



Leçon N. 4 – 12 Novembre 2025

Alessandro
MORBIDELLI

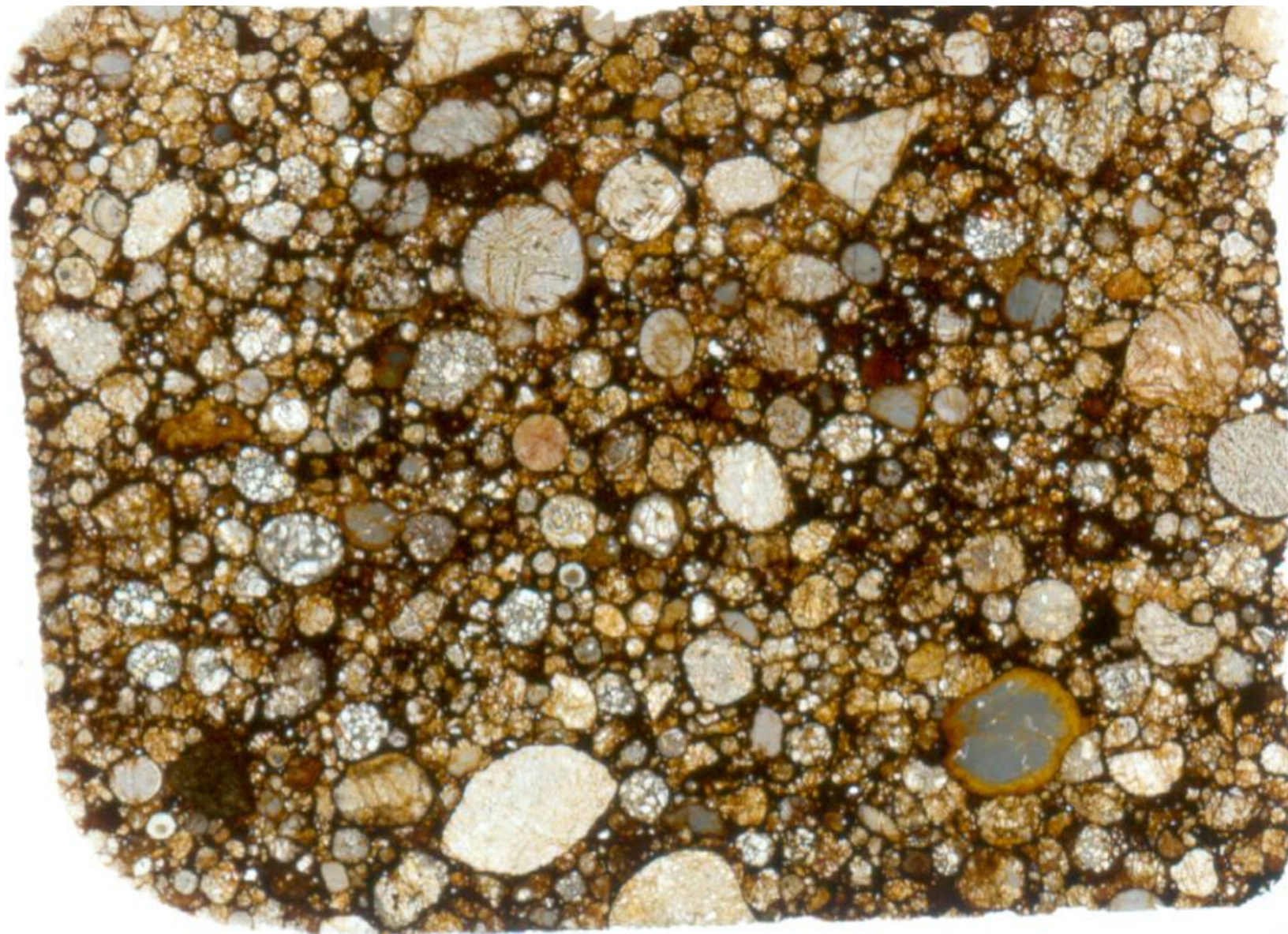
Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

Les chondres



Les chondres



Petites billes de silicates formés par la cristallisation de liquides silicatés issus de la fusion d'un grain précurseur



Chondres et chondrites

Chondrites carbonées

Chondrites ordinaires

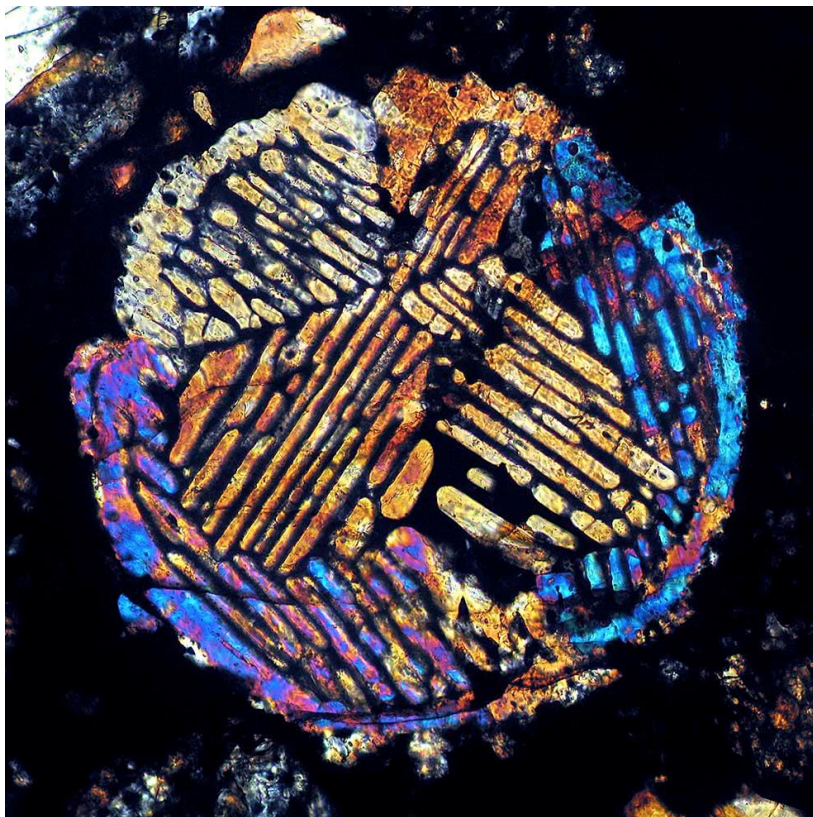
Chondrites à enstatite

Chondrite group	abundance (vol%)	avg. diam. (mm)
CI	0	—
CM	20	0.3
CO	50	0.15
CV	45	1
CK	45	1
CR	50–60	0.7
CH	70	0.02
CB	20–40	10 (a subgroup), 0.2 (b subgroup)
H	60–80	0.3
L	60–80	0.7
LL	60–80	0.9
EH	60–80	0.2
EL	60–80	0.6
R	>40	0.4
K	30	0.6

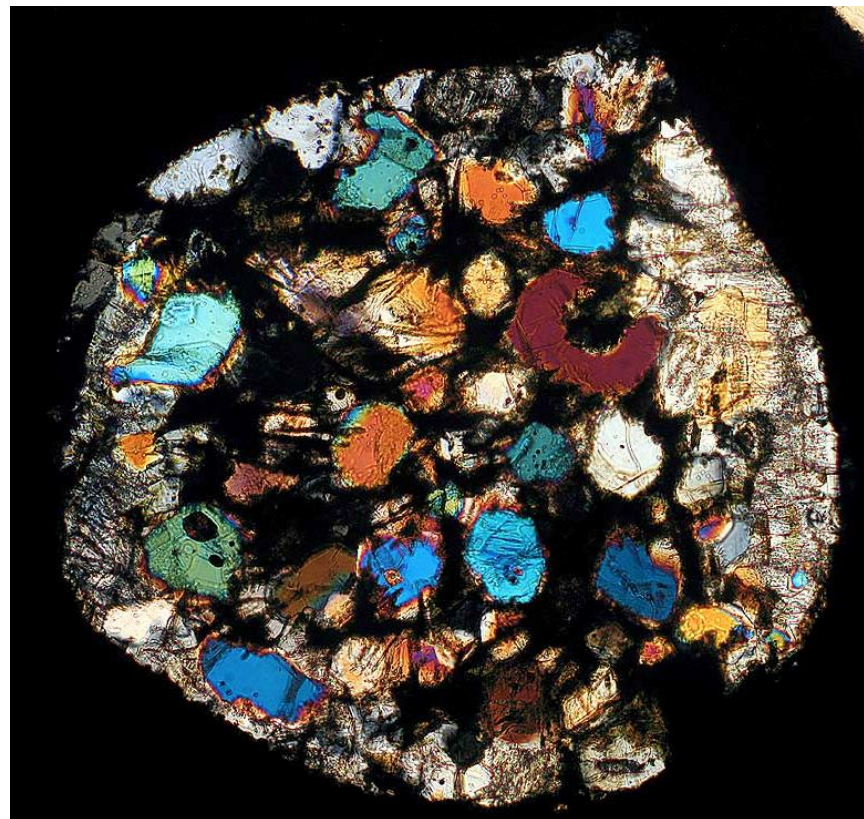
Weisberg et al. (2006)

Textures des chondres

Barred olivine chondrules



Porphyritic olivine chondrules



Elles varient selon la vitesse de refroidissement et cristallisation



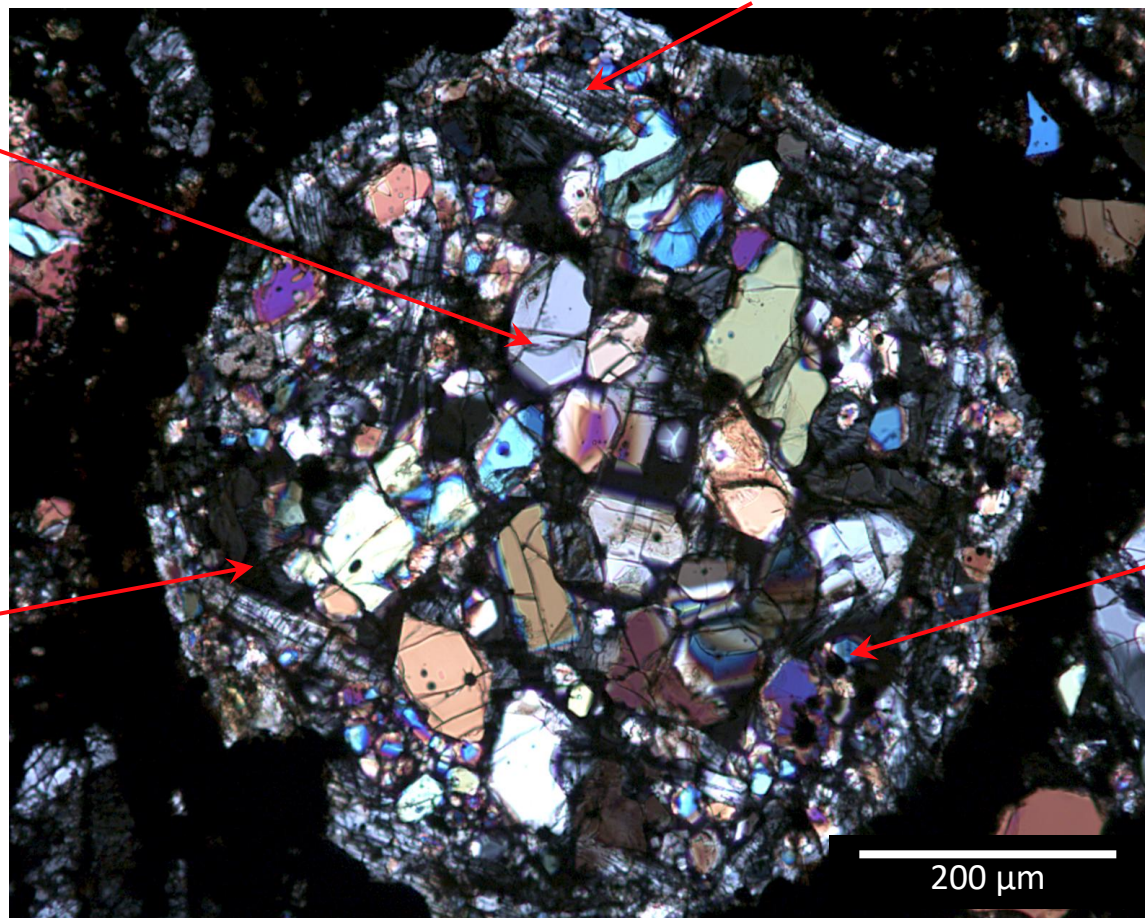
Composition des chondres

Mg-rich olivine
(Mg, Fe) $_2$ SiO $_4$

Pyroxene (Mg, Fe) $_2$ Si $_2$ O $_6$

Glass
(Si, Al, Ca,
Mg, Fe, $\pm$ Na)

Fe-Ni Metal



Chondre porphyrique
(PO, POP, PP selon que le minéral dominant soit l'olivine ou le pyroxène)



