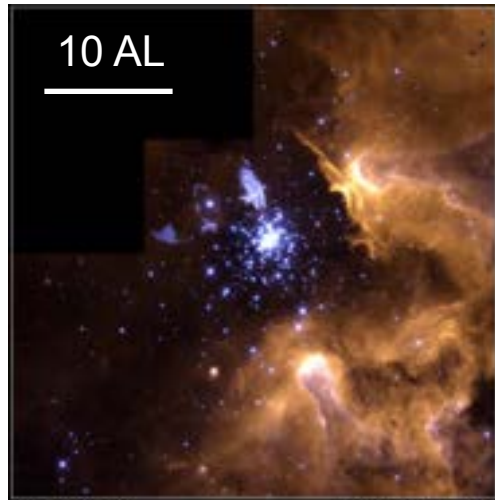


# histoire de la poussière du système solaire racontée par les chondres

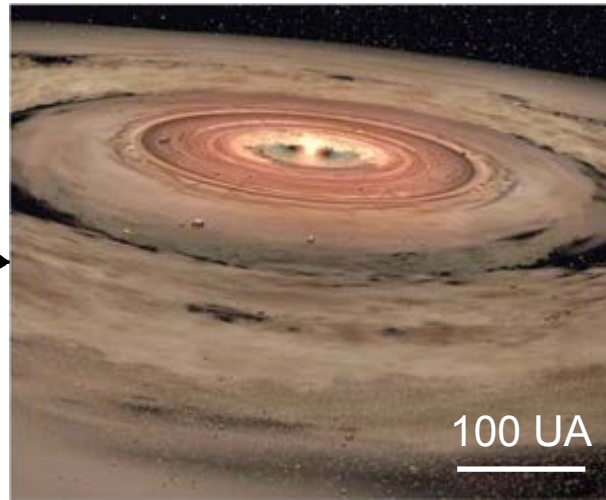


Vassily Kandinsky

## de quoi la poussière est-elle le nom ?



*nuage moléculaire*



*disque d'accrétion*



*astéroïdes – planètes*

*disques d'accrétion = lieux de formation et d'agglomération de la poussière*

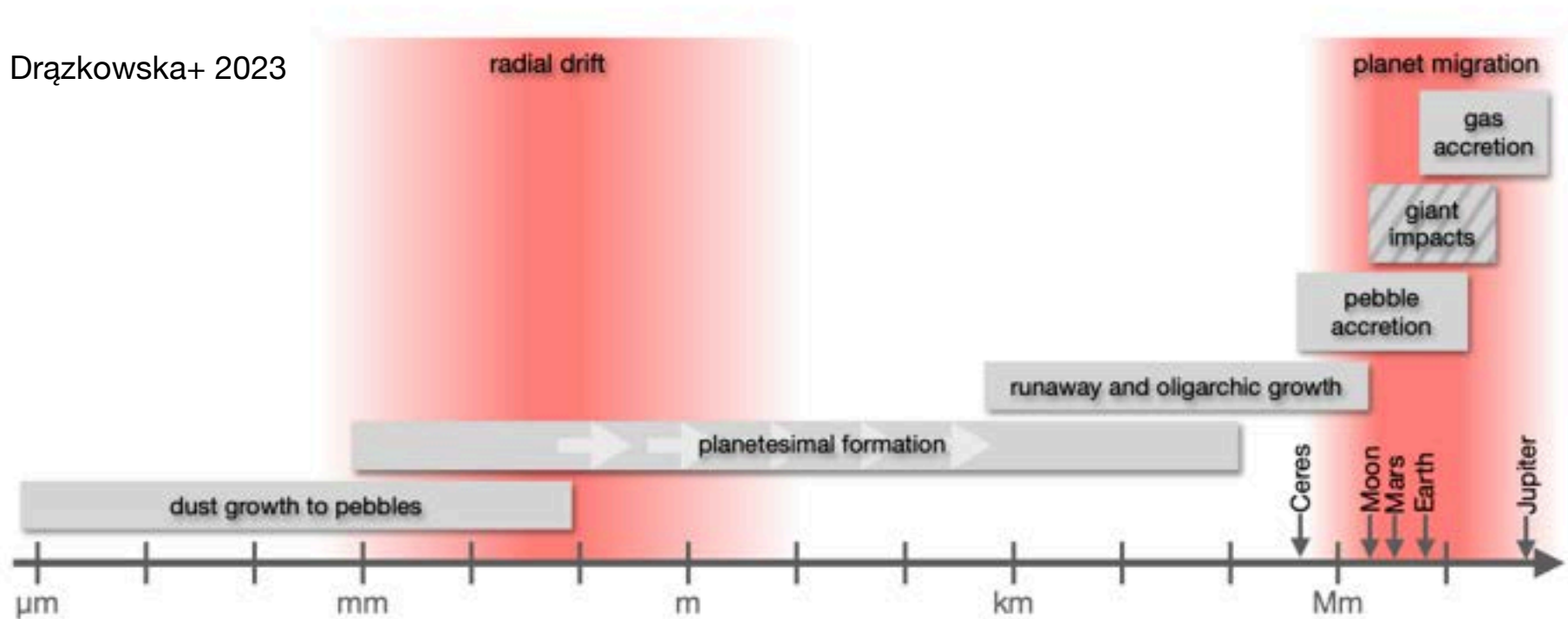


*structure fondamentale pour comprendre les conditions  
de formation des planètes*

**que se cache-t-il derrière le terme de poussière ?**

# définitions : dust – pebbles – planetesimals

Drażkowska+ 2023

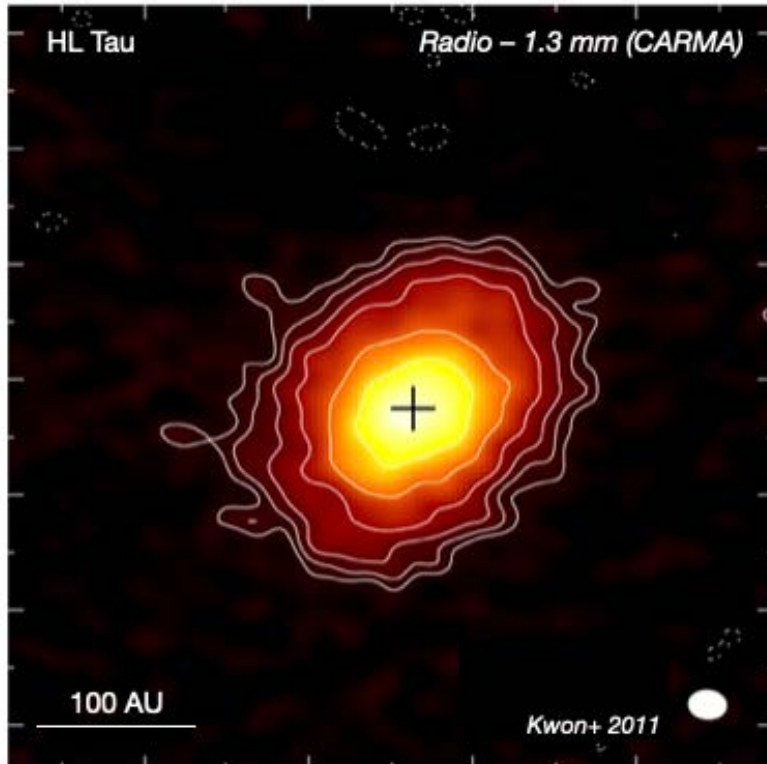


→ astrophysique = solides < mm

→ dust (= poussières) et pebbles (= galets)  
= poussières dans les disques

évolution de la poussière dans les disques

# observations astronomiques des disques d'accrétion



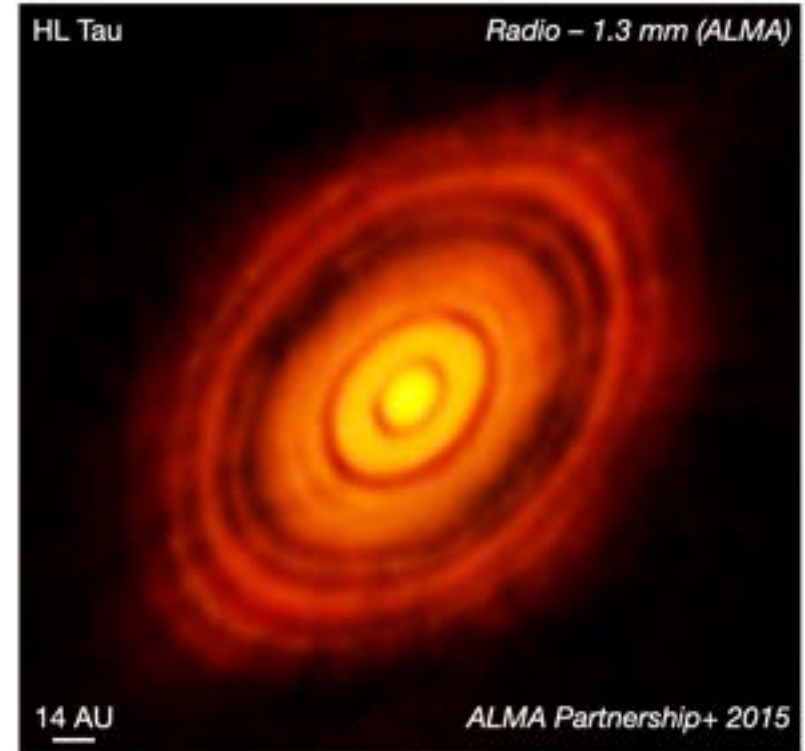
**observations  
astronomiques**

*structures difficiles à observer  
(luminosité des étoiles)*



*apparaissent comme des  
structures continues*

# la révolution ALMA – distribution de la poussière millimétrique



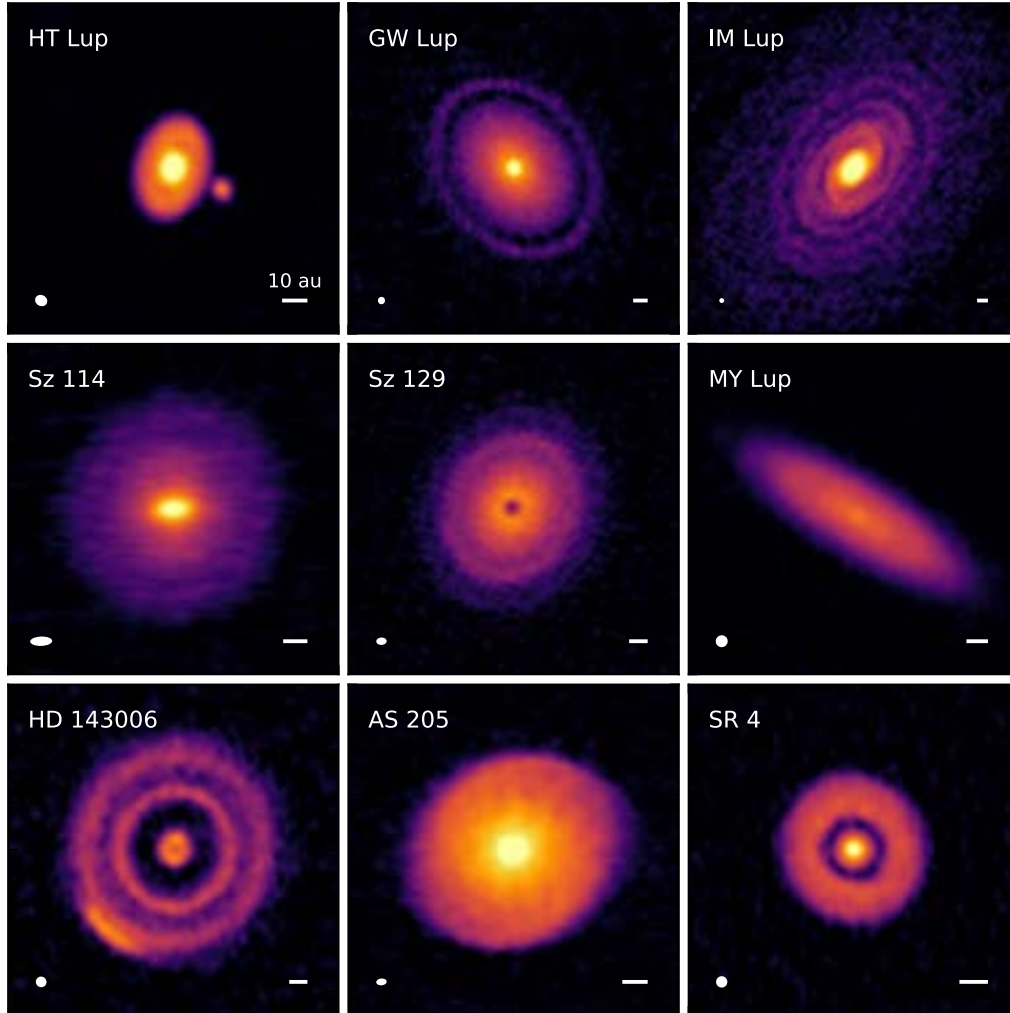
**observations  
astronomiques**

*ALMA = interféromètre de 66  
radiotélescopes (Atacama, Chili)*

↓  
*distribution hétérogène  
des pebbles millimétriques  
(Andrews+ 2018)*



# avantages et limitations



## avantages

→ nombre important de disques observés

## limitations

→ instantané de la distribution de la poussière

→ résolution spatiale = quelques unités astronomiques (distance Terre-Soleil)

météorites comme complément aux observations astronomiques

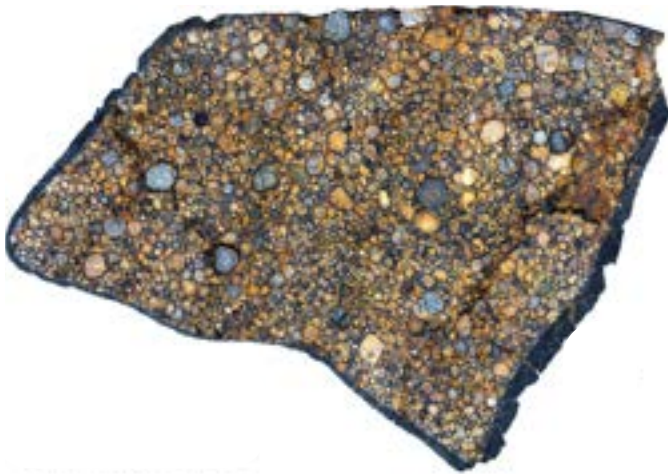
# diversité des météorites



météorites sont des roches  
résiduelles du disque



témoins de la formation  
du système solaire



**chondrites = agglomérats de poussière  
= météorites primitives**



**météorites de fer = noyaux planétésimaux  
= processus magmatiques**

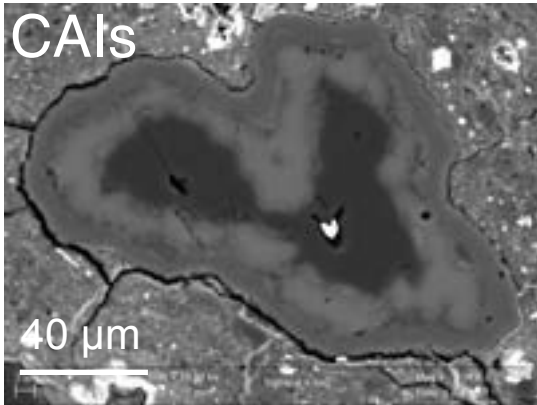
plus anciens solides du système solaire =  $t_0 = 4568.7 \text{ Ma}$  (Piralla+ 2023)



*formés par des processus de condensation à partir  
d'un gaz de composition solaire ( $T_{\text{cond}} \text{ CAIs} > T_{\text{cond}} \text{ AOAs}$ )*

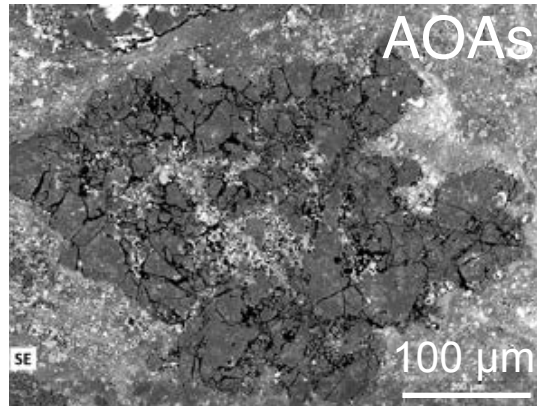
*inclusions réfractaires*

CAIs

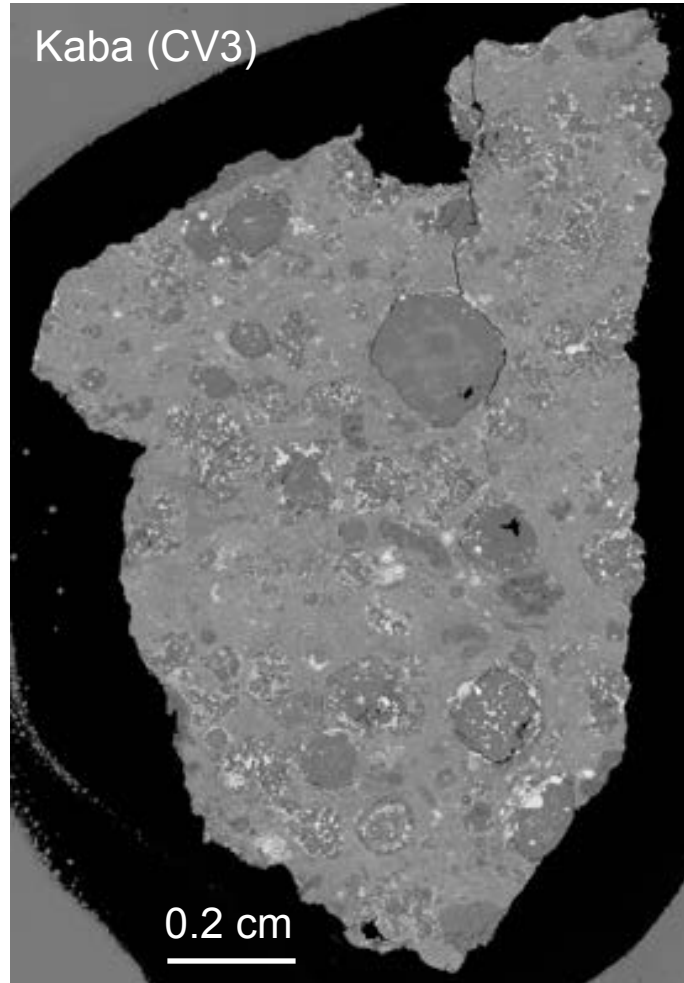


Calcium-Aluminium Inclusions

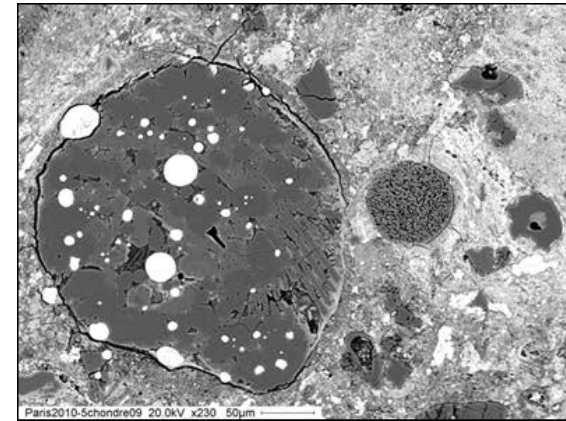
Amoeboid Olivine Aggregates



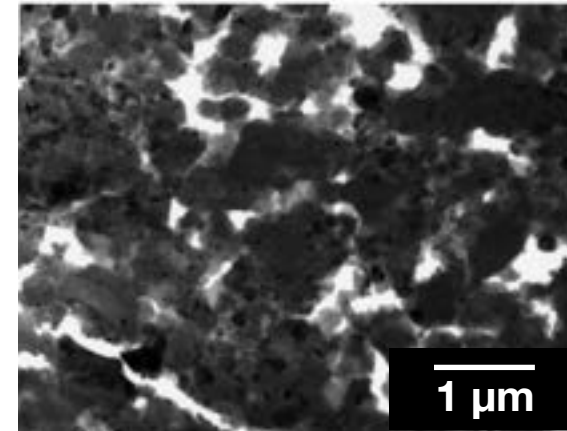
Kaba (CV3)



*chondres*



matrice à grains fins

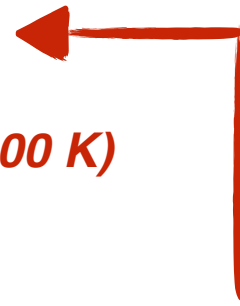




*poussière la plus abondante formée dans le disque*



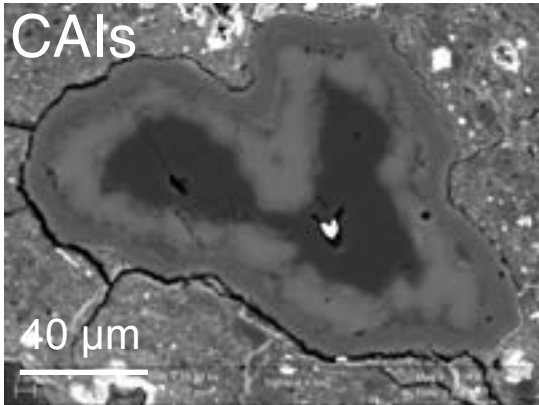
*résultent de processus magmatiques complexes ( $> 1200\text{ K}$ )*



*chondres*

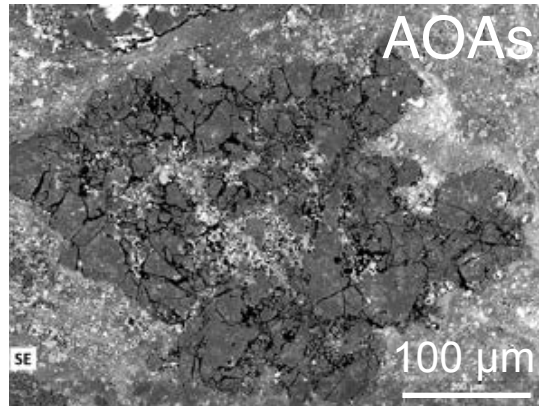
*inclusions réfractaires*

CAIs

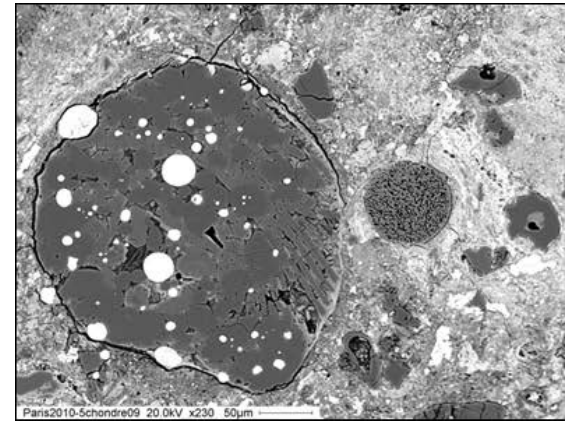
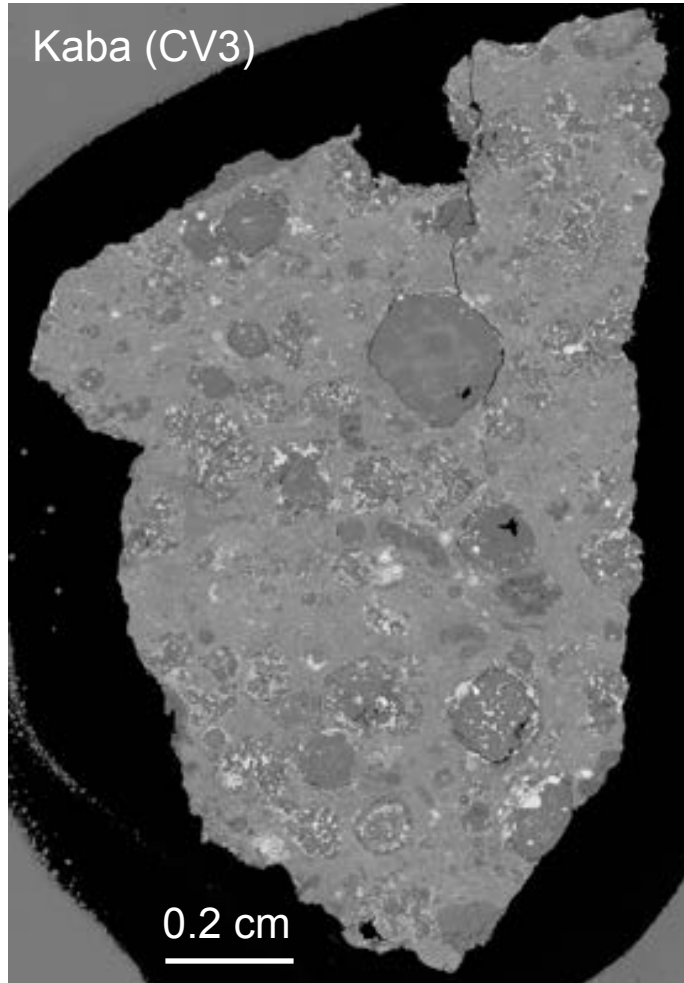


