



Leçon N. 8 – 9 Décembre 2025

Alessandro
MORBIDELLI

Chaire

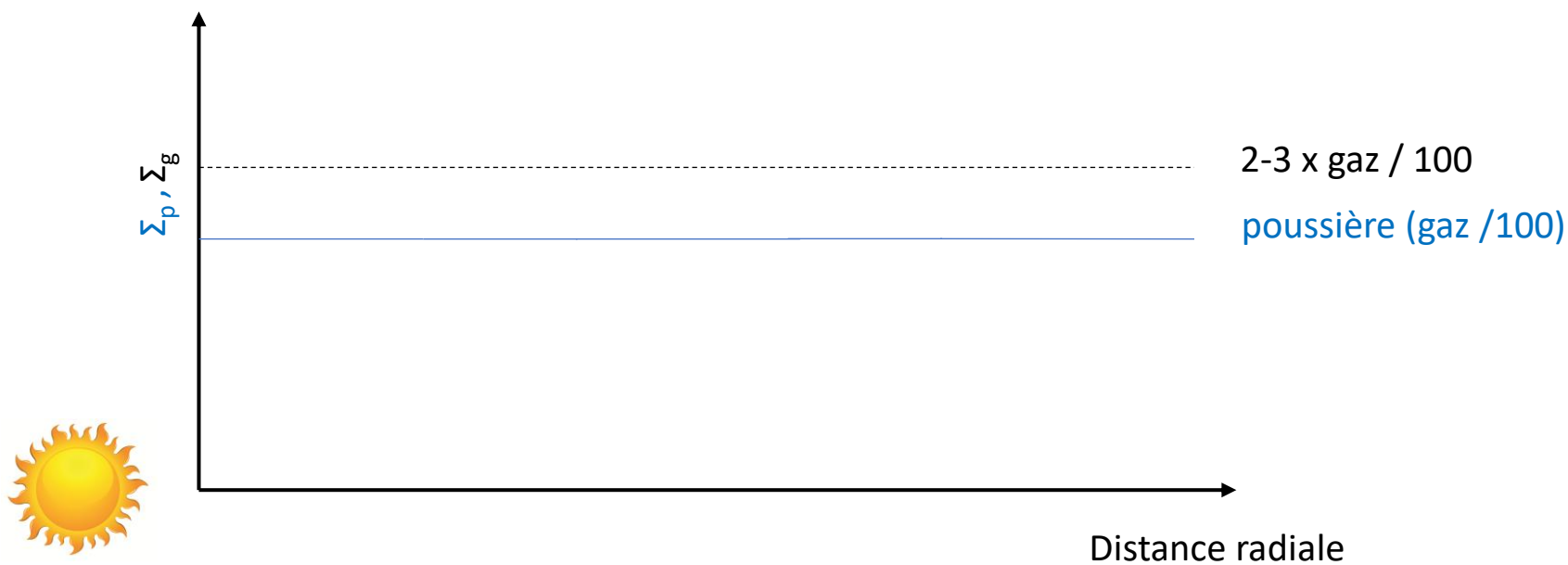
Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

***Une vision globale (partielle) de l'évolution initiale
du Système Solaire interne***



Conditions conduisant à la formation de planétésimaux

L'instabilité de courant requière que $\Sigma_p > 2-3 \times \Sigma_g / 100$, $\Sigma_g / 100$ étant la valeur typique dans un disque de composition solaire.



La formation de planétésimaux nécessite donc au préalable l'accumulation de poussières à des rayons donnés

Quels mécanismes pour cette accumulation?



Sur l'accumulation préalable des poussières

1) Accumulation par freinage dans la partie interne du disque

On s'attend en général à une accumulation de la matière solide dans la partie interne du disque

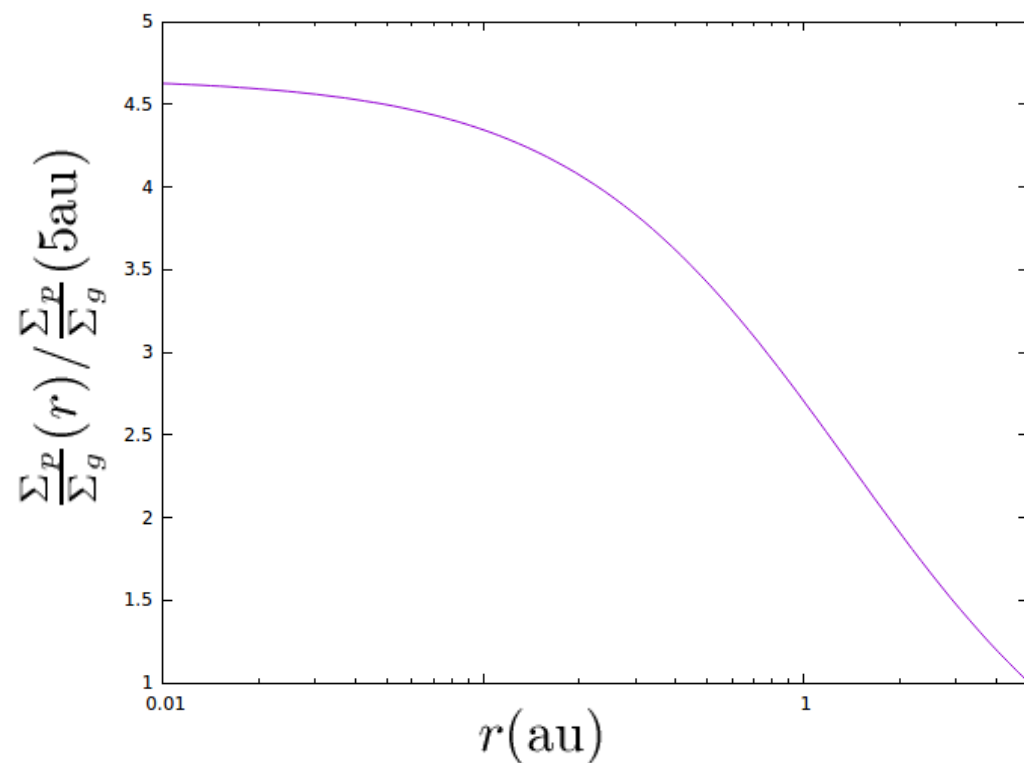
$$\Sigma_p = F_p / (2\pi r v_r) , \quad \Sigma_g = \dot{M} / (2\pi r u_r)$$

$$\frac{\Sigma_p}{\Sigma_g} = \frac{F_p}{\dot{M}} \frac{u_r}{v_r} \propto \frac{1}{r}$$

$$v_r = -2 \frac{\tau_f}{\tau_f^2 + 1} \eta v_K + \frac{u_r}{\tau_f^2 + 1}$$

η = constante

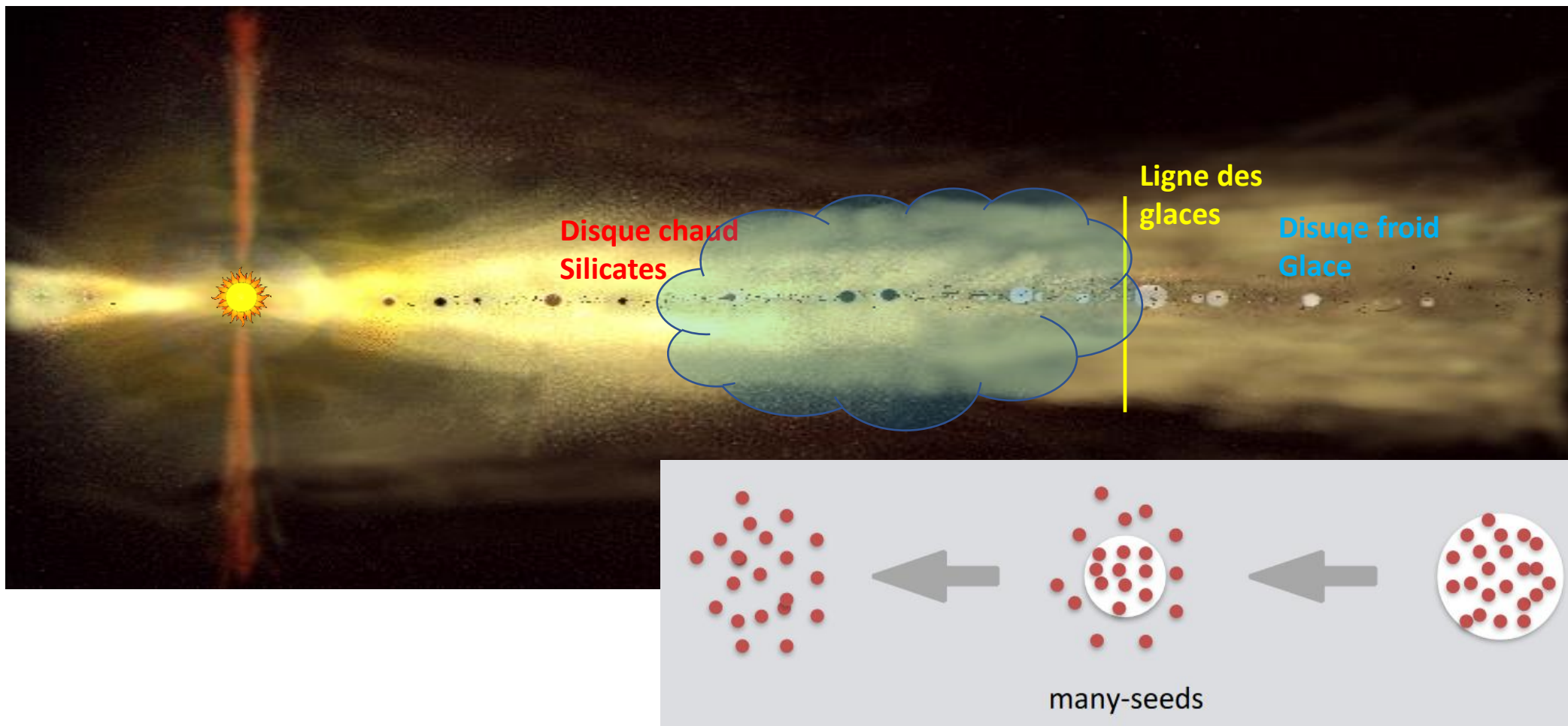
$$\text{si } H \propto r \quad \left\{ \begin{array}{l} \tau_f = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{v_{frag}}{c_s} \right)^2 \propto r \\ u_r = -\frac{3}{2} \frac{\nu}{r} = -\frac{3}{2} \alpha \left(\frac{H}{r} \right)^2 v_K \end{array} \right.$$