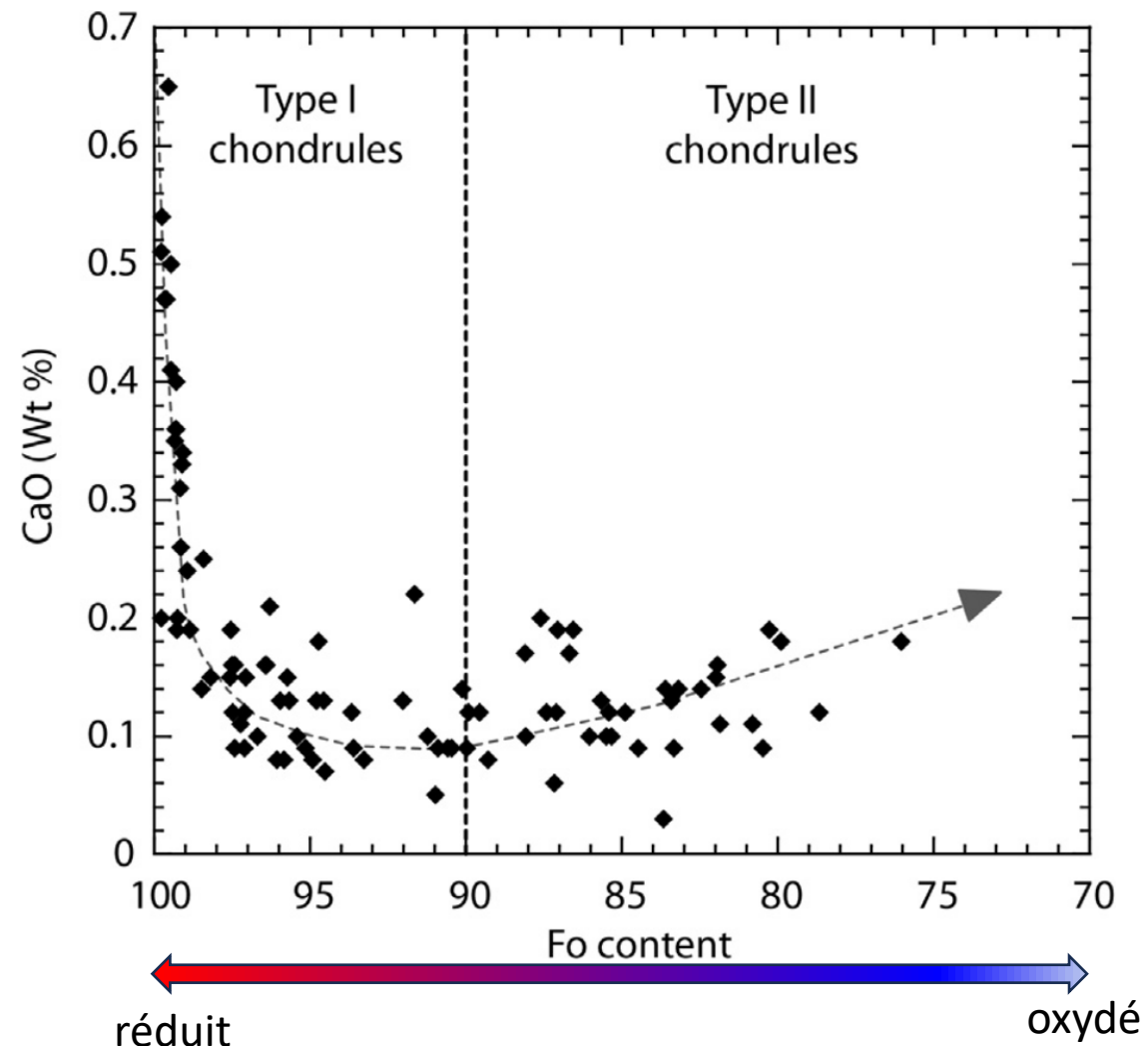
Oxydation des chondres

Villeneuve et al., 2015

Fo: ratio atomique $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ dans olivine

Olivine {
Fosterite: Mg_2SiO_4
Fayalite: Fe_2SiO_4

Mg#: ratio atomique $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ dans l'ensemble
(y compris pyroxène $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$)

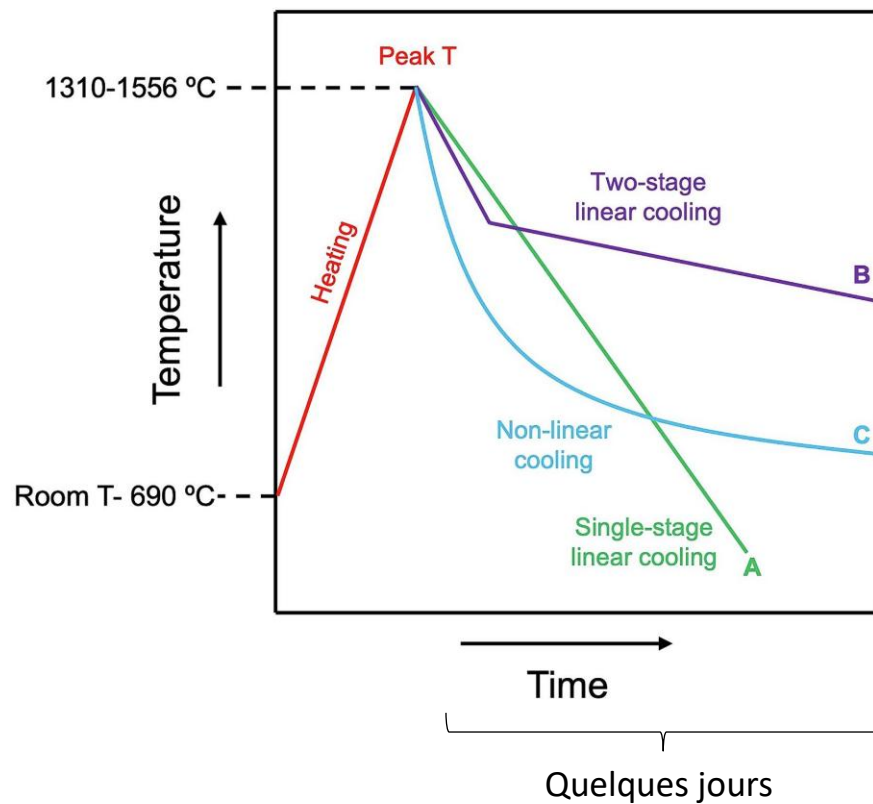


Pas de dichotomie entre Type I et Type II – possible évolution des chondres de Type I vers Type II



Histoire thermique des chondres

Smith and Jones, 2024



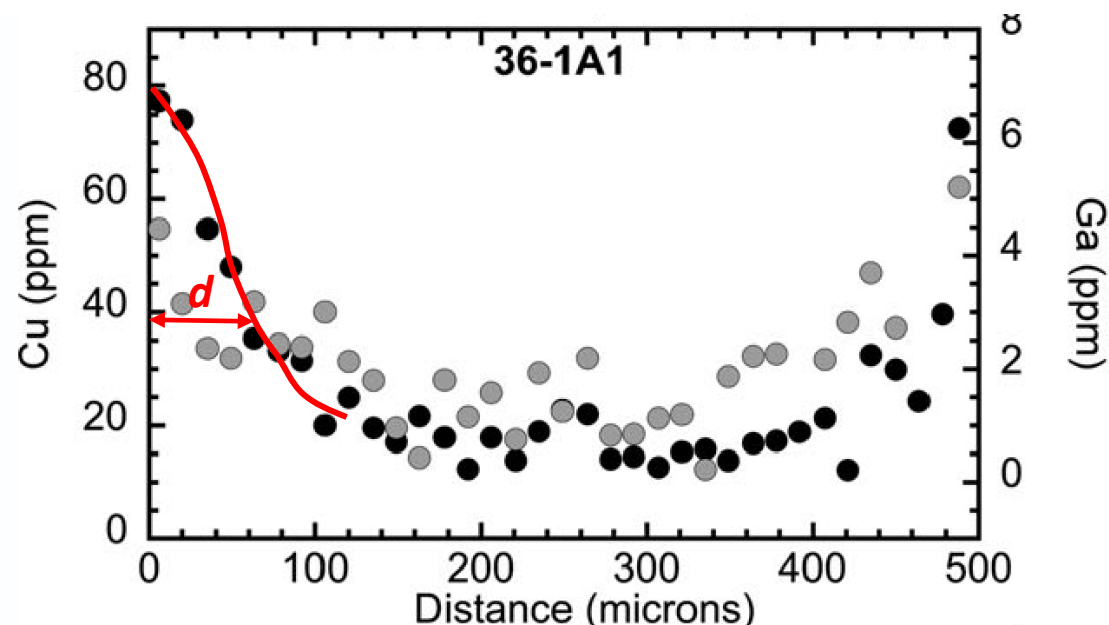
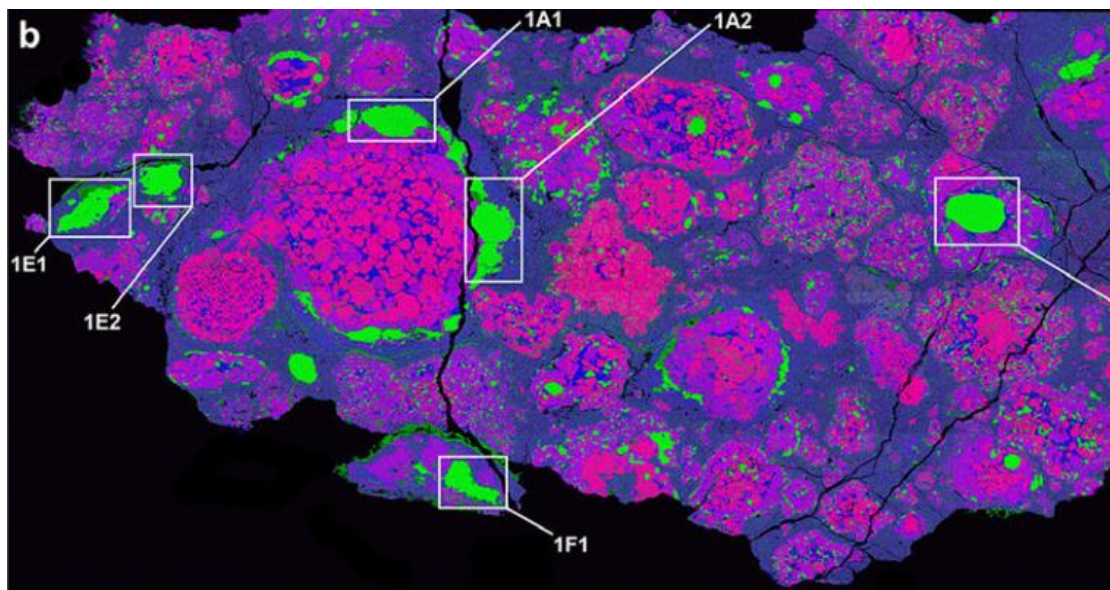
Expériences de laboratoire visant à reproduire la texture, la minéralogie et la chimie des chondres

Taux de refroidissement de
30 and 90 °C/h à 1310–1507 °C,
6 °C/hr à <1200 °C



Histoire thermique des chondres

Chaumard et al. (2018): analyse de grains de métal dans ou près des chondres



$$d = \sqrt{D(T)t}$$

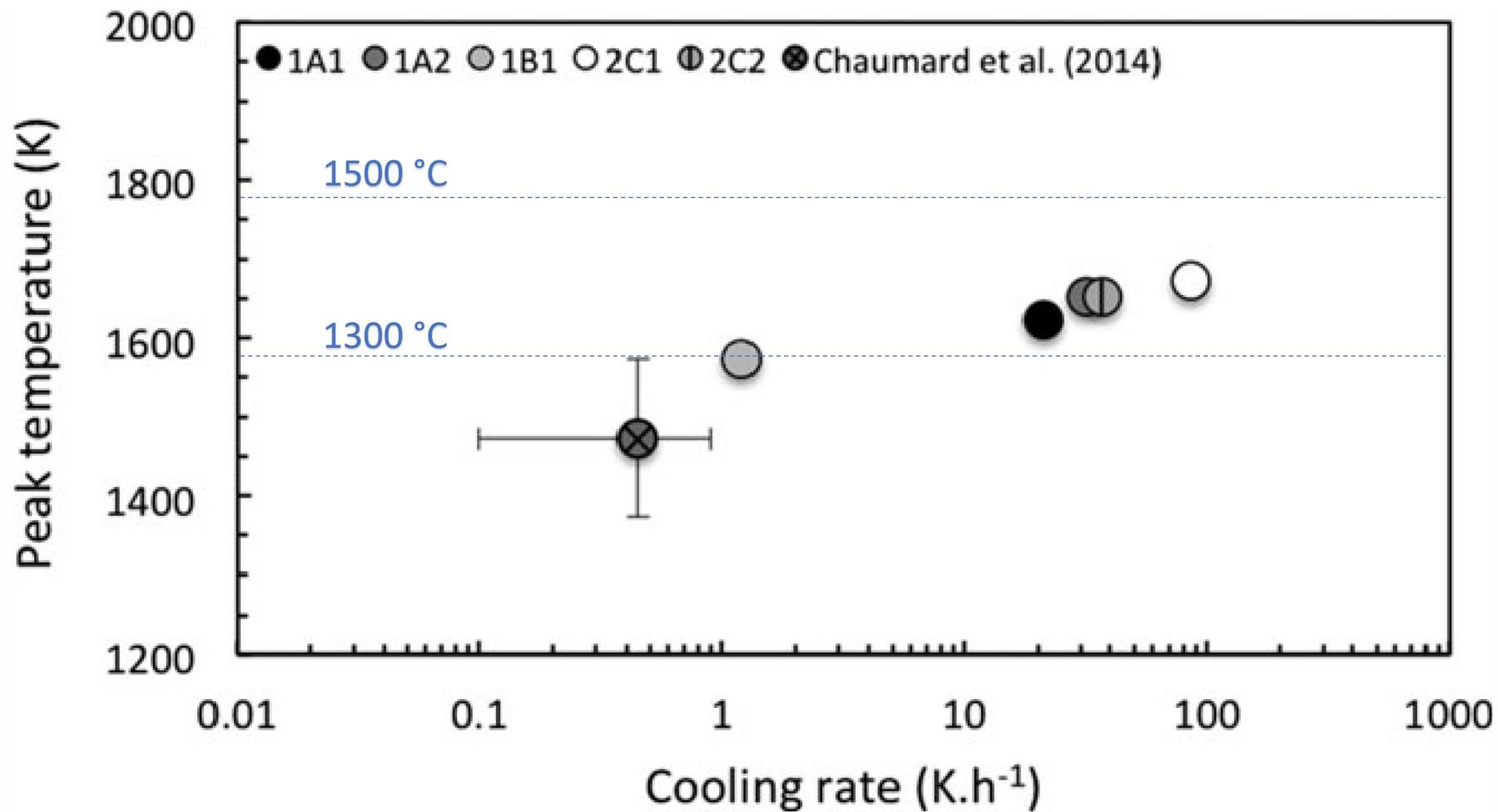
$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Loi d'Arrhenius})$$

$$\frac{d_{Cu}}{d_{Ga}} = \sqrt{\frac{D_{Cu}}{D_{Ga}}(T)} \rightarrow T \rightarrow t = \frac{d^2}{D}$$



