

astronomie 1

systeme solaire

Contenus

Articles

Système solaire	1
Soleil	25
Mercure (planète)	43
Vénus (planète)	64
Terre	79
Mars (planète)	101
Jupiter (planète)	146
Saturne (planète)	163
Uranus (planète)	172
Neptune (planète)	190
Pluton (planète naine)	208
Astéroïde	225
Comète	235

Références

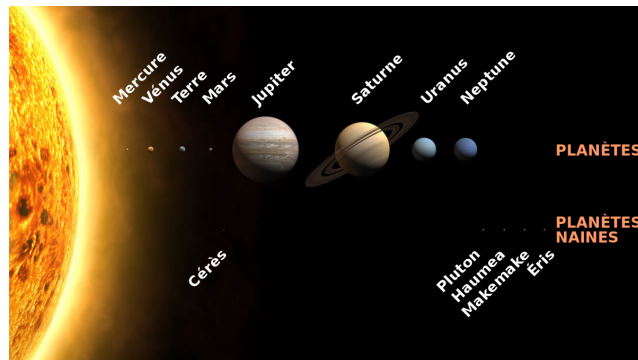
Sources et contributeurs de l'article	245
Source des images, licences et contributeurs	248

Licence des articles

Licence	255
---------	-----

Système solaire

Système solaire



Planètes et planètes naines déclarées du Système solaire. Les dimensions des objets sont à l'échelle. Les distances au Soleil, elles, ne sont pas à l'échelle.

Caractéristiques générales

Âge	4,568 Ga
Localisation	Nuage interstellaire local, Bulle locale, Bras d'Orion, Voie lactée
Masse du système	$1,9919 \times 10^{30}$ kg (1,0014 M _☉)
Étoile la plus proche	Proxima Centauri (4,22 al), système Alpha Centauri (4,37 al)
Système planétaire le plus proche	Système Alpha Centauri (4,37 al)
Système	
Demi-grand axe de la planète la plus extérieure (Neptune)	$4,503 \times 10^9$ km (30,10 ua)
Étoiles	1 : le Soleil
Planètes	8 : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune
Planètes naines	5 (UAI) : Cérès, Pluton, Hauméa, Makémaké et Éris ; des centaines de candidats supplémentaires
Nb. de satellites naturels connus	près de 600 dont au moins 220 confirmés (173 de planètes [+ > 150 lunes mineures non-confirmées], 8 de planètes naines et 247 de petits corps [dont au moins une quarantaines nommés et/ou avec désignation provisoire])
Nb. de petits corps répertoriés	636 352 (au 12 février 2014) ^[1] 636 964 (au 12 février 2014)
• dont astéroïdes et assimilés	632 567 ^[2] (au 12 février 2014) ^[1] 633 712 dont 385 184 numérotés (au 12 février 2014)
• dont comètes	3 785 (au 12 février 2014) 3 252 dont 364 numérotés (au 12 février 2014)
Nb. de satellites ronds identifiés	19
Orbite autour du centre galactique	
Inclinaison du plan invariable par rapport au plan galactique	60,19° (écliptique)
Distance du centre galactique	(27 000 ± 1 000) al

Vitesse orbitale	220 km/s
Période orbitale	225–250 Ma
Propriétés liées à la (aux) étoile(s)	
Type spectral	G2V
Distance de la ligne des glaces	≈ 5 ua
Distance de la falaise de Kuiper	≈ 50 ua
Distance du choc terminal	≈ 75 ua
Distance de l'héliopause	≈ 120 ua
Rayon de la sphère de Hill	≈ 1–2 al
modifier ^[3] 	

Le **Système solaire** est un système planétaire composé d'une étoile, le Soleil, et des objets célestes définis gravitant autour de lui (autrement dit, *notre* système planétaire) : les huit planètes et leurs 175 satellites naturels connus^[4] (appelés usuellement des « lunes »), les cinq planètes naines, et les milliards de petits corps (astéroïdes, objets glacés, comètes, poussière interplanétaire, *etc.*).

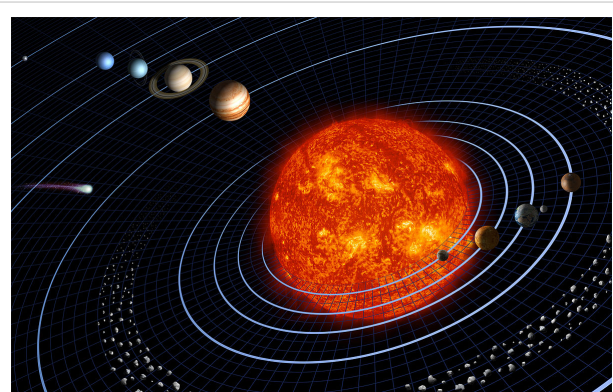
De façon schématique, le Système solaire est composé du Soleil, de quatre planètes telluriques internes, d'une ceinture d'astéroïdes composée de petits corps rocheux, quatre planètes géantes (deux géantes gazeuses et deux géantes glacées) externes et une seconde ceinture appelée ceinture de Kuiper, composée d'objets glacés. Ensuite vient l'héliopause, limite magnétique du

Système solaire définie par l'arrêt des vents solaires (ils deviennent plus faibles que le vent galactique). Bien au-delà se trouve une sphère d'objets épars, nommée suivant la théorie avancée par Jan Oort, le nuage d'Oort. La limite gravitationnelle du Système solaire, elle, se situe bien plus loin, jusqu'à 1 ou 2 années-lumière du Soleil.

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. Toutes ces planètes hormis les deux plus proches du Soleil possèdent des satellites en orbite et chacune des quatre planètes externes est entourée d'un anneau planétaire de poussière et d'autres particules. Toutes les planètes, y compris la Terre, portent des noms de dieux et déesses de la mythologie romaine.

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 Makémaké et Hauméa, 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 classifiées comme plutoïdes.

Par extension, et de façon impropre, l'expression « système solaire » est parfois 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 la Lune, et Mars. Une comète est également représentée sur la gauche.

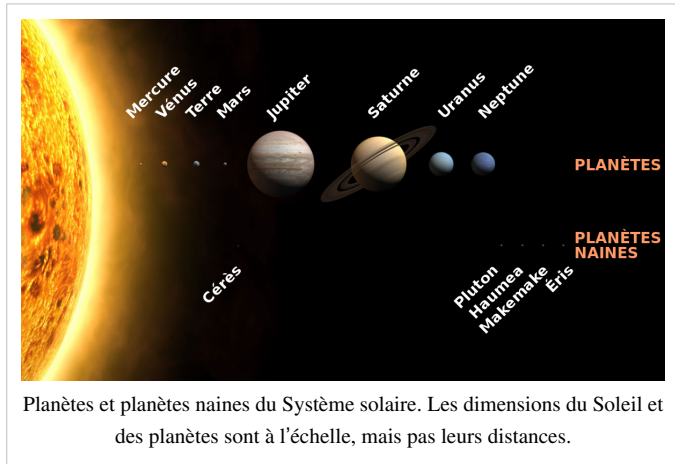
Terminologie

Depuis la décision prise le 24 août 2006 par l'Union astronomique internationale, les objets ou corps orbitant directement autour du Soleil sont officiellement divisés en trois classes : planètes, planètes naines et petits corps.

- Une planète est un corps en orbite autour du Soleil, suffisamment massif pour avoir une forme sphérique et avoir nettoyé son voisinage immédiat de tous les objets plus petits. On connaît huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- Une planète naine est un corps en orbite autour du Soleil qui, bien que suffisamment massif pour avoir une forme sphérique, n'a pas fait place nette dans son voisinage. En septembre 2008, cinq corps étaient officiellement désignés de la sorte : Cérès, Pluton, Éris, Makémaké et Hauméa. D'autres corps pourraient l'être dans le futur, tels que Sedna, Orcus ou encore Quaoar.
- Tous les autres objets en orbite directe autour du Soleil sont classés comme petits corps du Système solaire.

Les satellites naturels, aussi appelés lunes, sont les objets en orbite autour des planètes, des planètes naines et des petits corps du Système solaire plutôt qu'autour du Soleil. Les statuts de Charon et de la Lune sont, en se basant sur ces définitions, ambigus, et ne sont d'ailleurs pas encore définitivement tranchés, bien que ces corps soient toujours classés respectivement comme satellites de la Terre et Pluton.

Toutefois, cette décision de l'Union astronomique internationale est loin de faire l'unanimité. À la suite du vote, une pétition ayant réuni en cinq jours les signatures de plus de 300 planétologues et astronomes majoritairement américains (Pluton ayant été la première planète découverte par un Américain) a été lancée pour contester la validité scientifique de la nouvelle définition de planète qui déclassait Pluton ainsi que son mode d'adoption et inviter à la réflexion sur une autre définition plus appropriée^[5]. Catherine Cesarsky, présidente de l'UAI, clôt le débat en décidant que l'assemblée de l'UAI d'août 2009 ne reviendrait pas sur la définition de planète^[6].



Représentation artistique du Système solaire.

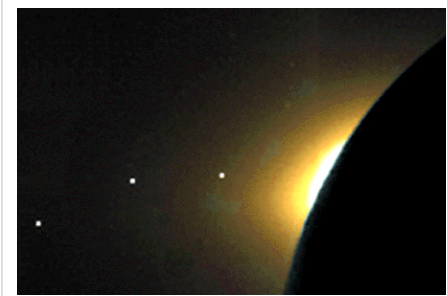
Structure

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. Jupiter et Saturne, les deux objets les plus massifs 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.

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.



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.



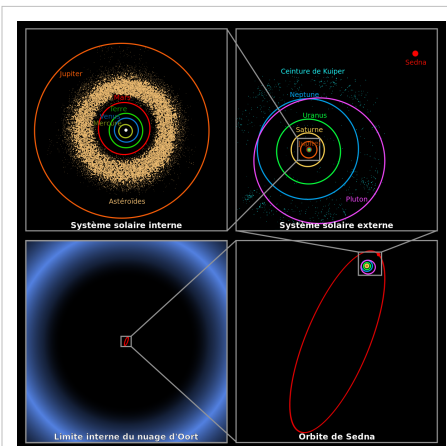
Si la distance Soleil-Neptune a été réduit à la longueur d'un terrain de football, le Soleil serait de deux tiers du diamètre d'une balle de golf, et les géantes gazeuses tout serait inférieur à un culot BB, avec les planètes telluriques chaque étant plus petite que la bille contenue à la pointe d'un stylo à bille. Les planètes seraient situés près des lignes: 1, 2, 3, 5, 17, 32, 64 et 100.

Comparaison à l'échelle des diamètres du Soleil, de ses planètes (du plus grand au plus petit). Distances mises à l'échelle d'un terrain de football.

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 ; d'autres séparent la région au-delà de Neptune des quatre géantes gazeuses.

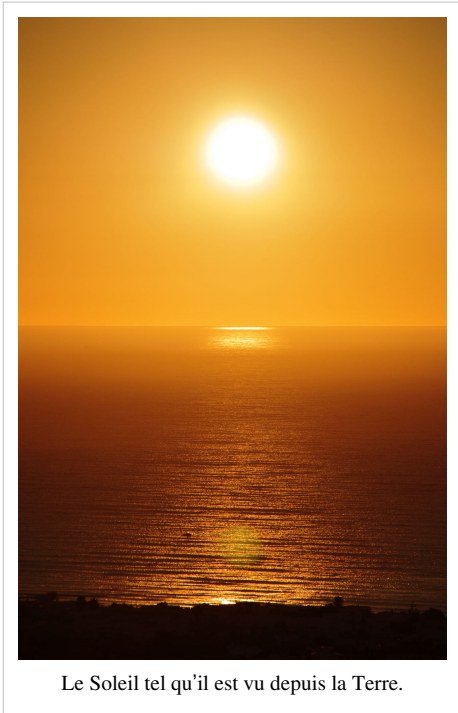


Les orbites des principaux corps du Système solaire, à l'échelle.

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.

Soleil

Article détaillé : Soleil.



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. 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 environ 627 millions de tonnes d'hydrogène^[7] en 623,6 millions de tonnes d'hélium. Cette masse que le Soleil perd vient simplement du fait qu'un noyau d'hélium produit a une masse inférieure à celle des quatre noyaux d'hydrogène ayant servi à le fabriquer. La puissance rayonnée par le Soleil dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, environ 4×10^{26} watts, n'est autre que celle qui correspond à ce différentiel de 3,4 millions de tonnes par seconde.

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.

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, soit l'équivalent de 3 fois la masse de Jupiter. Il devient progressivement plus brillant : au début de son histoire, sa luminosité était inférieure d'un bon tiers de celle d'aujourd'hui.

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. 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. 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 accréation de « métaux ».

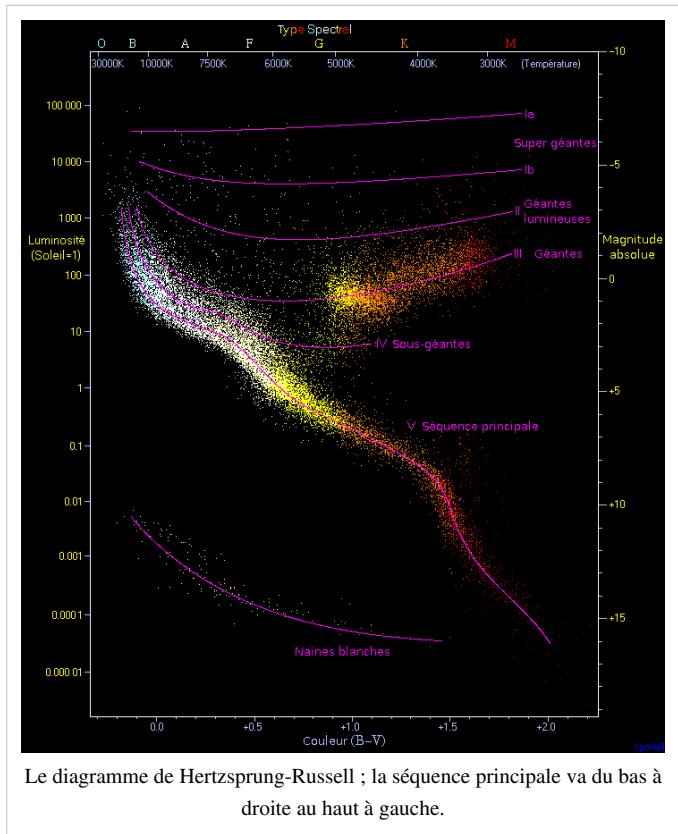
Milieu interplanétaire

Article détaillé : 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, 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. 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.



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

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. 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.

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. La deuxième s'étend de 10 à 40 UA et fut probablement créée lors de collisions similaires dans la ceinture de Kuiper.

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-mercurienne

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

Article détaillé : Planète tellurique.

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 12 756 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.

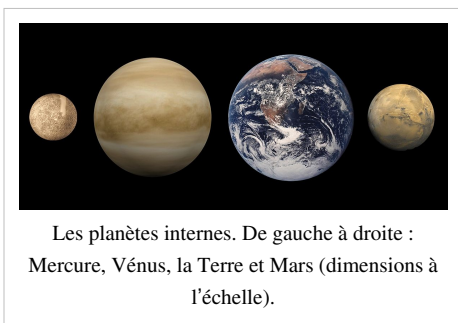
Mercure

Article détaillé : Mercure (planète).

Mercure est la planète la plus proche du Soleil (0,4 UA), ainsi que la plus petite (4 900 km de diamètre) et la moins massive, plus du vingtième de la masse terrestre (0,055 masse terrestre). 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



Une aurore australe vue depuis l'orbite terrestre.



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

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^[8]. L'atmosphère de Mercure, quasiment inexistante, est formée d'atomes arrachés à sa surface par le vent solaire, 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^{[9],[10]}. 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.

Vénus

Article détaillé : Vénus (planète).

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. Vénus ne possède aucun satellite. 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. 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 réalimentée régulièrement par des éruptions volcaniques. Sa période de révolution est d'environ 225 jours. Sa période de rotation est de 243 jours.

Terre

Article détaillé : 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 hydrosphère 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. 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 ce qui explique aussi que la période de rotation soit si courte (~24h). La période de révolution de la Terre, c'est-à-dire la durée de l'année, est d'environ 365,25 jours.

Mars

Article détaillé : Mars (planète).

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. Elle possède une atmosphère ténue, principalement composé de dioxyde de carbone et une surface désertique 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. 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. Ces structures géologiques montrent des signes d'une activité géologique voire hydraulique qui a peut-être persisté jusqu'à récemment. Mars possède deux petits satellites naturels (Déimos et Phobos), probablement des astéroïdes capturés.

Ceinture d'astéroïdes

Article détaillé : Ceinture d'astéroïdes.

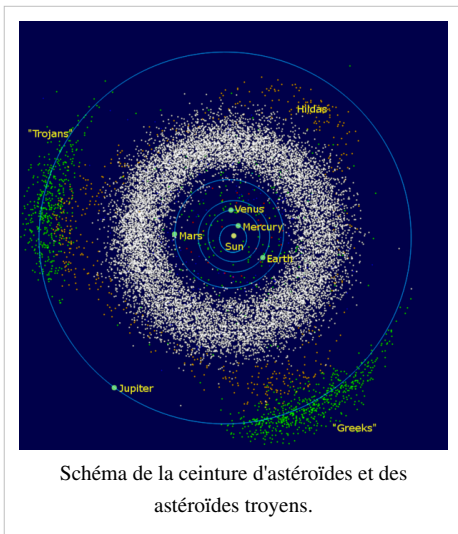


Schéma de la ceinture d'astéroïdes et des astéroïdes troyens.

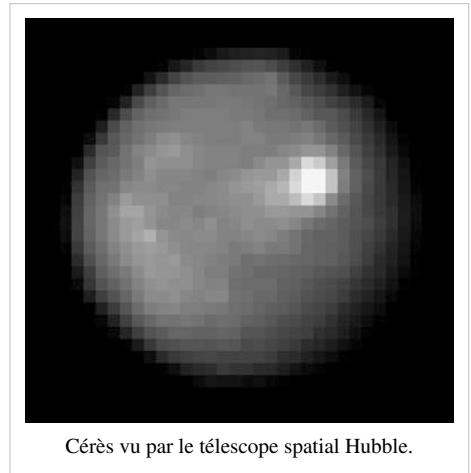
Les astéroïdes sont principalement de petits corps du Système solaire composés de roches et de minéraux métalliques non volatils. La ceinture d'astéroïdes occupe une orbite située entre Mars et Jupiter, à une distance comprise entre 2,3 et 3,3 UA du Soleil. On pense qu'il s'agit de restes du Système 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. Malgré ceci, la masse totale de la ceinture ne dépasse probablement pas un millième de celle de la Terre. 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.

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 1 000 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. Il fut également classifié comme planète naine depuis 2006 (tout en gardant son statut d'astéroïde défini de façon totalement indépendante).



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 d'où pourrait provenir l'eau terrestre.

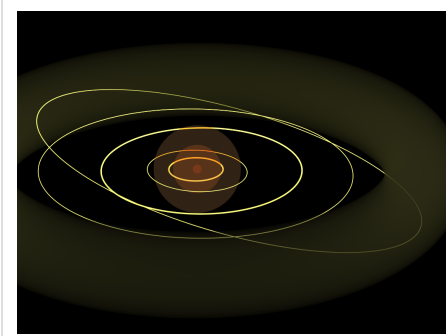
Le Système solaire interne est également constellé d'astéroïdes situés en dehors de la ceinture et dont l'orbite croise éventuellement celle des planètes telluriques.

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.



Le Système solaire externe comparé à trois étoiles.

Planètes externes

Article détaillé : Géante gazeuse.

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 ». 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

Article détaillé : Jupiter (planète).

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 67 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. Ganymède, le plus gros satellite du Système solaire, est plus grand que Mercure.

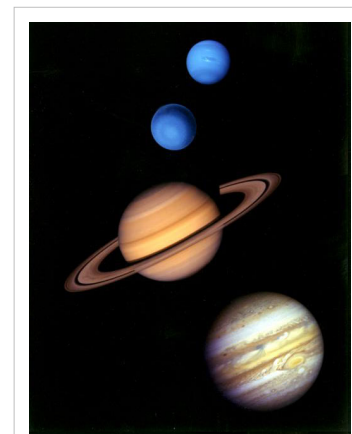
Sa période de révolution est d'environ 12 ans et sa période de rotation est de 9 h 55 min 27,3 s

Saturne

Article détaillé : Saturne (planète).

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^[11] ; deux d'entre eux, Titan et Encelade, présentent des signes d'activité géologique, essentiellement du cryovolcanisme. 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 et sa période de rotation est de 10 h 47 min 6 s.



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

Uranus

Article détaillé : Uranus (planète).

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. 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

Article détaillé : Neptune (planète).

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. Neptune possède 14 satellites connus. Le plus grand, Triton, est géologiquement actif et présente des geysers d'azote liquide. Triton est le seul grand satellite placé sur une orbite rétrograde.

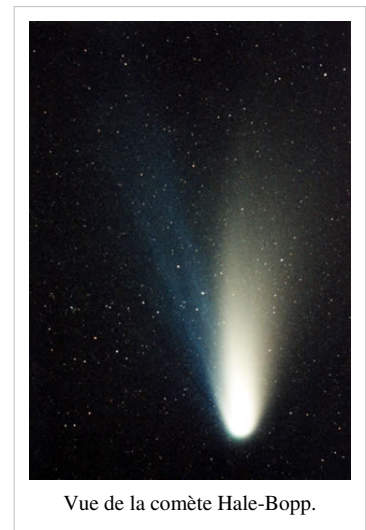
Sa période de révolution est d'environ 164 ans.

Comètes

Article détaillé : Comète.

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) parcourent 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. Les vieilles comètes qui ont perdu la plupart de leurs composés volatils sont souvent considérées comme des astéroïdes.



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. Le premier centaure découvert, Chiron, fut considéré comme une comète puisqu'il développait une queue cométaire. Certains astronomes classent les centaures comme des objets de la ceinture de Kuiper internes épars, des équivalents des objets épars externes.

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

Article détaillé : Objet transneptunien.

La zone au-delà de Neptune, souvent appelée région transneptunienne, est toujours largement inexploree. 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

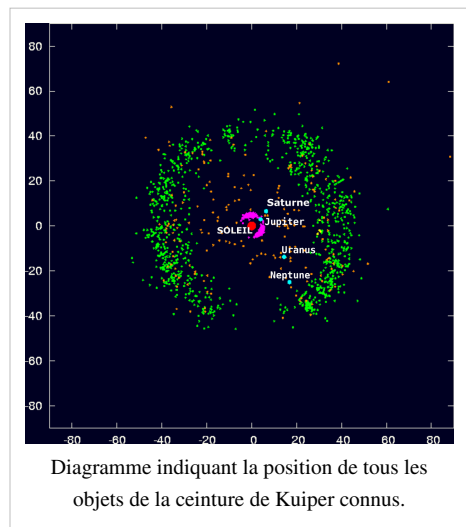
Article détaillé : Ceinture de Kuiper.

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 100 000 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. 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. Les membres de cette ceinture classique sont appelés cubewanos, d'après le premier objet de ce genre à avoir été découvert, (15760) 1992 QB₁.



Pluton et Charon

Pluton

Article détaillé : Pluton (planète naine).

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

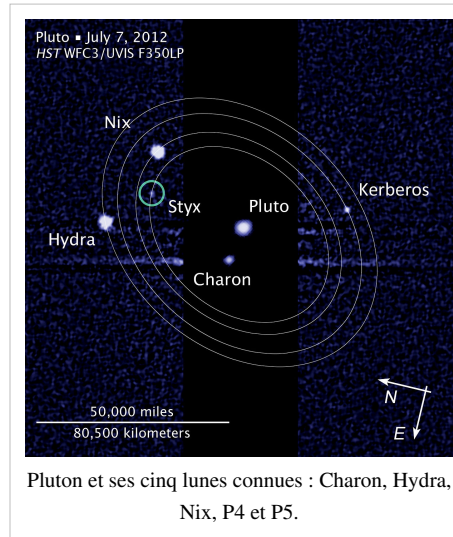
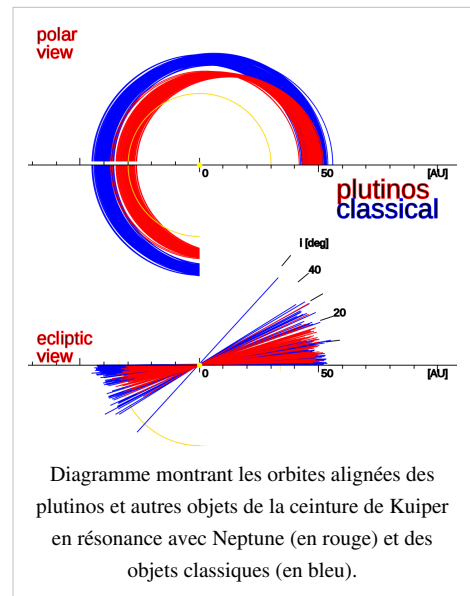
Article détaillé : Charon (lune).

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. Quatre autres petites lunes, Nix, Hydra, Kerberos et Styx, orbitent le couple Pluton-Charon.

Pluton est en résonance orbitale 3:2 avec Neptune (la planète naine 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.

Objets épars

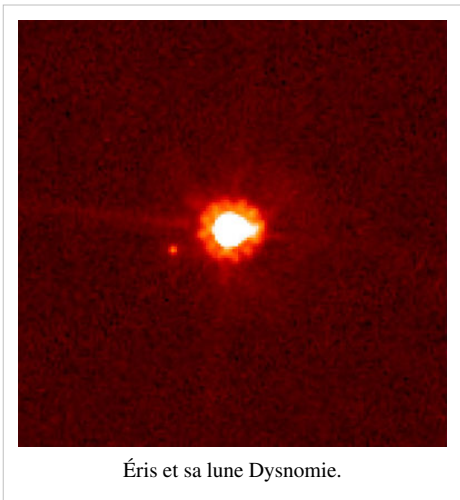
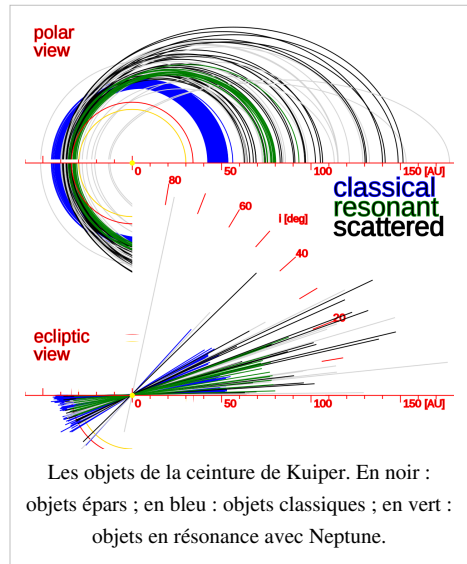
Article détaillé : Objet épars.



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 ».

Éris

Article détaillé : (136199) Éris.



Éris et sa lune Dysnomie.

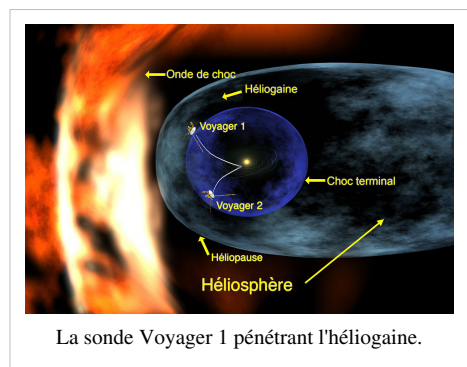
Éris (68 UA en moyenne) est le plus gros objet épars connu et a d'ailleurs provoqué une clarification du statut de planète à sa découverte, puisqu'il est au moins 5 % plus grand que Pluton (diamètre estimé de 2 400 km). Il possède une lune, Dysnomie. Comme Pluton, son orbite est fortement excentrique (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

Articles détaillés : Héliopause, Héliosphère et 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.



