

Informations Système Expert

Identification des planètes du système solaire

Contenus

Articles

Présentation globale du système solaire	1
Système solaire	1
Planètes telluriques	25
Planète tellurique	25
Mercure (planète)	37
Vénus (planète)	56
Terre	72
Mars (planète)	98
Planètes gazeuses	152
Géante gazeuse	152
Jupiter (planète)	157
Saturne (planète)	176
Uranus (planète)	185
Neptune (planète)	194

Références

Sources et contributeurs de l'article	202
Source des images, licences et contributeurs	204

Licence des articles

Licence	209
---------	-----

Présentation globale du système solaire

Système solaire

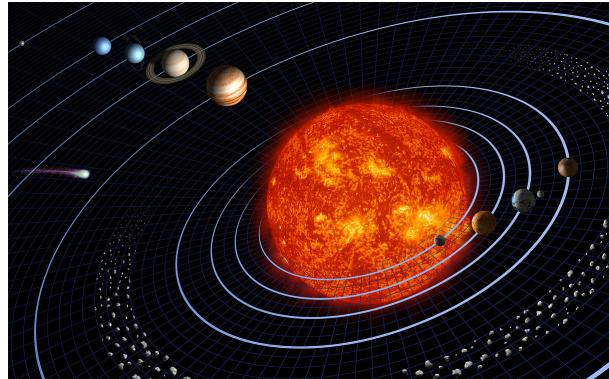
Le **système solaire** est un système planétaire composé d'une étoile, le Soleil, et des corps célestes ou objets définis gravitant autour de lui (autrement dit, *notre système planétaire*) : les huit planètes et leurs 165 satellites naturels connus^[1] (appelés usuellement des « lunes »), les cinq planètes naines, et les milliards de petits corps (astéroïdes, objets glacés, comètes, météorites, poussière interplanétaire, etc.).

De façon schématique, le système solaire est composé du Soleil, de quatre planètes telluriques internes, d'une ceinture d'astéroïdes composée de petits corps rocheux, quatre géantes gazeuses externes et une seconde ceinture appelée ceinture de Kuiper, composée d'objets glacés. Au-delà de cette ceinture se trouve un disque d'objets épars, nommé suivant la théorie avancée par Jan Oort, le nuage d'Oort. Ensuite vient l'héliopause, limite du système solaire définie par l'arrêt des vents solaires (ils deviennent plus faibles que le vent galactique).

De la plus proche à la plus éloignée (du Soleil), les planètes du système se nomment Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Six de ces planètes possèdent des satellites en orbite et chacune des planètes externes est entourée d'un anneau planétaire de poussière et d'autres particules. Toutes les planètes, y compris la Terre, portent les noms de dieux et déesses de la mythologie romaine et de la mythologie grecque.

Les cinq planètes naines, portant des noms de divinités diverses, sont Pluton, le plus ancien objet connu de la ceinture de Kuiper, Cérès, le plus grand objet de la ceinture d'astéroïdes, Éris, la plus grosse des planètes naines qui se trouve dans le disque des objets épars, et Makemake et Haumea objets de la ceinture de Kuiper. Les planètes naines orbitant au-delà de Neptune, ce qui est le cas de quatre d'entre-elles, sont également classifiées comme plutoïdes.

Par extension, le terme « système solaire » est employé pour désigner d'autres systèmes planétaires.



Montage présentant les composants principaux du système solaire (échelle non respectée), de gauche à droite : Pluton, Neptune, Uranus, Saturne, Jupiter, la ceinture d'astéroïdes, le soleil, Mercure, Vénus, la Terre et sa Lune, et Mars. Une comète est également représentée sur la gauche.



Autre montage plus détaillé montrant les planètes du système solaire avec leurs principaux satellites.

Terminologie

Les objets ou corps orbitant autour du Soleil sont divisés en trois classes : planètes, planètes naines et petits corps.

- Une planète est un corps en orbite autour du Soleil. Ce corps est suffisamment massif pour constituer une forme sphérique et avoir nettoyé son voisinage immédiat de tous les objets plus petits^[2]. On connaît huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune. Un moyen mnémotechnique de se souvenir de leur ordre, est la phrase : « Mon Vieux, Tu M'as Jeté Sur Une Nappe. » ou bien encore « Me Voici Toute Mouillée, Je Suis Une None. »

- Une planète naine est, selon la définition officielle (décision du 24 août 2006 de l'Union astronomique internationale), un corps en orbite autour du Soleil. Ce corps, bien que suffisamment massif pour constituer une forme sphérique, n'a pas fait place nette dans son voisinage^[2]. En septembre 2008, cinq corps étaient officiellement désignés de la sorte : Pluton, Éris, Makemake, Haumea et Cérès. D'autres corps pourraient l'être dans le futur, tels Sedna, Orcus ou Quaoar.
- Tous les autres objets en orbite autour du Soleil sont définis comme petits corps du système solaire^[3].

Les satellites naturels, ou lunes, sont les objets en orbite autour des planètes, des planètes naines et des petits corps plutôt qu'autour du Soleil.



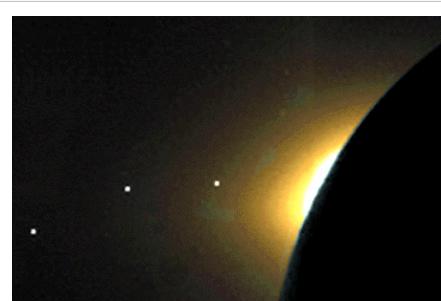
Planètes normales et naines du système solaire ; les dimensions du Soleil et des planètes sont à l'échelle, mais aucune de leurs distances.

Structure

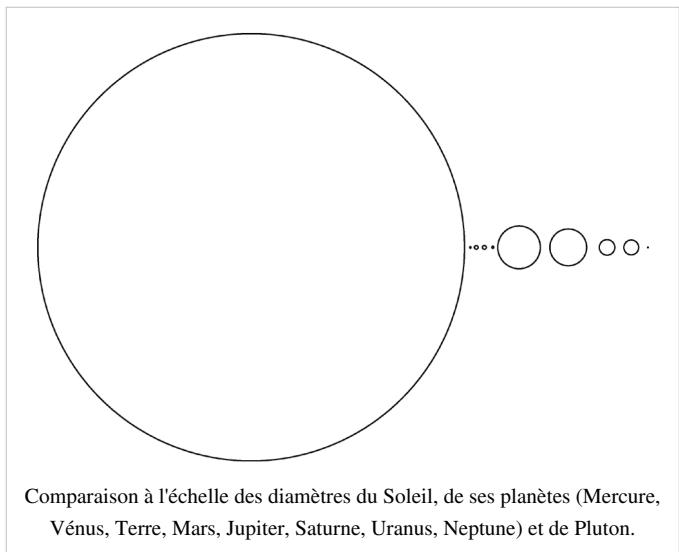
Généralités

Le principal corps céleste du système solaire est le Soleil, une étoile naine jaune de la séquence principale de type G2 qui contient 99.86 % de toute la masse connue du système solaire et le domine gravitationnellement^[4]. Jupiter et Saturne, les deux plus massifs objets orbitant autour du Soleil, regroupent à eux deux plus de 90 % de la masse restante.

La plupart des grands objets en orbite autour du Soleil le sont dans un plan proche de celui de l'orbite terrestre, nommé écliptique. Typiquement, le plan d'orbite des planètes est très proche de celui de l'écliptique tandis que les comètes et les objets de la ceinture de Kuiper ont pour la plupart une orbite qui forme un angle significativement plus grand par rapport à lui.



L'écliptique vu par la mission Clementine, alors que le Soleil était partiellement masqué par la Lune. Trois planètes sont visibles dans la partie gauche de l'image. De gauche à droite : Mercure, Mars et Saturne.



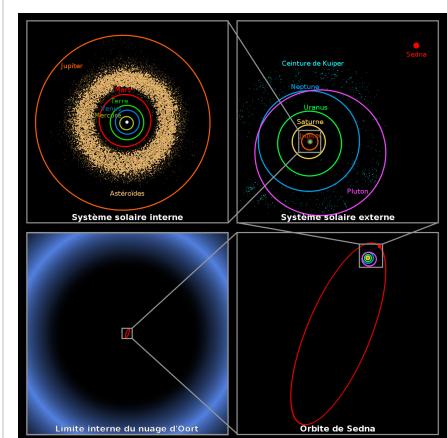
Toutes les planètes et la plupart des autres objets orbitent dans le même sens que la rotation du Soleil, c'est-à-dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre du point de vue d'un observateur situé au-dessus du pôle nord solaire. Certains objets orbitent dans un sens rétrograde, comme la comète de Halley.

Les trajectoires des objets gravitant autour du Soleil suivent les lois de Kepler. Ce sont approximativement des ellipses dont l'un des foyers est le Soleil. Les orbites des planètes sont quasiment circulaires. Celles des corps plus petits présentent des excentricités diverses et peuvent être fortement elliptiques. C'est notamment le cas des comètes et de certains autres petits corps, de certaines planètes naines et plus généralement des objets transneptuniens y compris ceux de la ceinture de Kuiper et du Nuage d'Oort.

La distance d'un corps au Soleil varie au cours de sa rotation autour du Soleil. On appelle le point le plus proche du Soleil de l'orbite d'un corps sa périhélie, le plus éloigné étant son aphélie.

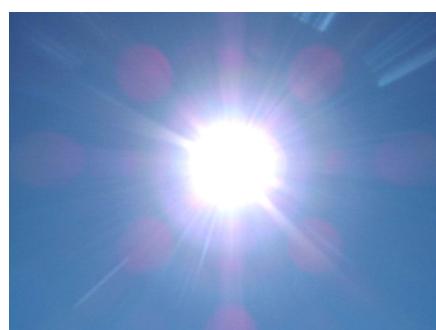
De façon informelle, le système solaire est souvent divisé en zones distinctes. Le système solaire interne inclut les quatre planètes telluriques et la ceinture d'astéroïdes. Le reste du système peut être considéré simplement comme système solaire externe^[5]; d'autres séparent la région au-delà de Neptune des quatre géantes gazeuses^[6].

La majorité des planètes du système solaire possèdent leur propre système secondaire. Les corps planétaires en rotation autour d'une planète sont appelés satellites naturels ou lunes. La plupart des plus grands satellites naturels évoluent sur une orbite synchrone, présentant toujours la même face à la planète autour de laquelle ils gravitent. Les quatre plus grandes planètes ont également un anneau planétaire.



Les orbites des principaux corps du système solaire, à l'échelle.

Soleil



Le Soleil tel qu'il est vu depuis la Terre.

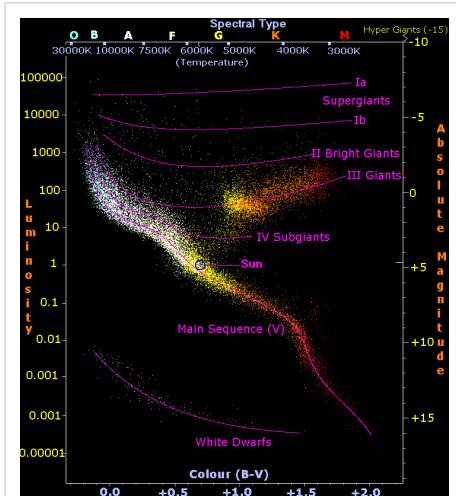
Le Soleil, au sein de notre galaxie, est une étoile de type naine jaune parmi tant d'autres : la Voie lactée contient entre 200 et 400 milliards d'étoiles, dont 20 à 40 milliards seraient des naines jaunes^[7]. Comme toute étoile selon les lois de la physique actuelle, sa masse permet à la densité en son cœur d'être suffisamment élevée pour provoquer des réactions de fusion thermonucléaire en continu. Chaque seconde le cœur du Soleil fusionne 564 millions de tonnes d'hydrogène et produit 560 millions de tonnes d'hélium. La différence de masse entre le produit (l'hélium) et le réactif (l'hydrogène), soit 4 millions de tonnes, est l'équivalent de masse de l'énorme quantité d'énergie produite : 4×10^{26} watts, qui est aussi l'énergie rayonnée dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, comme la lumière visible^[8].

Le Soleil est une naine jaune modérément grande, mais le nom est trompeur puisque le Soleil est plus large et plus lumineux que la majorité des étoiles de la Voie lactée (la plupart des étoiles de la Voie lactée étant des naines rouges, plus petites). Il se situe vers le milieu de la séquence principale du diagramme de Hertzsprung-Russell ; cependant, les étoiles plus brillantes et plus chaudes que le Soleil sont rares tandis que les étoiles moins lumineuses et plus froides sont courantes^[9].

On pense que la position du Soleil sur la séquence principale indique qu'il est loin d'avoir épuisé ses réserves d'hydrogène pour la fusion nucléaire. À ce jour, les calculs établissent qu'il a dispersé sous forme d'énergie 3 millièmes de sa masse initiale^[8]. Il devient progressivement plus brillant : au début de son histoire, sa luminosité était inférieure d'un bon tiers de celle d'aujourd'hui^[10].

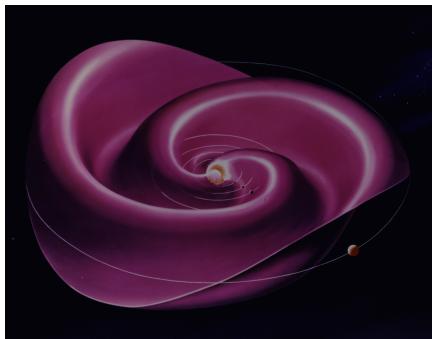
Le calcul du rapport entre l'hydrogène et l'hélium à l'intérieur du Soleil suggère qu'il est environ à mi-chemin de son cycle de vie. Dans plus de cinq milliards d'années, il quittera la séquence principale et deviendra plus grand, plus brillant, plus froid et plus rouge : une géante rouge^[11] .^[12] À ce moment, sa luminosité sera plusieurs milliers de fois celle d'aujourd'hui.

Le Soleil est une étoile de population I ; il est né après une ou plusieurs « générations » d'étoiles. Il contient plus d'éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium (des « métaux » dans le langage astronomique) que les étoiles de population II^[13] . Ces éléments métalliques ont été formés dans l'explosion des noyaux d'étoiles les plus massives, les supernovas. Les étoiles anciennes contiennent peu de métaux tandis que les étoiles ultérieures en contiennent ainsi plus. On pense que cette haute métallicité a été indispensable au développement du système planétaire, car les planètes se forment par accréption de « métaux »^[14] .



Le diagramme de Hertzsprung-Russell ; la séquence principale va du bas à droite au haut à gauche.

Milieu interplanétaire



La couche de courant héliosphérique.

En plus de la lumière, le Soleil rayonne un flux continu de particules chargées (un plasma) appelé vent solaire. Ce flux s'étend à la vitesse approximative de 1,5 million de kilomètres par heure^[15], créant une atmosphère ténue, l'héliosphère, qui baigne le système solaire jusqu'à environ 100 unités astronomiques (marquant l'héliopause). Le matériau composant l'héliosphère est connu sous le nom de milieu interplanétaire. Le cycle solaire de onze ans et les fréquentes éruptions solaires et éjections de masse coronale perturbent l'héliosphère et créent un climat spatial^[16]. La rotation du champ magnétique solaire agit sur le milieu interplanétaire pour créer la couche de courant héliosphérique, la plus grande structure du système solaire^[17].

Le champ magnétique terrestre protège l'atmosphère du vent solaire. Vénus et Mars ne possèdent pas de champ magnétique et le vent solaire souffle graduellement leur atmosphère dans l'espace^[18]. Sur Terre, l'interaction du vent solaire et du champ magnétique terrestre cause les aurores polaires.

L'héliosphère protège en partie le système solaire des rayons cosmiques, protection augmentée sur les planètes disposant de champ magnétique. La densité de rayons cosmiques dans le milieu interstellaire et l'intensité du champ magnétique solaire changent sur de très longues périodes, donc le niveau de rayonnement cosmique dans le système solaire varie, mais on ignore de combien^[19].

Le milieu interplanétaire héberge au moins deux régions de poussières cosmiques en forme de disque. La première, le nuage de poussière zodiacal, réside dans le système solaire interne et cause la lumière zodiacale. Il fut probablement formé par des collisions à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes causées par des interactions avec les planètes^[20]. La deuxième s'étend de 10 à 40 UA et fut probablement créée lors de collisions similaires dans la ceinture de Kuiper^[21] .[22].



Une aurore australe vue depuis l'orbite terrestre.

Système solaire interne

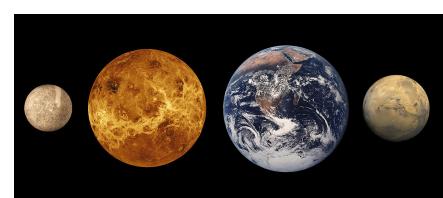
Le système solaire interne désigne traditionnellement la région située entre le Soleil et la ceinture d'astéroïdes. Composés principalement de silicates et de métaux, les objets du système solaire interne orbitent près du Soleil : le rayon de la région tout entière est plus petit que la distance entre Jupiter et Saturne.

Ceinture intra-mercienne

Très récemment^[Quand ?] des nuages de poussières intramercuriens ont été détectés entre le Soleil et Mercure. Des recherches sont toujours menées afin de trouver des corps plus gros : les Vulcanoïdes. Des comètes orbitent aussi dans cette zone : les astéroïdes apoheles.

Planètes internes

Les quatre planètes internes possèdent une composition dense et rocheuse, peu ou pas de satellites naturels et aucun système d'anneaux. De taille modeste (la plus grande de ces planètes étant la Terre dont le diamètre est de 12756 km), elles sont composées en grande partie de minéraux à point de fusion élevé, tels les silicates qui forment leur croûte solide et leur manteau semi-liquide, et de métaux comme le fer et le nickel qui composent leur noyau. Trois des quatre planètes (Vénus, la Terre et Mars) ont une atmosphère substantielle ; toutes présentent des cratères d'impact et des caractéristiques tectoniques de surface comme des rifts et des volcans^[23].



Les planètes internes. De gauche à droite : Mercure, Vénus, la Terre et Mars (dimensions à l'échelle).

Mercure

Mercure est la planète la plus proche du Soleil (0,4 UA de demi-grand axe soit 58 millions de km du Soleil), ainsi que la plus petite - 4900 km de diamètre - et la moins massive juste plus du vingtième de la masse terrestre (0,055 masse terrestre)^[24]. Elle est connue depuis l'antiquité et doit son nom au dieu Mercure, qui était chez les Romains le messager des dieux, et dieu du commerce et du voyage ; cela est dû au fait qu'elle se déplace très vite. Mercure ne possède aucun satellite naturel et ses seules caractéristiques géologiques connues, en dehors des cratères d'impact, sont des dorsa, probablement produites par contraction thermique lors de la solidification interne, plus tôt dans son histoire^[25]. L'atmosphère de Mercure, quasiment inexistante, est formée d'atomes arrachés à sa surface par le vent solaire^[26] ,^[27], ou momentanément capturé à ce vent. L'origine de son grand noyau de fer liquide -et son fin manteau, composée de différents métaux- n'a toujours pas été expliquée de manière adéquate. Parmi les scénarios hypothétiques, il est possible que ses couches externes aient été balayées par un impact géant ou qu'elle ait été stoppée dans son accrétion par l'énergie solaire^[28] ,^[29]. Sa période de révolution est d'environ 88 jours et sa période de rotation est de 58 jours. L'absence d'atmosphère significative et la proximité du Soleil amène les températures de surface à varier de 427°C (700 K) lorsque le Soleil est au zénith à -183°C (90 K) la nuit^[24].

Vénus

Vénus (0,7 UA) est proche de la Terre en taille et en masse (0,815 masse terrestre) et, comme elle, possède un épais manteau de silicate entourant un noyau métallique, une atmosphère significative et une activité géologique interne. Cependant, elle est beaucoup plus sèche et la pression de son atmosphère (au sol) est 90 fois celle de la nôtre^[30]. Vénus ne possède aucun satellite^[23]. Il s'agit de la planète la plus chaude, avec une température de surface supérieure à 450°C, maintenue essentiellement par l'effet de serre causé par son atmosphère très riche en gaz carbonique^[31] ,^[32]. Aucune activité géologique récente n'a été détectée sur Vénus ; son absence de champ magnétique ne permettant pas d'empêcher l'appauvrissement de son atmosphère, cela suggère cependant qu'elle est régulièrement alimentée par des éruptions volcaniques^[33] ,^[30]. Sa période de révolution est d'environ 225 jours.

Terre

La Terre (1 UA) est la plus grande, la plus massive et la plus dense des planètes internes, la seule dont on connaisse une activité géologique récente et qui abrite la vie. Son hydroosphère liquide est unique parmi les planètes telluriques et elle est la seule planète où une activité tectonique a été observée. L'atmosphère terrestre est radicalement différente de celle des autres planètes, ayant été altérée par la présence de formes de vie pour contenir 21 % d'oxygène^[34] ,^[35]. La Terre possède un satellite, la Lune, le seul satellite significativement grand des planètes telluriques du système solaire. L'explication la plus généralement admise pour expliquer l'origine de ce singulier satellite serait la collision latérale de la jeune terre avec un impacteur géant, de la taille de la planète Mars^[36]. La période de révolution de la terre, c'est-à-dire la durée de l'année, est d'environ 365 jours^[35].

Mars

Mars (1,5 UA) est deux fois plus petite que la Terre et Vénus, et a seulement le dixième de la masse terrestre (0,107 masse terrestre). Sa période de révolution autour du soleil est d'environ 669 jours et sa journée dure 24 heures et 40 minutes^[24]. Elle possède une atmosphère ténue, principalement composé de dioxyde de carbone et une surface désertique^[37] avec un climat qui peut être qualifié d'hyper-continental (la température de 20 °C lors d'un bel après-midi d'été peut chuter à -100 °C pendant la nuit^[24]). Le terrain martien, parfois très accidenté, est constellé de vastes volcans comme Olympus Mons (le plus massif du système solaire), de vallées, de rifts comme Valles Marineris^[38]. Ces structures géologiques montrent des signes d'une activité géologique voire hydraulique qui a peut-être persisté jusqu'à récemment^{[39] , [40]}. Mars possède deux petits satellites naturels (Déimos et Phobos), probablement des astéroïdes capturés^[41].

Ceinture d'astéroïdes

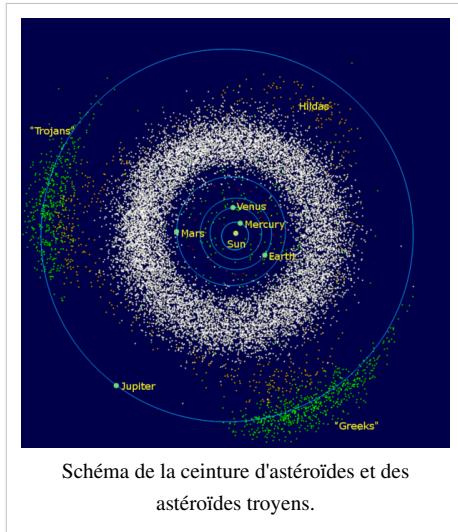


Schéma de la ceinture d'astéroïdes et des astéroïdes troyens.

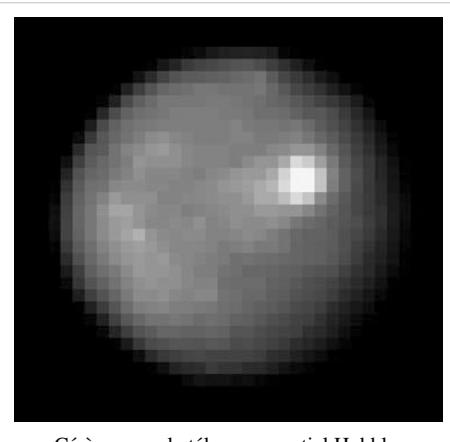
Les astéroïdes sont principalement de petits corps du système solaire composés de roches et de minéraux métalliques non-volatiles. La ceinture d'astéroïdes occupe une orbite située entre Mars et Jupiter, à une distance comprise entre 2,3 et 3,3 UA du Soleil. On pense qu'il s'agit de restes du système solaire en formation qui n'ont pas pu s'accréter en un corps plus gros à cause des interférences gravitationnelles de Jupiter.

Les astéroïdes varient en taille, depuis plusieurs centaines de kilomètres à des poussières microscopiques. Tous les astéroïdes, sauf le plus grand, Cérès, sont considérés comme des petits corps, bien que certains tels Vesta ou Hygie pourraient être reclassés comme planètes naines s'il est démontré qu'ils ont atteint un équilibre hydrostatique.

La ceinture d'astéroïdes contient des dizaines de milliers, éventuellement des millions, d'objets de plus d'un kilomètre de diamètre^[42]. Malgré ceci, la masse totale de la ceinture ne dépasse probablement pas un millième de celle de la Terre^[43]. La ceinture est très peu densément peuplée ; les sondes spatiales l'ont traversée régulièrement sans incident. Les astéroïdes d'un diamètre compris entre 10 et 10^{-4} m sont appelés météoroïdes^[44].

Cérès

Cérès (2,77 UA) est le plus grand corps de la ceinture d'astéroïdes et sa seule planète naine. D'un diamètre légèrement inférieur à 1000 km, suffisant pour que sa propre gravité lui donne une forme sphérique, Cérès fut considéré comme une planète quand il fut découvert au XIX^e siècle, puis recatégorisé comme astéroïde dans les années 1850 lorsque des observations révélèrent leur abondance^[45]. Il fut à nouveau classifié comme planète naine en 2006.



Cérès vu par le télescope spatial Hubble.

Groupes d'astéroïdes

Les astéroïdes de la ceinture principale sont divisés en plusieurs groupes et familles suivant leurs caractéristiques orbitales. Certains astéroïdes comportent des lunes, parfois aussi larges qu'eux-mêmes. La ceinture contient également des comètes^[46] d'où pourrait provenir l'eau terrestre.

Le système solaire interne est également constellé d'astéroïdes situés en dehors de la ceinture et dont l'orbite croise éventuellement celle des planètes telluriques.

Système solaire externe

Au-delà de la ceinture d'astéroïdes s'étend une région dominée par les géantes gazeuses. De nombreuses comètes à courte période, y compris les centaures, y résident également.

La zone ne possède pas de nom traditionnel correctement défini. Il est fait souvent mention du système solaire externe, par opposition au système solaire interne, mais le terme a récemment commencé à être utilisé exclusivement pour la zone située après l'orbite de Neptune.

Les objets solides de cette région sont composés d'une plus grande proportion de « glaces » (eau, ammoniac, méthane) que leurs correspondants du système solaire interne.

Planètes externes

Les quatre planètes externes sont des géantes gazeuses et regroupent à elles quatre 99% de la masse qui orbite autour du Soleil. L'atmosphère de Jupiter et Saturne est principalement constituée d'hydrogène et d'hélium ; celle d'Uranus et de Neptune contient un plus grand pourcentage de glaces. Il a été suggéré qu'elles appartiennent à une catégorie distincte, les « géantes glacées »^[47]. Les quatre géantes gazeuses possèdent des systèmes d'anneaux, mais seuls ceux de Saturne peuvent être facilement observés depuis la Terre. En outre, le nombre de leurs satellites naturels est élevé voire très élevé (On en a détecté plus de soixante autour de Jupiter et de Saturne).

Jupiter

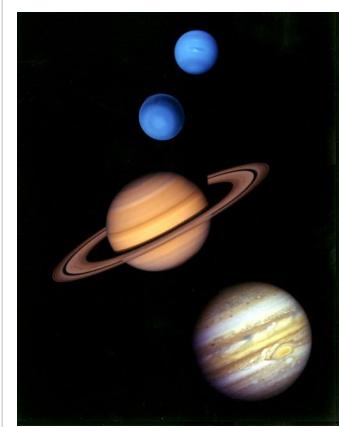
Jupiter (5,2 UA), avec 318 masses terrestres, est aussi massive que 2,5 fois toutes les autres planètes. Elle est composée essentiellement d'hydrogène et d'hélium. Sa forte chaleur interne crée un certain nombre de caractéristiques semi-permanentes dans son atmosphère, comme des bandes de nuages ou la Grande tache rouge. Jupiter possède 63 satellites connus ; les quatre plus gros, (appelés aussi satellites galiléens car découverts par l'astronome italien Galilée au XVII^e siècle), Ganymède, Callisto, Io et Europe, présentent des similarités avec les planètes telluriques, comme le volcanisme^[48]. Ganymède, le plus gros satellite du système solaire, est plus grand que Mercure.

Sa période de révolution est d'environ 12 ans.

Saturne

Saturne (9,5 UA), connue pour son système d'anneaux, possède des caractéristiques similaires à Jupiter, comme sa composition atmosphérique. Elle est moins massive (95 masses terrestres) et possède 62 satellites^[49] ; deux d'entre eux, Titan et Encelade, présentent des signes d'activité géologique, essentiellement du cryovolcanisme^[50]. Titan est plus grand que Mercure, il est le seul satellite du système solaire à avoir une atmosphère substantielle.

Sa période de révolution est d'environ 29 ans.



Les géantes gazeuses. De haut en bas : Neptune, Uranus, Saturne et Jupiter
(image non à l'échelle).

Uranus

Uranus (19,6 UA), avec 14 masses terrestres, est la moins massive des géantes gazeuses. De façon unique parmi les planètes du système solaire, elle orbite le Soleil sur son côté, l'axe de sa rotation étant incliné d'un peu plus de 90° par rapport à son orbite. Son noyau est nettement plus froid que celui des autres géantes gazeuses et rayonne très peu de chaleur dans l'espace^[51]. Uranus possède 27 satellites connus, les plus grands étant Titania, Obéron, Umbriel, Ariel et Miranda.

Sa période de révolution est d'environ 84 ans.

Neptune

Neptune (30 UA), bien que plus petite qu'Uranus, est légèrement plus massive (17 masses terrestres) et par conséquent plus dense. Elle rayonne plus de chaleur interne, mais pas autant que Jupiter ou Saturne^[52]. Neptune possède 13 satellites connus. Le plus grand, Triton, est géologiquement actif et présente des geysers d'azote liquide^[53]. Triton est le seul grand satellite placé sur une orbite rétrograde.

Sa période de révolution est d'environ 164 ans.

Comètes

Les comètes sont de petits corps célestes du système solaire, généralement de quelques kilomètres de diamètre, principalement composés de glaces volatiles. Elles possèdent des orbites hautement excentriques, avec un périhélie souvent situé dans le système solaire interne et un aphélie au-delà de Pluton. Lorsqu'une comète entre dans le système solaire interne, la proximité du Soleil provoque la sublimation et l'ionisation de sa surface, créant une queue : une longue traînée de gaz et de poussière.

Les comètes à courte période (comme la comète de Halley) parcourront leur orbite en moins de 200 ans et proviendraient de la ceinture de Kuiper ; les comètes à longue période (comme la comète Hale-Bopp) ont une périodicité de plusieurs milliers d'années et tiendraient leur origine du nuage d'Oort. D'autres enfin ont une trajectoire hyperbolique et proviendraient de l'extérieur du système solaire, mais la détermination de leur orbite est difficile^[54]. Les vieilles comètes qui ont perdu la plupart de leurs composés volatiles sont souvent considérées comme des astéroïdes^[55].



Vue de la comète Hale-Bopp.

Centaures

Les centaures, qui s'étendent entre 9 et 30 UA, sont des corps glacés analogues aux comètes orbitant entre Jupiter et Neptune. Le plus grand centaure connu, Chariklo, mesure entre 200 et 250 km de diamètre^[56]. Le premier centaure découvert, Chiron, fut considéré comme une comète puisqu'il développait une queue cométaire^[57]. Certains astronomes classent les centaures comme des objets de la ceinture de Kuiper internes épars, des équivalents des objets épars externes^[58].

Astéroïdes troyens

Les astéroïdes troyens sont deux groupes d'astéroïdes situés aux points de Lagrange L_4 ou L_5 de Jupiter (des zones gravitationnellement stables en avant et en arrière de son orbite).

Neptune et Mars sont également accompagnés par quelques astéroïdes troyens.

Région transneptunienne

La zone au-delà de Neptune, souvent appelée région transneptunienne, est toujours largement inexplorée. Il semble qu'elle consiste essentiellement en de petits corps (le plus grand ayant le cinquième du diamètre de la Terre et une masse bien inférieure à celle de la Lune) composés de roche et de glace.

Ceinture de Kuiper

La ceinture de Kuiper, la principale structure de la région, est un grand anneau de débris similaire à la ceinture d'astéroïdes, mais composée principalement de glace. La première partie de la ceinture s'étend entre 30 et 50 UA du Soleil et s'arrête à la « falaise de Kuiper », la seconde partie va au-delà (100 UA voire plus). On pense que la région est la source des comètes de courte période.

Elle est principalement composée de petits corps, mais plusieurs des plus gros objets, comme Quaoar, Varuna, ou Orcus, pourraient être reclassifiés comme planètes naines. On estime à 100000 le nombre d'objets de la ceinture de Kuiper d'un diamètre supérieur à 50 km, mais sa masse totale est estimée à un dixième, voire un centième de celle de la Terre^[59]. Plusieurs objets de la ceinture possèdent des satellites multiples et la plupart sont situés sur des orbites qui les emmènent en dehors du plan de l'écliptique.

La ceinture de Kuiper peut être grossièrement divisée entre les objets « classiques » et ceux en résonance avec Neptune. Comme par exemple les plutinos, qui parcourent deux orbites quand Neptune en parcourt trois, mais il existe d'autres rapports.

La ceinture en résonance débute à l'intérieur même de l'orbite de Neptune. La ceinture classique des objets n'ayant aucune résonance avec Neptune s'étend entre 39,4 et 47,7 UA^[60]. Les membres de cette ceinture classique sont appelés cubewanos, d'après le premier objet de ce genre à avoir été découvert, (15760) 1992 QB₁^[61].

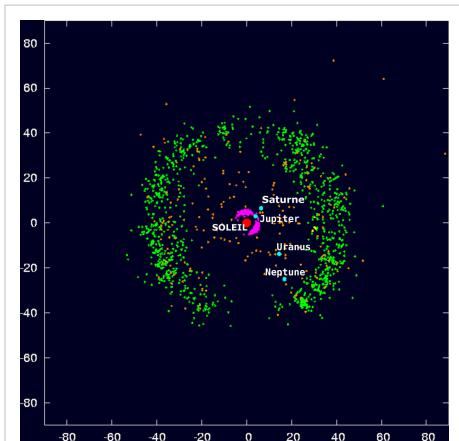


Diagramme indiquant la position de tous les objets de la ceinture de Kuiper connus.

Pluton et Charon

Pluton

Pluton (39 UA en moyenne), une planète naine, est le plus grand objet connu de la ceinture de Kuiper. Découvert en 1930 et considéré comme une planète, il fut reclassifié en août 2006 lors de l'adoption d'une définition formelle de ces différents corps. Pluton possède une orbite excentrique inclinée de 17° sur le plan de l'écliptique et qui s'étend de 29,7 UA au périhélie à 49,5 UA à l'aphélie.

Charon

La plus grande lune de Pluton, Charon, est suffisamment grande pour que l'ensemble gravite autour d'un centre de gravité situé au-dessus de la surface de chacun des deux corps. Trois autres petites lunes, Nix et Hydra et un dernier objet, orbitent le couple Pluton-Charon.

Pluton est en résonance orbitale 3:2 avec Neptune (la planète orbite deux fois autour du Soleil quand Neptune orbite trois fois). Les objets de la ceinture de Kuiper qui partagent cette résonance sont nommés plutinos^[62].

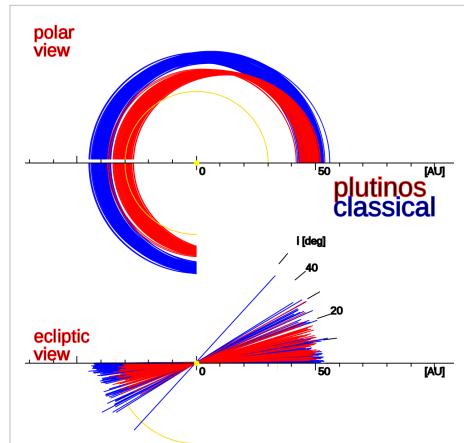
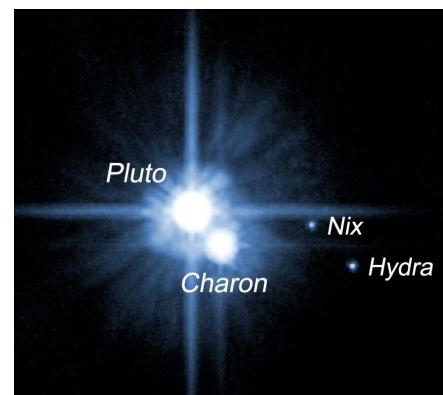


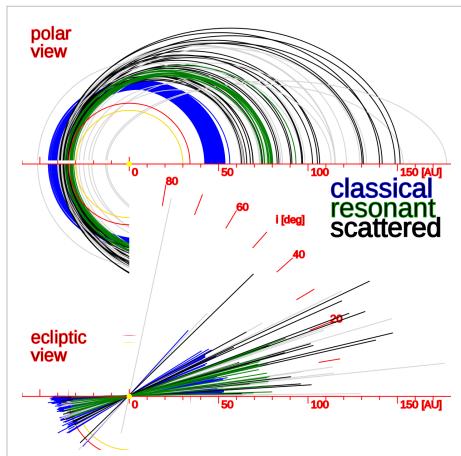
Diagramme montrant les orbites alignées des plutinos et autres objets de la ceinture de Kuiper en résonance avec Neptune (en rouge) et des objets classiques (en bleu).



Pluton et ses trois lunes connues.

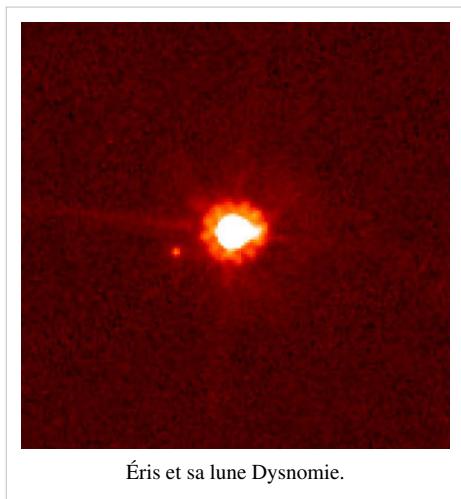
Objets épars

Les objets épars s'étendent bien au-delà de la ceinture de Kuiper. On pense qu'ils proviennent de cette ceinture mais en ont été éjectés par l'influence gravitationnelle de Neptune lors de sa formation. La plupart des objets épars possèdent un périhélie dans la ceinture de Kuiper et un aphélie pouvant atteindre 150 UA Soleil. De façon typique, leur orbite est fortement inclinée, souvent presque perpendiculaire à l'écliptique. Certains astronomes les considèrent comme d'autres éléments de la ceinture de Kuiper et les appellent d'ailleurs des « objets épars de la ceinture de Kuiper »^[63].



Les objets de la ceinture de Kuiper. En noir : objets épars ; en bleu : objets classiques ; en vert : objets en résonance avec Neptune.

Éris



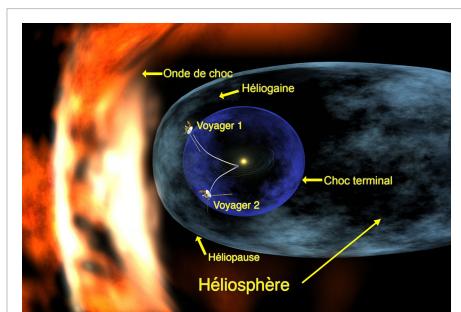
Éris et sa lune Dysnomie.

Éris (68 UA en moyenne) est le plus gros objet épars connu et a d'ailleurs provoqué une clarification du statut de planète à sa découverte, puisqu'il est au moins 5% plus grand que Pluton (diamètre estimé de 2400 km)^[64]. Il possède une lune, Dysnomie. Comme Pluton, son orbite est fortement excentrique (périhélie à 38,2 UA, la distance moyenne de Pluton au Soleil, aphélie à 97,6 UA) et fortement inclinée sur l'écliptique, à 44°.

Régions lointaines

Héliopause, Héliosphère, Héliogaine

L'héliosphère est divisée en deux régions distinctes. Le vent solaire voyage à sa vitesse maximale jusqu'à environ 95 UA, trois fois la distance moyenne entre Pluton et le Soleil. Ensuite, le vent solaire entre en collision avec les vents opposés en provenance du milieu interstellaire. Il ralentit, se condense et subit des turbulences, formant une grande structure ovale appelée l'héliogaine qui ressemble et se comporte de façon assez similaire à la queue d'une comète, s'étendant encore sur 40 UA dans un sens et sur plusieurs fois cette distance dans la direction opposée. La limite externe de l'héliosphère, l'héliopause, est le point où le vent solaire s'éteint et où débute l'espace interstellaire^[65].

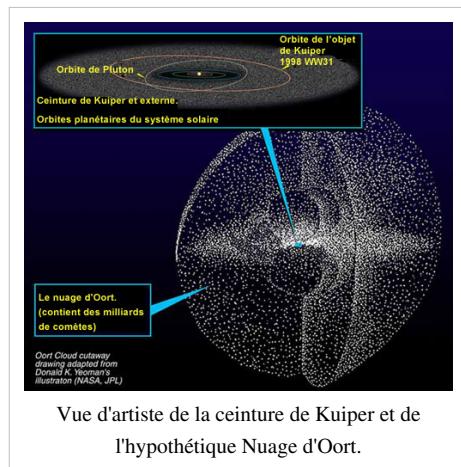


La sonde Voyager 1 pénétrant l'héliogaine.

La forme de l'héliopause est affectée par les interactions avec le milieu interstellaire^[66], ainsi que par les champs magnétiques solaires dominant au sud (l'hémisphère nord s'étend 9 UA plus loin que l'hémisphère sud). Au-delà de l'héliopause, à environ 230 UA du Soleil, s'étend une onde de choc, une zone de plasma laissée par le Soleil au cours de son trajet à travers la Voie lactée^[67].

Aucune sonde spatiale n'a dépassé l'héliopause et les conditions dans l'espace interstellaire ne sont pas connues. On sait assez peu à quel point l'héliosphère protège le système solaire des rayons cosmiques. Une mission spécifique a été suggérée^{[68], [69]}.

Nuage de Hills et Nuage d'Oort

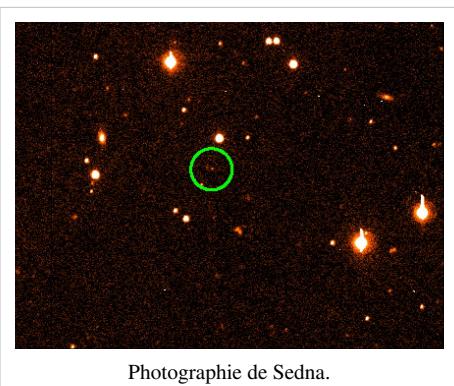


Le Nuage de Hills est une zone hypothétique, intermédiaire de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort.

Le nuage d'Oort est une zone hypothétique regroupant jusqu'à un trillion d'objets glacés et dont on pense qu'il est la source des comètes à longue période. Il entourerait le système solaire vers 50000 UA, peut-être même jusqu'à 154000 UA. On pense qu'il serait composé de comètes qui ont été éjectées du système solaire interne après des interactions avec les géantes gazeuses. Les objets du nuage d'Oort se déplacent très lentement et peuvent être affectés par des événements peu fréquents comme des collisions, les effets gravitationnels d'une étoile proche ou une marée galactique^{[70], [71]}.

Sedna et le nuage de Hills

Sedna est un grand objet rougeâtre ressemblant à Pluton dont l'orbite très excentrique amène à 76 UA du Soleil au périhélie et à 928 UA à l'aphélie et qui prend 12050 ans à être parcourue. Michael Brown, qui découvrit l'objet en 2003, a déclaré qu'il ne peut pas s'agir d'un objet épars car son périhélie est trop lointain pour avoir été affecté par Neptune. Il considère, avec d'autres astronomes, qu'il s'agit du premier membre connu d'une population nouvelle, qui pourrait inclure l'objet (148209) 2000 CR₁₀₅, qui possède un périhélie de 45 UA, un aphélie de 415 UA et une période orbitale de 3420 ans^[72]. Brown nomme cette population le « nuage d'Oort interne » car il se serait formé selon un procédé similaire, mais à une moins grande distance du Soleil^[73]. Sedna est très probablement une planète naine, même si sa forme n'est pas connue avec certitude.



Limites

La limite entre le système solaire et l'espace interstellaire n'est pas précisément définie. On pense que le vent solaire laisse la place au milieu interstellaire à quatre fois la distance entre Neptune et le Soleil. Cependant, la sphère de Hill du Soleil, c'est-à-dire sa zone d'influence gravitationnelle, pourrait s'étendre jusqu'à 1000 fois plus loin, jusqu'à 154202 UA avec c/1992 J1. Malgré des découvertes récentes comme celle de Sedna, la zone située entre la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort est globalement inconnue. Par ailleurs, celle située entre le Soleil et Mercure fait toujours l'objet d'études^[74].

Éléments orbitaux des planètes et planètes naines

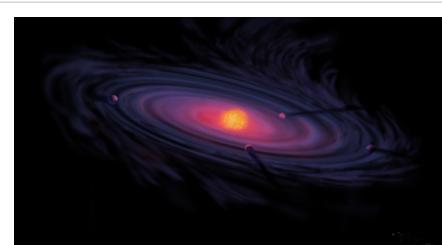
Orbites des planètes et planètes naines du système solaire

	Demi grand axe (UA)	Excentricité	Inclinaison (°)	Période (années)
Mercure	0,38710	0,205631	7,0049	0,2408
Vénus	0,72333	0,006773	3,3947	0,6152
Terre	1,00000	0,016710	0,00000	1,00000
Mars	1,52366	0,093412	1,8506	1,8808
Cérès planète naine	2,7665	0,078375	10,5834	4,601
Jupiter	5,20336	0,048393	1,3053	11,862
Saturne	9,53707	0,054151	2,4845	29,457
Uranus	19,1913	0,047168	0,7699	84,018
Neptune	30,0690	0,008586	1,7692	164,78
Pluton planète naine	39,4817	0,248808	17,1417	248,4
Éris planète naine	68,1461	0,432439	43,7408	562,55

Formation et évolution

Formation

Selon l'hypothèse la plus couramment acceptée, le système solaire s'est formé à partir de la nébuleuse solaire, théorie proposée pour la première fois en 1755 par Emmanuel Kant et formulée indépendamment par Pierre-Simon Laplace^[75]. Selon cette théorie, le système solaire s'est formé il y a 4,6 milliards d'années par effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire géant. Ce nuage était large de plusieurs années-lumière et a probablement donné naissance à plusieurs étoiles^[76]. Les études de météorites révèlent des traces d'éléments qui ne sont produits qu'au cœur d'explosions d'étoiles très grandes, indiquant que le Soleil s'est formé à l'intérieur d'un amas d'étoiles et à proximité d'un certain nombre de supernovas. L'onde de choc de ces supernovas a peut-être provoqué la formation du Soleil en créant des régions de surdensité dans la nébuleuse environnante, permettant à la gravité de prendre le dessus sur la pression interne du gaz et d'initier l'effondrement^[77].



Vision d'artiste d'un disque protoplanétaire.

La région qui deviendra par la suite le système solaire, connue sous le nom de nébuleuse pré-solaire^[78], avait un diamètre entre 7000 et 20000 UA^{[76], [79]} et une masse très légèrement supérieure à celle du Soleil (en excès de 0,001 à 0,1 masse solaire)^[80]. Au fur et à mesure de son effondrement, la conservation du moment angulaire de la nébuleuse la fit tourner plus rapidement. Tandis que la matière s'y condensait, les atomes y rentrèrent en collision de plus en plus fréquemment. Le centre, où la plupart de la masse s'était accumulé, devint progressivement plus chaud que le disque qui l'entourait^[76]. L'action de la gravité, de la pression gazeuse, des champs magnétiques et de la rotation aplatisirent la nébuleuse en un disque protoplanétaire en rotation d'un diamètre d'environ 200 UA^[76] entourant une proto-étoile dense et chaude^{[81], [82]}.

Des études d'étoiles du type T Tauri — des masses stellaires jeunes n'ayant pas démarré les opérations de fusion nucléaire et dont on pense qu'elles sont similaires au Soleil à ce stade de son évolution — montrent qu'elles sont souvent accompagnées de disques pré-planétaires^[80]. Ces disques s'étendent sur plusieurs centaines d'UA et

n'atteignent qu'au plus un millier de kelvins^[83].

Après 100 millions d'années, la pression et la densité de l'hydrogène au centre de la nébuleuse devinrent suffisamment élevées pour que la proto-étoile initie la fusion nucléaire, accroissant sa taille jusqu'à ce qu'un équilibre hydrostatique soit atteint, l'énergie thermique contrebalançant la contraction gravitationnelle. À ce niveau, le Soleil devint une véritable étoile^[84].

Les autres corps du système solaire se formèrent du reste du nuage de gaz et de poussière. Les modèles actuels les font se former par accrétion : initialement des grains de poussière en orbite autour de la proto-étoile centrale, puis des amas de quelques mètres de diamètre formés par contact direct, lesquels rentrèrent en collision pour constituer des planétésimaux d'environ cinq kilomètres de diamètre. À partir de là, leur taille augmenta par collisions successives au rythme moyen de 15 cm par an au cours des millions d'années suivants^[85].

Le système solaire interne était trop chaud pour que les molécules volatiles telles que l'eau ou le méthane se condensent : les planétésimaux qui s'y sont formés étaient relativement petits (environ 0,6 % de la masse du disque)^[76] et principalement formés de composés à point de fusion élevé, tels les silicates et les métaux. Ces corps rocheux devinrent à terme les planètes telluriques. Plus loin, les effets gravitationnels de Jupiter empêchèrent l'accrétion des planétésimaux, formant la ceinture d'astéroïdes^[86].

Encore plus loin, là où les composés glacés volatiles pouvaient rester solides, Jupiter et Saturne devinrent des géantes gazeuses. Uranus et Neptune capturèrent moins de matière et on pense que leur noyau est principalement formé de glaces^[87] .[88] .

Dès que le Soleil produisit de l'énergie, le vent solaire souffla le gaz et les poussières du disque protoplanétaire, stoppant la croissance des planètes. Les étoiles de type T Tauri possèdent des vents stellaires nettement plus intenses que les étoiles plus anciennes et plus stables^[89] .[90]



Image de disques protoplanétaires de la nébuleuse d'Orion prise par le télescope spatial Hubble ; cette « pépinière d'étoile » est probablement similaire à la nébuleuse primordiale à partir de laquelle s'est formé le Soleil.

Évolution

La chaleur dégagée par le Soleil augmente au fil du temps. On peut extrapoler qu'à très long terme (plusieurs centaines de millions d'années) elle atteindra un niveau tel que la vie sera impossible sur Terre.

Dans plus de cinq milliards d'années, le Soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, qui se seront transformées en hélium, et changera de structure. Son noyau se contractera mais l'étoile entière deviendra beaucoup plus volumineuse. Il devrait se transformer en géante rouge, 100 fois plus grande qu'à l'heure actuelle. Les planètes les plus proches, Mercure et Vénus, devraient être détruites.

Il entamera alors un nouveau cycle de fusion avec l'hélium fusionnant en carbone (et oxygène) dans son cœur, et l'hydrogène fusionnant en hélium dans une couche périphérique du cœur. Dans cette configuration, il aura « soufflé » son enveloppe externe, devenant une sous-géante, environ 10 fois plus grande qu'actuellement.

Il va ensuite brûler son hélium assez rapidement, à la fin de ce cycle il regonflera de manière encore plus importante, grillant complètement la Terre au passage.

Une fois ses réserves d'énergie nucléaire complètement consommées, le Soleil va s'effondrer sur lui-même et se transformer en naine blanche très dense et peu lumineuse. Il refroidira petit à petit et finira par ne plus rayonner ni lumière ni chaleur, il sera alors parvenu au stade de naine noire.

Le système solaire fait le tour de la Galaxie en 250 millions d'années. En même temps, il oscille de part et d'autre du plan galactique avec une période de 2 x 33 millions d'années. Il traverse donc ce plan toutes les 33 millions d'années ce qui constitue également la durée moyenne des étages géologiques. Ces étages sont définis d'après d'importants

changements dans la faune et la flore, parfois dus à des cataclysmes comme au passage Permien-Trias ou au passage Crétacé-Tertiaire. On peut penser que ces changements sont dus à des glaciations résultant de la rencontre de la Terre avec des nuages d'électrons du plan galactique. Les dernières glaciations, celles du Quaternaire, se sont produites alors que le système solaire traversait le plan de la Galaxie en allant du Sud vers le Nord.^[réf. nécessaire] C'est une explication qui peut indiquer pourquoi les glaciations étaient beaucoup plus prononcées dans l'hémisphère nord lequel recevait directement les électrons des nuages du plan galactique.

Contexte galactique

Le système solaire est situé dans la Voie lactée, une galaxie spirale barrée d'un diamètre d'environ 100000 années-lumière contenant 200 milliards d'étoiles^[91]. Le Soleil réside dans l'un des bras spiraux externes de la galaxie, le bras d'Orion^[92], à entre 25000 et 28000 années-lumière du centre galactique. Il y évolue à environ 220 km/s et effectue une révolution en 225 à 250 millions d'années, une année galactique^[93].

La situation du système solaire dans la galaxie est probablement un facteur de l'évolution de la vie sur Terre. Son orbite est quasiment circulaire et est parcourue à peu près à la même vitesse que la rotation des bras spiraux, ce qui signifie qu'il ne les traverse que rarement. Les bras spiraux hébergeant nettement plus de supernovas potentiellement dangereuses, cette disposition a permis à la Terre de connaître de longues périodes de stabilité interstellaire^[94]. Le système solaire réside également en dehors des zones riches en étoiles autour du centre galactique. Près du centre, l'influence gravitationnelle des étoiles proches perturberait plus souvent le nuage d'Oort et propulserait plus de comètes vers le système solaire interne, produisant des collisions aux conséquences potentiellement catastrophiques. Le rayonnement du centre galactique interférerait avec le développement de formes de vie complexes^[94]. Même à l'endroit actuel du système solaire, certains scientifiques ont émis l'hypothèse que des supernovas récentes ont affecté la vie dans les derniers 35000 ans en émettant des morceaux de cœur stellaire vers le Soleil sous forme de poussières radioactives ou de corps ressemblant à des comètes^[95].

Actuellement, le Soleil se déplace en direction de l'étoile Véga^[96].

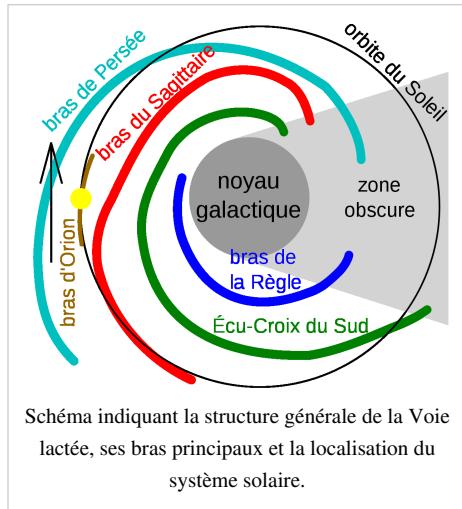


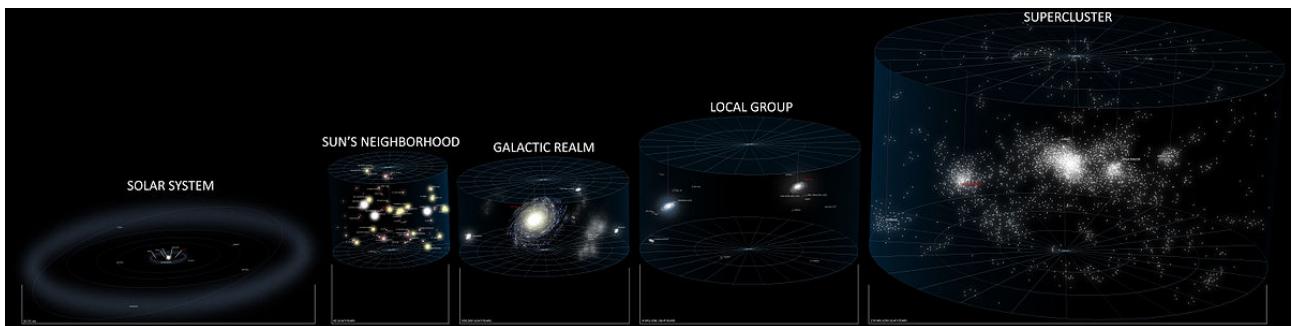
Schéma indiquant la structure générale de la Voie lactée, ses bras principaux et la localisation du système solaire.

Voisinage

Le voisinage immédiat du système solaire est connu sous le nom de nuage interstellaire local, une zone relativement dense à l'intérieur d'une région qui l'est moins, la Bulle locale. Cette bulle est une cavité du milieu interstellaire, en forme de sablier d'environ 300 années-lumière de large. La bulle contient du plasma à haute température de façon très diluée, ce qui suggère qu'elle est le produit de plusieurs supernovae récentes^[97].

On compte relativement peu d'étoiles distantes de moins de 10 années-lumière du Soleil. Le système le plus proche est celui d'Alpha Centauri, un système triple distant de 4,4 années-lumière. Alpha Centauri A et B sont deux étoiles proches ressemblant au Soleil, Alpha Centauri C (ou Proxima Centauri) est une naine rouge orbitant la paire à 0,2 année-lumière d'elle. On trouve ensuite les naines rouges de l'étoile de Barnard (6 années-lumière), Wolf 359 (7,8 années-lumière) et Lalande 21185 (8,3 années-lumière). La plus grande étoile à moins de 10 années-lumière est Sirius, une étoile brillante deux fois plus massive que le Soleil autour de laquelle orbite une naine blanche nommée Sirius B ; elle est distante de 8,6 années-lumière. Les autres systèmes dans ces 10 années-lumière sont le système binaire de naines rouges Luyten 726-8 (8,7 années-lumière) et la naine rouge solitaire Ross 154 (9,7 années-lumière)^[98]. La plus proche étoile simple analogue au Soleil est Tau Ceti, distante de 11,9 années-lumière ;

elle possède 80 % de la masse du Soleil, mais seulement 60 % de sa luminosité^[99]. La plus proche exoplanète ressemblant à la Terre que l'on connaît, Gliese 581 c, est située à 20,4 années-lumière.



Une série de cinq cartes qui montrent, de gauche à droite, notre position dans le système solaire, le système solaire dans les étoiles voisinent soleil, notre voisinage stellaire dans la voie lactée, la voie lactée dans notre Groupe local de galaxies, et notre groupe local dans le Superamas de la Vierge.
Cliquez ici ^[100] pour voir plus de détails.

Découverte et exploration

Observations pré-télescopiques

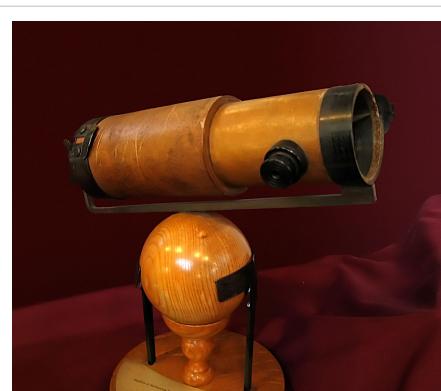
Le concept de système solaire n'existe pas de façon répandue avant une époque récente. En règle générale, la Terre était perçue comme stationnaire au centre de l'Univers et souvent de nature intrinsèquement différente à celui-ci. Un cosmos héliocentrique fut cependant postulé à plusieurs reprises, comme par exemple par le philosophe grec Aristarque de Samos, le mathématicien et astronome indien Aryabhata ou l'astronome polonais Nicolas Copernic. Néanmoins, les avancées conceptuelles du XVII^e siècle, conduites par Galileo Galilei, Johannes Kepler et Isaac Newton, popularisèrent l'idée que la Terre se déplaçait non seulement autour du Soleil, mais que les mêmes lois physiques s'appliquaient aux autres planètes.

Les cinq planètes les plus proches de la Terre (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) sont parmi les objets plus brillants du ciel et étaient nommées *πλανήτης* (*planētēs*, signifiant « errant ») par les astronomes grecs dans l'Antiquité. Hormis le Soleil, il s'agit des seuls membres du système solaire connus avant les observations instrumentales.

Observations instrumentales

Les premières observations du système solaire en tant que tel furent réalisées à partir de la mise au point de la lunette astronomique puis du télescope par les astronomes. Galilée fut parmi les premiers à découvrir des détails physiques sur d'autres corps : il observa que la Lune était couverte de cratères, que le Soleil possédait des taches et que quatre satellites orbitaient Jupiter^[101]. Christian Huygens poursuivit les découvertes de Galilée en découvrant Titan, le satellite de Saturne, et la forme des anneaux de cette planète^[102]. Jean-Dominique Cassini découvrit ensuite quatre autres lunes de Saturne, la division de Cassini dans ses anneaux et la grande tache rouge sur Jupiter^[103].

Edmond Halley réalisa en 1705 que les apparitions répétées d'une comète concernaient le même objet, revenant régulièrement tous les 75 à 76 ans. Ce fut la première preuve qu'autre chose que les planètes orbitait autour du Soleil^[104].



Réplique du télescope d'Isaac Newton.

En 1781, William Herschel observa ce qu'il pensa être une nouvelle comète, mais dont l'orbite révéla qu'il s'agissait d'une nouvelle planète, Uranus^[105].

Giuseppe Piazzi découvrit Cérès en 1801, un petit corps situé entre Mars et Jupiter qui fut initialement considéré comme une nouvelle planète. Des observations ultérieures révélèrent des milliers d'autres objets dans la même région, ce qui conduit à leur reclassification comme astéroïdes^[106].

Les écarts entre la position d'Uranus et les calculs théoriques de son orbite conduisirent à suspecter qu'une autre planète plus lointaine en perturbait le mouvement. Les calculs d'Urbain Le Verrier permirent la découverte de Neptune en 1846^[107]. La précession de l'avance du périhélie de Mercure conduisit également Le Verrier à postuler l'existence d'une planète située entre Mercure et le Soleil, Vulcain en 1859, ce qui s'avéra au bout du compte être une fausse piste. Les anomalies de trajectoire des planètes externes firent émettre par Percival Lowell l'hypothèse d'une planète X. Après sa mort, l'observatoire Lowell conduisit une recherche qui aboutit à la découverte de Pluton par Clyde Tombaugh en 1930. Pluton se révéla être trop petit pour perturber les orbites des géantes gazeuses et sa découverte fut une coïncidence. Comme Cérès, il fut d'abord considéré comme une planète avant d'être reclassifié en 2006 comme planète naine^[107].

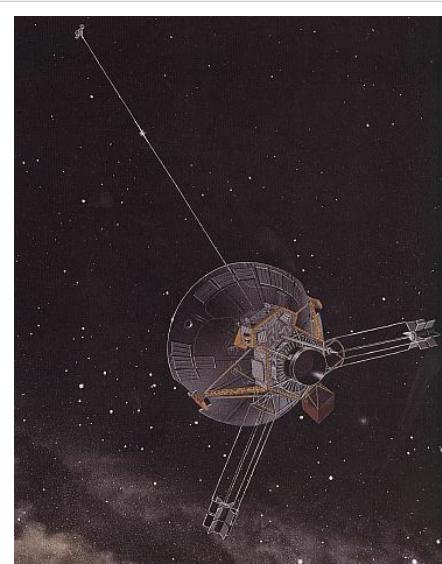
En 1992, David Jewitt et Jane Luu découvrirent (15760) 1992 QB₁. Cet objet se révéla être le premier d'une nouvelle catégorie, qui fut nommée ceinture de Kuiper, un analogue glacé à la ceinture d'astéroïdes et dont Pluton fait partie^[108],^[109].

Mike Brown, Chadwick Trujillo et David L. Rabinowitz annoncèrent la découverte d'Éris en 2005, un objet épars plus grand que Pluton, et d'ailleurs le plus grand découvert en orbite autour du Soleil depuis Neptune^[110].

Exploration spatiale

Depuis le début de l'ère spatiale, de nombreuses missions d'exploration par sondes spatiales ont été mises en œuvre. Toutes les planètes du système solaire ont été visitées à divers degrés par des sondes robotisées : au minimum, des photographies en furent prises, et dans certains cas des atterrisseurs ont effectué des tests sur les sols et les atmosphères.

Le premier objet humain lancé dans l'espace fut le satellite soviétique *Spoutnik 1* en 1957, qui orbita la Terre pendant trois mois. La sonde américaine *Explorer 6*, lancée en 1959, fut le premier satellite à renvoyer une image de la Terre prise de l'espace. La première sonde à voyager avec succès vers un autre corps fut *Luna 1* qui dépassa la Lune en 1959 ; à l'origine, elle devait la percuter mais manqua sa cible et devient le premier objet artificiel à entrer en orbite solaire. *Mariner 2* fut la première sonde à survoler une autre planète, Vénus, en 1962. Le premier survol réussi de Mars fut effectué par *Mariner 4* en 1964 ; Mercure fut approchée par *Mariner 10* en 1974.



Vue d'artiste de *Pioneer 10* lorsque la sonde dépassa l'orbite de Pluton en 1983. La dernière transmission fut reçue en janvier 2003, à plus de 82 UA de distance. La sonde, vieille de plus de 35 ans, fut la première à entrer dans le système solaire externe et s'éloigne du Soleil à plus de 43400 km/h^[111].

La première sonde à explorer les planètes externes fut *Pioneer 10*, qui survola Jupiter en 1973. *Pioneer 11* visita Saturne en 1979. Les deux sondes *Voyager* réalisèrent un survol de toutes les géantes gazeuses à partir de leur lancement en 1977. Elles survolèrent Jupiter en 1979 et Saturne en 1980 et 1981. *Voyager 2* continua par un survol d'Uranus en 1986 et de Neptune en 1989. Les sondes *Voyager* sont sur le chemin de l'héliogaine et de l'héliopause ; selon la NASA, elles ont rencontré le choc terminal à environ 93 UA du Soleil^{[65],[112]}.

Aucun objet de la ceinture de Kuiper n'a encore été visité par une sonde, mais *New Horizons*, lancée le 19 janvier 2006, est en route pour cette région ; la sonde doit survoler Pluton en juillet 2015, ainsi que par la suite d'autres corps si cela s'avère possible^[113].

En 1966, la Lune devint le premier objet du système solaire en dehors de la Terre autour duquel un satellite artificiel fut mis en orbite (*Luna 10*). Elle fut suivie par Mars en 1971 (*Mariner 9*), Vénus en 1975 (*Venera 9*), Jupiter en 1995 (*Galileo*, qui réalisa le premier survol d'un astéroïde, Gaspra, en 1991), l'astéroïde Éros en 2000 (*NEAR Shoemaker*) et Saturne en 2004 (*Cassini-Huygens*). La sonde MESSENGER est actuellement sur le trajet de Mercure qu'elle devrait orbiter en 2011, tandis que *Dawn* devrait atteindre l'astéroïde Vesta en 2011 et la planète naine Cérès en 2015.

La première sonde à se poser sur un autre corps fut la sonde soviétique *Luna 2*, qui impacta la Lune en 1959. La surface de Vénus fut atteinte en 1966 (*Venera 3*), Mars en 1971 (*Mars 3*, bien que le premier atterrissage sur Mars ne fut réalisé que par *Viking 1* en 1976), Éros en 2001 (*NEAR Shoemaker*) et le satellite de Saturne Titan en 2005 (*Huygens*). L'orbiteur *Galileo* lâcha également une sonde dans l'atmosphère de Jupiter en 1995 ; la géante gazeuse ne possédant pas de surface à proprement parler, la sonde fut détruite par la température et la pression lors de sa descente.

Exploration humaine

L'exploration humaine du système solaire est pour l'instant limitée aux environs immédiats de la Terre. Le premier être humain à avoir atteint l'espace (définie comme une altitude de plus de 100 km) et à orbiter la Terre fut le cosmonaute soviétique Youri Gagarine le 12 avril 1961. Le premier homme à marcher sur une autre surface du système solaire fut l'astronaute américain Neil Armstrong, qui atterrit sur la Lune le 21 juillet 1969. La première station orbitale pouvant héberger plus d'un passager fut le *Skylab* américain, qui accueillit des équipes de trois astronautes entre 1973 et 1974. La première station permanente fut la station spatiale soviétique *Mir*, qui fut occupée en continu entre 1989 et 1999, à laquelle succéda la station spatiale internationale, hébergeant une présence humaine dans l'espace depuis lors.



Photographie de la Terre (entourée d'un cercle) prise par la sonde *Voyager 1*, à six milliards de kilomètres de distance. Les raies lumineuses sont des pics de diffraction provenant du Soleil (hors-cadre, sur la gauche).

Notes et références

- [1] Scott S. Sheppard, « The Jupiter Satellite Page (<http://www.dtm.ciw.edu/sheppard/satellites/>) », Université d'Hawaï, 2007. Consulté le 9 octobre 2007.
- [2] *op. cit.*, p. 235.
- [3] The Final IAU Resolution on the definition of "planet" ready for voting (<http://www.iau.org/iau0602.423.0.html>), Union astronomique internationale, 24 août 2006. Consulté le 8 octobre 2007.
- [4] M Woolfson, « The origin and evolution of the solar system (<http://www.oso.chalmers.se/~michael/astrobiologi-2003/j.1468-4004.2000.00012.x.pdf>) », University of York. Consulté le 8 octobre 2007.
- [5] nineplanets.org, « An Overview of the Solar System (<http://www.nineplanets.org/overview.html>) ». Consulté le 15 février 2007.
- [6] Amir Alexander, « New Horizons Set to Launch on 9-Year Voyage to Pluto and the Kuiper Belt (http://www.planetary.org/news/2006/0116_New_Horizons_Set_to_Launch_on_9_Year.html) », The Planetary Society, 2006. Consulté le 8 novembre 2006.
- [7] *op. cit.*, p. 19.
- [8] *op. cit.*, p. 18.
- [9] Smart, R. L.; Carollo, D.; Lattanzi, M. G.; McLean, B.; Spagna, A., « The Second Guide Star Catalogue and Cool Stars (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001udns.conf..119S>) », Perkins Observatory, 2001. Consulté le 26 décembre 2006
- [10] J. F. Kasting, T. P. Ackerman, « Climatic Consequences of Very High Carbon Dioxide Levels in the Earth's Early Atmosphere », dans *Science*, vol. 234, 1986, p. 1383–1385.
- [11] *op. cit.*, p. 20.
- [12] Richard W. Pogge, « The Once and Future Sun (<http://www-astronomy.mps.ohio-state.edu/~pogge/Lectures/vistas97.html>) », Perkins Observatory, 1997. Consulté le 23 juin 2006.
- [13] T. S. van Albada, Norman Baker, « On the Two Oosterhoff Groups of Globular Clusters », dans *Astrophysical Journal*, vol. 185, 1973, p. 477–498
- [14] Charles H. Lineweaver, « An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets in the Universe: Quantifying Metallicity as a Selection Effect (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0012399>) », University of New South Wales, 2000. Consulté le 23 juillet 2006.
- [15] Solar Physics: The Solar Wind (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/SolarWind.shtml>), Marshall Space Flight Center, 2006. Consulté le 3 octobre 2006.
- [16] The Sun Does a Flip (http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast15feb_1.htm), Science@NASA, 15 février 2001. Consulté le 4 février 2007.
- [17] Artist's Conception of the Heliospheric Current Sheet (<http://quake.stanford.edu/~wso/gifs/HCS.html>), Wilcox Solar Observatory. Consulté le 22 juin 2006.
- [18] R. Lundin, « Erosion by the Solar Wind », dans *Science*, vol. 291, n° 5510, 9 mars 2001, p. 1909 [texte intégral (<http://sciemag.org/cgi/content/full/291/5510/1909>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1059763>) (le 26 décembre 2006)].
- [19] U. W. Langner, M. S. Potgieter, « Effects of the position of the solar wind termination shock and the heliopause on the heliospheric modulation of cosmic rays », dans *Advances in Space Research*, vol. 35, n° 12, 2005, p. 2084–2090 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AdSpR..35.2084L>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2004.12.005>) (le 11 février 2007)].
- [20] Long-term Evolution of the Zodiacal Cloud (<http://astrobiology.arc.nasa.gov/workshops/1997/zodiac/backman/IIIc.html>), 1998. Consulté le 3 février 2007.
- [21] ESA scientist discovers a way to shortlist stars that might have planets (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=29471>), ESA Science and Technology, 2003. Consulté le 3 février 2007.
- [22] M. Landgraf, J.-C. Liou, H. A. Zook, E. Grün, « Origins of Solar System Dust beyond Jupiter », dans *The Astronomical Journal*, vol. 123, n° 5, mai 2002, p. 2857–2861 [texte intégral (<http://www.journals.uchicago.edu/AJ/journal/issues/v123n5/201502/201502.html>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/339704>) (le 9 février 2007)].
- [23] *op. cit.*, p. 15.
- [24] *op. cit.*, p. 46.
- [25] Schenk P., Melosh H.J. (1994), *Lobate Thrust Scarps and the Thickness of Mercury's Lithosphere*, Abstracts of the 25th Lunar and Planetary Science Conference, 1994LPI....25.1203S
- [26] Bill Arnett, « Mercury (<http://www.nineplanets.org/mercury.html>) », The Nine Planets, 2006. Consulté le 14 septembre 2006.
- [27] *op. cit.*, p. 47.
- [28] Benz, W., Slattery, W. L., Cameron, A. G. W. (1988), *Collisional stripping of Mercury's mantle*, Icarus, v. 74, p. 516–528.
- [29] Cameron, A. G. W. (1985), *The partial volatilization of Mercury*, Icarus, v. 64, p. 285–294.
- [30] *op. cit.*, p. 48.
- [31] Mark Alan Bullock, « The Stability of Climate on Venus (<http://www.boulder.swri.edu/~bullock/Homedocs/PhDThesis.pdf>) », Southwest Research Institute, 1997. Consulté le 26 décembre 2006.
- [32] *op. cit.*, p. 51.
- [33] Paul Rincon, « Climate Change as a Regulator of Tectonics on Venus (http://www.boulder.swri.edu/~bullock/Homedocs/Science2_1999.pdf) », Johnson Space Center Houston, TX, Institute of Meteoritics, University of New Mexico, Albuquerque, NM, 1999. Consulté le 19 novembre 2006.

- [34] Anne E. Egger, M.A./M.S., « Earth's Atmosphere: Composition and Structure (http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?c3=&mid=107&l=1) », VisionLearning.com. Consulté le 26 décembre 2006.
- [35] *op. cit.*, p. 52.
- [36] *op. cit.*, p. 56.
- [37] *op. cit.*, p. 38.
- [38] *op. cit.*, p. 47.
- [39] David Noever, « Modern Martian Marvels: Volcanoes? (<http://www.astrobio.net/news/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=1360&mode=thread&order=0&thold=0>) », NASA Astrobiology Magazine, 2004. Consulté le 23 juillet 2006.
- [40] *op. cit.*, p. 55.
- [41] Scott S. Sheppard, David Jewitt, et Jan Kleyna, « A Survey for Outer Satellites of Mars: Limits to Completeness (<http://www.journals.uchicago.edu/cgi-bin/resolve?id=doi:10.1086/424541&erFrom=-8489916761933094142Guest>) », The Astronomical Journal, 2004. Consulté le 26 décembre 2006.
- [42] New study reveals twice as many asteroids as previously believed (<http://www.alphagalileo.org/index.cfm?fuseaction=readRelease&Releaseid=9162>), ESA, 2002. Consulté le 23 juin 2006.
- [43] G. A. Krasinsky, E. V. Pitjeva, M. Vasilyev, E. I. Yagudina, « Hidden Mass in the Asteroid Belt », dans *Icarus*, vol. 158, n° 1, juillet 2002, p. 98–105 [texte intégral (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2002Icar..158...98K&db_key=AST&data_type=HTML&format=&high=4326fb2cf906949), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1006/icar.2002.6837>)].
- [44] M. Beech, D. I. Steel, « On the Definition of the Term Meteoroid », dans *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 36, n° 3, septembre 1995, p. 281–284 [texte intégral (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1995QJRAS..36..281B&db_key=AST&data_type=HTML&format=&high=44b52c369007834) (le 31 aout 2006)].
- [45] History and Discovery of Asteroids (http://dawn.jpl.nasa.gov/DawnClassrooms/1_hist_dawn/history_discovery/Development_a_modeling_scale.doc), NASA. Consulté le 29 août 2006.
- [46] Phil Berardelli, « Main-Belt Comets May Have Been Source Of Earths Water (http://www.spacedaily.com/reports/Main_Belt_Comets_May_Have_Been_Source_Of_Earths_Water.html) », SpaceDaily, 2006. Consulté le 23 juin 2006.
- [47] Jack J. Lissauer, David J. Stevenson, « Formation of Giant Planets ([http://caltech-era.org/faculty/stevenson/pdfs/lissauer&stevenson\(PPV\).pdf](http://caltech-era.org/faculty/stevenson/pdfs/lissauer&stevenson(PPV).pdf)) », NASA Ames Research Center; California Institute of Technology, 2006. Consulté le 16 janvier 2006.
- [48] Pappalardo, R T, « Geology of the Icy Galilean Satellites: A Framework for Compositional Studies (<http://www.agu.org/cgi-bin/SFgate/SFgate?&listenv=table&multiple=1&range=1&directget=1&application=fm99&database=/data/epubs/wais/indexes/fm99/fm99&maxhits=200&="P11C-10">) », Brown University, 1999. Consulté le 16 janvier 2006.
- [49] NASA JPL (http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_discovery)
- [50] J. S. Kargel, « Cryovolcanism on the icy satellites (<http://www.springerlink.com/content/n7435h4506788p22/>) », U.S. Geological Survey, 1994. Consulté le 16 janvier 2006.
- [51] Hawksett, David; Longstaff, Alan; Cooper, Keith; Clark, Stuart, « 10 Mysteries of the Solar System (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AsNow..19h..65H>) », Astronomy Now, 2005. Consulté le 16 janvier 2006.
- [52] Podolak, M.; Reynolds, R. T.; Young, R., « Post Voyager comparisons of the interiors of Uranus and Neptune (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1990GeoRL..17.1737P>) », NASA, Ames Research Center, 1990. Consulté le 16 janvier 2006
- [53] Duxbury, N.S., Brown, R.H., « The Plausibility of Boiling Geysers on Triton (<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/handle/2014/28034?mode=full>) », Beacon eSpace, 1995. Consulté le 16 janvier 2006.
- [54] M. Królikowska, « A study of the original orbits of *hyperbolic* comets », dans *Astronomy & Astrophysics*, vol. 376, n° 1, 2001, p. 316–324 [texte intégral (http://www.aanda.org/index.php?option=com_base_ora&url=articles/aa/full/2001/34/aa1250/aa1250.right.html&access=standard&Itemid=81), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010945>) (le 2 janvier 2007)].
- [55] Fred L. Whipple, « The activities of comets related to their aging and origin (<http://www.springerlink.com/content/x0358l71h463w246/>) », 04/1992. Consulté le 26 décembre 2006.
- [56] TNO/Centaurs diameters and albedos (<http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnodiam.html>), 2005. Consulté le 8 novembre 2006.
- [57] Patrick Vanouplines, « Chiron biography (<http://www.vub.ac.be/STER/www.astro/chibio.htm>) », Vrije Universitet Brussel, 1995. Consulté le 23 juin 2006.
- [58] List Of Centaurs and Scattered-Disk Objects (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Centaurs.html>), IAU: Minor Planet Center. Consulté le 2 avril 2007.
- [59] Audrey Delsanti et David Jewitt, « The Solar System Beyond The Planets (<http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/papers/2006/DJ06.pdf>) », Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2006. Consulté le 3 janvier 2007.
- [60] M. W. Buie, R. L. Millis, L. H. Wasserman, J. L. Elliot, S. D. Kern, K. B. Clancy, E. I. Chiang, A. B. Jordan, K. J. Meech, R. M. Wagner, D. E. Trilling, « Procedures, Resources and Selected Results of the Deep Ecliptic Survey (<http://www.citebase.org/fulltext?format=application/pdf&identifier=oai:arXiv.org:astro-ph/0309251>) », Lowell Observatory, University of Pennsylvania, Large Binocular Telescope Observatory, Massachusetts Institute of Technology, University of Hawaii, University of California at Berkeley, 2005. Consulté le 7 septembre 2006.
- [61] E. Dotto1, M.A. Barucci2, et M. Fulchignoni, « Beyond Neptune, the new frontier of the Solar System (<http://sait.oat.ts.astro.it/MSAIS/3/PDF/20.pdf>) », 24 août 2006. Consulté le 26 décembre 2006.
- [62] J. Fajans, « Autoresonant (nonstationary) excitation of pendulums, Plutinos, plasmas, and other nonlinear oscillators », dans *American Journal of Physics*, vol. 69, n° 10, octobre 2001, p. 1096–1102 [texte intégral (http://scitation.aip.org/journals/doc/AJPIAS-ft/vol_69

- iss_10/1096_1.html), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1119/1.1389278>) (le 26 décembre 2006)]
- [63] David Jewitt, « The 1000 km Scale KBOs (http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/kb/big_kbo.html) », University of Hawaii, 2005. Consulté le 16 juillet 2006.
- [64] Mike Brown, « The discovery of 2003 UB313-Eris, the 10th planet-largest known dwarf planet. (<http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/planetlila/>) », CalTech, 2005. Consulté le 15 septembre 2006.
- [65] Voyager Enters Solar System's Final Frontier (http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/voyager_agu.html), NASA. Consulté le 2 avril 2007.
- [66] Fahr, H. J.; Kausch, T.; Scherer, H., « A 5-fluid hydrodynamic approach to model the Solar System-interstellar medium interaction (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2000A&A...357..268F>) », Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung der Universität Bonn, 2000. Consulté le 23 juin 2006.
- [67] P. C. Frisch, « The Sun's Heliosphere & Heliopause (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020624.html>) », University of Chicago, 2002. Consulté le 23 juin 2006.
- [68] R. L. McNutt, Jr. et al., « Innovative Interstellar Explorer », dans *AIP Conference Proceedings*, vol. 858, 2006, p. 341–347 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006AIPC..858..341M>)].
- [69] Interstellar space, and step on it! (<http://space.newscientist.com/article/mg19325850.900-interstellar-space-and-step-on-it.html>), New Scientist, 5 janvier 2007. Consulté le 5 février 2007.
- [70] Stern SA, Weissman PR., « Rapid collisional evolution of comets during the formation of the Oort cloud. (http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&list_uids=11214311&dopt=Citation) », Space Studies Department, Southwest Research Institute, Boulder, Colorado, 2001. Consulté le 19 novembre 2006.
- [71] Bill Arnett, « The Kuiper Belt and the Oort Cloud (<http://www.nineplanets.org/khoc.html>) », nineplanets.org, 2006. Consulté le 23 juin 2006.
- [72] David Jewitt, « Sedna - 2003 VB₁₂ (<http://www.ifa.hawaii.edu/~jewitt/kb/sedna.html>) », University of Hawaii, 2004. Consulté le 23 juin 2006.
- [73] Mike Brown, « Sedna (<http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/sedna/>) », CalTech. Consulté le 2 mai 2007.
- [74] Durda D.D.; Stern S.A.; Colwell W.B.; Parker J.W.; Levison H.F.; Hassler D.M., « A New Observational Search for Vulcanoids in SOHO/LASCO Coronagraph Images (<http://www.ingentaconnect.com/search/expand?pub=infobike://ap/is/2000/00000148/00000001/art06520&unc=ml>) », 2004. Consulté le 23 juillet 2006.
- [75] T. J. J. See, « The Past History of the Earth as Inferred from the Mode of Formation of the Solar System », dans *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 48, n° 191, 23 avril 1909, p. 119–128 [texte intégral ([http://links.jstor.org/sici?doi=0003-049X\(190901/04\)48:191<119:TPHOTE>2.0.CO;2-U&size=LARG](http://links.jstor.org/sici?doi=0003-049X(190901/04)48:191<119:TPHOTE>2.0.CO;2-U&size=LARG)) (le 23 juillet 2006)].
- [76] Lecture 13: The Nebular Theory of the origin of the Solar System (http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/mario/solar_system.html), University of Arizona. Consulté le 27 décembre 2006.
- [77] Jeff Hester, « New Theory Proposed for Solar System Formation (http://www.universetoday.com/am/publish/new_theory_solar_system_formation.html) », Arizona State University, 2004. Consulté le 11 janvier 2007.
- [78] W. M. Irvine, « The chemical composition of the pre-solar nebula (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1983coex....1....3I>) », Amherst College, Massachusetts. Consulté le 15 février 2007.
- [79] J. J. Rawal, « Further Considerations on Contracting Solar Nebula », dans *Physics and Astronomy*, vol. 34, n° 1, janvier 1985, p. 93–100 [texte intégral (<http://www.springerlink.com/content/r5825j48k66n8284/fulltext.pdf>) **[PDF]**, lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1007/BF00054038>) (le 27 décembre 2006)].
- [80] Yoshimi Kitamura, Munetake Momose, Sozo Yokogawa, Ryohei Kawabe, Shigeru Ida et Motohide Tamura, « Investigation of the Physical Properties of Protoplanetary Disks around T Tauri Stars by a 1 Arcsecond Imaging Survey: Evolution and Diversity of the Disks in Their Accretion Stage », dans *The Astrophysical Journal*, vol. 581, n° 1, 10 décembre 2002, p. 357–380 [texte intégral (<http://www.journals.uchicago.edu/ApJ/journal/issues/ApJ/v581n1/56044/56044.text.html>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/344223>) (le 9 janvier 2007)].
- [81] J. S. Greaves, « Disks Around Stars and the Growth of Planetary Systems », dans *Science*, vol. 307, n° 5706, 7 janvier 2005, p. 68–71 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/307/5706/68>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1101979>) (le 16 novembre 2006)].
- [82] Present Understanding of the Origin of Planetary Systems (<http://www7.nationalacademies.org/ssb/detectionch3.html>), National Academy of Sciences, April 5, 2000. Consulté le 19 janvier 2007.
- [83] Manfred Küker, Thomas Henning et Günther Rüdiger, « Magnetic Star-Disk Coupling in Classical T Tauri Systems (<http://www.journals.uchicago.edu/ApJ/journal/issues/ApJ/v589n1/56674/56674.text.html>) », Science Magazine, 2003. Consulté le 16 novembre 2006.
- [84] Antonio Chrysostomou et Phil W Lucas, « The formation of stars ([http://taylorandfrancis.metapress.com/\(sxqte345bi55ypvaql4ter55\)/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,3,6;journal,12,60;linkingpublicationresults,1:100654,1](http://taylorandfrancis.metapress.com/(sxqte345bi55ypvaql4ter55)/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,3,6;journal,12,60;linkingpublicationresults,1:100654,1)) », Department of Physics Astronomy & Mathematics University of Hertfordshire. Consulté le 2 mai 2007.
- [85] P. Goldreich et W. R. Ward, « The Formation of Planetesimals (<http://www.journals.uchicago.edu/ApJ/journal/issues/ApJ/v589n1/56674/56674.text.html>) », The American Astronomical Society, 1973. Consulté le 16 novembre 2006.
- [86] J.-M. Petit et A. Morbidelli, « The Primordial Excitation and Clearing of the Asteroid Belt (<http://www.gps.caltech.edu/classes/ge133/reading/asteroids.pdf>) », Centre National de la Recherche Scientifique, Observatoire de Nice, 2001. Consulté le 19 novembre 2006.

- [87] M. J. Mumma, M. A. DiSanti, N. Dello Russo, K. Magee-Sauer, E. Gibb et R. Novak, « Remote infrared observations of parent volatiles in comets: A window on the early solar system », dans *Advances in Space Research*, vol. 31, n° 12, juin 2003, p. 2563–2575 [texte intégral (<http://www.ifa.hawaii.edu/~meech/a740/papers/mumma03.pdf>) **[PDF]**, lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00578-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00578-7)) (le 16 novembre 2006)].
- [88] E. W. Thommes, M. J. Duncan et H. F. Levison, « The formation of Uranus and Neptune in the Jupiter–Saturn region of the Solar System (<http://www.nature.com/nature/journal/v402/n6762/abs/402635a0.html?year=1999>) », Department of Physics, Queen's University, Kingston, Ontario; Space Studies Department, Southwest Research Institute, Boulder, Colorado. Consulté le 2 avril 2007.
- [89] B. G. Elmegreen, « On the disruption of a protoplanetary disk nebula by a T Tauri like solar wind », dans *Astronomy and Astrophysics*, vol. 80, n° 1, 11-1979, p. 77–78 [texte intégral (http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1979A&A....80...77E&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf) **[PDF]** (le 11 février 2007)].
- [90] Heng Hao, « Disc-Protoplanet interactions », dans *Astronomy and Astrophysics*, vol. 80, n° 1, 11-1979, p. 77–78 [texte intégral (<http://cfa-www.harvard.edu/~kstanek/astro200/disk-protoplanet.pdf>) **[PDF]** (le 19 novembre 2006)].
- [91] A.D. Dolgov, « Magnetic fields in cosmology (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0306443>) », 2003. Consulté le 23 juillet 2006.
- [92] R. Drimmel, D. N. Spergel, « Three Dimensional Structure of the Milky Way Disk (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101259>) », 2001. Consulté le 23 juillet 2006.
- [93] Stacy Leong, « Period of the Sun's Orbit around the Galaxy (Cosmic Year) (<http://hypertextbook.com/facts/2002/StacyLeong.shtml>) », 2002. Consulté le 2 avril 2007.
- [94] Leslie Mullen, « Galactic Habitable Zones (<http://www.astrobio.net/news/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=139>) », Astrobiology Magazine, 2001. Consulté le 23 juin 2006.
- [95] Supernova Explosion May Have Caused Mammoth Extinction (<http://www.physorg.com/news6734.html>), Physorg.com, 2005. Consulté le 2 février 2007.
- [96] C. Barbieri, « Elementi di Astronomia e Astrofisica per il Corso di Ingegneria Aerospaziale V settimana (http://www.google.com/search?q=cache:yKkhLXIaAv0J:debora.pd.astro.it/planets/barbieri/IngAeroAnnoA2004-05/5_LecturesAstroAstroIng04_05QuintaSettimana.ppt+Elementi+di+Astronomia+e+Astrofisica+per+il+Corso+di+Ingegneria+Aerospaziale+V+settimana&hl=en&ct=clnk&cd=1&gl=us) », IdealStars.com, 2003. Consulté le 12 février 2007.
- [97] Near-Earth Supernovas (http://science.nasa.gov/headlines/y2003/06jan_bubble.htm), NASA. Consulté le 23 juillet 2006.
- [98] Stars within 10 light years (<http://www.solstation.com/stars/s10ly.htm>), SolStation. Consulté le 2 avril 2007.
- [99] Tau Ceti (<http://www.solstation.com/stars/tau-ceti.htm>), SolStation. Consulté le 2 avril 2007.
- [100] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/Universe_Reference_Map_%28Location%29_001.jpeg
- [101] Eric W. Weisstein, « Galileo Galilei (1564–1642) (<http://scienceworld.wolfram.com/biography/Galileo.html>) », Wolfram Research, 2006. Consulté le 8 novembre 2006.
- [102] Discoverer of Titan: Christiaan Huygens (http://www.esa.int/esaSC/SEMJRT57ESD_index_0.html), ESA Space Science, 2005. Consulté le 8 novembre 2006.
- [103] Giovanni Domenico Cassini (June 8, 1625–September 14, 1712) (<http://www.seds.org/messier/Xtra/Bios/cassini.html>), SEDS.org. Consulté le 8 novembre 2006.
- [104] Comet Halley (<http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/comets/halley.html>), University of Tennessee. Consulté le 27 décembre 2006.
- [105] Herschel, Sir William (1738–1822) (<http://science.enotes.com/earth-science/herschel-sir-william>), enotes.com. Consulté le 8 novembre 2006.
- [106] Discovery of Ceres: 2nd Centenary, 1 January 1801–1 January 2001 (<http://www.astropa.unipa.it/Asteroids2001/>), astropa.unipa.it, 2000. Consulté le 8 novembre 2006.
- [107] J. J. O'Connor et E. F. Robertson, « Mathematical discovery of planets (http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Neptune_and_Pluto.html) », St. Andrews University, 1996. Consulté le 8 novembre 2006.
- [108] Jane X. Luu et David C. Jewitt , « KUIPER BELT OBJECTS: Relics from the Accretion Disk of the Sun (<http://arjournals.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.astro.40.060401.093818>) », MIT, University of Hawaii, 2002. Consulté le 9 novembre 2006.
- [109] Minor Planet Center, « List of Trans-Neptunian Objects (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/TNOs.html>) ». Consulté le 2 avril 2007.
- [110] Eris (2003 UB313 (<http://www.solstation.com/stars/ub313.htm>)), Solstation.com, 2006. Consulté le 9 novembre 2006.
- [111] Donald Savage et Michael Mewhinney, « Farewell Pioneer 10 (http://solarsystem.nasa.gov/news/display.cfm?News_ID=4618) », NASA, 25 février 2003. Consulté le 8 octobre 2007.
- [112] Randy Culp, « Time Line of Space Exploration (<http://my.execpc.com/~culp/space/timeline.html>) », 2002. Consulté le 1er juillet 2006.
- [113] New Horizons NASA's Pluto-Kuiper Belt Mission (<http://pluto.jhuapl.edu/>), 2006. Consulté le 1er juillet 2006.

Références pour « Any-Chantal Levasseur-Regourd, André Brahic, Thérèse Encrenaz, François Forget, Marc Ollivier, Sylvie Vauclair, *Système solaire et planètes*, éditions ellipses, 2009, 249 p. (ISBN 978-2-7298-4048-6) » ;

Références pour « Thérèse Encrenaz, *Système Solaire*, *Systèmes Stellaires*, édition Quai des sciences, 2005, 168 p. (ISBN 2-10-048726-4) » ;

Références pour « Jonathan Tavel, *Voyage au cœur du Système solaire*, édition viaMedias, 2005, 328 p. (ISBN 2-84964-037-9) » ;

Références pour « André Brahic, *Planètes & satellites, cinq leçons d'astronomie*, éditions Vuibert, 2001, 360 p. (ISBN 2-7117-5287-9) » ;

Références pour « Serge Brunier, *Voyage dans le système solaire*, éditions Bordas, 1996, 232 p. (ISBN 2-04-027141-4) ».

Planètes telluriques

Planète tellurique

Les **planètes telluriques** (du latin *tellus*, la terre, le sol), en opposition aux planètes gazeuses, sont des planètes composées de roches et de métaux qui possèdent en général trois enveloppes concentriques (noyau, manteau et croûte). Leur surface est solide et elles sont composées principalement d'éléments non volatils, généralement des roches silicatées, du métal et du fer. Leur densité est donc relativement importante et comprise entre 4 et 5,5.



Les quatre planètes telluriques (à l'échelle) du système solaire :
Mercure, Vénus, Terre et Mars.

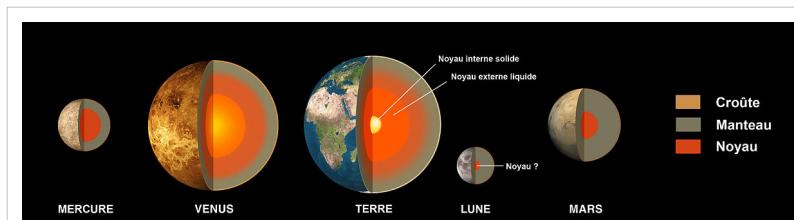
Dans notre système solaire, les planètes telluriques sont les quatre planètes internes, situées entre le Soleil et la ceinture d'astéroïdes : Mercure, Vénus, la Terre et Mars. La Lune ainsi que Io, la première des quatre grosses lunes de Jupiter, ont une structure similaire et pourraient donc aussi être qualifiés de *telluriques*.

Les planètes telluriques sont beaucoup plus petites que les planètes gazeuses mais ont une densité beaucoup plus élevée car elles sont composées de fers et de silicates.

On recherche activement des planètes de ce genre parmi les systèmes planétaires autres que le nôtre, mais leur détection est rendue difficile par leur faible masse (et leur proximité à l'étoile) comparée à celle des géantes gazeuses et des étoiles. Une exoplanète tellurique a été découverte et cette découverte a été rendue publique en avril 2007 : Gliese 581 c (une autre semblait avoir été découverte, OGLE-2005-BLG-390Lb, le 26 janvier 2006).

Structure

Les planètes telluriques ont à peu près toutes la même structure : un noyau central métallique (souvent du fer) entouré d'un manteau silicaté^[1]. La Lune est semblable mais possède un noyau de fer beaucoup plus petit. Les planètes telluriques ont des canyons, des cratères, des montagnes et des volcans. Elles possèdent des atmosphères secondaires^[2] (atmosphères générées via le volcanisme interne ou les impacts de comètes^[3] , contrairement au géantes gazeuses qui, elles, possèdent une atmosphère primaire), atmosphères directement capturées à partir de la nébuleuse originelle solaire^[4].



Structure interne des planètes telluriques et de la Lune.

Théoriquement, il existe deux types de planètes telluriques ou rocheuses : l'une dominée par des composés de silicium (planètes silicatées) et l'autre dominée par des composés de carbone (planètes carbonées ou "planètes de diamant"), comme les chondrites carbonées^[5] . Comme le suggère Marc Kuchner et ses collègues, les planètes de

carbone peuvent se former dans un disque protoplanétaire riche en carbone ou pauvre en oxygène^[5]. Autour d'un noyau de fer, il se formerait un manteau de carbures et éventuellement de graphite, dans lequel, si les conditions de pression le permettent, peut se former une couche riche en diamants^[6]. La planète peut-être entouré d'une atmosphère secondaire riche en composé de carbone^[7].

Les Planètes

Planètes telluriques solaires

Le système solaire possède quatre planètes telluriques : Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Une seule planète tellurique, la Terre, est connue pour avoir une hydrosphère active.

Lors de la formation du système solaire, il y en avait probablement beaucoup plus (planétésimaux), mais ils ont tous fusionné avec ou ont été détruit par les quatre planètes restantes dans la nébuleuse solaire, ou encore, expulsés du système solaire via l'effet de fronde gravitationnelle.

Les planètes telluriques se situent dans la partie interne du système solaire. Ce n'est pas une coïncidence, car comme elles sont proche du Soleil, la température tend à augmenter et les composants les plus légers de leur atmosphère primaire (hydrogène et hélium) se sont échappés dans l'espace pour atteindre la vitesse de libération de leur planète. Leur position détermine aussi leur température de surface qui sont relativement élevées et la période de révolution est plus rapide que celui des géantes gazeuses du système solaire externe, alors que leur période de rotation est plus lente^[8].

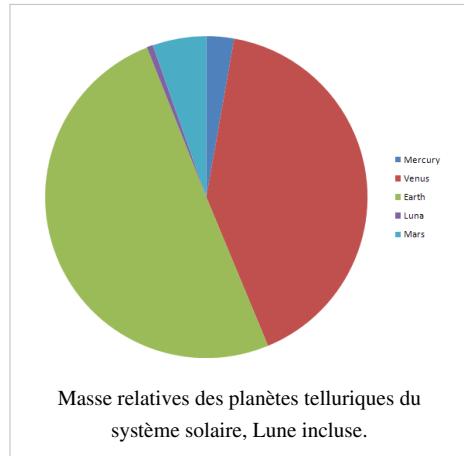
Ces planètes ont également un autre point commun : l'absence ou le faible nombre de satellites naturels et leur petite taille (moins de 15000 km de diamètre)^[8].

La Lune, Io et Europe sont principalement composés de roches et sont considérés comme des corps telluriques, mais ils ne tournent pas directement autour du Soleil. Le rayonnement émis par Jupiter pendant sa formation a du réchauffer une grande partie des anneaux de Jupiter conduisant à une composition rocheuse pour les deux satellites, bien qu'ils soient situés au-delà de la limite des glaces (*frost line*) du système solaire.

Selon certains astronomes, Cérès est un corps tellurique important^[9], bien qu'il n'ait pas fait le vide autour de lui, il doit être considéré comme une planète. D'autres astronomes, en revanche, principalement en raison de sa densité, pensent qu'il a plus de points communs avec les satellites des géantes gazeuses^{[10] .[11] .[12]}. La mission Dawn de la NASA, qui se rendra sur Cérès en 2015 pour recueillir des données, permettra de faire la lumière sur sa catégorie.

La plupart des astéroïdes ont une composition semblable à celle des planètes rocheuses, mais ils n'ont pas de forme sphérique et n'ont pas subi le processus de différenciation interne, c'est pour cela qu'ils ne sont pas considérés comme des corps telluriques.

Enfin, les corps comme Pluton, Ganymède et Titan (certains chercheurs incluent également Europe^[13] dans la liste, considéré comme un corps frontalier au deux catégories) ont de nombreuses caractéristiques qu'ils partagent avec les planètes telluriques, comme le fait qu'ils soit solides, qu'il ait une mince atmosphère, mais ils sont principalement constitués de glace et de roches de nature volatiles^[13] (comme les valeurs de densités l'indiquent : 1.5 - 2 g/cm³) parce-qu'ils sont au-delà de la limite des glaces du système solaire. Malgré les différences de composition et leur structure interne, certains astronomes les considèrent comme des corps telluriques^{[14] .[15]}. D'autres ont proposé des classifications et des descriptions alternatives^[16], comme des naines de glace, mais elles ont été rejeté par l'Union astronomique internationale.



Tendances des densités

La densité non-compressée d'une planète tellurique est la densité moyenne que ses matériaux auraient à pression nulle. Une haute valeur de densité non-compressée indique une teneur plus élevée en métal. La densité non-compressée est plus utilisée que la densité moyenne réelle car le noyau des planètes tend à l'augmenter (la densité moyenne d'une planète dépend aussi bien de sa taille que de sa composition).

Les densités non-compressées des planètes telluriques solaires, des trois plus gros astéroïdes et de deux satellites des géantes gazeuses sont présentées ci-dessous. Les densités ont généralement tendances à baisser lorsque la distance au Soleil augmente.

