

MOTS-CLÉS

- ▶ Lois de Kepler, loi de Bode.
- ▶ Planètes, plutoïdes, satellites, astéroïdes, météorites et comètes.
- ▶ Ceinture de Kuiper, nuage d'Oort.
- ▶ Accrétion et différenciation planétaire.
- ▶ Chondrites, achondrites, météorites SNC.
- ▶ Soleil, planètes telluriques, planètes géantes, astéroïdes, planète d'Olbers.
- ▶ Accrétion et différenciation planétaire.
- ▶ Mercure, Vénus, Terre, Lune, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- ▶ Norite, KREEP, régolite.
- ▶ Conditions « d'habitabilité » d'une planète, eau et vie sur Mars.

3.1 LA STRUCTURE DU SYSTÈME SOLAIRE

Nous ne présenterons ici qu'un bref résumé des connaissances qui résultent de plusieurs siècles d'observations célestes et de calculs. En effet, le monde grec possédait déjà une astronomie très avancée : ainsi Aristarque de Samos (vers 310-230 av. J.-C.) estimait-il que **c'était le Soleil et non la Terre qui est le centre du système planétaire**. Hipparque (Rhodes vers 150 av. J.-C.) calcula, à quelques kilomètres près, la distance moyenne Terre-Lune (384 395 km). Cependant, l'héritage transmis par les Grecs correspond surtout aux travaux de Claude Ptolémée (II^e siècle après J.-C.). Malgré des conceptions erronées (Terre immobile et centre du système planétaire), il dressa des éphémérides relativement exactes des planètes. Son « **géocentrisme** » imposait, cependant, que les planètes fassent périodiquement des retours en arrière sur leur orbite (épicycles).

Ces idées résistèrent à l'effondrement du monde grec et de l'Empire romain, traversèrent l'obscurantisme du Moyen Âge pour devenir le credo cosmique de l'Église catholique (Dieu, concepteur de toute chose, avait créé un monde géocentrique dont la Terre immobile dans l'espace occupait le centre).

3.1.1 Les apports de Nicolas Copernic (1473-1543) et Johannes Kepler (1571-1630)

L'un des premiers à risquer à s'attaquer au « dogme » du géocentrisme fut un chanoine polonais, Nicolas Copernic qui redécouvre l'héliocentrisme d'Aristarque et calcule les orbites (circulaires) des planètes. Il montre que l'apparente gravitation inverse des planètes lointaines est en fait un artefact d'observation, dû à l'orbite plus courte de la Terre. Il est cependant obligé d'ajouter un certain nombre d'épicycles aux orbites des planètes pour expliquer leurs divagations majeures.

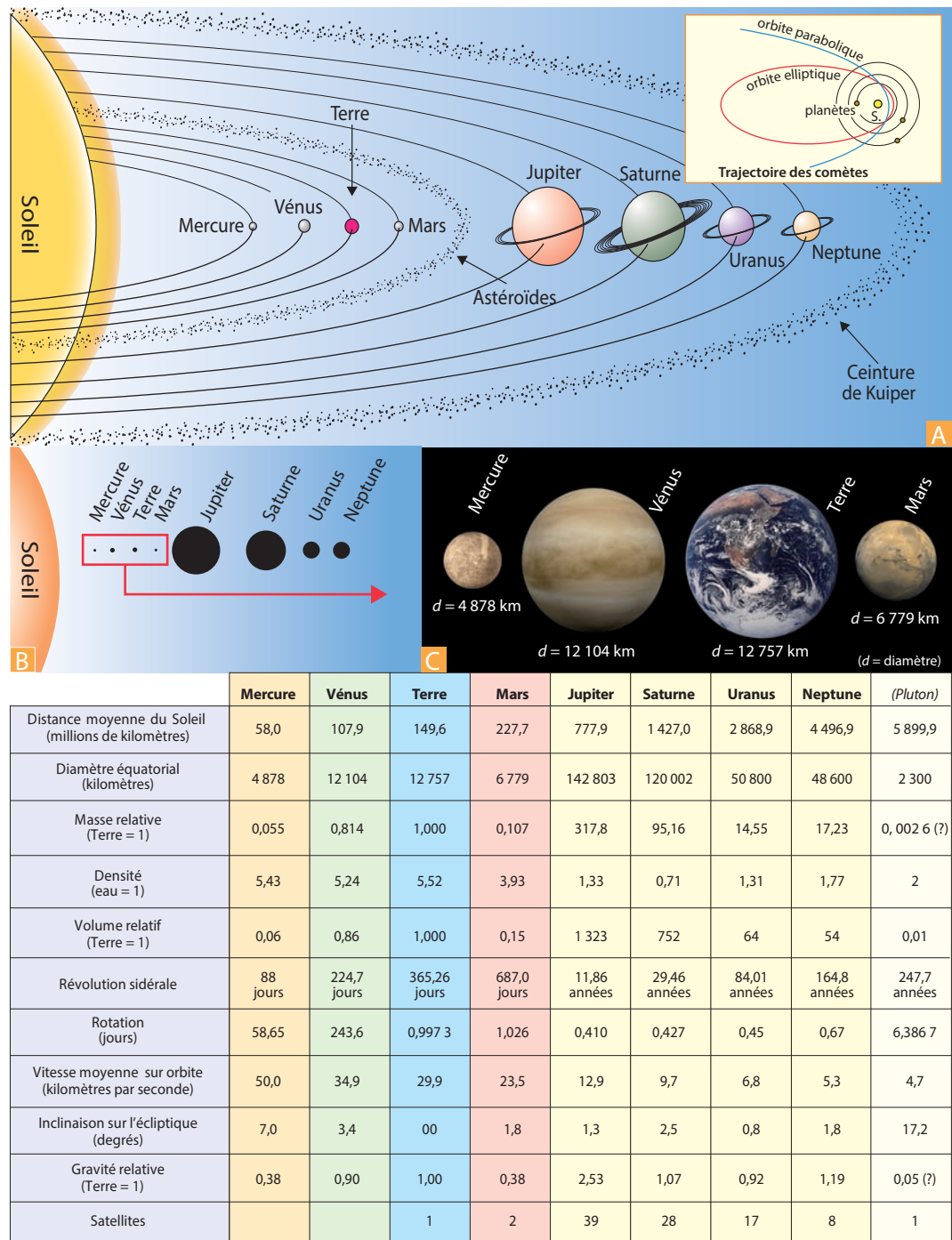


Figure 3.1 Le Système solaire : schémas d'organisation et tableau des données principales.

A. Schéma de situation des orbites des planètes (ni les échelles des distances ni celles des dimensions des objets ne sont respectées). En cartouche en haut à droite : la trajectoire des comètes. Entre Mars et Jupiter gravite un essaim de petits corps célestes, les astéroïdes, dont le diamètre est inférieur à 1 km en général.

B. Schéma montrant les dimensions relatives des planètes.

C. Diamètres des planètes telluriques (*document NASA, modifié*).

Le système copernicien fut amélioré par Johannes Kepler (1571-1630) qui put utiliser la documentation accumulée par l'astronome danois Tycho Brahé (1546-1601). Il montre que les planètes décrivent des orbites elliptiques (dont le Soleil occupe un des foyers) et que les corps célestes accélèrent en s'approchant du Soleil et ralentissent en s'en éloignant (**1^{re} et 2^e loi**). En démontrant que les vitesses des planètes varient sur leurs orbites, il prouve que les épicycles de Ptolémée n'étaient qu'illusion. Il formule, plus tard (Les harmonies du monde), une **troisième loi** : le carré des périodes de révolution des planètes est proportionnel au cube du grand axe de leur orbite. Connaissant les périodes respectives de la Terre (365 j) et de Mars (687 j), il détermine que Mars est situé à 1,523 unité astronomique du Soleil (la valeur de l'unité astronomique, soit la distance Terre-Soleil, ne fut déterminée réellement qu'en 1962, elle est légèrement inférieure à 150 millions de km). De plus, il pressent l'existence de la gravité en supposant qu'une force unique commande le mouvement des planètes. Bien que la légende ait surtout retenu les avatars de son contemporain italien, Galilée (1564-1642), qui par ses observations remettait aussi en cause le géocentrisme, le sort de Kepler ne fut pas meilleur : il fut excommunié et mourut dans la misère.

Le système de Kepler fut explicité par Isaac Newton (1642-1727) qui posa les fondements de la mécanique et les appliqua à tous les corps se mouvant dans l'espace.

3.1.2 La synthèse des connaissances sur le Système solaire

Nos connaissances peuvent se résumer ainsi :

- Le Système solaire est une communauté ordonnée qui comprend 8 ou 9 planètes, suivant le statut que l'on donne à Pluton, 73 satellites, des myriades d'astéroïdes, de comètes et autres petits corps célestes (*fig. 3.1*). En tant qu'étoile, le Soleil n'est pas très gros, mais comparé aux planètes, il est gigantesque. Si le Soleil avait les dimensions de l'Arc de Triomphe et était situé place Charles-de-Gaulle, Pluton serait un pamplemousse non loin de Tours.

Encart 3.1 – Planètes et plutoïdes : le statut de Pluton

Le statut de 9^e planète du Système solaire de Pluton, découverte en 1930 par Clyde Tombaugh, fut remis en cause par la découverte ultérieure d'objets similaires comme Cérés ou plus massif comme Eris/Xena en 2005 que son découvreur, M. E. Brown, présentait comme la 10^e planète.

En fait, la notion de planète n'est pas évidente et l'Union Astronomique Internationale (UAI) a mis en place en 2004 une commission chargée de préciser cette notion : une planète est un astre en orbite autour d'une étoile (à la condition de pas être lui-même une étoile) qui présente un diamètre (supérieur à 800 km) et une masse suffisants pour que les forces de gravité lui donnent une forme plus ou moins sphérique. Si cette définition permet de conserver parmi les planètes, Pluton dont le statut était périodiquement remis en cause car elle ne ressemble ni aux planètes telluriques ni aux planètes gazeuses, elle implique que

d'autres corps du Système solaire puissent avoir ce rang. Ainsi, trois nouveaux candidats ont été proposés en août 2006 à l'assemblée de l'UAI : *Ceres* (corps de 950 km de diamètre, découvert en 1801 dans la ceinture des astéroïdes entre Mars et Jupiter, qui fut déjà considéré comme une planète au XIX^e siècle), *Charon* (lune de Pluton de 1 200 km de diamètre découverte en 1978) et *Xena* (du nom de la série TV de science-fiction Xena princesse guerrière, de 2 400 km de diamètre).

Finalement, l'UAI a opté pour une définition restrictive en rejetant Pluton ; *le Système solaire ne comporte donc plus que 8 planètes au sens strict*. La ceinture de Kuiper, considérée jusqu'alors comme simplement formée de gros astéroïdes navigant au-delà de l'orbite de Neptune, devient un anneau de « planètes naines » transneptuniennes, les plutoïdes, comportant Pluton, Charon et Xena.

Partie I ■ La Terre : une planète dans l'Univers

- Les planètes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques qui sont presque des cercles. Ces orbites sont pratiquement toutes situées dans un même plan (**écliptique**), perpendiculaire à l'axe de rotation du Soleil. Ce plan est ainsi nommé parce que les éclipses de Lune et de Soleil ne se produisent que lorsque la Lune se trouve dans ce plan.
- La période de révolution des planètes autour du Soleil dépend de leur distance au Soleil, les plus éloignées tournent le plus lentement (Mercure : 0,24 année, Pluton : 248,4 années). Leur mouvement orbital est régulé, elles accélèrent lorsqu'elles se rapprochent du Soleil, elles ralentissent lorsqu'elles s'en éloignent. Les révolutions se font toutes dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même.
- La rotation des planètes sur elles-mêmes s'effectue suivant un axe sub-perpendiculaire au plan de l'écliptique. La rotation se fait dans le même sens que la révolution (sauf pour Vénus et Uranus qui tournent en sens inverse).

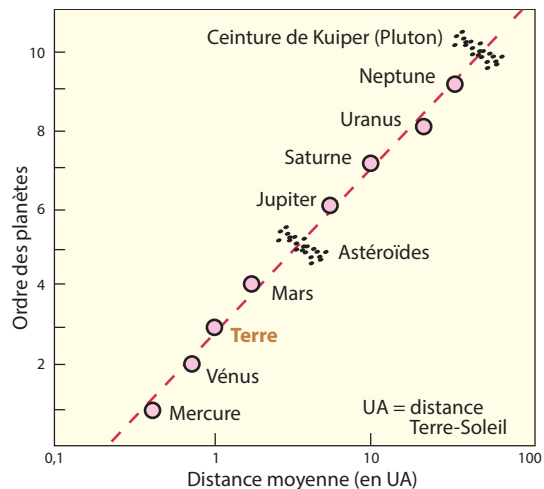
Encart 3.2 – Le basculement d'Uranus

Uranus est couché sur son orbite. Son axe de rotation se situe presque dans le plan de son orbite au lieu d'être quasi perpendiculaire à l'écliptique, comme les autres planètes. On a longtemps pensé que cela était le résultat d'une collision majeure avec une protoplanète de la taille de la Terre à la fin de la formation d'Uranus. Une modélisation de l'Institut de mécanique céleste de Paris (2010) propose un mécanisme sans collision : résonance avec un satellite massif aujourd'hui disparu, qui aurait fait basculer l'axe de rotation d'Uranus lors de la formation du Système solaire.

- De plus, la distance entre les planètes obéit à une loi simple (**loi de Bode**) : chaque planète est deux fois plus éloignée du Soleil que sa voisine intérieure. Toutefois entre Mars et Jupiter, il n'existe pas de planète à l'endroit prévu par la loi de Bode mais une multitude de petits objets célestes : les Astéroïdes (fig. 3.2). De même la « 9^e planète » de la loi Bode est maintenant considérée comme un ensemble d'objets transneptuniens (dont le prototype est Pluton) appelé **ceinture de Kuiper**.

Figure 3.2 La loi de Bode

La distance au Soleil est exprimée en unités astronomiques (1 UA = distance Terre-Soleil). En fait la loi de Bode n'est que très approximativement vérifiée, elle a cependant joué un rôle important dans la découverte des astéroïdes de Neptune et de Pluton en stimulant la recherche de ces objets. Cette loi indique simplement que deux planètes ne peuvent pas être trop proches, sinon elles auraient été en compétition pour la capture des particules lors de la phase d'accrétion planétaire (voir fig. 3.3).



Encart 3.3 – À la recherche de la « planète X » dite P9

L'année 2017 a vu les chercheurs de différents laboratoires se lancer dans la recherche d'une hypothétique nouvelle 9^e planète du Système solaire (d'où la dénomination de P9) qui serait responsable d'anomalies de trajectoires d'une catégorie de planétoïdes transneptuniens (situés dans la ceinture de Kuiper) dont le premier découvert en 2003 (Sedna) est un corps de 1 000 km de diamètre. Ces planétoïdes dits « extrêmes » ou « détachés » ont des trajectoires, inclinées par rapport à l'écliptique des planètes du Système solaire et fortement étirées, qui maintiennent ces objets à des distances considérables du Soleil. Ainsi Sedna ne s'en approche jamais à moins de 76 UA soit plus du double de la distance Soleil-Neptune. L'analyse en 2014 des trajectoires de 13 de ces planétoïdes montre qu'elles ont toutes leur périhélie (point le plus proche du Soleil) situé dans le plan de l'écliptique. Et que tous ces planétoïdes traversent ce plan du sud vers le nord. Beaucoup pensent que cette configuration n'est pas due au hasard mais résulterait de l'influence d'une planète loin-

taine 5 à 20 fois plus massive que la Terre placée sur une orbite inclinée de 30° et très étirée qui ferait varier sa distance au Soleil d'environ à 200 à 350 UA jusqu'à 1 200 UA selon un rythme de 15 000 ans. Les modèles indiquent qu'aucune planète ne peut se former sur une orbite aussi inclinée et étirée que celle proposée pour P9. Si l'existence de P9 était démontrée, cette planète devrait s'être formée ailleurs. Pour certains il pourrait s'agir d'une protoplanète éjectée de la région Jupiter-Neptune sous l'influence de forces gravitationnelles dans le Système solaire naissant (3 à 5 millions d'années). Pour d'autres, il y aurait eu, à la même période, captation par le soleil d'une planète qui gravitait autour d'une autre étoile. On estime que, si la masse de P9 était supérieure à celle de Neptune, la première hypothèse ne serait pas fonctionnelle. On doit noter qu'une publication franco-canadienne (2017) semble remettre en cause l'argument principal en faveur de la recherche de la planète X : la configuration des orbites des 13 planétoïdes ne pourrait être en fait qu'un biais d'observation.

3.1.3 Le nuage d'Oort et les comètes

La frontière du Système solaire ne se situe pas à l'orbite de Pluton (ceinture de Kuiper) ; aux confins du Système solaire, il existe un nuage de comètes (le **nuage d'Oort**, du nom de l'astronome hollandais Jan H. Oort qui émit l'hypothèse de son existence en 1950) où plus de 100 milliards de comètes (morceaux de roches et glaces) circuleraient dans une région sphérique de l'espace, d'environ une année-lumière (50 000 UA), centrée sur le Soleil. Soumises à une très faible attraction solaire, elles mettraient des milliers d'années à parcourir d'immenses orbites. De temps à autre, une perturbation du champ de gravitation (due, par exemple, au passage d'une étoile à proximité) en arrache certaines et les précipite en direction du Soleil. Une partie, telle la célèbre comète de Halley, parcourt alors de longues orbites englobant le Soleil. Le nuage d'Oort est un reliquat du disque protoplanétaire (voir le paragraphe 3.2).

Encart 3.4 – La comète de Halley

La comète de Halley, qui est de retour dans le ciel terrestre tous les 76 ans, est déjà figurée en 1077 sur la tapisserie de Bayeux (Calvados) dite de la Reine Mathilde qui relate la conquête de l'Angleterre en 1066 par Guillaume le Conquérant. Elle a été très bien étudiée lors de son survol par la sonde européenne Giotto en mars 1986. Son noyau, de densité voisine de 1, d'environ 600 km³, très riche en eau est évalué à $6 \cdot 10^{14}$ kg. Si ce noyau est représentatif de l'ensemble des comètes, la masse totale du nuage d'Oort serait alors supérieure à celle de l'ensemble des planètes du Système solaire.

Les comètes qui gravitent autour du Soleil s'en éloignent d'environ 1 500 fois plus que Pluton (fig. 3.1). Pour comparaison on doit rappeler que l'étoile la plus proche du Soleil est 6 000 fois plus lointaine que Pluton. En se rapprochant du Soleil, les comètes s'échauffent, leurs cristaux de glace se

volatilisent et elles laissent une traînée de poussières derrière elles. Ces comètes représentent les vestiges de la nébuleuse protosolaire (fig. 3.3). Certaines peuvent s'écraser sur la Terre, une telle catastrophe s'est produite, en 1908, en Sibérie dans la région de Tunguska. Selon les premières études, l'événement de Tunguska correspondrait à l'explosion, à une altitude de 5-10 km, d'un astéroïde de type comète, mais des analyses des sols et des arbres sous le centre de l'explosion semblent alimenter l'hypothèse de la chute d'une météorite pierreuse.



Voir fig. 37.2

La sonde Rosetta s'est mise en orbite autour de la comète 67P Churyumov-Gerasimenko après un voyage dans l'espace qui a duré 10 ans. Elle a largué le module Philae qui s'est posé sur la surface englacée de la comète le 12 octobre 2014 (voir chapitre 37.1.3).

En 2013, la désintégration d'une météorite de plus de dix tonnes faisait 500 blessés légers dans la ville de Tcheliabinsk. L'onde de choc a soufflé les vitres et les portes des immeubles de cette ville industrielle de l'Oural.



