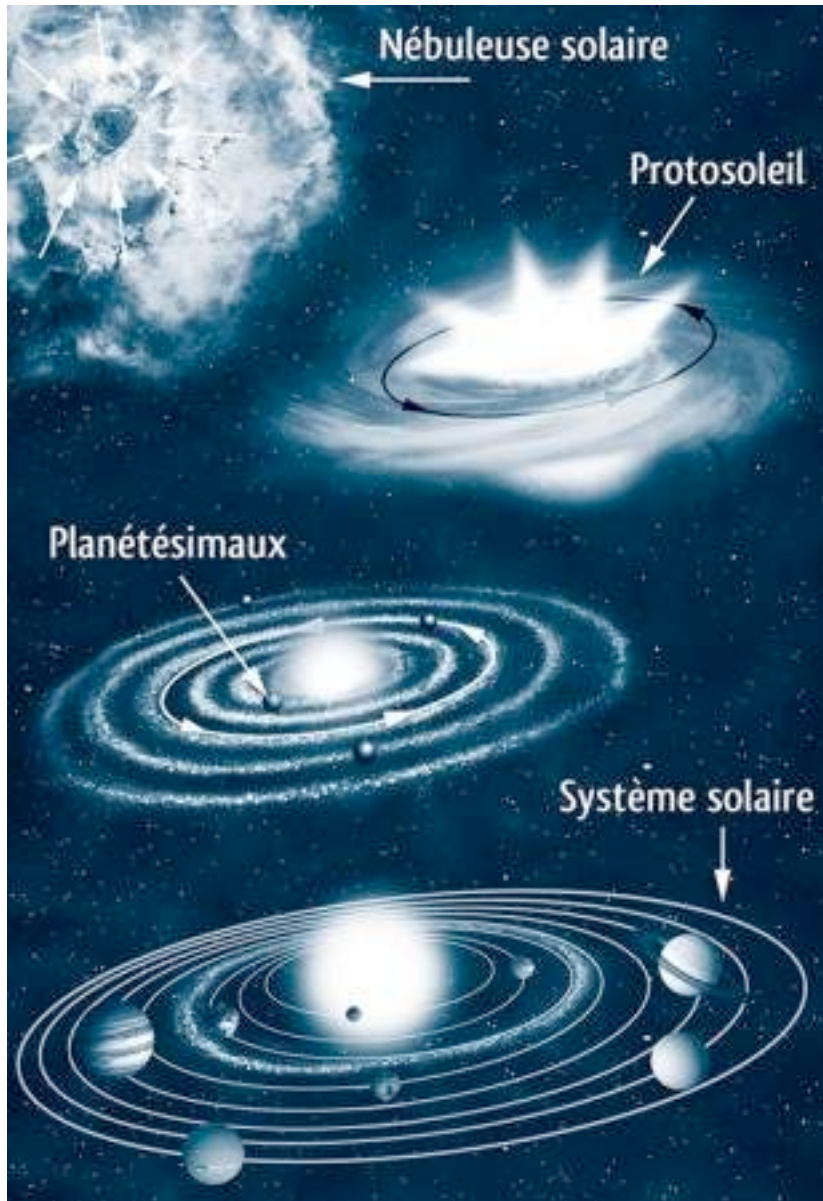


# De quoi sont constituées ces poussières solides ?



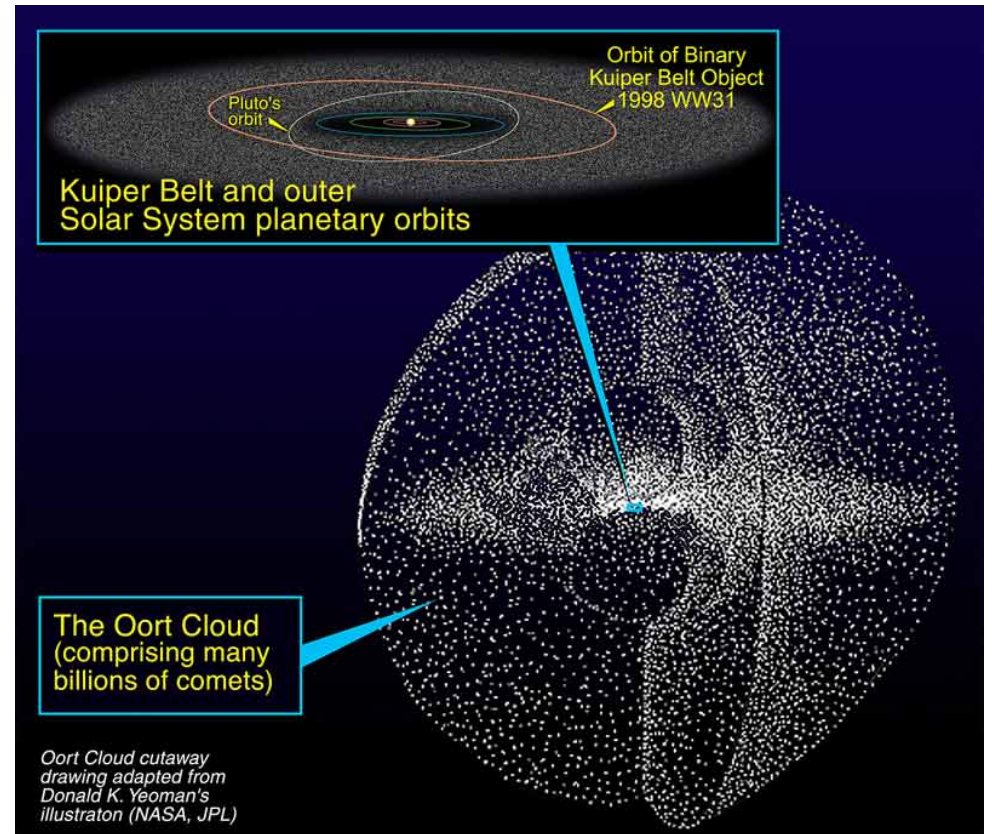
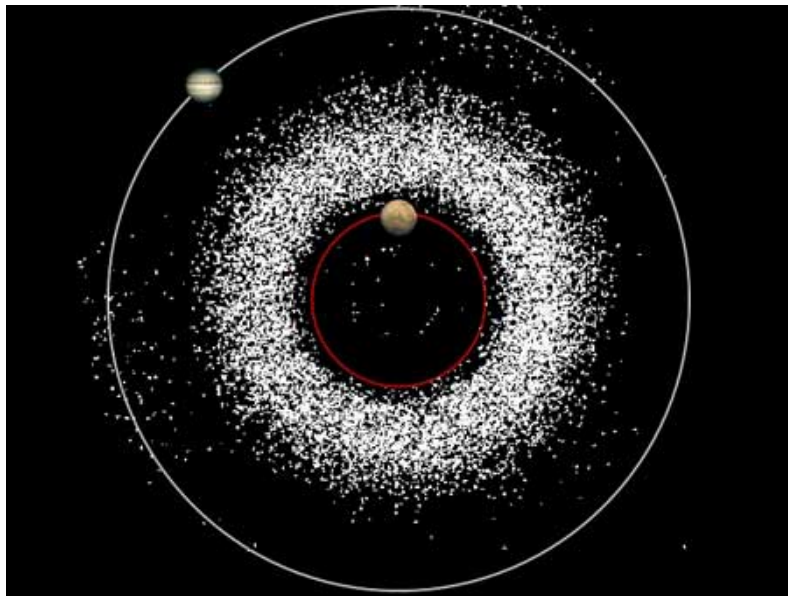
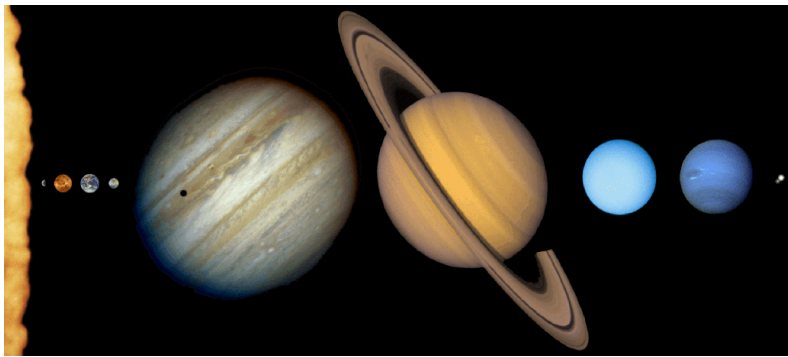
Diverses proportions en fonction des milieux de formation et d'évolution

# Formation du système solaire



- Soleil
- Planète gazeuse
- Planète rocheuse
- Corps plus ou moins gros dans la ceinture d'astéroïde, de Kuiper et le nuage d'Oort

# La matière solide du système solaire

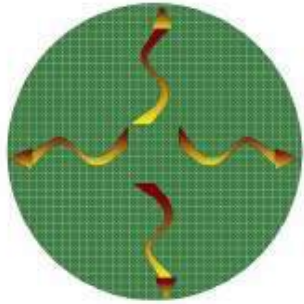


Astéroïdes et comètes

Des planètes, des planétésimaux et plein de poussières

# Evolution des planétésimaux du système solaire

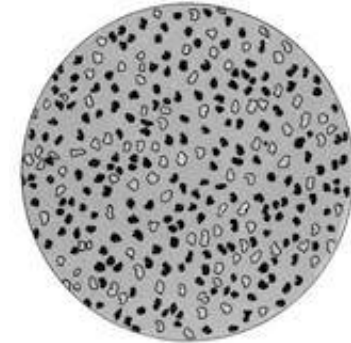
Chacun de ses corps ont évolué différemment depuis leur formation il y a 4.5 Ga



Dégagement de la chaleur  
d'accrétion + radioactivité  
→ fusion

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

**= témoin de la formation des planètes rocheuses**

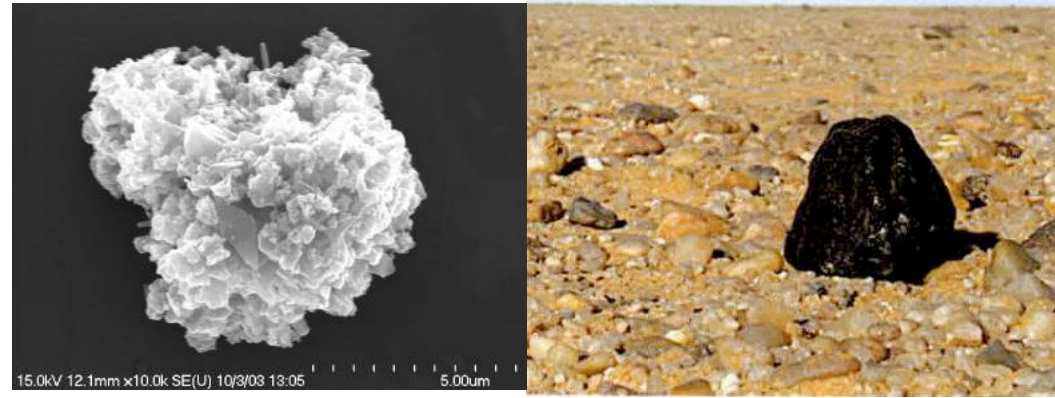


<http://www.geol.umd.edu/~jmerck/geol212/lectures/10.html>

**Les petits corps ou ceux formés tardivement** n'ont subi presque aucun changement depuis 4,5 milliards d'années...: constitués de **matière primitive** !  
**= témoin de ce qui s'est passé il y a 4,5 Ga dans le disque protosolaire!**

# Comment peut-on avoir accès à cette matière extraterrestre?

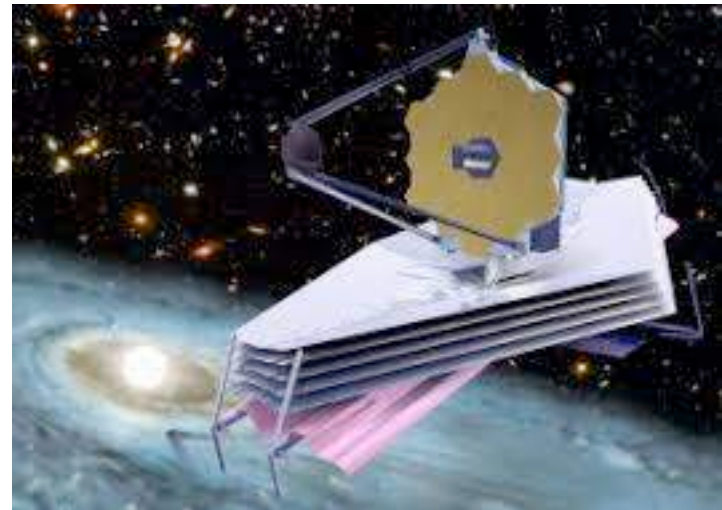
1/ elle vient jusqu'à la Terre: météorite et poussière interplanétaire qui viennent des astéroïdes et des comètes.