Objet	Masse (M_{\oplus})	Rayon Terrestre (R_{\oplus})	densité moyenne réelle (g/cm^3)	densité non-compressée (g/cm^3)	grand axe (UA)
Mercure ☿	0.053	0.3825	5.4	5.3	0.39
Vénus ♀	0.815	0.9488	5.2	4.4 - 3.95	0.72
Terre ⊕	1	1	5.5	4.4 - 4.03	1.0
Lune ☽	0.012	0.2726	3.3	3.3	1.0
Mars ♂	0.107	0.53226	3.9	3.8 - 3.71	1.5
Vesta ↘	4.5×10^{-5}	0.0414	3.4	3.4	2.3
Pallas ♀	3.6×10^{-5}	0.0417	2.8	2.8	2.8
Cérès ♀	1.59×10^{-4}	0.076	2.1	2.1	2.8
Europe	0.008	0.2460	3.96	3.96	5.2
Io	0.015	0.2845	3.55	3.55	5.2

La principale exception à cette règle est la densité de la Lune, qui doit probablement sa plus faible densité à son origine inhabituelle.

On ignore si les planètes telluriques extra-solaire suivent aussi cette tendance. Par exemple, Kepler-10b a une densité de 8.8 g/cm^3 et orbite plus près de son étoile que Mercure. D'autres part, les planètes Kepler-11b à Kepler-11f orbitent aussi proche de leur étoile que Mercure, mais ont des densités inférieures aux planètes de notre système^[17].

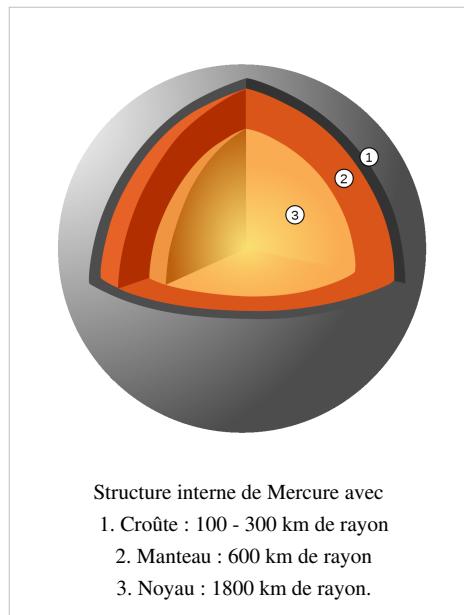
Mercure

Mercure est constitué à 70 % de matériaux métalliques (fer principalement) et de 30 % de roches silicatées. Sa densité est de 5.427 g/cm^3 . Les géologues estiment que le noyau occupe environ 42 % de son volume. Le noyau en fusion est entouré d'un manteau de roches silicatées. Sur la croûte de Mercure se trouve de nombreuses petites arêtes qui s'étendent sur des centaines de kilomètres de longueur. Cela laisse supposer que le noyau et le manteau se sont refroidis et contractés alors que la croûte s'était déjà solidifiée.

Des hypothèses existent pour expliquer cette teneur élevée en fer. La théorie la plus largement acceptée est que Mercure avait un rapport métal/silicate semblable à ceux des chondrites et avait une masse d'environ 2.25 fois sa masse actuelle. Mais au début de l'histoire du système solaire, Mercure pourrait avoir été percutée par un planétésimal d'environ 1/6 de la masse de Mercure et un diamètre de



La planète Mercure par MESSENGER le 14 janvier 2008.



des observations pour les vérifier^[18].

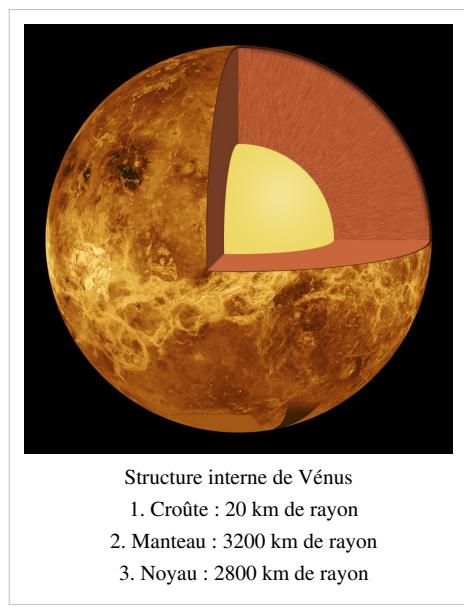
plusieurs centaines de kilomètres. L'impact aurait arraché une grande partie de la croûte primitive et du manteau, laissant le noyau intact.

Alternativement, Mercure aurait pu se former à partir de la nébuleuse solaire avant que la sortie d'énergie du Soleil ne se soit stabilisée. La planète aurait eu 2 fois sa masse actuelle, mais comme la proto-étoile était contractée, la température devait être comprise entre 2500 et 3000 K, et même peut-être jusqu'à 10000 K. La surface rocheuse de Mercure a pu être vaporisée à de telles températures, formant une atmosphère de "vapeur rocheuse" qui a pu être emportée par le vent solaire.

Une troisième hypothèse propose que la nébuleuse solaire à causée une traînée sur les particules lors de l'accrétion de Mercure, ce qui signifie que les matériaux les plus légers se sont séparés des matériaux d'accrétion.

Chaque hypothèse prévoit une composition de surface différente, et les deux missions spatiales, MESSENGER et BepiColombo, doivent faire

Vénus



Avec une densité de 5.26 g/cm^3 et un rayon de 6051 km, Vénus est la sœur jumelle de la Terre. La croûte vénusienne représente environ 0.34 % du rayon de la planète et les analyses faites par différentes sondes ont prouvé que le matériau extérieur de Vénus est semblable au granite et au basalte terrestre.

Vénus possèderait un manteau rocheux représentant environ 52,5 % du rayon de la planète, composé essentiellement de silicates et d'oxydes de métaux.

Le noyau de Vénus serait constitué de deux parties : un noyau externe constitué de fer et de nickel liquides qui représenterait environ 30 % du rayon de la planète ; un noyau interne composé de fer et de nickel solides qui représenterait environ 17 % du rayon de Vénus. Mais cette précision est spéculative, car contrairement à la Terre, il n'y a pas eu de mesures sismiques. Il n'est pas impossible que le noyau de Vénus soit entièrement liquide^[19].



Vénus en vraies couleurs vue par Mariner 10.

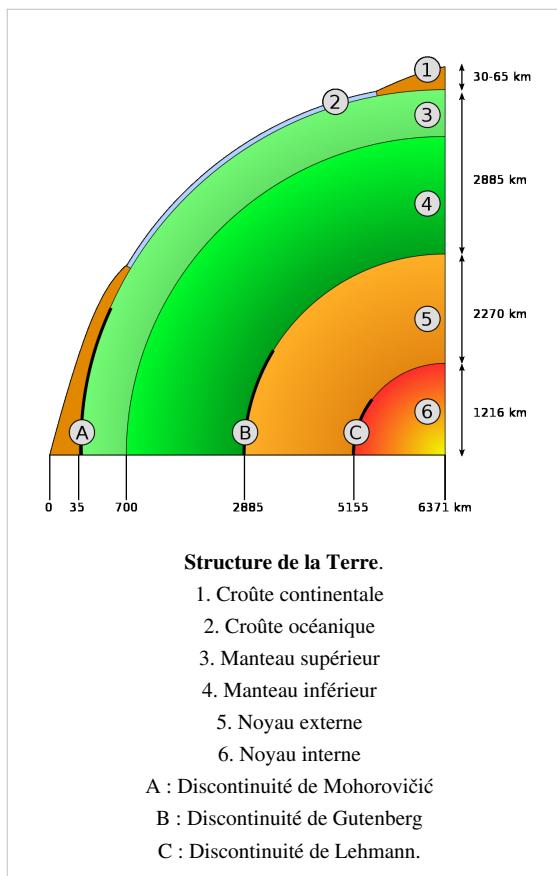
Terre

La Terre est composée de :

- Une croûte continentale solide essentiellement granitique, surmontée par endroits de roches sédimentaires. Elle est plus épaisse que la croûte océanique (de 30 km à 100 km sous les massifs montagneux). La croûte ou écorce terrestre représente environ 1,5 % du volume terrestre. Elle était anciennement appelée SIAL (silicium + aluminium).
- Une croûte océanique solide essentiellement composée de roches basaltiques. Relativement fine (environ 5 km). Elle est également appelée SIMA (silicium + magnésium).
- Un manteau supérieur, qui est moins visqueux (plus « ductile ») que le manteau inférieur car les contraintes physiques qui y règnent le rendent en partie liquide. Il est formé essentiellement de roches telles que la péridotite (ses minéraux sont : olivine, pyroxène, grenat).
- Un manteau inférieur aux propriétés d'un solide élastique. Le manteau n'est pas liquide comme on pourrait le croire en regardant les coulées de lave de certaines éruptions volcaniques mais il est moins « rigide » que les autres couches. Le manteau représente 84 % du volume terrestre.
- Un noyau externe liquide essentiellement composé de l'alliage fer-nickel (environ 80 % - 15 %) plus quelques éléments plus légers. Sa viscosité est proche de celle de l'eau, sa température moyenne atteint 4000°C et sa densité 10 g/cm^3 . Cette énorme quantité de métal en fusion est certainement agitée. Des écoulements de fer liquide peuvent y engendrer des courants électriques (par effet Seebeck) qui donnent naissance à des champs magnétiques



La Terre vue depuis Apollo 17 en 1972.



qui renforcent les courants, créant ainsi un effet dynamo, en s'entretenant les uns les autres. Le noyau liquide est donc à l'origine du champ magnétique terrestre.

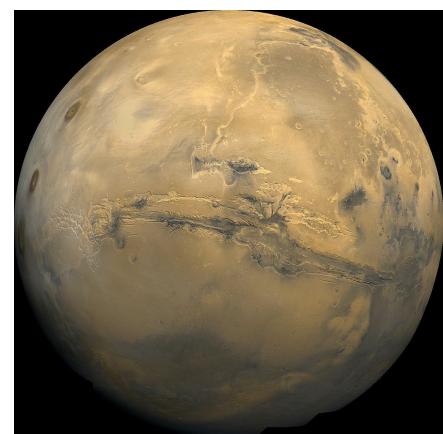
- Un noyau interne solide (également appelé "graine") essentiellement métallique (alliage de fer et de nickel principalement) constitué par cristallisation progressive du noyau externe. La pression, qui est de 3,5 millions de bars (350 Gpa), le maintient dans un état solide malgré une température supérieure à 5000°C et une densité d'environ 13 g/cm³[20].

Mars

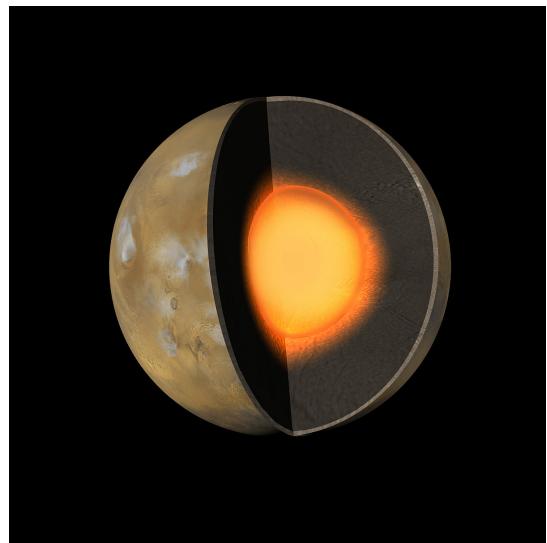
En première approximation, on peut considérer que l'écorce martienne a une densité uniforme de 2,9 g/cm³, ce qui conduit à une épaisseur moyenne d'environ 50 km, soit 4,4 % du rayon de la planète.

En l'absence de données sismiques exploitables, la structure interne de la planète demeure difficile à préciser. L'exploitation des informations recueillies par les diverses sondes qui ont exploré la planète a néanmoins permis de déterminer que celle-ci serait constituée d'un manteau solide de silicates riches en fer et d'un noyau liquide ou au moins encore essentiellement liquide. Une communication a fait état de calculs fondés sur des modèles géochimiques de la planète selon lesquels le noyau contiendrait de 5 à 13,5 % de soufre et le manteau contiendrait de 11 à 15,5 % de fer.

Le noyau de Mars aurait un rayon compris entre 1300 et 2000 km (soit entre 38 % et 59 % le rayon de la planète, incertitude due en partie à l'inconnue concernant la fraction de manteau qui pourrait être liquide et réduirait par conséquent la taille du noyau ; on trouve assez souvent citée



Mars vu par Viking 1 en 1980.



Structure interne de la planète Mars :

1. Écorce d'environ 50 km d'épaisseur
2. Manteau d'environ 1860 km d'épaisseur
3. Noyau d'environ 1480 km de rayon, essentiellement, voire entièrement, liquide.

la valeur 1480 km comme rayon du noyau de Mars, soit 43,7 % du rayon moyen de la planète elle-même. Les données de Mars Pathfinder ont ainsi permis d'affiner celles précédemment recueillies avec les sondes Viking et d'établir que la masse de Mars est plutôt concentrée en son centre, ce qui plaide pour un noyau dense et pas trop gros.

Avec une température estimée à environ 2000 K, le noyau de Mars serait entièrement liquide pour un taux d'éléments légers (essentiellement du soufre) de 14,2 % en masse, ce qui laisse supposer une composition majoritairement de fer allié à d'autres métaux (typiquement du nickel) et peut-être jusqu'à 17 % d'éléments légers. Des expériences conduites sur des systèmes fer-soufre et fer-nickel-soufre à des pressions comparables à celles estimées au cœur de Mars amènent à envisager que le noyau martien, encore entièrement liquide, se solidifierait par cristallisation superficielle, au contact du manteau, formant des sortes de « flocons » tombant en « neige » jusqu'au centre ; une autre possibilité pourrait être la formation d'une graine solide de sulfure de fer cristallisé au

centre du noyau liquide^[21].

Lune

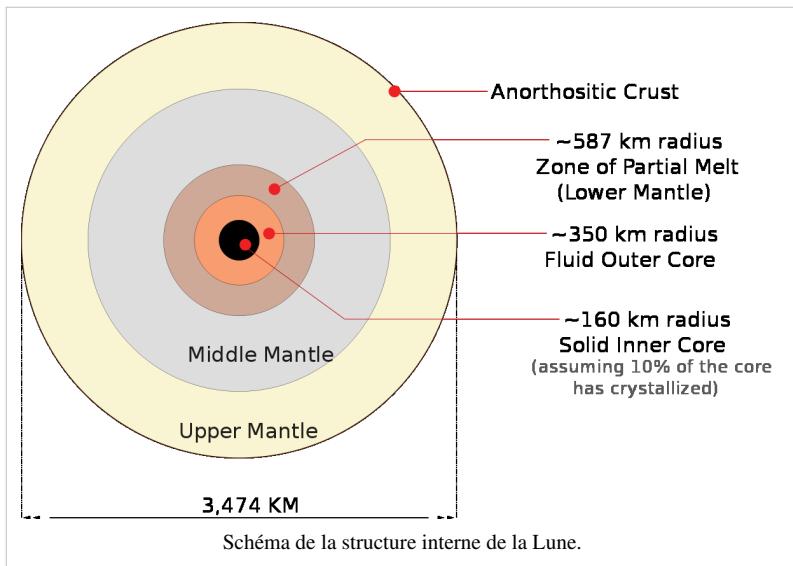
On considère aujourd'hui que la Lune est un corps différencié : sa structure en profondeur n'est pas homogène mais résulte d'un processus de refroidissement, de cristallisation du magma originel, et de migration du magma évolué. Cette différenciation a résulté en une croûte (en surface) et un noyau (en profondeur), entre lesquels se trouve le manteau.

La Lune a une densité moyenne de 3.3464 g/cm³, faisant d'elle la seconde lune la plus dense du Système Solaire après Io. La taille du noyau de Lune est seulement d'environ 20 % du rayon de la Lune, alors qu'il est plutôt de l'ordre de 50 % pour la plupart des autres corps telluriques.

La croûte lunaire est composée d'une grande variété d'éléments : uranium, thorium, potassium, oxygène, silicium,



La pleine lune vue depuis l'hémisphère nord.



magnésium, fer, titane, calcium, aluminium et hydrogène. L'épaisseur de la croûte varie de 0 à 100 kilomètres selon les endroits. Au premier ordre on peut considérer que la croûte de la face visible est deux fois plus fine que celle de la face cachée. Les géophysiciens estiment aujourd'hui que l'épaisseur moyenne serait autour de 35 - 45 kilomètres sur la face visible. La croûte de la face cachée atteint, elle, environ 100 kilomètres d'épaisseur maximum.

Selon les données disponibles à ce jour, le manteau est vraisemblablement homogène sur toute la Lune. Cependant, certaines hypothèses proposent que la face cachée comporterait un manteau légèrement différent de celui de la face visible, ce qui pourrait être à l'origine de la différence de croûte entre les deux hémisphères. L'analyse des basaltes des mers indique que le manteau est composé principalement de minéraux tels que l'olivine, l'orthopyroxène et le clinopyroxène et que le manteau de la Lune est plus riche en fer que celui de la Terre.

De la même manière, peu d'informations sont aujourd'hui disponibles pour contraindre la présence d'un noyau. Les données de télémétrie laser accumulées depuis les missions Luna et Apollo permettent toutefois aux scientifiques de penser qu'un petit noyau de 300 - 400 km de rayon est bien présent. Celui-ci est beaucoup moins dense que celui de la Terre (ne contient pas ou très peu de fer) et pourrait être partiellement fluide^[22].

Exo-planètes telluriques

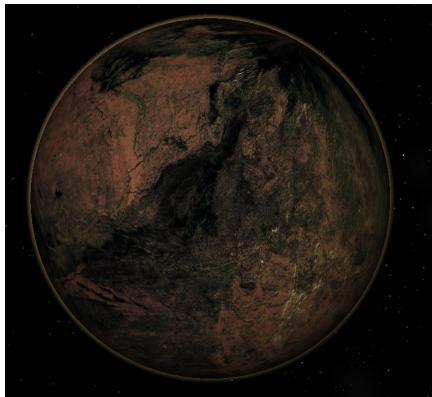


Vue d'artiste d'une planète semblable à la Terre.

La majorité des planètes trouvées à l'extérieur de notre système solaire sont des géantes gazeuses car elles produisent un oscillement plus important sur leur étoile hôte et sont donc plus facilement repérables. Toutefois, un certain nombre de planètes extra-solaires sont suspectées d'être telluriques.

Dans le début des années 1990, les premières exoplanètes ont été découverte en orbite autour du pulsar PSR B1257+12 avec des masses de 0.02, 4.3 et 3.9 fois celle de la Terre. Elles ont été découverte par hasard : leur transit a causé des interruptions dans les émissions radio du pulsar (si elles n'avaient pas été en orbite autour d'un pulsar, elles n'auraient pas été découverte).

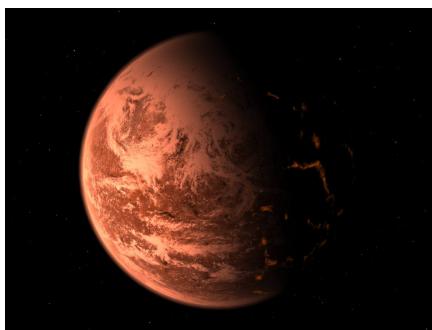
Lorsque 51 Pegasi b, la première et seule exoplanète trouvée jusque-là autour d'une étoile encore en fusion, a été découverte, de nombreux astronomes ont supposé que ça devait être une géante tellurique comme il est supposé qu'une géante gazeuse ne pourrait pas exister aussi près de son étoile (0.052 UA) comme le fait 51 Pegasi b. Cependant, à la suite de mesures de diamètre sur une exoplanète similaire (HD 209458 b), il a été montré que ces planètes étaient en fait des géantes gazeuses.



Vue d'artiste d'une Planète de carbone.

En juin 2005, la première planète autour d'une étoile en fusion et qui peut être tellurique a été trouvé en orbite autour de la naine rouge Gliese 876, à 15 années-lumière. Cette planète a une masse de 7 à 9 fois celle de la Terre et à une période de deux jours terrestre. Mais le radius et la composition de Gliese 876 d sont encore inconnus.

Le 10 août 2005, Probing Lensing Anomalies Network/Robotic Telescope Network (PLANET/RoboNet) et Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) ont observé la signature d'une planète froide nommée OGLE-2005-BLG-390Lb, avec environ 5.5 fois la masse de la Terre et à environ 21000 années-lumière dans la constellation du Scorpion. La planète nouvellement découverte orbite autour de son étoile hôte à une distance égale à celle de la ceinture d'astéroïdes de notre système. La planète a révélé son existence grâce à une technique connue sous le nom de microlentille gravitationnelle, qui est actuellement l'unique pour détecter des planètes de masse inférieure à celle de la Terre.

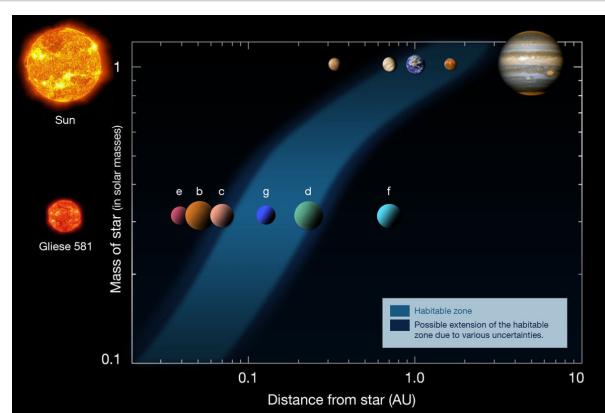


Vue d'artiste d'une Super-Terre (ici Gliese 876 d).

En avril 2007, une équipe de 11 scientifiques européens a annoncé la découverte d'une exoplanète potentiellement habitable, avec des températures semblables à celles de la Terre. La planète a été découverte par le télescope de l'Observatoire européen austral basé à La Silla, au Chili, qui est un instrument spécial qui dédouble la lumière pour trouver des oscillations de différentes longueurs d'ondes. Ces oscillations peuvent révéler l'existence d'autres planètes. Les scientifiques ont révélé des planètes en orbite autour de la naine rouge Gliese 581. Gliese 581 c a été considéré comme habitable au début, mais une étude plus récente (avril 2009)^[23] laisse supposer que Gliese 581 d est un meilleur candidat. Malgré tout, cela a engendré un intérêt plus important pour la recherche de planète orbitant autour d'étoile de plus faible magnitude. Environ 80 % des étoiles proches de la Terre sont des naines rouges. Les planètes Gliese 581 c et Gliese 581 d sont environ 5 à 7 fois plus lourdes que la Terre et sont donc classées dans la catégorie des Super-Terres.

Gliese 581 e a une masse d'environ 1,9 fois celle de la Terre^[23], mais il pourrait y avoir de l'ordre de 2 fois plus d'échauffement dû aux forces de marées que pour le satellite volcanique de Jupiter : Io^[24]. Une planète tellurique idéale serait de 2 fois la masse de la Terre et une période orbitale de 25 jours autour d'une naine rouge^[25].

La découverte de Gliese 581 g a été annoncé en septembre 2010 et on suppose qu'elle est la première planète jamais trouvée dans la zone habitable, la planète la plus semblable à la Terre et l'exoplanète candidate la mieux placée pour



Le système de Gliese 581 avec la zone habitable.

abriter une potentielle forme de vie à ce jour.

La mission Kepler cherche à découvrir des planètes comme la Terre en orbite autour d'autres étoiles en observant leurs transits devant l'étoile. La sonde Kepler a été lancé le 6 mars 2009. La durée de la mission devra durer 3 ans ½ afin de détecter et confirmer la présence d'une planète comme la Terre avec une distance orbitale semblable à celle de la Terre. Comme il y a des intervalles de 1 an pour qu'une planète comme la Terre fasse son transit (passe devant son étoile), il faudra environ 4 transits pour une vérification fiable.

Dimitar Sasselov, un collaborateur de la mission Kepler, a récemment mentionné lors de la conférence TED de 2010 qu'il y a eu des centaines de planètes telluriques potentielles depuis que Kepler a été lancé. Si ces planètes sont confirmées par des enquêtes plus approfondies, cela constituera la plus grosse découverte d'exoplanètes à ce jour. Les équipes scientifiques de la mission Kepler sont, pour l'instant, tenu de garder secret les premiers résultats de toutes les exoplanètes potentiellement telluriques jusqu'à ce qu'elles puissent confirmer les résultats. La première annonce publique de tout résultat est attendu au début de 2011^{[26], [27]}.

Le 2 février 2011, l'équipe de la mission de l'observatoire spatial Kepler a publié la liste des 1235 exoplanètes potentielles dont 54 qui sont peut-être dans la "zone habitable"^{[28], [29]}. Quelques unes de ces planètes sont de la même taille que la Terre ou plus grosses.

Défini tel que : "rayon de la planète (R_p) est plus petit ou égal à 2 fois celui de la Terre (R_\oplus)" (ou, $R_p \leq 2.0 R_\oplus$)^[28]. Six de ces candidates [nommées: KOI 326.01 ($R_p=0.85$), KOI 701.03 ($R_p=1.73$), KOI 268.01 ($R_p=1.75$), KOI 1026.01 ($R_p=1.77$), KOI 854.01 ($R_p=1.91$), KOI 70.03 ($R_p=1.96$)]^[28] sont dans la zone habitable^[28]. Une étude plus récente a révélé que l'une de ces candidates (KOI 326.01) est en fait beaucoup plus grande et plus chaude qu'il ne l'a été dit dans le premier rapport^[30].

Un certain nombre d'autres télescopes capables d'imager directement les exoplanètes telluriques sont également au travail. Il s'agit notamment du Terrestrial Planet Finder, du Space Interferometry Mission, du Darwin, du New Worlds Mission et du Overwhelmingly Large Telescope.

Exoplanètes semblables à la Terre

Titre	Planète	Étoile	Valeurs	Notes
Planète la plus proche de 1 M_\oplus	Gliese 581 e	Gliese 581	1.7 à 3.1 M_\oplus	Proche de son étoile et potentiellement volcanique comme Io ^[24] .
	Kepler-11f	Kepler-11	2.3 M_\oplus ^[17]	
Planète la plus proche de 1 R_\oplus	Kepler-10b	Kepler-10	1.416 R_\oplus ^[17]	A une masse de 3.3 - 5.7 M_\oplus . La moins massive, Gliese 581 e, est donc probablement plus petite que Kepler-10b, à moins qu'elle ait une densité beaucoup plus faible.
Planète la plus proche de 1 UA de son étoile	HD 142 b	HD 142	1 UA	
Planète de période orbitale le plus proche de 365 jours	HD 17092 b	HD 17092	359.9 j	
Plus haute probabilité d'eau liquide	Gliese 581 g (non confirmé)	Gliese 581	On ne sait pas explicitement	3.1 M_\oplus (masse minimum) ; au milieu de la zone habitable de la naine rouge ^[23] .

Types de planètes telluriques

Plusieurs classifications possibles pour les planètes telluriques ont été proposé^[31]:

Planète de silicates

Le type standard de la planète tellurique vu dans le système solaire, faite principalement d'un manteau rocheux à base de silicium avec un noyau métallique (fer).

Planète métallique

Un type théorique de planète tellurique qui se compose presque entièrement de fer et a donc une densité plus élevée et un rayon plus petit que les autres planètes telluriques de masse comparable. Mercure a un noyau métallique égale à 60 - 70 % de sa masse planétaire. On estime que les planètes métalliques sont formées dans les régions de très hautes températures (donc près de l'étoile), comme Mercure et si le disque protoplanétaire est riche en fer.

Planète sans noyau

Un type théorique de planète tellurique qui se compose de roches silicatées, mais n'a pas de noyau métallique, c'est-à-dire le contraire d'une planète métallique. Notre système solaire ne contient pas ce type de planète, mais les chondrites et météorites sont de ce genre. On estime que les planètes sans noyau se forment loin de l'étoile, là où les matériaux volatils oxydants sont courants.

Planète de carbone ou *planète de diamant*

Un type théorique de planète tellurique composée principalement de minéraux à base de carbone. Le système solaire ne contient pas ce type de planète, mais il existe des astéroïdes carbonés (Astéroïde de Type-C).

Planète océan

Un type théorique de planète tellurique intégralement recouverte d'un océan d'eau d'une profondeur d'une centaine de kilomètres. Aucune planète océan n'est confirmée, mais Gliese 1214 b pourrait en être une.

Super-Terre

Les Super-Terre représentent les plus grosses planètes telluriques.

Processus de différenciation

Les matériaux les plus lourds (nickel, fer) convergent vers le centre de la planète pour former son noyau. Sous la pression, le centre du noyau peut devenir solide, mais la chaleur accumulée peut laisser une partie de celui-ci fluide. D'autres matériaux, de densité légèrement plus faible, se trouvent pris entre le noyau et la surface, constituant un manteau dont la fluidité est fonction de la température résiduelle de la planète. La surface constitue une croûte de matériaux de densité moindre. Les matériaux les moins denses (eau, gaz) sont expulsés vers la surface et peuvent constituer une atmosphère si la gravité de la planète permet de les retenir malgré leur légèreté et la tendance qu'a le vent solaire à les emporter.

Références

- [1] **(en)** James W. Head III, The new solar system, Cambridge University Press, 1999 (ISBN 978-0-521-64587-4) , « Surfaces and Interiors of the Terrestrial Planets »
- [2] **(en)** Robert O. Pepin, On the Isotopic Composition of Primordial Xenon in Terrestrial Planet Atmospheres, vol. 92, 2000 , p. 371-395
- [3] **(en)** Julio Angel Fernández, Comets: nature, dynamics, origin, and their cosmogonical relevance, Dordrecht, Springer Science & Business, 2005 (ISBN 978-1-4020-3490-9) (LCCN 2006530653 (<http://lccn.loc.gov/2006530653>)) , « Comet contribution to the atmospheres of the terrestrial planets »
- [4] **(en)**Dr. James Schombert, « Primary Atmospheres (Astronomy 121: Lecture 14 Terrestrial Planet Atmospheres) (<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast121/lectures/lec14.html>) », Department of Physics University of Oregon, 2004. Consulté le 12 juin 2011
- [5] **(en)**Villard R., Maran S., Kuchner M. J., Seager S., « Extrasolar Planets may have Diamond Layers (<http://ciera.northwestern.edu/AspenW05/Press/EPDL.html>) », Aspen Center for Physics, Northwestern University, 2005. Consulté le 13 juin 2011
- [6] **(en)**Kuchner Marc J., « Image hypothétique de la structure interne d'une planète de carbone (http://ciera.northwestern.edu/AspenW05/Press/EPDL_5.html) », Aspen Center for Physics, Northwestern University. Consulté le 13 juin 2011
- [7] Marc J. Kuchner, Seager S., Extrasolar Carbon Planets
- [8] **(en)**Bill Arnett, « An Overview of the Solar System, The Nine Planets (http://arc.iki.rssi.ru/nineplanets/overview.html#ter_p) », 1998. Consulté le 13 juin 2011
- [9] **(en)**Peter Ulmschneider, Intelligent life in the universe: from common origins to the future of humanity, Springer, 2003 , « Planet Formation. Terrestrial Planets »
- [10] **(en)**Asteroid 1 Ceres (http://www.planetary.org/explore/topics/asteroids_and_comets/ceres.html), The Planetary Society. Consulté le 14 juin 2011
- [11] **(en)**McCord T.B., Sotin C., Ceres: Evolution and current state ,Journal of Geophysical Research, vol. 0110, 2005
- [12] **(en)**P.C. Thomas et al., Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape, Nature, vol. 437, 2005 , p. 224-226
- [13] **(en)**David Gubbins, Herrero-Bervera, Emilio, Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism, Dordrecht, Springer, 2007 (ISBN 978-1-4020-3992-8) (LCCN 2007937940 (<http://lccn.loc.gov/2007937940>)) , « Dynamos, Planetary and Satellite »
- [14] **(en)**Michael Richmond, « Terrestrial Bodies in the Solar System (http://spiff.rit.edu/classes/phys301/lectures/ter_planets/ter_planets.html#gallery) ». Consulté le 14 juin 2011
- [15] **(en)**Randal Jackson, « An 'alien Earth' in Saturn's backyard (<http://planetquest.jpl.nasa.gov/news/titan.cfm>) », Planet Quest, Jet Propulsion Laboratory, 25-06-2004. Consulté le 14 juin 2011
- [16] **(en)**Titan's Great Lakes (<http://www.astrobio.net/pressrelease/2495/titans-great-lakes>), Astrobiology Magazine, 17-10-2007. Consulté le 30-09-2009
- [17] **(en)**<http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/>
- [18] Toutes les informations viennent du Wikipedia anglais sur Mercure ([http://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_\(planet\)#Internal_structure](http://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_(planet)#Internal_structure))
- [19] Toutes les informations viennent du Wikipedia français sur Vénus ([http://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9nus_\(plan%C3%A8te\)#G%C3%A9ologie](http://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9nus_(plan%C3%A8te)#G%C3%A9ologie))
- [20] Toutes les informations viennent du Wikipedia français sur la Structure interne de la Terre (http://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_interne_de_la_Terre#Structure_d%C3%A9taill%C3%A9e)
- [21] Toutes les informations viennent du Wikipedia français sur la Géologie de la planète Mars (http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ologie_de_la_plan%C3%A8te_Mars#Structure_interne)
- [22] Toutes les informations viennent du Wikipedia français sur la Structure interne de la Lune (http://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_interne_de_la_Lune) et sur la Lune (http://fr.wikipedia.org/wiki/Lune#Composition_et_structure_interne)
- [23] **(en)**Lightest exoplanet yet discovered (<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2009/pr-15-09.html>), ESO (ESO 15/09 - Science Release), 2009-04-21. Consulté le 13 juin 2011
- [24] **(en)**Rory Barnes, Jackson Brian, Richard Greenberg et Sean N. Raymond, 2009-06-09, « Tidal Limits to Planetary Habitability (<http://www.arxiv.org/abs/0906.1785v1>) », {{version}}.
- [25] **(en)**M. Mayor, X. Bonfils, T. Forveille, X. Delfosse, S. Udry, J.-L. Bertaux, H. Beust, F. Bouchy, C. Lovis, F. Pepe, C. Perrier, D. Queloz, N. C. Santos, 2009, « The HARPS search for southern extra-solar planets,XVIII. An Earth-mass planet in the GJ 581 planetary system (<http://www.arxiv.org/abs/0906.2780>) », {{version}}.
- [26] **(en)**<http://news.discovery.com/space/kepler-scientist-galaxy-is-rich-in-earth-like-planets.html>
- [27] **(en)**<http://blogs.discovermagazine.com/80beats/2010/07/26/keplers-early-results-suggest-earth-like-planets-are-dime-a-dozen/>
- [28] **(en)**Borucki et al., « Characteristics of planetary candidates observed by Kepler, II: Analysis of the first four months of data (<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1102/1102.0541.pdf>) », arXiv, 1^{er} février 2011. Consulté le 13 juin 2011
- [29] **(en)**<http://arxiv.org/abs/1006.2799> Caractéristiques des planètes Kepler basées sur les premières données : La majorité ont la taille de Neptune ou sont plus petites, William J. Borucki, de l'équipe Kepler
- [30] **(en)**Exclusive: "Most Earth-Like" Exoplanet Gets Major Demotion—It Isn't Habitable (<http://blogs.discovermagazine.com/80beats/2011/03/08/exclusive-most-earth-like-exoplanet-gets-major-demotion-it-isnt-habitable/>), *80beats* (<http://blogs.discovermagazine.com/80beats>), Discover Magazine, 8 mars 2011. Consulté le 13 juin 2011
- [31] **(en)**<http://www.astrobio.net/pressrelease/2476/all-planets-possible>

Mercure (planète)

Mercure ♀



Mercure vue par la sonde MESSENGER,
le 14 janvier 2008.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	57909176 km (0.38709893 UA)
Aphélie	69817079 km (0.46669835 UA)
Périhélie	46001272 km (0.30749951 UA)
Circonférence orbitale	~360000000 km (2.406 UA)
Excentricité	0.20563069
Période de révolution	87.96934 d
Période synodique	115.8776 d
Vitesse orbitale moyenne	47.36 km/s
Vitesse orbitale maximale	58.98 km/s
Vitesse orbitale minimale	38.86 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	7.00487°
Nœud ascendant	48.33167°
Argument du périhélie	29.12478°
Satellites connus	0
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	2439.7 km (0.383 Terre)
Rayon polaire	2439.7 km (0.384 Terre)
Rayon moyen volumétrique	2439.7 km (0.383 Terre)
Aplatissement	0
Périmètre équatorial	15329.1 km (0.383 Terre)

Superficie	$75 \times 10^6 \text{ km}^2$ (0.147 Terre)
Volume	$60.83 \times 10^9 \text{ km}^3$ (0.056 Terre)
Masse	$330.2 \times 10^{21} \text{ kg}$ (0.055 Terre)
Masse volumique globale	5427 kg/m^3
Gravité de surface	3.701 m/s^2 (0.377 g)
Vitesse de libération	4.435 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	58.6462 d
Vitesse de rotation (à l'équateur)	10.892 km/h
Inclinaison de l'axe	$0.0352 \pm 0.0017^\circ$
Albédo géométrique visuel	0.106
Albédo de Bond	0.119
Irradiance solaire	9126.6 W/m^2 (6.673 Terres)
Température d'équilibre du corps noir	433.9 K (160.9 °C)
Température de surface :	
Maximum :	700 K (427 °C)
Moyenne :	442 K (169 °C)
Minimum :	90 K (-183 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	$\sim 10^{-9} \text{ Pa}$
Masse totale	Moins de 1000 kg
Potassium K	31,7 %
Sodium Na	24,9 %
Oxygène O[•]	9,5 %
Argon Ar	7,0 %
Hélium He	5,9 %
Dioxygène O₂	5,6 %
Azote N	5,2 %
Dioxyde de carbone CO₂	3,6 %
Eau H₂O	3,4 %
Hydrogène H₂	3,2 %
Histoire	
Divinité babylonienne	Nabû

Divinité grecque	- le matin : Ἀπόλλων - le soir : Ἐρυῆς
Nom chinois (élément associé)	Shuǐxīng 水星 (eau)

Mercure est la planète la plus proche du Soleil et la moins massive du système solaire^[1]. Son éloignement au Soleil est compris entre 0.3075 et 0.4667 UA, ce qui correspond à une excentricité orbitale de 0,2056 — plus de douze fois supérieure à celle de la Terre, et de loin la plus élevée du Système solaire. Elle est visible à l'œil nu depuis la Terre avec un diamètre apparent de 4,5 à 13 secondes d'arc, et une magnitude apparente de 5,7 à -2,3 ; son observation est toutefois rendue difficile par son elongation toujours inférieure à 28,3° qui la noie le plus souvent dans l'éclat du Soleil.

Mercure a la particularité d'être en résonance 3:2 sur son orbite, sa période de révolution (87,969 jours) valant exactement 1,5 fois sa période de rotation (58,646 jours), et donc la moitié d'un jour solaire (175,938 jours). L'inclinaison de l'axe de rotation de Mercure sur son plan orbital est la plus faible du Système solaire, à peine 2 minutes d'arc. Son périhélie connaît une précession autour du Soleil plus rapide que celle prédicta par la mécanique newtonienne, une avance de 42,98 secondes d'arc par siècle^[2] qui n'a pu être complètement expliquée que dans le cadre de la relativité générale^[3].

Mercure est une planète tellurique, comme le sont également Vénus, la Terre et Mars. Elle est près de trois fois plus petite et presque vingt fois moins massive que la Terre mais presque aussi dense qu'elle, avec une gravité de surface pratiquement égale à celle de Mars, qui est pourtant près de deux fois plus massive. Sa densité remarquable — dépassée seulement par celle de la Terre, qui lui serait d'ailleurs inférieure sans l'effet de la compression gravitationnelle — est due à l'importance de son noyau métallique, qui occuperait plus de 40 % de son volume, contre seulement 17 % pour la Terre.

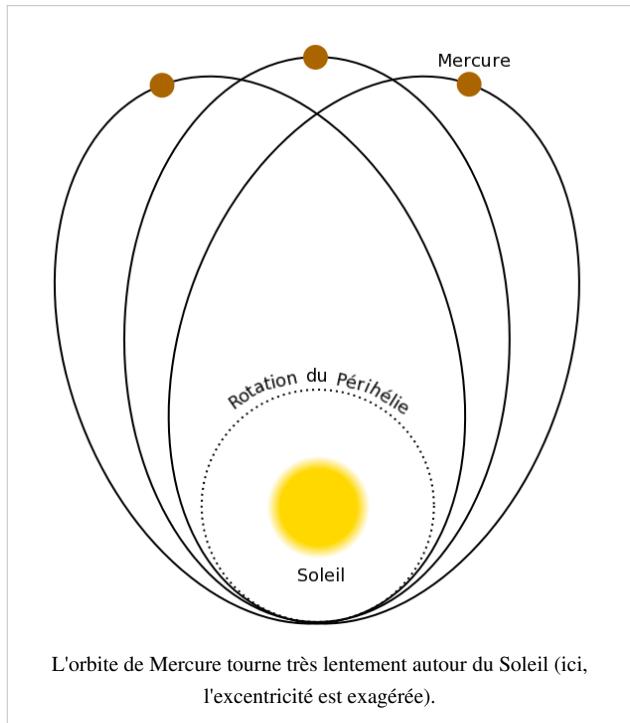
Comme Vénus, Mercure est quasiment sphérique — son aplatissement peut être considéré comme nul — en raison de sa rotation très lente. Dépourvue de véritable atmosphère, sa surface est très fortement cratérisée, globalement similaire à la face cachée de la Lune. Seules deux sondes spatiales ont étudié Mercure. Mariner 10, qui a survolé à trois reprises la planète en 1974–1975, a cartographié 45 % de sa surface et découvert son champ magnétique. La sonde MESSENGER, après trois survols en 2008–2009, s'est mis en orbite autour de Mercure en mars 2011 et a entamé une étude détaillée notamment de sa topographie, son histoire géologique, son champ magnétique et son exosphère.

La quasi-absence d'atmosphère — il s'agit en fait d'une exosphère exerçant une pression au sol de l'ordre d'1 nPa (10^{-14} atm) — combinée à la proximité du Soleil — dont l'irradiance à la surface de Mercure varie entre 4,6 et 10,6 fois la constante solaire (1362 W/m^2) — engendre des températures en surface allant de 90 K (-183 °C) au fond des cratères polaires (là où les rayons du Soleil ne parviennent jamais) jusqu'à 700 K (427 °C) au point subsolaire au périhélie.

La planète Mercure doit son nom au dieu Mercure du commerce et des voyages, également messager des autres dieux dans la mythologie romaine. La planète a été nommée ainsi par les Romains à cause de la vitesse à laquelle elle se déplaçait^[4]. Le symbole astronomique de Mercure est un cercle posé sur une croix et portant un demi-cercle en forme de cornes (Unicode : ♀). C'est une représentation du caducée du dieu Hermès. Mercure laissa également son nom au troisième jour de la semaine, mercredi (< Mercurii dies >)^[5].

Orbite

Excentricité



Mercure a une orbite très excentrique qui fait varier sa distance au Soleil de 46 à 70 millions de kilomètres^[6] .^[7]

L'excentricité de l'orbite de Mercure varie de manière chaotique de 0 (orbite circulaire) à une valeur très importante de 0,46 sur plusieurs millions d'années^[8] .^[9] .^[10]

En 1989, Jacques Laskar, du Bureau des longitudes, a démontré que les planètes intérieures du système solaire avaient toutes des courses chaotiques. Cependant Mercure est celle dont le mouvement est le plus chaotique^[11].

Précession du périhélie

Comme pour l'ensemble des planètes du système solaire, l'orbite de Mercure connaît une très lente précession du périhélie autour du Soleil^[12] . Cependant, contrairement aux autres planètes, la

période de précession du périhélie de Mercure ne concorde pas avec les prédictions faites à l'aide de la mécanique newtonienne.

En effet, Mercure connaît une précession légèrement plus rapide que celle à laquelle on peut s'attendre en appliquant les lois de la mécanique céleste, et se trouve en avance d'environ 43 secondes d'arc par siècle^[13].

Les astronomes ont donc, dans un premier temps, pensé à la présence d'un ou plusieurs corps entre le Soleil et l'orbite de Mercure dont l'interaction gravitationnelle perturberait le mouvement de cette dernière. L'astronome français Urbain Le Verrier — qui avait découvert en 1846 la planète Neptune à partir d'anomalies dans l'orbite d'Uranus — se pencha sur le problème et suggéra la présence d'une seconde ceinture d'astéroïdes entre le Soleil et Mercure. Des calculs effectués, en prenant en compte l'influence gravitationnelle de ces corps, devaient alors concorder avec la précession observée.

Le 28 mars 1859, Le Verrier fut contacté par le médecin français Lescarbault à propos d'une tache noire qu'il aurait vu passer devant le Soleil deux jours avant et qui était probablement, d'après lui, une planète intramercurienne. Le Verrier postula alors que cette planète — qu'il nomma Vulcain — était responsable des anomalies du mouvement de Mercure et se mit en tête de la découvrir. À partir des informations de Lescarbault, il conclut que Vulcain tournait autour du Soleil en 19 jours et 7 heures à une distance moyenne de 0,14 ua. Il en déduit également un diamètre d'environ 2000 km et une masse de 1/17^e de celle de Mercure. Cette masse était cependant bien trop faible pour expliquer les anomalies, mais Vulcain était une bonne candidate au corps le plus gros de cette hypothétique ceinture d'astéroïdes interne à Mercure.

Le Verrier profita alors de l'éclipse de Soleil de 1860 pour mobiliser tous les astronomes français afin de repérer Vulcain, mais personne ne put la trouver. Le Verrier resta cependant confiant après que le professeur Wolf, du Centre de données des taches solaires à Zurich, eut observé sur le Soleil deux douzaines de taches suspectes. La planète fut recherchée pendant des décennies. Certains astronomes attestèrent l'avoir vue passer devant le Soleil. Parfois plusieurs dirent l'avoir repérée, mais à des endroits différents.

Finalement, l'éénigme fut résolue en 1916 avec la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. En appliquant la relativité générale au mouvement de Mercure, on en arrive à la précession mesurée.

Transit de Mercure

Le transit de Mercure peut se produire en mai ou en novembre lorsque Mercure se situe entre la Terre et le Soleil. La fréquence de ces transits est de 13 ou 14 par siècle. Le prochain se déroulera le 9 mai 2016.

Rotation

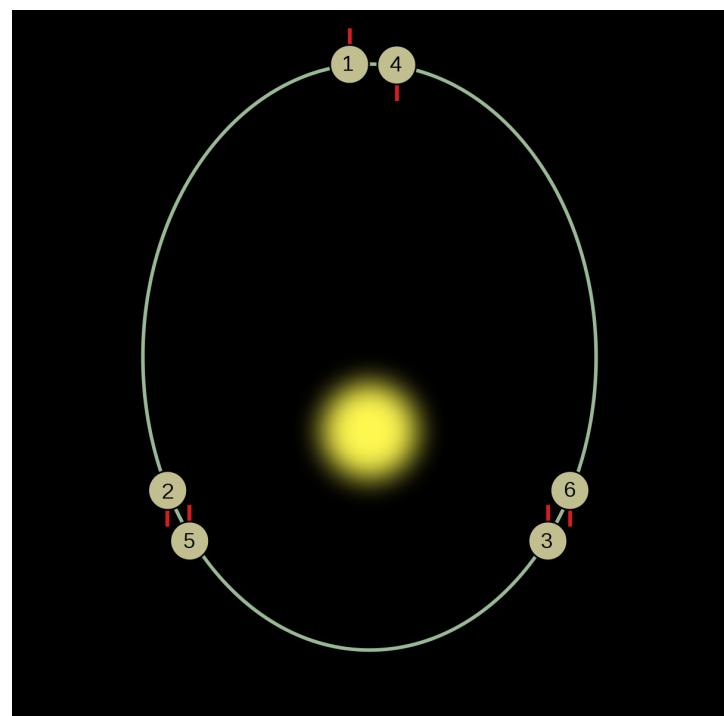
Alors qu'il étudiait Mercure afin d'en dresser une première carte, Schiaparelli avait remarqué après plusieurs années d'observation que la planète présentait toujours la même face au Soleil, comme la Lune le fait avec la Terre. Il en conclut alors en 1889 que Mercure était synchronisée par effet de marée avec le Soleil et que sa période de rotation équivalait à une année mercurienne, soit 88 jours terrestres. Cette durée était cependant erronée et il fallut attendre les années 1960 avant que les astronomes ne la revoient à la baisse.

En 1962, des observations par radar à effet Doppler ont été effectuées par le radiotélescope d'Arecibo sur Mercure afin d'en apprendre plus sur la planète et de vérifier si la période de rotation était bien égale à la période de révolution. Les températures relevées du côté de la planète censé être toujours exposé à l'ombre étaient

trop importantes, ce qui suggéra que cette face sombre était parfois exposée au Soleil. En 1965, les résultats obtenus par Gordon H. Pettengill et Rolf B. Dyce révèlent que la période de rotation de Mercure est en fait de 59 jours terrestres^[14], avec une incertitude de 5 jours. Cette période sera ajustée plus tard, en 1971, à 58,65 jours à $\pm 0,25$ jours grâce à des mesures plus précises — toujours par radar — effectuées par R.M. Goldstein. Trois ans plus tard, La sonde Mariner 10 apportera une meilleure précision, mesurant la période de rotation à $58,646 \pm 0,005$ jours. Il se trouve que cette période est exactement égale aux 2/3 de la révolution de Mercure autour du Soleil ; ce qu'on appelle une résonance 3:2.

En comparaison avec la Terre, Mercure tourne 59 fois moins vite sur elle-même. Mercure ne présente donc pas toujours la même face au Soleil. L'erreur de Schiaparelli était due au fait que la période de rotation réelle de Mercure est presque exactement la moitié de la période synodique de Mercure (c'est-à-dire le temps mis par Mercure pour revenir à la même configuration Terre—Mercure—Soleil) par rapport à la Terre.

Pour garder une telle période de rotation en étant aussi proche du Soleil, Mercure dispose d'une orbite elliptique inclinée de $3,4^\circ$ (par rapport à l'équateur solaire), ainsi qu'une forte excentricité — 0,2 — ce qui en fait la planète la plus excentrique . La raison pour laquelle les astronomes pensaient que Mercure était verrouillée avec le Soleil est qu'à chaque fois que Mercure était la mieux placée pour être observée, elle se trouvait toujours au même point sur son orbite (en résonance 3:2), présentant ainsi la même face à chaque fois ; ce qui serait aussi le cas si elle était



La révolution et la rotation de Mercure sont couplées : à chaque révolution, la planète effectue 1,5 rotation.

totalemen synchronisée avec le Soleil. Cette erreur peut être imputée à la difficulté d'observation de la planète avec les moyens de l'époque.

Il est cependant possible que par le passé, Mercure ait connu une période de rotation beaucoup plus rapide. Certains scientifiques avancent cette période jusqu'à 8 heures. Elle aurait progressivement diminué à cause des forces de marée engendrées par le Soleil sur Mercure. D'après les calculs, ce ralentissement de 8 heures à 58,65 jours se serait déroulé sur une période d'un milliard d'années, ce qui implique également un accroissement de la température intérieure de la planète de 100 K.^[réf. souhaitée]

En raison de sa résonance 3:2, bien qu'un jour sidéral (la période de rotation) dure environ 58,7 jours terrestres, le jour solaire (durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local) dure 176 jours terrestres, c'est-à-dire deux années mercuriennes. Ce qui fait qu'une journée, ainsi qu'une nuit, sur Mercure valent exactement une année chacune, soit 88 jours terrestres (presque un trimestre).

Il en résulte une journée mercurienne plutôt « étrange » pour un observateur qui serait situé à la surface de Mercure. À certains endroits^[15], celui-ci verra le Soleil se lever puis se recoucher, puis se relever à l'horizon Est ; et à la fin de la journée à l'Ouest, le Soleil se couchera puis se relèvera, pour se recoucher. Ce phénomène s'explique par la variation de la vitesse orbitale de Mercure. Quatre jours avant le périhélie,^[réf. souhaitée] la vitesse (angulaire) orbitale de Mercure est exactement égale à sa vitesse (angulaire) de rotation ; le mouvement du Soleil semble s'arrêter. Puis aux alentours du périhélie, la vitesse orbitale de Mercure excède sa vitesse de rotation et le Soleil semble alors avoir un mouvement rétrograde ; il apparaît retourner là d'où il vient, traversant le ciel d'ouest en est, durant environ quatre jours,^[réf. souhaitée] avant de reprendre un mouvement apparent normal, c'est-à-dire se déplaçant d'est en ouest.

Conditions de surface

« Atmosphère »

L'atmosphère de Mercure est quasi-inexistante ; on n'en décèle que quelques traces. Elle est extrêmement ténue à cause de la température très élevée de la surface et de la faible gravité de la planète, à tel point que les molécules de gaz de l'« atmosphère » entrent plus souvent en collision avec la surface de la planète qu'avec d'autres molécules de gaz. Il est d'ailleurs plus approprié de parler de l'*exosphère*^[16], commençant dès la surface de Mercure, directement « ouverte » sur l'espace, que de son « atmosphère ». Dans la plupart des cas, on peut la négliger et considérer Mercure comme privée d'atmosphère.

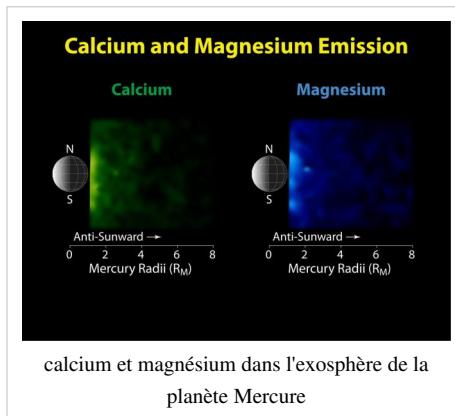
Cette exosphère est principalement composée de potassium (31 %), de sodium (25 %) et d'oxygène (9,5 %). On y trouve aussi des traces d'argon, de néon, d'hydrogène et d'hélium^[17].

Mariner 10 mit en évidence une ionosphère d'au plus un cent-millième de celle de la Terre^[18].

Le vent solaire et le dégazage du sol expliquent cette exosphère transitoire, d'une très faible pression de 200 nPa et la variation considérable de la composition de l'atmosphère^[17].

Les atomes composant principalement l'exosphère de Mercure (potassium et sodium) ont une durée de vie (de présence) estimée à trois heures avant d'être libérés dans l'espace et une heure et demie lorsque la planète est au périhélie c'est-à-dire au plus proche du Soleil. Les atomes se renouvellent constamment puisque des ions provenant du vent solaire sont capturés par la magnétosphère de la planète. De plus, les météorites qui tombent à la surface aident à l'approvisionnement en atomes de sodium et de potassium^[19].

Le sodium et le potassium, ainsi que l'argon et une bonne part du néon proviennent du dégazage résiduel des roches, alors que l'hydrogène et l'hélium proviennent principalement de la capture des ions du vent solaire par la



magnétosphère de Mercure.

Les impacts météoritiques (résiduels), comprenant les poussières du nuage zodiacal, qui éjectent des particules arrachées à la surface de la planète, contribuent aussi à la formation de cette infime « atmosphère ». Ces météorites apportent elles-mêmes de la matière et pourraient d'ailleurs être la source principale du potassium et du sodium détectés dans cette exosphère.

Conditions climatiques

Mercure est une planète très chaude. La température moyenne à la surface est 179 °C (452 K)^[20]. C'est la température de stabilisation en dessous du régolite, où le sous-sol n'est plus soumis à l'alternance des « ondes » thermiques de la journée et de la nuit (égales à l'année mercurienne).

Dans l'hémisphère nocturne, elle se stabilise vers 90 K (-183 °C) à la surface. Mais, elle monte jusqu'à 700 K (427 °C) dans l'hémisphère diurne, aux alentours du zénith.

De par l'inclinaison quasi nulle de son axe de rotation, ses zones polaires ne reçoivent les rayons solaires que rasants, ce qui doit induire une température d'équilibre en sous-sol bien inférieure à celles des latitudes plus basses et induit des températures de surface inférieures à 50 K (-223 °C) dans le fond des cratères polaires, où la lumière solaire ne pénètre jamais. De la glace pourrait y être conservée, car à ces températures elle ne se sublime quasiment plus (la pression partielle de vapeur de la glace est quasiment nulle).

Par comparaison, la température sur Terre varie seulement d'environ 11 K (sans tenir compte du climat ou des saisons, uniquement le rayonnement solaire).

Depuis sa surface, le Soleil apparaît en fonction de l'orbite elliptique de Mercure entre 2,1 et 3,3 fois plus gros que depuis la Terre, et sa lumière est environ 7 fois plus intense avec un flux de rayonnement solaire de 9126,6 W/m².

Géologie

Surface

La surface de Mercure est couverte d'un tapis poussiéreux de minéraux (silicates) et de cratères^[14]. La planète ressemble beaucoup en apparence à la Lune, ne présentant *a priori* aucun signe d'activité interne. Pour les astronomes, ces cratères sont très anciens et racontent l'histoire de la formation du système solaire, lorsque les planétésimaux entraient en collision avec les jeunes planètes pour fusionner avec elles. Par opposition, certaines portions de la surface de Mercure semblent lisses, vierges de tout impact^[21],^[22]. Il s'agit probablement de coulées de lave recouvrant un sol plus ancien et plus marqué par les impacts. La lave, une fois refroidie, donnerait lieu à une surface lisse, blanchâtre. Ces plaines datent d'un âge plus récent, postérieur à la période de bombardements intenses.

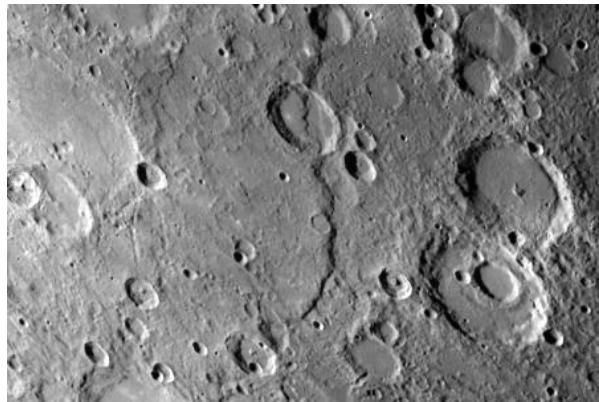
Le plus remarquable de ces cratères (du moins, sur la portion qui a pu être photographiée) est le Bassin Caloris, un impact météoristique d'un diamètre d'environ 1300 km et qui fut formé après la chute d'un astéroïde d'une taille avoisinant les 150 km il y a près de 3,85 milliards d'années. Son nom (« Caloris », chaleur en latin) vient du fait qu'il est situé sur l'un des deux « pôles chauds » de la surface de Mercure qui fait directement face au Soleil lorsque la planète est au plus proche de celui-ci. Les cratères d'un diamètre supérieur à 200 km sont appelés « bassins ». Il s'agit d'une grande dépression circulaire avec des anneaux concentriques. Plus tard, de la lave a certainement coulé dans le cratère et a lissé sa surface. Seule la partie est du bassin a pu être photographiée par la sonde Mariner 10, la partie ouest étant plongée dans l'ombre au moment du survol de Mercure^[23].

De l'autre côté du bassin se trouve une région très accidentée, de la taille de la France et de l'Allemagne réunies, formée de blocs rocheux désordonnés. Les scientifiques pensent que ces fractures sont le résultat du choc qui produisit le Bassin Caloris. Les ondes de choc produites par l'impact météoristique ont déformé la face opposée, soulevant le sol à une hauteur de 800 m à 1000 m et déformant la surface de Mercure, produisant cette région chaotique^[24] .^[25]

Par ailleurs, les photographies prises par Mariner 10 révèlent la présence d'escarpements lobés dus à une contraction de la planète lors de son refroidissement. Ce refroidissement entraîna une diminution du rayon de la planète d'environ 2 km, produisant des cassures dans la croûte pour former des crêtes et des plis. Ces escarpements traversent les cratères, les montagnes et les vallées et peuvent atteindre une longueur de 500 km. Certaines crêtes atteignent des hauteurs d'environ 4 km. L'ancienneté de ces escarpements montre que la planète n'a pas connu d'activité tectonique depuis son jeune âge.

Les différentes caractéristiques de la surface de Mercure sont^[26] .^[27] :

- les cratères — voir liste des cratères de Mercure ;
- les *Albedos* (régions marquées par une réflexion plus forte ou plus faible) — voir liste des albedos de Mercure ;
- les *Dorsa* (crête) — voir liste des crêtes de Mercure ;
- les *Montes* (montagnes) — voir liste des monts de Mercure ;
- les *Planitiae* (plaines) — voir liste des plaines de Mercure ;
- les *Rupes* (escarpements) — voir liste des escarpements de Mercure ;
- les *Valles* (vallées) — voir liste des vallées de Mercure.



Discovery Scarp (au centre), l'un des plus importants escarpements photographiés par Mariner 10. Il mesure 350 km de long et coupe deux cratères de 35 et 55 km de diamètre.

Périodes

L'évolution géologique de Mercure peut être divisée en cinq grandes périodes ou époques.

- La première s'étend du tout début de l'histoire du système solaire à la période de bombardements intenses. La nébuleuse solaire primitive s'est condensée et a commencé à former de la matière solide ; d'abord de petite masse qui à force de s'accumuler (processus d'accrétion) a produit des corps de plus en plus gros, ayant une force d'attraction de plus en plus importante, jusqu'à former la principale masse de Mercure. La nature homogène ou hétérogène de cette accumulation de matière reste encore inconnue : on ne sait pas si Mercure s'est formée à partir d'un mélange de fer et de silicate qui se sont ensuite dissociés pour former séparément un noyau métallique et un manteau de silicate, ou si le noyau s'est formé en premier, à partir de métaux, puis le manteau et la croûte ne sont venus qu'après, lorsque les éléments lourds comme le fer sont devenus moins abondants aux environs de Mercure.

Il y a peu de chance pour que Mercure ait possédé une atmosphère initiale (juste après l'accumulation de matière), ou alors elle se serait évaporée très tôt avant l'apparition des plus anciens cratères. Si Mercure avait eu une atmosphère, on aurait pu remarquer une érosion des cratères par les vents, comme sur Mars. Les escarpements présents majoritairement dans les régions « inter-cratères » (qui sont des surfaces plus anciennes que les cratères) et qui traversent parfois certains des plus vieux cratères, montrent que le refroidissement du noyau et la contraction de la planète se sont produits entre la fin de la première période et le début de la seconde.

- La seconde période est caractérisée par un fort bombardement météoristique par des corps relativement gros (des résidus du processus d'accrétion), couvrant la surface de Mercure par des cratères et des bassins (cratères larges de plus de 200 km de diamètre), et se termine à la formation du bassin Caloris. Il n'est pas certain que cette période

soit la phase terminale de l'accrétion de Mercure ; il est possible qu'il ne s'agisse que d'un second épisode de bombardement indépendant de cette accumulation. D'autant plus que c'est l'époque du grand bombardement tardif.

- La formation du bassin Caloris marque la séparation entre la seconde et la troisième période. L'impact météoristique a donné lieu à de fortes transformations de la surface de Mercure : la création de l'anneau montagneux Caloris Montes autour du cratère produit par l'impact et les déformations chaotiques de l'autre côté de la planète. Cet évènement s'est produit il y a environ 3,8 milliards d'années. L'asymétrie de la répartition interne des masses qu'il a occasionnée, à l'échelle de la planète, a été le pivot sur lequel se fonde la synchronisation des périodes rotation/révolution : le bassin Caloris est (avec son antipode) un des « pôles équatoriaux chauds ».
- La quatrième époque géologique de Mercure débute après la collision donnant lieu au bassin Caloris et couvre la période de volcanisme qui s'ensuivit. Des coulées de lave ont formé une partie des grandes plaines lisses, grossièrement similaires aux *maria* lunaires. Cependant, les plaines lisses recouvrant le bassin Caloris (Suisei, Odin, et Tir Planitia) auraient été formées par des éjectas lors de l'impact Caloris. On estime que cette période s'est déroulée il y a entre 4 et 3 milliards d'années.
- La dernière époque s'étend d'il y a 3 milliards d'années à aujourd'hui. Hormis de petits impacts météoritiques, peu d'évènements se sont produits sur Mercure durant cette période.

Il existe une autre chronologie semblable, découpée en cinq époques également : Pré-Tolstoïen (de la formation au refroidissement du noyau — il y a 4,5 à 3,97 milliards d'années), Tolstoïen (formation du bassin Tolstoj et des plaines lisses par coulées de lave — 3,97 à 3,77 milliards d'années), Calorien (impact du bassin Caloris et fin du bombardement intense — 3,77 à 3,5 milliards d'années), Mansurien (3,5 à 1 milliard d'années) et Kuiperien (depuis 1 milliard d'années à aujourd'hui). Ici, la période de volcanisme qui produisit une partie des plaines lisses est placée avant l'impact Caloris.

Glace

Des observations radar faites en 1991 à partir du radiotélescope d'Arecibo et de l'antenne de Goldstone indiquent la présence de glace d'eau aux pôles Nord et Sud de Mercure. Celle-ci est caractérisée par des zones à réflexion radar élevée et une signature fortement dépolarisée, contrairement à la réflexion radar typique du silicate, constituant la majeure partie de la surface de Mercure. Une vingtaine d'anomalies de ce type ont été observées.

Les résultats obtenus avec le radiotélescope d'Arecibo montrent que ces réflexions radar sont concentrées dans des taches circulaires de la taille d'un cratère. D'après les images prises par Mariner 10, la plus grosse d'entre elles, au pôle Sud, semble coïncider avec le cratère Chao Meng-Fu. D'autres, plus petites, correspondent également à des cratères bien identifiés. La corrélation est cependant impossible à faire pour le pôle Nord, puisque non cartographié. On pense que de la glace repose au fond de ces cratères.

La présence de glace sur Mercure peut surprendre ; les températures régnant à la surface de la planète peuvent atteindre 430 °C, notamment aux « pôles chauds » — régions les plus exposées au Soleil, lorsque Mercure est au plus proche de celui-ci. Cependant, certains cratères présents aux pôles peuvent ne jamais être exposés aux rayons du Soleil, et donc plongés dans une obscurité permanente. Des études ont montré que la température au niveau de ces cratères n'excède pas 102 K (-171 °C). Certaines surfaces plates, même au niveau des pôles toujours, seraient soumises à des températures inférieures à 167 K (-106 °C). Exposée à de telles conditions, l'eau peut rester sous forme de glace.

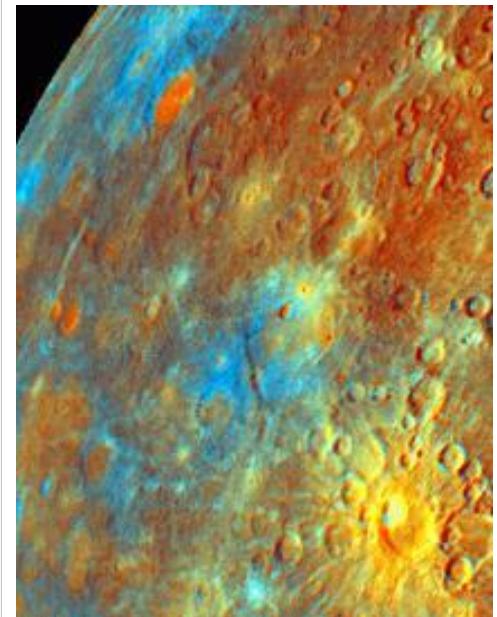
Deux sources probables de glace sont envisagées : le bombardement météoristique et le dégazage du sol. Les météorites frappant la planète ont pu apporter de l'eau qui serait restée piégée (gelée par les basses températures des pôles) aux endroits où se sont produits les impacts. De même pour les dégazages, certaines molécules ont pu migrer vers les pôles et s'y retrouver piégées.

Volcanisme

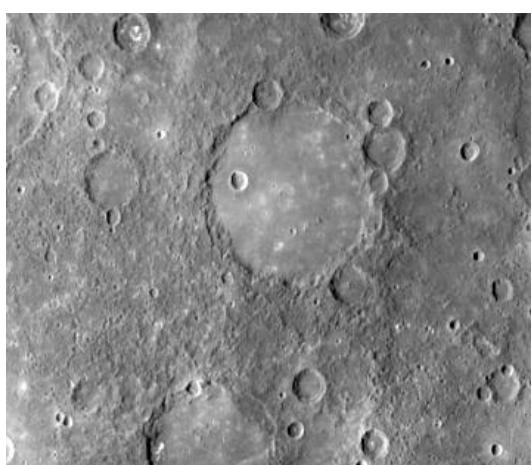
La présence de plaines plus jeunes (les plaines lisses) est la preuve que Mercure a connu dans son passé de l'activité volcanique^[28]. L'origine de ces plaines a été mise en évidence à la fin des années 1990 par Mark Robinson et Paul Lucey en étudiant les photographies de Mercure. Le principe était de comparer les surfaces lisses — formées à partir de coulées de laves — avec les autres, non lisses (et plus anciennes). S'il s'agissait bien d'éruptions volcaniques, ces régions devaient être d'une composition différente de celle qu'elles recouvaient, puisque composées de matériaux venant de l'intérieur de la planète.

Les images prises par Mariner 10 ont d'abord été recalibrées à partir d'images prises en laboratoire avant le lancement de la sonde, et d'images prises durant la mission des nuages de Vénus (Vénus présente une texture plutôt uniforme) et de l'espace profond. Robinson et Lucey ont ensuite étudié divers échantillons de la Lune — qui aurait connu une activité volcanique similaire — notamment la réflexion de la lumière afin de faire un parallèle entre la composition et la réflexion de ces matériaux.

À l'aide de techniques avancées de traitement d'images numériques (qui n'étaient pas possibles à l'époque de la mission Mariner 10), ils ont appliqué un code de couleurs aux images afin de différencier les matériaux minéraux sombres des matériaux métalliques. Trois couleurs ont été utilisées : le rouge pour caractériser les minéraux opaques, sombres (plus le rouge est prononcé, moins il y a de minéraux sombres) ; le vert pour caractériser à la fois la concentration d'oxyde de fer (FeO) et l'intensité du bombardement de micrométéorites, également appelé « maturité » (la présence de FeO est moins importante, ou la région est moins mature, sur les portions plus vertes) ; le bleu pour caractériser le rapport UV/lumière visible (l'intensité de bleu augmente avec le rapport). La combinaison des trois images donne des couleurs intermédiaires. Par exemple, une zone en jaune peut représenter une combinaison d'une forte concentration en minéraux opaques (rouge) et une maturité intermédiaire (vert).



Mercure en fausses couleurs. Les couleurs mettent en évidence des régions de composition différente, notamment les plaines lisses issues de coulées de lave (en bas à gauche, en orange).



Une plaine lisse recouvrant un ancien bassin de 190 km de diamètre.

Robinson et Lucey ont alors remarqué que les plaines étaient marquées de couleurs différentes par rapport aux cratères et ont pu en déduire que ces plaines étaient de composition différente par rapport aux surfaces plus anciennes (caractérisées par la présence de cratères). Ces plaines ont dû, à l'instar de la Lune, être formées par des coulées de lave. De nouvelles questions se posent alors quant à la nature de ces remontées de roche en fusion : s'agit-il de simples épanchements fluides, ou d'éruptions explosives ? Cependant, toutes les plaines n'ont peut-être pas pour origine des coulées de lave. Il est possible que certaines se soient formées à partir de retombées de poussières et de fragments du sol, éjectés lors de gros impacts météoritiques.

Certaines éruptions volcaniques ont pu se produire suite à de grosses collisions. Dans le cas du Bassin Caloris, le cratère généré par l'impact devait avoir à l'origine une profondeur de 130 km, atteignant probablement le manteau qui a dû entrer partiellement en fusion lors du choc (pression et température très importantes). Le manteau est ensuite remonté lors du réajustement du sol, comblant le cratère.

Ainsi, sachant qu'une partie de la surface de Mercure provient de son intérieur, les scientifiques ont pu en apprendre plus sur la composition interne de la planète.

Structure interne

La planète possède un noyau métallique correspondant à un minimum de 55% de la masse de la planète^[29], plus gros que celui de la Terre en proportions. Des recherches récentes suggèrent que ce noyau est liquide^[30]. La composition interne de la planète, est de 70 % de métaux (principalement dans le noyau) et 30 % de silicates (manteau). La masse volumique moyenne est de $5,430 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, ce qui est comparable à la masse volumique terrestre ($5,515 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[31]. À partir d'observations depuis la Terre, les astronomes savaient avant même d'envoyer Mariner 10 que Mercure était à peu près aussi dense que la Terre. En revanche, ils ne s'attendaient pas à ce que la croûte de Mercure soit d'une si faible densité, d'après les mesures effectuées par la sonde américaine. Ces résultats indiquent que Mercure possède un énorme noyau métallique occupant 42 % du volume planétaire, avec un rayon de 75 % de celui de la planète. En comparaison, le noyau de la Terre, lui, ne remplit que 17 % de son volume. Ceci implique que Mercure possède — en proportions — une quantité de fer deux fois plus importante que tout autre objet du système solaire. C'est la raison pour laquelle on la surnomme parfois « la planète métallique »^[32].

La raison pour laquelle Mercure possède un noyau si gros est encore inconnue et l'un des objectifs principaux des prochaines missions vers Mercure est d'étudier et comprendre la structure interne de la planète. Une réponse qui pourra nous en apprendre beaucoup sur la formation du système solaire.

Cet énorme noyau est recouvert d'un manteau de silicate d'une épaisseur de 500 à 600 km, puis d'une croûte^[33]. L'étude du spectre de la planète montre que la surface semble pauvre en métaux, ce qui intrigue les scientifiques. Sur Terre, le fer est abondant en surface. Cet élément est même présent dans chaque couche de la planète. Mercure a dû connaître un processus différent lors de sa formation.

Du fait de son important noyau ferreux et de son importante densité, Mercure est une planète très massive pour sa petite taille. Par comparaison, Ganymède, un satellite de Jupiter, est légèrement plus grande que Mercure pour une masse deux fois plus petite !

Méetallicité

La proportion en fer de Mercure — proportion plus importante que celle de tout autre objet du système solaire — intrigue toujours les astronomes. La réponse à cette question permettrait certainement d'en apprendre beaucoup sur la nébuleuse solaire primitive et les conditions dans lesquelles le système solaire s'est formé. Trois hypothèses ont été proposées pour expliquer la haute métallicité de Mercure et son noyau gigantesque.

L'une d'entre elles suggère que Mercure avait à l'origine un rapport métal-silicate semblable à celui des chondrites et une masse d'environ 2,25 fois la masse courante. Tôt dans l'histoire du système solaire, Mercure aurait été frappée par un planétésimal d'environ 1/6^e de cette masse. L'impact aurait arraché à la planète une grande partie de sa croûte et de son manteau, ne laissant derrière que le noyau (métallique), qui aurait fusionné avec celui du planétésimal, et un mince manteau. Une hypothèse assez semblable au scénario (très probable) retenu pour expliquer la formation de la Lune.

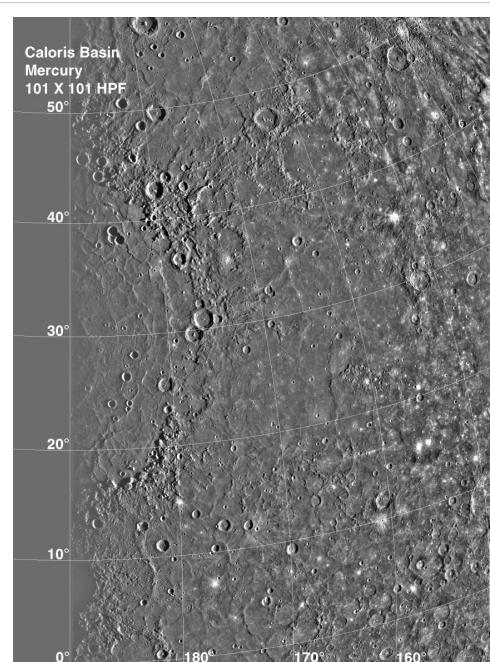
Une seconde hypothèse propose que le taux d'éléments lourds, comme le fer, présents dans la nébuleuse solaire était plus important au voisinage du Soleil, voire que ces éléments lourds étaient distribués graduellement autour du Soleil (plus on s'en éloignait, moins il y avait d'éléments lourds). Mercure, proche du Soleil, aurait donc amassé plus de matériaux lourds que les autres planètes pour former son noyau.

Alternativement, Mercure aurait pu s'être formée très tôt dans l'histoire, avant même que l'énergie dégagée par le Soleil ne se soit stabilisée. Mercure aurait eu à sa formation le double de sa masse courante, mais à mesure que la proto-étoile se contractait, la température aux alentours de Mercure augmentait et aurait pu atteindre 2500–3500 K, voire 10000 K. À de telles températures, une grande partie de la surface de Mercure aurait été vaporisée, formant une atmosphère de « vapeurs rocheuses », qui aurait été ensuite transportée ailleurs par les vents solaires. Une hypothèse similaire propose que les couches extérieures de Mercure aient été érodées par les vents solaires, durant une plus longue période.

Champ magnétique

Révélée par la sonde Mariner 10 lors de sa première approche, en mars 1974, la présence d'un champ magnétique faible^[33] surprit les astronomes qui pensaient jusque là que Mercure était dépourvue de toute magnétosphère. Vingt minutes avant de survoler la planète au plus près, les magnétomètres de Mariner 10 détectèrent l'onde de choc d'étrave produite par la collision de ce champ avec celui du Soleil et le mesurèrent à 1 µT, ce qui représente un peu moins d'un soixantième du champ magnétique terrestre^[34].

La source du champ magnétique, encore incertaine, a été déterminée durant un second passage de Mariner 10 comme étant intrinsèque à Mercure, et non pas provoquée par l'action des vents solaires. Avant la mission Mariner 10, les astronomes ne pensaient pas que Mercure possédât un champ magnétique du fait de sa vitesse de rotation — trop lente pour pouvoir l'engendrer par effet dynamo — et de sa petite taille — qui laissait penser que le noyau de Mercure s'était solidifié depuis longtemps. Il fallut donc admettre que ce noyau est partiellement fondu et connaît des mouvements de convection qui seraient à l'origine de ce champ. Néanmoins, les estimations récentes suggèrent que le noyau de Mercure n'est pas assez chaud pour que le fer-nickel soit présent sous forme liquide. En revanche, il est possible que d'autres éléments soient présents, comme le soufre ; qui se sont concentrés dans la phase liquide



Le bassin Caloris situé dans l'ombre du terminateur (à gauche), cratère formé suite à un impact météoristique, et mesurant 1350 km de diamètre.

résiduelle, abaissant ainsi le point de fusion du mélange^[30] .^[35] Il se peut également que le champ magnétique de Mercure soit le reste d'un ancien effet dynamo qui a maintenant cessé, devenu « figé » dans les matériaux magnétiques solidifiés du noyau (la période de rotation ayant pu être beaucoup plus courte par le passé).

Par ailleurs, le champ magnétique de Mercure est une version réduite du champ magnétique terrestre. Norman Ness, qui était alors chargé de l'étude du champ magnétique, put prédire — en supposant d'avance qu'il s'agissait d'une version réduite du champ terrestre — les moments précis où la sonde traverserait l'onde de choc, la magnétopause ainsi que la zone où le champ est maximal. Ces prédictions concordaient avec les mesures relevées par les instruments de Mariner 10. Des expériences menées par la sonde ont montré que, tout comme celle de la Terre, la magnétosphère de Mercure possède une queue séparée en deux par une couche neutre.

Exploration

Observation dans l'Antiquité

Mercure est connue depuis que les hommes s'intéressent au ciel nocturne ; la première civilisation à en avoir laissé des traces écrites est la civilisation sumérienne^[36] (III^e millénaire av. J.-C.) qui la nommait « *Ubu-idim-gud-ud* », mais elle était probablement connue depuis bien avant.

Les premiers écrits d'observations détaillées de Mercure nous viennent des Babyloniens. Les Babyloniens donnaient à cet astre, qu'ils associaient au dieu Nabû du savoir dans la mythologie mésopotamienne, le nom de « *gu-ad* » ou « *gu-utu* ». Ils sont également les premiers à avoir étudié le mouvement apparent de Mercure, qui est différent de celui des autres planètes^[37] .

Plus tard, dans l'Antiquité, les Grecs considérèrent jusqu'au IV^e siècle av. J.-C. que Mercure visible avant le lever du Soleil d'une part et Mercure visible après son coucher d'autre part relevaient de deux astres distincts, appelés respectivement du nom des dieux Apollon (Απόλλων) et Hermès (Ερμῆς) de la mythologie grecque^[36] ; bien que Pythagore aurait « démontré » qu'il s'agissait du même astre. Les Égyptiens procédèrent de même en donnant le nom de Sat à l'étoile du soir et Horus à celle du matin^[38] .

Le nom « Mercure » est issu de la mythologie romaine. Mercure, ou Hermès dans la mythologie grecque, est le messager des dieux ainsi que le dieu protecteur des commerçants, des médecins et des voleurs. L'association de la planète au dieu Mercure semble provenir du fait que la planète se déplace rapidement dans le ciel, rappelant la célérité de la divinité gréco-romaine^[39] .

Hygin qui, au I^{er} siècle ap. J.-C., a compilé un grand nombre de sources grecques mentionne dans ses *Fables mythologiques*^[40] que la planète était aussi connue sous le nom de Stilbon (ou *Stibos*), « celui qui brille »^[41] .

Vue depuis des millénaires dans le ciel terrestre, Mercure est une planète difficile à observer depuis la Terre de par sa distance relativement proche du Soleil. Depuis l'Antiquité, son observation est un défi pour les astronomes ; la planète restant dans les environs du Soleil dont la lumière éblouit. De plus, elle n'est visible qu'au petit matin, ou au crépuscule, et seulement quelques moments dans l'année. Mercure possède une magnitude apparente qui varie entre -0,4 et 5,5^[42] .

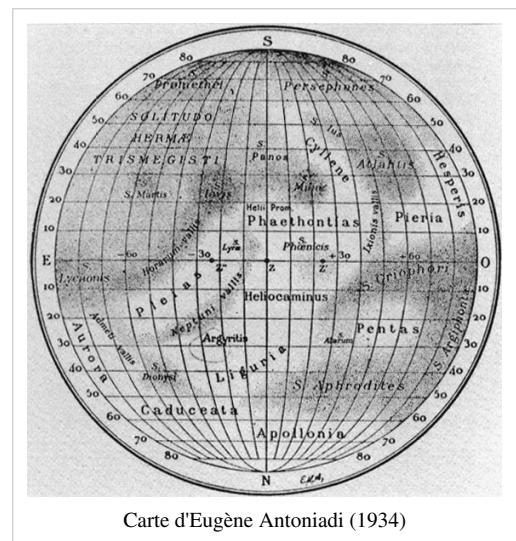
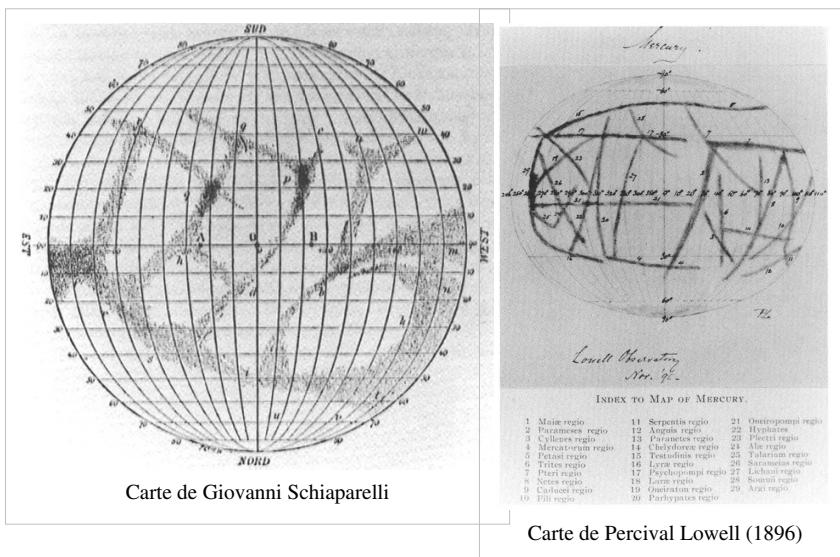
La planète est visible juste au-dessus de l'horizon, ce qui accroît la difficulté d'observation : la lumière réfléchie par Mercure doit traverser dix fois plus d'atmosphère terrestre que si on l'observait au zénith, ce qui produit des distorsions et une image moins nette. On raconte que sur son lit de mort Copernic regretta de ne jamais avoir pu observer Mercure à cause des brouillards qui s'élevaient sur la Vistule. Cette anecdote a peut-être été inventée mais elle montre qu'il est bien difficile d'observer cet astre.

Cartographie

À partir d'observations terrestres

Le premier astronome à avoir discerné des caractéristiques géologiques de Mercure était Johann Hieronymus Schröter qui, vers la fin du XVIII^e siècle, dessina en détails ce qu'il avait pu observer, dont des montagnes pouvant atteindre 19 km de haut. Ses observations furent cependant infirmées par William Herschel qui ne put voir aucune de ces caractéristiques.

Par la suite, d'autres astronomes ont dressé des cartes de Mercure, dont l'italien Giovanni Schiaparelli et l'américain Percival Lowell (en 1896) qui y voyaient des zones sombres en formes de lignes, similaires aux canaux de Mars. Schiaparelli et Lowell avaient également esquissé des cartes de Mars en soutenant qu'il y avait des canaux artificiels.



La meilleure carte d'avant Mariner 10 provient du franco-grec Eugène Antoniadi, au début des années 1930. Elle fut utilisée pendant près de 50 ans jusqu'à ce que Mariner 10 nous renvoie les premières photos de la planète. Antoniadi montra que les canaux n'étaient qu'une illusion d'optique. Il reconnut que l'élaboration d'une carte précise de Mercure était impossible à partir d'observations effectuées à l'aube ou au crépuscule, à cause des perturbations atmosphériques (l'épaisseur d'atmosphère terrestre que la lumière doit traverser lorsque Mercure se trouve à l'horizon est importante et crée des distorsions de l'image). Il entreprit alors de faire des observations — dangereuses — en plein jour lorsque le Soleil était bien au-dessus de l'horizon. Il gagna ainsi en netteté, mais perdit en contrastes à cause de la lumière du Soleil. Antoniadi parvint tout de même à achever sa carte en 1934, composée de plaines et de montagnes.

Les coordonnées utilisées sur ces cartes ont peu d'importance dans la mesure où elles ont été établies alors qu'on pensait, comme Schiaparelli l'avait affirmé, que la période de rotation de Mercure sur elle-même était la même que la période de révolution autour du Soleil. Il s'agit donc de la face supposée toujours illuminée qui a été cartographiée.

Depuis Mariner 10

En 1974–75^[14], Mariner 10 rapporta des photographies en haute résolution permettant la cartographie d'environ 40–45% de sa surface, révélant les détails topographiques jamais vu auparavant : une surface recouverte de cratères avec des montagnes et des plaines, et très ressemblante à celle de la Lune. Il a d'ailleurs été assez difficile de faire une corrélation entre les caractéristiques photographiées par la sonde et les cartes établies par télescope. Certaines des manifestations géologiques de la carte d'Antoniadi se sont révélées inexistantes.

L'Union Astronomique Internationale a défini en 1970 le méridien 0° comme étant le méridien solaire au premier périhélie après le 1^{er} janvier 1950. Le système de coordonnées utilisé par Mariner 10 se fonde sur le méridien 20° qui

coupe le cratère Hun Kal (Hun Kal signifie « 20 » en maya), ce qui donne une légère erreur de moins de 0,5° par rapport au méridien 0° défini par l'UAI. Le cratère Hun Kal est en quelque sorte le Greenwich de Mercure. L'équateur se trouve dans le plan de l'orbite de Mercure. Les longitudes sont mesurées de 0° à 360° en allant vers l'ouest.

Mercure est découpée en 15 quadrangles. Plusieurs méthodes de projection ont été utilisées pour cartographier la surface de Mercure, suivant la position du quadrangle sur le globe. Cinq projections Mercator (projection cylindrique tangente à l'équateur) entourant la planète au niveau de l'équateur, entre les latitudes 25° nord et 25° sud ; quatre projections Lambert (projection conique) entre 20° et 70° de latitude pour chaque hémisphère ; et deux projections stéréographiques pour cartographier les pôles (jusqu'à 65° de latitude).

Chaque quadrangle commence par la lettre H (pour « Hermès »), suivit de son numéro (de 1, pôle Nord, à 15, pôle Sud). Leur nom provient d'une caractéristique importante présente sur leur région (bassin, cratère, etc.) et un nom d'albedo (entre parenthèses) leur est attribué. Les noms d'albedos assignés pour cette nouvelle carte proviennent de celle d'Antoniadi, puisque c'était celle utilisée jusque là par tous les observateurs depuis plusieurs décennies. Ils servent pour repérer les quadrangles lors des observations au télescope depuis la Terre, où l'on ne distingue que les variations d'intensité de lumière. Seuls Lowell et Antoniadi avaient annoté leurs cartes. Les quadrangles non cartographiés ne possèdent que leur nom d'albédo.

Quadrangles de Mercure

Quadrangle	Nom	Projection	Longitudes
H-1	Borealis (Borea)	Stéréographique	pôle Nord
H-2	Victoria (Aurora)	Lambert	0° à 90°
H-3	Shakespeare (Caduceata)	Lambert	90° à 180°
H-4	<i>Non cartographié</i> (Liguria)	Lambert	180° à 270°
H-5	<i>Non cartographié</i> (Apollonia)	Lambert	270° à 360°
H-6	Kuiper (Tricrenia)	Mercator	0° à 72°
H-7	Beethoven (Solitudo Lycaonis)	Mercator	72° à 144°
H-8	Tolstoj (Phaethontias)	Mercator	144° à 216°
H-9	<i>Non cartographié</i> (Solitudo Criophori)	Mercator	216° à 288°
H-10	<i>Non cartographié</i> (Pieria)	Mercator	288° à 360°
H-11	Discovery (Solitudo Hermae Trismegisti)	Lambert	0° à 90°
H-12	Michelangelo (Solitudo Promethei)	Lambert	90° à 180°
H-13	<i>Non cartographié</i> (Solitudo Persephones)	Lambert	180° à 270°
H-14	<i>Non cartographié</i> (Cyllene)	Lambert	270° à 360°
H-15	Bach (Australia)	Stéréographique	pôle Sud

Exploration robotisée

Avant d'y envoyer des sondes, on ne connaissait que peu de choses de Mercure. Jusqu'à l'arrivée de la sonde Messenger en janvier 2008, seule la sonde Mariner 10 avait survolé Mercure (en 1974) : c'est à elle que l'on doit une grande partie de ce que l'on connaît de cette planète. La mission actuellement en cours (Messenger), et une autre en préparation devraient nous apporter plus d'informations sur Mercure dans les années à venir.

Tableau récapitulatif des missions vers Mercure

Sonde	Évènement	Date	Agence spatiale
Mariner 10	Lancement	novembre 1973	NASA
	Premier survol	mars 1974	
	Second survol	septembre 1974	
	Troisième survol	mars 1975	
MESSENGER	Lancement	août 2004	NASA
	Premier survol	effectué le 14 janvier 2008	
	Second survol	effectué le 6 octobre 2008	
	Troisième survol	effectué le 30 septembre 2009	
BepiColombo	Mise en orbite	effectué le 18 mars 2011 à 1h UTC	
	Lancement	planifié pour août 2014	ESA/JAXA

Mariner 10

Mariner 10 a été la première sonde à étudier Mercure de près^[43]. Elle a survolé la planète à trois reprises, en mars et septembre 1974^[14] et en mars 1975. À l'origine, elle était destinée à survoler et étudier Vénus, mais les astronomes ont pensé qu'ils pourraient en faire usage également pour étudier Mercure, dont on connaissait peu de choses. Mariner 10 est donc la première sonde à avoir utilisé l'assistance gravitationnelle d'une planète — Vénus — pour en atteindre une autre^[36].

La sonde aura pris durant ces trois passages plus de 2000^[44] photographies de Mercure dont certaines à haute résolution (100 m par pixel). Cependant, seuls 45 % de la surface ont pu être cartographiés. En effet, lors de ses trois passages, Mercure présentait la même face au Soleil ; les régions à l'ombre étant impossibles à cartographier.

Mariner 10 permit de découvrir la présence d'une très mince atmosphère, ainsi qu'une magnétosphère. Elle apporta également des précisions sur sa vitesse de rotation, et de nombreuses autres données exploitables par les scientifiques. La mission arriva à terme le 24 mars 1975 lorsque la sonde se trouva à court de carburant.

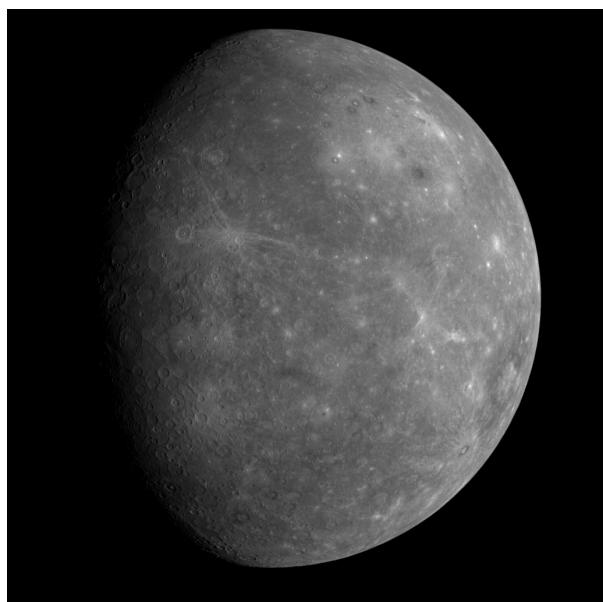


La sonde Mariner 10 envoyée par la NASA.

Messenger

Une nouvelle mission pour Mercure baptisée Messenger^[45] (*MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging*) a été lancée le 3 août 2004 de Cap Canaveral à bord d'une fusée Boeing Delta 2. La sonde Messenger a effectué un premier survol de Mercure en janvier 2008, ainsi qu'un second le 6 octobre de la même année. Ce passage permit de dévoiler une grande partie de la face cachée de la planète. Messenger a effectué un troisième passage, à 200 km d'altitude, en septembre 2009, qui permit de terminer la cartographie (10% restaient encore inconnus), avant d'entrer en orbite autour de Mercure le 18 mars 2011 vers 1h UTC. Une fois en orbite, elle étudiera l'atmosphère et la magnétosphère de la planète, sa composition chimique en surface et sa structure.

La sonde restera en orbite durant une année terrestre. Elle rapportera également de nouvelles photos à une résolution de 250 m par pixel et devrait produire des cartes de sa composition globale, un modèle en trois dimensions de la magnétosphère, la topographie de l'hémisphère nord et caractériser les éléments volatils présents dans les cratères constamment ombragés des pôles.



Mercure, imagé par Messenger, à l'occasion de son premier survol, en janvier 2008

BepiColombo

L'Agence spatiale européenne est en train de planifier en collaboration avec l'Agence spatiale japonaise une mission baptisée BepiColombo^[46], qui prévoit de placer deux sondes en orbite autour de Mercure : l'une pour cartographier la planète (*Mercury Planetary Orbiter*), l'autre pour étudier sa magnétosphère (*Mercury Magnetospheric Orbiter*). Le projet de l'envoi d'un atterrisseur embarqué avec la mission a dû cependant être abandonné pour des raisons budgétaires. Ces deux sondes vont être envoyées par un lanceur Soyouz en août 2014. Elles vont rejoindre Mercure environ six ans plus tard pour l'étudier durant une année.

Le programme BepiColombo a pour objectif de répondre à une douzaine de questions que se posent les astronomes, notamment au sujet de la magnétosphère et de la nature du noyau de Mercure (liquide ou solide), de la possible présence de glace au fond des cratères constamment à l'ombre, de la formation du système solaire et de l'évolution en général d'une planète au voisinage de son étoile. Des mesures très précises du mouvement de Mercure vont également être effectuées afin de vérifier la théorie de la Relativité générale, censée expliquer les anomalies observées dans son orbite.

Une possible colonisation humaine

Un cratère au pôle nord ou au pôle sud de Mercure serait peut-être l'un des meilleurs endroits extraterrestres pour l'établissement d'une colonie, là où la température resterait constante (à environ -200 °C). Ceci est dû à une inclinaison axiale quasi nulle de la planète et au vide quasi-parfait à la surface, empêchant l'apport de chaleur depuis les portions éclairées par le Soleil. Ce qui rend ainsi toujours sombre et froid le fond d'un cratère — même peu profond — à l'un des pôles, mais surtout éviterait de gros écarts de température. La colonie pourrait se chauffer elle-même et la faible température ambiante permettrait une évacuation plus facile de la chaleur que sur un autre lieu extraterrestre.

Une base n'importe où ailleurs, serait exposée en « journée » durant un trimestre (terrestre) à la chaleur intense du Soleil, puis durant une période nocturne identique sans la moindre source de chaleur extérieure. La situation ne serait pas aussi compliquée qu'il n'y paraît à première vue : les installations pourraient être enterrées sous plusieurs mètres de régolithe qui, dans le vide, servirait aussi bien d'isolant thermique que de bouclier antiradiations. Des approches similaires ont été proposées pour l'installation de bases sur la Lune, dont le jour dure deux semaines, suivi d'une nuit de deux semaines également. Par ailleurs, la base pourrait profiter du jour pour stocker la chaleur et s'en servir ensuite la nuit. Il serait aussi possible de se servir de la chaleur disponible dans les roches du sous-sol, où la température est quasi-constante de l'ordre de 180 °C (voir chapitre Conditions climatiques et insolation) : une sorte de géothermie mercurienne. En revanche, la protection des robots et des véhicules contre la chaleur du Soleil pourrait poser beaucoup plus de difficultés, entraînant une limitation des activités en surface durant le jour.

