



Leçon N. 6 – 26 Novembre 2025

Alessandro
MORBIDELLI

Chaire

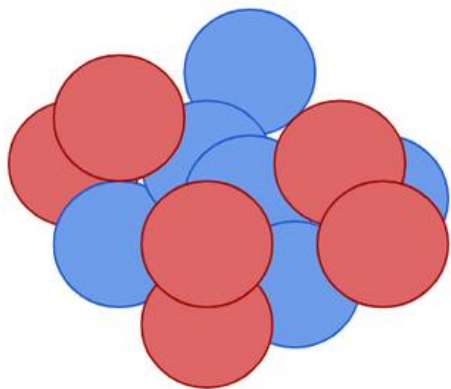
Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

La dichotomie isotopique

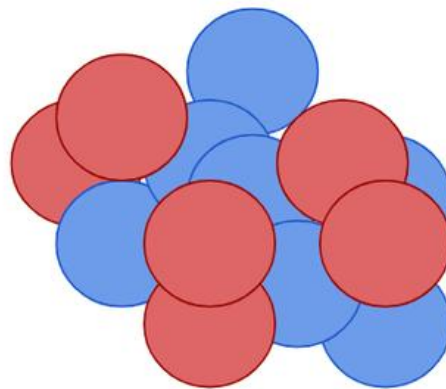


Isotopes

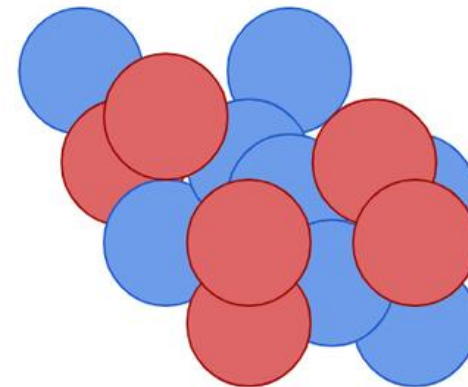
Atomes ayant le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons
Mêmes comportements chimiques, masses différentes.



Carbon-12
Nucleus



Carbon-13
Nucleus

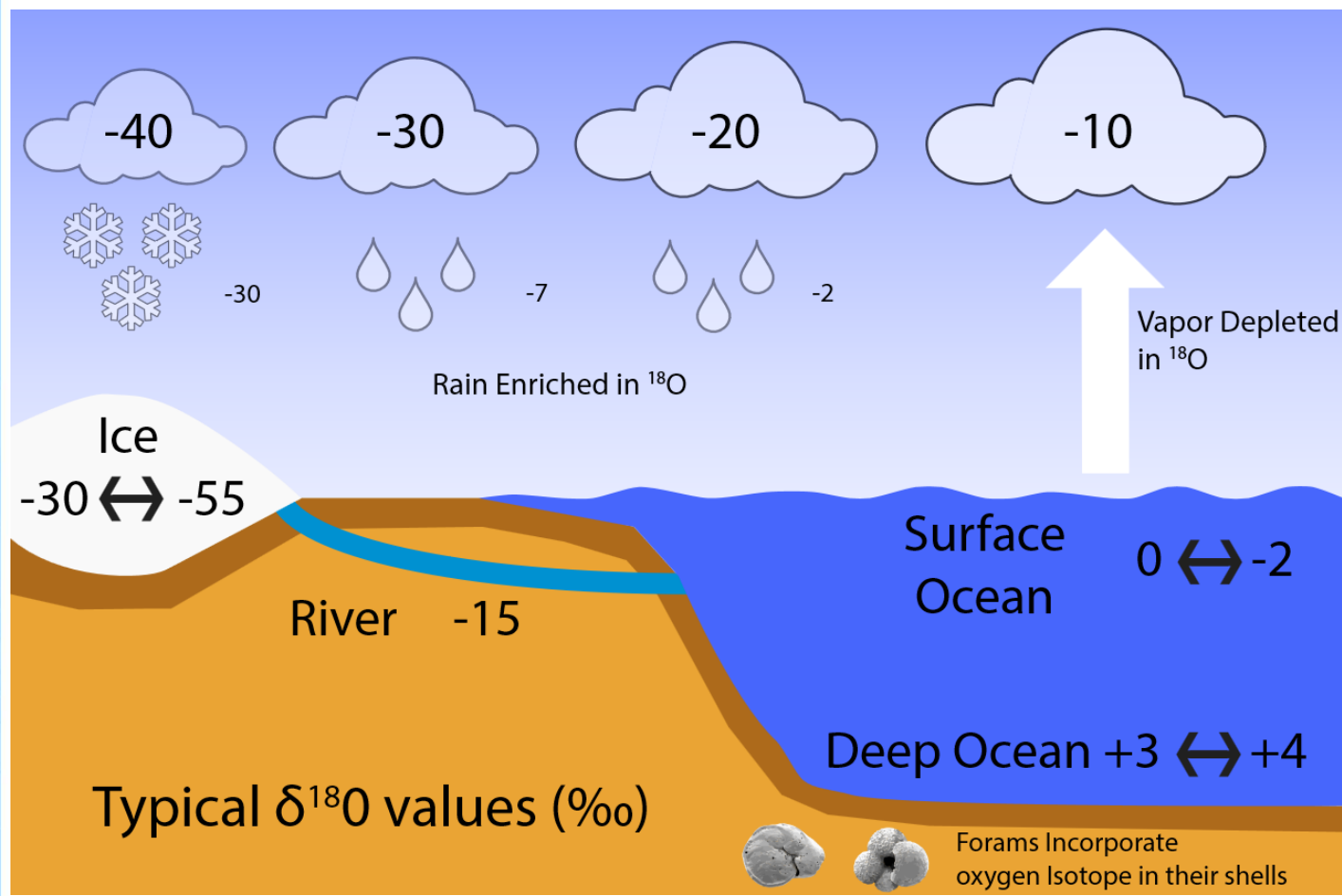


Carbon-14
Nucleus



Fractionnements isotopiques

Certaines réactions chimiques et transformations physiques (évaporation, condensation), peuvent privilégier un isotope par rapport à l'autre, en engendrant un changement de rapport isotopique dans une espèce donnée (molécule, minéral etc.).

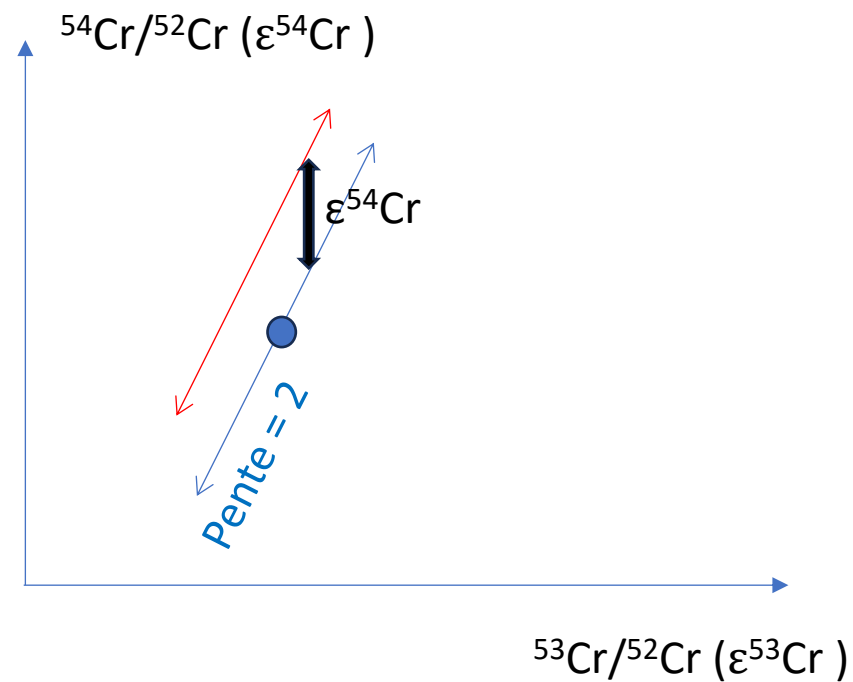
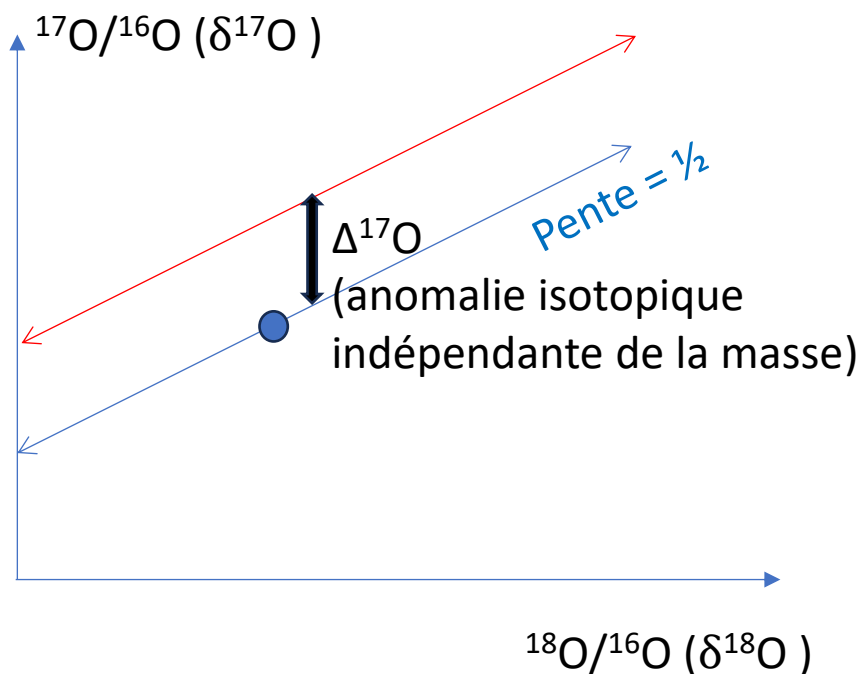


$$\delta^{17,18}\text{O} = \left[\frac{\left(\frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Sample}}}{\left(\frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 10^3$$



Fractionnements isotopiques (3 isotopes)

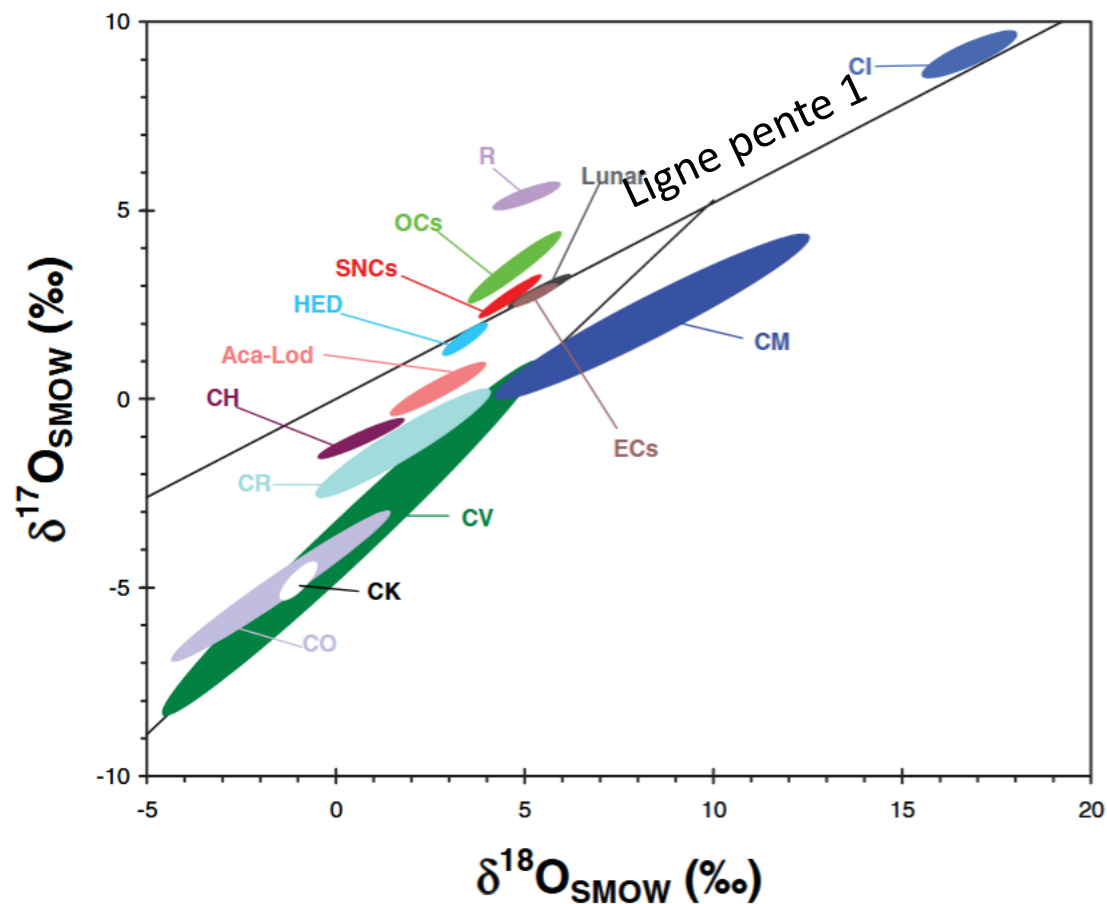
Les fractionnements isotopiques suivent des lois déterministes, dépendantes des masses des isotopes



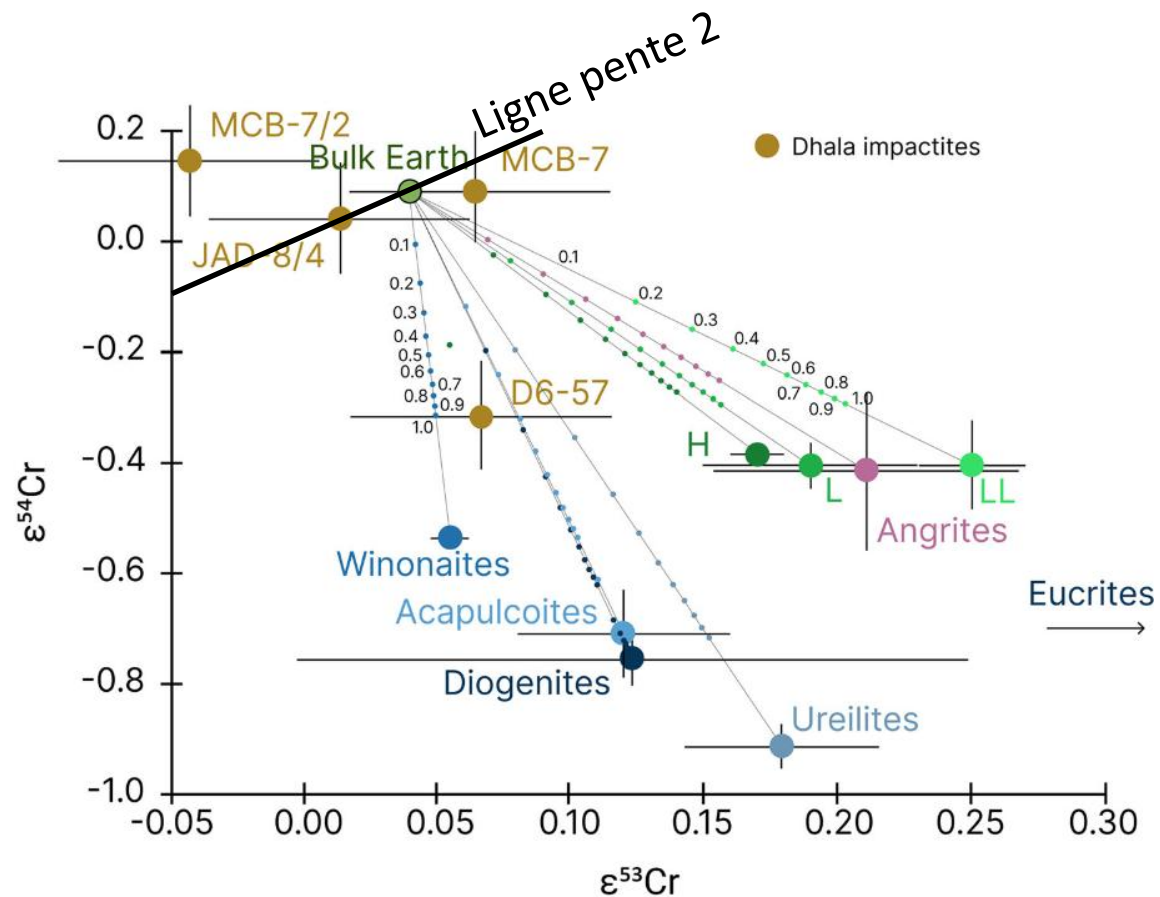
Les anomalies isotopiques indépendantes de la masse peuvent être déterminées seulement pour atomes ayant au moins 3 isotopes



Anomalies isotopiques indépendantes de la masse



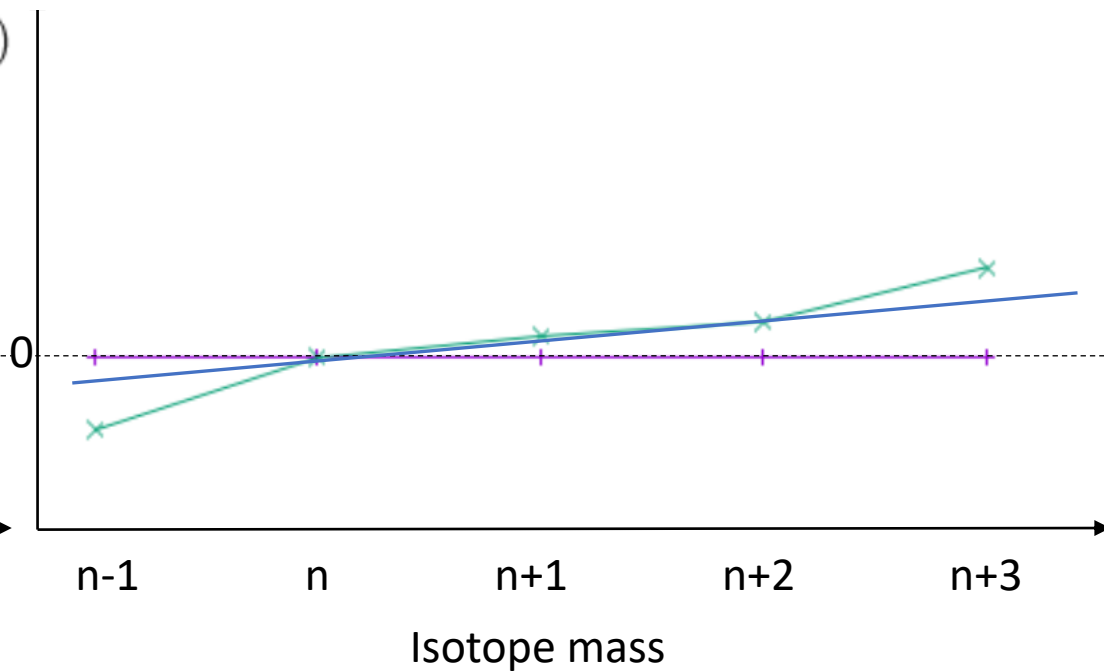
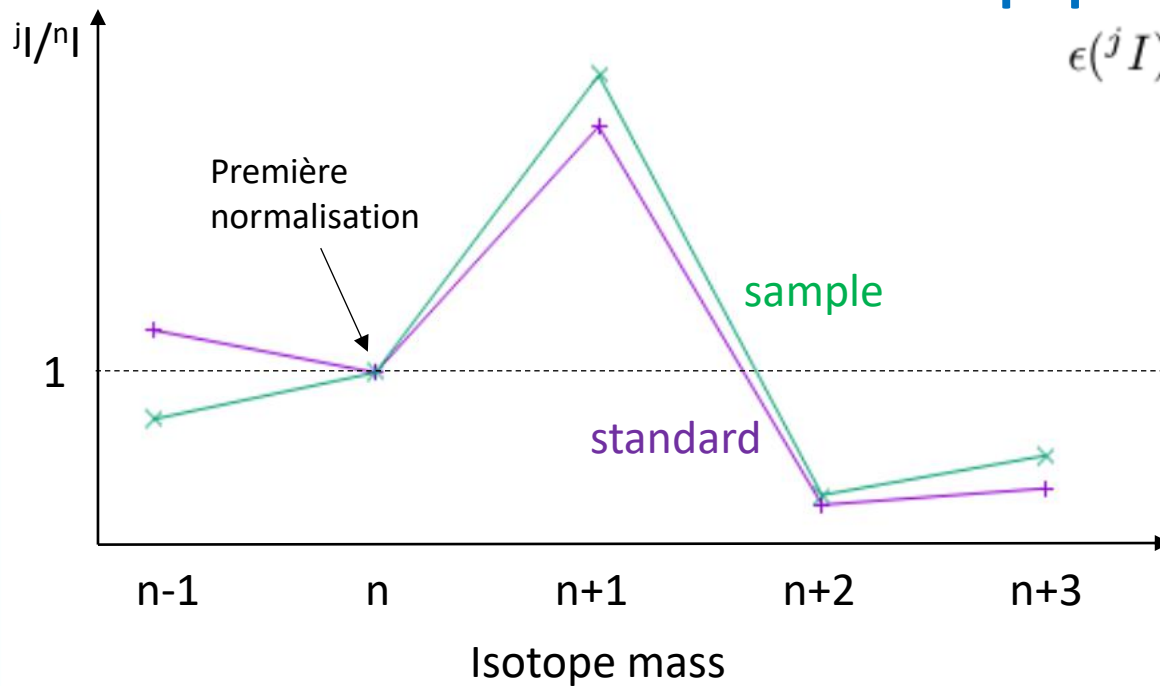
Engrand, 2011



Anand et al., 2023



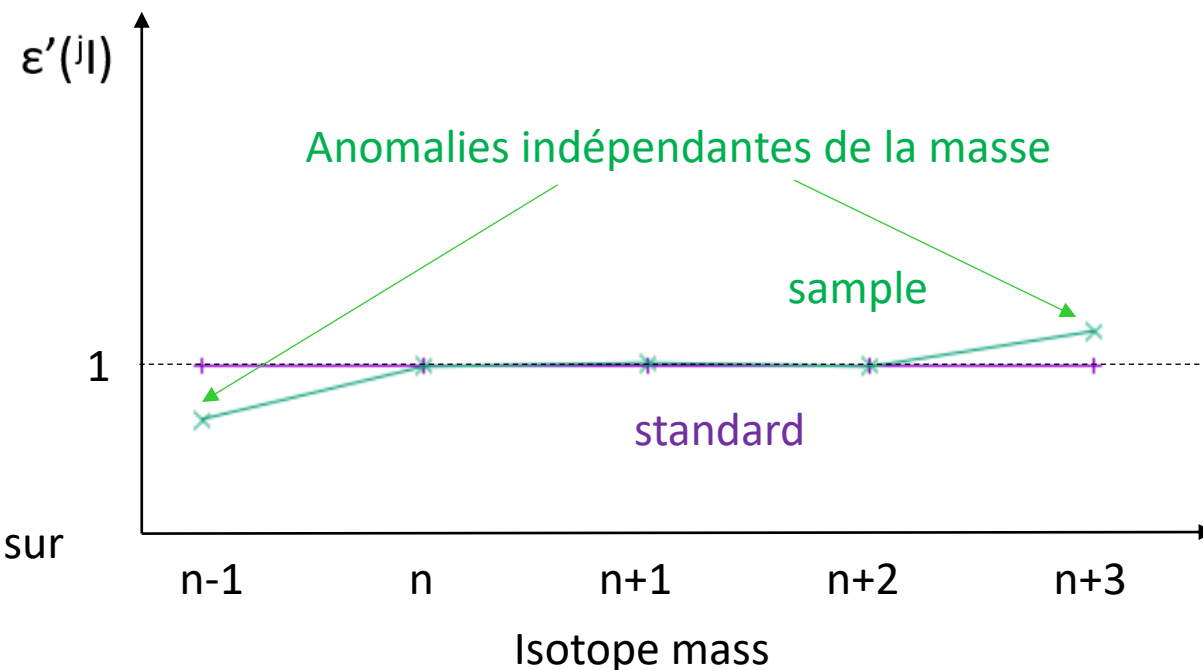
Fractionnements isotopiques (multiples isotopes)



$$\epsilon(jI) = \frac{(iI/nI)_{sample} - (iI/nI)_{standard}}{(iI/nI)_{standard}}$$

$$\text{Deuxième normalisation: } \epsilon'(jI) = \frac{2}{j-n} \frac{\epsilon(jI)}{\epsilon(n+2I)}$$

(élimine fractionnement dépendant de la masse sur la base de l'isotope $n+2$)





Anomalies isotopiques nucléosynthétiques

Certaines anomalies isotopiques indépendantes de la masse peuvent s'expliquer par des processus dans les disques (ex. pour l'oxygène via l'auto-écranage). Pour d'autres, elles semblent être liées aux processus de synthèse des éléments. Elles sont donc appelées anomalies isotopiques nucléosynthétiques.

