

L'origine de la Lune

Historique des hypothèses de Darwin, Roche, See ... à Hartmann, Lock, Rufu, Kegerreis



Copyright Pixabay – Myriams-photos

Claude Navarro
Toulouse, Février 2024

Remerciements :

A Christian Legrand et à Patrick de Luca pour leur aide à la réalisation de ce projet.

SOMMAIRE

<u>Introduction</u>	P. 01
<u>Hypothèse de la Fission</u> : la Lune est la fille de la Terre	P. 03
<u>Hypothèse de l'Accrétion</u> : la Lune est la sœur de la Terre	P. 11
<u>Hypothèse de la Capture</u> : la Lune est l'épouse de la Terre	P. 18
<u>Hypothèse impactique</u> : de Daly à la conférence de Kona en 1984	P. 26
<u>L'après Kona 1984</u> : débats récents et hypothèses alternatives	P. 35
<u>Conclusion</u>	P. 49
<u>Références bibliographiques</u>	P. 52
<u>Index des auteurs cités</u>	p. 58

NB1. De nombreux liens hypertextes figurent dans le texte afin de renvoyer le lecteur à des informations complémentaires en ligne. L'existence d'un lien cliquable est indiquée par le fait que le texte est souligné, comme c'est le cas par exemple dans le sommaire. Sauf erreur de mise en forme, un mot ou un ensemble de mots souligné a donc toujours cette signification.

NB2. Toutes les traductions sont personnelles (citations et légendes de schémas).

L'origine de la Lune

Historique des hypothèses, de Darwin, Roche, See ... à Hartmann, Lock, Rufu, Kegerreis



Depuis toujours, l'homme contemple la Lune et se demande parfois comment elle a été créée. Il est évident que sa présence quasi constante et son cycle mensuel régulier a particulièrement aidé l'humain dans son développement (agricole, administratif aussi), en lien avec le cycle annuel du Soleil. C'est pourquoi on retrouve une mythologie très ancienne la concernant. Associée à des divinités différentes selon les peuplades, elle est peu à peu devenue un centre d'intérêt scientifique dans l'antiquité. Rappelons que la sphéricité de la Lune (et de la Terre), la distance Terre-Lune, le diamètre de la Lune, l'énigme des éclipses (solaire comme lunaire), les phases lunaires, tout cela fut étudié et mesuré il y a fort longtemps. Rendons un hommage en passant à ces scientifiques antiques, par exemple à Aristarque qui trouva un moyen pour mesurer la taille de la Lune grâce aux éclipses lunaires (même s'il se trompa dans son estimation).

N'oublions pas que jusqu'à l'évènement de la lunette du temps de Galilée, tout se faisait à l'œil. Il était donc difficile d'avancer davantage que Copernic sans que cette révolution technologique eut lieu et que des observations « augmentées » (instrumentées) puissent confirmer ou infirmer telle ou telle supposition concernant les caractéristiques de la Lune. Seul corps céleste facile à détailler avec une lunette, elle fut l'objet de nombreux relevés qui associés à d'autres fournirent les premières cartes représentant le sol lunaire. Un petit pas de plus vers la compréhension de son sol tourmenté (plaines que certains pensaient être des mers, monts, cratères, ...). Mais quid jusqu'à une période assez récente de la compréhension de l'origine de la Lune, d'un point de vue scientifique ?

C'est en fait une histoire assez compliquée que la formation de la Lune. Les premières vraies théories à ce sujet, basées sur des faits mesurables, commencent au XIX^{ème} siècle seulement. Elles ont évolué, se sont transformées, certaines ont disparu. Des réponses sont actuellement privilégiées, mais la concurrence est rude chez les scientifiques, d'autant plus que la connaissance des différentes propriétés lunaires s'améliore avec le développement technologique et fait bouger les idées à ce sujet.

Nous allons tenter dans ce document de récapituler ces étapes du XIXème siècle jusqu'à nos jours. Pour une version synthétique équivalente, nous pouvons renvoyer le lecteur à l'article publié par Christian Legrand dans la revue « Astrosurf Magazine » (n° 114, Janvier/Février 2022), et ceci d'autant plus qu'il existe en réalité très peu de textes scientifiques détaillés sur ce sujet en langue française. Ma base de lecture est donc exclusivement - ou presque - anglosaxonne.

Dans les trois premiers chapitres, nous présenterons les hypothèses dites « historiques » qui ont été émises au XIXème et au début du XXème siècle : la fission (Darwin), l'accrétion (Roche), la capture (See). Il serait possible également de dire qu'il s'agit d'hypothèses formulées avant que l'humanité n'envoie des sondes photographier de plus près notre satellite naturel. A chaque fois, nous verrons que des variantes plus ou moins récentes (jusqu'à nos jours) ont tenté d'actualiser leurs principes théoriques fondateurs.

Dans un **quatrième chapitre**, nous consacrerons un temps à l'hypothèse encore dominante de nos jours, celle de « l'impactisme » qui considère qu'un impact géant a failli détruire la planète Terre dans sa toute jeunesse, avec comme effet de former la Lune. Cette hypothèse a pris son essor dans les années 1970 à la suite des missions Apollo, grâce à l'analyse des roches lunaires, et fut très médiatisée (un grand cataclysme, ça plait !). Elle mérite qu'on s'y arrête et l'on verra, là aussi, quelques variantes.

Enfin, dans un **cinquième et dernier chapitre**, nous réserverons une place aux hypothèses plus récentes, dont celle des « impacts multiples » et de la « synestia ». Ces hypothèses originales supposent souvent une interaction entre plusieurs processus déjà présentés sous d'autres modèles, mais suggèrent une nouvelle version de la création de notre satellite.

Ce panorama s'arrête en janvier 2024, car il est toujours sage de dater des propos scientifiques en ajoutant « dans l'état actuel de nos connaissances ». Nul doute qu'il faudra compléter ce tour d'horizon dans un avenir pas si lointain.

1. L'hypothèse de la Fission¹ (ou : la Lune est la fille de la Terre)

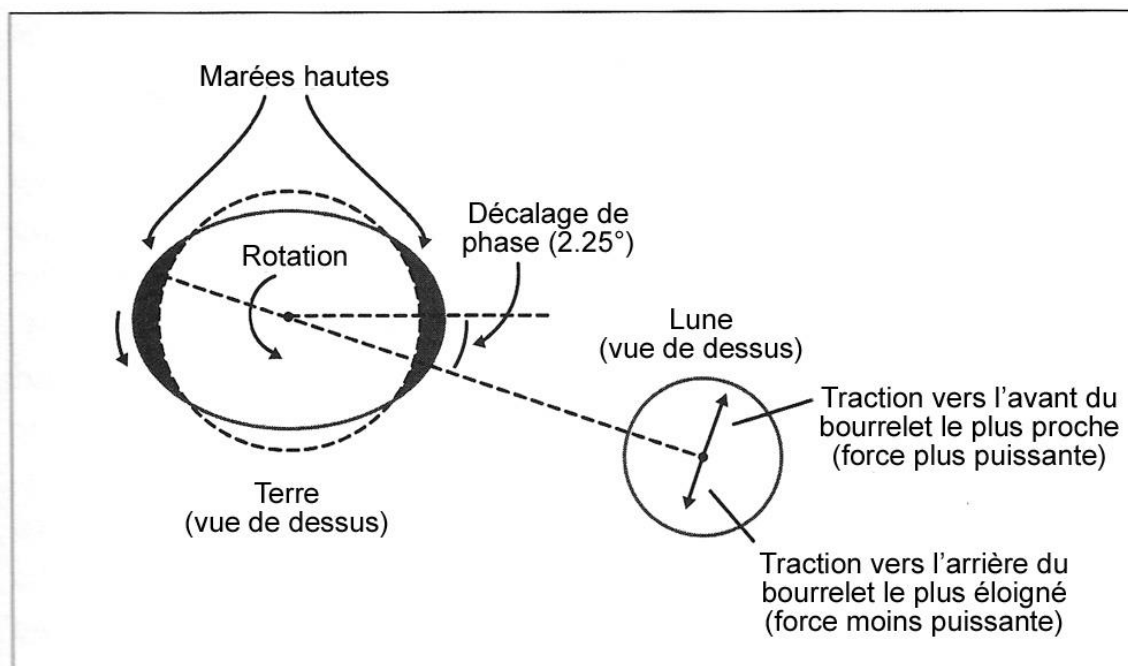


Savez-vous que dans un lointain futur il ne sera plus possible d'admirer une éclipse totale de Soleil ? Cette prévision quelque peu intrigante fait parfois l'objet d'une brève dans un journal ou sur un site web. C'est un fait exact. Depuis longtemps, on sait que dans les mouvements réciproques de la Terre et de la Lune essentiellement dus aux forces de marée, la Terre ralentit sa rotation et, respectant les principes immuables de la physique, la Lune s'éloigne en conséquence pour conserver le moment cinétique du couple. Depuis que les astronautes des missions Apollo ont déposé sur la surface lunaire des panneaux réfléchissants, des tirs laser depuis la Terre permettent de mesurer la distance Terre-Lune avec une précision remarquable. Conclusion : la Lune s'éloigne de nous de 3,8 centimètres par an. Rassurez-vous, on estime qu'il faudra attendre plus de 500 millions d'années pour que le diamètre apparent de la Lune ait diminué au point qu'il ne permettra plus de couvrir l'intégralité du diamètre solaire lors d'une éclipse. Cela laisse une marge suffisante aux traqueurs d'éclipses.

Une petite explication s'impose, qui nous introduira parfaitement au thème de l'hypothèse de la Fission auquel est consacré ce chapitre. Chacun a appris à l'école que la Lune attire la Terre (et vice-versa !) du fait de sa proximité et que cela se traduit par un spectacle impressionnant, si l'on prend le temps d'admirer un océan depuis une plage. L'eau se retire pendant un temps, puis revient, et le cycle des marées est immuable. Mais le phénomène physique est plus complexe que l'on croit. En effet, le bourrelet d'eau qui déforme la surface des mers terrestres ne suit pas exactement la position de la Lune. Certes, il y a le découpage des terres maritimes qui peut gêner cette progression, mais l'essentiel

¹ La chronologie n'est pas respectée puisque les travaux de Roche (hypothèse de l'accrétion) ont eu lieu un peu avant ceux de Darwin. Mais la logique thématique me semble ainsi plus cohérente dans son ensemble.

se trouve dans les mouvements respectifs de la Terre et de la Lune. Pour illustrer mon propos, je vous propose un schéma figurant en page 79 de l'ouvrage de Mackenzie (2003).



Tout serait simple s'il n'y avait aucune aspérité sur la Terre (un globe lisse) et, surtout, si la Lune avait une vitesse de révolution autour de la Terre en accord avec la vitesse de rotation de la Terre, ce qui est loin d'être le cas : la Terre tourne sur elle-même (360°) en 24 heures et pendant ce temps la Lune n'a avancé que de quelques 13 degrés dans le ciel puisqu'il lui faut environ 28 jours pour achever sa rotation - qui est synchrone avec sa révolution. Le différentiel de vitesse est tel que des effets opposés apparaissent. D'un côté, la Lune attire vers elle par effet gravitationnel l'élément liquide (pas seulement liquide, disons que c'est le plus évident). D'un autre côté, la Terre tourne vite, joue un rôle de « centrifugeuse » et, surtout, entraîne dans son mouvement de rotation cette masse liquide qui se retrouve légèrement en avance par rapport à la position de la Lune. En résumé : ça tire, ça frotte, donc ça freine. Et je ne parle pas de l'attraction solaire et de son rôle pendant la lunaison, accentuant ou diminuant celui de la Lune. C'est ce phénomène de friction, applicable aussi aux éléments plus rigides des deux corps, qui ralentit peu à peu la rotation de la Terre. La perte se compte en microsecondes par an, mais elle est suffisante pour produire l'effet d'éloignement de la Lune que nous avons évoqué.

1.1. La « fissiparturition » de George Darwin :

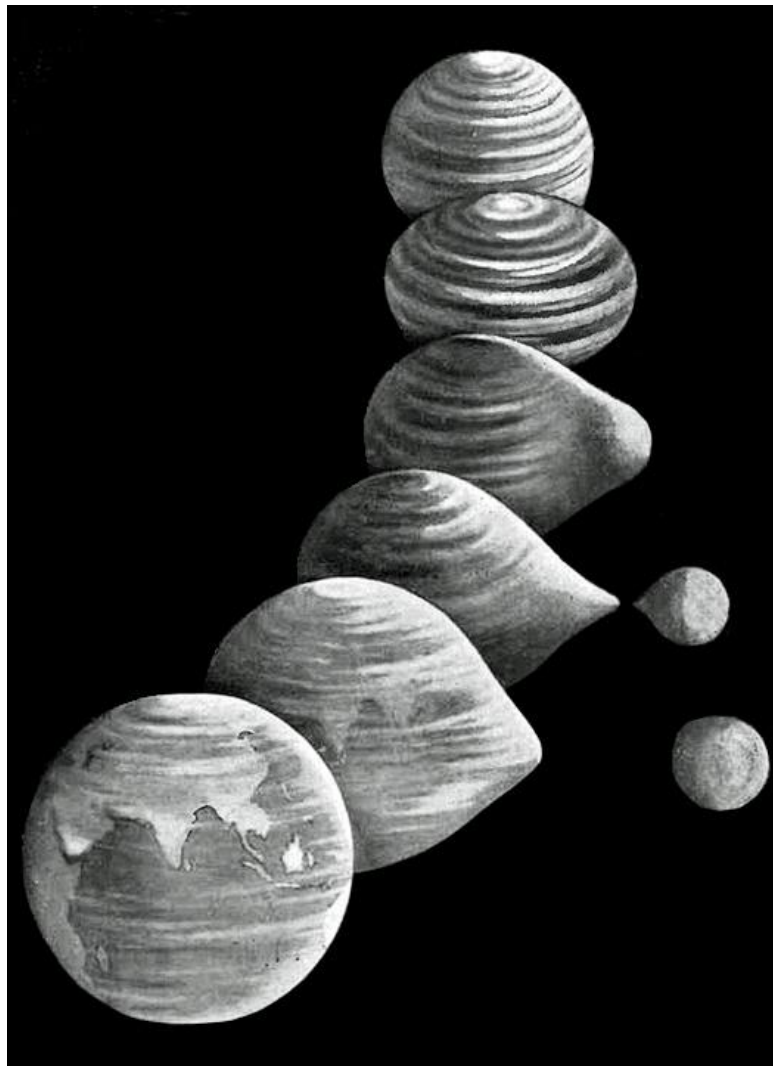
George Darwin (l'un des fils du célèbre Charles) est sans doute le scientifique qui s'est le plus intéressé aux effets de marée entre la Terre et la Lune dans la deuxième partie du XIX^{ème} siècle et le début du XX^{ème} siècle. Fêré de mathématiques, il a pu modéliser les phénomènes complexes que je viens d'évoquer. Plusieurs de ses travaux ont été à l'honneur et l'on peut trouver en ligne une synthèse de son travail sur les marées dans l'Encyclopaedia Britannica de 1902. Dans cette synthèse figure également une partie consacrée à l'histoire de la Terre et de la Lune. Elle reprend son idée évoquée dans des textes antérieurs à partir de 1878 : la Lune est issue de la Terre.

Pour en arriver là, Darwin a donc analysé l'effet ralentisseur de la marée Terre-Lune sur la durée de rotation de la Terre. Puisque les calculs lui montraient que, dans le futur, la durée du jour continuerait à augmenter et la Lune à s'éloigner, qu'en était-il dans le passé ? L'inverse, bien sûr ! C'est-à-dire qu'il devenait évident, sur la base des règles physiques connues, qu'il fut un temps où la Lune

devait être plus proche d'une Terre en rotation plus rapide. Voire très proche. En fin de compte, Darwin se retrouvait avec une proto-Terre qui à l'origine était sans satellite, sous forme plus ou moins visqueuse, en rotation excessivement rapide (de l'ordre de 3 à 4 heures). Bien entendu, on imagine facilement qu'avec une telle vitesse de rotation la proto-Terre avait davantage l'allure d'un ballon de rugby voire d'un cigare que d'une sphère. Et ce qui devait arriver arriva : la force centrifuge gigantesque finit par expulser un morceau de la proto-Terre dans l'espace qui forma un satellite, la Lune.

Darwin lui-même se demandait si la masse expulsée était un bloc unique ou se présentait sous forme d'anneau de débris qui finiront par s'agglomérer en un seul corps (NB : voilà une proposition de deux hypothèses de la formation de la Lune). Il n'excluait pas non plus le rôle impactique de ses constituants pour favoriser cette accrétion.

Pour enjoliver l'hypothèse de la Fission, j'aime bien me référer à ce chef d'œuvre imagé de ce processus, tel qu'il figure en page 3 de l'ouvrage de Phillips et Steavenson publié en 1923 « Hutchinson's Splendour of the Heavens ».



On voit en premier lieu une Proto-Terre totalement symétrique (étape « Sphère »). Peu à peu, elle commence à se déformer sous l'effet de sa rotation excessivement rapide (étape « Œuf »). Puis des

instabilités internes vont provoquer un renflement important (étape « Poire »). L'instabilité grandissant, le renflement finit par se séparer de la proto-Terre (étape du « Bourgeon » qui se détache). Puis la Lune est formée et se satellise autour de la Terre, tandis que cette dernière reprend rapidement sa forme sphéroïdale.

Revenons de manière plus réaliste aux propos de Darwin. Suite à cette scission, les deux corps sont presque en contact l'un de l'autre, tournant comme s'ils formaient encore un objet unique. Mais en raison des mouvements de marée respectifs, un tel système est instable. D'après Darwin, si la Lune avait tourné plus vite que la rotation de la Terre, elle aurait probablement eu une courte existence en retombant tout simplement sur la Terre. Conclusion : elle devait tourner moins vite. Il estimait tout de même qu'à ses débuts, sa révolution devait être de 5 à 6 heures – comparativement à ses 28 jours actuels, cela semble incroyable. Mais n'oublions pas les phénomènes de marée que nous avons évoqués qui produisent un ralentissement de la rotation terrestre tout en freinant la révolution lunaire. Mécaniquement, un éloignement progressif de la Lune a eu lieu, jusqu'à la situation que nous connaissons actuellement (la Lune gravite en moyenne à moins de 400.000 km de la Terre).

Pour être plus précis, ajoutons que Darwin avait calculé - et ses opposants aussi ! – qu'une Terre initiale en rotation de 3 à 5 heures n'aurait pas, seule, la capacité à se déformer au point d'éjecter une partie de ses matériaux dans l'espace. Malgré sa vitesse, il lui manquait de l'énergie. Qu'à cela ne tienne, rétorqua Darwin, le Soleil est là pour compléter. Sa force d'attraction est importante et aurait pu apporter ce coup de pouce nécessaire à la déformation du corps terrestre encore visqueux. Pour favoriser ce phénomène de marée, il fallait considérer que l'axe équatorial de la proto-terre visqueuse était situé dans l'axe de révolution autour du Soleil. C'est ce qui se passe actuellement lors des très grandes marées, c'est-à-dire lors d'un alignement parfait entre l'équateur terrestre, la Lune et le Soleil. Darwin calcula que pour accentuer le déséquilibre interne à la proto-Terre, il fallait admettre une rotation de 3 à 4 heures avec une fréquence d'oscillation interne de 1,30 heure à 2 heures. Dans ce cas, il y avait une synchronie entre la marée due au Soleil (qui se faisait, comme actuellement, deux fois par jour) et la fréquence d'oscillation de la proto-Terre. Ce cumul de forces accentue nécessairement l'importance de l'oscillation et, tel un pont qui s'écroule par amplification d'oscillation due au vent, la proto-Terre finit par partir en morceaux, tout au moins éjecte un gros morceau.

L'hypothèse de Darwin a connu un grand succès (et des critiques) dès le début. Elle fut même complétée par des auteurs tels que Osmond Fisher qui évoquait dès 1882 le fait que les bassins océaniques devaient être la trace de cet événement fabuleux (qu'il a joliment dénommé « *fissiparturition* », terme que j'ai repris pour intituler cette sous-partie). Dans un texte publié en 1891 il précisait même que le bassin de l'Océan Pacifique présente le volume suffisant pour être probablement l'endroit d'où ce gigantesque fragment s'est détaché (voir le « bourgeon » qui se détache dans l'image précédente). Cette hypothèse très originale n'a pas été reprise par Darwin. Pour Fisher, le mouvement des continents aurait ensuite comblé ce vide dans le bassin Pacifique et, en conséquence, le bassin Atlantique de son côté se serait déchiré en produisant avec le temps le parallélisme qu'on peut toujours constater entre les contours de l'Amérique et ceux de l'Afrique et de l'Europe.

Une autre idée novatrice de ce modèle réside dans la composition de la Lune et de la Terre. On considère actuellement (quel que soit le modèle sous-jacent utilisé) que la Lune est constituée des mêmes matériaux que le manteau de la Terre (avec une densité semblable). C'est tout à fait en accord avec l'hypothèse de Darwin de la formation de la Lune par fission de la partie externe de la Terre.

1.2. Les critiques du modèle de Darwin :

Dès la publication des premiers textes de Darwin sur la formation de la Lune, on voit se manifester autant de « fans » (tels que Fisher cité ci-dessus) que d'opposants (par exemple, James Nolan). Ce dernier publia un texte en 1885 dans lequel il montrait quelques lacunes à ce modèle. Ainsi, une difficulté est celle de la densité de la Lune. D'après Nolan, lors de cette fission le matériau éjecté est nécessairement issu du matériau le plus externe de la Terre (*NB : croûte + manteau*) et ce matériau est à la fois homogène et léger (il n'y a pas de noyau) ; de son côté la Terre s'est « densifiée » après la fission, son noyau central étant devenu proportionnellement plus important. Dans ses conditions, il devient difficile d'imaginer une Terre lourde et une Lune légère virevolter avec une période ultra-rapide et identique de rotation (pour la Terre) et de révolution (pour la Lune). Le moment cinétique est bien trop élevé pour la Lune. Sur cette question, en se basant sur ses propres calculs mathématiques, Forest Ray Moulton montrait que dans ce cas la friction des marées lunaires sur la Terre aurait amené la Lune à retomber sur la Terre.

Une autre critique de Nolan portait sur les effets de marée entre deux corps de taille et de densité différentes, si proches l'un de l'autre. Les déformations seraient telles que Nolan pensait qu'il était impossible à la Lune de se former ainsi ; il évoquait comme possibilité la formation autour de la Terre d'un anneau de débris, mais le différentiel de vitesse entre les corps plus proches de la Terre et ceux situés plus loin sur l'orbite aurait produit des collisions fréquentes ayant tendance à disperser les composants de l'anneau. La Lune aurait tout de même pu se former en agrégeant quelques-uns de ces corps, mais sous une forme réduite (*NB : la Lune est un très gros satellite comparativement à la Terre*).

De son côté, Harold Jeffreys fut tout d'abord séduit par la théorie de Darwin, mais en tant que mathématicien il s'aperçut que l'adjonction de la force de marée que Darwin prêtait au Soleil était quelque peu exagérée. En 1930, il publia un texte dans lequel ses calculs l'amènèrent à la conclusion que cette force n'aurait jamais pu compenser, et de loin, la dissipation d'énergie produite par les marées sur Terre. Autrement dit, il devenait impossible à la Terre d'accoucher de la Lune. Ce texte est souvent cité comme un coup fatal porté à la théorie de la Fission.

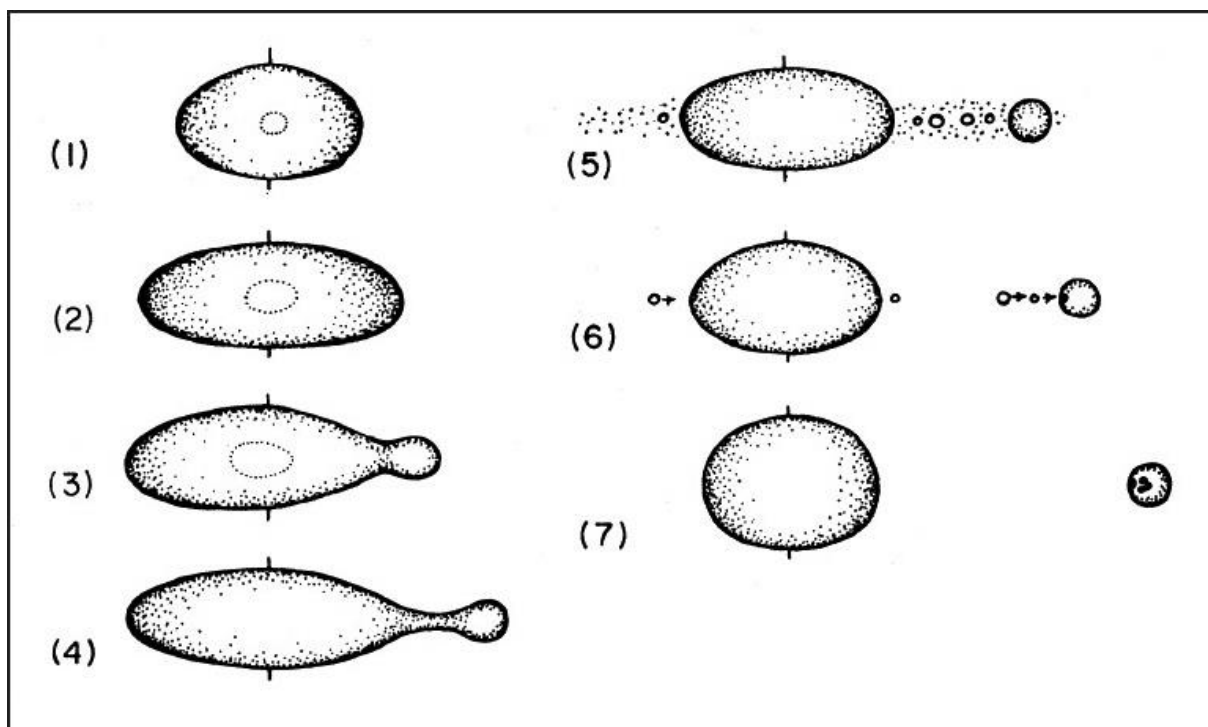
Une autre critique récurrente de cette théorie porte sur le fait que le matériau à l'origine de la Lune aurait été éjecté dans le plan équatorial de la proto-Terre ... mais l'orbite de la Lune actuelle est inclinée sur ce plan d'un peu plus de 5 degrés, ce qui se conçoit difficilement dans ce cadre de référence. Darwin avait d'ailleurs commencé ses premiers travaux en étudiant la question de ce décalage entre plans et estimé que les marées lunaires pouvaient avoir modifié l'axe de rotation de la Terre (avec comme conséquence une orbite lunaire décalée par rapport à l'équateur terrestre). Il est vrai que la critique n'est valable que si l'on considère un positionnement immuable Terre et Lune, sans prendre en compte les mouvements et inclinaisons diverses qui ont eu lieu depuis ce moment-là. Rien n'empêche des événements hypothétiques ultérieurs d'avoir eu comme effet d'incliner l'axe de rotation de la Terre ou de modifier l'axe de révolution de la Lune. Mais il ne s'agit là que de pure spéculation.

Ces différentes critiques, et la concurrence d'autres théories sur l'origine de la Lune, firent perdre peu à peu de la crédibilité au modèle de la fission de Darwin. Mais, comme le phénix renaît de ses cendres, des versions modernisées de cette théorie virent le jour ultérieurement.

1.3. Les versions modernisées de la théorie de Darwin :

Dans les années 1960, plusieurs auteurs réanalysèrent la question d'une création de la Lune à partir de matériaux éjectés par la Terre en rotation rapide. L'un d'eux, Donald U. Wise, s'attaqua à la critique importante de la vitesse de révolution initiale de la Lune autour d'une Terre en rotation - le problème récurrent de la valeur du moment cinétique du couple Terre-Lune. Il calcula que si le noyau

terrestre (plus dense) s'était contracté lors de sa formation au centre de la Terre, cela aurait eu comme conséquence d'augmenter la vitesse de rotation de la Terre, qui pouvait dès lors atteindre la valeur requise pour permettre une fission. Ce phénomène de conservation du moment cinétique est bien connu par analogie : « ... celle d'un patineur sur glace qui augmente sa vitesse de rotation en rapprochant ses bras tendus vers son corps » (Cummings, 2019, p. 127) - la contraction du noyau au centre de la Terre équivalant au rapprochement des bras du patineur. Dans ce cadre, Wise a proposé en 1963 un schéma de synthèse des différentes étapes de formation de la Lune, presque identique à celui de 1923 présenté précédemment, à un détail important près.