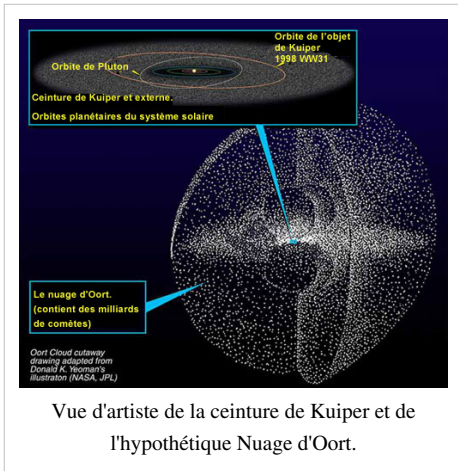
La sonde Voyager 1 pénétrant l'héliogaine.

La forme de l'héliopause est affectée par les interactions avec le milieu interstellaire, 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.

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.

Nuage de Hills et Nuage d'Oort

Articles détaillés : Nuage de Hills et Nuage d'Oort.



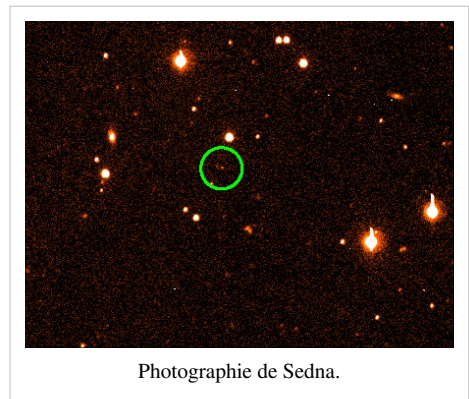
Vue d'artiste de la ceinture de Kuiper et de l'hypothétique Nuage d'Oort.

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 50 000 UA, peut-être même jusqu'à 154 000 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'.

Sedna et le nuage de Hills

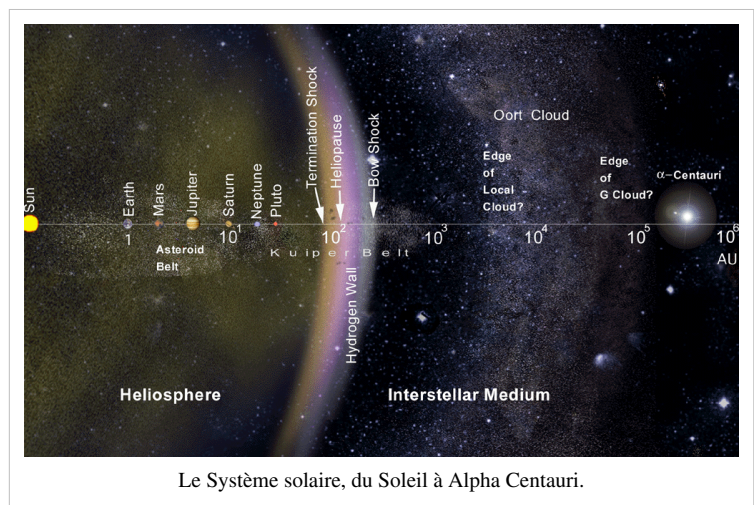
Sedna est un grand objet rougeâtre ressemblant à Pluton dont l'orbite très excentrique l'amène à 76 UA du Soleil au périhélie et à 928 UA à l'aphélie et qui prend 12 050 ans à être parcourue. Michael Brown, qui découvrit l'objet en 2003, a déclaré qu'il ne peut pas s'agir d'un objet épars car son périhélie 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. 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. Sedna est très probablement une planète naine, même si sa forme n'est pas connue avec certitude.



Photographie de Sedna.

Limites

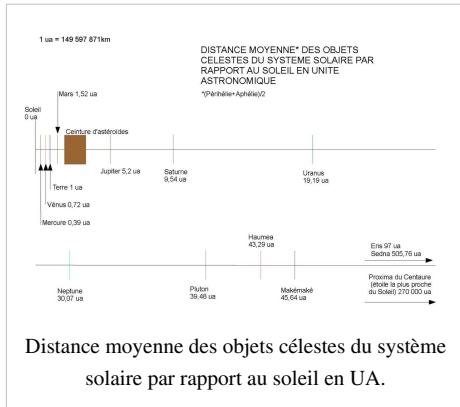
La limite entre le Système solaire et l'espace interstellaire n'est pas précisément définie. On pense que le vent solaire laisse la place au milieu interstellaire à quatre fois la distance entre Neptune et le Soleil. Cependant, la sphère de Hill du Soleil, c'est-à-dire sa zone d'influence gravitationnelle, s'étendrait plus de 1000 fois plus loin, jusqu'à plus de 2 années-lumières (la moitié de la distance à l'étoile la plus proche) ; des objets ont été détectés jusqu'à 154 202 ua (2,44 a.l.) avec C/1992 J1 (Spacewatch). Certaines comètes



Le Système solaire, du Soleil à Alpha Centauri.

ont une orbite calculée à une distance bien plus grande. C'est le cas de la comète C/2008 C1, qui d'après le site Jet Propulsion Laboratory de la NASA, affichait une distance de 312 174 ua (près de 5 a.l.), ce qui la situerait en-dehors du Système solaire. Cependant, la marge d'erreur des paramètres orbitaux est très importante et sa distance maximale du Soleil est très incertaine^[12]. 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.

Éléments orbitaux des planètes et planètes naines



Orbites des planètes et planètes naines du Système solaire

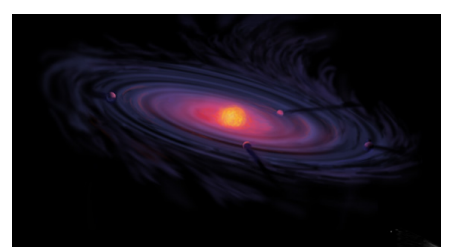
	Demi grand axe (UA)	Excentricité	Inclinaison (°)	Période (années)
Mercury	0,38710	0,205631	7,0049	0,2408
Vénus	0,72333	0,006773	3,3947	0,6152
Terre	1,00000	0,016710	0,00000	1,00000
Mars	1,52366	0,093412	1,8506	1,8808
Cérès planète naine	2,7665	0,078375	10,5834	4,601
Jupiter	5,20336	0,048393	1,3053	11,862
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

Articles détaillés : Formation et évolution du Système solaire, Évolution des étoiles et Nébuleuse solaire.

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 de Laplace. 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. 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. La présence d'une supernova à proximité d'un disque protoplanétaire étant fortement improbable (l'explosion chasse le gaz autour d'elle), une autre modélisation de l'environnement stellaire du Soleil primitif est proposée en 2012, à partir d'observations astronomiques d'étoiles jeunes, pour expliquer la présence d'isotopes radioactifs de l'aluminium ^{26}Al et du fer ^{60}Fe dans des inclusions météoritiques au tout début du Système solaire. En moins de 20 millions d'années, trois générations d'étoiles, formées par la compression du gaz à la suite d'ondes de choc produites par le vent solaire de supernovae selon le scénario du Little Bang, se seraient succédé dans un nuage moléculaire géant pour former le Système solaire.



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, avait un diamètre entre 7000 et 20 000 UA et une masse très légèrement supérieure à celle du Soleil (en excès de 0,001 à 0,1 masse solaire). 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. L'action de la gravité, de la pression gazeuse, des champs magnétiques et de la rotation aplatirent la nébuleuse en un disque protoplanétaire en rotation d'un diamètre d'environ 200 UA entourant une proto-étoile dense et chaude.

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. Ces disques s'étendent sur plusieurs centaines d'UA et n'atteignent qu'au plus un millier de kelvins^[13].

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.

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.

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) 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.

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.

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.

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 2×33 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

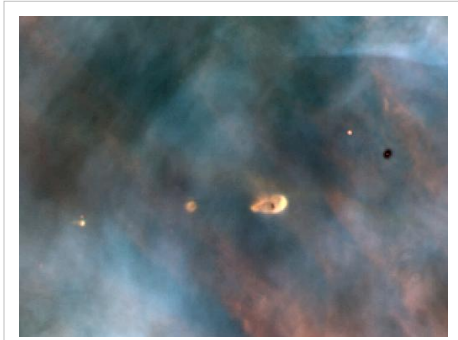


Image de disques protoplanétaires de la nébuleuse d'Orion prise par le télescope spatial Hubble ; cette « pépinière d'étoile » est probablement similaire à la nébuleuse primordiale à partir de laquelle s'est formé le Soleil.

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 100 000 années-lumière contenant 200 milliards d'étoiles. Le Soleil réside dans l'un des bras spiraux externes de la galaxie, le bras d'Orion, à entre 25 000 et 28 000 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.

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. Le Système solaire réside également en dehors des zones riches en étoiles autour du centre galactique.

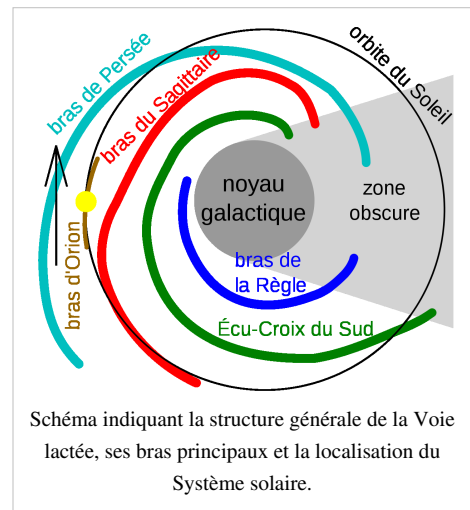
Près du centre, l'influence gravitationnelle des étoiles proches perturberait plus souvent le nuage d'Oort et propulserait plus de comètes vers le Système solaire interne, produisant des collisions aux conséquences potentiellement catastrophiques. Le rayonnement du centre galactique interférerait avec le développement de formes de vie complexes. 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 35 000 ans en émettant des morceaux de cœur stellaire vers le Soleil sous forme de poussières radioactives ou de corps ressemblant à des comètes.

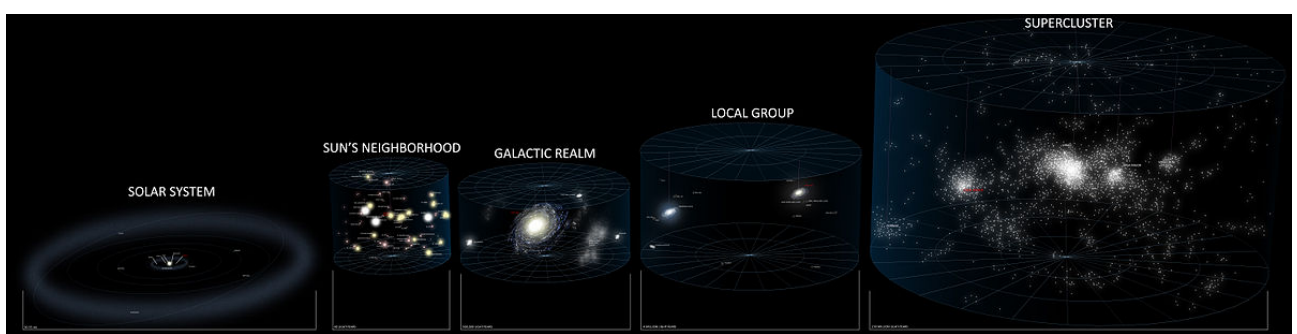
Actuellement, le Soleil se déplace en direction de l'étoile Véga.

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.

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 (B abritant d'ailleurs une planète), 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). 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. La plus proche exoplanète ressemblant à la Terre que l'on connaît, Gliese 581 c, est située à 20,4 années-lumière.





Série de cinq cartes montrant, de gauche à droite, notre position dans le Système solaire, le Système solaire parmi les étoiles du voisinage local, notre voisinage stellaire dans la Voie lactée, la Voie lactée dans le Groupe local de galaxies, et le Groupe local dans le Superamas de la Vierge.

Découverte et exploration

Observations pré-télescopiques

Articles détaillés : Géocentrisme et Héliocentrisme.

Le concept de Système solaire n'existait 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, 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 et la Lune, il s'agit des seuls membres du Système solaire connus avant les observations instrumentales.

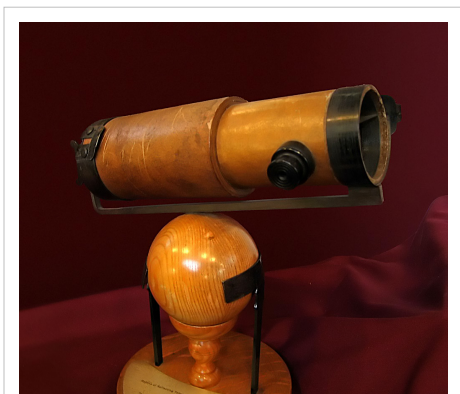
Observations instrumentales

Article détaillé : Chronologie de l'astronomie du Système solaire.

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. Christian Huygens poursuivit les découvertes de Galilée en découvrant Titan, le satellite de Saturne, et la forme des anneaux de cette planète. Jean-Dominique Cassini découvrit ensuite quatre autres lunes de Saturne, la division de Cassini dans ses anneaux et la grande tache rouge sur Jupiter.

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.

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.



Réplique du télescope d'Isaac Newton.

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 conduisit à leur reclassification comme astéroïdes.

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. 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.

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'.

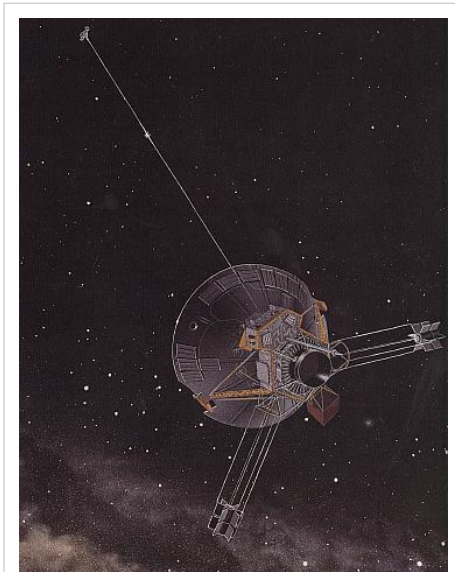
Mike Brown, Chadwick Trujillo et David L. Rabinowitz annoncèrent la découverte d'Éris en 2005, un objet épar plus grand que Pluton, et d'ailleurs le plus grand découvert en orbite autour du Soleil depuis Neptune.

Exploration spatiale

Article détaillé : Exploration du Système solaire.

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 43 400 km/h.

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. La NASA confirme officiellement le 12 septembre 2013, après analyse des données recueillies par la sonde, que *Voyager 1*, à plus de 18 milliards de kilomètres du Soleil, a quitté la zone d'influence directe de ce dernier, l'héliosphère (zone de prédominance magnétique, la sonde étant toujours dans la zone de prédominance gravitationnelle de notre étoile)^[14]. Elle se trouve désormais dans l'espace interstellaire.

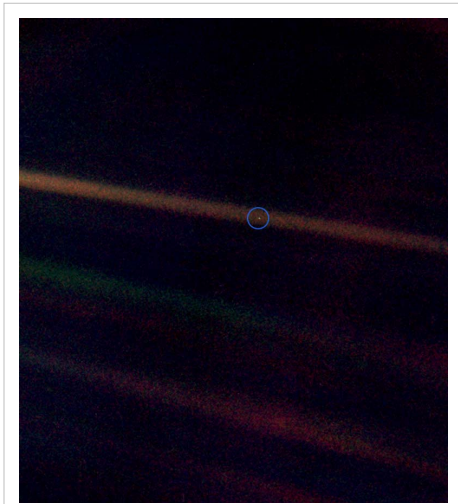
Aucun objet de la ceinture de Kuiper n'a encore été visité par une sonde, mais *New Horizons*, lancée le 19 janvier 2006, est en route pour cette région ; la sonde doit survoler Pluton en juillet 2015, ainsi que par la suite d'autres corps si cela s'avère possible.

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 en orbite autour de Mercure depuis le 18 mars 2011. *Dawn* devrait atteindre l'astéroïde (planétésimal) 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 (défini 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).

Sources

Références

- [1] *Minor Planet Center* (<http://www.minorplanetcenter.net/>), Union astronomique internationale. Consulté le 4 mars 2013.
- [2] Au , mineures répartis en :
- dans le Système solaire interne () :
 - de la ceinture principale
 - dans le Système solaire externe () :
 - et objets du disque épars
 - transneptuniens classiques
 - objets transneptuniens.
- [3] http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Syst%C3%A8me_solaire&action=edit§ion=0
- [4] Somme du nombre de satellites individuels pour chaque planète, d'après les pages concernées
- [5] Alain Doressoundiram et Emmanuel Lellouch, *Aux Confins du système solaire*, Éditions Belin, 2008,
- [6] *Revue Ciel et Espace*, hors série , octobre 2010,
- [7] Nucléaire - Calcul de la durée de vie du Soleil (<http://e.m.c.2.free.fr/nucleaire-duree-de-vie-soleil.htm>)
- [8] 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
- [9] Benz, W., Slattery, W. L., Cameron, A. G. W. (1988), *Collisional stripping of Mercury's mantle*, *Icarus*, v. 74, .
- [10] Cameron, A. G. W. (1985), *The partial volatilization of Mercury*, *Icarus*, v. 64, .
- [11] NASA JPL (http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_discovery)
- [12] C/2008 C1 (Chen-Gao), Jet Propulsion Laboratory NASA (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?orb=1;sstr=2008C1;cov=0;log=0;cad=0#elem>)
- [13] Manfred Küker, Thomas Henning et Günther Rüdiger, « Magnetic Star-Disk Coupling in Classical T Tauri Systems », dans *The Astrophysical Journal*, , 20 mai 2003, . (Texte intégral (<http://www.aip.de/groups/MHD/publications/03/56674.web.pdf>). Consulté le 25 décembre 2011.)
- [14] How Do We Know When Voyager Reaches Interstellar Space? (<http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-278>)

Bibliographie

- Any-Chantal Levasseur-Regourd, André Brahic, Thérèse Encrenaz, François Forget, Marc Ollivier et Sylvie Vauclair, *Système solaire et planètes*, Ellipses, 2009 (ISBN 978-2-7298-4084-6)
- Thérèse Encrenaz, *Système Solaire, Systèmes Stellaires*, Quai des sciences, 2005, 168 p. (ISBN 2-10-048726-4)
- Jonathan Tavel, *Voyage au cœur du Système solaire*, viaMedias, 2005, 328 p. (ISBN 2-84964-037-9)
- André Brahic, *Planètes & satellites, cinq leçons d'astronomie*, éditions Vuibert, 2001, 360 p. (ISBN 2-7117-5287-9).
- Serge Brunier, *Voyage dans le Système solaire*, éditions Bordas, 1996, 232 p. (ISBN 2-04-027141-4) ;


Annexes

Articles connexes


- Formation et évolution du Système solaire
- Milieu interplanétaire
- Exploration de l'espace
- Liste des objets du Système solaire classés par :
 - distance au Soleil
 - masse
 - taille
- Catégorie d'objets du système Solaire
 - Liste d'astéroïdes
 - Liste d'astéroïdes géocroiseurs
 - Liste d'astéroïdes troyens joviens

- Liste de comètes
- Type
 - Planète
 - Planète naine
 - Objet transneptunien
 - Comète
 - Astéroïde
 - Astéroïde géocroiseur
 - Astéroïde Apollon
 - Astéroïde Aten
 - Astéroïde Amor
 - Objet potentiellement dangereux
 - Astéroïde troyen
 - de la Terre
 - d'Uranus
 - de Mars
 - de Jupiter
 - de Neptune

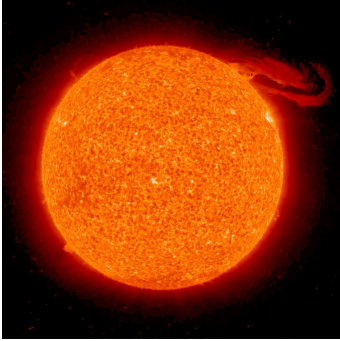
Liens externes

- Vidéo-conférence sur le thème : *Le Système solaire* (http://www.canal-u.tv/index.php/canalu/producteurs/universite_de_tous_les_savoirs/dossier_programmes/les_conferences_de_l_annee_2000/le_systeme_solaire/le_systeme_solaire/) (intervention d'André Brahic)
- Vidéo-conférence sur le thème : *Stabilité du Système solaire* (http://www.canal-u.tv/video/cerimes/mercure_mars_venus_la_terre_le_choc_des_planetes.7869) (intervention de Jacques Laskar)
-  Portail de l'astronomie

Soleil

 Pour les articles homonymes, voir soleil (homonymie).

Soleil ☉

		
Données observées		
Demi-grand axe de l'orbite de la Terre (1 ua)		149 597 870 km ^[1]
Magnitude apparente		−26,74
Magnitude absolue		4,83
Caractéristiques orbitales		
Distance du centre de la Voie lactée		2,50×10 ¹⁷ km (8 700 pc)
Période galactique		2,26×10 ⁸ années
Vitesse		217 km/s
Caractéristiques physiques		
Diamètre moyen		1 392 684 km
Rayon équatorial		696 342 km
Circonférence équatorial		4,379×10 ⁶ km
Aplatissement aux pôles		9×10 ^{−6}
Surface		6,0877×10 ¹² km ²
Volume		1,412×10 ¹⁸ km ³
Masse (<i>M</i>_☉)		1,9891×10 ³⁰ kg
Masse volumique	moyenne	1 408 kg·m ^{−3}
	au centre	150 000 kg·m ^{−3}
Gravité à la surface		273,95 m·s ^{−2}
Vitesse de libération		617,54 km/s
Température	au centre	15,1 MK
	à la surface	5 750 K
	couronne ^[2]	5 MK

Flux énergétique		3,826×10 ²⁶ W
Type spectral		G2– <u>Y</u>
Métallicité		Z = 0.0122
Rotation		
Inclinaison de l'axe	/écliptique	7,25°
	/plan Galaxie	67,23°
Vitesse, latitude 0		7 008,17 km·h ⁻¹
Période de rotation	latitude 0 °	24 j
	latitude 30 °	28 j
	latitude 60 °	30,5 j
	latitude 75 °	31,5 j
	moyenne	27,28 j
Composition photosphérique (en masse)		
Hydrogène		73,46 %
Hélium		24,85 %
Oxygène		0,77 %
Carbone		0,29 %
Fer		0,16 %
Néon		0,12 %
Azote		0,09 %
Silicium		0,07 %
Magnésium		0,05 %
Soufre		0,04 %

Le **Soleil** est l'étoile du Système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune, composée d'hydrogène (74 % de la masse ou 92,1 % du volume) et d'hélium (24 % de la masse ou 7,8 % du volume)^[3]. Autour de lui gravitent la Terre, et sept autres planètes, au moins cinq planètes naines, de très nombreux astéroïdes et comètes et une bande de poussière. Le Soleil représente à lui seul 99,86 % de la masse du Système solaire ainsi constitué, Jupiter représentant plus des deux tiers de tout le reste.

L'énergie solaire transmise par rayonnement rend possible la vie sur Terre par apport d'énergie lumineuse (lumière) et d'énergie thermique (chaleur), permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Les UV solaires contribuent à la désinfection naturelle des eaux de surfaces et à y détruire certaines molécules indésirables (quand l'eau n'est pas trop turbide)^[4]. La polarisation naturelle de la lumière solaire (y compris de nuit après diffusion ou réflexion, par la Lune) ou par des matériaux tels que l'eau ou les cuticules végétales est utilisée par de nombreuses espèces pour s'orienter.

Le rayonnement solaire est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur la Terre. En effet, le bilan radiatif global de la Terre est tel que la densité thermique à la surface de la Terre est en moyenne à 99,97 % ou 99,98 % d'origine solaire^[5]. Comme pour tous les autres corps, ces flux thermiques sont continuellement émis dans l'espace, sous forme de rayonnement thermique infrarouge ; la Terre restant ainsi en « équilibre dynamique ».

Le Soleil fait partie d'un ensemble constitué de matière interstellaire et d'environ 234 milliards d'étoiles (estimation 2009) : la Voie lactée. Il se situe à 15 parsecs du plan équatorial du disque, et est distant de 8 500 parsecs (environ 26 000 années-lumière) du centre galactique.

Le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil, couramment appelé « distance de la Terre au Soleil », égal à $149\,597\,870\text{ km}^{[1]}$, est la définition originale de l'unité astronomique (ua). Il faut 8 minutes et 19 secondes pour que la lumière du Soleil parvienne jusqu'à la Terre^[6].

Le symbole astronomique et astrologique du Soleil est un cercle avec un point en son centre : \odot .

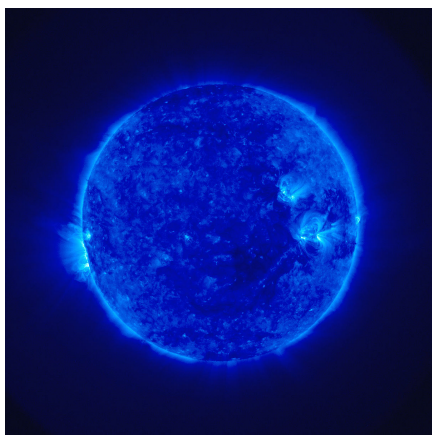
Origine et étymologie du terme

Le mot « Soleil » provient du latin populaire *soliculus*, dérivé du latin classique *sol*, *solis* désignant l'astre et la divinité.

Histoire

Au IIIe siècle av. J.-C., pour le philosophe Théophraste, le Soleil est fait de petites particules de feu, rassemblées du fait de l'exhalation humide ; en s'agglomérant, elles constituent le soleil.

Présentation générale



Le Soleil tel que vu dans l'ultraviolet « lointain » (UVC)

(image en « fausses couleurs »).
: la chromosphère et les protubérances sont les sources essentielles, bien plus chaudes que « la surface » (la photosphère).

Le Soleil est une étoile naine jaune qui se compose de 74 % d'hydrogène, de 24 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Le Soleil est de type spectral G2–V. « G2 » signifie qu'il est plus chaud (5 770 kelvins en surface environ) et plus brillant que la moyenne, avec une couleur jaune tirant sur le blanc. Son spectre renferme des bandes de métaux ionisés et neutres, ainsi que de faibles bandes d'hydrogène. Le suffixe « V » (ou « classe de luminosité ») indique qu'il évolue actuellement, comme la majorité des étoiles, sur la séquence principale du diagramme de Hertzsprung-Russell : il tire son énergie de réactions de fusion nucléaire qui transforment, dans son noyau, l'hydrogène en hélium, et se trouve dans un état d'équilibre hydrostatique, ne subissant ni contraction, ni dilatation continues.

Il existe dans la Voie lactée plus de 100 millions d'étoiles de type spectral identique, ce qui fait du Soleil une étoile assez ordinaire, bien qu'il soit en fait plus brillant que 85 % des étoiles de la Galaxie, qui sont en majorité des naines rouges^[7].

Le Soleil gravite autour du centre de la Voie lactée dont il est distant d'environ 25 000 à 28 000 années-lumière. Sa période de révolution galactique est d'environ 220 millions d'années, et sa vitesse de $217\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, équivalente à une année-lumière tous les 1 400 ans (environ), et une unité astronomique tous les 8 jours^[8].

Dans cette révolution galactique, le Soleil, comme les autres étoiles du disque, a un mouvement oscillant autour du plan galactique : l'orbite galactique solaire présente des ondulations sinusoïdales perpendiculaires à son plan de révolution. Le Soleil traverserait ce plan tous les 30 millions d'années environ, d'un côté puis de l'autre — sens Nord-Sud galactique, puis inversement — et s'en éloignerait au maximum de 230 années-lumière environ, tout en restant dans le disque galactique. La masse du disque galactique attire les étoiles qui auraient un plan de révolution différent de celui du disque galactique^[9].

Actuellement, le Système solaire se situerait à 48 années-lumière au-dessus (au nord) du plan galactique et en phase

ascendante à la vitesse de 7 km/s^[10].

Le Soleil tourne également sur lui-même, avec une période de 27 jours terrestres environ. En réalité, n'étant pas un objet solide, il subit une rotation différentielle : il tourne plus rapidement à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (35 jours). Le Soleil est également en rotation autour du barycentre du Système solaire, ce dernier pouvant se situer à un peu plus d'un rayon solaire du centre de l'étoile (hors de sa surface)^[11], en raison de la masse de Jupiter (environ un millième de la masse solaire).

