Leçon N. 2 - 28 Octobre 2026

Alessandro
MORBIDELLI

Chaire
Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

La Lune et sa formation

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Plan du cours

Partie I: Introduction
- carte d'identité de la Lune
- idées anciennes sur sa formation
- formation dans un impact géant

Partie II: L'impact géant – scénario canonique
- dynamique de la collision
- formation d'un disque circumterrestre
- formation de la Lune

Partie III: La crise isotopique
- nouveaux scénarios d'impact

Partie IV: L'équilibration isotopique Terre – disque proto-lunaire
- le modèle du *synestia*

Partie V: conséquences sur la croissance et différentiation de la Terre

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Partie I:
Introduction

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

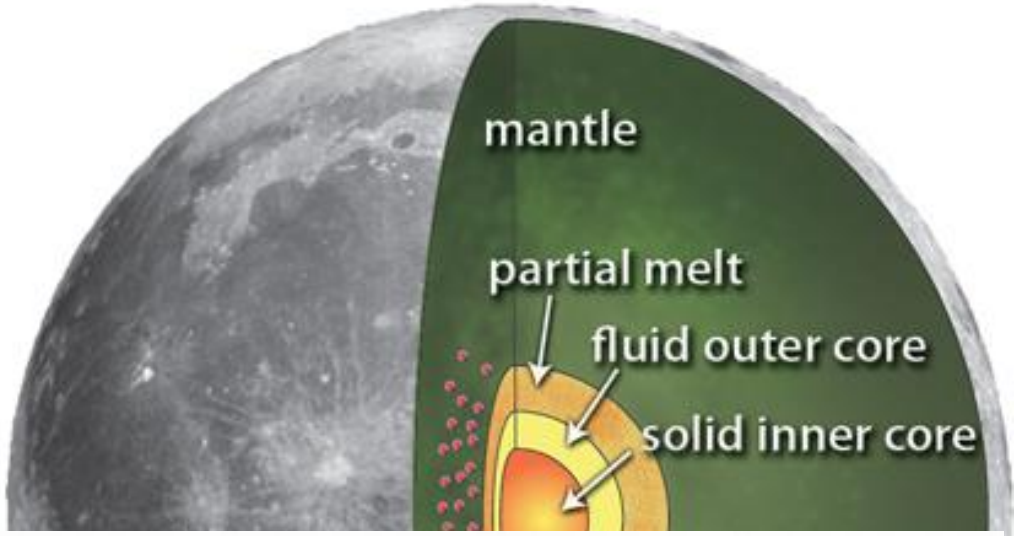
Carte d'identité de la Lune

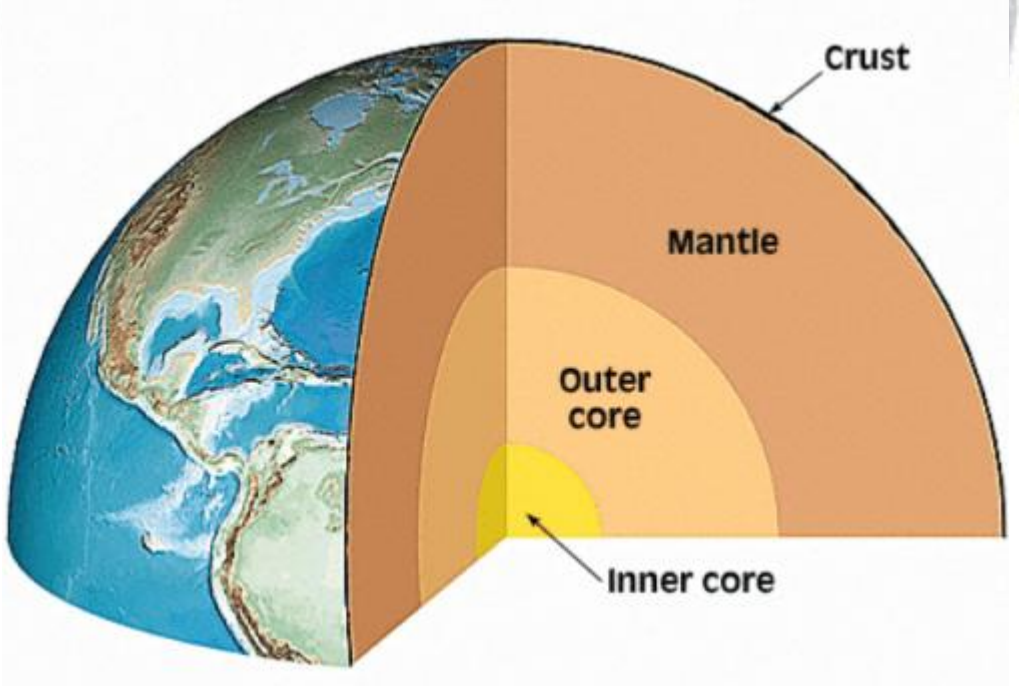
Demi-grand axe orbital: 384,400 km
Excentricité: 0,055
Inclinaison par rapport à l'écliptique: 5,1°
Inclinaison par rapport à l'équateur terrestre: 18°-28°

Masse: 0.0123 masses terrestres
Rayon: 1737 km, 0,27 rayons terrestres
Densité moyenne: 3350kg/m^3, 60% de la densité terrestre

La densité serait de 73% de celle de la Terre si la Lune avait la même composition, à cause de la moindre gravité (Christensen, 2009)

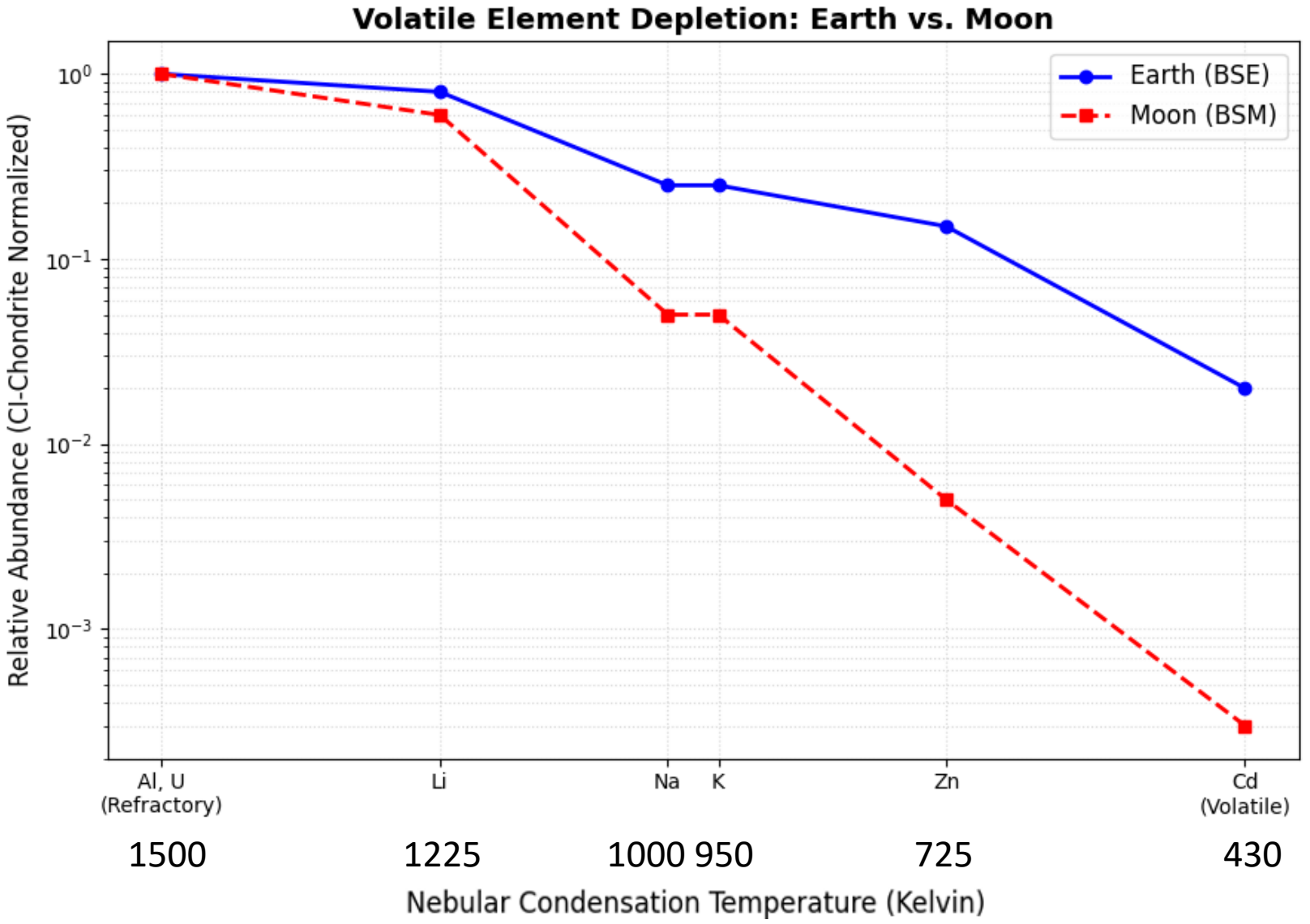
Sa plus faible densité révèle le déficit en éléments lourds, i.e. en fer





COLLÈGE DE FRANCE
1530

Carte d'identité de la Lune

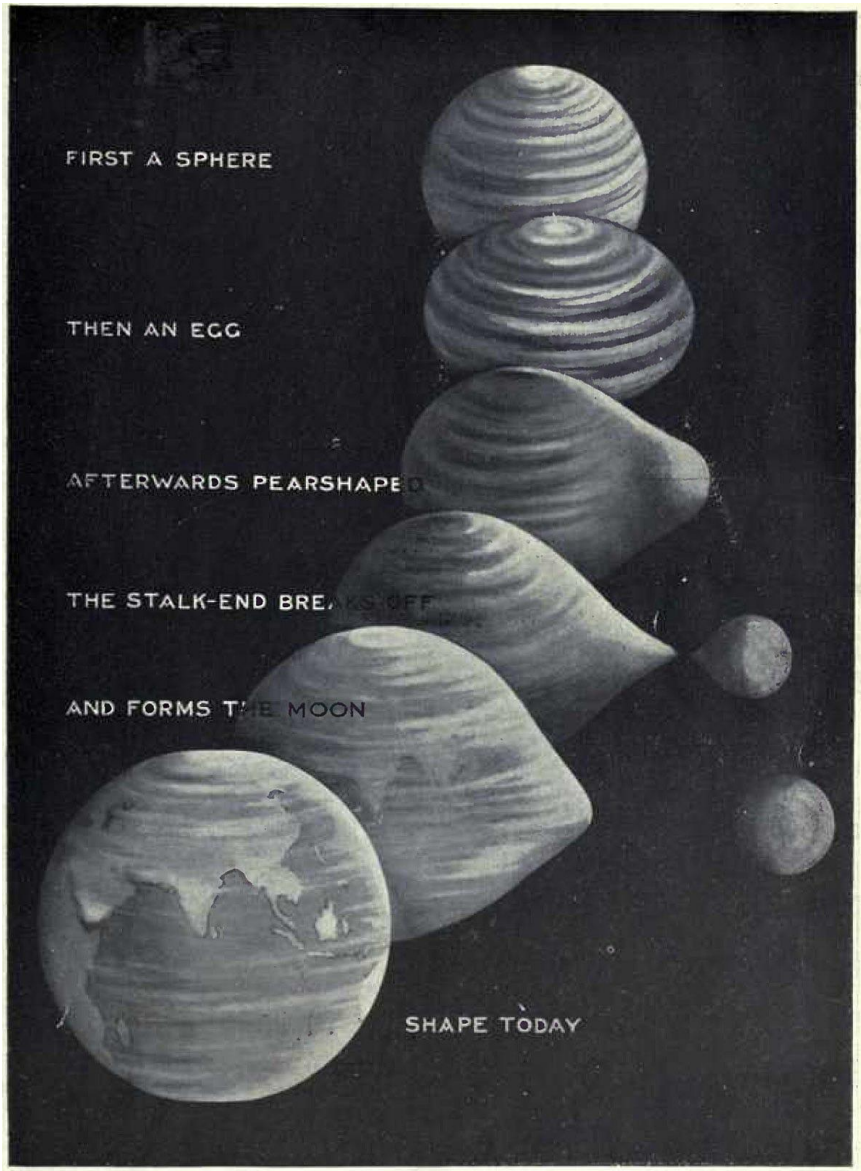


Le Zn lunaire est caractérisé par un fractionnement isotopique dépendent de la masse par rapport au Zn terrestre, ce qui suggère que le déficit en éléments volatiles de la Lune est dû à leur perte dans l'espace (Paniello et al., 2012; Day et Moynier, 2014)

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Hypothèses historiques sur l'origine de la Lune

- Co-accrétion (E. Roche, 1873)
  - Pourquoi une telle différence de composition? Pourquoi le système Terre-Lune est unique?
- Capture (T.J.J. See, 1909)
  - Comment dissiper l'énergie pour capturer en orbite un objet provenant de l'espace interplanétaire? Comment/où un corps si pauvre en Fe aurait pu se former?
- Ejection centrifuge (G. Darwin, 1879)
  - Explique l'appauvrissement en fer de la Lune, dont la composition serait similaire à celle du manteau terrestre; cohérent avec l'éloignement de la Lune et le ralentissement de la rotation terrestre dus aux marées; incohérent avec le moment cinétique totale du système Terre-Lune, qui à priori devrait être conservé.



By permission of] A THEORY OF THE MOON'S FORMATION. [L. E. A.

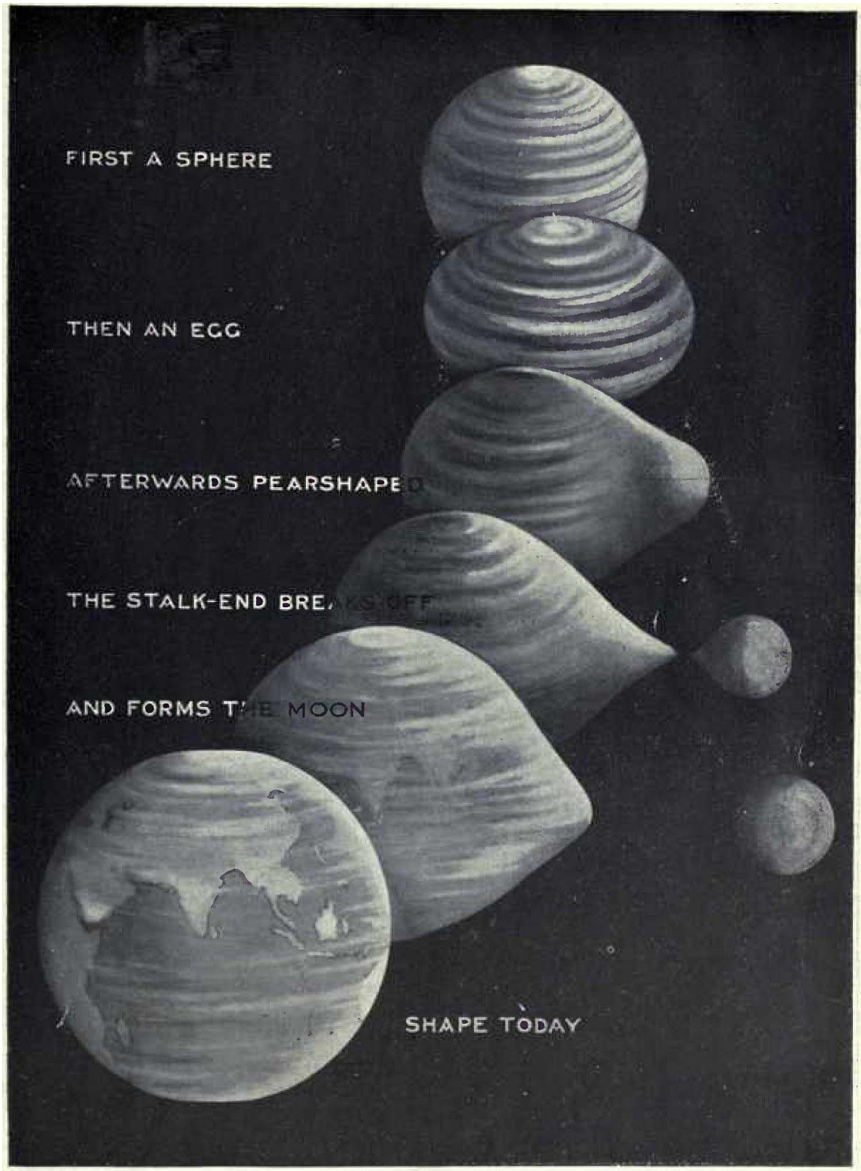
The problem of the Moon's origin has always had a curious fascination for astronomers. It is highly probable that the Earth and the Moon were once combined in one and the same body. This body would cool, and, as it contracted, its rate of rotation would correspondingly increase until the Moon was thrown into space. The tides would act as a drag on the spinning of the Earth and this loss of energy would be transferred to the Moon, which was set whirling round our Globe at an ever-increasing distance. This retreat from the Earth is even now going on.

Hypothèses historiques sur l'origine de la Lune

Pour une éjection centrifuge la Terre devait tourner en 1,5h
Si on met la Lune et la Terre ensemble et on impose le même moment cinétique, la rotation serait en 4h

Darwin résolvait le problème en invoquant:

- Vibration naturelle : un corps fluide ayant la densité de la Terre présente une période d'oscillation fondamentale naturelle d'environ 2 heures.
- Forçage solaire : si la jeune Terre effectuait une rotation toutes les 4 heures, les marées solaires frappaient la planète toutes les 2 heures.
- Amplification des oscillations par résonance et éjection éventuelle



By permission of] A THEORY OF THE MOON'S FORMATION. [L. E. A.

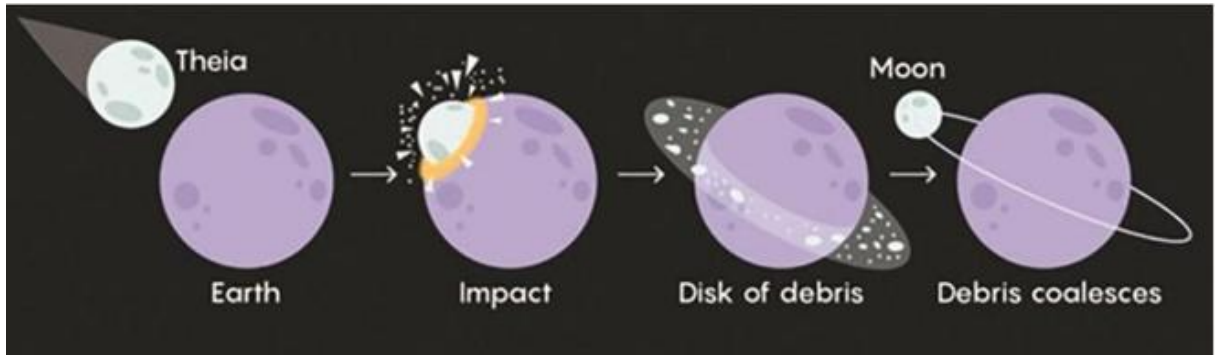
The problem of the Moon's origin has always had a curious fascination for astronomers. It is highly probable that the Earth and the Moon were once combined in one and the same body. This body would cool, and, as it contracted, its rate of rotation would correspondingly increase until the Moon was thrown into space. The tides would act as a drag on the spinning of the Earth and this loss of energy would be transferred to the Moon, which was set whirling round our Globe at an ever-increasing distance. This retreat from the Earth is even now going on.

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Origine par impact géant sur Terre

Idée proposée initialement par R. Daly (1946) au niveau qualitatif

Formalisée par Hartmann et Davis (1975) puis Cameron et Ward (1976) comme moyen d'éjecter de la matière provenant du manteau et de la croute terrestre, en forme de vapeur, qui ensuite aurait recondensé en orbite autour de la Terre, formant des planétésimaux qui auraient successivement donné origine à la Lune par accrétions mutuelles, comme proposé par Ringwood (1970)



Explique le déficit en fer, en éléments volatils de la Lune par rapport à la Terre et fait de la formation de la Lune un événement rare.