Elements recording nucleosynthetic isotope anomalies

H																	He															
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne									
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr															
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe															
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd															
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og															
																		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
																		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Sous débat

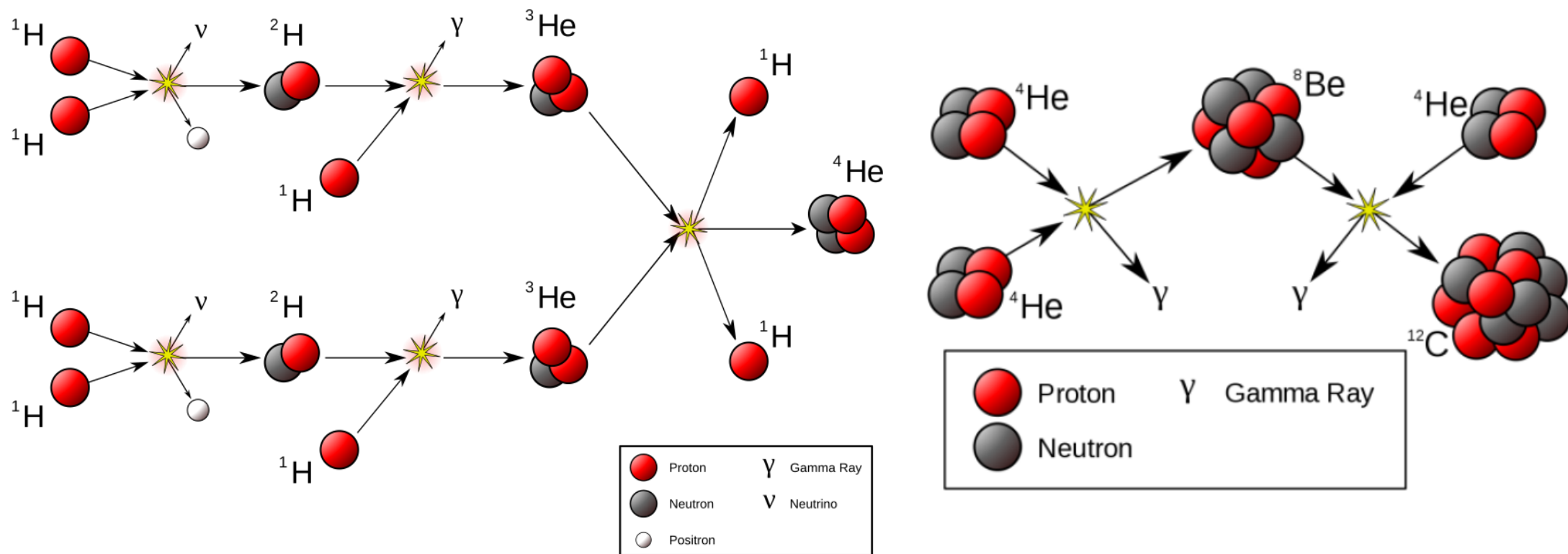
Iron group elements

Sous débat

Iron group elements



La synthèse nucléaire dans les étoiles

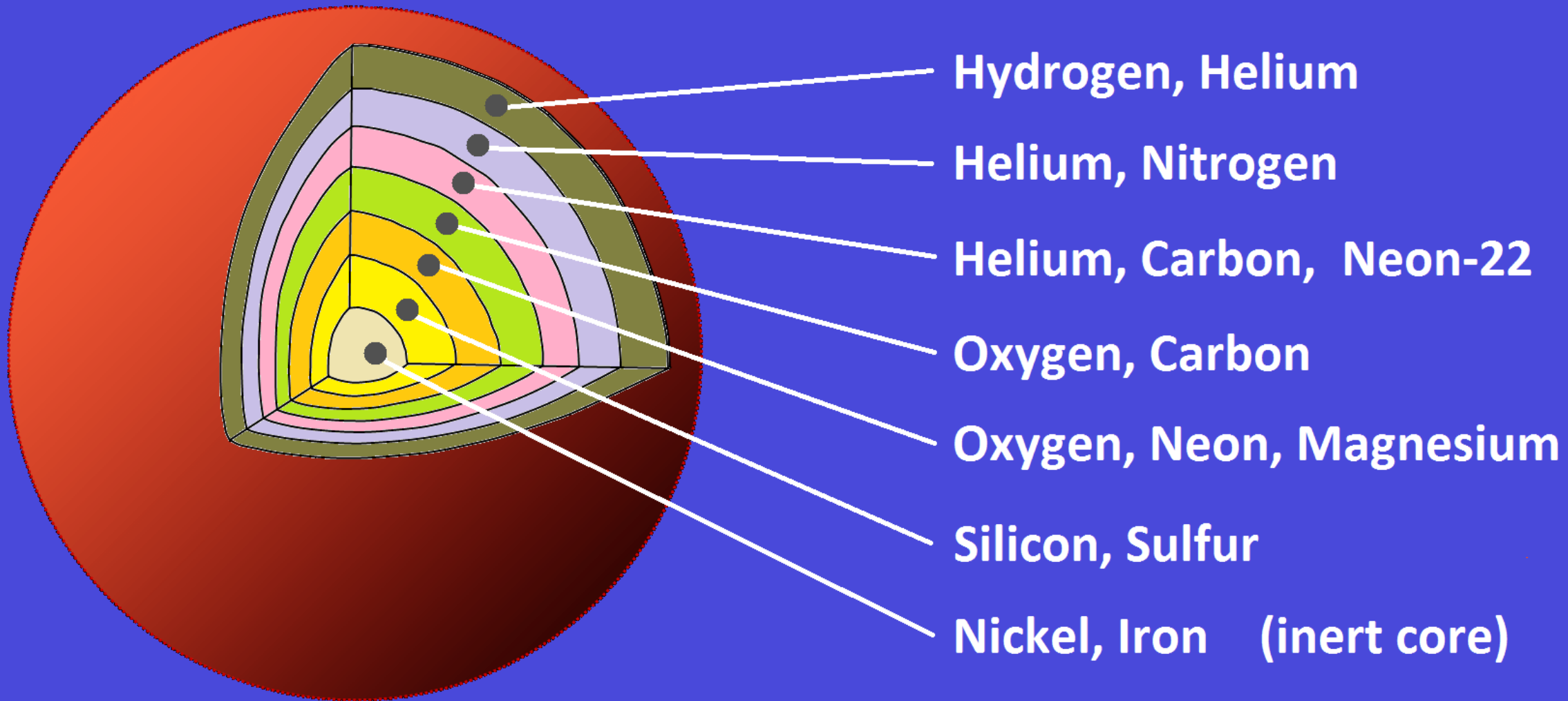


Cette chaîne de réaction de fusion nucléaire se poursuit jusqu'à la synthèse du Fe.
La synthèse d'éléments plus lourds ne produit plus d'énergie, mais consomme de l'énergie.



La synthèse nucléaire dans les étoiles

Étoile de > 8 masses solaires





La synthèse nucléaire dans les étoiles

Nuclear burning stages

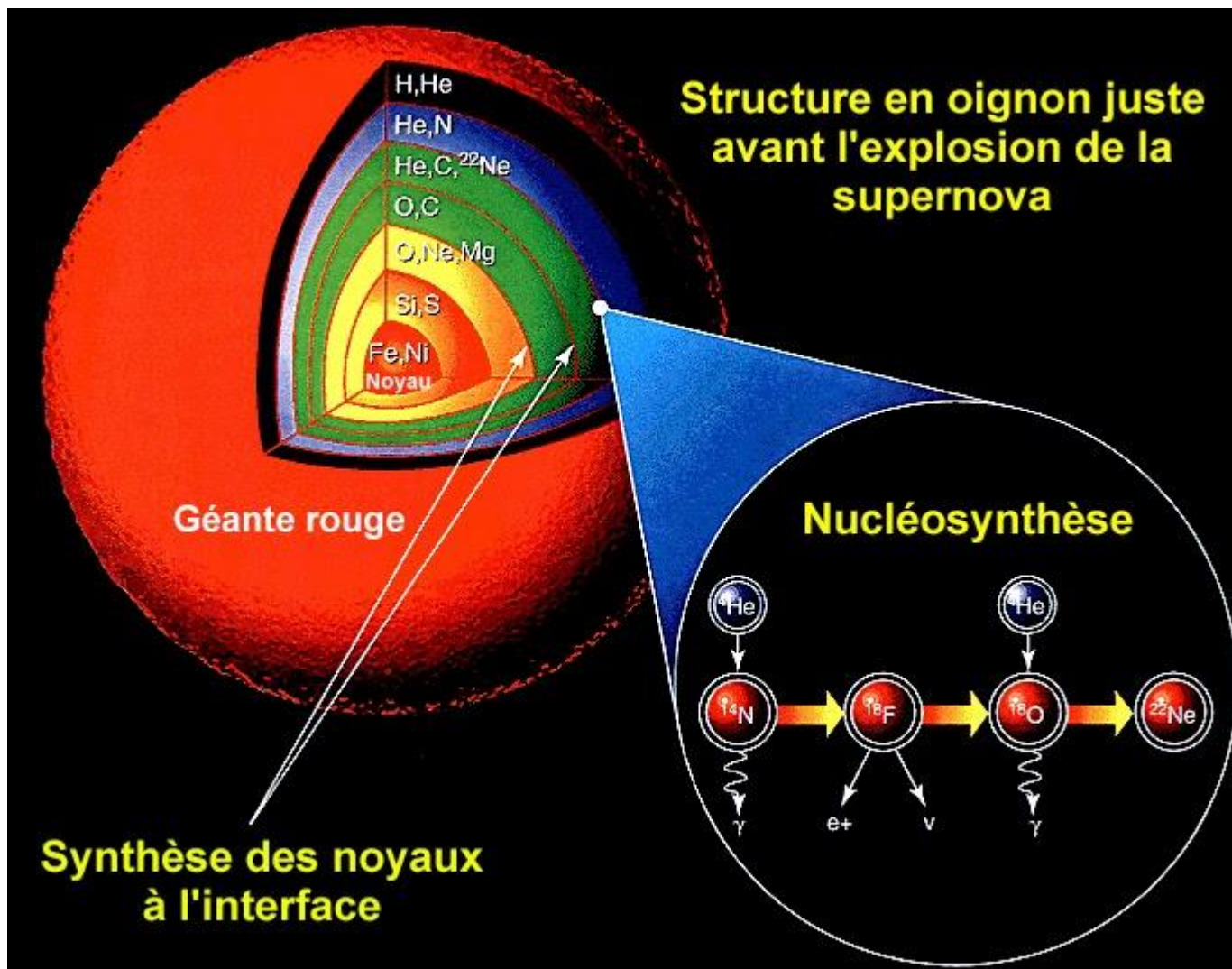
(e.g., 20 solar mass star)

Fuel	Main Product	Secondary Product	T (10 ⁹ K)	Time (yr)	Main Reaction
H	He	¹⁴ N	0.02	10 ⁷	^{CNO} 4 H → ⁴ He
He	O, C	¹⁸ O, ²² Ne s-process	0.2	10 ⁶	3 He ⁴ → ¹² C ¹² C(α,γ) ¹⁶ O
C	Ne, Mg	Na	0.8	10 ³	¹² C + ¹² C
Ne	O, Mg	Al, P	1.5	3	²⁰ Ne(γ,α) ¹⁶ O ²⁰ Ne(α,γ) ²⁴ Mg
O	Si, S	Cl, Ar, K, Ca	2.0	0.8	¹⁶ O + ¹⁶ O
Si	Fe	Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni	3.5	0.02	²⁸ Si(γ,α)...



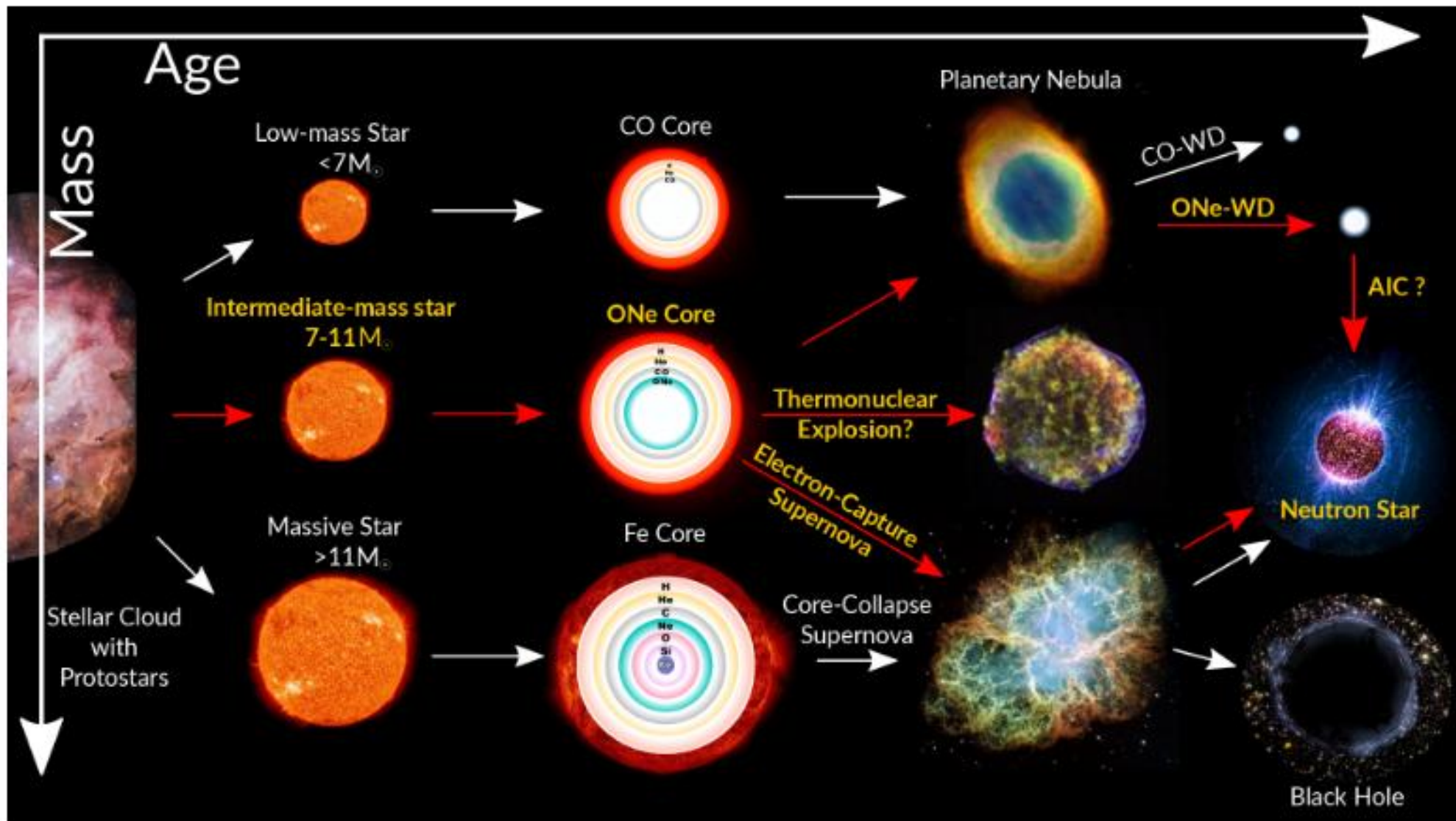
La synthèse nucléaire dans les étoiles

La nucléosynthèse se poursuit dans l'enveloppe





Libération des éléments synthétisés





Synthèse des isotopes des éléments du group du Fe

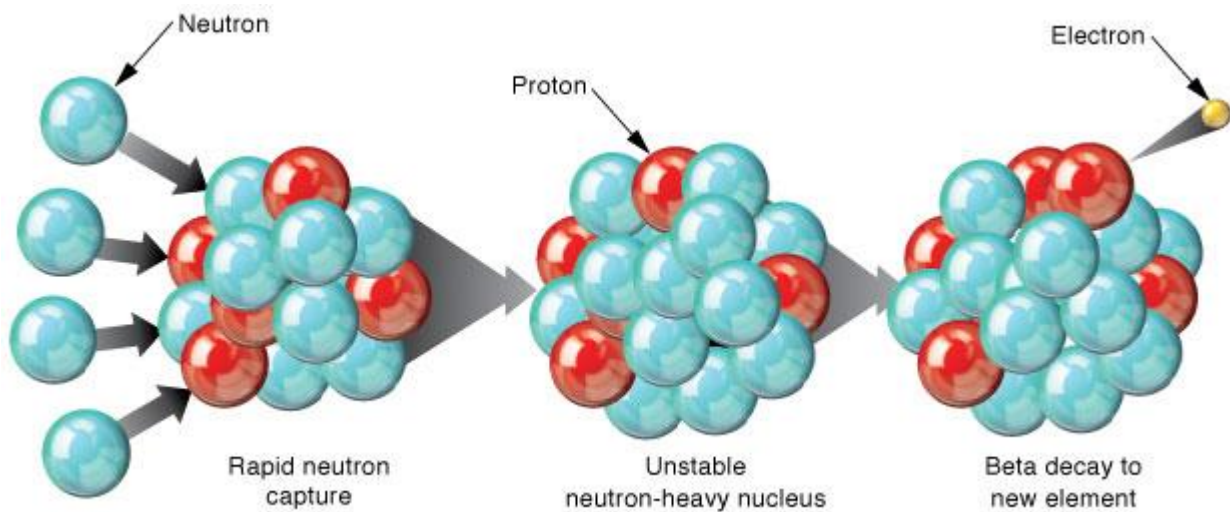
Produits pendant l'explosion des supernovæ par des réactions hors-équilibre.

Porteurs des anomalies: nano-spinelles (Dauphas et al., 2010) et oxydes pré-solaires (Qin et al., 2011)





Synthèse des atomes plus lourds que le Fer

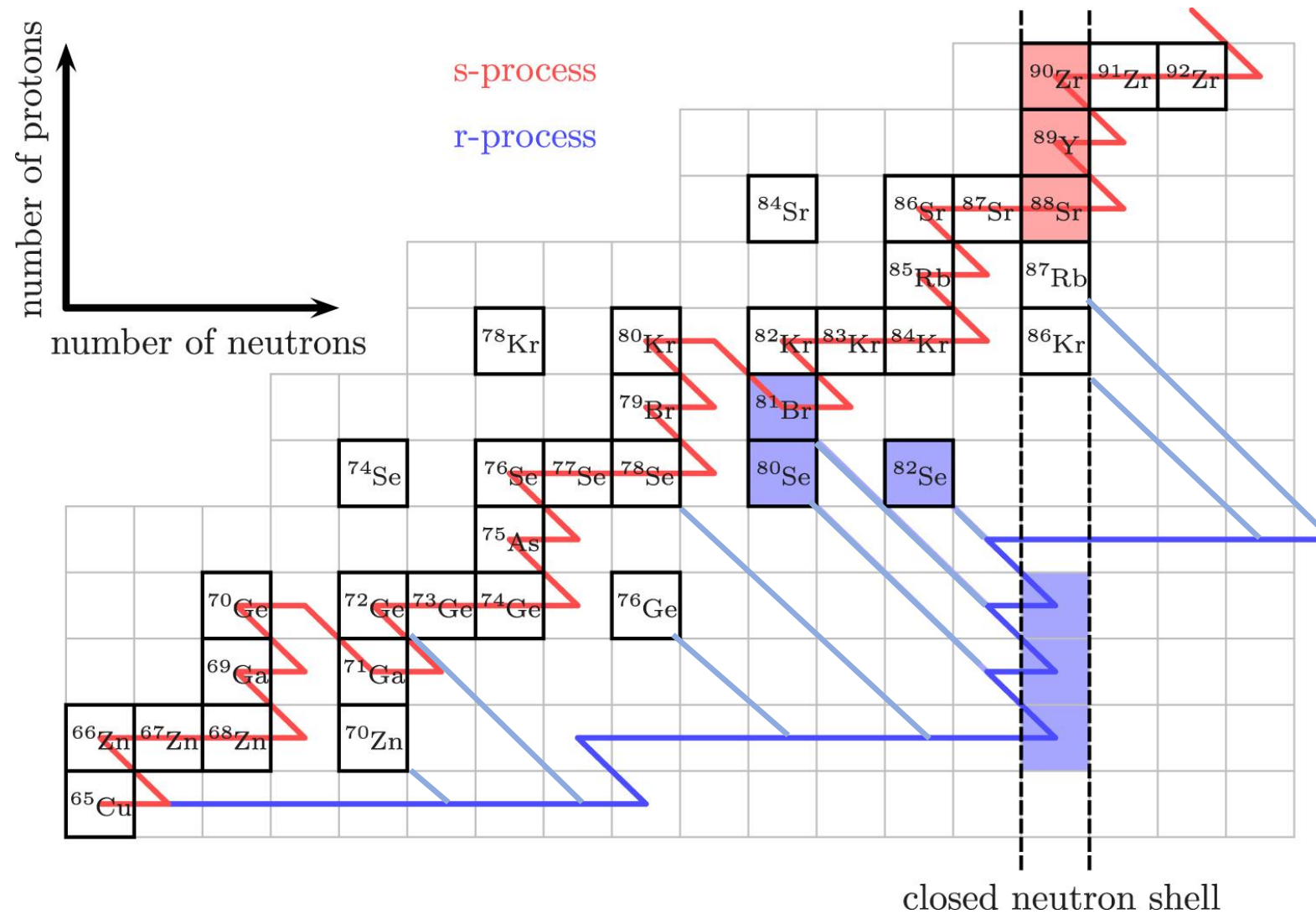


Processus-r: plusieurs neutrons sont capturés avant la décroissance β

Processus-s: après chaque capture d'un neutron, une décroissance β a lieu



Synthèse des atomes et de leurs isotopes par les processus s et r



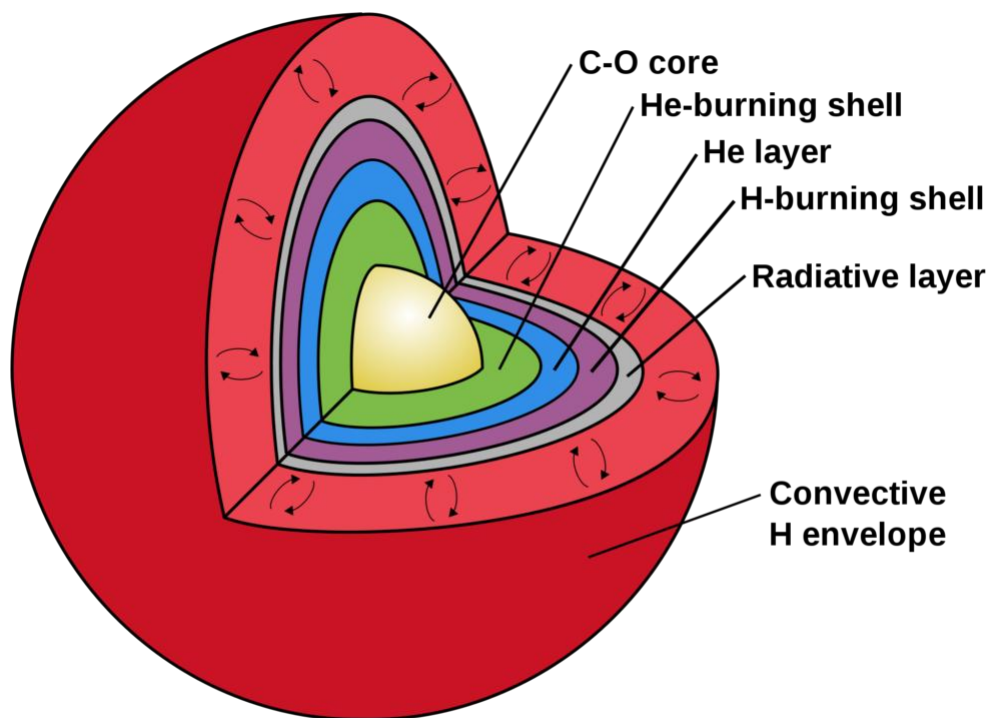


Processus s et étoiles géantes rouges

Étoiles de métallicité solaire entre 1,5 et 3 masses solaires.

