



Leçon N. 5 – 19 Novembre 2025

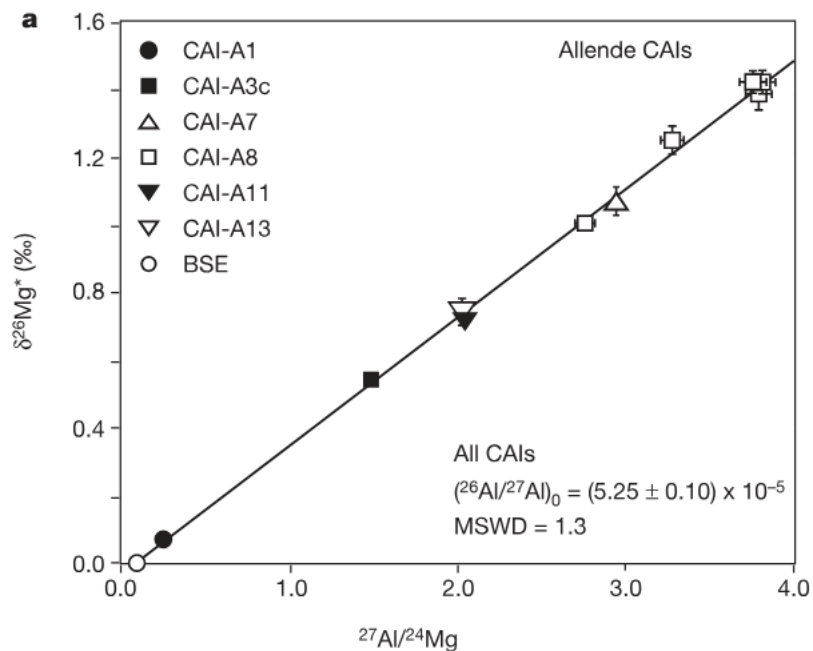
Alessandro
MORBIDELLI

Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

La formation des planétésimaux: contraintes

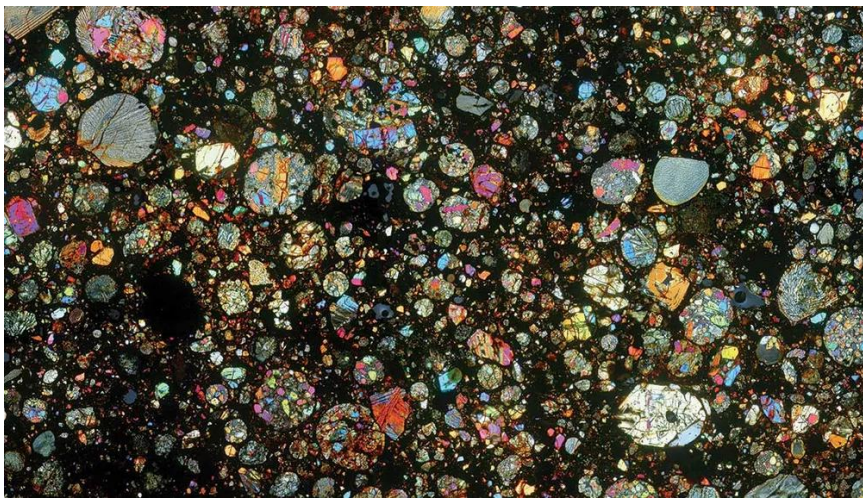
La quantité initiale de ^{26}Al



Bizzarro et al., 2004

L'étude des CAIs montre que, au moment de leur formation, le rapport $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ était $\sim 5 \times 10^{-5}$

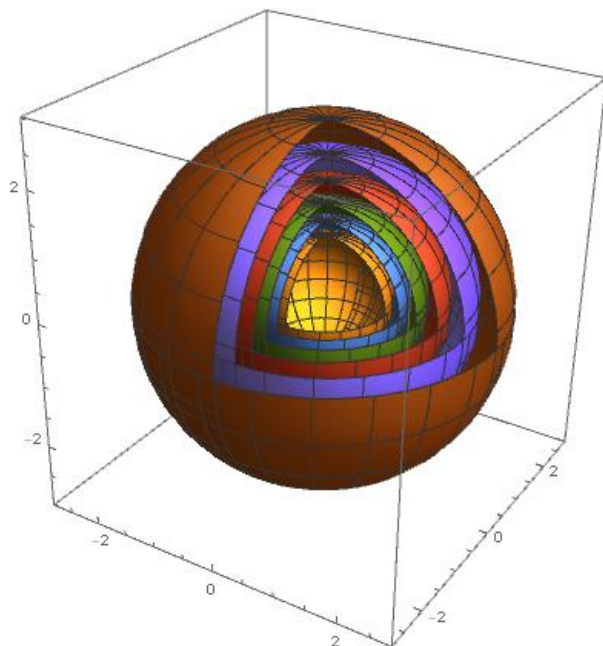
- Pendant leur vie dans le disque, le ^{26}Al des grains de poussière décroît avec une $\frac{1}{2}$ vie de 0,7Ma.
- Chaque atome de ^{26}Al qui décroît en ^{26}Mg relâche une énergie de 3.12 MeV ($1,4 \times 10^{-16}$ Wh)
- Dans 1g de matière il y a initialement $2,5 \times 10^{17}$ atomes de ^{26}Al
- Il faut donc $(5\text{m})^3$ de matière pour produire 1W
- Puisque un grain est petit, cette énergie est rapidement perdue et le grain reste en équilibre thermique avec le disque



Quand un objet macroscopique (planétésimal) se forme, l'énergie collective relâchée par tous les grains ne peut pas facilement être évacuée (seule la surface du planétésimal refroidit).
 Le planétésimal chauffe.



Modélisation de l'évolution thermique d'un planétésimal



Objet sphérique divisé en couches concentriques à r avec épaisseur dr

$$\rho c_V \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 K \frac{\partial T}{\partial r} + \rho h$$

température $\rightarrow \frac{\partial T}{\partial t}$
 production d'énergie $\rightarrow \rho h$
 conductivité thermique $\rightarrow K$
 capacité thermique $\rightarrow c_V$
 densité $\rightarrow \rho$

$$\rho = \rho_b (1 - \phi) \quad K = K_b f(\phi)$$

porosité $\rightarrow \phi$
 Densité et conductivité du matériel compacté

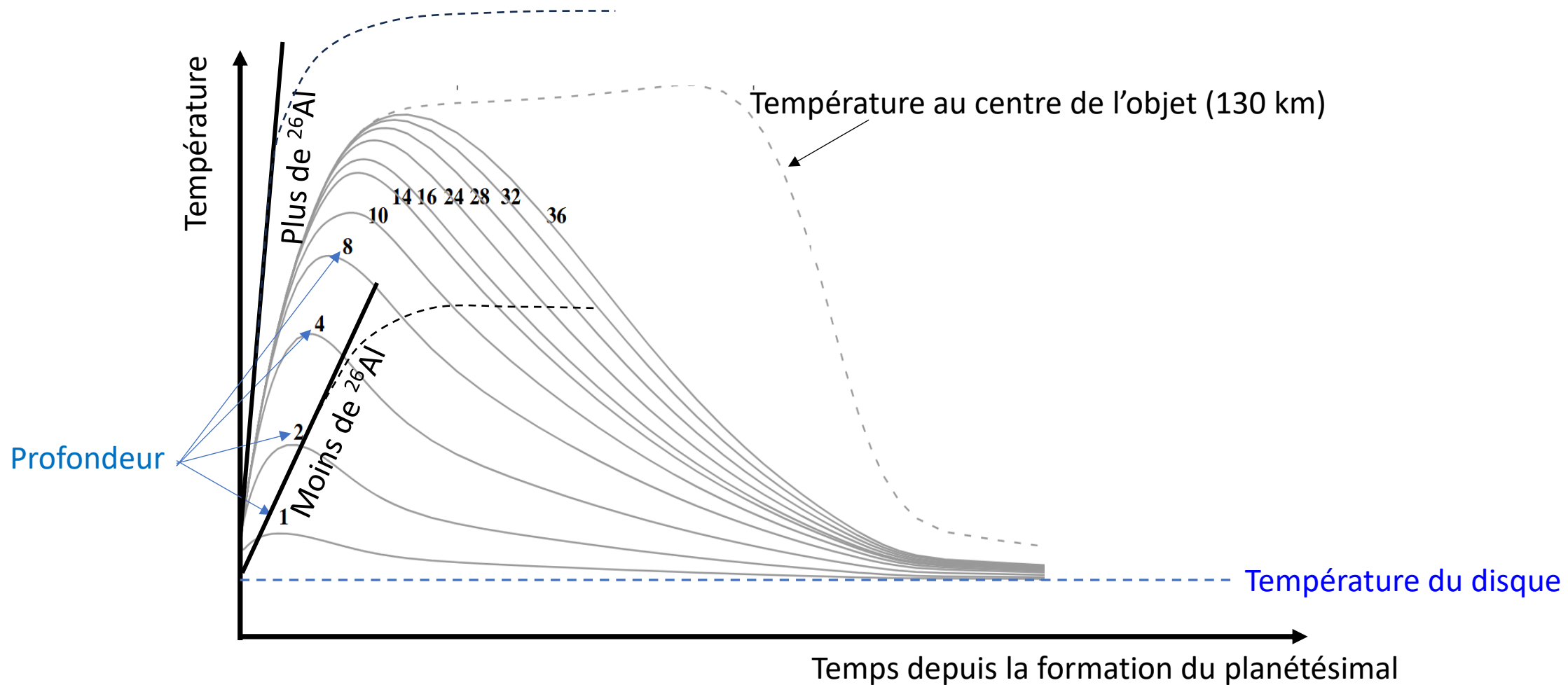
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi, P, T)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{G M(r) \rho}{r^2}$$

Condition au bord (surface): pendant le disque: $T = T_{disque}$
 après, refroidissement: $h_- = -\pi R^2 \sigma T^4$



Évolution thermique d'un planétésimal



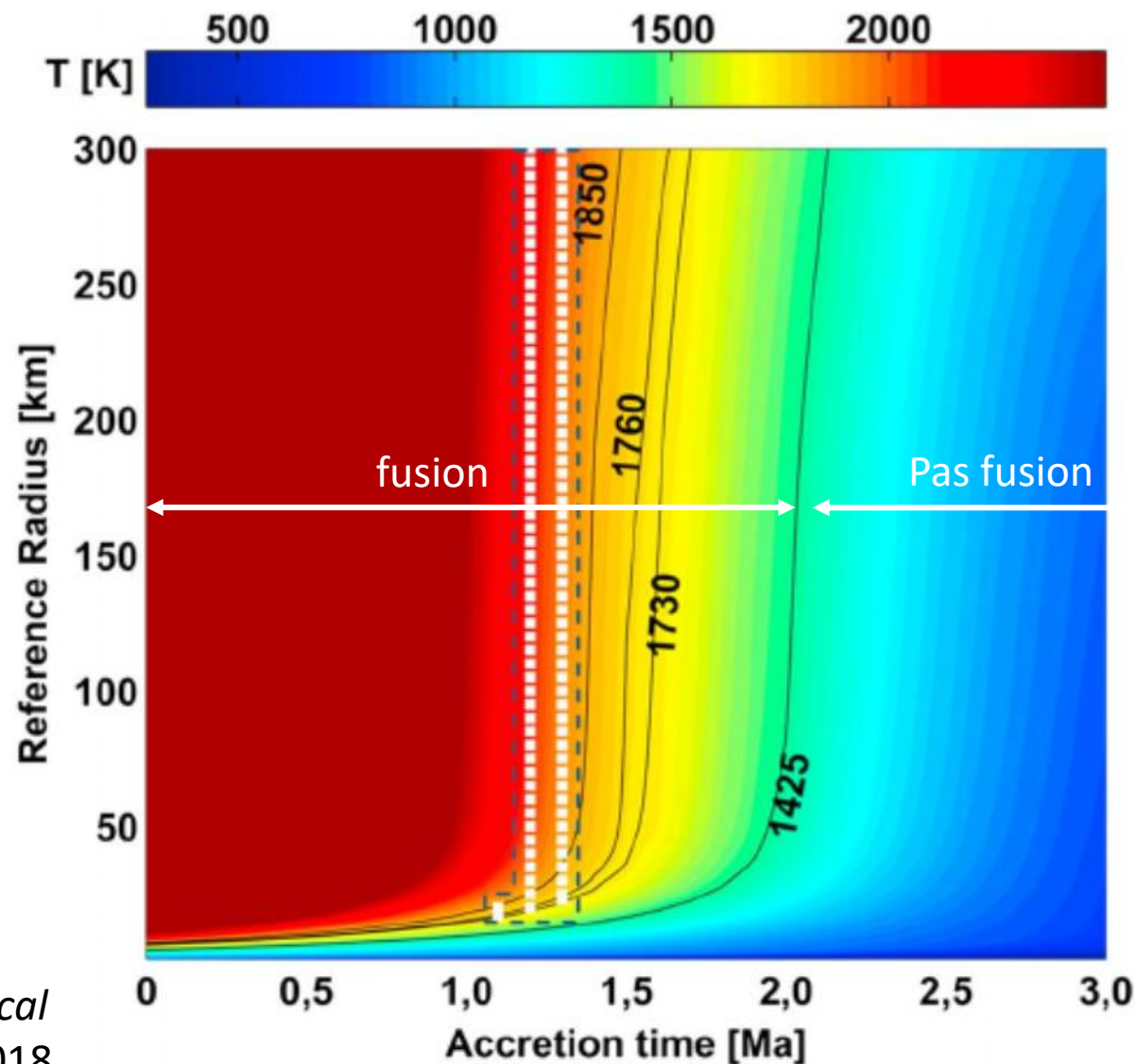


Température maximale au centre d'un planétésimal

Les corps qui se forment avant ~ 2 Ma fondent au moins partiellement leurs silicates, ceux qui se forment après chauffent mais ne fondent pas

