



Leçon N. 2 - 29 Octobre 2025

Alessandro
MORBIDELLI

Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

Les météorites et leur provenance



Anatomie d'une chute

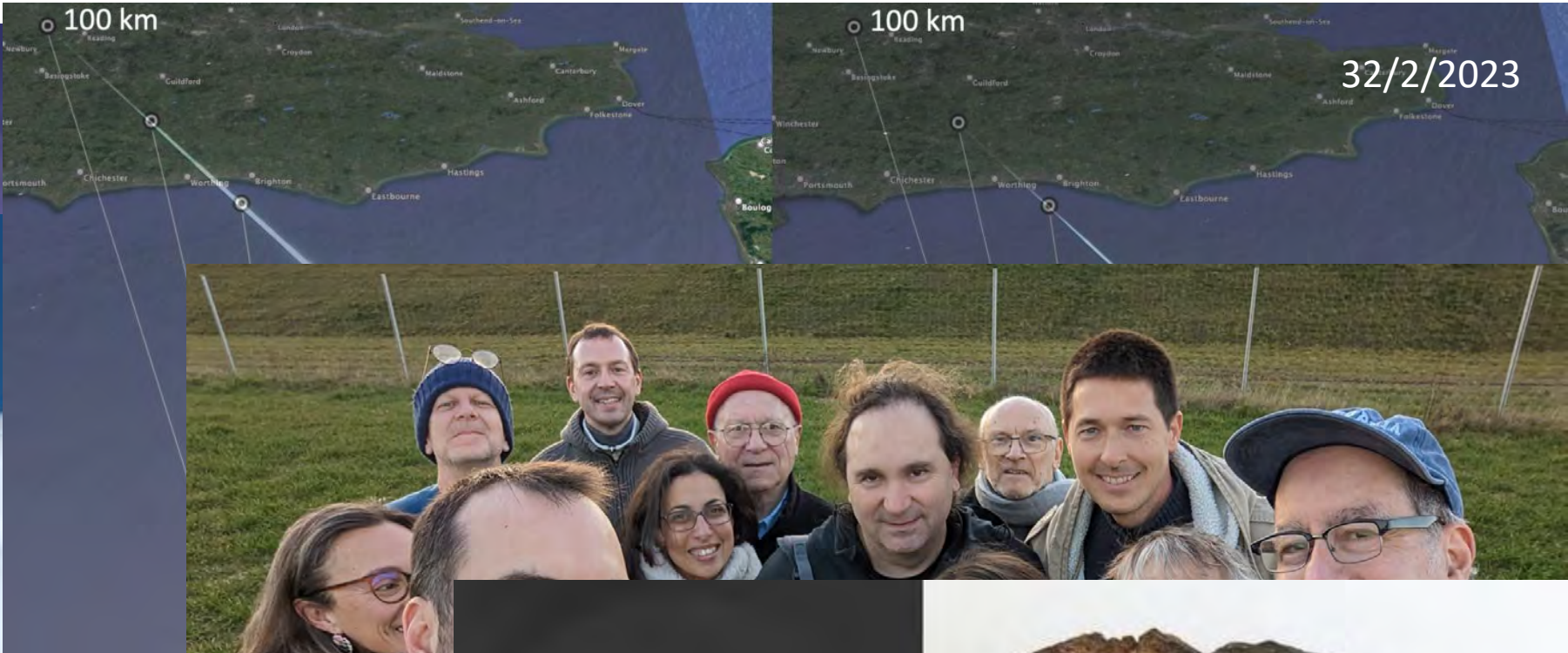


Peekskill, N.Y.
October 9th, 1992



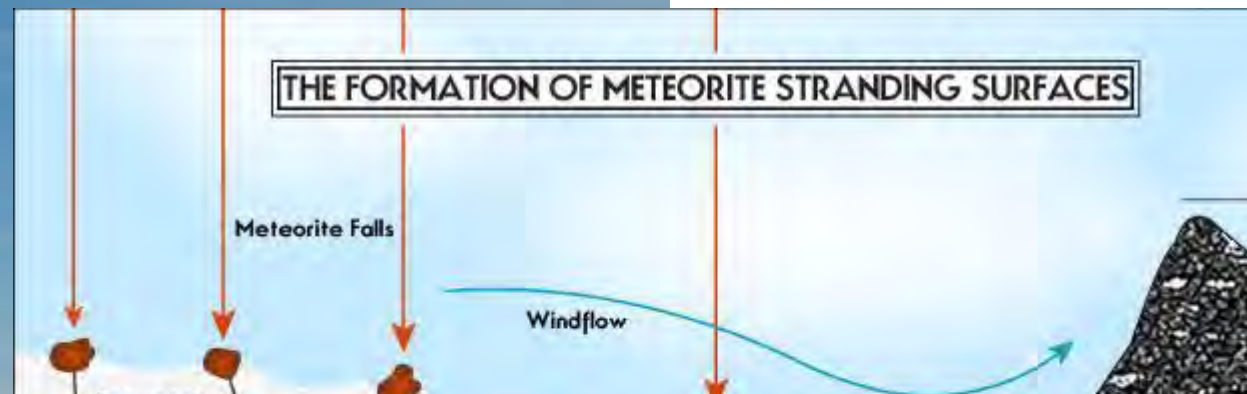


La recherche des météorites



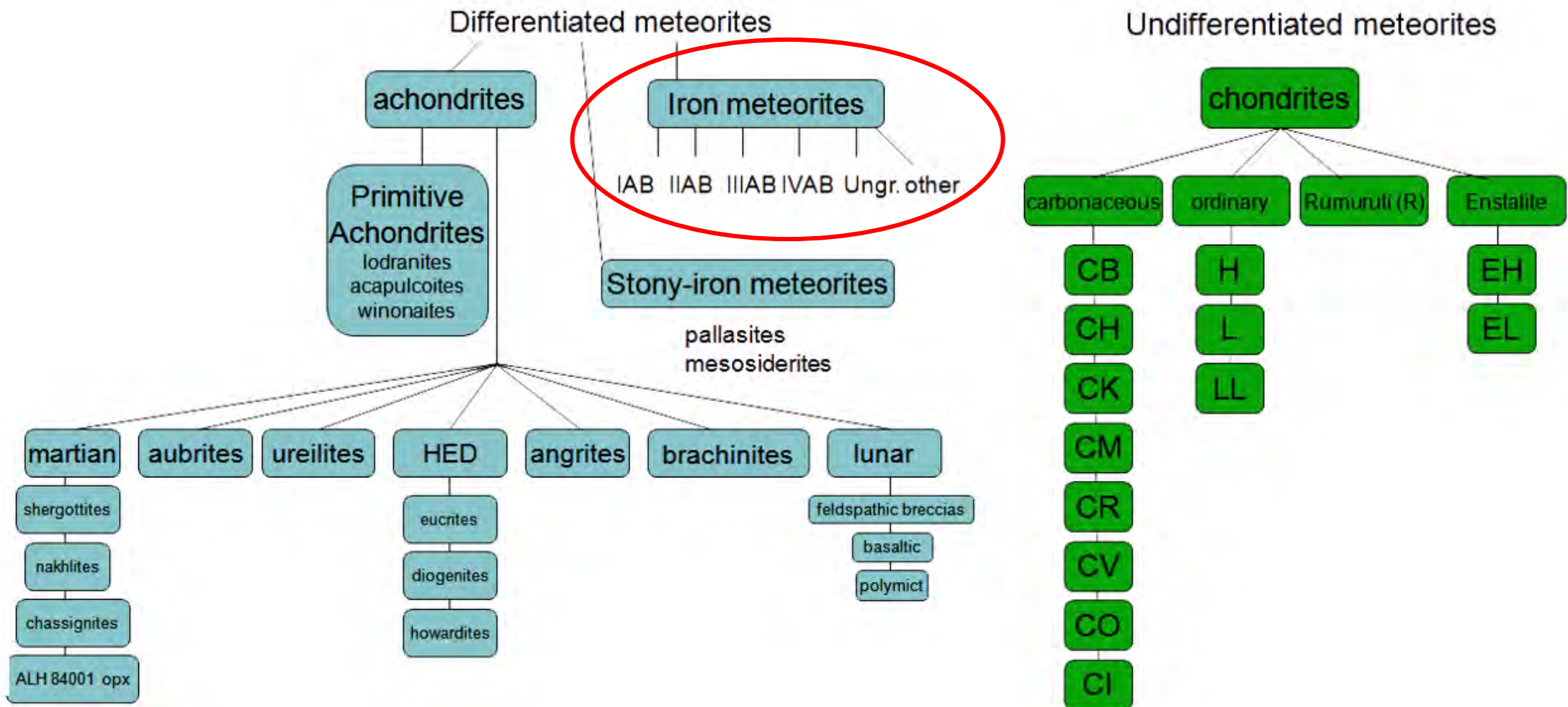


La recherche des météorites





La classification des météorites





Météorites de fer





Météorites de fer

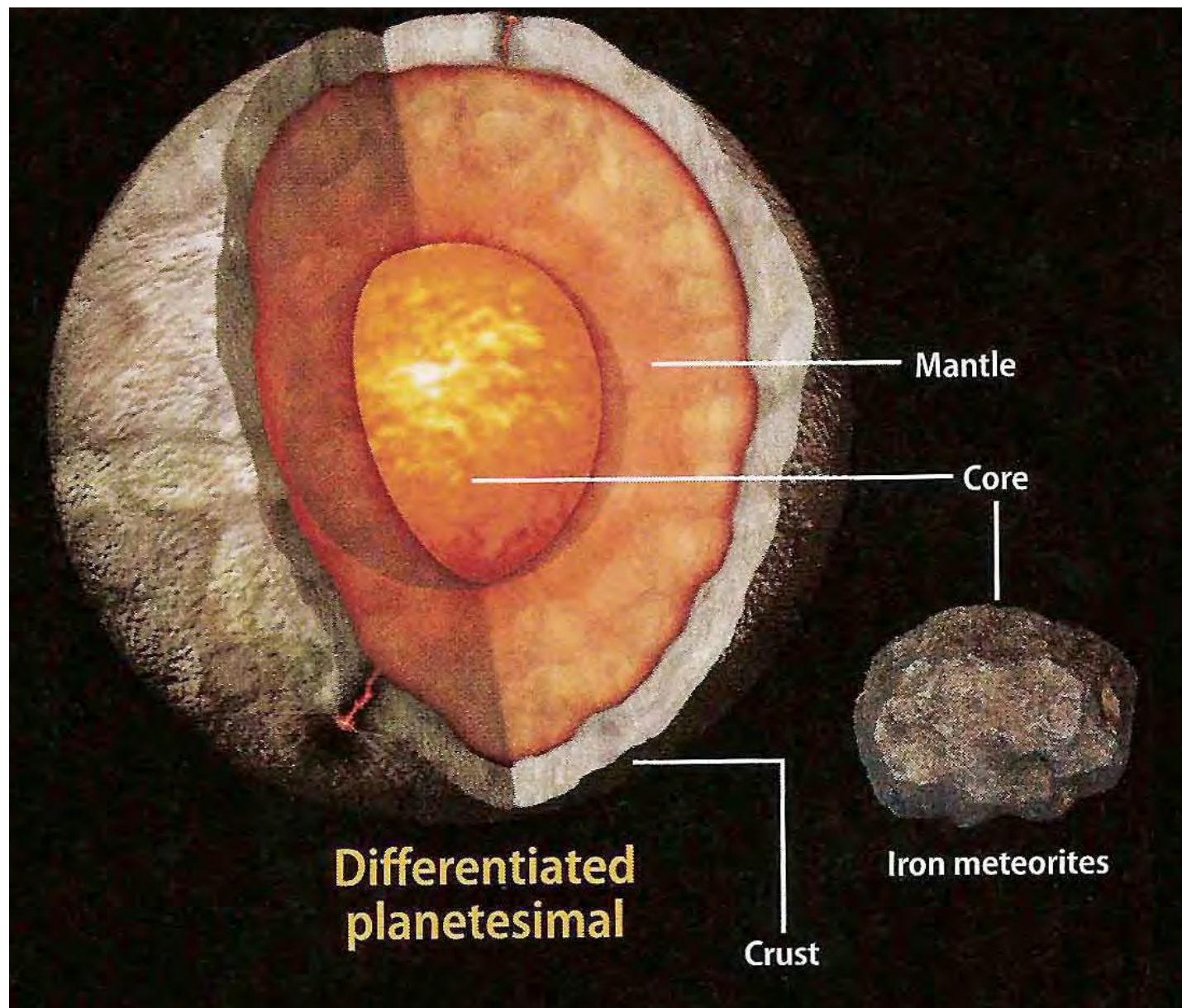


La météorite
de Hoba
(Namibie)
La plus
grande au
monde



Origine des météorites de fer (magmatiques)

Il y a aussi des météorites de fer non-magmatiques, dont l'origine est différente (recristallisation de roches fondues par impacts, etc.)



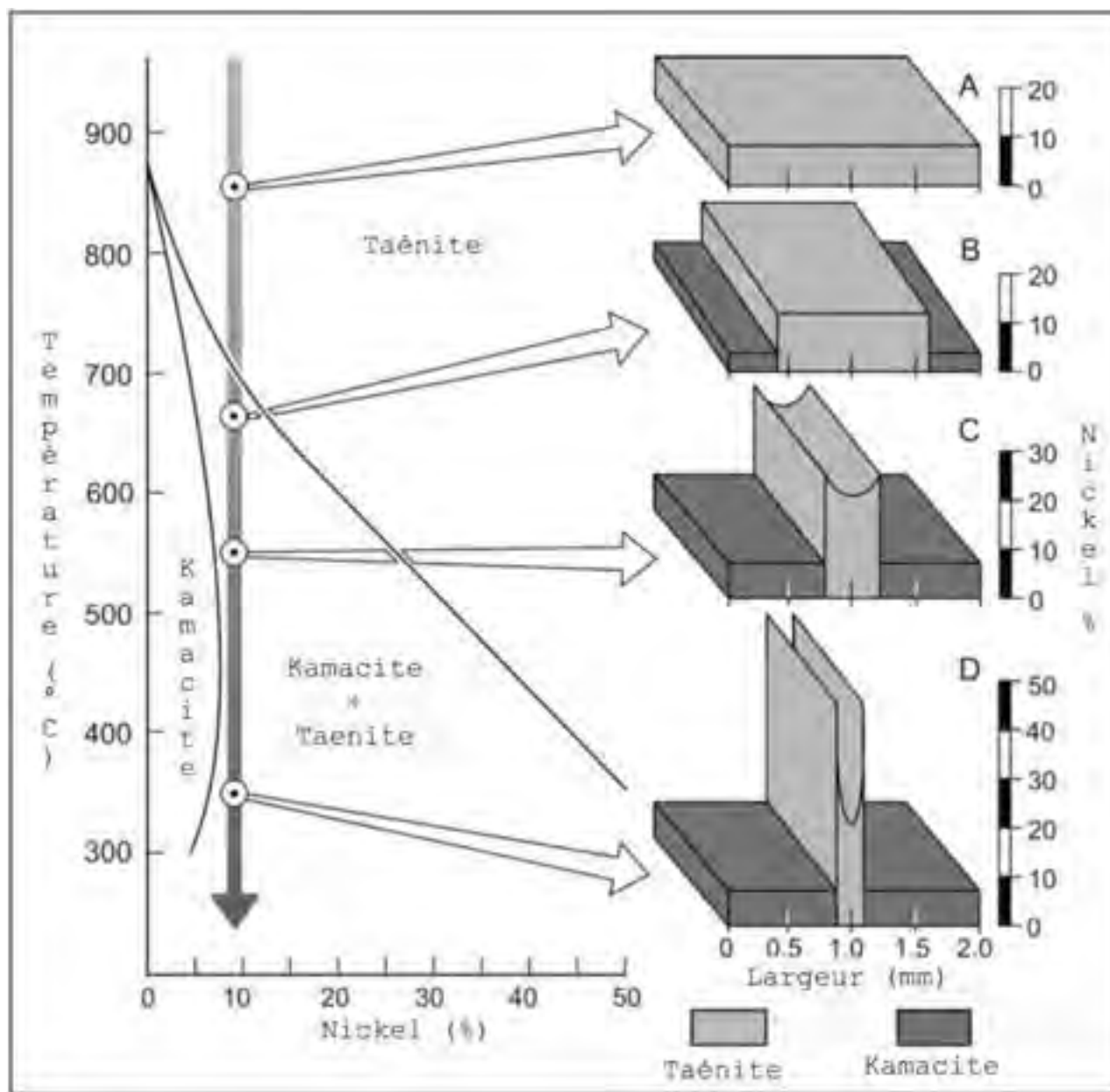


Météorites de fer: figures de Widmanstätten





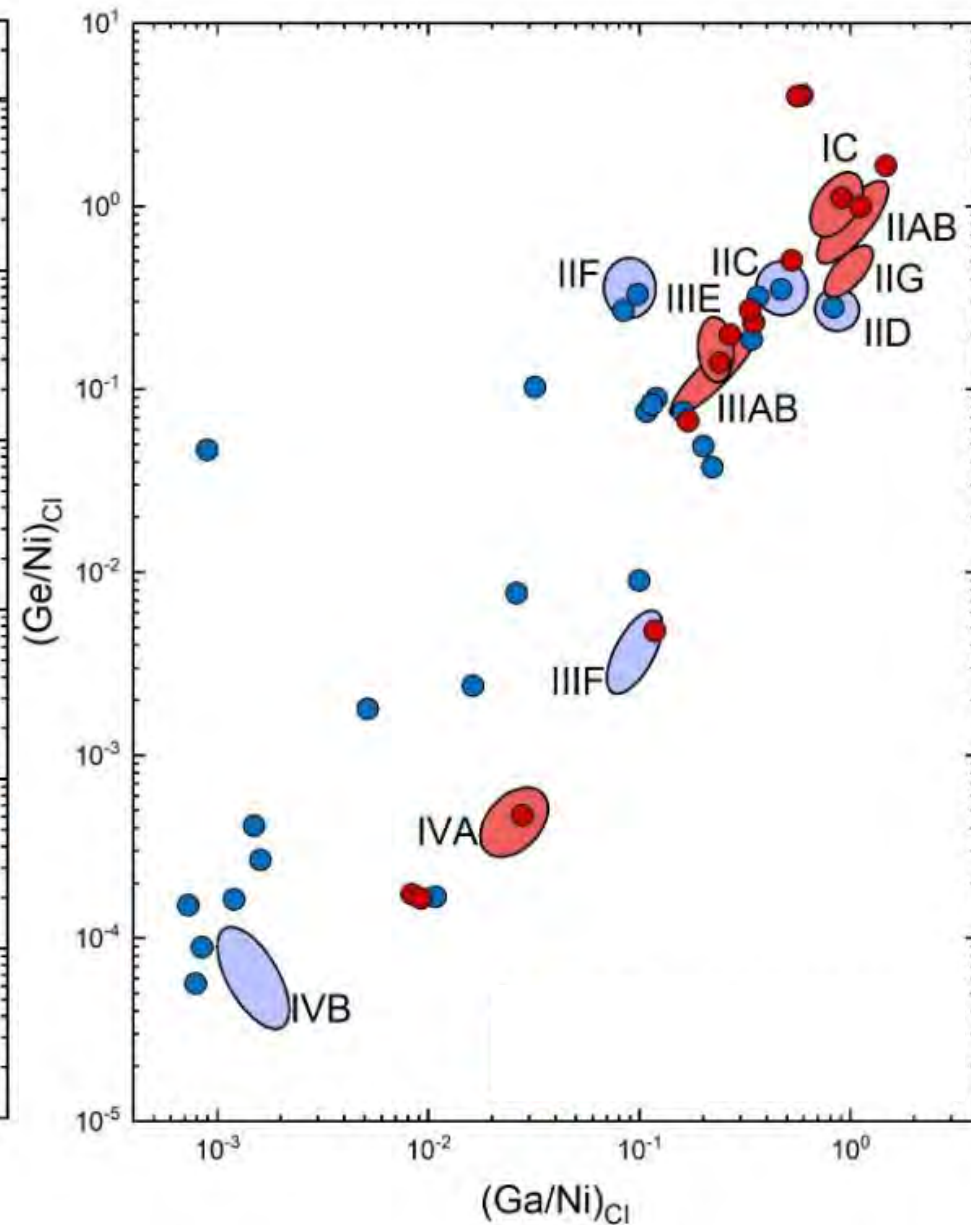
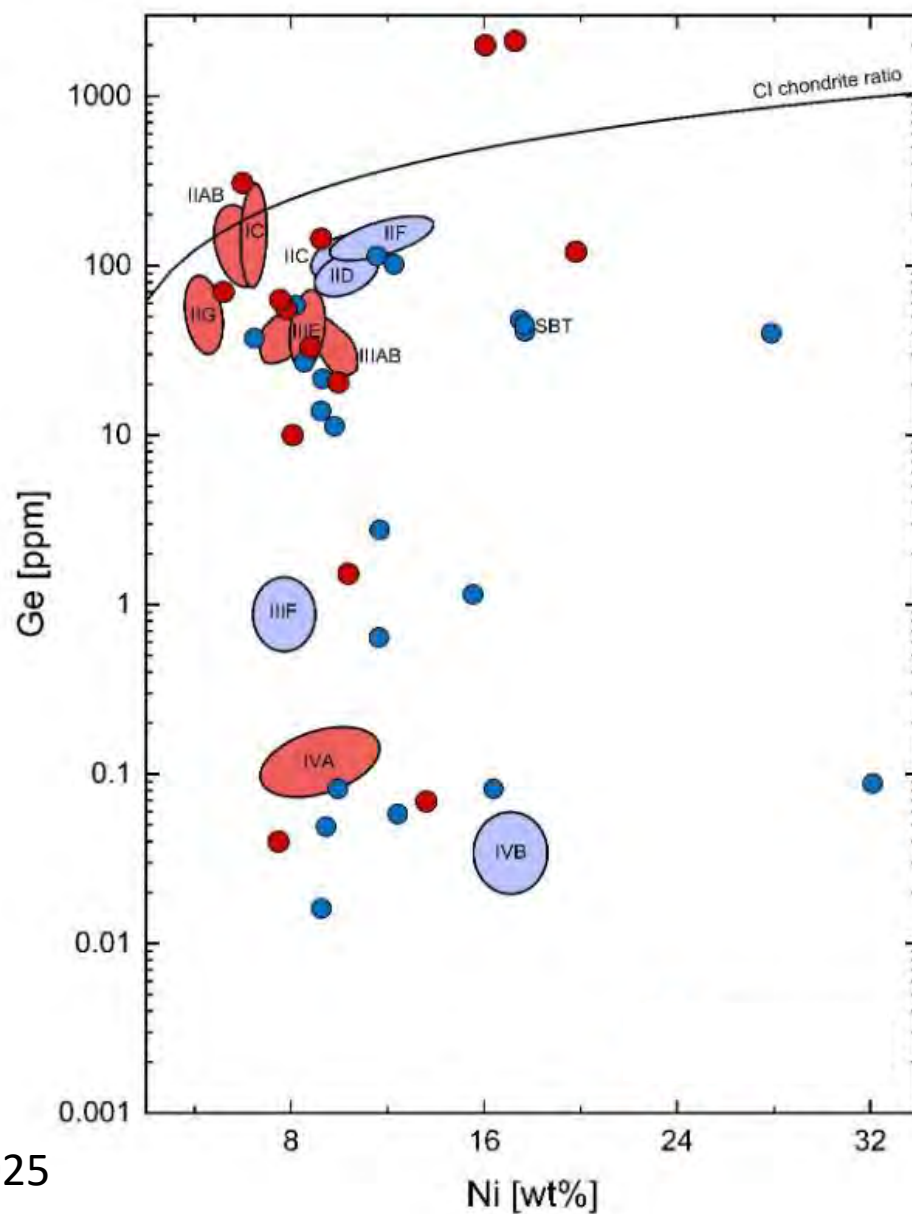
Météorites de fer: figures de Widmanstätten





Météorites de fer magmatiques et corps parents

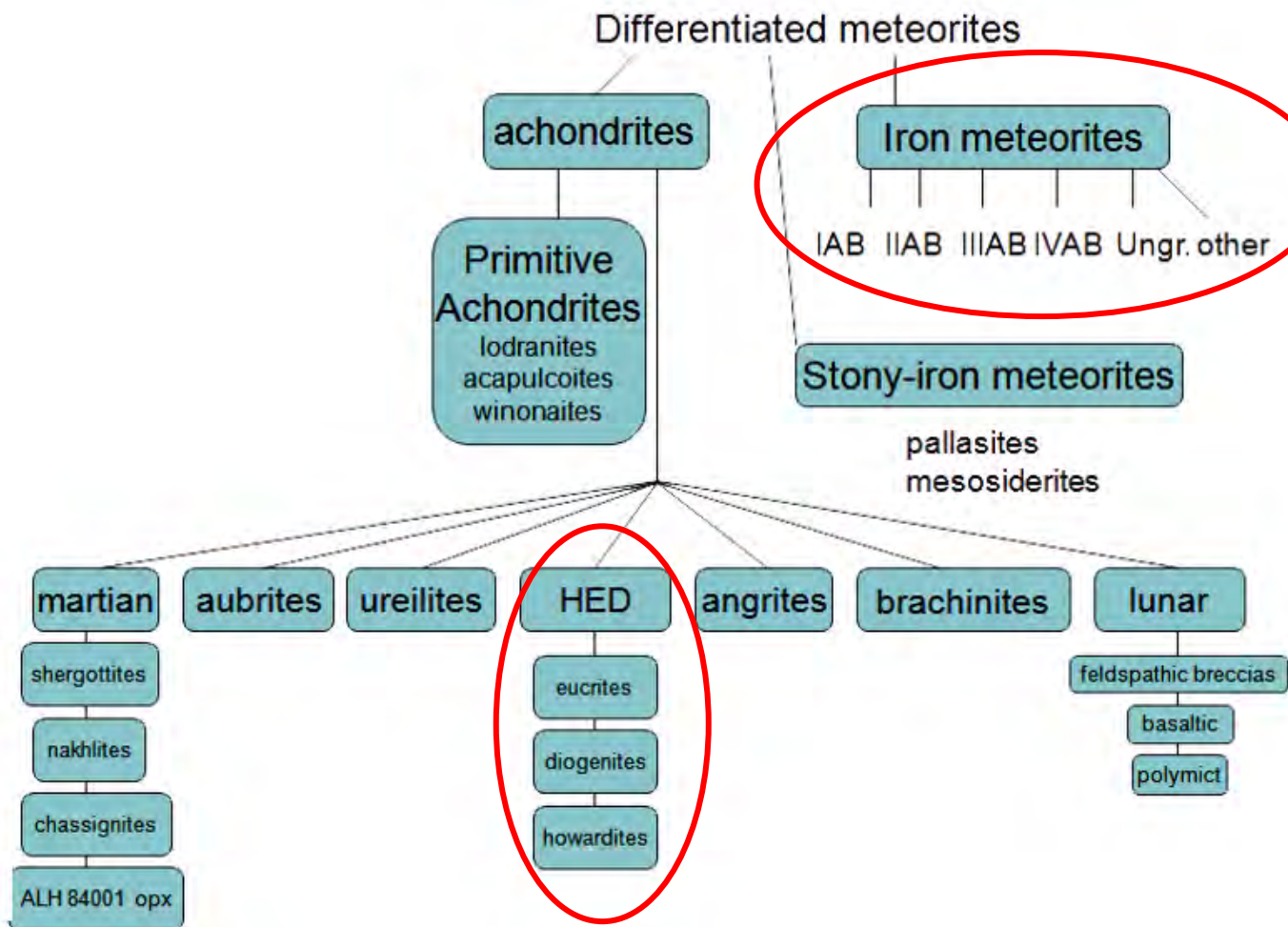
11 groupes,
35 météorites
individuelles:
Autant de corps
parents