Voir chap. 37.2.9

Un dérèglement gravitationnel dans la région du nuage d'Oort, suivi d'une chute de bolides, est évoqué pour expliquer l'anomalie positive en iridium et la crise biologique de la limite Crétacé-Tertiaire il y a 65 Ma.

Encart 3.5 – Les exoplanètes : existe-t-il d'autres systèmes solaires ?

Le Soleil, n'est pas la seule étoile à posséder un système planétaire. Depuis la découverte en 1995, par les astronomes suisses Mayor et Queyloz, à partir d'une méthode spectrométrique, d'une planète en orbite autour de l'étoile 51 Pégase (à environ 40 al de la Terre), plus de 4 000 **planètes extra-solaires ou exoplanètes** ont été identifiées. Ces planètes paraissent pour le moment très différentes de celles du Système solaire (la planète de Pégase 51, qui a une masse égale à la moitié de celle de Jupiter, n'est située qu'à 7 millions de km de l'étoile et effectue sa révolution en seulement 4,2 jours).

Ces recherches sont délicates car ces objets sont quasi invisibles (la planète a un éclat 10 milliards de fois plus faible que l'étoile autour de laquelle elle gravite) et l'on ne peut qu'utiliser des méthodes indirectes comme l'étude des perturbations gravitationnelles provoquées par la planète sur le mouvement de l'étoile. De ce fait, on n'est actuellement capable que de détecter des planètes de taille importante. Des missions de satellites ont été développées par différentes agences pour avancer dans notre connaissance des exo-Terres possibles. Le télescope spatial COROT (CNES-CNRS) et des pays partenaires comprend une caméra à 4 CCD hypersensibles, et scrute, pendant plus de 6 mois, le même champ d'étoiles. Le télescope spatial Kepler, de la NASA, a été lancé en 2009. Il utilise la méthode des transits (étude des variations de luminosité dues à un corps en rotation devant une étoile). En 2013, Kepler a découvert 134 planètes dans un échantillon de 145 000 étoiles.

Pour la première fois en mars 2005, le rayonnement de deux exoplanètes, HD 209458b (dans la Constellation de Pégase à 153 al) et TrES-1 (Constellation de la Lyre à 489 al) a pu être analysé et des températures respectives de 850 °C et 780 °C ont pu être calculées. L'espoir de connaître la nature chimique de ces planètes, que l'on pense proche de celle de Jupiter, ne paraît plus utopique.

Dans la Voie lactée, un système planétaire de 7 planètes de taille terrestre gravitant autour de l'étoile Trappist 1 (étoile de la constellation du Verseau, située à 39 années-lumière de la Terre) a été étudié à partir de 2015. Trappist 1 est une étoile naine plus froide que le Soleil, les planètes sont plus proches de l'étoile que la Terre ne l'est du Soleil (20 à 90 fois) et présentent des rotations synchrones (montrant toujours la même face à l'étoile). Au moins 3 des planètes ont des insulations et des températures moyennes compatibles avec l'existence d'eau liquide en surface pour une large gamme de compositions atmosphériques.

En 2019, de la vapeur d'eau a été mise en évidence dans l'atmosphère la planète K2-18b, une super-Terre (huit fois plus massive que la Terre pour un rayon deux fois plus grand), située à quelque 110 années-lumière de notre planète. La révolution de K2-18b autour de « son Soleil » est de 33 jours, à une distance de 21 millions de km (soit moins que la distance Soleil-Mercure, ce qui paraît exclure la présence d'eau liquide à sa surface).

3.2 LA NAISSANCE DU SYSTÈME SOLAIRE

Depuis longtemps, les astronomes se sont demandés quelle pouvait être l'origine d'une structure aussi régulière. Buffon (1749) le premier en déduit une origine unique des planètes (matériau éjecté du Soleil à la suite d'une collision avec une comète).

Les différents scénarios se doivent de répondre à deux types de questions :

- Le Soleil et le cortège planétaire sont-ils cogénétiques ?
- Le cortège planétaire s'est-il formé à partir de matière interstellaire (c'est-à-dire de composition universelle) ou de matière stellaire (c'est-à-dire de matière modifiée par le passage à l'intérieur d'une étoile) ?

3.2.1 Les différents modèles

Les différents scénarios peuvent être regroupés en quatre modèles.

a) Premier modèle

Le Soleil et les planètes sont nés, en même temps, à partir d'un même nuage de matière interstellaire. Cette théorie qui avait déjà été imaginée par Kant en 1755, fut indépendamment développée par Laplace en 1796 ; l'objet céleste initial hypothétique est, de ce fait, appelé « Nébuleuse protosolaire de Laplace ». Elle résulterait de la fragmentation d'un nuage interstellaire. Il s'agit donc d'une masse de gaz et de poussières en rotation rapide qui prend la forme d'un disque aplati. Les éléments non volatils se condensent et s'agglomèrent pour donner naissance aux planètes dans les régions plus froides (plus externes) du disque tandis que le centre se contracte et devient le Soleil (*fig. 3.3*). De très nombreux travaux actuels se rattachent à ce modèle.

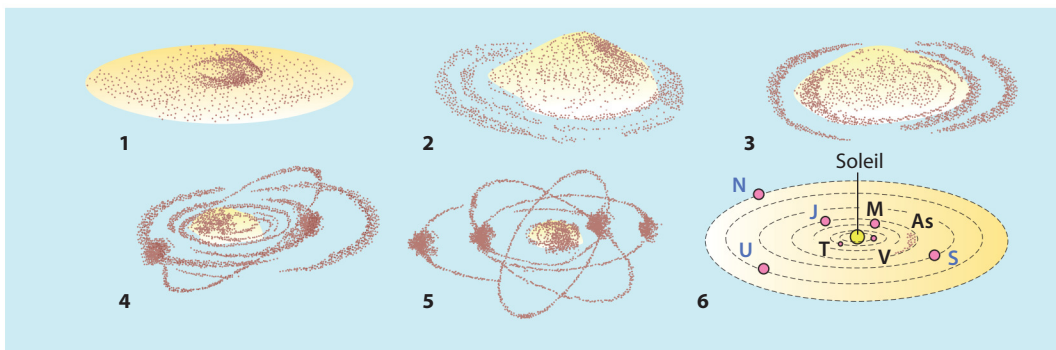


Figure 3.3 Un scénario envisagé pour la naissance du Système solaire : l'effondrement d'un nuage interstellaire (nébuleuse protosolaire de Laplace) en rotation.

Les lettres correspondent aux initiales des planètes. Comparer avec la figure 3.4. Diverses modélisations ont montré qu'il faudrait 5 à 10 Ma pour passer du stade 1 au stade 5 et ensuite, environ 100 Ma, pour passer au stade 6.

b) Second modèle

Le cortège planétaire provient de la transformation d'un nuage interstellaire mais celui-ci a été capturé (par gravité ou du fait du champ magnétique suivant les différents scénarios) par le Soleil après sa formation. Soleil et planètes ne sont donc pas cogénétiques.

c) Troisième modèle

À sa naissance, le Soleil faisait partie d'un système stellaire binaire (comme il en existe beaucoup dans l'Univers) mais l'étoile compagne s'est désintégrée ; sa matière s'est répandue dans l'espace et une partie a été capturée par le Soleil en donnant naissance à une nébuleuse. Dans cette théorie, très en vogue dans les années quarante, le Soleil et les planètes sont donc constitués de matière stellaire et sont aussi cogénétiques.

d) Quatrième modèle

Au cours des mouvements célestes une étoile serait passée à une proximité suffisante du Soleil pour que celui-ci provoque à la surface de l'étoile des phénomènes de marée éjectant de la matière qui serait mise en orbite autour de celui-ci (fig. 3.4). Dans ce type de scénario, la matière des planètes est donc d'origine stellaire mais il n'existe aucun lien génétique entre le Soleil et les planètes.

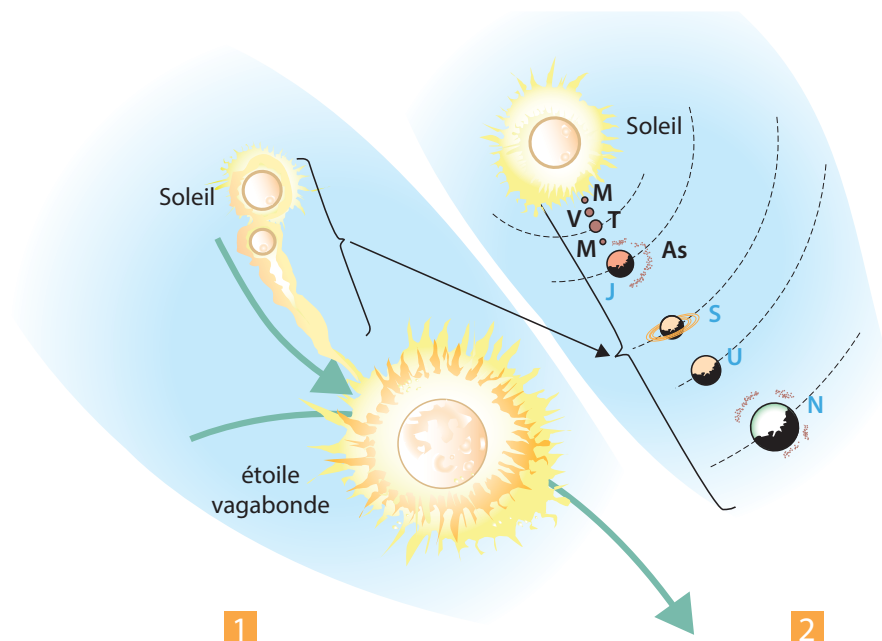


Figure 3.4 Un scénario « catastrophique » envisagé pour la naissance du Système solaire.

Capture (1) par une étoile vagabonde de matière stellaire émise au voisinage du Soleil. En se refroidissant (2) le filament de matière donne naissance aux planètes. Ce scénario reprend l'idée de Buffon (1749) en remplaçant la comète par une étoile (les lettres correspondent aux initiales des planètes).

3.2.2 L'origine de la matière dans le Système solaire

Deux types d'arguments peuvent nous permettre de tester la validité des différents modèles : les abondances isotopiques et élémentaires et les mesures d'âges.

Si nous regardons (tableau 3.1) les abondances relatives d'éléments fragiles, qui résistent mal aux conditions régnant dans les étoiles (deutérium et lithium), par rapport aux éléments résistants (hydrogène, fer, silicium), on constate que le cortège planétaire et la matière interstellaire présentent des compositions voisines. Les scénarios faisant intervenir de la matière stellaire (modèles 3 et 4) doivent donc être rejetés.

TABEAU 3.1

Rapport d'abondance de différents atomes dans la matière interstellaire, le Soleil et les planètes

	Matière interstellaire	Soleil	Cortège planétaire
Deutérium/hydrogène	$2 \cdot 10^{-5}$	$< 3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Lithium/silicium	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Fer/silicium	1	1	1

3.2.3 Les données radiochronologiques : l'âge du Système solaire

a) L'apport de l'étude des météorites

L'étude détaillée des météorites a considérablement fait progresser nos connaissances sur les premiers moments du Système solaire. Ces pierres tombées du ciel, dont l'étude de quelques trajectoires semble indiquer qu'elles proviennent, pour la plupart, de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, se divisent en plusieurs types (voir la figure 5.2). La majorité appartient au type **chondrite** ; elles sont ainsi nommées car elles contiennent des petites inclusions silicatées (les chondres) de même nature chimique que le reste de la météorite mais qui témoignent d'un phénomène de fusion (ce sont des gouttes de verre silicaté). Leur propriété principale est d'être des objets peu différenciés c'est-à-dire qu'elles présentent une composition chimique voisine de celle de la couronne solaire et de la matière interstellaire (fig. 3.5). De ce fait on pense que ces chondrites seraient les témoins de la condensation du nuage de gaz initial. Les autres types sont des objets différenciés présentant, comme la croûte terrestre (fig. 3.5), des compositions chimiques très différentes de celle de la couronne solaire. Il s'agit des **achondrites** de composition voisine de celle des basaltes terrestres et des **météorites de fer ou sidérites** qui sont des alliages fer-nickel. Les deux derniers types dériveraient des chondrites par un processus de différenciation, identique à celui qui a pu se passer pour la Terre et les autres planètes (noyau, manteau, croûte, fig. 5.2).

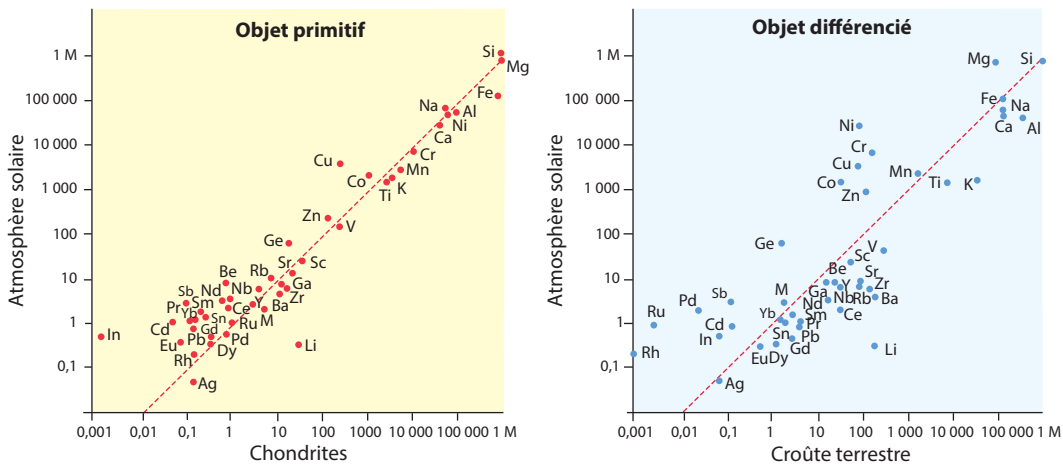


Figure 3.5 Comparaison de la composition chimique, par rapport à celle du Soleil, d'un objet primitif tel que les chondrites et d'un objet différencié tel que la croûte terrestre.

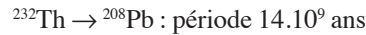
Dans le cas de la Terre, la ségrégation chimique entre noyau, manteau et croûte au cours de la différenciation a introduit des différences importantes dans la concentration relative des éléments.



Voir chap. 5.3

En utilisant des radioéléments à longues périodes on peut dater les météorites. Une dizaine de datations de chondrites, par le couple $^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$ (période 50×10^9 ans) sur roche totale, a conduit à un âge de $4,52 \pm 0,05$ Ga.

D'autres méthodes permettent une meilleure précision, il s'agit des couples :



Dans les 2 premiers, les nucléides pères et fils sont respectivement isotopes d'un même élément. On peut donc coupler ces 2 méthodes et mesurer un âge par les seules variations du rapport isotopique $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ (méthode plomb-plomb). À la fermeture du système qu'on cherche à dater, le rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ dépend de l'environnement du système (rapport isotopique initial). Ce rapport évolue, par la suite, en fonction des concentrations des éléments pères (^{238}U et ^{235}U), des éléments fils (^{206}Pb et ^{207}Pb) et des constantes de désintégration de chaque couple. Une méthode identique peut être appliquée à partir du thorium en utilisant le rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. La moyenne obtenue pour les chondrites est de $4,54 \pm 0,02$ milliards d'années. Avec ces mesures nous connaissons l'âge de la condensation de la nébuleuse protosolaire à 20 Ma près.

b) La radioactivité fossile

Une autre approche peut être tentée grâce à la **radioactivité fossile**. Si des éléments à courte période existaient au début du Système solaire, les nucléides pères ont depuis disparu et l'on ne peut soupçonner leur existence qu'à partir de variation de la composition isotopique des nucléides fils (qui peuvent permettre d'établir une chronologie relative des événements à défaut d'une chronologie absolue). Il semble que 3 radionucléides de ce type (^{26}Al , $P = 7,4 \cdot 10^5$ ans ; ^{129}I , $P = 1,7 \cdot 10^7$ ans et ^{244}Pu , $P = 8 \cdot 10^7$ ans) aient existé dans le nuage protosolaire. En effet, l'iode 129 se désintègre en xénon 129, or depuis 1960 on a découvert des excès de ^{129}Xe dans les météorites. Une technique sophistiquée, utilisant aussi l'isotopie stable de l'iode (^{127}I) a permis d'une part de montrer que le xénon 129 en excès provenait bien d'une décomposition *in situ* de ^{129}I et d'autre part, à partir du rapport $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$, d'établir une chronologie relative des différentes météorites connues par rapport à une météorite étalon (Bjurböle). Les âges obtenus s'évaluent sur 16 Ma (– 6 à + 10 Ma par rapport à Bjurböle), cet intervalle représenterait la durée de condensation du nuage protosolaire. Un modèle plus récent, faisant intervenir deux étapes de condensation des chondrites, ramène cet intervalle à 3 Ma. Quel que soit le modèle choisi, on constate l'extrême rapidité (par rapport à l'âge du Système solaire) de la phase de condensation. De plus, le fait qu'il existait encore de l'iode 129 ou du plutonium 244 au moment de la solidification des roches montre que la période écoulée entre le moment où le nuage protosolaire a été isolé du milieu interstellaire (donc sans apport nouveau de radionucléides) et la phase de condensation (formation des planètes) n'a pu être très longue. Les calculs donnent une approximation de l'ordre de 100 Ma.

À l'échelle de temps du Système solaire, Soleil et planètes sont donc cogénétiques.

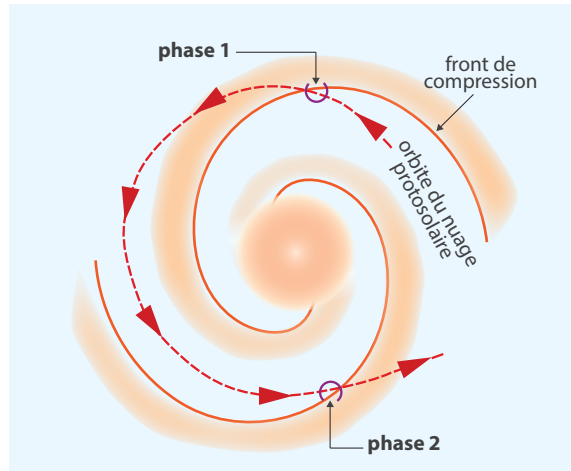
c) Un scénario plausible

Ces données s'interprètent, relativement facilement, dans le cadre de nos connaissances sur la dynamique des galaxies spirales et la formation des étoiles. Les nuages de matière interstellaire se déplacent par rapport à la Galaxie, ils gravitent autour du noyau central et de ce fait sont amenés à traverser successivement les bras spiraux (qui représentent des ondes de densité) et les régions inter-bras. La transformation d'un nuage interstellaire en étoile ne semble pouvoir se produire qu'en certains

endroits privilégiés. Au moment d'aborder un bras, le nuage subit une décélération qui le comprime fortement et permet le déclenchement des condensations en étoiles. On peut donc imaginer le scénario suivant pour le nuage protosolaire (fig. 3.6). Au cours du premier passage dans le bras galactique, le nuage ne s'effondre pas mais il est fortement comprimé. Il est affecté par l'intense nucléosynthèse qui règne dans cette région et reçoit une quantité importante d'atomes nouveaux. Pendant le voyage interbras, qui dure environ 100 Ma, l'abondance des noyaux à vie relativement courte comme l'iode 129 et le plutonium 244 décroît fortement avant que le nuage n'aborde le second bras où la condensation du nuage protosolaire va se réaliser.

Figure 3.6 Trajet hypothétique du nuage protosolaire.