Sur l'accumulation préalable des poussières

2) Recondensation et augmentation locale de la matière solide

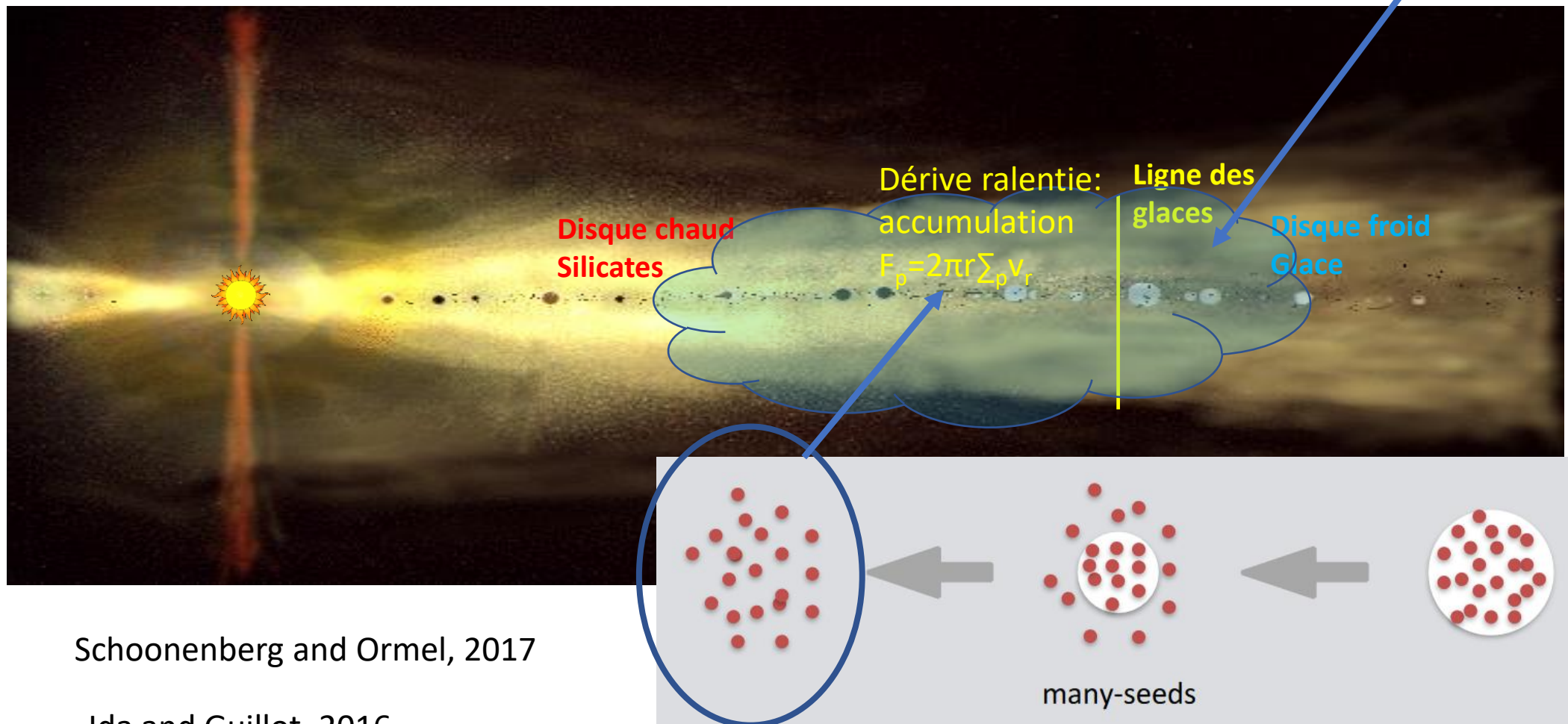




Sur l'accumulation préalable des poussières

2) Recondensation et augmentation locale de la matière solide

3) Fragmentation et freinage



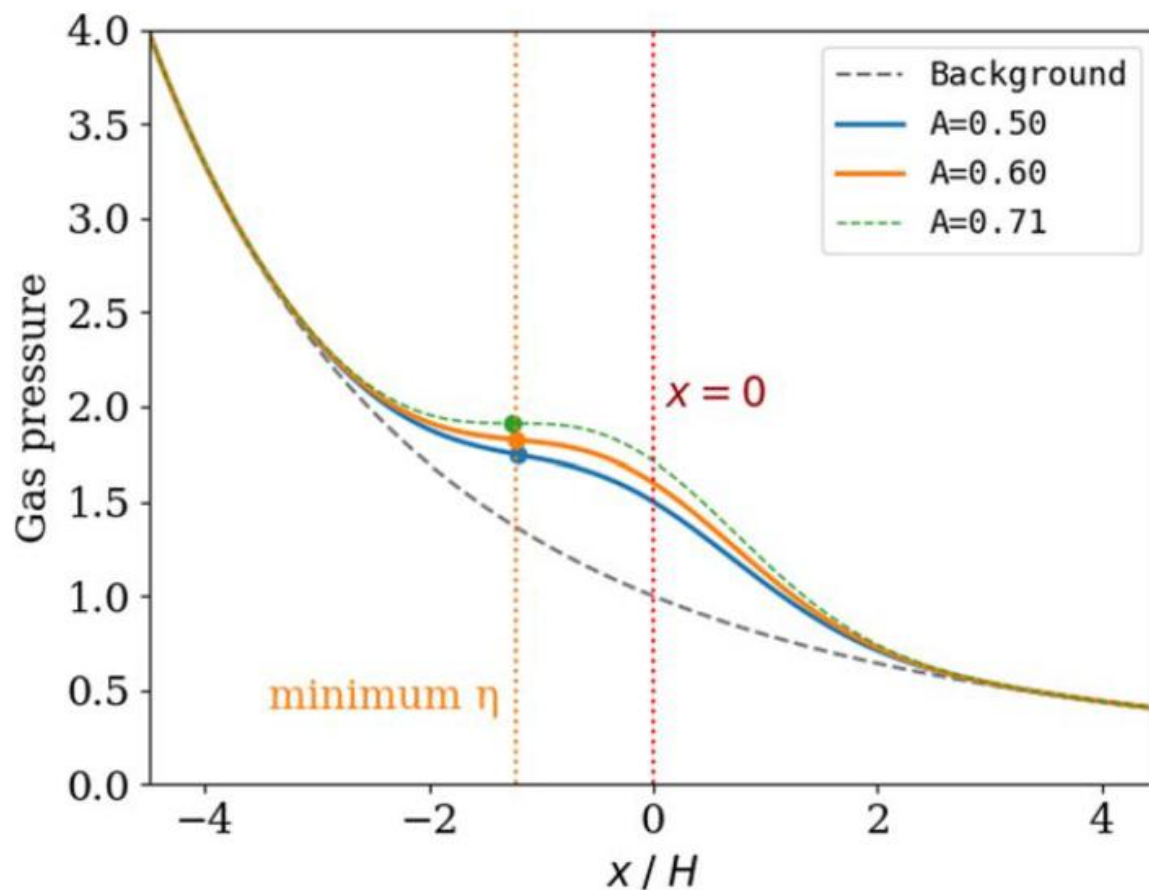
Schoonenberg and Ormel, 2017

Ida and Guillot, 2016



Sur l'accumulation préalable de poussières

4) Reduction du paramètre η



La diminution de la valeur de η augmente le rapport poussière/gaz

$$\eta = -\frac{1}{2} \left(\frac{H}{r} \right)^2 \frac{d \log P}{d \log r}$$

$$v_r = -2 \frac{\tau_f}{\tau_f^2 + 1} \eta v_K$$

$$\Sigma_p = F_p / (2\pi r v_r)$$

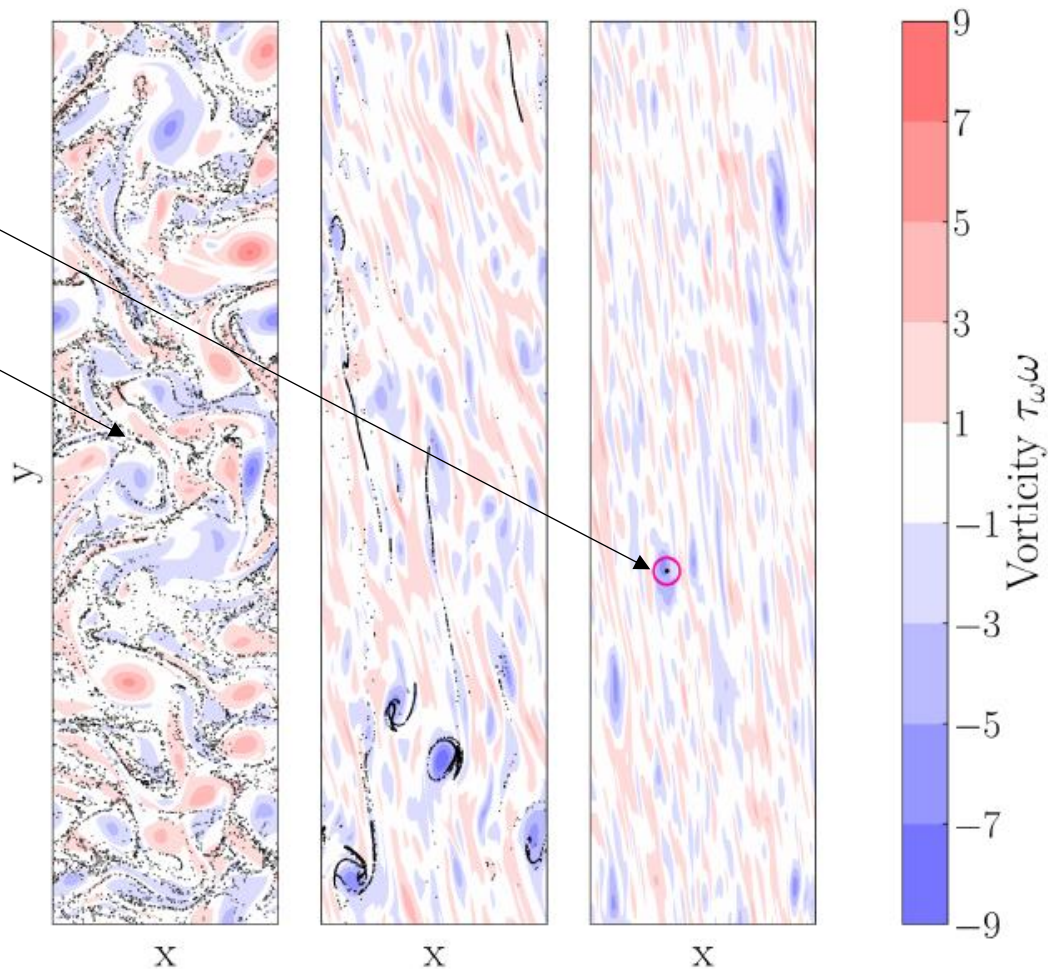


Sur l'accumulation préalables de poussières

5) Concentration turbulente

Barge et Sommeria, 1995

Hartlep and Cuzzi, 2020



Gerosa et al., 2023

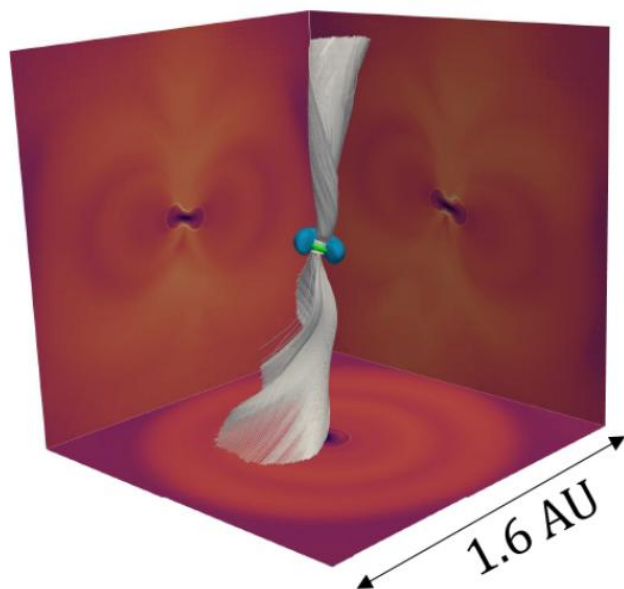


Tentative de modélisation de l'évolution initiale du Système solaire interne

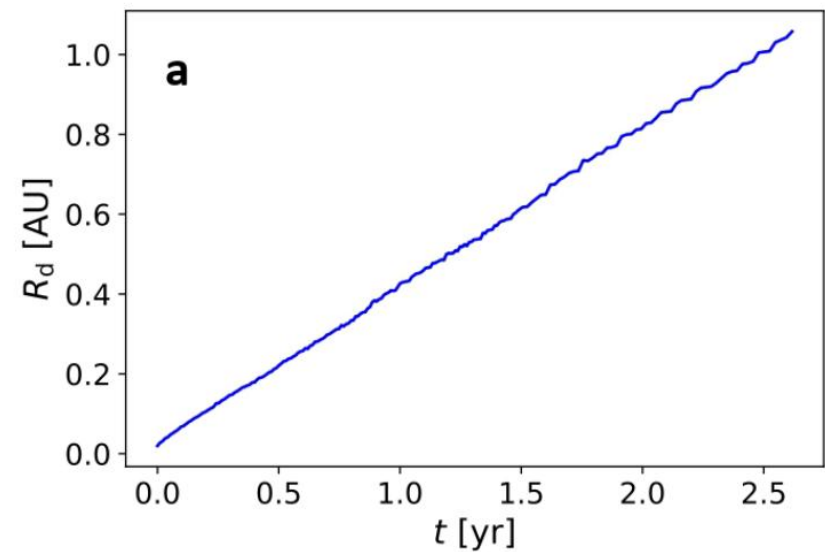
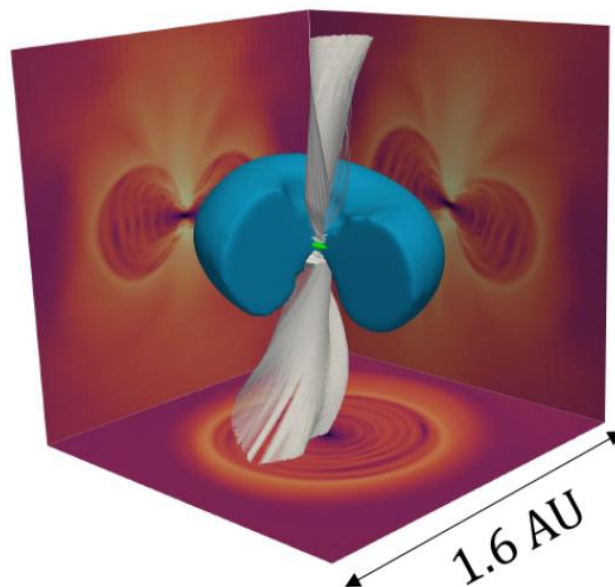
- En prenant en compte ce qu'on sait théoriquement sur l'évolution du gaz, des poussières et la formation des planétésimaux (voir cours N.7)
- En prenant en compte toutes les contraintes fournies par les météorites (cours 3, 4, 5, 6)
- En évitant dans un premier temps d'invoquer l'hypothèse ad-hoc d'existence de maxima de pression, car celle-ci est mal contrainte

Formation et expansion du disque protosolaire

$t = 0.10$ (yr)



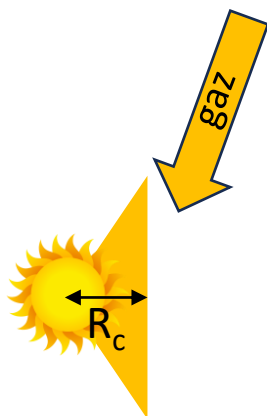
$t = 1.00$ (yr)



Ahmad et al. (2024)



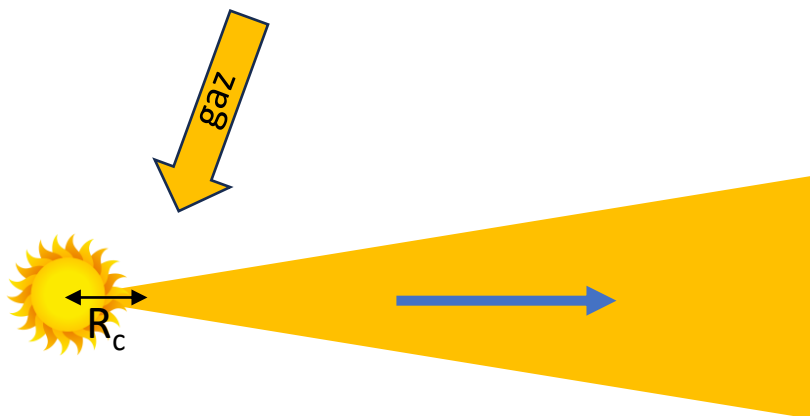
Esquisse du modèle



Accrétion du gaz depuis le nuage moléculaire à proximité de l'étoile (distance R_c)



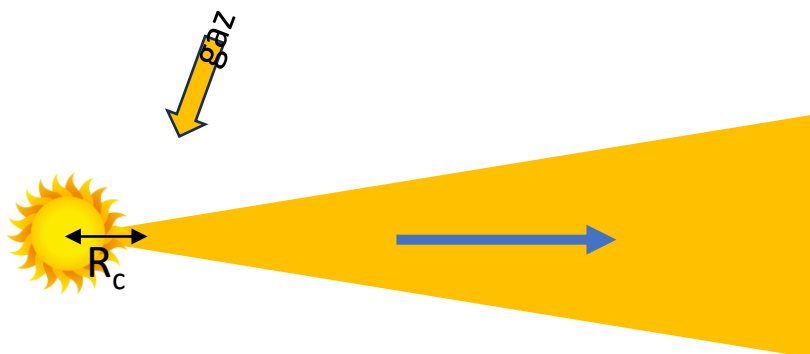
Esquisse du modèle



Étalement visqueux du disque



Esquisse du modèle



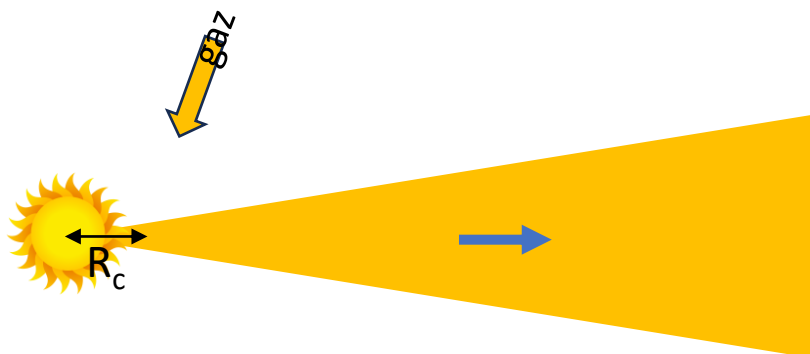
$$\dot{M}_d \sim e^{-t/\tau}$$

$$\alpha \sim \alpha_0 e^{-t/\tau} + 10^{-4}$$

Diminution dans le temps du taux de chute de gaz sur le disque et conséquente diminution de la viscosité du disque



Esquisse du modèle



$$\dot{M}_d \sim e^{-t/\tau}$$

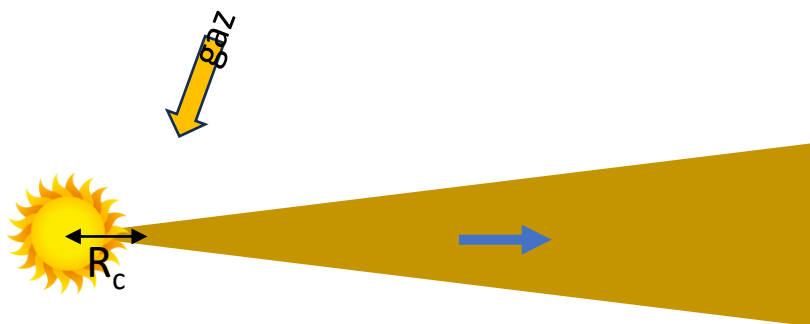
$$\alpha \sim \alpha_0 e^{-t/\tau} + 10^{-4}$$

Conséquences:

1) Ralentissement dans l'étalement radial du disque



Esquisse du modèle



$$\dot{M}_d \sim e^{-t/\tau}$$

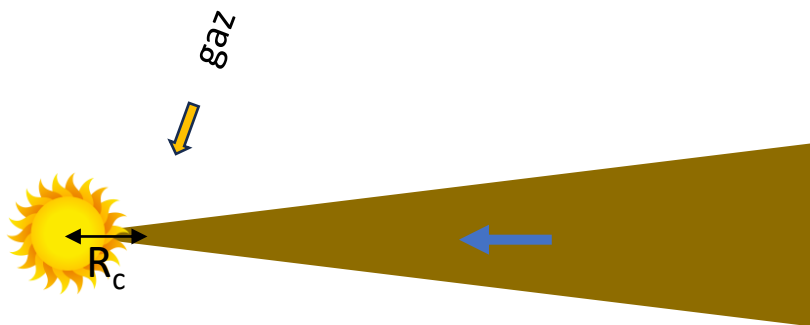
$$\alpha \sim \alpha_0 e^{-t/\tau} + 10^{-4}$$

Conséquences:

- 1) Ralentissement dans l'étalement radial du disque
- 2) Diminution de la température du disque (et de son épaisseur)



Esquisse du modèle



$$\dot{M}_d \sim e^{-t/\tau}$$

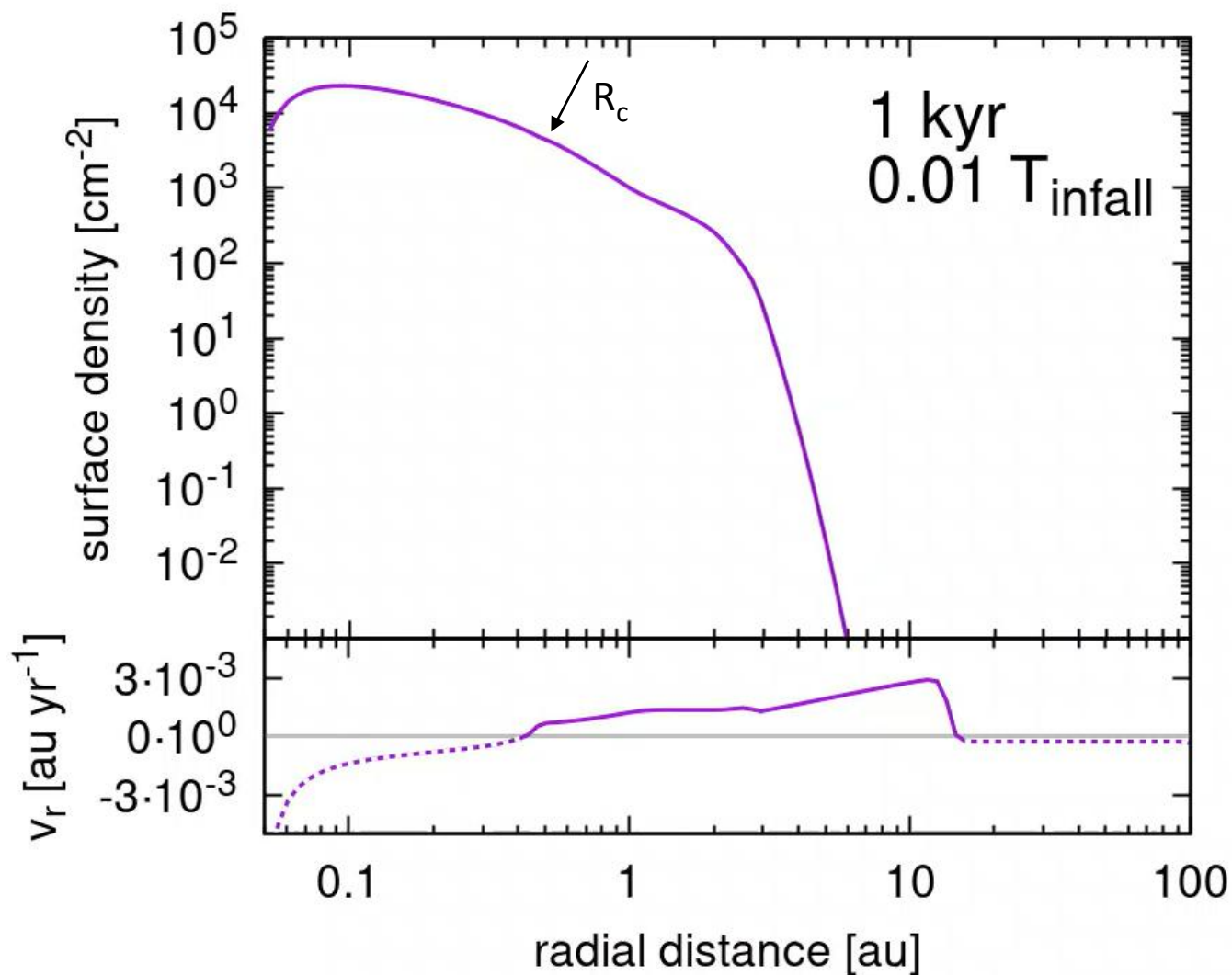
$$\alpha \sim \alpha_0 e^{-t/\tau} + 10^{-4}$$