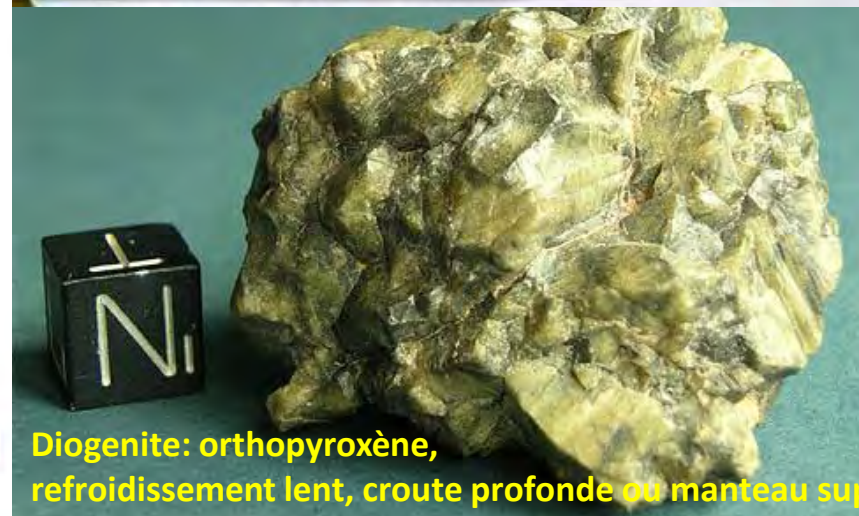
Spitzer et al., 2025



La classification des météorites

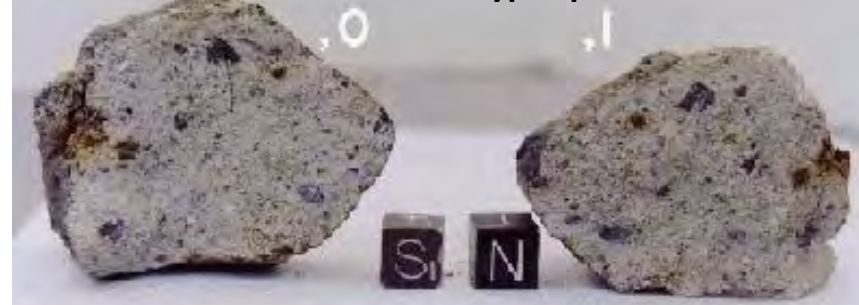


Euclite: pyroxène et anorthite, refroidissement rapide, surface de la croûte



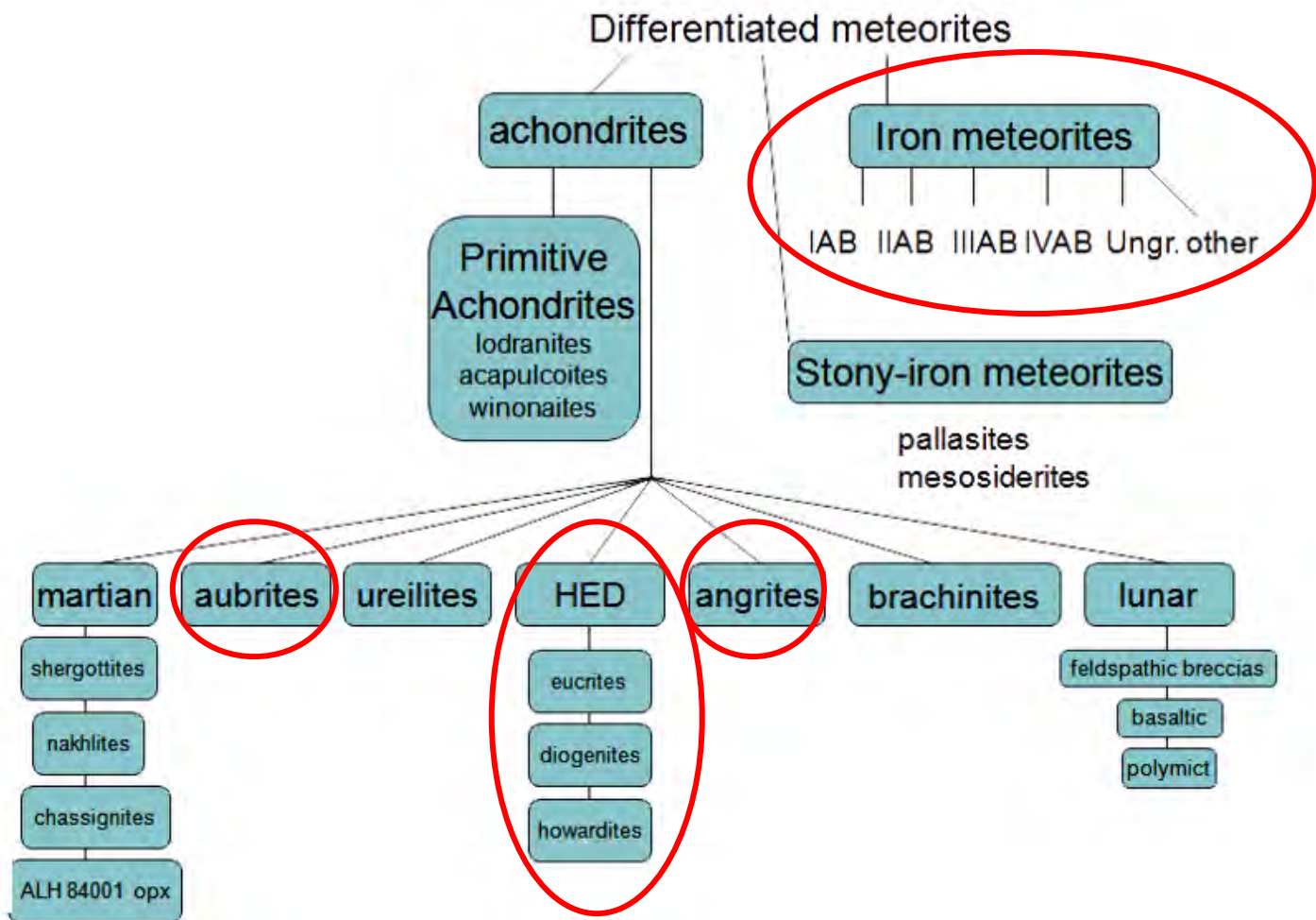
Diogenite: orthopyroxène, refroidissement lent, croûte profonde ou manteau sup

Howardite: breccia des deux types précédents





La classification des météorites



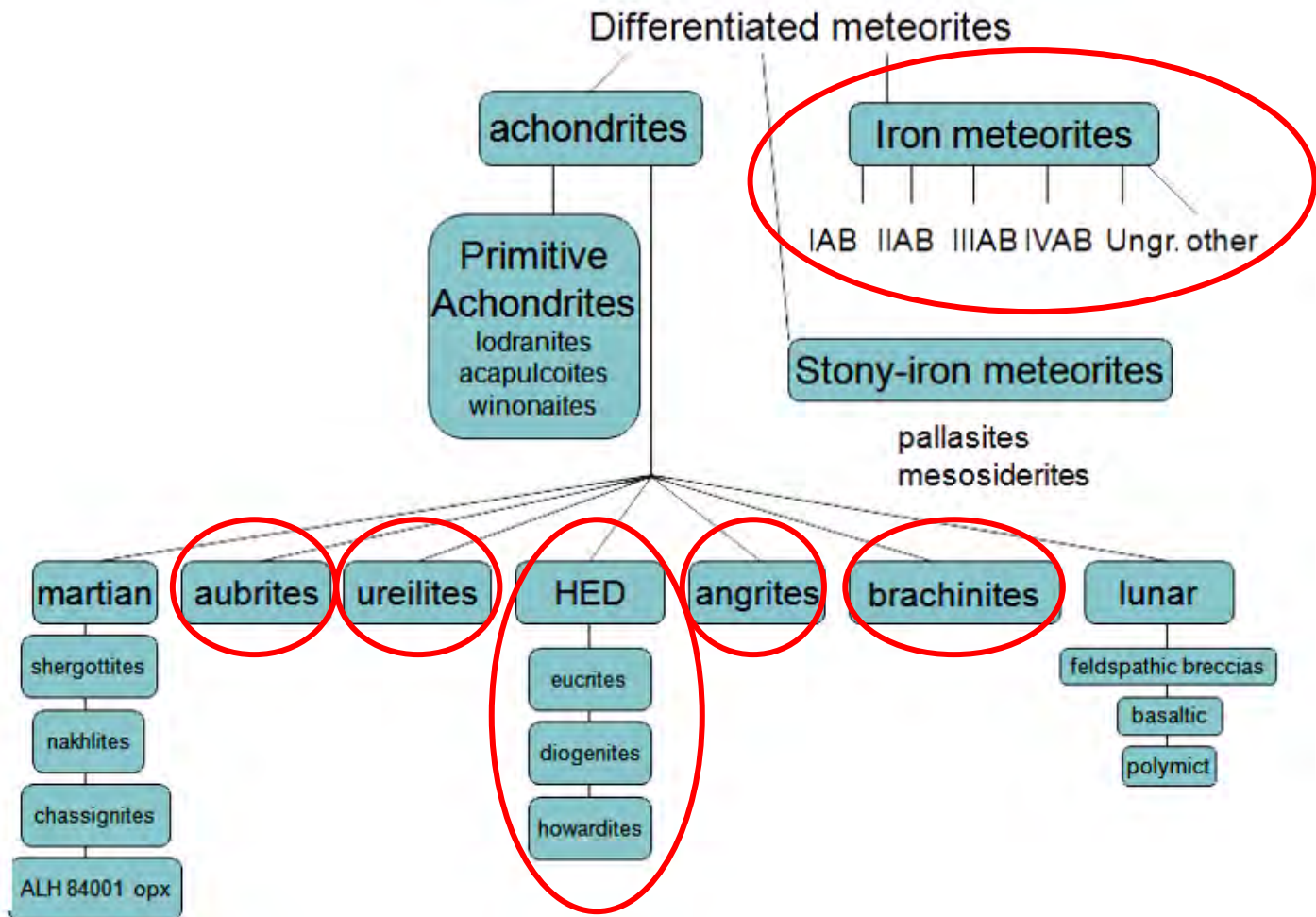
Aubrite: croute, ou manteau sup., enstatite, inclusions de métal et sulfides



Angrite: croute, Ca-Al, anorthite



La classification des météorites



Brachinite: olivine et plagioclase, manteau sup



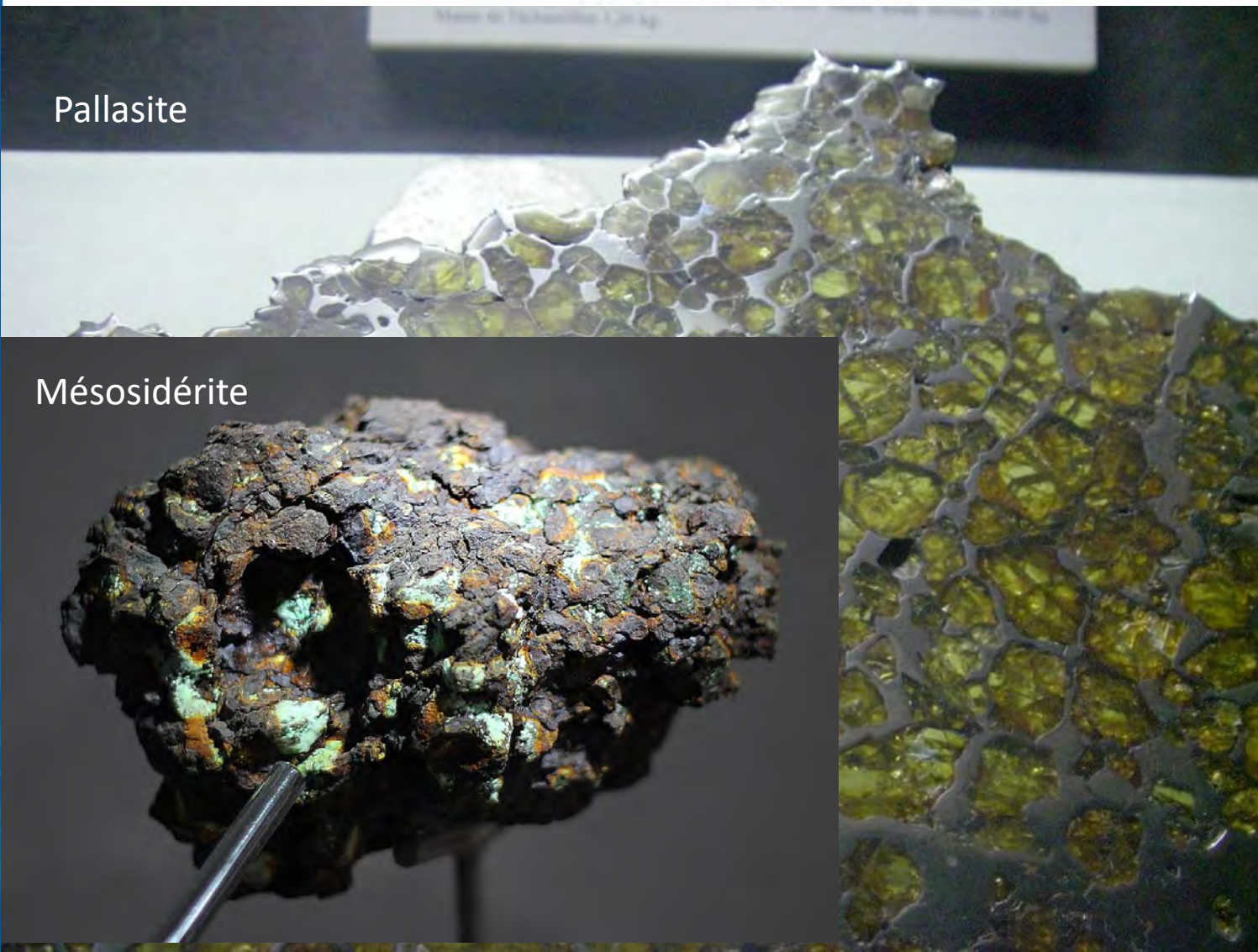
Ureilite: olivine, pyroxène et carbone, manteau prof.



La classification des météorites

Pallasite

Mésosidérite



Pas de météorites de dunite, issues du manteau d'objets complètement différenciés !

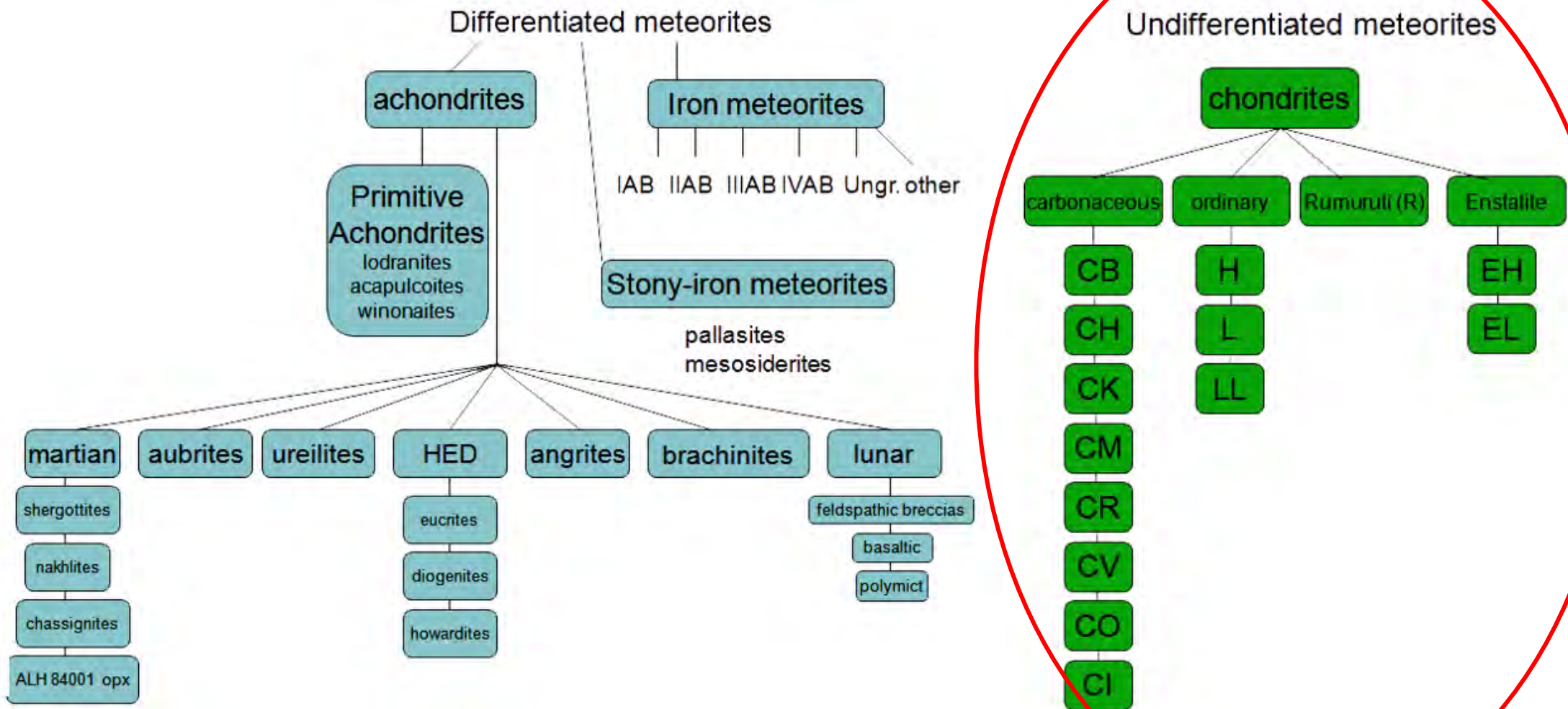


Olivine dans ureilites et brachinites et dans certaines météorites de “croute”

Mélanges olivine-métal dans mésosiderites et pallasites



La classification des météorites

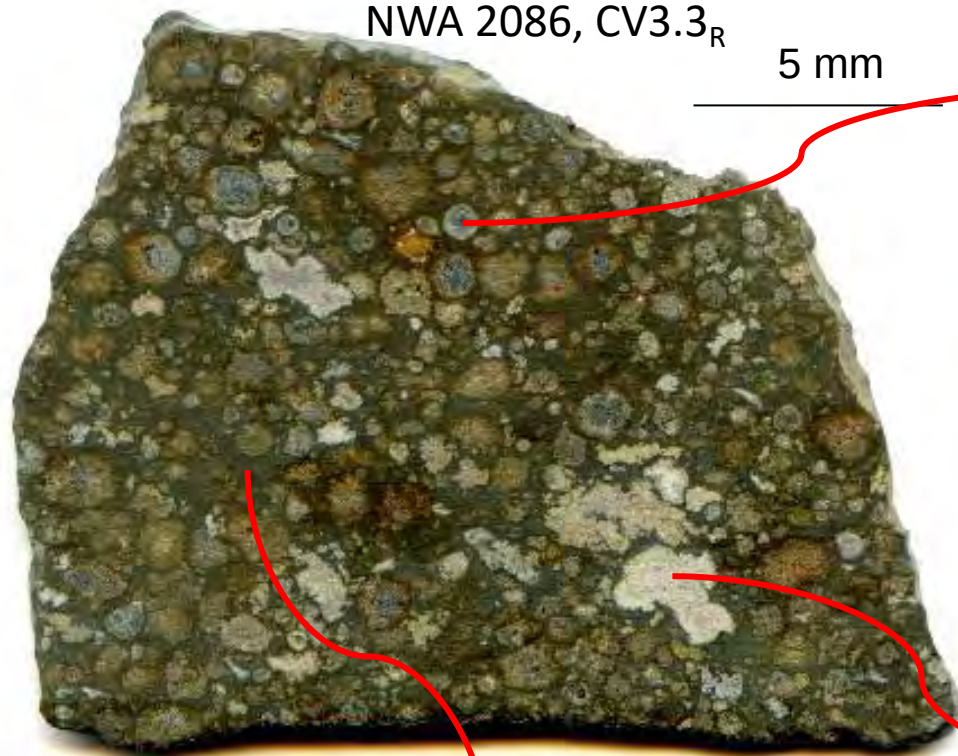




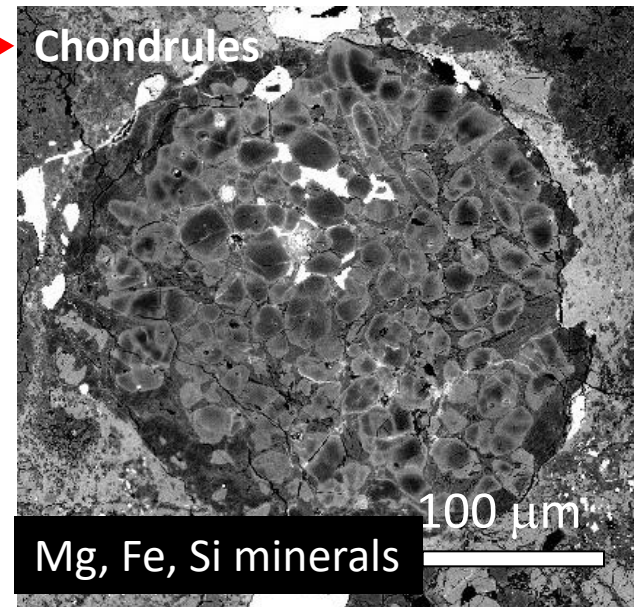
Les composantes des chondrites

NWA 2086, CV3.3_R

5 mm



Chondrules



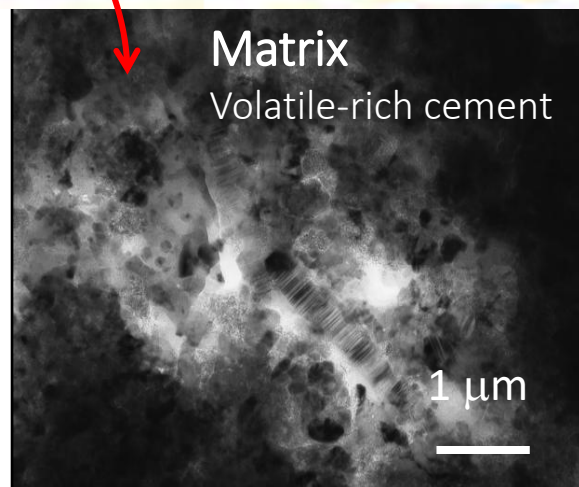
100 μm

Mg, Fe, Si minerals

Les chondrites se différencient par leurs différentes proportions entre CAIs, chondres et matrice

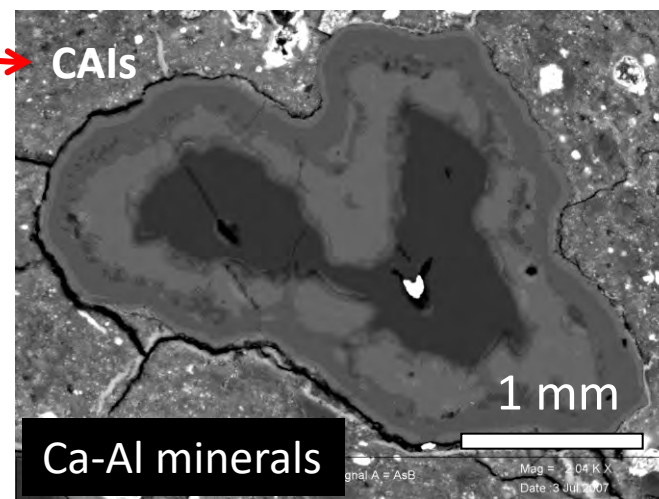
Matrix

Volatile-rich cement



1 μm

CAIs



1 mm

Ca-Al minerals

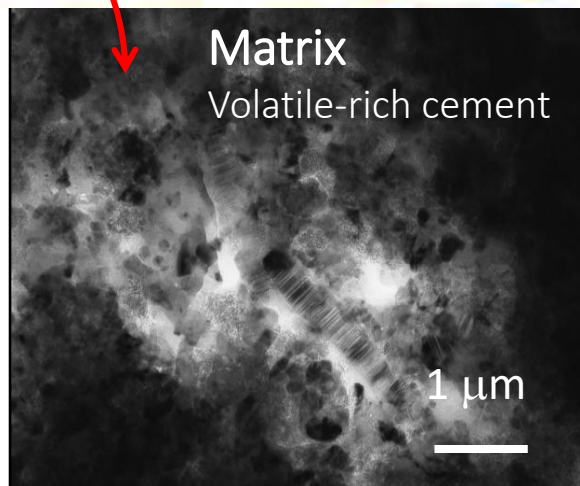
Les composantes des chondrites

NWA 2086, CV3.3_R

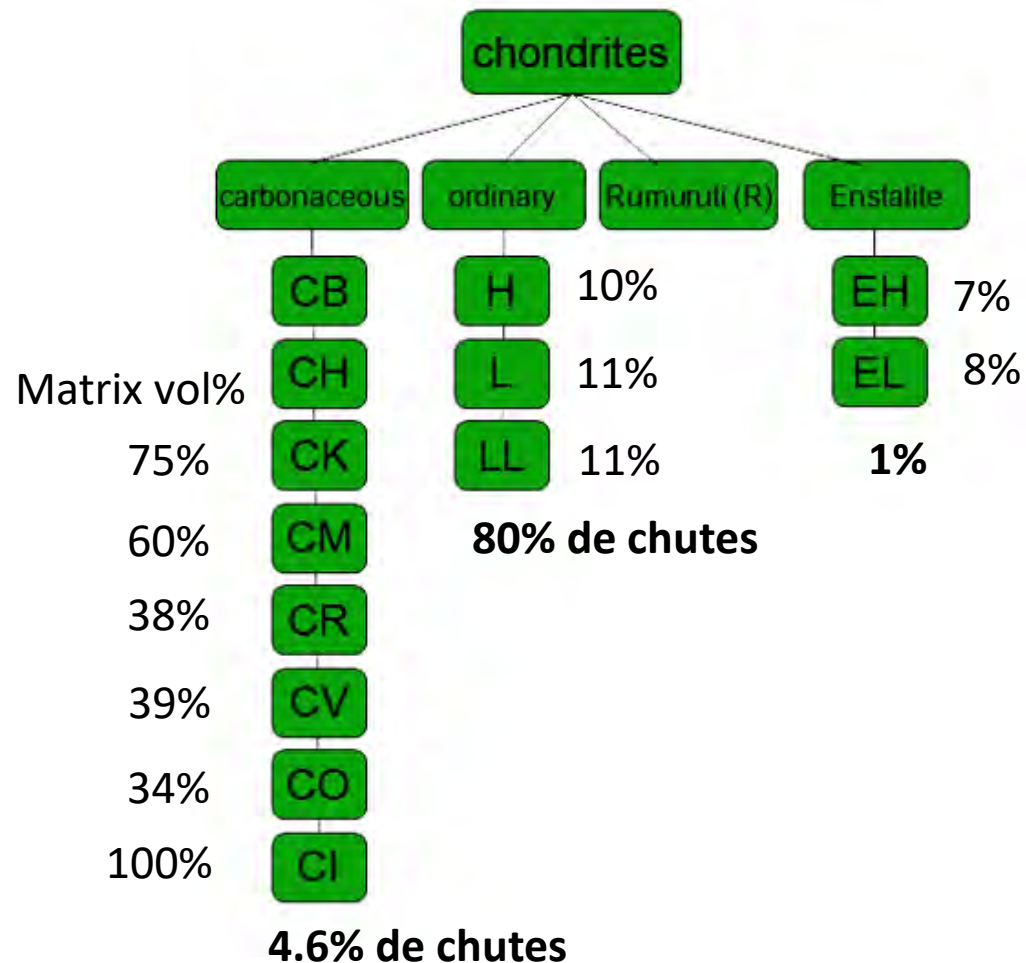
5 mm



Les chondrites se différencient par leurs différentes proportions entre CAIs, chondres et matrice

