

III. Naissance du Système solaire et de la Terre

III.1. Formation du Système solaire

III.1.1. La nébuleuse solaire

Il y'a 4,56 milliards d'années, un nuage de gaz et de poussières appelé « nébuleuse solaire » et animé d'une faible vitesse de rotation s'est contracté sous l'effet de sa propre gravité. Cette contraction a été probablement déclenchée par l'explosion d'une ou plusieurs étoiles voisines (supernovae). A un certain stade de la contraction, la nébuleuse prend la forme d'un disque aplati épais perpendiculaire à l'axe de rotation de l'ensemble. Dans la zone centrale se forme un noyau qui concentre l'essentiel de la masse du système. La température et la pression de cette région centrale augmentent au fur et à mesure de la contraction jusqu'à ce que la température dépasse 10 millions de degrés et permettent aux réactions de fusion nucléaire de démarrer marquant ainsi la **naissance** du Soleil.

Les planètes se sont formées à partir du disque protoplanétaire de gaz et de poussière (98 % d'hydrogène et d'hélium et 2 % d'éléments lourds) en rotation autour du jeune Soleil. Dans ce disque la température et la densité décroissent à mesure que l'on s'éloigne du Soleil. Les éléments chimiques se condensent en fonction de la température : près du Soleil, les métaux et les éléments réfractaires à base d'aluminium, de magnésium et de silicium qui résistent aux hautes températures. Plus loin se condense les glaces (principalement de la glace d'eau H₂O, du mono- et dioxydes de carbone CO et CO₂ et du méthane CH₄).

III.1.2. Phases d'accrétion et de différenciation. Formation des planétésimaux

En rotation autour du jeune Soleil, les grains de poussières se rencontrent et forment de plus gros agrégats. Ces agrégats continuent de s'agglomérer jusqu'à former des corps rocheux (près du Soleil) ou de glace (loin du Soleil) de taille kilométrique : c'est le processus d'**accrétion**. On appelle ces objets de taille kilométrique les **planétésimaux**.

La rencontre entre planétésimaux permet de former des objets encore plus gros qui attirent encore plus de matière à cause de l'augmentation de leur force de gravitation : c'est l'emballement de l'**accrétion**. Ainsi, quand un gros objet se forme par le hasard des rencontres et

des collisions, il augmente son attraction par gravité et grandit encore plus en attirant de plus en plus la matière environnante : c'est la naissance d'une **proto-planète**. Le Système solaire est alors composé d'une multitude de proto-planètes d'une centaine de km de diamètre qui tournent autour du jeune Soleil.

Le phénomène d'accrétion qui a conduit à la formation des planétésimaux et des proto-planètes dégage une grande quantité de chaleur qui fait fondre la roche. Plus un corps est gros, plus l'énergie d'accrétion est importante. A cette source d'énergie s'ajoute celle dégagée par la désintégration des éléments radioactifs. Ainsi cette grande quantité de chaleur dégagée fait fondre les gros corps formés (dont le diamètre est supérieur à une centaine de km) : lors de cette fusion, les matériaux les plus lourds dominés par le fer vont se concentrer vers le centre de l'objet pour former un noyau métallique, tandis que les plus légers vont rester en surface former une croûte riche en aluminium, calcium, sodium et potassium (éléments légers). Entre les deux couches demeure les éléments intermédiaires qui forment le manteau silicaté riche en fer et en magnésium. Ce processus est appelé **la différenciation**.

- La formation des gros objets du Système solaire (plus d'une centaine de km de diamètre) passe donc par deux étapes principales qui se produisent simultanément : **la phase d'accrétion et la phase de différenciation**.

III.1.3. La phase « T Tauri »

Notons également que le jeune Soleil est passé par une étape d'intense activité appelée « phase T Tauri » (du nom de l'étoile T de la constellation du Taureau) qui se caractérise par l'émission d'un intense vent stellaire qui balaie tous les gaz et les poussières de dimension inférieure à quelques centimètres. La formation des planétésimaux et des planètes géantes s'est donc faite avant la dissipation de la nébuleuse proto-planétaire durant la phase T Tauri.