Les grandes dates

La plus ancienne éclipse solaire répertoriée date de 1223 av. J.-C.^[12], elle est représentée sur une table d'argile dans la cité d'Ugarit (aujourd'hui en Syrie). Vers 800 av. J.-C., a eu lieu la première observation plausible d'une tache solaire en Chine. Environ 400 ans après, en 400 av. J.-C., les premières civilisations pensaient que la Terre était plate et que le Soleil était un dieu.

Le philosophe grec, Anaxagore, avance l'idée que le Soleil est un corps grand, éloigné de la Terre. Il estime son rayon à 56 km. Ses idées vont à l'encontre des croyances de son temps, ce qui lui vaut d'être menacé puis finalement exilé d'Athènes.

La première tentative de calcul mathématique de la distance Terre-Soleil est faite en 200 av. J.-C., par Aristarque de Samos. Claude Ptolémée déclare en 150 ap. J.-C., que la Terre est un corps stationnaire au centre de l'Univers. Selon lui, ce sont le Soleil, la Lune et les autres planètes qui tournent autour de la Terre.

Plus proche de notre époque, en 1543, Copernic présente son modèle d'Univers dans lequel le Soleil est au centre et les planètes tournent autour de lui.

En 1610, Galilée observe les taches solaires avec son télescope.

Peu de temps après, en 1644, Descartes énonce une théorie selon laquelle le Soleil est une étoile parmi bien d'autres. Entre 1645 et 1715, se trouve la période durant laquelle on observa peu de taches solaires ; on appelle cette période « le minimum de Maunder ».

L'astronome français Pierre-Simon de Laplace énonce en 1796, l'hypothèse de la nébuleuse selon laquelle le Soleil et le Système solaire sont nés de l'effondrement gravitationnel d'un grand nuage de gaz diffus.

C'est en 1845 que la première image du Soleil fut prise, par les physiciens français Hippolyte Fizeau et Léon Foucault. La première relation entre l'activité solaire et géomagnétique eu lieu en 1852 (première observation 1859 par l'astronome amateur Richard Carrington).

L'observation de l'éclipse solaire totale de 1860^[13] permet le premier enregistrement d'une éjection de masse coronale.

Au siècle dernier, en 1908, eut lieu le premier enregistrement des champs magnétiques des taches solaires par l'astronome américain George Ellery Hale. Onze ans après, en 1919, les lois de la polarité de Hale fournissent une preuve du cycle magnétique solaire. En 1942 fut observée pour la première fois une émission d'ondes radio solaires, puis en 1946 fut faite la première observation de rayons ultraviolets (UV) solaires à l'aide d'une fusée sonde, et évaluée la température de la couronne à 2 millions de °C, à l'aide des raies spectrales. La première observation des rayons X solaires à l'aide d'une fusée sonde date de 1949. En 1954, on s'aperçoit que l'intensité des rayons provenant du Soleil varie sur un cycle solaire de 11 ans. Une observation massive de taches solaires est réalisée en 1956, une première observation du vent solaire en 1963, par la sonde Mariner 2. En 1973 et 1974, Skylab observe le Soleil et découvre les trous coronaires. En 1982 a lieu la première observation des neutrons d'une tache solaire par la sonde SMM (Solar Maximum Mission). Et pour finir, en 1994 et 1995, Ulysse (sonde lancée par la navette Discovery en 1990) survole les régions polaires du Soleil.

Histoire naturelle

Articles détaillés : Évolution des étoiles et Formation et évolution du Système solaire.

Le Soleil est une étoile âgée de 4,5682 milliards d'années^[14], soit un peu moins de la moitié de son chemin sur la séquence principale^[15]. L'hypothèse des années 1970 qu'une supernova serait à l'origine de l'effondrement de la nébuleuse qui a donné naissance au Soleil n'est plus crédible. Une modélisation récente (2012) propose un scénario en trois étapes pour expliquer la formation du Soleil et l'abondance de magnésium-26 et de nickel-60 dans les météorites. Ces éléments sont les produits de la décomposition de deux isotopes radioactifs (à la vie très courte) nés dans les étoiles : l'aluminium-26 (demi-vie de 717 000 ans) et le fer-60 (demi-vie de 2,6 Ma). Pour comprendre la présence de ces éléments dans la chimie du Soleil, il fallait imaginer une étape pour le fer-60 et une autre pour l'aluminium-26. Scénario : Il y a 4,6 Ga, une nébuleuse s'effondre et une première génération d'étoiles ($\pm 5 000$) naît. Après 5 Ma, les plus massives meurent en supernovae et dispersent leurs éléments dont l'isotope fer-60. Après 2 Ma, un nuage riche en fer-60 s'effondre et de nouvelles étoiles se forment. Cette seconde génération comprend des étoiles très massives (plus de 30 masses solaires) qui éjectent des vents chargés en aluminium-26. Après 100 000 ans, le vent d'une de ces étoiles très massives comprime la matière qui l'entoure. Il se forme une coquille de gaz et de poussières riches en fer-60 et en aluminium-26 qui finit par s'effondrer et donner naissance, il y a 4,5682 Ga, à une troisième génération d'étoiles : le Soleil et une centaine d'étoiles jumelles. Quelques millions d'années plus tard, l'étoile très massive à l'origine du processus meurt en supernova. On l'appelle Coatlicue qui signifie "mère du Soleil" dans la cosmogonie aztèque. Les sœurs du Soleil (à la composition chimique identique) se dispersent dans la Voie lactée. Le Soleil reste seul ; les astéroïdes qui l'entourent gardent la trace de sa généalogie sous la forme des dérivés du fer-60 et de l'aluminium-26 : le nickel-60 et le magnésium-26^[16].

Actuellement, dans le cœur du Soleil, chaque seconde, environ 627 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent^[17] pour produire $\pm 622,7$ millions de tonnes d'hélium. La différence de masse de 4,3 millions de tonnes d'hydrogène (une masse de l'ordre de celle de la pyramide de Gizeh^[18]) équivaut à l'énergie lumineuse produite (4.10^{26} joules). Cette énergie lumineuse migre lentement par rayonnement et par convection vers la surface solaire et est émise dans l'espace sous forme de rayonnements électromagnétiques (lumière, rayonnement solaire) et de flux de particules (vent solaire).

Durant les 7,6 milliards d'années à venir, le Soleil épuisera petit à petit ses réserves d'hydrogène ; sa brillance augmentera d'environ 7 % par milliard d'années, à la suite de l'augmentation du rythme des réactions de fusion par la lente contraction du cœur.

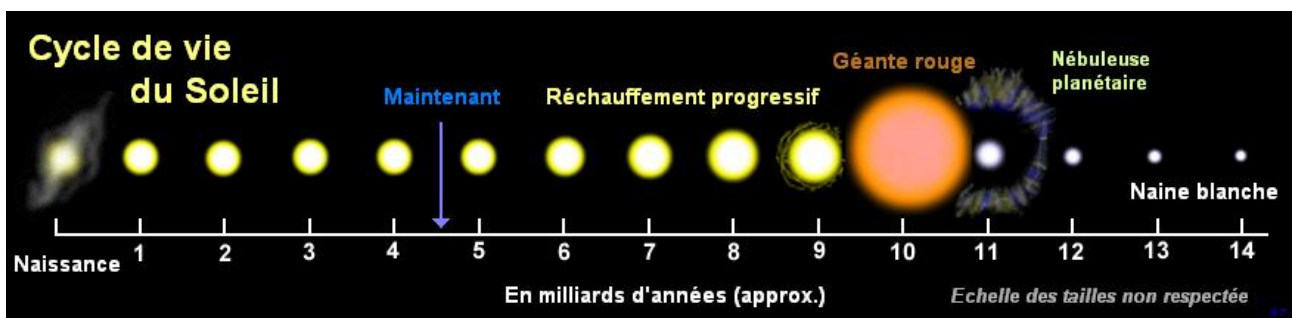
Lorsqu'il sera âgé de 10,5 milliards d'années, l'équilibre hydrostatique sera rompu. Le Soleil aura converti tout l'hydrogène de son cœur en hélium. Le noyau d'hélium se contractera et s'échauffera fortement tandis que les couches superficielles, dilatées par le flux thermique croissant et ainsi partiellement libérées de l'effet gravitationnel, seront progressivement repoussées : le Soleil se dilatera et se transformera en géante rouge. Au terme de ce processus, le diamètre du Soleil sera environ 100 fois supérieur à l'actuel ; il dépassera l'orbite de Mercure et de Vénus. La Terre, si elle subsiste encore, ne sera plus qu'un désert calciné.

C'est durant cette phase de gonflement que son cœur en contraction arrivera aux environs de 100 millions de kelvins, initiant les réactions de fusion de l'hélium pour donner du carbone (voir réaction triple-alpha) ainsi que de l'oxygène, tandis qu'une couronne externe du cœur fusionnera l'hydrogène en hélium. La période de fusion de l'hélium sera rapide : pendant 50 millions d'années, les noyaux d'hélium se combineront trois par trois pour former des noyaux de carbone qui peupleront le cœur de la géante rouge. Le Soleil n'est pas assez massif pour comprimer son cœur de carbone et atteindre la température de 600 millions de K nécessaire à la fusion du carbone produisant de l'oxygène^[19]. Cette phase se terminera par le flash de l'hélium, suivi d'un réarrangement des couches du Soleil faisant diminuer son diamètre jusqu'à ce qu'il se stabilise à une taille de plusieurs fois (jusqu'à 10 fois) sa taille actuelle, soit d'environ 10 millions de kilomètres de diamètre. Il sera devenu une sous-géante.

Enfin, les couches externes seront arrachées par les vents stellaires causés par les contractions du cœur de carbone sous l'effet de la gravité. La matière sera répandue dans l'espace et donnera naissance à une nébuleuse planétaire. La

nébuleuse planétaire sera un nuage de gaz très chaud (plus de 10 000 K) composé essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium non consommés dans les fusions et d'un peu de carbone. Elle servira de berceau à de nouvelles étoiles. Le cœur de carbone, n'ayant plus de carburant pour fournir l'énergie nécessaire pour contrecarrer la gravité, va s'effondrer sur lui-même et former une naine blanche d'une taille comparable à la Terre. La densité y sera si élevée que le cœur abritera de la *matière électronique dégénérée*. La température en surface de la naine blanche atteindra 50 000 K (chaleur emmagasinée lors de l'effondrement du cœur). Cette chaleur émet un rayonnement de couleur blanche. La surface radiative étant extrêmement faible, la naine blanche mettra plusieurs milliards d'années à se refroidir. Quand la température sera assez basse, le rayonnement thermique sera si faible que la naine blanche sera invisible. Elle terminera sa vie en naine noire, un cadavre céleste si froid qu'il n'émet plus aucune lumière.

Ce scénario est caractéristique des étoiles de faible à moyenne masse^{[20],[21]} ; de $\sim 0,5$ à $\sim 4 M_{\odot}$.

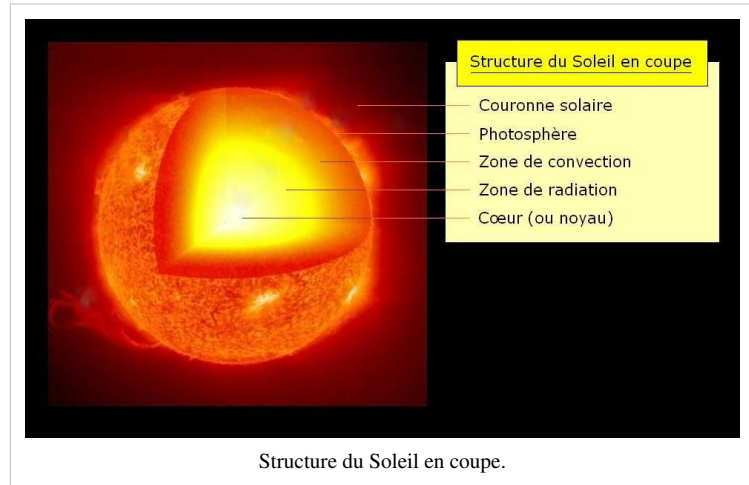


Cycle de vie du Soleil, il est similaire à celui d'une naine jaune. Diagramme trop court de 2 milliards d'années, il y manque aussi la « courte » phase de sous-géante.

Structure et fonctionnement

Bien que le Soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul environ 99,86 % de la masse du Système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement aux pôles estimé à neuf millièmes^[22], ce qui signifie que son diamètre polaire est plus petit que son diamètre équatorial de seulement dix kilomètres.

Contrairement aux objets telluriques, le Soleil n'a pas de limite extérieure bien définie. La densité de ses gaz chute de manière à peu près exponentielle à mesure que l'on s'éloigne de son centre. Par contre, sa structure interne est bien définie.



Structure du Soleil en coupe.

Le rayon du Soleil est mesuré de son centre jusqu'à la photosphère. La photosphère est la couche en dessous de laquelle les gaz sont assez condensés pour être opaques et au-delà de laquelle ils deviennent transparents. La photosphère est ainsi la couche la plus visible à l'œil nu. La majeure partie de la masse solaire se concentre à 0,7 rayon du centre.

La structure interne du Soleil n'est pas observable directement. De la même façon que la sismologie permet, par l'étude des ondes produites par les tremblements de terre, de déterminer la structure interne de la Terre, on utilise l'héliosismologie pour mesurer et visualiser indirectement la structure interne du Soleil. La simulation informatique est également utilisée comme outil théorique pour sonder les couches les plus profondes.

Le cœur ou noyau

Article détaillé : Noyau solaire.

On considère que le cœur du Soleil s'étend du centre à environ 0,25 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à $150\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (150 fois la densité de l'eau sur Terre) et sa température approche les 15 millions de kelvins (ce qui contraste nettement avec la température de surface du Soleil, qui avoisine les 5 800 kelvins). C'est dans le cœur que se produisent les réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) qui transforment, dans le cas du Soleil, l'hydrogène en hélium (voir, pour les détails de ces réactions, l'article chaîne proton-proton).

Environ $3,4\times 10^{38}$ protons (noyaux d'hydrogène), soit 619 millions de tonnes d'hydrogène, sont convertis en 614 millions de tonnes d'hélium chaque seconde, libérant une énergie correspondant à l'annihilation de 4,26 millions de tonnes de matière par seconde, produisant 383 yottajoules (383×10^{24} joules) par seconde, soit l'équivalent de l'explosion de $91,5\times 10^{15}$ tonnes de TNT^{[23],[24]}.

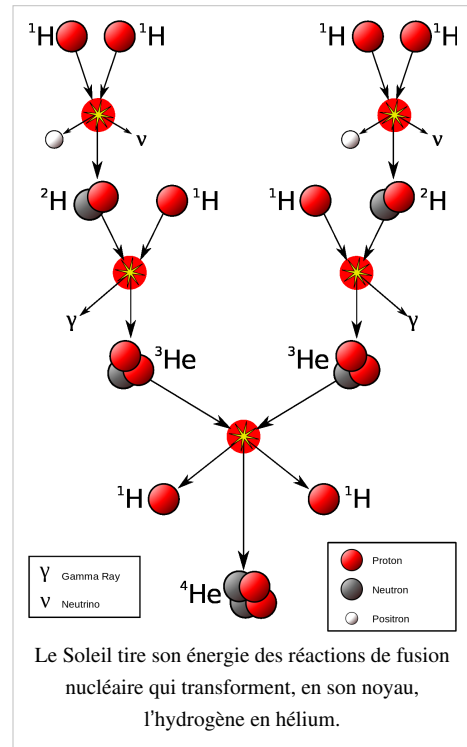
Le taux de fusion nucléaire est proportionnel à la densité du noyau, aussi la fusion nucléaire au sein du cœur est un processus auto-régulé : toute légère augmentation du taux de fusion provoque un réchauffement et une dilatation du cœur qui réduit en retour le taux de fusion. Inversement, toute diminution légère du taux de fusion refroidit et densifie le cœur, ce qui fait revenir le niveau de fusion à son point de départ.

Le cœur est la seule partie du Soleil qui produise une quantité notable de chaleur par fusion : le reste de l'étoile tire sa chaleur uniquement de l'énergie qui en provient. La totalité de l'énergie qui y est produite doit traverser de nombreuses couches successives jusqu'à la photosphère, avant de s'échapper dans l'espace sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules.

L'énergie des photons de haute énergie (rayons X et gamma) libérés lors des réactions de fusion met un temps considérable pour traverser les zones de radiation et de convection avant d'atteindre la surface du Soleil. On estime que le temps de transit du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans. Après avoir traversé la couche de convection et atteint la photosphère, les photons s'échappent dans l'espace, en grande partie sous forme de lumière. Chaque rayon gamma produit au centre du Soleil est finalement transformé en plusieurs millions de photons lumineux qui s'échappent dans l'espace. Des neutrinos sont également libérés par les réactions de fusion, mais contrairement aux photons ils interagissent peu avec la matière et sont donc libérés immédiatement. Pendant des années, le nombre de neutrinos produits par le Soleil était mesuré plus faible d'un tiers que la valeur théorique : c'était le *problème des neutrinos solaires*, qui a été résolu en 1998 grâce à une meilleure compréhension du phénomène d'oscillation du neutrino.

La zone de radiation

La zone de radiation ou zone radiative se situe approximativement entre 0,25 et 0,7 rayon solaire. La matière solaire y est si chaude et si dense que le transfert de la chaleur du centre vers les couches les plus extérieures se fait par la seule radiation thermique. L'hydrogène et l'hélium ionisés émettent des photons qui voyagent sur une courte distance avant d'être réabsorbés par d'autres ions. Les photons de haute énergie (rayons X et gamma) libérés lors des réactions de fusion mettent un temps considérable pour atteindre la surface du Soleil, ralentis par l'interaction avec la matière et par le phénomène permanent d'absorption et de réémission à plus basse énergie dans le manteau solaire. On estime que le temps de transit de l'énergie d'un photon du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans. Dans cette



zone, il n'y a pas de convection thermique car bien que la matière se refroidisse en s'éloignant du cœur, le gradient thermique reste inférieur au gradient thermique adiabatique. La température y diminue à 2 millions de kelvins.

La zone de convection

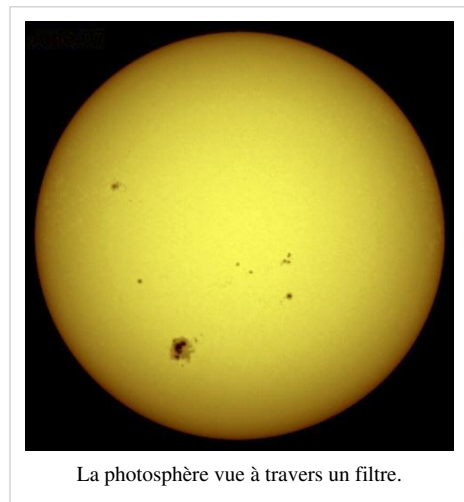
La zone de convection ou zone convective s'étend de 0,8 rayon solaire du centre à la surface visible du Soleil. Elle est séparée de la zone de radiation par une couche épaisse d'environ 3 000 kilomètres, la tachocline, qui d'après les études récentes pourrait être le siège de puissants champs magnétiques et jouerait un rôle important dans la dynamo solaire. Dans la zone de convection la matière n'est plus ni assez dense ni assez chaude pour évacuer la chaleur par radiation : c'est donc par convection, selon un mouvement vertical, que la chaleur est conduite vers la photosphère. La température y passe de 2 millions à ~5 800 kelvins. La matière parvenue en surface, refroidie, plonge à nouveau jusqu'à la base de la zone de convection pour recevoir la chaleur de la partie supérieure de la zone de radiation, etc. Les gigantesques cellules de convection ainsi formées sont responsables des granulations solaires observables à la surface de l'astre. Les turbulences survenant dans cette zone produisent un effet dynamo responsable de la polarité magnétique nord-sud à la surface du Soleil.

La photosphère

La photosphère est une partie externe de l'étoile qui produit entre autres la lumière visible. Elle est plus ou moins étendue : de moins de 0,1 % du rayon pour les étoiles naines, soit quelques centaines de kilomètres ; à quelques dizaines de pourcent du rayon de l'étoile pour les plus géantes, ce qui leur donnerait un contour *flou* contrairement au Soleil aux bords nets.

La lumière qui y est produite contient toutes les informations sur la température, la gravité de surface et la composition chimique de l'étoile. Pour le Soleil, la photosphère a une épaisseur d'environ 400 kilomètres. Sa température moyenne est de 6 000 K. Elle permet de définir la température effective qui pour le Soleil est de 5 781 K. Sur l'image de la photosphère solaire on peut voir l'assombrissement centre-bord qui est une des caractéristiques de la photosphère.

L'analyse du spectre de la photosphère solaire est très riche en information en particulier sur la composition chimique du Soleil. La photosphère est maculée d'une granulation qui lui donne l'aspect d'une peau d'orange. Ce sont des sphères d'environ 1 000 km de diamètre, composées de gaz chaud remontant vers la surface à près de 500 mètres par seconde, qui lui donnent cet aspect. La surface atteinte, elles irradient leur énergie et, une fois refroidies, replongent dans l'étoile. Chaque sphère de granulation dure huit minutes en moyenne.



La photosphère vue à travers un filtre.

L'atmosphère solaire

La structure du Soleil au-delà de la photosphère est généralement connue sous le nom d'*Atmosphère solaire*. Elle comprend trois zones principales : la chromosphère, la couronne et l'héliosphère. La chromosphère est séparée de la photosphère par la *zone de température minimum* et de la couronne par une *zone de transition*. L'héliosphère s'étend jusqu'aux confins du Système solaire où elle est limitée par l'héliopause. Pour une raison encore mal élucidée, la chromosphère et la couronne sont plus chaudes que la surface du Soleil. Bien qu'elle puisse être étudiée en détail par les télescopes spectroscopiques, l'atmosphère solaire n'est jamais aussi accessible que lors des éclipses totales de Soleil.

La chromosphère

La *zone de température minimum* qui sépare la photosphère de la chromosphère offre une température suffisamment basse (~4 000 kelvins) pour qu'on y trouve des molécules simples (monoxyde de carbone, eau), détectables par leur spectre d'absorption. La chromosphère proprement dite est épaisse d'environ 2 000 kilomètres. Sa température augmente graduellement avec l'altitude, pour atteindre un maximum de 100 000 kelvins à son sommet. Son spectre est dominé par des bandes d'émission et d'absorption. Son nom, qui vient de la racine grecque *chroma* (couleur), lui a été donné en raison du flash rose soutenu qu'elle laisse entrevoir lors des éclipses totales de Soleil.

La couronne

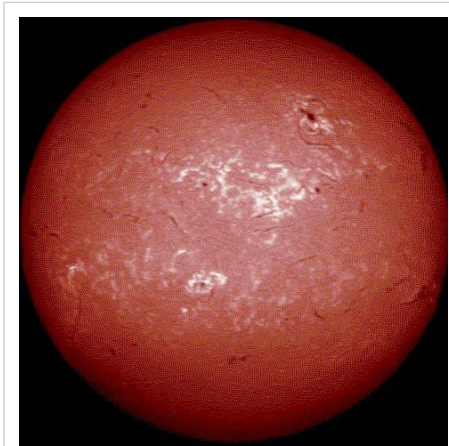
La *zone de transition* entre la chromosphère et la couronne est le siège d'une élévation rapide de température, qui peut approcher 1 million de kelvins. Cette élévation est liée à une transition de phase au cours de laquelle l'hélium devient totalement ionisé sous l'effet des très hautes températures. La zone de transition n'a pas une altitude clairement définie. Grossièrement, elle forme un halo surplombant la chromosphère sous l'apparence de spicules et de filaments. Elle est le siège d'un mouvement chaotique et permanent. Difficile à percevoir depuis la Terre malgré l'utilisation de coronographes, elle est plus aisément analysée par les instruments spatiaux sensibles aux rayonnements ultraviolets extrêmes du spectre.

La couronne solaire est composée à 73 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium. Les températures sont de l'ordre du million de degrés.

Bien plus vaste que le Soleil lui-même, la couronne solaire elle-même s'étend à partir de la zone de transition et s'évanouit progressivement dans l'espace, mêlée à l'héliosphère par les vents solaires. La couronne inférieure, la plus proche de la surface du Soleil, a une densité particulière comprise entre $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ et $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, soit moins d'un milliardième de la densité particulière de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer. Sa température, qui peut atteindre les 5 millions de kelvins, contraste nettement avec la température de la photosphère. Bien qu'aucune théorie n'explique encore complètement cette différence, une partie de cette chaleur pourrait provenir d'un processus de reconnexion magnétique.

L'héliosphère

Débutant à environ 20 rayons solaires (0,1 ua) du centre du Soleil, l'héliosphère s'étend jusqu'aux confins du Système solaire. On admet qu'elle débute lorsque le flux de vent solaire devient plus rapide que les ondes d'Alfvén (le flux est alors dit *superalfvénique*) : les turbulences et forces dynamiques survenant au-delà de cette frontière n'ont pas d'influence sur la structure de la couronne solaire, car l'information ne peut se déplacer qu'à la vitesse des ondes d'Alfvén. Le vent solaire se déplace ensuite en continu à travers l'héliosphère, donnant au champ magnétique solaire la forme d'une spirale de Parker jusqu'à sa rencontre avec l'héliopause, à plus de 50 ua du Soleil. En décembre 2004, Voyager 1 est devenue la première sonde à franchir l'héliopause. Chacune des deux sondes Voyager a détecté d'importants niveaux énergétiques à l'approche de cette frontière^[25].



La chromosphère vue en analyse spectrale H α .



Les éclipses totales de Soleil (ici celle du 11 août 1999) sont la seule occasion de visualiser directement la couronne (en blanc) et la chromosphère (en rose).

L'activité solaire

Le champ magnétique solaire

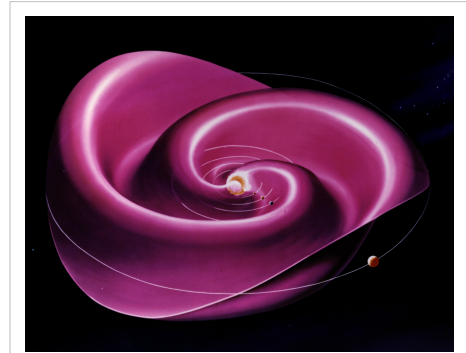
Article connexe : Dynamo solaire.

Le Soleil est une étoile magnétiquement active. Le soleil étant une boule de gaz et de plasma, sa rotation n'est pas contrainte à une rotation solide. On peut ainsi observer une rotation différentielle selon la latitude. Cela signifie que la surface du Soleil tourne à une vitesse différente autour de son axe selon la latitude. Cette rotation est plus rapide à l'équateur qu'aux pôles. Différents effets magnétohydrodynamiques régissent cette rotation différentielle, mais il n'y a pas encore de consensus parmi les scientifiques pour expliquer la cause de cette rotation.

On appelle cycle solaire l'alternance de minima et de maxima d'activité solaire (apparition de taches solaires, intensité et complexité du champ magnétique). Le cycle solaire reste inexplicable aujourd'hui. On évoque certains modèles de dynamo pour y apporter des explications, mais aucun modèle auto-consistant n'est aujourd'hui capable de reproduire les cycles solaires.

Le vent solaire est un flux de particules issu de la couronne solaire en expansion. Une partie des particules de la couronne solaire possède une vitesse thermique suffisamment élevée pour dépasser la vitesse de libération gravitationnelle du soleil. Ils quittent alors la couronne en se dirigeant radialement dans l'espace interplanétaire. En raison du théorème du gel qui régit le comportement des plasmas très peu résistifs (MHD idéale) comme dans la couronne où le nombre de Reynolds magnétique est très élevé, le plasma (la matière) entraîne avec elle le champ magnétique. C'est ainsi que le vent solaire est muni d'un champ magnétique initialement radial. À partir de la distance d'Alfvén, qui décrit l'équilibre des forces entre la réaction à la courbure des lignes de champs et le moment angulaire dû à la rotation du Soleil, le champ se courbe. Cette courbure est due à la rotation du Soleil. Il existe une analogie avec un arroseur rotatif produisant des jets d'eau dont les figures forment des spirales. Dans le cas du Soleil, cette spirale s'appelle spirale de Parker, du nom de celui qui l'a prédite dans les années 1950^[26].