Calcium-Aluminium Inclusions

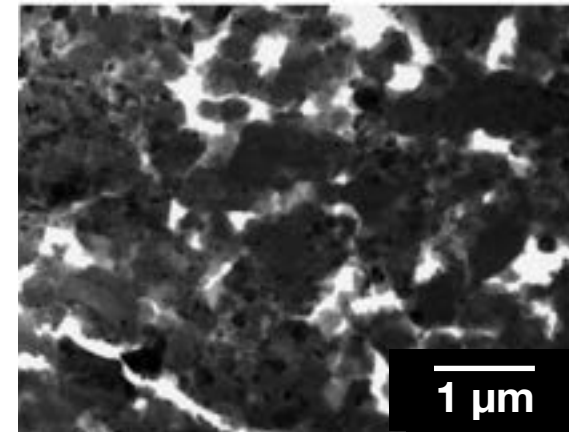
Amoeboid Olivine Aggregates



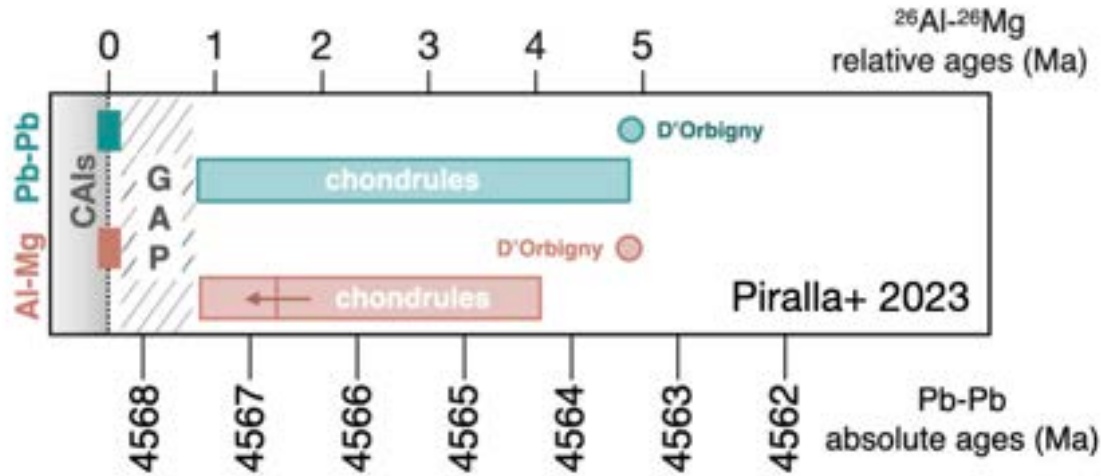
Kaba (CV3)



matrice à grains fins



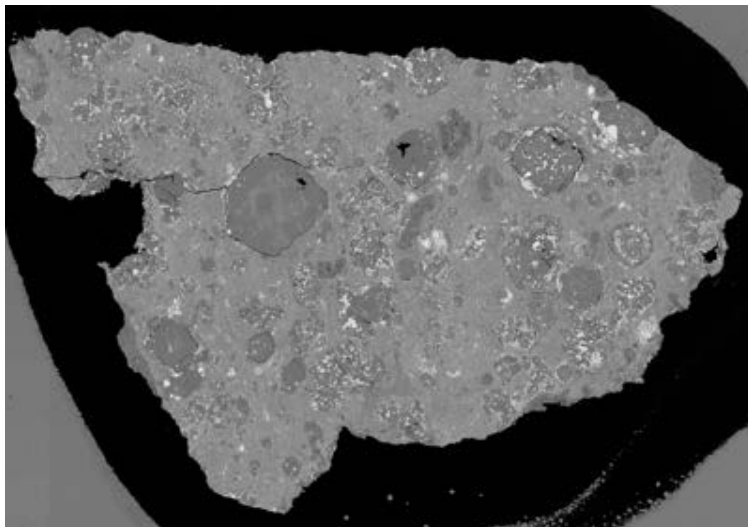
# chronologie de formation des chondrules



**formation des chondres pendant centaines de milliers d'années**

**→ même au sein d'une chondrite donnée**

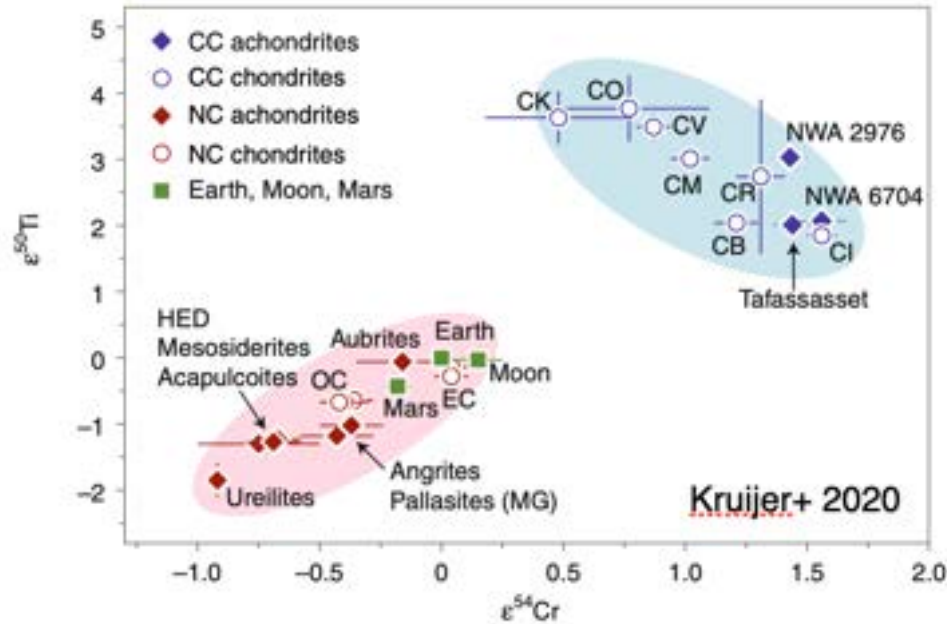
(Bollard+ 2017; Sirion+ 2021, Fukuda+ 2022, Piralla+ 2023)



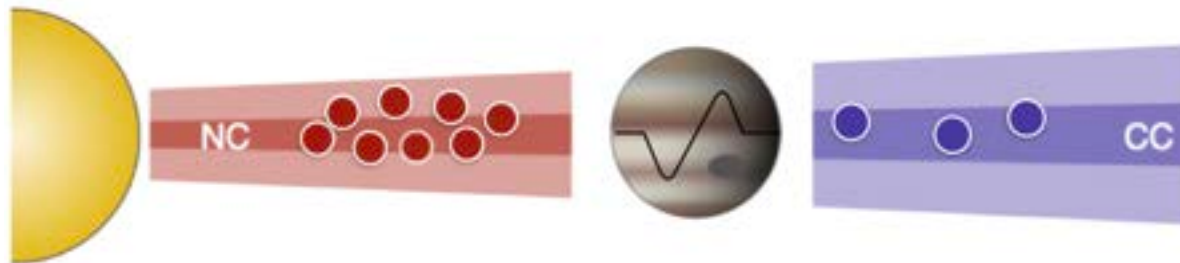
→ chondrites = enregistrement continu de l'évolution de la poussière

→ chondrites se sont formées tardivement (après la formation du dernier chondre)

# chondrites enregistrent également la structure du système solaire

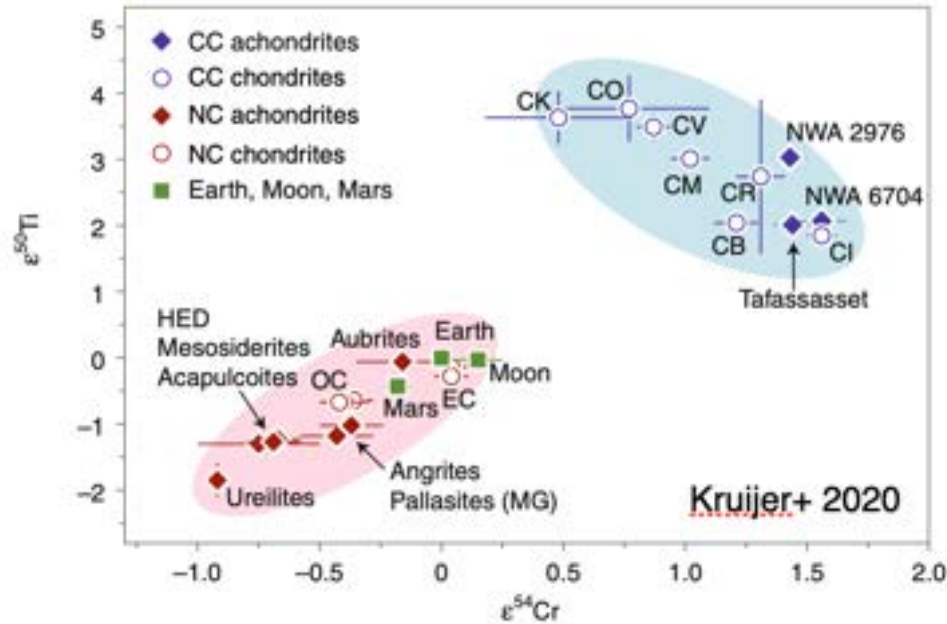


→ compositions isotopiques spécifiques  
**(anomalies nucléosynthétiques)**  
révèlent une dichotomie fondamentale  
entre les chondrites **NC** et **CC**  
(Warren 2011 ; Kleine+ 2020)

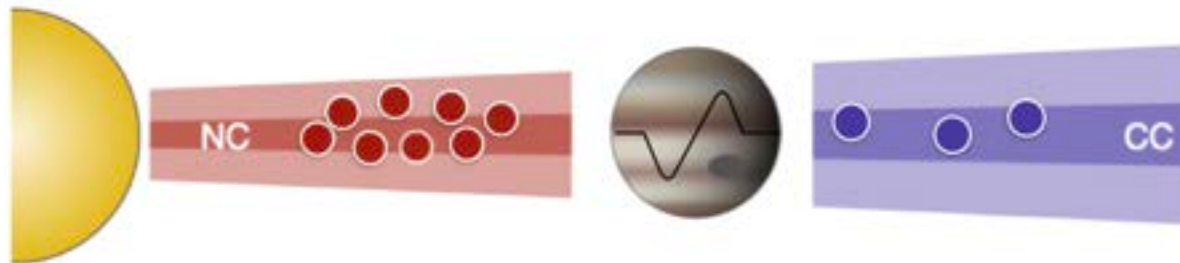


→ au moment de la formation des chondres,  
le disque était divisé en deux réservoirs (Warren, 2011)

# avantages et limitations



→ compositions isotopiques spécifiques  
**(anomalies nucléosynthétiques)**  
révèlent une dichotomie fondamentale  
entre les chondrites **NC** et **CC**  
(Warren 2011 ; Kleine+ 2020)



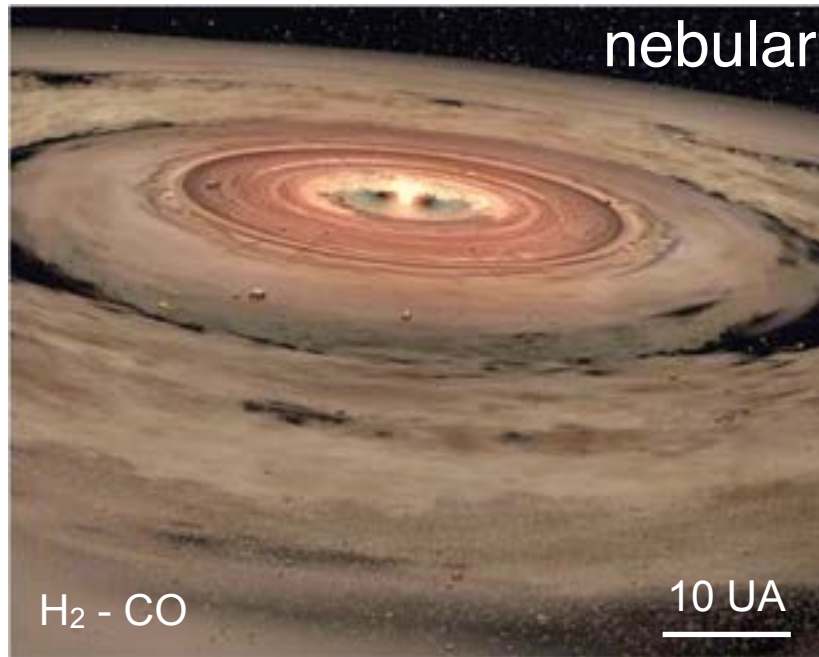
→ **avantage** : bonnes résolutions spatiales et temporelles  
pour étudier l'évolution de la poussière

→ **limitation** : données sur un seul disque



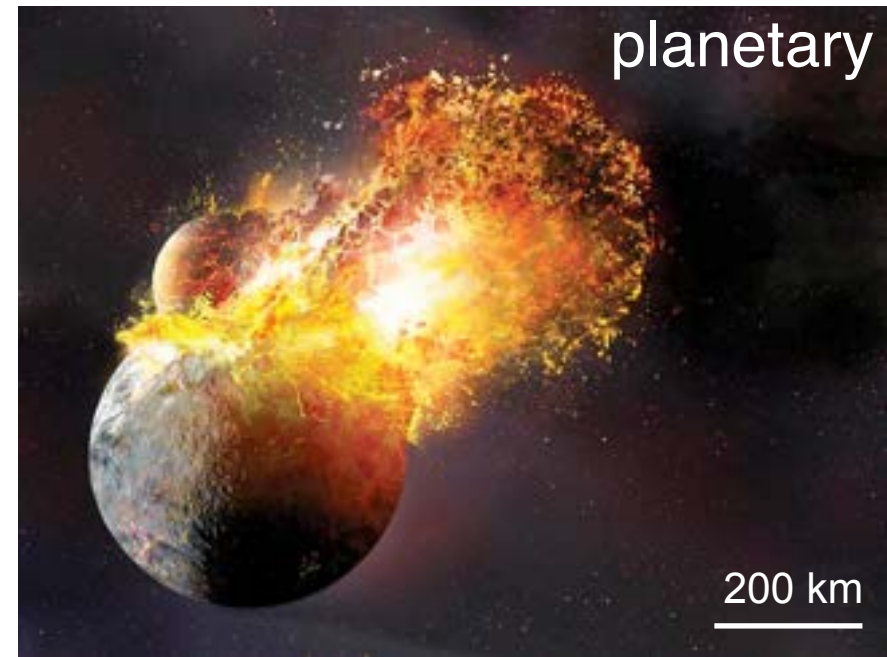
quel processus est à l'origine des chondres ?

**aucun consensus aujourd'hui sur leurs conditions de formation**



→ fusion incomplète de précurseurs  $\mu\text{m}$   
(Hewins+, 2005; Tenner+, 2017)

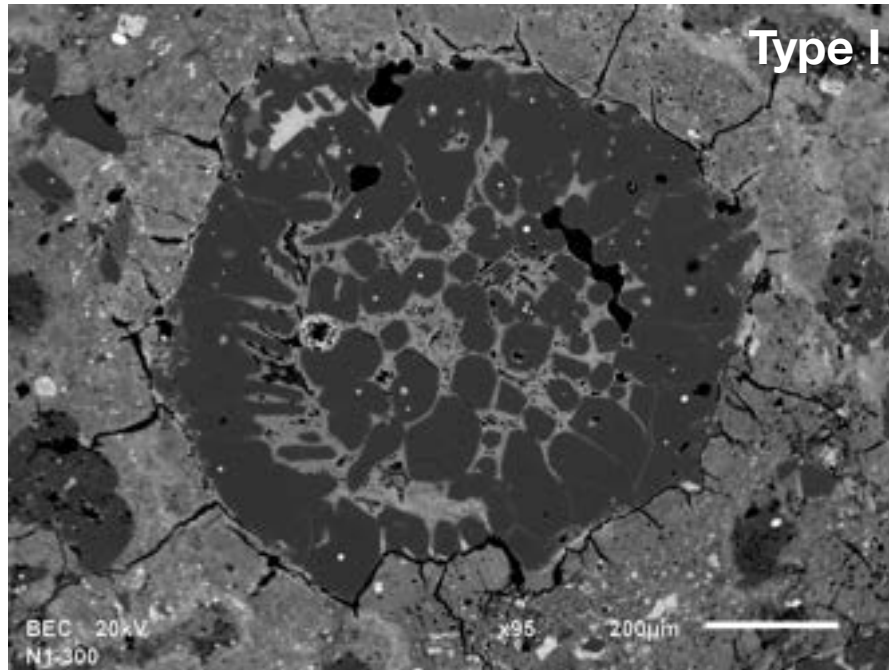
→ recyclage des condensats précoces  
(Marrocchi+ 2018, 2019)



→ collisions entre protoplanètes  
(Libourel & Krot 2007, Faure+, 2017)

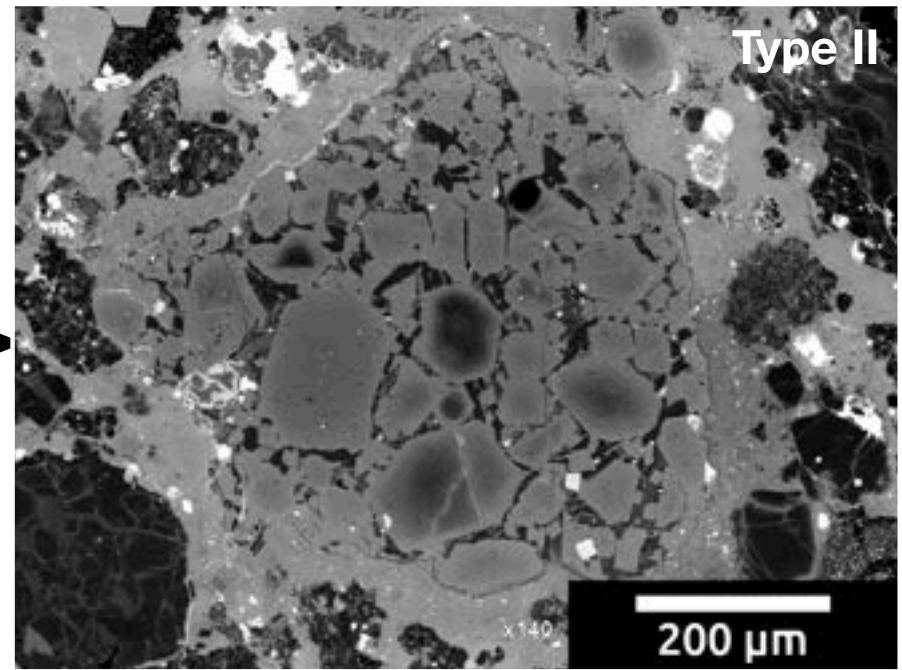
→ gouttes d'impact  
(Lichtenberg+ 2018, Libourel+ 2022)

plus de 90 % des chondres sont porphyriques (= grands minéraux)



*chondres de type I*

↓  
conditions réductrices  
(Fe dans des billes de métal)

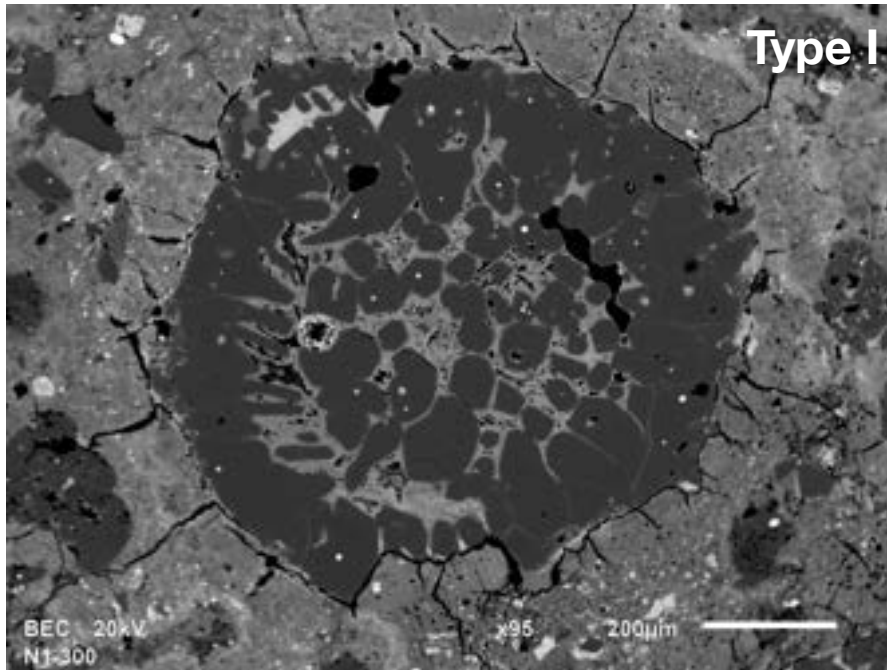


*chondres de type II*

↓  
conditions oxydantes  
(Fe dans les silicates)

**CAIs, AOAs et chondres de type I et type II  
coexistent dans les chondrites carbonées**

plus de 90 % des chondres sont porphyriques (= grands minéraux)

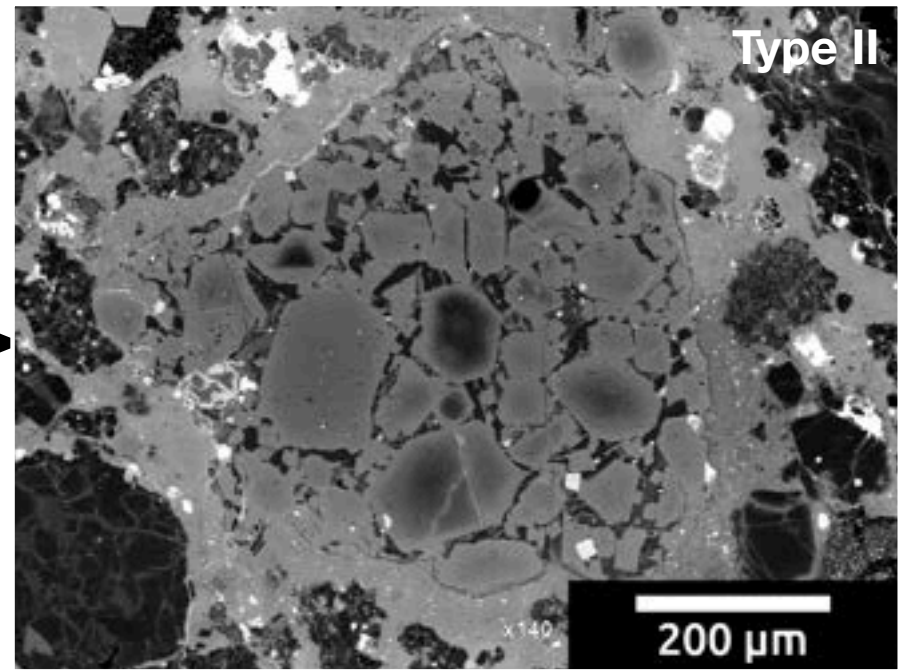


Type I

*chondres de type I*



conditions réductrices  
(Fe dans des billes de métal)



Type II

*chondres de type II*

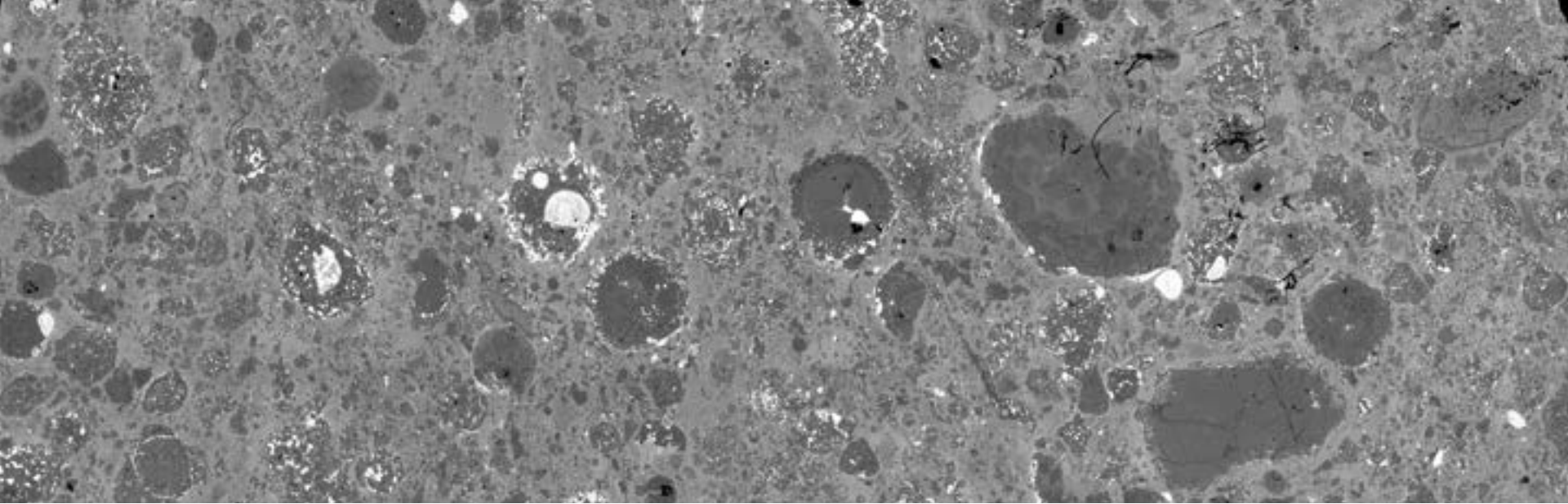


conditions oxydantes  
(Fe dans les silicates)

→ conditions différentes = chronologie différente et/ou régions différentes

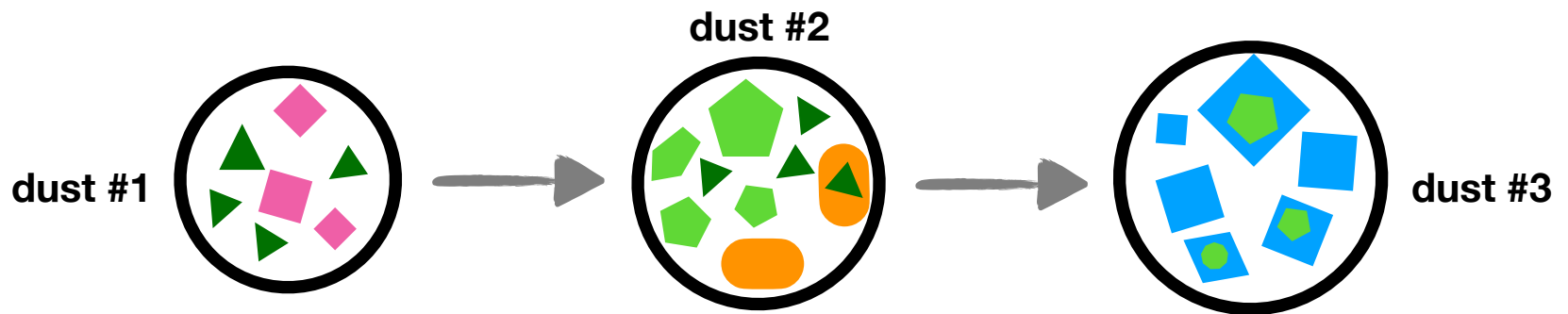
→ dérive les uns des autres = liens génétiques entre les ≠ poussières



