



Leçon N. 6 – 27 Novembre 2024

**Alessandro
MORBIDELLI**

Chaire

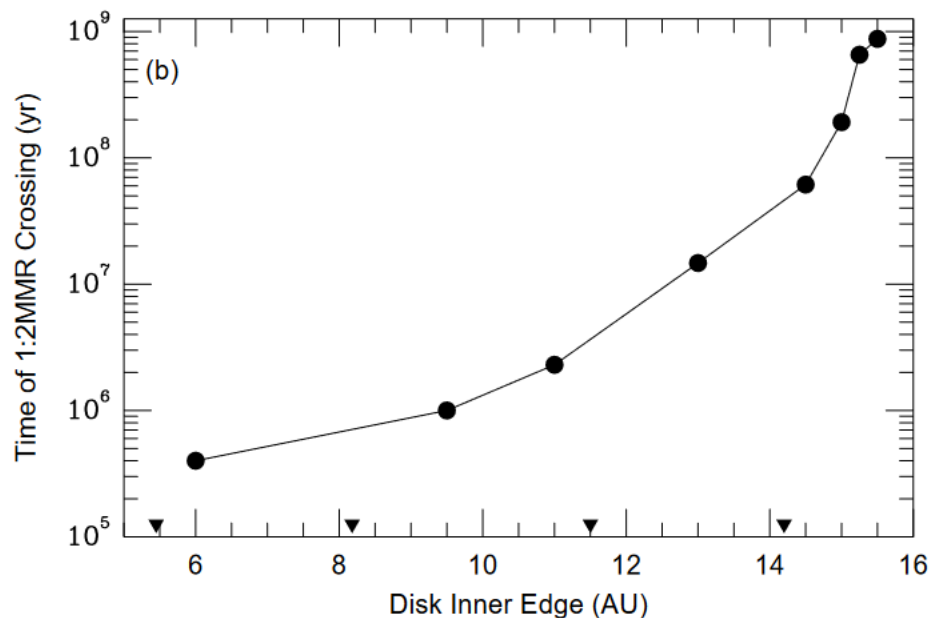
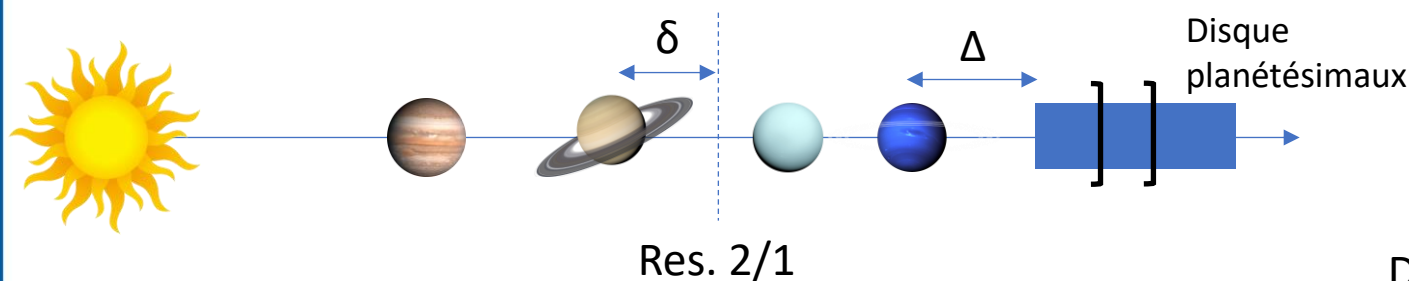
Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

Quand l'instabilité des planètes géantes a-t-elle eu lieu ?



Pas possible de répondre à priori

Les modèles peuvent donner des instabilités précoces ou tardives selon les conditions initiales



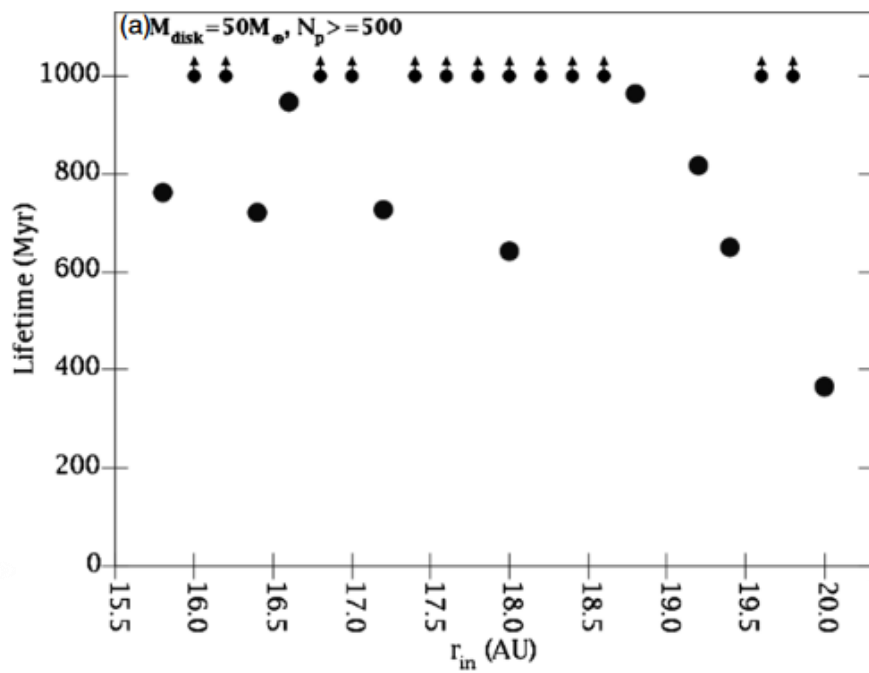
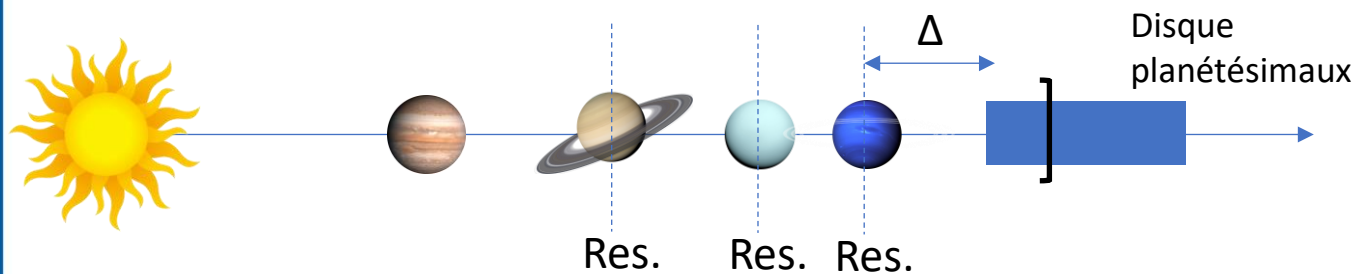
Dans le premier modèle de Nice (2005) le temps de déclenchement de l'instabilité dépend de la distance de Jupiter et Saturne de leur résonance 2/1 et de la position du disque des planétésimaux par rapport à Neptune, qui règle la vitesse de migration

Gomes et al., 2005



Pas possible de répondre à priori

Les modèles peuvent donner des instabilités précoces ou tardives selon les conditions initiales

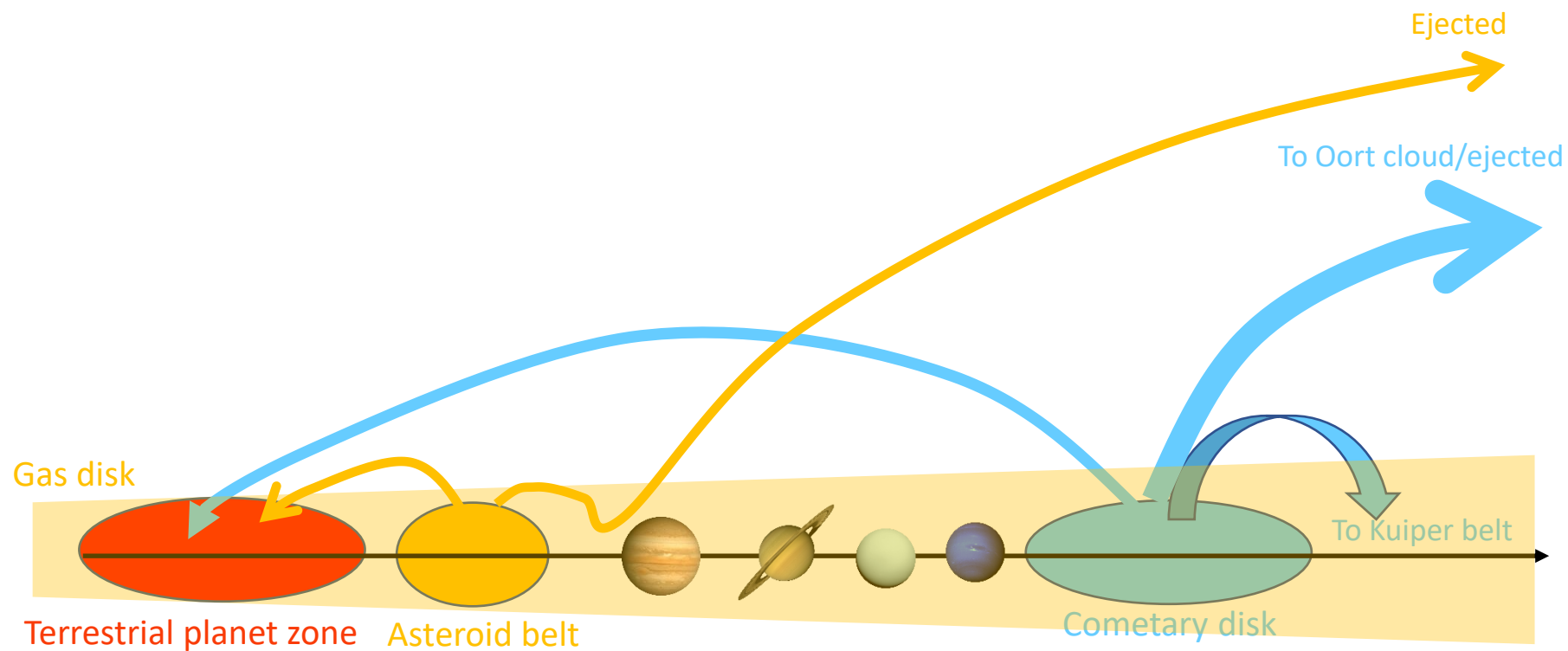


Dans le nouveau modèle de Nice les planètes sont en résonance. L'instabilité se déclenche quand elles sortent de résonance à cause des perturbations cumulées des planétésimaux. Le seul paramètre est la distance Δ , qui augmente avec le temps jusqu'à l'instabilité

Levison et al., 2011



Conséquences de l'instabilité et calibration sur les données: bombardement des planètes telluriques





La surface de la Terre est trop jeune pour porter les traces de ce bombardement

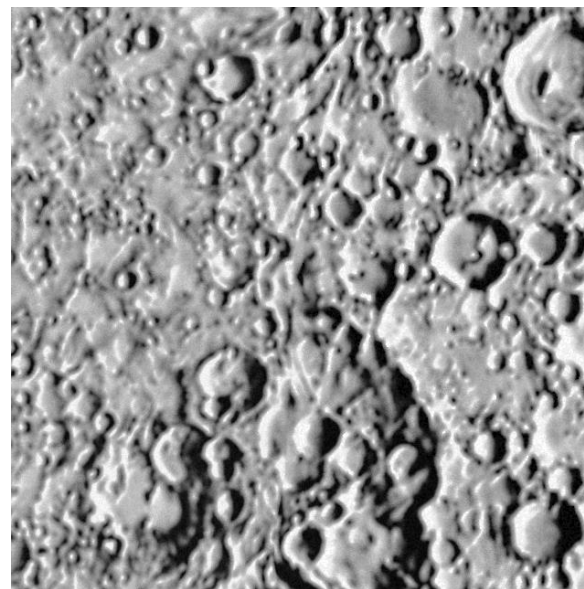


Age des plus vieilles roches: $\sim 3,8$ Ga

Age du plus vieux cratère d'impact: ~ 2 Ga (Vredefort crater)



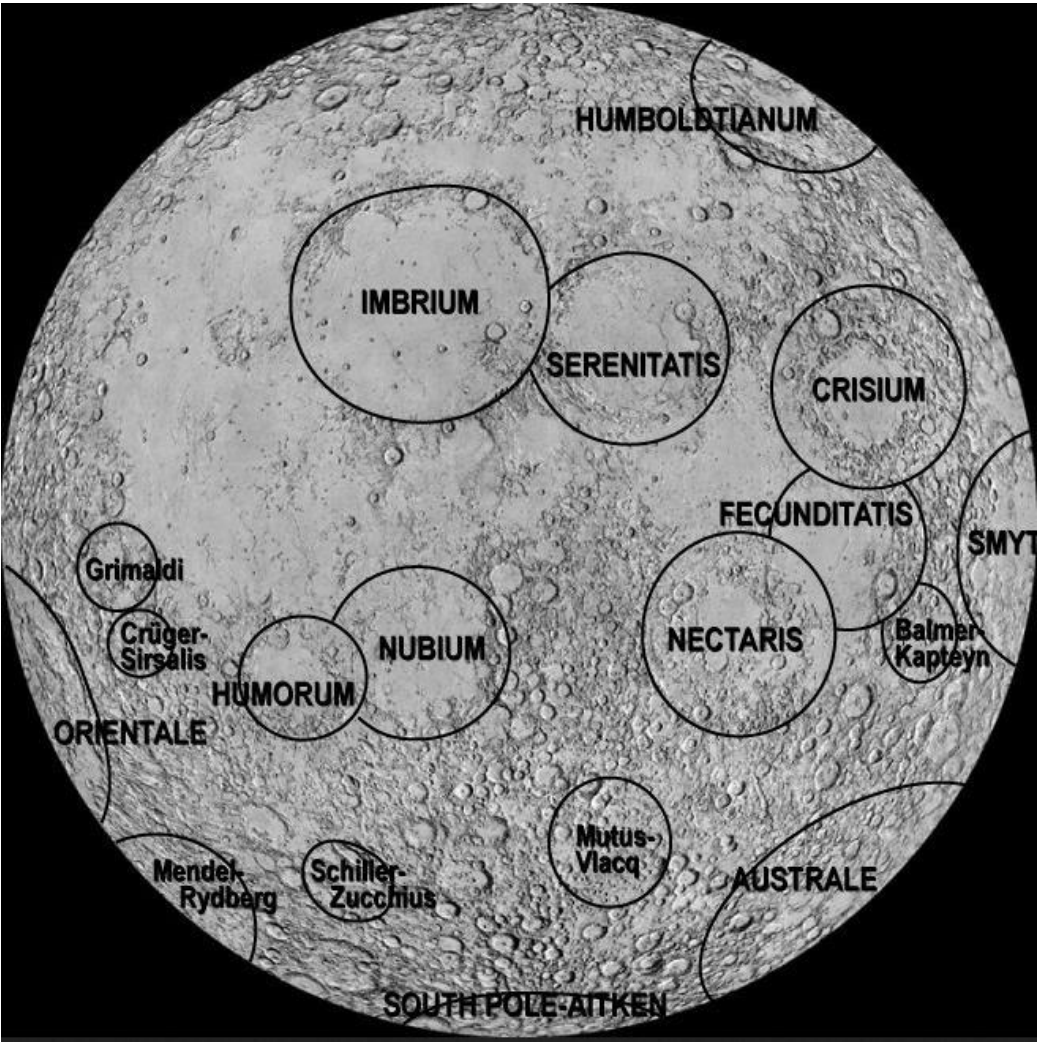
La Lune offre des meilleures traces



Terrains très cratérisés



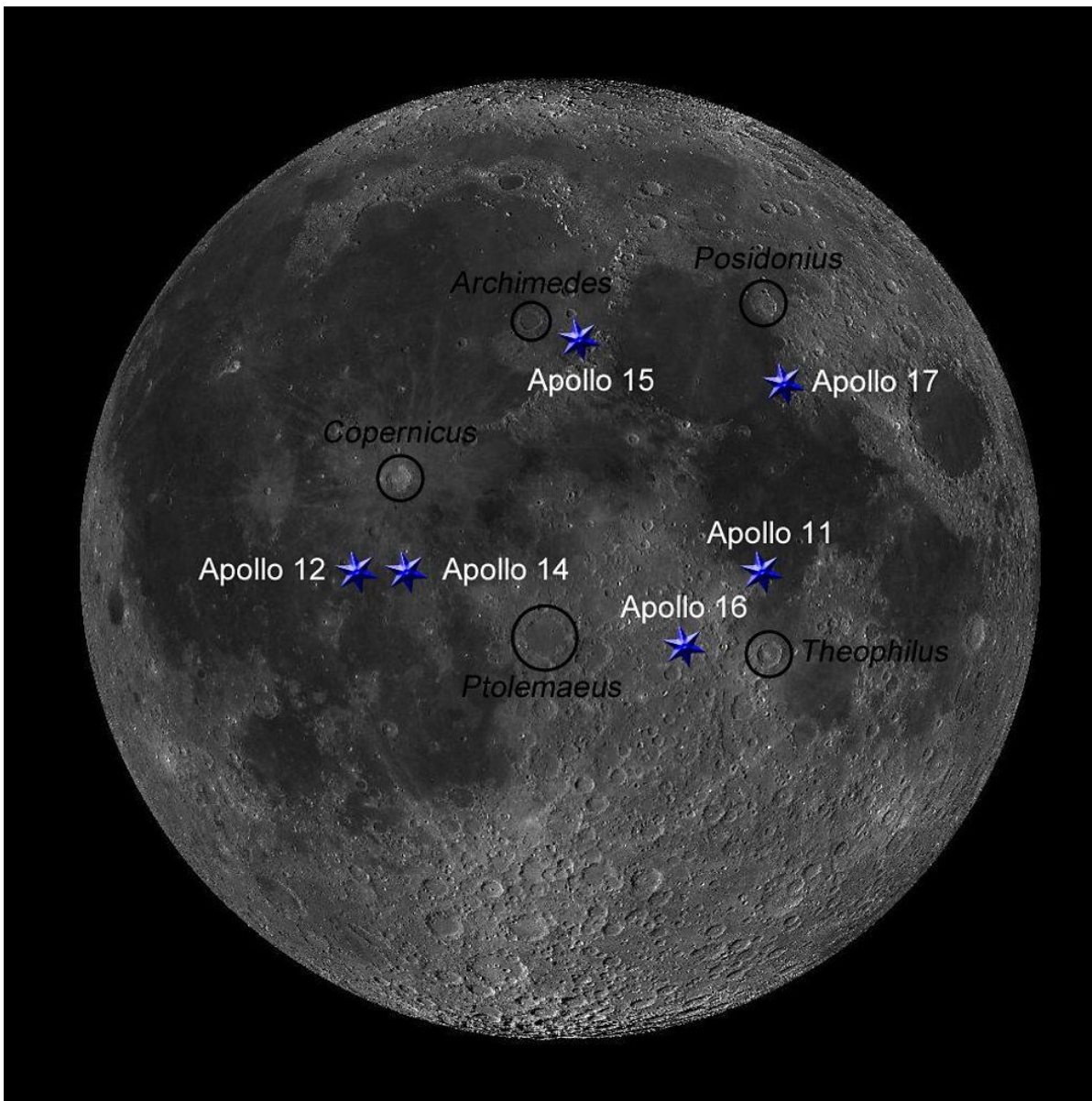
La Lune offre des meilleures traces



Bassins d'impact (D>300km)