Les éléments lourds sont préexistants à la formation de l'étoile et capturent les neutrons dans la phase d'expansion.

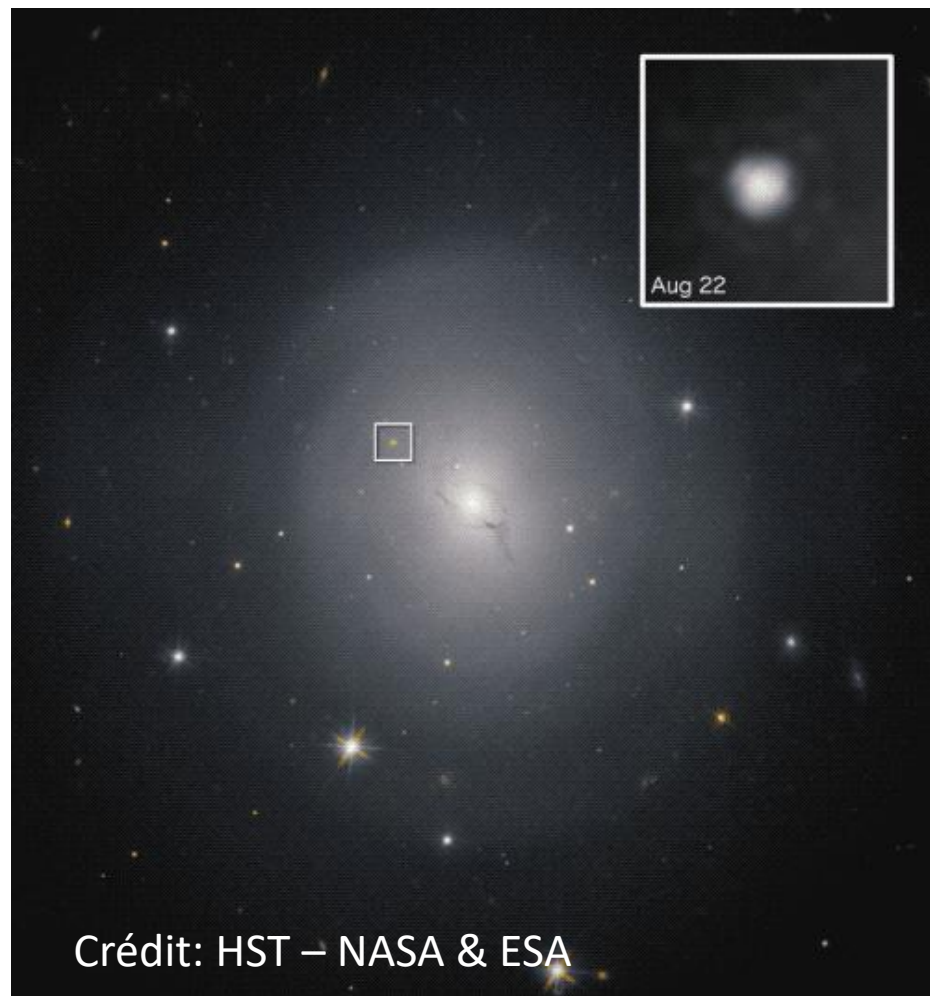
Les SiC sont les porteurs des anomalies nucléosynthétiques générées par le processus-s





Processus r, supernovæ et kilonovæ

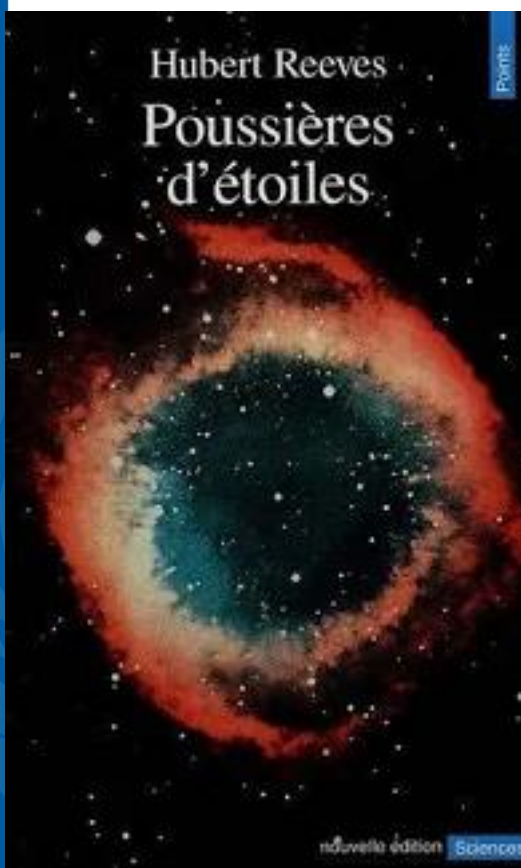
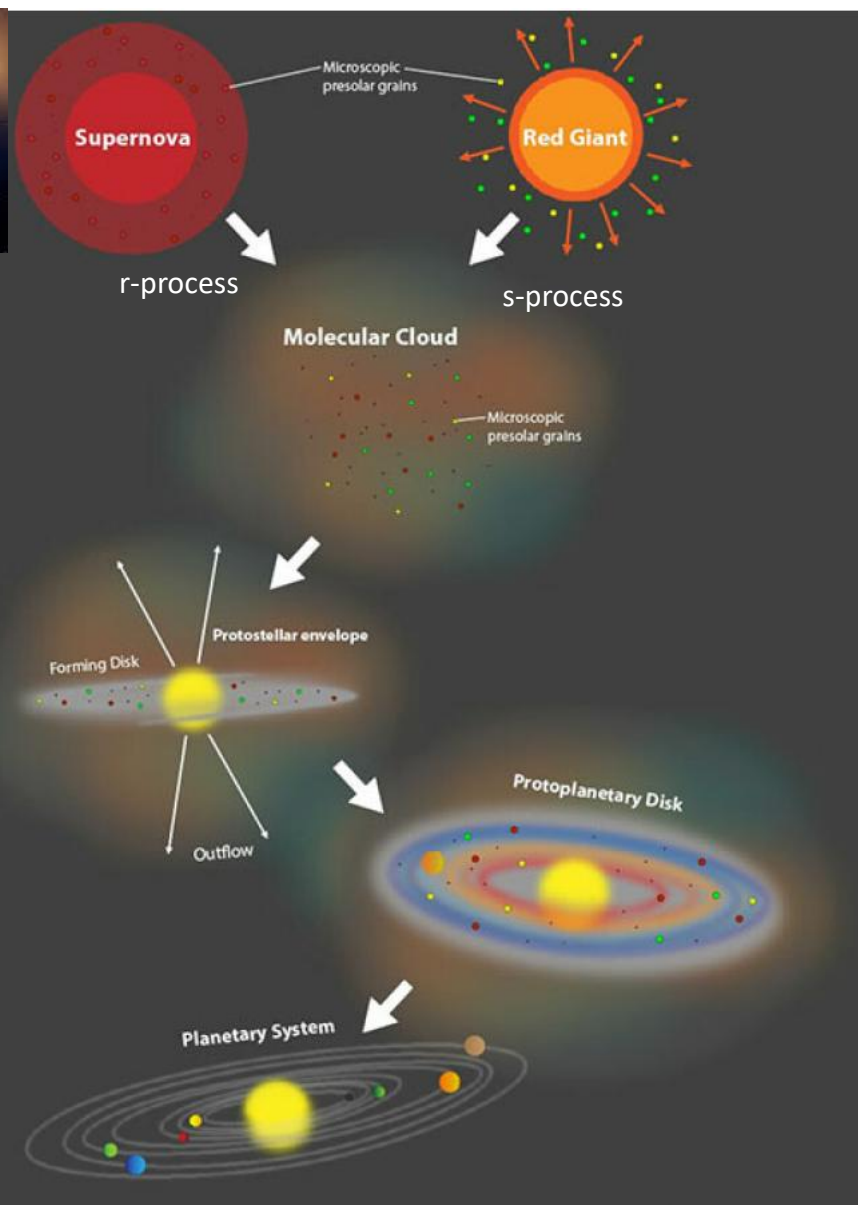
Kilonova: collision entre étoiles à neutrons. Première détection en 2017 par ondes gravitationnelles. Sr (Strontium, Watson et al., 2019) et Yt (Yttrium, Sneppen et al., 2023) détectés spectroscopiquement.



Crédit: HST – NASA & ESA

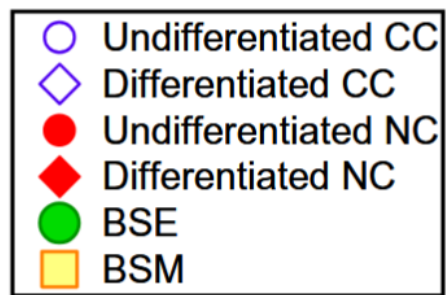
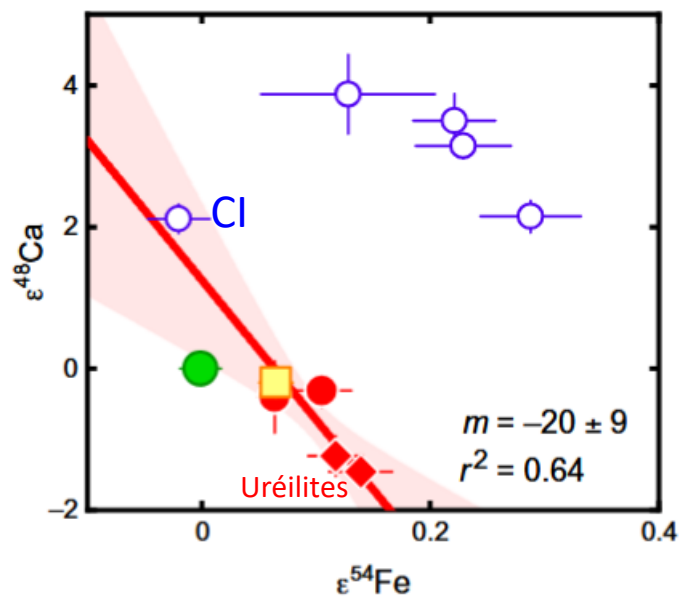
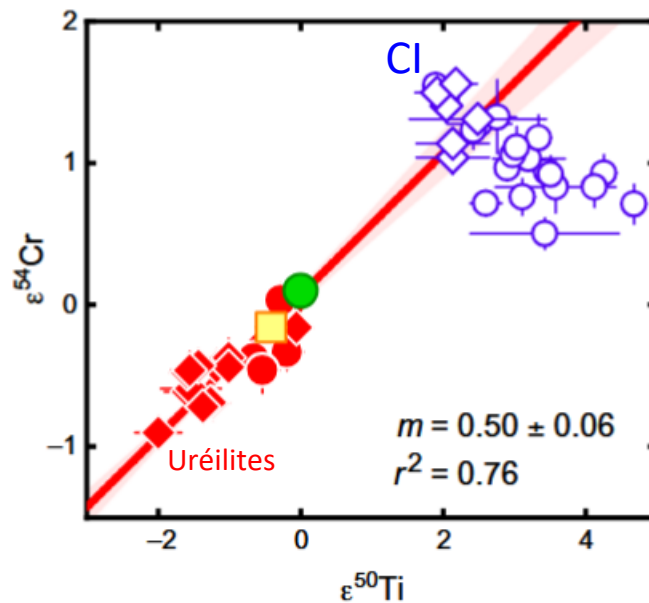
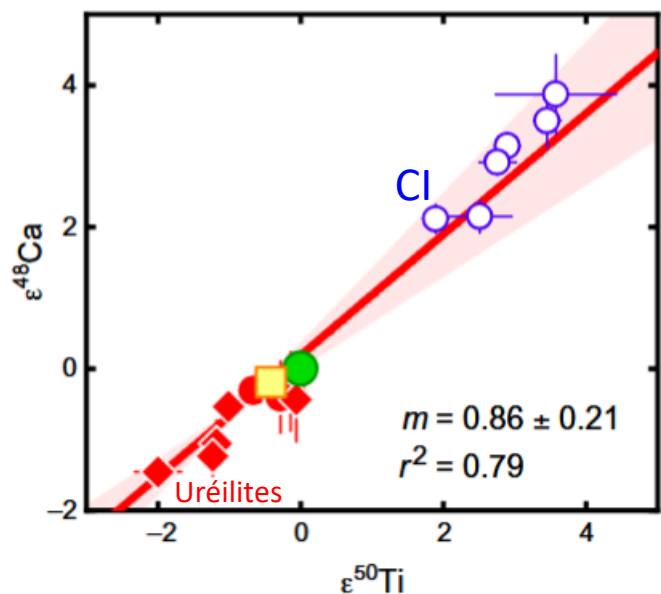


Depuis les étoiles mourantes aux disques protoplanétaires





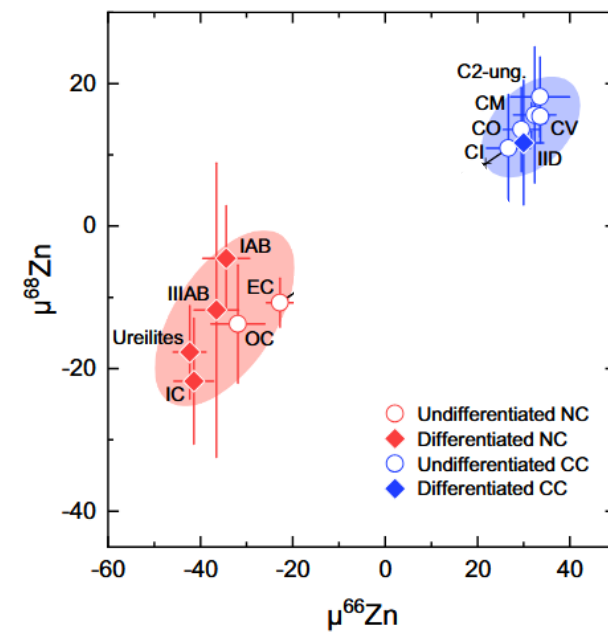
La dichotomie isotopique: atomes du groupe du Fer



Burkhardt et al., 2019

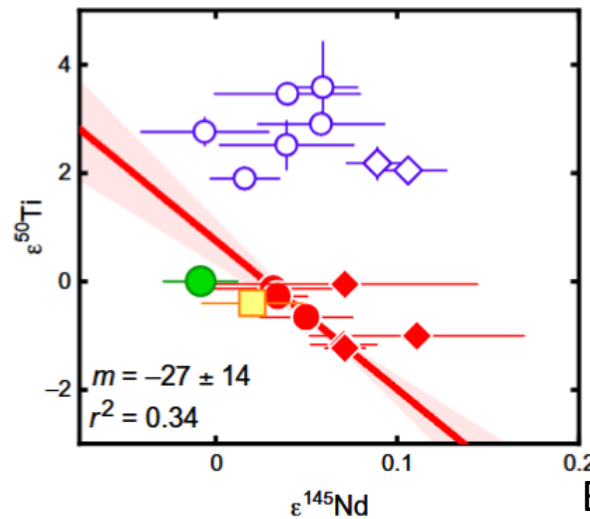
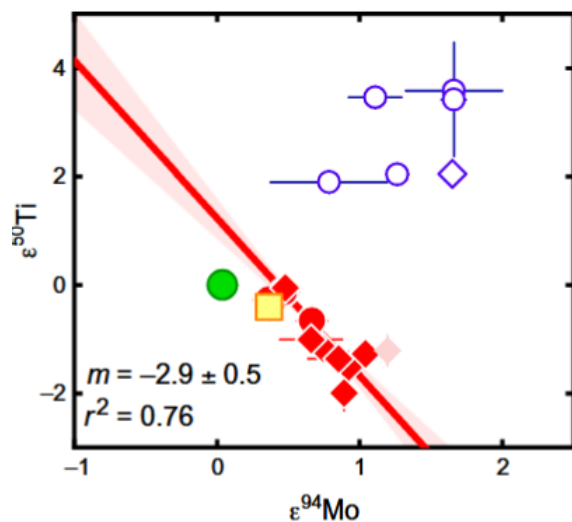
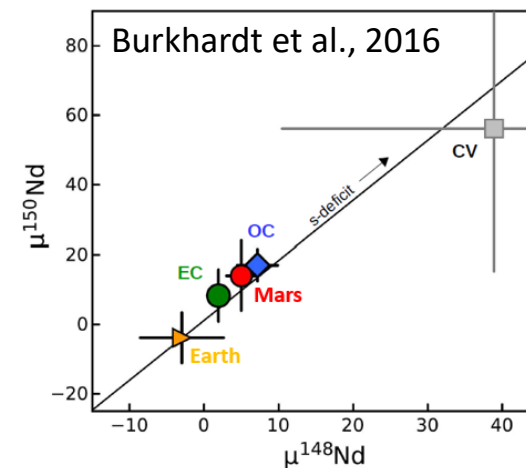
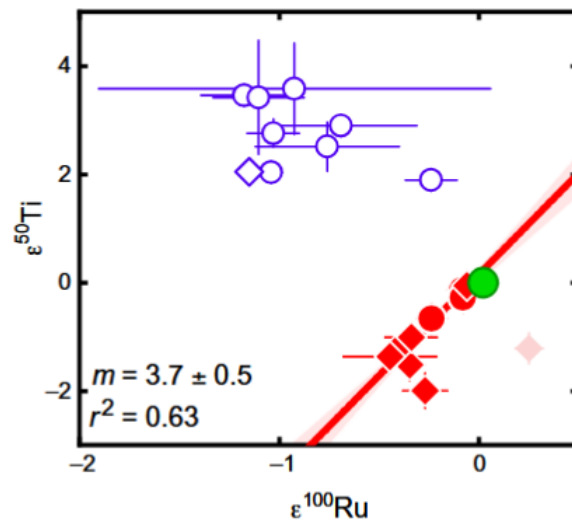
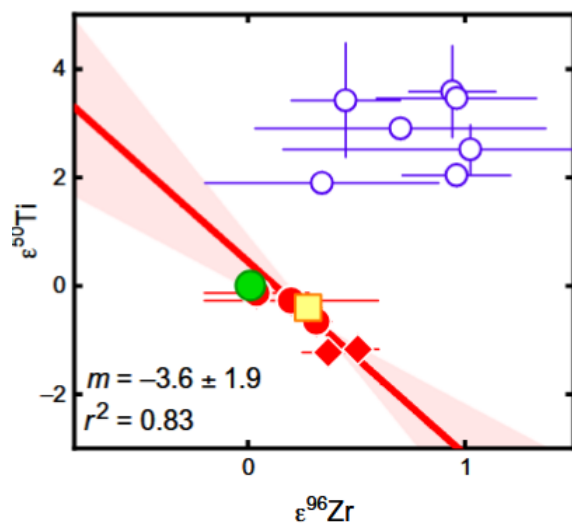
Mélange Uréilite-CI?