Au premier passage dans un bras galactique le nuage est comprimé mais ne s'effondre pas, il se charge cependant en atomes nouveaux (notamment en ^{129}I) issus de l'intense nucléosynthèse qui règne dans les bras galactiques. Au cours du voyage interbras, l'iode 129 va se désintégrer en xénon 129 et il n'en restera qu'une très faible quantité lors de la phase de condensation. Les calculs montrent, qu'entre les phases 1 et 2, il a dû s'écouler un temps de l'ordre de 100 Ma, ce qui est compatible avec le trajet proposé.



Encart 3.6 – L'éclatement d'une Super Nova au voisinage du nuage protosolaire ?

La découverte d'aluminium 26 dans certaines météorites (telle celle d'Allende, tombée au Mexique en 1969) a singulièrement compliqué le schéma de création du Système solaire car, d'une part, cet isotope ne semble pouvoir être synthétisé que dans les très grosses étoiles et d'autre part sa très courte durée de vie ($P = 0,75 \text{ Ma}$) interdit qu'il ait pu subsister dans le nuage protosolaire pendant la centaine de millions d'années nécessaire au déplacement du nuage d'un bras galactique à l'autre. Un apport extérieur de matière stellaire au nuage très peu de temps avant la phase de condensation est donc nécessaire. Pour beaucoup, il proviendrait de l'explosion d'une supernova, au voisinage du Système solaire naissant, environ 1 Ma avant la phase de condensation. L'onde de choc de l'explosion pouvant même être, selon certains auteurs, le déclencheur du processus de condensation. Cet apport tardif, sous forme de gaz et/ou de grains expliquerait de plus les hétérogénéités isotopiques (celle de l'oxygène par exemple fig. 3.7) du nuage protosolaire que semblent mettre en évidence les données sur les météorites primitives.

Ces processus ont été confirmés par la découverte dans les météorites d'anomalies en chrome 53. Cet isotope provient de la désintégration radioactive du manganèse 53 (période de vie plus courte que le temps nécessaire à la formation du Système solaire) qui ne peut être formé que dans des étoiles très évoluées. La présence de ^{53}Mn indique donc qu'une supernova a probablement explosé quelques millions d'années avant la formation du Système solaire.

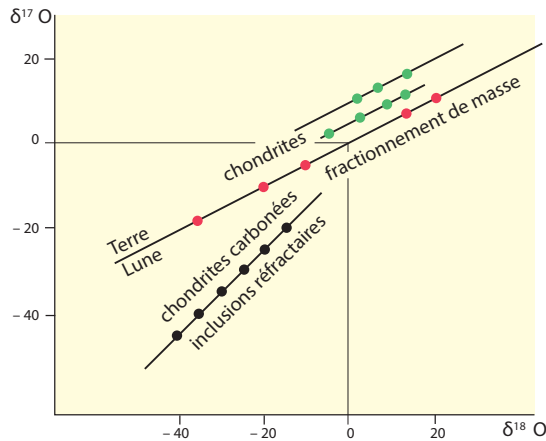


Figure 3.7 Hétérogénéité isotopique de l'oxygène dans les météorites.

Les rapports isotopiques $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sont exprimés par rapport à un standard, qui est ici l'eau de mer (SMOW : *standard mean oceanic water*) sous forme de $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$. Sur la Terre, la composition isotopique de l'oxygène n'est pas constante dans tous les matériaux, mais ses variations suivent une loi simple (fractionnement de masse) qui fait que les différentes mesures se placent sur une droite de pente 1/2 (le $\delta^{17}\text{O}$ augmente de 1 quand le $\delta^{18}\text{O}$ augmente de 2). Les échantillons lunaires obéissent à la même logique. Si le nuage protosolaire était initialement homogène du point de vue isotopique, toutes les mesures devraient se répartir sur cette même droite, or les mesures faites sur différents groupes de chondrites ordinaires se répartissent sur des droites parallèles significativement différentes de la droite terrestre. Cela traduirait que les différents objets considérés se sont formés dans des régions différentes du nuage protosolaire qui présentait une hétérogénéité isotopique. De plus, les inclusions des *chondrites carbonées* (objets primitifs) montrent une relation $\delta^{17}\text{O} - \delta^{18}\text{O}$ très différentes (droite de pente 1).

On interprète ce phénomène en postulant que l'oxygène des chondrites est le résultat d'un mélange, en proportions variables, entre l'oxygène « normal » (avec les 3 isotopes) et un oxygène « anormal » constitué principalement de l'isotope 16. On pense que cet oxygène riche en ^{16}O aurait été formé dans une super nova qui aurait explosé, peu de temps avant la formation du Système solaire, trop tard pour que ces produits de nucléosynthèse puissent être mélangés et homogénéisés avec le reste du nuage protosolaire. Seules certaines régions du disque auraient donc subi cet enrichissement en ^{16}O .

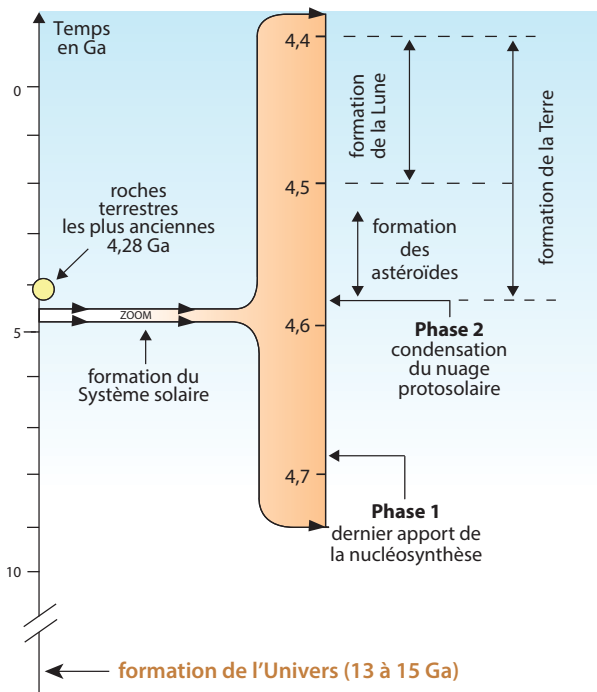


Figure 3.8 Résumé schématique de la formation du Système solaire.

On constate qu'il s'agit d'un phénomène rapide par rapport à l'histoire de l'Univers (200 Ma au maximum). Les phases 1 et 2 se rapportent aux phases de la figure 3.6. Sous le terme de formation, on a regroupé les phénomènes de condensation, d'accrétion et de différenciation. Cette succession peut être très rapide (de l'ordre de la dizaine de millions d'années) dans le cas de petites planètes (corps parents des météorites), pour de plus grosses planètes comme la Terre, la durée est de l'ordre de la centaine de millions d'années.

On retient actuellement le schéma de formation du Système solaire présenté sur la figure 3.8 : une phase d'isolement du nuage protosolaire qui dure environ 100 Ma suivi d'une phase de condensation rapide (au plus 10 à 15 Ma mais sans doute beaucoup moins).

d) L'accrétion des planètes

Au cours de la phase de condensation, la température du nuage protosolaire décroît fortement et des grains solides se condensent à partir du gaz. Les données de laboratoire permettent comprendre la séquence de condensation (fig. 3.9). À partir de 1 600 °K, il se condense d'abord les matériaux réfractaires (principalement oxydes d'aluminium, de calcium et de titane). À partir de 1 400 °K, se condensent les alliages de fer avec d'autres métaux. Entre 1 200 et 400 °K, ce sont les silicates. Enfin à basse température, les éléments volatils se condensent et vers 200 °C les glaces apparaissent. De plus la température étant plus chaude vers l'étoile qu'à la périphérie du disque, la composition chimique des grains varie en fonction de la distance à l'étoile, les réfractaires et les métaux dans la partie interne et les éléments volatils dans la partie externe du disque protosolaire.

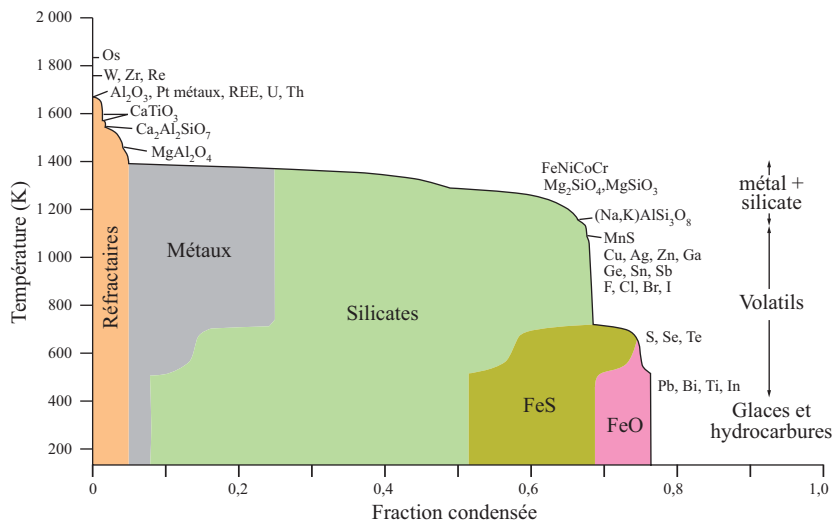


Figure 3.9 Séquence de condensation d'un gaz de composition solaire.

Au début du processus, les condensats sont de trop petite taille pour que la gravité puisse jouer un rôle. Les phénomènes permettant de passer de grains à des embryons de planétoïdes restent énigmatiques : le disque protosolaire se comporterait comme un fluide turbulent où des tourbillons concentreraient les grains. Le problème est complexe car il faut atteindre une taille suffisante pour capter d'autres corps par gravité et dans le même temps résister à la fragmentation par les impacts (encart 3.7). Quoiqu'il en soit, les condensats s'agglomèrent en objets planétaires qui se réchauffent. Cet échauffement est produit par l'énergie gravitationnelle libérée lors de l'agglomération et par la désintégration d'isotopes radioactifs tel l'aluminium 26. Il en résulte une fusion et une homogénéisation du corps planétaire en formation. Il se produit, ensuite, un lent refroidissement au cours duquel les éléments chimiques se combinent en minéraux qui, sous l'action des forces de gravité, subissent une ségrégation, pour former le noyau, le manteau et la croûte, en donnant naissance à une *planète différenciée*. Ces processus seront traités aux chapitres 3.4 et 5.2 (fig. 5.6). Dans le cas des petites planètes, corps parents des météorites, ils ont pris environ 10 Ma, pour de plus grosses planètes comme la Terre, la différenciation dure environ 100 Ma.

En fait, deux processus physiques interviennent donc au cours de la formation du Système solaire : **l'effondrement gravitationnel** et les **collisions**. Le premier, très rapide, semble prépondérant dans la formation du Soleil et des planètes géantes tandis que les planètes internes (telluriques) se formeraient plutôt par agglomération, lors de collisions, de petits corps de moins de 20 km de diamètre (sortes de microplanètes : les planétoïdes).

Encart 3.7 – Une modélisation numérique de l'accrétion progressive des planètes

Des simulations ont été réalisées, sur ordinateur. Il s'agit d'un modèle à 100 planétoïdes de même masse, décrivant des ellipses autour du Soleil, dont les paramètres sont définis de façon aléatoire. Les orbites étant irrégulières les unes par rapport aux autres, les collisions sont nombreuses, il en résulte des captures et, en fin de processus, il ne reste que 6 planètes distinctes dont les orbites sont devenues régulières. Dans une première modélisation, réalisée seulement en 2 dimensions (les probabilités de collision sont donc plus grandes), le processus d'accrétion ne dure que 61 000 ans. Une modélisation plus poussée, en 3 dimensions, montre à partir des 100 planétoïdes initiaux, qu'il ne reste plus que 22 corps en orbite au bout de 30 Ma, 11 au bout de 79 Ma et 6 au bout de 151 Ma. Cette modélisation semble donc bien confirmer que la Terre aurait pu se former en une centaine de millions d'années au cours des processus d'accrétions décrits sur la figure 3.3.

Les photographies du sol lunaire montrent une cratérisation importante, témoin de ce bombardement météoritique intense (*fig. 3.10*). Le diamètre des cratères varie de quelques mètres à environ 60 km et les impacts ont produit des roches de nature magmatique. La fréquence des cratères est une fonction inverse de leur diamètre. La cratérisation permet, de plus, une datation relative : plus une portion du sol lunaire est cratérisée, plus elle est ancienne. Le prélèvement d'échantillons du sol lunaire a permis de dater, par radiochronologie, certaines portions (*fig. 3.10*). On constate alors une décroissance très forte de la cratérisation entre 4,5 et 3,5 milliards d'années. Cette observation traduit que le phénomène d'accrétion a culminé vers 4,5 milliards d'années pour décroître ensuite très rapidement (ainsi que la cratérisation) à cause d'une pénurie de projectiles (capturés progressivement par les planètes en formation).

Sur la Terre, les impacts météoritiques sont bien connus mais ils sont rares et, en général, de dimensions modestes (*fig. 3.10c*). Pourtant, on pense que le bombardement a été, aux premiers temps, aussi important que sur la Lune, mais à la différence de la Lune, la Terre présente encore une activité géologique qui a effacé les traces des impacts très anciens (97 % des roches terrestres ont un âge inférieur à 2 milliards d'années). Dans cet ordre d'idée, des gisements métallifères du Précambrien liés à des massifs rocheux de grosse taille (de nature basaltique ou péridotique) tel le Bushveld (chrome et platine) en Afrique du Sud ou le Sudbury (chrome et nickel) au Canada, sont généralement interprétés comme le résultat d'impacts de météorites géantes car ils s'intègrent difficilement à la géologie environnante et présentent des structures de chocs caractéristiques des impacts.

Encart 3.8 – Les météorites SNC trouvées sur Terre seraient d'origine martienne

Certaines météorites retrouvées sur Terre, les 8 météorites dites **SNC** (initiales des localités d'où proviennent 3 d'entre elles, Shergotty [Inde], Nakla [Égypte] et Chassigny [tombée le 3 octobre 1815, Haute-Marne]) présentent des compositions chimiques et isotopiques aberrantes (voisines de celles connues sur la planète Mars) et un âge de cristallisation très jeune (1,3 milliard d'années). Certains pensent donc que la collision d'une grosse météorite avec la planète Mars a expulsé un fragment de la croûte martienne (à une vitesse supérieure à la vitesse d'échappement sur Mars soit $5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) qui, au bout d'un voyage complexe, a fini par arriver sur Terre. L'analyse chimique d'une telle météorite de type SNC, trouvée en Antarctique, prouverait la présence de systèmes hydrothermaux sur Mars. De même, un fragment de roche lunaire a été identifié dans les glaces antarctiques. Ces faits, pour anecdotiques qu'ils soient, montrent bien la fréquence et l'énergie des impacts qui ont pu survenir dans le Système solaire.

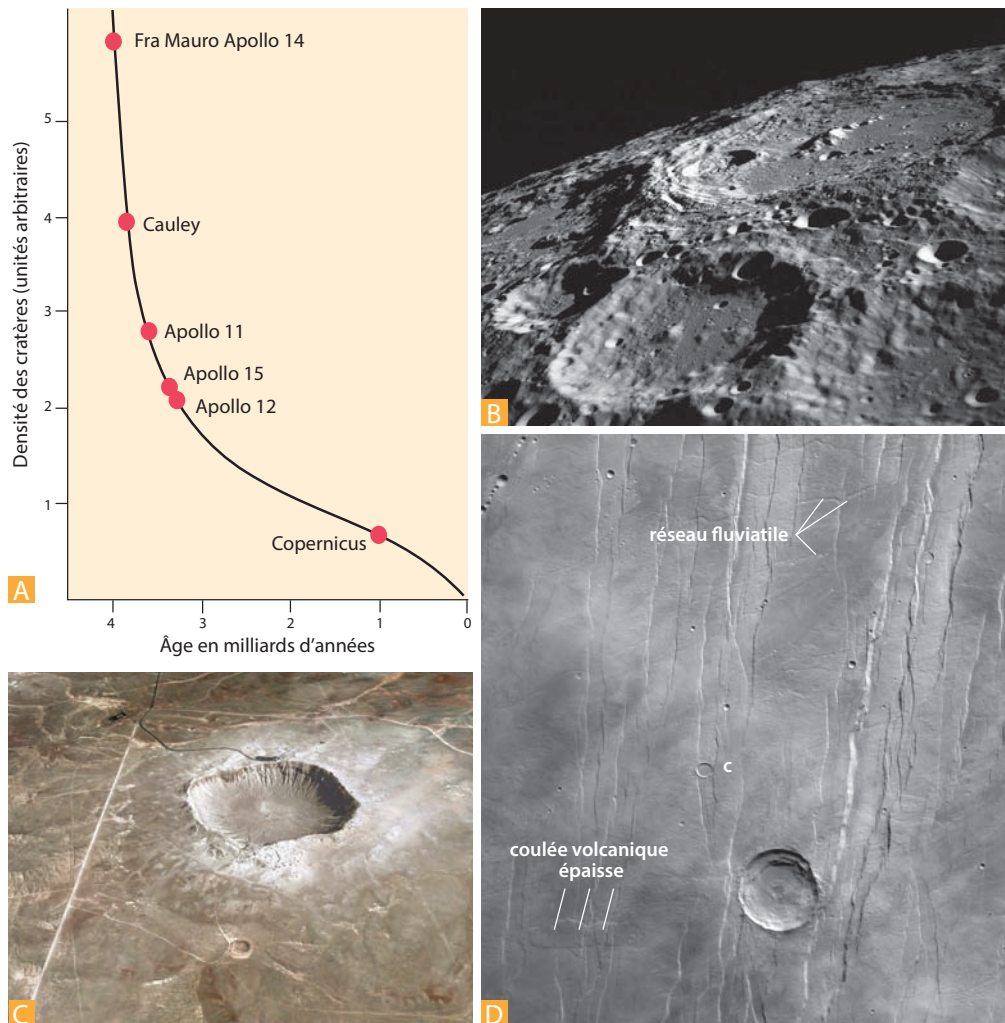


Figure 3.10 La cratérisation dans le Système solaire.

A. Densité des cratères en fonction de l'âge du sol lunaire. La densité décroît exponentiellement en fonction de l'âge de la région étudiée (données issues des diverses missions Apollo).

B. Cratérisation intense de la Lune (document NASA, mission Apollo 10).

C. Un cratère d'impact sur la Terre : le Meteor Crater en Arizona (USA). Ce cratère a un diamètre de 1 200 m, une profondeur de 190 m, et son bourrelet d'éjection mesure 30 m de hauteur. Il est dû à l'impact d'une météorite composée de nickel et de fer d'un diamètre de 27 m survenu il y a environ 50 000 ans sur le plateau Coconino Sandstone, d'âge permien. De nombreux fragments métalliques ont été recueillis autour du cratère. Des minéraux du métamorphisme de choc (coésite, stishovite) ont été découverts sur les parois du cratère (photo USGS).

D. Cratérisation de Mars. Un recensement cartographique achevé en 2012 montre que Mars a reçu plus de 635 000 impacts de météorites de plus de 1 km de diamètre. Le cratère principal visible sur ce document a un diamètre d'environ 20 km, il est situé sur le flanc sud du grand volcan Alba Patera, au nord du dôme Tharsis (voir localisation et détails sur les figures 3.13 et 3.14) dont la pente ici est seulement de 1° à 2°. De nombreuses failles normales, parallèles et à faible rejet, appartiennent à un système tectonique extensif lié au gonflement de l'ensemble du dôme de Tharsis. Ces failles, qui délimitent des grabens de 100 m de profondeur, semblent recouper les bordures du cratère principal, mais un cratère plus petit (c) recoupe nettement une faille du réseau extensif. Une coulée volcanique épaisse se distingue en bas à gauche. Un réseau fluvial de vallées sinueuses peu profondes (20 m) se surimpose aux failles. Il est très probablement le résultat d'un écoulement rapide d'eau suite à la fonte récente de glaciers (document Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes, MOLA).