Conséquences:

- 1) Ralentissement dans l'étalement radial du disque
- 2) Diminution de la température du disque (et de son épaisseur)
- 3) Évolution vers un disque d'accrétion (vitesse radiale du gaz négative)



Évolution de la composante gazeuse du disque



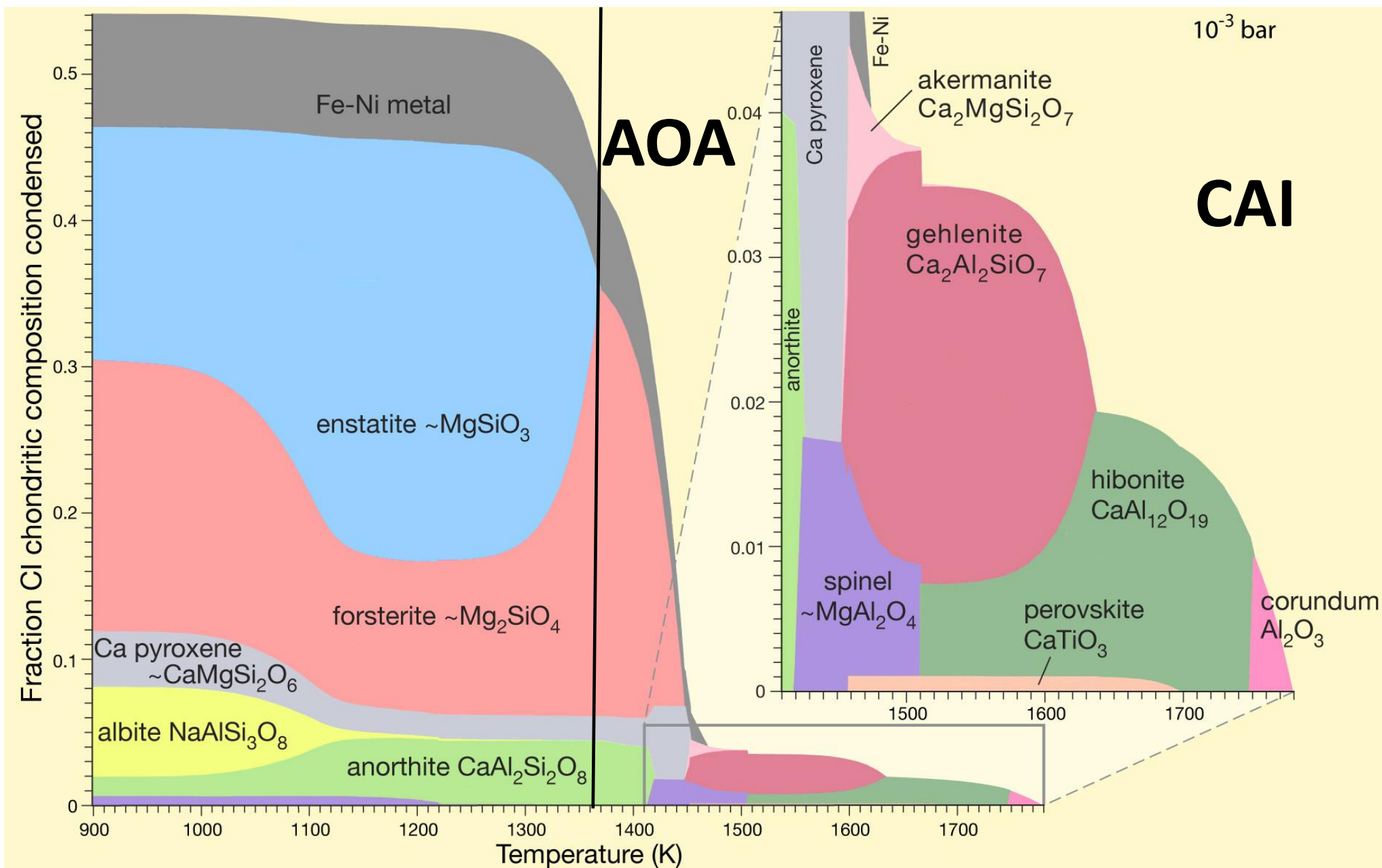
$$\dot{M}_d \sim e^{-t/\tau}$$
$$\alpha \sim \alpha_0 e^{-t/\tau} + 10^{-4}$$

$$T_{\text{infall}} = \tau = 100 \text{ Ky}$$

$$\alpha_0 = 0.01$$

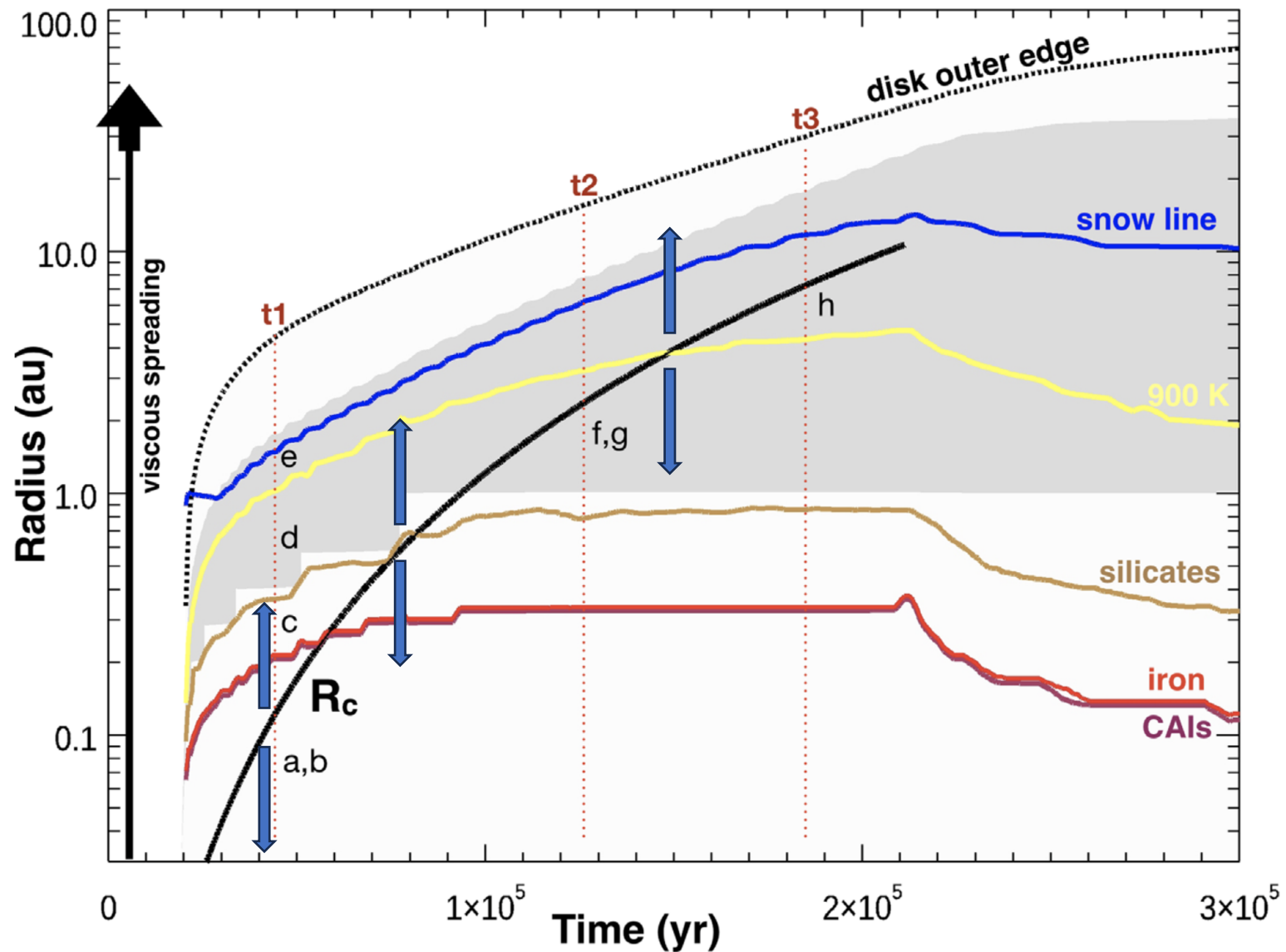


La séquence de condensation





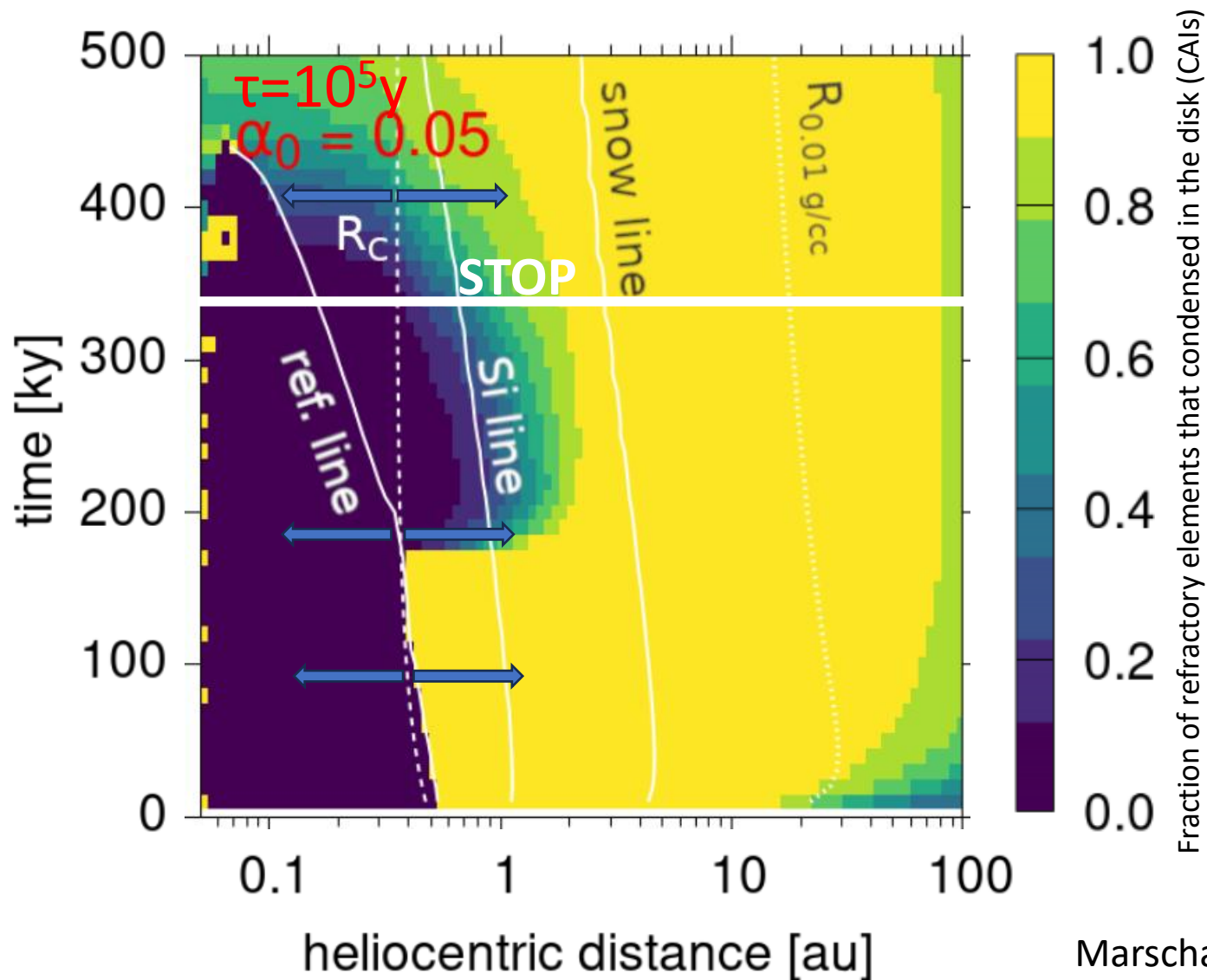
Évolution chimique des poussières pendant l'expansion