Steller et al., 2023

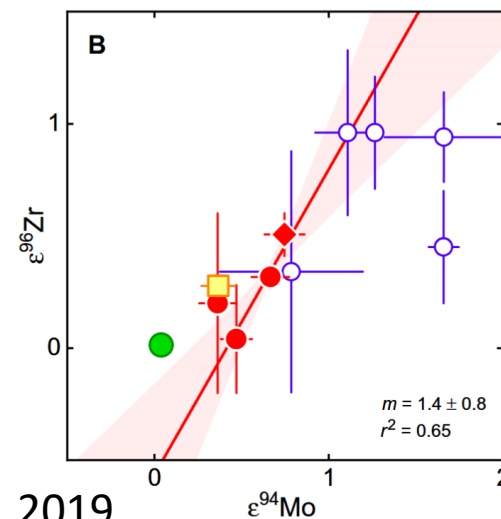




La dichotomie isotopique: isotopes produits par le processus s



Burkhardt et al., 2019

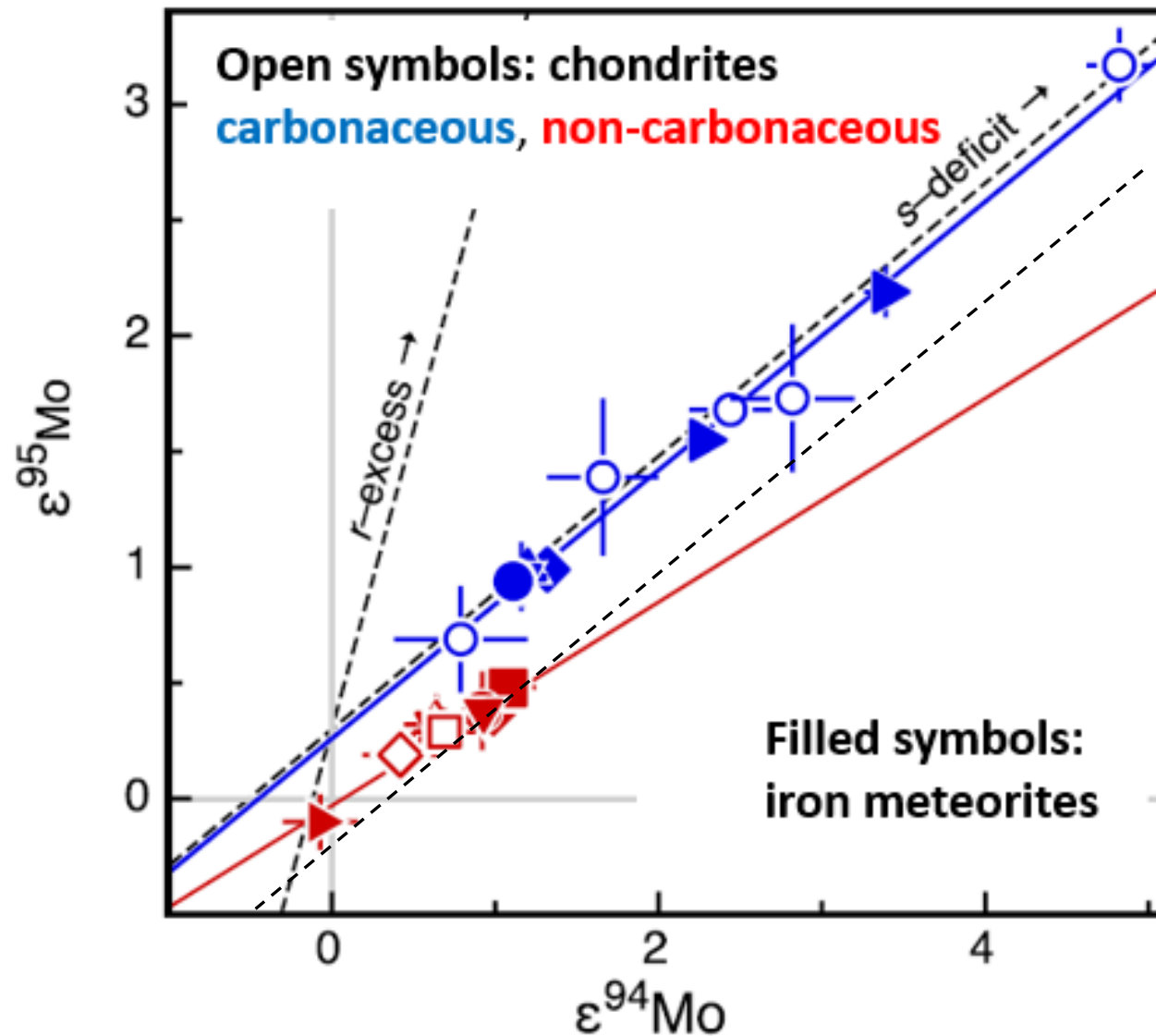


Pas de mélange Uréilite-CI possible

Surprenante corrélation entre isotopes des éléments du groupe du fer et issus du processus s dans les météorites NC



La dichotomie isotopique: le cas du Mo



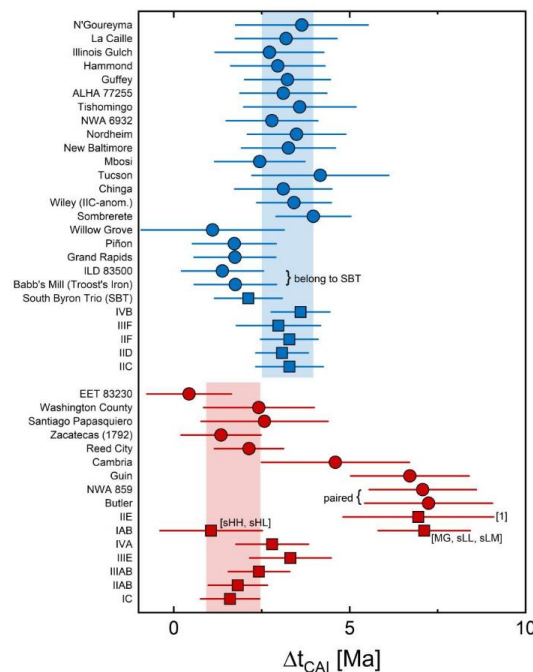
Budde et al., 2016
Kruijer et al., 2017



Hétérogénéité spatiale ou temporelle?

Les différences isotopiques entre les corps NC et CC peuvent s'expliquer à priori de deux manières:

- Soit ces corps se sont formés à des temps différents, dans un disque qui changeait de composition
- Soit ces corps se sont formés à des endroits différents dans un disque ayant une hétérogénéité radiale.



Corps de composition isotopique NC

différentiés

undifférentiés

0.1
My

1 My

2 My

3 My

4 My

Temps après CAI

différentiés

undifférentiés

Corps de composition isotopique CC

Pas de ségrégation temporelle

Par conséquent, les corps NC et CC doivent s'être formés à des endroits différents

Corps de composition isotopique NC

Corps de composition isotopique CC



Distance du Soleil



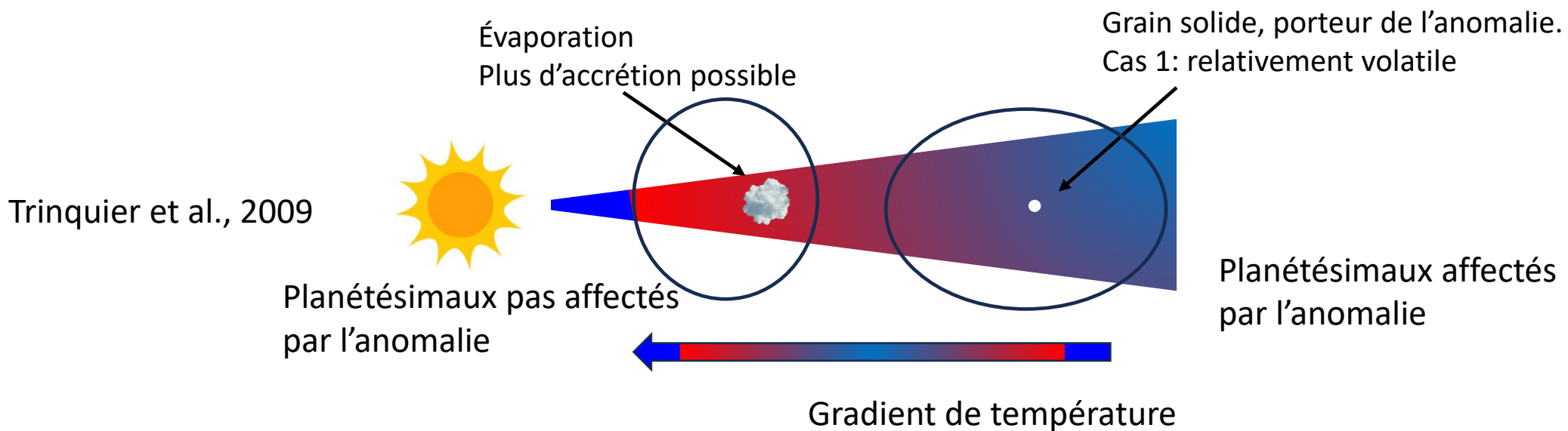
Dichotomie isotopique: les grandes questions

Comment le disque a acquis une hétérogénéité radiale de composition?

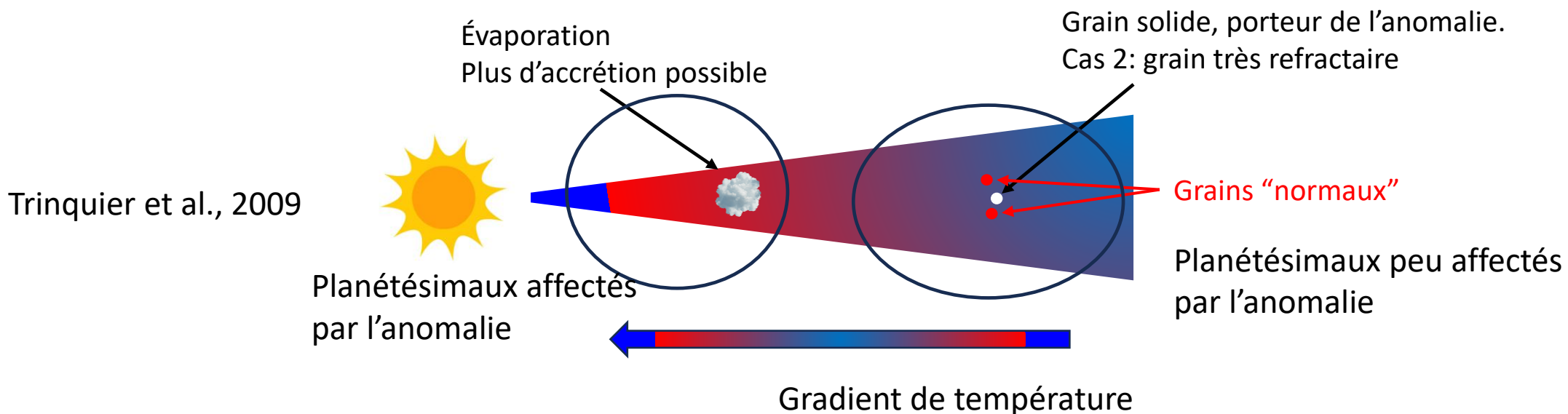
Comment l'a-t-il préservée pendant des millions d'années?



Fractionnement de la matière par réchauffement?



Fractionnement de la matière par réchauffement?



Scénario jamais démontré quantitativement.

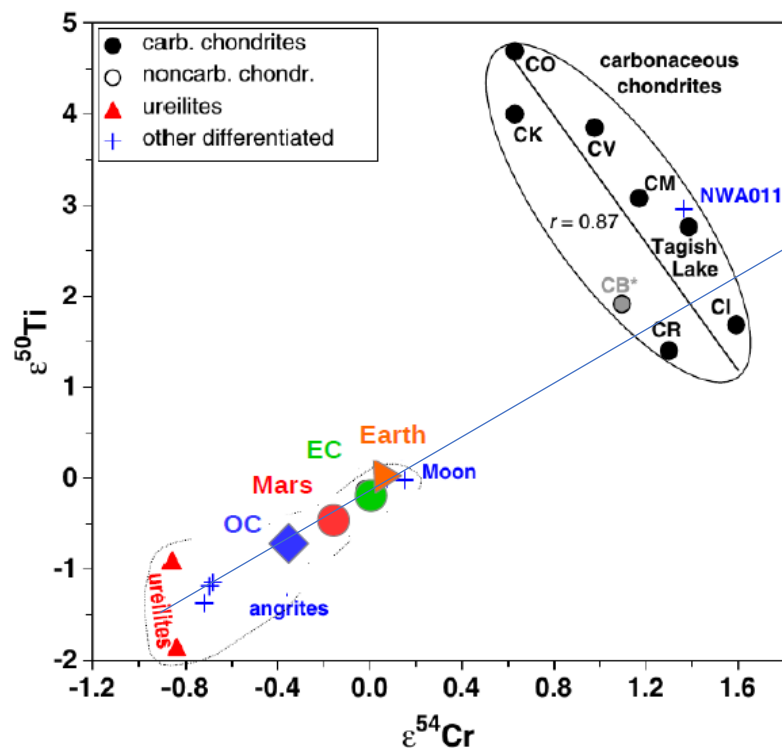
Problèmes:

- Les anomalies isotopiques d'éléments très réfractaires (Ca) et volatiles (Zn) sont corrélées.
- Isotopes produits dans les processus r et s sont portés par des grains présolaires différents qui devraient avoir des températures de sublimations différentes. Or, leurs anomalies sont corrélées
- Les corps parents des météorites de fer et des chondrites devraient s'être formés à des températures différentes car le disque refroidit avec le temps. Or leurs anomalies isotopiques à l'intérieur des groupes NC et CC sont très similaires.
- Les objets les plus internes devrait avoir les anomalies portées par les grains les plus réfractaires. Or, c'est tout l'inverse



Le rôle des CAIs

CAI



Schneider et al., 2020, démontrent que les anomalies isotopiques du Cr et Ti des chondres et des chondrites CC peuvent s'expliquer par un mélange de matière NC avec CAI et/ou AOA

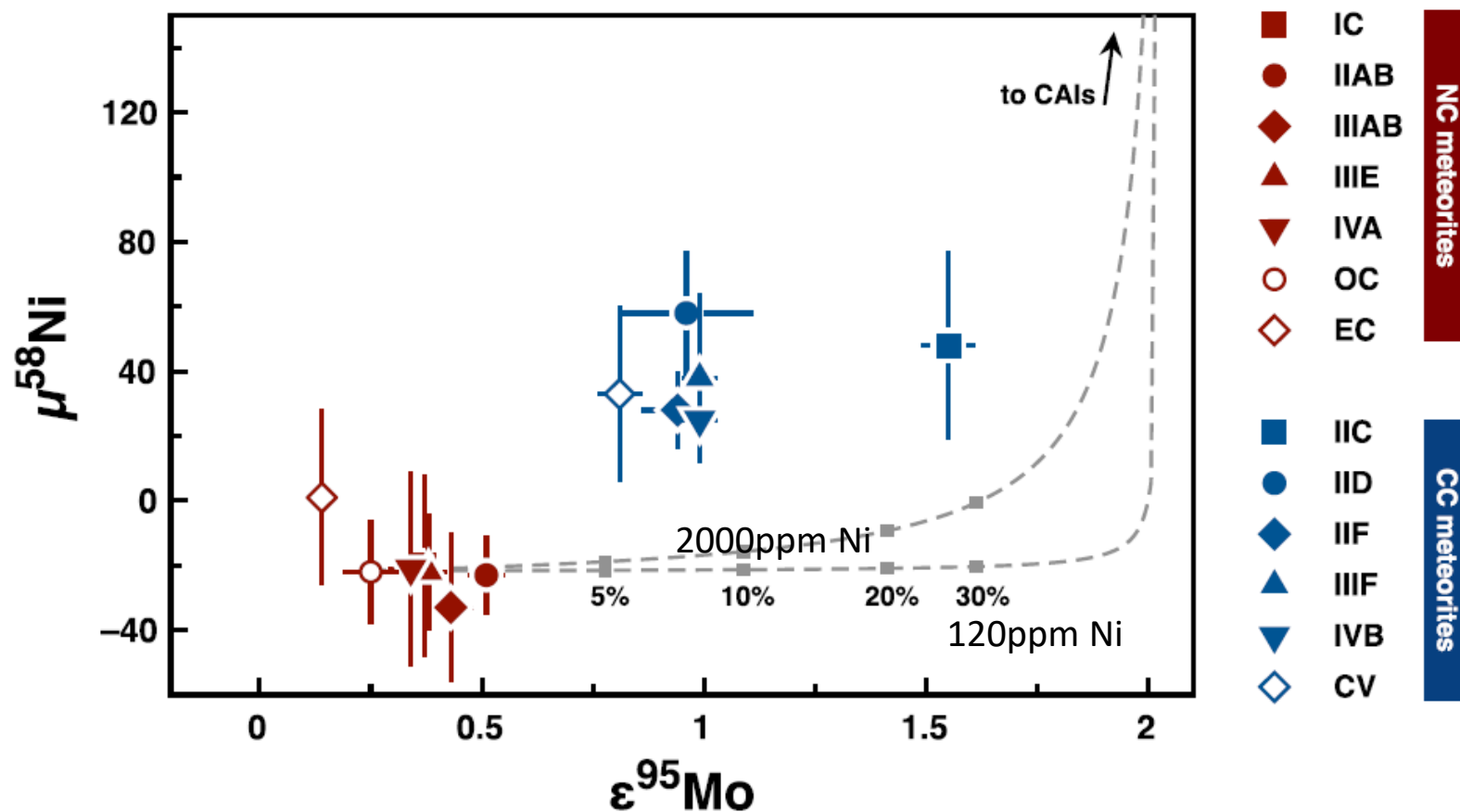


Le rôle des CAIs/AOAs

On pourrait conclure que les anomalies isotopiques sont portées par des grains ultra- réfractaires (CAIs) ou modérément réfractaires (AOAs), ce qui supporterait le cas N. 2 du modèle de la destruction thermique. Mais....

Les CCs ont une anomalie nucléosynthétique du Ni intermédiaire entre NC et CAIs, mais il n'y a presque pas de Ni dans les CAIs. Les CAIs ne peuvent pas être les porteurs de cette anomalie

Nanne et al., 2020



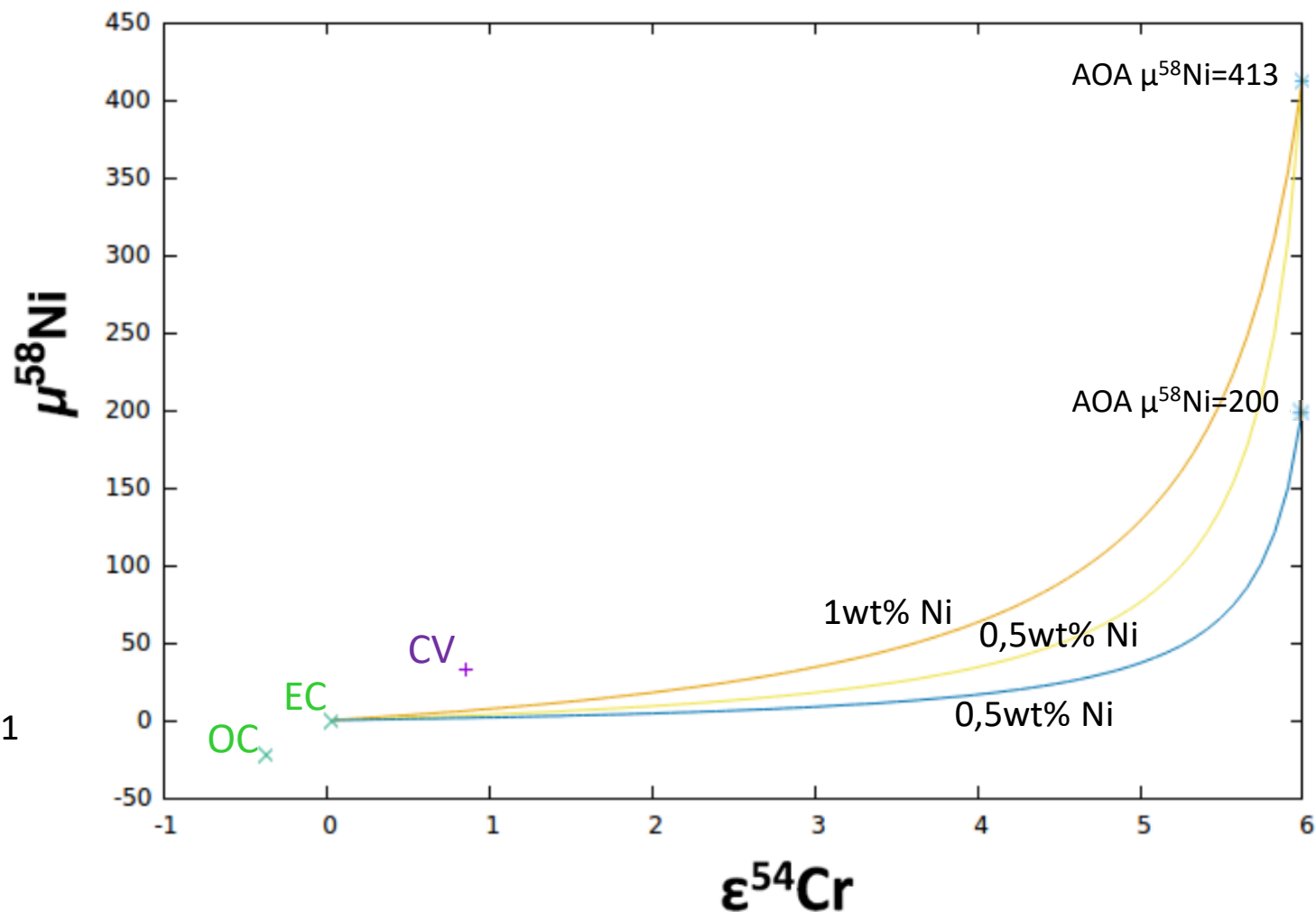


Le rôle des CAIs/AOAs

On pourrait conclure que les anomalies isotopiques sont portées par des grains ultra- réfractaires (CAIs) ou modérément réfractaires (AOAs), ce qui supporterait le cas N. 2 du modèle de la destruction thermique. Mais....

Le même est vrai pour les AOAs
Les AOAs ne peuvent pas être les porteurs de cette anomalie

0,18wt% Cr dans AOA, Komatsu et al., 2001
0,26wt% Cr dans les chondrites
16wt% Ni dans les chondrites





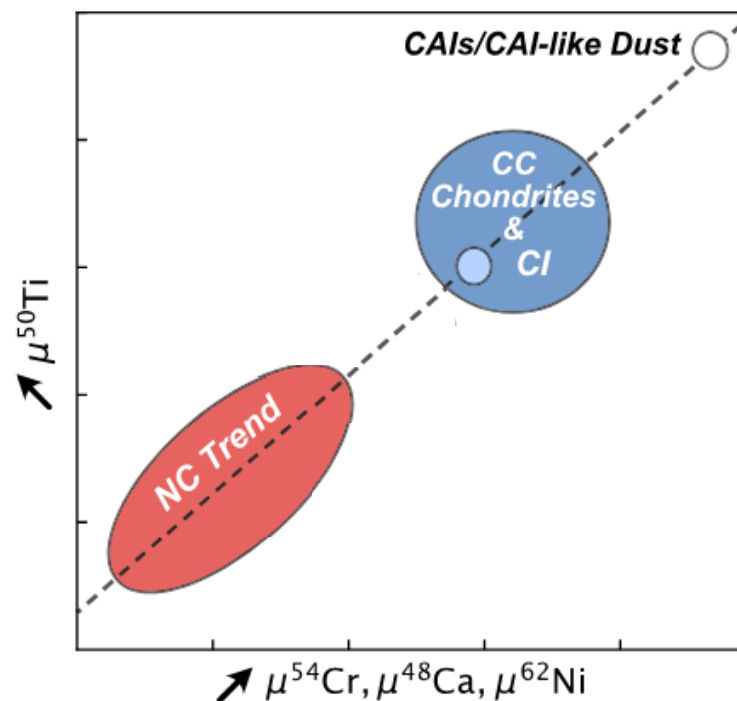
Le rôle des CAIs/AOAs

La situation est encore plus remarquable pour le Zn, qui est presque inexistant dans CAIs et AOAs

L'anomalie isotopique doit donc être portée pas seulement par CAIs et AOAs, mais aussi par de la matière qui a condensé des éléments plus volatils, et a donc une composition solaire jusqu'au moins au Zn

Burkhardt et al. (2019) appellent cette matière “unprocessed primitive cloud material (IC)”
Yap et Tissot (2023) l'appellent “CAI-like dust”.