Histoire thermique des chondres

Chaumard et al. (2018): analyse de grains de métal dans ou près des chondres



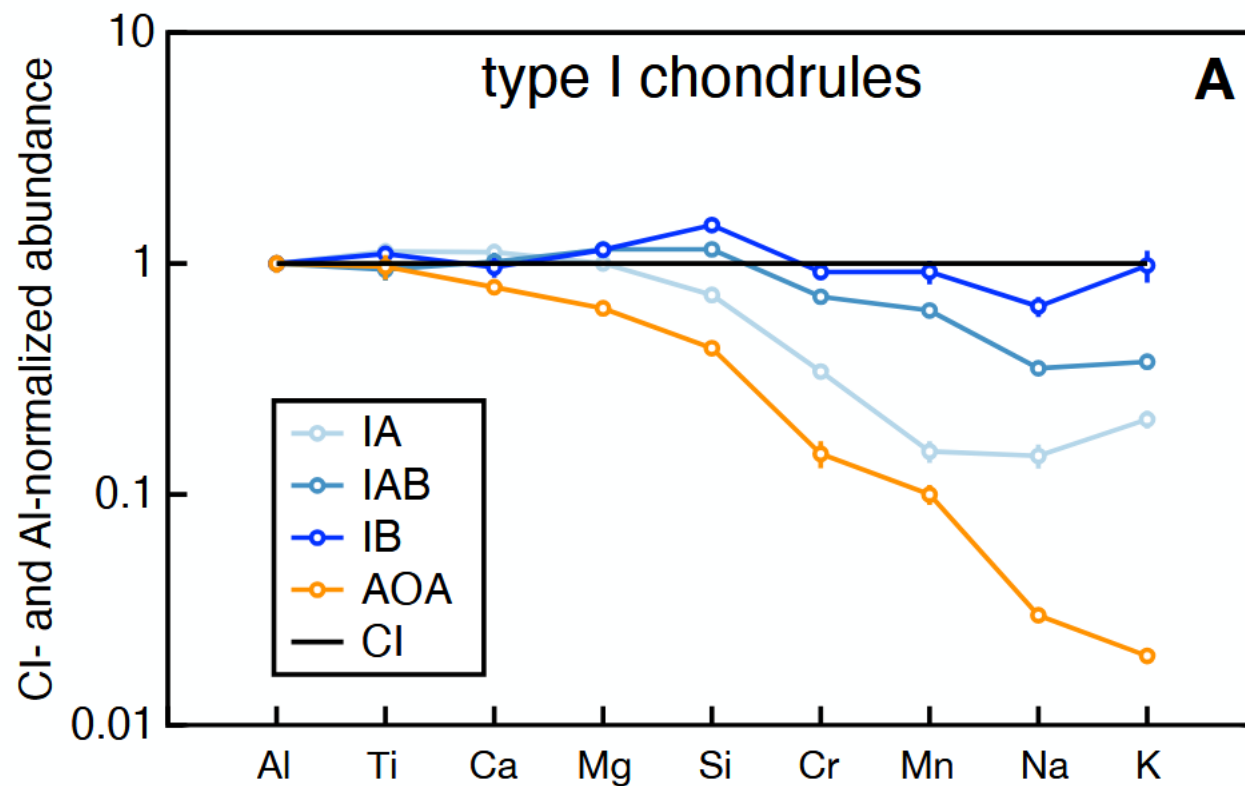


L'étonnante rétention des éléments volatils dans les chondres

Le cas du Na
(Alexander et al., Science, 2008)

Na est un élément volatil, avec une température de condensation de 950K dans le disque protosolaire.

Pourtant, les chondres ne sont presque pas dépletés en Na, tout en ayant atteint des températures de 1.600-1.700 K



Jacquet, Marrocchi et Charnoz, 2025



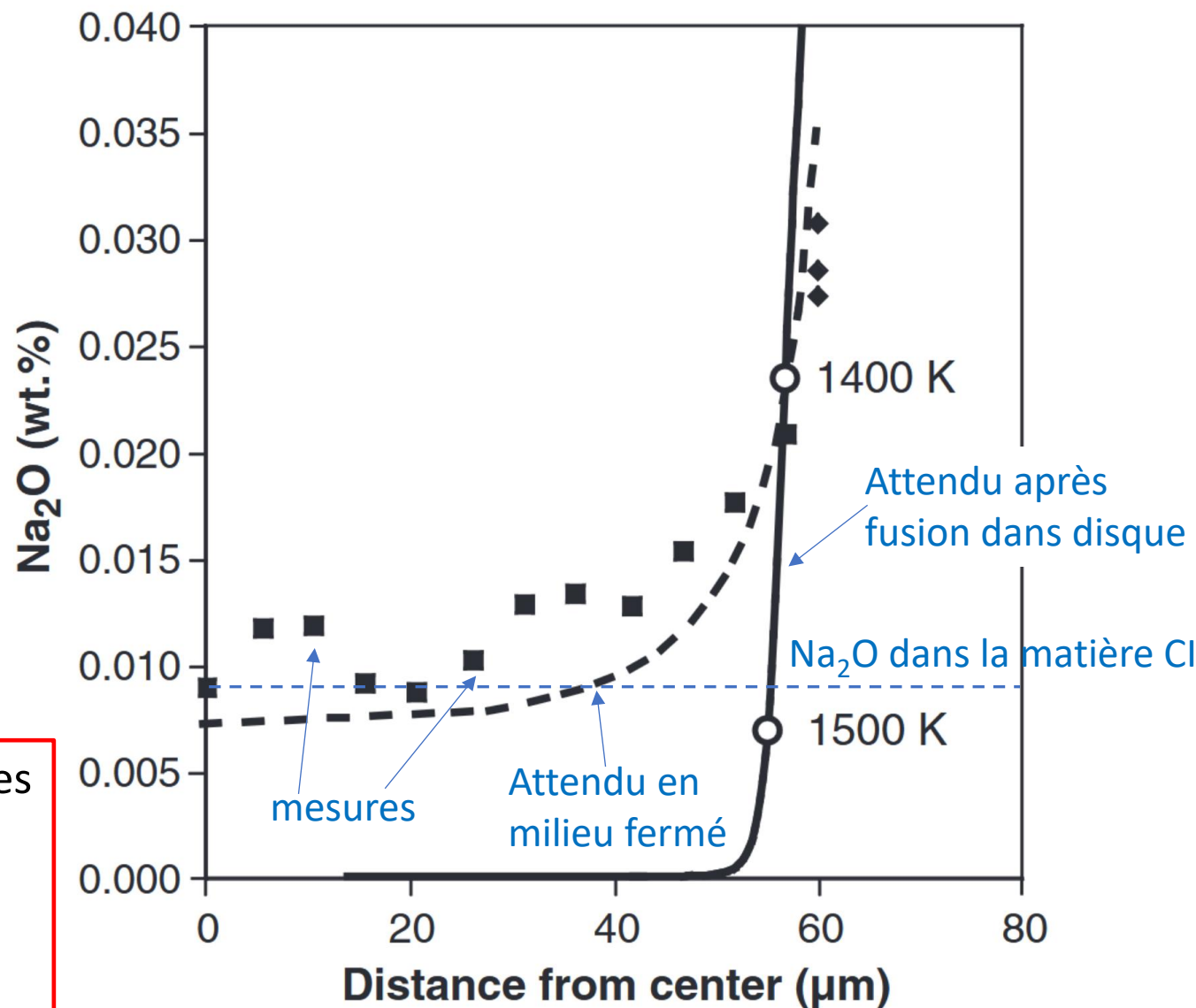
L'étonnante rétention des éléments volatils dans les chondres

Le cas du Na
(Alexander et al., Science, 2008)

Na est un élément volatil, avec une température de condensation de 950K dans le disque protosolaire.

Pourtant, les chondres ne sont presque pas dépletés en Na, tout en ayant atteint des températures de 1.600-1.700 K

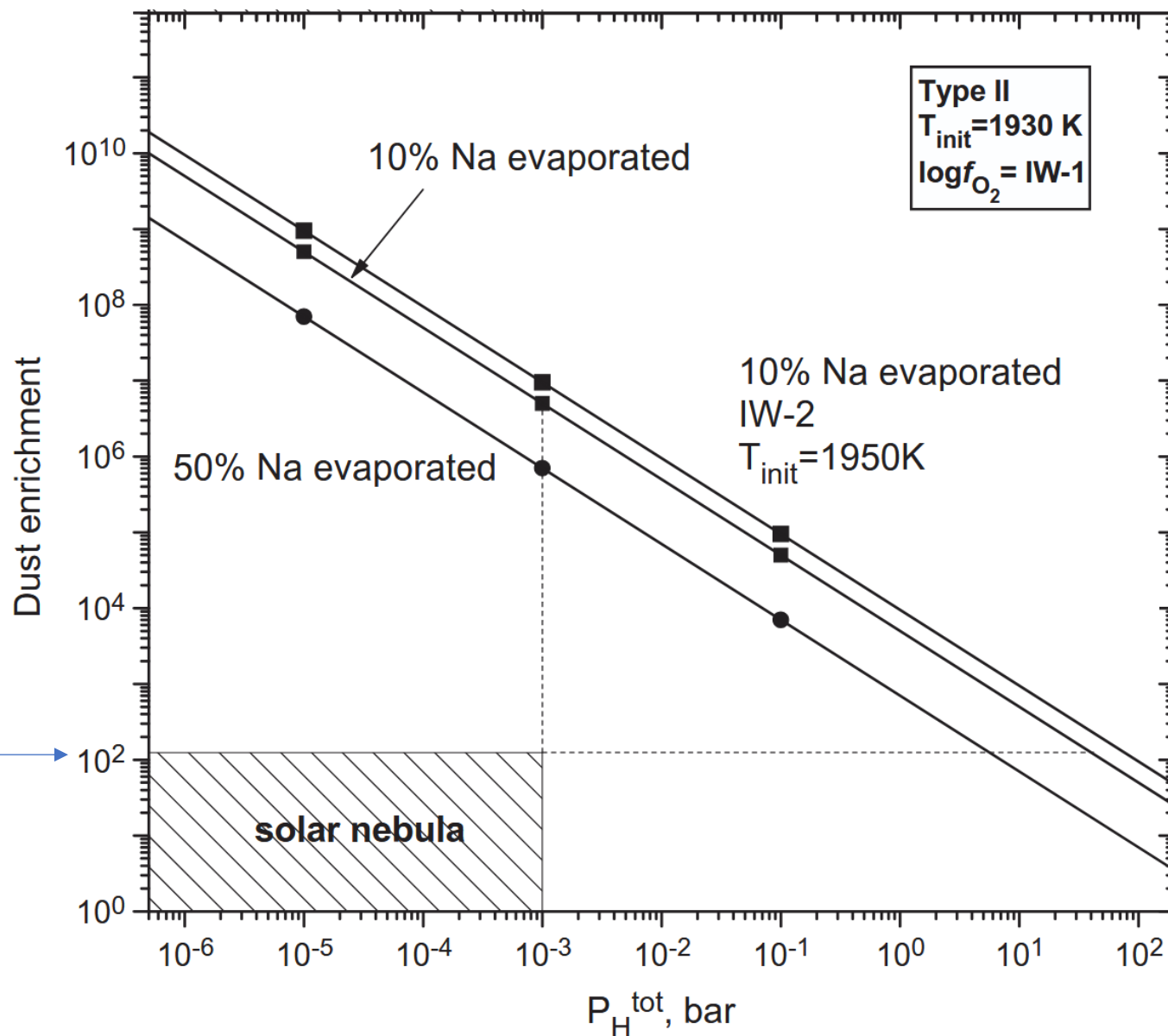
Alexander et al. concluent que les chondres doivent se former dans un milieu extraordinairement dense en poussières, $10^6 - 10^7$ x plus que dans le rapport solaire (1% du gaz)





L'étonnante rétention des éléments volatils dans les chondres

Enrichissement sur la plan
médian dû à la sédimentation



Fedkin et Grossman (2013)



Chondres et formation des planétésimaux

A des telles densités ($> 10\text{g/m}^3$) les chondres devraient s'effondrer les uns sur les autres par gravité.

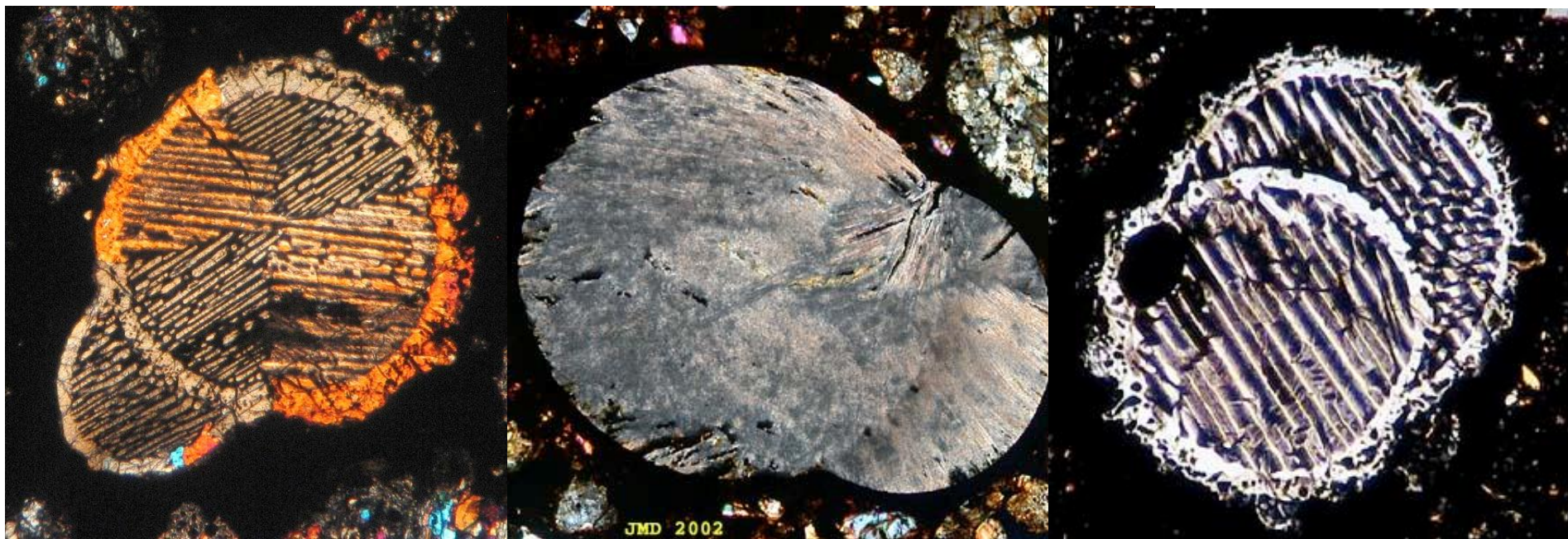
Est-ce que les chondres se forment lors de la formation des planétésimaux?

Deux problèmes à cela.