Pignatale et al., 2018



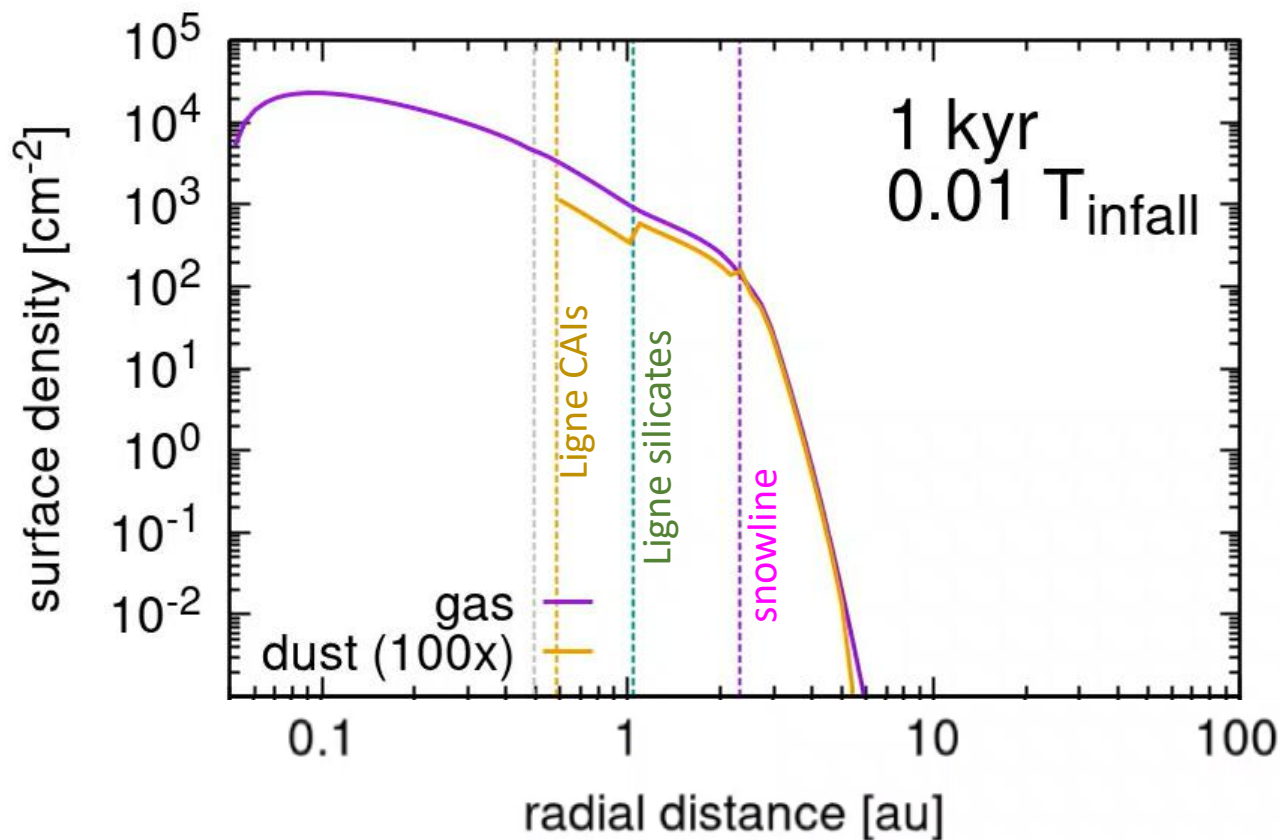
Formation et évolution des CAIs



Marschall and Morbidelli, 2023



Enrichissement du disque en poussières aux lignes de condensation



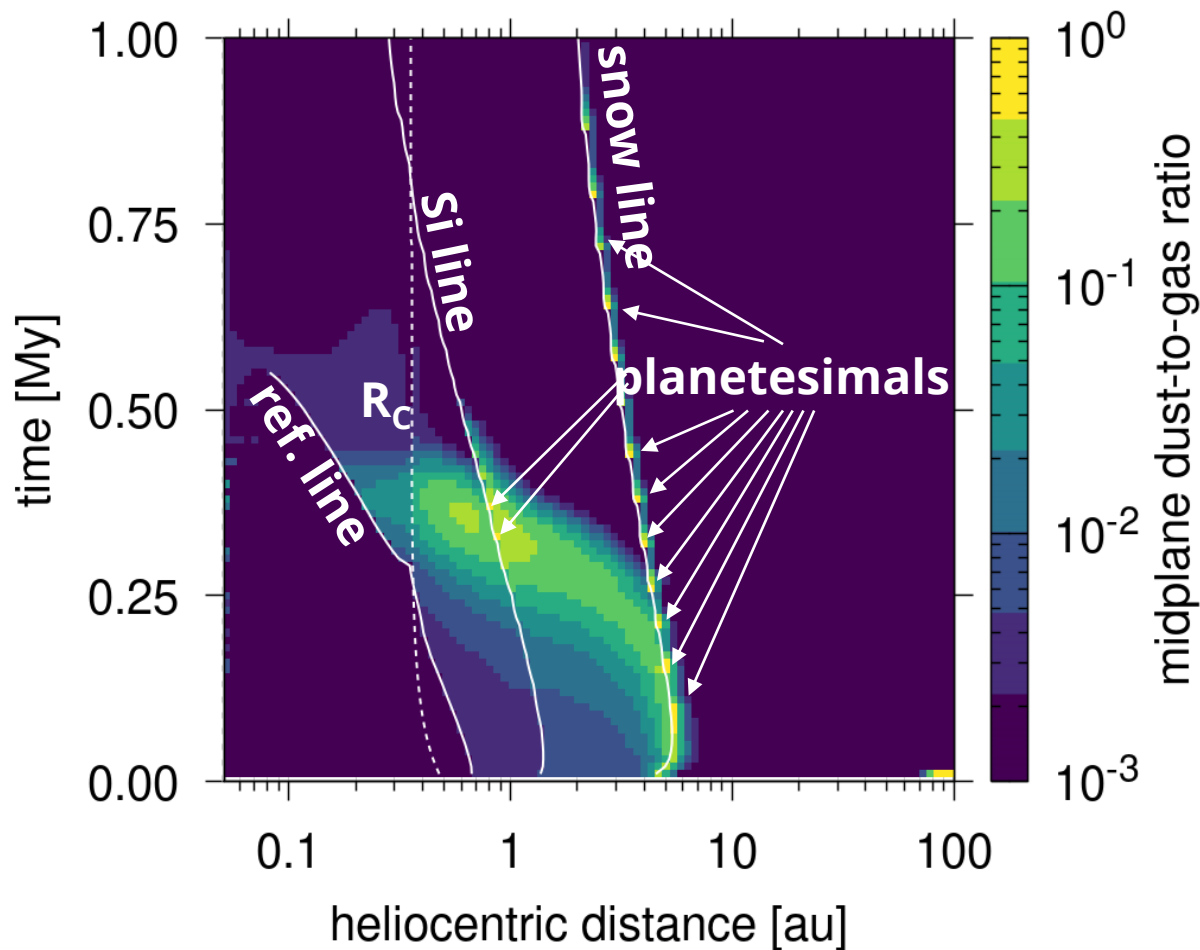
$$\dot{M}_d \sim e^{-t/\tau}$$
$$\alpha \sim \alpha_0 e^{-t/\tau} + 10^{-4}$$

$$T_{\text{infall}} = \tau = 100 \text{ Ky}$$

$$\alpha_0 = 0.01$$



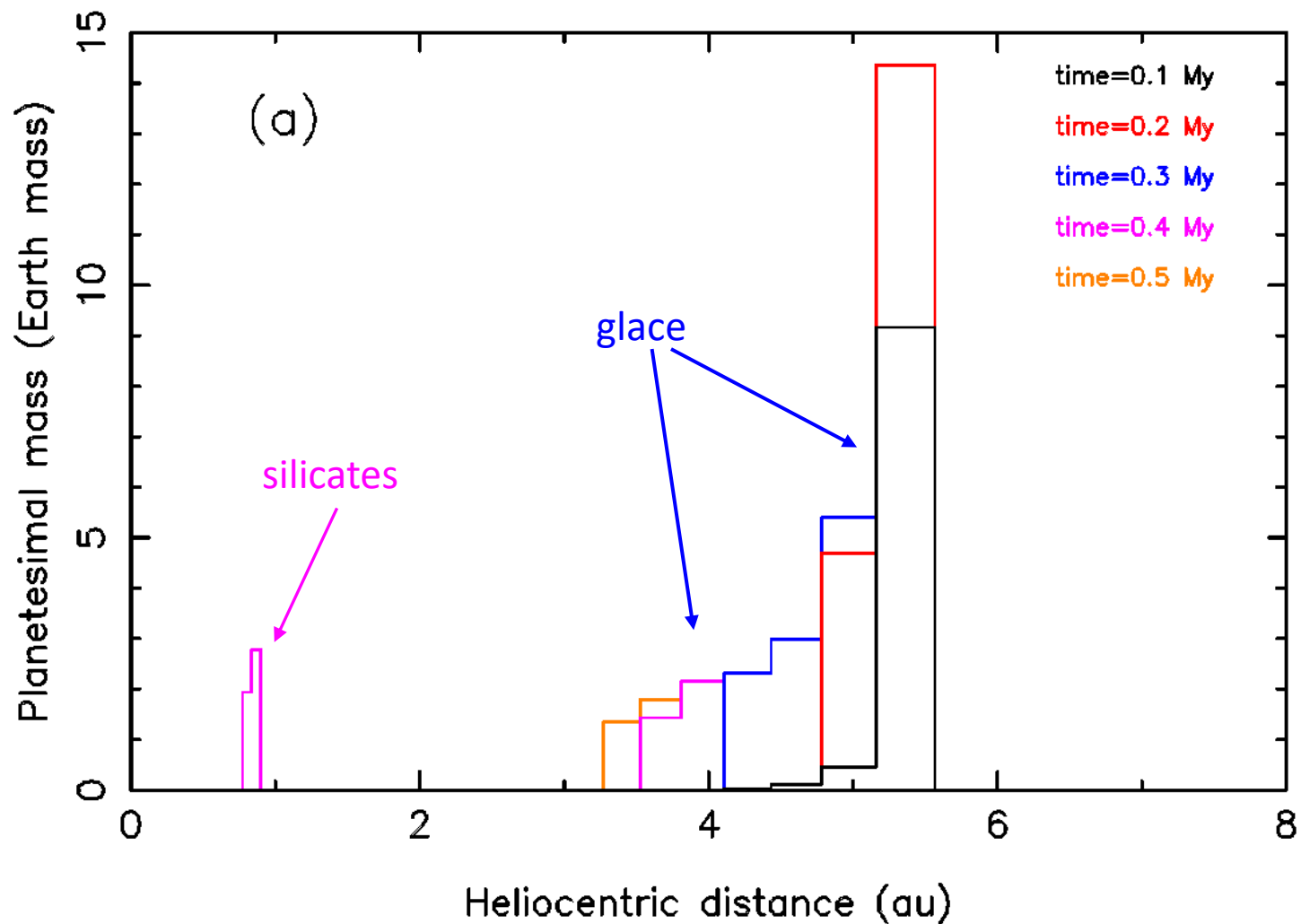
Formation des planétésimaux en deux anneaux



Limite à la croissance des poussières à
 $v_{\text{rel}} = 1\text{m/s}$ for rocky grains
 $v_{\text{rel}} = 10\text{ m/s}$ for “warm” icy grains
 $v_{\text{rel}} = 1\text{m/s}$ for “cold” icy grains
(Musioli and Wurm, 2019)



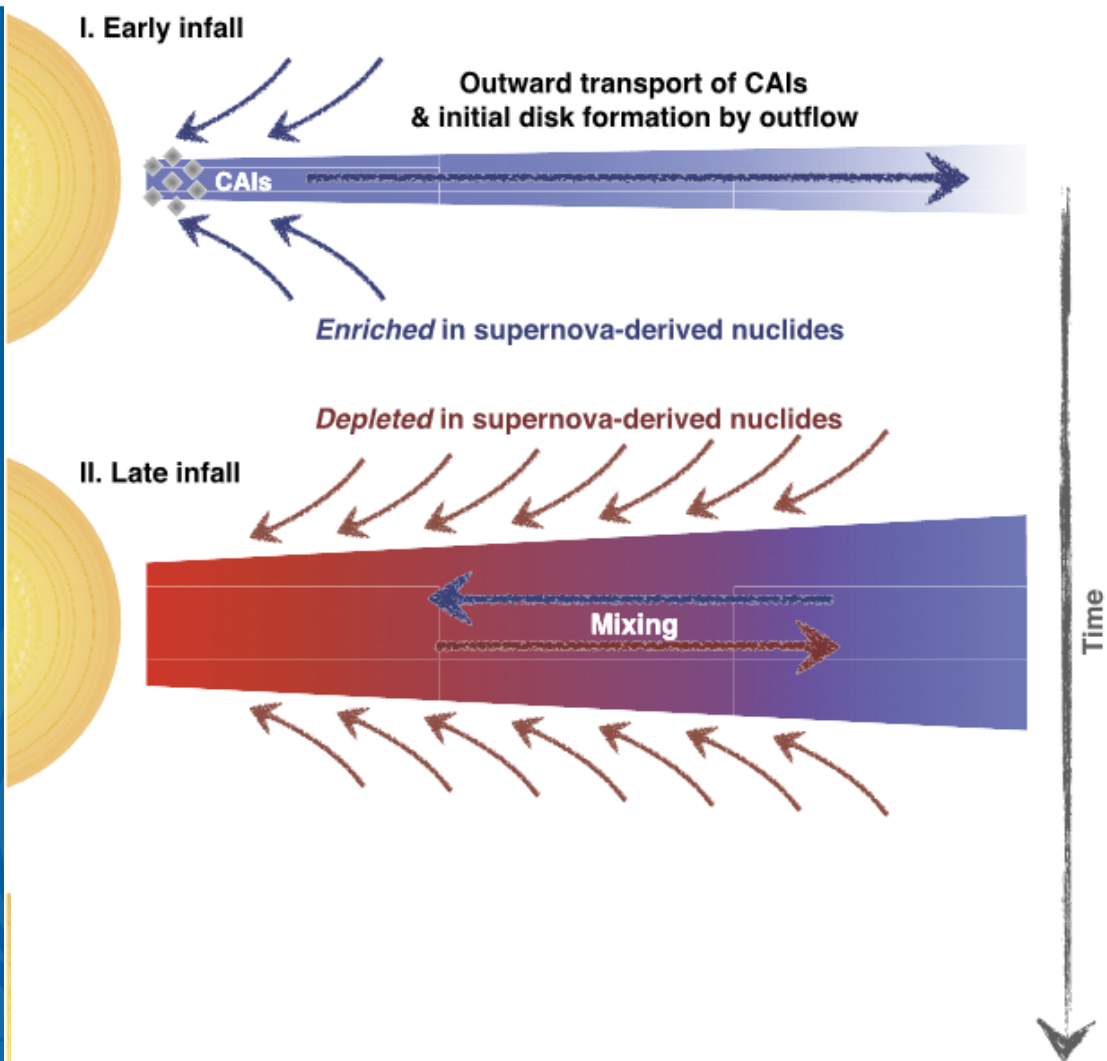
Formation des planétésimaux en deux anneaux





Dichotomie isotopique

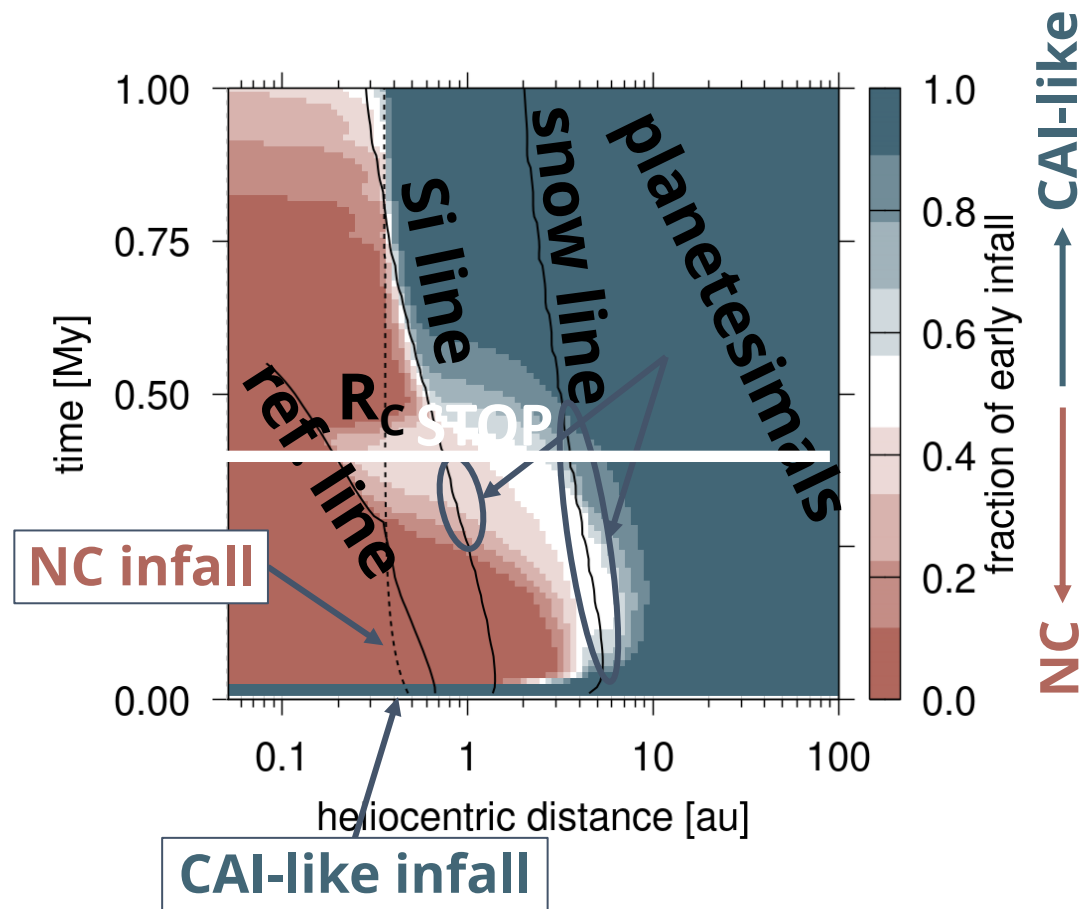
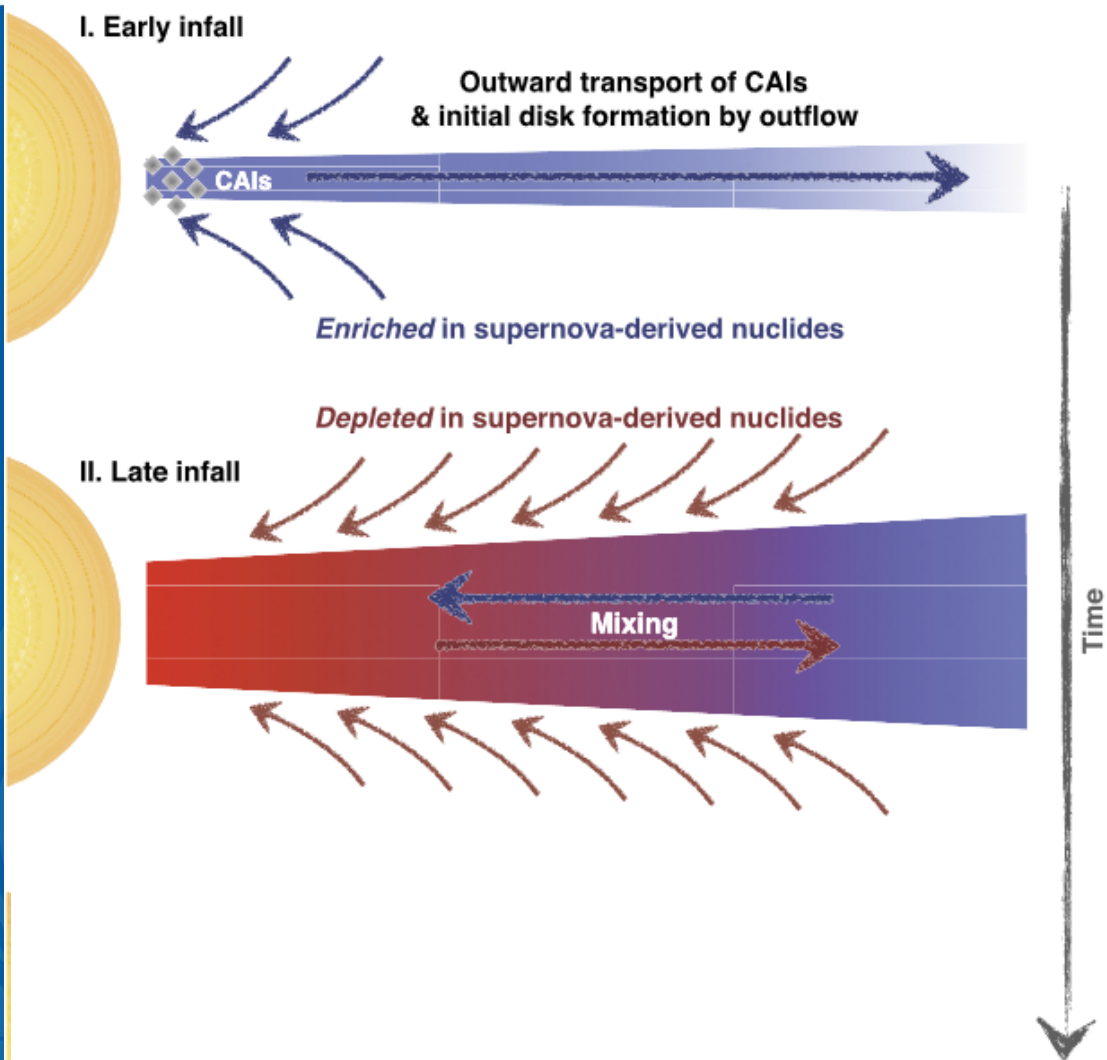
Nanne et al., 2019





Dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019



Morbidelli et al., NatAst, 2022

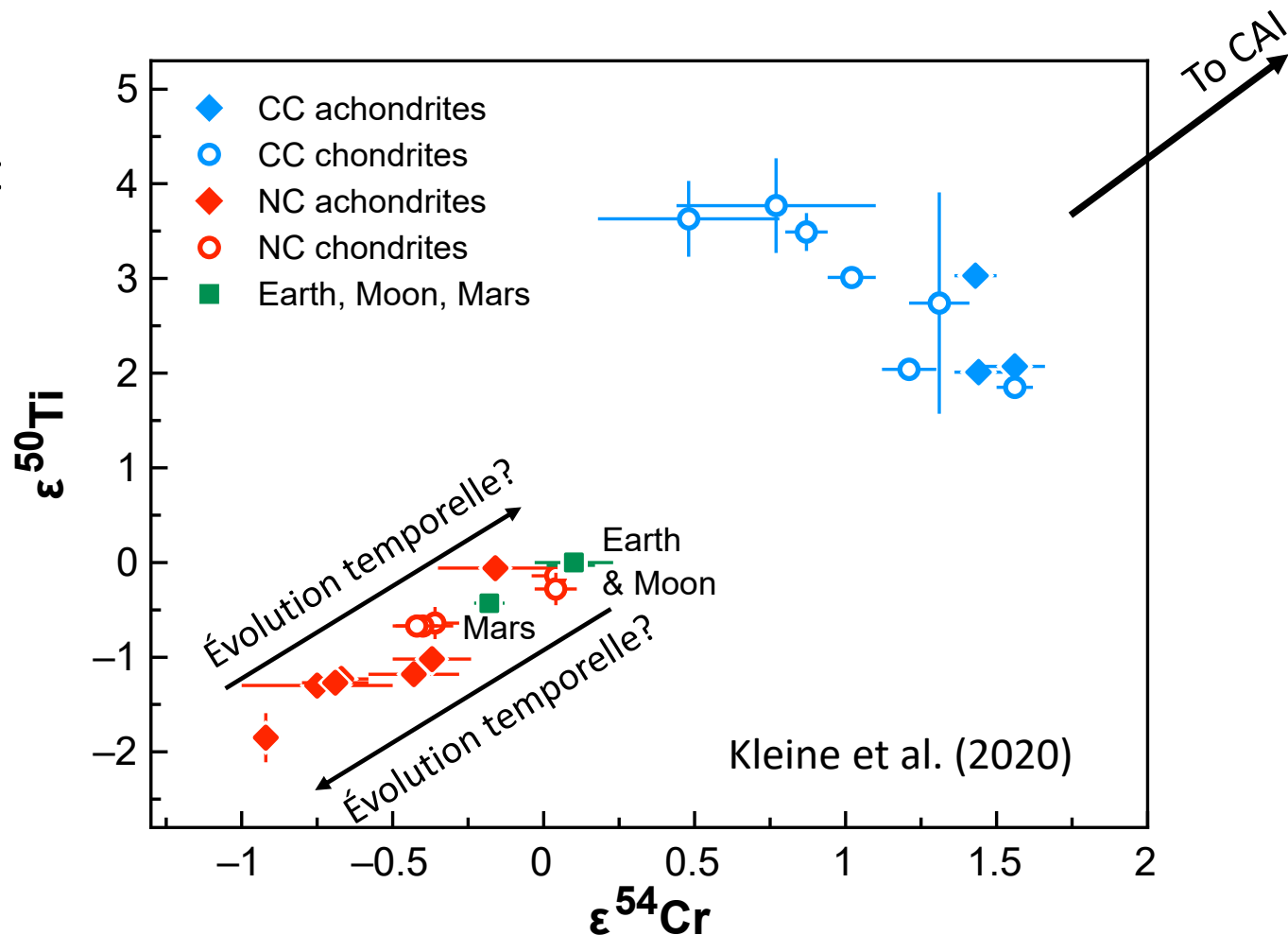


Problème N. 1

Les premiers planétésimaux de type NC (achondrites et précurseurs des planètes) couvrent un intervalle de valeurs isotopiques considérable

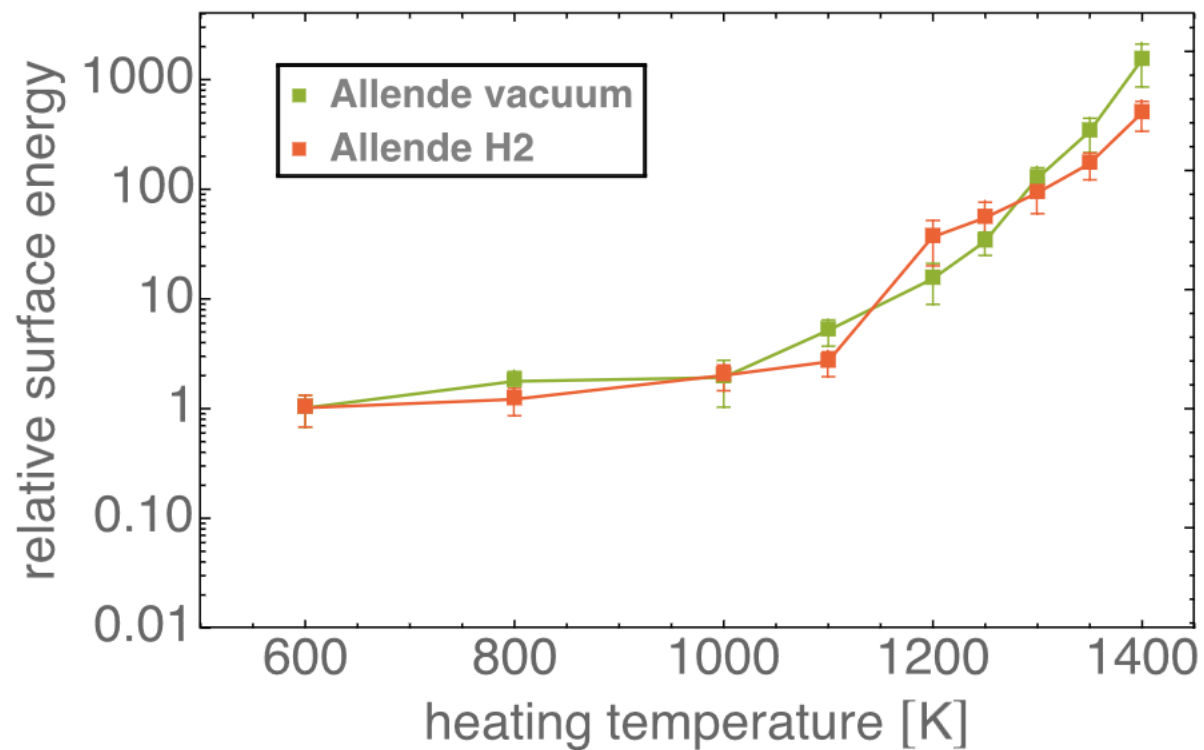
Ils ne peuvent pas s'être formés au même temps et au même endroit, comme dans notre modèle

Nécessité de former les planétésimaux NC à des temps différents





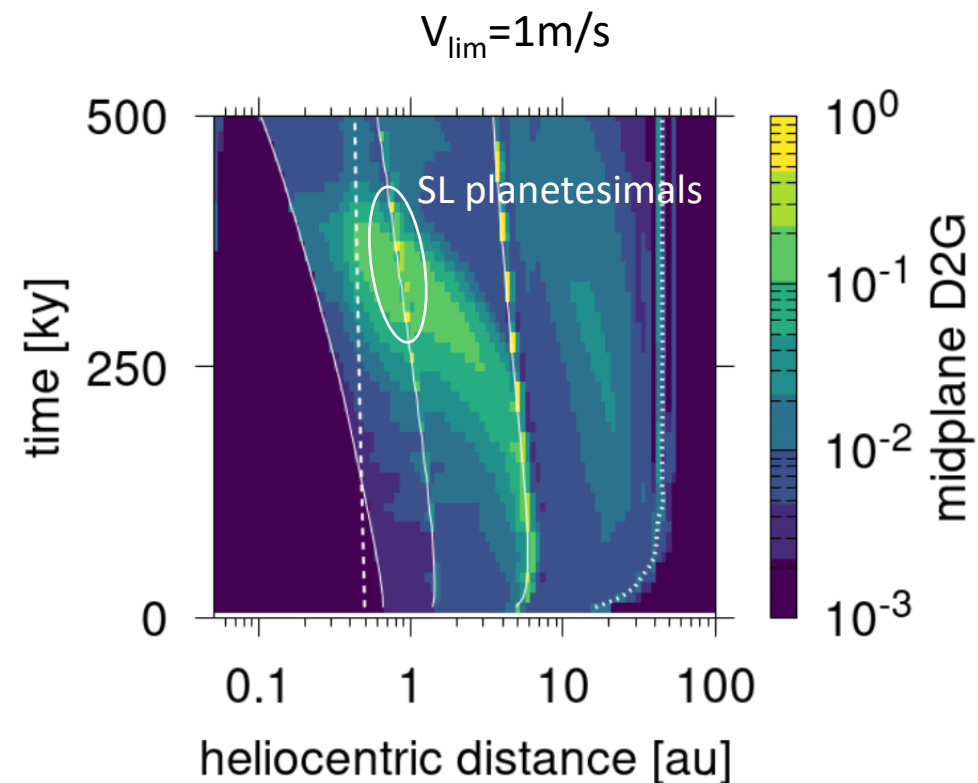
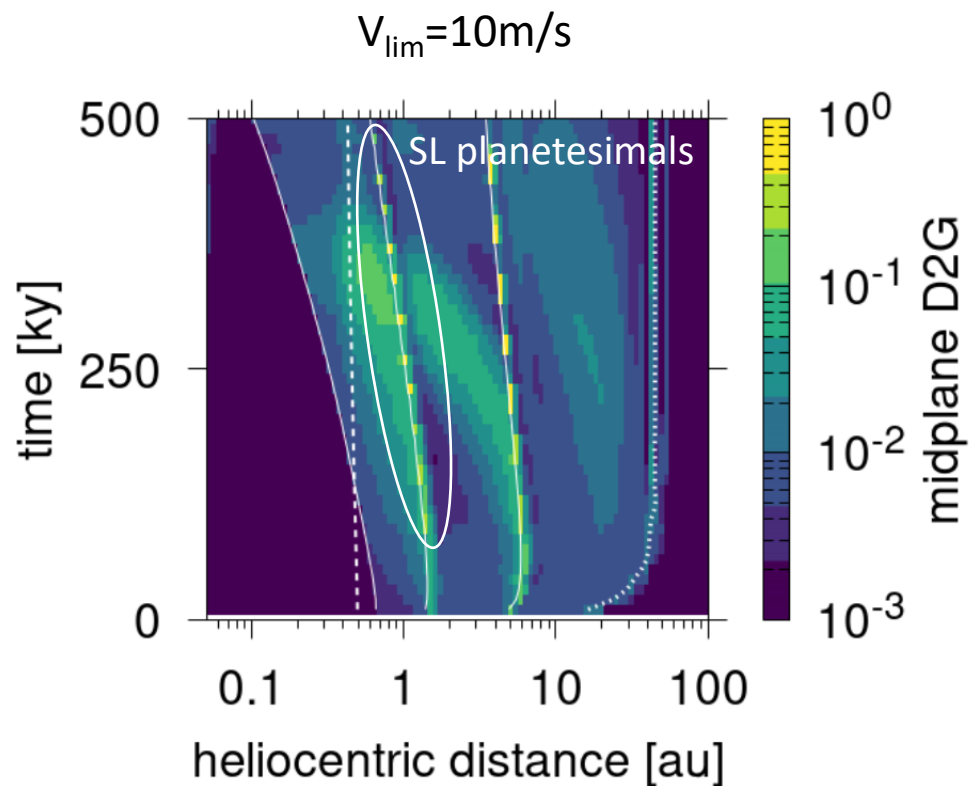
Collage des grains silicatés près de leur température de fusion



Pillich et al., 2023



Effet d'une augmentation de la limite de v_{rel} pour collage près de la ligne des silicates



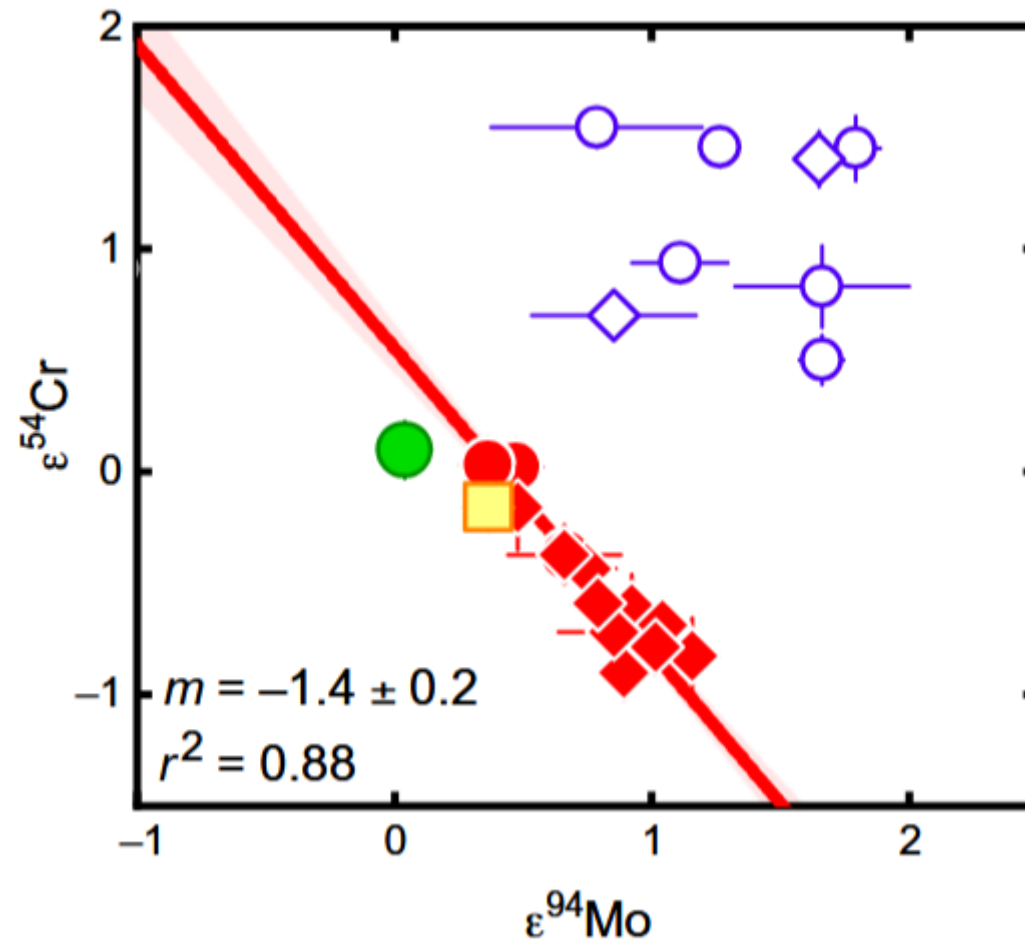


Problème N. 2

Pour chaque paire d'éléments avec anomalies isotopique nucléosynthétiques, les météorites de type NC tombent toujours sur une ligne.

Même quand on combine une anomalie issue des supernovæ (comme ^{54}Cr) avec une issue du processus s (comme ^{94}Mo)

Comment corréler processus indépendants?