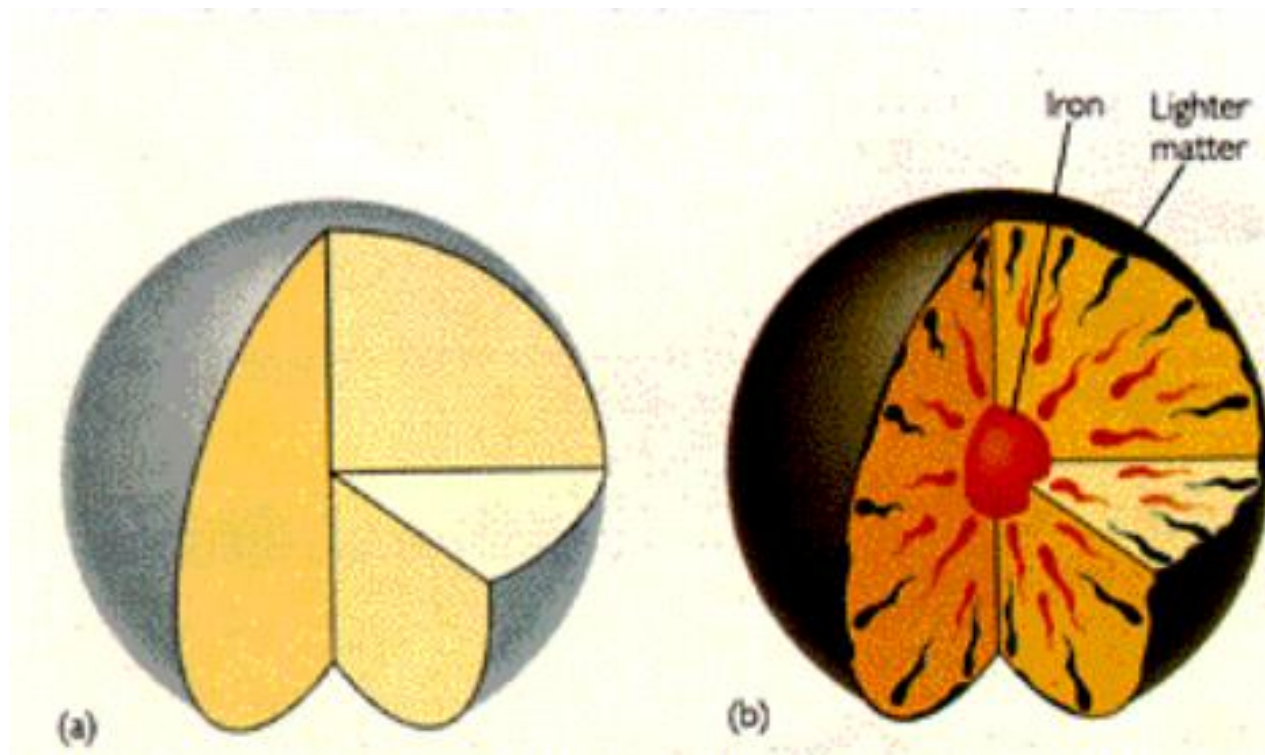
Nous avons des météorites issues de corps fondus (achondrites) et d'autres qui n'ont pas assez chauffé (chondrites).

Ceci implique que la formation des planétésimaux a continué pendant un intervalle de temps de quelques millions d'années.

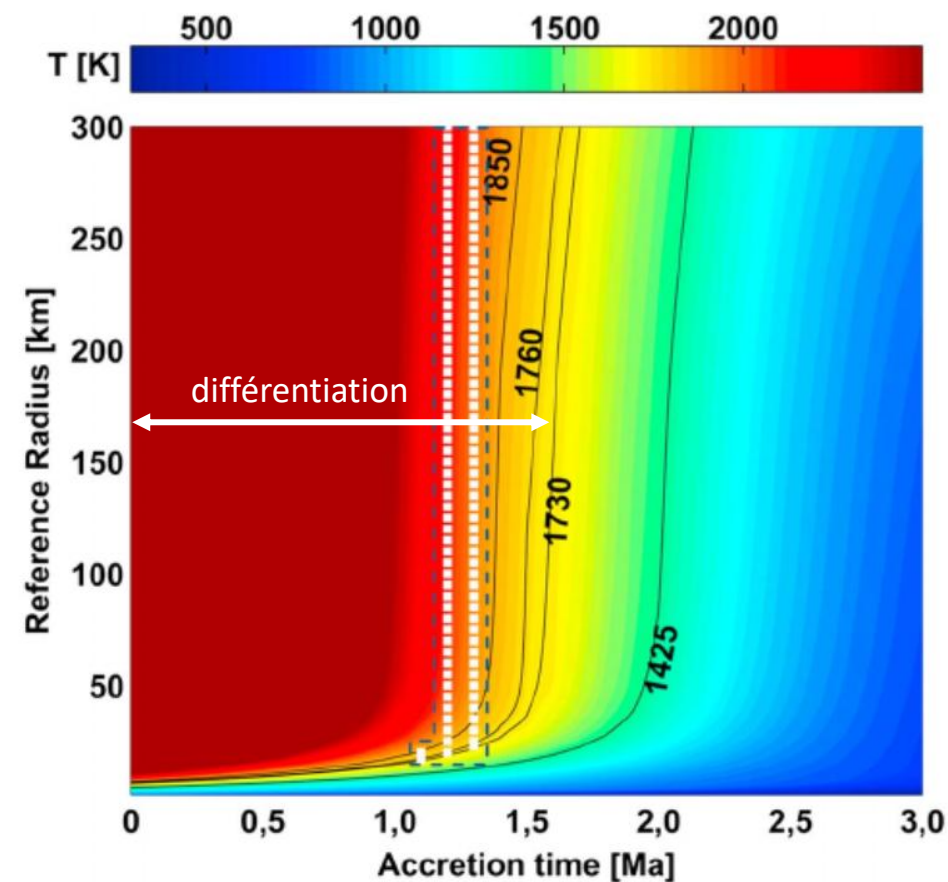


Neumann et al. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123, 421–444, 2018

La différenciation des premiers planétésimaux



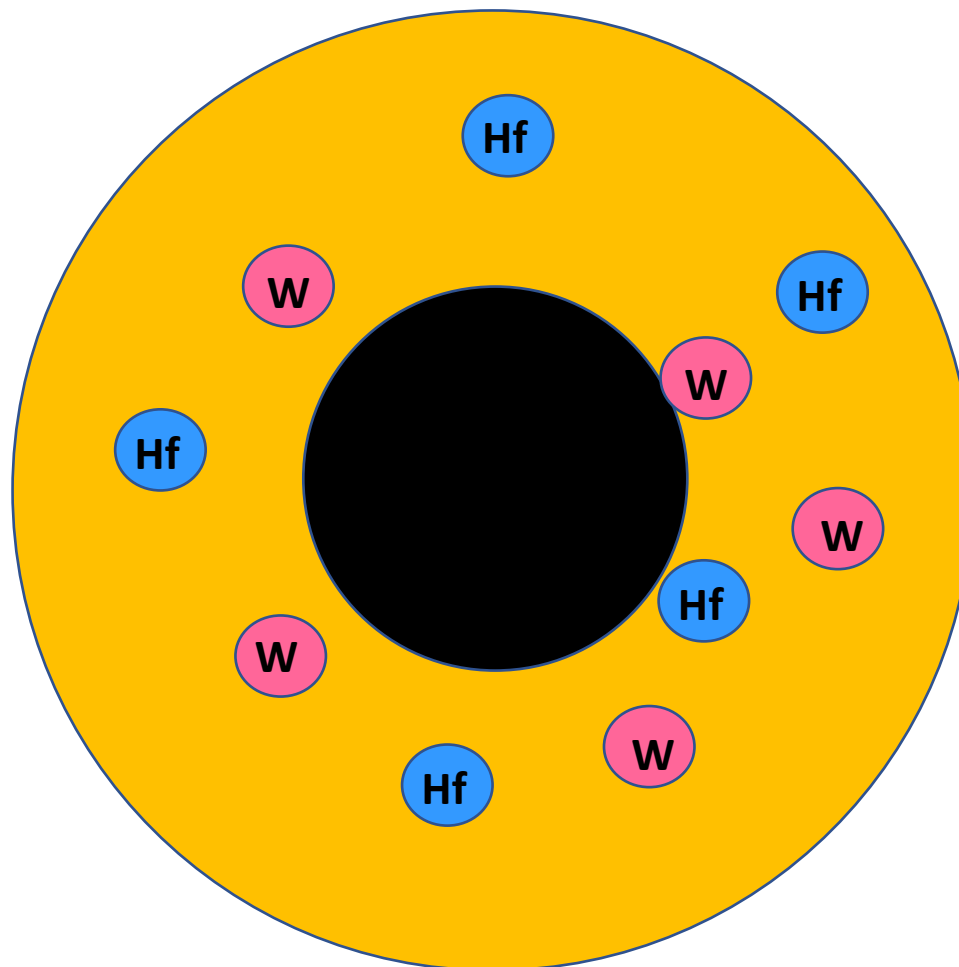
Différenciation (séparation métal – silicates)