Echantillons lunaires



381kg de roches rapportées sur Terre



Météorites lunaires

LAP 02205



649 connues à ce jour

Environ 1 tonne de matériel

QUE 93069





Le principe de la datation U-Pb

^{238}U décroît en ^{206}Pb avec une demie-vie de 4,468 milliards d'années

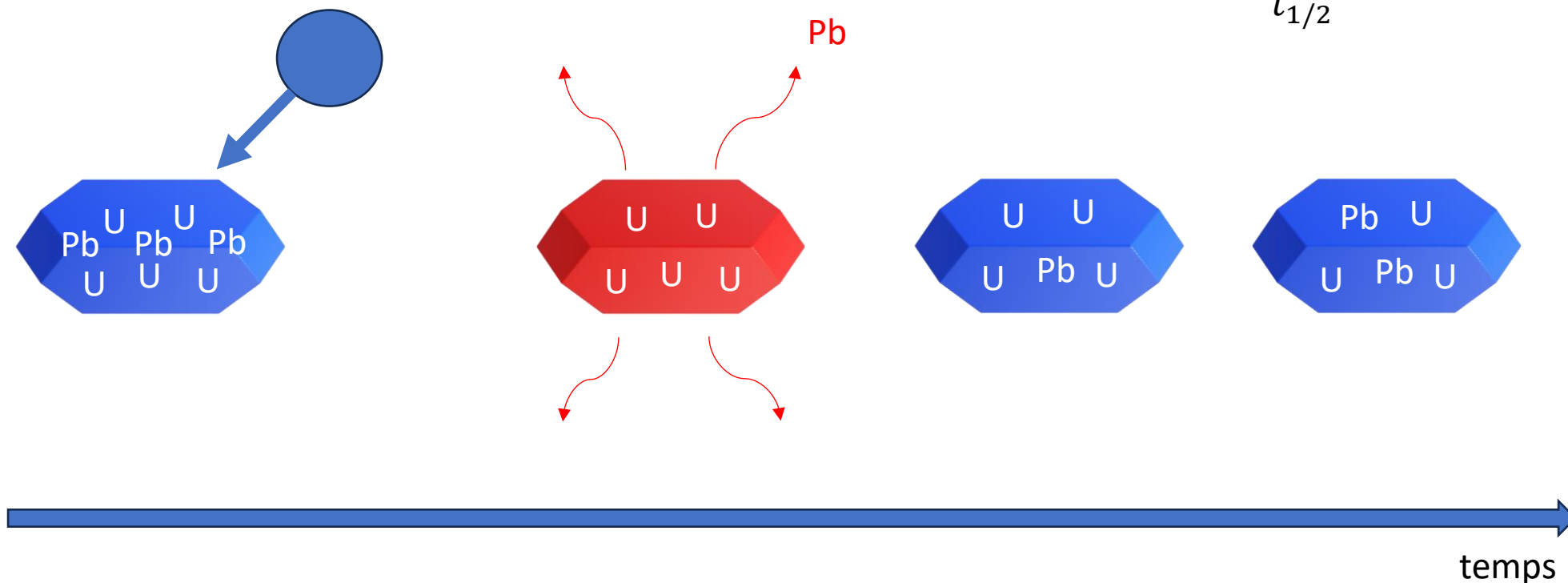
^{235}U décroît en ^{207}Pb avec une demie-vie de 703,8 millions d'années

Le Pb est volatile, l'U pas

$$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} = e^{\lambda_{238}t} - 1$$

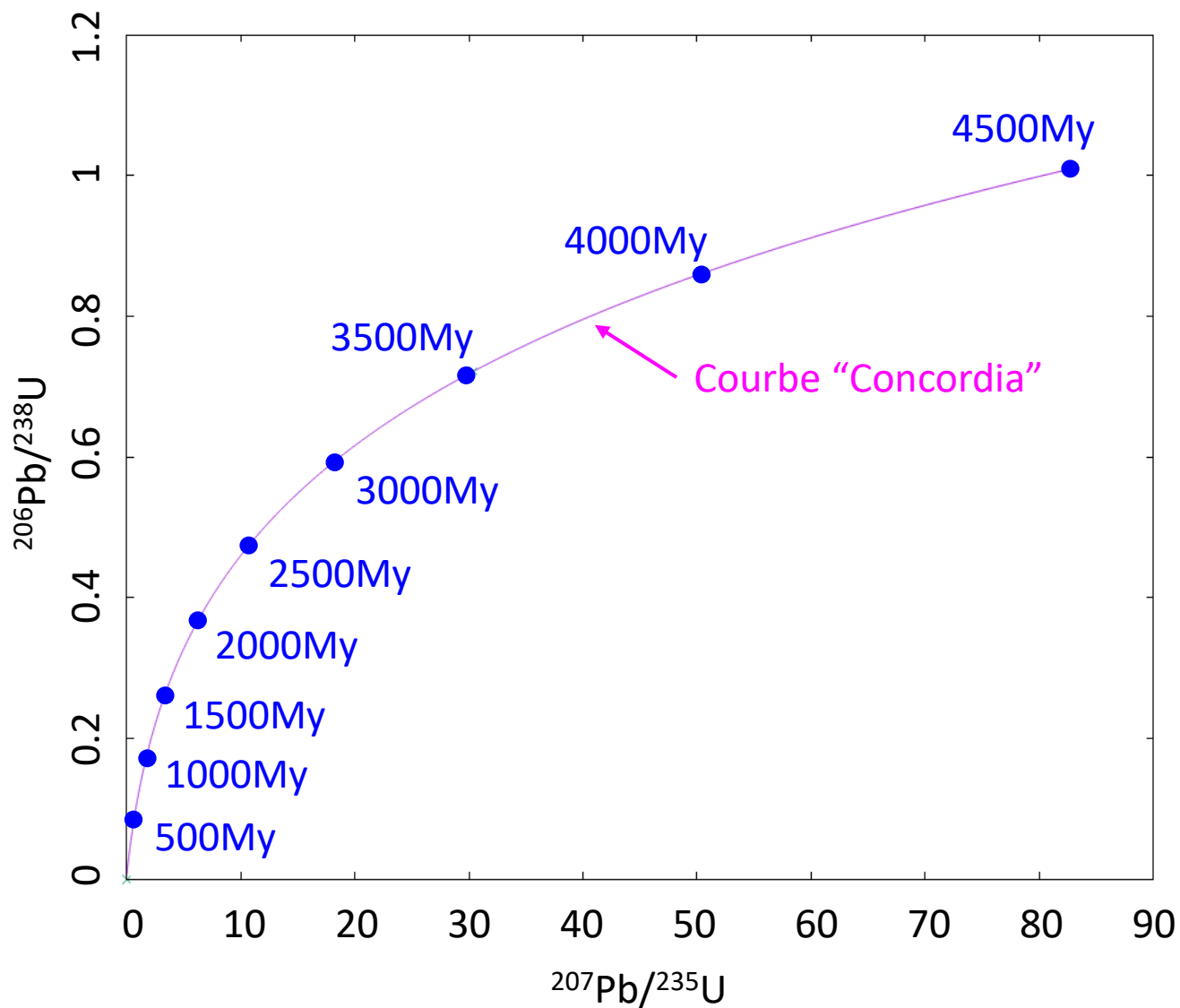
$$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}} = e^{\lambda_{235}t} - 1$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$





Le principe de la datation U-Pb

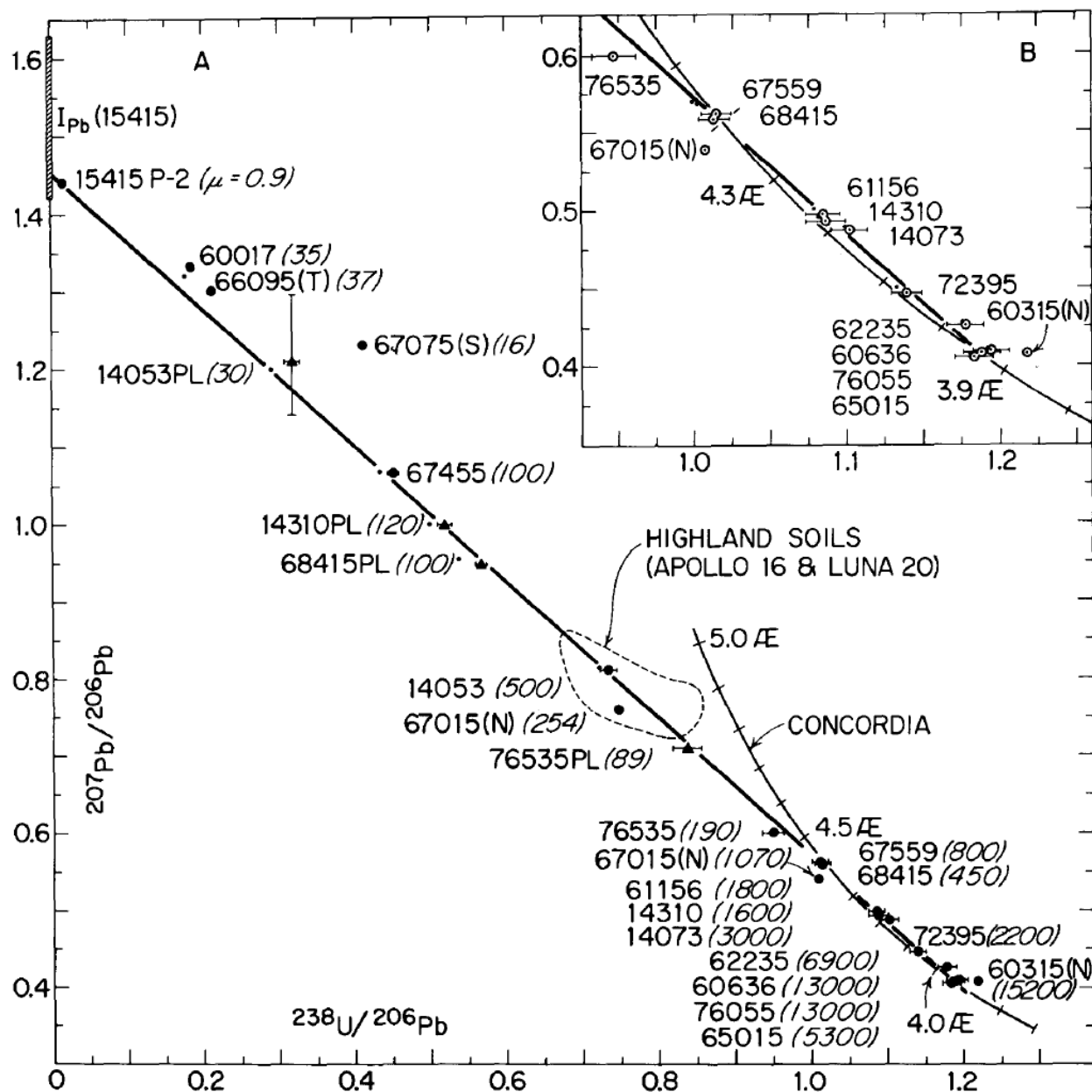


$$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} = e^{\lambda_{238}t} - 1$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}} = e^{\lambda_{235}t} - 1$$



Première analyse des échantillons Apollo: Tera et al. 1974

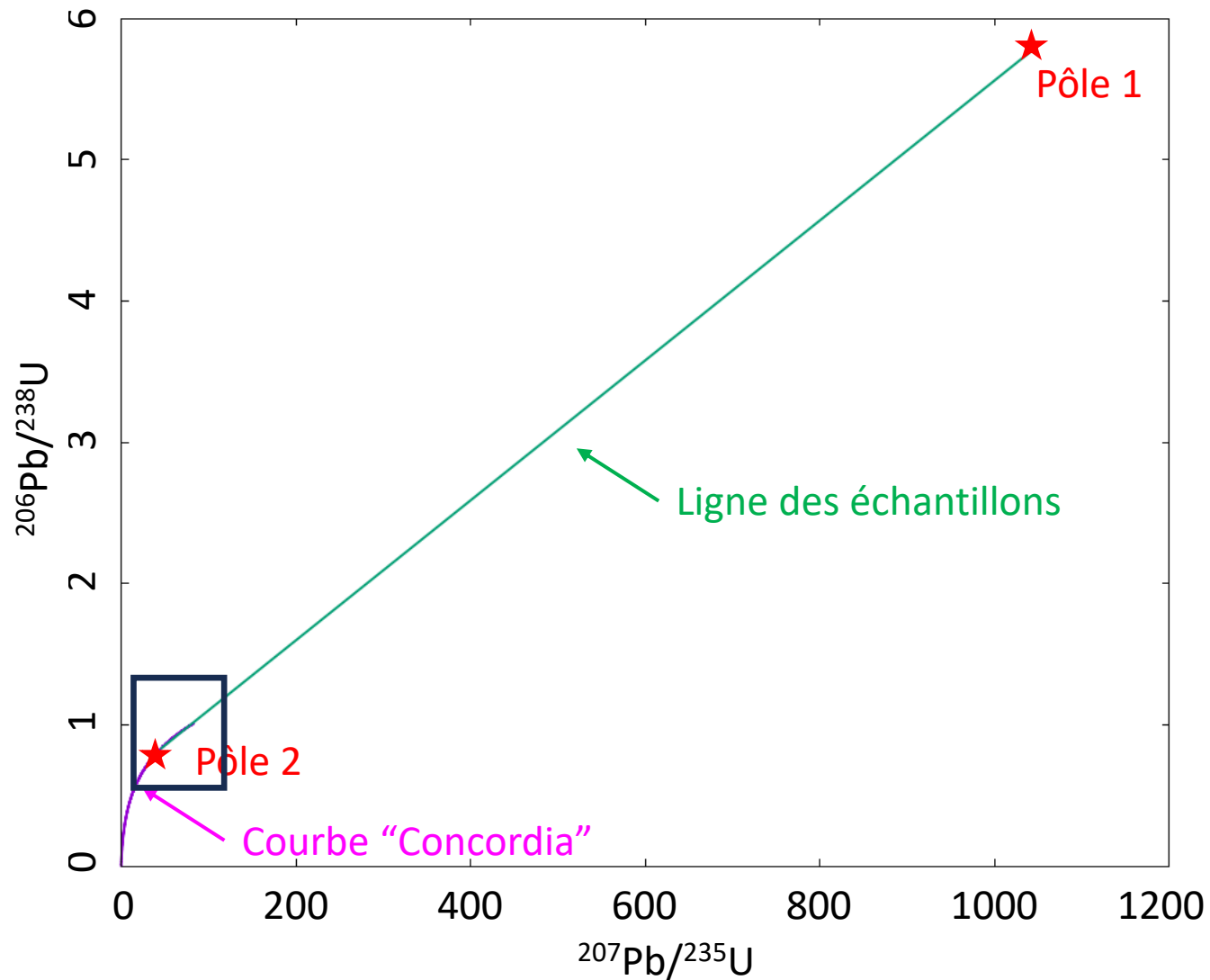


18 échantillons

Ils se disposent sur une droite qui intersecte la courbe "Concordia" à 3,9Ga



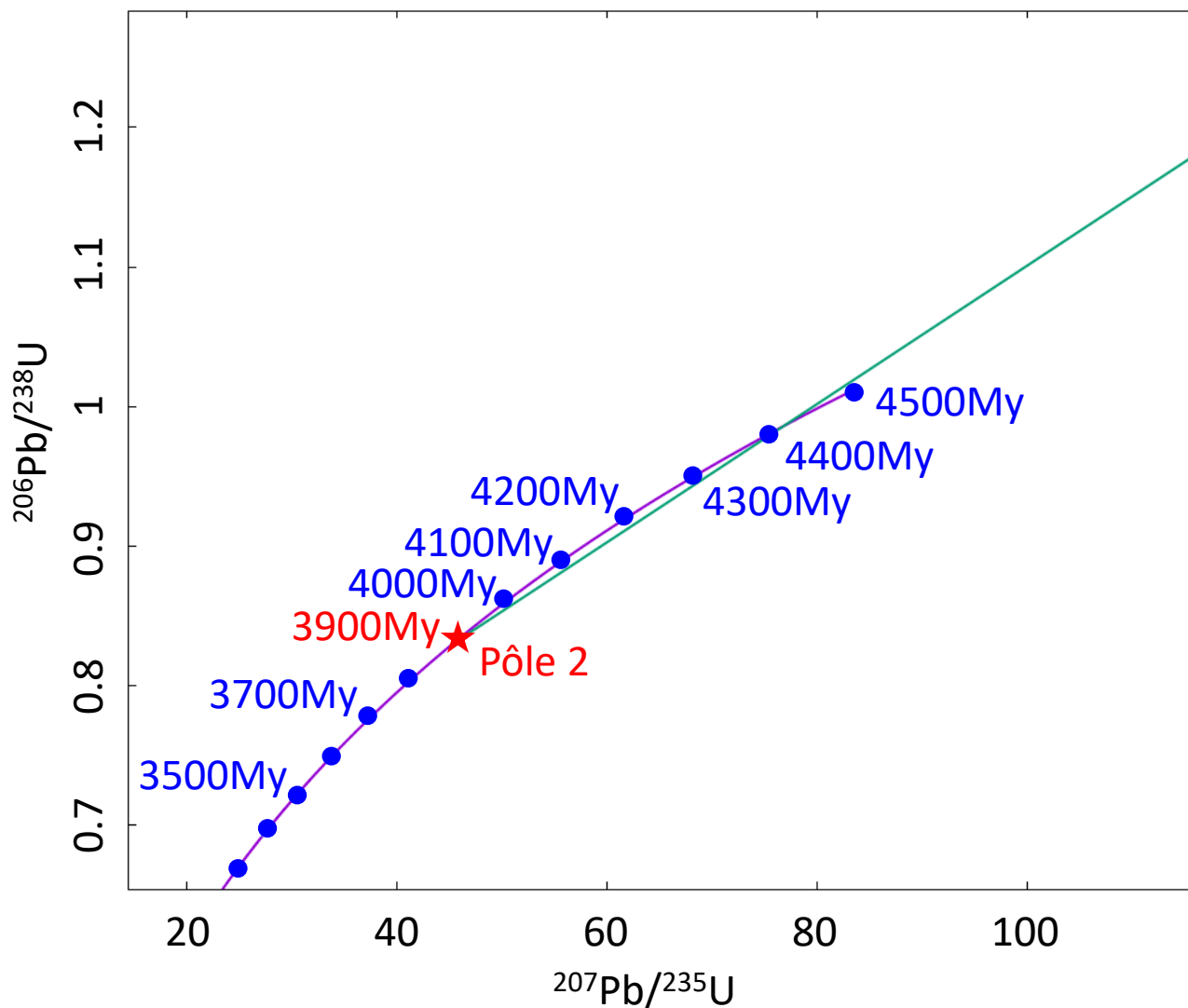
Première analyse des échantillons Apollo: Tera et al. 1974



La ligne des échantillons est interprétée comme une ligne de mélange entre deux pôles:
Pôle 1: matière ayant accumulé du Pb radiogénique pendant un certain temps, puis ont perdu l'Uranium
Pôle 2: sur la courbe "Concordia"



Première analyse des échantillons Apollo: Tera et al. 1974



Le Pôle 2 est sur la courbe “Concordia” à 3,9Ga. Il correspond donc à un dégazage complet du Pb à ce moment-là. Il est présent dans toutes les roches.

Par conséquent toutes les roches ont subi des impacts violents il y a 3,9 milliards d’années.