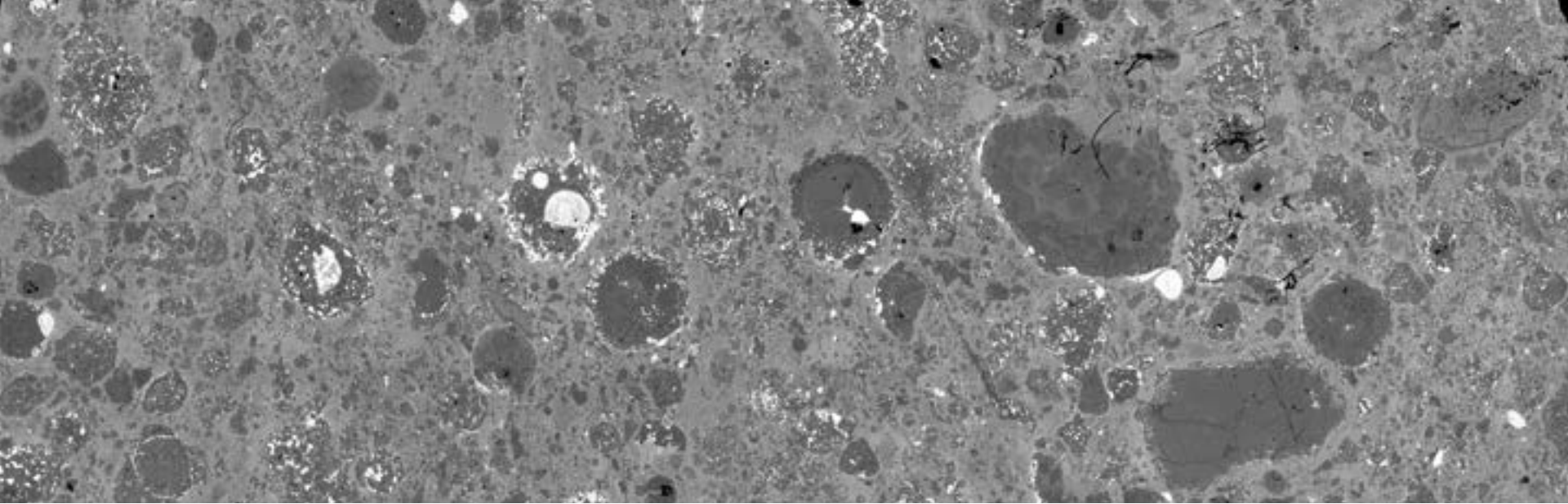


lien génétique est attesté par la présence de minéraux reliques

→ hérité de la génération précédente de poussière

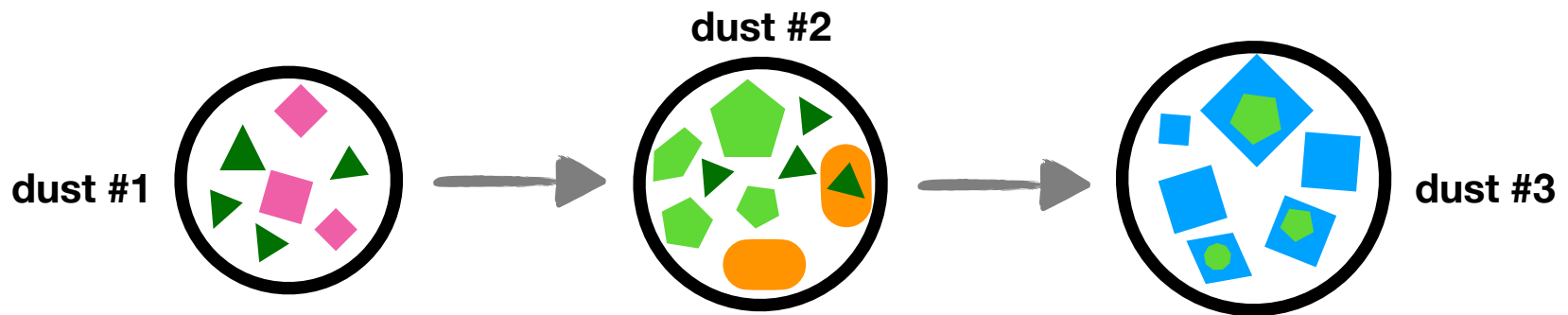






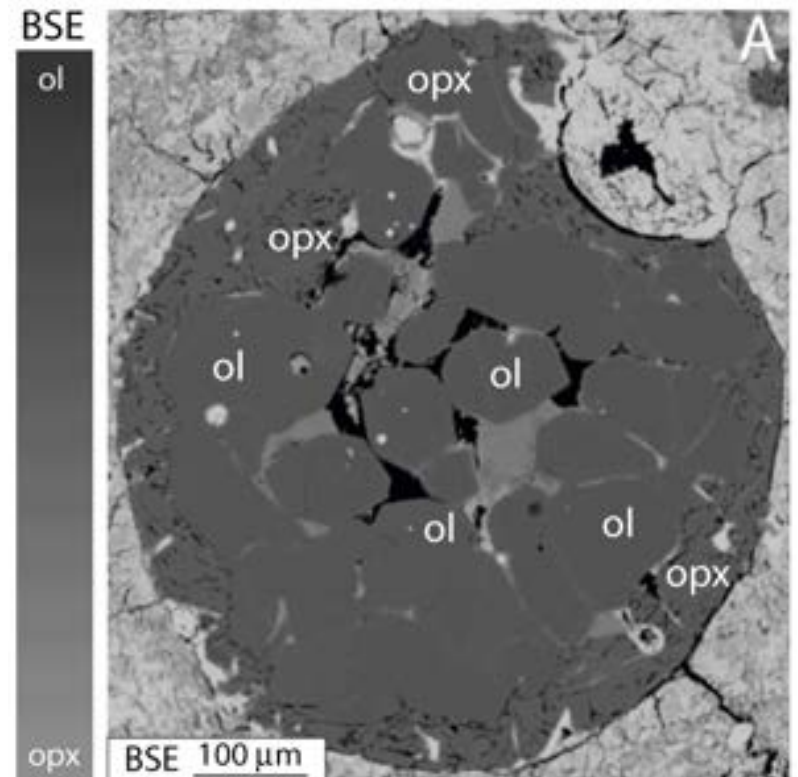
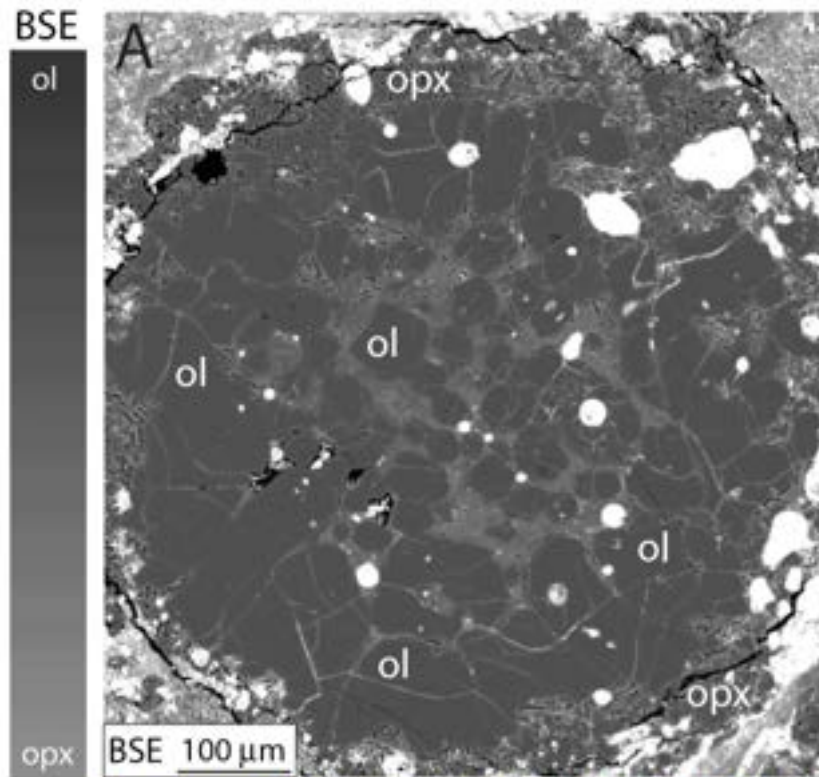
lien génétique est attesté par la présence de minéraux reliques

→ hérité de la génération précédente de poussière



comment reconnaître et caractériser les minéraux reliques ?

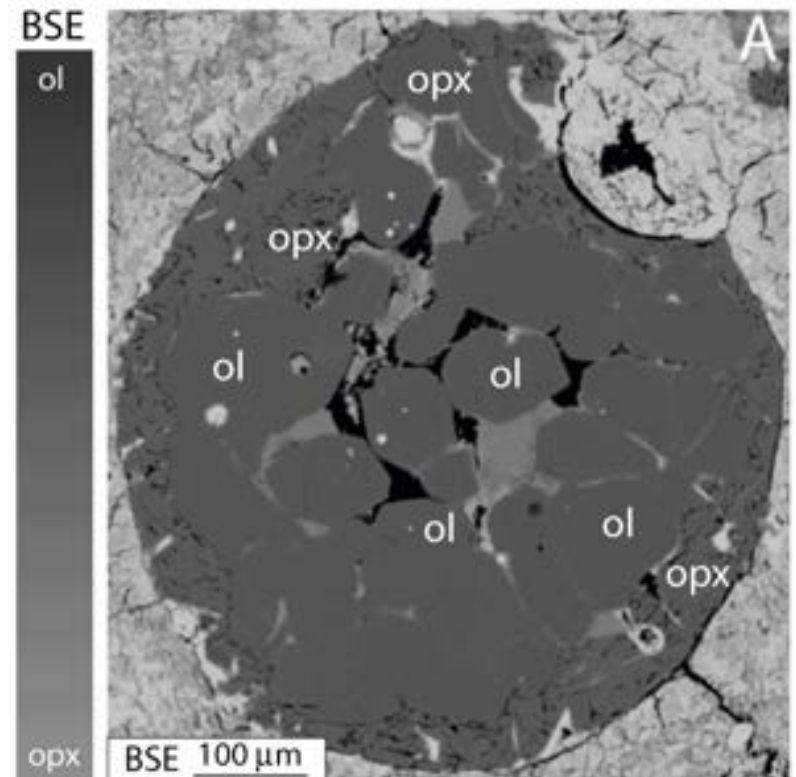
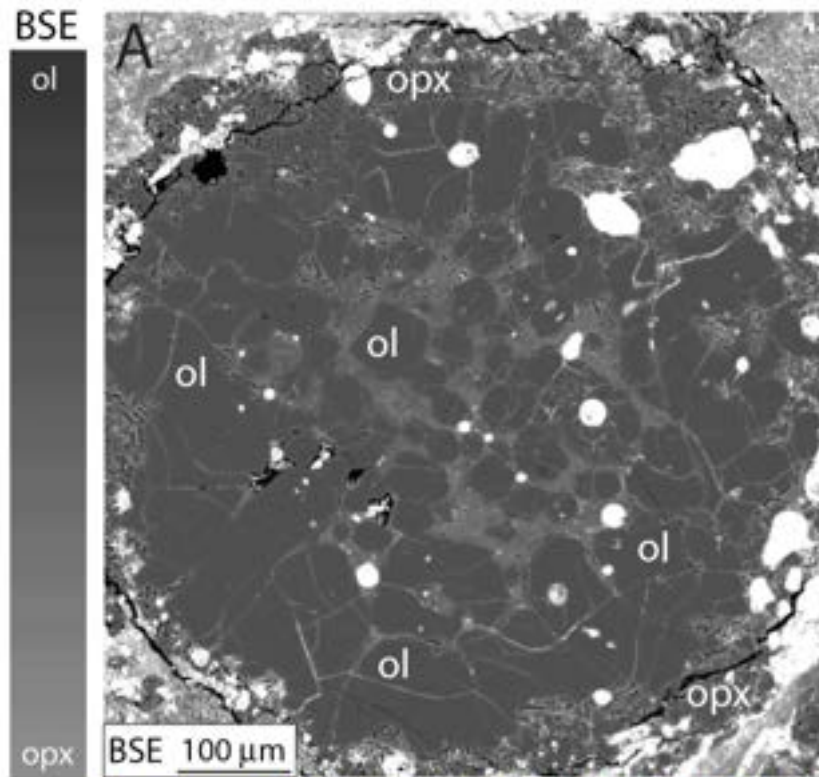
facile en théorie, plus compliqué en pratique



→ chondres de type I riches en olivine semblent homogènes

**comment reconnaître et caractériser les minéraux reliques ?**

## développement de nouvelles méthodes

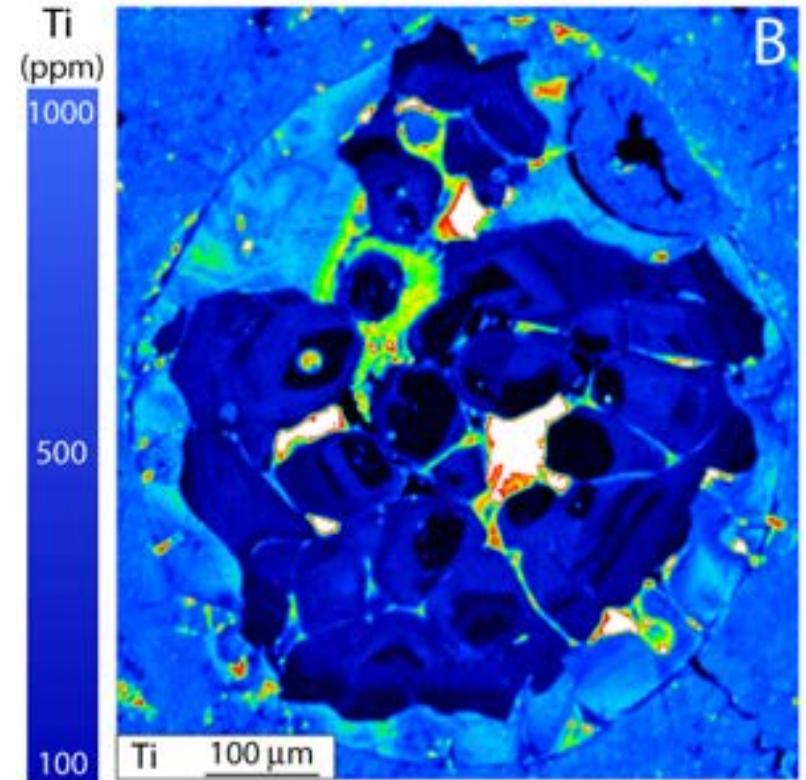
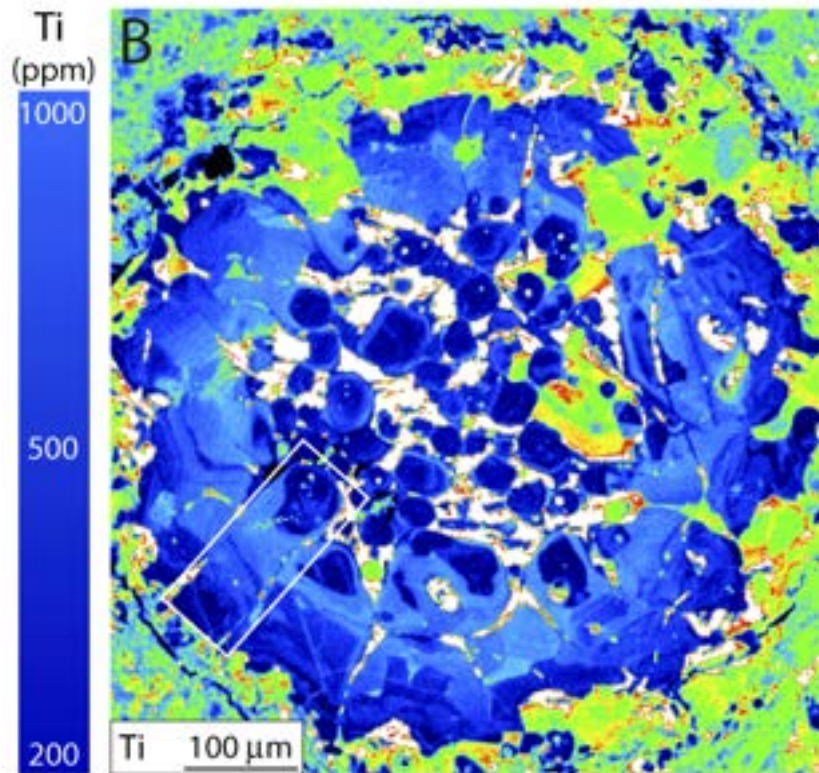


→ chondres de type I riches en olivine semblent homogènes

**développer et utiliser des méthodes permettant de “voir” à l’intérieur des minéraux**



## cartographies RX fort courant

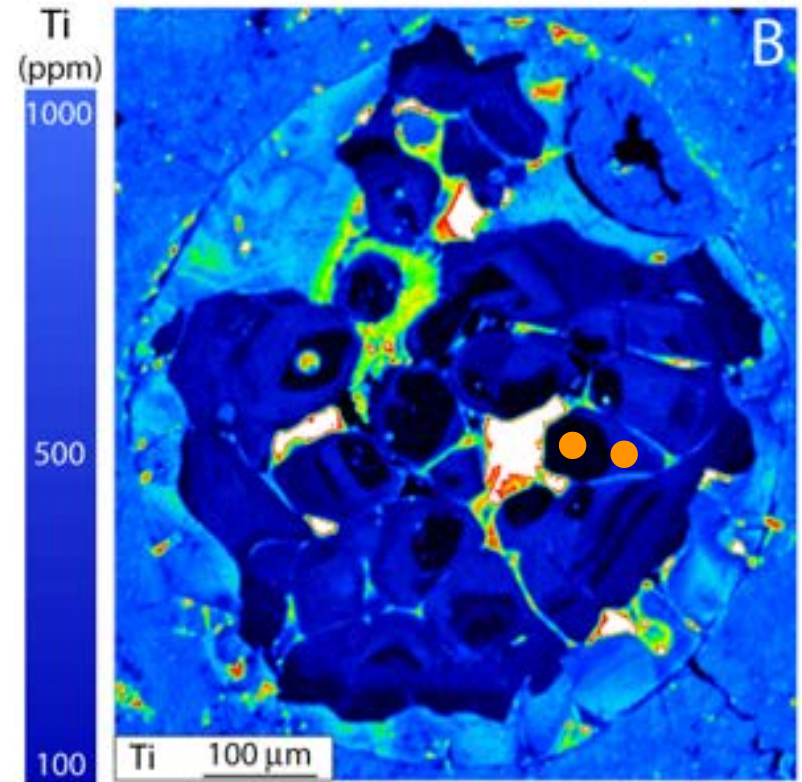
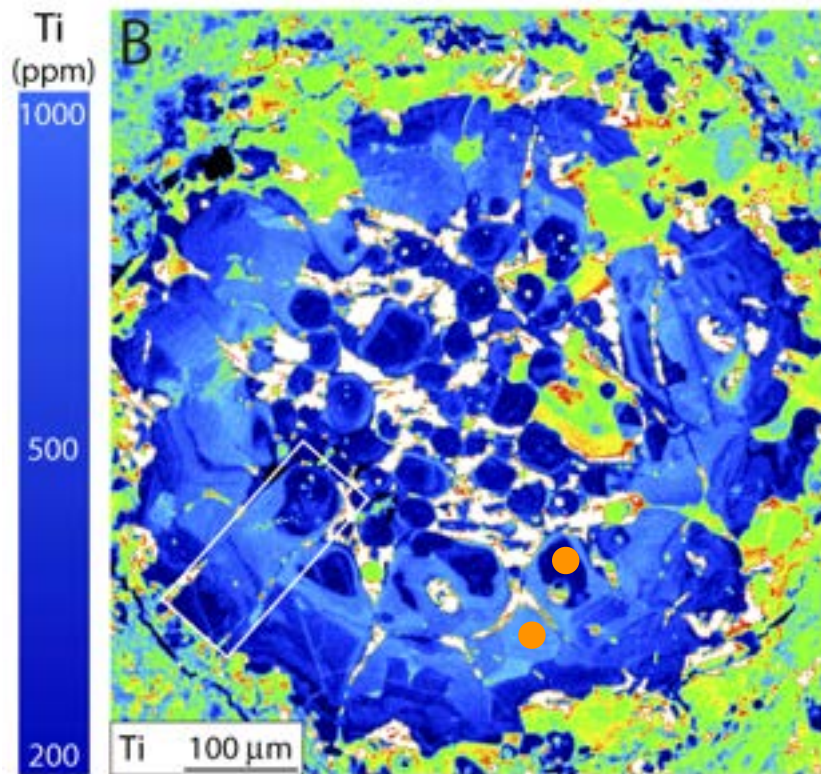


→ chondres de type I riches en olivine semblent homogènes

→ cartes en rayon X à fort courant révèlent des textures inédites  
(Marrocchi+ 2018, 2019, 2022, 2024)



## mesures spatialement localisées

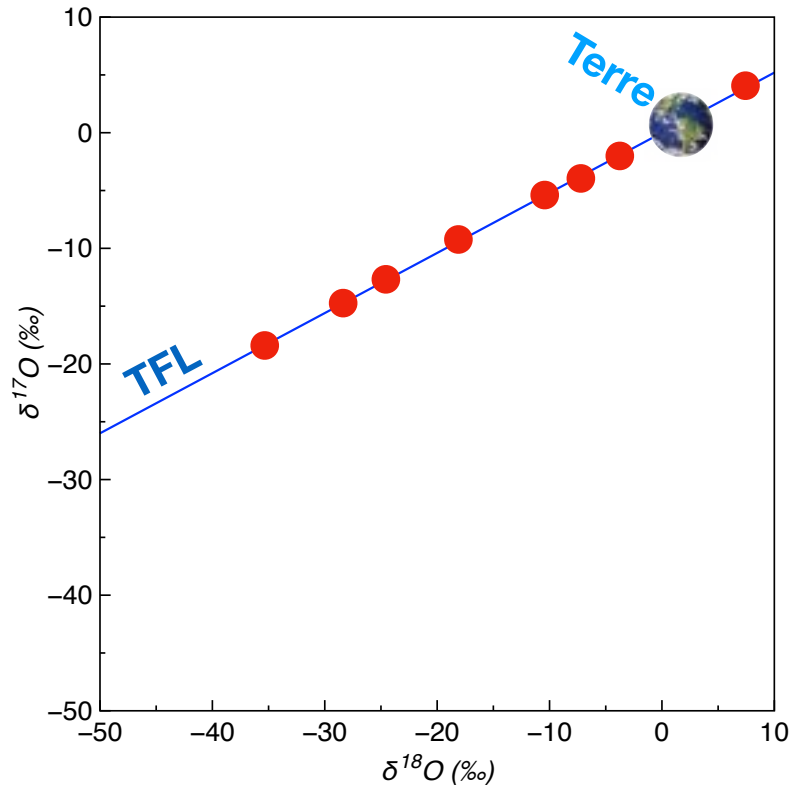


→ chondres de type I riches en olivine semblent homogènes

→ cartes en rayon X à fort courant révèlent des textures inédites  
(Marrocchi+ 2018, 2019, 2022, 2024)

permet de déterminer les compositions isotopiques en oxygène  
de grains d'olivine caractérisés chimiquement = mesures sonde ionique

# concept géochimique – isotopes de l'oxygène



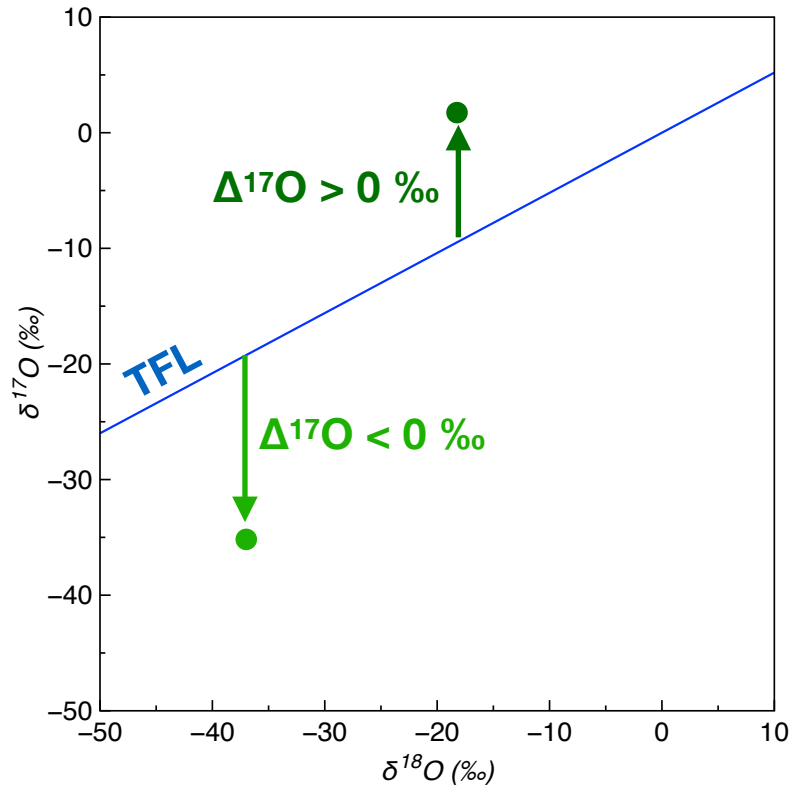
$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1,000$$

→ tous les échantillons terrestres s'alignent le long d'une droite de pente 0.52 (Robert+ 1992)

**TFL** = terrestrial fractionation line = variations dépendantes de la masse ( $18-16/17-16 \sim 0.52$ )

→ tous les processus ou réactions chimiques produisent des variations dépendantes de la masse (évaporation, condensation, cristallisation...)