Chondres agglutinés (compound chondrules)

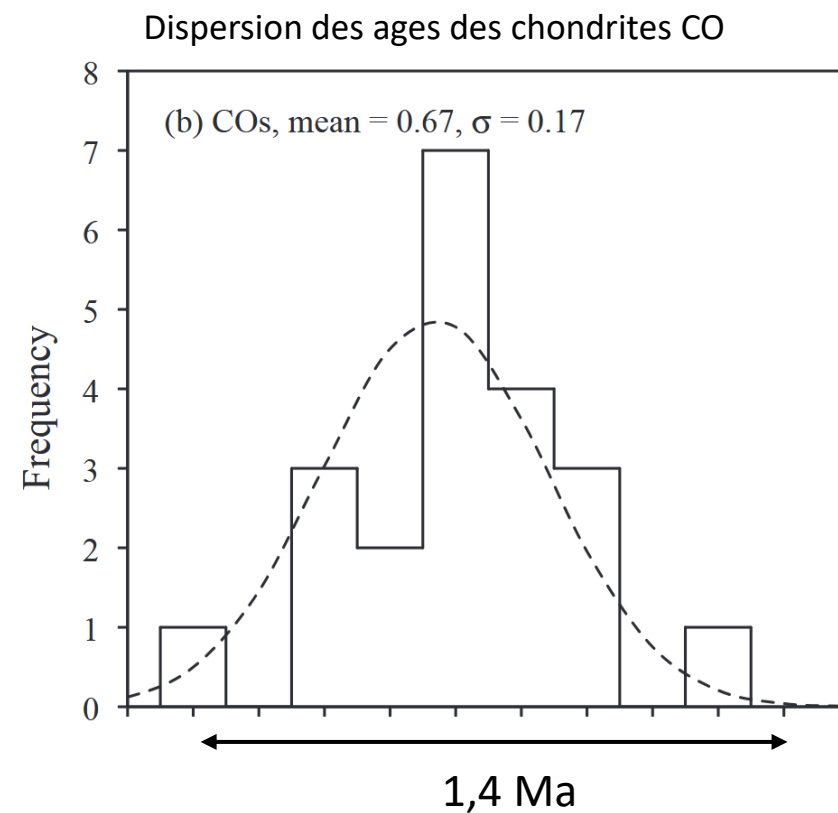
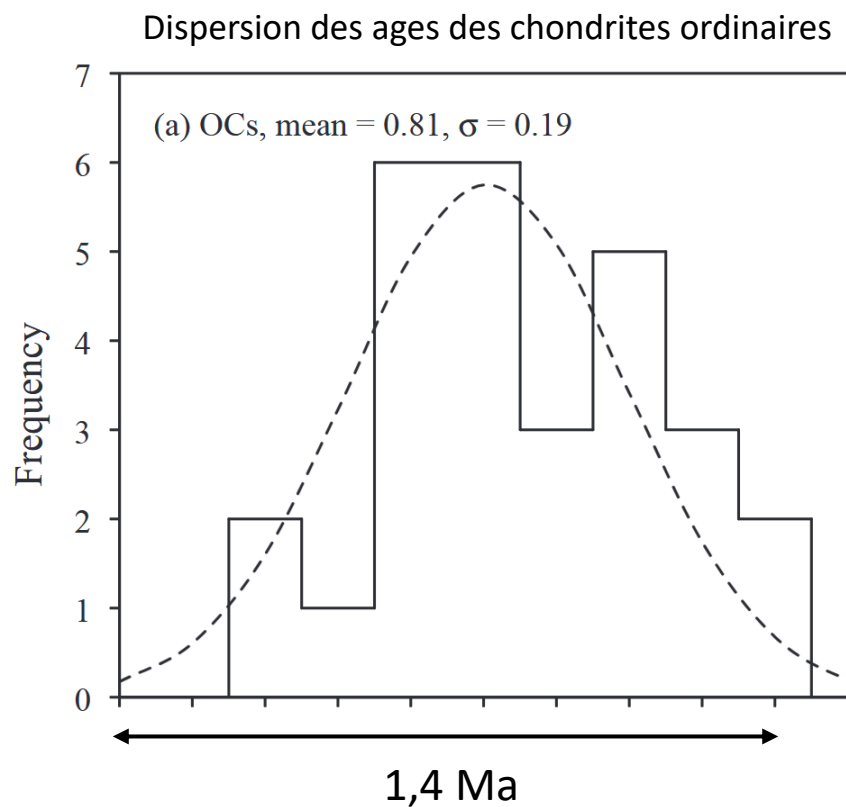
Ce sont des chondres qui se sont collés quand ils étaient encore partiellement fondus. Quelques % des chondres au plus. Ne devraient-t-il pas être plus fréquents?



Alexander et Ebel (2012): Les compound chondrules se forment seulement dans un intervalle de températures très étroit: plus chauds ils auraient fusionné; plus froids ils ne se seraient pas collés



Dispersion des âges des chondres de la même chondrite



Alexander et Ebel (2012): La dispersion des âges est apparente et due aux erreurs de mesure

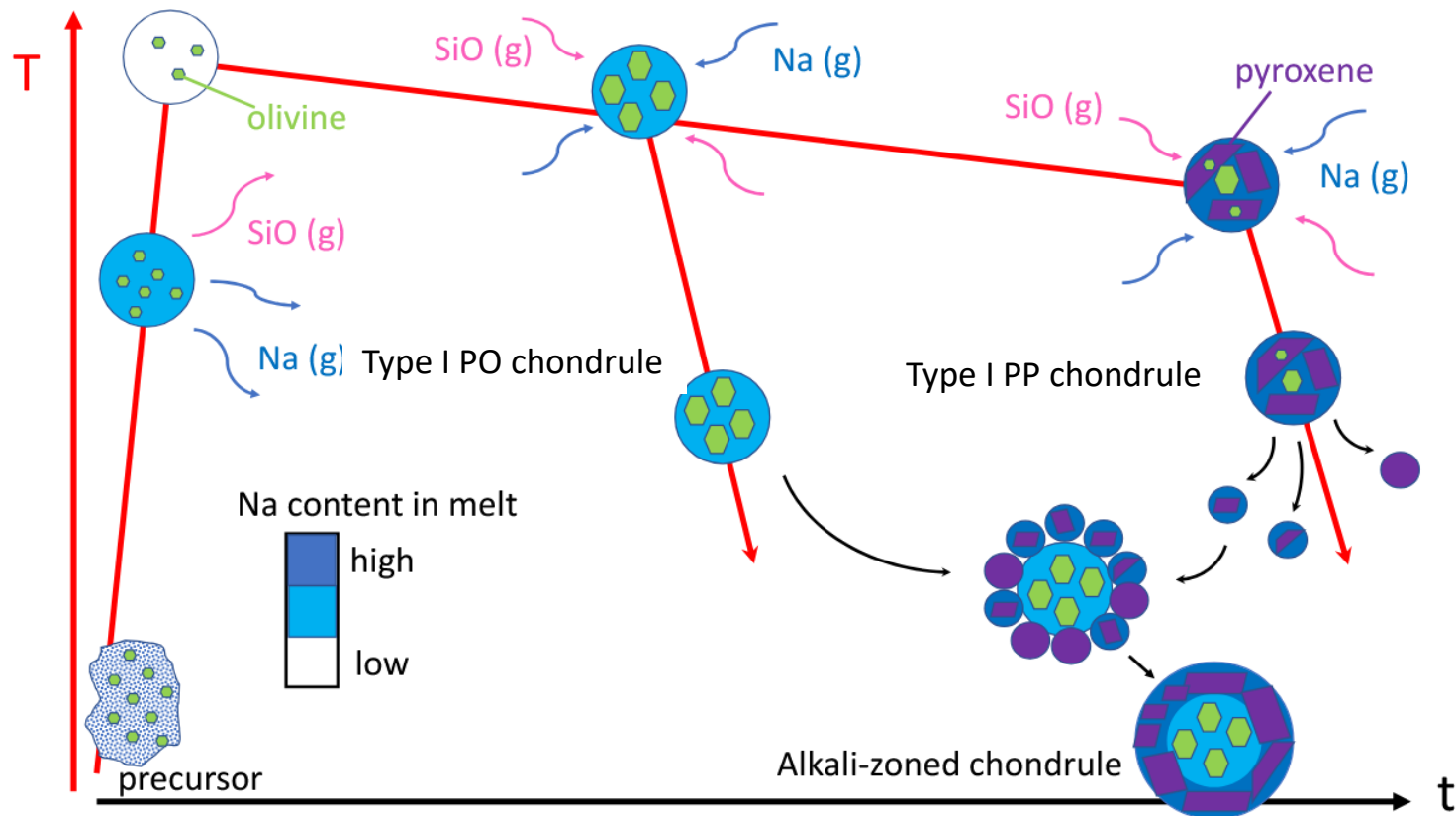


L'argument qui tue





Une alternative aux densités extrêmes: récondensation du Na



Jacquet et al., 2025, proposent que les chondres ont bien perdu leur Na initialement, mais ensuite celui-ci a recondensé dans les chondres, au prorata de SiO. Une densité de chondres de 10^{-3}g/m^3 pourrait suffire, correspondant à un rapport poussières/gaz de l'ordre de 1/1 sur le plan médian du disque (enrichissement de 100)

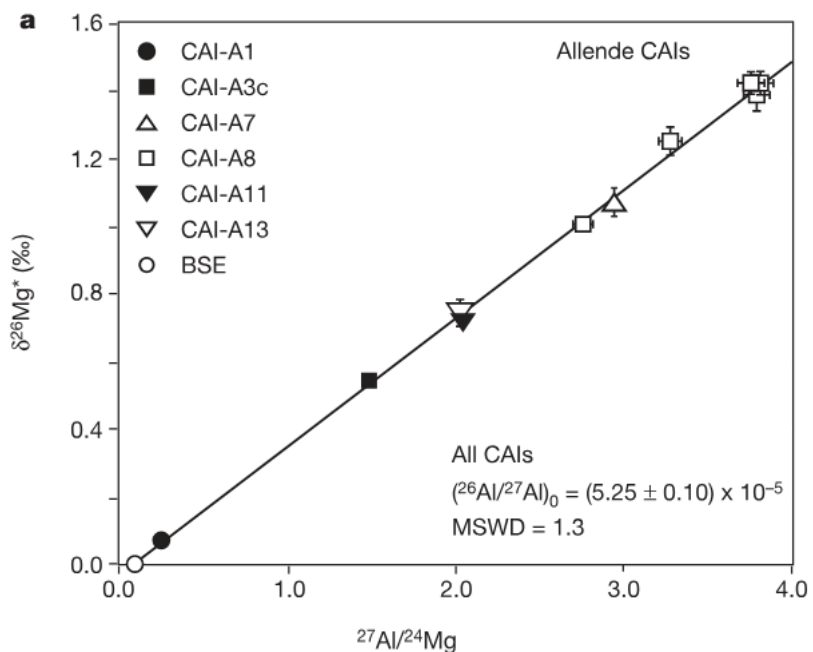


Les âges des chondres: chronologie relative

^{26}Al décroît en ^{26}Mg avec une demi-vie de 0,717Ma

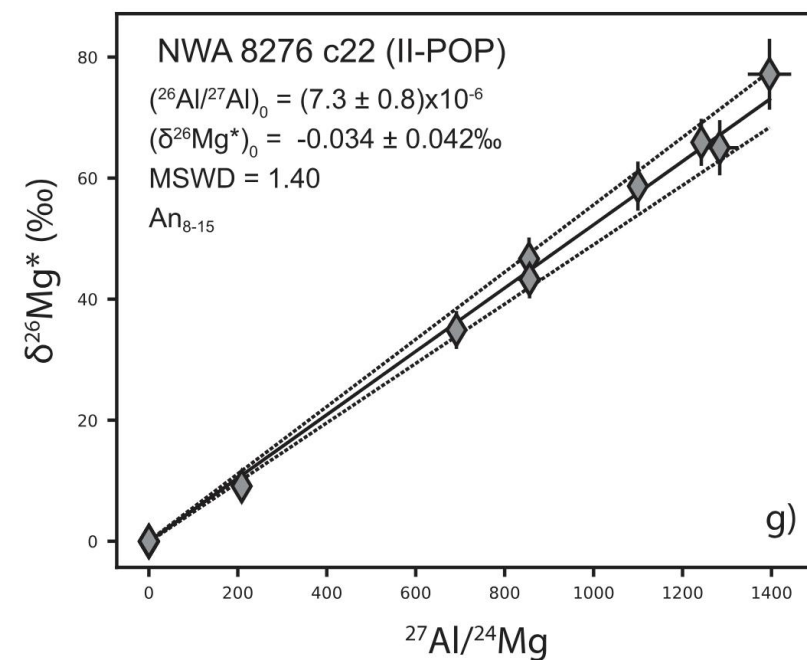
^{27}Al est stable

CAI : abondance initiale de ^{26}Al



Bizzarro et al., 2004

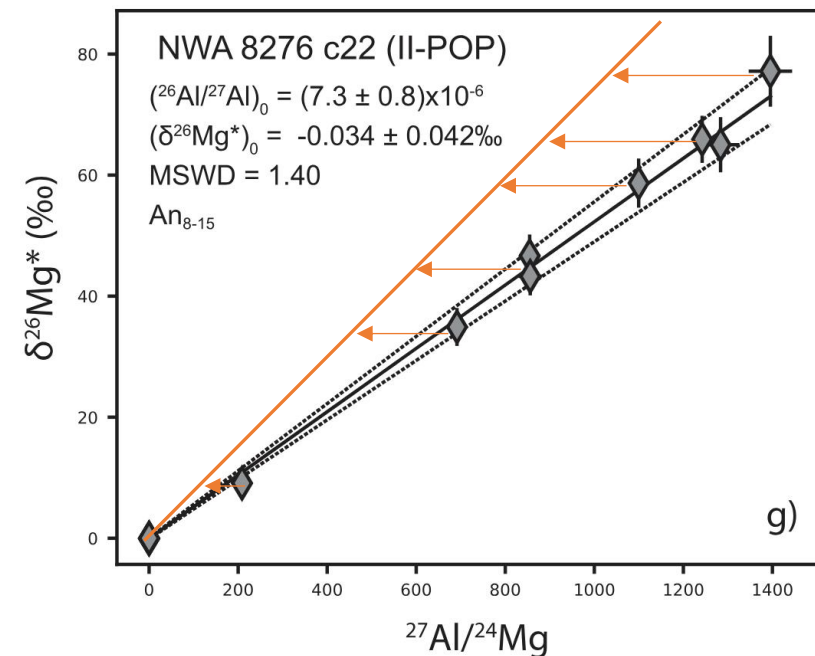
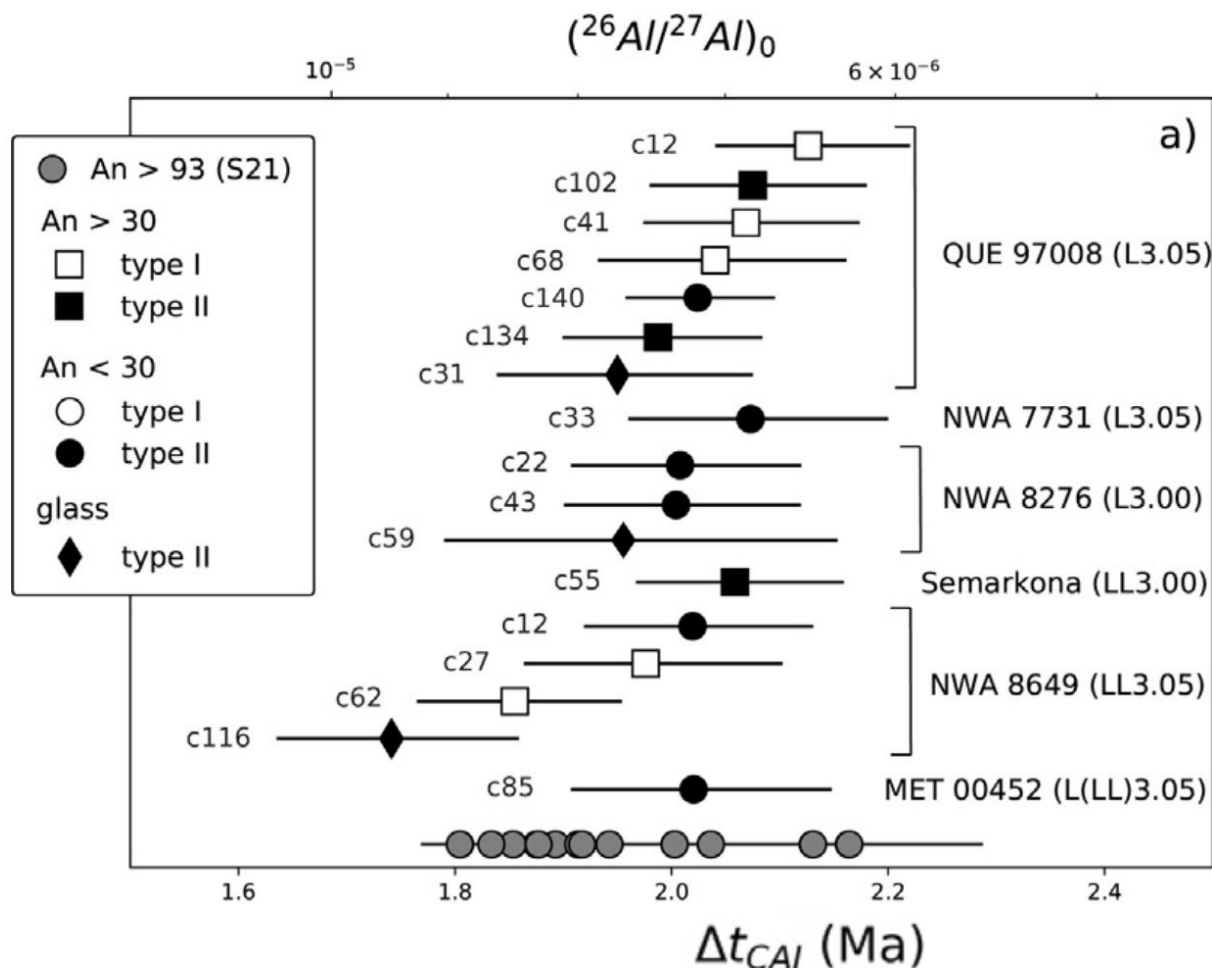
Chondres – isochrone interne