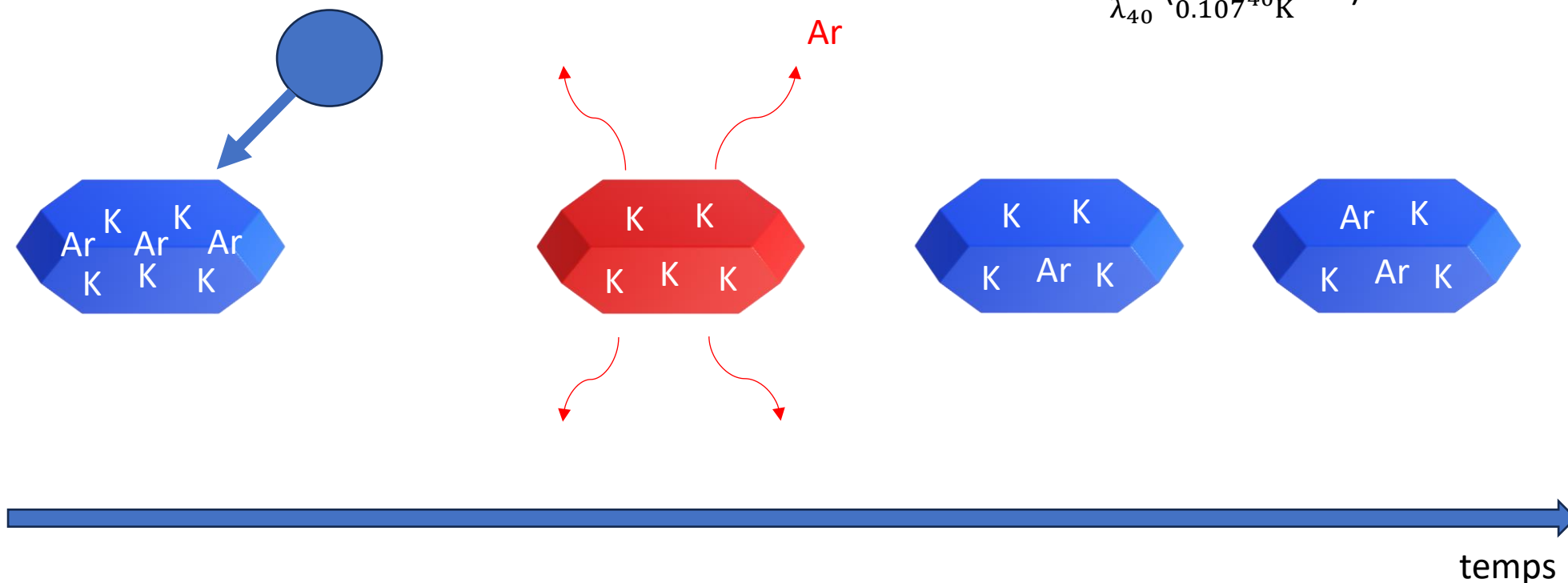
Le principe de la datation K-Ar

^{40}K décroît avec une demie-vie de 1,248 milliards d'années en ^{40}Ca et ^{40}Ar .
Ce dernier est produit dans le 10.7% des cas

Le Ar est extrêmement volatile, le K beaucoup moins

$$^{40}\text{Ar} = 0.107 \ ^{40}\text{K} (e^{\lambda_{40}t} - 1)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_{40}} \left(\frac{^{40}\text{Ar}}{0.107^{40}\text{K}} + 1 \right)$$

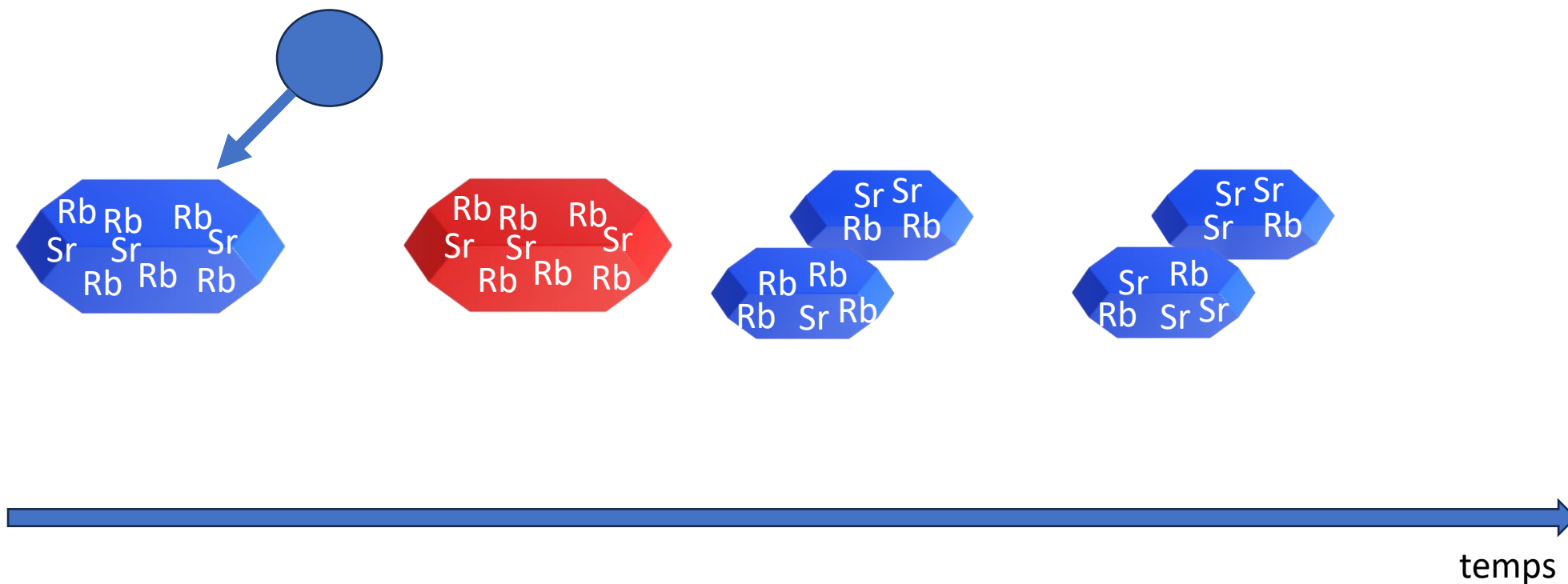




Le principe de la datation Rb-Sr

^{87}Rb décroît en ^{87}Sr avec une demie-vie de 49,4 milliards d'années

$$^{87}\text{Sr} = \underbrace{^{87}\text{Sr}_0}_{\text{inconnue}} + ^{87}\text{Rb} (e^{\lambda t} - 1)$$





Le principe de la datation Rb-Sr

Heureusement, il existe un deuxième isotope, le ^{86}Sr , qui est stable et non radiogénique

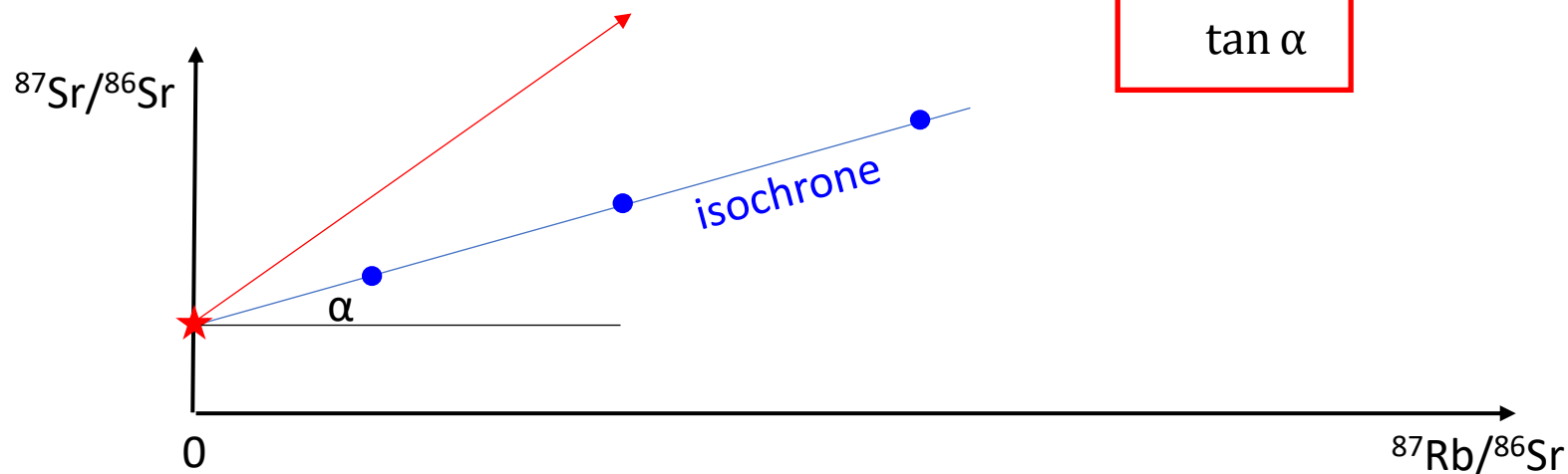
On divise alors l'équation précédente:

$$^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Sr}_0 + ^{87}\text{Rb} (e^{\lambda t} - 1)$$

par la quantité de ^{86}Sr qui ne change pas au cours du temps:

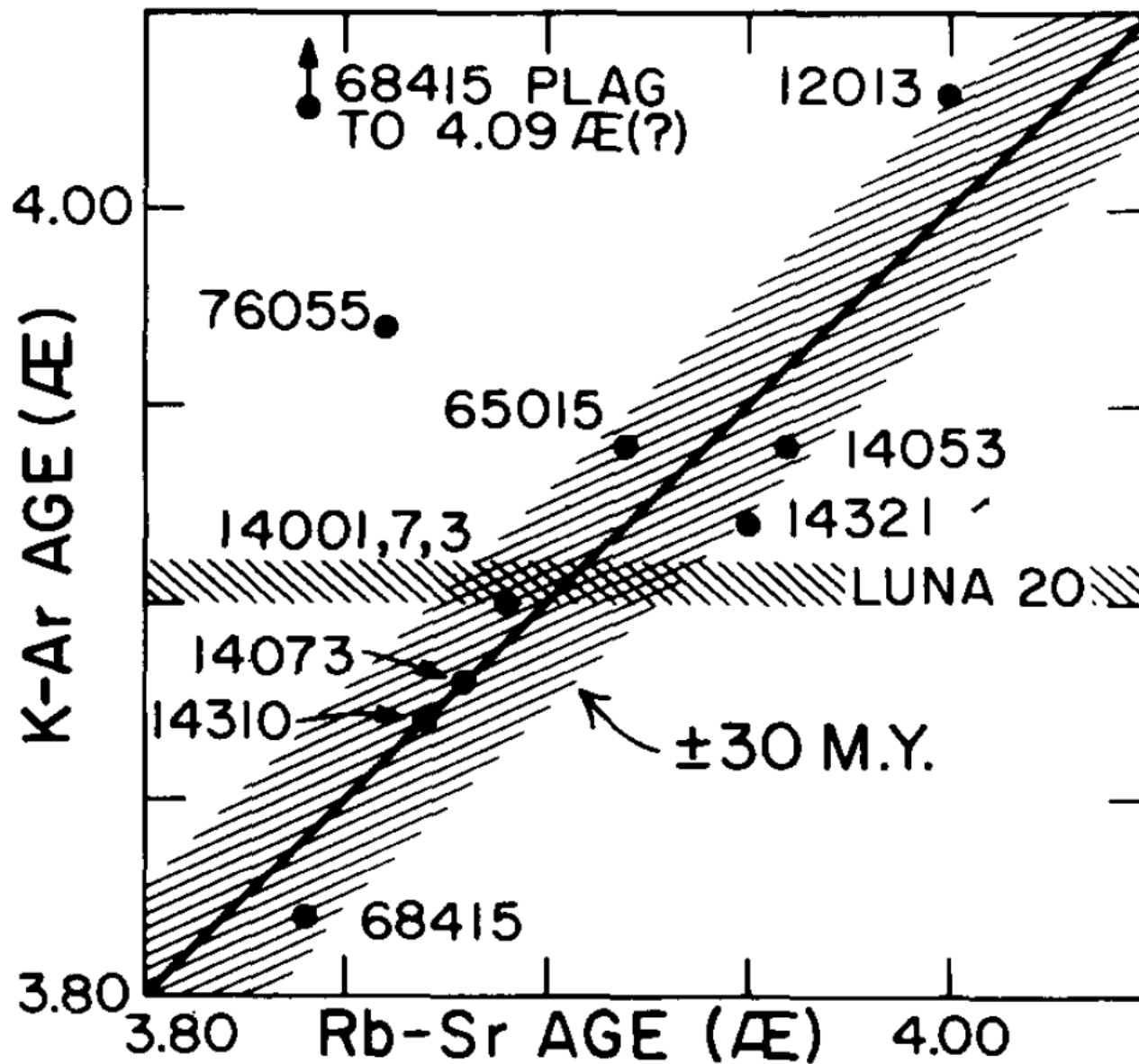
$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right) = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_0 + \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} \right) (e^{\lambda t} - 1)$$

$= \tan \alpha$





Ages Rb-Sr et K-Ar des échantillons lunaire



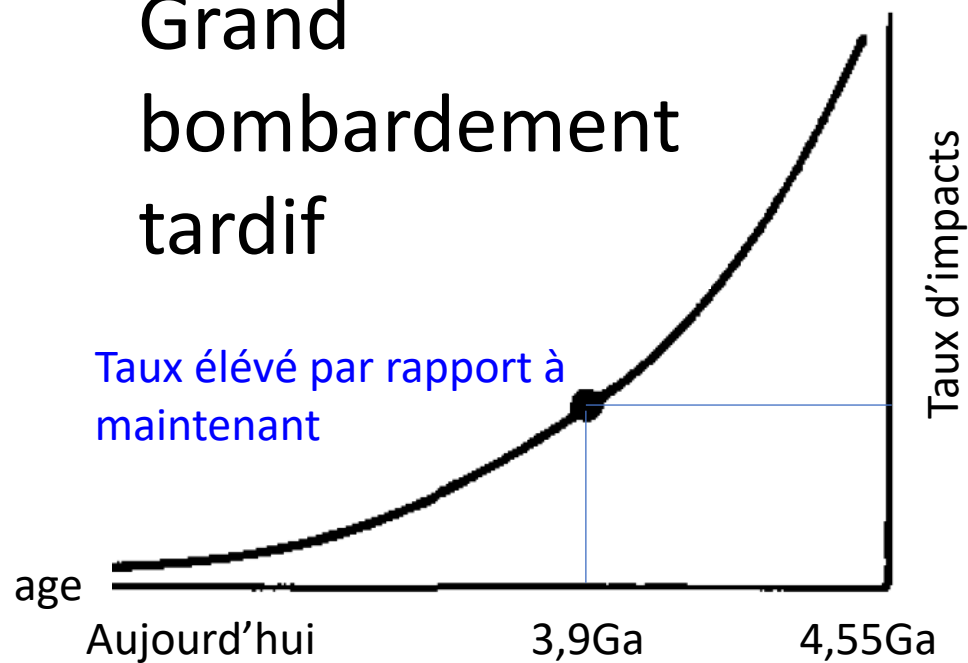
Tera et al., 1974



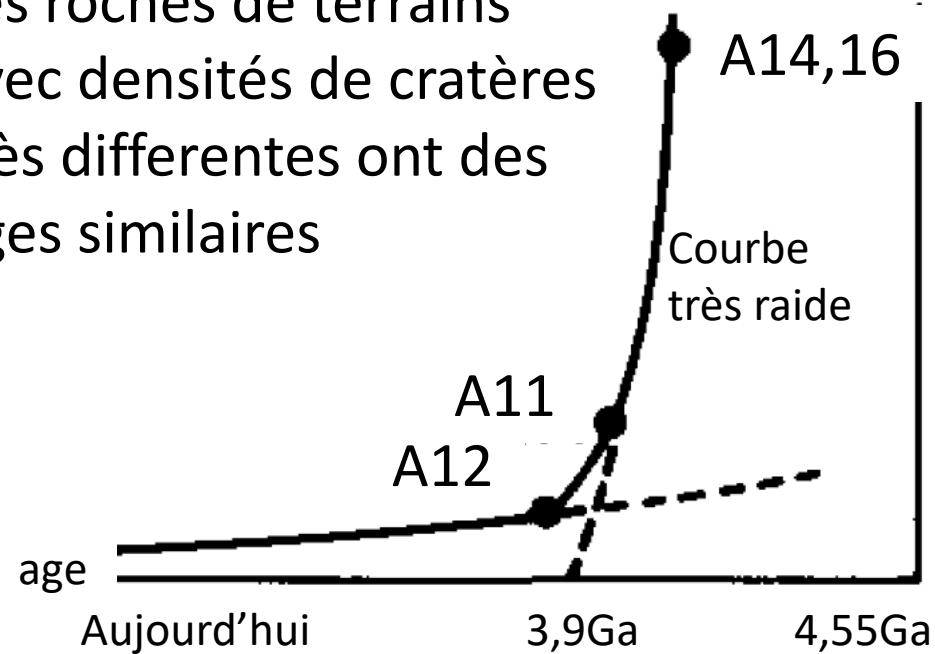
Grand bombardement tardif et cataclysme terminal lunaire

Tera et al., 1974

Grand bombardement tardif



Les roches de terrains avec densités de cratères très différentes ont des âges similaires

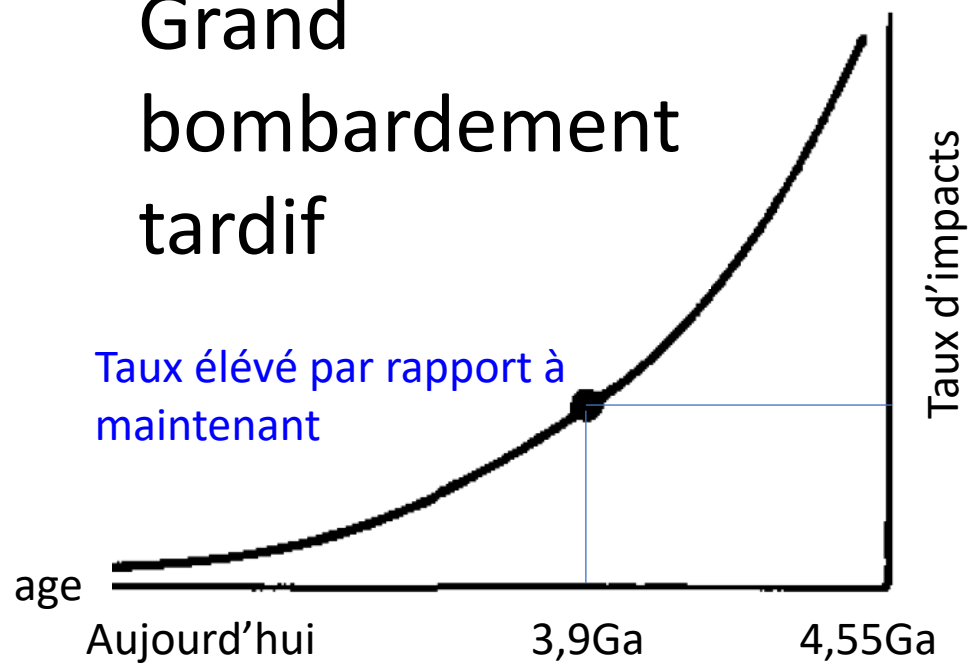




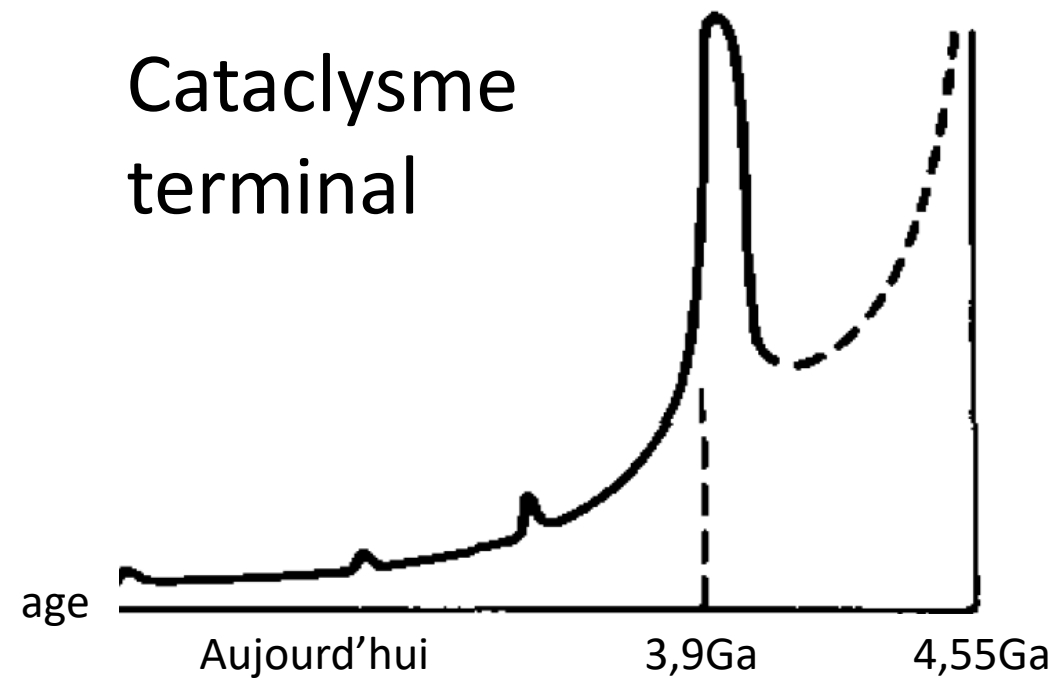
Grand bombardement tardif et cataclysme terminal lunaire

Tera et al., 1974

Grand bombardement tardif



Cataclysme terminal



L'absence d'âges d'impact anciennes (> 4 Ga) suggère un pic du taux de bombardement, i.e. un cataclysme



Le cataclysme terminal lunaire: réel ou apparent?