Notes et références

Notes

- [1] Pluton a longtemps été considérée comme la plus petite planète du Système solaire, mais a été reclassée comme planète naine par l'Union astronomique internationale en 2006, et n'est donc plus considérée comme une planète.
- [2] G. M. Clemence, « The Relativity Effect in Planetary Motions », dans *Reviews of Modern Physics*, vol. 19, n° 4, octobre 1947, p. 361-364 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.19.361>)]
- [3] (en) Jose Wudka, « Precession of the perihelion of Mercury (http://physics.ucr.edu/~wudka/Physics7/Notes_www/node98.html) », Department of Physics and Astronomy at the University of California, Riverside, 1998-09-24. Consulté le 2009-03-04
- [4] <http://www.le-systeme-solaire.net/mercure.html>
- [5] Dictionnaire de l'astronomie, universalis, ISBN:2-226-107-87-8,p.594.
- [6] Fillion 1990, p. 71
- [7] David R. Williams, « *Mercury Fact Sheet* (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>) », NASA, National Space Science Data Center., novembre 2007
- [8] Ceci pourrait expliquer la résonance 3:2 de la rotation de Mercure (plutôt que 1:1), car on s'attend plutôt à rencontrer cet état pendant une période où l'orbite a une forte excentricité. Ainsi, durant les périodes de faible excentricité, la résonance 1:1 (rotation/révolution) aurait cours, ce qui tendrait à la conserver. Mais lorsque les influences externes rendent l'orbite excentrique au point que cette résonance ne se maintient plus, la période de rotation changerait rapidement pour avoir une autre résonance, comme celle de 3:2 de nos jours, ce qui tend à maintenir l'excentricité acquise. Jusqu'au « désaccord » suivant...
- [9] Ekeland 2006, p. ?
- [10] Ilya Prigogine, Les lois du Chaos, Flammarion, coll. « Champs » (ISBN 2-08-081369-2)
- [11] Laskar 1992, p. ?
- [12] En d'autres termes, son orbite est elle-même en rotation autour du Soleil.
- [13] René Taton, *La science contemporaine*, Quadrige/PUF (1995), La relativité, p.170-171
- [14] Duncan 2007, p. 59
- [15] Les 2 « pôles équatoriaux froids ». Où ils sont alternativement au zénith (ou dans la nuit), lors de l'aphélie de Mercure.
Ils sont en quadrature avec les « pôles équatoriaux chauds » dont le bassin Caloris en est l'un d'eux.
- [16] Duncan 2007, p. 55
- [17] Frances 2006, p. 125
- [18] Mercury Fact Sheet (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>)
- [19] Duncan 2007, p. 57
- [20] Background Science (<http://sci.esa.int/science-e/www/category/index.cfm?fcategoryid=4586>), European Space Agency. Consulté le 2008-05-23
- [21] Staff, « Mercury (<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/BrowseTheGeologicSolarSystem/MercuryBack.html>) », U.S. Geological Survey, August 5, 2003. Consulté le 2008-04-07
- [22] James W. Head, « Tectonic Evolution of the Terrestrial Planets », dans *Science*, vol. 213, n° 4503, 1981, p. 62–76 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/213/4503/62>), lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17741171>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.213.4503.62>) (le 2008-04-07)]
- [23] Shiga, David : *Bizarre spider scar found on Mercury's surface* (<http://space.newscientist.com/article/dn13257-bizarre-spider-scar-found-on-mercurys-surface.html>), NewScientist.com news service (January 30, 2008).
- [24] Frances 2006, p. 127
- [25] Peter H. Schultz, « Seismic effects from major basin formations on the moon and Mercury », dans *Earth, Moon, and Planets*, vol. 12, n° 2, 1975, p. 159–175 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1975Moon...12..159S>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1007/BF00577875>) (le 2008-04-16)]

- [26] Gazetteer of Planetary Nomenclature (<http://planetarynames.wr.usgs.gov/>), US Geological Survey, April 11, 2008. Consulté le 2008-04-11
- [27] (**en**) Dunne, J. A. and Burgess, E., The Voyage of Mariner10 — Mission to Venus and Mercury, NASA History Office, 1978 , « Chapter Seven »
- [28] R.J. Wagner *et al.*, « Application of an Updated Impact Cratering Chronology Model to Mercury's Time-Stratigraphic System », dans *Workshop on Mercury: Space Environment, Surface, and Interior, Chicago*, 2001, p. 106 [texte intégral (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2001mses.conf..106W&db_key=AST&data_type=HTML&format=&high=4613707b1d22308)]
- [29] http://www.nasa.gov/mission_pages/messenger/media/flyby20091029.html
- [30] Chronicle Online, « Mercury has molten core, Cornell researcher shows (<http://www.news.cornell.edu/stories/May07/margot.mercury.html>) », Cornell University, 3 mai 2007. Consulté le 4 mai 2007
- [31] staff, « Mercury (<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/BrowseTheGeologicSolarSystem/MercuryBack.html>) », U.S. Geological Survey, May 8, 2003. Consulté le 2006-11-26
- [32] Lyttleton, R. A., « On the Internal Structures of Mercury and Venus », dans *Astrophysics and Space Science*, vol. 5, n° 1, 1969, p. 18 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1007/BF00653933>) (le 2008-04-16)]
- [33] Astronomie,Sélection, ISBN 978-2-7098-1539-0, p.77
- [34] Mercury magnetic field (http://www-spc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/merc_mag/), C. T. Russell & J. G. Luhmann. Consulté le 2007-03-16
- [35] Finley, Dave : *Mercury's Core Molten, Radar Study Shows* (<http://www.nrao.edu/pr/2007/mercury/>), National Radio Astronomy Observatory (May 3, 2007). Consulté le 2008-05-12.
- [36] Bienvenue sur la planète Mercure !!! (<http://perso.orange.fr/youpie/systsol/Mdecouv.htm>)
- [37] Dictionnaire de l'astronomie, Larousse, ISBN:2-03-720019-6, p. 194.
- [38] Charles Frankel, *Dernières nouvelles des planètes*, Seuil 2009, p.14
- [39] Mercure (<http://www.solarviews.com/french/mercury.htm>)
- [40] <http://www.theoi.com/Text/FulgentiusMythologies1.html#18>
- [41] <http://www.tribunes.com/tribune/alliage/33-34/guil.htm>
- [42] Jean Étienne, « En images : Mercure photographiée presque entièrement grâce à Messenger (http://www.futura-sciences.com/fr/news/t-astronautique/d/en-images-mercure-photographiee-presque-entierement-grace-a-messenger_17196/) » sur <http://www.futura-sciences.com>", Futura-Sciences, 31 octobre 2008. Consulté le 21 décembre 2009.
- [43] Page sur Mariner 10 (<http://www.le-systeme-solaire.net/modules.php?name=sondes&page=mariner10>)
- [44] Frances 2006, p. 126
- [45] page dédiée à MESSENGER (<http://www.astroculture.net/article/messenger.htm>)
- [46] BepiColombo sur le site de la CNES (<http://smsc.cnes.fr/BEPICOLOMBO/Fr/index.htm>)

Références

Vénus (planète)

Vénus ♀



Vénus en vraies couleurs vue par Mariner 10.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	108208930 km (0.723332 UA)
Aphélie	108942109 km (0.72823128 UA)
Périhélie	107476259 km (0.71843270 UA)
Circonférence orbitale	680000000 km (4.545 UA)
Excentricité	0.0068
Période de révolution	224.701 d
Période synodique	583.92 d
Vitesse orbitale moyenne	35.02 km/s
Vitesse orbitale maximale	35.26 km/s
Vitesse orbitale minimale	34.79 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	3.39°
Nœud ascendant	76.67069°
Argument du périhélie	54.85229°
Satellites connus	0
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	6051.8 ± 1.0 km (0.949 Terre)
Rayon polaire	6051.8 ± 1.0 km (0.952 Terre)
Rayon moyen volumétrique	6051.8 ± 1.0 km (0.950 Terre)
Aplatissement	0
Périmètre équatorial	38025 km (0.949 Terre)

Superficie	$460 \times 10^6 \text{ km}^2$ (0.902 Terre)
Volume	$928.43 \times 10^9 \text{ km}^3$ (0.857 Terre)
Masse	$4.8685 \times 10^{24} \text{ kg}$ (0.815 Terre)
Masse volumique globale	$5.204 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Gravité de surface	8.87 m/s^2 (0.905 g)
Vitesse de libération	10.46 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	-243.0185 d
Vitesse de rotation (à l'équateur)	6.52 km/h
Inclinaison de l'axe	177.36°
Albédo géométrique visuel	0.65
Albédo de Bond	0.75
Irradiance solaire	2613.9 W/m^2 (1.911 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	231.7 K (-41.3 °C)
Température de surface :	
Maximum :	763 K (490 °C)
Moyenne :	735 K (462 °C)
Minimum :	719 K (446 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	$9.3 \times 10^6 \text{ Pa}$
Masse volumique au sol	$\sim 65 \text{ kg/m}^3$
Masse totale	$480 \times 10^{18} \text{ kg}$
Hauteur d'échelle	15.9 km
Masse molaire moyenne	43.45 g/mol
Dioxyde de carbone CO₂	~96,5 %
Diazote N₂	~3,5 %
Dioxyde de soufre SO₂	150 ppm
Argon Ar	70 ppm
Vapeur d'eau H₂O	20 ppm
Monoxyde de carbone CO	17 ppm
Hélium He	12 ppm
Néon Ne	7 ppm
Acide chlorhydrique HCl	100 à 600 ppb

Acide fluorhydrique HF	1 à 5 ppb
Sulfure de carbonyle COS	Traces
Histoire	
Divinité babylonienne	Ishtar
Divinité grecque	- le matin : Φωσφόρος - le soir : Ἔωσφόρος
Nom chinois (élément associé)	Jīnxīng 金星 (métal)

Vénus est une planète du Système solaire. C'est la deuxième des huit planètes par ordre de distance croissante au Soleil, et la troisième par masse ou par taille croissantes.

Généralités

La distance de Vénus au Soleil est comprise entre 0.718 et 0.728 UA, avec une période orbitale de 224.7 jours. Vénus une planète tellurique, comme le sont également Mercure, la Terre et Mars. Elle possède un champ magnétique très faible et n'a aucun satellite naturel. Elle est, avec Uranus, l'une des deux seules planètes du Système solaire dont la rotation est rétrograde, et la seule ayant une période de rotation (243 jours) supérieure à sa période de révolution. Vénus présente en outre la particularité d'être quasiment sphérique — son aplatissement peut être considéré comme nul — et de parcourir l'orbite la plus circulaire des planètes du Système solaire, avec une excentricité orbitale de 0,0068 (contre 0,0167 pour la Terre).

Vénus est presque aussi grande que la Terre — son diamètre représente 95 % de celui de notre planète — et a une masse équivalente aux quatre cinquièmes de celle de la Terre. Sa surface est dissimulée sous d'épaisses couches de nuages très réfléchissants qui lui confèrent un albédo de Bond de 0,75 et une magnitude apparente dans le ciel pouvant atteindre -4,6, valeur dépassée uniquement par la Lune et le Soleil. Étant plus proche du Soleil que la Terre, elle présente des phases au même titre que la Lune et Mercure selon sa position relative par rapport au Soleil et à la Terre, son élongation ne dépassant jamais 47,8°.

L'atmosphère de Vénus est la plus épaisse de celle de toutes les planètes telluriques, avec une pression au sol atteignant 9.3 MPa (91.8 atm) au niveau de référence des altitudes vénusiennes. Cette atmosphère est composée d'environ 96,5 % de dioxyde de carbone et 3,5 % d'azote, avec de faibles concentrations de dioxyde de soufre et de divers autres gaz. Elle contient d'épaisses couches nuageuses opaques constituées de gouttelettes de dioxyde de soufre et d'acide sulfurique surmontées d'une brume de cristaux de glace d'eau qui donne à la planète son aspect laiteux lorsqu'on l'observe depuis l'espace. Ces nuages réfléchissent l'essentiel du rayonnement solaire, de sorte que la puissance solaire parvenant au sol sur Vénus représente moins de 45 % de celle reçue au sol sur Terre, et est même inférieure d'un quart à celle reçue à la surface de la planète Mars^[1].

L'atmosphère de Vénus est près de cent fois plus massive que celle de la Terre et possède une dynamique propre, indépendante de la planète elle-même, avec une super-rotation dans le sens rétrograde en quatre jours terrestres, ce qui correspond à une vitesse linéaire au sommet des nuages d'environ 100 m/s (360 km/h) par rapport au sol. Compte tenu de sa composition et de sa structure, cette atmosphère génère un très puissant effet de serre à l'origine des températures les plus élevées mesurées à la surface d'une planète du Système solaire : près de 740 K (environ 465 °C) en moyenne à la surface — supérieures à celles de Mercure, pourtant plus proche encore du Soleil, où les températures culminent à 700 K (environ 425 °C) — et ceci bien que l'atmosphère ne laisse passer que le quart de l'énergie solaire incidente.

À cette pression (9.3 MPa) et à cette température (740 K), le CO₂ n'est plus un gaz, mais un fluide supercritique (intermédiaire entre un gaz et un liquide), d'une masse volumique voisine de 65 kg/m³.

La topographie de Vénus présente peu de reliefs élevés, et consiste essentiellement en de vastes plaines *a priori* volcaniques géologiquement très jeunes — quelques centaines de millions d'années tout au plus. De très nombreux volcans ont été identifiés à sa surface — mais sans véritables coulées de lave, ce qui constitue une énigme — ainsi que des formations géologiques, parfois uniques dans le Système solaire telles que *coronae*, arachnoïdes et *farra*, attribuées à des manifestations atypiques de volcanisme. En l'absence de tectonique des plaques identifiée à la surface de la planète, on pense que Vénus évacue sa chaleur interne périodiquement lors d'éruptions volcaniques massives qui remodèlent entièrement sa surface, ce qui expliquerait que celle-ci soit si récente. Entre ces épisodes de volcanisme global, le refroidissement de la planète serait trop lent pour entretenir un gradient thermique suffisant dans la phase liquide du noyau pour générer un champ magnétique global par effet dynamo^[2].

Par ailleurs, des mesures d'émissivité à 1.18 µm réalisées en 2008^[3] ont suggéré une relative abondance des granites et autres roches felsiques sur les terrains les plus élevés — qui sont généralement les plus anciens — de la planète, ce qui impliquerait l'existence passée d'un océan global assorti d'un mécanisme de recyclage de l'eau dans le manteau susceptible d'avoir produit de telles roches. À l'instar de Mars, Vénus aurait ainsi peut-être connu, il y a plusieurs milliards d'années, des conditions tempérées permettant l'existence d'eau liquide en surface, eau aujourd'hui disparue — par évaporation puis dissociation photochimique dans la haute atmosphère — au point de faire de cette planète l'une des plus sèches du Système solaire.

La planète Vénus a été baptisée du nom de la déesse Vénus de la féminité et de l'amour physique dans la mythologie romaine. Elle était déjà connue des Babyloniens à l'Âge du bronze, associée à la déesse Ishtar de la mythologie mésopotamienne.

Caractéristiques physiques

Vénus est souvent décrite comme une « sœur jumelle » de la Terre en raison de ses caractéristiques globales très proches de celles de notre planète : son diamètre vaut 95 % de celui de la Terre, et sa masse un peu plus de 80 %. Néanmoins, si sa géologie est sans doute proche de celle de la Terre, les conditions qui règnent à sa surface diffèrent radicalement des conditions terrestres, et les phénomènes géologiques affectant la croûte vénusienne semblent également spécifiques à cette planète.

Atmosphère



Structures nuageuses dans l'atmosphère de Vénus, révélées par des observations en ultraviolet.

L'atmosphère de Vénus est extrêmement dense. Elle se compose majoritairement de dioxyde de carbone (CO₂) et d'une faible quantité d'azote. Cette atmosphère est occupée par d'épais nuages de dioxyde de soufre^[4]. Ce mélange crée le plus fort effet de serre du système solaire, permettant d'atteindre des températures de surface tournant autour des 460 °C^[5]. La température de surface de Vénus est supérieure à celle de Mercure (420 °C), bien que Vénus se situe à près de deux fois la distance Mercure-Soleil et ne reçoive donc qu'environ 25 % de l'irradiance solaire de Mercure^[6].

Il n'y a que très peu d'ozone présent dans l'atmosphère vénusienne et donc aucune stratosphère^[5].

L'atmosphère vénusienne peut se diviser sommairement en trois parties : la basse atmosphère, la couche nuageuse et la haute atmosphère.

Basse atmosphère

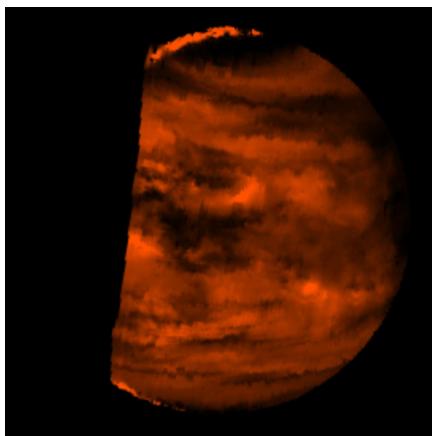


Image en proche infrarouge (2.3 μm) des profondeurs de l'atmosphère de Vénus obtenue par la sonde Galileo. Les régions sombres sont la silhouette des nuages apparaissant en négatif sur la basse atmosphère, très chaude et donc très lumineuse dans l'infrarouge.

La **basse atmosphère** (*lower haze region*) se situe entre 0 et 48 km d'altitude et est relativement transparente.

La composition de la basse atmosphère est décrite dans le tableau ci-dessous. Le dioxyde de carbone y domine largement, le gaz secondaire étant l'azote. Tous les autres sont des constituants mineurs (~300 ppm en tout)^[7].

Composition de la basse atmosphère de Vénus

Élément ou molécule ^[7]	Pourcentage dans la basse atmosphère ^[7] (en dessous des nuages)
Dioxyde de carbone	-96.5 %
Diazote	~3.5 %
Dioxyde de soufre	0.0150 %
Argon	0.0070 %
Vapeur d'eau	0.0020 %
Monoxyde de carbone	0.0017 %
Hélium	0.0012 %
Néon	0.0007 %

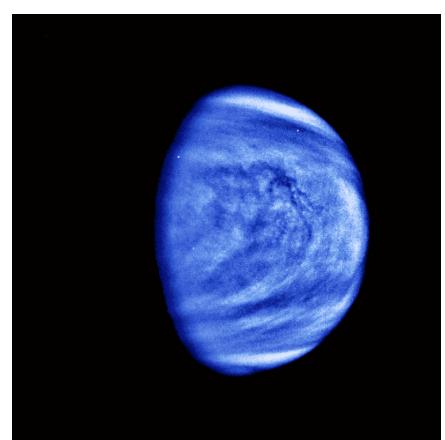
Couche nuageuse

Il y a plusieurs couches de nuages situées entre 45 km et 70 km^{[6],[8]}. Cette couche nuageuse opaque réfléchit la lumière solaire, ce qui explique la brillance de Vénus et empêche d'observer directement le sol vénusien depuis la Terre.

La couche nuageuse, présente notamment du dioxyde de soufre et de l'eau (à l'état solide comme gazeux) ainsi que de l'acide sulfurique sous forme de gouttelettes^[6]. Le dioxyde de carbone y domine toujours^[8].

Cette couche se subdivise en trois sous-couches :

1. **La couche inférieure ou basse** (*lower cloud region*), de 31 à 51 km. De 31 à 48 km d'altitude, l'atmosphère est qualifiée de *brumeuse* à cause de la faible quantité de particules d'acide sulfurique qu'elle contient. Ces nuages d'acide sulfurique sont visibles depuis le sol comme des rubans de vapeur jaunis par le soufre qu'ils contiennent ;
2. **La couche centrale ou principale** (*middle cloud region*) de 51 à 52 km d'altitude, relativement claire ;
3. **La couche supérieure ou haute** (*upper cloud region*), de 52 à 68 km d'altitude. De 52 à 58 km d'altitude, elle consiste notamment en des gouttelettes d'acide sulfurique et d'acide chlorhydrique ainsi que des particules de soufre (liquides comme solides). Les gouttelettes d'acide sulfurique sont en solution aqueuse, constituées à 75 % d'acide sulfurique et à 25 % d'eau. Enfin, la plus haute partie de la couche supérieure, de 58 à 68 km d'altitude, consisterait en une brume de cristaux de glace. Ce sont ces cristaux qui donnent à Vénus son apparence « laiteuse » vue depuis la Terre.



Photographie prise par la sonde Galileo en 1990. Les nuages de petite échelle ont été agrandis et la teinte bleue vient de l'utilisation d'un filtre violet.

Haute atmosphère

La haute atmosphère (*upper haze region*) se situe entre 68 et 90 km d'altitude. Elle est principalement composée de dioxyde de carbone, qui y est majoritaire à plus de 96 %, le reste étant principalement du diazote (~3.5 %). Il s'y trouve aussi des traces de monoxyde de carbone.

On y retrouve des nuages formés de gouttelettes d'acide sulfurique à 70 km^[6].

Géographie

Vénus ayant un aplatissement nul, les altitudes y sont définies par rapport au rayon moyen volumétrique de la planète, qui vaut 6051.84 km^[7]. C'est une planète au relief assez peu accidenté : les quatre cinquièmes de sa surface sont recouverts de plaines volcaniques à faible pente^[9]. La surface vénusienne est principalement occupée à hauteur de 70 % par de vastes plaines sans grand relief^[9]. Baptisées *planitiae* en géomorphologie planétaire, les principales d'entre elles ont reçu un nom dans le cadre de la nomenclature maintenue par l'UAI, comme Atalanta Planitia, Guinevere Planitia ou encore Lavinia Planitia. Elles sont parsemées de grands bassins (de 400 à 600 km de diamètre) peu profonds (de 200 à 700 m) qui seraient des vestiges de cratères anciens^[réf. nécessaire].

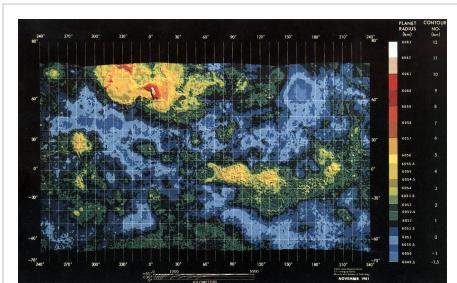
Ces plaines, de nature *a priori* volcanique, se creusent par endroits jusqu'à 2900 m sous le niveau moyen de la surface, au niveau de dépressions couvrant environ un cinquième de la surface de la planète.

Les reliefs élevés couvrent environ le dixième de la surface de Vénus, sous forme de plateaux et de montagnes. Deux vastes régions élevées, très différentes l'une de l'autre et qui seraient en quelque sorte l'équivalent vénusien des continents terrestres, sont particulièrement remarquables par leurs dimensions et leur relative cohérence topographique :

- Ishtar Terra, dans l'hémisphère nord de Vénus, dans les régions polaires. Ses dimensions de 3700×1500 km sont un peu supérieures à celles de l'Australie. Il s'agit d'un ensemble géologique essentiellement volcanique à l'ouest, avec notamment la très remarquable formation baptisée Lakshmi Planum, et orogénique à l'est, où se trouve Skadi Mons, point culminant de la planète à 10700 m, dans la chaîne des Maxwell Montes, puis l'immense Fortuna Tessera qui est une région de terrains typiquement vénusiens.
- Aphrodite Terra, trois fois plus étendue mais aux reliefs bien moins élevés, située le long de l'équateur essentiellement dans l'hémisphère sud. Il s'agit de fragments de plateaux dans un ensemble de *tesserae* prolongé au sud-est et surtout au nord-est par des *coronae* et des volcans, parmi lesquels Maat Mons, le plus haut volcan vénusien.

D'autres régions élevées, de moindre importance, existent également. C'est le cas d'Alpha Regio, une série de cuvettes, d'arêtes, et de plis qui s'agencent dans toutes les directions avec une altitude moyenne de 1 à 2 km ; ou encore de Beta Regio, remarquable puisqu'on y aurait trouvé de hautes formations volcaniques dont certains sommets, récents, dépasseraient 5000 m d'altitude.

Vénus possède également des structures planétaires rares, les couronnes. Ce sont d'énormes ravins circulaires entourant une sorte de plateau.



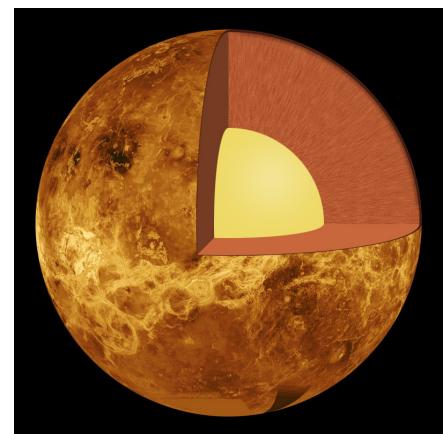
Profil topographique de Vénus : au nord-ouest, les plateaux d'*Ishtar Terra* et de *Lakshmi Planum* (en ocre clair), où culmine le mont Maxwell (en rouge et blanc) ; au sud de l'équateur, le plateau d'*Aphrodite Terra*, avec le volcan *Maat Mons* tout à fait à l'est (en ocre et rouge) ; au sud-est, *Alpha Regio* en vert très foncé, et, plus à l'ouest, en ocre, *Beta Regio* ; en vert et bleu foncé, les vastes plaines de Vénus ; en bleu plus clair, les vastes dépressions vénusiennes.

Géologie

Vénus ressemble à la Terre par sa taille (6051 km de rayon contre 6378 km pour la Terre) et par sa densité (5,26 contre 5,52). Plusieurs auteurs supposent que les deux planètes ont une structure interne comparable^{[10] , [11] , [12] , [13]}.

Croûte

La croûte silicatée, de 20 km d'épaisseur environ, serait plus épaisse que la croûte océanique terrestre (moyenne de 6 km), mais plus fine que la croûte continentale terrestre (moyenne de 30 km). La taille de la croûte vénusienne a été déduite des nombreux épanchements de lave constatés autour des cratères d'impact. Cette croûte ne représenterait que 0,34 % du rayon de la planète et les analyses faites par les différentes sondes Venera ont prouvé que le matériau extérieur de Vénus est semblable au granite et au basalte terrestre (roches riches en silice et ferromagnésiennes). Le système de plaques continentales y serait moins complexe que sur Terre : les roches plus plastiques absorbent fortement les effets de la dérive des continents. Ainsi, Vénus n'a pas de plaques tectoniques^[12] comme celles de la Terre.



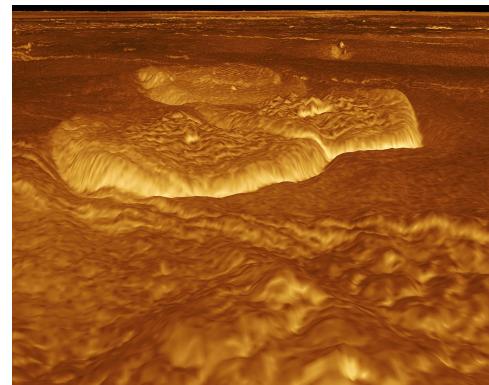
Vénus présente une structure interne semblable à celle de la Terre : croûte, manteau et noyau.

Cette différence fondamentale entre la géologie des 2 planètes telluriques les plus ressemblantes, peut être attribuée à leur évolution climatique divergente. En effet, le climat vénusien empêche l'eau de se conserver à la surface, desséchant irréversiblement les roches de la croûte. Or l'eau interstitielle des roches joue un grand rôle dans la subduction sur Terre, où elle est conservée dans ses océans. Les roches terrestres contiennent toutes un minimum d'eau résiduelle, ce qui n'est pas le cas dans les conditions du climat infernal de Vénus.

Volcanisme et impacts météoritiques

Il reste sur Vénus un volcanisme résiduel, entraînant parfois la présence de lave en fusion au sol^[14]. D'ailleurs, la surface de Vénus semble jeune, affichant moins d'un milliard d'années fait d'un volcanisme actif relativement récent^[14].

Un épisode généralisé aurait eu lieu il y a 600 Ma. Émergeant d'un plateau accidenté situé dans l'ouest d'Eistla Regio, le volcan bouclier Gula Mons atteint une altitude de 3000 m. Dans la vaste région des hautes terres de Beta Regio, il est dominé par deux monts imposants. Le premier, Rhea, est situé à 800 km du deuxième, nommé Theia Mons. *Rhea* est un massif soulevé, entaillé par une vallée axiale, Devana Chasma, longue de 4600 km, alors que *Theia* est un volcan. Les reliefs auraient à 80 % une origine volcanique et certaines montagnes seraient des coulées de lave.



Quatre « galettes » orientales de Seoritsu Farra, à l'est d'Alpha Regio.

Les sondes soviétiques Venera 15 et Venera 16 ont répertorié plusieurs cratères à la surface de cette planète^[15].

Manteau et noyau

Vénus possèderait un manteau rocheux représentant environ 52.5 % du rayon de la planète^[16], composé essentiellement de silicates et d'oxydes de métaux.

Le noyau de Vénus serait constitué de deux parties : un noyau externe constitué de fer et de nickel liquides qui représenterait environ 30 % du rayon de la planète ; un noyau interne composé de fer et de nickel solides qui représenterait environ 17 % du rayon de Vénus^[16]. Mais cette précision est spéculative en 2009, car contrairement à la Terre, il n'y a pas eu de mesures sismiques. Il n'est pas impossible que le noyau de Vénus soit entièrement liquide. Certains indices pourraient aller dans ce sens, comme l'absence de champ magnétique.

Champ magnétique

Vénus possède un champ magnétique très faible^{[12] .[17]}, et traîne dans son sillage une queue de plasma longue de 45 millions de kilomètres, observée pour la première fois par la sonde SOHO en 1997.

L'existence d'un noyau externe de fer liquide (conducteur) tournant sur lui-même crée normalement un champ magnétique par effet dynamo, comme c'est le cas pour la Terre et Mercure. Cependant, Vénus ne possède pas de champ magnétique intrinsèque^{[12] .[17]}. En effet, le champ magnétique de Vénus est très faible, et ne résulte que de l'interaction directe de l'ionosphère avec le vent solaire^[18].

L'absence de dynamo s'expliquerait par un manque de convection dans le noyau de Vénus^[19]. Cette absence serait due d'une part à la rotation très lente de la planète, mais aussi au faible gradient thermique d'un manteau moins refroidi que celui de la Terre^{[20] .[12]}, ce qui empêcherait la solidification du noyau vénusien, limitant grandement la séparation des divers constituants et impuretés, et de là les mouvements internes du fluide métallique du noyau, qui génèrent le champ magnétique.

Rotation

L'un des faits les plus remarquables des paramètres orbitaux de Vénus est sa rotation rétrograde : elle tourne sur elle-même, de façon très lente, dans le sens indirect, alors que les planètes du système solaire ont le plus souvent un sens direct^[21]. Vénus fait donc exception à la règle (on peut citer également le cas d'Uranus). Sa période de rotation n'est connue que depuis 1962, date à laquelle des observations radar menées par le *Jet Propulsion Laboratory* ont permis d'observer la surface de la planète au travers de l'épaisse atmosphère^[22].

Cette rotation très lente, et qui plus est rétrograde, produit des jours solaires bien plus courts que son jour sidéral, alors qu'ils sont plus longs pour les planètes avec une rotation dans le sens direct. Rappelons que le jour solaire est l'intervalle (moyen) entre deux passages consécutifs du Soleil au méridien. Par exemple, la Terre a un jour solaire (moyen) de 24 h et un jour sidéral de 23 h 56 min 4,09 s. Sur Vénus, le jour solaire est de 116.75 jours terrestres (116 j 18 h)^[23], alors que le jour sidéral est de 243.018 jours terrestres.

On a donc un peu moins de 2 jours solaires complets pendant la durée d'une année vénusienne. Les journées et les nuits vénusiennes s'étendent tout de même sur près de 2 mois terrestres : 58 j 9 h.

Par ailleurs, une année vénusienne est légèrement plus courte qu'un jour sidéral vénusien, dans un rapport de 0.924^[24].

Origine de la rotation rétrograde

Les causes de la rotation rétrograde de Vénus sont encore mal comprises. L'explication qui a été le plus souvent avancée est une collision gigantesque avec un autre corps de grande taille, pendant la phase de formation des planètes du système solaire^[22],^[25],^[26].

Une autre explication met en jeu l'atmosphère vénusienne qui, du fait de sa forte densité, a pu influencer la rotation de la planète. Des travaux de Jacques Laskar et Alexandre C. M. Correia prenant en compte les effets de marée thermique atmosphérique montrent le comportement chaotique de l'obliquité et de la période de rotation de Vénus^[22],^[27]. Vénus aurait donc pu évoluer naturellement vers une rotation rétrograde, qui est un état d'équilibre des différents effets de marée, sans avoir à faire intervenir de collision avec un corps massif. Il n'est cependant pas possible de savoir si l'obliquité de Vénus est passée brusquement de 0° à 180° au cours de son histoire ou si sa vitesse de rotation s'est ralentie jusqu'à une vitesse nulle pour ensuite devenir négative. Les deux scénarios sont possibles et aboutissent au même état d'équilibre actuel^[28].

L'hypothétique synchronisation Terre-Vénus

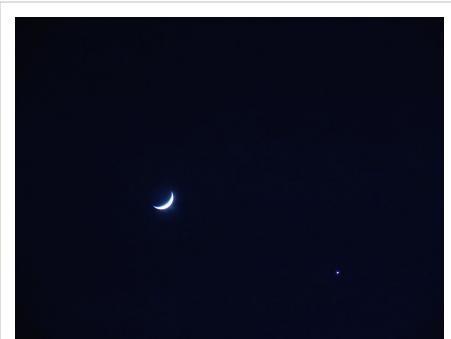
Les jours solaires vénusiens sont tels que Vénus présente la même face aux observateurs terrestres lors de chaque conjonction inférieure : Vénus dans l'axe Terre-Soleil ; la Terre en opposition vénusienne. En effet, la période entre 2 conjonctions inférieures se déroule sur 5 jours solaires vénusiens (une « semaine vénusienne » en quelque sorte). Cette révolution synodique de Vénus (vue de la Terre) fait 584 jours^[7] (583.92108 j exactement), ce qui est effectivement très proche de 5 jours solaires : $5 \times 116.7505 \text{ j}$.

Il a été discuté de cette synchronisation Terre-Vénus (les deux principales planètes telluriques). Mais il semblerait bien que l'influence des marées terrestres sur Vénus soit trop ténue pour l'imposer, d'autant qu'elle n'est pas exacte : $583,92108/116,7505 \approx 5,0014$; et pas exactement 5. Tandis que le verrouillage gravitationnel de la Lune sur la Terre (1:1) ou de celui de la rotation de Mercure sur sa révolution (3:2) sont exacts et stabilisés.[réf. nécessaire]

Observation

Vénus est la deuxième planète du système solaire en partant du Soleil et le troisième objet naturel le plus brillant du ciel avec une magnitude apparente variant entre -4,6 et -4,7^[7]. Il est possible, à certaines périodes de l'année, d'apercevoir la planète en plein jour^[29]. Comme Vénus est sur une orbite plus proche du Soleil que celle de la Terre, elle ne semble jamais loin du Soleil vue de cette dernière. Son elongation atteint un maximum de 47,8°. Elle n'a pas de satellite naturel connu^[7].

On peut observer, comme avec la Lune, des phases de la planète selon leur moment d'apparition dans l'année^[29]. Leur observation a été faite pour la première fois au début du XVII^e siècle par Galilée à l'aide de sa lunette astronomique. Elles ont été un argument utilisé par ce dernier pour se rallier à la théorie héliocentrique de Copernic^[30].

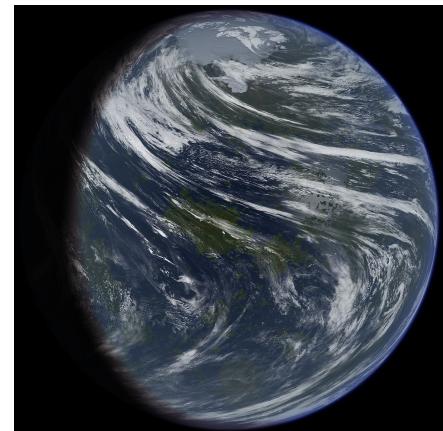


Observation nocturne de Vénus (à droite de la Lune).

Analogie avec la Terre

De par sa taille et sa masse, Vénus est très similaire à la Terre et a souvent été décrite comme la *sœur jumelle* de cette dernière^[31]. Les deux planètes sont très similaires par certains aspects, autant physiques qu'orbitaux :

- Elles sont nées à peu près en même temps dans le même nuage de gaz et de poussière il y a 4,6 milliards d'années ;
- Vénus et la Terre sont toutes deux des planètes du système solaire interne ;
- Leurs surfaces montrent un terrain diversifié : montagnes, plaines, plateaux élevés, gorges, volcans, arêtes et cratères d'impact ;
- Les deux ont peu de cratères, signe d'une surface relativement jeune et d'une atmosphère dense ;
- Leurs compositions chimiques sont très proches.



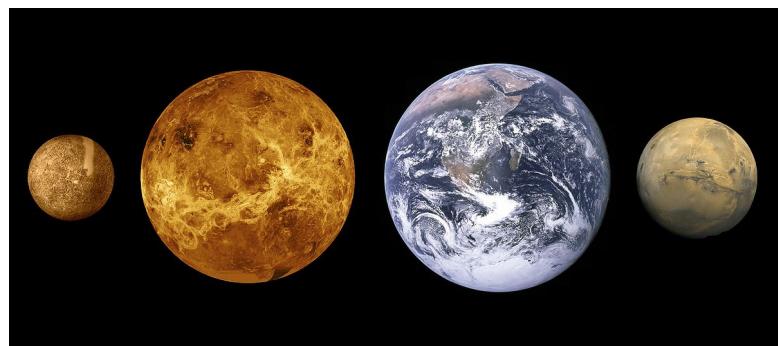
Une vue d'artiste de Vénus présentant son apparence si elle était similaire à la Terre.

Comparaison de propriétés physiques de Vénus et de la Terre

Propriétés physiques	Vénus ^[7]	Terre ^[7]	Rapport Vénus/Terre ^[7]
Masse	4.8685×10^{24} kg	5.9736×10^{24} kg	0,815
Rayon équatorial	6051 km	6378 km	0,948
Densité moyenne	5,25	5,51	0,952
Demi-grand axe	108208926 km	149597887 km	0,723
Vitesse orbitale moyenne	$35.02 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$	$29.79 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$	1,175
Pesanteur extérieure équatoriale	$8.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	$9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	0,906

Du fait de ces similitudes, des spécialistes ont longtemps pensé que, sous ses nuages denses, Vénus pourrait être très similaire à la Terre et peut-être même abriter la vie. Des études proposent même qu'il y a quelques milliards d'années, Vénus ait été beaucoup plus semblable à la Terre qu'elle ne l'est actuellement^[32]. En effet, il a été découvert qu'il y avait fort probablement des quantités importantes d'eau à sa surface. Cette eau se serait évaporée suite à un important effet de serre créant ainsi un niveau de gaz à effet de serre critique dans l'atmosphère^[33].

Planète	Rayon équatorial	Masse	Gravité	Inclinaison de l'axe
Mercure ^[34]	2439.7 km (0,383 Terre)	3.302×10^{23} kg (0,055 Terre)	3.701 m/s^2 (0,377 g)	~0,01 °
Vénus ^[7]	6051.8 km (0,95 Terre)	4.8685×10^{24} kg (0,815 Terre)	8.87 m/s^2 (0,904 g)	177,36 ° ^[35]
Terre ^[36]	6378.14 km	5.9736×10^{24} kg	9.780 m/s^2 (0,99732 g)	23,45 °
Mars ^[37]	3402,45 km (0,533 Terre)	6.4185×10^{23} kg (0,107 Terre)	3.69 m/s^2 (0,376 g)	25,19 °



Photomontage comparatif des tailles des planètes telluriques (de gauche à droite) :
Mercure, Vénus, la Terre et Mars.

Satellite et quasi-satellites de Vénus

En 1645, l'astronome italien Francesco Fontana déclara avoir découvert un satellite autour de Vénus. Cassini affirma l'avoir observé deux fois (en 1672 et en 1686). Lagrange, lui l'aperçut en 1761, et Johann Heinrich Lambert calcula son orbite en 1773. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, la communauté astronomique semblait persuadée de l'existence de ce satellite qui reçut un nom, Neith. On sait depuis qu'il n'existe pas.

Cependant, le quasi-satellite 2002 VE₆₈, découvert en 2002, (et qui n'a rien à voir avec Neith) exerce autour d'elle une révolution en orbite en fer à cheval. Il ne s'agit pas d'un satellite car il n'est pas gravitationnellement lié à Vénus, mais cependant sa révolution autour du Soleil l'amène à avoir une trajectoire qui fait dans le même temps un tour autour de Vénus, selon une trajectoire en U (d'où le nom de quasi-satellite)^[38].

Vénus possède un autre quasi-satellite : 2001 CK32^[39].

Les recherches afin de trouver un satellite naturel de Vénus sont toujours en cours^[40].

Transit

On appelle « transit de Vénus » le passage de la planète Vénus entre la Terre et le Soleil, où l'ombre de Vénus apparaît devant le disque solaire. En raison de l'inclinaison de l'orbite de Vénus par rapport à celle de la Terre, ce phénomène est extrêmement rare à l'échelle de temps humaine. Il se produit deux fois à 8 ans d'intervalle, ces doubles passages étant séparés les uns des autres de plus d'un siècle (105,5 ou 121,5 ans)^[41]. Historiquement, l'observation du transit de Vénus était la méthode la plus commode pour déterminer la valeur de la distance Terre-Soleil (l'unité astronomique). Le XVIII^e siècle notamment a ainsi vu de grandes expéditions de la part des astronomes européens pour mesurer les deux transits de 1761 et 1769, auxquels le nom de l'astronome français Guillaume Le Gentil est resté attaché en raison de la malchance qui l'empêcha d'effectuer les observations auxquelles il avait consacré des années de préparation.

Au cours du transit de Vénus, il apparaît un effet d'optique appelé « phénomène de la goutte noire ». Lors du deuxième contact et juste avant le troisième contact, une petite larme noire semble connecter le disque de la planète avec la frontière du limbe solaire, rendant impossible de dater précisément lesdits contacts.

Le dernier transit de Vénus a eu lieu le 8 juin 2004. Les prochains transits auront lieu le 6 juin 2012 et le 11 décembre 2117^[42].

Exploration

L'exploration de Vénus à l'aide de sondes spatiales a débuté au début des années 1960. Une vingtaine d'entre elles ont depuis visité la planète, que ce soit pour de simples survols, pour des séjours plus longs en orbite autour de Vénus, ou encore pour larguer des modules d'observation dans l'atmosphère et à la surface de Vénus.

L'année 1962 marque un pas important dans la connaissance de Vénus. La sonde américaine *Mariner 2* réalise cette année-là le premier survol de la planète et permet de découvrir sa température de surface, infernale, autour de 700 °K, ainsi que la température de la couche nuageuse. La sonde ne détecte pas de champ magnétique au voisinage de la planète et met en évidence la quasi absence d'eau dans l'atmosphère vénusienne^[43] .^[44]. Les informations envoyées par *Mariner 2* complètent admirablement les observations radar réalisées depuis le sol terrestre la même année, notamment à l'observatoire Goldstone en Californie, qui ont permis d'estimer la période de rotation de la planète, inconnue jusqu'alors^[45].

En 1967, les missions soviétique *Venera 4* et américaine *Mariner 5* continuent l'exploration de la planète, fournissant des données précises sur la composition atmosphérique et la pression élevée à la surface de Vénus. La sonde *Venera 4* parvient à lancer une capsule vers le sol vénusien, et celle-ci transmet des données sur la composition de l'atmosphère vénusienne jusqu'à une altitude de 24 km.

Dans les années 1970, plusieurs sondes du programme *Venera* parviennent à atteindre la surface et les capsules transmettent des données à la Terre depuis le sol de Vénus. En mars 1982, les premières photos couleur de la surface sont réalisées par *Venera 13* et *Venera 14* à quelques jours d'intervalle^[43].

Afin d'utiliser la gravité de Vénus dans un effet de fronde gravitationnelle, la sonde *Galileo* passe autour de cette dernière en février 1990, prenant des observations en proche infrarouge^[46].

En orbite pendant 4 ans autour de Vénus, entre 1990 et 1994, la sonde *Magellan* réalise une cartographie complète et très précise (avec une résolution horizontale inférieure à 100 m) de la surface de la planète. La sonde spatiale a utilisé pour cela un radar, seul instrument capable de percer l'épaisse atmosphère de Vénus. Un relevé altimétrique est également effectué. Cette cartographie détaillée révèle d'une part un sol remarquablement jeune géologiquement parlant (de l'ordre de 500 millions d'années), d'autre part l'absence de tectonique des plaques et enfin la présence de milliers de volcans^[43].

La sonde *Vénus Express* de l'Agence spatiale européenne est en cours d'observation de Vénus depuis avril 2006. Elle devrait terminer sa mission le 31 décembre 2014, à confirmer en 2012^[47]. D'autres missions visant à explorer Vénus sont prévues d'ici quelques années, notamment la sonde japonaise *Akatsuki* en 2010^[48] et la sonde européenne *Venus Entry Probe* qui doit être lancée en novembre 2013^[49]. La mission *BepiColombo* prévue pour 2014 et destinée principalement à Mercure réalisera un survol de Vénus^[50] .^[51].

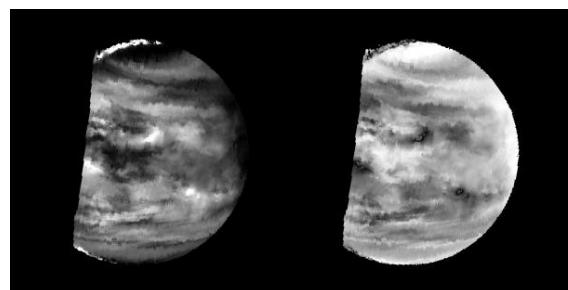


Image de Vénus prise dans le proche infrarouge par la sonde *Galileo* (1990).

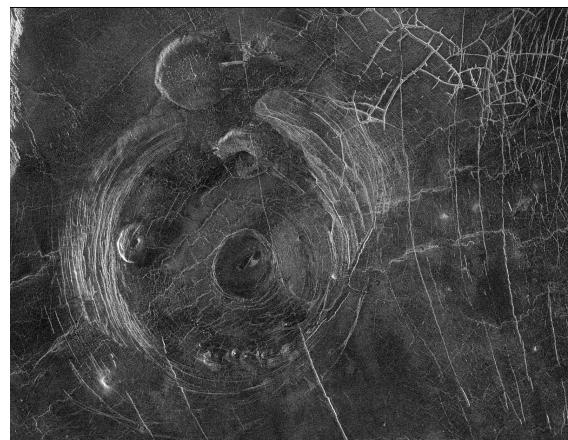


Image radar de Fotla Corona, une *corona* de 200 km de diamètre à la surface de Vénus. Sonde *Magellan* (1994).

Dans la culture

Symbolisme

La planète Vénus doit son nom à la déesse de l'amour et de la beauté dans la mythologie romaine, Vénus, qui a pour équivalent Aphrodite dans la mythologie grecque. Cythère étant une épiclese homérique d'Aphrodite, l'adjectif « cythérien » ou « cythérénien » est parfois utilisé en astronomie (notamment dans astéroïde cythérocroiseur) ou en science-fiction (les Cythériens, une race de Star Trek). Par extension, on parle d'un Vénus à propos d'une très belle femme ; de manière générale, il existe en français un lexique très développé mêlant Vénus au thème de l'amour ou du plaisir charnel^[52].

L'adjectif « vénusien » a remplacé « vénérien » qui a une connotation moderne péjorative, d'origine médicale.

Les cultures chinoise, coréenne, japonaise et vietnamienne désignent Vénus sous le nom d'« étoile d'or », et utilisent les mêmes caractères 金星 (jīnxīng en hanyu pinyin ; きんせい en hiragana, *kinsei* en romaji ; 금성 *geumseong* en hangeul), selon la « théorie » des cinq éléments.

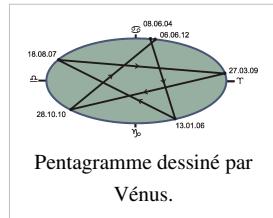
Vénus était connue des civilisations mésoaméricaines, elle occupait une place importante dans leur conception du cosmos et du temps. Les Nahua l'assimilaient à Tlahuizcalpanecuhtli, double de Quetzalcoatl. Les Maya connaissaient la durée de sa révolution synodique et l'avaient mis en relation avec leur calendrier solaire, avec une marge d'erreur très faible, de l'ordre de un jour en plus de 6000 ans. Dans le *Popol Vuh*, les jumeaux Xbalamque et Hun Ahpu deviennent le Soleil et Vénus après avoir vaincu les seigneurs de Xibalba.

On l'appelle souvent, improprement car il s'agit d'une planète, l'« étoile du berger » car elle peut être facilement visible dans le ciel du matin, avant le lever du Soleil ou dans le ciel du soir, après le coucher de notre étoile^[53]. Moins fréquemment, on parle de la « planète ardente » à cause de la température élevée qui règne à sa surface. Vénus est associée à vendredi parmi les jours de la semaine.



Le symbole de Vénus.

Son symbole astronomique est un cercle avec une croix pointant vers le bas (unicode 0x2640 : ♀), qui représente le miroir à main de la déesse Vénus. En biologie, il est utilisé comme signe pour le sexe féminin^[54].



Le pentagramme fut aussi utilisé comme symbole de Vénus et du féminin en général (et notamment du féminin sacré). L'adoption de ce symbole est directement lié à l'observation de la planète : les positions successives de Vénus dans le ciel à chaque période synodique dessinent approximativement un pentagramme autour du Soleil, sur un cycle total de 8 ans (c'est-à-dire cinq périodes synodiques de Vénus)^[55].

En fiction

La représentation de Vénus dans la fiction existe depuis le XIX^e siècle. Ses nuages impénétrables ont entraîné les auteurs de science-fiction à spéculer sur les conditions de vie à sa surface. Plus près du Soleil que la Terre, Vénus était souvent décrite comme plus chaude mais quand même habitable ; les écrivains imaginent alors des extraterrestres qu'ils nomment les Vénusiens. Le genre atteint son apogée entre les années 1930 et 1950^[56]. Même si cette planète a été explorée et que l'on sait à présent qu'aucune forme de vie n'y habite, elle continue à fasciner les auteurs, ainsi que les lecteurs.

Plusieurs auteurs se sont inspirés de cette planète, par exemple :

- Isaac Asimov : *Les Océans de Vénus*
- Ray Bradbury : *La Pluie (Death-by-Rain ou The Long Rain)* in *L'Homme illustré (The Illustrated Man)*, *Et l'été ne dura qu'un jour ou Tout l'été en un jour (All Summer in a Day)*
- Stephen King : *The Cursed Expedition*
- H. P. Lovecraft : *In the Walls of Eryx*
- A. E. van Vogt : dans *Le Monde des Â*, Vénus accueille une utopie réservée aux êtres humains jugés les plus aptes. Elle joue également un rôle prépondérant dans sa suite, *Les Joueurs du Â*.
- C. S. Lewis : *Perelandra*

Notes et références

Notes

- [1] **(en)** Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (http://www.imcce.fr/vt2004/en/fiches/fiche_n13_eng.html) « *Information sheet #13: Clouds and atmosphere of Venus.* »
- [2] **(en)** Francis Nimmo, « Why does Venus lack a magnetic field? », dans *Geology*, vol. 30, n° 11, novembre 2002, p. 987-990 (ISSN 0091-7613 (<http://worldcat.org/issn/0091-7613&lang=fr>) [texte intégral (<http://geology.gsapubs.org/content/30/11/987>) (le 11 août 2010)]
- DOI: 10.1130/0091-7613(2002) ([http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2002)))
- [3] **(en)** George L. Hashimoto, Maarten Roos-Serote, Seiji Sugita, Martha S. Gilmore, Lucas W. Kamp, Robert W. Carlson, Kevin H. Baines, « Felsic highland crust on Venus suggested by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer data », dans *Journal of Geophysical Research – Planets*, vol. 113, 31 décembre 2008, p. E00B24 [texte intégral (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008JE003134.shtml>) (le 9 août 2010)]
- DOI: 10.1029/2008JE003134 (<http://dx.doi.org/10.1029/2008JE003134>)
- [4] Hua C.T., Courtès G. & Nguyen-Huu-Doan, *Détection de la molécule SO₂ dans l'atmosphère de Vénus: The Messenger - ESO 1979*, Compte Rendu de l'Académie des Sciences, 288, Série B, 187.
- [5] **(en)** Stuart Robbins, « Venus (<http://filer.case.edu/sjr16/advanced/venus.html>) » sur <http://filer.case.edu/>, 14 septembre 2006. Consulté le 9 décembre 2009.
- [6] **(en)** Information sheet n° 13 : Clouds and atmosphere of Venus (http://www.imcce.fr/vt2004/en/fiches/fiche_n13_eng.html), Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides. Consulté le 15 décembre 2009.
- [7] **(en)** David R. Williams, « *Venus Fact Sheet* (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>) », NASA, National Space Science Data Center., avril 2005. Consulté le 18 avril 2008
- [8] ESO, « Vénus, la Terre et Mars: Une comparaison (<http://www.bdl.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages6/717.html>) », Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, 2004. Consulté le 21 décembre 2009.
- [9] **(en)** Alexander T. Basilevsky et James W. III Head, « Global stratigraphy of Venus: Analysis of a random sample of thirty-six test areas », dans *Earth, Moon, and Planets*, vol. 66, n° 3, 1995, p. 285–336 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1995EM&P...66..285B>)]
- [10] **(en)** W.M. Kaula, « The tectonics of Venus », dans *Royal Society of London Philosophical Transactions A- Mathematical, physical & engineering sciences*, vol. 349, 1994, p. 345–355
- [11] **(en)** S.R. Taylor, *Solar system evolution: A new perspective*, New York, Cambridge University Press, 1992, 307 p.
- [12] Nimmo 2002, p. 987
- [13] <http://venus.aeronomie.be/en/venus/internalstructure.htm>
- [14] « Une étoile, huit planètes et des poussières », dans *Science et Vie*, n° Hors Série n°246, mars 2009, p. 53
- [15] Ford 1989, p. 10
- [16] Vénus - Structure - Manteau et noyau (<http://www.astrosurf.com/pioneerastro/venus.htm>) sur *Astrosurf*, 23 juin 2006. Consulté le 29 novembre 2009
- [17] Russel 1980, p. 82
- [18] **(en)** Agence spatiale européenne, « Caught in the wind from the Sun (http://www.esa.int/esaMI/Venus_Express/SEM0G373R8F_0.html) » sur *ESA Venus Express*, 28 novembre 2007. Consulté le 29 novembre 2009
- [19] Russel 1980, p. 86
- [20] Le faible gradient thermique pourrait être causé, par exemple, par l'absence de plaques tectoniques sur cette planète. Limitant le refroidissement du manteau vénusien.
- [21] Sens de rotation vu par un observateur situé au-dessus du pôle Nord du Soleil
- [22] **(fr)** La rotation rétrograde de Vénus (<http://www.imcce.fr/Equipes/ASD/Venus/venus0.html>) sur la page de Jacques Laskar
- [23] Le jour solaire vénusien se calcule comme suit : à partir de la période de révolution de 224.7 j et de la période de rotation sidérale *rétrograde* de 243.018 j, on obtient $j_{sol} = \left(\frac{1}{224.7} + \frac{1}{243.018} \right)^{-1} = 116.75j$

- [24] Bill Arnett, « Vénus (<http://www.lasam.ca/billavf/nineplanets/venus.html>) » sur <http://www.lasam.ca>" , La Société d'astronomie de Montréal, 19 février 1997. Consulté le 19 décembre 2009.
- [25] (**en**) *Venus Mysteries Blamed on Colossal Collision* (<http://www.space.com/scienceastronomy/080228-venus-collision.html>) sur le site space.com.
- [26] (**en**) J. Huw Davies, « Did a mega-collision dry Venus' interior? », dans *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 268, 30 avril 2008, p. 376-383 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.01.031>)]
- [27] (**en**) Alexandre C. M. Correia et Jacques Laskar, « The four final rotation states of Venus », dans *Nature*, vol. 411, 14 juin 2001, p. 767-770 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1038/35081000>)]
- [28] « Dans le premier scénario, Vénus s'incline de plus en plus jusqu'à se retrouver « la tête en bas » tout en ralentissant ; et dans l'autre, l'obliquité est amenée à zéro et la vitesse de rotation diminue jusqu'à s'annuler puis passe en valeur négative *In the first scenario, the axis is tilted towards 180 degrees while its rotation rate slows down, while in the second one, the axis is driven towards 0 degree obliquity and the rotation rate decreases, stops, and increases again in the reverse direction* » (Laskar 2003, p. 8)
- [29] (**en**) James W. Head III, « World Book at NASA - Venus (http://www.nasa.gov/worldbook/venus_worldbook.html) » sur <http://www.nasa.gov>, NASA, 2004. Consulté le 9 décembre 2009.
- [30] Sébastien Charnoz, « Galilée (1564-1642) ([http://www.aim.ufr-physique.univ-paris7.fr](http://www.aim.ufr-physique.univ-paris7.fr/CHARNOZ/homepage/GRAVITATION/grav4.html)), Université Paris 7. Consulté le 19 décembre 2009.
- [31] Lopes et Gregg 2004, p. 61
- [32] (**en**) Henry Bortman, « Was Venus Alive? 'The Signs are Probably There' (http://www.space.com/scienceastronomy/venus_life_040826.html) » sur <http://www.space.com>, 26 août 2004. Consulté le 9 décembre 2009.
- [33] (**en**) James F. Kasting, « Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus », dans *Icarus*, vol. 74, n° 3, juin 1988, p. 472-494 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-4731BRD-67&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=07e30ca56634c16be47c4a5d80c2bab3) (le 9 décembre 2009.)]
- [34] (**en**) David R. Williams, « *Mercury Fact Sheet* (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>) », NASA, National Space Science Data Center., novembre 2007. Consulté le 18 avril 2008
- [35] La rotation de Vénus étant rétrograde, l'inclinaison de son axe est supérieure à 90°. On pourrait dire que son axe est incliné de « -2,64° ».
- [36] (**en**) David R. Williams, « *Earth Fact Sheet* (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>) », NASA, National Space Science Data Center., avril 2007. Consulté le 18 avril 2008
- [37] (**en**) David R. Williams, « *Mars Fact Sheet* (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>) », NASA, National Space Science Data Center., novembre 2007. Consulté le 18 avril 2008
- [38] (**en**) Discovery of the first quasi-satellite of Venus (<http://www.astro.utu.fi/tuorla/new/venusqs.shtml>), Tuorla Observatory, Université de Turku (Finlande), 17 août 2004. Consulté le 9 décembre 2009.
- [39] (**en**) H. Scholl, F. Marzari et P. Tricarico, « The instability of Venus trojans », dans *The Astronomical Journal*, vol. 130, n° 6, décembre 2005, p. 2912-2915 [texte intégral (<http://www.iop.org/EJ/article/1538-3881/130/6/2912/204904.text.html>) (le 9 décembre 2009.)]
- [40] (**en**) Scott S. Sheppard et Chadwick A. Trujillo, « A Survey for Satellites of Venus », dans *Icarus*, vol. 202, juillet 2009, p. 12-16 [texte intégral (http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0906/0906.2781v1.pdf) (le 9 décembre 2009.)]
- [41] (**en**) Fred Espenak, « Transits of Venus - Six Millennium Catalog: 2000 BCE to 4000 CE (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/transit/catalog/VenusCatalog.html>) » sur <http://eclipse.gsfc.nasa.gov>, NASA, 11 février 2004. Consulté le 9 décembre 2009.
- [42] (**en**) Jim Watson, « Image of the Day: The Rare Venus Transit (http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_184.html) » sur NASA, 23 mars 2008. Consulté le 29 novembre 2009.
- [43] Philippe Henarejos et Pierre Thomas, « Vénus, les secrets de la fournaise », *Ciel et Espace*, n° 300, mars 1995, p.33-41.
- [44] (**en**) James S. Martin et R. C. Wyckoff, « Mariner 2 (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1962-041A>) » sur <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>, NASA, 23 novembre 2009. Consulté le 9 décembre 2009.
- [45] (**en**) L.D. Kaplan, « *Venus, Recent Physical Data* » (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19650012602_1965012602.pdf) [PDF], juin 1964. p. 2-3.
- [46] Fin du voyage pour la sonde Galileo (<http://www.actu-environnement.com/ae/news/297.php4>) sur <http://www.actu-environnement.com>, Actu-environnement, 17 septembre 2003. Consulté le 21 décembre 2009.
- [47] (**fr**) Les Missions Scientifiques du Centre National d'Études Spatiales (<http://smsc.cnes.fr/VEX/Fr/index.htm>) « *Venus Express : première mission de l'Europe vers Vénus.* »
- [48] (**en**) Nobuaki Ishii, « Planet-C (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=PLANET-C>) » sur <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>, NASA, 2009. Consulté le 9 décembre 2009.
- [49] (**en**) *Venus Entry Probe* (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35987>), ESA
- [50] La mission BEPICOLOMBO (<http://smsc.cnes.fr/BEPICOLOMBO/Fr/>) sur le site du CNES.
- [51] (**en**) Marcello Coradini, « BepiColombo (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=BEPICLMBO>) », NASA, 2009. Consulté le 9 décembre 2009.
- [52] Définitions lexicographiques (<http://www.cnrtl.fr/lexicographie/Vénus>) et étymologiques (<http://www.cnrtl.fr/etymologie/Vénus>) de « Vénus » du CNRTL. Consulté le 13 décembre 2009.

- [53] Définitions lexicographiques (<http://www.cnrtl.fr/lexicographie/Berger>) et étymologiques (<http://www.cnrtl.fr/etymologie/Berger>) de « Berger » du CNRTL. cf. ASTRON. *L'étoile du berger/du Berger*. Consulté le 23 décembre 2009.
- [54] (en) William T. Stearn, *The Origin of the Male and Female Symbols of Biology* (<http://www.jstor.org/pss/1217734>), IAPT, 1962
- [55] (en) Liungman, Carl G. "Symbol 29:14" (<http://www.symbols.com/encyclopedia/29/2914.html>) in *Symbols -- Encyclopedia of Western Signs and Ideograms*
- [56] Miller 2002, p. 12

Références

Terre

Terre \oplus



La Terre vue depuis Apollo 17 en 1972^[1].

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	149597887.5 km (1.0000001124 UA)
Aphélie	152097701 km (1.0167103335 UA)
Périhélie	147098074 km (0.9832898912 UA)
Circonférence orbitale	924375700 km (6.1790699007 UA)
Excentricité	0.01671022
Période de révolution	365.25696 d
Période synodique	— d
Vitesse orbitale moyenne	29.783 km/s
Vitesse orbitale maximale	30.287 km/s
Vitesse orbitale minimale	29.291 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	(par définition) 0°
Nœud ascendant	174.873°
Argument du périhélie	288.064°
Satellites connus	1, la Lune
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	6378.137 km
Rayon polaire	6356.752 km

Rayon moyen volumétrique	6371.0 km
Aplatissement	0.0033529
Périmètre équatorial	40075.017 ; périmètre méridional "polaire" = 40007.864 km
Superficie	510067420 km ²
Volume	1.08321×10 ¹² km ³
Masse	5.9736×10 ²⁴ kg
Masse volumique globale	5.515×10 ⁻³ kg/m ³
Gravité de surface	9.780 m/s ² (0.99732 g)
Vitesse de libération	11.186 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	0.99726949 d (23 h 56 min 4,084 s)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	1674.364 km/h
Inclinaison de l'axe	23.4388°
Albédo géométrique visuel	0.367
Albédo de Bond	0.306
Irradiance solaire	1367.6 W/m ² (1 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	254.3 K (-18.7 °C)
Température de surface :	
Maximum :	57.8 °C ^[2]
Moyenne :	15 °C
Minimum :	-89.2 °C ^[3]

Caractéristiques de l'atmosphère

Pression atmosphérique	101325 Pa
Masse volumique au sol	1.217 kg/m ³
Masse totale	5.1×10 ¹⁸ kg
Hauteur d'échelle	8.5 km
Masse molaire moyenne	28.97 g/mol
Azote N₂	78,084 % volume sec
Oxygène O₂	20,946 % volume sec
Argon Ar	0,9340 % volume sec
Dioxyde de carbone CO₂	390 ppm volume sec
Néon Ne	18,18 ppm volume sec
Hélium He	5,24 ppm volume sec

Méthane CH₄	1,79 ppm volume sec
Krypton Kr	1,14 ppm volume sec
Hydrogène H₂	550 ppb volume sec
Protoxyde d'azote N₂O	300 ppb volume sec
Monoxyde de carbone CO	100 ppb volume sec
Xénon Xe	90 ppb volume sec
Ozone O₃	0 à 70 ppb volume sec
Dioxyde d'azote NO₂	20 ppb volume sec
Iode I	10 ppb volume sec
Vapeur d'eau H₂O	~ 0,4 % volume global ~ de 1 à 4 % en surface (valeurs typiques)
Histoire	
Découverte par	<ul style="list-style-type: none"> • Nature planétaire pressentie par l'école pythagoricienne (Philolaos de Crotone). • Attestée à l'époque hellénistique (Aristarque de Samos, puis Ératosthène).
Découverte le	<ul style="list-style-type: none"> • V^e siècle av. J.-C. • III^e siècle av. J.-C.

La **Terre** est la troisième planète du système solaire par ordre de distance croissante au Soleil, et la quatrième par taille et par masse croissantes. Il s'agit de la plus grande et la plus massive des quatre planètes telluriques, les trois autres étant Mercure, Vénus et Mars. La terre se trouve dans la zone habitable du système solaire. Elle est couramment appelée en français *Terre, planète Terre, planète bleue* ou encore *Monde*^[4].

La Terre s'est formée il y a 4,54 milliards d'années environ et la vie apparut moins d'un milliard d'années plus tard^[5]. La planète abrite des millions d'espèces dont les humains^[6]. La biosphère de la Terre a fortement modifié l'atmosphère et les autres caractéristiques abiotique de la planète, permettant la prolifération d'organismes aérobies de même que la formation d'une couche d'ozone, qui associée au champ magnétique terrestre, bloque une partie des rayonnements solaires permettant ainsi la vie sur Terre^[7]. Les propriétés physiques de la Terre de même que son histoire géologique et son orbite ont permis à la vie de subsister durant cette période et la Terre devrait pouvoir supporter la vie durant encore au moins 500 millions d'années^{[8] [9]}.

La croûte terrestre est divisée en plusieurs segments rigides appelés plaques tectoniques qui se déplacent sur des millions d'années. Environ 71 % de la surface terrestre est couverte par des océans d'eau salée qui forment l'hydrosphère avec les autres sources d'eau comme les lacs ou les nappes phréatiques. Les pôles géographiques de la Terre sont principalement recouverts de glace (inlandsis de l'Antarctique) ou de banquises. L'intérieur de la planète reste actif avec un épais manteau composé de roches plus ou moins fondues, un noyau externe liquide qui génère un champ magnétique et un noyau interne de fer solide.

La Terre interagit avec les autres objets spatiaux, principalement le Soleil et la Lune. Actuellement, la Terre orbite autour du Soleil en 365,26 jours solaires ou une année sidérale^[10]. L'axe de rotation de la Terre est incliné de 23,4° par rapport à la perpendiculaire du plan de l'Écliptique, ce qui produit des variations saisonnières sur la surface de la planète avec une période d'une année tropique (365,24 jours solaires)^[11]. Le seul satellite naturel connu de la Terre est la Lune qui commença à orbiter il y a 4,5 milliards d'années. Celle-ci provoque des marées, stabilise l'inclinaison axiale et ralentit lentement la rotation terrestre. Il y a environ 3,8 milliards d'années, lors du grand bombardement tardif, de nombreux impacts d'astéroïdes causèrent d'importantes modifications de sa surface.

La Terre a pour particularité d'être le seul endroit de l'univers connu pour abriter la vie, et accessoirement l'espèce humaine, qui utilise les ressources minérales de la planète et les produits de la biosphère pour soutenir sa population.

Les cultures humaines ont développé de nombreuses représentations de la planète, dont une personnification en tant que déité, la croyance en une terre plate, la Terre en tant que centre de l'univers et la perspective moderne d'un monde en tant que système global nécessitant une gestion raisonnable.

La science qui étudie la Terre est la géologie. Compte tenu de l'influence de la vie sur la composition de l'atmosphère, des océans et des roches sédimentaires, la géologie emprunte à la biologie une partie de sa chronologie et de son vocabulaire.

Chronologie

Globalement l'histoire de la Terre est divisée en quatre éons:

l'hadéen

a débuté il y a 4,567 milliards d'années^[12], lorsque la Terre s'est formée avec les autres planètes à partir d'une nébuleuse solaire, une masse de poussières et de gaz en forme de disque détachée du Soleil en formation. C'est au début de cette éon que ce sont formés la croûte terrestre, les océans, l'atmosphère et la Lune.

l'archéen

est l'éon qui marque l'apparition de la vie. On estime qu'il a débuté il y a 3,800 milliards d'années.

le protérozoïque

est l'éon lié à l'apparition des premières plantes à photosynthèse. Son début remonte à 2,500 milliards d'années. La photosynthèse a eu un impact considérable sur la géologie, car elle a provoqué une crise appelée grande oxydation pendant laquelle les océans se sont chargés en oxygène après avoir été vidés de leur fer, et avant que l'oxygène ne soit émis aussi en grande quantité dans l'atmosphère.

le phanérozoïque

est marqué par l'apparition des premiers animaux à coquilles, et plus globalement par le début du règne animal. Il a débuté il y a 542 millions d'années environ, et s'étend jusqu'à nos jours.

Époque prébiotique

La formation de la Terre par accrétion était presque terminée en moins de 20 millions d'années^[13]. Initialement en fusion, la couche externe de la Terre s'est refroidie pour former une croûte solide lorsque l'eau commença à s'accumuler dans l'atmosphère, aboutissant aux premières pluies et aux premiers océans. La Lune s'est formée peu de temps après il y a 4.53 milliards d'années^[14]. Le consensus actuel^[15] pour la formation de la Lune est l'hypothèse de l'impact géant, lorsqu'un objet de la taille de Mars (quelquefois appelé Théia) avec environ 10 % de la masse terrestre^[16] impacta la Terre^[17]. Dans ce modèle, une partie de cet objet se serait agglomérée avec la Terre, tandis qu'une autre portion, mêlée avec peut-être 10 % de la masse totale de la Terre, aurait été éjectée dans l'espace, où elle aurait formé la Lune.

L'activité volcanique a produit une atmosphère primitive. De la vapeur d'eau condensée ayant plusieurs origines possibles, mêlée à de la glace apportée par des comètes, a produit les océans^[18]. Une combinaison de gaz à effet de serre et d'importants niveaux d'activité solaire permirent d'augmenter la température à la surface de la Terre et empêchèrent les océans de geler^[19]. Vers 3.5 milliards d'années, le champ magnétique se forma et il permit d'éviter à l'atmosphère d'être balayée par le vent solaire^[20].

Deux principaux modèles ont été proposés pour expliquer la vitesse de croissance continentale^[21] : une croissance constante jusqu'à nos jours^[22] et une croissance rapide au début de l'histoire de la Terre^[23]. Les recherches actuelles montrent que la deuxième hypothèse est la plus probable avec une formation rapide de la croûte continentale^[24] suivie par de faibles variations de la surface globale des continents^{[25] [26] [27]}. Sur des échelles de temps de plusieurs centaines de millions d'années, les continents ou supercontinents se forment puis se divisent. C'est ainsi qu'il y a environ 750 millions d'années, le plus vieux des supercontinents connus, Rodinia, commença à se disloquer.

Les continents entre lesquels il s'était divisé se recombinèrent plus tard pour former Pannotia, il y a 650-540 millions d'années, puis finalement Pangée, au Permien, qui se fragmenta il y a 180 millions d'années^[28].

Évolution de la vie

On suppose qu'une activité chimique intense dans un milieu hautement énergétique a produit une molécule capable de se reproduire, dans un système particulier, il y a environ 4 milliards d'années. La vie elle-même serait apparue entre 200 et 500 millions d'années plus tard^[29]. [évasif]

Le développement de la photosynthèse, active depuis bien avant 3 (à 3,5) milliards d'années avant le présent, permit à la vie d'exploiter directement l'énergie du Soleil. Celle-ci produisit de l'oxygène qui s'accumula dans l'atmosphère, à partir de ~2,5 milliards d'années avant le présent, et forma la couche d'ozone (une forme d'oxygène O_3) dans la haute atmosphère, lorsque les niveaux d'oxygène dépassèrent quelques %. Le regroupement de petites cellules entraîna le développement de cellules complexes appelées eucaryotes^[30]. Les premiers organismes multicellulaires formés de cellules au sein de colonies devinrent de plus en plus spécialisés. Aidée par l'absorption des dangereux rayons ultraviolets par la couche d'ozone, des colonies bactériennes pourraient avoir colonisé la surface de la Terre, dès ces époques lointaines^[31]. Les plantes et les animaux pluricellulaires colonisèrent la terre ferme qu'à partir de la fin du Cambrien (pour les premiers végétaux, mousses, lichens et champignons) et pendant l'Ordovicien (pour les premiers végétaux vasculaires et les arthropodes), le Silurien (pour les gastéropodes ?) et le Dévonien (pour les vertébrés).

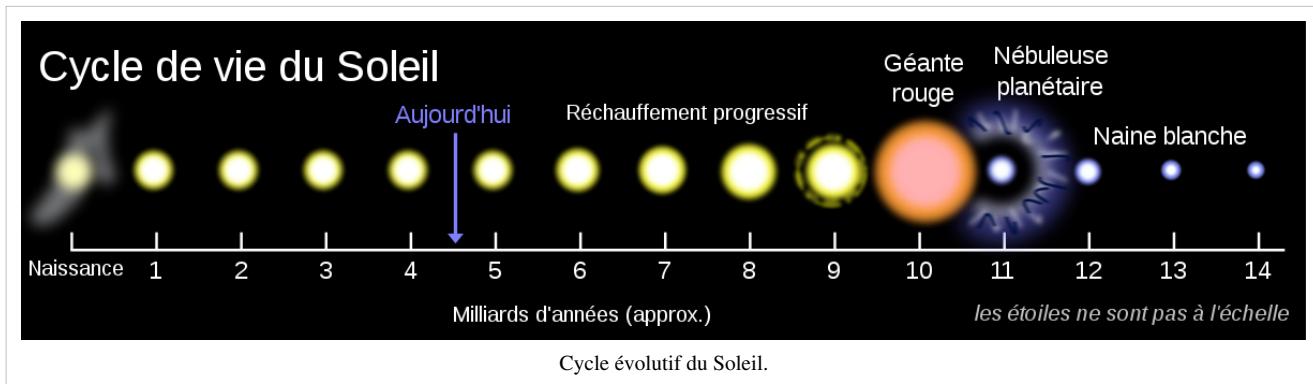
Depuis les années 1960, il a été proposé une hypothèse selon laquelle une ou une série de glaciations globales eut lieu il y a 750 à 580 millions d'années, pendant le Néoprotérozoïque, et qui couvrit la planète d'une couche de glace. Cette hypothèse a été nommée *Snowball Earth* (« Terre boule de neige »), et est d'un intérêt particulier parce qu'elle précède l'explosion cambrienne, quand des formes de vies multicellulaires commencèrent à proliférer^[32].

À la suite de l'explosion cambrienne, il y a environ 535 millions d'années, cinq extinctions massives eurent lieu^[33]. La dernière extinction majeure date de 65 millions d'années, quand une météorite est entrée en collision avec la Terre, exterminant les dinosaures et d'autres grands reptiles, épargnant de plus petits animaux comme les mammifères, oiseaux, lézards, etc.

Dans les 65 millions d'années qui se sont écoulées depuis, les mammifères se sont diversifiés, l'espèce humaine s'étant développée depuis deux millions d'années. Des changements périodiques à long terme de l'orbite de la Terre, causés par l'influence gravitationnelle des autres astres, sont probablement une des causes des glaciations qui ont plus que doublé les zones polaires de la planète, périodiquement dans les derniers millions d'années.

À l'issue de la dernière glaciation, le développement de l'agriculture et, ensuite, des civilisations, permit aux humains de modifier la surface de la Terre dans une courte période de temps, comme aucune autre espèce avant lui sur Terre, affectant la nature tout comme les autres formes de vie^[34].

Futur



Le futur de la Terre est très lié à celui du Soleil. Du fait de l'accumulation d'hélium dans le cœur du Soleil, la luminosité de l'étoile augmente lentement à l'échelle des temps géologiques. La luminosité va croître de 10 % au cours des 1,1 milliards d'années à venir et de 40 % sur les prochains 3,5 milliards d'années^[35]. Les modèles climatiques indiquent que l'accroissement des radiations atteignant la Terre aura probablement des conséquences dramatiques sur la pérennité de son climat « terrestre », dont la disparition des océans^[36].

La Terre devrait cependant rester habitable durant encore plus de 500 millions d'années^[8], bien que cette durée puisse passer à 2,3 milliard d'années si l'azote est retiré de l'atmosphère^[37]. L'augmentation de la température terrestre va accélérer le cycle du carbone inorganique, réduisant sa concentration à des niveaux qui pourraient devenir trop faibles pour les plantes (10 ppm pour la photosynthèse du C4) dans environ 500^[8] ou 900 millions d'années. La réduction de la végétation entraînera la diminution de la quantité d'oxygène dans l'atmosphère, ce qui provoquera la disparition progressive de la plupart des formes de vies animales^[38]. Ensuite, la température moyenne (de la Terre) augmentera plus vite dû à un emballement de l'effet de serre par la vapeur d'eau, vers ~40 à 50 °C^[38]. Puis les océans s'évaporeront « rapidement »^[9] précipitant le climat de la Terre dans celui de type vénusien.

Même si le Soleil était éternel et stable, le refroidissement interne de la Terre entraînerait la baisse du niveau de CO₂ du fait d'une réduction du volcanisme^[39], et 35 % de l'eau des océans descendrait dans le manteau du fait de la baisse des échanges au niveau des dorsales océaniques^[40].

La « fin »

Dans le cadre de son évolution, le Soleil deviendra une géante rouge dans plus de 5 milliards d'années. Les modèles prédisent qu'il gonflera jusqu'à atteindre environ 250 fois son rayon actuel^{[35] [41]}.

Le destin de la Terre est moins clair. En tant que géante rouge, le Soleil va perdre environ 30 % de sa masse, donc sans effets de marée, la Terre se déplacera sur une orbite à 1.7 ? (254316600 km) du Soleil lorsque celui-ci atteindra sa taille maximale. La planète ne devrait donc pas être engloutie par les couches externes du Soleil même si l'atmosphère restante finira par être « soufflée » dans l'espace, et la croûte terrestre finira par fondre pour se transformer en un océan de lave, lorsque la luminosité solaire atteindra environ 5000 fois son niveau actuel^[35]. Une simulation de 2008 indique que la l'orbite terrestre va se modifier du fait des effets de marées et poussera la Terre à entrer dans l'atmosphère du Soleil où elle y sera absorbée et vaporisée^[41].

Composition et structure

La Terre est une planète tellurique, c'est-à-dire une planète essentiellement rocheuse à noyau métallique, contrairement aux géantes gazeuses, telles que Jupiter, essentiellement constituées de gaz légers (hydrogène et hélium). Il s'agit de la plus grande des quatre planètes telluriques du système solaire, que ce soit en termes de taille ou de masse. De ces quatre planètes, la Terre a aussi la masse volumique globale la plus élevée, la plus forte gravité de surface, le plus puissant champ magnétique global, la vitesse de rotation la plus élevée^[42] et est probablement la seule avec une tectonique des plaques active^[43].

La surface externe de la Terre est divisée en plusieurs segments rigides, ou plaques tectoniques, qui se déplacent lentement sur la surface sur des durées de plusieurs millions d'années. Environ 71 % de la surface est couverte d'océans d'eau salée, les 29 % restants étant des continents et des îles. L'eau liquide, nécessaire à la vie telle que nous la connaissons, est très abondante sur Terre, et aucune autre planète n'a encore été découverte avec des étendues d'eau liquide (lacs, mers, océans) à sa surface.

Forme

La forme de la Terre approxime un ellipsoïde, une sphère aplatie aux pôles^[44]. La rotation de la Terre entraîne l'apparition d'un léger bourellet de sorte que le diamètre à l'équateur est 43 km plus long que le diamètre polaire (du pôle Nord au pôle Sud)^[45]. Le diamètre moyen du sphéroïde de référence (appelé géoïde) est d'environ 12742 km, ce qui est approximativement $40000 \text{ km}/\pi$, car le mètre était initialement défini comme $1/10000000$ e de la distance de l'équateur au pôle nord en passant par Paris^[46].



Comparaison des tailles des planètes telluriques avec de gauche à droite : Mercure, Venus, la Terre et Mars

La topographie locale dévie de ce sphéroïde idéalisé même si à grande échelle, ces variations sont faibles : La Terre a une tolérance d'environ 0,17 % par rapport au sphéroïde parfait, ce qui est moins que la tolérance de 0,22 % imposée aux boules de billard^[47]. Les plus grandes variations dans la surface rocheuse de la Terre sont l'Everest (8848 m au dessus du niveau de la mer) et la fosse des Mariannes (10911 m sous le niveau de la mer). Du fait du bourellet équatorial, les lieux les plus éloignés du centre de la Terre sont les sommets du Chimborazo en Équateur et du Huascarán au Pérou^{[48] [49] [50]}.

Composition chimique

Composition chimique de la croûte^[51]

Composé	Formule	Composition	
		Continentale	Océanique
Silice	SiO_2	60,2 %	48,6 %
Oxyde d'aluminium	Al_2O_3	15,2 %	16,5 %
Oxyde de calcium	CaO	5,5 %	12,3 %
Oxyde de magnésium	MgO	3,1 %	6,8 %
Oxyde de fer(II)	FeO	3,8 %	6,2 %
Oxyde de sodium	Na_2O	3,0 %	2,6 %
Oxyde de potassium	K_2O	2,8 %	0,4 %
Oxyde de fer(III)	Fe_2O_3	2,5 %	2,3 %
Eau	H_2O	1,4 %	1,1 %
Dioxyde de carbone	CO_2	1,2 %	1,4 %
Dioxyde de titane	TiO_2	0,7 %	1,4 %
Pentoxyde de phosphore	P_2O_5	0,2 %	0,3 %
Total		99,6 %	99,9 %

La masse de la Terre est d'approximativement $5,98 \times 10^{24}$ kg. Elle est principalement composée de fer (32.1 %^[52]), d'oxygène (30.1 %), de silicium (15.1 %), de magnésium (13.9 %), de soufre (2.9 %), de nickel (1.8 %), de calcium (1.5 %) et d'aluminium (1.4 %), le 1.2 % restant consistant en de légères traces d'autres éléments. Les éléments les plus denses ayant tendance à se concentrer au centre de la Terre (phénomène de différenciation planétaire), on pense que le cœur de la Terre est composé majoritairement de fer (88.8 %), avec une plus petite quantité de nickel (5.8 %), de soufre (4.5 %) et moins de 1 % d'autres éléments^[53].

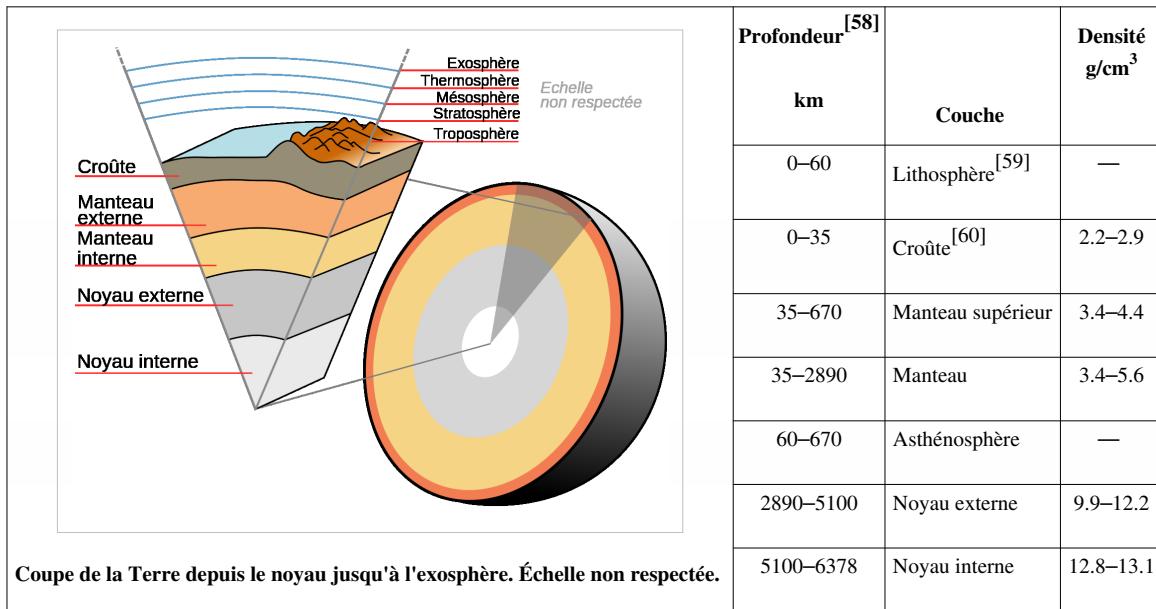
Le géochimiste F. W. Clarke a calculé que 47 % (en poids) de la croûte terrestre était faite d'oxygène, présent principalement sous forme d'oxydes, dont les principaux sont les oxydes de silicium, d'aluminium, de fer, de

calcium, de magnésium, de potassium et de sodium. La silice est le constituant majeur de la croûte, sous forme de pyroxénoïdes, les minéraux les plus communs des roches magmatiques et métamorphiques. Après une synthèse basée sur l'analyse de 1672 types de roches, Clarke a obtenu les pourcentages présentés dans le tableau ci-dessous^[54].

Structure interne

L'intérieur de la Terre, comme celui des autres planètes telluriques, est stratifié, c'est-à-dire organisé en couches concentriques superposées, ayant des densités croissantes quand on s'enfonce. Ces diverses couches se distinguent par leur nature pétrologique (contrastes chimiques et minéralogiques) et leurs propriétés physiques (changements d'état physique, propriétés rhéologiques). La couche extérieure de la Terre solide, fine à très fine relativement au rayon terrestre, s'appelle la croûte ; elle est solide, et chimiquement distincte du manteau, solide, sur lequel elle repose ; sous l'effet combiné de la pression et de la température, avec la profondeur, le manteau passe d'un état solide fragile (cassant, sismogène, "lithosphérique") à un état solide ductile (plastique, "asthénosphérique", et donc caractérisé par une viscosité plus faible, quoiqu'encore extrêmement élevée). La surface de contact entre la croûte et le manteau est appelée le Moho ; il se visualise très bien par les méthodes sismiques du fait du fort contraste de vitesse des ondes sismiques, entre les deux côtés. L'épaisseur de la croûte varie de 6 km sous les océans jusqu'à plus de 50 km en moyenne sous les continents. La croûte et la partie supérieure froide et rigide du manteau supérieur sont appelés lithosphère ; leur comportement horizontalement rigide à l'échelle du million à la dizaine de millions d'années est à l'origine de la tectonique des plaques. L'asthénosphère se trouve sous la lithosphère et est une couche convective, relativement moins visqueuse sur laquelle la lithosphère se déplace "*en plaques minces*". Des changements importants dans la structure cristallographique des divers minéraux du manteau, qui sont des changements de phase au sens thermodynamique, vers respectivement les profondeurs de 410 km et de 670 km sous la surface, encadrent une zone dite de transition, définie initialement sur la base des premières images sismologiques. Actuellement, on appelle manteau supérieur la couche qui va du Moho à la transition de phase vers 670 km de profondeur, la transition à 410 km de profondeur étant reconnue pour ne pas avoir une importance majeur sur le processus de convection mantellique, au contraire de l'autre. Et l'on appelle donc manteau inférieur la zone comprise entre cette transition de phase à 670 km de profondeur, et la limite noyau-manteau. Sous le manteau inférieur, le noyau terrestre, composé à presque 90% de fer métal, constitue une entité chimiquement originale de tout ce qui est au-dessus, à savoir la Terre silicatée. Ce noyau est lui-même stratifié en un noyau externe liquide et très peu visqueux (viscosité de l'ordre de celle d'une huile moteur à 20 °C), qui entoure un noyau interne solide^[55] encore appelé graine. Cette graine résulte de la cristallisation du noyau du fait du refroidissement séculaire de la Terre. Cette cristallisation, par la chaleur latente qu'elle libère, est source d'une convection du noyau externe, laquelle est la source du champ magnétique terrestre. L'absence d'un tel champ magnétique sur les autres planètes telluriques laisse penser que leurs noyaux métalliques, dont les présences sont nécessaires pour expliquer les données astronomiques de densité et de moment d'inertie, sont totalement cristallisés. Selon une interprétation encore débattue de données sismologiques, le noyau interne terrestre semblerait tourner à une vitesse angulaire légèrement supérieure à celle du reste de la planète, avançant relativement de 0,1 à 0,5° par an^[56].

Couches géologiques de la Terre^[57]



Chaleur

La chaleur interne de la Terre est issue d'une combinaison de l'énergie résiduelle issue de l'accrétion planétaire (environ 20 %) et de la chaleur produite par les éléments radioactifs (80 %)^[61]. Les principaux isotopes producteurs de chaleur de la Terre sont le potassium-40, l'uranium-238, l'uranium-235 et le thorium-232^[62]. Au centre de la planète, la température pourrait atteindre 7000 K et la pression serait de 360 GPa^[63]. Comme la plus grande partie de la chaleur est issue de la désintégration des éléments radioactifs, les scientifiques considèrent qu'au début de l'histoire de la Terre, avant que les isotopes à courte durée de vie ne se soient désintégrés, la production de chaleur de la Terre aurait été bien plus importante. Cette production supplémentaire, deux fois plus importante qu'aujourd'hui il y a 3 milliards d'années^[61] aurait accru les gradients de températures dans la Terre et donc le rythme de la convection mantellique et de la tectonique des plaques, ce qui aurait permis la formation de roches ignées comme les komatiites qui ne sont plus formées aujourd'hui^[64].

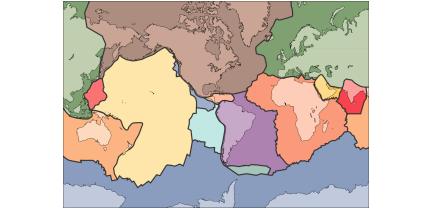
Principaux isotopes producteurs de chaleur actuels^[65]

Isotope	Libération de chaleur W/kg isotope	Demi-vie années	Concentration moyenne dans le manteau kg isotope/kg manteau	Libération de chaleur W/kg manteau
²³⁸ U	9.46×10^{-5}	4.47×10^9	30.8×10^{-9}	2.91×10^{-12}
²³⁵ U	5.69×10^{-4}	7.04×10^8	0.22×10^{-9}	1.25×10^{-13}
²³² Th	2.64×10^{-5}	1.40×10^{10}	124×10^{-9}	3.27×10^{-12}
⁴⁰ K	2.92×10^{-5}	1.25×10^9	36.9×10^{-9}	1.08×10^{-12}

La perte moyenne de chaleur par la Terre est de 87 mW/m² pour une perte globale de 4.42×10^{13} W^[66]. Une portion de l'énergie thermique du noyau est transportée vers la croûte par des panaches ; une forme de convection où des roches semi-fondues remontent vers la croûte. Ces panaches peuvent produire des points chauds et des trapps^[67]. La plus grande partie de la chaleur de la Terre est perdue à travers la tectonique des plaques au niveau des dorsales océaniques. La dernière source importante de perte de chaleur est la conduction à travers la lithosphère, la plus grande partie ayant lieu dans les océans car la croûte y est plus mince que celle des continents^[68].

Plaques tectoniques

Principales plaques^[69]



Nom de la plaque	Superficie 10^6 km^2
Plaque africaine ^[70]	78.0
Plaque antarctique	60.9
Plaque australienne	47.2
Plaque eurasienne	67.8
Plaque nord-américaine	75.9
Plaque sud-américaine	43.6
Plaque pacifique	103.3

Les plaques tectoniques sont des segments rigides de lithosphère qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Les relations cinématiques qui existent aux frontières des plaques peuvent être regroupées en trois domaines : des domaines de convergence où deux plaques se rencontrent, de divergence où deux plaques se séparent et des domaines de transcurseure où les plaques se déplacent latéralement les unes par rapport aux autres. Les tremblements de terre, l'activité volcanique, la formation des montagnes et des fosses océaniques sont plus fréquentes le long de ces frontières^[71]. Le mouvement des plaques tectoniques est lié aux mouvements de convection ayant lieu dans le manteau terrestre^[72].

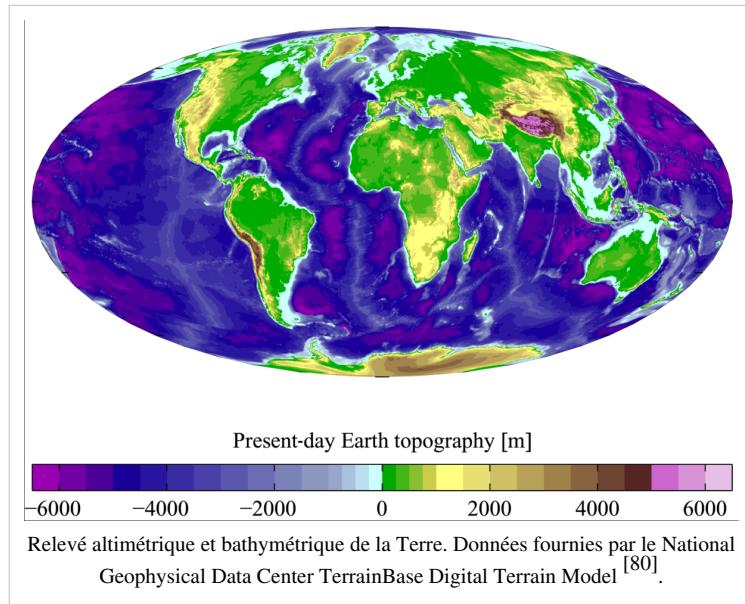
Du fait du mouvement des plaques tectoniques, le plancher océanique plonge sous les bords des autres plaques. Au même moment, la remontée du magma au niveau des frontières divergentes crée des dorsales. La combinaison de ces processus permet un recyclage continu de la lithosphère océanique qui retourne dans le manteau. Par conséquent, la plus grande partie du plancher océanique est âgée de moins de 100 millions d'années. La plus ancienne croûte océanique est localisée dans l'ouest du Pacifique et a un âge estimé de 200 millions d'années^{[73] [74]}. Par comparaison, les éléments les plus anciens de la croûte continentale sont âgés de 4030 millions d'années^[75].

Il existe sept principales plaques, Pacifique, Nord-Américaine, Eurasienne, Africaine, Antarctique, Australienne et Sud-Américaine. Parmi les plaques importantes, on peut également citer les plaques Arabique, Caraïbe, Nazca à l'ouest de la côte occidentale de l'Amérique du Sud et la plaque Scotia dans le sud de l'océan atlantique. La plaque australienne fusionna avec la plaque indienne il y a 50 millions d'années. Les plaques océaniques sont les plus rapides : la plaque de Cocos avance à un rythme de 75 mm/an^[76] et la plaque pacifique à 52-69 mm/an. À l'autre extrême, la plus lente est la plaque eurasienne progressant à une vitesse de 21 mm/an^[77].

Surface

Le relief de la Terre diffère énormément suivant le lieu. Environ 70,8 %^[78] de la surface du globe est recouvert par de l'eau et une grande partie du plateau continental se trouve sous le niveau de la mer. Les zones submergées ont un relief aussi varié que les autres dont une dorsale océanique faisant le tour de la Terre ainsi que des volcans sous-marins^[45], des fosses océaniques, des canyons sous-marins, des plateaux et des plaines abyssales. Les 29,2 % non recouverts d'eau sont composés de montagnes, de déserts, de plaines, de plateaux et d'autres géomorphologies.

La surface planétaire subit de nombreuses modifications du fait de la tectonique et de l'érosion. Les éléments de surface construits ou déformés par la tectonique des plaques sont sujet une météorisation constante du fait des précipitations, des cycles thermiques et des effets chimiques. Les glaciations, l'érosion du littoral, la construction des récifs coralliens et les impacts météoriques^[79] contribuent également aux modifications du paysage.



La lithosphère continentale est composée de matériaux de faible densité comme les roches ignées : granit et andesite. Le basalte est moins fréquent et cette roche volcanique dense est le principal constituant du plancher océanique^[81]. Les roches sédimentaires se forment par l'accumulation de sédiments qui se compactent. Environ 75 % des surfaces continentales sont recouvertes de roches sédimentaires même si elles ne représentent que 5 % de la croûte^[82]. Le troisième type de roche rencontré sur Terre sont les roches métamorphiques, qui sont créées par la transformation d'autres types de roche en présence de hautes pressions, de hautes

températures ou les deux. Parmi les silicates les plus abondants de la surface terrestre on peut citer le quartz, le feldspath, l'amphibole, le mica, le pyroxène et l'olivine^[83]. Les carbonates courants sont le calcite (composant du calcaire) et la dolomite^[84].

La pédosphère est la couche la plus externe de la Terre. Elle est composée de sol et est sujet au processus de formation du sol. Elle se trouve à la rencontre de la lithosphère, de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère. Actuellement, les zones arables représentent 13,31 % de la surface terrestre et seulement 4,71 % supportent des cultures permanentes^[85]. Près de 40 % de la surface terrestre est utilisée pour l'agriculture et l'élevage soit environ $1,3 \times 10^7 \text{ km}^2$ de cultures et $3,4 \times 10^7 \text{ km}^2$ de pâturage^[86].

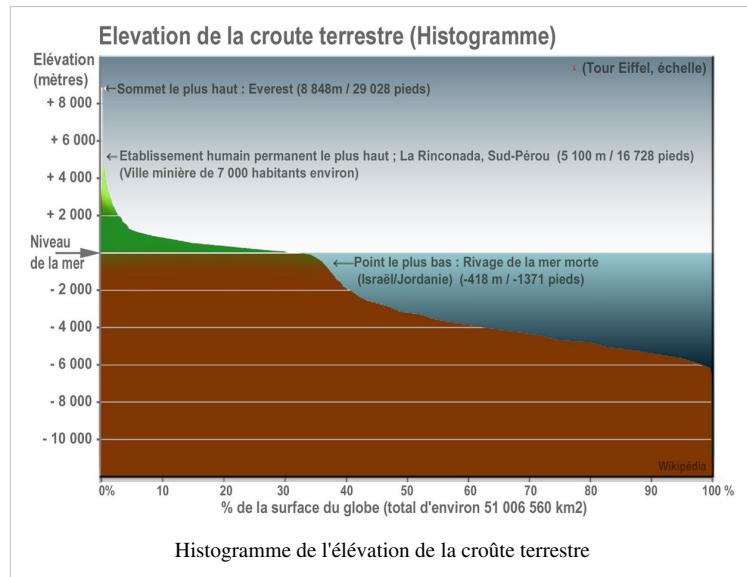
L'altitude de la surface terrestre de la Terre varie de -418 m dans la Mer morte à 8848 m au sommet de l'Everest. L'altitude moyenne des terres émergées est de 840 m au dessus du niveau de la mer^[87].

Hydrosphère

L'abondance de l'eau sur la surface de la Terre est une caractéristique unique qui distingue la "planète bleue" des autres planètes du système solaire. L'hydrosphère terrestre est principalement composée par les océans mais techniquement elle inclut également les mers, les lacs, les rivières et les eaux souterraines jusqu'à une profondeur de 2000 m. La Challenger Deep de la fosse des Mariannes dans l'océan pacifique est le lieu immergé le plus profond avec une profondeur de 10911 m^[88] [89].

La masse des océans est d'environ $1,35 \times 10^{18}$ t soit environ 1/4400e de la masse totale de la Terre. Les océans couvrent une superficie de $3,618 \times 10^8$ km² avec une profondeur moyenne de 3682 m soit un volume estimé à $1,332 \times 10^9$ km³^[90]. Environ 97,5 % de l'eau terrestre est salée. Les 2,5 % restants sont composés d'eau douce mais environ 68,7 % de celle-ci est immobilisée sous forme de glace^[91].

La salinité moyenne des océans est d'environ 35 grammes de sel par kilogramme d'eau de mer (35 %)^[92]. La plupart de ce sel fut libéré par l'activité volcanique ou par l'érosion des roches ignées^[93]. Les océans sont également un important réservoir de gaz atmosphériques dissous qui sont essentiels à la survie de nombreuses formes de vie aquatiques^[94]. L'eau de mer a une grande influence sur le climat mondial du fait de l'énorme réservoir de chaleur que constituent les océans^[95]. Des changements dans les températures océaniques peuvent entraîner des phénomènes météorologiques très importants comme El Niño^[96].



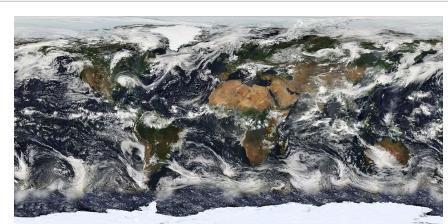
Atmosphère

La Terre est entourée d'une enveloppe gazeuse qu'elle retient par attraction gravitationnelle : l'atmosphère. L'atmosphère de la Terre est intermédiaire entre celle, très épaisse, de Vénus, et celle, très ténue, de Mars. La pression atmosphérique au niveau de la mer est en moyenne de 101325 Pa, soit 1 atm par définition^[97]. L'atmosphère est constituée de 78.09 % d'azote, 20.95 % d'oxygène, 0.93 % d'argon et 0.039 % de dioxyde de carbone, ainsi que de divers autres gaz dont de la vapeur d'eau. La hauteur de la troposphère varie avec la latitude entre 8 km aux pôles et 17 km à l'équateur avec quelques variations résultant de facteurs météorologiques et saisonniers^[98].

La biosphère de la Terre a fortement altéré son atmosphère. La photosynthèse à base d'oxygène apparut il y a 2,7 milliards d'années et forma l'atmosphère actuelle principalement composée d'azote et d'oxygène. Ce changement permit la prolifération d'organismes aérobies de même que la formation de la couche d'ozone bloquant les rayons ultraviolets émis par le Soleil. L'atmosphère favorise également la vie en transportant la vapeur d'eau, en fournissant des gaz utiles, en faisant bruler les petites météorites avant qu'elles ne frappent la surface et en modérant les températures^[99]. Ce dernier phénomène est connu sous le nom d'effet de serre : des molécules présentes en faible quantité dans l'atmosphère bloquent la déperdition de chaleur dans l'espace et font ainsi augmenter la température globale. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'ozone sont les principaux gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre. Sans cette conservation de la chaleur, la température moyenne sur Terre serait de -18 °C par rapport aux 15 °C actuels^[78].

Météorologie et climat

L'atmosphère terrestre n'a pas de limite clairement définie disparaît lentement dans l'espace. Les trois-quarts de la masse atmosphérique sont concentrées dans les premiers 11 km de l'atmosphère. Cette couche la plus inférieure est appelée la troposphère. L'énergie du Soleil chauffe cette couche et la surface en dessous ce qui entraîne une expansion du volume atmosphérique. Cet air avec une densité inférieure s'élève et est remplacé par de l'air plus dense car plus froid. La circulation atmosphérique qui en résulte est un acteur déterminant dans le climat et la météorologie du fait de la redistribution de la chaleur qu'elle implique^[100].



Couverture nuageuse de la Terre photographiée par le satellite Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer de la NASA

Les principales bandes de circulations sont les alizés dans la région équatoriale à moins de 30° et les vents d'ouest dans les latitudes intermédiaires entre 30° et 60°^[101]. Les courants océaniques sont également importants dans la détermination du climat en particulier la circulation thermohaline qui distribue l'énergie thermique des régions équatoriales vers les régions polaires^[102].

La vapeur d'eau générée par l'évaporation de surface est transportée par les mouvements atmosphériques. Lorsque les conditions atmosphériques permettent une élévation de l'air chaud et humide, cette eau se condense et retombe sur la surface sous forme de précipitations^[100]. La plupart de l'eau est ensuite transportée vers les altitudes inférieures par les réseaux fluviaux et retourne dans les océans ou dans les lacs. Ce cycle de l'eau est un mécanisme vital au soutien de la vie sur Terre et joue un rôle primordial dans l'érosion des reliefs terrestres. La distribution des précipitations est très variée de plusieurs mètres à moins d'un millimètre par an. La circulation atmosphérique, les caractéristiques topologiques et les gradients de températures déterminent les précipitations moyenne sur une région donnée^[103].

La quantité d'énergie solaire atteignant la Terre diminue avec la hausse de la latitude. Aux latitudes les plus élevées, les rayons solaires atteignent la surface suivant un angle plus faible et doivent traverser une plus grande colonne d'atmosphère. Par conséquent, la température moyenne au niveau de la mer diminue d'environ 0.4 °C à chaque degré de latitude en s'éloignant de l'équateur^[104]. La Terre peut être divisée en ceintures latitudinaires de climat similaires. En partant de l'équateur, celles-ci sont les zones tropicales (ou équatoriales), subtropicales, tempérées et polaires^[105]. Le climat peut également être basé sur les températures et les précipitations. La classification de Köppen (modifiée par Rudolph Geiger, étudiant de Wladimir Peter Köppen) est la plus utilisée et définit cinq grands groupes (tropical humide, aride, tempéré, continental et polaire) qui peuvent être divisées en sous-groupes plus précis^[101].

Haute atmosphère

Au dessus de la troposphère, l'atmosphère est habituellement divisée trois couches, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère^[99]. Chaque couche possède un gradient thermique adiabatique différent définissant l'évolution de la température avec l'altitude. Au delà, l'exosphère se transforme en magnétosphère, où le champ magnétique terrestre interagit avec le vent solaire^[106]. La couche d'ozone se trouve dans la stratosphère et bloque une partie des rayons ultraviolets ce qui est important pour la vie sur Terre. La ligne de Kármán, définie comme se trouvant à 100 km au dessus de la surface terrestre, est la limite habituelle entre l'atmosphère et l'espace^[107].