Ce vent de particules et ce champ magnétique spiralé est le support de l'influence du Soleil autour du Système solaire. C'est ainsi qu'est définie l'héliosphère.



Vue d'artiste du champ magnétique solaire.

Les taches solaires

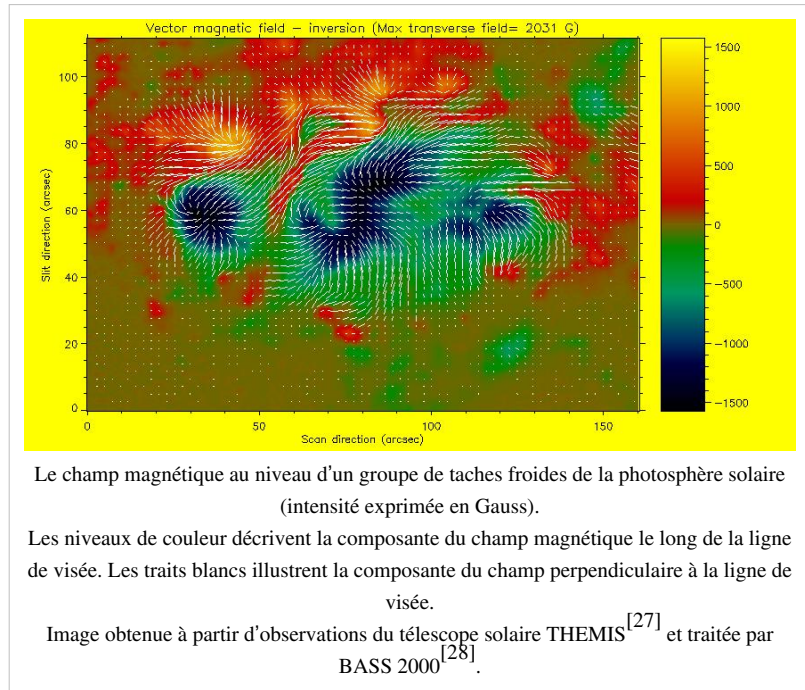
Bien que tous les détails sur la genèse des taches solaires ne soient pas encore élucidés, il a été démontré (par l'observation de l'effet Zeeman) qu'elles sont la résultante d'une intense activité magnétique au sein de la zone de convection. Le champ magnétique, qui en est issu, freine la convection et limite l'apport thermique en surface à la photosphère, le plasma de la surface se refroidit et se contracte.

Les taches solaires sont des dépressions à la surface solaire. Elles sont ainsi moins chaudes de 1 500 à 2 000 kelvins que les régions voisines, ce qui suffit à expliquer pourquoi elles apparaissent, en contraste, bien plus sombres que le reste de la photosphère.

Cependant, si elles étaient isolées du reste de la photosphère, les taches solaires, où règne malgré tout une température proche des 4 000 kelvins, sembleraient 10 fois plus brillantes que la pleine lune. La sonde spatiale SoHO a permis de démontrer que les taches solaires répondent à un mécanisme proche de celui des cyclones sur Terre. On distingue deux parties au sein de la tache solaire : la zone d'ombre centrale (environ 4 000 kelvins) et la zone de pénombre périphérique (environ 4 700 kelvins). Le diamètre des taches solaires les plus petites est habituellement plus de deux fois supérieur à celui de la Terre. En période d'activité, il est parfois possible de les observer à l'œil nu sur le Soleil couchant, avec une protection oculaire adaptée.

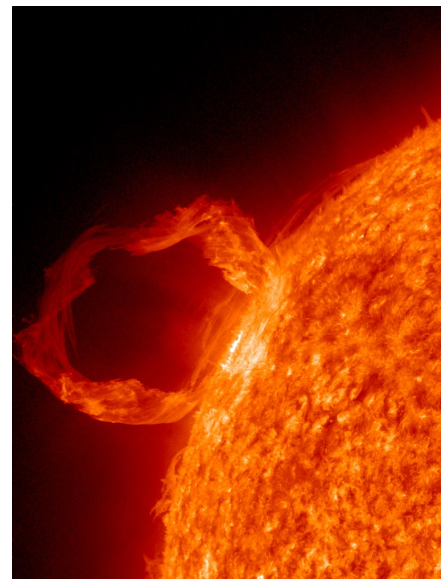
La surveillance des taches solaires est un excellent moyen pour mesurer l'activité solaire et prédire ses répercussions terrestres. Une tache solaire a une durée de vie moyenne de deux semaines. Au XIX^e siècle, l'astronome allemand Heinrich Schwabe fut le premier à tenir une cartographie méthodique des taches solaires, ce qui lui permit de mettre en évidence une périodicité temporelle de leurs occurrences. L'ensemble des mesures réalisées indique un cycle principal dont la période varie entre 9 et 13 ans (moyenne statistique 11.2). Dans chaque période apparaît un maximum d'activité (où les taches se multiplient) et un minimum d'activité. Le dernier maximum d'activité a été enregistré en 2001, avec un groupe de taches particulièrement marqué (image)^[29].

Pour davantage de détails sur les taches solaires, voir l'article : Cycle solaire.



Les éruptions solaires

Pour davantage de détails, voir les articles : Éruption solaire et Sursaut solaire.



Une éruption solaire.

Effets terrestres de l'activité solaire



Les aurores polaires sont une manifestation spectaculaire de l'activité solaire.

Les **effets terrestres de l'activité solaire** sont multiples, le plus spectaculaire étant le phénomène des aurores polaires (également appelée aurore boréale dans l'hémisphère Nord et aurore australe dans l'hémisphère Sud). Une prévision de l'activité solaire est particulièrement importante en vue des missions spatiales. Une méthode reposant sur des relations entre plusieurs périodes consécutives a été établie par Wolfgang Gleißberg.

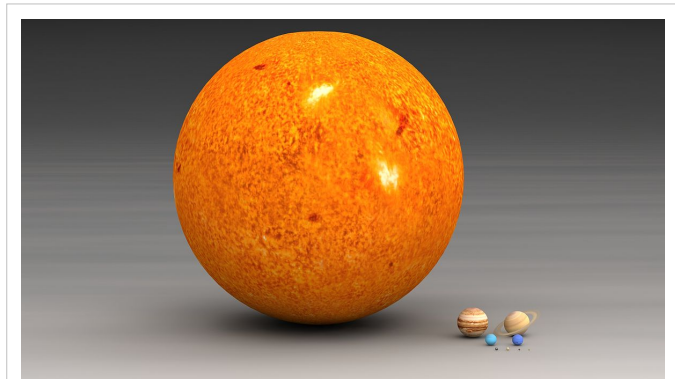
La Terre possède une magnétosphère qui la protège des vents solaires, mais lorsque ceux-ci sont plus intenses, ils déforment la magnétosphère et des particules solaires ionisées la traversent en suivant les lignes de champs. Ces particules ionisent et excitent les particules de la haute atmosphère. Le résultat de ces réactions est la création de nuages ionisés qui reflètent les ondes radios et l'émission de lumière visible par les atomes et molécules excités dans les aurores polaires.

Les vents solaires peuvent également perturber les moyens de communication et de navigation utilisant des satellites, en effet, les satellites à basse altitude peuvent être endommagés par l'ionisation de l'ionosphère.

Le Système solaire

Article détaillé : Système solaire.

À lui seul, le Soleil représente 99,86 % de la masse totale du Système solaire, les 0,14 % restants incluant les planètes (surtout Jupiter), les comètes et les astéroïdes.



Comparaison de la taille du Soleil par rapport aux planètes du Système solaire.

Rapport de la masse du Soleil aux masses des planètes

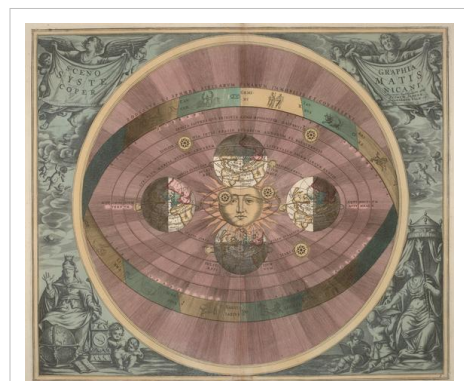
Mercure	6 023 600	Jupiter	1 047
Vénus	408 523	Saturne	3 498
Terre et Lune	328 900	Uranus	22 869
Mars	3 098 710	Neptune	19 314

Le Soleil et l'être humain

Histoire des théories et de l'observation

Le philosophe grec Anaxagore fut un des premiers occidentaux à proposer une théorie scientifique sur le Soleil, avançant qu'il s'agissait d'une masse incandescente plus grande que le Péloponnèse et non le chariot d'Hélios. Cette audace lui valut d'être emprisonné et condamné à mort, même s'il fut plus tard libéré grâce à l'intervention de Périclès.

Au XVI^e siècle, Copernic émit la théorie que la Terre tournait autour du Soleil, renouant par là avec l'hypothèse formulée par Aristarque de Samos au III^e siècle av. J.-C. Au début du XVII^e siècle, Galilée inaugura l'observation télescopique du Soleil, observa les taches solaires, se doutant qu'elles se situaient à la surface de l'astre et qu'il ne s'agissait pas d'objets passant entre le Soleil et la Terre^[30]. Près de cent ans plus tard, Newton décomposa la lumière solaire au moyen d'un prisme, révélant le spectre visible^[31], tandis qu'en 1800 William Herschel découvrit les rayons infrarouges^[32]. Le XIX^e siècle vit des avancées considérables, en particulier dans le domaine de l'observation spectroscopique du Soleil sous l'impulsion de Joseph von Fraunhofer, qui observa les raies d'absorption du spectre solaire, auxquelles il donna son nom.



Rompant avec le géocentrisme, Copernic proposa la théorie héliocentrique qui plaçait le Soleil au centre de l'Univers. Galilée et Kepler approfondirent ses travaux.

La source de l'énergie solaire fut la principale énigme des premières années de l'ère scientifique moderne. Dans un premier temps plusieurs théories furent proposées, mais aucune ne s'avéra vraiment satisfaisante. Lord Kelvin

proposa un modèle suggérant que le Soleil était un corps liquide qui se refroidissait graduellement en rayonnant à partir d'une réserve de chaleur stockée en son centre^[33]. Kelvin et Helmholtz tentèrent d'expliquer la production d'énergie solaire par la théorie connue sous le nom de mécanisme de Kelvin-Helmholtz. Malheureusement, l'âge estimé du Soleil d'après ce mécanisme n'excédait pas 20 millions d'années, ce qui était très inférieur à ce que laissait supposer la géologie. En 1890, Joseph Norman Lockyer, le découvreur de l'hélium, proposa une théorie météoritique sur la formation et l'évolution du Soleil^[34].

Il fallut attendre 1904 et les travaux d'Ernest Rutherford pour qu'enfin une hypothèse plausible soit offerte. Rutherford supposa que l'énergie était produite et entretenue par une source de chaleur interne et que la radioactivité était à la source de cette énergie^[35]. En démontrant la relation entre la masse et l'énergie ($E=mc^2$), Albert Einstein apporta un élément essentiel à la compréhension du générateur d'énergie solaire. En 1920 Jean Perrin, suivi par Sir Arthur Eddington proposèrent la théorie selon laquelle le centre du Soleil était le siège de pressions et de températures extrêmes, permettant des réactions de fusion nucléaire qui transformaient l'hydrogène en hélium, libérant de l'énergie proportionnellement à une diminution de la masse^[36]. La prépondérance de l'hydrogène dans le soleil fut confirmée en 1925 par Cecilia Payne-Gaposchkin. Ce modèle théorique fut complété dans les années 1930 par les travaux des astrophysiciens Subrahmanyan Chandrasekhar et Hans Bethe, qui décrivent en détail les deux principales réactions nucléaires productrices d'énergie au cœur du Soleil^{[37],[38]}. Pour finir en 1957, un article intitulé *Synthèse des Éléments dans les Étoiles*^[39] apporta la démonstration définitive que la plupart des éléments rencontrés dans l'Univers se sont formés sous l'effet de réactions nucléaires au cœur d'étoiles telles que le Soleil.

Les missions spatiales solaires



Vue d'artiste du satellite *SolarMax*.
Il observa la couronne solaire et les taches solaires de 1984 à 1989.

Les premières sondes conçues pour observer le Soleil depuis l'espace interplanétaire furent lancées par la NASA entre 1959 et 1968 : ce furent les missions *Pioneer 5, 6, 7, 8* et *9*. En orbite autour du Soleil à une distance similaire à celle de l'orbite terrestre, elles permirent les premières analyses détaillées du vent solaire et du champ magnétique solaire. *Pioneer 9* resta opérationnelle particulièrement longtemps et envoya des informations jusqu'en 1987^[40].

Dans les années 1970, deux missions apportèrent aux scientifiques des informations capitales sur le vent solaire et la couronne solaire. La sonde germano-américaine *Helios 1* étudia le vent solaire depuis la périhélie d'une orbite plus petite que celle de Mercure. La station américaine *Skylab*, lancée en 1973, comportait un module d'observation solaire baptisé *Apollo Telescope Mount* et commandé par

les spationautes embarqués dans la station. *Skylab* fit les premières observations de la zone de transition entre la chromosphère et la couronne et des émissions ultraviolettes de la couronne solaire. La mission permit également les premières observations d'éjections de masse coronale et de trous coronaux, phénomènes dont on sait aujourd'hui qu'ils sont intimement liés au vent solaire.

En 1980 la NASA lança le satellite *Solar Maximum Mission* (plus connu sous le nom de *SolarMax*), conçu pour l'observation des rayons gamma, X et ultraviolets émis par les éruptions solaires dans les périodes de forte activité solaire. Malheureusement quelques mois après son lancement, un dysfonctionnement électronique plaça le satellite en mode *standby*, et l'appareil resta inactif les trois années suivantes. En 1984 toutefois la mission *STS-41-C* du programme *Space Shuttle Challenger* intercepta le satellite et permit une réparation et un relancement. *SolarMax* put alors réaliser des milliers d'observations de la couronne solaire et des taches solaires jusqu'à sa destruction en juin 1989^[41].

Le satellite japonais *Yohkoh (Rayon de Soleil)*, lancé en 1991, observa les éruptions solaires aux longueurs d'onde des rayons X. Les données rapportées par la mission permirent aux scientifiques d'identifier différents types

d'éruptions, et démontra que la couronne au-delà des régions de pics d'activité était bien plus dynamique et active qu'on l'avait supposé auparavant. *Yohkoh* suivit un cycle solaire entier mais tomba en panne à la suite d'une éclipse annulaire de Soleil le 14 décembre 2001. Il fut détruit en rentrant dans l'atmosphère en 2005^[42].

Une des plus importantes missions solaires à ce jour est la *Solar and Heliospheric Observatory* ou SoHO, lancée conjointement par l'Agence spatiale européenne et la NASA le 2 décembre 1995. Prévue au départ pour deux ans, la mission SoHO est toujours active. Elle s'est avérée si performante qu'une mission de prolongement baptisée *Solar Dynamics Observatory* est envisagée pour 2008. Localisée au point de Lagrange entre la Terre et le Soleil (auquel la force d'attraction de ces deux corps célestes est égale), SoHO envoie en permanence des images du Soleil à différentes longueurs d'onde. En plus de cette observation directe du Soleil, SoHO a permis la découverte d'un grand nombre de comètes, principalement de très petites comètes effleurant le Soleil et détruites lors de leur passage, les comètes rasantes^[43].

Toutes les observations enregistrées par ces satellites sont prises depuis le plan de l'écliptique. En conséquence, ils n'ont pu observer en détail que les seules régions équatoriales du Soleil. En 1990 cependant la sonde *Ulysses* a été lancée pour étudier les régions polaires du Soleil. Elle fit d'abord route vers Jupiter et utilisa son assistance gravitationnelle pour se séparer du plan de l'écliptique. Par chance elle fut idéalement placée pour observer, en juillet 1994, la collision entre la comète Shoemaker-Levy 9 et Jupiter. Une fois sur l'orbite prévue, *Ulysses* étudia le vent solaire et la force du champ magnétique à des latitudes solaires élevées, découvrant que le vent solaire aux pôles était plus lent que prévu ($750 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ environ) et que d'importantes ondes magnétiques en émergeaient, participant à la dispersion des rayons cosmiques^[44].

La mission *Genesis* fut lancée par la NASA en 2001 dans le but de capturer des parcelles de vent solaire afin d'obtenir une mesure directe de la composition de la matière solaire. Elle fut sévèrement endommagée lors de son retour sur Terre, le 10 septembre 2004, mais une partie des prélèvements a pu être sauvée et est actuellement en cours d'analyse.

La mission STEREO (*Solar TERrestrial RELation Observatories*) lancée le 25 octobre 2005 par la NASA a permis pour la première fois l'observation tridimensionnelle du Soleil depuis l'espace. Composée de deux satellites quasiment identiques, cette mission doit permettre une meilleure compréhension des relations Soleil-Terre, en particulier en permettant l'observation des CME (Éjections de Masse Coronale) jusqu'à l'environnement électromagnétique terrestre.

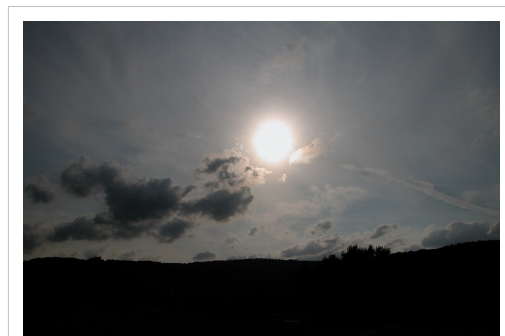
Observation du Soleil et dangers pour l'œil

Observation à l'œil nu

Regarder le Soleil à l'œil nu, même brièvement, est douloureux et même dangereux pour les yeux.

Un coup d'œil vers le Soleil entraîne des cécités partielles et temporaires (taches sombres dans la vision). Lors de cette action, environ 4 milliwatts de lumière frappent la rétine, la chauffant un peu, et éventuellement la détériorant. La cornée peut également être atteinte.

L'exposition générale à la lumière solaire peut aussi être un danger. En effet, au fil des années, l'exposition aux UV jaunit le cristallin ou réduit sa transparence et peut contribuer à la formation de cataractes.



Soleil vu de la Terre.

Observation avec un dispositif optique

Regarder le Soleil à travers les dispositifs optiques grossissants — par exemple des jumelles, un téléobjectif, une lunette astronomique ou un télescope — dépourvus de filtre adapté (filtre solaire) est extrêmement dangereux et peut provoquer des dommages irréparables à la rétine, au cristallin et à la cornée.

Avec des jumelles, environ 500 fois plus d'énergie frappe la rétine, ce qui peut détruire les cellules rétinales quasiment instantanément et entraîner une cécité permanente.

Une méthode pour regarder sans danger le Soleil est de projeter son image sur un écran en utilisant un télescope avec oculaire amovible (les autres types de télescopes peuvent être détériorés par ce traitement).

Les filtres utilisés pour observer le Soleil doivent être spécialement fabriqués pour cet usage. Certains filtres laissent passer les UV ou infrarouges, ce qui peut blesser l'œil. Les filtres doivent être placés sur la lentille de l'objectif ou l'ouverture, mais jamais sur l'oculaire car ses propres filtres peuvent se briser sous l'action de la chaleur.

Les films photographiques surexposés — et donc noirs — ne sont pas suffisants pour observer le Soleil en toute sécurité car ils laissent passer trop d'infrarouges. Il est recommandé d'utiliser des lunettes spéciales en Mylar, matière plastique noire qui ne laisse passer qu'une très faible fraction de la lumière.

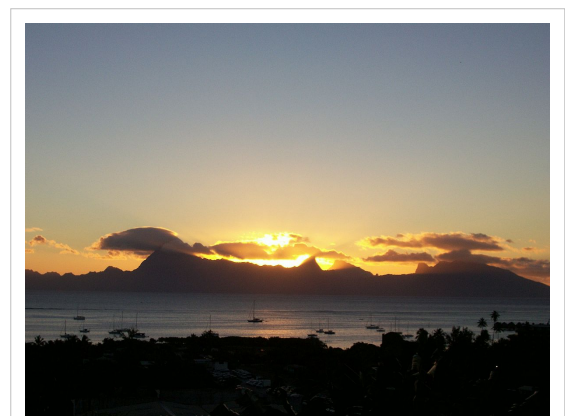
Les éclipses

Les éclipses solaires partielles sont particulièrement dangereuses car la pupille se dilate en fonction de la lumière globale du champ de vision et non selon le point le plus brillant présent dans le champ. Durant une éclipse, la majeure partie de la lumière est bloquée par la Lune, mais les parties non cachées de la photosphère sont toujours aussi brillantes. Dans ces conditions, la pupille se dilate pour atteindre 2 à 6 millimètres et chaque cellule exposée au rayonnement solaire reçoit environ 10 fois plus de lumière qu'en regardant le Soleil sans éclipse ! Ceci peut endommager ou même tuer ces cellules, ce qui crée de petits points aveugles dans la vision.

Les éclipses sont encore plus dangereuses pour les observateurs inexpérimentés et les enfants car il n'y a pas perception de douleur lors de ces destructions de cellules. Les observateurs peuvent ne pas se rendre compte que leur vision est en train de se faire détruire.

Lever et coucher du Soleil

Durant l'aube et l'aurore, le rayonnement solaire est atténué par la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie dues à un plus long passage dans l'atmosphère terrestre, à tel point que le Soleil peut être observé à l'œil nu sans grand danger. En revanche, il faut éviter de le regarder lorsque sa lumière est atténuée par des nuages ou la brume, car sa luminosité pourrait croître très rapidement dès qu'il en sortirait. Un temps brumeux, les poussières atmosphériques et la nébulosité sont autant de facteurs qui contribuent à atténuer le rayonnement.



Coucher de Soleil.

Mythes, légendes et symbolique

Article connexe : Mythe solaire.

Le Soleil est un symbole très puissant pour les hommes. Il occupe une place dominante dans chaque culture.

D'une façon générale, il est un principe masculin et actif. Toutefois, certains peuples nomades d'Asie centrale le considéraient comme un principe féminin (la Mère soleil) ; c'est aussi le cas des shintoïstes, pour qui le Soleil est le kami Amaterasu, la grande déesse, sœur de Tsukuyomi, le kami de la Lune. Même dans la langue allemande, le Soleil est féminin selon son article (*die Sonne*). Dans la mythologie nordique, les enfants de Mundilfari et Glaur sont

Sol (déesse du Soleil) et Máni (dieu de la Lune), une idée que J. R. R. Tolkien a reprise dans son œuvre.

Souvent, le Soleil représente le pouvoir. Cet astre donne la vie et si le Soleil venait à disparaître, ou même si ses rayons ne nous parvenaient plus, la vie s'éteindrait sur Terre, d'où le symbole de vie (donneur de vie).

Dans l'Égypte antique, Râ (ou Rê) est le dieu Soleil et Akhénaton en fera son dieu unique sous le nom d'Aton. Dans le Panthéon grec c'est Apollon, fils de Zeus et de la titane Léo. Citons aussi Hélios qui est la personnification du Soleil lui-même. Les Aztèques l'appelaient Huitzilopochtli, dieu du Soleil et de la guerre, le maître du monde. S'il n'est pas associé à un dieu, des gens l'ont associé à eux-mêmes comme le roi de France Louis XIV surnommé le Roi-Soleil (couronné de Dieu). La famille impériale japonaise descendrait d'Amaterasu, déesse du Soleil. Le Japon est aussi connu sous le nom de « Pays du Soleil Levant ».

En alchimie, le symbole du Soleil et de l'or est un cercle avec un point au centre : \odot . Il représente l'intérieur avec tout ce qui gravite autour. En astronomie comme en astrologie, le symbole est le même.

Soleil est aussi employé par métaphore en poésie pour « jour, journée » et par analogie aux sens de « plein jour », de « vie publique » et de « grand homme » (voir le Roi Soleil). Ces différents sens se retrouvent dans de nombreuses périphrases qui le caractérisent : *l'œil du ciel*, *le maître des astres*, *l'âme du monde*, *le seigneur des étoiles*, *le père du jour*, *le fils aîné de la nature*, *le grand flambeau*, etc. Le dieu du Soleil commun entre les Romains et les Grecs, était le dieu Hélios, dieu de la vérité et du Soleil.

Notes et références

Notes

- [1] on guidelines for the designations and specifications of optical and infrared - astronomical photometric passbands. (http://www.iau.org/static/resolutions/IAU2012_English.pdf), sur le site iau.org, consulté le 15 decembre 2012
- [2] Valeur maximale.
- [3] Vidéo sur YouTube : euronews - - Le soleil, ses cycles, ses tâches et ses explorateurs (<http://www.youtube.com/watch?v=-xktVs9C2qk&feature=dir>).
- [4] Reed RH (2004), *The inactivation of microbes by sunlight: solar disinfection as a water treatment process* Adv Appl Microbiol; 54:333-65 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15251286> PubMed])
- [5] Les 0,02 % ou 0,03 % restants proviennent de la chaleur issue de la Terre elle-même ; l'ensemble des activités humaines (actuelles) produisent une puissance de l'ordre de 0,01 % de celle de l'ensoleillement terrestre.
- [6] CEA - Jeunes - Thèmes - La physique - Le Soleil (http://www.cea.fr/jeunes/themes/la_physique/le_soleil)
- [7] Voir site : space.com (http://www.space.com/scienceastronomy/060130_mm_single_stars.html).
- [8] Kerr, F. J., Lynden-Bell D. (1986). (http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1986MNRAS.221.1023K&data_type=PDF_HIGH&type=PRINTER&filetype=.pdf). 221 : 1023-1038.
- [9] C'est une situation gravitationnelle très différente que celle en cours dans le Système solaire, où la masse du Soleil peut être considéré (en première approximation) comme la source unique du champ gravitationnel.
- [10] Situation du Système solaire (<http://system.solaire.free.fr/presentationsyt.htm#situation>).
- [11] En fait, la position du barycentre fluctue selon celle des planètes ; il se trouve en moyenne à 1.19 rayon solaire du centre, mais peut s'en éloigner jusqu'à 2 rayons solaires, ou s'en rapprocher jusqu'à être presque confondu avec lui.
- [12] Éclipse solaire du 5 Mars -1222 (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/5MCSEmap/-1299--1200/-1222-03-05.gif>)
- [13] Éclipse solaire du 18 Juillet 1860 (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/5MCSEmap/1801-1900/1860-07-18.gif>)
- [14] Pierre-Yves Bely, Carol Christian et Jean-René Roy : 250 réponses à vos questions sur l'astronomie, 2008, p 55 : 4,57 Ga ± 0,012 Ga. Trinh Xuan Thuan, Dictionnaire amoureux du Ciel et des Etoiles, 2009, p 793 : 4,55 Ga. Sciences et avenir octobre 2010, p 21 : 4,5682 Ga. Futura-Science 3 mai 2012 : http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/astromomie/d/journee-mondiale-du-soleil-les-enigmes-de-notre-etoile_38317/
- [15] Bonanno, A., Schlattl, H.; Paternò, L. (2002). "" (http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0204/0204331.pdf). 390 : 1115-1118.
- [16] Article de Matthieu Gounelle dans Astronomy and Astrophysics (<http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2012/09/aa19031-12.pdf>) Vulgarisé dans Sciences et vie décembre 2012.
- [17] Nucléaire - Calcul de la durée de vie du Soleil (<http://e.m.c.2.free.fr/nucleaire-duree-de-vie-soleil.htm>)
- [18] Wolfram Alpha "4.3 Mt" (<http://m.wolframalpha.com/input/?i=4.3+Mt&x=0&y=0>)
- [19] Trinh Xuan Thuan, Origines, la nostalgie des commencements, Folio essais 2003 p 177
- [20] Pogge, Richard W. (1997). (<http://www-astronomy.mps.ohio-state.edu/Vistas/>). . Consulté le 7 décembre 2005.
- [21] Sackmann, I.-Juliana, Arnold I. Boothroyd ; Kathleen E. Kraemer (11 1993). "" (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?1993ApJ...418..457S&db_key=AST&high=24809&nosetcookie=1). Astrophysical Journal 418 : 457.