III.1.4. Formation des planètes et satellites

L'accrétion des proto-planètes et des planétésimaux a ensuite conduit à la formation des huit planètes du Système solaire et d'une trentaine de corps dont le diamètre est supérieur à 500 km (satellites principaux des planètes et les gros objets de la ceinture de Kuiper). On estime à 100 millions d'années le temps qui s'est écoulé entre le début de l'accrétion et la formation des planètes du Système solaire telles que nous les connaissons actuellement.

Le Système solaire actuel est composé de huit planètes : quatre telluriques, les plus proches du Soleil, et au-delà d'une ceinture d'astéroïdes, quatre planètes géantes entourées de satellites de glaces. Cette répartition est liée au fait que la température à proximité du Soleil était très élevée, et que les gaz légers ont été soufflés par le Soleil au cours de la phase T-Tauri. À faible distance (moins de 3 UA du Soleil), seules ont pu demeurer des planètes composées de matériaux réfractaires. À plus grande distance du Soleil, la température restée basse a permis l'accrétion des glaces qui avec les matériaux réfractaires ont formé les noyaux des planètes géantes dont la masse est de plusieurs dizaines de masses terrestres. Ces noyaux massifs ont pu accrété gravitationnellement les volatiles de la nébuleuse qui les entoure (hydrogène et hélium) et ainsi de former les planètes géantes.

La distribution de la taille des planètes du Système solaire s'explique de la manière suivante : à faible distance du Soleil, la matière disponible pour faire croître la planète en formation est moins abondante qu'à grande distance, d'où formation de planètes de petite taille près du Soleil.

III.1.5. L'existence des petits corps du Système solaire

L'existence des petits corps du Système solaire s'explique par les perturbations gravitationnelles engendrées par la formation des planètes géantes. En effet, l'énorme masse de Jupiter a considérablement perturbé l'orbite des planétésimaux formés entre lui et l'orbite de Mars, ce qui a stoppé l'accrétion dans cette région et dispersé la plupart d'entre eux qui ont été soit éjectés hors du Système solaire ou envoyés vers le Soleil. Ceux qui ont survécu dans cette zone forment aujourd'hui la ceinture des astéroïdes. Une grande partie des planétésimaux de glace formée dans la zone des planètes géantes ont été éjectés vers l'extérieur du Système solaire à quelques milliers d'UA formant le nuage d'Oort. Une autre partie est venue bombarder les planètes intérieures du Système solaire. Enfin, les planétésimaux qui se trouvaient loin des planètes n'ont pas été perturbés et forment le disque de la ceinture de Kuiper.

III.1.6. Les collisions catastrophiques

Des giga-collisions se sont également produites durant la phase finale de la formation des planètes conduisant à des modifications de la composition et de l'état de surface de certaines planètes et satellites.

Ainsi une collision catastrophique entre une proto-planète de la taille de Mars et la planète Terre aurait arraché des fragments de manteau terrestre et formé la Lune. Une autre giga-collision entre la planète Mercure et une proto-planète massive qui aurait arraché une partie du manteau de

la planète expliquerait l'existence d'un noyau de fer relativement important. Une collision entre la planète Uranus et un objet de la taille de la Terre est également invoquée pour expliquer l'inclinaison à 90° de l'axe de rotation de cette planète.