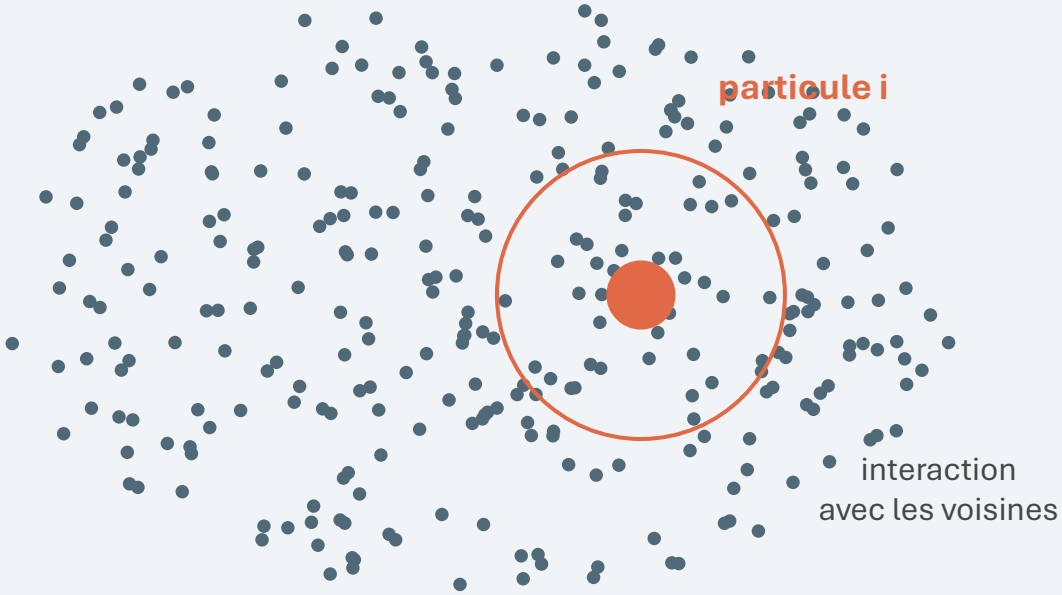
Partie II:
L'impact géant – scénario canonique

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Simulations modernes de l’impact – la méthode SPH

Smoothed Particle Hydrodynamics — représenter la matière par des particules qui se déplacent

La matière = un nuage de particules



1

Chaque particule porte les propriétés de la matière

masse • vitesse • énergie • densité

2

Elle « voit » ses voisines

les grandeurs physiques sont lissées sur une petite région

3

On avance dans le temps

les particules se déplacent →
la forme et l’écoulement évoluent

SPH est particulièrement adaptée aux écoulements très déformés et aux collisions.

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

L'impact canonique

Canup et Asphaug, Nature, 2001

Simulations SPH des collisions géantes des planètes

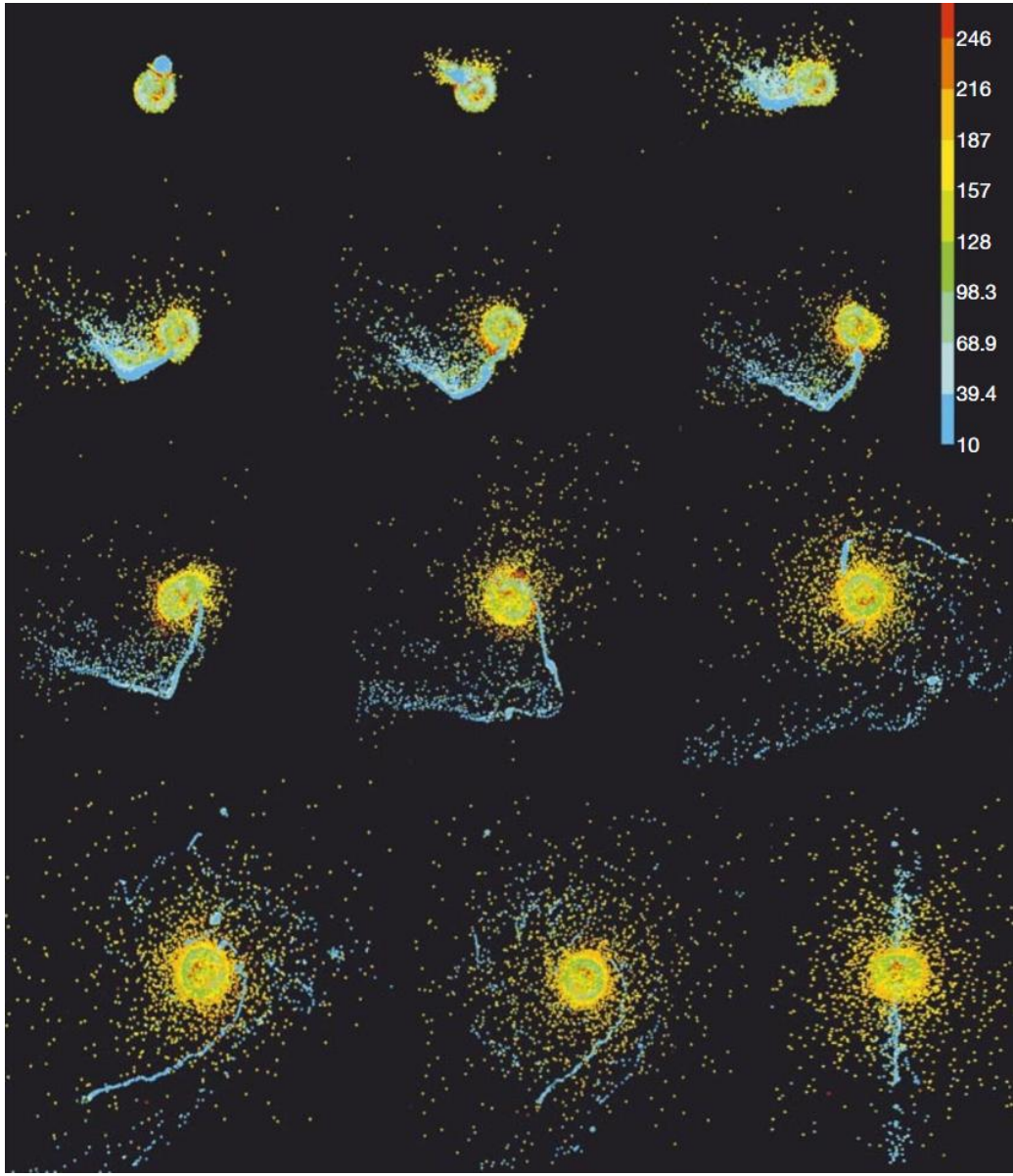
- Avec masse totale de l'ordre de la masse de la Terre
- sans rotation
- à vitesse minimale
- Avec un moment cinétique du système impacteur-cible égale au moment cinétique actuel du système Terre-Lune

Critères de succès:

- Masse du disque circumterrestre > M_{Lune}
- Masse du Fe dans le disque < 3%

Solution:

Impact d'une planète de masse ~M_{Mars} avec un paramètre d'impact de ~0,8

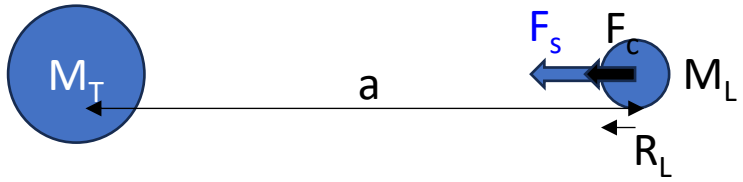


Formation de la Lune à partir d'un disque cirumterrestre

Limite de Roche: distance en deça de laquelle un objet autogravitant sans cohésion est déchiré par les forces de marée:

$$a_R = 2.44 R_T \left(\frac{\rho_T}{\rho_L}\right)^{1/3} \sim 2.9\ R_T$$

Dérivation:

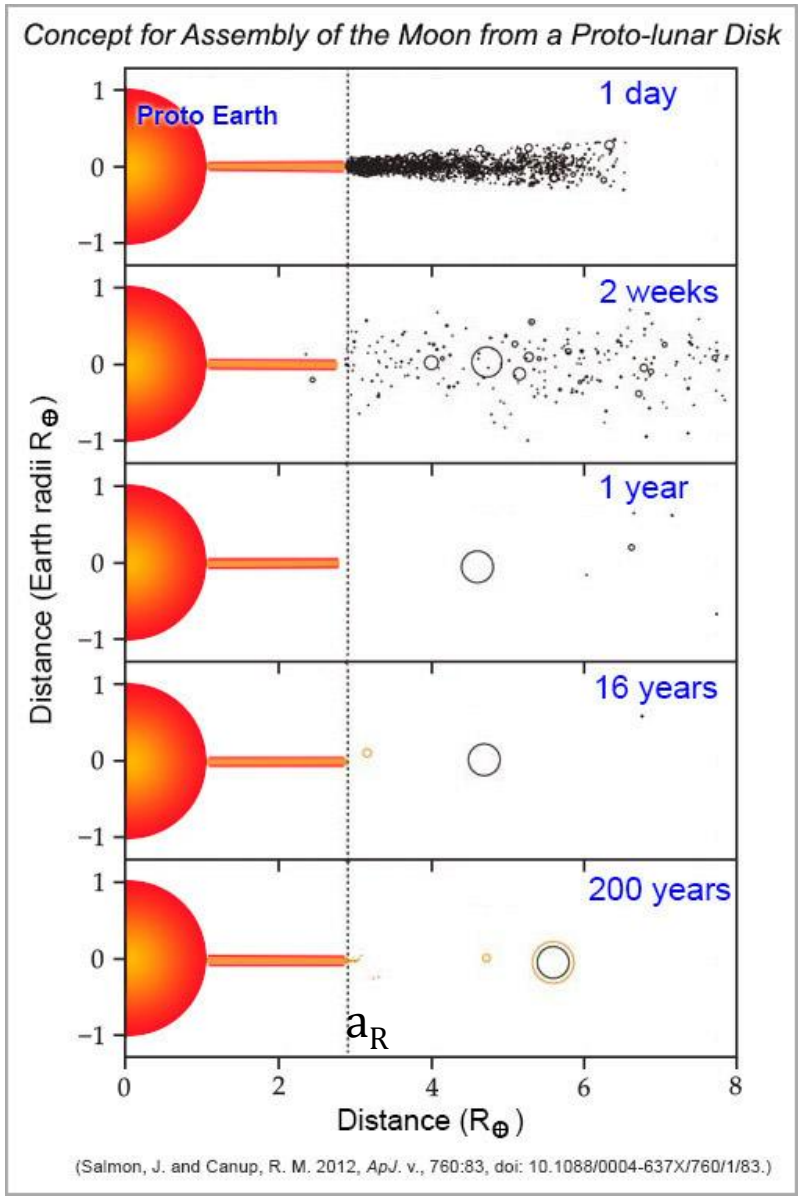


$$F_s = \frac{GM_T}{(a - R_L)^2} \qquad F_c = \frac{GM_T}{a^2} \qquad \delta F = \frac{2GM_T R_L}{a^3} = \frac{2G4\pi R_T^3 \rho_T R_L}{3a^3}$$

Force de gravité à la surface de la Lune: $F = \frac{GM_L}{{R_L}^2} = \frac{G4\pi R_L \rho_L}{3}$

En imposant $\delta F = F$ on trouve $a = 2^{1/3} R_T \left(\frac{\rho_T}{\rho_L}\right)^{1/3}$

Le coefficent est ici $2^{1/3}$ au lieu de 2.44 car on a négligé la deformation de l'objet, qui modifie l'expression de F

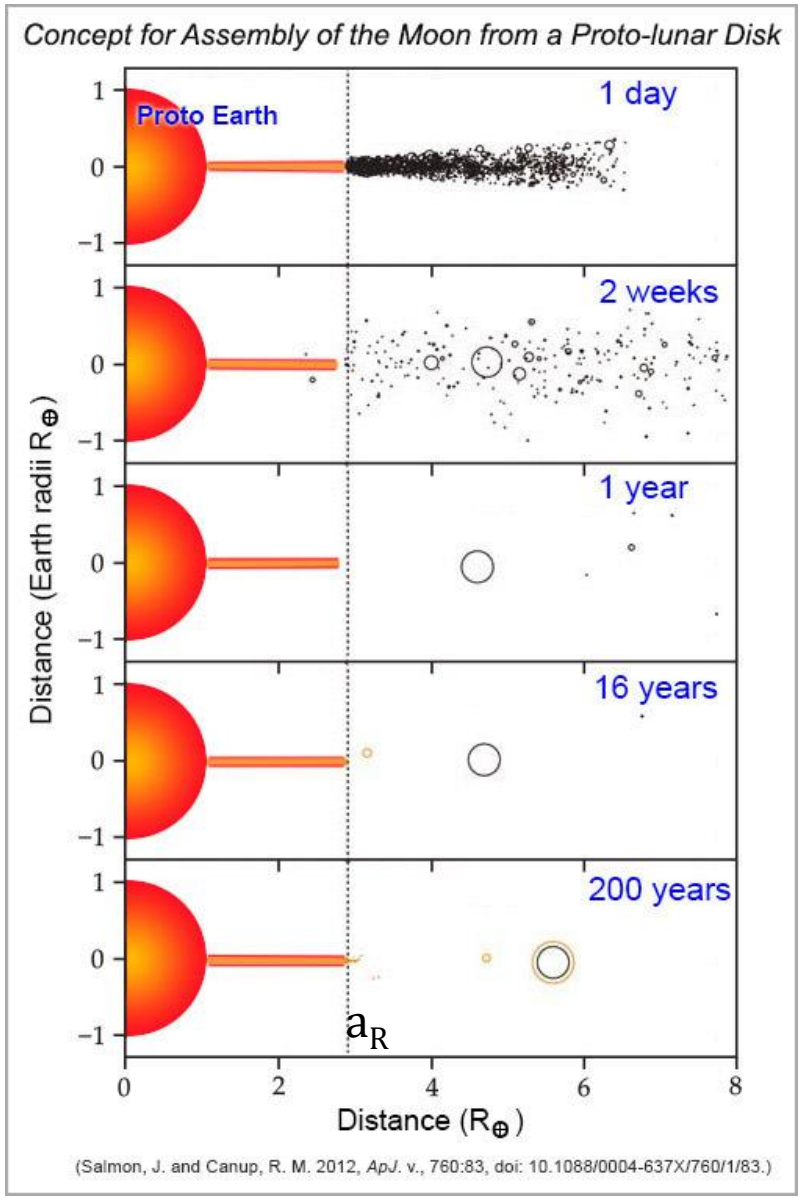


COLLÈGE DE FRANCE 1530

Formation de la Lune à partir d'un disque cirumterrestre

La Lune se forme rapidement (en ~100 jours) à partir du matériel initialement éjecté au-delà de la limite de Roche (la plupart du matériel éjecté dans l'impact canonique – Canup 2004; Downey et Canup, 2026).

Puis, la Lune continue d'accréter le matériel du disque interne au fur et à mesure qu'il s'étale au-delà de la limite de Roche, pendant qu'elle recesse (Ida, Canup & Esposito, 1997; Crida et Charnoz, 2010; Salmon et Canup, 2012)

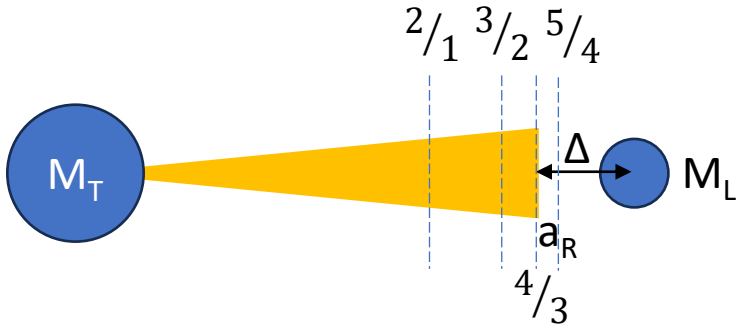


COLLÈGE DE FRANCE
1530

La migration de la Lune

Due à son interaction avec le disque et aux forces de marée

Interaction avec le disque:
Analogue à la migration des planètes dans un disque protoplanétaire (voir cours #5, année 2004-2005)



Dépend de quelles résonances sont dans le disque
Peut être approximée par:

$$\frac{d\Delta}{dt} = \frac{2^5}{3^3}\, q\, D\, T_{\mathrm{R}}^{-1}\, \Delta^{-3}$$ (Lin et Papaloizou, 1979)

où $q = \frac{\mathrm{M_L}}{\mathrm{M_T}}$, T_{R} est la période orbitale à a_R, $D = \frac{\mathrm{M_{disque}}}{\mathrm{M_L}}$

Elle s'arrête quand la résonance 2/1 sort du disque

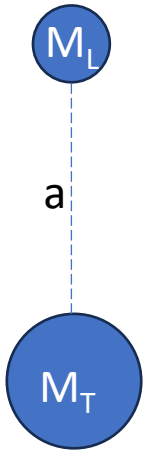
COLLÈGE DE FRANCE 1530

La migration de la Lune

Due à son interaction avec le disque et aux forces de marée

Interaction par marée:

Due à la déformation des corps et à la différence entre la fréquence de rotation de la Terre (Ω) et celle orbitale de la Lune (n)



La Lune exerce une force de marée sur la Terre:

$$\delta F = \frac{2GM_L R_T}{a^3}$$

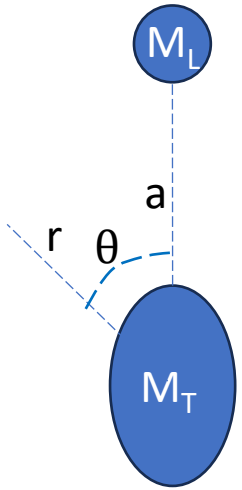
COLLÈGE DE FRANCE 1530

La migration de la Lune

Due à son interaction avec le disque et aux forces de marée

Interaction par marée:

Due à la déformation des corps et à la différence entre la fréquence de rotation de la Terre (Ω) et celle orbitale de la Lune (n)



La Lune exerce une force de marée sur la Terre:

$$\delta F = \frac{2GM_L R_T}{a^3}$$

En réponse, la Terre se déforme et génère un potentiel gravitationnel:

$$U = -\frac{GM_T}{r} + k_2 \frac{GM_L R_T{}^5}{a^3 r^3} \frac{1}{2}(3\cos^2\theta - 1)$$

k_2: nombre de Love Note: ne dépend pas de M_T

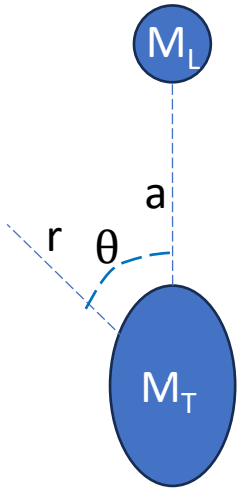
COLLÈGE DE FRANCE 1530

La migration de la Lune

Due à son interaction avec le disque et aux forces de marée

Interaction par marée:

Due à la déformation des corps et à la différence entre la fréquence de rotation de la Terre (Ω)
et celle orbitale de la Lune (n)



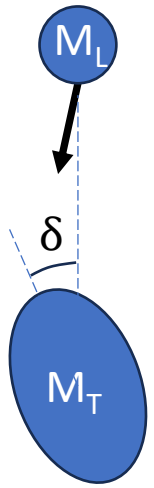
La Lune exerce une force de marée sur la Terre:

$$\delta F = \frac{2GM_L R_T}{a^3}$$

En réponse, la Terre se déforme et génère un potentiel gravitationnel:

$$U = -\frac{GM_T}{r} + k_2 \frac{GM_L R_T^5}{a^3 r^3} \frac{1}{2}(3\cos^2\theta - 1)$$

k_2: nombre de Love Note: ne dépend pas de M_T



A cause de la rotation de la Terre dans un repère solidaire avec la Lune, la déformation est décalée d'un angle $\delta = (\Omega - n)\Delta t$ (Singer, 1996; Mignard 1979)

$$\delta = \frac{1}{2Q}\mathrm{sgn}(\Omega - n)$$ (MacDonald, 1964)