Avant 2005, l'idée d'un cataclysme lunaire semblait absurde: comment une population d'impacteurs peut s'activer soudainement?

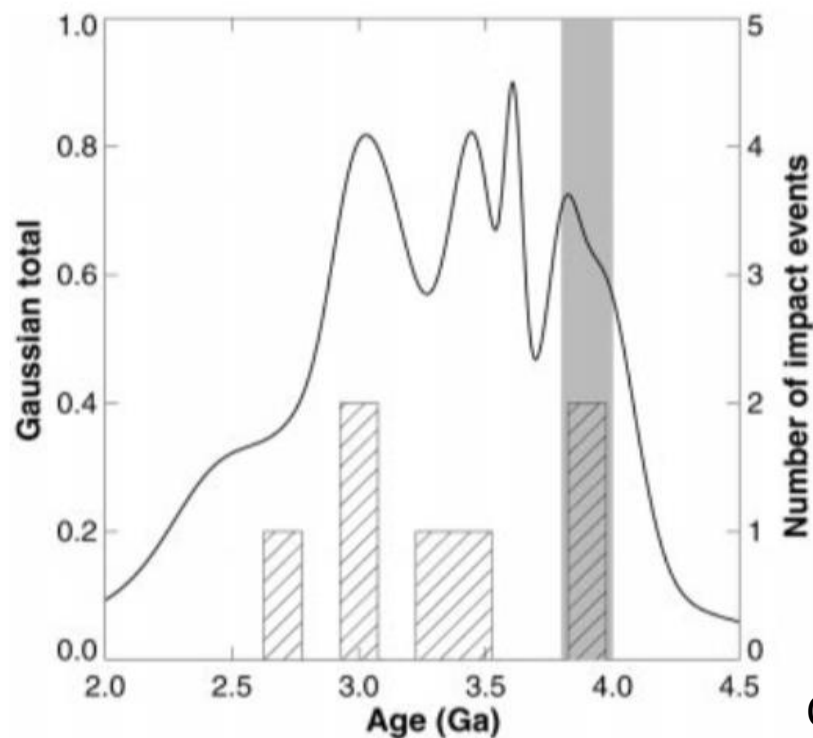
Hypothèses alternatives:

- Les roches subissent multiples impacts pendant le déclin du bombardement et les chronomètres enregistrent seulement le dernier. 3.9Ga est l'époque à partir de laquelle une roche a une probabilité non-nulle de ne plus subir d'impacts (Hartmann, 1975, 2003; Grinspoon, 1989)
- Les échantillons récoltés dans les différents sites Apollo sont des ejecta du bassin Imbrium, le troisième plus jeune. 3,9Ga serait donc simplement l'âge de ce bassin (Rockow and Haskin, 1996; Haskin et al., 1998, 2002a)



Que disent les météorites lunaires?

Les météorites lunaires fournissent des échantillons moins biaisés des ceux d'Apollo. Environ la moitié devrait provenir de la face cachée. La contamination d'Imbrium devrait être plus modeste.



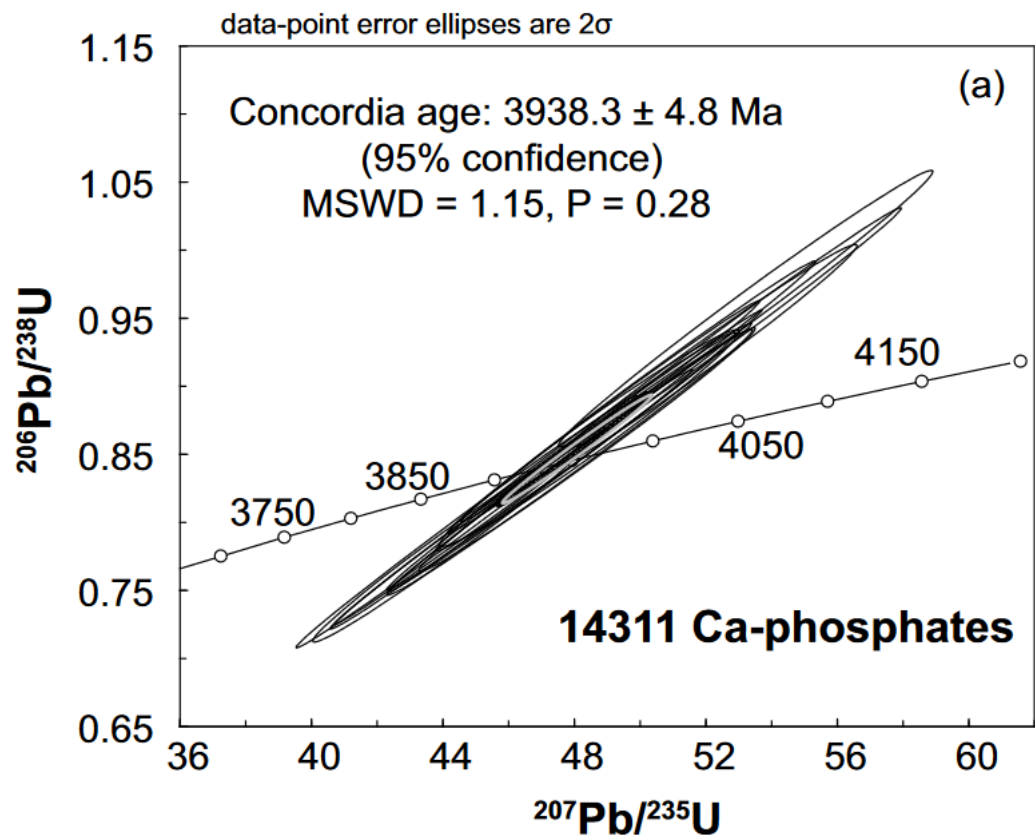
- Pas d'impacts plus vieux que 4 Ga
-> confirmation du cataclysme?
- Un profil de bombardement très différent de celui des échantillons Apollo -> biais évidents

Cohen et al., 2000 (Science) et 2005

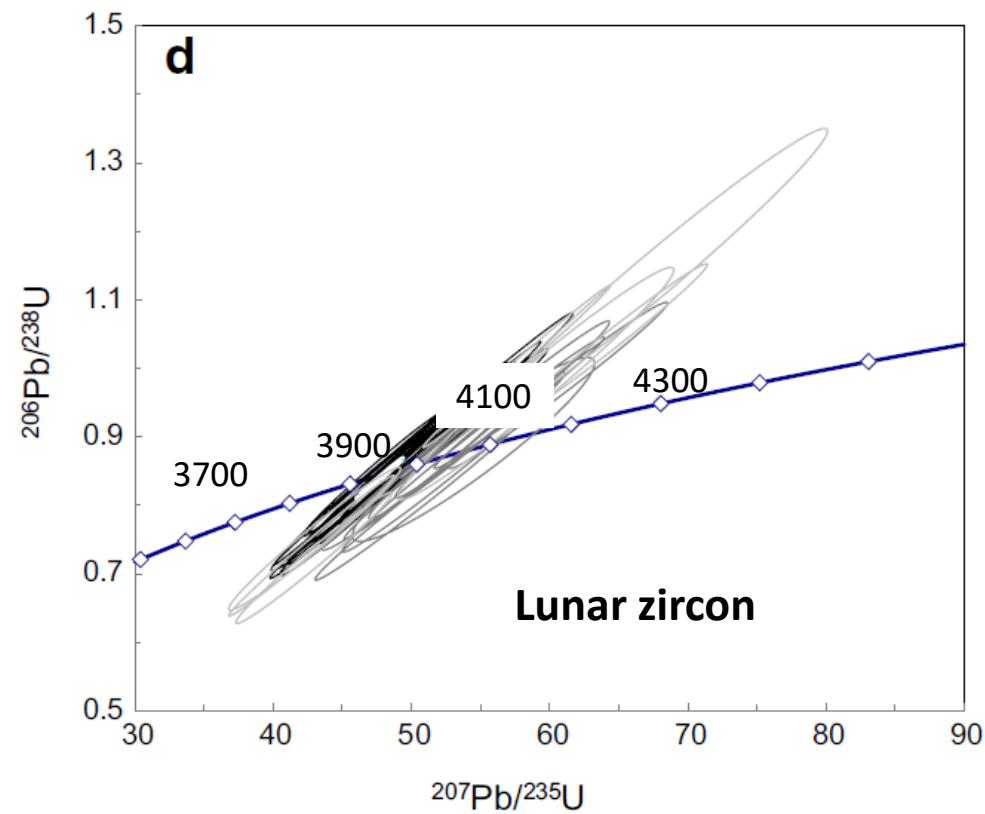


De l'analyse des roches à celles des minéraux

Age = 3,9Ga



Merle et al., 2014

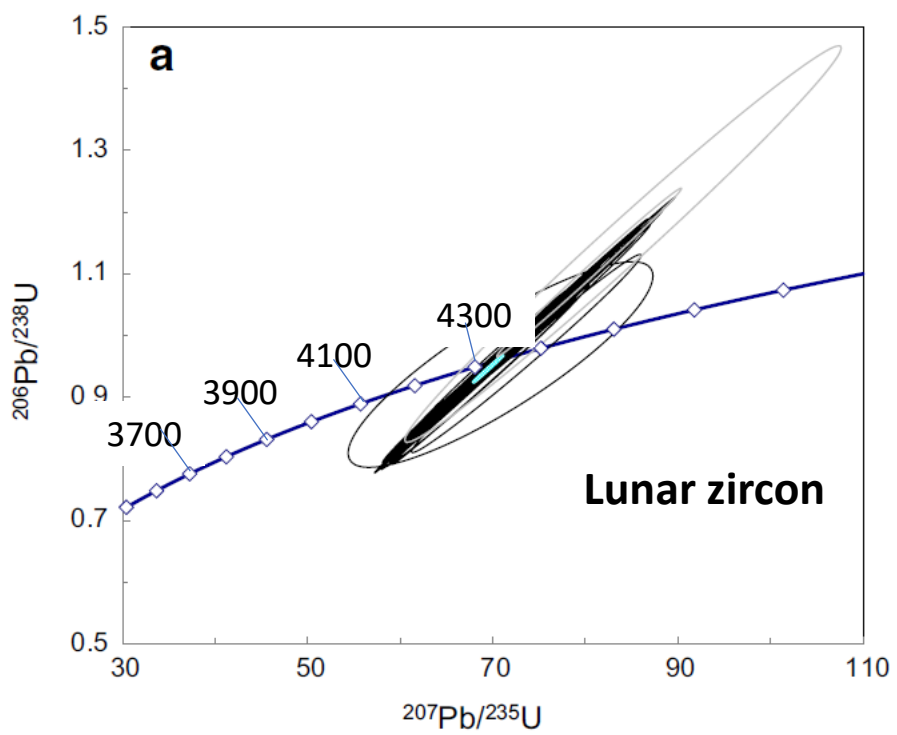


Hopkins and Mojzsis, 2014

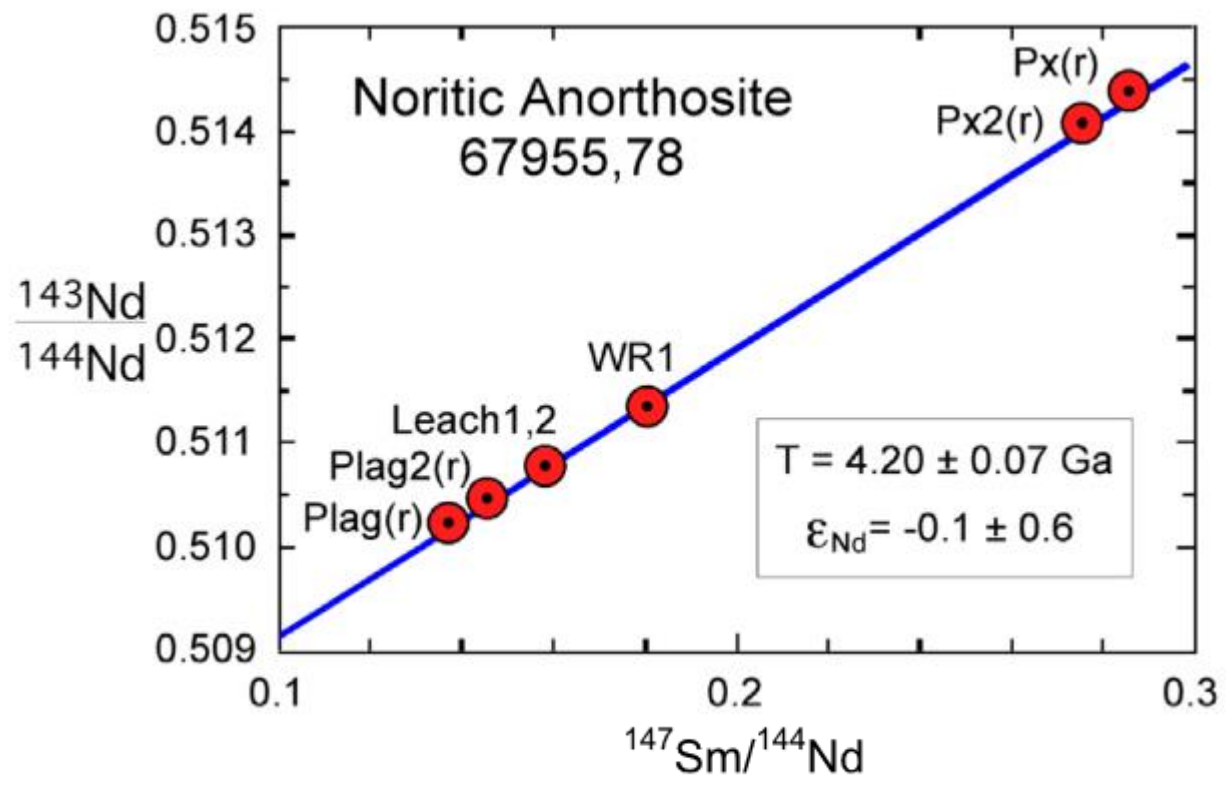


De l'analyse des roches à celles des minéraux

Age > 4,0Ga



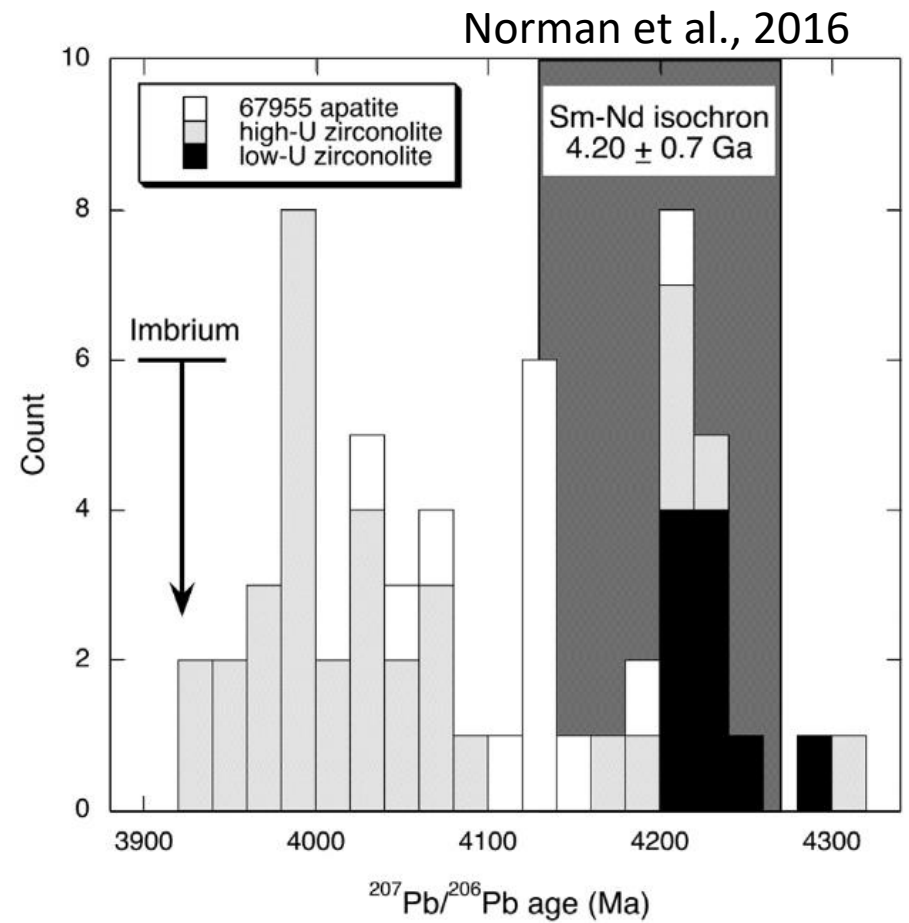
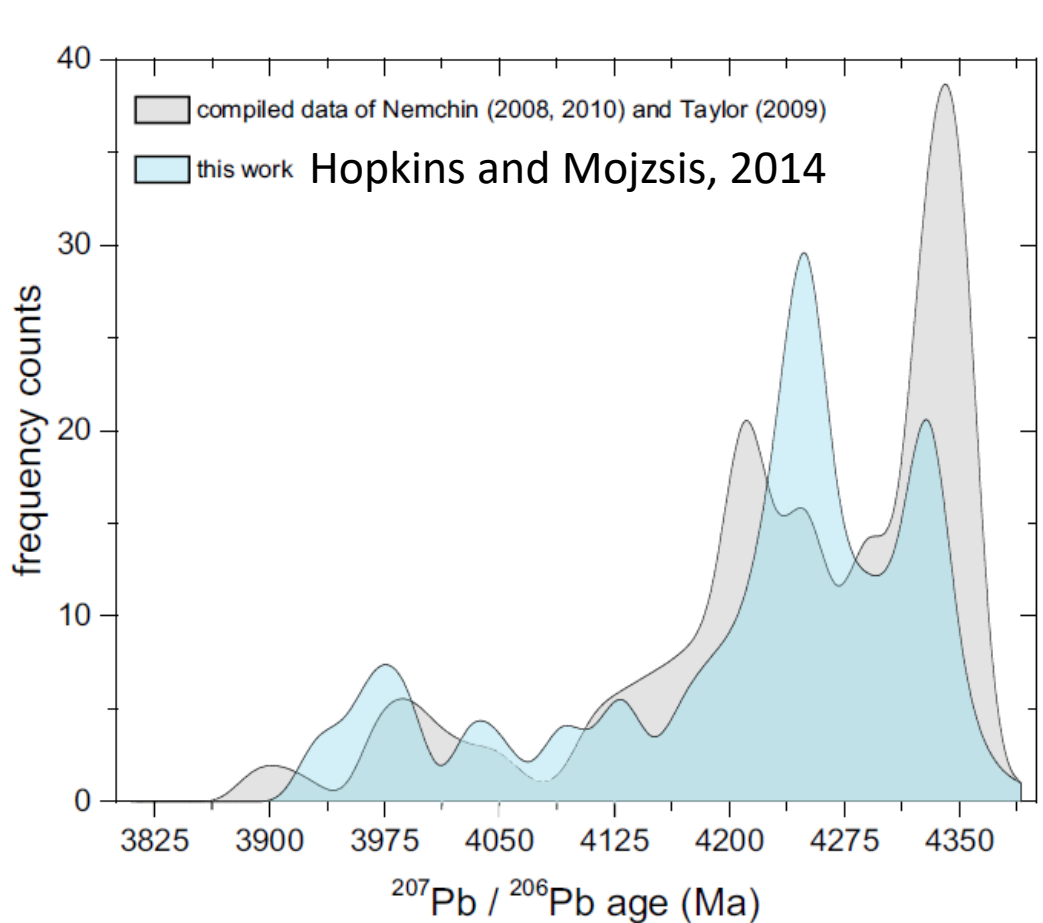
Hopkins and Mojzsis, 2014