Ceci invalide l'hypothèse de la destruction thermique des porteurs et appelle à une autre explication

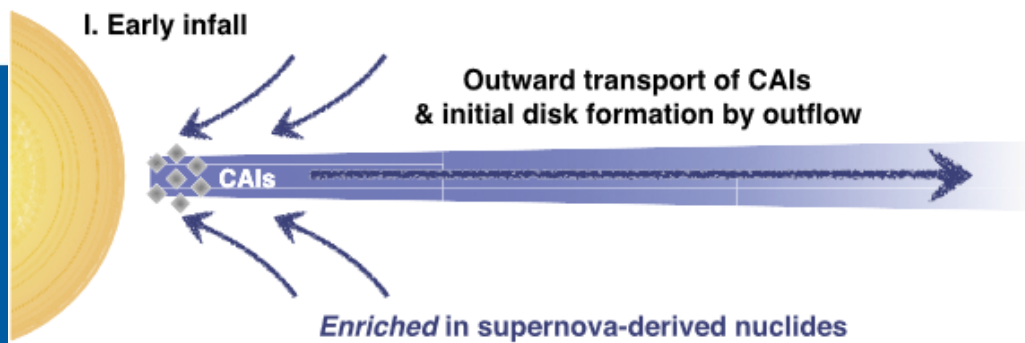


Yap and Tissot (2023)

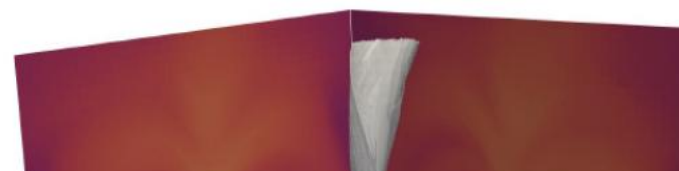


Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019



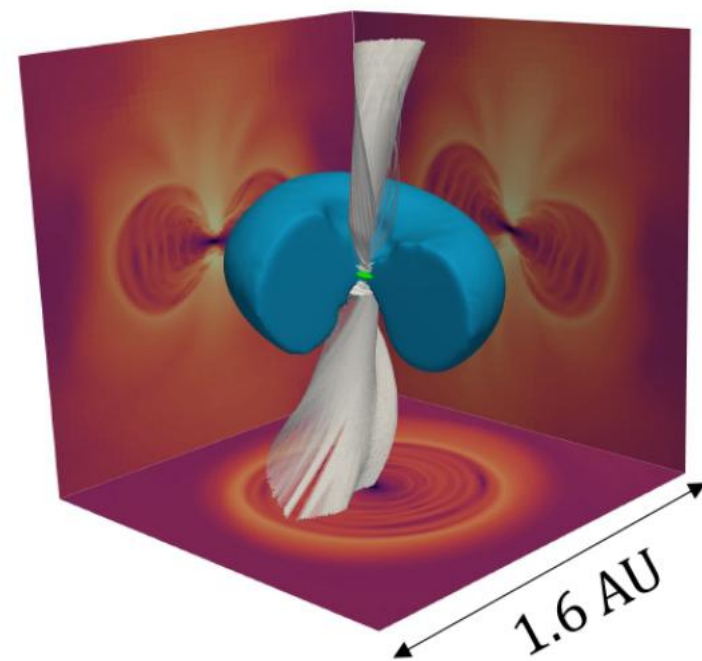
$t = 0.10$ (yr)



$t = 1.00$ (yr)

Time

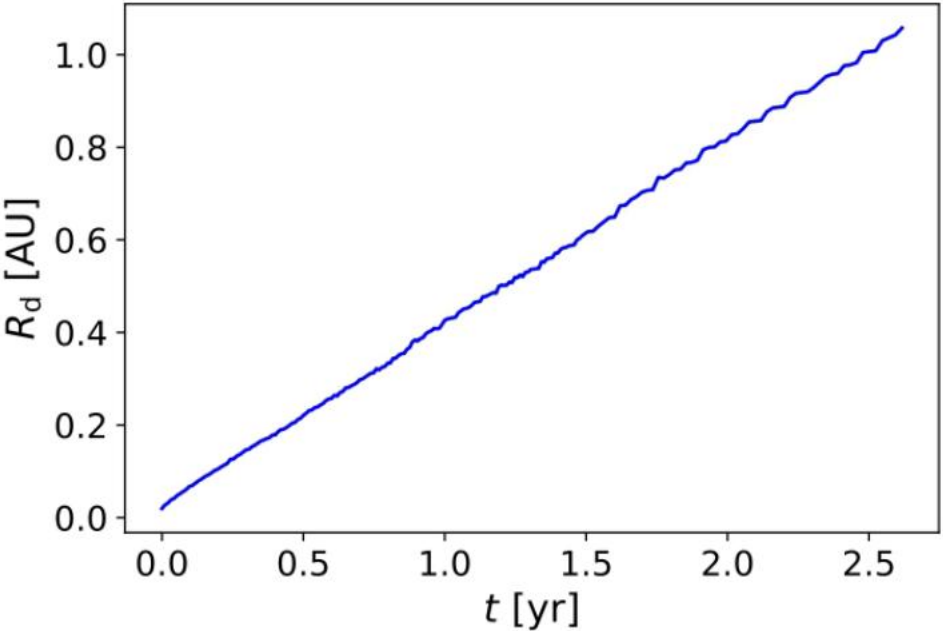
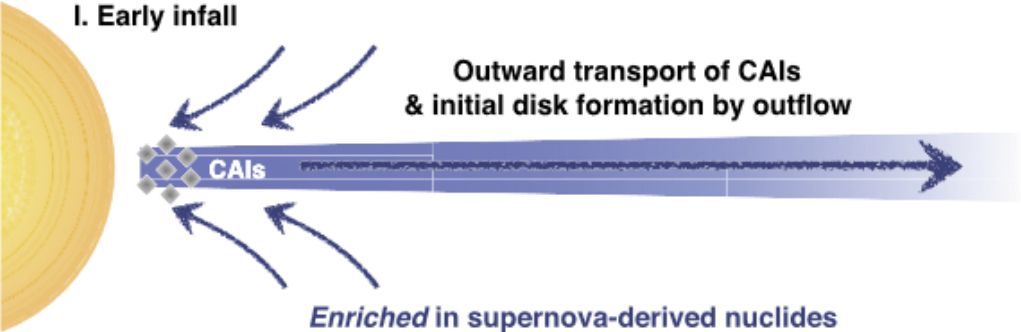
Ahmad et al. (2024)





Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019

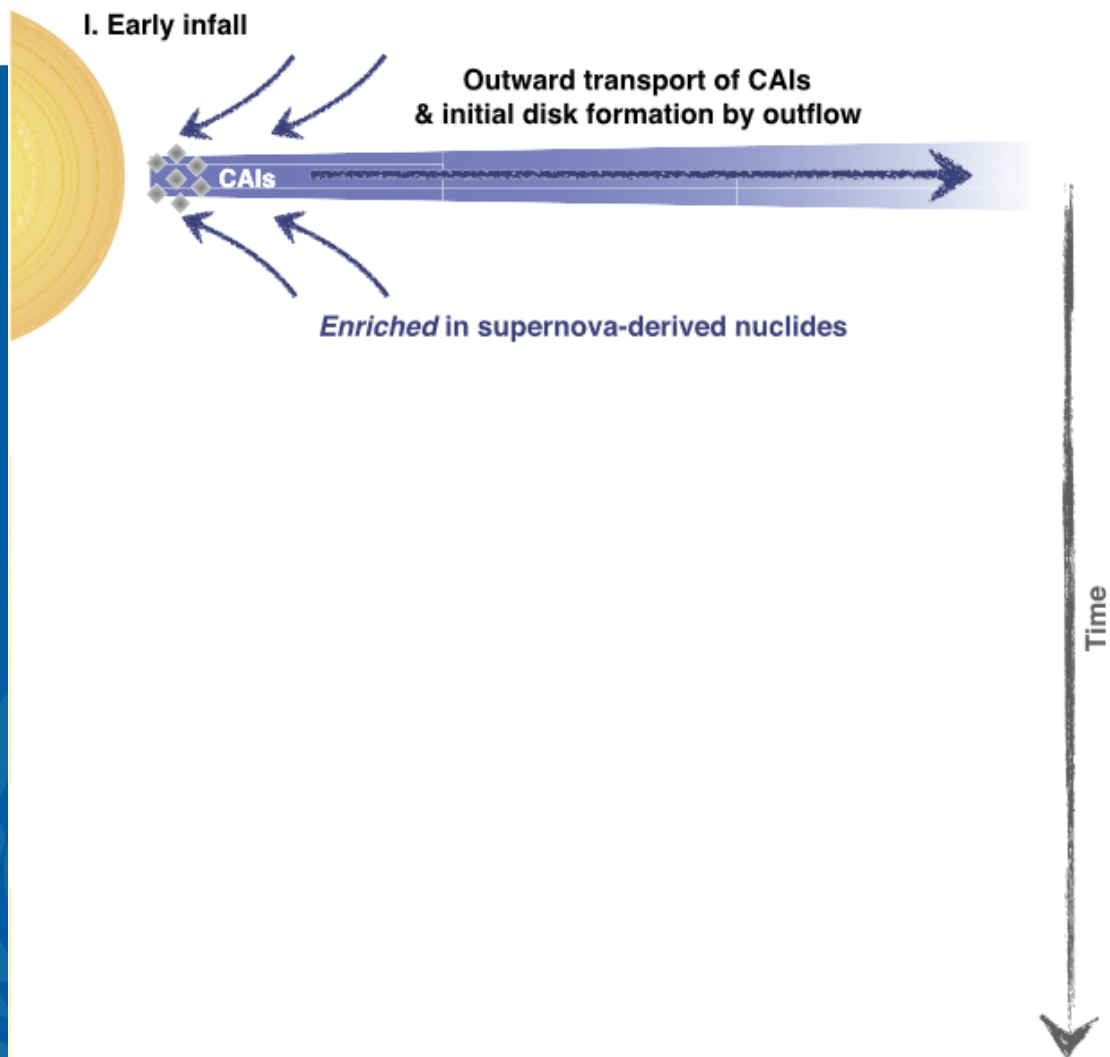


Ahmad et al. (2024)