# concept géochimique – isotopes de l'oxygène



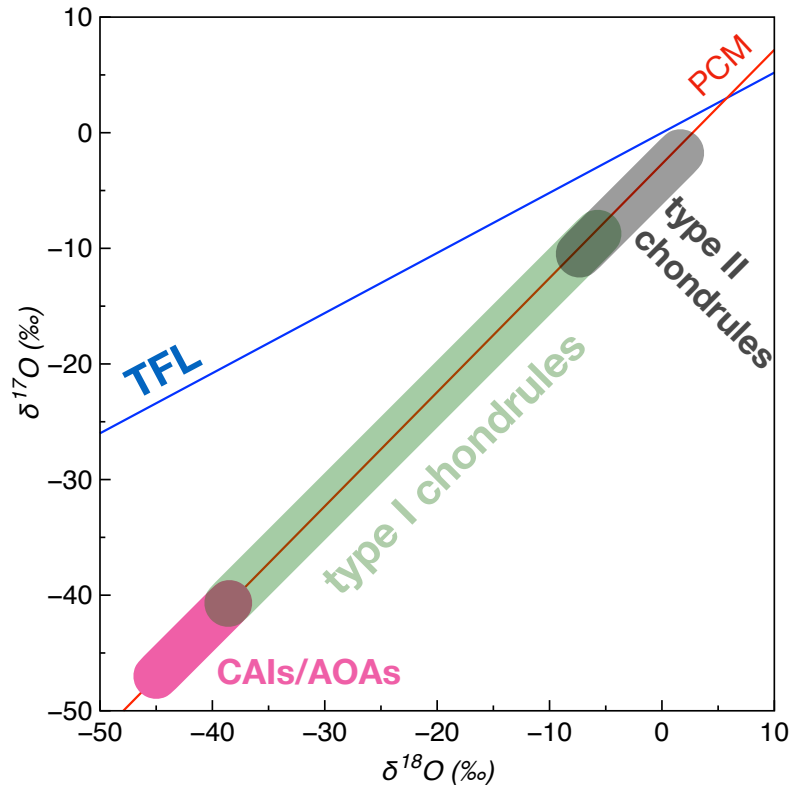
$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1,000$$

**TFL** = terrestrial fractionation line =  
variations dépendantes de la masse (**pente 0.52**)

tout écart par rapport à la TFL est  
exprimé à l'aide de la notation  $\Delta^{17}\text{O}$

$$\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$$

# concept géochimique – isotopes de l'oxygène



$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1,000$$

**TFL** = terrestrial fractionation line = variations dépendantes de la masse (**pente 0.52**)

**PCM** = variations indépendantes de la masse = **pente 1**



**processus  
de recyclage**

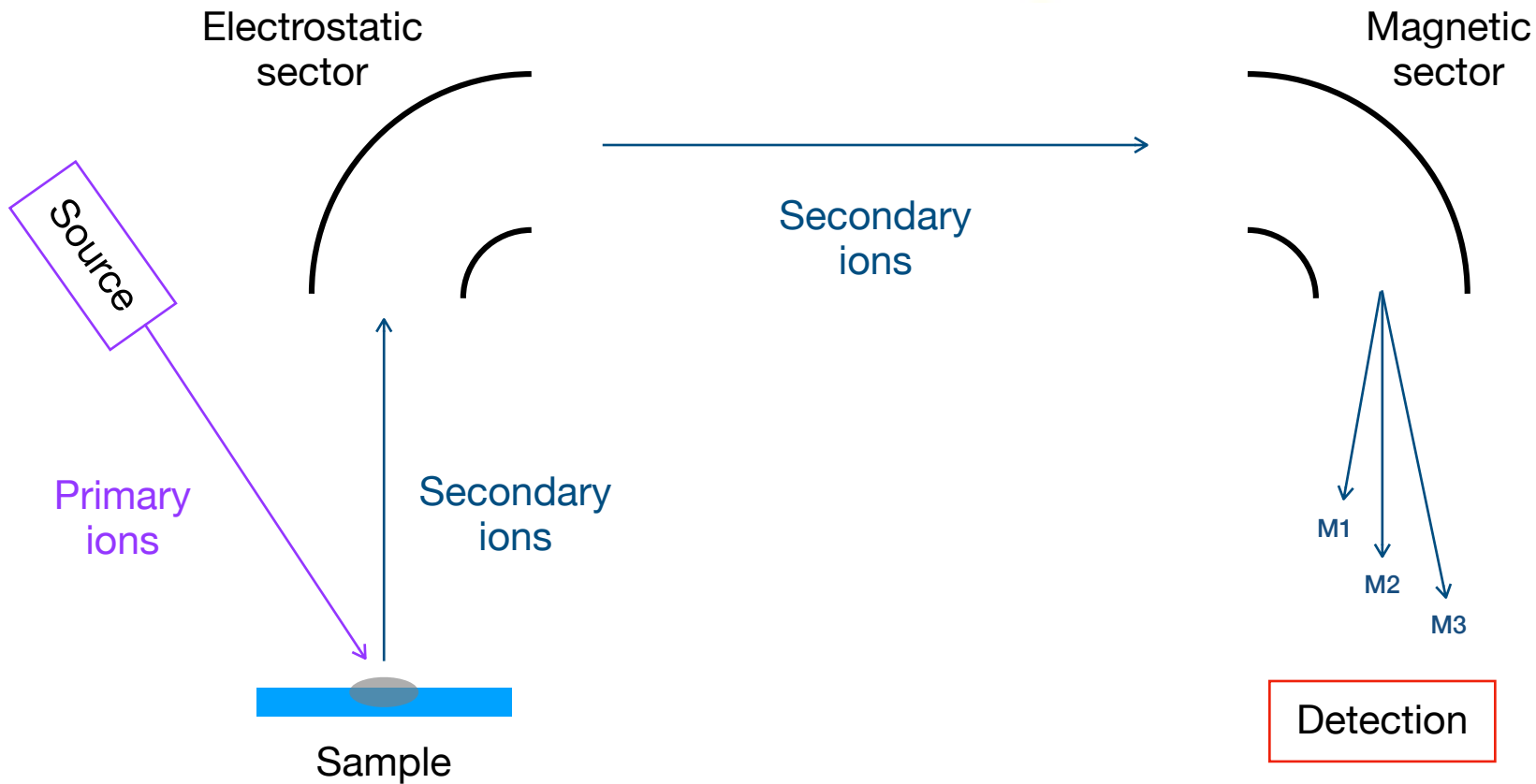
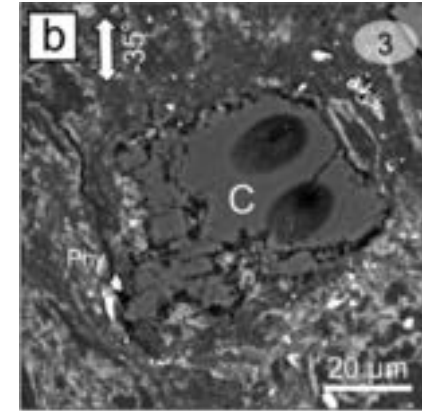
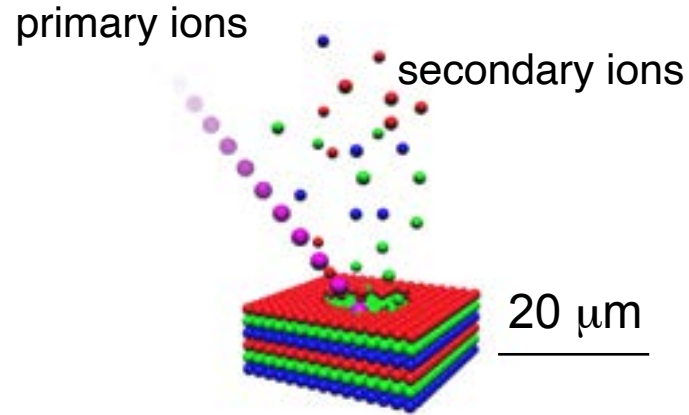
→ CAI/AOA ont des  $\Delta^{17}\text{O} = -23$  ‰

→ chondres ont des compositions isotopiques s'alignant sur la PCM

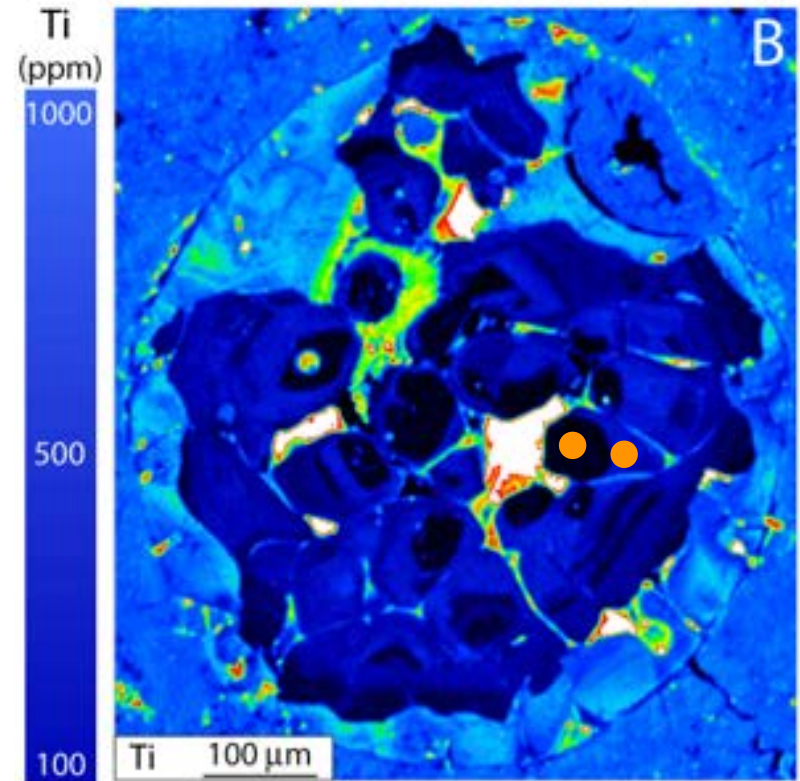
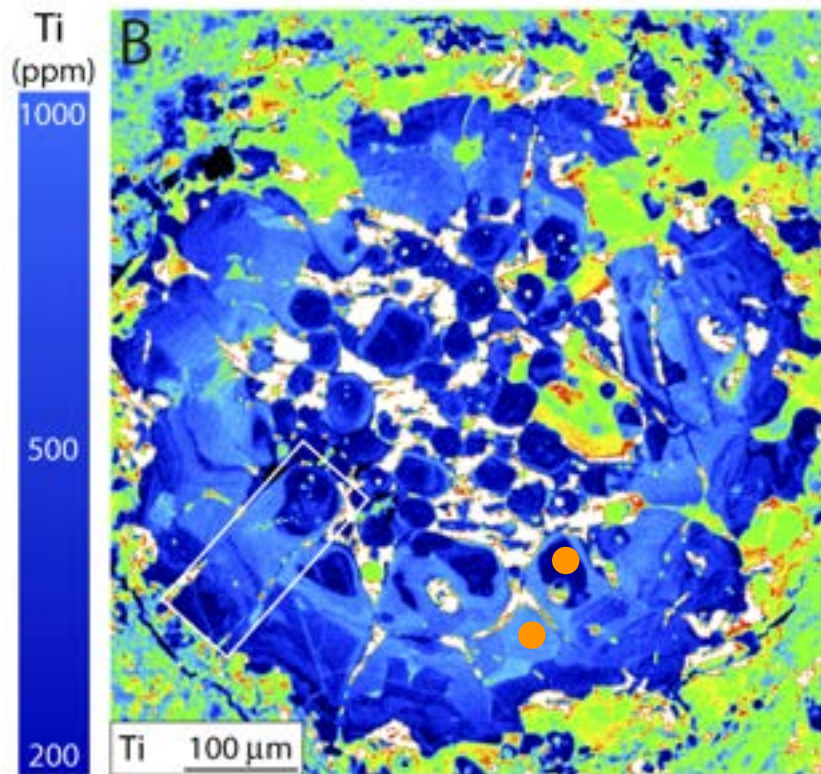
→ différence type I/type II



# qu'est-ce qu'une mesure sonde ionique ?



## mesures spatialement localisées

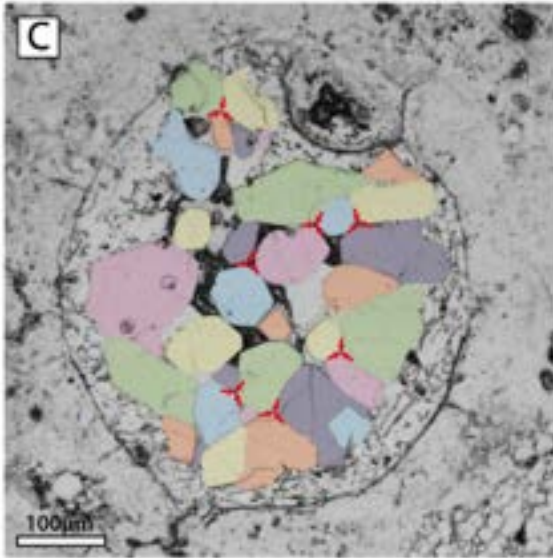


→ chondres de type I riches en olivine semblent homogènes

→ cartes en rayon X à fort courant révèlent des textures inédites  
(Marrocchi+ 2018, 2019, 2022, 2024)

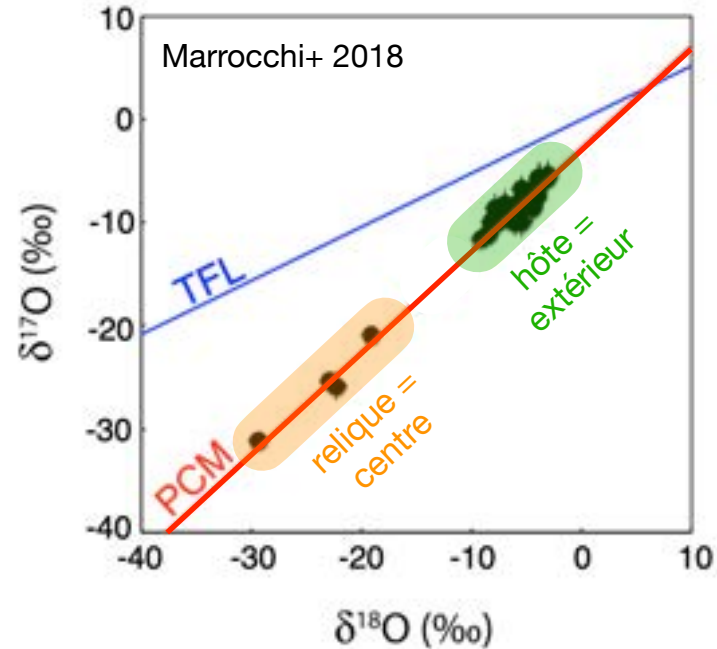
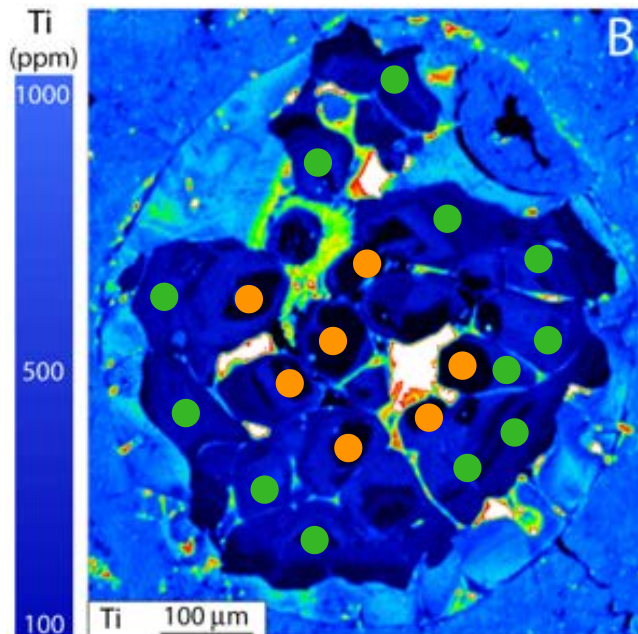
permet de déterminer les compositions isotopiques en oxygène  
de grains d'olivine caractérisés chimiquement = mesures sonde ionique

# deux types d'olivine dans les chondres



→ variations indépendantes de la masse

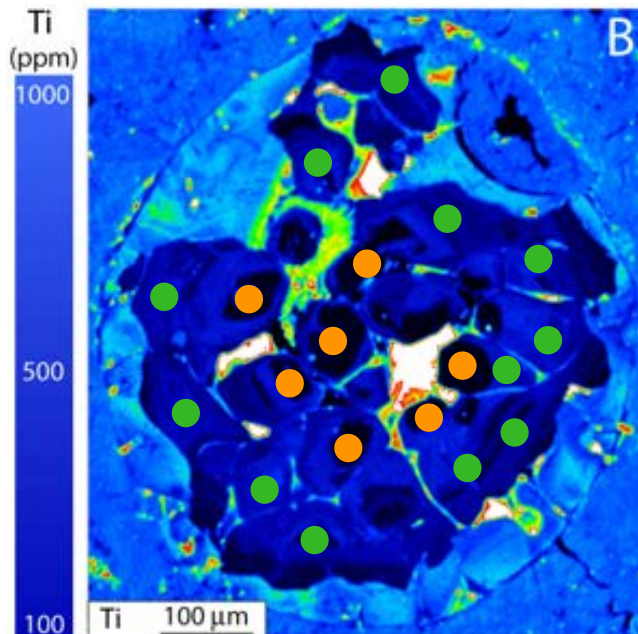
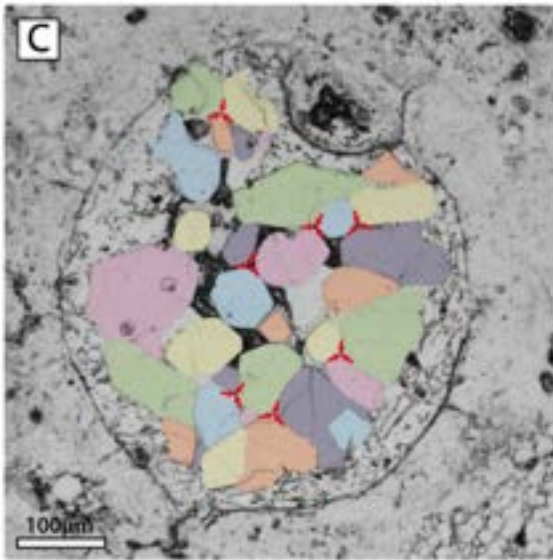
→ incompatible avec une origine planétaire  
(fragments solides de planétésimaux, Libourel+ 2007)



chondres sont composés de deux types d'olivines :  
– **olivine reliques** hérités des précurseurs  
– **olivines hôtes** cristallisées lors de la formation des chondres



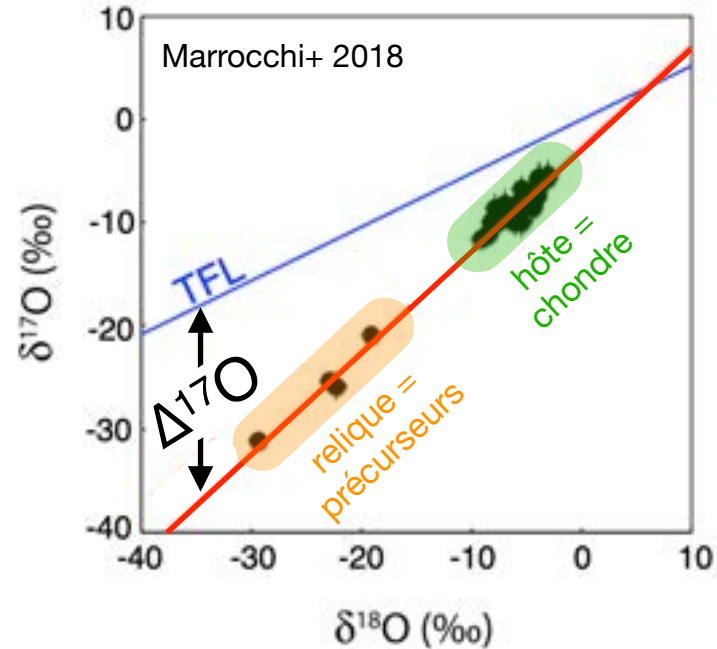
# nature des olivines reliques ?



→ variations indépendantes de la masse

→ incompatible avec une origine planétaire  
(fragments solides de planétésimaux, Libourel+ 2007)

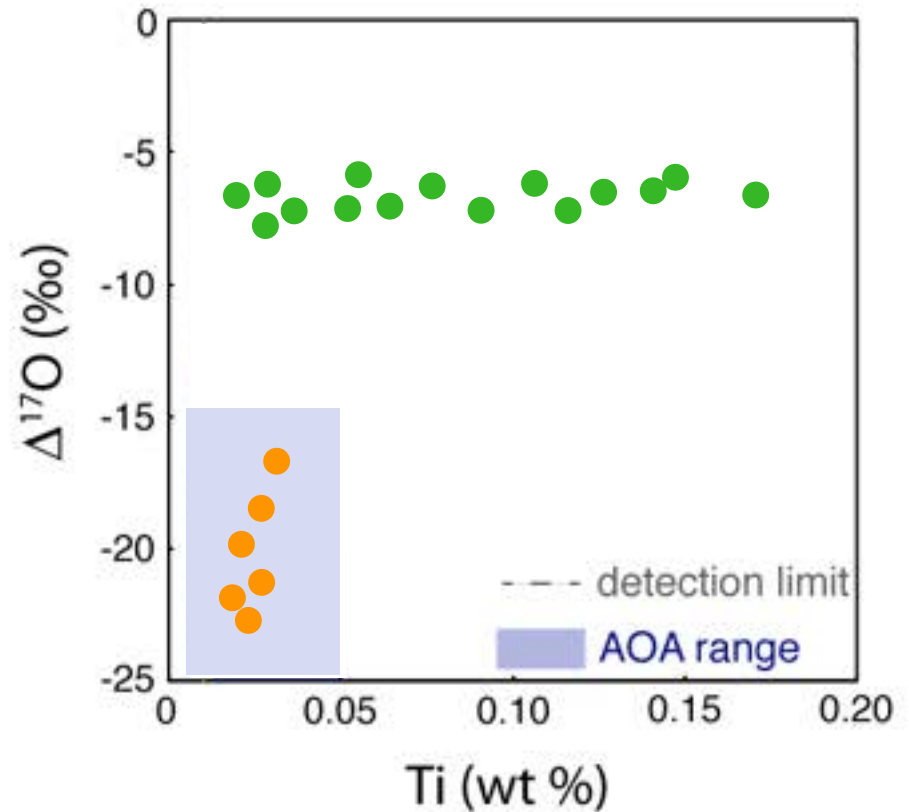
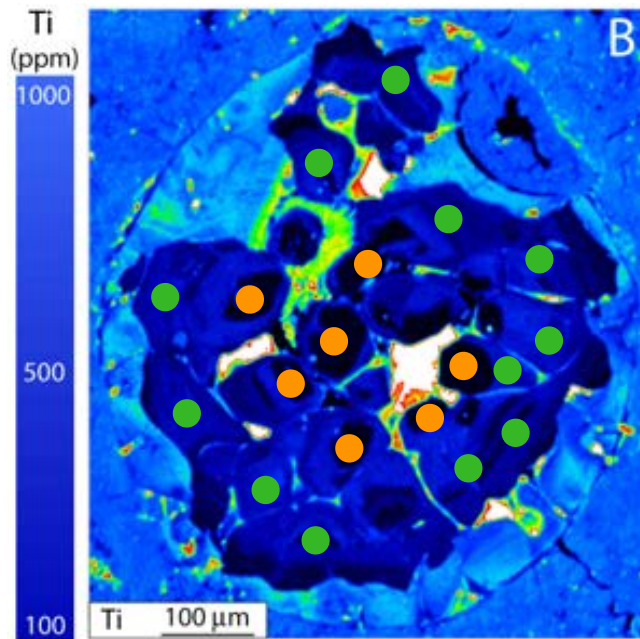
$$\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$$



*quelle est la nature et l'origine des  
olivines reliques?*



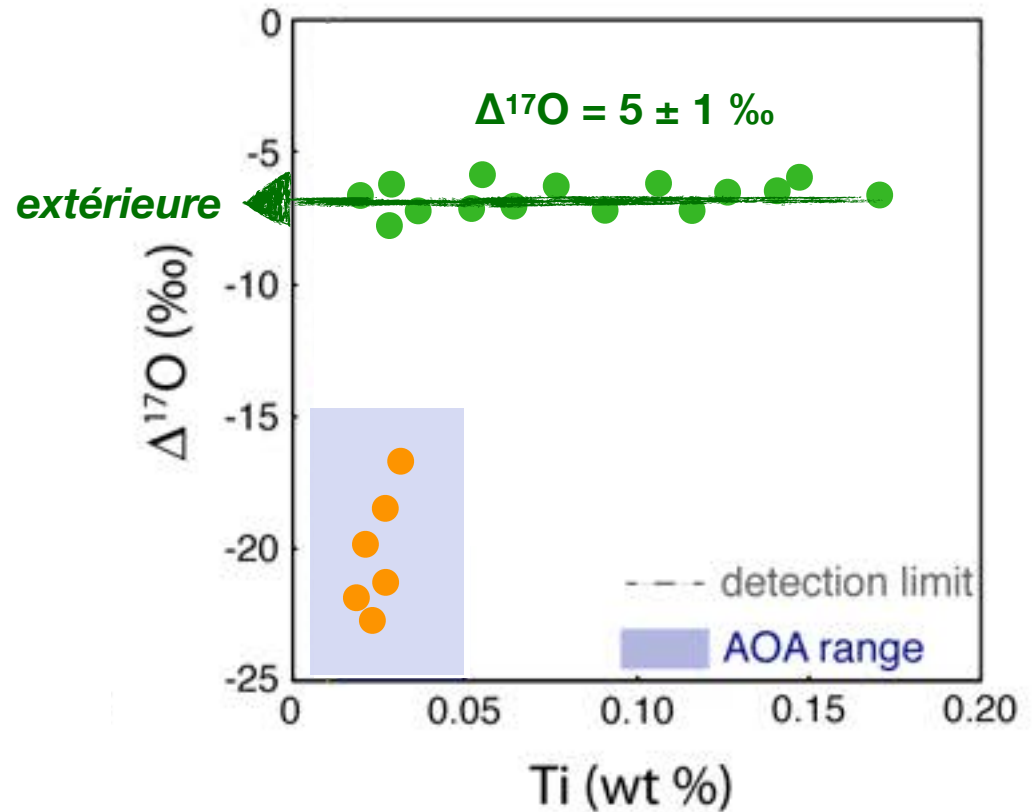
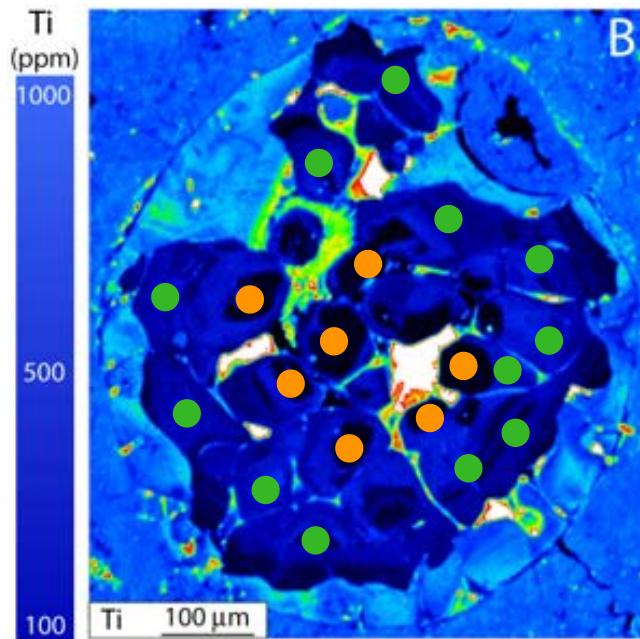
## nature des olivines reliques ?