2/ on va la collecter (mission spatiale) et on la ramène sur Terre



3/ on l'observe (observation astronomique)



# Quels sont les types de matières extraterrestres ?

Météorites différenciées

Issus d'un corps différencié

Fers

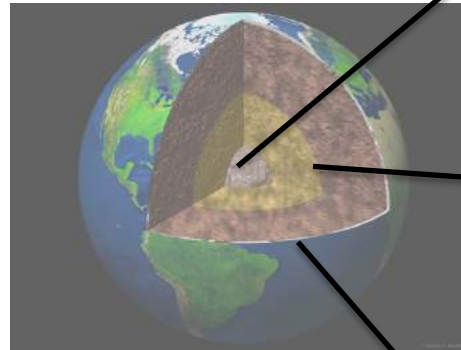
Mixtes

Achondrites

+ Météorites planétaires (Lune, Mars)



Evolution précoce des planètes



## Météorites non différenciées ou chondrites

N'ayant pas subi de fusion  
totale depuis leur formation

Chondrites ordinaires

Chondrites à enstatite

Chondrites carbonées

+ Poussières cométaires ?

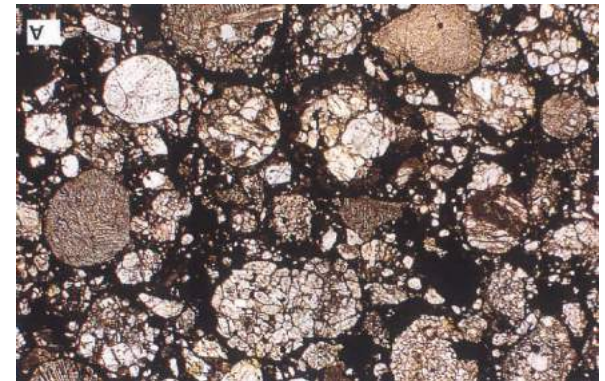


### Matériaux de départ

Roche « sédimentaire » très hétérogène  
échantillonnant différents endroits de la  
nébuleuse



Allende




Semarkona

# Des matériaux tout de même un peu modifié...

← altération hydrothermale

→ métamorphisme haute température



Cl: Ivuna      CM: Murchison      CR: Renazzo      CO, CV: Allende

The diagram shows four meteorite samples arranged horizontally. Above them are two arrows: a blue arrow pointing left labeled 'altération hydrothermale' and a red arrow pointing right labeled 'métamorphisme haute température'. The samples from left to right are: Cl: Ivuna (dark, irregularly shaped), CM: Murchison (dark, angular, with small bright spots), CR: Renazzo (dark, angular, with more bright spots), and CO, CV: Allende (lighter, angular, with many bright spots).

Effets secondaires peuvent légèrement modifier les matériaux initiaux=  
recherche des météorites les plus primitives

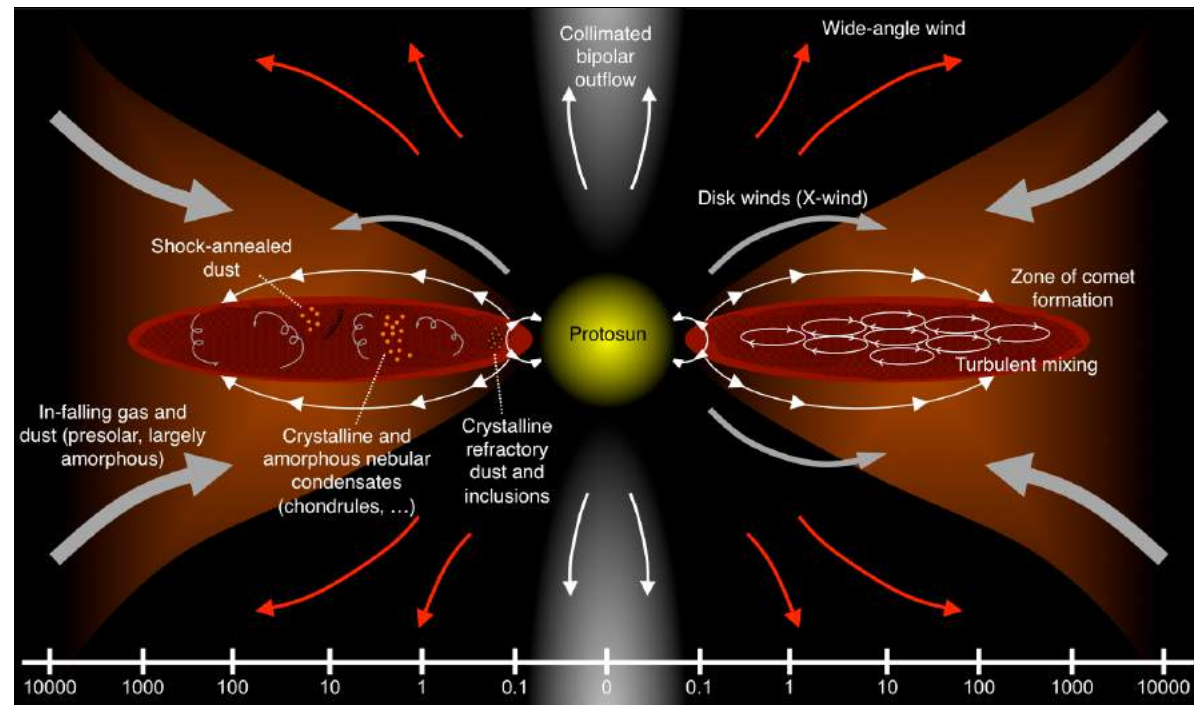
# Questions auxquelles on voudrait répondre en étudiant les matériaux extraterrestres

## En étudiant les achondrites ?

Phénomènes de différenciation ? Dégazage ? Formation des atmosphères ?

## Et en étudiant les chondrites ?

- Comment se sont agglomérés toutes les poussières pour former nos planètes ? Et en particulier la Terre ?
- Origine de ces poussières ? Interstellaires ou directement formés par condensation dans la nébuleuse solaire



Credit: J. Stodolna

- Modification qu'ont subi ces poussières dans la nébuleuse ?
- Phénomènes physico-chimiques qui ont lieu dans un système solaire naissant ? Conditions d'oxydo-réduction ? Présence d'eau ?

# Les météorites non différenciées = sédiments cosmiques non équilibrés



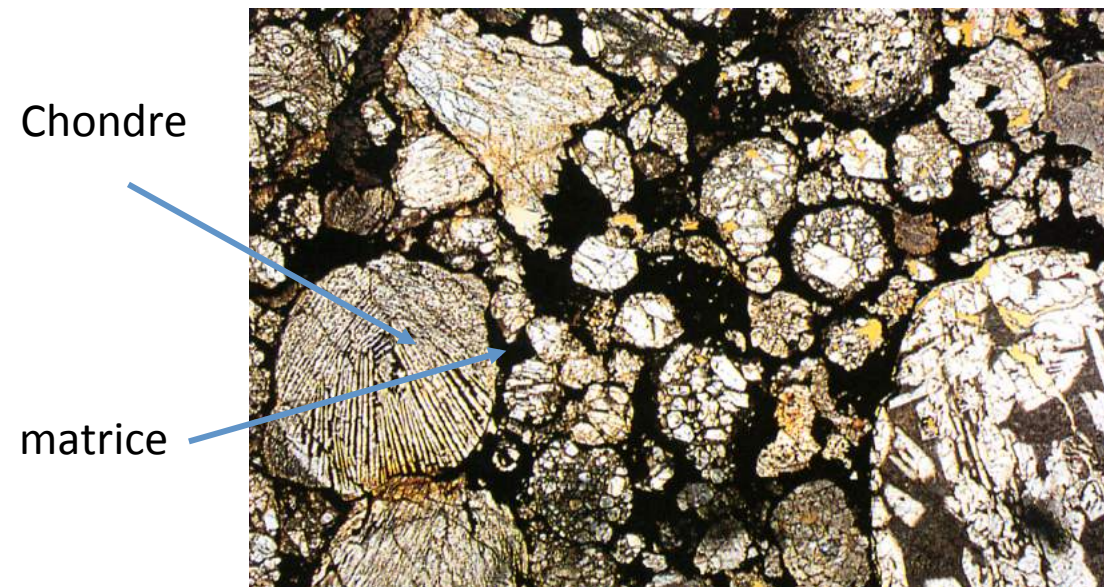
**Les chondres** (0 - 80 vol%) :  
Billes de roches fondues  
(0.1 - 10 mm)

**Les inclusions réfractaires**  
(qq vol %) : les plus vieilles  
roches du système solaire  
(0.1 - 10 mm)

**Le metal :**  
Associés aux autres  
composants

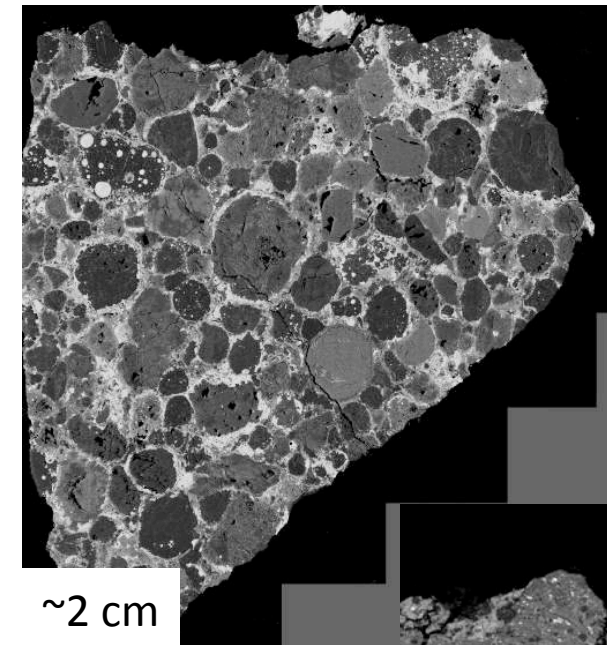
**La matrice :**  
Ce qui se trouve entre tout  
cela (10 nm à 10  $\mu$ m)

