



Les micrométéorites : les messagères de notre origine

Cécile Engrand et collègues...

IJCLab, CNRS/Univ. Paris-Saclay,
Orsay Campus, France

cecile.engrand@ijclab.in2p3.fr



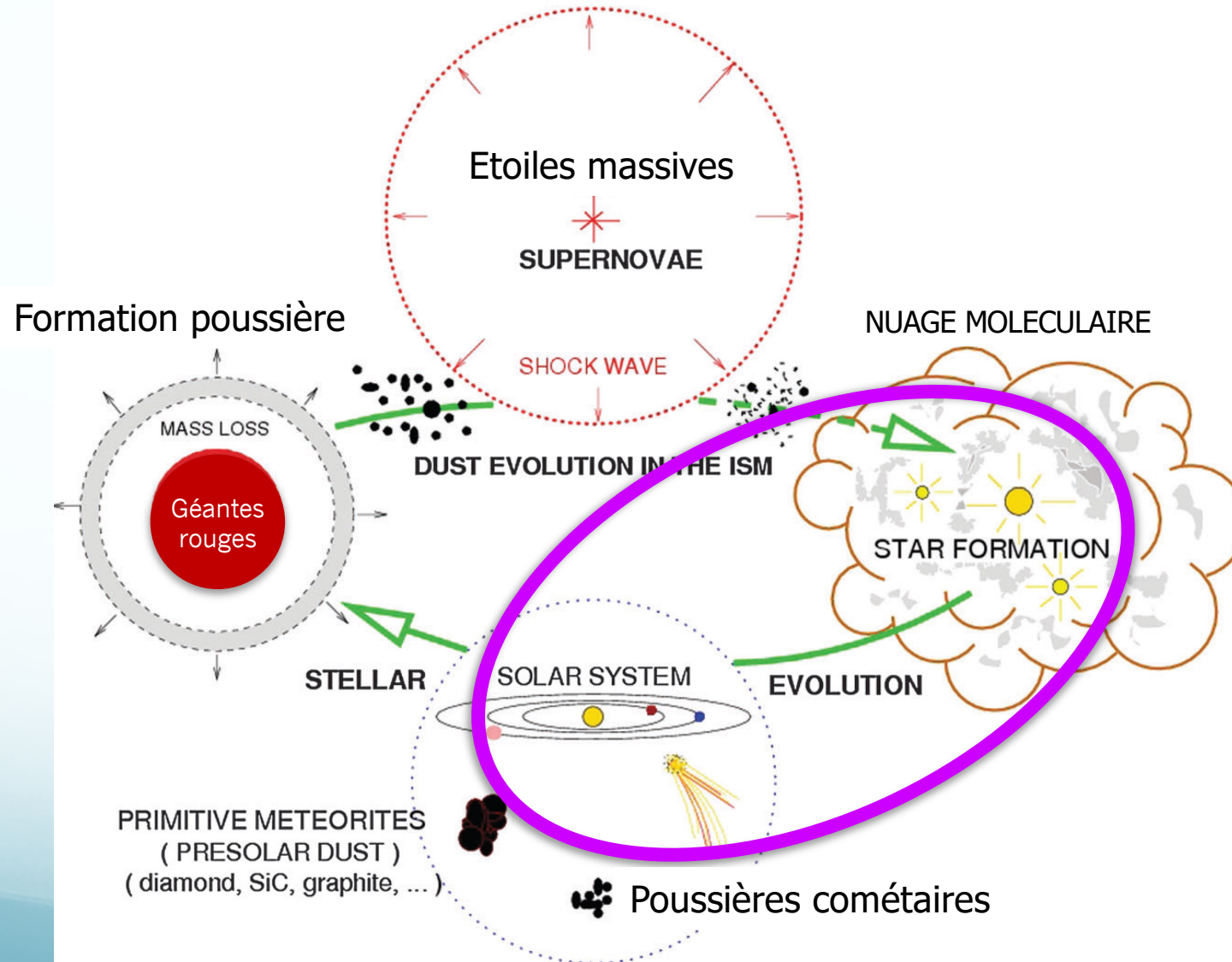


...et collègues (passés et actuels)

- **Orsay – Univ. Paris-Saclay – synchrotron SOLEIL** : **M. Maurette** (décédé), E. Dartois, B. Guérin, L. Bejach, J. Rojas, L. Delauche, S. Hervé, E. Charon, M. Godard, , B. Augé, J. Mathurin, A. Dazzi, A. Deniset, G. Slodzian, T.-D. Wu, T. Pino, F. Borondics, C. Sandt, M. Scheel
- **IMPMC/MNHN Paris**: J. Duprat, M. Gounelle, K. Benzerara, S. Bernard, L. Remusat, M. Roskosz, T. Jiang, S. Mostefaoui, J. Aléon, F. Robert
- **UMET Lille**: H. Leroux, C. Le Guillou
- **IPAG Grenoble**: F.R. Orthous-Daunay, V. Vuitton, E. Quirico, L. Bonal, P. Beck
- **Rosetta/COSIMA Team** (PI M. Hilchenbach (PI (décédé), MPS Göttingen) (Germany, France, Finland, Austria, The Netherlands, Sweden...)
- **Consortium Cosmorbitrap en France** (LPC2E, LISA, LATMOS, IPAG, IJCLab)
- **Japan – Hayabusa2**: Initial analyses “Stone” and “IOM” T. Nakamura (U. Tohoku), H. Yabuta (U. Hiroshima), Y. Kebukawa (Inst. Science Tokyo)
- **USA**: E. Dobrică, J.P. Bradley, H. Ishii (Univ. Hawai); L. Nittler, R. Stroud (ASU); B. De Gregorio (US NRL); E. Parker, D. Glavin, J. Dworkin, J. Elsila (NASA GSFC)



Tout n'est que poussière... et redeviendra poussière...



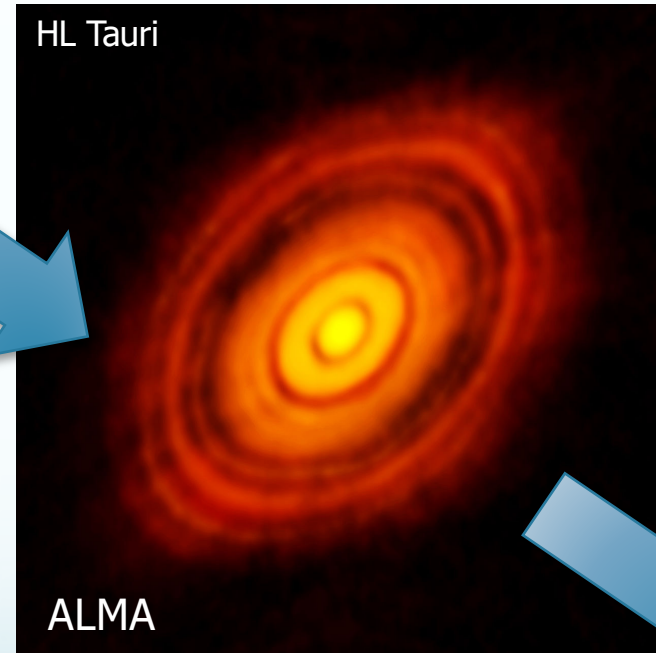


Du nuage moléculaire au système planétaire

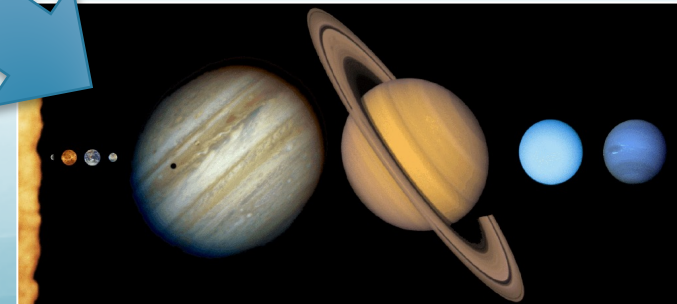
Nuage moléculaire



Disque protoplanétaire

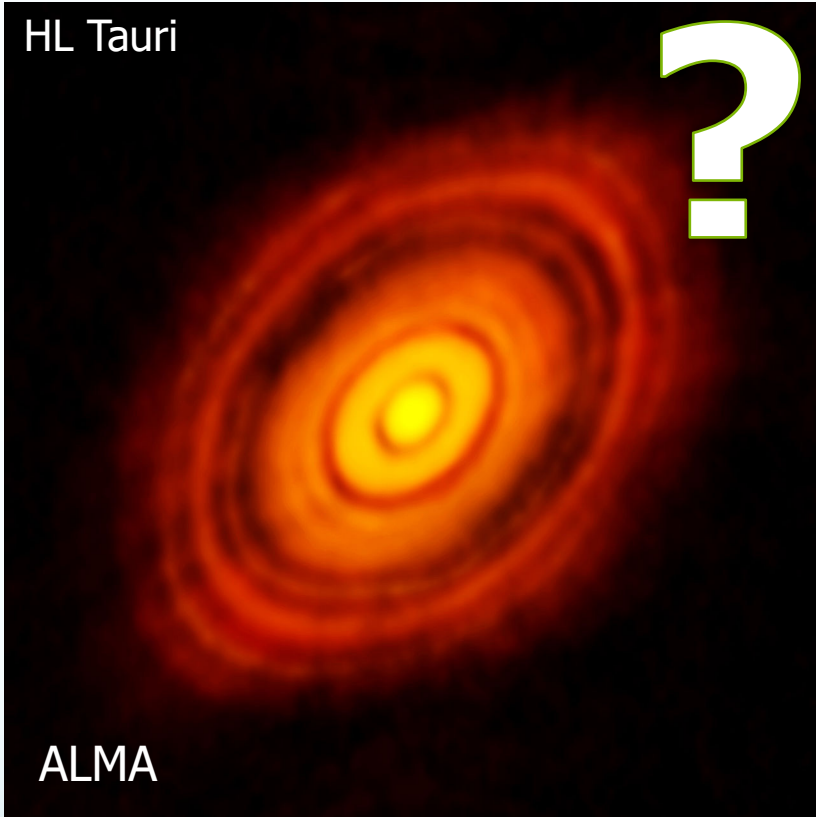


Système stellaire –
Système Solaire pour nous...



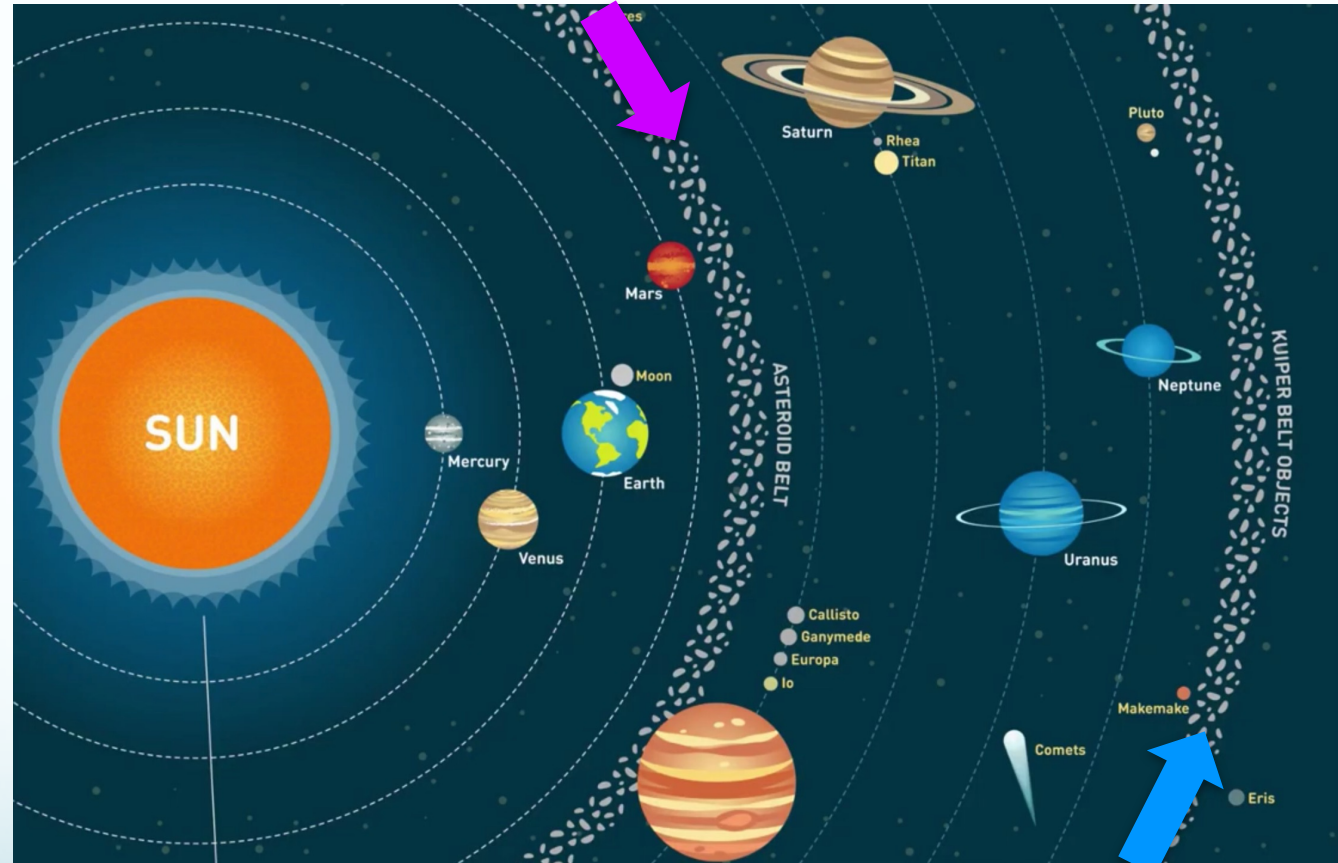


Formation du système Solaire : où sont les archives?



Ceinture d'astéroïdes...

Echantillons d'astéroïdes? Les **météorites!** (et micrométéorites)



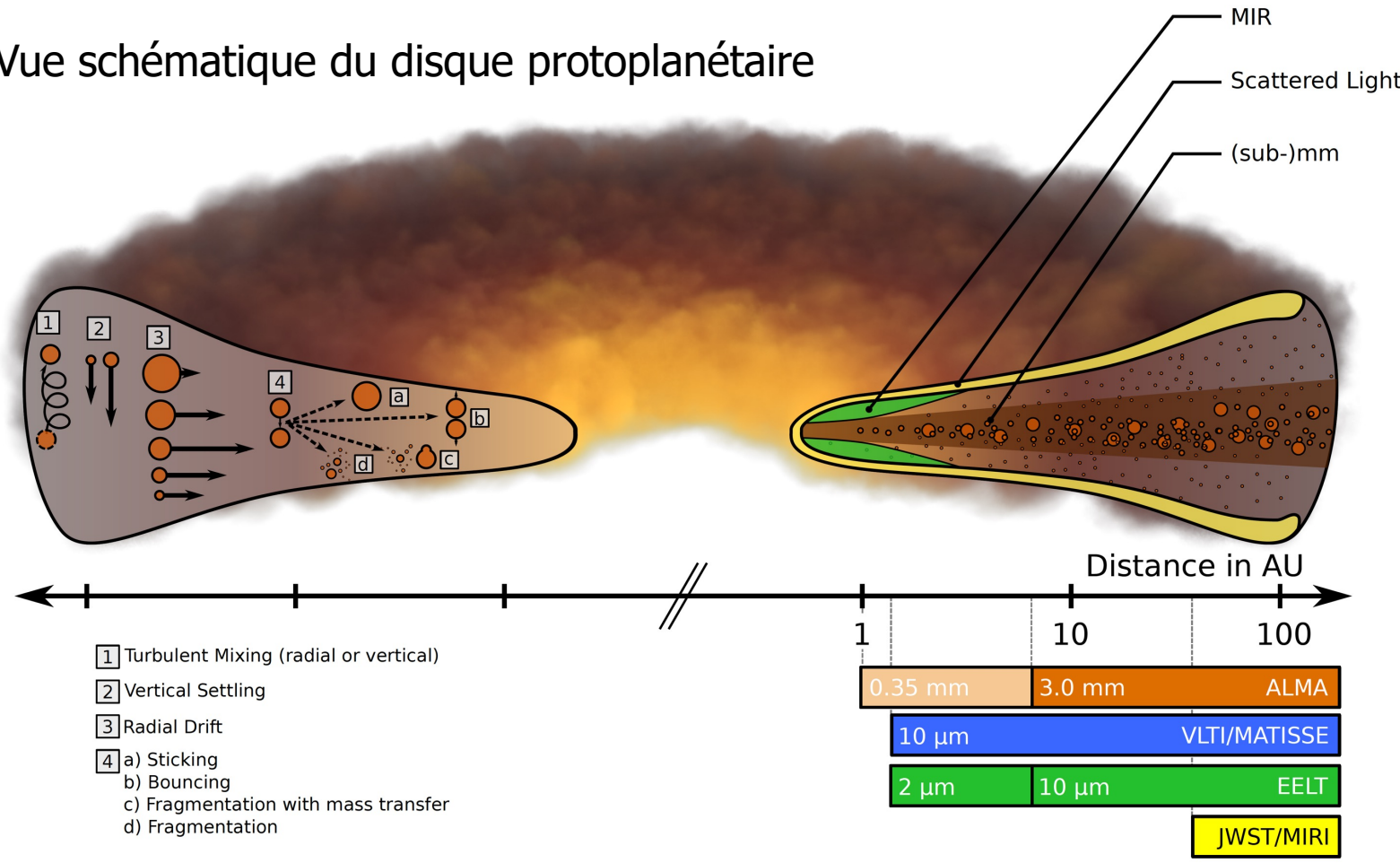
Les comètes... Ceinture de Kuiper... (et nuage d'Oort)
Echantillons de comètes? Les **micrométéorites!**



Quelles informations à partir de ces archives?

1 – Briques élémentaires ayant formé les planètes?

Vue schématique du disque protoplanétaire



- Coordination avec observations astronomiques...



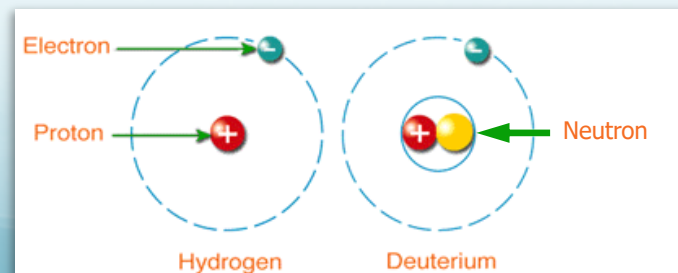
Quelles informations à partir de ces archives?

2 - Origine des océans terrestres?

- Hydrosphère terrestre : **océans** + environ **2x-10x** l'eau des océans dans le **manteau terrestre** (minéraux hydratés)
- Volume des océans ~ **0,12%** volume de la Terre
- Dans le temps, on pensait...
 - Dégazage du manteau il y a plus de 4 milliards d'années
 - Formation des nuages à partir des gaz volcaniques riches en vapeur d'eau
 - Pluies formant peu à peu les océans
- **Plus récemment**
 - Peu d'eau dans la matière qui a formé la Terre (de type « chondrite à enstatite ») – maintenant dans le manteau (?)
 - Et/ou l'eau a été perdue pendant l'impact de formation lunaire
 - Rapport isotopique D/H donne des informations sur l'origine de l'eau...