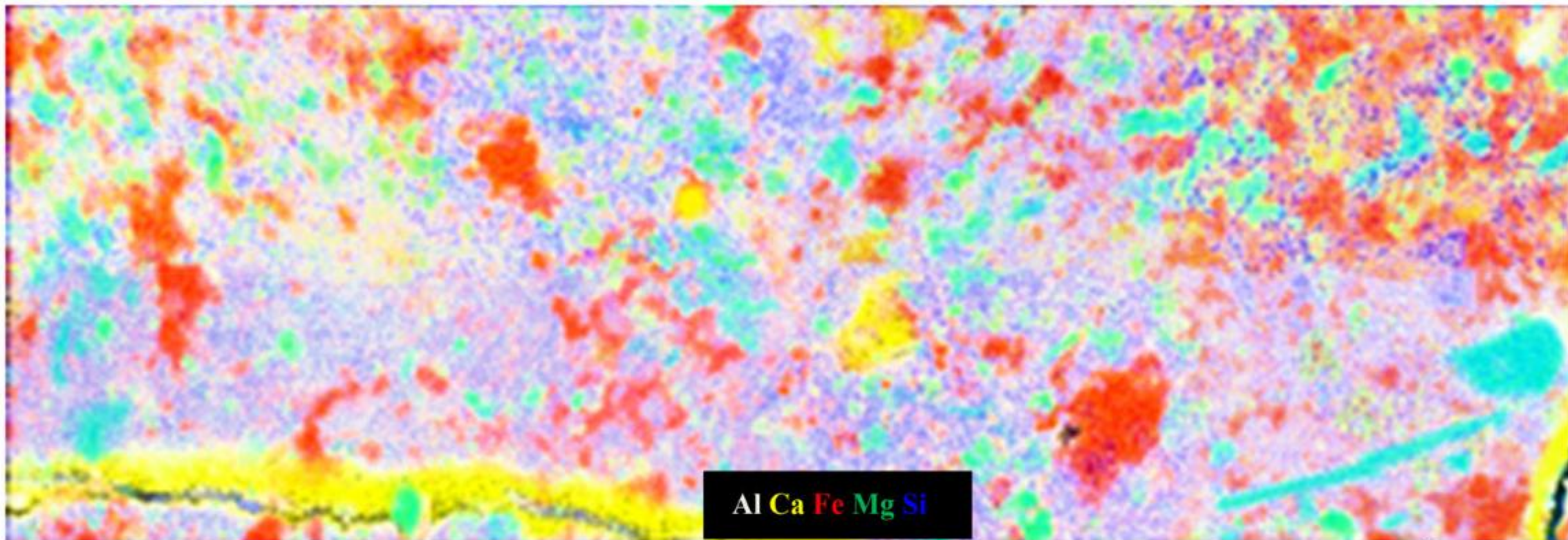


Undifferentiated meteorites





La matrice

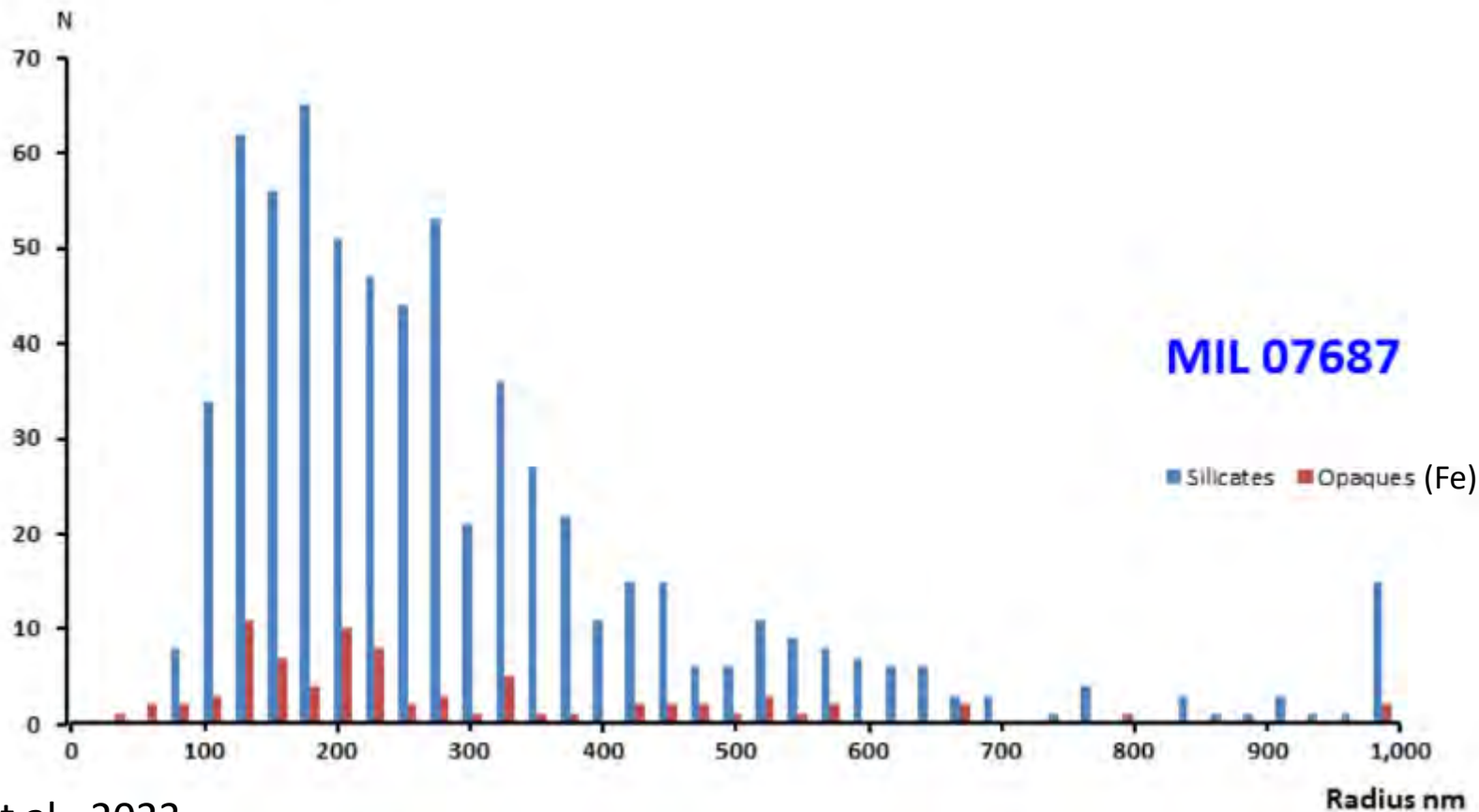


Vaccaro et al., 2023

Extrêmement hétérogène à petite échelle: silicates cristallins, amorphes, matière organique (C), grains Fe-Ni, FeS, débris de chondres et CAIs, grains présolaires.



La matrice



Vaccaro et al., 2023

Tailles de grains sous-microniques



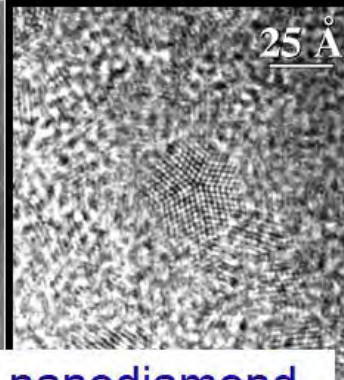
Grains présolaires



Silicon
Carbide



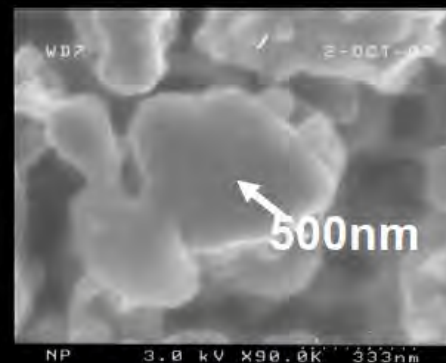
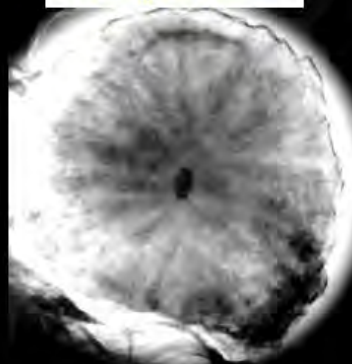
Graphite



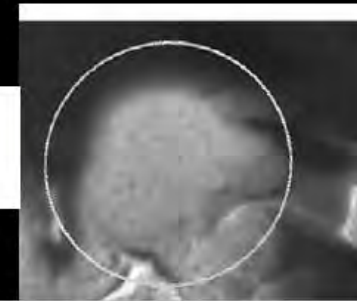
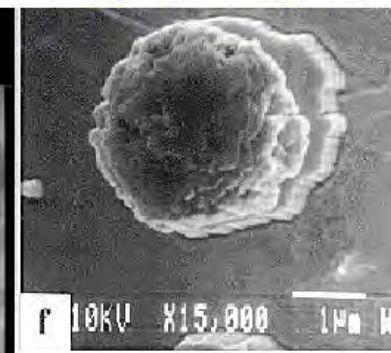
nanodiamond



Oxides(Al_2O_3 ,
 MgAl_2O_4 , TiO_2 ...)

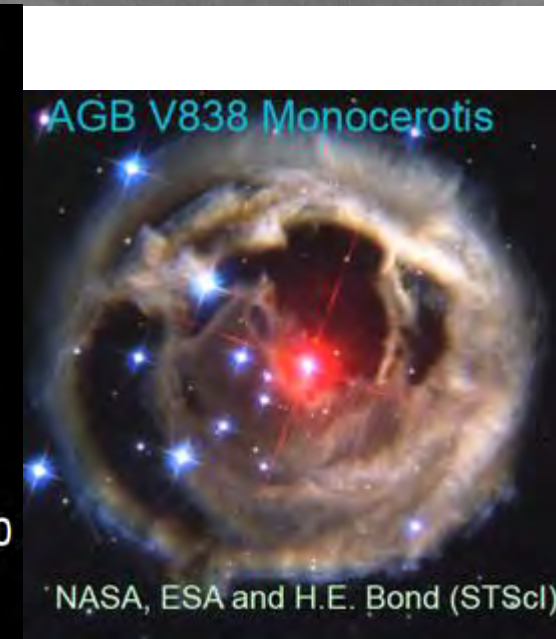
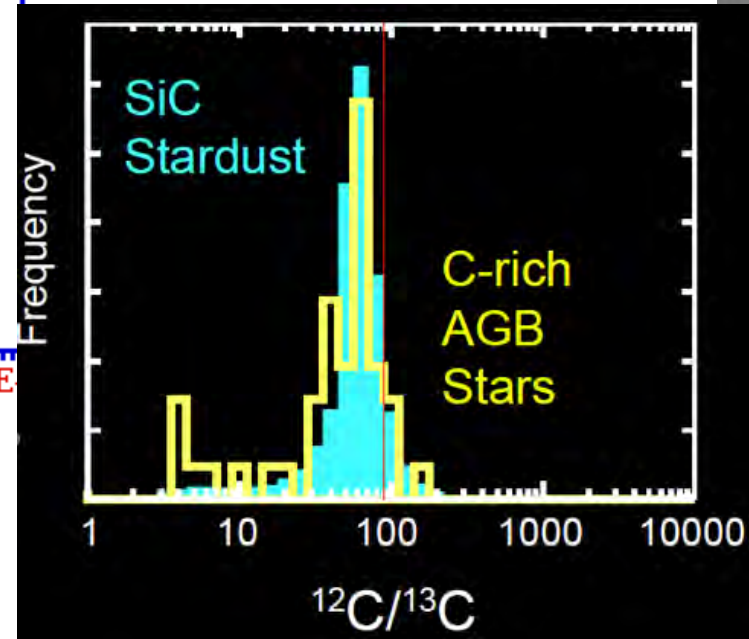
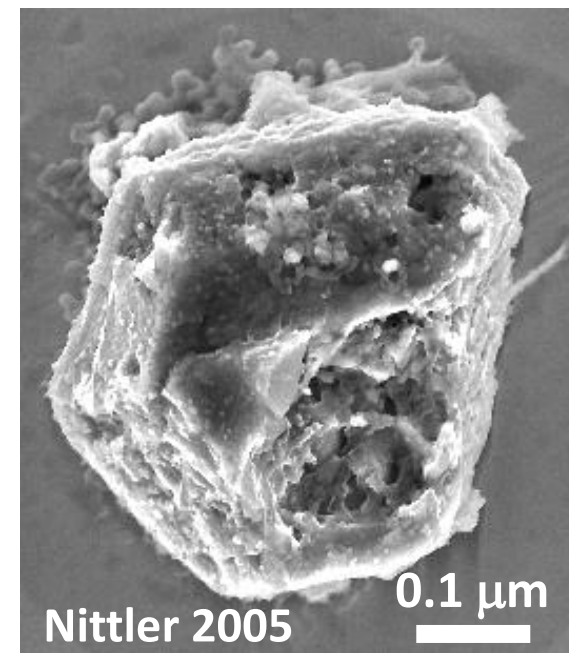
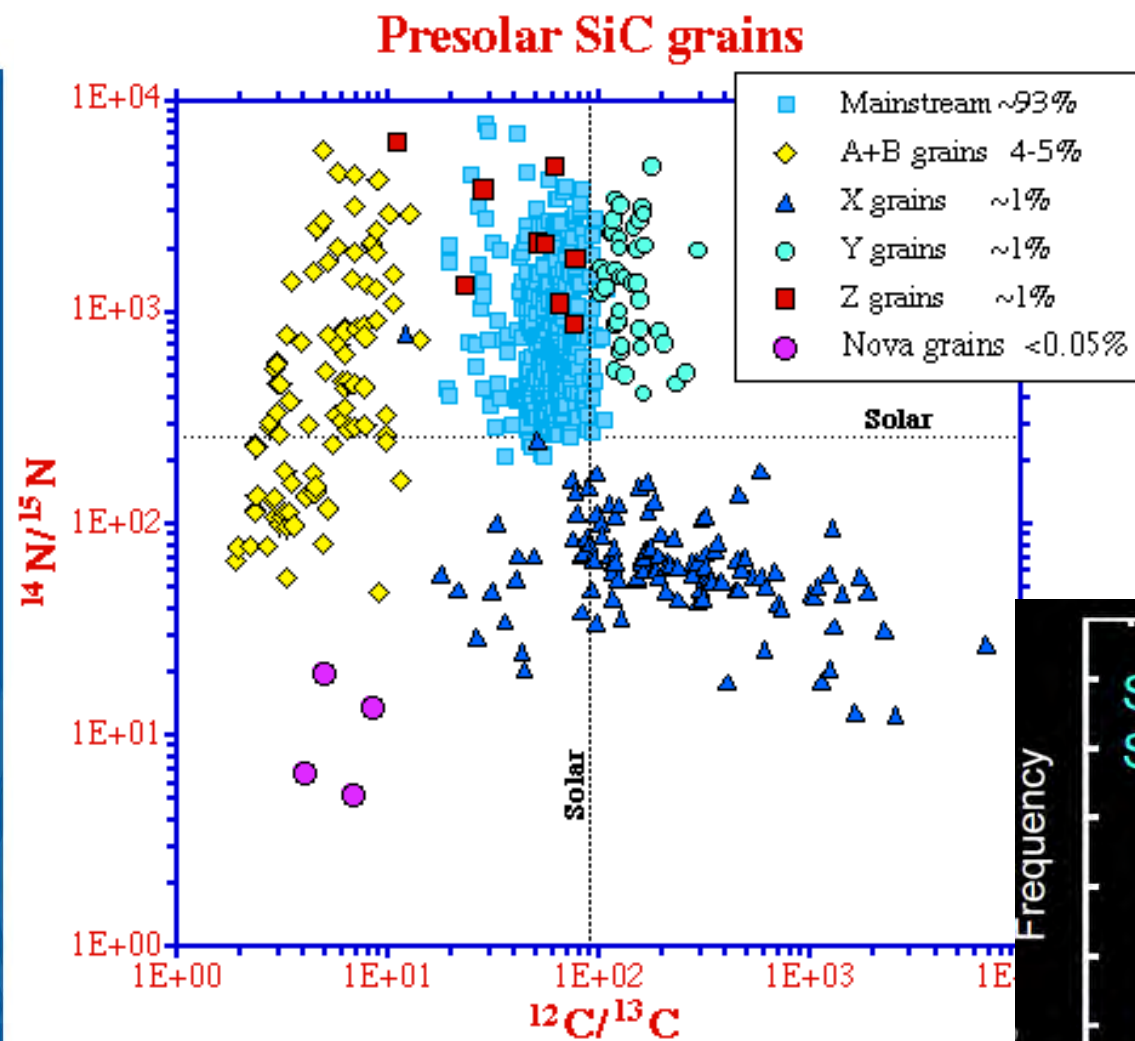


Silicates (Glass,
 MgSiO_4 ...)





Identification des grains présolaires par anomalie isotopique





La composition solaire des chondrites CI

CI = 100% matrice

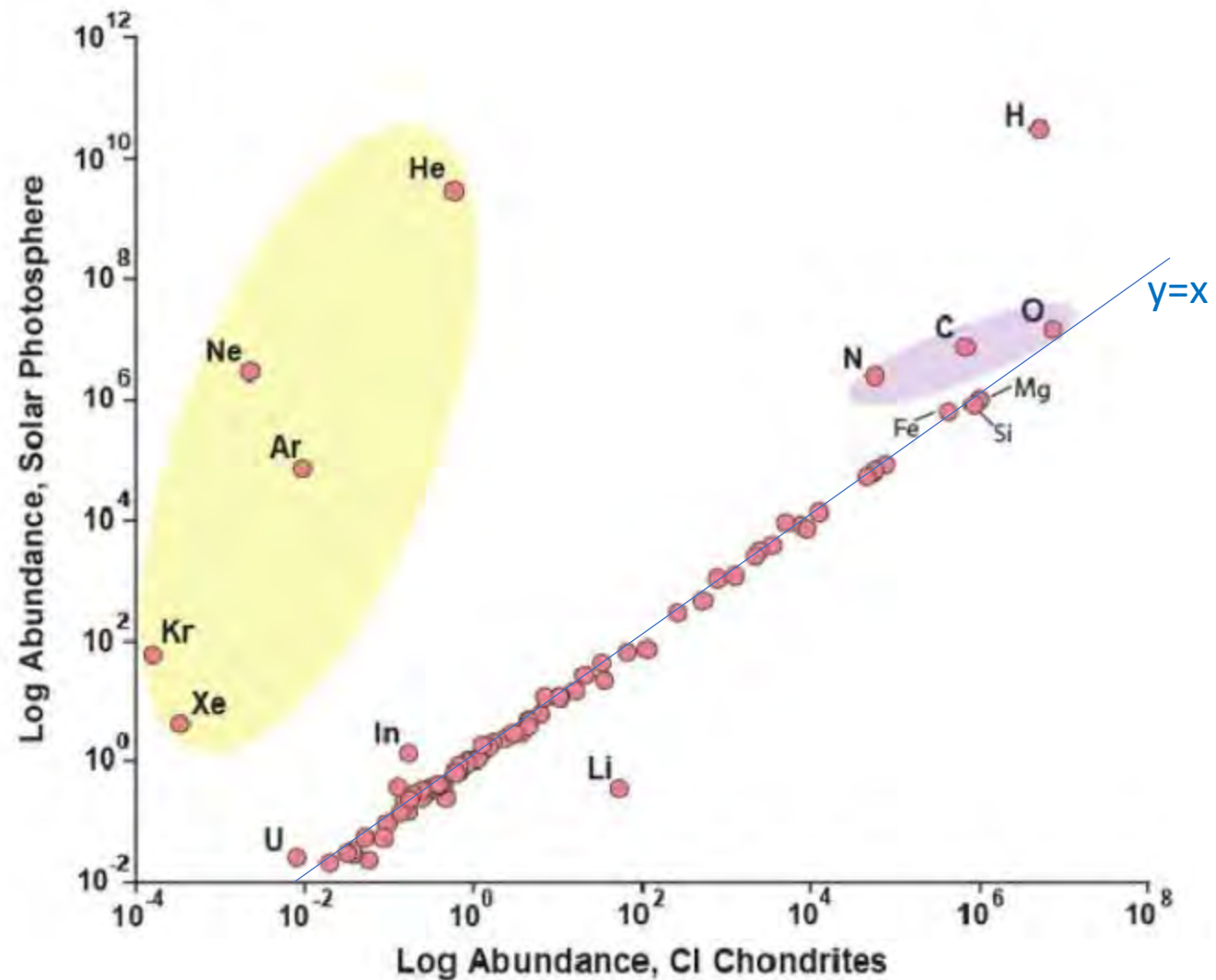
Températures de condensation:

H₂O ~170 K

CO₂ ~ 70-90 K

CO ~20-30 K

N₂ ~15-25 K



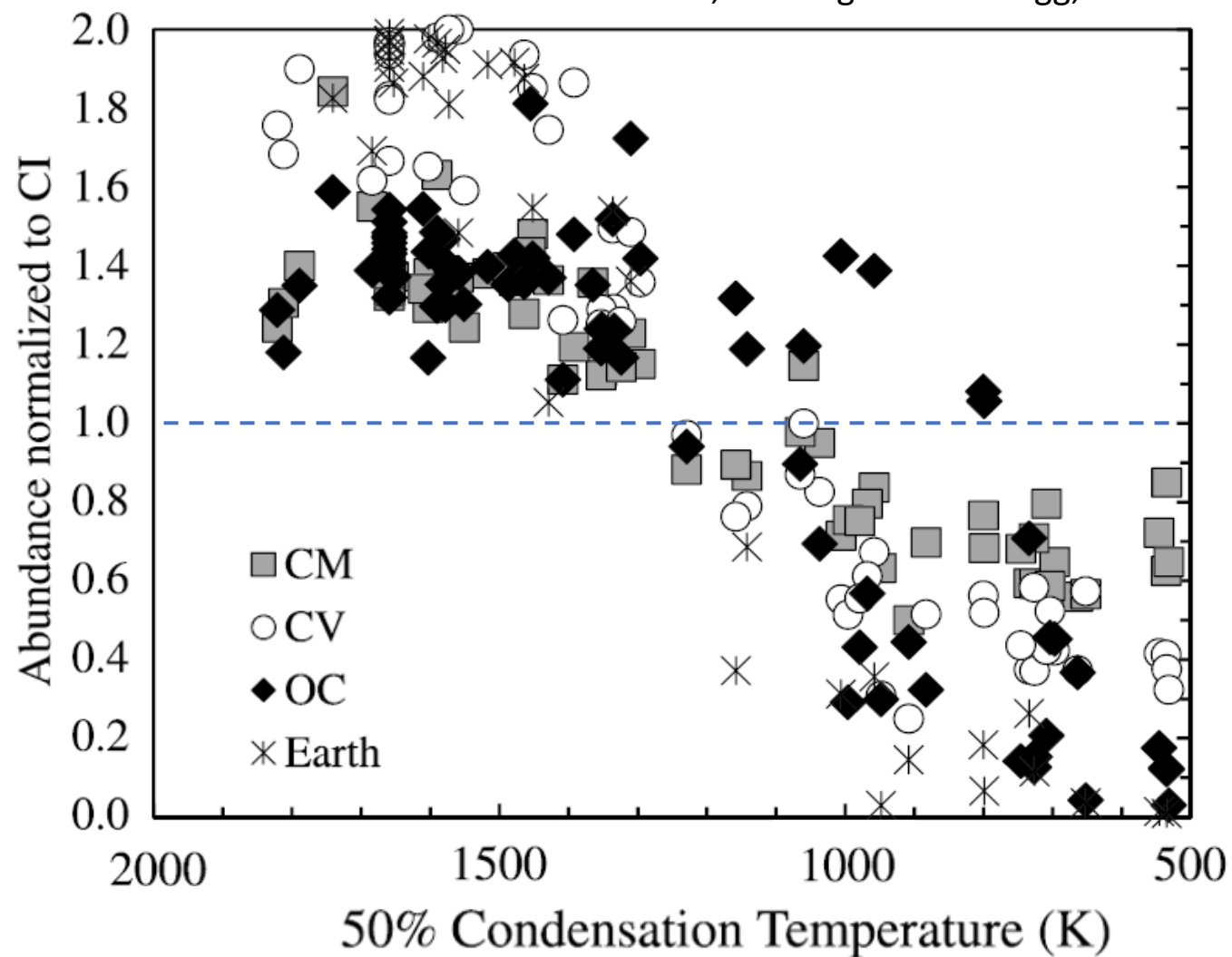
Dye et al., 2014



Fractionation de la composition chimique des autres chondrites

Les autres chondrites carbonées et les chondrites ordinaires, sont progressivement dépletés en éléments volatiles et enrichies en éléments réfractaires