Photographie montrant la Lune à travers l'atmosphère terrestre. NASA

L'énergie thermique peut accroître la vitesse de certaines particules de la zone supérieure de l'atmosphère qui peuvent ainsi échapper à la gravité terrestre. Cela entraîne une lente mais constante "fuite" de l'atmosphère dans

l'espace. Comme l'hydrogène non lié a une faible masse moléculaire, il peut atteindre la vitesse de libération plus facilement et disparaît dans l'espace à un rythme plus élevé que celui des autres gaz^[108]. La fuite de l'hydrogène dans l'espace déplace la Terre d'un état initialement réducteur à une état actuellement oxydant. La photosynthèse fournit une source d'oxygène non lié mais la perte d'agents réducteurs comme l'hydrogène est considéré comme une condition nécessaire à l'accumulation massive d'oxygène dans l'atmosphère^[109]. Ainsi la capacité de l'hydrogène à quitter l'atmosphère terrestre aurait put influencer la nature de la vie qui s'est développée sur la planète^[110]. Actuellement, la plus grande partie de l'hydrogène est convertie en eau avant qu'il ne s'échappe du fait de l'atmosphère riche en oxygène. La plupart de l'hydrogène s'échappant provient de la destruction des molécules de méthane dans la haute atmosphère^[111].

Champ magnétique

Le champ magnétique terrestre a pour l'essentiel la forme d'un dipôle magnétique avec les pôles actuellement situés près des pôles géographiques de la planète. À l'équateur du champ magnétique, son intensité à la surface terrestre est de $3,05 \times 10^{-5}$ T, avec un moment magnétique global de 7.91×10^{15} T m³^[112]. Selon la théorie de la dynamo, le champ est généré par le cœur externe fondu où la chaleur crée des mouvements de convection au sein de matériaux conducteurs, ce qui génère des courants électriques. Ceux-ci produisent le champ magnétique terrestre. Les mouvements de convection dans le noyau externe sont organisés spatialement selon un mode spécifique de cette géométrie (colonnes de Busse), mais présentent néanmoins une composante temporelle relativement chaotique (au sens de la dynamique non-linéaire) ; bien que le plus souvent plus ou moins alignés avec l'axe de rotation de la Terre, les pôles magnétiques se déplacent et changent irrégulièrement d'alignement. Cela entraîne des inversions du champ magnétique terrestre à intervalles irréguliers, approximativement plusieurs fois par million d'années pour la période actuelle, le cénozoïque. L'inversion la plus récente eut lieu il y a environ 700000 ans^{[113] [114]}.

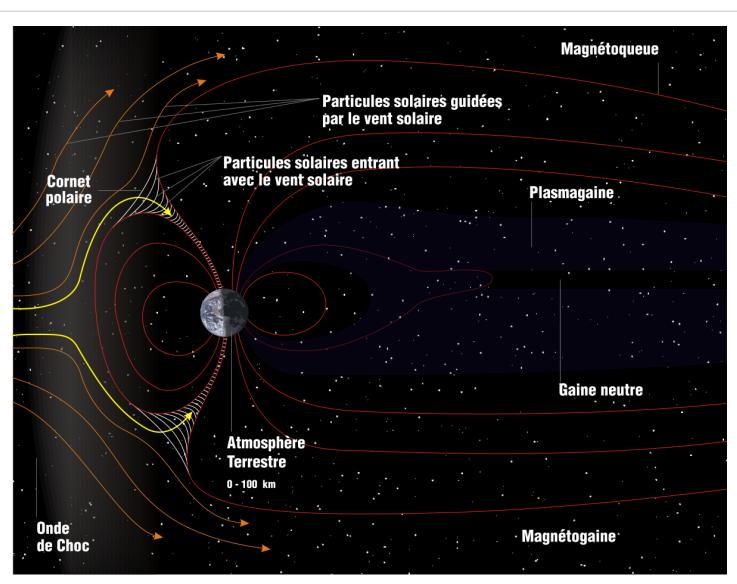


Schéma de la magnétosphère terrestre. Le vent solaire progresse de la gauche vers la droite.

Le champ magnétique forme la magnétosphère qui dévie les particules du vent solaire et s'étend jusqu'à environ treize fois le rayon terrestre en direction du Soleil. La collision entre le champ magnétique et le vent solaire forme les ceintures de Van Allen, une paire de régions toroïdales contenant un grand nombre de particules énergétiques ionisées. Lorsque, à l'occasion d'arrivées de plasma solaire plus intenses que le vent solaire moyen, par exemple lors d'événements d'éjections de masse coronale vers la Terre, la déformation de la géométrie de la magnétosphère sous l'impact de ce flux solaire, permet le processus de reconnexion magnétique, et une partie des électrons de ce plasma solaire entre dans l'atmosphère terrestre en une ceinture autour aux pôles magnétiques ; il se forme alors des aurores polaires^[115], qui sont l'émission d'une lumière de fluorescence résultant de la désexcitation des atomes et molécules, essentiellement d'oxygène de la haute et moyenne atmosphère, excités par les chocs des électrons solaires.

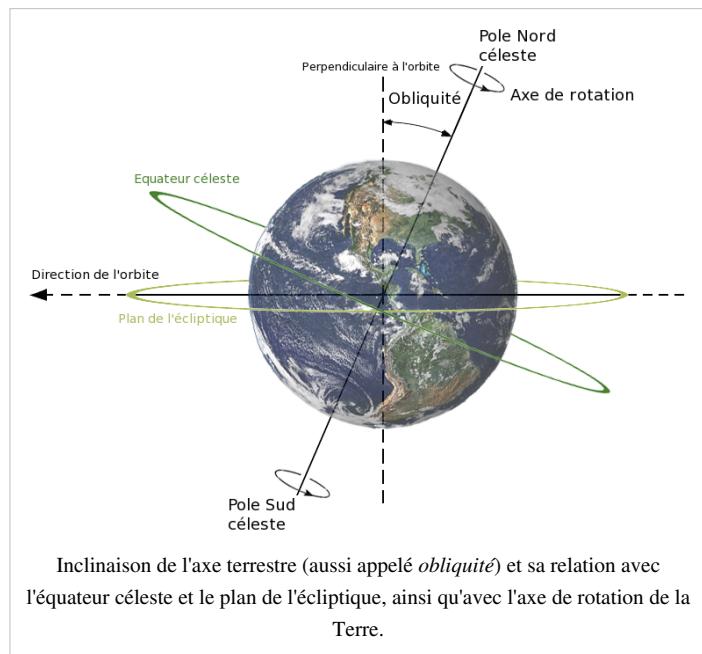
Orbite et rotation

Rotation

La période de rotation relative de la Terre autour de la Terre est d'environ 86400 s soit un jour solaire^[116]. La période de rotation relative de la Terre par rapport aux étoiles fixes, appelé son *jour stellaire* par l'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), est de 86164.098903691 secondes de temps solaire moyen (UT1) ou 23 h 56 min 4.098903691 s^[117]^[118]. Du fait de la précession des équinoxes, la période de rotation relative de la Terre, son jour sidéral est de 23 h 56 min 4.09053083288 s^[117]. Ainsi le jour sidéral est plus court que le jour stellaire d'environ 8.4 ms^[119].

À part des météorites dans l'atmosphère et les satellites en orbite basse, le principal mouvement apparent des corps célestes dans le ciel terrestre est vers l'ouest à un rythme de 15°/h ou 15'/min.

Pour les corps proches de l'équateur céleste, cela est équivalent à un diamètre apparent de la Lune ou du Soleil toutes les deux minutes^[120] [121].



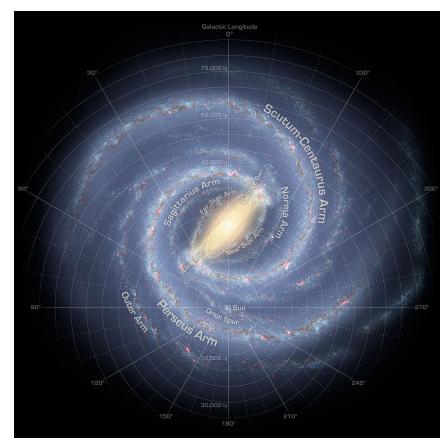
Orbite

La Terre orbite autour du Soleil à une distance moyenne d'environ 150 millions de kilomètres suivant une période de 365.2564 jours solaires ou une année sidérale. De la Terre, cela donne un mouvement apparent du Soleil vers l'est par rapport aux étoiles à un rythme d'environ 1°/jour ou un diamètre solaire toutes les 12 heures. Du fait de ce mouvement, il faut en moyenne 24 heures, un jour solaire, à la Terre pour réaliser une rotation complète autour de son axe et que le Soleil revienne au plan méridien. La vitesse orbitale de la Terre est d'environ 29.8 km/s (107000 km/h)^[97].

La Lune tourne avec la Terre autour d'un barycentre commun tous les 27.32 jours par rapport aux étoiles lointaines. Lorsqu'il est associé au mouvement du couple Terre-Lune autour du Soleil, la période du mois synodique, d'une nouvelle lune à une nouvelle lune est de 29.53 jours. Vu depuis le pôle céleste nord, le mouvement de la Terre, de la Lune et de leurs rotations axiales sont toutes dans le sens inverse de rotation. Depuis un point situé au dessus du pôle nord de la Terre et du Soleil, la Terre semble tourner dans le sens inverse des aiguilles autour du Soleil. Les plans orbitaux et axiaux ne sont pas précisément alignés, l'axe de la Terre est incliné de 23.4° par rapport à la perpendiculaire au plan Terre-Soleil et le plan Terre-Lune est incliné de 5° par rapport au plan Terre-Soleil. Sans cette inclinaison, il y aurait une éclipse toutes les deux semaines, avec une alternance entre éclipses lunaires et solaires^[97] [122].

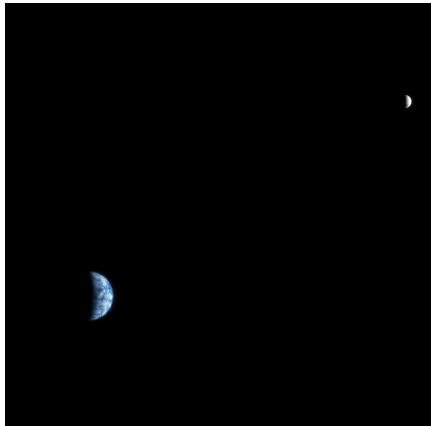
La sphère de Hill ou la sphère d'influence gravitationnelle de la Terre a un rayon d'environ 1500000 km^[123] [124]. C'est la distance maximale à laquelle l'influence gravitationnelle de la Terre est supérieure à celle du Soleil et des autres planètes. Pour orbiter autour de la Terre, les objets doivent se trouver dans cette zone où ils peuvent être perturbés par l'attraction gravitationnelle du Soleil.

La Terre, au sein du système solaire, est située dans la Voie lactée et se trouve à 28000 années lumières du centre galactique. Elle est actuellement à environ 20 années lumières du plan équatorial de la galaxie dans le bras d'Orion^[125].



Représentation de la Voie lactée montrant l'emplacement du Soleil

Inclinaison de l'axe et saisons



La Terre et la Lune photographiés depuis Mars par la sonde Mars Reconnaissance Orbiteur. Depuis l'espace, la Terre présente des phases similaires à celles de la Lune.

Du fait de l'inclinaison axiale de la Terre, la quantité de rayonnement solaire atteignant tout point de la surface varie au cours de l'année. Cela a pour conséquence des changements saisonniers dans le climat avec un été dans l'hémisphère nord lorsque le pôle nord pointe vers le Soleil et l'hiver lorsque le pôle pointe dans l'autre direction. Durant l'été, les jours durent plus longtemps et le Soleil monte plus haut dans le ciel. En hiver, le climat devient généralement plus froid et les jours raccourcissent. Au delà du cercle arctique, il n'y a aucun jour durant une partie de l'année, ce qui est appelé une nuit polaire. Dans l'hémisphère sud, la situation est exactement l'inverse.

Par convention astronomique, les quatre saisons sont déterminées par les solstices, le point de l'orbite où l'inclinaison vers ou dans la direction opposée du Soleil est maximale et les équinoxes lorsque la direction de l'inclinaison de l'axe et la direction au Soleil sont perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le solstice d'hiver a lieu le 21 décembre, le solstice d'été est proche du 21 juin, l'équinoxe de printemps a lieu autour du 20 mars et l'équinoxe d'automne se déroule vers le 21 septembre. Dans l'hémisphère sud, la situation est inversée et les dates des solstices d'hiver et d'été et celles des équinoxes de printemps et d'automne sont inversées^[126].

L'angle d'inclinaison de la Terre est relativement stable au cours du temps. L'inclinaison entraîne la nutation, un balancement périodique ayant une période de 18.6 années^[127]. L'orientation (et non l'angle) de l'axe de la Terre évolue et réalise un cercle complet suivant un cycle de 25800 années. Cette précession des équinoxes est la cause de la différence de durée entre une année sidérale et une année tropique. Ces deux mouvements sont causés par le couple qu'exercent les forces de marées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre. De plus, les pôles se déplacent périodiquement par rapport à la surface de la Terre selon un mouvement connu sous le nom d'oscillation de Chandler^[128].

À l'époque moderne, la périhélie de la Terre a lieu vers le 3 janvier et l'aphélie vers le 4 juillet. Ces dates évoluent au cours du temps du fait de la précession et d'autres facteurs orbitaux qui suivent un schéma cyclique connu sous le nom de paramètres de Milanković.

Lune

Caractéristiques

Diamètre	3474.8 km
Masse	7.349×10^{22} kg
Demi-grand axe	384400 km
Période orbitale	27 j 7 h 43.7 min

La Lune est un satellite naturel, situé à environ 380500 km de la Terre. Relativement grand, son diamètre est environ le quart de celui de la Terre. Au sein du système solaire, c'est l'un des plus grands satellites naturels (après Ganymède, Titan, Callisto et Io) et le plus grand d'une planète non gazeuse. De plus, c'est la plus grande lune du système solaire par rapport à la taille de sa planète même si Charon est relativement plus grand que la planète naine Pluton. Elle est relativement proche de la taille de la planète Mercure. Les satellites naturels orbitant autour des autres planètes sont communément appelés "lunes" en référence à la Lune de la Terre.

L'attraction gravitationnelle entre la Terre et la Lune cause les marées sur Terre. Le même effet a lieu sur la Lune faisant en sorte que sa période de rotation est identique au temps qu'il faut pour orbiter autour de la Terre, présentant ainsi toujours la même face vers la Terre. En orbitant autour de la Terre, différentes parties du côté visible de la Lune sont illuminées par le Soleil, causant les phases lunaires.

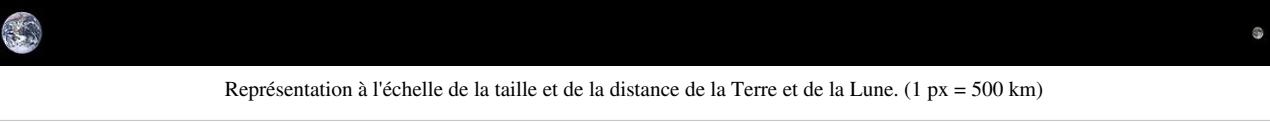
À cause du couple des marées, la Lune s'éloigne de la Terre à un rythme d'environ 38 mm par an, produisant aussi l'allongement du jour terrestre de 23 microsecondes par an^[129]. Sur plusieurs millions d'années, l'effet cumulé de ces petites modifications produit d'importants changements. Durant la période du Dévonien, il y a approximativement 410 millions d'années, il y avait 400 jours dans une année, chaque jour durant 21,8 heures^[130].

La Lune aurait eu une influence importante dans le développement de la vie en régulant de climat de la Terre. Les preuves paléontologiques et les simulations informatiques montrent que l'inclinaison de l'axe de la Terre est stabilisé par les effets de marées avec la Lune^[131]. Certains scientifiques considèrent que sans cette stabilisation contre les torques appliqués par le Soleil et les planètes sur le renflement équatorial, l'axe de rotation aurait pu être très instable ce qui aurait provoqué des changements chaotiques au cours des millions d'années comme cela semble avoir été le cas pour Mars^[132].

Vue de la Terre, la Lune est assez éloignée pour avoir la même taille apparente que le Soleil. Le diamètre angulaire (ou l'angle solide) des deux corps est quasiment égale car même si le diamètre du Soleil est 400 fois plus grand que celui de la Lune, celle-ci est 400 fois plus rapprochée de la Terre que ce dernier^[121]. Ceci permet des éclipses solaires totales et annulaires sur Terre.

Le consensus actuel sur les origines de la Lune, l'hypothèse de l'impact géant, est celle d'un impact géant entre un planétoïde de la taille de Mars, appelé Théia, et la Terre nouvellement formée. Cette hypothèse explique en partie le fait que la composition de la Lune ressemble particulièrement à celle de la croûte terrestre^[133].

La Terre a au moins cinq satellites co-orbitaux, dont l'astéroïde (3753) Cruithne et 2002 AA₂₉^{[134] [135]}. En 2011, on compte 931 satellites artificiels en orbite autour de la Terre^[136].



Habitabilité

Une planète qui peut abriter la vie est dite habitable même si la vie n'en est pas originaire. La Terre fournit de l'eau liquide, un environnement où les molécules organiques complexes peuvent s'assembler et interagir et suffisamment d'énergie pour maintenir un métabolisme^[137]. La distance de la Terre au Soleil, de même que son excentricité orbitale, sa vitesse de rotation, l'inclinaison de son axe, son histoire géologique, son atmosphère accueillante et un champ magnétique protecteur contribuent également aux conditions climatiques actuelles à sa surface^[138].

Biosphère

Les formes de vie de la planète sont parfois désignées comme formant une "biosphère". On considère généralement que cette biosphère a commencé à évoluer il y a environ 3.5 milliards d'années. La biosphère est divisée en plusieurs biomes, habités par des groupes similaires de plantes et d'animaux. Sur terre, les biomes sont principalement séparés par des différences de latitudes, l'altitude et l'humidité. Les biomes terrestres se trouvent au delà des cercles arctique et antarctique, en haute altitude ou dans les zones très arides sont relativement dépourvus de vie animale et végétale alors que la biodiversité est maximale dans les forêts tropicales humides^[139].

Ressources naturelles

La Terre fournit des ressources qui sont exploitable par les humains pour divers utilisations. Certaines ne sont pas renouvelables, comme les combustible fossiles, qui sont difficiles à reconstituer sur une courte échelle de temps. D'importantes quantités de combustibles fossiles peuvent être obtenues de la croûte terrestre comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel ou les hydrates de méthane. Ces dépôts sont utilisés pour la production d'énergie et en tant que matière première pour l'industrie chimique. Les minéraux se sont formés dans la croûte terrestre et sont constitués de divers éléments chimiques utiles comme les métaux^[140].

La biosphère terrestre produit de nombreuses ressources biologiques pour les humains comme de la nourriture, du bois, des médicaments, de l'oxygène et assure également le recyclage de nombreux déchets organiques. Les écosystèmes terrestres dépendent de la couche arable et de l'eau douce tandis que les écosystèmes marins sont basés sur les nutriments dissous dans l'eau^[141]. Les humains vivent également sur terre en utilisant des matériaux de construction pour fabriquer des abris. En 1993, l'utilisation humaine des terres étaient approximativement répartie ainsi :

Utilisation des terres	Terres arables	Cultures permanentes	Pâturages permanents	Forêts	Zones urbaines	Autre
Pourcentage	13,13 % ^[85]	4,71 % ^[85]	26 %	32 %	1,5 %	30 %

La superficie irriguée estimée en 1993 était de 2481250 km²^[85].

Risques environnementaux

D'importantes zones de la surface terrestre sont sujettes à des phénomènes météorologiques extrêmes comme des cyclones, des ouragans ou des typhons qui dominent la vie dans ces régions. Entre 1980 à 2000, ces événements ont causé environ 11800 morts par an^[142]. De même, de nombreuses régions sont exposées aux séismes, aux glissements de terrain, aux éruptions volcaniques, aux tsunamis, aux tornades, aux dolines, aux blizzards, aux inondations, aux sécheresses, aux incendies de forêt et autres calamités et catastrophes naturelles.

De nombreuses régions sont sujettes à la pollution de l'air et de l'eau créée par l'homme, aux pluies acides, aux substances toxiques, à la perte de végétation (surpâturage, déforestation, désertification), à la perte de biodiversité, à la dégradation des sols, à l'érosion et à l'introduction d'espèces invasives.

Selon les Nations-Unies, un consensus scientifique existe qui lie les activités humaines au réchauffement climatique du fait des émissions industrielles de dioxyde de carbone. Cette modification du climat risque de provoquer la fonte des glaciers et des calottes glaciaires, des amplitudes de température plus extrêmes, d'importants changements de la

météorologie et une élévation du niveau de la mer^[143].

Géographie humaine

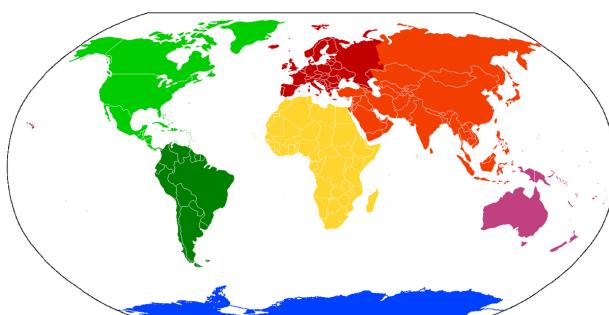
La Terre compte approximativement 7000000000 habitants au 31 octobre 2011^[144]. Les projections indiquent que la population mondiale atteindra 9.2 milliards en 2050^[145]. La plupart de cette croissance devrait se faire dans les pays en développement. La densité de population humaine varie considérablement autour du monde mais une majorité vit en Asie. En 2020, 60 % de la population devrait vivre dans des zones urbaines plutôt que rurales^[146].

On estime que seul un-huitième de la surface de la Terre convient pour les humains ; trois-quarts de la Terre sont recouverts par les océans et la moitié des terres émergées sont des déserts (14 %)^[147], des hautes montagnes (27 %)^[148] ou d'autres milieux peu accueillants. L'implantation humaine permanente la plus au nord est Alert sur l'île d'Ellesmere au Canada (82°28'N)^[149]. La plus au sud est la station d'Amundsen-Scott en Antarctique située près du pôle sud (90°S).

La totalité des terres émergées, à l'exception de certaines zones de l'Antarctique et du Bir Tawil non revendiqué que ce soit par l'Égypte ou le Soudan, sont revendiquées par des nations indépendantes. En 2011, on compte 204 états souverains dont 193 sont membres des Nations-Unies. De plus, il existe 59 territoires à souveraineté limitée et de nombreuses entités autonomes ou contestées^[85]. Historiquement la Terre n'a jamais connut une souveraineté s'étendant sur l'ensemble de la planète même si de nombreuses nations ont tentés d'obtenir une domination mondiale et ont échoué^[150].

L'Organisation des Nations unies est une organisation internationale qui fut créée dans le but de régler pacifiquement les conflits entre nations^[151]. Les Nations-Unies servent principalement de lieu d'échange pour la diplomatie et le droit international public. Lorsque le consensus est obtenu entre les différents membres, une opération armée peut être envisagée^[152].

La premier humain a avoir orbité autour de la Terre fut Youri Gagarine le 12 avril 1961^[153]. Au total, en 2004, environ 400 personnes se sont rendus dans l'espace et douze d'entre-aux ont marché sur la Lune^{[154] [155] [156]}. En temps normal les seuls humains dans l'espace sont ceux se trouvant dans la station spatiale internationale. Les astronautes de la mission Apollo 13 sont les humains qui se sont le plus éloignés de la Terre avec 400171 km en 1970^[157].



Les sept continents de la Terre^[1] : Amérique du nord , Amérique du sud, Antarctique, Afrique, Europe, Asie, Océanie



Image composite de la Terre pendant la nuit réalisée par les satellites du DMSP. Cette image n'est pas une photographie et de nombreux éléments sont plus lumineux que ce qu'ils apparaîtraient en cas d'observation directe.



Vidéo réalisée par l'équipage de la station spatiale internationale commençant juste au sud-est de l'Alaska. La première ville survolée par l'ISS est San Francisco (vers 10 secondes sur la droite) puis la station continue le long de la côte ouest des États-Unis avant de survoler Mexico (vers 23 secondes au centre). De nombreux orages avec de la foudre sont clairement visibles. Le survol de la cordillère des Andes se termine au dessus de la capitale bolivienne, La Paz.

Point de vue culturel

À la différence des autres planètes du système solaire, l'humanité n'a pas considéré la Terre comme un objet mobile en rotation autour du Soleil avant le XVI^e siècle^[158]. La Terre a souvent été personnifiée en tant que déité, en particulier sous la forme d'une déesse. Les mythes de la création de nombreuses religions relatent la création de la Terre par une ou plusieurs divinités. Un certain nombre de groupes religieux souvent affiliés aux branches fondamentalistes du Protestantisme^[159] et de l'Islam^[160] avancent que leur interprétation de ces mythes dans les textes sacrés est la vérité et que celle-ci devrait être considérée comme l'égale des hypothèses scientifiques conventionnelles concernant la formation de la Terre et le développement de la vie voire devrait les remplacer^[161]. De telles affirmations sont rejetées par la communauté scientifique^{[162] [163]} et par les autres groupes religieux^[164] [165] [166].

Dans le passé, la croyance en une terre plate^[167] fut contredite par les observations et par les circumnavigations et le modèle d'une Terre sphérique s'imposa^[168]. La vision humaine concernant la Terre a évolué depuis les débuts de l'aérospatiale et la biosphère est maintenant vue selon une perspective globale^{[169] [170]}. Cela est reflétée dans le développement de l'écologie qui s'inquiète de l'impact de l'humanité sur la planète^[171].

Notes

- [1] La Bille bleue, photo prise par l'équipage d'Apollo 17 le 7 décembre 1972. L'année 2009 marque le 50^e anniversaire de la première photographie couleur à avoir été envoyée de l'espace le 1^{er} décembre (1959 en science).
- [2] Température relevée à El Azizia, Libye, le 13 septembre 1922 : ([en](#)) Global Measured Extremes of Temperature and Precipitation (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/globalextremes.html>), National Climatic Data Center. Mis en ligne le 20 août 2008
- [3] Température relevée le 21 juillet 1983 à Vostok, Antarctique : ([ru](#)) Budretsky, A.B., « New absolute minimum of air temperature », dans *Bulletin of the Soviet Antarctic Expedition*, Leningrad, Gidrometeoizdat, n° 105, 1984 [texte intégral (http://www.aari.aq/publication/abs_min/abs_min.html)]
- [4] La Terre est la seule planète tournant autour du Soleil qui ne soit pas dotée d'un nom universel pour toutes les langues issues de la mythologie grecque ou romaine. En français toutefois, « Terre » s'apparente à Terra, déesse romaine de la terre, Gaïa en grec.
- [5] See:
 - ([en](#)) G.B. Dalrymple, *The Age of the Earth*, California, Stanford University Press, 1991 (ISBN 0-8047-1569-6)
 - *Age of the Earth* (<http://pubs.usgs.gov/gip/geotime/age.html>), Publications Services, USGS, 2007-07-09. Consulté le 2007-09-20
 - G. Brent Dalrymple, « The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved », dans *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 190, n° 1, 2001, p. 205–221 [texte intégral (<http://sp.lyellcollection.org/cgi/content/abstract/190/1/205>),

- lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.190.01.14>) (le 2007-09-20)]
- The Age of the Earth (<http://www.talkorigins.org/faqs/faq-age-of-earth.html>), TalkOrigins Archive, 2005-09-10. Consulté le 2008-12-30
- [6] Robert M. May, « How many species are there on earth? », dans *Science*, vol. 241, n° 4872, 1988, p. 1441–1449 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17790039>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.241.4872.1441>)]
- [7] (en) Roy M. Harrison et Ronald E. Hester, Causes and Environmental Implications of Increased UV-B Radiation, Royal Society of Chemistry, 2002 (ISBN 0-85404-265-2)
- [8] Freeze, Fry or Dry: How Long Has the Earth Got? (http://replay.waybackmachine.org/20090605231345/http://www.space.com/scienceastronomy/solarsystem/death_of_earth_000224.html), 2000-02-25
- [9] Date set for desert Earth (http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/specials/washington_2000/649913.stm), BBC News (2000-02-21). Consulté le 2007-03-31.
- [10] Le nombre de jours solaires est inférieur de un au nombre de jours sidéraux car le mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil ajoute une révolution de la planète autour de son axe.
- [11] (en) Charles F. Yoder, Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants, Washington, American Geophysical Union, 1995 (ISBN 0-87590-851-9) , p. 8
- [12] S. Bowring, « The Earth's early evolution », dans *Science*, vol. 269, n° 5230, 1995, p. 1535 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7667634>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.7667634>)]
- [13] Qingzhu Yin, « A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites », dans *Nature*, vol. 418, n° 6901, 2002, p. 949–952 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12198540>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1038/nature00995>)]
- [14] Thorsten Kleine, « Hf-W Chronometry of Lunar Metals and the Age and Early Differentiation of the Moon », dans *Science*, vol. 310, n° 5754, 2005-11-24, p. 1671–1674 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16308422>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1118842>)]
- [15] Controversial Moon Origin Theory Rewrites History (<http://news.discovery.com/space/moon-earth-formation.html>) (October 22, 2009). Consulté le 2010-01-30.
- [16] (Fall Meeting 2001) "An impact origin of the Earth-Moon system". Abstract #U51A-02, American Geophysical Union. Consulté le 2007-03-10.
- [17] R. Canup, « Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation », dans *Nature*, vol. 412, n° 6848, 2001, p. 708–712 [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v412/n6848/abs/412708a0.html>), lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11507633>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1038/35089010>)]
- [18] A. Morbidelli, « Source regions and time scales for the delivery of water to Earth », dans *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 35, n° 6, 2000, p. 1309–1320 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01518.x>)]
- [19] "Our Changing Sun: The Role of Solar Nuclear Evolution and Magnetic Activity on Earth's atmosphère and Climate". Benjamin Montesinos, Alvaro Gimenez et Edward F. Guinan *ASP Conference Proceedings: The Evolving Sun and its Influence on Planetary Environments*, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. Consulté le 2009-07-27.
- [20] Staff : Oldest measurement of Earth's magnetic field reveals battle between Sun and Earth for our atmosphère (<http://www.physorg.com/news186922627.html>), Physorg.news (March 4, 2010). Consulté le 2010-03-27.
- [21] (en) John James William Rogers et M. Santosh, Continents and Supercontinents, Oxford University Press US, 2004 (ISBN 0-19-516589-6), p. 48
- [22] P. M. Hurley, « Pre-drift continental nuclei », dans *Science*, vol. 164, n° 3885, juin 1969, p. 1229–1242 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17772560>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.164.3885.1229>)]
- [23] R. L. Armstrong, « A model for the evolution of strontium and lead isotopes in a dynamic earth », dans *Reviews of Geophysics*, vol. 6, n° 2, 1968, p. 175–199 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1029/RG006i002p00175>)]
- [24] J. De Smet, « Early formation and long-term stability of continents resulting from decompression melting in a convecting mantle », dans *Tectonophysics*, vol. 322, n° 1-2, 2000, p. 19 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00055-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00055-X))]
- [25] T. Harrison, « Heterogeneous Hadean hafnium: evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 ga », dans *Science*, vol. 310, n° 5756, décembre 2005, p. 1947–50 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16293721>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1117926>)]
- [26] D. Hong, « Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt », dans *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 23, n° 5, 2004, p. 799 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00134-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00134-2))]
- [27] R. L. Armstrong, « The persistent myth of crustal growth », dans *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 38, n° 5, 1991, p. 613–630 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1080/08120099108727995>)]
- [28] J. B. Murphy, « How do supercontinents assemble? », dans *American Scientist*, vol. 92, n° 4, 1965, p. 324–33 [texte intégral (<http://scienceweek.com/2004/sa040730-5.htm>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1511/2004.4.324>) (le 2007-03-05)]
- [29] W. Ford Doolittle, « Uprooting the tree of life », dans *Scientific American*, vol. 282, n° 6, février 2000, p. 90–95 [texte intégral (http://shiva.msu.montana.edu/courses/mb437_537_2005_fall/docs/uprooting.pdf)]
- [30] L. V. Berkner, « On the Origin and Rise of Oxygen Concentration in the Earth's atmosphère », dans *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 22, n° 3, 1965, p. 225–261 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1965\)022<0225:OTARO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1965)022<0225:OTARO>2.0.CO;2))]
- [31] Astrobiologists Find Evidence of Early Life on Land (http://www.nasa.gov/centers/ames/news/releases/2000/00_79AR.html), NASA, 2002-11-29. Consulté le 2007-03-05

- [32] (**en**) J. L. Kirschvink, Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth, Cambridge University Press, 1992 (ISBN 0-521-36615-1), p. 51–52
- [33] D. M. Raup, « Mass Extinctions in the Marine Fossil Record », dans *Science*, vol. 215, n° 4539, 1982, p. 1501–1503 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17788674>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.215.4539.1501>)]
- [34] B. H. Wilkinson, « The impact of humans on continental erosion and sedimentation », dans *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 119, n° 1–2, 2007, p. 140–156 [texte intégral (<http://bulletin.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/119/1-2/140>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1130/B25899.1>) (le 2007-04-22)]
- [35] I.-J. Sackmann, « Our Sun. III. Present and Future », dans *Astrophysical Journal*, vol. 418, 1993, p. 457–468 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/173407>)]
- [36] J.F. Kasting, « Runaway and Moist Greenhouse atmosphères and the Evolution of Earth and Venus », dans *Icarus*, vol. 74, n° 3, 1988, p. 472–494 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11538226>), lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90116-9](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(88)90116-9))]
- [37] King-Fai Li, « Atmospheric Pressure as a Natural Climate Regulator for a Terrestrial Planet with a Biosphere », dans *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 1–6, n° 24, 2009, p. 9576–9579 [texte intégral (http://www.gps.caltech.edu/~kfl/paper/Li_PNAS2009.pdf), lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19487662>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0809436106>) (le 2009-07-19)]
- [38] (**en**) Peter D. Ward et Donald Brownlee, *The Life and Death of Planet Earth: How the New Science of Astrobiology Charts the Ultimate Fate of Our World*, New York, Times Books, Henry Holt and Company, 2002 (ISBN 0-8050-6781-7)
- [39] H. Guillemot, « Ce que sera la fin du monde », dans *Science et Vie*, vol. N° 1014, mars 2002
- [40] Christine Bounama, « The fate of Earth's ocean », dans *Hydrology and Earth System Sciences*, Germany, Potsdam Institute for Climate Impact Research, vol. 5, n° 4, 2001, p. 569–575 [texte intégral (<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/5/569/2001/hess-5-569-2001.pdf>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.5194/hess-5-569-2001>) (le 2009-07-03)]
- [41] K.-P. Schröder, « Distant future of the Sun and Earth revisited », dans *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 386, n° 1, 2008, p. 155 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13022.x>)]
See also Palmer, Jason : *Hope dims that Earth will survive Sun's death* (http://space.newscientist.com/article/dn13369-hope-dims-that-earth-will-survive-suns-death.html?feedId=online-news_rss20), *NewScientist.com news service* (2008-02-22). Consulté le 2008-03-24.
- [42] Planetary Magnetism (<http://astrogeology.usgs.gov/HotTopics/index.php?archives/147-Names-for-the-Columbia-astronauts-provisionally-approved.html>), NASA, 2001-11-25. Consulté le 2007-04-01
- [43] Paul J. Tackley, « Mantle Convection and Plate Tectonics: Toward an Integrated Physical and Chemical Theory », dans *Science*, vol. 288, n° 5473, 2000-06-16, p. 2002–2007 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10856206>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.288.5473.2002>)]
- [44] Converting GPS Height into NAVD88 Elevation with the GEOID96 Geoid Height Model (http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/gislis96.html), National Geodetic Survey, NOAA. Consulté le 2007-03-07
- [45] Exploring the Ocean Basins with Satellite Altimeter Data (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/predicted/explore.HTML>), NOAA/NGDC, 2006-07-07. Consulté le 2007-04-21
- [46] Unit of length (meter) (<http://physics.nist.gov/cuu/Units/meter.html>), *NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*, NIST Physics Laboratory, 2000. Consulté le 2007-04-23
- [47] Staff, « WPA Tournament Table & Equipment Specifications (http://www.wpa-pool.com/index.asp?content=rules_spec) », World Pool-Billiards Association, 2001. Consulté le 2007-03-10
- [48] Joseph H. Senne, « Did Edmund Hillary Climb the Wrong Mountain », dans *Professional Surveyor*, vol. 20, n° 5, 2000, p. 16–21
- [49] David Sharp, « Chimborazo and the old kilogram », dans *The Lancet*, vol. 365, n° 9462, 2005-03-05, p. 831–832 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15752514>), lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)71021-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(05)71021-7))]
- [50] Tall Tales about Highest Peaks (<http://www.abc.net.au/science/k2/moments/s1086384.htm>), Australian Broadcasting Corporation. Consulté le 2008-12-29
- [51] (**en**) Geoff C. Brown et Alan E. Mussett, *The Inaccessible Earth*, Taylor & Francis, 1981 (ISBN 0-04-550028-2), p. 166 Note: After Ronov and Yaroshevsky (1969).
- [52] pourcentage pondéral
- [53] J. W. Morgan, « Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury », dans *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 77, n° 12, 1980, p. 6973–6977 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16592930>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.77.12.6973>)]
- [54] (**en**) « Terre », dans *Encyclopædia Britannica*, 1911 Référence:Encyclopædia Britannica 1911
- [55] (**en**) Toshiro Tanimoto, *Crustal Structure of the Earth*, Washington, DC, American Geophysical Union, 1995, PDF (ISBN 0-87590-851-9)
- [56] Richard A. Kerr, « Earth's Inner Core Is Running a Tad Faster Than the Rest of the Planet », dans *Science*, vol. 309, n° 5739, 2005-09-26, p. 1313 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16123276>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.309.5739.1313a>)]
- [57] T. H. Jordan, « Structural Geology of the Earth's Interior », dans *Proceedings National Academy of Science*, vol. 76, n° 9, 1979, p. 4192–4200 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16592703>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.76.9.4192>)]
- [58] The Interior of the Earth (<http://pubs.usgs.gov/gip/interior/>), USGS, 2001-07-26. Consulté le 2007-03-24

- [59] Peut localement varier entre 5 et 200 km.
- [60] Peut localement varier entre 5 et plus de 70 km.
- [61] ([en](#)) D. L. Turcotte et G. Schubert, *Geodynamics*, Cambridge, England, UK, Cambridge University Press, 2002
(ISBN 978-0-521-66624-4), « 4 », p. 136–137
- [62] *Radioactive potassium may be major heat source in Earth's core* (http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/12/10_heat.shtml), UC Berkeley News (2003-12-10). Consulté le 2007-02-28.
- [63] D. Alfè, « The *ab initio* simulation of the Earth's core », dans *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, vol. 360, n° 1795, 2002, p. 1227–1244 [texte intégral (<http://chianti.geol.ucl.ac.uk/~dario/pubblicazioni/PTRSA2002.pdf>) [\[PDF\]](#) (le 2007-02-28)]
- [64] N Vlaar, « Cooling of the Earth in the Archaean: Consequences of pressure-release melting in a hotter mantle », dans *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 121, n° 1-2, 1994, p. 1 [texte intégral (http://www.geo.lsa.umich.edu/~keken/papers/Vlaar_EPSL94.pdf) [\[PDF\]](#) , lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90028-0](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(94)90028-0))]
- [65] ([en](#)) D. L. Turcotte et G. Schubert, *Geodynamics*, Cambridge, England, UK, Cambridge University Press, 2002
(ISBN 978-0-521-66624-4), « 4 », p. 137
- [66] Henry N. Pollack, « Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set », dans *Reviews of Geophysics*, vol. 31, n° 3, août 1993, p. 267–280 [texte intégral (<http://www.agu.org/journals/ABS/1993/93RG01249.shtml>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1029/93RG01249>)]
- [67] M. A. Richards, « Flood Basalts and Hot-Spot Tracks: Plume Heads and Tails », dans *Science*, vol. 246, n° 4926, 1989, p. 103–107 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17837768>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.246.4926.103>)]
- [68] John G Sclater, « Oceans and Continents: Similarities and Differences in the Mechanisms of Heat Loss », dans *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, n° B12, 1981, p. 11535 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1029/JB086iB12p11535>)]
- [69] SFT and the Earth's Tectonic Plates (<http://www.ees1.lanl.gov/Wohletz/SFT-Tectonics.htm>), Los Alamos National Laboratory, 2005. Consulté le 2007-03-02
- [70] Incluant la plaque somalienne qui est actuellement entrain de se séparer de la plaque africaine. Voir : Jean Chorowicz, « The East African rift system », dans *Journal of African Earth Sciences*, vol. 43, n° 1–3, octobre 2005, p. 379–410 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.019>)]
- [71] Understanding plate motions (<http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>), USGS, 1999-05-05. Consulté le 2007-03-02
- [72] The Structure of the Terrestrial Planets (<http://cseigman.com/text/planets/innerstructure.htm>), *Online Astronomy eText Table of Contents*, cseligman.com, 2008. Consulté le 2008-02-28
- [73] Pacific Plate Motion (<http://www.soest.hawaii.edu/GG/ASK/plate-tectonics2.html>), University of Hawaii, 1999-08-12. Consulté le 2007-03-14
- [74] Age of the Ocean Floor Poster (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/96mgg04.html>), NOAA, 2007-03-07. Consulté le 2007-03-14
- [75] Samuel A. Bowring, « Priscoan (4.00–4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada », dans *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 134, n° 1, 1999, p. 3 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1007/s004100050465>)]
- [76] Plate Tectonic Evolution of the Cocos-Nazca Spreading Center (http://www-odp.tamu.edu/publications/170_SR/chap_07/chap_07.htm), *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, Texas A&M University, 2000-11-20. Consulté le 2007-04-02
- [77] Staff, « GPS Time Series (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>) », NASA JPL. Consulté le 2007-04-02
- [78] Fundamentals of Physical Geography (2nd Edition) (<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7h.html>), PhysicalGeography.net, 2006. Consulté le 2007-03-19
- [79] Terrestrial Impact Cratering and Its Environmental Effects (http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/impact_cratering/intro/), Lunar and Planetary Laboratory. Consulté le 2007-03-22
- [80] <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/>
- [81] Staff, « Layers of the Earth (http://volcano.oregonstate.edu/vwdocs/vwlessons/plate_tectonics/part1.html) », Volcano World. Consulté le 2007-03-11
- [82] Weathering and Sedimentary Rocks (<http://geology.csupomona.edu/drjessey/class/Gsc101/Weathering.html>), Cal Poly Pomona. Consulté le 2007-03-20
- [83] ([en](#)) Imke de Pater et Jack J. Lissauer, *Planetary Sciences*, Cambridge University Press, 2010 (ISBN 0-521-85371-0), p. 154
- [84] ([en](#)) Hans-Rudolf Wenk et Andrei Glebovich Bulakh, *Minerals: their constitution and origin*, Cambridge University Press, 2004 (ISBN 0-521-52958-1), p. 359
- [85] Staff, « World (<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html>) », *The World Factbook*, Central Intelligence Agency, 2008-07-24. Consulté le 2008-08-05
- [86] ([en](#)) FAO Staff, *FAO Production Yearbook 1994*, Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995 (ISBN 92-5-003844-5)
- [87] ([en](#)) H. U. Sverdrup et Richard H. Fleming, *The oceans, their physics, chemistry, and general biology*, Scripps Institution of Oceanography Archives, 1942-01-01 (ISBN 0-13-630350-1)
- [88] Cette mesure fut effectuée par le navire *Kaikō* en mars 1995 et est considérée comme la plus précise. Voir l'article sur Challenger Deep pour plus de détails.
- [89] 7,000 m Class Remotely Operated Vehicle *KAIKO 7000* (<http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/kaiko7000.html>), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). Consulté le 2008-06-07

- [90] Matthew A. Charette, « The Volume of Earth's Ocean », dans *Oceanography*, vol. 23, n° 2, juin 2010, p. 112–114 [texte intégral (http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/issue_pdfs/23_2/23-2_charette.pdf) (le 2010-06-04)]
- [91] World Water Resources and their use Beginning of the 21st century Prepared in the Framework of IHP UNESCO (<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>), State Hydrological Institute, St. Petersburg, 1999. Consulté le 2006-08-10
- [92] (en) Michael J. Kennish, Practical handbook of marine science, CRC Press, 2001 (ISBN 0-8493-2391-6), p. 35
- [93] Salt of the Early Earth (<http://www.astrobio.net/news/article223.html>), NASA Astrobiology Magazine, 2002-06-11. Consulté le 2007-03-14
- [94] Oceanic Processes (<http://replay.waybackmachine.org/20090415082741/http://seis.natsci.csulb.edu/rmorris/oxy/oxy4.html>), NASA Astrobiology Magazine. Consulté le 2007-03-14
- [95] Earth's Big heat Bucket (<http://earthobservatory.nasa.gov/Study/HeatBucket/>), NASA Earth Observatory, 2006-04-24. Consulté le 2007-03-14
- [96] Sea Surface Temperature (<http://science.hq.nasa.gov/oceans/physical/SST.html>), NASA, 2005-06-21. Consulté le 2007-04-21
- [97] Earth Fact Sheet (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>), NASA, 2004-09-01. Consulté le 2010-08-09
- [98] The height of the tropopause (<http://www-das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap01/tropo.html>), *Resources in Atmospheric Sciences*, University of Wyoming, 1997. Consulté le 2006-08-10
- [99] Staff, « Earth's atmosphère (http://www.nasa.gov/audience/forstudents/9-12/features/912_liftoff_atm.html) », NASA, 2003-10-08. Consulté le 2007-03-21
- [100] Weather (http://www.nasa.gov/worldbook/weather_worldbook.html), *World Book Online Reference Center*, NASA/World Book, Inc, 2005. Consulté le 2007-03-17
- [101] The Earth's Climate System (<http://earthguide.ucsd.edu/virtualmuseum/climatechange1/cc1syllabus.shtml>), University of California, San Diego, 2002. Consulté le 2007-03-24
- [102] The Thermohaline Ocean Circulation (http://www.pik-potsdam.de/~stefan/the_fact_sheet.html), Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2003. Consulté le 2007-04-21
- [103] Various, « The Hydrologic Cycle (<http://ww2010.atmos.uiuc.edu/Gh/guides/mtr/hyd/home.xml>) », University of Illinois, 1997-07-21. Consulté le 2007-03-24
- [104] (en) David E. Sadava, H. Craig Heller et Gordon H. Orians, Life, the Science of Biology, MacMillan, 2006 (ISBN 0-7167-7671-5), p. 1114
- [105] Staff, « Climate Zones (http://www.ace.mmu.ac.uk/ea/Climate/Older/Climate_Zones.html) », UK Department for Environment, Food and Rural Affairs. Consulté le 2007-03-24
- [106] Staff, « Stratosphere and Weather; Discovery of the Stratosphere (<http://scienceweek.com/2004/rmps-23.htm>) », Science Week, 2004. Consulté le 2007-03-14
- [107] Presentation of the Karman separation line, used as the boundary separating Aeronautics and Astronautics (<http://www.fai.org/astronautics/100km.asp>), Fédération Aéronautique Internationale, 2004-06-21. Consulté le 2007-04-21
- [108] S. C. Liu, « The Aeronomy of Hydrogen in the atmosphere of the Earth », dans *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 31, n° 4, 1974, p. 1118–1136 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1118:TAOHIT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1118:TAOHIT>2.0.CO;2))]
- [109] David C. Catling, « Biogenic Methane, Hydrogen Escape, and the Irreversible Oxidation of Early Earth », dans *Science*, vol. 293, n° 5531, 2001, p. 839–843 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/293/5531/839>), lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11486082>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1061976>)]
- [110] History of Earth (<http://www.mansfield.ohio-state.edu/~sabedon/biol1010.htm>), Ohio State University, 1997-03-31. Consulté le 2007-03-19
- [111] D. M. Hunten, « Hydrogen loss from the terrestrial planets », dans *Annual review of earth and planetary sciences*, vol. 4, n° 1, 1976, p. 265–292 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ea.04.050176.001405>)]
- [112] (en) Kenneth R. Lang, The Cambridge guide to the solar system, Cambridge University Press, 2003 (ISBN 0-521-81306-9), p. 92
- [113] MHD dynamo theory (<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/lectures/node69.html>), NASA WMAP, 2006-02-16. Consulté le 2007-02-27
- [114] (en) Wallace Hall Campbell, Introduction to Geomagnetic Fields, New York, Cambridge University Press, 2003 (ISBN 0-521-82206-8), p. 57
- [115] Exploration of the Earth's Magnetosphere (<http://www-sopof.gsfc.nasa.gov/Education/wmap.html>), NASA, 2005-07-08. Consulté le 2007-03-21
- [116] Dennis D. McCarthy, « The Physical Basis of the Leap Second », dans *The Astronomical Journal*, vol. 136, n° 5, novembre 2008, p. 1906–1908 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/136/5/1906>)]
- [117] Staff, « Useful Constants (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/constants.html>) », International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2007-08-07. Consulté le 2008-09-23
- [118] Aoki, la meilleure source pour ces chiffres, emploie le terme de "secondes d'UT1" au lieu de "secondes de temps solaire moyen".—S. Aoki, « The new definition of universal time », dans *Astronomy and Astrophysics*, vol. 105, n° 2, 1982, p. 359–361
- [119] (en) P. Kenneth Seidelmann, Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, Mill Valley, CA, University Science Books, 1992 (ISBN 0-935702-68-7), p. 48
- [120] (en) M. Zeilik et S. A. Gregory, Introductory Astronomy & Astrophysics, Saunders College Publishing, 1998 (ISBN 0-03-006228-4), p. 56

- [121] Planetary Fact Sheets (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html>), NASA, 2006-02-10. Consulté le 2008-09-28—See the apparent diameters on the Sun and Moon pages.
- [122] Moon Fact Sheet (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>), NASA, 2004-09-01. Consulté le 2007-03-21
- [123] The Earth as an Object of Astrophysical Interest in the Search for Extrasolar Planets (<http://www.iac.es/folleto/research/preprints/files/PP06024.pdf>), Instituto de Astrofísica de Canarias, 2006. Consulté le 2007-03-21
- [124] Pour la Terre, le rayon de Hill est :

$$R_H = a \left(\frac{m}{3M} \right)^{\frac{1}{3}},$$

où m est la masse de la Terre, a est une unité astronomique , and M est la masse du Soleil. Donc le rayon en unité astronomique est :

$$\left(\frac{1}{3.332,946} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.01.$$

- [125] Astrophysicist team, « Earth's location in the Milky Way (http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/ask_astro/answers/030827a.html) », NASA, 2005-12-01. Consulté le 2008-06-11
- [126] The Lengths of the Seasons (on Earth) (<http://www.sym454.org/seasons/>), University of Toronto, 2008-05-01. Consulté le 2008-11-08
- [127] Animation of precession of moon orbit (http://www.ifa.hawaii.edu/users/lin/ast110-6/applets/precession_of_moon_orbit.htm), Survey of Astronomy AST110-6, University of Hawaii at Manoa, 2006. Consulté le 2010-09-10
- [128] Earth Rotation and Equatorial Coordinates (http://www.cv.nrao.edu/~rfisher/Ephemerides/earth_rot.html), National Radio Astronomy Observatory, 1996-02-05. Consulté le 2007-03-21
- [129] Secular acceleration of the Moon (<http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/SEcat5/secular.html>), NASA, 2007-02-07. Consulté le 2007-04-20
- [130] Using Coral as a Clock (<http://www.skepticfiles.org/origins/coralclo.htm>), Skeptic Tank, 1991-12-16. Consulté le 2007-04-20
- [131] J. Laskar, « A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth », dans *Astronomy and Astrophysics*, vol. 428, n° 1, 2004, p. 261–285 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>)]
- [132] N. Murray, « The role of chaotic resonances in the solar system », dans *Nature*, vol. 410, n° 6830, 2001, p. 773–779 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11298438>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1038/35071000>)]
- [133] R. Canup, « Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation », dans *Nature*, vol. 412, n° 6848, 2001, p. 708–712 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11507633>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1038/35089010>)]
- [134] *Earth's little brother found* (<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/2347663.stm>), BBC News (2002-10-21). Consulté le 2007-03-31.
- [135] {{ {author}}}, {{ {year}}}, « A long-lived horseshoe companion to the Earth (<http://www.arxiv.org/abs/1104.0036>) », v1. See table 2, p. 5.
- [136] UCS Satellite Database (http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html), *Nuclear Weapons & Global Security*, Union of Concerned Scientists, January 31, 2011. Consulté le 2011-05-12
- [137] Staff, « Astrobiology Roadmap (<http://astrobiology.arc.nasa.gov/roadmap/g1.html>) », NASA, Lockheed Martin, 2003. Consulté le 2007-03-10
- [138] (en) Stephen H. Dole, *Habitable Planets for Man*, American Elsevier Publishing Co, 1970 (ISBN 0-444-00092-5)
- [139] Helmut Hillebrand, « On the Generality of the Latitudinal Gradient », dans *American Naturalist*, vol. 163, n° 2, 2004, p. 192–211 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14970922>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/381004>)]
- [140] Staff, « Mineral Genesis: How do minerals form? (http://www.utexas.edu/tmm/npl/mineralogy/mineral_genesis/) », Non-vertebrate Paleontology Laboratory, Texas Memorial Museum, 2006-11-24. Consulté le 2007-04-01
- [141] Peter A. Roma, « Resources of the Sea Floor », dans *Science*, vol. 299, n° 5607, 2003, p. 673–674 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/299/5607/673?ijkey=AHVbRrqUsmdHY&keytype=ref&siteid=sci>), lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12560541>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1080679>) (le 2007-02-04)]
- [142] (en) Patrick J. Walsh, *Oceans and human health: risks and remedies from the seas*, Academic Press, 2008 (ISBN 0123725844) , p. 212
- [143] Staff, « Evidence is now 'unequivocal' that humans are causing global warming – UN report (<http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=21429&Cr=climate&Cr1=change>) », United Nations, 2007-02-02. Consulté le 2007-03-07
- [144] United States Census Bureau, « World POP Clock Projection (<http://www.census.gov/ipc/www/popclockworld.html>) », *United States Census Bureau International Database*, 2008-01-07. Consulté le 2008-01-07
- [145] Staff, « World Population Prospects: The 2006 Revision (<http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/wpp2006.htm>) », United Nations. Consulté le 2007-03-07
- [146] Staff, « Human Population: Fundamentals of Growth: Growth (<http://www.prb.org/Educators/TeachersGuides/HumanPopulation/PopulationGrowth/QuestionAnswer.aspx>) », Population Reference Bureau, 2007. Consulté le 2007-03-31
- [147] M. C. Peel, « Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification », dans *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 4, n° 2, 2007, p. 439–473 [texte intégral (<http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/439/2007/hessd-4-439-2007.html>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.5194/hessd-4-439-2007>) (le 2007-03-31)]
- [148] Staff, « Themes & Issues (<http://www.biodiv.org/programmes/default.shtml>) », Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Consulté le 2007-03-29
- [149] Staff, « Canadian Forces Station (CFS) Alert (<http://www.tscm.com/alert.html>) », Information Management Group, 2006-08-15. Consulté le 2007-03-31

- [150] ([en](#)) Paul Kennedy, *The Rise and Fall of the Great Powers*, Vintage, 1989 (ISBN 0-679-72019-7)
- [151] U.N. Charter Index (<http://www.un.org/aboutun/charter/>), United Nations. Consulté le 2008-12-23
- [152] Staff, « International Law (<http://www.un.org/law/>) », United Nations. Consulté le 2007-03-27
- [153] ([en](#)) Betsy Kuhn, *The race for space: the United States and the Soviet Union compete for the new frontier*, Twenty-First Century Books, 2006 (ISBN 0-8225-5984-6), p. 34
- [154] ([en](#)) Lee Ellis, *Who's who of NASA Astronauts*, Americana Group Publishing, 2004 (ISBN 0-9667961-4-4)
- [155] ([en](#)) David Shayler et Bert Vis, *Russia's Cosmonauts: Inside the Yuri Gagarin Training Center*, Birkhäuser, 2005 (ISBN 0-387-21894-7)
- [156] Astronaut Statistics (<http://www.astronautix.com/articles/aststics.htm>), Encyclopedia Astronautica, 2008-06-30. Consulté le 2008-12-23
- [157] *Nasa's Discovery extends space station* (<http://www.telegraph.co.uk/earth/earthnews/3311903/Nasas-Discovery-extends-space-station.html>), Telegraph (2007-10-28). Consulté le 2009-03-23.
- [158] Earth (<http://nineplanets.org/earth.html>), *The Nine Planets, A Multimedia Tour of the Solar System: one star, eight planets, and more*, July 16, 2006. Consulté le 2010-03-09
- [159] S. I. Dutch, « Religion as belief versus religion as fact », dans *Journal of Geoscience Education*, vol. 50, n° 2, 2002, p. 137–144 [texte intégral (http://nagt.org/files/nagt/jge/abstracts/Dutch_v50n2p137.pdf) [\[PDF\]](#) (le 2008-04-28)]
- [160] ([en](#)) Taner Edis, *A World Designed by God: Science and Creationism in Contemporary Islam*, Amherst: Prometheus, 2003, PDF (ISBN 1-59102-064-6)
- [161] M. R. Ross, « Who Believes What? Clearing up Confusion over Intelligent Design and Young-Earth Creationism », dans *Journal of Geoscience Education*, vol. 53, n° 3, 2005, p. 319 [texte intégral (http://www.nagt.org/files/nagt/jge/abstracts/Ross_v53n3p319.pdf) [\[PDF\]](#) (le 2008-04-28)]
- [162] R. T. Pennock, « Creationism and intelligent design », dans *Annual Review of Genomics Human Genetics*, vol. 4, n° 1, 2003, p. 143–63 [lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14527300>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.genom.4.070802.110400>)]
- [163] ([en](#)) National Academy of Sciences, Institute of Medicine, Science, Evolution, and Creationism, Washington, D.C, National Academies Press, 2008 (ISBN 0-309-10586-2)
- [164] A. Colburn,, « Clergy views on evolution, creationism, science, and religion », dans *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 43, n° 4, 2006, p. 419–442 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1002/tea.20109>)]
- [165] ([en](#)) Roland Mushat Frye, *Is God a Creationist? The Religious Case Against Creation-Science*, Scribner's, 1983 (ISBN 0-684-17993-8)
- [166] S. J. Gould, « Nonoverlapping magisteria », dans *Natural History*, vol. 106, n° 2, 1997, p. 16–22 [texte intégral (http://www.jbburnett.com/resources/gould_nonoverlapping.pdf) [\[PDF\]](#) (le 2008-04-28)]
- [167] The Myth of the Flat Earth (<http://www.asa3.org/ASA/topics/history/1997Russell.html>), American Scientific Affiliation. Consulté le 2007-03-14; but see also Cosmas Indicopleustes.
- [168] Archaeogeodesy, a Key to Prehistory (<http://www.jqjacobs.net/astro/aegeo.html>), 1998-02-01. Consulté le 2007-04-21
- [169] ([en](#)) R. Buckminster Fuller, *Operating Manual for Spaceship Earth*, New York, E.P. Dutton & Co, 1963 (ISBN 0-525-47433-1)
- [170] ([en](#)) James E. Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford, Oxford University Press, 1979 (ISBN 0-19-286030-5)
- [171] For example: ([en](#)) Anthony J. McMichael, *Planetary Overload: Global Environmental Change and the Health of the Human Species*, Cambridge University Press, 1993 (ISBN 0-521-45759-9)

References

- ([en](#)) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l'article de Wikipédia en anglais intitulé « Earth (<http://en.wikipedia.org/wiki/En:earth?oldid=cur>) » (voir la liste des auteurs (<http://en.wikipedia.org/wiki/En:earth?action=history>))

Mars (planète)

Mars ♂



Mars vue par les sondes Viking en 1980.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	227936637 km (1.52366231 UA)
Aphélie	249228730 km (1.66599116 UA)
Périhélie	206644545 km (1.38133346 UA)
Circonférence orbitale	~1430000000 km (9.553 UA)
Excentricité	0.09341233
Période de révolution	686.9601 d (1,8808 a)
Période synodique	779.9643 d
Vitesse orbitale moyenne	24.077 km/s
Vitesse orbitale maximale	26.499 km/s
Vitesse orbitale minimale	21.972 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	1.85061°
Nœud ascendant	49.578°
Argument du périhélie	286.46230°
Satellites connus	2 (Phobos, Déimos)
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	3 396.2 ± 0.1 km (0.533 Terre)
Rayon polaire	3 376.2 ± 0.1 km (0.531 Terre)
Rayon moyen volumétrique	3389.5 km (0.532 Terre)
Aplatissement	0.00589 ± 0.00015
Périmètre équatorial	21344 km (0.5326 Terre)

Superficie	144798500 km ² (0.284 Terre)
Volume	163.18×10^9 km ³ (0.151 Terre)
Masse	641.85×10^{21} kg (0.107 Terre)
Masse volumique globale	3933.5 ± 0.4 kg/m ³
Gravité de surface	3.711 m/s ² (0.376 g)
Vitesse de libération	5.027 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	1.025957 d (24,622962 h)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	868.220 km/h
Inclinaison de l'axe	25.19°
Albédo géométrique visuel	0.15
Albédo de Bond	0.25
Irradiance solaire	589.2 W/m ² (0.431 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	210.1 K (-62.9 °C)
Température de surface :	
Maximum :	270 K (-3 °C)
Moyenne :	210 K (-63 °C)
Minimum :	140 K (-133 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	636 (30 à 1155) Pa
Masse volumique au sol	0.020 kg/m ³
Masse totale	25×10^{15} kg
Hauteur d'échelle	11.1 km
Masse molaire moyenne	43.34 g/mol
Dioxyde de carbone CO₂	95,32 %
Diazote N₂	2,7 %
Argon Ar	1,6 %
Dioxygène O₂	0,13 %
Monoxyde de carbone CO	0,07 %
Vapeur d'eau H₂O	0,03 %
Monoxyde d'azote NO	130 ppm
Hydrogène moléculaire H₂	15 ppm
Néon Ne	2,5 ppm

Eau lourde HDO	850 ppb
Krypton Kr	300 ppb
Méthanal HCHO	130 ppb
Xénon Xe	80 ppb
Ozone O₃	30 ppb
Peroxyde d'hydrogène H₂O₂	18 ppb
Méthane CH₄	10,5 ppb
Histoire	
Divinité babylonienne	Nergal
Divinité grecque	Ἄρης
Nom chinois (élément associé)	Huǒxīng 火星 (feu)

Mars est la quatrième planète par ordre de distance croissante au Soleil et la deuxième par masse et par taille croissantes sur les huit planètes que compte le Système solaire. Son éloignement au Soleil est compris entre 1.381 et 1.666 UA, avec une période orbitale de 686.71 jours.

C'est une planète tellurique, comme le sont Mercure, Vénus et la Terre, environ dix fois moins massive que la Terre mais dix fois plus massive que la Lune. Sa topographie présente des analogies aussi bien avec la Lune, à travers ses cratères et ses bassins d'impact, qu'avec la Terre, avec des formations d'origine tectonique et climatique telles que des volcans, des rifts, des vallées, des mesas, des champs de dunes et des calottes polaires. La plus grande montagne du Système solaire, Olympus Mons (qui est aussi un volcan bouclier), et le plus grand canyon, Valles Marineris, se trouvent sur Mars.

Mars a aujourd'hui perdu la presque totalité de son activité géologique interne, et seuls des événements mineurs surviendraient encore épisodiquement à sa surface, tels que des glissements de terrain, sans doute des geysers de CO₂ dans les régions polaires, peut-être des séismes, voire de rares éruptions volcaniques sous forme de petites coulées de lave^[1].

La période de rotation de Mars est du même ordre que celle de la Terre, et son obliquité lui confère un cycle des saisons similaire à celui que nous connaissons ; ces saisons sont toutefois marquées par une excentricité orbitale cinq fois et demie plus élevée que celle de la Terre, d'où une asymétrie saisonnière sensiblement plus prononcée entre les deux hémisphères.

Mars peut être observée à l'œil nu, avec un éclat bien plus faible que celui de Vénus mais qui peut, lors d'oppositions rapprochées, dépasser l'éclat maximum de Jupiter, atteignant une magnitude apparente de -2,91^[2], tandis que son diamètre apparent varie de 25,1 à 3,5 secondes d'arc selon que sa distance à la Terre varie de 55,7 à 401,3 millions de kilomètres. Mars a toujours été caractérisée visuellement par sa couleur rouge, due à l'abondance de l'hématite amorphe — oxyde de fer(III) — à sa surface. C'est ce qui l'a fait associer à la guerre depuis l'Antiquité, d'où son nom en Occident d'après le dieu Mars de la guerre dans la mythologie romaine, assimilé au dieu Arès de la mythologie grecque. En français, Mars est souvent surnommée « la planète rouge » en raison de cette couleur particulière.

Avant le survol de Mars par Mariner 4 en 1965, on pensait qu'il s'y trouvait de l'eau liquide en surface et que des formes de vie similaires à celles existant sur Terre pouvaient s'y être développées, thème très fécond en science fiction. Les variations saisonnières d'albédo à la surface de la planète étaient attribuées à de la végétation, tandis que des formations rectilignes perçues dans les lunettes astronomiques et les télescopes de l'époque étaient interprétées, notamment par l'astronome amateur américain Percival Lowell, comme des canaux d'irrigation traversant des étendues désertiques avec de l'eau issue des calottes polaires. Toutes ces spéculations ont été balayées par les sondes spatiales qui ont étudié Mars : dès 1965, Mariner 4 permit de découvrir une planète dépourvue de champ magnétique global, avec une surface craterisée rappelant celle de la Lune, et une atmosphère ténue.

Depuis lors, Mars fait l'objet de programmes d'exploration plus ambitieux que pour aucun autre objet du Système solaire : de tous les astres que nous connaissons, c'est en effet celui qui présente l'environnement ayant le plus de similitudes avec celui de notre planète. Cette exploration intensive nous a apporté une bien meilleure compréhension de l'histoire géologique martienne, révélant notamment l'existence d'une époque reculée — le Noachien — où les conditions en surface devaient être assez similaires à celles de la Terre à la même époque, avec la présence de grandes quantités d'eau liquide ; la sonde Phoenix a ainsi découvert en été 2008 de la glace d'eau à une faible profondeur dans le sol de Vastitas Borealis^[3].

Enfin, Mars possède deux petits satellites naturels, Phobos et Déimos.

Caractéristiques physiques et orbitales

Quatrième planète du système solaire par ordre de distance croissante en partant du Soleil, Mars est une planète tellurique moitié moins grande que la Terre et près de dix fois moins massive, dont la superficie est un peu inférieure à celle des terres émergées de notre planète (144,8 contre 148,9 millions de km²). La gravité y est le tiers de celle de la Terre, tandis que la durée du jour solaire martien — appelé *sol* — excède celle du jour terrestre d'un peu moins de 40 minutes. Mars est une fois et demie plus éloigné du Soleil que la Terre, sur une orbite sensiblement plus elliptique, et reçoit, selon sa position sur cette orbite, entre deux et trois fois moins d'énergie solaire que notre planète. L'atmosphère de Mars étant de surcroît plus de 150 fois moins dense que la nôtre et ne générant par conséquent qu'un effet de serre très limité, ce faible rayonnement solaire explique que la température moyenne sur Mars soit inférieure à -60 °C.

Le tableau ci-dessous permet de comparer les valeurs de quelques paramètres physiques entre Mars et la Terre :



La Terre et Mars à l'échelle.

Propriété	Valeur martienne	Valeur terrestre (Mars % Terre)
Rayon équatorial	3396.2 ± 0.1 km	6378.1 km (53,3 %)
Rayon polaire	3376.2 ± 0.1 km	6356.8 km (53,1 %)
Rayon moyen volumétrique	3389,5 km	6371,0 km (53,2 %)
Surface	144798500 km ²	510072000 km ² (28,4 %)
Volume	1.6318×10^{11} km ³	1.0832073×10^{12} km ³ (15,1 %)
Masse	6.4185×10^{23} kg	5.9736×10^{24} kg (10,7 %)
Masse volumique moyenne	3933.5 ± 0.4 kg/m ³	5515 kg/m ³ (71,3 %)
Gravité de surface à l'équateur	3,711 m/s ²	9,780327 m/s ² (37,9 %)
Vitesse de libération	5027 m/s	11186 m/s (44,9 %)
Période de rotation sidérale	1.02595675 d ≈ 88642.663 s	86164.098903691 s (102,9 %)
Durée du jour solaire	$1 \text{ sol} \approx 1.02749125$ d ≈ 88775.244 s	1 d = 86400 s (102,75 %)
Inclinaison de l'axe	25,19°	23,439281°

Albédo de Bond	0.25	0.29
Albédo géométrique visuel	0.15	0.367
Demi-grand axe de l'orbite	227939100 km	149597887.5 km (152,4 %)
Excentricité orbitale	0.093315	0.016710219 (558,4 %)
Période orbitale	668.5991 <i>sols</i> ≈ 686.971 d	365.256366 d (188,1 %)
Aphélie	249209300 km	152097701 km (163,8 %)
Périhélie	206669000 km	147098074 km (140,5 %)
Rayonnement solaire	492 à 715 W/m ²	1321 à 1413 W/m ²
Température moyenne au sol	-63 °C ≈ 210 K	14 °C ≈ 287 K
Température la plus élevée	-3 °C ≈ 270 K	58 °C ≈ 331 K
Température la plus basse	-133 °C ≈ 140 K	-89 °C ≈ 184 K

Mars étant environ dix fois moins massive que la Terre mais dix fois plus massive que la Lune, sa surface présente des similitudes avec ces deux objets. On y trouve des terrains criblés de cratères d'impact rappelant ceux de la Lune, mais aussi des formations d'origine tectonique et climatique comme sur Terre, notamment des volcans, des rifts, des vallées, des mesas, des champs de dunes et des calottes polaires. La fine atmosphère martienne, dans laquelle circulent des nuages localement abondants, est le siège d'une météorologie particulière, dominée par des tempêtes de poussières qui obscurcissent parfois la planète tout entière. Son excentricité orbitale cinq fois plus marquée que celle de la Terre est à l'origine d'une asymétrie saisonnière très sensible sur Mars : dans l'hémisphère nord, la saison la plus longue est le printemps (198,6 jours), qui excède la plus courte (l'automne, 146,6 jours) de 35,5 % ; sur Terre, l'été, la saison la plus longue, n'excède la durée de l'hiver que de 5 %. Cette particularité explique également que la superficie de la calotte polaire australe se réduise nettement plus en été que celle de la calotte polaire boréale.

La distance moyenne de Mars au Soleil est d'environ 227.937 millions de kilomètres, soit 1.5237 UA. Cette distance varie entre un périhélie de 1.381 UA et un aphélie de 1.666 UA, correspondant à une excentricité orbitale de 0,093315. La période orbitale de Mars est de 686,96 jours terrestres, soit 1.8808 années terrestres, et le jour solaire y dure 24 h 39 min 35,244 s.

Variations de l'excentricité

Des sept autres planètes du système solaire, seule Mercure possède une excentricité plus élevée que celle de Mars. Toutefois, par le passé, l'orbite de Mars aurait été plus circulaire qu'aujourd'hui, avec une excentricité d'environ 0,002 il y a 1,35 millions d'années^[4]. L'excentricité de Mars évoluerait selon deux cycles superposés, le premier d'une période de 96000 ans et le second d'une période de 2200000 ans^[5], de sorte qu'elle devrait encore croître au cours des 25000 prochaines années^[6].

Variations de l'obliquité

L'obliquité désigne l'inclinaison de l'axe de rotation d'une planète sur son plan orbital autour du Soleil. L'obliquité de Mars est actuellement de 25,19° mais, comme celle de la Terre, connaît des variations périodiques dues aux interactions gravitationnelles avec les autres planètes du système solaire. Ces variations cycliques ont été évaluées par simulations informatiques dès les années 1970^[7] comme ayant une périodicité de 120000 ans s'inscrivant elle-même dans un super-cycle de 1,2 millions d'années avec pour valeurs extrêmes 14,9° et 35,5°. Un cycle encore plus long se superposerait à cet ensemble, de l'ordre de 10 millions d'années, dû à une résonance orbitale entre la rotation de la planète et son orbite autour du Soleil, susceptible d'avoir porté à 40° l'obliquité de Mars il y a seulement 5 millions d'années^[8]. Des simulations plus récentes, réalisées au début des années 1990, ont de surcroît révélé des variations chaotiques de l'obliquité martienne, dont les valeurs possibles s'inscriraient de 11° à 49°^[9].

Encore affinées à l'aide des données recueillies par les sondes martiennes des années 1990 et 2000, ces simulations numériques ont mis en évidence la prépondérance des variations chaotiques de l'obliquité martienne dès qu'on remonte au-delà de quelques millions d'années, ce qui rend aléatoire toute prédiction de la valeur de l'obliquité au-delà de quelques dizaines de millions d'années dans le passé. Une équipe européenne a ainsi évalué à 63 % la probabilité que l'obliquité de Mars ait atteint au moins 60° au cours du dernier milliard d'années, et à plus de 89 % au cours des trois derniers milliards d'années^[10].

Ces variations d'obliquité induisent des variations climatiques très significatives à la surface de la planète, affectant notamment la répartition de la glace d'eau en fonction des latitudes. Ainsi, la glace tend à s'accumuler aux pôles en période de faible obliquité comme actuellement^[11], tandis qu'elle tend à migrer aux basses latitudes en période de forte obliquité^[12]. Les données recueillies depuis le début du siècle tendent à montrer que Mars sortirait en ce moment même d'un « âge glaciaire », notamment en raison de l'observation de structures glaciaires (glaciers, fragments de banquise et pergélisol notamment) jusqu'à des latitudes aussi basses que 30° et qui semblent connaître une érosion active^[13].

Dans la mesure où la pression atmosphérique moyenne au sol dépend de la quantité de dioxyde de carbone gelé aux pôles, les variations d'obliquité ont également un impact sur la masse totale de l'atmosphère de Mars, la pression atmosphérique moyenne pouvant même tomber, en période de faible obliquité, à seulement 30 Pa (à peine 5 % de la pression atmosphérique standard actuelle) et induire un réchauffement de 20 à 30 K du sous-sol martien en réduisant la conductivité thermique du régolithe dont la taille moyenne des pores serait comparable au libre parcours moyen des molécules de gaz dans une atmosphère aussi raréfiée^[14], ce qui bloquerait la dissipation du flux « aréothermique » — c'est-à-dire du flux géothermique martien. Un tel réchauffement pourrait expliquer de nombreuses formations géologiques impliquant un sous-sol chargé d'eau liquide sans qu'il soit nécessaire d'invoquer un accroissement passé de la pression atmosphérique ou du flux thermique de la planète.

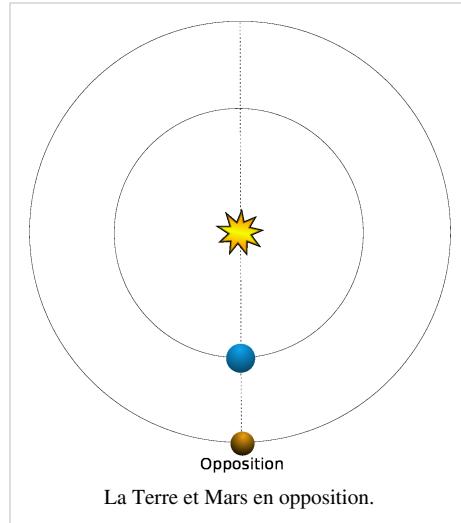
Oppositions Terre-Mars

Mars est la planète extérieure la plus proche de la Terre. La distance qui sépare les deux astres est la plus faible lorsque Mars est en opposition, c'est-à-dire lorsque la Terre s'intercale entre Mars et le Soleil. Toutefois, compte tenu de l'inclinaison et de l'excentricité orbitales, le moment précis où Mars est le plus proche de la Terre peut différer de quelques jours du moment de l'opposition astronomique. Ainsi, l'opposition du 28 août 2003 avait lieu précisément à 17 h 58 min 49 s UTC tandis que la plus grande proximité entre les deux planètes avait eu lieu la veille, le 27 août 2003 à 09 h 51 min 14 s UTC (données IMCCE^[15]).

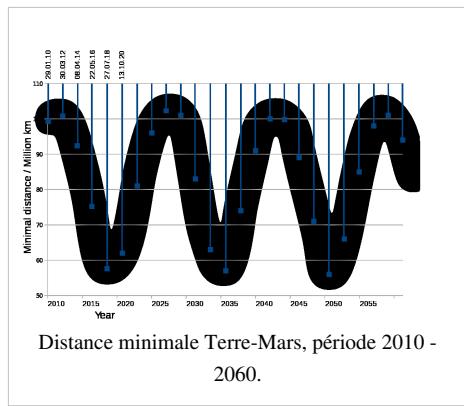
Ces oppositions surviennent approximativement tous les 780 jours, la dernière en date s'étant produite le 29 janvier 2010^[16].

Compte tenu de l'excentricité respective des orbites de Mars et de la Terre, la distance Terre-Mars n'est pas constante à chaque opposition. L'excentricité de Mars étant plus importante que celle de la Terre, c'est lorsque Mars est au périhélie que le rapprochement est le plus favorable. Ainsi, le 27 août 2003, Mars était distante de la Terre de 55.758 millions de kilomètres, soit 0.3727 UA.

De tels rapprochements favorables se produisent tous les quinze ans environ, après sept oppositions. La plus grande proximité entre Mars et la Terre depuis 59618 ans a été atteinte le 27 août 2003 à 09 h 51 min 14 s UTC, avec une distance de seulement 55.758 millions de kilomètres^[15]. Un rapprochement encore un peu plus étroit est prévu le 28 août 2287, avec une distance de 55.688 millions de kilomètres.



La Terre et Mars en opposition.



Distances minimales Terre-Mars

Date	Distance (ua)	Distance (Mkm)	Diamètre apparent
27 Août 2003	0,372719	55,758	25,13 "
15 août 2050	0,374041	55,957	25,04 "
30 août 2082	0,373564	55,884	25,08 "
19 août 2129	0,373276	55,841	25,10 "
24 août 2208	0,372794	55,769	25,13 "
28 août 2287	0,372254	55,688	25,16 "

En tenant compte des influences gravitationnelles des autres planètes sur l'excentricité orbitale de Mars qui continuera à croître légèrement au cours des 25000 prochaines années, il est possible de prédire des rapprochements encore plus étroits : 55.652 millions de kilomètres le 3 septembre 2650 et 55.651 millions de kilomètres le 8 septembre 2729^[6].



Mosaïque d'images en quasi vraies couleurs donnant une vue panoramique du cratère Victoria, large d'environ 730 m, obtenues en automne 2006 par le rover Opportunity sur Meridiani Planum^[17].

Géographie de Mars

L'étude de la géographie martienne remonte au début des années 1970 avec la sonde Mariner 9, qui a permis de cartographier la presque totalité de la surface martienne avec une résolution excellente pour l'époque. Ce sont les données recueillies à cette occasion sur lesquelles s'est notamment fondé le programme Viking pour le développement de ses missions Viking 1 et Viking 2. Notre connaissance de la topographie martienne a fait un bond spectaculaire à la fin des années 1990 grâce à l'instrument MOLA — *Mars Orbiter Laser Altimeter* — de la sonde Mars Global Surveyor, qui nous a permis d'accéder à des relevés altimétriques d'une très grande précision sur la totalité de la surface martienne.

Référentiels

Sur Mars, le **méridien 0** est celui qui passe par le centre du cratère Airy-0^[18].

Dans le **système planétocentrique**, développé à partir des données acquises par le MOLA de MGS et aujourd'hui le plus utilisé, les coordonnées géographiques sont exprimées sur Mars dans le système décimal — et non dans le système sexagésimal utilisé sur Terre — avec les longitudes croissant vers l'est de 0 à 360° E, les angles étant calculés à partir du plan équatorial pour les latitudes et à partir du méridien 0 pour les longitudes.

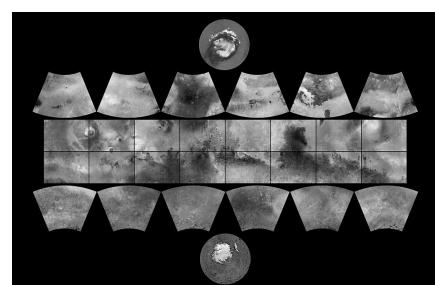
Dans le **système planétographique**, développé à partir des données recueillies par Mariner 9 et aujourd'hui de moins en moins utilisé, les coordonnées sont exprimées de façon décimale avec les longitudes croissant vers l'ouest de 0 à 360° W en fonction d'un maillage projeté sur la surface de la planète. En pratique, les longitudes planétographiques et planétocentriques se déduisent facilement les unes des autres, en revanche les latitudes planétographiques peuvent être supérieures aux latitudes planétocentriques de plus d'un tiers de degré en valeur absolue.

Le **niveau de référence** des altitudes martiennes a, quant à lui, été défini arbitrairement comme l'altitude à laquelle la pression atmosphérique moyenne est de 610 Pa^[19]. Ceci permet de définir formellement une surface équipotentielle globale à partir de laquelle il est possible de calculer les altitudes en chaque point de la planète, bien qu'en pratique la détermination de cette surface soit assez imprécise en raison des importantes fluctuations saisonnières de la pression atmosphérique résultant du fait que le dioxyde de carbone, constituant majoritaire de l'atmosphère de Mars, est en équilibre avec le dioxyde de carbone gelé aux pôles, état d'équilibre qui varie tout au long de l'année au gré des saisons.

Quadrangles

Pour en structurer l'étude, la surface de Mars a été divisée par l'USGS en 30 régions de taille semblable, 15 par hémisphère, dont la topographie établie par le MOLA est disponible sur Internet sous forme de cartes au 1 / 5000000^[20]. Chacun de ces quadrangles a été nommé d'après l'un de ses reliefs caractéristiques, mais, dans la littérature, ils sont souvent référencés par leur numéro, préfixé du code « MC » signifiant *Mars Chart*.

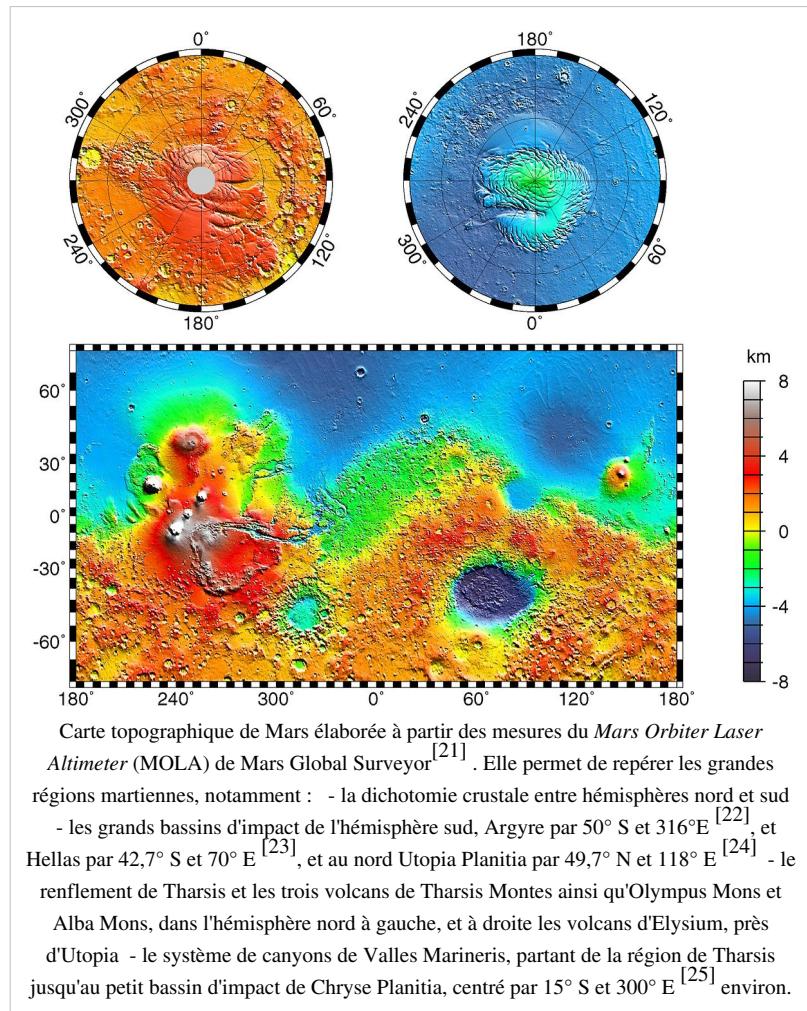
Cette division en quadrangles est une méthode générale de cartographie, d'abord développée sur Terre à des échelles variables, puis étendue progressivement aux planètes du Système solaire pour lesquelles les données géographiques sont suffisantes pour devoir être structurées. Vénus a ainsi été divisée en huit quadrangles au 1 / 10000000 et en 62 quadrangles au 1 / 5000000.



Carte de Mars en 30 quadrangles (par MGS).

Traits notables

Le trait le plus frappant de la géographie martienne est sa fameuse « dichotomie crustale », c'est-à-dire l'opposition très nette entre d'une part un hémisphère nord constitué d'une vaste plaine lisse à une altitude d'une demi-douzaine de kilomètres sous le niveau de référence, et d'autre part un hémisphère sud formé de plateaux souvent élevés et très cratérisés au relief pouvant être localement assez accidenté. Ces deux domaines géographiques sont séparés par une limite très nette, légèrement oblique sur l'équateur. Deux régions volcaniques proches l'une de l'autre se trouvent précisément sur cette frontière géologique, dont l'une est un immense soulèvement de 5500 km de diamètre, le renflement de Tharsis, dont la moitié nord-ouest regroupe une douzaine de volcans majeurs parmi lesquels Olympus Mons, tandis que la région méridionale se compose d'un vaste ensemble de hauts plateaux volcaniques tels que Syria Planum et Solis Planum, et la partie orientale est marquée par le système de canyons de Valles Marineris prolongeant par l'est le réseau de Noctis Labyrinthus. Deux grands bassins d'impact sont nettement visibles dans l'hémisphère sud, Argyre Planitia et surtout Hellas Planitia, au fond duquel a été relevée la plus grande profondeur à la surface de Mars, avec une altitude de -8200 m par rapport au niveau de référence. Le point le plus élevé se trouve quant à lui au sommet d'Olympus Mons, à 21229 m au-dessus du niveau de référence ; les cinq montagnes les plus hautes du Système solaire sont d'ailleurs cinq volcans martiens, dont quatre se trouvent sur le renflement de Tharsis et le cinquième dans la seconde région volcanique de Mars, Elysium Planitia.



Origine de la dichotomie martienne

Sans entrer dans les détails (se reporter pour cela à l'article détaillé), on retiendra ici que deux types de scénarios ont été proposés pour rendre compte de cette situation^[26]. Les premiers reposent sur la dynamique interne de la planète, les mouvements de convection du manteau et une ébauche de tectonique des plaques, à la manière de la formation des supercontinents terrestres à l'aube de l'histoire de notre planète. Les seconds reposent sur un ou plusieurs grands impacts entraînant la fusion de l'écorce dans l'hémisphère nord. L'étude des bassins d'impact enfouis sous la surface a par ailleurs permis d'établir que la dichotomie crustale martienne remonte à plus de quatre milliards d'années avant le présent^[27], et est donc une structure héritée des premiers âges de la planète. Certaines formations plus récentes à la limite entre les deux domaines suggèrent de surcroît une relaxation isostatique des hautes terres du sud après le comblement volcanique de la dépression de l'hémisphère nord, ce qui plaide également pour la grande ancienneté de

cette dichotomie.



Coucher de soleil vu du cratère Gusev par le rover Spirit le 19 mai 2005^[28] en vraies couleurs restituées à travers des filtres à 750, 530 et 430 nm. Le diamètre apparent du Soleil vu de Mars n'est que des deux tiers de celui vu de la Terre. La lueur de crépuscule se prolonge deux bonnes heures après que le soleil a disparu derrière l'horizon en raison de la grande quantité de poussières présentes jusqu'à une altitude élevée dans l'atmosphère de Mars.

Atmosphère, climats et radiations

Atmosphère

La pression et la composition exactes de l'atmosphère de Mars sont connues depuis moins d'un demi-siècle et remontent aux premières analyses *in situ* effectuées en 1976 par les « atterriseurs » des sondes Viking 1 et Viking 2^[29]. Le premier observateur à avoir supposé l'existence d'une atmosphère autour de Mars est l'astronome (et compositeur) germano-britannique William Herschel qui, en 1783, avait attribué à la météorologie martienne certains changements observés à la surface de la planète, notamment des points blancs interprétés comme des nuages. Cette hypothèse avait été contestée au début du siècle suivant avec les progrès des télescopes à miroir, qui fournissaient des images de meilleure qualité semblant montrer au contraire une surface plus statique, jusqu'à ce que surgisse à la fin du XIX^e siècle le débat sur la réalité des canaux de Mars observés en Italie et popularisés par l'astronome amateur américain Percival Lowell. Un autre astronome américain (de profession, cette fois) et pionnier de la spectroscopie, William Wallace Campbell, demeurait sceptique quant à l'existence d'une atmosphère importante autour de Mars, et annonça à l'occasion de l'opposition de 1909 n'avoir pu détecter aucune trace de vapeur d'eau dans cette éventuelle atmosphère — son compatriote Vesto Slipher, qui soutenait la théorie des canaux, annonça quant à lui le contraire. En se fondant sur les variations d'albédo du disque martien, Percival Lowell estima en 1908 la pression atmosphérique au sol à 87 mbar (8700 Pa), valeur qui demeurera plus ou moins la référence jusqu'aux mesures réalisées par la sonde Mariner 4 en 1965. La difficulté à analyser la composition de l'atmosphère martienne par spectroscopie était alors généralement attribuée à la présence d'azote, difficile à caractériser par cette technique, et c'est ainsi que l'astronome français Gérard de Vaucouleurs, qui travaillait alors en Angleterre, émit en 1950 l'idée que l'atmosphère martienne était constituée de 98,5 % d'azote, 1,2 % d'argon et 0,25 % de dioxyde de carbone. À l'observatoire McDonald du Texas, l'astronome américain d'origine néerlandaise Gerard Kuiper établit en 1952 à partir du spectre infrarouge de Mars que le dioxyde de carbone était au moins deux fois plus abondant dans l'atmosphère martienne que dans l'atmosphère terrestre, l'essentiel de cette atmosphère devant être, comme la nôtre, constituée selon lui d'azote^[29].



Atmosphère de Mars au-dessus de Noachis Terra à l'horizon, vue depuis une sonde Viking survolant Argyre Planitia en 1976. Les couleurs ont été renforcées pour souligner l'atmosphère.

Propriétés physiques et chimiques

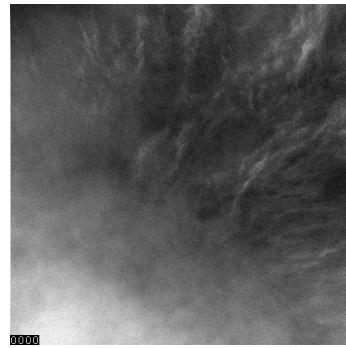
On sait aujourd'hui que Mars possède une atmosphère ténue dont la pression moyenne au niveau de référence martien est par définition de 610 Pa, avec une température moyenne de 210 K (-63 °C). Elle est composée principalement de dioxyde de carbone CO₂ (95,32 %), d'azote N₂ (2,7 %) et d'argon Ar (1,6 %). Viennent ensuite l'oxygène O₂ (0,13 %), le monoxyde de carbone CO (0,07 %), la vapeur d'eau H₂O (0,03 %) et le monoxyde d'azote NO (0,013 %)^[30]. Divers autres gaz sont présents à l'état de traces, à des concentrations ne dépassant jamais quelques parties par million, notamment le néon Ne, le krypton Kr, le méthanal HCHO, le xénon Xe, l'ozone O₃ et le méthane CH₄, la concentration atmosphérique moyenne de ce dernier étant de l'ordre de 10.5 ppb. La masse molaire moyenne des constituants gazeux de l'atmosphère de Mars serait de 43.34 g/mol^[31].

Compte tenu de la faible gravité à la surface de Mars, la hauteur d'échelle de cette atmosphère est de 11 km, plus d'une fois et demie celle de l'atmosphère terrestre, qui n'est que de 7 km^[32]. Les pressions extrêmes relevées à la surface de la planète vont d'à peine 30 Pa au sommet d'Olympus Mons jusqu'à 1155 Pa au point le plus bas du bassin d'impact d'Hellas Planitia^[33].

Nuages



Nuages de glace d'eau dans le ciel de Vastitas Borealis vus par la sonde Phoenix le 29 août 2008.



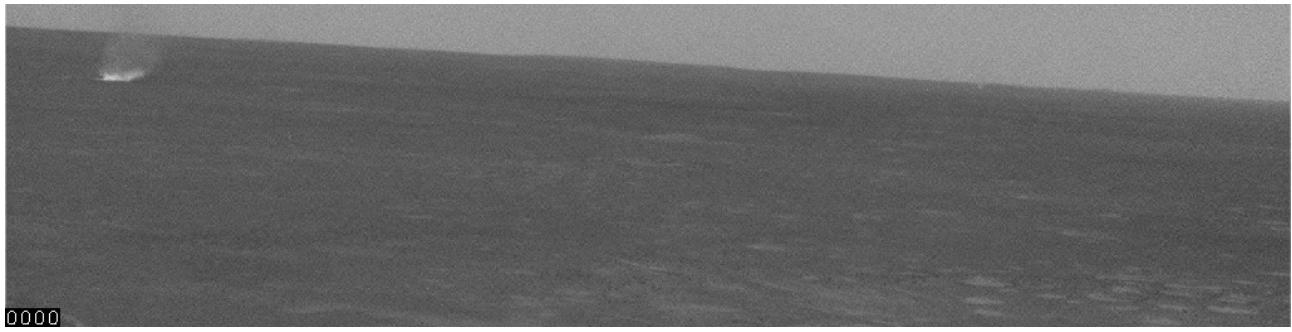
Nuages vus la même année dans le ciel de Meridiani Planum par le rover Opportunity^[34].

L'eau pure ne peut exister à l'état liquide qu'en-dessous du niveau de référence martien, qui correspond à peu près à la pression du point triple de l'eau, soit 611.73 Pa : à ce niveau, pour peu que la température soit suffisante (0 °C pour de l'eau pure, mais seulement 250 K (-23 °C) pour de nombreuses solutions salines, voire 210 K (-63 °C) pour certains mélanges^[35] de solutions d'acide sulfurique H₂SO₄), l'eau peut se trouver sous ses trois états physiques. Au-dessus de ce niveau, en revanche, et notamment dans l'atmosphère, elle ne peut exister qu'à l'état de vapeur d'eau, qui se condense parfois en glace pour former des nuages de cristaux d'H₂O d'apparence très semblable à celle de nos cirrus^[36], typiquement à une altitude de 10 à 20 km ; on observe de tels nuages par exemples sur les flancs des grands volcans du renflement de Tharsis ou d'Elysium Planitia : visibles au télescope depuis la Terre dès le XIX^e siècle, les nuages accrochés au sommet d'Olympus Mons avaient été pris pour de la neige, d'où le nom *Nix Olympica* qui avait été donné à cette région par Giovanni Schiaparelli.

Mais le dioxyde de carbone forme lui aussi des nuages, constitués de cristaux de CO₂ dépassant 1 µm de diamètre, à des altitudes plus élevées que ceux constitués de glace d'eau ; l'instrument OMEGA de la sonde Mars Express a déterminé en 2007 que ces nuages sont susceptibles d'absorber jusqu'à 40 % du rayonnement solaire^[37], provoquant une baisse de 10 K de la température sous ces nuages, ce qui n'est pas sans conséquence sur le climat martien, notamment sur son régime des vents.

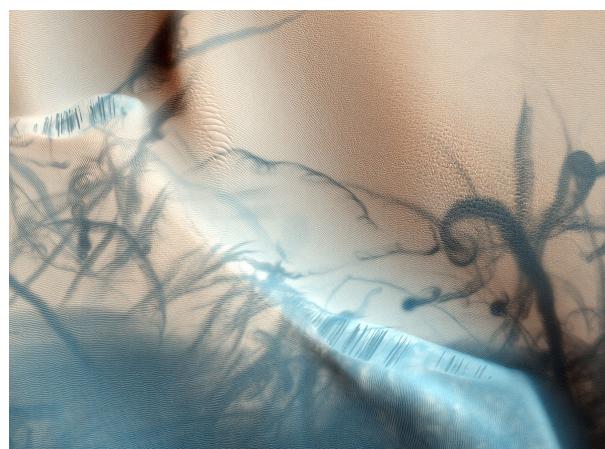
Poussières

La caractéristique particulière de l'atmosphère martienne est d'être constamment chargée en poussières, dont les grains ont un diamètre moyen de l'ordre de 1.5 µm responsable de la teinte ocre du ciel martien^[38] .^[39] Cette poussière est continuellement injectée dans l'atmosphère par des tourbillons de poussière^[40] (couramment désignés de leur terme anglophone *dust devils*), comme celui observé ci-dessous par le rover Spirit le 12 mars 2005^[41] ; les prises de vue durent en tout 575 s (ce qu'indique le compteur de l'angle inférieur gauche), et trois autres tourbillons sont brièvement visibles au loin dans la moitié droite de la vue, au début de la séquence, puis près du tourbillon principal, puis à la toute fin :



De tels tourbillons sont loin d'être anecdotiques, et tant leur permanence que leur accumulation conduit à empoussiérer des volumes considérables d'atmosphère, comme l'illustre un cliché saisissant (ci-contre)^[43] , où l'on voit une multitude de traînées noires laissées par des tourbillons qui ont emporté la couche de poussières superficielle, de couleur rouge orangé caractéristique de l'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 (hématite) amorphe, laissant apparaître les couches plus profondes de sable plus sombre, peut-être en rapport avec la région volcanique voisine de Syrtis Major Planum. La couche de poussières ainsi soulevée n'est jamais très massive, et l'étude de la grande tempête globale de 2001, au cours de laquelle la poussière avait gagné toutes les couches atmosphériques jusqu'à 60 km d'altitude, a conduit à estimer que si toute la poussière alors soulevée se déposait uniformément entre 58° N et 58° S, elle ne formerait qu'une pellicule de 3 µm d'épaisseur^[44] . La dynamique de la poussière dans l'atmosphère martienne est conditionnée par la ténuité de cette atmosphère et par la faible gravité à la surface de la planète. Ainsi, alors que les grains de poussière martiens ont typiquement quelques micromètres de diamètre, on a calculé que des grains de 20 µm peuvent être soulevés par des vents d'à peine 2 m/s et maintenus indéfiniment en suspension par des turbulences de seulement 0.8 m/s^[45] .

Les grains de poussière en suspension dans l'atmosphère sont responsables de la couleur rouille de cette dernière, qui vire au bleu au coucher du soleil, comme l'a illustré la sonde Mars Pathfinder :

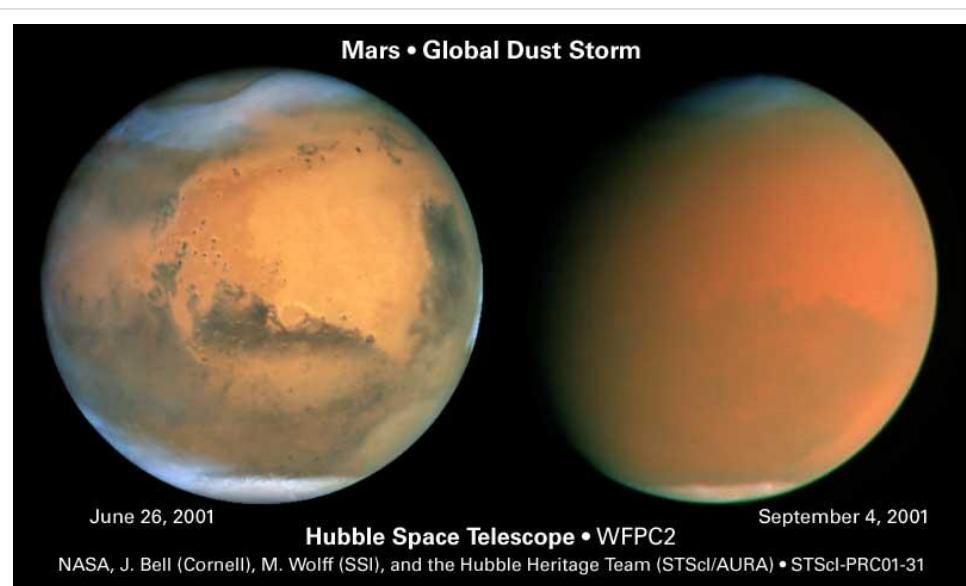


Traînées laissées par des tourbillons de poussière vues par l'instrument HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter le 24 août 2009 au nord du cratère Antoniadi par 26,7° N et 62,8° E^[42] . La bande blanchâtre qui traverse l'image est une pente givrée sous un banc de brouillard et traversée de traînées noires.



Ciel martien à midi^[46] et au crépuscule^[47] vu par Mars Pathfinder en 1999.

L'observation de l'activité atmosphérique de Mars à l'aide du télescope spatial Hubble entre 1996 et 1997, alors que la planète exposait son pôle nord au début du printemps, a permis de mettre en évidence le rôle de la sublimation des calottes polaires dans la génération de masses d'air à l'origine de vents qui soulèvent d'importantes quantités de poussières et sont susceptibles de déclencher de véritables tempêtes de poussières^[48] à l'échelle de la planète tout entière, comme celle qui a affecté l'ensemble de l'atmosphère martienne en été 2001.



Deux vues de Mars au télescope spatial Hubble avant et pendant la grande tempête de poussières martienne de l'été 2001^[49].

Méthane

Début 2004, le spectromètre infrarouge *PFS* de la sonde européenne Mars Express a détecté de faibles concentrations de méthane (10 parties par milliard) et de formaldéhyde (130 parties par milliard) dans l'atmosphère martienne^[50]. Le méthane étant détruit par le rayonnement ultraviolet au bout de 340 ans seulement, sa présence implique l'existence d'une source interne. Une activité géothermique profonde, un pergélisol bombardé par les particules à haute énergie du rayonnement cosmique et une forme de vie microbienne méthanogénique^[51] sont autant de sources plausibles^[52]. En outre, si l'on considère que le formaldéhyde, dont la durée de vie n'est que de 7 heures, est produit par oxydation du méthane, ces sources doivent être plus abondantes encore. Ainsi, selon cette hypothèse, la production annuelle de méthane est estimée à 2.5 millions de tonnes.