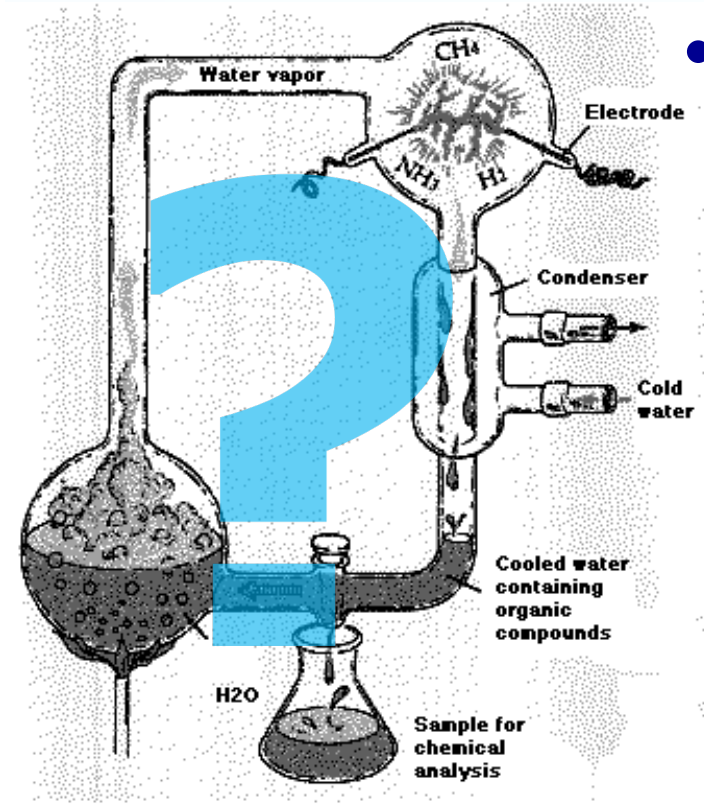
<https://www.cieletespace.fr/article/l-eau-dans-le-systeme-solaire> (en zettalitres = 10^{21} l)





Quelles informations à partir de ces archives?

3 - Origine de la vie sur Terre?



(Miller & Urey 1953)

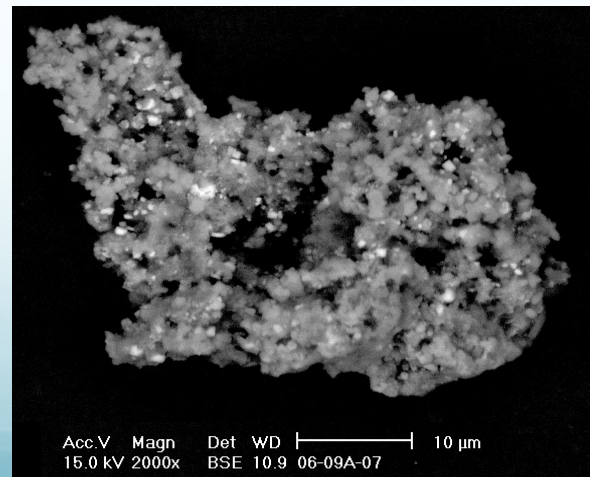
- Apport de matière organique “prébiotique” sur Terre

- Comètes ?
- Astéroïdes ?
- Micrométéorites?



Tim Bertelink

Micrométéorite



Météorite



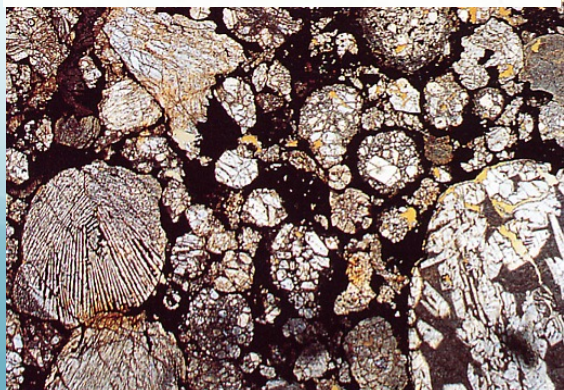
Que sont ces archives?



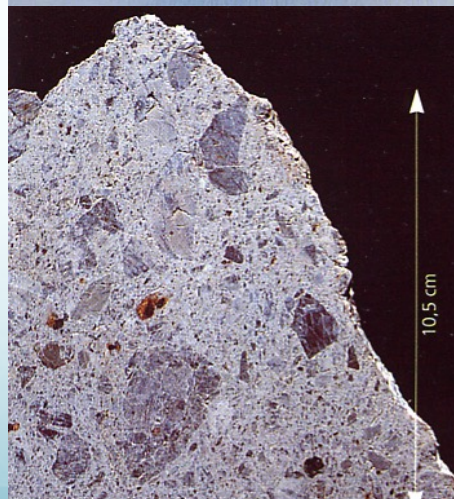
Les astéroïdes $\Rightarrow$ Météorites

- Météorites proviennent des astéroïdes (entre Mars et Jupiter), de la Lune et de Mars
 - Roches de « grande taille » (> 1 cm)
- $\Rightarrow$ Fondues ou altérées par l'eau, l'information initiale peut être perdue...

Chondrites



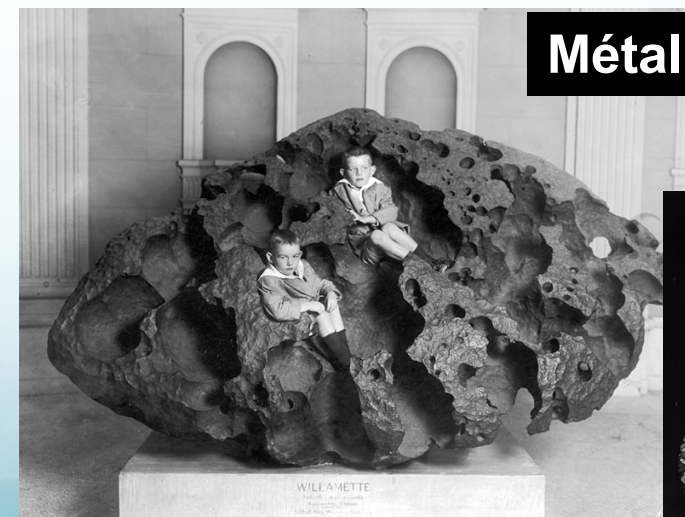
Achondrites



Métal + pierre

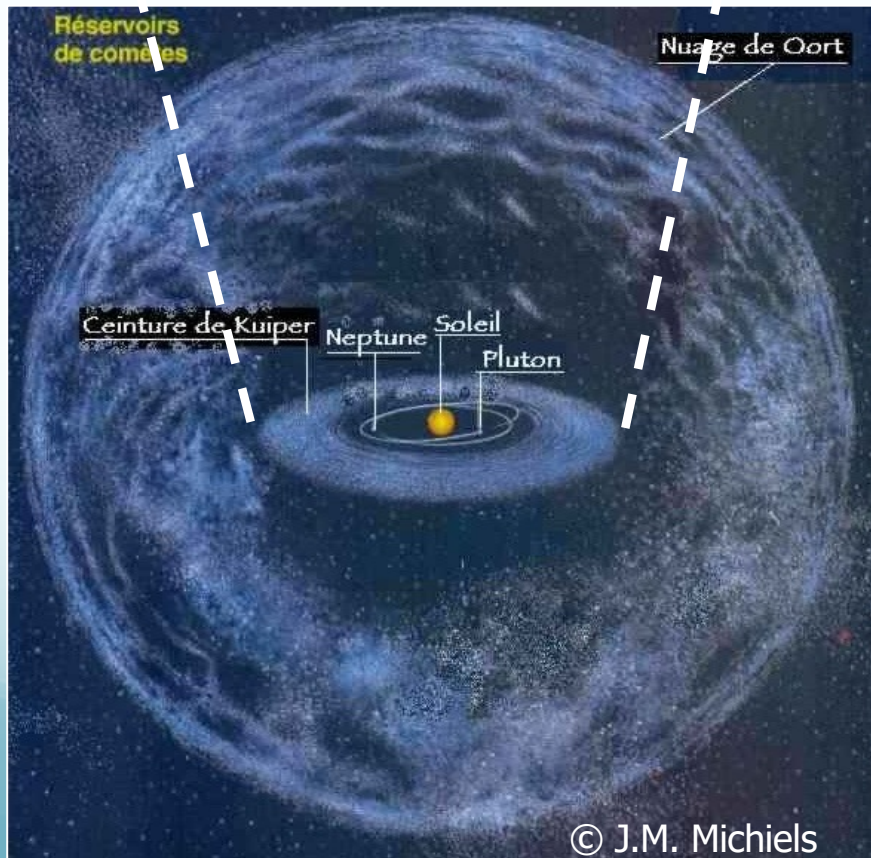
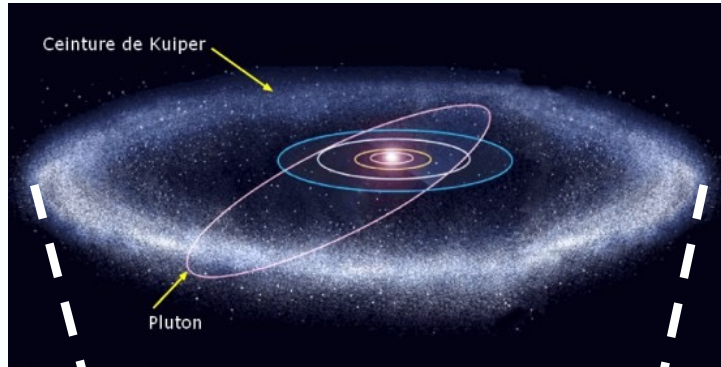


Métal





Les comètes $\Rightarrow$ Poussières cosmiques





Étoiles filantes = 'grosses' micrométéorites (tailles millimétriques)



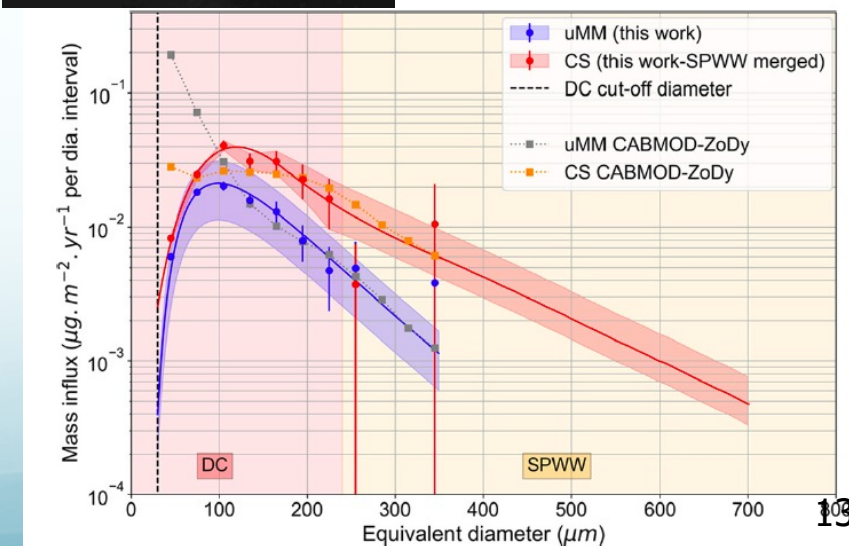
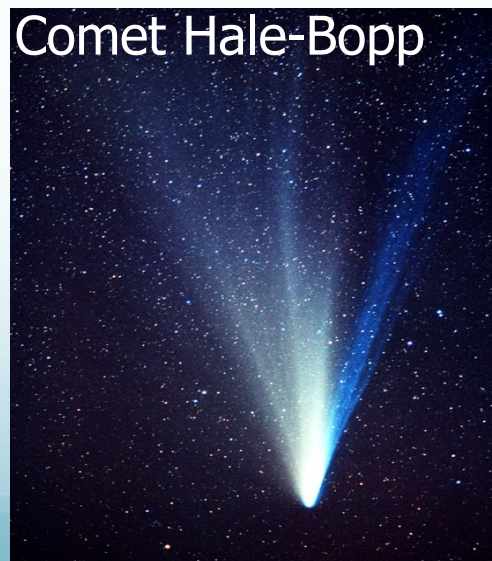
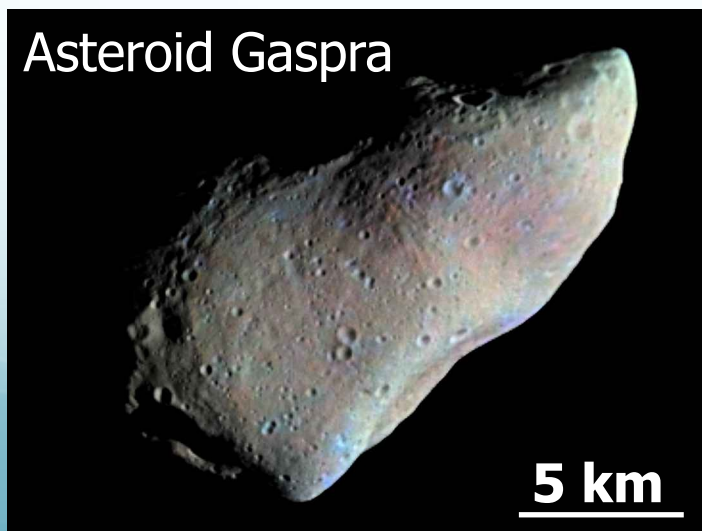
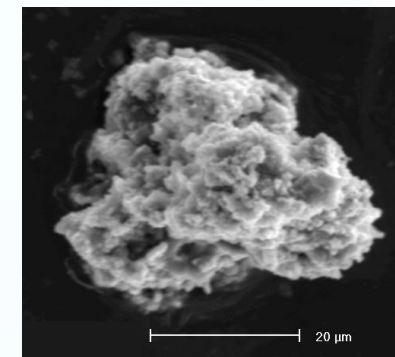
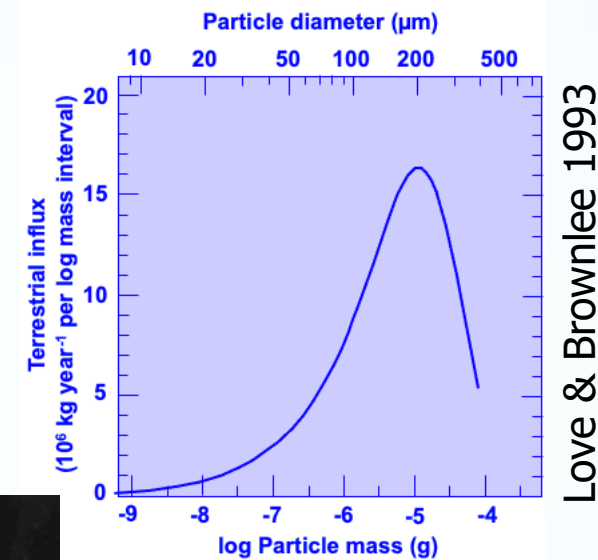
Averse des Léonides 2002

© 2001 Jerry Lodriguss



Poussières cosmiques

- Poussières cosmiques : $5\text{ }\mu\text{m}$ to $\sim 1\text{-}2\text{ mm}$
- **Flux Pre-atm** : $\sim 20\text{ }000\text{ tonnes/an}$ (Love & Brownlee 1993)
 - **1000 x flux des météorites** (10 tonnes/an)
 - Maximum du flux en mass $\sim 200\text{ }\mu\text{m}$
- **Sur Terre** : $\sim 5\text{ }200\text{ tonnes/an}$ (Rojas+ 2021)
- $\sim 80\%$ proviennent des **comètes de la famille de Jupiter?** (Carrillo-Sanchez+2016)





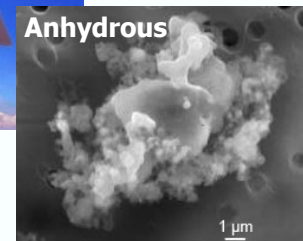
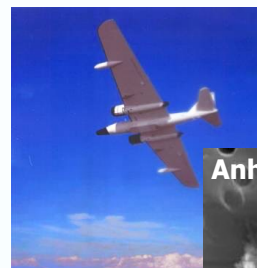
Comment collecter les poussières cosmiques?