- [22] Godier, S., Rozelot J.-P. (2000). "" (<http://aa.springer.de/papers/0355001/2300365.pdf>). *Astronomy and Astrophysics* 355 : 365-374.
- [23] , p. 3
- [24] , p. 9
- [25] European Space Agency (). (<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=16394>). Consulté le .
- [26] *Physics of the Inner Heliosphere*, R. Schwenn E. Marsch, Springer-Verlag, 1990
- [27] Page officielle du télescope THEMIS (<http://www.themis.iac.es/>).
- [28] Page officielle de la base de données solaires (<http://bass2000.bagn.obs-mip.fr/>).
- [29] sec.noaa.gov (<http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/>) – Le cycle solaire actuel.
- [30] Galileo Galilei (1564 - 1642) (http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/galilei_galileo.shtml). BBC. Retrieved on 2006-03-22.
- [31] Sir Isaac Newton (1643 - 1727) (http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/newton_isaac.shtml). BBC. Consulté le 22 mars 2006.
- [32] (http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_bio.html). . Consulté le 22 mars 2006.
- [33] Thomson, Sir William (1862). "" (http://zapatopi.net/kelvin/papers/on_the_age_of_the_suns_heat.html). : 288-293.
- [34] Lockyer, Joseph Norman (1890). (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1890QB981.L78.....>).
- [35] Darden, Lindley (1998). (<http://www.philosophy.umd.edu/Faculty/LDarden/sciinq/>)
- [36] CNRS : Naissance, vie et mort des étoiles (http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/etoiles/niv1_1.htm).
- [37] Bethe, H. (1938). "" . 54 : 862-862.
- [38] Bethe, H. (1939). "" . 55 : 434-456.
- [39] E. Margaret Burbidge ; G. R. Burbidge ; William A. Fowler ; F. Hoyle (1957). " (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1957RvMP...29..547B>)". 29 (4): 547-650.
- [40] Pioneer 6-7-8-9-E. *Encyclopedia Astronautica* (<http://www.astronautix.com/craft/pio6789e.htm>). Consulté le 22 mars 2006.
- [41] St. Cyr, Chris ; Joan Burkepille (1998). (http://web.hao.ucar.edu/public/research/svosa/smm/smm_mission.html). Consulté le .
- [42] (2005). (http://www.jaxa.jp/press/2005/09/20050913_yohkoh_e.html). Consulté le .
- [43] (<http://sungrazer.nrl.navy.mil/>) Consulté le .
- [44] (http://ulysses.jpl.nasa.gov/science/mission_primary.html). Consulté le .

Références

([en](#)) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l’article de Wikipédia en anglais intitulé « Sun (<http://en.wikipedia.org/wiki/Sun?oldid=83121606>) » (voir la liste des auteurs (<http://en.wikipedia.org/wiki/Sun?action=history>))

Mercure (planète)

↻ Pour les articles homonymes, voir Mercure.

Mercure ☿



Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	57 909 176 km (0,38709893 UA)
Aphélie	69 817 079 km (0,46669835 UA)
Périhélie	46 001 272 km (0,30749951 UA)
Circonférence orbitale	359 976 739 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	2 439,7 km (0,383 Terre)
Rayon polaire	2 439,7 km (0,384 Terre)
Rayon moyen volumétrique	2 439,7 km (0,383 Terre)
Aplatissement	0
Périmètre équatorial	15 329,1 km (0,383 Terre)

Superficie	75×10 ⁶ km ² (0,147 Terre)
Volume	60,83×10 ⁹ km ³ (0,056 Terre)
Masse	330,2×10 ²¹ kg (0,055 Terre)
Masse volumique globale	5 427 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 ± 0,0017°
Albédo géométrique visuel	0,106
Albédo de Bond	0,119
Irradiance solaire	9 126,6 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	~ 10 ⁻⁹ Pa
Masse totale	Moins de 1 000 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 : Ἑρμῆς
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 pour une planète 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 élongation 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 prédite par la mécanique newtonienne, une avance de 42,98 secondes d'arc par siècle qui n'a pu être complètement expliquée que dans le cadre de la relativité générale.

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.

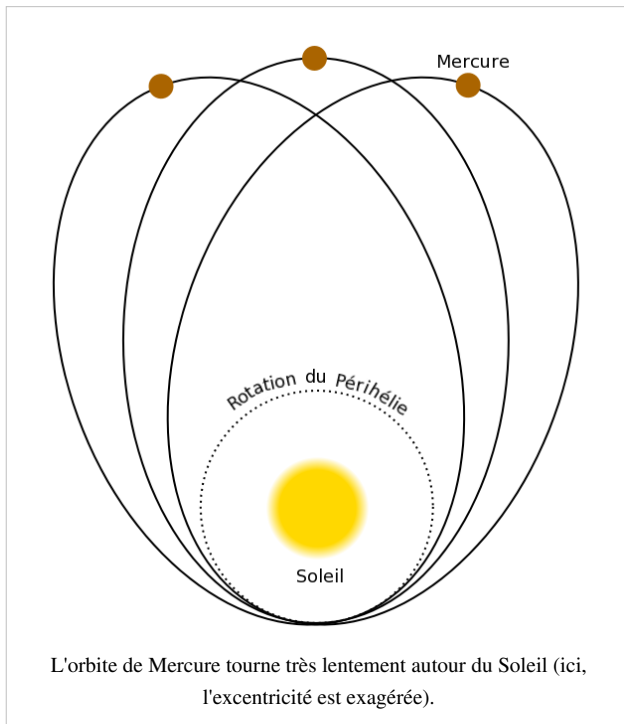
Comme Vénus, Mercure est quasiment sphérique — son aplatissement pouvant être considéré comme nul — en raison de sa rotation très lente. Dépourvue de véritable atmosphère, sa surface est très fortement cratérisée, et globalement similaire à la face cachée de la Lune. Seules deux sondes spatiales ont 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 mise 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 ($1\,362\text{ W/m}^2$) — 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^[2]. 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 »)^[3].

Orbite

Excentricité



Mercure a une excentricité orbitale qui fait varier sa distance au Soleil de 46 à 70 millions de kilomètres.

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^[4].

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.

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^[5]. 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^[6].

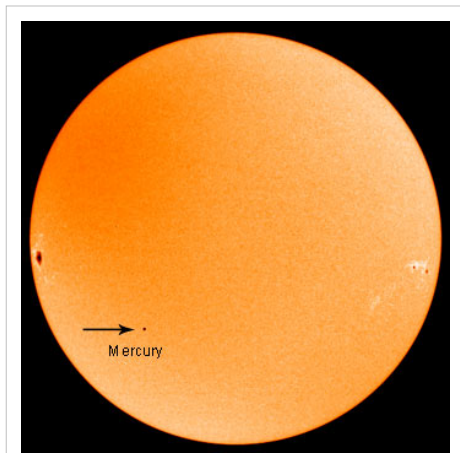
Les astronomes ont donc, dans un premier temps, pensé à la présence d'un ou plusieurs corps entre le Soleil et l'orbite de Mercure dont l'interaction gravitationnelle perturberait le mouvement de cette dernière. L'astronome français Urbain Le Verrier — qui avait découvert en 1846 la planète Neptune à 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 déduisit également un diamètre d'environ 2 000 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^[7].

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'énigme 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^[8].

Transit de Mercure



Transit de Mercure (*Mercury*) du 8 novembre 2006.

Article détaillé : 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.

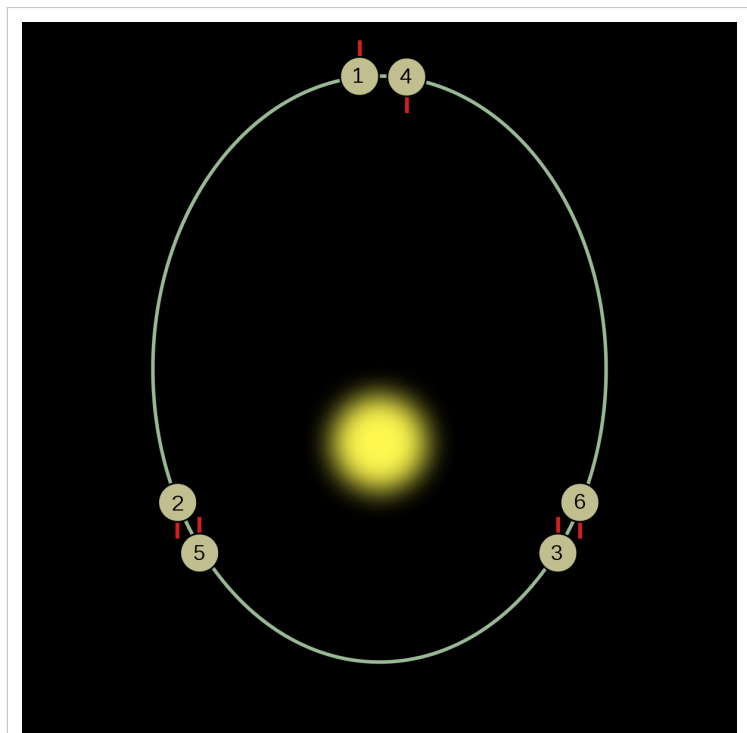
Les transits de Mercure vus depuis la Terre sont beaucoup plus fréquents que ceux de Vénus, avec une fréquence d'environ 13 ou 14 par siècle, en raison de la proximité de la planète au Soleil, ce qui implique une période de révolution plus courte que celle de Vénus. Ils peuvent se produire en mai à des intervalles de 13 ou 33 ans, ou en novembre tous les 7, 13 ou 33 ans. Les deux derniers transits de Mercure datent de 2003 et 2006 ; les deux prochains se produiront en 2016 et 2019^[9].

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^[10].

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



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

terrestres, 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^[11]. 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^[12].

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

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^[13], 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^[14], 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, avant de reprendre un mouvement apparent normal, c'est-à-dire se déplaçant d'est en ouest^[15].

Conditions de surface

« Atmosphère »

Article détaillé : Atmosphère de Mercure.

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*, 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.

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

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.

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.

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

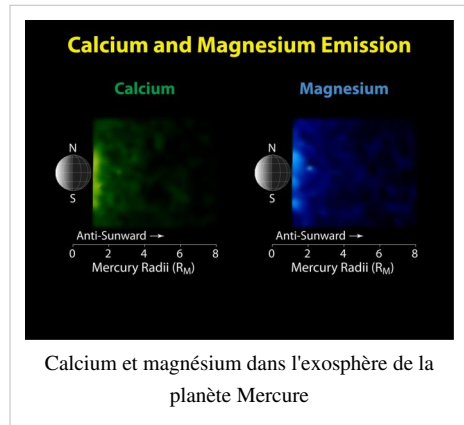
Mercure est une planète très chaude. La température moyenne à la surface est 179 °C (452 K). C'est la température de stabilisation en dessous du régolite, où le sous-sol n'est plus soumis à l'alternance des « ondes » thermiques de la journée et de la nuit (égales à l'année mercurienne).

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).

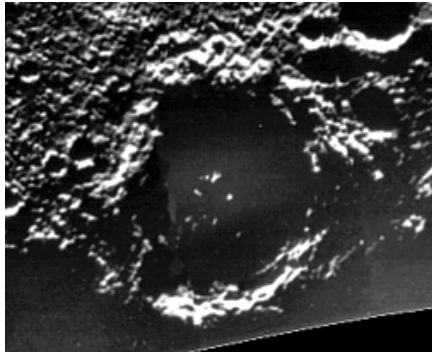
Depuis sa surface, le Soleil apparaît en fonction de l'orbite elliptique de Mercure entre 2,1 et 3,3 fois plus gros que depuis la Terre, et sa lumière est environ 7 fois plus intense avec un flux de rayonnement solaire de 9 126,6 W/m².



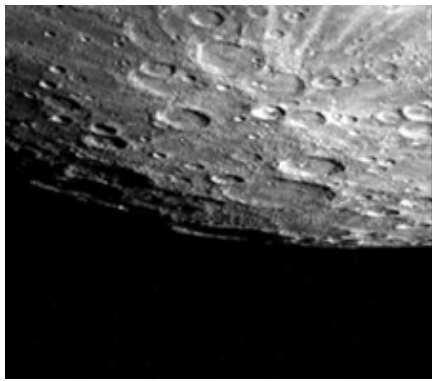
Géologie

Article détaillé : Géologie de Mercure.

Surface



Cratère de Chao Meng-Fu.



Surface de Mercure.

La surface de Mercure est couverte d'un tapis poussiéreux de minéraux (silicates), de cassures et de cratères. 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. 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. La découverte des plaines volcaniques sur la surface aurait été mise en cause par les chutes d'énormes astéroïdes qui atteignaient le manteau et en même temps créaient des éruptions volcaniques à l'opposé de la planète de fer.

Le plus remarquable de ces cratères (du moins, sur la portion qui a pu être photographiée) est le Bassin Caloris, un impact météoritique d'un diamètre d'environ 1 300 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. L'impact aurait « creusé » jusqu'au manteau planétaire de Mercure, créé des ondes de choc qui ont perturbé et traversé le noyau puis fait des plissements à l'opposé du cratère.

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 météoritique ont déformé la face opposée, soulevant le sol à une hauteur de 800 m à 1 000 m et déformant la surface de Mercure, produisant cette région chaotique'.

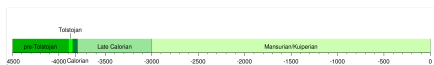
Par ailleurs, les photographies prises par Mariner 10 révèlent la présence d'escarpements lobés dus à une contraction de la planète lors de son refroidissement. Ce refroidissement entraîna une diminution du rayon de la planète d'environ 2 km, produisant des cassures dans

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 :

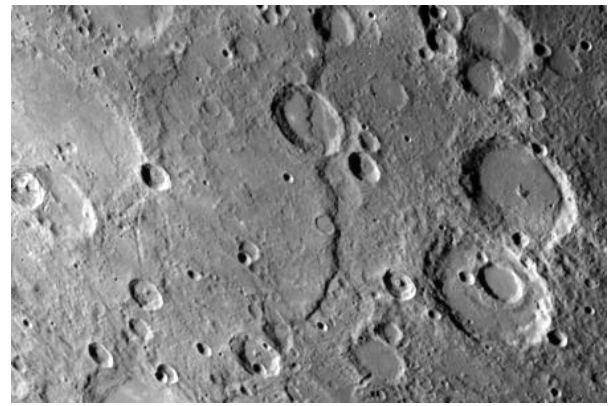
- les cratères — voir liste des cratères de Mercure ;
- les *Albedos* (régions marquées par une réflexion plus forte ou plus faible) — voir liste des albedos de Mercure ;
- les *Dorsa* (crête) — voir liste des crêtes de Mercure ;
- les *Montes* (montagnes) — voir liste des monts de Mercure ;
- les *Planitiae*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

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.



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.



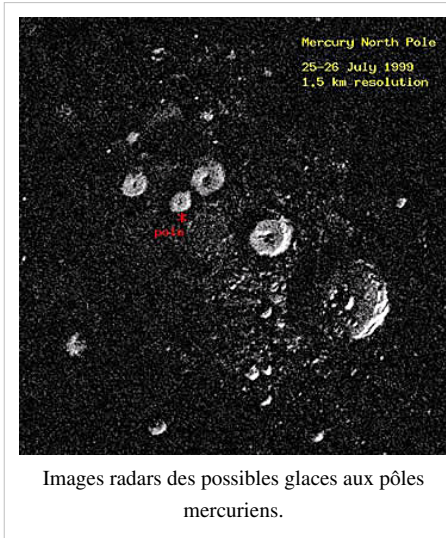
Vue d'artiste d'un grand bombardement tardif.

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 météoritique 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 météoritique 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 événement 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'ensuit. 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'événements 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 produit une partie des plaines lisses est placée avant l'impact Caloris^[16].

Glace



Des observations radar effectuées 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.

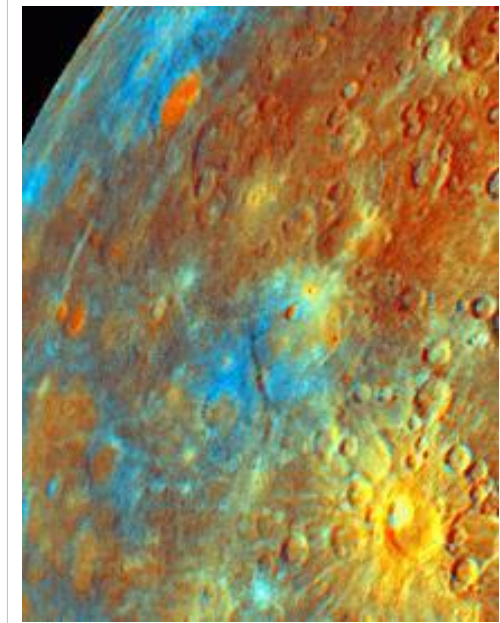
Deux sources probables de glace sont envisagées : le bombardement météoritique et le dégazage du sol. Les météorites frappant la planète ont pu apporter de l'eau qui serait restée piégée (gelée par les basses températures des pôles) aux endroits où se sont produits les impacts. De même pour les dégazages, certaines molécules ont pu migrer vers les pôles et s'y retrouver piégées^[17].

Volcanisme

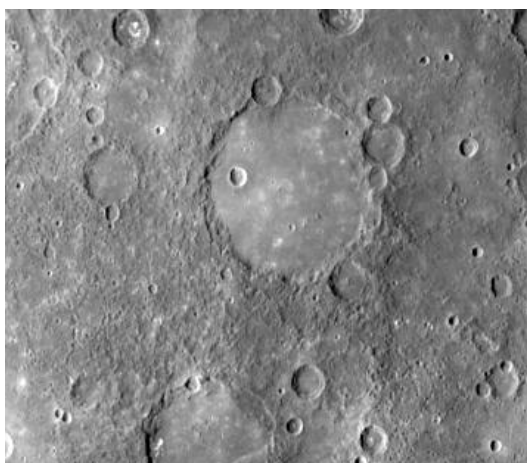
La présence de plaines plus jeunes (les plaines lisses) est la preuve que Mercure a connu dans son passé une activité volcanique. L'origine de ces plaines a été mise en évidence à la fin des années 1990 par Mark Robinson et Paul Lucey en étudiant les photographies de Mercure. Le principe était de comparer 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 recouvraient, 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.

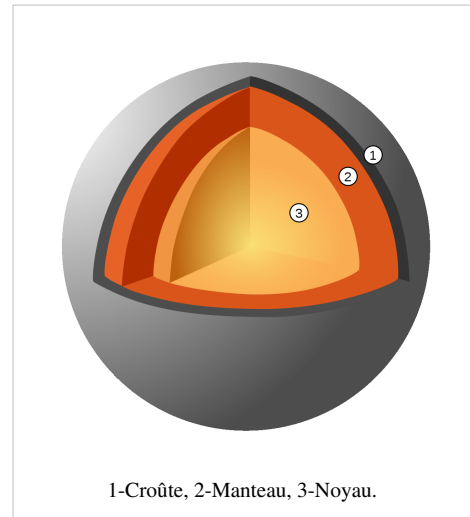
Robinson et Lucey ont alors remarqué que les plaines étaient marquées de couleurs différentes par rapport aux cratères et ont pu en déduire que ces plaines étaient de composition différente par rapport aux surfaces plus anciennes (caractérisées par la présence de cratères). Ces plaines ont dû, à l'instar 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 à la suite 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^[18].

Structure interne

La planète possède un noyau métallique correspondant à un minimum de 55 % de la masse de la planète^[19], plus gros que celui de la Terre en proportions environ 33 % en masse pour la Terre). Des recherches récentes suggèrent que ce noyau est liquide (fer et du nickel), au moins dans sa partie externe. 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 ($5,515 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). 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 » ou « la planète de fer »^[20].



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^[21]. 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.

Selon des données plus récentes, Mercure aurait une couche externe solide de 410 km composée d'une croûte d'une cinquantaine de kilomètre surplombant une couche de sulfure de fer cristallisé. En dessous se trouverait le noyau ferreux, liquide au moins dans sa partie externe et probablement solide au cœur.

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 moindre.

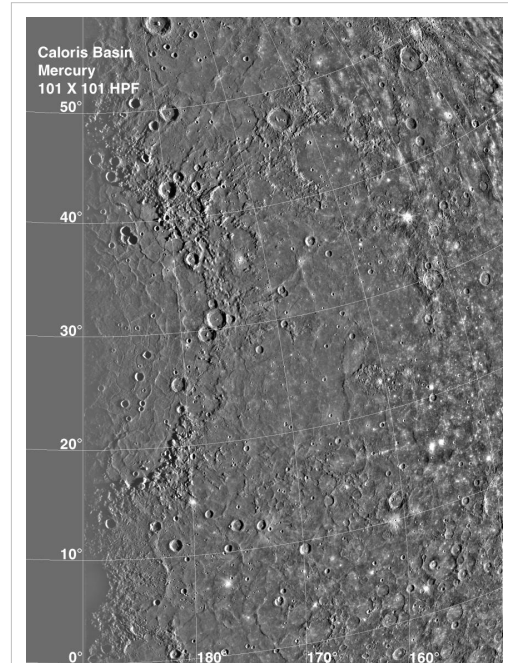
Métallicité

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 (la croûte terrestre est la partie superficielle et solide du matériau dont est faite Mercure) 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^[22].

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.

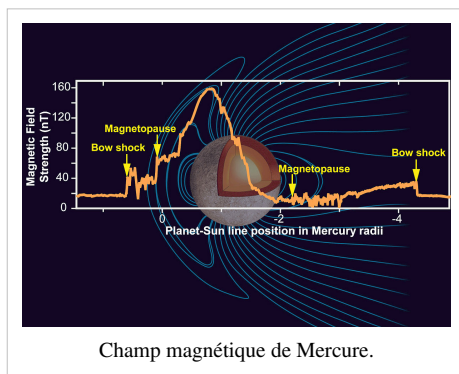
Alternativement, Mercure aurait pu s'être formée très tôt dans l'histoire, avant même que l'énergie dégagée par le Soleil ne se soit stabilisée. Mercure aurait eu à sa formation le double de sa masse courante, mais à mesure que la proto-étoile se contractait, la température aux alentours de Mercure augmentait et aurait pu atteindre 2500–3500 K, voire 10 000 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^[23].



Le bassin Caloris situé dans l'ombre du terminateur (à gauche), cratère formé à la suite d'un impact météoritique, et mesurant 1 350 km de diamètre.

Champ magnétique

Article principal : Champ magnétique de Mercure.



Champ magnétique de Mercure.

Révélee par la sonde Mariner 10 lors de sa première approche, en mars 1974, la présence d'un champ magnétique faible 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 μ T, ce qui représente un peu moins d'un soixantième du champ magnétique terrestre.

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 résiduelle, abaissant ainsi le point de fusion du mélange. 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^[24].

Exploration

Observation dans l'Antiquité

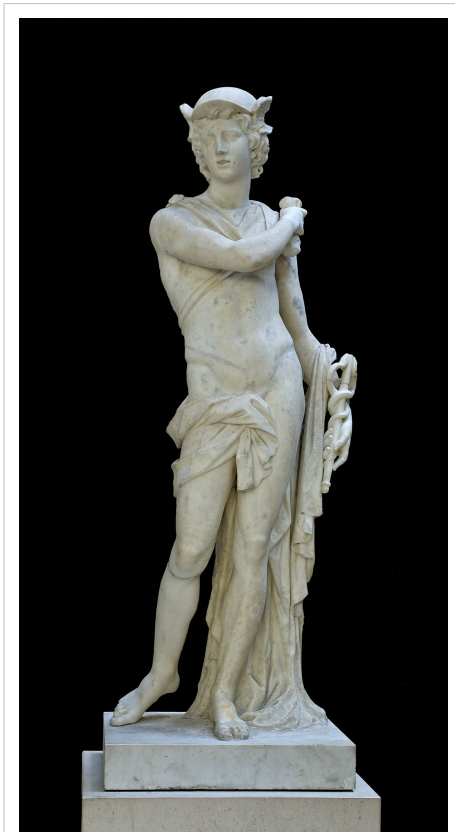
Mercure est connue depuis que les hommes s'intéressent au ciel nocturne ; la première civilisation à en avoir laissé des traces écrites est la civilisation sumérienne^[25] (III^e millénaire av. J.-C.) qui la nommait « *Ubu-idim-gud-ud* », mais elle était probablement connue depuis bien avant.

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^[26].

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 (Ἀπόλλων) et Hermès (Ἑρμῆς) de la mythologie grecque; 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^[27].

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^[28]. Auguste Wahlen écrit dans son Dictionnaire^[29]: « Pourquoi



Mercure, le messager des dieux.

donc une planète aussi peu importante dans le système dont elle fait partie porte t'elle le nom du messager des dieux dans l'Olympe mythologique ? C'est qu'elle se trouve assez fréquemment en conjonction avec les autres planètes entre lesquelles ces rapprochements sont beaucoup plus rares. Comme la durée de sa révolution autour du Soleil ou son année n'est que le quart de l'année terrestre, dans ce court espace de temps on la voit se diriger vers une planète et après s'en être approchée s'éloigner pour faire une autre visite aussi promptement terminée. La fréquente répétition de cette sorte de voyages a pu faire concevoir l'idée d'un autre messager. »

Hygin qui, au I^{er} siècle ap.J.-C., a compilé un grand nombre de sources grecques mentionne dans ses *Fables mythologiques*^[30] que la planète était aussi connue sous le nom de Stilbon (ou *Stilbos*), « celui qui brille »^[31].

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.

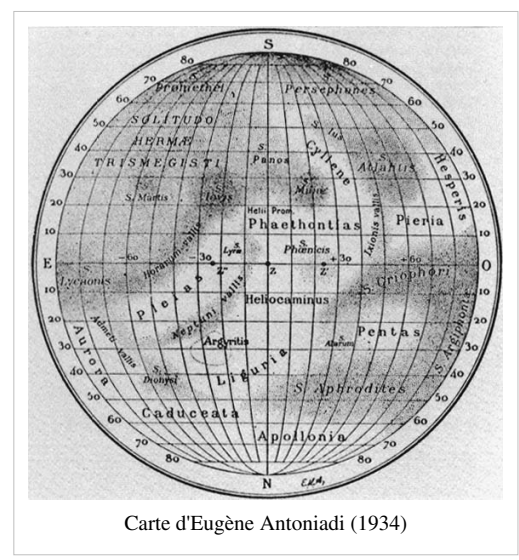
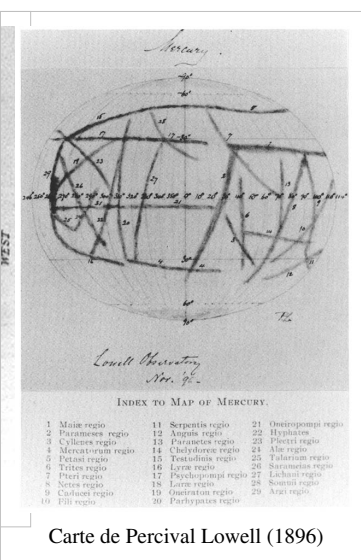
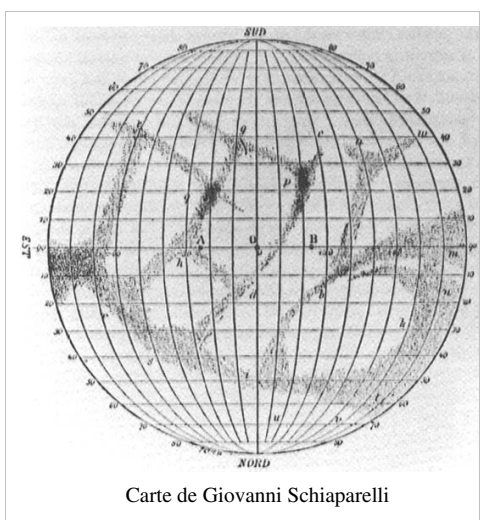
La planète est visible juste au-dessus de l'horizon, ce qui accroît la difficulté d'observation : la lumière réfléchie par Mercure doit traverser dix fois plus d'atmosphère terrestre que si on l'observait au zénith, ce qui produit des distorsions et une image moins nette. On raconte que sur son lit de 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 détail 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^[32].