Ceci genère un couple sur la Lune

$$\tau = \frac{3}{2} k_2 \frac{GM_L{}^2 R_T{}^5}{a^6} \sin 2\delta$$

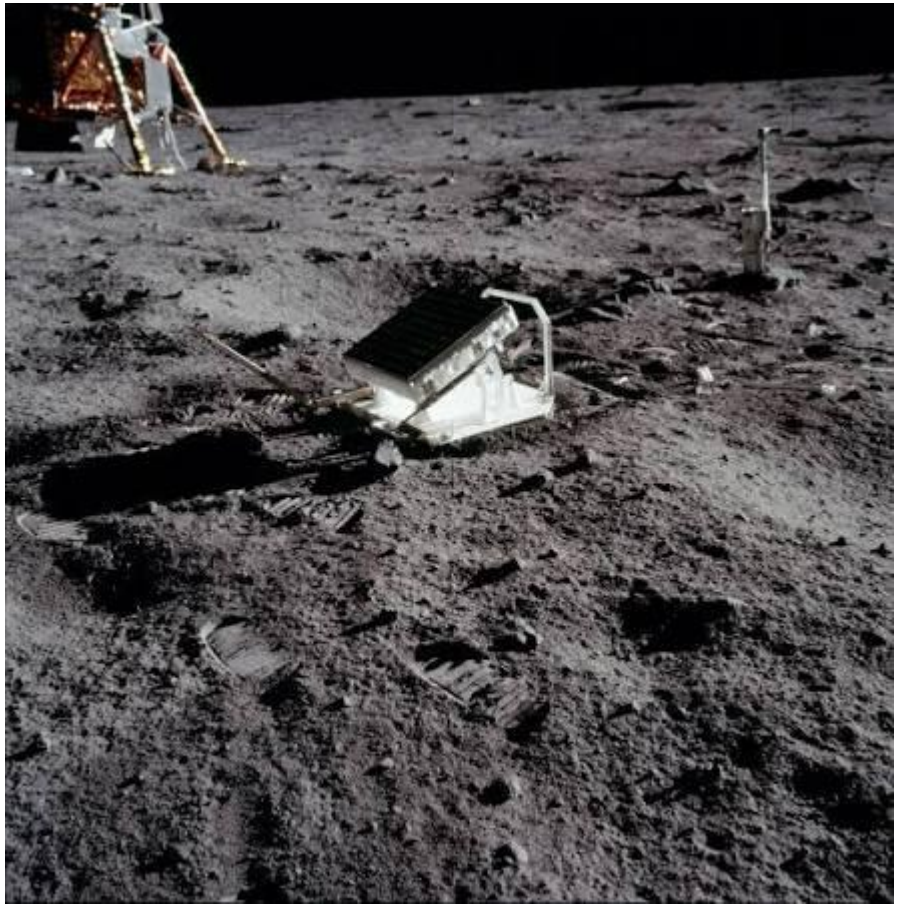
et donc une vitesse de migration:

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{v_L M_L}\tau = 3k_2 v_L \frac{M_L}{M_T}\left(\frac{R_T}{a}\right)^5 \sin 2\delta$$

où $v_L = \sqrt{GM_T/a}$ est la vitesse orbitale de la Lune

COLLÈGE DE FRANCE 1530

La migration de la Lune due à la marée est un fait observationnel



3,8 cm/an

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Vitesse de migration et d'étalement du disque: différents scénarios

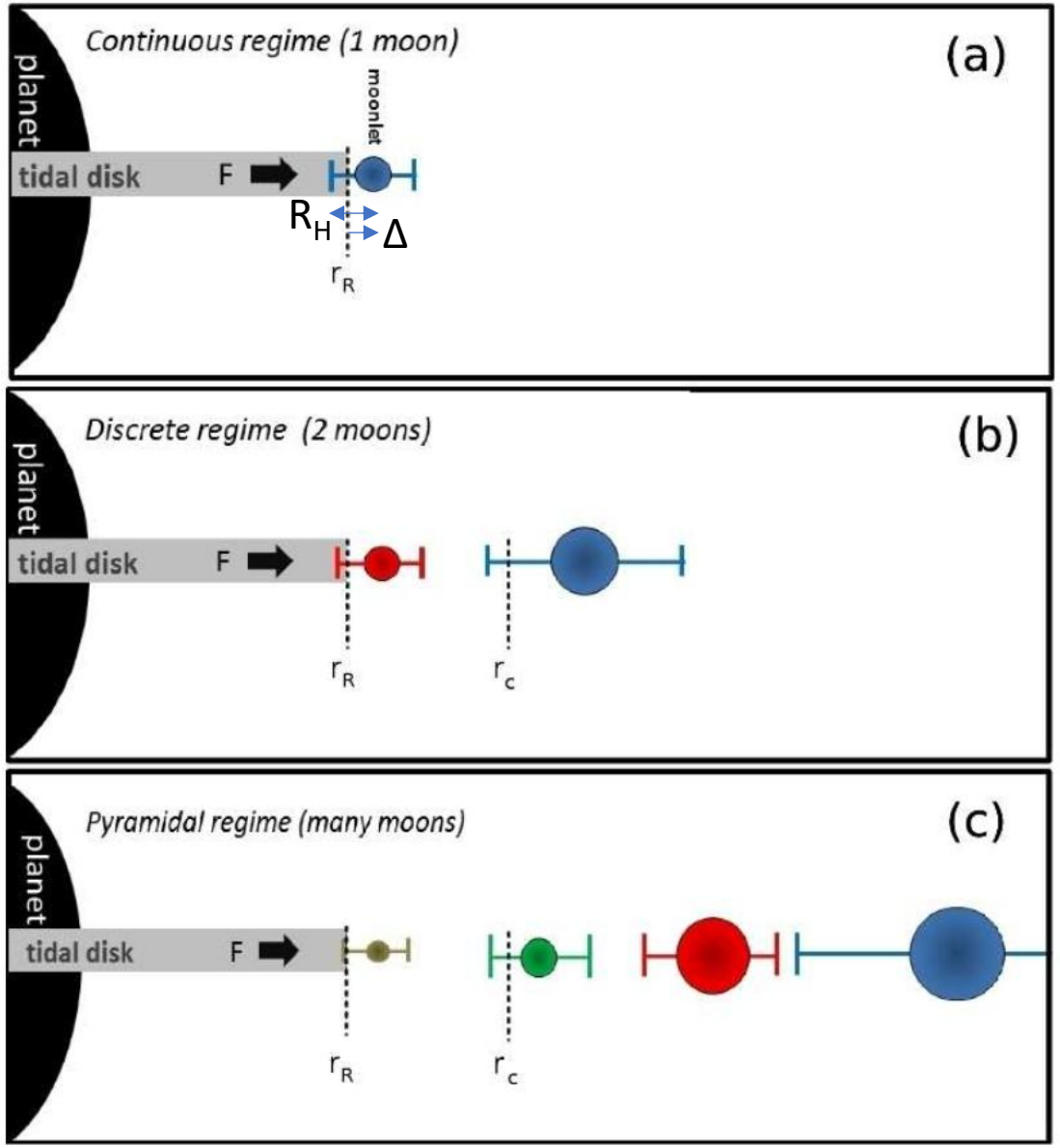
La Lune accrète directement le matériel du disque qui s'étale au-delà de la limite de Roche, tant que son rayon de Hill $R_H > \Delta$ (croissance continue)

Quand $R_H < \Delta$ la matière qui sort du disque ne peut pas être capturée par la Lune mais forme un nouveau satellite

Deux ou plusieurs satellites peuvent ainsi se former, selon le rapport
vitesse de migration / vitesse d'étalement

Les satellites peuvent fusionner, ce qui donne une croissance "par sauts"

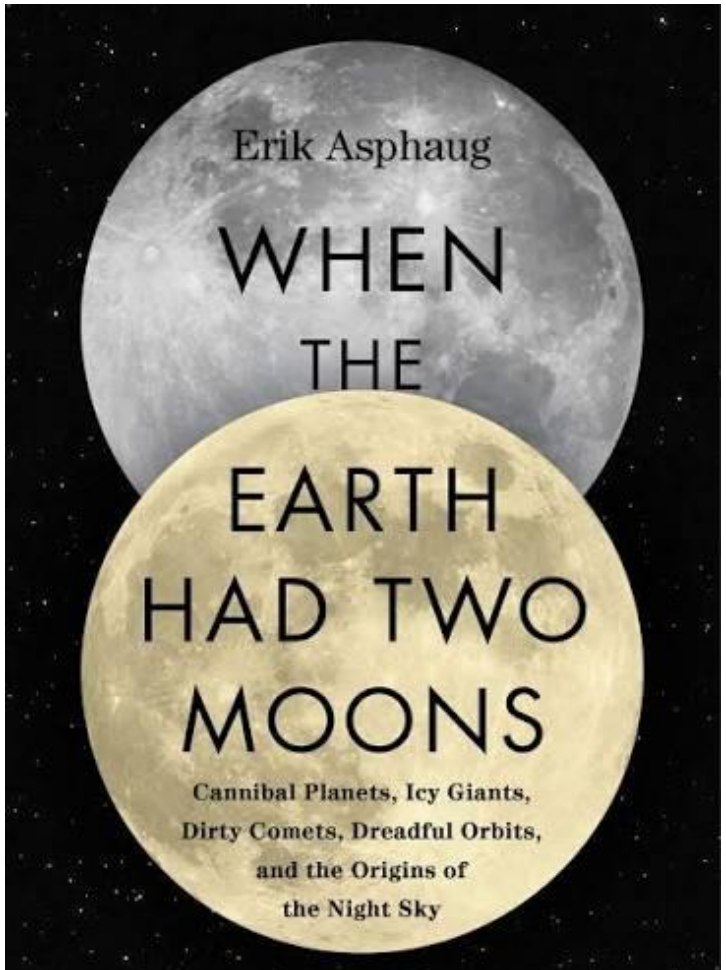
Crida et Charnoz, Science, 2012

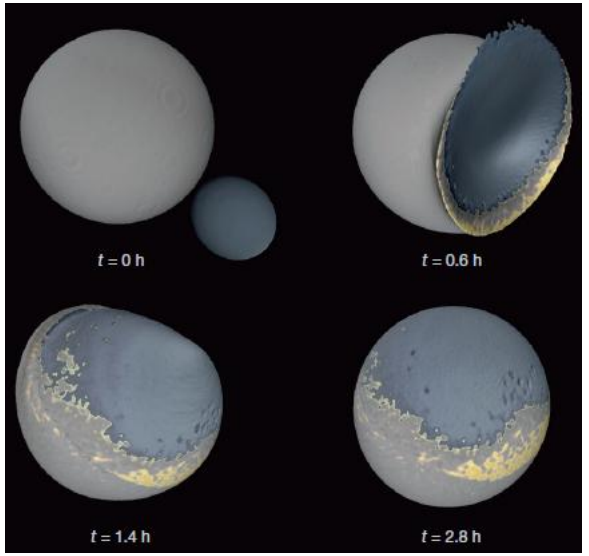


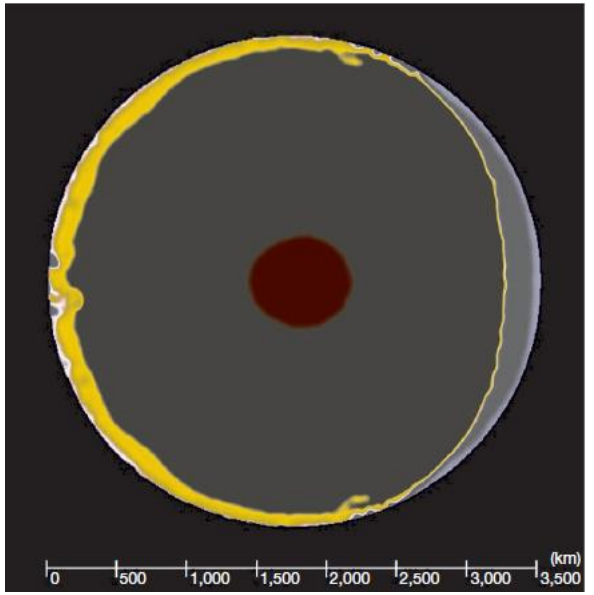
COLLÈGE DE FRANCE
1530

Plusieurs Lunes?

Jutzi et Asphaug (Nature, 2011) ont proposé que l'asymétrie de la Lune, avec une croute beaucoup plus épaisse sur la face cachée, est due à l'accrétion par la Lune d'un plus petit satellite, à faible vitesse

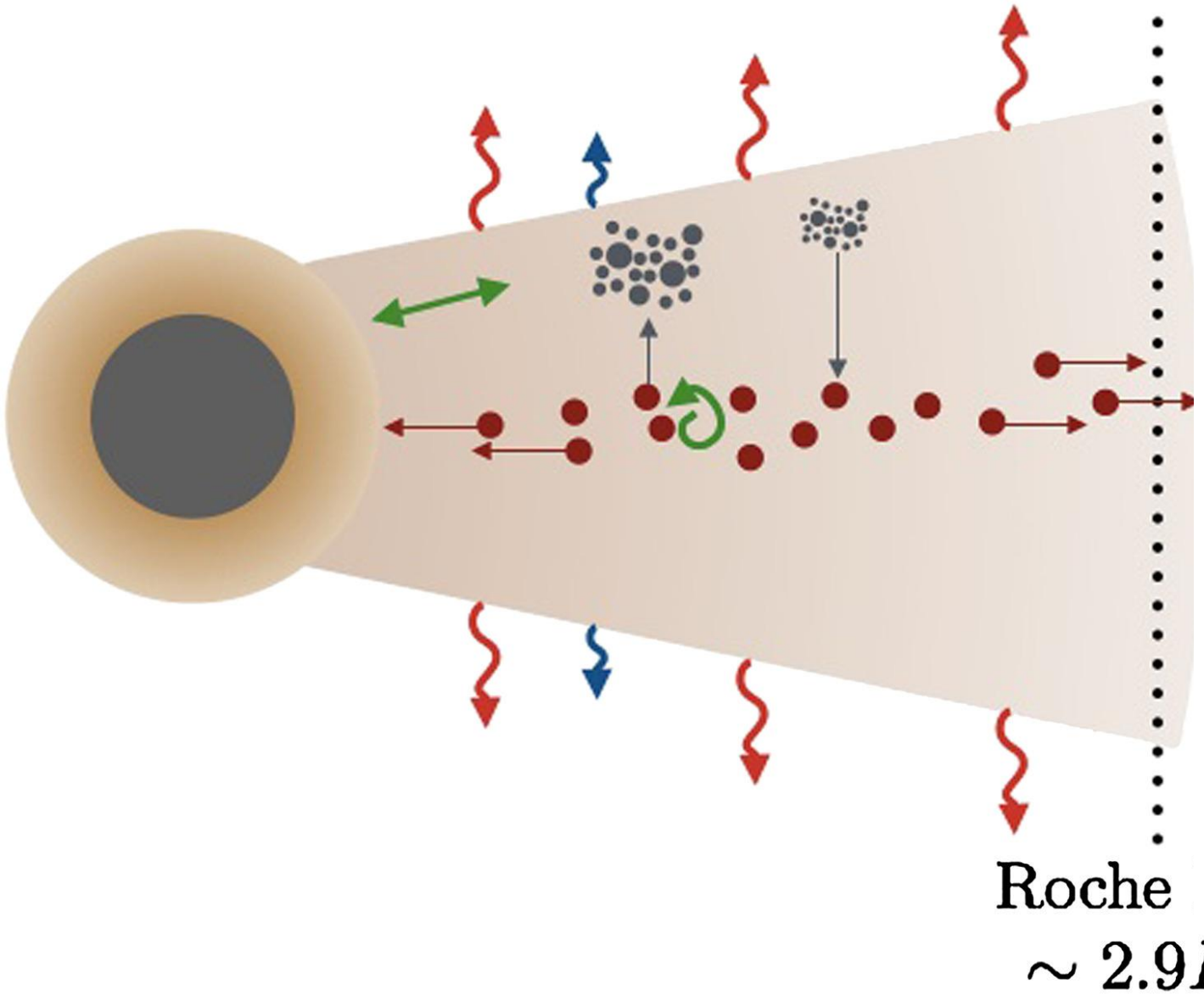






COLLÈGE DE FRANCE
1530

Origine du déficit lunaire en éléments volatiles



Initialement le disque est très chaud, avec une partie de la matière en vapeur et une partie en liquide (magma).

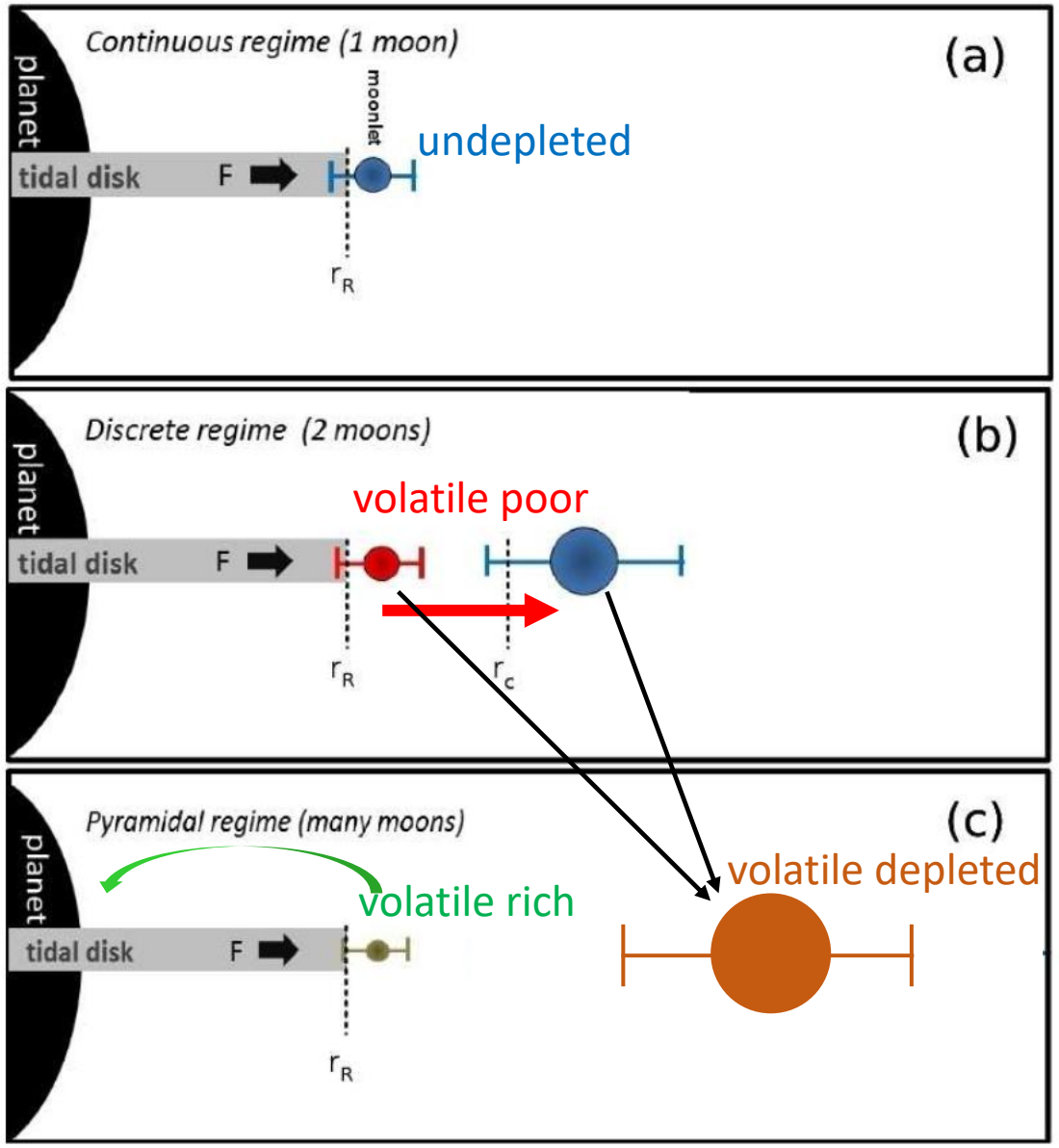
Les éléments volatiles sont en majorité dans la partie vapeur

Cependant, la fuite du vapeur dans l'espace n'est pas possible, à cause de la gravité terrestre (Nakajima et Stevenson, 2018)

La déplétion en volatiles de la Lune par rapport à la Terre nécessite d'une explication un peu plus complexe