- **Collection « Deep Sea »** (depuis 1875...) : sphérules cosmiques : particules fondues et altérées par l'eau
- **Collectes stratosphériques** (NASA) depuis les années 70 : **IDPs** (5-50 μm)
- **Collectes Urbaines**
 - Toits des bâtiments (principalement fondues)
- **Collectes Polaires** depuis les années 80 (Groenland puis Antarctique): **Micrométéorites** (F, J, US, I)
 - Dans la glace et la neige: 20 - 500 μm
 - Dans les sédiments (Transantarctic Mountains) : ~200 - 2000 μm (principalement fondues)

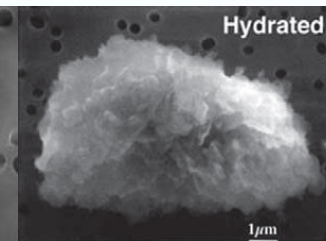


(Murray & Renard 1891)

HMS Challenger

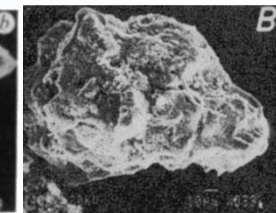
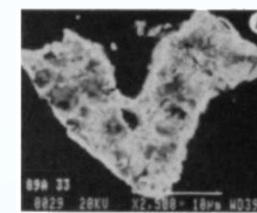


Anhydrous

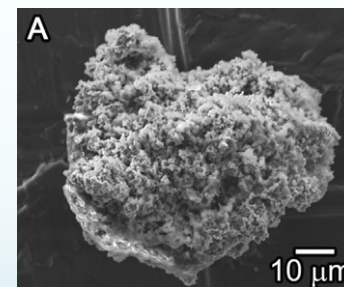


Hydrated

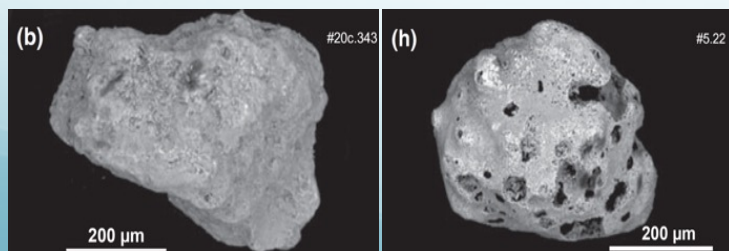
Taylor+2016



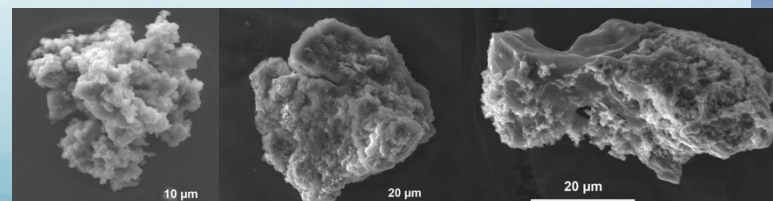
Maurette+1991



Noguchi+2015



Van Ginneken+ 2012



Duprat+ 2007, 2010

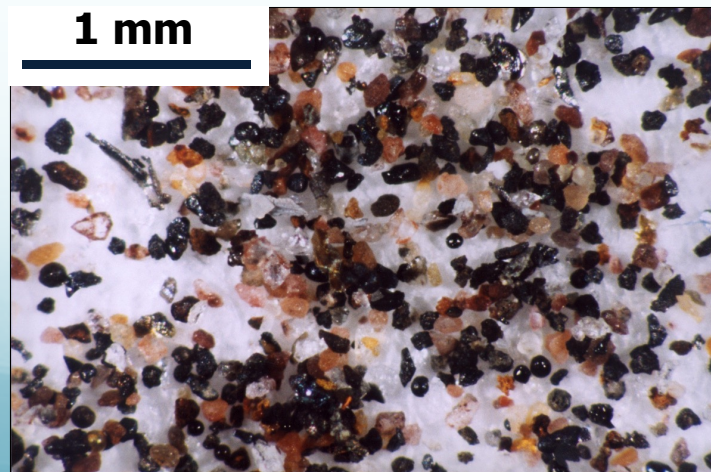
- Groenland Blue Lake I et II (1984 & 1987)



➤ **Premières micrométéorites non fondues**

Maurette+ 1987 (*Nature*)

- Antarctique : Blue Ice (1988, 1991, 1994 & 1998)

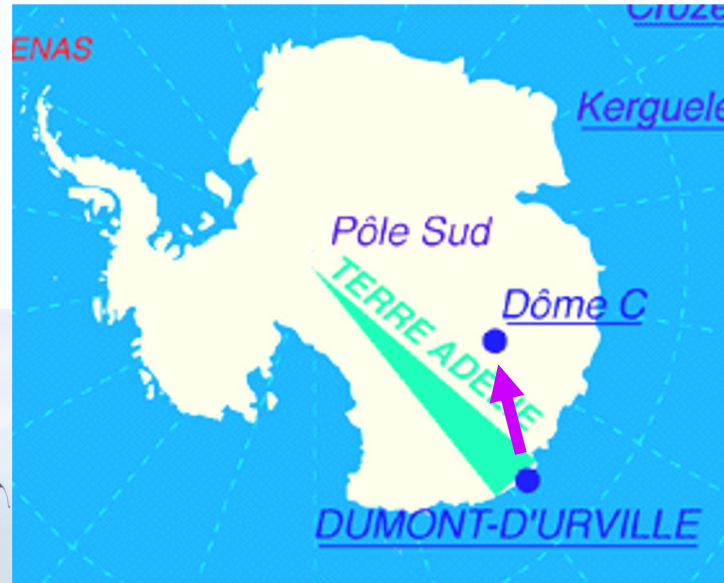


M. Maurette+ 1991 (*Nature*)

Terre Adélie : Base de Dumont d'Urville



De Terre Adélie à Dôme C



Le « raid » (pour le matériel lourd et le fuel)



M. Godard, L. Delauche, J. Duprat



2000-2019 : Collectes dans les régions centrales antarctiques



Collectes à Dôme C (2000-2019)

ARCHIVES



Tranchée de ~5m de
profondeur



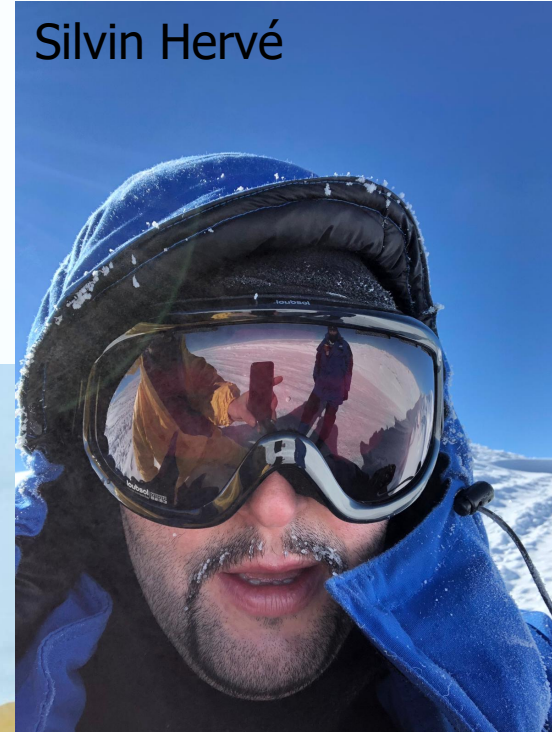
Dôme C : des collègues pas toujours faciles à reconnaître!

Marie Godard

Lucie Delauche



Silvin Hervé



Franck Fortuna



F. Fortuna

E. Dartois

S. Hervé

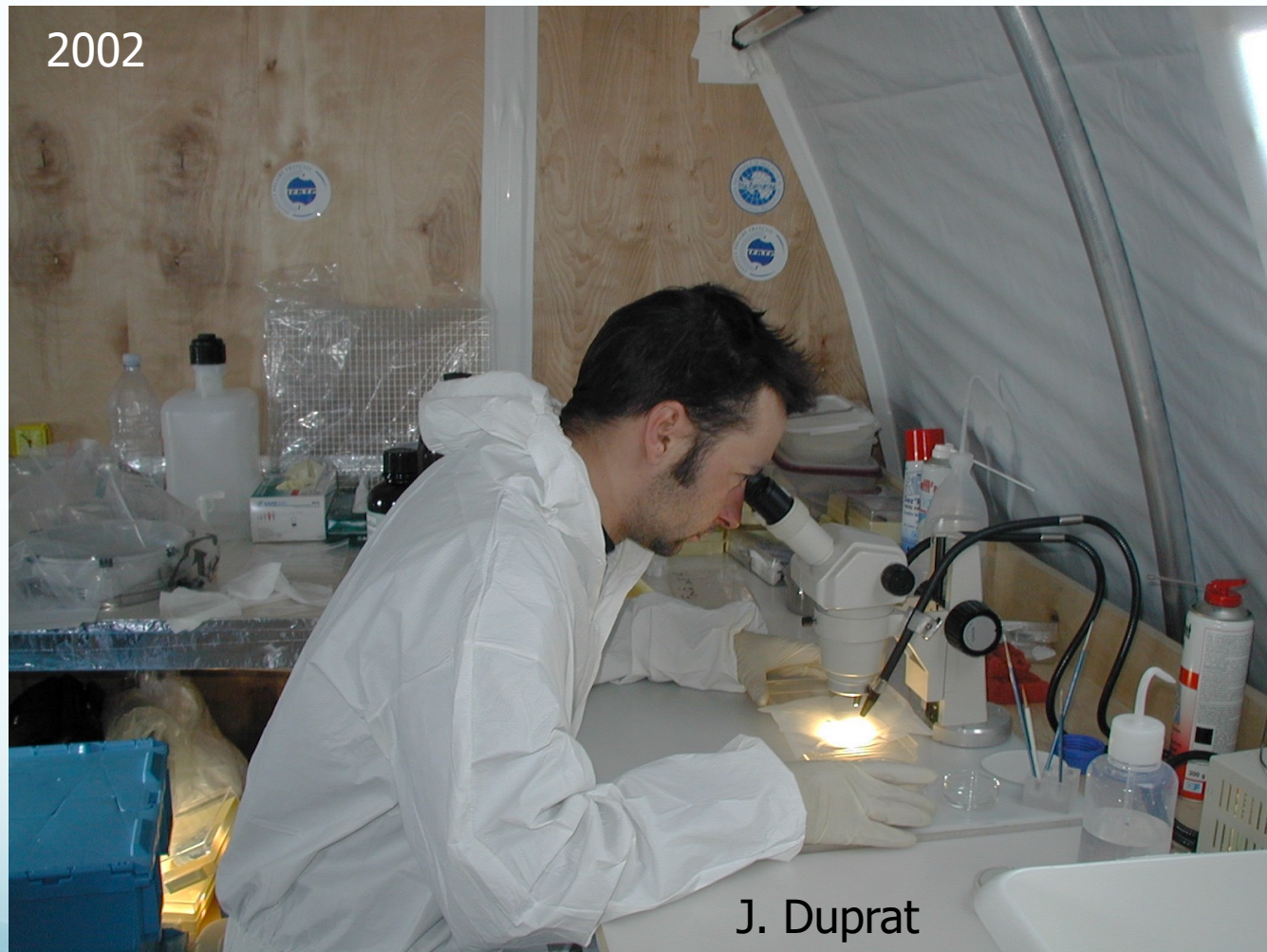


Dôme C : Fonte/filtration de la neige



La neige est fondue dans un fondeur inox à double cuve

Contrôle de la qualité de collecte sur place



- Les filtres sont pré-examinés sur le terrain

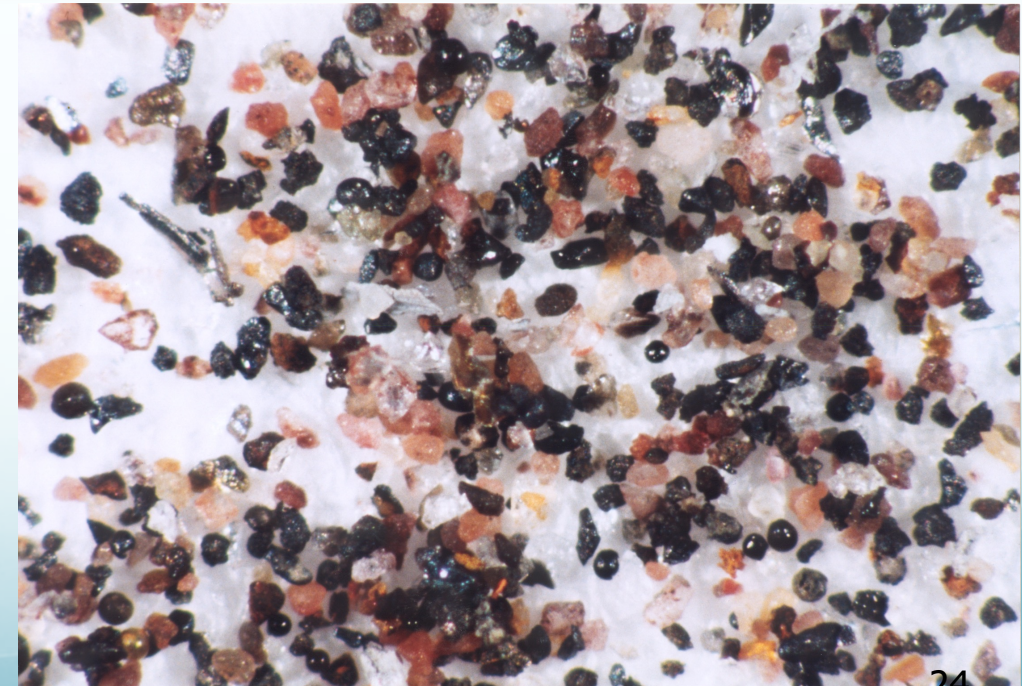
Collection CONCORDIA

- > 5000 micrométéorites (Dome C 75°S, 123°E)
- Micrométéorites très bien préservées
- Campagnes 2000, 2002, 2006, 2014, 2016 & 2019





Salle blanche MYRTHO (IJCLab)



- Tri des particules en salle blanche
- Préparation d'échantillons



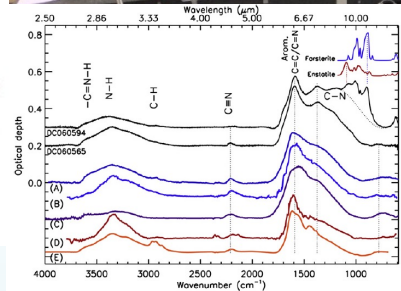
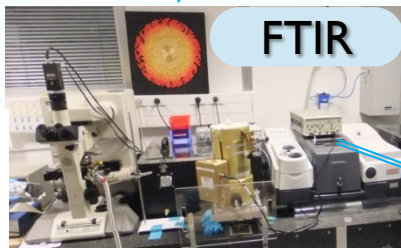
Micromanipulation & fragmentation



Organiques Solubles (Orbitrap, NanoUPL)



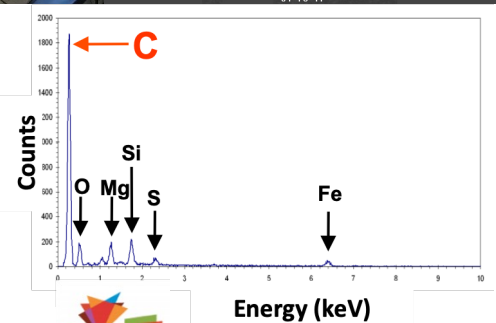
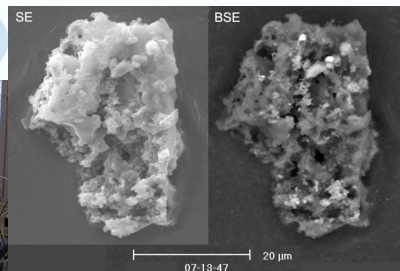
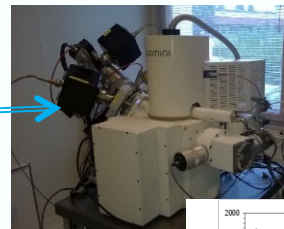
FTIR



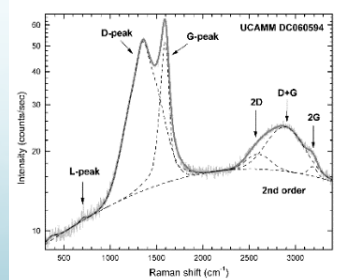
EPMA



SEM + EDX



Raman



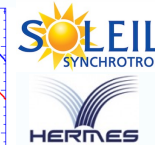
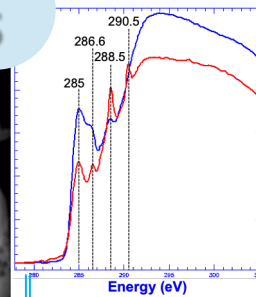
Gaz rares

CRPG

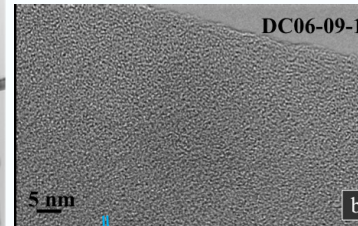
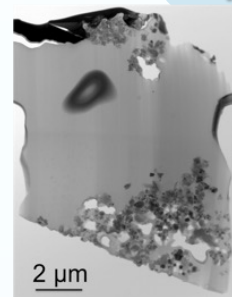
section FIB



STXM + XANES



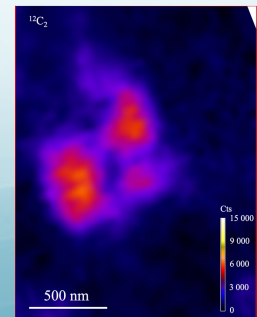
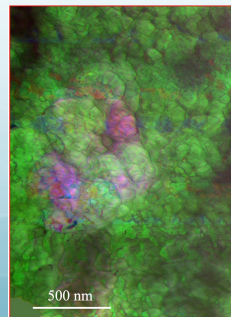
TEM