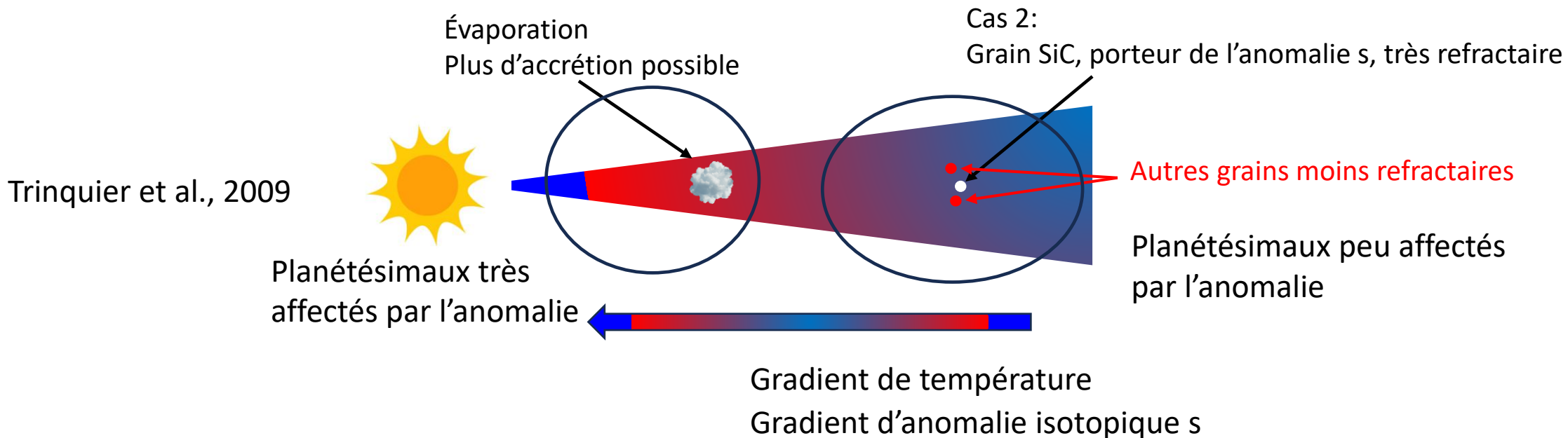


Burkhardt et al., 2021



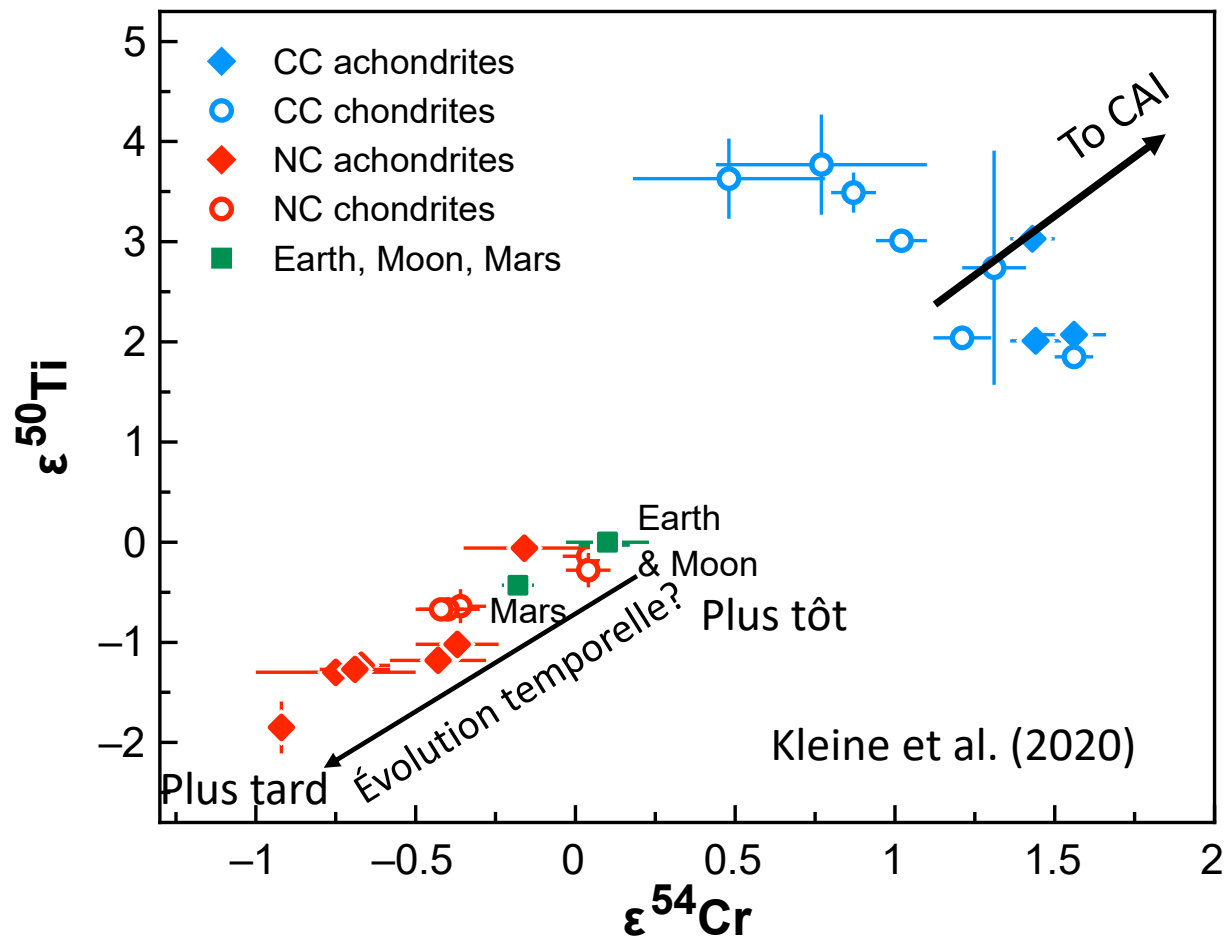
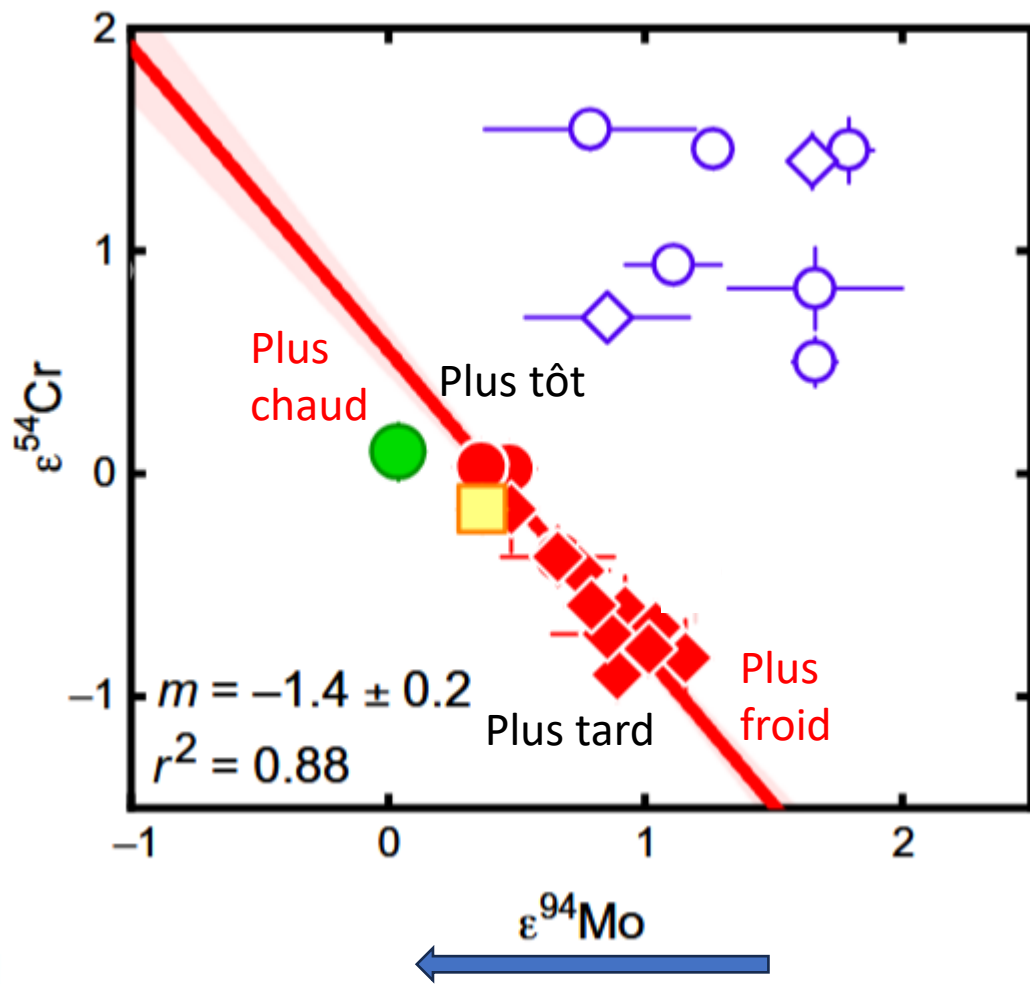
Fractionnement de la matière par réchauffement?

Ce scénario pourrait s'appliquer aux anomalies nucléosynthétiques produites dans le processus s





Une possible corrélation entre anomalies isotopiques s et du groupe du fer



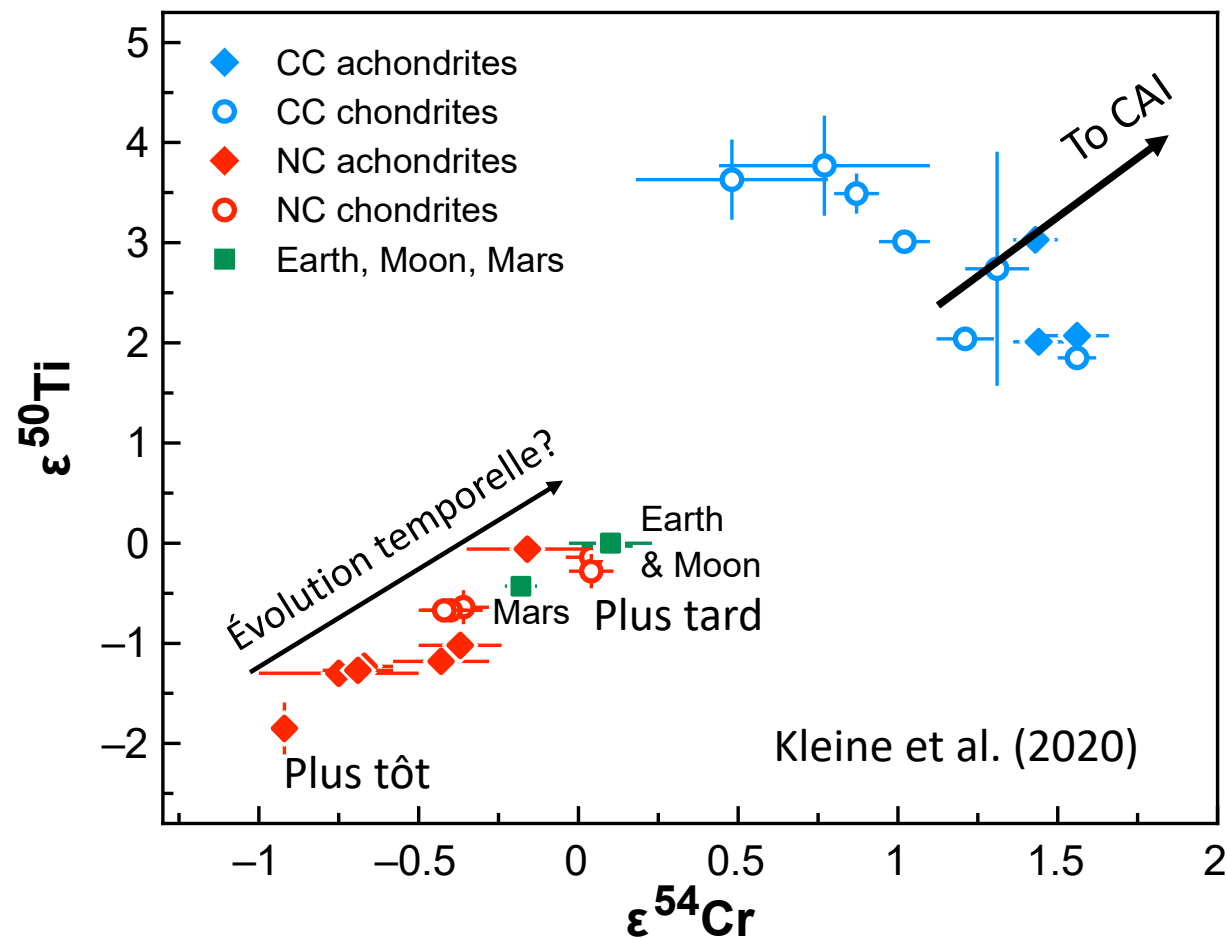
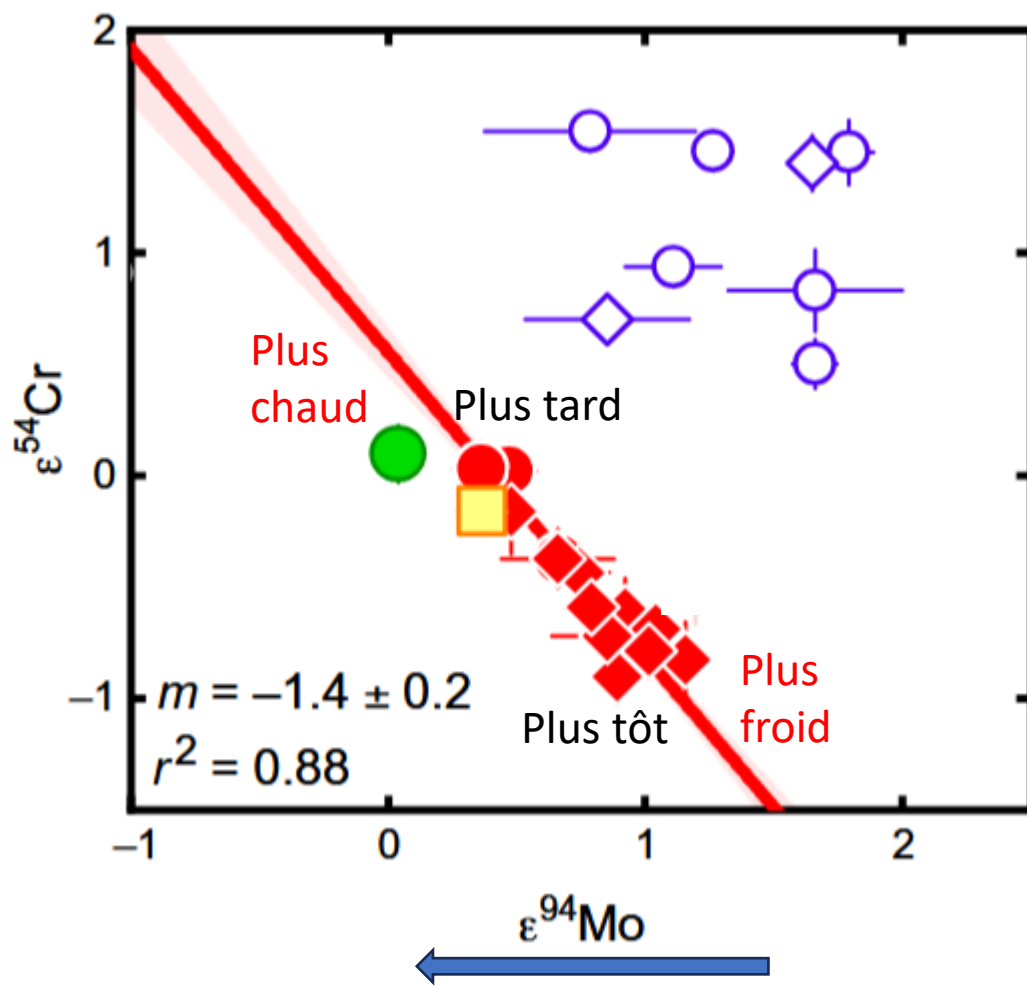
Enrichissement en processus s

Ça implique que les planétésimaux NC ne se forment pas tous à la ligne des silicates

Accrétion de matière NC pendant le refroidissement du disque?