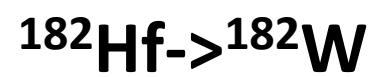
Le chronomètre Hf-W

W: sidérophile
Hf: lithophile

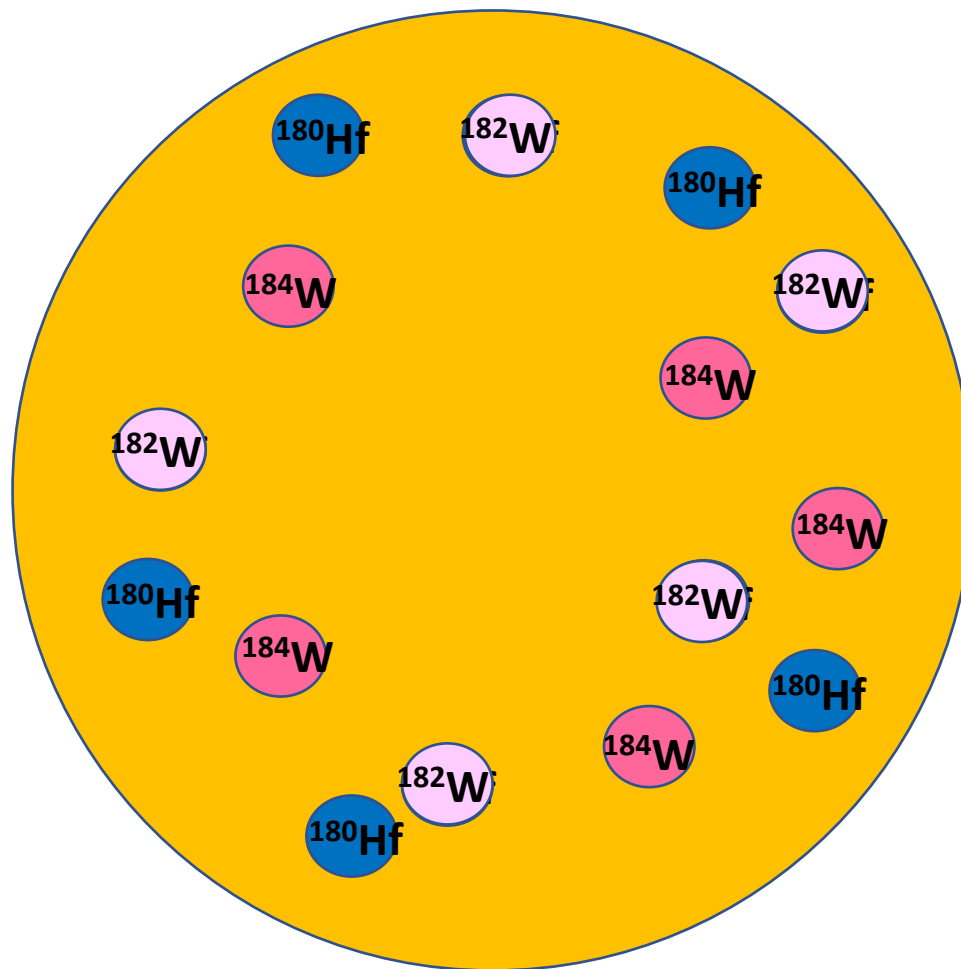




Le chronomètre Hf-W



$$t_{1/2} = 9 \text{ Ma}$$



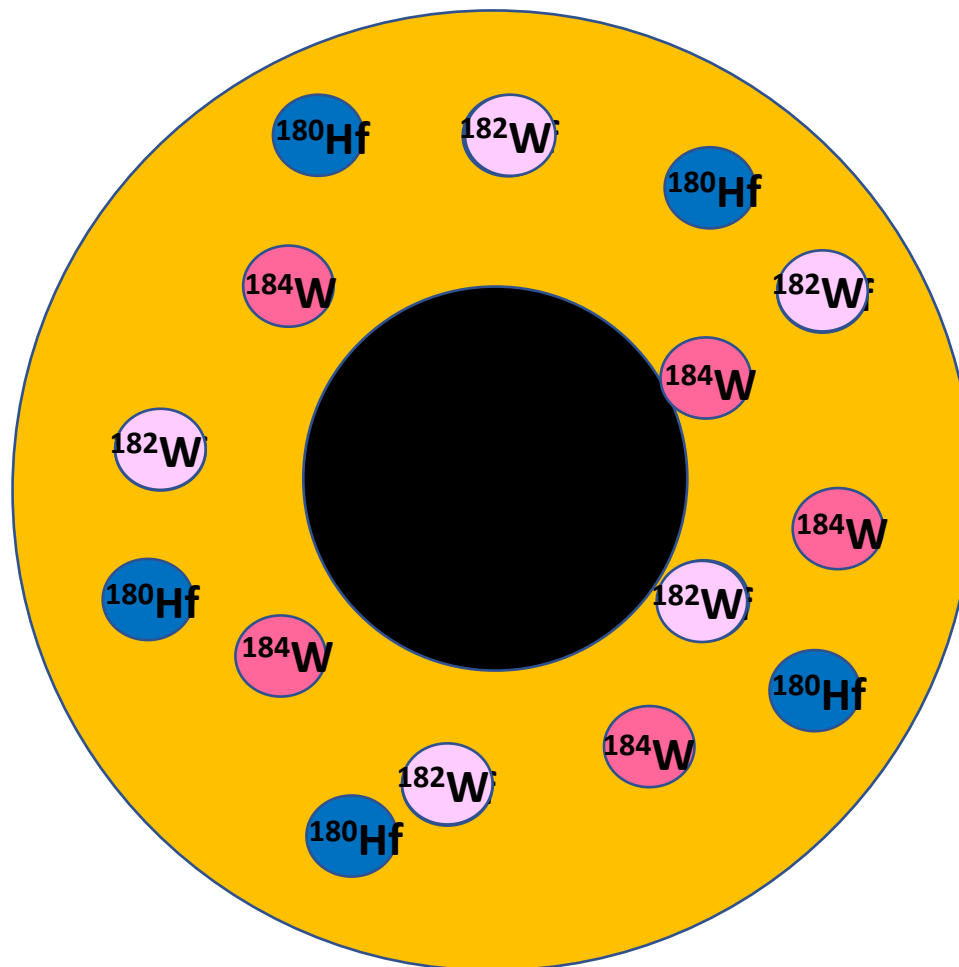


Le chronomètre Hf-W

Formation rapide
du noyau



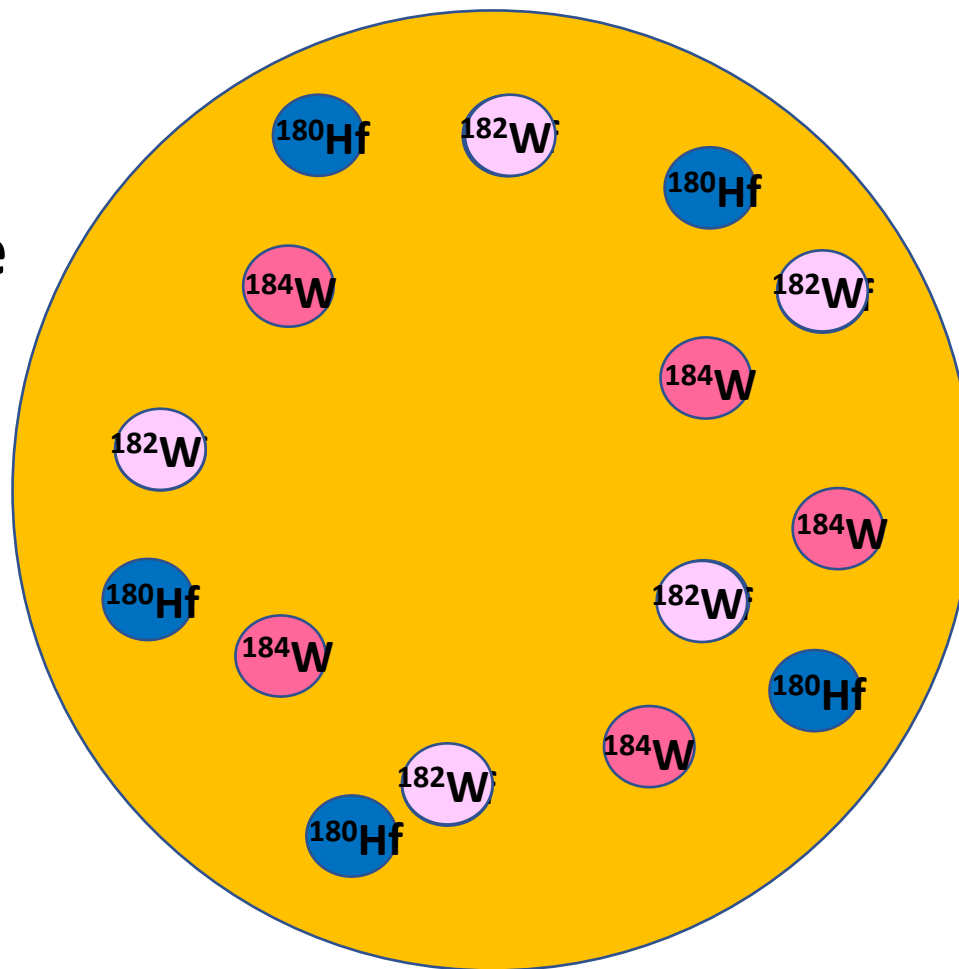
$^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ grand
dans le manteau,
petit dans le
noyau





Le chronomètre Hf-W

Formation tardive
du noyau



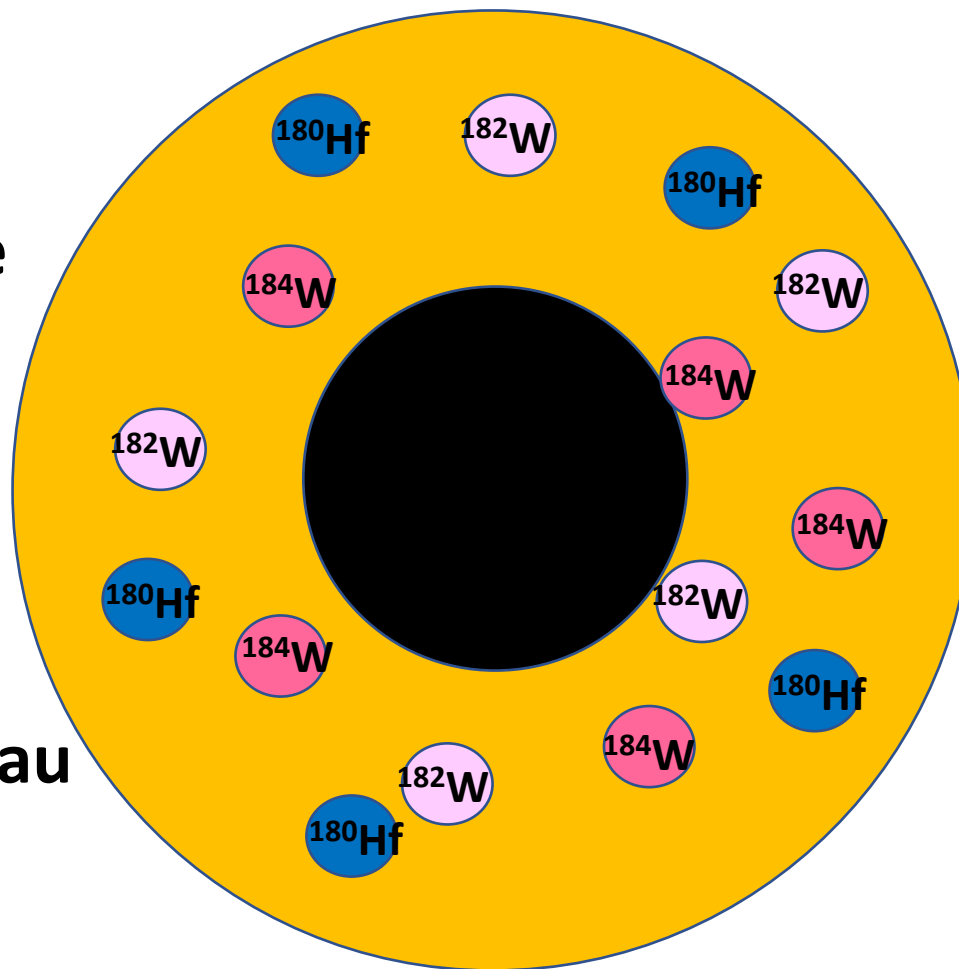


Le chronomètre Hf-W

Formation tardive
du noyau

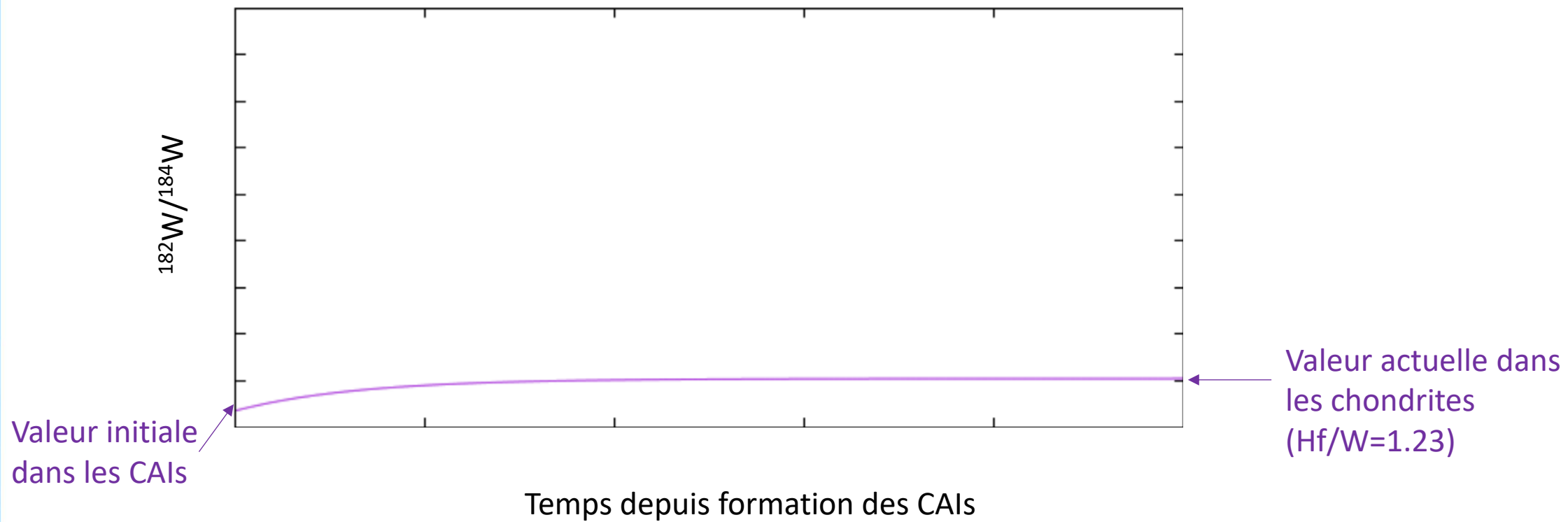


$^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ petit
dans le manteau,
grand dans le noyau



