Cycle 2026

Alessandro
MORBIDELLI

Chaire
Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

La formation des planetes telluriques

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Agenda

21 Octobre - Les planètes telluriques : caractéristiques orbitales, physiques et compositionnelles
28 Octobre - La Lune et sa formation
4 Novembre - Chronologie de la formation des planètes telluriques
11 Novembre
18 Novembre - La formation des planètes telluriques I: premiers modèles
25 Novembre - La formation des planètes telluriques II: nouveaux modèles
2 Décembre - Focus sur Venus et Mercure; le modèle alternatif de la *pebble accretion*

8-9 Juillet 2027 - Colloque: Open problems in terrestrial planet formation

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Leçon N. 1 - 21 Octobre 2026

Alessandro
MORBIDELLI

Chaire
Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

Les planètes telluriques : caractéristiques orbitales, physiques et compositionnelles

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Plan du cours

Partie I: masses et orbites – évolution orbitale

Partie II: La structure différentiée noyau-manteau-croute

- Différences d'oxydation entre Mars et la Terre
- Le déficit en éléments sidérophiles dans les manteaux
- L'accrétion tardive.

Partie III: Les planètes telluriques dans le contexte de la dichotomie isotopique du système solaire

- Fraction de matière du système solaire externe incorporée dans les planètes telluriques
- Un réservoir manquant dans la collection des météorites

Partie IV: Les propriétés chimiques des planètes – comparaisons avec les météorites

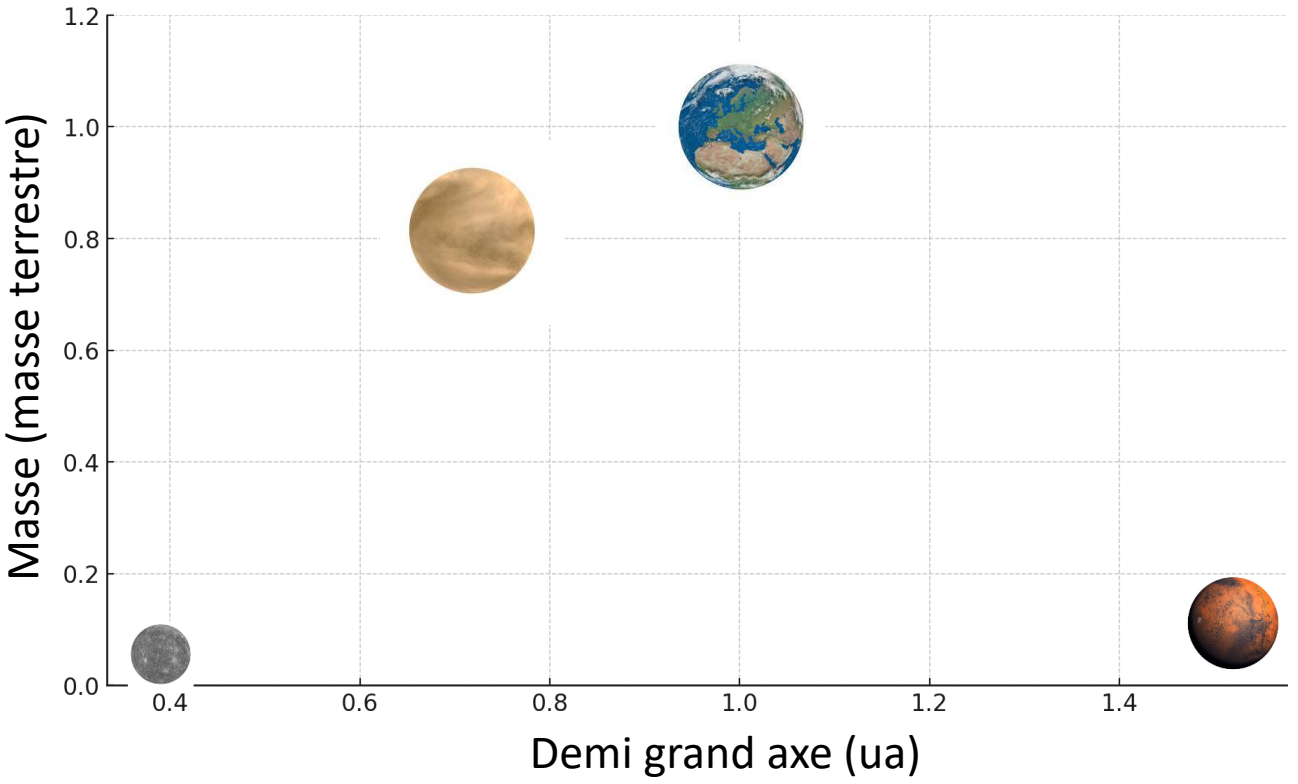
- L'enrichissement en éléments très réfractaires
- Le déficit en éléments volatiles

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Partie I:
masses et orbites – évolution orbitale

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Masses et orbites



$6x10^{27}g$

$1,5x10^{8}km$

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

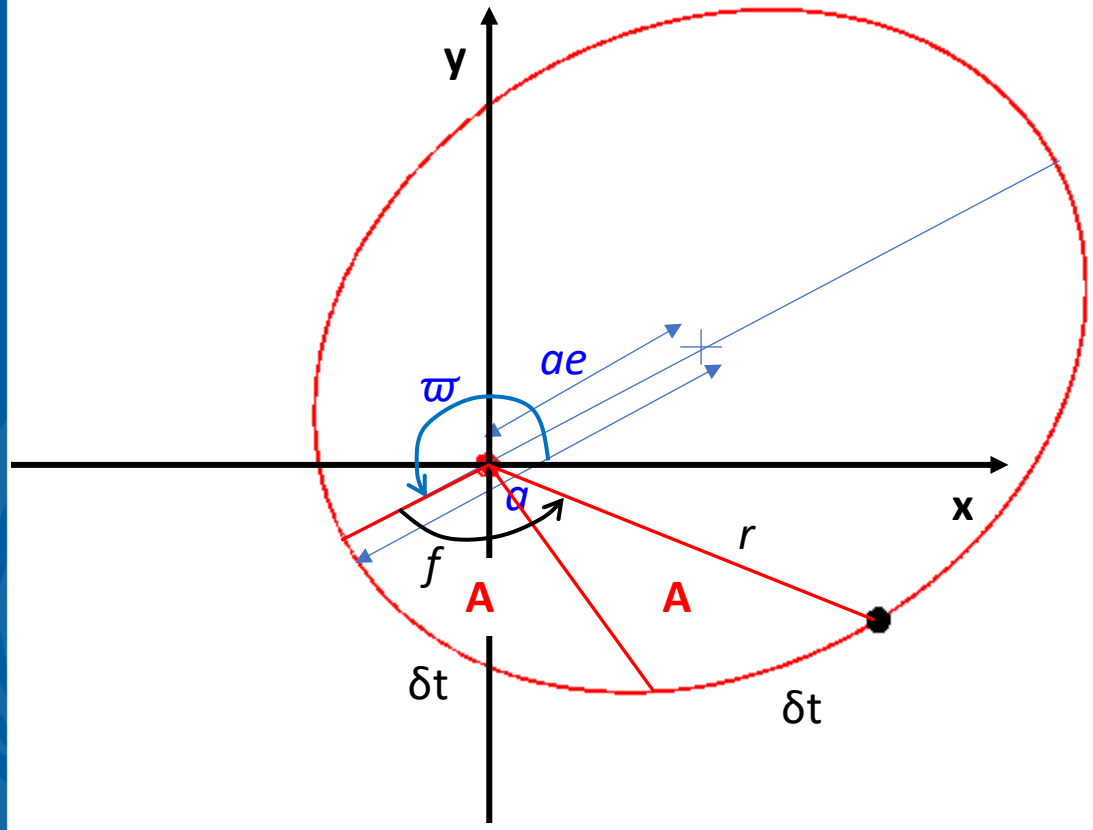
Les éléments orbitaux

a: demi grand axe
e: excentricité
ϖ: longitude du périhélie

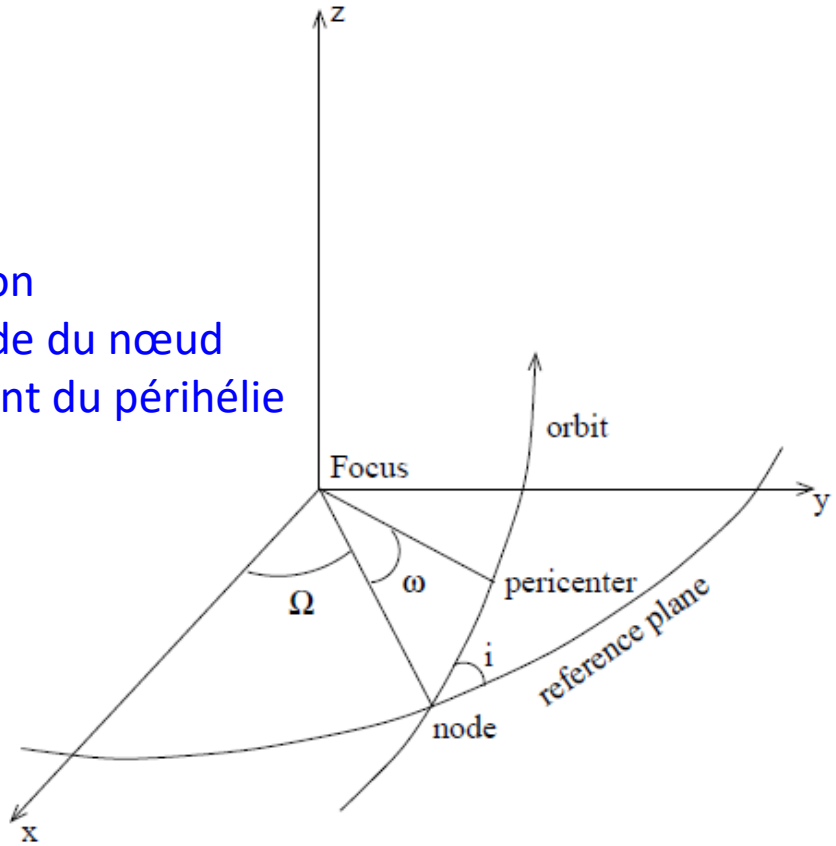
M = 2π A(t)/A_{tot}: anomalie moyenne

$$E - e\sin E = M$$

$$r = a(1 - e\cos E)\ , \quad \cos f = \frac{\cos E - e}{1 - e\cos E}$$



i: inclinaison
Ω: longitude du nœud
ω: argument du périhélie
$\varpi = \Omega + \omega$



La période orbitale dépend uniquement du demi grand axe

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Oscillations “séculaires” des excentricités et des inclinaisons

La solution linéaire (Lagrange-Laplace)

$$e_j \cos \varpi_j = \sum_{k=1}^{N} M_{j,k} \cos(g_k t + \beta_k)$$

$$e_j \sin \varpi_j = \sum_{k=1}^{N} M_{j,k} \sin(g_k t + \beta_k)$$

$$\sin \frac{i_j}{2} \cos \Omega_j = \sum_{k=1}^{N} N_{j,k} \cos(s_k t + \delta_k)$$

$$\sin \frac{i_j}{2} \sin \Omega_j = \sum_{k=1}^{N} N_{j,k} \sin(s_k t + \delta_k)$$

Angular momentum deficit:

$$\mathrm{AMD} = \sum_k m_k \sqrt{G m_0 a_k} \left(1 - \sqrt{1 - e_k^2} \cos i_k\right)$$

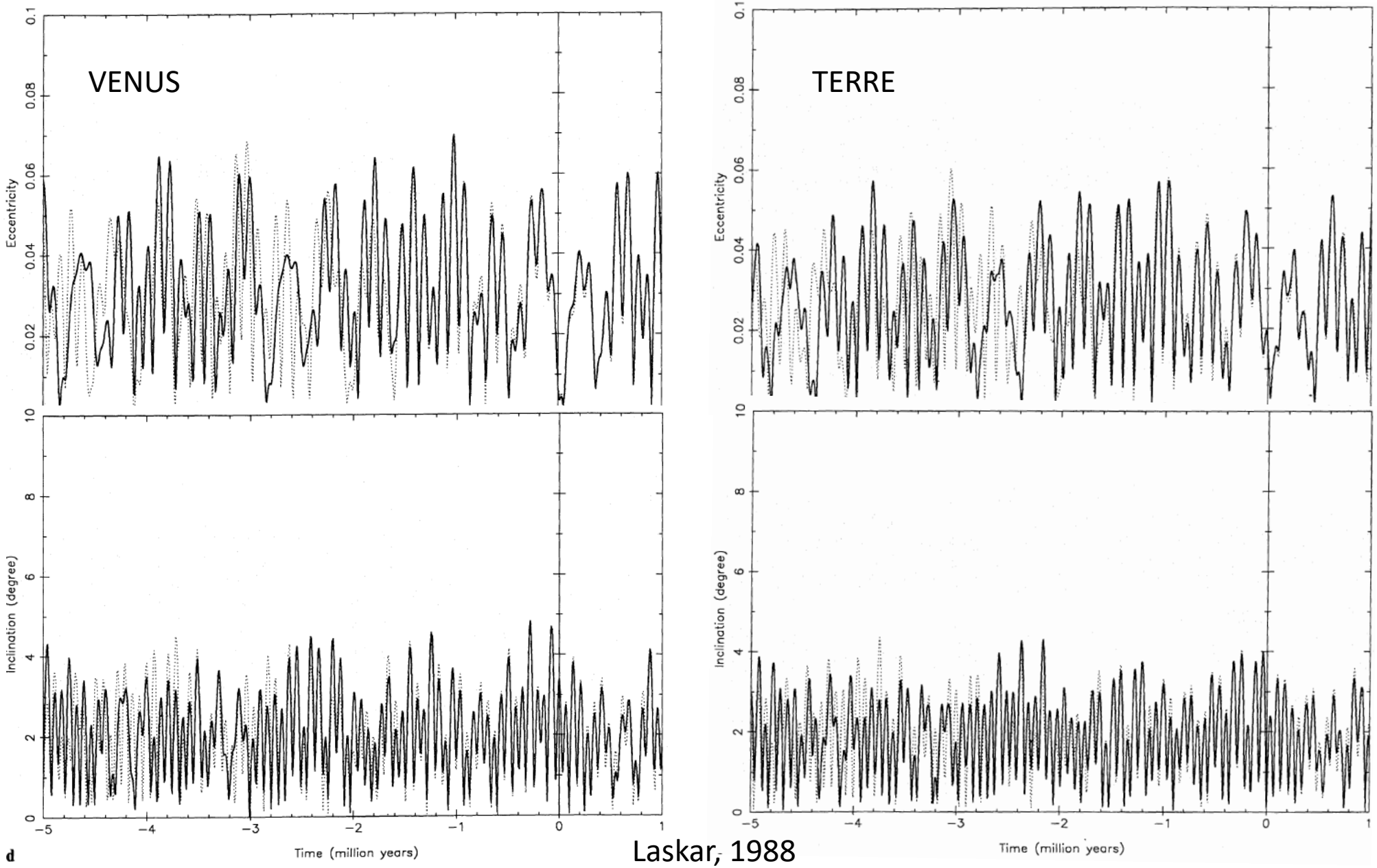
Pratiquement constant au dépit des oscillations des e,i de chaque planète

Solution non-linéaire (Laskar, 1990)

var.	i		ν_i ("/yr)	$A_i \times 10^6$	ϕ_i (°)
z_1	1	g_1	5.5964355	185444	111.179
	2	$g_1 - \sigma$	5.4744873	66814	274.217
	3	$g_1 + \sigma$	5.7167139	52366	121.597
	4	g_5	4.2472969	36353	26.449
	5	$g_1 - 2\sigma$	5.3581992	28415	94.683
	6	g_2	7.4559375	27700	20.295
	7	$g_5 + \sigma$	4.3707920	13105	224.261
	8	$g_2 - s_1 + s_2$	5.9923652	10123	114.094
	9		6.9339902	9344	166.112
	10		5.6548916	8548	48.431
z_2	1	g_2	7.4559199	20733	200.618
	2	g_5	4.2487822	19636	30.571
	3	g_4	17.9155986	13464	335.715
	4	g_3	17.3646299	11671	124.965
	5	g_1	5.5964531	6668	112.487
	6	$g_3 - \theta$	17.0827998	2848	175.821
	7	$g_3 - 2\theta$ $2g_3 - g_4$ $g_4 + s_3 - s_4$	16.8131865	2350	274.361
	8	$g_1 - \sigma$	5.4740830	2242	272.955
	9		6.9349658	2184	170.325
	10	$g_1 + \sigma$	5.7163008	1893	123.764
z_3	1	g_5	4.2487910	18913	30.597
	2	g_2	7.4559199	16047	200.630
	3	g_4	17.9155811	13159	155.568
	4	g_3	17.3646123	9406	304.902
	5	g_1	5.5964883	4248	112.565
	6	$g_3 - \theta$	17.0830020	2238	351.000
	7	$g_3 + \theta$	17.6287061	1956	7.770
	8	$g_3 - 2\theta$ $2g_3 - g_4$ $g_4 + s_3 - s_4$	16.8132568	1722	94.866
	9		6.9349219	1598	169.028
	10	g_6	28.2206602	1506	128.008

COLLÈGE DE FRANCE
1530

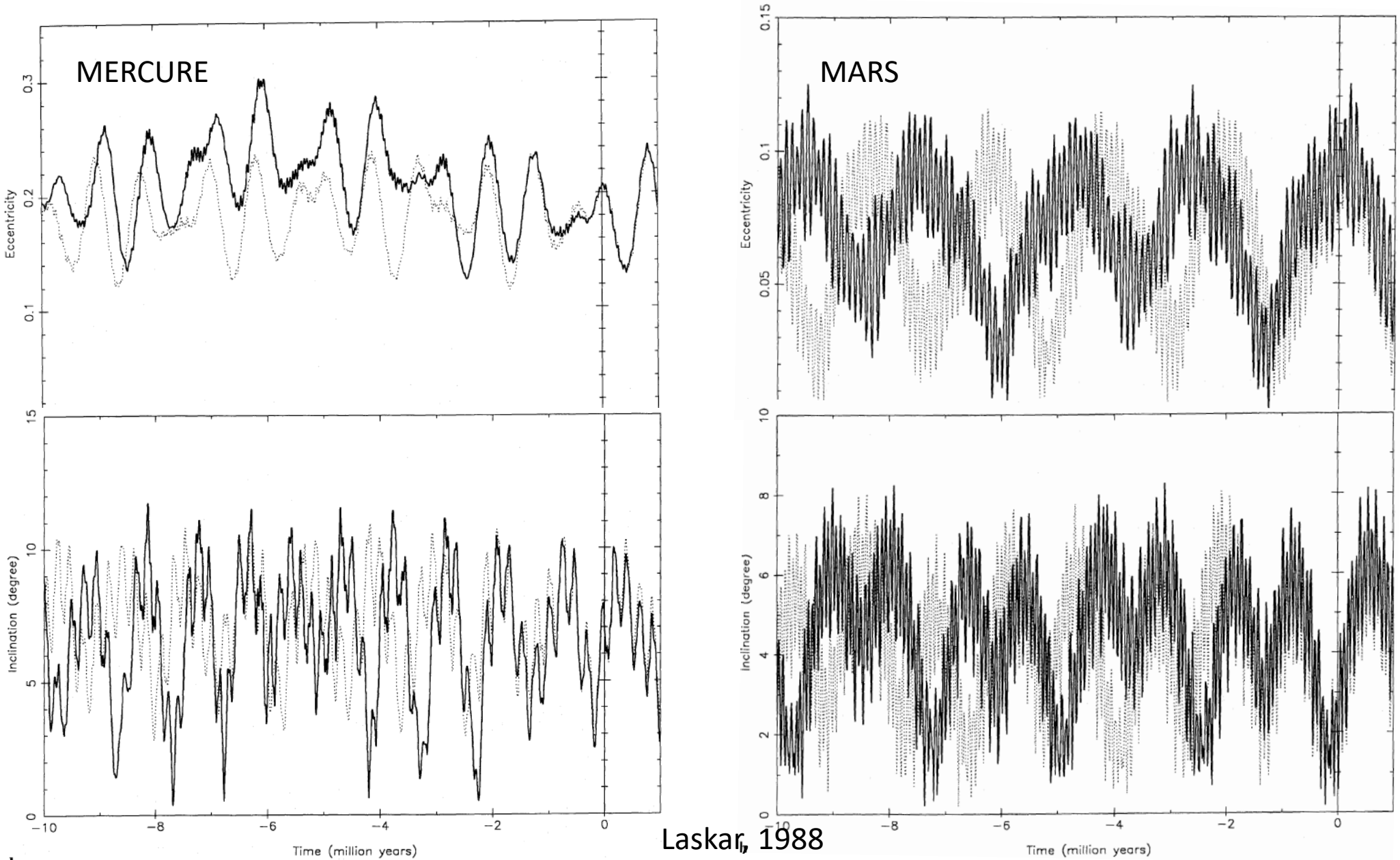
Oscillations “séculaires” des excentricités et des inclinaisons