Climat

En vertu de son éloignement plus grand par rapport au Soleil que celui de la Terre, Mars reçoit du Soleil une énergie variant de 492 à 715 W/m² selon sa position sur son orbite, contre de 1321 à 1413 W/m² pour la Terre, c'est-à-dire de 37,2 % à 50,6 % entre les aphélies et les périhéliques respectivement. L'atmosphère martienne étant de surcroît 150 fois moins dense que celle de la Terre, elle ne génère qu'un effet de serre négligeable, d'où une température moyenne d'environ 210 K (-63 °C) à la surface de Mars, avec des variations diurnes importantes en raison de la faible inertie thermique de cette atmosphère : Viking 1 Lander avait ainsi relevé des variations diurnes allant typiquement de 184 à 242 K, soit de -89 à -31 °C^[53], tandis que les températures extrêmes — assez variables selon les sources — seraient d'environ 140 et 270 K, c'est-à-dire, en chiffres ronds, de l'ordre de -135 et -5 °C.

Saisons

Saison (hémisphère nord)	Durée sur Mars		Durée sur Terre
	Sols	Jours	
Printemps	193,30	198,614	92,764
Été	178,64	183,551	93,647
Automne	142,70	146,623	89,836
Hiver	153,95	158,182	88,997
Année	668,59	686,97	365,25

L'obliquité de Mars est proche de celle de la Terre — respectivement 25,19° contre 23,44° — mais l'excentricité de l'orbite martienne est sensiblement plus élevée — 0,09332 contre 0,01671 pour la Terre — de sorte que, si Mars possède des saisons similaires à celles de la Terre, celles-ci sont d'intensité et de durée très inégales au cours de l'année martienne (voir tableau ci-contre).

L'hémisphère nord connaît ainsi des saisons moins marquées que l'hémisphère sud, car Mars est à son aphélie à la fin du printemps et à son périhélie à la fin de l'automne, d'où des hivers courts et doux et des étés longs et frais ; le printemps dure ainsi 52 jours de plus que l'automne. À l'inverse, l'hémisphère sud connaît des saisons très marquées, avec des hivers longs et très froids tandis que les étés sont courts et plus chauds que ceux de l'hémisphère nord. C'est donc dans l'hémisphère sud qu'on observe les écarts de température les plus élevés.

Le simulateur Mars24 Sunclock^[54] de la NASA donne, pour l'hémisphère nord, les dates suivantes pour le début de chaque saison :

Printemps	21 janvier 2006	9 décembre 2007	26 octobre 2009	13 septembre 2011	31 juillet 2013	18 juin 2015
Été	7 août 2006	24 juin 2008	12 mai 2010	29 mars 2012	14 février 2014	2 janvier 2016
Automne	7 février 2007	25 décembre 2008	12 novembre 2010	29 septembre 2012	17 août 2014	4 juillet 2016
Hiver	4 juillet 2007	21 mai 2009	7 avril 2011	22 février 2013	10 janvier 2015	27 novembre 2016

Vers la fin du printemps austral, quand Mars est au plus près du Soleil, des tempêtes locales et parfois régionales apparaissent. Exceptionnellement, ces tempêtes peuvent devenir planétaires et durer plusieurs mois comme ce fut le cas en 1971 et, dans une moindre mesure, en 2001. De minuscules grains de poussière sont alors soulevés, rendant la surface de Mars quasiment invisible. Ces tempêtes de poussière naissent en général au-dessus du Bassin d'Hellas. Les importantes différences thermiques observées entre le pôle et les régions avoisinantes provoquent des vents violents à l'origine du soulèvement de fines particules dans l'atmosphère. Lors de tempêtes globales, ce phénomène provoque d'importantes modifications climatiques : les poussières en suspension absorbent le rayonnement solaire, réchauffant ainsi l'atmosphère et réduisant dans le même temps l'insolation au sol^[55]. Ainsi, lors de la tempête de 2001, la température atmosphérique s'est élevée de 30 K alors que la température au sol s'est abaissée de 10 K^[56].

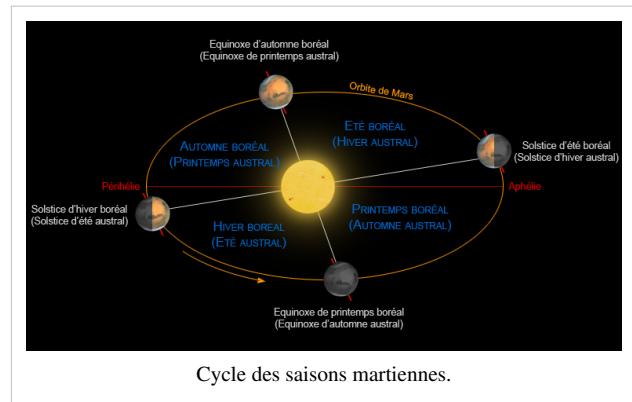
Il n'existe qu'une seule cellule de Hadley sur Mars mais beaucoup plus marquée en altitude et en amplitude, joignant les deux hémisphères et qui s'inverse deux fois par an.

Enfin, l'obliquité de la planète, qui n'est pas stabilisée par la présence d'un satellite massif comme c'est le cas pour la Terre, suit un régime chaotique selon une cyclicité d'environ 120000 ans. Elle oscille entre 0° et 60° et connaît des phases relativement stabilisées entrecoupées de changements brusques, ce qui bouleverse complètement le climat martien^[57].

Condensation hivernale de l'atmosphère aux pôles

L'une des caractéristiques propres à la planète Mars est qu'une fraction significative de son atmosphère se condense alternativement au pôle sud et au pôle nord lors de l'hiver austral et de l'hiver boréal respectivement. Les conditions hivernales aux pôles — pression et température — sont en effet favorables à la condensation du dioxyde de carbone : la pression de vapeur saturante du CO₂ à 150 K (-123 °C) se trouve être voisine de 800 Pa, et tombe à seulement 400 Pa à 145 K (-128 °C), qui sont des températures courantes lors de l'hiver austral ; il y a condensation du CO₂ dès que la pression partielle de ce gaz dépasse la pression de vapeur saturante correspondant à la température à laquelle il se trouve.

La sonde Viking 1 a mesuré la pression atmosphérique sur une année complète à son point d'atterrissement situé par 22,697° N et 312,778° E^[58] dans le bassin de Chryse Planitia, à une altitude d'environ -3300 m par rapport au niveau de référence. La pression atmosphérique moyenne s'est révélée évoluer tout au long de l'année selon les saisons, avec des valeurs approximatives, en chiffres ronds, de 850 Pa au printemps, 680 Pa en été, 900 Pa en automne et 800 Pa en hiver^{[59],[60]} : ces variations s'expliquent bien si l'on considère que la calotte hivernale australe condense une masse de glace carbonique supérieure à celle de la calotte hivernale boréale, tandis qu'à l'automne de l'hémisphère nord l'essentiel de la calotte australe s'est sublimée alors que la calotte boréale commence tout juste à se condenser.



Calottes polaires

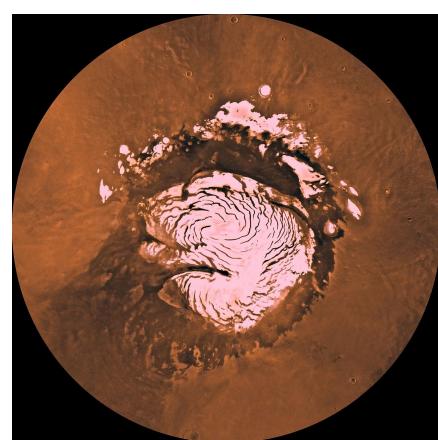
Les calottes polaires de Mars ont été observées pour la première fois au milieu du XVII^e siècle par Jean-Dominique Cassini et Christian Huygens. Leur taille varie considérablement au cours des saisons par échange de dioxyde de carbone et d'eau avec l'atmosphère. On distingue ainsi, dans les deux hémisphères, une calotte polaire dite « résiduelle » ou « estivale » qui se maintient tout l'été, et une calotte polaire dite « saisonnière » ou « hivernale » qui vient la recouvrir à partir de l'automne.

L'hiver austral étant plus long et plus froid que l'hiver boréal, la calotte saisonnière australe est plus vaste que la calotte saisonnière boréale. Au cours de l'hiver austral, le CO₂ contenu dans l'atmosphère se condense en glace carbonique au-dessus de 55° S alors que c'est plutôt au-dessus de 65° N qu'il se condense pendant l'hiver boréal. Il s'agit d'une glace de CO₂ très pure et presque transparente, d'une épaisseur ne dépassant pas quelques mètres, qui laisse voir le sol à l'aplomb sur les clichés pris par les sondes spatiales en orbite au-dessus des régions polaires.

Avec ses 300 km de diamètre, la calotte résiduelle australe est à l'inverse trois fois plus petite que la calotte résiduelle boréale (1000 km de diamètre). Elles sont de nature très différente des calottes saisonnières, contenant une forte proportion de glace d'eau mêlée de terre avec une structure stratifiée révélée par l'instrument THEMIS de la sonde 2001 Mars Odyssey^[61], avec une épaisseur atteignant localement plusieurs kilomètres. Leurs surfaces sont entaillées par de profondes vallées, appelées *chasmata* (pluriel du latin *chasma* désignant des vallées encaissées), qui forment des spirales dont le sens de rotation est conditionné par la force de Coriolis. Ainsi, les vallées s'enroulent autour du pôle sud dans le sens des aiguilles d'une montre alors qu'elles s'enroulent autour du pôle nord dans le sens inverse.

La calotte résiduelle boréale ne contient pas de glace carbonique, mais la calotte résiduelle australe en est presque entièrement recouverte d'une croûte d'une dizaine de mètres d'épaisseur dont la surface alvéolée rappelle celle d'une tranche de gruyère ; des observations réalisées par la sonde Mars Global Surveyor ont montré que le diamètre moyen des alvéoles augmentait au fil des saisons, suggérant un réchauffement climatique dans l'hémisphère sud^[62] (voir paragraphe suivant).

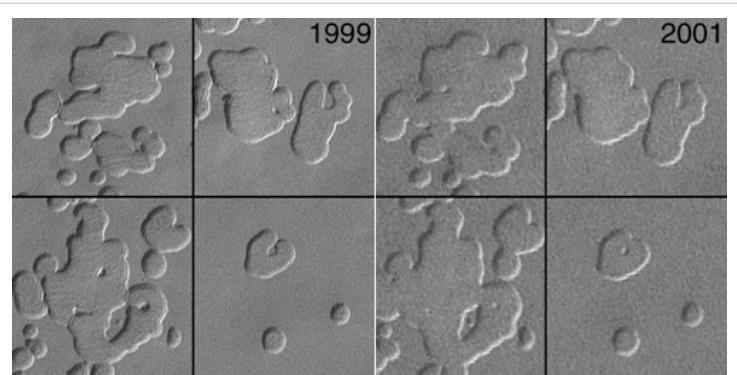
Les calottes polaires ont un impact important sur la composition atmosphérique globale de la planète. Le cycle des condensations et sublimations du CO₂ fait varier la pression atmosphérique de près d'un tiers, et, pendant l'été boréal, la glace d'eau qui compose la calotte polaire résiduelle nord se sublime, injectant de grandes quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Si toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère venait à précipiter, elle formerait une couche de moins de 10 µm d'épaisseur durant l'hiver et de plus de 40 µm en plein été^[63].



Vue de la calotte résiduelle boréale.

Variations climatiques observées sur la calotte résiduelle australe

La comparaison des clichés de la calotte résiduelle australe pris par Mars Global Surveyor en 1999 et en 2001 a mis en évidence une tendance générale à la régression de la croûte de glace carbonique superficielle de cette région^[64]. Ceci résulterait de la sublimation progressive du CO₂ constituant la croûte superficielle de la calotte résiduelle australe pour laisser apparaître les couches plus profondes, constituées essentiellement de glace d'eau mêlée de poussières. Ce phénomène semble avoir été assez rapide, le bord des cavités observées dans la croûte de glace carbonique progressant alors de 3 m par année martienne. Constatée sans ambiguïté sur trois années martiennes consécutives, cette tendance à la sublimation de la calotte résiduelle australe est venue s'ajouter à diverses observations ailleurs sur la planète, telles que l'apparition de ravines sur les bords de cratères ou de dépressions, indiquant que la surface martienne est sujette à davantage de transformations qu'on le pensait jusqu'alors^[65].



Élargissement des alvéoles dans la couche superficielle de glace carbonique de la calotte résiduelle australe observé par MGS entre deux étés martiens, ici 1999 et 2001.

Observées dans la croûte de glace carbonique progressant alors de 3 m par année martienne. Constatée sans ambiguïté sur trois années martiennes consécutives, cette tendance à la sublimation de la calotte résiduelle australe est venue s'ajouter à diverses observations ailleurs sur la planète, telles que l'apparition de ravines sur les bords de cratères ou de dépressions, indiquant que la surface martienne est sujette à davantage de transformations qu'on le pensait jusqu'alors^[65].

Ces données, interprétées par les scientifiques comme le signe que Mars pourrait connaître actuellement une transition entre une période glaciaire et une période interglaciaire similaire à celle qu'à connu la Terre il y a près de 12000 ans^[13], ont parfois été comprises par le grand public comme révélatrices d'un « réchauffement climatique martien, » d'origine nécessairement non-humaine, et contredisant, par conséquent, les conclusions du Quatrième rapport du GIEC relatives à l'origine humaine du réchauffement climatique terrestre. Les débats sur la question ont été particulièrement aigus en automne 2007, dans la foulée de la publication de ce rapport.

Avec le recul, il apparaît cependant que les observations martiennes n'ont jamais indiqué autre chose qu'un réchauffement climatique localisé à la calotte résiduelle australe^[65], et non un réchauffement climatique global. De plus, le climat martien est très largement conditionné par les tempêtes de poussières et les variations d'albédo qui en découlent, davantage que par le rayonnement solaire — contrairement au climat terrestre — ce qui limite la pertinence des raisonnements établissant des parallèles entre les deux planètes^[66]. Et surtout, les observations les plus récentes, notamment celles de la sonde 2001 Mars Odyssey, qui est toujours en fonctionnement, ne confirment pas la tendance à long terme à la sublimation des calottes polaires, mais indiquerait au contraire des variations annuelles autour d'une valeur stable^[67].

Radiations

L'absence de magnétosphère autour de Mars a pour conséquence d'exposer directement la surface de la planète aux rayons cosmiques et aux bouffées de protons solaires, à l'origine d'une radioactivité ambiante très supérieure sur Mars à celle relevée à la surface de la Terre. L'instrument MARIE — *Mars Radiation Environment* — de la sonde 2001 Mars Odyssey a permis, dans les années 2002-2003, d'évaluer la dose efficace en orbite martienne entre 400 et 500 mSv/an^[68], soit un peu plus du double de celle reçue dans la station spatiale internationale^[69], tandis qu'au sol, au niveau de référence martien, les doses reçues seraient deux à trois fois plus faibles — un peu moins de 200 mSv/an — en raison de l'absorption d'une partie des radiations solaires et galactiques par l'atmosphère. À titre de comparaison, la radioactivité moyenne sur Terre s'élève, en France, à environ 3.5 mSv/an^[70] et la dose cumulée admise pour un astronaute sur toute sa carrière n'excède pas quelques sieverts^[71].

L'instrument MARIE a par ailleurs révélé que cette radioactivité est très inégalement répartie dans le temps, avec un bruit de fond d'environ 220 µGy/jour sur lequel s'inscrivent des pics parfois 150 fois plus intenses^[72], correspondant

aux bouffées de protons énergétiques — plusieurs dizaines de mégaélectron-volts — émis lors d'une éruption solaire ou par l'onde de choc d'une éjection de masse coronale.

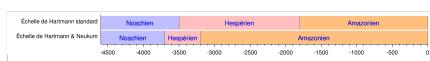
Géologie de Mars

Échelle des temps géologiques martiens

La géologie martienne est marquée par la dichotomie crustale entre les basses plaines peu cratérisées de l'hémisphère nord et les hautes terres très cratérisées de l'hémisphère sud, avec, entre ces deux domaines principaux, deux régions volcaniques bien différenciées. En vertu du principe empirique selon lequel l'âge d'une région est une fonction croissante de son taux de cratérisation^[73], ces trois types majeurs de terrains martiens ont très tôt été rattachés à trois époques caractéristiques de l'histoire géologique de la planète, nommées d'après des régions typiques de ces périodes^[74] :

- **Le Noachien** (du nom de Noachis Terra) correspond aux terrains les plus anciens, depuis la formation de la planète il y a 4.6 milliards d'années, jusqu'à 3.7 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann & Neukum (mais 3.5 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann standard^[75]), fortement cratérisés et situés majoritairement dans l'hémisphère sud. Mars avait sans doute une atmosphère épaisse à cette époque, dont la pression et l'effet de serre ont certainement permis l'existence d'une hydroosphère grâce à de grandes quantités d'eau liquide. La fin de cette époque aurait été marquée par les impacts d'astéroïdes du grand bombardement tardif, daté aux environs de 4.1 à 3.8 milliards d'années, ainsi que par le début d'une intense activité volcanique, notamment dans la région du renflement de Tharsis.
- **L'Hespérien** (du nom d'Hesperia Planum) correspond aux terrains de 3.7 à 3.2 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann & Neukum (mais de 3.5 à 1.8 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann standard), marqués par un épisode d'activité volcanique majeur se traduisant par des coulées de lave et des dépôts soufrés. Le champ magnétique global aurait disparu dès la fin du Noachien, permettant au vent solaire d'éroder l'atmosphère de Mars, dont la température et la pression au sol auraient commencé à baisser significativement, de sorte que l'eau liquide aurait cessé d'exister de façon permanente à la surface de la planète.
- **L'Amazonien** (du nom d'Amazonis Planitia) correspond aux terrains de moins de 3.2 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann & Neukum (mais de seulement 1.8 milliards d'années selon l'échelle de Hartmann standard), très peu cratérisés et situés très majoritairement dans l'hémisphère nord, à une altitude inférieure au niveau de référence de la planète. L'activité volcanique se serait prolongée, en perdant de son intensité tout au long de cette époque, en quatre épisodes majeurs, le dernier survenant il y a environ cent millions d'années, certains terrains volcaniques semblant même ne dater que de quelques millions d'années. L'érosion de l'atmosphère par le vent solaire se serait prolongée pendant des milliards d'années jusqu'à ce que la pression se stabilise au voisinage du point triple de l'eau pure, dont la pression est de 611.73 Pa. Les structures géologiques amazoniennes sont marquées par l'aridité extrême de l'environnement martien, alors totalement dépourvu d'hydroosphère — ce qui n'empêche pas l'existence discontinue et épisodique d'eau liquide en certains points de la surface.

Cette chronologie en trois époques est aujourd'hui bien acceptée — la datation de chacune de ces époques demeure, en revanche, très incertaine — et permet de rendre compte des phénomènes observés à la surface de Mars par les différentes sondes en activité autour de cette planète, notamment la présence simultanée de minéraux, formés à des époques différentes, supposant pour les uns un environnement très humide et pour les autres au contraire l'absence totale d'eau liquide. Les datations proposées pour ces trois époques — ou éons — géologiques, selon l'échelle de Hartmann standard et l'échelle de Hartmann & Neukum, sont les suivantes (âges en millions d'années) :



Structure interne

En l'absence de données sismiques exploitables — les sismomètres des sondes Viking étaient trop sensibles au vent pour effectuer des mesures fiables, et aucune autre expérience de ce type n'a depuis lors été menée sur Mars — il n'a pas encore été possible de déterminer directement la structure interne de la planète. Un modèle standard a donc été élaboré à partir des données indirectes recueillies par les différentes sondes qui ont exploré la planète, permettant de préciser notamment la structure de son champ gravitationnel, son moment d'inertie et la densité de ses différentes couches de matériaux.

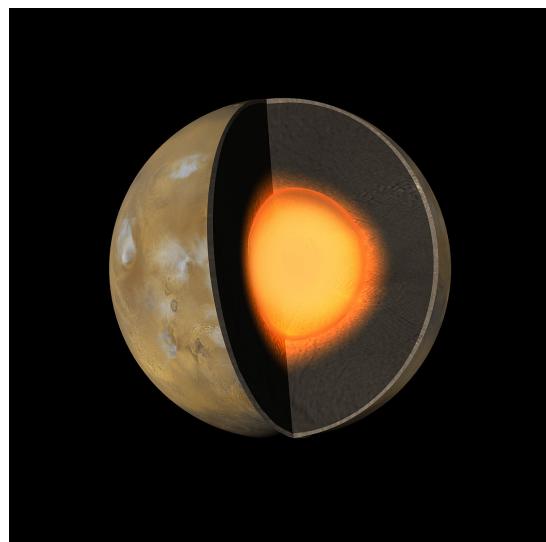
Le résultat le plus frappant est que le noyau de Mars, dont la température serait de l'ordre de 2000 K, est très certainement liquide, au moins dans sa plus grande partie^[76] ,^[77] , en raison d'une charge élevée — précisément une fraction pondérale d'au moins 14,2 % — en éléments légers, notamment en soufre, qui abaissent le point de fusion du mélange de fer et de nickel supposé constituer l'essentiel du noyau. Ce noyau aurait un rayon compris entre 1300 et 2000 km^[78] (soit entre 38 % et 59 % du rayon de la planète), peut-être plus précisément entre 1520 et 1840 km^[79] (soit entre 45 % et 54 % du rayon de Mars), incertitude due en partie à l'inconnue concernant la fraction de manteau qui pourrait être liquide et réduirait par conséquent la taille du noyau ; on trouve assez souvent citée la valeur 1480 km comme rayon du noyau de Mars^[80] , soit 43,7 % du rayon moyen de la planète elle-même (3389,5 km). Les caractéristiques physiques (taille, densité) du noyau peuvent être approchées qualitativement par le moment d'inertie de la planète, qui peut être évalué en analysant la précession de son axe de rotation ainsi que les variations de sa vitesse de rotation à travers les modulations par effet Doppler des signaux radio émis par les sondes posées à sa surface ; les données de Mars Pathfinder ont ainsi permis d'affiner celles précédemment recueillies avec les sondes Viking et d'établir que la masse de Mars est plutôt concentrée en son centre^[81] , ce qui plaide pour un noyau dense et pas trop gros.

Le manteau de Mars serait très semblable à celui de la Terre, constitué de phases solides où dominent les silicates riches en fer, ce dernier représentant une fraction pondérale de 11 à 15,5 % du manteau.

L'écorce (ou croûte) martienne semble, assez logiquement, bien plus épaisse dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord : un modèle simple avec une masse volumique uniforme de 2900 kg/m³ conduit à une épaisseur moyenne d'environ 50 km, soit 4,4 % du volume de la planète, avec comme valeurs extrêmes 92 km dans la région de Syria Planum et à peine 3 km sous le bassin d'impact d'Isidis Planitia, tandis que l'écorce aurait moins de 10 km sous toute la région d'Utopia Planitia.

Champ magnétique

Mars ne possède pas de magnétosphère. Toutefois, le magnétomètre et réflectomètre à électrons MAG/ER de la sonde Mars Global Surveyor a mis en évidence dès 1997 un magnétisme rémanent^[82] , jusqu'à 30 fois supérieur à celui de l'écorce terrestre^[83] , au dessus de certaines régions géologiquement anciennes de l'hémisphère sud^[84] , et notamment dans la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum^[85] . Les mesures font état d'un champ magnétique atteignant 1,5 µT à 100 km d'altitude, ce qui requiert la magnétisation d'un volume significatif d'écorce martienne, d'au moins 10⁶ km³^[86] . Pendant neuf ans, MGS a mesuré les paramètres magnétiques au-dessus de la surface



Structure interne « standard » de Mars :

- écorce d'environ 50 km d'épaisseur,
- manteau d'environ 1860 km d'épaisseur,
- noyau d'environ 1480 km de rayon, essentiellement, voire entièrement, liquide.

martienne, l'instrument MGS MAG (*MGS Magnetometer*) recueillant des données vectorielles depuis une altitude typiquement de 400 km, s'approchant parfois à 90 km de la surface, et MGS ER (*MGS Electron Reflectometer*) mesurant le magnétisme total depuis une altitude de 185 km en moyenne. Il n'existe donc pas à l'heure actuelle de carte magnétique de la surface martienne elle-même, de même que la nature exacte des minéraux magnétisés ne peut qu'être supposée dans l'état actuel de nos connaissances.

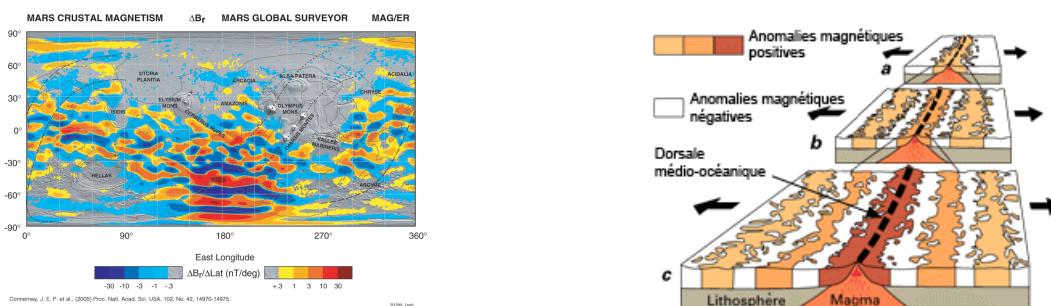
Géographie du paléomagnétisme martien et minéraux impliqués

L'étude des météorites de Mars suggère que ce paléomagnétisme résulte, comme sur Terre, de la magnétisation de minéraux ferromagnétiques tels que la magnétite Fe_3O_4 et la pyrrhotite $\text{Fe}_{1-\delta}\text{S}$ dont les atomes alignent leur moment magnétique sur le champ magnétique global et figent cette configuration en passant en dessous de la température de Curie du minéral — soit par exemple 858 K (585 °C) pour Fe_3O_4 , mais seulement 593 K (320 °C) pour $\text{Fe}_{1-\delta}\text{S}$. Les autres minéraux candidats comme vecteurs du paléomagnétisme de l'écorce martienne sont l'ilménite FeTiO_3 en solution solide avec l'hématite Fe_2O_3 , de même structure, pour former des titanohématites, et dans une moindre mesure la titanomagnétite Fe_2TiO_4 , dont la magnétisation et la température de Curie sont cependant inférieures^[86].

L'absence d'un tel paléomagnétisme au-dessus des bassins d'impacts de l'hémisphère sud tels qu'Hellas et Argyre est généralement interprétée comme l'indication que Mars ne possédait plus de champ magnétique global lors de ces impacts, bien qu'il soit également possible que le refroidissement des matériaux sur le lieu de l'impact ait été trop rapide pour permettre l'alignement de leur magnétisation éventuelle sur le champ magnétique global^[87]. *A contrario*, un paléomagnétisme significatif, et parfois même assez élevé, a été relevé au-dessus des 14 bassins les plus anciens identifiés sur la planète^[86]. De la même façon, aucun champ magnétique notable n'a été détecté au-dessus des régions volcaniques majeures d'Elysium Planitia et du renflement de Tharsis, en revanche un magnétisme faible mais de plus forte intensité a été relevé au-dessus des provinces volcaniques plus petites et plus anciennes des hautes terres australes.

L'analyse des composantes tridimensionnelles du champ magnétique relevé en quelques dizaines de points significatifs de la surface martienne a permis à plusieurs équipes d'extrapoler la position du pôle paléomagnétique de Mars^[88]. Ces simulations — qui doivent néanmoins être prises avec un certain recul — sont assez cohérentes entre elles et conduisent à localiser l'un des pôles paléomagnétiques martiens entre 150° E et 330° E d'une part et 30° S et 90° N d'autre part, c'est-à-dire approximativement dans un rayon de 3600 km autour d'un point situé à mi-chemin entre Alba Mons et Olympus Mons.

Inversions de polarité et disparition du magnétisme global



Paléomagnétisme martien mesuré par MGS au-dessus de la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum. Les bandes de polarité opposée sont bien visibles, mais aucun axe de symétrie n'a pu être mis en évidence jusqu'à présent.

Sur Terre, l'expansion des fonds océaniques se traduit, de part et d'autre des dorsales, par la magnétisation rémanente du plancher océanique en bandes symétriques de polarisation opposée suivant les inversions du champ magnétique global de notre planète.

Fait remarquable, la magnétisation mesurée par MGS est structurée en bandes parallèles de polarité opposée, de façon rappelant celles du plancher océanique sur Terre (voir schéma ci-contre) : celui-ci cristallise de part et d'autre des dorsales au fur et à mesure que les plaques s'écartent en « mémorisant » l'orientation du champ magnétique

terrestre au moment de la solidification ; chaque inversion du champ magnétique terrestre est donc « enregistrée » dans les roches ainsi formées, dont la magnétisation est par conséquent symétrique de chaque côté de chaque dorsale. Une telle symétrie n'a en revanche jamais été relevée sur Mars, de sorte qu'aucun élément ne permet actuellement de supposer l'existence passée d'une quelconque tectonique des plaques sur la planète rouge^[89]. Seule une observation à de plus hautes résolutions permettrait de clore le débat.

Lorsqu'il est global, le champ magnétique d'une planète est principalement d'origine interne. On suppose qu'il est provoqué par la convection des fluides conducteurs (c'est-à-dire des métaux liquides) composant la partie externe du noyau. Ce processus est connu sous le nom d'effet dynamo. Ces mouvements de convection impliquent l'existence d'un gradient thermique suffisant du noyau vers le manteau ; en l'absence d'un tel gradient, l'effet dynamo ne pourrait pas se maintenir.

Ce fait serait à l'origine de la disparition du champ magnétique global de Mars, il y a sans doute au moins quatre milliards d'années : les impacts d'astéroïdes du grand bombardement tardif auraient injecté suffisamment d'énergie thermique dans le manteau de Mars en convertissant en chaleur l'énergie cinétique des impacteurs, ce qui aurait stoppé l'effet dynamo en annulant le gradient thermique nécessaire à son maintien^[90].

Origine de la dichotomie magnétique entre hémisphères nord et sud

L'attribution de la disparition du champ magnétique global martien à un impact cosmique a été reprise dans une théorie alternative impliquant cette fois une protoplanète résiduelle de la taille de la Lune impactant Mars bien avant le grand bombardement tardif, c'est-à-dire quelques dizaines de millions d'années seulement après la formation de la planète (de façon similaire à l'impact hypothétique de Théia avec la proto-Terre^[91]), au voisinage du pôle nord actuel et sous un angle d'incidence assez faible : cet impact serait à l'origine d'une part de la dichotomie crustale^[92]^[93] (l'idée n'est pas nouvelle, recouvrant la théorie, assez discutée, du bassin boréal^[94]) et d'autre part de l'absence de paléomagnétisme dans l'écorce de l'hémisphère nord, en raison de la disparition du gradient thermique entre le noyau et le manteau dans l'hémisphère nord uniquement, laissant subsister un effet dynamo concentré dans l'hémisphère sud^[95]. Mars aurait ainsi connu transitoirement un magnétisme non pas global, mais « hémisphérique » et décentré vers le pôle sud, ce qui expliquerait l'intensité exceptionnelle du magnétisme rémanent dans certaines parties de l'écorce de l'hémisphère sud, ainsi que l'absence de paléomagnétisme notable dans l'hémisphère nord.

Cette théorie n'est bien entendu pas la seule proposée pour rendre compte de la superposition d'une « dichotomie magnétique » à la dichotomie crustale martienne : la différence d'épaisseur et de structure de l'écorce martienne entre les deux hémisphères^[96], la fonte partielle de l'écorce de l'hémisphère nord à l'origine du remodelage de sa surface^[97], et la serpentisation de l'écorce martienne au Noachien^[98], sont les explications les plus couramment avancées.

Aurores

Des aurores peuvent se produire au-dessus des anomalies magnétiques de la croûte martienne. Selon toute vraisemblance, elles ne peuvent cependant pas être perçues par l'œil humain, car elles émettent principalement dans l'ultraviolet^[99].

Volcanisme

Le volcanisme martien aurait débuté il y a près de quatre milliards d'années^[100], à la fin du Noachien après le grand bombardement tardif. Il aurait connu son intensité maximale à l'Hespérien — entre 3.7 et 3.2 Ga selon l'échelle de Hartmann & Neukum — puis se serait progressivement affaibli tout au long de l'Amazonien. Il a produit d'énormes volcans boucliers qui sont les plus grands édifices volcaniques connus du Système solaire : le plus large d'entre eux, Alba Mons, a un diamètre d'environ 1600 km à la base, tandis que le plus gros est Olympus Mons, sur la marge occidentale du renflement de Tharsis, qui atteint 22.5 km de haut de la base au sommet. Il a également produit de nombreux stratovolcans, bien plus petits, plusieurs centaines de petits volcans de quelques centaines de mètres de

large (par exemple sur Syria Planum) ainsi que des plaines de lave, similaires aux étendues volcaniques identifiées sur la Lune, sur Vénus ou sur Mercure.

Plaines de lave

La plus ancienne forme de volcanisme martien, remontant à la fin du Noachien et perdurant jusqu'au début de l'Hespérien, serait celle des étendues basaltiques qui recouvrent le fond des bassins d'impact d'Argyre Planitia et d'Hellas Planitia, ainsi que certaines étendues planes et lisses localisées entre ces deux bassins et celui d'Isidis, de façon rappelant les terrains volcaniques lisses identifiés sur Mercure (par exemple Borealis Planitia), sur Vénus (typiquement Guinevere Planitia) et sur la Lune — les « mers » lunaires, la plupart du temps corrélées à des impacts cosmiques.

Sur Mars, ces plaines de lave noachiennes constituent les régions de Malea Planum, Hesperia Planum et Syrtis Major Planum, qui se présentent comme des plateaux basaltiques dont la surface, typique de l'Hespérien, est géologiquement plus récente. La dynamique sous-jacente à ce type de volcanisme, entre fissure et point chaud, n'est pas vraiment comprise ; en particulier, on n'explique pas complètement le fait que les volcans de Malea, d'Hesperia et d'Elysium soient plus ou moins alignés sur plus d'un tiers de circonférence martienne.

Typologie et distribution des volcans martiens

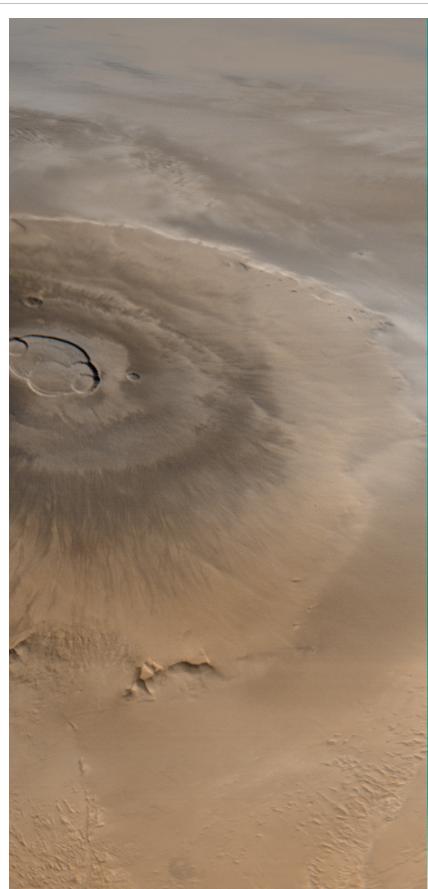
Le volcanisme martien est surtout connu pour ses volcans boucliers, les plus grands du système solaire. Ce type de volcan est caractérisé par la très faible pente de ses flancs. Sur Terre, un tel volcan résulte d'épanchements de laves pauvres en silice, très fluides, qui s'écoulent facilement sur de grandes distances, formant des structures aplatis s'étalant sur des surfaces très importantes, contrairement, par exemple, aux stratovolcans, dont le cône, bien formé, a une base bien plus restreinte. Le type même de volcan bouclier est, sur Terre, le Mauna Loa, à Hawaï ; le Piton de la Fournaise, à la Réunion, en est un autre, plus petit mais très actif.

Le plus emblématique des volcans boucliers martiens, Olympus Mons, mesure quelque 22.5 km de haut pour 648 km de large et possède une caldeira sommitale de $85 \times 60 \times 3$ km résultant de la coalescence de six cratères distincts^[101]. Mars possède en fait les cinq plus hauts volcans connus du système solaire (altitudes données par rapport au niveau de référence martien) :

1. Olympus Mons (21229 m), en marge occidentale du renflement de Tharsis
2. Ascraeus Mons (18225 m), volcan septentrional de Tharsis Montes
3. Arsia Mons (17761 m), volcan méridional de Tharsis Montes
4. Pavonis Mons (14058 m), volcan central de Tharsis Montes
5. Elysium Mons (14028 m), volcan principal d'Elysium Planitia

À titre de comparaison, le plus haut volcan vénusien, Maat Mons, ne culmine qu'à 8000 m environ au-dessus du rayon moyen de Vénus, qui sert de niveau de référence sur cette planète.

Sur Mars se trouve également le plus large des volcans du système solaire, Alba Mons, dont l'altitude ne dépasse pas 6600 m mais qui s'étend sur environ 1600 km de large.



Cliché d'Olympus Mons obtenu par la sonde Mars Global Surveyor. Son sommet culmine à 21.2 km au-dessus du niveau de référence martien (22.5 km au-dessus des plaines alentour), et sa base atteint 624 km de large. Il s'agit du plus haut volcan connu du système solaire.

Les volcans boucliers martiens atteignent des tailles gigantesques par rapport à leurs équivalents terrestres en raison de l'absence de tectonique des plaques sur Mars : l'écorce martienne demeure immobile par rapport aux points chauds, qui peuvent ainsi la percer au même endroit pendant de très longues périodes de temps pour donner naissance à des édifices volcaniques résultant de l'accumulation de laves pendant parfois plusieurs milliards d'années, alors que, sur Terre, le déplacement des plaques lithosphériques au-dessus de ces points chauds conduit à la formation d'un chapelet de parfois plusieurs dizaines de volcans, chacun ne demeurant actif que pendant quelques millions d'années, ce qui est bien trop bref pour permettre la formation de structures aussi imposantes que sur Mars. L'archipel d'Hawaï est le meilleur exemple terrestre illustrant le déplacement d'une plaque tectonique au-dessus d'un point chaud, en l'occurrence de la plaque pacifique au-dessus du point chaud d'Hawaï ; de la même façon, l'archipel des Mascareignes résulte du déplacement de la plaque somalienne au-dessus du point chaud de la Réunion.

Les six volcans boucliers martiens se répartissent géographiquement en deux régions volcaniques voisines d'inégale importance :

- la région d'Elysium Planitia, à l'ouest d'Amazonis Planitia, où se trouvent Elysium Mons, qui semble être de nature différente (moins « rouge » et plus « gris ») des autres volcans, et trois autres volcans plus petits
- le renflement de Tharsis, immense soulèvement crustal de 5500 km de diamètre au sud-est d'Amazonis, où se trouvent les cinq autres grands volcans boucliers martiens ainsi que d'innombrables volcans plus petits, dont cinq seulement ont reçu un nom.

Ces volcans plus petits sont souvent des volcans boucliers anonymes, comme ceux de Syria Planum^[102] .[103] , mais certains de taille intermédiaire rappellent davantage les stratovolcans, qui résultent de l'accumulation de dépôts de laves mêlées de cendres volcaniques. Ce sont les *tholi* (pluriel latin de *tholus*), édifices de taille plus modeste que les volcans boucliers, aux pentes plus accusées, surtout près du cratère, ainsi que les *paterae*, qui se réduisent parfois à leur caldeira. Tous ces types de volcans sont présents dans les régions du renflement de Tharsis et d'Elysium Planitia, la tendance générale étant cependant d'observer les volcans boucliers plutôt dans la région de Tharsis tandis que les volcans d'Elysium s'apparentent davantage à des stratovolcans.

Origine et chronologie du volcanisme martien

La discontinuité entre Phyllosien et Theikien, qui coïnciderait plus ou moins avec les débuts de l'hypothétique « grand bombardement tardif » (*LHB* en anglais), matérialiserait l'époque d'activité volcanique maximum, qui se prolongerait au Theikien et au Sidérien — et donc à l'Hespérien et à l'Amazonien — en disparaissant progressivement au fur et à mesure que la planète aurait perdu l'essentiel de son activité interne. Une corrélation entre le volcanisme de l'Hespérien et les impacts cosmiques du Noachien n'est d'ailleurs pas à exclure. Ce volcanisme aurait atteint son maximum à la suite des impacts cosmiques massifs à la fin de l'éon précédent, et chacune des cinq régions volcaniques de la planète jouxte directement un bassin d'impact :

- le renflement de Tharsis, plus grande formation volcanique martienne, en bordure de l'hypothétique bassin boréal, plus grand bassin d'impact de la planète (et du système solaire), le bouclier d'Alba Mons étant, de surcroît, situé exactement aux antipodes d'Hellas Planitia ;
- la région d'Elysium Mons, en bordure d'Utopia Planitia et voisine des antipodes d'Argyre Planitia ;
- Malea Planum, en bordure sud-ouest d'Hellas Planitia, et Hesperia Planum en bordure nord-est, cette dernière région étant également voisine des antipodes de Chryse Planitia ;
- Syrtis Major Planum, en bordure d'Isidis Planitia.

La superficie et la masse de Mars étant respectivement 3,5 et 10 fois moindres que celles de la Terre, cette planète s'est refroidie plus rapidement que la nôtre et son activité interne s'est donc réduite également plus vite : alors que le volcanisme et, plus généralement, la tectonique (orogenèse, séismes, tectonique des plaques, etc.) sont encore très actifs sur Terre, ils ne semblent plus être notables sur Mars, où aucune tectonique des plaques, même passée, n'a jamais pu être mise en évidence.

Le volcanisme martien paraît également avoir cessé d'être actif, bien que l'âge semble-t-il très récent de certaines coulées de lave^[104] suggère, pour certains volcans, une activité actuellement certes très réduite, mais peut-être pas rigoureusement nulle^[1], d'autant que Mars, contrairement à la Lune, n'a pas fini de se refroidir, et que son intérieur, loin d'être entièrement figé, contient en réalité un noyau peut-être entièrement liquide^[76] .^[77]. D'une manière générale, l'analyse des données recueillies par Mars Express a conduit une équipe de planétologues de l'ESA dirigée par l'Allemand Gerhard Neukum à proposer une séquence en cinq épisodes volcaniques^[105] :

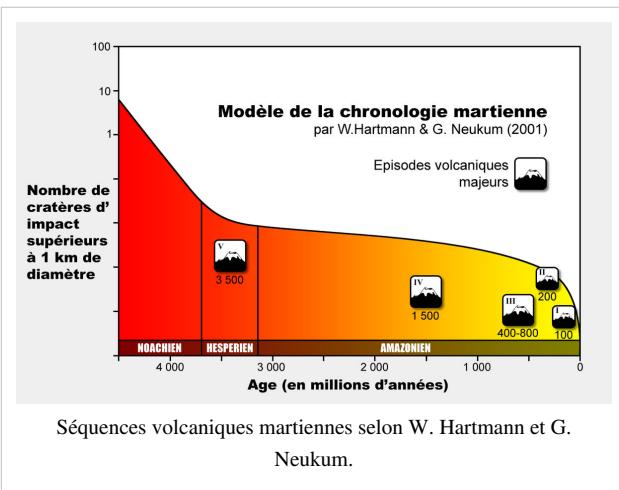
- épisode volcanique majeur de l'Hespérien il y a environ 3,5 milliards d'années,
- regain de volcanisme il y a environ 1,5 milliards d'années, puis entre 800 et 400 millions d'années avant le présent,
- épisodes volcaniques récents d'intensité rapidement décroissante il y a environ 200 et 100 millions d'années.

Ces datations reposent sur l'évaluation du taux de cratérisation des coulées de lave correspondantes, qui semble recoupée par les observations indirectes sur le moyen terme mais contredites par les observations directes à court terme déduites de la fréquence des impacts récents observés sur plus de dix ans par les sondes satellisées autour de Mars, la principale difficulté de ce type de datation étant d'évaluer les biais statistiques introduits par la différence notable d'ordres de grandeur entre les surfaces anciennes (âgées de plus 2 milliards d'années), qui représentent une fraction importante de la surface de Mars, et les surfaces les plus récentes (âgées de moins de 200 millions d'années), qui sont comparativement extrêmement réduites.

Par ailleurs, si la fréquence des impacts récents relevée par les sondes satellisées autour de Mars semble suggérer un taux de cratérisation plus élevé que celui habituellement retenu pour dater les formations martiennes (ce qui conduirait à devoir « rajeunir » toutes ces datations^[106]), il semblerait plutôt que, sur le long terme, ce taux de cratérisation ait au contraire été divisé par trois depuis 3 milliards d'années^[107] , ce qui tendrait à « vieillir » les datations martiennes, et ce d'autant plus qu'elles sont relatives à des phénomènes récents.

Minéralogie

La minéralogie de la surface martienne n'a longtemps pu être approchée qu'à travers l'étude de quelques dizaines de météorites de Mars. Bien que peu nombreuses et restreintes à des époques géologiques limitées, ces météorites permettent d'évaluer l'importance des roches basaltiques sur Mars. Elles soulignent les différences de composition chimique entre Mars et la Terre^[108] et témoignent de la présence d'eau liquide à la surface de la planète il y a plus de 4 milliards d'années. Les « orbiteurs », dont les spectromètres permettent de déterminer la nature des phases solides présentes en surface, et les « atterriseurs », qui peuvent analyser chimiquement la composition d'échantillons prélevés sur des rochers ou dans le sol, nous ont permis depuis d'affiner notre connaissance des minéraux martiens.



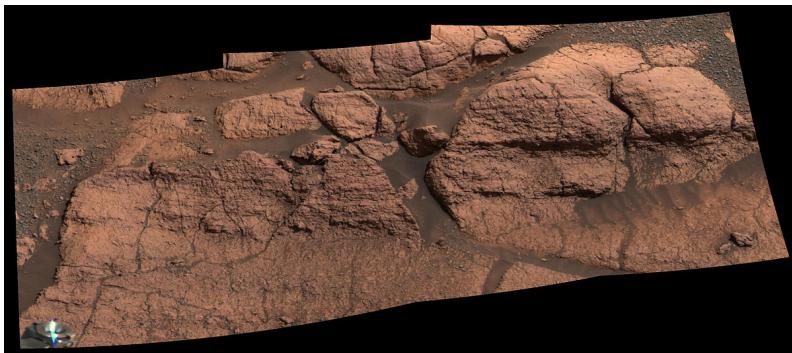
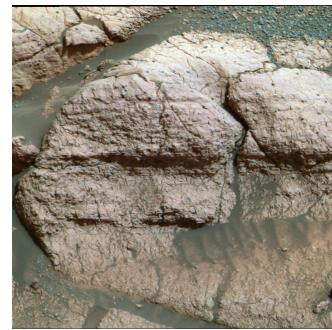


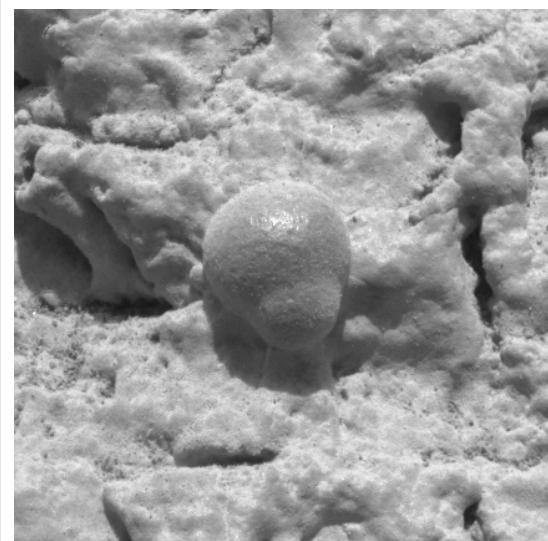
Image composite du rocher « *El Capitan* » vu par la caméra panoramique (PanCam) du rover Opportunity en bordure du cratère Eagle, dans la région de Meridiani Planum, en février 2004. C'est sur ce rocher qu'ont été caractérisées des sphérules d'hématite, *a priori* formées en milieu aqueux.



Vue du rocher « *El Capitan* » avec les sphérules, ou « myrtilles, » riches en hématite, à la surface et dans la roche.

Analyses *in situ* par les « atterriseurs »

Dès les années 1970, les sondes Viking 1 Lander et Viking 2 Lander ont analysé le sol martien, révélant une nature qui pourrait correspondre à l'érosion de basaltes. Ces analyses ont montré une abondance élevée en silicium Si et en fer Fe, ainsi qu'en magnésium Mg, aluminium Al, soufre S, calcium Ca et titane Ti, avec des traces de strontium Sr, d'yttrium Y et peut-être de zirconium Zr. Le taux de soufre était près de deux fois supérieur et celui de potassium cinq fois inférieur à la moyenne de l'écorce terrestre^[109]. Le sol contenait également des composés de soufre et de chlore ressemblant aux dépôts d'évaporites, résultant sur Terre de l'évaporation de l'eau de mer. La concentration en soufre était plus élevée en surface qu'en profondeur. Les expériences destinées à déterminer la présence d'éventuels microorganismes dans le sol martien en mesurant la libération d'oxygène après adjonction de « nutriments » ont mesuré un dégagement de molécules O₂ significatif, ce qui, en l'absence d'autres traces biologiques par ailleurs relevées, a été attribué à la présence d'ions superoxyde O₂⁻^[110]. Le spectromètre APXS de Mars Pathfinder a réalisé en automne 1997 un ensemble de mesures^[111] exprimées en pourcentage pondéral d'oxydes qui sont venues compléter ces résultats avec ceux d'une région différente de la surface de Mars.



Sphérule d'hématite sur « *El Capitan* » vue par le rover Opportunity en février 2004 dans Meridiani Planum.

La teinte rougeâtre de la planète provient avant tout de l'oxyde de fer(III) Fe₂O₃, omniprésent à sa surface. Cette hématite amorphe (l'hématite cristallisée, quant à elle, est de couleur grise) est très présente à la surface des roches ainsi que des grains de poussière transportés par les vents qui balayent continuellement la surface de la planète, mais ne semble pas pénétrer très profondément dans le sol, à en juger par les traces laissées depuis l'hiver 2004 par les roues des rovers Spirit et Opportunity^[112], qui montrent que la couleur rouille est celle des couches de poussières, plus épaisses et recouvertes de poussières sombres pour Opportunity, tandis que les roches elles-mêmes sont nettement plus sombres.

Par ailleurs, le sol de Mars analysé *in situ* par la sonde Phoenix en automne 2008 s'est révélé être alcalin (pH ≈ 7,7 ± 0,5) et contenir de nombreux sels, avec une abondance élevée de potassium K⁺, de chlorures Cl⁻, de perchlorates ClO₄⁻ et de magnésium Mg²⁺^[113]. La présence de perchlorates, notamment, a été abondamment commentée, car *a priori* assez peu compatible avec la possibilité d'une vie martienne^[114]. Ces sels ont la particularité d'abaisser sensiblement la température de fusion de la glace d'eau et pourraient expliquer les « ravines »

— *gullies* en anglais — régulièrement observées par les sondes en orbite autour de la planète, qui seraient ainsi les traces d'écoulements de saumures sur des terrains en pente.

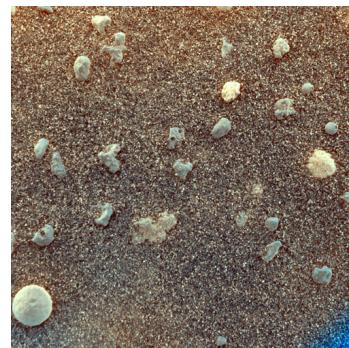
D'une manière générale, les rochers martiens se sont révélés être principalement de nature basaltique tholéitique^[115]



Sol jonché de rochers volcaniques vu par Mars Pathfinder le 8 septembre 1999^[116].



Autre vue du sol martien, par le rover Spirit le 13 avril 2006^[117].



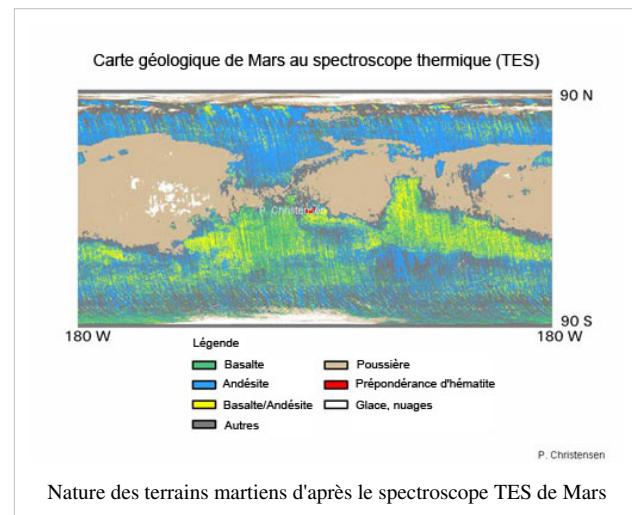
Gros plan sur le sol du cratère Eagle montrant des sphérules plus ou moins régulières sur fond de poussière fine^[118]. Le plus gros grain a un diamètre de 3 mm, tandis que l'image elle-même couvre une surface de 3 cm de côté.

Résultats recueillis par les « orbiteurs »

Des sondes américaines (notamment 2001 Mars Odyssey et Mars Reconnaissance Orbiter) et européenne (Mars Express) étudient globalement la planète depuis plusieurs années (respectivement 2002, 2006 et 2003), permettant d'élargir et d'affiner notre compréhension de sa nature et de son histoire. Si elles ont confirmé la prédominance des basaltes à la surface de la planète, ces sondes ont également recueilli quelques résultats inattendus.

Olivines et pyroxènes

Ainsi, la sonde Mars Express, de l'ESA, possède un instrument appelé OMEGA — acronyme signifiant « Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité » — de réalisation essentiellement française et sous la responsabilité de Jean-Pierre Bibring, de l'IAS à Orsay, qui mesure le spectre infrarouge (dans les longueurs d'onde comprises entre 0.35 et 5.2 μm) de la lumière solaire réfléchie par la surface martienne dans le but d'y déceler le spectre d'absorption des différents minéraux qui la composent. Cette expérience a pu confirmer l'abondance des roches ignées sur la surface de Mars, notamment des olivines et des pyroxènes, ces derniers ayant un taux de calcium plus



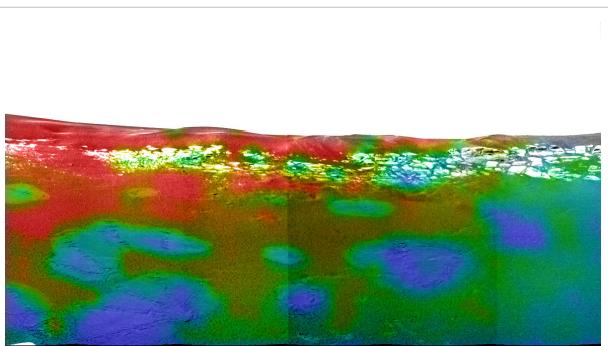
Nature des terrains martiens d'après le spectroscope TES de Mars Global Surveyor. L'hématite grise (cristallisée) apparaît en rouge^[119]; ceci a permis de sélectionner le site d'atterrissement du rover Opportunity dans Meridiani Planum.

bas dans les hautes terres caractérisées de l'hémisphère sud que dans le reste de la planète, où on le rencontre avec de l'olivine ; ainsi, les matériaux les plus anciens de l'écorce martienne se seraient formés à partir d'un manteau appauvri en aluminium et en calcium^[121].

Olivines et pyroxènes sont les constituants principaux des périclites, des roches plutoniques bien connues sur Terre pour être le principal constituant du manteau.

Phyllosilicates, altération aqueuse de roches ignées

Une découverte déterminante dans la compréhension de l'histoire de Mars a été l'identification par OMEGA de phyllosilicates largement répandus dans les régions les plus anciennes de la planète^[122], révélant l'interaction prolongée des roches ignées avec l'eau liquide. L'instrument CRISM — *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* — de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter a permis de préciser la nature de ces minéraux^[123].



Taux d'hématite grise dans le cratère Eagle vu par l'instrument Mini-TES du *lander* du rover Opportunity superposés à une vue panoramique du cratère^[120]. Les taches bleues au premier plan indiquent que les rebonds des airbags protecteurs sur le sol en ont enlevé la poussière riche en hématite.

Chlorures et sulfates hydratés, marqueurs d'un passé humide

OMEGA a également permis de détecter, en de nombreux endroits de la planète, des sulfates hydratés, tels que, par exemple, de la kiesérite $MgSO_4 \cdot H_2O$ dans la région de Meridiani Planum^[124], voire, dans la région de Valles Marineris^[125], des sulfates encore davantage hydratés dont il n'a pas été possible d'identifier la nature minéralogique^[126], ainsi que des dépôts de gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ sur de la kiesérite au fond d'un lac asséché, indiquant un changement de nature saline de ce plan d'eau au cours de son assèchement, passant du sulfate de magnésium au sulfate de calcium^[127].

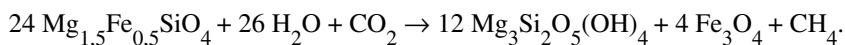
De vastes étendues de sulfate de calcium hydraté, vraisemblablement du gypse, ont également été détectées en bordure de la calotte polaire boréale^[128]. La présence de ces minéraux hydratés est une indication forte de la présence passée d'étendues d'eau liquide à la surface de Mars, une eau contenant notamment des sulfates de magnésium et de calcium dissous.

La sonde 2001 Mars Odyssey a détecté également la présence de chlorures dans les hautes terres de l'hémisphère sud^[129], résultant de l'évaporation de plans d'eau salée ne dépassant pas 25 km² en divers endroits de ces terrains anciens remontant au Noachien voire, pour certains, au début de l'Hespérien.

Méthane et hydrothermalisme dans la région de Nili Fossae

L'un des résultats les plus étonnans de Mars Reconnaissance Orbiter provient de l'étude détaillée en 2008 de la région de Nili Fossae, identifiée début 2009 comme source d'importants dégagements de méthane^[130]. Le méthane a été détecté dès 2003 dans l'atmosphère de Mars, aussi bien par des sondes telles que Mars Express que depuis la Terre ; ces émissions de CH_4 se concentreraient notamment en trois zones particulières de la région de Syrtis Major Planum^[131]. Or le méthane est instable dans l'atmosphère martienne, des études récentes suggérant même qu'il soit six cents fois moins stable qu'estimé initialement (on évaluait sa durée de vie moyenne à 300 ans) car le taux de méthane n'a pas le temps de s'uniformiser dans l'atmosphère et demeure concentré autour de ses zones d'émission, ce qui correspondrait à une durée de vie de quelques centaines de jours ; la source de méthane correspondante serait par ailleurs 600 fois plus puissante qu'estimé initialement, émettant ce gaz une soixantaine de jours par année martienne, à la fin de l'été de l'hémisphère nord^[132].

Les analyses géologiques menées en 2008 par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter dans la région de Nili Fossae ont révélé la présence d'argiles ferromagnésiennes (smectites), d'olivine (silicate ferromagnésien $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$, détectée dès 2003^[134]) et de magnésite (carbonate de magnésium MgCO_3)^[135], ainsi que de serpentine^[136]. La présence simultanée de ces minéraux permet d'expliquer assez simplement la formation de méthane, car, sur Terre, du méthane CH_4 se forme en présence de carbonates — tels que le MgCO_3 détecté en 2008 — et d'eau liquide lors du métamorphisme hydrothermal d'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 ou d'olivine $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ en serpentine $(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, particulièrement lorsque le taux de magnésium dans l'olivine n'est pas trop élevé et lorsque la pression partielle de dioxyde de carbone CO_2 est insuffisante pour conduire à la formation de talc $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ mais aboutit au contraire à la formation de serpentine et de magnétite Fe_3O_4 , comme dans la réaction :

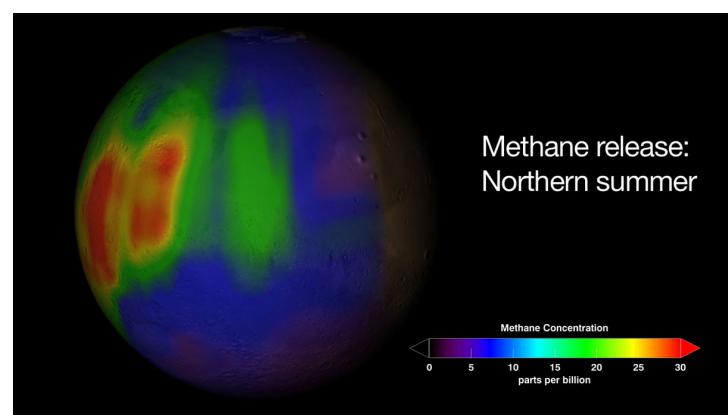


La probabilité de ce type de réactions dans la région de Nili Fossae est renforcée par la nature volcanique de Syrtis Major Planum et par l'étroite corrélation, observée dès 2004, entre le taux d'humidité d'une région et la concentration de méthane dans l'atmosphère^[137].

Olivine et jarosite, ne subsistant qu'en climat aride

L'olivine, découverte dans la région de Nili Fossae^[134] ainsi qu'en d'autres régions martiennes^[121] par le *Thermal Emission Spectrometer* (TES) de Mars Global Surveyor, est un minéral instable en milieu aqueux, donnant facilement d'autres minéraux tels que de l'iddingsite, de la goethite, de la serpentine, des chlorites, des smectites, de la maghémite et de l'hématite ; la présence d'olivine sur Mars indique donc des surfaces qui n'ont pas été exposées à l'eau liquide depuis la formation de ces minéraux^[138], laquelle remonte à plusieurs milliards d'années, jusqu'au Noachien pour les terrains les plus anciens. Il s'agit donc d'une indication forte de l'aridité extrême du climat martien au cours de l'Amazonien, aridité qui avait semble-t-il déjà commencé, au moins localement, à la fin de l'Hespérien.

Par ailleurs, la découverte, par le rover martien Opportunity sur Meridiani Planum en 2004, de jarosite, un sulfate ferrique hydraté de sodium (sur Terre, le sodium y est remplacé par le potassium) de formule $\text{NaFe}^{(\text{III})}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ ^[139], a permis de préciser encore davantage l'enchaînement des épisodes climatiques sur Mars^[140]. Ce minéral se forme en effet, sur Terre, par l'altération de roches volcaniques en milieu aqueux oxydant acide, de sorte que sa détection sur Mars implique l'existence d'une période de climat humide permettant l'existence d'eau liquide acide. Mais ce minéral est également assez rapidement dégradé par l'humidité, pour former des oxyhydroxydes ferriques tels que la goethite $\alpha\text{-FeO(OH)}$, qui a par ailleurs été retrouvée en d'autres endroits de la planète (notamment par le rover Spirit dans le cratère Gusev). Par conséquent, la formation de la jarosite en climat humide a dû être rapidement suivie jusqu'à nos jours d'un climat aride afin de préserver ce minéral, nouvelle indication que l'eau liquide avait cessé d'exister à l'Amazonien mais avait été présente aux époques antérieures de l'histoire de Mars.



Visualisation d'un dégagement de méthane dans l'atmosphère de Mars début 2009, pendant l'été de l'hémisphère nord martien^[133].

Histoire géologique de Mars

Le scénario qui suit se veut une synthèse plausible déduites de nos connaissances actuelles issues des différentes campagnes d'exploration de Mars depuis une quarantaine d'années et dont les résultats ont été résumés dans l'article Géologie de la planète Mars.

Formation et différentiation

Comme les autres planètes du système solaire, Mars se serait formée il y a environ 4,6 milliards d'années par accrétion gravitationnelle de planétésimaux résultant de la condensation de la nébuleuse solaire. Étant située en deçà de la limite des 4 UA du Soleil, au-delà de laquelle peuvent se condenser les composés volatils tels que l'eau H_2O , le méthane CH_4 ou encore l'ammoniac NH_3 , Mars s'est formée à partir de planétésimaux de nature essentiellement sidérophile (riches en fer) et lithophile (constitués de silicates), mais avec une teneur accrue en éléments chalcophiles, à commencer par le soufre qui semble bien plus abondant sur Mars que sur Terre, comme l'ont révélé d'intéressantes mesures réalisées par Mars Global Surveyor^[80].



Vue d'artiste de la phase d'accrétion des planétésimaux dans la nébuleuse solaire^[141].

Cette teneur élevée en soufre aurait eu pour effet de favoriser la différenciation du globe martien, d'une part en abaissant la température de fusion des matériaux qui le constituent, et d'autre part en formant des sulfures de fer qui ont séparé chimiquement le fer des silicates et ont accéléré sa concentration au centre de la planète pour y former un noyau d'éléments sidérophiles, plus riche en éléments chalcophiles que le noyau terrestre ; l'étude des isotopes radiogéniques des météorites de Mars, et notamment du système $^{182}Hf/^{182}W$, a ainsi révélé que le noyau de Mars se serait formé en à peine 30 millions d'années^[142], contre plus de 50 millions d'années pour la Terre. Ce taux d'éléments légers expliquerait à la fois pourquoi le noyau de Mars est encore liquide, et pourquoi les épanchements de lave les plus anciens identifiés à la surface de la planète semblent avoir été particulièrement fluides, jusqu'à s'écouler sur près d'un millier de kilomètres autour d'Alba Patera par exemple.

La nature des planétésimaux qui ont conduit à la formation de la planète a déterminé la nature de l'atmosphère primordiale de Mars, par dégazage progressif des matériaux en fusion dans la masse de la planète en cours de différenciation. En l'état actuel de nos connaissances^{[143] , [144]}, cette atmosphère devait être essentiellement constituée de vapeur d'eau H_2O ainsi que de dioxyde de carbone CO_2 , d'azote N_2 , de dioxyde de soufre SO_2 , et peut-être d'assez grandes quantités de méthane CH_4 .

Au début de son existence, Mars a certainement dû perdre, plus rapidement que la Terre, une fraction importante de la chaleur issue de l'énergie cinétique des planétésimaux qui se sont écrasés les uns sur les autres pour conduire à sa formation : sa masse est en effet 10 fois moindre que celle de la Terre, alors que sa surface est seulement 3,5 fois plus réduite, ce qui signifie que le rapport surface/masse de la planète rouge est près de trois fois plus élevé que celui de notre planète. Une croûte a donc certainement dû se solidifier à sa surface en une centaine de millions d'années, et il est possible que la dichotomie crustale observée aujourd'hui entre les hémisphères nord et sud remonte aux quelques centaines de millions d'années qui ont suivi la formation de la planète.

Une fois suffisamment refroidie, il y a environ 4,5 à 4,4 milliards d'années, la surface solide de la planète dut recevoir en pluie la vapeur d'eau atmosphérique condensée, qui réagit avec le fer contenu dans les minéraux chauffés pour l'oxyder en libérant de l'hydrogène H_2 , lequel, trop léger pour s'accumuler dans l'atmosphère, s'échappa dans l'espace. Ceci aurait conduit à une atmosphère primitive où ne subsistèrent plus que le CO_2 , le N_2 et le SO_2 comme

constituants majoritaires de l'atmosphère martienne primitive, avec une pression atmosphérique totale alors plusieurs centaines de fois supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui — la pression standard actuelle au niveau de référence martien est par définition de 610 Pa.

Champ magnétique global et climat tempéré humide

Environnement martien au Noachien

Pendant l'époque géologique appelée *Noachien* qui prit fin il y a environ 3,7 à 3,5 milliards d'années, Mars semble avoir offert des conditions très différentes de celles d'aujourd'hui et assez similaires à celles de la Terre à cette époque, avec un champ magnétique global protégeant une atmosphère épaisse et peut-être tempérée permettant l'existence d'une hydroosphère centrée autour d'un océan boréal occupant l'actuelle étendue de Vastitas Borealis.

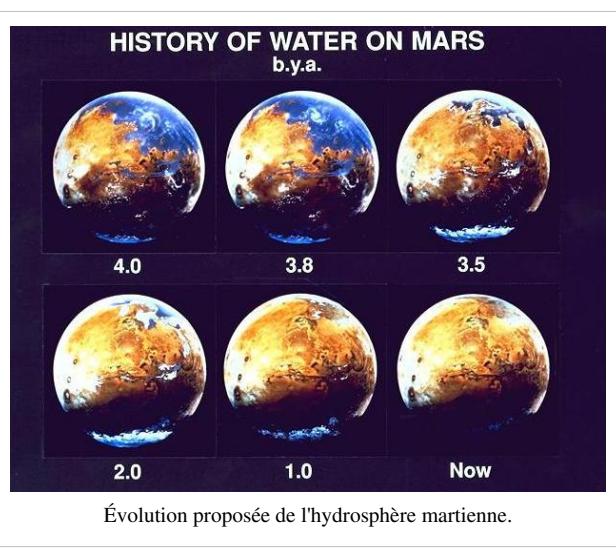
L'existence passée d'un champ magnétique global autour de Mars a été découverte à travers l'observation, réalisée dès 1998 par Mars Global Surveyor, d'un paléomagnétisme au-dessus des terrains les plus anciens de l'hémisphère sud, notamment dans la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum^[85]. La magnétosphère générée par ce champ magnétique global devait agir, comme la magnétosphère terrestre de nos jours, en protégeant l'atmosphère de Mars de l'érosion par le vent solaire, qui tend à éjecter dans l'espace les atomes de la haute atmosphère en leur transférant l'énergie nécessaire pour atteindre la vitesse de libération.

Un effet de serre aurait été à l'œuvre pour tempérer l'atmosphère martienne, qui sinon aurait été plus froide qu'aujourd'hui en raison du plus faible rayonnement émis par le Soleil, alors encore jeune et en voie de stabilisation. Les simulations montrent qu'une pression partielle de 150 kPa de CO₂ aurait permis d'avoir une température moyenne au sol égale à celle d'aujourd'hui, soit 210 K (un peu moins de -60 °C). Un renforcement de cet effet de serre au-delà de cette température aurait pu provenir de plusieurs facteurs complémentaires :

- la condensation du CO₂ en nuages réfléchissants dans le domaine de l'infrarouge aurait contribué à renvoyer au sol le rayonnement thermique qu'il émet, de façon encore plus efficace que ne le font les nuages terrestres, constitués d'eau.
- la présence en haute altitude de SO₂ très absorbant dans le domaine de l'ultraviolet aurait contribué à réchauffer la haute atmosphère, comme le fait la couche d'ozone sur Terre par un mécanisme similaire.
- le rôle de l'eau et du méthane (le CH₄ génère un effet de serre vingt fois plus puissant que celui du CO₂) n'est peut-être pas non plus à négliger.

Indices d'une hydroosphère martienne au Noachien

Nous savons que l'eau liquide était alors abondante sur Mars car l'étude minéralogique de la surface de la planète a révélé la présence significative de phyllosilicates dans les terrains remontant à cette époque^{[145] , [146] , [147]}. Or les phyllosilicates sont de bons indicateurs de l'altération de roches ignées en milieu humide. L'abondance de ces minéraux dans les sols antérieurs à environ 4,2 milliards d'années a conduit l'équipe de planétologues de l'ESA responsable de l'instrument OMEGA et dirigée par Jean-Pierre Bibring à proposer la dénomination de Phyllosien pour l'éon stratigraphique correspondant : c'est l'époque semble-t-il la plus humide qu'ait connu la planète Mars.



Des études plus fines réalisées *in situ* par les deux Mars Exploration Rovers, Spirit et Opportunity, respectivement dans le cratère Gusev, au sud d'Apollinaris Patera, et sur Meridiani Planum, suggèrent même l'existence passée d'une hydroosphère suffisamment importante pour avoir pu homogénéiser le taux de phosphore des minéraux analysés sur ces deux sites situés de part et d'autre de la planète^[148]. Une approche différente, fondée sur la cartographie de l'abondance du thorium, du potassium et du chlore à la surface de Mars par le spectromètre gamma (GRS) de la sonde Mars Odyssey^[149], aboutit au même résultat.

Par ailleurs, l'étude détaillée des traces laissées dans le paysage martien par de supposés cours d'eau et étendues liquides a conduit à proposer l'existence d'un véritable océan couvrant près du tiers de la surface de la planète au niveau de l'actuel Vastitas Borealis. Dans un article de 1991 devenu classique^[150], Baker *et al.* allaient jusqu'à identifier certaines structures aux traces d'un ancien rivage. Les lignes côtières ainsi identifiées se trouvaient de surcroît correspondre aux courbes d'altitude constante corrigées des déformations ultérieures déduites du volcanisme et d'estimations quant au changement d'axe de rotation de la planète^[151]. Ces projections, parfois assez hardies, n'ont cependant pas convaincu tout le monde, et d'autres théories ont également été proposées pour rendre compte de ces observations, notamment en se fondant sur la possible origine volcanique des structures ainsi interprétées^[152].

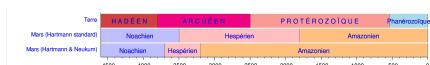
L'idée d'un océan boréal au cœur d'une hydroosphère étendue demeure néanmoins toujours aussi séduisante, et de nombreuses équipes travaillent à analyser, avec des outils toujours plus performants, les données topographiques continuellement enrichies des informations recueillies par les sondes actuellement en fonctionnement autour de Mars, dans l'espoir d'établir la distribution géographiques de l'hydroosphère martienne au noachien^[153].

Dans le même ordre d'idées, l'existence du lac Eridania au cœur des hautes terres de Terra Cimmeria a été suggérée pour expliquer notamment la genèse de Ma'adim Vallis à partir de l'observation de certaines formations topographiques interprétées comme d'anciens rivages fossilisés^{[154], [155]}.

Éventualité d'une abiogenèse au Noachien

Les conditions martiennes du Noachien auraient peut-être pu permettre l'émergence de formes de vie sur Mars comme cela s'est passé sur Terre : outre la présence d'eau liquide et l'effet de serre qui aurait pu maintenir une température suffisamment élevée, l'abondance des argiles permet d'envisager des scénarios d'apparition de la vie élaborés dans le cadre de certaines des (nombreuses) théories d'abiogenèse^[156], tandis que d'autres théories (par exemple celle conçue à la fin du XX^e siècle par Günter Wächtershäuser^{[157], [158], [159], [160]}) envisagent l'abiogenèse terrestre dans des sources hydrothermales riches en sulfure de fer(II) FeS, un environnement également susceptible d'avoir existé sur Mars au Noachien. Ces conditions seraient cependant rapidement devenues nettement moins favorables à l'éon suivant, l'Hespérien, qui aurait débuté au plus tard il y a 3.5 milliards d'années : dominé par la chimie du soufre, il s'est certainement traduit par un abaissement significatif du pH de l'eau martienne sous l'effet de pluies d'acide sulfurique H₂SO₄, qui auraient eu accessoirement pour conséquence de permettre l'existence d'eau liquide à des températures sensiblement inférieures à 0 °C.

Or les plus anciennes traces de « vie » détectées sur notre planète ne remontent pas au-delà de 3.85 milliards d'années pour la plus reculée de toutes les dates publiées^[161] (autour de la limite conventionnelle entre l'Hadéen et l'Archéen), soit 700 millions d'années après la formation de la Terre, c'est-à-dire presque autant que la durée totale du premier éon martien dans l'hypothèse la plus favorable, comme le rappelle la chronologie ci-dessous des éons terrestres comparée à l'échelle de Hartmann standard et à l'échelle de Hartmann & Neukum :



Dans ces conditions, si un processus d'abiogenèse avait pu aboutir sur Mars au Noachien, il aurait conduit à des formes de vie qui auraient eu très peu de temps pour évoluer avant les bouleversements de l'Hespérien, à une époque — autour de 4 à 3.8 milliards d'années avant le présent — marquée par les impacts d'astéroïdes du grand bombardement tardif.

À titre de comparaison, la photosynthèse ne serait pas apparue sur Terre avant 3 milliards d'années^[162], voire seulement 2,8 milliards d'années^{[163], [164]}, tandis que les plus anciennes cellules eucaryotes ne remonteraient pas au-delà de 2,1 milliards d'années^[165], et la reproduction sexuée ne daterait pas de plus de 1,2 milliards d'années^[166].

Premiers épanchements volcaniques et grand bombardement tardif

Alors que le Phyllosien semble avoir été plutôt dépourvu d'activité volcanique, l'analyse détaillée des données recueillies par l'instrument OMEGA de Mars Express, conçu pour l'analyse minéralogique de la surface martienne, a conduit à identifier, à la fin de cet éon, une période de transition, s'étendant d'environ 4,2 à 4,0 milliards d'années avant le présent, marquée par l'apparition d'une activité volcanique significative^[167] alors que la planète connaissait vraisemblablement encore des conditions tempérées et humides sous une atmosphère plutôt épaisse.

De surcroît, l'exploration par des sondes de la surface des planètes telluriques — à commencer par la Lune — à la fin du XX^e siècle a conduit à postuler un épisode dit de « grand bombardement tardif » (appelé *Late Heavy Bombardment* par les Anglo-saxons) s'étendant sur une période datée approximativement de 4,0 à 3,8 milliards d'années avant le présent, à plus ou moins 50 millions d'années près. C'est au cours de cet épisode que se seraient formés les grands bassins d'impact aujourd'hui visibles sur Mars, tels qu'Hellas, Argyre ou encore Utopia.

Survenu à la fois sur Terre et sur Mars, ce cataclysme serait peut-être également à l'origine de la différence de concentration en oxyde de fer (plus du simple au double) observée entre le manteau de la Terre et celui de Mars^[168]. Les impacts cosmiques auraient en effet liquéfié le manteau terrestre sur peut-être 1200 à 2000 km d'épaisseur, portant la température de ce matériau jusqu'à 3200 °C, température suffisante pour réduire le FeO en fer et en oxygène^[169]. Le noyau terrestre aurait ainsi connu un apport supplémentaire en fer issu de la réduction du manteau à l'issue de ce bombardement météoritique, ce qui expliquerait la teneur pondérale résiduelle d'environ 8 % de FeO dans le manteau terrestre. Sur Mars, au contraire, la température du manteau fondu n'aurait jamais dépassé 2200 °C, température insuffisante pour réduire l'oxyde de fer(II) et laissant donc inchangée la teneur en FeO du manteau martien à environ 18 %. Ceci expliquerait pourquoi Mars est aujourd'hui extérieurement plus de deux fois plus riche en oxydes de fer que la Terre alors que ces deux planètes sont supposées avoir été originellement similaires.

A l'issue de ces impacts géants, les conditions à la surface de la planète ont vraisemblablement été sensiblement altérées. En premier lieu, Mars aurait perdu une fraction importante de son atmosphère, dispersée dans l'espace sous l'effet de ces collisions. Le climat général de la planète aurait été bouleversé par les poussières et les gaz injectés dans l'atmosphère lors de ces collisions, ainsi que par un possible changement d'obliquité lors de tels impacts. Mais il est également possible que l'énergie cinétique des impacteurs, en injectant de l'énergie thermique dans le manteau martien, ait modifié le gradient thermique dont on suppose qu'il entretient, dans le noyau planétaire, les mouvements de convection à l'origine de l'effet dynamo générant le champ magnétique global, ce qui aurait fait disparaître la magnétosphère martienne dès la fin du Noachien^[90].

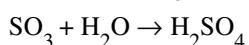
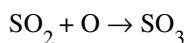
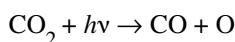
Formation des grandes structures volcaniques martiennes

Les impacts à l'origine des grands bassins martiens ont peut-être initié le plus grand épisode volcanique de l'histoire de la planète, définissant l'époque qu'on appelle l'Hespérien. Celle-ci est caractérisée, d'un point de vue pétrologique, par l'abondance des minéraux contenant du soufre, et notamment de sulfates hydratés tels que la kiesérite $MgSO_4 \cdot H_2O$ ^[170] et le gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ^[171].

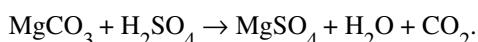
Les principales formations volcaniques martiennes seraient apparues à l'Hespérien, peut-être même, pour certaines, dès la fin du Noachien ; c'est notamment le cas des plaines de laves telles que Malea Planum, Hesperia Planum et Syrtis Major Planum. Alba Mons aurait peut-être également commencé son activité à ce moment, suite à l'impact à l'origine du bassin d'Hellas Planitia situé aux antipodes. Le renflement de Tharsis et les volcans d'Elysium Planitia, en revanche, remonteraient au milieu de l'Hespérien, aux alentours de 3,5 milliards d'années avant le présent, date qui correspondrait à la période d'activité volcanique maximum sur la planète rouge ; Alba Mons aurait ainsi connu sa

plus grande activité dans la seconde moitié de l'Hespérien jusqu'au début de l'Amazonien.

Ce volcanisme aurait libéré dans l'atmosphère de Mars de grandes quantités de dioxyde de soufre SO_2 qui, en réagissant avec l'eau dans les nuages, aurait formé du trioxyde de soufre SO_3 donnant, en solution dans l'eau, de l'acide sulfurique H_2SO_4 . Cette réaction aurait sans doute été favorisée sur Mars par la photolyse à haute altitude des molécules d'eau, sous l'action du rayonnement ultraviolet du Soleil, qui libère notamment des radiaux hydroxyle HO^\bullet et produit du peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , un agent oxydant. La comparaison avec l'atmosphère de Vénus, qui possède des nuages d'acide sulfurique dans une atmosphère de dioxyde de carbone, souligne également le rôle de la dissociation photochimique du dioxyde de carbone par les ultraviolets de moins de 169 nm pour initier l'oxydation du dioxyde de soufre :



L'eau martienne aurait donc été chargée d'acide sulfurique à l'Hespérien, ce qui aurait à la fois pour conséquence d'abaisser sensiblement son point de congélation — l'eutectique du mélange $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ gèle ainsi un peu en-dessous de -20 °C, et celui du mélange $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 6,5\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ gèle autour de 210 K, température légèrement inférieure à -60 °C^[35], qui est la température moyenne actuelle sur Mars — et de conduire à la formation de sulfates plutôt que de carbonates. Ainsi s'expliquerait pourquoi, alors que Mars possédait *a priori* une atmosphère de CO_2 et de grandes étendues d'eau liquide, on n'y trouve quasiment pas de carbonates, alors que les sulfates semblent, au contraire, particulièrement abondants^{[172], [173]} : la formation des carbonates est inhibée par l'acidité — que la présence de sulfates laisse supposer (la sidérite FeCO_3 , *a priori* le carbonate le moins soluble, ne précipite qu'à pH > 5^[174]) — et la libération continue de SO_2 par l'activité volcanique à l'Hespérien aurait déplacé le CO_2 des carbonates qui auraient pu s'être formés au Noachien pour les remplacer par des sulfates, comme cela se produit par exemple à pH faible avec le magnésium :



La chronostratigraphie minéralogique proposée par l'équipe de planétologues responsable de l'instrument OMEGA de la sonde Mars Express fait correspondre, à l'Hespérien, l'éon stratigraphique appelé « Theiikien », terme forgé — via l'anglais — à partir du grec ancien τὸ θεῖον signifiant « soufre » — la racine exacte serait plutôt l'adjectif *θεικός dans le sens de « sulfurique ». Cet éon serait cependant daté de 4.0 à 3.6 milliards d'années avant le présent, c'est-à-dire avec un décalage de 300 à 400 millions d'années vers le passé par rapport à l'échelle de Hartmann & Neukum.

Ralentissement du volcanisme et dessiccation de l'atmosphère

Une fois passé l'épisode volcanique majeur de l'Hespérien, Mars aurait progressivement vu son activité interne se réduire jusqu'à nos jours, où elle semble être devenue imperceptible, voire peut-être nulle. En effet, plusieurs épisodes volcaniques, d'intensité décroissante, auraient eu lieu au cours de l'Amazonien, notamment au niveau d'Olympus Mons, et certaines éruptions se seraient même produites il y a seulement 2 millions d'années^[1], mais cette activité demeure épisodique et, en tout état de cause, insignifiante comparée par exemple au volcanisme existant actuellement sur Terre.

Parallèlement, l'atmosphère de Mars aurait subi une érosion continue depuis le début de l'Hespérien sous l'effet du vent solaire suite à la disparition de la magnétosphère, sans doute dès la fin du Noachien. Une telle érosion, même modérée, mais continue sur plusieurs milliards d'années, aurait sans difficulté dispersé dans l'espace l'essentiel de ce qu'il restait d'enveloppe gazeuse à la surface de Mars après le grand bombardement tardif. Il s'en est suivi la disparition progressive de l'effet de serre dû au CO_2 martien, d'où la baisse continue de la température et de la pression atmosphérique de la planète à partir de l'Hespérien et tout au long de l'Amazonien.

La présence d'eau liquide sur Mars a donc progressivement cessé d'être continue pour ne plus être qu'éparse et épisodique. Les conditions martiennes actuelles permettent en effet l'existence d'eau liquide dans les régions les plus basses de la planète dans la mesure où cette eau est chargée de chlorures et/ou d'acide sulfurique, ce qui semble précisément être le cas sur Mars compte tenu du résultat des analyses effectuées *in situ* par les sondes qui ont étudié chimiquement le sol de la planète rouge. Des précipitations significatives semblent également avoir eu lieu jusqu'au milieu de l'Amazonien, à en juger par les arêtes sinuuses identifiées par exemple à l'est d'Aeolis Mensae^[175]. Mais, au cours de l'Hespérien et de l'Amazonien, les conditions martiennes globales sont passées d'une atmosphère épaisse, humide et tempérée à une atmosphère ténue, aride et froide.

Ces conditions particulières, exposant, pendant des milliards d'années, les minéraux de la surface martienne à une atmosphère sèche chargée d'ions oxydants, ont favorisé l'oxydation anhydre du fer sous forme d'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 (hématite) amorphe, à l'origine de la couleur rouille caractéristique de la planète. Cette oxydation demeure néanmoins limitée à la surface, les matériaux situés immédiatement en-dessous étant la plupart du temps demeurés dans leur état antérieur, avec une couleur plus sombre. Cette prédominance des oxydes ferriques est à l'origine du terme *sidérikiens* désignant l'éon stratigraphique correspondant, forgé par les planétologues en charge de l'instrument OMEGA de la sonde Mars Express à l'ESA, à partir du grec ancien ὁ σίδηρος signifiant « fer » — la racine exacte serait plutôt l'adjectif *σιδηρικός dans le sens de « ferrique » — et qui débuterait dès 3,6 milliards d'années avant le présent.

La transition entre Hespérien et Amazonien aurait en fait été assez progressive, ce qui explique l'extrême variabilité des dates définissant la limite entre ces deux époques : 3.2 milliards d'années avant le présent selon l'échelle de Hartmann & Neukum, mais seulement 1.8 milliards d'années selon l'échelle standard de Hartmann.

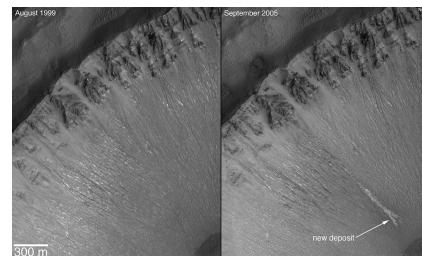
L'eau sur Mars

De l'abondance d'eau liquide du Noachien, il ne reste plus aujourd'hui que des traces dans l'atmosphère de Mars et, sans doute, d'importantes quantités d'eau gelée dans le sol et les calottes polaires de Mars, sous forme de pergélisol, voire de mollisol^[176]. En 2005, la sonde Mars Express a détecté, à proximité du pôle nord, un lac de glace d'eau dans un cratère^[177]. En 2007, le radar MARSIS de Mars Express a mis en évidence de grandes quantités de glace d'eau enfouies dans les terrains qui bordent la calotte résiduelle australe. Ainsi, le volume de glace d'eau contenue dans le pôle sud est estimé à 1.6 millions de km³, soit approximativement le volume de glace d'eau de la calotte résiduelle boréale^[178].

La présence d'eau dans le sous-sol a également été détectée à mi-distance entre l'équateur et le pôle nord. Ainsi, en 2009, la sonde Mars Reconnaissance Orbiter a révélé que des cratères d'impact récemment formés contenaient de la glace pure à 99 %^[179].



Cliché d'une formation ressemblant à un lac pris par l'instrument THEMIS de la sonde Mars Odyssey le 14 novembre 2003.



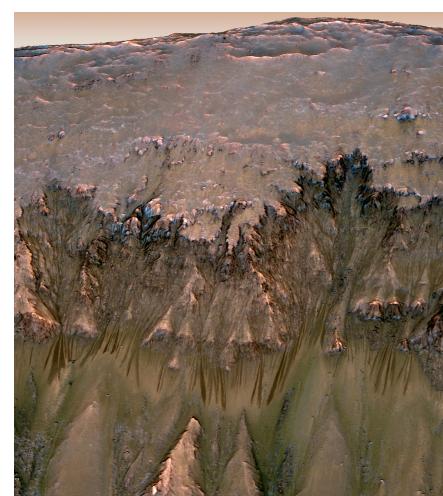
La photo de droite prise le 10 septembre 2005 par la sonde Mars Global Surveyor révèle la présence d'un dépôt blanchâtre ressemblant à de la glace d'eau et qui n'était pas présent le 30 août 1999 (image de gauche).

La présence durable d'eau liquide à la surface de Mars est considérée comme improbable. En effet, compte tenu de la pression et de la température à la surface de Mars, l'eau ne peut exister à l'état liquide et passe directement de l'état solide à l'état gazeux par sublimation. Cependant, de récents éléments suggèrent la présence temporaire d'eau liquide dans des conditions particulières.

- En 2004, l'équipe scientifique de THEMIS, l'instrument de Mars Odyssey prévu pour détecter la présence d'eau passée sur Mars, a découvert sur une des images de la sonde une « structure qui ressemble à un lac située au centre du cratère »^[180].
- De très brèves coulées pourraient encore avoir lieu. Ainsi, Michael Malin et Kenneth Edgett (et co-auteurs), chercheurs de la Nasa, ont annoncé en décembre 2006 avoir désormais la preuve d'écoulements granulaires épisodiques actifs. L'analyse d'images haute résolution *MOC* prises par la sonde Mars Global Surveyor a révélé la présence de nouvelles ravines (*gullies*) dont la mise en place pourrait être liée à des écoulements de boue^[181]. Mais des analyses ultérieures ont montré que ces observations pouvaient tout aussi bien être expliquées par des écoulements secs^[182].
- Au niveau du bassin d'impact d'Hellas Planitia, la différence d'altitude entre le rebord et le fond est d'environ 9 km. La profondeur du cratère (7152 mètres sous le niveau topographique de référence^[183]) explique la pression atmosphérique en contre-bas : 1155 Pa^[183] (soit 11.55 mbar ou encore 0.01 atm). C'est 89 % plus élevé que la pression au niveau zéro (610 Pa, soit 6.1 mbar) et au-dessus du point triple de l'eau, suggérant que la phase liquide serait éphémère (évaporation à mesure de la fusion de la glace) si la température dépasse 273.16 K (0.01 °C)^[184] dans le cas de l'eau pure. Une température inférieure serait néanmoins suffisante pour de l'eau salée, ce qui serait justement le cas de l'eau martienne — de l'eau liquide existe sur Terre jusqu'à -24 °C, par exemple dans le très salé lac Don Juan, en Antarctique^[185], et certaines saumures demeurent liquides à des températures encore plus basses, de même que certaines solutions d'acide sulfurique^[35].

Des traces saisonnières d'écoulements ont également été identifiées au printemps 2011 par l'instrument HiRISE de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter en plusieurs points de la surface martienne sous forme de traces sombres qui s'allongent et s'élargissent sur des pentes exposées au soleil, notamment sur les bords du cratère Newton^[187]. Ces formations assez sombres, larges de 0.5 à 5 mètres, se forment préférentiellement face à l'équateur sur des pentes inclinées de 25° à 40° entre 48° S et 32° S, avec une longueur maximale à la fin de l'été et au début de l'automne local, alors que la température de surface se situe entre 250 et 300 K^[188].

Les variations d'éclat, la distribution en latitude et la saisonnalité de ces manifestations suggèrent qu'elles soient l'œuvre d'une substance volatile, mais celle-ci n'a pas été directement détectée. Elles se trouvent en des points trop chauds de la surface martienne pour qu'il puisse s'agir de dioxyde de carbone gelé, et généralement trop froids pour qu'il puisse également s'agir d'eau pure gelée. Ces observations plaident donc également en faveur de saumures, qui semblent se former ponctuellement de temps en temps à la surface de la planète^[189].^[190]

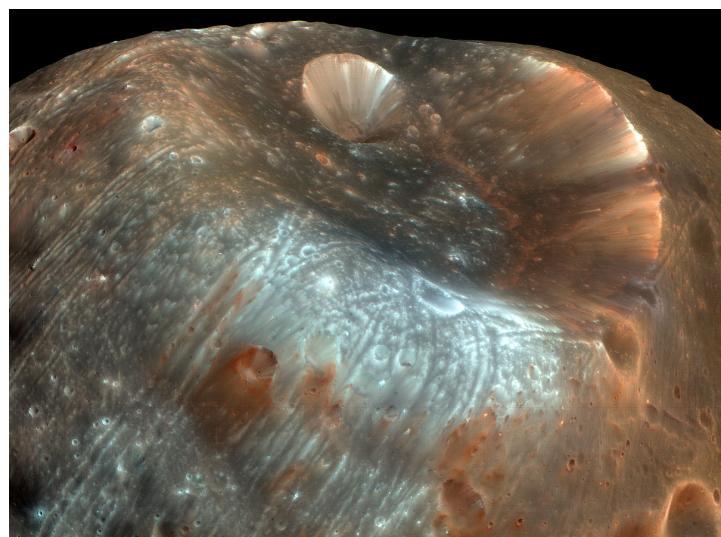


Traces d'écoulements observées par l'instrument HiRISE de la sonde MRO le 30 mai 2011 par 41,6° S et 202,3° E^[186] sur les bords du cratère Newton.

Satellites naturels

Mars possède deux petits satellites naturels, Phobos et Déimos, ressemblant à des astéroïdes de type chondrite carbonée ou de type D, dont l'origine demeure incertaine^[191].

Il pourrait en effet s'agir d'astéroïdes incidents capturés par Mars, mais la difficulté de ce scénario est d'expliquer comment, dans ce cas, ces deux satellites ont pu acquérir leurs orbites actuelles, circulaires et peu inclinées — à peine 1° — par rapport à l'équateur martien : ceci impliquerait des mécanismes de freinage atmosphérique et de régularisation par effets de marée^[192], scénarios qui présentent des difficultés par rapport à l'insuffisance de l'atmosphère de Mars pour réaliser un tel freinage dans le cas de Phobos^[193], et à l'insuffisance du temps requis pour circulariser l'orbite de Déimos^[193]. Néanmoins, ce mécanisme de capture aurait pu être grandement facilité dans le cas d'astéroïdes doubles dont l'une des composantes aurait été éjectée tandis que l'autre se satellisait autour de la planète rouge.



Cratère Stickney, de 9 km de diamètre, vu par l'instrument HiRISE de MRO à 6000 km de Phobos le 23 mars 2008, avec le cratère Limtoc visible à l'intérieur et les sillons parallèles au premier plan ; agrandissement de l'image ci-dessous.

Les deux satellites de Mars pourraient également s'être formés en même temps que leur planète mère, la difficulté étant dans ce cas d'expliquer la différence de composition entre Mars d'une part et ses deux satellites d'autre part. Une troisième hypothèse fait de Phobos et Deimos deux corps agglomérés à partir des résidus satellisés suite à un ou plusieurs impacts majeurs de planétésimaux peu après la formation de Mars^[194] — scénario rejoignant « l'hypothèse Théia » expliquant la formation de la Lune par un mécanisme similaire intervenu sur la proto-Terre.

Phobos

Phobos, le satellite naturel de Mars le plus proche de sa planète, est une masse irrégulière de $27 \times 22 \times 18$ km qui orbite à moins de 6000 km d'altitude, au point de n'être pas visible depuis les régions polaires de la surface martienne, au-delà de $70,4^\circ$ de latitude nord ou sud, où il est masqué par la courbure de la planète. La sonde Mars Global Surveyor a révélé que sa surface, très cratérisée, est recouverte d'un régolithe épais d'une centaine de mètres provenant sans doute des myriades d'impacts survenus à la surface de cet objet. Sa masse volumique moyenne est moitié moindre que celle de Mars, à un peu moins de 1890 kg/m^3 , suggérant une nature poreuse résultant d'une structure en blocs agglomérés dont la cohésion globale serait assez faible. Il s'agirait d'un astéroïde de type D, c'est-à-dire constitué de matériaux où dominent les silicates anhydres avec une proportion notable de carbone, de composés organiques ainsi que, peut-être, de glace d'eau. Il aurait une composition proche d'une chondrite carbonée, expliquant son albédo d'à peine 0,071. La nature minéralogique de la surface examinée par le spectromètre infrarouge ISM de la sonde Phobos 2 semble correspondre à de l'olivine avec localement des concentrations d'orthopyroxène^[196]. La présence d'eau en surface du satellite a clairement été écartée par plusieurs études^{[197] , [198]} mais ne demeure pas exclue en profondeur.



Le satellite Phobos de Mars vu le 23 mars 2008 à 6800 km de distance par l'instrument HiRISE de la sonde MRO^[195]. Les sillons sont bien visibles. La résolution de cette image permet d'y percevoir des détails de 20 cm.

L'un des traits caractéristiques de Phobos est la présence de sillons parallèles d'au plus 30 m de profondeur, 200 m de large et 20 km de long, qui semblent envelopper le satellite radialement autour du cratère Stickney, et qui pourraient en fait être les traces de débris projetés dans l'espace lors d'impacts sur Mars qui auraient été balayés en orbite par Phobos : les sillons semblent en réalité « s'écouler » sur la surface du satellite à partir de son point « avant » — dans le sens de sa révolution synchrone autour de Mars — davantage qu'à partir du cratère Stickney lui-même, situé, il est vrai, à proximité du point avant^[199]. Ces sillons sont plus précisément des catenae, qui résultent de chaînes de cratères alignés.

Orbitant à l'intérieur de l'orbite synchrone de Mars, située à 17000 km d'altitude, Phobos est ralenti par les forces de marée exercées par le globe martien, ce qui lui fait perdre de l'altitude à raison d'environ 18 cm par an : à cette vitesse, il atteindra sa limite de Roche dans environ 11 millions d'années et se désagrègera à environ 4000 km d'altitude au-dessus de la surface martienne.

Déimos

Le second satellite de Mars, Déimos, est encore plus petit que le premier, avec des dimensions de $15 \times 12.2 \times 10.4$ km. Il orbite à un peu plus de 23000 km d'altitude, sur une orbite quasiment circulaire inclinée de moins d'un degré par rapport à l'équateur martien. Il semble être de même nature que Phobos — astéroïde de type D de composition proche d'une chondrite carbonée — mais sa surface, *a priori* tout aussi cratérisée que celle de Phobos, serait nettement plus adoucie par une couche de régolithe suffisamment épaisse pour combler la plupart des cratères. La masse volumique de ce régolithe a été estimée au radar à environ 1100 kg/m^3 , celle du satellite dans son ensemble étant de l'ordre de 1470 kg/m^3 .

Les vues prises par Mars Reconnaissance Orbiter ont montré une surface de couleur variable selon les régions, le régolithe ayant une teinte rouge sombre plus prononcée que les surfaces semble-t-il plus récentes, situées autour de certains cratères et sur le bord des arêtes. Les catenae formant les sillons caractéristiques de la surface de Phobos n'ont pas été observées sur Déimos.



Vue de Déimos par l'instrument HiRISE de la sonde MRO le 21 février 2009 [200] montrant des détails de 60 m .

Les surfaces semblaient plus récentes, situées autour de certains cratères et sur le bord des arêtes. Les catenae formant les sillons caractéristiques de la surface de Phobos n'ont pas été observées sur Déimos.

Propriété	Phobos	Deimos
Dimensions	$26.8 \times 22.4 \times 18.4$ km	$15.0 \times 12.2 \times 10.4$ km
Masse	1.072×10^{16} kg	1.48×10^{15} kg
Masse volumique moyenne	1887 kg/m^3	1471 kg/m^3
Gravité de surface	$1.9 \text{ à } 8.4 \text{ mm/s}^2$	environ 3.9 mm/s^2
Vitesse de libération	11.3 m/s	5.6 m/s
Albédo	0.071	0.068
Demi-grand axe de l'orbite	9377.2 km	23460 km
Excentricité orbitale	0.0151	0.0002
Inclinaison de l'axe	1.075 °	0.93 °
Période orbitale	$0.3108418 \text{ sols} \approx 0.31891023 \text{ d}$	$1.2305 \text{ sols} \approx 1.26244 \text{ d}$

Propriétés des satellites naturels de Mars [201]

Découverte et nommage

Les deux satellites ont été découverts lors de l'opposition d'août 1877 par Asaph Hall à l'aide d'un télescope de 26 pouces depuis l'observatoire naval des États-Unis de Washington^[202],^[203].

Ils ont été originellement nommés *Phobus* et *Deimus* d'après une suggestion d'Henry Madan professeur au collège d'Eton d'après la ligne 119 du chant XV de l'Iliade^[204]:

« Ὡς φάτο, καὶ δὲ πόπους κέλετο Δεῖμόν τε Φόβον τε ζευγνύμεν, αὐτὸς δὲ ἔντε' ἐδύσετο παμφανώωντα. »

Il parla ainsi, et il ordonna à la Terreur et à la Crainte d'atteler ses chevaux, et il se couvrit de son armure splendide^[205].

Dans la mythologie grecque, Phobos et Déimos sont les fils du dieu Arès, en grec ancien *Φόβος* / *Phóbos* signifie « peur » et *Δεῖμος* / *Deîmos* « terreur ». Cette dénomination est un jeu de mot sur la polysémie du mot *satellite* qui peut désigner à la fois un astre (les satellites de la planète) ou bien une personne, un garde du corps (les satellites du dieu)^[206].

Astéroïdes troyens et croiseurs de Mars

Actuellement sont connus quatre troyens dans le sillage de Mars. Le premier, découvert en 1990, et le plus connu d'entre eux, est (5261) Eurêka, situé au point de Lagrange L₅. Les trois autres sont 1998 VF31 (au point L₅), 1999 UJ7 (au point L₄), et 2007 NS2 (au point L₅)^[207].

Mars possède aussi un astéroïde coorbital : (26677) 2001 EJ18.

Six autres astéroïdes sont également étroitement liés à Mars, mais ne semblent pas en être des troyens : 2001 FR127, 2001 FG24, 2001 DH47, 1999 ND43, 1998 QH56 et 1998 SD4^[208].