→ olivines reliques sont pauvres en Ca-Al-Ti et ont des  $\Delta^{17}\text{O} < -15$  ‰ (Marrocchi+ 2019)

→ caractéristiques chimiques et isotopiques similaires à celles des olivines des AOA (Weisberg+, 2004, Ebel+, 2012; Komatsu+ 2019)

# caractéristiques chimiques des grains d'olivine reliques

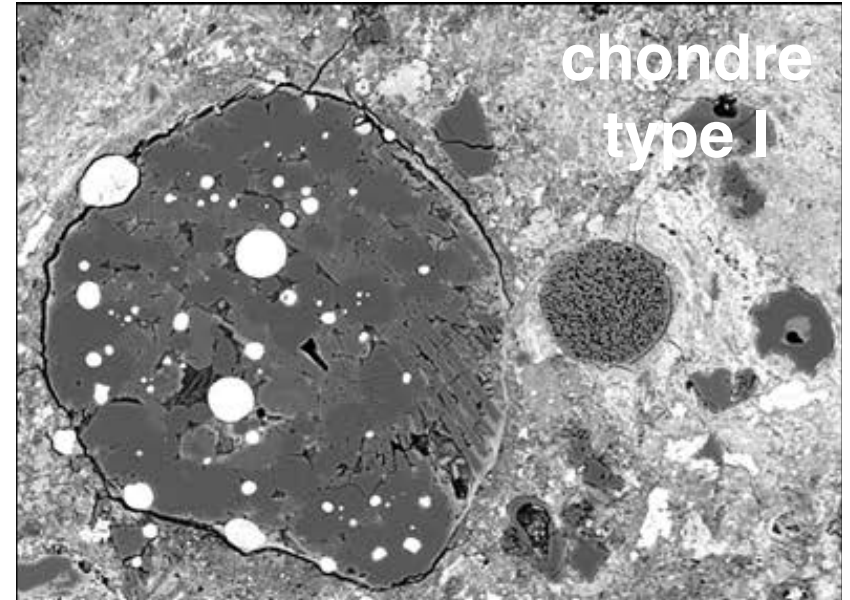
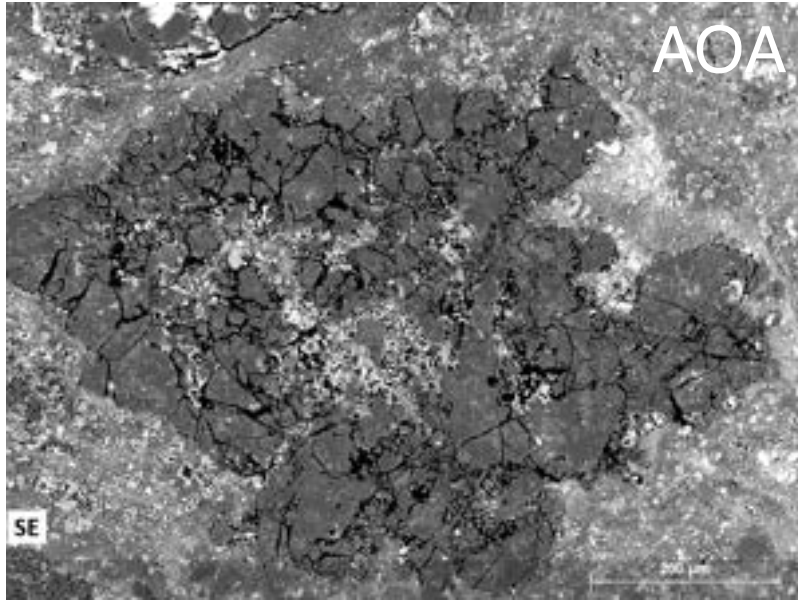


→ olivines reliques sont pauvres en Ca-Al-Ti et ont des  $\Delta^{17}\text{O} < -15 \text{ ‰}$  (Marrocchi+ 2019)

→ **caractéristiques chimiques et isotopiques similaires à celles des olivines des AOA** (Weisberg+, 2004, Ebel+, 2012; Komatsu+ 2019)

→ olivines hôtes formées lors de l'épisode magmatique à l'origine des chondres tels qu'observés aujourd'hui

## formation de chondrules de type I par recyclage d'AOAs



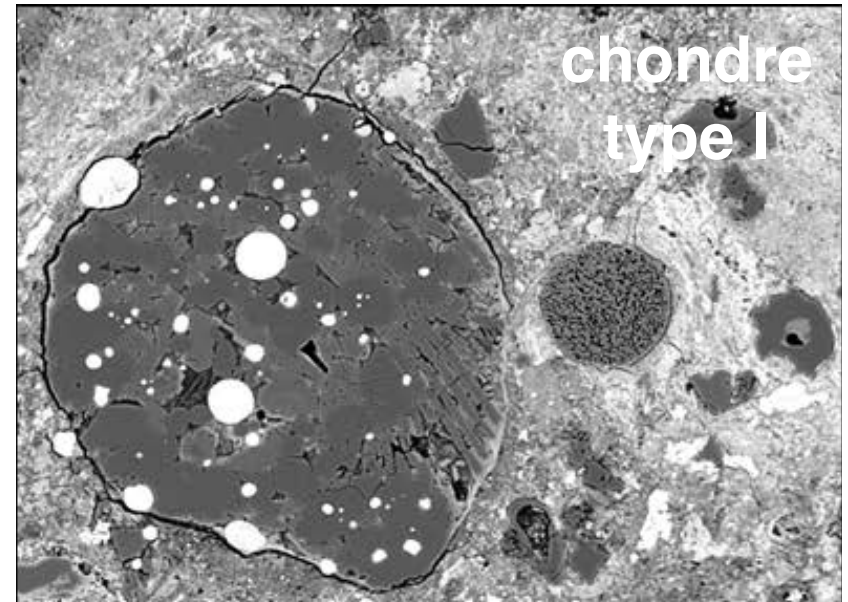
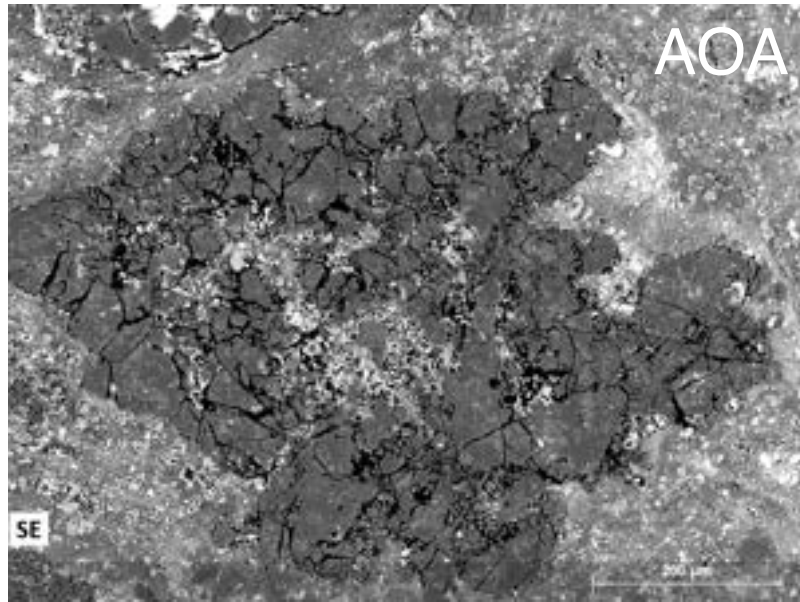
### **les chondres de type I sont des agents doubles**

→ implique la fusion partielle des AOA plusieurs dizaines de milliers d'années après leur condensation

→ nécessite un processus efficace de chauffage nébulaire dans le disque externe pour atteindre des températures magmatiques ( $> 1200$  K)



## formation de chondrules de type I par recyclage d'AOAs



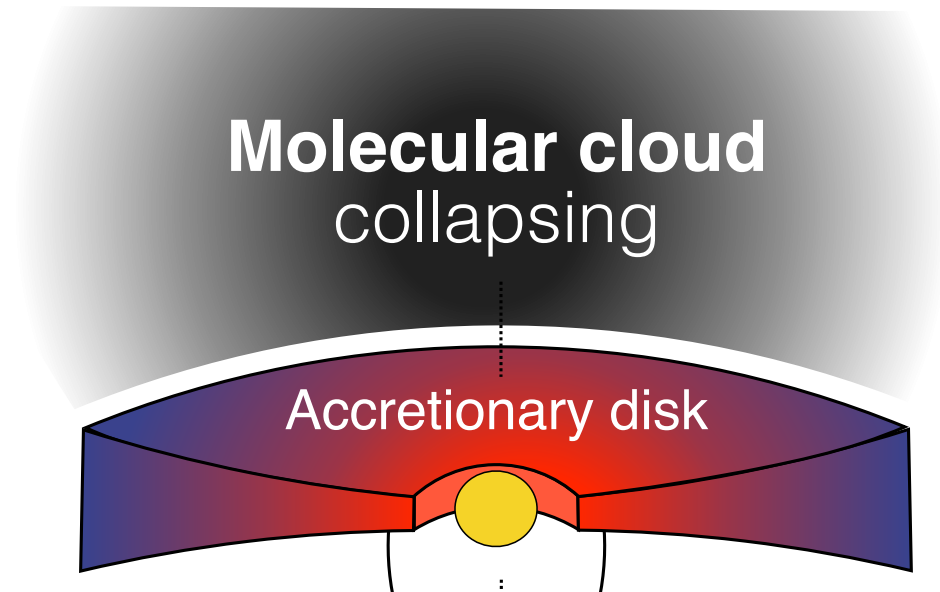
**processus ayant largement affecté le disque externe**

- AOAs représentent les condensats les plus abondants (Krot+ 2004)
- textures et  $\Delta^{17}\text{O}$  similaires dans la plupart des chondrites carbonées (CM-CO-CV chondrites = ~ 90% des CCs)

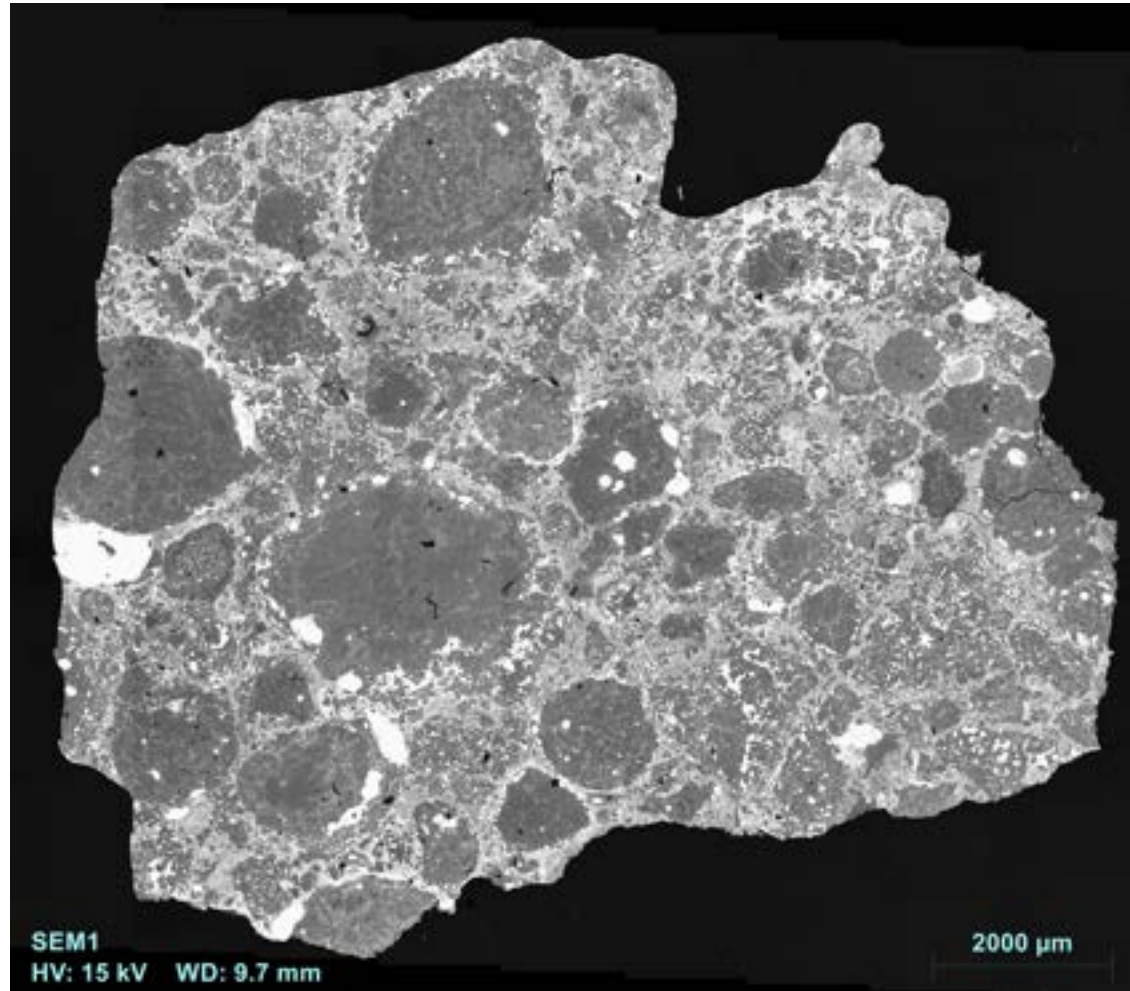


## modèle de formation des chondres CC

---

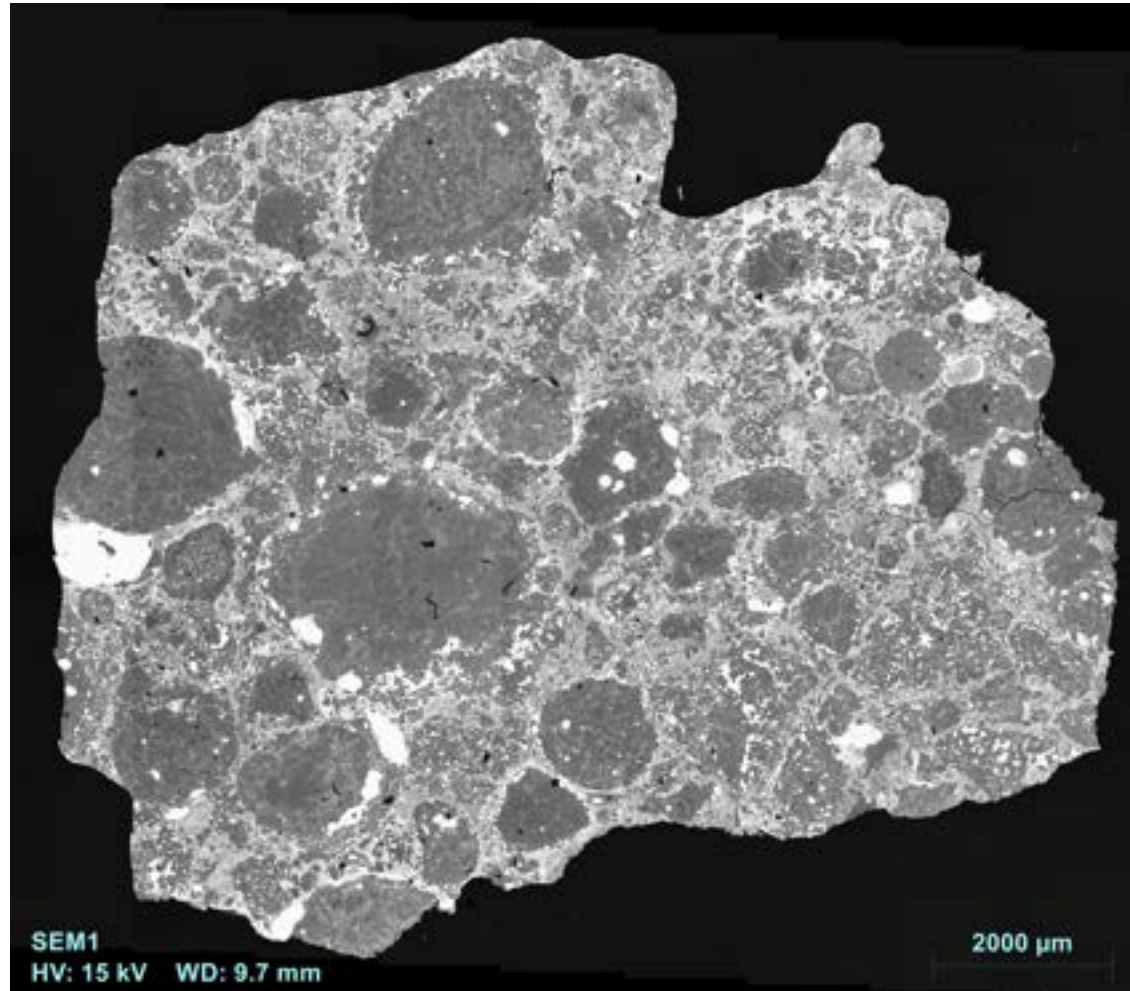


y-a-t-il eu des épisodes de recyclage multiple dans le disque ?



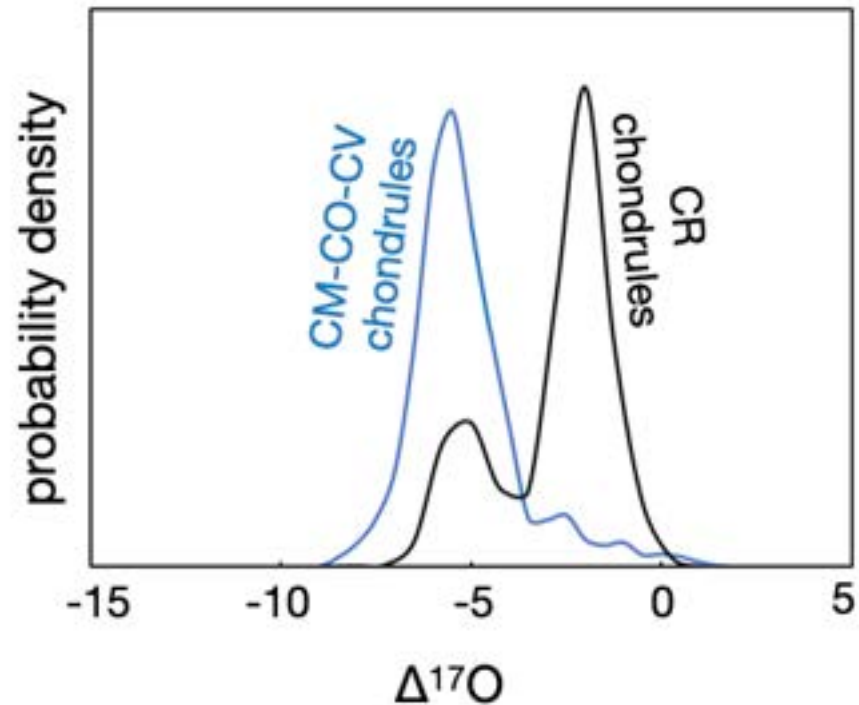
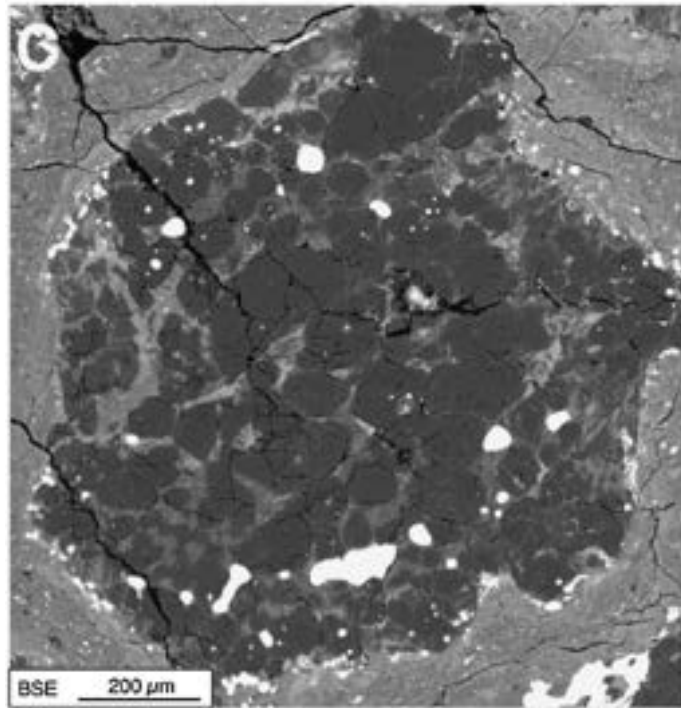
**quels chondres analyseriez-vous dans cette chondrite CR ?**

y-a-t-il eu des épisodes de recyclage multiple dans le disque ?