AFM-IR

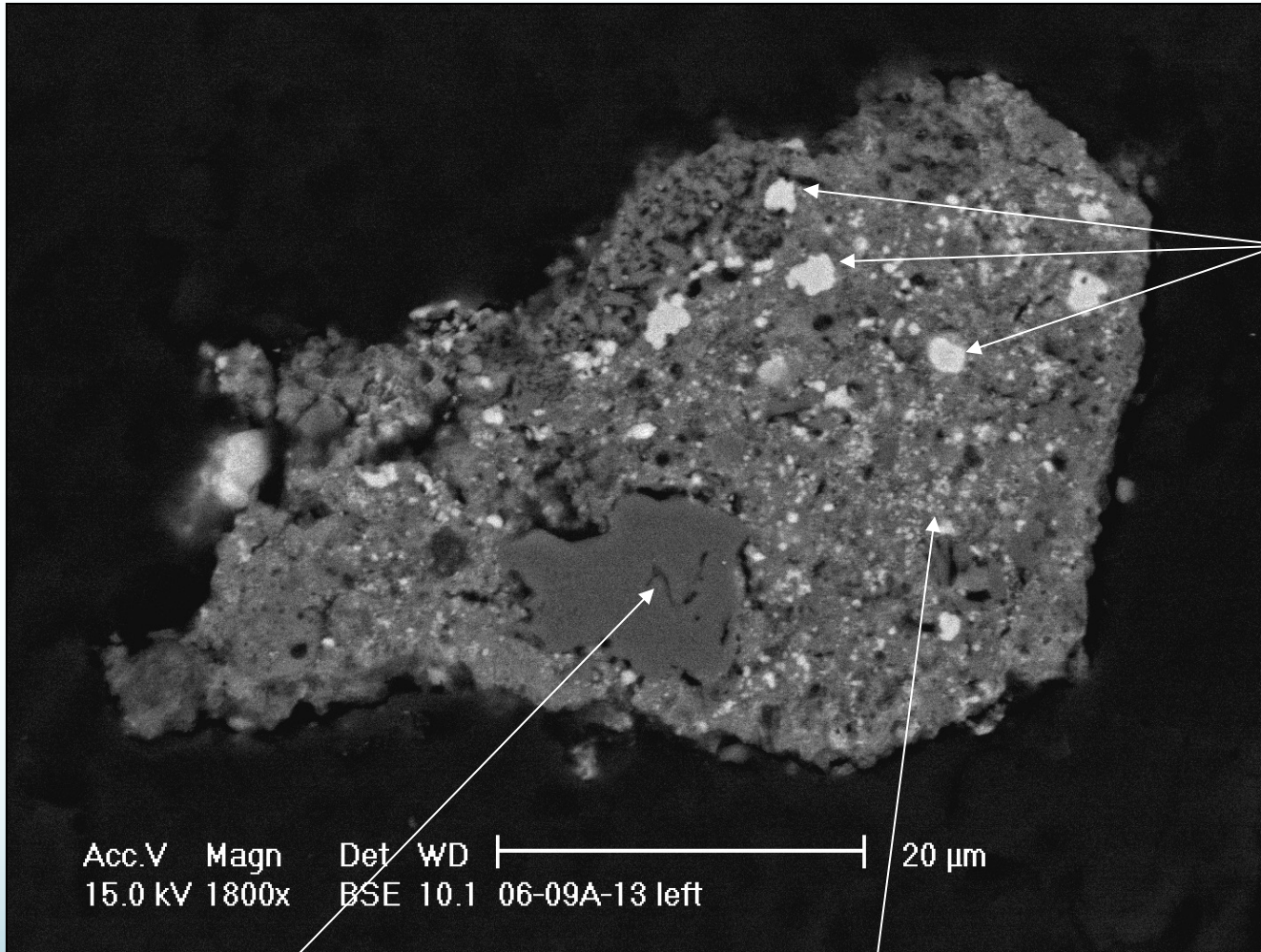


NanoSIMS



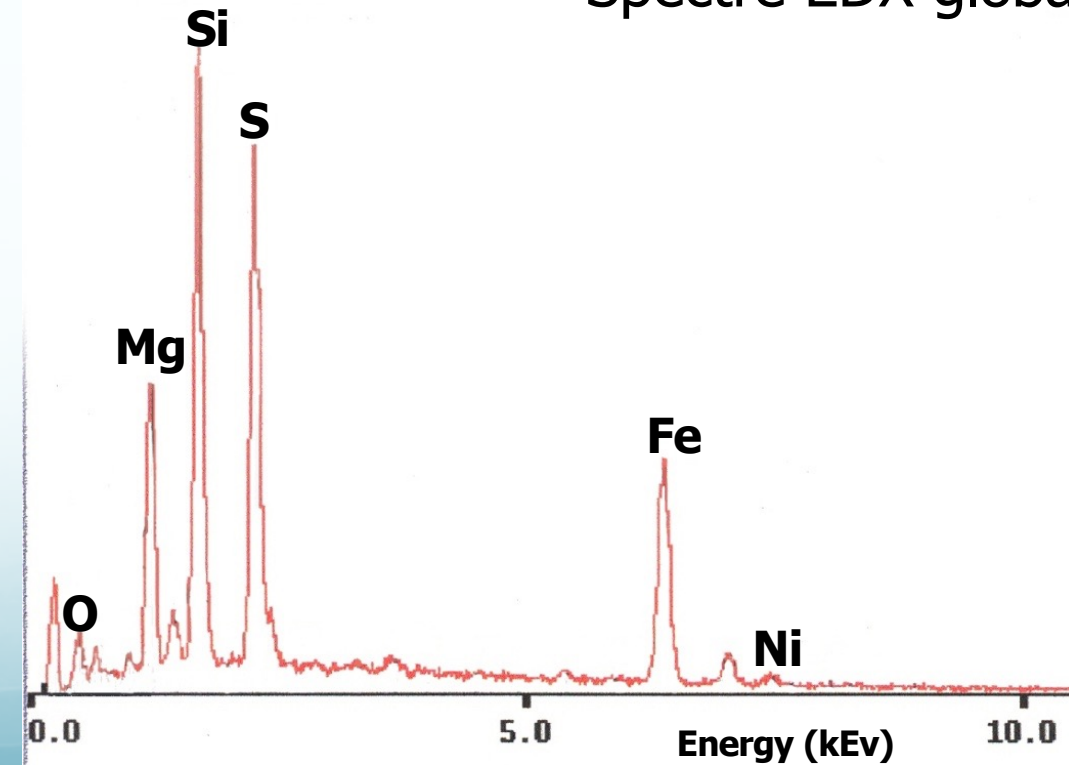


Micrométéorite Concordia



Sulfures de Fe-Ni

Spectre EDX global

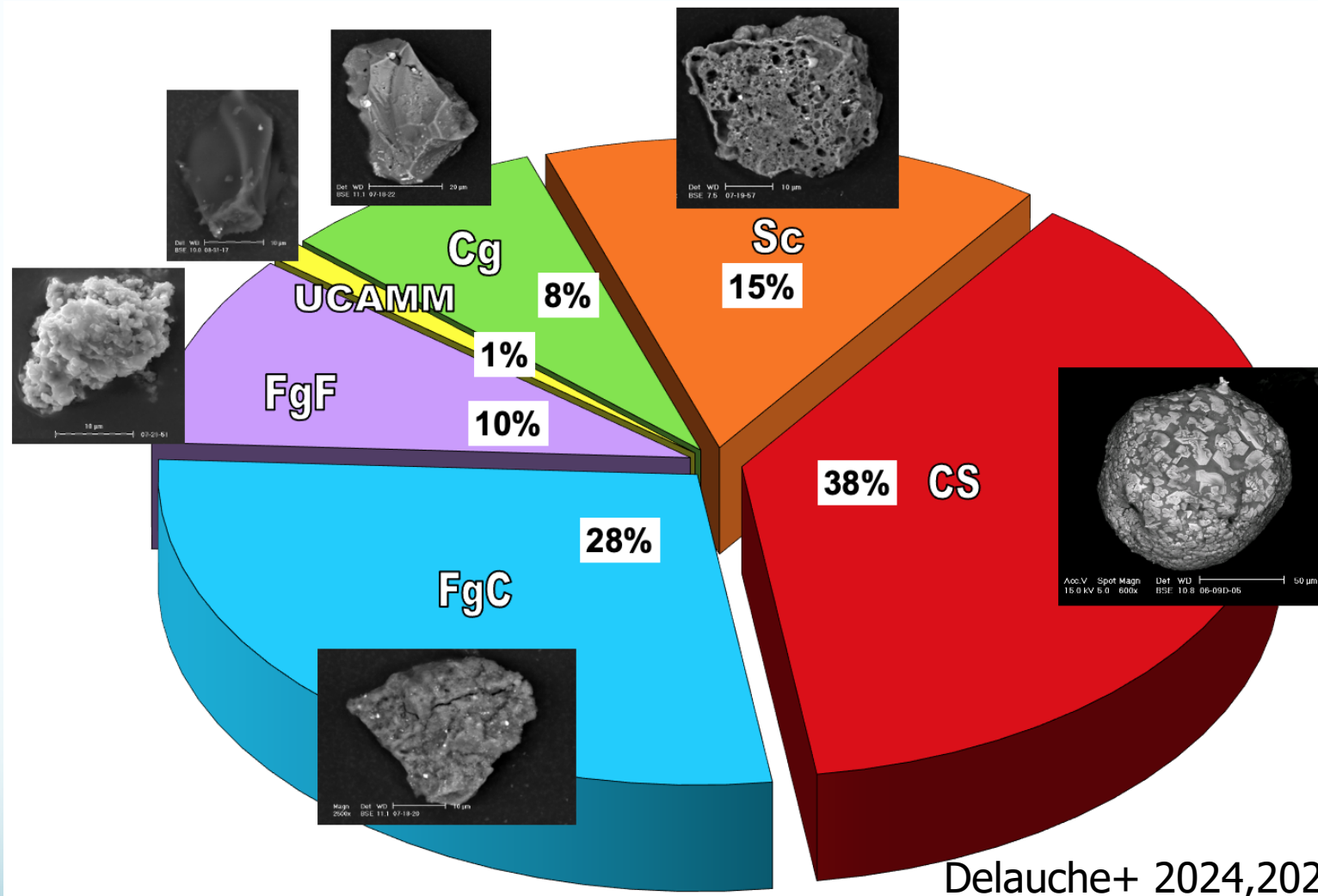


Olivine (Fo_{96})

'Matrice'
(minéraux anhydres et
hydratés, matière carbonée)



Classification des MMs Concordia



Unmelted

- **Cg** : Coarse-grained
- **UCAMM** : Ultracarbonaceous Antarctic MM
- **FgF** : Fine-grained Fluffy
- **FgC** : Fine-grained Compact

Partially melted

- **Sc** : Scoria

Melted

- **CS** : Cosmic spherule

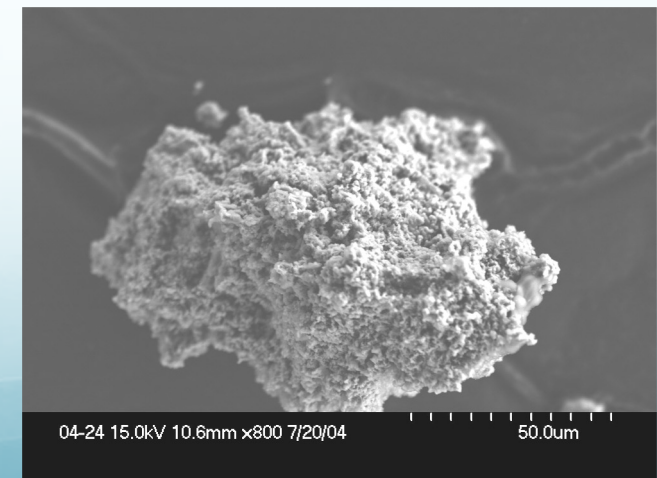
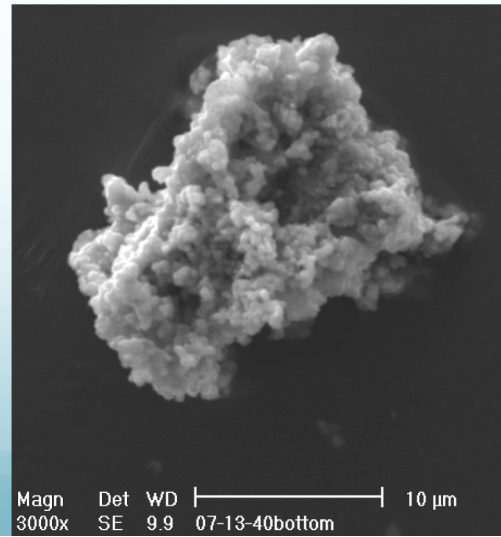
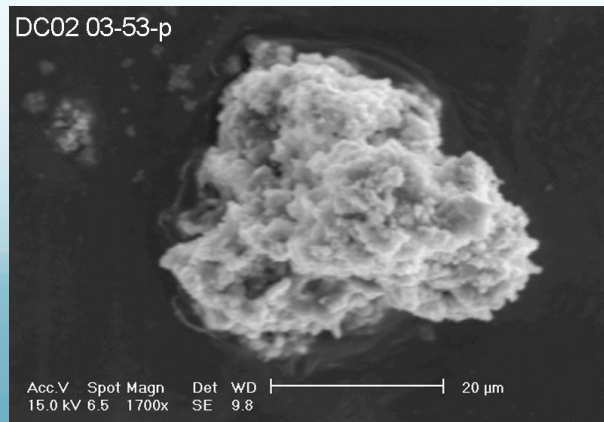
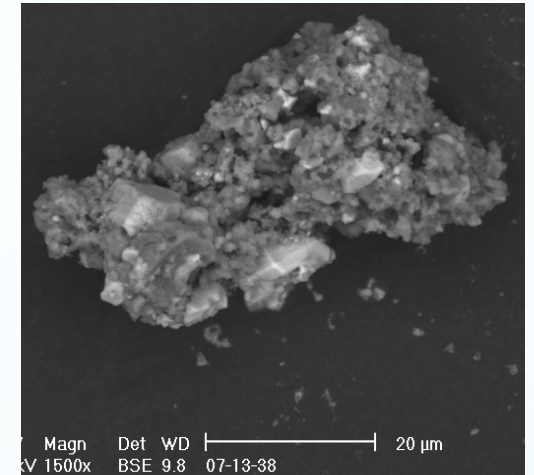
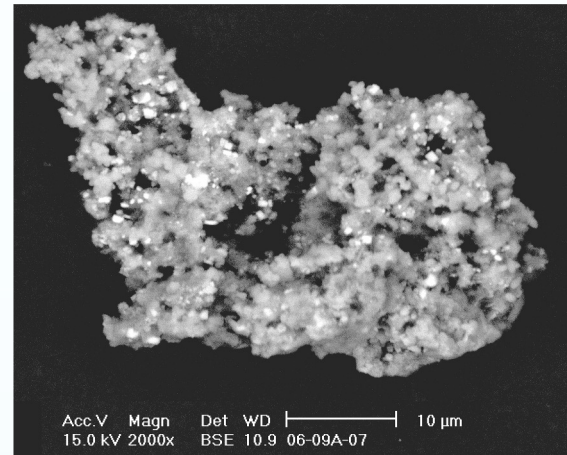
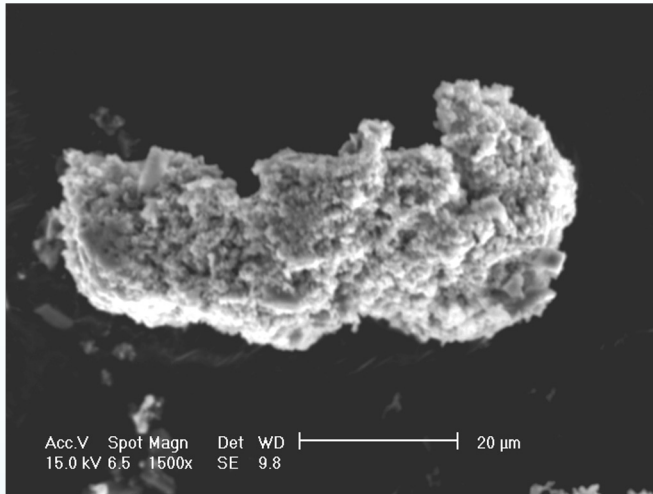
- Gamme de taille: 20-250 μm ; taille moyenne $\sim 45 \mu\text{m}$

1 – Briques élémentaires ayant formé les planètes?



Micrométéorites Concordia

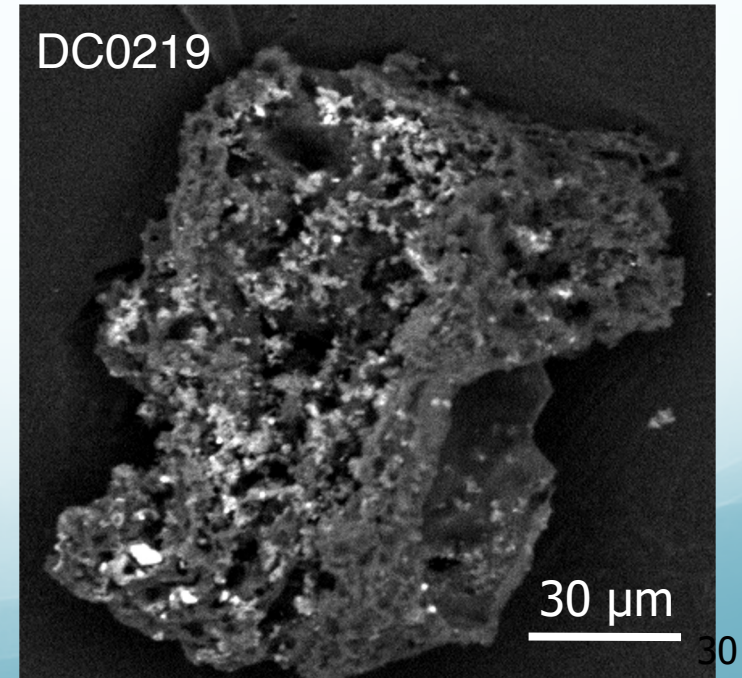
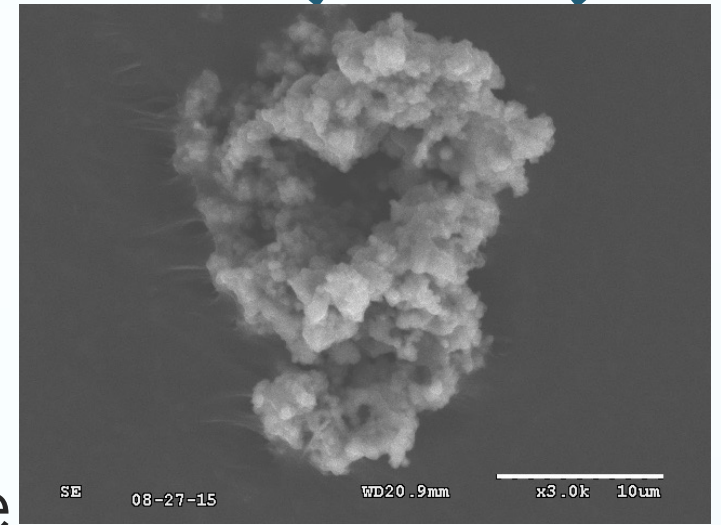
- Petits grains de taille minimum ~ 50 nm se sont agrégés en poussières
- Minéralogie « déséquilibrée » (mélange mécanique dans le disque protoplanétaire)





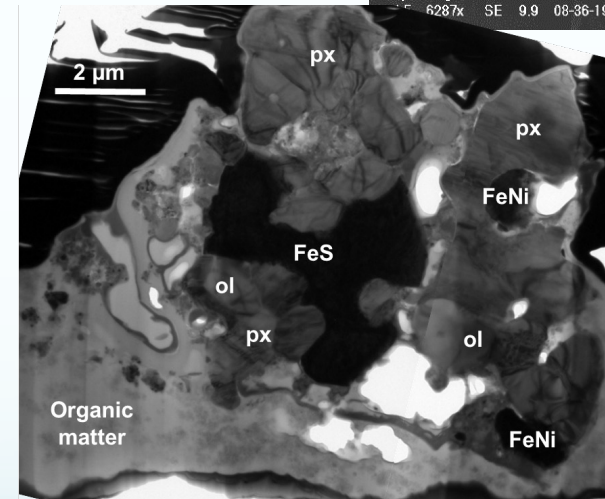
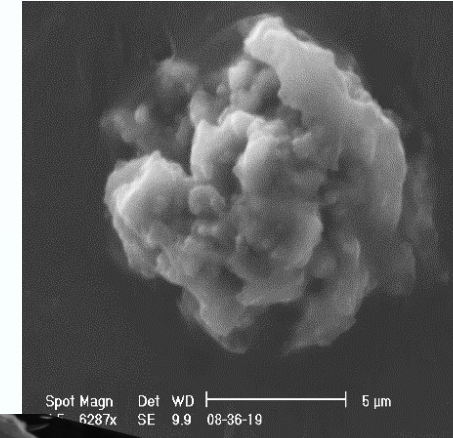
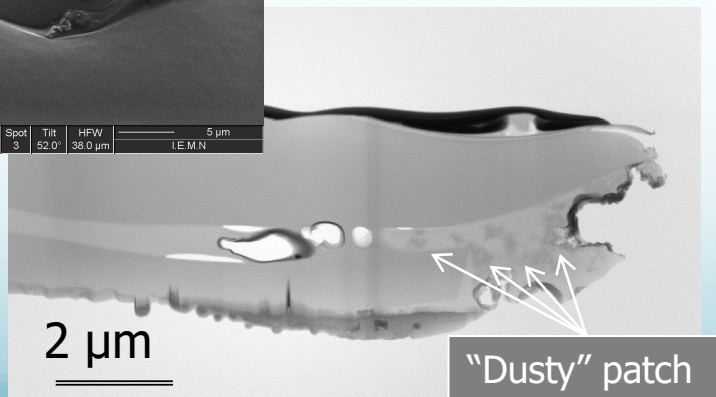
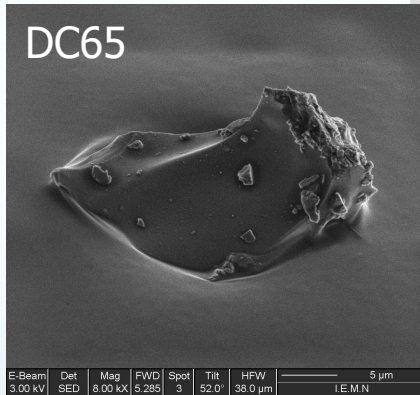
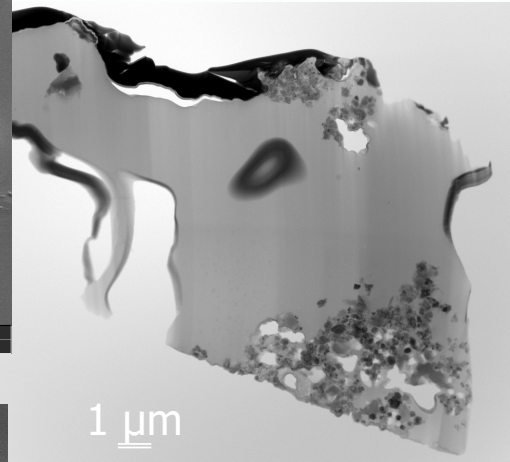
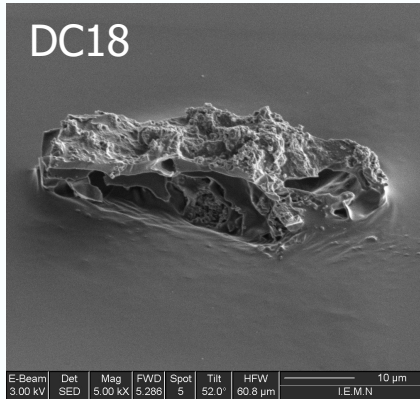
Deux familles de micrométéorites (MMs)