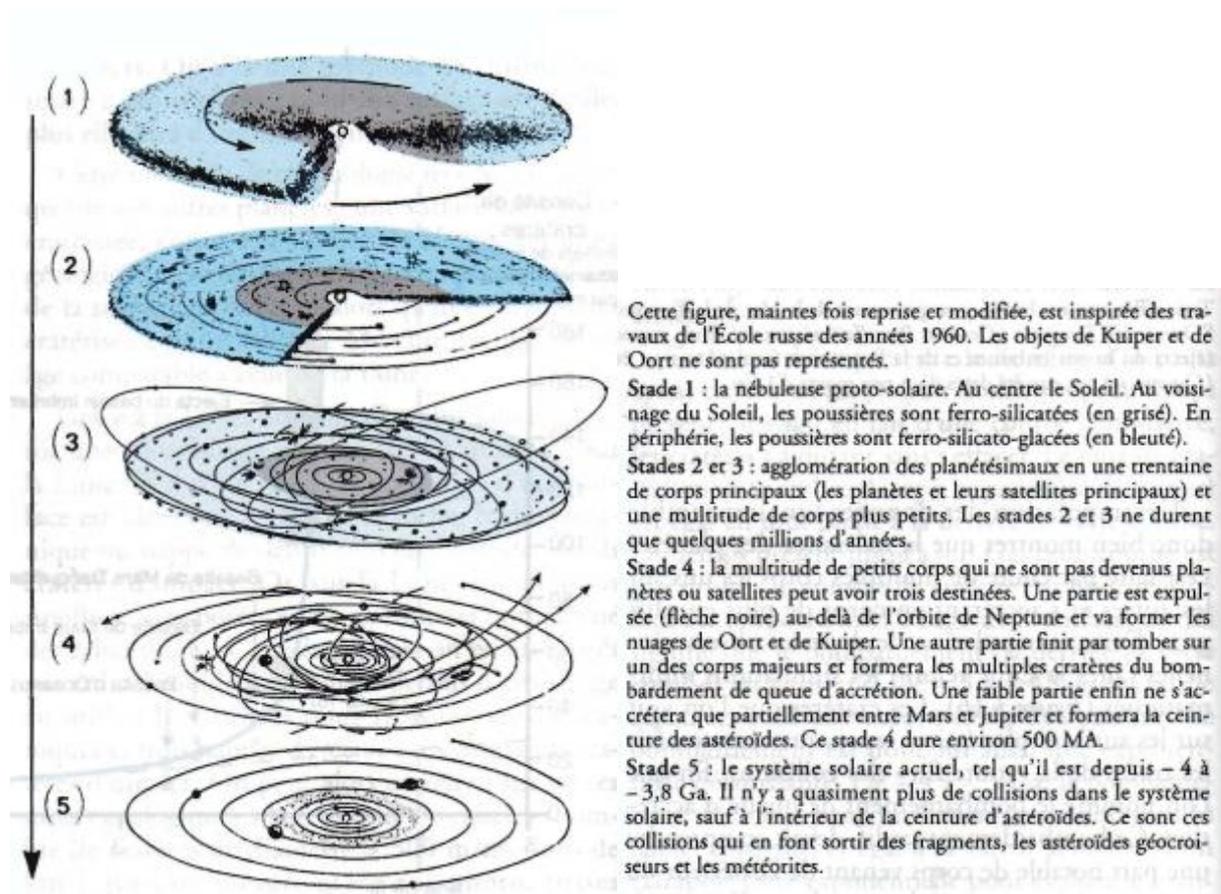


Figure 1. Représentation schématique et imagée de l'origine du Système solaire (d'après Jean Dercourt et al., Géologie, objets, méthodes et modèles ; Dunod)

III.2. Les météorites

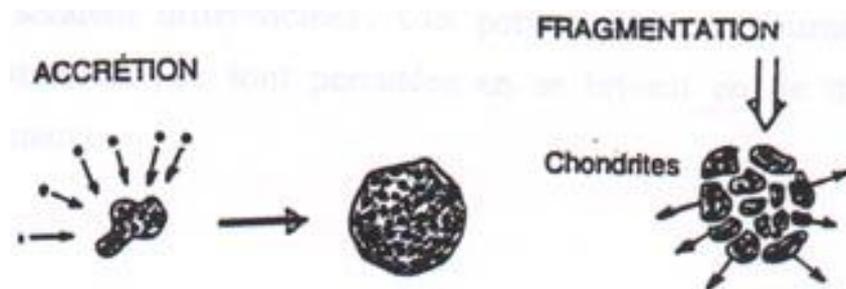
Les météorites sont des fragments d'astéroïdes ou de comètes qui tombent sur Terre. La plupart des météorites sont âgées de 4,56 milliards d'années (elles ont l'âge du Système solaire) et leur composition chimique est proche de celle de l'atmosphère solaire (mis à part l'hydrogène et l'hélium). Elles représentent donc un précieux témoignage sur l'origine et la composition des différents corps du Système solaire et leur étude nous renseigne sur les conditions physiques et chimiques présents dans la nébuleuse solaire et sur la naissance de la Terre et des autres planètes du Système solaire.