**Très hétérogènes: nécessité  
du MEB**

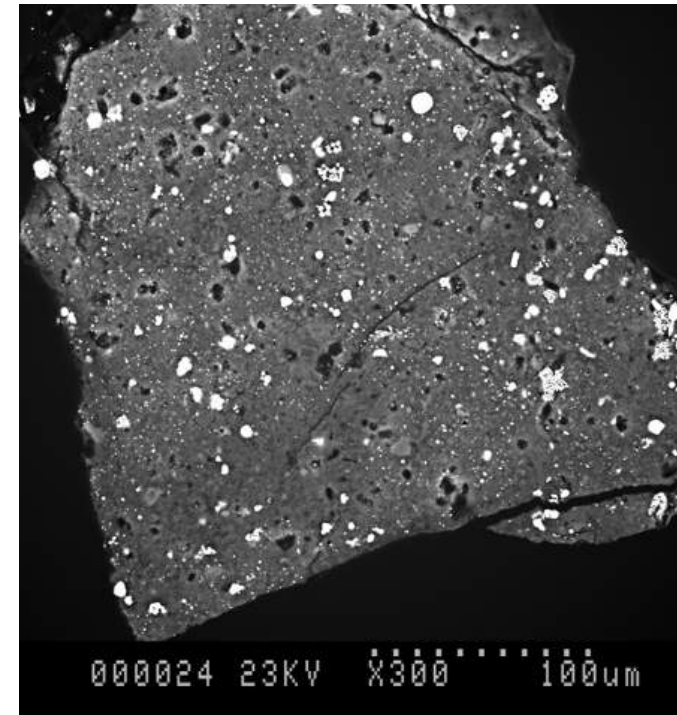
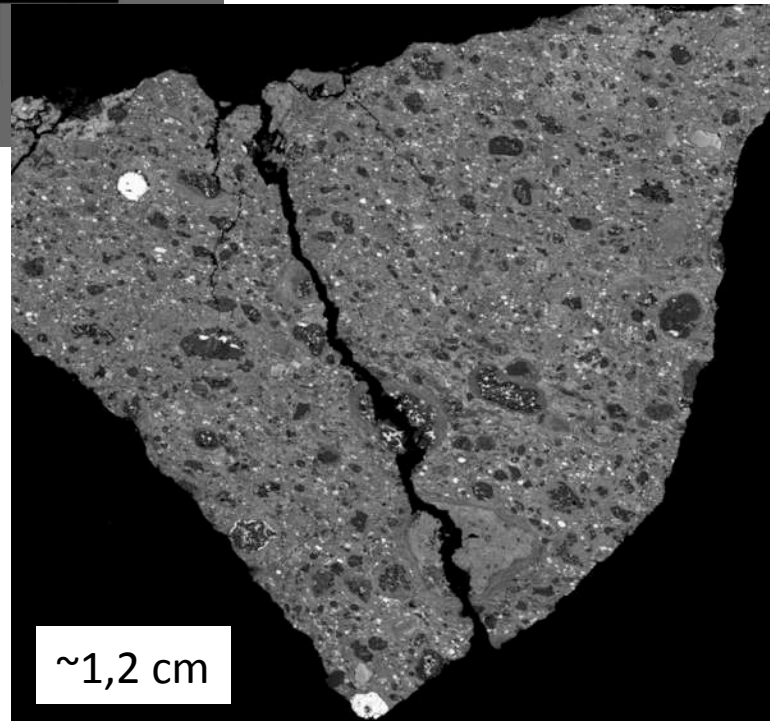


# Grandes variabilité des proportions matrice/chondre/CAIs parmi les classes de chondrites

## Chondrite ordinaire

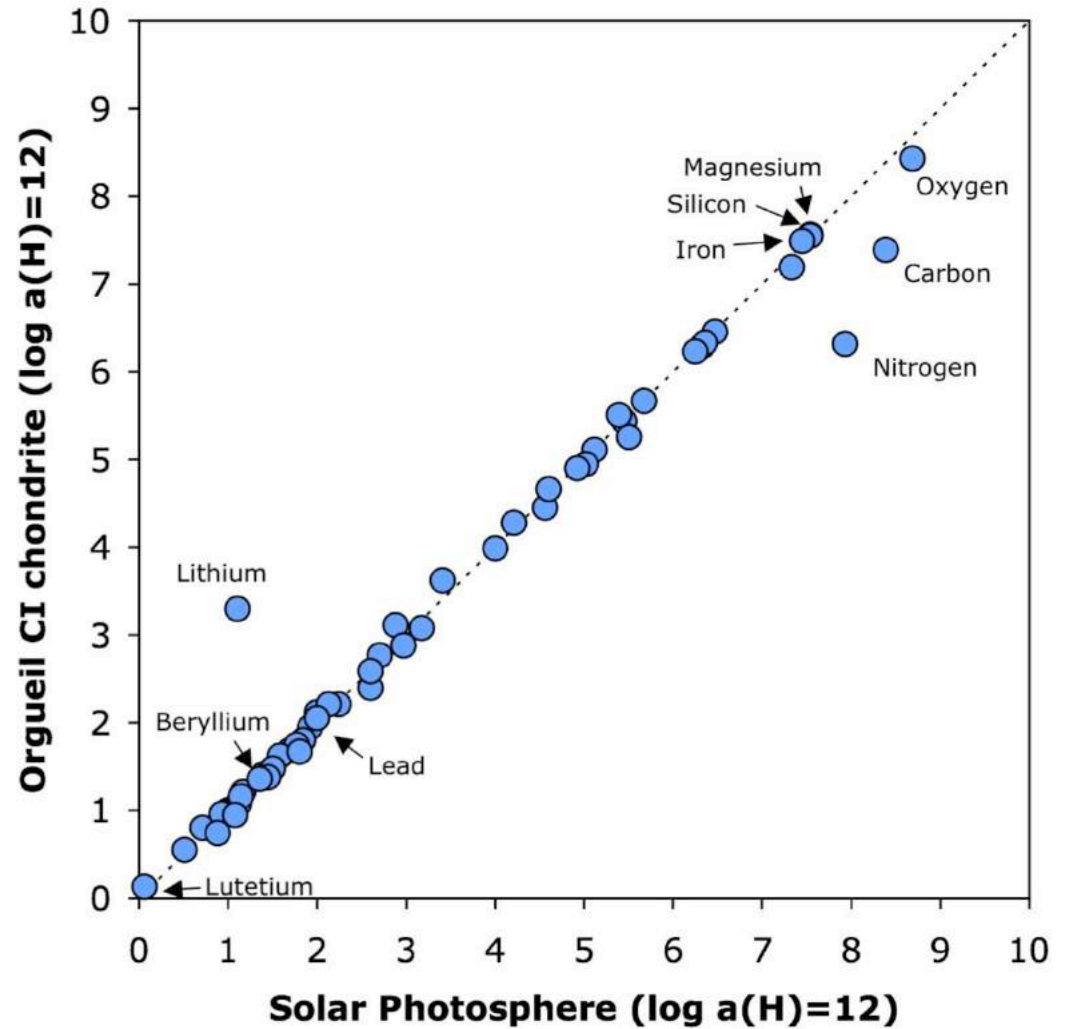


- 25% de matrice pour les chondrites à enstatite et ordinaires
- 50 % pour les chondrites carbonées
- 100 % pour les CI



# Les abondances solaires dans les chondrites

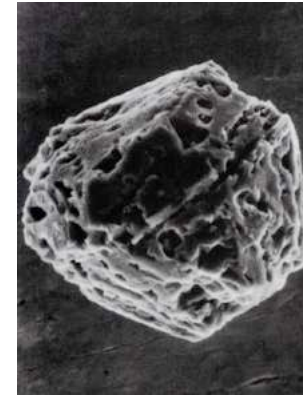
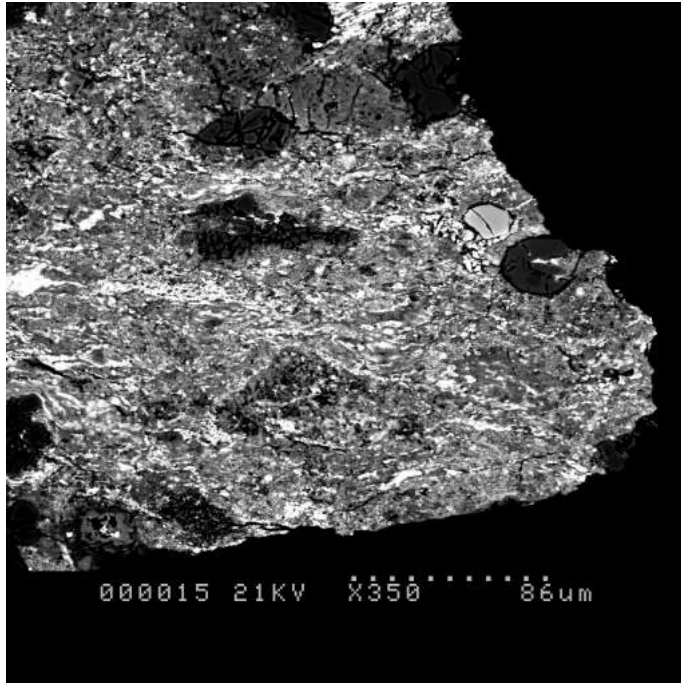
Orgueil (chondrite carbonée CI)



Soleil = 99 % de la masse du système solaire

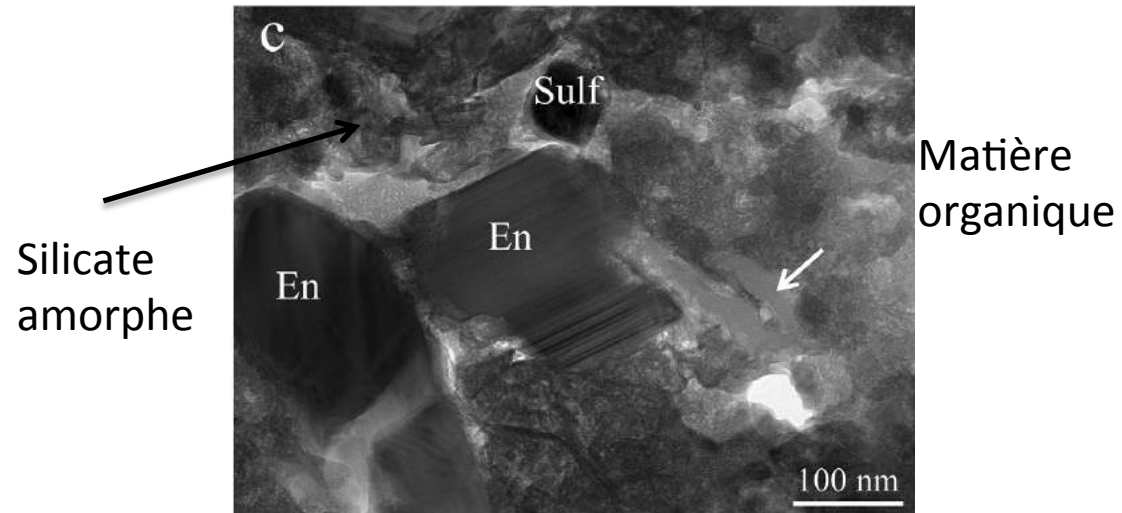
Composition chimique du Soleil = matériau de départ

# Une matrice très hétérogène



Grains présolaires  
( Nanodiamants,  
Silicates, Graphites, SiC,  
Oxydes)

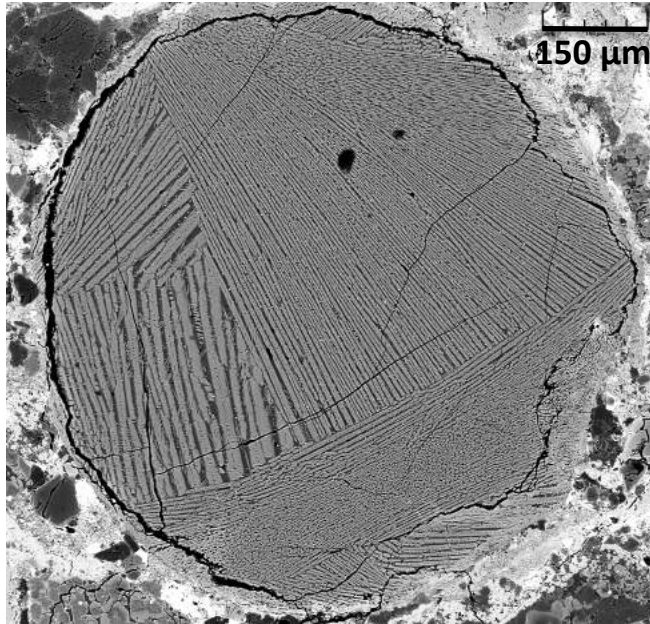
De 0,1% à 0,1 ppm  
De 2 nm à qqs microns



Leroux et al, 2015

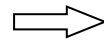
Mélange de minéraux HT (olivine, pyroxène), de sulfure, de grains de métal, et de minéraux BT (phyllosilicate, d'oxyde de fer), de matière carbonée, de silicate amorphe.