Depuis Mariner 10

En 1974–75, Mariner 10 rapporta des photographies en haute résolution permettant la cartographie d'environ 40–45 % de sa surface, révélant les détails topographiques jamais vus 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 »), suivie 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'albédo (entre parenthèses) leur est attribué. Les noms d'albédos 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.

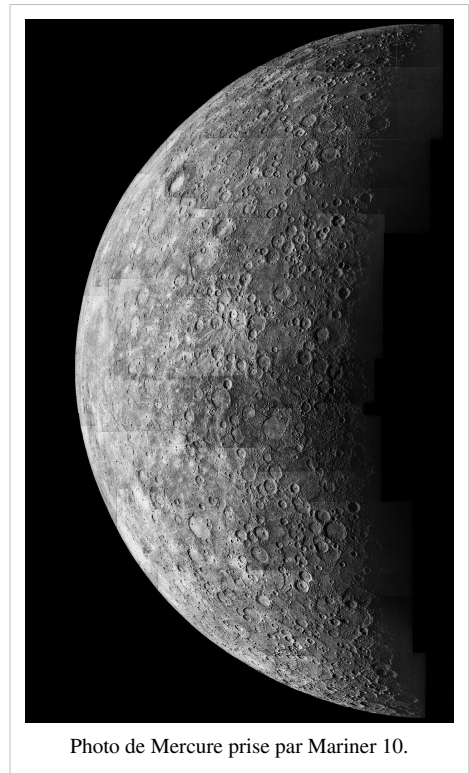


Photo de Mercure prise par Mariner 10.

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 (Tricrena)	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	
	Mise en orbite	effectué le 18 mars 2011 à 1h UTC	
BepiColombo	Lancement	planifié pour 2015 ^[33]	ESA/JAXA
	Mise en orbite	planifiée pour 2022	

Mariner 10

Article détaillé : Mariner 10.

Mariner 10 a été la première sonde à étudier Mercure de près^[34]. Elle a survolé la planète à trois reprises, en mars et septembre 1974 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.

La sonde aura pris durant ces trois passages plus de 2000 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.

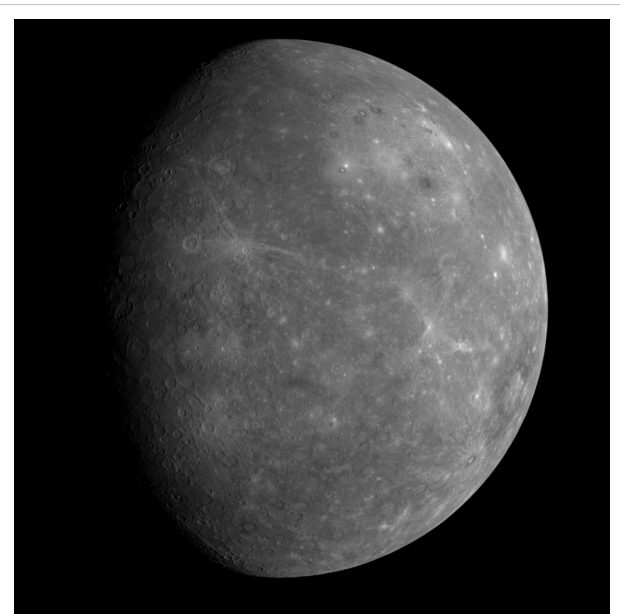
Messenger

Article détaillé : Programme Messenger.

Une nouvelle mission pour Mercure baptisée Messenger^[35] (*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 1 h 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

Article détaillé : BepiColombo.

L'Agence spatiale européenne est en train de planifier en collaboration avec l'Agence spatiale japonaise une mission baptisée BepiColombo^[36], 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 Ariane 5 en juillet 2016^[37]. Elles vont rejoindre Mercure environ huit 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 et serait donc dangereuse avec des températures diurnes de 430°C et des températures nocturnes de -180°C. 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) : 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.

Culture

« Mercure, le messager ailé » est le 3^e mouvement de l'œuvre pour grand orchestre Les Planètes, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

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] Mercure (<http://www.le-systeme-solaire.net/mercure.html>)
- [3] Dictionnaire de l'astronomie, universalis, ISBN 2-226-10787-8, .
- [4] 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...

- [5] En d'autres termes, son orbite est elle-même en rotation autour du Soleil.
- [6] René Taton, *La science contemporaine*, Quadrige/PUF (1995), La relativité,
- [7] "Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète" (<http://www.archive.org/stream/comptesrendusheb49acad#page/378/mode/2up>)
- [8] Vulcan, the intra-Mercurial planet, 1860-1916, 1971 Solarviews (<http://www.solarviews.com/eng/hypothet.htm#vulcan>)
- [9] Transit de Mercure, une inhabituelle tache sur le Soleil (http://www.cidehom.com/apod.php?_date=061114)
- [10] Mercury (Planet) - Mercury's Rotation Rate (<http://science.jrank.org/pages/4241/Mercury-Planet-Mercury-s-rotation-rate.html>)
- [11] Solarview.com (<http://www.solarviews.com/french/mercury.htm>)
- [12] 3:2 Mercury-Sun Synchronization (<http://large.stanford.edu/courses/2007/ph210/kwon2/>)
- [13] 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.
- [14] Orbit and Rotation of Mercury (<http://planetfacts.org/orbit-and-rotation-of-mercury/>)
- [15] Tous sur orbite !, DVD documentaire
- [16] P. D. Spudis (2001). "The Geological History of Mercury". Workshop on Mercury: Space Environment, Surface, and Interior, Chicago
- [17] Ice on Mercury (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/ice/ice_mercury.html)
- [18] Evidence of Volcanism on Mercury: It's the Pits (http://messenger.jhuapl.edu/gallery/sciencePhotos/image.php?gallery_id=2&image_id=349)
- [19] NASA - New Science Findings From Messenger's Third Mercury Flyby (http://www.nasa.gov/mission_pages/messenger/media/flyby20091029.html)
- [20] *Ciel & Espace*, février 2013 (<http://www.cieletespace.fr/a-la-une/10023>).
- [21] *Astronomie, Sélection*, ISBN 978-2-7098-1539-0,
- [22] Benz, W.; Slattery, W. L.; Cameron, A. G. W. (1988). "Collisional stripping of Mercury's mantle". *Icarus* 74
- [23] Cameron, A. G. W. (1985). "The partial volatilization of Mercury". *Icarus* 64 (2): 285–294
- [24] Mercury: Magnetic field and interior, Norman F. Ness (<http://www.springerlink.com/content/m42g57734m88n3w1/>)
- [25] Bienvenue sur la planète Mercure !!! (<http://perso.orange.fr/youpie/systsol/Mdecouv.htm>)
- [26] Dictionnaire de l'astronomie, Larousse, ISBN 2-03-720019-6, .
- [27] Charles Frankel, *Dernières nouvelles des planètes*, Seuil 2009,
- [28] Mercure (<http://www.solarviews.com/french/mercury.htm>)
- [29] Nouveau dictionnaire de la conversation, Vol. 8, 1841, (<http://books.google.fr/books?id=N98PAAAAQAAJ&pg=PA226&hl=fr&q&f=false#v=onepage&q&f=false>)
- [30] Classical E-Text: FULGENIUS, MYTHOLOGIES 1 (<http://www.theoi.com/Text/FulgentiusMythologies1.html#18>)
- [31] <http://www.tribunes.com/tribune/alliage/33-34/guil.htm>
- [32] De Mercure à Pluton, planètes et satellites, Pierre Humbert, 1937,
- [33] Date de lancement (<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30>) sur le site de l'ESA. Consulté le 07 mai 2012.
- [34] Page sur Mariner 10 (<http://www.le-systeme-solaire.net/modules.php?name=sondes&page=mariner10>)
- [35] page dédiée à MESSENGER (<http://www.astrocosmos.net/article/messenger.htm>)
- [36] BepiColombo sur le site de la CNES (<http://smc.cnes.fr/BEPICOLOMBO/Fr/index.htm>)
- [37] BepiColombo fact sheet (<http://sci.esa.int/bepicolombo/47346-fact-sheet/>), site officiel ESA

Références

Vénus (planète)

🔗 Pour les articles homonymes, voir Vénus.

Vénus ♀



Vénus en vraies couleurs vue par Mariner 10.

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	108 208 930 km (0,723332 UA)
Aphélie	108 942 109 km (0,72823128 UA)
Périhélie	107 476 259 km (0,71843270 UA)
Circonférence orbitale	679 888 899 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	6 051,8 ± 1,0 km (0,949 Terre)
Rayon polaire	6 051,8 ± 1,0 km (0,952 Terre)
Rayon moyen volumétrique	6 051,8 ± 1,0 km (0,950 Terre)
Aplatissement	0
Périmètre équatorial	38 025 km (0,949 Terre)

Superficie	460×10 ⁶ km ² (0,902 Terre)
Volume	928,43×10 ⁹ km ³ (0,857 Terre)
Masse	4,8685×10 ²⁴ kg (0,815 Terre)
Masse volumique globale	5,204×10 ³ 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)	-243,023 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	2 613,9 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	9,3×10 ⁶ Pa
Masse volumique au sol	~ 65 kg/m ³
Masse totale	480×10 ¹⁸ 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 carbone COS	Traces
Histoire	
Divinité babylonienne	Ishtar
Divinité grecque	- le matin : Φωσφόρος - le soir : Έωσφόρος
Nom chinois (élément associé)	Jīnxīng 金星 (métal)

Vénus est la deuxième des huit planètes du Système solaire en partant du Soleil, et la sixième par masse ou par taille décroissantes.

La planète Vénus a été baptisée du nom de la déesse Vénus de la mythologie romaine.

Présentation générale

La distance de Vénus au Soleil est comprise entre 0,718 et 0,728 UA, avec une période orbitale de 224,7 jours. Vénus est 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 remodelent 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.

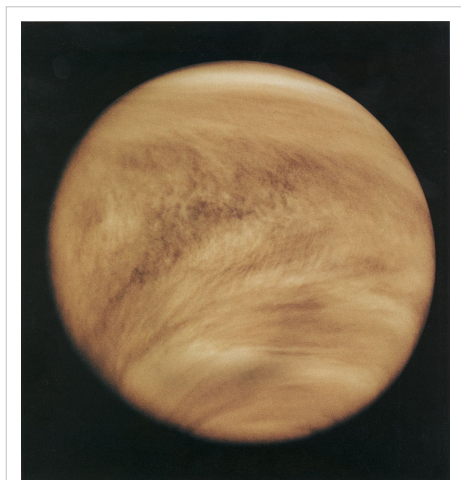
Par ailleurs, des mesures d'émissivité à 1,18 μm réalisées en 2008 ont suggéré une relative abondance des granites et autres roches felsiques sur les terrains les plus élevés — qui sont généralement les plus anciens — de la planète, ce qui impliquerait l'existence passée d'un océan global assorti d'un 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.

Article détaillé : atmosphère de Vénus.

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^[2]. Ce mélange crée le plus fort effet de serre du Système solaire, permettant d'atteindre des températures de surface tournant autour des 460 °C. 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.

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

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

Basse atmosphère

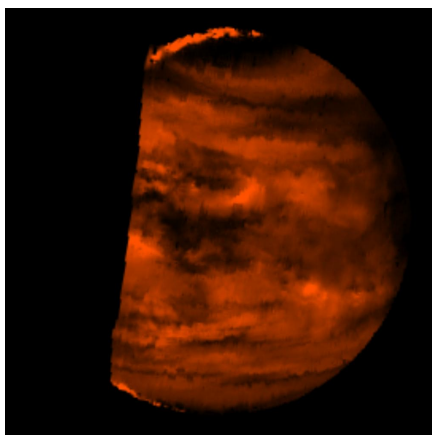


Image en proche infrarouge (2,3 μm) des profondeurs de l'atmosphère de Vénus obtenue par la sonde Galileo. Les régions sombres sont la silhouette des nuages apparaissant en négatif sur la basse atmosphère, très chaude et donc très lumineuse dans l'infrarouge.

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).

Composition de la basse atmosphère de Vénus

Élément ou molécule	Pourcentage dans la basse atmosphère (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 %

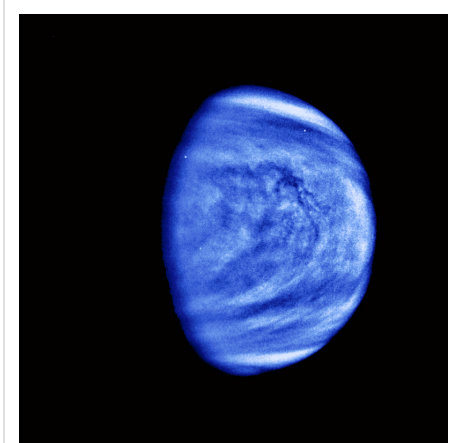
Couche nuageuse

Il y a plusieurs couches de nuages situées entre 45 km et 70 km. 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. Le dioxyde de carbone y domine toujours.

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 détails ont été accentués 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.

Surface

Vénus ayant un aplatissement nul, les altitudes y sont définies par rapport au rayon moyen volumétrique de la planète, qui vaut 6 051,84 km. C'est une planète au relief assez peu accidenté : les quatre cinquièmes de sa surface sont recouverts de plaines volcaniques à faible pente. La surface vénusienne est principalement occupée à hauteur de 70 % par de vastes plaines sans grand relief. Baptisées *planitia* 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].

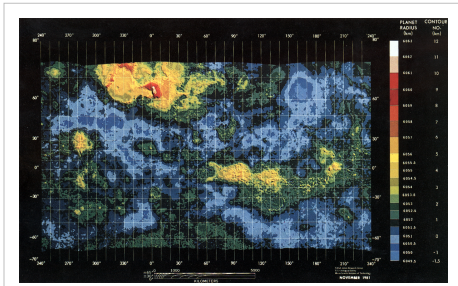
Ces plaines, de nature *a priori* volcanique, se creusent par endroits jusqu'à 2 900 m sous le niveau moyen de la surface, au niveau de dépressions couvrant environ un cinquième de la surface de la planète.

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 3 700×1 500 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 10 700 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 5 000 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

Article détaillé : Géologie de Vénus.

Vénus ressemble à la Terre par sa taille (6 051 km de rayon contre 6 378 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^[3].

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 riche 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 comme celles de la Terre.

Cette différence fondamentale entre la géologie des deux 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.

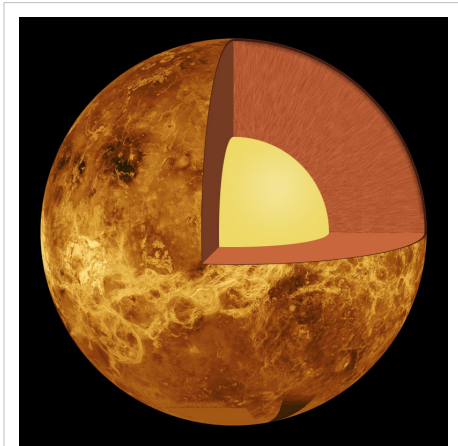
Volcanisme et impacts météoritiques

Article détaillé : Volcanisme sur Vénus.

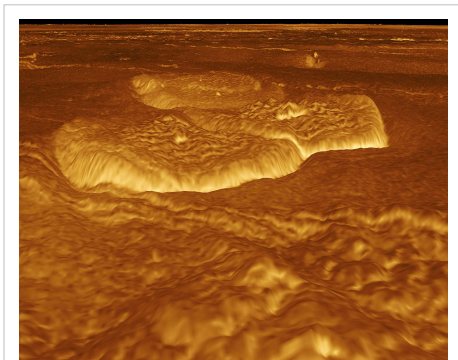
Il reste sur Vénus un volcanisme résiduel, entraînant parfois la présence de lave en fusion au sol. D'ailleurs, la surface de Vénus semble jeune, affichant moins d'un milliard d'années du fait d'un volcanisme actif relativement récent.

Un épisode généralisé aurait eu lieu il y a 600 Ma. Émergeant d'un plateau accidenté situé dans l'ouest d'Estla Regio, le volcan bouclier Gula Mons atteint une altitude de 3 000 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 4 600 km, alors que *Theia* est un volcan. Les reliefs auraient à 80 % une origine volcanique et certaines montagnes seraient des coulées de lave.

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



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



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

Manteau et noyau

Vénus posséderait 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 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, 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. 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.

L'absence de dynamo s'expliquerait par un manque de convection dans le noyau de Vénus. 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^[4], 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^[5]. 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^[6].

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)^[7], alors que le jour sidéral est de 243,023 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.

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^[8].

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'. 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.

L'hypothétique synchronisation Terre-Vénus

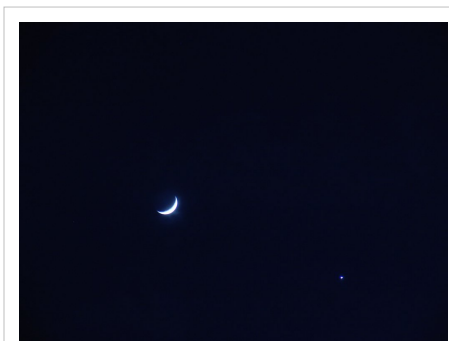
Les jours solaires vénusiens sont tels que Vénus présente la même face aux observateurs terrestres lors de chaque conjonction inférieure : Vénus dans l'axe Terre-Soleil ; la Terre en opposition vénusienne. En effet, la période entre 2 conjonctions inférieures se déroule sur 5 jours solaires vénusiens (une « semaine vénusienne » en quelque sorte). Cette révolution synodique de Vénus (vue de la Terre) fait 584 jours (583,92108 j exactement), ce qui est effectivement très proche de 5 jours solaires : $5 \times 116,7505$ 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. Il est possible, à certaines périodes de l'année, d'apercevoir la planète en plein jour. Comme Vénus est sur une orbite plus proche du Soleil que celle de la Terre, elle ne semble jamais loin du Soleil vue depuis la Terre. Son élongation atteint un maximum de 47,8°. Elle n'a pas de satellite naturel connu.

On peut observer, comme avec la Lune, des phases de la planète selon leur moment d'apparition dans l'année. 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.

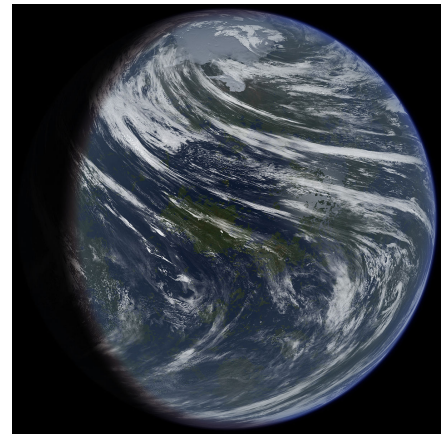


Observation nocturne de Vénus (à droite de la Lune).

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. Les deux planètes sont semblables, autant par des aspects physiques qu'orbitaux :

- Elles sont nées à peu près en même temps, il y a 4,6 milliards d'années, dans le même nuage de gaz et de poussière ;
- 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.

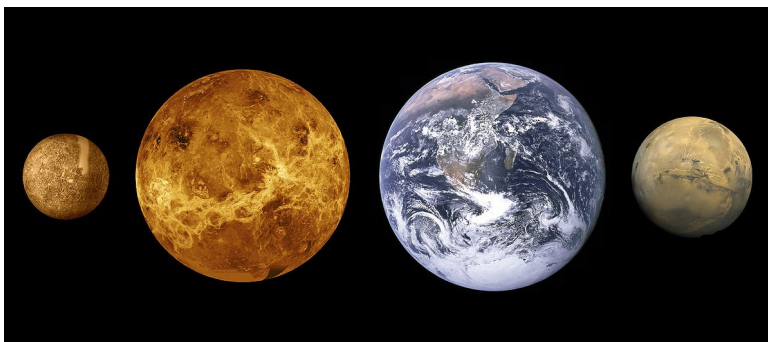


Une vue d'artiste de Vénus présentant son apparence si elle était similaire à la Terre.

Comparaison de propriétés physiques de Vénus et de la Terre

Propriétés physiques	Vénus	Terre	Rapport Vénus/Terre
Masse	$4,8685 \times 10^{24}$ kg	$5,9736 \times 10^{24}$ kg	0,815
Rayon équatorial	6 051 km	6 378 km	0,948
Densité moyenne	5,25	5,51	0,952
Demi-grand axe	108 208 926 km	149 597 887 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. En effet, il a été découvert qu'il y avait probablement des quantités importantes d'eau à sa surface. Cette eau se serait évaporée à la suite d'un important effet de serre créant ainsi un niveau de gaz à effet de serre critique dans l'atmosphère.



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

Comparaison de quelques caractéristiques physiques des quatre planètes telluriques du système solaire

Planète	Rayon équatorial	Masse	Gravité	Inclinaison de l'axe
Mercure	2 439,7 km (0,383 Terre)	$3,302 \times 10^{23}$ kg (0,055 Terre)	3,701 m/s ² (0,377 g)	~0,01 °
Vénus	6 051,8 km (0,95 Terre)	$4,8685 \times 10^{24}$ kg (0,815 Terre)	8,87 m/s ² (0,904 g)	177,36 ° ^[9]
Terre	6 378,14 km	$5,9736 \times 10^{24}$ kg	9,780 m/s ² (0,99732 g)	23,45 °
Mars	3 402,45 km (0,533 Terre)	$6,4185 \times 10^{23}$ kg (0,107 Terre)	3,69 m/s ² (0,376 g)	25,19 °

Satellite et quasi-satellites de Vénus

Article détaillé : Neith (satellite).

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).

Vénus possède un autre quasi-satellite : (322756) 2001 CK₃₂.

Les recherches afin de trouver un satellite naturel de Vénus sont toujours en cours.

Transit

Article détaillé : Transit de Vénus.

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). 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 6 juin 2012. Le prochain transit aura lieu le 11 décembre 2117.

Exploration

Article détaillé : Exploration de Vénus.

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^[10]. 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^[11].

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.

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.

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.

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^[12]. D'autres missions visant à explorer Vénus sont prévues d'ici quelques années, notamment la sonde japonaise *Akatsuki* en 2010 (retardée à 2015) et la sonde européenne *Venus Entry Probe* qui devait être lancée en novembre 2013 (mais restée à l'état de projet)^[13]. La mission *BepiColombo* prévue pour 2014 et destinée principalement à Mercure réalisera un survol de Vénus^[14].

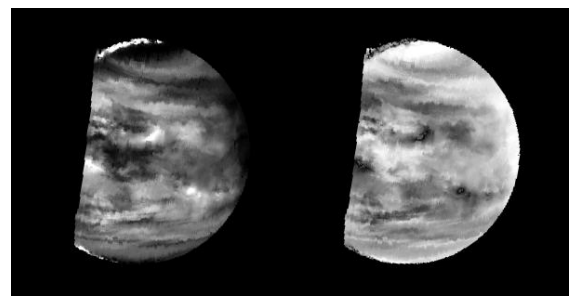


Image de Vénus prise dans le proche infrarouge par la sonde *Galileo* (1990).



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

Dans la culture

Symbolisme

Article détaillé : Vénus (mythologie).

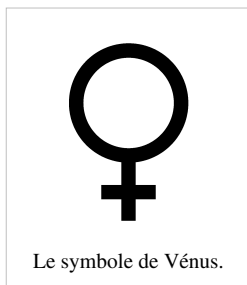
La planète Vénus doit son nom à la déesse de l'amour et de la beauté dans la mythologie romaine, Vénus, qui a pour équivalent Aphrodite dans la mythologie grecque. Cythère étant une épiclèse homérique d'Aphrodite, l'adjectif « cythérien » ou « cythéréen » est parfois utilisé en astronomie (notamment 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^[15].

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.

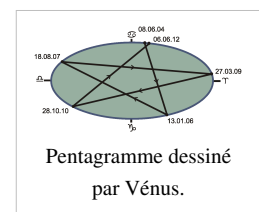
Vénus était connue des civilisations mésoaméricaines ; elle occupait une place importante dans leur conception du cosmos et du temps. Les Nahuas l'assimilaient au dieu Quetzalcoatl, et, plus précisément, à Tlahuizcalpantecuhtli (« étoile du matin »), dans sa phase ascendante et à Xolotl (« étoile du soir »), dans sa phase descendante. Les Mayas 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 d'un jour en plus tous les 6 000 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^[16]. 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.



Son symbole astronomique est un cercle avec une croix pointant vers le bas (unicode 0x2640 : ♀), qui peut représenter le miroir à main de la déesse Vénus. En biologie, il est utilisé comme signe pour le sexe féminin, le cercle représentant l'utérus, et la petite croix vers le bas étant le symbole de l'accouchement ou l'origine de la vie^[17].

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 liée 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)^[18].



« Vénus, celui qui apporte la paix » est le deuxième mouvement de l'œuvre pour grand orchestre *Les Planètes*, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

En fiction

Article détaillé : Vénus 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. 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 : *Dans les murs d'Eryx*
- A. E. van Vogt : dans *Le Monde des Ā*, Vénus accueille une utopie réservée aux êtres humains jugés les plus aptes. Elle joue également un rôle prépondérant dans sa suite, *Les Joueurs du Ā*.
- C. S. Lewis : *Perelandra*

Notes et références

Notes

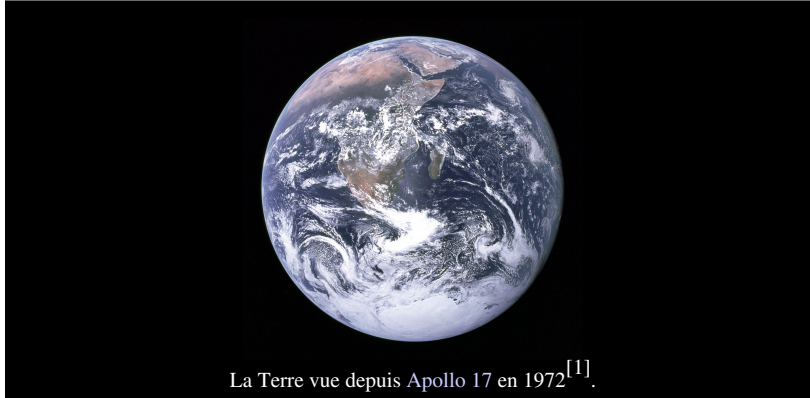
- [1] Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (http://www.imcce.fr/vt2004/en/fiches/fiche_n13_eng.html) « *Information sheet #13: Clouds and atmosphere of Venus* ».
- [2] Hua C.T., Courtès G. & Nguyen-Huu-Doan, *Détection de la molécule SO2 dans l'atmosphère de Vénus: The Messenger - ESO 1979*, *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, 288, Série B, 187.
- [3] <http://venus.aeronomie.be/en/venus/internalstructure.htm>
- [4] Le faible gradient thermique pourrait être causé, par exemple, par l'absence de plaques tectoniques sur cette planète. Limitant le refroidissement du manteau vénusien.
- [5] Sens de rotation vu par un observateur situé au-dessus du pôle Nord du Soleil
- [6] La rotation rétrograde de Vénus (<http://www.imcce.fr/Equipes/ASD/Venus/venus0.html>) sur la page de Jacques Laskar
- [7] 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 UNIQ-math-0-4ef4be504fcad0fe-QINU
- [8] *Venus Mysteries Blamed on Colossal Collision* (<http://www.space.com/scienceastronomy/080228-venus-collision.html>) sur le site space.com.
- [9] 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° ».
- [10] Philippe Henarejos et Pierre Thomas, « Vénus, les secrets de la fournaise », *Ciel et Espace*, , mars 1995, p.33-41.
- [11] L.D. Kaplan, « *Venus, Recent Physical Data* » (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19650012602_1965012602.pdf) , juin 1964. p. 2-3.
- [12] Les Missions Scientifiques du Centre National d'Études Spatiales (<http://smc.cnes.fr/VEX/Fr/index.htm>) « *Venus Express : première mission de l'Europe vers Vénus* ».
- [13] *Venus Entry Probe* (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35987>), ESA
- [14] La mission BEPICOLOMBO (<http://smc.cnes.fr/BEPICOLOMBO/Fr/>) sur le site du CNES.
- [15] Consulté le 13 décembre 2009.
- [16] cf. *ASTRON. L'étoile du berger/du Berger*. Consulté le 23 décembre 2009.
- [17] William T. Stearn, *The Origin of the Male and Female Symbols of Biology* (<http://www.jstor.org/pss/1217734>), IAPT, 1962
- [18] Liungman, Carl G. "Symbol 29:14" (<http://www.symbols.com/encyclopedia/29/2914.html>) in

Références

Terre

🔗 Pour les articles homonymes, voir Terre (homonymie).