Voir chap. 37.2.9

Aujourd'hui, on estime encore à 50 000 tonnes/an le poids de matière météoritique reçu par la Terre soit plus de 100 t par jour. L'impact d'une météorite de 10 km de diamètre (cratère de Chicxulub au nord de la péninsule mexicaine du Yucatan) paraît une des causes essentielles de la crise biologique survenue à la limite Crétacé/Tertiaire. Le centre de la France conserve les traces de deux météorites géantes, celles de Rochechouart (Haute-Vienne) et de Bizeneuille (Allier). D'un diamètre de 15 km, elles auraient creusé un cratère de 200 km de diamètre. Elles appartiendraient à une **catena** (groupe de plusieurs météorites) ayant frappé la Terre vers 200 Ma qui pourrait avoir contribué à la crise biologique de la limite Trias/Jurassique.

3.3 LE SOLEIL

À 150 millions de kilomètres de la Terre, le Soleil est une étoile de dimension modeste (environ 1 400 000 km), située dans un bras spiral de la galaxie, à 30 000 années-lumière du centre de cette dernière (fig. 1.2). Son rayon est de 695 000 km environ. Bien que constitué essentiellement d'hydrogène (73 %), d'hélium et de seulement 2 % d'autres éléments, son poids est de $2 \cdot 10^{30}$ kg soit 330 000 fois celui de la Terre. Sa période de rotation, dans le sens direct, est de 26,9 jours à l'équateur, 35 jours au pôle. Son axe de rotation est incliné de $82^{\circ}45'$ sur le plan de l'écliptique.

3.3.1 La structure du Soleil

La structure du Soleil montre l'existence d'un **cœur** ou **noyau** de 250 000 km de rayon (fig. 3.11) où la température est estimée à 15 millions de degrés. Ainsi, le Soleil se comporte-t-il comme un *four thermonucléaire* effectuant chaque seconde la fusion de 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et en deutérium par deux réactions essentielles, le cycle proton-proton et le cycle proton-oxygène-azote (CNO ou *cycle de Bethe* (fig. 2.6), où le carbone joue un rôle de catalyseur) aboutissant au même résultat : quatre noyaux d'hydrogène (protons) qui fusionnent en absorbant deux électrons pour former un noyau d'hélium. Le cycle CNO est surtout dominant dans les étoiles massives (au-delà de 1,2 masse solaire), dans le cas du Soleil le cycle proton-proton est la source principale de l'énergie. Ces réactions sont la source d'un intense rayonnement gamma et de l'émission de photons et de neutrinos qui transportent l'énergie libérée par le noyau vers la surface.



Voir fig. 20.1

Les photons émis au cœur du Soleil seront absorbés, réémis, réabsorbés des milliards de fois avant de sortir de l'étoile si bien qu'ils n'atteindront la surface du Soleil qu'environ au bout d'un million d'années. La lumière solaire ne mettra ensuite que 8 minutes pour atteindre la Terre. En moyenne, au sommet de l'atmosphère terrestre, une surface de 1 m^2 reçoit un rayonnement de 1370 watts (**constante solaire**). Au contraire, tout étant transparent aux neutrinos, ceux-ci ne mettront que quelques dizaines de secondes pour atteindre la surface du Soleil.

De ce fait, la mesure du flux de neutrinos s'est fortement développée ces dernières années car ils nous apportent directement des renseignements sur les conditions physiques du cœur des étoiles.

La densité du noyau (150) est beaucoup plus élevée que la densité moyenne du Soleil (1,41) et 1 000 fois plus élevée que celle des couches superficielles. Autour du noyau, la majeure partie de la sphère est occupée par une zone de radiation d'énergie, **zone radiative** s'étendant jusqu'à 200 000 km de la surface où la température (1 million de degrés) et la densité (15) diminuent (fig. 3.11). On trouve ensuite la **zone convective** limitée à l'extérieur par l'atmosphère.

3.3.2 L'atmosphère solaire

L'atmosphère solaire, partie accessible à l'observation dans le domaine visible, comprend d'abord la **photosphère**, pellicule de 300 km d'épaisseur où se concentre le champ magnétique. Sa température,

qui varie de 8 000 °C à la base à 4 500 °C au sommet, explique la couleur blanc-jaune perçue par l'œil. Elle est parsemée de taches noires où le champ magnétique est plusieurs milliers de fois supérieur au champ magnétique environnant. Les photons qu'elle émet sont les seuls à nous parvenir directement et sont à l'origine de la lumière solaire.

À la photosphère succède la **chromosphère**, couche rose vif épaisse de 2 000 à 3 000 km, dont la température, à l'inverse de celle de la photosphère croît avec l'altitude et passe de 4 500 degrés à la base à 1 million de degrés dans la zone de transition avec la couronne. La chromosphère, fortement hétérogène, présente des structures verticales d'un diamètre de 1 000 km, les spicules, qui bordent des régions de 40 000 km de diamètre, dessinant une sorte de quadrillage.

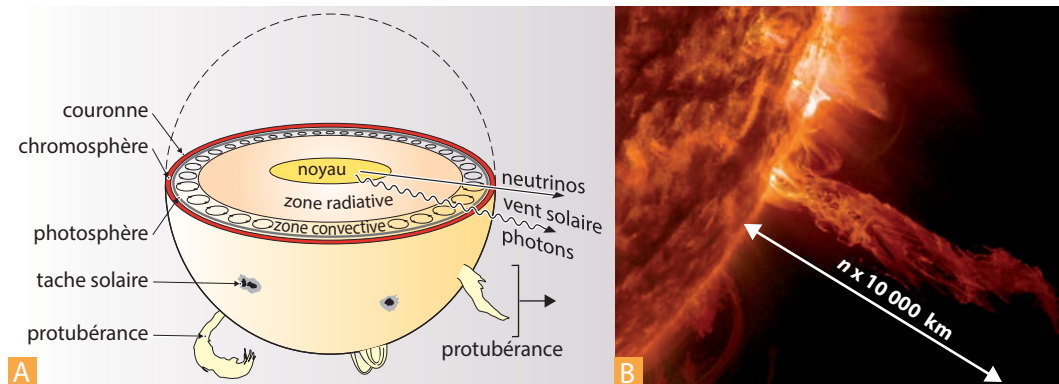


Figure 3.11 Le soleil.

A. Structure interne.

B. Détail d'une protubérance (document NASA).

La partie la plus externe de l'atmosphère solaire, ou **couronne**, est observable lors des éclipses ou à l'aide d'un coronographe qui masque le disque solaire, et aujourd'hui par les sondes spatiales. Sa très haute température (3 millions de degrés alors que celle de la surface du Soleil n'est que de 6 000 degrés), longtemps énigmatique, s'explique par une dynamique qui naît à quelque 150 000 km sous la surface du Soleil, où se créent de puissantes concentrations magnétiques. En atteignant la couronne, les lignes de force des champs magnétiques peuvent produire des courts-circuits, sources de puissants courants électriques qui chauffent continuellement le plasma. La couronne interne est comprise entre 15 000 et 150 000 km au-dessus de la photosphère, et la couronne externe peut atteindre 10 rayons solaires soit plus de 5 millions de kilomètres.

3.3.3 L'activité solaire

L'activité solaire n'est pas constante : on observe l'existence d'un plus grand nombre de centres actifs durant des périodes qui se répètent tous les onze ans. Le Soleil est aujourd'hui à la moitié de sa vie, estimée à 10 Ga. Dans 5 Ga, ayant épuisé sa réserve d'hydrogène, le noyau d'hélium se contractera tandis que la périphérie enflera considérablement. Le Soleil deviendra une géante rouge dont le diamètre dépassera l'orbite de Mercure. Sa température volatiliser les planètes internes puis il deviendra une nébuleuse planétaire avec volatilisation des planètes externes, et il évoluera vers une naine blanche, marquant la fin du Système solaire.

Voir fig. 2.5

Encart 3.9 – Taches, protubérances, tornades et éruptions solaires

Ce sont des manifestations de l'activité solaire :

Les taches sont dues à l'émergence, au niveau de la photosphère, de boucles de champ magnétique transportées par convection. Elles perturbent l'atmosphère terrestre avec une périodicité de 11 ans (fig. 20.1). Les plus petites sont de la taille de la Terre, les plus volumineuses cent fois plus grosses

Les *tornades* sont des panaches de gaz tournoyant à de fantastiques vitesses, jusqu'à 500 000 km/h et qui peuvent endommager satellites et systèmes électriques.

Les *éruptions* sont dues à une onde de perturbation sphérique, qui se propage à la vitesse de 1,5 million de km/h, associée à des séismes pouvant atteindre 11,3 sur l'échelle de Richter. Elles se manifestent par des aurores boréales et des orages magnétiques. Tornades et éruptions alimentent le *vent solaire*, porteur de protons,

d'électrons et de neutrinos émis par la couronne, après accélération par le champ magnétique, à la vitesse de 400 à 800 km/seconde. Le vent solaire déteste le Soleil, à chaque seconde, de 1,6 million de tonnes de plasma.

Les *protubérances* naissent dans la chromosphère profonde. Ce sont des extrusions éphémères de gaz à l'architecture bizarre d'arches entrelacées, relativement froides, 10 000 degrés contre 10 millions de degrés pour la couronne environnante. Les protubérances ont été détectées pour la première fois lors d'éclipses de Soleil car elles allument, au moment de l'occultation totale, de longs filaments au-delà du disque lunaire. D'un diamètre de 4 000 à 5 000 km, d'une altitude de quelques dizaines de milliers de kilomètres, elles peuvent atteindre exceptionnellement 1 million de kilomètres avant d'exploser et de disparaître.

3.4 LES DIFFÉRENTES PLANÈTES

3.4.1 Une zonation par rapport au Soleil



Voir encart 3.1

Les huit planètes actuellement connues sont, en partant du Soleil : Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus (découverte en 1781 par Heschel), Neptune (découverte en 1846 par l'astronome allemand Galle, à partir des calculs de l'astronome mathématicien français Le Verrier). Pluton, découverte seulement en 1930 par Tombaugh, a perdu son statut de planète en 2008.

L'exploration spatiale a permis de déterminer avec précision le diamètre, la température de surface, la masse, la densité et la répartition des masses. Les planètes sont constituées de couches successives de densité croissante en allant vers le centre. Les matériaux détectés sont pour les solides : le fer, le sulfure de fer et les silicates et pour les gaz, l'eau, l'azote, le gaz carbonique, l'ammoniac, le méthane, l'hydrogène et l'hélium. Quel que soit le mode de calcul utilisé pour modéliser la structure des planètes à partir des données de l'exploration spatiale, il apparaît **qu'il n'existe pas deux planètes de structure identique**.

La diversité se marque dans la nature et la composition des différentes couches. Ainsi l'atmosphère de Mars et de Vénus est dominée par le gaz carbonique, celle de la Terre par l'azote et l'oxygène, celle de Titan (satellite de Saturne) par le méthane et l'ammoniac et celle de Jupiter par l'hydrogène et l'hélium. L'intensité du champ magnétique est elle aussi très variable (assez fort sur Mercure, la Terre et Jupiter, il est négligeable sur Vénus, Mars et les satellites de Jupiter). Même un phénomène aussi répandu que le volcanisme présente une origine et une composition variables suivant les planètes. Il semble lié à la radioactivité sur la Terre et sur Mars, à la chaleur créée par les impacts sur la Lune, aux marées joviennes sur Io. Les produits émis sont silicatés (Terre et Mars), soufrés (Io) ou aqueux (Ganyède ou Encélade : satellites de Jupiter et de Saturne).

Les principales caractéristiques des différentes planètes sont résumées dans la figure 3.1. Le fait principal est l'existence d'une zonation par rapport au Soleil. On distingue ainsi deux groupes de planètes. Les quatre plus proches du Soleil (Mercure, Vénus, Terre, Mars) sont relativement petites et denses. Leur atmosphère, réduite, est dépourvue d'hydrogène (*planètes telluriques*), les suivantes

(Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) beaucoup plus volumineuses et légères sont très riches en gaz. La température de leur surface ou de la surface de leur atmosphère va en décroissant au fur et à mesure qu'on s'éloigne du Soleil. Le fait que la température au sol de Vénus soit supérieure à celle de Mercure peut paraître anormale : cela tient à la présence autour de Vénus d'une atmosphère (effet de serre) inexistante sur Mercure où elle fut chassée par le vent solaire. Ce « vent » composé essentiellement d'ions H, He et de neutrinos est émis à une vitesse de 300 à 800 km·s⁻¹ par la couronne solaire à une température de 10 000 à 50 000 °C. Il épargne la surface de Vénus comme celle de la Terre car il est dévié par le champ magnétique ou absorbé par l'atmosphère.

Encart 3.10 – Les astéroïdes et l'hypothétique planète d'Olbers ?

Entre les planètes telluriques et les planètes géantes (fig. 3.1) se trouve le domaine des astéroïdes, corps de consistance pierreuse, au nombre de plusieurs milliers (2 000 environ sont identifiés). La plupart ont un diamètre inférieur à 1 km et leur forme est variable. Les deux plus gros, Cérés et Vesta, ont un diamètre de 650 km et sont sphériques. Deux hypothèses sont toujours envisagées pour l'origine des astéroïdes : l'éclatement d'une planète hypothétique, la planète d'Olbers, ou les résidus du nuage planétaire originel qui ne se seraient pas accrétés.

Il faut toutefois noter que cette ceinture correspond sans doute à une frontière physico-chimique importante du disque protosolaire. Elle se situe à la transition de la zone où les phénomènes d'accrétion ont dû être prépondérants (pour conduire aux planètes telluriques) et de la zone où les phénomènes d'effondrement gravitationnel ont dû être prédominants (pour conduire aux planètes géantes). C'est aussi la zone de l'isotherme -120 °C qui sépare une zone interne du nuage protosolaire où l'eau pouvait exister sous forme vapeur et une zone externe où elle est présente sous forme de glaces.

Lancée en 2014 la sonde japonaise Hayabusa 2 a rapporté en décembre 2020 des échantillons (poudre de grains obtenue après un impact de tir) provenant de l'astéroïde Ryugu (astéroïde primitif carboné). Ces premières analyses sur Terre d'un objet primitif devraient apporter des enseignements majeurs sur la formation du Système solaire.

Comment expliquer cette zonation par rapport au Soleil ? Elle doit traduire l'existence d'une zonation thermique dans le disque protosolaire au moment de l'accrétion (centre plus chaud, périphérie plus froide). Le fer, plus lourd et plus résistant à la chaleur, est conservé dans la partie centrale tandis que les gaz sont évacués vers la périphérie. Ainsi les planètes géantes ont, à cause de leur très basse température (-140 °C à -250 °C), qui entraîne en particulier la solidification de l'azote et du méthane sous forme de glace, de leur masse (vitesse de libération 2 à 5 fois celle de la Terre) et de leur éloignement du Soleil (faiblesse du vent solaire), retenu la presque-totalité de leur hydrogène et de leur hélium. Toutefois, leur masse étant encore beaucoup trop faible par rapport à celle du Soleil, la température atteinte en leur cœur n'a pas été suffisante pour déclencher la réaction thermonucléaire susceptible d'en faire des étoiles.

Il est probable que les planètes telluriques ont eu une évolution initiale semblable. Mais leur température alors plus élevée (500 à 1 000 °C) n'a permis la solidification que des seuls silicates et métaux, les autres éléments demeurés gazeux étant chassés par le vent solaire, d'autant plus facilement qu'ils étaient plus légers (disparition complète d'H et He).

Le rapport fer/silicates devait aussi décroître dans le disque protosolaire en allant vers la périphérie. Les données d'observation rendent bien compte de ce phénomène : Mercure a une densité plus forte que Mars.

Il se serait ainsi produit une sorte de décantation dans le disque protosolaire qui explique, d'une part, qu'à partir d'un gaz galactique identique on obtienne deux populations si différentes de planètes et, d'autre part, que la masse du cortège planétaire ne représente plus aujourd'hui qu'une si faible partie (environ deux millièmes) de la masse solaire.

Ainsi la masse des planètes telluriques ne correspondrait-elle en gros qu'au *résidu silicaté et métallique des planètes géantes* (3 %) et leur évolution rend compte qu'elles soient, au contraire des planètes géantes, privées d'anneaux et de satellites, ce qui est le cas pour Mercure et Vénus. Les deux satellites de Mars (Phobos et Deimos) et celui de la Terre (la Lune) ont une toute autre origine et ont probablement été capturés ultérieurement dans le champ gravitationnel de ces planètes.

3.4.2 Accrétion et différenciation

Quand il s'agit d'expliquer l'origine de la structure globalement concentrique des planètes, une polémique se développe quant aux rapports temporels existant entre accrétion et différenciation.

a) L'accrétion hétérogène

Pour certains, les matériaux constituant les planètes telluriques se sont accrétés dans l'ordre de leur densité. Les éléments les plus lourds, comme le fer, se sont condensés et rassemblés les premiers, en formant le noyau. Puis d'autres solides, plus légers, comme les silicates sont venus s'accoler pour donner le manteau et la croûte. Enfin, les matériaux gazeux ont été capturés pour donner l'atmosphère (et l'océan dans le cas de la Terre). Dans ce cas, accrétion et différenciation sont simultanées et conduisent à une planète « chaude » car l'accrétion se continue, transformant énergie cinétique en chaleur, pendant la différenciation.

b) L'accrétion homogène

Dans cette hypothèse, il y a accrétion de poussières de composition homogène, le corps accrété (en passant sans doute par une phase chaude avec fusion) subit ensuite une différenciation qui conduit à la formation des différentes enveloppes. Le fer, plus lourd, migre au centre, les silicates restent à la périphérie tandis que les produits volatils migrent vers la surface pour former l'atmosphère (*fig. 3.9*). Au contraire du cas précédent, accrétion et différenciation sont donc successives et conduisent à une planète « froide », l'accrétion étant terminée ou en forte diminution lors de la phase de différenciation. De plus, l'origine de l'atmosphère (et de l'océan pour la Terre) est différente, il s'agirait ici du dégazage du manteau lors des processus de différenciation.

La majorité des chercheurs penchent plutôt pour la théorie de l'accrétion homogène qui explique mieux le flux de chaleur actuel des planètes et la présence d'une atmosphère sur les planètes telluriques (la gravité permettant de piéger plus efficacement les gaz sur une planète « froide » que sur une planète « chaude »). De plus, compte tenu des températures envisagées dans la nébuleuse protosolaire, la condensation séparée du fer et des silicates paraît peu plausible.

Enfin, les séquences de condensation calculées pour un modèle d'accrétion homogène conduisent à des compositions planétaires conformes aux observations. Au contraire, les modèles basés sur une accrétion hétérogène prédisent des structures non vérifiées par l'observation : la Terre devrait avoir un noyau entièrement solide constitué de fer-nickel et un manteau d'énstatite (pyroxène), ce qui n'est pas mis en évidence par les études sismiques ; de plus Io, Vénus, la Terre et les astéroïdes, bien que situés à des distances très différentes du Soleil, devraient avoir une composition identique.

Quoi qu'il en soit, il y a sans doute une part de vrai dans chacune des théories car il s'agit de phénomènes complexes : le noyau devant commencer à se différencier avant la fin de l'accrétion planétaire.