Laskar, 1988

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

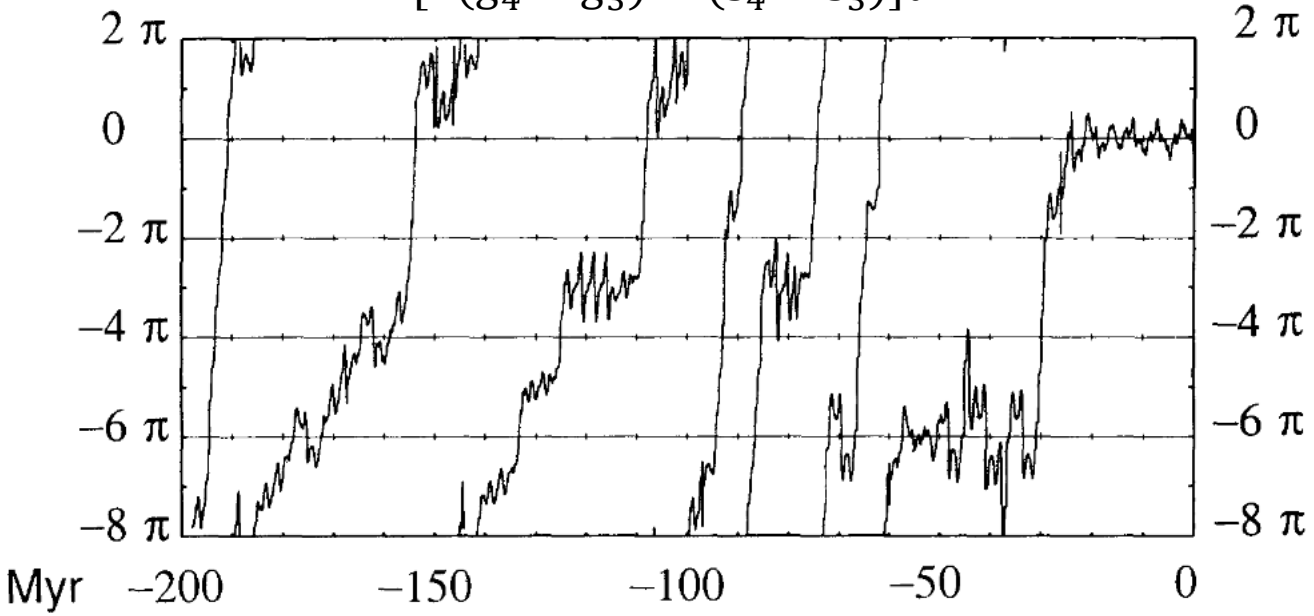
Oscillations “séculaires” des excentricités et des inclinaisons



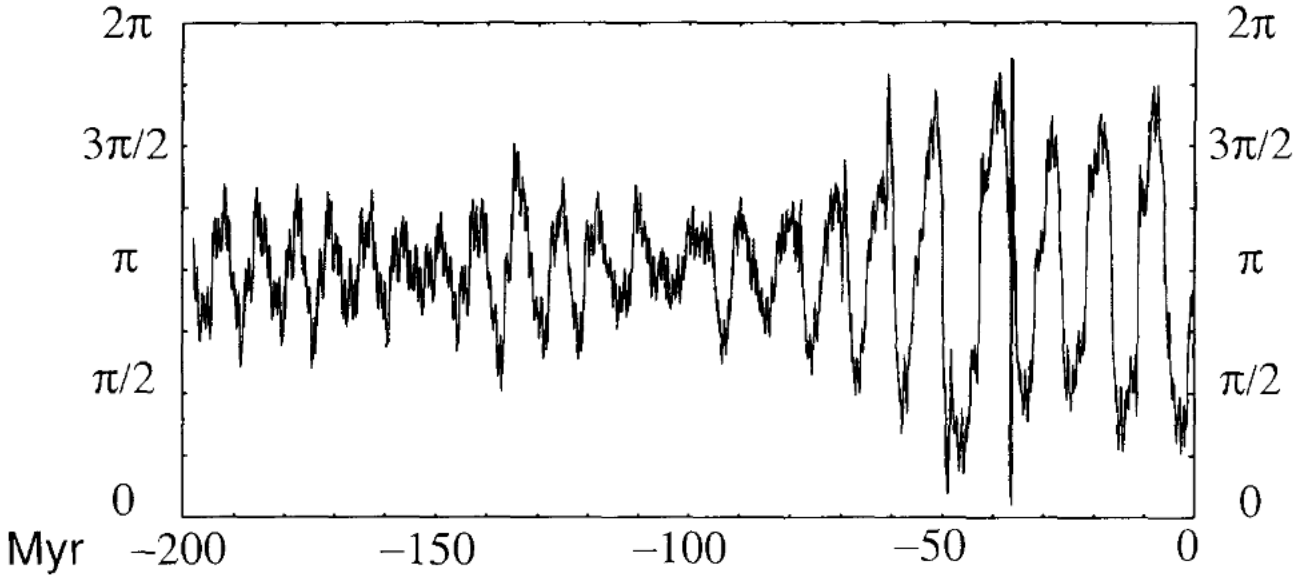
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Origine du mouvement chaotique des planètes telluriques

$[2(g_4 - g_3) - (s_4 - s_3)]t$



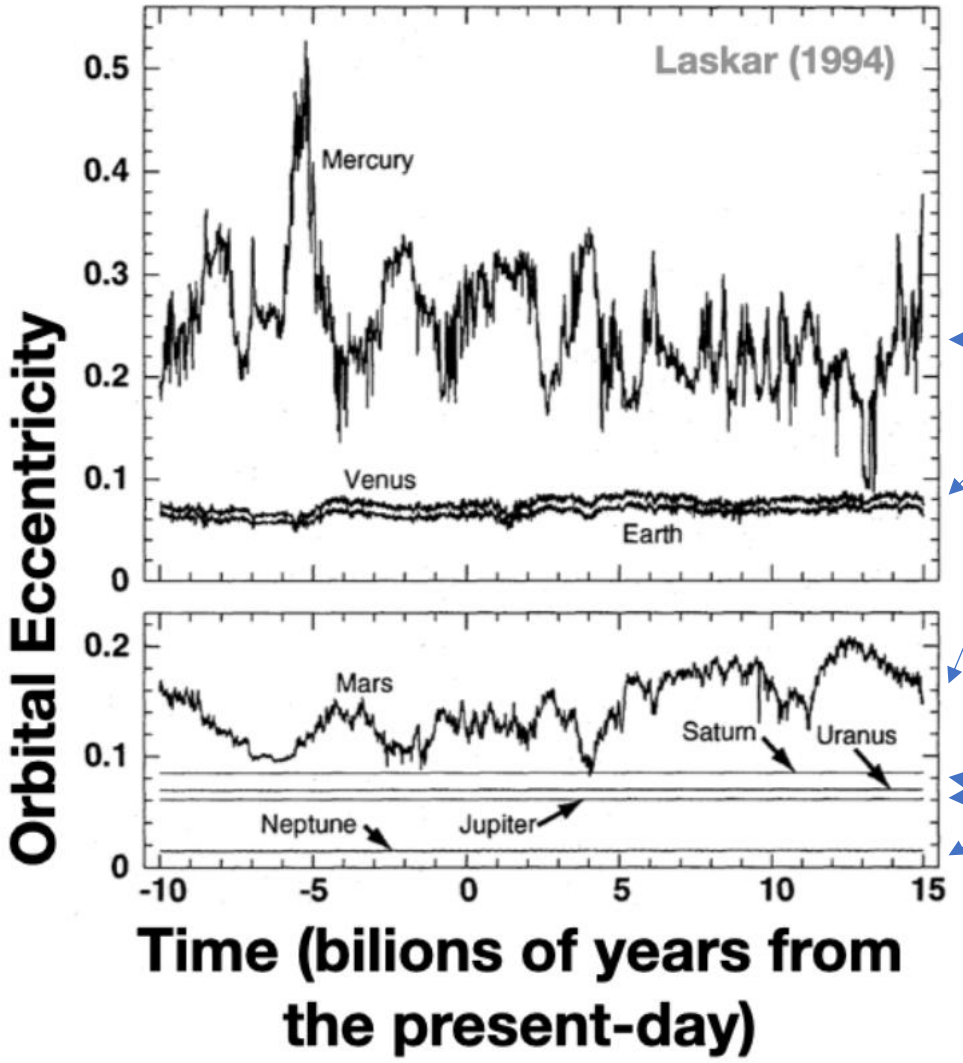
$[2(g_1 - g_5) - (s_1 - s_2)]t$



Laskar, 1990

Conséquences du mouvement chaotique

Excentricité maximale atteignable par les planètes par intervalles de 10Ma



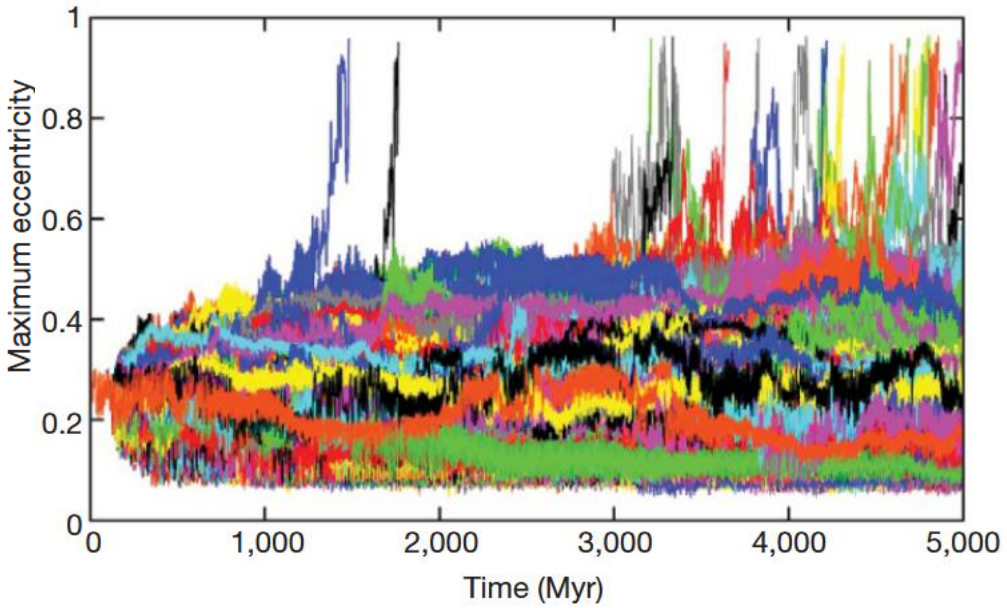
Les orbites des planètes telluriques ont des oscillations chaotiques importantes

Les orbites des planètes géantes n'ont pas des variations significatives

COLLÈGE DE FRANCE
1530

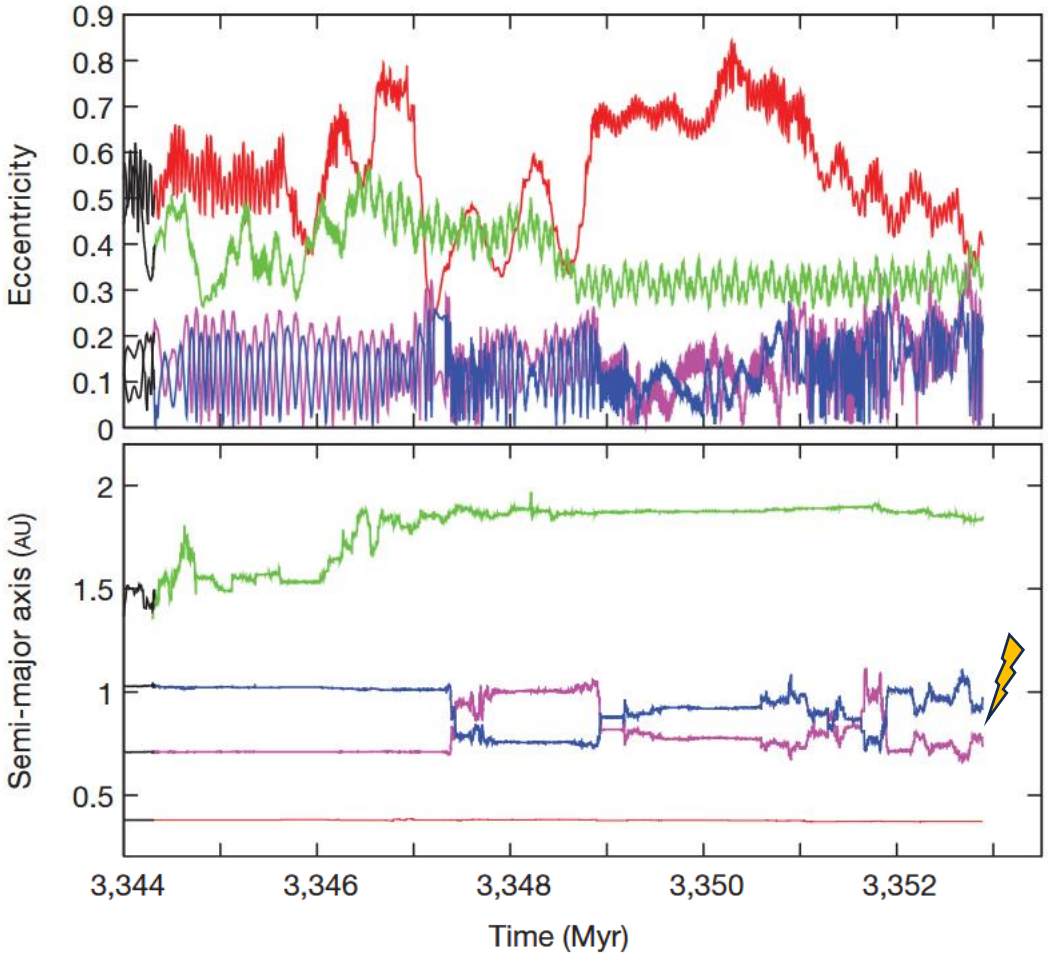
Conséquences du mouvement chaotique

Laskar et Gastineau, Nature, 2009



2,500 évolutions possibles, qui diffèrent initialement par la position initiale de Mercure dans un intervalle de 0,38mm

Collisions planétaires



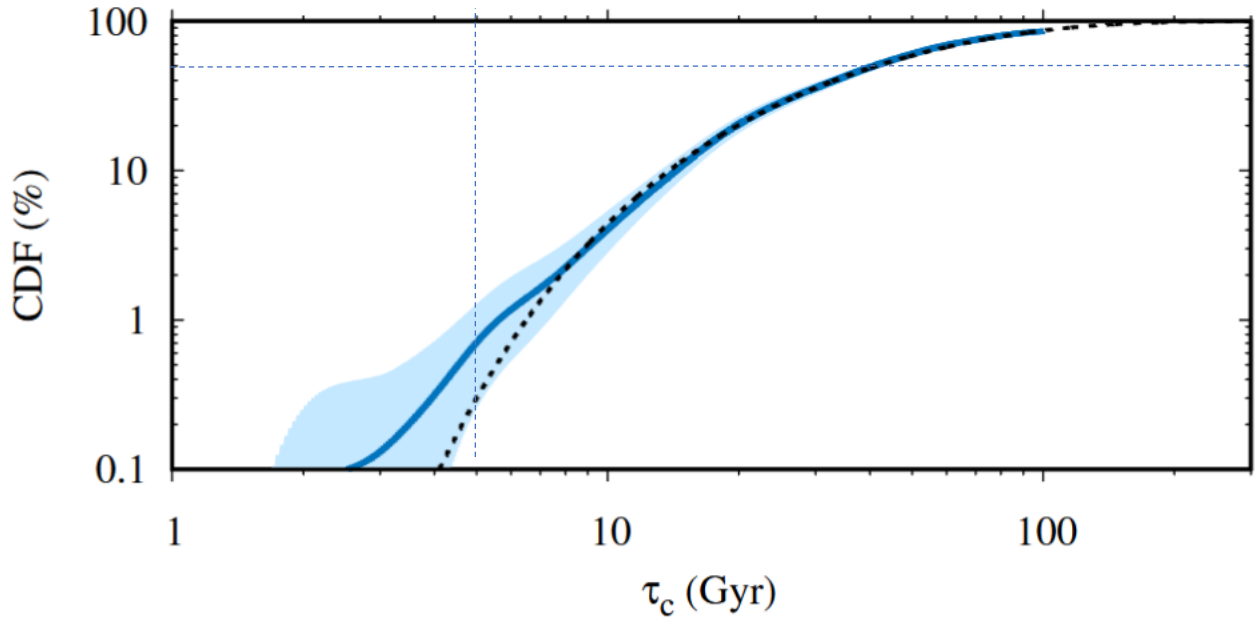
La probabilité d'une collision planétaire dans les prochaines 5 Ga est de ~1%

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Conséquences du mouvement chaotique

Mogavero et Laskar, 2021

En supposant le Soleil éternel, probabilité d'une collision entre planètes telluriques en un temps donné

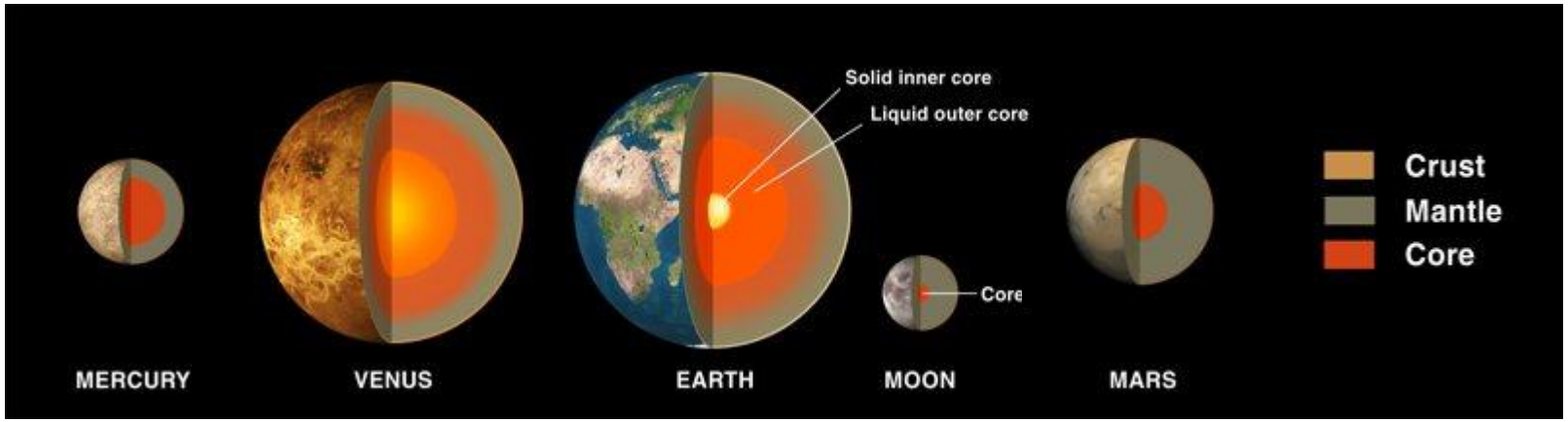


Partie II:
La structure différentiée noyau-manteau-croute

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

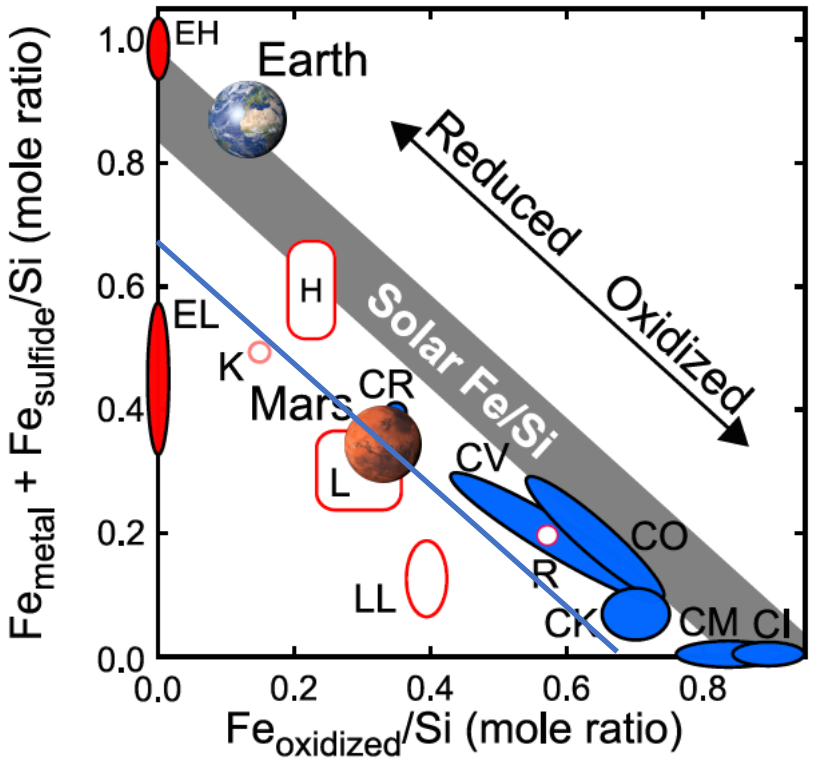
Propriétés physiques des planètes telluriques: la différentiation noyau-manteau