Siron et al., 2022

Le rapport $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ est 7 fois moindre dans le chondre que dans les CAIs. Or, $1/7 = (1/2)^{2,8}$.
Donc ils se sont passé 2,8 demi-vies de ^{26}Al entre la condensation des CAIs et la cristallisation du chondre.
Par conséquent, ce chondre a cristallisé $2,8 \times 0,717 \text{ Ma} = 2 \text{ Ma}$ plus tard.

Les âges des chondres: chronologie relative

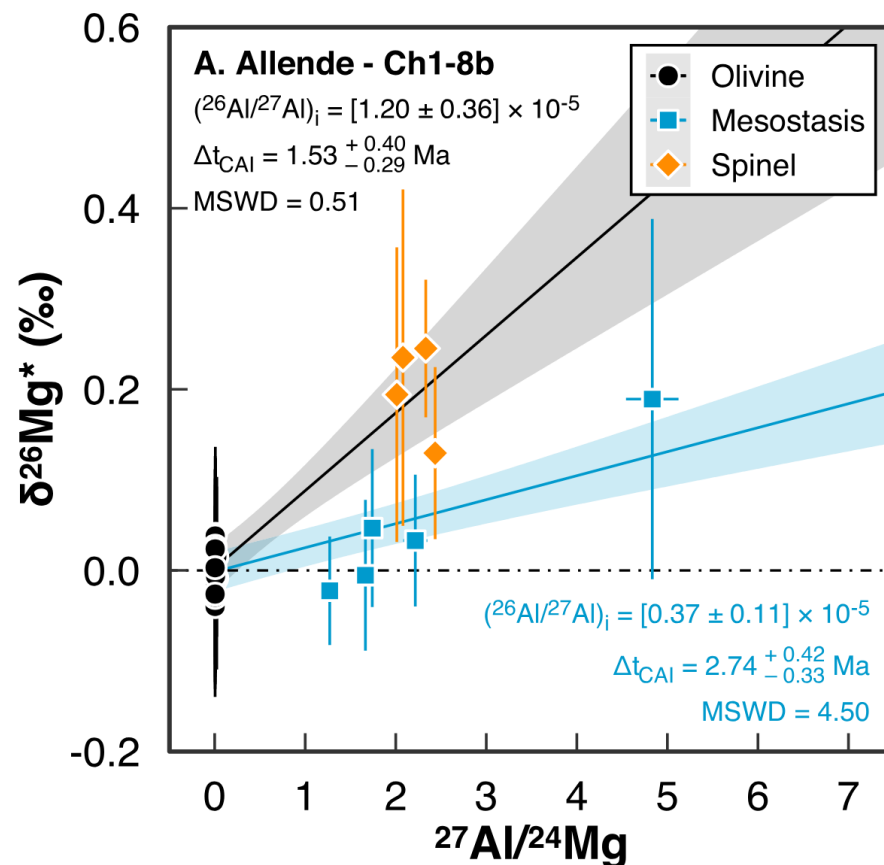


Siron et al., 2022

Ces isochrones internes ont été obtenues à partir de minéraux riches en Al, (plagioclases, mésostases). Le Mg aurait pu diffuser des ces minéraux davantage que le Al lors du réchauffement de l'astéroïde, résultant en une réduction apparente du rapport initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$



Les âges des chondres: chronologie relative



Piralla et Marrocchi, 2023

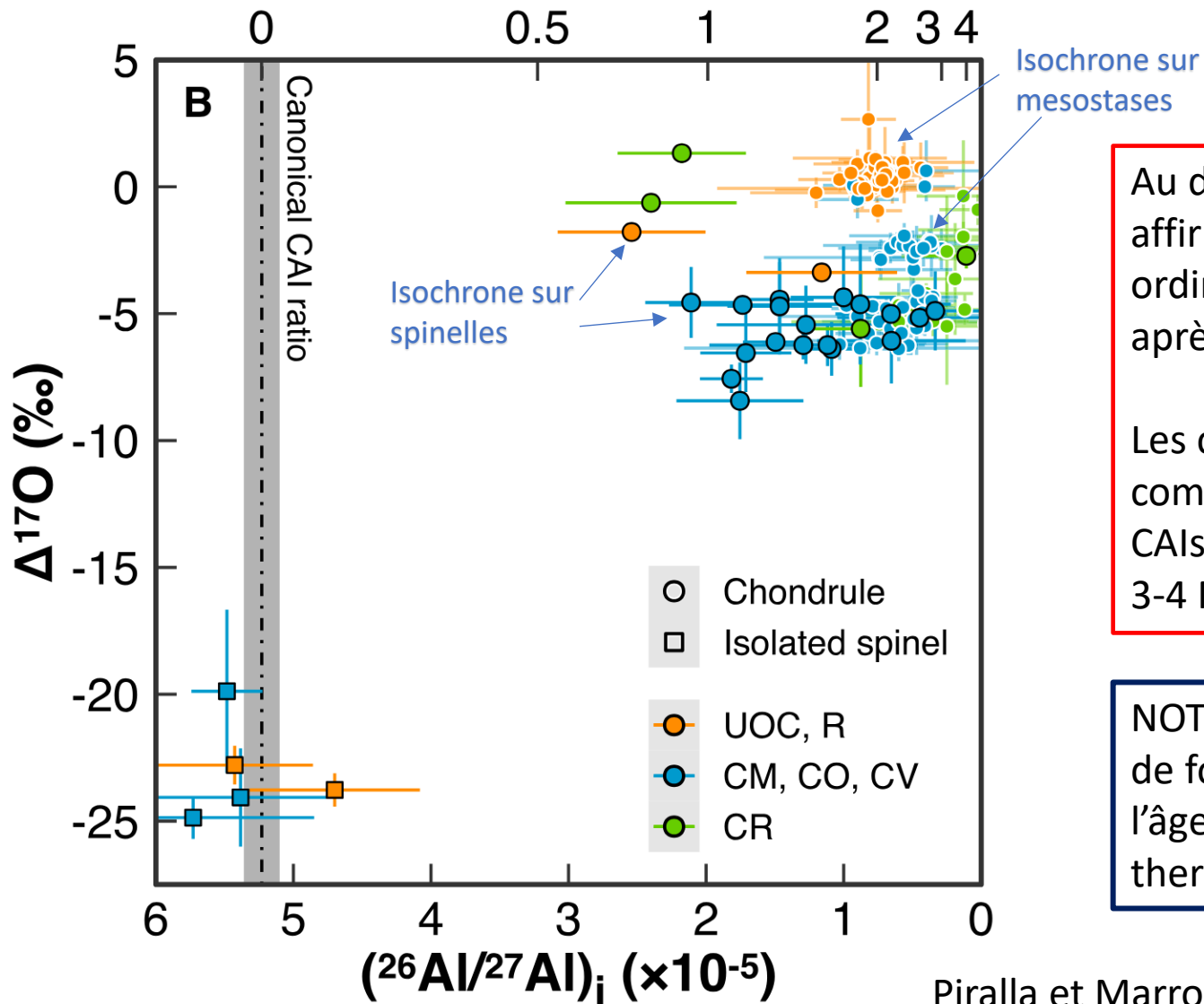
Piralla et Marrocchi (2023) montrent qu'une isochrone construite sur les spinelles donne un rapport initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ plus élevé et donc une différence d'âge par rapport aux CAIs plus courte de 1,2 Ma

Ils concluent que le ^{26}Mg a diffusé des mésostases et plagioclases, moins réfractaires que les spinelles, lors du réchauffement de l'astéroïde, résultant en une réduction apparente du rapport initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$



Les âges des chondres: chronologie relative

Age after CAIs (Ma)



Au dépit de cette incertitude, on peut affirmer que les chondres des chondrites ordinaires se sont formés entre 0,7 et 2 Ma après les CAI.

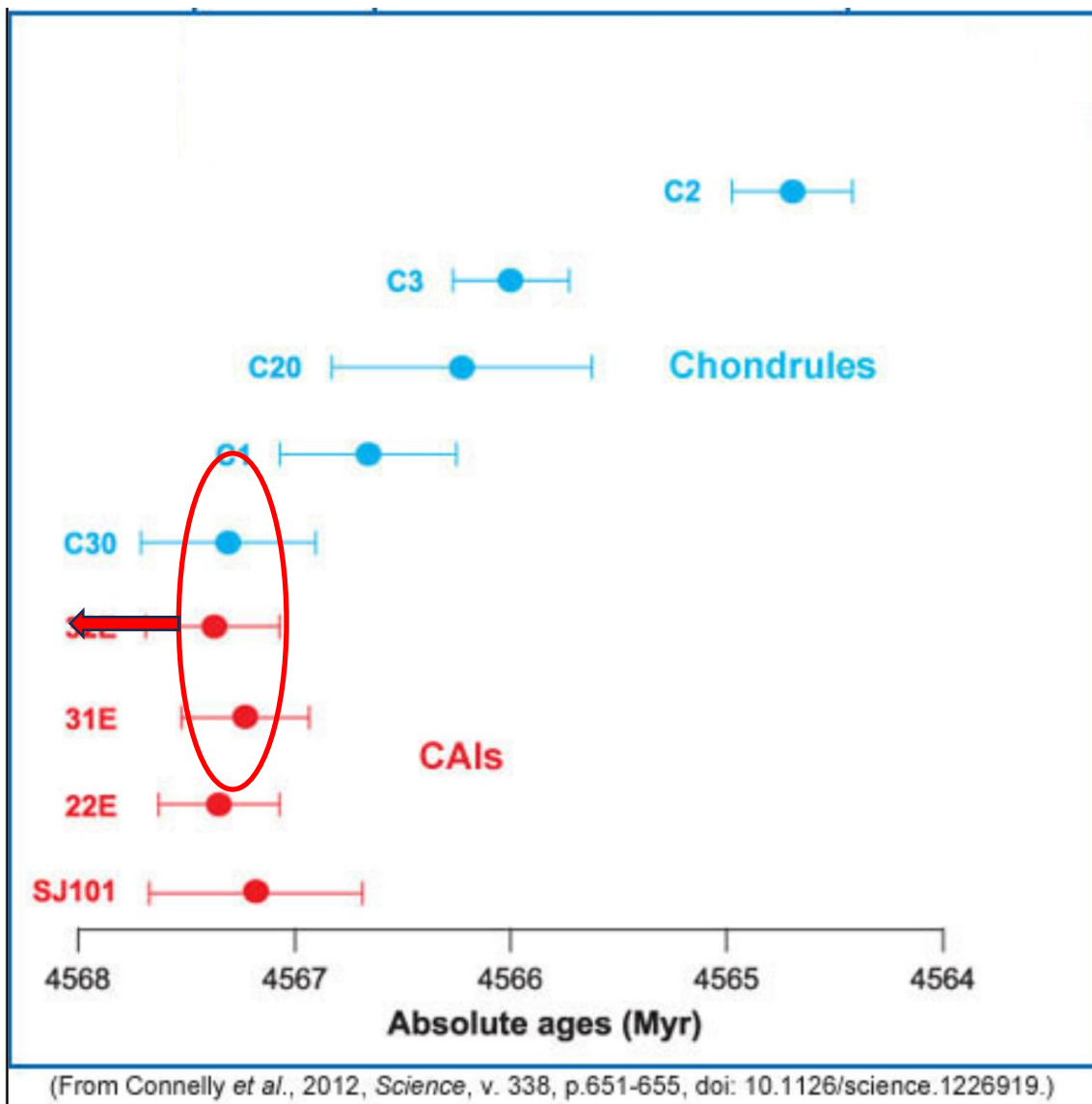
Les chondres des chondrites carbonées ont commencé à se former 1-2 Ma après les CAIs et leur formation a perduré jusqu'à 3-4 Ma après les CAIs.

NOTE: l'âge d'un chondre n'est pas l'âge de formation de son précurseur. C'est l'âge de son dernier épisode d'évolution thermique



Les âges des chondres: chronologie absolue

Chronomètre Pb-Pb



Avec ce chronomètre on ne voit plus la différence minimale de ~1 Ma entre la formation des CAIs et celle des chondres, révélée par le chronomètre Al-Mg

....Problème.....