- **MMs Chondritiques**
 - 99% du flux de MMs
 - Rapport D/H ~ terrestre
 - C ~ 2 wt%
 - Similarités avec CCs et Stardust (comète Wild2)
- **MMs ultracarbonées (UCAMMs)**
 - ~ 1% du flux de MMs
 - Rapports D/H >> terrestres
 - Jusqu'à 65 wt% C, N/C ~ 0.05-0.2
 - Similarités avec particules CHON (comète Halley)



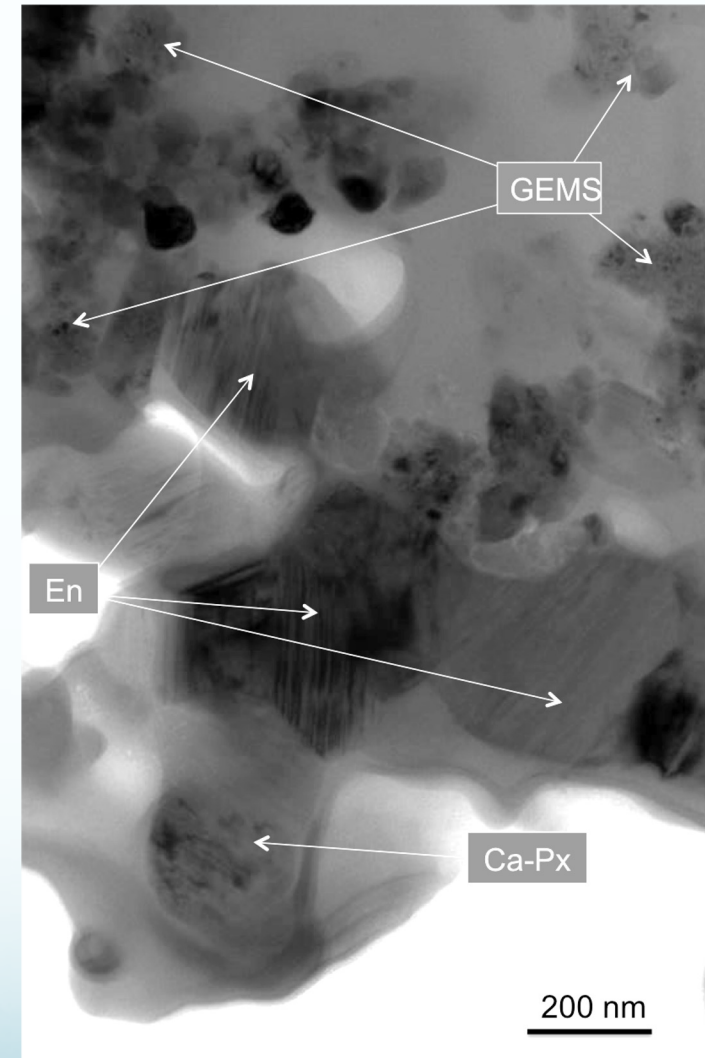
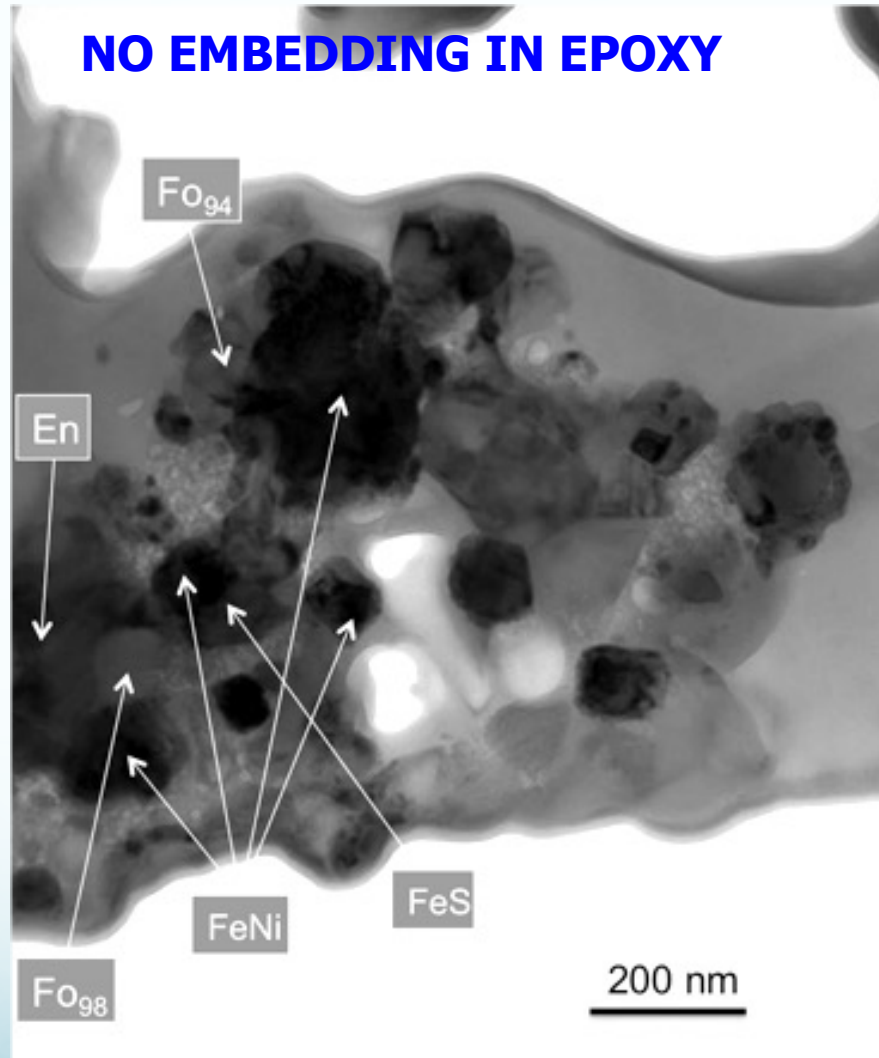


UCAMMs : Mélange intime MO et minéraux



(100 nm FIB Sections - **No epoxy** :
D. Troadec IEMN Lille)

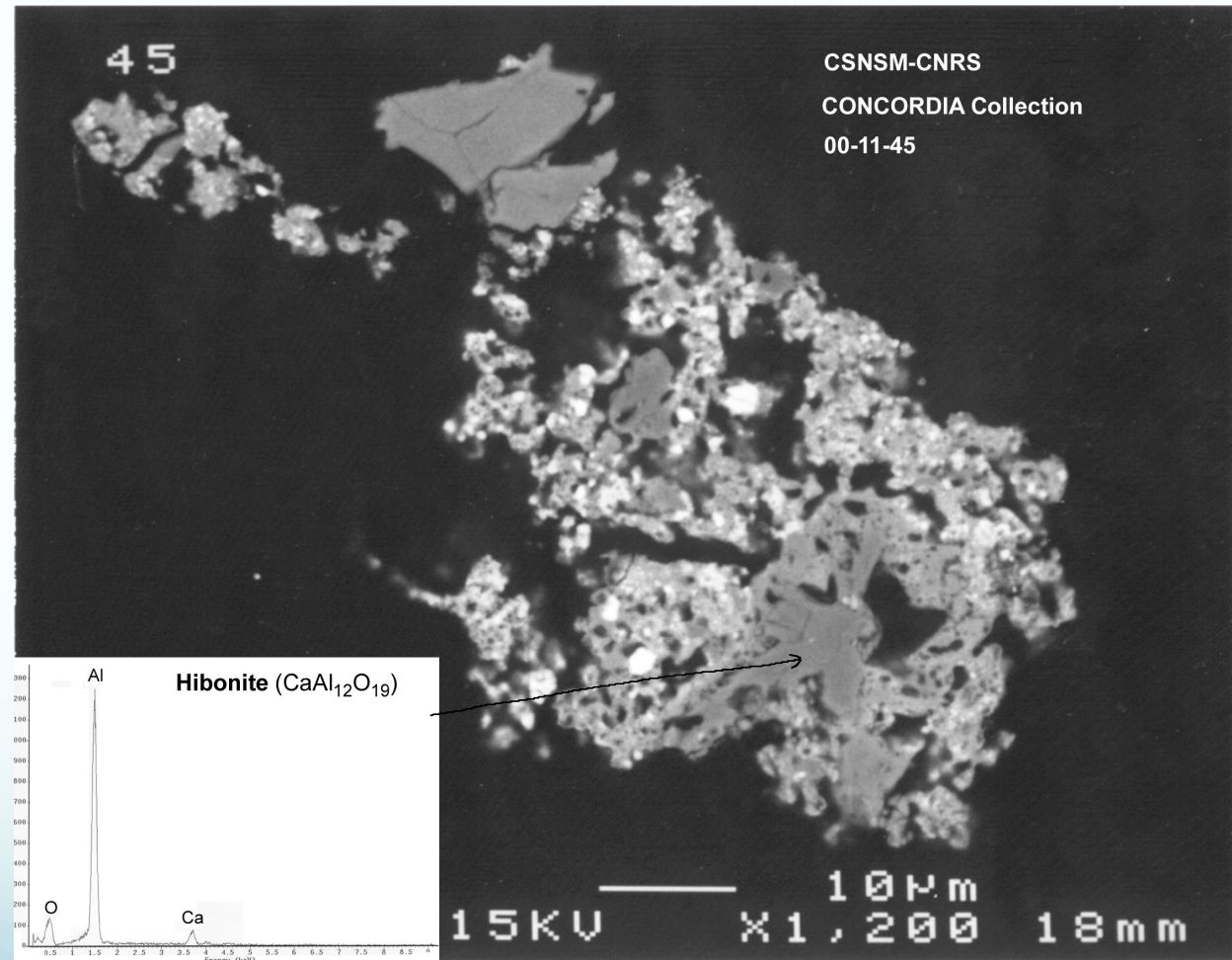
UCAMMs : Intimate mixing OM & Crystalline + Glassy phases



Engrand+ 2024



Les premières phases minérales du Système Solaire

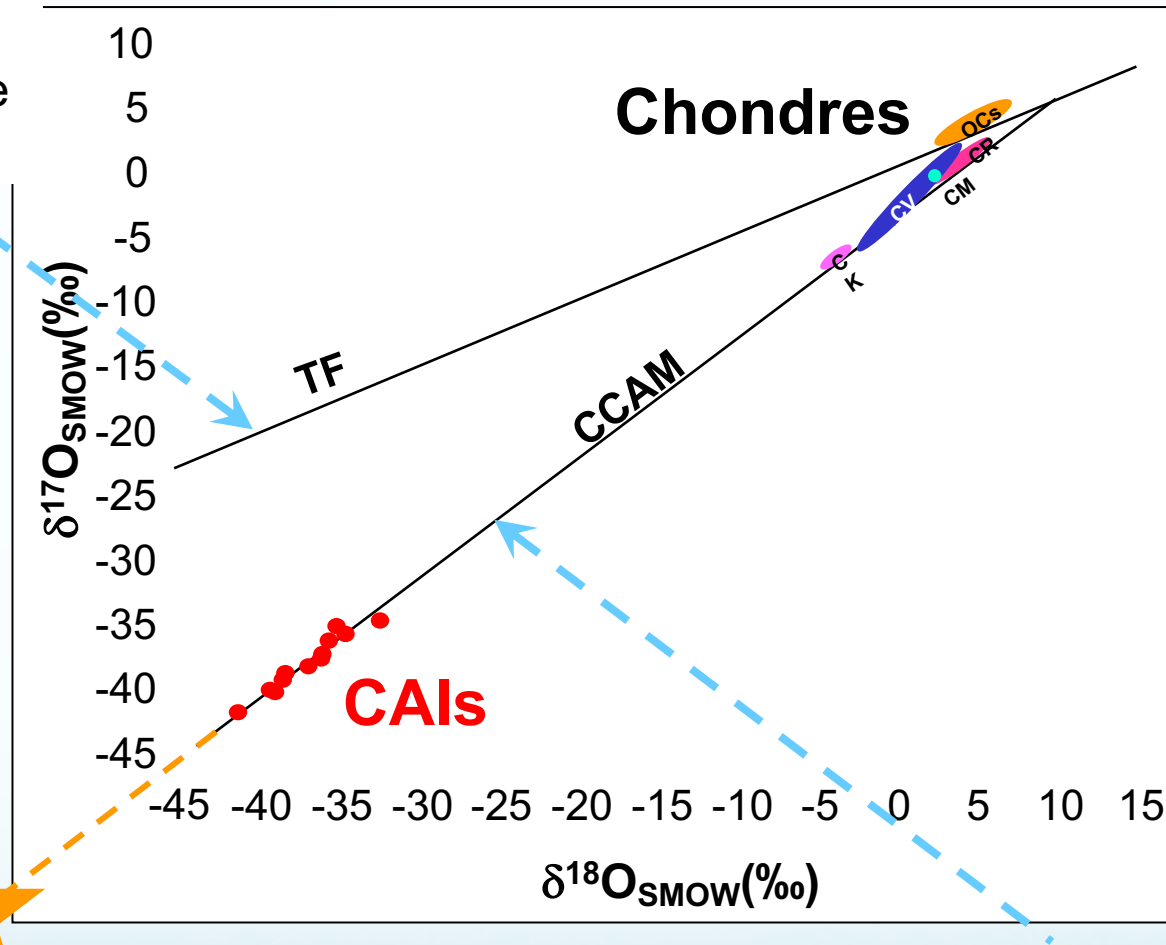


- Datation (météorites) = âge du système solaire 4,568 Ga



Isotopes de l'Oxygène

Pente 1/2:
droite terrestre
– MF –



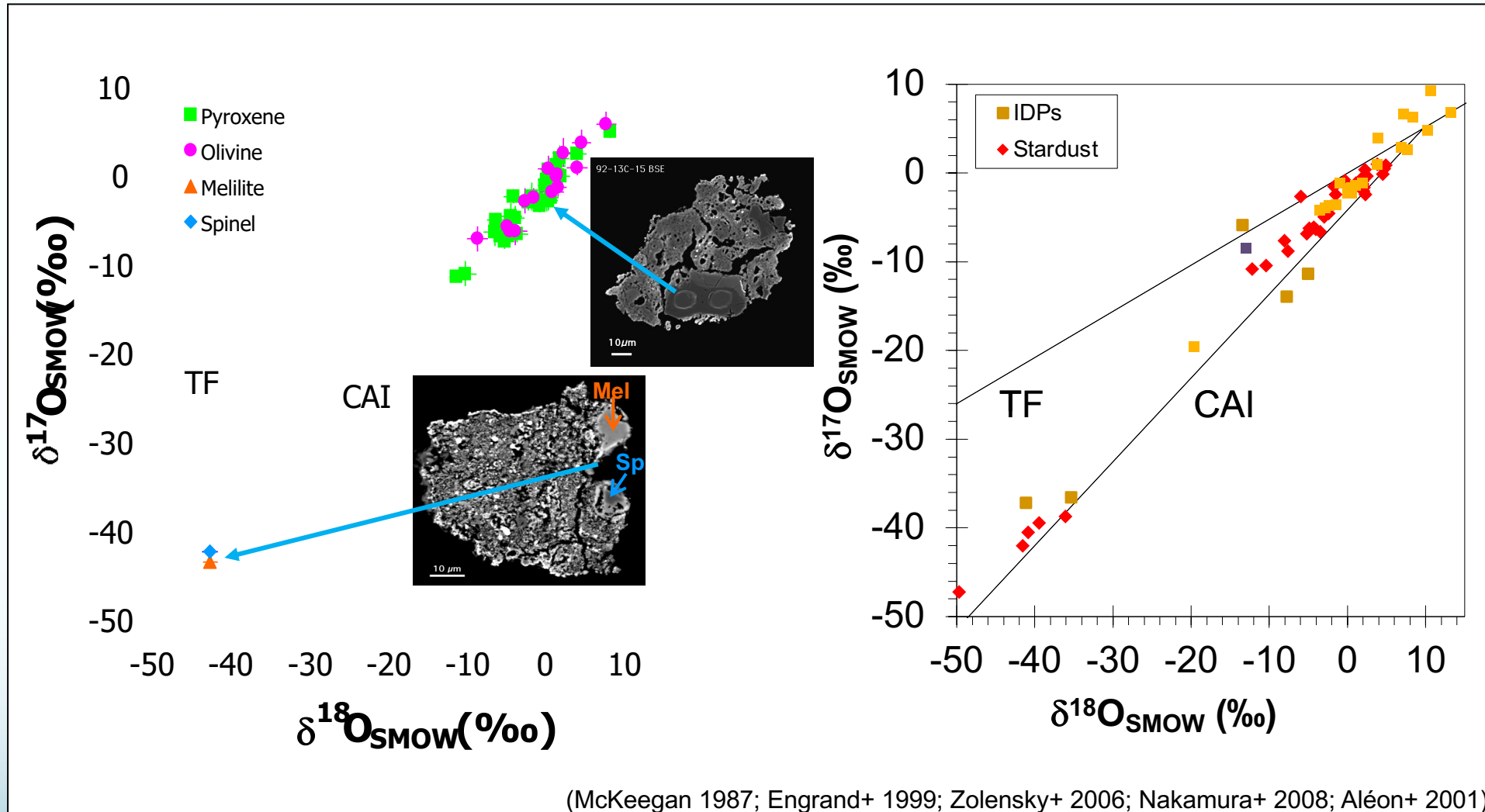
Soleil riche
en ^{16}O

(Hashizume & Chaussidon 2005, 2009)
(McKeegan et al. 2009, 2010)

Pente 1 : Droite des météorites
IMF : mélange entre deux réservoirs
ou fractionnement isotopique non
dépendant de la masse : **débat...**



Isotopes de l'oxygène

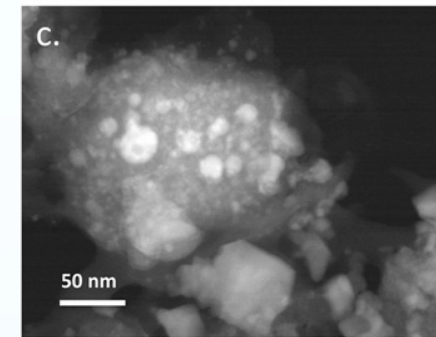
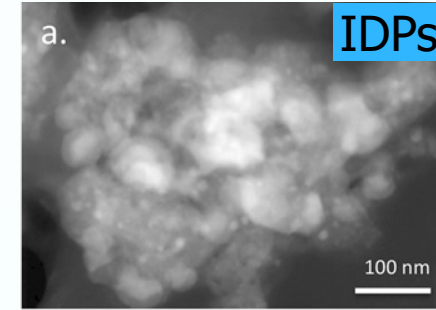


- Continuum astéroïdes-comètes

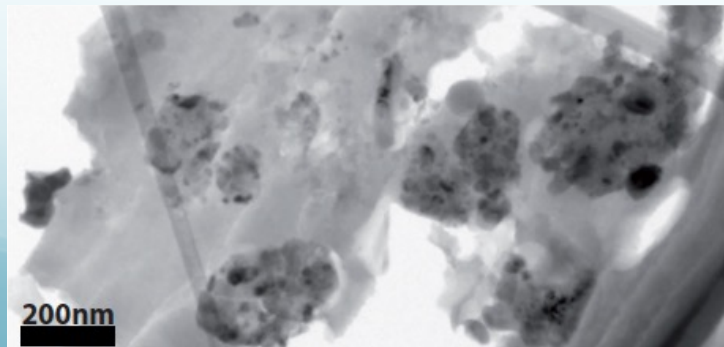
Phases vitreuses “GEMS”

- GEMS: Glass with Embedded Metals and Sulfides (Bradley+ 1994)
- Similaires (?) aux phases amorphes du milieu interstellaire?
- Origine présolaire débattue
- Phases présentes dans tous les objets primitifs

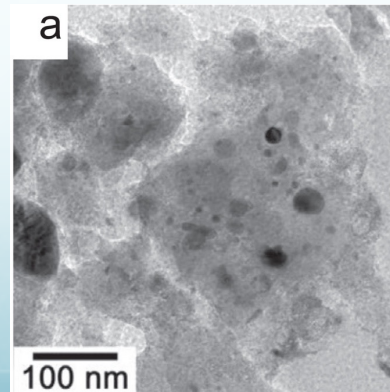
=> Briques de la formation planétaire?