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Origine du déficit lunaire en éléments volatiles



Canup et al., 2015:
Initialement la lune se forme par la matière du disque au-delà de la limite de Roche. Cette partie du disque refroidie vite, les volatiles condensent. La proto-Lune n'est pas appauvrie en volatiles

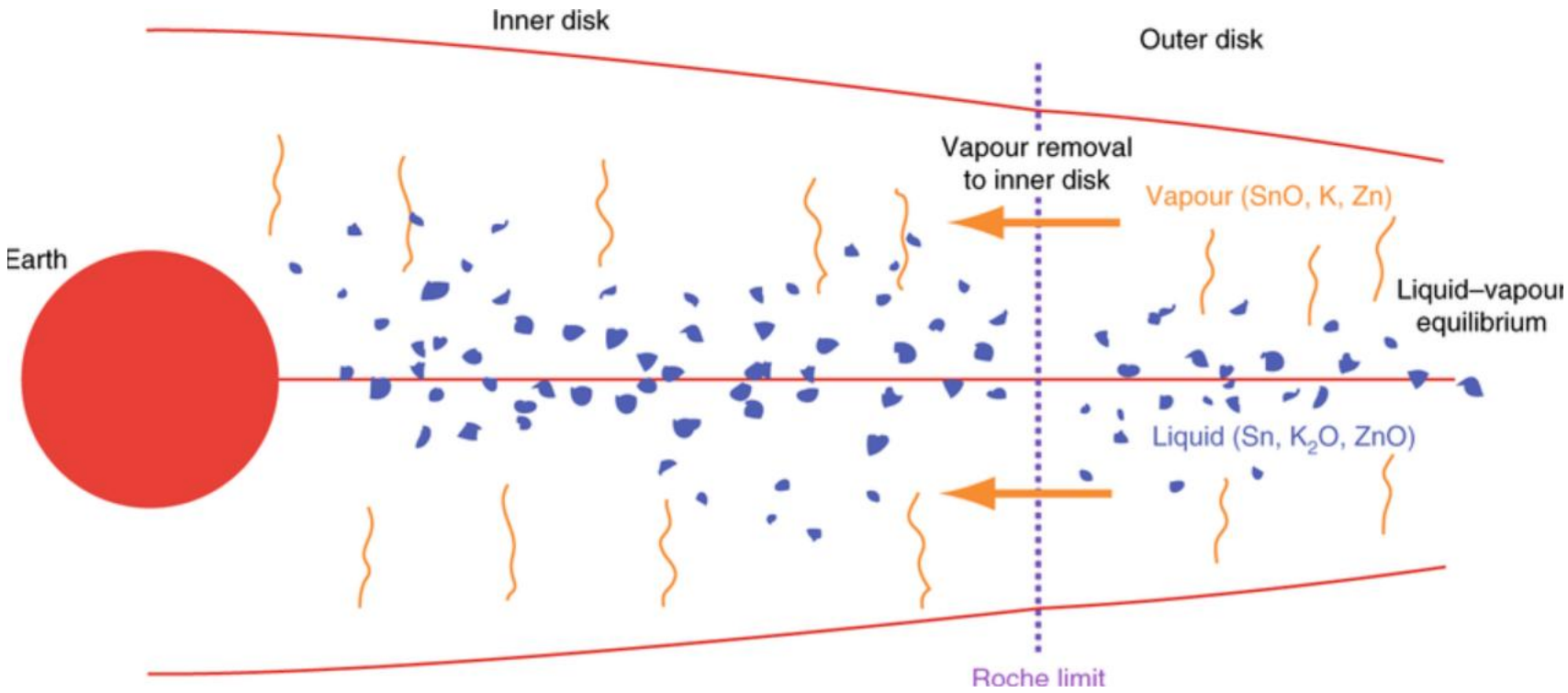
Ensuite, la Lune accrète la matière solide qui sort du disque interne. Celui-ci étant très chaud, cette matière est dépourvue d'éléments volatiles. Elle forme un satellite, qui migre plus vite que la proto-Lune et se fond avec elle

Plus tard, quand le disque interne aura refroidi, la matière qui sort sera enrichie en élément volatiles. Mais la Lune sera trop loin pour l'accréter. Elle formera un petit satellite, qui ne migrera pas vite et finira pour retomber sur Terre

COLLÈGE DE FRANCE
1530

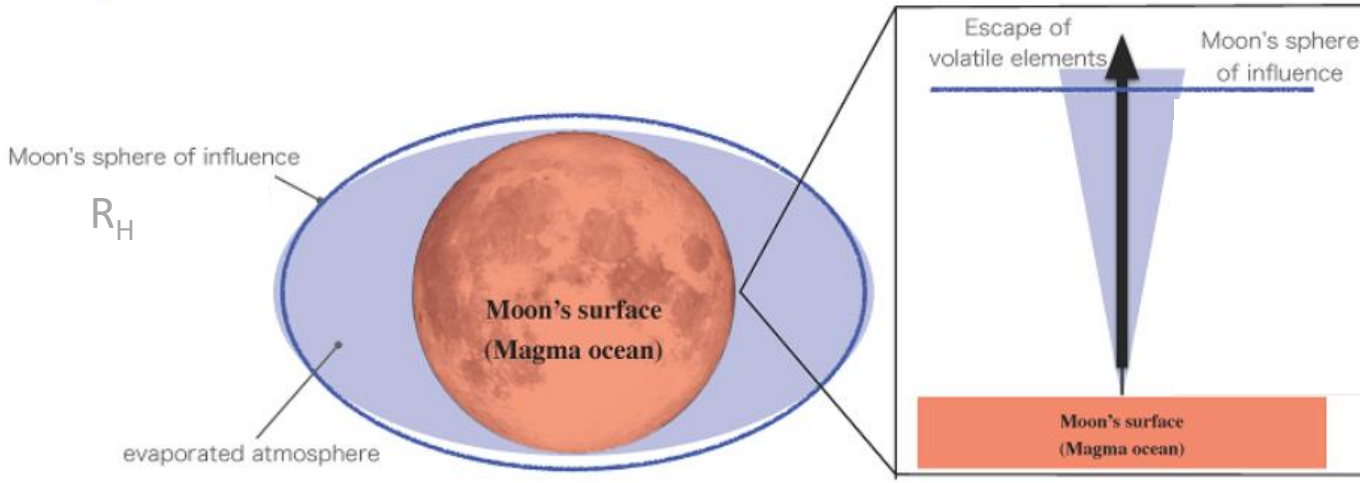
Origine du déficit lunaire en éléments volatiles

Charnoz et Michaut, 2015:
Quand le disque est chaud la phase vapeur et la phase solide/liquide ont des dynamiques différentes car elles ont des viscosités différentes. Si le gaz est plus visqueux, car turbulent, il sera accrété davantage par la Terre. La matière restante sera donc appauvrie en éléments volatiles.
L'équilibre liquide-vapeur explique le fractionnement isotopique dépendant de la masse du Zn (Nie et Dauphas, 2019) et du Sn (Wang et al., 2019)



Origine du déficit lunaire en éléments volatiles

Charnoz et al., 2021:
La jeune Lune est chaude. Les éléments volatiles s'évaporent dans une atmosphère.



Celle-ci est plus étendue que la sphère d'influence gravitationnelle de la Lune (R_H) surtout quand la Lune est proche de la Terre: $R_H = a_L(M_L/3M_L)^{1/3}$

Les éléments volatiles s'échappent donc de la Lune et partent dans l'espace circum-Terrestre

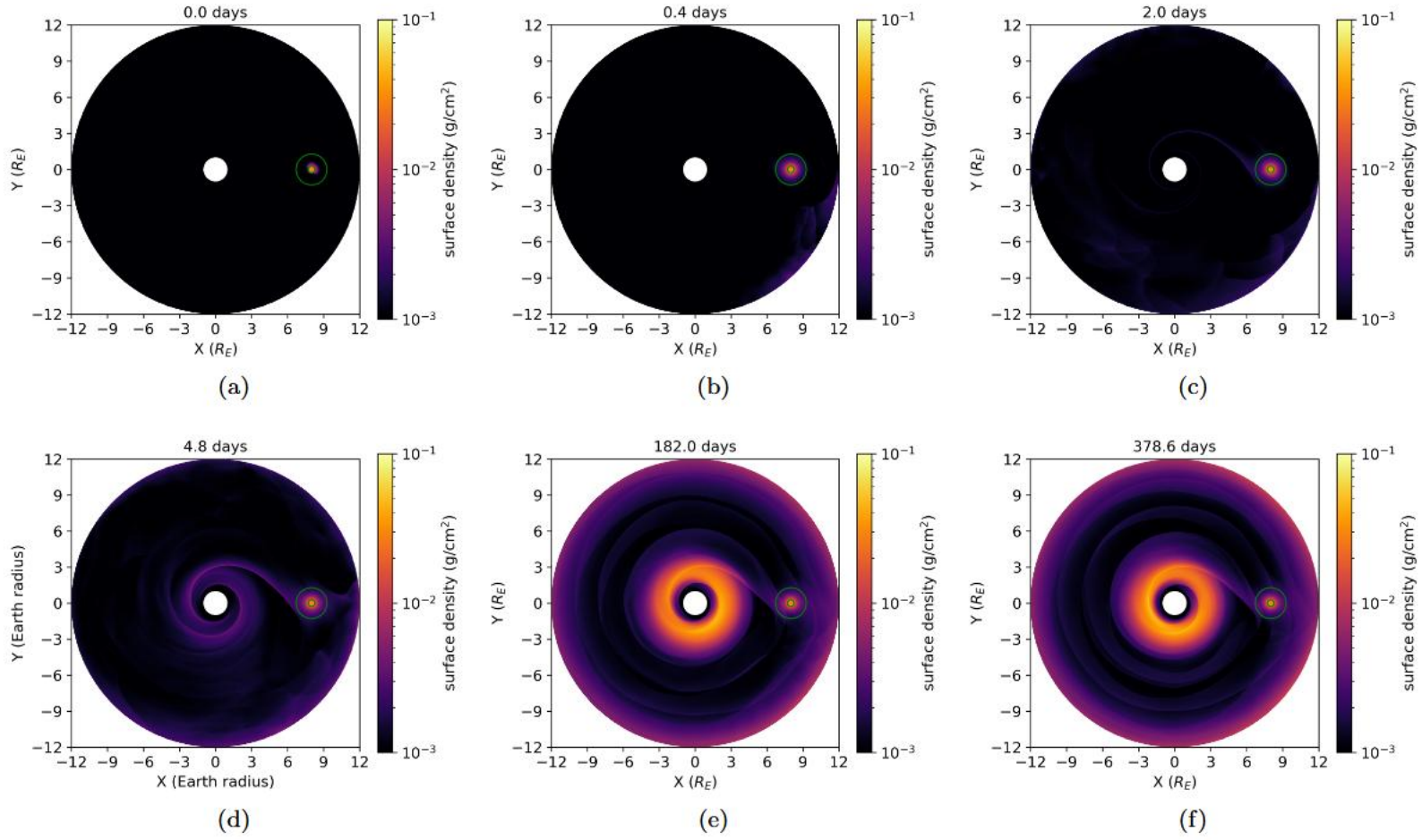
L'évaporation des éléments volatiles à partir de l'océan magmatique lunaire induit un fractionnement isotopique dépendant de la masse, qui favorise la rétention des isotopes lourds. Possible contradiction avec le rapport isotopique du Sn, qui est plus "léger" du rapport terrestre (Wang et al., 2019).

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Origine du déficit lunaire en éléments volatiles

Charnoz et al., 2021:

Scénario validé par simulations hydordynamiques par Madeira et al., 2025



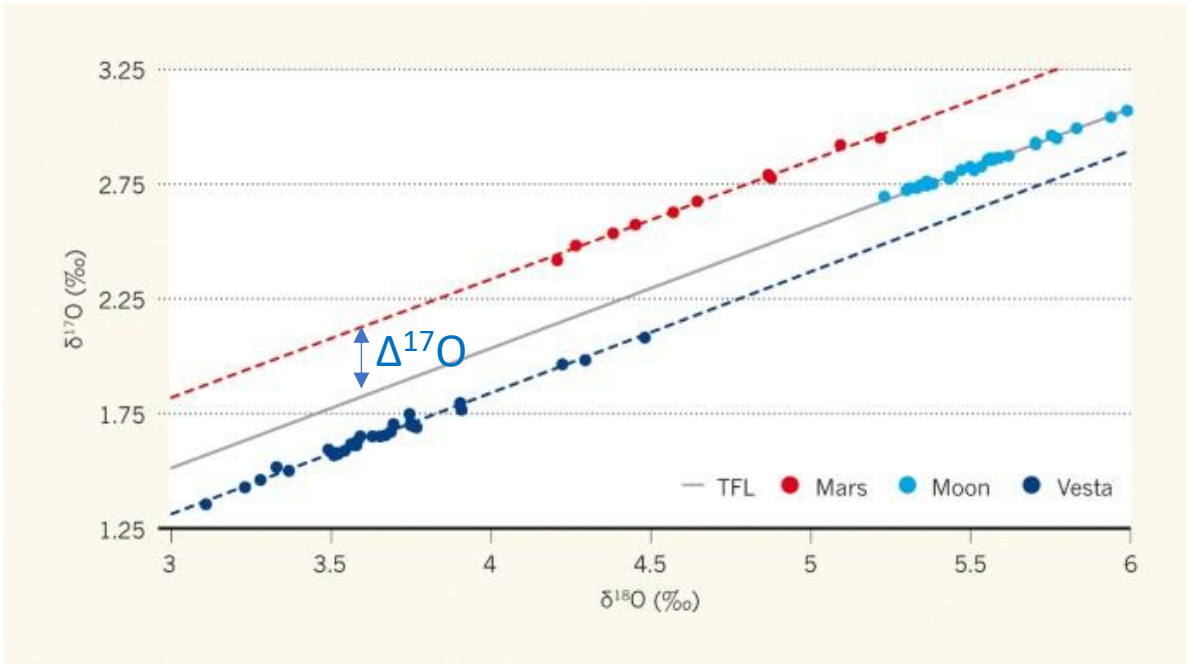
COLLÈGE DE FRANCE
1530

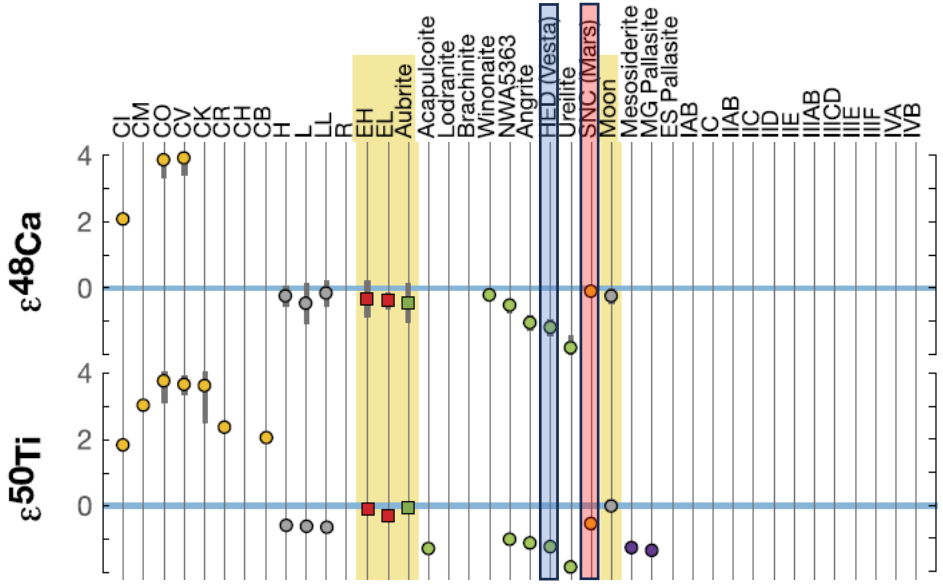
Partie III:
La crise isotopique – nouveaux scénarios d'impact

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Rapports isotopiques identiques entre la Terre et la Lune

La Terre et la Lune ont des rapports isotopiques identiques pour $\Delta^{17}O$ (Wiechert et, 2001; Young et al., 2016), ε48Ca et ε50Ti (Dauphas, 2017) et ε54Cr (Mougel et al., 2018)





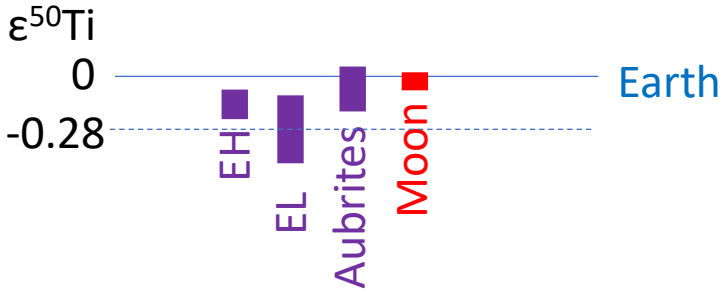
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

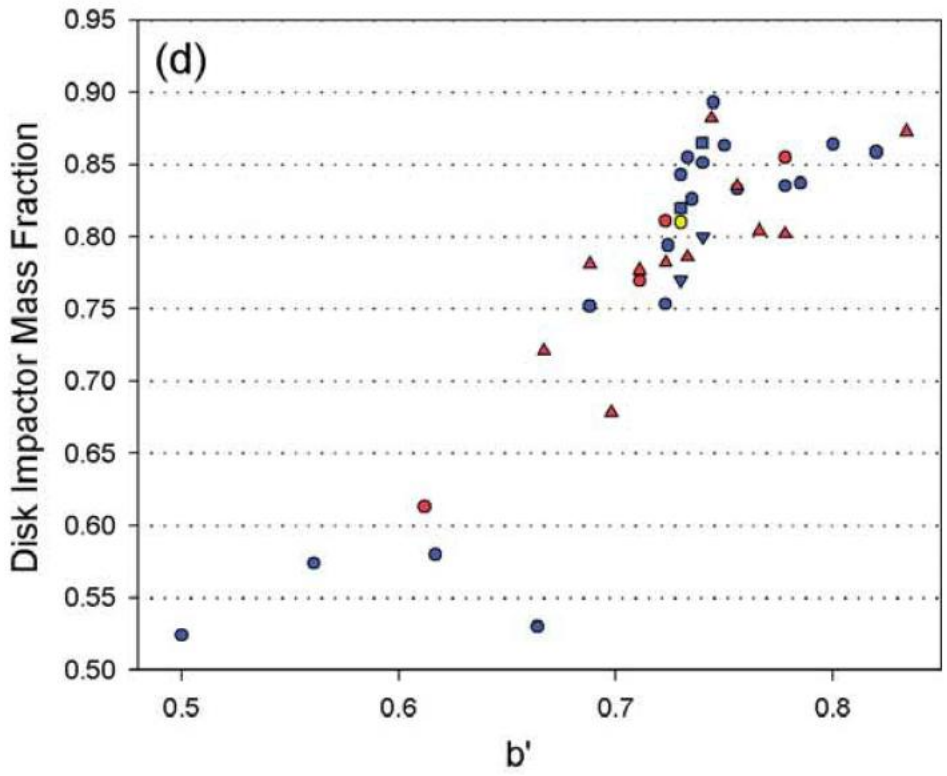
Est-ce que Theia était identique à la Terre?

Dans l'impact canonique, la majorité de la matière du disque proto-Lunaire provient de l'impacteur (Theia).

L'équivalence isotopique entre la Terre et la Lune impliquerait donc l'équivalence isotopique entre Theia et la proto-Terre

Est-ce raisonnable?
Mars et Vesta sont très différents de la Terre
Mais EC/Aubrites sont presque indentiques...