Les météorites sont divisées en trois grandes classes :

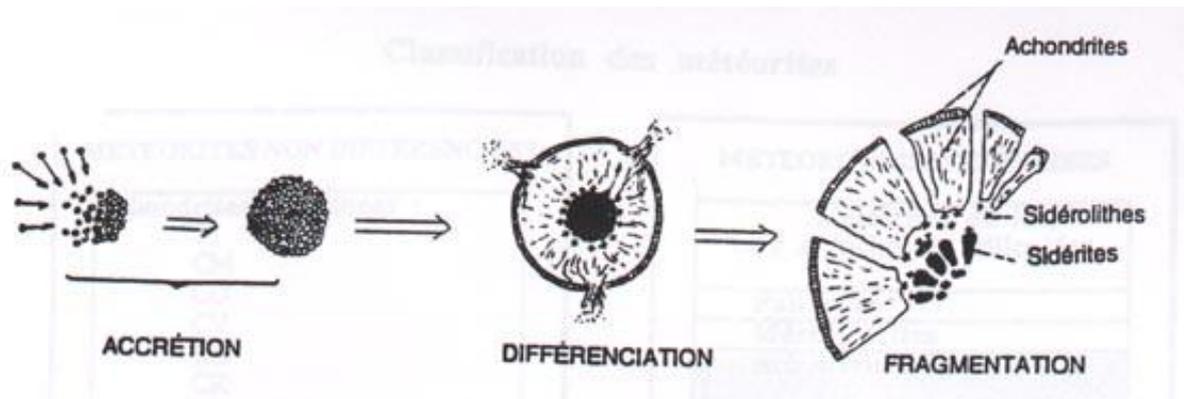
- Les météorites **ferreuses** ou **sidérites** (du grec *sideros* qui signifie fer) composées essentiellement de fer et de nickel.
- Les **lithosidérites** ou **sidérolithes**, contenant en quantité à peu près égales du fer-nickel et de silicates (roches).
- Les météorites **pierreuses** ou **aérolithes**, composées de silicates (roches). Elles se divisent en deux classes : **chondrites** et **achondrites**, selon qu'elles contiennent ou non des **chondres** (du grec *chondros* qui veut dire grain), petites structures sphériques de silicates inconnues dans les roches terrestres. Les météorites pierreuses sont les plus fréquentes (90 % des chutes).

Une autre classification distingue deux grandes familles de météorites en fonction des processus qui leur ont donné naissance :

- les météorites **non différenciées** (primitives), ou **chondrites** : elles représentent 80 % des météorites recensées sur Terre et sont issues de corps parents n'ayant pas subis de différenciation. Ces météorites sont les plus intéressantes à étudier car elles représentent des échantillons de la nébuleuse solaire qui n'ont pas été modifiés.



- les météorites **différenciées**, qui sont issues de corps parents différenciés. Les sidérites, lithosidérites et achondrites appartiennent à cette catégorie de météorites et semblent être issues respectivement du noyau, limite manteau-noyau et manteau (et croûte) d'astéroïdes différenciés.



Notons que certaines achondrites semblent provenir de la surface de la Lune (météorites lunaires) et celle de la planète Mars (les SNC : shergottites, nakhlites et chassignites).

Tableau 1. Les différentes classes de météorites

Nom	Densité	Composition générale	Origine	% de chutes
Ferreuses (sidérites)	7-8	Fer-nickel	Noyau d'astéroïdes différenciés	4
Ferro-pierreuses (lithosidérites)	Intermédiaire	Silicates et fer-nickel à part égale	Limite noyau-manteau d'astéroïdes différenciés	1
Pierreuses (aérolithes)	3,4-3,8	Silicates (roches)	Manteau et croûte d'astéroïdes – La Lune – Mars.	10
<ul style="list-style-type: none"> ○ Achondrites ○ Chondrites 			Astéroïdes non différenciés	85

III.3. Formation de la Lune

Plusieurs hypothèses ont été proposées concernant l'origine de la Lune. Depuis un siècle, trois familles de théories s'opposent : la théorie **de la fission**, la théorie **de la capture** et la théorie **des planètes jumelles (ou doubles)**. Cependant, chacune présente des difficultés qu'il est difficile de surmonter. Une quatrième hypothèse, celle de la **collision géante**, proposée pour la première fois en 1946 par Reginald Daly, puis développée par W. Hartmann et Donald Davis à partir de 1975 a été acceptée par la communauté scientifique en 1984. C'est la théorie la plus admise actuellement car elle permet d'expliquer beaucoup de faits qui ne trouvent pas de solutions dans les autres théories.