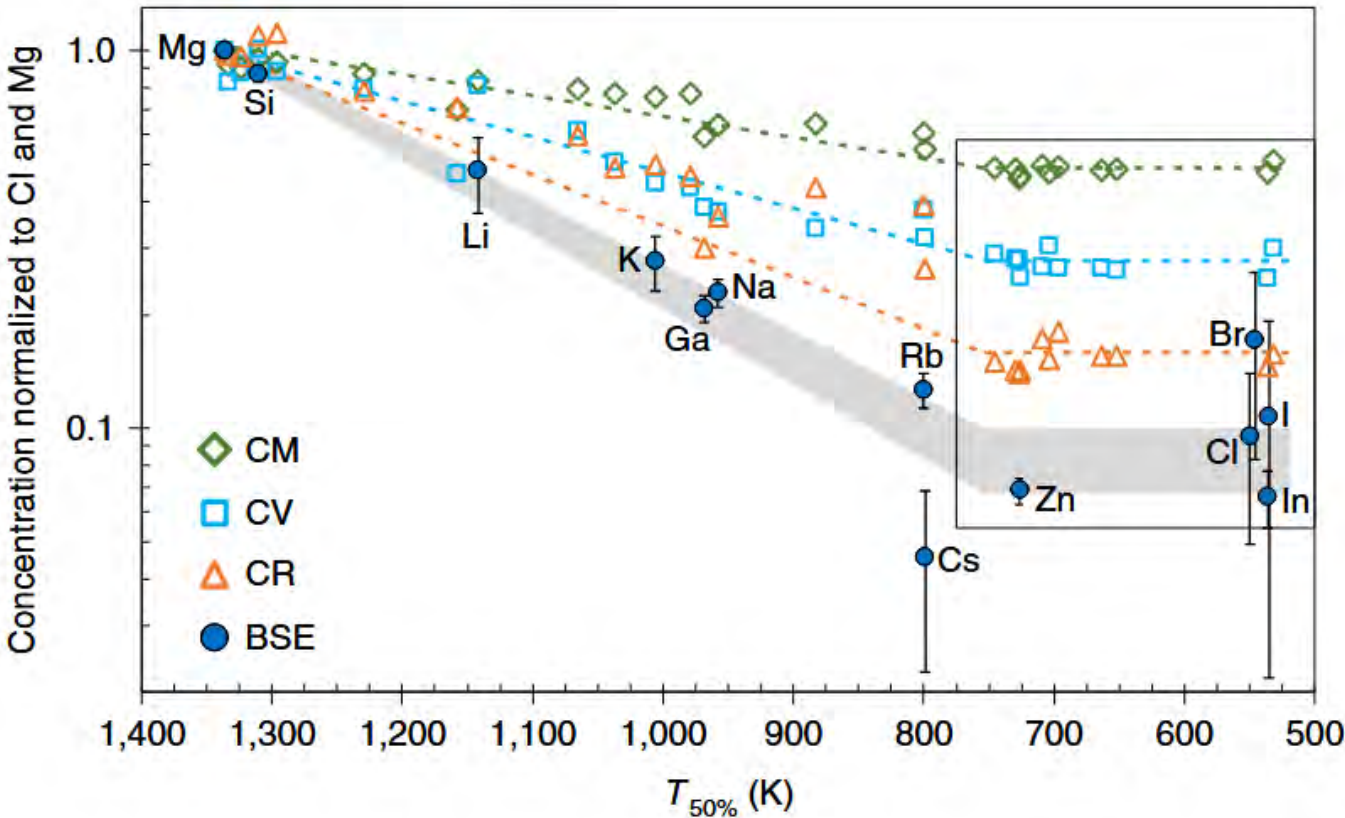
Alexander, McKeegan et Altwegg, 2018



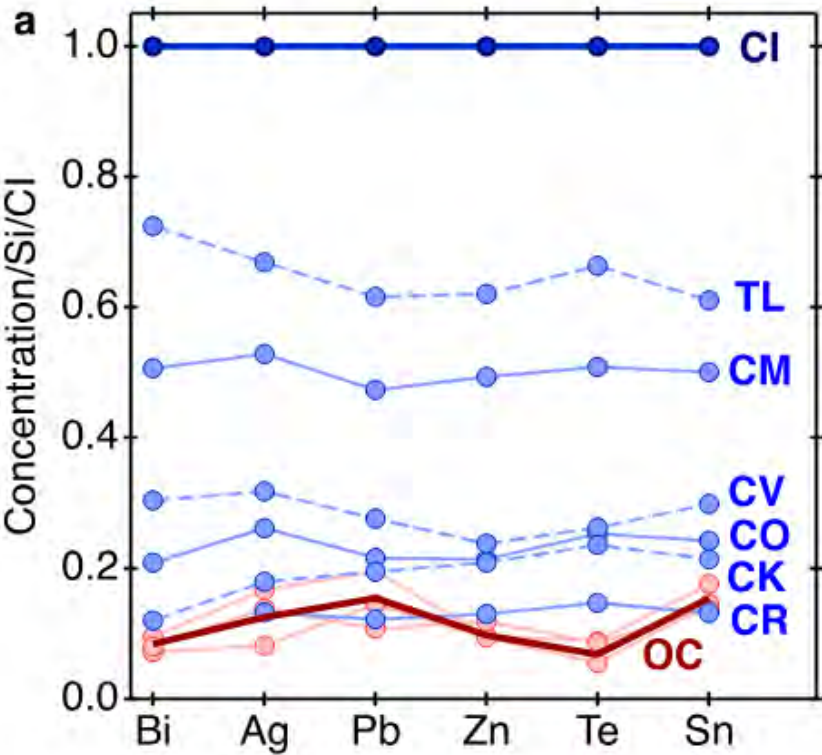


Déplétion progressive des éléments volatils

Suggère que chaque météorite contient une fraction de matière CI, qui porte les éléments plus volatils



Braukmuller et al., 2019



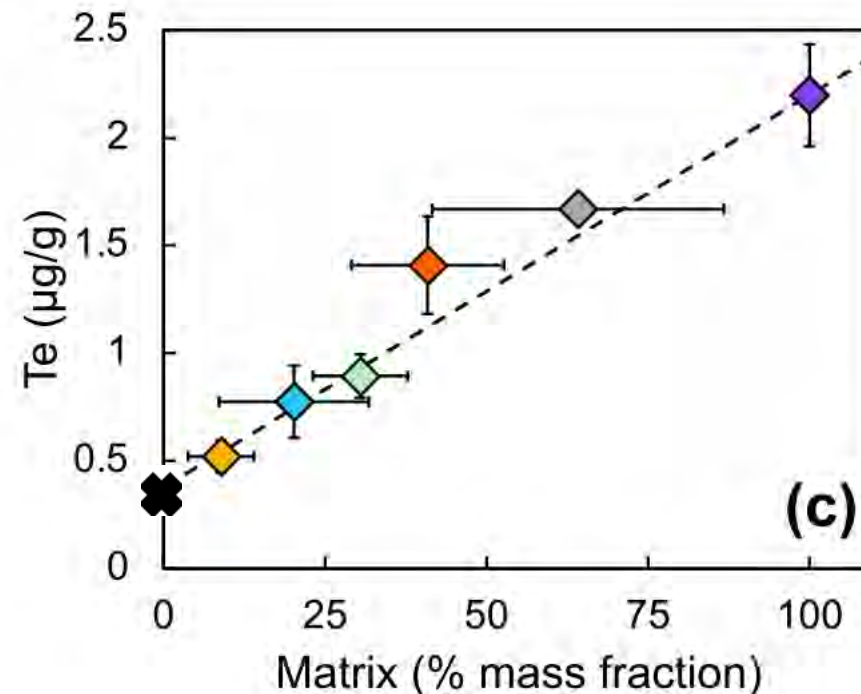
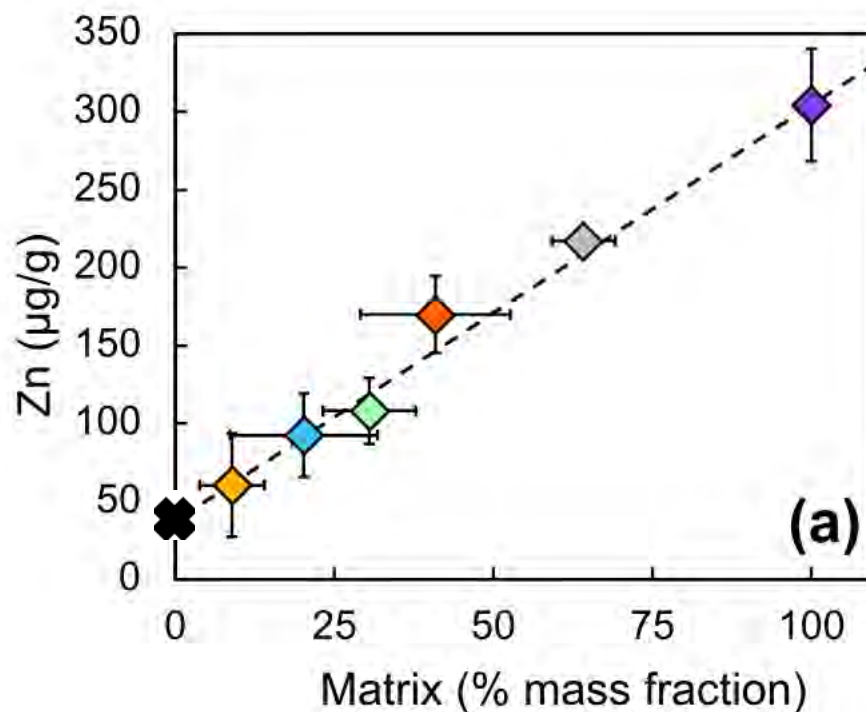
Bryson & Brennecka, 2021



Matrice et éléments volatils

Cette matière CI corrèle assez bien avec la quantité de matrice, ce qui suggère que la matrice a une composition CI (solaire)

Cependant les éléments volatils ne se trouvent pas exclusivement dans la matrice



◆ CI ◆ Tagish Lake ◆ CM ◆ CV ◆ CO ◆ CR ◆ Non-matrix endmember



Matrice et abondance d'eau

Quelques points à clarifier:

Les météorites ne contiennent pas d'eau à proprement parler (gouttes d'eau liquide, cristaux de glace).

Mais elles portent les traces d'existence ancienne d'eau liquide qui a interagit avec le fer en l'oxydant, et avec les silicates et la matière organique pour former des minéraux hydratés (argiles, carbonates, ...).

En partant de ces minéraux, on peut extraire de l'eau aujourd'hui

De plus, de l'eau aurait pu s'échapper par évaporation, sans en laisser trace. La quantité initiale d'eau dans le corps parent déduite à partir des l'abondance des minéraux hydratés et du FeO est donc une limite inférieure.

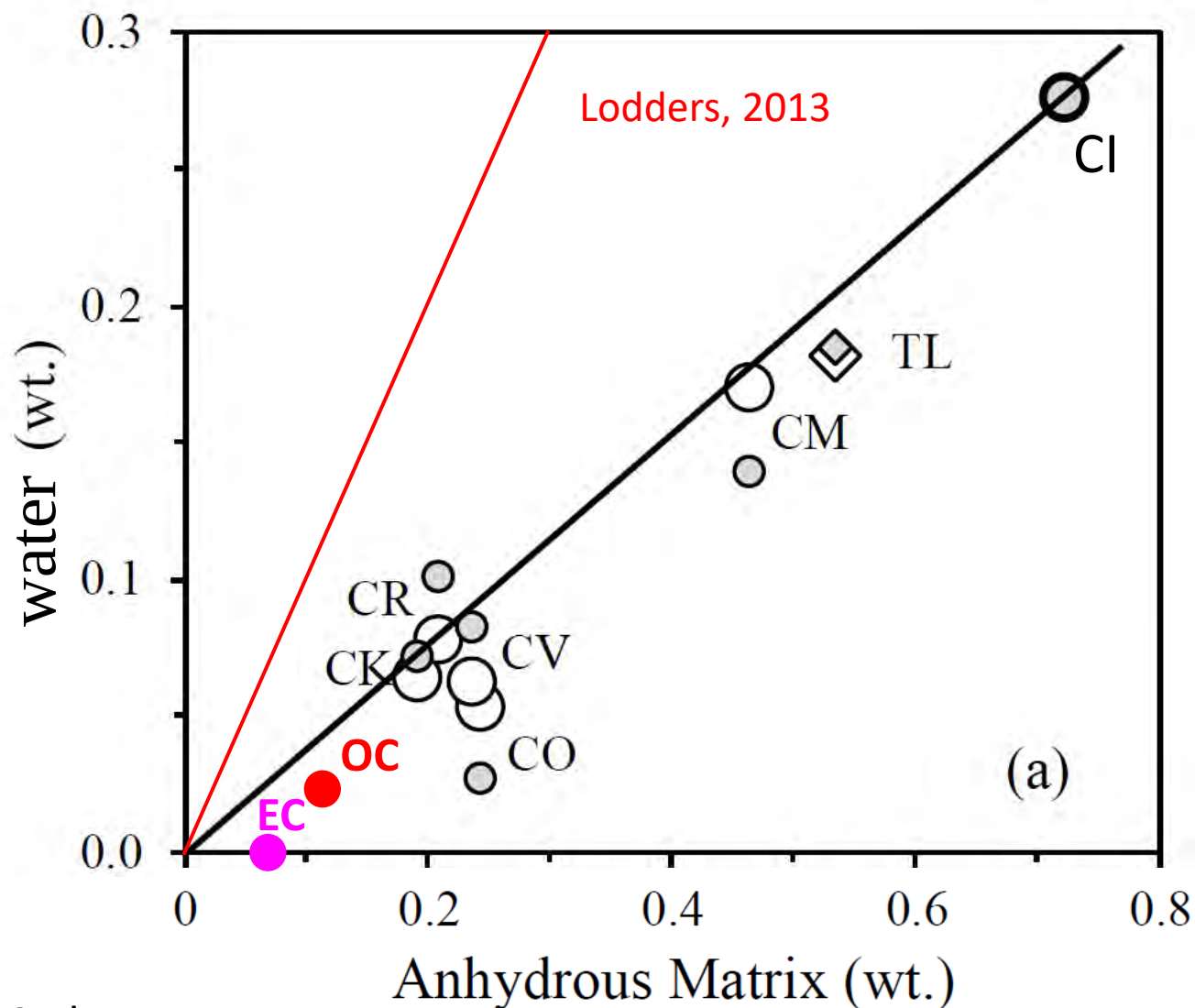


Matrice et abondance d'eau

Matrice anhydre: matrice à la quelle on a retiré toute l'eau contenue dans les minéraux hydratés et l'oxygène ayant oxydé le Fe

C'est la matrice qui porte l'eau
Une matrice sans eau existe seulement dans les chondrites à enstatite

Mais le rapport H_2O /roche dans la matrice est $\sim 1/3$, bien inférieur au rapport 1/1 attendu à partir de la composition solaire.



Alexander, 2019a,b

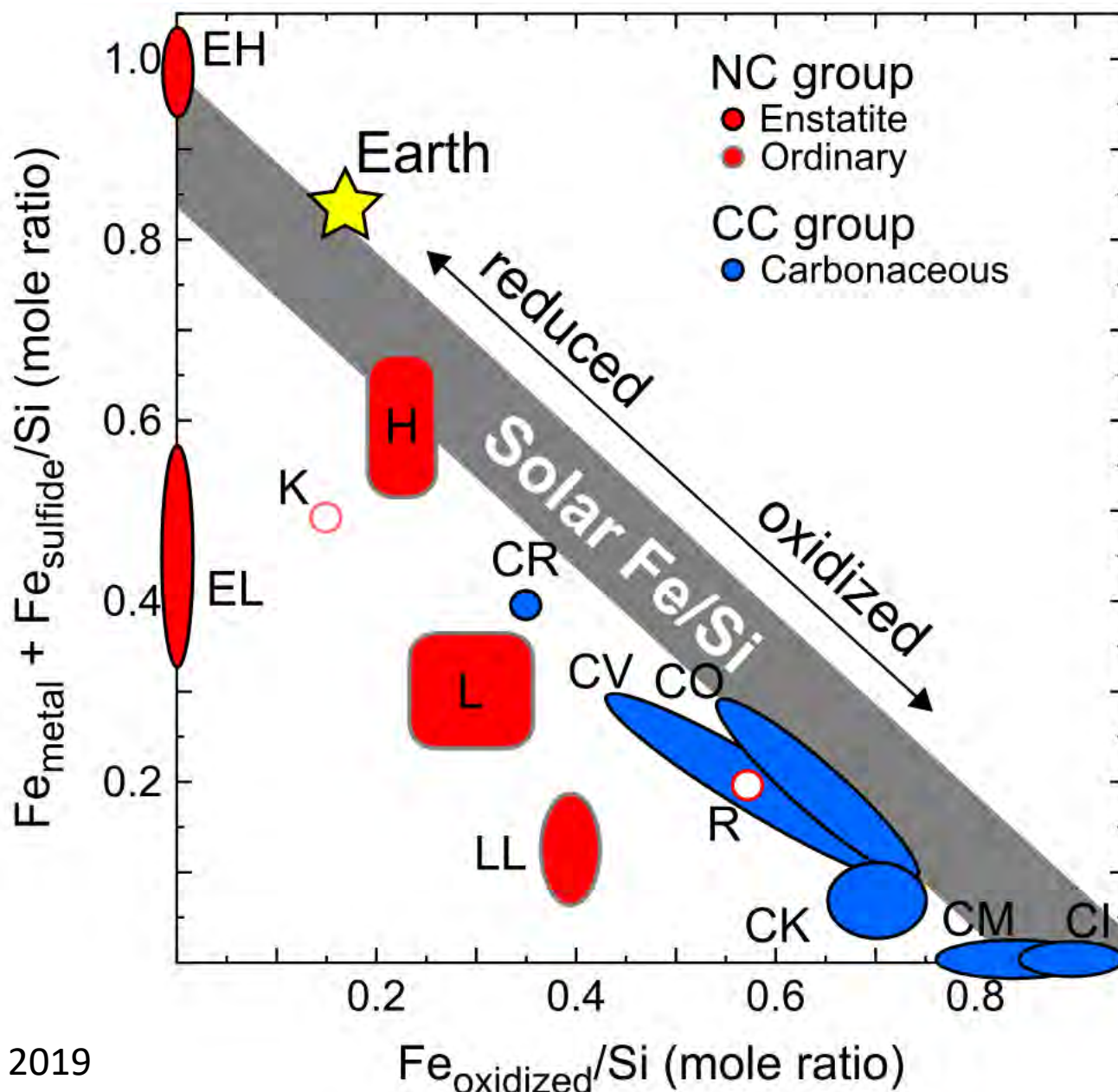


Sous-classification des chondrites ordinaires et à enstatites

Diagramme de Urey-Craig:

Trois sous-classes de chondrites ordinaires (LL, L, H)
Deux sous-classes de chondrites à enstatite (EL, EH)

Différents corps parents



Yoshizaki et al., 2019



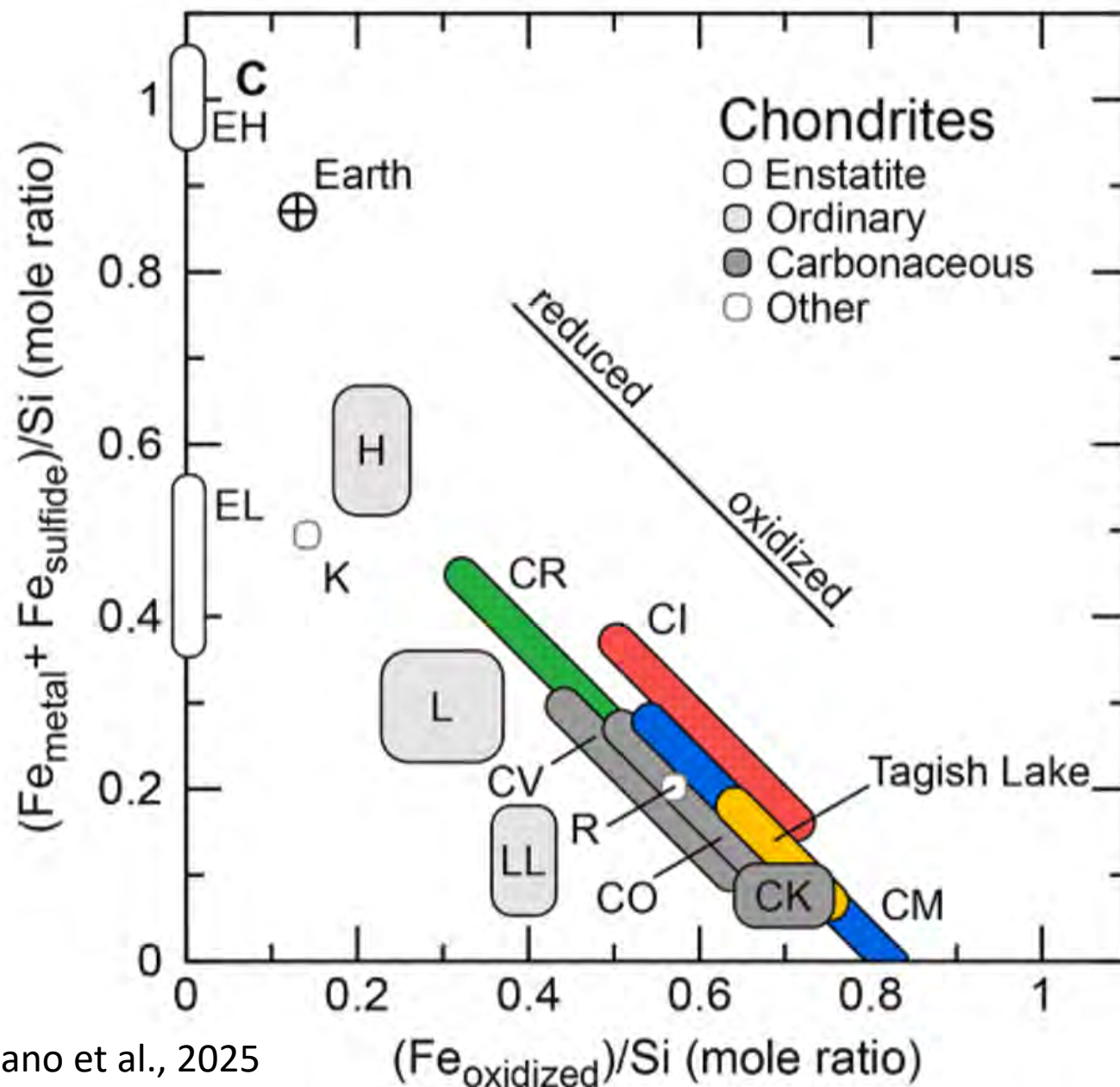
Sous-classification des chondrites ordinaires et à enstatites

Diagramme de Urey-Craig:

Trois sous-classes de chondrites ordinaires (LL, L, H)

Deux sous-classes de chondrites à enstatite (EL, EH)

Différents corps parents



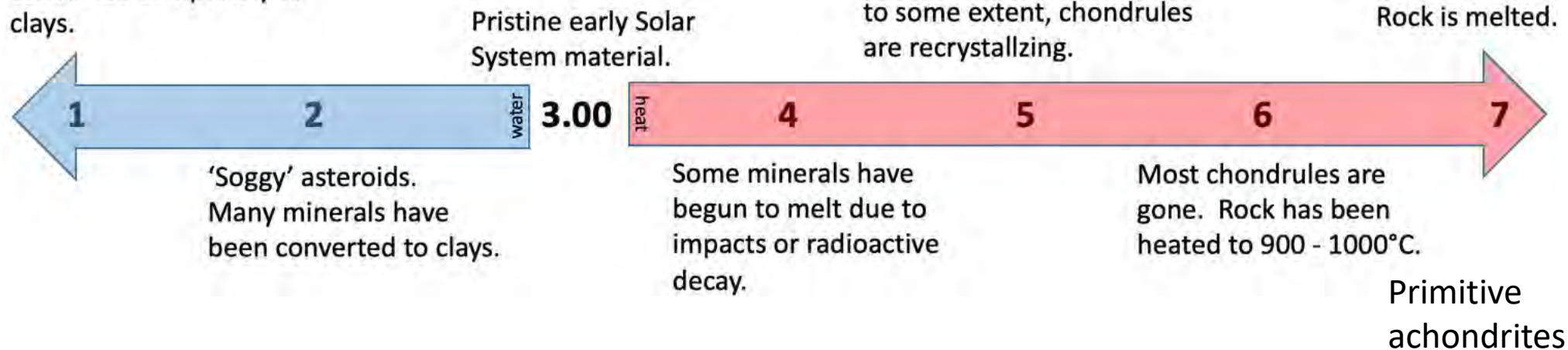
Nouvelle version du diagramme par Amano et al., 2025



Classification des chondrites selon le métamorphisme

Exposed to water for millions of years on their parent asteroids.

Minerals have been converted completely to clays.





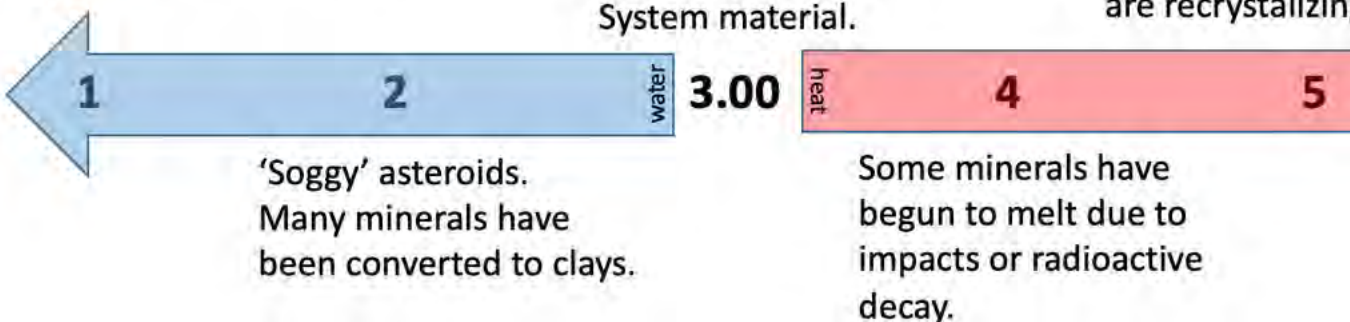
Classification des chondrites selon le métamorphisme

Exposed to water for millions of years on their parent asteroids.