**quels chondres analyseriez-vous dans cette chondrite CR ?**

**sans doute les plus gros (comme tout le monde)**

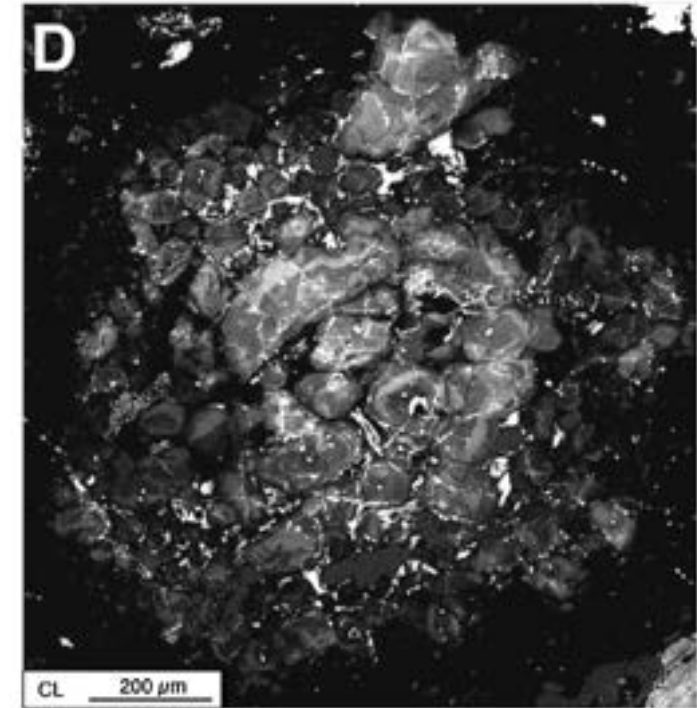
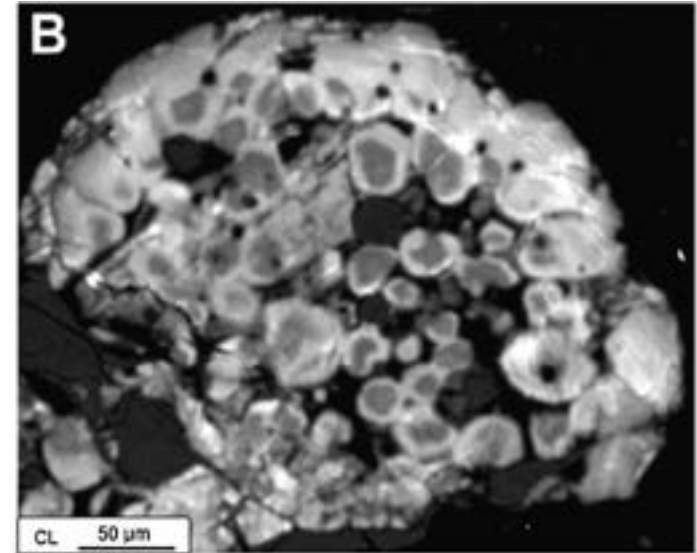
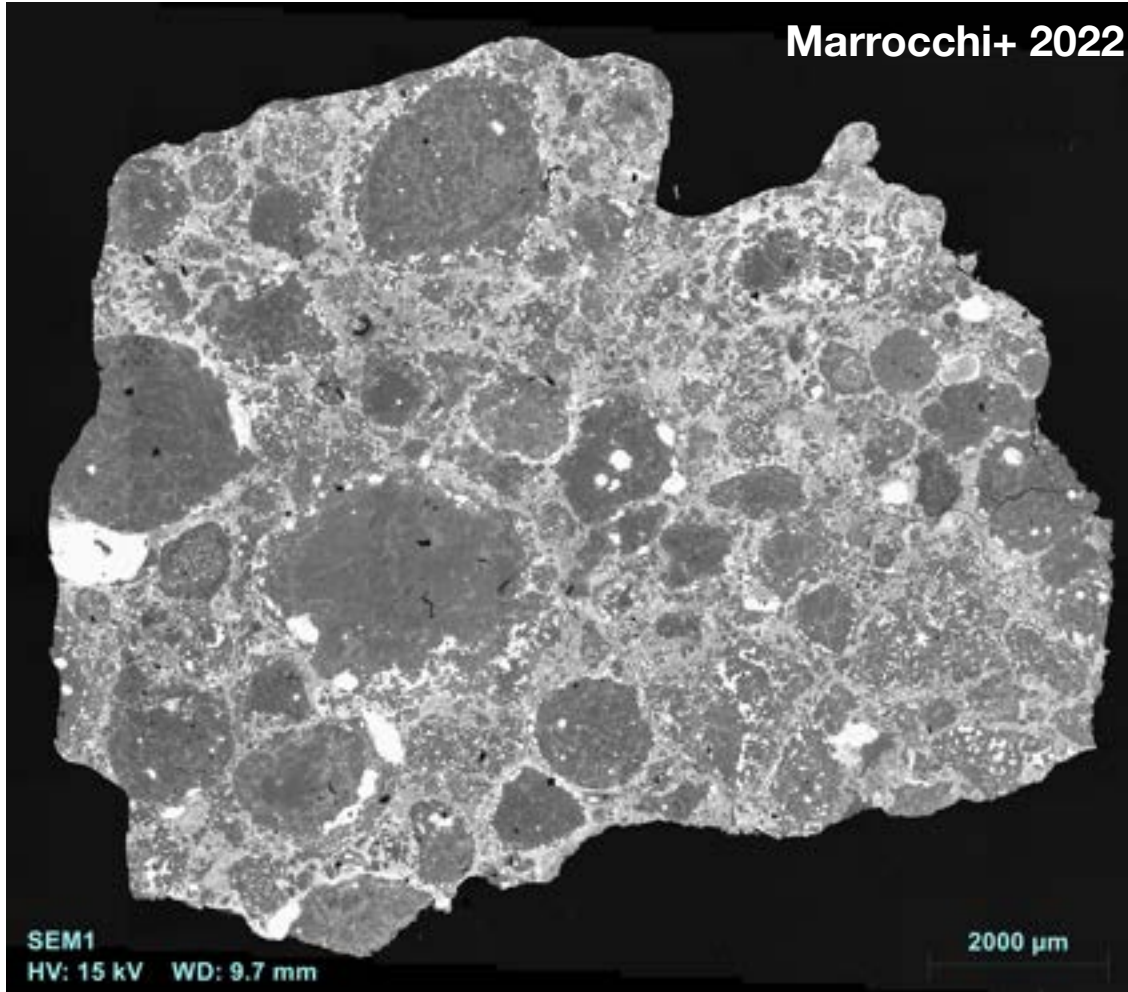


→ chondres très larges de CRs ont des  $\Delta^{17}\text{O}$  différents des autres CCs (Marrocchi+ 2024a)

**précurseurs et conditions de formation différentes ?**



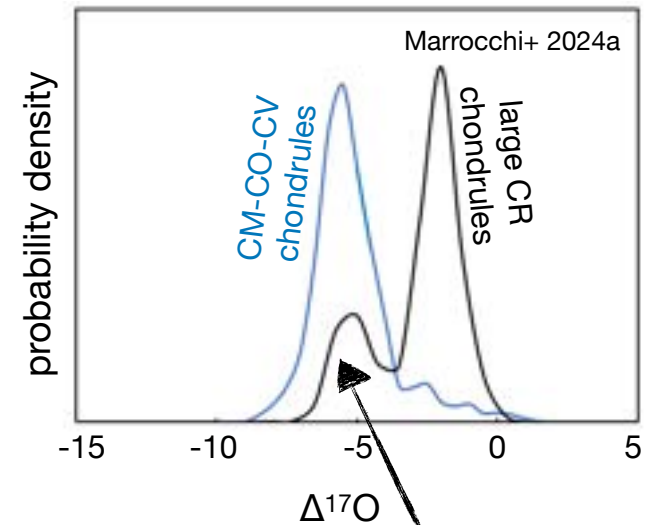
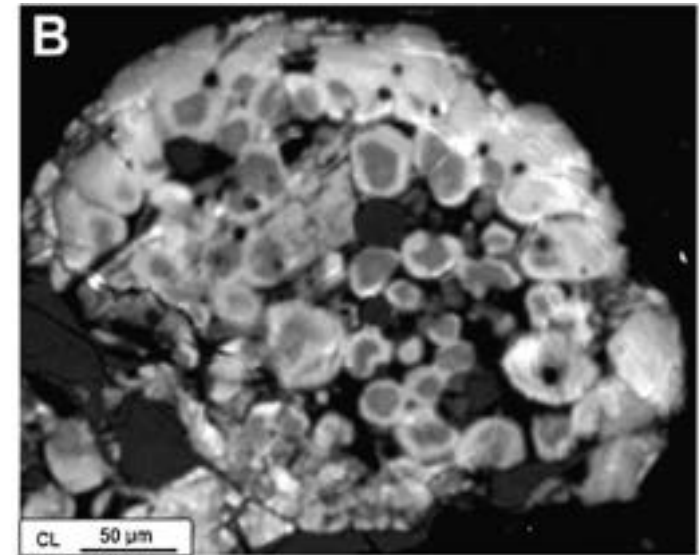
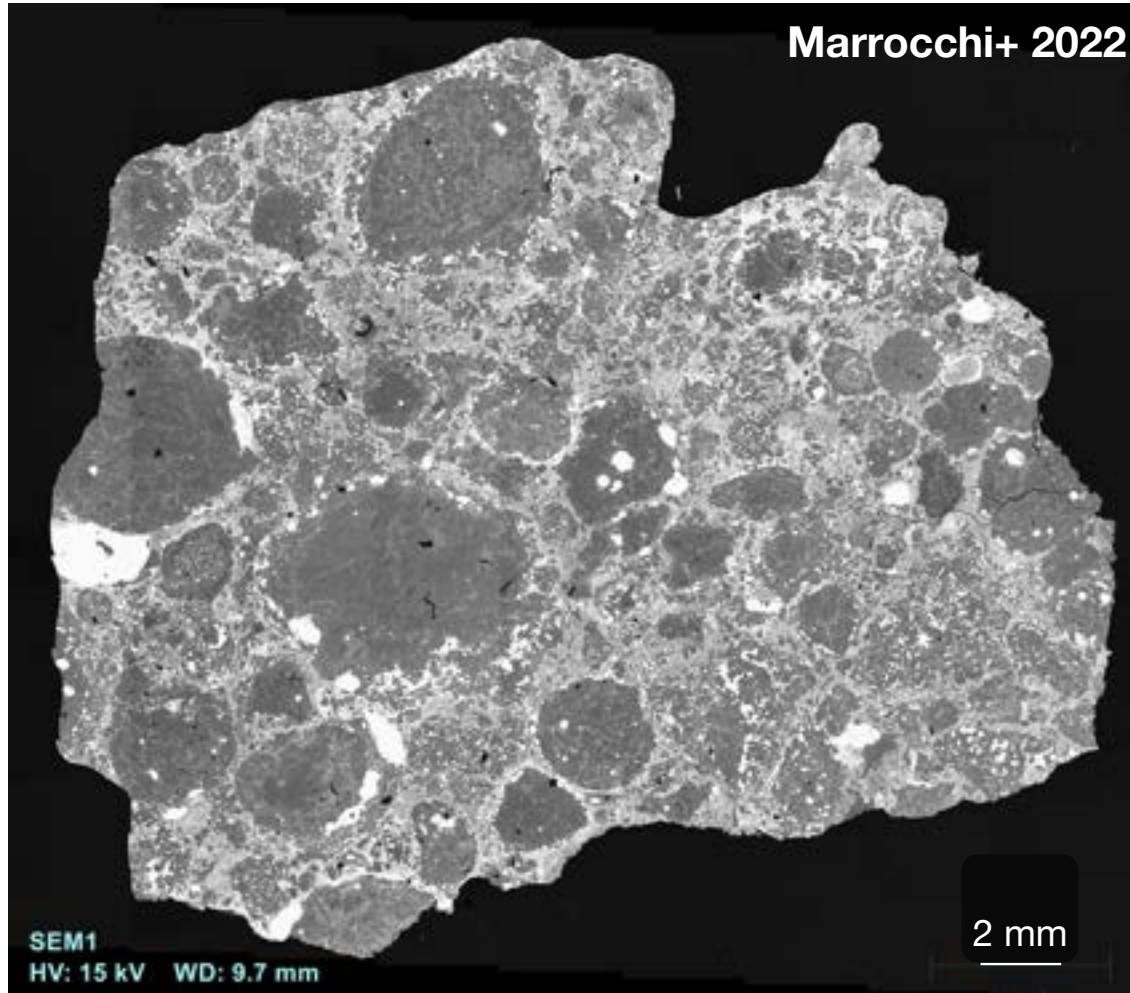
# importance des petits chondres dans les chondrites CR



→ les petits chondres ont une texture similaire à celle des autres chondres CC (Libourel & Portail, 2018)

→ chondres plus larges ont des textures plus complexes

## chondres de différentes tailles

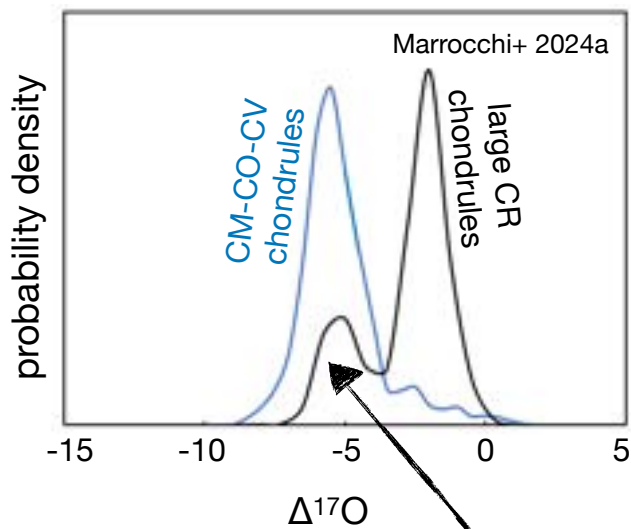
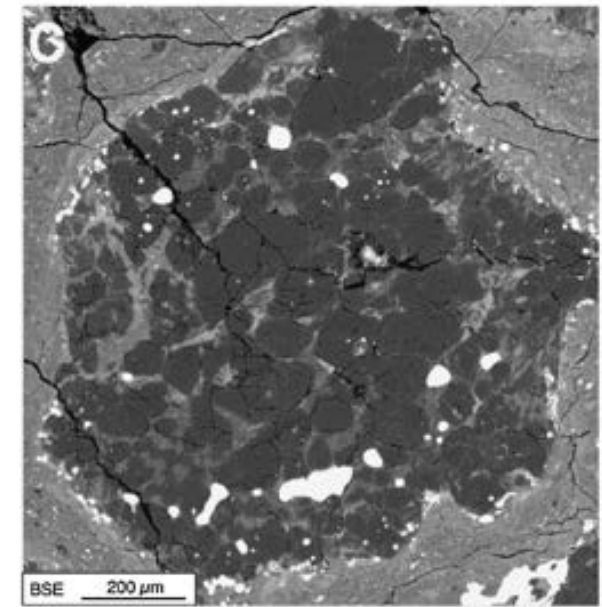
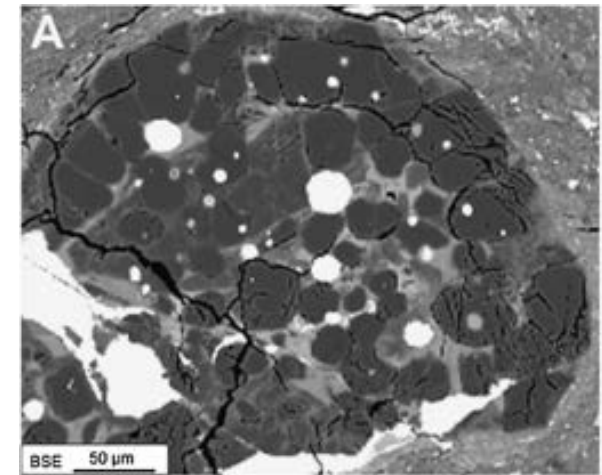
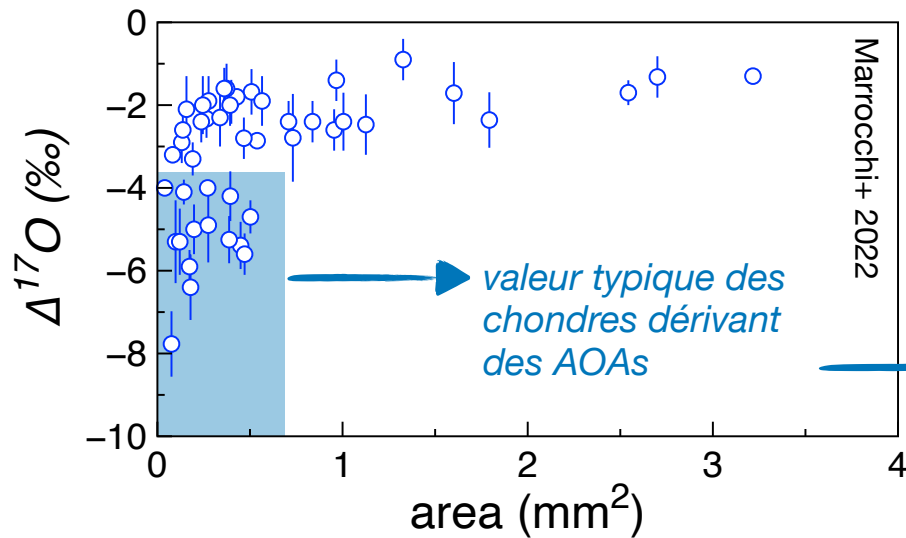


→ les petits chondres ont une texture similaire à celle des autres chondres CC (Libourel & Portail, 2018)

→  $\Delta^{17}\text{O}$  similaires aux autres CC également

**petits chondres des CRs**

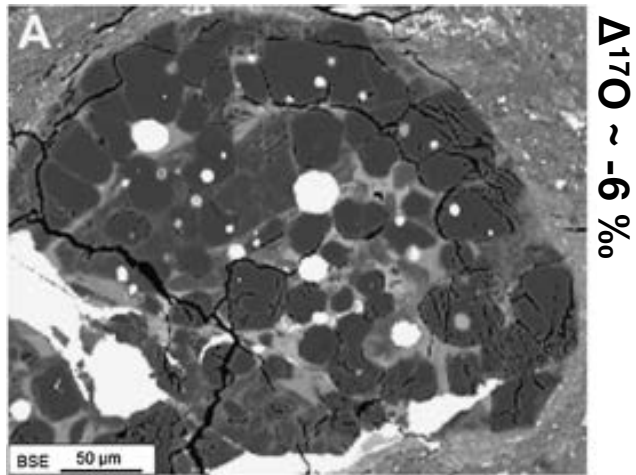
# effet de la taille sur la composition isotopique en oxygène



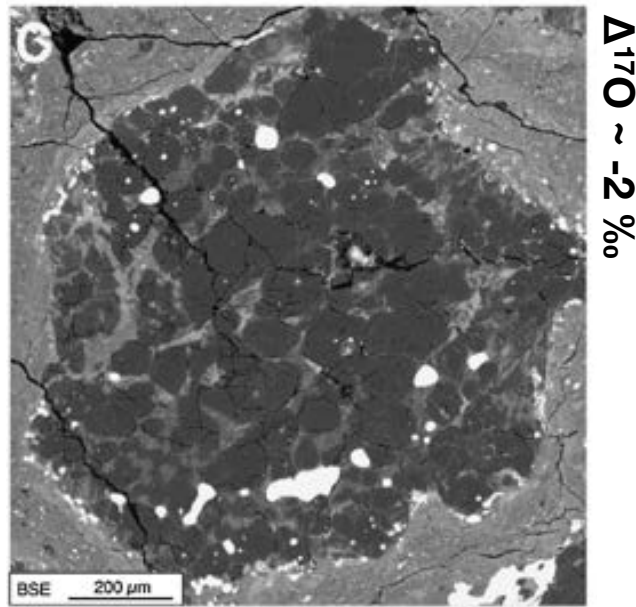
petits chondres des CRs



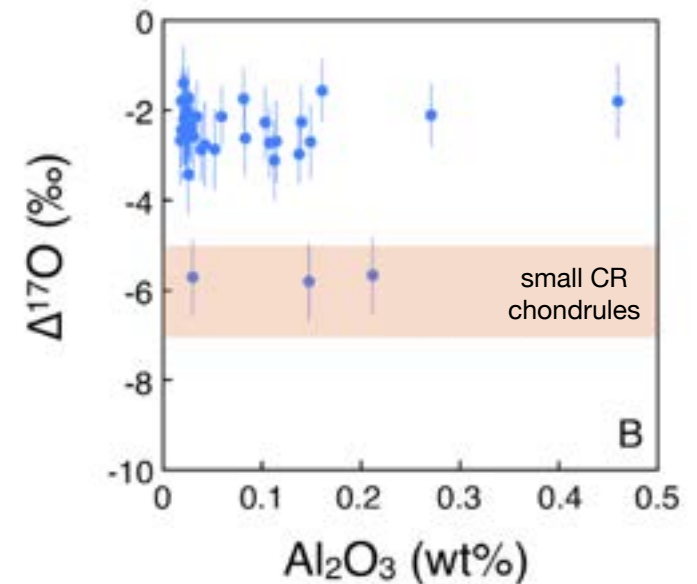
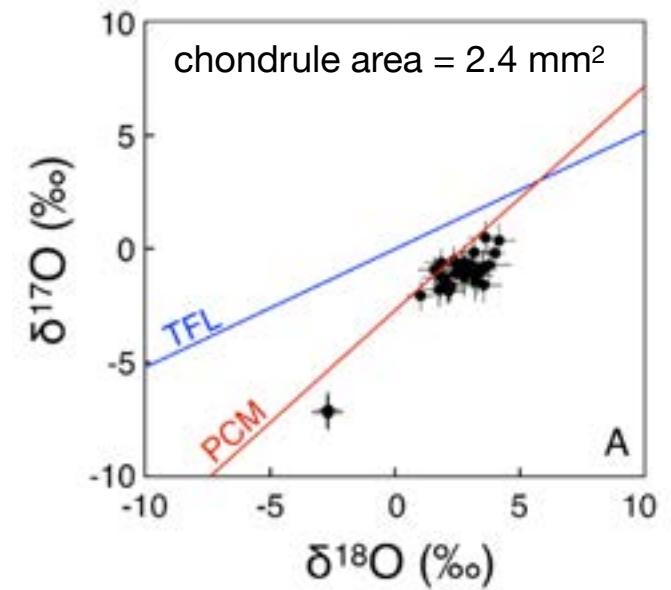
# effet de la taille sur la composition isotopique en oxygène



$\Delta^{17}\text{O} \sim -6\text{‰}$



$\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$

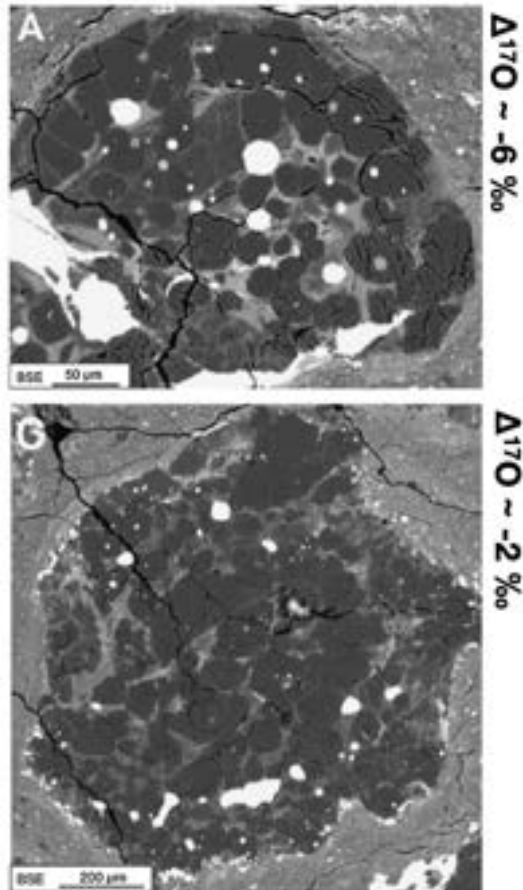


→ olivine reliques dans les gros chondres ont des  $\Delta^{17}\text{O}$  similaires aux olivines de petits

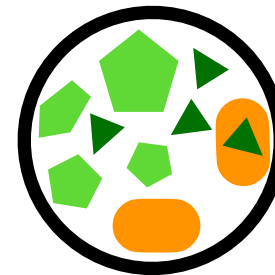
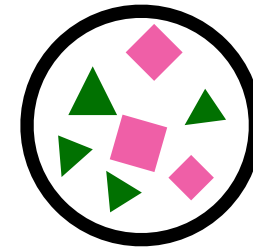


# chondres sont parfois leurs propres précurseurs

AOAs → chondres de type I = pas le seul épisode de recyclage



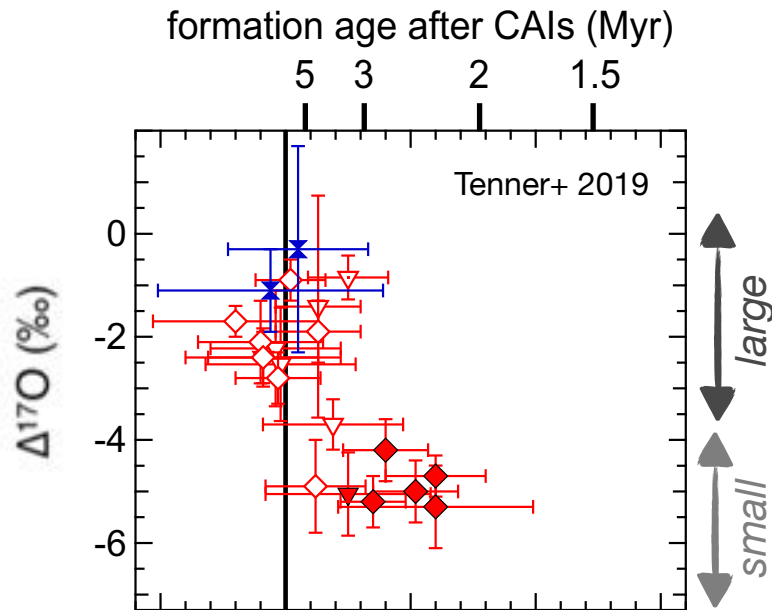
petits chondres



gros chondres

petits chondres sont les précurseurs  
des chondres plus larges

# chronologie de formation des chondres CR



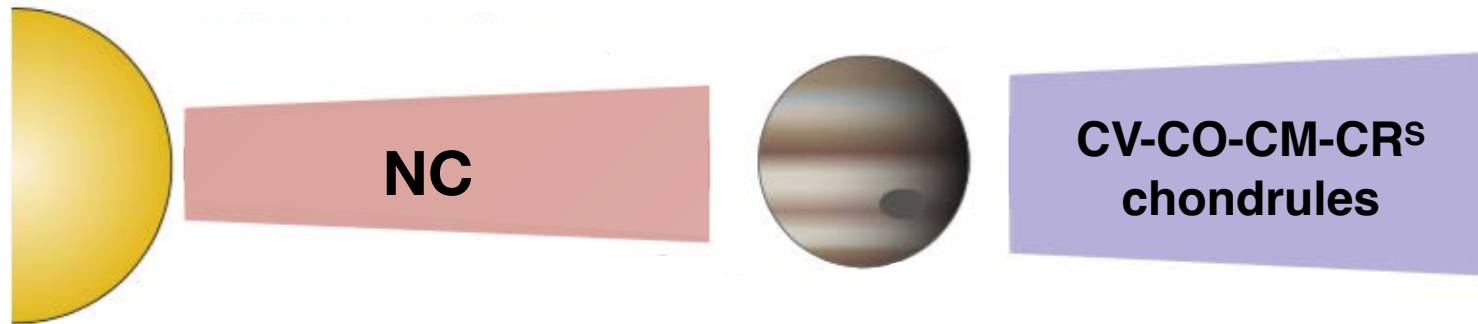
**différence d'âge entre les chondres**

→ petits chondres ~ 2.5 My après CAIs

→ larges chondres ~ 4 My après CAIs

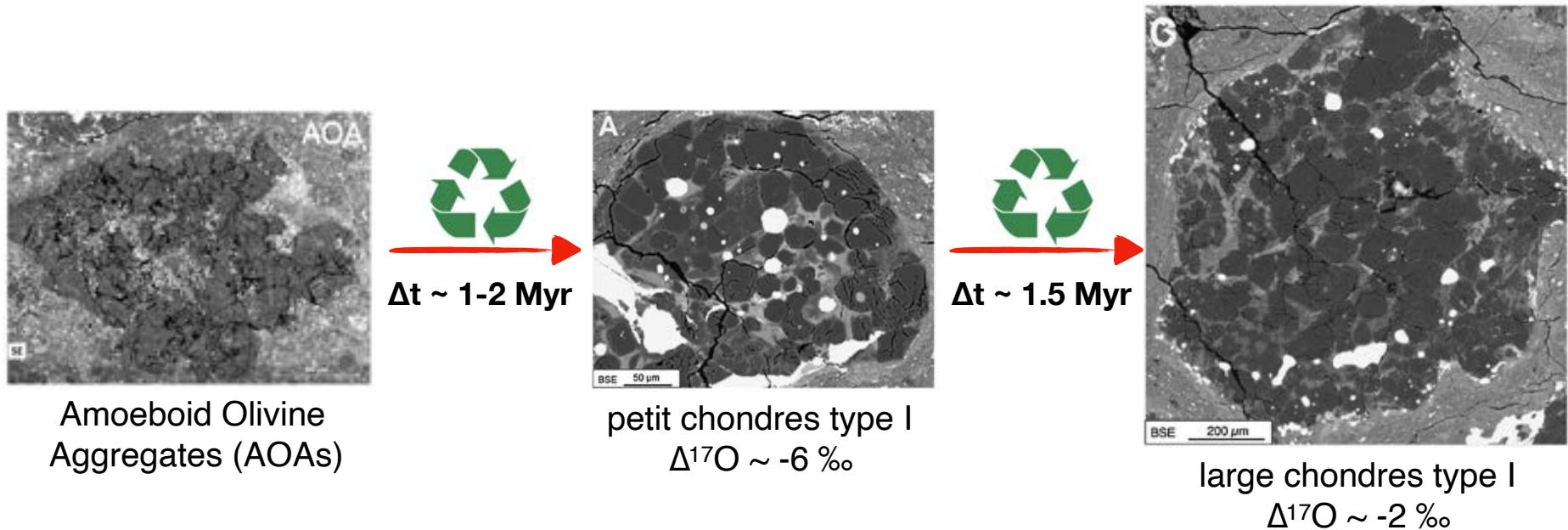
**les petits chondres des chondrites CR ont des âges similaires à ceux des chondres des CCs**