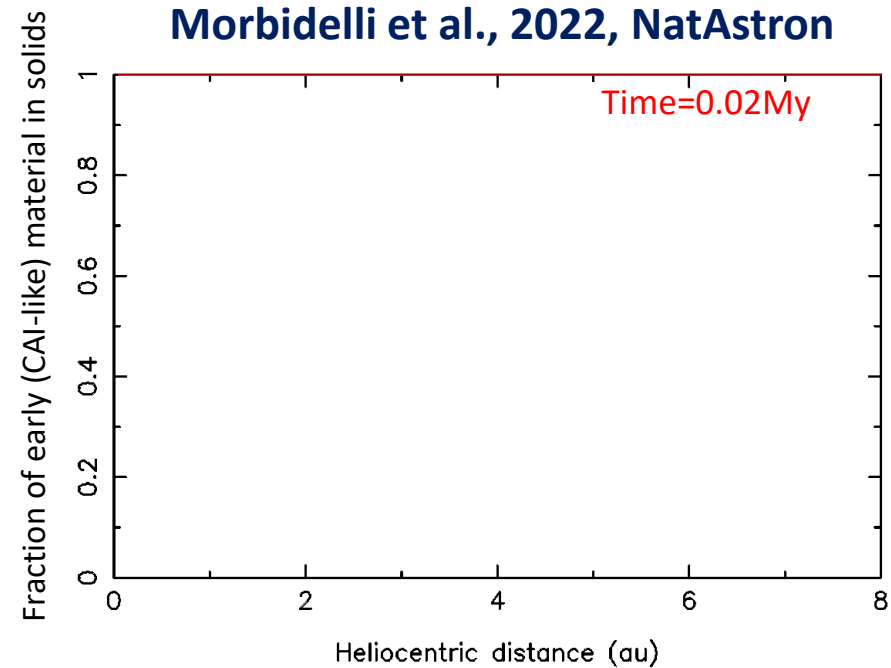


Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019

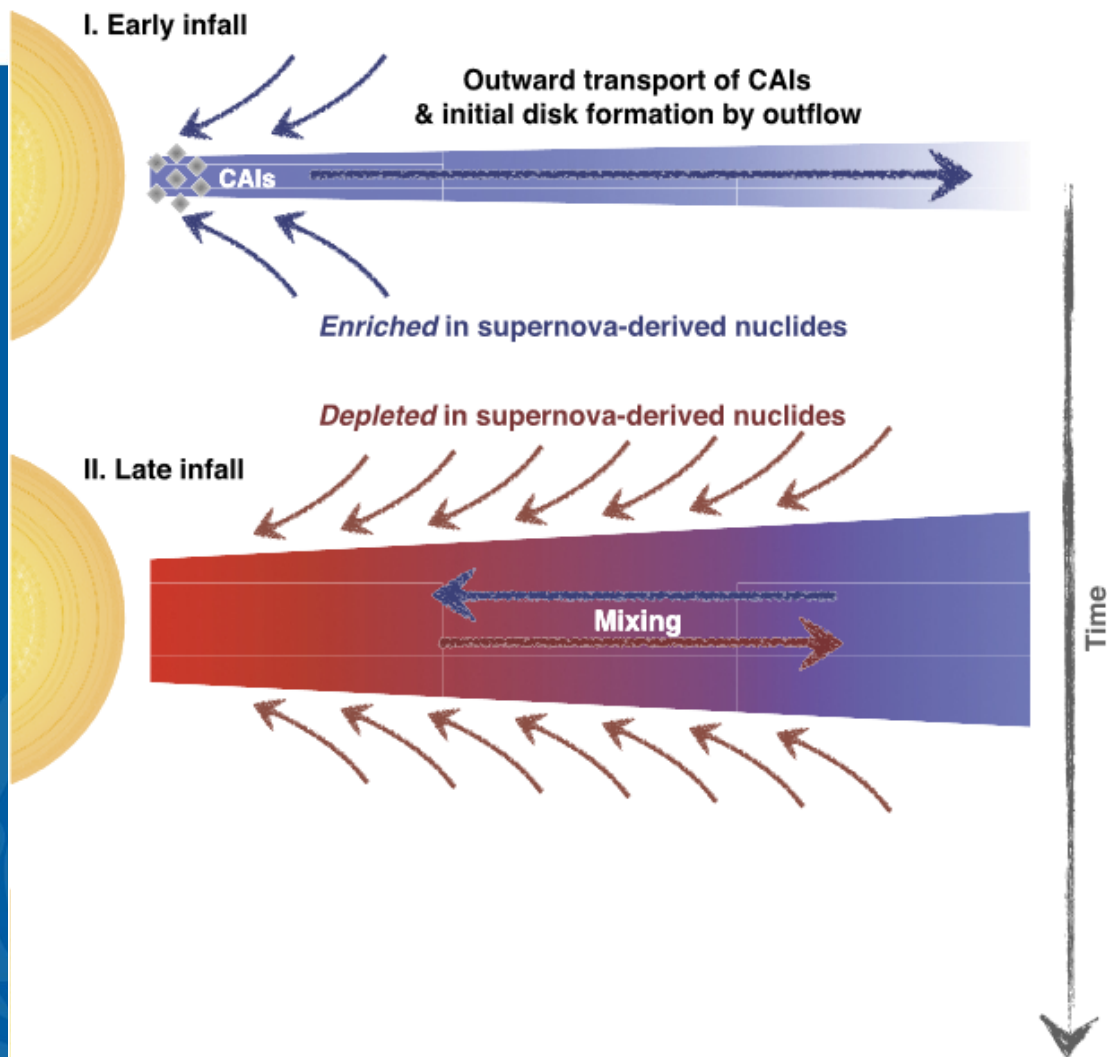


Morbidelli et al., 2022, NatAstron

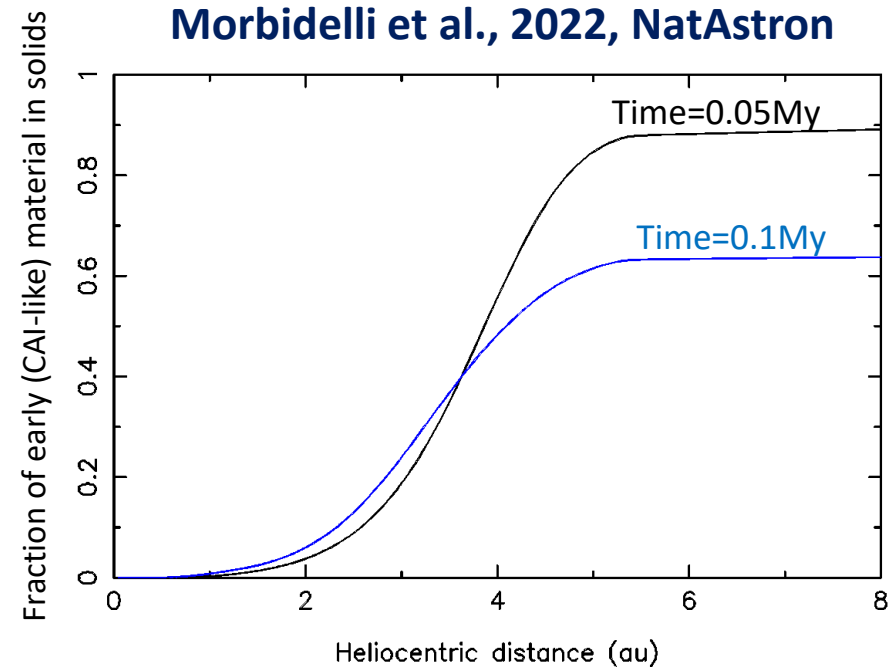


Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019

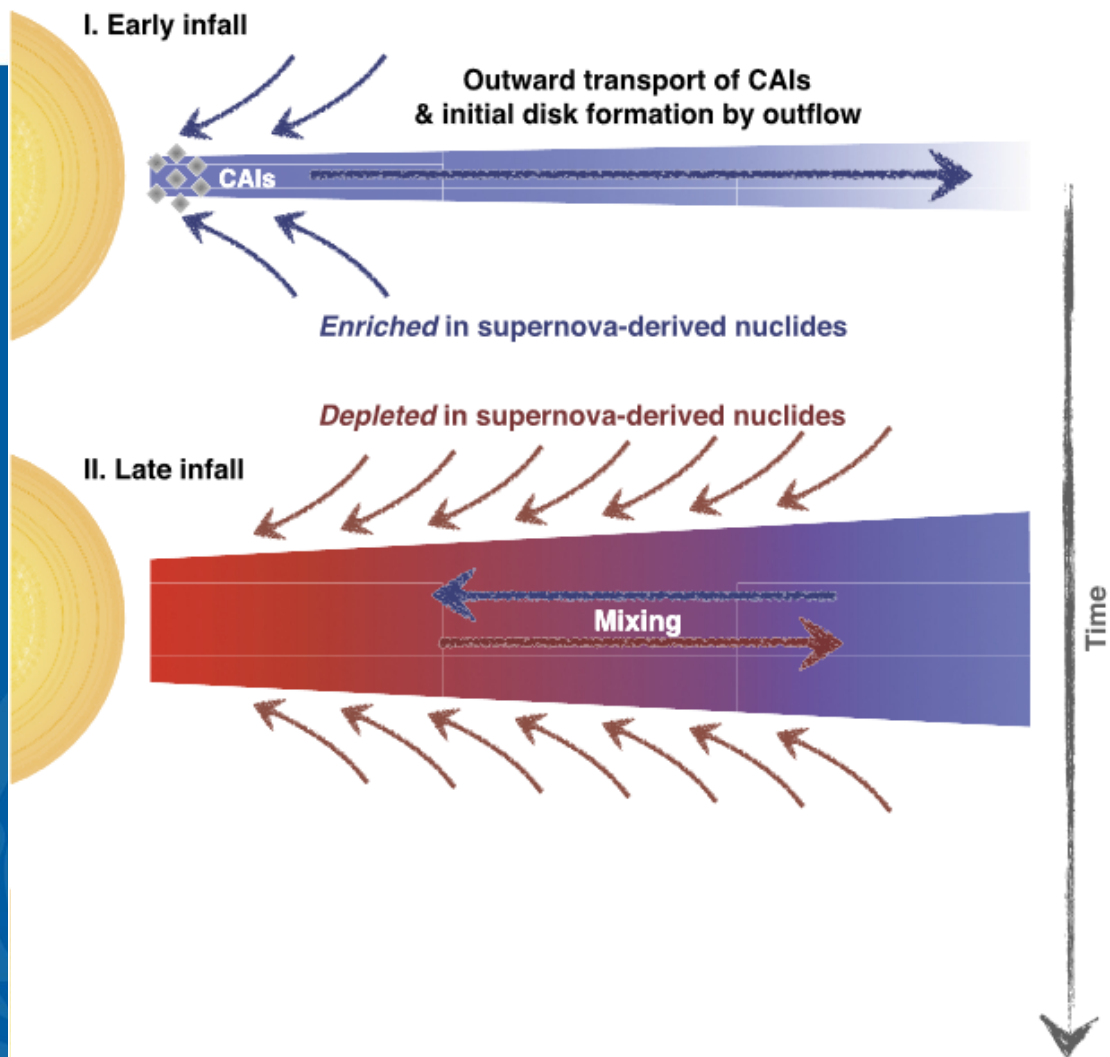


Morbidelli et al., 2022, NatAstron

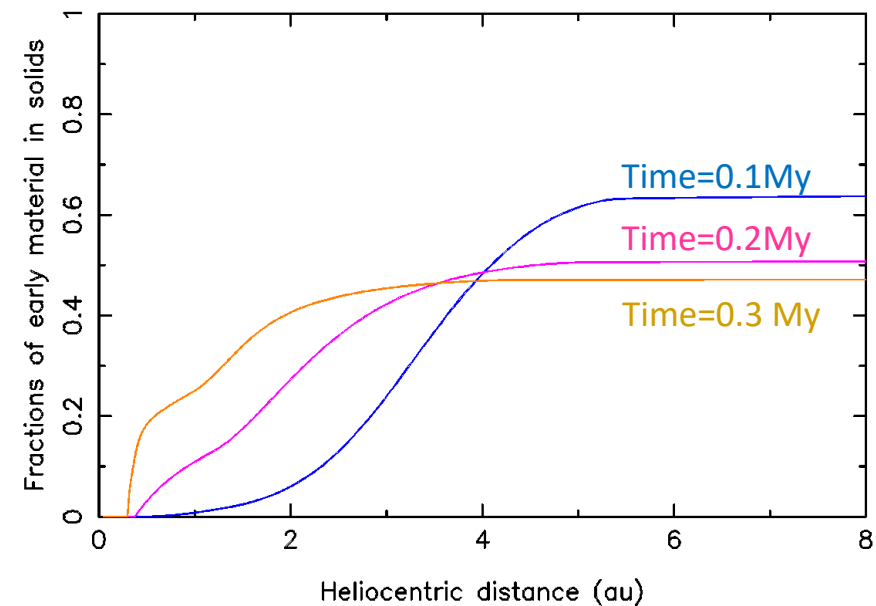


Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019

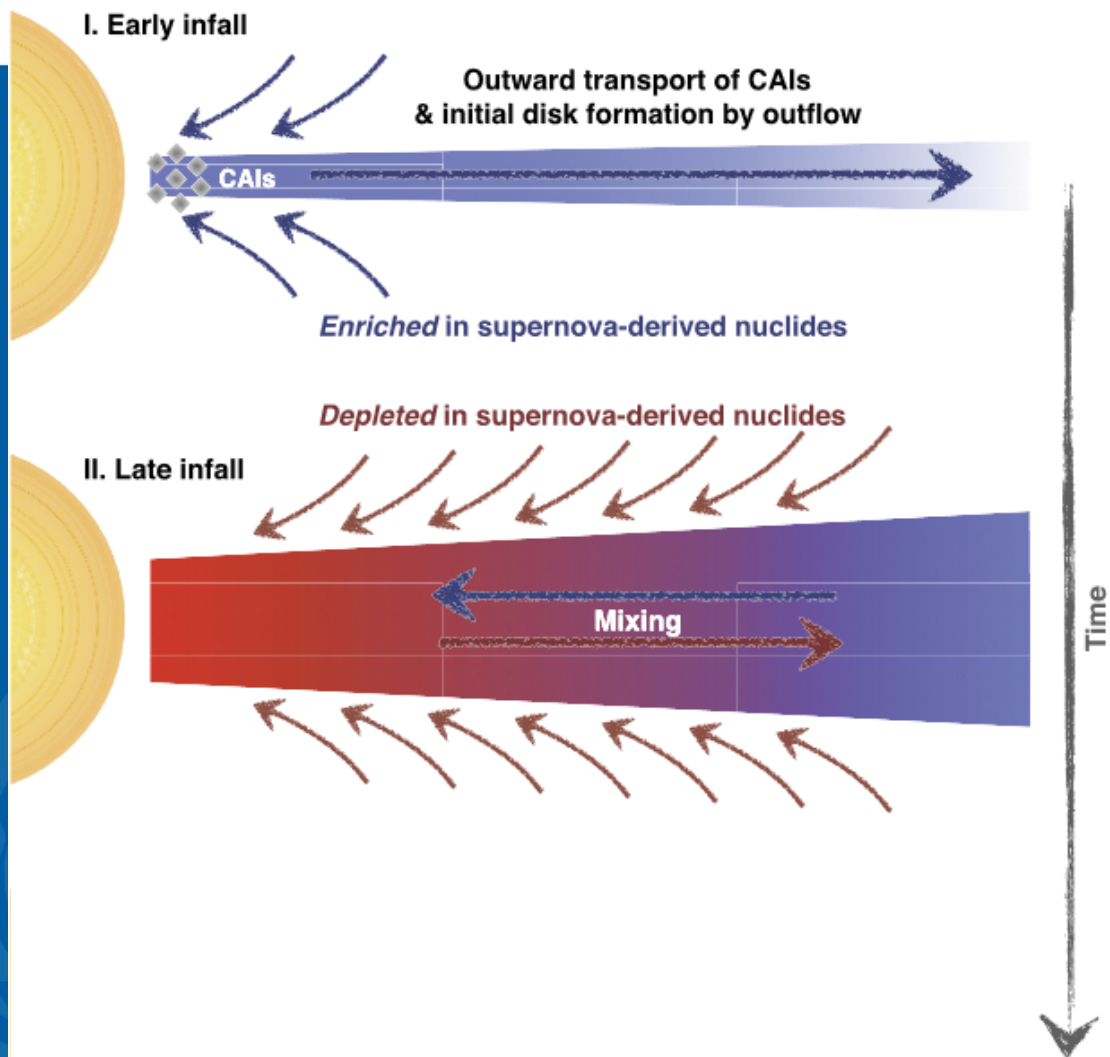


Morbidelli et al., 2022, NatAstron

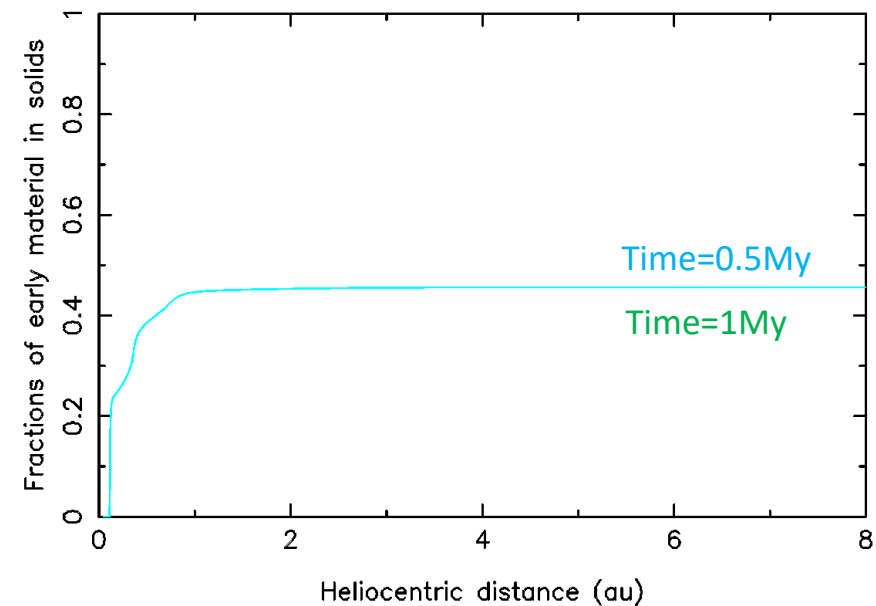


Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019

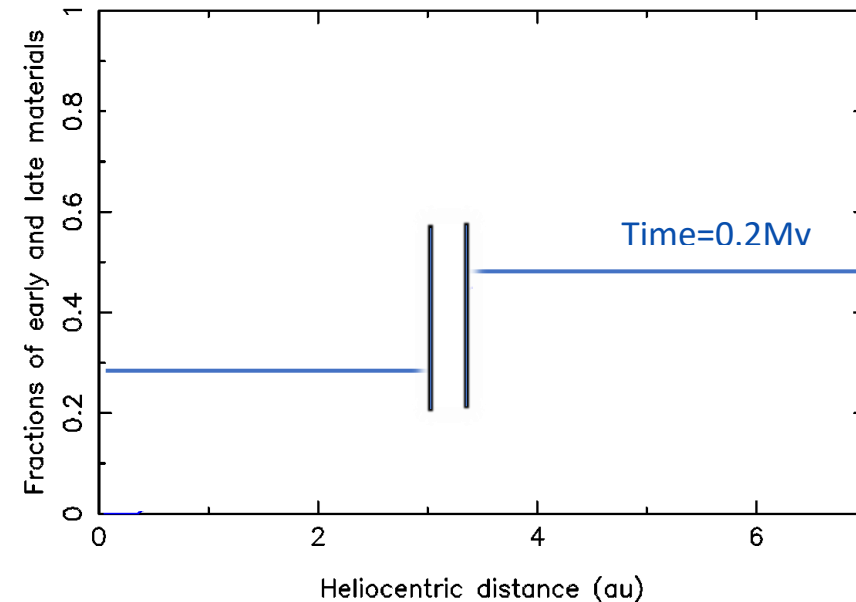
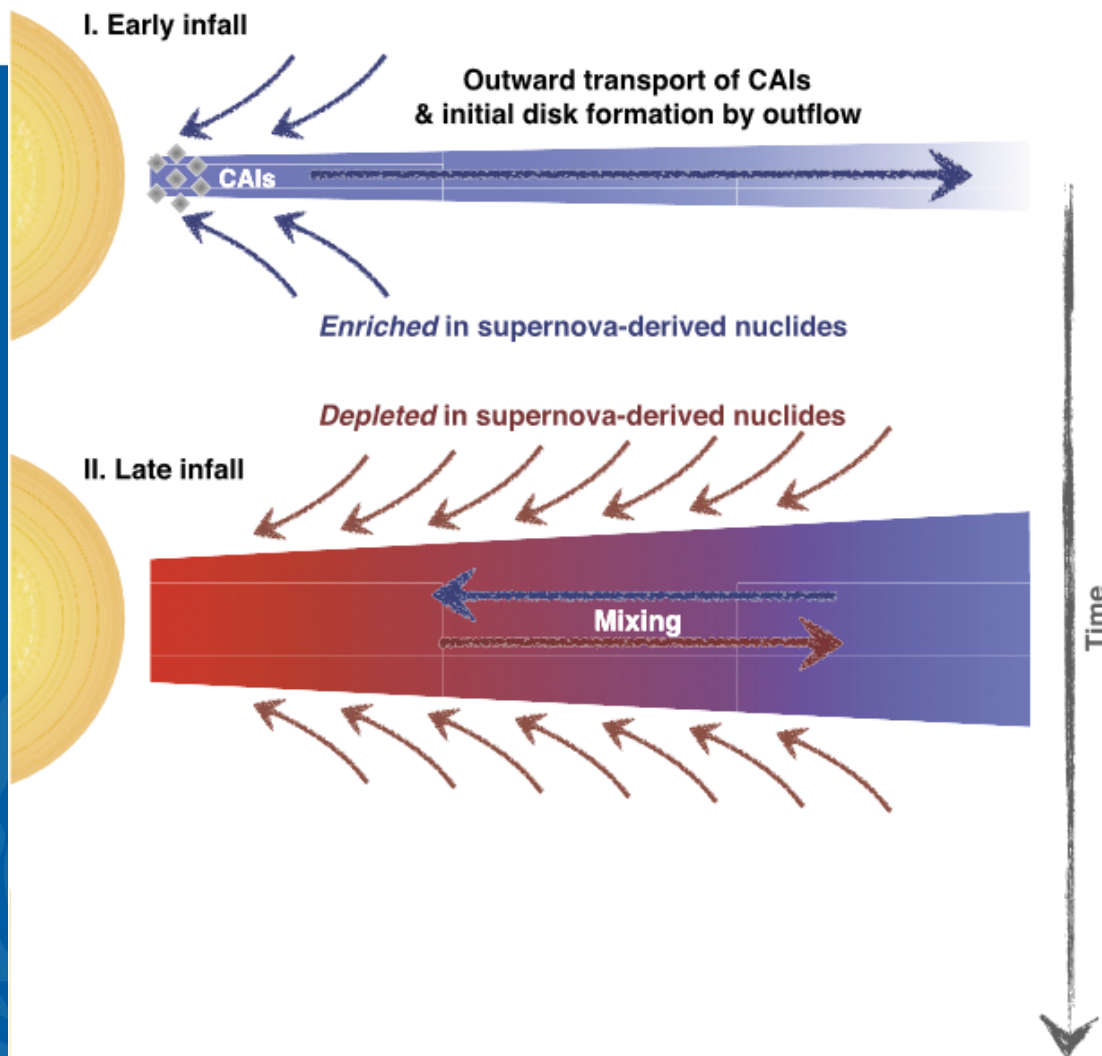


Morbidelli et al., 2022, NatAstron



Origine de la dichotomie isotopique

Nanne et al., 2019



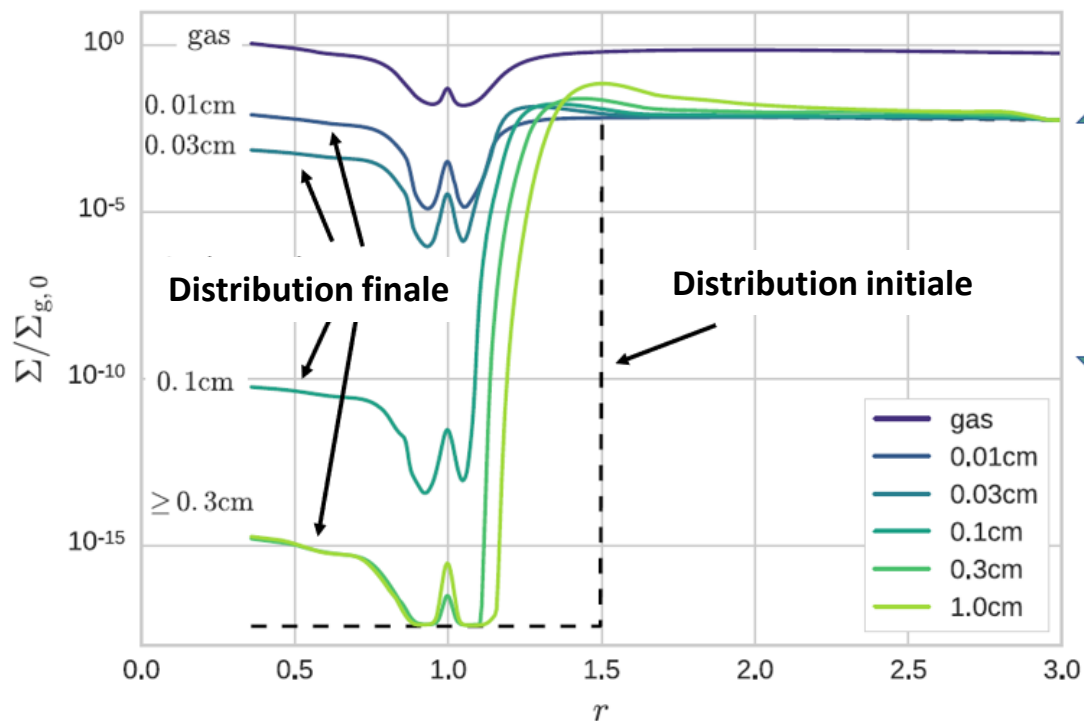
Comment la dichotomie a-t-elle été préservée pendant des millions d'années?

Pourquoi Jupiter?



La barrière de Jupiter

Weber et al. 2018: Jupiter-mass planet, $\alpha=3 \times 10^{-3}$



Facteur de déplétion du disque interne par rapport au disque externe pour particules de 0,1cm

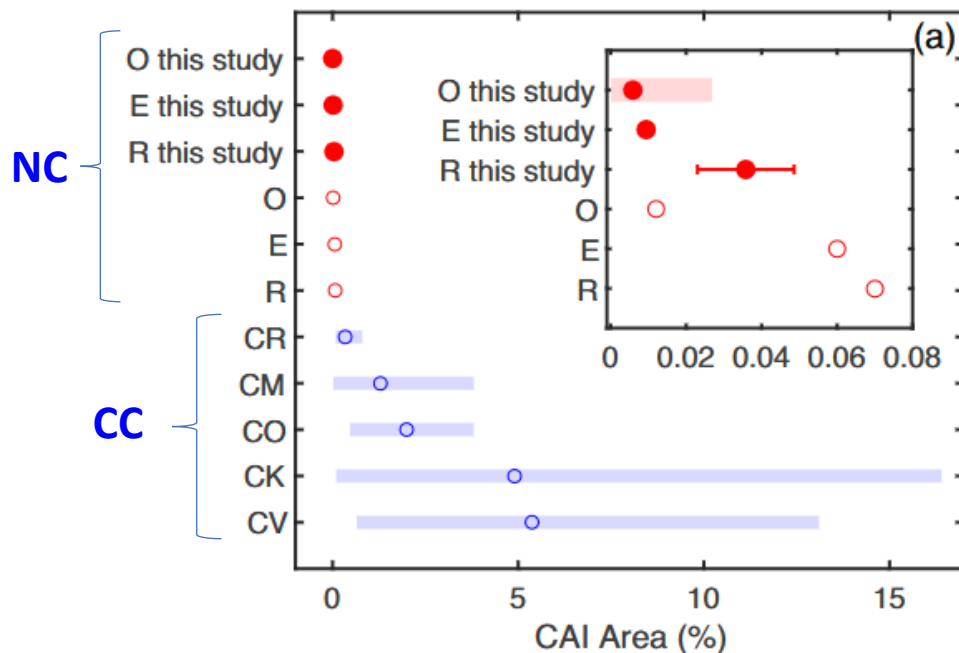
Les particules plus petites, plus couplées avec le gaz, passent davantage à travers la barrière de Jupiter

Est ce que Jupiter peut se former si rapidement ($< 0,3$ Ma)?

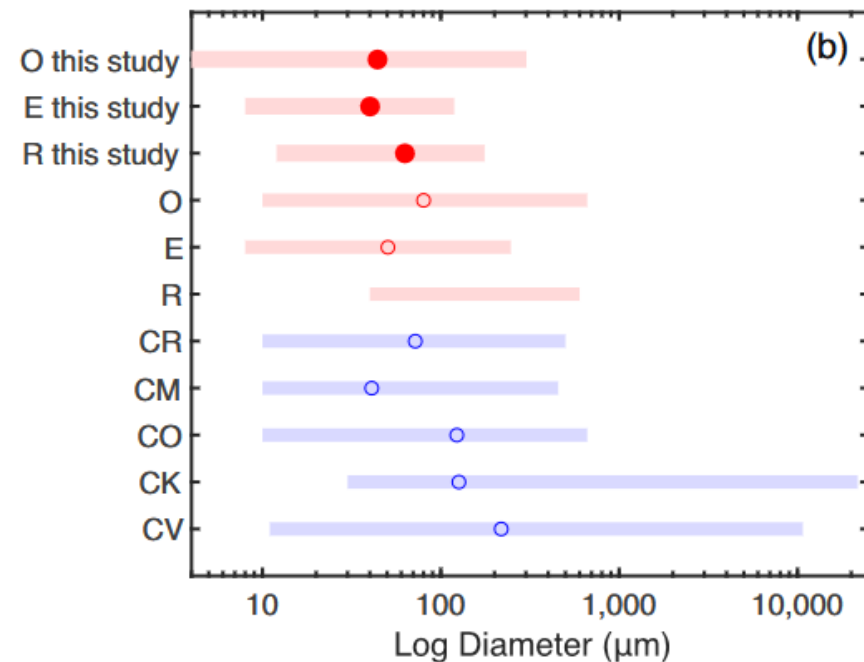


Le filtrage des poussières par la barrière: contraintes météoritiques

Abondance des CAIs dans les météorites



Tailles des CAIs dans les météorites



Dunham et al., 2023

Les gros CAI ($> 1 \text{ mm}$) existent seulement dans CV et CK. Les autres météorites (NC et CC) ont des distributions des tailles des CAIs comparables. Mais les CAIs sont $\sim 100\times$ moins abondants par unité de surface dans les NCs.

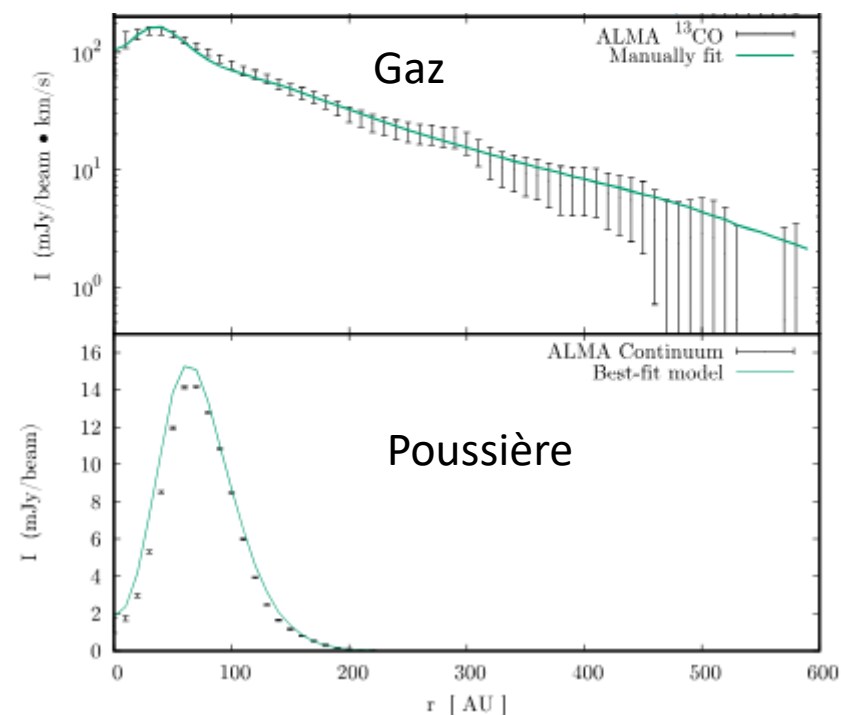
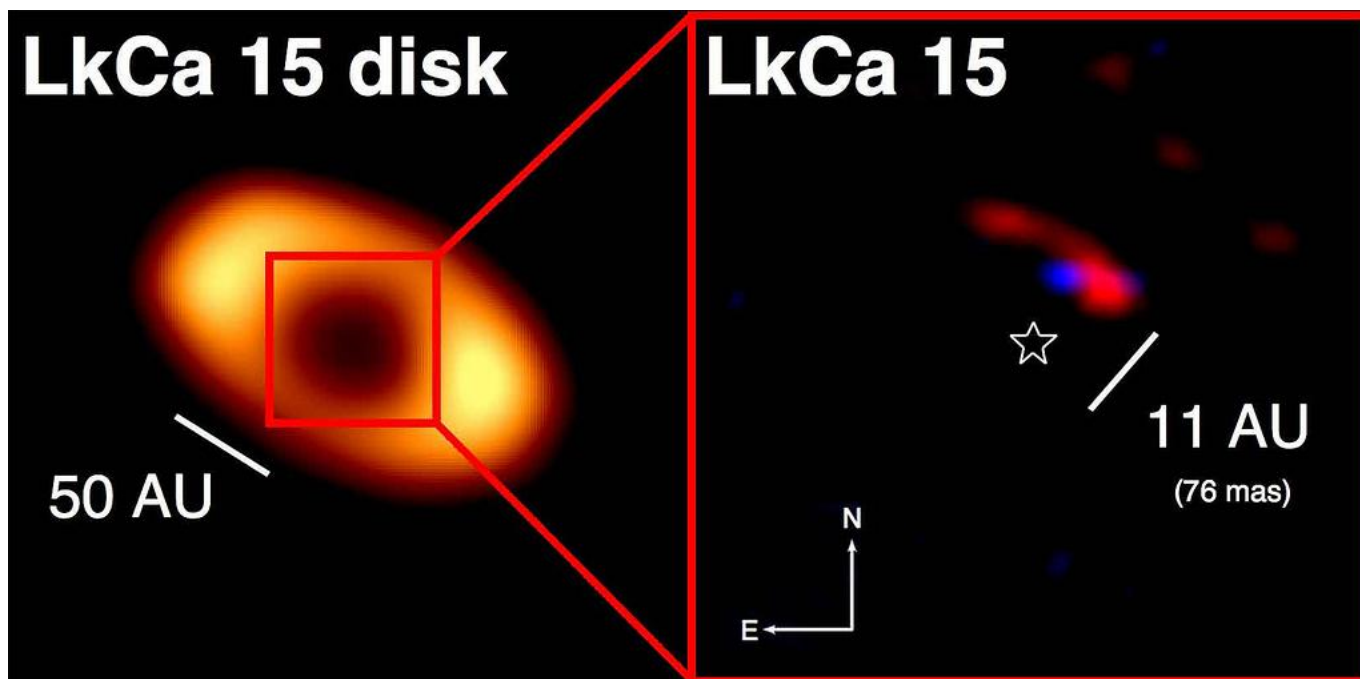
La barrière filtrait donc 99% des grains de $\sim 50 \mu\text{m}$. Extrêmement efficace



Le Système Solaire comme disque de transition

L'existence d'une barrière efficace au flux des grains d'au moins 50 μm implique que le disque interne du Système Solaire était dépeuplé de poussières