3.4.3 Mercure

Jusqu'à la mission Mariner 10 (1974), Mercure était mal connue car, située trop près du Soleil, elle est difficilement photographiable. Les résultats de la mission Mariner 10, complétés par les observations de la sonde Messenger, lancée en 2004 et mise en orbite mercurienne en 2011, peuvent être résumés ainsi : la structure interne de Mercure ressemble à celle de la Terre (noyau de fer et manteau de silicate

pendant dans des proportions différentes) mais la surface externe rappelle celle de la Lune (coulées de laves et cratères de dimensions variées). Mercure est une planète morte mais qui a été autrefois le siège d'une abondante activité volcanique. L'absence d'atmosphère limite les phénomènes d'érosion et explique les écarts de température entre la nuit (-180 °C) et le jour ($+450\text{ °C}$). Les résultats principaux concernent la mise en évidence d'un champ magnétique dipolaire, de polarité sud, comme sur la Terre mais beaucoup plus faible ($4 \cdot 10^4$ fois moins fort) dont l'origine doit être liée au noyau sans qu'on sache encore l'expliquer.

Les connaissances devraient progresser avec la mission de la sonde BepiColombo qui a été lancée de Kourou par l'ESA en Octobre 2018 pour une mise en orbite autour de Mercure en 2025. Cette mission est très complexe d'une part à cause du trajet puisqu'il faut utiliser successivement l'assistance gravitationnelle de la Terre puis de Venus et enfin de Mercure (le nom de la sonde est d'ailleurs un hommage à Giuseppe « Bepi » Colombo (1920-1984), scientifique italien qui proposa à la NASA d'utiliser l'attraction de Venus pour envoyer Mariner10 vers Mercure) et d'autre part du fait des conditions régnant à proximité de Mercure (énergie solaire et température).

3.4.4 Vénus

Vénus est un peu plus petite que la Terre ($R = 6\,043\text{ km}$), un peu moins dense (5,24) mais là s'arrêtent les similitudes. Ainsi, sa rotation s'effectue-t-elle dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur placé au pôle. Le Soleil s'y lève à l'ouest. D'autre part, sa rotation est très lente (243 jours terrestres, la nuit vénusienne durant 117 jours), durée supérieure à celle de sa révolution autour du Soleil (224 jours). Mais, ce qui rend particulièrement intéressante l'étude de cette planète, c'est l'existence d'une *atmosphère très dense* dont la pression est 95 fois supérieure à celle de la Terre.

a) L'atmosphère vénusienne

L'atmosphère vénusienne, postérieure au départ des gaz galactiques (H et He), est formée de 97 % de CO_2 , de 3 % d'azote, de composés soufrés (1 000 ppm de H_2S et S), de 1 000 ppm d' H_2O , de 60 ppm d'oxygène, de traces de néon et d'argon. De cette atmosphère très épaisse résulte un effet de serre qui explique la température très élevée au sol (en moyenne 460 °C) et la formation de sulfure de carbone (OCS) et d'acide sulfurique (H_2SO_4) qui se condensent dans les nuages avec d'autres gaz, lorsque la température diminue avec l'altitude (entre -40 °C et -80 °C à 80 km). Cette atmosphère provient du dégazage volcanique et des effets secondaires dus à la photolyse. C'est ainsi que l'oxygène proviendrait de la décomposition de l'eau et du CO_2 , l'hydrogène trop léger étant évacué dans l'espace.

L'atmosphère de Vénus n'est pas aussi différente de celle de la Terre qu'il y paraît : c'est qu'en effet, sur cette dernière, le CO_2 a été dissous dans l'eau et combiné au calcium dans les carbonates. Si l'on calcule le rapport de CO_2 total et d'azote par rapport à un gramme de roche, on trouve en effet des proportions voisines pour les deux planètes.

Encart 3.11 – Des traces de vie sur Venus : Un emballement médiatique ?

En septembre 2020, la détection de phosphine (PH_3) dans les nuages de Vénus, interprétée comme marqueur d'une activité bactérienne anaérobie, a déclenché un engouement médiatique autour de la présence de vie sur cette planète particulièrement inhospitalière. Quelques mois plus tard, force est de constater que l'emballement médiatique était, pour le moins prématuré, car la « signature biologique » univoque de cette molécule, loin d'être prouvée, a été largement remise en cause.

b) La structure de Vénus

La surface vénusienne est mieux connue depuis les missions américaines. Les sondes *Pioneer*, *Venus* et *Magellan*, utilisant un radar pour percer l'atmosphère, ont pu dresser une carte topographique. La

surface est assez plate (60 % de la planète présente, un dénivelé inférieur à 1 000 m) mais il existe des « montagnes » ou « continents » dont l'altitude moyenne se situe environ 2 000 m au-dessus des plaines et qui peuvent culminer jusqu'à 10 000 m.

Les sondes russes qui se sont posées sur le sol, ont pu, malgré les conditions très défavorables de température et de pression, analyser les roches. Certaines rappellent les granites, d'autres les basaltes terrestres. L'étude du champ de gravité semble confirmer ces données, les zones de reliefs correspondent à des matériaux de densité différente de ceux des plaines. Les analogies avec la Terre (malgré l'absence de champ magnétique) sont donc d'autant plus grandes qu'il semble que Vénus soit encore géologiquement active.

En se basant sur la topographie, on pensait que Vénus pouvait être le siège d'une tectonique des plaques de type terrestre. La cartographie très précise (résolution pouvant approcher les 100 km) transmise par la sonde *Magellan* (mise en orbite vénusienne de 1990 à 1994) a montré une réalité plus complexe. La cratérisation d'impact est faible (du même ordre de grandeur que sur la Terre) ce qui traduit une surface planétaire jeune. Ceci est dû à un volcanisme extrêmement actif et non, comme sur Terre, à un recyclage de la croûte par la tectonique des plaques. Une phase volcanique majeure se serait produite, il y a environ 500 Ma, remodelant la surface vénusienne. Il semble que ce volcanisme, associé à des amincissements crustaux (mis en évidence par des anomalies gravitaires), soit principalement de type **point chaud**. Alors que sur Terre la dissipation d'énergie se fait à 95 % au niveau des limites de plaques et seulement pour 5 % par le volcanisme de point chaud, cette forme d'évacuation de la chaleur serait majoritaire sur Vénus.

Une tectonique des plaques embryonnaire pourrait cependant exister. Certains voient en effet dans les *coronae*, formations circulaires de grande dimension (2 600 km de diamètre pour la plus grande), un lieu possible de résorption de la lithosphère vénusienne. Les coronae seraient en leur centre le lieu d'émergence des courants mantelliques ascendants, la lithosphère dériverait radialement par rapport à ce point jusqu'à une cassure circulaire où elle plongerait vers le manteau (Henarejos et Thomas, 1995). L'absence de plaques mobiles de type terrestre serait due à l'épaisseur (70 km) et à la rigidité de la croûte vénusienne, les courants de convection ne pouvant émerger qu'en des points très localisés. De plus le manteau serait moins malléable que sur Terre du fait de l'absence d'eau qui aurait été totalement évacuée et détruite dans la haute atmosphère vénusienne au cours du premier milliard d'années.

3.4.5 La Terre et la Lune

Le détail de la structure de la Terre sera développé dans la partie II de l'ouvrage, où l'essentiel concernant l'évolution géochimique de la Terre est présenté à côté des apports des méthodes géophysiques (sismiques, gravimétrie, paléomagnétisme). L'origine et l'évolution de l'atmosphère sont traitées section 21.4 et celles de l'hydrosphère section 23.3.

a) Caractères physiques et astronomiques de la Terre

La Terre peut être considérée comme un solide entouré d'une enveloppe liquide discontinue, l'hydrosphère, et d'une enveloppe gazeuse, l'atmosphère.

La situation dans le cortège des planètes du Système solaire est moyenne tant au point de vue de la position (3^e) que du volume (5^e) et de la masse (5^e). Jupiter est douze fois plus grosse, Mercure et Pluton nettement plus petites. La densité globale (5,5) est forte ; aucune des petites planètes n'atteint ce chiffre (Mercure : 5,4 ; Vénus : 5,2 ; Mars : 3,9) et les grosses planètes, qui s'échelonnent de Neptune (1,6) à Saturne (0,71), sont beaucoup moins denses. La Lune elle-même n'a qu'une densité de 3,3 (*fig. 3.1*).

Encart 3.12 – La fenêtre « d’habitabilité »

Les conditions permettant l’installation de la vie sur une planète sont assez strictes. Ainsi la Terre possède un thermostat climatique, basé en grande partie sur le cycle de l’eau (évaporation, condensation, formation de nuages), qui le permet. Si la Terre avait été située à 0,95 U.A. du Soleil, soit seulement 5 % plus près qu’elle ne l’est actuellement, tous les océans auraient déjà disparu (fig. 3.12). La zone d’« habitabilité » du Système solaire est donc très réduite entre une frontière interne où les conditions deviennent trop chaudes et une frontière externe où elles deviennent trop froides (à 1,37 U.A. du Soleil, le CO₂ commence à geler dans la haute atmosphère). Selon certains auteurs, la frontière interne avancerait aussi du fait de l’augmentation progressive de la luminosité solaire et atteindrait l’orbite terrestre dans environ 1,5 Ga.

b) Caractères physiques et astronomiques de la Lune

La Lune est une sphère légèrement aplatie dont le rayon (1 735 km) est presque 4 fois plus petit que celui de la Terre (rapport des volumes 1 à 50). Sa densité moyenne est de 3,35 (Terre 5,52). De ce fait, la pesanteur ($g = 162$ gals) y est environ 6 fois plus faible que sur la Terre ce qui conduit à une vitesse de libération de 2 375 m·s⁻¹ contre 11 180 m·s⁻¹, favorable au décollage des capsules spatiales

La distance moyenne de la Terre à la Lune est de 384 000 km, elle augmente de 3 cm par an. La Lune tourne autour de la Terre en 27 jours et 8 heures (la révolution lunaire sera de 30 jours dans 100 Ma) et sur elle-même dans le même temps si bien qu’elle présente toujours la même face (rotation synchrone). La longue durée des nuits lunaires qui en découle (14 jours environ) et l’absence d’atmosphère expliquent l’amplitude des variations de température au sol qui peuvent dépasser 200 °C en un même lieu (températures extrêmes évaluées à + 125 °C à l’équateur, – 175 °C, la nuit, au pôle).

Accessible seulement à l’œil nu pendant plusieurs millénaires, la Lune fut, à l’égal du Soleil, l’objet d’un culte et de sacrifices. L’homme y distingua sans difficulté des parties claires (*terra*) et sombres (*mare*, du mot latin mer). En 1610, Galilée, grâce à sa lunette astronomique, y découvre des cratères que les télescopes révèlent de plus en plus nombreux (définition de 100 m).

c) La surface lunaire : les enseignements de l’exploration lunaire

À partir de 1959, l’engin russe *Luna*, puis les vaisseaux américains photographient de près le satellite et rapportent pour la première fois sur la Terre des clichés de sa face cachée. L’apothéose survient le 11 juillet 1969 avec l’alunissage d’*Apollo 11* et les premiers pas sur la Lune des astronautes Armstrong et Aldrin. Entre 1969 et 1972, au cours de six vols *Apollo*, 12 astronautes explorèrent la surface de la Lune et rapportèrent 382 kg d’échantillons (les deux engins automatiques soviétiques *Luna* prélevèrent aussi 130 grammes de sol lunaire).

L’analyse de ces roches conduit à les classer en 3 catégories :

- les anorthosites ;
- les norites KREEP ainsi nommées du fait de leurs teneurs élevées en potassium (K), terre rares (REE en anglais) et en phosphore (P) ;
- les basaltes.

Sur les *terras* existe surtout l’anorthosite mais aussi les norites KREEP. L’anorthosite est une roche plutonique claire, relativement légère (densité 2,8 à 2,95), de structure grenue, où dominent les feldspaths calco-sodiques (96 %) accompagnés de pyroxène et parfois d’un peu d’olivine. L’âge des anorthosites s’établit entre 4 500 Ma et 4 000 Ma ce qui confirme la date de 4 600 Ma pour la formation de l’ensemble du cortège planétaire. En fait, les anorthosites seraient présentes sur toute la surface lunaire et représenteraient la croûte qui se serait différenciée par flottaison des minéraux légers sur un « océan magmatique » dans lequel s’enfonçaient les minéraux denses, olivine et pyroxènes, phénomène observé dans les « chambres magmatiques » de la Terre. Les données sismiques montrent une discontinuité vers 60 km de profondeur ; au-dessus les vitesses

Partie I ■ La Terre : une planète dans l'Univers

sismiques sont d'environ $6,5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui correspond aux anorthosites, en dessous les vitesses sont de l'ordre de $8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui correspond à des roches plus denses représentant sans doute le manteau lunaire.

Le basalte occupe les *mare*. Comme sur la Terre, c'est une roche volcanique sombre, dense (3,3), fluide, épanchée en coulées superposées entre 3 800 et 3 000 Ma. Les gaz qui se sont dégagés, en laissant des vésicules, se sont échappés dans l'espace à cause de la trop faible attraction lunaire ; si bien que l'absence d'eau et d'atmosphère, et l'intensité du rayonnement ultraviolet qui en découle, ainsi que la rigueur des températures extrêmes, ont rendu impossible l'apparition de la vie sur la Lune.

Encart 3.13 – L'origine des norites KREEP

Les norites KREEP ont une répartition très ponctuelle à la surface de la Lune (au niveau de pointements perçant les basaltes). Il semblerait donc qu'à une certaine période (après la formation de la croûte anorthosique), mais avant l'épanchement des basaltes lunaires qui recouvrent ces régions, il y ait eu une refonte partielle du matériel crustal anorthosique pour donner une lave de type norite. On ignore la source de la chaleur nécessaire à la fusion et la raison pour laquelle les éruptions sont ainsi localisées. Pour certains cela serait lié à un énorme impact d'une microplanète. Pour d'autres, les norites ne représenteraient pas une fusion partielle des anorthosites mais les derniers résidus d'un processus de cristallisation fractionnée. Au cours du refroidissement de la croûte lunaire une couche de norite KREEP aurait fini par cristalliser sous la croûte anorthositique et aurait été mise à jour ultérieurement lors de la formation des cratères.

Les connaissances devraient progresser prochainement avec la mission chinoise Chang'e 5 qui, depuis un orbiteur lunaire, a largué un atterrisseur (muni d'un bras télescopique et d'une foreuse pouvant prélever des échantillons à une profondeur de 2 m) qui s'est posé le 1^{er} décembre 2020, au nord de l'Océan des Tempêtes. Dans cette région, les roches sont beaucoup plus jeunes (1,2 Ga) que celles rapportées par les missions Apollo et Luna (3,1 à 4,4 Ga). Le module de remontée (avec 2 kg d'échantillons) s'est amarré à l'orbiteur le 5 décembre et le retour sur Terre a eu lieu le 16 décembre. Ces nouveaux échantillons devraient permettre de compléter la géologie lunaire et comprendre les derniers événements volcaniques à sa surface.

En surface, sur 1 à 10 m d'épaisseur, les fragments de roches qui résultent des impacts et les petits météorites qui ne se sont pas, comme sur la Terre, volatilisés dans l'atmosphère, forment un *régosol* ou *régolite* ; remanié et contaminé par le vent solaire, puis localement vitrifié par des impacts de météorites. C'est une formation superficielle constituée de débris rocheux non transportés et non transformés, ce qui la distingue d'un sol. Ainsi la Lune connaît-elle des processus frustes d'érosion, de transport et de sédimentation dont le déterminisme n'est pas du tout atmosphérique, comme sur la Terre, mais purement cosmique. En 1998, la sonde *Lunar Prospector* a détecté la présence de 10 à 300 millions de tonnes de glace, probablement apportée par des comètes, dispersée dans le régolithe et conservée au fond de cratères polaires où les rayons solaires ne pénètrent jamais.

Encart 3.14 – Une inhumation lunaire

Le 30 juillet 1999 la sonde *Lunar Prospector*, après être restée en orbite autour de la lune, a été envoyée percuter un cratère lunaire pour rechercher la vapeur d'eau, emportant dans sa chute les cendres d'Eugène Schoemaker (« inventeur » de la comète qui heurta Jupiter en 1994), premier terrien inhumé dans l'espace.

d) Résumé de l'histoire géologique de la Lune

L'histoire géologique de la Lune peut se résumer ainsi :

- vers 4 600 Ma, formation de la Lune à partir du disque solaire primitif et passage par un stade partiellement liquide provoqué par la désintégration d'isotopes radioactifs (par exemple $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$)

attesté par l'analyse isotopique. Il en est résulté une différenciation magmatique qui conduit en surface à la formation d'une croûte anorthositique. Ce stade s'achève vers 4 400 Ma ;

- bombardement météoritique très intense entre 4 400 et 3 800 Ma provoquant la formation de cratères qui peuvent être gigantesques (mare imbrium = la mer des pluies a près de 200 km de diamètre) ;
- de 3 800 à 3 000 Ma, activité éruptive et épanchement de basalte qui tapisse le fond des mare ;
- à partir de 3 000 Ma, assoupissement. La Lune est alors figée : les chutes de météorites et les éruptions se font plus rares.

Actuellement l'épaisseur de la lithosphère lunaire est de l'ordre de 1 000 km (contre 70 à 150 km sur Terre) ce qui interdit tout mouvement de plaques ou transport de laves provenant de l'asthénosphère. Sous tous ses aspects la Lune est un astre mort. Seuls de légers séismes, dus probablement aux marées de l'écorce lunaire, agitent encore sa surface désertique, balayée par le vent solaire.

e) Les relations Terre-Lune

Assez paradoxalement l'évolution de la Lune s'achève au moment où l'on commence à entrevoir celle de la Terre, puisque les plus anciennes roches datées sur celle-ci le sont d'un peu plus de 4 000 Ma et que 97 % des roches de notre planète ont un âge inférieur à 2 milliards d'années. Quels ont été les rapports de la Lune avec la Terre ?

Les mesures des rapports isotopiques de l'oxygène dans les échantillons lunaires excluent que la Lune et la Terre aient pu se former dans des régions très différentes du disque protosolaire.

Diverses hypothèses ont été émises concernant la formation de la Lune (séparation de la Lune à partir de la Terre primitive, astre double, capture gravitationnelle d'objets relativement petits alors que les orbites n'étaient pas stabilisées) mais c'est l'hypothèse d'une *collision gigantesque*, vers 4,5 Ga, qui recueille la faveur des planétologues : une énorme météorite aurait arraché à la Terre en formation des matériaux qui, ajoutés à une partie de ceux de la météorite et projetés en orbite, auraient constitué la Lune. Le projectile, en percutant obliquement la Terre, aurait accéléré sa vitesse de rotation (sinon le jour terrestre durerait peut-être 8 mois, comme celui de Vénus) et aurait provoqué son inclinaison par rapport au plan de l'écliptique. En 2014, la datation de l'échantillon lunaire 60025 (Apollo 12, 1969) par deux méthodes différentes (Pb-Pb et Sm-Nd) a donné un âge de 4,36 Ga, soit 200 Ma plus jeune que les datations précédentes. Ceci conduit à rediscuter dans le détail les processus qui, après la collision entre la Terre et l'astéroïde géant, ont présidé à l'accrétion et à la solidification des assises de la Lune. Sossi et Moynier (2017) ont repris l'étude des roches lunaires très magnésiennes rapportées par les missions Apollo 15 (1971) et 17 (1972) en analysant leurs rapports isotopiques du Fer. Ces échantillons, qui sont des roches plutoniques (dites « Suites Magnésiennes ») constituées des premiers cristaux formés lors du refroidissement de la Lune, présentent des rapports Fe/Mg et une signature isotopique du fer identiques aux roches du manteau terrestre. On pense que les « Suites Magnésiennes » fournissent un meilleur analogue pour la composition de la Lune que ne le sont les roches volcaniques lunaires précédemment analysées, il est donc raisonnable de penser que la Lune est composée presque entièrement de matériel du manteau terrestre. L'hypothèse de la collision géante en ressort confortée.