l'ensemble du disque externe était initialement peuplé de chondres similaires



**la région CR a connu un épisode supplémentaire tardif de formation de chondres**

# processus de recyclage des chondres CC de type I

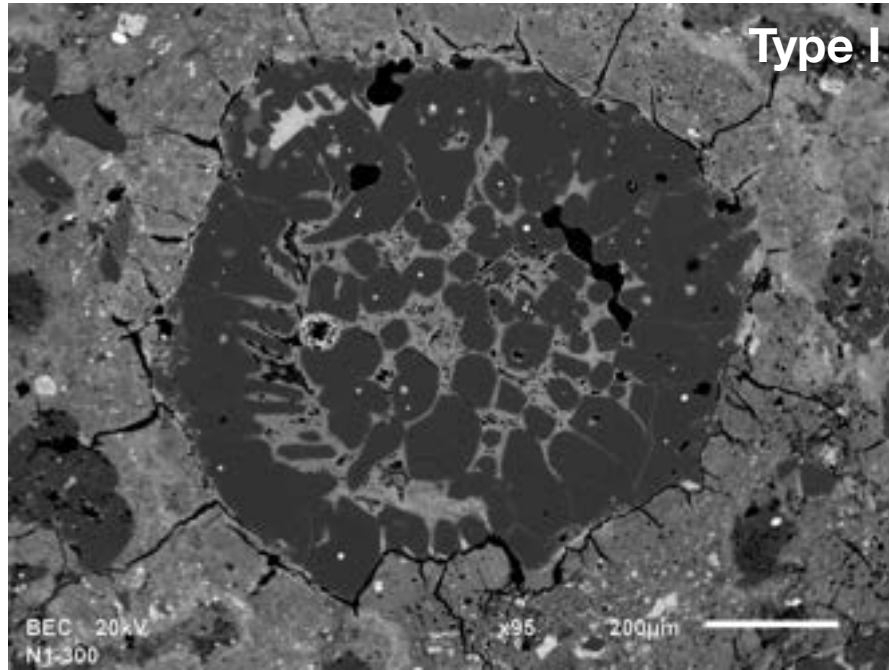


→ suggère un stockage à long terme de la poussière dans le réservoir externe du disque

→ cette poussière n'est pas stockée dans des corps de plusieurs centaines de km (planétésimaux) = fusion et homogénéisation

stockage dans le disque = problème astrophysique fondamental

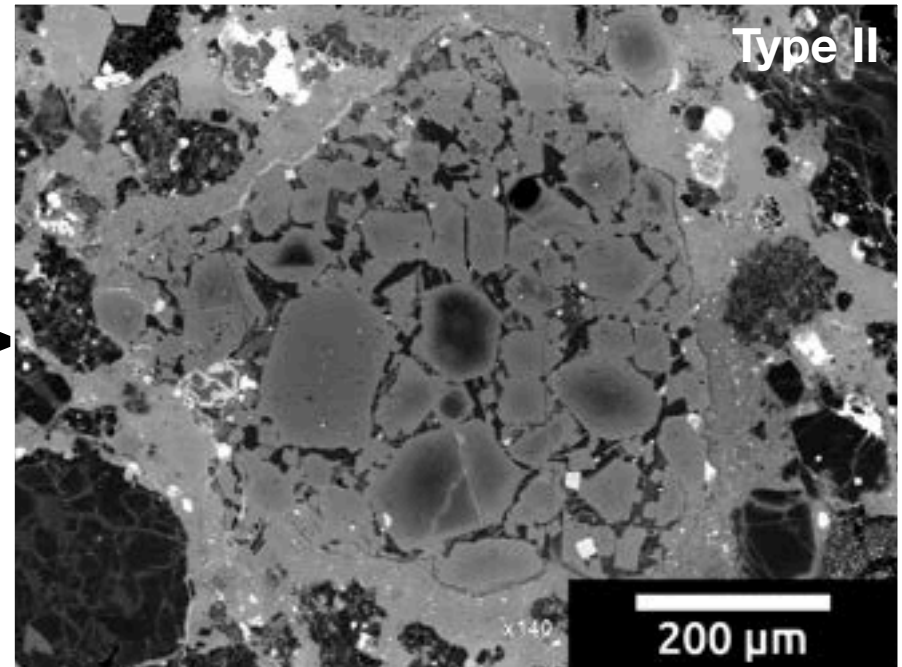
# quid des chondres de type II ?



*chondres de type I*



conditions réductrices  
(Fe dans des billes de métal)



*chondres de type II*



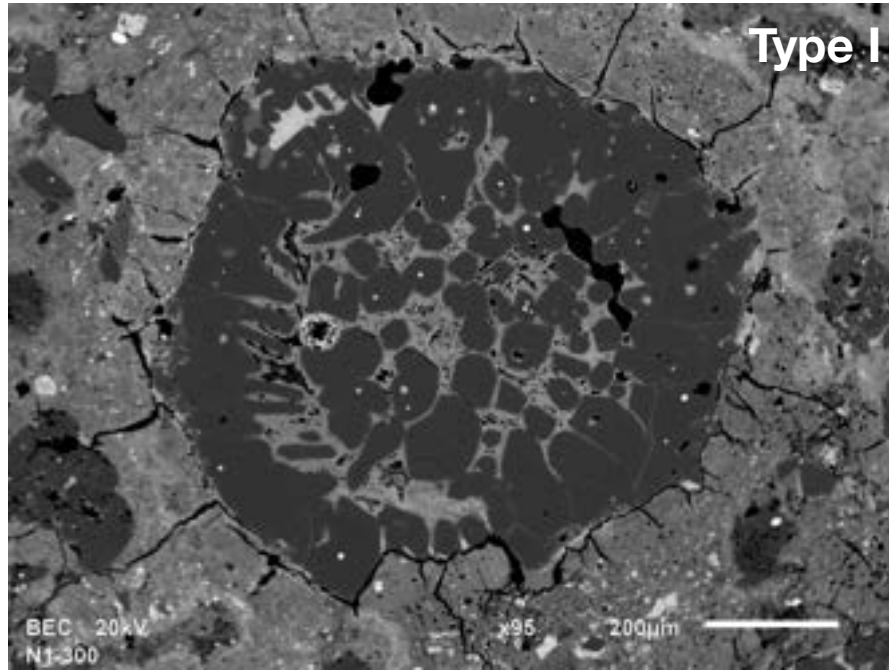
conditions oxydantes  
(Fe dans les silicates)

1- formés dans deux réservoirs différents (Connolly et al., 1994, Tenner+ 2015, 2018)

2- type II dérivent des type I (Villeneuve+ 2015, 2020)



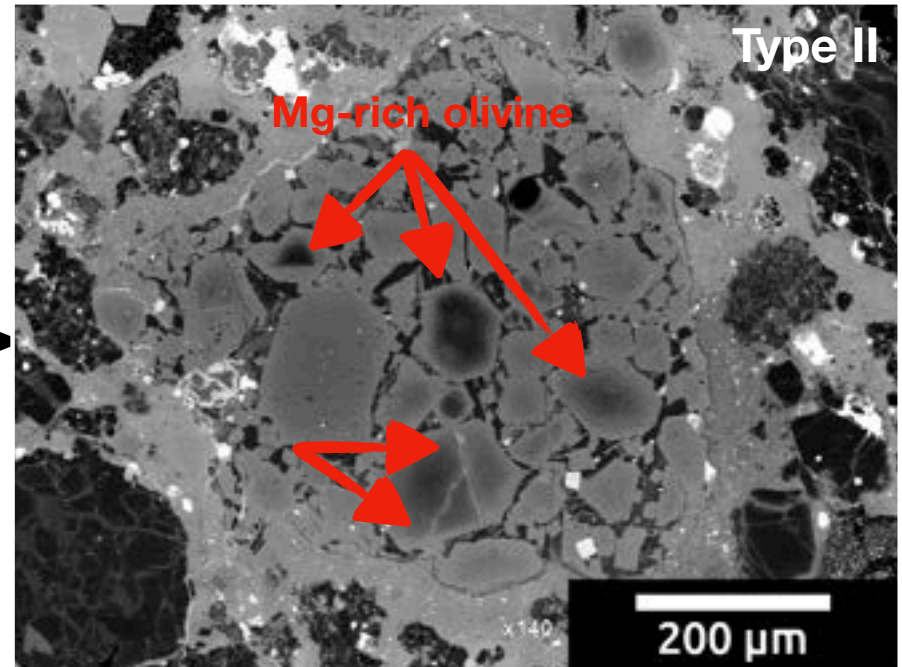
# comment tester le lien génétique potentiel ?



*chondres de type I*



conditions réductrices  
(Fe dans des billes de métal)



*chondres de type II*

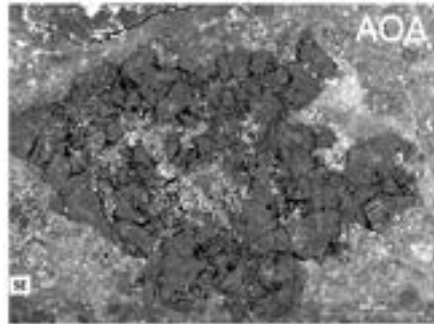


conditions oxydantes  
(Fe dans les silicates)

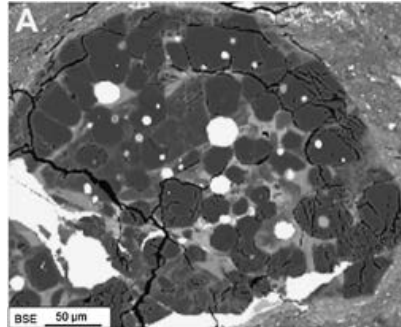
**type II dérivent des chondres de type I**

→ présence dans les type II d'olivine riches en Mg  
similaires à celle observées dans les type I

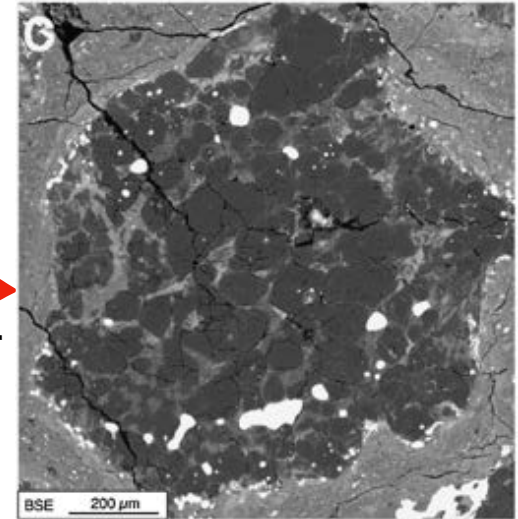
# compositions isotopiques en oxygène



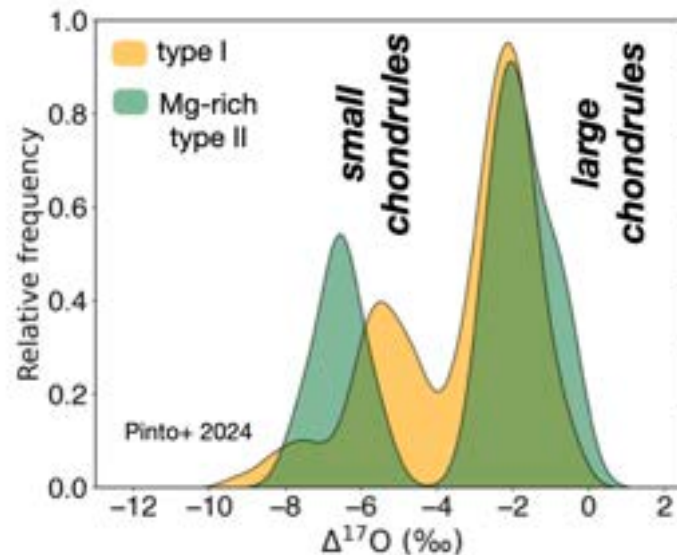
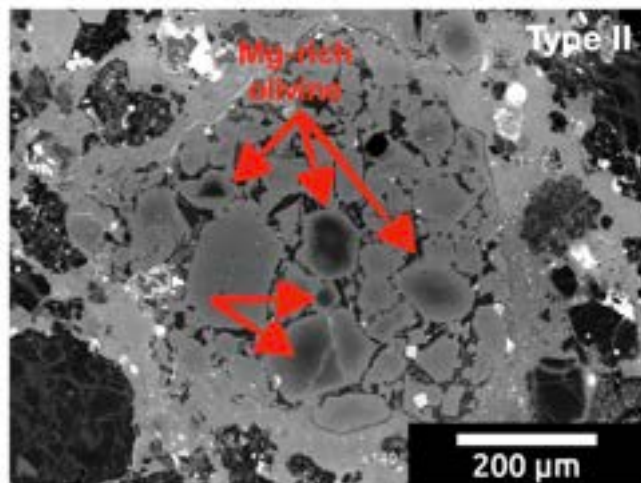
Amoeboïd Olivine  
Aggregates (AOAs)



petit chondres type I  
 $\Delta^{17}\text{O} \sim -6 \text{ ‰}$

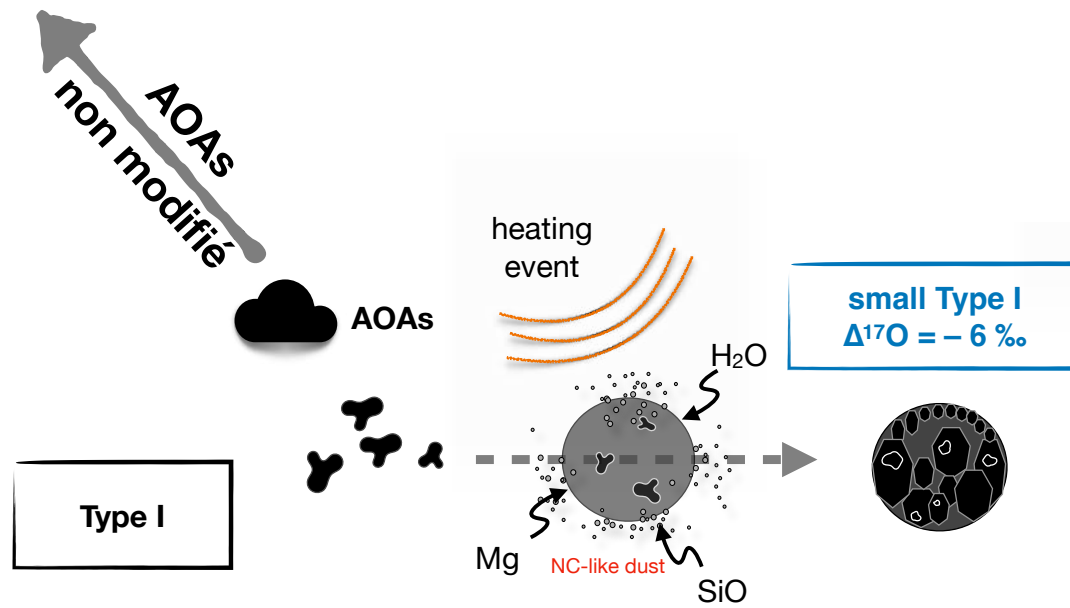


large chondres type I  
 $\Delta^{17}\text{O} \sim -2 \text{ ‰}$

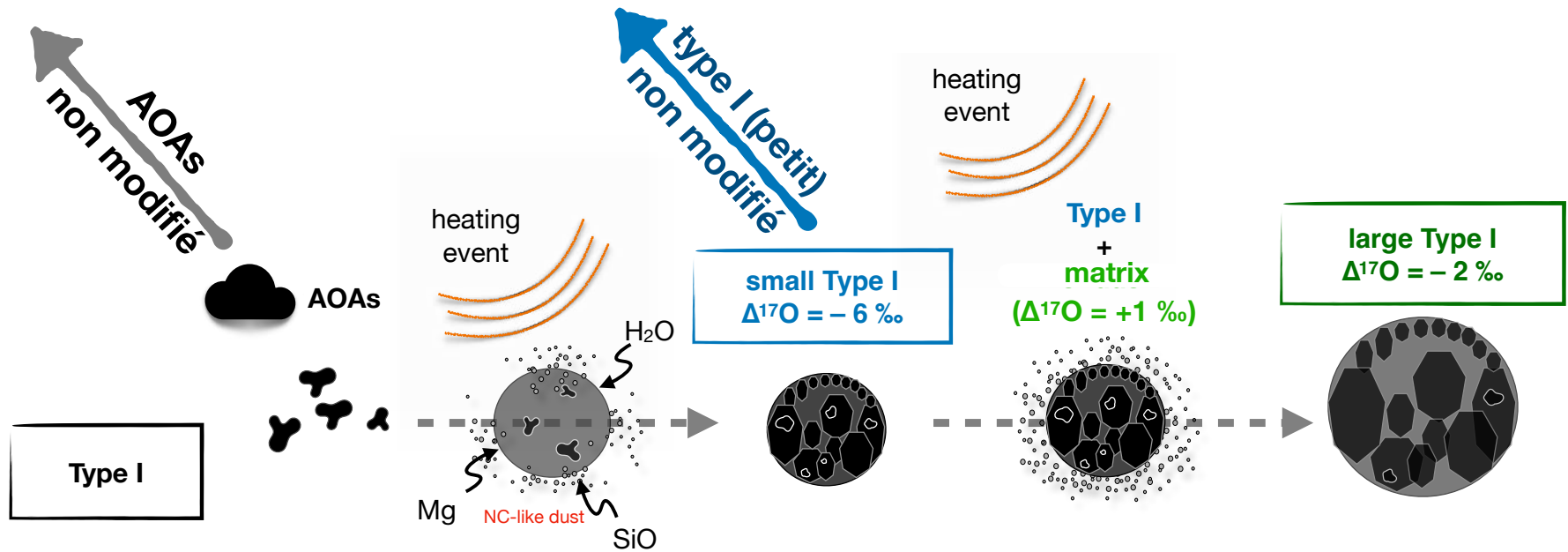


olivines riches en Mg  
des chondres de type II  
proviennent des deux types  
de chondres de type I  
(petits et gros)

# time-lapse de la formation des chondres CC

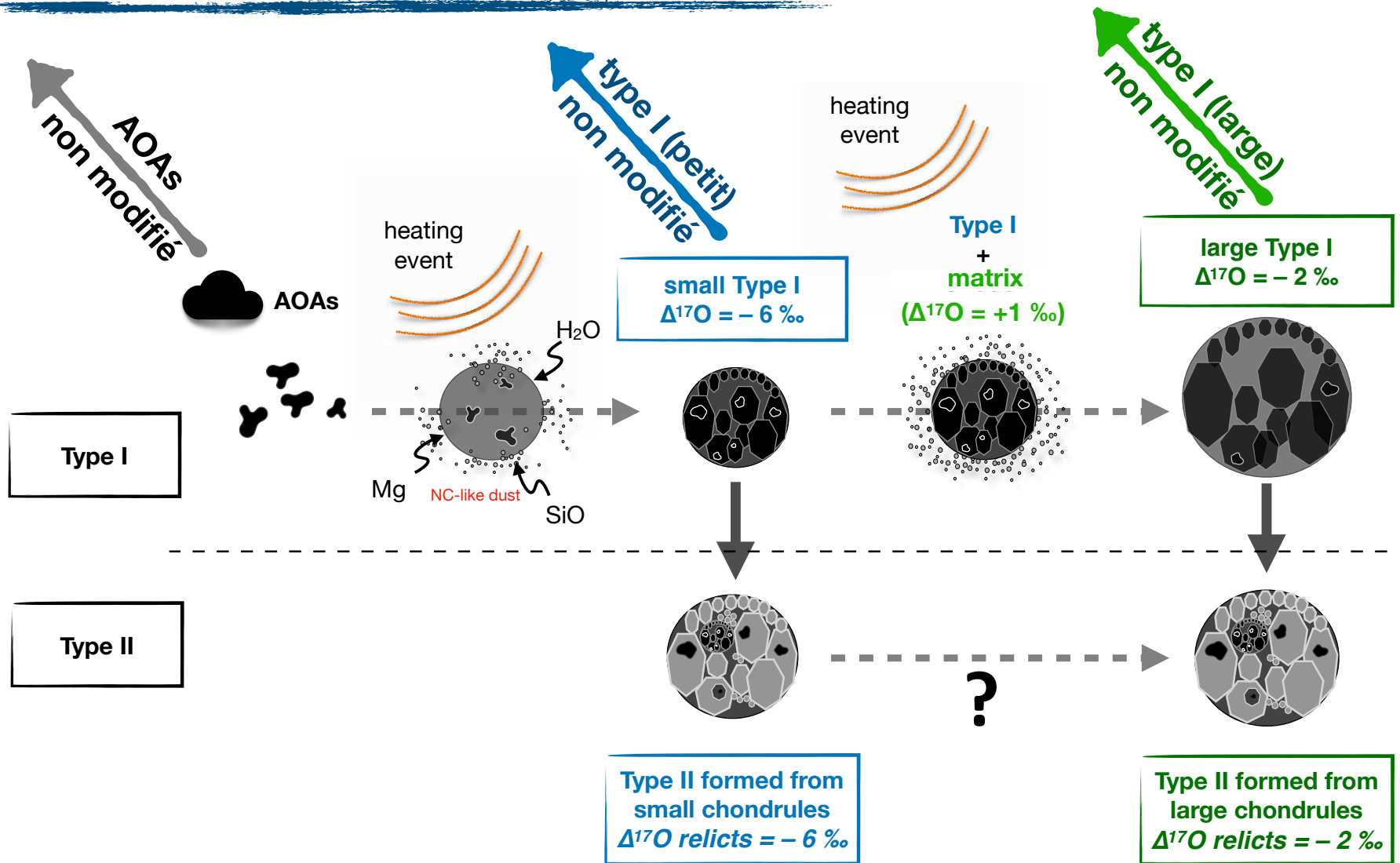


# time-lapse de la formation des chondres CC





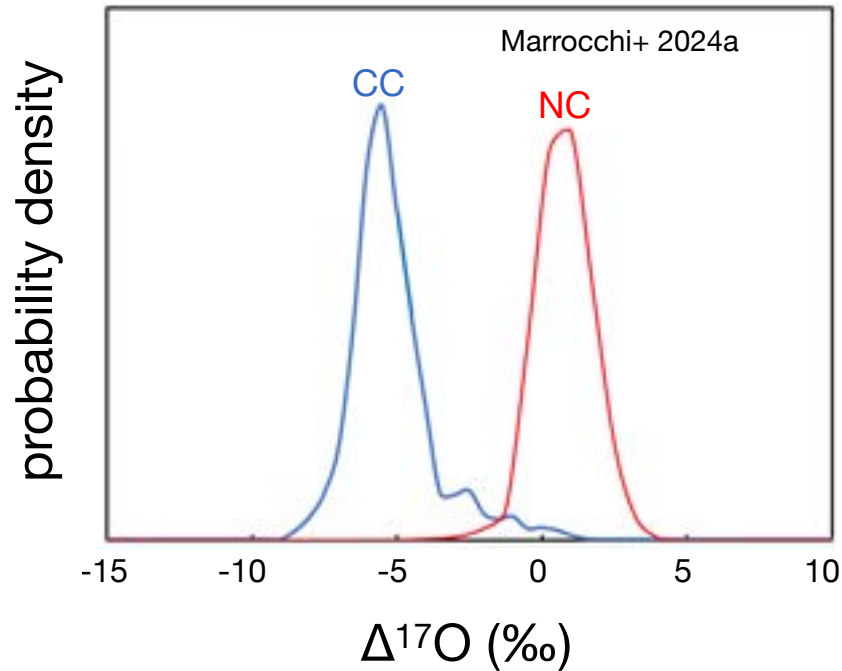
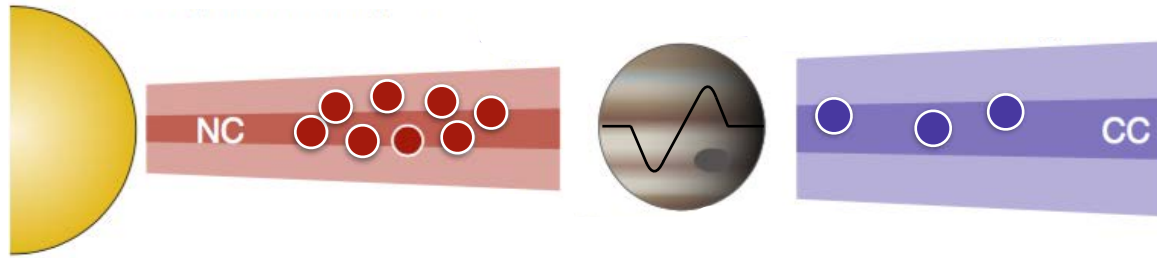
# time-lapse de la formation des chondres CC



→ tous ces objets génétiquement apparentés sont observés au sein d'une seule chondrite

→ implique des processus de chauffage extrêmement localisés

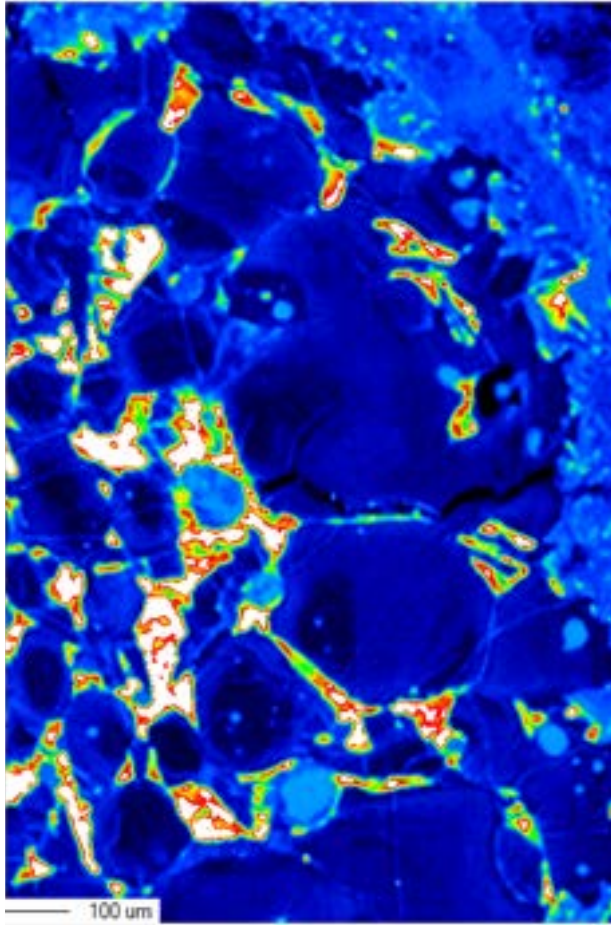
## qu'en est-il du disque interne échantillonné par les chondrites **NC** ?