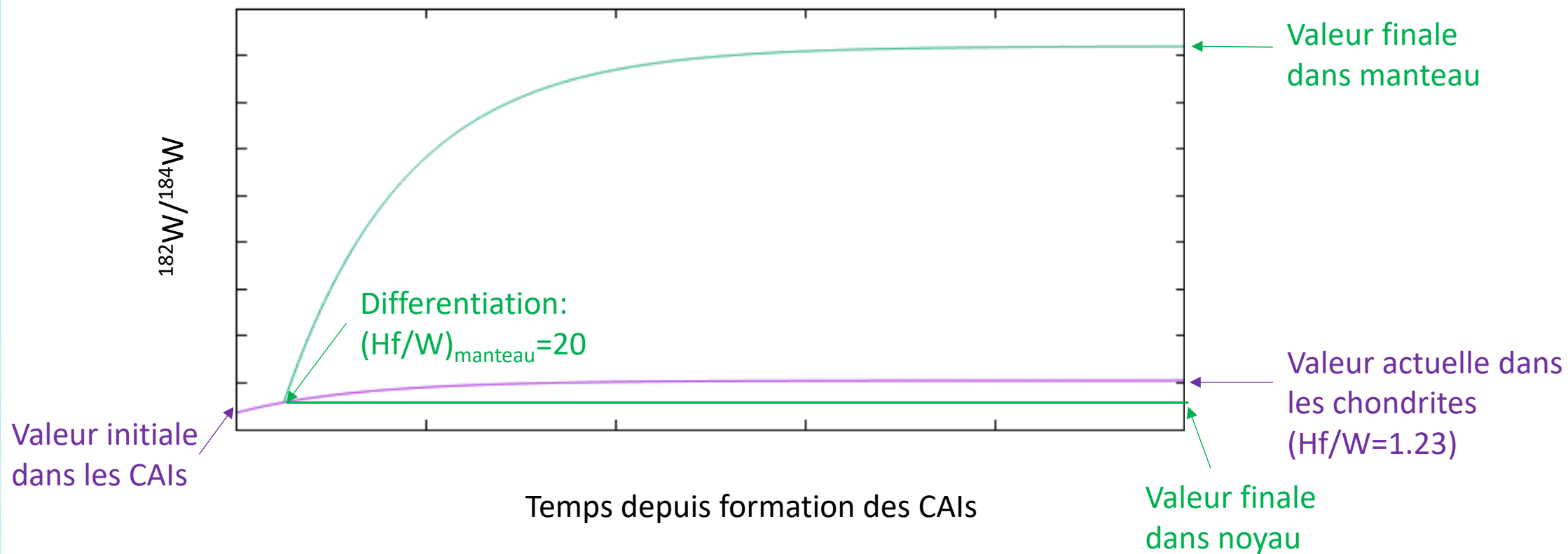


Le chronomètre Hf-W



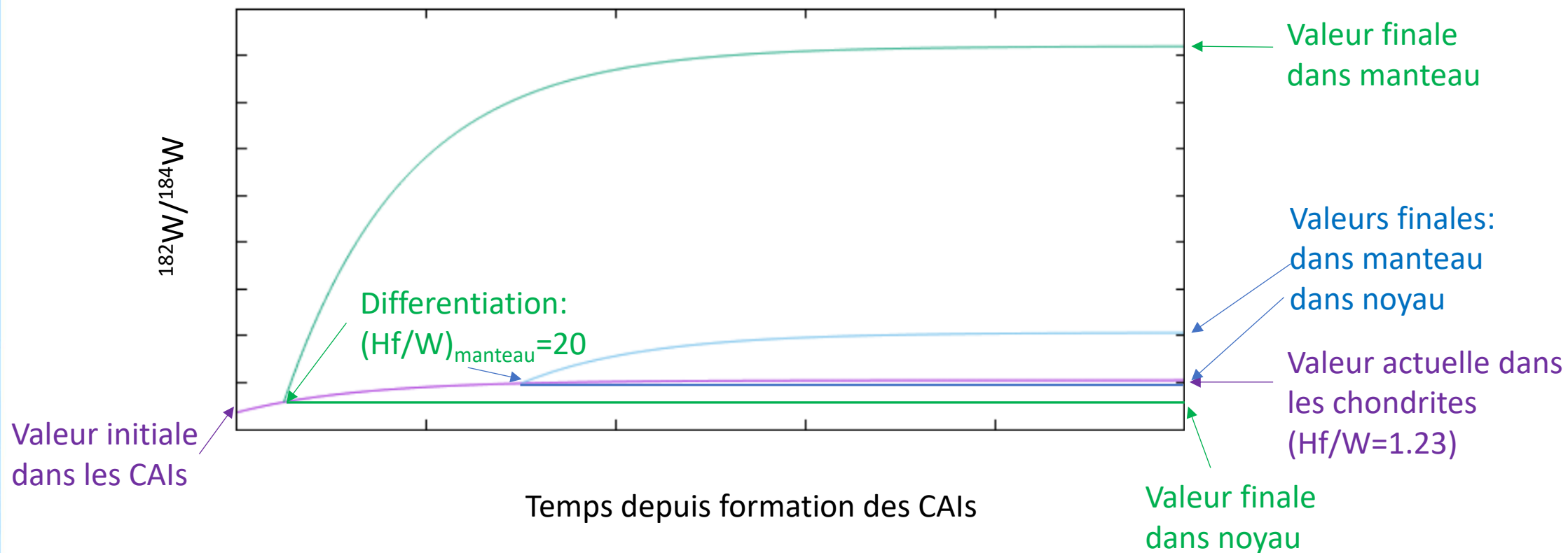


Le chronomètre Hf-W



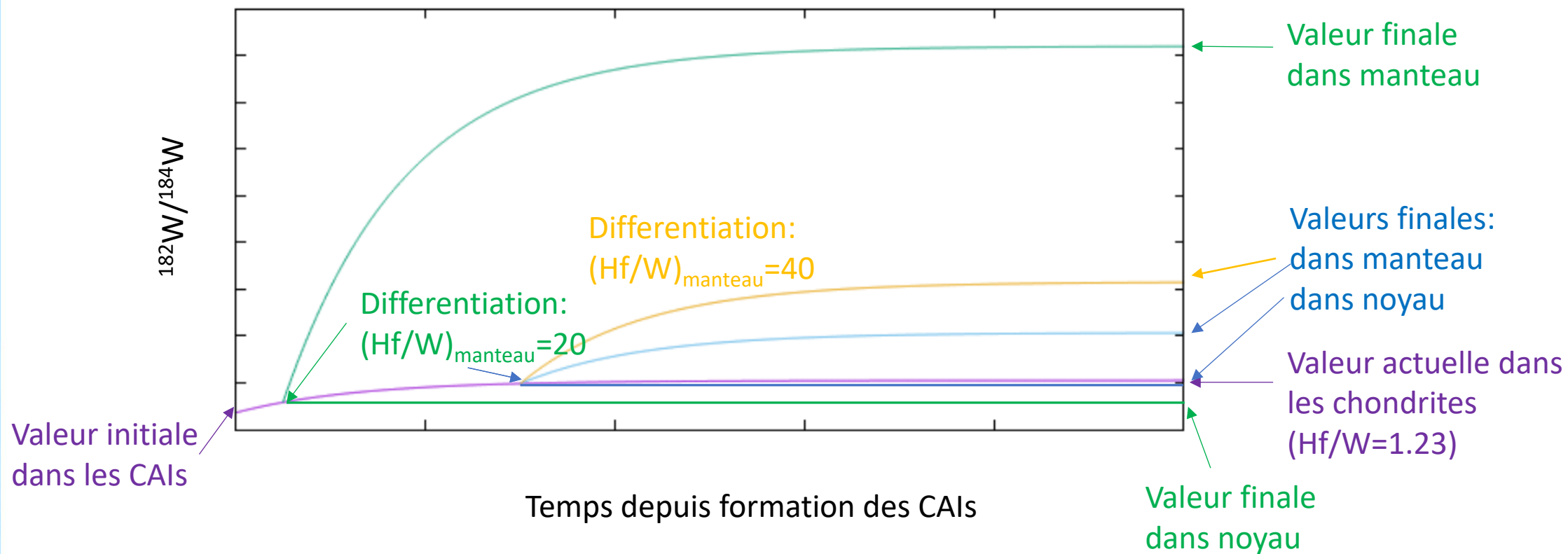


Le chronomètre Hf-W





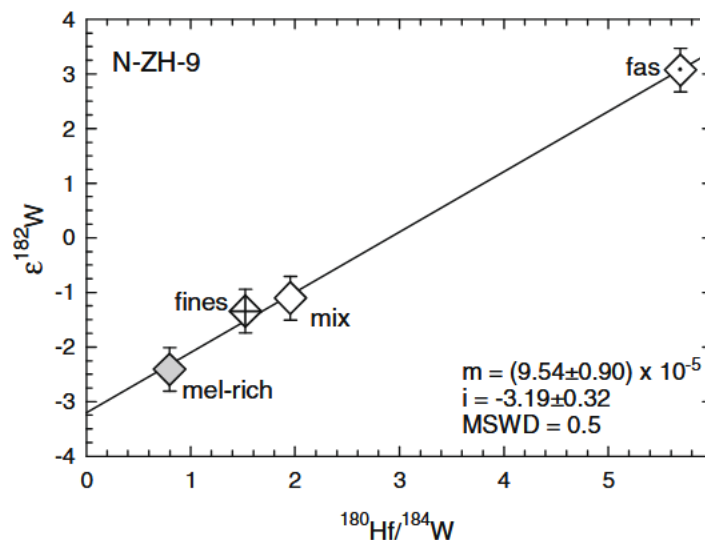
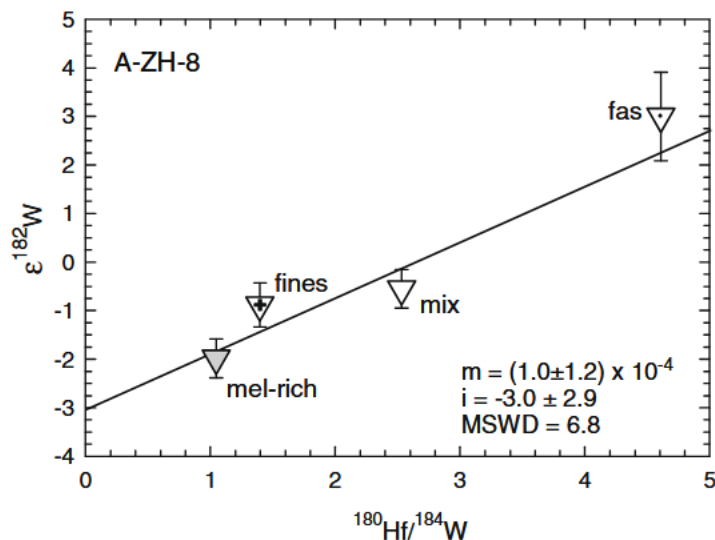
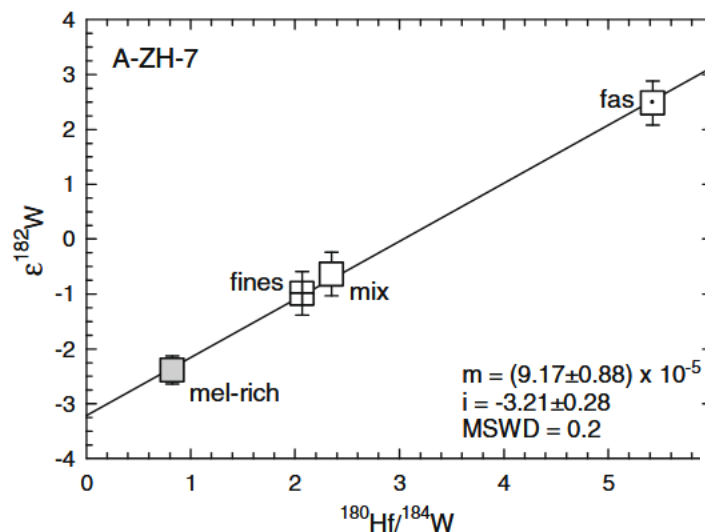
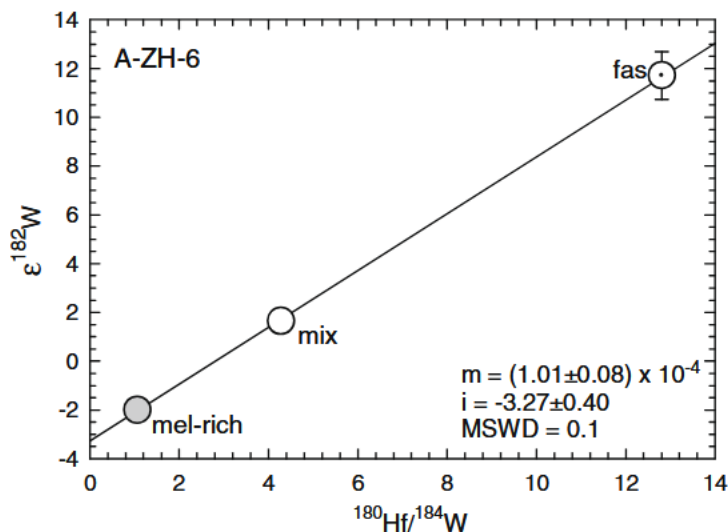
Le chronomètre Hf-W





Le chronomètre Hf-W – analyse quantitative

Isochrones des CAIs



Valeurs initiales:

$$^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf} = (9.72 \pm 0.44) \times 10^{-5}$$

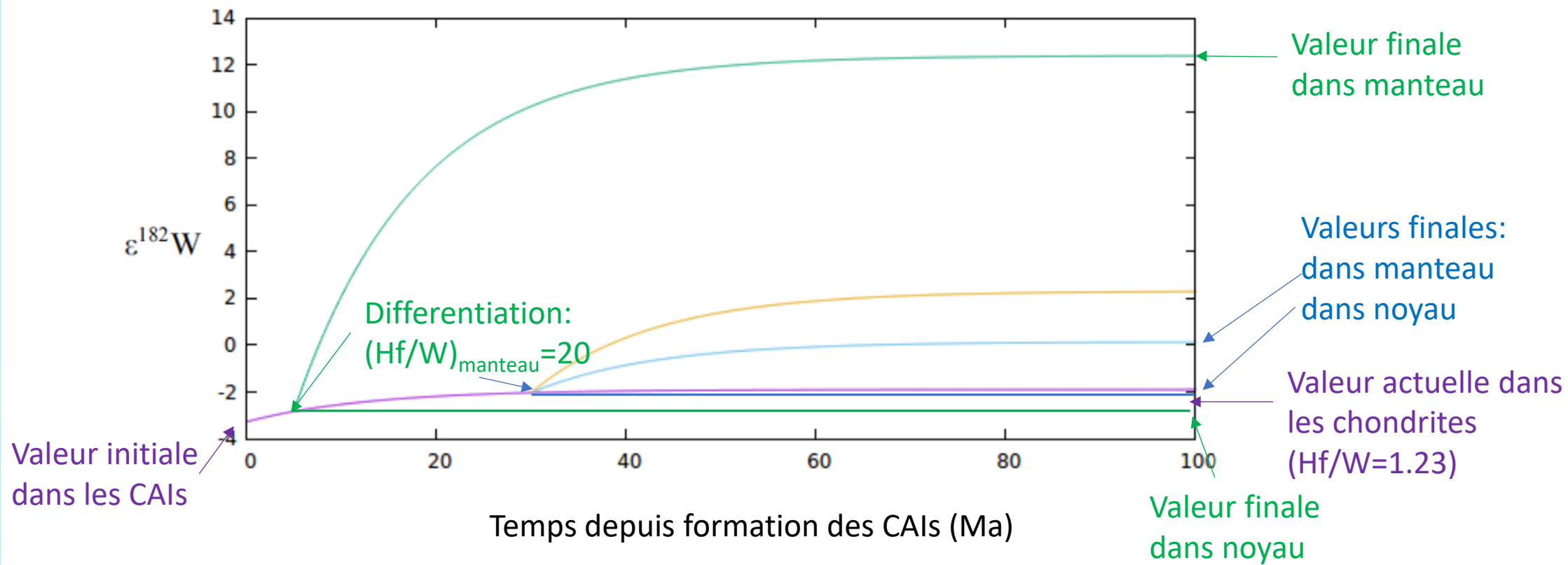
$$^{182}\text{W}/^{184}\text{W} = 0.864579 \pm 0.000014$$

$$\epsilon^{182}\text{W} = -3.28 \pm 0.12$$

$$\epsilon^{182}\text{W} = \left\{ \frac{(^{182}\text{W}/^{184}\text{W})_{\text{sample}}}{(^{182}\text{W}/^{184}\text{W})_{\text{standard}}} - 1 \right\} \times 10^4$$