2007 WD₅ est un astéroïde géocroiseur et aréocroiseur de 50 m de long découvert le 20 novembre 2007 par Andrea Boattini, du Catalina Sky Survey. Selon le *Near Earth Object Program* de la NASA, il avait une chance sur 10000 (soit 0,01 %) d'impacter Mars le 30 janvier 2008^[209], impact qui ne s'est finalement pas produit.

Historique des observations de la planète

Observations antiques

« Hor-Desher »

« qui se déplace à reculons »

Mars faisant partie des 5 planètes visibles à l'œil nu (avec Mercure, Vénus, Jupiter, et Saturne), elle est observée depuis que les hommes regardent le ciel nocturne. Mars, lors de ses oppositions, est la planète la plus brillante après Vénus (sa magnitude apparente peut alors atteindre -2.9, le reste du temps, la deuxième planète la plus brillante est Jupiter).

La couleur rouge sang caractéristique de Mars lui valut dans l'Antiquité le rapprochement avec le dieu grec de la guerre *Arès* puis avec son équivalent romain *Mars*, le rouge évoquant le sang des champs de bataille.

Les Babyloniens la nommaient *Nirgal* ou *Nergal*, le dieu de la mort, des destructions et du feu. Les Égyptiens la nommaient « Horus rouge » (*hr Dšr, Hor-desher*) et connaissaient son « déplacement à reculons » (actuellement connu sous le nom de mouvement rétrograde)^[210].

Dans la mythologie hindoue, Mars est nommée *Mangala* (मङ्गल) du nom du dieu de la guerre. Mangala Vallis est nommé en son honneur.

En hébreu, elle est nommée *Ma'adim* (מָאַדִּים) : *Celui qui rougit*. Ma'adim Vallis reprend ce vocable.

En Asie de l'Est (Chine, Japon, Corée et Viêt Nam) Mars est 火星, littéralement l'astre (星) feu (火). En mandarin et cantonais, elle est couramment nommée huoxing (火星, huǒxīng en pinyin) et traditionnellement Yinghuo (熒惑, yínghuò en pinyin, litt. « flamboyant confus »). En japonais, 火星 en kanji, かせい en hiragana, ou kasei en rōmaji (qui a donné son nom à Kasei Vallis). En coréen, 火星 en hanja et 화성 en hangeul, transcrit en hwaseong.

Mars est encore connue de nos jours sous le nom de « Planète rouge ».

Des observations de l'astronomie pré-télescopique, il reste peu de documents, et ceux-ci sont teintés de religion ou d'astrologie (comme le zodiaque de Dendérah en Haute-Égypte). De plus, les observations à l'œil nu ne permettent pas d'observer la planète elle-même mais plutôt sa trajectoire dans le ciel.

Observations télescopiques

En 1600 à Prague, Johannes Kepler devient l'assistant de Tycho Brahe (mort en 1601) pour lequel il doit calculer l'orbite précise de Mars. Il met 6 ans à faire le calcul et découvre que les orbites des planètes sont des ellipses et non des cercles. C'est la première loi de Kepler qu'il publie en 1609 dans son ouvrage *Astronomia nova*.

La croyance en l'existence des canaux martiens dura de la fin du XIX^e siècle au début du XX^e siècle et marqua l'imagination populaire, contribuant au mythe de l'existence d'une vie intelligente sur la quatrième planète du système solaire. Leur observation, qui n'a jamais fait l'unanimité, provenait d'une illusion d'optique, phénomène fréquent dans les conditions d'observation de l'époque (pareidolie).

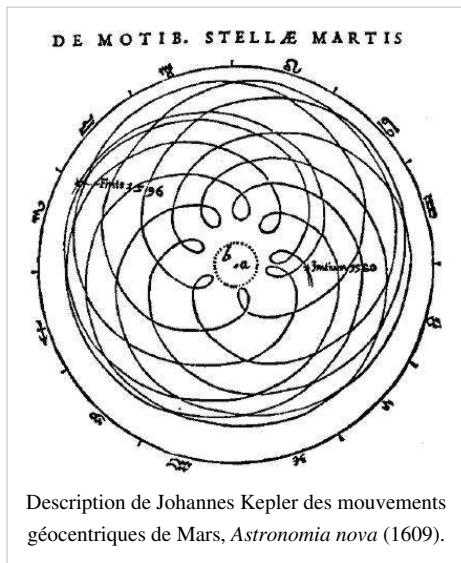
Au XX^e siècle, l'utilisation de grands télescopes permit d'obtenir les cartes les plus précises avant l'envoi des sondes. À l'observatoire de Meudon, les observations d'Eugène Antoniadi en 1909 aboutirent à la publication de *La planète Mars* en 1930. À l'Observatoire du Pic du Midi, des observations furent effectuées par Bernard Lyot, Henri Camichel, Audouin Dollfus, et Jean-Henri Focas^[210].

Exploration

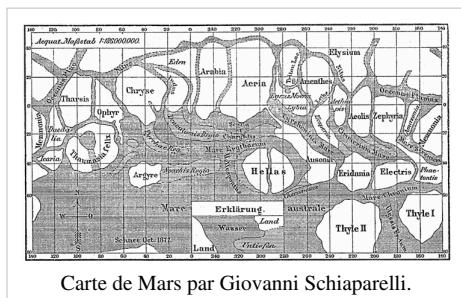
L'exploration de Mars se fait à l'aide de sondes spatiales : notamment de satellites artificiels et « d'astromobiles » (c'est-à-dire de rovers).

Elle tient une place importante dans les programmes d'exploration spatiale de la Russie (et avant elle par l'URSS), des États-Unis, de l'Union européenne, et du Japon, et commence à se matérialiser dans le programme spatial de la république populaire de Chine. Une quarantaine de sondes orbitales et d'atterrisseurs ont été lancés vers Mars depuis les années 1960.

N.B. Les dates ci-dessous sont celles du lancement et de la fin des missions ; la date intermédiaire est celle de l'insertion en orbite martienne pour un *orbiter* (satellite) ou de l'atterrissement sur Mars pour un *lander* (« atterrisseur »).



Description de Johannes Kepler des mouvements géocentriques de Mars, *Astronomia nova* (1609).



Carte de Mars par Giovanni Schiaparelli.

Missions en échec

- Sondes soviétiques :
 - **Mars 1960A**
 - **Mars 1960B**
 - **Mars 1962A**
 - **Mars 1962B**
 - **Mars 1** (1^{er} novembre 1962 - 21 mars 1963)
 - **Zond 4**
 - **Phobos 1**
 - **Phobos 2**
- Sondes américaines :
 - **Mariner 3**
 - **Mariner 8**
 - **Deep Space 2**
 - **Mars Climate Orbiter** (11 décembre 1998 - 23 septembre 1999)
 - **Mars Polar Lander** (3 janvier 1999 - 3 décembre 1999)
- La sonde britannique **Beagle 2** (2 juin 2003 - 25 décembre 2003)
- La sonde japonaise **Nozomi** (のぞみ) (3 juillet 1998 - 9 décembre 2003 - demeurée depuis lors en orbite héliocentrique)

Missions accomplies

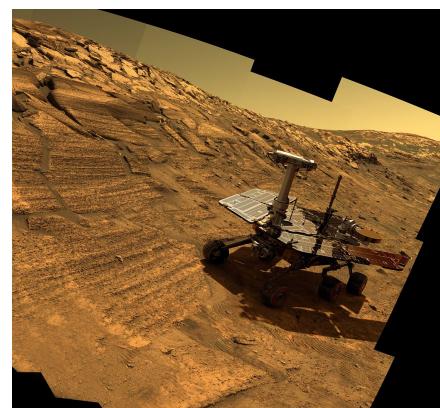
- Sondes américaines (simples survols) :
 - **Mariner 4** (28 novembre 1964 - survol le 14 juillet 1965 - mission terminée le 21 décembre 1967)
 - **Mariner 6** (24 février 1969 - survol le 31 juillet 1969)
 - **Mariner 7** (27 mars 1969 - survol le 5 août 1969)
- Satellites américains :
 - **Mariner 9** (30 mai 1971 - 13 novembre 1971 - 27 octobre 1972)
 - **Mars Global Surveyor** (7 novembre 1996 - 11 septembre 1997 - 5 novembre 2006)
- Atterriseurs soviétiques :
 - **Mars 2** (19 mai 1971 - 27 novembre 1971 - 22 août 1972)
 - **Mars 3** (28 mai 1971 - 2 décembre 1971 - 22 août 1972).
- Programme Viking, avec atterrisseur et orbiteur :
 - **Viking 1** (20 août 1975 - 11 novembre 1982)
 - **Viking 2** (9 septembre 1975 - 11 avril 1980)
- Atterrisseur **Phoenix** (4 août 2007 - 26 mai 2008 - 10 novembre 2008)



Mariner 4.

Missions orbitales en cours

-  **2001 Mars Odyssey** (7 avril 2001 - ?)
-  **Mars Express** (2 juin 2003 - ?)
-  **Mars Reconnaissance Orbiter** (12 août 2005 - ?)
-  **Phobos-Grunt** est une mission portée par la Russie dont le lancement a eu lieu 8 novembre 2011. L'objectif est de rapporter des échantillons du sol de Phobos.
-  **Yinghuo 1** est une mission chinoise sur laquelle peu de précisions ont filtré. Il s'agit d'un petit module devant être placé en orbite martienne par le vaisseau russe Phobos-Grunt pour y étudier l'environnement immédiat de la planète rouge.



Opportunity dans le cratère Endurance (vue simulée).

Missions au sol en cours

-  **Mars Exploration Rover :**
 - Spirit (10 juin 2003 - 3 janvier 2004 - 22 mars 2010, date du dernier contact avec ce rover, à présent enlisé.)
 - Opportunity (8 juillet 2003 - 24 janvier 2004 - ?)
-  **Mars Science Laboratory** est une mission développée par la NASA et lancée le 26 novembre 2011. Elle est équipée d'un rover nommé *Curiosity* nettement plus performant que Spirit et Opportunity en vue de rechercher des traces de vie passée à travers diverses analyses géologiques.

Programmes et missions en projet

-  Le **programme Aurora** de l'Agence spatiale européenne (ESA), avec les missions ExoMars (lancement prévu en 2016) dont le but est d'effectuer des expériences d'exobiologie et Mars Sample Return (en collaboration avec la NASA) dont l'objectif est de rapporter sur Terre des échantillons du sol martien. Ce programme viserait à préparer d'éventuelles missions habitées sur Mars vers le milieu du siècle.

Programme annulé

-  Le **programme Constellation** de la NASA proposait de renvoyer des hommes sur la lune d'ici 2020 pour préparer de futures missions habitées vers Mars. Jugé trop coûteux pour des options technologiques dépassées, ce programme initié par l'administration Bush, qui accusait déjà d'importants retards, a été abandonné le 1^{er} février 2010 par l'administration Obama^[211].

Satellites artificiels autour de Mars

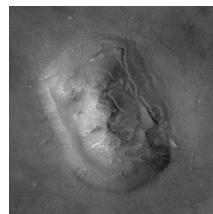
Les différentes missions martiennes ont mis en place des satellites artificiels autour de la planète. Ils servent de relais pour les télécommunications avec les modules posés au sol, et réalisent des mesures globales sur l'environnement et la surface de Mars.

Cinq satellites artificiels orbitent actuellement autour de Mars, dont trois sont encore en fonctionnement, soit davantage d'engins que pour tout autre objet du Système solaire hormis la Terre :

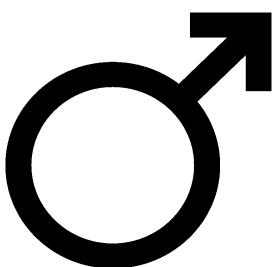
Mission	Lancement	Mise en orbite	Fin
Mariner 9	30 mai 1971	14 novembre 1971	27 octobre 1972, orbite stable durant au moins 50 ans ^[212]
Mars Global Surveyor	7 novembre 1996	11 septembre 1997	2 novembre 2006, perte du contact ^[213]
2001 Mars Odyssey	7 avril 2001	24 octobre 2001	En opération.
Mars Express	2 juin 2003	25 décembre 2003	En opération.
Mars Reconnaissance Orbiter	12 août 2005	10 mars 2006	En opération.

Culture

Symbolisation et symbolisme



Le « visage de Mars » vu par Viking 1. Le visage vu par Mars Global Surveyor.



Symbole astronomique de Mars.

Le symbole astronomique de Mars est un cercle avec une flèche pointant vers le nord-est (Unicode 0x2642 ♂). En alchimie, ce symbole est associé au fer (dont l'oxyde est rouge) et indique parfois une mine de fer sur les cartes. Mars mettant un peu moins de deux ans pour faire le tour du Soleil, son symbole représente les plantes bisannuelles^[214].

Ce symbole est une représentation stylisée du bouclier et de la lance du dieu Mars. En biologie, le même symbole est utilisé comme signet pour le sexe mâle.

Les hommes viennent de Mars, les femmes viennent de Vénus est un best-seller de John Gray paru en 1992.

La couleur rouge est associée à Mars. On lui associe aussi la violence, la colère, la guerre : tous les attributs habituels du dieu Mars.

L'hypothétique corrélation entre la position de la planète Mars par rapport à l'horizon au moment de la naissance et la destinée de certains sportifs est nommée effet Mars.

Sur les photos prises par Viking 1, le 25 juillet 1976, au cours de sa 35^e orbite, on distingue dans Cydonia Mensae des structures semblant artificielles dont un visage gigantesque et des pyramides. Cette légende est reprise dans le film de science-fiction américain *Mission to Mars* réalisé en 2000 par Brian De Palma.

Fiction

Mars inspire depuis longtemps les auteurs de science-fiction. Malgré les désillusions qu'ont apportées les techniques modernes d'exploration spatiale, le filon est encore largement exploité. C'est le sens de la fiction qui a changé.

Mars était représentée peuplée par divers êtres vivants, les Martiens, qui, un temps, ont été représentés verts, puis gris. Depuis les années 60, elle est plutôt considérée comme une future planète d'accueil, prête à être terraformée, puis colonisée par l'Homme, telle seconde Terre.

Les livres les plus connus sont :

- *La Guerre des mondes (The War of the Worlds)*, 1898, de Herbert George Wells (texte de La Guerre des mondes sur Wikisource) ;
- *Chroniques martiennes (The Martian Chronicles)*, 1950, de Ray Bradbury ;
- La Trilogie de Mars : *Mars la rouge (Red Mars)*, 1992, *Mars la verte (Green Mars)*, 1993, *Mars la bleue (Blue Mars)*, 1996, de Kim Stanley Robinson ainsi que le recueil de nouvelles *Les Martiens (The Martians)*, 1999 ;
- *Voyage*, 1996, de Stephen Baxter ;
- *Ilium*, 2003 et *Olympos*, 2005, de Dan Simmons.

Références

- [1] ([en](#)) G. Neukum, R. Jaumann, H. Hoffmann, E. Hauber, J. W. Head, A. T. Basilevsky, B. A. Ivanov, S. C. Werner, S. van Gasselt, J. B. Murray, T. McCord et l'équipe de l'instrument *High Resolution Stereo Camera* de la mission Mars Express, « Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera », dans *Nature*, vol. 432, 23 décembre 2004, p. 971-979 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v432/n7020/abs/nature03231.html>) (le 27 février 2010)])
DOI: 10.1038/nature03231 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature03231>)
- [2] ([en](#)) David R. Williams, « Mars Fact Sheet (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>) », NASA, National Space Science Data Center, septembre 2004. Consulté le 12 octobre 2007
- [3] ([en](#)) NASA Phoenix Mars Lander Exploring the Arctic Plain of Mars – 31 juillet 2008 (http://www.nasa.gov/mission_pages/phoenix/news/phoenix-20080731.html) « *NASA Spacecraft Confirms Martian Water, Mission Extended.* »
- [4] ([en](#)) A. Vitagliano, « When in the past was Mars closer to Earth than it was at the opposition of August 27, 2003 ? (<http://main.chemistry.unina.it/~alvitagl/solex/MarsDist.html>) ». Consulté le 27 novembre 2009
- [5] ([en](#)) J. Meeus, « When Was Mars Last This Close? (<http://www.ips-planetarium.org/planetarian/articles/imagesanddocs/whenwasmarslastthisclose.pdf>) », Mars 2003. Consulté le 27 novembre 2009
- [6] ([en](#)) R. Baalke, « Mars Makes Closest Approach In Nearly 60,000 Years (<http://www.mail-archive.com/meteorite-list@meteoritecentral.com/msg14044.html>) », 22 aout 2003. Consulté le 27 novembre 2009
- [7] ([en](#)) Willim R. Ward, « Large-Scale Variations in the Obliquity of Mars », dans *Science*, vol. 181, n° 4096, 20 juillet 1973, p. 260-262 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/181/4096/260>) (le 18 mars 2010)])
DOI: 10.1126/science.181.4096.260 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.181.4096.260>)
- [8] ([en](#)) William R. Ward et Donald J. Rudy, « Resonant obliquity of Mars? », dans *Icarus*, vol. 94, n° 1, novembre 1991, p. 160-164 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-4731FBY-11S&_user=10&_coverDate=11/30/1991&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1256361919&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=387ea18eeebabf307b89d3bcdccfbf) (le 18 mars 2010)]
DOI: 10.1016/0019-1035(91)90146-K ([http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90146-K](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(91)90146-K))
- [9] ([en](#)) Jihad Touma et Jack Wisdom, « The Chaotic Obliquity of Mars », dans *Science*, vol. 259, n° 5099, 26 février 1993, p. 1294-1297 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/259/5099/1294>) (le 18 mars 2010)])
DOI: 10.1126/science.259.5099.1294 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.259.5099.1294>)
- [10] ([en](#)) J. Laskar, A. C. M. Correia, M. Gastineau, F. Joutel, B. Levrard et P. Robute, « Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars », dans *Icarus*, vol. 170, n° 2, août 2004, p. 343-364 [texte intégral (http://hal.inria.fr/docs/00/00/13/67/PDF/Ma_2004.laskar_prep.pdf) (le 18 mars 2010)]
DOI: 10.1016/j.icarus.2004.04.005 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2004.04.005>)
- [11] ([en](#)) Benjamin Levrard, François Forget, Franck Montmessin et Jacques Laskar, « Recent ice-rich deposits formed at high latitudes on Mars by sublimation of unstable equatorial ice during low obliquity », dans *Nature*, n° 431, 28 octobre 2004, p. 1072-1075 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v431/n7012/full/nature03055.html>) (le 18 mars 2010)])

- DOI: 10.1038/nature03055 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature03055>)
- [12] (en) F. Forget, R. M. Haberle, F. Montmessin, B. Levrard et J. W. Head, « Formation of Glaciers on Mars by Atmospheric Precipitation at High Obliquity », dans *Science*, vol. 311, n° 5759, 20 janvier 2006, p. 368-371 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/311/5759/368>) (le 18 mars 2010)]
DOI: 10.1126/science.1120335 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1120335>)
- [13] (en) NASA Jet Propulsion Laboratory – 17 décembre 2003 (<http://www.jpl.nasa.gov/releases/2003/169.cfm>) « *Mars May Be Emerging from an Ice Age.* »
- [14] (en) Seventh International Conference on Mars (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/7thmars2007/pdf/3387.pdf>) « *Mars subsurface warming at low obliquity.* »
- [15] (fr) J. Laskar, IMCCE/CNRS, Observatoire de Paris, « Petite notice sur les oppositions de Mars (<http://www.imcce.fr/Equipes/ASD/mars/oppo.html>) ». Consulté le 27 novembre 2009
- [16] (fr) Mars en opposition le 29 janvier 2010 (http://www.maxisciences.com/hirise/mars-en-opposition-le-29-janvier-2010_mrm2428.html), *Maxiscience*. Consulté le 30 janvier 2010
- [17] (en) Cornell University MarsWatch – 29 décembre 2006 (http://marswatch.astro.cornell.edu/pancam_instrument/991B_cape_verde.html) « *Cape Verde, Victoria Crater.* »
- [18] (en) ESA, « Where is zero degrees longitude on Mars? (http://www.esa.int/esaMI/Mars_Express/SEM0VQV4QWD_0.html) ». Mis en ligne le 19 août 2004, consulté le 26 juin 2008
- [19] (en) Lunar and Planetary Institute (<http://www.lpi.usra.edu/education/K12/gangis/marsdatum.html>) « *Mars Datum.* »
- [20] <http://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/mars1to5mMOLA>
- [21] (en) NASA Jet Propulsion Laboratory Photojournal – 27 mai 1999 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02031>) « *PIA02031: Maps of Mars Global Topography.* »
- [22] <http://www.google.com/mars/#lat=-50&lon=-34&zoom=4&q=Argyre%20Planitia>
- [23] <http://www.google.com/mars/#lat=-42.7&lon=70&zoom=4&q=Hellas%20Planitia>
- [24] <http://www.google.com/mars/#lat=49.7&lon=118&q=Utopia%20Planitia>
- [25] <http://www.google.com/mars/#lat=-13.8&lon=-59.2&zoom=5&q=Valles%20Marineris>
- [26] (en) Thomas R. Watters, Patrick J. McGovern et Rossman P. Irwin, « Hemispheres Apart: The Crustal Dichotomy on Mars », dans *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 35, mai 2007, p. 621-625 [texte intégral (<http://arjournals.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.earth.35.031306.140220>) (le 17 février 2010)]
DOI: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140220 (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140220>)
- [27] (en) Thomas R. Watters, Carl J. Leuschen, Jeffrey J. Plaut, Giovanni Picardi, Ali Safaeinili, Stephen M. Clifford, William M. Farrell, Anton B. Ivanov, Roger J. Phillips et Ellen R. Stofan, « MARSIS radar sounder evidence of buried basins in the northern lowlands of Mars », dans *Nature*, vol. 444, 14 décembre 2006, p. 905-908 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v444/n7121/abs/nature05356.html>) (le 26 janvier 2010)])
DOI: 10.1038/nature05356 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature05356>)
- [28] (en) NASA Jet Propulsion Laboratory Caltech Mars Exploration Rover Mission – 10 juin 2005 (<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/spirit/20050610a.html>) « *Press Release Images: Spirit – A Moment Frozen in Time.* »
- [29] (en) David Darling – The Internet Encyclopedia of Science (<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/Marsatmos.html>) « *Mars' atmosphere.* »
- [30] (en) V. I. Moroz, « Chemical composition of the atmosphere of Mars », dans *Advances in Space Research*, vol. 22, n° 3, 17 septembre 1998, p. 449-457 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V3S-3TN437N-R&_user=10&_coverDate=12/31/1998&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=360144151ccf19eb1d6ec292ced45677) (le 20 mars 2010)]
DOI: 10.1016/S0273-1177(98)00085-4 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(98\)00085-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(98)00085-4))
- [31] (en) Alvin Seiff et Donn B. Kirk, « Structure of the Atmosphere of Mars in Summer at Mid-Latitudes », dans *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, 30 septembre 1977, p. 4364-4378 [texte intégral (<http://www.agu.org/pubs/crossref/1977/JS082i028p04364.shtml>) (le 20 mars 2010)]
DOI: 10.1029/JS082i028p04364 (<http://dx.doi.org/10.1029/JS082i028p04364>)
- [32] (en) Arvydas Kliore , Dan L. Cain, Gerald S. Levy, Von R. Eshleman, Gunnar Fjeldbo, et Frank D. Drake, « Occultation Experiment: Results of the First Direct Measurement of Mars's Atmosphere and Ionosphere », dans *Science*, vol. 149, n° 3689, 10 septembre 1965, p. 1243-1248 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/149/3689/1243>) (le 4 avril 2010)])
DOI: 10.1126/science.149.3689.1243 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.149.3689.1243>)
- [33] (en) STAR Lab @ Stanford – The Daily Martian Weather Report (<http://www-star.stanford.edu/projects/mgs/sum/s0403210230.html>) Mesures climatiques sur Mars le 21 mars 2004 à 2h30 GMT.
- [34] (en) NASA Mars Exploration Rover Mission – 24 mars 2008 (http://marsrovers.jpl.nasa.gov/spotlight/20080324_Opportunity.html) « *Watching Martian Clouds Go By.* »
- [35] (en) Lunar and Planetary Science XXXV (2004) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1965.pdf>) J.S. Kargel et Giles M. Marion, « *Mars as a salt-, acid-, and gas-hydrate world.* »

- [36] (**en**) NASA Phoenix Mars Mission – 1^{er} septembre 2008 (http://phoenix.lpl.arizona.edu/videos_sol96.php) « *Ice Clouds in Martian Arctic (Accelerated Movie)*. »
- [37] (**en**) ESA News – 16 janvier 2008 (http://www.esa.int/esaCP/SEM1DV3MDAF_index_0.html) « *Ice clouds put Mars in the shade*. »
- [38] (**fr**) Olivier de Goursac, « Les couleurs de Mars (http://www.futura-sciences.com/fr/comprendre/dossiers/doc/t/astronomie-1/d/les-couleurs-de-mars_511/c3/221/p1/) » sur *Futura-Sciences* (<http://www.futura-sciences.com/>). Mis en ligne le 10 mai 2007, consulté le 26 juillet 2008. « Olivier de Goursac, *Visions de Mars*, Éditions de la Martinière, 14 septembre 2004. », p. 3. La grande variabilité des couleurs
- [39] (**en**) M. T. Lemmon, M. J. Wolff, M. D. Smith, R. T. Clancy, D. Banfield, G. A. Landis, A. Ghosh, P. H. Smith, N. Spanovich, B. Whitney, P. Whelley, R. Greeley, S. Thompson, J. F. Bell et S. W. Squyres, « Atmospheric Imaging Results from the Mars Exploration Rovers: Spirit and Opportunity », dans *Science*, vol. 306, n° 5702, 3 décembre 2004, p. 1753-1756 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/306/5702/1753>) (le 20 mars 2010)] DOI: 10.1126/science.1104474 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1104474>)
- [40] (**en**) Conway B. Leovy, « Mars: The devil is in the dust », dans *Nature*, vol. 424, 28 août 2003, p. 1008-1009 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v424/n6952/full/4241008a.html>) (le 20 mars 2010)] DOI: 10.1038/4241008a (<http://dx.doi.org/10.1038/4241008a>)
- [41] (**en**) NASA Mars Exploration Rover Mission – 27 mai 2005 (<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/spirit/20050527a.html>) « *Spirit's Wind-Driven Traveler on Mars (Spirit Sol 486)*. »
- [42] <http://www.google.com/mars/#lat=26.7&lon=62.8&zoom=6&q=>
- [43] (**en**) High Resolution Imaging Science Experiment (http://www.uahirise.org/ESP_014426_2070) « *USGS Dune Database Entry (ESP_014426_2070)*. »
- [44] (**en**) Bruce A. Cantor, « MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm », dans *Icarus*, vol. 186, n° 1, janvier 2007, p. 60-96 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-4M5WJ2X-5&_user=10&_coverDate=01/31/2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=10dd31545dc296787224ba10341716d4) (le 21 mars 2010)] DOI: 10.1016/j.icarus.2006.08.019 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2006.08.019>)
- [45] (**en**) Philippe Claudin et Bruno Andréotti, « A scaling law for aeolian dunes on Mars, Venus, Earth, and for subaqueous ripples », dans *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 242, n° 1-2, 30 novembre 2006, p. 30-44 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V61-4M7CDN0-1&_user=10&_coverDate=11/30/2006&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=8238cfdf791df1300e798b995a6d40f) (le 21 mars 2010)] DOI: 10.1016/j.epsl.2006.09.004 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.004>)
- [46] (**en**) NASA Jet Propulsion Laboratory Photojournal – 22 juin 1999 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01546>) « *PIA01546: True Color of Mars - Pathfinder Sol 10 at noon*. »
- [47] (**en**) NASA Jet Propulsion Laboratory Photojournal – 22 juin 1999 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01547>) « *PIA01547: True Color of Mars - Pathfinder Sol 24 at 4 PM*. »
- [48] (**en**) Philip B. James, Jeffery L. Hollingsworth, Michael J. Wolff, et Steven W. Lee, « North Polar Dust Storms in Early Spring on Mars », dans *Icarus*, vol. 138, n° 1, mars 1999, p. 64-73 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-45GMFJM-5H&_user=10&_coverDate=03/01/1999&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=7716e28853391bf9d2adec01179deb33) (le 20 mars 2010)] DOI: 10.1006/icar.1998.6060 (<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1998.6060>)
- [49] (**en**) HubbleSite – 11 octobre 2001 (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2001/31/image/a/>) « *Scientists Track "Perfect Storm" on Mars*. »
- [50] (**en**) ESA, « Mars Express confirms methane in the Martian atmosphere (http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/SEMZ0B57ESD_0.html) ». Mis en ligne le 30 mars 2004, consulté le 29 juin 2008
- [51] (**fr**) S. Atreya, « Le méthane, signe de vie sur Mars et Titan ? », dans *Pour la Science*, n° 356, juin 2007
- [52] (**en**) ESA, « 1st Mars Express Science Conference (<http://sci2.esa.int/Mars/MarsExpressConference2005.pdf>) », 21 février 2005, p. 113. Consulté le 29 juin 2008
- [53] (**en**) NASA National Space Science Data Center – 29 novembre 2007 (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>) « *Mars Fact Sheet*. »
- [54] <http://www.giss.nasa.gov/tools/mars24>
- [55] (**en**) ESA, « Mars Express watches a dust storm engulf Mars (http://www.esa.int/esaSC/SEMPWD361AF_index_0.html) ». Mis en ligne le 11 décembre 2007, consulté le 6 juillet 2008
- [56] (**en**) NASA, « Planet Gobbling Dust Storms (http://science.msfc.nasa.gov/headlines/y2001/ast16jul_1.htm) ». Mis en ligne le 16 juillet 2001, consulté le 6 juillet 2008
- [57] (**en**) J. Laskar, A. Correia, M. Gastineau, F. Joutel, B. Levrard, P. Robutel, « Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars », dans *Icarus*, vol. 170, n° 2, 2004, p. 343-364
- [58] voir sur google.com (<http://www.google.com/mars/#lat=22.697&lon=-47.222&zoom=5&q=Viking 1 Lander>)

- [59] (**en**) S. L. Hess, R. M. Henry, C. B. Leovy, J. A. Ryan et J. E. Tillman, « Meteorological Results From the Surface of Mars: Viking 1 and 2 », dans *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, n° 28, 30 septembre 1977, p. 4559-4574 (ISSN 0148-0227 (http://worldcat.org/issn/0148-0227&lang=fr)) [texte intégral (http://www.mars.asu.edu/christensen/classdocs/Hess_Meteorological_jgr_77.pdf) (le 12 avril 2010)]
DOI: 10.1029/JS082i028p04559 (http://dx.doi.org/10.1029/JS082i028p04559)
- [60] (**en**) NASA Facts – 1988 (http://www.jpl.nasa.gov/news/fact_sheets/viking.pdf) « *Viking Mission to Mars.* »
- [61] (**en**) JPL/NASA/Arizona State University, « Water ice confirmed at Mars' south polar cap (http://themis.asu.edu/discoveries-polarcap) ». Consulté le 15 juin 2008. « *Science*, 299, 1048-1053, 2003 »
- [62] (**en**) JPL/NASA, « Mars Global Surveyor Gives New Global View of Mars (http://mars.jpl.nasa.gov/mgs/overview/) ». Consulté le 15 juin 2008
- [63] (**fr**) P. Thomas (ENS Lyon), « Les calottes polaires de Mars : rappels, bilan des 10 dernières années d'observation. (http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-calotte-polaire-Mars-2008.xml) ». Mis en ligne le 14 mai 2008, consulté le 15 juin 2008
- [64] (**en**) NASA Jet Propulsion Laboratory – 6 décembre 2001 (http://mars.jpl.nasa.gov/mgs/msss/camera/images/CO2_Science_rel/index.html) MGS MOC Release No. MOC2-297: « *MOC Observes Changes in the South Polar Cap: Evidence for Recent Climate Change on Mars.* »
- [65] (**en**) NASA JPL Mars Global Surveyor – 20 septembre 2005 (http://mpfwww.jpl.nasa.gov/mgs/newsroom/20050920a.html) « *Orbiter's Long Life Helps Scientists Track Changes on Mars.* »
- [66] (**en**) Skeptical Science – 13 mars 2008 (http://www.skepticalscience.com/Climate-Change-on-Mars.html) « *Climate change on Mars.* »
- [67] (**en**) NewScientist – 16 mai 2007 (http://www.newscientist.com/article/dn11642-climate-myths-mars-and-pluto-are-warming-too.html) « *Climate myths: Mars and Pluto are warming too.* »
- [68] (**en**) C. Zeitlin, T. Cleghorn, F. Cucinotta, P. Saganti, V. Andersen, K. Lee, L. Pinsky, W. Atwell, R. Turner et G. Badhwar, « Overview of the Martian radiation environment experiment », dans *Advances in Space Research*, vol. 33, n° 12, 2004, p. 2204-2210 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V3S-4BJ1Y3G-D&_user=10&_coverDate=12/31/2004&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=fe5de5406cffa076507cddada7d39af2) (le 5 avril 2010)]
DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00514-3 (http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00514-3)
- [69] (**en**) NASA Images – 8 décembre 2003 (http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~4~4-17878~122006:Radiation-Environment-at-Mars-and-E) « *Radiation Dose-Equivalent at Skin Level (mSv/day): ISS Orbit vs. Mars Orbit,* » moyennes mensuelles mesurées sur 18 mois d'avril 2002 à octobre 2003.
- [70] (**en**) S. Billon, A. Morin, S. Caë, H. Baysson, J. P. Gambard, J. C. Backe, A. Rannou, M. Tirmarche et D. Laurier, « French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays », dans *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 113, n° 3, 28 avril 2005, p. 314-320 [texte intégral (http://rpd.oxfordjournals.org/content/113/3/314.abstract) (le 5 avril 2010)]
DOI: 10.1093/rpd/nch463 (http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nch463)
- [71] (**en**) NASA Human Adaptation & Countermeasures Division (http://hacd.jsc.nasa.gov/web_docs/radiation/MARIE/marie-gb.doc) Gautam D. Badhwar, « *MArtian Radiation EnvIronment Experiment (MARIE).* »
- [72] (**en**) NASA Human Adaptation & Countermeasures Division (http://hacd.jsc.nasa.gov/projects/space_radiation_marie_references.cfm) Documents de référence de l'expérience MARIE, notamment les rapports de mesures de décembre 2002 (http://hacd.jsc.nasa.gov/web_docs/radiation/MARIE/MARIEScienceComments-Dec02.pdf) à octobre 2003 (http://hacd.jsc.nasa.gov/web_docs/radiation/MARIE/MARIEScienceComments-Oct03.pdf).
- [73] (**en**) Malin Space Science System – février 1994 (http://www.msss.com/http/ps/age2.html) « *Determining the age of surfaces on Mars,* » par Mike Caplinger.
- [74] (**en**) Lunar and Planetary Science XXXIX (2008) (http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/2509.pdf) « *The Lunar and Martian cratering record and chronologies.* »
- [75] (**en**) Kenneth L. Tanaka, « The Stratigraphy of Mars », dans *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, vol. B13, n° 91, 1986, p. E139–E158 (ISSN 0148-0227 (http://worldcat.org/issn/0148-0227&lang=fr)) [texte intégral (http://www.agu.org/pubs/crossref/1986/JB091iB13p0E139.shtml) (le 25 janvier 2010)]
DOI: 10.1029/JB091iB13p0E139 (http://dx.doi.org/10.1029/JB091iB13p0E139)
- [76] (**en**) Yingwei Fei et Constance Bertka, « The Interior of Mars », dans *Science*, vol. 308, n° 5725, 20 mai 2005, p. 1120-1121 (ISSN 0036-8075 (http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr)) [texte intégral (http://www.sciencemag.org/cgi/content/short/308/5725/1120) (le 9 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1110531 (http://dx.doi.org/10.1126/science.1110531)
- [77] (**en**) Véronique Dehant, « A Liquid Core for Mars? », dans *Science*, vol. 300, n° 5617, 11 avril 2003, p. 260-261 (ISSN 0036-8075 (http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr)) [texte intégral (http://www.sciencemag.org/cgi/content/summary/300/5617/260) (le 9 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1083626 (http://dx.doi.org/10.1126/science.1083626)
- [78] (**en**) M. P. Golombek, R. A. Cook, T. Economou, W. M. Folkner, A. F. C. Haldemann, P. H. Kallemyer, J. M. Knudsen, R. M. Manning, H. J. Moore, T. J. Parker, R. Rieder, J. T. Schofield, P. H. Smith et R. M. Vaughan, « Overview of the Mars Pathfinder Mission and Assessment of Landing Site Predictions », dans *Science*, vol. 278, n° 5344, 5 décembre 1997, p. 1743-1748 (ISSN 0036-8075 (http://

- worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/278/5344/1743>) (le 10 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.278.5344.1743 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.278.5344.1743>)
- [79] (en) C. F. Yoder, A. S. Konopliv, D. N. Yuan, E. M. Standish et W. M. Folkner, « Fluid Core Size of Mars from Detection of the Solar Tide », dans *Science*, vol. 300, n° 5615, 11 avril 2003, p. 299-303 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/300/5617/299>) (le 10 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1079645 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1079645>)
- [80] (en) Argonne National Laboratory Newsroom – 26 septembre 2003 (http://www.anl.gov/Media_Center/News/2003/030926mars.htm)
« *APS X-rays reveal secrets of Mars' core.* »
- [81] (en) W. M. Folkner, C. F. Yoder, D. N. Yuan, E. M. Standish et R. A. Preston, « Interior Structure and Seasonal Mass Redistribution of Mars from Radio Tracking of Mars Pathfinder », dans *Science*, vol. 278, n° 5344, 5 décembre 1997, p. 1749-1752 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/278/5344/1749>) (le 9 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.278.5344.1749 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.278.5344.1749>)
- [82] (en) J. E. P. Connerney, M. H. Acuña, P. J. Wasilewski, G. Kletetschka, N. F. Ness, H. Rème, R. P. Lin et D. L. Mitchell, « The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution », dans *Geophysical Research Letters*, vol. 28, n° 21, 2001, p. 4015-4018 (ISSN 0949-8276 (<http://worldcat.org/issn/0949-8276&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2001/2001GL013619.shtml>) (le 10 mai 2010)]
DOI: 10.1029/2001GL013619 (<http://dx.doi.org/10.1029/2001GL013619>)
- [83] (en) NASA Mars Global Surveyor – 9 octobre 2007 (<http://mgs-mager.gsfc.nasa.gov/>) « *Magnetic Field Experiment MAG/ER.* »
- [84] (en) Science@NASA – 31 janvier 2001 (http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast31jan_1.htm) « *The Solar Wind at Mars.* »
- [85] (en) NASA's Mars Exploration Program – 22 mars 2006 (<http://mars.jpl.nasa.gov/gallery/global/PIA02819.html>) « *Mars Crustal Magnetic Field Remnants.* »
- [86] (en) NASA Jet Propulsion Laboratory – 2011 Planetary Science Decadal Survey (http://mepag.jpl.nasa.gov/decadal/Decadal_survey_Whitepaper_Mars_crustal_magnetism-final-20090818.pdf) [**PDF**] « *Mars' Ancient Dynamo and Crustal Remanent Magnetism.* »
- [87] (en) Laurent Carporzen, Stuart A. Gilder et Rodger J. Hart, « Palaeomagnetism of the Vredefort meteorite crater and implications for craters on Mars », dans *Nature*, vol. 435, 12 mai 2005, p. 198-201 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v435/n7039/full/nature03560.html>) (le 8 janvier 2010)]
DOI: 10.1038/nature03560 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature03560>)
- [88] (en) Sixth International Conference on Mars (2003) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/sixthmars2003/pdf/3051.pdf>) Jafar Arkani-Hamed et Daniel Boutin, « *Polar Wander of Mars: Evidence from Magnetic Anomalies.* »
- [89] (en) J.E.P. Connerney, M.H. Acuña, N.F. Ness, G. Kletetschka, D.L. Mitchell, R.P. Lin, H. Rème, « Tectonic implications of Mars crustal magnetism », dans *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, n° 42, 18 octobre 2005, p. 14970-14975 [texte intégral (<http://www.pnas.org/cgi/reprint/102/42/14970.pdf>) (le 26 juin 2008)]
- [90] (en) 40th Lunar and Planetary Science Conference (2009) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1265.pdf>) James H. Roberts, Rob Lillis et Michael Manga, « *Giant impacts on early Mars and the cessation of the Martian dynamo.* »
- [91] (en) Edward Belbruno et J. Richard Gott, « Where Did the Moon Come From? », dans *The Astronomical Journal*, vol. 129, n° 3, mars 2005, p. 1724 [texte intégral (<http://iopscience.iop.org/1538-3881/129/3/1724>) (le 10 mai 2010)]
DOI: 10.1086/427539 (<http://dx.doi.org/10.1086/427539>)
- [92] (en) Margarita M. Marinova, Oded Aharonson et Erik Asphaug, « Mega-impact formation of the Mars hemispheric dichotomy », dans *Nature*, vol. 453, 26 juin 2008, p. 1216-1219 (ISSN 1476-4687 (<http://worldcat.org/issn/1476-4687&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7199/full/nature07070.html>) (le 10 mai 2010)]
DOI: 10.1038/nature07070 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature07070>)
- [93] (en) F. Nimmo, S. D. Hart, D. G. Korycansky et C. B. Agnor, « Implications of an impact origin for the martian hemispheric dichotomy », dans *Nature*, vol. 453, 26 juin 2008, p. 1220-1223 (ISSN 1476-4687 (<http://worldcat.org/issn/1476-4687&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7199/full/nature07025.html>) (le 10 mai 2010)]
DOI: 10.1038/nature07025 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature07025>)
- [94] (en) Jeffrey C. Andrews-Hanna, Maria T. Zuber et W. Bruce Banerdt, « The Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy », dans *Nature*, vol. 453, 26 juin 2008, p. 1212-1215 (ISSN 1476-4687 (<http://worldcat.org/issn/1476-4687&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7199/full/nature07011.html>) (le 10 mai 2010)]
DOI: 10.1038/nature07011 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature07011>)
- [95] (en) Sabine Stanley, Linda Elkins-Tanton, Maria T. Zuber et E. Marc Parmentier, « Mars' Paleomagnetic Field as the Result of a Single-Hemisphere Dynamo », dans *Science*, vol. 321, n° 5897, 26 septembre 2008, p. 1822-1825 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/321/5897/1822>) (le 10 mai 2010)]
DOI: 10.1126/science.1161119 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1161119>)
- [96] (en) G. A. Neumann, M. T. Zuber, M. A. Wieczorek, P. J. McGovern, F. G. Lemoine, et D. E. Smith, « Crustal structure of Mars from gravity and topography », dans *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, 10 août 2004, p. E08002 (ISSN 0148-0227 (<http://worldcat.org/issn/0148-0227&lang=fr>)) [texte intégral (http://www-geodyn.mit.edu/neumann_mars_crust04.pdf) (le 11 mai 2010)]

- DOI: 10.1029/2004JE002262 (<http://dx.doi.org/10.1029/2004JE002262>)
- [97] **(en)** Tectonic implications of Mars crustal magnetism, « J. E. P. Connerney, M. H. Acuña, N. F. Ness, G. Kletetschka, D. L. Mitchell, R. P. Lin et H. Rème », dans *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, n° 42, 18 octobre 2005, p. 14970-14975 [texte intégral (<http://www.pnas.org/content/102/42/14970.full.pdf>) (le 11 mai 2010)]
DOI: 10.1073/pnas.0507469102 (<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0507469102>)
- [98] **(en)** Yoann Quesnel, Christophe Sotin, Benoit Langlais, Simona Costin, Miocra Mandea, Matthias Gottschalk et Jérôme Dyment, « Serpentization of the martian crust during Noachian », dans *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 277, n° 1-2, 15 janvier 2009, p. 184-193 [texte intégral (http://www.sciences.univ-nantes.fr/geol/WEBUMR6112/Persnl/langlais/pdf/Quesnel-et-al_2009_EPSL_MarsMagnetismSerpentization.pdf) (le 11 mai 2010)]
DOI: 10.1016/j.epsl.2008.10.012 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.10.012>)
- [99] **(en)** R. Sanders (UC Berkeley's Space Sciences Laboratory), « Hundreds of auroras detected on Mars (http://berkeley.edu/news/media/releases/2005/12/12_mars.shtml) ». Mis en ligne le 12 décembre 2005, consulté le 26 juin 2008
- [100] **(en)** Freie Universität Berlin ([http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000001959/16_W_chap15.pdf;jsessionid=D61166A3058C8552C3B6269B9DCF0DC9?hosts="](http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000001959/16_W_chap15.pdf;jsessionid=D61166A3058C8552C3B6269B9DCF0DC9?hosts=)) « 15. *Volcanic Activity on Mars.* »
- [101] **(en)** ESA Mars Express News – 11 février 2004 (http://www.esa.int/esaMI/Mars_Express/SEM9BA1PGQD_0.html) « *Olympus Mons - the caldera in close-up.* »
- [102] **(en)** Ana Rita Baptista, Nicolas Mangold, Véronique Ansan, David Baratoux, Philippe Lognonne, Eduardo I. Alves, David A. Williams, Jacob E. Bleacher, Philippe Masson, Gerhard Neukum, « A swarm of small shield volcanoes on Syria Planum, Mars », dans *Journal of geophysical research*, vol. 113, n° E9, 26 septembre 2008, p. E09010.1-E09010.19 (ISSN 0148-0227 (<http://worldcat.org/issn/0148-0227&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007JE002945.shtml>) (le 6 mars 2010)])
DOI: 10.1029/2007JE002945 (<http://dx.doi.org/10.1029/2007JE002945>)
- [103] **(en)** The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006epsc.conf..213B>) A. Baptista, N. Mangold, V. Ansan, et P. Lognonne, « *The unique volcanic type of Syria Planum, Mars: Geophysical analysis using Mars Express - HRSC data,* » European Planetary Science Congress 2006, Berlin, Allemagne, 18-22 septembre 2006, p. 213.
- [104] **(en)** Université d'Hawaï – 31 janvier 2005 (<http://www.psrh.hawaii.edu/Jan05/MarsRecently.html>) « *Recent Activity on Mars: Fire and Ice.* »
- [105] **(en)** ESA Mars Express News – 14 mars 2008 (http://www.esa.int/esaMI/Mars_Express/SEMCPLM5NDF_0.html) « *Mars Express reveals the Red Planet's volcanic past.* »
- [106] **(fr)** École Normale Supérieure de Lyon (<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Mars-eau-crateres-2006.xml#id2832456>) Thomas Pierre, « *Environ 60 nouveaux cratères d'impact se sont formés sur Mars entre 1999 et 2006.* »
- [107] **(en)** Cathy Quantin, Nicolas Mangold, William K. Hartmann et Pascal Allemand, « Possible long-term decline in impact rates: 1. Martian geological data », dans *Icarus*, vol. 186, n° 1, janvier 2007, p. 1-10 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-4KVXHT6-1&_user=10&_coverDate=01/31/2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=8d7e64097921ce92699dcf50cfa6defe) (le 9 mars 2010)])
DOI: 10.1016/j.icarus.2006.07.008 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2006.07.008>)
- [108] **(en)** NASA Mars Program (http://marsprogram.jpl.nasa.gov/MPF/ops/hap_3.jpg) « *Mineralogy and Geochemistry – Mars Pathfinder Science Results.* »
- [109] **(en)** Benton C. Clark, A. K. Baird, Harry J. Rose Jr., Priestley Toulmin III, Klaus Keil, Angelo J. Castro, Warren C. Kelliher, Catherine D. Rowe et Peter H. Evans, « Inorganic Analyses of Martian Surface Samples at the Viking Landing Sites », dans *Science*, vol. 194, n° 4271, 17 décembre 1976, p. 1283-1288 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/194/4271/1283>) (le 6 février 2010)])
DOI: 10.1126/science.194.4271.1283 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.194.4271.1283>)
- [110] **(en)** A. S. Yen, S. S. Kim, M. H. Hecht, M. S. Frant et B. Murray, « Evidence That the Reactivity of the Martian Soil Is Due to Superoxide Ions », dans *Science*, vol. 289, n° 5486, 15 septembre 2000, p. 1909-1912 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/15768/1/00-1505.pdf>) (le 6 février 2010)])
DOI: 10.1126/science.289.5486.1909 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5486.1909>)
- [111] **(en)** R. Rieder, T. Economou, H. Wänke, A. Turkevich, J. Crisp, J. Brückner, G. Dreibus et H. Y. McSween Jr., « The Chemical Composition of Martian Soil and Rocks Returned by the Mobile Alpha Proton X-ray Spectrometer: Preliminary Results from the X-ray Mode », dans *Science*, vol. 278, n° 5344, 5 décembre 1997, p. 1771-1774 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/278/5344/1771>) (le 5 février 2010)])
DOI: 10.1126/science.278.5344.1771 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.278.5344.1771>)
- [112] **(en)** 40th Lunar and Planetary Science Conference (2009) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/2257.pdf>) P. E. Geissler, R. Arvidson, J. Bell, N. Bridges, P. Desouza, M. Golombek, R. Greenberger, R. Greeley, K. Herkenhoff, H. Lahtela, J.R. Johnson, G. Landis, R. Li, J. Moersch, L. Richter, M. Sims, J. Soderblom, R. Sullivan, B. Thompson, C. Verba, D. Waller, A. Wang, ainsi que les équipes de l'expérience HiRISE et des Mars Exploration Rovers, « *Constraints on Aeolian Degradation Rates on Mars from Erasure of Rover Tracks.* »
- [113] **(en)** NASA Phoenix Mars Mission – 9 septembre 2008 (http://phoenix.lpl.arizona.edu/09_09_pr.php) « *Next Mars Soil Scoop Slated For Last Of Lander's Wet Lab Cells.* »

- [114] ([en](#)) NASA Phoenix Mars Mission – 5 août 2008 (http://phoenix.lpl.arizona.edu/08_05_pr.php) « *Phoenix Mars Team Opens Window On Scientific Process.* »
- [115] ([en](#)) Harry Y. McSween, Jr., G. Jeffrey Taylor et Michael B. Wyatt, « Elemental Composition of the Martian Crust », dans *Science*, vol. 324, n° 5928, 8 mai 2009, p. 736-739 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/324/5928/736>) (le 13 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1165871 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1165871>)
- [116] ([en](#)) NASA Jet Propulsion Laboratory – 8 septembre 1999 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02406>) « *PIA02406: Twin Peaks in Super Resolution - Right Eye.* »
- [117] ([en](#)) NASA Jet Propulsion Laboratory – 5 mai 2006 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA08440>) « *PIA08440: Spirit Beholds Bumpy Boulder.* »
- [118] ([en](#)) NASA Jet Propulsion Laboratory Caltech Mars Exploration Rover Mission – 4 février 2004 (<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/opportunity/20040204a.html>) « *Mars Under the Microscope (stretched).* »
- [119] ([en](#)) Mars Global Data Sets, « TES Hematite Abundance (http://jmars.asu.edu/data/tes_hematite/) ». Consulté le 11 mai 2008. « Bandfield, J.L., Global mineral distributions on Mars, *Journal of geophysical research*, vol. 107, 22 juin 2002 »
- [120] ([en](#)) NASA Jet Propulsion Laboratory Caltech Mars Exploration Rover Mission – 4 février 2004 (<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/opportunity/20040204a.html>) « *Thar be Hematite!* »
- [121] ([en](#)) J. F. Mustard, F. Poulet, A. Gendrin, J.-P. Bibring, Y. Langevin, B. Gondet, N. Mangold, G. Bellucci et F. Altieri, « Olivine and Pyroxene Diversity in the Crust of Mars », dans *Science*, vol. 307, n° 5715, 11 mars 2005, p. 1594-1597 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/307/5715/1594>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1109098 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1109098>)
- [122] ([en](#)) F. Poulet, J.-P. Bibring, J. F. Mustard, A. Gendrin, N. Mangold, Y. Langevin, R. E. Arvidson, B. Gondet et C. Gomez, « Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate », dans *Nature*, n° 438, 1^{er} décembre 2005, p. 623-627 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v438/n7068/abs/nature04274.html>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1038/nature04274 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature04274>)
- [123] ([en](#)) John F. Mustard, S. L. Murchie, S. M. Pelkey, B. L. Ehlmann, R. E. Milliken, J. A. Grant, J.-P. Bibring, F. Poulet, J. Bishop, E. Noe Dobrea, L. Roach, F. Seelos, R. E. Arvidson, S. Wiseman, R. Green, C. Hash, D. Humm, E. Malaret, J. A. McGovern, K. Seelos, T. Clancy, R. Clark, D. D. Marais, N. Izenberg, A. Knudson, Y. Langevin, T. Martin, P. McGuire, R. Morris, M. Robinson, T. Roush, M. Smith, G. Swayze, H. Taylor, T. Titus & M. Wolff, « Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument », dans *Nature*, n° 454, 17 juillet 2008, p. 305-309 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v454/n7202/full/nature07097.html>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1038/nature07097 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature07097>)
- [124] ([en](#)) R. E. Arvidson, F. Poulet, J.-P. Bibring, M. Wolff, A. Gendrin, R. V. Morris, J. J. Freeman, Y. Langevin, N. Mangold et G. Bellucci, « Spectral Reflectance and Morphologic Correlations in Eastern Terra Meridiani, Mars », dans *Science*, vol. 307, n° 5715, 11 mars 2005, p. 1591-1594 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<https://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/307/5715/1591>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1109509 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1109509>)
- [125] ([fr](#)) CNES, « La minéralogie de Mars », dans *CNES Mag*, Juin 2005, p. 11 [texte intégral (http://www.cnes-tv.com/cnes_fr/cnesmag/cnesmag26_actualite.pdf) (le 11 mai 2008)]
- [126] ([en](#)) Aline Gendrin, Nicolas Mangold, Jean-Pierre Bibring, Yves Langevin, Brigitte Gondet, François Poulet, Guillaume Bonello, Cathy Quantin, John Mustard, Ray Arvidson et Stéphane LeMouélic, « Sulfates in Martian Layered Terrains: The OMEGA/Mars Express View », dans *Science*, vol. 307, n° 5715, 17 février 2005, p. 1587-1591 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/307/5715/1587>) (le 7 mars 2010)]
DOI: 10.1126/science.1109087 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1109087>)
- [127] ([en](#)) Jean-Pierre Bibring, Yves Langevin, Aline Gendrin, Brigitte Gondet, François Poulet, Michel Berthé, Alain Soufflot, Ray Arvidson, Nicolas Mangold, John Mustard, P. Drossart, et l'équipe OMEGA, « Mars Surface Diversity as Revealed by the OMEGA/Mars Express Observations », dans *Science*, vol. 307, n° 5715, 11 mars 2005, p. 1576-1581 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1108806>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1108806 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1108806>)
- [128] ([en](#)) Yves Langevin, François Poulet, Jean-Pierre Bibring, Brigitte Gondet, « Sulfates in the North Polar Region of Mars Detected by OMEGA/Mars Express », dans *Science*, vol. 307, n° 5715, 11 mars 2005, p. 1584-1586 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/307/5715/1584>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1109091 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1109091>)
- [129] ([en](#)) M. M. Osterloo, V. E. Hamilton, J. L. Bandfield, T. D. Glotch, A. M. Baldwin, P. R. Christensen, L. L. Tornabene, F. S. Anderson, « Chloride-Bearing Materials in the Southern Highlands of Mars », dans *Science*, vol. 319, n° 5870, 21 mars 2008, p. 1651-1654 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>)) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/319/5870/1651>) (le 6 février 2010)]
DOI: 10.1126/science.1150690 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1150690>)

- [130] ([en](#)) NASA Explores the Red Planet – 15 janvier 2009 (http://www.nasa.gov/mission_pages/mars/news/marsmethane.html) « *Martian Methane Reveals the Red Planet is not a Dead Planet.* »
- [131] ([en](#)) Michael J. Mumma, Geronimo L. Villanueva, Robert E. Novak, Tilak Hewagama, Boncho P. Bonev, Michael A. DiSanti, Avi M. Mandell, et Michael D. Smith, « Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003 », dans *Science*, vol. 323, n° 5917, 20 février 2009, p. 1041-1045 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (http://images.spaceref.com/news/2009/Mumma_et_al_Methane_Mars_wSOM_accepted2.pdf)] , lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1165243>) (le 25 décembre 2009)]
- [132] ([en](#)) Franck Lefèvre et François Forget, « Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics », dans *Nature*, vol. 40, 6 août 2009, p. 720-723 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7256/pdf/nature08228.pdf>) (le 26 décembre 2009)] DOI: 10.1038/nature08228 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature08228>)
- [133] ([en](#)) NASA Explores the Red Planet – 15 janvier 2009 (http://www.nasa.gov/mission_pages/mars/news/marsmethane_media.html) « *Mars Methane Press Conference - Media Page.* »
- [134] ([en](#)) Todd M. Hoefen, Roger N. Clark, Joshua L. Bandfield, Michael D. Smith, John C. Pearl et Philip R. Christensen, « Discovery of Olivine in the Nili Fossae Region of Mars », dans *Science*, vol. 203, n° 5645, 24 octobre 2003, p. 627-630 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/302/5645/627>) (le 26 décembre 2009)] DOI: 10.1126/science.1089647 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1089647>)
- [135] ([en](#)) NASA Mars Reconnaissance Orbiter – 18 décembre 2008 (http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/multimedia/carb-plot.html) « *Mineral Spectra from Nili Fossae* », révélant la présence d'argiles riches en fer et en magnésium, d'olivine et de carbonate de magnésium.
- [136] ([en](#)) 40th Lunar and Planetary Science Conference – 2009 (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1787.pdf>) B. L. Ehlmann, J. F. Mustard et S.L. Murchie, « *Detection of serpentine on Mars by MRO-CRISM and possible relationship with olivine and magnesium carbonate in Nili Fossae.* »
- [137] ([en](#)) ESA News – 20 septembre 2004 (http://www.esa.int/esaCP/SEMAK21XDYD_Life_0.html) « *Water and methane maps overlap on Mars: a new clue?* »
- [138] ([en](#)) NASA Goddard Space Flight Center – 28 octobre 2003 (<http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2003/1022olivine.html>) « *Green mineral indicates Red Planet is dry.* »
- [139] ([en](#)) C. Lunar and Planetary Science XXXVIII (2007) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/1835.pdf>) Upadhyay, G. Klingelhöfer I. Fleischer, C. Schröder, D. Rodionov, M. Panthöfer, R. Jung-Pothmann, N. Tahir, T. Hager et W. Tremel, « *Classification of Martian Jarosite.* »
- [140] ([en](#)) M. E. Elwood Madden, R. J. Bodnar et J. D. Rimstidt, « Jarosite as an indicator of water-limited chemical weathering on Mars », dans *Nature*, n° 431, 14 octobre 2004, p. 821-823 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v431/n7010/full/nature02971.html>) (le 26 décembre 2009)] DOI: 10.1038/nature02971 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature02971>)
- [141] ([en](#)) NASA Solar System Exploration – 16 octobre 2008 (http://solarsystem.nasa.gov/scitech/display.cfm?ST_ID=748) « *Migration of Phyllosilicates Through the Solar Nebula Could Explain Water-rich Planetary Formation.* »
- [142] ([en](#)) Der-Chuen Lee et Alex N. Halliday, « Core formation on Mars and differentiated asteroids », dans *Nature*, vol. 388, 28 août 1997, p. 854-857 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v388/n6645/abs/388854a0.html>) (le 23 mars 2010)]
- [143] ([en](#)) NASA Ames Research Center – Mars General Circulation Modeling Group (<http://www-mgcm.arc.nasa.gov/mgcm/HTML/FAQS/wetmars.html>) « *Was Mars always so dry and cold as today (were there once rivers and seas)?* »
- [144] ([en](#)) NASA Ames Research Center – Mars General Circulation Modeling Group (http://www-mgcm.arc.nasa.gov/mgcm/HTML/FAQS/thin_atm.html) « *Why is the Martian atmosphere so thin and mainly carbon dioxide?* »
- [145] ([en](#)) ESA: Results from Mars Express and Huygens – 30 novembre 2005 (http://www.esa.int/SPECIALS/Results_from_Mars_Express_and_Huygens/SEMA1UUWFE_0.html) « *Mars Express evidence for large aquifers on early Mars.* »
- [146] ([en](#)) ESA Space Science News – 16 octobre 2006 (http://www.esa.int/esaSC/SEMADOV74TE_index_0.html) « *Mars Express and the story of water on Mars.* »
- [147] ([fr](#)) Document CNRS (<http://www.crgp.cnrs-nancy.fr/NEWS/PNP2006/RESUMES/Loizeau-et-al.pdf>) [[PDF](#)] D. Loizeau, N. Mangold, F. Poulet, J.-P. Bibring, A. Gendrin, C. Gomez, Y. Langevin, B. Gondet, V. Ansan, P. Masson, G. Neukum, et les équipes OMEGA et HRSC, « *Les phyllosilicates de la région de Mawrth Vallis, Mars, découverts par OMEGA/Mars Express.* »
- [148] ([en](#)) James P. Greenwood et Ruth E. Blake, « Evidence for an acidic ocean on Mars from phosphorus geochemistry of Martian soils and rocks », dans *Geology*, vol. 34, n° 11, novembre 2006, p. 953-956 (ISSN 1943-2682 (<http://worldcat.org/issn/1943-2682&lang=fr>) [texte intégral (<http://geology.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/34/11/953>) (le 15 janvier 2010)] DOI: 10.1130/G22415A.1 (<http://dx.doi.org/10.1130/G22415A.1>)
- [149] ([en](#)) 40th Lunar and Planetary Science Conference (2009) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1411.pdf>) G. Jeffrey Taylor et William V. Boynton, « *Global Concentrations of Thorium, Potassium and Chlorine: Implications for Martian Bulk Composition.* »
- [150] ([en](#)) V. R. Baker, R. G. Strom, V. C. Gulick, J. S. Kargel, G. Komatsu et V. S. Kale, « Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars », dans *Nature*, vol. 352, 15 août 1991, p. 589-594 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte

- intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v352/n6336/pdf/352589a0.pdf>) (le 15 janvier 2010)]
DOI: 10.1038/352589a0 (<http://dx.doi.org/10.1038/352589a0>)
- [151] (**en**) Maria T. Zuber, « Planetary science: Mars at the tipping point », dans *Nature*, vol. 447, 14 juin 2007, p. 785-786 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v447/n7146/full/447785a.html>) (le 15 janvier 2010)]
DOI: 10.1038/447785a (<http://dx.doi.org/10.1038/447785a>)
- [152] (**en**) M/ H. Carr et J. W. Head, « *Oceans on Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate* », dans *Journal of Geophysical Research* **108**, 2002.
- [153] (**fr**) Radio Canada Science et Santé – 24 novembre 2009 (<http://www.radio-canada.ca/nouvelles/science/2009/11/24/001-mars-ocean-nord.shtml>) « *Exploration martienne – Sur l'existence passée d'un océan.* »
- [154] (**en**) Rossman P. Irwin III, Ted A. Maxwell, Alan D. Howard, Robert A. Craddock et David W. Leverington, « A Large Paleolake Basin at the Head of Ma'adim Vallis, Mars », dans *Science*, vol. 296, n° 5576, 21 juin 2002, p. 2209-2212 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/296/5576/2209>) (le 25 mai 2010)]
DOI: 10.1126/science.1071143 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1071143>)
- [155] (**en**) Lunar and Planetary Science XXXV (2004) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1223.pdf>) M.A. de Pablo, A.G. Fairén et A. Márquez, « *The geology of Atlantis Basin, Mars, and its astrobiological interest.* »
- [156] L'une de ces théories, formulée dans les années 1980, fait précisément appel aux propriétés répliquatives des argiles pour catalyser la formation de macromolécules organiques, par exemple : Alexander Graham Cairns-Smith, « *Seven Clues to the Origin of Life* », Cambridge University Press, 1985, New York. (ISBN 0-521-27522-9).
- [157] (**en**) Günter Wächtershäuser, « Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism », dans *Microbiological Reviews*, vol. 52, n° 4, décembre 1988, p. 452-484 [texte intégral (<http://mmbr.asm.org/cgi/reprint/52/4/452>) (le 21 janvier 2010)]
DOI: 0146-0749/88/040452-33\$02.00/0 ([http://dx.doi.org/0146-0749/88/040452-33\\$02.00/0](http://dx.doi.org/0146-0749/88/040452-33$02.00/0))
- [158] (**en**) Günter Wächtershäuser, « Evolution of the first metabolic cycles », dans *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, n° 87, janvier 1990, p. 200-204 [texte intégral (<http://www.pnas.org/content/87/1/200.full.pdf+html>) (le 21 janvier 2010)]
- [159] (**en**) Günter Wächtershäuser, « Groundworks for an evolutionary biochemistry: The iron-sulphur world », dans *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 58, n° 2, 1992, p. 85-201 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TBN-47PGDYW-26&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=23627d056832ce463887124656db0701) (le 21 janvier 2010)]
DOI: 10.1016/0079-6107(92)90022-X ([http://dx.doi.org/10.1016/0079-6107\(92\)90022-X](http://dx.doi.org/10.1016/0079-6107(92)90022-X))
- [160] (**en**) Günter Wächtershäuser, « From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya », dans *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 361, n° 1474, 29 octobre 2006, p. 1787-1808 [texte intégral (<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/361/1474/1787.full.pdf>) (le 21 janvier 2010)]
DOI: 10.1098/rstb.2006.1904 (<http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2006.1904>)
- [161] Manfred Schidlowski, « *Antiquity and Evolutionary Status of Bacterial Sulfate Reduction: Sulfur Isotope Evidence* », dans *Origins of Life* **9**, pp. 229-231 (1979).
- [162] (**en**) David J. Des Marais, « When Did Photosynthesis Emerge on Earth? », dans *Science*, vol. 289, n° 5485, 8 septembre 2000, p. 1703-1705 (ISSN 1095-9203 (<http://worldcat.org/issn/1095-9203&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/289/5485/1703>) (le 8 janvier 2010)]
DOI: 10.1126/science.289.5485.1703 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5485.1703>)
- [163] (**en**) Jin Xiong, William M. Fischer, Kazuhito Inoue, Masaaki Nakahara, Carl E. Bauer, « Molecular Evidence for the Early Evolution of Photosynthesis », dans *Science*, vol. 289, n° 5485, 8 septembre 2000, p. 1724-1730 (ISSN 1095-9203 (<http://worldcat.org/issn/1095-9203&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/289/5485/1724>) (le 8 janvier 2010)]
DOI: 10.1126/science.289.5485.1724 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5485.1724>)
- [164] (**en**) John M. Olson, « Photosynthesis in the Archean Era », dans *Photosynthesis Research*, vol. 88, n° 2, 2 février 2006, p. 109-117 (ISSN 1573-5079 (<http://worldcat.org/issn/1573-5079&lang=fr>) [texte intégral (<https://commerce.metapress.com/content/g6n805154602432w/resource-secured/?target=fulltext.pdf&sid=lzg4sybclx2ivo4tthq0nuc&sh=www.springerlink.com>) (le 8 janvier 2010)]
DOI: 10.1007/s11120-006-9040-5 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11120-006-9040-5>)
- [165] (**en**) A.H. Knoll,* E.J. Javaux, D. Hewitt et P. Cohen, « Eukaryotic organisms in Proterozoic oceans », dans *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 361, n° 1470, 29 juin 2006, p. 1023-1038 (ISSN 1471-2970 (<http://worldcat.org/issn/1471-2970&lang=fr>) [texte intégral (<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/361/1470/1023>) (le 11 janvier 2010)]
DOI: 10.1098/rstb.2006.1843 (<http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2006.1843>)
- [166] (**en**) Nicholas J. Butterfield, « *Bangiomorpha pubescens* n. gen., n. sp.: implications for the evolution of sex, multicellularity, and the Mesoproterozoic/Neoproterozoic radiation of eukaryotes », dans *GeoScienceWorld*, vol. 26, n° 3, septembre 2000, p. 386-404 (ISSN 0094-8373 (<http://worldcat.org/issn/0094-8373&lang=fr>) [texte intégral (<http://paleobiol.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/26/3/386>) (le 11 janvier 2010)]
DOI: 10.1666/0094-8373(2000)026<0386:BPNGNS>2.0.CO;2 ([http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373\(2000\)026<0386:BPNGNS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1666/0094-8373(2000)026<0386:BPNGNS>2.0.CO;2))

- [167] ([en](#)) Science – 21 avril 2006 (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/312/5772/400/FIG5>) « *Sketch of the alteration history of Mars, with phyllosilicates formed first, then sulfates, then anhydrous ferric oxides,* » dans l'article accessible par DOI: 10.1126/science.1122659 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1122659>).
- [168] ([en](#)) Nature News – 6 mai 2004 (<http://www.nature.com/news/2004/040503/full/news040503-6.html>) « *How Mars got its rust – Model explains why the red planet is so red.* »
- [169] ([en](#)) David C. Rubie, Christine K. Gessmann et Daniel J. Frost, « Partitioning of oxygen during core formation on the Earth and Mars », dans *Nature*, vol. 429, 6 mai 2004, p. 58-61 (ISSN 0028-0836 (<http://worldcat.org/issn/0028-0836&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.nature.com/nature/journal/v429/n6987/full/nature02473.html>) (le 6 mai 2010)] DOI: 10.1038/nature02473 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature02473>)
- [170] ([en](#)) Lunar and Planetary Science XXXIX (2008) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/1001.pdf>) J. M. Karner, P. V. Burger, C. K. Shearer, et A. Wang, « *Mars surface mineralogy: Kieserite MgSO₄-H₂O. Characterization of a terrestrial end-member.* »
- [171] ([en](#)) Seventh International Conference on Mars – 2007 (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/7thmars2007/pdf/3234.pdf>) J.-P. Bibring, Y. Langevin, F. Poulet, B. Gondet, N. Mangold, J. Mustard, R. Arvidson, V. Chevrie, C. Sotin et l'équipe OMEGA, « *Mars Climatic Change and Geological History, Derived from the OMEGA/MEX Data.* »
- [172] ([en](#)) ESA Science & Technology – 18 décembre 2008 (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=43946>) « *Mars Express reveals a link between ferric oxides and sulfates in equatorial regions of Mars.* »
- [173] ([en](#)) ESA Mars Express News – 19 janvier 2006 (http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/SEMMLKMZCIE_0.html) « *Sulphate deposits in Juventae Chasma.* »
- [174] ([en](#)) David C. Catling, « A chemical model for evaporites on early Mars: Possible sedimentary tracers of the early climate and implications for exploration », dans *Journal of Geophysical Research – Planets*, vol. 104, n° E7, 1999, p. 16453-16469 (ISSN 0148-0227 (<http://worldcat.org/issn/0148-0227&lang=fr>) [texte intégral (<http://www.agu.org/pubs/crossref/1999/1998JE001020.shtml>) (le 10 avril 2010)] DOI: 10.1029/1998JE001020 (<http://dx.doi.org/10.1029/1998JE001020>)
- [175] ([en](#)) Devon M. Burr, Marie-Therese Enga, Rebecca M.E. Williams, James R. Zimbelman, Alan D. Howard et Tracy A. Brennan, « Pervasive aqueous paleoflow features in the Aeolis/Zephyria Plana region, Mars », dans *Icarus*, vol. 200, n° 1, mars 2009, p. 52-76 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-4TY9MTX-5&_user=10&_coverDate=03/31/2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1343121695&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=b22d4ba62ef0403131f3932ca312a017) (le 21 mai 2010)] DOI: 10.1016/j.icarus.2008.10.014 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2008.10.014>)
- [176] ([fr](#)) Thèse *RHEOLOGIE DU PERGELISOL DE MARS* (<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=185055>) de Mangold Nicolas, Université de Grenoble 1.
- [177] ([en](#)) ESA, « Water ice in crater at Martian north pole (http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/SEMGKA808BE_0.html) ». Mis en ligne le 18 juillet 2005, consulté le 5 mars 2010
- [178] ([en](#)) ESA, « Mars Express radar gauges water quantity around Mars' south pole (http://www.esa.int/esaSC/SEMSWJQ08ZE_index_0.html) ». Mis en ligne le 15 mars 2007, consulté le 15 juin 2008
- [179] ([fr](#)) De la glace pure à 99% observée sur Mars (<http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=7065>). Consulté le 29 septembre 2009.
- [180] ([en](#)) NASA/JPL/Arizona State University, « MSIP: Multinational Research in the Southern Hemisphere (Released 22 April 2004) (<http://themis.mars.asu.edu/zoom-20040422a>) ». Mis en ligne le 22 avril 2004, consulté le 5 mars 2010
- [181] ([fr](#)) *De l'eau liquide aurait coulé sur Mars il y a quelques années !* (http://www.futura-sciences.com/news-eau-liquide-aurait-coule-mars-il-y-quelques-annees_10073.php), Jean Étienne, 7 décembre 2006, Futura-Sciences.com
- [182] ([en](#)) Bright Gully Deposits in Hale Crater and Implications for Recent Water (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AGUFM.P13B1295K>), Kolb, K. J.; McEwen, A. S.; Pelletier, J. D
- [183] ([en](#)) Martian Weather Observation (<http://www-star.stanford.edu/projects/mgs/sum/s0403210230.html>) MGS radio science measured 11.50 mbar at 34.4° S 59.6° E -7152 meters
- [184] ([en](#)) Making a Splash on Mars (http://science.msfc.nasa.gov/headlines/y2000/ast29jun_1m.htm), NASA, 29 June 2000
- [185] ([en](#)) Science@NASA – 29 juin 2000 (http://science.msfc.nasa.gov/headlines/y2000/ast29jun_1m.htm)
- [186] <http://www.google.com/mars/#lat=-41.6&lon=-157.7&zoom=4&q=newton>
- [187] ([en](#)) Science – 4 août 2011 (<http://news.sciencemag.org/sciencenow/2011/08/is-mars-weeping-salty-tears.html>) « *Is Mars Weeping Salty Tears?* », par Richard A. Kerr.
- [188] ([en](#)) Alfred S. McEwen, Lujendra Ojha, Colin M. Dundas, Sarah S. Mattson, Shane Byrne, James J. Wray, Selby C. Cull, Scott L. Murchie, Nicolas Thomas et Virginia C. Gulick, « Seasonal Flows on Warm Martian Slopes », dans *Science*, vol. 333, n° 6043, 5 août 2011, p. 740-743 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/content/333/6043/740>) (le 6 août 2011)] DOI: 10.1126/science.1204816 (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1204816>)
- [189] ([en](#)) « NASA Spacecraft Data Suggest Water Flowing on Mars » (<http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2011-242>), NASA Jet Propulsion Laboratory Caltech, 4 août 2011.
- [190] ([en](#)) « NASA Spacecraft Data Suggest Water Flowing on Mars » (http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mro20110804.html), NASA Mars Reconnaissance Orbiter Mission News, 4 août 2011.

- [191] ([en](#)) Geological History:Moons of Mars (http://web.archive.org/web/20070517181817/http://calspace.ucsd.edu/Mars99/docs/library/science/geological_history/moons1.html) Page archivée d'un site universitaire californien résumant les principales théories actuelles concernant l'origine des satellites naturels de Mars.
- [192] ([en](#)) A. Cazenave, A. Dobrovolskis et B. Lago, « Orbital history of the Martian satellites with inferences on their origin », dans *Icarus*, vol. 44, n° 3, décembre 1980, p. 730-744 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-470F3TN-4W&_user=10&_coverDate=12/31/1980&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=7f76bcbac332e6a1539a9ca6e1f919ef) (le 7 avril 2010)] DOI: 10.1016/0019-1035(80)90140-2 ([http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(80\)90140-2](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(80)90140-2))
- [193] ([en](#)) J. A. Burns, « *Contradictory Clues as to the Origin of the Martian Moons* » dans *Mars*, H. H. Kieffer et al., éditions U. Arizona Press, Tucson, 1992
- [194] ([en](#)) ESA Space Science News – 16 octobre 2008 (http://www.esa.int/esaSC/SEM8MUSG7MF_index_0.html) « *ESA closes in on the origin of Mars' larger moon.* »
- [195] ([en](#)) NASA Jet Propulsion Laboratory – 9 avril 2008 (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA10368>) « *PIA10368: Phobos from 6,800 Kilometers (Color).* »
- [196] ([en](#)) Lunar and Planetary Science XXXIV (2003) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1273.pdf>) A. Gendrin et S. Erard, « *Phobo's mineralogy reinvestigated. Application of the wavelet transform to the analysis of ISM/Phobos2 infrared spectra.* »
- [197] ([en](#)) A. S. Rivkin, R. H. Brown, D. E. Trilling, J. F. Bell et J. H. Plassmann, « Near-Infrared Spectrophotometry of Phobos and Deimos », dans *Icarus*, vol. 156, n° 1, mars 2002, p. 64-75 [texte intégral (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WGF-45P0DYW-5&_user=10&_coverDate=03/31/2002&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=a1be200dde36f379a51a8c702a9a9f09) (le 7 avril 2010)] DOI: 10.1006/icar.2001.6767 (<http://dx.doi.org/10.1006/icar.2001.6767>)
- [198] ([en](#)) Lunar and Planetary Science XXXIX (2008) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/1832.pdf>) B. Gondet, J-P. Bibring, Y. Langevin, F. Poulet, S. Murchie et l'équipe OMEGA « *Phobos observations by the OMEGA/Mars Express hyperspectral imager.* »
- [199] ([en](#)) Lunar and Planetary Science XXXVII (2006) (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2006/pdf/2195.pdf>) John B.Murray, Jonathan C.Illiffe, Jan-Peter A.L.Muller, Gerhard Neukum, Stephanie Werner, Matt Balme et l'équipe HRSC, « *New evidence on the origin of Phobos' parallel grooves from HRSC Mars Express.* »
- [200] ([en](#)) NASA Mars Reconnaissance Orbiter Press Release Images – 21 février 2009 (<http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/gallery/press/20090309a.html>) « *Martian Moon Deimos in High Resolution.* »
- [201] ([de](#)) Freie Universität Berlin – Fachrichtung Planetologie und Fernerkundung – 11 décembre 2009 (<http://www.geoinf.fu-berlin.de/projekte/mars/hrsc455-PhobosandDeimos.php>) « *Mars und seine Monde Phobos und Deimos.* »
- [202] ([fr](#)) Page Lunes (<http://www.nirgal.net/lunes.html>) sur nirgal.net, le site de Philipe Labrot
- [203] ([en](#)) A. Hall, « Notes: The Satellites of Mars », dans *The Observatory, Vol. 1, No. 6*, vol. 1, n° 6, 20 septembre 1877, p. 181–185 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/full/seri/Obs..0001/0000181.000.html>) (le 31 juillet 2007)]
- [204] ([en](#)) A. Hall, « Names of the Satellites of Mars », dans *Astronomische Nachrichten*, vol. 92, n° 2187, 14 mars 1878, p. 11-14 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/full/seri/AN.../0092//0000031.000.html>) (le 2 juillet 2007)]
- [205] ([fr](#)) L'Iliade - Chant XV, traduction du grec ancien par Leconte de Lisle
- [206] Définitions lexicographiques (<http://www.cnrtl.fr/lexicographie/satellite>) et étymologiques (<http://www.cnrtl.fr/etymologie/satellite>) de « satellite » du CNRTL.
- [207] ([en](#)) La liste des troyens martiens (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/MarsTrojans.html>) du Minor Planet Center, 29 janvier 2008.
- [208] ([en](#)) Page Eureka (<http://www.orbitsimulator.com/gravity/articles/eureka.html>) sur orbitsimulator.com.
- [209] ([en](#)) Don Yeomans, Paul Chodas, Steve Chesley, « *2007 WD5 Mars Collision Effectively Ruled Out - Impact Odds now 1 in 10,000* » (<http://neo.jpl.nasa.gov/news/news156.html>), NASA/JPL Near-Earth Object Program Office, 9 janvier 2008. Consulté le 11 janvier 2008.
- [210] ([fr](#)) *Petite histoire de l'observation martienne* (<http://olympus.umh.ac.be/articles/5/Petitehistobs.pdf>), article de Francis Michel, dans la *Galactée* (revue du cercle d'Astronomie de l'Université de Mons-Hainaut), numéro 5 d'octobre 1997.
- [211] ([fr](#)) Cité des Sciences, Journal de l'astronomie et de l'espace, « *La Lune s'éloigne des Etats-Unis* (http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/science_actualites/sitesactu/magazine/article.php?id_mag=1&lang=fr&id_article=13883) ». Mis en ligne le 2 février 2010, consulté le 5 février 2010
- [212] ([en](#)) Fiche Mariner 9 (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1971-051A>) sur le National Space Science Data Center de la NASA.
- [213] ([en](#)) Fiche Mars Global Surveyor (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1996-062A>) sur le National Space Science Data Center de la NASA.
- [214] ([en](#)) article 4228 ♂ (<http://www.symbols.com/encyclopedia/42/4228.html>) sur symbols.com, Online Encyclopedia of Western Signs and Ideograms.

Planètes gazeuses

Géante gazeuse

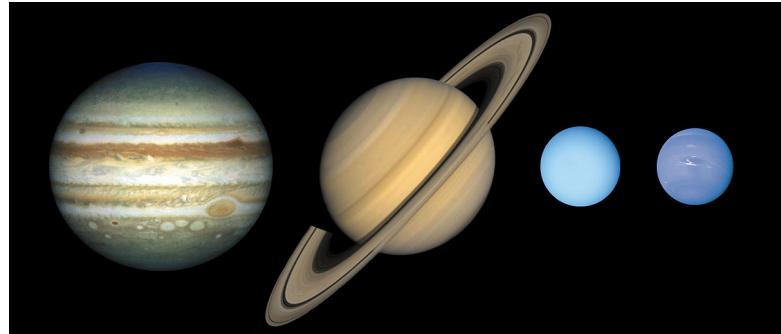
Les planètes du système solaire sont regroupées en deux familles distinctes. Les premières, les planètes telluriques telles que Mercure, Vénus, la Terre et Mars possèdent des densités assez élevées et des dimensions plutôt modestes avec un rayon équatorial de quelques milliers de kilomètres. Elles possèdent peu de satellites (un seul pour la Terre, deux pour Mars). Par opposition, les secondes, les **géantes gazeuses** sont très volumineuses et sont peu denses. Elles sont parfois également appelées *planètes jovaines* ou *géantes jovaines* en référence à Jupiter^[1]. Ces planètes sont plus éloignées du Soleil dans le système solaire^[2] et possèdent un nombre important de satellites. Elles possèdent aussi toutes des anneaux planétaires. À la différence des planètes telluriques, leurs masses découlent essentiellement d'éléments chimiques légers (hydrogène et hélium).

Caractéristiques physiques

Composition chimique

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. Est la bienvenue !

Les atmosphères des géantes gazeuses sont constituées principalement d'hydrogène et d'hélium. Des traces importantes de méthane sont présentes dans les atmosphères d'Uranus et de Neptune, elles rendent compte de la coloration bleutée de ces planètes.

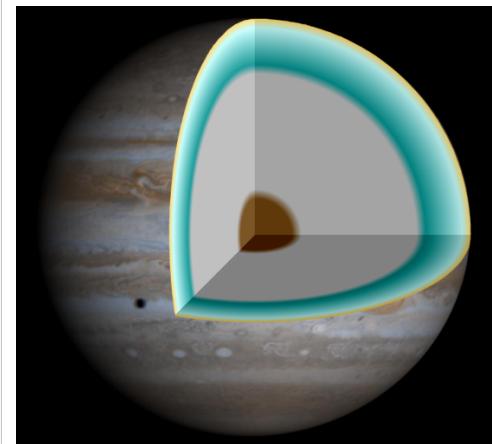


Les quatre planètes géantes gazeuses du système solaire à l'échelle : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Composition chimique des atmosphères des géantes gazeuses du système solaire

Composant	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Hydrogène (H_2)	86 %	93 %	83 %	80 %
Hélium (He)	13 %	5 %	15 %	19 %
Méthane (CH_4)	0,1 %	0,2 %	2,3 %	1,5 %

Du fait de leur épaisse atmosphère la surface des géantes gazeuses est invisible quelle que soit la longueur d'onde utilisée. Les couches supérieures de celle-ci, dont la pression est inférieure à 10 bars sont par contre directement accessibles aux instruments d'observation^[3]. De plus, les conditions de pression et de température qui règnent dans les profondeurs de l'atmosphère des géantes sont difficiles (voire impossibles) à reproduire en laboratoire. La composition chimique et l'état de la matière des noyaux des planètes géantes sont donc déduites de modèles de formation et de suppositions théoriques. Une étude de Joon Eggert et de son équipe du Lawrence Livermore National Laboratory^[4] développe une théorie selon laquelle les noyaux d'Uranus et de Neptune contiennent du carbone cristallin tétraédrique (diamant). La structure interne des deux plus grosses planètes (Jupiter et Saturne) serait quant à elle dominée par des couches d'hydrogène liquide et métallique.



Coupe de l'intérieur de Jupiter. Le noyau central (en marron) est entouré d'une épaisse couche d'hydrogène métallique (en gris).

Pression et température

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !

Grâce aux données fournies par les sondes spatiales qui les ont survolées, il est possible de reconstruire (à l'aide de modèles mathématiques complexes) les conditions de température et de pression internes des planètes géantes.

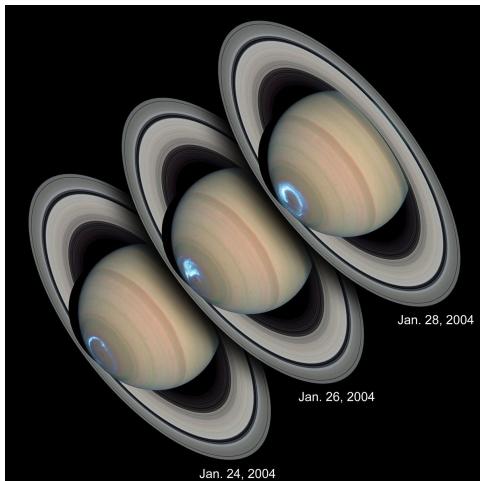
Dimension et masse, rotation et aplatissement

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !

Le rayon équatorial des géantes gazeuses varie d'environ 4 rayons terrestres pour les plus petites (Uranus et Neptune) à plus de 10 rayons terrestres (Jupiter). Leur densité est de l'ordre de grandeur de celle de l'eau (1000 kg/m^3), très inférieure à celle des planètes telluriques ($4000\text{-}5000 \text{ kg/m}^3$). Leur masse par contre peut être très importante, de 15 à 315 masses terrestres ($\approx 10^{25}\text{-}10^{27} \text{ kg}$) pour les planètes du système solaire^[5]. En dehors de ces différences physiques, une particularité des géantes par rapport aux planètes telluriques est leur période de rotation, beaucoup plus rapide. Le jour sidéral est de l'ordre de 10 heures pour Jupiter, Saturne et Uranus et de 15-16 heures pour Neptune. Ces vitesses entraînent un aplatissement beaucoup plus prononcé aux pôles que dans le cas des planètes telluriques (phénomène accentué par la composition gazeuse des planètes). En vertu du principe de la conservation du moment cinétique, les astronomes supposent que cette caractéristique est liée à la légère contraction du rayon des planètes au cours du temps.

Champ magnétique et magnétosphère

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !



Série de photographies (lumière visible et UV) par le télescope spatial Hubble d'une aurore sur Saturne.

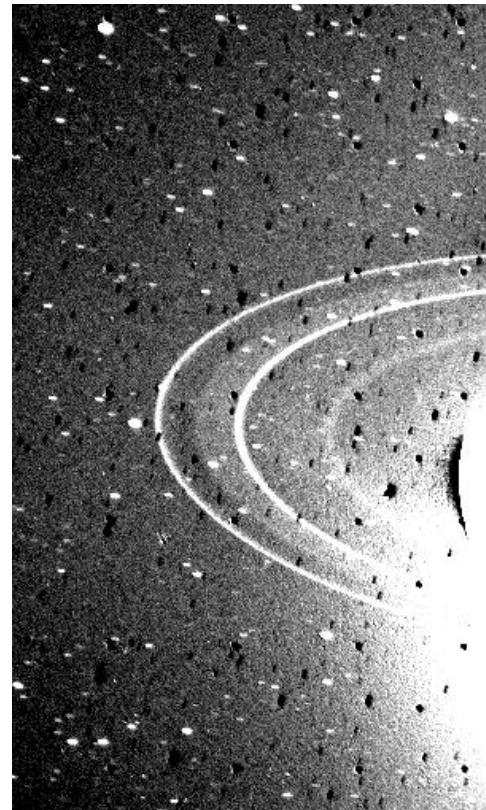
Les quatre planètes géantes du système solaire génèrent des champs magnétiques puissants en raison de la vitesse de rotation rapide de leur noyau central métallique. La rencontre des magnétosphères avec le vent solaire produisent des aurores australes et boréales aux pôles des planètes.

Anneaux et satellites

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !

Avec la découverte par la sonde Voyager 2 des anneaux de Jupiter et Neptune, il s'avère que toutes les planètes gazeuses du système solaire possèdent des anneaux planétaires. Cependant, la variété des anneaux, quasiment indécelable pour Jupiter et très étendue pour Saturne, ne permet pas de les considérer comme une caractéristique générique des planètes gazeuses. Leur formation est liée aux effets de marée des planètes géantes. Leur grande masse interdit à des satellites de demeurer à une distance inférieure à une limite (dite *limite de Roche*) sans être détruit. De plus, au dessous de la limite de Roche les poussières et les glaces ne peuvent pas donner naissance à un satellite par accrétion, ils sont nécessairement éparpillés le long d'anneaux concentriques situés dans le plan équatorial de la planète.

La grande masse des planètes gazeuses permet également de rendre compte du grand nombre et de la variété de leurs satellites. Une partie de ceux-ci sont des astéroïdes ou des objets transnéptuniens capturés par le champ gravitationnel des planètes^[6].



Anneaux de Neptune photographiés par la sonde spatiale Voyager 2 en 1989.

Anneaux principaux et satellites connus des géantes gazeuses

Nombre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Anneaux	3	7	13	5
Satellites	63	62	27	13

Formation

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !

Le mécanisme de formation des planètes gazeuses diffère peu de celui des planètes telluriques. Elles se seraient formées par accrétion de poussières et de glaces provenant de la nébuleuse primordiale^[7]. La différence de constitution provient du fait qu'a proximité du Soleil beaucoup d'éléments chimiques sont vaporisés et que seuls subsistent les métaux et les roches silicatées qui deviendront les constituants des planètes telluriques. En considérant que la composition du disque protosolaire est conforme aux abondances cosmiques, ces éléments sont les moins abondants (l'hydrogène est l'élément dominant avec 75% de la masse totale, 23% pour l'hélium)^[8]. À une distance plus grande du Soleil, un nombre d'éléments beaucoup plus important peuvent se maintenir à l'état solide (le carbone et l'oxygène notamment) et serviront de briques pour la formation de planétésimaux plus massifs que ceux du système interne^[9]. Après avoir atteint une taille critique (estimée à 8-10 masses terrestres), les planètes sont capables de retenir dans leur champ gravitationnel les éléments les plus volatiles et les plus nombreux de la nébuleuse primordiale (l'hydrogène et l'hélium).

Exoplanètes et "Jupiter chauds"

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !

Comme l'indique le paragraphe précédent, on estime habituellement que les géantes gazeuses se forment à une distance importante de leur étoile. Les disques d'accrétion des étoiles ne sont pas suffisamment denses pour permettre la formation de planètes aussi massives à leur proximité.

La découverte d'exoplanètes de type géantes gazeuses très proches de leur étoile, à la fin des années 1990, a forcé les scientifiques à modifier cette théorie. Les *Jupiters chauds*, une classe particulière de *géante gazeuse*, se sont également formées à bonne distance de leur étoile ; par la suite, elles se sont rapprochées de celle-ci par un phénomène appelé migration planétaire. Cette théorie permet d'expliquer l'existence de planètes géantes avec des périodes orbitales aussi courtes que 3 ou 4 jours (à titre de comparaison, la période orbitale de la Terre est de une année). La proximité de leur étoile entraîne l'élévation de la température de leur atmosphère à plus de 1000 °C, ce qui entraîne des phénomènes parfois violents (pouvant aller jusqu'à une évaporation partielle de l'exosphère de l'astre comme sur Osiris).

Néanmoins, la confirmation en avril 2004 de l'existence de planètes de la masse de Jupiter avec des périodes orbitales de l'ordre de un jour ouvre à nouveau le problème : comment de tels astres, baptisés *Jupiters très chauds*, peuvent-ils survivre dans de telles conditions ?

De plus, la théorie de la migration (voir ci-dessous) est remise en question par la découverte, le 2 janvier 2008 par l'Institut Max-Planck de recherche sur le système solaire (Heidelberg en Allemagne), d'une jeune planète en formation dans le disque circumstellaire de TW Hydrae, une étoile de moins de 10 millions d'années qu'elle frôle à moins de 0,04 unité astronomique, soit 25 fois moins que la distance entre la Terre et le Soleil. L'étude de cette planète gazeuse dix fois plus massive que Jupiter devra permettre de mieux comprendre la formation des planètes^[10]^[11]. Il s'agit de la première planète détectée autour d'une étoile de moins de 100 millions d'années.

Incidence sur les planètes internes

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. est la bienvenue !

La présence de géantes gazeuses dans un système stellaire a de grandes conséquences sur l'évolution du système. Elle permet notamment la stabilisation des orbites de toutes les planètes (selon leur nombre). Le modèle de Nice - du nom de l'Observatoire de la Côte d'Azur à Nice - part de l'idée que les planètes géantes étaient autrefois plus confinées qu'actuellement^[12]. Les interactions gravitationnelles entre le disque de planétismaux et les planètes conduisent à un rapprochement du Soleil de Jupiter et à un éloignement de Saturne, d'Uranus et de Neptune. Cette lente migration des planètes a favorisé la déstabilisation du disque et aurait engendré le bombardement intense tardif des planètes internes (LHB : *Late Heavy Bombardment*).

Notes et références

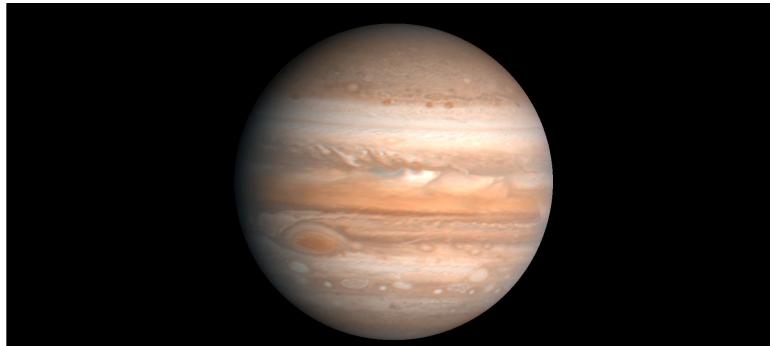
Notes

- [1] http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/univers-1/d/geante-gazeuse_4727/
- [2] La littérature scientifique distingue également les planètes internes (Mercure, Vénus, Terre et Mars) aux planètes externes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune). Ces deux familles sont situées de part et d'autre de la ceinture d'astéroïde.
- [3] André Brahic, *Les Planètes géantes* in *Le Ciel à découvert*, ss la dir. de Jean Audouze, Ed : CNRS Éditions, p.55.
- [4] <http://www.sciencesetavenir.fr/magazine/dcouvertes/098081/des-oceans-de-diamant-sur-uranus-et-neptune.html>
- [5] La limite supérieure d'une géante - un domaine de recherche encore sujet à discussion - atteint 10-20 masses jovianennes. Au-delà, l'objet est considéré comme une naine brune et n'appartient plus à la famille des géantes.
- [6] Le fait que les géantes soient situées entre la ceinture de Kuiper et la ceinture d'astéroïdes augmente sensiblement les chances de capture. La migration supposée des planètes (voir le paragraphe "Incidence sur les planètes internes") est également un facteur d'enrichissement potentiel du cortège lunaire des planètes gazeuses.
- [7] Théorie dite de "Safranov". Cf. Daniel Benest, *Les Planètes*, Ed : Le Seuil, Coll : Points Sciences, 1996, p. 76.
- [8] Thérèze Encrenaz. *Atmosphères planétaires. Origines et évolution*, Ed : Belin – CNRS Éditions, 2000, p. 52.
- [9] Cf. l'article de Thérèze Encrenaz *Y a-t-il de l'eau partout dans l'Univers ?* de la revue *L'Astronomie*, Vol. 124, n° 29, Juillet-Août 2010, p. 19.
Pour une température inférieure à 200° K, les molécules simples associées à l'hydrogène se condensent.
- [10] (**en**) Découverte de TW Hydrea a1 (http://www.mppia.de/Public/menu_q2e.php?Aktuelles/PR/2008/PR080103/PR_080103_en.html)
- [11] Article de *Futura Sciences* sur la découverte d'une planète en formation (http://www.futura-sciences.com/fr/sinformer/actualites/news/t/astronomie/d/une-jeune-exoplanete-decouverte-dans-son-berceau_14131/)
- [12] Cf. Alain Doressoundiram et Emmanuel Lellouch, *Aux confins du système solaire*, Ed : Belin – Pour la Science, 2008, pp. 120-122.

Références

Jupiter (planète)

Jupiter 2



Jupiter vue par Voyager 2 en 1979

(image retraitée en 1990 pour souligner les formations telles que la Grande tache rouge).

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	778412027 km (5.20336301 UA)
Aphélie	816620000 km (5.46 UA)
Périhélie	740520000 km (4.95 UA)
Circonférence orbitale	4774000000 km (32.675 UA)
Excentricité	0.04839266
Période de révolution	4335.3545 d (11,862 a)
Période synodique	398.8613 d
Vitesse orbitale moyenne	13.0572 km/s
Vitesse orbitale maximale	13.72 km/s
Vitesse orbitale minimale	12.44 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	1.30530°
Nœud ascendant	100.55615°
Argument du périhélie	14.75385°
Satellites connus	63
Anneaux connus	3 principaux.
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	71492 km (11.209 Terres)
Rayon polaire	66864 km (10.517 Terres)
Rayon moyen volumétrique	69911 km (10.973 Terres)
Aplatissement	0.06487

Périmètre équatorial	449197 km (11.21 Terres)
Superficie	6.14×10^{10} km ² (120.5 Terres)
Volume	1.43128×10^{15} km ³ (1321.3 Terres)
Masse	1.8986×10^{27} kg (317.8 Terres)
Masse volumique globale	1326 kg/m ³
Gravité de surface	24.7964249 m/s ² (2.358 g)
Vitesse de libération	59.5 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	0.41351 d (9 h 55 min 27,3 s)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	47051 km/h
Inclinaison de l'axe	3.12°
Albédo géométrique visuel	0.52
Albédo de Bond	0.343
Irradiance solaire	50.50 W/m ² (0.037 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	110.0 K (-163 °C)
Température de surface :	
Température à 10 kPa :	112 K (-161 °C)
Température à 100 kPa :	165 K (-108 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Masse volumique à 100 kPa	0.16 kg/m ³
Hauteur d'échelle	27 km
Masse molaire moyenne	2.22 g/mol
Dihydrogène (H₂)	~86 %
Hélium (He)	~13 %
Méthane (CH₄)	0,1 %
Vapeur d'eau (H₂O)	0,1 %
Ammoniac (NH₃)	0,02 %
Éthane (C₂H₆)	0,0002 %
Phosphine (PH₃)	0,0001 %
Sulfure d'hydrogène (SH₂)	< 0,0001 %
Histoire	
Divinité babylonienne	Marduk

Divinité grecque	Zεύς
Nom chinois (élément associé)	Mùxīng 木星 (bois)

Jupiter est une planète géante gazeuse. Il s'agit de la plus grosse planète du système solaire et la cinquième en partant du Soleil (après Mercure, Vénus, la Terre et Mars). Elle doit son nom au dieu romain Jupiter^[1]. Le symbole astronomique de la planète est la représentation de la foudre de Jupiter.

Visible à l'œil nu dans le ciel nocturne, Jupiter est habituellement le quatrième objet le plus brillant (après le Soleil, la Lune et Vénus^[2] ; parfois Mars apparaît plus lumineuse que Jupiter, et de temps en temps Jupiter apparaît plus lumineuse que Vénus^[réf. souhaitée]).

Comme sur les autres planètes gazeuses, des vents violents, de près de 600 km/h, parcourrent les couches supérieures de la planète. La célèbre et spectaculaire grande tache rouge est une zone de surpression qui est observée au moins depuis le XIX^e siècle.

Caractéristiques physiques

Composition

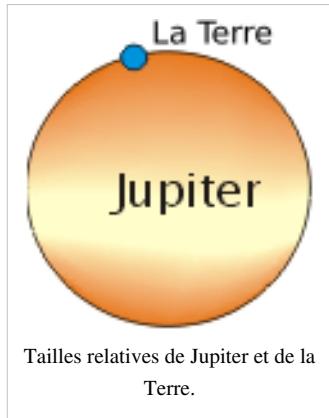
La haute atmosphère de Jupiter est composée à 93 % d'hydrogène et 7 % d'hélium en nombre d'atomes, ou à 86 % de dihydrogène et 13 % d'hélium en nombre de molécules. En masse, l'atmosphère est approximativement constituée de 75 % d'hydrogène et de 24 % d'hélium ; le 1 % restant étant apporté par divers autres éléments et composés chimiques (traces de méthane, de vapeur d'eau, d'ammoniac, très petites quantités de carbone, d'éthane, de sulfure d'hydrogène, de néon, d'oxygène, d'hydrure de phosphore et de soufre). La couche la plus externe de la haute atmosphère contient des cristaux d'ammoniac^[3] .^[4] .

Par mesures infrarouges et ultraviolettes, des traces de benzène et d'autres hydrocarbures ont également été détectées^[5] . L'intérieur de Jupiter contient des matériaux plus denses et la distribution par masse est de 71 % d'hydrogène, 24 % d'hélium et 5 % d'autres éléments.

Les proportions d'hydrogène et d'hélium dans la haute atmosphère sont proches de la composition théorique de la nébuleuse planétaire qui aurait donné naissance au système solaire. Néanmoins, le néon n'y est détecté qu'à hauteur de vingt parties par million en termes de masse, un dixième de ce qu'on trouve dans le Soleil^[6] . L'hélium y est également en défaut, mais à un degré moindre. Cette absence pourrait résulter de la précipitation de ces éléments vers l'intérieur de la planète^[7] [réf. incomplète],^[8] . Les gaz inertes lourds sont 2 à 3 fois plus abondants dans l'atmosphère de Jupiter que dans le Soleil.