Si les étapes 1 à 4 sont classiques dans ce modèle, l'étape 5 du processus de fission comprend à la fois un gros planétésimal qui s'est formé non loin de la Terre (Lune en création) et toute une gamme de morceaux plus ou moins importants qui, gravité oblige, retomberont soit sur la Terre soit sur la Lune. Pour Wise, les plus gros d'entre eux participeront au modelage par impact des structures lunaires telles que les bassins sous-jacents aux mers (la lave remplira plus tard ces bassins). L'idée d'impacts de corps sur la Lune qui aurait créé les bassins et les cratères lunaires avait déjà été proposée par Karl Grove Gilbert lors d'une conférence fin 1892 (texte publié en 1893). Nous évoquerons à nouveau Gilbert dans les chapitres suivants.

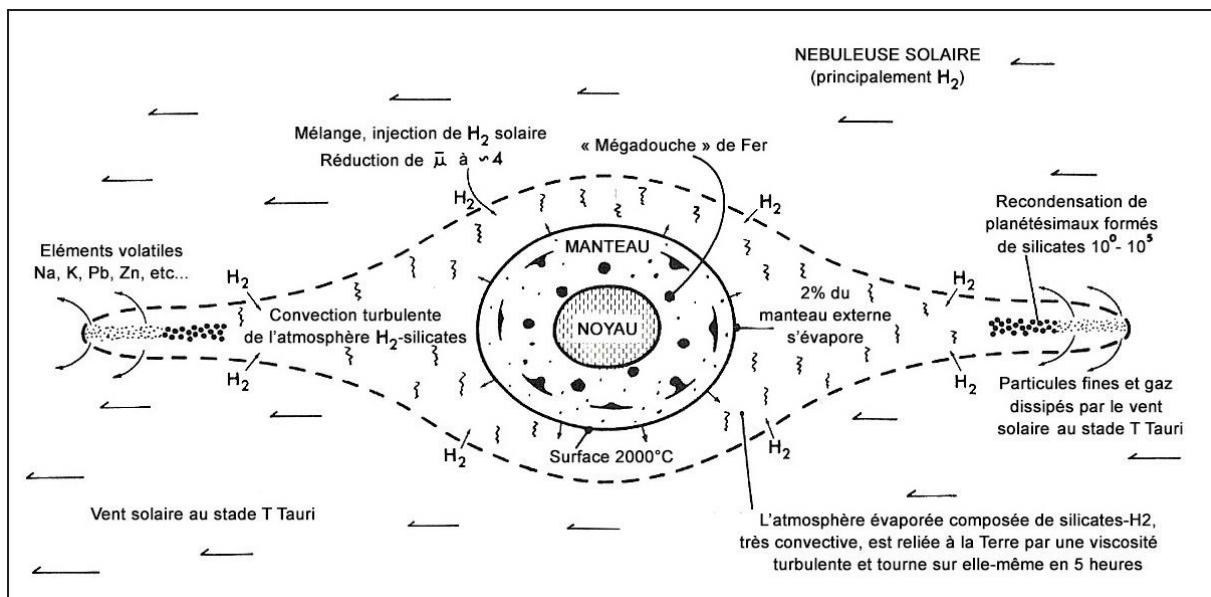
Wise dénomme « Imber » (Pluie, en latin) la plus importante des mini-lunes formées par co-accrétion qui vint percuter le sol lunaire en formant le bassin Imbrium situé sous la Mer des Pluies (*Mare Imbrium*) et cet impact, en soulevant la croûte, aurait formé les monts Pico et Piton. L'auteur explique également sous cette hypothèse pourquoi la face cachée de la Lune a une structure tout à fait différente de la face visible. Avec le temps, Wise n'a pas fondamentalement changé d'avis sur le modèle tel qu'il l'avait présenté dans les années 60. En 2014 encore, il critiquait le modèle dominant actuel (celui de l'impact géant) et arguait en faveur de la réhabilitation de la théorie de la fission.

J'ajoute qu'on voit converger ici trois processus de formation de la Lune ou de sa modification physique : la fission, l'accrétion et l'impactisme. Et j'avoue avoir un faible pour les modèles qui se complètent ... au risque de compliquer les choses !

N'oublions pas, dans les années 1960 également, le point de vue de John O'Keefe qui défendait la thèse de la fission (O'Keefe, 1969). Il supposait une fission ayant créé deux corps tournant l'un près de l'autre avec une période de révolution double de la période de rotation, ce qui règle entre autres difficultés celle relative à la conservation du moment cinétique.

Une variante très intéressante de la fission a été proposée dans les années 1970 (et suivantes) par Alfred E. Ringwood. Il l'a dénommée **l'hypothèse de la « précipitation »** (plus exactement, je dirais « évaporation/précipitation »). Elle mérite d'être développée ici, car à mon avis elle présente des analogies avec une hypothèse bien plus récente (années 2010) que nous présenterons plus loin. Partant du même constat qu'il y a un problème relatif à la valeur du moment cinétique du couple Terre – Lune, il reprend l'idée d'une contraction du noyau au centre de la Terre qui a permis à la fission de se produire. Mais il ajoute un nouveau facteur : *« le moment cinétique excédentaire du système Terre-Lune a été absorbé par une atmosphère primitive massive qui a également été déstabilisée et s'est échappée lors du cataclysme. »* (Ringwood, 1979, p. 236). L'auteur estime que dans les états de température excessifs de la formation des planètes, du matériau terrestre a pu s'évaporer (état gazeux) dans un premier temps, former un disque, se condenser ensuite sous forme d'anneau d'éléments solides, qui eux-mêmes finiront par s'agglomérer pour former la lune. Encore une fois, on voit que fission et accrétion peuvent fonctionner en harmonie.

Voici comment Ringwood représente cet état où la Terre baigne dans une atmosphère primitive et que la « précipitation » est en cours (op. cit. p. 238) :



La surface de la proto-Terre est à une température d'au moins 2.000 degrés. Les éléments à l'état gazeux ont été éjectés de la proto-Terre ou le sont encore par « évaporation ». Le manteau se constitue et le fer tombe en masse en se dirigeant vers le centre de la Terre (« précipitation »). Des éléments volatils sont évacués dans l'espace, des transformations chimiques opèrent. Les zones les plus externes, moins chaudes, se condensent et l'on voit les « grains » de planétésimaux se former. Ce sont eux qui, plus tard, s'aggloméreront pour former la Lune. Remarquons également dans ce modèle l'importance accordée à la radiation solaire (stade T Tauri dans lequel une étoile perd beaucoup de gaz sous forme de vent solaire).

On est loin, avec cette vision des choses, de la fissiparturition à la Darwin telle qu'imaginée dans l'ouvrage de 1923. Mais elle se situe toujours dans l'hypothèse d'une formation de la Lune à partir

d'ingrédients de la Terre qui ont été éjectés autour d'elle. L'accrétion est un bon complément à la fission et l'on a vu plus haut que Darwin lui-même évoquait cette possibilité.

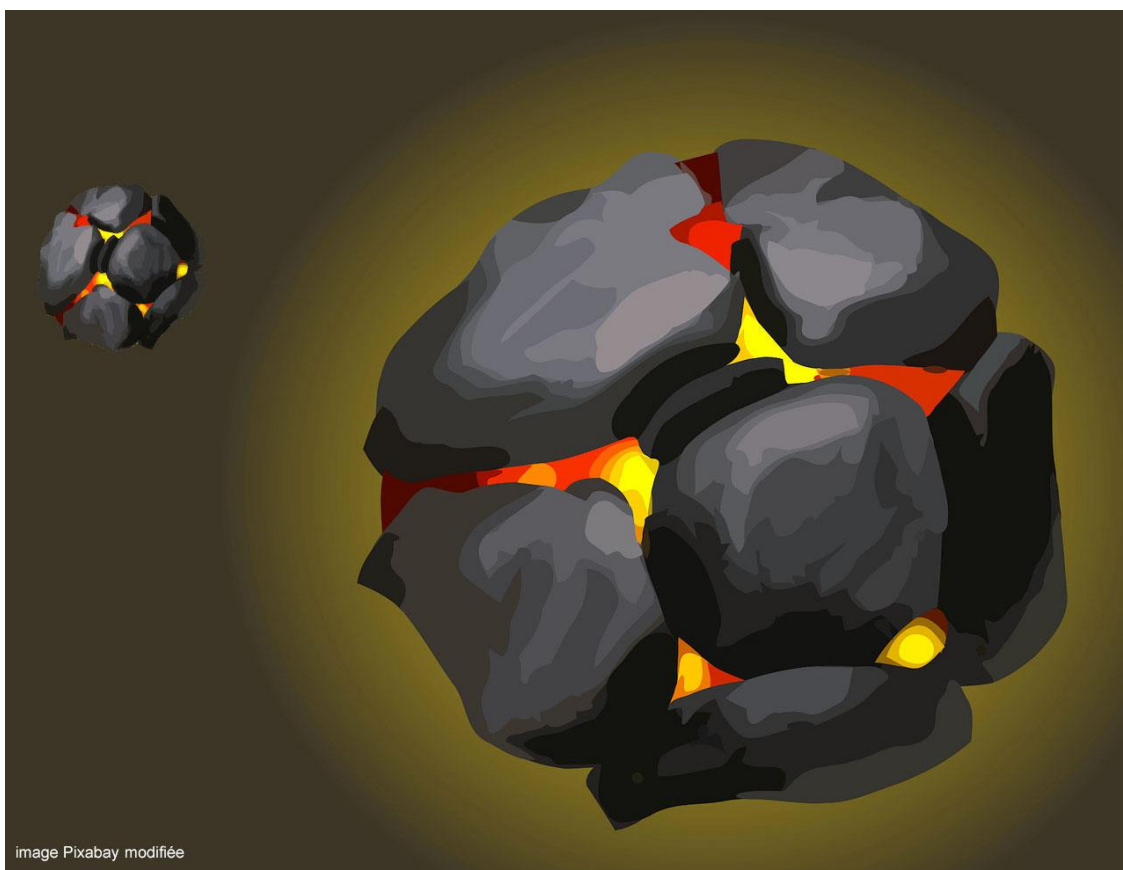
Au cours des années 1970, Ringwood a évolué dans sa modélisation de la fission. Il s'attacha toutefois à garder constante son idée que la Lune provenait bien du matériau terrestre. Ce n'est qu'en 1984 lors de la conférence de Kona (voir la partie consacrée à cette conférence) qu'il intégra la possibilité qu'un impact géant ait déclenché la série de transformations figurant dans son modèle. Ajoutons qu'à cette même conférence on trouve également Binder qui argumente encore en faveur de la fission (voir plus loin).

Nous aimerions signaler une dernière hypothèse qui se situe dans le cadre de la « fissiparturition », mais sous un angle original : celui de **l'explosion nucléaire naturelle**. Partant du principe que leurs matériaux sont à peu près identiques, Rob de Meijer et al. (2013) considèrent que la Lune est bien fille de la Terre. Mais, selon leurs calculs, la difficulté réside dans l'énergie gigantesque nécessaire à la fission. Seule une explosion nucléaire naturelle à l'échelle planétaire peut produire une telle énergie. Comment cela est-il possible ? En premier lieu, les auteurs estiment que la force centrifuge élevée de la proto-terre a concentré les éléments lourds (thorium, uranium) sur le plan équatorial, à la limite entre noyau et manteau. Ces éléments étant radioactifs, et en supposant une forte concentration, une réaction nucléaire en chaîne aurait pu se déclencher et dégénérer en explosion gigantesque, éjectant une masse importante de matériau terrestre dans l'espace.

Pour surprenante que soit cette hypothèse, elle se base à la fois sur des données physico-chimiques relatives à la Lune et sur le fait qu'il a existé sur Terre ce qu'on appelle des « géoréacteurs » nucléaires naturels, dont le seul scientifiquement référencé est celui d'Oklo au Gabon qui a fonctionné il y a environ 2 milliards d'années, mais avec une faible puissance. Dans un passé encore plus lointain, des géoréacteurs très puissants ont pu se former selon les principes décrits par de Meijer et al. Mais il ne s'agit là que de conjecture, certes basée sur des faits.

Comme on le voit, bien que délaissée au profit d'autres théories, l'hypothèse de la Fission n'est pas morte. Lors de la conférence de Kona qui se tint en 1984 pour rassembler toutes les idées relatives à la formation de la Lune, elle était encore acceptée chez bon nombre de scientifiques et, comme le rappelle Mackenzie (op. cit. p. 171), elle obtenait un score honorable dans une comparaison avec les hypothèses concurrentes. Dans ses variantes récentes, elle s'est élargie à d'autres processus explicatifs, mais l'idée initiale de George Darwin survit toujours un peu en eux.

2. L'hypothèse de l'Accrétion (ou : la Lune est la sœur de la Terre)



Le terme d'accrétion implique la formation d'un corps par agglomération de matériaux, d'abord petits (matière fine), puis plus gros au fur et à mesure que se produisent des impacts du fait des forces de gravité. On parle de co-accrétion lorsque ce sont deux corps (au moins) qui se forment côte à côte dans une durée semblable. C'est dans la « nébuleuse primitive du système solaire » que se produisent ces phénomènes, et il est utile de rappeler ici que cette idée remonte au moins aux travaux de Pierre-Simon de Laplace et qu'elle est toujours d'actualité dans sa version moderne des « planétésimaux ».

C'est dans cette idée d'une condensation progressive au sein d'une nébuleuse centrée sur le Soleil que se situent les travaux de l'astronome français Edouard Roche au XIX^{ème} siècle. Dans son Essai sur la constitution et l'origine du système solaire publié en 1873, Roche propose d'appliquer le principe de la nébuleuse solaire de Laplace à la formation du couple Terre-Lune². Il considère qu'au sein de cette nébuleuse en condensation il fut une époque où l'atmosphère terrestre [au sens de : *nébuleuse*] s'étendait jusqu'au niveau où se situait celle de la future Lune. Il suffit alors qu'un ensemble de particules se condensent ou s'agrègent pour former un embryon au sein de cette atmosphère. Citons Roche qui dit : « *Le noyau lunaire grossit peu à peu par la condensation des matières voisines, et par cela même il tend à devenir indépendant du fluide atmosphérique qui l'enveloppe et l'entraîne avec lui (...)* Il est facile de prévoir à quel moment de la révolution lunaire s'effectuera cette séparation du noyau et de l'atmosphère. Ce sera lors d'une syzygie : (...) » (Roche, 1873, p. 55). S'ajoute ici, à travers le terme de « syzygie », un second fait que Roche prend en compte qui est celui des forces de marée

² En 1874 parut l'ouvrage « The Moon » de Nasmyth et Carpenter qui adhèrent à la conception de l'agrégation planétaire selon le modèle de Laplace, sans entrer dans une démonstration. Leur ouvrage vise à comprendre ce qu'on voit sur la Lune.

lors de l'alignement de corps avec le soleil - phénomène bien connu sur notre bonne vieille Terre lors des grandes marées d'équinoxe.

Cette force d'attraction est au cœur de nombreux travaux sur la formation (ou la destruction) de corps célestes et ce n'est certes pas un hasard si Roche rappelle ici cette dimension. En effet, quelques années plus tôt (1849), il avait calculé dans quelles conditions un fluide trop proche d'un autre fluide massif va se déformer à l'infini. Adapté à la question des solides, cela signifie que le corps se disloquera car il subit de trop grandes forces antagonistes (sa proche force d'inertie et la force de marée qui s'exerce sur lui). La frontière - distance au corps massif - où se produira cette dislocation est appelée la Limite de Roche - en hommage à ce chercheur. Dans le cas de la théorie de l'accrétion présentée ici, les forces gravitationnelles jouent leur rôle et produisent progressivement une séparation des particules en agrégation d'avec le « fluide » gazeux dans lequel elles baignent.

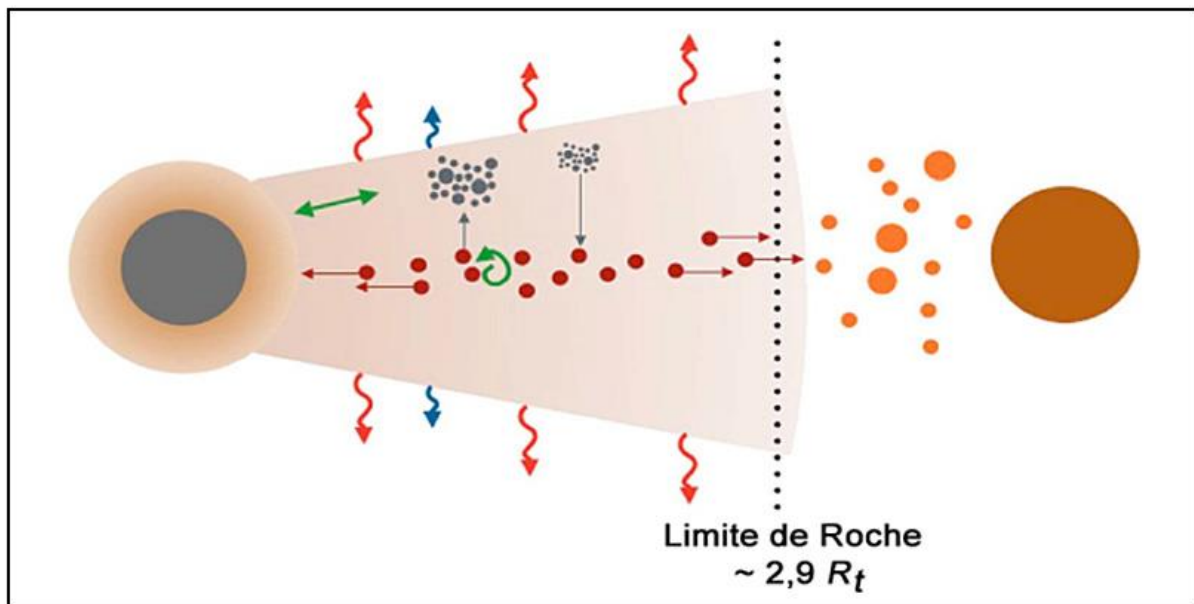


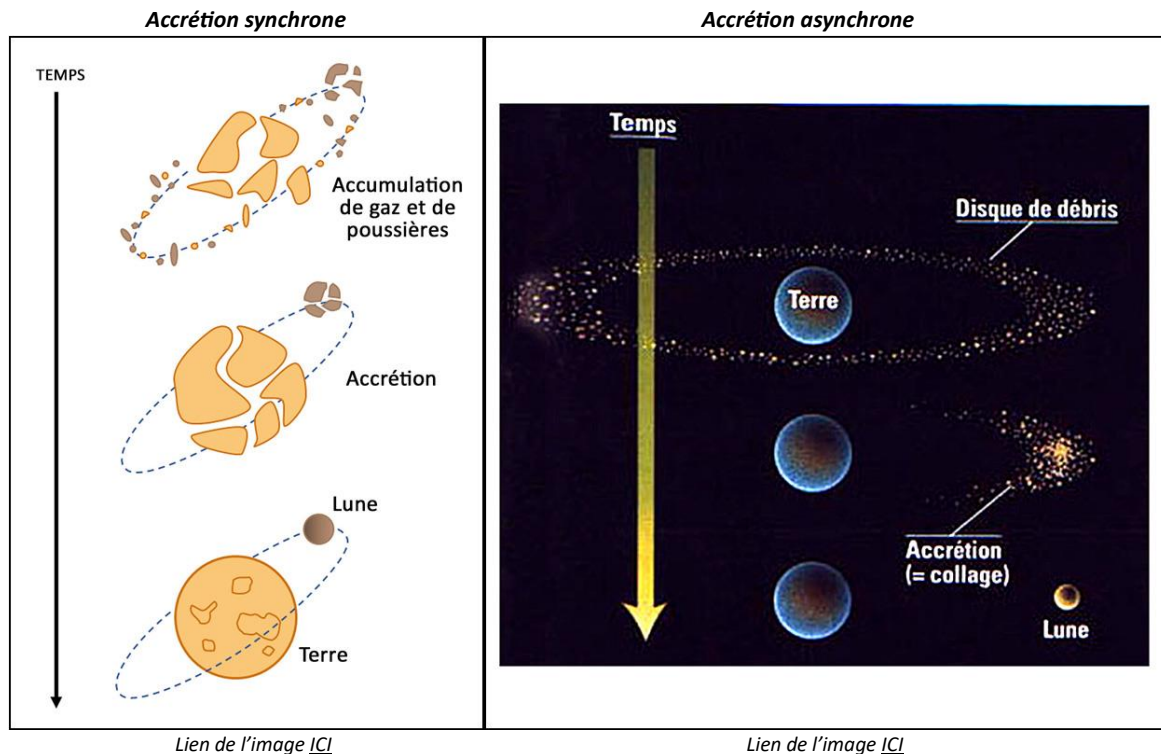
Illustration et commentaires de la « Limite de Roche » - version actualisée (Barr, 2016, p. 1586)

À l'intérieur de la limite de Roche (distances orbitales inférieures à $2,9 R_t$ – Rayon Terrestre), les forces de marée empêchent l'accrétion, et le disque contient des amas de silicate en fusion (rouge) et vaporisés (nuage rose). La vapeur peut se condenser, et les amas de matière fondue peuvent être vaporisés (flèches grises). Le disque se refroidit sous l'effet du rayonnement (flèches rouges) et perd de l'eau (flèches bleues). La couche de matière en fusion s'étend de manière diffuse, vers la proto-Terre et au-delà de la limite de Roche. Le mélange turbulent (en vert) peut permettre aux rapports isotopiques stables de s'équilibrer entre l'atmosphère silicatée de la proto-Terre et le disque. Au-delà de la limite de Roche, le disque se fragmente en amas d'une centaine de kilomètres (orange), qui s'accrèteront pour former la Lune (marron).

L'hypothèse de la co-accrétion de deux corps dans un environnement proche, suivie d'une mise en orbite du corps moins massif autour du corps plus massif, a été reprise à plusieurs reprises à la suite de Roche pour rendre compte de la création du couple Terre-Lune. Temporellement, on peut imaginer deux scénarios, même si les phénomènes physiques évoqués ne changent pas. L'agrégation progressive de particules en matériau plus imposant puis en corps planétaires a pu se faire :

- soit de façon synchrone : la Terre et la Lune se forment en même temps, proches l'une de l'autre.
- soit de façon asynchrone : la Lune se forme par accrétion, proche de la Terre, mais plus tard.

Nous avons représenté ces deux scénarios dans les images qui suivent ...



L'image de gauche représente des particules qui vont progressivement et simultanément s'agglomérer dans deux zones proches pour former à terme deux corps en interaction gravitationnelle. L'image de droite représente une Terre déjà agglomérée autour de laquelle des débris sont en orbite sous forme d'anneau - à instar du célèbre Saturne - et vont peu à peu s'agglutiner pour former un corps unique. Au passage, remarquons que le disque de débris n'est pas sans évoquer le phénomène de la Limite de Roche que nous venons de signaler : en effet, on peut imaginer qu'un corps unique s'est désagréé au préalable avant que ses constituants ne se mettent « sagement » en orbite terrestre. Cette remarque n'est pas si anodine que cela car elle ouvre la porte à des hypothèses combinées relatives à l'origine de la Lune.

20 ans après le texte de Roche, on trouve exprimée en 1893 chez Grove Karl Gilbert, dans son ouvrage « The Moon's Face », l'idée qu'un anneau s'était formé autour de la Terre (il fait lui-même le parallèle avec les anneaux de Saturne) avant que ses composants ne s'agglomèrent pour former la Lune. Gilbert s'intéressait tout particulièrement à la physionomie des différents cratères qui parsèment notre satellite. Contre l'avis de tous, il défendit le fait que les cratères lunaires avaient été produits par l'impact au sol de corps rocheux circulant dans l'espace et attirés par la Lune. C'est cette étude de la nature des cratères lunaires et des impacteurs qui les ont créés qui l'amènèrent à réfléchir à la façon dont la Lune avait pu se former.

L'accrétion, qu'est-ce que c'est physiquement parlant ?

L'accrétion est un phénomène reconnu par tous les chercheurs qui s'intéressent à la formation des corps qui circulent dans l'espace. Car il faut bien que la nébuleuse de gaz primitive, en se refroidissant, produise une condensation déclenchant le phénomène d'agglomération en particules solides. Mais de la particule au planétésimal, il y a une marge qui n'est pas si évidente à franchir. Comme le souligne Philippe Thébaud sur son [site web consacré à ce phénomène](#), la première étape semble simple : « A mesure que la température baisse, de plus en plus d'éléments peuvent se condenser. A moins de 1600K, ce sont des oxydes métalliques, à 1400K c'est le Fer, et, enfin, à 1300K, les silicates. La condensation forme initialement des grains très petits, de l'ordre de quelques microns. La croissance de

ces grains se fait ensuite lors de collisions mutuelles, quand la vitesse d'impact est suffisamment faible pour qu'ils restent soudés. Pour des particules de si petites tailles, ce qui les fait « coller » les unes aux autres lors de collisions, ce sont les forces de surface moléculaire (forces de Van der Waals). »

Que se passe-t-il lorsque les grains sont suffisamment agglomérés pour devenir un corps important ? Thébault nous dit : « *Quand les corps solides ont atteint quelques centimètres ou décimètres, les modèles de croissance par collisions mutuelles rencontrent un problème majeur, qu'on appelle pour simplifier la barrière du mètre. En effet, ces corps sont devenus suffisamment gros pour commencer à se découpler du gaz³ et ce gaz va alors commencer à exercer une forte friction sur eux.* » Voilà un autre mécanisme de modification des particules qui apparaît dans le phénomène d'accrétion : la friction, qui tend à éroder les corps et à leur faire perdre de leur moment cinétique. Tout est ensuite affaire de gravité où les corpuscules vont avoir tendance à se diriger naturellement vers le centre d'attraction. Et donc à se regrouper en corps de plus en plus gros.

Cette petite explication physique est là pour montrer que la position scientifique d'Edouard Roche semble tout à fait légitime. Basée sur le principe d'accrétion, son hypothèse suit les règles physiques telles que l'attraction gravitationnelle, les forces de marées Terre-Soleil, la « limite de Roche ». Elle propose que deux corps se sont formés côté à côté, dans une même nébuleuse-crèche, le plus petit des deux devenant pour finir le satellite de l'autre.

Une illustration d'un corps « accréte » nous a été fournie par la sonde Hayabusa 2 qui a imagé de près l'astéroïde Ryugu au cours de l'année 2018. Quand on voit cet amoncellement étonnant de roches, graviers et diverses poussières, on se demande même comment ça tient ! Pourtant, il vogue tranquillement dans l'espace. Et si Ryugu était devenu plus gros (il ne mesure même pas 1.000 mètres de diamètre) et avait subi comme à l'époque d'innombrables (micro)percussions, nous aurions affaire à l'heure actuelle à un beau planétoïde bien sphérique.