Le chronomètre Hf-W – analyse quantitative

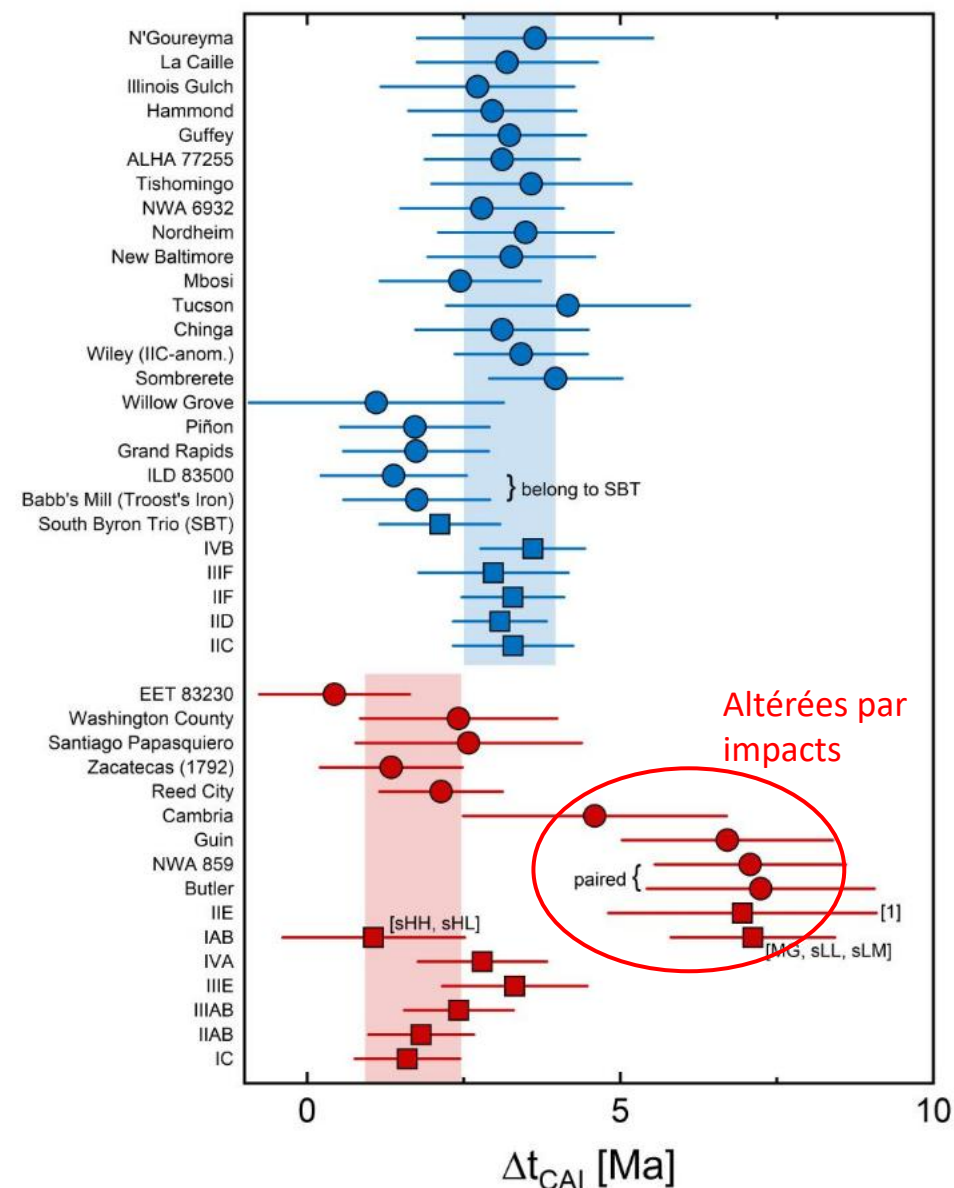




Ages de différenciation des corps parents des météorites de fer

Note: la valeur de $\varepsilon^{182}\text{W}$ mesurée dans une météorite a été altérée par l'exposition aux rayons cosmiques et doit être corrigée avant l'utilisation du chronomètre Hf-W.

Discussions et débats sur ces conversions



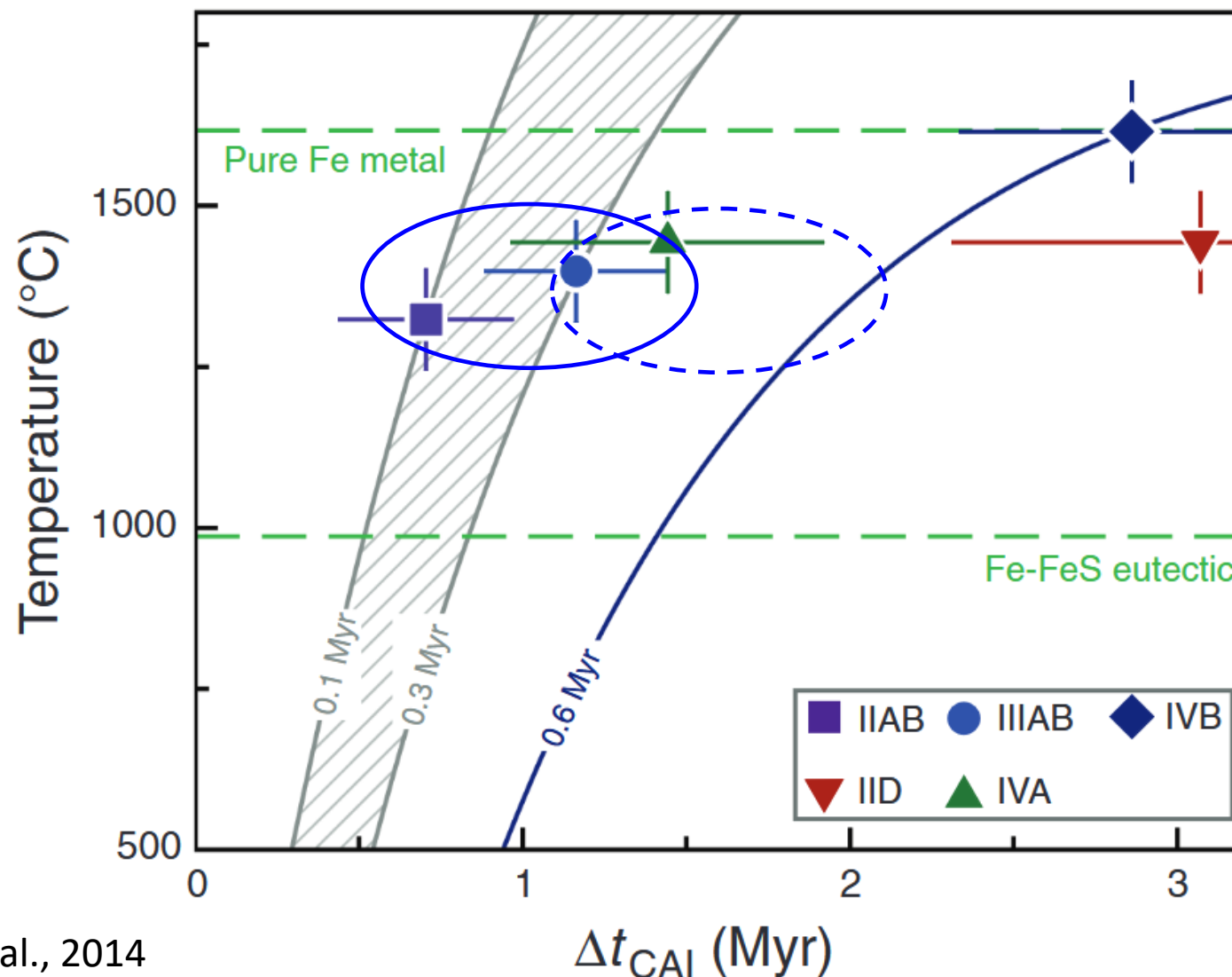
Spitzer et al., 2025



Ages de formation des corps parents des météorites de fer

Via un modèle d'évolution thermique et ses incertitudes

Accrétion des corps parents dans le premier Ma, i.e. *avant* la formation des chondres



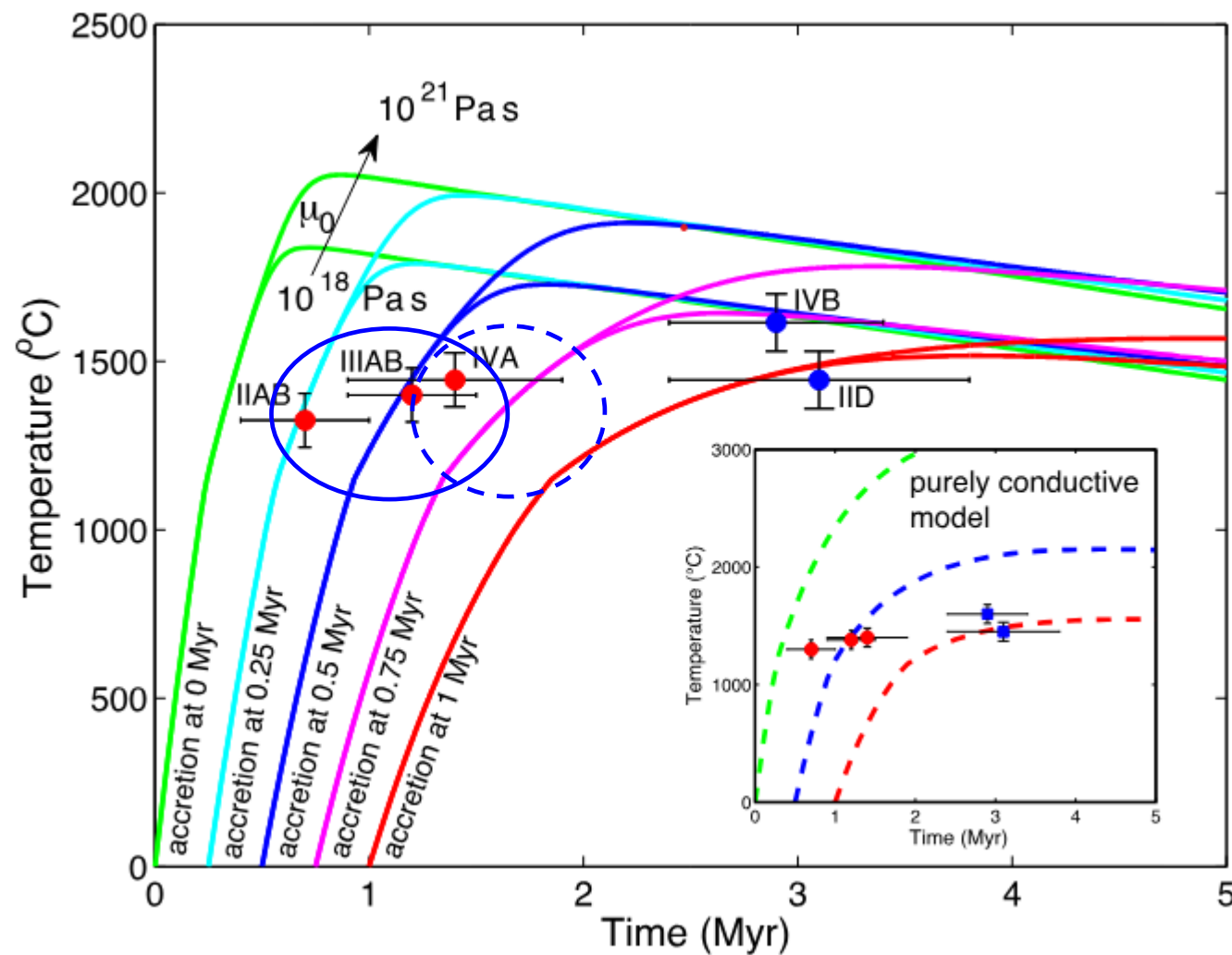
Kruijer et al., 2014



Ages de formation des corps parents des météorites de fer

Via un modèle d'évolution thermique et ses incertitudes

Accrétion des corps parents dans le premier Ma,
i.e. *avant* la formation des chondres



Kaminski et al., 2020



Âges des achondrites

On cherche à dater la séparation entre le manteau et la croûte, la cristallisation des roches, leur dévolatilisation....