Norman et al., 2016



De l'analyse des roches à celles des minéraux

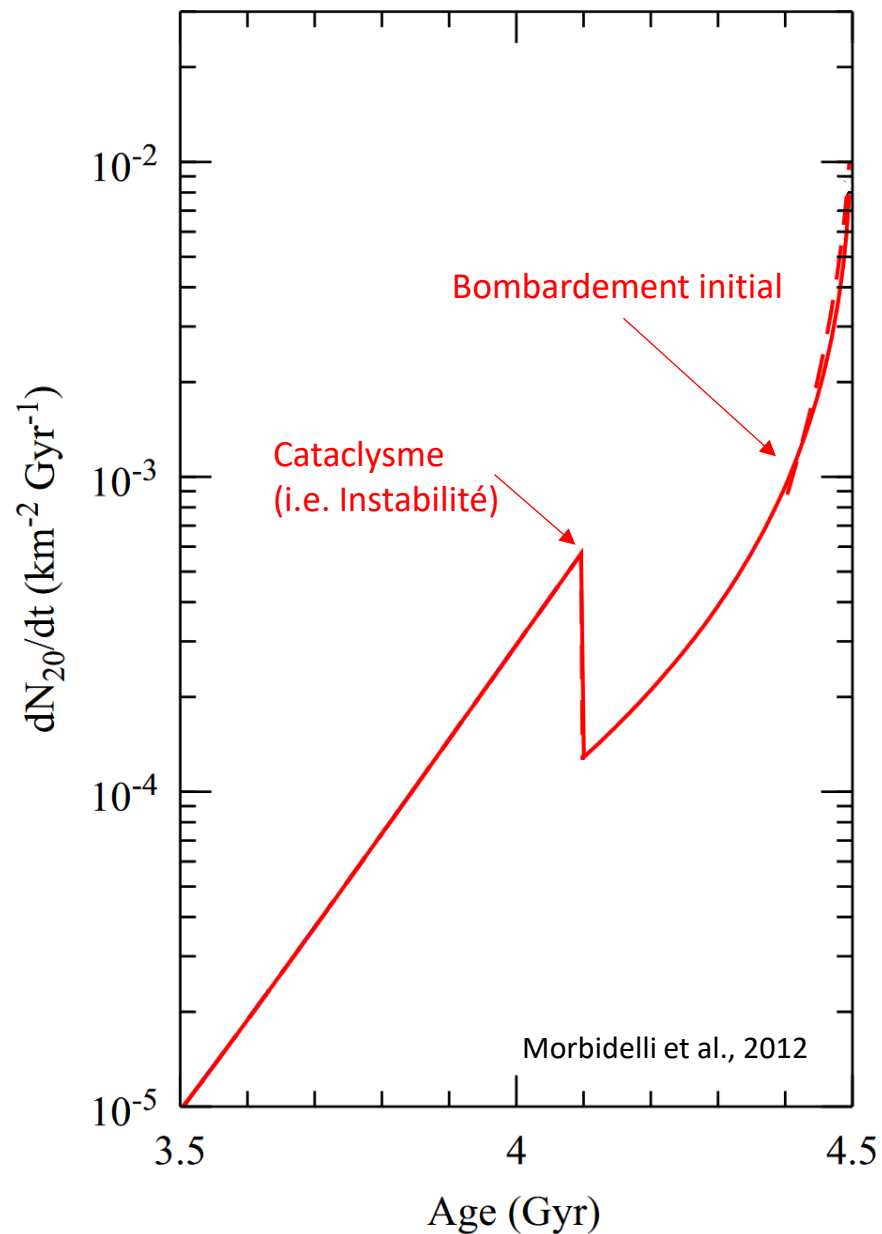


Les collisions anciennes existent certainement, mais il est difficile d'établir le taux d'impact en fonction du temps en partant de jeux de données différents, biaisés, et difficiles à calibrer les uns par rapport aux autres.



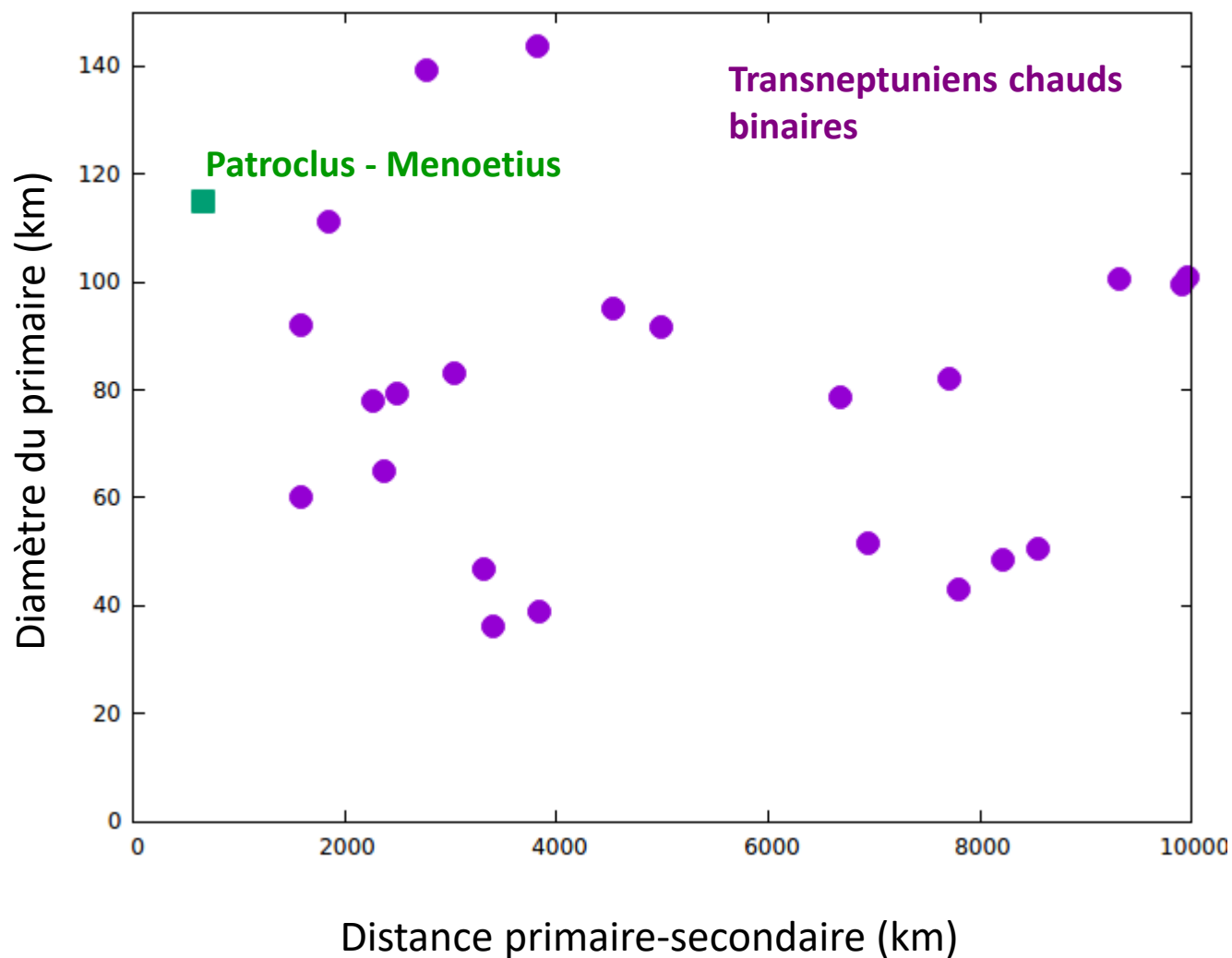
Un bombardement en dent de scie?

Un profil de bombardement en “dent de scie” serait compatible à la fois avec un cataclysme (et donc une instabilité tardive) et l’existence d’impacts plus vieux que 4,1 Ga





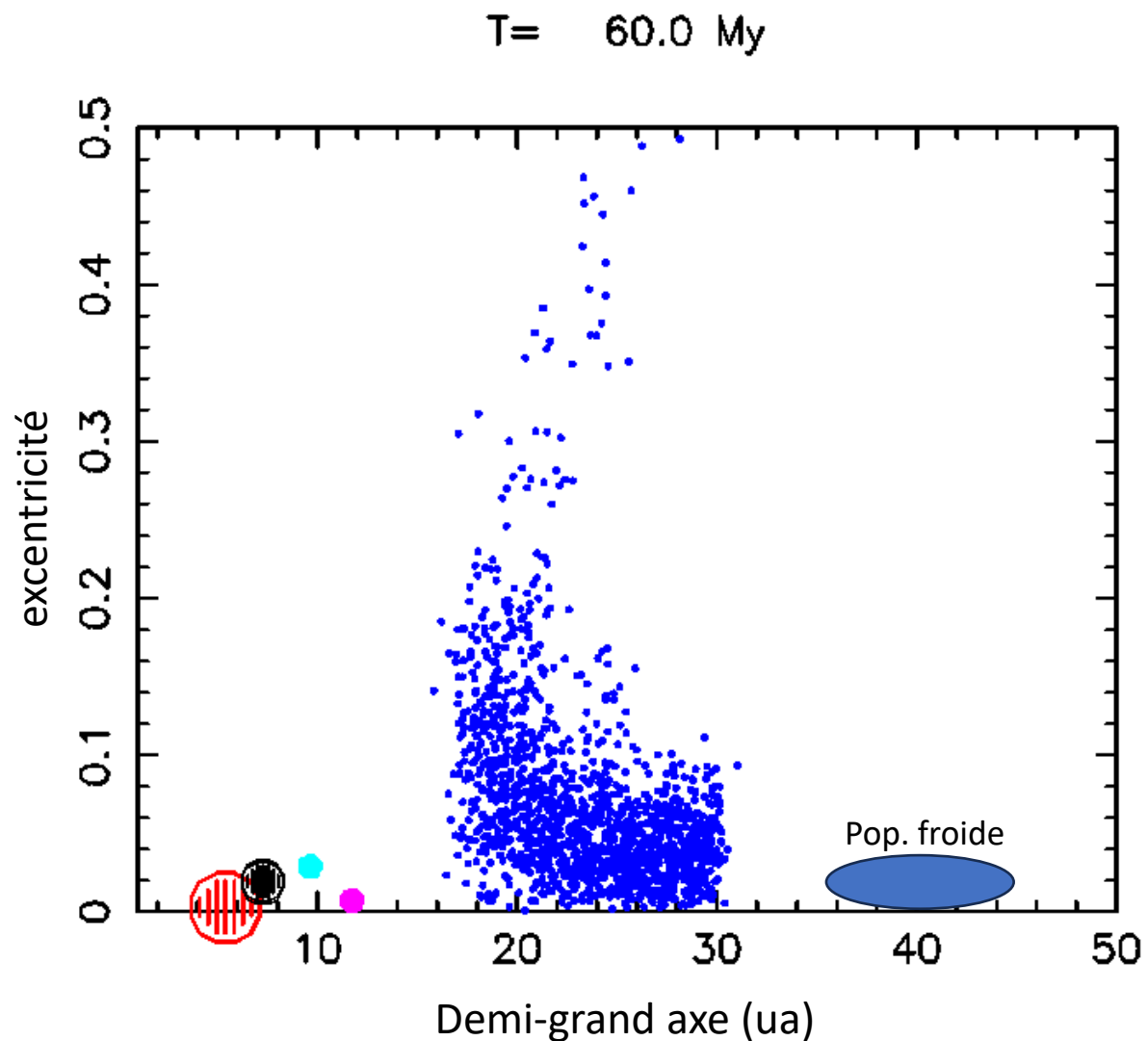
Quand l'instabilité a-t-elle eu lieu? La contrainte des binaires transneptuniens



Dans la population "chaude" de la ceinture de Kuiper ~2,5% des objets sont binaires (Leçon N.1)



Quand l'instabilité a-t-elle eu lieu? La contrainte des binaires transneptuniens

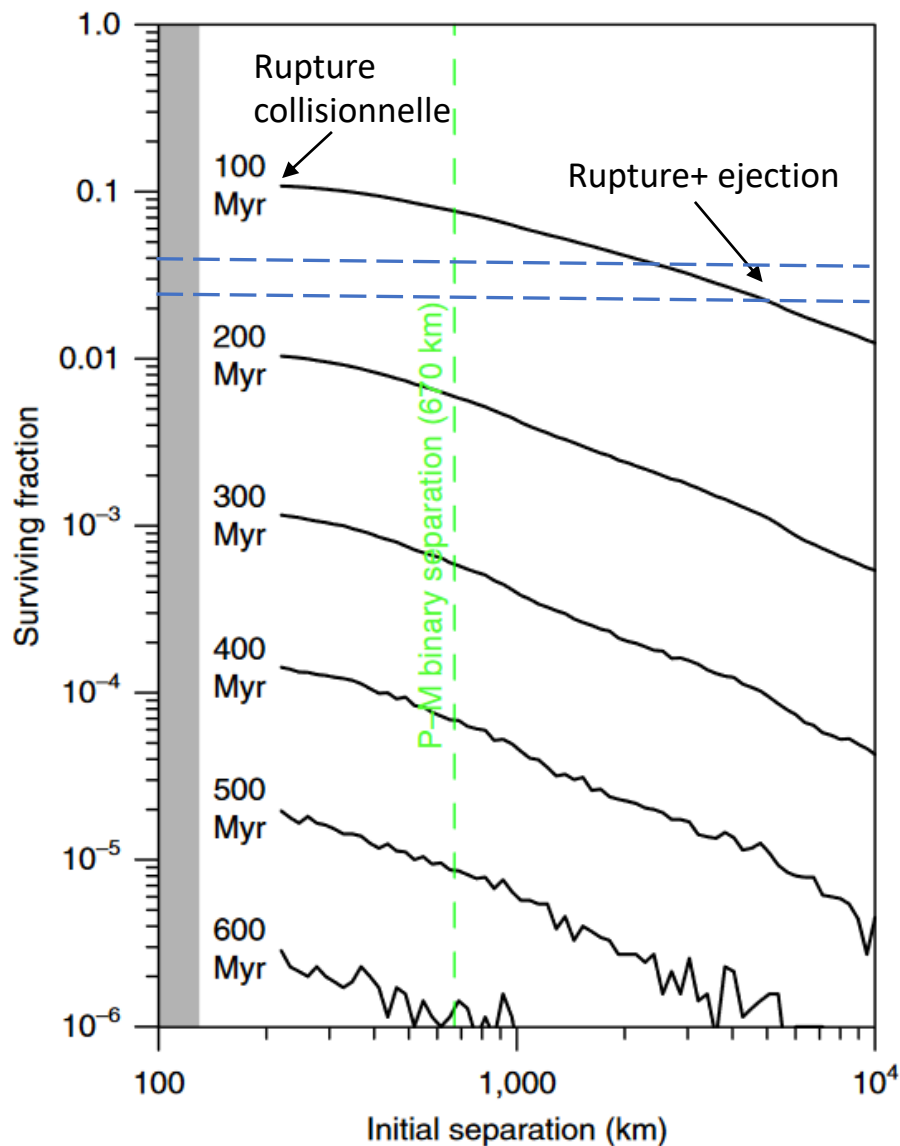


Le disque progéniteur de la population chaude ($a < 30$ ua) était massif ($20-30M_{\oplus}$) avant l'instabilité et, par conséquent, les collisions étaient nombreuses et relativement violentes:
Un objet de $D > 100$ km était impacté par un projectile $d > 10$ km tous les ~ 10 My, à une vitesse de $\sim 0,4$ km/s (Morbidelli et Rickman, 2015)



Quand l'instabilité a-t-elle eu lieu? La contrainte des binaires transneptuniens

Survie des binaires de $D = 100\text{km}$



Les collisions peuvent détruire une binaire, soit en pulvérisant une des composantes, soit en donnant un impulse qui éjecte le satellite sur une orbite hyperbolique

Parmi les 25 Troyens de Jupiter le plus gros, Patroclus-Menoetius est le seul binaire. En supposant que tous les objets du disque transneptunien étaient comme P-M, la probabilité de survie doit donc être $\sim 4\%$

La fréquence des binaires parmi la population chaude avec $50 < D < 100\text{ km}$ et $1.000 < a_B < 10.000\text{ km}$ est 2,5%

Le disque doit avoir été dispersé dans le premier $\sim 100\text{ My}$

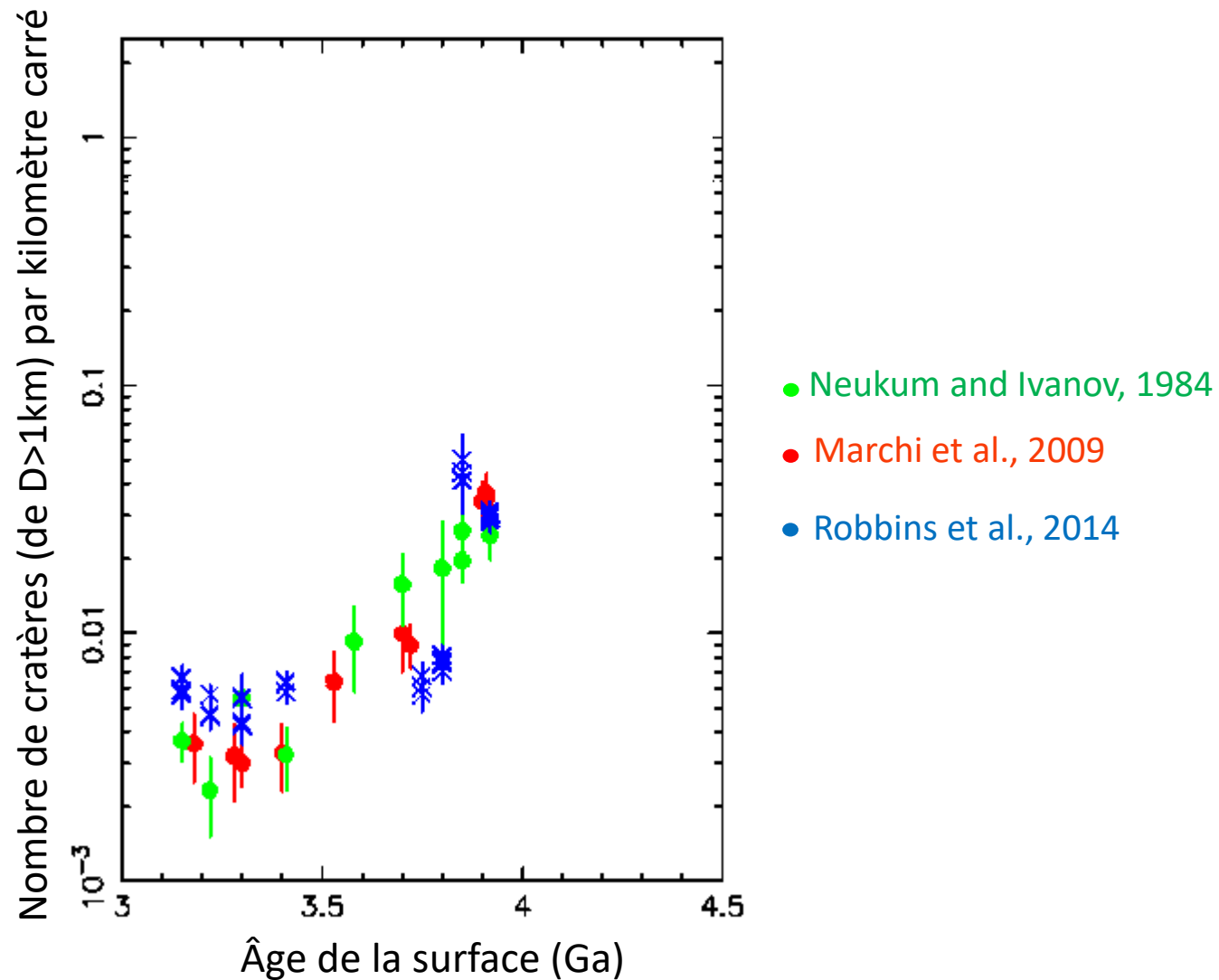
Cette contrainte est incompatible avec le cataclysme lunaire

Nesvorny et al. (2018, Nature Astronomy)



Peut-on expliquer le bombardement lunaire sans instabilité tardive?