Canup, 2004

COLLÈGE DE FRANCE
1530

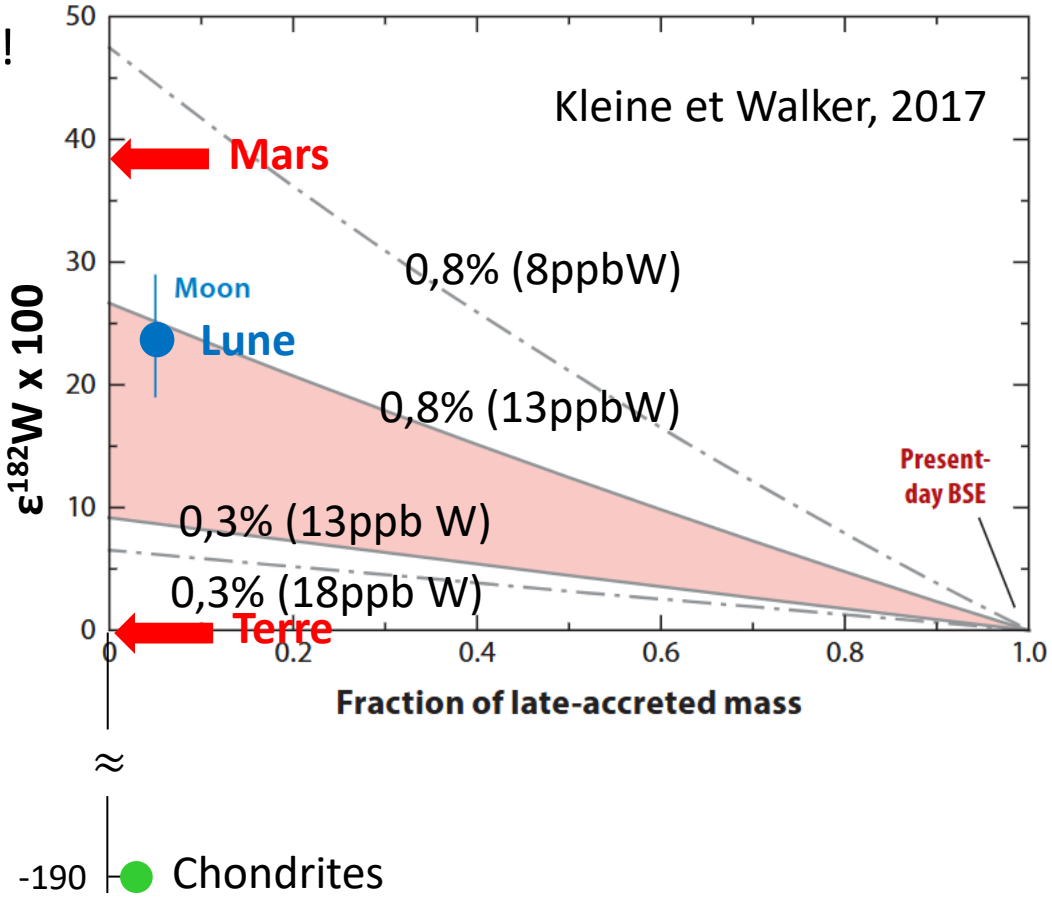
Le cas du $\varepsilon^{182}W$

Cette anomalie isotopique n'est pas nucléosynthétique. Elle est radiogénique (issue de la décroissance du ^{182}Hf et de la séquestration du W dans le noyau). Il est donc très improbable que deux planètes, même de composition identique, aient le même $\varepsilon^{182}W$

La Lune et la Terre ont des valeurs de $\varepsilon^{182}W$ distincts!

La différence en $\varepsilon^{182}W$ entre la Terre et la Lune s'explique si la Terre a accrété un vernis tardif chondritique pour 0,5 - 0,8% de sa masse, alors que la Lune a accrété beaucoup moins (~0,015%).

Mais si la Terre a accrété moins (Blanchard et al., 2026), ou la Lune plus (Morbidelli et al., 2018), la différence reste réelle. Elle ne s'explique pas par la décroissance du ^{182}Hf sur la Lune car $\varepsilon^{182}W$ est homogène pour des roches lunaires ayant W/Hf différents. On pourrait donc détecter une petite différence entre Theia et la Terre! (Kleine et al., 2026)



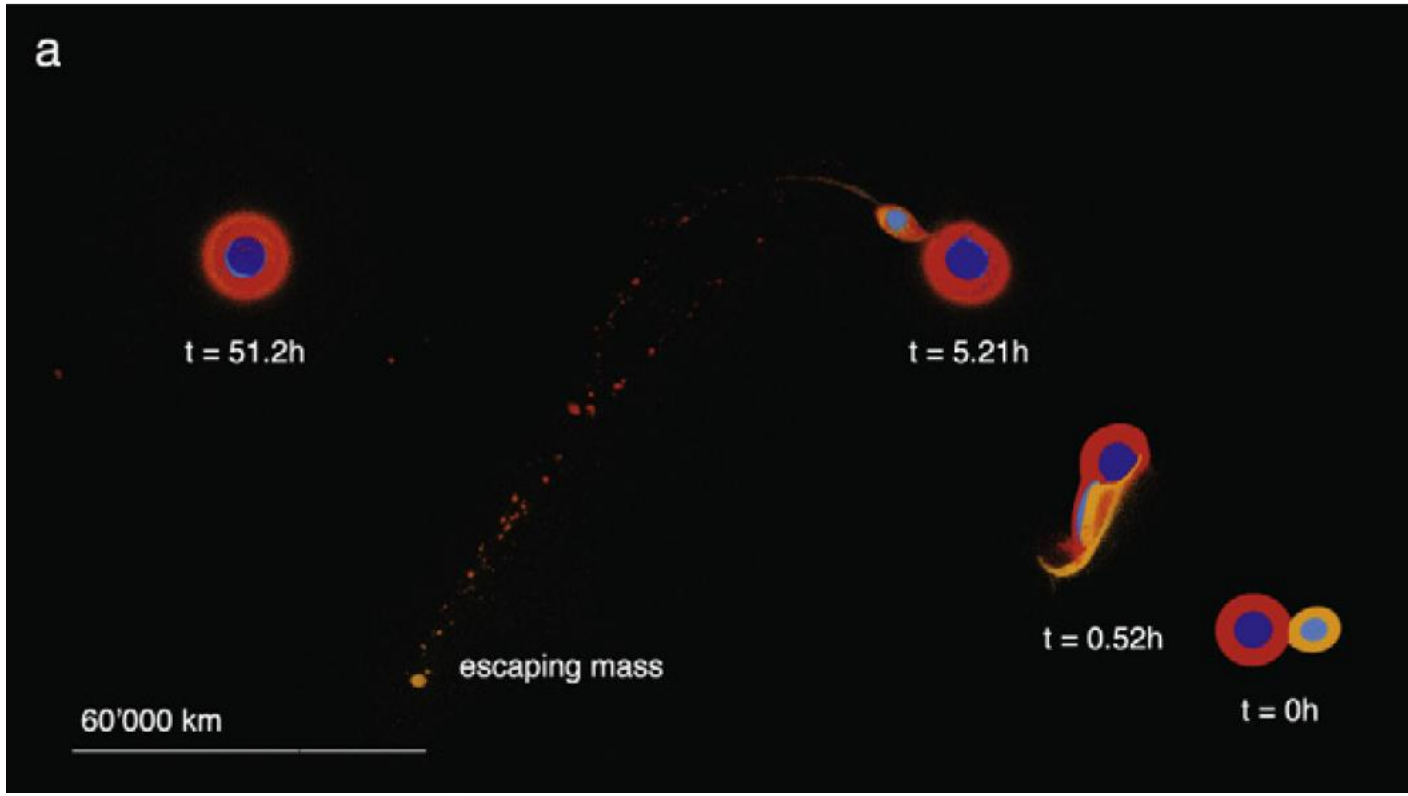
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Impacts non-canoniques

A la recherche d'impacts pouvant injecter plus de matière Terrestre dans le disque
I: collisions "hit-and-run" (Reufer et al., 2012)

Dans une collision hit-and-run, une large fraction du projectile poursuit sa trajectoire dans l'espace.

Le moment cinétique du système proto-Terre – Theia peut donc être bien plus grand que le moment cinétique du système Terre - Lune



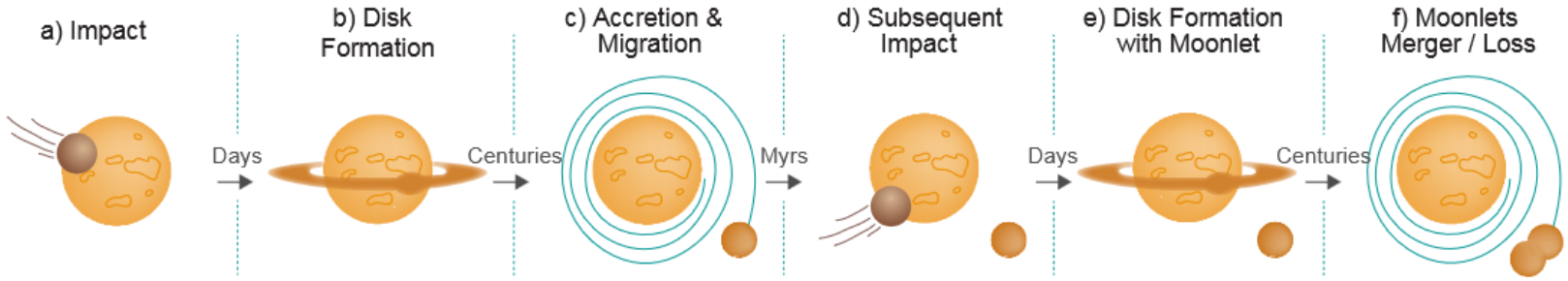
$$\delta f_T = \left(M_{\text{targ}}^{\text{silc}} / M_{\text{tot}}^{\text{silc}}\right)_{\text{disk}} / \left(M_{\text{targ}}^{\text{silc}} / M_{\text{tot}}^{\text{silc}}\right)_{\text{post-impact Earth}} - 1$$

δf_T entre -0.1 et -0.7 pour simulations avec bonne masse du disque et moment cinétique final
(dans l'impact canonique: entre -0.5 et -0.9)

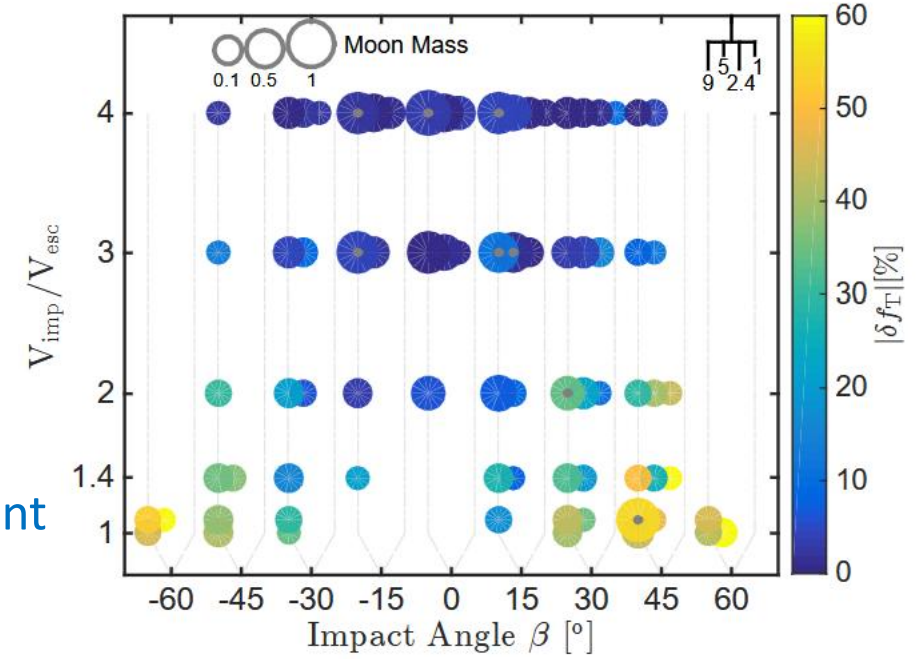
COLLÈGE DE FRANCE
1530

Impacts non-canoniques

A la recherche d'impacts pouvant injecter plus de matière Terrestre dans le disque
II: multiples petits impacts (Rufu et al., 2017)



Avec des petits impacteurs (quelques % de la masse de la Terre), on peut faire des petits satellites (~10% M_L) avec $|\delta f_T| < 0.1$ et le bon moment cinétique



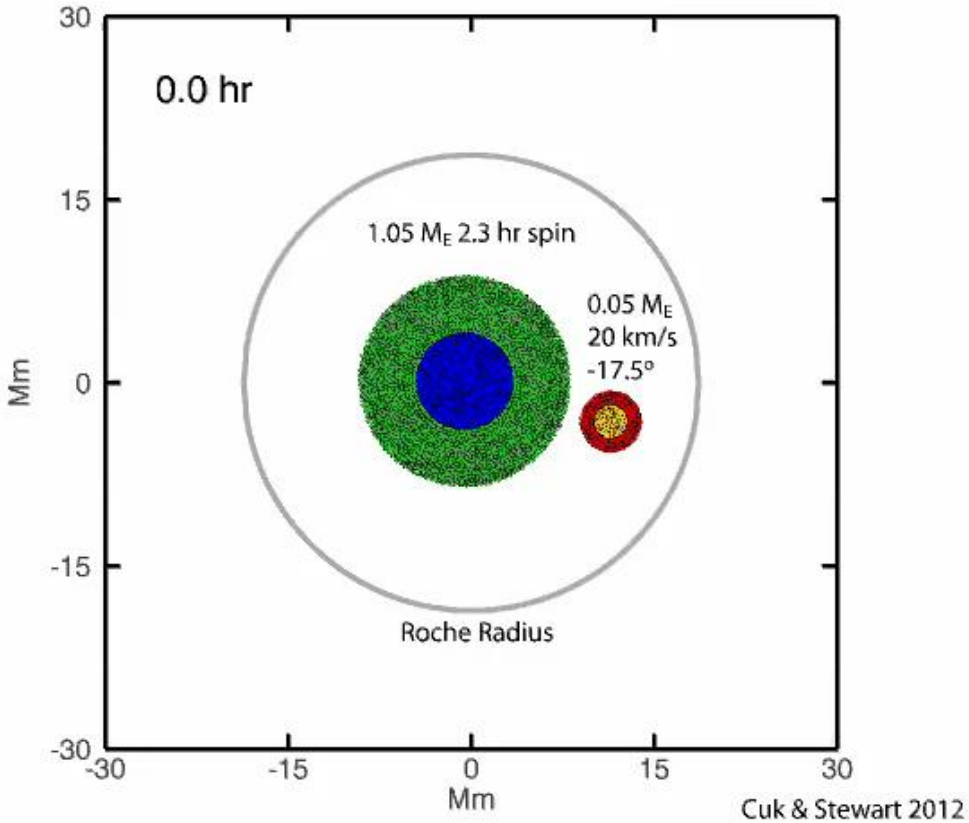
Pourquoi seulement sur Terre?
On perd l'exceptionnalité, qui a motivé l'idée de l'impact géant

Impacts non-canoniques

A la recherche d'impacts pouvant injecter plus de matière Terrestre dans le disque
III: proto-Terre en rotation rapide (Cuk et Stewart, 2012)

Petit impacteur, à grande vitesse (20km/s) sur une proto-Terre de ~1M_T, en rotation rapide (2,3h)

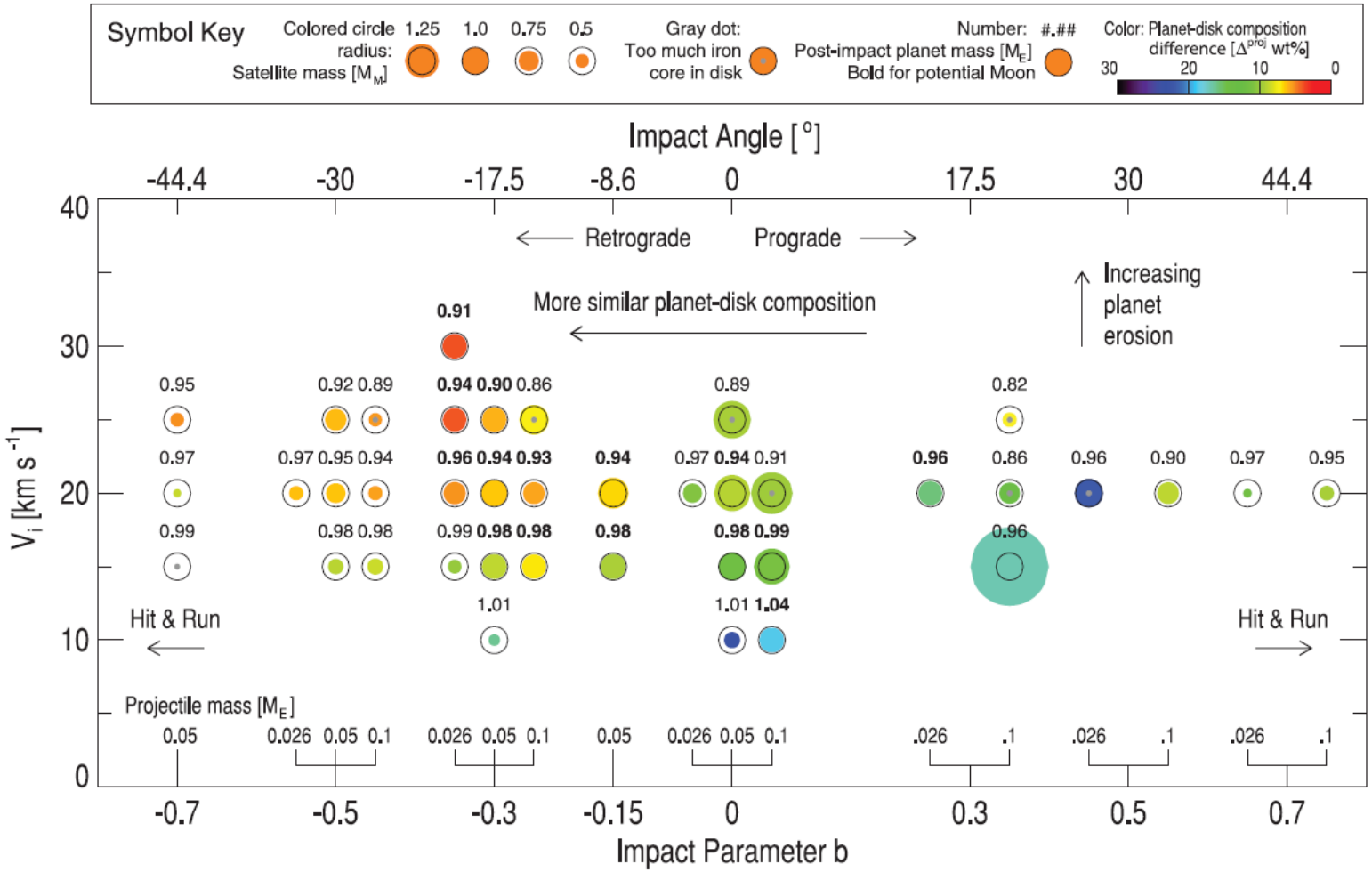
La rotation rapide favorise l'éjection de matière terrestre dans le disque



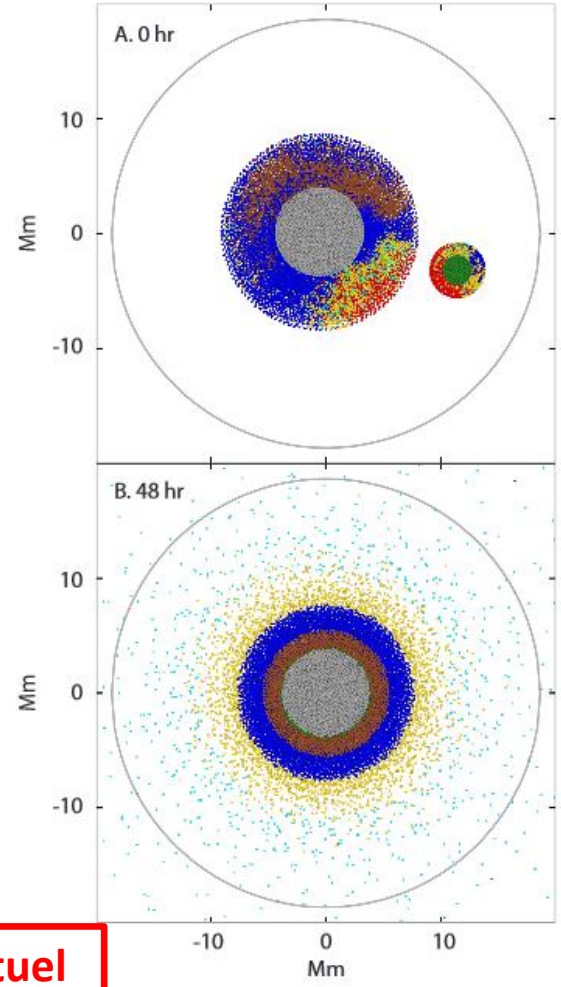
Impacts non-canoniques

A la recherche d'impacts pouvant injecter plus de matière Terrestre dans le disque