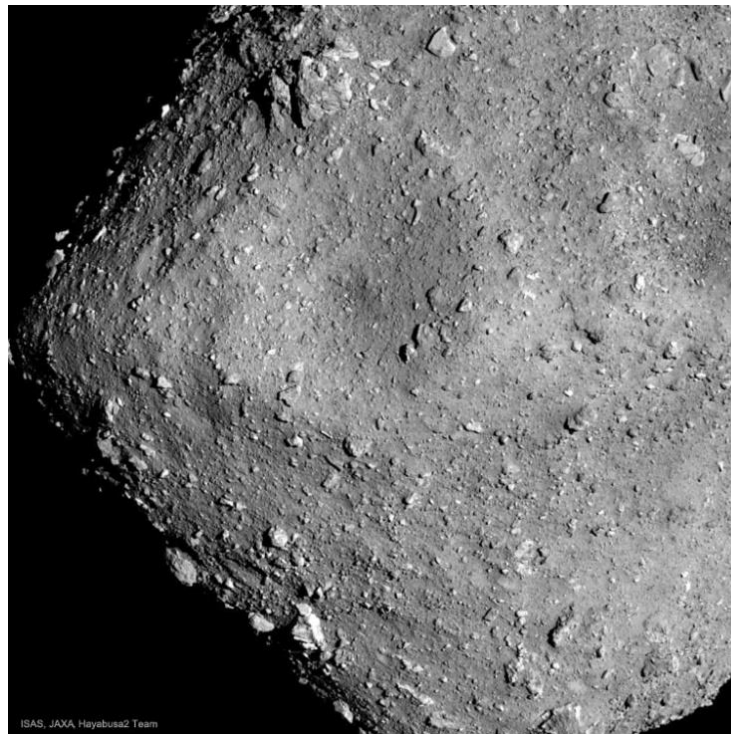


Image Jaxa

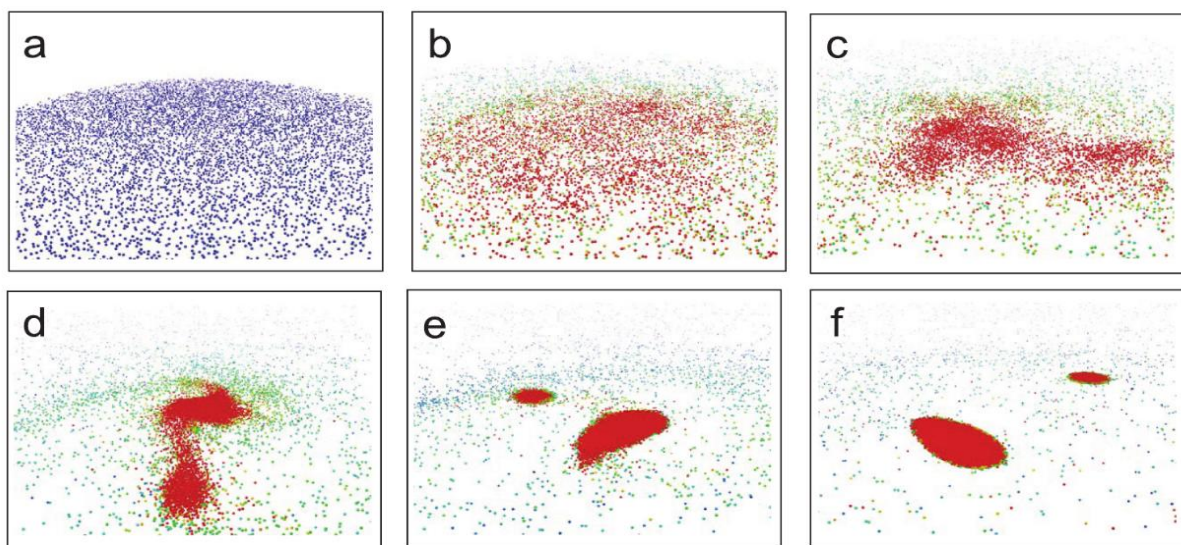
³ Phrase semblable ce qu'écrivait Roche lorsqu'il évoquait la condensation de particules dans une nébuleuse gazeuse.

Plusieurs arguments plaident en la faveur de l'accrétion.

En premier lieu, cette hypothèse reprend le principe de la formation du système solaire dans le cadre de la nébuleuse de gaz primitive, en l'adaptant à une échelle locale (couple Terre-Lune). En deuxième lieu, elle présente l'avantage de comprendre pourquoi la Terre et la Lune sont si semblables dans leur composition : formés dans un même environnement, les matériaux de base sont de même type pour la Terre comme pour la Lune. En troisième lieu, elle n'est pas incompatible avec l'idée d'un impact relativement important sur la proto-Terre qui aurait mis en orbite terrestre un grand nombre de petits corps sous forme d'un anneau de débris. Le processus d'accrétion aurait ensuite démarré jusqu'à former la Lune.

C'est dans cet ordre d'idées que Viktor Safronov, astronome de l'Union Soviétique (à l'époque), a relancé le modèle de l'accrétion à l'échelle de l'ensemble du système solaire vers la fin des années 1960. Ces premiers textes furent publiés en russe dans des revues nationales, mais en 1972 sa thèse fut traduite et donna lieu aux premières discussions internationales. Un texte plus récent co-signé avec Ruskol fut publié en 1994. Le modèle est le suivant : la nébuleuse solaire primitive (cf. Laplace) se condense en corps solides qui grossissent en s'agglutinant et peuvent se percuter au hasard de leurs trajectoires indépendantes. Mais dès qu'une masse critique est atteinte, l'attraction gravitationnelle joue un rôle essentiel et les petits corps s'agrègent de plus en plus par percussion sur des corps plus gros qu'eux qui les attirent. Les planétésimaux se forment ainsi et « dégagent » les alentours (attraction au sein de la « feeding zone » - « zone d'alimentation » - du planétésimal). Ils finiront par créer les belles planètes du système solaire que nous connaissons aujourd'hui ... et leurs satellites, dont la Lune. On a au final un modèle quasiment « mixte » de la constitution des planètes et de la Lune, comportant le facteur impactique à l'échelle locale associé à celui de l'accrétion initiale, bien que Safronov soit resté attaché au modèle de la co-accrétion. Comme le signale Mackenzie (op. cit., p. 113) : « *Aussi étrange que cela puisse paraître, Safronov lui-même n'a pas poussé sa théorie jusqu'à sa conclusion logique* », c'est-à-dire le fait que des impacts géants sur la Terre aient pu être à l'origine de la création de la Lune.

Proche de Safronov, le point de vue de Erik Galimov est à présenter. On reste dans le cadre d'un disque de particules qui va peu à peu s'agglomérer, de grands corps se former et éjecter le reste des particules. Voici une illustration de ce modèle (cf. Galimov et Krivtsov, 2012) à partir d'une simulation informatique (les étapes se suivent de A à F). L'effet visuel est saisissant.



Dans la proposition des chercheurs, l'accrétion de particules s'intensifie dans un certain espace et prend le pas progressivement sur les autres éléments alentour : la Terre se forme par accrétion au détriment de ces voisins. La Lune ne peut se développer autant et reste proche des composants d'origine à forte température, pauvres en fer et en éléments volatils. Ce modèle suppose une longue durée d'existence d'un disque de particules et d'éléments vaporisés, avec les phénomènes hydrodynamiques associés.

Plus récemment, signalons un texte de 2001 écrit par Morishima & Watanabe dans lequel les auteurs présentent deux scénarios possibles de co-accrétion : le premier correspond au scénario classique (la Lune a grossi par accrétion à partir d'un embryon de corps), le second est l'idée qu'un impact géant a pu être le préalable aux phénomènes d'accrétion amenant la formation de la Lune près de la Terre. Dans ce deuxième scénario, on retrouve une combinaison entre deux mécanismes distincts, mais complémentaires.

La théorie de l'accrétion présente quelques épines difficiles à enlever.

En dehors de la dynamique physique du système Terre-Lune (moment cinétique des deux corps) qui pose une interrogation sur la formation d'une Lune sous forme d'accrétion il y a des milliards d'années, les chercheurs ont longtemps été intrigués (et le sont encore) par les constituants chimiques de notre satellite comparativement à ceux de notre planète. Globalement, Terre et Lune sont extrêmement proches sur ce plan, ce qui semble conforter l'hypothèse d'une origine commune, mais des différences la rendent quelque peu suspecte.

Et c'est Roche lui-même qui en a signalé la plus intéressante. En 1881, il a déduit l'existence d'un noyau de fer au centre de la Terre et d'une enveloppe pierreuse autour. Malheureusement les mesures effectuées depuis cette date ont montré qu'il y avait une grande différence entre la Terre et la Lune sur ce plan : selon des mesures récentes (Briaud et al, 2023), la Lune posséderait un noyau solide de masse volumique proche du fer et d'un diamètre de plus de 500 km (valeur plus élevée que celle qu'on imaginait jusqu'à présent) alors que celui de la Terre, de même composition, a un diamètre de 2.500 km. Ce rapport est à mettre en regard des dimensions des deux corps : la Lune a un diamètre de 3.474 km et la Terre de 12.472 km, soit un rapport de 3,6 seulement (la Lune est effectivement un très gros satellite comparativement à la planète autour de laquelle elle orbite). Le diamètre du noyau solide, revu à la hausse, n'est finalement pas si différent que ça entre les deux corps : 15 % pour la Lune et 20% pour la Terre. Mais si l'on prend également en compte le noyau interne liquide (autour du noyau solide), on calcule que cet ensemble représente 55% du diamètre de la Terre pour seulement 36% de celui de la Lune. La différence est donc jugée toujours importante. Les matériaux sidérophiles étant, par leur densité, constitutifs des deux types de noyau, on peut dire que globalement la Lune interne est plus pauvre en fer. Toutefois, des analyses récentes (voir par ex. ICI) montrent qu'en surface la présence de fer sur la Lune est plus importante que prévu, d'où les débats sur « l'exploitation minière » de notre satellite.

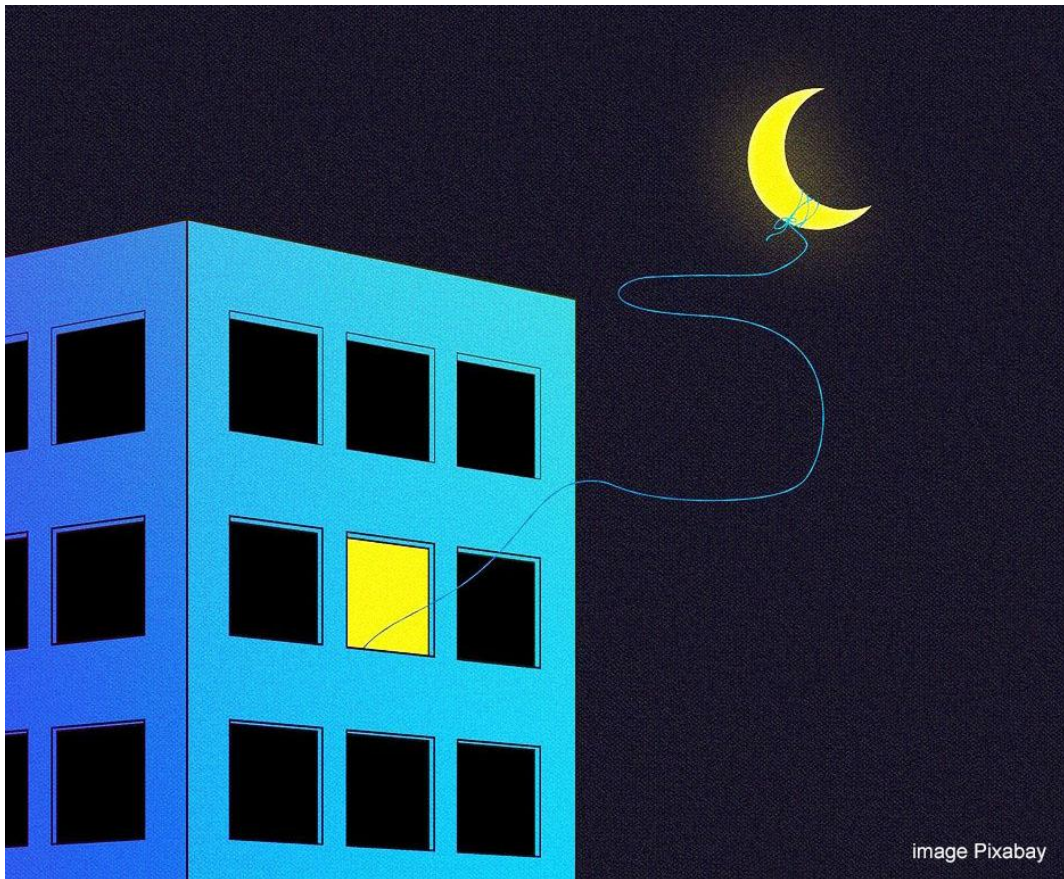
De fait, la communauté scientifique a du mal à expliquer pourquoi il existe cette différence entre la Terre et la Lune dans la composition ferreuse et sa répartition interne : si les deux corps se sont formés côte à côte par agrégation, en partageant un même environnement de matériau, ils devraient être semblables sur ce point. On peut imaginer l'apport de matériau ferreux lors d'impacts d'astéroïdes se percutant tout près du système Terre-Lune en formation, la Terre attirant bien plus ces particules que la Lune du fait de leur différence de taille (gravité) et de magnétisme (par exemple, Kraus et al. 2015). Mais ceci n'explique pas la différence importante entre les deux noyaux, ceux-ci se formant très tôt dans la genèse. Bref, les débats restent ouverts sur ce point dans le cadre de l'hypothèse d'une co-accrétion Terre et Lune.

Un autre problème non résolu sous cette hypothèse est celui de la différence de composition en éléments réfractaires et en éléments volatils entre les deux corps. Concrètement, les scientifiques ont établi des catégories d'éléments selon la température à laquelle ils passent, par sublimation, de l'état solide à l'état gazeux – dans l'espace, il n'y a pas de passage par un état liquide du fait d'absence de pression. Les métaux et les roches constitutifs des planètes telluriques sont dénommés « réfractaires » car ils ont une température de différenciation moyenne entre le gazeux et la solide bien plus élevée que d'autres éléments qui sont dénommés « volatils ». Ainsi, le Fer dont nous venons de parler est un élément réfractaire tandis que le Zinc, par exemple, est un élément volatil.

Si l'on compare sur cette base la Terre et la Lune, on constate que cette dernière est pauvre en éléments volatils. Une hypothèse serait que la Lune se serait formée un peu plus tard que la Terre, une fois que celle-ci aurait « aspiré » (attraction) une bonne partie des éléments volatils et que certains autres se soient dispersés dans l'espace. L'aggrégation à l'origine de la Lune aurait alors concerné des éléments réfractaires. Ceci n'est pas incompatible avec l'idée de Roche qui évoquait la formation d'un anneau de matériau en orbite autour de la Terre qui, peu à peu, se serait agrégé pour former la Lune. Il y aurait donc eu un décalage temporel, comme évoqué plus haut dans l'illustration proposée d'une accréation asynchrone. Cette possibilité est à mettre en regard de l'analyse de l'âge des plus vieilles roches lunaires et terrestres ... mais là aussi, il y a débat sur l'ancienneté de la Lune dans le système solaire. Signalons deux estimations récentes quant à la datation de la formation de la Lune : peut-être plus de 4,5 milliards d'années selon Greer et coll. 2023, peut-être moins de 4,4 milliards d'années selon Borg et Carlson 2023. Un écart de 100 millions d'années qui paraît minime, mais qui tracasse parfois les analystes de l'évolution de la Lune comparativement à celle du système solaire.

Si cette hypothèse permet d'expliquer le manque d'éléments volatils sur la Lune et sa richesse en éléments réfractaires, elle remet en exergue le fait que notre satellite est pauvre en fer (élément dit réfractaire). Difficile à comprendre ! Il faut alors ajouter une hypothèse à l'hypothèse : un planétésimal « proto-Lune » se serait trop approché de la Terre en franchissant la « limite de Roche », ce qui l'aurait désintégré. Le noyau de fer aurait fait sa vie ailleurs tandis que les roches auraient pu se réagglomérer pour former la Lune. Cette hypothèse fut émise lors de la Fifth Lunar Science Conference (1974) et elle est rapportée dans l'ouvrage de Cummings (2019). On la retrouve également proposée dans le cadre de l'hypothèse de la Capture (voir partie suivante). Je relate ce fait car on retrouve l'idée que deux hypothèses peuvent se coordonner : l'idée d'une capture préalable d'un corps par la Terre et celle d'une accréation à la suite de sa dislocation, d'où l'appellation parfois utilisée de « Capture désintégrative ». Ceci nous ouvre un nouveau chapitre : l'hypothèse de la Capture.

3. L'hypothèse de la Capture (ou : la Lune est l'épouse de la Terre)



« Dans le cas de notre Lune, il est démontré que la Terre a simplement capturé l'une des vingt-sept millions de planètes qui se sont formées à partir de l'immense masse du Soleil. La Lune nous est venue des profondeurs de l'espace et n'a jamais fait partie de la Terre, comme on l'a longtemps supposé. Les célèbres travaux du professeur Sir G. H. Darwin en 1879 se révèlent fondés sur des coïncidences fortuites et non sur une histoire physique réelle. Tous les détails du système lunaire et terrestre que l'on connaît sont en accord avec la théorie selon laquelle la Lune est une planète capturée ».

« La possibilité théorique de la capture de la Lune ne faisant aucun doute, il est donc certain qu'elle a eu lieu. »

Cette introduction est un extrait d'un texte de Thomas Jefferson Jackson See qu'il a écrit en 1909 (pp. 170/171). La première partie résume l'opinion de cet astronome américain quant à l'origine de la Lune, la dernière phrase est là pour situer le personnage toujours sûr de lui. Car ce fut un vrai calvaire pour ses collègues de travailler avec See. Arriviste, outrecuidant, il passa son temps à générer des conflits professionnels qui à la longue se retournèrent contre lui au point qu'il finit sa carrière dans un poste subalterne à l'observatoire de la base navale de Mare Island, près de San Francisco, où il était chargé de contrôler et maintenir l'heure en usage pour la côte Ouest. Mackenzie (op. cit., pp. 89/90) rapporte que le directeur de son université signalait le comportement de l'étudiant See de cette façon : c'était un homme « *totale­ment dépourvu de scrupules, un intrigant parmi les étudiants d'un genre dangereux, un génie dans la poursuite de ses propres prétentions à être promu, et pour résumer, il était largement dénué de principes moraux.* » Voilà qui est clair et net !

Cela étant dit, See a montré ses compétences dans plusieurs domaines. Il se fit d'abord connaître pour ses travaux sur les étoiles doubles. Et dans les textes qu'il écrivit plus tard à propos de l'origine de la Lune, il se basa sur les travaux de Gilbert (dont nous avons déjà parlé) pour affirmer l'origine impactique des cratères lunaires. Sur ces deux points, on peut reconnaître ses compétences d'analyste et d'observateur. Mais son style très « personnel » l'amena parfois à inventer des faits d'observation, comme le rapporte Paul Spudis dans son ouvrage « The Once and Future Moon » publié en 1996 : « *Il se fit remarquer en affirmant avoir observé au télescope des cratères sur la planète Mercure (il y en a, mais ils sont trop petits pour les voir depuis la Terre)* » (p. 160)

Malgré son isolement professionnel sur Mare Island à partir de 1903 (ou grâce à lui ?), See a été prolifique dans son travail de théorisation et acheva son « œuvre » qui fut publiée en deux volumes sous le titre « Researches on the Evolution of the Stellar Systems ». C'est dans le second volume (daté de 1910) que l'on trouve une partie consacrée à la théorie de la capture de la Lune par la Terre.

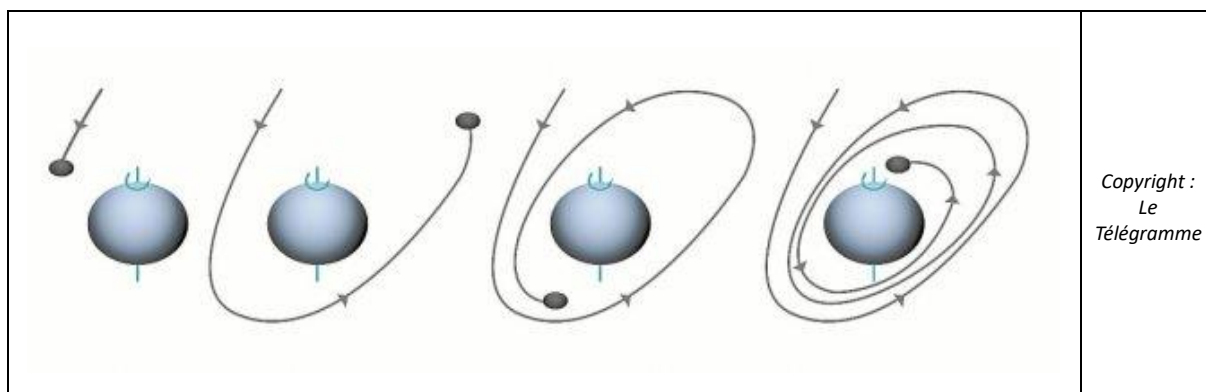
See considérait que Darwin était dans l'erreur en pensant que les satellites du système solaire avaient été formés à partir du matériau de la planète autour de laquelle ils orbitent (ce qui était logique dans le cadre de l'hypothèse de Laplace relative à la formation du système solaire). En effet, rien n'empêche un corps d'attirer un autre corps plus petit provenant du fin fond de l'espace et, si les circonstances physiques sont réunies, de le capturer de sorte qu'il se mette en orbite autour de lui.

Un de ses arguments préféré était le fait que seule l'hypothèse d'une capture d'un objet ayant un mouvement propre élevé pouvait expliquer pourquoi le couple terre-lune possédait un tel moment cinétique élevé. La théorie de la fission de Darwin lui semblait impuissante à rendre compte de ce fait. Mais on sait aussi qu'un objet qui arrive rapidement près d'une planète peut tout simplement « rebondir » sur une trajectoire hyperbolique et continuer sa course dans l'espace. Aussi, See imagina que l'espace n'était pas vide mais rempli d'une substance ténue capable d'offrir une résistance aux corps en mouvement – de jouer le rôle de « frein », si l'on préfère.

Cette façon de penser est typique de See qui, tout en étant un bon mathématicien, pouvait ajouter un facteur qui l'arrangeait dans le cadre de son hypothèse, sans apporter le moindre argument en sa faveur. N'ayant pas montré l'existence ni modélisé la densité de cette supposée « substance ténue » dans l'espace, il se trouvait en défaut. Comme l'écrit avec humour Mackenzie (op. cit., p. 94), « *demander à un milieu résistant tenu de ralentir la Lune, c'était comme essayer de freiner un train avec une barrière en papier de soie* ». Ce comportement est d'autant plus intéressant à signaler que See reprochait à Darwin ... d'en faire autant pour améliorer son hypothèse de la fission (c'est ce qu'on appelle couramment « faire une hypothèse ad hoc »).

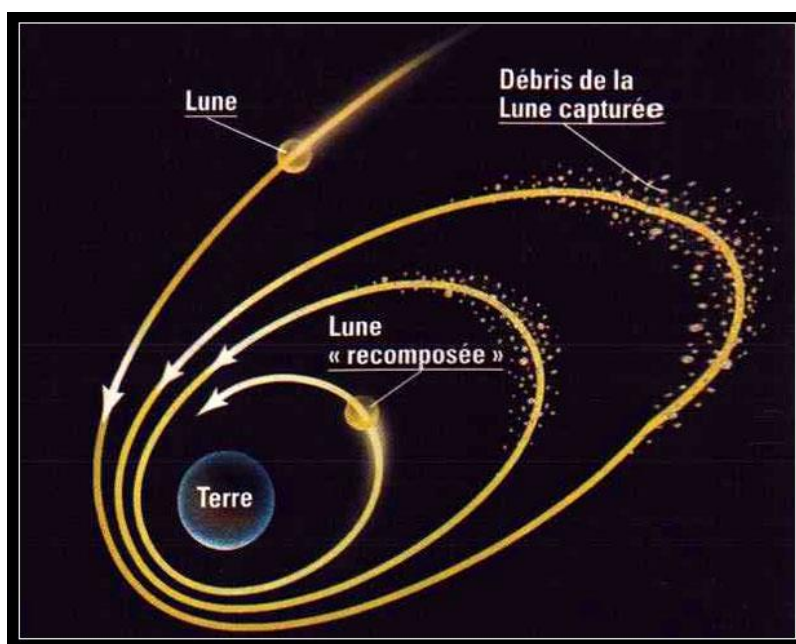
Comment fonctionne ce phénomène de capture d'un (petit) corps par un autre (plus gros) ?

La **première possibilité** est celle d'une capture directe d'un astre qui reste intact :



Comme on le voit, le phénomène n'est pas instantané étant donnée les forces en présence. Le planétoïde est capturé sur une orbite très elliptique en se déplaçant à une vitesse « faible » - si la vitesse est trop élevée, la trajectoire devient hyperbolique comme on l'a dit précédemment. L'orbite se stabilise peu à peu jusqu'à ce qu'un équilibre se fasse entre force gravitationnelle du corps principal et vitesse de révolution du corps capturé. Dans ce cas, le corps n'est pas déchiqueté par les forces en présence. On peut appeler ce scénario la capture « douce ».

La **deuxième possibilité** est celle d'une capture avec des forces gravitationnelles et de vitesse qui désintègrent dans un premier temps l'astre frôlant la Terre de trop près :



Copyright : [Astropolis](#)

Dans ce scénario, ce sont les débris de l'astre capturé qui se mettent en orbite. Proches les uns des autres, ils vont s'accréter progressivement par attraction mutuelle ou/et simples impacts entre eux pour former enfin un nouveau corps, appelé ici « Lune recomposée ». Dans les termes actuels, on parle aussi de « capture désintégrative ».

Horst Gerstenkorn et l'effet rétro de la proto-Lune

Pour résoudre le problème de l'énorme énergie nécessaire pour que la Terre puisse capturer un astre venu du fin fond de l'espace, un professeur allemand du nom de [Gerstenkorn propose en 1955](#) que cet astre errant se soit approché de la Terre en sens inverse du mouvement de rotation de notre planète, en se positionnant sur une trajectoire rétrograde. Voici comment [Cumings \(2019\)](#) résume cette idée (p. 149) : « Lors de ce premier passage, à une distance de 26 rayons terrestres, Gerstenkorn a calculé qu'il y avait suffisamment d'énergie perdue par la friction des marées pour permettre à la Lune d'être capturée par la Terre. En raison de son mouvement rétrograde, la conservation du moment cinétique impliquait que la Lune se rapproche de la Terre, au lieu de s'en éloigner, car la rotation de la Terre était réduite en raison du frottement des marées, et que l'inclinaison du plan de l'orbite de la Lune augmentait. Lorsque la Lune s'est rapprochée de la Terre à 4,7 rayons terrestres, l'inclinaison de l'orbite lunaire par rapport à l'équateur terrestre a dépassé 90 degrés et la Lune a commencé à orbiter autour de la Terre dans le sens prograde ».

La probabilité d'un tel événement est très faible. Mais ce scénario est intéressant du point de vue de la perte d'énergie nécessaire à cette satellisation, sans avoir besoin d'évoquer des moyens de

freinage plus ou moins imaginaires. A nouveau, la friction des marées intervient comme moteur fondamental d'interaction entre deux corps proches.

Les revirements d'Harold Clayton Urey

Lors d'une interview en 1969, Harold Clayton Urey, chimiste de formation⁴, regrettait de ne pas pouvoir aller sur la Lune comme astronaute. En tant que scientifique, il avait activement travaillé à la préparation des missions Apollo et espérait beaucoup des prélèvements qui y seraient faits. Il attendait que les analyses du matériau lunaire recueilli sur place lors de ces missions puissent permettre de déterminer l'origine de la Lune. A ce moment-là, Urey était partisan de la théorie de la capture par la Terre d'un planétoïde circulant dans l'espace. Si cela était confirmé, alors l'humanité aurait à portée de main un gigantesque globe nous racontant les premiers temps de la création du système solaire. Dans une conférence dont les textes furent publiés en 1962, il faisait le bilan de ses dix dernières années de recherche ; il estimait que la Lune était un astre ayant échappé à la destruction lors des intenses collisions entre corps ayant eu lieu pendant la formation de notre système planétaire et qu'elle avait été capturée sur une orbite « spéciale » par la Terre. Etant donné le nombre de corps circulant alors, Urey pensait que la probabilité d'occurrence d'un tel événement était loin d'être nulle. Parmi les arguments qu'il apportait, il mentionnait l'incontournable problème de la différence de composition en fer de la Lune et des planètes terrestres, et inversement de la proportion semblable à celle du Soleil en éléments non volatils. Conclusion : la Lune avait dû se créer dans une autre zone du système solaire que la Terre, sous une forme indifférenciée, et par voie de conséquence avait été capturée plus tard par notre planète.

L'analyse des pierres de Lune effectuée suite aux missions Apollo (et quelques missions russes) n'a pas permis de valider cette idée. Bien que les premières analyses des roches ramenées de la Mer de la Tranquillité en 1969 montrèrent une grande rareté des éléments les plus volatils par rapport au reste du système solaire, on constata que des matériaux très variés composent la Lune et que leur ressemblance avec ceux de la Terre est notable. D'autres mesures montrèrent que la meilleure explication pour rendre compte de leur présence et de leur proportion suppose la création originelle d'une Lune à des températures extrêmes, de l'ordre de 1000°, ce qui allait là aussi à l'encontre de l'idée d'Urey d'une Lune originellement « froide ». Enfin, les analyses isotopiques de matériau montrèrent des taux semblables entre la Terre et la Lune. Difficile alors de parler d'un astre errant venu de loin.