Depuis lors, Lune et Terre ont destins liés. La distance relativement faible qui les sépare met la Lune à l'abri d'une fugue éventuelle et explique l'intensité des relations de marées qui existent entre les deux astres. L'attraction de la Terre provoque *sur la Lune des marées crustales* qui ont ralenti son mouvement de rotation jusqu'à le faire coïncider avec celui de sa révolution (27 j 8 h). Réciproquement l'attraction de la Lune détermine *sur la Terre des marées liquides et crustales*, ces dernières de beaucoup plus faible amplitude, freinent le mouvement de rotation de la Terre de 0,0016 seconde par an, ce qui signifie que le nombre de jours dans l'année diminue d'une unité tous les 50 millions d'années. Théoriquement ce ralentissement ne cessera que lorsque la durée du jour égalera celle du mois lunaire. Mais, en même temps, la perte d'énergie fait que la distance qui sépare les deux astres



Voir fig. 3.7



Voir Encart 3.16

augmente de 3 à 5 cm par an (au contraire Phobos, qui tourne plus vite autour de Mars que la planète sur elle-même, s'en rapproche et devrait s'y écraser dans 30 millions d'années).



Voir fig. 22.8

Le climat terrestre étant sous contrôle des paramètres orbitaux de la Terre (théorie de Milankovitch), la Lune semble jouer un rôle dans la régulation de celui-ci. En effet, le mouvement orbital des planètes internes est relativement chaotique du fait de l'influence de Jupiter qui en perturbe l'excentricité et l'obliquité. Selon Laskar (1989), les variations de l'obliquité, cause d'instabilité climatique, seraient beaucoup plus fortes si la Lune ne contrebalançait pas l'influence de Jupiter.

Encart 3.15 – La surface lunaire s'est-elle déplacée par rapport à son axe de rotation ?

Depuis une vingtaine d'années, on connaît l'existence de deux régions lunaires présentant des indices de glaces. L'originalité est que, bien qu'elles soient antipodales l'une de l'autre, elles ne se trouvent pas aux pôles actuels (régions les plus froides). Pour expliquer cette anomalie, des chercheurs ont postulé en 2016, que les assises externes de la Lune avaient pu se décaler par rapport à son axe de près de 6 degrés au cours du premier milliard d'années, déplaçant ainsi, vers 3,5 Ga, ces zones glacées loin des pôles. Ce déplacement des assises superficielles lunaires serait dû à un changement dans la distribution des masses suite à l'activité volcanique et radioactive induisant des anomalies thermiques (donc de densité) dans certaines régions (bassin volcanique de l'Océan des Tempêtes). Si cette hypothèse se confirme, cela impliquerait qu'il y ait eu de l'eau présente précocement sur la Lune vers 4,5 Ga alors que l'on pensait que l'eau y était apparue plus récemment suite aux impacts d'astéroïdes.

On doit noter qu'un processus identique de déplacement des pôles par rapport aux assises superficielles a aussi été envisagé pour la Terre, notamment dans le cadre de la théorie « Terre boule de neige » (Snow Ball Earth, voir encart 6.20 et paragraphe 24.3.2).

3.4.6 Mars



Voir fig. 28.23

Nos connaissances sur la planète Mars se sont considérablement accrues grâce aux données transmises par les trois orbiteurs américains (*Mars Global Surveyor*, mis en orbite en 1997, et *Mars Odyssey*, en 2001) et européen (*Mars Express*, 2003). Dès 1997, la sonde *Pathfinder* et le robot *Sejourner (Rocky)* avaient transmis quelque 16 000 photographies et de nombreuses informations sur l'atmosphère et la croûte de cette planète. Les deux astromobiles de la NASA *Spirit* et *Opportunity* ont été déposées en juin et juillet 2003 sur deux régions opposées de la planète. *Spirit* a fini d'émettre en 2010, et *Opportunity* en 2019. Lancé en 2011, le véhicule *Curiosity*, est capable d'analyser les roches à distance grâce à un spectromètre à rayon laser (*chem lab*) et de forer le sol. Notons aussi le rôle prépondérant du satellite MOLA et de l'orbiteur *Mars Express* qui a mis en évidence une activité volcanique plus longue que l'on ne pensait (fig. 3.13) et la présence de glaciers récents.

Du fait d'une fenêtre de tir favorable, il y a eu en 2020 un fort regain d'activité dans l'exploration martienne et pas moins de 4 programmes sont en cours de développement :

- La mission américaine « **Mars 2020** » est la première de 3 missions dont l'objectif est de ramener des échantillons martiens sur Terre. Elle consiste à déployer l'astromobile (rover) « *Perseverance* » qui doit prélever des carottes de roches qui seront déposées sur des emplacements repérés en attendant d'être ramenés sur Terre par une mission conjointe de la NASA et de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). La mission « Mars 2020 » a décollé le 30 juillet 2020 et l'astromobile s'est posé le 18 février 2021 dans le cratère d'impact « *Jezero* » qui, ayant été le siège d'un ancien lac (présence de deltas), pourrait constituer un site favorable à la conservation de traces de vie. Le retour sur Terre des échantillons est prévu pour 2031.

- L'agence chinoise CNSA a lancé, le 23 juillet 2020, depuis le centre de Wenchang, la sonde *Tianwen-1* (*question au ciel*), l'une des plus lourdes (près de 5 tonnes), constituée d'un orbiteur, d'un atterrisseur et d'un astromobile. Les objectifs portent sur la géologie et la structure interne de la planète, la présence actuelle et/ou passée d'eau et la caractérisation de l'atmosphère. La sonde a été placée en orbite autour de Mars le 10 février 2021. Après une phase de reconnaissance du site d'atterrissage, l'atterrisseur se détache de l'orbiteur le 15 Mai 2021 pour déposer l'astromobile (240 kg) à la surface de la planète où il doit circuler pendant au moins 3 mois. L'orbiteur servira de relais de télécommunications pendant la mission de l'astromobile puis se placera, durant 2 ans, sur une orbite plus propice aux observations.
- Le programme *ExoMars* regroupe deux missions, développées par l'ESA et l'agence russe Roscosmos, qui ont pour objectif l'étude de l'atmosphère martienne (voir § 3.4.6.c) ainsi que la recherche d'indices d'une vie passée ou présente. Un orbiteur TGO (Trace Gaz Orbiteur) et son atterrisseur (*Schiaparelli*) ont été lancés en mars 2016. Le lancement d'un astromobile (*Rosalind Franklin*¹) a été reporté et est programmé pour 2022.
- La mission *EMM* (*Emirates Mars Mission*) a été lancée par une fusée Japonaise, le 19 juillet 2020, depuis le centre spatial de Tanegashima. La sonde *Al Amal* (espoir en arabe), développée par les Émirats Arabes Unis, a été placée en orbite martienne le 9 février 2021, pour étudier l'atmosphère et le climat de la planète.

a) L'atmosphère martienne

Les analyses directes des sondes *Viking* (1976) sont toujours d'actualité, l'atmosphère martienne contient 95,32 % de CO₂, 2,7 % d'azote et 1,6 % d'argon, des traces d'oxygène (0,13 %), de CO (0,07 %), d'hydrogène et de vapeur d'eau (0,03 %). L'ozone n'est présent qu'en infime quantité (0,3 ppm), ce qui correspond à 1/60^{ème} de l'épaisseur de la couche d'ozone terrestre. De ce fait, la planète est très mal protégée contre le rayonnement UV et la chimie de l'atmosphère martienne est principalement contrôlée par la photolyse du CO₂ (en CO et O) et de l'H₂O (en OH et O). Les radicaux hydroxyles (OH) produits catalysant la régénération du CO₂ à partir de CO et O, la composition de l'atmosphère martienne est stable à long terme. À court terme (échelle de la saison), on observe des variations spatio-temporelles importantes. Ainsi, la vapeur d'eau diminue fortement en hiver autour de la calotte polaire (cf. infra) du fait de sa condensation en glace, elle s'évapore par contre de la calotte résiduelle en été. La teneur en H₂O de l'atmosphère peut alors être 10 fois plus forte. De plus la vapeur d'eau est plus abondante dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud. Il en est de même pour le CO₂ qui est piégé de façon conséquente en hiver dans les calottes polaires ; compte tenu de la teneur de ce gaz dans l'atmosphère, il en résulte des variations de l'ordre de 25 % de la pression atmosphérique martienne au cours de l'année. Les fluctuations des calottes polaires, en relation avec les fluctuations de l'obliquité, sont beaucoup plus importantes que sur Terre car il n'existe pas pour Mars l'action régulatrice qu'exerce la Lune vis-à-vis de la Terre. Ces calottes sont formées d'une alternance de glace blanche (glace de CO₂) et de glace sombre (H₂O plus poussières).

La pression atmosphérique est très basse (7,3 millibars soit 1/160^e de la pression terrestre) et ceci explique l'absence actuelle d'eau liquide sur Mars. En effet compte tenu de la température (– 30 °C environ), l'eau liquide ne peut exister que si la pression partielle en H₂O est supérieure à 6,1 millibars, or les pressions partielles observées ne dépassent jamais 0,66 millibar. La position du point triple sur le diagramme de phase (fig. 3.12) explique donc que l'eau ne puisse exister actuellement sur Mars que sous forme de glace ou, en cas de réchauffement, de vapeur.

 Voir fig. 22.7 et 22.8

1. En l'honneur de la physico-chimiste qui, à l'origine de la compréhension de la structure de l'ADN, fut « oubliée » par le prix Nobel.

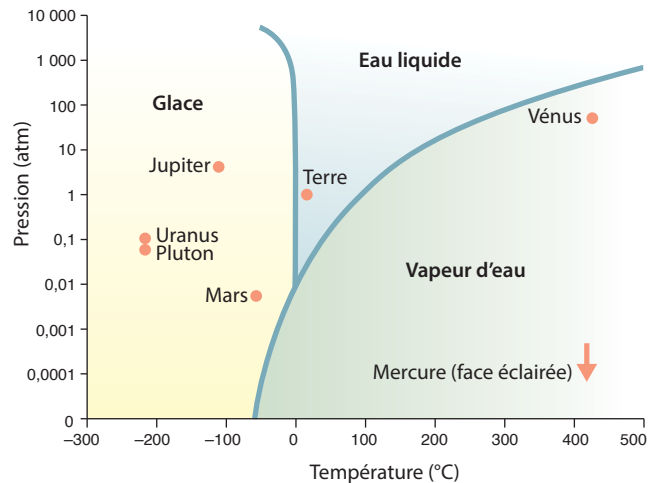


Figure 3.12 Diagramme de phase de l'eau en fonction de la température et de la pression et position des principales planètes du Système solaire.

On voit que sur Mars, dans les conditions actuelles, l'eau ne peut être que sous forme de glace ou de vapeur (lors d'un réchauffement climatique ou volcanique).

b) La géologie martienne

La géologie de Mars est principalement marquée par une importante dissymétrie topographique entre l'hémisphère Sud dont la surface moyenne se situe plusieurs kilomètres au-dessus du niveau de référence (sur Mars le niveau de référence ne peut pas être le niveau moyen de la mer, on prend l'altitude correspondant à une pression atmosphérique de 6,1 mbars) et l'hémisphère Nord dont le sol se développe quelques kilomètres en dessous de ce niveau (*fig. 3.13*). La frontière qui sépare ces deux unités, soulignée par un escarpement important ou par une série de cuestas, correspond à un grand cercle incliné de 35° par rapport à l'équateur martien.

Ces deux ensembles présentent des morphologies et des caractères très différents. Les plateaux de l'hémisphère Sud sont très accidentés et très cratérisés, les terrains sont donc très anciens, antérieurs à 3,5 milliards d'années (la chronologie des terrains martiens est difficile à établir, on extrapole les courbes de cratérisation obtenues pour la Lune). La croûte de cette région est épaisse (80 km environ). Au contraire, les plaines de l'hémisphère Nord (1/3 de la surface de Mars) sont peu cratérisées, les terrains y sont donc plus jeunes (postérieurs à 1,5 Ga ?). L'épaisseur de la croûte y est aussi plus fine (30 km). L'origine de cette dichotomie reste énigmatique : conséquence d'un processus interne (convection mantellique ?) ou impact d'un méga-astéroïde (peu vraisemblable car nous n'avons aucune trace des matériaux expulsés ni sur Mars ni dans l'espace). Cette présentation dichotomique est cependant très simplificatrice, des monts importants, liés au volcanisme (province d'Elysium et une partie du dôme de Tharsis, *fig. 3.13*), existent dans l'hémisphère Nord et des zones basses, liées à la cratérisation (bassin d'impact d'Hellas et d'Argyre, Valles Marineris), se trouvent dans l'hémisphère Sud.

La structure interne de Mars est assez mal connue, le moment d'inertie global (0,365) implique la présence d'un noyau métallique (Fe et FeS) d'un rayon de 1 300 à 2 000 km, d'un manteau (olivine et oxyde de fer) d'une épaisseur de l'ordre de 1 800 km et d'une croûte de 40 à 50 km en moyenne. Le manteau martien présenterait deux transitions de phase : la première entre 1 000 et 1 150 km (olivine-> β spinelle), la seconde entre 1 350 et 1 650 km (transformation en g-spinelle).

En 1998, le magnétomètre de la sonde Mars Global Surveyor a mis en évidence un champ magnétique faible (1/800^e du champ terrestre) qui semble être un champ fossile. La dynamo planétaire, liée au mouvement du noyau liquide autour du noyau solide, paraît être éteinte ce qui implique que le noyau soit entièrement solide.

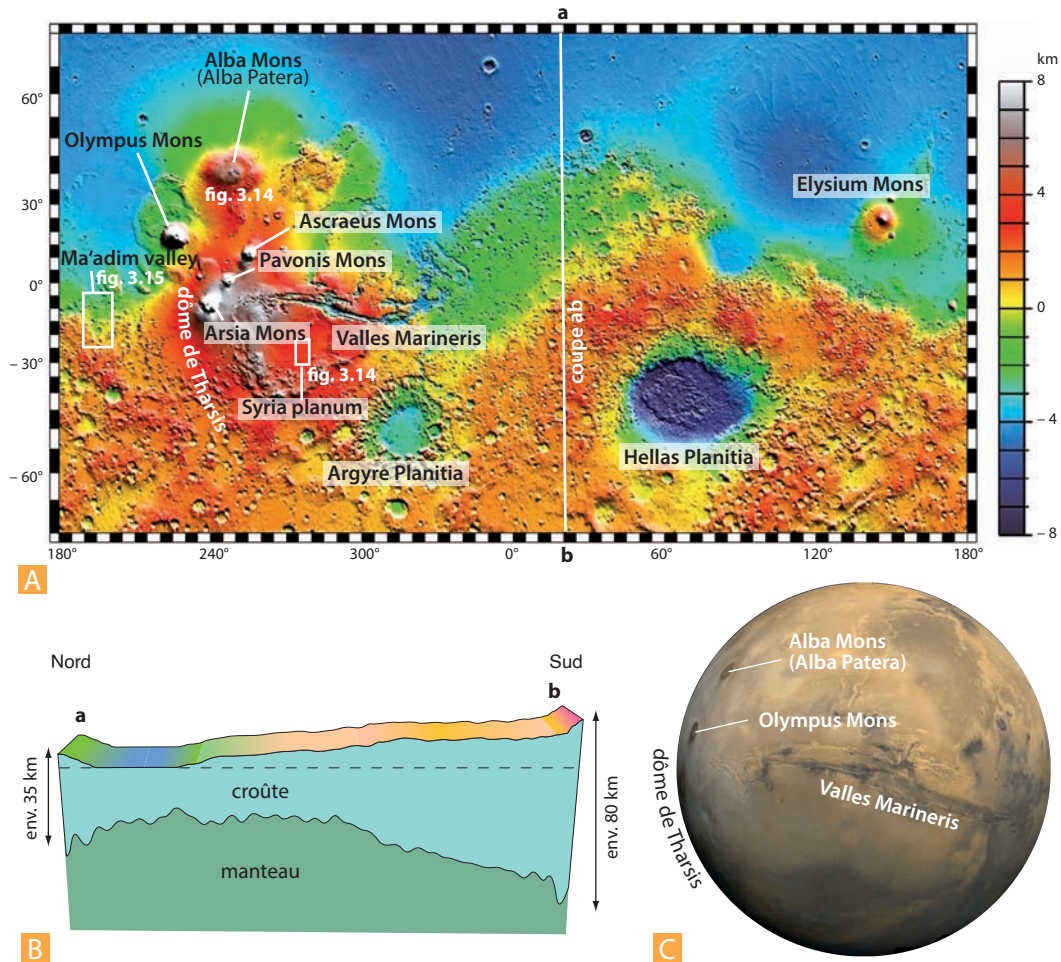


Figure 3.13 La surface et la croûte de Mars.

A. Carte topographique dressée à partir des données de l'altimètre *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) de Mars Global Surveyor (NASA). Le dôme de Tharsis est un soulèvement volcanique de 5 500 km de diamètre, culminant de 4 à 8 km au-dessus du niveau de référence. Il porte les quatre plus gros appareils volcaniques de Mars : Olympus Mons, et les trois volcans formant Tharsis Montes (Arsia Mons, Pavonis Mons, et Ascreaeus Mons, voir *fig. 3.14*). Il comprend aussi de très hauts plateaux volcaniques comme Syria Planum. Il est entaillé par le fossé d'effondrement de Valles Marineris.

B. Coupe schématique de la croûte de Mars montrant la « dichotomie martienne » (différence d'épaisseur de la croûte selon les hémisphères). Cette dissymétrie aurait pu résulter d'une rotation différentielle de la lithosphère par rapport à l'asthénosphère dans les temps anciens de l'histoire de Mars. Pour certains auteurs, la partie à croûte fine aurait pu recevoir l'eau d'un vaste océan (voir *fig. 3.16*).

C. Vue équatoriale de Mars. Montage des images de la sonde Viking (*document NASA*).

Mars a connu un volcanisme intense, qui semble actuellement sinon éteint du moins très réduit. Au niveau de la nature des laves on retrouve une dissymétrie semblable à celle évoquée plus haut pour la topographie. Les hauts plateaux cratérisés de l'hémisphère Sud semblent surtout constitués de basaltes tandis que les basses plaines de l'hémisphère Nord semblent présenter une proportion très notable d'andésites dont l'origine reste énigmatique (cristallisation fractionnée?) compte tenu de l'absence probable de tectonique des plaques (donc de subduction) sur cette planète.

Les volcans sont concentrés dans deux régions : le dôme de Tharsis et Elysium Planitia (*fig. 3.13*). Tharsis est un vaste plateau de 5 500 km de diamètre et d'une hauteur de 6 à 10 km, dont l'activité pourrait avoir commencé il y a 3 Ga et s'être achevée vers 100 Ma. Les principaux édifices sont d'énormes volcans boucliers émettant des coulées de laves fluides de types basaltes. Le plus célèbre

est l'Olympus Mons (26 km de hauteur, 600 km de diamètre et 500 000 km² de superficie). Par comparaison, le plus grand volcan terrestre, le Mauna Loa (Hawaï), ne mesure que 9 km de haut (à partir du plancher océanique) pour 100 km de diamètre (fig. 3.14).