# Les chondres



Bille liquide dans lequel a cristallisé des minéraux:

- Olivine, pyroxène
- Épisode HT > 1500°C pour former ces billes de compo. donnée
- Refroidissement rapide pour avoir de telles textures



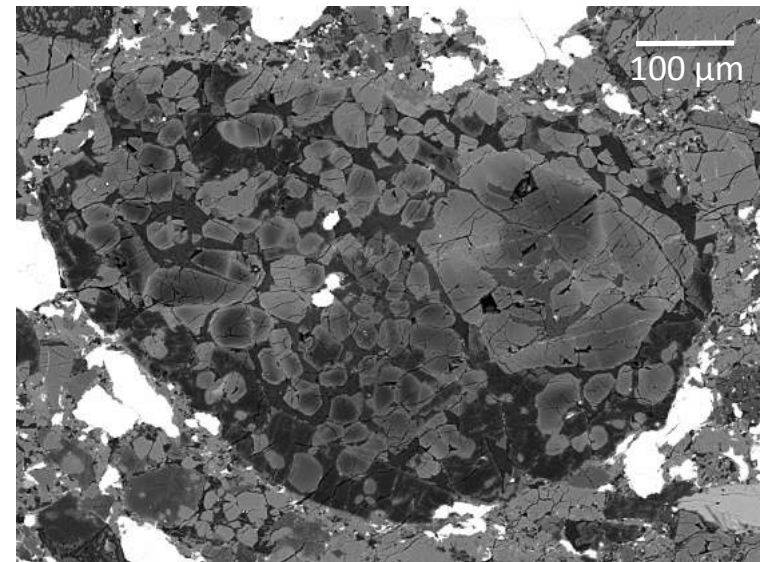
⇒ Épisode de chauffe de poussière au sein de la nébuleuse:

Activité stellaire

Onde de choc

Décharge électrique (frottement des grains)

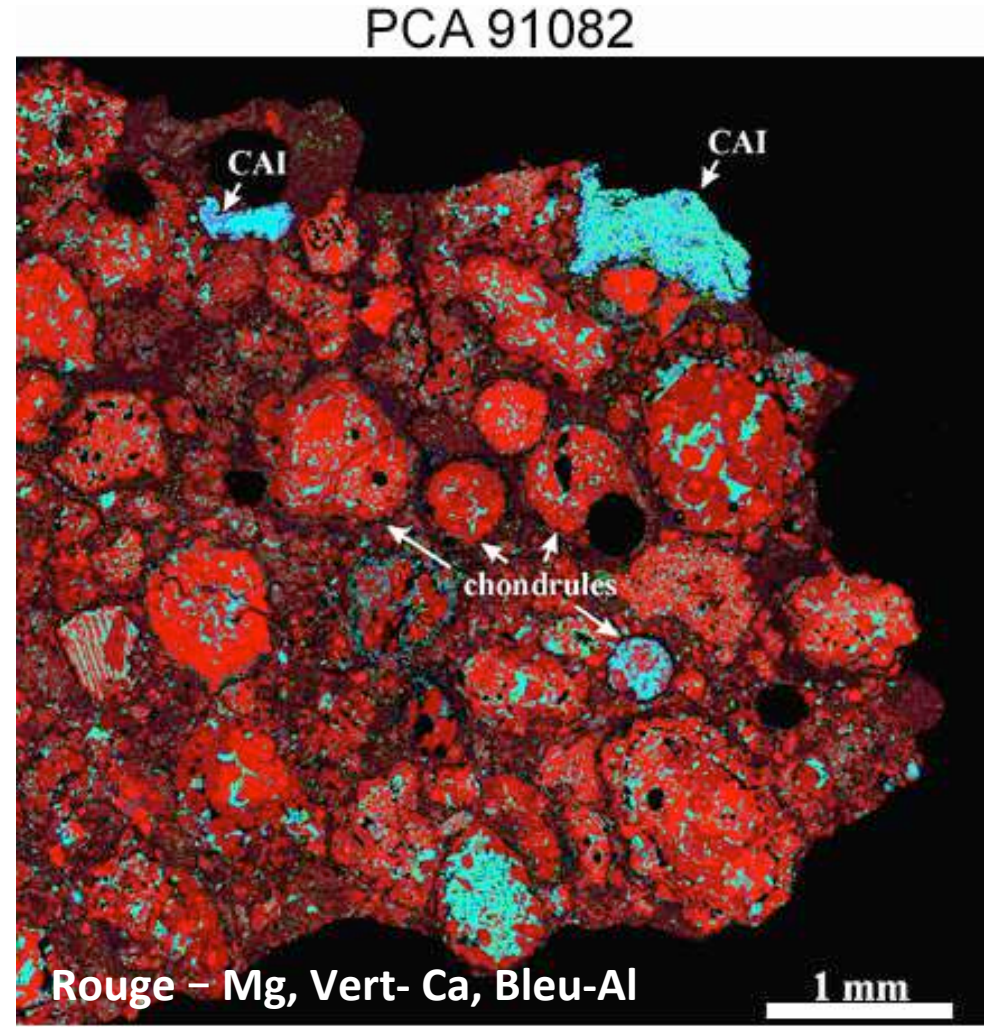
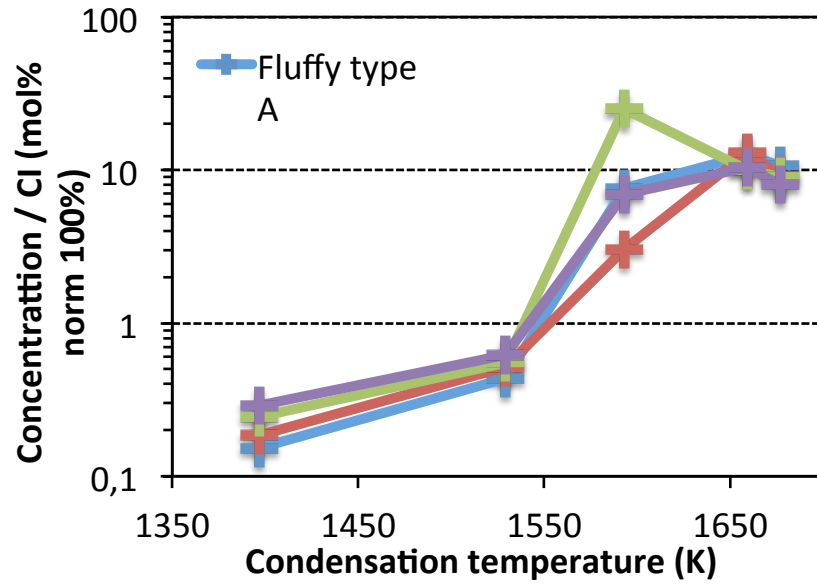
manteau de planétésimaux ?



# Les inclusions réfractaires ou CAIs



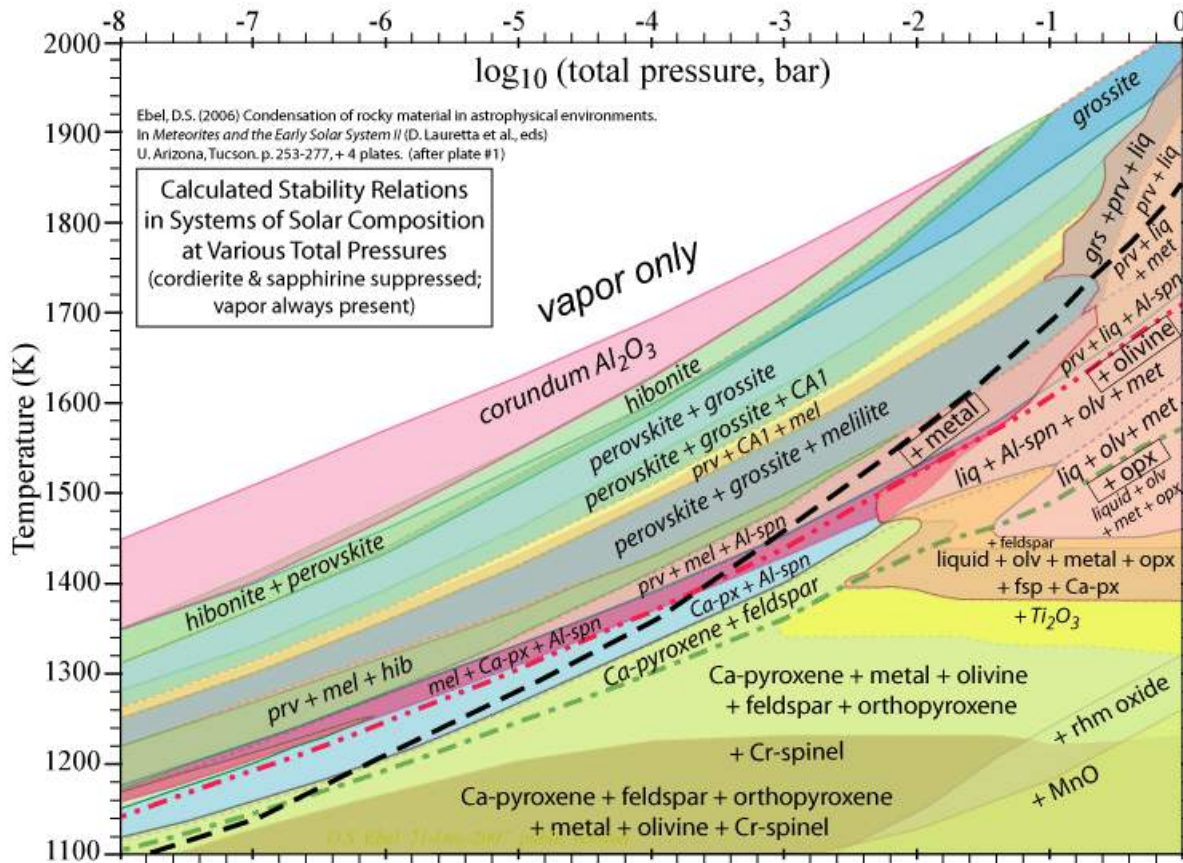
FIGURE 24--Two views of broken fragment from a large Allende specimen (NMNH 3529): a, normal distribution of aggregates and chondrules. b, preferential accumulation of aggregates and large chondrules, and a vague oriented fabric. Actual size.



Rouge - Mg, Vert- Ca, Bleu-Al  
 (Alexander Krot, University of Hawaii)

<http://www.psrcd.hawaii.edu/May05/chondrulesCAIs.html>

Inclusions riches en Calcium et en Aluminium (spinelle, ménilite, pyroxène, anorthite)<sup>8</sup>