Terre ⊕



Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	149 597 887,5 km (1,0000001124 UA)
Aphélie	152 097 701 km (1,0167103335 UA)
Périhélie	147 098 074 km (0,9832898912 UA)
Circonférence orbitale	939 885 629,3 km (6,282747374 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	6 378,137 km
Rayon polaire	6 356,752 km
Rayon moyen volumétrique	6 371,0 km
Aplatissement	0,0033529
Périmètre équatorial	40 075,017 ; périmètre méridional « polaire » = 40 007,864 km
Superficie	510 067 420 km ²

Volume	$1,08321 \times 10^{12} \text{ km}^3$
Masse	$5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}$
Masse volumique globale	$5,515 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Gravité de surface	$9,80665 \text{ m/s}^2$ (1 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)	1 674,364 km/h
Inclinaison de l'axe	23,4375°
Albédo géométrique visuel	0,367
Albédo de Bond	0,306
Irradiance solaire	1 367,6 W/m ² (1 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	254,3 K (-18,7 °C)
Température de surface :	
Maximum :	56,7 °C
Moyenne :	15 °C
Minimum :	-93,2 °C (voir Records de température sur Terre)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	101 325 Pa
Masse volumique au sol	$1,217 \text{ kg/m}^3$
Masse totale	$5,1 \times 10^{18} \text{ kg}$
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	400 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 Crotona). • Attestée à l'époque hellénistique (Aristarque de Samos, puis Ératosthène).
Découverte le	<ul style="list-style-type: none"> • V^e siècle <u>av. J.-C.</u> • III^e siècle <u>av. J.-C.</u>

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*^[2].

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. La planète abrite des millions d'espèces vivantes dont les humains. La biosphère de la Terre a fortement modifié l'atmosphère et les autres caractéristiques abiotiques 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. 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 soutenir la vie durant encore au moins 500 millions d'années'.

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^[3]. L'axe de rotation de la Terre est incliné de 23,44°^[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 (365,2422 jours solaires). 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, comme la faune (dont entre autres l'espèce humaine) et la flore. 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

Article détaillé : Histoire de la Terre.

Globalement l'histoire de la Terre est divisée en quatre intervalles de temps, dits éons :

- L'Hadéen a débuté il y a 4,567 milliards d'années, 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 se 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 3,8 milliards d'années.
- Le Protérozoïque est l'éon lié à l'apparition des premières plantes à photosynthèse. Son début remonte à 2,5 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

Article détaillé : Hadéen.

La formation de la Terre par accréation était presque terminée en moins de 20 millions d'années. 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. Le consensus actuel 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 entra en collision avec la Terre. Dans ce modèle, une partie de cet objet se serait agglomérée avec la Terre, tandis qu'une autre partie, 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. 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. 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.

Deux principaux modèles ont été proposés pour expliquer la vitesse de croissance continentale : une croissance constante jusqu'à nos jours et une croissance rapide au début de l'histoire de la Terre. Les recherches actuelles montrent que la deuxième hypothèse est la plus probable avec une formation rapide de la croûte continentale suivie par de faibles variations de la surface globale des continents". Sur une échelle 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 recombinaient 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.

Évolution de la vie

Article détaillé : Histoire évolutive du vivant.

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. On pense que la vie elle-même serait apparue entre 200 et 500 millions d'années plus tard.

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 d'environ 2,5 milliards d'années avant le présent, et forma la couche d'ozone (une forme d'oxygène [O₃]) dans la haute atmosphère, lorsque les niveaux d'oxygène dépassèrent quelques %. Le regroupement de petites cellules entraîna le développement de cellules complexes appelées eucaryotes. Les premiers organismes multicellulaires formés de cellules au sein de colonies devinrent de plus en plus spécialisés. Aidées 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. Les plantes et les animaux pluricellulaires ne colonisèrent la terre ferme qu'à partir de la fin du Cambrien (pour 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).

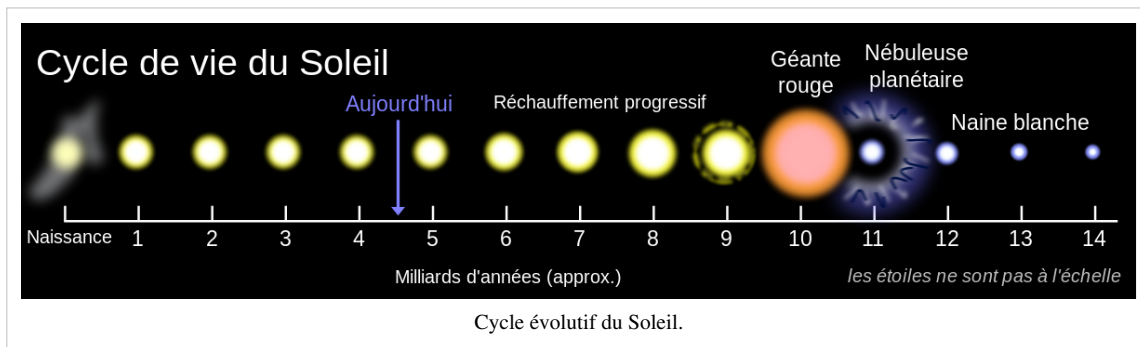
Depuis les années 1960, il a été proposé une hypothèse selon laquelle une ou une série de glaciations globales eurent lieu il y a 750 à 580 millions d'années, pendant le Néoprotérozoïque, et qui couvrirent la planète d'une couche de glace. Cette hypothèse a été nommée *Snowball Earth* (« Terre boule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

À la suite de l'explosion cambrienne, il y a environ 535 millions d'années, cinq extinctions massives se produisirent. 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, le genre humain (*Homo*) 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.

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 du 1,1 milliard d'années à venir et de 40 % sur les prochains 3,5 milliards d'années. Les modèles climatiques indiquent que l'accroissement des radiations atteignant la Terre aura probablement des conséquences dramatiques sur

la pérennité de son climat « terrestre », notamment la disparition des océans.

La Terre devrait cependant rester habitable durant encore plus de 500 millions d'années, bien que cette durée puisse passer à 2,3 milliards d'années si l'azote est retiré de l'atmosphère.^[évasif] 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 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. Ensuite, la température moyenne (de la Terre) augmentera plus vite en raison de l'emballement de l'effet de serre par la vapeur d'eau, vers 40 à 50 °C, puis les océans s'évaporeront « rapidement » 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, et 35 % de l'eau des océans descendrait dans le manteau du fait de la baisse des échanges au niveau des dorsales océaniques.

« 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'.

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 ua (254 316 600 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 5 000 fois son niveau actuel. Une simulation de 2008 indique que 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 sera absorbée et vaporisée.

Composition et structure

Article détaillé : Sciences de la Terre.

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 par la taille ou la 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 et est probablement la seule avec une tectonique des plaques active.

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

Article détaillé : Figure de la Terre.

La forme de la Terre est approchée par un ellipsoïde, une sphère aplatie aux pôles. La rotation de la Terre entraîne l'apparition d'un léger bourrelet de sorte que le diamètre à l'équateur est 43 kilomètres plus long que le diamètre polaire (du pôle Nord au pôle Sud). Le diamètre moyen du sphéroïde de référence (appelé géoïde) est d'environ 12 742 kilomètres, ce qui est approximativement $40\,000 \text{ kilomètres}/\pi$, car le mètre était initialement défini comme 1/10 000 000e (dix-millionième) de la distance de l'équateur au pôle Nord en passant par Paris'.



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. Les plus grandes variations dans la surface rocheuse de la Terre sont l'Everest (8 848 mètres au-dessus du niveau de la mer) et la fosse des Mariannes (10 911 mètres sous le niveau de la mer). Du fait du bourrelet équatorial, les lieux les plus éloignés du centre de la Terre sont les sommets du Chimborazo en Équateur et du Huascarán au Pérou”.

Composition chimique

Article connexe : Abondance des éléments chimiques.

Composition chimique de la croûte

Composé	Formule	Composition	
		Continentale	Océanique
Silice	SiO ₂	60,2 %	48,6 %
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O 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 ₂ O	3,0 %	2,6 %
Oxyde de potassium	K ₂ O	2,8 %	0,4 %
Oxyde de fer(III)	Fe ₂ O ₃	2,5 %	2,3 %
Eau	H ₂ O	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 ₂ O 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 %^[5]), 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.

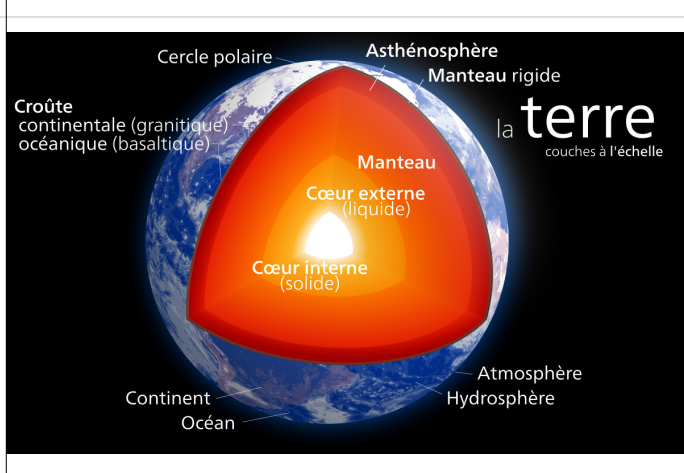
Le géochimiste F. W. Clarke (en) a calculé que 47 % (en poids, soit 94 % en volume) de la croûte terrestre était faite d'oxygène, présent principalement sous forme d'oxydes, dont les principaux sont les oxydes de silicium (sous forme de silicates), d'aluminium (aluminosilicates), de fer, de calcium, 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 1 672 types de roches, Clarke a obtenu les pourcentages présentés dans le tableau ci-dessous.

Structure interne

Article détaillé : Structure interne de la Terre.

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, quoi qu'en soit 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 kilomètres sous les océans jusqu'à plus de 50 kilomètres 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 kilomètres et de 670 kilomètres 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 kilomètres de profondeur, la transition à 410 kilomètres de profondeur étant reconnue pour ne pas avoir une importance majeure 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 kilomètres 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 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.

Couches géologiques de la Terre



Profondeur km	Couche	Densité g/cm ³
0–60	Lithosphère ^[6]	—
0–35	Croûte ^[7]	2.2–2.9
35–670	Manteau supérieur	3.4–4.4
35–2890	Manteau	3.4–5.6
60–670	Asthénosphère	—
2890–5100	Noyau externe	9.9–12.2
5100–6378	Noyau interne	12.8–13.1

Coupe de la Terre depuis le noyau jusqu'à l'exosphère. Échelle respectée.

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 %). Les principaux isotopes producteurs de chaleur de la Terre sont le potassium 40, l'uranium 238, l'uranium 235 et le thorium 232. Au centre de la planète, la température pourrait atteindre 7 000 K et la pression serait de 360 GPa. 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 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.

Principaux isotopes producteurs de chaleur actuels

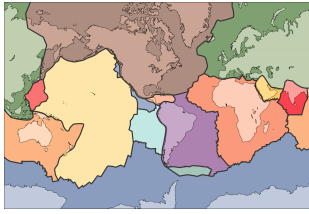
Isotope	Libération de chaleur W/kg isotope	Demi-vie années	Concentration moyenne dans le manteau kg isotope/kg manteau	Libération de chaleur W/kg manteau
²³⁸ U	9.46×10^{-5}	4.47×10^9	30.8×10^{-9}	2.91×10^{-12}
²³⁵ U	5.69×10^{-4}	7.04×10^8	0.22×10^{-9}	1.25×10^{-13}
²³² Th	2.64×10^{-5}	1.40×10^{10}	124×10^{-9}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

Plaques tectoniques

Article détaillé : Tectonique des plaques.

Principales plaques



Nom de la plaque	Superficie 10 ⁶ km ²
Plaque africaine ^[8]	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 uns par rapports 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 transcurrence 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 fréquents le long de ces frontières. Le mouvement des plaques tectoniques est lié aux mouvements de convection ayant lieu dans le manteau terrestre.

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. Par comparaison, les éléments les plus anciens de la croûte continentale sont âgés de 4 030 millions d'années.

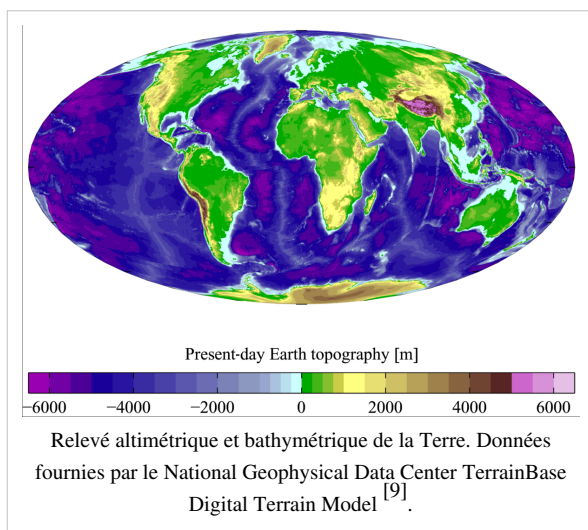
Il existe sept principales plaques, Pacifique, Nord-Américaine, Eurasienne, Africaine, Antarctique, Australienne et Sud-Américaine. Parmi les plaques importantes, on peut également citer les plaques Arabique, Caraïbe, Nazca à l'ouest de la côte occidentale de l'Amérique du Sud et la plaque Scotia dans 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 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.

Surface

Articles détaillés : Géomorphologie et Liste de points extrêmes du monde.

Le relief de la Terre diffère énormément suivant le lieu. Environ 70,8 % de la surface du globe est recouverte 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, des fosses océaniques, des canyons sous-marins, des plateaux et des plaines abyssales. Les 29,2 % non recouvertes 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 sujets à 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 contribuent également aux modifications du paysage.



La lithosphère continentale est composée de matériaux de faible densité comme les roches ignées : granit et andésite. Le basalte est moins fréquent et cette roche volcanique dense est le principal constituant du plancher océanique. 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. Le troisième type de roche rencontré sur Terre est la roche métamorphique, créée 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.

Les carbonates courants sont le calcite (composant du calcaire) et la dolomite.

La pédosphère est la couche la plus externe de la Terre. Elle est composée de sol et est sujette 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. Près de 40 % de la surface terrestre est utilisée pour l'agriculture et l'élevage soit environ $1,3 \times 10^7$ km de cultures et $3,4 \times 10^7$ km de pâturage.

L'altitude de la surface terrestre de la Terre varie de -418 mètres dans la Mer morte à 8 848 mètres au sommet de l'Everest. L'altitude moyenne des terres émergées est de 840 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Expansion de la Terre

Article détaillé : Expansion terrestre.

Une vieille théorie nouvellement remise sur le devant de la scène^[10] explique que la Terre n'aurait pas toujours eu la même taille, et qu'elle serait en expansion. Cela a pu avoir pour conséquence un rallongement des journées, à une échelle de millions d'années.

Cette théorie n'est, à ce jour, que peu reconnue par la communauté scientifique mondiale voire considérée comme de la pseudo-science.

Hydrosphère

Article détaillé : 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 2 000 mètres. La Challenger Deep de la fosse des Mariannes dans l'océan Pacifique est le lieu immergé le plus profond avec une profondeur de 10 911 mètres^[11].

La masse des océans est d'environ $1,35 \times 10^{18}$ t soit environ 1/4 400e de la masse totale de la Terre. Les océans couvrent une superficie de $3,618 \times 10^8$ km avec une profondeur moyenne de 3 682 mètres soit un volume estimé à $1,332 \times 10^9$ km. 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.

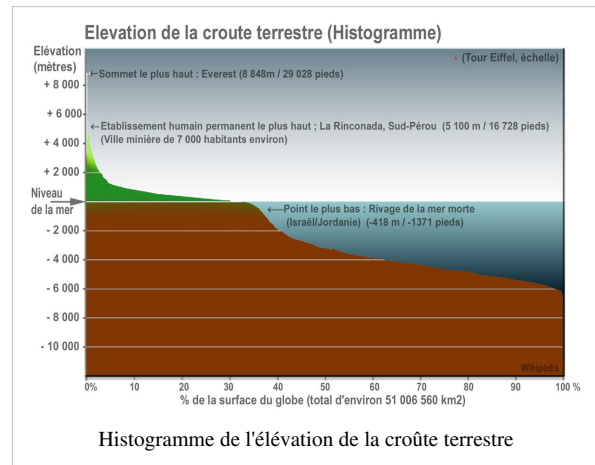
La salinité moyenne des océans est d'environ 35 grammes de sel par kilogramme d'eau de mer (35 ‰). La plupart de ce sel fut libéré par l'activité volcanique ou par l'érosion des roches ignées. Les océans sont également un important réservoir de gaz atmosphériques dissous qui sont essentiels à la survie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

Atmosphère

Article détaillé : Atmosphère terrestre.

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 101 325 Pa, soit 1 atm par définition. 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 kilomètres aux pôles et 17 kilomètres à l'équateur avec quelques variations résultant de facteurs météorologiques et saisonniers.

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 format 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 brûler les petites météorites avant qu'elles ne frappent la surface et en modérant les températures. 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.



Météorologie et climat

Articles détaillés : Temps (météorologie) et Climat.

L'atmosphère terrestre n'a pas de limite clairement définie, elle disparaît lentement dans l'espace. Les trois-quarts de la masse atmosphérique sont concentrées dans les premiers 11 kilomètres 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.

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°. 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.

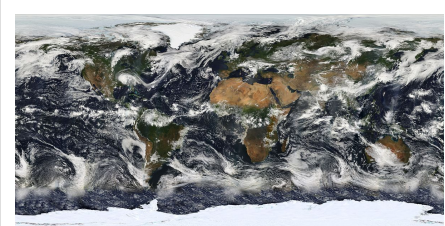
La vapeur d'eau générée par l'évaporation de surface est transportée par les mouvements atmosphériques. Lorsque les conditions atmosphériques permettent une élévation de l'air chaud et humide, cette eau se condense et retombe sur la surface sous forme de précipitations. La plupart de l'eau est ensuite 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.

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. La Terre peut être divisée en ceintures latitudinales de climat similaires. En partant de l'équateur, celles-ci sont les zones tropicales (ou équatoriales), subtropicales, tempérées et polaires. 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.

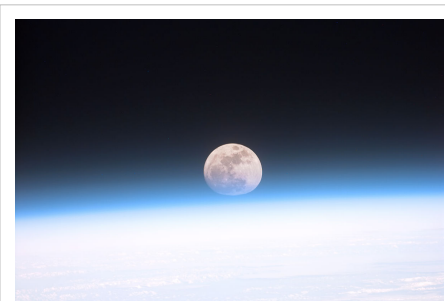
Haute atmosphère

Article connexe : Espace (cosmologie).

Au-dessus de la troposphère, l'atmosphère est habituellement divisée en trois couches, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. 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. 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 kilomètres au-dessus de la surface terrestre, est la limite habituelle entre l'atmosphère et l'espace.



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



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

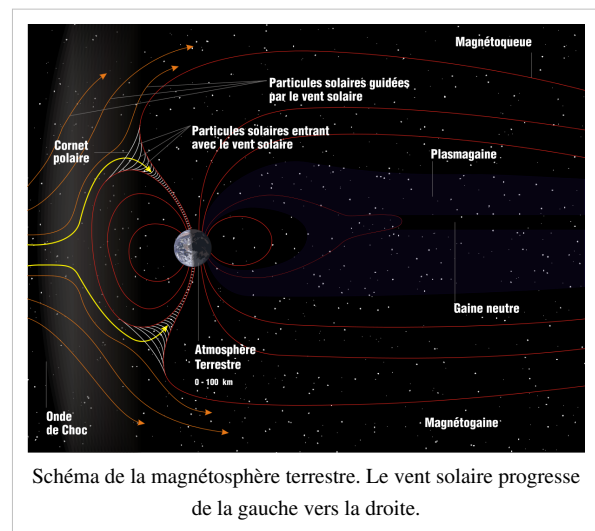
L'énergie thermique peut accroître la vitesse de certaines particules de la zone supérieure de l'atmosphère qui peuvent ainsi échapper à la gravité terrestre. Cela entraîne une lente mais constante « fuite » de l'atmosphère dans l'espace. Comme l'hydrogène non lié a une faible masse moléculaire, il peut atteindre la vitesse de libération plus facilement et disparaît dans l'espace à un rythme plus élevé que celui des autres gaz. La fuite de l'hydrogène dans l'espace déplace la Terre d'un état initialement réducteur à un 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. Ainsi la capacité de l'hydrogène à quitter l'atmosphère terrestre aurait pu influencer la nature de la vie qui s'est développée sur la planète. 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.

Champ magnétique

Article détaillé : Champ magnétique terrestre.

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 $7,91 \times 10^{15}$ T m. 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 700 000 ans'.

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, 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.



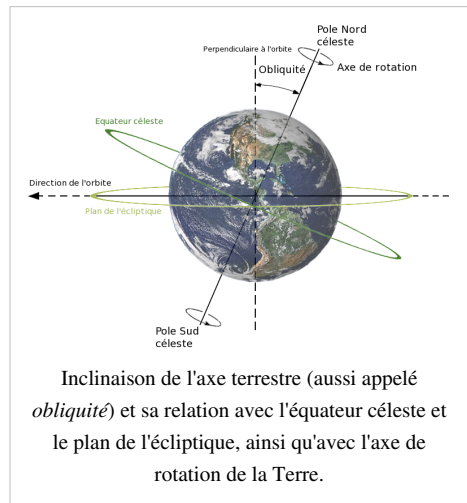
Orbite et rotation

Rotation

Article détaillé : Rotation de la Terre.

La période de rotation relative de la Terre par rapport au Soleil est d'environ 86 400 s soit un jour solaire. 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 86 164,098903691 secondes de temps solaire moyen (UT1) ou 23 h 56 min 4,098903691 s^[12]. 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. Ainsi le jour sidéral est plus court que le jour stellaire d'environ 8,4 ms.

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'.



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 (107 000 km/h).

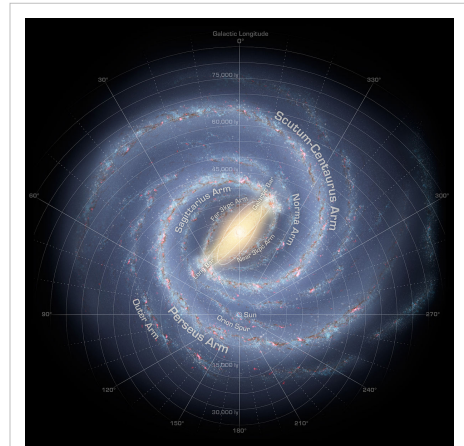
La Lune tourne avec la Terre autour d'un barycentre commun tous les 27,32 jours par rapport aux étoiles lointaines. Lorsqu'il est associé au mouvement du couple Terre-Lune autour du Soleil, la période du mois synodique, d'une nouvelle lune à une nouvelle lune est de 29,53 jours. Vu depuis le pôle céleste 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 trigonométrique 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'.

La sphère de Hill ou la sphère d'influence gravitationnelle de la Terre a un rayon d'environ 1 500 000 kilomètres^[13]. 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 ou ils peuvent être perturbés par l'attraction gravitationnelle du Soleil.

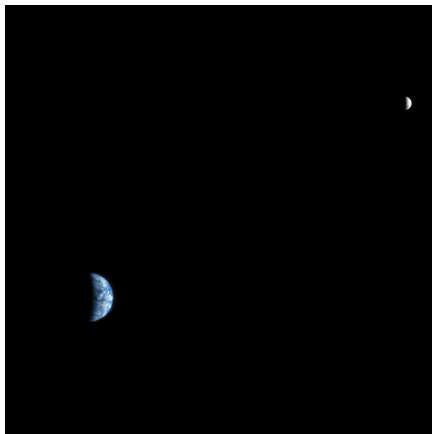
La Terre, au sein du Système solaire, est située dans la Voie lactée et se trouve à 28 000 années lumières du centre galactique. Elle est actuellement à environ 20 années lumières du plan équatorial de la galaxie dans le bras d'Orion.

Inclinaison de l'axe et saisons

Article détaillé : Inclinaison de l'axe.



Représentation de la Voie lactée montrant l'emplacement du Soleil



La Terre et la Lune photographiées depuis Mars par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. 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, lorsque 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 perpendiculaires. 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 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.

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. L'orientation (et non l'angle) de l'axe de la Terre évolue et réalise un cycle complet en 25 771 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.

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.

Cortège de la Terre

Satellites

La Lune

Caractéristiques

Diamètre	3 474,8 km
Masse	$7,349 \times 10^{22}$ kg
Demi-grand axe	384 400 km
Période orbitale	27 j 7 h 43,7 min

Article détaillé : Lune.

La Terre a un seul satellite naturel « permanent » connu, la Lune, située à environ 380 500 kilomètres 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 (environ les trois quarts du diamètre de cette dernière). 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 lui 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 millimètres par an, produisant aussi l'allongement du jour terrestre de 23 microsecondes par an. 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 ainsi 400 jours dans une année, chaque jour durant 21,8 heures.

La Lune aurait eu une influence importante dans le développement de la vie en régulant le climat de la Terre. Les preuves paléontologiques et les simulations informatiques montrent que l'inclinaison de l'axe de la Terre est stabilisée par les effets de marées avec la Lune. Certains scientifiques considèrent que sans cette stabilisation contre les couples 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.

La Lune est aujourd'hui à une distance de la Terre telle que, vue de la Terre, notre satellite a la même taille apparente (taille angulaire) que le Soleil. Le diamètre angulaire (ou l'angle solide) des deux corps est quasiment identique car, même si le diamètre du Soleil est 400 fois plus important que celui de la Lune, celle-ci est 400 fois plus rapprochée de la Terre que ce dernier. 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 (ou proto-Terre) nouvellement formée. Cette hypothèse explique en partie le fait que la composition de la Lune ressemble particulièrement à celle de la croûte terrestre.



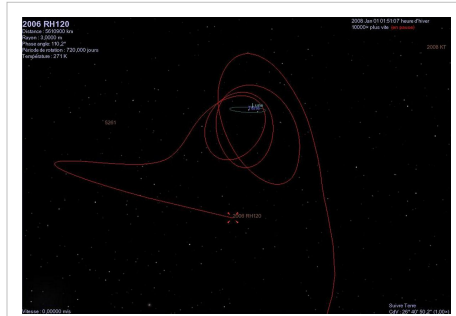
Représentation à l'échelle de la taille et de la distance de la Terre et de la Lune.

Un second satellite ?

D'après des simulations effectuées il y a peu^[Quand ?], il semblerait qu'il y ait, en moyenne, en permanence (ou quasiment) au moins un autre « caillou » qui serait satellite temporaire de notre planète.

Dans les faits, un tel objet est connu. En effet, entre 2006 et 2007, 2006 RH120 était effectivement temporairement en orbite autour de notre planète plutôt qu'autour du Soleil.

Le 21 septembre 2012, des chutes de météorites ont lieu sur les îles Britanniques et l'Amérique du Nord. L'origine de ces météorites pourrait être un petit corps en orbite autour de la Terre^[14].



2006 RH120 en orbite autour de la Terre. L'orbite de la Lune est également représentée.

Satellites artificiels

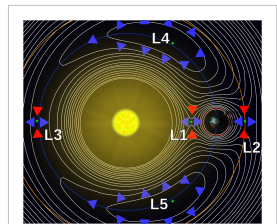
En janvier 2014, on compte 1167 satellites artificiels en orbite autour de la Terre (contre 931 en 2011).

Quasi-satellites et autres objets du cortège entourant la Terre

Troyens

Dans le système Soleil-Terre

2010 TK₇ est le premier astéroïde troyen connu de la Terre, autour du point de Lagrange L₄ du couple Terre-Soleil, 60° en avance par rapport à la Terre sur son orbite autour du Soleil.



Points de Lagrange du système Terre-Soleil.