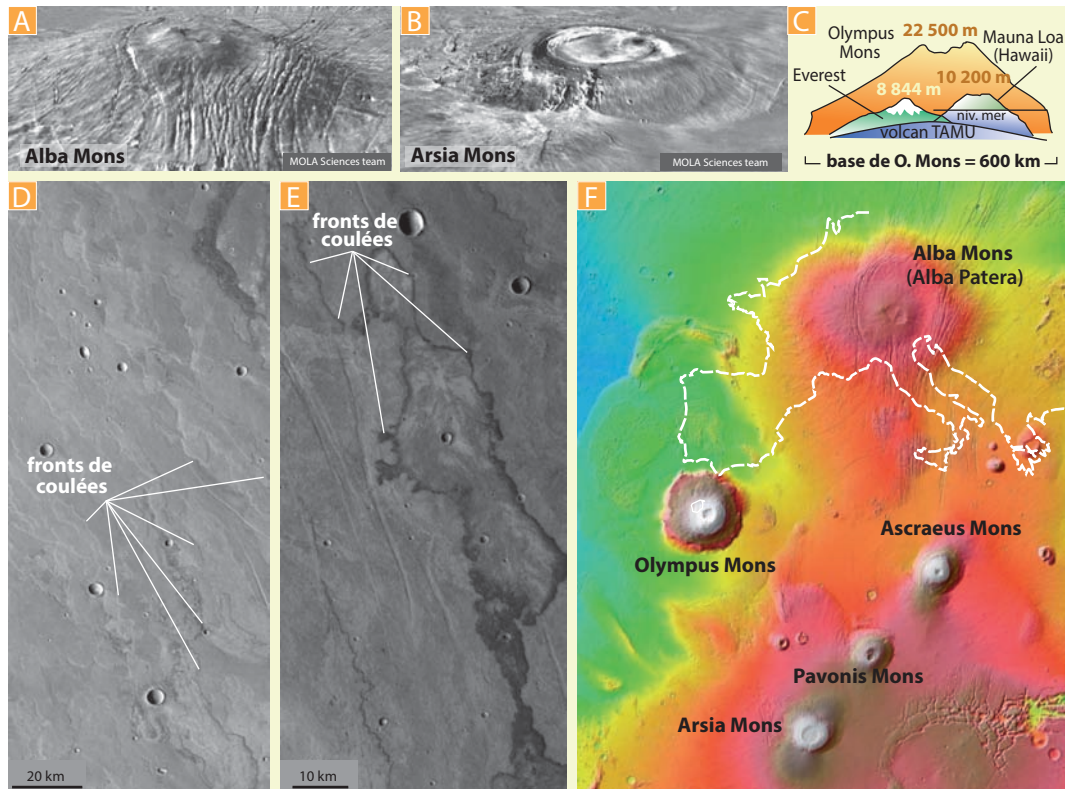


Figure 3.14 Le volcanisme sur Mars

A. Le volcan bouclier Alba Mons, plus connu sous le nom d'Alba Patera, est le plus vaste volcan de l'ensemble du Système solaire. Situé au nord-ouest du renflement de Tharsis, sa taille est comparable à celle des États-Unis. Il culmine à 6,6 km (soit un tiers de la hauteur d'Olympus Mons). La pente du flanc nord, le plus raide, est seulement de 0.5°. Il est ici vu en 3D (avec une exagération du relief de 10x) grâce aux données altimétriques relevées par l'instrument MOLA de MGS et aux images noir et blanc des orbiteurs Vikings. Il est recoupé par un réseau de grandes failles qui prirent naissance lorsque le dôme se souleva de 10 000 m sur 6 000 km. Les failles forment un réseau parallèle bordant des dépressions à fond plat d'une centaine de mètres de profondeur. Elles sont défléchies autour du sommet du volcan.

B. Le volcan bouclier Arsia Mons, vu par un des orbiteurs Viking. Situé sur le dôme de Tharsis, il possède une caldera considérablement plus large que celle des volcans Ascaeus Mons et Pavonis Mons, situés plus au nord. Une telle caldera se forme lorsque le cône volcanique s'effondre au-dessus d'une chambre magmatique, souvent par effet de sous-tirage (extrusion des coulées latérales). Arsia Mons a un diamètre de 435 kilomètres, une altitude de presque 20 kilomètres : la caldera sommitale est large de 116 kilomètres.

C. Comparaison des dimensions de grands reliefs des planètes telluriques du système solaire. L'Everest est un relief d'origine tectonique (épaississement crustal par convergence lithosphérique), alors que l'Olympus Mons et les édifices de Big Island (Hawaï) ou le volcan TAMU (ride de Sharsky, Pacifique) sont des constructions d'origine magmatique.

D. et E. Détails du sol du plateau volcanique de la Plaine de Syria (Syria Planum) montrant notamment des coulées volcaniques sombres à lobes contournés.

F. Comparaison de la taille des appareils volcaniques du dôme de Tharsis par rapport aux dimensions de l'Europe. Alba Patera y apparaît aussi grand que la France tandis que Olympus Mons en occuperait les 4/5. Carte d'après *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA, NASA).

A, B, D et E d'après les documents de NASA/JPL/MSSS/MOLA Science Team et du Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes.

Il s'agirait d'un volcanisme de point chaud et le gigantisme des édifices est en général mis en relation avec l'absence de tectonique des plaques, le panache « perforant » ainsi la lithosphère toujours au même endroit. Certaines coulées de l'Olympus Mons pourraient être très récentes, certains ont postulé un âge de l'ordre de 30 Ma.

La région d'Elysium constitue la seconde province volcanique, de dimension plus restreinte que Tharsis (1 700 km de large, 240 km de long), son point culminant est le volcan Elysium Mons (10 km de haut, 170 km de diamètre) dont la structure ne serait pas uniquement basaltique. Certains auteurs pensent qu'il pourrait y avoir une liaison entre ces provinces volcaniques et des impacts météoritiques. Les bombements lithosphériques de Tharsis et de Elysium se situant respectivement aux antipodes des bassins d'impacts d'Hellas et d'Argyre, impacts qui auraient pu initier une convection mantellique et deux panaches (*fig. 3.13*).

c) De l'eau et des sédiments sur Mars

Comme pour les autres planètes telluriques, on admet que l'atmosphère et l'hydrosphère martiennes se sont formées par dégazage après la phase d'accrétion de la planète. La teneur en eau et en volatiles des poussières (0,01 %) et des minéraux hydratés des laves est suffisante pour donner naissance à une hydrosphère conséquente même si les apports extérieurs par les comètes et les astéroïdes (volatilisation lors des impacts) ne doivent pas être négligés. Entre 4,5 et 4 Ga, l'atmosphère de Mars devait être assez proche de celle de la Terre. Des pressions comprises entre 5 et 10 bars sont généralement admises. Mars n'aurait pas pu conserver cette atmosphère du fait de sa taille trop petite, de son éloignement du Soleil et de la perte de son champ magnétique. La petite taille de la Planète a eu plusieurs effets :

- la gravité n'a pas été suffisamment importante pour éviter l'échappement des gaz vers les confins froids du Système solaire ;
- la chaleur interne a été trop faible pour permettre un dégazage complet (environ 20 % par rapport à la Terre). La planète Mars a intégré une quantité trop faible d'éléments radioactifs (générateurs de chaleur lors de leur décomposition) et son rapport surface/volume défavorable conduit à une perte importante de chaleur

L'éloignement du Soleil a renforcé le refroidissement qui a rendu impossible ou stoppé très précocement les processus de tectonique des plaques en limitant la convection mantellique et en stoppant la dynamo nucléaire par solidification du noyau. Il en est résulté une disparition précoce du champ magnétique conduisant à une absence de protection vis-à-vis des UV qui provoquent alors la dissociation des composés gazeux (CO_2 , H_2O) et une perte de l'oxygène dont l'énergie d'excitation est supérieure à celle de libération.

On admet donc que Mars aurait perdu son atmosphère (et donc son potentiel à être un lieu de développement des processus vitaux) entre - 3 Ga et -2,5 Ga du fait d'une gravité trop faible et de l'absence d'une tectonique des plaques (sur Terre l'eau est réinjectée dans le manteau au niveau des zones de subduction tandis que sur Mars elle est vaporisée).

L'eau liquide a toutefois existé sur Mars (avant 3,5 Ga) car les photos prises par les différentes sondes montrent au niveau des terrains anciens des dispositifs de réseaux de chenaux (*fig. 3.15*) et des figures sédimentaires qui rappellent les systèmes fluviaux terrestres (on observe notamment des réseaux alignés suivant les pentes du dôme de *Tharsis*). Des différences semblent toutefois exister. D'une part les systèmes semblent commencer d'emblée avec des rivières de taille importante (on n'observe pas de réseaux de petits ruisseaux) et d'autre part il existe souvent des structures chaotiques évoquant des débâcles. Il semble donc que le ruissellement ait été relativement faible, les rivières n'étant pas alors alimentées principalement par les pluies mais par la fonte des nappes phréatiques gelées (en association avec des éruptions volcaniques, pour certains la présence d'eau liquide sur Mars pourrait correspondre au paroxysme du volcanisme martien).

Un autre argument a été apporté en 2021 par le **Trace Gas Orbiter** (TGO), de la mission européenne-russe ExoMars, en orbite autour de Mars depuis 2016 (cf. *supra*) qui a mis en évidence, entre 2018 et 2021, la présence de chlorure d'hydrogène (HCl) dans l'atmosphère (aucun autre gaz n'avait été détecté depuis la découverte controversée de trace de CH₄ en 2004, voir chap. 3.4.6.d). La première hypothèse a été de considérer ce gaz comme une émission volcanique mais l'absence d'autres gaz caractéristiques de telles émissions, la détection simultanée d'HCl dans les deux hémisphères et la liaison temporelle des détections avec des phases de tempêtes de poussières a conduit à une autre interprétation qui implique la **présence passée d'eau salée sur Mars**. Du NaCl, résidu d'anciennes mers ou de lacs aujourd'hui évaporés, se serait incrusté dans les grains de poussière (phénomène connu sur la Terre). Le NaCl des poussières réagirait ensuite avec la vapeur d'eau atmosphérique en libérant du chlore, qui lui-même réagit avec des composés hydrogénés pour former HCl.

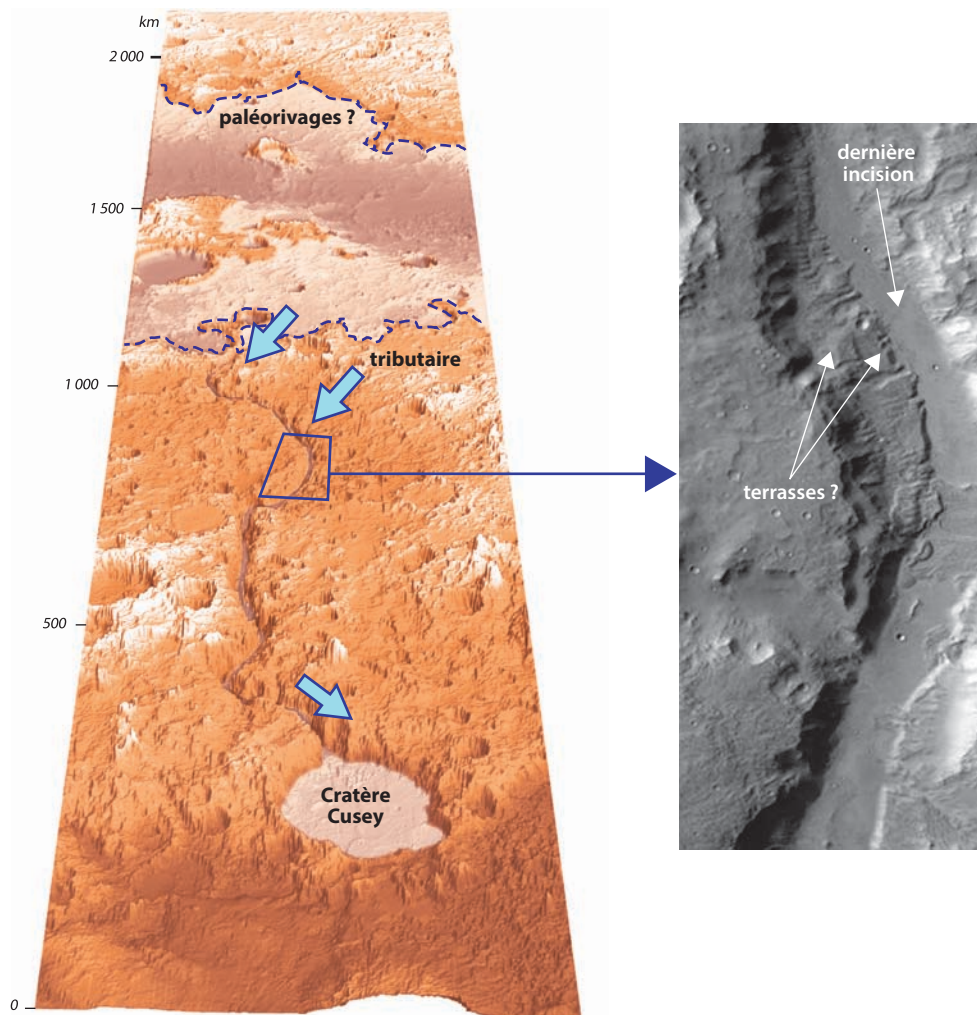


Figure 3.15 Le chenal de *Ma'adim Vallis* se jetant dans le cratère d'impact *Cusey* (14,7° S et 1 84,6° W).

Les structures plates à l'amont de *Ma'adim* sont interprétées comme une série de lacs qui seraient l'origine vraisemblable de l'eau qui a formé cette vallée. La trace des rivages de ces paléo-lacs semble être repérable à une altitude constante. Le *Cusey* cratère serait en quelque sorte le déversoir de ces lacs d'altitude (d'après document NASA/JPL et National Air and Space). Les flèches bleues indiquent la position de paléo-cours d'eau tributaires.

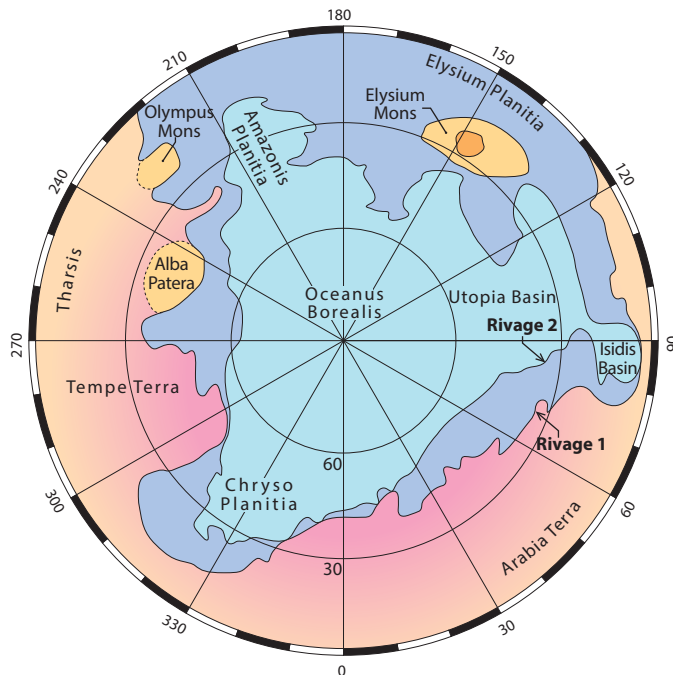
Un chenal important (Ma'adim Vallis, 825 km de long, profondeur de 2,1 km et largeur de 3 à 5 km) se jette dans le cratère d'impact Gusev (14,7 S et 184,6 W, ainsi nommé en l'honneur de Matvei Gusev astronome russe, 1826-1866) qui paraît avoir abrité un lac (fig. 3.15). Le robot Spirit y a été déposé le 3 janvier 2004 avec l'espoir d'y observer des roches sédimentaires mais les analyses ont été décevantes, le robot n'a pu mettre en évidence que des basaltes assez frais. S'il y a eu des roches sédimentaires elles ont été recouvertes par des laves et des poussières. Le second robot, Opportunity, s'est posé dans une plaine située à 2 degrés au sud de l'équateur (Meridiani Planum). Il a eu une durée d'activité exceptionnellement longue (2004-2019) et a pu parcourir 45 km. Les roches sous la surface ont pu être analysées, les spectromètres ont mis en évidence de l'hématite, des sulfates (jarosite : sulfate hydraté de fer ; kiesérite : sulfate hydraté de magnésium) et les caméras ont révélé des stratifications, des structures et des traces de dissolution rappelant celles des roches évaporitiques sur Terre.

Encart 3.16 – Un océan fossile ?

L'existence de lacs et/ou de mers intérieures sur Mars est une hypothèse qui prend de la consistance. Certains ont voulu aller plus loin en postulant, que du fait du dénivelé existant entre l'hémisphère Sud et l'hémisphère Nord (fig. 3.13), les eaux martiennes avaient dû s'accumuler dans les plaines de ce dernier pour former avec le temps un véritable océan, l'*Oceanus borealis* qui recouvrirait 1/6 de la planète (fig. 3.16). Les arguments sont principalement morphologiques : platitude du relief de la zone d'*Amazonia Planitia* qui serait due à la sédimentation dans une « plaine abyssale » et mise en évidence de structures topographiques qui pourraient correspondre à une ligne de rivage à laquelle semble associée une série de terrasses parallèles de régression. De plus le volume de l'hypothétique océan, qui devait atteindre une profondeur maximale de l'ordre de - 5 000 m dans le bassin polaire, correspond assez bien aux estimations des ressources en eau de la planète. Toutefois, le risque de confondre des topographies martiennes « normales » avec des structures de rivage n'est pas négligeable et la preuve de l'existence d'un ancien océan n'est pas totalement établie.

Figure 3.16 L'hémisphère Nord de Mars en vue polaire.

On a mis en évidence, les deux structures topographiques en escarpement (rivages 1 et 2) qui, séparant les plaines basses peu cratérisées (« jeunes », en bleu clair) et les hauts plateaux anciens, plus accidentés (en rose), sont des candidats comme lignes de rivages d'un hypothétique *Oceanus borealis* résultant de l'accumulation des eaux s'écoulant de l'hémisphère Sud. On remarquera à gauche et droite les provinces volcaniques du dôme de Tharsis avec le volcan Olympus Mons et de Elysium Planitia avec Elysium Mons.



d) Une vie sur Mars ?

Si les dépôts de sulfates semblent bien impliquer la présence d'eau liquide dans le passé martien, un problème majeur, vis-à-vis de la recherche d'une trace de processus vitaux, reste l'absence des carbonates. Les spectromètres des différentes sondes n'ont jamais mis en évidence d'accumulation de

carbonates alors que la présence de CO_2 , d' H_2O aurait dû conduire à leur formation. Quelques traces de MgCO_3 ont été décelées dans les poussières martiennes (2 à 5 %) et dans la météorite martienne ALH84001 (voir encart 3.8) où ont été décrites des particules de 25 à 50 nm qui seraient, pour certains auteurs, des nanobactéries. On admet actuellement que : soit les pluies étaient trop acides et dissolvaient les carbonates au fur et à mesure de leur formation soit que l'eau liquide n'a pas perduré suffisamment longtemps pour permettre l'accumulation de ceux-ci (fig. 3.17).