Toutes les planètes telluriques ont un cœur métallique, ce qui implique qu'elles étaient fondues



Masse rélative du noyau:
Mercure: 68%
Venus: 32%
Terre: 32,5%
Lune: 3%
Mars: 25%

Pourquoi le noyau de Mars est plus petit que celui de la Terre

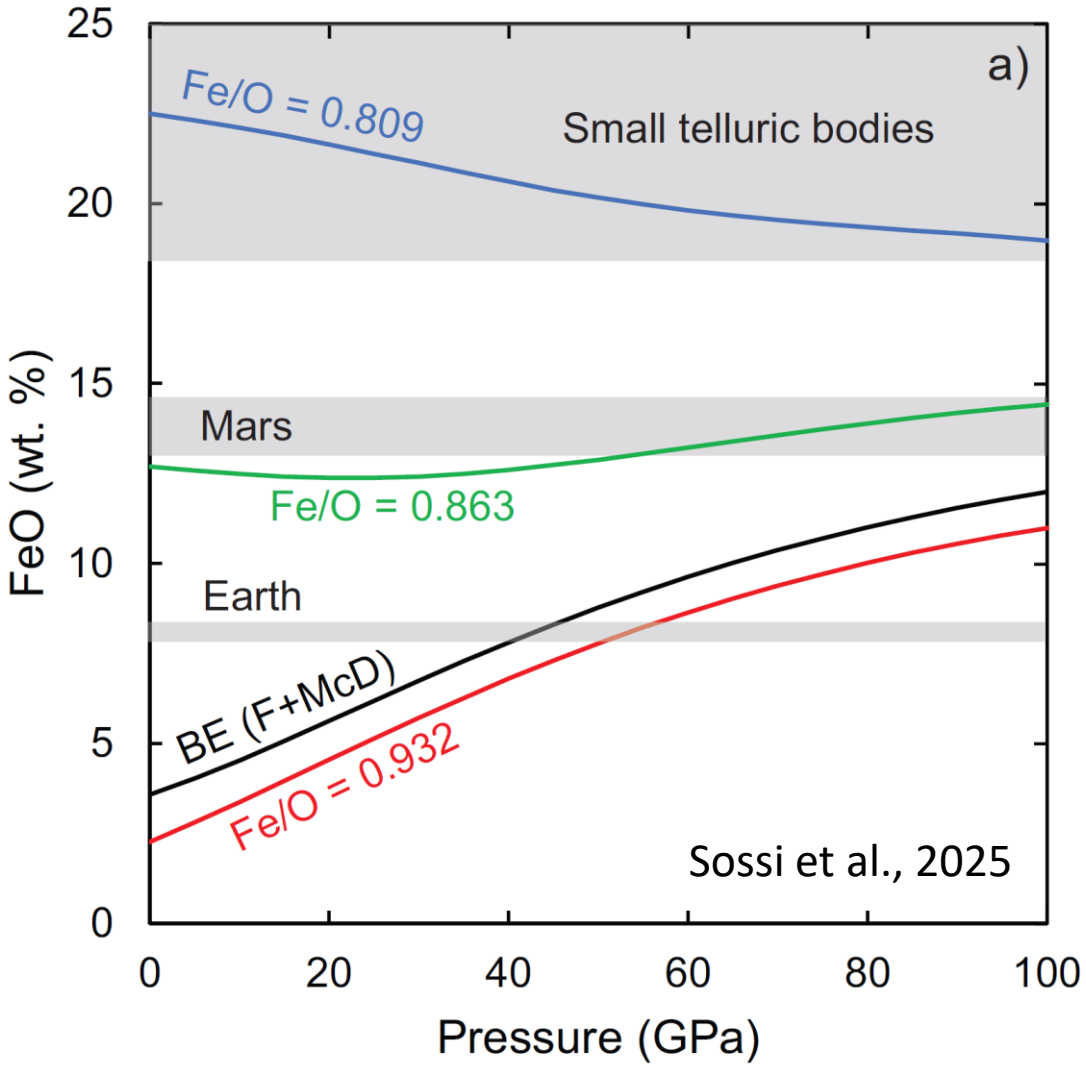


Yoshizaki and McDonough, 2021

Mars est plus oxydé que la Terre et a un déficit en Fe par rapport au Si

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Oxydations différentes impliquent matériaux différents



La quantité de FeO est déterminée par la réaction:

SiO_2(silicates)+2Fe(métal)↔Si(métal)+2FeO(silicates)

dont l'équilibre dépend de P et T de la réaction. La FeO finale du manteau d'une planète dépend donc de la pression à laquelle se fait la différentiation métal-silicates

En partant de la composition globale de la Terre il est possible d'expliquer la quantité de FeO du manteau terrestre, mais pas celui du manteau martien.

La Terre et Mars sont donc composées de matériaux différents. La matière originelle de Mars était plus oxydée que celle qui a composé la Terre.

COLLÈGE DE FRANCE
1530

L'appauvrissement en éléments sidérophiles du manteau terrestre

Lorsque le fer en forme métallique et les silicates sont fondus et en contact, les différents éléments se lient avec le métal et les silicates en proportions dictées par le coefficient de partage:

$$D_i^{met-sil} = \frac{X_i^{met}}{X_i^{sil}}$$

Concentration molaire dans le métal

Concentration molaire dans le silicate

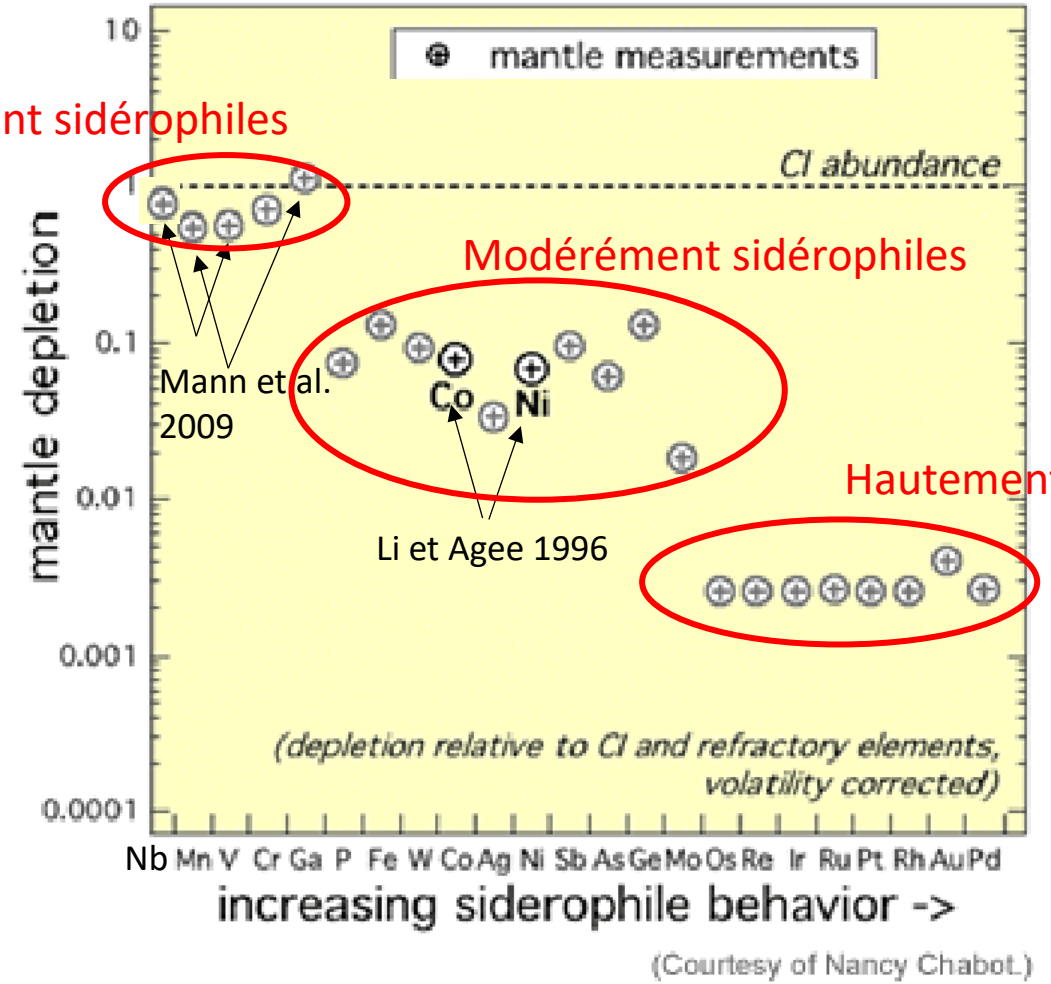
$$D_i^{met-sil}(P, T, fO_2, C, \ldots)$$

~ 0 Lithophile

> 0 Sidérophile

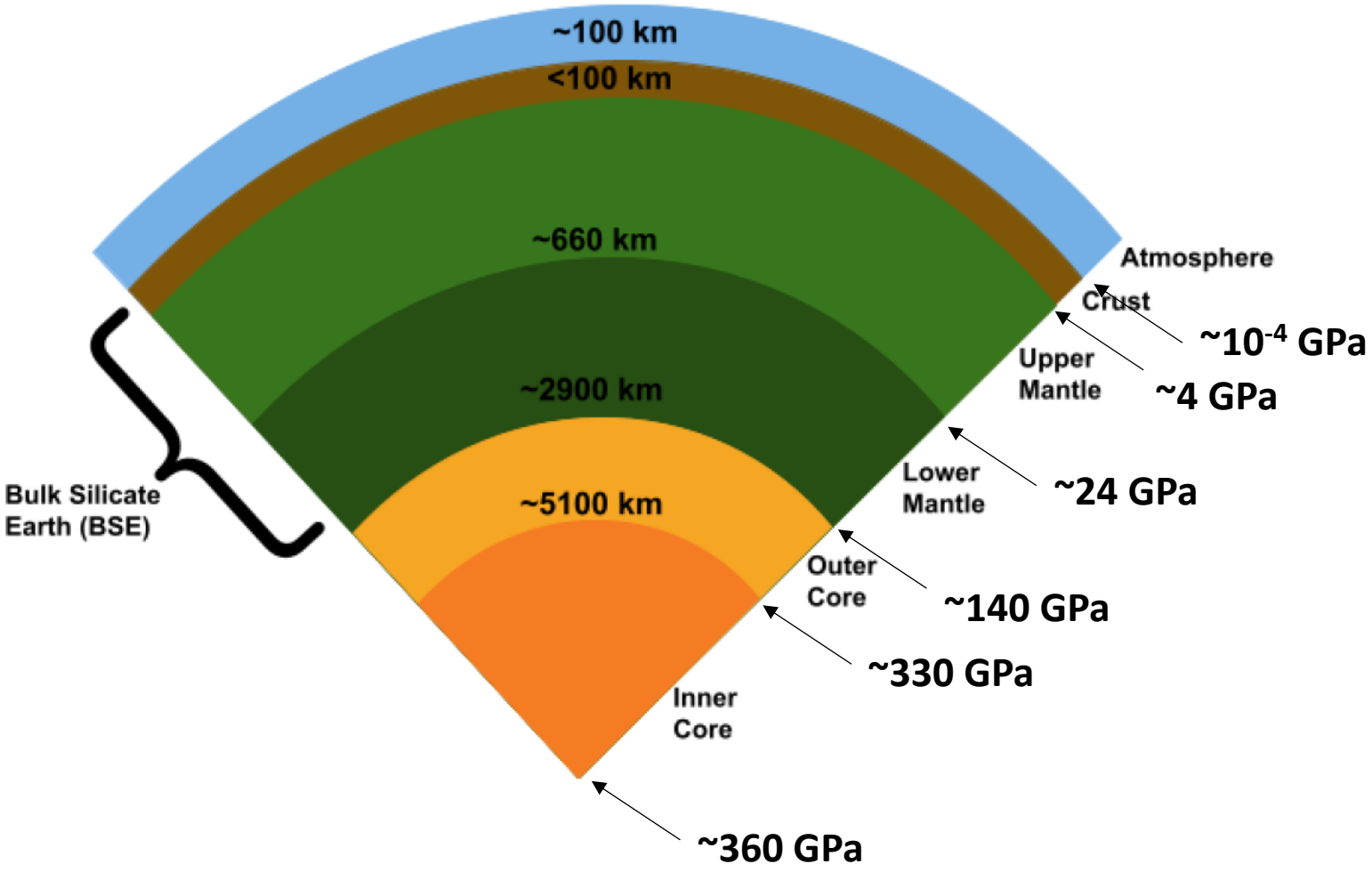
COLLÈGE DE FRANCE
1530

L'appauvrissement en éléments sidérophiles du manteau terrestre



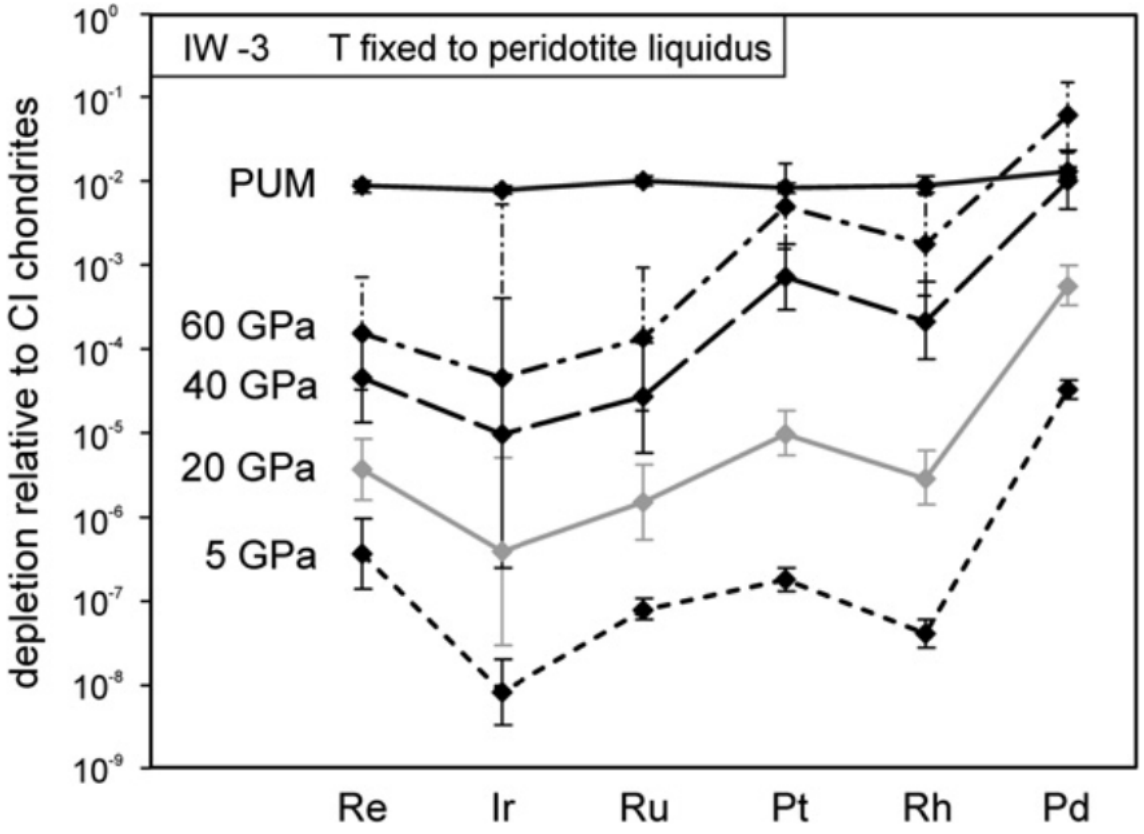
Li et Agee, 1996
Mann et al., 2009:
Équilibration métal-silicate à
P ~ 30-50 GPa

Pressions à l'intérieur de la Terre



COLLÈGE DE FRANCE
1530

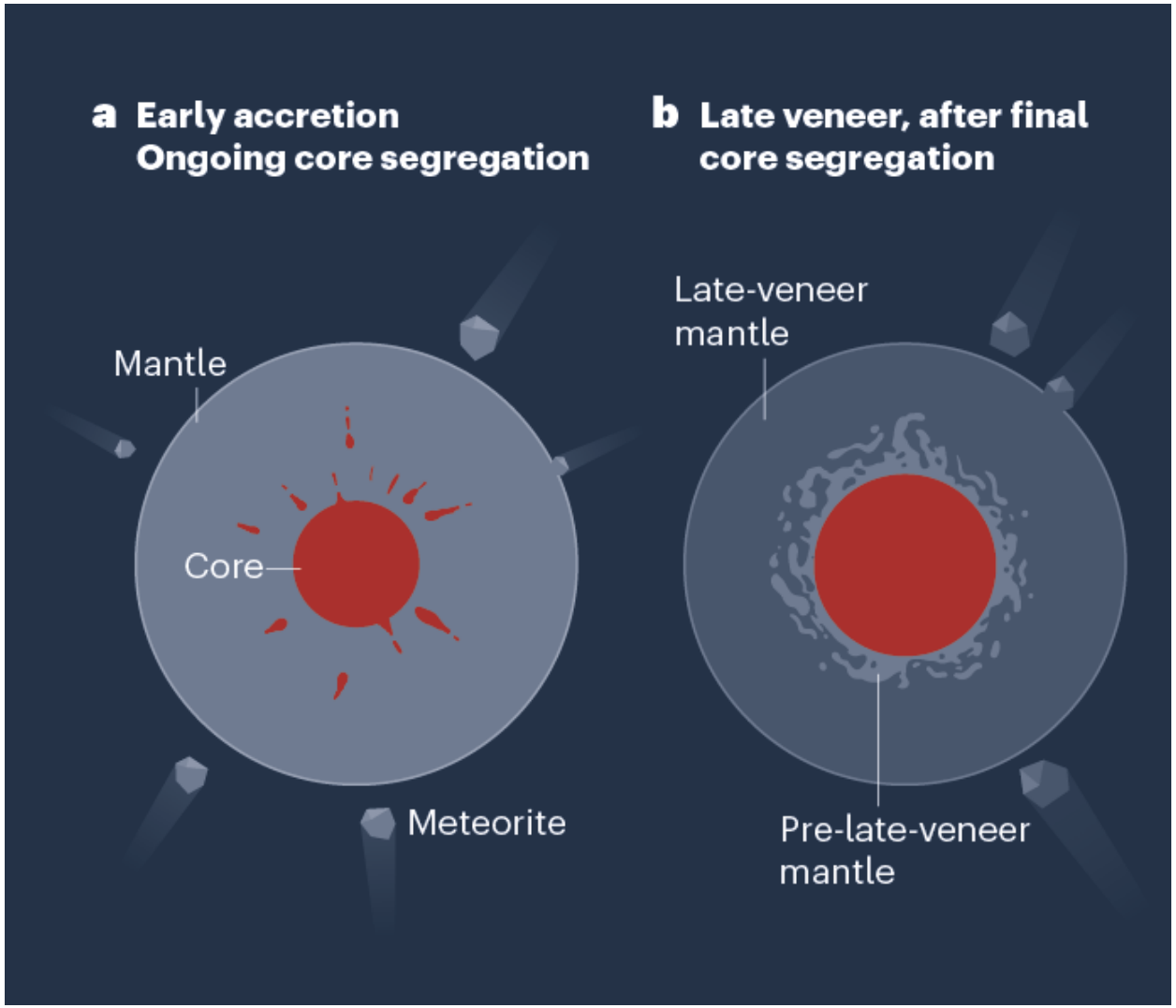
L’appauvrissement en éléments hautement sidérophiles



Mann et al., 2012

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

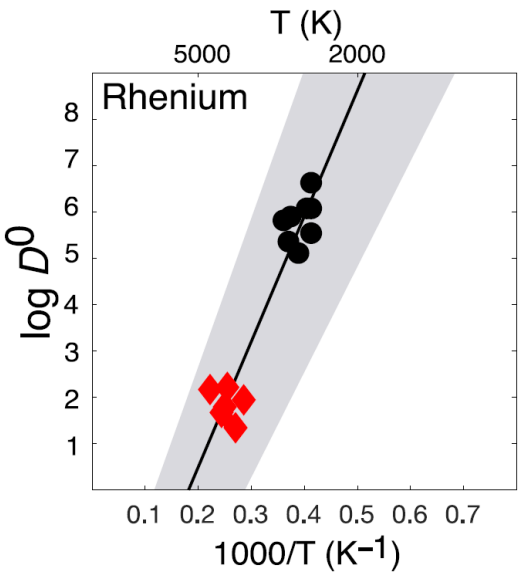
Le vernis tardif / accrétion tardive

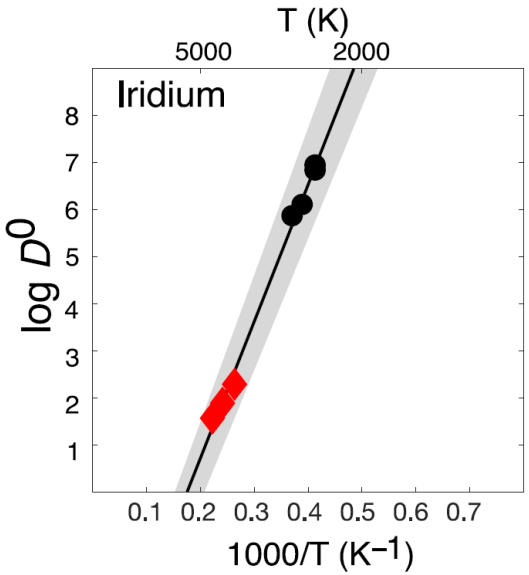


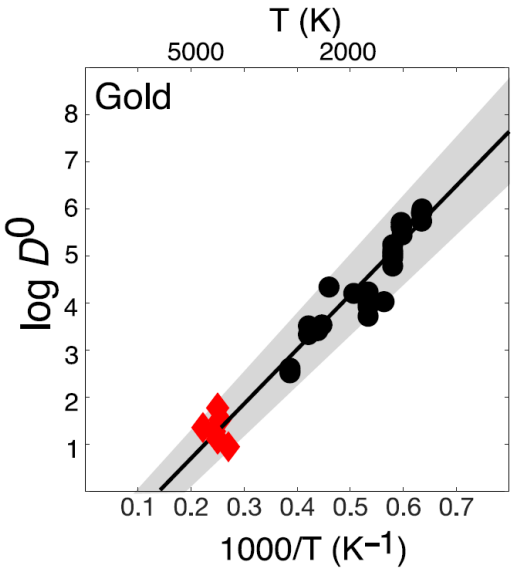
Pour expliquer l'abondance des éléments hautement sidérophiles et leurs proportions rélatives, la Terre aurait accrété ~0,5% de sa masse après la fin de la formation de son noyau