Finalement, Urey dut changer de point de vue. Les arguments favorables à la théorie de la Capture semblant s'évanouir les uns après les autres, il revint vers des hypothèses plus proches des résultats des analyses des roches lunaires, comme la Fission. Il eut à ce sujet des échanges fort instructifs avec O'Keefe (partisan de la théorie de la Fission) dans les années 1970 et écrivit même avec lui un article relatif à la déficience de la Lune en éléments sidérophiles (O'Keefe & Urey, 1977). Enfin, lorsqu'il lut les premiers textes faisant allusion à un gigantesque impact ayant expédié une partie du manteau de la Terre dans l'espace (ce qui forma la Lune), il estima que cette hypothèse était séduisante. Voilà ce coup-ci la théorie de l'Impactisme vue d'un bon œil par Urey.

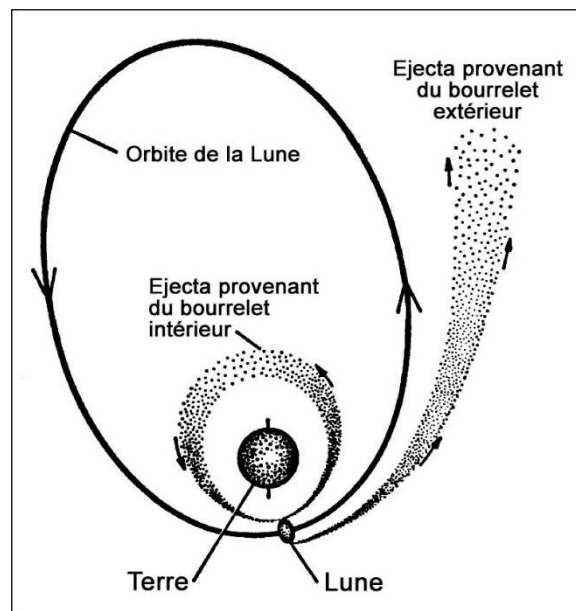
Ne considérons pas Urey comme quelqu'un qui, comme une girouette tourne avec le vent, changeait d'avis selon l'air du temps. La plupart de ses contemporains et des analystes ultérieurs estiment que c'est la raison scientifique d'Urey qui a fait évoluer sa pensée. Un bon chercheur doit reconnaître les limites de la théorie qu'il défend, quitte à l'abandonner au profit d'une autre plus adéquate quand ces limites sont dépassées. Ou à y revenir si des faits nouveaux la relance.

⁴ Il obtint le prix Nobel de Chimie en 1934 pour sa découverte du deutérium.

D'autres tentatives ont été faites pour valider l'hypothèse de la Capture.

Hannes Alfven, astrophysicien suédois, co-lauréat du prix Nobel de physique en 1970, défendait également l'hypothèse d'une Lune capturée par la Terre. Au cours des années 1960, il publia plusieurs textes à ce sujet. Dans un article paru en 1965 dans la revue *Science*, il se basait lui aussi sur les calculs de Gerstenkorn que nous avons signalés plus haut et, de manière très imagée, décrivait l'approche de la proto-lune jusqu'à ce qu'elle atteigne la fameuse Limite de Roche, à environ 2,9 rayons terrestres de notre planète en formation. Il évoque alors le franchissement de cette barrière physique d'un corps qui finit par éclater partiellement en morceaux. Certains débris vont partir dans l'espace, d'autres vont retomber sur la proto-Lune ainsi amputée, d'autres sur la Terre. C'est cette « averse » de débris sur les deux corps qui explique pourquoi la Lune et la Terre se ressemblent. Alfven dit même qu'il est possible « *qu'une grande quantité de matière lunaire soit retombée sur la Terre au point que sa couche supérieure – la croûte – en soit composée* » (p. 477). Conclusion : roches lunaires, roches terrestres, pourquoi pas une même origine ... tout au moins en surface.

En juillet 1969, juste avant l'épopée d'Apollo 11, il évoquait deux scénarios possibles de formation de la Lune et les confrontait. L'un reprend le scénario catastrophe décrit ci-dessus, et il est illustré par une figure synthétique reproduite ci-dessous :



Extrait de Alfven H. & Arrhenius G. (1969), p. 14

On y voit une Lune, au moment du périgée, fortement déformée en « ballon de rugby » qui expulse les deux extrémités de ses gigantesques bourrelets de marée soit en interne (ils se mettent en orbite à l'intérieur de l'orbite lunaire) soit en externe (ils se mettent en orbite à l'extérieur de l'orbite lunaire, certains sortiront même de l'influence gravitationnelle du système Terre-Lune).

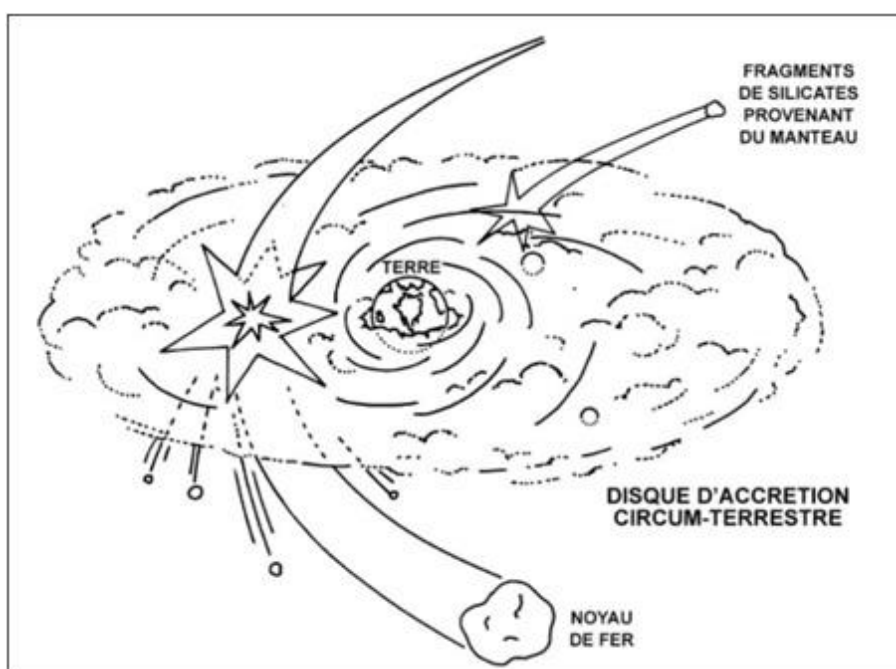
L'autre scénario envisagé est plus « doux ». L'approche de la Lune ne provoque pas de phénomène de marées gigantesques, ni de dislocation de son intégrité, du fait d'une durée très longue de stabilisation de l'orbite lunaire. Dans tous les cas, disait-il, c'est l'analyse des météorites d'impact et de leur âge qui permettra d'en savoir plus sur la formation et l'évolution du système Terre-Lune.

Dans son volumineux document « Evolution of the Solar System » publié en 1976 et coécrit avec Gustav Arrhenius, Alfven évoque dans ses conclusions relatives au système Terre-Lune un scénario évènementiel encore plus complexe : en premier lieu, la Terre aurait eu à l'origine 5 à 10 petits satellites

(cette donnée provient de son analyse de l'évolution des planètes et satellites du système solaire). Un nouveau corps en approche (la Lune) a coupé l'orbite de la Terre, ce qui a provoqué des perturbations de sa trajectoire, l'amenant au bout d'un certain nombre d'orbites à être capturé par la Terre. Ce faisant, l'ancien système satellitaire a été détruit, balayé par les interactions Terre-Lune. Cette idée séduisante, car physiquement possible, n'a pas donné lieu à l'apport de preuves tangibles.

En 1967, Cooper et coll. publièrent un court texte dans lequel ils rappellent en premier lieu les travaux de Gerstenkorn - encore lui. Les forces de « freinage » en présence (attraction et marée) étaient telles lors du passage du corps au périégée - sur une orbite très elliptique au début - que le manteau terrestre a pu se liquéfier en partie et se transformer. Mais les auteurs reconnaissent qu'aucune trace géologique ne peut actuellement étayer cette idée, ce qui explique selon eux que l'hypothèse de la Capture soit peu retenue par les chercheurs. Ils mettent alors en avant des analyses de différents isotopes du plomb dans du jeune matériau volcanique terrestre. De là, ils estiment que des variations isotopiques importantes ont eu lieu dans le manteau à une époque correspondant à l'approche serrée de la proto-Lune, selon le modèle de la Capture. C'est cet évènement fabuleux qui, du fait du processus de liquéfaction dont nous avons parlé, aurait joué un rôle important dans l'homogénéisation interne du manteau terrestre. En mettant en comparaison le modèle de l'accrétion, Cooper & coll. estiment que le modèle de la Capture ainsi précisé est meilleur, car plus réaliste.

L'année même où parut le texte d'Hartmann qu'on considère comme fondateur de l'hypothèse de l'Impact Géant (1975), Mitler publia un article dans lequel il reprend l'idée d'Urey de la capture, modifiée par Ernst Öpik. Plusieurs planétoïdes auraient franchi la Limite de Roche, se seraient brisés et une partie de leur matière aurait été capturée par la Terre. Cela est équivalent à ce que disait Alfven (cf. plus haut) ou précédemment dans l'hypothèse d'une accrétion, mais l'intérêt du texte est de proposer que ces planétoïdes étaient différenciés (cad composé d'un noyau de fer entouré de silicates) avant leur dislocation. Dans ce cas, le noyau de fer - qui est bien plus dense - échappe à la capture et disparaît au loin, tandis que le matériau silicaté va s'agréger pour former la Lune. Voilà une réponse possible au mystère du noyau de fer bien plus petit sur la Lune que sur la Terre. Et, pour le plaisir des yeux, voici la représentation très « dynamique » qu'en proposaient en 1984 Herbert et coll. lors des conférences de Kona, en y ajoutant le rôle du disque d'accrétion préalable.



En 1977, Winters et Malcuit⁵ publièrent un texte dans lequel ils montrent que si l'on considère une lune originellement très chaude, donc facilement déformable par des forces physiques, alors une capture en douceur par la Terre peut se faire. Dans ce cas, contrairement à une capture d'un corps froid (rigide), l'énergie se dissipe beaucoup plus rapidement. Sa malléabilité relative sert, en quelque sorte, d'amortisseur.

Dans son livre « The Moon : our Sister Planet » paru en 1981, quelques années avant la conférence de Kona (1984), Cadogan réserve une partie de chapitre au résumé des théories classiques de la formation de la Lune, et conclut en donnant sa préférence à la théorie de la Capture.

Nous avons déjà signalé l'importance de la Conférence « Origin of the Moon » qui se tint en 1984 à Kona dans l'île d'Hawaï, où furent invités les chercheurs qui avaient un point de vue à défendre sur ce thème. L'Hypothèse de la Capture y fut défendue, par exemple dans un exposé de S. Fred Singer qui, faisant un bilan de ses 20 ans de travaux sur ce thème, expliqua comment éviter les écueils que présente traditionnellement cette hypothèse si l'on prend en compte correctement les phénomènes énergétiques lors du passage de la future Lune au plus près de la Terre (énergie cinétique, énergie due aux effets de marée).

Il faut noter une variante intéressante de l'hypothèse de la capture dans les années 1960 avec les travaux de Gordon MacDonald. Dans un chapitre d'ouvrage de 1996 (sous la direction de B. G. Marsden & Alastair G. W. Cameron), il passe en revue les diverses théories sur l'origine de la Lune et propose d'imaginer une succession de petites lunes (des « moonlets »), au nombre de 6 à 10, qui sont plus faciles à intercepter. Puis les phénomènes d'attraction et de friction dus aux marées vont les rapprocher avec le temps au point de provoquer une agrégation finale en un seul corps. Cette idée originale a un point commun avec une proposition récente de l'origine de la Lune (les « moonlets »), faite dans le cadre de la théorie de l'impactisme (voir plus loin « l'hypothèse des impacts multiples »).

Changement d'échelle : formation planétaire lors d'une capture d'une proto-étoile par le Soleil.

Eloignons-nous un instant du seul cas de la Lune pour atteindre le niveau interplanétaire. Depuis les années 1960 jusqu'à son décès en 2019, le physicien et planétologue britannique Michael Mark Woolfson fut partisan d'une théorie de la formation des planètes du système solaire (et de leurs satellites) sous une forme originale : la capture par le Soleil déjà condensé du matériau d'une proto-étoile venant à passer trop près de lui⁶. En faisant intervenir un corps massif extérieur au système solaire en formation, cette idée supprime le problème de la distribution du moment cinétique entre le soleil que nous connaissons et les planètes actuelles du système solaire. Celui-ci représente presque toute la masse du système solaire, mais moins de 1% du moment cinétique de celui-ci (dit avec humour : ce sont les planètes qui font tout le boulot en tournant comme des dingues autour du Soleil qui, lui, se la coule douce en jouant au chef d'orchestre des révolutions planétaires).

La vitesse des planètes a été transmise par l'orbite initiale de l'étoile vagabonde, lorsqu'elle fut capturée et qu'une partie de son matériau (ou tout ?) s'est effilochée sous forme de filament elliptique, un peu comme une spirale. Ce filament s'est fragmenté pour former les principales planètes et leur a transmis sa vitesse de révolution. Dans l'environnement dans lequel se mouvaient alors ces planètes, une grande masse de matière a pu se condenser (par accrétion), éventuellement des impacts géants

⁵ Les travaux de Malcuit sont à mentionner, car il a passé toute sa carrière – y compris pendant sa retraite comme professeur émérite – à défendre l'hypothèse de la Capture. Signalons un de ses derniers textes publié en 2015 où il défend cette thèse. On peut lire également la « saga » de sa carrière présentée dans le Denison Magazine en 2007 par Grabmeier.

⁶ Jeffreys en 1924 proposait déjà que le Système Solaire ait été créé par une étoile vagabonde qui serait passée trop près du Soleil. Cela aurait eu comme effet d'étirer le Soleil sous forme de fuseau (filament), puis la partie extrême de ce fuseau se serait séparée de lui et condensée en plusieurs petits corps qui deviendront les proto-planètes.

ont pu avoir lieu entre ces planètes, le tout permettant la formation de satellites planétaires par simple capture : la probabilité n'est pas négligeable que, dans cet ensemble, des corps importants se soient formés non loin de ce qui sera leur planète autour de laquelle ils vont orbiter. Ainsi, la Lune peut se former par plusieurs processus initiaux (accrétion, impacts) avant d'être soumise à une capture « douce », c'est-à-dire sans vitesse propre trop élevée. Formée à proximité de la Terre, elle est en outre constituée des mêmes matériaux qu'elle (sauf en Fer).

L'explication est certes un peu longue puisqu'elle démarre d'une proto-étoile venant de l'extérieur du système solaire. Mais elle présente l'avantage de rendre compte de la formation de l'ensemble des corps du système solaire de manière cohérente. Elle combine plusieurs processus complémentaires de formation des corps : la capture, l'accrétion, l'impactisme. Elle donne même un argument rétrospectif à See - je ne pense pas que c'était l'intention de Woolfson ! - qui revendiquait une « substance » ténue pour ralentir les corps. Ici, c'est la matière non condensée qui joue le rôle de frein, au fil des multiples orbites autour du soleil que les planètes initiales et les autres corps ont pu faire avant de se stabiliser.

Il reste que l'histoire de la formation du système solaire ainsi racontée est complexe et que la capture de la Lune n'est qu'un simple incident de parcours pour Woolfson (ce n'est pas spécialement la Lune qui l'intéressait). La probabilité est faible, mais non nulle, qu'une succession d'évènements de ce genre se soit produite jusqu'à la formation de notre satellite. Dans une [synthèse de son modèle paru en 2000](#), Woolfson présentait un scénario qui amenait ce type de capture sur une orbite stable, avec une excentricité de 0,4 et ajoutait que cette capture « *se produit facilement en présence d'autres corps qui retirent de l'énergie au système Terre-Lune* » - encore la question du trop-plein d'énergie à dissiper pour être réaliste.

Au fil des années, les textes mettant en avant l'hypothèse de la capture se sont raréfiés du fait de la prédominance de l'hypothèse actuelle de l'impactisme. Au demeurant, il en est de même des deux autres hypothèses historiques. Mais qui dit impactisme ne dit pas nécessairement faire table rase du passé, comme on va le voir dans le chapitre suivant.

4. L'hypothèse impactique : de Daly à la conférence de Kona en 1984



4.1. Un planétoïde géant percute la Terre : de Daly à Hartmann, Davis et Cameron

Le chercheur (géologue) canadien Reginald Aldworth Daly a publié un texte en 1946 dans lequel il analyse tout d'abord les principes de la théorie de la Fission élaborée par Darwin. Les critiques dont nous avons parlées plus haut sont présentées et face aux difficultés rencontrées, Daly propose alors une nouvelle voie. Il imagine que les éjections de matériau de la Terre sont dues non pas à une vitesse excessive de rotation de la Terre, mais « *à la collision avec un planétoïde qui est arrivé avec une grande vitesse relative* » (p. 108) provoquant un échauffement énorme qui a eu des conséquences en termes d'évaporation et de fission. L'auteur va jusqu'à estimer que la température, à l'endroit du contact entre la proto-Terre et l'astéroïde impacteur, pouvait s'élever à ... 100.000 degrés Celsius ! Un certain nombre de corps éjectés se seraient ensuite agrégés pour former la Lune. Daly complète son analyse en se référant aux travaux de Gilbert déjà signalés à propos de la création par impact des (grands) cratères lunaires, et en tire un argument : après cet événement catastrophique, des masses considérables de débris ont pu retomber sur la Lune et former ces cratères. Enfin, il signale que cette hypothèse peut rendre compte de plusieurs aspects physiques dont la densité de la Lune et le moment cinétique du couple Terre-Lune – ce sont deux arguments de poids.

Sa proposition ne fut pas prise en compte, même si des chercheurs compétents comme Henry Norris Russell - qui lut le texte de Daly avant sa parution - abonda dans son sens, après avoir au préalable critiqué ce point de vue. Il lui fit la suggestion qu'une grande partie de notre Lune serait le reste d'un planétoïde ayant au préalable percuté la Terre pour être ensuite capturé sur une orbite terrestre. Et ce fut tout. Ce n'est qu'en 1992 que Ralph Baldwin et Don Wilhelms consacrèrent un article entier aux idées de Daly. D'après Mackenzie (op. cit.), cette ignorance de Daly pendant un temps long

serait due au manque d'intérêt des chercheurs pour la Lune, orientés vers d'autres domaines de l'astronomie. En outre, l'idée que des cratères, des mers, des monts aient pu être créés par des impacts n'était pas dans l'air du temps : la plupart des astronomes pensaient que les cratères lunaires étaient dus au volcanisme, à l'exception de quelques-uns comme Robert S. Dietz (article de 1946) ou Ralph Baldwin (ouvrage célèbre « The face of the Moon » paru en 1949).

Il fallut attendre les années 1970 pour voir ressurgir ce type d'hypothèses. Le déclencheur de cette évolution est sans conteste le « coup de fouet » qu'a apporté dès le début des années 60 le projet des USA de marcher sur la Lune avant la fin de la décennie. Un nouvel objectif, à la fois scientifique, technique et appliqué, allait susciter des vocations ... et de gros investissements dans l'étude de la Lune. Un certain William Kenneth Hartmann, jeune doctorant dans le tout récent laboratoire de Gerard Kuiper, participa à l'élaboration d'une cartographie détaillée de la Lune afin de préparer les missions astronautiques à venir. En particulier, Kuiper et lui se rendirent compte que la Mer Orientale (plus exactement, le bassin sous-jacent à la mer) s'était certainement formée à la suite d'un impact très important.⁷ Cette découverte quasi fortuite ouvrait la porte à l'étude plus systématique des phénomènes d'impactisme géant, c'est-à-dire impliquant de très gros objets percutant le sol lunaire. Il faut préciser que la structure Mare Orientale (la mer de lave elle-même, les 3 anneaux montagneux successifs qui la cernent et les environs liés à sa formation) atteint un diamètre de ... 900 km !

La précision photographique de plus en plus grande, permise grâce aux premières sondes lunaires, montra également l'inextricable empiètement des cratères sur une surface donnée, des plus grands aux plus petits. C'est d'ailleurs par un tel décompte (méthode de dénombrement des cratères d'impact) que les âges des structures lunaires se précisèrent et que les mers lunaires se trouvèrent affublées d'un âge respectable, au moins 3,6 milliards d'années – c'était avant le prélèvement de roches sur la Lune permettant des mesures directes par datation radiométrique. Les impacts géants, eux, s'étaient nécessairement produits bien avant.

Inspiré par sa compréhension de ce qu'était réellement la Mer Orientale, Hartmann déduisit de la présence de grandes structures montagneuses situées vers le pôle Sud lunaire qu'un autre bassin d'impact encore plus grand devait se situer derrière le limbe, c'est-à-dire sur la face cachée de la Lune. Quelques années plus tard, les sondes confirmèrent ses dires en montrant les premières images du bassin SPA (South Pole - Aitken). Cette déduction était bien plus osée, car il est impossible de voir ce bassin depuis la Terre, à l'exception de son extrême bord montagneux.

Encore une étape, et Hartmann sera mûr pour lancer son hypothèse de l'impact géant qui a créé la lune ; cette étape s'appelle Safronov (dont nous avons parlé plus haut). A partir de ses lectures relatives à la possibilité que de gros planétésimaux aient pu se former par accréation et circuler dans l'environnement de la Terre, Hartmann en vint à se demander ce qui se passerait lors d'impacts avec de gros corps, de tailles diverses. Il s'associa à Donald R. Davis dans le début des années 70 pour faire tourner quelques scénarios sur ordinateur. Et voici qu'apparut, sous forme calculable, la possibilité qu'un corps aussi gros que la Lune ait pu se former près de la Terre. C'est alors qu'Hartmann imagina un scénario dans lequel un tel objet a pu percuter la Terre pour former les très grands bassins dont nous avons parlé. Et pourquoi pas un impact qui formerait la Lune dans son ensemble ?

⁷ Mackenzie rapporte (op. cit. pp. 154-155) que c'est lors d'une projection d'assemblages photographiques de la Lune sur une sphère (afin d'avoir une vue réaliste du globe lunaire) que Kuiper et Hartmann s'aperçurent de la forme réelle de la Mer Orientale qui, vue depuis la Terre, ressemble simplement à une simple tâche sombre sur le bord extrême du limbe lunaire occidental. Sa forme arrondie et ses reliefs symétriques emboîtés (trois anneaux montagneux) leur sautèrent aux yeux : il y avait eu là nécessairement un très gros impact. On trouvera ICI un texte de synthèse paru en 1962 et montrant les photographies ainsi obtenues (par projection sur sphère) de tous les bassins lunaires visibles depuis la Terre, et également ICI une photographie de Hartmann en pleine action.

Entre avoir une idée et la prouver, chaque chercheur sait qu'il y a une sacrée marge. Des arguments sont à apporter pour que la thèse résiste aux critiques. Mais l'analyse des roches lunaires ramenées par les différentes missions ne semblaient pas montrer trace d'un tel cataclysme, ce qui était assez gênant. Malgré tout, Hartmann peaufina ses arguments et les présenta tout d'abord avec Davis dans une conférence en 1974 à l'Université Cornell à Ithaca, et cet exposé donna lieu à un [article en 1975](#) (devenu une référence) publié en commun dans la revue *Icarus*.

Regardons de plus près ce texte qui n'a rien de « médiatique » et reste dans les règles austères de présentation de données. Tout d'abord, Hartmann et Davis considèrent une étape de la formation du système solaire dans laquelle des groupes de planétésimaux sont nombreux à circuler dans l'espace. Certains ont pu être capturés par les planètes, mais il y a doute sur ce plan quant à la Lune. Ces planétésimaux étant de taille très variable, les auteurs vont créer des scénarios avec des tailles de corps différentes (de gros à petit, pour résumer). En appliquant des équations de croissance de ces corps par accrétion et en faisant varier leurs vitesses mutuelles, Hartmann et Davis montrent que les corps initialement les plus gros vont accélérer rapidement leur croissance (par le jeu de leur attraction gravitationnelle qui s'accroît exponentiellement) alors que d'autres corps plus petits peuvent persister alentour, mais sous forme réduite puisqu'ils ont de moins en moins de matière à agréger. Les planètes vont se distinguer ainsi fortement du reste du matériau alentour.

Certes, il est difficile actuellement d'imaginer l'environnement de la Terre encombré de corps célestes, mais à l'époque de la formation des planètes le « nuage » de particules du système solaire était épais. Les auteurs écrivent par exemple que *« l'on peut s'attendre à ce que les planètes atteignent pratiquement leurs dimensions actuelles, entourées d'un essaim de particules coorbitantes, plus petites, mais non négligeables, sur des orbites héliocentriques »* (op. cit. p. 505).

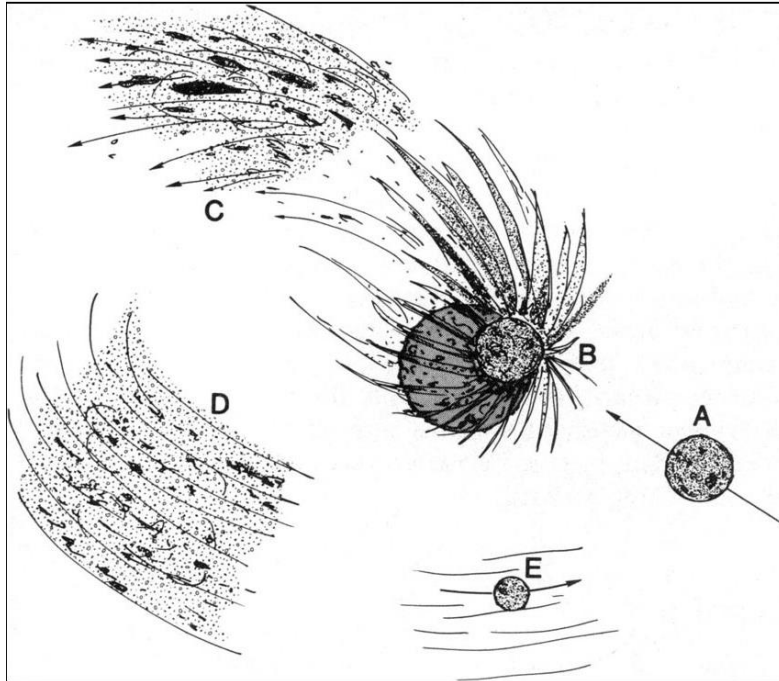
Quid alors du mécanisme de collision ? Il se produit nécessairement dans cet environnement « chargé » en corps par simple percussion aléatoire entre eux (trajectoires d'interception) ou par le phénomène physique d'attractivité que nous avons signalé. Le résultat dépend essentiellement de la vitesse d'impact du corps attiré : une destruction est possible dans certaines configurations⁸. D'après les calculs réalisés, Hartmann et Davis estiment qu'une planète et de nombreux corps d'au moins 100 km de rayon se forment au bout de 10^7 années. Les phénomènes continus d'accrétion et d'impacts mutuels modifient la distribution et la trajectoire des corps errants, et c'est au cours de ces multiples changements qu'un impact majeur d'un gros corps sur une planète peut se produire. Les auteurs écrivent que *« la moitié de l'énergie cinétique d'un planétésimal d'environ 1.200 km de rayon percutant la Terre à une vitesse de 13 km/s suffirait à éjecter deux masses lunaires à une vitesse proche de la vitesse de libération »* (op. cit. p. 512)

Enfin, les auteurs listent les arguments allant dans le sens d'une Lune formée à la suite d'un impact majeur sur la Terre, à savoir : l'absence de fer sur la Lune, l'appauvrissement en éléments volatils, et l'enrichissement en éléments réfractaires (comparativement à la Terre). Car au moment de la rédaction du texte nous sommes en 1974/1975, c'est-à-dire dans l'après Apollo, et les roches lunaires ont pu être analysées. Et même si la preuve d'un impact majeur n'a pas été découverte, ces mesures vont dans le sens de leur hypothèse. En considérant que le noyau de la Terre, qui contient essentiellement du fer, est déjà formé au moment de l'impact géant, on comprend que ce qui est éjecté provient du manteau terrestre (et aussi du corps impactant) et soit pauvre en fer.