Piralla et Marrocchi, 2023 et Desch et al., 2023 proposent que les vrais âges des CAIs soient 4568Ma, et que les mesures à 4567Ma sont dues à une perte de Pb pendant un épisode de réchauffe similaire à celui souffert par les chondres

Une autre explication (Bollard et al., 2019, 2017) est que le rapport initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ était un peu plus grand dans la région de formation des CAIs que dans celle de formation des chondres

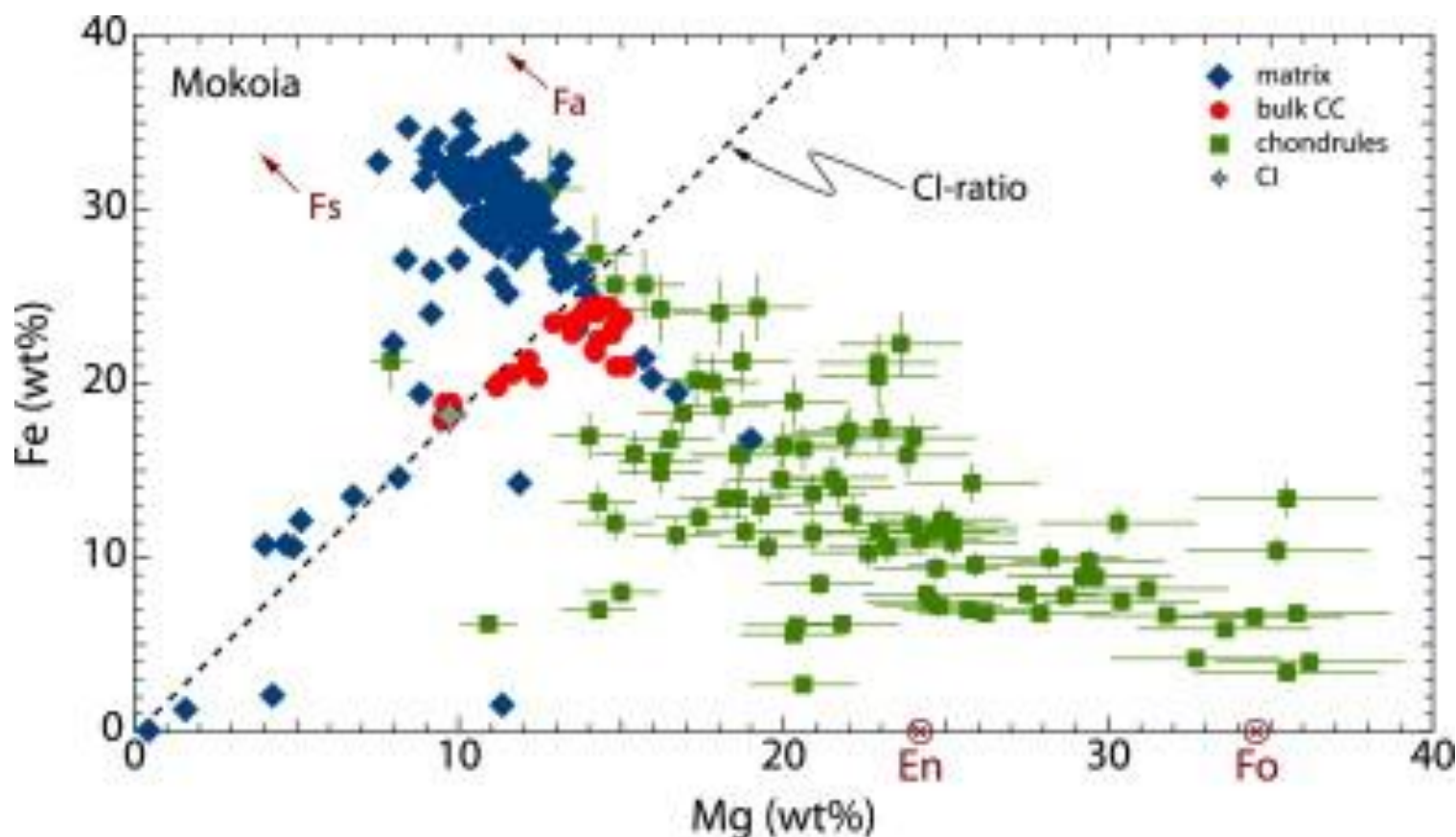


La complémentarité chondre-matrice

Hezel & Palme (2010) ont remarqué que les chondres et la matrice ont des rapports Mg/Fe différents mais, ensemble, ils rendent le rapport Mg/Fe égal à celui solaire (des météorites CI).

C'est vrai pour des paires d'éléments qui ont la même température de condensation: Mg/Si, Al/Ti, Hf/W,

mais pas pour des éléments avec températures de condensation différentes: Al/Na, Al/Si or Ca/Si (Zanda et al. 2018).



Troublant: la complémentarité impliquerait que ce qui est perdu lors de la formation d'un chondre se mélange à la matrice (pas étonnant), et ensuite chondres et matrice sont ré-accrétés dans les *bonnes proportions* (étonnant!)

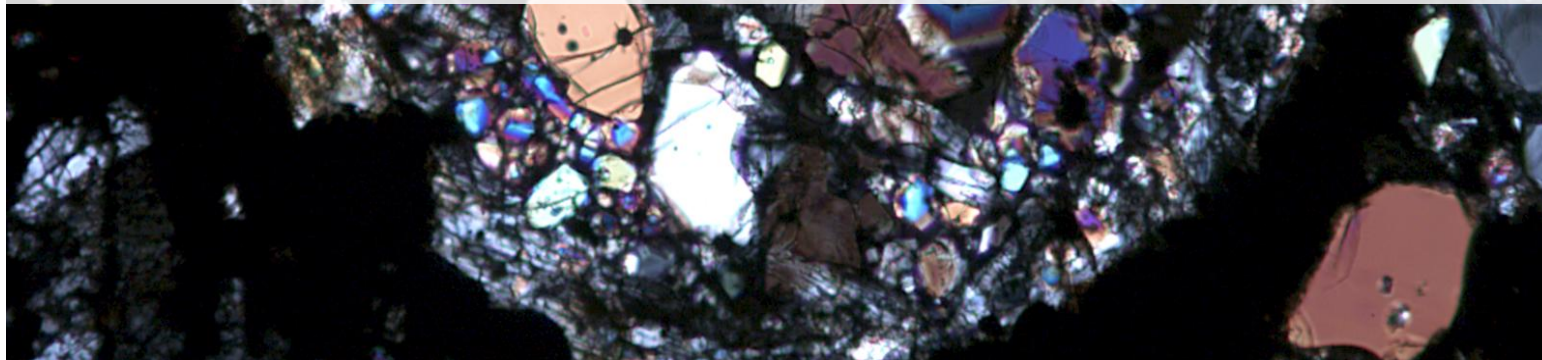


La formation des chondres



On veut expliquer:

1. Augmentation soudaine de la température (pour fondre le grain précurseur)
2. Le refroidissement rapide (30 and 90 °C/h à 1300–1500 °C, 1 °C/hr à <1300 °C)
3. Pourquoi les chondres n'ont pas commencé à se former tout de suite (délai de ~1Ma par rapport au CAIs)
4. Pourquoi les chondres se forment seulement dans des environnements de grande densité de poussières (pour limiter la perte d'éléments volatils)





La formation des chondres: I) impacts

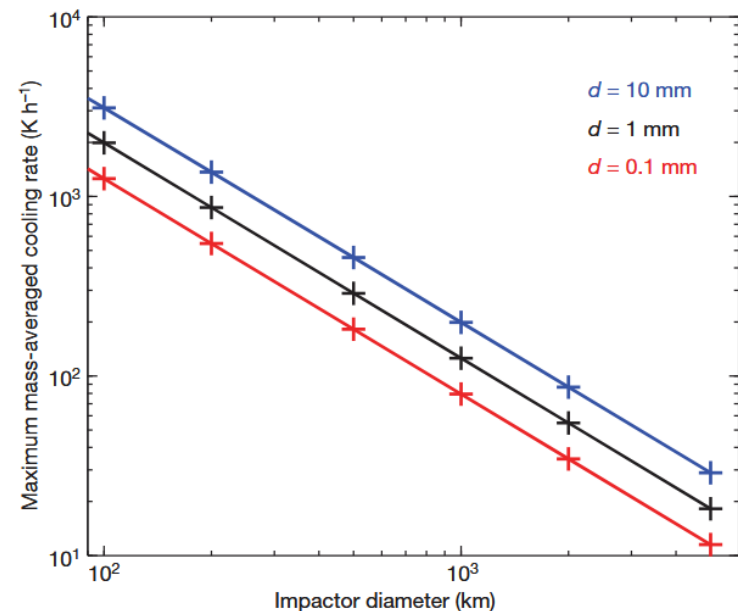
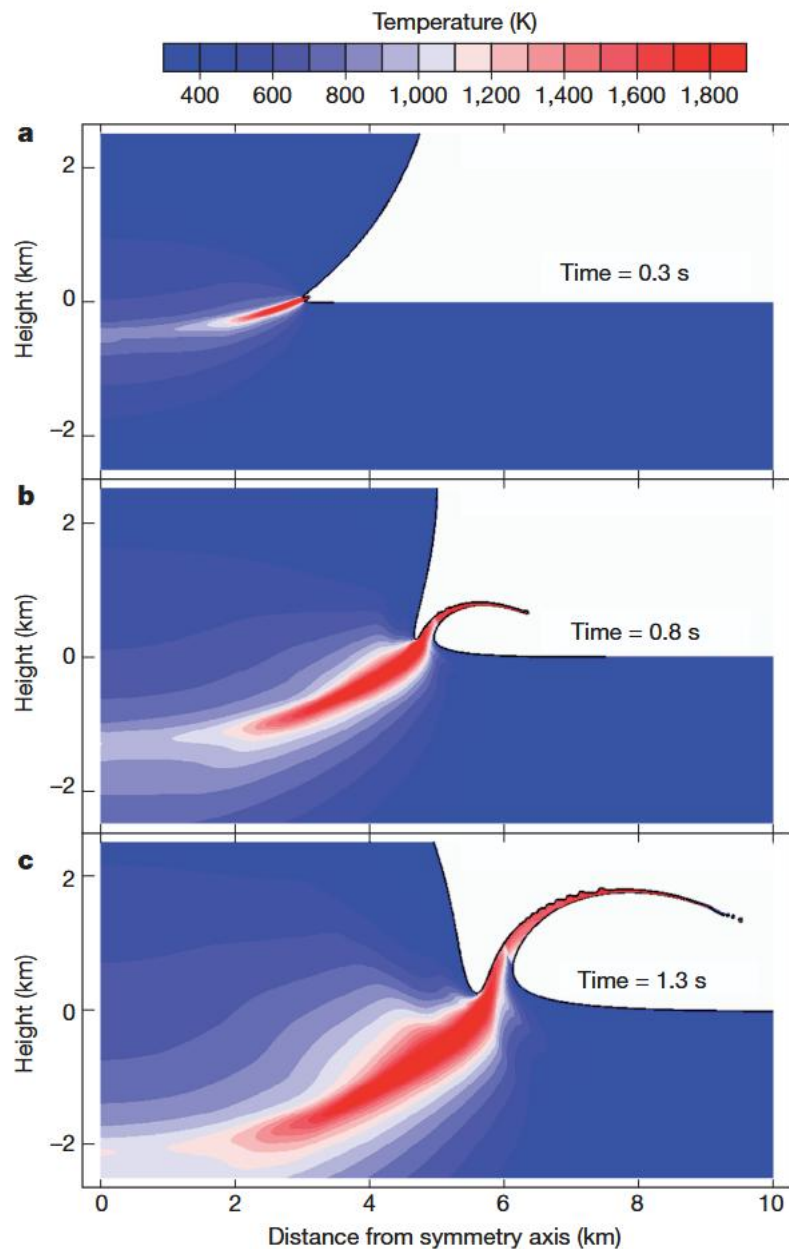
Impacts à haute vitesse entre corps plus ou moins grands peuvent fondre et éjecter dans l'espace une partie de la matière qui ensuite refroidit et cristallise rapidement.

Peut expliquer:

- Début retardé de formation des chondres
- Haute densité de matière pour limiter la dévolatilisation

Mais:

- Les premiers corps auraient dû être différenciés (voir cours #5), mais les chondres n'ont pas un grand déficit en Fe
- Grains précurseurs de chondres (voir séminaire)

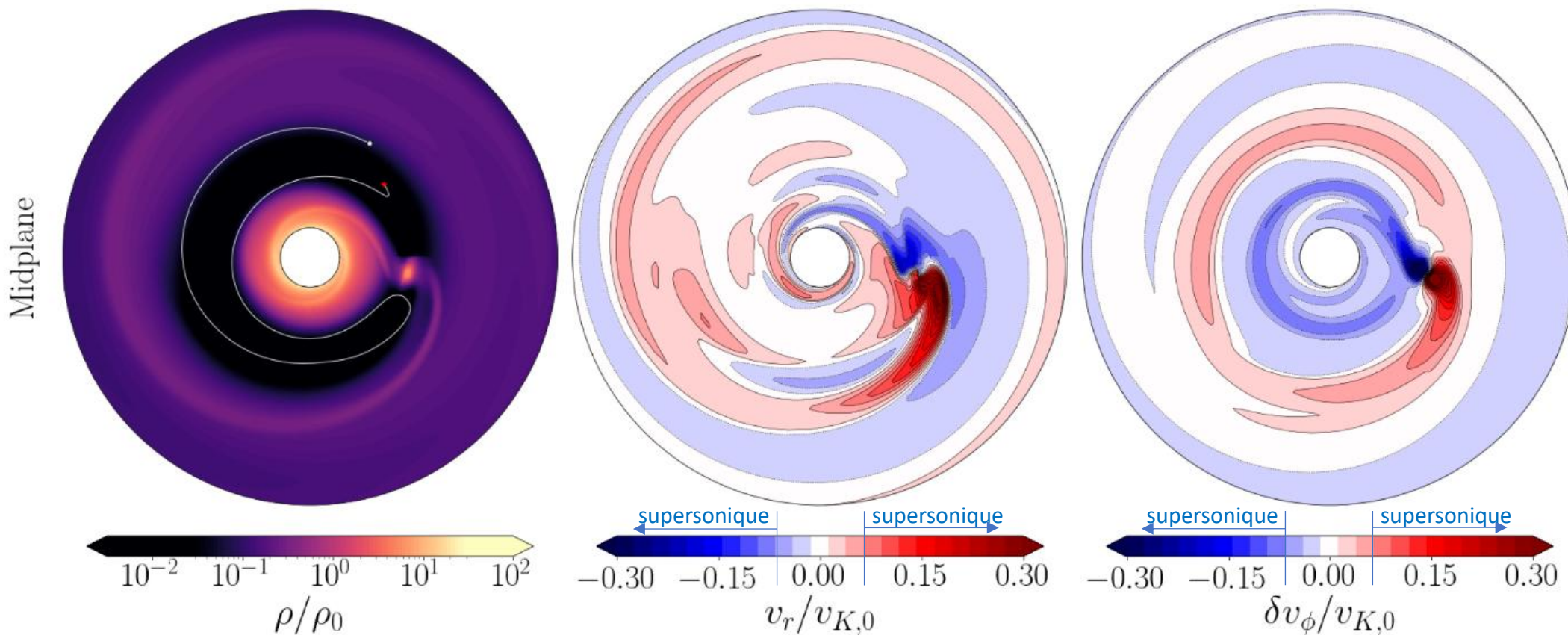


Impact d'un objet de 10km à 3km/s sur objet de taille Lunaire
Johnson et al., 2015