Le disque du Système Solaire devait alors sembler à un disque de transition

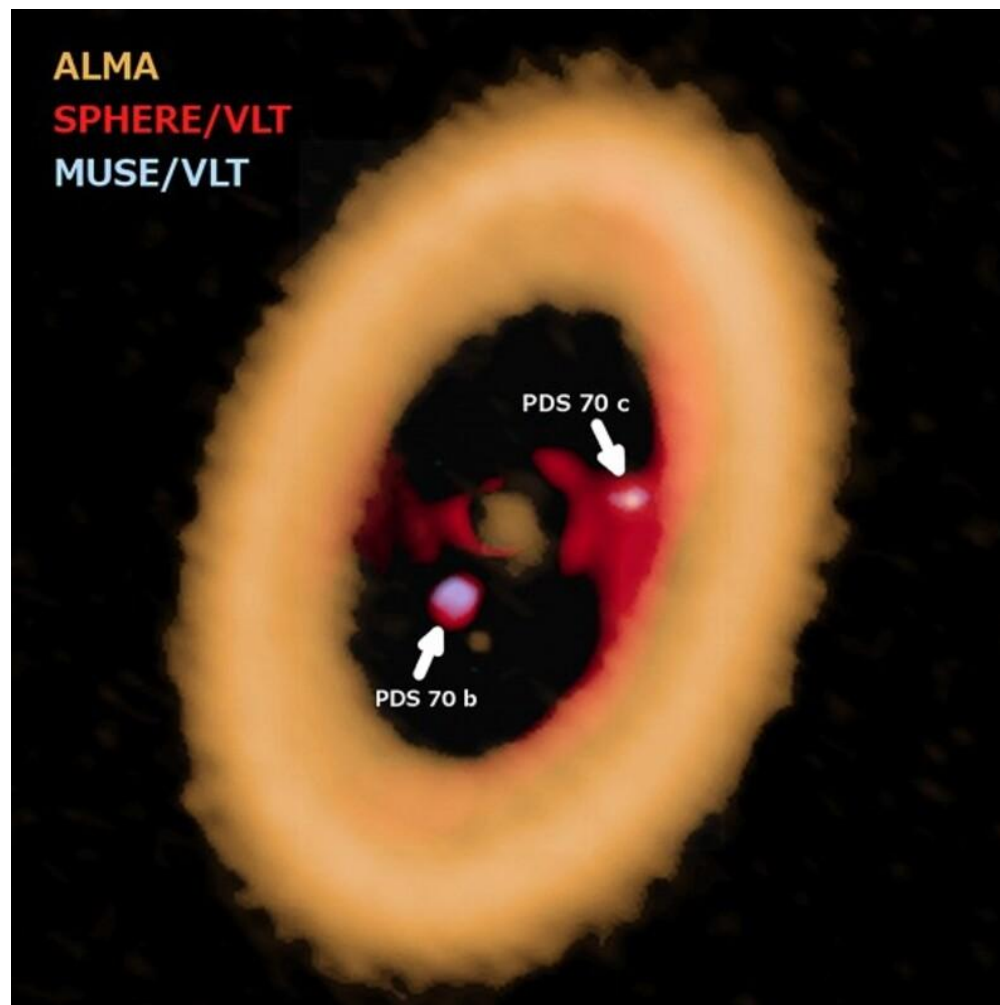


Jin et al., 2019



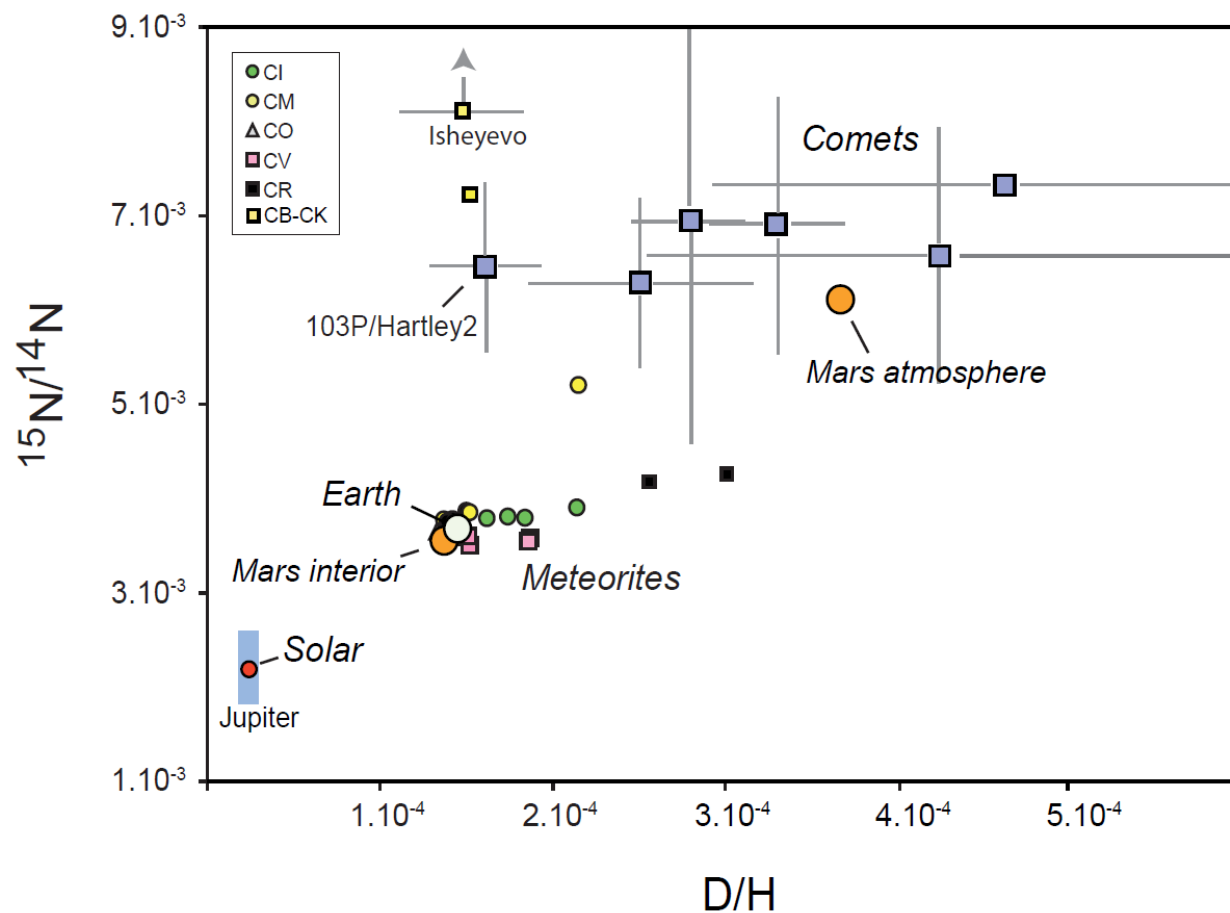
Disques de transition et exoplanètes

L'origine des disques de transition est débattue. Mais dans au moins un cas, elle est due à la barrière issue par l'existence de planètes géantes, à l'instar de la barrière de Jupiter.





Anomalie isotopique des éléments volatils

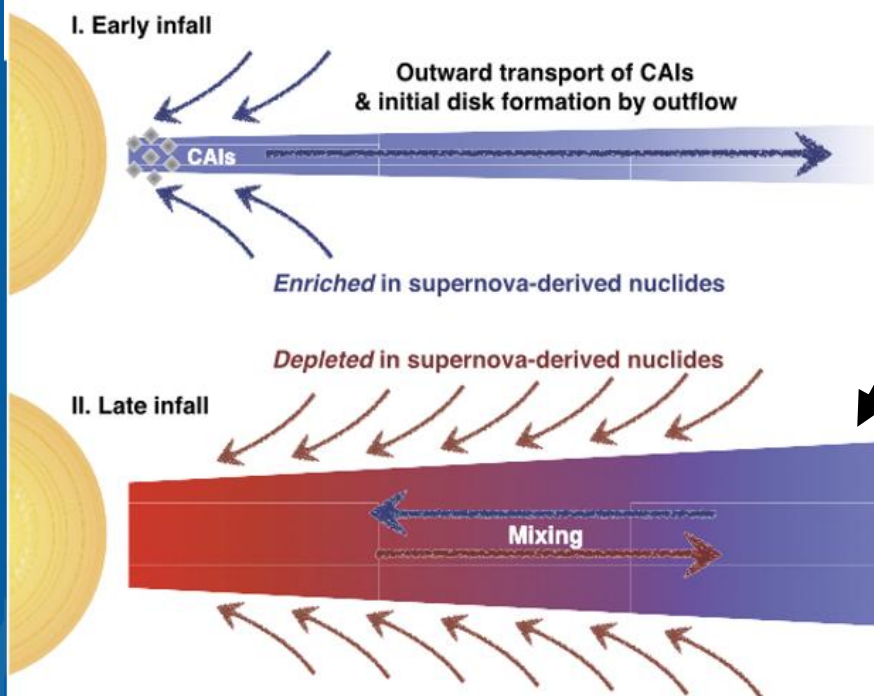


Les comètes et les chondrites ont une composition isotopique de H et N différente de celle solaire.

Ceci implique que des grains interstellaires porteurs de ces anomalies ont atteint le disque suffisamment loin du Soleil pour ne pas sublimer et recondenser, car dans ce cas leur composition isotopique se serait équilibrée avec celle solaire du H_2 et N_2 du disque



Anomalie isotopique des éléments volatils



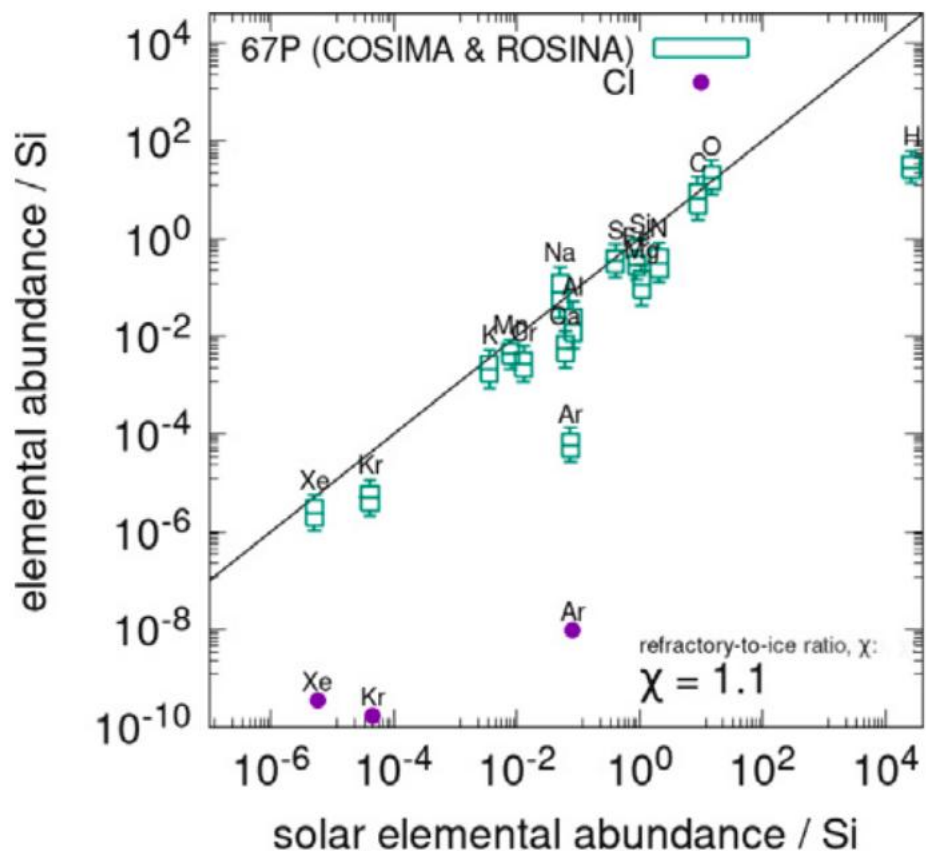
Ce schéma n'est donc pas complètement correct:
Une partie du matériel doit arriver aussi plus loin sur le disque

A partir des rapports D/H et $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ observés dans le milieu interstellaire, on déduit que 13% de l'eau et 5% du azote des météorites a été apporté par des grains non-équilibrés.

Pour les comètes ses fractions sont 28% et 15%, respectivement



Le Xe cométaire: une stratigraphie radiale NC – CC – NC dans le disque?

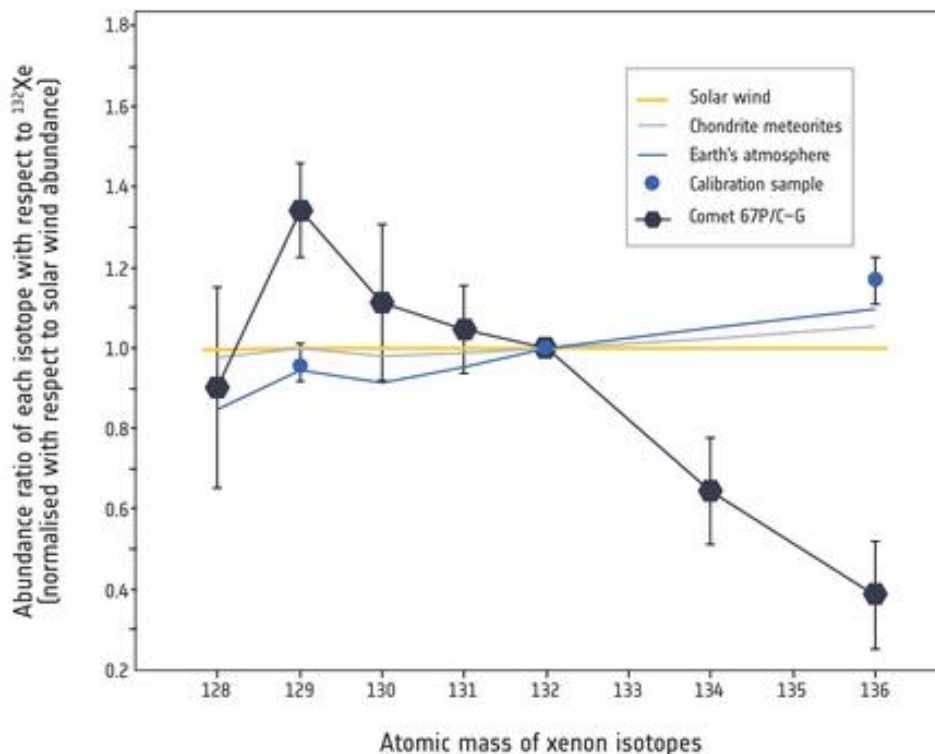


Les comètes ont une abondance solaire de Xe, 4 ordres de grandeur plus que les météorites CI

Elles ont donc accrété le Xe sous forme solide, condensé sur les grains.
Les météorites en revanche l'ont adsorbé en petite quantité sous forme de gaz



Le Xe cométaire: une stratigraphie radiale NC – CC – NC dans le disque?



Le Xe cométaire est fortement dépeuplé en ^{134}Xe et ^{136}Xe par rapport au Soleil et les chondrites, Ces deux isotopes sont produits par le processus r.

Ils laissent soupçonner que les comètes sont généralement appauvries en isotopes issus du processus r, ce qui est la caractéristique des objets NC.

Si vrai:



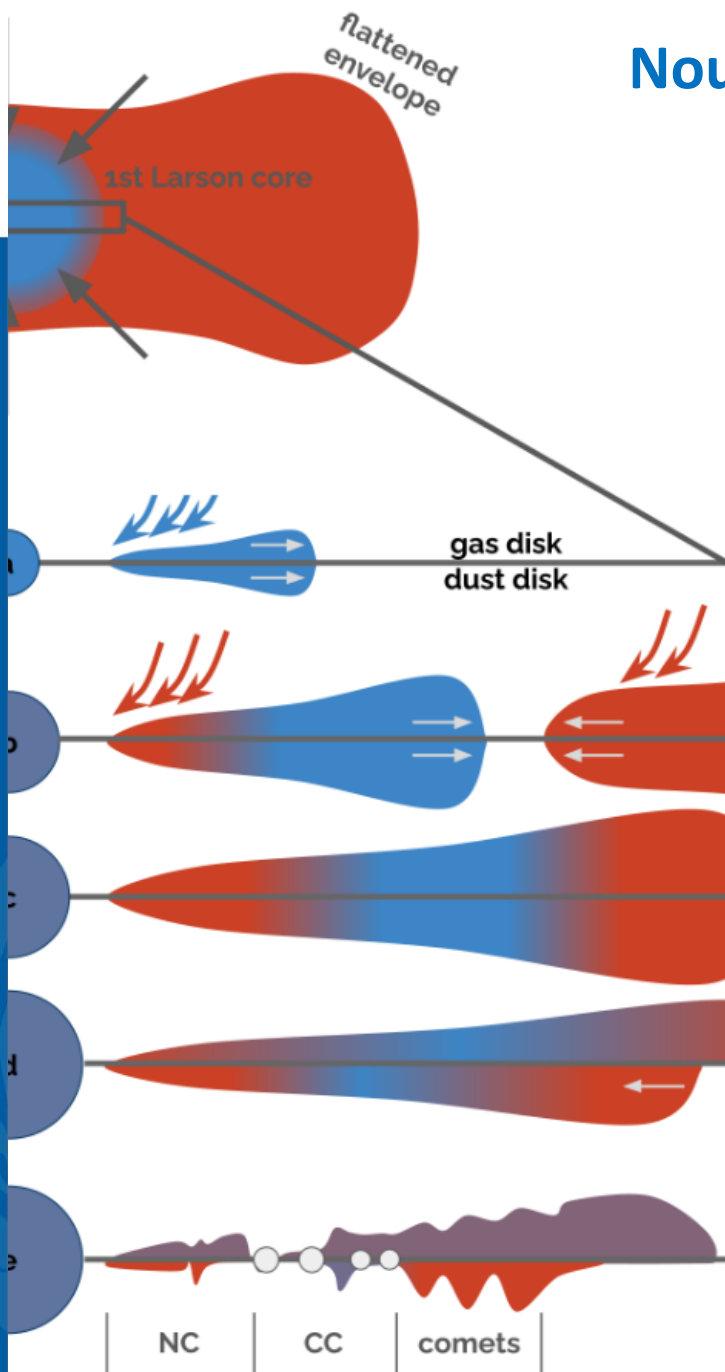
NC

CC

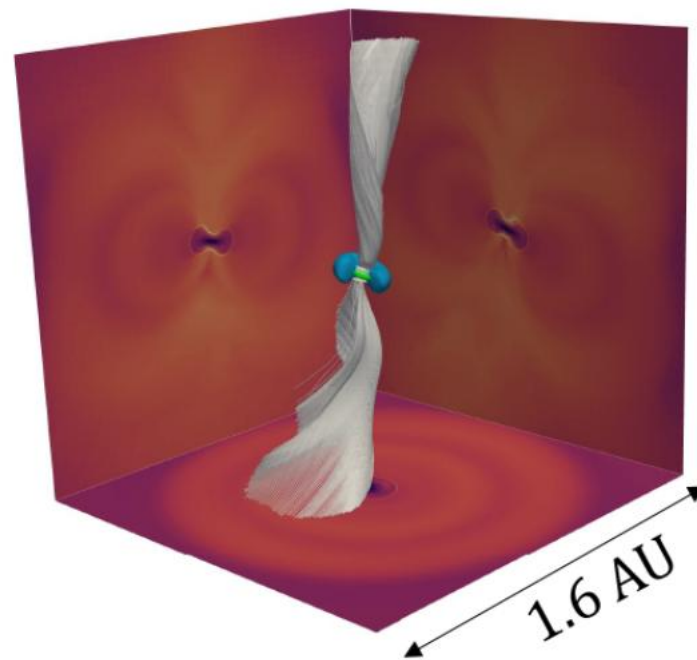
NC



Nouveau schéma d'assemblage du disque



$t = 0.10$ (yr)

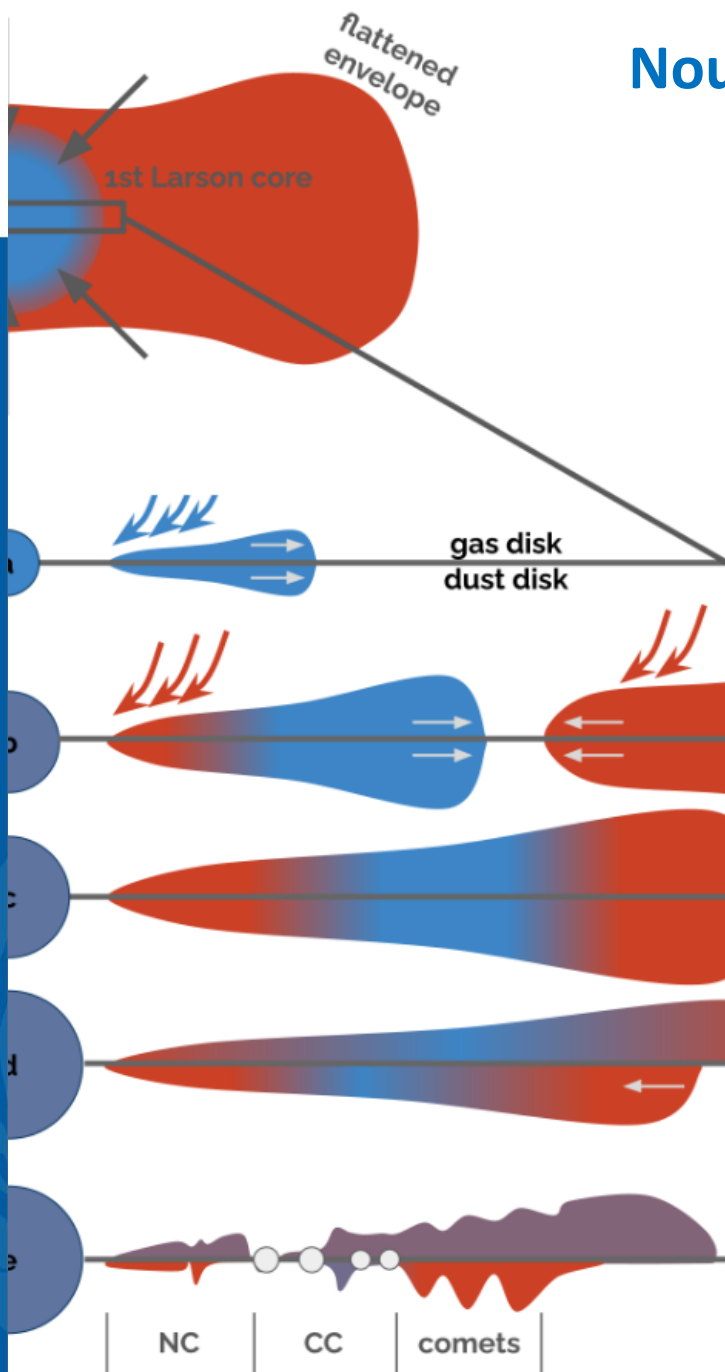


Ahmad et al. (2024)

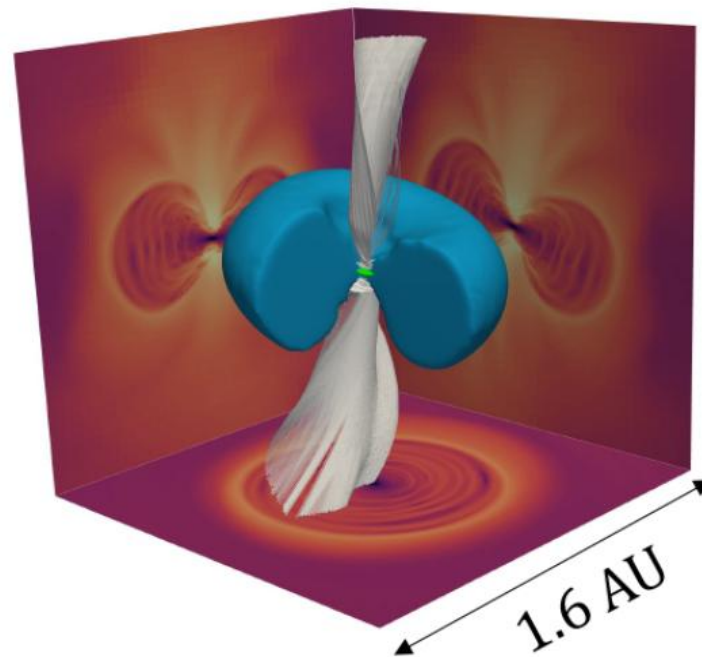
Marschall et al., 2025



Nouveau schéma d'assemblage du disque



$t = 1.00$ (yr)