Quelle serait la taille de l'impacteur ? L'estimation de 1.200 km que mentionnent Hartmann et Davis est une des possibilités « théoriques ». Le planétésimal peut être en fait plus gros. A ce sujet, en

⁸ Chose intéressante, les auteurs n'excluent pas qu'une planète puisse capturer un corps proche.

note 1 de la page 512, les auteurs indiquent que lors d'une communication privée avec l'astrophysicien Alastair Cameron en 1974, celui-ci leur signale avoir utilisé le même modèle (mathématique) qu'eux et qu'il estime que le planétésimal pouvait être de la taille de la planète Mars (environ 3.400 km de rayon). Quel choc ! Le risque d'un tel impact est que la Terre puisse carrément éclater en mille morceaux – ce qui n'aurait pas fait les affaires de l'évolution ! On peut donc imaginer un choc rasant se produisant à une vitesse non excessive, ce qui permet d'éviter la catastrophe ultime. Cette idée d'un impact tangentiel sera dès lors soutenue par les partisans de l'impact géant. En voici une représentation due à Alan Boss, parue dans Science en 1986. Les événements se déroulent dans l'ordre des lettres, de A (approche de l'impacteur) à E (la Lune est formée).



Que se passe-t-il lors d'un tel choc, et comment se forme ensuite la Lune ? Pour rester dans les premières conceptions de l'époque, on peut prendre pour base un texte présenté en 1976 à la « Lunar and Planetary Science Conference » par Alastair Cameron et William Ward. Le scénario décrit est précis. Le point de départ est le constat (récurrent dans les études) d'un moment cinétique trop élevé du couple Terre-Lune. Il faut donc supposer que lors de l'impact initial la rotation de la Terre a été modifiée sous le choc, estimé à 11 km/s. L'impacteur lui-même a deux destinées : l'hémisphère qui percute la Terre va finir par s'y amalgamer, tandis que celui qui y échappe dans ce choc tangentiel voit sa vitesse largement freinée. Le mouvement se fait vers l'avant à une vitesse d'éjection allant jusqu'à plusieurs fois la vitesse du son pour les couches superficielles. Les silicates les plus réfractaires, après vaporisation, se condensent en particules tandis que les éléments les plus volatils forment une sorte de poussière fine qui finira par s'échapper du système d'attraction locale. Un disque de particules suffisamment épais se crée alors et ce changement dans la distribution des masses et des vitesses des différents corps va participer à la transformation du moment cinétique de l'ensemble. Ce disque s'agglomérera ensuite pour former la Lune.

Cameron et Ward estiment que la Lune peut dès lors se former très vite, par agglomération des corps composant le disque. L'intégralité de la matière disponible dans le disque ne serait pas nécessaire dans ce processus, une partie d'entre elle finira par se disperser. En conclusion, les auteurs estiment que ce scénario répond correctement aux difficultés rencontrées alors, relatives au moment

cinétique du système et à la différence Terre-Lune entre éléments réfractaires et volatils, tout en validant la forte ressemblance des roches entre les deux corps.

Dans les années qui suivirent les premiers textes de Hartmann ou de Cameron, une certaine fébrilité s'empara de la communauté scientifique. Tout ce qui avait été écrit auparavant était donc faux ? Un seul gigantesque choc pourrait expliquer l'ensemble de l'histoire de la formation de la Lune et de la modification de la Terre ? Beaucoup étaient réticents et gardaient en tête les classiques théories de la fission, de l'accrétion ou de la capture, et cherchaient à combler les défauts de chacune. Les « Lunar and Planetary Science Conference » qui se tenaient annuellement étaient le lieu de ces débats. Mais il devenait urgent de faire un point complet sur cette affaire, ce qui fut fait en 1984.

4.2. La conférence de Kona en 1984 : le bilan tant attendu

En 1982, en réfléchissant au futur programme de la « Lunar and Planetary Science Conference », l'équipe chargée de préparer ce meeting proposa de rassembler les chercheurs ayant des positions à défendre quant à l'origine de la Lune. D'après les souvenirs que relate G. Jeffrey Taylor, il semble que ce soit Günter W. Lugmair qui le premier émit cette idée. Taylor, Phillips et Hartmann furent chargés de cette organisation. L'année 1983 parut trop précoce aux organisateurs pour que les chercheurs intéressés aient le temps de préparer quelque chose de consistant. Ce sera donc en 1984 et, pour des questions budgétaires, la conférence se tiendra à Kona dans l'île d'Hawaï où était déjà prévu un autre meeting (la plupart des chercheurs venaient des USA).

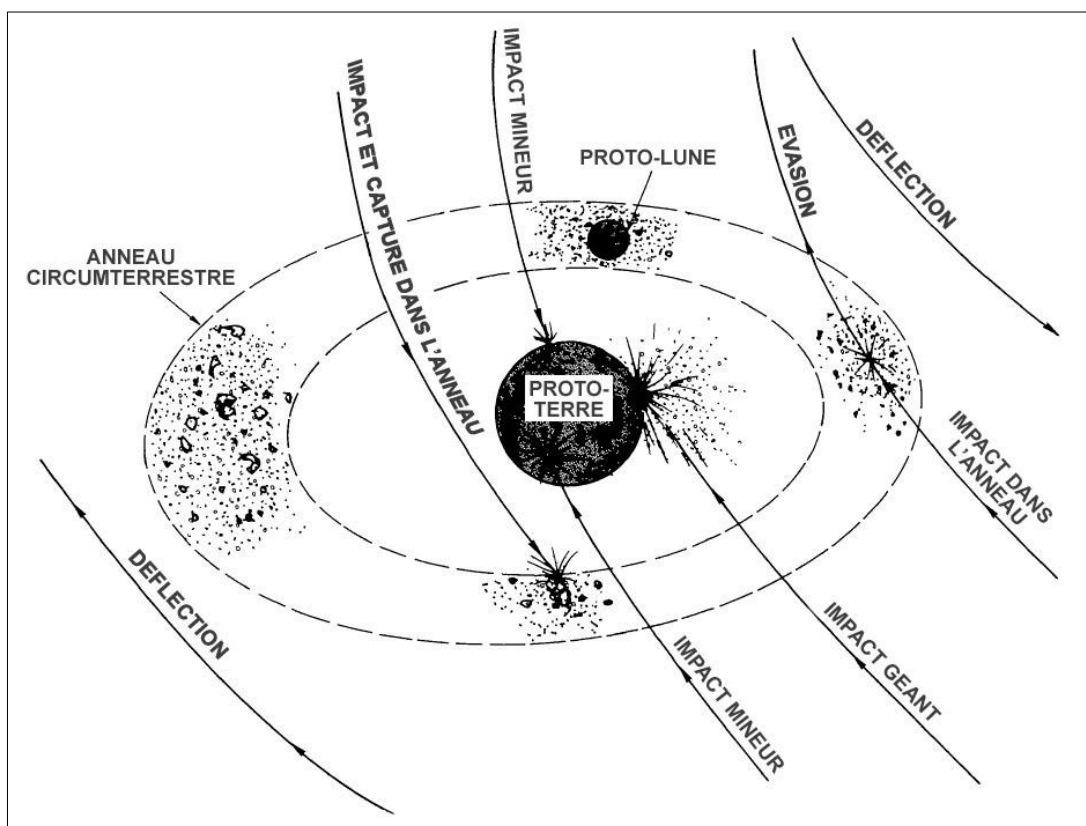
Le programme de cette conférence comporte des thèmes spécifiques aux contraintes dynamiques, géochimiques et géophysiques auxquelles doivent répondre les chercheurs pour parler de l'histoire de la Lune (et de la Terre) : il s'agit de questions relatives aux similitudes des manteaux terrestre et lunaire, à l'existence d'un cœur de fer au sein de la Lune, aux caractéristiques mêmes des composants tels que le nickel, l'uranium, le molybdène, etc., ces analyses étant devenues possibles depuis que les missions Apollo avaient rapportées des roches lunaires. Il s'ensuit une série d'exposés qui développent les hypothèses en concurrence.

Les théories classiques sont présentées dans leurs derniers développements. Par exemple, nous avons déjà mentionné Singer dans le cadre de la théorie de la capture qui estime que cette hypothèse est toujours valide, en particulier par le fait que la Lune présente une faible teneur en fer et en éléments volatils, comparativement à la Terre. Ceci se comprend si l'on admet que la Lune est un astre capturé qui venait du plus profond du système solaire. De son côté, William Cassidy⁹ plaide pour l'hypothèse d'une planète binaire (c.-à-d. la formation par accrétion de deux corps proches) en considérant une formation dans la même « zone d'alimentation » de la Terre et de la Lune, cette dernière démarrant le processus d'accrétion plus tardivement que la Terre. Citons également Binder qui défend l'hypothèse de la Fission. Ses arguments restent classiques (voir la partie consacrée à cette théorie) et il en profite pour pointer une difficulté de la théorie de l'Impact Géant : la Lune serait essentiellement composée du matériau de l'impacteur, or elle ressemble davantage au matériau du manteau de la Terre. Par quel mystère alors l'impacteur, venu d'on ne sait où, serait composé de matériaux semblables à ceux de la planète qu'il percute ? Enfin, le texte de Weidenschilling et al. remet au goût du jour la co-accrétion à partir d'un disque formé autour de la terre, et son illustration montre que le matériau silicaté peut s'agréger au disque alors que le matériau ferreux le traverse et file dans l'espace – toujours la question du manque de fer dans la Lune.

⁹ Sauf erreur de ma part, l'exposé de Cassidy n'apparaît pas dans les actes publiés en 1986 (ce n'est pas le seul), mais on peut lire la synthèse de son intervention dans le document des résumés acceptés pour la conférence. Inversement, certains chercheurs ont été ajoutés à l'ouvrage final sans avoir communiqué lors de la conférence de 1984.

Mais l'essentiel des exposés consacrés à l'origine de la Lune est réservé à l'hypothèse de l'impact géant (qui donnera lieu à la journée finale et aux discussions associées). On y trouve tout d'abord le duo Hartmann et Davis dont nous avons parlé plus haut, puis d'autres intervenants qui centrent leurs interventions sur le disque de débris (plus ou moins solides ou gazeux) qui se forme autour de la terre à la suite de l'impact géant. Car c'est là le nœud du problème qui persiste depuis 1975 : que se passe-t-il après le choc initial ? Le dessin de Boss que j'ai reproduit ci-dessus donne un aperçu très imagé, mais le processus d'ensemble peut être complexe, comme on l'a vu avec le texte de Cameron et Ward de 1976 (mentionné plus haut). Et il peut intégrer différents mécanismes à partir de l'idée d'un impact géant.

Comme illustration de cette possible interaction entre différents phénomènes physiques, voyons le schéma présenté lors de ces journées par Boss et Peale pour accompagner leur texte qui clôturaient ces journées. En fait, cette représentation visait à associer plusieurs processus plausibles de formation de différents types de corps, dont certains sont devenus notre Lune.

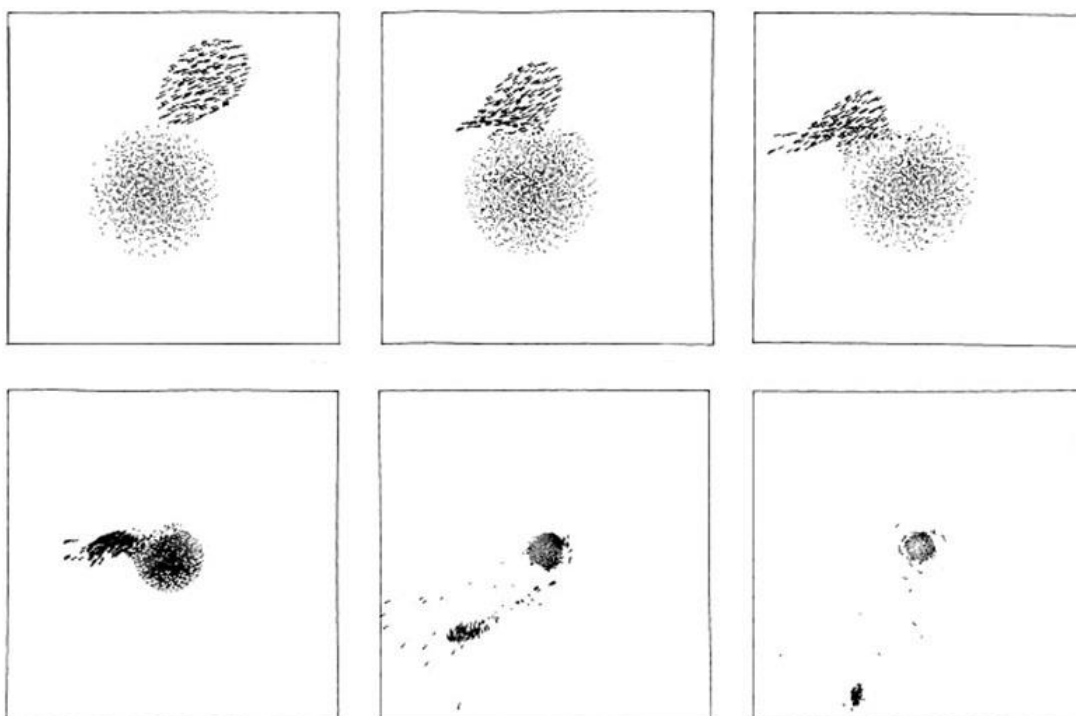


A l'exception de l'hypothèse de la Fission (version Darwin), on retrouve associés : des corps trop rapides ou passant un peu trop loin de la Terre et qui sont rejetés dans l'espace sans pouvoir être capturés (déflexion) ; un impact géant qui va produire le phénomène d'éjection de débris autour de la Terre ; la formation d'un anneau de matériaux solides ou gazeux capturés par l'attraction terrestre et mis en orbite (dans la zone comprise entre les deux cercles pointillés) ; une accréation de corps au sein de cet anneau finissant par s'agglomérer pour former la Lune. Les auteurs y ont ajouté quelques impacts mineurs sur la Terre et au sein de l'anneau, celui-ci pouvant éventuellement capturer de petits corps y pénétrant ou, du fait de l'orientation et de la force de l'impact, les éjecter du système (évasion).

En plus des arguments classiques (par exemple, une meilleure explication du moment cinétique du couple Terre-Lune), de nouvelles analyses allaient également dans le sens de l'hypothèse de l'Impact Géant. On peut les regrouper en deux thèmes, l'un chimique, l'autre informatique.

=> l'analyse isotopique des éléments contenus dans les roches lunaires avait progressé dans la diversité des éléments étudiés et semblait confirmer la forte ressemblance entre Terre et Lune ; cela renforçait l'idée d'un impact rasant ayant éjecté du matériau terrestre provenant uniquement de son manteau, mixé au matériau de l'impacteur supposé de composition analogue.

=> l'apparition de la simulation en 3D sur ordinateur : celle-ci permet dès lors de voir se dérouler un ou plusieurs scénarios de création de la Lune et de modifier les paramètres à la demande. Voici celui présenté par Benz et al. qu'on peut considérer comme l'une des premières représentations imagées d'un scénario d'Impact Géant en 3D. Les six images sont à lire de gauche à droite et de haut en bas. Bien que les possibilités de calculs étaient encore limitées à l'époque, il est facile de voir l'impact et la déformation des deux corps, puis la formation d'une « traînée » de petits corps qui vont, soit retomber sur Terre, soit s'agglomérer pour former une Lune en orbite terrestre (dernière image).



L'effet « psychologique » de la conférence de Kona fut fondamental pour la suite des recherches sur l'origine de la Lune. Toute la fin de la conférence fut centrée sur l'impact géant. Le défilé des conférenciers qui a traité de cette hypothèse a ébranlé les participants, non seulement par leur nombre, mais aussi par leur façon de résoudre les problèmes de dynamique, de physique et de chimie qui étaient gênants dans les autres théories. Citons Mackenzie (op. cit., p. 168) : « Pour l'essentiel, le changement d'attitude n'est pas dû à une révélation particulière, mais au fait qu'un grand nombre d'orateurs, amenés à se prononcer, ont conclu que l'impact géant semblait meilleur que n'importe quelle autre solution. Et ils l'ont fait indépendamment les uns des autres. Jusqu'à la réunion, seuls Hartmann et Taylor s'étaient rendu compte de l'ampleur du consensus qui se dégagait. Pour tous les autres, ce fut une surprise, et Hartmann se souvient d'avoir vu des gens aller et venir avec l'air abasourdi. » On peut dire qu'il y eut un avant et un après Kona 1984.

Ceci est d'autant plus étonnant que les hypothèses de Hartmann (et Davis, et Cameron, et d'autres qui s'y étaient rapidement ralliés) étaient diffusées depuis 1975 dans des revues scientifiques. Neuf années s'étaient écoulées jusqu'à la conférence de Kona. Les arguments en faveur de l'Impact Géant avaient déjà été présentés, y compris dès le premier texte d'Hartmann et Davis, et depuis cette

date il était facile de les examiner en détails. Mais il semble que cette hypothèse était toujours considérée comme marginale par un grand nombre de chercheurs, préoccupés davantage à tenter d'améliorer leurs propres hypothèses. D'où le choc ressenti par ceux-ci qui se retrouvèrent subitement eux-mêmes marginalisés lors de cette conférence.

Quels arguments de poids étaient apportés ? Pour répondre à cette question, continuons notre lecture de Mackenzie. Celui-ci mentionne le fait qu'à la fin de la conférence, John Wood improvisa un questionnaire qu'il fit passer aux participants. Celui-ci était constitué de plusieurs questions, chacune reprenant un point que toute théorie devait correctement expliquer : pourquoi la Lune est-elle si grosse (proportionnellement à la Terre) ? pourquoi y trouve-t-on si peu d'éléments volatils ? pourquoi a-t-elle un noyau de fer si petit (par rapport à celui de la Terre) ? pourquoi au contraire ressemble-t-elle à la Terre quant aux isotopes de l'oxygène ? la théorie rend-elle compte correctement de l'existence d'un océan de magma qui s'est formé au début de l'histoire de la Lune ?

Wood demanda aux participants de noter sur cette base cinq théories différentes : Capture ; Co-accrétion ; Fission ; Impact Géant ; Capture désintégrative (variante récente de l'hypothèse de la capture¹⁰). Les résultats furent clairs : l'hypothèse de l'Impact Géant est celle qui obtint le meilleur score sur l'ensemble de ces critères. Même ceux qui étaient réticents à cette théorie se rendirent compte de son « efficacité » explicative.

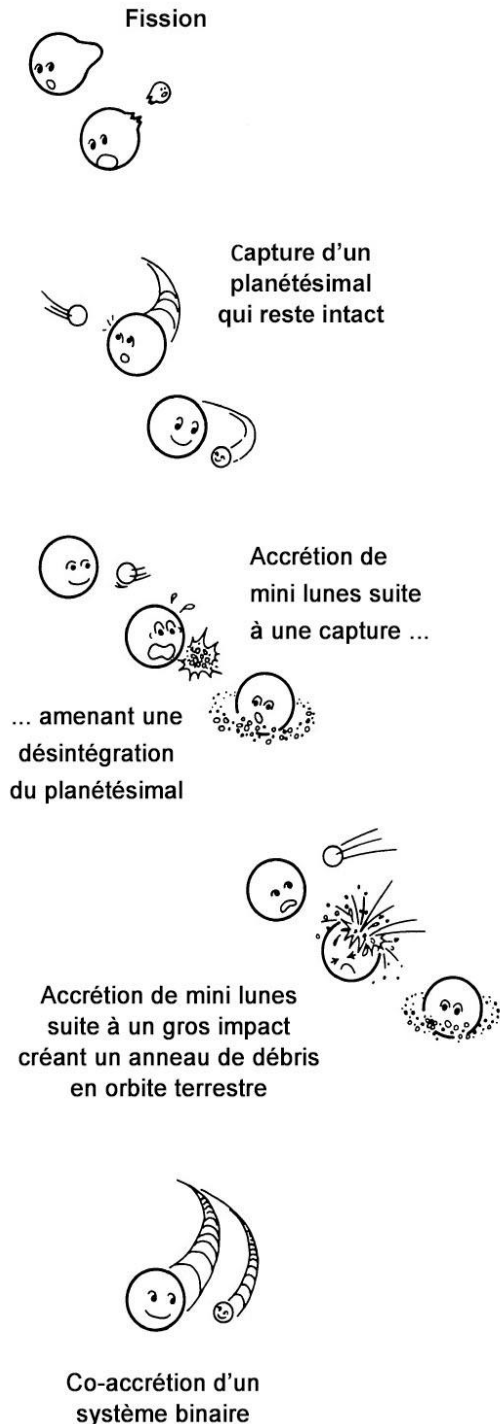
Certains intervenants ont tenté lors de cette conférence de montrer l'interaction entre plusieurs théories. C'est par exemple le cas dans l'exposé de Ringwood qui proposa un mixte entre son hypothèse de l'évaporation/précipitation (voir son modèle dans le chapitre sur la théorie de la Fission) et celle de l'Impact Géant. Le fait qu'il semble exister un lien étroit entre la composition du manteau terrestre et celle de la Lune corrobore tout à fait son hypothèse, mais les difficultés restantes - et résistantes - énoncées plus haut l'amènent à considérer que l'Impact Géant pourrait apporter de l'eau (si je peux m'exprimer ainsi) à son moulin. Il fournit en effet toute l'énergie utile aux phénomènes de vaporisation des éléments, puis de précipitation. Ringwood estime même, en se basant sur des travaux antérieurs, qu'il n'est pas nécessaire que le projectile qui a impacté la Terre soit gigantesque pour créer l'ensemble des événements qui s'ensuivront : un planétésimal mesurant plus de 100 km de rayon et arrivant à une vitesse supérieure à 12 km/s pourrait suffire.

L'attitude de Ringwood est intéressante, car elle participe à ce mouvement qui va se faire jour dans les décennies suivantes, visant à prendre comme point d'entrée l'idée d'un impact géant tout en y associant quelques aspects liés aux théories antérieures : oui, il y a bien eu une forme de capture d'un planétésimal important par la Terre, mais une capture ... directe, en plein dans la cible ! oui, il y a bien eu une forme de fission puisqu'une partie importante de la Terre lui a été arrachée par le planétésimal ; oui, il y a bien eu une forme de co-accrétion proche dans la mesure où, suite à l'impact, de larges débris se sont amalgamés non loin de la Terre tandis que celle-ci « absorbait » ceux qui étaient trop proches et retombaient sur elle par simple effet gravitationnel.

Quoiqu'il en soit, comme on le verra aussi dans le chapitre suivant, l'hypothèse impactique primordiale n'est plus vraiment remise en cause, même si des variantes existent. Pour la petite histoire, le planétésimal dont on parle n'a été dénommé que ... 16 ans après la Conférence de Kona. C'est Alexander Halliday qui proposa en 2000 de l'appeler Theia (plus pratique à écrire que : « le planétésimal qui a impacté la Terre »). Le choix du nom est judicieux quand on sait que dans la mythologie grecque Theia est la fille d'Ouranos (le Ciel) et de Gaïa (la Terre). Et il a eu un sacré succès ...

¹⁰ Possibilité que nous avons présentée dans la partie consacrée à l'hypothèse de la Capture.

Pour conclure cette partie, voici deux extraits des actes de la conférence de Kona 1984. Je vous propose, d'une part un dessin humoristique représentant les différentes théories évoquées qui figure dans le [texte de Matsui et Abe \(page 454\)](#), d'autre part la traduction d'un poème de Carle Pieters qu'on trouve en avant-préface de ce même ouvrage (ouvrage complet en téléchargement [ICI](#)).



La Lune originelle¹¹

*Il y a fort longtemps (quatre éons et demi)
Un nuage de poussière sortit de l'infini.
Le Soleil devint Star, la Terre belle planète,
Et la Lune, nouveau monde, naquit à la sauvette.*

*Ce couple Terre et Lune jusqu'alors si lié,
Finit, c'est le destin, par être séparé.
Leurs jeunes liens intimes que nous voulons comprendre
N'eurent qu'un temps limité avant de se distendre.*

*Terre et Lune furent toutes deux grandement dépouillées
Dans leur manteau caché de tout sidérophile.
Mais la Lune seulement fut alors condamnée
A mourir de soif faute d'agent volatil.*

*La Lune cache les secrets d'une époque révolue
Où les planètes naissantes se disputaient l'espace.
Sur sa croûte primitive qui sans cesse s'est tordue,
Une violence brutale vint modifier sa face.*

*Après le tout premier demi-milliard d'années,
D'énormes cicatrices alors se sont formées ;
L'ancienne croûte feldspathique leur a bien survécu
Et un manteau mafique aussi est apparu.*

*Mais ensuite du tréfonds de la Lune ranimée,
Une nouvelle chaleur a pu s'en échapper.
De grandes inondations, des fontes, des coulées
Ont surgi et la face de la Lune fut changée.*

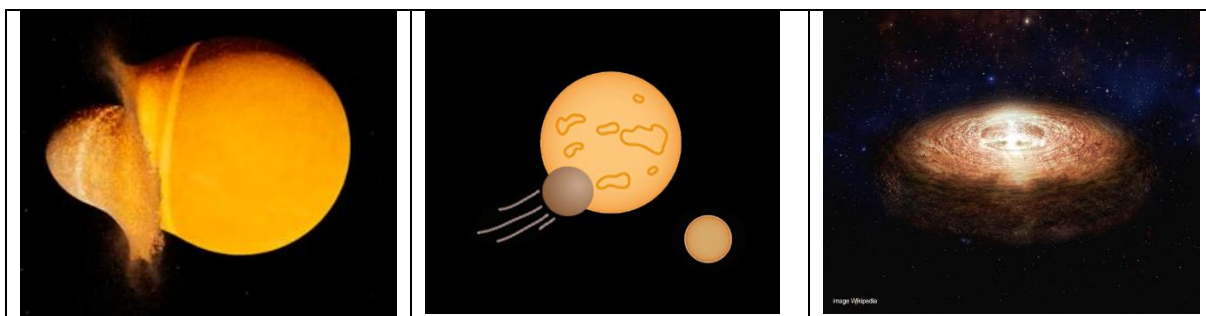
*Ainsi varia la Lune en ces temps si troublés.
Nous traquons les raisons et nos rimes sont trouvées :
Est-ce une sœur attitrée ?
Ou un clone modifié ?
Un migrant capturé ?
Un impact supposé ?*

*Un jour la vérité, quand on la connaîtra,
Nous ira, nous plaira, ou nous agacera.*

Carle Pieters

¹¹ Je vous propose une version française « classique » en rimes et en alexandrins. Pour y parvenir, j'ai dû parfois m'éloigner de la version anglaise, mais chaque phrase respecte le sens donné par Pieters. Voir [ICI](#) pour lire le poème en version originale.

5. L'après Kona 1984 : débats récents et hypothèses alternatives



5.1. Les années 90 et la conférence de Monterey 1998 :

Cela fait près de 40 ans (au moment où j'écris ces lignes) que la conférence de Kona s'est déroulée. Si elle a définitivement mis en avant le modèle de l'Impact Géant, cela ne signifie pas que plus rien n'est à étudier quant à l'origine de la Lune. Au contraire, en associant plusieurs autres modèles à l'élément clef qu'est l'impactisme initial, elle a permis un foisonnement des idées qui vont se baser sur plusieurs aspects scientifiques et techniques : d'une part, l'analyse des roches lunaires des missions Apollo continue, à quoi s'ajoute d'autres relevés à distance ou in situ effectués par des sondes spécialisées¹², ce qui permet de répondre plus précisément à des questions d'ordre géologique ; d'autre part, l'explosion des capacités de calcul informatique va autoriser des simulations de plus en plus élaborées quant aux scénarios plausibles de la formation de la Lune.

Bien entendu, tout ceci a pris du temps car les progrès ne sont pas instantanés. C'est pourquoi, à un rythme régulier, des conférences se sont tenues depuis 1984 pour faire le point sur l'avancée des travaux portant sur l'origine de la Lune. Il y eut en 1998 celle qui s'est tenue à Monterey (Californie), puis celle de Londres en 2013. Je cite ici deux grandes conférences mondiales centrées sur ce thème, mais d'autres ont pu entre-temps susciter des analyses dans ce domaine - par exemple lors des conférences annuelles du Lunar and Planetary Institute (LPI).