Le comptage de cratères sur les surfaces lunaires d'âge connue grâce à la datation des échantillons d'Apollo (tous plus jeunes que 3,9Ga) fournit la contrainte la plus robuste sur l'intensité du bombardement tardif

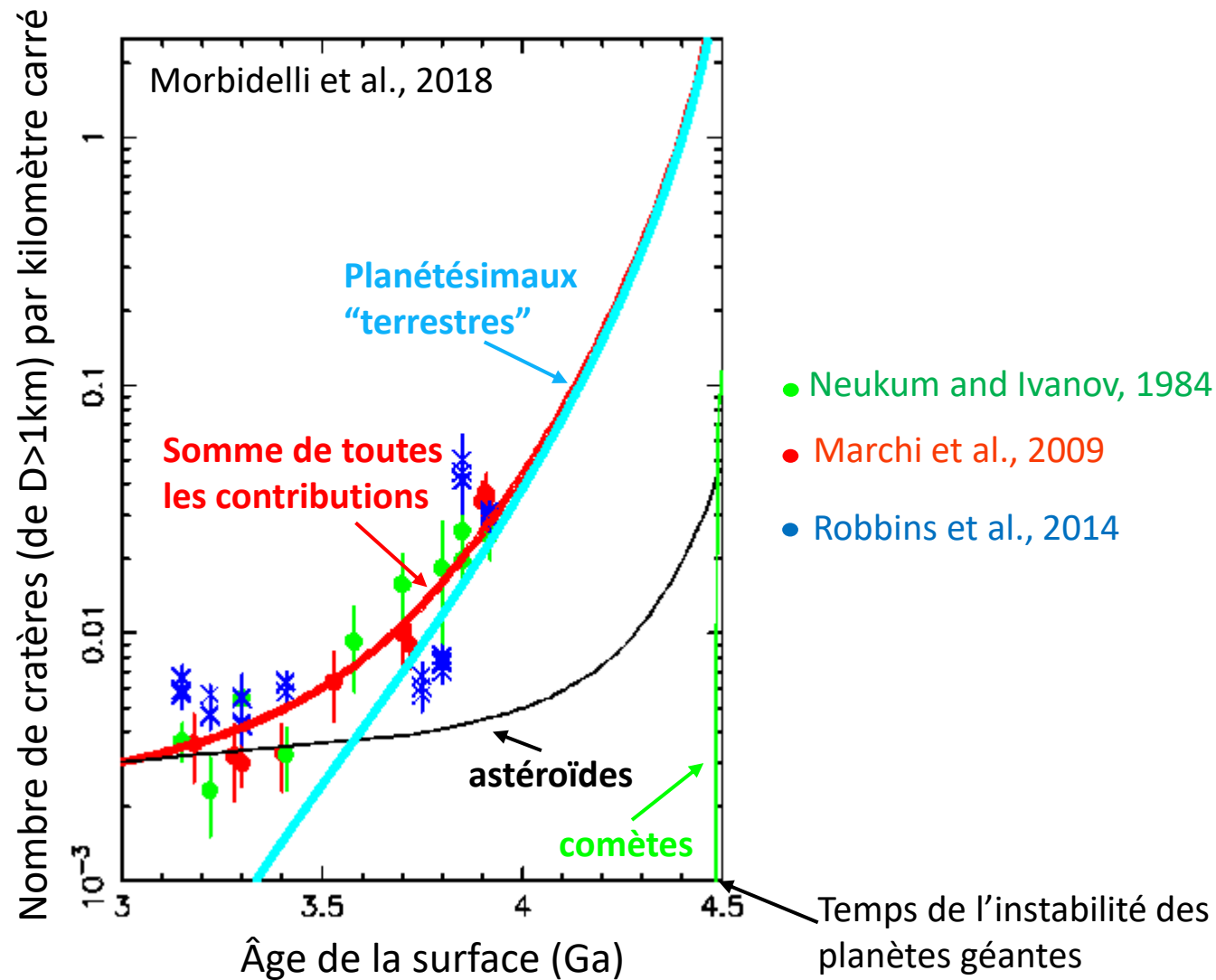




Peut-on expliquer le bombardement lunaire sans instabilité tardive?

Le comptage de cratères sur les surfaces lunaire d'âge connue grâce à la datation des échantillons d'Apollo (tous plus jeunes que 3,9Ga) fournit la contrainte la plus robuste sur l'intensité du bombardement tardif

Les planétésimaux "terrestres" sont ceux formés dans la région des planètes telluriques et non incorporés par les planètes. Leur distribution de taille est supposée être comparable à celle des astéroïdes. Leur décroissance temporelle est donnée par les simulations numériques. Leur nombre total est incertain, mais celui utilisé ici est compatible avec les simulations de formation des planètes telluriques (Nesvorny et al., 2023)

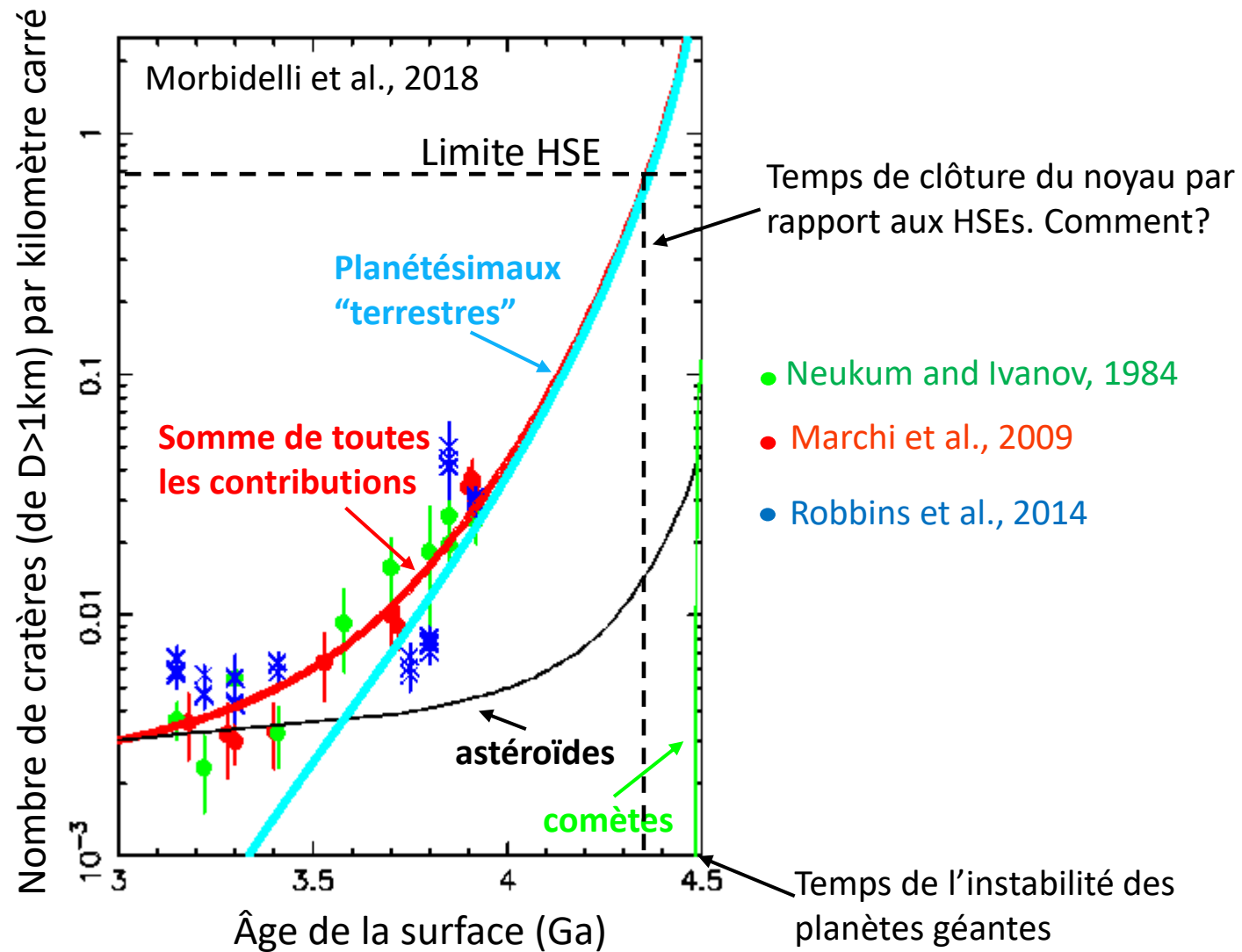




Peut-on expliquer le bombardement lunaire sans instabilité tardive?

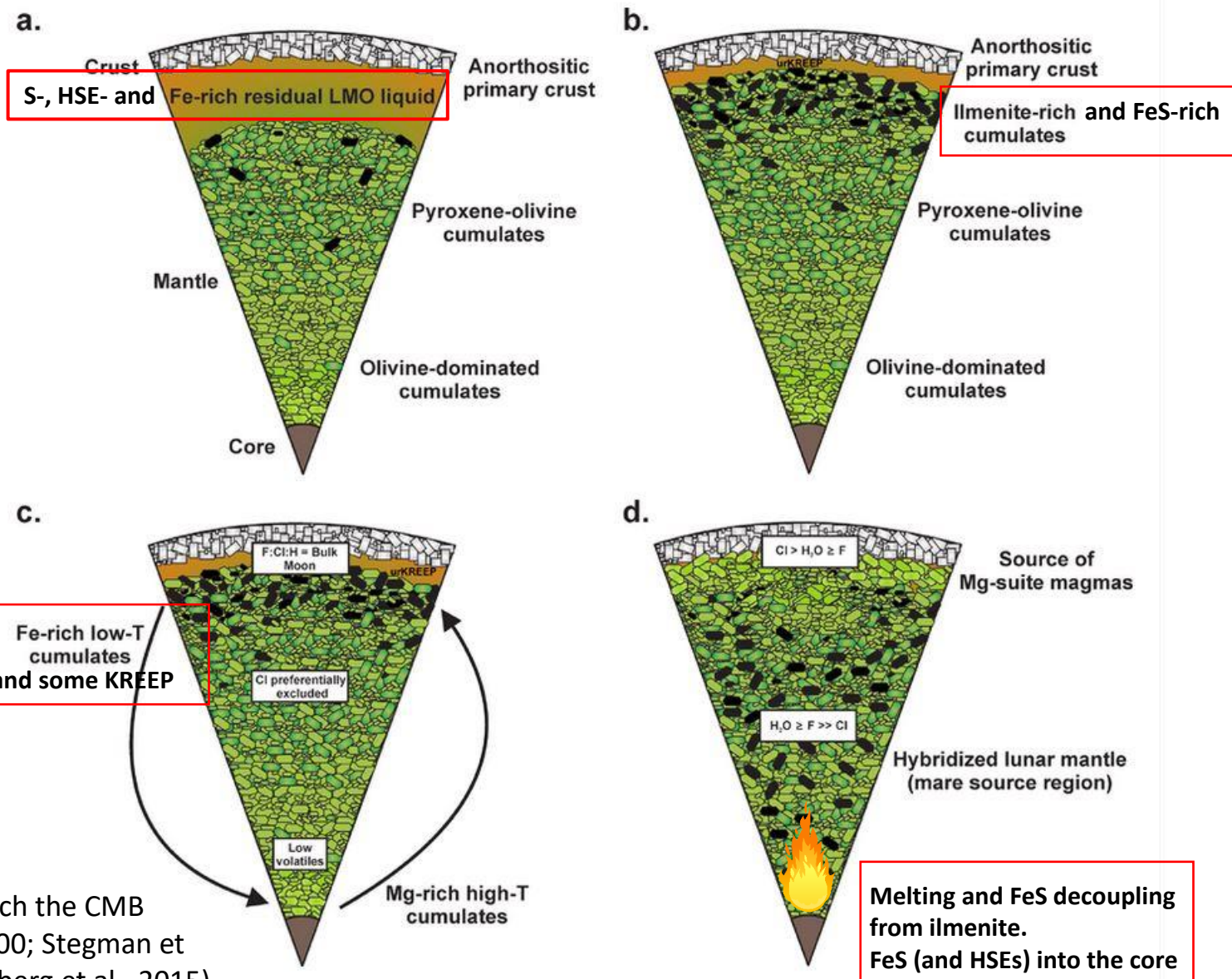
Les éléments hautement sidérophiles (HSE): Ir, Pt, Pd, Au, Os, sont séquestrés dans le noyau de fer quand celui-ci se forme. Leur présence dans le manteau et la croûte contraint la quantité de matière accrétée depuis la formation du noyau.

Dans ce scénario de bombardement décroissant, la quantité de matière apportée à la Lune excède significativement celle compatible avec la faible abondance des HSEs dans le manteau et dans la croûte lunaires (Ryder, 2002)





La cristallisation du manteau lunaire et son retournement



Possibility to reach the CMB
(Zhong et al., 2000; Stegman et al., 2003; Scheinberg et al., 2015)
(Briaud et al., Nature, 2023)



Une cristallisation tardive du manteau lunaire explique le déficit en HSEs

L'abondance des HSEs terrestres suggère que la Lune a accrété 20x plus de masse que celle indiquée par ses propres HSEs

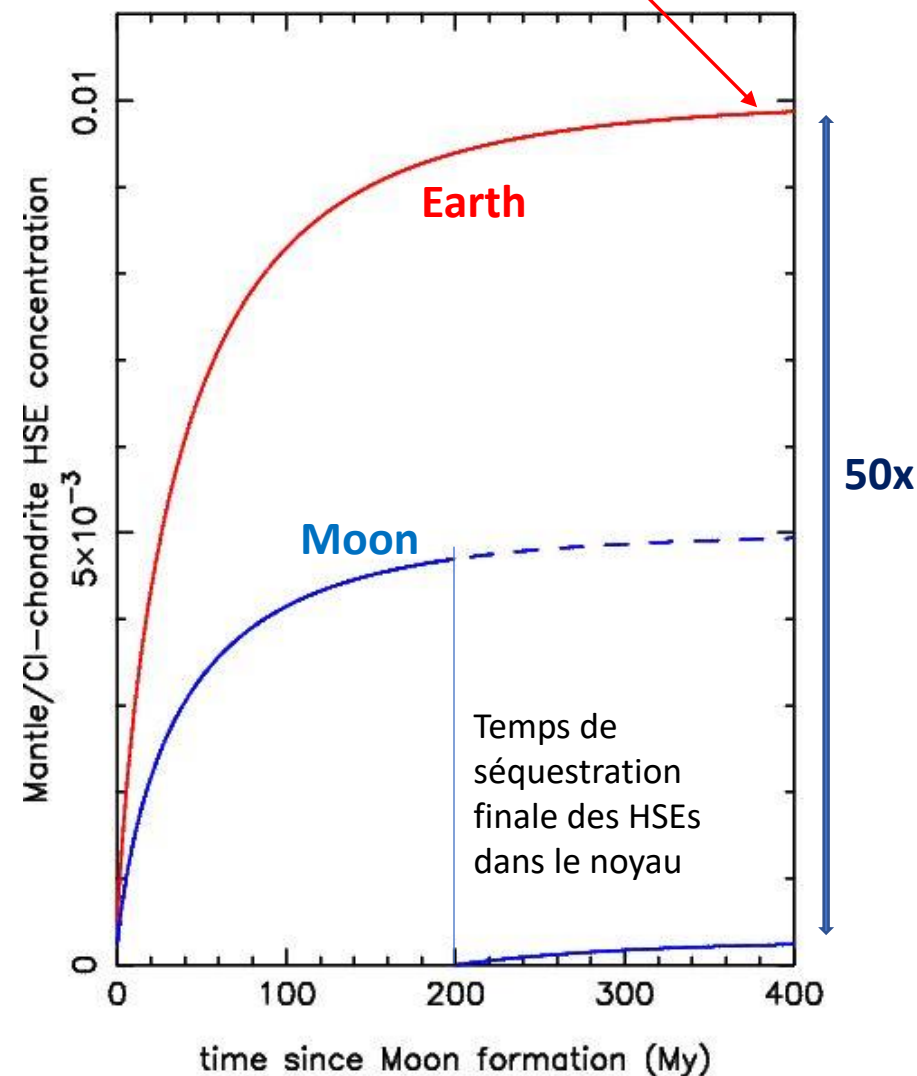
Selon Elkins-Tanton et al., 2011, la cristallisation du manteau lunaire aurait pu perdurer jusqu'à 100-200Ma après la formation de la Lune.

Nimmo et al. (2024) proposent que le manteau lunaire ait refondu partiellement vers 4,35Ga, quand la Lune a traversé une résonance pendant sa migration et son orbite est devenue temporairement excentrique

Les HSEs sont séquestrés dans le noyau jusqu'à la cristallisation finale du manteau, ce qui explique le déficit lunaire.