Ces quatre hypothèses peuvent être classées en deux grandes familles (figures 2 et 3) :

- Hypothèses de **l'origine nébulaire** (la Lune s'est formée à partir des matériaux de la nébuleuse solaire) qui comprennent : l'hypothèse de la planète double et celle de la capture.
- Hypothèses de **l'origine terrestre** (La Lune s'étant formée à partir de matériaux terrestres) qui comprennent : l'hypothèse de la fission et celle de la collision géante.

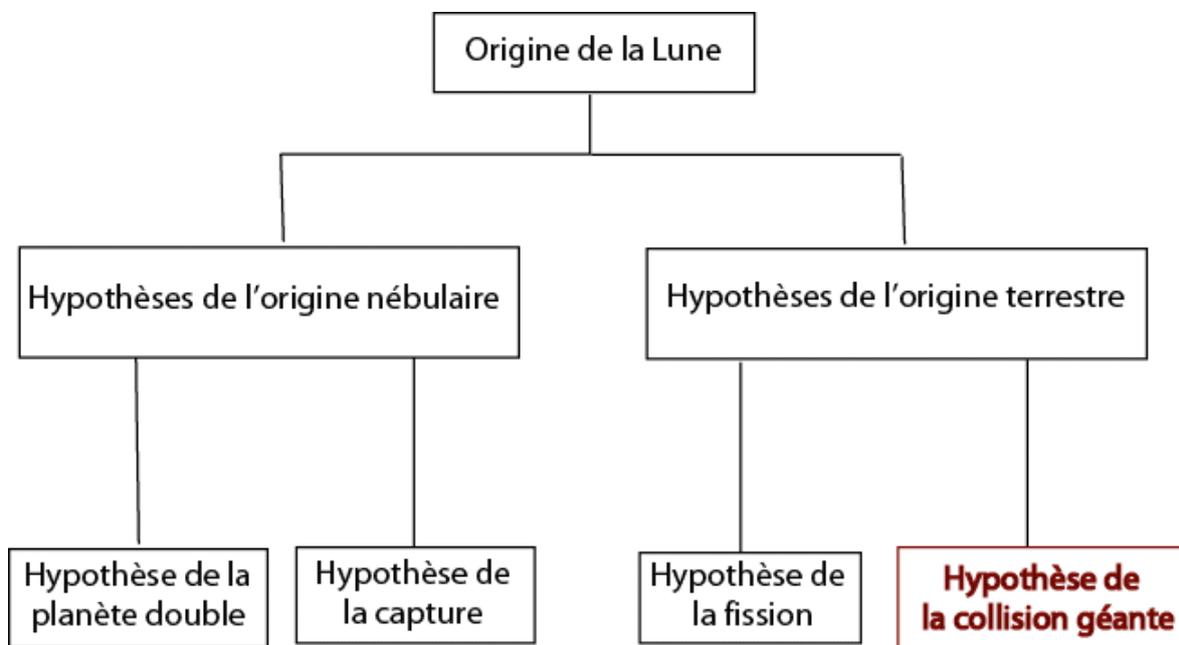


Figure 2. Schéma illustrant les principales hypothèses qui ont été proposées pour rendre compte de l'origine de la Lune.