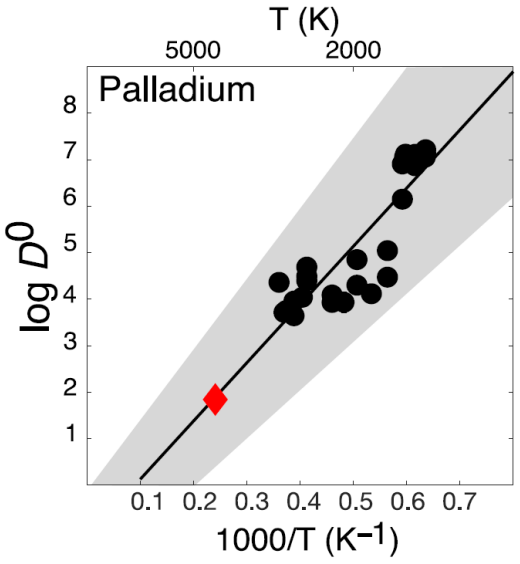
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

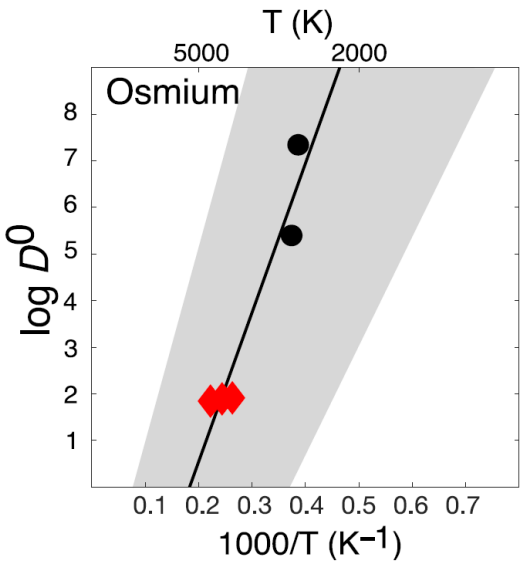
Le vernis tardif remis en question











Large volume presses experiments

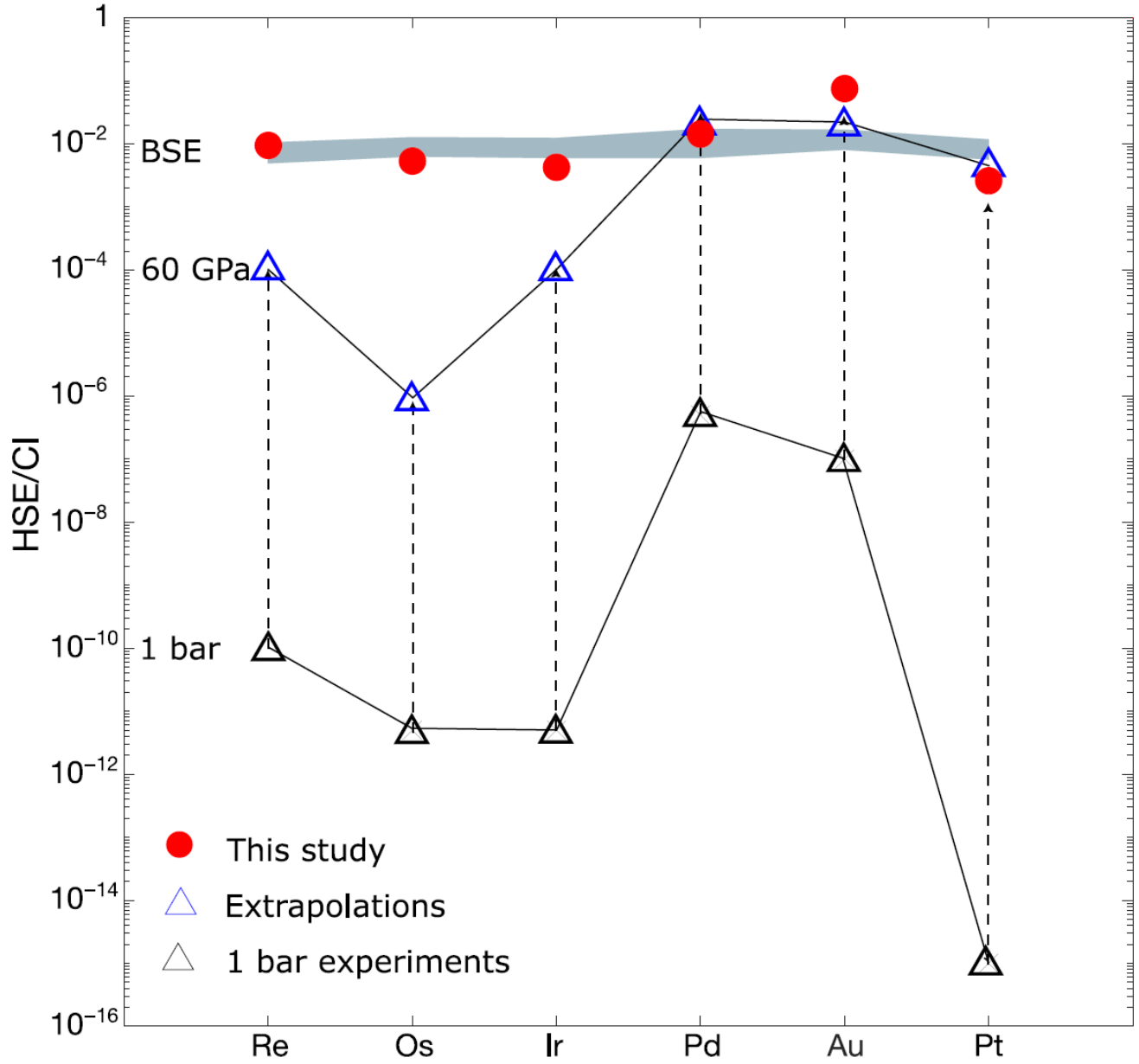
This study

Blanchard et al. (2026) trouvent que les coefficients de partage des HSE dépendent très fortement de la température et convergent à 0,01 pour T~4,000-5,000K

$$\log D^0 = a + \frac{b}{T}$$

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Le vernis tardif remis en question

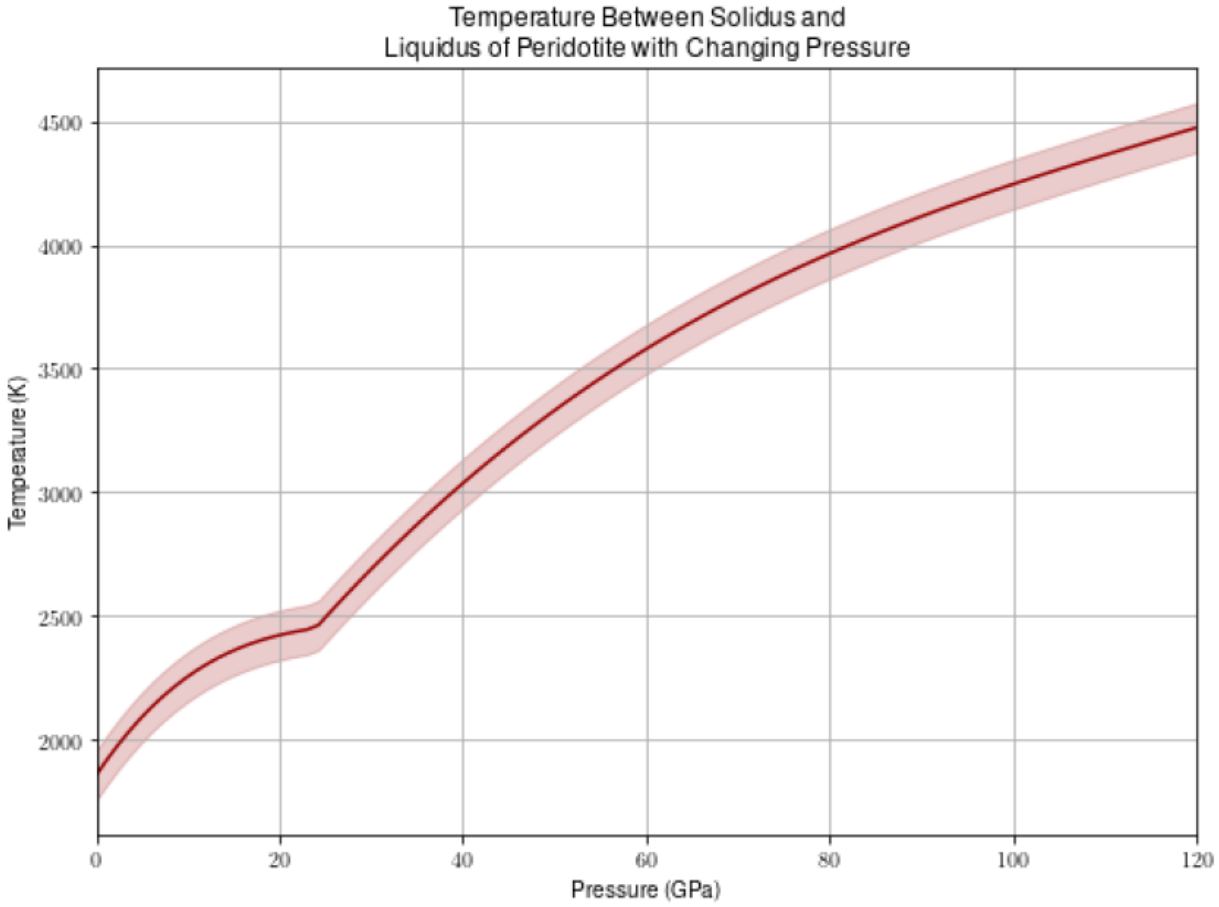


Blanchard et al. (2026) trouvent que les coefficients de partage des HSE dépendent très fortement de la température et convergent à 0,01 pour T~4,000-5,000K

Ce résultat peut expliquer l'abondance des HSEs sans invoquer un vernis tardif !

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Corrélation pression-température lors de la fusion de la péridotite



Andrault et al. 2010

T> 4,000 K implique donc P> 80 GPa (CMB:140 GPa)

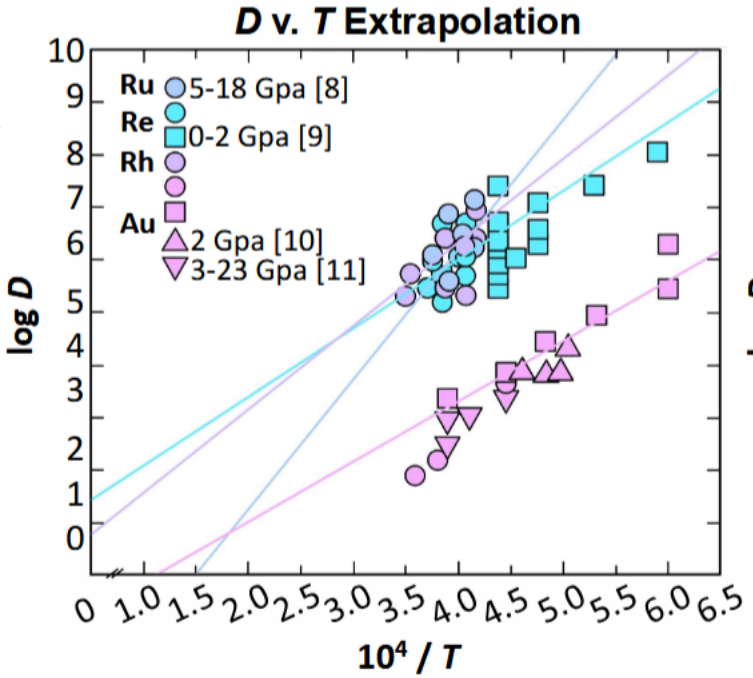
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

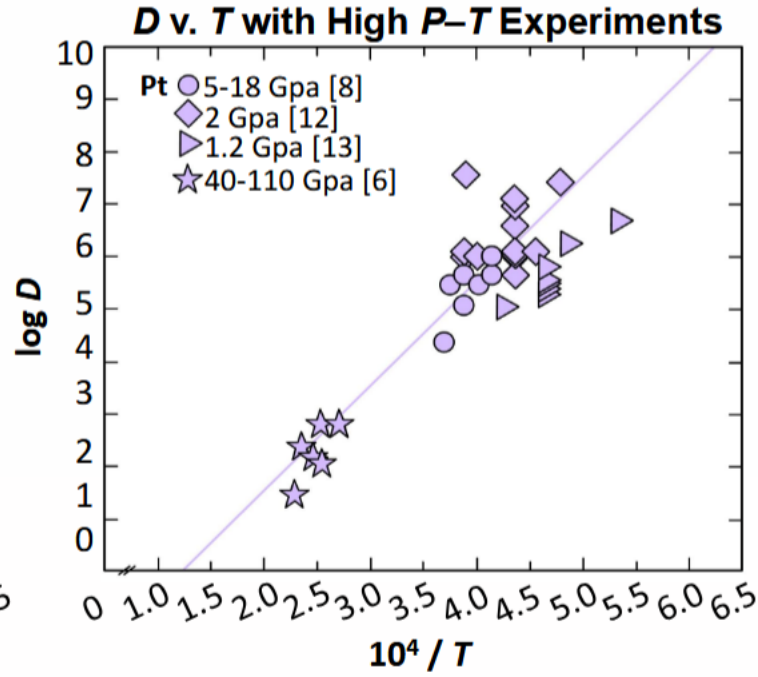
Vernis tardif: la controverse

Le groupe de R. Fischer confirme que les HSEs deviennent moins sidérophiles à haute température, mais conteste que leurs coefficients de partage convergent tous à la même valeur.

Deux implications:

- les rapports chondritiques entre HSEs sont la signature du vernis tardif
- L'appauvrissement du manteau en Pt, Ru, Au avant le vernis tardif n'est pas trivial





Sheehan, Fischer et Suer, 2023
Fischer et al., EGU 2026

Le débat sur l'origine des HSEs et sur la quantité de matière accrétée via le vernis tardif reste ouvert et sera un des sujets principaux du workshop de Juillet 2027

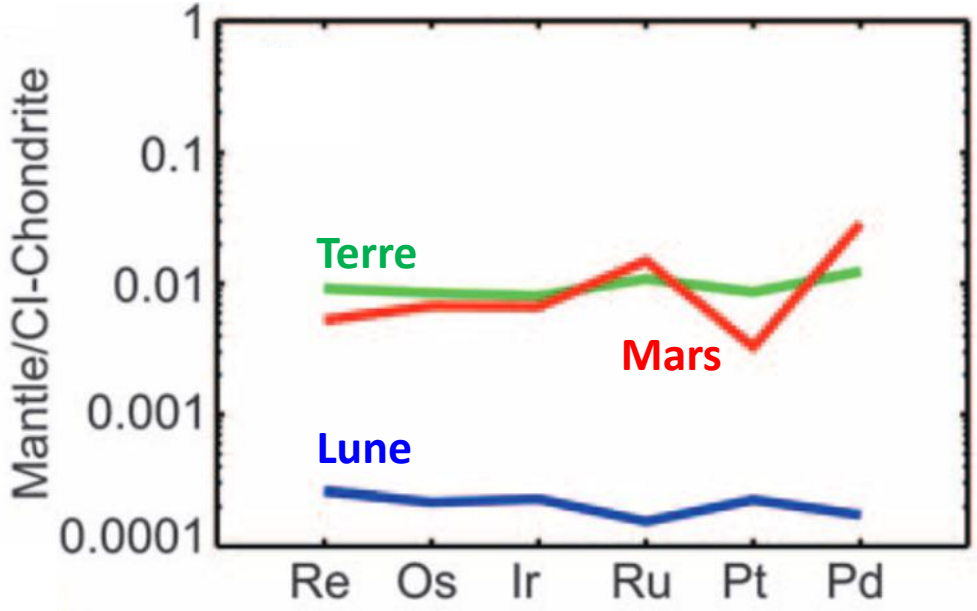
COLLÈGE DE FRANCE
1530

L’abondance d’éléments hautement sidérophiles sur les autres planètes

Mars et la Lune ont aussi des HSEs en proportions chondritiques dans leurs manteaux.

La pression à l’interface noyau-manteau est ~20 GPa sur Mars et ~5 GPa sur la Lune.

La présence de HSE est donc due au vernis tardif et ne peut pas s’expliquer par une partition métal-silicate à haute pression



Day et al., 2007; Bottke et al., 2010

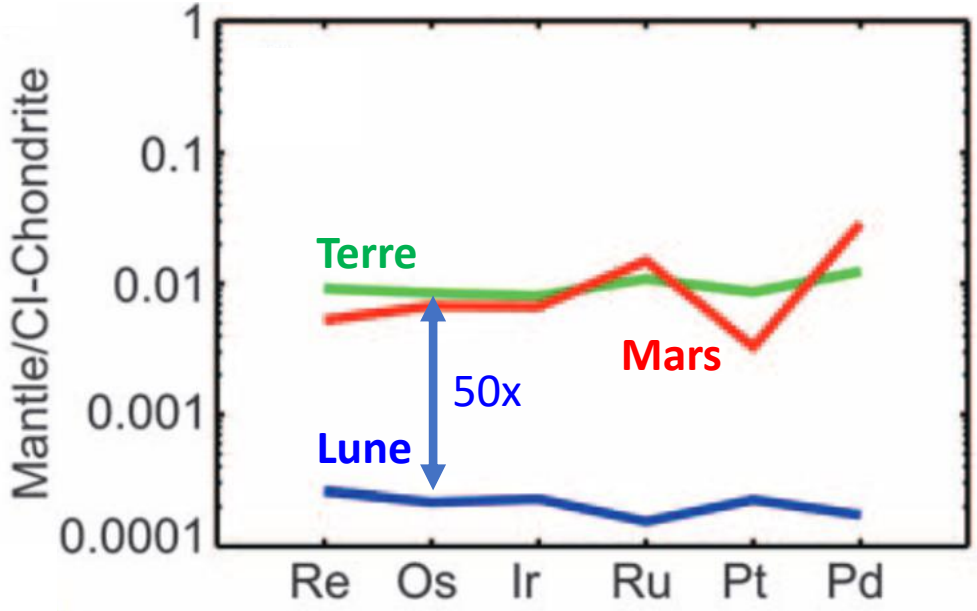
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Abondance des HSEs: Lune vs Terre

Curieusement, la concentration des HSEs dans le manteau lunaire est 50x moins que dans le manteau terrestre.

La Lune aurait dû accréter 60x moins de matière de la Terre. Mais sa masse est 100x plus petite. Donc, la concentration des HSEs devrait être comparable à celle du manteau terrestre.