Dans cet exemple, la Lune reçoit 1/20 de la matière accrétée par la Terre et en retient 20% (le reste étant perdu dans l'espace lors des impacts)

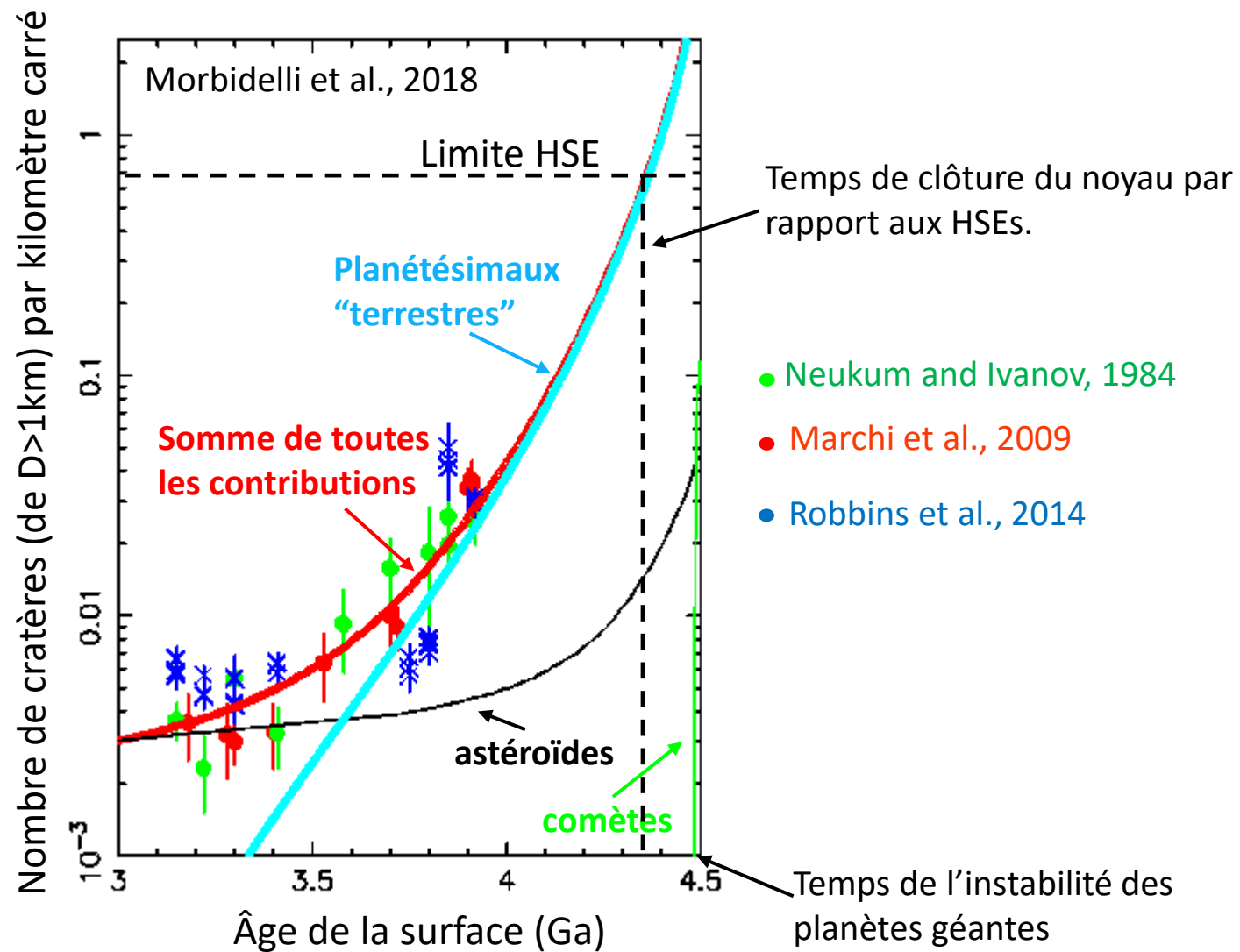
La concentration des HSEs retombe à zéro lors de la cristallisation finale du manteau, ici à 200Ma





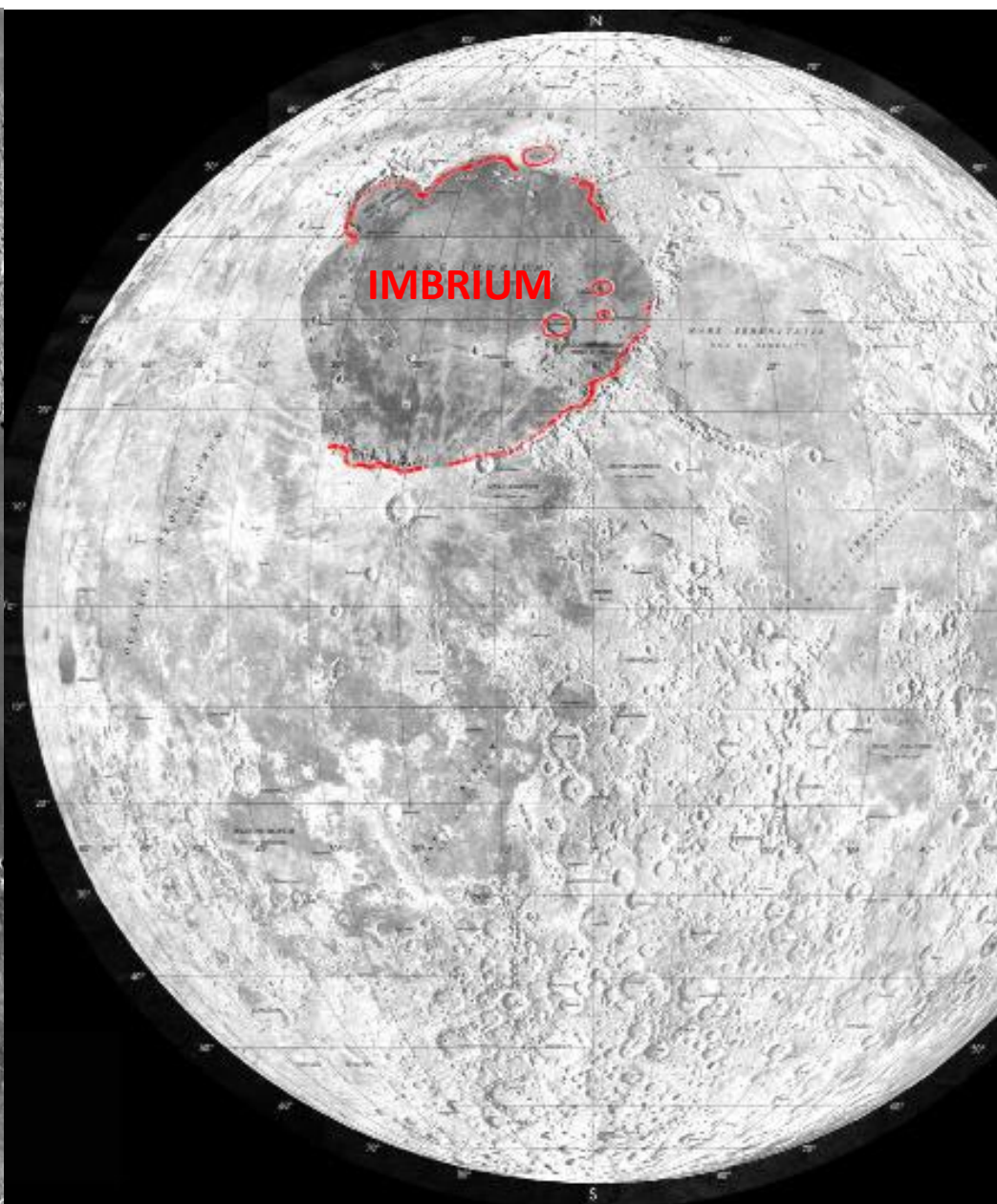
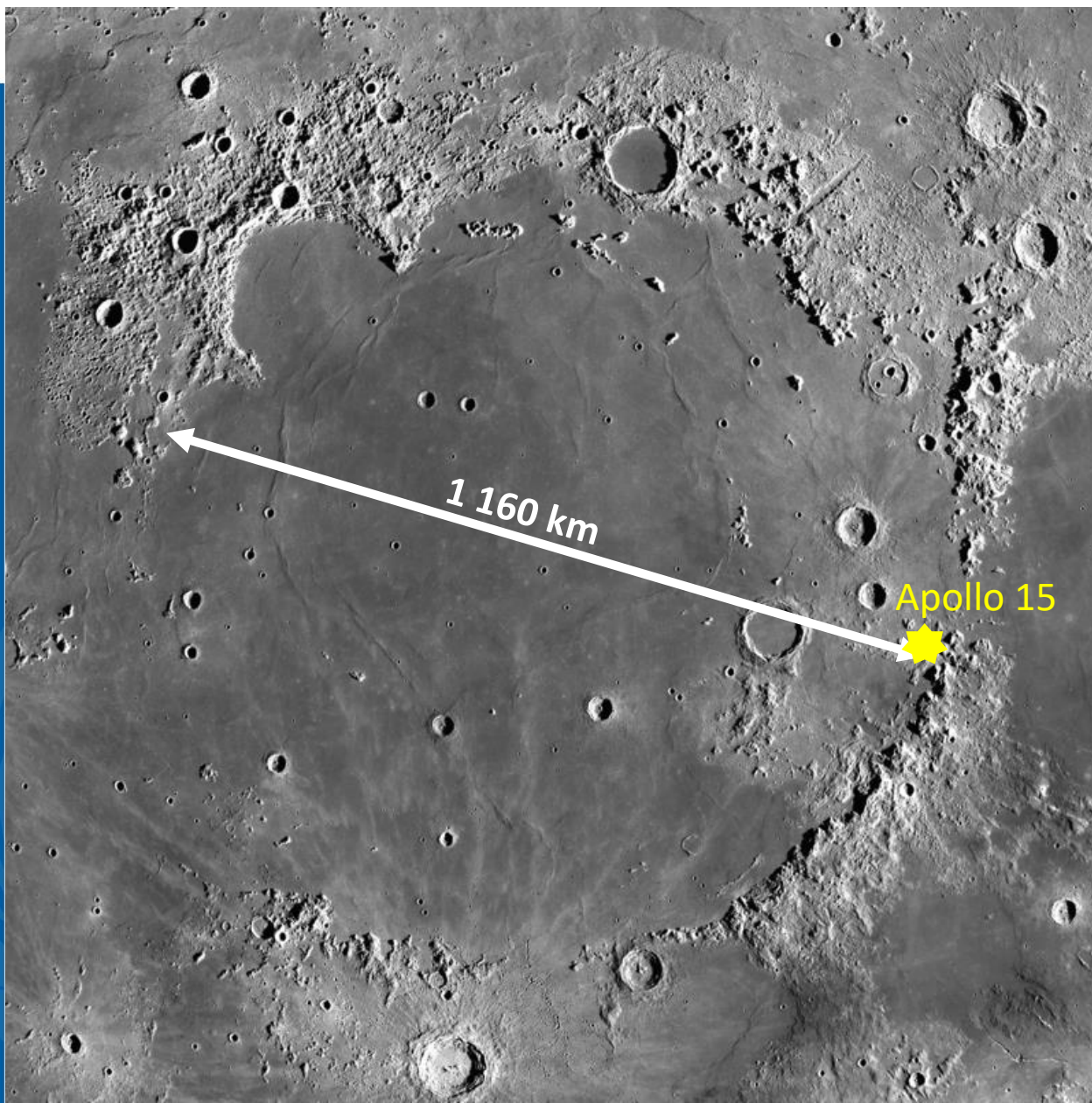
Une cristallisation tardive du manteau lunaire explique le déficit en HSEs

La concentration de HSEs dans le manteau lunaire et dans le manteau terrestre sont compatibles avec un profil de bombardement sans cataclysme, dominé par les planétésimaux "terrestres"





Formation tardive des bassins d'impact





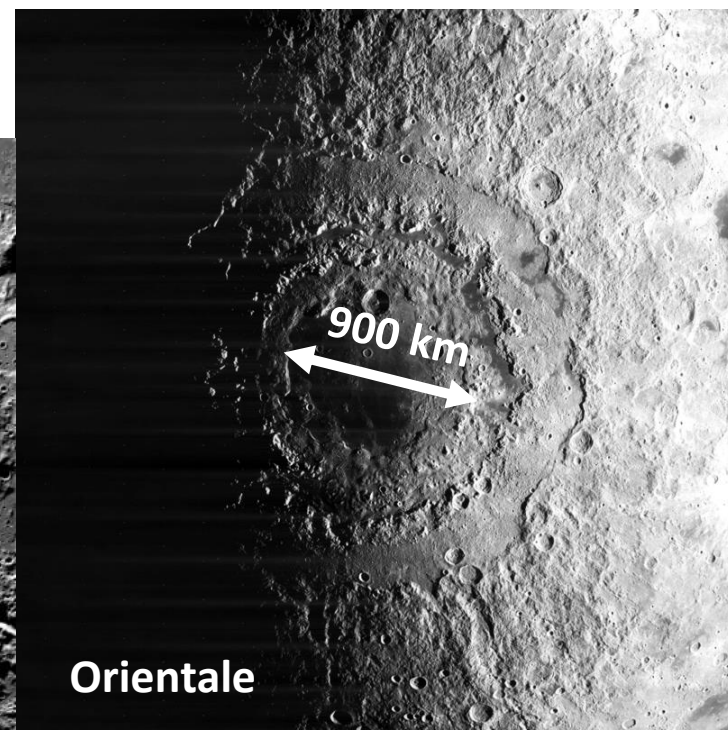
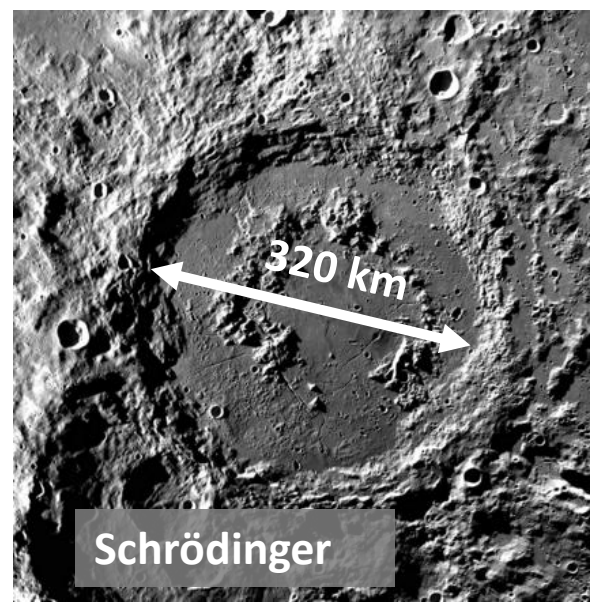
Formation tardive des bassins d'impact

Carte d'identité du bassin Imbrium:

- Diamètre: $D = 1\,160$ km
- Age: 3,92 Ga
- Diamètre du projectile: $d \geq 100$ km; Miljković et al. 2013; Schultz & Crawford 2016; Miljković et al. 2021

Seulement deux autres bassins sont plus jeunes qu'Imbrium (par stratigraphie):

- Orientale: $D = 900$ km; $d \sim 50\text{--}64$ km
- Schrödinger: $D = 320$ km; $d \sim 20$ km





Formation tardive des bassins d'impact

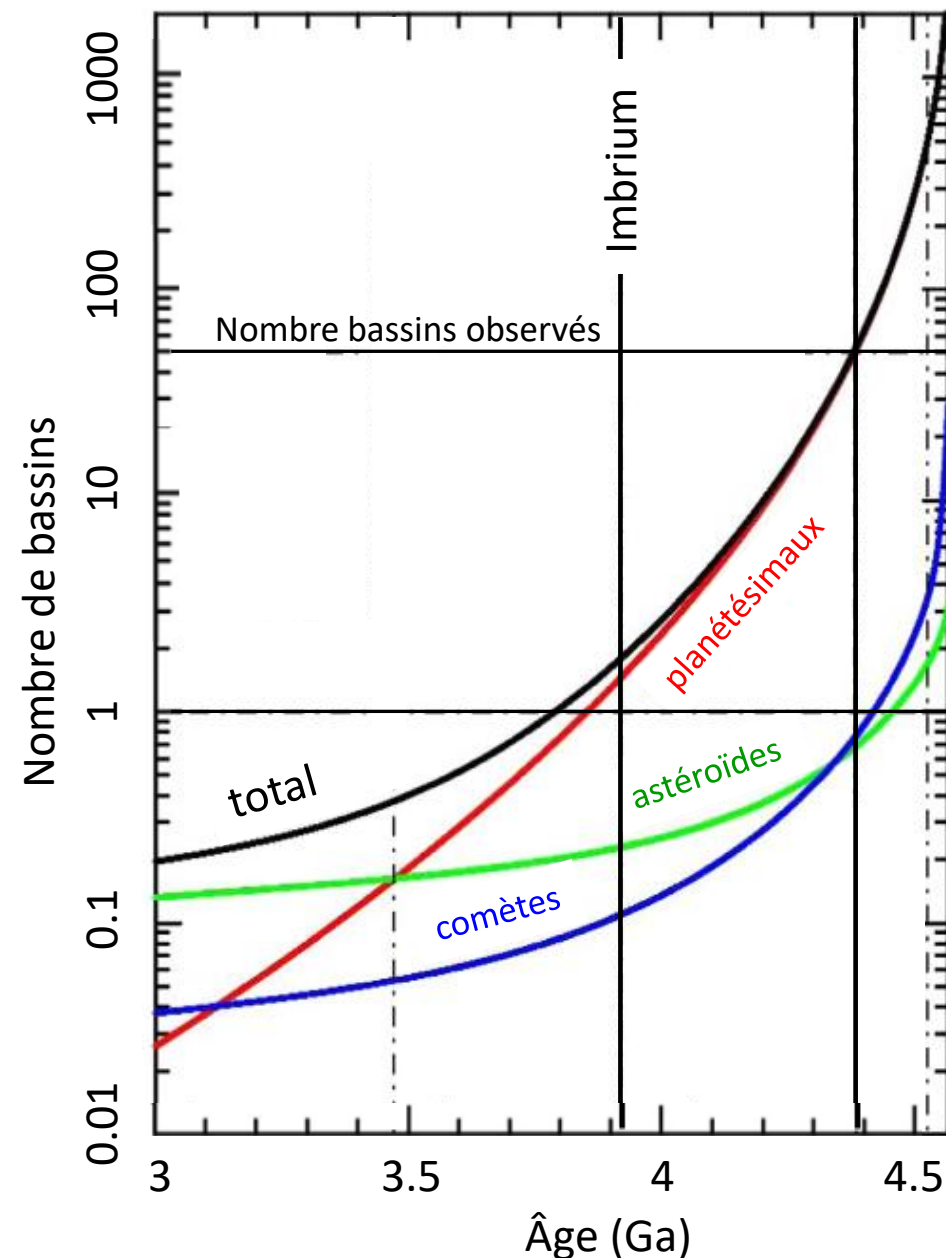
Nombre attendu de bassins en fonction de l'âge dans un modèle avec instabilité précoce.

Il suppose une distribution de tailles des planétésimaux "terrestres" analogue à celle des astéroïdes et que un projectile de $d > 20$ km produit un bassin de $D > 300$ km.

2 bassins sont attendus avec un âge comparable ou inférieur à celle d'Imbrium

Imbrium, avec un projectile $d \geq 100$ km a une probabilité de 25% de se former à un âge inférieur à 3,92 Gy

Nesvorny et al., ApJ, 2022.