Toute théorie essayant d'élucider le mystère de l'origine de la Lune doit tenir compte des éléments suivants :

- les différences de composition chimique entre la Terre et la Lune : la Lune est riche en silicium, magnésium, calcium et aluminium. Ces éléments sont une fois et demie plus abondants dans les roches lunaires que dans les roches terrestres. La chimie lunaire est voisine de celle du manteau terrestre, mais la Lune est plus **pauvre en éléments volatils** comme le potassium et le sodium, et plus **riche en éléments réfractaires** comme le titane et le zirconium.
- la taille de la Lune comparée à celle de la Terre est grande. Aucune Lune dans le Système solaire ne présente un rapport aussi élevé entre sa taille et celle de la planète auquel elle est liée. Le couple Terre-Lune est parfois considéré comme une planète double.
- Les échantillons lunaires rapportés par les missions Apollo et Luna ont démontré que l'âge de la Lune était le même que celui de la Terre, soit 4,55 milliards d'années.

III.3.1. Hypothèses de l'origine nébulaire

Les hypothèses de l'origine nébulaire admettent que la Terre et la Lune se sont formées de la même manière à partir **de la nébuleuse solaire primitive** soit à proximité l'une de l'autre (hypothèse de la planète double) soit tout à fait indépendamment, la Lune ayant été alors ultérieurement « capturée » par la Terre (hypothèse de la capture).

III.3.1.1. Hypothèse de la planète double : dans cette hypothèse, la Lune et la Terre seraient issues d'un même nuage de gaz et de poussière dans la même région de l'espace, la Lune étant formée par accréation de matériaux en orbite autour de la Terre.

Cette hypothèse possède **deux avantages** :

- elle ne requiert aucun événement cataclysmique ou hasardeux ;
- elle permet d'expliquer les similitudes entre la Terre et la Lune.

Cependant, elle possède **deux inconvénients majeurs** :

- ✓ elle ne rend pas compte des différences dans la composition chimique entre la Terre et la Lune, notamment la pauvreté de la Lune en éléments volatils et en fer par rapport à la Terre. Si la Lune et la Terre s'étaient formées en un même endroit de la nébuleuse solaire, elles auraient dûes accrétées des matériaux similaires en composition.

- ✓ La deuxième objection tient compte du fait que cette théorie n'invoquait aucune condition particulière ou événement cataclysmique, on s'attendrait donc à ce que toutes les planètes intérieures du Système solaire, qui étaient toutes passées par les mêmes phases de formation que la Terre, posséderait une Lune comparable à la notre ce qui n'est pas le cas.

A cause de ces objections, cette hypothèse qui était la favorite avant 1984, est actuellement abandonnée.

III.3.1.2. Hypothèse de la capture gravitationnelle : dans cette théorie, la Lune serait née loin de la Terre, comme une vraie planète. Elle tournait autour du Soleil, et en passant près de la Terre, elle aurait été piégée dans son champ gravitationnel.

Cependant, cette théorie présente un certain nombre d'inconvénients et d'objections qui sont :

- ✓ la probabilité d'une rencontre entre la Terre et la Lune formée dans une autre région du Système solaire qui aboutisse à une capture est improbable : un corps de la taille de la Lune qui s'approcherait de la Terre entrerait plutôt en collision avec elle ou subirait de sa part une poussée gravitationnelle qui l'éloignerait de la Terre. Pour que l'orbite héliocentrique de la Lune soit devenue géocentrique, il aurait fallu qu'au moment de son passage au plus près de la Terre, la Lune soit fortement freinée par un mécanisme inconnu.
- ✓ l'absence d'un noyau métallique riche en fer au centre de la Lune restait inexplicée si on admettait qu'elle se serait formée indépendamment de la Terre, puisque toutes les planètes intérieures du Système solaire possèdent un noyau ferrique. Il fallait donc admettre que notre planète ait capturée le seul objet du Système solaire doté d'un aussi petit noyau de fer (moins de 3 % de la masse lunaire).

Devant ces inconvénients et les événements hasardeux auxquels se basent cette théorie, elle ne reçut qu'un nombre très réduit de partisans et était la moins crédible parmi les quatre hypothèses.

III.3.2. Hypothèses de l'origine terrestre

Les hypothèses de l'origine terrestre suggèrent que la Lune serait un morceau de la Terre qui se serait détaché. Bien que l'hypothèse dite de la fission parait aujourd'hui absurde, celle de la collision géante a réussi à rendre compte de toutes les données concernant la Lune et semble être l'hypothèse la plus vraisemblable.