Par spectroscopie, on pense que Saturne possède une composition similaire, mais qu'Uranus et Neptune sont constituées de beaucoup moins d'hydrogène et d'hélium^[9] . Cependant, aucune sonde n'ayant pénétré l'atmosphère de ces géantes gazeuses, les données d'abondance des éléments plus lourds ne sont pas connues.

Masses et dimensions



Jupiter est 2.5 fois plus massive que toutes les autres planètes du système solaire réunies, tellement massive que son barycentre avec le Soleil est situé à l'extérieur de ce dernier, à environ 1.068 rayon solaire du centre du Soleil. Par ailleurs, son diamètre est 11 fois plus grand que celui de la Terre (environ 143000 km) et on pourrait placer environ 1321 corps de la taille de cette dernière dans le volume occupé par la géante gazeuse. En revanche, la densité de Jupiter n'est que le quart de celle de la Terre (0.240 fois, précisément) : elle n'est donc que 318 fois plus massive que la Terre^{[2],[10]}.

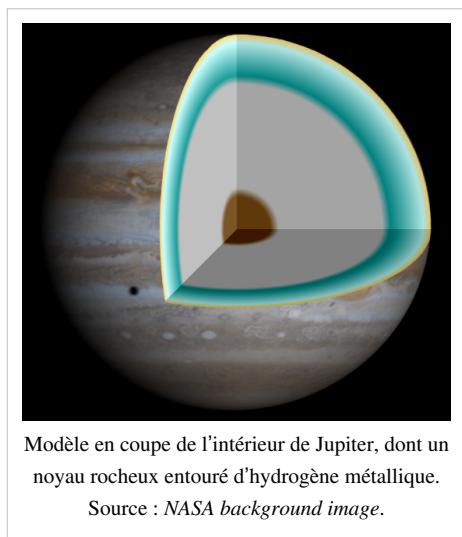
Cette masse a eu une grande influence gravitationnelle sur la formation du système solaire : la plupart des planètes et des comètes de courte période sont situées près de Jupiter et les lacunes de Kirkwood de la ceinture d'astéroïdes lui sont dues en grande partie.

Si Jupiter était plus massive, on pense que son diamètre serait plus petit. L'intérieur de la planète serait plus comprimé par une plus grande force gravitationnelle, décroissant sa taille. Par conséquent, Jupiter posséderait le diamètre maximal d'une planète de sa composition et de son histoire. La planète a parfois été décrite comme une « étoile ratée », mais il faudrait qu'elle possède 13 fois sa masse actuelle pour démarrer la fusion du deutérium et être cataloguée comme une naine brune et 75 fois pour devenir une étoile. La plus petite naine rouge connue est seulement 30 % plus volumineuse que Jupiter^[11].

Des exoplanètes beaucoup plus massives que Jupiter ont été découvertes^[12]. Ces planètes pourraient être des géantes gazeuses semblables à Jupiter, mais pourraient appartenir à une autre classe de planètes, celle des Jupiter chauds, parce qu'elles sont très proches de leur étoile primaire.

Jupiter rayonne plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. La quantité de chaleur produite à l'intérieur de la planète est presque égale à celle reçue du Soleil^[13]. Le rayonnement additionnel est généré par le mécanisme de Kelvin-Helmholtz, par contraction adiabatique. Ce processus conduit la planète à rétrécir de 2 cm chaque année^[14]. Lorsque Jupiter s'est formée, elle était nettement plus chaude et son diamètre était double^[15].

Structure interne



Dans l'état actuel des choses, les connaissances sur la composition planétaire de Jupiter sont relativement spéculatives et ne reposent que sur des mesures indirectes. Selon l'un des modèles proposés, Jupiter ne posséderait aucune surface solide, la densité augmentant progressivement vers le centre de la planète. Alternativement, Jupiter pourrait être composée d'un noyau rocheux (silicates et fer) comparativement petit (mais néanmoins de taille comparable à la Terre et de 10 à 15 fois la masse de celle-ci)^{[16],[13]}, entouré d'hydrogène en phase métallique qui occupe 78 % du rayon de la planète^[13]. Cet état serait liquide, un peu à la manière du mercure. Il est dénommé ainsi car la pression est telle que les atomes d'hydrogène s'ionisent, formant un matériau conducteur. Cet hydrogène métallique est lui-même entouré d'hydrogène liquide, à son tour entouré d'hydrogène gazeux.

Des expériences ayant montré que l'hydrogène ne change pas de phase brusquement (il se trouve bien au-delà du point critique), il n'y aurait pas de délimitation claire entre ces différentes

phases, ni même de surface à proprement parler. Quelques centaines de kilomètres en dessous de la plus haute atmosphère, la pression provoquerait une condensation progressive de l'hydrogène sous forme d'un brouillard de plus en plus dense qui formerait finalement une mer d'hydrogène liquide^[13] .^[17] .^[18] Entre 20000 et 40000 km de profondeur, l'hydrogène liquide céderait la place à l'hydrogène métallique de façon similaire. Des gouttelettes de démixtion, plus riches en hélium et néon se précipiteraient vers le bas à travers ces couches, appauvrissant ainsi la haute atmosphère en ces éléments.

Les énormes pressions générées par Jupiter entraînent les températures élevées à l'intérieur de la planète, par un phénomène de compression gravitationnelle (mécanisme de Kelvin-Helmholtz) qui se poursuit encore de nos jours, par une contraction résiduelle de la planète. Des résultats de 1997 du Lawrence Livermore National Laboratory indiquent qu'à l'intérieur de Jupiter, la transition de phase à l'hydrogène métallique se fait à une pression de 140 GPa et une température de 3000 K^[19] . La température à la frontière du noyau serait de l'ordre de 36000 K et la pression à l'intérieur d'environ 3000 à 4500 GPa^[13] .

Si Jupiter était 75 fois plus massive, la température au centre du noyau serait suffisante pour que s'y produise la fusion de l'hydrogène, et Jupiter serait une étoile ; d'ailleurs, la plus petite naine rouge connue est seulement 30 % plus volumineuse que Jupiter^[20] .^[21] .

La faible inclinaison de l'axe de Jupiter fait que ses pôles reçoivent bien moins d'énergie du Soleil que sa région équatoriale. Ceci causerait d'énormes mouvements de convection à l'intérieur des couches liquides et serait ainsi responsable des forts mouvements des nuages dans son atmosphère^[10] .

Atmosphère



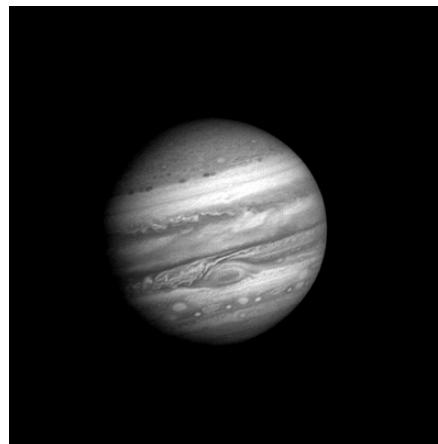
Mosaïque de Jupiter en vraies couleurs réalisée à partir de photographies prises par la sonde Cassini le 29 décembre 2000 à 5 h 30 UTC.

On pense également que l'atmosphère de Jupiter comporte trois couches de nuages distinctes :

- La plus externe, probablement vers 100 km de profondeur, serait formée de nuages de glace d'ammoniac.
- La suivante, vers 120 km de profondeur, de nuages d'hydrogénosulfure d'ammonium (NH_4HS).
- La dernière, vers 150 km de profondeur, de nuages d'eau et de glace^[13] .

Ces chiffres proviennent des données sur la condensation de ces composés en fonction de la température, mais l'évolution de la température à l'intérieur de l'atmosphère de Jupiter n'est pas connue avec précision. La combinaison des nuages d'eau et de la chaleur provenant de l'intérieur de la planète est propice à la formation d'orages électriques^[22] . La foudre engendrée est jusqu'à 1000 fois plus puissante que celle observée sur la Terre^[23] .

L'atmosphère externe de Jupiter subit une rotation différentielle, remarquée pour la première fois par Jean-Dominique Cassini en 1690^[13], qui a aussi estimé sa période de rotation^[4]. La rotation de l'atmosphère polaire de Jupiter est d'environ 5 minutes plus longue que celle de l'atmosphère à la ligne équatoriale. De plus, des bancs de nuages circulent le long de certaines latitudes en direction opposée des vents dominants. Des vents d'une vitesse de 360 km/h y sont communs^[24]. Ce système éolien serait causé par la chaleur interne de la planète. Les interactions entre ces systèmes circulatoires créent des orages et des turbulences locales, telles la grande Tache Rouge, un large ovale de près de 12000 km sur 25000 km d'une grande stabilité, puisque déjà observé avec certitude depuis au moins 1831^[25] et possiblement depuis 1665^[26]. D'autres taches plus petites ont été observées depuis le XX^e siècle^{[27], [28], [29]}.



Mouvement de l'atmosphère de Jupiter (depuis une sonde Voyager).

La couche la plus externe de l'atmosphère de Jupiter contient des cristaux de glace d'ammoniac. Les couleurs observées dans les nuages proviendraient des éléments présents en quantité infime dans l'atmosphère, sans que les détails soient là non plus connus. Les zones de nuages varient d'année en année en termes de largeur, couleur et intensité, mais sont toutefois assez stables pour que les astronomes leur assignent des noms^[10].

Grande tache rouge et autres taches

La grande tache rouge est une tempête anticyclonique persistante située à 22° au sud de l'équateur de Jupiter. Son existence est connue depuis au moins 1831 et peut-être depuis 1665. Des modèles mathématiques suggèrent que la tempête est stable et est une caractéristique permanente de la planète^[30]. Elle est suffisamment grande pour être visible au travers de télescopes depuis la Terre.

La grande tache rouge présente une forme ovale, de 24 à 40000 km de long sur 12 à 14000 km de large, suffisamment grande pour contenir deux ou trois planètes de la taille de la Terre^[31]. L'altitude maximale de la tempête est située à environ 8 km au-dessus du sommet des nuages environnants. Elle tourne sur elle-même dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, avec une période d'environ 6 jours^[32]; les vents soufflent à plus de 400 km/h sur ses bords^[33].



La grande tache rouge prise par Voyager 1, en fausses couleurs.



La grande tache rouge.

Des tempêtes de ce genre ne sont pas inhabituelles dans l'atmosphère des géantes gazeuses. Jupiter possède également des ovales blancs et bruns de plus petite taille. Les ovales blancs sont plutôt constitués de nuages relativement froids à l'intérieur de la haute atmosphère. Les ovales bruns sont plus chauds et situés à l'intérieur de la couche nuageuse habituelle. De telles tempêtes peuvent exister pendant des heures ou des siècles.

La grande tache rouge est entourée d'un ensemble complexe d'ondes de turbulence qui peuvent donner naissance à un ou plusieurs petits anticyclones satellites. Située à la même distance de l'équateur, elle possède une période de rotation propre, légèrement différente du reste de l'atmosphère avoisinante, parfois plus lente, d'autres fois plus rapide : depuis l'époque où elle est connue, elle a fait plusieurs fois le tour de Jupiter par rapport à son environnement proche.

En l'an 2000, une autre tache s'est formée dans l'hémisphère sud, similaire en apparence à la grande tache rouge, mais plus petite. Elle a été créée par la fusion de plusieurs tempêtes ovales blanches plus petites (observées pour la première fois en 1938). La tache résultante, nommée *Oval BA* et surnommée *Red Spot Junior* (petite tache rouge en anglais, par rapport à la grande appelée *Great Red Spot*), a depuis accru son intensité et est passée du blanc au rouge.^[27] .^[34] .^[29]

Anneaux planétaires

Jupiter possède plusieurs anneaux planétaires, très fins, composés de particules de poussières continuellement arrachées aux quatre lunes les plus proches de la planète lors de micro-impacts météoriques du fait de l'intense champ gravitationnel de la planète^[35] . Ces anneaux sont en fait tellement fins et sombres qu'ils ne furent découverts que lorsque la sonde Voyager 1 s'approcha de la planète en 1979. Du plus près au plus lointain du centre de la planète, les anneaux sont regroupés en trois grandes sections^[36] :

- Halo : entre 92000 km et 122500 km du centre de la planète. Le halo est un anneau en forme de tore, élargi par le champ magnétique de Jupiter.
- Anneau principal : entre 122500 km et 128940 km du centre de Jupiter et épais de seulement 30 km. Il est probablement composé de poussières provenant des satellites Adrastée et Métis.
- Anneau *gossamer* : entre 128940 km et 280000 km du centre. Avant 181350 km, il est constitué de poussières provenant d'Amalthéa^[35] . Après, elles proviennent de Thébé. Cet anneau est très peu dense (*gossamer* signifie « gaze » en anglais), nettement plus épais que le précédent (plusieurs milliers de kilomètres) et s'évanouit progressivement dans le milieu interplanétaire.

Ces anneaux sont constitués de poussières et non de glace comme c'est le cas des anneaux de Saturne^[13] . Ils sont également extrêmement sombres, avec un albédo de l'ordre de 0,05.

Il existe également un anneau externe extrêmement ténu et distant qui tourne autour de Jupiter en sens rétrograde. Son origine est incertaine mais pourrait provenir de poussière interplanétaire capturée.

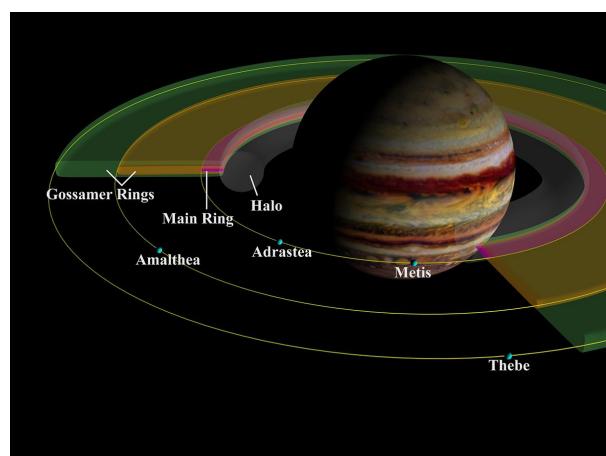
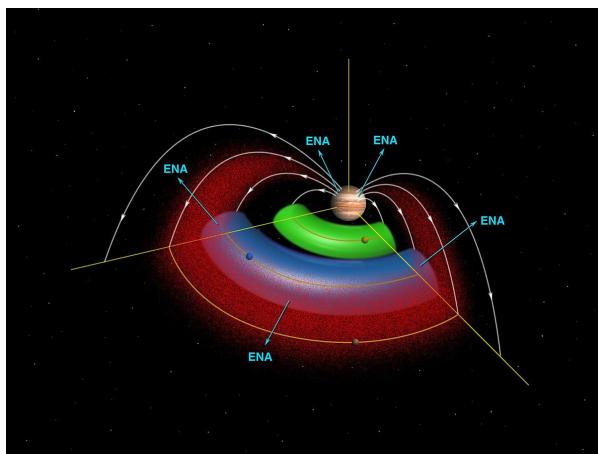


Schéma des anneaux.

Magnétosphère



Carte magnétosphérique : le champ magnétique est schématisé en blanc et les ions magnétiquement piégés en rouge. En vert et bleu, les tores de particules provenant de Io et Europe.

Jupiter possède un champ magnétique, 14 fois plus puissant que celui de la Terre, allant de 4.2 G à l'équateur à 10 à 14 G aux pôles, ce qui en fait le plus intense du système solaire (à l'exception des taches solaires)^[2]. Il proviendrait des mouvements de la couche d'hydrogène métallique qui, par sa rotation rapide (Jupiter fait un tour sur lui-même en moins de dix heures), agit comme une immense dynamo. La magnétosphère de la planète correspond à la région où le champ magnétique de Jupiter est prépondérant.

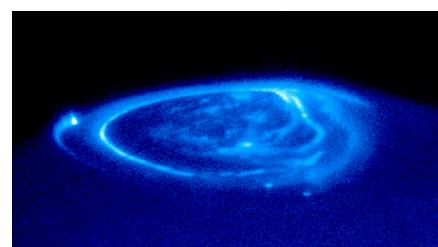
À environ 75 rayons de la planète, l'interaction de la magnétosphère et du vent solaire provoque un arc de choc. La magnétosphère est entourée d'une magnétopause, située sur le bord interne d'une magnétogaine où le champ magnétique de la planète

décroît et se désorganise. Le vent solaire interagit avec ces régions, allongeant la magnétosphère en direction opposée au Soleil sur 26 millions de kilomètres, jusqu'à l'orbite de Saturne. Vu de la Terre, la magnétosphère apparaît cinq fois plus grande que la pleine Lune, malgré la distance plus importante. Les quatre lunes principales de Jupiter sont à l'intérieur de la magnétosphère et donc protégées des vents solaires^[13].

Le champ magnétique capture des particules ionisées du vent solaire. Les électrons de ce plasma ionisent le tore de particules neutres provenant de la lune Io (ainsi que d'Europe, dans une moindre mesure). Des particules d'hydrogène de l'atmosphère jovienne sont également capturées dans la magnétosphère. Les électrons de la magnétosphère provoquent un intense rayonnement radio dans une large gamme de fréquence (de quelques kilohertz à 40 MHz^[37]). Lorsque la trajectoire de la Terre intercepte ce cône d'émissions radio, celles-ci dépassent les émissions radio en provenance du Soleil^[38].

La situation d'Io, à l'intérieur d'une des plus intenses ceintures de rayonnement de Jupiter, a interdit un survol prolongé du satellite par la sonde Galileo qui a dû se contenter de 6 survols rapides de la lune galiléenne entre 1999 et 2002, en se gardant de pénétrer au sein du tore de particules englobant l'orbite du satellite, particules qui auraient été fatales au fonctionnement de la sonde.

La magnétosphère jovienne permet la formation d'impressionnantes aurores polaires. Les lignes de champ magnétique entraînent des particules à très haute énergie vers les régions polaires de Jupiter. L'intensité du champ magnétique est 10 fois supérieure à celui de la Terre et en transporte 20000 fois l'énergie.



Aurore polaire, photographiée dans le domaine des ultraviolets par le télescope spatial *Hubble*.

Orbite et rotation

La distance moyenne entre Jupiter et le Soleil est de 778300000 km (environ 5.2 fois la distance moyenne entre la Terre et le Soleil) et la planète boucle une orbite en 11.86 ans. L'orbite de Jupiter est inclinée de 1,31° par rapport à celle de la Terre. Du fait d'une excentricité de 0,048, la distance entre Jupiter et le Soleil varie de 75000000 km entre le périhélie et l'aphélie^[39],^[40].

L'inclinaison de l'axe de Jupiter est relativement faible : seulement 3,13°. En conséquence, la planète n'a pas de changements saisonniers significatifs^[41].

La rotation de Jupiter est la plus rapide du système solaire : la planète effectue une rotation sur son axe en un peu moins de 10 heures ; cette rotation produit une accélération centrifuge à l'équateur, y conduisant à une accélération nette de 23.12 m/s² (la gravité de surface à l'équateur est de 24.79 m/s²). La planète a ainsi une forme oblongue, renflée à l'équateur et aplatie aux pôles, un effet facilement perceptible depuis la Terre à l'aide d'un télescope amateur. Le diamètre équatorial est 9275 km plus long que le diamètre polaire^[18].

Jupiter n'étant pas un corps solide, sa haute atmosphère subit un processus de rotation différentielle. La rotation de la haute atmosphère jovienne est environ 5 minutes plus longue aux pôles qu'à l'équateur. En conséquence, trois systèmes sont utilisés comme référentiel, particulièrement pour tracer les mouvements de caractéristiques atmosphériques. Le premier système concerne les latitudes entre 10° N et 10° S, le plus court, avec une période de 9 h 50 min 30,0 s. Le deuxième système s'applique aux latitudes au nord et au sud de cette bande, d'une période de 9 h 55 min 40,6 s. Le troisième système fut initialement défini par les radio-astronomes et correspond à la rotation de la magnétosphère de la planète : sa période est la période « officielle », 9 h 55 min 30 s^[42].

Satellites naturels

En juin 2010, on connaissait 62^[43] satellites naturels de Jupiter. Quatre sont de grands satellites, connus depuis plusieurs siècles et regroupés sous la dénomination de « lunes galiléennes » : Io, Europe, Ganymède et Callisto. Les 58 autres satellites sont nettement plus petits et tous irréguliers ; 12 possèdent une taille encore significative (plus de 10 km de diamètre), 25 entre 3 et 10 km de diamètre et 22 autres entre 1 et 2 km de diamètre.

Les 16 satellites principaux ont été nommés d'après les conquêtes amoureuses de Zeus, l'équivalent grec du dieu romain Jupiter.

Lunes galiléennes

En 1610, Galilée découvrit les quatre plus importants satellites de Jupiter, les lunes galiléennes. C'était la première observation de lunes autres que celle de la Terre. Ganymède, avec ses 5262 km de diamètre, est le plus gros satellite du système solaire. Callisto, 4821 km de diamètre, est à peu de choses près aussi grand que Mercure. Io et Europe ont une taille similaire à celle de la Lune. Par comparaison, la 5^e plus grande lune de Jupiter est Amalthéa, un satellite irrégulier dont la plus grande dimension n'atteint que 262 km. Trois de ces quatre satellites galiléens sont très rapprochés de Jupiter : Io, Europe et Ganymède.

Les orbites d'Io, Europe et Ganymède sont en résonance orbitale. Quand Ganymède tourne une fois autour de Jupiter, Europe tourne exactement deux fois et Io quatre fois. En conséquence, les orbites de ces lunes sont déformées elliptiquement, chacune d'elle recevant en chaque point de son orbite un petit *plus* gravitationnel de la part des deux autres.

En revanche, les forces de marées de Jupiter tendent à rendre leurs orbites circulaires^[44]. Ces deux forces déforment chacune de ces trois lunes quand elles s'approchent de la planète, provoquant un réchauffement de leur noyau. En particulier, Io présente une activité volcanique intense et Europe un remodelage constant de sa surface.

Classification

Depuis au moins mi-2007, on pense que les satellites de Jupiter peuvent être regroupés en plusieurs groupes principaux, sur la base de leurs éléments orbitaux, mais certains groupes sont plus frappants que d'autres.

Une subdivision de base consiste à regrouper les huit satellites intérieurs, de tailles très diverses mais possédant des orbites circulaires très faiblement inclinées par rapport à l'équateur de Jupiter et dont on pense qu'ils se sont formés en même temps que la géante gazeuse. On peut subdiviser ce groupe en deux sous-groupes :

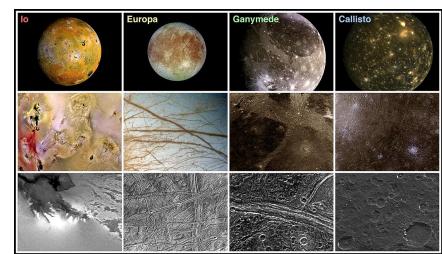
- Le groupe interne n'a été découvert que par la mission Voyager, à l'exception d'Amalthéa. Tous ces satellites ont un diamètre de moins de 200 km et orbitent à moins de 200000 km du centre de Jupiter, sur des orbites à peine inclinées, moins d'un demi-degré. Il s'agit du groupe d'Amalthéa, lequel se compose de Métis, Adrastée, Amalthéa et Thébé.
- Les quatre satellites galiléens ont été découverts par Galilée en 1610. Ils sont parmi les plus grosses lunes du système solaire. Ils orbitent entre 400000 km et 2000000 km : Io, Europe, Ganymède et Callisto.

Les autres lunes forment un ensemble d'objets irréguliers placés sur des orbites elliptiques et inclinées, probablement des astéroïdes ou des fragments d'astéroïdes capturés. Il est possible de distinguer quatre groupes, sur la base d'éléments orbitaux similaires, dont on pense que les éléments partagent une origine commune, peut-être un objet plus grand qui s'est fragmenté^{[45] .[46]} :

- La petite lune Thémisto forme un groupe à elle seule.
- Le groupe d'Himalia, découvert au XX^e siècle avant les sondes *Voyager*, comprend cinq lunes de 170 km de diamètre ou moins, orbitant entre 1100000 et 1300000 km sur des orbites inclinées de 26° à 29° : Léda,



Les quatre lunes galiléennes de Jupiter. De haut en bas : Io, Europe, Ganymède et Callisto.



Surfaces des lunes galiléennes.

Himalia, Lysithéa, Élara et S/2000 J 11.

- La petite lune Carpo forme un autre groupe isolé, aux caractéristiques intermédiaires entre le groupe d'Himalia et celui de Pasiphaé.
- Trois groupes externes, sur des orbites rétrogrades. Les plus gros satellites sont Ananké, Carmé, Pasiphaé et Sinopé, mais beaucoup de lunes minuscules ont été découvertes récemment dans cette zone. En mai 2007, on en connaissait 48 représentants :
 - Le groupe d'Ananké, aux limites indistinctes, orbitant vers 21276000 km suivant une inclinaison de 149°.
 - Le groupe de Carmé, un groupe assez distinct situé vers 23404000 km avec une inclinaison de 165°.
 - Le groupe de Pasiphaé, un groupe dispersé et assez lâche regroupant toutes les autres lunes. Il présente des satellites de 60 km de diamètre ou moins, orbitant entre 17000000 km et 30000000 km sur des orbites rétrogrades inclinées de 145° à 165°.

Interaction avec le système solaire

Avec celle du Soleil, l'influence gravitationnelle de Jupiter a modelé le système solaire. Les orbites de la plupart des planètes sont plus proches du plan orbital de Jupiter que du plan équatorial du Soleil (Mercure est la seule qui fasse exception). Les lacunes de Kirkwood dans la ceinture d'astéroïdes sont probablement dues à Jupiter et il est possible que la planète soit responsable du grand bombardement tardif que les planètes internes ont connu à un moment de leur histoire^[47].

La majorité des comètes de courte période possèdent un demi-grand axe plus petit que celui de Jupiter. On suppose que ces comètes se sont formées dans la ceinture de Kuiper au-delà de l'orbite de Neptune. Lors d'approches de Jupiter, leur orbite aurait été perturbée vers une période plus courte, puis rendue circulaire par interaction gravitationnelle régulière du Soleil et de Jupiter. Par ailleurs, Jupiter est la planète qui reçoit le plus fréquemment des impacts cométaires^[48]. C'est en grande partie dû à son puits gravitationnel, ce qui lui vaut le surnom « d'aspirateur du système solaire »^[49].

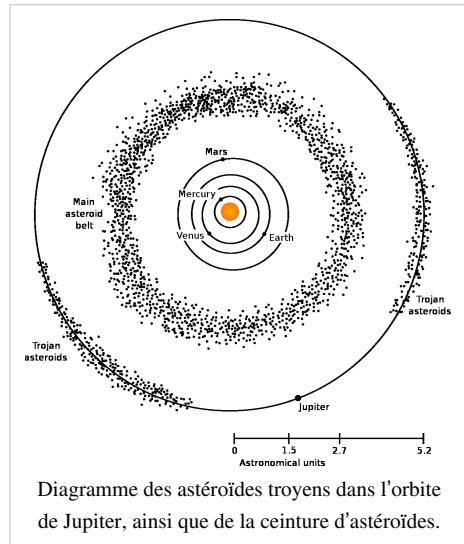


Diagramme des astéroïdes troyens dans l'orbite de Jupiter, ainsi que de la ceinture d'astéroïdes.

Astéroïdes troyens

En plus de ses lunes, le champ gravitationnel de Jupiter maintient un grand nombre d'astéroïdes situés aux alentours des points de Lagrange L_4 et L_5 de l'orbite de Jupiter^[50]. Il s'agit de petits corps célestes qui ont la même orbite mais sont situés à 60° en avance ou en retard par rapport à Jupiter. Connus sous le nom d'astéroïdes troyens, le premier d'entre eux (588) Achille a été découvert en 1906 par Max Wolf ; depuis des centaines d'autres troyens ont été découverts, le plus grand étant (624) Hector.

Historique

Observations pré-télescopiques

Jupiter est visible à l'œil nu la nuit et est connue depuis l'Antiquité. Pour les Babyloniens, elle représentait le dieu Marduk ; ils utilisèrent les douze années de l'orbite jovienne le long de l'écliptique pour définir le zodiaque. Les Romains nommèrent la planète d'après le dieu Jupiter, dérivé du « dieu-père » *dyeu ph₂ter de la religion proto-indo-européenne^[1]. Le symbole astronomique de Jupiter est une représentation stylisée d'un éclair du dieu. Les Grecs l'appelèrent Φαέθων, Phaethon, « ardent ».

Dans les cultures chinoise, coréenne, japonaise et vietnamienne, Jupiter est appelée 木星 « l'étoile de bois », dénomination basée sur les cinq éléments^[51]. Dans l'astrologie védique, les astrologues hindous font référence à Jupiter en tant que Brihaspati, ou « Gurû », c'est-à-dire « le pesant »^[52].

Le nom « jeudi » est étymologiquement le « jour de Jupiter ». En hindi, jeudi se dit गुरुवार (*guruvār*) et possède le même sens. En anglais, *Thursday* fait référence au jour de Thor, lequel est associé à la planète Jupiter dans la mythologie nordique. En japonais, ceci se retrouve également : le jeudi se dit *mokuyōbi* (木曜日[?]) en référence à l'étoile Jupiter, *mokusei* (木星[?]). La même similitude entre les langues occidentales et le japonais se retrouve entre toutes les planètes et les jours de la semaine. En effet, l'attribution des noms de jours de la semaine étant un ajout relativement récent à la langue japonaise, elle fût alors calquée sur les civilisations européennes.

Observations télescopiques terrestres

En janvier 1610, Galilée découvre les quatre satellites qui portent son nom en braquant sa lunette vers la planète. Cette observation des premiers corps tournant autour d'un autre corps que la Terre sera pour lui une indication de la validité de la théorie héliocentrique. Son soutien de cette théorie lui a valu les persécutions de l'Inquisition^[53].

Pendant les années 1660, Cassini utilise un télescope pour découvrir des taches et des bandes de couleur sur Jupiter et observer que la planète semblait oblongue. Il fut également capable d'estimer la période de rotation de la planète^[4]. En 1690, il remarque que l'atmosphère subit une rotation différentielle^[13].

La grande tache rouge a peut-être été observée en 1664 par Robert Hooke et en 1665 par Jean-Dominique Cassini, mais ceci est contesté. Heinrich Schwabe en produit le premier dessin détaillé connu en 1831^[54]. La trace de la tache est perdue à de nombreuses reprises entre 1665 et 1708 avant de redevenir flagrante en 1878. En 1883 et au début du XX^e siècle, il est estimé qu'elle s'estompait à nouveau^[55].

Giovanni Borelli et Cassini ont réalisé des éphémérides des lunes galiléennes. La régularité de la rotation des quatre satellites galiléens sera utilisée fréquemment dans les siècles suivants, leurs éclipses par la planète elle-même permettant de déterminer l'heure à laquelle était effectuée l'observation. Cette technique sera utilisée un temps pour déterminer la longitude en mer. Dès les années 1670, on constate que ces événements se produisaient avec 17 minutes de retard lorsque Jupiter se trouvait à l'opposé de la Terre par rapport au Soleil. Ole Christensen Rømer en déduit que l'observation n'était pas instantanée et effectua en 1676 une première estimation de la vitesse de la lumière^[56].

En 1892, Edward Barnard découvre Amalthea, le cinquième satellite de Jupiter, à l'aide du télescope de l'observatoire Lick en Californie^[57]. La découverte de cet objet assez petit le rendit célèbre rapidement. Amalthea est le dernier satellite de Jupiter à avoir été découvert par l'observation terrestre : les huit suivants le furent à l'aide de la mission *Voyager 1* en 1979^[58].

En 1932, Rupert Wildt identifie des bandes d'absorption d'ammoniaque et de méthane dans le spectre de Jupiter^[59].

Trois phénomènes anticycloniques, de forme ovale, furent observés en 1938. Pendant plusieurs décennies, ils restèrent distincts. Deux des ovales fusionnèrent en 1998 et absorbèrent le troisième en 2000. C'est le *Oval BA*^[60].

En 1955, Bernard Burke et Kenneth Franklin détectent des accès de signaux radios en provenance de Jupiter à 22.2 MHz^[13]. La période de ces signaux correspondait à celle de la rotation de la planète et cette information permit d'affiner cette dernière. Les pics d'émission ont des durées qui peuvent être de quelques secondes ou de moins d'un centième de seconde^[61].



Impact de fragments de la comète
Shoemaker-Levy 9.

Entre le 16 juillet et le 22 juillet 1994, l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter permet de recueillir de nombreuses nouvelles données sur la composition atmosphérique de la planète. Plus de 20 fragments de la comète sont entrés en collision avec l'hémisphère sud de Jupiter, fournissant la première observation directe d'une collision entre deux objets du système solaire. L'évènement, qui constitue une première dans l'histoire de l'astronomie, a été suivi par des astronomes du monde entier^[62], [63].

Le 21 juillet 2009, les astronomes ont observé un nouvel impact sur le pôle sud, de la taille de l'océan Pacifique^[64]. Si l'impact n'a pu être suivi en direct, c'est l'astronome amateur australien Anthony Wesley qui, le premier, signala ces observations. La NASA émet l'hypothèse que la cause soit attribuée à une comète. En effet, les observations ont relevées la présence d'une tache avec une remontée de particules brillantes dans l'atmosphère supérieure, accompagnée d'un échauffement de la troposphère et d'émissions de molécules d'ammoniac. Autant d'indices corroborant un impact et non un phénomène météorologique interne à la planète^[65], [66], [67].

Sondes spatiales

Survol

À partir de 1973, plusieurs sondes spatiales ont effectué des manœuvres de survol qui les ont placées à portée d'observation de Jupiter. Les missions Pioneer 10 et Pioneer 11 obtinrent les premières images rapprochées de l'atmosphère de Jupiter et de plusieurs de ses lunes. Elles décrivirent que les champs électromagnétiques dans l'entourage de la planète étaient plus importants qu'attendus, mais les deux sondes y survécurent sans dommage. Les trajectoires des engins permirent d'affiner les estimations de masse du système jovien. Les occultations de leurs signaux radios par la planète géante conduisirent à de meilleures mesures du diamètre et de l'aplatissement polaire^[10], [68].

Six ans plus tard, les missions Voyager améliorèrent les connaissances des lunes galiléennes et découvrirent les anneaux de Jupiter. Elles prirent les premières images détaillées de l'atmosphère et confirmèrent que la grande tache rouge était d'origine anticyclonique (une comparaison d'images indiqua que sa couleur avait changé depuis les missions *Pioneer*). Un tore d'atomes ionisés fut découvert le long de l'orbite de Io et des volcans furent observés à sa surface. Alors que les engins passèrent derrière la planète, ils observèrent des flashes lumineux dans l'atmosphère^[10], [3].

La mission suivante, la sonde spatiale Ulysses, effectua une manœuvre de survol en 1992 afin d'atteindre une orbite polaire autour du Soleil et effectua alors des études de la magnétosphère de Jupiter. Aucune photographie ne fut prise, la sonde ne possédant aucune caméra. Un second survol nettement plus lointain se produisit en 2004^[69].

En décembre 2000, la sonde Cassini, en route pour Saturne, survola Jupiter et prit des images en haute résolution de la planète. Le 19 décembre 2000, elle prit une image de faible résolution d'Himalia, alors trop lointaine pour observer des détails de la surface^[70].

La sonde *New Horizons*, en route pour Pluton, survola Jupiter pour une manœuvre d'assistance gravitationnelle. L'approche minimale s'effectua le 28 février 2007^[71]. Le système jovien fut imaginé à partir du 4 septembre 2006 ; les instruments de la sonde affinèrent les éléments orbitaux des lunes internes de Jupiter, particulièrement Amalthea^[72]. Les caméras de *New Horizons* photographièrent des dégagements de plasma par les volcans de Io et plus généralement des détails des lunes galiléennes^[73], [74].



Voyager 2.

Résumé des survols

Sonde	Date	Distance (km)
Pioneer 10	3 décembre 1973	130000
Pioneer 11	4 décembre 1974	34000
Voyager 1	5 mars 1979	349000
Voyager 2	9 juillet 1979	570000
Ulysses	8 février 1992 ^[69]	408894
	4 février 2004 ^[69]	120000000
Cassini	30 décembre 2000	10000000
New Horizons	28 février 2007	2304535

Galileo

Jusqu'à l'arrivée de la sonde Juno en 2016, la sonde Galileo est le seul engin à avoir orbité autour Jupiter. Galileo entra en orbite autour de la planète le 7 décembre 1995, pour une mission d'exploration de près de huit années. Elle survola à de nombreuses reprises les satellites galiléens et Amalthea, apportant des preuves à l'hypothèse d'océans liquides sous la surface d'Europe et confirmant le volcanisme d'Io. La sonde fut également témoin de l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 en 1994 lors de son approche de Jupiter. Cependant, bien que les informations récupérées par Galileo furent nombreuses, l'échec du déploiement de son antenne radio à grand gain limita les capacités initialement prévues^[75].

Galileo lâcha une petite sonde à l'intérieur de l'atmosphère jovienne pour en étudier la composition en juillet 1995. Cette sonde pénétra l'atmosphère le 7 décembre 1995. Elle fut freinée par un parachute sur 150 km d'atmosphère, collectant des données pendant 57.6 minutes avant d'être écrasée par la pression (22 fois la pression habituelle sur Terre, à une température de 153 °C). Elle a fondu peu après, et s'est probablement vaporisée ensuite. Un destin que Galileo expérimenta de façon plus rapide le 21 septembre 2003, lorsqu'elle fut délibérément projetée dans l'atmosphère jovienne à plus de 50 km/s, afin d'éviter toute possibilité d'écrasement ultérieur sur Europe^[75].

Missions futures

La NASA lance en août 2011 la sonde *Juno* qui doit se placer en 2016 sur une orbite polaire autour de Jupiter pour mener une étude détaillée de la planète^[76].

À cause de la possibilité d'un océan liquide sur Europe, les lunes glacées de Jupiter ont éveillé un grand intérêt. Une mission fut proposée par la NASA pour les étudier tout spécialement. Le JIMO (*Jupiter Icy Moons Orbiter*) devait être lancé en 2015, mais la mission fut estimée trop ambitieuse et son financement fut annulé^[77].

Observation

À l'œil nu, Jupiter a l'aspect d'un astre blanc très brillant, puisque de par son albédo élevé, son éclat de magnitude atteint les -2,7 en moyenne à l'opposition^[39]. Le fait que sa lumière ne scintille pas indique qu'il s'agit d'une planète. Jupiter est plus brillant que toutes les étoiles et a un aspect similaire à celui de Vénus, cependant celle-ci ne se voit que quelque temps avant le lever du Soleil ou quelque temps après son coucher et est l'astre le plus éclatant du ciel^[78] après le soleil et la lune.



Photo astronomique prise par un amateur.

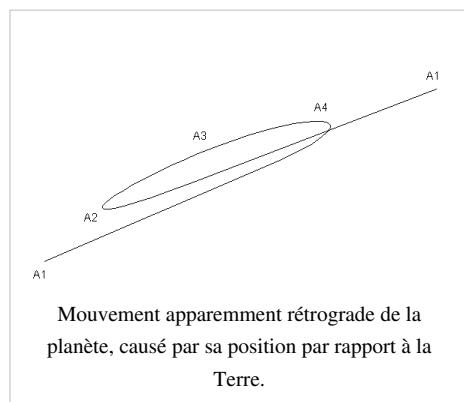


Jupiter et ses satellites.

La planète est souvent considérée comme intéressante à observer du fait qu'elle dévoile nombre de détails dans une petite lunette. Comme l'a fait Galilée en 1610, on peut découvrir quatre petits points blancs qui sont les satellites galiléens^[79]. Du fait qu'ils tournent tous assez vite autour de la planète, il est aisément de suivre leurs révolutions : on constate que, d'une nuit à l'autre, Io fait presque un tour complet. On peut les voir passer dans l'ombre de la planète puis réapparaître.

C'est en observant ce mouvement que Roëmer a montré que la lumière voyageait à une vitesse finie^[80]. On peut aussi observer la structure des couches gazeuses supérieures de la planète géante, visibles avec un télescope de 60 mm^[80].

Un télescope de 25 cm permet d'observer la grande tache rouge (note : il est possible de l'observer dans une petite lunette de 60 mm si les conditions de turbulence atmosphérique sont bonnes) et un télescope de 50 cm, bien que moins accessible pour les amateurs, permet d'en découvrir davantage de nuances^[81].



Mouvement apparemment rétrograde de la planète, causé par sa position par rapport à la Terre.

Le meilleur moment pour observer Jupiter est quand elle est à l'opposition. Jupiter a atteint le périhélie en mars 2001 ; l'opposition de septembre 2010 était donc favorable à son observation^[82]. Grâce à sa rapide rotation, toute la

surface de Jupiter est observable en 5 h^[80].

Observation radio

Avec un simple récepteur de radiodiffusion d'onde courte bande des 13 mètres et avec comme antenne un fil électrique de 3.5 mètres, il est simple d'intercepter le bruit radio-électromagnétique de la planète Jupiter en AM sur la fréquence de 21.86 MHz^[83] bruit de petites vagues rapides écoutées sur haut-parleur^[84].

La radioastronomie poussée de Jupiter est réalisée avec du matériel radioastronomique de réception dans les bandes radios dédiées à la radioastronomie^[85].

Jupiter dans les œuvres de fiction

- Dans *Micromégas* de Voltaire, le personnage éponyme fait un voyage sur Jupiter. (1752)
- Le *Mythe de Cthulhu* de H. P. Lovecraft nomme la planète *Ylidionph*. (1928 - ...)
- Dans le pulp Captain Future de Edmond Moore Hamilton, qui deviendra célèbre via l'adaptation animée (Capitaine Flam), Jupiter (Mégara dans le dessin animé) est le sanctuaire d'une ancienne civilisation, dont un dictateur (l'Empereur de l'Espace) tente de s'approprier l'héritage (1937)
- Dans une nouvelle traitant de l'invention des champs de force (concept fictif), Isaac Asimov place Jupiter et l'immense pression près de son centre au cœur de son récit, comme enjeu^[réf. nécessaire].
- Dans la tétralogie de l'*Odyssée de l'espace* d'Arthur C. Clarke, Jupiter est rebaptisée *Lucifer* après être devenue la deuxième étoile du système solaire. (1968, 1982, 1988, 1997)
- *Sailor Jupiter* est l'un des personnages principaux de l'anime *Sailor Moon*. Ses techniques de combat ont trait à Jupiter : force herculéenne et lancer d'éclairs. (1992)
- Dans le manga Planètes, le personnage principal devient membre d'équipage d'un vaisseau partant explorer Jupiter.
- Dans le roman *Demain les chiens*, de Clifford D. Simak, les hommes ont disparu de la Terre car ils ont découvert une forme de vie sur Jupiter horrible vue de l'extérieur mais délicieuse une fois dans la « peau » des jupitériens et toute l'humanité va s'installer sur Jupiter.
- Dans le roman en trois parties *L'aube de la nuit*, de Peter F. Hamilton, Le système Jovien abrite des habitats Edenistes dont Eden, le premier d'entre eux.
- La planète Bespin de l'Univers de Star Wars a été inspiré par Jupiter, comme Jupiter, Bespin et une planète gazeuse et Bespin ressemble à Jupiter... Bespin apparaît dans Star Wars, épisode V : L'Empire contre-attaque (1980).
- Dans le roman *Ilium* de l'écrivain américain Dan Simmons, les lunes de Jupiter sont le domicile de moravecs, organismes autonomes, conscients et biomécaniques.
- Dans le manga RahXephon, il est question de Jupiter, et ce à-travers l'évocation de Tokyo-Jupiter, ville nommée ainsi en raison de son aspect rappelant la planète du même nom (cf. RahXephon sur Wikipédia).

Notes et références

[1] ([en](#)) Douglas Harper, « Jupiter (<http://www.etymonline.com/index.php?term=Jupiter>) », Online Etymology Dictionary, novembre 2001. Consulté le 23 février 2007.

[2] Gierasch, Peter J.; Nicholson, Philip D., « Jupiter (http://www.nasa.gov/worldbook/jupiter_worldbook.html) », World Book @ NASA, 2004. Consulté le 10 août 2006.

[3] ([en](#)) Gautier, D.; Conrath, B.; Flasar, M.; Hanel, R.; Kunde, V.; Chedin, A.; Scott N., « The helium abundance of Jupiter from Voyager », dans *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, septembre 1981, p. 8713-8720 Résumé disponible sur ADS : 1981JGR....86.8713G (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1981JGR....86.8713G).

[4] ([en](#)) Kunde, V. G. et al, « Jupiter's Atmospheric Composition from the Cassini Thermal Infrared Spectroscopy Experiment », dans *Science*, vol. 305, n° 5690, 10 septembre 2004, p. 1582-1586 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.1100240>)] Résumé disponible sur ADS : 2004Sci...305.1582K (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2004Sci...305.1582K).

- [5] (en) Kim, S. J.; Caldwell, J.; Rivolo, A. R.; Wagner, R., « Infrared Polar Brightening on Jupiter III. Spectrometry from the Voyager 1 IRIS Experiment », dans *Icarus*, vol. 64, novembre 1985, p. 233-248 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(85\)90201-5](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(85)90201-5))] Résumé disponible sur ADS : <http://adsabs.harvard.edu/abs/1985Icar...64..233K> (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=http://adsabs.harvard.edu/abs/1985Icar...64..233K).
- [6] (en) Niemann, H. B.; Atreya, S. K.; Carignan, G. R.; Donahue, T. M.; Haberman, J. A.; Harpold, D. N.; Hartle, R. E.; Hunten, D. M.; Kasprzak, W. T.; Mahaffy, P. R.; Owen, T. C.; Spencer, N. W.; Way, S. H., « The Galileo Probe Mass Spectrometer: Composition of Jupiter's Atmosphere », dans *Science*, vol. 272, n° 5263, mai 1996, p. 846-849 Résumé disponible sur ADS : 1996Sci...272..846N (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1996Sci...272..846N).
- [7] (en) <http://ael.gsfc.nasa.gov/jupiterHighlights.shtml> (<http://english.people.com.cn/english/200003/25/eng20000325W101.html>), NASA Goddard Space Flight Center, Atmospheric Experiments Laboratory. Consulté le 15 novembre 2007.
- [8] (en)[PDF] Hugh F. Wilson et Burkhard Militzer, « Sequestration of noble gases in giant planet interiors (http://militzer.berkeley.edu/papers/resubmitted_neon_ms.pdf) ». Consulté le 29 mars 2010.
- [9] (en)[PDF] Ingersoll, A. P.; Hammel, H. B.; Spilker, T. R.; Young, R. E., « Outer Planets: The Ice Giants (http://www.lpi.usra.edu/opag/outer_planets.pdf) », Lunar & Planetary Institute. Consulté le 15 novembre 2007.
- [10] (en) Eric Burgess, *By Jupiter: Odysseys to a Giant*, New York, Columbia University Press, 1982 (ISBN 978-0-231-05176-7) (LCCN 82004139 (<http://lccn.loc.gov/82004139>)).
- [11] (en) Working Group on Extrasolar Planets: Definition of a "Planet" (<http://www.dtm.ciw.edu/boss/definition.html>), *IAU position statement*, 28 février 2006. Consulté le 9 septembre 2006.
- [12] (en) Anonymous, « Extrasolar Planets (<http://www.planetary.org/explore/topics/extrasolar/>) », The Planetary Society, 2007. Consulté le 25 février 2007.
- [13] (en) Linda T. Elkins-Tanton, *Jupiter and Saturn*, New York, Chelsea House, 2006 (ISBN 978-0-8160-5196-0) (OCLC 60393951 (<http://worldcat.org/oclc/60393951&lang=fr>)) (LCCN 2005014190 (<http://lccn.loc.gov/2005014190>)).
- [14] (en) Guillot, T.; Stevenson, D. J.; Hubbard, W. B.; Saumon, D., *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Cambridge University Press, 2004, pdf , « Chapter 3: The Interior of Jupiter ».
- [15] (en) Bodenheimer, P., « Calculations of the early evolution of Jupiter », dans *Icarus*, vol. 23, novembre 1974, p. 319–25. Résumé disponible sur ADS : 1974Icar...23..319B (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1974Icar...23..319B).
- [16] (en) Guillot, T.; Gautier, D.; Hubbard, W. B., « New Constraints on the Composition of Jupiter from Galileo Measurements and Interior Models », dans *Icarus*, vol. 130, n° 2, décembre 1997, p. 534-539 Résumé disponible sur ADS : 1997astro.ph..7210G (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1997astro.ph..7210G).
- [17] (en) Guillot, T., « A comparison of the interiors of Jupiter and Saturn », dans *Planetary and Space Science*, vol. 47, n° 10–11, octobre 1999, p. 1183–200. Résumé disponible sur ADS : 1999astro.ph..7402G (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1999astro.ph..7402G).
- [18] (en) Kenneth R. Lang, « Jupiter: a giant primitive planet (http://ase.tufts.edu/cosmos/view_chapter.asp?id=9&page=3) », NASA, 2003. Consulté le 10 janvier 2007.
- [19] (en) Metallic Hydrogen at High Pressures and Temperatures in Jupiter (<http://www3.interscience.wiley.com/journal/112287687/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>). Consulté le 28 août 2009.
- [20] (en) Burrows, A.; Hubbard, W. B.; Saumon, D.; Lunine, J. I., « An expanded set of brown dwarf and very low mass star models », dans *Astrophysical Journal*, vol. 406, n° 1, mars 1993, p. 158–71 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/172427>)] Résumé disponible sur ADS : 1993ApJ...406..158B (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1993ApJ...406..158B).
- [21] Queloz, Didier : *VLT Interferometer Measures the Size of Proxima Centauri and Other Nearby Stars* (<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/pr-22-02.html>), European Southern Observatory (19 novembre 2002). Consulté le 12 janvier 2007..
- [22] (en) Kerr, Richard A., « Deep, Moist Heat Drives Jovian Weather », dans *Science*, vol. 287, n° 5455, 2000, p. 946 - 947 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.287.5455.946b>)].
- [23] (en) Surprising Jupiter: Busy Galileo spacecraft showed jovian system is full of surprises (http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/galileo_end.html), NASA, 25 février 2006. Consulté le 20 février 2007.
- [24] (en)[PDF] Ingersol, A. P.; Dowling, T. E.; Giersch, P. J.; Orton, G. S.; Read, P. L.; Sanchez-Lavega, A.; Showman, A. P.; Simon-Miller, A. A.; Vasavada A. R., « Dynamics of Jupiter's Atmosphere (<http://www.lpl.arizona.edu/~showman/publications/ingersolletal-2004.pdf>) », Lunar & Planetary Institute. Consulté le 1^{er} février 2007.
- [25] (en) Denning, W. F., « Jupiter, early history of the great red spot on », dans *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 59, juin 1899, p. 574-584. Résumé disponible sur ADS : 1899MNRAS..59..574D (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1899MNRAS..59..574D).
- [26] (en) Kyrala, A., « An explanation of the persistence of the Great Red Spot of Jupiter », dans *Moon and the Planets*, vol. 26, février 1982, p. 105–7. Résumé disponible sur ADS : 1982M&P....26..105K (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1982M&P....26..105K).
- [27] (en) Jupiter's New Red Spot (http://science.nasa.gov/headlines/y2006/02mar_redjr.htm), 2006. Consulté le 9 mars 2006.
- [28] (en) Bill Steigerwald, « Jupiter's Little Red Spot Growing Stronger (http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2006/little_red_spot.html) », NASA, 14 octobre. Consulté le 2 février 2007.
- [29] (en) Sara Goudarzi, « New storm on Jupiter hints at climate change (http://www.usatoday.com/tech/science/space/2006-05-04-jupiter-jr-spot_x.htm) », USA Today, 4 mai. Consulté le 2 février 2007.

- [30] (**en**) Sommeria, Jöel; Meyers, Steven D.; Swinney, Harry L., « Laboratory simulation of Jupiter's Great Red Spot », dans *Nature*, vol. 331, 25 février 1988, p. 689-693 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1038/331689a0>)]. Résumé disponible sur ADS : 1988Natur.331..689S (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1988Natur.331..689S).
- [31] (**en**) Jupiter Data Sheet (<http://www.space.com/scienceastronomy/solarsystem/jupiter-ez.html>), Space.com. Consulté le 2 février 2007.
- [32] (**en**) Cardall, C. Y.; Daunt, S. J., « The Great Red Spot (<http://csep10.phys.utk.edu/str161/lect/jupiter/redspot.html>) », University of Tennessee. Consulté le 2 février 2007.
- [33] (**en**) Tony Phillips, « Jupiter's New Red Spot (http://science.nasa.gov/headlines/y2006/02mar_redjr.htm) », NASA, 3 mars. Consulté le 2 février 2007.
- [34] (**en**) Bill Steigerwald, « Jupiter's Little Red Spot Growing Stronger (http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2006/little_red_spot.html) », NASA, 14 octobre. Consulté le 2 février 2007.
- [35] (**en**) Burns, J. A.; Showalter, M. R.; Hamilton, D. P.; et.al., « The Formation of Jupiter's Faint Rings », dans *Science*, vol. 284, mai 1999, p. 1146-50 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.284.5417.1146>)]. Résumé disponible sur ADS : 1999Sci...284.1146B (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1999Sci...284.1146B).
- [36] (**en**) Showalter, M. A.; Burns, J. A.; Cuzzi, J. N.; Pollack, J. B., « Jupiter's ring system: New results on structure and particle properties », dans *Icarus*, vol. 69, n° 3, mars 1987, p. 458-98 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(87\)90018-2](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(87)90018-2))]. Résumé disponible sur ADS : 1987Icar...69..458S (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1987Icar...69..458S).
- [37] (**en**) Zarka, P., « Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories », dans *J. Geophys. Res. (E)*, vol. 103, 1998, p. 20159-20194 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1029/98JE01323>)].
- [38] (**en**) Radio Storms on Jupiter (http://science.nasa.gov/headlines/y2004/20feb_radiostorms.htm), NASA, 20 février 2004. Consulté le 1^{er} février 2007.
- [39] (**en**) David R. Williams, « Jupiter Fact Sheet (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/jupiterfact.html>) », NASA, 16 novembre. Consulté le 21 février 2007.
- [40] (**en**) Jupiter (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35651>), European Space Agency, 20 septembre. Consulté le 21 février 2007.
- [41] (**en**) Interplanetary Seasons (<http://science.nasa.gov/headlines/y2000/interplanetaryseasons.html>), Science@NASA. Consulté le 20 février 2007.
- [42] (**en**) Ian Ridpath, Norton's Star Atlas, Harlow (homonymie), Prentice Hall, 1998, 19th ed.^e éd., poche (ISBN 978-0-582-35655-9).
- [43] (**en**) Solar System Exploration: Planets: Jupiter: Moons (<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Jupiter&Display=Moons>), NASA.
- [44] (**en**) Musotto, S.; Varadi, F.; Moore, W. B.; Schubert, G., « Numerical simulations of the orbits of the Galilean satellites », dans *Icarus*, vol. 159, 2002, p. 500-504 [texte intégral (<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=13969974>)].
- [45] (**en**) Jewitt, D. C.; Sheppard, S.; Porco, C., Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere, Cambridge University Press, 2004, pdf .
- [46] (**en**) Nesvorný, D.; Alvarellos, J. L. A.; Dones, L.; Levison, H. F., « Orbital and Collisional Evolution of the Irregular Satellites », dans *The Astronomical Journal*, vol. 126, n° 1, juillet 2003, p. 398-429 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/375461>)]. Résumé disponible sur ADS : 2003AJ....126..398N (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2003AJ....126..398N).
- [47] (**en**) Kerr, Richard A., « Did Jupiter and Saturn Team Up to Pummel the Inner Solar System? », dans *Science*, vol. 306, n° 5702, décembre 2004, p. 1676 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.306.5702.1676a>)].
- [48] (**en**) Nakamura, T.; Kurahashi, H., « Collisional Probability of Periodic Comets with the Terrestrial Planets: An Invalid Case of Analytic Formulation », dans *Astronomical Journal*, vol. 115, n° 1, 1998, p. 848-854 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/300206>)]. Résumé disponible sur ADS : 1998AJ....115..848N (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1998AJ....115..848N).
- [49] Lovett, Richard A. : *Stardust's Comet Clues Reveal Early Solar System* (<http://news.nationalgeographic.com/news/2006/12/061215-comet-stardust.html>), National Geographic News (15 décembre 2006). Consulté le 8 janvier 2007.
- [50] (**en**) Quinn, T.; Tremaine, S.; Duncan, M., « Planetary perturbations and the origins of short-period comets », dans *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 355, juin 1990, p. 667-679 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1086/168800>)]. Résumé disponible sur ADS : 1990ApJ...355..667Q (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1990ApJ...355..667Q).
- [51] (**en**) Bill Arnett, « Planetary Linguistics (<http://www.nineplanets.org/days.html>) », The Nine Planets Solar System Tour, 28 janvier. Consulté le 8 mars 2007.
- [52] (**en**) Guru (http://www.webonautics.com/mythology/guru_jupiter.html), Indian Divinity.com. Consulté le 14 février 2007.
- [53] (**en**) Richard S. Westfall, « Galilei, Galileo (http://galileo.rice.edu/Catalog/NewFiles/galilei_gal.html) », The Galileo Project. Consulté le 10 janvier 2007.
- [54] (**en**) Paul Murdin, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Bristol, Institute of Physics Publishing, 2000 (ISBN 978-0-12-226690-4) (LCCN 88024062 (<http://lccn.loc.gov/88024062>))).
- [55] (**en**) SP-349/396 Pioneer Odyssey — Jupiter, Giant of the Solar System (<http://history.nasa.gov/SP-349/ch1.htm>), NASA, août 1974. Consulté le 10 août 2006.
- [56] (**en**) Roemer's Hypothesis (<http://www.mathpages.com/home/kmath203/kmath203.htm>), MathPages. Consulté le 12 janvier 2007.
- [57] (**en**) Joe Tenn, « Edward Emerson Barnard (<http://www.phys-astro.sonoma.edu/BruceMedalists/Barnard/>) », Sonoma State University, 10 mars. Consulté le 10 janvier 2007.
- [58] (**en**) Amalthea Fact Sheet (<http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/education/teacherres-amalthea.html>), NASA JPL, 1^{er} octobre. Consulté le 21 février 2007.

- [59] (**en**) Dunham Jr., Theodore, « Note on the Spectra of Jupiter and Saturn », dans *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 45, février 1933, p. 42–44 Résumé disponible sur ADS : 1933PASP...45...42D (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1933PASP...45...42D).
- [60] (**en**) Youssef, A.; Marcus, P. S., « The dynamics of jovian white ovals from formation to merger », dans *Icarus*, vol. 162, n° 1, mars 2003, p. 74-93 [lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/S0019-1035\(02\)00060-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-1035(02)00060-X))]. Résumé disponible sur ADS : 2003Icar..162...74Y (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2003Icar..162...74Y).
- [61] (**en**) Rachel A. Weintraub, « How One Night in a Field Changed Astronomy (http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/radio_jupiter.html) », NASA, 26 septembre. Consulté le 18 février 2007.
- [62] (**en**) Ron Baalke, « Comet Shoemaker-Levy Collision with Jupiter (<http://www2.jpl.nasa.gov/sl9/>) », NASA. Consulté le 2 janvier 2007.
- [63] Britt, Robert R. : *Remnants of 1994 Comet Impact Leave Puzzle at Jupiter* (http://www.space.com/scienceastronomy/mystery_monday_040823.html), space.com (23 août 2004). Consulté le 20 février 2007.
- [64] Un gros objet s'écrase sur Jupiter (<http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=6851>). Consulté le 27 juillet 2009.
- [65] La Presse Canadienne, « Jupiter a été frappée par un objet volant non identifié (<http://fr.canoe.ca/techno/nouvelles/archives/2009/07/20090721-083022.html>) », La Presse Canadienne. Consulté le 21 juillet 2009.
- [66] Un objet s'écrase sur Jupiter (<http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=6851>), Techno-sciences. Consulté le 25 juillet 2009.
- [67] Un corps s'écrase sur Jupiter (http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/astronomie/d/en-image-un-corps-secrase-sur-jupiter_19969/#xtor=RSS-8), Futura-sciences. Consulté le 21 juillet 2009.
- [68] (**en**) Lawrence Lasher, « Pioneer Project Home Page (http://spaceprojects.arc.nasa.gov/Space_Projects/pioneer/PNhome.html) », NASA Space Projects Division, 1^{er} août. Consulté le 28 novembre 2006.
- [69] (**en**)[PDF] Chan, K.; Paredes, E. S.; Ryne, M. S., « Ulysses Attitude and Orbit Operations: 13+ Years of International Cooperation (<http://www.aiaa.org/Spaceops2004Archive/downloads/papers/SPACE2004sp-template00447F.pdf>) », American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. Consulté le 28 novembre 2006.
- [70] (**en**) Hansen, C. J.; Bolton, S. J.; Matson, D. L.; Spilker, L. J.; Lebreton, J.-P., « The Cassini-Huygens flyby of Jupiter », dans *Icarus*, vol. 172, n° 1, novembre 2004, p. 1-8 [lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2004.06.018>)]. Résumé disponible sur ADS : 2004Icar..172....1H (http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=2004Icar..172....1H).
- [71] (**en**) Mission Update: At Closest Approach, a Fresh View of Jupiter (http://www.planetary.org/explore/topics/space_missions/new_horizons/022807.html). Consulté le 27 juillet 2007.
- [72] (**en**) Pluto-Bound New Horizons Provides New Look at Jupiter System (http://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/news/jupiter_system.html). Consulté le 27 juillet 2007.
- [73] (**en**) New Horizons targets Jupiter kick (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/6279423.stm>), BBC News Online, 19 janvier. Consulté le 20 janvier 2007.
- [74] (**en**) Amir Alexander, « New Horizons Snaps First Picture of Jupiter (http://www.planetary.org/news/2006/0927_New_Horizons_Snaps_First_Picture_of.html) », The Planetary Society, 27 septembre. Consulté le 19 décembre 2006.
- [75] (**en**) Shannon McConnell, « Galileo: Journey to Jupiter (<http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/>) », NASA Jet Propulsion Laboratory, 14 avril. Consulté le 28 novembre 2006.
- [76] (**en**) Juno launch press kit (http://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/JunoLaunch.pdf), NASA, juillet 2011.
- [77] Berger, Brian : *White House scales back space plans* (<http://www.msnbc.msn.com/id/6928404/>), MSNBC (7 février 2005). Consulté le 2 janvier 2007.
- [78] Observer les planètes : Système solaire : Vénus (<http://www.planetobs.com/planete.php?page=12>). Consulté le 4 janvier 2009.
- [79] Observer les planètes : Système solaire : Jupiter (<http://www.planetobs.com/planete.php?page=15>). Consulté le 4 janvier 2009.
- [80] (**da**) Teuber, Jan (2004). *Ole Rømer og den bevægede Jord - en dansk førsteplads?*. in Friedrichsen, Per; Henningsen, Ole; Olsen, Olaf; Thykier, Claus; Tortzen, Chr. Gorm (eds.). Ole Rømer - videnskabsmand og samfundstjener. Copenhagen: Gads Forlag. p. 218. ISBN 87-12-04139-4.
- [81] A Jupiter Observing Guide (<http://www.skyandtelescope.com/observing/objects/planets/3304326.html>), Sky & Telescope. Consulté le 15 novembre 2007.
- [82] (**en**) *Favorable Appearances by Jupiter* (<http://home.comcast.net/~kpheider/jup2010.txt>), anonyme. Consulté le 12 juin 2008.
- [83] Weber, Colom, Kerdraon et Lecacheux, Techniques d'observation en radioastronomie basse fréquence en présence d'émetteurs radioélectriques[PDF] (<http://www.lesia.obspm.fr/plasma/Goutelas2007/Presentations/Weber/Weber-bnm.pdf>), Bulletin du BNM^[Quoi ?] n° 12X, Volume 2004-Y. Voir la figure de la page 2.
- [84] 3.3 Parasites bandes étroites continus : AM au NDA pages 135 et 139[PDF] (http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/31/99/39/PDF/Cedric_DV.pdf).
- [85] Bandes dédiées à la radioastronomie, page 24 Chapitre 1 : Introduction à la Radioastronomie[PDF] (http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/31/99/39/PDF/Cedric_DV.pdf).

Saturne (planète)

Saturne ↗



Saturne vue par la sonde Cassini en 2008.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	1421179772 km (9.53707032 UA)
Aphélie	1503983449 km (10.05350840 UA)
Périhélie	1349467375 km (9.02063224 UA)
Circonférence orbitale	5684719086 km (38 UA)
Excentricité	0.05415060
Période de révolution	10757.7365 d (29 à 165 d 11,68 h)
Période synodique	378.0944 d
Vitesse orbitale moyenne	9.6446 km/s
Vitesse orbitale maximale	10.183 km/s
Vitesse orbitale minimale	9.137 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	2.48446°
Noeud ascendant	113.7153281104°
Argument du périhélie	338.71690°
Satellites connus	62 connus en septembre 2010, dont 53 ont été nommés.
Anneaux connus	7 principaux, finement divisés.
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	60268 km (9.4492 Terres)
Rayon polaire	54359 km (8.5521 Terres)
Rayon moyen volumétrique	58232 km (9.014 Terres)
Aplatissement	0.09796
Périmètre équatorial	378675 km
Superficie	$43.466 \times 10^9 \text{ km}^2$ (83.703 Terres)

Volume	827.13×10 ¹² km ³ (763 Terres)
Masse	568.46×10 ²⁴ kg (95.152 Terres)
Masse volumique globale	687.3 kg/m ³
Gravité de surface	8.96 m/s ² (0.916 g)
Vitesse de libération	35.5 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	0.444 d (10 h 47 min 6 s)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	34821 km/h
Inclinaison de l'axe	26.73°
Albédo géométrique visuel	0.47
Albédo de Bond	0.342
Irradiance solaire	14.90 W/m ² (0.011 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	81.1 K (-191.9 °C)
Température de surface :	
Température à 10 kPa :	84 K (-189 °C)
Température à 100 kPa :	134 K (-139 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Masse volumique à 100 kPa	0.19 kg/m ³
Hauteur d'échelle	59.5 km
Masse molaire moyenne	2.07 g/mol
Hydrogène H₂	> 93 %
Hélium He	> 5 %
Méthane CH₄	0,2 %
Vapeur d'eau H₂O	0,1 %
Ammoniac NH₃	0,01 %
Éthane C₂H₆	0,0005 %
Hydrure de phosphore PH₃	0,0001 %
Histoire	
Divinité babylonienne	Ninurta (<i>Ninib</i>)
Divinité grecque	Kρόνος
Nom chinois (élément associé)	Tǔxīng 土星 (terre)

Saturne est la sixième planète du système solaire par ordre de distance au Soleil et la deuxième plus grande planète du système solaire après Jupiter. Son nom vient du dieu romain Saturne . Le symbole de Saturne représente la

faucille du dieu (Unicode: ⚛).

Saturne est une géante gazeuse, comme Jupiter, Uranus et Neptune. D'un diamètre d'environ neuf fois et demi celui de la Terre, elle est majoritairement composée d'hydrogène et d'hélium.

Saturne possède un magnifique système d'anneaux, composés principalement de particules de glace et de poussière. Saturne possède de nombreux satellites, dont cinquante-trois ont été confirmés et nommés. Titan est le plus grand satellite de Saturne et la deuxième plus grande lune du système solaire (après Ganymède de Jupiter). Titan est plus grand que la planète Mercure et est la seule lune du système solaire à posséder une atmosphère significative.

Caractéristiques physiques

Masses et dimensions

Saturne a la forme d'un sphéroïde oblate : la planète est aplatie aux pôles et renflée à l'équateur. Ses diamètres équatoriaux et polaires diffèrent de près de 10 % (120536 km pour le premier, 110449 km pour le second), conséquence de sa rapide rotation sur elle-même et d'une composition interne extrêmement fluide. Les autres géantes gazeuses du système solaire (Jupiter, Uranus et Neptune) sont également aplatis, mais de façon moins marquée.

Saturne est la deuxième planète la plus massive du système solaire, 3,3 fois moins que Jupiter, mais 5,5 fois plus que Neptune et 6,5 fois plus qu'Uranus. En comparaison avec la Terre, Saturne est 95 fois plus massive. Son diamètre étant environ 9 fois plus grand que celui de la Terre, on pourrait caser 760 corps de la taille de cette dernière dans le volume occupé par la géante gazeuse.

Saturne est la seule planète du système solaire dont la masse volumique moyenne est inférieure à celle de l'eau : 0,69 g/cm³. Cela vient à dire que si on trouvait un océan assez grand pour contenir Saturne, celle-ci flotterait^[1]. Ce chiffre masque d'énormes disparités dans la répartition de la masse à l'intérieur de la planète : si son atmosphère, essentiellement composée d'hydrogène (le gaz le plus léger), est moins dense que l'eau, son noyau l'est considérablement plus.

Composition

La haute atmosphère de Saturne est constituée à 93,2 % d'hydrogène et à 6,7 % d'hélium en termes de molécules de gaz (96,5 % d'hydrogène et 3,5 % d'hélium en termes d'atomes). Des traces de méthane CH₄, d'éthane C₂H₆, d'ammoniac NH₃, d'acétylène C₂H₂ et de phosphine PH₃ ont également été détectées^[2]. Les nuages les plus en altitude sont composés de cristaux d'ammoniac, tandis que les nuages plus bas semblent être constitués soit d'hydrosulfure d'ammonium NH₄SH soit d'eau H₂O^[3]. Par rapport à l'abondance des éléments du Soleil, l'atmosphère de Saturne est sensiblement plus pauvre en hélium.

La quantité d'éléments plus lourds que l'hélium n'est pas connue avec précision, mais on suppose que leurs proportions correspondent aux abondances initiales lors de la formation du système solaire. La masse totale de ces éléments est estimée à 19 à 31 fois celle de la Terre, une fraction significative étant située dans la région du noyau de Saturne^[4].

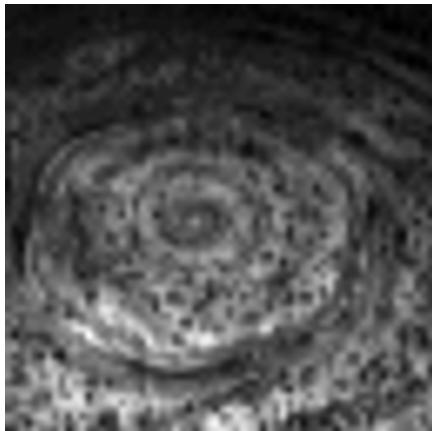
Structure interne

La structure interne de Saturne serait similaire à celle de Jupiter, avec un noyau rocheux de silicates et de fer, entouré d'une couche d'hydrogène métallique, puis d'hydrogène liquide, puis enfin d'hydrogène gazeux. Des traces de glaces diverses seraient également présentes. Les transitions entre ces différentes couches seraient progressives et la planète ne comporterait pas de surface à proprement parler. La région du noyau posséderait entre 9 et 22 fois la masse de la Terre^[5].

Saturne a une température interne très élevée, atteignant probablement 12 000 K dans le noyau, et dégage, à l'instar de Jupiter, plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. La majeure partie de cette énergie provient d'un effet de

compression gravitationnelle (mécanisme de Kelvin-Helmholtz), mais cet effet ne suffit pas à lui seul à expliquer la production thermique. Une explication proposée serait une « pluie » de gouttelettes d'hélium dans les profondeurs de Saturne, dégageant de la chaleur par friction en tombant dans une mer d'hydrogène plus léger^[réf. nécessaire].

Atmosphère



Animation du système nuageux polaire hexagonal.

De manière similaire à Jupiter, l'atmosphère de Saturne est organisée en bandes parallèles, même si ces bandes sont moins visibles et plus larges près de l'équateur. En fait, le système nuageux de Saturne ne fut observé pour la première fois que lors des missions Voyager. Depuis, les télescopes terrestres ont fait suffisamment de progrès pour pouvoir suivre l'atmosphère saturnienne et les caractéristiques courantes chez Jupiter (comme les orages ovales à longue durée de vie) ont été retrouvées chez Saturne. En 1990, le télescope spatial Hubble a observé un énorme nuage blanc près de l'équateur de Saturne qui n'était pas présent lors du passage des sondes Voyager. En 1994, un autre orage de taille plus modeste a été observé.

Le nuage de 1990 est un exemple de grande tache blanche, un phénomène saturnien éphémère qui se reproduit environ tous les 30 ans. Des grandes taches blanches ont été observées en 1876, 1903, 1933 et 1960. Si la périodicité se maintient, une autre tempête devrait se produire vers 2020^[6].

Dans les images transmises par la sonde *Cassini*, l'atmosphère de l'hémisphère nord apparaît bleue, de façon similaire à celle d'Uranus. Cette couleur est probablement causée par diffusion Rayleigh.

L'imagerie infrarouge a montré que Saturne possède un vortex polaire chaud, le seul phénomène de ce type connu dans le système solaire.

Un système ondulatoire hexagonal existe autour du pôle nord, vers 78° de latitude. Il a été remarqué pour la première fois lors du passage des sondes *Voyager*^{[7] .[8]}. Les bords de l'hexagone mesurent environ 13800 km. La structure tourne sur elle-même avec une période de 10 h 39 min 24 s. Le système ne se décale pas en longitude comme les autres structures nuageuses de l'atmosphère visible. Son origine n'est pas connue. La plupart des astronomes semblent penser qu'il s'agit d'un ensemble d'ondes stationnaires. Parmi les autres théories, il pourrait s'agir d'un type inconnu d'aurore polaire^[9]. Des formes polygonales ont été reproduites en laboratoire à l'intérieur de seaux de fluides en rotation^[10].

Les images prises par le télescope spatial Hubble indiquent la présence au pôle sud d'un courant-jet, mais pas d'un vortex polaire ou d'un système hexagonal analogue^[11]. Cependant, la NASA a signalé en novembre 2006 que *Cassini* a observé une tempête analogue à un ouragan, stationnant au pôle sud, et qui possède un œil clairement défini^[12]. Il s'agit du seul œil jamais observé sur une autre planète que la Terre^[13].

De 2004 à 2009, la sonde Cassini a également pu observer la formation, le développement et la fin de 9 violents orages. Les orages de Saturne sont particulièrement longs. Un orage s'étala de novembre 2007 à juillet 2008. De même, un très violent orage débuta en janvier 2009 et dura plus de 8 mois. Ce sont les plus long orages observés jusqu'à présent dans le système solaire. Ils peuvent s'étendre sur plus de 3.000 km de diamètre autour de la région appelée 'Allée des tempêtes' située à 35° au Sud de l'équateur. Les décharges électriques provoquées par les orages de Saturne émettent des ondes radio dix mille fois plus fortes que celles des orages terrestres.

Magnétosphère

Le champ magnétique de Saturne est plus faible que celui de Jupiter (mais néanmoins plus intense que celui de la Terre) et sa magnétosphère est plus petite^[14].

Rotation

L'atmosphère de Saturne subissant une rotation différentielle, plusieurs systèmes ont été définis, avec des périodes de rotation propres (un cas similaire à celui de Jupiter) :

- Le premier système a une période de 10 h 14 min 00 s et concerne la zone équatoriale, qui s'étend entre le bord nord de la ceinture équatoriale méridionale et le bord sud de la ceinture équatoriale boréale.
- Le deuxième système concerne toutes les autres latitudes et possède une période de 10 h 39 min 24 s.
- Le troisième système, basé sur la rotation des émissions radio de Saturne, possède une période de 10 h 39 min 22,3 s.

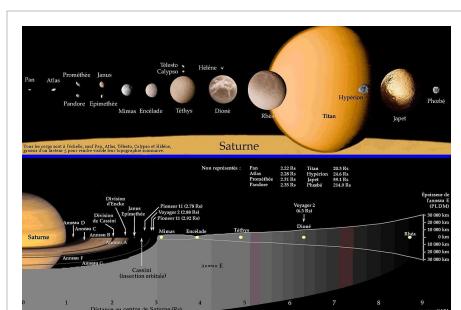
Ce dernier système, mesuré lors du passage des sondes *Voyager*, était celui généralement utilisé pour parler de la rotation de la planète. Cependant, lors de son approche de Saturne en 2004, la sonde *Cassini* mesura que la période de rotation radio s'était légèrement accrue, atteignant 10 h 45 min 45 s (± 36 s)^[15]. La cause exacte du changement n'est pas connue.

En mars 2007, il a été annoncé que la rotation des émissions radio ne rend pas compte de la rotation de la planète, mais est causée par des mouvements de convection du disque de plasma entourant Saturne, lesquels sont indépendants de la rotation. Les variations de période pourraient être causées par les geysers de la lune Encelade. La vapeur d'eau émise en orbite saturnienne se chargerait électriquement et pèserait sur le champ magnétique de la planète, ralentissant sa rotation par rapport à celle de Saturne. Si ce point est vérifié, on ne connaît aucune méthode fiable pour déterminer la période de rotation réelle du noyau de Saturne^{[16] .[17] .[18] .[19]}.

Anneaux planétaires

Les anneaux de Saturne sont un des spectacles les plus remarquables du système solaire et constituent la caractéristique principale de la planète Saturne. À la différence de ceux des autres géantes gazeuses, ils sont extrêmement brillants (albédo de 0,2 à 0,6) et peuvent être vus à l'aide de simples jumelles.

Il y règne une agitation permanente : vagues, collisions, accumulations de matières.



Les anneaux de Saturne par rapport aux orbites de certains de ses satellites

Caractéristiques des anneaux et des divisions de Saturne

Nom	Rayon interne		Rayon externe		Largeur (km)	Épaisseur (m)
	km	R _S	km	R _S		
Anneau D	66900	1.110	74510	1.236	7610	?
Division de Guérin	74510	1.236	74658	1.239	148	—
Anneau C	74658	1.239	92000	1.527	17342	5
Anneau B	92000	1.527	117580	1.951	25580	5-10
Division de Cassini	117500	1.95	122200	2.03	4700	—
Anneau A	122170	2.027	136775	2.269	14605	20-40
Division d'Encke	133589	2.216	—	—	325	—
Division de Keeler	136530	2.265	—	—	35	—
R/2004 S 1	137630	2.284	—	—	?	?
R/2004 S 2	138900	2.305	—	—	?	?
Anneau F	140180	2.326	—	—	30-500	?
Anneau G	170000	2.82	175000	2.90	5000	1×10 ⁵
Anneau E	181000	3	483000	8	302000	1×10 ⁷

En 2009 un anneau a été mis en évidence par le satellite Spitzer en infrarouge. Ce nouvel anneau, très peu dense, a été trouvé à l'endroit même où évolue un des satellites de Saturne, Phœbé, qui en serait peut-être à l'origine.

Satellites

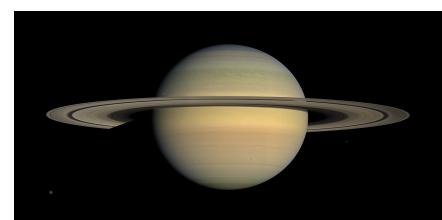
Saturne possède un grand nombre de satellites naturels. Il est difficile de dire combien, dans la mesure où tout morceau de glace des anneaux est techniquement un satellite et qu'il n'est pas possible de faire la distinction entre une grande particule et une petite lune.

En 2009, 62^[20] satellites ont été identifiés, ainsi que 3 autres corps qui pourraient n'être que des amas dans les anneaux. 53 satellites ont été confirmés et nommés.

La plupart des lunes connues sont petites : 31 mesurent moins de 10 km de diamètre, et 13 autres moins de 50 km^[21]. Seules sept sont suffisamment massives pour avoir pu prendre une forme sphéroïde sous leur propre gravité. Titan, la plus grande d'entre elles, plus grande que Mercure ou Pluton, est le seul satellite du système solaire à posséder une atmosphère dense.

Tous les satellites pour lesquels la période de rotation est connue, à l'exception de Phœbé et d'Hypérion, sont synchrones. Les orbites des trois paires Mimas-Téthys, Encelade-Dioné et Titan-Hypérion sont en résonance : Mimas et Téthys sont en résonance 1:2 (la période de révolution de Mimas est exactement la moitié de celle de Téthys) ; Encelade et Dioné sont également en résonance 1:2 ; Titan et Hypérion sont en résonance 3:4.

Traditionnellement, la plupart des lunes de Saturne ont été nommées d'après des Titans de la mythologie grecque.



Cette photo couleur est un assemblage de 30 clichés de *Cassini* depuis une distance de 1.1 million de km pris au moment de l'équinoxe Saturnien. Six satellites de Saturne sont visibles : Titan, Mimas, Janus, Pandore, Épiméthée et Encelade

Historique

Observations pré-télescopiques

Saturne est la plus lointaine des cinq planètes visibles à l'œil nu la nuit, des observations étant attestées jusqu'à la préhistoire^[22].

Observations télescopiques terrestres

En 1610, Galilée, en braquant son télescope vers Saturne, en observe les anneaux mais ne comprend pas ce qu'il en est, décrivant que la planète aurait des « oreilles ». En 1612, la Terre passant dans le plan des anneaux, ceux-ci disparaissent. En 1613, ils réapparaissent sans que Galilée puisse émettre une hypothèse quant à ce qu'il observe^[23].

En 1655, Christian Huygens, découvre un astre près de Saturne qui sera nommé plus tard Titan.

En 1656, Christian Huygens, en utilisant un télescope bien plus puissant, comprend que la planète est en réalité entourée d'un anneau, qu'il pense être solide.

En 1675, Jean-Dominique Cassini détermine que l'anneau est composé de plusieurs petits anneaux, séparés par des divisions ; la plus large d'entre elles sera plus tard appelée la division de Cassini.

En 1859, James Clerk Maxwell démontre que les anneaux ne peuvent pas être solides. Il émet l'hypothèse qu'ils sont constitués d'un grand nombre de petites particules, toutes orbitant autour de Saturne indépendamment^[24]. La théorie de Maxwell fut prouvée correcte en 1895 par des études spectroscopiques menées par James Keeler à l'observatoire Lick.

Sondes spatiales

Survol

Dans le dernier quart du XX^e siècle, Saturne fut visitée par plusieurs sondes spatiales, Pioneer 11 en 1979, Voyager 1 en 1980 et Voyager 2 en 1981.

Pioneer 11 passa à 22 000 km des nuages de Saturne en septembre 1979. La sonde prit des photographies en basse résolution de la planète et de quelques-uns de ses satellites, lesquelles n'étaient pas assez bonnes pour distinguer les caractéristiques de leur surface. Elle étudia l'étalement des anneaux, découvrit l'anneau F et le fait que les divisions ne sont pas vides de matériaux. Pioneer 11 mesura également la température de Titan.

En novembre 1980, Voyager 1 visita le système saturnien. La sonde renvoya les premières images en haute résolution de la planète, de ses anneaux et de ses satellites. Les surfaces de plusieurs lunes furent vues pour la première fois. Voyager 1 effectua un survol de Titan, accroissant les connaissances sur l'atmosphère de cette lune. Cependant, elle prouva également que cette atmosphère était imperméable aux longueurs d'onde de la lumière visible. Le survol éjecta la sonde hors du plan du système solaire.

En août 1981, Voyager 2 continua l'étude de Saturne. Elle prit plus de gros plans des lunes et apporta des preuves d'évolution de l'atmosphère et des anneaux. Malheureusement, pendant le survol, la plateforme de caméra orientable resta coincée pendant deux jours et certaines photographies ne purent être prises selon l'angle prévu. La gravité de Saturne fut utilisée pour diriger la sonde vers Uranus (voir cette planète) qui, à son tour, la dirigea vers Neptune.

Les sondes découvrirent et confirmèrent plusieurs satellites orbitant près ou à l'intérieur des anneaux de Saturne. Elles découvrirent également la division de Maxwell et la division de Keeler.



Saturne vue par Voyager 2

Résumé des survols

Sonde	Date	Distance (km)
Pioneer 11	1 ^{er} septembre 1979	21000
Voyager 1	12 novembre 1980	124000
Voyager 2	25 août 1981	161000

Cassini

La sonde Cassini-Huygens s'est placée en orbite autour de Saturne le 1^{er} juillet 2004 afin d'étudier le système saturnien, avec une attention particulière pour Titan. En juin 2004, elle effectua un survol de Phœbé.

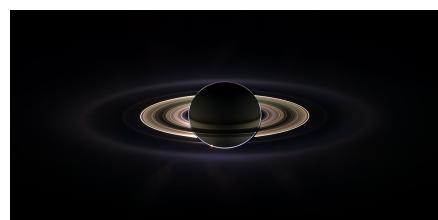
L'orbiteur réalisa deux survols de Titan avant de larguer le module atterrisseur *Huygens* le 25 décembre 2004. *Huygens* descendit à la surface de Titan le 14 janvier 2005, transmettant un flot de photographies et de données pendant la descente et après l'atterrissement. Pendant l'année 2005, *Cassini* effectua plusieurs autres survols de Titan et d'autres satellites.

Le 10 mars 2006, la NASA annonça que *Cassini* avait mis en évidence des réservoirs d'eau liquide s'échappant en geyser sur Encelade^[25].

Le 20 septembre 2006, *Cassini* photographia un anneau planétaire non encore découvert, en dehors des anneaux principaux et à l'intérieur des anneaux E et G^[26].

En juillet 2006, *Cassini* détecta la première preuve de lacs d'hydrocarbures près du pôle nord de Titan, ce qui fut confirmé en janvier 2007. En mars 2007, de nouvelles images du pôle mirent en évidence des mers d'hydrocarbures, la plus grande ayant presque la taille de la mer Caspienne^[27].

Dépendant de la réserve de carburant nécessaire à moduler chaque orbite, la mission principale de la sonde devait en principe s'achever en 2008, après 74 orbites autour de Saturne ; début 2008, au vu des réserves encore existantes, elle a été prolongée de 2 ans.



Saturne éclipsant le soleil, vu par la sonde *Cassini*.

Références

- [1] Gaétan Morrissette, Astronomie Premier Contact, p.186
- [2] (en) R. Courtin, D. Gautier, A. Marten et B. Bezard, « The Composition of Saturn's Atmosphere at Temperate Northern Latitudes from Voyager IRIS spectra », dans *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 15, 1983, p. 831 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1983BAAS...15..831C>) (le 4 février 2007)].
- [3] (en) Carolina Martinez, « Cassini Discovers Saturn's Dynamic Clouds Run Deep (http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/whycassini/cassini-090505-clouds.html) », NASA, 5 septembre 2005. Consulté le 29 avril 2007
- [4] (en) Tristan Guillot, « Interiors of Giant Planets Inside and Outside the Solar System », dans *Science*, vol. 286, n° 5437, 1999, p. 72-77 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/286/5437/72>) (le 27 avril 2007)].
- [5] (en) Jonathan J. Fortney, « Looking into the Giant Planets », dans *Science*, vol. 305, n° 5689, 2004, p. 1414-1415 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/305/5689/1414>) (le 30 avril 2007)]
- [6] (en) Mark Kidger, « The 1990 Great White Spot of Saturn », dans *1993 Yearbook of Astronomy*, W.W. Norton & Company, 1993, p. 176-215
- [7] (en) D. A. Godfrey, « A hexagonal feature around Saturn's North Pole (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1988Icar...76..335G&db_key=AST&data_type=HTML&format=) »
- [8] (en) A. Sánchez-Lavega, J. Lecacheux, F. Colas, P. Laques, « Ground-based observations of Saturn's north polar SPOT and hexagon (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1993Sci...260..329S&db_key=AST&data_type=HTML&format=) »
- [9] (en) A Hex on Saturn (<http://www.science-frontiers.com/sf063/sf063a04.htm>), Science Frontiers, 31 mai 1989. Consulté le 28 mars 2007

- [10] (**en**) Geometric whirlpools revealed (<http://www.nature.com/news/2006/060515/full/060515-17.html>), Nature, 19 mai 2006. Consulté le 27 avril 2007
- [11] (**en**) A. Sánchez-Lavega, S. Pérez-Hoyos, R. G. French, « Hubble Space Telescope Observations of the Atmospheric Dynamics in Saturn's South Pole from 1997 to 2002 (<http://www.aas.org/publications/baas/v34n3/dps2002/10.htm> »), 2002
- [12] (**en**) PIA09187: Spinning Saturn (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA09187>), NASA/JPL/University of Arizona, 2006
- [13] (**en**) NASA Sees into the Eye of a Monster Storm on Saturn (<http://saturn.jpl.nasa.gov/news/press-release-details.cfm?newsID=703>), NASA, 9 novembre 2006. Consulté le 10 novembre 2006
- [14] (**en**) C. T. Russell, J. G. Luhmann, « Saturn: Magnetic Field and Magnetosphere (http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/sat_mag.html »), UCLA - IGPP Space Physics Center, 1997. Consulté le 29 avril 2007
- [15] (**en**) Scientists Find That Saturn's Rotation Period is a Puzzle (http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/media/cassini-062804.html), NASA, 28 avril 2006. Consulté le 22 mars 2007
- [16] (**en**) Enceladus Geysers Mask the Length of Saturn's Day (<http://saturn.jpl.nasa.gov/news/press-release-details.cfm?newsID=733>), Jet Propulsion Laboratory, 22 mars 2007. Consulté le 22 mars 2007
- [17] (**en**) The Variable Rotation Period of the Inner Region of Saturn's Plasma Disk (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/316/5823/442>), Science, 03.22.07. Consulté le 24 avril 2007
- [18] (**en**) A New Spin on Saturn's Rotation (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/316/5823/442>), Science, 20 avril 2007. Consulté le 24 avril 2007
- [19] (**fr**) Encelade pèse sur le champ magnétique de Saturne (http://tempsreel.nouvelobs.com/actualites/sciences/espace/20070327-OBS9246/encelade_pese_sur_le_champ_magnetique_de_saturne.html), Le Nouvel Observateur, 27 mars 2007. Consulté le 14 mai 2007
- [20] <http://sse.jpl.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Saturn&Display=Moons>
- [21] Saturn's Known Satellites (<http://www.ifa.hawaii.edu/~sheppard/satellites/satsatdata.html>), Scott S. Sheppard, 2007
- [22] (http://www.nmm.ac.uk/gcse-astronomy/solar-system/saturn/*/viewPage/5)
- [23] (**en**) Historical Background of Saturn's Rings (<http://www2.jpl.nasa.gov/saturn/back.html>), NASA/JPL. Consulté le 15 mai 2007
- [24] (**en**) James Clerk Maxwell, « On the Stability of the Motion of Saturn's Rings (http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/~history/Extras/Maxwell_Saturn.html »), 1859
- [25] (**en**) NASA's Cassini Discovers Potential Liquid Water on Enceladus (<http://saturn.jpl.nasa.gov/news/press-release-details.cfm?newsID=639>), NASA/JPL, 9 mars 2006. Consulté le 15 mai 2007
- [26] (**en**) Scientists Discover New Ring and Other Features at Saturn (<http://saturn.jpl.nasa.gov/news/press-release-details.cfm?newsID=691>), NASA/JPL, 9 mars 2006. Consulté le 15 mai 2007
- [27] (**en**) Titan Has Liquid Lakes, Scientists Report in Nature (<http://saturn.jpl.nasa.gov/news/features/feature20070103.cfm>), NASA/JPL, 3 janvier 2007. Consulté le 15 mai 2007

Uranus (planète)

Uranus ☐



Uranus vue par la sonde Voyager 2 en 1986.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	2876679082 km (19.22941195 UA)
Aphélie	3004419704 km (20.08330526 UA)
Périhélie	2748938461 km (18.37551863 UA)
Circonférence orbitale	17620000000 km
Excentricité	0.044405586
Période de révolution	30799.095 d (84,323326 ans)
Période synodique	369.66 d
Vitesse orbitale moyenne	6.81 km/s
Vitesse orbitale maximale	7.128 ? km/s
Vitesse orbitale minimale	6.486 ? km/s
Inclinaison sur l'écliptique	0.772556°
Nœud ascendant	73.989821°
Argument du périhélie	96.541318°
Satellites connus	27
Anneaux connus	13
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	25559 ± 4 km (4.007 Terres)
Rayon polaire	24973 ± 20 km (3.929 Terres)
Aplatissement	0.02293
Périmètre équatorial	160592 km
Superficie	$8.1156 \times 10^9 \text{ km}^2$ (15.91 Terres)

Volume	68.33×10 ¹² km ³ (63.086 Terres)
Masse	86.810 ± 0.013 ×10 ²⁴ kg (14.536 Terres)
Massé volumique globale	1270 kg/m ³
Gravité de surface	8.69 m/s ² (0.886 g)
Vitesse de libération	21.3 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	-0.71833 d (17 h 14 min 24 s (rétrograde))
Vitesse de rotation (à l'équateur)	9320 km/h
Inclinaison de l'axe	97.77°
Albédo géométrique visuel	0.51
Albédo de Bond	0.300
Irradiance solaire	3.71 W/m ² (0.003 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	58.2 K (-214.8 °C)
Température de surface :	
Température à 10 kPa :	53 K (-220 °C)
Température à 100 kPa :	76 K (-197 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Massé volumique à 100 kPa	0.42 kg/m ³
Hauteur d'échelle	27.7 km
Massé molaire moyenne	2.64 g/mol
Hydrogène H₂	83 %
Hélium He	15 %
Méthane CH₄	2,3 %
Ammoniac NH₃	0,01%
Éthane C₂H₆	2,5 ppm
Acétylène C₂H₂	100 ppb
Monoxyde de carbone CO	traces
Sulfure d'hydrogène H₂S	traces
Histoire	
Découverte par	William Herschel
Découverte le	13 mars 1781

Uranus est une géante gazeuse et la 7^e planète du système solaire. C'est la 3^e par la taille et la 4^e par la masse. Elle doit son nom à la divinité grecque du ciel, Uranus (*Οὐρανός*), le père de Cronos (Saturne) et grand-père de Zeus (Jupiter). Uranus est la première planète découverte à l'époque moderne. Bien qu'elle soit visible à l'œil nu comme

les 5 planètes classiques, son caractère planétaire ne fut jamais identifié en raison de son très faible éclat^[1], étant à la limite de visibilité (magnitude comprise entre 5,3 et 5,7 pour les oppositions et ~6 sinon). William Herschel annonce sa découverte le 26 avril 1781, élargissant les frontières connues du système solaire pour la première fois à l'époque moderne. Uranus est la première planète découverte à l'aide d'un télescope.

Uranus et Neptune ont des compositions, internes et atmosphériques, différentes de celles des deux plus grandes géantes gazeuses : Jupiter et Saturne. Les astronomes les placent donc parfois dans une catégorie différente, celle des géantes glacées ou des sous-géantes. L'atmosphère d'Uranus, bien que composée principalement d'hydrogène et d'hélium, contient une proportion plus importante de glaces d'eau, d'ammoniac et de méthane, ainsi que les traces habituelles d'hydrocarbures. Uranus est la planète du système solaire dont l'atmosphère est la plus froide, sa température minimale étant de 49 K (-224 °C), à la tropopause (vers 56 km d'altitude et 0.1 bar). Elle a une structure nuageuse complexe : les nuages des couches les plus basses seraient constitués d'eau, ceux des couches les plus élevées, de méthane^[2].

À l'instar des autres géantes gazeuses, Uranus a un système d'anneaux, une magnétosphère et de nombreux satellites naturels. Le système uranien est unique dans le système solaire car son axe de rotation est pratiquement dans son plan de révolution autour du Soleil ; les pôles nord et sud sont situés où les autres planètes ont leur équateur^[3]. En 1986, les images de Voyager 2 ont montré Uranus comme une planète sans caractéristique particulière en lumière visible, sans couches nuageuses ou tempêtes existant sur les autres planètes gazeuses. Cette visite de la sonde se produisit près du solstice, l'hémisphère éclairé était alors principalement son hémisphère austral.

Cependant, les observateurs terrestres ainsi que le télescope spatial Hubble, ont depuis constaté des signes de changements saisonniers et une augmentation de l'activité météorologique ces dernières années^[4], Uranus approchant alors de son équinoxe, qu'il a atteint en décembre 2007^[5]. Le vent à la surface d'Uranus peut atteindre une vitesse de 250 m/s^[6].

Découverte

Uranus fut observée à de nombreuses occasions avant que son caractère planétaire ne soit formellement identifié : elle est en général prise pour une étoile. La plus ancienne mention date de 1690 lorsque John Flamsteed l'observe au moins six fois et la catalogue sous le nom de 34 Tauri. L'astronome français Pierre Charles Le Monnier observe Uranus au moins douze fois entre 1750 et 1769^[7], notamment durant quatre nuits consécutives.

Sir William Herschel observe la planète le 13 mars 1781 dans le jardin de sa maison du 19 New King Street à Bath dans le Somerset en Angleterre (désormais le Musée d'astronomie Herschel)^[8] mais n'annonce la découverte que le 26 avril 1781, en tant que comète^[9]. Herschel avait entrepris une série de mesures de la parallaxe des étoiles fixes en utilisant un télescope de sa conception^[10].

Il écrit dans son journal : « dans le quartile près de ζ Tauri ... soit [une] étoile nébuleuse soit peut-être une comète^[11] . » Le 17 mars, il note, « j'ai regardé la comète ou étoile nébuleuse et, comme elle avait changé de place, j'en ai déduit que c'était une comète et non une nébuleuse^[12] . » Lorsqu'il présente sa découverte à la Royal Society, il continue d'affirmer que c'est une comète mais la compare aussi implicitement à une planète^[13] :

« The power I had on when I first saw the comet was 227. From experience I know that the diameters of the fixed stars are not proportionally magnified with higher powers, as planets are; therefore I now put the powers at 460 and 932, and found that the diameter of the comet increased in proportion to the power, as it ought to be, on the supposition of its not being a fixed star, while the diameters of the stars to which I compared it were not increased in the same ratio. Moreover, the comet being magnified much beyond what its light would admit of, appeared hazy and ill-defined with these great powers, while the stars preserved that lustre and distinctness which from many thousand observations I knew they would retain. The sequel has shown that my surmises were well-founded, this proving to be the Comet we have lately observed. »

Herschel avertit l'astronome royal, Nevil Maskelyne, de sa découverte et reçut une réponse embarrassée de sa part le 23 avril : « Je ne sais pas comment l'appeler. Il est aussi probable que ce soit une planète située sur une orbite autour

du Soleil presque circulaire, que ce soit une comète de trajectoire très elliptique. Je n'ai pas observé pour l'instant de chevelure ou de queue^[14]. »

Tandis qu'Herschel continue par précaution à appeler ce nouvel objet une comète, d'autres astronomes soupçonnent sa véritable nature. L'astronome russe Anders Johan Lexell estime sa distance à dix-huit fois la distance Terre-Soleil. Aucune comète ayant un périhélie supérieur à quatre fois la distance Terre-Soleil n'a alors jamais été observée^[15]. L'astronome berlinois Johann Elert Bode pense que la découverte d'Herschel est « une étoile mobile qui peut être considérée comme un type d'objet planétaire jusqu'alors inconnu orbitant au-delà de l'orbite de Saturne^[16] ». Bode conclut que son orbite presque circulaire ressemble davantage à celle d'une planète que d'une comète^[17].

L'objet est bientôt unanimement accepté en tant que planète. En 1783, Herschel lui-même le reconnaît auprès du président de la Royal Society Joseph Banks : « Selon les observations des plus éminents astronomes européens, il apparaît que la nouvelle étoile que j'ai eu l'honneur de leur faire découvrir en mars 1781, est une planète principale du système solaire. »^[18] ^[19] Le roi Georges III récompense Herschel de sa découverte en lui attribuant une rente annuelle de £200 à condition qu'il s'installe à Windsor afin que la famille royale puisse regarder à travers ses télescopes^[20].

Orbite et rotation

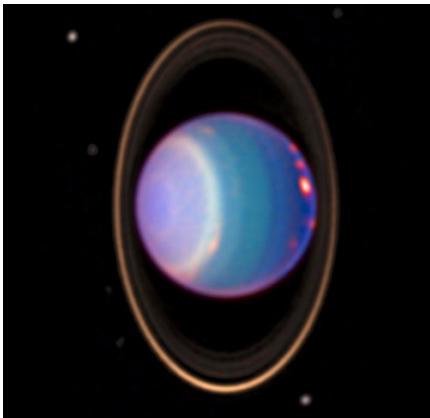


Image d'Uranus prise avec le télescope spatial Hubble.

On distingue les nuages, les anneaux et plusieurs lunes.

La période de révolution d'Uranus autour du Soleil est de 84 années terrestres. Sa distance moyenne au Soleil est d'environ 3 milliards de kilomètres. L'intensité du flux solaire sur Uranus est d'environ 1/400^e celui reçu par la Terre^[21].

Les paramètres orbitaux d'Uranus furent calculés pour la première fois par Pierre-Simon Laplace en 1783^[15]. Avec le temps, des différences apparaissent entre les orbites prédictes et calculées. En 1841, John Couch Adams émit l'hypothèse qu'une planète inconnue serait la cause des perturbations constatées. En 1845, Urbain Le Verrier commença indépendamment ses travaux afin d'expliquer l'orbite d'Uranus. Le 23 septembre 1846, Johann Gottfried Galle identifia une nouvelle planète (qui sera plus tard nommée Neptune) à une position très proche de celle prédictée par Le Verrier^[22].

La période de rotation des couches intérieures d'Uranus est de 17 heures et 14 minutes. Cependant, la haute atmosphère d'Uranus est le théâtre de vents très violents dans la direction de rotation, comme pour toutes les géantes gazeuses. Par conséquent, à certaines latitudes, par exemple vers 60° de latitude, des parties visibles de son atmosphère se déplacent beaucoup plus vite et effectuent une rotation complète en un peu moins de 14 heures^[23].

Caractéristiques physiques

Composition interne

Uranus est une planète géante gazeuse, comme Jupiter, Saturne et Neptune. Même si la composition interne d'Uranus est peu connue, il est certain que sa structure est différente de celle de Jupiter et Saturne. En théorie, elle serait composée d'un noyau solide de silicates et de fer d'environ 7500 km de diamètre, entouré d'un manteau composé de glace d'eau mélangée à de l'hélium, du méthane et de l'ammoniac sur une épaisseur de 10000 km, puis d'une couche superficielle d'hydrogène et d'hélium liquide, épaisse d'environ 7600 km qui se fond graduellement dans l'atmosphère.^[réf. nécessaire] À la différence de Jupiter et Saturne, Uranus n'est pas assez massive pour que l'hydrogène existe à l'état métallique autour du noyau.