En résumé:

- Le bombardement lunaire, y compris sa phase tardive, ne nécessite pas que l'instabilité des planètes géantes soit tardive
- Pas de preuve "forte" de l'existence d'un cataclysme lunaire
- La survie de Patroclus-Menoetius et celle des binaires dans la population chaude de la ceinture de Kuiper contraignent l'instabilité à avoir eu lieu dans les premiers 100 millions d'années

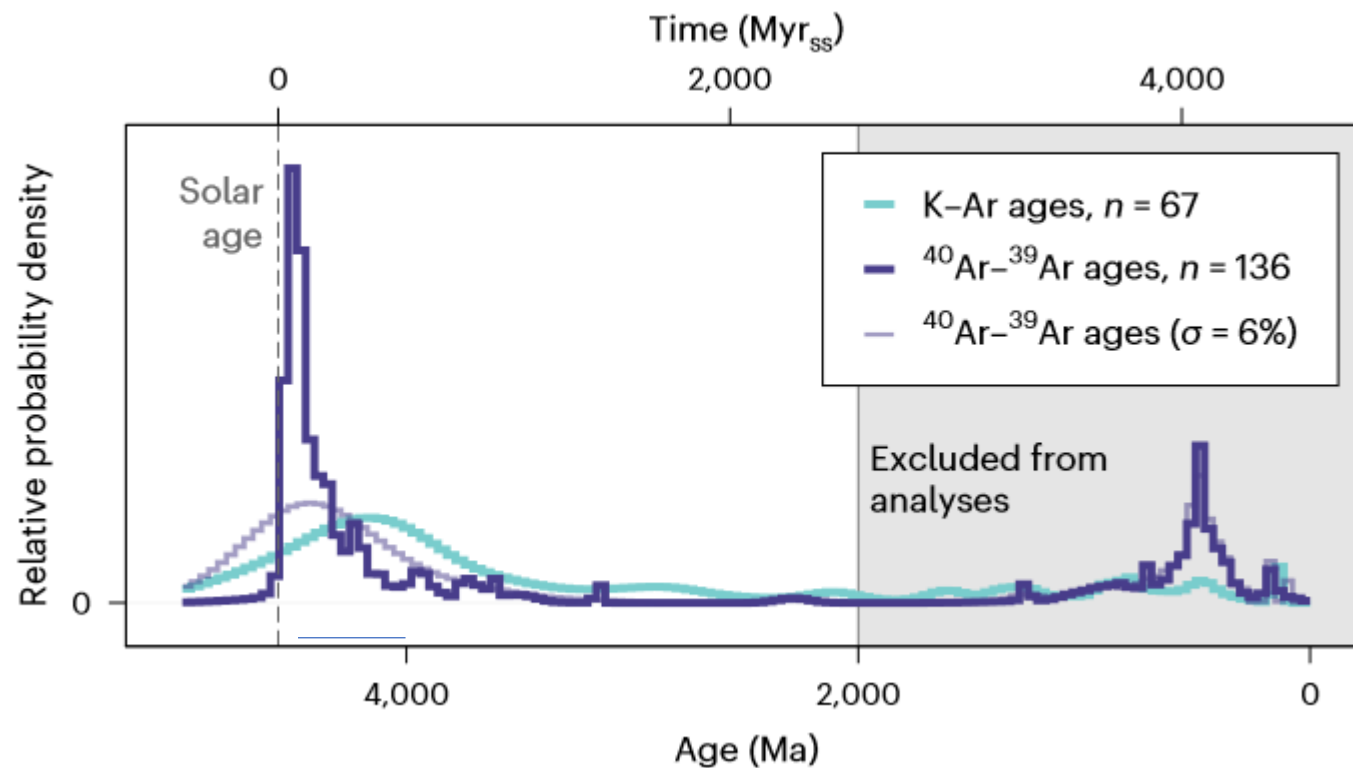
Est-t-il possible de dater plus précisément l'instabilité dans l'intervalle 0 – 100 Ma?



Ce que disent les météorites

Edwards et al., 2024, Nature

Distribution des âges de choc mesurés sur les chondrites ordinaires et à enstatite

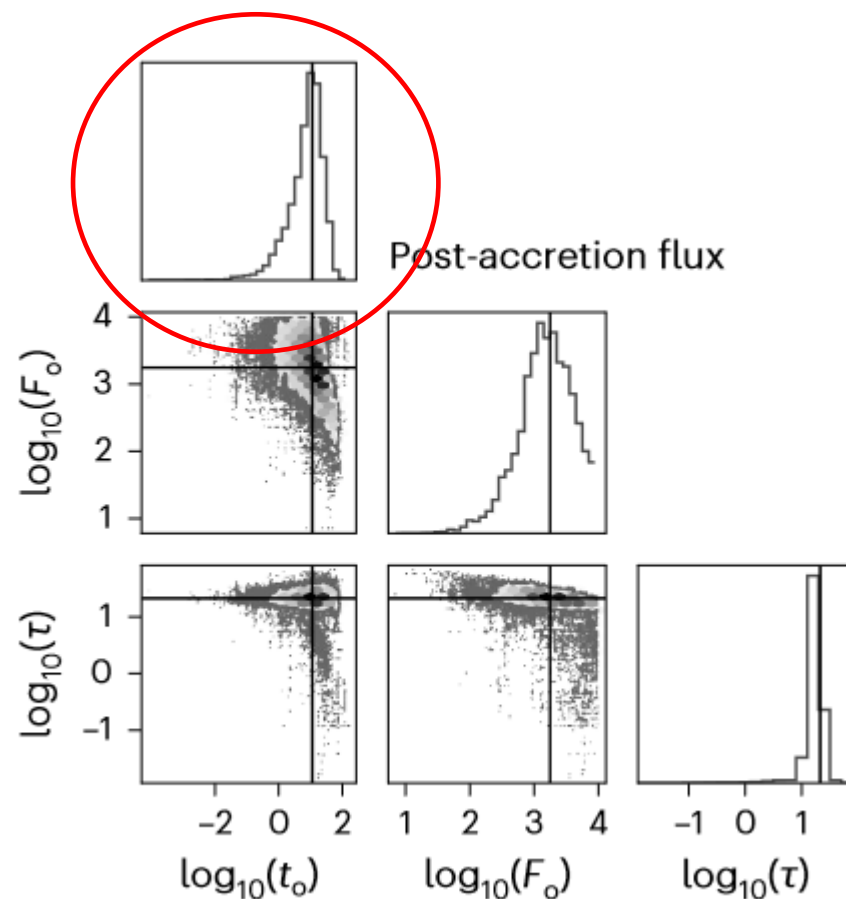




Ce que disent les météorites

Edwards et al., 2024, Nature

Un modèle de type Monte Carlo, qui suppose un flux d'impacts se déclenchant t_0 (Ma) après le début du Système solaire (4,568 Ga), avec une intensité F_0 par rapport au flux actuel, et décroissant exponentiellement: $F(t) = F_0 e^{-(t-t_0)/\tau}$

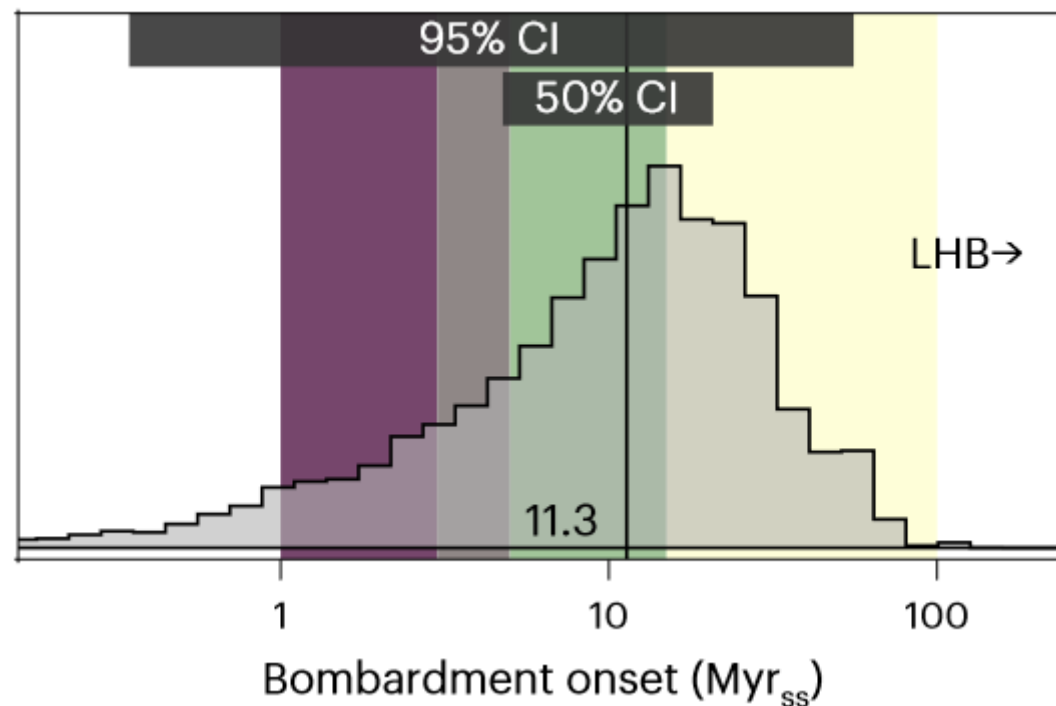




Ce que disent les météorites

Edwards et al., 2024, Nature

Un modèle de type Monte Carlo, qui suppose un flux d'impacts se déclenchant t_0 (Ma) après le début du Système solaire (4,568 Ga), avec une intensité F_0 par rapport au flux actuel, et décroissant exponentiellement: $F(t) = F_0 e^{-(t-t_0)/\tau}$



Si la date de déclenchement la plus probable est 11,3 Ma, tout l'intervalle 0 – 100 Ma est admissible

De plus: ce modèle ne contemple pas une double composante du flux d'impacts: celle due aux planétésimaux "terrestres" pour laquelle $t_0=0$ et celle induite par l'instabilité à $t=t_0$. Il sous-estime donc t_0



Ce que disent les météorites

RESEARCH

Avdellidou *et al.*, *Science* **384**, 348–352 (2024) 19 April 2024

ASTEROIDS

Dating the Solar System's giant planet orbital instability using enstatite meteorites

Chrysa Avdellidou^{1,2*}, Marco Delbo^{1,2}, David Nesvorný³, Kevin J. Walsh³, Alessandro Morbidelli^{1,4}

The giant planets of the Solar System formed on initially compact orbits, which transitioned to the current wider configuration by means of an orbital instability. The timing of that instability is poorly constrained. In this work, we use dynamical simulations to demonstrate that the instability implanted planetesimal fragments from the terrestrial planet region into the asteroid main belt. We use meteorite data to show that the implantation occurred >60 million years (Myr) after the Solar System began to form. Combining this constraint with a previous upper limit derived from Jupiter's trojan asteroids, we conclude that the orbital instability occurred 60 to 100 Myr after the beginning of Solar

Basé sur la supposition que l'astéroïde Athor est le corps parent des météorites à enstatite, sur la base d'analogies spectroscopiques.

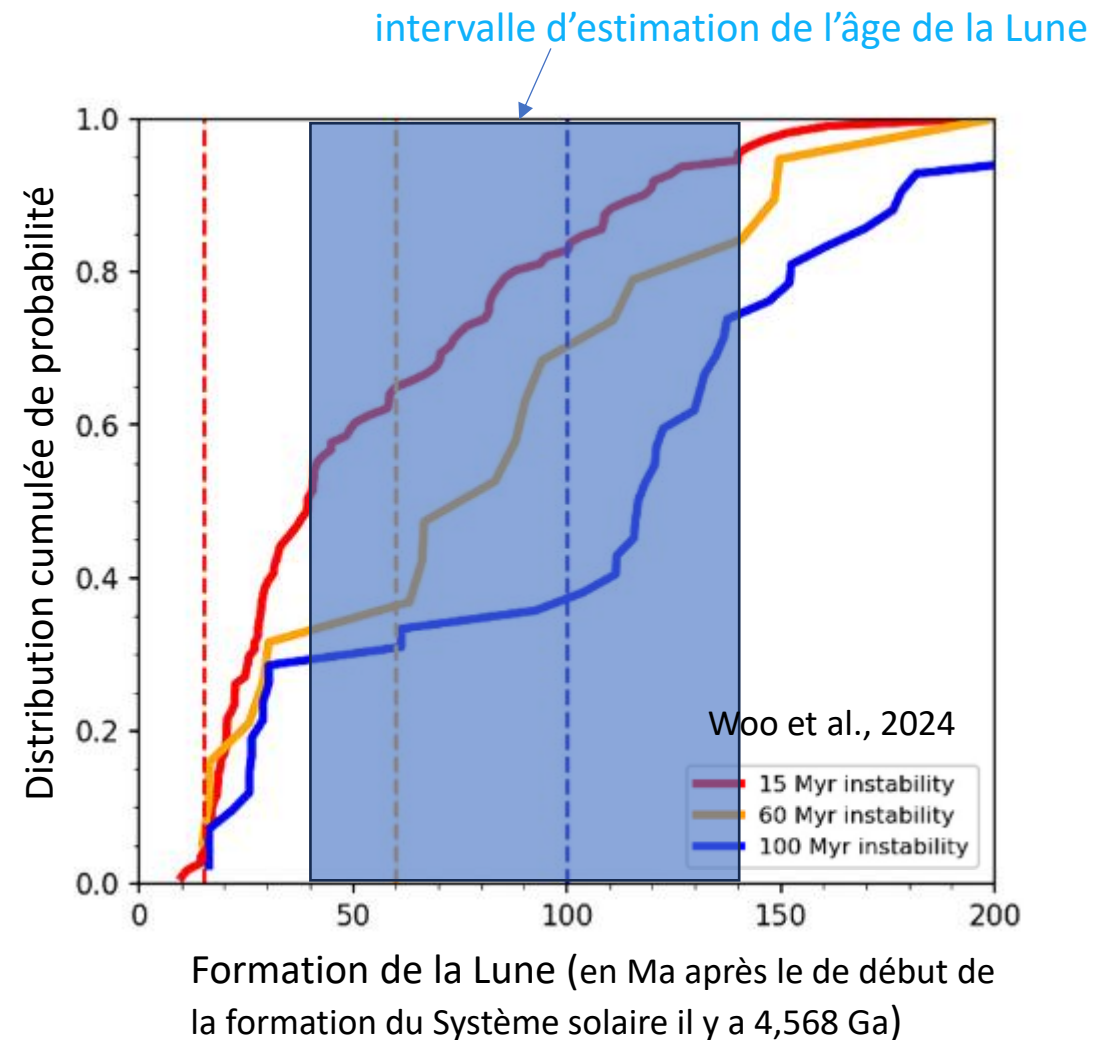
Cette supposition est remise en question par Broz et al. (2024)



Relation entre l'instabilité et la formation de la Lune

Il y a une faible dépendance entre l'âge de formation de la Lune et le temps de l'instabilité....
...et on ne sait pas précisément quand la Lune s'est formée !

Pas de conclusions





Le bombardement cométaire

La chimie de l'atmosphère terrestre porte les traces d'un bombardement cométaire, sans doute déclenché par l'instabilité des planètes géantes.

Voir le séminaire de Sarah Joiret le 4 décembre

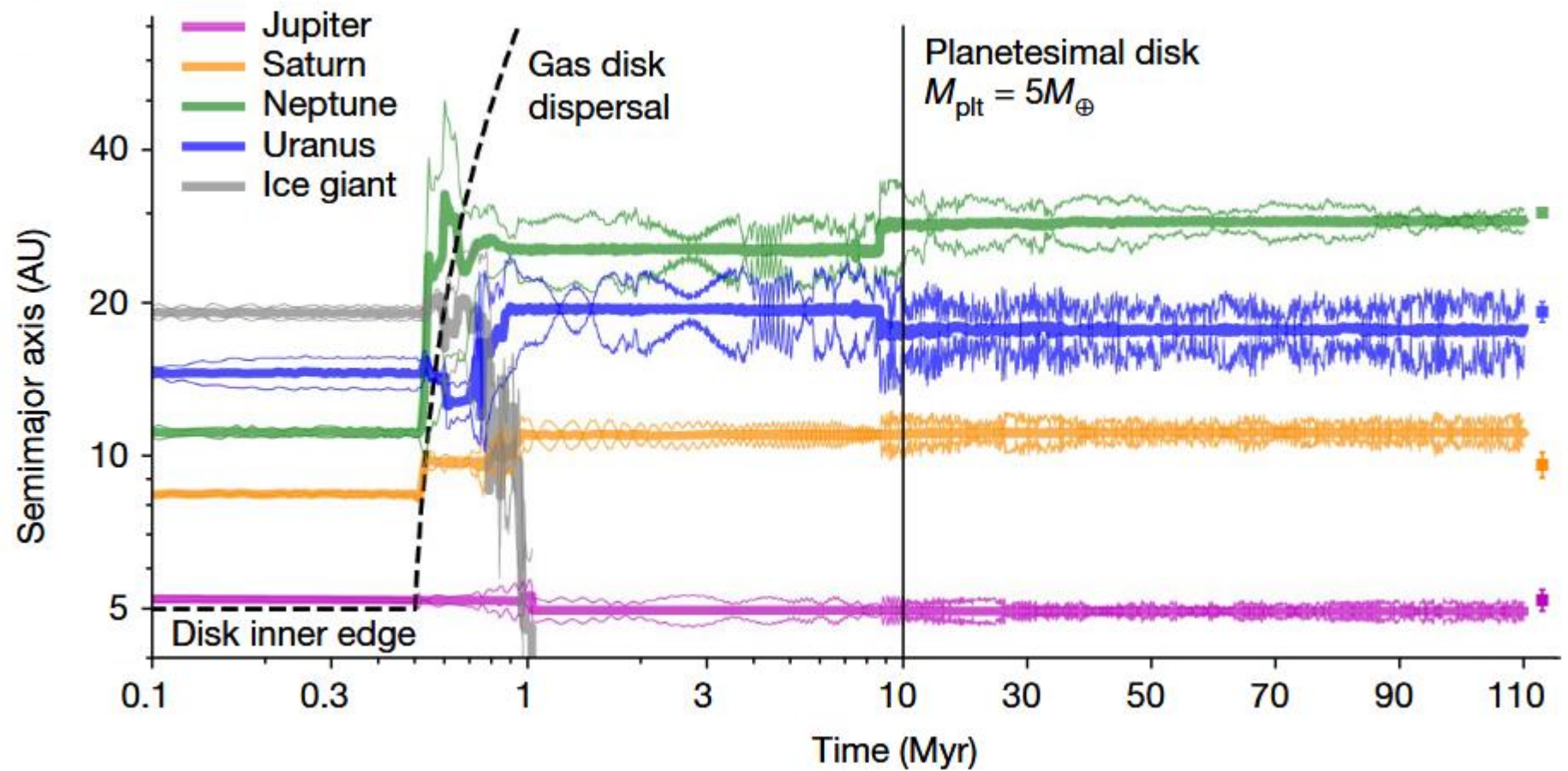


Une instabilité déclenchée par la disparition du gaz?

Liu et al., 2022, proposent que l'instabilité se soit déclenchée lors de l'ouverture d'une cavité centrale du disque due à la photo-évaporation.

Problèmes techniques sur la migration des planètes; difficulté à implanter des planétésimaux dans le nuage d'Oort en présence du gaz.....

Malgré ces défauts il reste cependant vrai que l'instabilité peut se déclencher rapidement à la disparition du gaz





A retenir

- Si l'instabilité des planètes géantes semble incontournable, on ne sait toujours pas quand elle a eu lieu
- Les âges de choc des roches Lunaires ont été interprétées pendant longtemps comme l'indication d'une recrudescence du bombardement lunaire 600 Ma après la formation de la Lune, i.e. d'une instabilité tardive des planètes géantes
- Cependant les nouvelles mesures d'âges de choc de minéraux individuels montrent que le bombardement était intense aussi avant cette date
- Finalement, l'histoire de la cratérisation lunaire (nombre de cratères et de bassins en fonction du temps) peut s'expliquer par les collisions portées par la population des planétésimaux formés dans la région terrestre et ne nécessite pas l'apport de nouveaux projectiles par une instabilité tardive
- Le déficit en HSE et en nombre de bassins par rapport aux prédictions de ce scénario peut s'expliquer si le manteau lunaire a terminé sa cristallisation (ou a été partiellement refondu) il y a 4,35Ga
- La survie des objets binaires dans la population chaude de la ceinture de Kuiper et du couple Patroclus-Menoetius implique que l'instabilité a eu lieu pendant les premiers 100 Ma de vie du Système solaire
- On ne sait toujours pas déterminer le moment de l'instabilité entre la disparition du gaz et 100 Ma