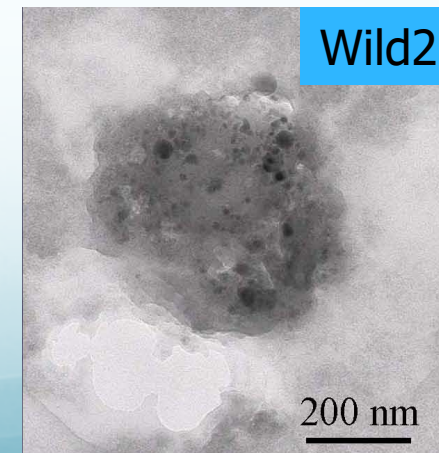
Bradley+1994 to Ishii+2018



Dobrica+2012



Yabuta+2012

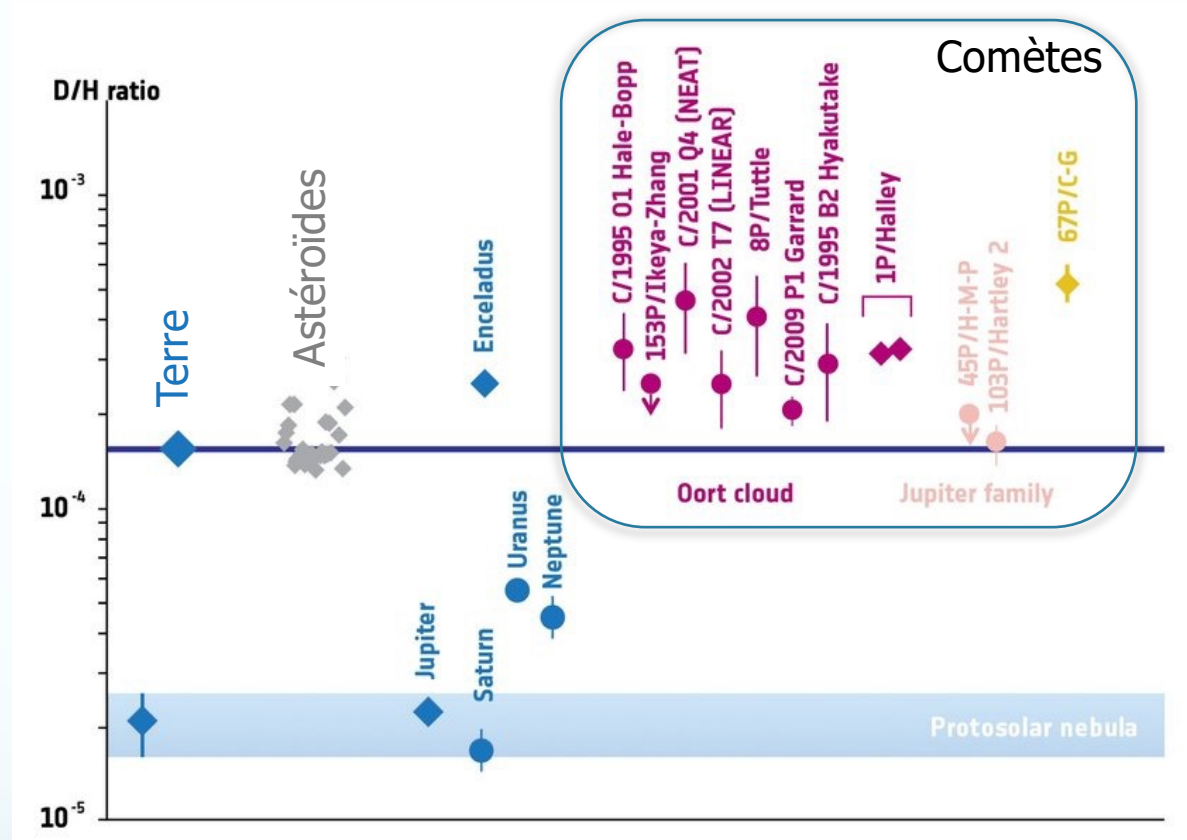


Leroux+2008

2 – Origine des océans?



Rapports D/H de l'eau : un indice précieux pour son origine sur Terre



Source: ESA (2017)

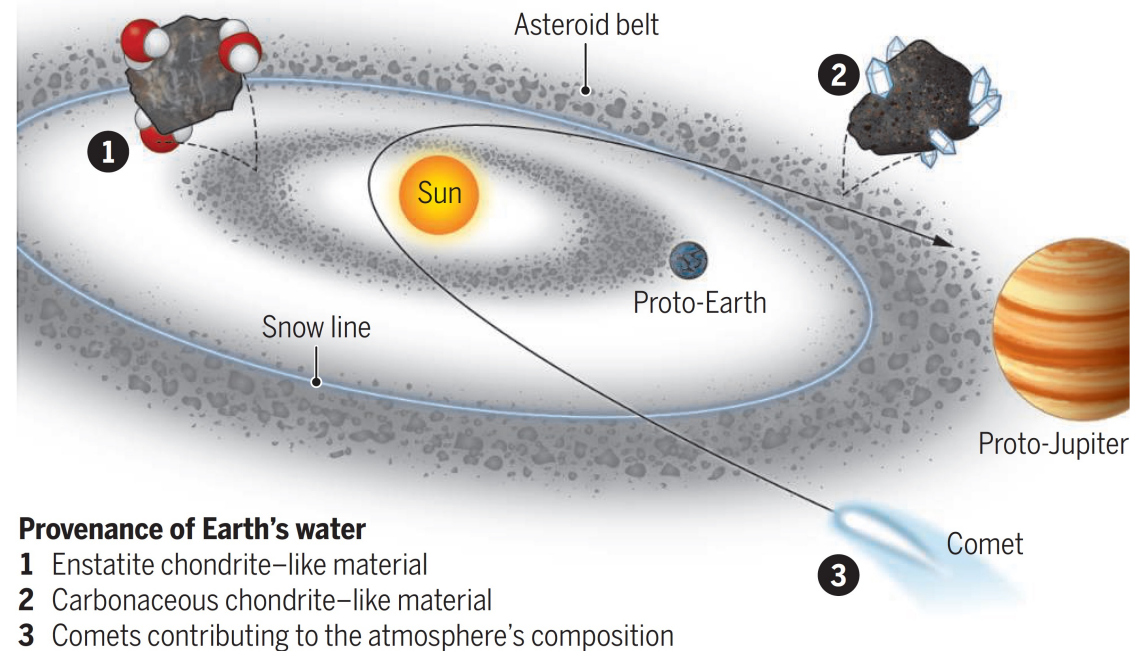
- $D/H_{\text{Terre}} = 0.015\%$ (150 ppm)
- $D/H_{\text{Météorites(astéroïdes)}} \sim D/H_{\text{Terre}}$
- $D/H_{\text{Comètes}}$ entre D/H_{Terre} et $4 \times D/H_{\text{Terre}}$



Origine des océans : des théories qui évoluent...

Sources of Earth's water

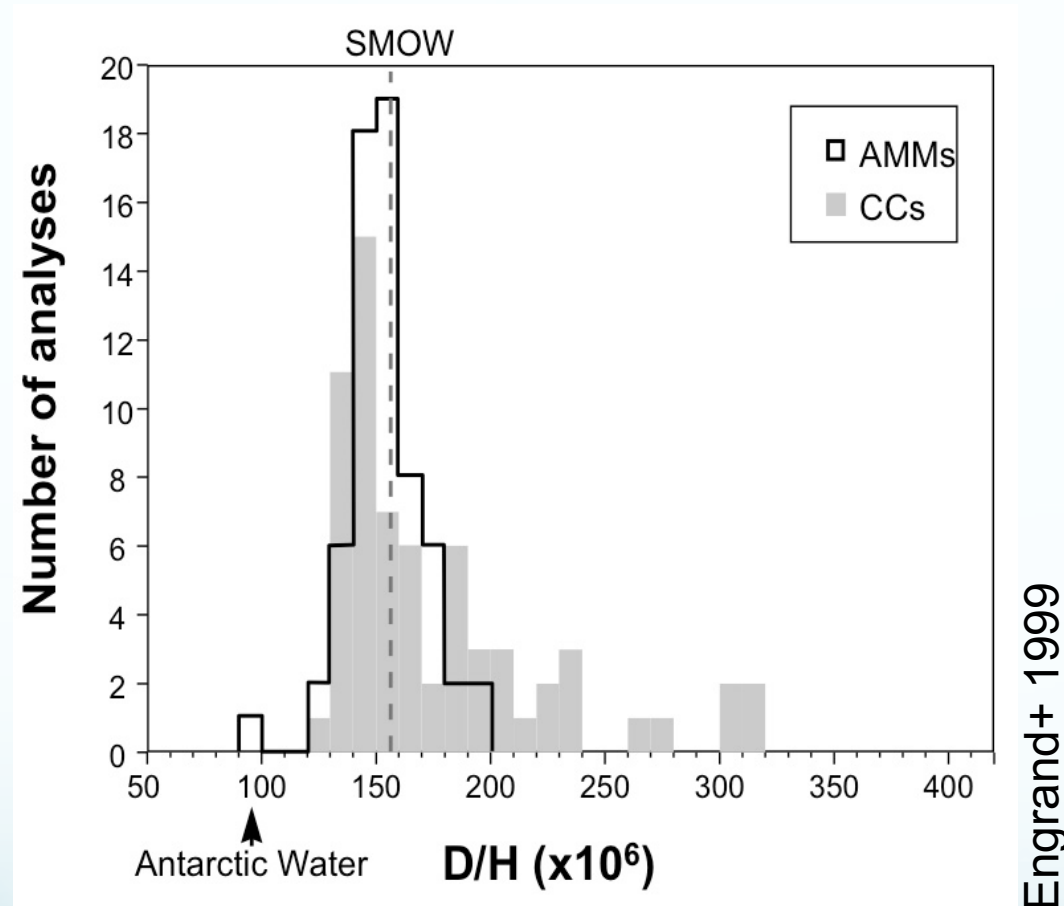
New measurements of enstatite chondrites indicate that water could have been primarily acquired from Earth's building blocks. Additional water was delivered to Earth's early oceans and atmosphere by water-rich material from comets and the outer asteroid belt.



- Un peu **d'eau était présente** dans la matière qui a formé la Terre (mais le D/H correspond plutôt à **l'eau du manteau terrestre**)...
- Les **météorites/micrométéorites** ont apporté leur part : **eau des océans**
- Les **comètes** ont contribué un peu (~20%?), en particulier pour **l'atmosphère**



Rapports D/H des MMs



- Composition isotopique de l'eau dans les MMs:
 - Similaire à l'eau des océans terrestres (Standard Mean Ocean Water - SMOW)
- $H_2O_{MMs} : \sim 0,3 \times H_2O_{océans}$
(e.g. Maurette+ 2000-2008)

- Une fraction importante de l'eau des océans terrestres est probablement d'origine (micro)météoritique...



Des poussières pour former les océans terrestres ?



- Un peu **d'eau était présente** dans la matière qui a formé la Terre (mais sa composition correspond plutôt à **l'eau du manteau terrestre**)...
- Les **météorites/micrométéorites** ont apporté leur part : **eau des océans**
- Les **comètes** ont contribué un peu ($\sim 20\%$?), en particulier pour **l'atmosphère**

3 – Origine de la vie?



Apport extraterrestre de matière organique sur la Terre primitive?

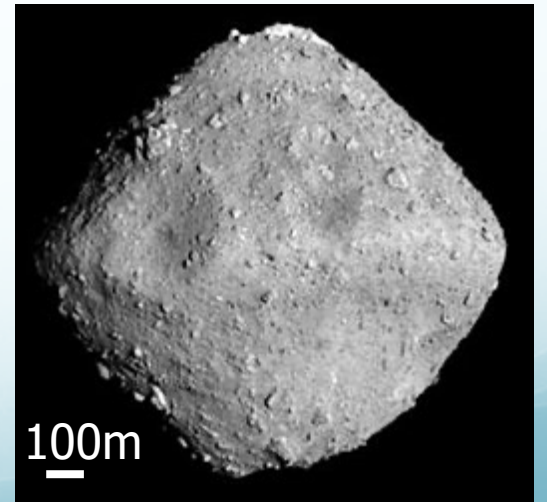
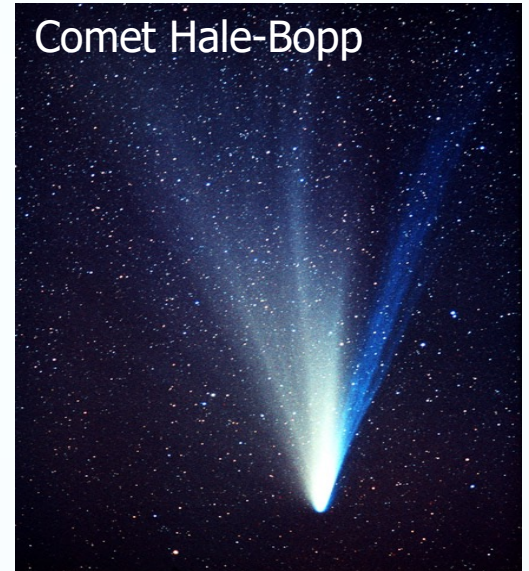
Comètes?

- Riches en eau, organiques
- Haute vitesses d'entrée, impacts...
- Quelques similarités (minéraux) avec matière astéroïdale primitive (Chondrites carbonées - CCs)

Astéroïdes Carbonés?

- CCs (ex. Murchison) contiennent **qqs wt%** de matière carbonée abiotique
 - IOM (~80-90%)
 - SOM (~10%) grande diversité moléculaire (e.g. acides aminés (~50-100 ppm)...
 - Excès énantiomérique L pour quelques acides aminés

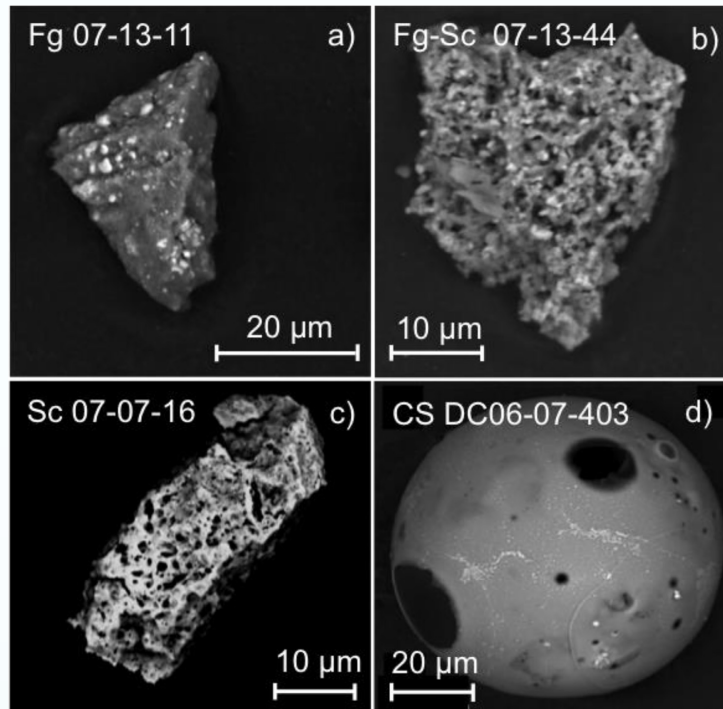
Micrométéorites?