III: proto-Terre en rotation rapide (Cuk et Stewart, 2012)



Origine de la différence entre manteau profond et supérieur



Le moment cinétique final est 2-3 x le moment cinétique du système Terre-Lune actuel

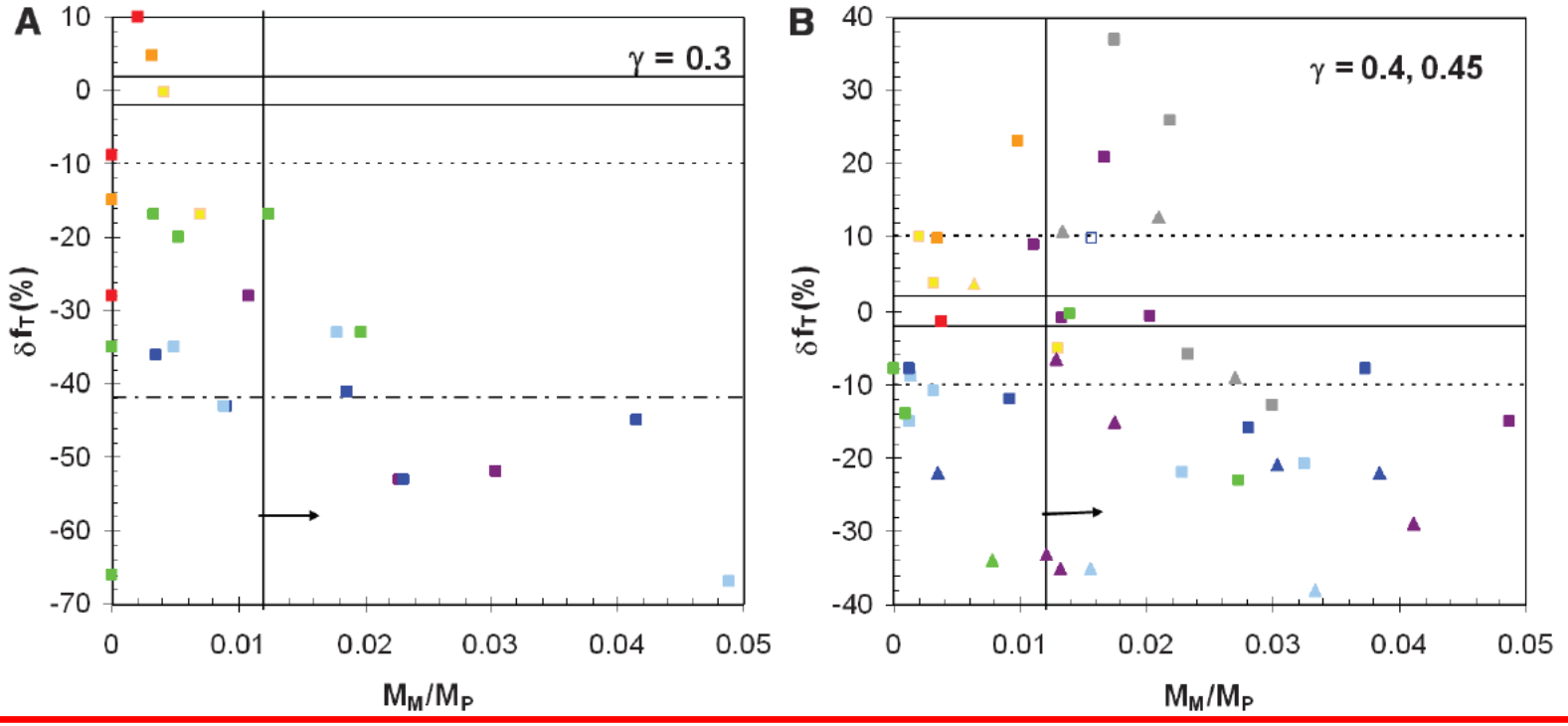
COLLÈGE DE FRANCE 1530

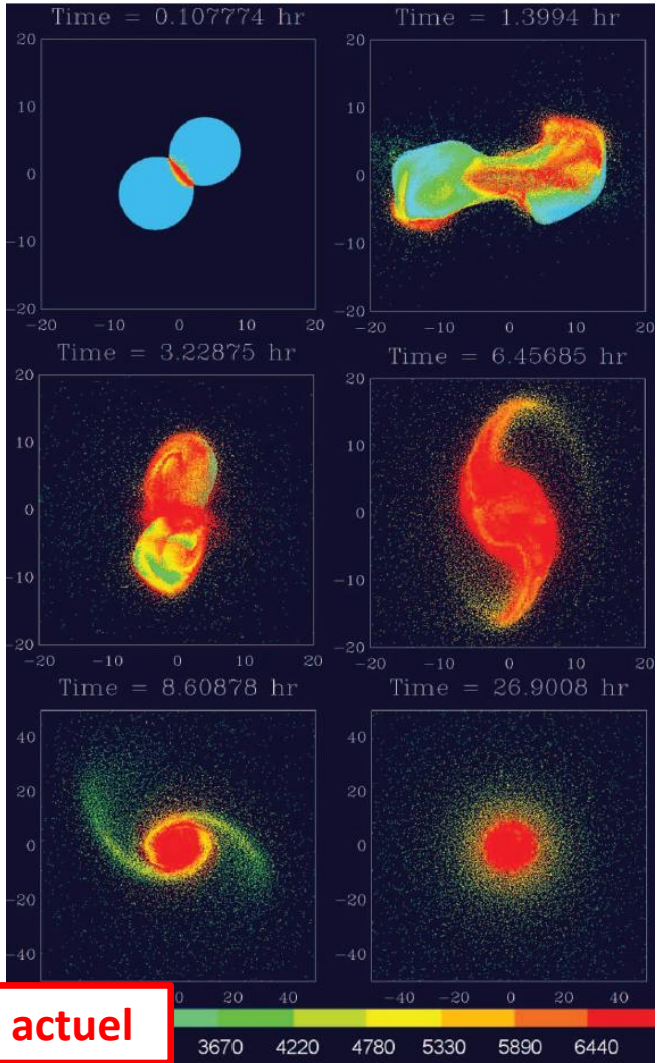
Impacts non-canoniques

A la recherche d'impacts pouvant injecter plus de matière Terrestre dans le disque
IV: collision entre proto-planètes de masse comparable (Canup, 2012)

Si deux planètes identiques collisionnent, par symétrie la fraction de chacun dans le disque et dans la planète finale sera la même.

Si le rapport $\gamma = M_p/(M_c+M_p) \geq 0.4$ plusieurs résultats donnent $|\delta f_T| < 0.1$





Le moment cinétique final est 2-3 x le moment cinétique du système Terre-Lune actuel

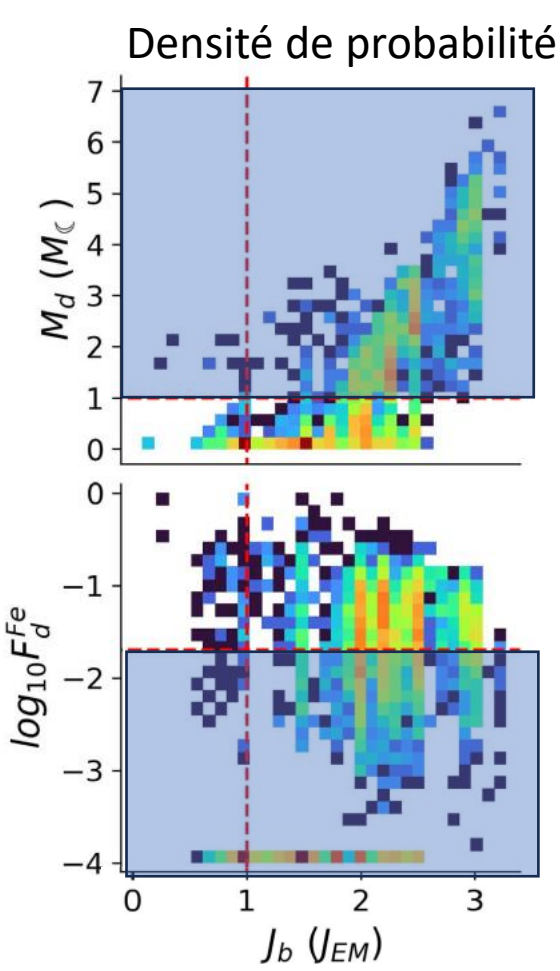
COLLÈGE DE FRANCE 1530

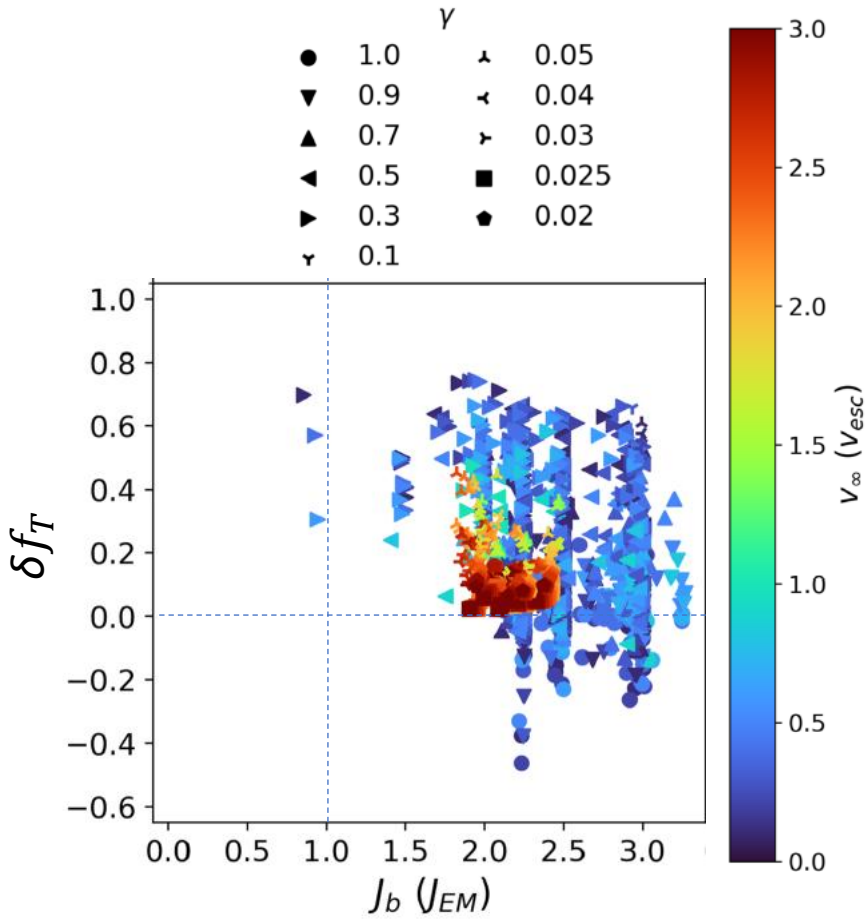
Considérations sur le moment cinétique

En utilisant le modèle SPH le plus performant à ce jour, Meier et al. (2025) montrent que avoir un trop grand moment cinétique final est une caractéristique commune à tout modèle qui ejecte dans le disque suffisamment de masse mais peu de fer

Grand éventail de simulations, avec différents rapports des masses, vitesses et angles d'impact, rotations de la cible et du projectile

Aucune simulation avec moment cinétique final égal à celui du système Terre-Lune a δf_T<0.2

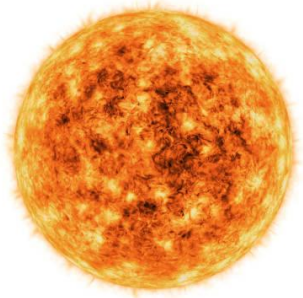




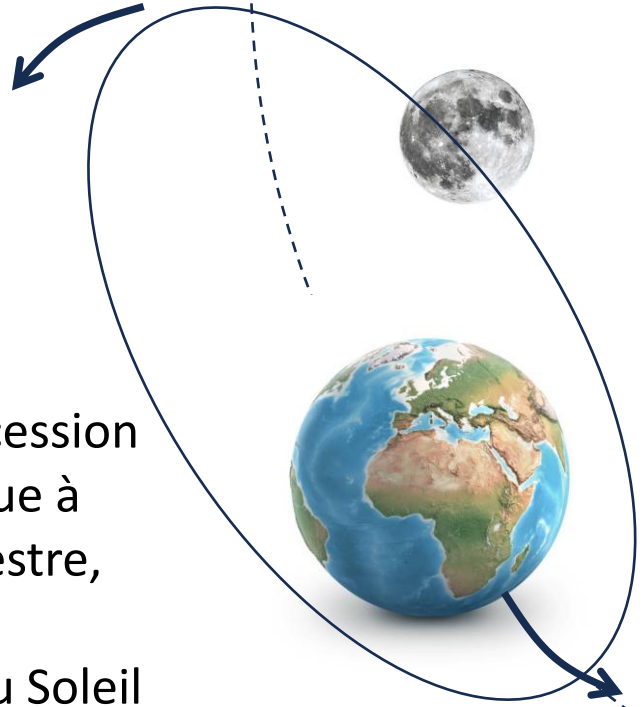
COLLÈGE DE FRANCE 1530

La non conservation du moment cinétique

Pendant la migration de la Lune, deux épisodes peuvent avoir lieu qui permettent de transférer une partie du moment cinétique du système Terre-Lune à l'orbite de la Terre autour du Soleil



I: la résonance d'évection



A lieu quand la période de précession de l'orbite elliptique Lunaire, due à l'aplatissement équatorial terrestre, est la même que la période de révolution de la Terre autour du Soleil (Kaula et Yoder, 1976; Touma et Wisdom, 1998)

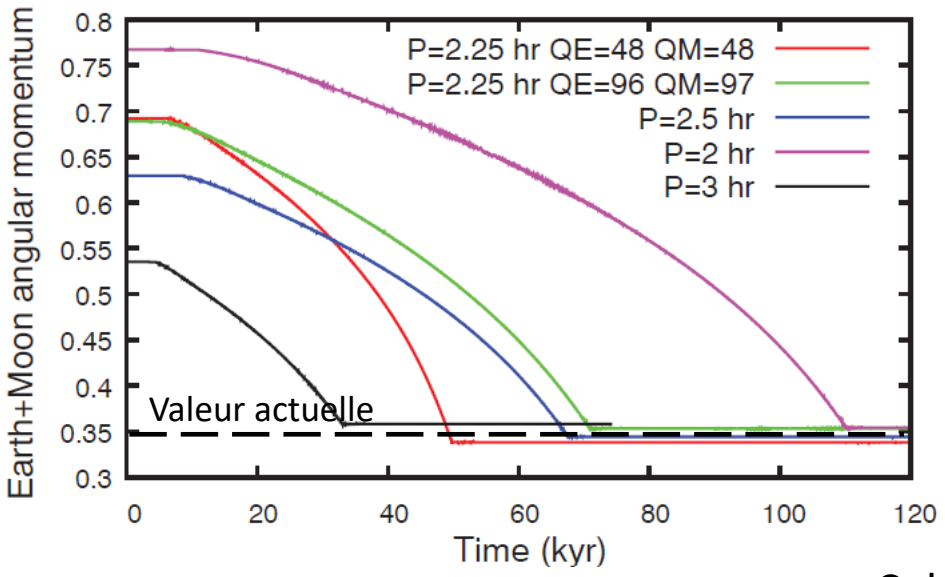
COLLÈGE DE FRANCE 1530

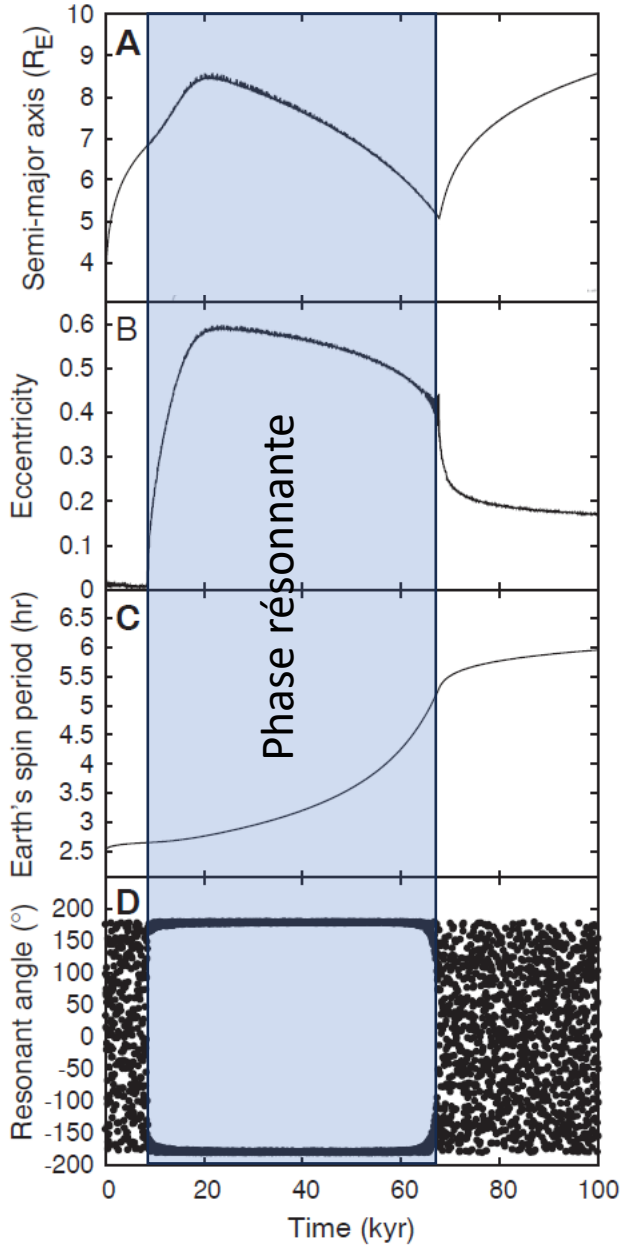
La non conservation du moment cinétique

I: la résonance d'évection

Elle cause une forte augmentation de l'excentricité de l'orbite lunaire, suivie d'un fort amortissement par effet de marée, qui temporairement inverse le sens de migration, alors que l'orbite lunaire s'oriente à 90 degrés par rapport à la ligne Soleil-Terre.