Il y a donc un paradoxe à expliquer



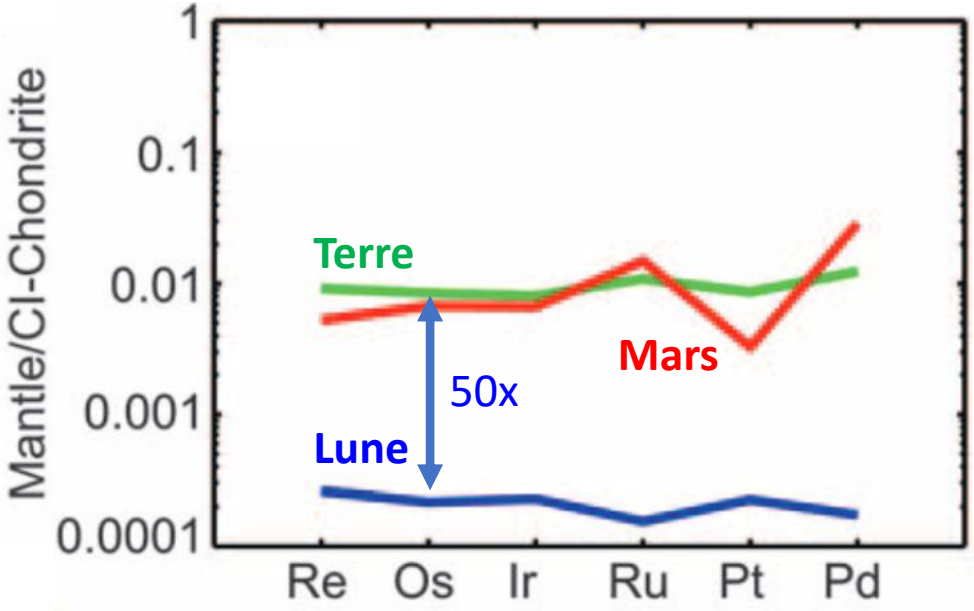
Day et al., 2007; Bottke et al., 2010

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Abondance des HSEs: Lune vs Terre

Trois possibilités:

- Le vernis tardif terrestre réel était seulement 60x celui lunaire (~1,5x10^{-4} M_E) et les HSEs du manteau terrestre résultent du partage métal-silicate à haute P-T (Blanchard et al., 2026)
- La fermeture du noyau a eu lieu plus tard sur la Lune que sur la Terre (Morbidelli et al., 2018; Zhu et al., 2019; Nimmo et al., 2024)
- Le vernis tardif terrestre a été apporté par moins de 20 gros impacteurs (Bottke et al., 2010). Étant donné leur grande masse (>M_{Ceres}), ces corps auraient dû être différenciés, avec les HSEs dans leur noyau. Seulement une partie de leur noyau resterait piégée dans le manteau terrestre lors des collisions, ce qui implique que la masse totale apportée par le vernis tardif serait 1-3% (Genda et al., 2017, Marchi et al., 2018)



Day et al., 2007; Bottke et al., 2010

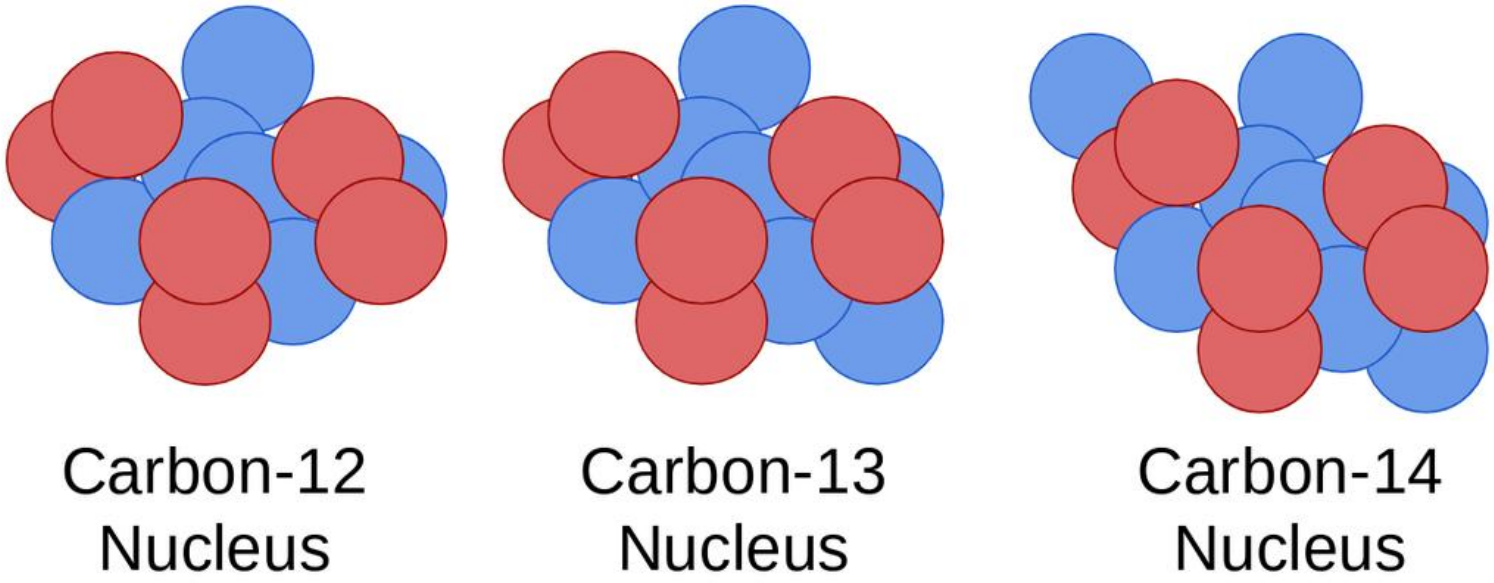
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Partie III:
Les planètes telluriques dans le contexte de la dichotomie isotopique du système solaire

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Isotopes

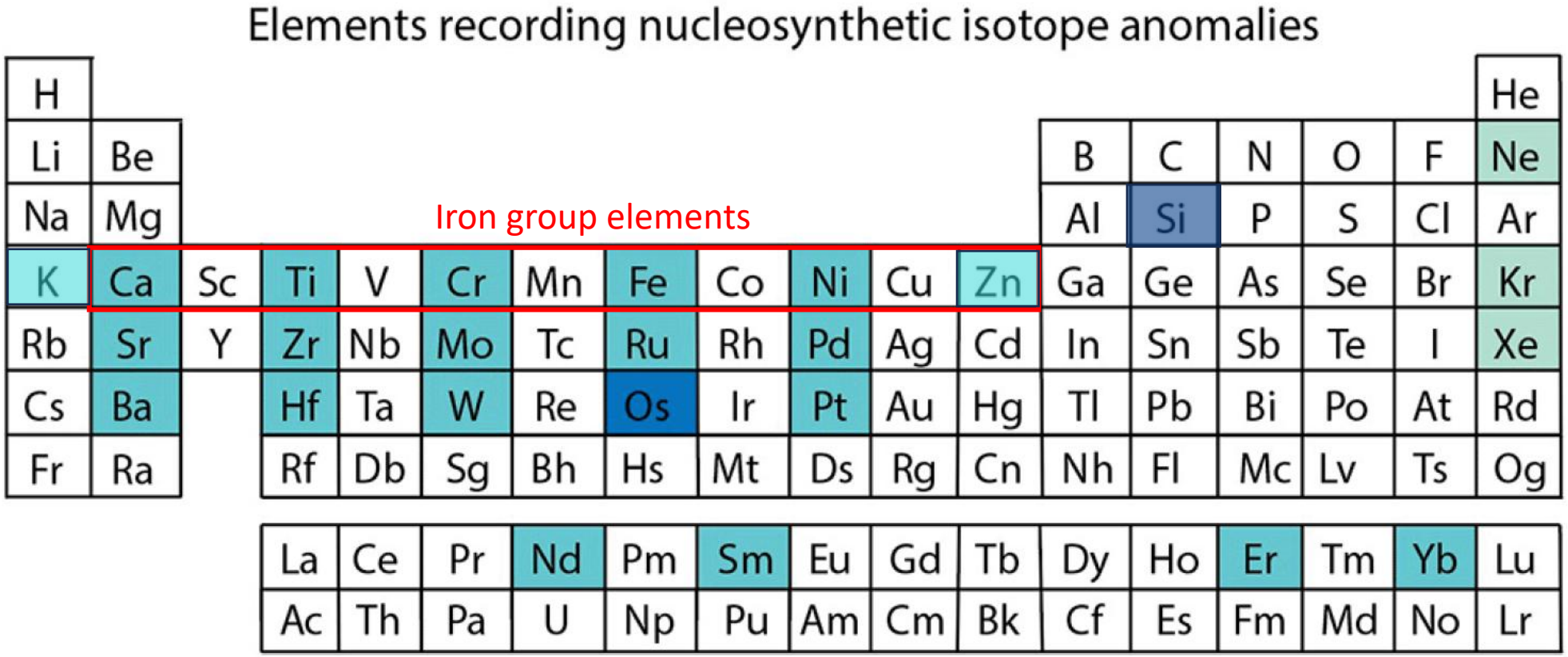
Atomes ayant le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons
Mêmes comportements chimiques, masses différentes.



COLLÈGE
DE FRANCE
1530

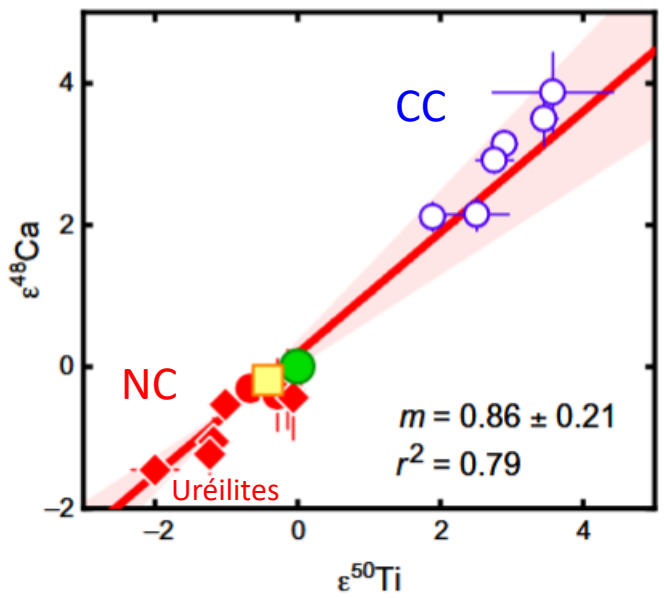
Anomalies isotopiques nucléosynthétiques

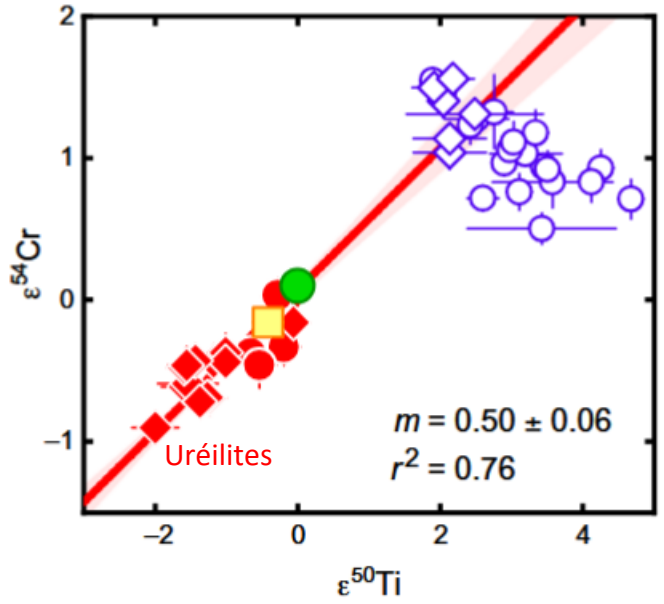
Ce sont des différences dans les rapports isotopiques liées aux processus de synthèse des éléments (supernovae, étoiles géantes rouges etc.)

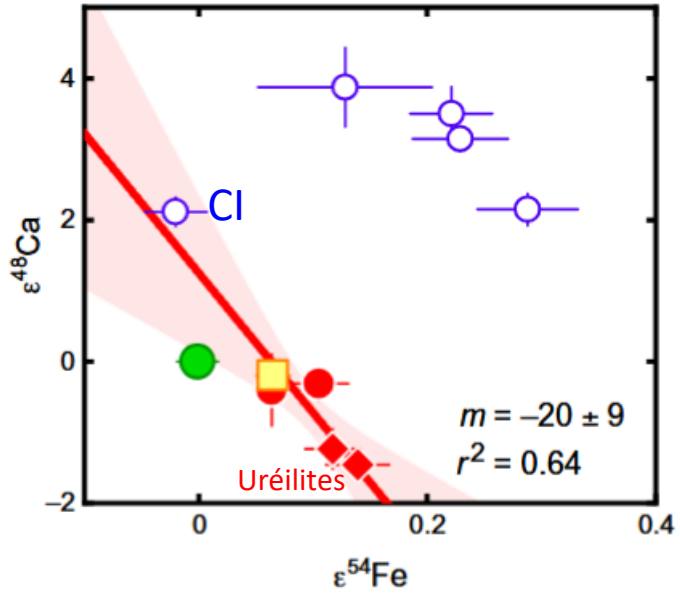


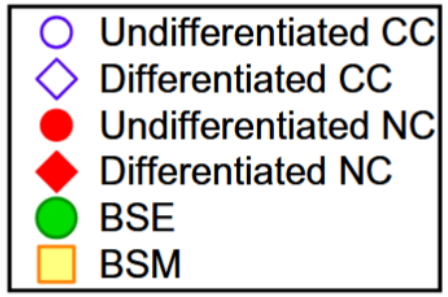
Bermingham and Meyer, 2024

La dichotomie isotopique: atomes du groupe du Fer









Burkhardt et al., 2019

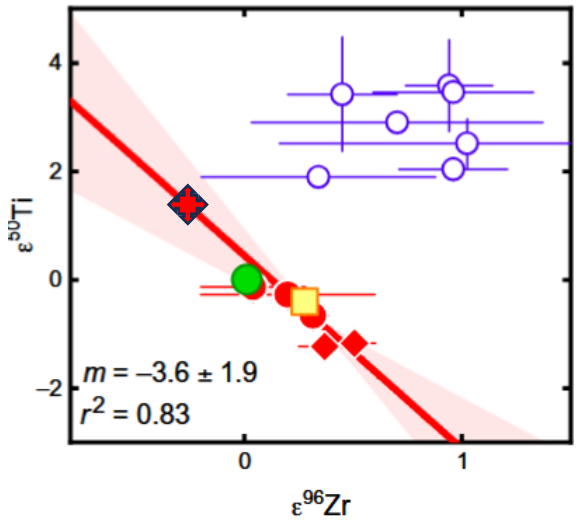
Mélange Uréilite-CI?
(Schiller et al., 2018)

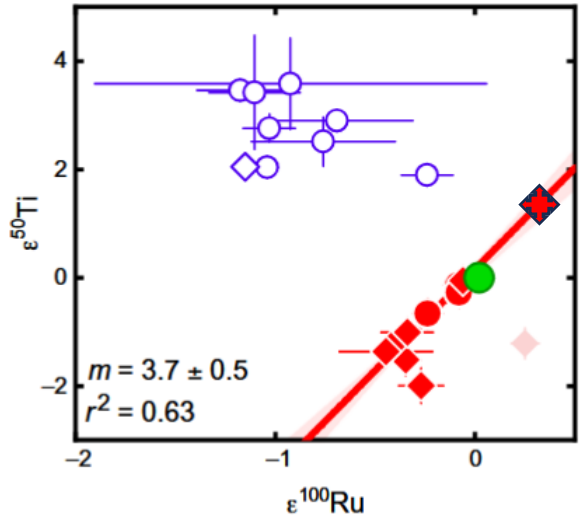
$$\varepsilon^{i}X = \left(\frac{\left({}^{i}X/{}^{j}X\right)_{\text{reservoir}}}{\left({}^{i}X/{}^{j}X\right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10\,000$$

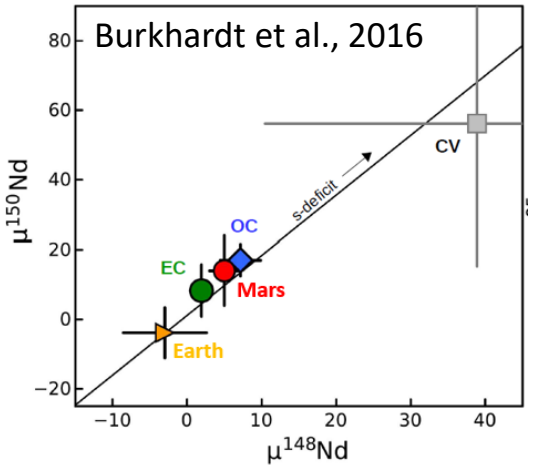
après correction pour fractionnement dépendant de la masse

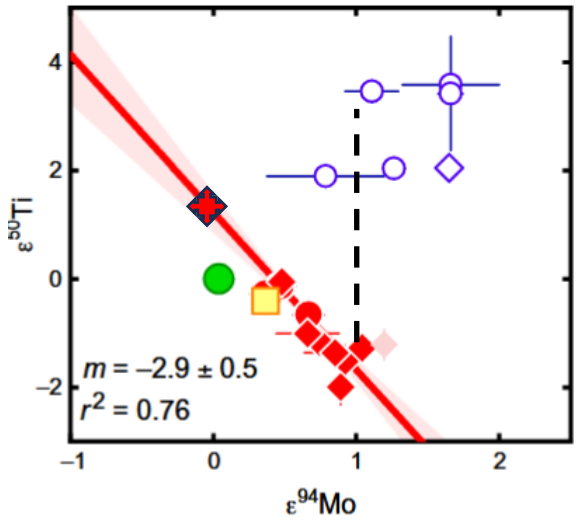
COLLÈGE DE FRANCE
1530

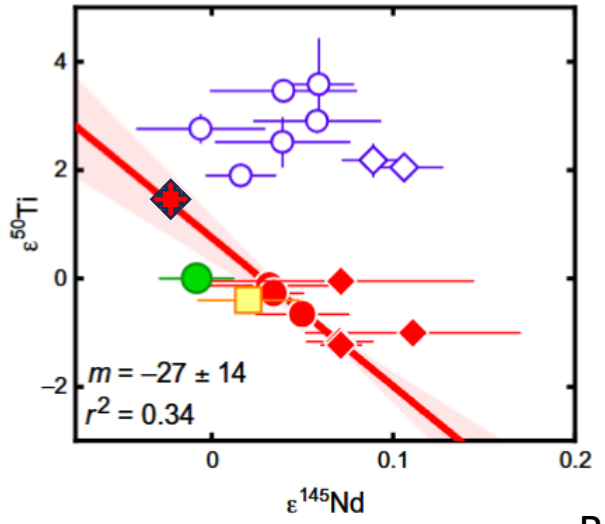
La dichotomie isotopique: isotopes produits par le processus s

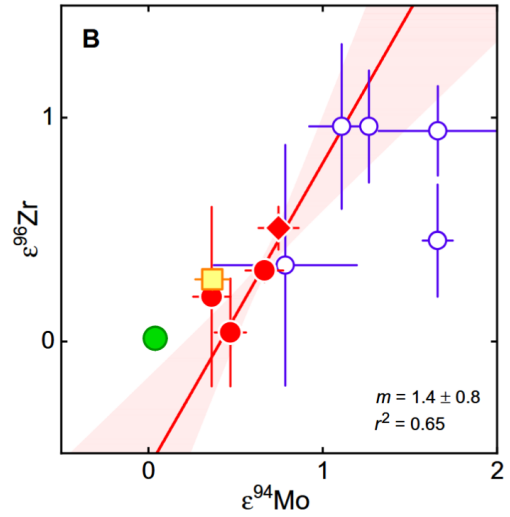












Burkhardt et al., 2019

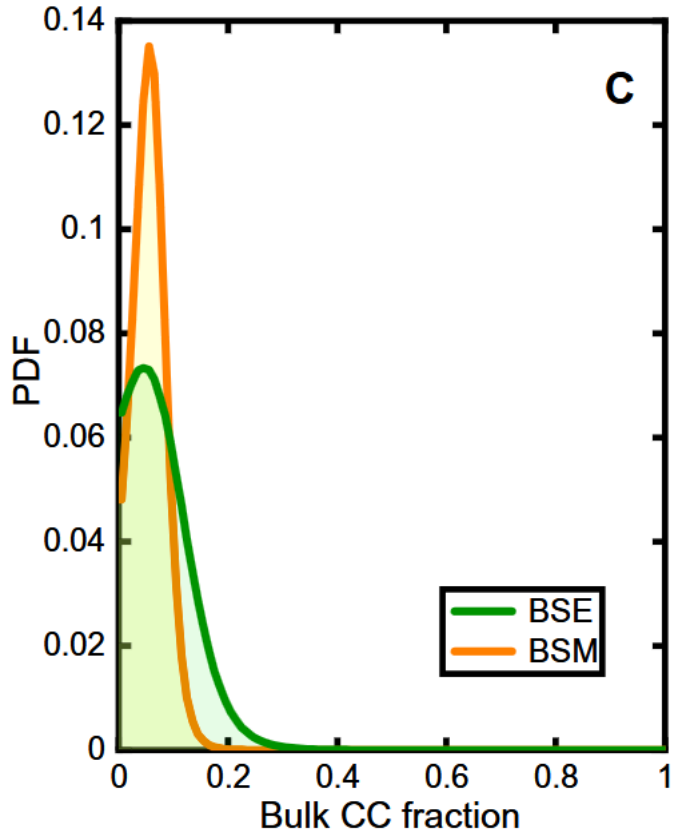
Pas de mélange Uréilite-CI possible pour former Mars et la Terre

La Terre est un *end-member* de la distribution des corps NC. Elle doit avoir accrété un réservoir non échantillonné par les météorites. <u>Mars et la Terre ont des compositions isotopiques distinctes.</u>

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

Dans Burkhardt et al., 2021, en considérant 4 rapports isotopiques (ε^{94}Mo, ε^{95}Mo, ε^{54}Cr, ε^{96}Zr) la fraction de la masse totale de la Terre et de Mars d'origine CC a été contrainte être moins de 10-20%