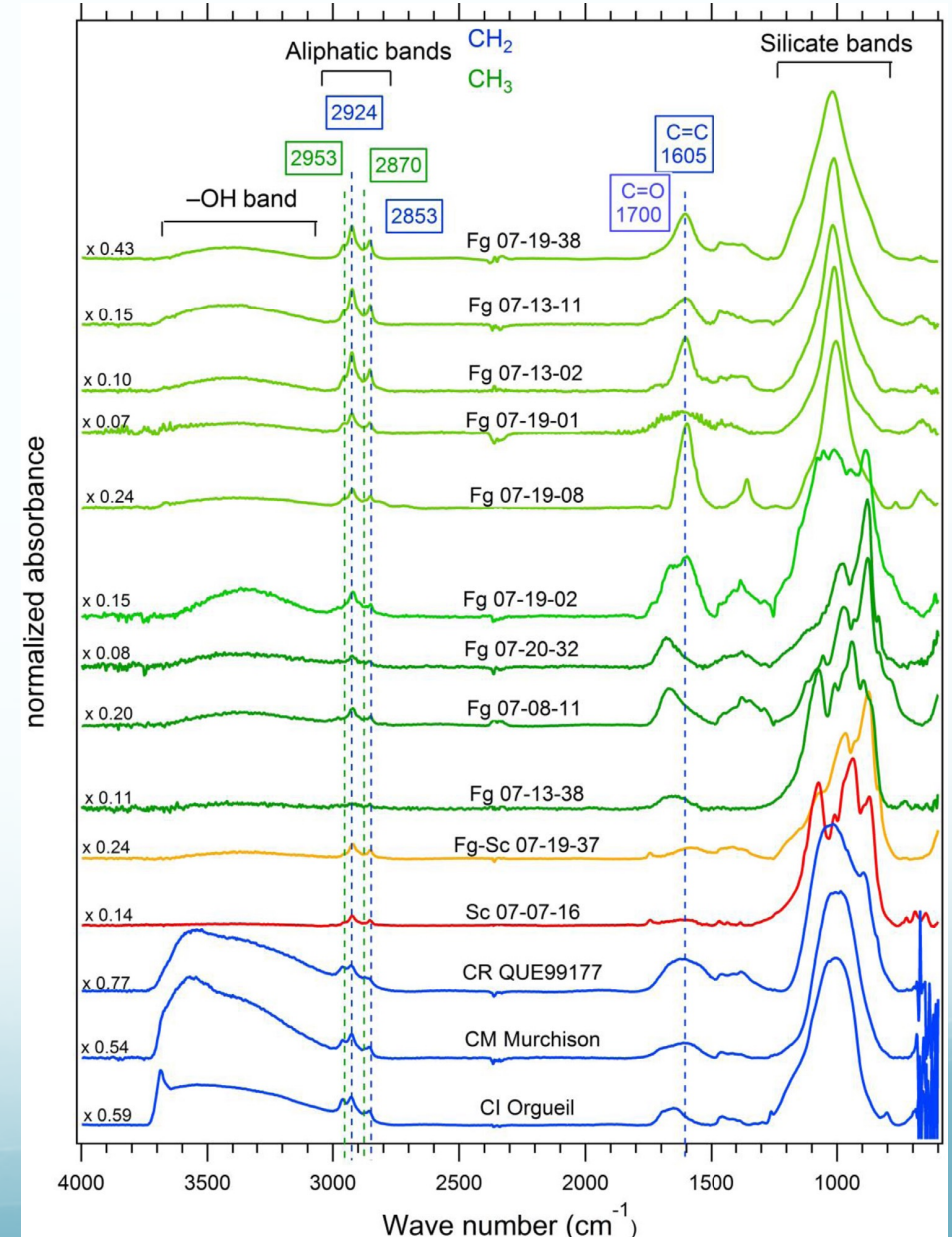
Ryugu (Hayabusa2 JAXA)



Matière Organique des MMs chondritiques

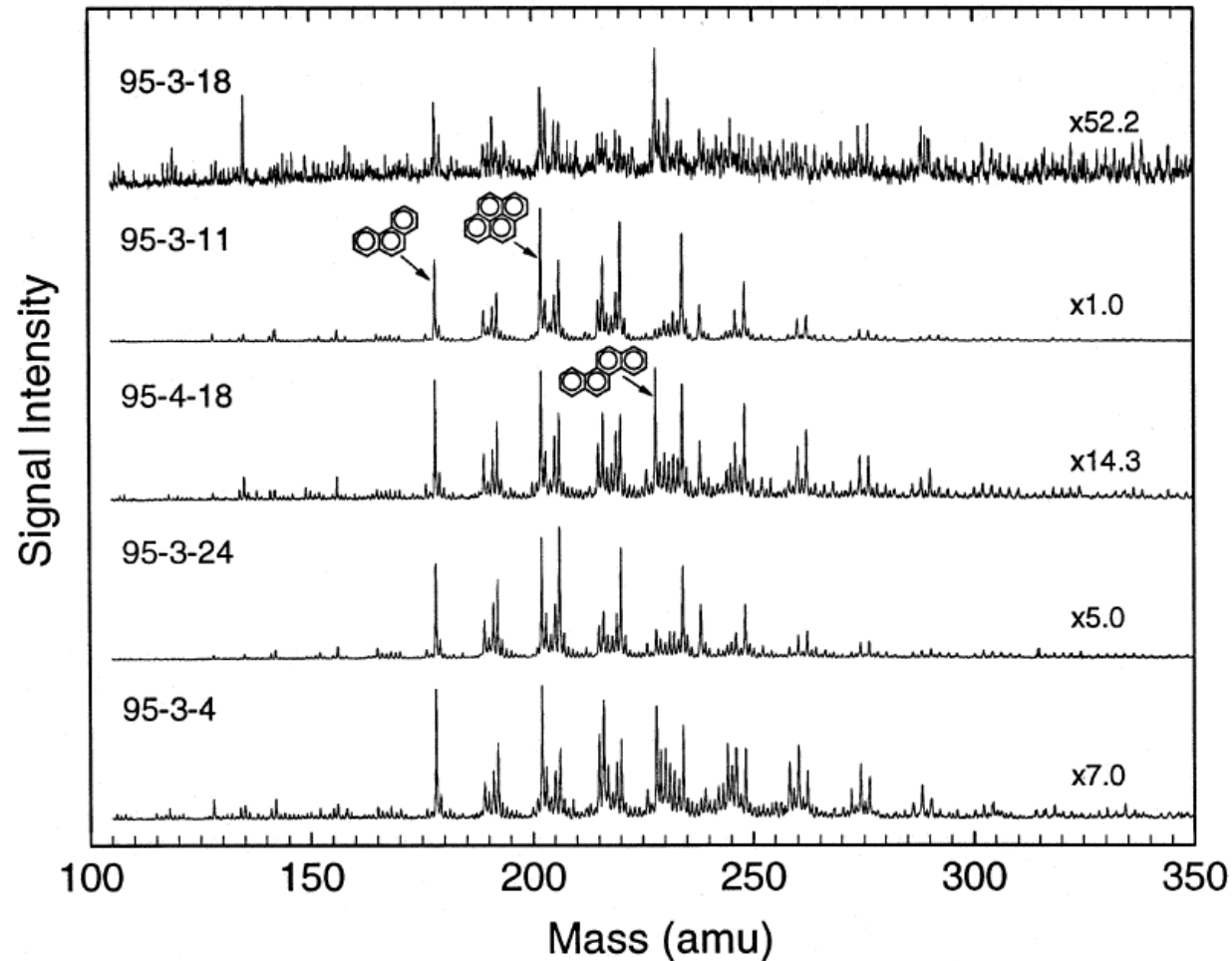


- Matière organique polyaromatique « IOM »
- Concentration C qqs Wt %
- Variété de signatures aliphatiques/aromatiques

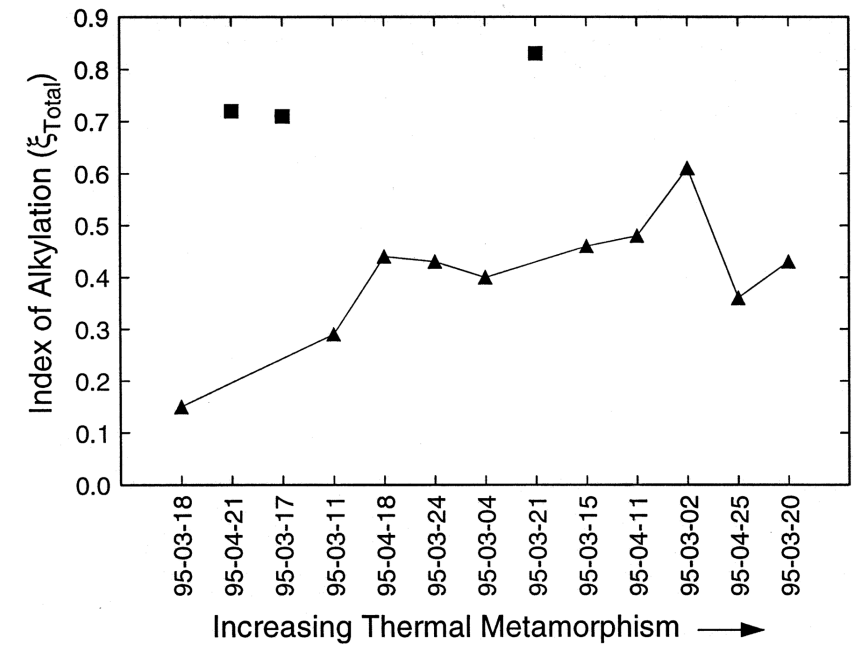




Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) dans les MMs



Clemett+1998



- Concentrations détectables de HAPs dans toutes les MMs à grains fins



Acides aminés dans 2 collections de MMs

Amino acid	A91 (50 µg)	I91 (175 µg)	III91 (310 µg)	IV94 (166 µg)	V94 (259 µg)
D-Aspartate	10	1	18	20	20
L-Aspartate	34	1	30	40	100
L-Serine	85	73	100	7	100
D,L-Glutamate	280	170	40	40	70
Glycine	260	250	210	5	40
D-Alanine	570	73	37	<0.1	<0.6
L-Alanine	620	310	180	60	60
AIB	280	<78	<22	<0.1	<20
D,L-Isovaline	<13	<3	<20	<0.1	<1

(Values in ppm)

Cap Prudhomme MM Collection

~ 100 grains for A91

(Brinton+1998)

Amino acid detected	A (MMs) 6.9 mg		
	H ₂ O (nmol/g) ^a	HF (nmol/g)	Total (nmol/g)
Glutamic acid	2.3	9.7	12.0
Glycine	5.8	46.3	52.1
Alanine	3.3	12.3	15.6
AIB	0.5	1.6	2.1
Valine	0.7	1.8	2.5
Aspartic acid	n.d.	n.d.	—
Serine	<0.0005	<0.0005	—

^anmol/g = nanomol of amino acid per gram of sample

South Pole Water Well MM Collection

~ 200 grains + sédiment

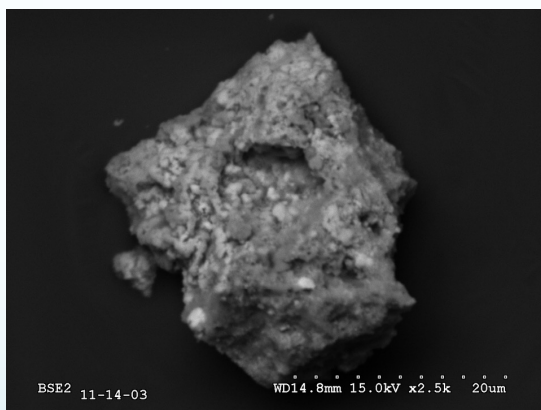
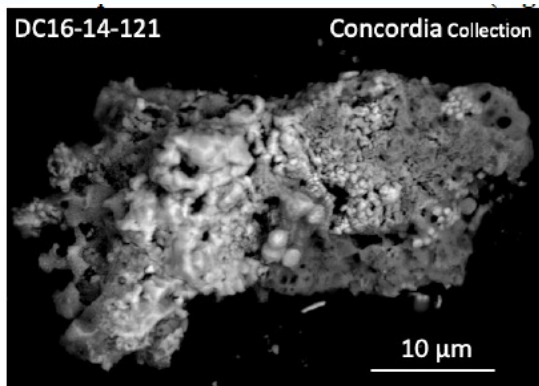
(Matrajt+2004)

~ 0.2 ppm

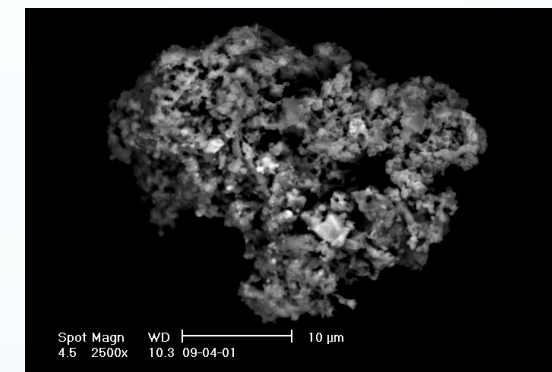
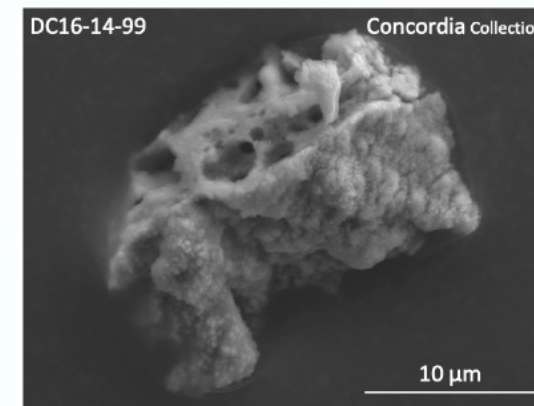
- Présence d'AIB (a.a. extraterrestre)
- Contamination par des a.a. de la glace...
- Analyse d'un grand nombre de MMs mélangées...



Recherche d'acides aminés dans 6 MMs de la collection Concordia

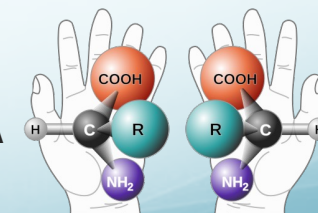


Amino Acid	AMMs (free)	AMMs (total)	CM2 Murchison (total)	Hayabusa (total)
α -AIB	not detected	10.5±1.2	0.21±0.03	0.10±0.01
β -ABA	1.07±0.13	2.3±0.1	0.049±0.001	0.091±0.005
γ -ABA	2.7±0.5	136.6±9.3	2.07±0.09	3.2±0.2



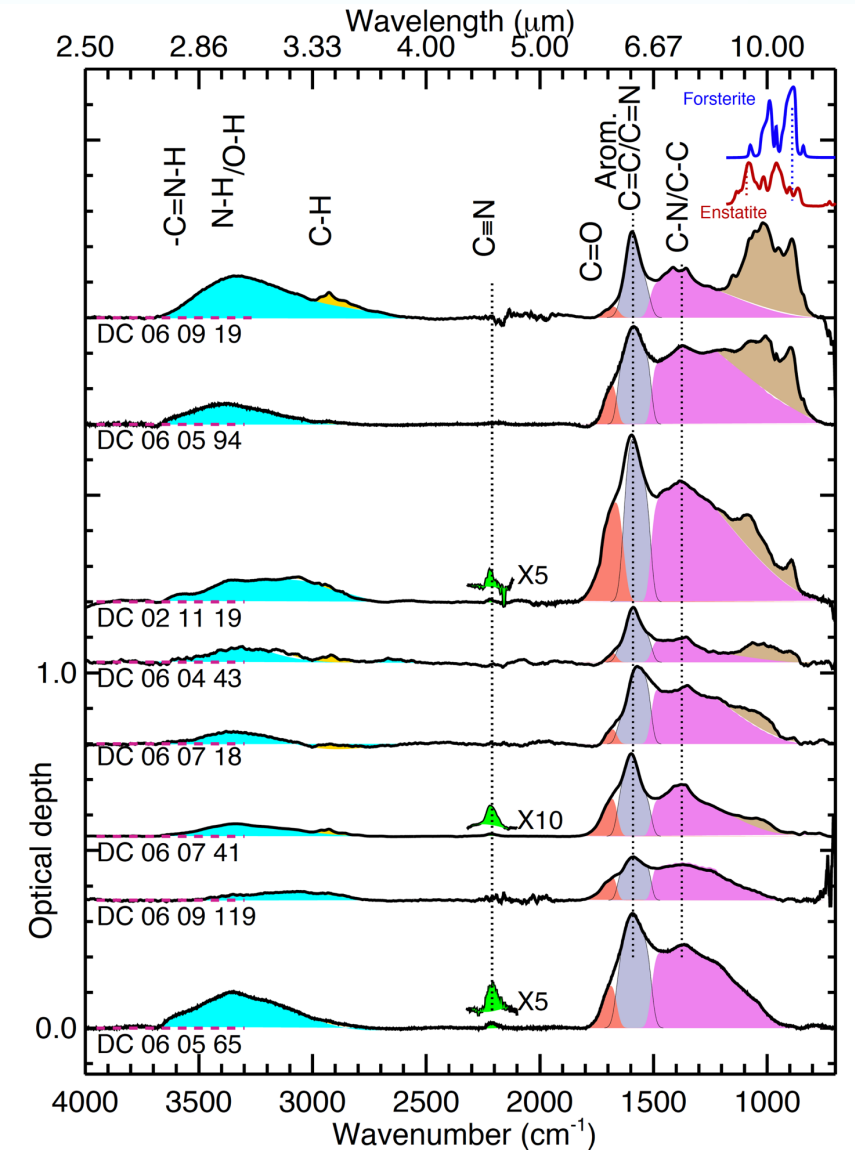
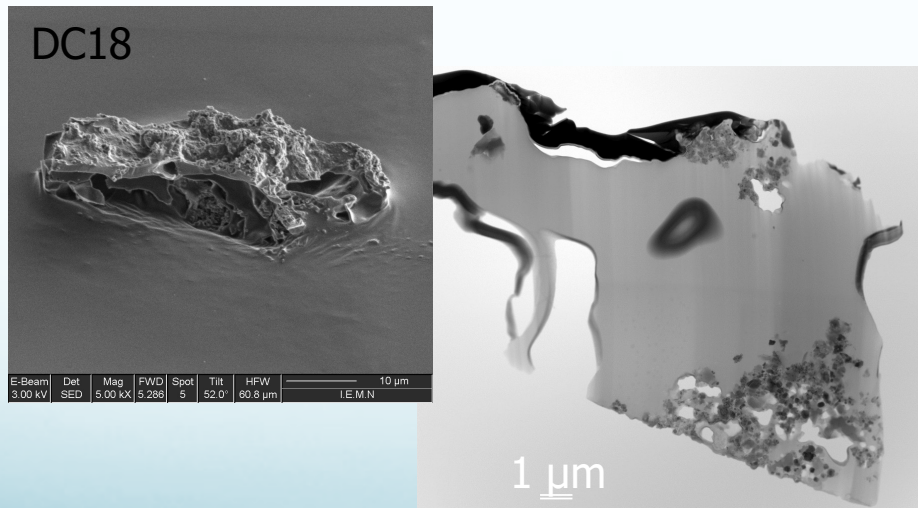
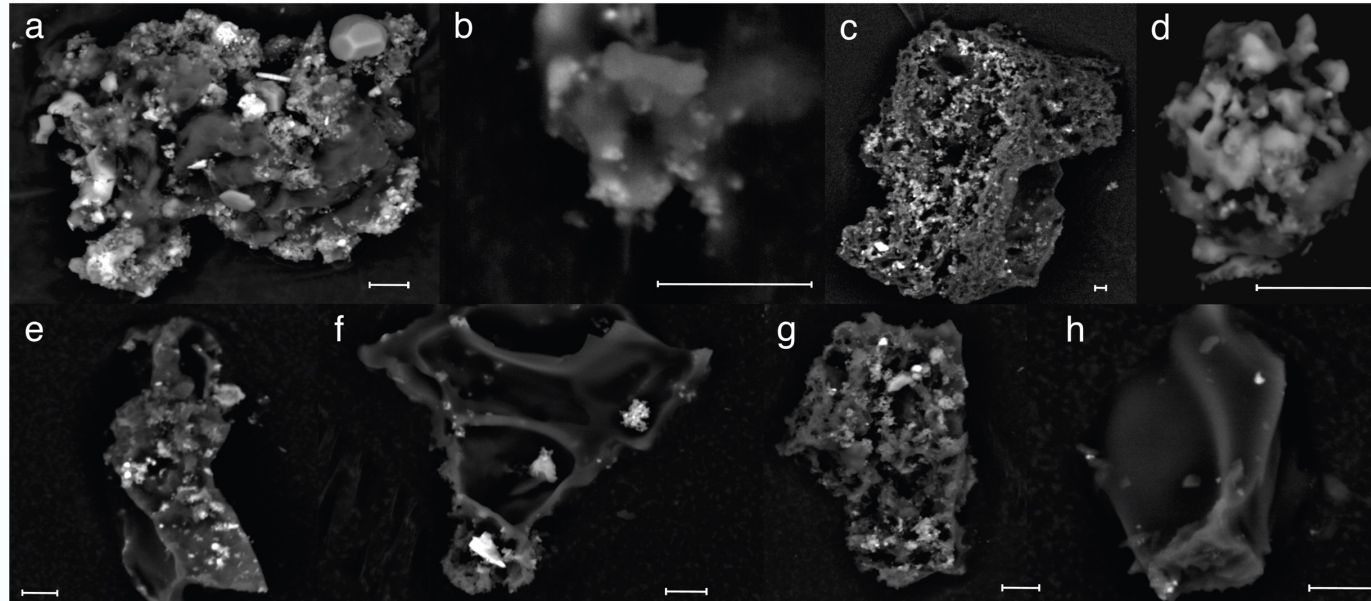
Parker+ 2024

- Détection d'acides aminés abiotiques : β -amino-*n*-butyric acid (β -ABA), α -AIB and γ -ABA
- Rapports énantiomériques (formes L/D) ~ 1 (mélange racémique)
- Similarité avec météorites chondrites carbonées chauffées – effet de l'entrée atmosphérique?
- Large diversité d'acides aminés (effet de la collecte dans la neige? Propreté de la collecte?)