Prenons l'exemple de la conférence de 1998 qui s'est tenue à Monterey du 1 au 3 décembre. Dans un texte commun, Cameron et Robin Canup évoquent la difficulté qu'ils avaient dans les années 80 à intégrer un volume de paramètres suffisants pour obtenir des simulations informatiques fiables. Ainsi, celle de Benz et al. signalée plus haut (conférence de Kona 1984) est assez limitée sur ce plan, même si la représentation visuelle obtenue est intéressante. En utilisant la même méthode dite « Hydrodynamique des particules lissées » centrée sur la mécanique des milieux continus solides, liquides ou gazeux, les auteurs ont pu intégrer 10.000 voire 20.000 particules – c'est-à-dire des décompositions en éléments très petits des corps en présence – et jusqu'à 100.000 dans certains cas. Benz évoquait en 1984 une simulation portant seulement sur un peu plus de 2.000 particules. Le « jeu » consiste ensuite à faire varier des paramètres comme la vitesse, la masse, le moment cinétique de l'ensemble. Les auteurs constatent que dans des conditions optimales, deux impacts se produisent : le premier déforme l'impacteur et de la matière se rassemble en orbite ; une seconde collision finit par détruire l'impacteur. Le moment cinétique se transfère à l'ensemble du système (Terre et particules).

Sous cette version, le processus se complique un tant soit peu, puisqu'il est suggéré un double impact. Pourquoi pas ? On a déjà émis l'idée d'un matériau éjecté lors de l'impact dont une partie non négligeable va retomber sur la Terre (attraction oblige) tandis qu'une autre va s'agglomérer pour former

¹² Citons les sondes Clementine, Lunar Prospector, Smart-1, Kaguya, Grail A et B, ou récemment Chang' 5, Chandrayaan-3.

la Lune (plus une partie qui va s'enfuir dans l'espace). La nuance n'est pas si grande que ça. Je signale ici cette idée d'un impacteur qui est détruit en percutant la Terre lors d'une deuxième collision car elle ouvre la porte à ces questions : Ses composants ont-ils été amalgamés au matériau terrestre ? Ne peut-on pas en retrouver trace sur notre bonne vieille Terre ? Cette interrogation a tout récemment été relancée et on en reparlera un peu plus loin.

Lors de cette conférence, Kokubo et coll. ont cherché à expliquer la façon dont le disque de débris, formé autour de la Terre à la suite de l'impact Géant, va évoluer pour former la Lune. En utilisant un calculateur spécialisé dans le problème des 3 corps, ils ont pris en compte jusqu'à 30.000 particules pour simuler le disque en orbite. La simulation montre la formation de bras en spirale – ce qui au passage explique mieux le transfert du moment cinétique au sein du système. Ils précisent que *« lorsqu'un bras en spirale est prolongé au-delà de la limite de Roche, son extrémité se détache du bras pour former un petit agrégat. L'accrétion rapide de ces petits agrégats forme une graine lunaire »*. A partir de ce stade, cette graine va croître en absorbant les éléments de son environnement. Les particules composant le disque vont peu à peu disparaître au profit de l'accroissement de la Lune et d'autres, par modification de leur orbite, seront amenées sur une trajectoire de collision avec la Terre. Ce processus est très rapide, la Lune pouvant être « presque achevée » (*sic*) en l'espace d'un mois.

Ne croyons pas qu'en 1998 les autres hypothèses sur la formation de la Lune étaient définitivement écartées au profit de l'Impact Géant. On trouve par exemple dans les actes de la conférence de Monterey un texte de Jones qui, sans valider les anciennes théories, critique le modèle devenu dominant de l'Impact Géant à partir de trois « tests » : l'Impact Géant explique-t-il pourquoi la Lune est pauvre en éléments volatils ? Ce même modèle prévoit que la Terre, comme la Lune, a eu à une époque un océan de magma, mais en a-t-on trouvé trace ? Les isotopes du Tungstène sont-ils semblables entre la Terre et la Lune ? A ces trois tests, l'auteur répond « Non » et explique pourquoi. Cela dit, Jones ne s'engage pas car pour lui *« aucun d'entre eux ne soutient le modèle de l'impact géant, mais ils ne le réfutent pas non plus »*. Voilà la légendaire prudence du chercheur mise en avant !

Plus engagés dans leur opinion, on trouve encore des défenseurs de la théorie de la Capture. Ainsi, Malcuit et Winters - déjà mentionnés dans le chapitre consacré à cette théorie - argumentent à nouveau en faveur de l'idée d'un corps errant qui ne se détruit pas en étant pris par l'attraction terrestre. Les auteurs font valoir qu'il est possible d'obtenir une capture réussie sur une longue durée (plusieurs centaines de millions d'années) : à partir d'une première orbite fortement elliptique de l'objet capturé, celle-ci va se « circulariser » très progressivement. Ainsi, on évite le problème des énormes forces nécessaires à la dissipation énergétique sur lequel butait l'hypothèse d'une capture rapide – dans ce dernier cas, elles réduiraient certainement le corps en morceaux¹³. Une fois l'orbite circularisée, les processus potentiels de modification ultérieure (essentiellement, les forces de marées) sont semblables à ce qui se passe dans le cadre des autres théories. Malcuit et Winters estiment qu'on doit trouver trace de ces événements dans les roches terrestres et lunaires à partir des déformations des couches de roches engendrées à l'origine par l'intensité des forces de marées, et ils désignent même plusieurs zones très anciennes sur Terre où l'on pourrait vérifier cette idée. Sur la Lune, il faudrait rechercher des endroits où la croûte s'est fortement déformée. Mais les auteurs se contentent là de poser une piste de recherche originale.

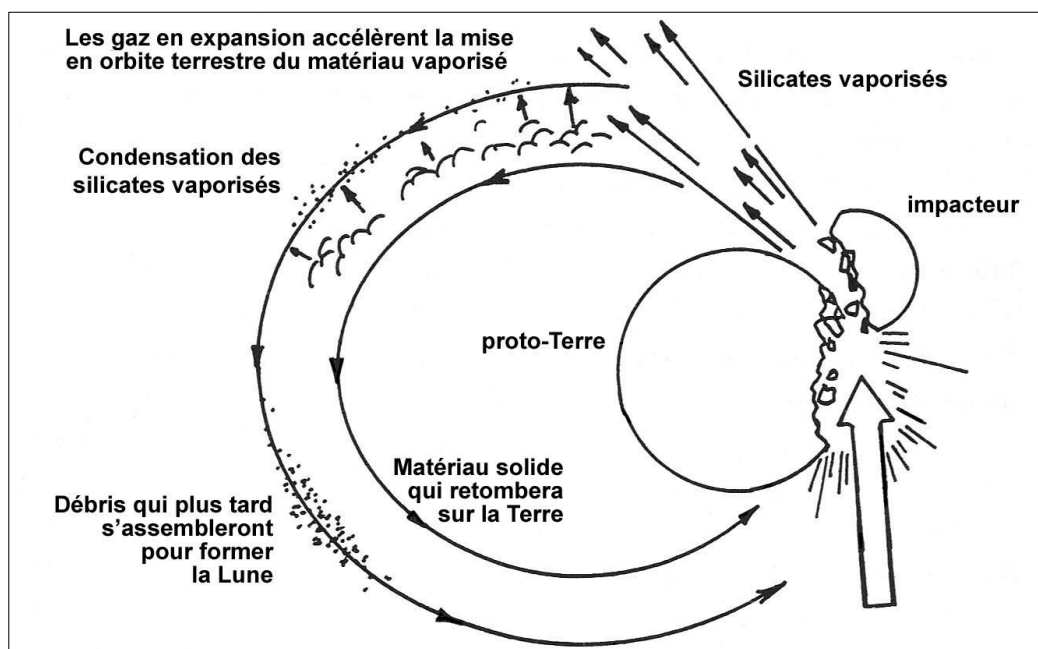
Avant la conférence de Monterey en 1998 (et après la conférence de Kona en 1984), il y eut bien sûr des publications étudiant la validité de l'Impact Géant. Difficile d'avoir une vue exhaustive,

¹³ La conférence se tenant en 1998, le monde entier avait pu voir quelques années auparavant, et pour la première fois, un exemple concret de mise en pièces d'un astre capturé : en 1994, la comète Shoemaker-Levy 9 finit sa vie dans Jupiter après que les forces de marée de la planète géante l'eurent au préalable réduite en 21 fragments se suivant à la queue leu leu.

mais on peut signaler un texte de Ringwood paru en 1989 dans lequel celui-ci présente les points d'achoppement de ce modèle et propose une version de « compromis » : Oui à un impact géant, mais celui-ci n'a pas pu former la Lune lors d'un choc unique. Il a certes produit une éjection très importante de matériaux divers, mais l'auteur estime que « *les collisions de planétésimaux beaucoup plus petits (par ex, de 0,001 à 0,01 masse terrestre) et arrivant à grande vitesse dans un stade très avancé de l'accrétion ont probablement été à l'origine de l'éjection du matériel protolunaire du manteau terrestre sans provoquer de fusion importante ni de différenciation de la Terre* » (cf. résumé dans l'article). Une variante en deux coups, si l'on peut dire, ce qui est à rapprocher de ce que vont dire en 1998 Cameron et Canup dans leur exposé à la conférence de Monterey.

Quelques années plus tard, Canup & Esposito (1996) se demandèrent s'il n'est pas possible que la Lune ait été créée, à la suite de l'Impact Géant, par la formation de plusieurs petites lunes dans le disque de débris en orbite terrestre. Celles-ci se seraient agglomérées plus tard pour ne former qu'un astre plus grand, la Lune. Leurs simulations montrent que ce n'est pas si évident que cela, les conditions nécessaires (vitesse des corps, orientation de leurs orbites, taille, distance à la Terre en lien avec la Limite de Roche) étant difficiles à respecter simultanément. Mais après tout, comme dans le cadre de l'évolution des espèces, le hasard et la nécessité peuvent toujours s'associer favorablement. Notons au passage que l'idée de petites lunes orbitant autour de la Terre (« moonlets ») n'est pas nouvelle ; je l'ai déjà signalée, mais dans un autre cadre théorique (Hypothèse de la Capture).

N'oublions pas la parution la même année de l'ouvrage déjà mentionné de Paul Spudis « The Once and Future Moon » qui consacre une partie importante à l'Impact Géant dans le chapitre relatif aux différentes théories à ce sujet. Il semble au début y adhérer en présentant en détails le mécanisme de la version classique de l'impact et en vantant ses mérites, et il l'illustre (p. 166) en reprenant une proposition imagée figurant dans l'ouvrage de Hartmann et coll déjà cité. On y retrouve les différentes étapes et processus que nous avons évoqués plus haut.



Mais Spudis ajoute ensuite une interrogation. Ce modèle peut apparaître à certains chercheurs comme trop « élastique » (*sic*), une sorte de fourre-tout capable d'intégrer plusieurs aspects d'autres théories et très adaptable en fonction des dimensions à prendre en compte. En sus, ce modèle est peu loquace quant aux caractéristiques de l'impacteur, sans doute grand comme Mars. Il est alors facile de

lui supposer telle ou telle composition, mais rappelons qu'un problème important est que pour rendre compte de la similitude physico-chimique de la Terre et de la Lune, l'impacteur qui s'en est mêlé - c'est le cas de le dire - doit leur être géologiquement semblable. Bizarre, s'il vient de loin.

5.2. Les années 2000 et l'explosion de la simulation informatique :

Passons à l'an 2000 où il faut signaler la parution de l'ouvrage collectif « Origin of the Earth and Moon » (sous la direction de Canup et Righter). C'est un ouvrage technique et quelque peu austère, rassemblant une trentaine de textes écrits par différents auteurs. On y trouve par exemple un texte de Cameron qui précise que les simulations dont il parle prennent en compte de 5 à 10.000 particules (cf. explication de la méthode plus haut) tout en indiquant qu'il peut simuler à présent (en l'an 2000) le fonctionnement de 100.000 particules. Les progrès sont notables. En fin d'ouvrage sont associées à ce texte de très belles images couleur représentant le déroulement complet d'un impact géant et de ses conséquences (sur une durée de deux jours) ce qui permet de visualiser le fameux « double » impact déjà signalé plus haut. L'impacteur fusionne quasiment avec la Terre lors de ce deuxième impact, et en particulier son cœur de fer finit par s'intégrer au cœur de fer de la Terre. En analysant ces simulations, Cameron en conclut que former une Lune - telle que nous la connaissons - semble plus complexe que prévu. Il y a énormément de petits corps en orbite et il faut supposer que ceux qui ne termineront pas leur course en s'écrasant sur la Terre finiront par s'agglomérer, attirés par un corps plus massif parmi eux. Ainsi ils atteindront la masse requise, mais sur une période assez longue (jusqu'à quelques années). Enfin, parmi les difficultés qui restent en suspens dans ce modèle, Cameron signale le fait que le plan équatorial de la Terre n'est pas aligné sur celui de l'orbite lunaire, ce qui amène à imaginer des collisions ultérieures importantes. Une autre réponse possible peut-être trouvée dans un article de Ward et Canup paru la même année qui proposent que des phénomènes de résonance d'interactions entre la Lune formée et les débris résiduels en orbite terrestre ont amené ce décalage¹⁴.

Les autres textes figurant dans l'ouvrage de Canup et Righter qui traitent de la formation de la Lune partent de l'hypothèse de l'Impact Géant et en étudient les conséquences, y compris sur le plan chimique (isotopes). Tous ? Non, un au moins fait de la résistance. A partir d'arguments géochimiques et géophysiques, Jones et Palme répondent négativement aux 4 points suivants : la Lune possède un cœur très petit, donc la question de l'intégration des éléments sidérophiles de l'impacteur au sein de la Terre ne se pose pas ; la similitude des quantités de tungstène (W) entre la Terre et la Lune est une coïncidence ; les éléments alcalins présents sur la Lune ne proviennent pas seulement de la Terre ; l'analyse du manteau terrestre montre que la Terre n'a jamais possédé un océan de magma. C'est sur ce bilan que les auteurs mettent en doute la validité prédictive de cette hypothèse. Ils proposent en conclusion de revenir au modèle d'un disque formé autour de la Terre qu'avaient proposé Weidenschilling et coll. lors de la conférence de Kona en 1984 (cf. la partie qui lui est consacré).

Les années 2000 ont vu s'accélérer les recherches dans l'étude de l'Impact Géant. Parmi les travaux entrepris, mettons en avant ceux de Canup dont nous venons de parler, chercheuse américaine qui produit presque sans discontinuer depuis les années 1990 (et fut récompensée en 2003 par le prix Harold C. Urey). En 2001, Robin Canup et Erik Asphaug écrivent un texte dans lequel ils reconsidèrent le modèle « canonique » de l'Impact Géant en estimant que la Terre n'était pas complètement formée lorsqu'un impact plus petit qu'on ne pensait l'a percuté. En 2004, Canup présente une centaine de simulations informatiques dont les résultats précisent les conditions de l'impact permettant de produire un disque protolunaire pauvre en fer (problème éternel pour les chercheurs !) et confirment

¹⁴ Rappel : l'inclinaison de l'orbite de la Lune sur le plan équatorial de la Terre est actuellement de plus de 5 degrés.

NB : Pahlevan et Morbidelli proposent en 2015 une explication différente de celle de Ward et Canup, en faisant intervenir le passage de planétésimaux dans le système Terre-Lune et la dissipation des forces de marées ainsi engendrées sur la Terre.

que la plus grande partie de ce disque provient du matériau de l'impacteur (autre point de discussion). En 2008, Canup aborde une autre dimension des conditions de la collision : et si les corps étaient en rotation rapide AVANT l'impact ? Sur la base d'une centaine de simulations, elle estime ce que cela changerait quant au moment cinétique du système Terre-Lune. En fait, il apparaît peu de différences par rapport à un impacteur supposé sans rotation initiale, sauf dans le cas particulier d'un impact sur une Terre en rotation rétrograde ce qui ouvre la possibilité d'un impacteur plus gros, plus en accord avec le moment cinétique actuel du système Terre-Lune (mais au détriment de l'idée d'un plus petit impacteur émise en 2001).

Signalons aussi l'idée de Belbruno & Goot III (2005) qui suggèrent un impact à énergie quasi-nulle entre le planétoïde et la proto-terre : formé par accréation au point de Lagrange 4 (ou 5), le planétoïde a été perturbé plus tard par des interactions gravitationnelles avec d'autres planétésimaux en croissance, ce qui l'a amené à quitter son orbite initiale en se rapprochant peu à peu de la proto-Terre avant de la percuter. On trouvera ICI une animation montrant ce type de phénomène. Cette idée intéressante, bien que contestée, suppose un planétoïde formé par accréation non loin de la proto-terre (donc composé de matériaux semblables) et évite le risque de destruction totale par un impact violent.

En dehors de cet aspect purement mécanique, d'autres types d'études ont été faites, en particulier l'analyse isotopique des éléments à partir des échantillons de roches ramenées lors des missions Apollo. Il était déjà manifeste qu'apparaissait une similitude de composition entre la Terre et la Lune (surtout quant à l'Oxygène). Si les premières analyses de ce type surprisent les chercheurs, les années 1990 et 2000 continuèrent à confirmer cette proximité en étudiant d'autres types d'éléments chimiques tels que le Potassium (K), le Chrome (Cr), le Manganèse (Mn). Citons quelques exemples.

Palme publia une courte synthèse en 2004 qui montre deux choses intéressantes : d'un point de vue informatique, les simulations ne sont pas assez diversifiées dans leur technique (une seule est utilisée : celle de « l'hydrodynamique des particules lissées » que nous avons déjà signalée) et l'auteur suggère de trouver d'autres méthodes d'hydrodynamique pour étayer les résultats obtenus ; d'un point de vue géochimique, la faible teneur en fer de la Lune et celle en Tungstène ne peuvent être dues qu'aux caractéristiques de l'impacteur.

De leur côté, en 2007, Touboul et coll insérèrent dans leur étude de différents isotopes celle du Silicium (Si) et du Tungstène (W) et le résultat alla dans le même sens : Terre et Lune se ressemblaient de plus en plus quand on les étudiait en détails. Cela nous éloignait de l'idée d'un impacteur formé dans une zone lointaine. Comme on le voit, des contradictions persistaient, ou tout au moins des questions se posaient plus fréquemment quant à la composition de Theia.

Mais la même année, Pahlevan et Stevenson publièrent un texte dans lequel ils proposèrent une explication au fait que la Terre et la Lune aient une composition isotopique semblable en Oxygène, alors que l'impacteur devait être différent sur ce point s'il venait de loin.¹⁵ Les auteurs estiment, conformément aux connaissances acquises, que l'impacteur était à l'origine différent de la Terre dans sa composition isotopique. Mais son impact aurait provoqué un « mixage » si important des matériaux, sur une durée comprise entre 100 et 1000 ans, que ce mélange aurait rééquilibré les éléments en Oxygène entre la Terre et la Lune en formation. Voilà une réponse originale à ce casse-tête !

Pendant cette décennie (2000), précisons que les critiques du modèle dominant de l'Impact Géant continuaient. Rappelons par exemple les écrits de Galimov et Krivtsov qui en 2005 préfère l'idée d'une agglomération de particules dans un disque, formant peu à peu des embryons de planètes telles

¹⁵ Depuis longtemps, les chercheurs, grâce à l'analyse des météorites, savaient que les isotopes de l'oxygène étaient hétérogènes dans l'espace primitif, en particulier entre la partie interne et la partie externe du système solaire.

que la Terre et la Lune (cf. partie sur l'hypothèse de la co-accrétion). Mais reconnaissons que les modèles alternatifs à l'Impact Géant se faisaient rares et les anciennes théories faiblement défendues.

5.3. Les années 2010 et de nouveaux modèles :

Faisons un saut jusqu'à la décennie 2010 et examinons la conférence tenue à Londres en 2013 ([actes publiés en 2014](#)). On y retrouve, aux côtés d'autres chercheurs, des « célébrités » comme Canup, Hartmann, Morbidelli, Halliday, Taylor, Ward. On s'aperçoit en lisant les textes principaux que le questionnement est toujours du même type : les différences isotopiques n'ont pas de réponses claires quant aux similitudes et aux différences entre la Terre et la Lune ; les simulations de l'Impact Géant progressent dans le nombre de facteurs pris en compte dans les calculs informatiques, mais ne vont pas jusqu'à rejeter définitivement les autres hypothèses de formation de la Lune ; les questions de moment cinétique du système Terre-Lune ou d'inclinaison de l'axe de la Lune sont toujours posées. Bref, on a parfois l'impression en lisant ces textes de voir le film « Un jour sans fin »¹⁶.

C'est cette impression de faire du sur-place que relate [H. Jay Melosh](#) qui écrit [un texte original](#), à la fois critique et lucide. Il est centré sur « la crise isotopique¹⁷ » - expression qui a fait florès - et met en avant plusieurs points importants pour lui. En premier lieu, il évoque le fait que sur certains aspects géochimiques, il apparaît que la Terre et la Lune se ressemblent beaucoup, mais qu'elles sont différentes sur d'autres aspects comme les éléments volatils (dont l'eau). Puis il développe l'histoire probable de l'Impact Géant avec les ajustements qui ont été proposés depuis les années 70. Les simulations informatiques sont également exposées (Melosh lui-même en a réalisées) et l'auteur reconnaît le gain en finesse d'analyse que cela a apporté. Suit une partie entière consacrée à la « crise isotopique » en elle-même. A partir des diverses analyses, évolutions, contradictions qui se sont faites jour à travers le temps sur ce sujet, Melosh écrit ceci (voir pp. 4/5 de l'article en pdf) :

« Nous sommes face à un cas particulier : la Terre et la Lune, bien qu'apparemment presque identiques dans la plupart des rapports isotopiques, sont en substance différentes dans leur chimie globale. En outre, si la Lune provient entièrement du manteau terrestre et si les modèles d'impact géant ne peuvent prendre en compte qu'environ 30 % des matériaux du manteau terrestre dans le disque de débris en orbite, que devient l'hypothèse de l'impact géant ? À première vue, cela exclurait ce scénario. Cependant, aucun des autres modèles plus anciens de l'origine de la Lune ne peut non plus tenir compte de ces faits. De toute évidence, les récentes évaluations isotopiques de haute précision dans les roches lunaires ont créé une crise à la fois pour l'hypothèse de l'impact géant et pour les autres scénarios de l'origine de la Lune ».

Comme on le voit, Melosh semble perplexe. Aussi présente-t-il alors une suite de questions de fonds auxquelles il tâche de répondre : Oui, il faut admettre que l'impacteur Theia était de composition semblable à la Terre ce qui simplifie largement les débats ; Oui, il est urgent d'améliorer les simulations informatiques de l'Impact Géant, non pas dans leur précision mais dans les paramètres qu'elles prennent en compte et qui ne sont pas suffisamment géologiques ou physiques ; Non, l'équilibration isotopique entre le disque de particules et les corps planétaires en formation que propose Pahlevan ([voir plus haut](#)) n'est pas une idée suffisamment pertinente du fait de problèmes chimiques et physiques que ce modèle ne résout pas ; Oui, on peut imaginer à l'instar de [Wolbeck & Connolly \(2010\)](#) que l'impacteur venu de très loin ait été composé de beaucoup de glace - ce qui résoudrait pas mal de problèmes - mais cette idée est loin d'être bien argumentée ; Oui, trouver un modèle qui élimine la

¹⁶ Film de Harold Ramis (1993) dans lequel l'acteur principal se réveille chaque jour en se retrouvant invariablement le même premier matin de son arrivée. Il va donc voir se produire devant lui des événements qu'il a déjà vécus.

¹⁷ Expression déjà utilisée par [Melosh en 2009](#) dans les actes du « 72nd Annual Meteoritical Society Meeting ».

question du moment cinétique grâce au phénomène de résonance d'évection (comme le proposent Čuk & Stewart en 2012) est une idée intéressante à étayer.

En conclusion de son texte, Melosh émet un avis plutôt mitigé sur l'hypothèse de l'Impact Géant, bien qu'il le considère toujours comme le mieux-disant. Il dit « se sentir mal à l'aise » (*sic*) devant un ensemble d'hypothèses ad hoc se succédant chez des chercheurs différents, basées sur des conditions de réalisation très restreintes des phénomènes évoqués. Il suffit d'un rien pour que les résultats valident ou infirment l'idée du chercheur. Ainsi, Melosh indique que dans l'article de Čuk et Stewart cité ci-dessus figurent « *de très nombreuses simulations qui, tout en produisant une lune, n'en produisent pas une qui soit isotopiquement aussi proche de son noyau que l'est notre lune* ». Il en vient même à se demander dans sa conclusion si le retour à l'hypothèse de la Fission de Darwin ne serait pas une idée à suivre¹⁸, même s'il concède que les difficultés à surmonter dans ce cadre théorique restent trop importantes.

Bref, le moral semble bas chez certains ! Mais pas chez tous les participants à cette conférence, heureusement. On trouve à l'inverse des exposés novateurs qui apportent des arguments intéressants à la théorie de l'Impact Géant. Ainsi, une hypothèse récente est mise en valeur pour expliquer la création des planètes terrestres (dont la Lune). Le texte de Jacobson et Morbidelli présente le modèle du « Grand Tack ». Il faut remonter au tout début du système solaire et imaginer que seules des planètes géantes s'étaient formées dans le disque protoplanétaire. Pour des raisons physiques, Jupiter (mais aussi Saturne) a migré vers l'intérieur du système solaire avant de réinfléchir son orbite en revenant vers le système solaire extérieur jusqu'à sa position actuelle. Cette migration interne suivie de ce « virement de bord » externe (signification exacte du terme « Tack ») a largement perturbé le disque proto-planétaire, engendrant de profondes modifications dans les trajectoires des innombrables corps constituant le disque, ce qui facilite une agrégation progressive par percussion. Sous cette hypothèse, l'idée d'impacts géants entre planétésimaux importants, voire entre planètes de type terrestre, n'est plus une infime probabilité mais au contraire un phénomène plus courant. On tient là, peut-être, un chaînon manquant répondant à deux questions :

* sur le plan global du système solaire, le « Grand Tack » permet d'expliquer pourquoi, contrairement à de nombreux systèmes solaires qu'on a pu étudier dans notre galaxie, aucune planète géante ne circule près du Soleil. Selon Batygin & Laughlin (2015), du fait de ces gigantesques perturbations, elles ont été détruites ou ont fini leur vie dans le soleil en laissant la possibilité aux petits corps de s'exprimer.

* sur le plan local, les petites planètes de type terrestre ont pu alors se former dans le système solaire interne en se « nourrissant » des corps alentours (agrégation) et en subissant des transformations par impacts géants - permettant ainsi la création de la Lune. On peut alors supposer que Theia fit partie du « réservoir » de planétésimaux proches (avec une composition semblable à celle de la proto-Terre), fut bouleversé dans son orbite lors de cette période agitée, et finit sa vie en impactant la proto-Terre avec les conséquences décrites plus haut.

A partir des simulations que relatent Jacobson et Morbidelli, il est proposé que la Lune se soit formée lors d'un impact géant qui aurait eu lieu au plus tôt 40 millions d'années après la formation du système solaire, « avec un niveau de confiance de 97,5 % ». La date de 95 millions d'années apparaît toutefois plus cohérente aux auteurs.

¹⁸ Dans un article publié la même année, Erik Asphaug évoque aussi la crise isotopique et écrit en introduction que « les théories précédemment rejetées méritent un réexamen attentif ».

Si le modèle du « Grand Tack » apparaît prometteur, le texte indique toutefois une difficulté. Les résultats des simulations « *peuvent varier considérablement en termes d'histoire de l'accrétion de la Terre et de Mars si nous modifions deux paramètres fondamentaux qui caractérisent le disque au moment de la migration des planètes géantes : le rapport de masse totale entre les embryons et les planétésimaux, et la masse des embryons individuels* » (voir p. 17 de l'article en pdf). On retrouve là un problème évoqué par Melosh qui le rendait mal à l'aise, à savoir les trop grandes incertitudes qui apparaissent si l'on change quelque peu les données des calculs informatiques.