COLLÈGE
DE FRANCE
1530

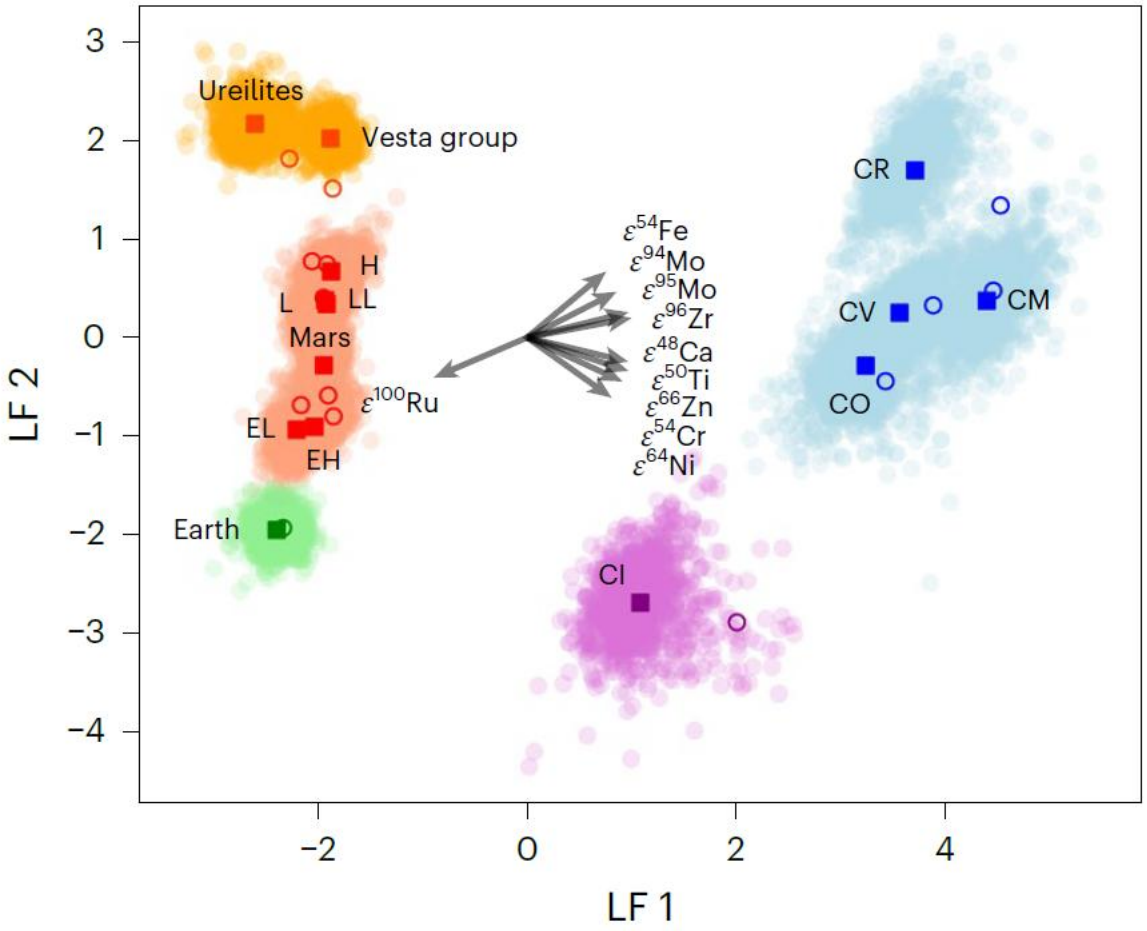
Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

Sossi et Bower (2025, *Nature Astronomy*) ont considéré simultanément 10 rapports isotopiques: ε^{48}Ca, ε^{50}Ti, ε^{54}Cr, ε^{54}Fe, ε^{64}Ni, ε^{66}Zn, ε^{94}Mo, ε^{95}Mo, ε^{96}Zr et ε^{100}Ru

Analyse en Composantes Principales: Méthode statistique qui identifie les combinaisons des variables qui maximisent la dispersion des données.

Résultats principaux:

- La Terre est un *end-member* des NCs
- Elle est distincte des chondrites à Enstatite
- Elle ne peut pas être reproduite en combinant NC et CC
- Corrélation linéaire parmi les NCs



COLLÈGE DE FRANCE 1530

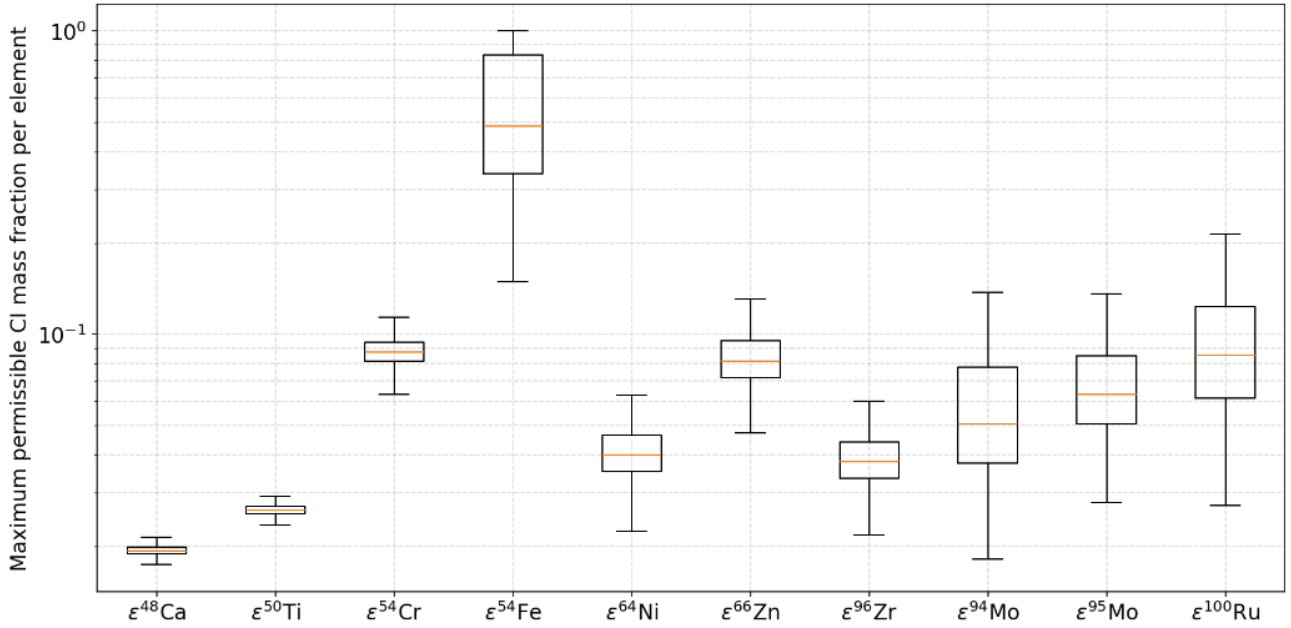
Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

Sossi et Bower (2025, *Nature Astronomy*) ont considéré simultanément 10 rapports isotopiques: ε^{48}Ca, ε^{50}Ti, ε^{54}Cr, ε^{54}Fe, ε^{64}Ni, ε^{66}Zn, ε^{94}Mo, ε^{95}Mo, ε^{96}Zr et ε^{100}Ru

Analyse en Composantes Principales: Méthode statistique qui identifie les combinaisons des variables qui maximisent la dispersion des données.

Résultats principaux:

- La Terre est un *end-member* des NCs
- Elle est distincte des chondrites à Enstatite
- Elle ne peut pas être reproduite en combinant NC et CC
- Corrélation linéaire parmi les NCs
- **Maxi 2% de CC dans la Terre**



COLLÈGE DE FRANCE 1530

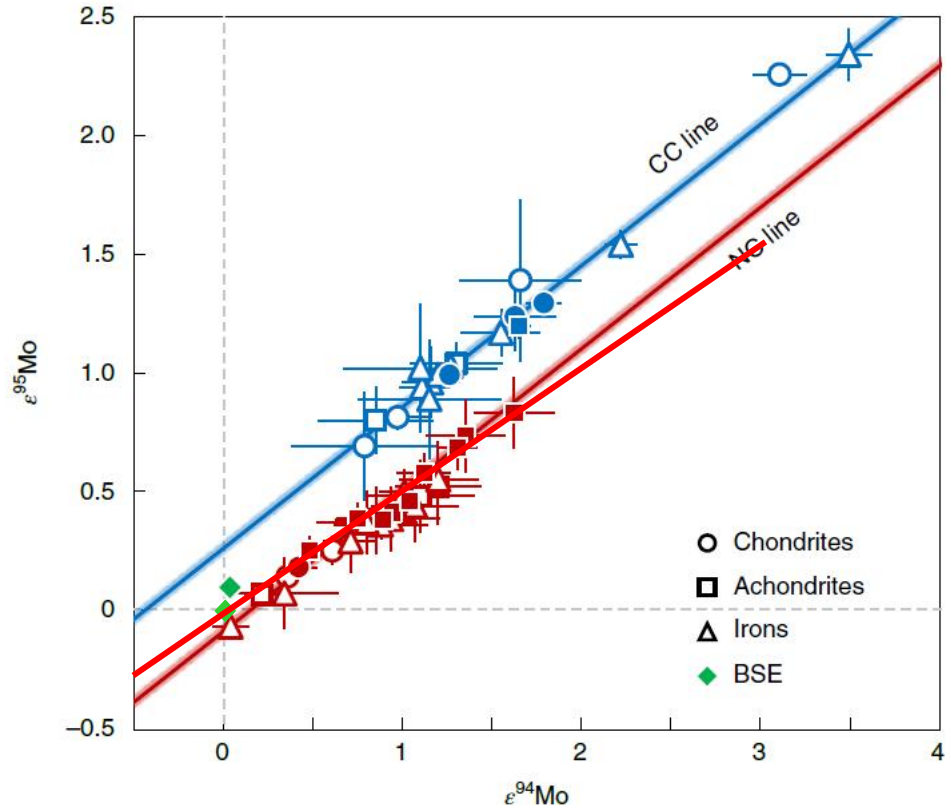
Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

Le cas du Molybdène

Dans l'espace des isotopes du Mo, les NC et CC se disposent sur deux lignes.
La Terre semble être intermédiaire, ce qui suggère que 40% du Mo du manteau terrestre (BSE) est d'origine CC

Note: le Mo est un élément sidérophile.
40% du Mo d'origine CC n'implique pas que 40% de la masse de la Terre est CC!

Cependant la BSE pourrait se retrouver à (0,0), (Sossi et Bower, 2025) et la ligne NC pourrait avoir une pente légèrement différente (Bermingham et al., 2025), ce qui réduirait la fraction du CC Mo à 0.
Débat technique

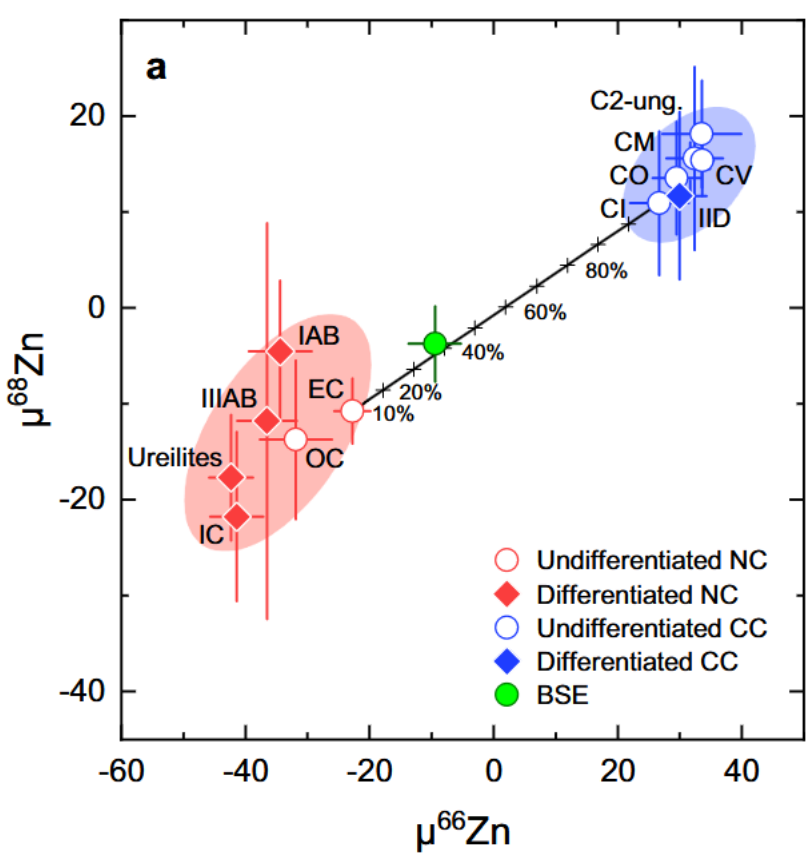


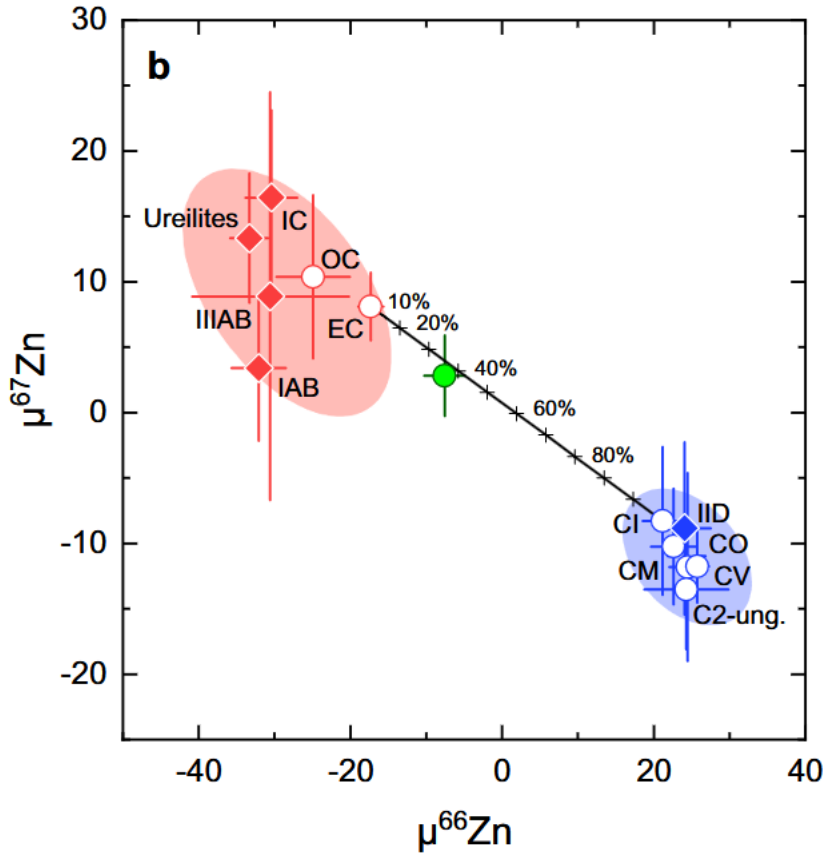
Budde et al. 2019

Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

Le cas du Zinc

Steller et al., 2022; Savage et al., 2022 et Martins et al., 2023, montrent que la Terre est intermédiaire aux NC et CC en anomalies isotopiques du Zn. 30% du Zn serait d'origine CC





COLLÈGE DE FRANCE 1530

Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

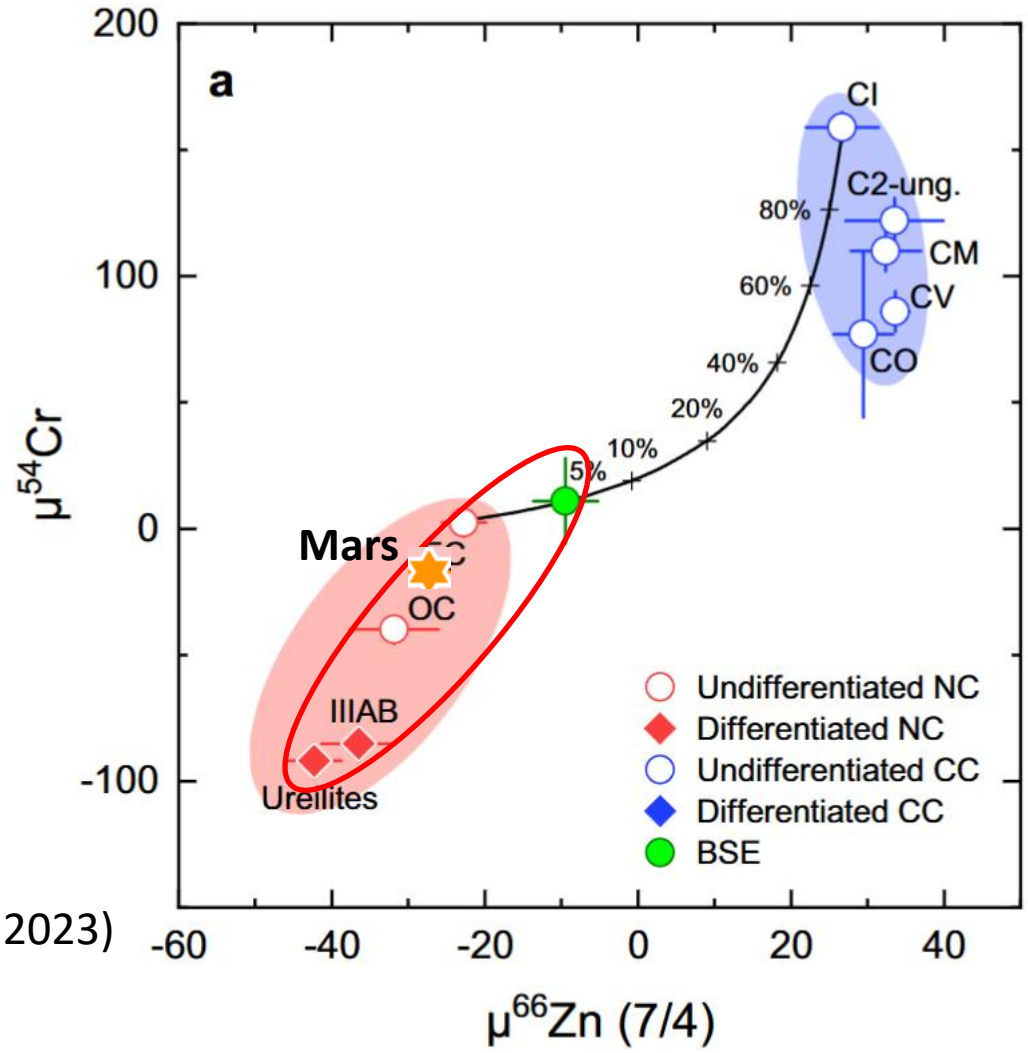
Le cas du Zinc

Le Zn est un élément volatil, abondant dans les CC et moins dans les NC. Pour apporter 30% du Zn, l'ajout de 5% de la masse de la Terre en météorites CI suffit (Steller et al., 2022)

Dans ce diagramme la Terre semble être d'un mélange EC+CI, mais les autres isotopes excluent un tel mélange, nécessitant une composante non échantillonnée dans les météorites.

Peut-être le domaine NC avec sa composante manquante, comprend la Terre, sans besoin d'un apport CC (Sossi et Bower, 2025)

Mars est clairement dans le domaine NC (Kleine et al., 2023)



COLLÈGE DE FRANCE 1530

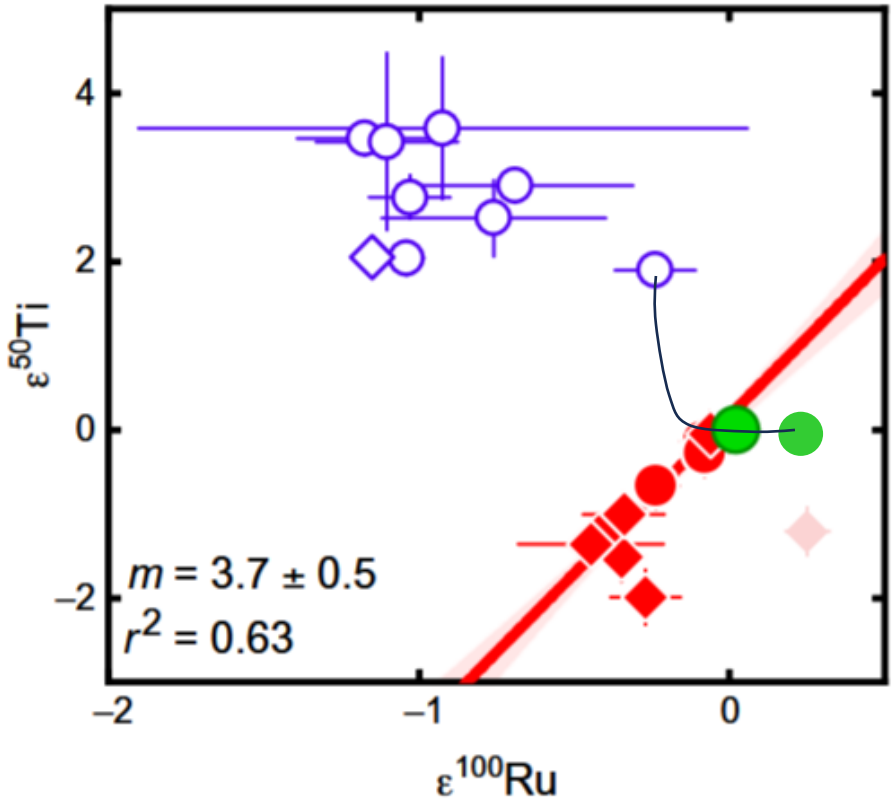
Quelle fraction de matière carbonée (CC) dans la Terre?