Voir aussi:
Asphaug et al., 2011
Dullemond et al., 2014, 2016

La formation des chondres: II) chocs hydrodynamiques dans le disque

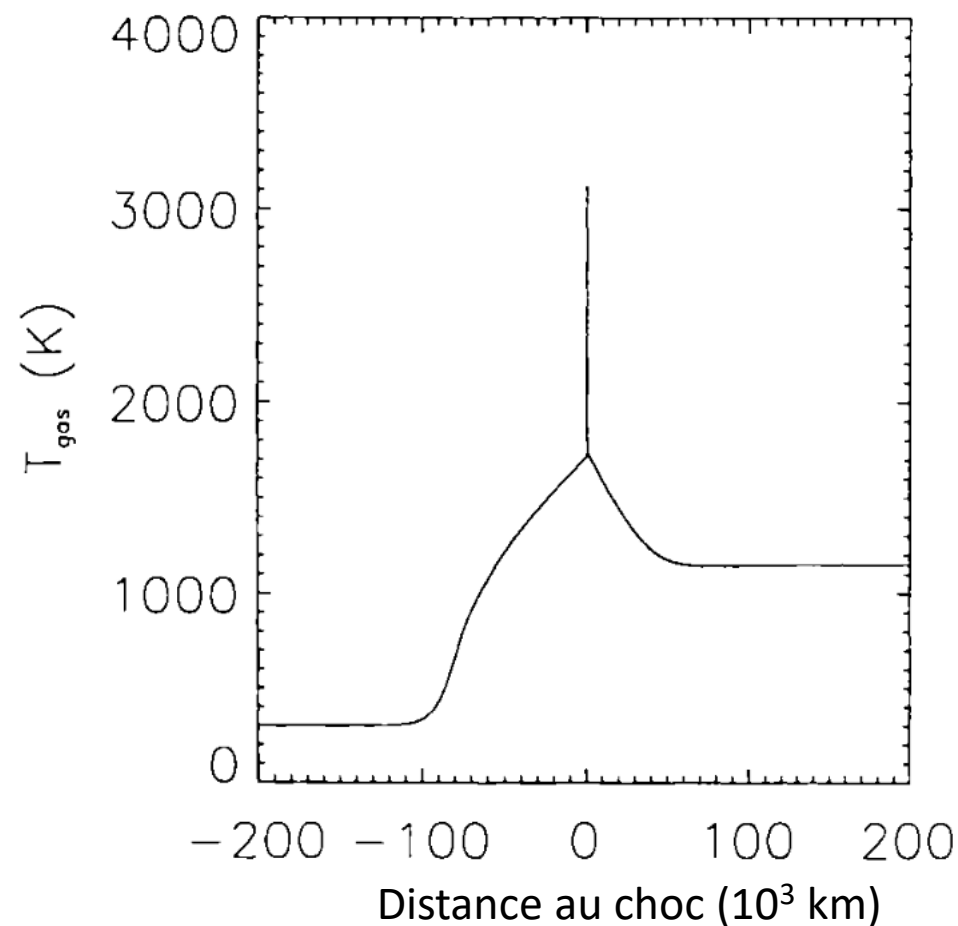
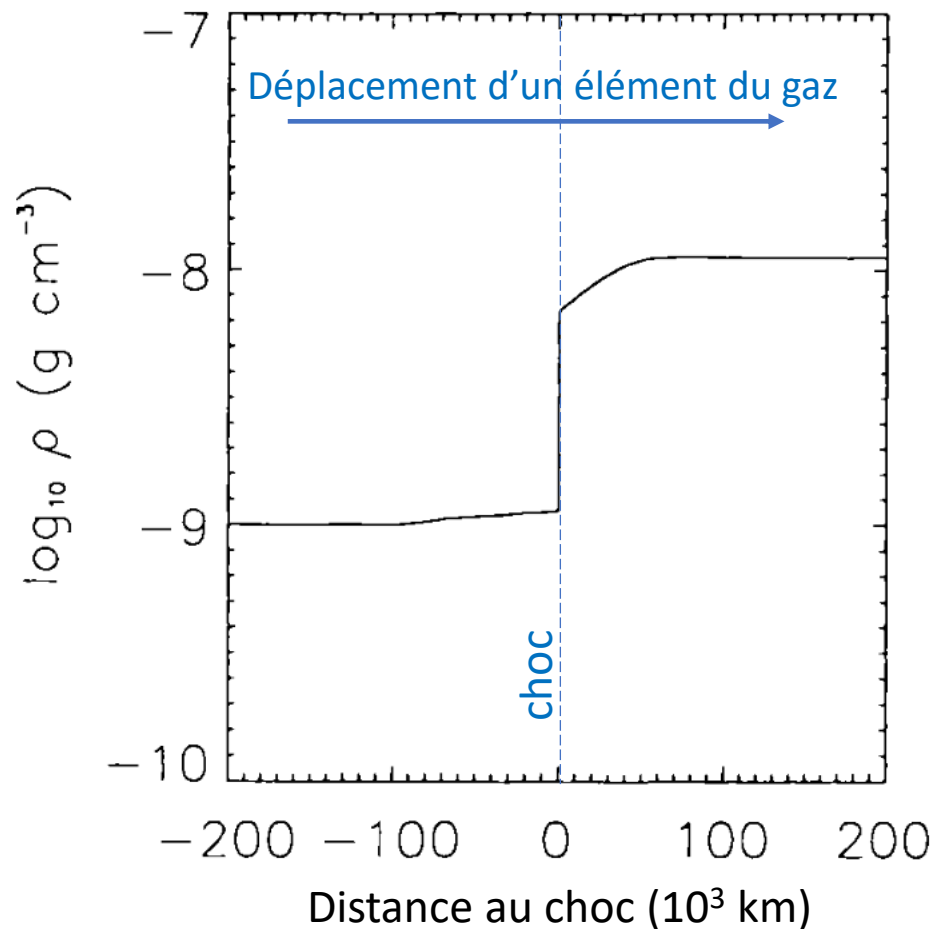
Choc: *perturbation supersonique de la vitesse du gaz par rapport au mouvement orbital circulaire*





La formation des chondres: II) chocs hydrodynamiques dans le disque

Choc: *perturbation supersonique de la vitesse du gaz par rapport au mouvement orbital circulaire*

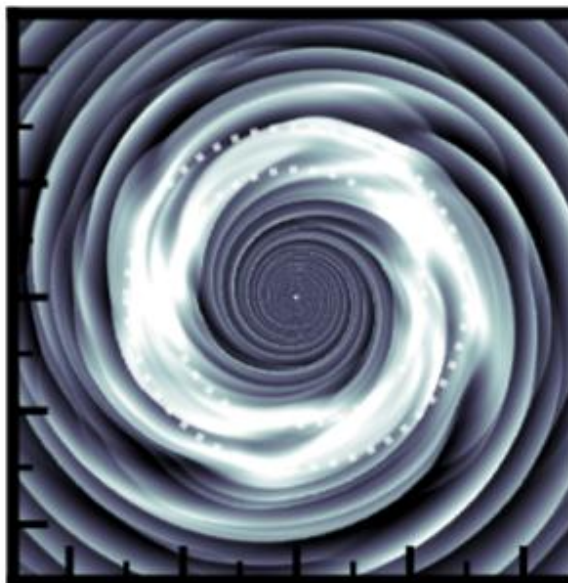
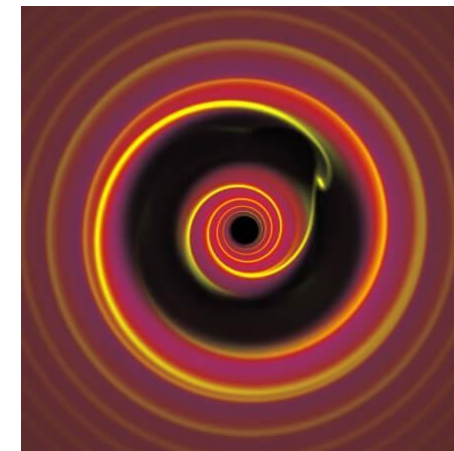


Desch and Connolly, 2002

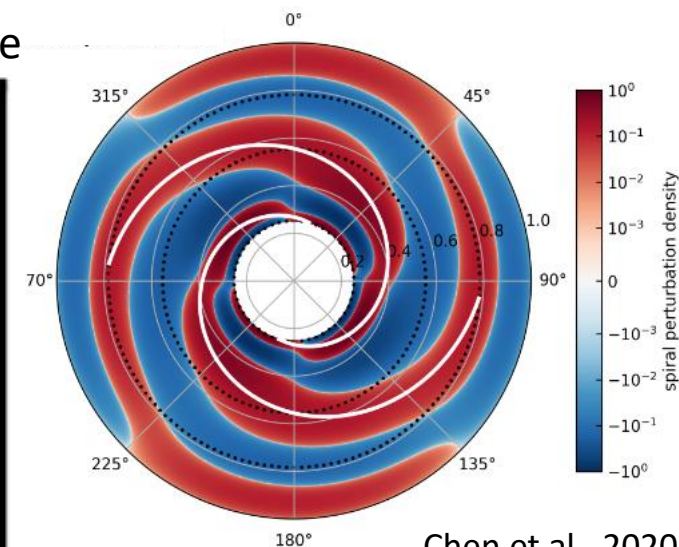
La formation des chondres: II) chocs hydrodynamiques dans le disque

Quelle origine pour les chocs dans les disques?

- Onde spirale lancée par Jupiter - saut de densité trop faible, $T_{\max} < 1000^{\circ}\text{C}$
- Ondes spirales dues à l'instabilité gravitationnelle d'un disque autogravitant – elles se génèrent dans les disques très jeunes, incompatible avec le délai des chondres
- Ondes spirales dues à l'accrétion du gaz sur le disque – typique du disque jeune - incompatible avec le délai des chondres



Kuznetsova et al. (2022)



Chen et al., 2020

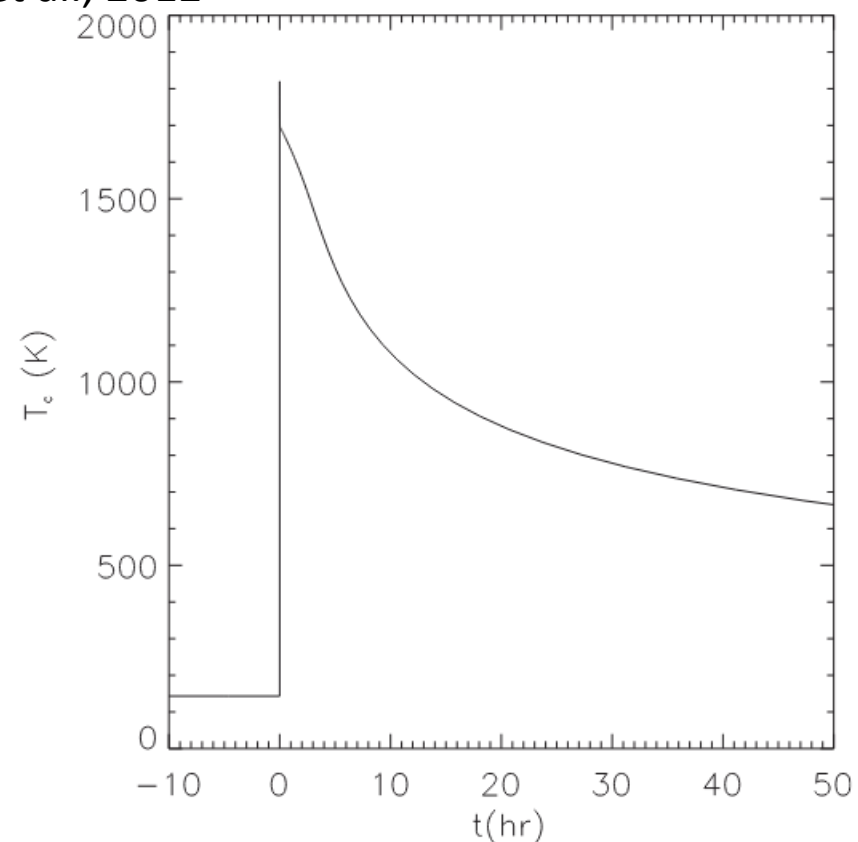
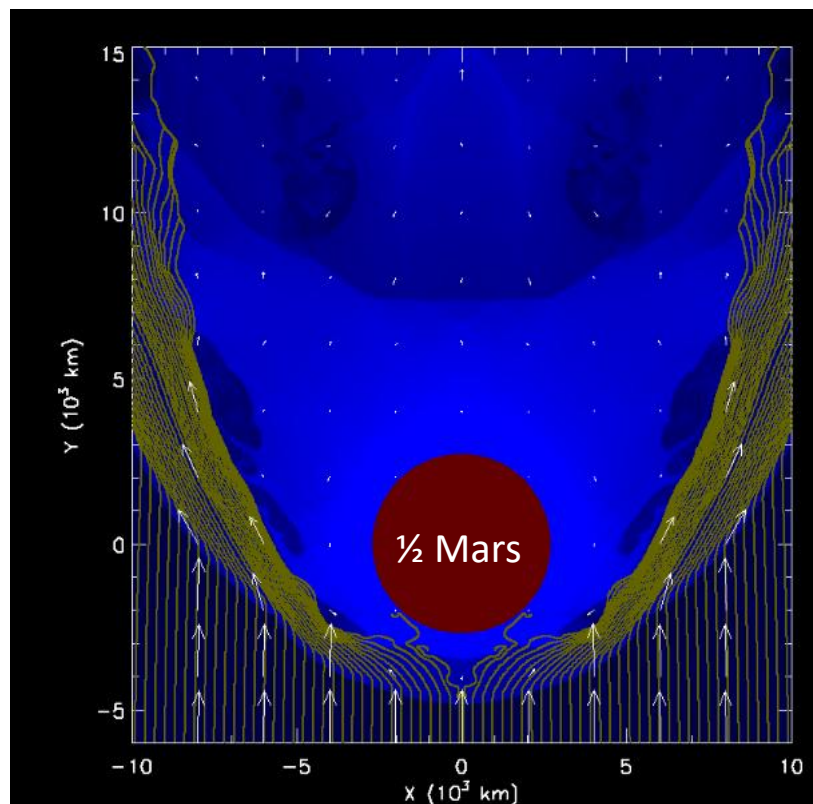


La formation des chondres: II) chocs hydrodynamiques dans le disque

Quelle origine pour les chocs dans les disques?