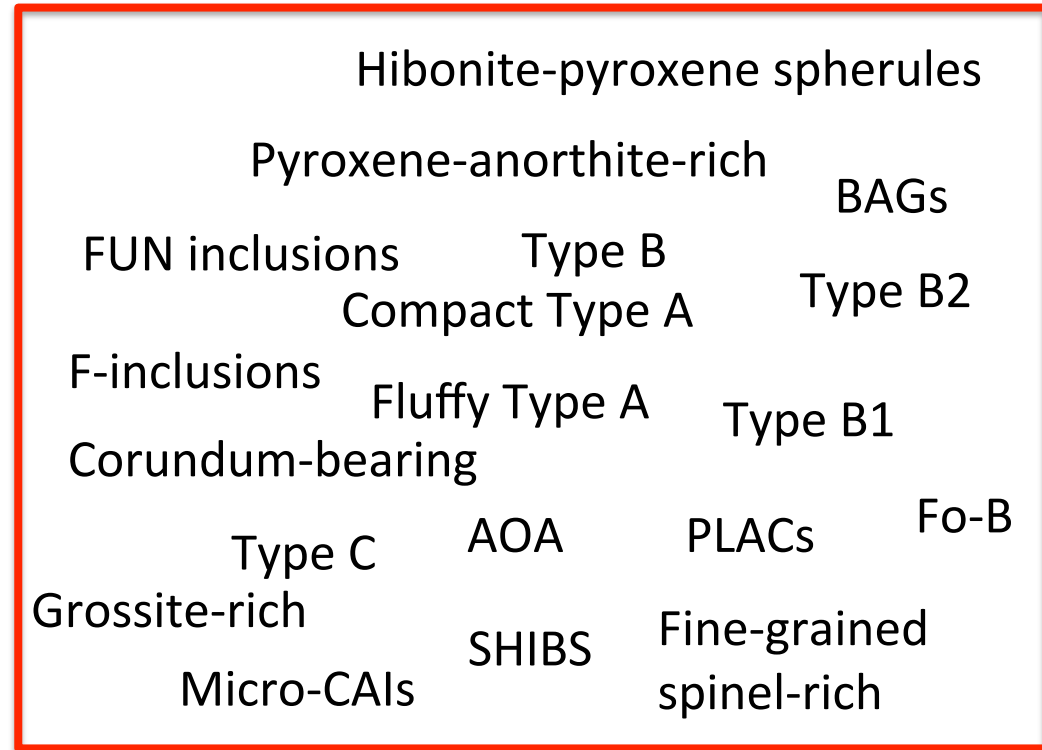
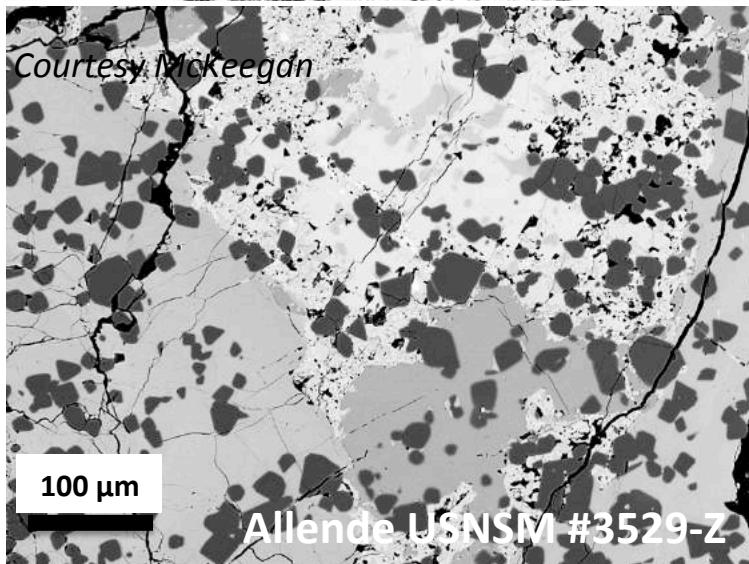
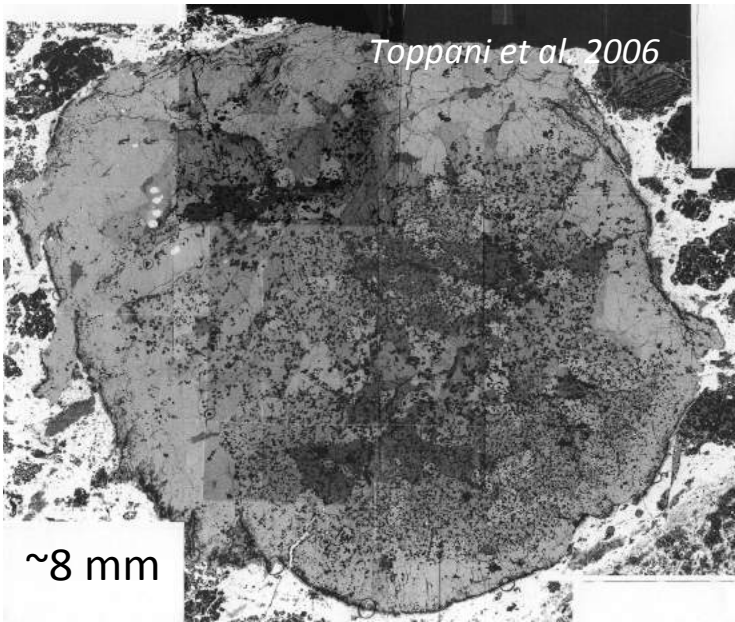


- Minéraux des CAIs prédits par les calculs thermodynamique de condensation d'un gaz solaire
- Inclusions formés à moins de 0,1 AU du Soleil à haute température (1500°)
- Datation U/Pb : 4,56 Ga- Plus vieux objets du système solaire

**CAIs= premier solides formés par condensation du gaz solaire dans la nébuleuse**  
**Témoins des premiers instants du système solaire près du soleil jeune**

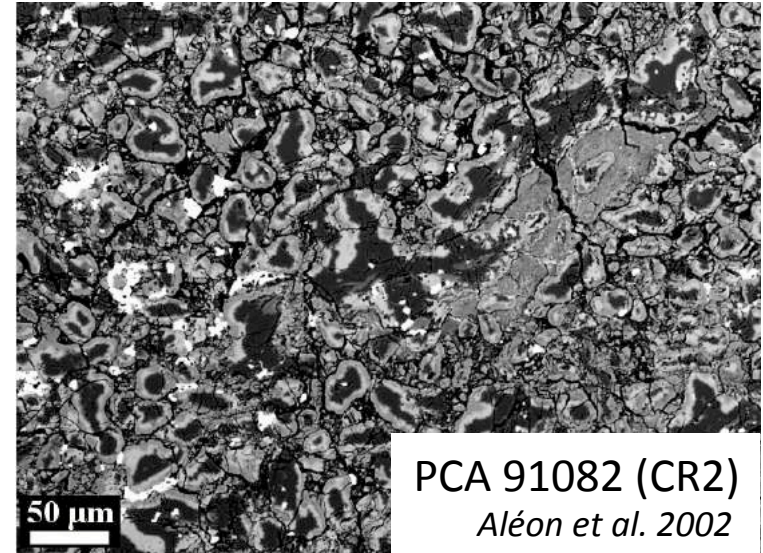
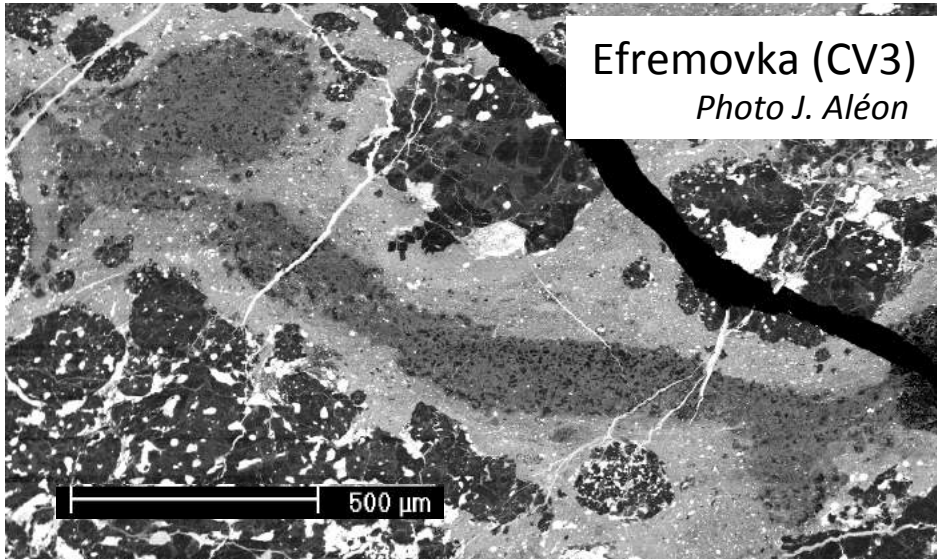
# Une grande variété de ces inclusions réfractaires

## 1- Inclusions réfractaires à gros grains



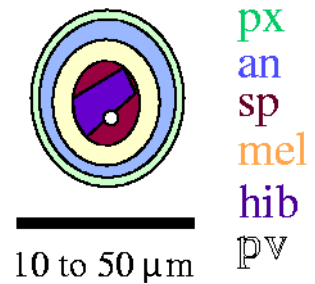
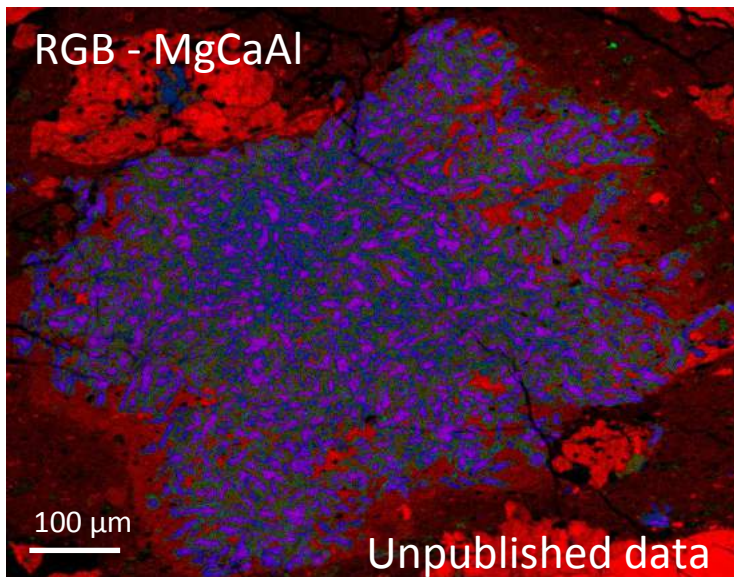
Basé sur la reproduction expérimentale de la minéralogie/texture de ces CAIs : cristallisation de ces CAIs (de type B) à partir d'un liquide silicaté riche en Ca et Al.

# A la recherche des inclusions les plus primitives: les inclusions à grains fins



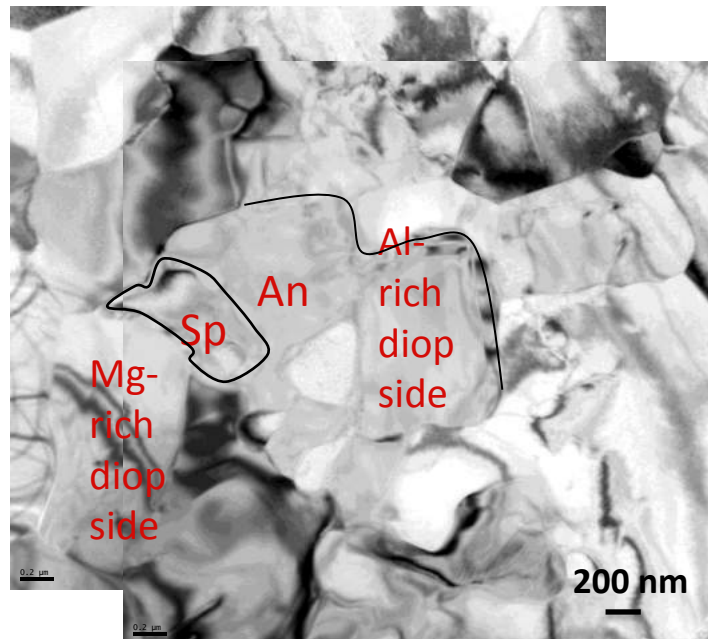
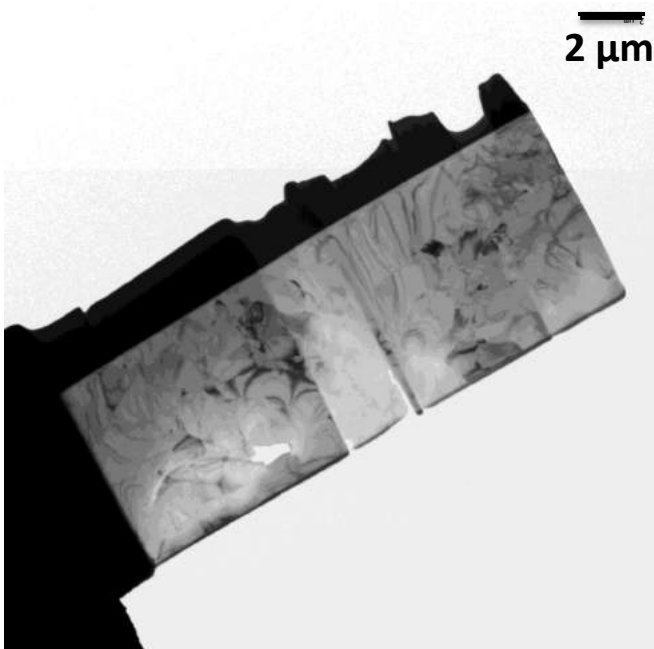
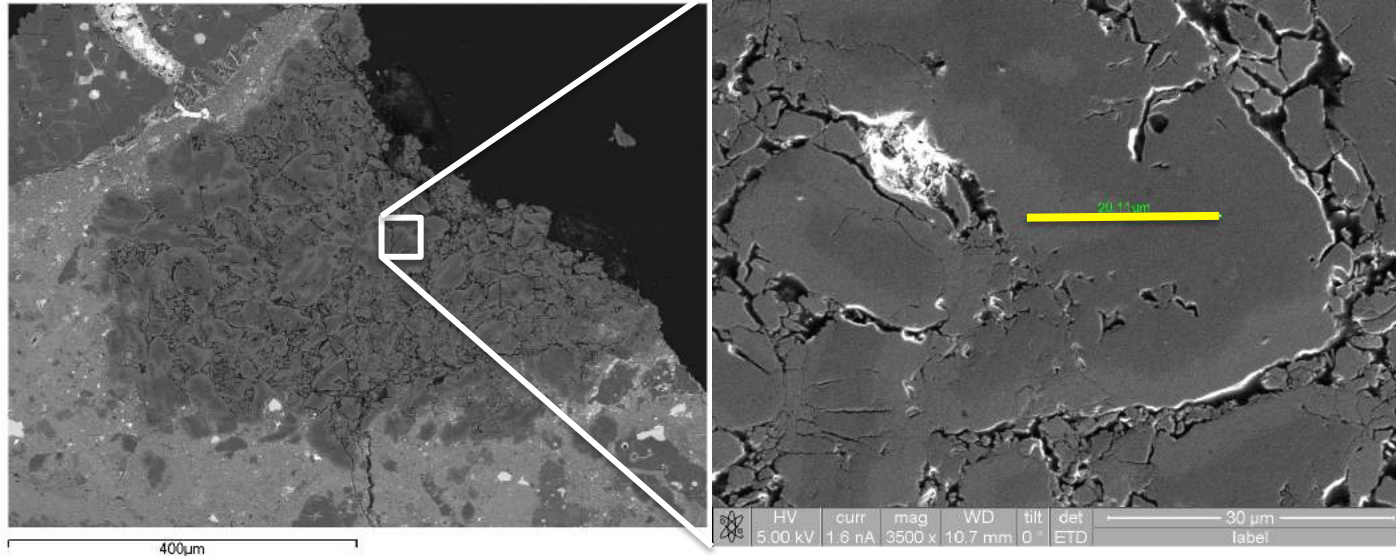
Inclusion à grains fins: condensation directe dans la nébuleuse à partir de gaz « solaire » ?