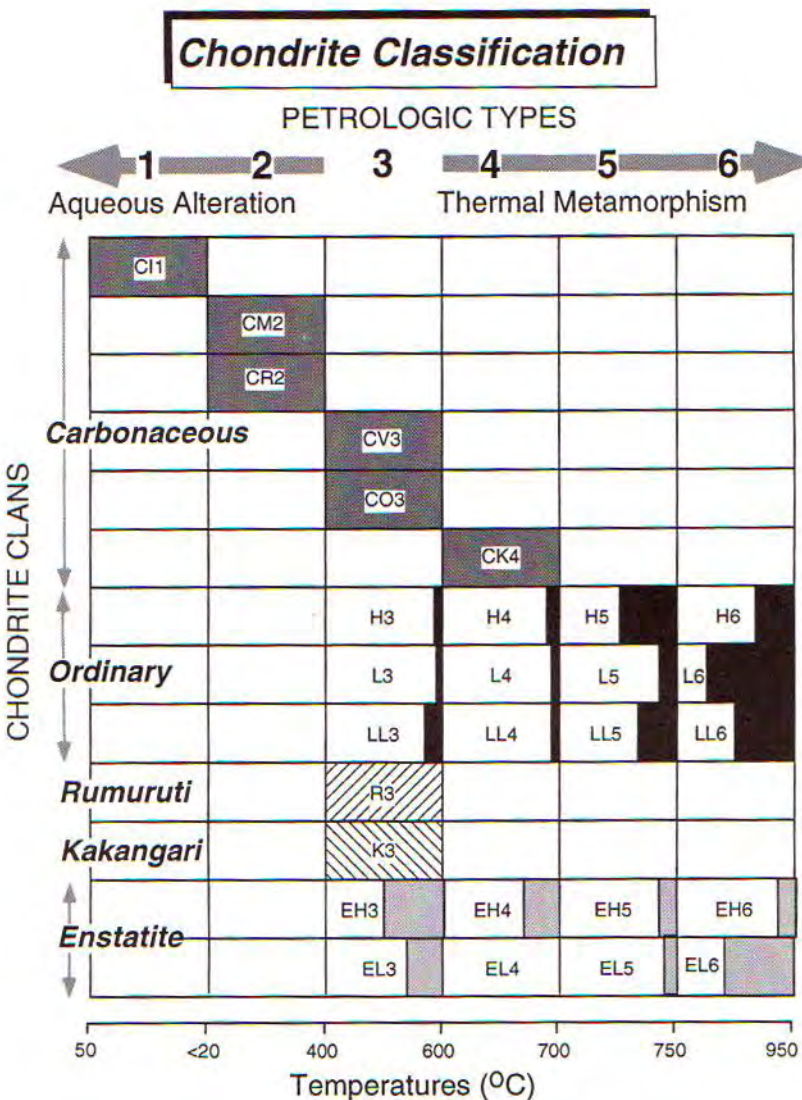
Minerals have been converted completely to clays.

Pristine early Solar System material.

Most minerals have to some extent, are recrystallizing.

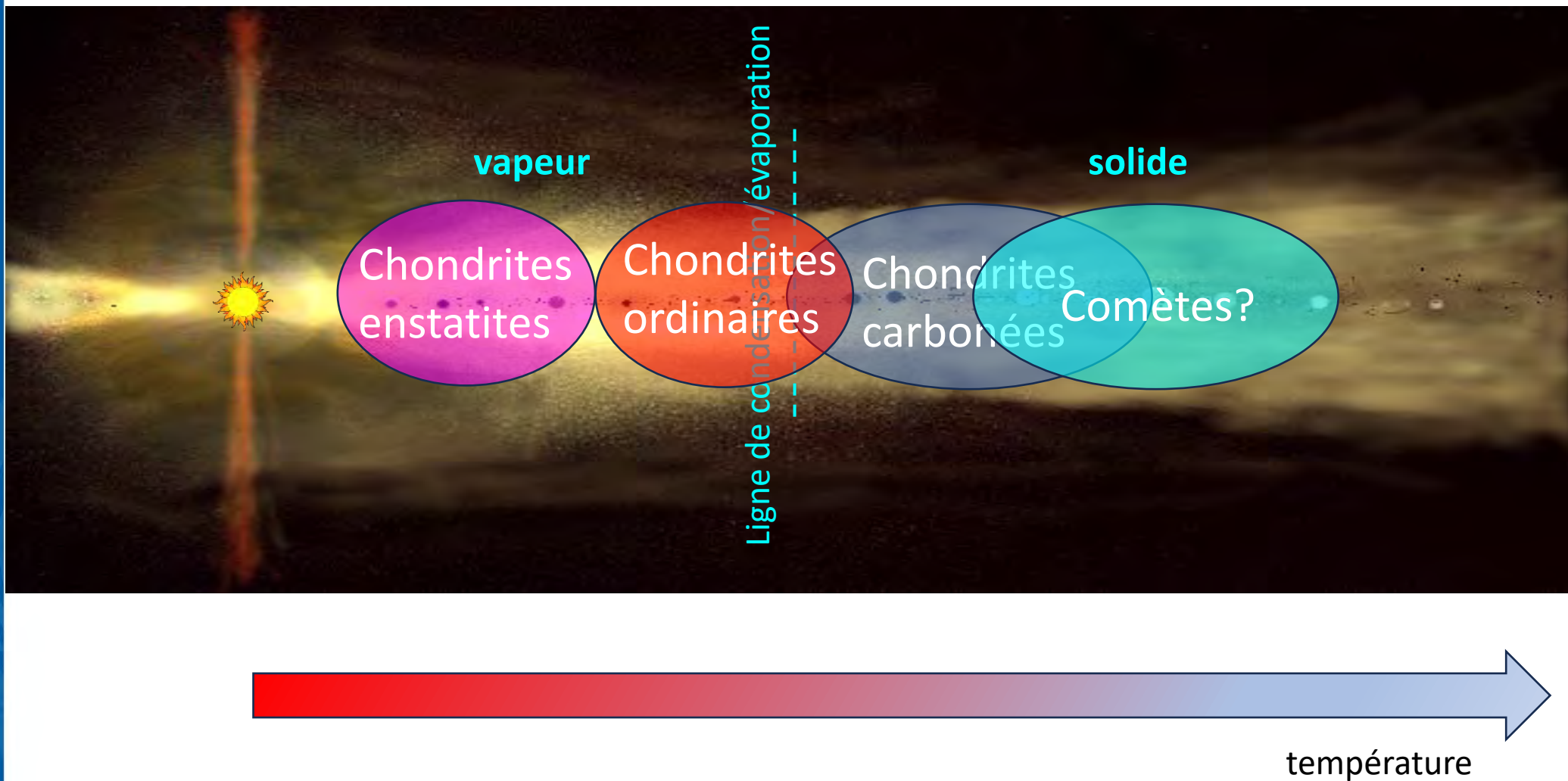


Météorites de la même classe mais avec pétrologies différentes peuvent venir du même corps parent mais depuis des profondeurs différentes.





Éléments volatils et la distance héliocentrique de formation des corps parents





Différences fondamentales entres chondrites carbonées et comètes

1) La glace a fondu dans les corps parents des chondrites, pas dans les comètes



(Image courtesy of Mike Zolensky, NASA JSC)



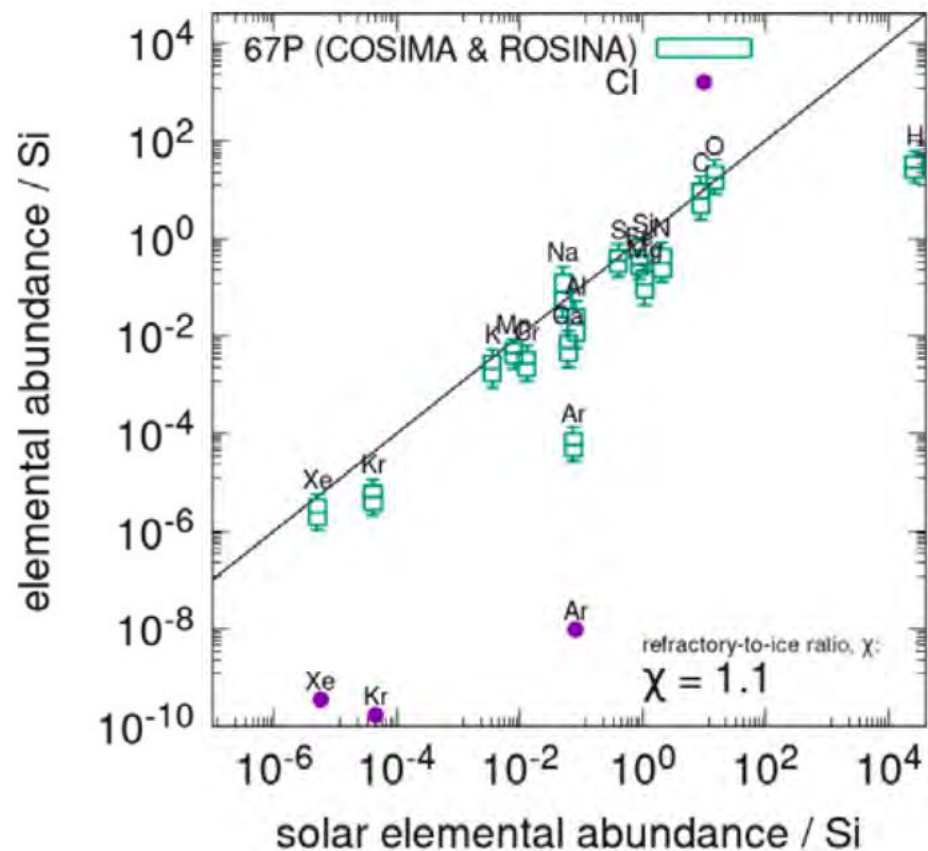
Les comètes n'ont jamais chauffé autant que les corps parents des chondrites. Elles se sont formées sans doute plus tard.



Différences fondamentales entre chondrites carbonées et comètes

- 2) La composition chimique est différente:
rapport roche/glace ~ 3 dans la matrice des chondrites, ~ 1 dans les comètes
énorme différence dans l'abondance de gaz rares

Les comètes se sont formées dans une zone beaucoup plus froide du disque, où même Xe and Kr ont largement condensé sur les grains

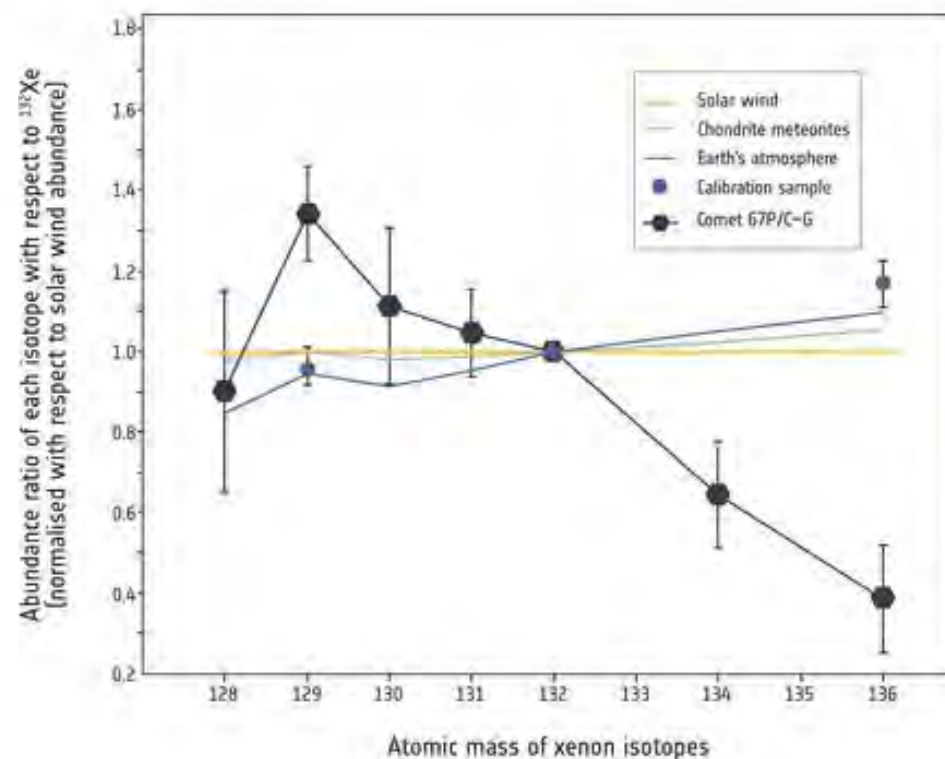
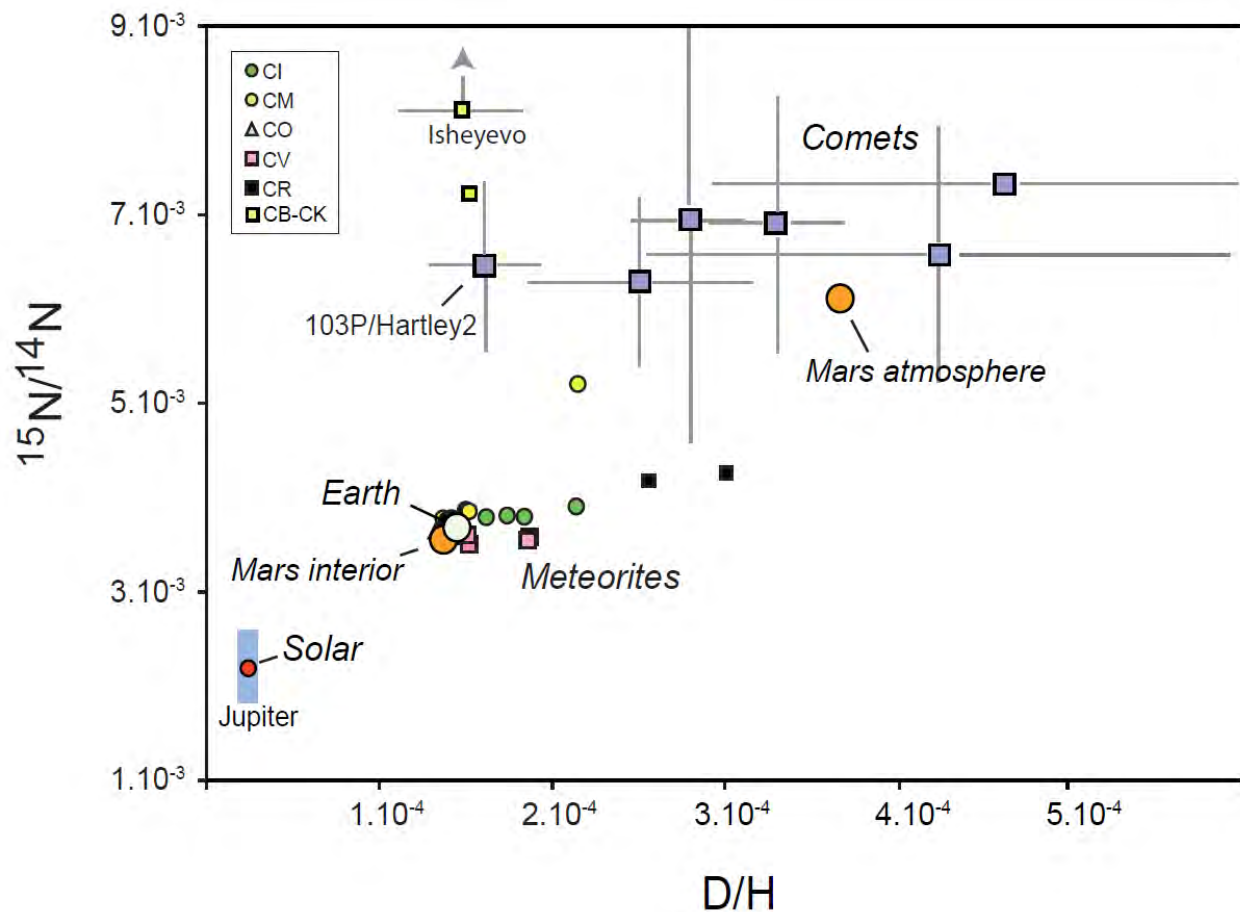


Marschall et al., 2025



Différences fondamentales entre chondrites carbonées et comètes

3) Les rapports isotopiques* des éléments volatils sont différents

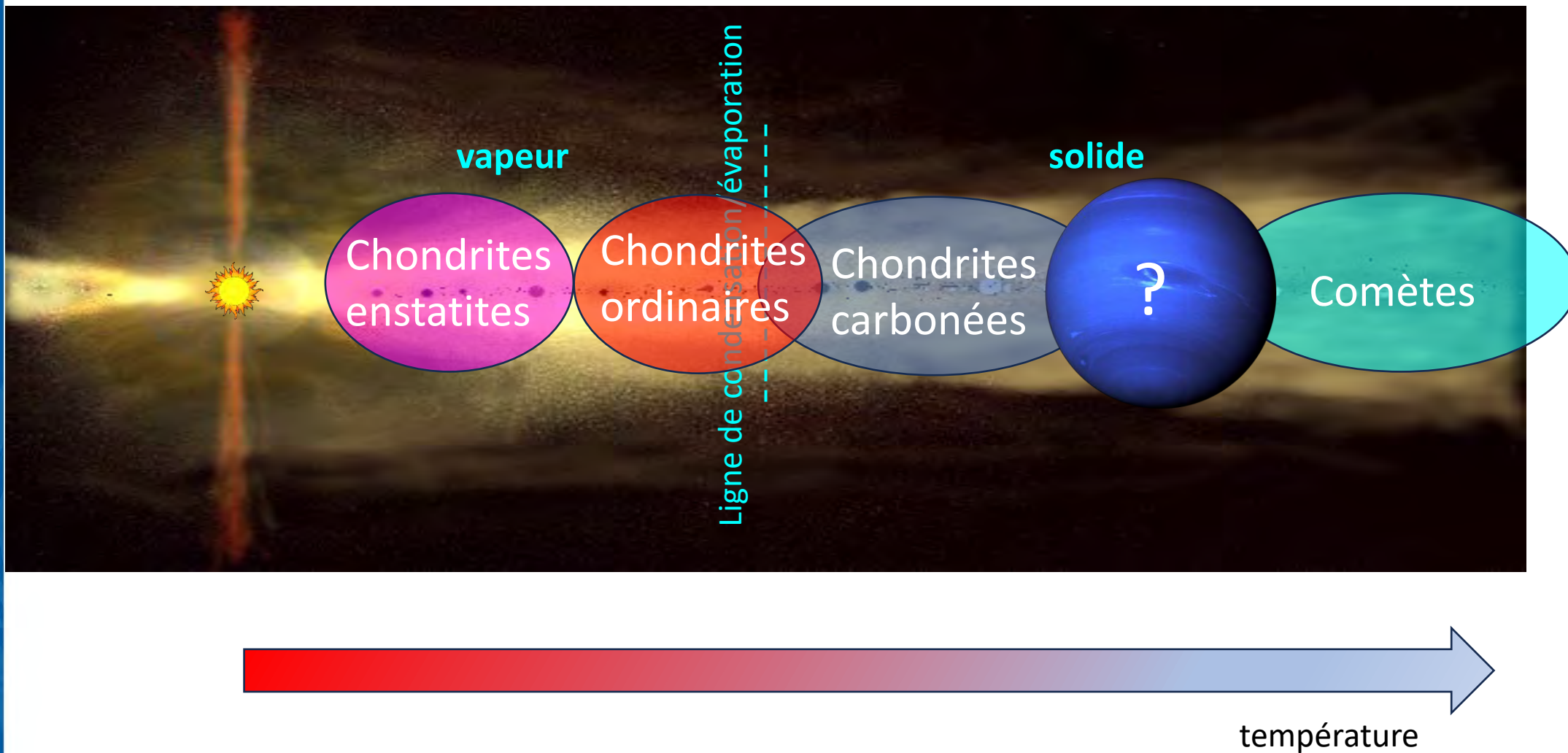


Marty et al., 2017

*Isotopes: atomes ayant le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents



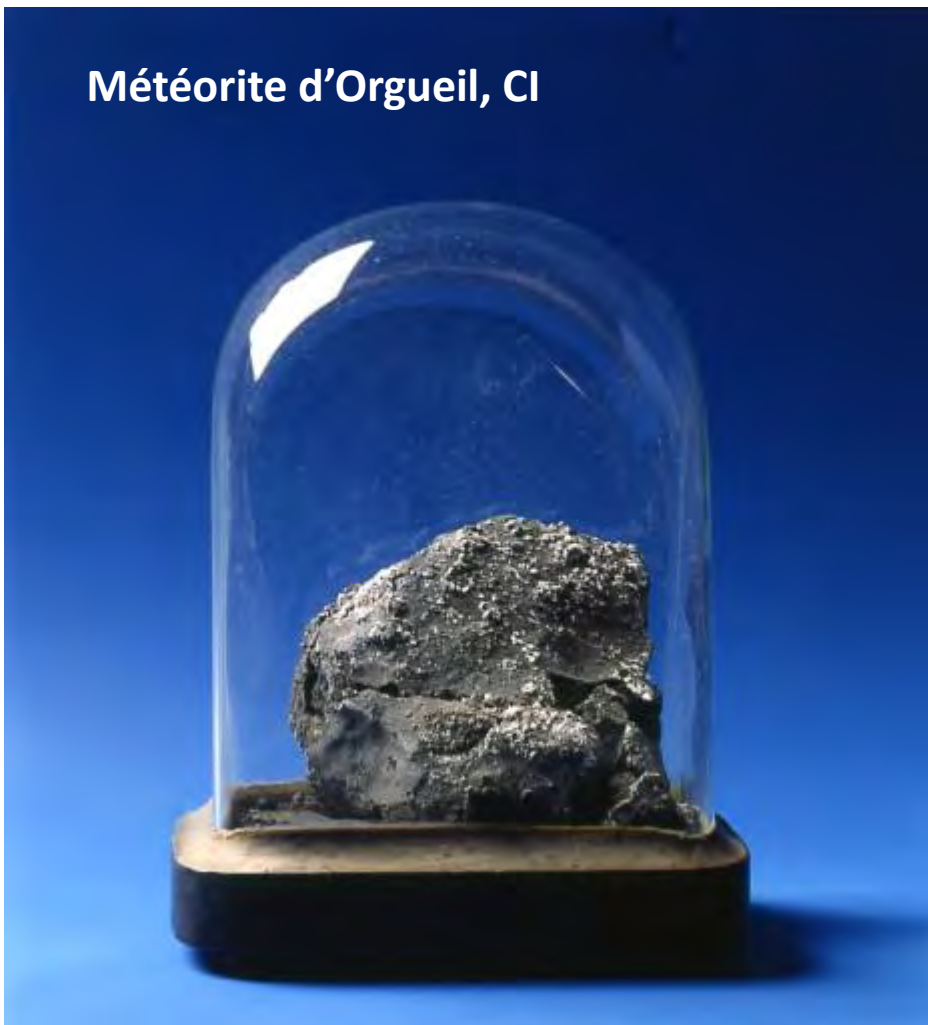
Éléments volatils et la distance héliocentrique de formation des corps parents



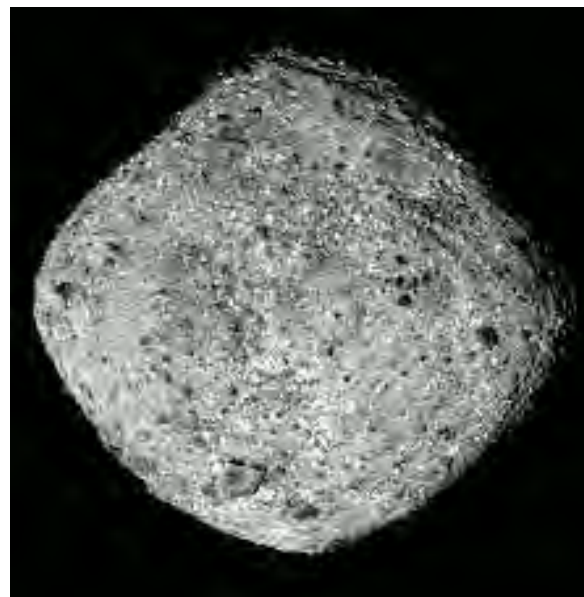


Associations météorites - astéroïdes

Météorite d'Orgueil, CI



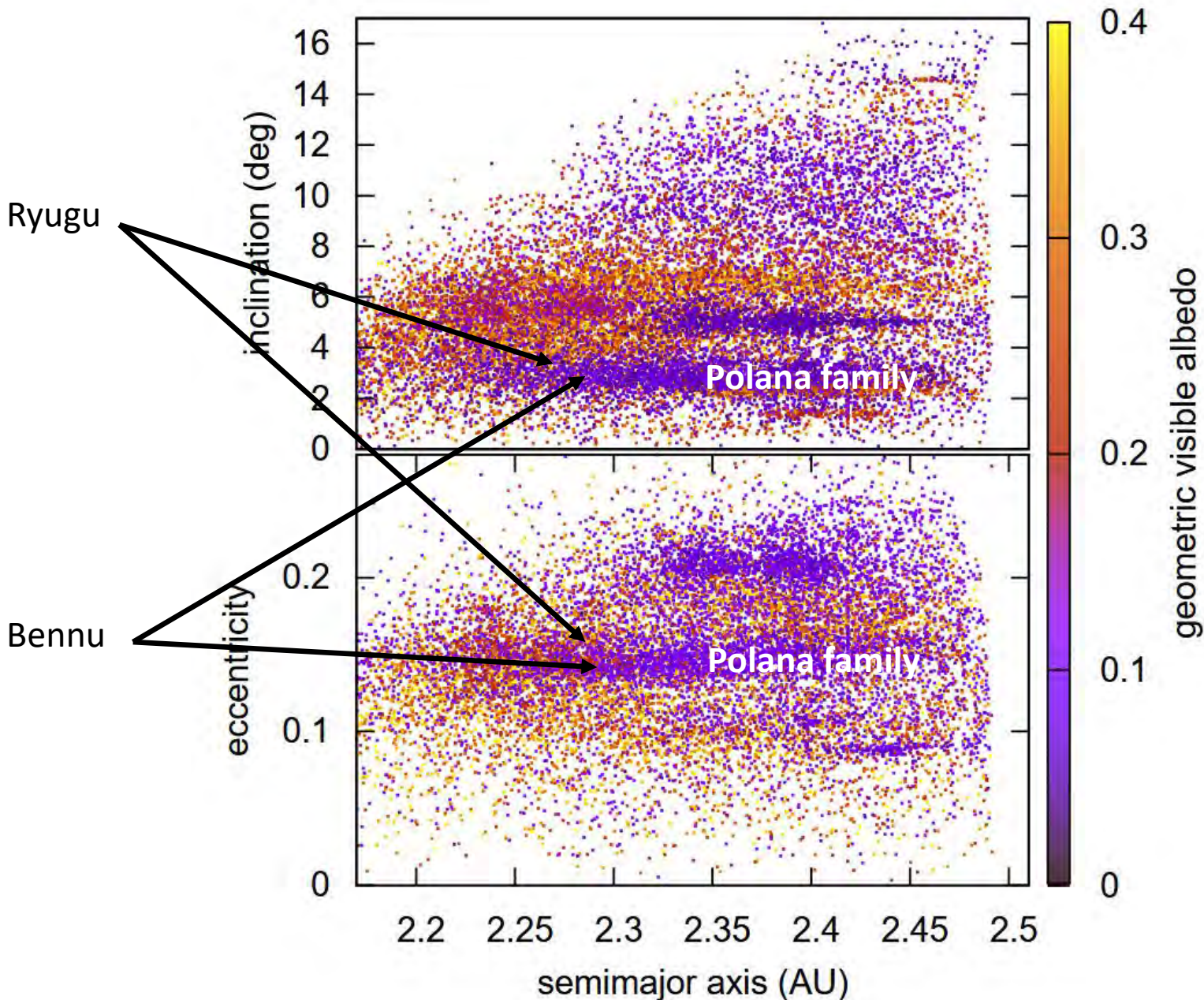
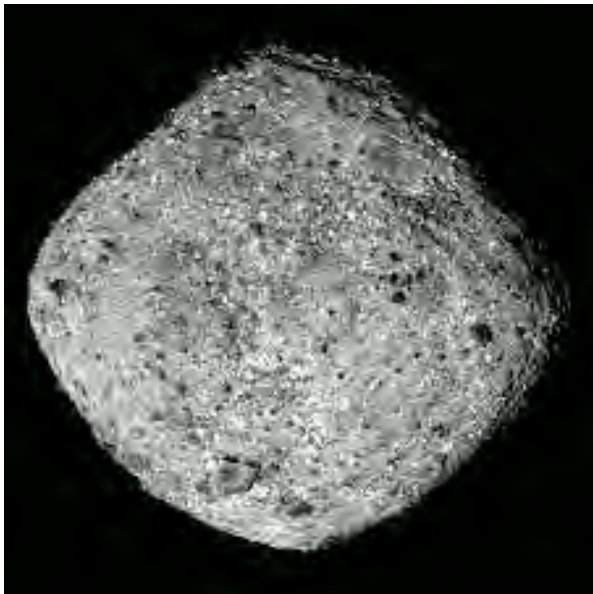
Ryugu