III.3.2.1. Hypothèse de la fission : cette hypothèse a été proposée par George Darwin (le fils de Charles Darwin) et suggère que la Terre et la Lune constituaient autrefois un objet unique que sa rotation rapide rendit instable et qui se déforma jusqu'à ce qu'un fragment s'en détache et donne naissance à la Lune.

- Cette théorie avait l'avantage d'expliquer les similitudes de composition entre la Lune et le manteau terrestre, et en particulier, il explique la faible teneur en fer par la concentration de cet élément dans le noyau terrestre au moment de la fission.
- ✓ Cependant cette théorie ne rend pas compte de la teneur en éléments réfractaires sur la Lune, et l'absence des éléments volatils.
- ✓ Enfin, pour qu'un morceau de la Terre vienne à se détacher, il aurait fallu qu'elle tourne très vite sur elle-même. Les calculs montrent que le moment cinétique du système Terre-Lune devait être plus de 5 fois plus élevés que sa valeur actuelle. On ne connaît aucune raison pour qu'il ait diminué à ce point.

A cause de ces objections, cette théorie qui fut longtemps populaire, ne rencontre plus aujourd'hui l'adhésion des astronomes.

III.3.2.2. Hypothèse de la collision géante : c'est la théorie la plus plausible actuellement. Selon cette hypothèse, on admet qu'il y a 4,55 milliards d'années juste après la formation de notre planète, un corps de la taille de la planète Mars (appelé **Theia**) s'approche de la Terre et la heurte. Au cours du choc, des morceaux des manteaux des deux planètes fusionnent et sont éjectés dans l'espace. La chaleur dégagée par cette collision **débarrasse la matière éjectée de pratiquement tous ses éléments volatils.**

Après la collision, la planète qui a percutée la Terre perd la totalité de son manteau, dont les débris, ainsi que ceux arrachés du manteau terrestre par l'impact, s'éloignent dans l'espace en un mouvement tournant autour de notre planète. Ces débris se trouvent ensuite suffisamment loin

de la Terre pour pouvoir s'agglutiner sous l'effet de leur propre gravitation et fusionner en un seul bloc : la Lune.

Cette théorie explique donc toutes les données concernant la Lune :