Agrégats de nodules à texture concentrique



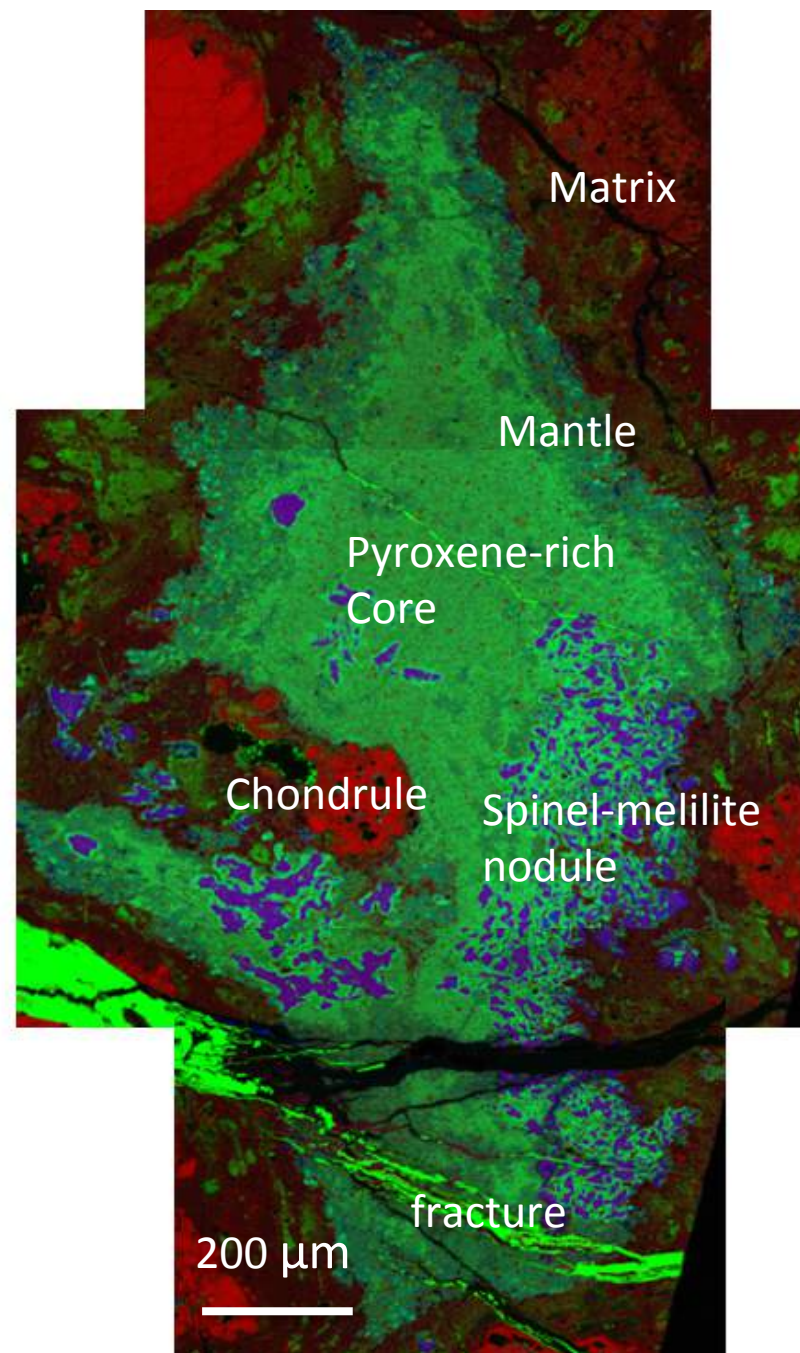
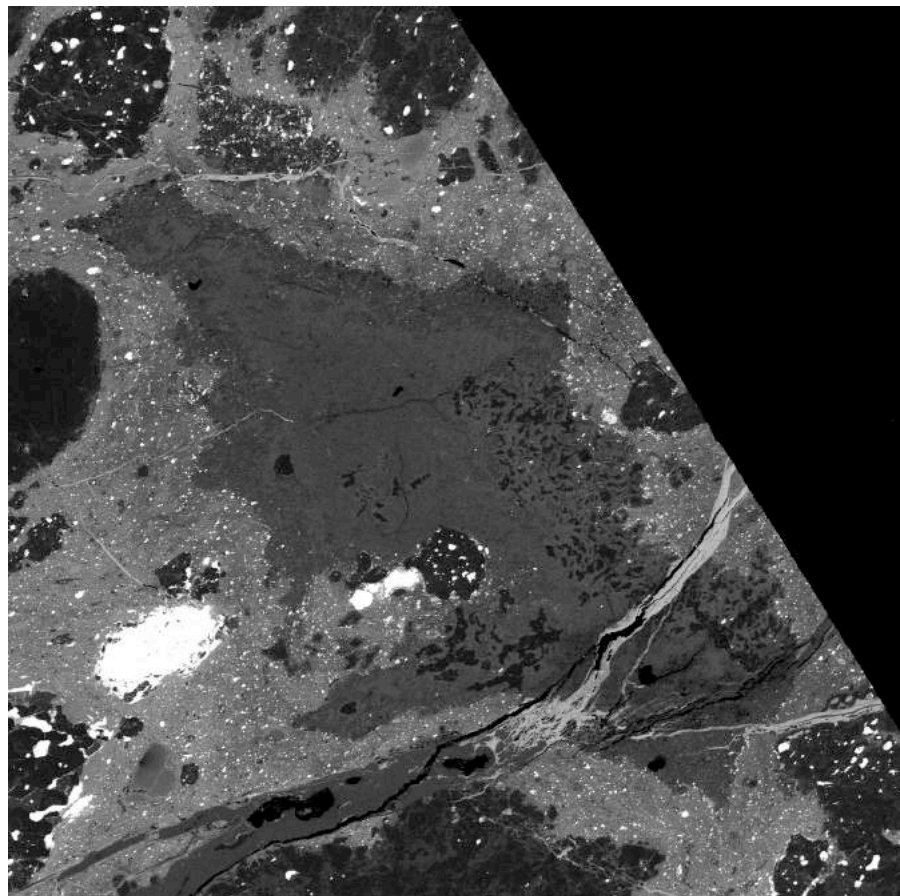
# Etudes MET à plus fine échelle: inclusion VA16 (Vigarano)

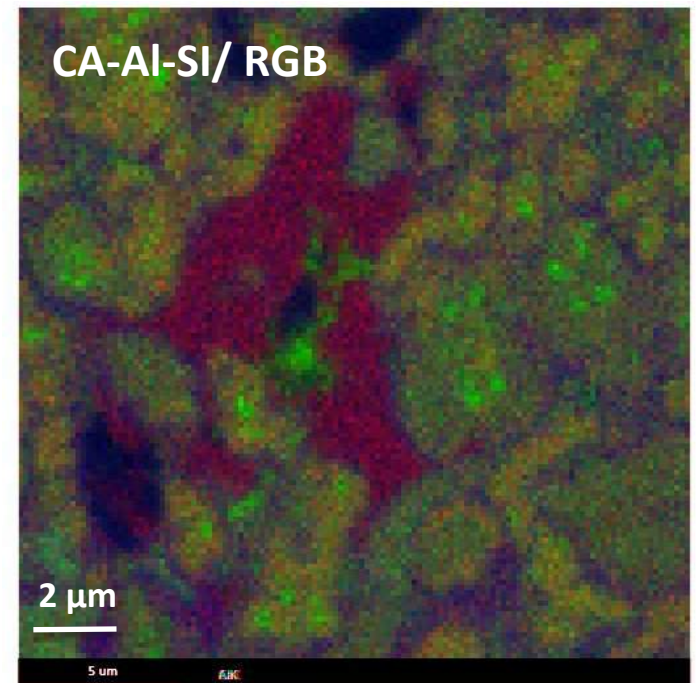
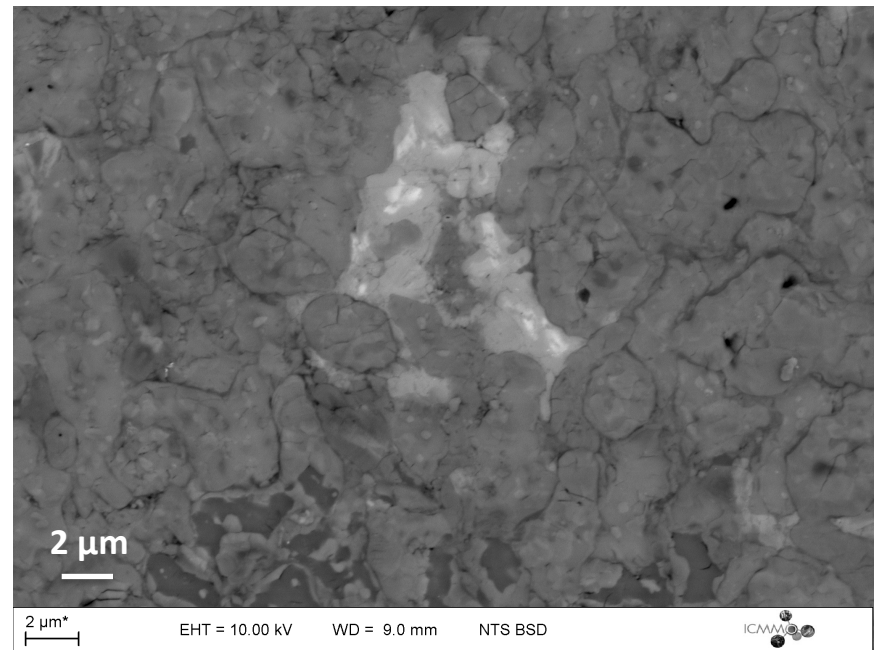
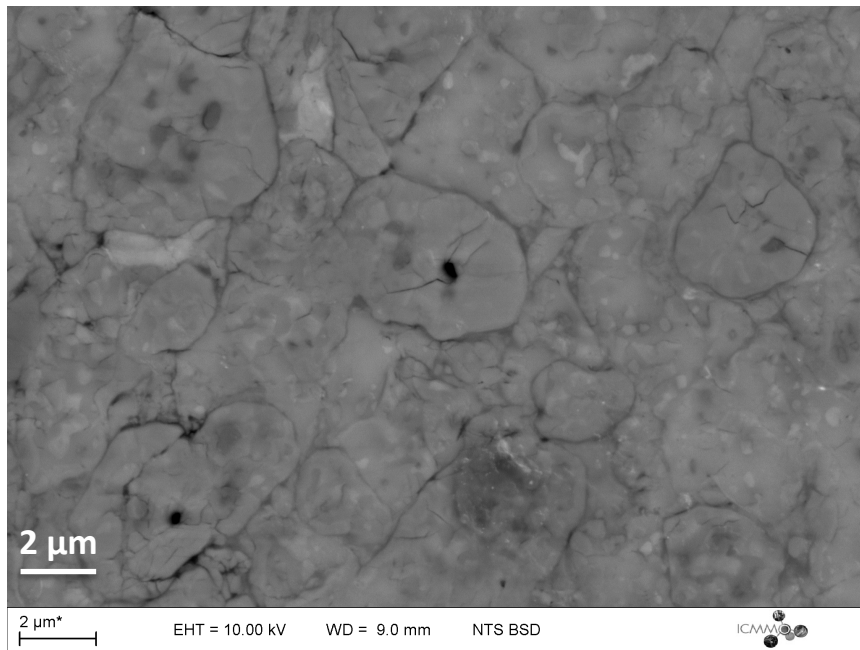
Peu de porosité,  
structure en  
faveur d'une  
interaction avec le  
gaz à l'état  
liquide ?