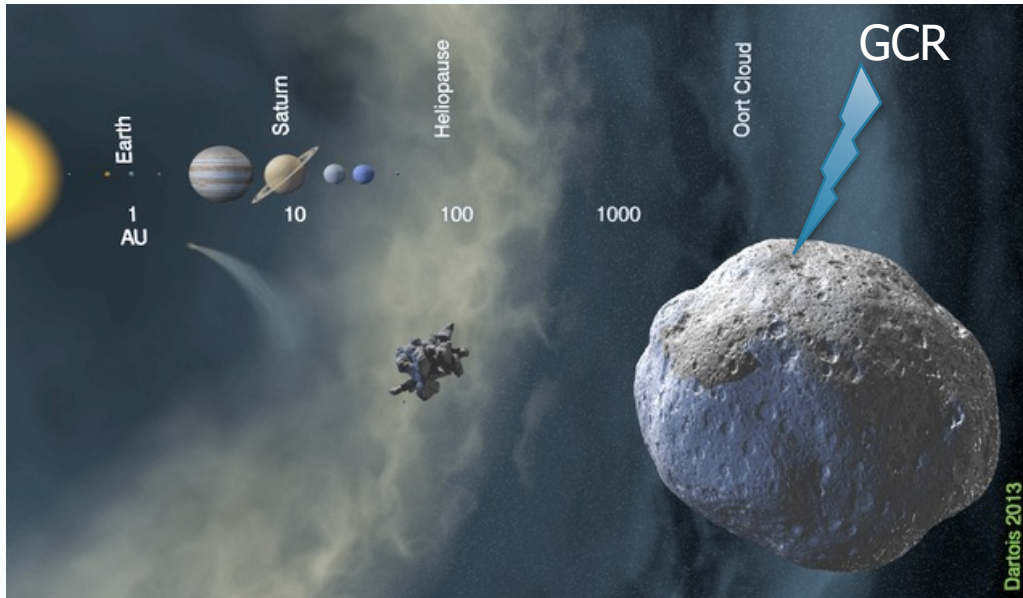
Une matière organique riche en N dans les UCAMMs



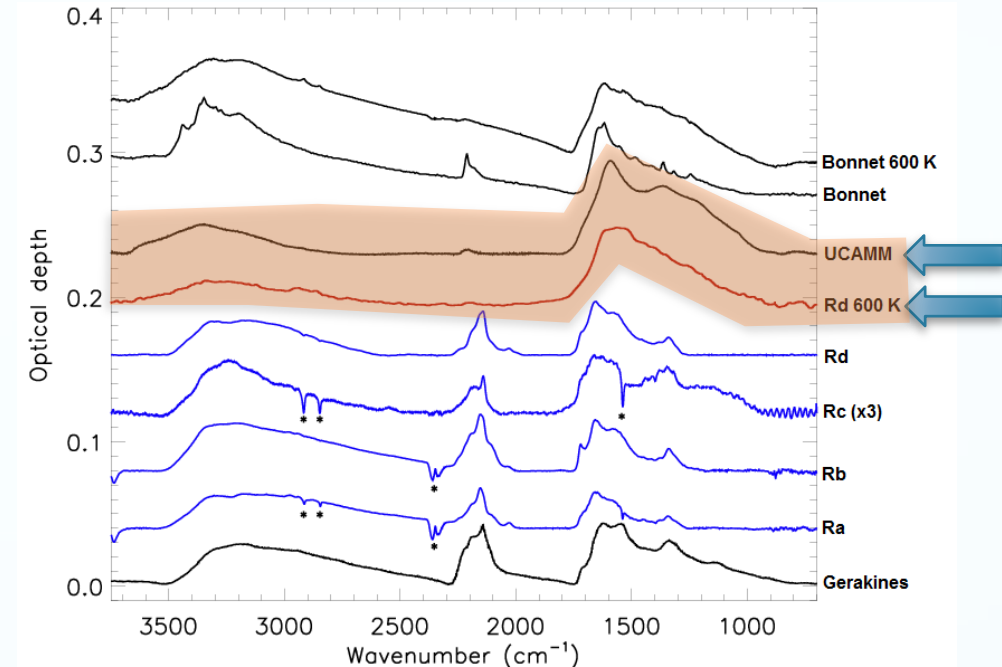
- MO globalement riche en N
- Proportion variée de minéraux (< 50 vol%)



Formation de MO riche en N par irradiation?



Dartois+2013



Augé+2016

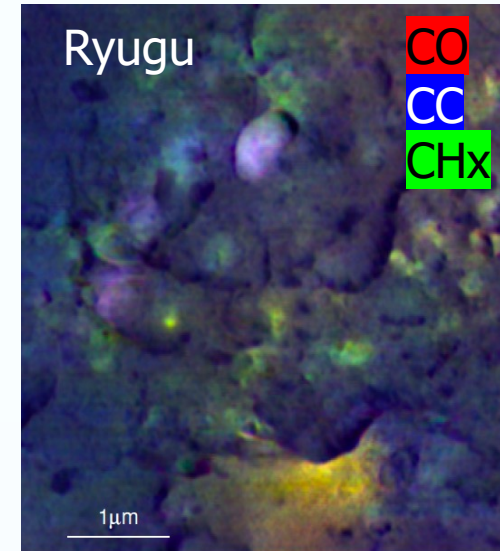
- UCAMMs : matériau formé **au delà de la ligne de glace d'azote**
- Formation de **MO riche en N** par **irradiation de type GCR de glaces N₂-CH₄** à la surface d'un objet de Kuiper ou d'un TNO (Dartois+ 2013, 2018)
 - **Démonstration de faisabilité** au GANIL (Augé+ 2016, 2019, Rojas+ 2025)
- Ou: formation par **photolyse UV** de **glaces** – mais faible volume d'interaction (Yabuta+ 2017)



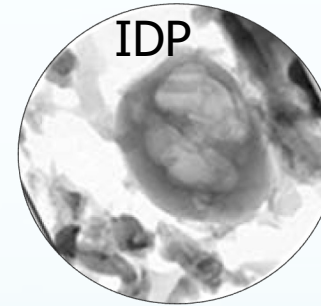
Autres phases organiques : nanoglobules

- **Partout dans la matière primitive** : CCs, MMs, IDPs, 81P/Wild2, Ryugu...
- Mais **plusieurs populations** (composition, isotopes – De Gregorio+ 2013)
- Différences pré-accrétionnelles **et** altération sur le corps parent...
- Origine présolaire?
- Processus de formation débattu... Formation à partir d'un polymère de formaldéhyde ? (Cody+ 2011), ou à partir d'hydrocarbures (PAHs) dans les enveloppes circumstellaires? (Saito & Kimura 2009)...

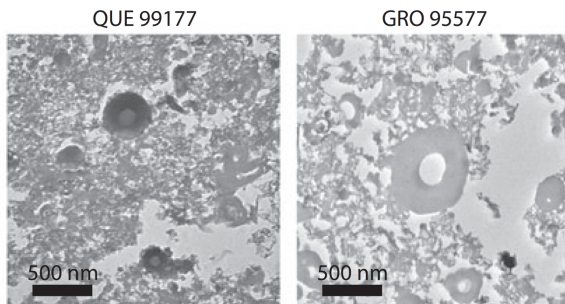
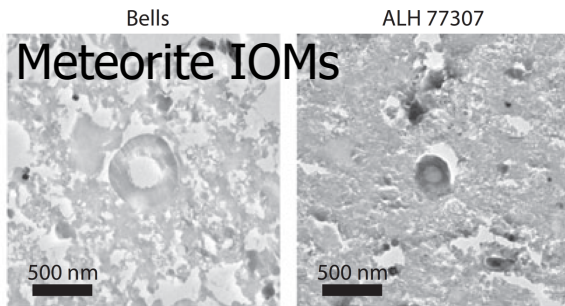
AFM-IR



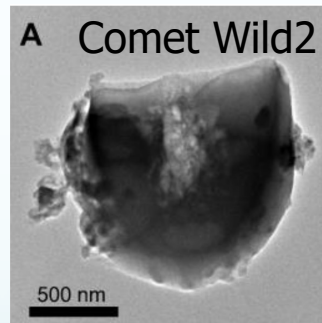
Mathurin+2024



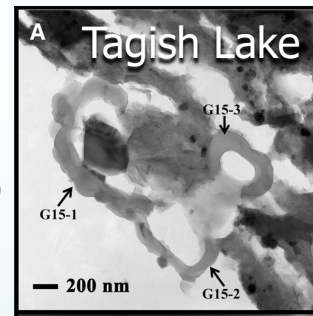
Messenger+2008



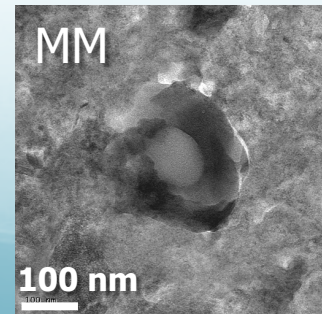
De Gregorio+2013



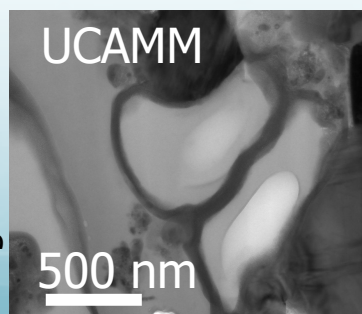
De Gregorio+2010



Nakamura+2006

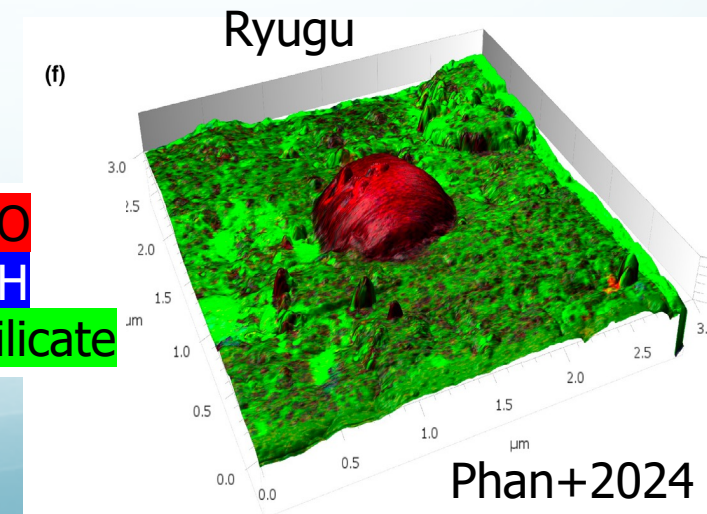


Engrand+1993



Charon+2017

CO
CH
Silicate



Phan+2024



Apport prébiotique des micrométéorites

- **MMs chondritiques** ($\sim 99\%$ des MMs) : C $\sim (3 \pm 2)$ wt%
- **UCAMMs** ($\sim 1\%$ des MMs) : C $\sim 60 \pm 30$ wt%
- Flux de poussières **sur Terre**: 5 200 tonnes/an (Rojas+2021)
- $\Phi_c \sim 60$ tonnes.an⁻¹ (de nos jours) + augmentation du flux dans le passé
- ➔ Apport de **carbone sur la Terre primitive**
- ➔ Présence de **composés et phases organiques d'intérêt prébiotique**: HAPs, a.a., nanoglobules (?)
- ➔ Mélange intime entre matière carbonée et minéraux (possible rôle de catalyseur)



Des poussières pour l'émergence de la vie?



4,3 - 2,8 Milliards
d'années

- Apport de matière potentiellement « prébiotique » sur la Terre primitive
- Participation à l'émergence de la vie sur Terre? (et sur d'autres planètes?)



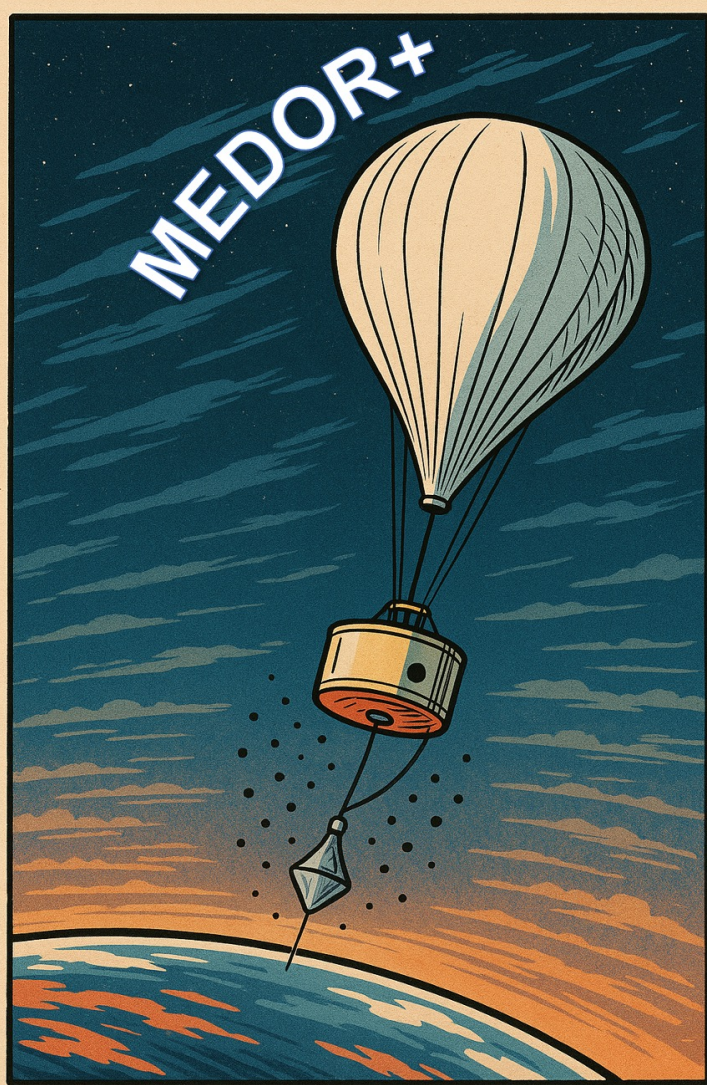
Conclusions

- Les poussières sont partout...
- Les poussières cométaires dominant le flux actuel sur Terre
- les météorites sont plutôt d'origine astéroïdales, mais il y a probablement un continuum entre astéroïdes et comètes...
- Les poussières sont à la base de la formation planétaire
- Elles contiennent des minéraux hydratés qui auraient pu participer à la formation des océans sur Terre (l'eau terrestre est « extraterrestre »...)
- Le carbone et les composés organiques qu'elles contiennent ont participé à l'apport de matière prébiotique



Et après?

- Encore beaucoup de questions en suspens...
- MEDOR+...



IJCLab/Univ. Paris-Saclay :

Cécile ENGRAND, Vincent TATISCHEFF, Clarisse HAMADACHE, Lucie DELAUCHE, Christine LE GALLIARD, Silvin HERVE

ISMO/Univ. Paris-Saclay

Franck FORTUNA, Emmanuel DARTOIS

ICP/Univ. Paris-Saclay

Julien ROJAS

LMD/IPSL

Albert HERTZOG, Claire CENAC

IRAP/Univ. Toulouse

Jérémie LASUE

Quentin TAUPIN

Hassan SABBAH

LATMOS/IPSL

Anni MÄÄTTÄNEN

ENS Paris

Jérôme DELACOTTE

NASA Johnson Space Center (Houston)

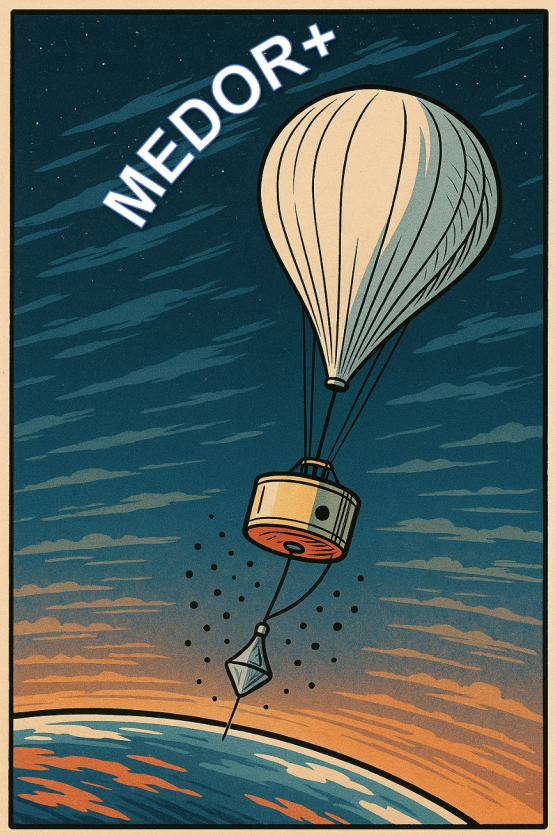
Mike ZOLENSKY, Melissa RODRIGUEZ





Pourquoi?

- Collecte de poussières dans la stratosphère (artificielles, naturelles, extraterrestres...)
- Collecte de petites particules non collectées à Dôme C
- Recherche de petites poussières atypiques, poussières interstellaires contemporaines
- Estimer la pollution de la stratosphère (lancements/réentrées)





MEDOR+ : MicromEtéorites Dans la stratOsphère +

Comment?

- ⇒ Vol ballon stratosphérique - transformation du système de panneaux solaires MEDOR du CNES pour vols transatlantiques : adaptation et utilisation d'un gel collecteur (PDMS)
- Altitude > 35 km (au dessus de la couche d'aérosols)
- Collection de particules > 0,1 μm
- Volume d'air échantillonné : $\sim 2\,500\text{ m}^3$
 - Surface de collecte : $\sim 1\text{ m}^2$
 - Temps de vol : $\sim 10\text{h}$
 - Mesure du volume échantillonné grâce à l'anémomètre sonique VATA (Stratéole-2)
- ⇒ **Vol prévu Automne 2027**
- ⇒ **Analyses des échantillons par microscopie électronique automatisée (ISMO)**