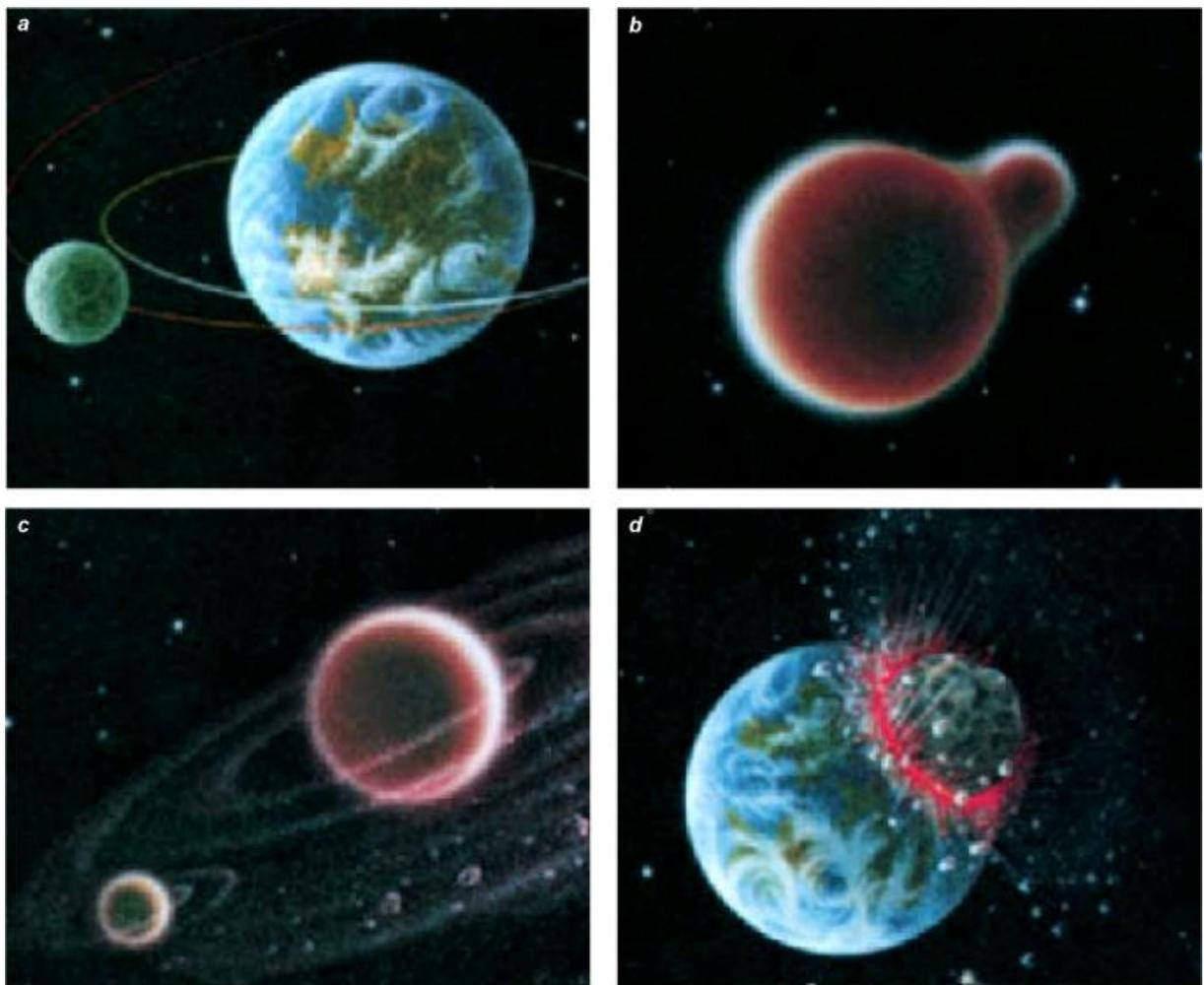
- d'une part les débris provenant uniquement des manteaux des deux objets célestes ne contenaient que très peu de fer ;
- d'autre part, le choc des deux planètes ayant dégagé une énorme chaleur, il est normal que les éléments les plus volatils se soient évaporés. Par contre les éléments réfractaires qui résistent à la chaleur se sont très vite condensés après l'échauffement et ont été incorporés.
- Quant au noyau de fer de la planète qui rencontré la nôtre, il a été séparé du manteau au moment de la collision. La Terre l'a ensuite absorbée et a été mélangé aux autres matériaux de notre planète.

Pour que cette théorie soit valable, il faut :

- que la vitesse relative entre les deux objets au moment de l'impact soit inférieure à 14 km/s ;
- que le rapport des masses des deux objets doit être compris entre 0,12 et 0,16 ce qui correspond à une planète légèrement plus grosse que Mars.

Aucune autre théorie n'explique :

- la composition de la Lune et sa ressemblance avec le manteau terrestre primitif.
- La pauvreté en éléments volatils et en fer des matériaux lunaires.
- Cette hypothèse est également intéressante car elle n'invoque pas de phénomène hasardeux : les collisions géantes étaient très fréquentes juste après la naissance du Système solaire. De telles collisions sont invoquées pour expliquer la composition particulière de Mercure (notamment son énorme noyau de fer) et l'inclinaison de l'axe de rotation de la planète Uranus.



LES SCÉNARIOS DE FORMATION DE LA LUNE étaient divers avant les missions *Apollo*. Selon l'hypothèse de la capture (*a*), la Lune est un objet piégé par la gravité terrestre. Selon l'hypothèse de la fission (*b*), un morceau de la Terre en formation, arraché par la rotation rapide, a formé la Lune. Selon l'hypothèse de la planète

double (*c*), la Terre et la Lune se sont formées simultanément par agrégation de grains de poussière. La théorie de la collision gigantesque (*d*), qui domine aujourd'hui, postule qu'un corps céleste qui heurta la Terre projeta en orbite des débris qui donnèrent naissance à la Lune.

Figure 3. Schéma récapitulatif des scénarios de formation de la Lune (d'après : les Terres Célestes, Numéro Hors Série Pour la Science, 1999, Belin)