Plusieurs chronomètres sont utilisés:

Age absolue:

Pb-Pb

^{40}K - ^{40}Ar

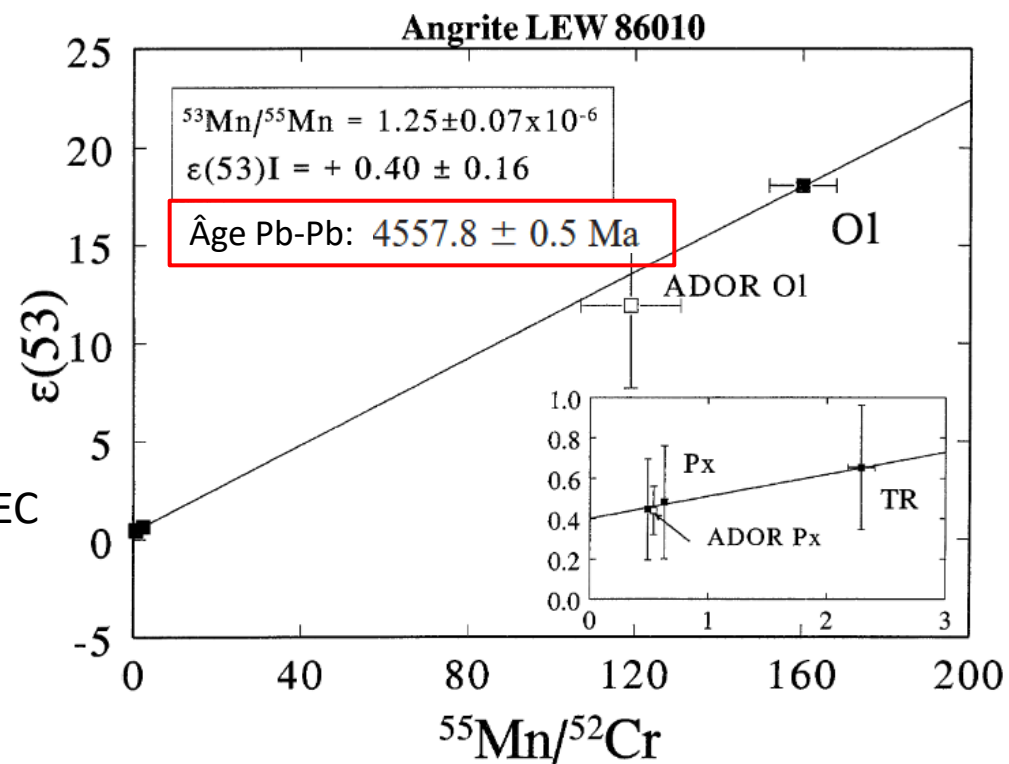
^{87}Rb - ^{87}Sr

Age relative:

^{26}Al - ^{26}Mg - $t_{1/2}=0,7$ Ma; calibré sur CAIs

^{53}Mn - ^{53}Cr - $t_{1/2}=3,7$ Ma; calibré sur Angrite LEW

^{129}I - ^{129}Xe - $t_{1/2}=16,1$ Ma; calibré sur Shallowater EC



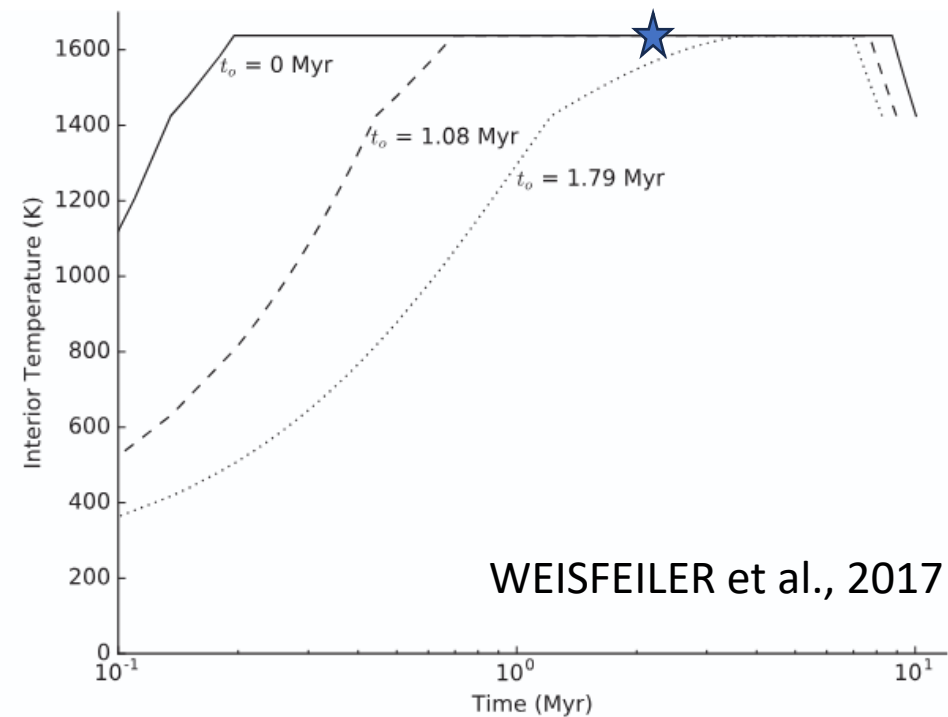
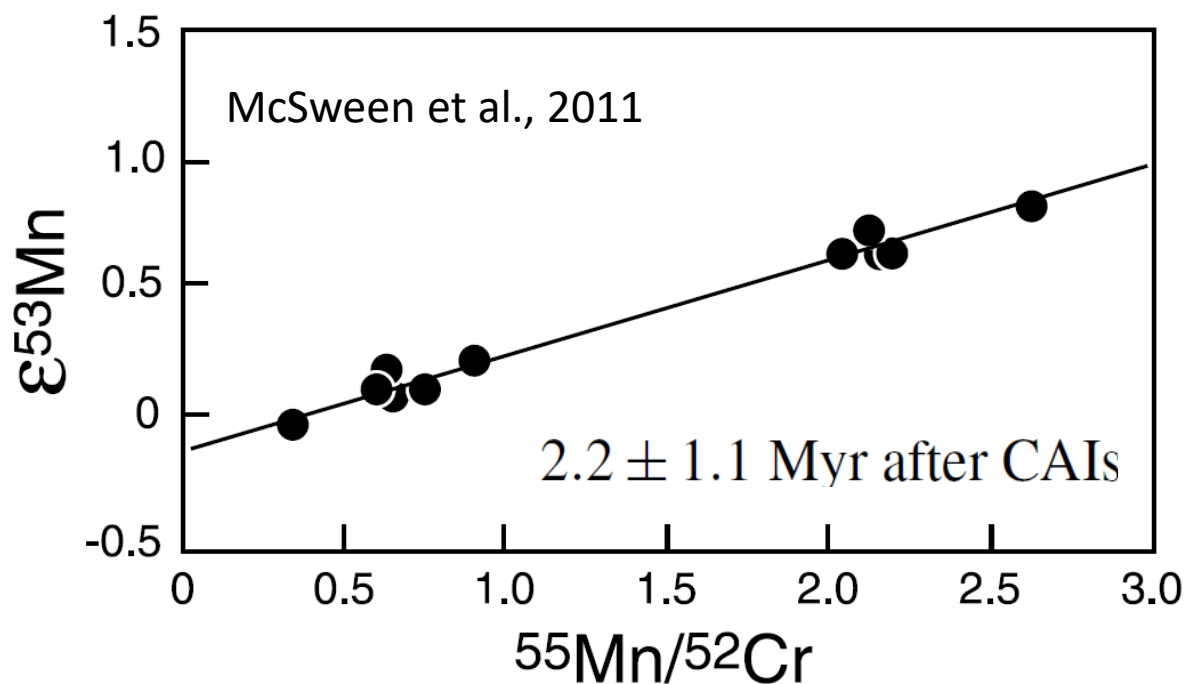
LUGMAIR & SHUKOLYUKOV, 1998



Ages de formation de Vesta

Isochrone ^{53}Mn - ^{53}Cr des météorites HED

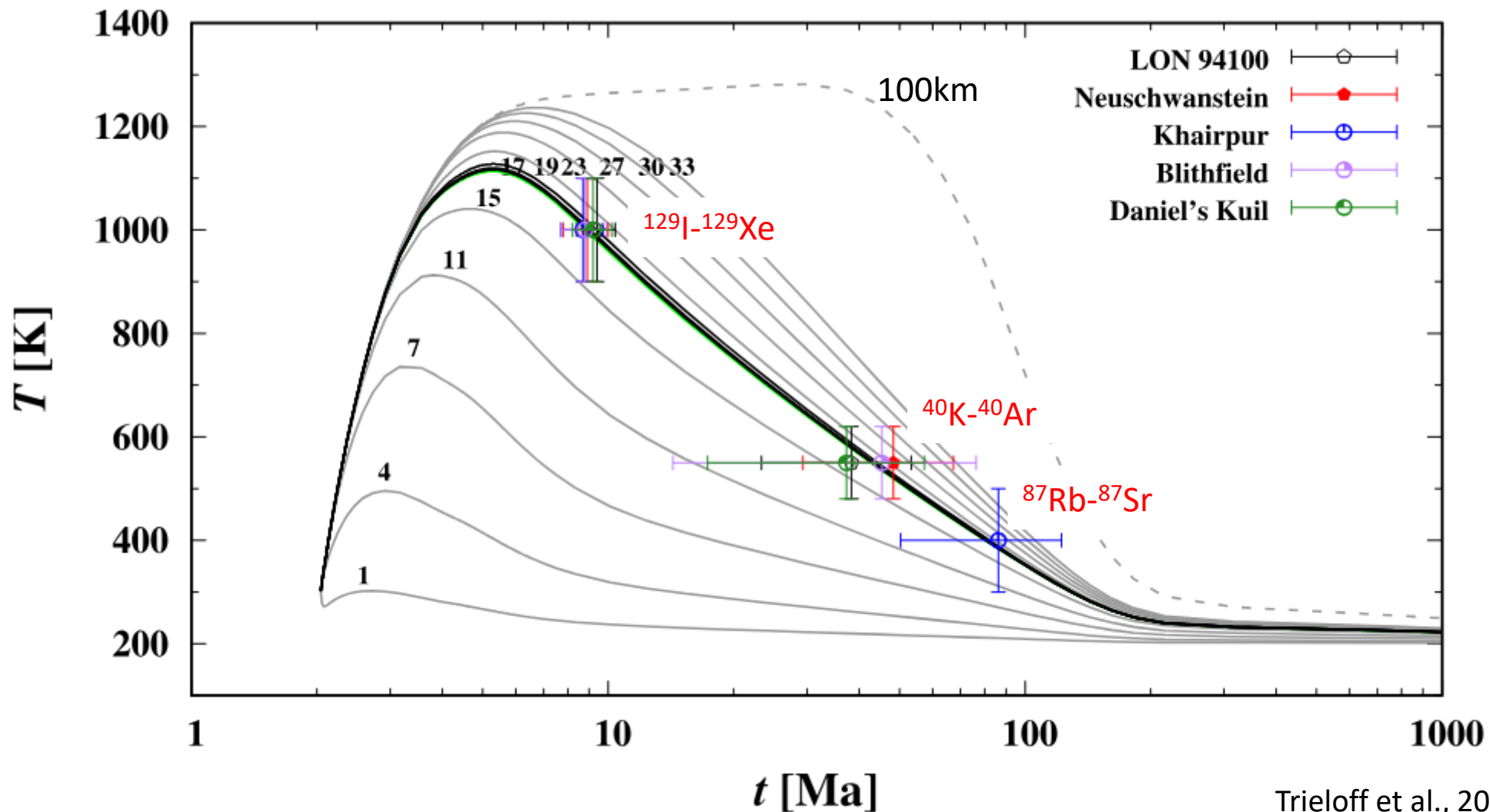
Date la séparation entre les réservoirs du manteau et de la croûte