Diminution du moment cinétique Terre-Lune





Cuk et Stewart 2012

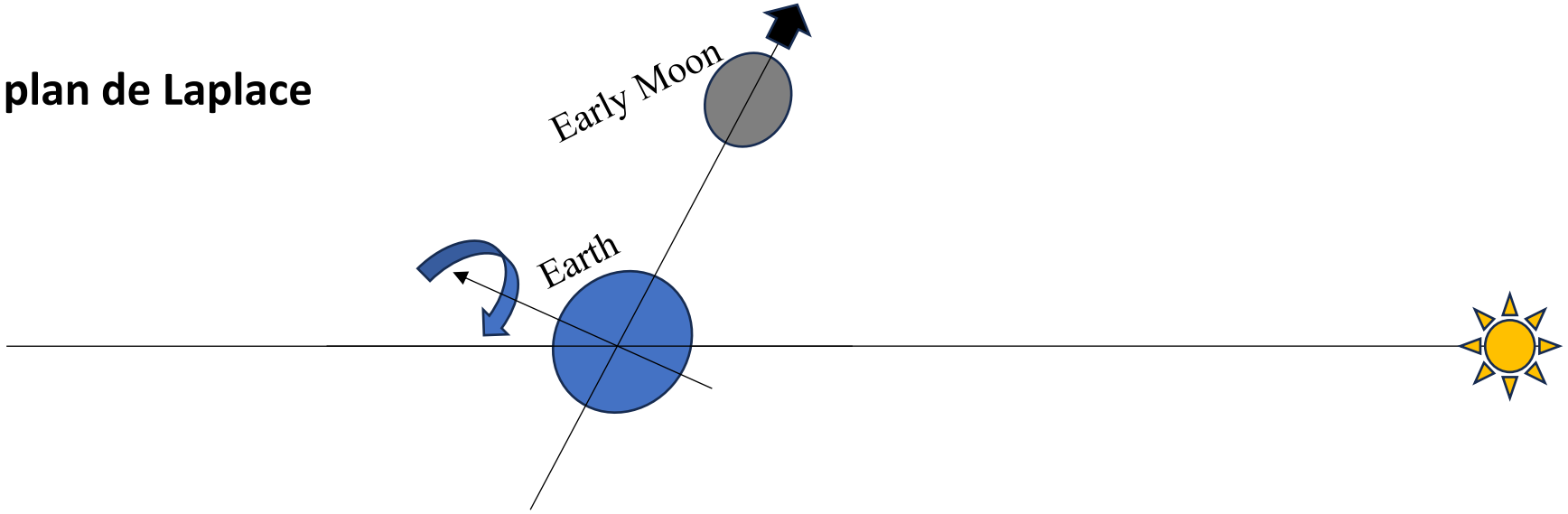
COLLÈGE DE FRANCE 1530

La non conservation du moment cinétique

Pendant la migration de la Lune, deux épisodes peuvent avoir lieu qui permettent de transférer une partie du moment cinétique du système Terre-Lune à l'orbite de la Terre autour du Soleil

II: la transition du plan de Laplace

Cuk et al., 2016



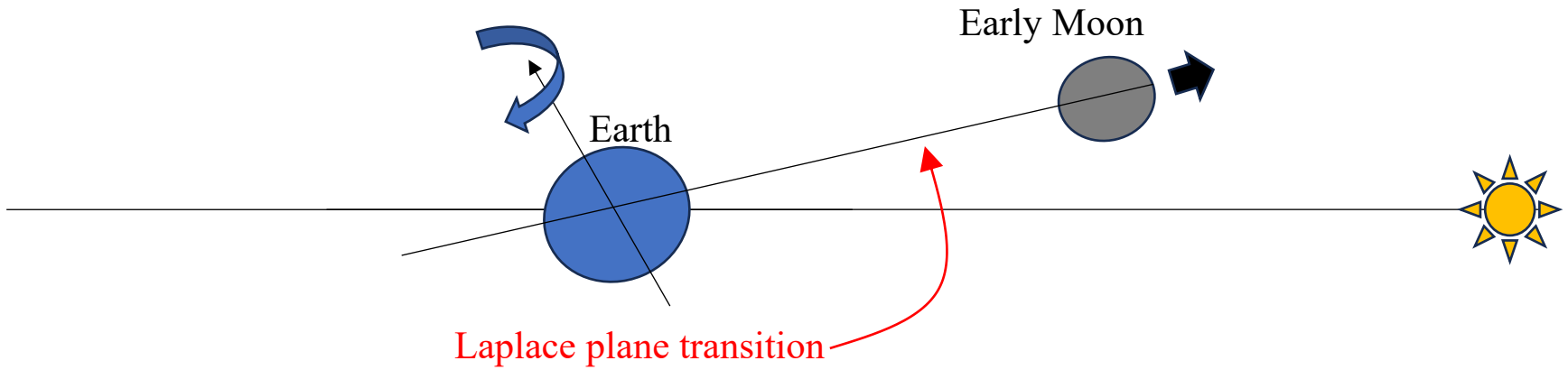
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

La non conservation du moment cinétique

Pendant la migration de la Lune, deux épisodes peuvent avoir lieu qui permettent de transférer une partie du moment cinétique du système Terre-Lune à l'orbite de la Terre autour du Soleil

II: la transition du plan de Laplace

Cuk et al., 2016

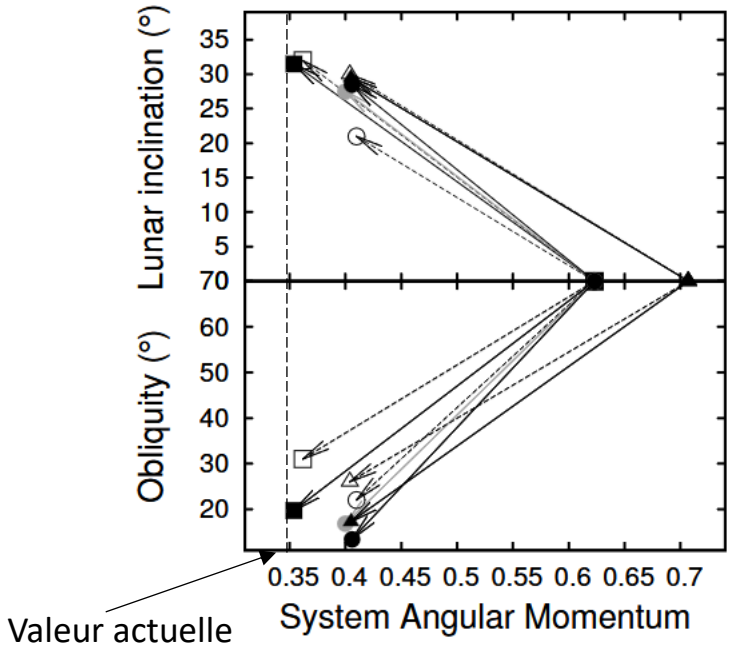


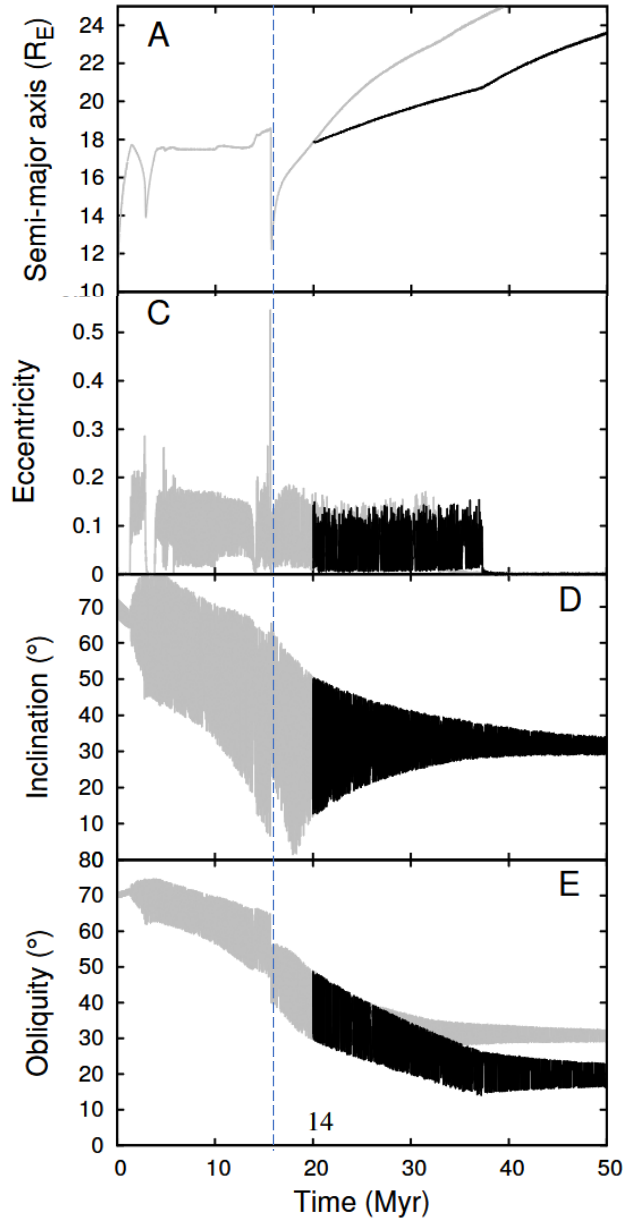
COLLÈGE
DE FRANCE
1530

La non conservation du moment cinétique

II: la transition du plan de Laplace

Elle cause une augmentation de l'excentricité et une forte diminution de l'inclinaison de l'orbite lunaire par rapport à l'écliptique, ainsi qu'un redressement de l'axe de rotation terrestre





Cuk et al. 2016

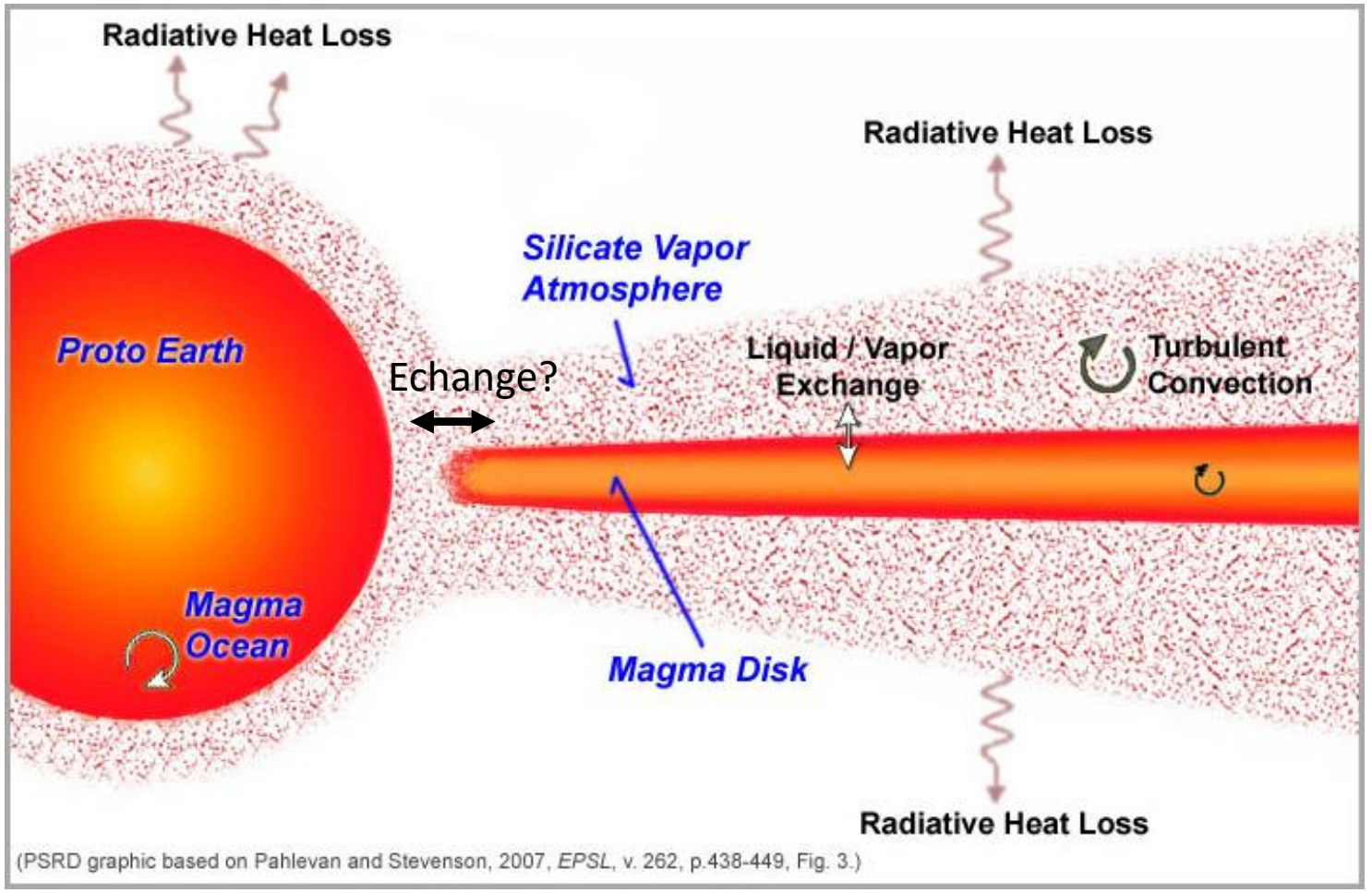
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Partie IV:
L’équilibration isotopique Terre – disque proto-lunaire

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Connexion planète-disque

Étant donné que même les impacts non-canoniques ont du mal à obtenir $\delta f_T \sim 0$, Pahlevan et Stevenson (2007) ont proposé que la Terre et le disque proto-Lunaire se soient équilibrés isotopiquement par échange de matière en phase vapeur ou liquide

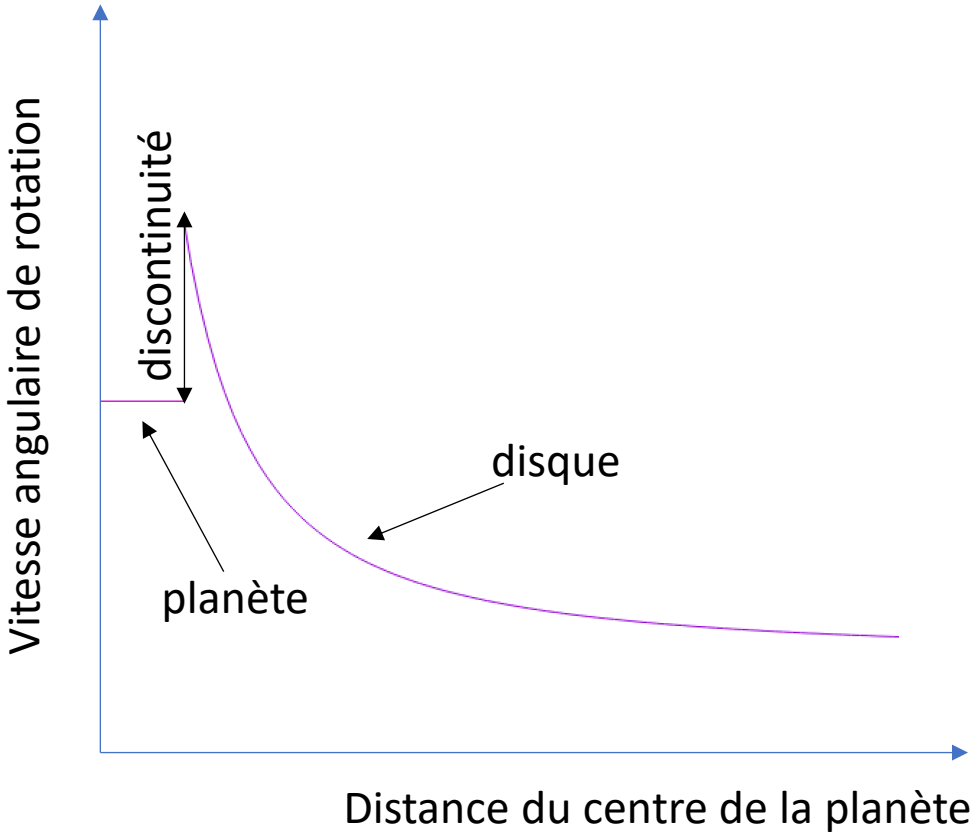


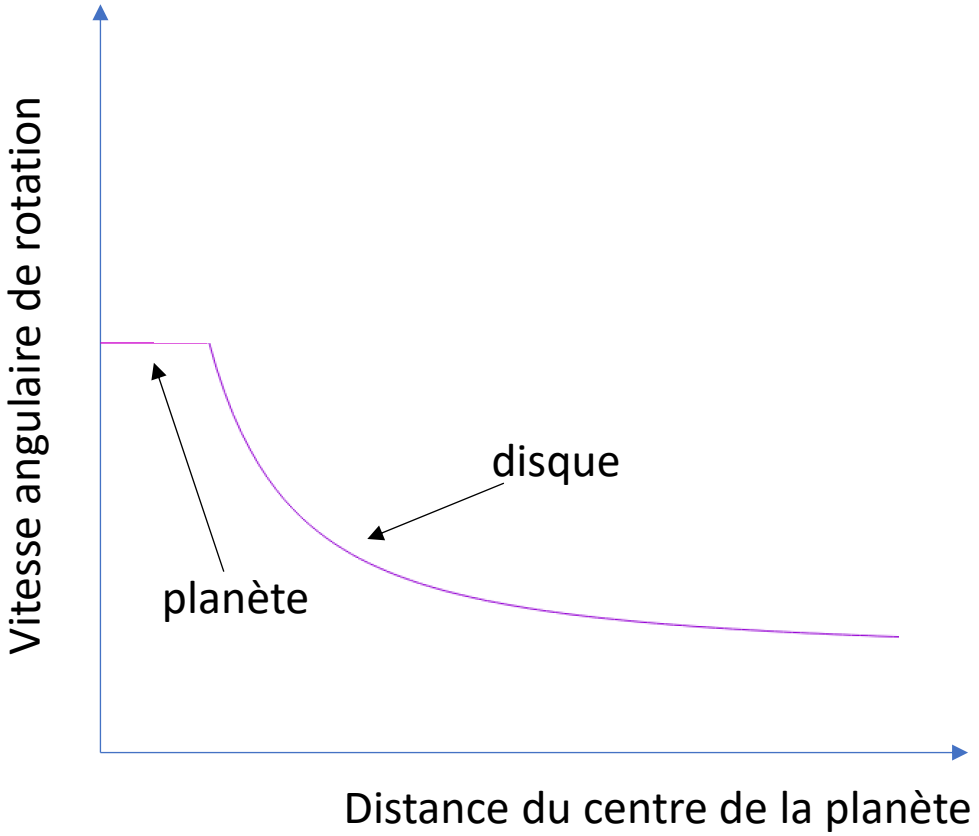
Comment échanger de la matière entre la planète et le disque? Quelle interface?