Notons également une idée intéressante reprise par Hartmann dans son texte: allons voir de près à quoi précisément ressemble la planète Vénus, c'est la seule façon de vérifier si une certaine forme d'homogénéisation des matériaux dans le système solaire interne a eu lieu lors du « Grand Tack », ce qui renforcerait l'hypothèse d'une composition de l'impacteur semblable à la Terre.

Signalons aussi un texte de Canup qui propose dans ses conclusions l'idée que la proto-Terre ait déjà possédé une lune qui aurait pu se disloquer (force des marées) pour ensuite retomber sur Terre (force gravitationnelle). Elle aurait pu également être détruite lors de l'Impact Géant et ainsi jouer un rôle dans la redistribution de matériau qui forma la « vraie » Lune. Mais là, ce ne sont que des hypothèses sans preuve évidente.

Peu de temps après la conférence tenue en 2013 à Londres, Asphaug publia un article de synthèse portant sur l'Origine de la Lune (voir aussi la note de la page précédente), et après avoir rappelé les théories classiques, en vient à l'analyse du modèle de l'Impact Géant. Les difficultés ressenties par les tenants de cette théorie les ont amenés à proposer des aménagements à cette hypothèse, ce qu'Asphaug résume en ... 7 variantes ! elles vont du modèle classique d'une collision tangentielle¹⁹, à un impact sur une Terre en rotation extrêmement rapide (impact + fission), en passant par une collision « hit-and-run » - c'est-à-dire un corps qui percute violemment la Terre et s'échappe dans l'espace sous une forme dégradée ou éclatée. Il y a le choix, sachant qu'Asphaug présente pour chaque variante son intérêt et ses limites.

Les années qui suivirent ont donné lieu à des idées originales qui ont été émises quant à la formation de la Lune, s'éloignant sur certains points du modèle classique de l'Impact Géant²⁰. Il faut bien entendu citer le modèle de la Synestia dont les prémisses ont été proposés lors d'une conférence en 2016 par Lock et coll., et qui a donné lieu à une publication l'année suivante par Lock et Stewart sous forme d'article. Une autre théorie a été proposée la même année par Rufu et coll., celle de la possibilité d'impacts multiples successifs. Nous allons les présenter.

Des impacts multiples en chaîne ? Une Synestia cataclysmique ?

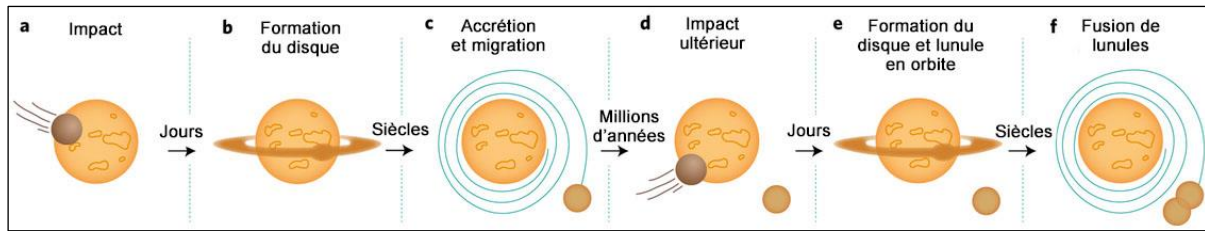
Commençons par le plus simple. L'idée d'**impacts multiples** se succédant n'est pas nouvelle dans les années 2010 puisque, par exemple, Ringwood en 1989 l'avait déjà proposée en tant que possibilité (cf. plus haut). Partant du principe qu'au début de la formation du système solaire les grands impacts pouvaient être très nombreux entre les différents corps, Rufu et coll. proposent le scénario suivant : la Lune pourrait être le produit d'une succession de collisions plus petites.

Sur cette base, les auteurs élaborent des simulations numériques qui montrent que lors d'une collision un disque de débris va se former autour de la proto-Terre, et celui-ci s'accrètera ensuite pour former une mini-lune ou lunule (« moonlet ») qui va se positionner en orbite terrestre. Un peu plus

¹⁹ J'en profite pour rendre hommage à Hubert Reeves, décédé le 13 octobre 2023, et vous signale cette vidéo dans laquelle il explique l'hypothèse classique de l'Impact Géant.

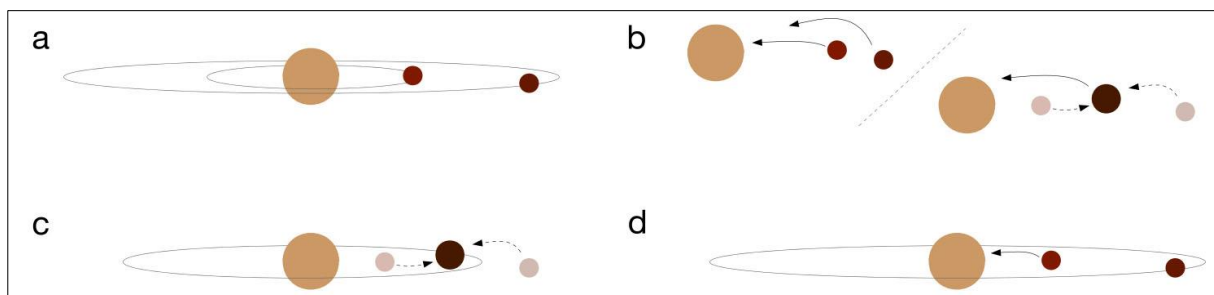
²⁰ Je mets de côté la théorie de l'explosion nucléaire naturelle de Rob de Meijer et al. (2013) que nous avons signalée à la fin du chapitre sur la théorie de la Fission. Elle ne semble pas avoir eu un grand succès (pas encore ?).

tard, un autre corps vient percuter la Terre et le mécanisme se reproduit. Sous l'effet des forces de marée, la nouvelle lunule va progressivement se déplacer vers l'extérieur et se retrouver sur la même orbite que la lunule précédente. Elles peuvent alors fusionner par attraction mutuelle et former un corps un peu plus gros. Voici un résumé imagé, extrait du texte de Rufu et coll. (voir page suivante).



Un troisième corps percute la Terre un peu plus tard, et le cycle continue²¹. Les chercheurs estiment qu'une Lune telle que nous la connaissons se formera au bout d'une vingtaine d'impacts de ce type. Ce processus répond à la fois aux questions de composition isotopique semblable entre la Terre et la Lune, et à la question de la variation du moment cinétique de l'ensemble

Citron et coll. (2018) proposent une variante à ce processus. Les auteurs estiment que des impacts successifs peuvent déterminer deux scénarios qui peuvent fonctionner ensemble : soit il y a fusion de lunules produisant un plus gros corps qui reste en orbite terrestre, soit les lunules retombent sur la Terre. Ces nouveaux impacts participent à la dynamique de l'ensemble. Le schéma de fonctionnement est plus complexe, comme on le voit sur ce dessin qu'on trouve dans l'article cité :



(a) une lunule externe due à un impact ou une fusion a migré vers une orbite éloignée, et une lunule interne a été produite par un impact récent. Le système évolue jusqu'à ce que ...

(b) les deux lunes tombent individuellement (b à gauche) ou après une fusion (b à droite), impactant la proto-Terre (une lune peut être éjectée, mais ceci ne figure pas dans le dessin), ou bien ...

(c) les lunes fusionnent en une plus grande lune qui continue à se déplacer vers l'extérieur, ou bien ...

(d) la lune située à l'intérieur tombe tandis que la lune située à l'extérieur se stabilise (dans de rares cas, c'est l'inverse qui se produit dans les simulations).

Tout comme Rufu et coll., Citron et coll. estiment qu'un scénario d'impacts multiples avec des corps plus petits semble plus en rapport avec la situation agitée du système solaire de l'époque, plutôt qu'un seul gigantesque impact ayant une probabilité d'occurrence moindre, et permet un ajustement plus fin du moment cinétique du système Terre-Lune (en considérant que d'autres petits impacts ont continué à avoir lieu après la formation de la Lune).

²¹ Le lecteur désireux de voir le processus peut [visionner cette vidéo](#) publiée sur le site du Weizmann Institute of Science.

Une critique est à faire au modèle des Impacts Multiples : il faut vraiment un nombre très important de petits corps circulant de façon plus ou moins désordonnée dans le système solaire pour que l'ensemble du processus puisse se dérouler en formant au final notre Lune. C'est possible, mais les chercheurs se demandent alors pourquoi la planète Vénus, semblable à la Terre quant à ses dimensions et proche d'elle, ne possède pas une Lune (ou plusieurs). On retombe ici sur la remarque de Hartmann signalée plus haut quant à l'intérêt de l'étude de Vénus.

La proposition d'une explication via la **formation d'une Synestia** (Synestie) est plus complexe. Nous abordons là un processus qui a démarré de façon bien plus catastrophique que s'il s'était agi d'un impact géant tangentiel. Une Synestia, au moment où elle est présentée dans le détail par Simon Lock et Sarah Stewart dans un article publié en 2017, est une nouveauté relative car elle présente - à mon avis - une analogie avec l'hypothèse de l'évaporation/précipitation de Ringwood que nous avons présentée plus haut. Si le démarrage du processus commence par un impact géant, celui-ci est bien plus violent et se produit sur une proto-Terre en rotation très rapide (possiblement, elle ressemble à un ballon de rugby). Le choc transforme la Terre et son impacteur en un ensemble de roches vaporisées et en fusion. Les températures sont extrêmes, en milliers de degrés. La rotation de l'ensemble suite à l'impact est telle qu'un vaste nuage en forme d'anneau torique se forme et il est si étalé dans l'espace qu'il n'a plus de ressemblance avec une structure planétaire quelconque, d'où le choix des auteurs de lui octroyer un nom spécifique : une Synestia, mot formé en utilisant le préfixe grec « syn » (ensemble) et le nom de la déesse « Hestia » (déesse du foyer domestique).

La transformation progressive du disque va amener le centre à se condenser pour former la Terre. Le disque se rétrécira peu à peu, mais une « graine » qui s'est formée en son bord par condensation également va rester en rotation autour du centre (donc, de la Terre en formation) et grossira par agrégation pour former la Lune. Quand le disque de la Synestia aura disparu, seules la Terre et la Lune seront la trace de son existence éphémère (si je peux dire « éphémère » !). Le mélange initial de tous les éléments chimiques explique la ressemblance entre les deux corps.

Revenons à ma remarque concernant le modèle de Ringwood qu'il présentait dans le cadre de l'hypothèse de la fission (voir ce chapitre). On y retrouve les ingrédients que sont la dispersion d'éléments dans un disque²², un noyau central qui va voir des éléments chimiques « pleuvoir » sur lui, des particules situées vers la partie externe du disque qui se condenseront pour former la Lune. Bien entendu, les différences sont notables, à commencer par la façon dont le disque va se former, ou le fait qu'il n'y a pas de destruction totale préalable chez Ringwood. Mais certains mécanismes ont un air de famille, ce qui au demeurant est tout à fait intéressant dans l'évolution des théories.

Un rapprochement est également à faire avec le texte de Pahlevan et Stevenson (2007) que nous avons signalé plus haut, au moins quant à l'idée que c'est lors d'un mixage des éléments constitutifs de la proto-Terre et de l'impacteur que s'est forgée la similitude des deux corps. Mais chez Lock et Stewart ce mixage a lieu dans des conditions de fusions physiques et chimiques hautement plus énergétiques. Il s'agit chez eux de la création in extenso d'un nouveau monde post-cataclysmique.

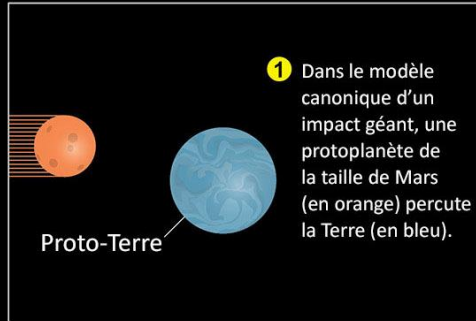
On a reproduit en page suivante une représentation de la formation et de l'évolution d'une Synestia, comparée au modèle canonique de l'impact géant. On peut aussi [suivre sur cette vidéo](#) la conférence qu'a donnée Sarah Stewart à ce sujet en 2019.

²² Chez Ringwood, il s'agit d'une forme de « galaxie » avec un bulbe central, à l'inverse du « tore » de Lock & Stewart qui présente un creux central.

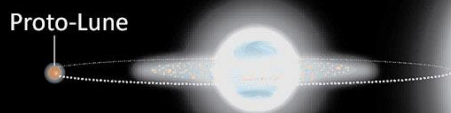
Modèle de l'Impact Géant

UNE COLLISION RASANTE

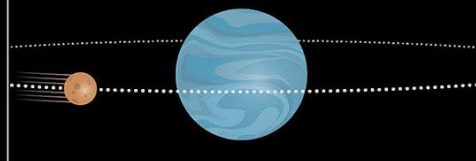
Le modèle canonique d'un impact géant explique de nombreuses caractéristiques de la Lune, telles que son ancien océan de magma et son petit noyau de fer.



- 3 Le noyau de fer de l'impacteur aurait été incorporé à la Terre, laissant derrière lui un disque de débris formant une lune, principalement constitué du manteau de l'impacteur.



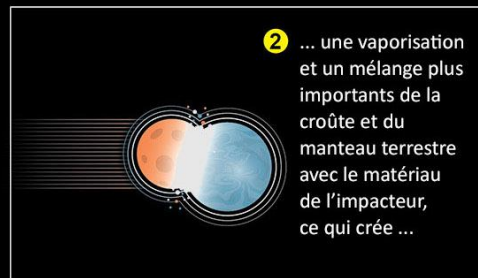
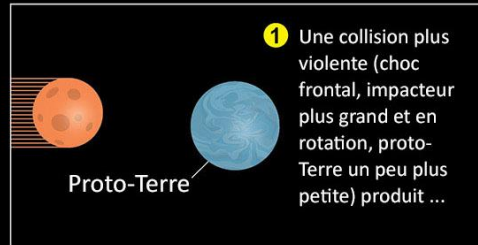
- 4 Le disque va s'aggréger rapidement (peut-être en un siècle) pour former une Lune nouvelle comportant un petit noyau de fer et un océan de magma.



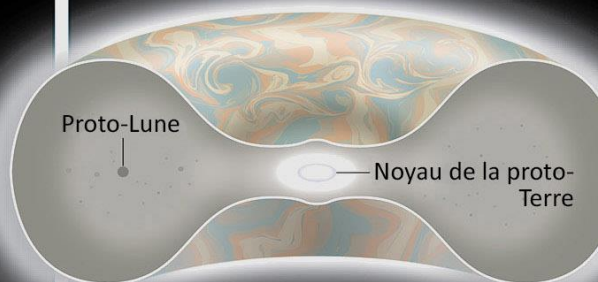
Modèle de la Synestia

UNE SYNESTIA CUITE A COEUR

En modifiant le modèle de l'impact géant dans lequel la lune se forme et « cuit » à haute température dans un environnement à très haute pression, on peut mieux expliquer des détails comme la composition isotopique quasi identique entre la Lune et la Terre et la très faible proportion d'éléments volatils (sur la Lune).



- 3 ... une masse de roches vaporisées, de forme torique - une synestia - dans laquelle la Lune se forme en quelques décennies peut-être. La plupart des éléments volatils restent à l'état de vapeur et retombent sur Terre lorsque la synestia se refroidit.



- 4 Un mélange complet du matériau constitutif des deux corps initiaux pourrait expliquer les compositions quasi-identiques de la Terre et de la Lune.

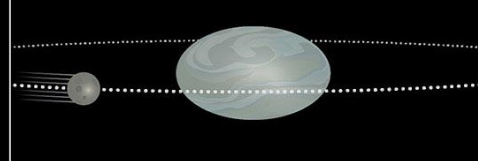


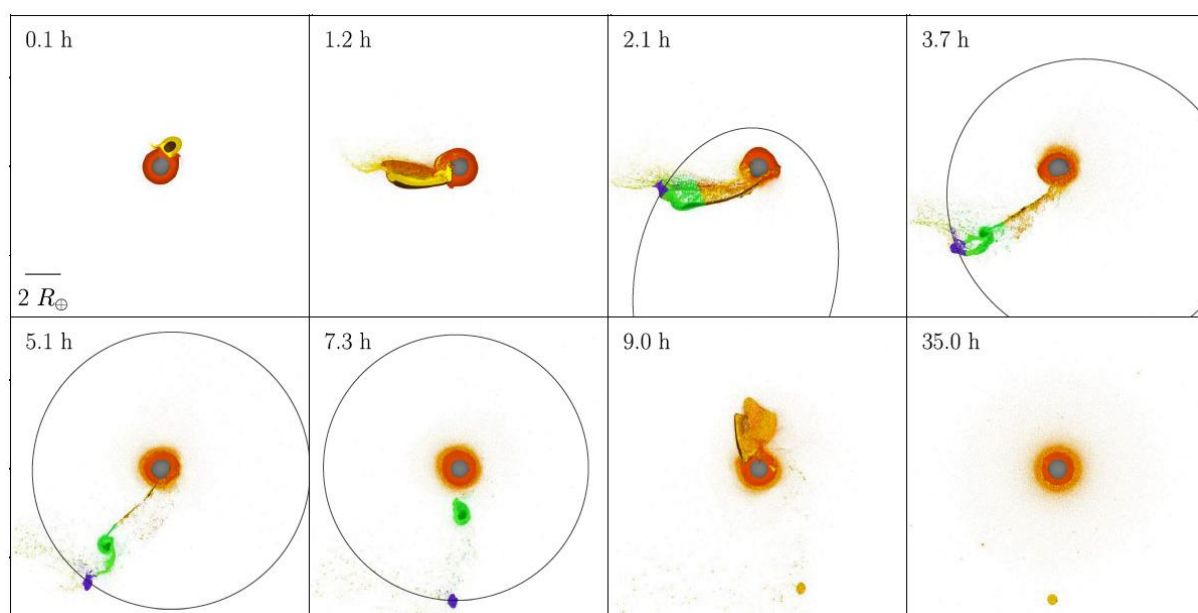
Image extraite et traduite de « When Earth and Moon were One » par Lock et Stewart, *Scientific American*, 1^{er} Juillet 2019

5.4. Les années 2020 et à venir : quelles perspectives ?

Les toutes dernières années (jusqu'au moment où je rédige ce texte) ne sont pas dénuées de rebondissements, par exemple dans la façon d'envisager la temporalité de la formation de la Lune suite à un impact géant, ou dans l'idée de rechercher des traces concrètes de l'impacteur lui-même.

Ainsi, l'hypothèse de l'Impact Géant a été revue par Kegerreis et coll en 2022 qui proposent une « **formation immédiate de la Lune** » suite à cet impact. Encore mieux que 24 heures Chrono²³ ! Pour en arriver là, il a fallu concevoir des simulations de très haute définition, passant de 10^5 ou 10^6 particules intégrées habituellement dans les calculs à 10^8 particules. Rappelons qu'une particule est la plus petite décomposition des corps simulés dans cette méthode ; au niveau de détail obtenu ici, les auteurs précisent qu'une particule équivaut à une taille effective de 14 km. En faisant varier les différents paramètres utiles (tels que l'angle d'impact, la vitesse de l'impacteur, la masse des deux corps, leur température initiale), les auteurs ont lancé environ 400 simulations.

Les résultats ont montré qu'en quelques heures seulement après l'impact géant un satellite grand comme la Lune peut se reformer. Voici en images ce qui se produit (exemple d'une simulation) :



Le processus est d'une rapidité foudroyante, puisqu'au bout de 9 heures à peine (avant-dernière image) on obtient une Lune en orbite autour d'une « masse » centrale – la Terre ne s'est pas encore complètement réagregée. La dernière image montre un état stable au bout de 35 heures. Il est possible de voir [ces images sous forme d'animation](#) (durée simulée : 24 heures) ou de bénéficier d'une sensation 3D sur cette [autre vidéo](#) (variante plus agréable à l'œil).

Quelques résultats intéressants : la Lune se retrouve composée à 60% de matériau terrestre, ce qui résout le problème de sa ressemblance avec la Terre plutôt qu'avec l'impacteur ; la teneur en fer est semblable aux valeurs réelles, ce qui résout un deuxième problème ; si l'orbite de l'impacteur n'est pas alignée sur l'axe de rotation de la proto-Terre, alors il devient possible après l'impact d'obtenir une Lune inclinée sur cet axe, troisième problème résolu.

Il est étonnant qu'en utilisant une méthode largement employée par les chercheurs dans ce domaine (toujours celle dénommée « Hydrodynamique des particules lissées »), les résultats obtenus

²³ Série télévisée américaine des années 2000.

soient si différents dans leur temporalité que ce qui avait été mesuré précédemment. Il semble bien que la haute définition des particules utilisée dans cette étude soit un vrai gain dans la précision du comportement du système simulé, non seulement en ce qui concerne la diversité des mouvements obtenus mais aussi quant à la détermination des durées nécessaires. Par exemple, un des points-clé de cette étude est le constat d'une mise en orbite très rapide du corps qui deviendra la Lune, celui-ci étant en quelque sorte propulsé par la masse déformée du reste de l'impacteur. Les auteurs rendent compte de cette nouveauté en disant que « *ce processus apparaît de manière fiable si la résolution numérique est suffisante* ». On peut donc penser que de futures simulations basées sur une puissance de calcul supérieure pourraient affiner encore (et encore ?) ce que l'Impact Géant a à nous révéler.

Une autre orientation relative à l'étude de l'Impact Géant est tout simplement d'avoir des traces tangibles de l'impacteur. La question est donc : **que sont devenus les composants de Theia ?** Si cela paraît difficile dans l'hypothèse de la Synestia où tout fusionne avant de former de nouveaux corps, les autres variantes peuvent tenter d'y répondre. En 2014, dans le texte d'Asphaug déjà mentionné, l'auteur écrivait dans les perspectives qu'il traçait : « *L'imagerie sismique et la géochimie de la Terre pourraient révéler l'existence d'une accréation planétaire, dans la région noyau-manteau, peut-être même l'identification de Theia en son sein* ». A la recherche du Saint Graal, en quelque sorte !

C'est bien ce qu'on trouve dans un texte de Yuan et coll. présenté en 2021 lors de la « 52nd Lunar and Planetary Conference » et qui a donné lieu à un article dans la revue Nature en 2023. Les auteurs pensent que des restes de Theia sont enfouis dans les tréfonds de la Terre. En fait, la tomographie sismique avait déjà permis de montrer l'existence de zones internes au manteau terrestre profond (à la limite du noyau). Ces zones, appelées en anglais LLSVPs (Large Low Shear Velocity Provinces) alors qu'en français on les dénomme plus poétiquement « Superpanaches », se caractérisent par une faible vitesse de propagation des ondes sismiques qui les traversent (d'où leur appellation anglosaxonne). Deux zones internes ont été repérées, l'une au niveau de l'Afrique, l'autre au niveau du Pacifique. Il s'agit, selon les connaissances actuelles, d'anciennes plaques tectoniques ayant profondément « plongé » dans les entrailles de la Terre par subduction. Ce sont des vestiges de matériau plus dense que le manteau environnant ; ils pourraient dater de la Terre primitive d'avant impact et auraient résisté à toutes les catastrophes.

C'est sur cette base que Yuan et coll. ont imaginé un nouveau scénario. Ces LLSVPs seraient tout ce qui reste (au sein de notre terre actuelle) de l'impacteur venu percuter la proto-Terre. Ce ne serait qu'une petite partie de Theia, certes, mais imposante à notre échelle. Les simulations auxquelles ils ont procédé valident la possibilité de la survivance de ce corps étranger dans notre Terre malgré toutes les transformations ultérieures. Un argument supplémentaire réside dans l'existence de laves montrant des caractéristiques isotopiques particulières qui n'existaient qu'au tout début de la formation de la Terre. Ces laves se situent dans les îles d'Islande et de Samoa, dont on sait qu'elles sont reliées aux LLSVPs par une série de panaches magmatiques.

Mais dans un texte résumant les idées de Yuan, Voosen en 2021 signale toutefois une critique importante : la structure « visuelle » des LLSVPs est une reconstruction informatique²⁴ qui pourrait être faussée car elle reposerait sur un modèle de propagation des ondes sismiques à basse fréquence qui gomme les nuances. Dans ce cas, les « Superpanaches » ne seraient plus une structure gigantesque, mais mesureraient tout au plus quelques centaines de kilomètres, composés uniquement de matériaux terrestres très anciens. Les vestiges de Theia ne seraient alors qu'illusion ...

²⁴ On peut les voir dans cette vidéo où Yuan explique son idée. NB : il utilise le terme « blob » pour parler des LLSVPs.

Nous finirons ce petit tour d'horizon des premières années 2020 en signalant deux autres articles qui ont attiré mon attention.

En 2021, Asphaug et coll. ont repris l'idée que la vitesse de Theia devait être, au début, plus importante que ce que prévoit le modèle classique de l'Impact Géant, provoquant un mécanisme de type « hit-and-run »²⁵. L'essentiel de Theia s'est échappé (avec une partie arrachée au matériau terrestre) lors d'un premier impact rasant avant de revenir plus tard percuter la proto-terre déjà meurtrie, mais avec une vitesse bien moindre²⁶. On retrouve le principe du double impact, mais sur une durée très longue. Dans ce cas, Theia et la Terre ont eu le temps d'homogénéiser leurs composants après le premier impact (mélange de matériaux), ce qui permet d'avoir un deuxième impact entre deux astres présentant des caractéristiques semblables. C'est ce deuxième impact qui va produire la Lune et c'est ce « mixage » qui est la cause de la similitude entre la Terre et son satellite.

Point complémentaire que signalent les auteurs : la planète Vénus fut susceptible d'agréger un nombre important de corps « hit-and-run » ayant impacté au préalable la Terre, et les auteurs la considèrent même comme le « terminus » (*sic*) de la moitié de ces corps. Se pose à nouveau la question : pourquoi Vénus n'a-t-elle pas de satellite ? Peut-être faut-il y voir l'effet de la révolution bien plus rapide de Vénus autour du Soleil (comparativement à la Terre) qui change la donne quant aux mécanismes qui s'y sont déroulés, ou la possibilité pour ces corps arrivant à leur « terminus » de détruire tout satellite potentiel en formation autour de Vénus.

Signalons enfin Canup et coll. 2023 qui ont publié un long texte de synthèse (de type méta-analyse) consacré à l'origine de la Lune. Les cosignataires sont loin d'être des inconnus : on y trouve Pahlevan, Ćuk, Stewart, Lock, Rufu, et d'autres. Le texte, très technique, entre dans le détail des analyses isotopiques comparatives entre la Terre et la Lune, puis traite des diverses variantes de l'hypothèse de l'Impact Géant ainsi que de l'évolution du système après l'impact. Parmi ces scénarios, il est à noter que l'hypothèse de la formation d'une Synestia est développée sur près de 3 pages. Et dans la sous-partie consacrée aux facteurs à prendre en compte pour rendre vraisemblable un scénario traitant de l'origine de la lune, les auteurs signalent par prudence qu'on peut imaginer - mais avec quelques difficultés - que celui de l'Impact Géant ne soit pas le bon. Ils ajoutent même, en note de bas de page, que l'hypothèse de la Fission a été revigorée récemment car la question du moment cinétique qui lui était « fatale » a trouvé d'autres types de réponses. Seul reste, dans ce cadre hypothétique, le problème de l'appauvrissement de la Lune en éléments volatils.

Ceci étant dit, l'article reste centré sur l'hypothèse impactique et les auteurs définissent, à la manière d'Asphaug en 2014 mais de façon plus détaillée, les conditions auxquelles doivent satisfaire les différents scénarios au sein de l'hypothèse impactique. Mais comme dit plus haut, les auteurs restent prudents dans cette présentation et proposent, à la manière de Sherlock Holmes (*sic*), d'éliminer les impossibilités : ce qui restera, même improbable, sera peut-être la solution. Et clôturons ces années 2020 (avant l'heure) en citant cette phrase figurant dans leurs conclusions ...

« En raison de l'accessibilité de la Lune, notre connaissance de sa composition détaillée et de ses propriétés physiques dépassera probablement toujours celle des autres planètes du système solaire interne. Ainsi, trouver comment la Lune s'est formée promet d'être la pierre angulaire pour comprendre l'origine de nos planètes telluriques ».