Bennu



Origine des météorites CI





Origine des météorites CI

Les météorites CI sont rares, pourtant les deux premiers astéroïdes carbonés échantillonnés ont la composition chimique et isotopique des météorites CI



Orgueil, CI

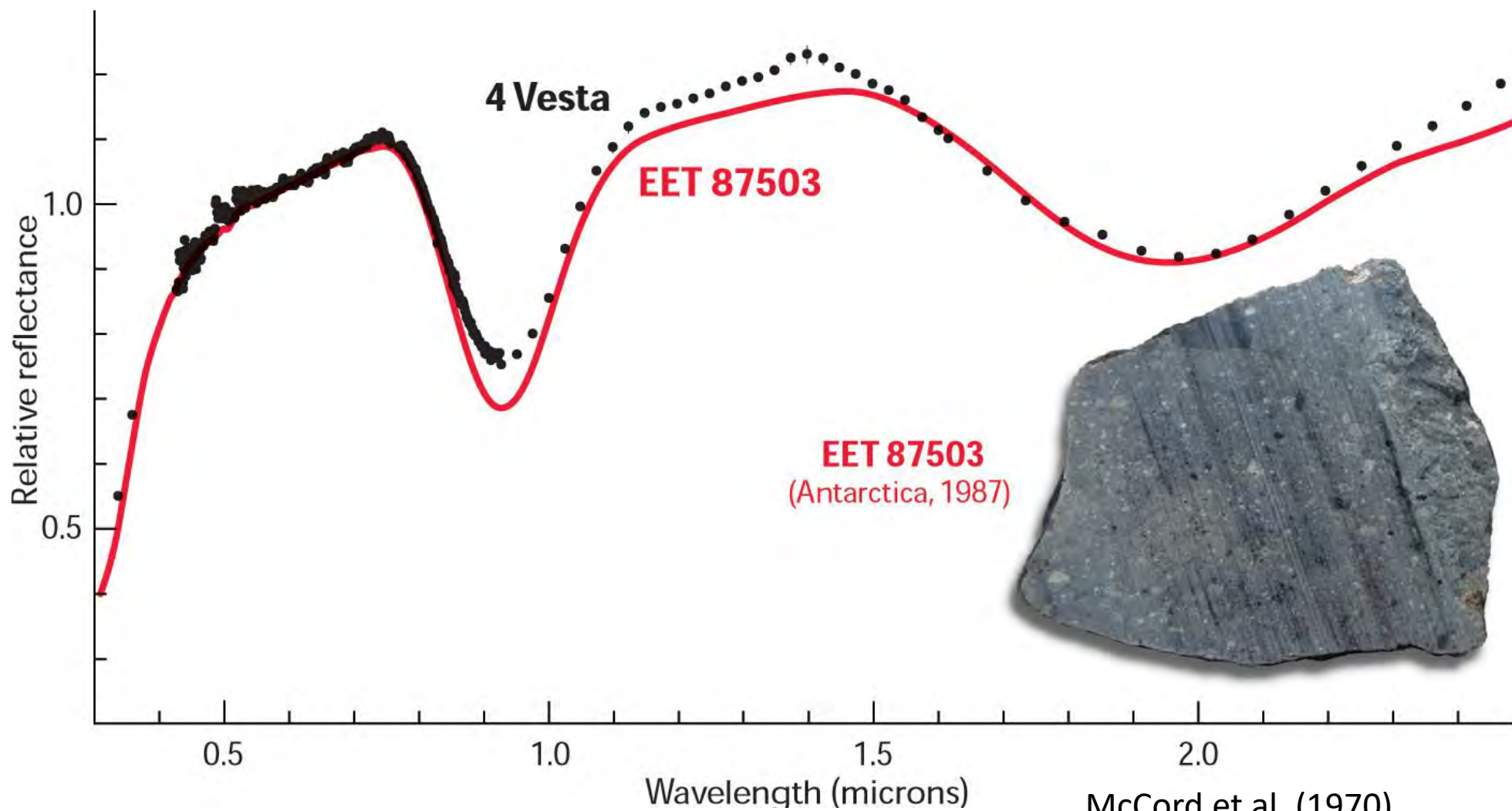
6 météorites de ce type connues





Associations spectrales

1) Le cas des météorites HED et l'astéroïde Vesta

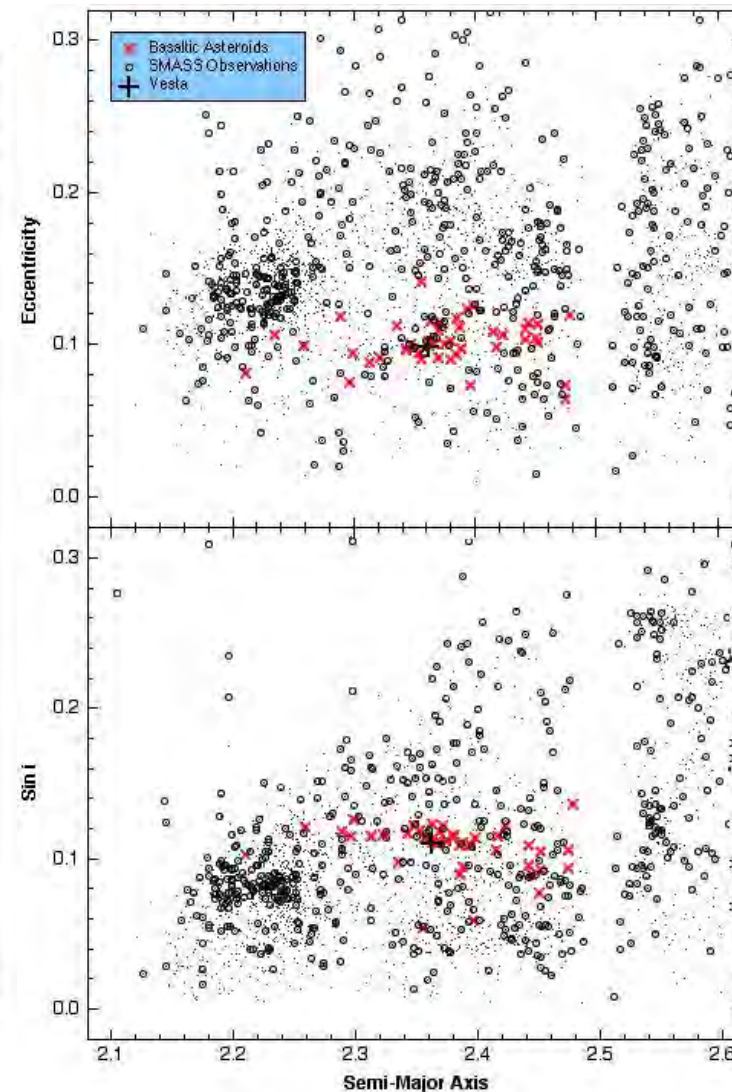
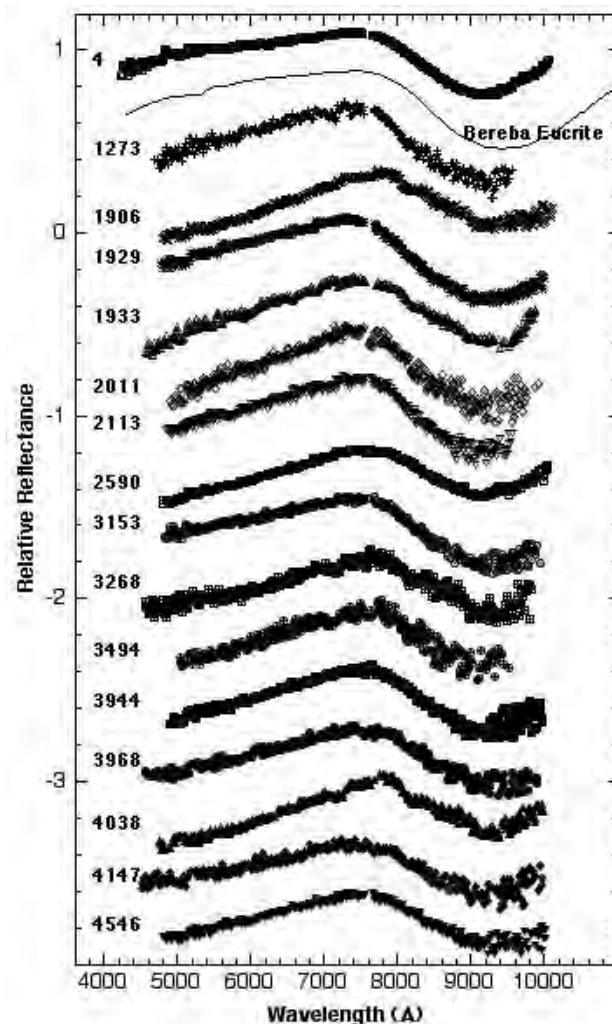




Associations spectrales

1) Le cas des météorites HED et l'astéroïde Vesta

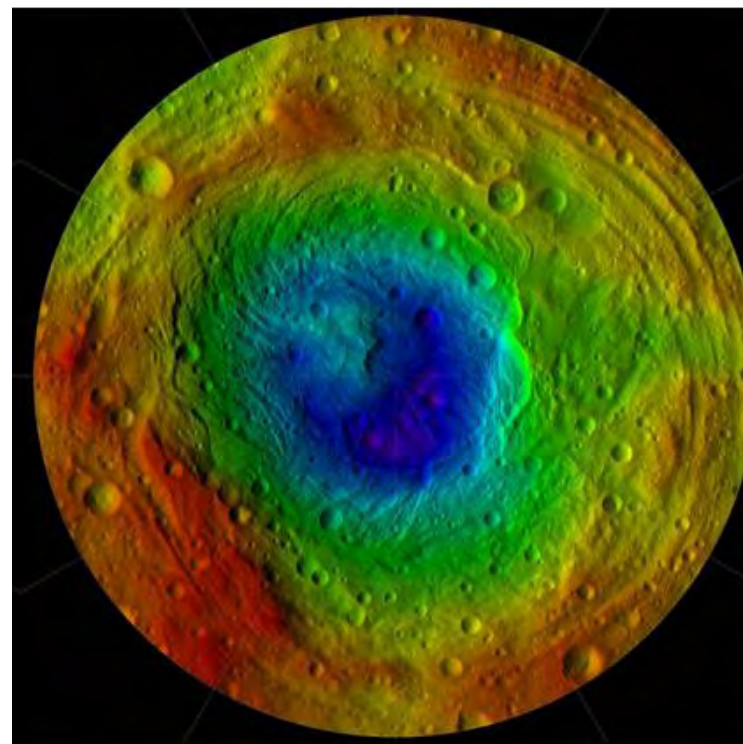
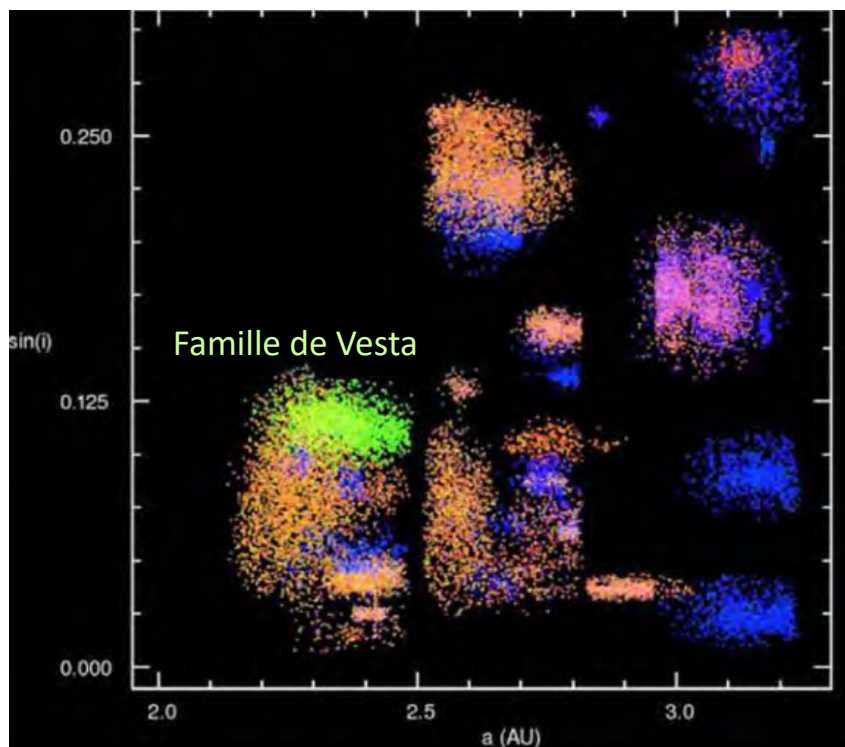
Identification d'une série d'astéroïdes avec les mêmes spectres autour de l'astéroïde Vesta par Binzel et Xu (1993), ce qui permet de définir une "famille spectroscopique"





Associations spectrales

1) Le cas des météorites HED et l'astéroïde Vesta

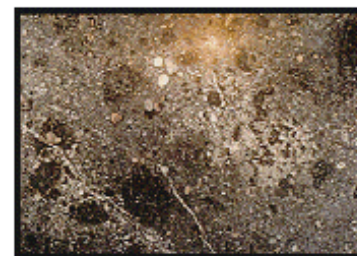
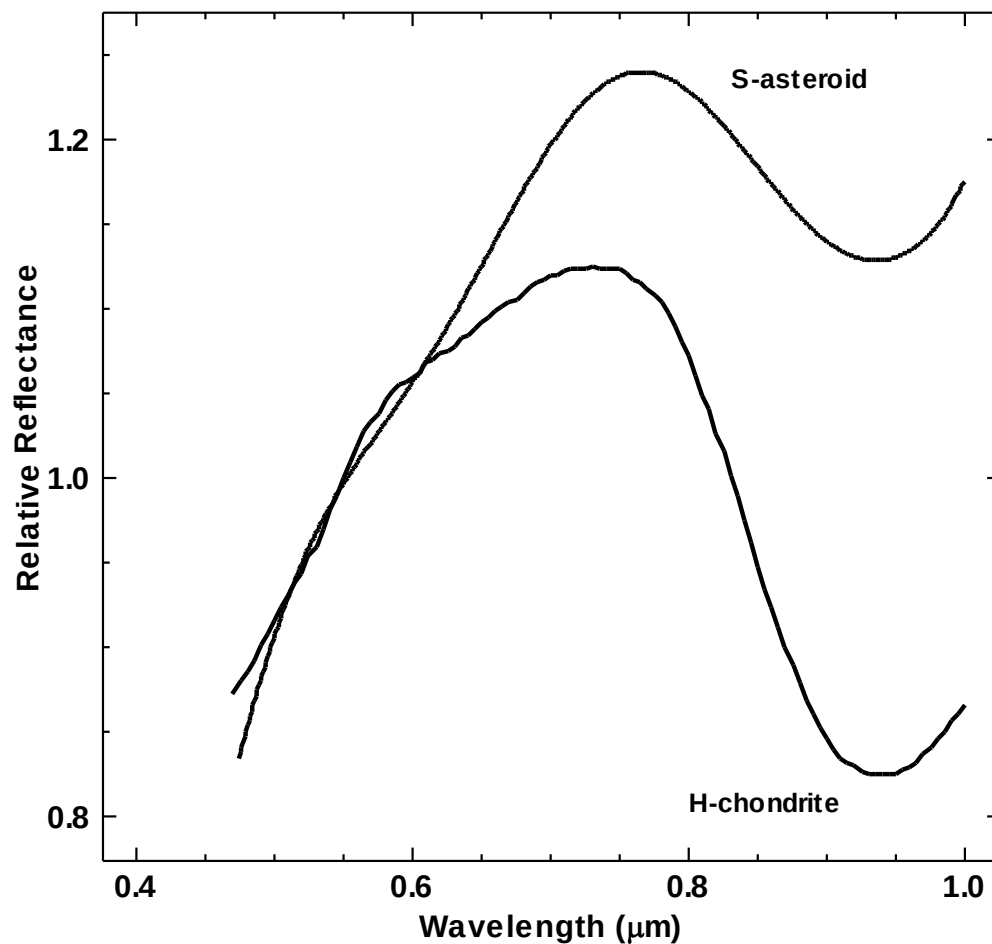


Aujourd'hui la famille de Vesta est bien identifiée et les bassins Veneneia et Rheasilvia, à l'origine de la famille ont été identifiés par la sonde Dawn.



Associations spectrales

2) Le cas des chondrites ordinaires

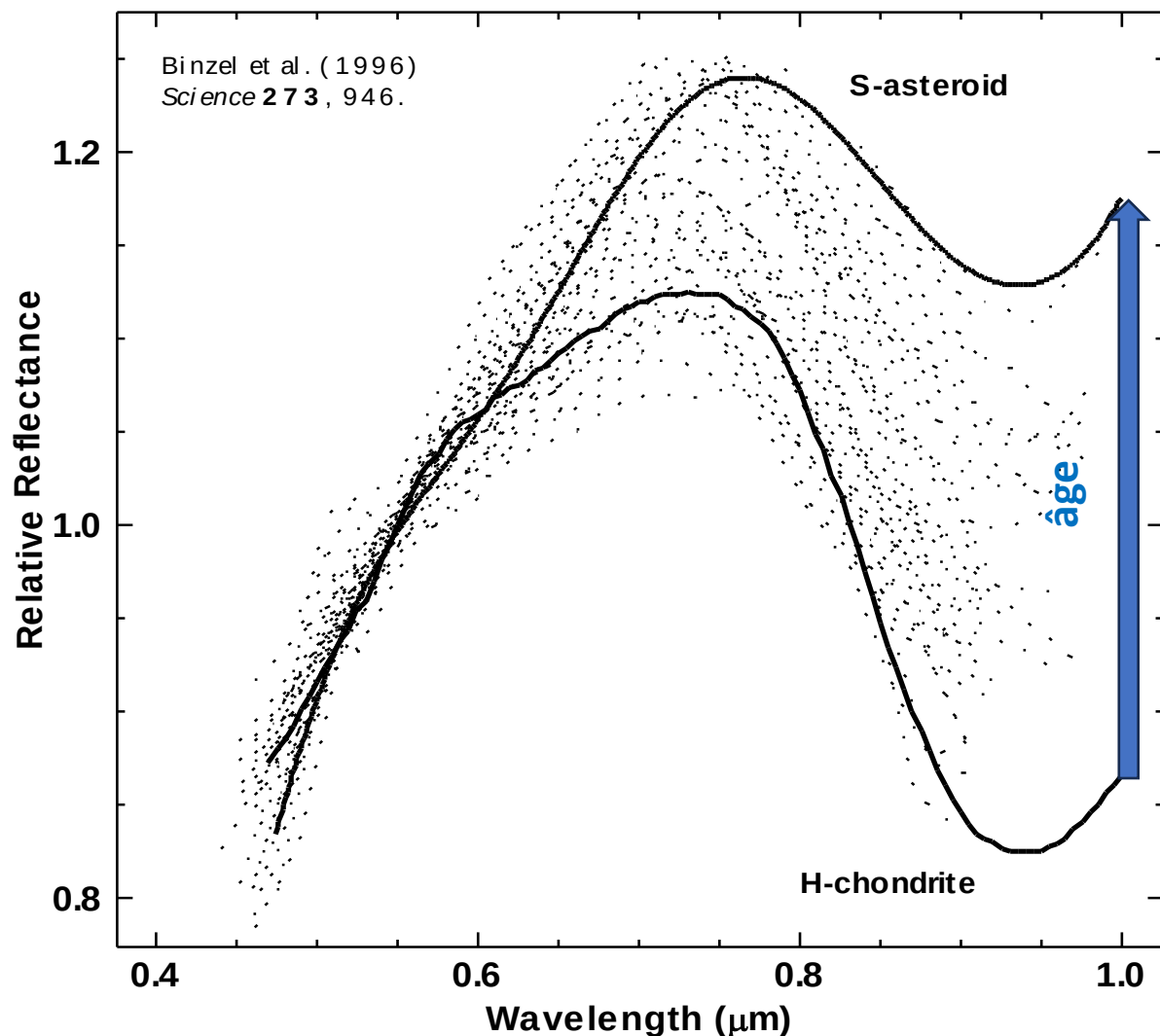


Grande différence!



Associations spectrales

2) Le cas des chondrites ordinaires



Un continuum de spectres observé parmi des astéroïdes de plus en plus petits, et donc collisionnellement plus jeunes

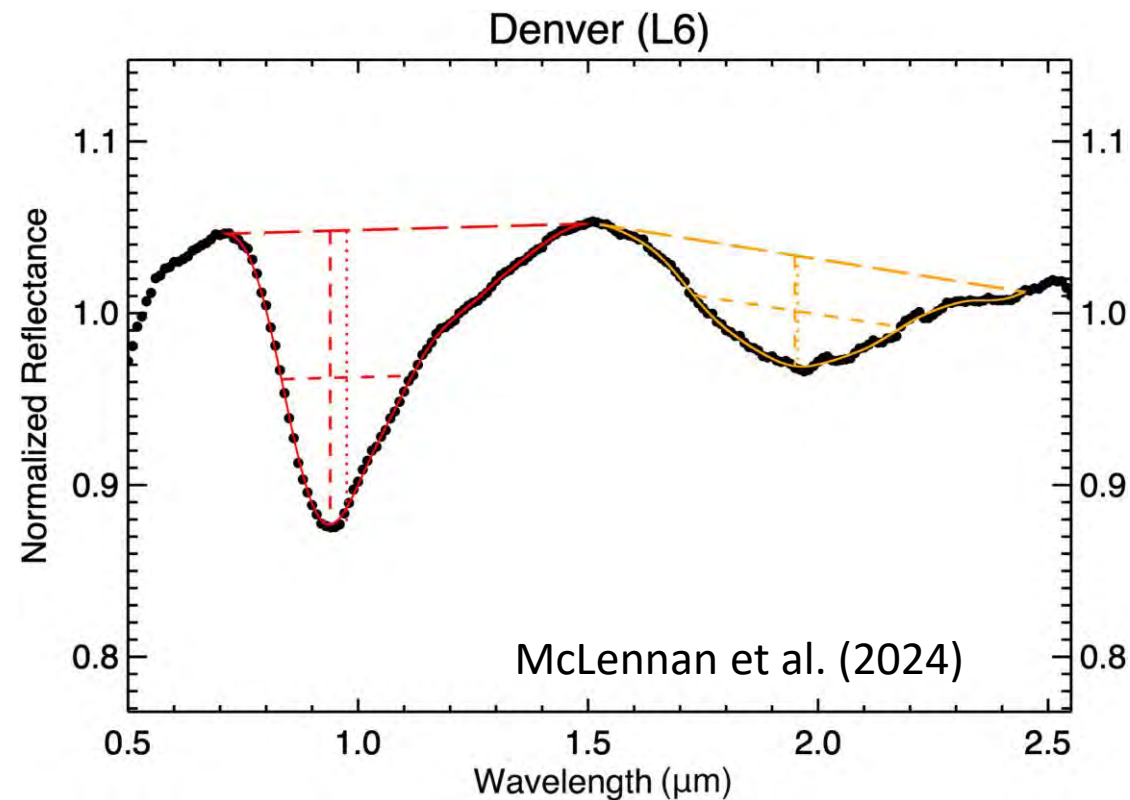
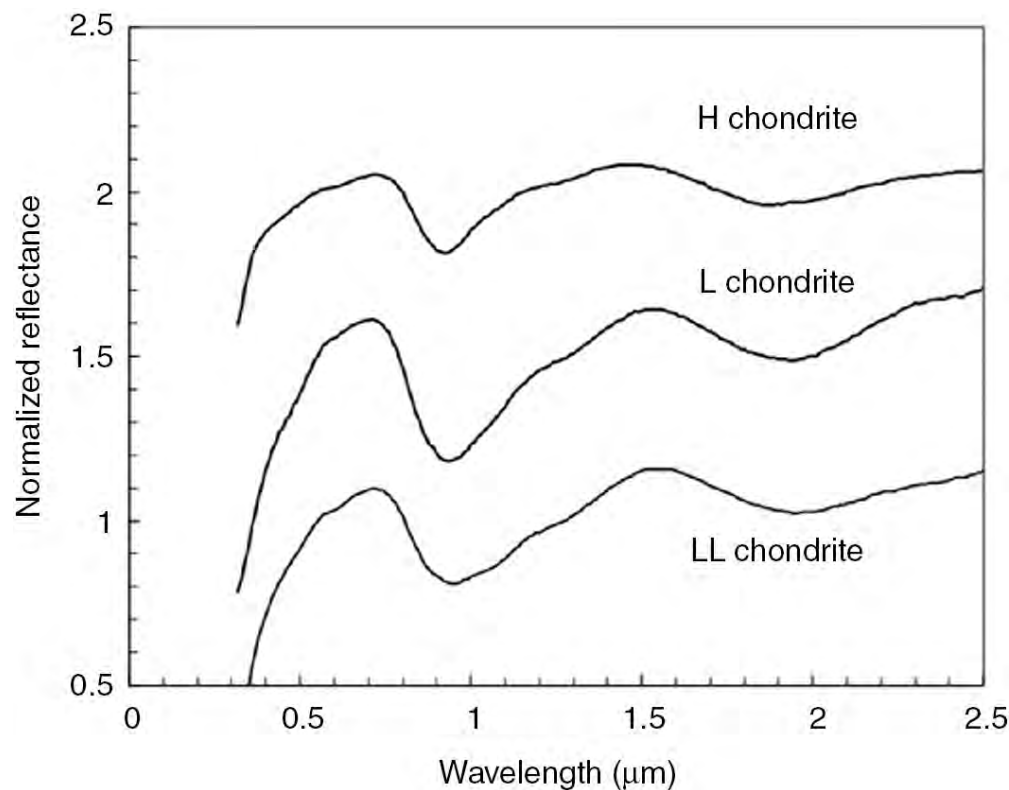
Suggère un rougisement de la surface d'un astéroïde avec l'âge, dû à l'exposition au rayonnement (space weathering)