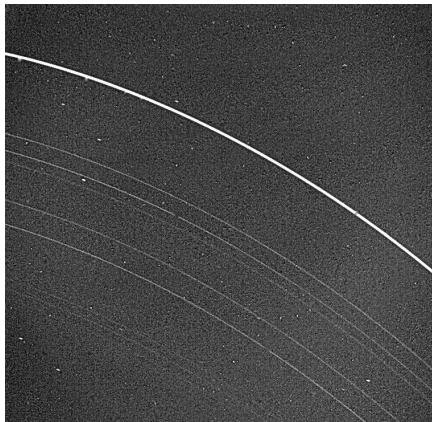
Atmosphère

L'atmosphère d'Uranus est composée principalement de dihydrogène (H_2) à 83 %, d'hélium (He) à 15 %, de méthane (CH_4) et d'ammoniac (NH_3). Cette atmosphère occuperait près de 30 % du rayon de la planète, soit 7500 km.

La couleur bleu-vert d'Uranus est due à la présence de méthane dans l'atmosphère, qui absorbe principalement le rouge et l'infrarouge.

Des nuages ont été détectés en haute altitude et se déplaceraient d'est en ouest entre 40 et 160 m/s. Des mesures ont révélé également des vents soufflant à 100 km/h dans le sens contraire au niveau de l'équateur.

Anneaux planétaires



Les anneaux d'Uranus. Seuls 9 anneaux sont visibles sur cette photo. Le plus marqué est ϵ .

Photo prise par Voyager 2.

Uranus possède au moins 13 anneaux principaux. Cinq ont été découverts en 1977 grâce aux observations d'occultations d'étoiles par Uranus. Six autres furent observés par Voyager 2 entre 1985 et 1986. Les deux derniers furent découverts grâce au télescope spatial Hubble en décembre 2005.

Les anneaux d'Uranus sont fins et ont des bords nets ; entre eux s'étend un milieu diffus. Les particules qui les composent ont des dimensions de l'ordre du centimètre et un albédo moyen de 0,15 qui les rend très peu visibles.

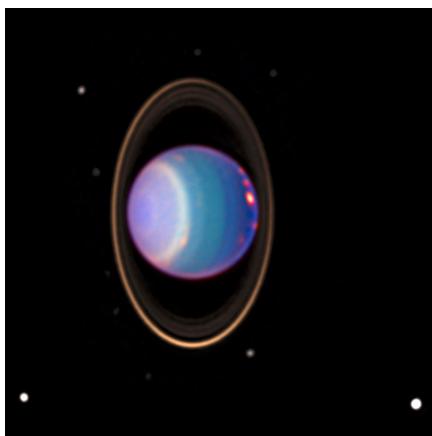
Si les 10 premiers anneaux d'Uranus sont fins et circulaires, le dernier, l'anneau ϵ , est plus excentrique et plus large, de 20 km au point le plus proche de la planète à 98 km au point le plus éloigné. Il est encadré par deux satellites « bergers », Cordélia et Desdémone. Les deux derniers anneaux sont très nettement plus éloignés, l'anneau μ se situant deux

fois plus loin qu' ϵ , par exemple.

Anneaux d'Uranus

Nom	Distance (km)	Épaisseur (km)
ζ	38000	2
6	41840	1 à 3
5	42230	2 à 3
4	42580	2 à 3
α	44720	7 à 12
β	45670	7 à 12
η	47190	0 à 2
γ	47630	1 à 4
δ	48290	3 à 9
λ	50020	1 à 2
ϵ	51140	20 à 100
ν	~ 66000	?
μ	97734	?

Inclinaison de l'axe



Uranus en fausses couleurs, accompagnée de quelques-uns de ses satellites.

Les régions en vert et bleu laissent facilement pénétrer les rayons du Soleil à travers l'atmosphère. Les régions en rouge et en orange indiquent la présence de nuages en haute altitude.

À la différence de toutes les autres planètes du système solaire, Uranus est très fortement incliné sur son axe puisque celui-ci est quasiment parallèle à son plan orbital. Elle roule pour ainsi dire sur son orbite et présente alternativement son pôle nord, puis son pôle sud au Soleil (même si la désignation de nord ou de sud est assez délicate dans ce cas précis).

Au moment du survol de la planète par Voyager 2 en 1986, le pôle sud d'Uranus était orienté presque directement vers le Soleil. On peut dire qu'Uranus a une inclinaison légèrement supérieure à 90° ou bien que son axe a une inclinaison légèrement inférieure à 90° et qu'elle tourne alors sur elle-même dans le sens rétrograde. Ces deux descriptions sont équivalentes d'un point de vue physique mais il en résulte une définition différente du pôle nord et du pôle sud.

Une des conséquences de cette orientation est que les régions polaires reçoivent plus d'énergie du Soleil que les régions équatoriales. Néanmoins, Uranus reste plus chaude à son équateur qu'à ses pôles. Le mécanisme qui en est la cause reste encore inconnu. Des théories

proposent d'expliquer cette inclinaison en faisant appel à une collision cataclysmique avec un autre corps, pendant sa formation peut-être, ou par une interaction avec un ancien gros satellite, depuis éjecté. Il semblerait également que l'importante inclinaison d'Uranus entraîne des variations saisonnières extrêmes dans son climat.

Champ magnétique

Le champ magnétique d'Uranus est à peu près de la même intensité que le champ magnétique terrestre. En revanche, il est incliné de 59° par rapport à son axe de rotation. Il trouve probablement son origine, comme celui de toutes les autres planètes, dans un effet dynamo lié à la rotation rapide des couches internes fluides. Il est possible que cette inclinaison résulte de la combinaison d'un champ magnétique « fossile », résidu de la nébuleuse solaire à partir de laquelle s'est formé le système solaire, et de l'effet dynamo actuel.

Lunes d'Uranus

Uranus possède au moins 27 satellites naturels. Les deux premiers furent découverts par William Herschel le 13 mars 1787 et nommés Titania et Obéron par son fils, d'après des personnages du « Songe d'une nuit d'été » de William Shakespeare. La plupart des autres satellites naturels connus d'Uranus, découverts par la suite, prirent également le nom de personnages créés par le dramaturge. Deux autres lunes, Ariel et Umbriel, furent découvertes par William Lassell en 1851. Gerard Kuiper découvrit Miranda en 1948. Dix autres lunes furent découvertes lors du passage de Voyager 2 en 1986 et une autre, Perdita, fut découverte treize ans plus tard parmi les photographies reçues. Onze autres lunes ont été identifiées depuis, en utilisant des télescopes terrestres. Il est à noter que les lunes d'Uranus sont nommées à partir de personnages venant des pièces de Shakespeare, alors que les satellites des autres planètes sont nommés à partir de personnages de la mythologie grecque.

Satellites d'Uranus

Nom	Diamètre (km)	Masse (10^{16} kg)	Rayon orbital moyen (km)	Période de révolution (d)
Cordélia	40	4,5 (?)	49800	0,335
Ophélie	43	5,4 (?)	53800	0,376
Bianca	51	9,3 (?)	59200	0,435
Cressida	80	34,3 (?)	61800	0,464
Desdémone	64	17,8 (?)	62700	0,474
Juliette	94	55,7 (?)	64400	0,493
Portia	135	168 (?)	66100	0,513
Rosalinde	72	25,4 (?)	69900	0,558
Cupid	12	0,12 (?)	74800	0,618
Belinda	81	35,7 (?)	75300	0,624
Perdita	80	40,0 (?)	76416	0,638
Puck	162	289 (?)	86000	0,762
Mab	16	0,28 (?)	97734	0,923
Miranda	474	6600	129900	1,413
Ariel	1159	135000	190900	2,520
Umbriel	1169	117000	266000	4,144
Titania	1578	352000	436300	8,706
Obéron	1523	301000	583500	13,46
Francisco	12	0,13 (?)	4276000	-266,56
Caliban	98	73 (?)	7231000	-579,73
Stephano	20	0,60 (?)	8004000	-677,37
Trinculo	10	0,075 (?)	8578000	-759,03
Sycorax	190	540 (?)	12179000	-1288,28
Margaret	11	0,10 (?)	14345000	1687,01
Prospero	30	2,1 (?)	16243000	-1977,29
Setebos	30	2,1 (?)	17501000	-2234,77
Ferdinand	12	0,13 (?)	20901000	-2887,21

Histoire

Uranus fut la première planète du système solaire à ne pas avoir été connue dès l'Antiquité, car elle est trop lointaine pour pouvoir être facilement vue à l'œil nu, même si elle fut observée à plusieurs occasions, mais toujours confondue avec une étoile (John Flamsteed la catalogua dès 1690).



Le méthane présent dans son atmosphère donne à Uranus une couleur bleu-vertâtre.

William Herschel la découvre le 13 mars 1781 lors d'une recherche systématique d'étoiles doubles à l'aide d'un télescope. À la frontière des constellations des Gémeaux et du Taureau, Herschel remarque au milieu des points-étoiles une petite tache semblant sortir de derrière la planète Saturne. Il change alors successivement d'oculaire, passant du grossissement 227 à 460. Il note alors que la petite tache double de taille ! Il change à nouveau d'oculaire pour un grossissement de 932, 1536 et 2010, et là encore, l'objet double de taille à chaque fois, tandis que les étoiles tout autour, très éloignées, ne varient pas en taille et restent de simples points brillants. Cela ne peut être une étoile ; il écrit donc dans son journal l'observation d'un curieux objet, une nébuleuse ou une comète. Il nota la position de l'astre, puis quelques jours après reprit son observation. La petite tache avait bougé, ça ne pouvait être une nébuleuse, donc c'était une comète. Il décide alors de prévenir la

communauté scientifique de sa découverte et envoie un courrier avec les détails de sa comète au directeur de l'observatoire d'Oxford, Thomas Hornsby. Il informe également l'astronome royal Nevil Maskelyne de l'observatoire de Greenwich. Celui-ci, après avoir observé la comète et constaté qu'elle se comportait différemment des autres, conseille à Herschel d'écrire à la Royal Society.

La comète n'avait pas de queue, ce qui commença à faire douter de sa vraie nature. Maskelyne se demande alors si cette comète ne serait pas une planète.

Les astronomes commencent alors le calcul de la trajectoire de la comète, en prenant le modèle classique des orbites de comètes : une parabole, mais celle-ci ne semblait pas vouloir se conformer au modèle prévu. Charles Messier remarque alors qu'avec son aspect de disque, elle ressemblait plus à Jupiter qu'aux 18 autres comètes qu'il avait observé. L'astronome Russe Anders Lexell tenta lui de calculer l'orbite en appliquant le modèle d'une planète. À sa grande surprise, cette trajectoire semblait correspondre et convainquit les autres astronomes sur la nature de l'objet : une planète et non une comète.

Herschel la nomme alors *Georgium Sidus* (« la planète de George ») en l'honneur du roi George III, tandis que les astronomes français l'appellent simplement Herschel. Le nom « Uranus », soit le père de Saturne dans la mythologie romaine, fut proposé par l'astronome allemand Johann Elert Bode dès 1781^[24] de façon conforme aux autres planètes, mais il ne devint commun qu'après 1850.

La sonde Voyager 2 est le seul engin spatial jamais envoyé vers Uranus. Elle l'approcha au plus près le 24 janvier 1986.

Observation

La magnitude apparente d'Uranus évolue entre +5,3 et +6,0. Ainsi, avec un ciel parfaitement sombre et dégagé, il est possible de la voir à l'œil nu, comme une étoile très peu lumineuse. C'est d'ailleurs en cataloguant des étoiles allant jusqu'à la limite de visibilité à l'œil nu que John Flamsteed l'inventoria plusieurs fois, chaque fois sous des appellations différentes dont la plus connue est 34 Tauri. Depuis la Terre, la planète possède un diamètre angulaire de 4 secondes d'arc et est facilement distinguable avec des jumelles. Avec un télescope de plus de 30 cm de diamètre, Uranus apparaît comme un disque bleu pâle dont l'obscurcissement du limbe est visible. Les plus grands satellites, Titania et Obéron peuvent être perçus.

Jusqu'en 2007, Uranus s'était approché de son équinoxe et une activité nuageuse s'y développa. La majeure partie de cette activité ne peut pas être perçue autrement qu'avec le télescope spatial Hubble ou de grands télescopes munis d'optique adaptative. Cependant, certains phénomènes pourraient être suffisamment brillants pour être vus à l'aide de télescopes amateurs suffisamment grands. En 2006, une tache sombre a été détectée dans les longueurs d'onde visibles par Hubble.

Annexes

Articles connexes

- Anneaux d'Uranus
- Satellites naturels d'Uranus

Liens externes

- Caractéristiques d'Uranus ^[25] sur le site de l'IMCCE
- Le Système Solaire - Uranus ^[26]
- Uranus - pioneer-astro ^[27]

Notes et références

Notes

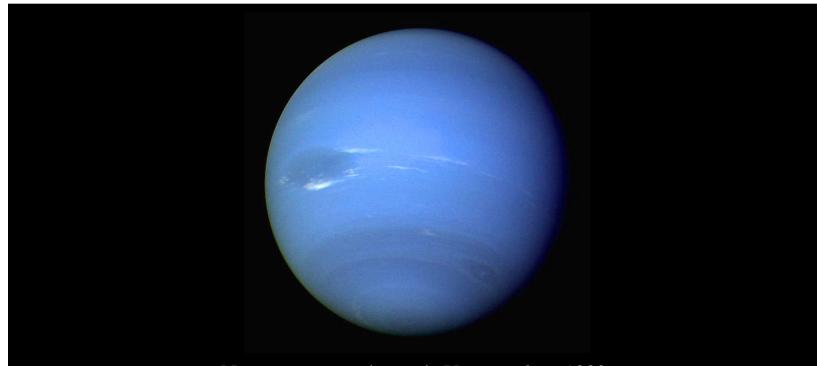
- [1] ([en](#)) MIRA's Field Trips to the Stars Internet Education Program (<http://www.mira.org/fts0/planets/101/text/txt001x.htm>), *Monterey Institute for Research in Astronomy*. Consulté le 2007-08-27
- [2] ([en](#)) Jonathan. I. Lunine, « The Atmospheres of Uranus and Neptune », dans *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 31, 1993, p. 217-263 [texte intégral (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1993ARA&A..31..217L>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.001245>)]
- [3] ([en](#)) B.A. Smith, L.A. Soderblom, A. Beebe et al., « Voyager 2 in the Uranian System: Imaging Science Results », dans *Science*, vol. 233, n° 4759, 04 juillet 1986, p. 97-102 (ISSN 0036-8075 (<http://worldcat.org/issn/0036-8075&lang=fr>) [résumé (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1986Sci...233...43S>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.233.4759.43>)]
- [4] ([en](#)) Hubble Discovers Dark Cloud In The Atmosphere Of Uranus (<http://www.sciencedaily.com/releases/2006/10/061001211630.htm>), Science Daily. Consulté le 2007-04-16
- [5] ([en](#)) Heidi B. Hammel, « Uranus nears Equinox: A report from the 2006 Pasadena Workshop », dans *Outer Planets Assessment Group meeting report*, 05 septembre 2006 [texte intégral (http://www.apl.ucl.ac.uk/iopw/uworkshop_060905.pdf) [[PDF](#)]]
- [6] ([en](#)) L.A. Sromovsky et P.M. Fry, « Dynamics of cloud features on Uranus », dans *Icarus*, vol. 179, n° 2, juillet 2005, p. 459-483 [résumé (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005Icar..179..459S>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2005.07.022>)]
- [7] ([en](#)) Duane Dunkerson, « Astronomy Briefly - Uranus:About Saying, Finding, and Describing It (<http://www.thespaceguy.com/Uranus.htm>) » sur *thespaceguy.com*. Consulté le 2007-04-17
- [8] ([en](#)) Bath Preservation Trust (<http://www.bath-preservation-trust.org.uk/>). Consulté le 2007-09-29
- [9] ([en](#)) William Herschel, « Account of a Comet, By Mr. Herschel, F. R. S.: Communicated by Dr. Watson, Jun. of Bath, F. R. S. », dans *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Londres, Royal Society, vol. 71, 1781, p. 492–501 [résumé (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1781RSPT...71..492H>), lien DOI (<http://dx.doi.org/:+10.1098/rstl.1781.0056>) disponible (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k87110w.image.f293.langFR.pagination>) sur Gallica
- [10] ([en](#)) Ellis D. Miner, *Uranus - The Planet, Rings and Satellites*, New York, John Wiley and Sons, 1998 (ISBN 1-85233-216-6 et 978-1852332167), p. 8
- [11] Traduction libre de « In the quartile near ζ Tauri ... either [a] Nebulous star or perhaps a comet » Royal Astronomical Society MSS W.2/1.2, 23 cité dans Miner 1998, p. 8
- [12] Traduction libre de « I looked for the Comet or Nebulous Star and found that it is a Comet, for it has changed its place ». RAS MSS Herschel W.2/1.2, 24, cité dans Miner 1998, p. 8
- [13] Journal of the Royal Society and Royal Astronomical Society 1, 30; cité dans Miner 1998, p. 8
- [14] Traduction libre de « I don't know what to call it. It is as likely to be a regular planet moving in an orbit nearly circular to the sun as a Comet moving in a very eccentric ellipsis. » RAS MSS Herschel W1/13.M, 14 cité dans Miner 1998, p. 8
- [15] ([en](#)) George Forbes, « History of Astronomy (<http://www.vinnysalstore.com/historyofastronomy2.html#8>) », 1909. Consulté le 2007-08-07

- [16] Traduction libre de « a moving star that can be deemed a hitherto unknown planet-like object circulating beyond the orbit of Saturn ». Johann Elert Bode, Berliner Astronomisches Jahrbuch, p. 210, 1781, cité dans Miner 1998, p. 11
- [17] Miner 1998, p. 11
- [18] Traduction libre de « By the observation of the most eminent Astronomers in Europe it appears that the new star, which I had the honour of pointing out to them in March 1781, is a Primary Planet of our Solar System. » cité dans Dreyer 1912
- [19] ([en](#)) J. L. E. Dreyer, The Scientific Papers of Sir William Herschel, vol. 1, Royal Society and Royal Astronomical Society, 1912 , p. 100
- [20] Miner 1998, p. 12
- [21] ([en](#)) Next Stop Uranus (<http://www.astrosociety.org/education/publications/tm/04/04.html>), 1986. Consulté le 2007-06-09
- [22] ([en](#)) J.J.O'Connor et E.F.Robertson, « Mathematical discovery of planets (http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Neptune_and_Pluto.html) », 1996. Consulté le 2007-06-13
- [23] ([en](#)) Peter J. Giersch et Philip D. Nicholson, « Uranus (http://www.nasa.gov/worldbook/uranus_worldbook.html) », NASA World Book, 2004. Consulté le 2007-06-09
- [24] ([en](#)) Astronomy in Berlin (<http://bdaugherty.tripod.com/astronomy/berlin.html>)
- [25] <http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages1/150.html>
- [26] [http://www.le-système-solaire.net/modules.php?name=syssol&page=uranus](http://www.le-systeme-solaire.net/modules.php?name=syssol&page=uranus)
- [27] <http://www.astrosurf.com/pioneerastro/uranus.htm>

Références

Neptune (planète)

Neptune ♫



Neptune vue par la sonde Voyager 2 en 1989.

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	4,503,443,661 km (30.10366151 UA)
Aphélie	4,553,946,490 km (30.44125206 UA)
Périhélie	4,452,940,833 km (29.76607095 UA)
Circonférence orbitale	28.142×10^9 km
Excentricité	0.00858587
Période de révolution	60224.9036 d (164 à 323 d 21,7 h)
Période synodique	367.4857 d
Vitesse orbitale moyenne	5.4317 km/s
Vitesse orbitale maximale	5.479 km/s
Vitesse orbitale minimale	5.385 km/s

Inclinaison sur l'écliptique	1.76917°
Nœud ascendant	131.72169°
Argument du périhélie	273.24966°
Satellites connus	13, notamment Triton.
Anneaux connus	5 principaux.
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	24764 ± 15 km (3.883 Terres)
Rayon polaire	24341 ± 30 km (3.829 Terres)
Rayon moyen volumétrique	24622 km (3.865 Terres)
Aplatissement	0.0171
Périmètre équatorial	155597 km
Superficie	7.6408×10 ⁹ km ² (14.98 Terres)
Volume	62.526×10 ¹² km ³ (57.74 Terres)
Masse	102.43×10 ²⁴ kg (17.147 Terres)
Masse volumique globale	1638 kg/m ³
Gravité de surface	11.15 m/s ² (1.14 g)
Vitesse de libération	23.5 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	0.67125 d (16 h 6,6 min)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	9660 km/h
Inclinaison de l'axe	29.58°
Albédo géométrique visuel	0.41
Albédo de Bond	0.29
Irradiance solaire	1.51 W/m ² (0.001 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	46.6 K (-226.4 °C)
Température de surface :	
Température à 10 kPa :	55 K (-218 °C)
Température à 100 kPa :	72 K (-201 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Masse volumique à 100 kPa	0.45 kg/m ³
Hauteur d'échelle	19.1 à 20.3 km

Masse molaire moyenne	2.53 à 2.69 g/mol
Dihydrogène H₂	80 ± 3,2 %
Hélium He	19 ± 3,2 %
Méthane CH₄	1,5 ± 0,5 %
Deutérure d'hydrogène HD	190 ppm
Ammoniac NH₃	100 ppm
Éthane C₂H₆	2,5 ppm
Acétylène C₂H₂	100 ppb
Histoire	
Découverte par	Johann Gottfried Galle sur les indications d'Urbain Le Verrier.
Découverte le	23 septembre 1846

Neptune est la huitième et dernière planète du système solaire par distance croissante au Soleil^[1].

Neptune orbite autour du Soleil à une distance d'environ 30 UA avec une excentricité orbitale moitié moindre que celle de la Terre en bouclant une révolution complète en 164,79 ans. C'est la troisième planète du Système solaire par masse décroissante — elle est 17 fois plus massive que la Terre et 19 fois moins massive que Jupiter — et la quatrième par taille décroissante ; Neptune est en effet à la fois un peu plus massive et un peu plus petite qu'Uranus.

Neptune et Uranus ont une composition similaire, et légèrement différente de celle des deux autres planètes géantes gazeuses, Jupiter et Saturne. Comme ces dernières, l'atmosphère de Neptune est principalement constituée d'hydrogène et d'hélium avec des traces d'hydrocarbures et peut-être d'azote, mais contiendrait davantage de « glaces » (au sens astrophysique), c'est-à-dire de composés volatils tels que l'eau, l'ammoniac et le méthane. Ce dernier est d'ailleurs partiellement responsable de la teinte bleue de l'atmosphère de Neptune, bien que l'origine de ce bleu très soutenu — plus soutenu que celui produit par le seul méthane — soit en fait inconnue.

Cette atmosphère présente des formations météorologiques bien visibles, contrairement à celle, uniforme, d'Uranus, avec notamment une Grande tache sombre observée en été 1989 par Voyager 2 dont la nature semble similaire à celle de la Grande tache rouge de Jupiter — à la différence près que celle de Neptune a disparu depuis — et des vents dont la vitesse a été estimée à 2100 km/h — de loin les vents les plus rapides du Système solaire. La température mesurée dans les couches supérieures de l'atmosphère est de l'ordre de 55 K (-218 °C), moyenne la plus basse mesurée sur une planète du système solaire, après Uranus .

Contrairement aux sept autres planètes, Neptune n'est jamais visible à l'œil nu : sa magnitude apparente de 8,0 en fait un astre environ quatre fois moins brillant que les plus pâles étoiles visibles à l'œil nu, dont la magnitude apparente ne dépasse pas 6,5. Elle n'apparaît comme un disque bleu-vert qu'à travers un télescope. Planète la plus éloignée de la Terre, Neptune n'a été visitée que par une seule sonde spatiale, Voyager 2, qui est passée près de la planète le 25 août 1989 et a permis à la fois de découvrir cinq de ses treize satellites actuellement connus, d'explorer partiellement le principal d'entre eux (Triton) et de confirmer l'existence d'au moins six anneaux ténus et très sombres, dont le plus externe comporte cinq arcs concentrés sur 52° de circonférence. L'essentiel de nos connaissances sur Neptune provient de cette unique rencontre.

Neptune est la seule des huit planètes connues à avoir été découverte par le calcul mathématique plutôt que par l'observation empirique. L'astronome français Alexis Bouvard avait noté des perturbations inexplicées sur l'orbite d'Uranus et conjecturé au début du XIX^e siècle qu'une huitième planète, plus lointaine, pouvait en être la cause. Les astronomes britannique John Couch Adams en 1843 et français Urbain Le Verrier en 1846 calculèrent chacun de leur côté et par des méthodes différentes la position prévisible de cette hypothétique planète, qui fut observée le 23 septembre 1846 par l'astronome allemand Johann Gottfried Galle à 1° de la position alors calculée par Le Verrier, et à 12° de celle calculée par Adams.

Le nom de cette huitième planète vient de Neptune le dieu des océans dans la mythologie romaine. Son symbole astronomique Ψ est une version stylisée du trident du dieu Neptune, tandis que son symbole alternatif N représente les initiales de Le Verrier.

Caractéristiques physiques

Composition interne

La composition interne de Neptune serait similaire à celle d'Uranus. Elle possède très probablement un noyau solide de silicates et de fer d'à peu près la masse de la Terre. Au-dessus de ce noyau, là encore à l'instar d'Uranus, Neptune présenterait une composition assez uniforme (roches en fusion, glaces, 15 % d'hydrogène et un peu d'hélium) et non pas une structure « en couches » comme Jupiter et Saturne.

Cependant, plusieurs modèles actuels de la structure d'Uranus et Neptune proposent l'existence de 3 couches : un cœur de type tellurique, une couche moyenne, de glacée à fluide, formée d'eau, méthane et ammoniac, et une atmosphère hydrogène-hélium dans les proportions solaires.

La pression maximum de la couche médiane est estimée à 600 GPa (6 millions d'atmosphères) et sa température maximum à 7000 K, si bien que les études théoriques et les expériences réalisées par compression laser sur ses molécules ont conduit en 1981 Marvin Ross^[2] (University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA) à poser qu'elle soit totalement ionisée et que le méthane y soit pyrolyisé en carbone sous forme de métal ou de diamant. Le méthane se décompose en carbone et en hydrocarbures. La précipitation du carbone libère de la chaleur (énergie potentielle gravitationnelle convertie en chaleur) qui entraîne des courants de convection qui libèrent les hydrocarbures dans l'atmosphère. Ce modèle expliquerait la présence d'hydrocarbures divers dans l'atmosphère de cette planète. Sous l'action de la pression, le carbone adopte un état plus stable, le diamant solide qui flotte sur un océan de carbone métallique liquide.

Aujourd'hui, un groupe de chercheurs du laboratoire national de Lawrence Livermore a publié dans *Nature* les résultats d'études portant sur le point de fusion du carbone diamant à hautes pressions : partis de 40 millions d'atmosphère, ces chercheurs conservent du liquide à 11 millions d'atmosphères et 50 000 K, ont observé des fragments de diamant solide se former et flotter à la surface du liquide.

Neptune et Uranus étant composées d'environ 10% de carbone et des conditions similaires aux précédentes pouvant exister à grandes profondeurs dans ces planètes, il pourrait donc s'y trouver des icebergs en diamant flottant sur du carbone liquide.

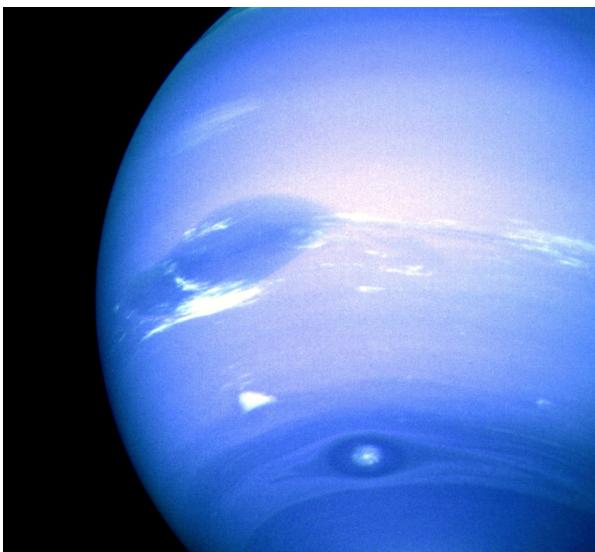
Atmosphère

L'atmosphère de Neptune, épaisse de plus de 8000 km, est composée à haute altitude de 84 % d'hydrogène et de 12 % d'hélium^[3] avec de l'ordre de 1,5 % de méthane CH₄. Des traces d'ammoniac (NH₃), d'éthane (C₂H₆) et d'acétylène (C₂H₂) ont également été détectées.

La couleur bleue de Neptune provient principalement du méthane qui absorbe la lumière dans les longueurs d'onde du rouge. Cependant, la couleur azur de l'atmosphère de Neptune ne peut être expliquée par le seul méthane — qui donnerait une couleur plus proche de l'aigue-marine d'Uranus — et d'autres espèces chimiques, pour l'heure non identifiées, sont certainement à l'origine de cette teinte particulière.

Neptune, comme les autres géantes gazeuses, possède un système éolien composé par des vents rapides confinés dans des bandes parallèles à l'équateur et d'immenses orages et vortex. Les vents de Neptune sont les plus rapides du Système solaire et peuvent dépasser 580 m/s (environ 2100 km/h).

Grande tache sombre



Détails de l'atmosphère de Neptune montrant la Grande tache sombre, la Petite tache sombre et le « Scooter » (formation blanche à gauche).

Lors du passage de Voyager 2 en 1989, la marque la plus distinctive de la planète était la « Grande tache sombre » qui présentait à peu près la moitié de la taille de la « Grande tache rouge » de Jupiter. Les vents y soufflaient vers l'ouest à 300 m/s (1080 km/h) ou encore, jusqu'à 2500 km/h. Cette tache était un gigantesque ouragan sombre qui pouvait se déplacer à plus de 1000 km/h^[4].

Cette tache avait disparu lorsque Neptune fut observée par le télescope spatial Hubble en 1994. D'autres taches sombres à d'autres endroits ont été détectées depuis, ce qui indique que l'atmosphère de Neptune change rapidement au cours des années.

Anneaux planétaires

Neptune possède des anneaux planétaires peu visibles. Ceux-ci sont sombres et leur composition, ainsi que

leur origine, sont inconnues.

Les anneaux de Neptune furent détectés sur Terre au Chili, en 1984 grâce à des observations conduites d'une part à l'ESO par Patrice Bouchet, Jean Manfroid, et Reinhold Haefner pour André Brahic, Bruno Sicardy, et Françoise Roques de l'Observatoire de Meudon, et d'autre part par William Hubbard à partir d'observations conduites par Faith Vilas à l'Observatoire Inter-américain de Cerro Tololo (AURA, Inc.), lors d'occultations d'étoiles ; on pensait alors que ceux-ci n'étaient pas « complets » mais n'étaient que des « arcs » autour de la planète. Cinq ans plus tard, le passage de Voyager 2 a permis de clarifier les connaissances : les anneaux de Neptune sont bien « entiers », il en existe plusieurs et l'un d'entre eux, l'anneau *Adams*, possède quatre « arcs » (nommés *Liberté*, *Égalité*, *Fraternité* et *Courage*), qui sont en fait des parties plus brillantes que le reste de l'anneau. La stabilité de ces arcs est un mystère, mais on pense que la lune Galatée, située juste un peu plus près de Neptune, les confine.

Anneaux de Neptune

Nom	Distance (km)	Largeur (km)
Galle	41900	15
Le Verrier	53200	15
Lassell	53200	5800
Arago	57000	?
Adams	62930	< 50

L'anneau Lassell est bordé par les anneaux Le Verrier et Arago. Une partie des arcs d'Adams est torsadée mais aucune explication n'a été trouvée à ce jour. L'épaisseur des anneaux est inconnue.

Champ magnétique

Le champ magnétique de Neptune, comme celui d'Uranus, est très incliné par rapport à l'axe de la planète. Il est incliné de 47° et décalé du centre physique de près de 13 500 km (la moitié du rayon). On pense que cette orientation viendrait de courants internes à la planète, extrêmement violents.

Satellites de Neptune

Neptune possède au moins 13 satellites naturels dont le plus important est Triton, découvert par William Lassell 17 jours seulement après la découverte de Neptune.

Satellites naturels de Neptune^[5]

Nom	Dimensions (km)	Masse (10^{15} kg)	Demi-grand axe (km)	Excentricité orbitale	Inclinaison (° / Laplace)	Période de révolution (d)
Naïade	$96 \times 60 \times 52$	~ 190	48227 ± 1	0.0003	4.691	0.294
Thalassa	$108 \times 100 \times 52$	~ 350	50074 ± 1	0.0002	0.135	0.311
Despina	$180 \times 148 \times 128$	~ 2200	52526 ± 1	0.0002	0.068	0.335
Galatée	$204 \times 184 \times 144$	~ 2120	61953 ± 1	0.0001	0.034	0.429
Larissa	$216 \times 204 \times 168$	~ 4200	73548 ± 1	0.0014	0.205	0.555
Protée	$436 \times 416 \times 402$	~ 44000	117646 ± 1	0.0005	0.075	1.122
Triton	2706.8	21400000	354759	0.0000	156.865	-5.877
Néréide	~ 340	~ 31000	5513818	0.7507	7.090	360.136
Halimède	~ 62	~ 190	16611000	0.2646	112.712	-1874.83
Sao	~ 44	~ 67	22228000	0.1365	53.483	2405.98
Laomédie	~ 42	~ 58	23567000	0.3969	37.874	2674.87
Psamathée	~ 38	~ 43	48096000	0.3809	126.312	-9136.11
Néso	~ 60	~ 160	49285000	0.5714	136.439	-9373.99

Les périodes de révolution négatives indiquent que l'orbite du satellite est rétrograde.

Astéroïdes troyens de Neptune

Comme Jupiter et Mars, Neptune possède des astéroïdes troyens, partageant son orbite autour du Soleil.

Sept ont été confirmés à ce jour^[6] (août 2010) :

Désignation	Point de Lagrange	Périhélie (UA)	Aphélie (UA)	Inclinaison (°)	Magnitude absolue	Diamètre	Année de découverte
2001 QR ₃₂₂	L4	29.428	31.349	1.3	8.2	?	2001
2004 UP ₁₀	L4	29.351	31.259	1.4	8.8	?	2004
2005 TN ₅₃	L4	28.253	32.284	25.0	9.1	?	2005
2005 TO ₇₄	L4	28.733	31.824	5.2	8.5	?	2005
2006 RJ ₁₀₃	L4	29.345	31.005	8.2	7.5	?	2006
2007 VL ₃₀₅	L4	28.131	32.171	28.1	8.0	?	2007
2008 LC ₁₈	L5	27.546	32.468	27.5	8.4	?	2008

Découverte de Neptune

Neptune n'est pas visible à l'œil nu et comme Uranus, elle n'a été découverte qu'après l'invention du télescope. Pourtant, cette découverte se démarque de celle des autres planètes : elle a été faite uniquement par le calcul à partir de la trajectoire et des caractéristiques d'Uranus. Le télescope ne servira qu'à la confirmation de la découverte.

Plusieurs astronomes ont manqué de faire la découverte par les moyens traditionnels (observation au télescope). Les dessins astronomiques de Galilée montrent qu'il a observé Neptune le 28 décembre 1612 alors qu'il regardait Jupiter. La planète est alors répertoriée comme une simple étoile de magnitude 8. Il la remarque de nouveau dans le ciel un mois plus tard, le 28 janvier 1613, et constate même qu'elle a bougé par rapport à une étoile voisine. Ce ne peut donc être une étoile, mais Galilée ne tire aucune conclusion et n'en reparlera plus par la suite. Comme il pensait qu'il s'agissait d'une étoile, il ne peut alors être crédité de sa découverte.

Neptune est également observée par Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732-1807) le 10 mai 1795 et par John Herschel, fils de William Herschel (qui a découvert Uranus), sans rien noter de particulier. La planète semblant échapper aux astronomes, la découverte reviendra à deux mathématiciens.

Déjà en 1788, la planète Uranus récemment découverte, ne semblait pas se conformer au modèle d'orbite que les astronomes avaient prévu. Plus le temps passait et plus l'erreur entre la position annoncée de l'astre et celle relevée augmentait. Le mouvement d'Uranus pouvait être prévu pour des observations anciennes, ou récentes, mais pas pour les deux à la fois. Jean-Baptiste Delambre tenta d'expliquer les anomalies en ajoutant l'influence gravitationnelle de Jupiter et Saturne dans ses calculs. Ses tables étaient plus précises, mais ne permettaient toujours pas de prévoir le mouvement de la planète sur un long terme. En 1821, l'astronome français Alexis Bouvard publia de nouvelles tables. Il utilisa 17 observations étalées sur les 40 années qui se sont écoulées depuis sa découverte pour tenter, en vain, d'expliquer l'orbite d'Uranus.

Lors d'une réunion de la British Association for the Advancement of Science, George Biddell Airy rapporta que les tables de Bouvard étaient erronées de plus d'une demi minute d'arc. Cet écart inquiétant devait absolument être résolu. Deux hypothèses s'opposèrent, celle proposée par Bouvard lui-même de l'existence d'une autre planète encore inconnue, et qui pourrait affecter les mouvements d'Uranus, ou celle d'une remise en cause de la loi universelle de la gravitation, proposée par Airy. Selon Airy, la loi de gravitation perdrait de sa validité au fur et à mesure que l'on s'éloigne du Soleil. Cependant, dès 1838, la plupart des astronomes étaient d'accord sur l'existence d'une nouvelle planète trans-uranienne pour expliquer les perturbations du mouvement d'Uranus.

Étudiant à Cambridge, John Couch Adams tomba le 26 juin 1841 sur le rapport d'Airy concernant le problème de l'orbite d'Uranus et fut intéressé par la question. Ne pouvant se pencher sur le problème immédiatement, il le nota sur un bout de papier en guise de pense-bête afin de le reprendre une fois ses études finies. En 1843, Adams se mit au travail. Il s'appuya sur la loi de Titius-Bode pour obtenir une première approximation de la distance de cette nouvelle planète au Soleil. Dans la mesure où la plupart des planètes avaient une orbite faiblement excentrique, il supposa également que son orbite était circulaire, afin de simplifier les calculs. Il termina ses travaux deux ans plus tard en ayant déterminé la position de Neptune avec une erreur de moins de deux degrés. Il ne lui manquait plus qu'à les confirmer par observation. Se tournant vers James Challis, directeur de l'observatoire de Cambridge, celui-ci le renvoya à l'astronome royal Sir George Biddell Airy. Adams transmit ses résultats à Airy par courrier le 21 octobre 1845, et obtint une réponse le 5 du mois suivant. Airy émit des doutes sur les travaux de son jeune collègue. Découragé par le comportement d'Airy, Adams ne lui répondra qu'un an après.

Au même moment en France, François Arago, directeur de l'observatoire de Paris, encourage le mathématicien Urbain Le Verrier, spécialisé en mécanique céleste, à déterminer les caractéristiques de cette huitième planète dont l'influence gravitationnelle se faisait sentir sur la trajectoire d'Uranus. Le Verrier travaillait alors sur les comètes de courte période. Il commence ses travaux sur Uranus en 1845, ignorant totalement ceux d'Adams, et publie ses premiers résultats le 10 novembre 1845 dans *Premier Mémoire sur la Théorie d'Uranus*, puis dans *Recherche sur les Mouvements d'Uranus* le 1^{er} juin 1846.

Airy, remarquant les travaux de l'astronome français, fait le parallèle avec ceux d'Adams et entre en contact avec Le Verrier. Celui-ci lui demande à son tour d'effectuer les recherches de la planète à l'aide des calculs qu'il vient de publier, mais Airy refuse. Finalement, sous la pression de George Peacock, Airy demande à Challis le 12 juillet 1846 d'entreprendre la recherche du nouvel astre au télescope. Adams, informé par le directeur de Cambridge, fournit de nouvelles coordonnées à Challis en précisant que l'objet serait de magnitude 9, mais Airy proposa à Challis d'observer une large portion du ciel et jusqu'à magnitude 11. Cette méthode demandait à Challis beaucoup plus de temps d'observation, d'autant plus qu'il ne disposait pas de cartes fiables de la zone à observer. Challis commença ses recherches le 1^{er} août 1846.

Le Verrier communique ses résultats définitifs à l'Académie des sciences le 31 août 1846. Devant le peu d'enthousiasme des astronomes français, il décide de faire alors appel à une de ses connaissances : l'astronome prussien Johann Gottfried Galle de l'observatoire de Berlin. Galle reçoit la position de Neptune par courrier le 23 septembre 1846. Le soir même, il pointe son télescope de 23 cm vers l'endroit indiqué et passe au peigne fin toutes les étoiles de la région, pendant que son assistant Heinrich Louis d'Arrest vérifiait si l'astre observé était répertorié sur les cartes stellaires récentes de Bremiker. Vers minuit, Galle trouva Neptune, à moins d'un degré de l'emplacement calculé. Il attendit quelques heures pour vérifier si l'astre a bien bougé, avant de confirmer qu'il s'agissait bien de la planète recherchée.

Outre-Manche, la déception est grande. Challis apprend la découverte en lisant le *Times*. En revoyant ses notes, il découvre même qu'il avait observé Neptune deux fois depuis le 1^{er} août. Une vive polémique s'ensuit jusque dans la presse. Les Britanniques ressortent les papiers d'Adams s'écriant que la découverte leur revient. De leur côté, les Français réfutent en rappelant que seule une publication officielle peut valider la découverte, et refusent de pied ferme que le nom d'Adams figure à côté de celui de Le Verrier dans les livres d'histoire. En juin 1847, Adams et Le Verrier se sont rencontrés pour la première fois à la British Association for the Advancement of Science et ont entretenu par la suite une relation amicale.

Lors de nouveaux calculs sur les caractéristiques orbitales de Neptune, on s'aperçut que ceux de Le Verrier et Adams étaient faux, bien que tous deux aient annoncé la position de la planète non loin de sa position réelle. Le premier avait déterminé un rayon de 36,154 ua et une excentricité de 0,107 tandis que le second avait trouvé un rayon de 37,25 ua. Le rayon réel de l'orbite de Neptune est 30,1 ua et son excentricité inférieure à 0,009. Par ailleurs, des historiens ont trouvé des éléments qui tendent à montrer que les solutions d'Adams ne convergeaient pas mais variaient par plus de 35 degrés de longitude.

Avec une période orbitale de presque 165 ans, Neptune est retournée le 12 juillet 2011 au point où Galle l'avait observée^[7].

Notes et références

- [1] Pluton, dont l'orbite est globalement extérieure à celle de Neptune, a longtemps été considérée comme la planète la plus éloignée du Soleil, mais a été reclassée comme planète naine le 24 août 2006 à l'issue de la 26^e Assemblée générale de l'Union astronomique internationale.
- [2] Nature 292, 435-436 (30 July 1981) | doi:10.1038/292435a0; Accepted 2 June 1981
- [3] W. B. Hubbard, « Neptune's Deep Chemistry », dans *Science*, vol. 275, 1997, p. 1279–1280 [texte intégral (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/275/5304/1279>), lien PMID (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9064785>), lien DOI (<http://dx.doi.org/10.1126/science.275.5304.1279>) (le 2008-02-19)]
- [4] Gaétan Morissette, *Astronomie Premier Contact 3e édition*, p. 201.
- [5] (en) NASA Jet Propulsion Laboratory Caltech – Planetary Satellite Mean Orbital Parameters (http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_elem#neptune) « Neptune. »
- [6] List Of Neptune Trojans (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/NeptuneTrojans.html>)
- [7] David Fossé, « Neptune: c'est reparti pour un tour (<http://www.cieletespace.fr/node/7505>) », Cieletespace.fr, 2011. Consulté le 15 juillet 2011

Sources et contributeurs de l'article

Système solaire Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73215780> Contributeurs: A2, ADM, Aaaf-wiki, Abracadabra, Abrahami, Acer11, Across.land.and.time, Actarus Prince d'Endor, Acélan, Agentpitch, Akzo, Alain r, Alef_Burzuali, Alex0o, Alno, Alphos, Anarchimede, Anthere, Apollon, ArséniureDeGallium, Assdfg, Astro vienne, AstroWiki, Ayadho, Azertytimtim, Baran1999, Barteborte, Baronnet, Barraki, Basile II, Bastien Sens-Méyé, Benjamin Lefèvre, Bernardltt, Birdie, Bob Saint Clar, Bouette, Bub's, Calo, Cantons-de-l'Est, Caton, Caverna, Cdiot, Cedric.ch, Cham, Chemnir, Chmlal, Cody escadrone delta, CommonsDelinker, ComputerHotline, Coyau, Creasy, Crochet.david, Cépey, Céréales Killer, D4m1en, DENIS 48, Dake, Damouns, Darkoneko, David Berardan, Denys, Derkleinebaueraufdemriesigenschachbrett, Dhenry, Didier, Doch54, DocteurCosmos, Domsau2, Dududul, Démocrite, E Bernal, EDUCA33E, Einstein, Emmanuel legrand, En passant, Enrac Sum, Escaladix, Esprit Fugace, Estomus, Et caetera, Excessilior, Fabrice Ferrer, Fafnir_Ffx, Fm790, Fmaunier, Fotaun, François Rey, Fruge, GLec, GaMip, Ganondorf, Gaspra951, Gb2000, Gdgourou, Gede, Gemme, Genton, Geoffrey06, Gh, Graffity, Gribeco, Grimlock, Grondin, Gual-25, Guillaume70, Guill, Guillom, Gvf, Gyrocompa, Gz260, Hashar, Hemmer, Herr Satz, Hibisco-da-Ilha, Hément, IAlex, Ico, Inisheer, Io Katai, JB, JLM, JackPotte, Jaefverol, Jean-Christophe BENOIST, Jean-Louis Lascoux, Jerome66, Jerome72, Jeune aldebaran, Jfpierce, Jibeam, Jmfayard, Joal ban Kluane, Jocelyn, JohnD, Joub, Jules78120, Jyp, Kalviner, Kanabiz, Kelson, Kenny32, Keul, Khayman, Kriss Baxter, Laddo, Lady9206, Laurent, Laurent Nguyen, Laurent75005, Leag, Lebosdu641, Like tears in rain, Lilian, Lolomalin, Lomita, Looxix, Loveless, Lézard, MIMATA, MOB, Mafiu44, Maloq, Malost, Malta, Man132, Mandrak, Mangatome, Manuguf, Marc Liger, Marc Mongenet, Markov, Matrix76, Med, Medium69, Meoududlye, Mephistau, Michel421, Mike Coppolano, Mizalcor, Mnémoxine, MohamedSaheed, Mokona, Moumousse13, Mr H., Mro, Mustrum Ridculle, Mutatis mutandis, Naevus, Nataraja, Necrid Master, Neef, Nemesis 12, Nias, Nicolas Lardot, Nicolas Wälchli, Nicolas b-m, Nomadi, Oblic, Oliezekat, Ollamh, Orsatelli, Orthogaffe, Oxo, PP Tom, PST, Padawane, Papatt, Pautard, Pelsou, Phe, Pierre cb, Pierre-louis, Pioneer6014, Pixeltoo, Pk-Undying, Pld, Pline, Pok148, Pontauxchats, Poppy, Portboy, Poulos, Pouply, Poxtre102, Pseudomoii, Punx, Raizin, Ratigan, Romain C, Rominandreu, Roucas, Rpa, Salamander03, Sam Hocevar, Samlego2, Sanao, Sbrunner, Sebleouf, Semnoz, Setimo, Simoes, Simon-kempf, Skull13, Slovy, Sophoole, Spleenico, Stanlekub, Stéphane33, Subarf, Sublimo69, Tejjad, Teofilo, Terror Belli, The Dav21, The RedBurn, Thierry Caro, Thierry65, Thiébaut, Tibou77, Tilux, Timoram26, Toto Azéro, Tpa2067, Trafalgur, Traroth, Uop, Urhixidur, Utls, VIGNERON, Valantes, Vicostar, Vivi-1, Vlaam, Wantoknow, Warm-Ice, Woww, Wynette, XaVieR, Xfigpower, Xofc, Yelkrokoyade, Zakke, Zandr4, Zelda, Zetud, script de conversion, 584 modifications anonymes

Planète tellurique Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=71897181> Contributeurs: Alno, Apoz, Arnaud.Serander, Arthurno, Astromathieu, Basile II, Carbone14, Clatourre, Coyau, Dhenry, Esprit Fugace, Francois Trazzi, GL, GLec, Graffity, Gz260, JihemD, Jlmt, JmCor, Jmax, Jyp, Kanabiz, Kikuyu3, Klemen Kocjancic, Leag, Looxix, Medium69, Nemesis 12, Nias, Nono64, Nupar, Olrick, Orthogaffe, OxTaz, Pixeltoo, Pld, Poppy, Raoullepitbull, Sliya, Spooky, Stanlekub, TigH, Ultrogote, Urhixidur, YolanC, Zelda, 69 modifications anonymes

Mercure (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73228673> Contributeurs: A2, Akwa, Alain r, Alexandref, Aliesin, Alno, Ampon, Amqui, Anne97432, Anthere, Apoz, Arrakis, ArséniureDeGallium, Astro vienne, AviaWiki, Badmood, Baronnet, Bastien Sens-Méyé, BernardM, Bernardltt, Best friend fr, Bibi Saint-Pol, Bilou, Binabik155, Bob Saint Clar, Bokken, Bouette, Bpollet, Bulb's, Buzz, Calo, Cemp, Cdang, Ceedje, Chic075, Chmlal, Chris93, Cody escadrone delta, Coyote du 86, Crouchineki, Curry, Cédric Boissière, Céréales Killer, DanyGagnon, David Berardan, David602b, De Wikischim, Dhatiay, Dhenry, Didier, Dreoven, Droop, Démocrite, EDUCA33E, El Comandante, El Jj, Elg, Estonius, Fabric75, FvdP, GLec, GaMip, Galdrad, Gemme, Gordjazz, GrahamHill, Grecha, Greudin, Gribeco, Grigg Skjellerup, Grim Reaper, Grimlock, Guadalou, Guillaume70, Guillaumehf, Gz260, Hercule, Herr Satz, Hibisco-da-Ilha, Hément, ImBeast16, Izngood, JC (Exether), JLM, Jastrow, Jblndl, Jean-Fréderic, Jef-Infojef, Jeffsexbyboy, Jerome72, Jmicht, Jyp, Klroman, Kanabiz, Kapitanov, Kelson, Khayman, Kndiaye, Korg, Kosame, Kropotkine113, Kyro, Lady9206, Laurent Nguyen, Laurentleap, Le gorille, Le soré, LeToff, Leag, LeonardoRob0, Lheoche, Lily, Lisaël, Litlok, Looxix, MIMATA, Manchot, Manuguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Martinwi1e1980, Maurilbert, Med, Medium69, Meoududlye, Moumousse13, MuDavid, Naevus, Nanoxyde, Nataraja, Nemesis 12, Neuceu, Nias, Nicolas Lardot, Nikai, Nk, Nono64, Nykozof, O, Morand, Oliezekat, Orthogaffe, PST, Paolo3109, Padawane, Pagir, Paolo31, Papier K, Phe, Phido, PieRROMaN, Piku, Pipin, Pioneer6014, Pld, Pline, Podzemnik, Pok148, Polauret, Poppy, Poulos, Pouply, Priper, Pymous, Quebenaute, Reclame, Romainhk, Rominandreu, Rpa, RémiH, Salle, Sam Hocevar, Sanao, Sav, Seb35, Sebleouf, Semnoz, Shawn, Sherbrooke, Skull133, Speculos, Spooky, Spundun, Stanlekub, Ste281, Sublimo69, Superjuju10, The Obento Musubi, Theon, Thewayforward, Tieum512, Tontonflingue, Traroth, Tython, UncivilFire, Urhixidur, Ursus, VIGNERON, Valéry Beaud, Vargenau, Vince66, Vincnet, VonTasha, Witoki, Woaha, Wynette, XBadWolf, Yann, YolanC, Zelda, Zetud, 216 modifications anonymes

Vénus (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73228581> Contributeurs: 157.104.202.62.dial.bluewin.ch, 44leen, Agrafian Hem Rarko, Alain r, Alphos, Anarchimede, Andre Engels, AnnieAstronomie, Apoz, ArkaM, ArmenG, Arrakis, Arsael, ArséniureDeGallium, Asasdfg, Astro vienne, B3N0!7, Balougador, Balrogou, Baronnet, Bastien Sens-Méyé, Bastique, Bernardltt, Bertrand Bellet, Blogbreather, Blood Destructor, Bluespark, Bob Saint Clar, Bob08, Bouchecl, Buzz, Cantons-de-l'Est, Chaps the idol, Chmlal, Christophe Marcheux, Clashman, Cody escadrone delta, CommonsDelinker, ComputerHotline, Crom1, Crouchineki, Cyril555, Céréales Killer, DBP, DC2, David Berardan, David Cena, Denys, Difeldmann, Dhatiay, Dhenry, Didier, Duckysmotkon, EDUCA33E, El Jj, Emericpro, En passant, Ender, Epsilon0, Erasmus, Erestrebian, EricGall23, Escaladix, Estonius, EyOne, FR, FRF 1, Fabrice Dury, Fabrice Ferrer, Fafnir, Federix, Fluti, Fv, FvdP, GLec, GaMip, Gemme, Gene.arboit, Gloup gloup, Grecha, Gribeco, Grigg Skjellerup, Grondin, Grook Da Oger, Gsoucis, Guadalou, Guillaume70, Guymartin1, Gypaete, Gz260, HYUK3, Helldjinn, Herr Satz, Hudsonmanu, Hégésippe Cormier, IAlex, Ida Shaw, Immanuel Giel, JLM, Jastrow, Jean-Fréderic, Jef-Infojef, Jerome72, Jeromelap56, JihemD, Jmax, Jmc, Jplm, Jyp, Kanabiz, Kelson, Kevex91, Khayman, Khrys63, Kiliaroures, Kirtap, Korrigan, Kriss Baxter, Kropotkine113, Laddo, Laurent75005, Laurentleap, Le soré, Leag, LeonardoRob0, Lgd, Lily, Linguiuste, Litlok, Lollocolpo, Loostik, Looxix, LordAnatar, Lozère, M-le-mot-dit, MG, MIMATA, Macassar, Mafiu44, Maggic, Manudwarf, Manuguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Martinwi1e1980, Maurilbert, Maximini1010, Medium69, Meoududlye, MetalGearLiquid, Mnémoxine, Moumousse13, Moy, MuDavid, Nataraja, Nbouchard, Nemesis 12, Nguyenld, Nias, NicoV, Nicolas Lardot, Nilfanion, Noritaka666, Ofenis, Oliezekat, Orlodrim, Orthogaffe, Paskalo, Pegasus, Perditax, PetitDej, Phe, Phido, Philtr, Phosphorus, Piku, Pipin, Pioneer6014, Piotr Ilitch Tchaiakovski, Pixeltoo, Plaisirk, Pld, Polauret, Popolon, Pouply, Prosopée, Reclame, Roby, Romanc19s, Rominandreu, RémiH, SaReVoK MuAd DiB, Sanao, Sanguinez, Sardur, Satfr, Scanoine, Sephiroth669, Sherbrooke, Sisyph, Snif, Speculos, Spleenico, Spooky, Spundun, Stanlekub, Sylveno, Sémhur, Tavernier, The Nick, The Obento Musubi, The Titou, Theycberman, Thedreamtree, Thunderbird, Tieum512, Tokerboy, Tonymainaki, Tpa2067, Traroth, Treehill, Urhixidur, VIGNERON, Vdefourny, Vixounet, Vol de nuit, VonTasha, Wanderer999, Wandtoast, Wynette, Xiglofre, Yves-Laurent, Zed90, Zelda, Zetud, script de conversion, Ælfgar, Çläggä, 272 modifications anonymes

Terre Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73215887> Contributeurs: -JalOmax-203-, A2, A3 nm, Adrien Cornet, Alain r, Alchemica, Almacha, Alphos, Alvaro, Amin34, Andre315, Annelea, Anthere, Antoaviaque, Apokrif, Apollofox, Aporie, Apoz, Apprenons, Archibald, Ardu Petus, Arflam, Arglanir, Aristarché, Arnaud.Serander, ArnoLagrange, Arrakis, Arria Belli, Arslan-San, ArséniureDeGallium, Astro vienne, Azurfrog, Badmood, Baronnet, Barraki, Bdc43, Benjism89, BernardM, Bernardltt, Bertol, Bigballs, Bigi111, Bionet, Bkar, BlanchardJ, Bob Saint Clar, Bob08, Bobjoe59, Boretti, Boral, BrightRaven, Buison, Cantons-de-l'Est, Cmpc, Cdang, Cessa150, Charlie Pinard, Chewbie 67, Chtit draco, Cilantr, Cit vësc, Clem23, Coyau, Coyote du 86, Crazymars, Céréales Killer, D4m1en, DC2, DREED, DSCH, Daniel SANNIER, Darwinian, Dauphine, David Berardan, Delrot, Desideria20, Dhenry, Didier, Dirac, Dkessas, Doc Carbur, DocteurCosmos, Dr gong, EDUCA33E, Eden2004, El Comandante, El Jj, Elfie, Eltarys II, Emericpro, Emirix, En passant, Environnement2100, Eric LEWIN, Ersmino, Escaladix, Eskimo, Esprit Fugace, Evpok, Exocet, Fab97, Fabrice Ferrer, Fabric75, Fabriceboulet, Fafnir, Fimac, Fluti, Fm790, Former user 1, Frakir, Francois Trazzi, Fuemcmuffins, Fuhiro, FvdP, GLec, GaMip, Gablebz, Gaetan Poix, Gdgourou, Gede, Gemme, Gentil Hibou, Geologeek, Givrali, Glacier, Goku, Graffity, Grecha, Gribeco, Grimlock, Grondilu, Grondin, Grook Da Oger, Guadalou, Guillerinskyrie, Guiyrra, Guillaume70, Gz260, Harmonia Amanda, Haypo, Herr Satz, Hesoneofus, Hégésippe Cormier, IA Alex, Inike, Izngood, JLM, JSDX, Rhomasie, Jastrow, Jean.Bomber, Jef-Infojef, Jerome72, Jide, Jmc, Jmh20, Juraastro, Jusjih, Jynn, Jyp, Klroman, Kamar seraihe, Kanabiz, Kataklism, Kelson, Khayman, Khrys63, Kiliith, King Willan, Kolossus, Korrigan, Kyro, La pinte, Lacheaume, Laddo, Lady9206, Lapeitetille, Laurent Nguyen, Le gorille, Le soré, LeMouchoir, LeYaYa, Leag, Leridan, Les3corbiers, Letartean, Like tears in rain, Linan, Litlok, Lmaltier, Lomita, Looxix, Loreleï, Louperivois, Luc7418, Lucas thierry, Lylvie, MG, MIMATA, MOB, Madhif, Madiot, Mafiu44, MakiZen, Malgovert, Malost, Manalfer, Manuguf, Marc Mongenet, Martinwi1e1980, Mathias Poujol-Rost, Mavericklist70, Mañikemfa, Mbenoist, Med, Medium69, Mekong Bluesman, Melkor73, Meoududlye, MetalGearLiquid, MicroCitron, Mikayé, Mnémoxine, Moala, Moez, MohamedSaheed, Moulins19, Moumousse13, Mouna75, Moy, Moyogo, Mr H., MuDavid, Mutatis mutandis, Mythos, N'importe lequel, Nakor, Nataraja, Nemesis 12, Newyork60, Nguyenld, Nias, Nicname123, NicoRay, NicoV, Nicolas Lardot, NicolasBertoni, Nk, Nnemo, Nonopoly, Noritaka666, NouvelUtilisateur, Nupar, Nyro Xeo, ObiWan Kenobi, Oblic, Oliezekat, Olivier.descout, Ollamh, Orion 8, Orlodrim, Orthogaffe, Oxan Hartog, P-e, Padawane, Palamède, Papatt, Paris 16, Paris75000, Patrick, Pautard, Penjo, Phe, Pino, Pixeltoo, Planète-Info, Pld, Pline, Ploum's, Pollucks, Popolon, Poppy, Poulos, Pouply, Prosopée, Pulsar, Purecreatin2, Pyerre, Raph, Reclame, RenaultR83, Rhadamante, Rhizome, Rinaku, Rogilbert, Rominandreu, Rune Obash, RémiH, Sabrosour, Sacha6100, Saeming80, Sakharov, Salader, Salsero35, Sam Hocevar, Samm, Sanao, Sand, Scrabble, Sebjardon, Sebletoulousain, Shaihulud, Sherbrooke, Simoes, Simon-kempf, Sixsons, Ske, Speculos, Spooky, Spundun, Stanlekub, Star Trek Man, Status, Sublimo69, Sun, Superjuju10, The Obento Musubi, Thedreamtree, Theolian, Theon, Thidras, TiChou, Tieum512, Titanicophile, Tiyon, Tomtom333, Tornad, Toto Azéro, Tovinx, Traroth, Tu'malila, Turnebob, Tvp, Tyuzzuiduyzz, Udufruduhi, Urhixidur, User01010101, VIGNERON, Vazkor, Vchahun, Vincnet, Vinz1789, Vlaam, VonTasha, Wart Dark, Wictorya, Wiki-User03, Wikipedix, Wrangel, Wynette, XaVieR, XavXav999, Xavdel, Yanajin33, Yann, YolanC, Zargoid, Zed90, Zelda, Zetud, Ziame, Zorlot, Zubro, script de conversion, Ælfgar, Éclusette, Посёлок Коломак, 675 modifications anonymes

Mars (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73258594> Contributeurs: Abracadabra, Agrafian Hem Rarko, Alain r, Alchemica, Almacha, Alphos, Alonso, Alvaro, Anarchimede, Ancalagon, Anthere, Antonov14, Apollofox, Apoz, Arglanir, ArkaM, Arria Belli, Assurbanipal, Astro vienne, B3N0!7, BIGDAVID, Badmood, Baffab, Baronnet, Bassminier, Bastien Sens-Méyé, Benji Eo, Bernardltt, Berru, BetoCG, Bibi Saint-Pol, Bilou, Bob Saint Clar, Bpa, Bubblegum, Caesius, Calo, Cantons-de-l'Est, Captainim, Cascade65, Catzillator, Cdang, Cdiot, Chaps the idol, Chmlal, ChongDae, Chouca, Christopher Marcheux, Clashman, CommeCeci, CommonsDelinker, ComputerHotline, Corsaire, Crouchineki, Cépey, Céréales Killer, D4m1en, Damouns, Darkoneko, David Berardan, Deelight, Deep silence, Denys, Dhenry, Didier, Dkchacha, DocteurCosmos, Dr Brains, Druth, E Bernal, EDUCA33E, El Jj, El Marsupio, Elapied, Emshef, Enogael, EoWinn, Eric LEWIN, EricGall23, Esprit Fugace, Estomus, FIZOR, FR, FabienGomez, Fafnir, Fandepanda, Faschion-coco, Feldo, Florn88, FoeNyx, Fphilibert, François-Dominique, Freeowl, Frombenny, Frór, FvdP, GLec, Gemme, Gene.arboit, Ggal, Ggl3x, Graffity, Greatpatton, Grecha, Greewi, Greudin, Grigg Skjellerup, Grimlock, Gronico, Grook Da Oger, Guadalou, Guillaume70, Gz260, GôTô, HAL, Hadrien, Hashar, Heljqfy, Hemmer, Hexasoft, IA Alex, Ianare, Ice Scream, Inisheer, Intelligence, Ithilsul, Izngood, JB, JC (Exether), JLM, JL TB34, Jarfe, Jd, Jean-eud-maurice, Jeangagnon, Jef-Infojef, Jeffdelonge, Jerome pi, Jerome66, Jerome72, Jeune aldebaran, Jmc, Jmfayard, Jmicht, Jonathaneo, Jotun, Jplm, Jumpingglade, Jyp, K-o-x, Kallort,

Kapitanov, Karta24, Keforal, Kelson, Kertraon, Khayman, Khrys63, Kilith, Killer eagle, Korrigan, Koyuki, Kropotkine 113, KuSh, Kwak, Kyle the hacker, LD, LUDOVIC, Lades, Lady9206, Laurent75005, Laurentleap, Le sotré, Leag, Lekium85, LeonardoRob0t, Like tears in rain, Lilyu, Lin Dan4, Lithium57, Lolcollopo, Lomita, Looxix, Louis-garden, Loveless, Lv242819, Lylvic, MIMATA, MPO man, Madon.olivier, Maggic, Maniak, Manipédia, Manuguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Markadet, Marsu15, Martinwilke1980, Mathieu, Mathiouze, Mauribert, Med, Medium69, Meodudlye, MicroCitron, Mikaa, Miuki, Mnémösyne, Moumousse13, MuDavid, Naevus, Nanoxyde, Nataraja, Nebula38, Necrid Master, Nemesis 12, Nemoi, Newyork60, Nias, Nicolas Lardot, Nicolas Ray, Nk, Noritaka666, Oblic, Octavius, Okki, Oliezekat, Ollamh, Olybrius, Ordifana75, Orlodrim, Orthogaffe, P-e, Papatt, PatrickLapointe, Perditax, Peter17, PetitDej, Phe, Phido, Philippe.petrinko, Pioneer6014, Pixeltoo, Pld, Pline, Ploum's, Poulauret, Popolon, Poppy, Pouply, Pousi, Pseudomoii, Punx, Purodha, Pwet-pwet, R, Reclame, Riba, Rioult Michel, Ripounet, Romanc19s, Rominandreu, Roymail, Rune Obash, Ryo, Rémih, Sakharov, Salsero35, Sam Hocevar, Sanao, Scanoine, Schiste, Sebleouf, Semnoz, Sephiroth699, SergeiPoupl, Shaihulud, Shakki, Sherbrooke, SilbornTheProton, Simonauxx, Sindor, Snap, Spleenico, Spooky, Spundun, Stanlekub, Starus, Stephane Simard, Sting, Stéphane33, Sum, Tados, TaraO, Tarquin, The Nick, The Obento Musubi, Theoliane, TiChou, Tium512, Tognopop, Tohuvalobohu, Toma007, Tonymainaki, Traroth, Treehill, Tsaga Valren, TuSex, Turb, Tython, Urban, Urhixidur, VIGNERON, Valéry Beaud, Vargenau, Vazkor, Vengeurz, Vierlo, Vikingmars, Vinz1789, Vivarés, VladoubidoOo, Wart Dark, Who killed Bambi ?, Wiki-User03, WikiPatrol, Xic667, Xillimiandus, Xofc, Yann, YolanC, Yves-Laurent, Zeldz, Zetud, Švitrigaila, 579 modifications anonymes

Géante gazeuse Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=7200250> Contributeurs: Abracadabra, Alno, Arrakis, Basile II, Bob08, Buzz, Cantons-de-l'Est, Cody escadron delta, Critias, Dhenry, Démocrite, Erud, Jef-Infoje, Jyp, Klemen Kocjanic, Lagroue, Looxix, Medium69, Mro, Nemesis 12, Onc, Orthogaffe, Pautard, Phido, Pld, Rical, Roby, Sam Hocevar, SolanaBogonPolaris, Spooky, Stanlekub, Svdmolen, TigH, Urhixidur, Vargenau, Zetud, Zhonghuo, 25 modifications anonymes

Jupiter (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73264182> Contributeurs: AEIOU, Aboumael, Abracadabra, Akzo, Alvaro, Anarchimede, AnnieAstronomie, Apollofox, Arct, Aristidebränd, Arnaudus, ArsénireDeGallium, Astro vienne, Bapts, Baronnnet, Bernardtl, Bertol, Bibi Saint-Pol, Bibop, Bob Saint Clar, Bob08, Calame, Camico, Captaim, Castagna, Cempg, Cdang, Chmlal, Chris93, CommonsDelinker, ComputerHotline, Corsaire, Crouchineki, Céphide, Céréales Killer, Daniel Case, Darkoneko, David Berardan, Dhatier, Dhenry, Didier, DocteurCosmos, Domsau2, Duckysmokton, EDUCAA33E, El Jj, Elryck, Erik Warmelink, EyOne, Fljmm, Falissard, Fluti, Flying jacket, FvdP, GLec, GaMip, Gemme, Gene.arboit, Ghuber001, Goliadkine, Gordjazz, Grecha, Grigge Skjellerup, Grum, Guadalou, Guillaume70, Guillou, Guillou, Hashar, Hemmer, Henri4, Hégésippe Cormier, IAlex, Ice Scream, Ico, Inisheer, Iznogood, Jackske85, Jarfe, Jean Gomel, Jean-Christophe BENOIST, Jeano, Jef-Infoje, Jerome72, Jiray 92, Jmc, Jmicht, Jyp, K90, KMan, Kelson, Khayman, Khrys63, Kilith, KoS, Korrigan, Koyuki, Kropotkine 113, LD, Laddo, Lalancette, Laurent75005, Laurentleap, Le sotré, Leag, Like tears in rain, Lilyu, Lionel Allorge, Litlok, Looxix, M-le-mot-dit, MIMATA, MPO man, Marc BERTIER, Marc Mongenet, Marc-andré18, Marie Becker, Marie Kiki, Marsyas Panique, Martinwilke1980, Med, Medium69, Meodudlye, MetalGearLiquid, MF9000, Mnémösyne, Moez, Mosaffa, Moumousse13, MuDavid, Mutichou, Naevus, Nataraja, Neualilij, Nias, Oblic, Oliezekat, Onc, Orlodrim, Orthogaffe, Ouranos, PST, Pallas4, Pamputt, Paoloo31, Pem, Perditax, Peter17, PetitDej, Phe, Pioneer6014, Pld, Pline, Ploum's, Plyd, Popolon, Poppy, Poss Jean-Louis, Pouply, Purodha, Rhadamante, Ripounet, Rominandreu, Ryo, Saig, Salsero35, Sam Hocevar, Samstag, Sanao, Sebaen, Sephiroth699, Septelophoppe, Simon-kempf, Sisebut, Sisyp, Sixsous, Smily, Speculos, Spundun, Stanlekub, Ste281, Stéphane33, Suzicat, Séraphin 01, Taguelmost, Tanguy Vaz, Tium512, Titi3, Tognopop, Traroth, Treehill, Urhixidur, Vivarés, Weft, WikiMoi, Wikinade, Wikisoft*, Wiklol, Wynette, Xfigpower, Xofc, Yvan Rivierre, ZeroJanvier, Zetud, Ému07, 236 modifications anonymes

Saturne (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73257272> Contributeurs: Alain r, Alecs.y, AlexRenou, Allison connors, Alvaro, Asabengurtza, Astro vienne, Balougador, Baronnet, Bastien Sens-Méyé, Bh98, Bernardtl, Bestter, Bibi Saint-Pol, BifITTheUnderstudy, Bob Saint Clar, Buzz, C2rik, Calcineur, Captaim, Caro15189, Cdang, Chaps the idol, Chmlal, ComputerHotline, Crouchineki, Céréales Killer, Darkoneko, Davgrps, David Berardan, Dhatier, Dhenry, Didier, Didier, DocteurCosmos, Dr Brains, Drongou, EDUCAA33E, El Jj, Elryck, En passant, Ender, EricGall23, Fabrice Ferrer, Fafnir, Falissard, Fm790, Frank9321, FvdP, GLec, GaMip, Gemme, Gene.arboit, Ghallou, Grecha, Greudin, Grimlock, Gronico, Grum, Guadalou, Guillaume70, Gz260, Harmonia Amanda, Hashar, JLM, Jef-Infoje, Jerome66, Jerome72, Jules78120, Jyp, Kassus, Kataklism, Kelaway, Kelson, Khayman, Khrys63, Kilith, Killer eagle, Kokoyaya, Korrigan, KuSh, LERK, Lady9206, Lauren Nguyen, Lauren75005, Laurentleap, Le sotré, Leag, Lekium85, Letartean, Lgd, Lomita, Long John Silver, Looxix, M.A.D.company, M0tty, MIMATA, MPO man, MakiZen, Malta, Marc Mongenet, Marie Becker, Marie Kiki, Med, Medium69, Meodudlye, Mnémösyne, Moez, Moumousse13, MuDavid, Nataraja, Nemesis 12, Nias, Nicolas Lardot, Nicoluc2, Nmariotti, Noritaka666, Obourgain, Ohkami, Oliezekat, Orthogaffe, Ouhpinaise, Ouranos, P-e, Padawane, Phae, Phe, Phido, Pinnip, Pld, Pline, Ploum's, Plyd, Pmx, Popolon, Pouply, Psi, Purodha, Reclame, Riba, Rmehdi78, Rocky7624, Roger1313, Rune Obash, Saig, Sam Hocevar, Sanao, Sebletooulousain, Semnoz, Shaihulud, Sixsous, Souris2002, Spooky, Spundun, Stanlekub, Stephane Orts, Sublimo69, Sylfred1977, Tejgad, TiChou, Tium512, Toto Azéro, Toutoune25, Traroth, Trazfr, Treehill, Urhixidur, VIGNERON, Vivarés, VonTasha, Vy, Widar, Wizou, Wynette, XaVieR, Xfigpower, Xofc, Yann, script de conversion, ~Pyb, Éclusette, 279 modifications anonymes

Uranus (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72683102> Contributeurs: Aadri, Alain r, Alvaro, Andre Engels, Avatar, Badmood, Balougador, Baronnet, Benji Eo, Bernardtl, Bibi Saint-Pol, Bilou, Bob Saint Clar, Cantons-de-l'Est, Cdang, Chmlal, Clatourre, CommonsDelinker, Céréales Killer, DC2, David Berardan, Dereckson, Dhenry, Didier, Didier, Misson, DocteurCosmos, Droopy nico, Durandal, Démocrite, EDUCAA33E, El Jj, Elisa, Erasmus.new, Escaladix, Et caetera, EyOne, FR, FvdP, GLec, GaMip, Gibboys, Graffity, Grecha, Grigg Skjellerup, Grondin, Grum, Guadalou, Guillaume70, Gyrocompa, Gz260, Hashar, Heby03, Herr Satz, Hégésippe Cormier, Iznogood, Jef-Infoje, Jerome72, JihemD, Jjdumas, Jusjih, Jyp, Kelson, Khayman, Kolossus, Korrigan, Koyuki, Lalancette, Laurent Nguyen, Laurentleap, Leag, Litlok, Long John Silver, Looxix, MIMATA, MV500, Manuguf, Marc Mongenet, Marc-André Beauchamp, Marie Becker, Med, Medium69, Menerlach, Meodudlye, MetalGearLiquid, Mnémösyne, Mokona, Nanoxyde, Nataraja, Nba jules, Necrid Master, Nemesis 12, Nias, Nicolas Eynaud, Nicolas Ray, Nono64, Oblic, Oliezekat, Orthogaffe, PST, Padawane, PetitDej, Phe, Pioneer6014, Pld, Pline, Ploum's, Poppy, Pouply, Purodha, RenaultR83, Rominandreu, Sanao, Semnoz, Shawn, Spoirier, Spooky, Spundun, Stanlekub, Superju10, Sémhur, The Obento Musubi, Tium512, Traroth, Treehill, Urhixidur, Vivarés, XaVieR, Xansandre, Xic667, script de conversion, 152 modifications anonymes

Neptune (planète) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73278992> Contributeurs: Alain r, Allstars, Alphos, Alvaro, Arrakis, Ash Crow, Baronnet, BeatrixBelibaste, Bernardtl, Bilou, Bob Saint Clar, Bob08, Bvs-aca, Cdang, Chaps the idol, Chatsam, Cj73, Clatourre, Cmagnan, Conchita, Coyau, Crouchineki, Céréales Killer, David Berardan, Dhenry, Didier, DonCamillo, Dragonpoop, EDUCAA33E, El Jj, EmilienKia, Emmanuel legrand, Enzino, EricGall23, Eurocommuter, EyOne, Fripouille69, FvdP, G4BOX Metin2, GLec, GaMip, Galpha, GrahamHill, Grecha, Grum, Guadalou, Guillaume70, Hashar, Hemmer, Hément, JLM, Jackgemini, Jef-Infoje, Jerome66, Jerome72, Jilibi, Johann Grimm, Jyp, Kanabiz, Kataklism, Kelson, Khayman, Kom1 mage, Korrigan, L'ono, Labé, Lady9206, LairepoNite, Laurent Nguyen, LeMorvandiau, Leag, Long John Silver, Looxix, M.Tanguay, MIMATA, Macassar, Maniak, Marc Mongenet, Marie Becker, Med, Medium69, Meodudlye, Mnémösyne, Nataraja, Nias, Nico 5 M., Nicolas Lardot, Numbo3, Oblic, Oliezekat, Orthogaffe, Pierre.Lescanne, Patocche 77, Phouchet, PetetheJock, Pfinge, Phe, Pld, Pline, Ploum's, Popolon, Poppy, Pouply, Pymouss, Raminagrobis, Reclame, Regis.gallois, Rhadamante, Rocky7624, Rominandreu, STyx, Sam Hocevar, Sanao, Semnoz, Shipbegian, Simoes, SofiaNadezda, Sofronie II, Spooky, Spundun, Stanlekub, Teux, Theon, Tibauk, Tidus1188, Tium512, Traroth, Treehill, Triaxx, Urhixidur, Valérie75, VonTasha, Weft, Wiz, Wrangell, Yann, Zeldz, 137 modifications anonymes

Source des images, licences et contributeurs

Fichier:Solar sys.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_sys.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Harman Smith and Laura Generosa (nee Berwin), graphic artists and contractors to NASA's Jet Propulsion Laboratory.

Fichier:systemesolaire2.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Systemesolaire2.jpg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs:* Licoti

Fichier:UpdatedPlanets2006 french.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:UpdatedPlanets2006_french.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Adam850, stanlekub (french translation)

Fichier:solarsystem.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solarsystem.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Kaktuse

Fichier:Solar system-Comparison of planetes with sun.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_system-Comparison_of_planetes_with_sun.png *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* Tpa2067

Fichier:Oort cloud Sedna orbit-fr.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Oort_cloud_Sedna_orbit-fr.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Oort_cloud_Sedna_orbit.svg: * Image courtesy of NASA / Jet Propulsion LaboratoryJPL-Caltech / Robert L. HurtR. Hurt Original text courtesy of NASA / Jet Propulsion LaboratoryJPL-Caltech SVG conversion by Holek derivative work: Leovilok (talk)

Fichier:The sun1.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_sun1.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* DrKiernan, Halfdan, HappyLogolover2011, Patricka, Sebman81, Tom, 2 modifications anonymes

Fichier:H-R diagram -edited-3.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:H-R_diagram_-edited-3.gif *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs:* Richard Powell minor adjustments by:penubag (original image)

Fichier:Heliospheric-current-sheet.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Heliospheric-current-sheet.gif> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Werner Heil (see "other version" below).

Fichier:Aurora-SpaceShuttle-EO.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Aurora-SpaceShuttle-EO.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA (Crew of STS-39)(Original uploader was Seth Ilys at en.wikipedia)

Fichier:Terrestrial planet size comparisons.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Terrestrial_planet_size_comparisons.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* wikipedia user Brian0918

Fichier:InnerSolarSystem-en.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:InnerSolarSystem-en.png> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Mdf at en.wikipedia

Fichier:Ceres Hubble sing.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ceres_Hubble_sing.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* KillOrDie, PedroPVZ, Ruslik0

Fichier:Gas giants in the solar system.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gas_giants_in_the_solar_system.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Comet c1995o1.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Comet_c1995o1.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Miketsukunibito

Fichier:Outersolarsystem objectpositions labels comp-fr.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Outersolarsystem_objectpositions_labels_comp-fr.png *Licence:* inconnu *Contributeurs:* WilyD

Fichier:TheKuiperBelt Projections 55AU Classical Plutinos.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:TheKuiperBelt_Projections_55AU_Classical_Plutinos.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* User:Eurom commuter

Fichier:Pluto system 2006.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_system_2006.jpg *Licence:* Public domain *Contributeurs:* H. Weaver (JHU/APL), A. Stern (SwRI), and the HST Pluto Companion Search Team

Fichier:TheKuiperBelt Projections 100AU Classical SDO.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:TheKuiperBelt_Projections_100AU_Classical_SDO.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* User:Eurom commuter

Fichier:Eris and dysnomia2.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Eris_and_dysnomia2.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* John800104, Kalki, Krinkle, Ruslik0, 1 modifications anonymes

Fichier:Voyager 1 entering heliosheath region fr.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Voyager_1_entering_heliosheath_region_fr.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Yapa at fr.wikipedia

Fichier:Kuiper oort (french).jpg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Kuiper_oort_\(french\).jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Kuiper_oort_(french).jpg) *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Contributeurs:* NASA

Fichier:Sedna-NASA.JPG *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Sedna-NASA.JPG> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User:Evercat

Fichier:Protoplanetary-disk.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Protoplanetary-disk.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:M42proplyds.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M42proplyds.jpg> *Licence:* Public domain *Contributeurs:* C.R. O'Dell/Rice University; NASA

Fichier:Milky Way Spiral Arm french.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Milky_Way_Spiral_Arm_french.svg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Dragons flight & Surachit (english version), stanlekub (french translation).

Image:Universe Reference Map (Location) 001.jpeg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universe_Reference_Map_\(Location\)_001.jpeg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universe_Reference_Map_(Location)_001.jpeg) *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* Azcolvin429

Fichier:NewtonsTelescopeReplica.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:NewtonsTelescopeReplica.jpg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic *Contributeurs:* Basilicofresco, DrJunge, Eoghanacht, Fabian Commons, HHahn, JMCC1, Jahobr, Plindenbaum, Sanao, Solipsist, Thomas Gun, Thuresson, Wst, Xocoyote, 12 modifications anonymes

Fichier:Pioneer10-11.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pioneer10-11.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:PaleBlueDot.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PaleBlueDot.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Benzband, Emijrp, Kenyon, Nard the Bard, SuperM401, 6 modifications anonymes

Image:Terrestrial planet size comparisons.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Terrestrial_planet_size_comparisons.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* wikipedia user Brian0918

Image:Structure planetes telliuriques.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Structure_planetes_telliuriques.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* MushiHoshiishi, Ruslik0, Vyskocil

Image:Masses of terrestrial planets.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Masses_of_terrestrial_planets.png *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* kwami (talk) Original uploader was Kwamikagami at en.wikipedia

Image:Mercury symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Lexicon

Image:Venus symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Kyle the hacker

Image:Earth symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earth_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* OsgoodeLawyer

Image:Moon symbol crescent.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Moon_symbol_crescent.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Lexicon

Image:Mars symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* , redesigned by

Image:Vesta symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Vesta_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* G.dallorto, Lexicon, Rmhermen, Sarang, Urhixidur

Image:Pallas symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pallas_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Basilicofresco, Lexicon, Sarang, Urhixidur

Image:Ceres symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ceres_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Aquantrum, Crei0, Galphi, Lexicon, Ramiy, Ruslik0, Sarang, Sarihol1, Urhixidur, 4 modifications anonymes

Fichier:Mercury in color - Prockter07 centered.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_in_color_-_Prockter07_centered.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* w:NASANASA:w:Applied Physics LaboratoryJohns Hopkins University Applied Physics Laboratory/w:Carnegie Institution for ScienceCarnegie Institution of Washington. Edited version of Image:Mercury in color - Prockter07.jpg by Papa Lima Whiskey.

Image:Mercury Internal Structure.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_Internal_Structure.svg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Joel Holdsworth ()

Image:Venus structure.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_structure.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* User:Vzb83

Image:Venus-real.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus-real.jpg> *Licence:* inconnu *Contributeurs:* NASA/Ricardo Nunes

Image:The Earth seen from Apollo 17.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_Earth_seen_from_Apollo_17.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA. Photo taken by either Harrison Schmitt or Ron Evans (of the Apollo 17 crew).

Image:Slice earth.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Slice_earth.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs:* Ajraddatz, Dake, Fschoenn, Hmmwhatthisdo, Ji Wha, Rocket000, Stevecrye, 10 modifications anonymes

Image:Mars Valles Marineris.jpeg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Valles_Marineris.jpeg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Avala, Bricktop, Common Good, Homonihilis, Hunyadym, MGA73, Njardarlogar, Ruslik0, TheDJ, Yarl, Ævar Arnfjörð Bjarmason, 2 modifications anonymes

Fichier:Mars interior.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_interior.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Edward, Metrónomo, Rursus, Theresa knott, Tony Wills, WinstonSmith, Xhienne

Image:Full Moon Luc Viatour.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Full_Moon_Luc_Viatour.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Luc Viatour

Image:Moon_Schematic_Cross_Section.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Moon_Schematic_Cross_Section.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Bryan Derksen at en.wikipedia

Image:Earthlike planet-browse.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earthlike_planet-browse.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bricktop, Bryan Derksen, ComputerHotline, IvoShandor, Paulo Cesar-1

Image:Carbon Planet.JPG *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Carbon_Planet.JPG *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Luyten

Image:Gl876 planet1_h.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gl876_planet1_h.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bryan Derksen, ComputerHotline, Davepape, DouglasGreen, Honeplus, I AM, Kheider, LERK, Magister Mathematicae, Rursus, Ruslik0, Tony Wills, 1 modifications anonymes

Image:Gliese 581 - 2010.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gliese_581_-_2010.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution 3.0 *Contributeurs:* Phot-15b-09-fullres.jpg: ESO derivative work: Henrykus (talk)

Image:Mercury in color - Prockter07 centered.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_in_color_-_Prockter07_centered.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* w:NASANASA/w:Applied Physics LaboratoryJohns Hopkins University Applied Physics Laboratory/w:Carnegie Institution for ScienceCarnegie Institution of Washington. Edited version of Image:Mercury in color - Prockter07.jpg by Papa Lima Whiskey.

Image:Mercure orbite precession.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_orbite_precession.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Dhenry; Original uploader was Dhenry at fr.wikipedia

Image:Mercury's orbital resonance.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury's_orbital_resonance.svg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Tos, converted to SVG from PNG. Original author: Worldtraveller

image:PIA12366 modest.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA12366_modest.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Paoloo31

Image:Rupes discovery.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Rupes_discovery.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User:Lotse

Image:mercure fausses couleurs.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_fausses_couleurs.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bryan Derksen, CWitte, Delian, Lotse, TheDJ, 1 modifications anonymes

Image:Mercure plaine lisse.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_plaine_lisse.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bryan Derksen, CWitte, Delian, Lotse, 1 modifications anonymes

Image:Caloris basin mercury.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Caloris_basin_mercury.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Dhenry at fr.wikipedia

Image:Mercure carte schiaparelli.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_carte_schiaparelli.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bilou, Bryan Derksen, CWitte, Marcok, Rursus

Image:Mercure carte lowell.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_carte_lowell.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bryan Derksen, CWitte, Jodo, Rursus

Image:Mercure carte antoniadi.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_carte_antoniadi.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Dhenry at fr.wikipedia

Image:Mariner10.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mariner10.gif> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Messenger mercury 1st flyby.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Messenger_mercury_1st_flyby.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Fichier:Venuspioneeruv.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venuspioneeruv.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Venus clouds Galileo Color PIA00124.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_clouds_Galileo_Color_PIA00124.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:PIA00072.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA00072.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech

Image:Map of Venus.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Map_of_Venus.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA Ames Research Center, U.S Geological Survey and Massachusetts Institute of Technology

Fichier:Venus dome 3D.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_dome_3D.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bryan Derksen, ComputerHotline, Crux, Lotse, Ruslik0, Rémihi, TheDJ

Image:The_Moon,_Mars_and_Venus.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_Moon,_Mars_and_Venus.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution 2.0 *Contributeurs:* Badseed, ComputerHotline, Crux, FlickrLickr, FlickreviewR, MBisanz, Para, Rentier

Image:TerraformedVenus.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:TerraformedVenus.jpg> *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Original uploader was Ittiz en.wikipedia

Image:Terrestrial planet size comparisons_edit.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Terrestrial_planet_size_comparisons_edit.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Jack · talk .

Fichier:Venus clouds Galileo PIA00221.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_clouds_Galileo_PIA00221.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Fotla Corona PIA00202.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Fotla_Corona_PIA00202.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/Magellan probe

Fichier:Venus pentagramm.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_pentagramm.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs:* CWitte

Fichier:Solar Life Cycle-fr.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_Life_Cycle-fr.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Solar_Life_Cycle.svg: Oliverbeatson derivative work: Pethrus (talk)

Fichier:Earth-crust-cutaway-french.svg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earth-crust-cutaway-french.svg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* ComputerHotline

Fichier:Tectonic plates (empty).svg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Tectonic_plates_\(empty\).svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Tectonic_plates_(empty).svg) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Dbenbenn, Denys, JorisvS, KJG2007, Santosa, Sting, Ævar Arnfjörð Bjarmason

Fichier:A Yool topography 15min.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:A_Yool_topography_15min.png *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 *Contributeurs:* Plumbago

Fichier:Earth elevation histogram fr.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earth_elevation_histogram_fr.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Lamiot, remade (translation to french) from English Wikipedia, made by User: 17:22, 15 July 2007

Fichier:MODIS Map.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:MODIS_Map.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Marit Jentoft-Nilsen

Fichier:Full moon partially obscured by atmosphere.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Full_moon_partially_obsured_by_atmosphere.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Structure de la magnétosphère.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Structure_de_la_magnétosphère.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original bitmap from w:NASANASA. SVG rendering by w:User:AkaaseAaron Kaase. French translation by William Crochet.

Fichier:Oblique plan ecliptique.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Oblique_plan_ecliptique.png *Licence:* Creative Commons Attribution 3.0 *Contributeurs:* derivative work: Daelomin53 (talk) AxialTiltObliquity.png: Dna-webmaster

Fichier:236084main MilkyWay-full-annotated.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:236084main_MilkyWay-full-annotated.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech/R. Hurt

Fichier:The Earth and the Moon photographed from Mars orbit.jpg *Source:*

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_Earth_and_the_Moon_photographed_from_Mars_orbit.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech/University of Arizona

Fichier:Earth-Moon2.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earth-Moon2.jpg> *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Bryan Derksen, Objix, Orion 8, Samuli, Santosga, Saperaud, Sertion, 5 modifications anonymes

Image:Continents vide couleurs.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Continents_vide_couleurs.png *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* User:Cogito ergo sumo

Image:Earthlights dmsp.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earthlights_dmsp.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Data courtesy Marc Imhoff of NASA GSFC and Christopher Elvidge of NOAA NGDC. Image by Craig Mayhew and Robert Simmon, NASA GSFC.

Image:Northwest coast of United States to Central South America at Night.ogv *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Northwest_coast_of_United_States_to_Central_South_America_at_Night.ogv *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Crew Earth Observations team at Johnson Space Center

Image:Mars-Schiaparelli.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars-Schiaparelli.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* USGS

Fichier:Mars Earth Comparison.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Earth_Comparison.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Edward, RHorning, Sebman81, Tony Wills, Urhixidur

Fichier:Astronomical opposition schema.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Astronomical_opposition_schema.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs:* Stanlekub, W!B:

Fichier:Min-dist-earth-mars.svg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Min-dist-earth-mars.svg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Share Alike *Contributeurs:* own work.

Fichier:Victoria Crater, Cape Verde-Mars.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Victoria_Crater,_Cape_Verde-Mars.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Mars en:Opportunity rover

Fichier:MGS MOC Wide Angle Map of Mars PIA03467.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:MGS_MOC_Wide_Angle_Map_of_Mars_PIA03467.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/MSSS

Fichier:MarsTopoMap-PIA02031 modest.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:MarsTopoMap-PIA02031_modest.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech

Fichier:MarsSunsetCut.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:MarsSunsetCut.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Mars atmosphere.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_atmosphere.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Alkuin at de.wikipedia

Image:Ice Clouds in Martian Arctic.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ice_Clouds_in_Martian_Arctic.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University

Image:Victoria clouds.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Victoria_clouds.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU/Texas A&M/Navigation camera

Fichier:Marsdustdevil2.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Marsdustdevil2.gif> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Martian Dust Devil Trails.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Martian_Dust_Devil_Trails.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/University of Arizona

Fichier:Mars sky at noon PIA01546.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_sky_at_noon_PIA01546.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL-Caltech Original uploader was Curps at en.wikipedia

Fichier:Mars sunset PIA01547.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_sunset_PIA01547.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Curps at en.wikipedia

Fichier:Mars duststorm.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_duststorm.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Cycle Saisons Martiennes.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Cycle_Saisons_Martiennes.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2,5,2,0,1,0 *Contributeurs:* Who killed Bambi ?

Fichier:Mars NPArea-PIA00161 modest.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_NPArea-PIA00161_modest.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/USGS

Fichier:Mars pits 1999.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_pits_1999.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Mars Crustal Magnetism MGS.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Crustal_Magnetism_MGS.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Oceanic.Stripe.Magnetic.Anomalies.Scheme.fr.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Oceanic.Stripe.Magnetic.Anomalies.Scheme.fr.gif> *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* derivative work: Who killed Bambi ? (talk) Oceanic.Stripe.Magnetic.Anomalies.Scheme.gif: Kurgus

Fichier:Olympus Mons.jpeg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Olympus_Mons.jpeg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Hurricanehink, Kanonkas, PDCA, TheDJ, Ævar Arnfjörð Bjarmason, 4 modifications anonymes

Fichier:Chronologie Volcanisme Martien.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Chronologie_Volcanisme_Martien.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* Who killed Bambi ?

Image:Rocher El Capitan vu par PanCam Opportunity sur Mars.jpg *Source:*

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Rocher_El_Capitan_vu_par_PanCam_Opportunity_sur_Mars.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Almak at fr.wikipedia

Fichier:Nasa mars opportunity rock water 150 eng 02mar04.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Nasa_mars_opportunity_water_150_eng_02mar04.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/US Geological Survey

Image:Mars rocks.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_rocks.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL

Image:PIA08440-Mars Rover Spirit-Volcanic Rock Fragment.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA08440-Mars_Rover_Spirit-Volcanic_Rock_Fragment.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Mib color1 rgbsstretch-B011R1_br.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mib_color1_rgbsstretch-B011R1_br.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/USGS

Fichier:Hematite grise sur Mars sonde Mars Global Surveyor cor.jpg *Source:*

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hematite_grise_sur_Mars_sonde_Mars_Global_Surveyor_cor.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Utilisateur:Céréales Killer

Fichier:Hematite new-B011R1_th543h.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hematite_new-B011R1_th543h.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/Arizona State University/Cornell

Fichier:Martian Methane Map.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Martian_Methane_Map.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Michael Mumma, Trent Schindler/NASA

Fichier:Solarnebula.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solarnebula.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Angusmcellan, Qbek, Ruslik0

Fichier:History of water on Mars.jpeg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:History_of_water_on_Mars.jpeg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Chmee2, DragonFire1024, Yakuza1, Zoz, 4 modifications anonymes

Image:Mars Potentialy Lake (resized)- Multinational Research in the Southern Hemisphere (Released 22 April 2004).png Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Potentialy_Lake_(resized)_-_Multinational_Research_in_the_Southern_Hemisphere_(Released_22_April_2004).png Licence: Public Domain Contributeurs: Christensen, P.R., N.S. Goresick, G.L. Mehall, and K.C. Murray, THEMIS Public Data Releases, Planetary Data System node, Arizona State University

Image:163914main_PIA09028_a-516.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:163914main_PIA09028_a-516.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA

Fichier:Newton Crater flows.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Newton_Crater_flows.jpg Licence: inconnu Contributeurs: -

Fichier:PSP_007769_9010_IRB_Stickney.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PSP_007769_9010_IRB_Stickney.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/University of Arizona

Fichier:Phobos colour 2008.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Phobos_colour_2008.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona

Fichier:Deimos-MRO.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Deimos-MRO.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL-caltech/University of Arizona

Fichier:Kepler Mars retrograde.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Kepler_Mars_retrograde.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: CarolSpears, Frank C. Müller, Nichalp, Ragesoss, Roomba, Ruslik0, SteveMcCluskey

Fichier:Karte Mars Schiaparelli MKL1888.png Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Karte_Mars_Schiaparelli_MKL1888.png Licence: Public Domain Contributeurs: unkown

Image:Flag of the Soviet Union.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_the_Soviet_Union.svg Licence: Public Domain Contributeurs: A1, Ahmadi, Alex Smotrov, Alvis Jean, Art-top, BagnoHax, Brandmeister, Denniss, ELeschev, Endless-tripper, EugeneZelenko, F l a n k e r, Fred J, Fry1989, G.dallorto, Garynsmon, Herbythyme, Homo lupus, Jake Wartenberg, MaggotMaster, Ms2ger, Nightstallion, Pianist, R-41, Rainforest tropicana, Sebyugez, Solbris, Storkk, Str4nd, Tabasco, ThomasPusch, Toben, Twilight Chill, Xgeorg, Zscout370, Серп, Тоны4, 59 modifications anonymes

Image:Flag of the United States.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_the_United_States.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Dbenbenn, Zscout370, Jacobolus, Indolences, Technion.

Image:Flag of the United Kingdom.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_the_United_Kingdom.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Original flag by James I of England/James VI of ScotlandSVG recreation by User:Zscout370

Image:Flag of Japan.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_Japan.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Various

Fichier:Mariner_3_and_4.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mariner_3_and_4.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA

Fichier:Opportunity in Endurance Crater.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Opportunity_in_Endurance_Crater.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Bryan Derksen, Li-sung, Ruslik0

Fichier:Flag of Europe.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_Europe.svg Licence: Public Domain Contributeurs: User:Verdy p, User:-xfi-, User:Paddu, User:Nightstallion, User:Funakoshi, User:Jeltz, User:Dbenbenn, User:Zscout370

Image:Flag of Russia.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_Russia.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Zscout370

Image:Flag of the People's Republic of China.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Flag_of_the_People's_Republic_of_China.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Drawn by User:SKopp, redrawn by User:Deneison83 and User:Zscout370 Recode by cs:User:-xfi- (code), User:Shizhao (colors)

Image:Martian face viking cropped.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Martian_face_viking_cropped.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Viking 1, NASA

Image:Mars face.png Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_face.png Licence: Public Domain Contributeurs: NASA / JPL / Malin Space Science Systems

Fichier:Mars symbol.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_symbol.svg Licence: Public Domain Contributeurs: , redesigned by

Image:Gas planet size comparisons.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gas_planet_size_comparisons.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Solar System Exploration, NASA

Image:Jupiter interior.png Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_interior.png Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/R.J. Hall

Image:Saturn.Aurora.HST.UV-Vis.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn.Aurora.HST.UV-Vis.jpg Licence: Public domain Contributeurs: Kurgus, Lars Lindberg Christensen, Martin H., Ruslik0, 2 modifications anonymes

Image:Neptune rings PIA02224.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_rings_PIA02224.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Courtesy NASA/JPL-Caltech

Image:Jupiter symbol.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_symbol.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Lexicon

Image:Jupiter.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/USGS

Fichier:Jupiter et la Terre en grandeurs relatives.png Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_et_la_Terre_en_grandeurs_relatives.png Licence: GNU Free Documentation License Contributeurs: user:gene.arbott

Image:PIA04866 modest.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA04866_modest.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/Space Science Institute

Image:790106-0203 Voyager 58M to 31M reduced.gif Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:790106-0203_Voyager_58M_to_31M_reduced.gif Licence: Public Domain Contributeurs: NASA

Image:Jupiter from Voyager 1.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_from_Voyager_1.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA, Caltech/JPL

Image:PIA02863 - Jupiter surface motion animation.gif Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA02863_-_Jupiter_surface_motion_animation.gif Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/University of Arizona

Image:PIA01627 Ringe.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA01627_Ringe.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/Cornell University

Image:PIA04433 Jupiter Torus Diagram.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA04433_Jupiter_Torus_Diagram.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Bricktop, Mdd, Ruslik0

Image:Jupiter.Aurora.HST.UV.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter.Aurora.HST.UV.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Anime Addict AA, Bapho, Borrow-188, ComputerHotline, FoeNyx, Friendlystar, Kurgus, Newone, RupertMillard, Ruslik0, Türelö, Überraschungsbilder, 6 modifications anonymes

Image:Jupitermoon.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupitermoon.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/DLR

Image:Jupiter.moons1.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter.moons1.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Bricktop, ComputerHotline, Edward, Hellisp, Jacklee, Urhixidur

Image:Asteroid Belt.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Asteroid_Belt.svg Licence: Public Domain Contributeurs: my own work derived from NASA's image.

Image:Jupitersatelliteimpact.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupitersatelliteimpact.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Bricktop, Friendlystar, Gentgeen, LeaMaimone, Ruslik0

Image:voyager2.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Voyager2.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Bomazi, Loveless, Pline, Zscout370

Image:Jupiter-14-03-2004.jpeg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter-14-03-2004.jpeg Licence: GNU Free Documentation License Contributeurs: Rochus Hess

Image:Jupiter_et_satellites_20090822.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_et_satellites_20090822.jpg Licence: Creative Commons Attribution 3.0 Contributeurs: ONC (Olivier Huet)

Image:Retrogadation1.png Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Retrogadation1.png Licence: Public Domain Contributeurs: WIB

Image:Saturn symbol.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn_symbol.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Lexicon

Image:Saturn during Equinox.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn_during_Equinox.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/Space Science Institute

Fichier:Rotatingsaturnhexagon.gif Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Rotatingsaturnhexagon.gif Licence: Public Domain Contributeurs: NASA

Fichier:Saturn-map-fr.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn-map-fr.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Korrigan, Nono314

Fichier:Saturn during Equinox.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn_during_Equinox.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/Space Science Institute

Fichier:Saturn (planet) large.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn_(planet)_large.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: Voyager 2

Fichier:Saturn eclipse.jpg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn_eclipse.jpg Licence: Public Domain Contributeurs: NASA/JPL/Space Science Institute

Image:Uranus symbol.svg Source: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_symbol.svg Licence: Public Domain Contributeurs: Lexicon

Image:Uranus.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Uranusandrings.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranusandrings.jpg> *Licence:* Public domain *Contributeurs:* Hubble Space Telescope - NASA Marshall Space Flight Center

Image:Uranian rings PIA01977 modest.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranian_rings_PIA01977_modest.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Uranus rings and moons.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_rings_and_moons.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bobdoe, Bricktop, Duebbers, Ruslik0, 2 modifications anonymes

Image:Uranus thumb.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_thumb.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Loveless, Ruslik0

Image:Neptune symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Amit6

Image:Neptune.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* .

Fichier:Neptune symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Amit6

Fichier:Neptune symbol alternate.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_symbol_alternate.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Francois Arago

Fichier:Neptune storms.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_storms.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Voyager 2 Team

Licence

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)