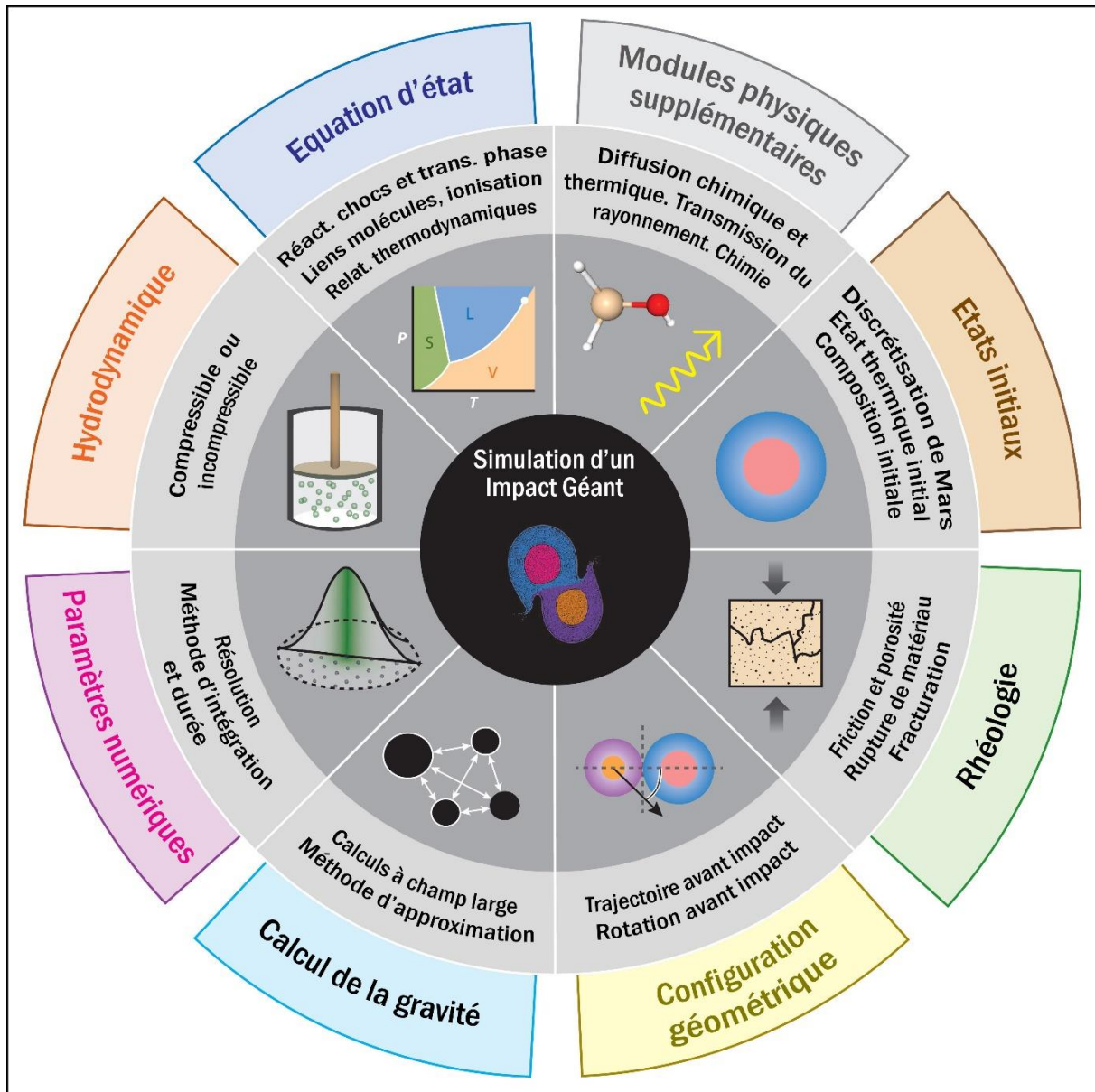
²⁵ Voir Asphaug & coll. 2006 qui traitent des collisions « hit-and-run » lors de la formation des planètes de type terrestre.

²⁶ Tout récemment, Timpe & coll. (2023) privilégient aussi une faible vitesse d'impact (d'un gros impacteur).

En guise de Conclusion ...

Nous arrivons au terme de ce périple. Comme on le voit, les pistes de recherche sont encore largement ouvertes pour améliorer notre vision de la création de la Lune et démêler l'écheveau des événements fabuleux qui ont pu se produire. Si l'on garde l'hypothèse de l'Impact Géant comme fil conducteur, alors pourquoi ne pas l'appliquer aux planètes de tout le système solaire, en particulier de type terrestre - les traces sont mieux visibles que sur des planètes géantes gazeuses ! C'est ce que proposent par exemple [Gabriel & Cambioni dans un texte récent \(2023\)](#). Les auteurs rappellent les dimensions à prendre en compte dans l'étude de ce type de phénomène, et elles sont nombreuses.

La preuve en image (figure extraite et traduite de leur article) ...



Bien que les termes soient parfois difficiles d'accès (cf. la version originale dans l'article²⁷), on comprend d'un coup d'œil la diversité des approches nécessaires pour faire le tour complet (c'est le cas de le dire) de la question. Simuler l'Impact Géant de manière réaliste, cela suppose une coordination

²⁷ D'autant que les mots traduits ne rentrent pas tous dans les cases, d'où certaines de mes simplifications ou abréviations.

de spécialistes des domaines de la physique, de la chimie, des mathématiques, de la simulation numérique. Tâche complexe mais nécessaire quand on s'attaque à ce qui reste une énigme dont on aurait simplement compris les prémisses.

En conclusion de leur article, Gabriel & Cambioni insistent sur la diversité des conséquences qui peuvent résulter de TEL type d'Impact Géant sur TEL type de protoplanète. Rien ne semble uniforme dans cet univers très proche ! Même l'impact qui est le plus connu, celui qui a créé notre Lune, a produit dans la littérature scientifique un grand nombre d'hypothèses, comme notre texte l'a résumé. Pour améliorer la situation, cela passe selon les auteurs par des progrès sur toutes les dimensions évoquées dans le schéma précédent, avec peut-être une insistance mise sur les modes de calculs et de simulations actuels qui restent à affiner. A quand les prochains supercalculateurs ?

Et mon point de vue, quel est-il ? Il m'est inconcevable d'un point de vue scientifique de jouer au devin. Mais si je devais choisir une seule piste, j'avoue trouver originale la proposition qui a été faite par plusieurs auteurs d'étudier en détails la planète Vénus, notre proche voisine de taille comparable à la Terre, afin de trouver des indices de sa formation et les raisons pour lesquelles elle ne possède pas (ou plus ?) de satellites. On en tirerait certainement des informations fort utiles pour notre compréhension de la formation de la Terre (et de la Lune) au sein d'un très ancien système planétaire interne bien mouvementé dans ses origines. Ce qui me fait écrire à peu près la phrase de Canup et coll. (2023) mentionnée en conclusion du chapitre précédent, mais en inversant l'ordre des variables !

Quoi que nous réserve l'avenir sur ces questions, que cela ne nous empêche pas d'admirer la belle Séléné autant que faire se peut. Car il ne faut pas oublier que si nous profitons de sa face souriante agréable à voir, nous le devons aux mystères de sa formation et de ses modifications ultérieures. Il suffit de voir l'allure de sa face cachée, si monotone, pour s'en convaincre !



Tableau récapitulatif et chronologique des hypothèses et des auteurs principaux.

1873	Edouard Roche <i>Hypothèse de l'Accrétion</i>
1878	George Darwin <i>Hypothèse de la Fission</i>
1910	Thomas Jefferson Jackson See <i>Hypothèse de la Capture</i>
1946	Reginald Aldworth Daly <i>Hypothèse "oubliée" de l'Impact Géant</i>
1963	Alfred Edward Ringwood <i>Hypothèse modernisée de la Fission</i>
1975	William Kenneth Hartmann <i>Hypothèse de l'Impact Géant</i>
2017	Simon J. Lock <i>Hypothèse de la Synestia</i>
2017	Raluca Rufu <i>Hypothèse des Impacts Multiples</i>
2022	Jacob Kegerreis <i>Hypothèse "modernisée" de l'Impact Géant</i>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(lien http en cliquant sur le titre du document)

- Alfven H. (1965). Origin of the Moon. Science, 148 (3669), pp. 476-477.
- Alfven H. & Arrhenius G. (1969). Two Alternatives for the History of the Moon. Science, 165 (3888), pp. 11-17.
- Alfven H. & Arrhenius G. (1976). Evolution of the Solar System. Washington : NASA Publications.
- Asphaug E. (2014). Impact Origin of the Moon ? Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 42, pp. 551-578.
- Asphaug E., Agnor C. B. & Williams Q. (2006). Hit-and-run planetary collisions. Nature, 139, pp. 155-160.
- Asphaug E., Emsenhuber A., Cambioni S., Gabriel T. S. J. & Schwartz S. R. (2021). Collision Chains among the Terrestrial Planets. III. Formation of the Moon. The Planetary Science Journal, 2 (5), pp. 1 à 20 de l'article en pdf.
- Baldwin R. B. (1949). The Face of the Moon. Chicago : University Press.
- Baldwin R. B. & Wilhems D. E. (1992). Historical review of a long-overlooked paper by R. A. Daly concerning the origin and early history of the Moon. JGR Planets, 97 (3), pp. 3837-3843.
- Barr A. C. (2016). On the origin of Earth's Moon. JGR Planets, 121 (9), pp. 1573–1601.
- Batygin K. & Laughlin G. (2015). Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution. PNAS, 112 (14), pp. 4214-4217.
- Belbruno E. & Goot III J. J. (2005). Where did the moon come from ? The Astronomical Journal, 129, pp. 1724–1745.
- Benz W., Slattery W. L. & Cameron A. G. W. (1986). Short note: Snapshots from a three-dimensional modeling of a giant impact. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 617-620). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984.
- Binder A. B. (1986). The binary fission origin of the moon. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 499-516). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984.
- Borg L. E. & Carlson R. W. (2023). The Evolving Chronology of Moon Formation. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 51, pp. 25-52.
- Boss A. P. (1986). The Origin of the Moon. Science, 231 (4736), pp. 341-345.
- Boss A. P. & Peale S. J. (1986). Dynamical constraints on the origin of the moon. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 59-101). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984.
- Briaud A., Ganino C., Fienga A., Mémin A. & Rambaux N. (2023). The lunar solid inner core and the mantle overturn. Nature 617, 743–746.
- Cadogan P. H. (1981). The Moon - our sister planet. Cambridge : University Press.

- Cameron A. G. W. (2000). *Higher-Resolution Simulations of the Giant Impact*. In R. M. Canup & K. Righter (Eds.), « *Origin of the Earth and Moon* » (pp. 133-144). Tucson : Arizona Press University.
- Cameron A. G. W. & Canup R. M. (1998). *The giant impact and the formation of the moon*. In « *Origin of the Earth and Moon* » (pp. 3-4). Houston, TX : Lunar & Planetary Institute, Contribution n° 957 - *Actes de la conférence de Monterey (Californie), 1-3 décembre 1998*.
- Cameron A. G. W. & Ward W. R. (1976). *The Origin of the Moon*. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, volume 7, pp. 120-122.
- Canup R. M. (2004). *Simulations of a late lunar-forming impact*. *Icarus*, 168 (2), 433-456.
- Canup R. M. (2008). *Lunar-forming collisions with pre-impact rotation*. *Icarus*, 196 (2), pp. 518-538.
- Canup R. M. (2014). *Lunar-forming impacts: processes and alternatives*. In D. J. Stevenson D. J. & A. N. Halliday (Eds.), « *The origin of the Moon* ». Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372 - *Actes de la conférence tenue à Londres en 2013*.
- Canup R. M. & Asphaug E. (2001). *Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation*. *Nature*, 412, 708-712.
- Canup R. M. & Esposito L. W. (1996). *Accretion of the Moon from an Impact-Generated Disk*. *Icarus*, 119 (2), pp. 427-446.
- Canup R. M. & Righter K., eds. (2000). *Origin of the Earth and Moon*. Tucson : Arizona Press University.
- Canup R. M, Righter K., Dauphas N., Pahlevan K., Čuk M., Lock S. J., Stewart S. T., Salmon J., Rufu R., Nakajima N. & Tomáš Magna T. (2023). *Origin of the Moon*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry Search*, 89 (1°, pp. 53-102.
- Citron R. J., Perets H. B. & Aharonson O. (2018). *The Role of Multiple Giant Impacts in the Formation of the Earth–Moon System*. *The Astrophysical Journal*, 862 (1), pp. 1 à 11 de l'article en pdf.
- Cooper J. A., Richards J. R. & Stacey F. D. (1967). *Possible New Evidence bearing on the Lunar Capture Hypothesis*. *Nature*, 215, p. 1256.
- Čuk M. & Stewart S. T. (2012). *Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning*. *Science*, 338 (6110), pp. 1047-1052.
- Cummings W. D. (2019). *Evolving Theories on the Origin of the Moon*. Switzerland : Springer.
- Daly R. A. (1946). *Origin of the Moon and Its Topography*. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 90 (2), pp. 104-119.
- Darwin G. (1902). *The Tides*. *Encyclopedia Britannica*.
- de Meijer R. J., Anisichkin V. F. & van Westrenen W. (2013). *Forming the Moon from terrestrial silicate-rich material*. *Chemical Geology*, 345 (8), pp. 40-49.
- Dietz R. S. (1946). *The Meteoritic Impact Origin of the Moon's Surface Features*. *The Journal of Geology*, 54 (6), pp. 359–375.
- Fisher O. (1891). *Appendix to the second edition of « Physics of the earth's crust »*. London : Macmillan & Co.

- Gabriel T. S. J. & Cambioni S. (2023). *The Role of Giant Impacts in Planet Formation*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 51, pp. 671-695.
- Galimov E. M. & Krivtsov A. M. (2012). *Origin of the Moon : New Concepts*. Berlin, Boston : De Gruyter.
- Gerstenkorn H. (1955). *Über Gezeitenreibung beim Zweikörperproblem*. Zeitschrift für Astrophysik, Vol. 36, pp. 245-274.
- Gilbert K. G. (1892). *The Moon's Face : a study of the origin of its features*. Bulletin of the Philosophical Society of Washington, 12, pp. 241-292.
- Grabmeier J. (2007). *The Capture Theory*. Site web du Denison Magazine (article consacré à R. J. Malcuit).
- Greer J., Zhang B., Isheim D., Seidman D.N., Bouvier A., Heck P.R. (2023). *4.46 Ga zircons anchor chronology of lunar magma ocean*. Geochemical Perspectives Letters, 27, pp. 49–53.
- Halliday A. N. (2000). *Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon*. Earth and Planetary Science Letters, 176 (1), pp. 17-30.
- Hartmann W. K. (2014). *The giant impact hypothesis: past, present (and future ?)*. In D. J. Stevenson D. J. & A. N. Halliday (Eds.), « The origin of the Moon ». Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372 - *Actes de la conférence tenue à Londres en 2013*.
- Hartmann W. K. & Davis D. R. (1975). *Satellite-Sized Planetesimals and Lunar Origin*. Icarus, 24 (4), 504-515.
- Herbert F., Davis D. R. & Weidenschilling S. J. (1986). *Formation and Evolution of a Circumterrestrial Disk*. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 701-730). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - *Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984*.
- Jacobson S. A. & Morbidelli A. (2014). *Lunar and terrestrial planet formation in the Grand Tack scenario*. In D. J. Stevenson D. J. & A. N. Halliday (Eds.), « The origin of the Moon ». Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372 - *Actes de la conférence tenue à Londres en 2013*.
- Jeffreys H. (1924). *The Earth : its origin, history and physical constitution*. Cambridge : University Press.
- Jeffreys H. (1930). *The Resonance Theory of the Origin of the Moon (Second Paper)*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 91 (1), pp. 169–174.
- Jones J. H. (1998). *Tests of the Giant Impact Hypothesis*. In « Origin of the Earth and Moon » (p. 17). Houston, TX : Lunar & Planetary Institute, Contribution n° 957 - *Actes de la conférence de Monterey (Californie), 1-3 décembre 1998*.
- Jones J. H. & Palme H. (2000). *Geochemical Constraints on the Origin of the Earth and Moon*. In R. M. Canup & K. Righter (Eds.), « Origin of the Earth and Moon » (pp. 197-216). Tucson : Arizona Press University.
- Kegerreis J. A., Ruiz-Bonilla S., Eke V. R., Massey R. J., Sandnes T. D. & Teodoro L. F. A. (2022). *Immediate Origin of the Moon as a Post-impact Satellite*. The Astrophysical Journal Letters, 937 (2), pp. 1 à 11 de l'article en pdf.

- Kokubo E., Ida S. & Makino J. (1998). High-Resolution N-Body Simulation of Lunar Accretion from an Impact-generated Disk. In « Origin of the Earth and Moon » (p. 20). Houston, TX : Lunar & Planetary Institute, Contribution n° 957 - *Actes de la conférence de Monterey (Californie), 1-3 décembre 1998*.
- Kraus R. G., Root S., Lemke R. W., Stewart S. T., Jacobsen S. B. & Mattsson T. S. (2015). Impact vaporization of planetesimal cores in the late stages of planet formation. *Nature Geoscience*, 8, pp. 269–272.
- Lock S. J., Stewart S. T., Petaev M. I., Leinhardt Z. M., Mace M., Jacobsen S. B. & Čuk M. (2016). A new model for lunar origin : equilibration with Earth beyond the hot spin stability limit. 47th Lunar and Planetary Science Conference. Actes de la conférence tenue à The Woodlands, Texas, 21-25 mars.
- Lock S. J. & Stewart S. T. (2017). The structure of terrestrial bodies: Impact heating, corotation limits, and synestias. *JGR Planets*, 122 (5), pp. 950-982.
- Lock S. J. & Stewart S. T. (2019). When Earth and the Moon Were One. Article disponible sur le site web de Scientific American - publié initialement in Scientific American, 2019, 321 (1), p. 68.
- MacDonald G.J.F. (1966). Origin of the Moon: Dynamical Considerations. In B. G. Marsden & A. G. W. Cameron, A.G.W. (Eds.), « The Earth-Moon System » (pp. 165–209). Boston, MA : Springer - *Actes de la conférence tenue au Goddard Space Flight Center (NASA), 20-21 janvier 1964*.
- Mackenzie D. (2003). The Big Splat, Or How Our Moon Came To Be. Hoboken : John Wiley & Sons.
- Malcuit R. J. (2015). The Twin Sister Planets Venus and Earth : Why are they so different ? Switzerland : Springer.
- Malcuit R. J. & Winters R. R. (1998). A Prograde Gravitational Capture Model for the Origin of the Earth-Moon System: Is It Compatible with the Rock Records of the Earth and Moon ? In « Origin of the Earth and Moon » (p. 24). Houston, TX : Lunar & Planetary Institute, Contribution n° 957 - *Actes de la conférence de Monterey (Californie), 1-3 décembre 1998*.
- Matsui T. & Abe Y. (1986). Origin of the moon and its early thermal evolution. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 453-468). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - *Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984*.
- Melosh J. (2009). An isotopic crisis for the giant impact origin of the Moon ? 72nd Annual Meteoritical Society Meeting, Nancy (France), 13-18 juillet.
- Melosh J. (2014). New approaches to the Moon's isotopic crisis. In D. J. Stevenson D. J. & A. N. Halliday (Eds.), « The origin of the Moon ». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372 - *Actes de la conférence tenue à Londres en 2013*.
- Mitler H. E. (1975). Formation of an iron-poor Moon by partial capture. *Icarus*, 24 (2), pp. 256-268.
- Morishima R. & Watanabe Si. (2001). Two types of co-accretion scenarios for the origin of the Moon. *Earth, Planets, and Space*, 53, 213–231.
- Nasmyth J. & Carpenter J. (1874). The Moon, considered as a planet, a world, and a satellite. London : John Murray.
- Nolan J. (1885). Genesis of the Moon : Particulars and Results of a Short Investigation Thereof. Melbourne : George Robertson & Co.
- O' Keefe J. A. (1969). Origin of the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 74 (10), pp. 2758-2767.

- O'Keefe J. A. & Urey H. C. (1977). The deficiency of siderophile elements in the Moon. Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical and Physical Sciences, 285, 569-575.
- Pahlevan K. & Morbidelli A. (2015). Collisionless encounters and the origin of the lunar inclination. Nature, 527, pp. 492-494.
- Pahlevan K. & Stevenson D. J. (2007). Equilibration in the aftermath of the lunar-forming giant impact. Icarus, 262 (3-4), pp. 438-449.
- Palme H. (2004). The Giant Impact Formation of the Moon. Science, 304 (5673), pp. 977-979.
- Phillips T. E. R. & Steavenson W. H. (1923). Hutchinson's Splendour of the heavens : a popular authoritative astronomy. London : Hutchinson & Co.
- Ringwood A. E. (1979). Origin of the Earth and Moon. New York : Springer-Verlag.
- Ringwood A. E. (1986). Composition and origin of the moon. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 673-698). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984.
- Ringwood A. E. (1989). Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin. Icarus, 95 (3-4), pp. 208-214.
- Roche E. (1849). Mémoire sur la figure d'une masse fluide, soumise à l'attraction d'un point éloigné (1^{ère} partie). Mémoire de la section des Sciences, Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, pp. 243-262.
=> NB : la 2^{ème} partie figure dans le même document, année 1850, pp. 333-348.
- Roche E. (1873). Essai sur la constitution et l'origine du système solaire. Paris : Gauthier-Villars.
- Rufu R., Aharonson O. & Perets H. B. (2017). A multiple-impact origin for the Moon. Nature Geoscience, 10, pp. 89-94.
- Safronov V. S. & Ruskol E. L. (1994). Formation and evolution of planets. Astrophysics and Space Science, 212, pp. 13-22.
- See T. J. J. (1909). The capture theory of satellites. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 21 (127), pp. 167-173.
- See T. J. J. (1910). Researches on the evolution of the stellar systems (Vol. II). Lynn : P. Nichols & Sons.
- Singer S. F. (1986). Origin of the Moon by Capture. In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 471-485). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984.
- Spudis P. D. (1996). The Once and Future Moon. Washington : Smithsonian Institution Press.
- Stevenson D. J. & Halliday A. N., eds (2014). The origin of the Moon. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372 (2024). - Actes de la conférence tenue à Londres en 2013.
- Taylor G. J. (1998). Reminiscences of the Conference on the Origin of the Moon, Kailua-Kona, Hawaiï, October 13-16, 1984. Site web « Planetary Science and Resources Discoveries ».
- Thébault P. (site web). Le scénario standard: accréation des planètes telluriques.

- Timpe M., Reinhardt C., Meier T., Stadel J. & Moore B. (2023). *A Systematic Survey of Moon-forming Giant Impacts. I. Nonrotating Bodies.* The Astrophysical Journal, 959 (1), pp. 1 à 17 de l'article en pdf.
- Touboul M., Kleine T., Bourdon B., Palme H. & Wieler R. (2007). *Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals.* Nature, 450, 1206-1209.
- Urey H. C. (1962). *The Origin of the Moon and its Relationship to the Origin of the Solar System.* In Z. Kopal & Z. K. Michailov (Eds.), « The Moon » (pp. 133-148). IAU Symposium 14.
- Urey H. C. (1971). *Was the Moon Originally Cold ?* Science, 172 (3981), pp. 403-405 .
- Voosen P. (2021). *Remains of Moon-forming impact may lie deep in Earth.* Science, 371 (6536), pp. 1295-1296.
- Ward W. R. & Canup R. M. (2000). *Origin of the Moon's orbital inclination from resonant disk interactions.* Nature, 403, 741–743.
- Weidenschilling S. J., Greenberg R., Chapman C. R., Herbert F., Davis D. R., Drake M. J., Jones J. & Hartmann W. K. (1984). *Origin of the moon from a circumterrestrial disk.* In W. K. Hartmann, R. J. Phillips & J. G. Taylor (Eds.), « Origin of the moon » (pp. 731-762). Houston, TX : Lunar and Planetary Institute - Actes de la conférence de Kona (Hawaï), 13-16 Oct. 1984.
- Winters R. R. & Malcuit R.J. (1977). *The lunar capture hypothesis revisited.* The Moon, 17, pp. 353–358.
- Wise D. U. (1963). *An origin of the Moon by rotational fission during formation of the Earth's core.* Journal of Geophysical Research, Vol. 68 (5), pp. 1547-1554.
- Wise D. U. (2014). *Alternative models of the Moon's origin.* Physics Today, 67 (1), pp. 8–9.
- Wolbeck J. & Connolly H. C. (2010). *Origin of the Moon: Icy Impactor Model (IIM).* 73rd Annual Meteoritical Society Meeting, New York (26-30 juillet).
- Woolfson M. (2000). *The origin and evolution of the solar system.* Astronomy & Geophysics, 45 (1), pp. 12-19.
- Yuan Q., Li M. M., Desch S. J. & Ko. B. (2021). *Giant impact origin for the large low shear velocity provinces.* 52nd Lunar and Planetary Science Conference. Actes de la conférence tenue du 15 au 19 mars (conférence en ligne du fait du COVID).

INDEX DES AUTEURS CITES

(lien [http](#) pour les auteurs dont le nom est souligné)

Abe, 34
[Alfven](#), 22, 23
Arrhenius, 22
[Asphaug](#), 38, 41, 42, 47, 48
[Baldwin](#), 26, 27
Barr, 12
Batygin, 41
Belbruno, 39
Benz, 32, 35
Binder, 10, 30
Borg, 17
[Boss](#), 31
Briaud, 16
Cadogan, 24
Cambioni, 49, 50
[Cameron](#), 24, 26, 29, 30, 31, 32, 35, 37, 38
[Canup](#), 35, 37, 38, 39, 40, 42, 48, 50
Carlson, 17
[Carpenter](#), 11
[Cassidy](#), 30
Citron, 43
Connolly, 40
Cooper, 23
Ćuk, 41, 48
Cummings, 8, 17, 20
[Daly](#), 26, 51
[Darwin](#), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 18, 19, 26, 31, 41, 51
[Davis](#), 26, 27, 28, 31, 32
de Meijer, 10, 42
[Dietz](#), 27
Esposito, 37
[Fisher](#), 6, 7
Gabriel, 49, 50
[Galimov](#), 15, 39
Gerstenkorn, 20, 22, 23
[Gilbert](#), 8, 13, 19, 26
Goot III, 39
Grabmeier, 24
Greer, 17
[Halliday](#), 40
[Hartmann](#), 1, 23, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 37, 40, 42, 44, 51
Herbert, 23
Jacobson, 41
[Jeffreys](#), 7, 24
Jones, 36, 38
Kegerreis, 1, 46, 51
Kokubo, 36
Kraus, 16
Krivtsov, 15, 39
[Kuiper](#), 27
[Laplace](#), 11, 15, 19
Laughlin, 41
Lock, 1, 42, 44, 45, 48, 51

Lugmair, 30
[MacDonald](#), 24
Mackenzie, 4, 10, 15, 18, 19, 26, 27, 32, 33
Malcuit, 24, 36
Marsden, 24
Matsui, 34
[Melosh](#), 40, 41, 42
Mitler, 23
[Morbidegli](#), 40, 41
Morishima, 16
[Moulton](#), 7
[Nasmyth](#), 11
Nolan, 7
[O'Keefe](#), 9, 21
[Öpik](#), 23
Pahlevan, 39, 40, 44, 48
Palme, 38, 39
Peale, 31
[Phillips](#), 30
Phillips et Steavenson, 5
Pieters, 34
[Reeves](#), 42
Righter, 38
[Ringwood](#), 9, 10, 33, 37, 42, 44, 51
[Roche](#), 1, 2, 3, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 22, 23, 36, 37, 51
Rufu, 1, 42, 43, 48, 51
Ruskol, 15
[Russell](#), 26
[Safronov](#), 15, 27
[See](#), 1, 2, 18, 19, 25, 51
Singer, 24, 30
[Spudis](#), 19, 37
Stevenson, 39, 44
[Stewart](#), 41, 42, 44, 45, 48
Taylor, 30, 32, 40
Thébault, 13, 14
Timpe, 48
Touboul, 39
[Urey](#), 21, 23, 38
Voosen, 47
[Ward](#), 29, 31, 38, 40
Watanabe, 16
Weidenschilling, 30, 38
[Wilhelms](#), 26
Winters, 24, 36
[Wise](#), 7, 8
Wolbeck, 40
Wood, 33
[Woolfson](#), 24, 25
Yuan, 47