Ages de formation des corps parents des chondrites

Chondrites EL

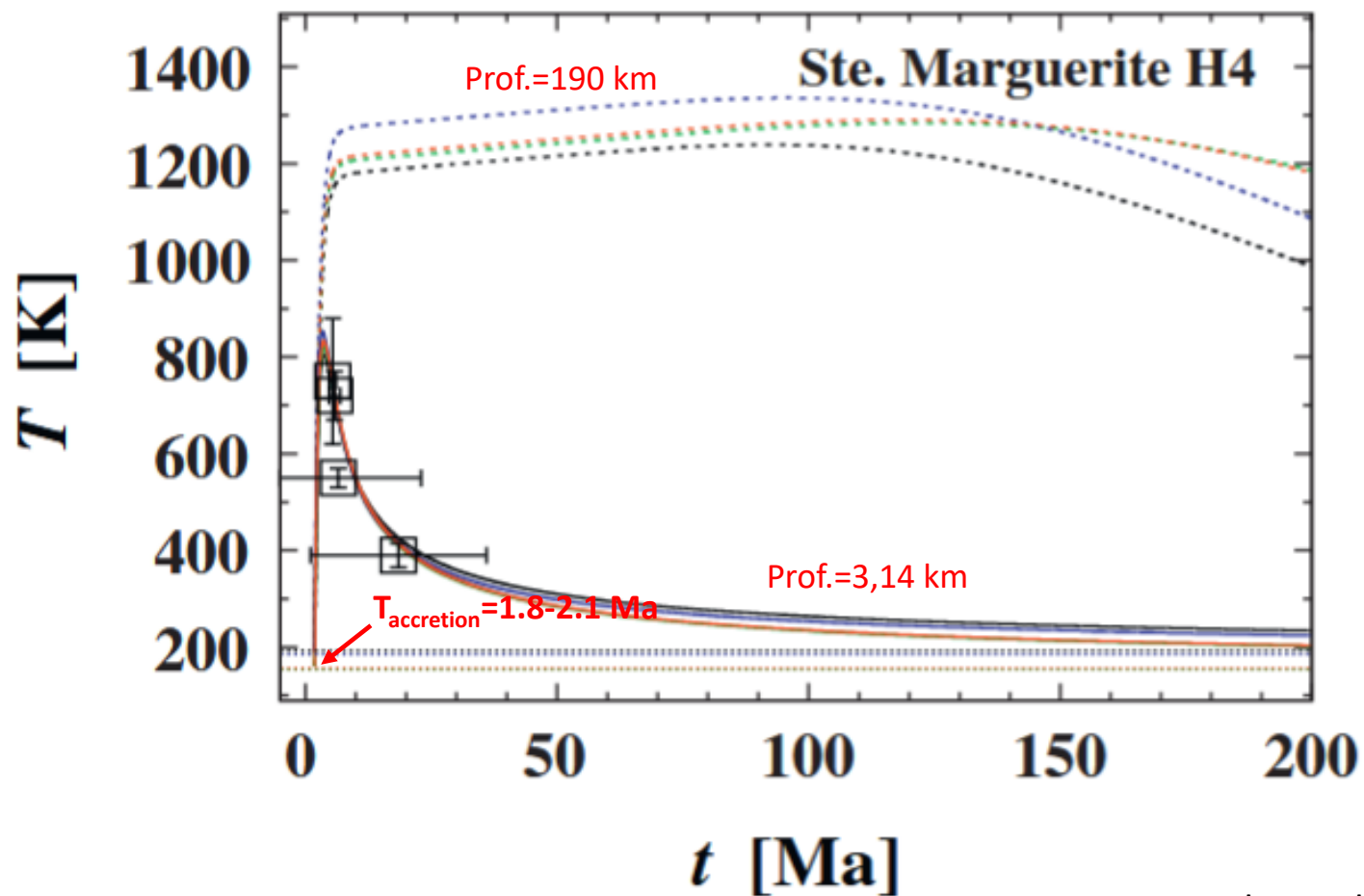


Trieloff et al., 2022



Ages de formation des corps parents des chondrites

Chondrites H

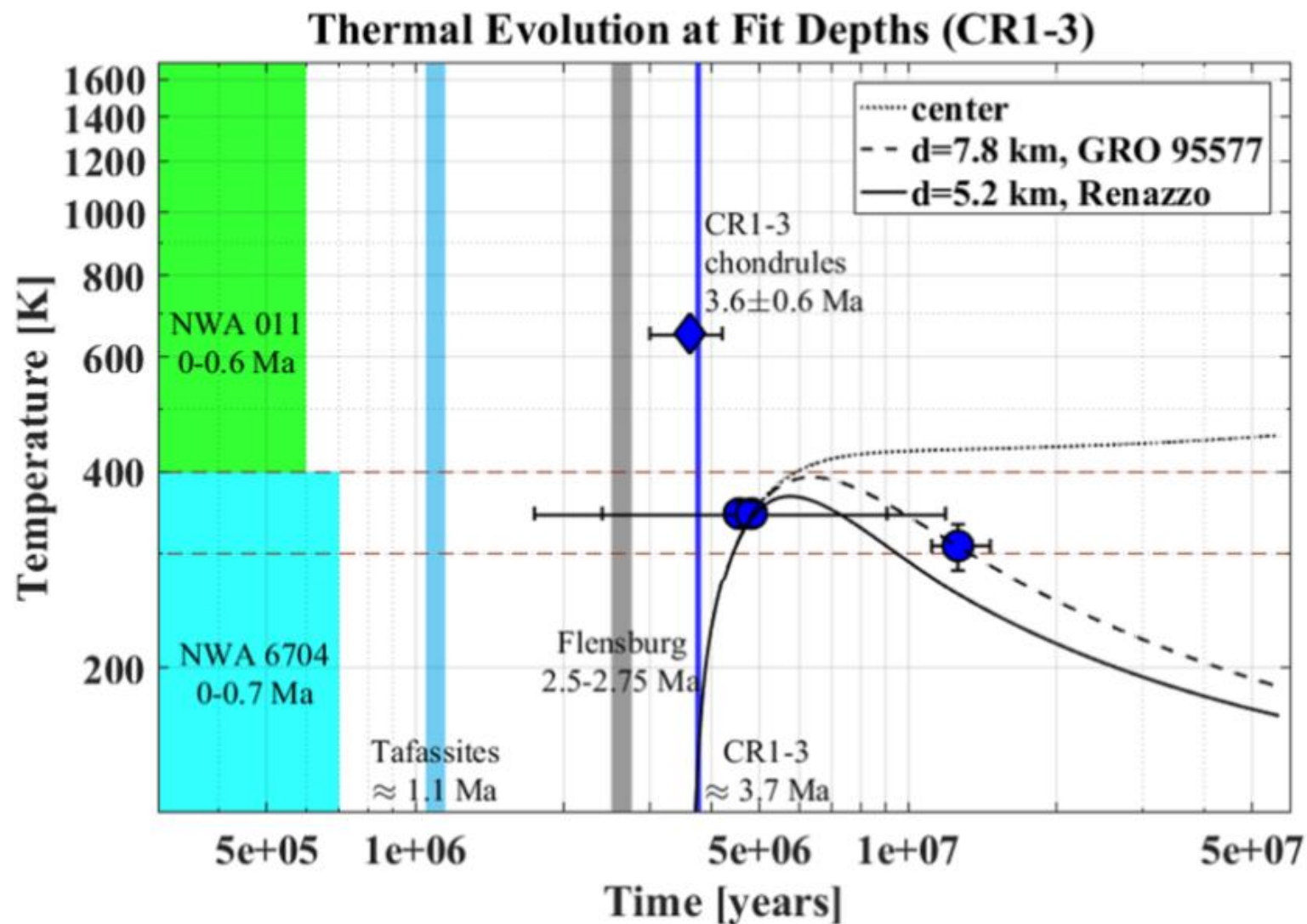


Henke et al., 2013



Ages de formation des corps parents des chondrites

Chondrites CR

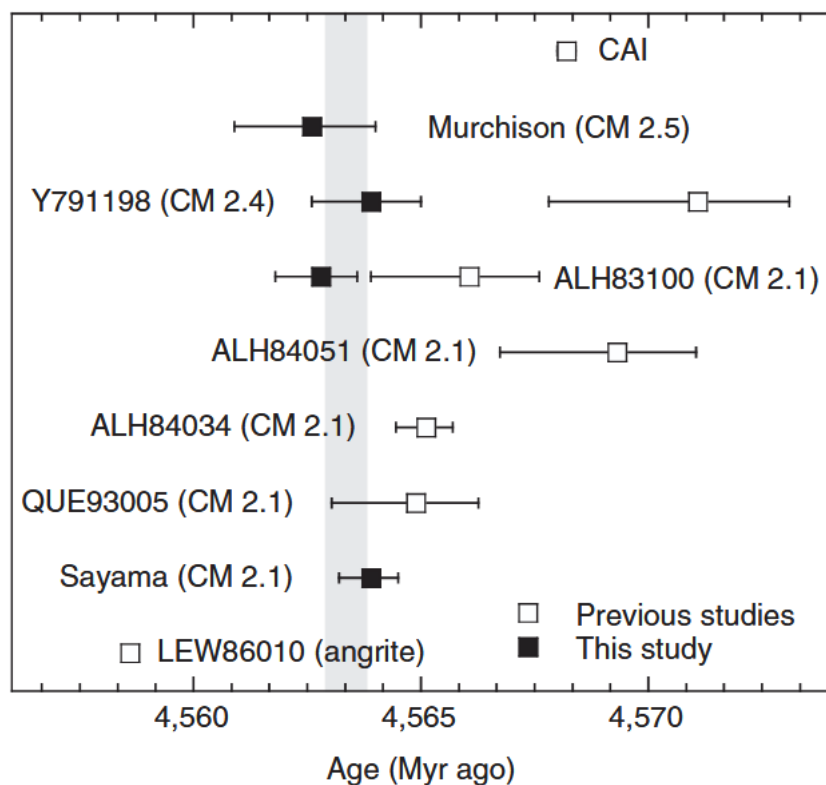




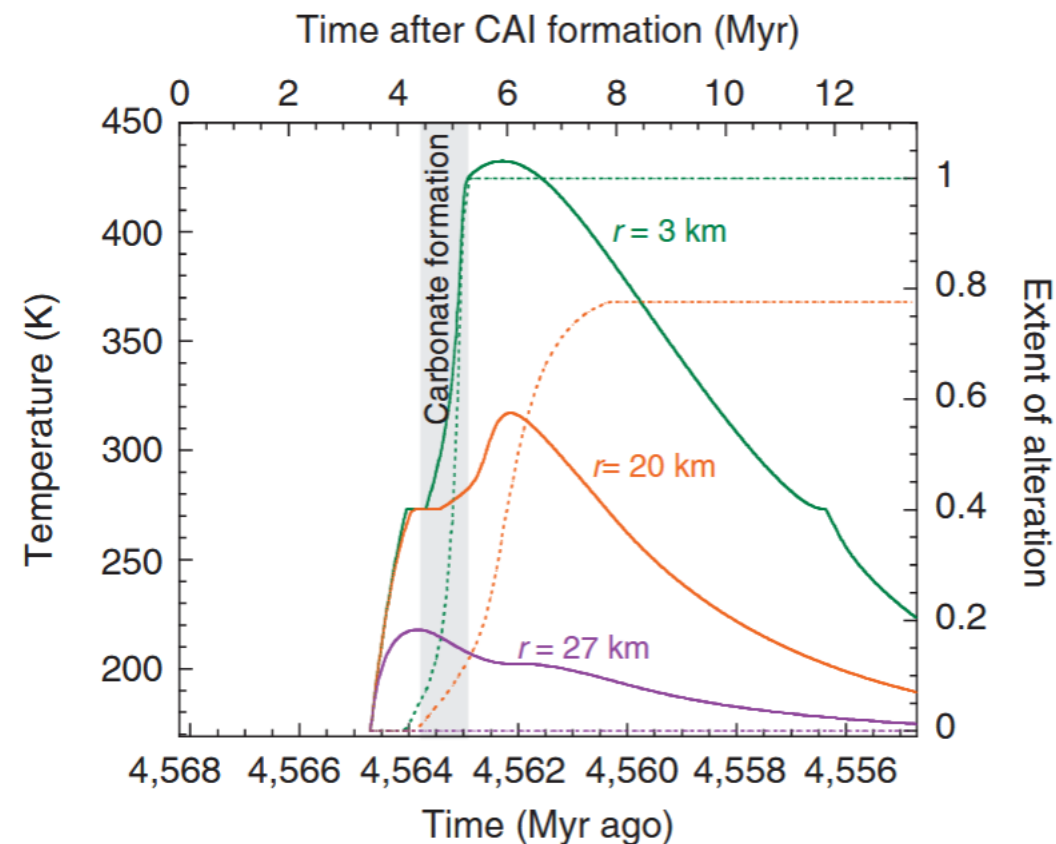
Ages de formation des corps parents des chondrites

Chondrites CM

Datation Mg-Cr de la formation des carbonates:
Calcite ($T \sim 300$ K) et Dolomite ($T \sim 400$ K)



Modèle thermique pour une formation 3,5 Ma après CAI

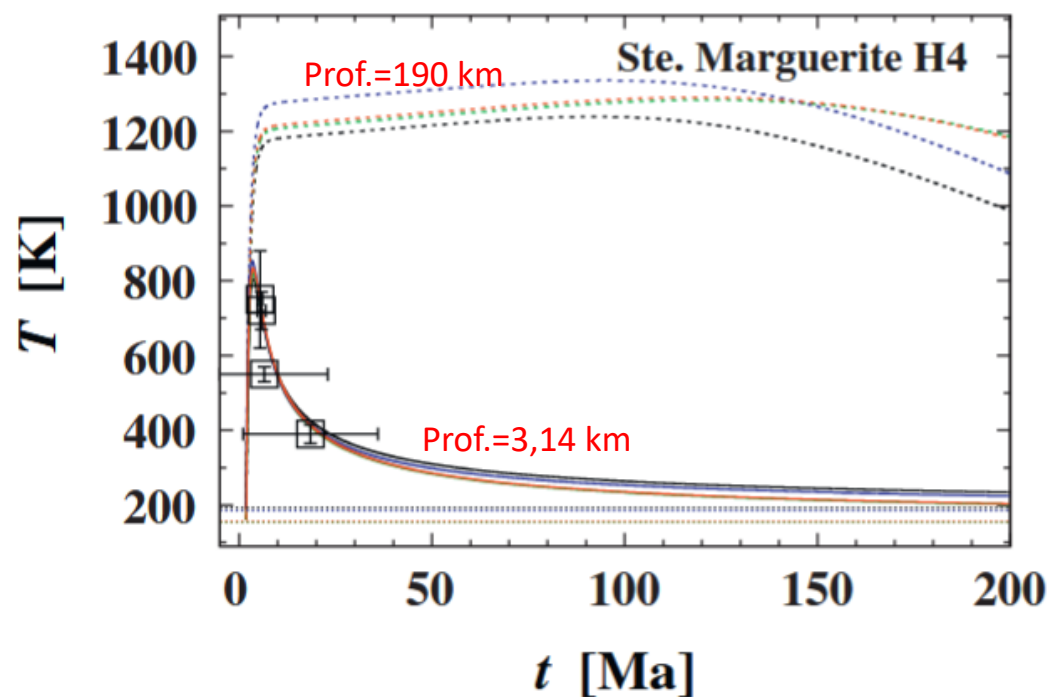


Fujiya et al., 2012

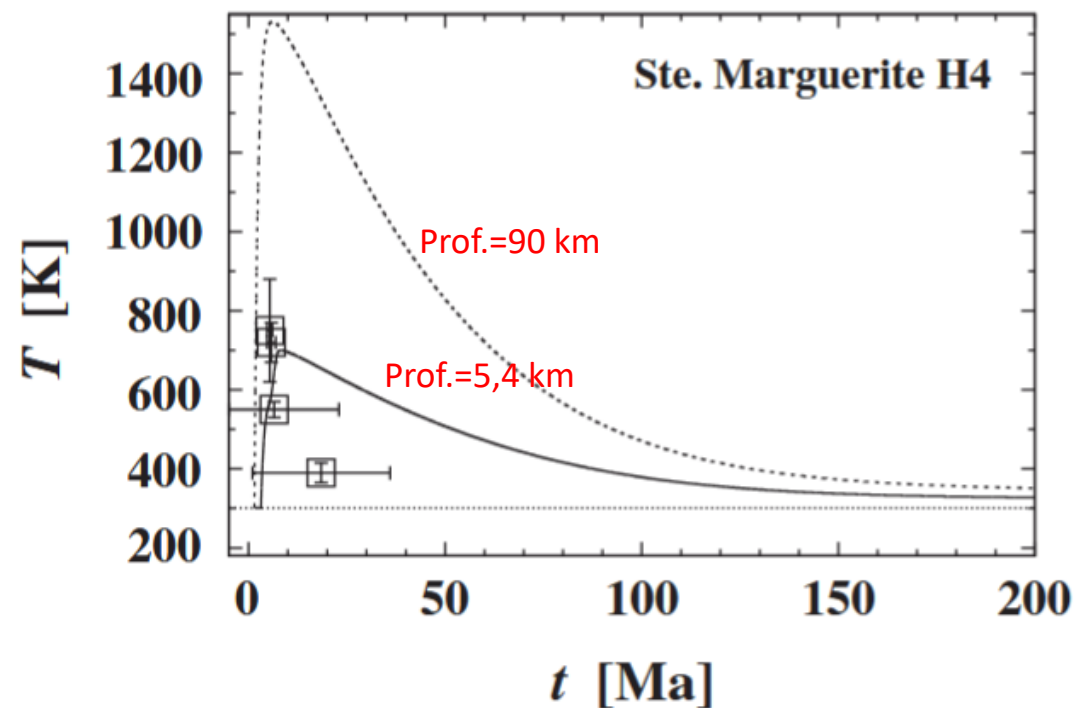


Accrétion instantanée ou continue?