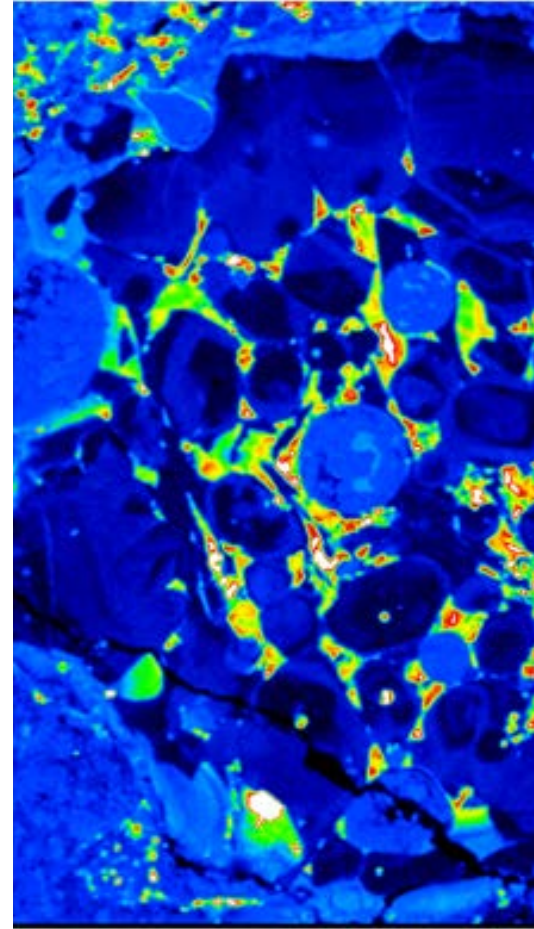
→ chondres **NC** and **CC** ont des compositions isotopiques différentes

→ impliquent différents précurseurs et différentes histoires de formation

## textures similaires



*chondre NC*

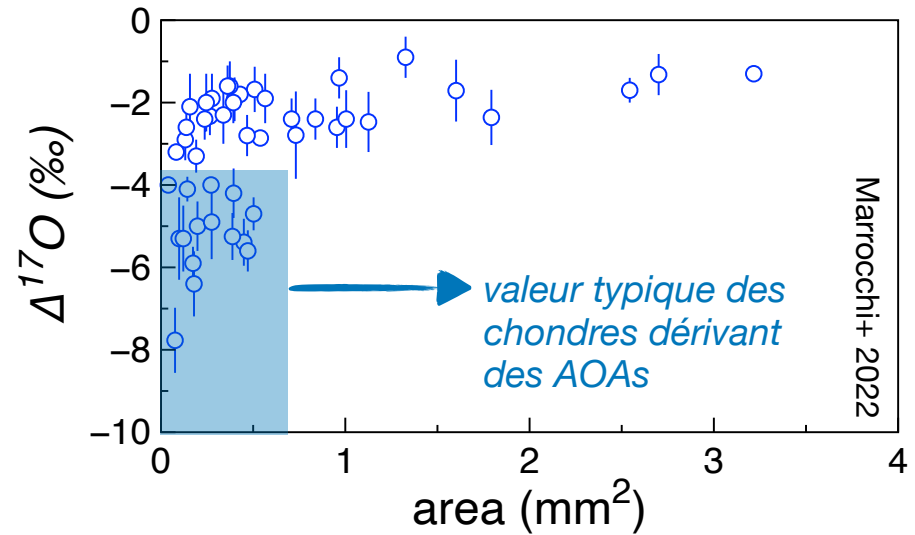


*chondre CC*

→ textures similaires dans les chondres **NC** et **CC** = processus de recyclage

→ processus omniprésents dans les zones interne et externe du disque

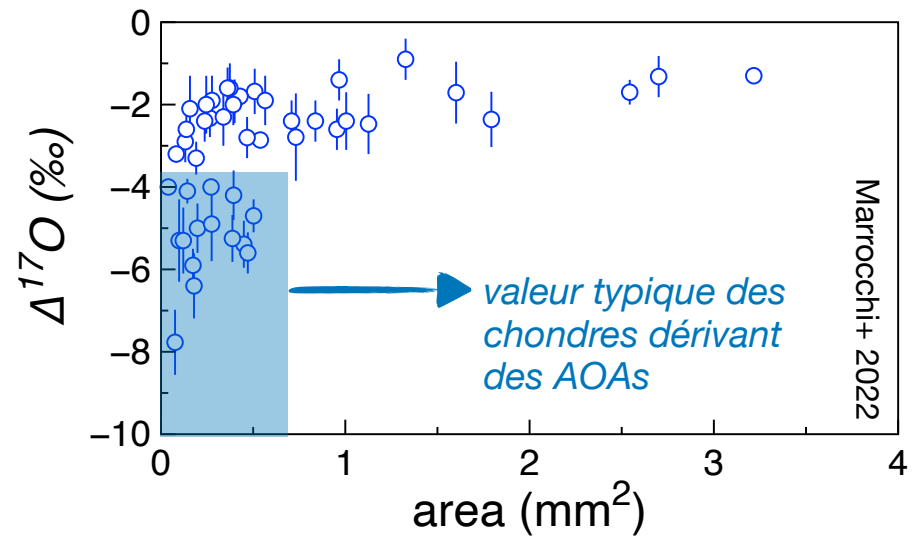
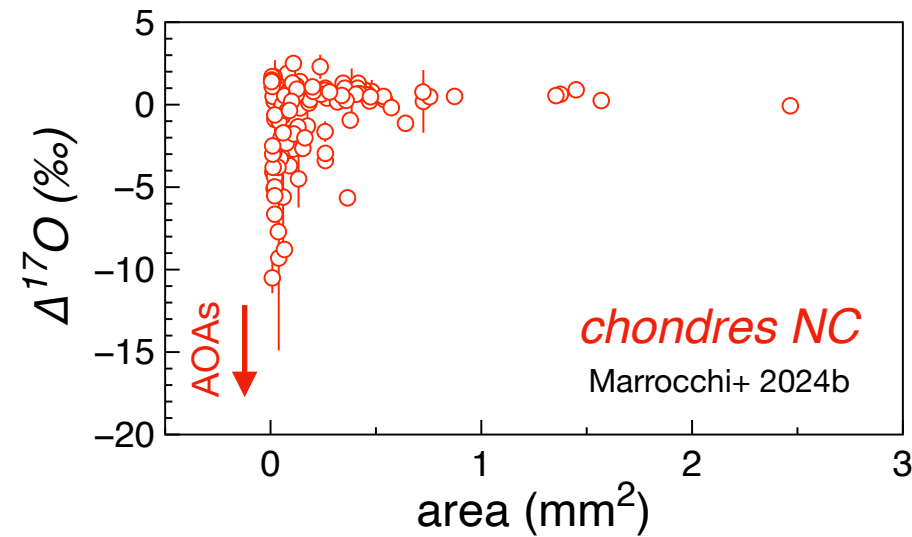
## effet de la taille sur la composition isotopique en oxygène



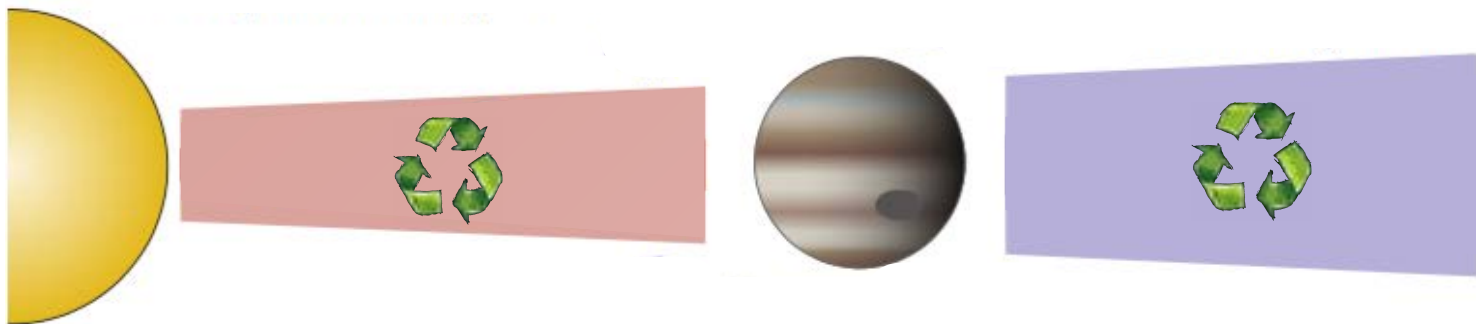
→ processus de recyclage **AOAs-chondre-chondre** dans le réservoir **CC**



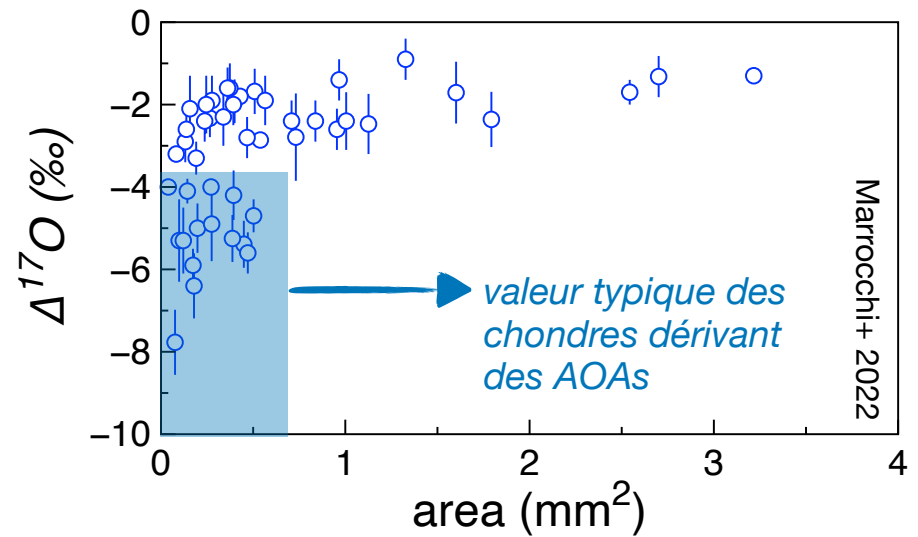
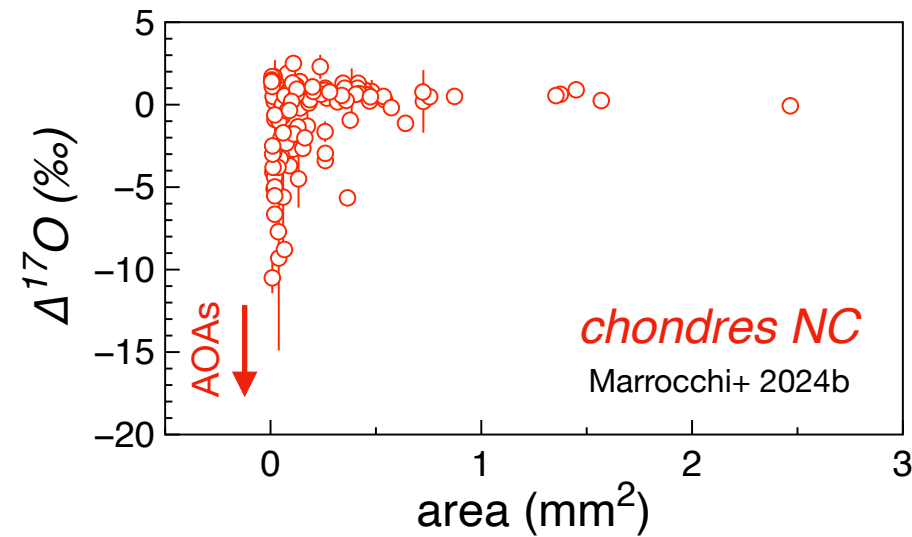
## similitude entre les chondres **NC** et **CC**



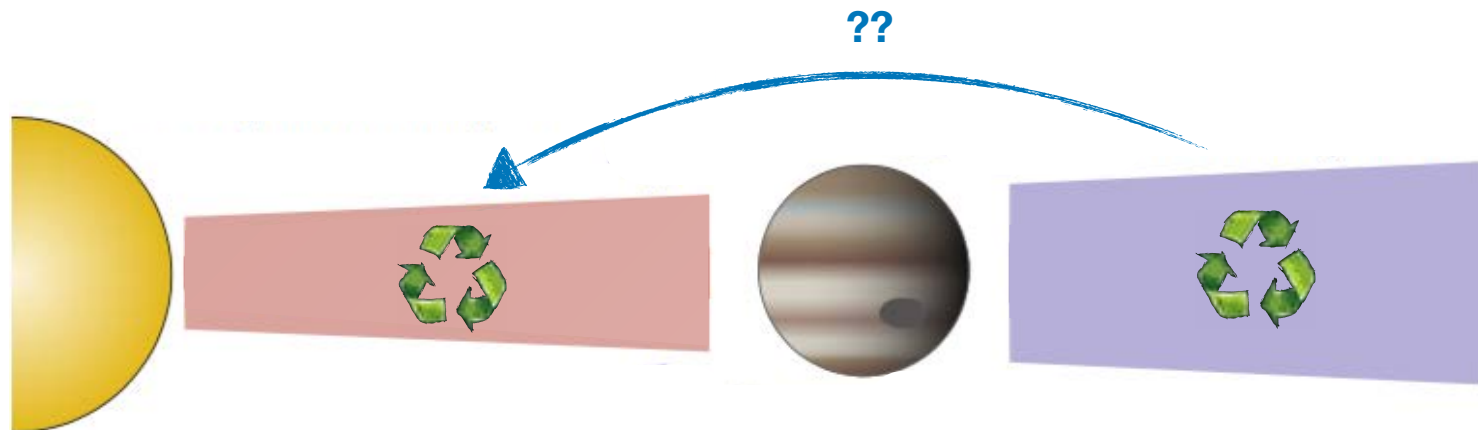
→ processus de recyclage **AOAs-chondre-chondre** dans tout disque ?



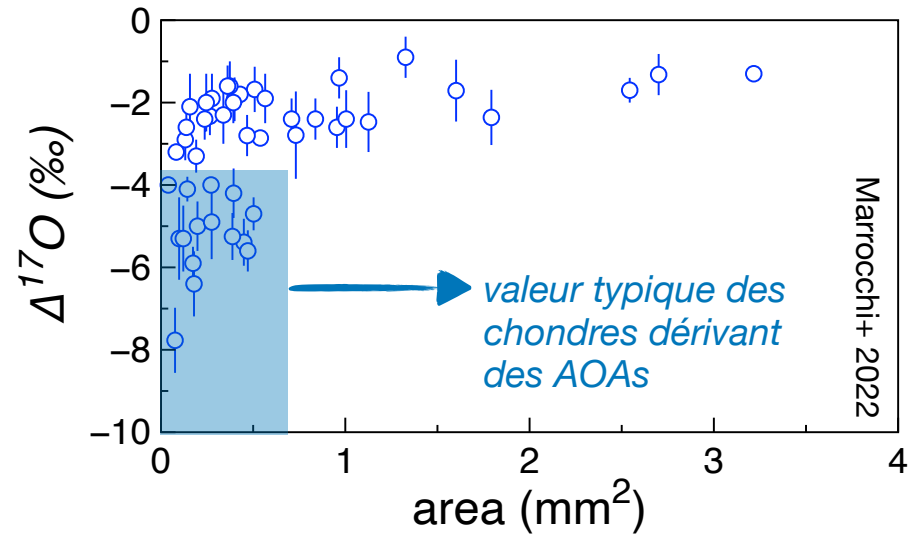
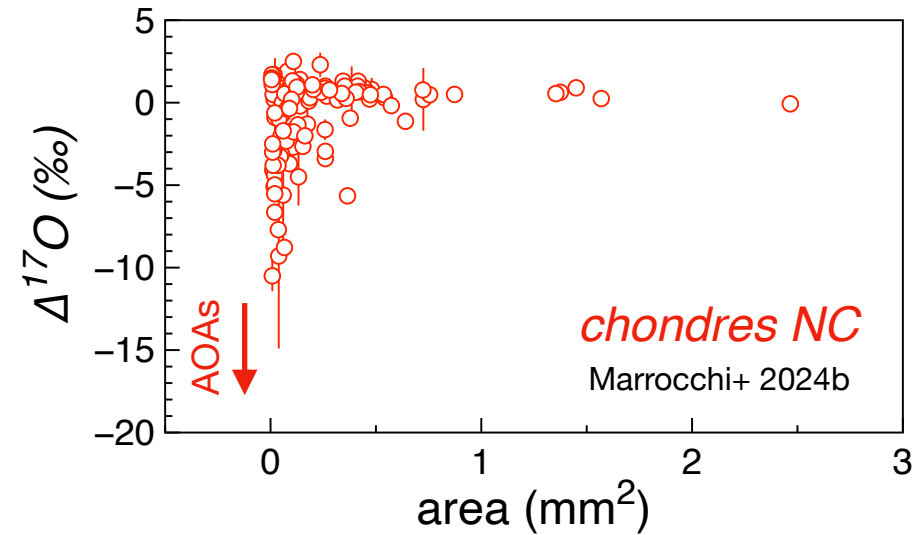
# similitude entre les chondres **NC** et **CC**



origine des petits chondres **NC** ?

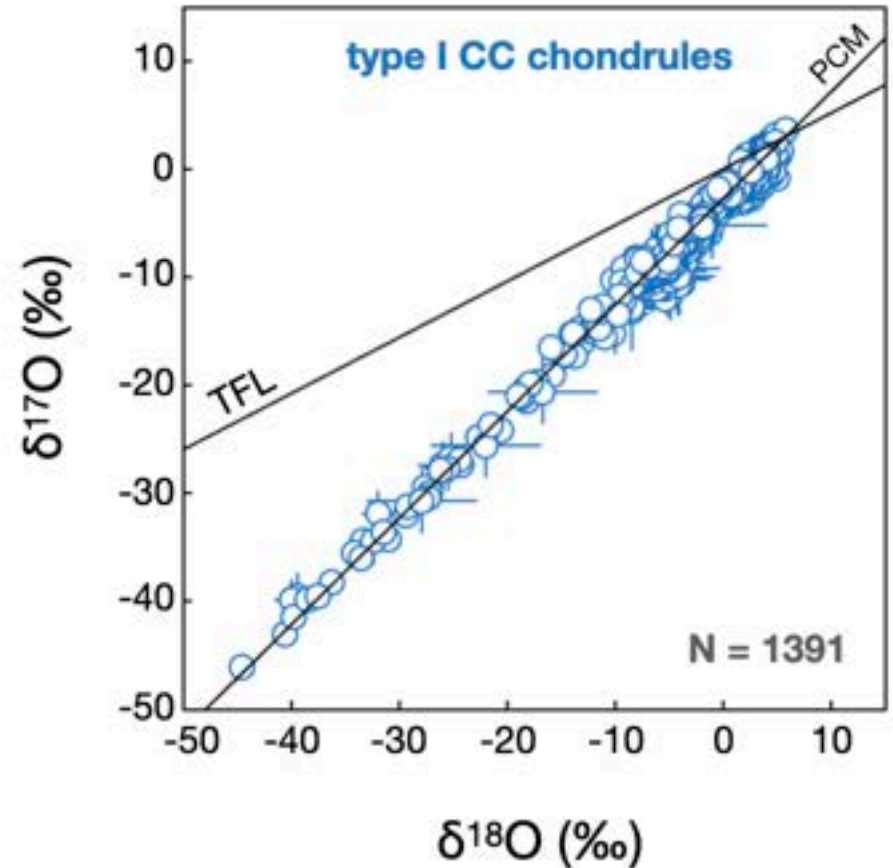
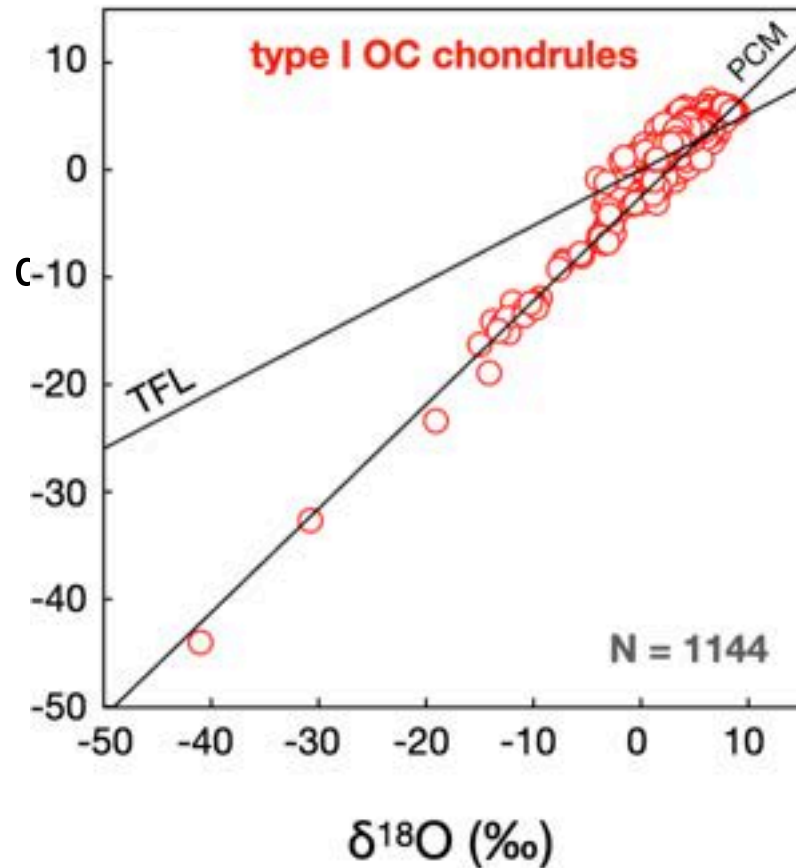


# implications sur la dynamique des poussières



- petits chondres d'une même chondrite **NC** et **CC** sont hétérogènes isotopiquement
  - pas de stockage dans de gros planétésimaux formés tôt dans le disque (taille maximum < 5-10 km sinon fusion complète)
  - cela implique que la poussière a été stockée longtemps dans le disque interne et externe = **GROS PROBLEME ASTROPHYSIQUE**

## différences de conditions de formation entre les chondres NC et CC



→ olivine reliques sont plus abondantes dans les chondres CC que NC  
= production de poussière plus efficace dans le disque interne

→ processus de recyclage plus intenses dans le disque interne + pas de stockage dans des planétésimaux = **GROS PROBLEME ASTROPHYSIQUE**



# évolution de la poussière → tout est question de recyclage



- chondres **NC** et **CC** résultent d'épisodes répétitifs de fusion et de recyclage de la poussière nébulaire
- le processus haute température permettant de former les chondres est toujours mystérieux
- la poussière est constamment reprocessé lors de l'évolution du disque
- recyclage local et partiel = certaines poussières ne sont pas affectées

# évolution des chondrules



que nous ne comprenons pas, c'est le mécanisme de chauffage

↓  
**éclairs**

↓  
**ondes de chocs**

↓  
**nappes de courant**

**doit être extrêmement localisé et répétitive tout au long de  
l'historique du disque interne et externe**