Le cas du Ruthénium

Le Ru est un élément hautement sidérophile, accrété essentiellement pendant le vernis tardif, avec peut-être une composante antécédente.

Dans un diagramme ε^{100}Ru, ε^{50}Ti la Terre est sur la ligne des NC, ce qui semble exclure toute contribution des CC au vernis tardif (Dauphas, 2017; Burkhardt et al., 2021)

Cependant Fischer-Gödde et al., 2020 ont identifié une roche archéenne de Groenland avec ε^{100}Ru=0,2. Ils concluent que avant le vernis tardif la Terre était décalée en ε^{100}Ru et l'accrétion d'une composante CI pendant le vernis tardif l'a ramenée à sa position actuelle



Burkhardt et al., 2021

Le débat sur la fraction de matière CC dans la Terre reste ouvert et sera un des sujets principaux du workshop de Juillet 2027

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Partie IV:
Les propriétés chimiques des planètes. Éléments réfractaires et volatils

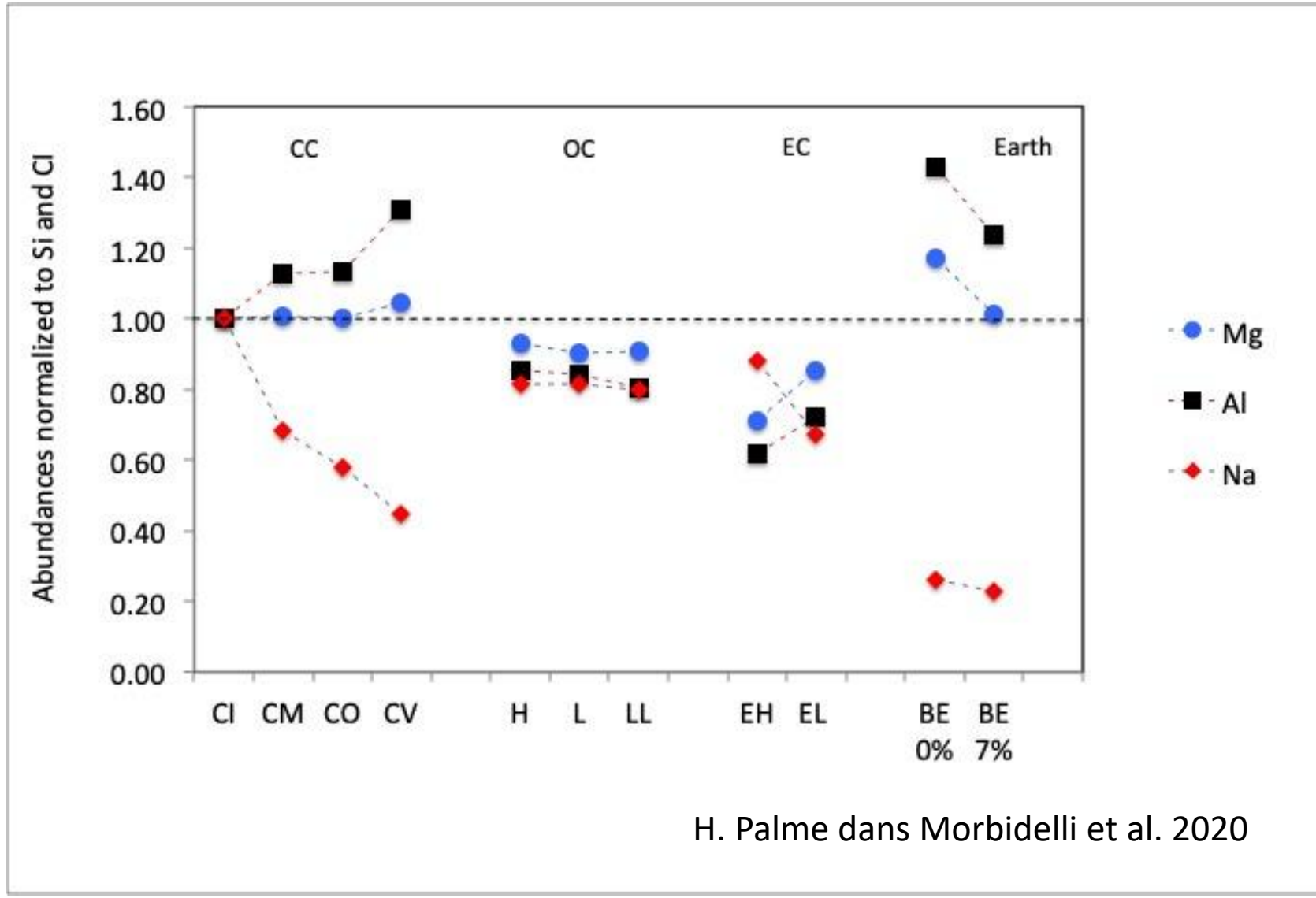
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Comparaison entre la Terre et les Chondrites

La Terre du point de vue chimique est plus semblable aux chondrites carbonées que aux non-carbonées.

Elle est plus enrichie en éléments réfractaires (Al, Mg) et plus appauvrie en éléments volatils (Na) que les chondrites NC.

Ceci confirme l'existence d'une population de précurseurs de la Terre non échantillonnée par les météorites



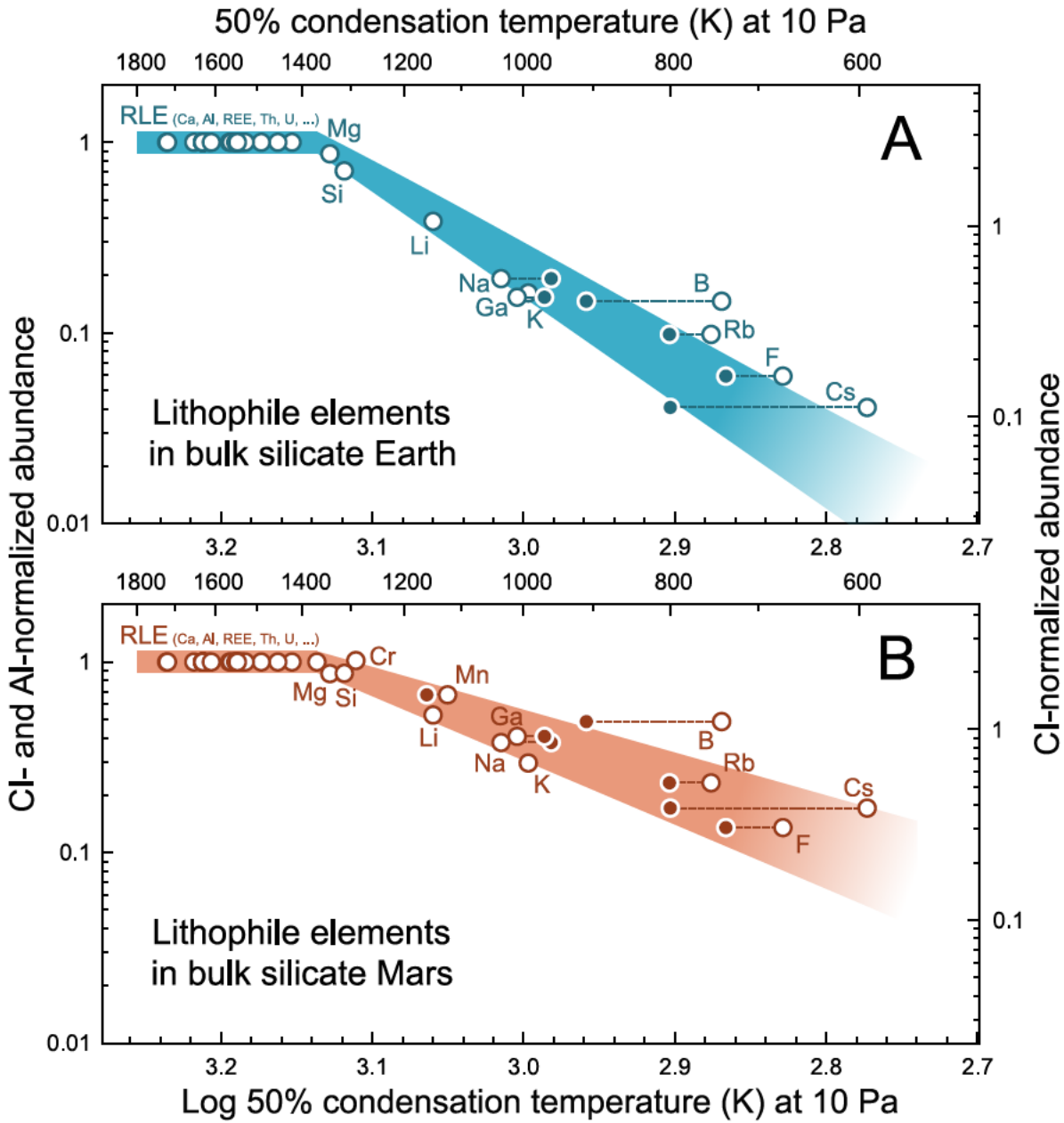
H. Palme dans Morbidelli et al. 2020

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Déficit en éléments volatils

Le déficit est corrélé avec la température de condensation des différents éléments.

Mars est moins appauvri que la Terre
La Lune l'est davantage.



Yoshizaki et McDonough, 2021

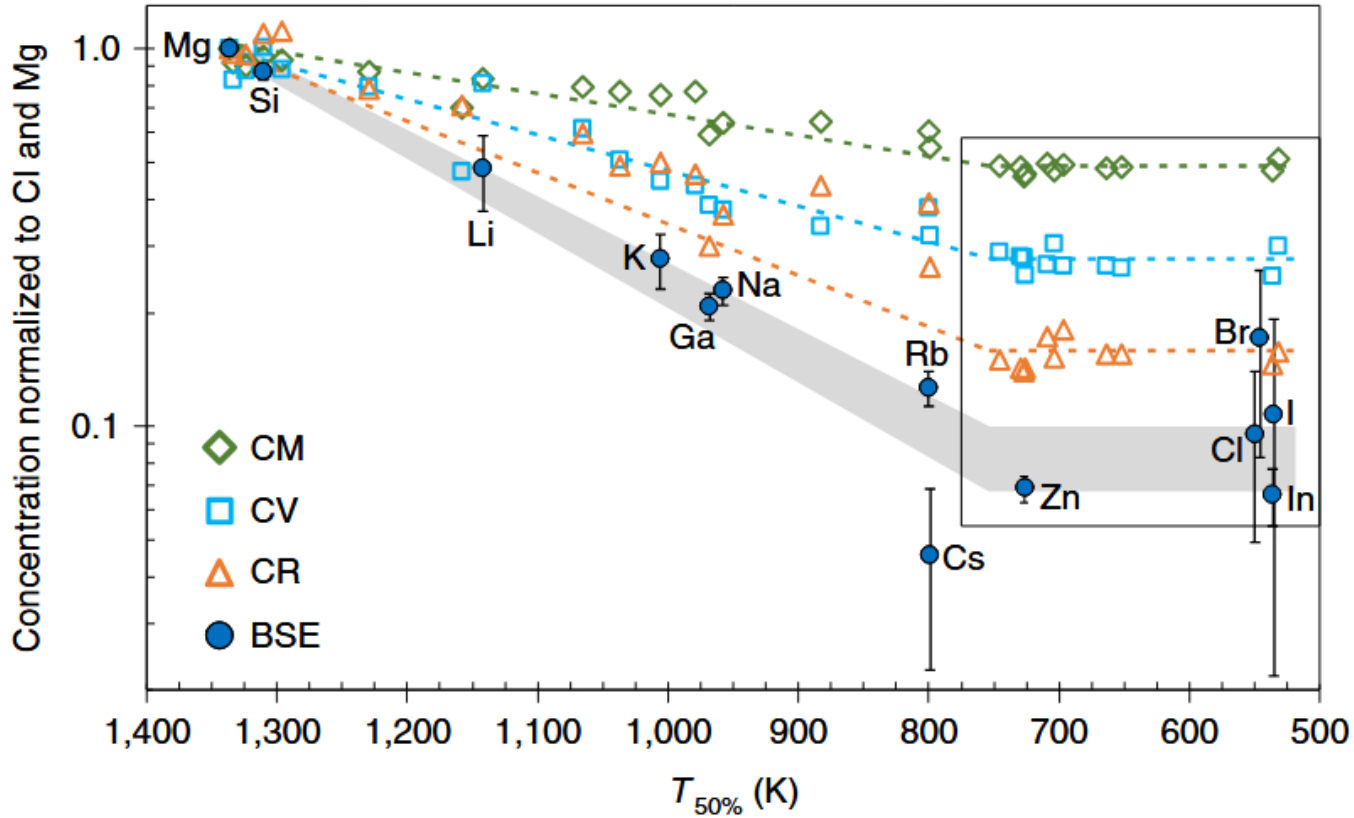
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Déficit en éléments volatils

Le déficit est corrélé avec la température de condensation des différents éléments.

Mars est moins appauvri que la Terre
La Lune l'est davantage.

Corrélation semblable à celle des chondrites mais plus extrême



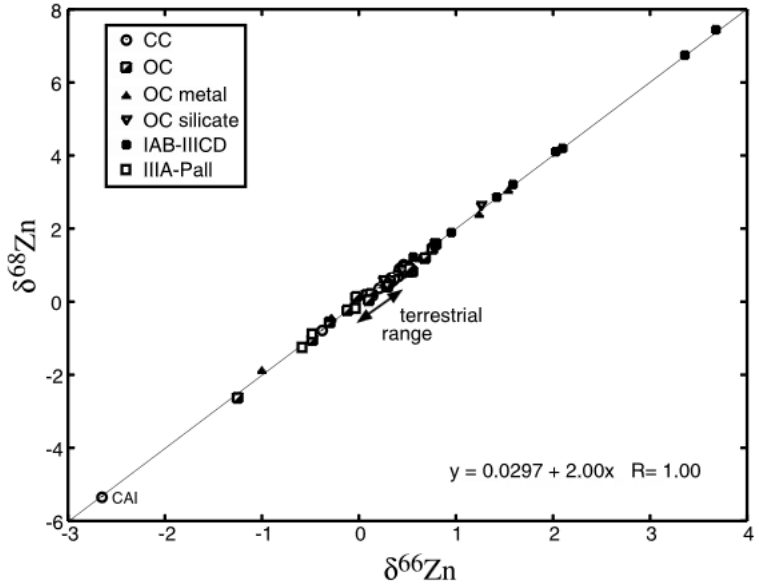
Braukmuller et al., 2019

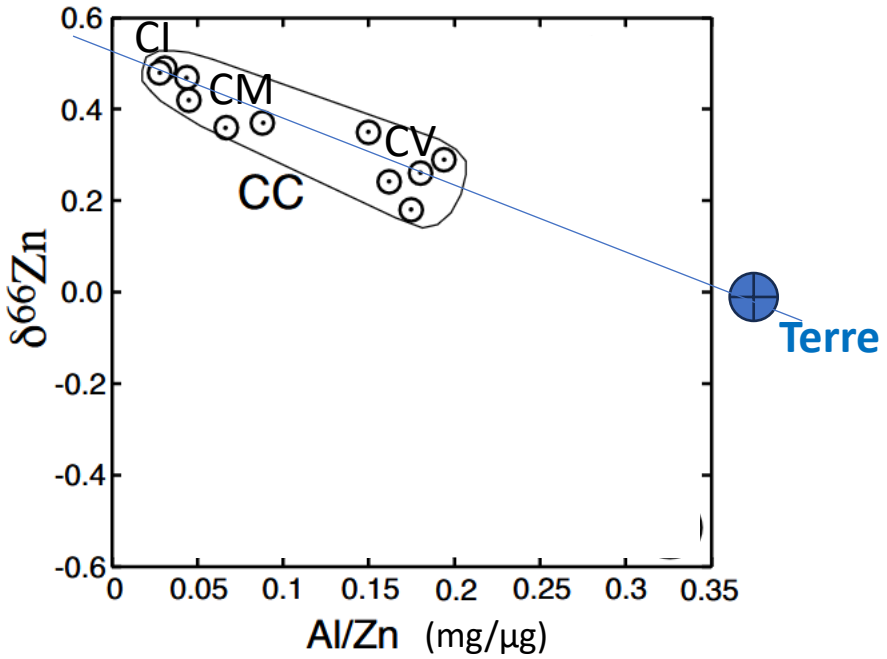
Origine du déficit en éléments volatils

$$\delta^{n}Zn=\left(\frac{(^{n}Zn/^{64}Zn)_{sample}}{(^{n}Zn/^{64}Zn)_{ref}}-1\right)x\ 1{,}000$$

Mass dependent fractionation of Zn in the Solar System (Luck et al., 2005)

Zinner, Moynier et Stroud, 2011: *L'abondance du Zn dans les chondrites carbonées diminue dans l'ordre suivant : CI > CM > CV-CO > Terre. Le rapport isotopique $\delta^{66}Zn=^{66}Zn/^{64}Zn$ diminue dans le même ordre, allant de la plus lourde sur le plan isotopique chez les CI à la plus légère sur le plan isotopique sur Terre (Luck et al., 2005). On s'attendrait à une tendance inverse si l'appauvrissement en Zn des chondrites et de la Terre par rapport aux chondrites CI était dû à une volatilisation. La tendance observée plaide en faveur d'une origine par accrétion incomplète pour l'appauvrissement en éléments volatils dans le Système Solaire*





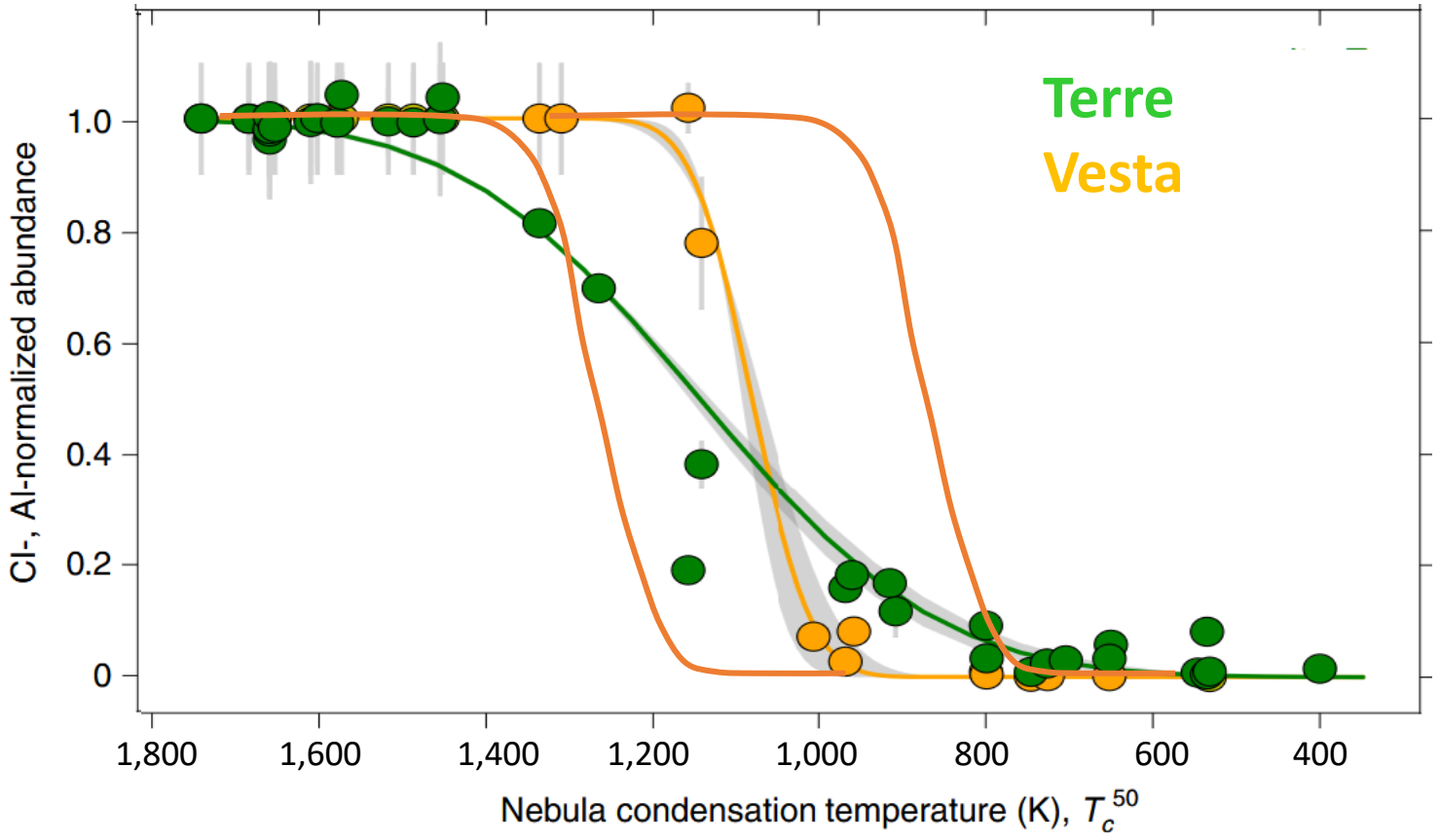
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Origine du déficit en éléments volatils

Sossi et al. (2022) remarquent que les chondrites ne devraient pas être les constituants principaux de la Terre car elle se sont formées trop tard.