Accrétion instantanée à 1,85 Ma



Accrétion continue entre 1,5 et 3,5 Ma



Henke et al., 2013

Accrétion instantanée ou continue?

Erg Chech 002: une achondrite partiellement fondue (25%) à 1200°C, à 1,4 Ma (0,95 – 2,2 Ma)

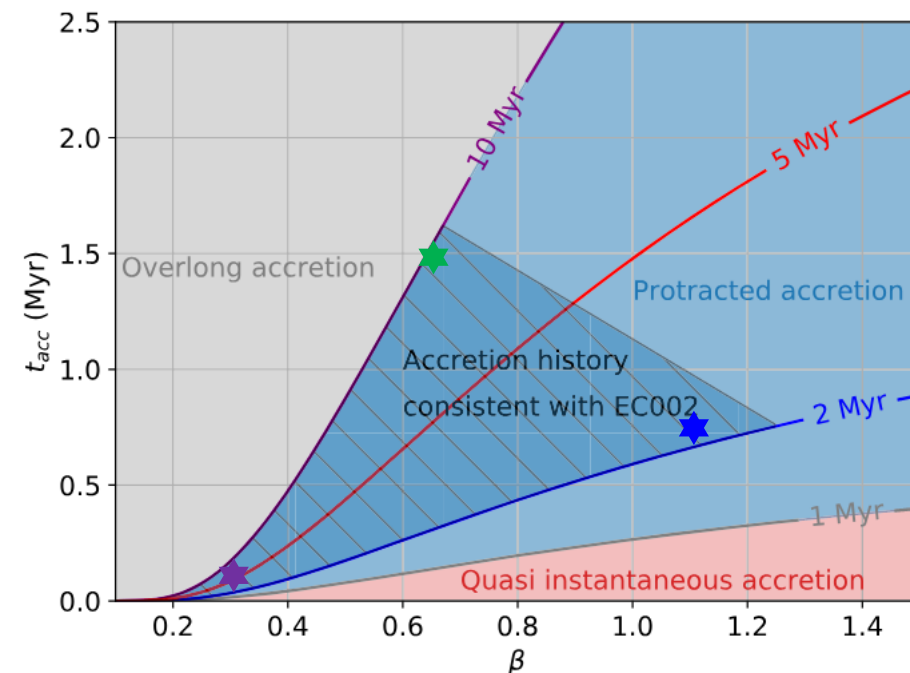
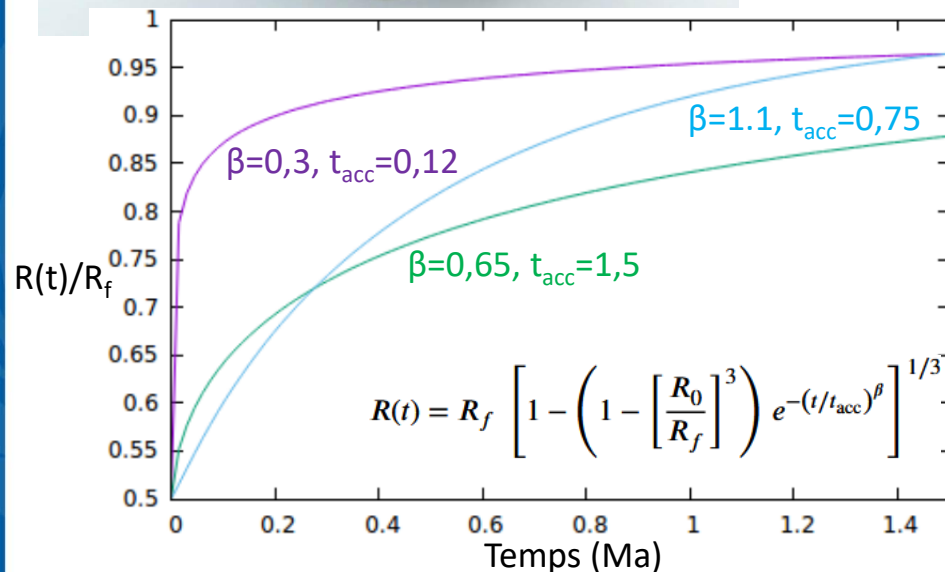


Sturtz et al. 2022:

Le corps parent doit s'être formé avant cette date.

S'il s'est formé tôt, il devrait avoir complètement fondu.

Nécessité d'accréter de la nouvelle matière froide pour expliquer la fusion partielle

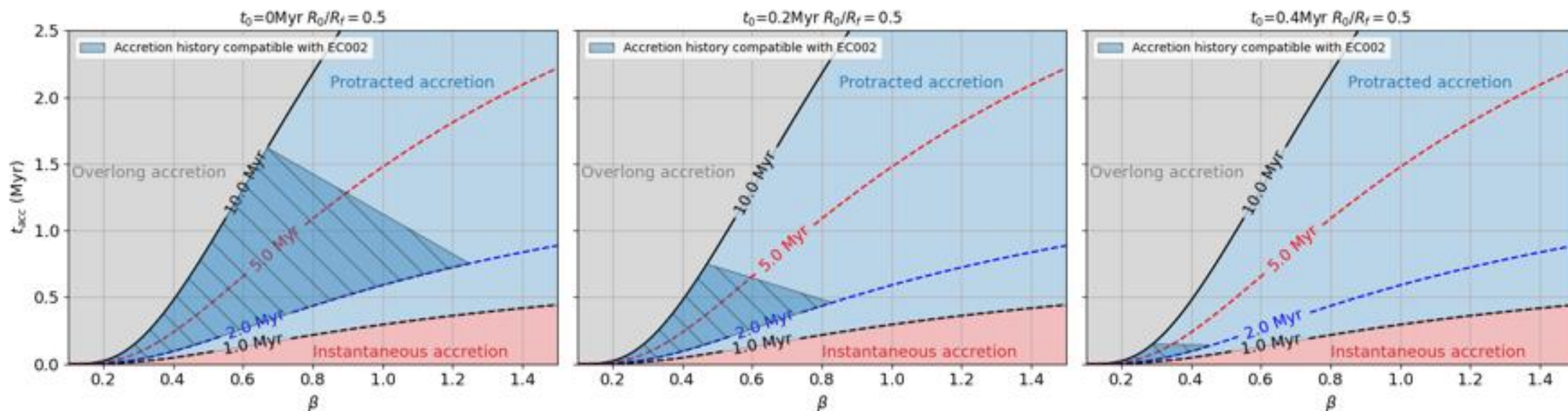


Accrétion instantanée ou continue?

Erg Chech 002: une chondrite partiellement fondue (25%) à 1200°C, à 1,4 Ma (0,95 – 2,2 Ma)

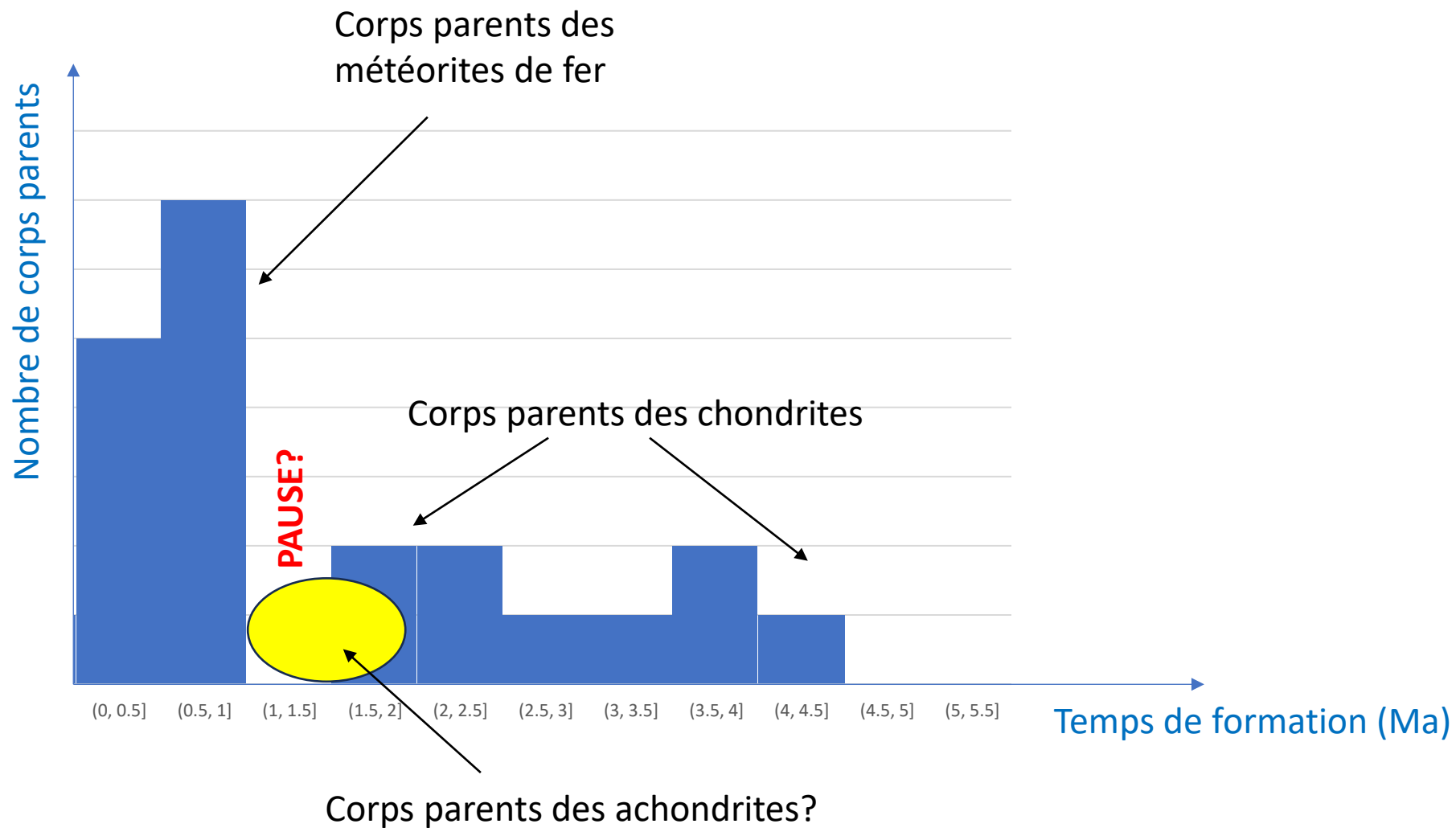


Cependant, Sturtz et al. Fixent le début de l'accrétion à $t=0$.
Si cette contrainte est relaxée, l'accrétion peut se faire à β et t_{acc} beaucoup plus courts, c'est à dire quasi-instantanée





Une pause dans la formation des planétésimaux?





A retenir

- Au début du Système solaire, lors de la formation des CAIs, il y avait une quantité considérable de ^{26}Al .
- Sa décroissance radioactive a été l'agent principal pour chauffer les planétésimaux
- Plus un planétésimal s'est formé tôt, plus était riche en ^{26}Al et plus il a chauffé.
- Seuls les planétésimaux formés dans les premiers ~ 1.5 Ma se sont différenciés.
- Les météorites montrent la coexistence d'objets différenciés et d'objets qui n'ont pas fondu
- La formation du noyau peut être datée par le chronomètre Hf-W. Il montre des âges entre 1 et 4 Ma.
- Par le biais de modèles d'évolution thermique, on estime que les corps parents des météorites de fer se sont formés dans le premier Ma de la vie du Système solaire.
- La formation des achondrites peut être datée par plusieurs chronomètres, dont le Mn-Cr
- La datation de la formation de leurs corps parents est incertaine car ces roches se sont formées près de la surface, peuvent avoir été altérées par des impacts, l'apport de matière froide etc.
- Les corps parents des chondrites n'ont pas fondu, mais leur réchauffement a engendré plusieurs altérations qui peuvent être datées par une série de chronomètres, qui permettent de contraindre leur refroidissement
- Grâce à ses contraintes, les modèles thermiques permettent de déduire assez précisément l'âge de formation des corps parents qui a eu lieu à partir de 1,8 ou 2 Ma.
- Les corps parents des chondrites carbonées se sont formés après ceux des chondrites ordinaires et à enstatite
- Il pourrait y avoir eu une pause, au moins partielle dans la production des planétésimaux, entre 1 et 2 Ma.