COLLÈGE DE FRANCE 1530

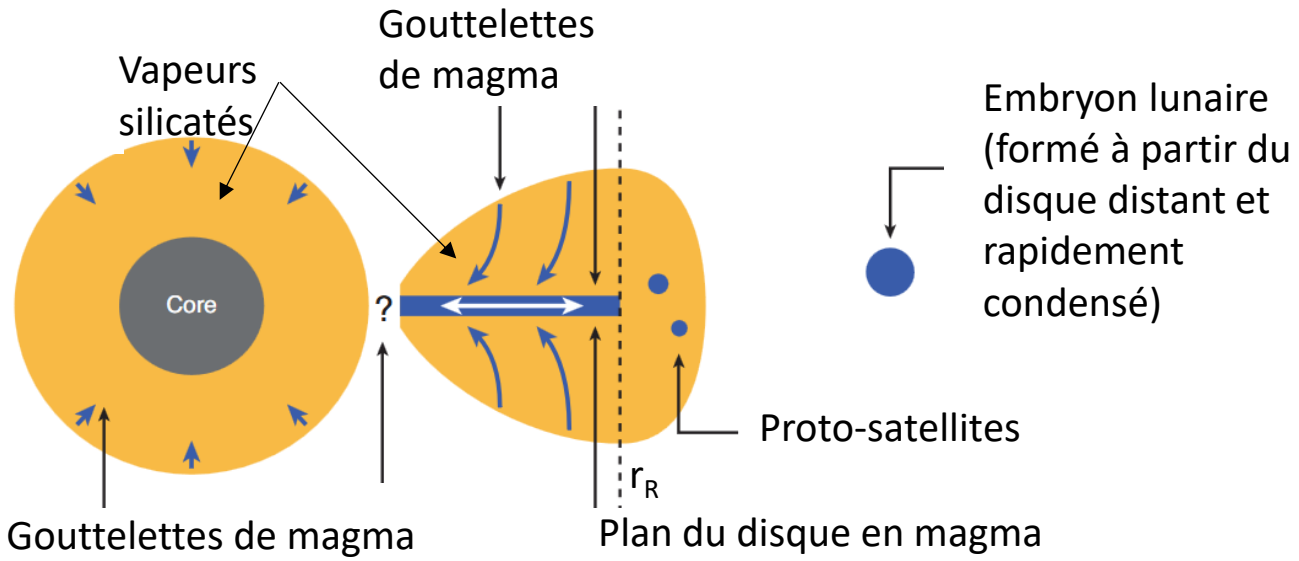
Connexion planète-disque

Lock et Stewart (2017) proposent que, à la suite d'un impact à haut moment cinétique et haute energie, la planète soit plus étendue et en rotation rapide, de sorte de ne pas avoir de discontinuité rotationnelle avec le disque. Ils appellent une telle structure planète-disque le *synestia*

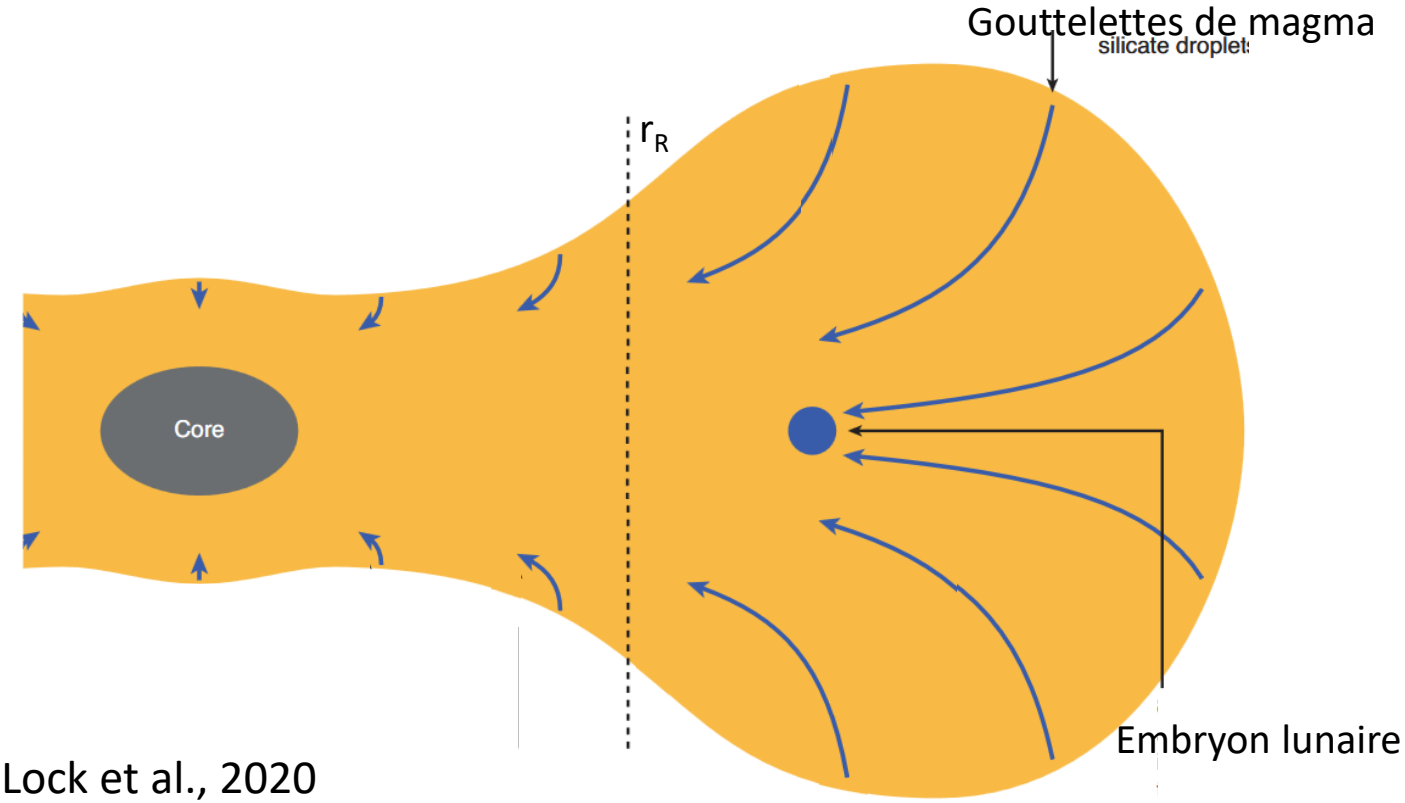




Structure “classique”



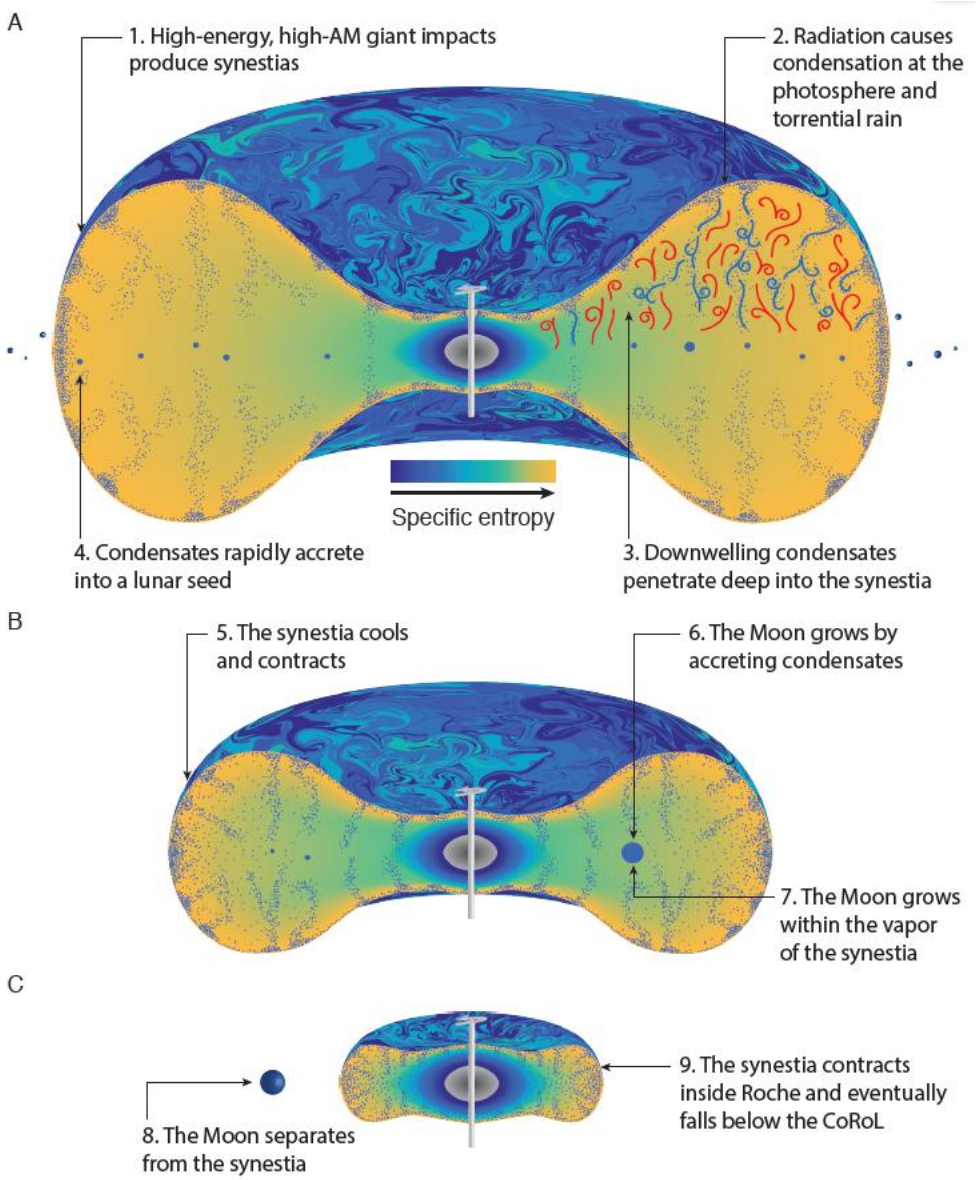
Structure Synestia



Lock et al., 2020

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Le synestia et l'appauvrissement lunaire en éléments volatils



Lors de son refroidissement le synestia se contracte et se sépare de la Lune. Les éléments encore en phase gazeuse (volatils) ne sont donc pas accrétés.

Dans ce scénario, le moment cinétique final du système Terre-Lune est trop élevé. Il faut donc invoquer évection et/ou transition du plan de Laplace pour le réduire.

Lock et al., 2018

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Partie V:
Conséquences sur la croissance de la Terre

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Mode d'accrétion

Pas seulement une accrétion continue de petits planétésimaux mais au moins un impact géant.

L'impact qui a généré la Lune a au lieu forcément à la fin de la croissance Terrestre.

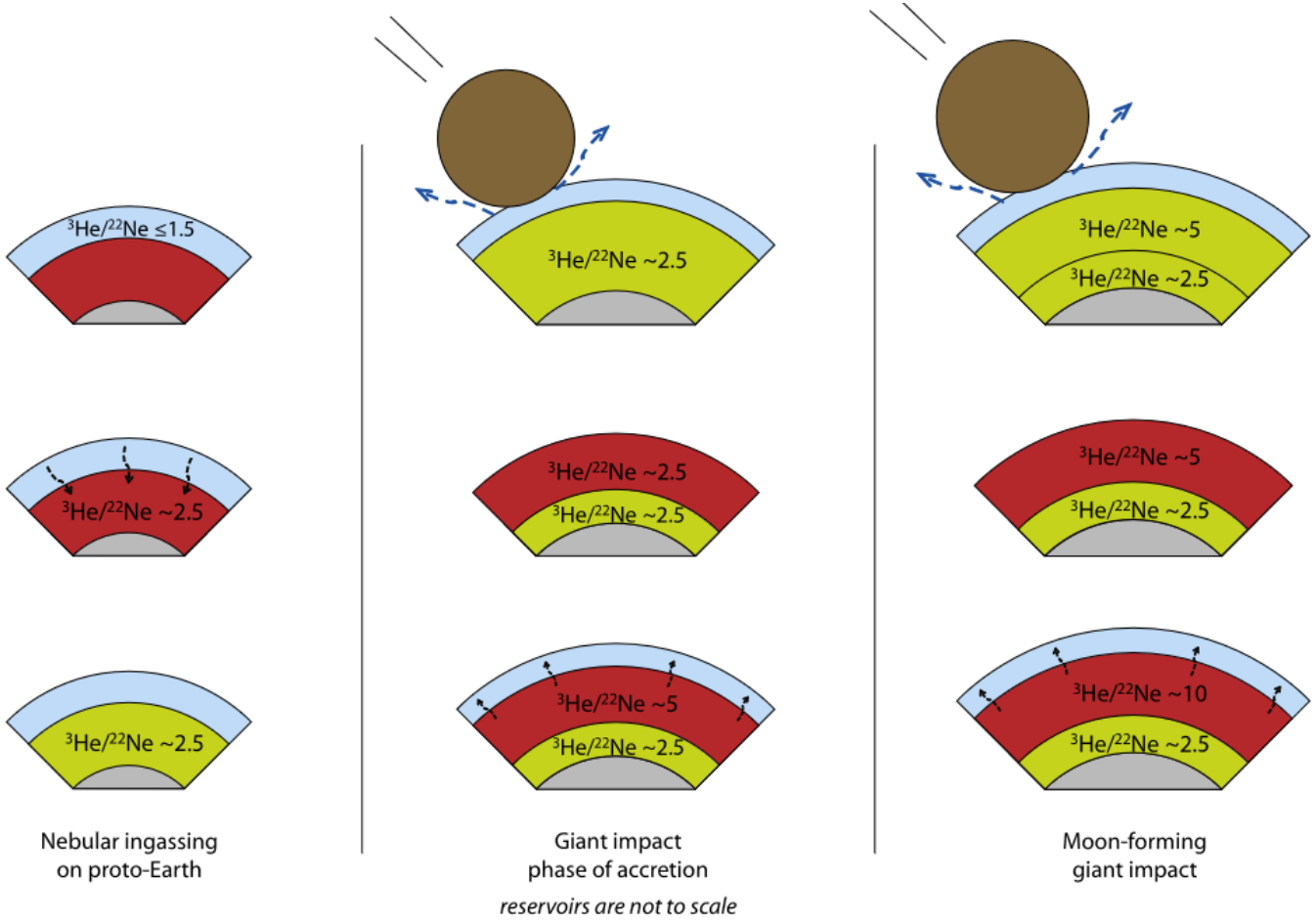
Si la Terre avait accrété plus que le vernis tardif (~0.5%) après la formation de la Lune, les deux objets ne pourraient pas être identiques du point de vue isotopique

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Plusieurs impacts géants?

Tucker and Mukhopadhyay, 2014:
Le rapport $^{3}He/^{22}Ne$ du manteau supérieur, 4x plus grand que celui du manteau inférieur qui représente la valeur initiale, nécessite la fusion répétée du manteau supérieur par des gros impacts et son dégazage.

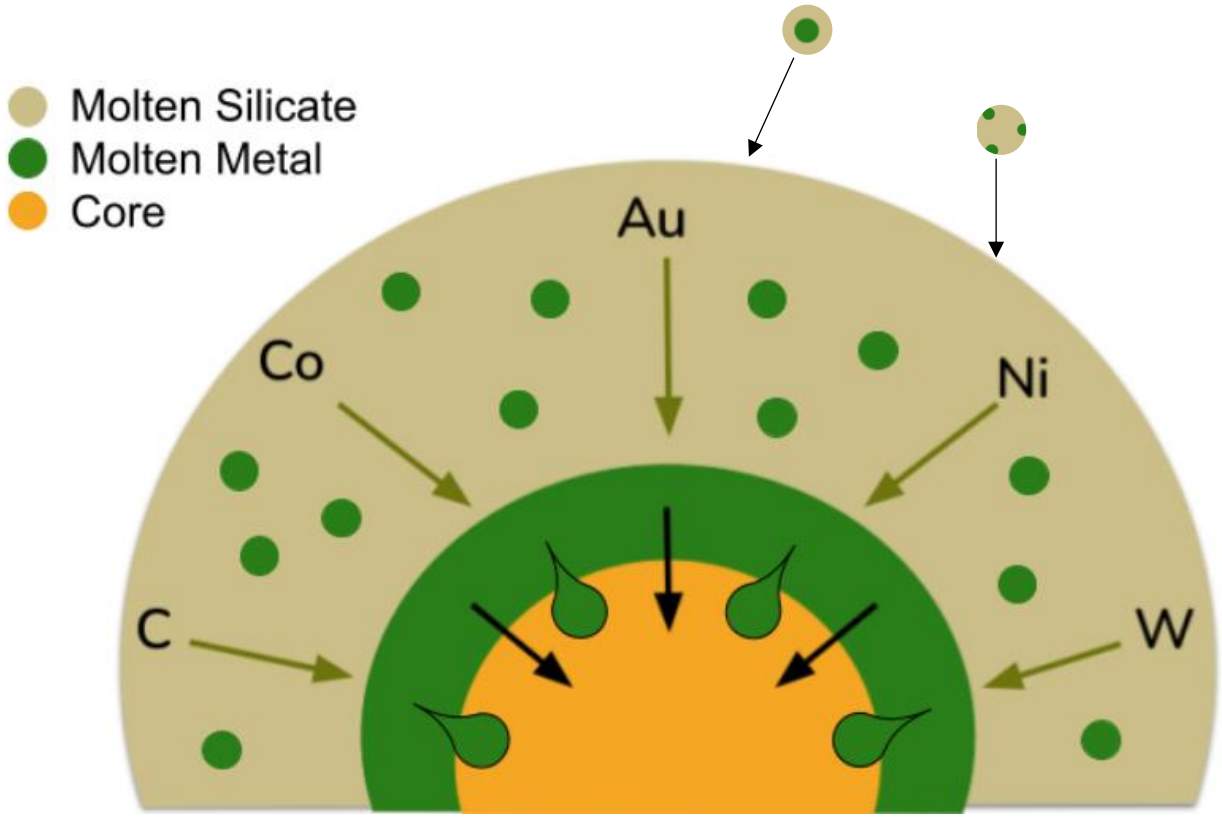
Au moins 2 impacts géants



COLLÈGE DE FRANCE
1530

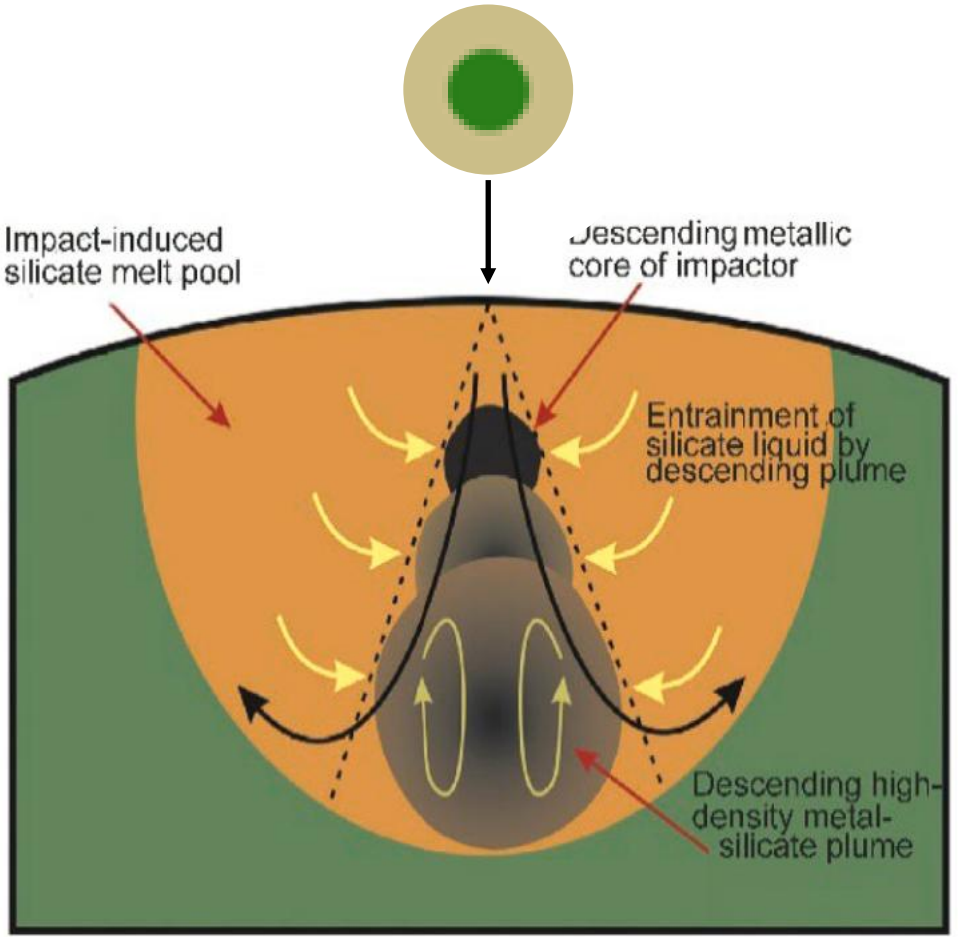
Conséquences sur la différentiation de la Terre

Croissance par accrétion de planétésimaux



Apport continu de matière
Équilibration métal-silicate et formation du noyau tant que la planète est fondue

Croissance par impact géant



Fusion partielle du manteau
Équilibration d'une partie du noyau avec une partie du manteau fondu

COLLÈGE DE FRANCE
1530

A retenir

- Les caractéristiques principales de la Lune sont son fort appauvrissement en fer et en éléments volatiles par rapport à la Terre
- La formation via un impact géant est le seul scénario qui permet de les expliquer
- L'impact génère un disque de matière issue des manteaux des deux corps (avec peu de fer), fondue ou vaporisée; la Lune se forme à partir de la matière solide (réfractaire) qui s'étale au-delà de la limite de Roche
- La Lune et la Terre sont identiques en termes d'anomalies nucléosynthétiques et $\Delta^{17}O$
- Soit la Terre et Theia étaient identiques, soit le disque proto-lunaire doit avoir le même mélange Theia – protoTerre que la Terre finale, ce qui n'est pas le cas de l'impact canonique
- Impacts rasants, impacts super-géants ou sur des cibles en rotation rapide permettent d'avoir des mélanges plus semblables entre la Terre et le disque
- Cependant, le moment cinétique final du système Terre-Lune est 2-3x celui actuel. Le moment cinétique doit être transféré à l'orbite terrestre via la résonance d'évection ou la transition du plan de Laplace
- Il est possible que la Terre et le disque proto-lunaire se soient équilibrés isotopiquement. Ceci demande un impact à haut moment cinétique et haute énergie, qui crée le *synestia*, une structure Terre-disque sans solution de continuité.
- La Terre ne s'est donc pas formée que par impact de petits planétésimaux, mais aussi par impacts géants.
- Ceci implique la fusion épisodique d'une partie de son manteau et l'équilibration partielle métal-silicate

COLLÈGE DE FRANCE 1530