Unpublished data  
22

Un CAI à grain fin pas comme les autres ?  
Inclusion E45V météorite Efremovka

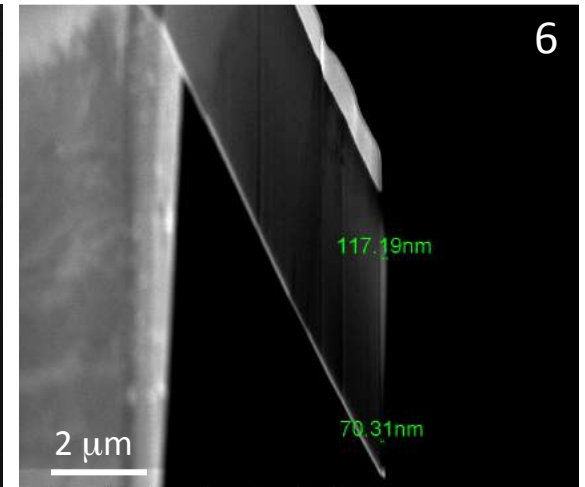
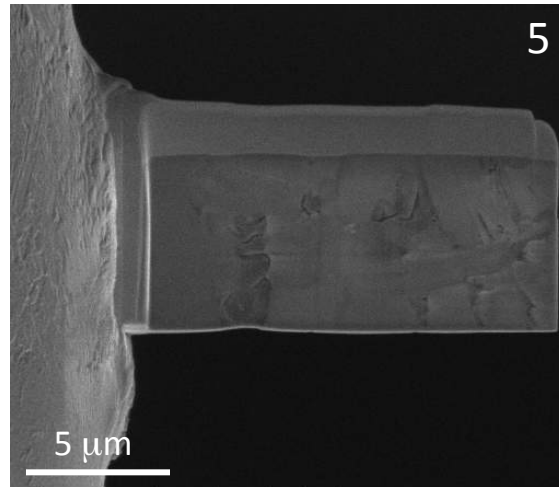
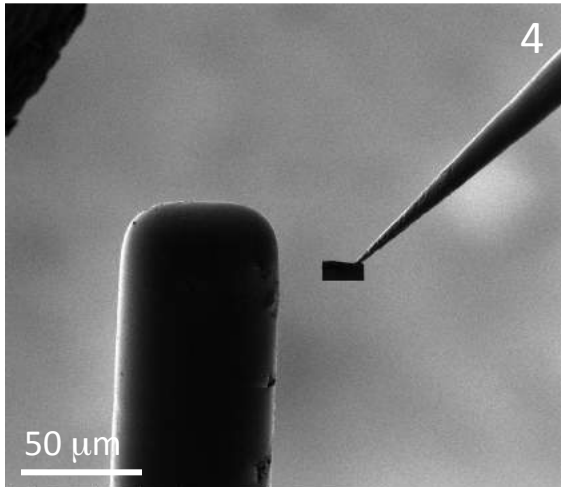
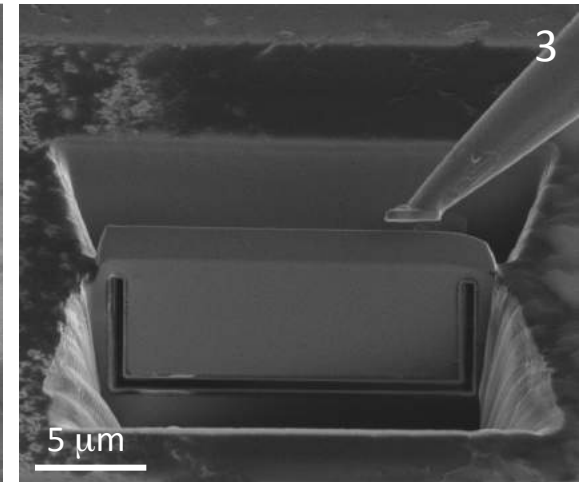
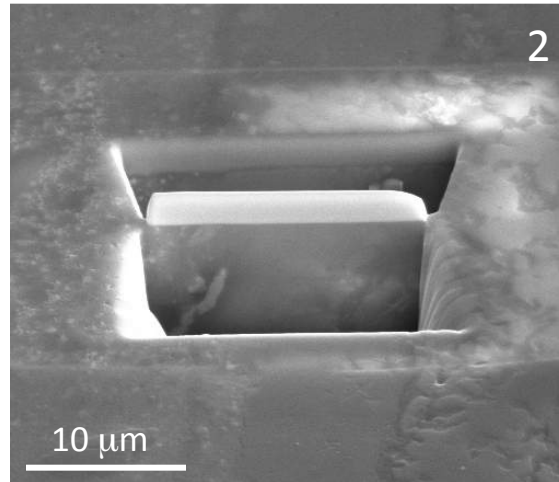
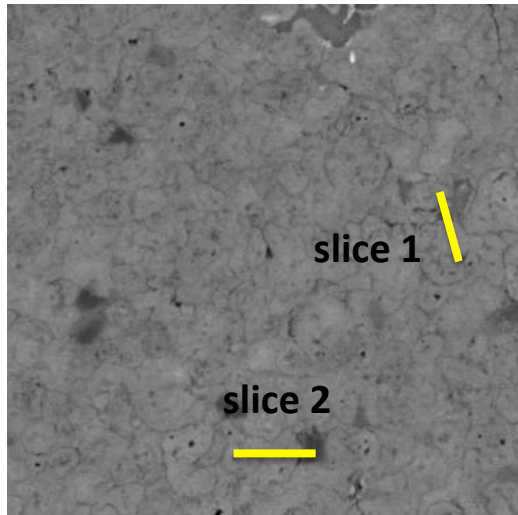




## Images Feg-SEM (F. Brisset) de E45-V

- Structure en agrégat de nodules
- Hétérogénéité chimique ~ 100 nm
- Accès à la composition chimique de chaque nodule

# Préparation de sections ultra-mince pour le MET aux endroits sélectionnés



# Observation des sections de nodules par MET

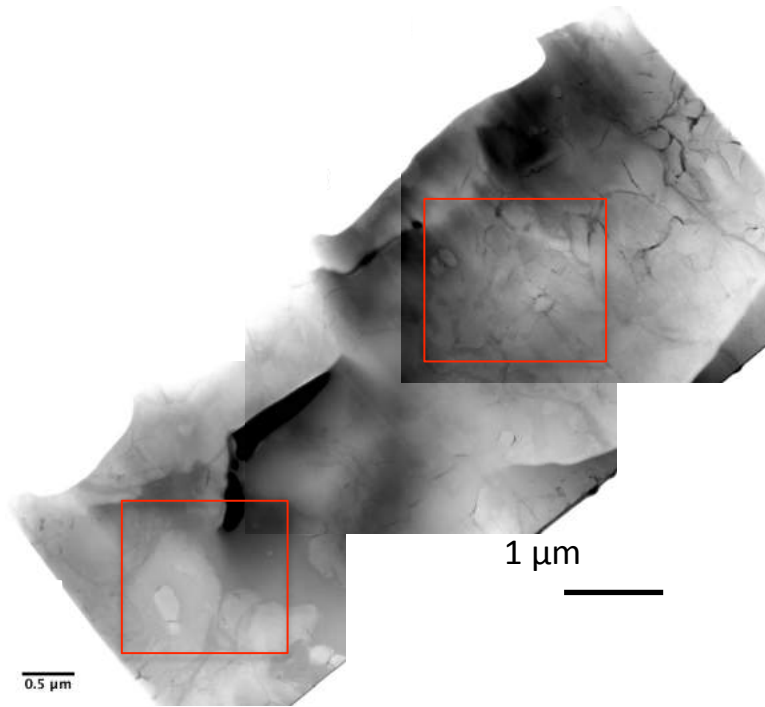
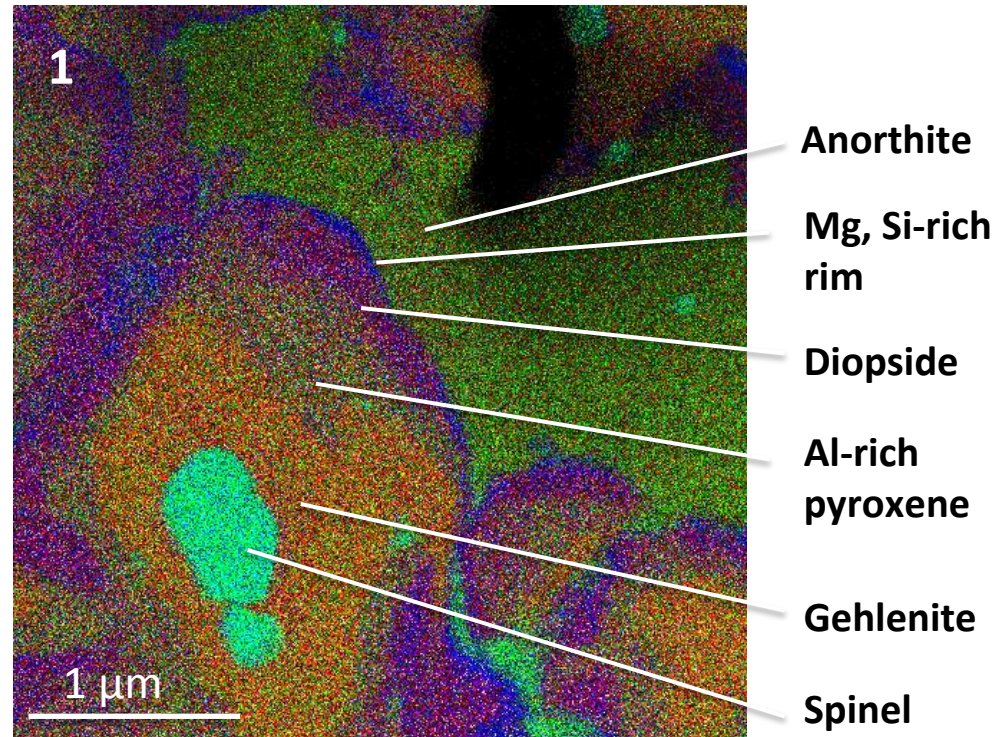