La sonde *Mars Express* mise en orbite en septembre 2003 par l'Agence Spatiale Européenne a mis en évidence, outre des sulfates au niveau des dépôts stratifiés du canyon Valles Marin, des traces de méthane dans l'atmosphère martienne (10,5 ppb contre 770 ppb dans l'atmosphère terrestre) or ce gaz est très instable dans les atmosphères planétaires et est totalement éliminé par oxydation et photodissociation si aucun processus n'en forme de façon continue (durée de vie 340 années). Cela implique donc la présence actuelle d'une source de méthane qui pourrait être soit volcanique ou hydrothermale (hypothèse la plus prudente mais qui implique la présence de sources de chaleur) soit biologique (bactéries méthanogènes). Comme la répartition du méthane ne semble pas homogène (plus grande concentration au niveau de la ceinture équatoriale), certaines hypothèses exobiologiques postulent que durant l'été les températures seraient à cet endroit suffisamment élevées pour permettre l'apparition sporadique d'eau liquide permettant le développement d'organismes méthanogènes. Enfin, il est également possible d'envisager un dégazage périodique d'un réservoir ancien d'**hydrates de méthane** (clathrates, cf. chapitre 33) piégés dans les calottes martiennes) dont l'origine initiale pourrait avoir été aussi bien géologique que biologique. La connaissance du rapport isotopique du carbone de ce méthane pourrait lever cette ambiguïté (les processus biologiques fractionnant en faveur du ^{12}C) mais nous ne disposons pour le moment d'aucune donnée de ce type.

Voir
chap. 36.3.2

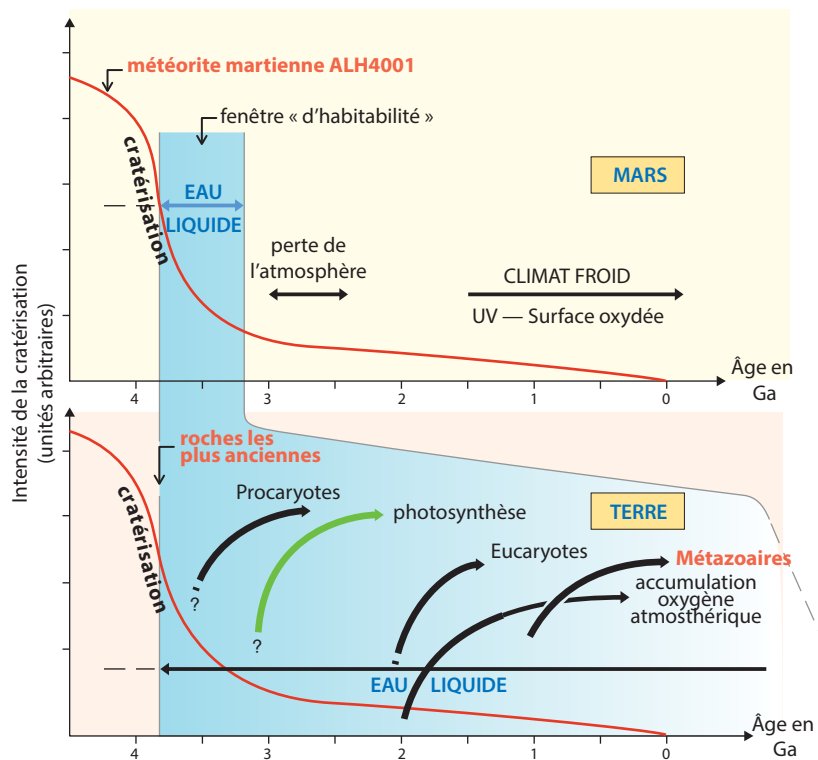


Figure 3.17 Résumé simplifié de l'histoire comparée de Mars et de la Terre.

Les conditions initiales ont été assez voisines. Mars a donc connu un environnement potentiellement favorable au développement de la vie (habitabilité), mais ces conditions ont disparu précocement du fait de l'éloignement du Soleil, de la petite taille de la planète et de l'arrêt de la dynamo magnétique.

Une autre caractéristique de la surface de Mars est l'existence de structures morphologiques éoliennes semblables aux dunes terrestres (barkhanes, dunes longitudinales, voir *fig. 28.23*). La majorité des auteurs pensent que ce système dunaire est fossile (les conditions de températures et de pression à la surface ne permettant plus la saltation des particules sédimentaires) et que la fraîcheur des formes est due au gel des nappes phréatiques qui fige les structures.

L'histoire de Mars (*fig. 3.17*) est riche d'enseignements sur la fragilité **des conditions « d'habitabilité » d'une planète**. Cette propriété correspond à des conditions physico-chimiques strictes que Mars a connues dans son passé lointain, mais qu'elle a perdues très tôt et très rapidement, sans doute en moins de 500 Ma alors qu'elles ont perduré sur Terre du fait de la taille de la planète, de sa proximité du Soleil et de la persistance des processus de tectonique des plaques et du champ magnétique.

3.4.7 Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune

Il a fallu attendre le survol des sondes spatiales *Pioneer* (1975) et *Voyager* (1979) pour avoir des données physico-chimiques sur ces planètes lointaines, bien différentes des planètes telluriques.

Les clichés et analyses transmis par les sondes *Voyager* révèlent que la température de ces planètes, très froide à la périphérie de leur atmosphère (-150 °C pour Jupiter), est en réalité très forte à leur surface qui est maintenue en ébullition ($1\ 600\text{ °C}$). Elles sont le siège d'un volcanisme intense et permanent mais leur température interne, qui atteindrait $20\ 000\text{ °C}$, est encore bien trop faible cependant pour provoquer les réactions thermonucléaires. Il semble ainsi que le noyau de ces planètes supposées gazeuses a en fait une composition voisine de celle des planètes telluriques qui, comme nous l'avons vu, auraient pu passer par ce stade.

Le nombre de leurs satellites est plus élevé qu'on ne le pensait. Outre les 9 satellites de Saturne déjà répertoriés, les sondes en ont détecté 7 puis 12 nouveaux de taille inférieure à 20 km. Jupiter en possède 39. Les quatre plus importants satellites de Jupiter avaient déjà été observés par Galilée en 1610 (satellites galiléens, par ordre d'éloignement Io, Europe, Ganymède et Callisto). 17 satellites tournent autour d'Uranus et 8 autour de Neptune.

Deux de ces satellites retiendront notre attention, Io pour Jupiter, et Titan pour Saturne.

Encart 3.17 – Les anneaux des planètes géantes

On sait maintenant grâce aux résultats de *Voyager 2* que toutes les planètes géantes (et non pas seulement Saturne) possèdent des anneaux. Ceci est lié au fait qu'à proximité d'un objet très massif on ne peut pas condenser de corps de grosse taille en deçà d'une certaine limite. Dans le cas de la Terre, cette limite est située à 18 000 km. Si la Lune était ramenée en deçà, elle éclaterait en morceaux de 300 à 400 km de taille. Les anneaux sont formés de particules de glace ou de pierres (*fig. 3.18*). Des simulations numériques suggèrent que les anneaux planétaires pourraient être un processus majeur dans la formation de satellites autour des planètes géantes. Avec le temps, les anneaux s'étalent et lorsque leurs particules sont à une distance suffisante (dite limite de Roche²), elles s'agglomèrent en petits corps qui se détachent et donnent naissance à des satellites, de tailles variables, en orbite autour de la planète. Cette hypothèse expliquerait pourquoi les planètes telluriques n'ont pas ou peu de satellites (qui résultent alors principalement d'impacts, voir § 3.4.5e) tandis que les planètes géantes ont de nombreux satellites provenant de la partie externe des anneaux.

2. De l'astronome français Édouard Roche (1820-1883) qui a théorisé les effets de marées que provoque un corps céleste et qui peuvent disloquer le satellite qui est en orbite autour de lui.

a) Jupiter

En 2016, une dizaine de sondes spatiales avaient pu observer Jupiter et ses satellites au cours de transit vers des objectifs plus lointains mais seules les sondes *Galileo* (1995-2003) et *Juno* (depuis 2016) ont pu mener des missions prolongées en se plaçant en orbite autour de Jupiter. Le lancement d'une sonde européenne (*JUICE, Jupiter Icy Moon Explorer*) est prévu en 2022. Elle doit survoler à plusieurs reprises *Callisto, Europe et Ganymède*, trois des lunes glacées de Jupiter, avant de se placer en orbite en 2032-2033 autour de *Ganymède* pour une étude plus approfondie.

Il semble que **Jupiter** joue un rôle majeur dans le Système solaire.

- Cette planète serait responsable du petit nombre de planètes existant dans le Système solaire en ayant contraint les planétoïdes primitifs à s'agglutiner en corps de taille suffisamment grande (ce qui a permis la rétention d'une atmosphère donc l'apparition de la vie sur Terre). Sa surface est parcourue de vents violents (600 km/h), responsables d'une stratification et du développement de volutes spectaculaires (fig. 3.18).
- Elle provoque des désordres dans le mouvement orbital des planètes telluriques.
- Elle sert de bouclier aux planètes internes en captant la majorité des comètes. Ainsi le 19 juillet 1994, on a pu observer (télescope spatial Hubble) la collision de la comète Shoemaker-Levy avec Jupiter provoquant un panache haut de 2 000 km et une tache noire résiduelle de 25 000 km de diamètre contenant Mg, Sr, Fe.

L'atmosphère de Jupiter est formée d'hydrogène (82 %) et d'hélium (17 %) associés à CH₄ et CH₃D (0,05 %), NH₃ (0,01 %), de l'azote et des composés soufrés. Celles de Saturne, Uranus et Neptune semblent avoir une composition voisine.

Io, le plus proche des satellites jupitériens, est un corps de 1 800 km de rayon et de densité 3,4 dont la composition (noyau ferrique, manteau silicaté et soufré) évoquerait celle des planètes telluriques. Un bassin en forme de cœur (800 km x 1 000 km) évoque la *Mare Orientale* de la Lune ou la *Mare Caloris* de Mercure, et a sans doute la même origine (percussion par une météorite géante ou un astéroïde). De nombreux volcans ont été repérés, l'un de 50 km de diamètre. Du fait de la faiblesse de la gravité (178 gals), certaines projections jaillissant à 1 000 m/s peuvent s'élever jusqu'à 250 km. C'est ce dégazage volcanique qui explique la régénération permanente d'une atmosphère réduite. On ne peut exclure que certains produits éruptifs dépassant exceptionnellement 2,53 km/s (vitesse de libération) ne puissent s'évader dans l'espace tout en restant prisonniers de la gravitation de Jupiter dont ils nourrissent les anneaux.

Une mission américaine d'étude du volcanisme de Io (*Io Volcano Observer*) est en cours de validation. L'objectif est d'étudier l'impact de Io sur le système de Jupiter, en mesurant les flux de chaleur globaux, le champ magnétique induit, la température de la lave, et en déterminant la composition de son atmosphère, des panaches volcaniques et des laves. Le lancement serait prévu pour 2026-2028.

b) Saturne

Nos connaissances sur Saturne ont progressé avec les résultats de la mission Cassini-Huygens. La sonde *Cassini* a été mise en orbite autour de Saturne le 1^{er} juillet 2004 après un voyage de 3,5 milliards de km. La météorologie paraît plus complexe que ne laissaient supposer les observations des sondes *Voyager*, les zones orageuses sont multiples et non limitées aux zones équatoriales. Dans la magnétosphère, des particules chargées se déplacent le long des lignes de champs tant à l'extérieur des anneaux qu'à l'intérieur du disque annulaire. Saturne émet aussi de façon quasi-continue des jets de poussières nanométriques électriquement chargées. Enfin la composition des anneaux n'est pas homogène, leur teneur en eau (glace) augmente en allant vers leur périphérie (fig. 3.18).

Titan, satellite de Saturne, est aussi un astre tellurique, un peu plus volumineux que Io (rayon 2 460 km), remarquable par son atmosphère composée pour 99 % d'azote et d'argon (alors qu'on la croyait méthanique) et pour 1 % de CH₄, CO, C₂H₆, C₂H₂, CNH.

À cause de la température très basse de sa surface ($-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec des variations saisonnières et nycthémérales de l'ordre de 20 %) et étant donné la pression atmosphérique (2,7 bars), l'atmosphère gazeuse est en équilibre avec des océans ou des lacs d'azote baignant des continents de méthane (l'azote fond à $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ et bout à $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, le méthane respectivement à $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Le 26 octobre 2004, la sonde *Cassini* a survolé Titan, à 1 200 km d'altitude transmettant les premières photos basses résolutions. Le module d'atterrissage *Huygens* s'est séparé de la sonde pour plonger dans l'atmosphère de Titan le 14 janvier 2005. Les premiers résultats furent la mise en évidence de dunes longitudinales ressemblant à celles des déserts terrestres. En 2006 la sonde *Cassini* détecta des mers d'hydrocarbures à proximité du pôle nord de Titan. Pour P. Masson et A. Brahic « la situation de Titan est un peu analogue à celle qu'aurait connue la Terre au moment de sa formation si elle avait été placée soudainement dix fois plus loin du Soleil ». Mars ayant perdu ses conditions « d'habitabilité » très précocement (fig. 3.17), on doit constater qu'outre la Terre, des deux astres où les conditions atmosphériques pourraient autoriser la naissance de la vie, l'un est brûlant (Vénus) et l'autre glacé (Titan).

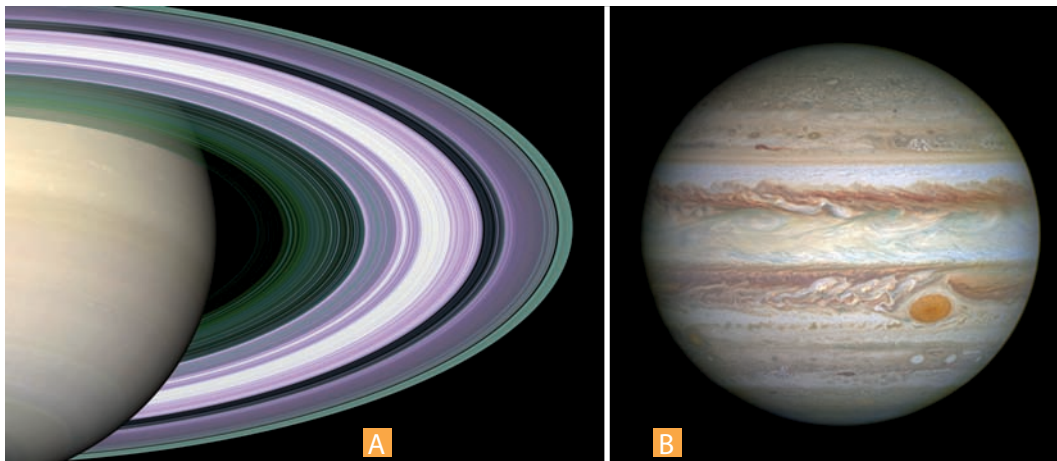


Figure 3.18 Les planètes gazeuses.

A. Les anneaux de Saturne. Avant le vol de la sonde *Voyager 1*, on ne connaissait que 5 ou 6 anneaux. Sur ce montage des données de la sonde *Cassini-Huygens* (2004), on peut en distinguer plus de 95, auxquels s'ajoutent ceux de la division de Cassini.

B. Jupiter vu par le télescope spatial Hubble en 2007 (fig. 1.3) (document NASA, ESA, the Hubble Heritage Team, AURA/STScI).

c) Uranus

La composition interne d'Uranus est mal connue (la sonde *Voyager 2* n'a effectué qu'un survol rapide) mais il paraît fort probable que sa structure soit différente de celle de Jupiter et Saturne. Elle semble composée d'un noyau solide de silicate et fer (7 500 km de diamètre) entouré d'un manteau de glace d'eau mélangée à de l'hélium, du méthane et de l'ammoniaque et d'une couche superficielle d'hydrogène et d'hélium liquide. Des vents violents ($100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) organisés en cellules semblent être caractéristiques de son atmosphère.

d) Neptune

Sa composition interne paraît proche de celle d'Uranus. La mission *Voyager 2* est la seule à avoir survolé Neptune. La mission, s'est terminée en août 1989 par la transmission des images de Neptune et de son satellite Triton.

Neptune possède un champ magnétique faible à très forte inclinaison (50°). L'atmosphère contient des hydrocarbures mais les quantités de H et He sont faibles, ce qui implique une accréation très lente

dans une région de la nébuleuse primitive où H et He ont été partiellement chassés au cours du temps. L'uniformité de la température (-213 °C) est imputée au brassage de l'atmosphère par des vents violents (2000 km.h^{-1}) liés à la rotation rapide de la planète (en environ 16,5 heures). Neptune présente une énergie interne, elle émet 2,8 fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. Un tel coefficient n'avait jamais été observé. La faible densité (1,6) de Neptune ne permet pas de mettre en cause des corps radioactifs comme responsables de cette chaleur interne qui pourrait résulter d'une accréation encore active. Triton présente des structures complexes qui témoignent d'un volcanisme et/ou d'une tectonique de la glace de méthane.

À retenir

- Le Soleil est une petite étoile, située à 150 millions de kilomètres de la Terre, dans un bras spiral de la galaxie, à 30 000 années-lumière du centre. Le cycle proton-proton est la source principale de l'énergie. En moyenne, au sommet de l'atmosphère terrestre, une surface de 1 m^2 reçoit un rayonnement de $1\,370\text{ watts}$ (*constante solaire*).
- Huit planètes sont actuellement connues (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) ; Pluton, découverte seulement en 1930 a perdu son statut de planète en 2008. L'exploration spatiale, a montré qu'il n'existe pas deux planètes de structure identique. La structure concentrique des planètes résulte d'une interaction entre les processus d'accréation et de différenciation. Entre les planètes telluriques (les 4 plus proches du soleil) et les planètes géantes se trouve le domaine des astéroïdes, corps de consistance pierreuse.
- Le Système solaire est un système ordonné de 8 planètes (Mercure, Venus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) et de très nombreux plutoïdes, satellites, astéroïdes et comètes gravitant autour du soleil et qui obéit aux lois de Kepler et de Bode. Entre Mars et Jupiter, il n'existe pas de planète mais une ceinture de petits objets célestes (les astéroïdes). De même Pluton a perdu son statut de planète, ce n'est plus, au même titre que Charon ou Xena, que l'un des nombreux plutoïdes (planètes naines) constituant la ceinture de Kuiper. Aux confins du Système solaire il existe un nuage de comètes, le nuage d'Oort.
- Le Système solaire a un âge de $4,54 \pm 0,02$ milliards d'années. Le Soleil et les planètes semblent s'être formés à partir d'un nuage de matière interstellaire subissant un effondrement gravitationnel lors du passage dans un bras de la Galaxie (Soleil et planètes géantes) et par collisions et aggradation de petits corps célestes (planètes telluriques).
- La formation du Système solaire est un processus rapide par rapport à l'histoire de l'Univers, qui dure au maximum 200 millions d'années.
- L'origine la plus classiquement admise pour la Lune est celle d'une collision gigantesque, vers 4,5 Ga, d'un énorme météorite avec la Terre en formation, arrachant des matériaux qui, ajoutés à une partie de ceux de la météorite et projetés en orbite, auraient constitué la Lune. La surface lunaire est recouverte par un régolite ou *régolite* qui recouvre 3 types de roches : les anorthosites et les norites KREEP (au niveau des *terras*) et les basaltes (au niveau des *mare*).
- Concernant l'hypothèse de traces de vie sur Mars, on admet que cette planète aurait perdu son atmosphère (et donc son potentiel à être un lieu de développement des processus vitaux) entre -3 Ga et $-2,5\text{ Ga}$ du fait d'une gravité trop faible et de l'absence d'une tectonique des plaques.
- L'eau liquide a toutefois existé sur Mars (avant 3,5 Ga) car on observe au niveau des terrains anciens des dispositifs de réseaux de chenaux qui rappellent les systèmes fluviaux terrestres. Une autre caractéristique de Mars est l'existence de structures morphologiques éoliennes semblables aux dunes terrestres. Ce système dunaire paraît fossile, la fraîcheur des formes serait due au gel des nappes phréatiques qui figerait les structures.