Une possible corrélation entre anomalies isotopiques s et du groupe du fer



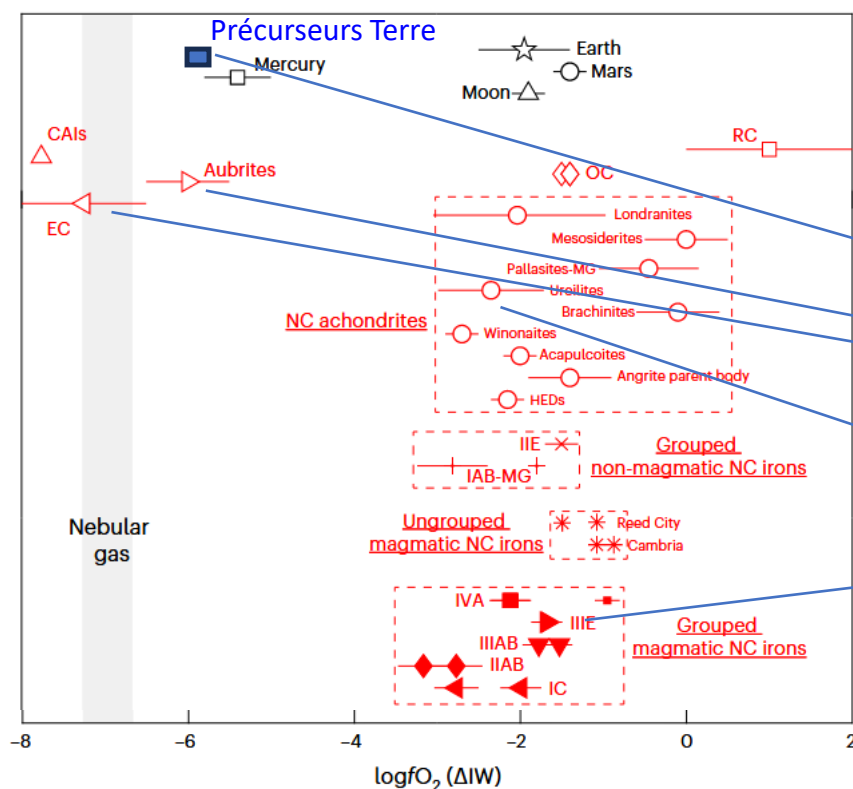
Enrichissement en processus s

Ça implique que les planétésimaux NC ne se forment pas tous à la ligne des silicates

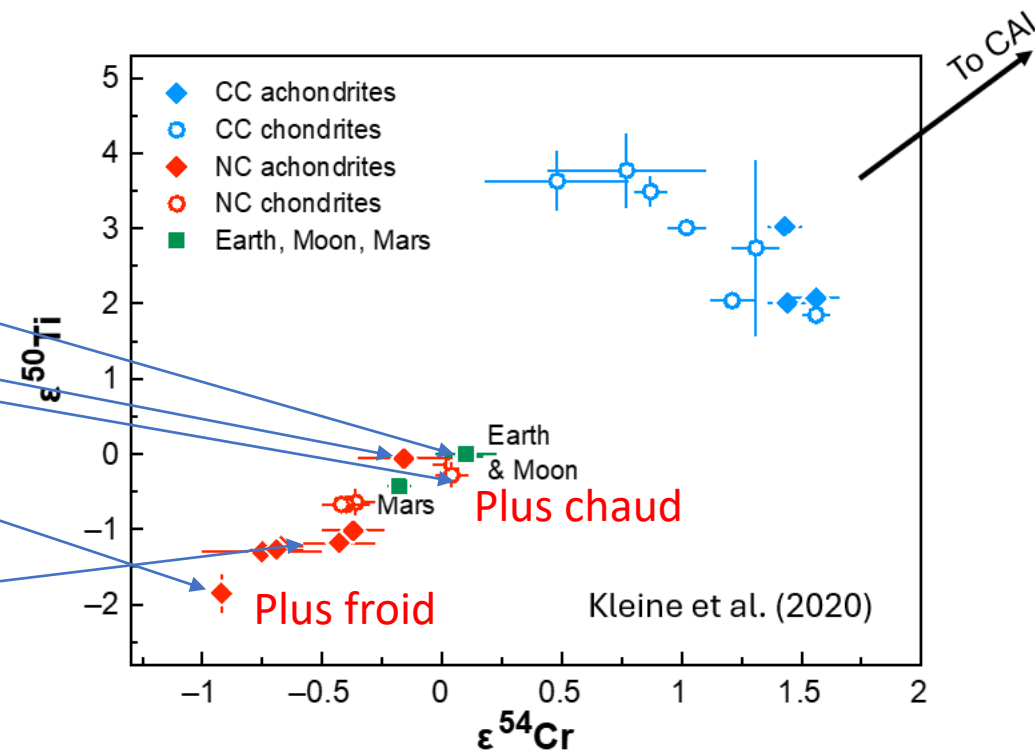
Accrétion démarre au-delà de la ligne des silicates et progresse vers cette ligne dans le temps?



Planétésimaux NC d'oxydation variable



Grewal et al. (2024)

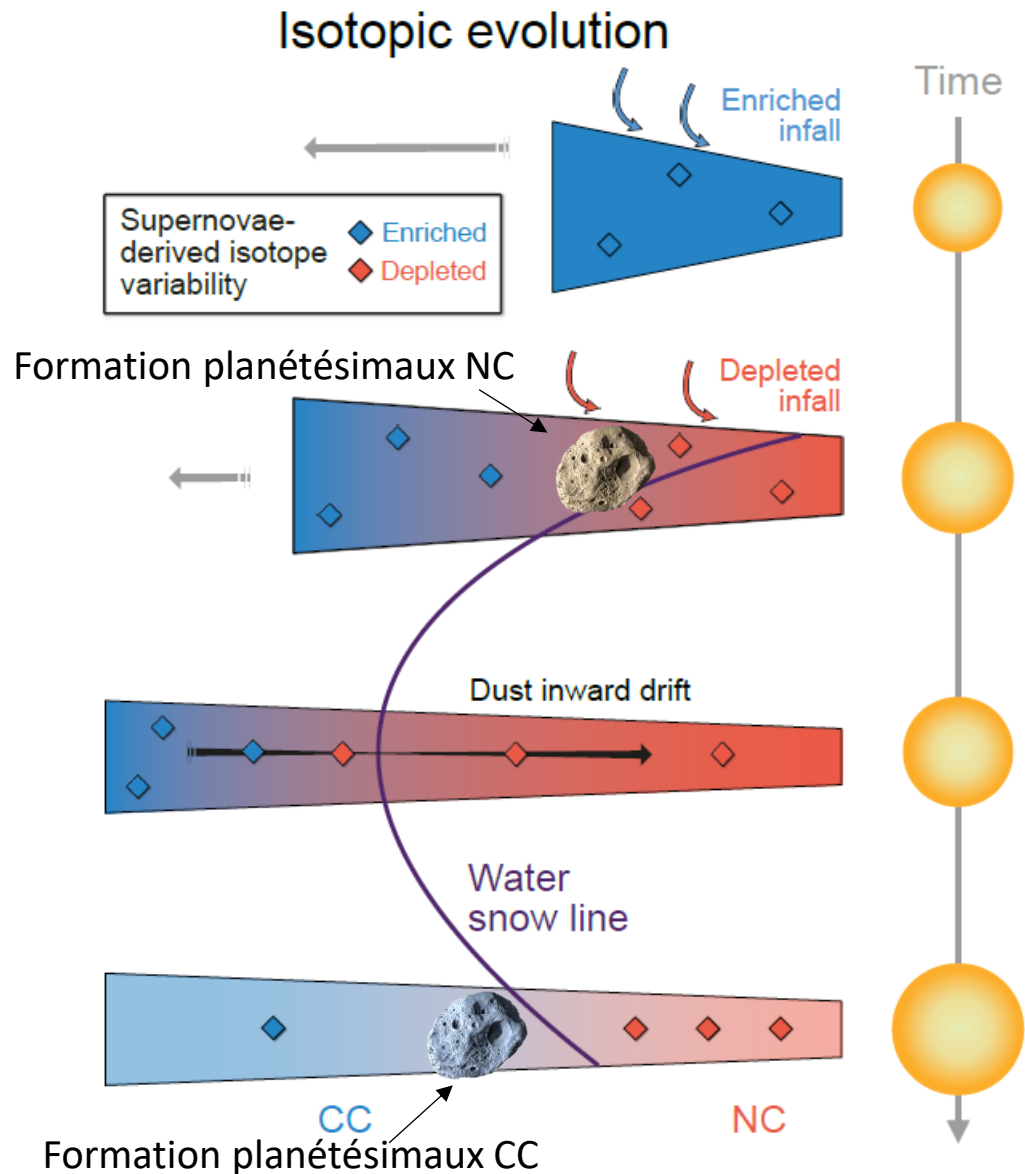


Kleine et al. (2020)

Est ce que les planétésimaux NC oxydés se sont formés au-delà de la ligne des glaces?



Une interprétation possible



Principes:

1. Les planétésimaux se forment seulement à la ligne des glaces
2. Le déplacement de la ligne des glaces et le mouvement relatif de la matière CC/NC produit la dichotomie isotopique

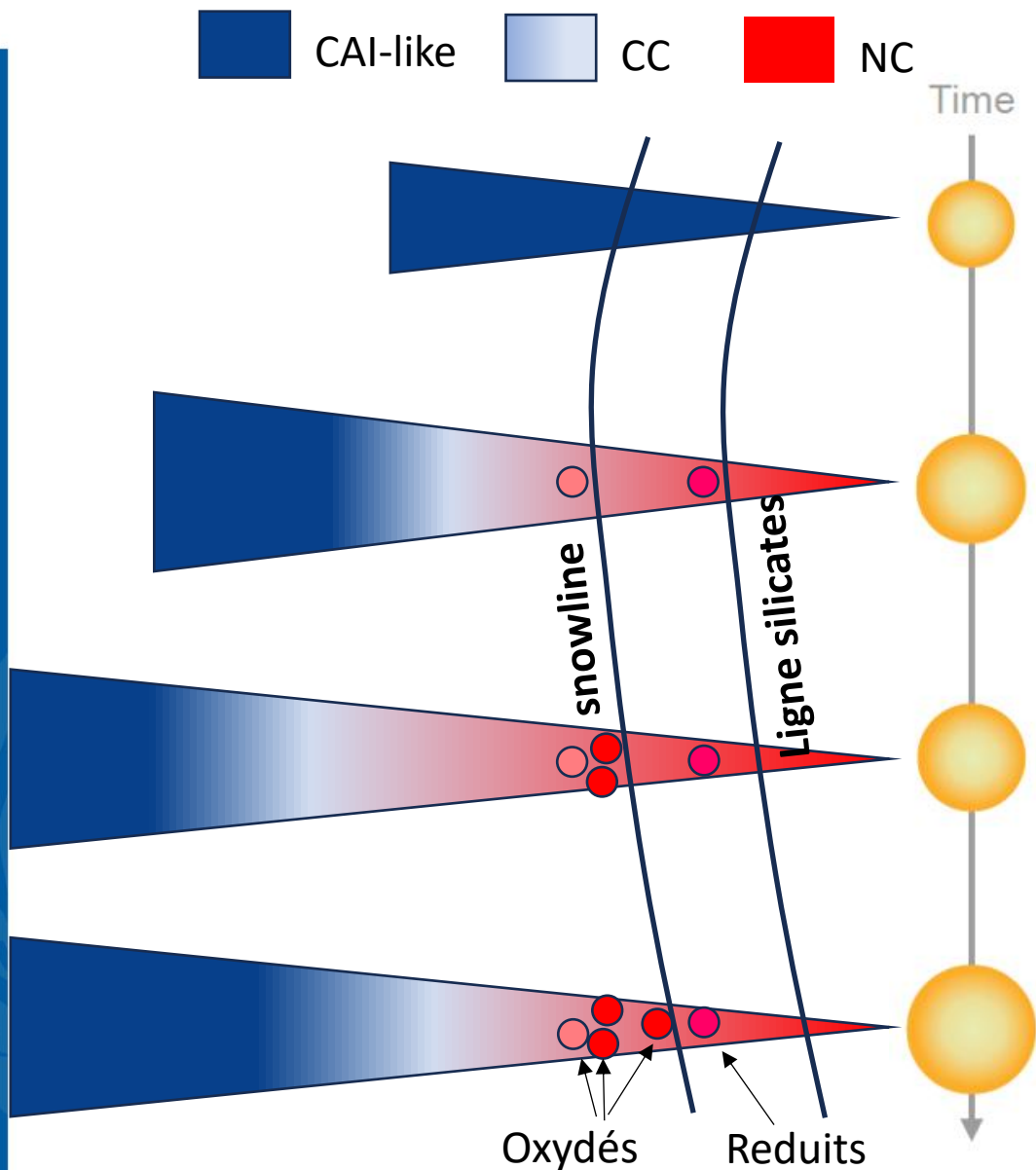
Scénario qualitatif.

Requière une formation et réchauffement du disque très lente (\sim Ma), ce qui n'est pas supporté par les observations astronomiques de formation stellaires

Lichtenberg et al., 2021



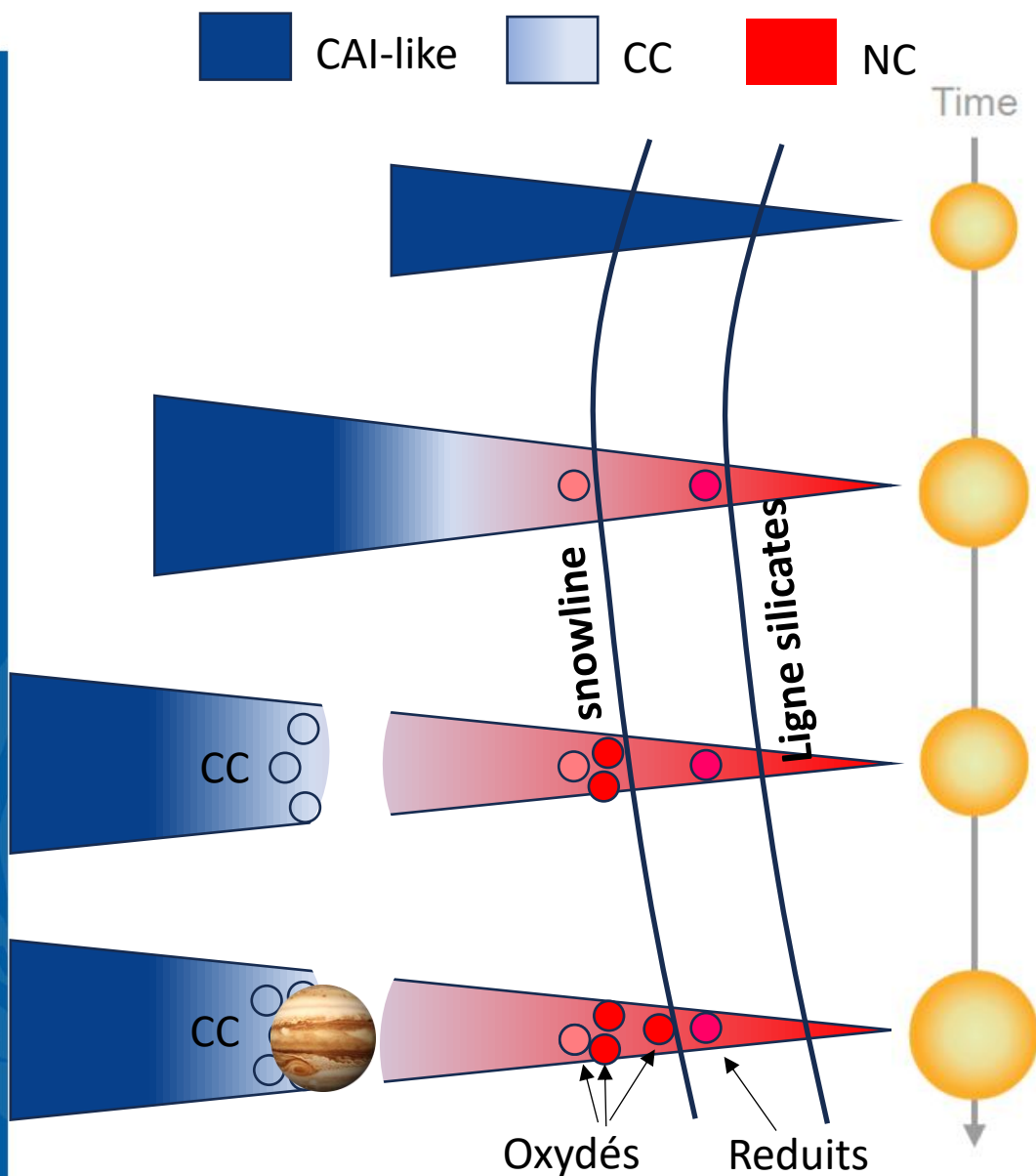
Matière NC à la ligne des glaces?



On peut imaginer que la ligne de glaces soit dans la partie du disque de composition isotopique NC, mais où se forment les CC et les planètes géantes alors, étant la ligne de glaces le lieu pour fabriquer une grande quantité de planétésimaux?



Formation d'un sillon plus loin?