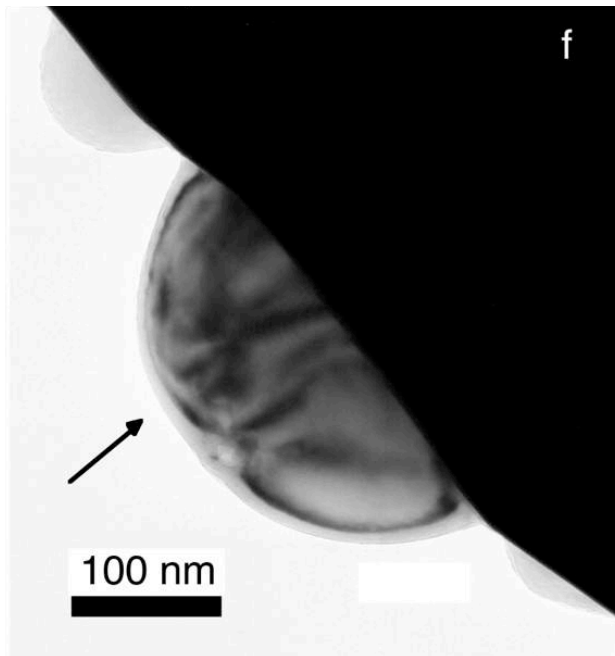
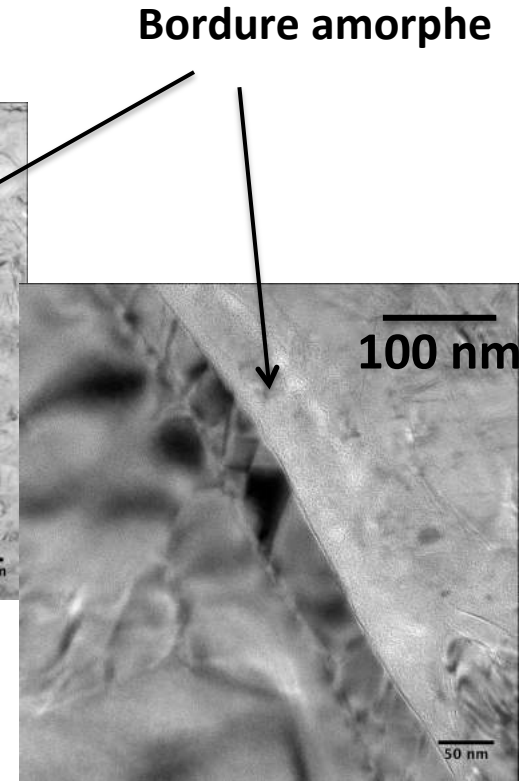
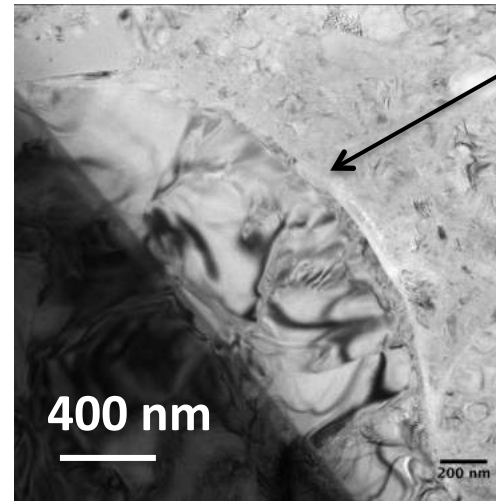
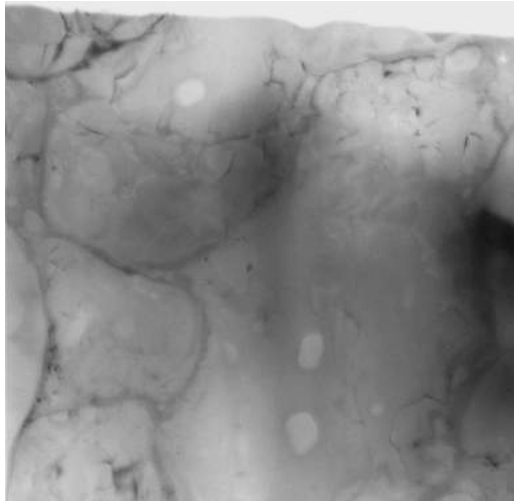
Image en champ clair (MET)  
d'une section FIB

Carte composée Ca-Al-Mg/RGB



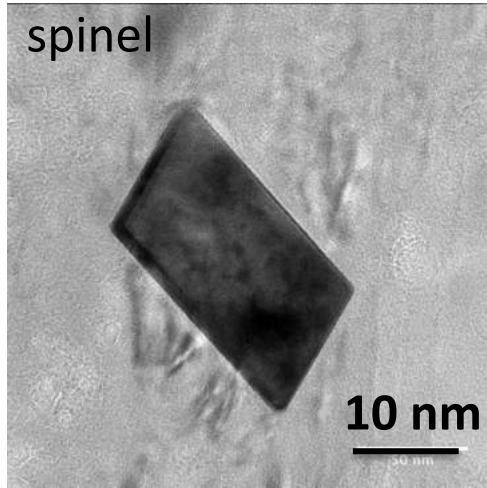
- Nodules montrant la séquence de condensation du spinelle jusqu'à diopside.
- Variabilité de la teneur en fer du spinelle.

# Présence de bordure amorphe riche en Mg-Si riche autour des nodules: similaires aux résultats des expériences de condensation

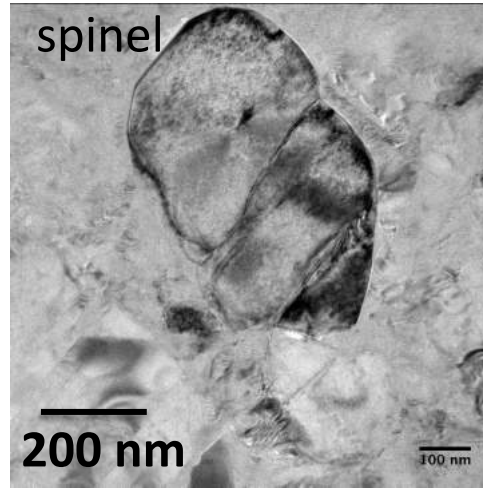


Bordure amorphe (flèche) sur un cristal de mélilite condensé à partir d'un gaz solaire CMAS à 1138°C. Toppani et al. 2006

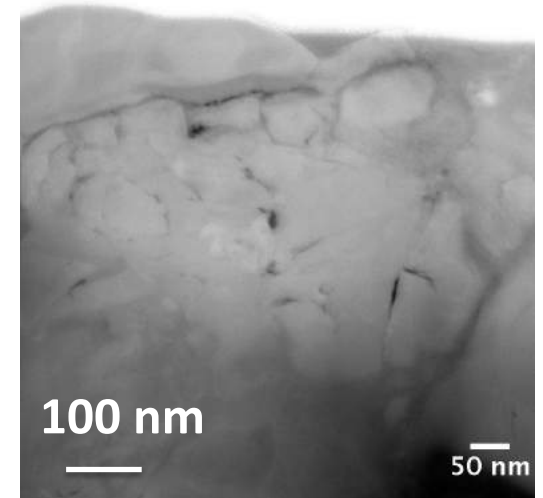
# Diversité des tailles et des morphologies des cristaux



**Nanocrystal automorphe**

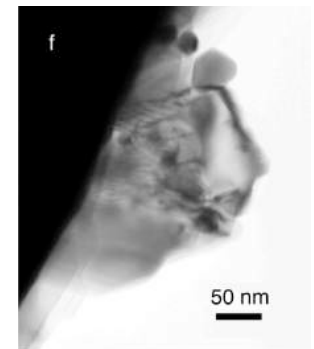
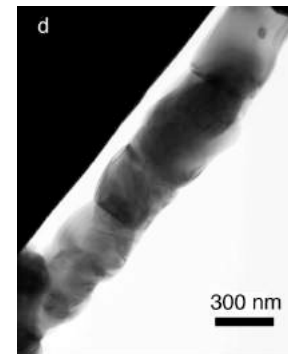
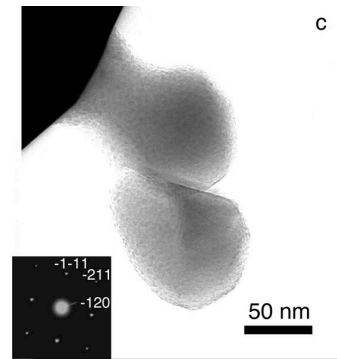
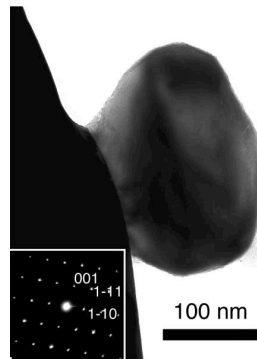


**Cristaux arrondis**

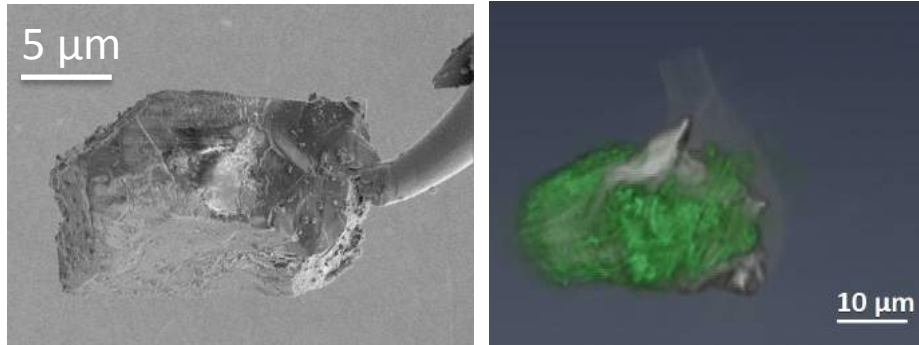


**Agrégats de cristaux**

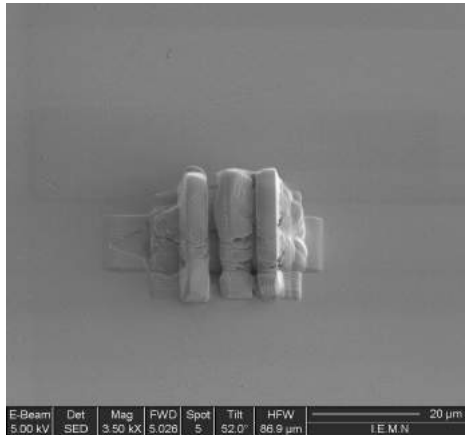
Nombreuses similitudes avec les expériences de condensation (Toppani et al, 2006)



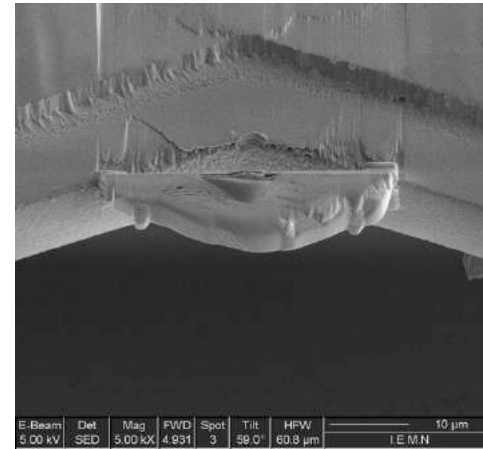
# Vers une étude combinée MEB/IR/Nanosims/MET pour les échantillons précieux



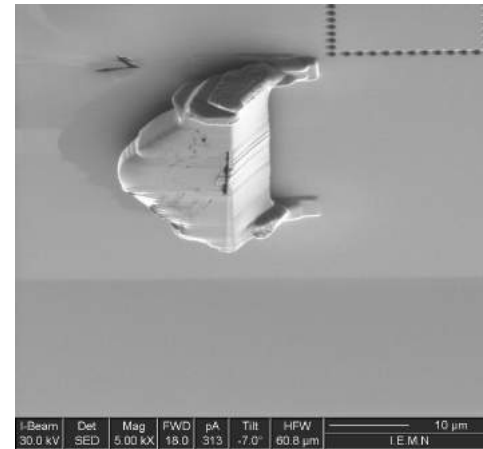
IR tomography of 10 micron grain welded on a tungsten needle



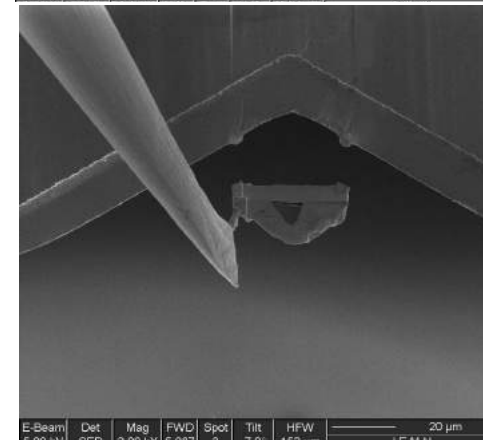
Recovery of the grain and deposition on a Si wafer- Cutting of the grain in three slices



1 micron slice for IR and Raman spectroscopy



3 microns slice for nanosims and Feg-SEM



100 nm slice for TEM

## Préparation au retour des missions spatiales de collecte d'échantillon



Hayabuza 2, Osiris-rex...