à l'instar de HED/Vesta, les planétésimaux plus précoces avaient sans doute une chute d'abondance en éléments volatils abrupte, correspondant à la température du disque lors de leur formation.

La déplétion graduelle en éléments volatils de la Terre peut s'expliquer par l'accrétion de planétésimaux formés à des températures différentes



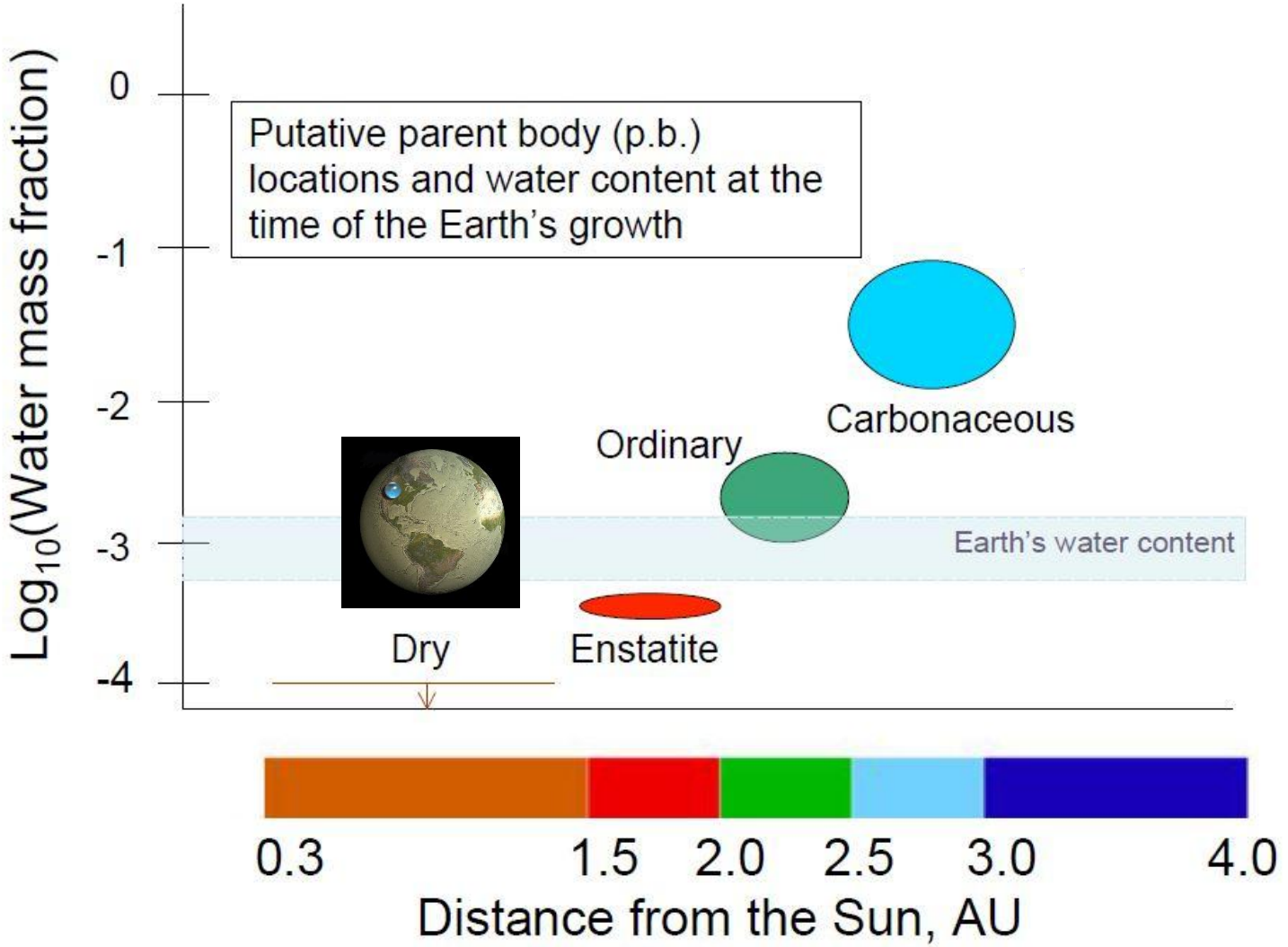
COLLÈGE DE FRANCE
1530

L’eau terrestre

Juste une petite fraction de la masse de la Terre (~0,1%)

Mais plus que la quantité d’eau dans les silicates hydratés des chondrites enstatites et sans doute plus que celle dans les planétésimaux plus réfractaires non échantillonnés par les météorites.

L’idée classique est que l’eau soit venue d’ailleurs, par l’accrétion d’une petite quantité de masse par des planétésimaux riches en eau comme les chondrites carbonées ou les comètes

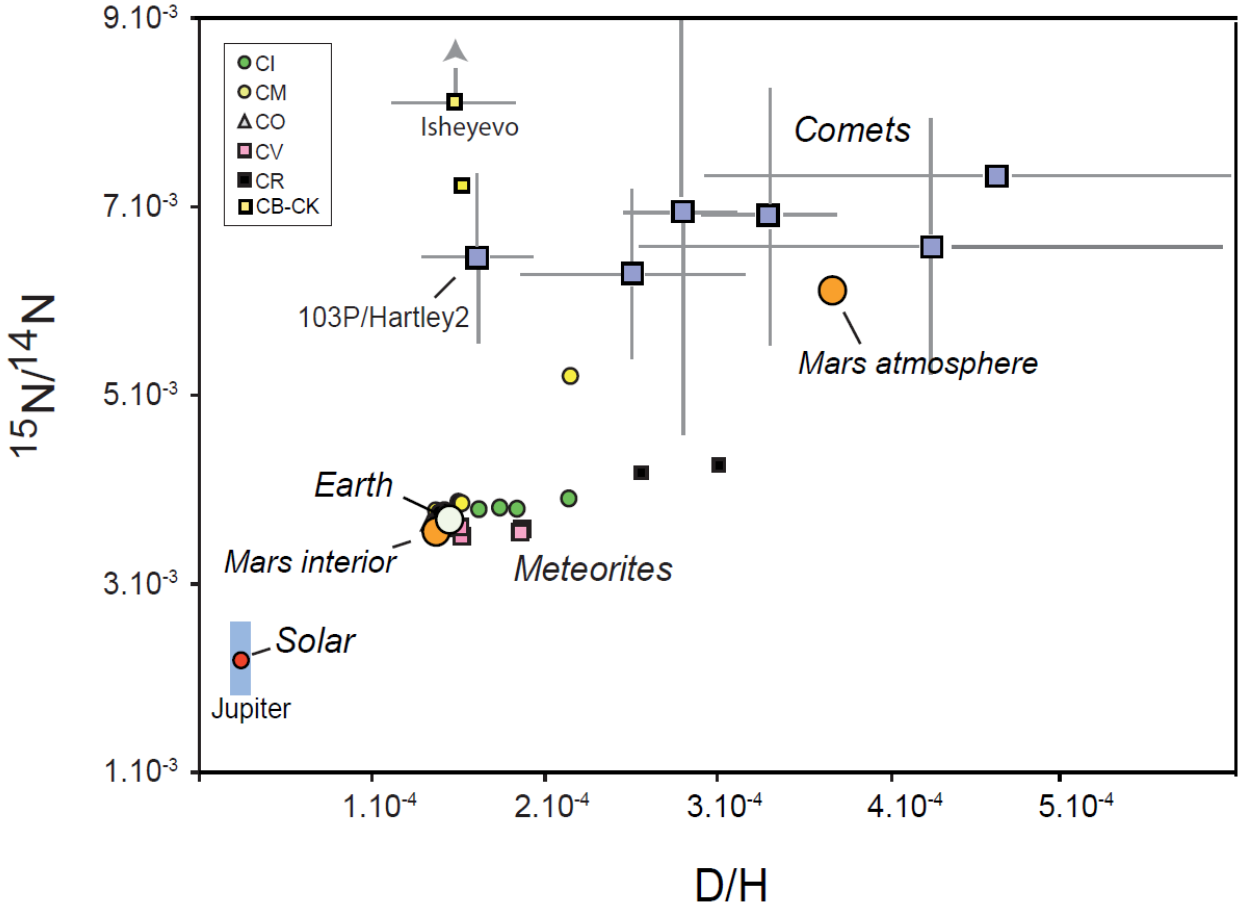


COLLÈGE DE FRANCE
1530

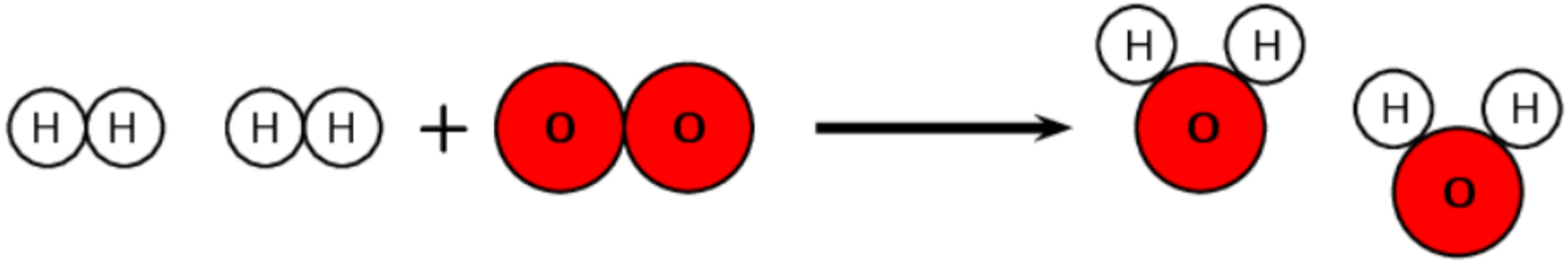
L'eau terrestre

Les rapports isotopiques D/H et $^{15}N/^{14}N$ pointent les chondrites carbonées comme les principaux responsables.

Ceci semble suggérer que la Terre a bien accrété quelque % de sa masse pas des chondrites carbonées en apportant donc une information complémentaire dans le débat issu de la dichotomie isotopique.

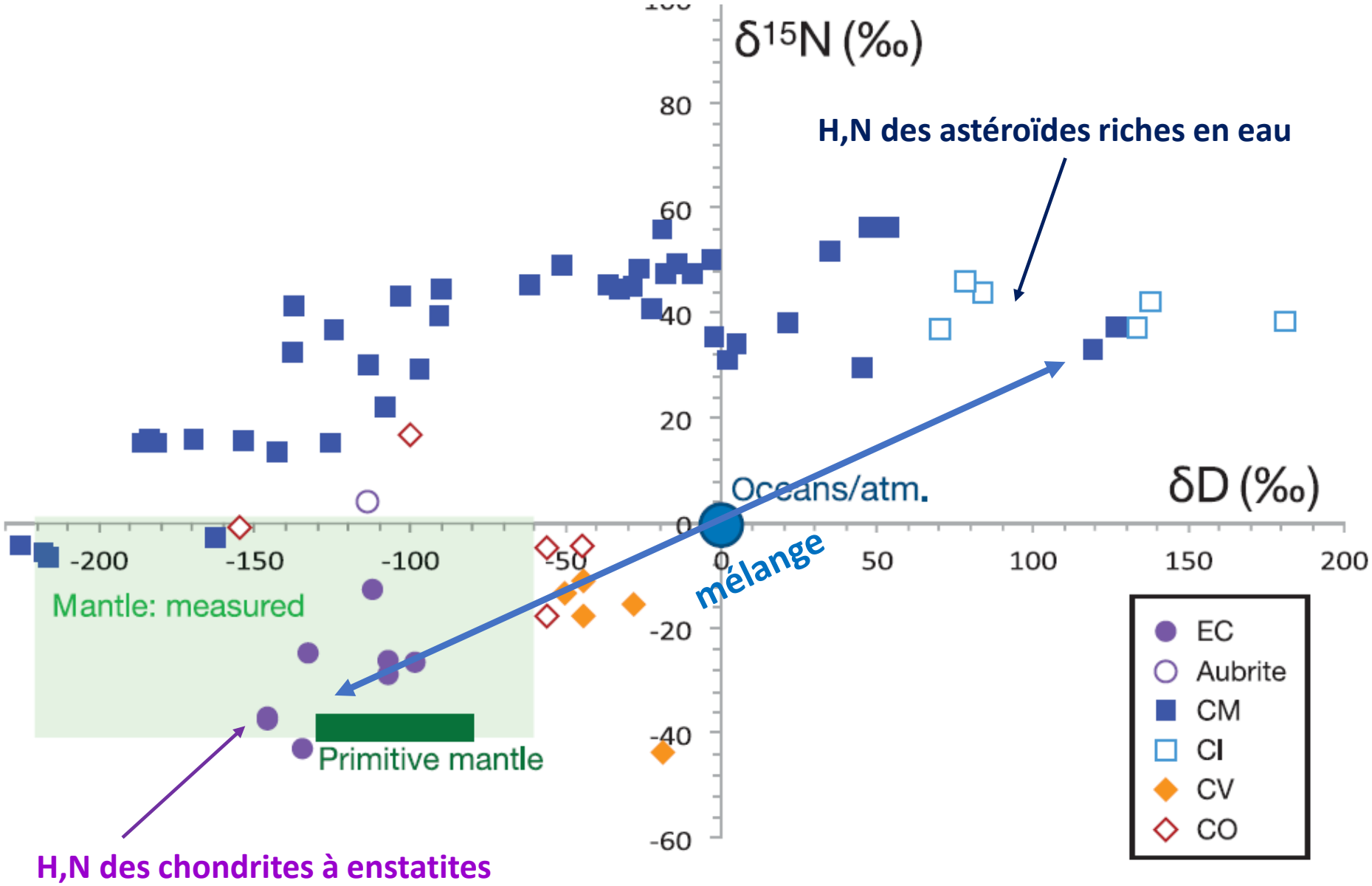


Une hypothèse alternative aux chondrites carbonées: la synthèse de l'eau



- L'oxygène est abondant sur Terre, piégé dans les silicates
- L'hydrogène pouvait se trouver dans l'atmosphère primitive, capturé du disque protoplanétaire. Mais ont D/H était trop faible
- Récemment Piani et al. (2020) ont montré que les chondrites à enstatites, des météorites sans eau, vestiges des corps qui ont apporté la plupart de la masse à la Terre, contiennent du H, lié au S

Une hypothèse alternative aux chondrites carbonées: les chondrites à enstatite



Piani et al. (2020)

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Une hypothèse alternative aux chondrites carbonées: les chondrites à enstatite

Est ce que la Terre a accrété une grande masse de chondrites à enstatite?

Si elle a accrété surtout des aubrites (EC différenciés, avec les mêmes anomalies isotopiques nucléosynthétiques), ces dernières semblent être beaucoup moins riches en H (Lorenz et al., 2020; Peterson et al., 2023)

Les planétésimaux précurseurs de la Terre non échantillonnés par les météorites auraient pu être encore plus appauvris en H

Encore un sujet de débat ouvert, pour le colloque de Juillet

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

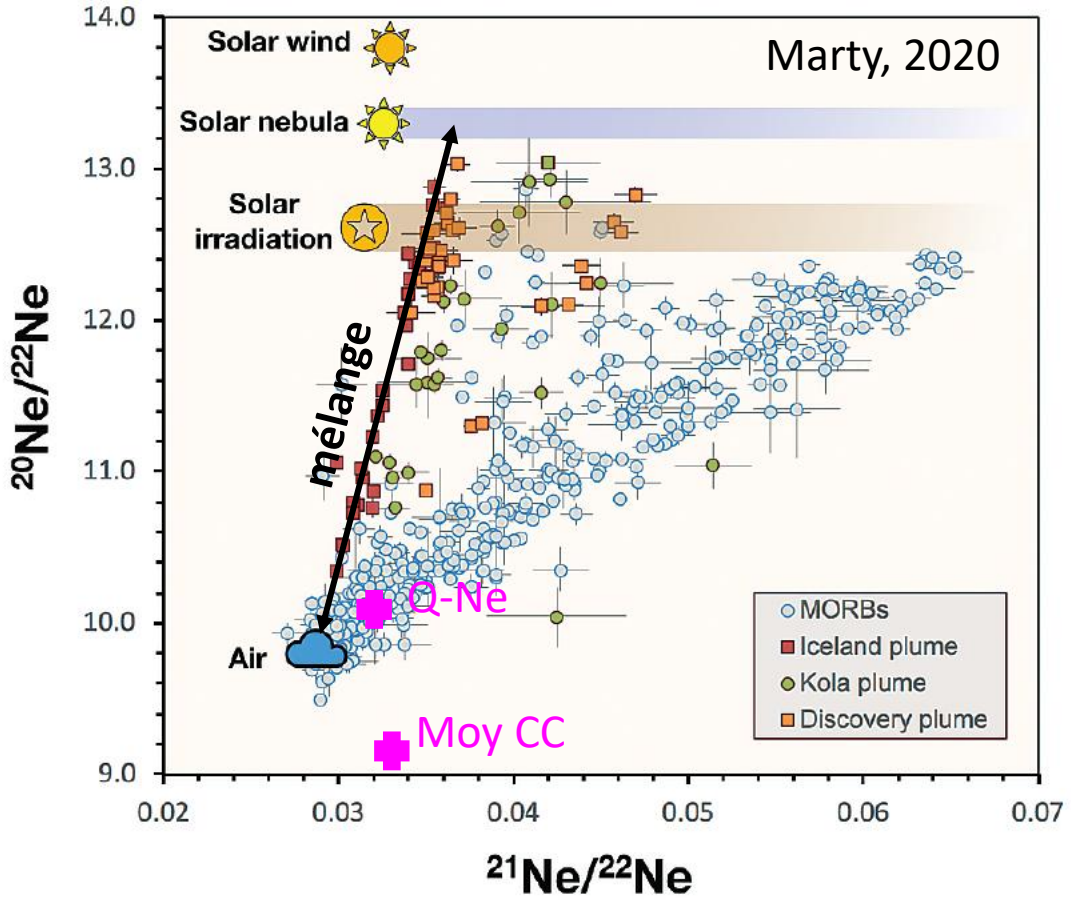
Les gaz rares

He, Ne, Ar, Kr, Xe

Se sont des gaz, qui condensent sur des grains seulement à très faible température

Peuvent être adsorbés en phase gazeuse par des grains ou être dissous dans le magma

Le rapport isotopique $^{20}Ne/^{22}Ne$ des basaltes issus du manteau profond terrestre révèle la capture de gaz depuis le disque protoplanétaire (Yokochi & Marty, 2004; Mukhopadhyay, 2012; Williams and Mukhopadhyay, 2019)



La Terre devait avoir une masse suffisante (quelques fois la masse martienne) avant la disparition du disque!

Radiogénique (Tucker et al., 2012)

$$^{18}O + \alpha \rightarrow {}^{21}Ne + n$$

COLLÈGE DE FRANCE 1530

A retenir

- La dynamique des planètes telluriques n'est pas régulière. Mais un changement orbital radical avant la fin du Système Solaire est improbable
- Toutes les planètes telluriques sont différenciées, signe qu'elles étaient fondues à l'origine
- La formation du noyau a séquestré le fer métal et les éléments sidérophiles, plus ou moins selon leurs coefficients de partage
- Après la fin de la formation du noyau, les planètes ont accrété encore un peu de matière (vernis tardif). Pour la Terre, il est généralement considéré que ceci a apporté le dernier 0,5% de sa masse, mais la valeur précise est maintenant sous débat (entre $1,6x10^{-4}$ M_E et 0,03 M_E)
- Dans le cadre de la dichotomie isotopique du Système Solaire, les planètes telluriques sont clairement dans le camp des NC
- Debat sur la quantité de matière CC accrétée par la Terre, mais tout au plus ~5%
- Si quelques %, l'eau a pu être apportée par les CC, autrement elle doit avoir été synthétisée sur Terre
- La Terre et Mars sont faites des matières distinctes, du point de vue chimique (Fe/Si, Fe/O) et isotopique
- La Terre doit avoir accrété des corps qui ne sont pas échantillonnés par les météorites. Ces corps, enrichis en isotopes issus des supernovæ et d'étoiles évoluées, devaient être aussi enrichis en éléments plus réfractaires que le Si et fortement déficients en éléments volatils
- Le déficit en éléments volatils vient d'un manque d'accrétion, pas d'une perte lors de la fusion
- Le rapport isotopique du Néon dans le manteau profond révèle la présence de gaz capturé depuis le disque et donc que la masse de la Terre était au moins quelques fois la masse de Mars avant sa disparition