- Protoplanète sur une orbite excentrique ($e \sim 0.3 - 0.5$; $v_{rel} \sim 6 - 8$ km/s)

Morris et al., 2012



Compatible avec le délai des chondres.

Mais pourquoi toujours une haute densité de poussières? Existence de telles protoplanètes?

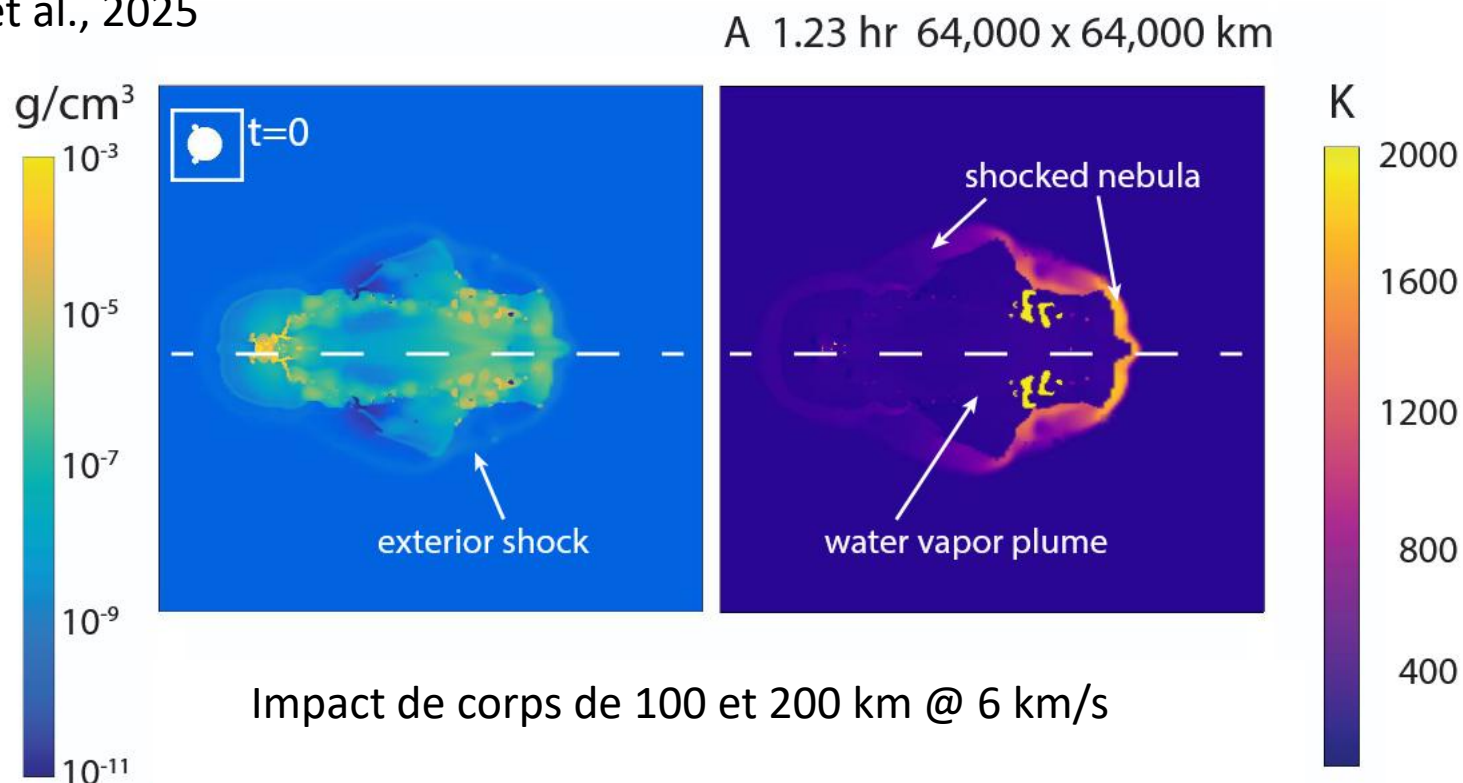


La formation des chondres: II) chocs hydrodynamiques dans le disque

Quelle origine pour les chocs dans les disques?

- Un champignon de vapeur généré lors d'une collision entre corps riches en eau

Stewart et al., 2025



Compatible avec le délai et la haute densité, mais efficace seulement pour corps riches en glace à haute vitesse



La formation des chondres: III) foudres dans le disque

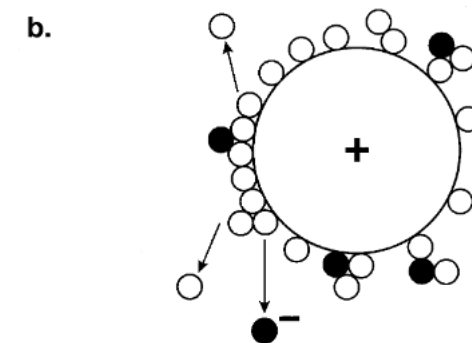
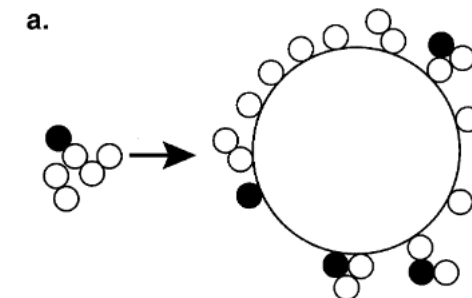
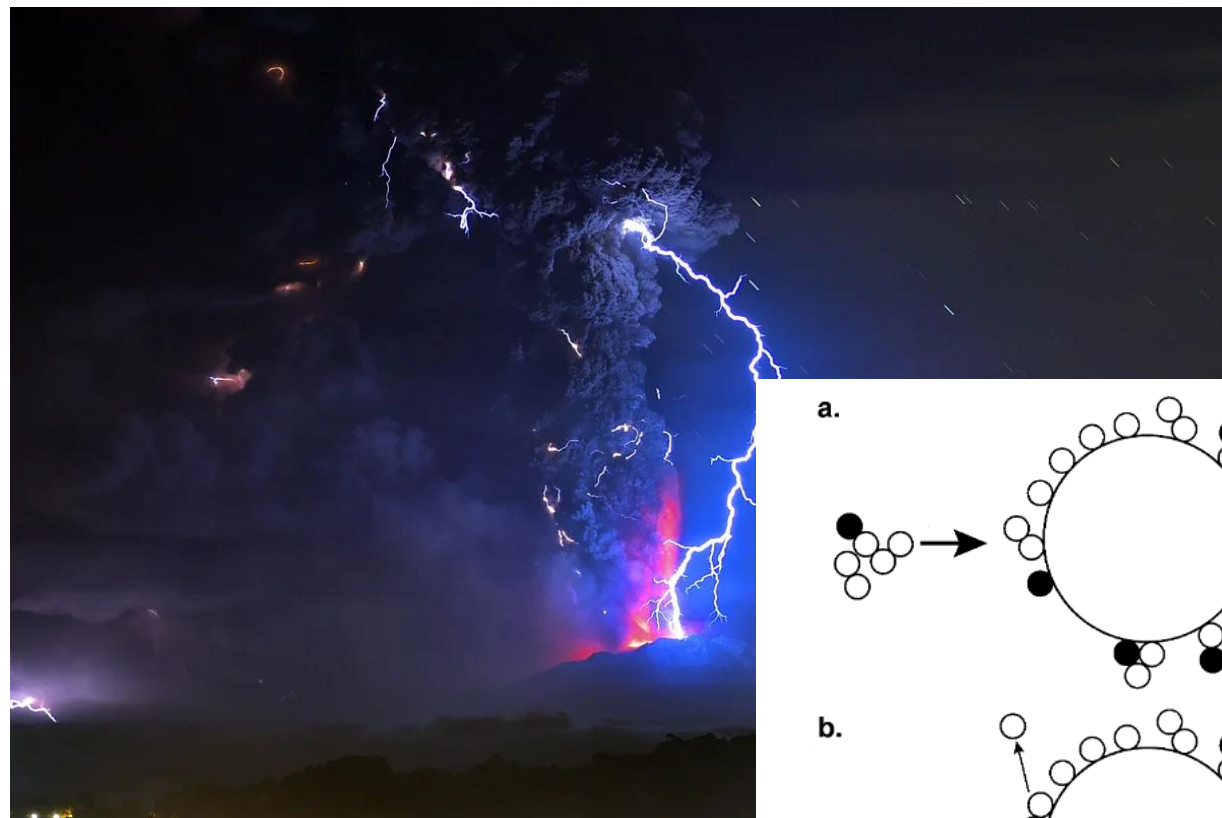
Desch et Cuzzi, 2000:

Analogie avec ce qu'il se passe lors des éruptions volcaniques: les collisions chargent électriquement les grains. S'il y a ségrégation des charges, la différence de potentiel peut devenir suffisamment grande pour déclencher une foudre

Compatible avec haute densité de poussières.

Mais processus inefficace car la section d'une foudre est très petite (~100 km)

Pourquoi un délai?



Key: ● Fine metal grain
○ Fine silicate grain
○ Silicate chondrule precursor



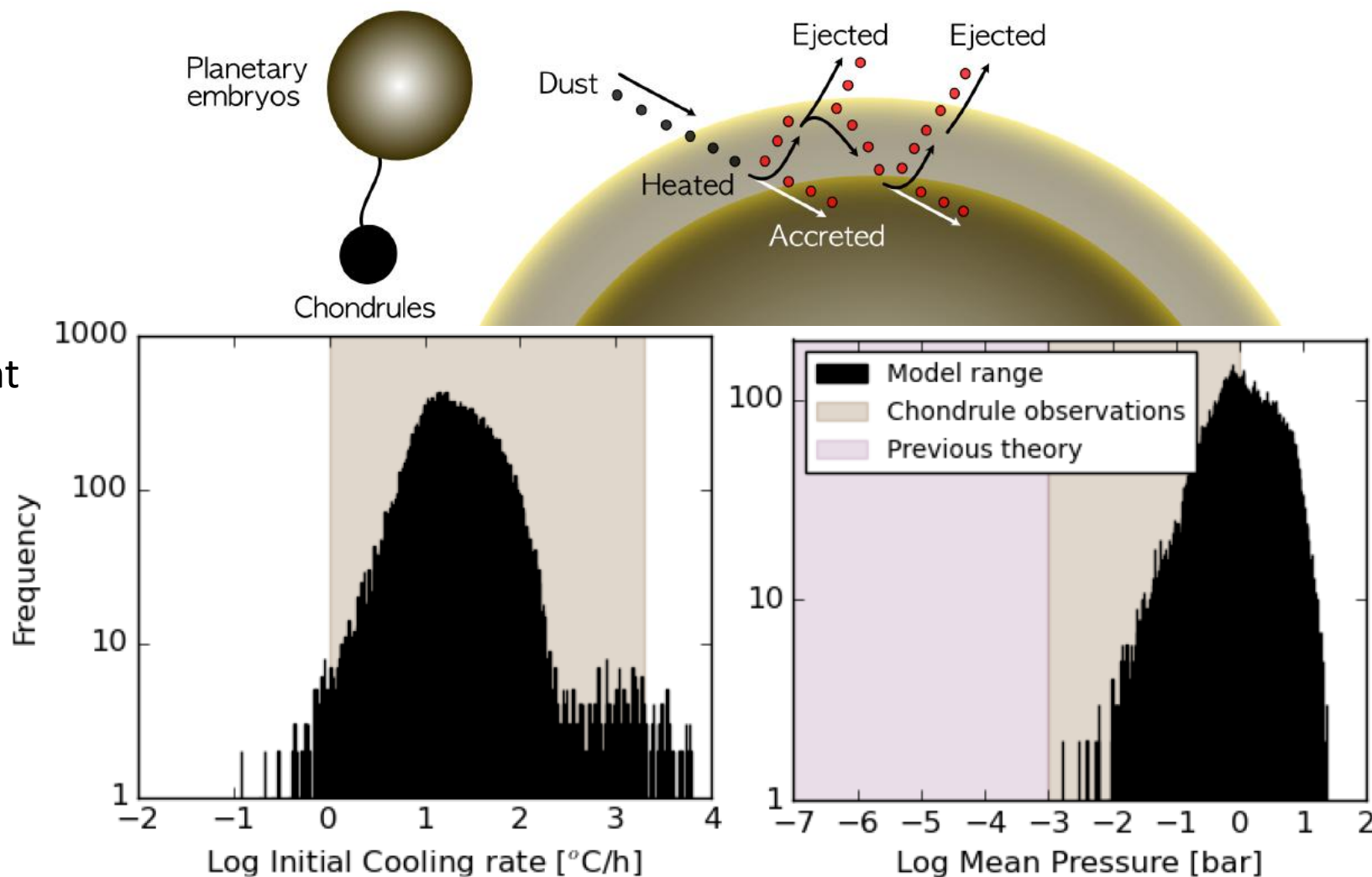
La formation des chondres: IV) passage dans l'atmosphère des protoplanètes

Ali-Dib et Walton, 2025:

Compatible avec:

- haute pression,
- délais des chondres,
- temps de refroidissement

Combien de protoplanètes
“favorables”?





A retenir

- Les chondres sont des petites billes formées par la cristallisation de liquides silicatés issus de la fusion d'un grain précurseur
- Abondants dans toutes les chondrites, particulièrement celles non-carbonées
- Leur formation témoigne l'existence de sursauts de température dans le disque très rapides, suivis d'un refroidissement de 100 à 1 °C/h
- La faible perte d'éléments volatils comme le Na implique que les chondres se forment dans un environnement de haute densité, soit en poussière ou en gaz.
- La formation des chondres a démarré ~ 1 Ma après celle des CAIs; elle a perduré jusqu'à la fin de la vie du disque protoplanétaire
- Il n'est pas clair si les chondres d'une même météorite se sont formés au même moment ou pas
- Il pourrait y avoir un lien entre chondres et matrice d'une même météorite
- Il n'existe pas un modèle généralement accepté sur la formation des chondres. Le plus probable est le passage de grains précurseurs dans des ondes de chocs générées soit par des protoplanètes sur des orbites excentriques, soit lors des collisions à haute vitesse entre planétésimaux riches en glace. Le passage dans les atmosphères des protoplanètes est aussi un mécanisme possible.
- Quoi qu'il soit le mécanisme de leur formation, les chondres témoignent d'une histoire complexe de la poussière (voir séminaire)