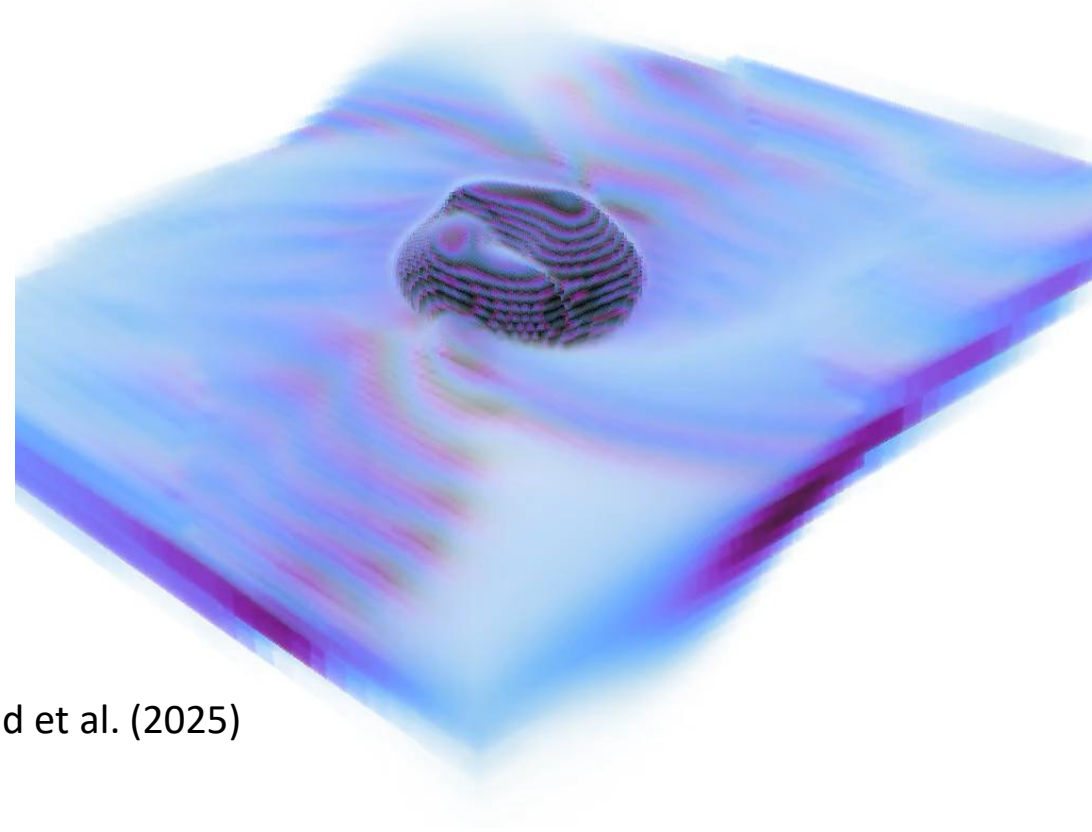
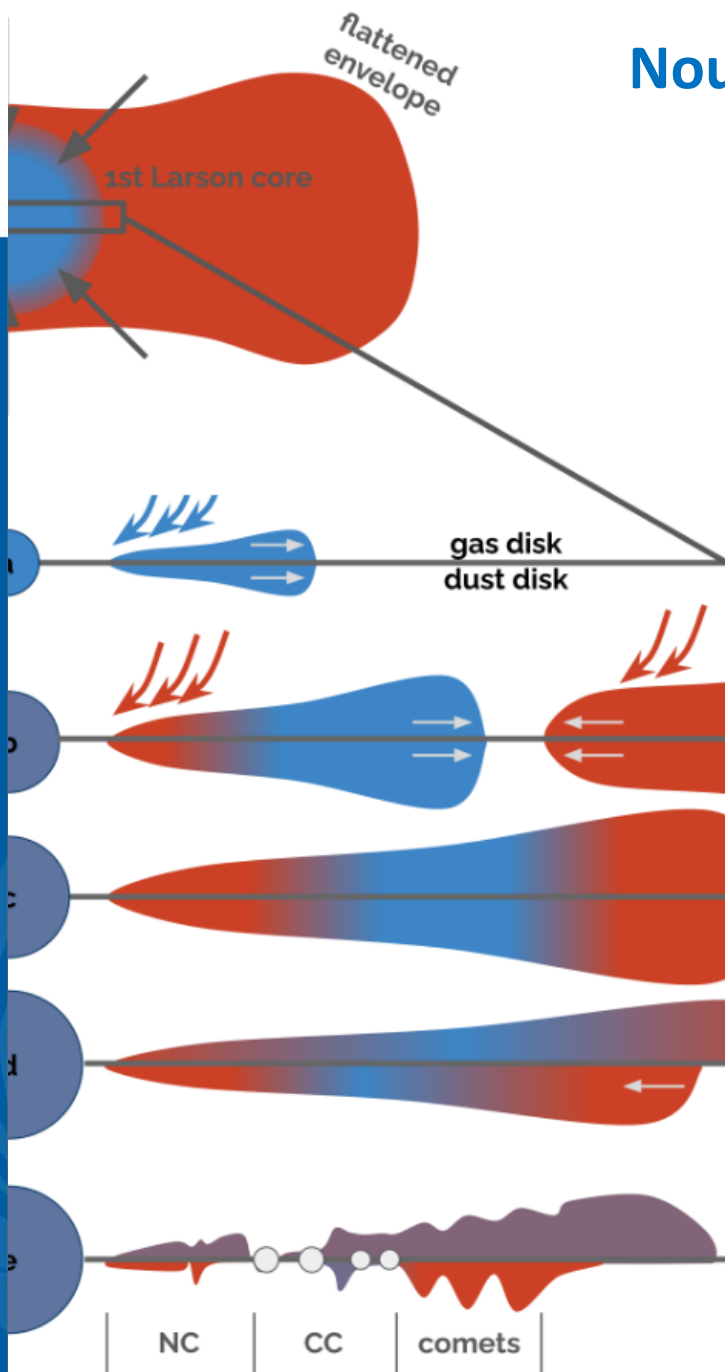
Ahmad et al. (2024)

Marschall et al., 2025



Nouveau schéma d'assemblage du disque

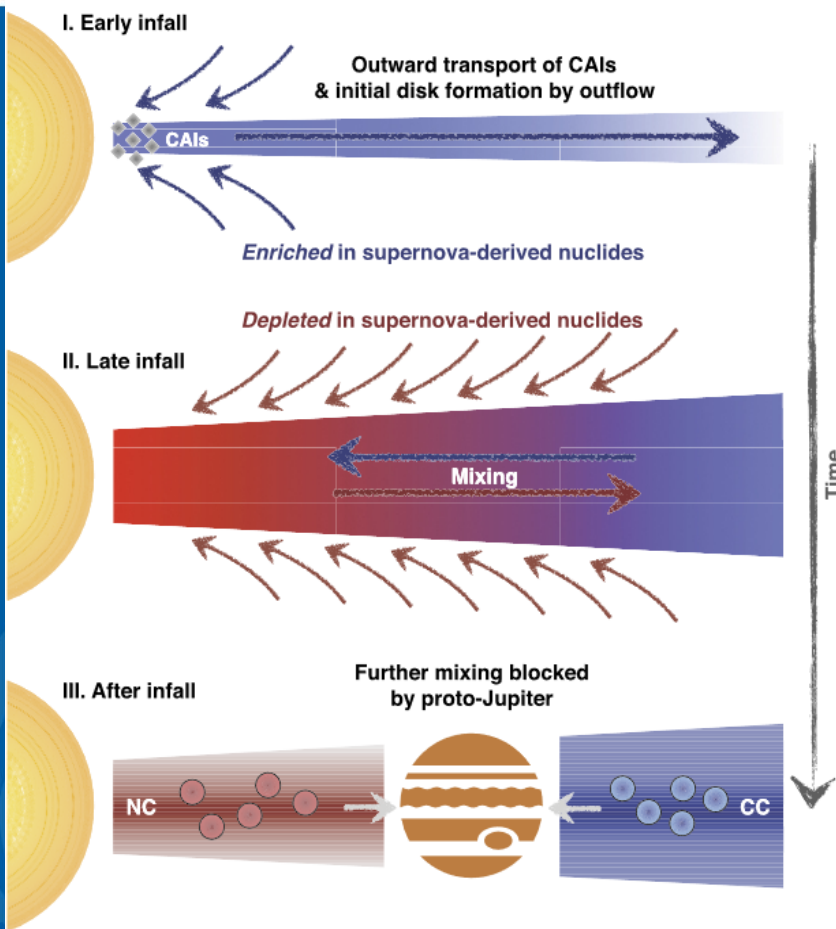
$t = 0.000$ kyr



Marschall et al., 2025

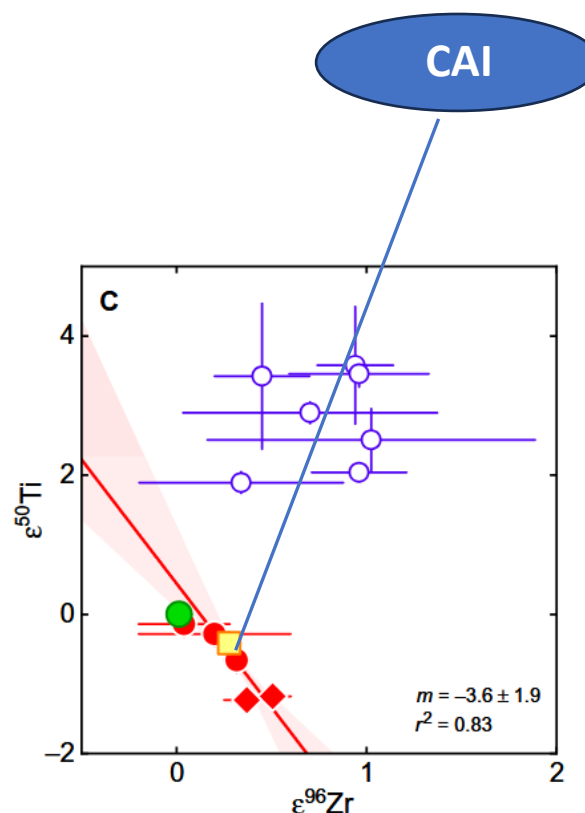


La distribution des anomalies nucléosynthétiques issues du processus s



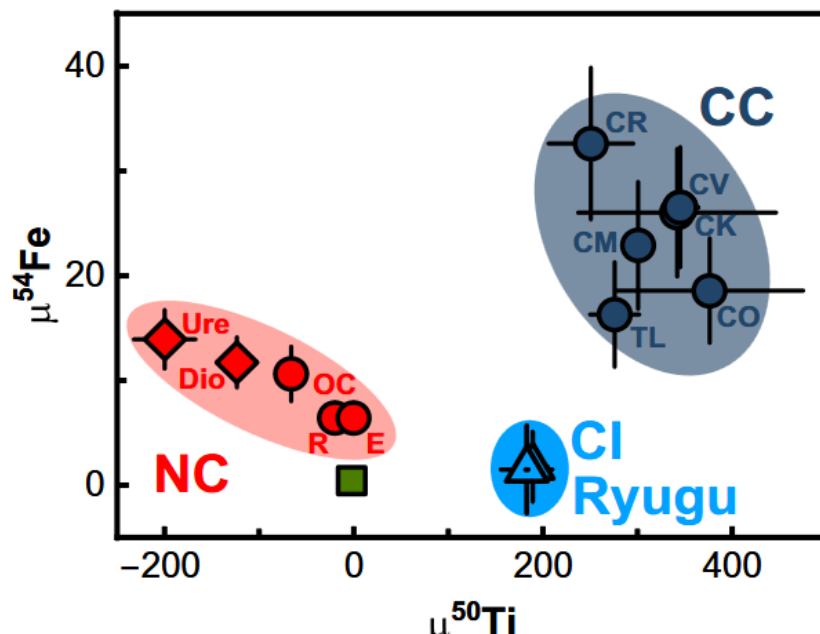
Le modèle illustré auparavant explique la dichotomie isotopique des éléments du groupe du Fe ou issus du processus r

Mais il n'explique pas la distribution des anomalies isotopiques issues du processus s, qui est transverse à la ligne directrice <NC> <CC> <CAI>



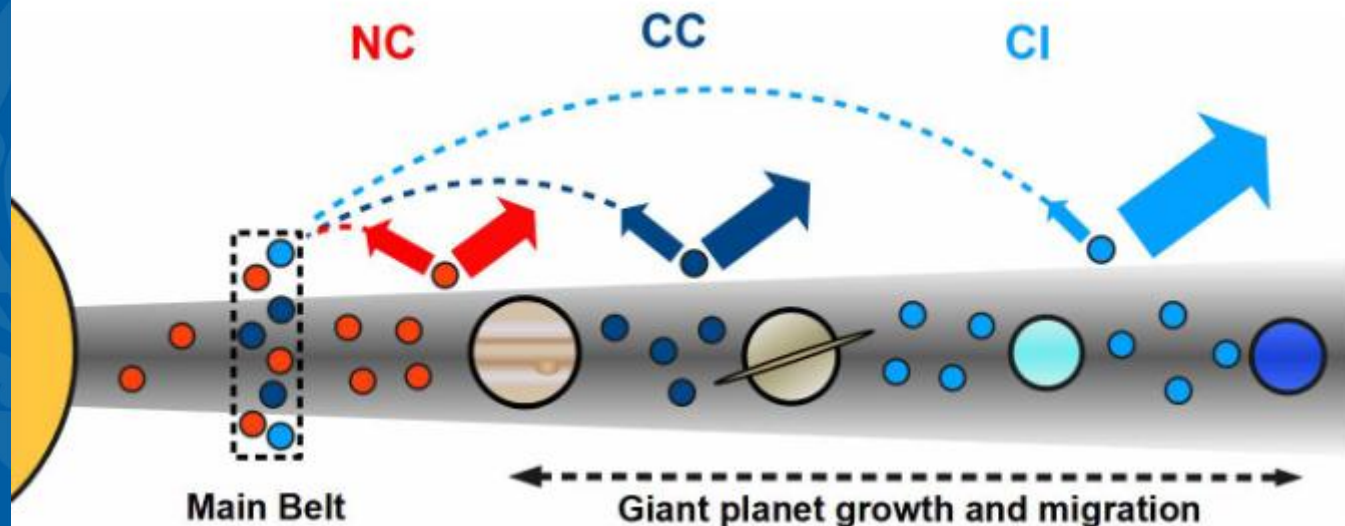
Ceci, ainsi que la corrélation entre anomalies isotopiques issues des processus r et s, restent des problèmes ouverts

Combien de barrières dans le disque?



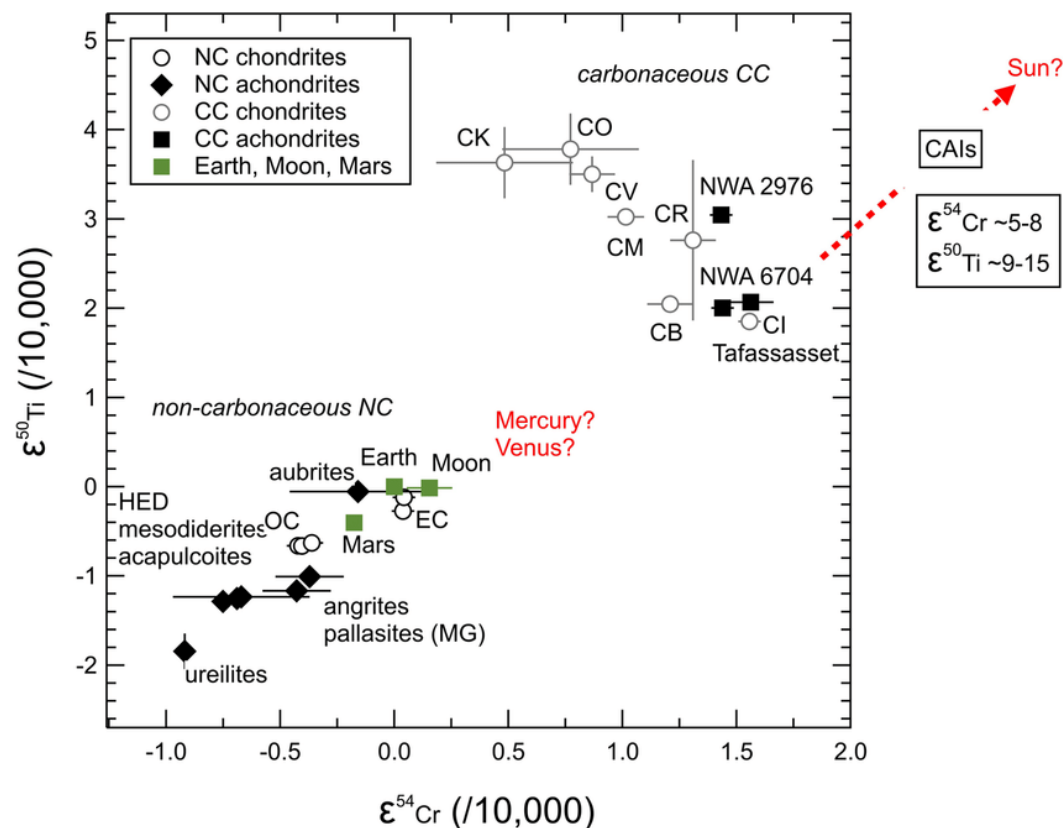
Hopp et al., 2022, relèvent une trichotomie isotopique en regardant l'anomalie isotopique du Fe. Ils proposent donc l'existence d'une deuxième barrière, peut-être associée à la formation de Saturne (Dauphas et al., 2024; Nesvorny et al., 2024).

La trichotomie est visible seulement en Fe et Ni. Elle pourrait être due à l'accrétion de grains Fe-Ni, porteurs de l'anomalie, de préférence par les corps parents des météorites CI (Spitzer et al., 2025), ou au manque d'échantillonnage des corps intermédiaires (Yap et Tissot, 2023).





Combien de barrières dans le disque?



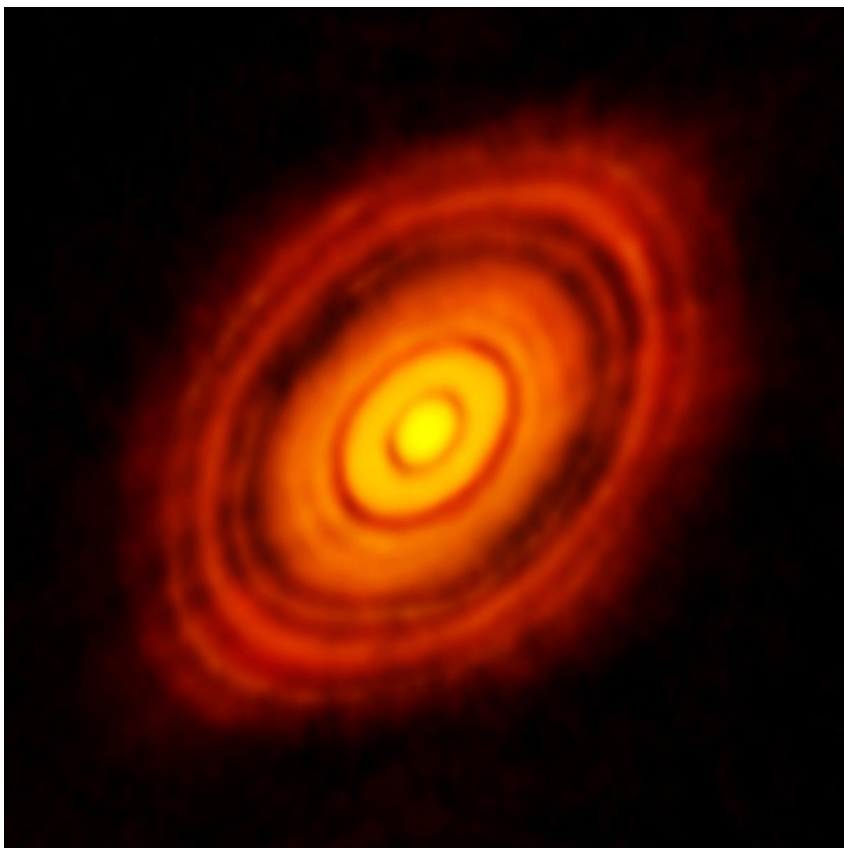
La similitude isotopique entre certaines chondrites et achondrites (par exemple EC et Aubrites, CR et Tafassasset, NWA2976, NWA 6704), qui se sont formés à $\sim 1-2$ Ma d'écart, suggère aussi le piégeage de poussières dans des anneaux confinés pendant longtemps (Neumann et al., 2024).

La formation très tardive des objets de la ceinture de Kuiper jusqu'à 45 au, suggère aussi le piégeage de poussières à cette distance.

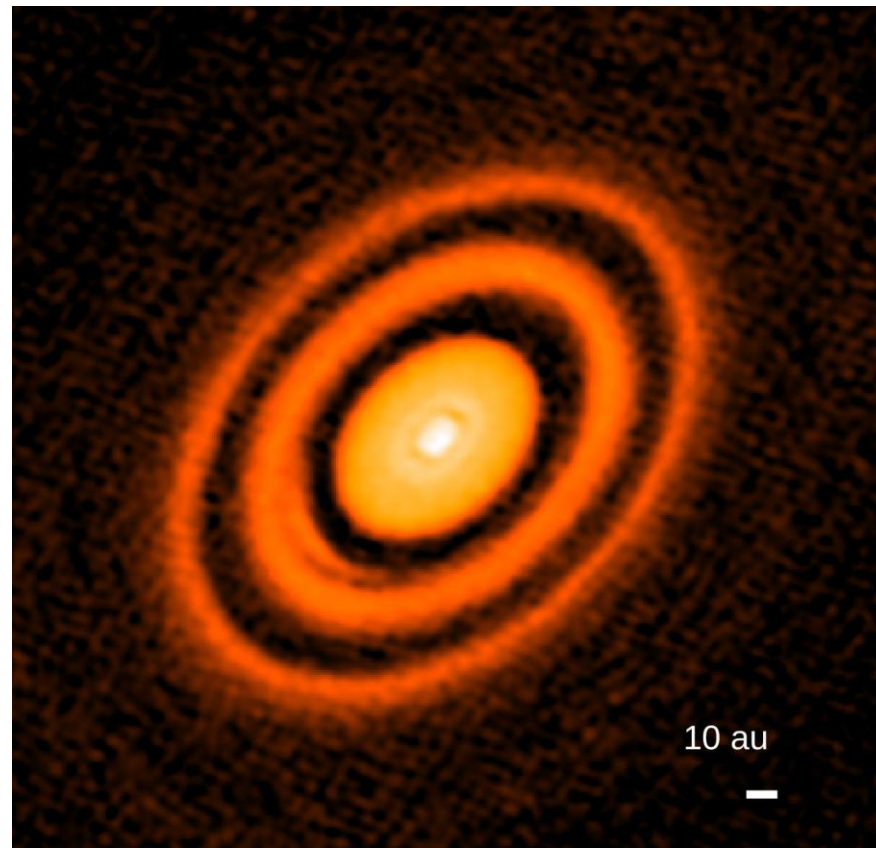


Combien de barrières dans le disque?

Probablement le disque du Système Solaire était fragmenté en anneaux, comme on voit souvent autour d'étoiles jeunes. Comme il n'y a que deux planètes (Jupiter et Saturne) capables de créer des barrières, ceci suggère que la plupart des barrières sont dues à des processus (magnéto)hydrodynamiques



HL Tau



HD163296



A retenir

- Les anomalies isotopiques indépendantes de la masse, d'origine nucléosynthétique, montrent une dichotomie entre chondrites carbonées (CC) et non carbonées (NC).
- Les achondrites et les météorites de fer montrent aussi la même dichotomie
- Ceci permet d'étendre les classes NC et CC aux achondrites
- La dichotomie observée semble être incompatible la simple destruction thermique des grains porteurs des anomalies
- En revanche, elle suggère que la nature isotopique du matériel accrété par le disque protosolaire a changé dans le temps et que cette accrétion a eu lieu de préférence à proximité du Soleil (et peut-être très loin)
- La formation et le maintien d'une dichotomie à partir d'un gradient isotopique nécessite la formation précoce ($<0,3$ Ma) d'une barrière contre la dérive radiale des poussières
- Une telle barrière aurait pu être créée par la formation de Jupiter, mais a-t-elle pu se former suffisamment vite?
- Il y a eu probablement plusieurs barrières dans le disque
- La distribution des anomalies isotopiques produites par le processus s est moins bien comprise que celles des éléments du groupe du Fe ou produites dans le processus r.
- La corrélation entre les anomalies isotopiques produites dans les processus s et r parmi les météorites NC reste mystérieuse.