Reproduit en laboratoire (altération des nanoparticules de Fe: Hapke et al., 1975; Pieters et al., 2000)



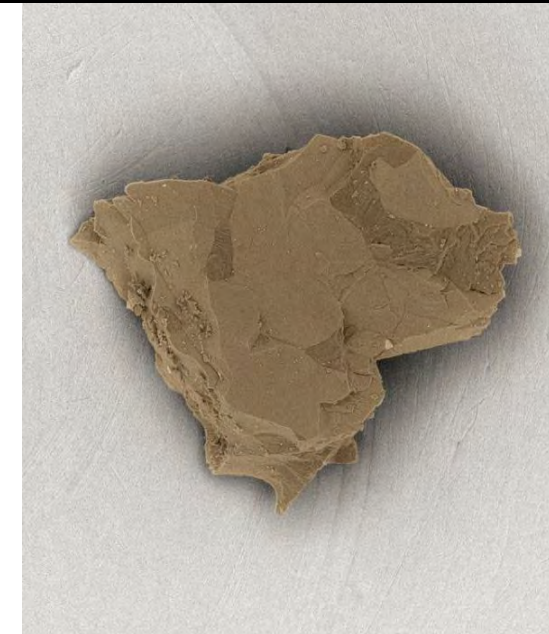
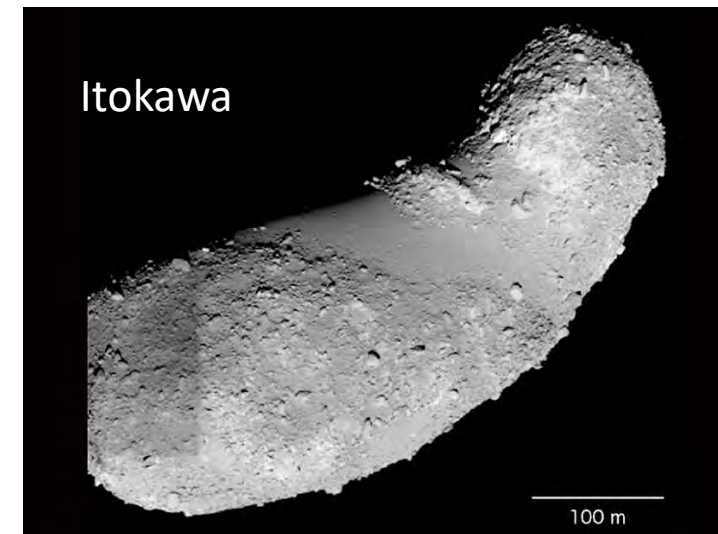
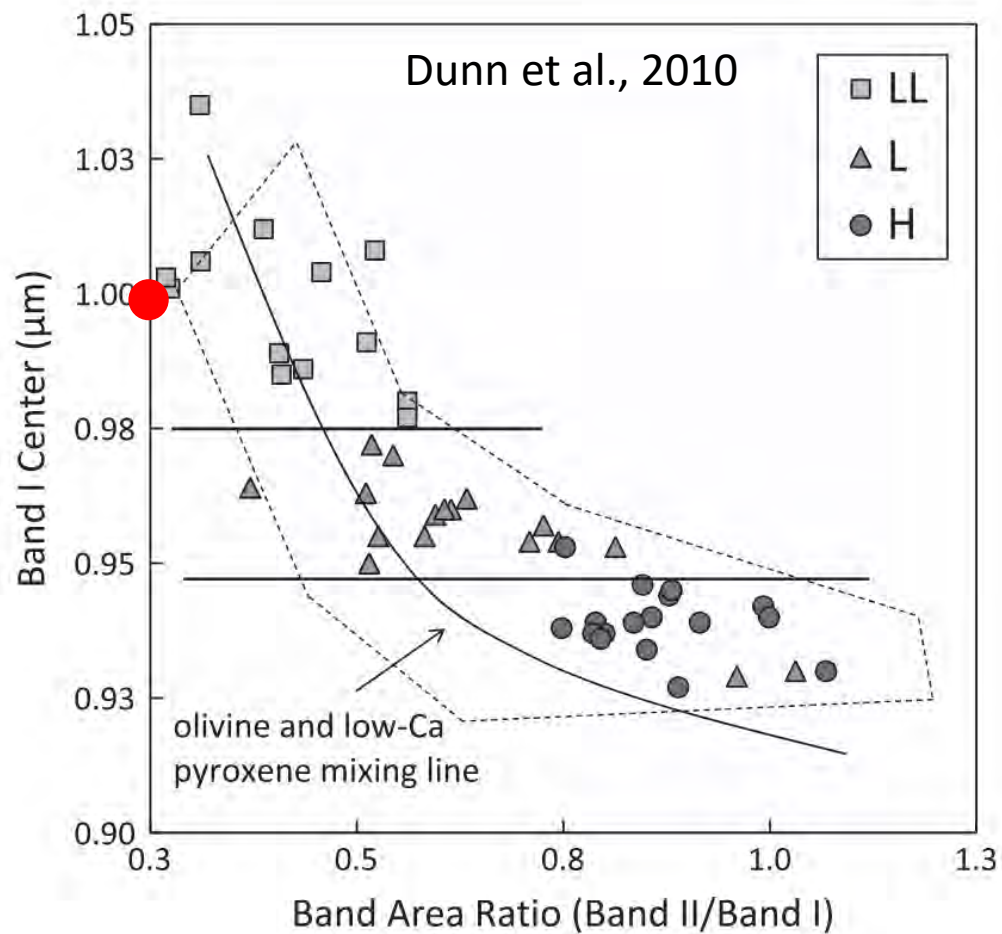
Associations spectrales

3) Identification d'astéroïdes de composition L, LL, H



Spectres légèrement différents, qu'on peut caractériser par différentes valeurs des centres des bandes et de leurs aires respectives (Vernazza et al., 2008, Nature)

3) Identification d'astéroïdes de composition L, LL, H

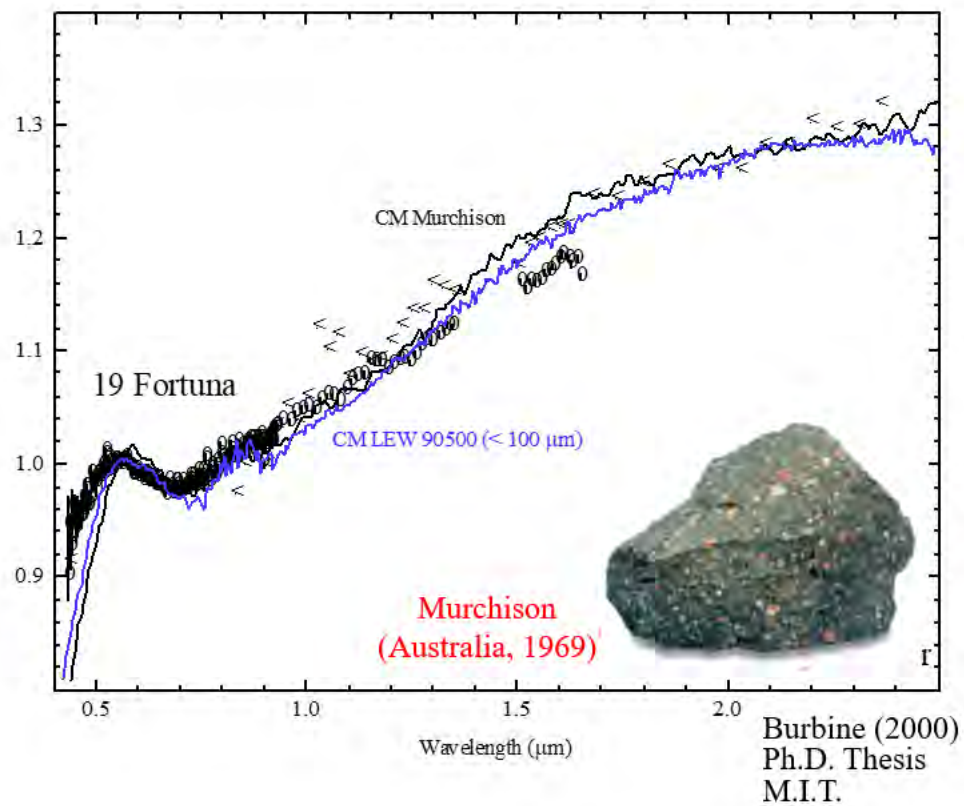


Spectres légèrement différents, qu'on peut caractériser par différentes valeurs des centres des bandes et de leurs aires respectives (Vernazza et al., 2008, Nature)



Associations spectrales

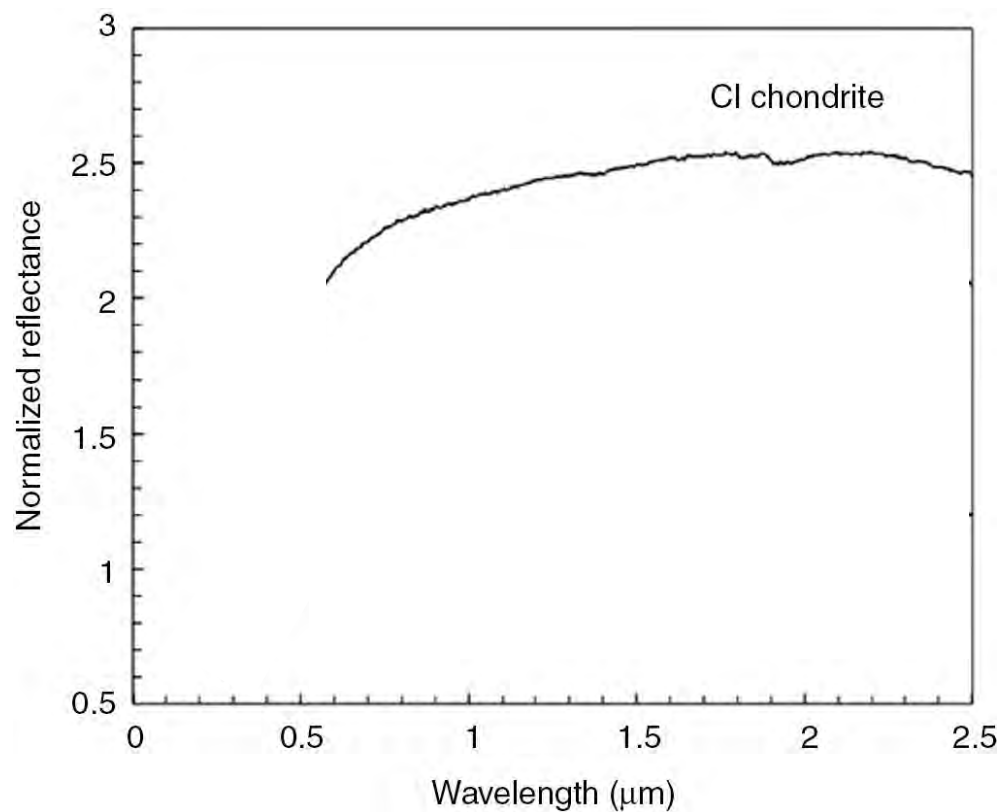
4) Association générique entre chondrites carbonées et astéroïdes de type C



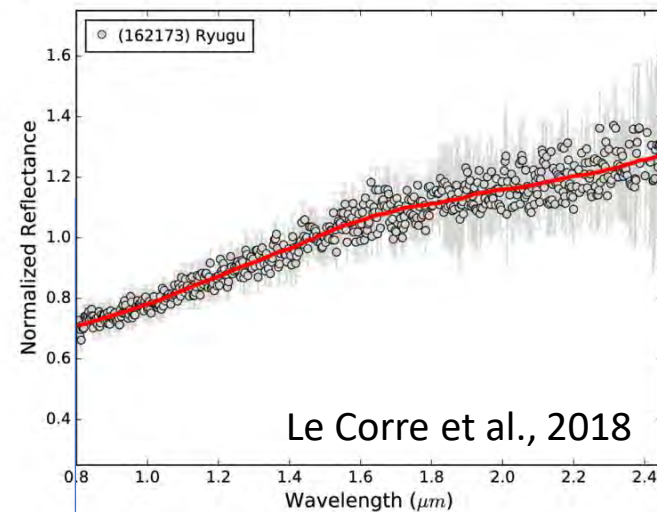


Associations spectrales

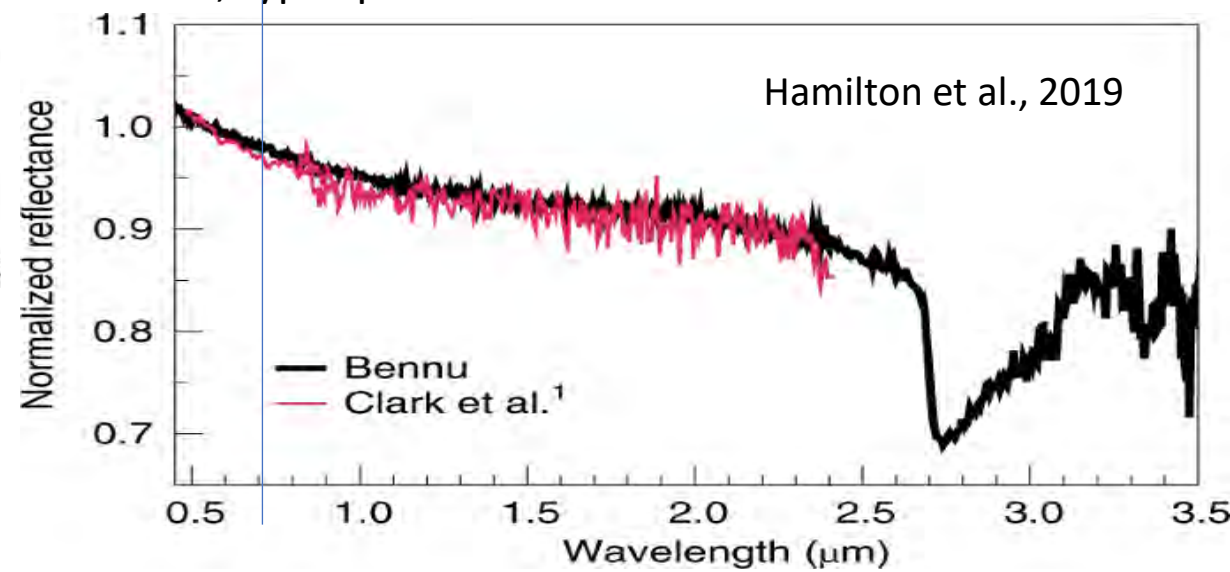
4) Association générique entre chondrites carbonées et astéroïdes de type C



Ryugu, type spectral: Cb



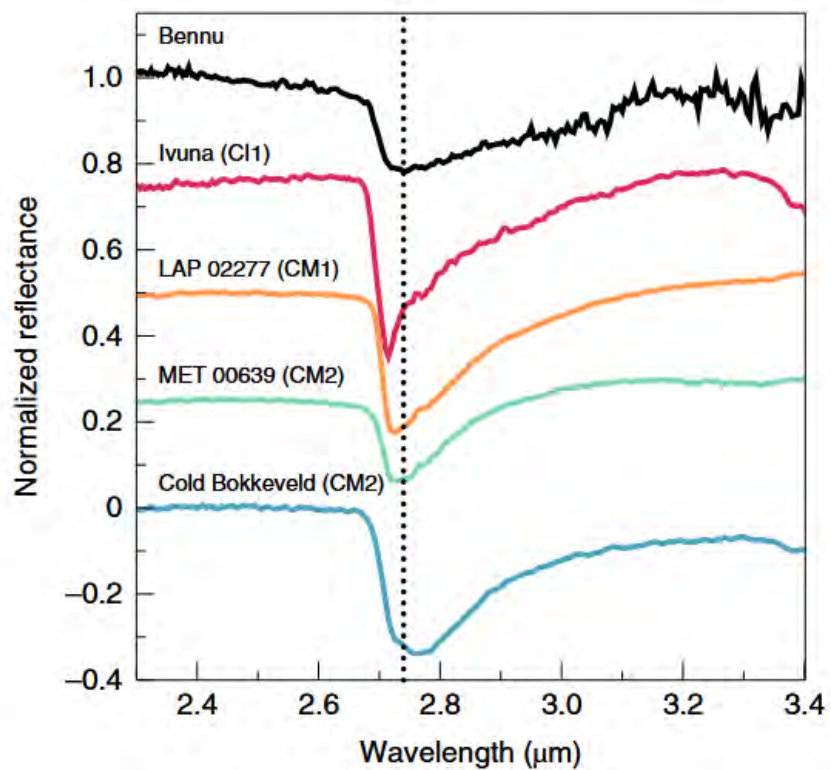
Bennu, type spectral: B





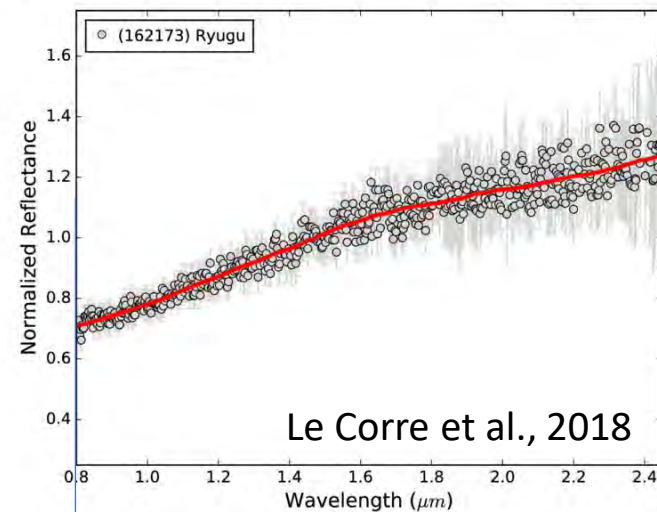
Associations spectrales

4) Association générique entre chondrites carbonées et astéroïdes de type C

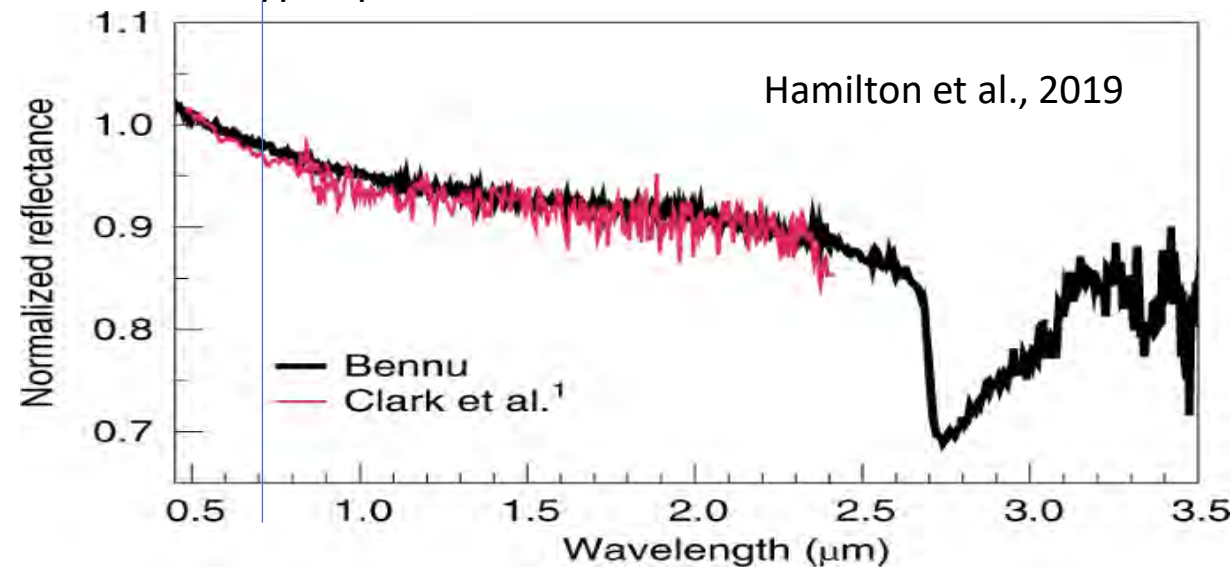


Plus de diagnostic dans l'infra-rouge et albédo.

Ryugu, type spectral: Cb



Benu, type spectral: B





Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

Broz et al., Nature, 2024

Critères:

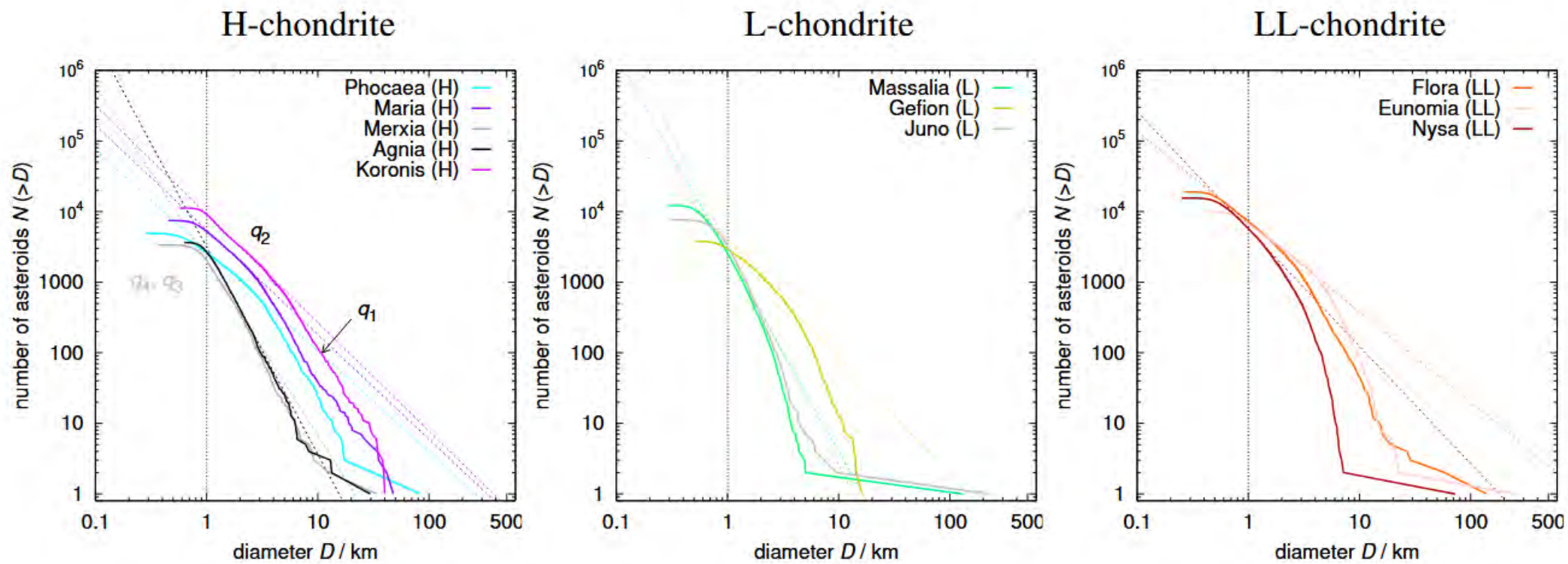
- Avoir la bonne classe spectrale
- Pour générer des météorites, l'astéroïde doit avoir subi une collision majeure et donc être associé à une famille
- Cette famille doit avoir suffisamment d'objets de taille métrique et atteindre les résonances principales qui permettent leur transport vers des orbites croisant celle de la Terre
- Elle doit avoir un âge compatible avec des contraintes météoritiques (âge de choc, âge d'exposition aux rayons cosmiques)



Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

Broz et al., Nature, 2024

Identification des familles avec “bon” type spectral



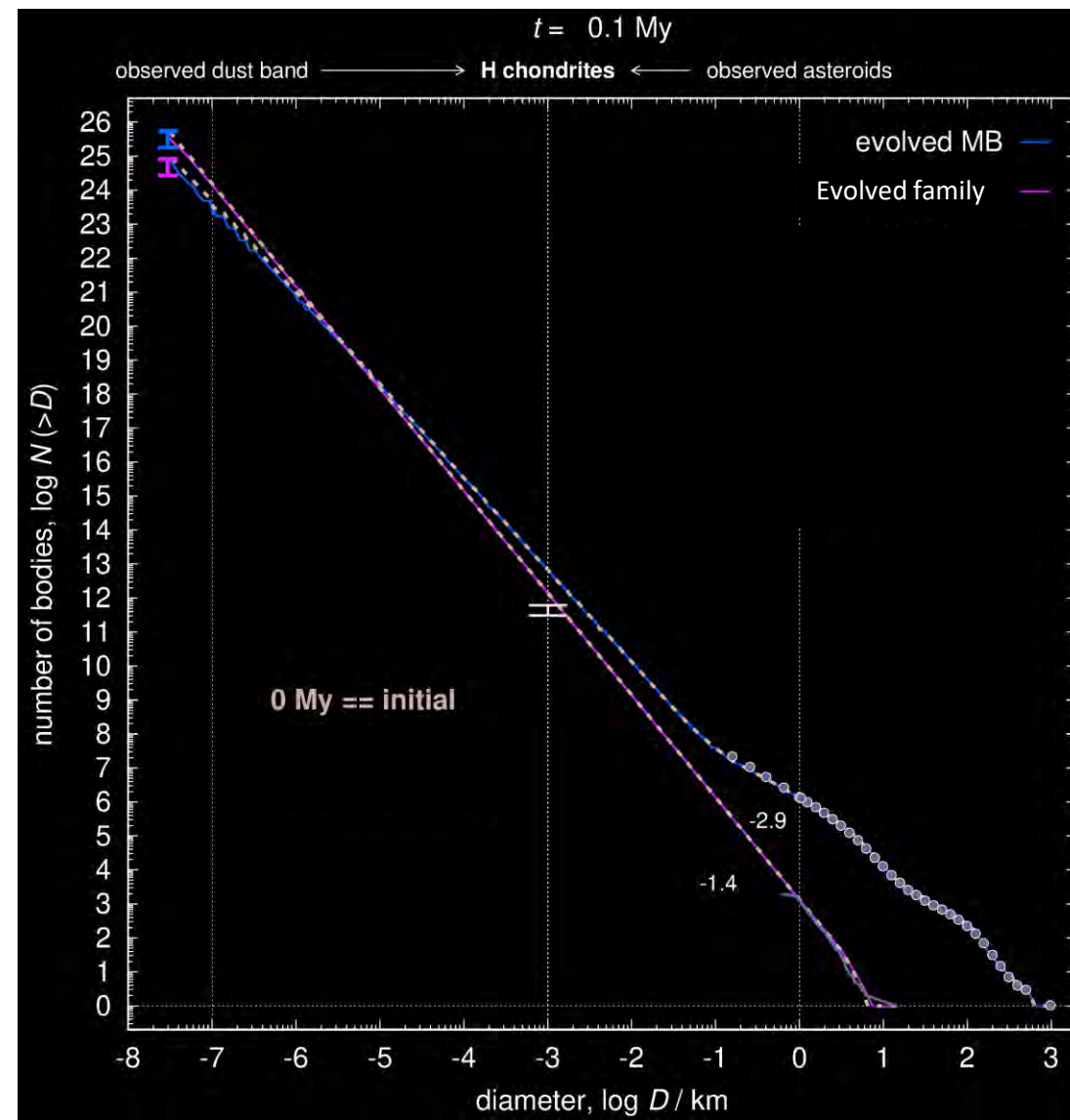


Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

Broz et al., Nature, 2024

Simulation de l'évolution collisionnelle sur une durée de temps comparable à l'âge de la famille estimée par sa dispersion en demi grand axe induite par l'effet Yarkovsky

Seulement les jeunes familles peuvent produire assez de météorites



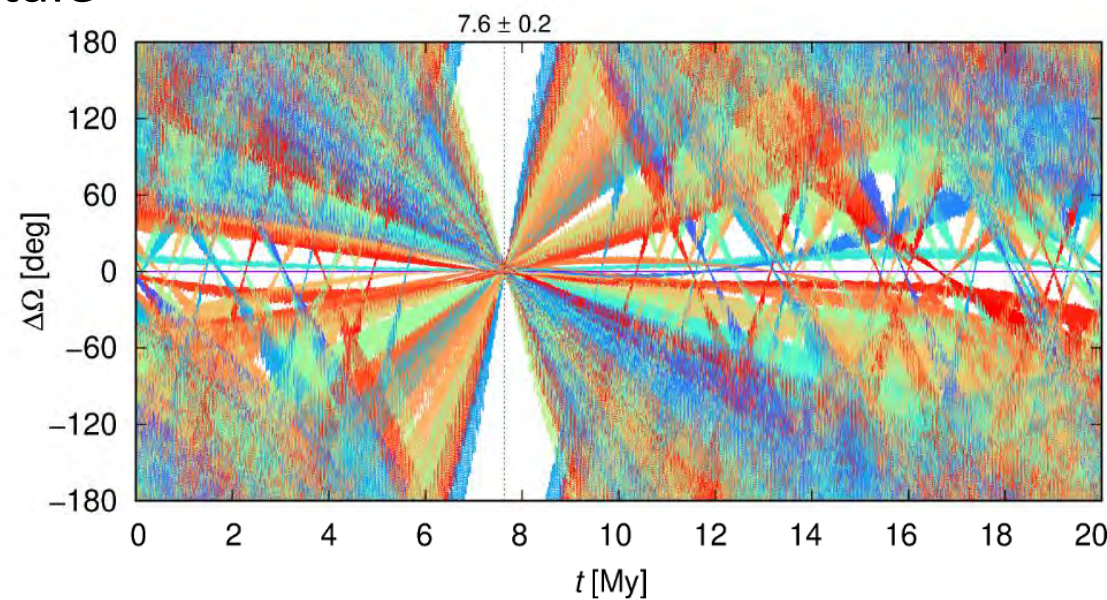
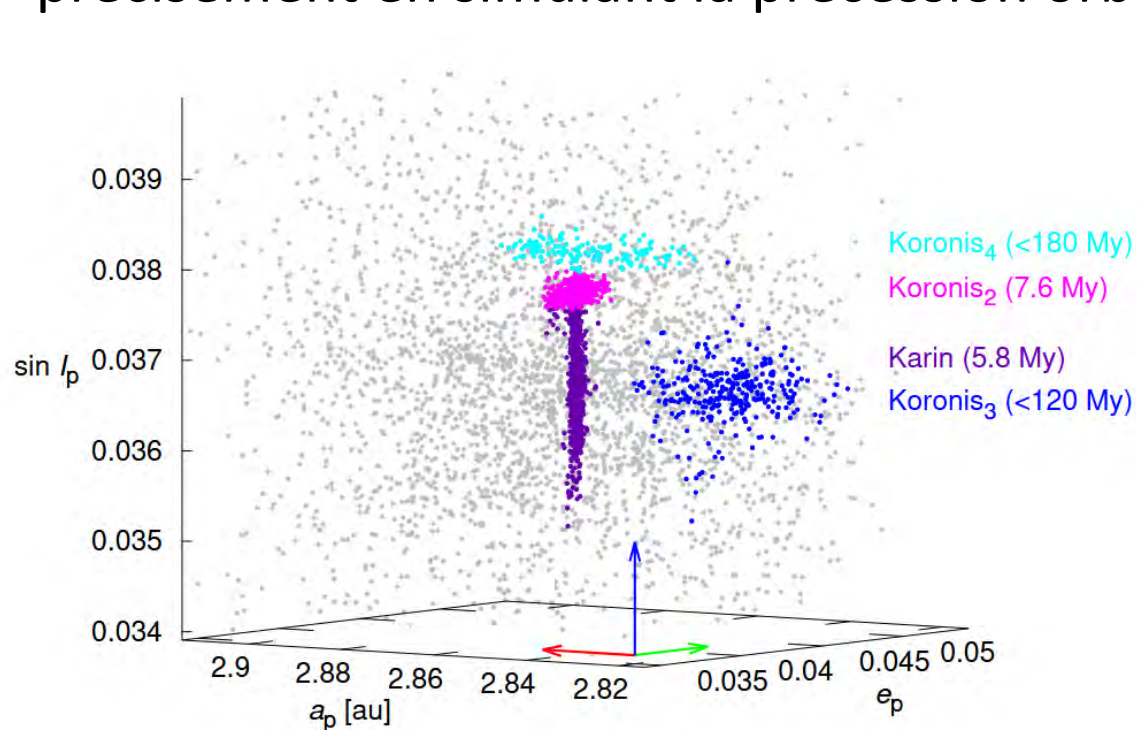


Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

Broz et al., Nature, 2024

Origine des chondrites H:

La famille de Koronis a des sous-familles jeunes, dont l'âge peut être calculée précisément en simulant la précession orbitale

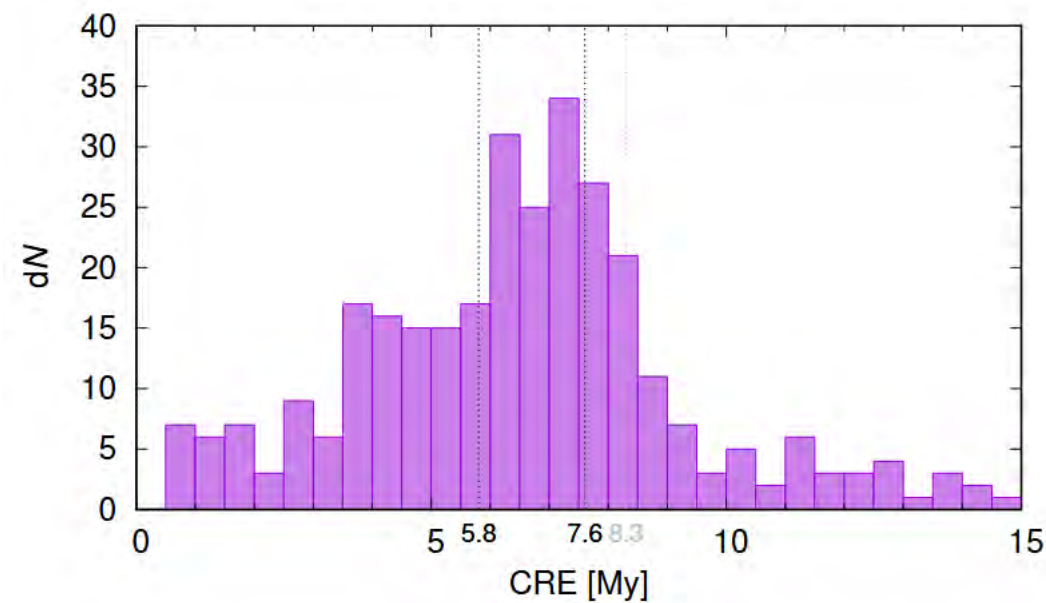
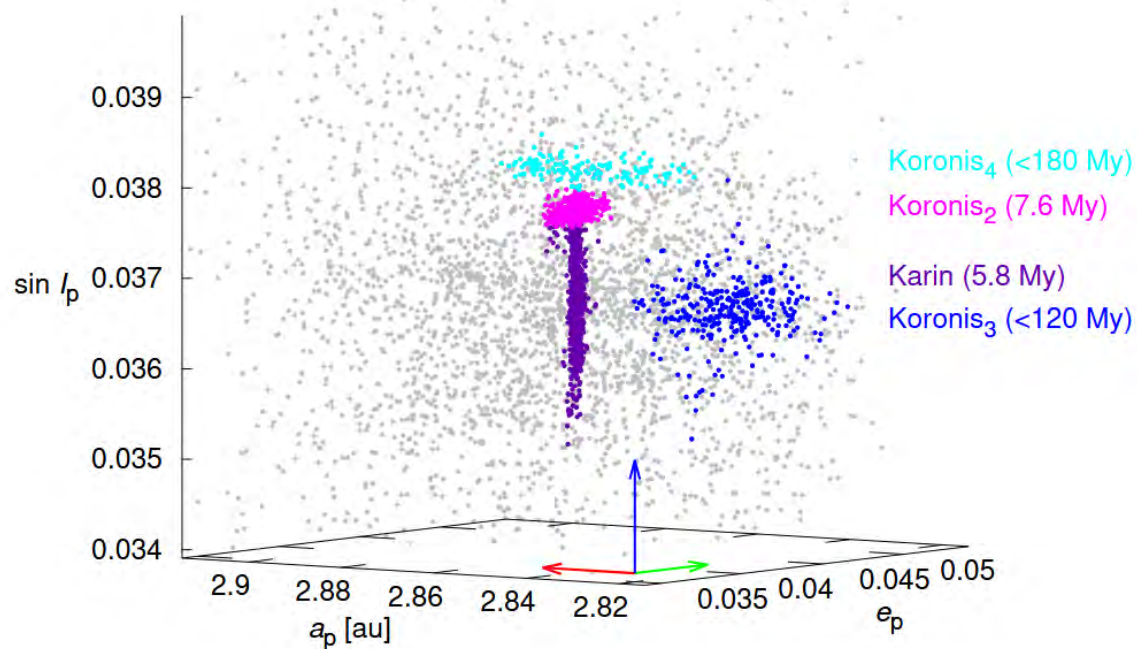




Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

Broz et al., Nature, 2024

Ces âges correspondent assez bien aux pics de la distribution des âges d'exposition aux rayons cosmiques (CRE) des météorites H





Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

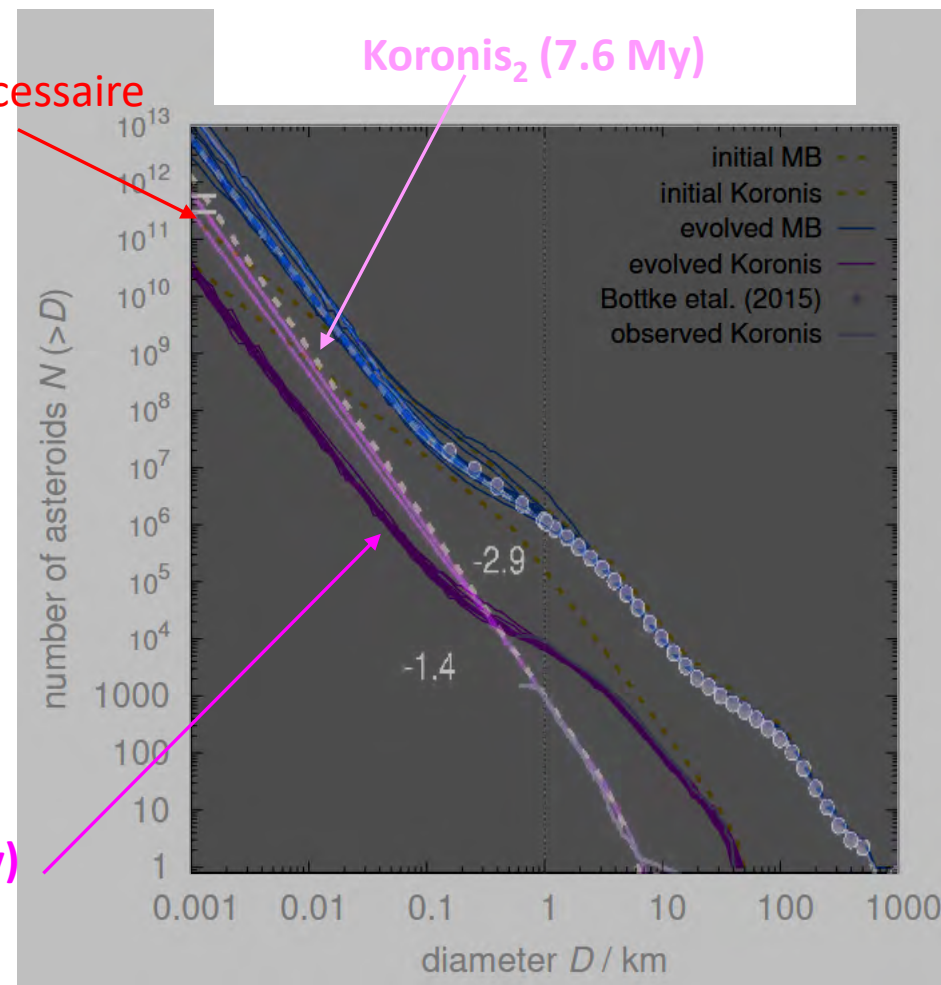
Broz et al., Nature, 2024

Les sous-familles de Karin et Koronis₂ dominant le nombre d'objets métriques et sont compatibles avec le flux de météorites H observé.

Nombre nécessaire

Koronis₂ (7.6 My)

Koronis (2500 My)



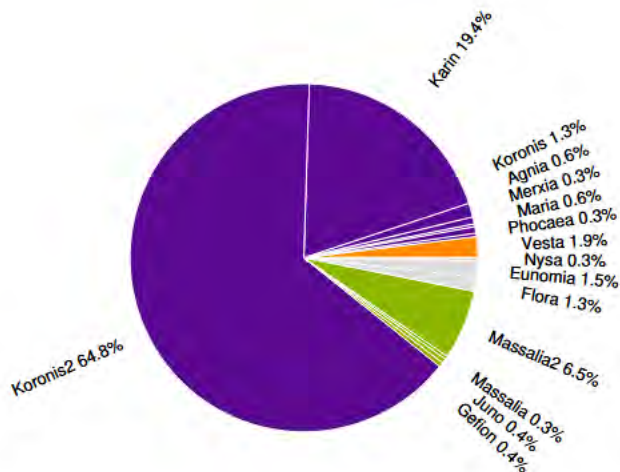


Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

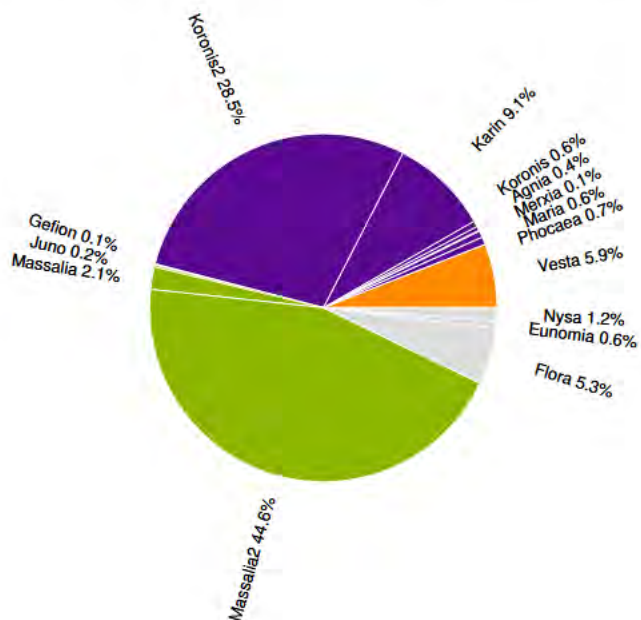
Broz et al., Nature, 2024

Les sources des météorites

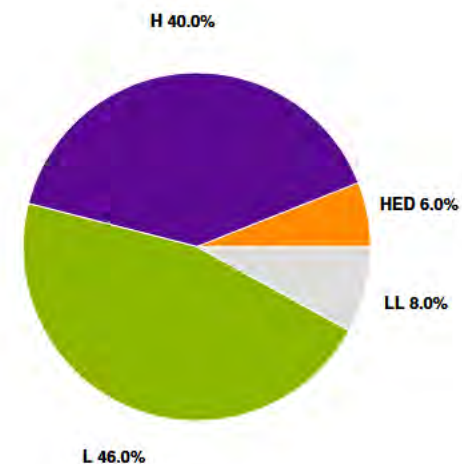
synthetic main belt 1-m



synthetic meteoroids 1-m (flux)



observed meteoroids 1-m



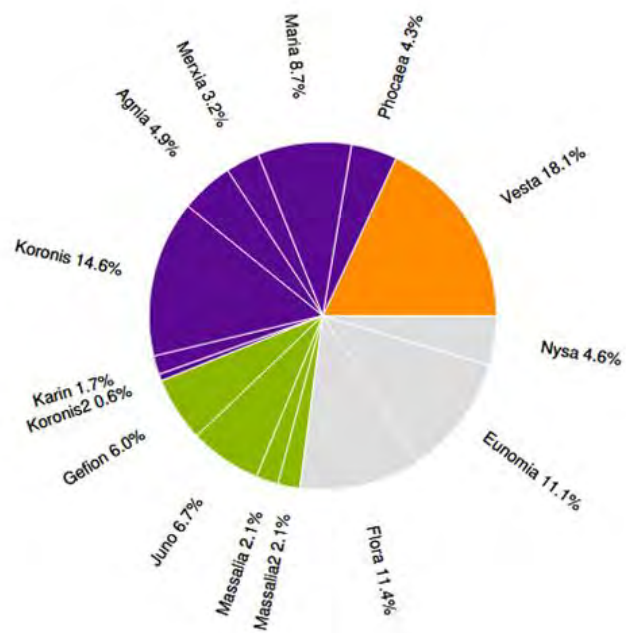


Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

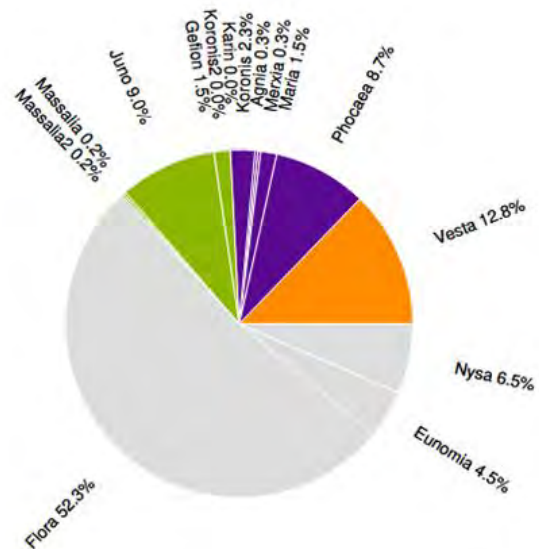
Broz et al., Nature, 2024

Les sources des géocroiseurs kilométriques

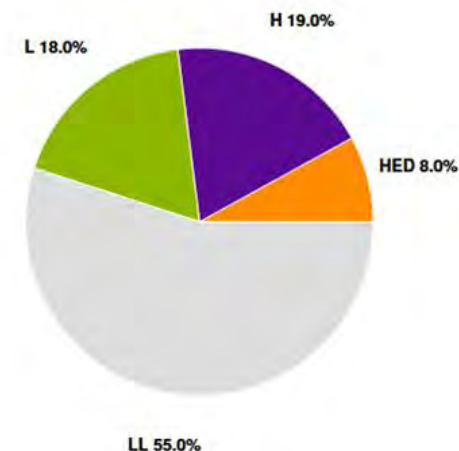
synthetic main belt 1-km



synthetic NEO 1-km



observed NEO 1-km





Identification des astéroïdes parents des chondrites ordinaires

Broz et al., Nature, 2024; Marsset et al., 2024

Implications:

- L'âge de choc des météorites H (3500 Ma) correspond à l'âge de la famille de Koronis (estimée par effet Yarkovsky à 2500 Ma)
- L'âge de choc des météorites L (470 Ma) correspond à l'âge de la famille de Massalia (estimée par effet Yarkovsky à 152 Ma)
- L'âge de choc mesuré sur les grains de Itokawa (1300 Ma) devrait correspondre à l'âge de la famille de Flora (estimée par effet Yarkovsky à 1200 Ma)

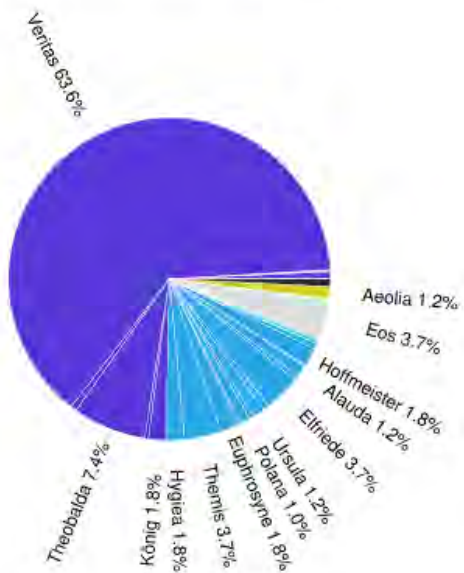
On reconstruit ainsi la chronologie des événements collisionnels majeurs de la ceinture des astéroïdes !



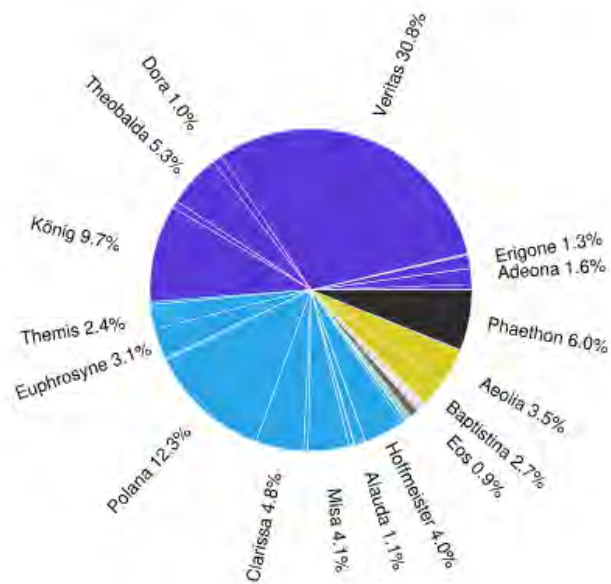
Identification des astéroïdes parents des chondrites carbonées

Broz et al., A&A, 2024

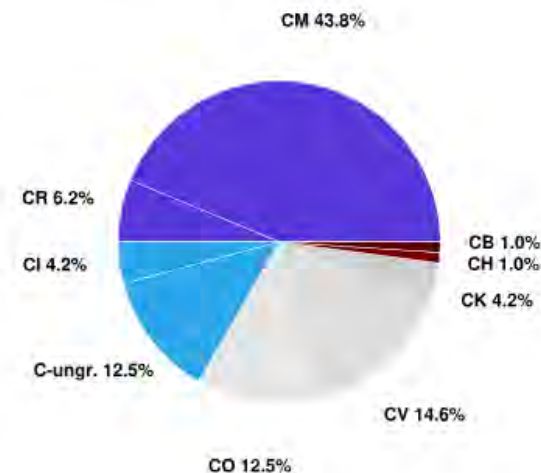
synthetic main belt 1-m



synthetic meteoroids 1-m (flux)



observed meteorites 1-m (no irons)



Accord beaucoup moins bon que pour les chondrites ordinaires
Météorites fragiles. Possibles biais de survie à la traversée atmosphérique



Météorites avec corps parents toujours inconnus

- Toutes les météorites de fer (~46 corps parents distincts!)
- Les chondrites à enstatites (EL, EH)
- CR, CV, CO, CK
- Uréilites
- Pallasites
- Mésosidérites
-



A retenir

- Les météorites se classifient d'abord en chondrites et achondrites
- Les achondrites proviennent de corps différenciés.
 - Les météorites de fer échantillonnent les noyaux de ~46 corps distincts
 - D'autres achondrites échantillonnent la croûte d'autre corps
 - Absence de météorites de dunite, issus des manteaux des corps différenciés
 - Existence des mélanges fer-olivine
- Les chondrites proviennent de corps qui n'ont pas chauffé suffisamment pour fondre leurs constituants
- Elle se composent essentiellement de CAIs, chondres et matrice
- C'est la matrice qui porte la plupart des éléments volatils et de l'eau, ainsi que la matière organique
- Les différentes classes de chondrites se distinguent par les rapports relatifs entre CAI, chondres et matrice
- Les chondrites carbonées contiennent plus de matrices que les chondrites à enstatite ou ordinaires
- Elles se sont sans doute formées plus loin dans le disque protoplanétaire
- Elles sont cependant différentes de comètes, qui doivent s'être formées encore plus loin
- Pour certaines météorites on connaît aujourd'hui le corps parent:
 - HED = Vesta
 - H = Koronis et ses sous-familles
 - L = Massalia et sa sous-famille
 - LL = Flora
 - CM = Véritas (probablement)
 - CI = Polana (probablement)
- Beaucoup des météorites restent cependant sans corps parents identifiés

ATTENTION:
Prochain cours mardi 4/11 à 17h!