Sauf s'il se forme (par MHD?) plus loin un sillon qui bloque la dérive de poussières CC et les accumulent, ainsi formant une grande quantité de planétésimaux et le noyau de Jupiter

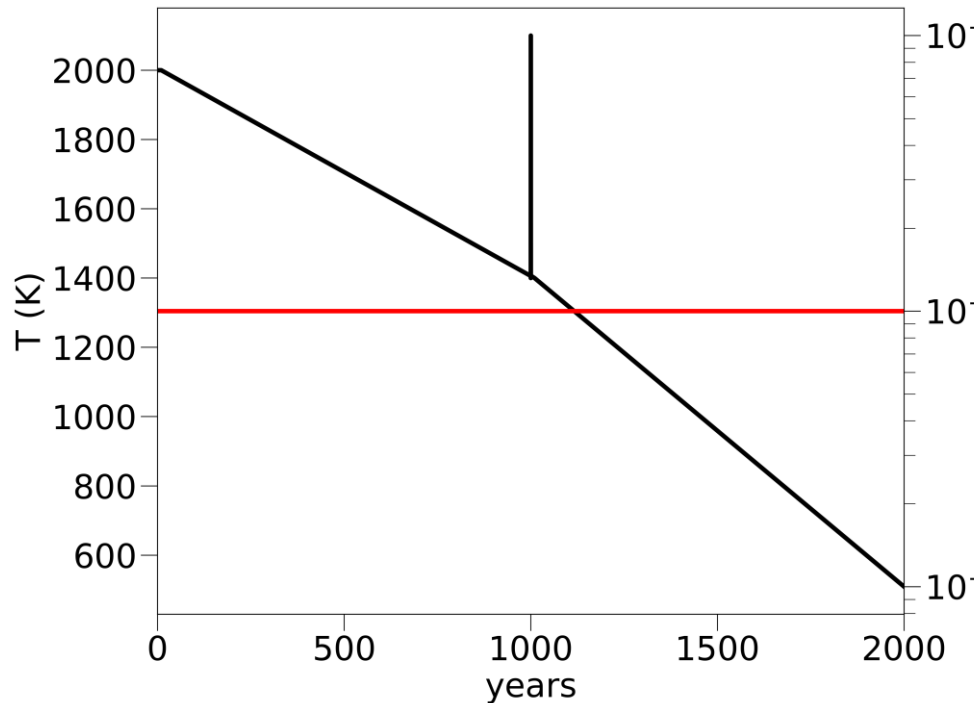


Une alternative?

Condensation hors-équilibre et oxydation dans le Système Solaire

Sébastien Charnoz

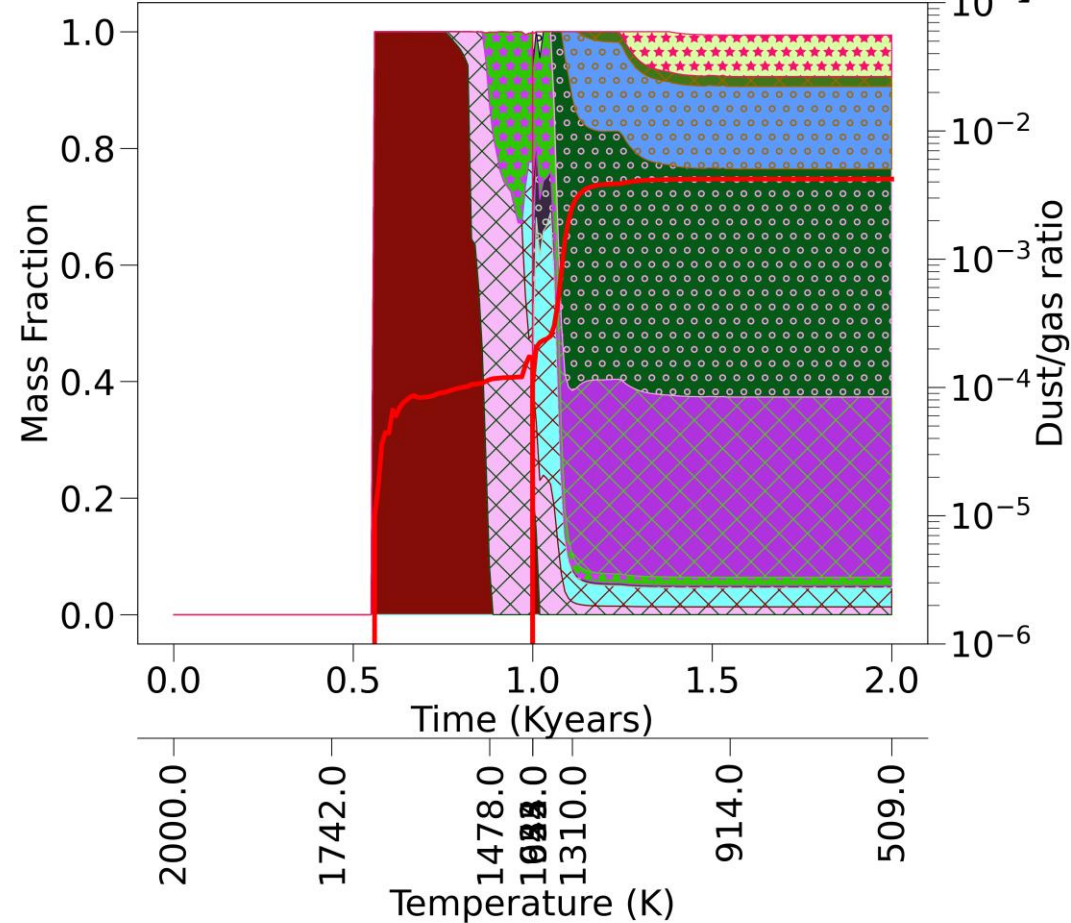




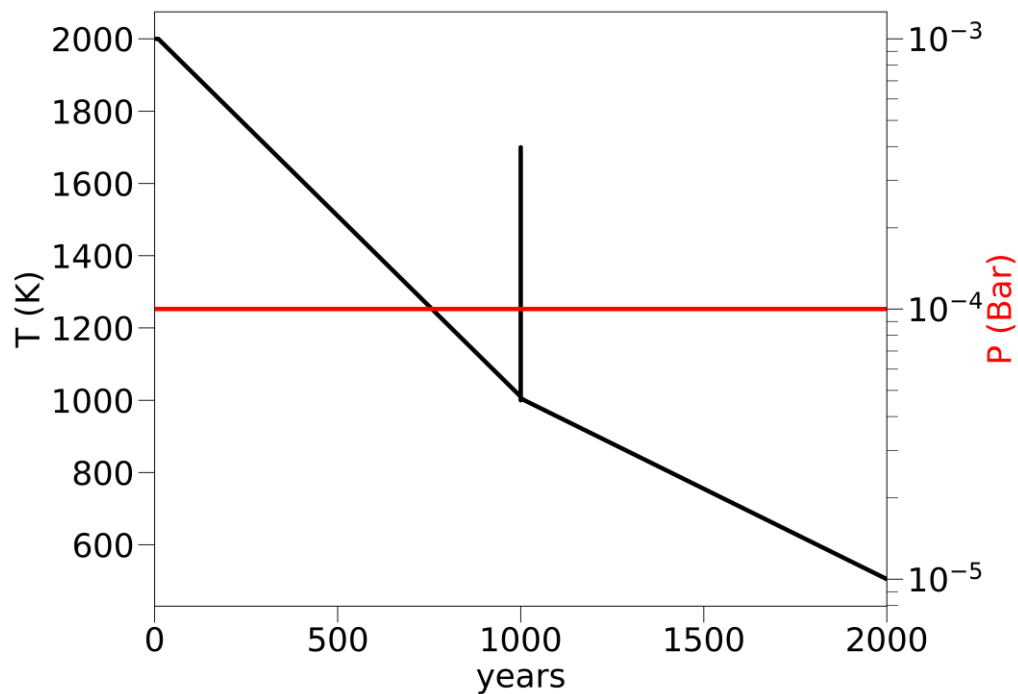
Reduced mineralogy form
 \Rightarrow Close to enstatite.

$$\Delta IW \sim -4$$

$R=10.0$ microns, $P=0.0001$ bar, Cool Rate= 0.75 K/year



- | | |
|---|--|
| Al ₂ O ₃ , Corund. | Fe, Iron M. |
| CaAl ₁₂ O ₁₉ , Hiboni. | Mg ₂ SiO ₄ , Forste. |
| CaSiO ₃ , Wollas. | MgAl ₂ O ₄ , Spinel. |
| Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , Ghelen. | MgSiO ₃ , Enstat. |
| Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ , Grossu. | Ni, Nickel. |
| CaAl ₂ Si ₂ O ₈ , Anorth. | SiO ₂ , Quartz. |
| CaAl ₄ O ₇ , Grossi. | |

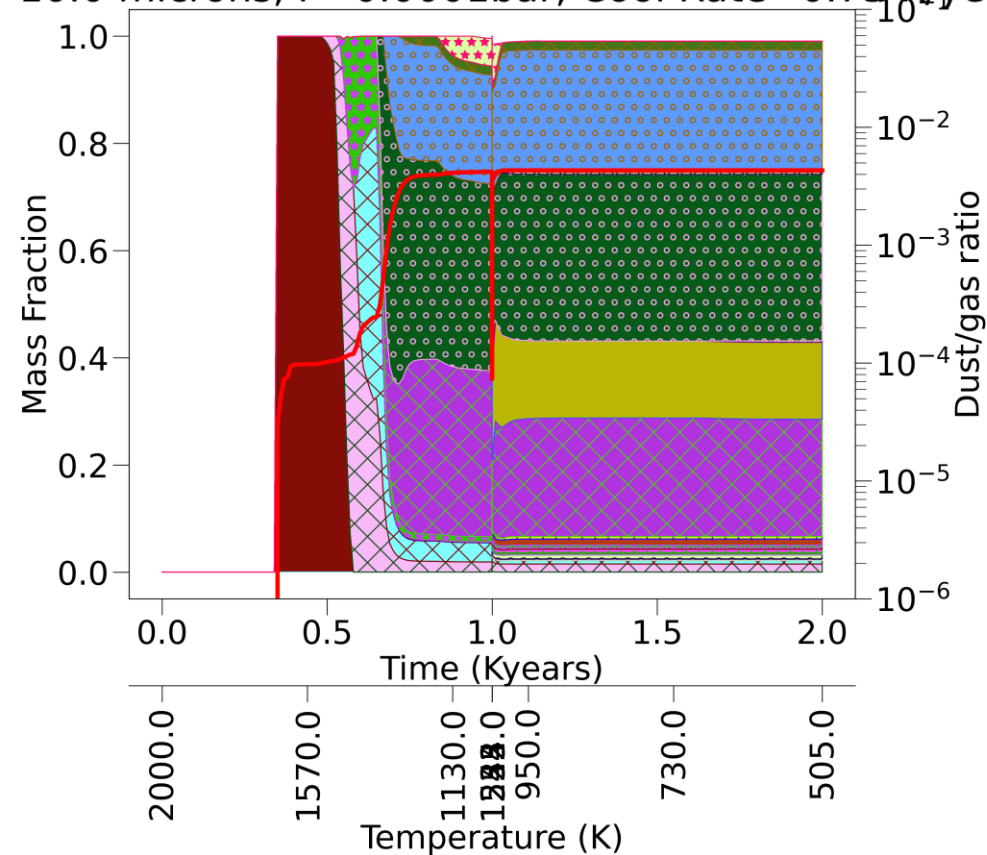


Produce a mineralogy close to ordinary chondrites :

Presence of Fayalite + interestingly we have a little bit of sulfure trapped

$$\Delta IW \sim -2$$

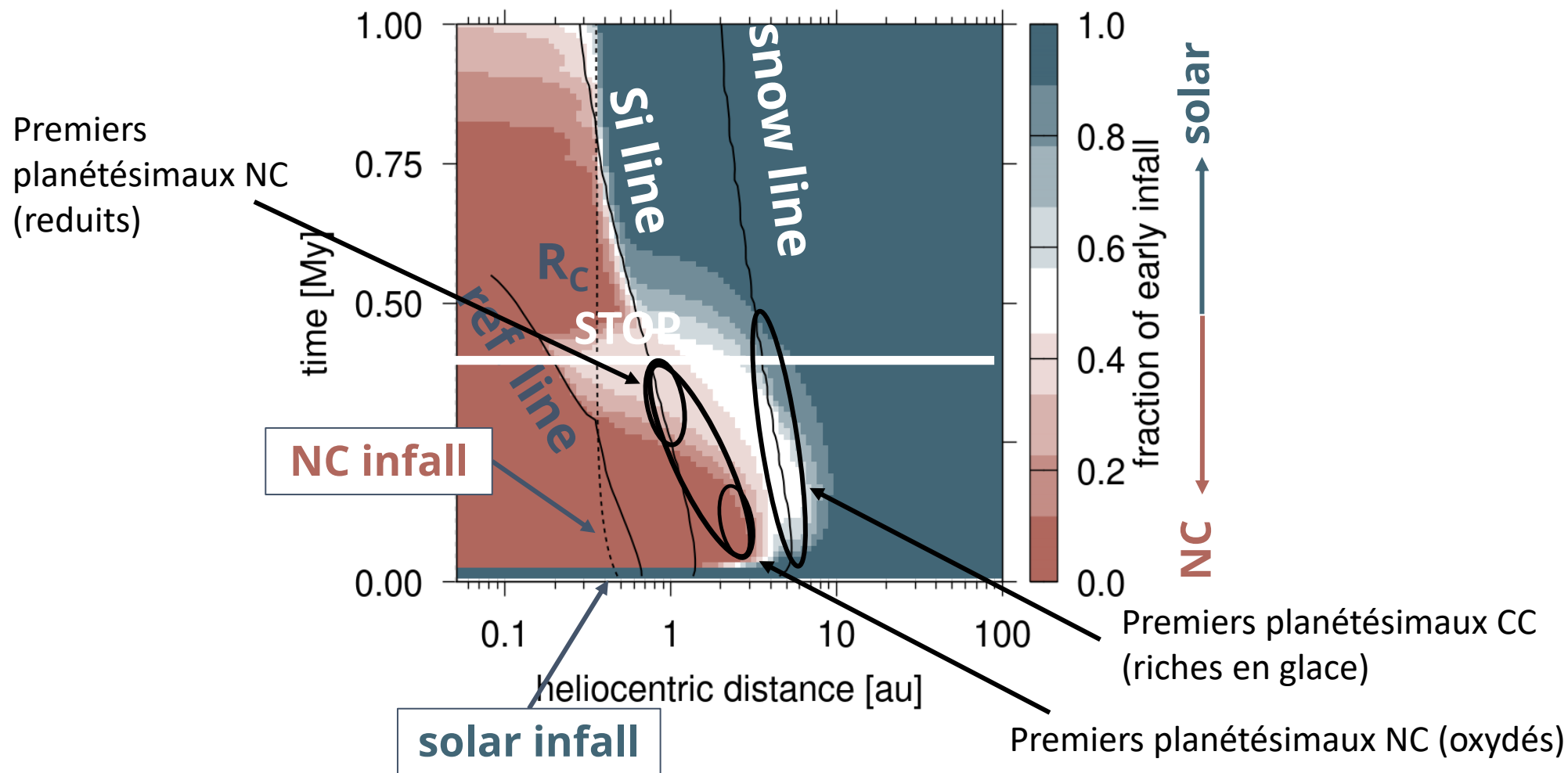
R=10.0 microns, P=0.0001bar, Cool Rate=0.75 K/year



	Al ₂ O ₃ , Corund.		CaS, Oldham.
	CaAl ₁₂ O ₁₉ , Hiboni.		Fe, Iron M.
	CaSiO ₃ , Wollas.		Fe ₂ Si ₁₀ O ₄ , Fayali.
	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , Ghelen.		FeS, Troili.
	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ , Akerma.		Mg ₂ SiO ₄ , Forste.
	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ , Grossu.		MgAl ₂ O ₄ , Spinel.
	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂ , Andrad.		MgSiO ₃ , Enstat.
	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ , Anorth.		Ni, Nickel.
	CaAl ₄ O ₇ , Grossi.		SiO ₂ , Quartz.
	CaMgSi ₂ O ₆ , Diopsi.		



Une autre interprétation possible



Comment expliquer la formation des planétésimaux entre les deux lignes de condensation majeures?



A retenir

- La formation des planétésimaux nécessite l'accumulation préalable des poussières
- Les lignes de condensation de l'eau et des silicates pourraient être les lieux privilégiés pour la formation des premiers planétésimaux
- L'expansion radiale initiale du disque peut permettre le transport des CAIs vers le disque externe ...
- ... Et l'accrétion préférentielle de la matière interstellaire sur la partie interne du disque peut expliquer la dichotomie des anomalies isotopiques produites par supernovæ, si la nature de la matière change avec le temps
- Les premiers planétésimaux CC se formeraient à la ligne de glace, les premiers planétésimaux NC à la ligne des silicates
- La corrélation entre les anomalies isotopiques produites par le processus s et celles produites par les supernovæ impliquent que les planétésimaux NC ne se sont pas tous formés à la ligne de sublimation des silicates ni au même temps.
- Beaucoup des planétésimaux NC sont oxydés
- Ceci semble suggérer que ces derniers se soient formés au-delà de la ligne des glaces ...
- ...Mais des sursauts de températures dans le disque, suivi d'une condensation hors-équilibre peuvent produire des minéraux oxydés sans besoin de l'interaction avec l'eau.
- Même si beaucoup d'idées sont sur la table, la vision de la séquence de formation des premiers planétésimaux n'est pas encore consolidée.