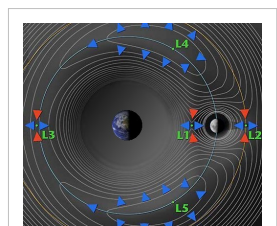
Dans le système Terre-Lune

Les nuages de Kordylewski graviteraient aux points L₄ et L₅ du système Terre-Lune, mais leur existence reste incertaine à ce jour.

Autres satellites co-orbitaux

La Terre a au moins sept satellites co-orbitaux :

- (3753) Cruithne
- 2002 AA₂₉
- 2003 YN₁₀₇
- 2001 GO₂
- (164207) 2004 GU₉
- (54509) YORP
- 2010 SO₁₆



Points de Lagrange du système Terre-Lune.

Habitabilité

Article connexe : Habitabilité d'une planète.

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. 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.

Biosphère

Article détaillé : 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 trouvant 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.

Ressources naturelles

Article détaillé : Ressource naturelle.

La Terre fournit des ressources qui sont exploitables par les humains pour diverses utilisations. Certaines ne sont pas renouvelables, comme les combustibles 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 minerais se sont formés dans la croûte terrestre et sont constitués de divers éléments chimiques utiles comme les métaux.

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. 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 %	4,71 %	26 %	32 %	1,5 %	30 %

La superficie irriguée estimée en 1993 était de 2 481 250 km².

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 11 800 morts par an. De même, de nombreuses régions sont exposés 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, et plus généralement des gaz à effet de serre. 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.

Géographie humaine

Articles détaillés : Géographie humaine et Population mondiale.

Article connexe : Monde (univers).

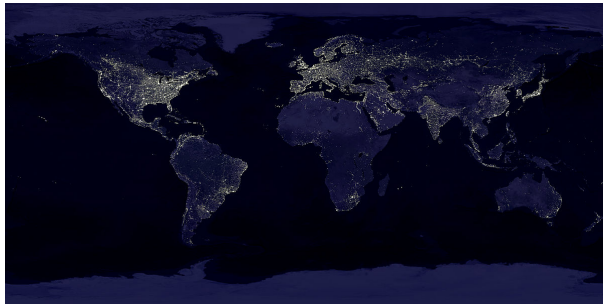
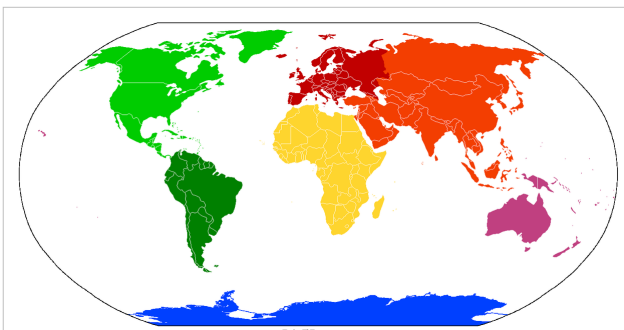


Image composite de la Terre pendant la nuit réalisée par les satellites du DMSP en 1994-1995. Cette image n'est pas une photographie et de nombreux éléments sont plus lumineux que ce qu'ils apparaîtraient en cas d'observation directe.



Les sept continents de la Terre^[15] : Amérique du Nord Amérique du Sud Antarctique Afrique Europe Asie Océanie

La Terre compte approximativement 7,16 milliards d'habitants en 2013^[16]. Les projections indiquent que la population mondiale atteindra 9,55 milliards en 2050. 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.

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 %), des hautes montagnes (27 %) 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). 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. Historiquement la Terre n'a jamais connu une souveraineté s'étendant sur l'ensemble de la planète même si de nombreuses nations ont tenté d'obtenir une domination mondiale et ont échoué.

L'Organisation des Nations unies est une organisation internationale qui fut créée dans le but de régler pacifiquement les conflits entre nations. 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.

Le premier humain à avoir orbité autour de la Terre fut Youri Gagarine le 12 avril 1961. Au total, en 2004, environ 400 personnes se sont rendues dans l'espace et douze d'entre-elles ont marché sur la Lune'. 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 400 171 kilomètres en 1970.

Point de vue philosophique et culturel

Représentations passées

Article détaillé : Figure de la Terre dans l'Antiquité.

Article détaillé : Figure de la Terre au Moyen Âge.

Dans le passé, la croyance en une terre plate fut contredite par les observations et par les circumnavigations et le modèle d'une Terre sphérique s'imposa.

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. 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.

Point de vue minoritaire

Quelques groupes religieux souvent affiliés aux branches fondamentalistes du protestantisme et de l'islam avancent que leur interprétation des mythes de la création dans les textes sacrés est la vérité et que celle-ci devrait être considérée comme l'égal des hypothèses scientifiques conventionnelles concernant la formation de la Terre et le développement de la vie voire devrait les remplacer. De telles affirmations sont rejetées par la communauté scientifique et par les autres groupes religieux".

Aujourd'hui : la finitude écologique

La vision humaine concernant la Terre a évolué depuis les débuts de l'aérospatiale et la biosphère est maintenant vue selon une perspective globale'. Cela est reflété dans le développement de l'écologie qui s'inquiète de l'impact de l'humanité sur la planète.

Bertrand de Jouvenel a évoqué la finitude de la Terre dès 1968^[17].

Le philosophe Dominique Bourg, spécialiste de l'éthique du développement durable, évoque la découverte de la finitude écologique de la Terre dans *la nature en politique ou l'enjeu philosophique de l'écologie* (2000). Estimant que cette finitude est suffisamment connue et prouvée pour qu'il soit inutile de l'illustrer, il souligne qu'elle a entraîné dans nos représentations un changement radical de la relation entre l'universel et le singulier. Alors que le paradigme moderne classique postulait que l'universel commandait le singulier, et le général le particulier, on ne peut pas y réduire la relation entre le planétaire et le local. Dans l'univers systémique de l'écologie, la biosphère (le planétaire) et les biotopes (le local) sont interdépendants. Cette interdépendance du local et du planétaire fait voler en éclats le principe moteur de la modernité, qui tendait à abolir toute particularité locale au profit de principes généraux, ce en quoi le projet moderne fut proprement utopique. La preuve expérimentale du raccordement symbolique de l'écologie



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 administrative bolivienne, La Paz.

à la culture a été fournies les réactions des premiers astronautes qui, en 1969, ont pu observer notre planète à partir de la Lune. Ils dirent que la Terre était belle, précieuse, et fragile. C'est-à-dire que l'Homme a le devoir de la protéger^[18].

Les concepts d'empreinte écologique et de biocapacité permettent d'appréhender les problèmes liés à la finitude écologique de la Terre.

Notes et références

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 décembre 1959.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Mise à jour Obliquité (http://www.neoprogrammics.com/obliquity_of_the_ecliptic/)
- [5] pourcentage pondéral
- [6] Peut localement varier entre 5 et 200 kilomètres.
- [7] Peut localement varier entre 5 et plus de 70 kilomètres.
- [8] Incluant la plaque somalienne qui est actuellement en train de se séparer de la plaque africaine. Voir :
- [9] <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/>
- [10] *La Terre : Une planète en pleine croissance*, documentaire Arte de Franz Fitzke, 2006 (http://www.dailymotion.com/video/x160xn_1-3-la-terre-en-expansion_shortfilms).
- [11] 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.
- [12] Aoki, la meilleure source pour ces chiffres, emploie le terme de « secondes d'UT1 » au lieu de « secondes de temps solaire moyen ».—
- [13] Pour la Terre, le rayon de Hill est :

$$\text{UNIQ-math-0-4ef4be504fcad0fe-QINU} ,$$

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 :

$$\text{UNIQ-math-1-4ef4be504fcad0fe-QINU} .$$

- [14] Chute d'une deuxième lune sur Terre (<http://meteor-center.com/blog/2012/12/chute-dune-deuxieme-lune-sur-terre/>)
- [15] World (<http://www.nationalgeographic.com/xpeditions/atlas/index.html?Parent=world&Mode=d&SubMode=w>), *National Geographic - Xpeditions Atlas* (<http://www.nationalgeographic.com/xpeditions/>). 2006. Washington, DC: National Geographic Society.
- [16] World Population Prospects, the 2012 Revision (<http://esa.un.org/unpd/wpp/Excel-Data/population.htm>)
- [17] Bertrand de Jouvenel, « La terre est petite », *Repr. in Arcadie, essais sur le mieux-vivre. Futuribles 9. Paris 1968*
- [18] Dominique Bourg, *La nature en politique ou l'enjeu philosophique de l'écologie*, L'Harmattan,

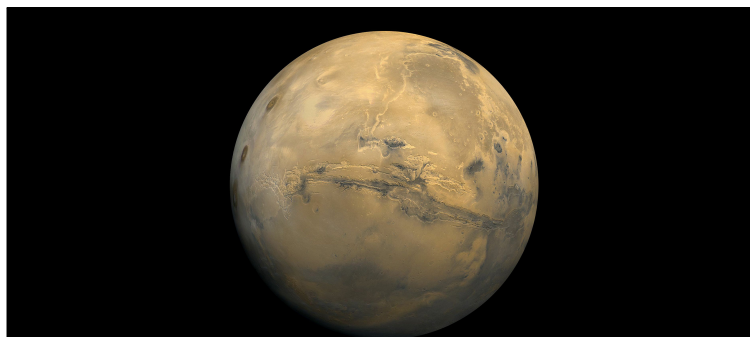
Références

- (en) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l’article de Wikipédia en anglais intitulé « Earth (<http://en.wikipedia.org/wiki/Earth?oldid=392360355>) » (voir la liste des auteurs (<http://en.wikipedia.org/wiki/Earth?action=history>))

Mars (planète)

Pour les articles homonymes, voir Mars.

Mars ♂



Mosaïque assemblée à partir d'images prises par l'orbiteur Viking 1 le 22 février 1980.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	227 936 637 km (1,52366231 UA)
Aphélie	249 228 730 km (1,66599116 UA)
Périhélie	206 644 545 km (1,38133346 UA)
Circonférence orbitale	1 429 038 772 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	3 389,5 km (0,532 Terre)
Aplatissement	0,00589 ± 0,00015

Périmètre équatorial	21 344 km (0,5326 Terre)
Superficie	144 798 500 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	3 933,5 ± 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 1 155) 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 O ₃	30 ppb
Peroxyde d'hydrogène H ₂ O ₂	18 ppb
Méthane CH ₄	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 (206,6 à 249,2 millions de km), avec une période orbitale de 686,71 jours terrestres.

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.

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, 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 cratérisée rappelant celle de la Lune, et une atmosphère ténue.

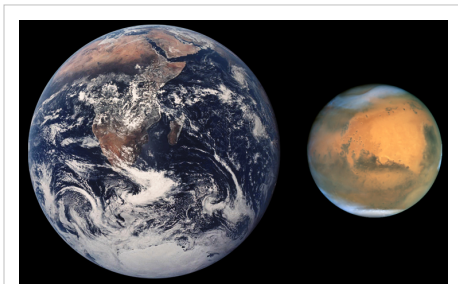
Depuis lors, Mars fait l'objet de programmes d'exploration plus ambitieux que pour aucun autre objet du Système solaire : de tous les astres que nous connaissons, c'est en effet celui qui présente l'environnement ayant le plus de similitudes avec celui de notre planète. Cette exploration intensive nous 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 à l'été 2008 de la glace d'eau à une faible profondeur dans le sol de Vastitas Borealis.

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 éloignée 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 d'environ -65 °C.

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



La Terre et Mars à la même échelle.

Propriété	Valeur martienne	Valeur terrestre (Mars % Terre)
Rayon équatorial	3 396,2 ± 0,1 km	6 378,1 km (53,3 %)
Rayon polaire	3 376,2 ± 0,1 km	6 356,8 km (53,1 %)
Rayon moyen volumétrique	3 389,5 km	6 371,0 km (53,2 %)
Surface	144 798 500 km ²	510 072 000 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	3 933,5 ± 0,4 kg/m ³	5 515 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	5 027 m/s	11 186 m/s (44,9 %)
Période de rotation sidérale	1,02595675 d ≈ 88 642,663 s	86 164,098903691 s (102,9 %)

Durée du jour solaire	1 sol \approx 1,02749125 d \approx 88 775,244 s	1 d = 86 400 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	227 939 100 km	149 597 887,5 km (152,4 %)
Excentricité orbitale	0,093315	0,016710219 (558,4 %)
Période orbitale	668,5991 sols \approx 686,971 d	365,256366 d (188,1 %)
Aphélie	249 209 300 km	152 097 701 km (163,8 %)
Périhélie	206 669 000 km	147 098 074 km (140,5 %)
Rayonnement solaire	492 à 715 W/m ²	1 321 à 1 413 W/m ²
Température moyenne au sol	-63 °C \approx 210 K	14 °C \approx 287 K
Température la plus élevée	-3 °C \approx 270 K	58 °C \approx 331 K
Température la plus basse	-133 °C \approx 140 K	-89 °C \approx 184 K

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 de l'hémisphère nord, 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 million d'années. L'excentricité de Mars évoluerait selon deux cycles superposés, le premier d'une période de 96 000 ans et le second d'une période de 2 200 000 ans, de sorte qu'elle devrait encore croître au cours des 25 000 prochaines années.

Variations de l'obliquité

Article connexe : Théorie astronomique des paléoclimats.

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°, proche de celle de la Terre, mais 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 comme ayant une périodicité de 120 000 ans s'inscrivant elle-même dans un super-cycle de 1,2 million 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. 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°.

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.

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, tandis qu'elle tend à migrer aux basses latitudes en période de forte obliquité. 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.

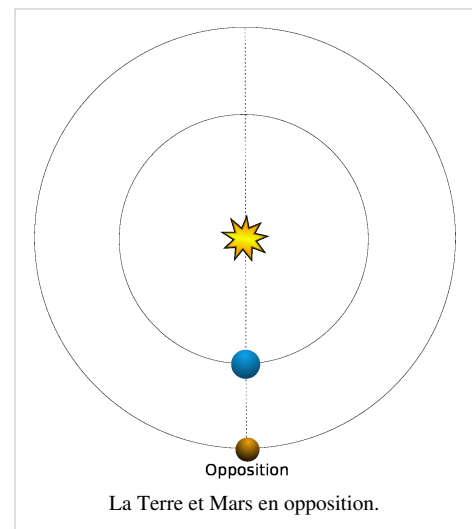
Dans la mesure où la pression atmosphérique moyenne au sol dépend de la quantité de dioxyde de carbone gelé aux pôles, les variations d'obliquité ont également un impact sur la masse totale de l'atmosphère de Mars, la pression atmosphérique moyenne pouvant même tomber, en période de faible obliquité, 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, 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.

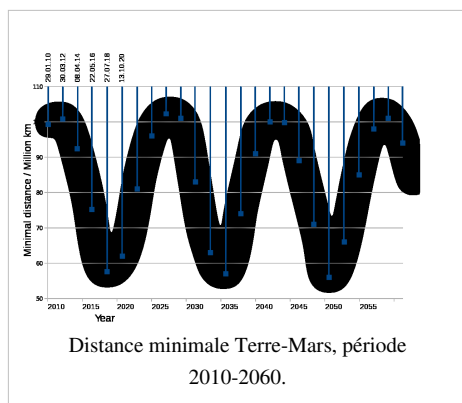
Oppositions Terre-Mars

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 orbitale, 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 9 h 51 min 14 s UTC (données IMCCE).

Ces oppositions surviennent approximativement tous les 780 jours, les deux dernières en date s'étant produites le 29 janvier 2010 et le 3 mars 2012.

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. Cette situation se rencontre tous les quinze ans environ, après sept oppositions. Ainsi, le 27 août 2003 à 9 h 51 min 14 s UTC, Mars était distante de la Terre de 55,758 millions de kilomètres, soit 0,3727 UA ; c'est la plus grande proximité entre Mars et la Terre depuis 59 618 ans . Un rapprochement encore un peu plus resserré est prévu le 28 août 2287, avec une distance de 55,688 millions de kilomètres.

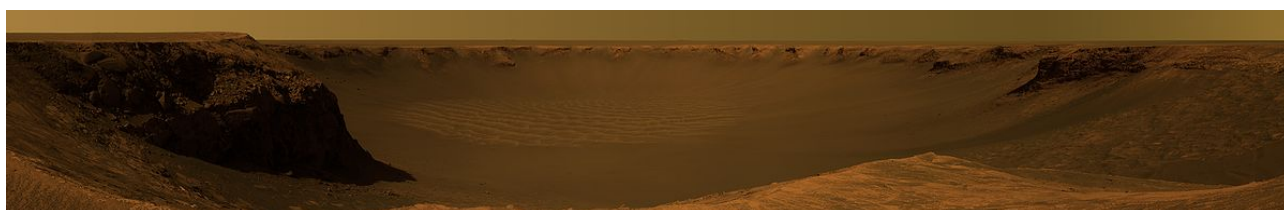




Distances minimales Terre-Mars

Date	Distance (UA)	Distance (Gm)	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 25 000 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.

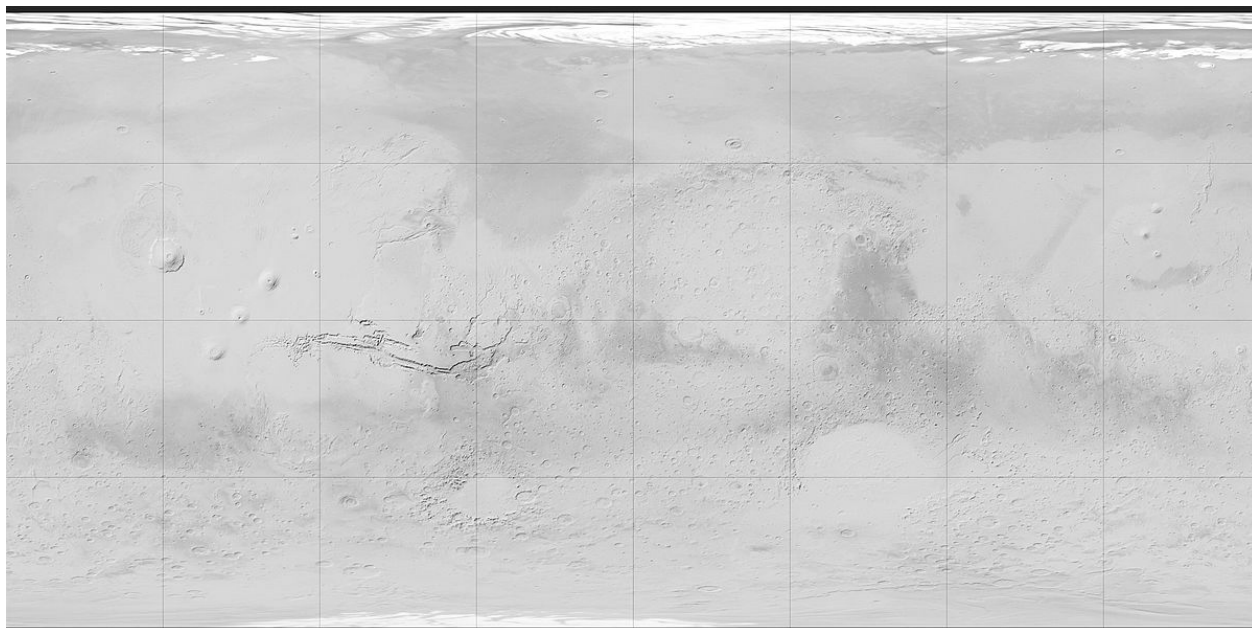


Mosaïque d'images en quasi vraies couleurs donnant une vue panoramique du cratère Victoria, large d'environ 730 m, obtenues en automne 2006 par le rover Opportunity sur Meridiani Planum.

Géographie de Mars

Article détaillé : Géographie de la planète Mars.

Carte annotée des principaux reliefs martiens



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. La 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 a permis d'accéder à des relevés altimétriques d'une très grande précision sur la totalité de la surface martienne.

Référentiels

Article détaillé : Altitudes et coordonnées géographiques sur Mars.

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

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. 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

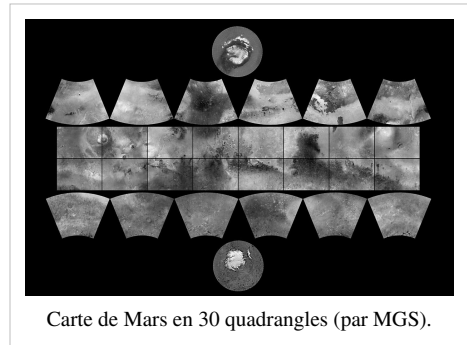
saisons.

Quadrangles

Article détaillé : Quadrangle (Mars).

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 1/5 000 000. 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 1/10 000 000 et en 62 quadrangles au 1/5 000 000.

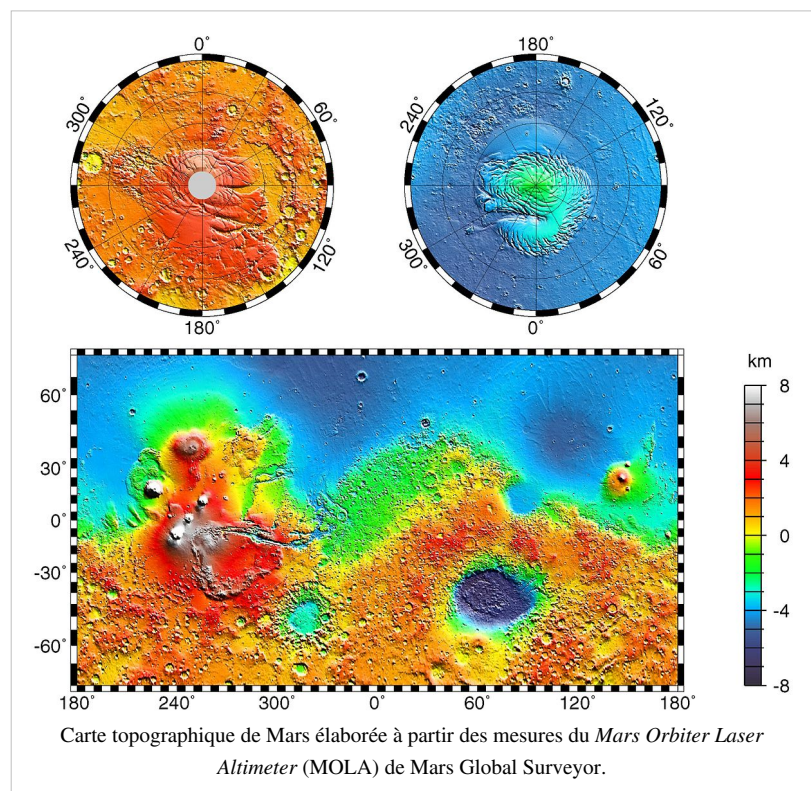


Carte de Mars en 30 quadrangles (par MGS).

Traits notables

La carte ci-contre permet de repérer les grandes régions martiennes, notamment :

- la dichotomie crustale entre hémisphères nord et sud,
- les grands bassins d'impact de l'hémisphère sud, Argyre par 50° S et 316° E ^[1], et Hellas par $42,7^{\circ}$ S et 70° E ^[2], et au nord Utopia Planitia par $49,7^{\circ}$ N et 118° E ^[3],
- le renflement de Tharsis et les trois volcans de Tharsis Montes ainsi qu'Olympus Mons et Alba Mons, dans l'hémisphère nord à gauche, et à droite les volcans d'Elysium, près d'Utopia,
- le système de canyons de Valles Marineris, partant de la région de Tharsis jusqu'au petit bassin d'impact de Chryse Planitia, centré autour de 15° S et 300° E ^[4].



Carte topographique de Mars élaborée à partir des mesures du Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) de Mars Global Surveyor.

Le trait le plus frappant de la géographie martienne est sa « 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 5 500 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 -8 200 m par rapport au niveau de référence. Le point le plus élevé se trouve quant à lui au sommet d'Olympus Mons, à 21 229 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

Article détaillé : Dichotomie crustale martienne.

Deux types de scénarios ont été proposés pour rendre compte de cette situation. 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, 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.



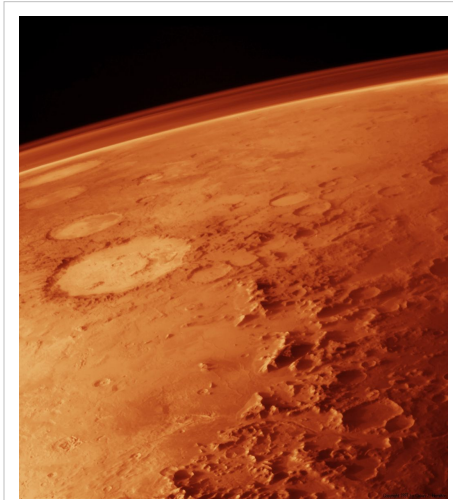
Coucher de soleil vu du cratère Gusev par le rover Spirit le 19 mai 2005 en vraies couleurs restituées à travers des filtres à 750, 530 et 430 nm. Le diamètre apparent du Soleil vu de Mars n'est que des deux tiers de celui vu de la Terre. La lueur de crépuscule se prolonge deux bonnes heures après que 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

Article détaillé : Atmosphère de Mars.

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 « atterrisseurs » des sondes Viking 1 et Viking 2. 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 Américain, William Wallace Campbell, astronome de profession et pionnier de la spectroscopie, 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 (8 700 Pa), valeur qui demeurera plus ou moins la référence jusqu'aux mesures réalisés 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.



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 %). 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 (formaldéhyde) 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.

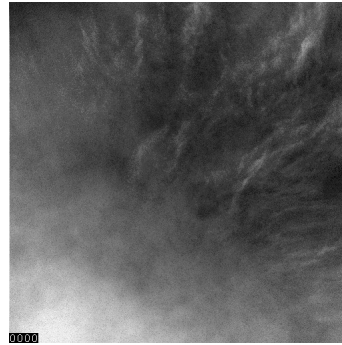
Compte tenu de la faible gravité à la surface de Mars, la hauteur d'échelle de cette atmosphère est de 11 km, plus d'une fois et demie celle de l'atmosphère terrestre, qui n'est que de 7 km. Les pressions extrêmes relevées à la surface de la planète vont d'à peine 30 Pa au sommet d'Olympus Mons jusqu'à 1 155 Pa au point le plus bas du bassin d'impact d'Hellas Planitia.

Début 2004, le spectromètre infrarouge *PFS* de la sonde européenne Mars Express a détecté de faibles concentrations de méthane (10 ppb) et de formaldéhyde (130 ppb) dans l'atmosphère martienne. 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 méthanogène sont autant de sources plausibles. 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.

Nuages



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



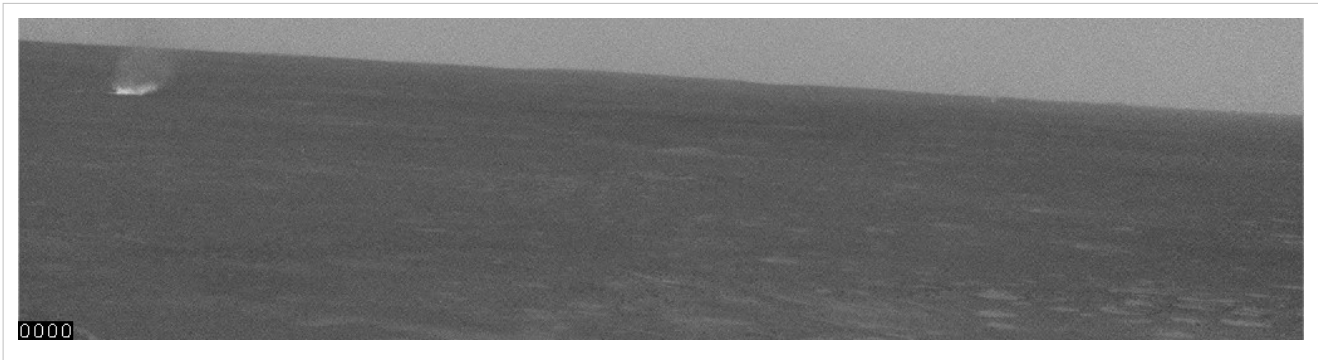
Nuages vus la même année dans le ciel de Meridiani Planum par le rover Opportunity.

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 de solutions d'acide sulfurique H_2SO_4), 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' H_2O d'apparence très semblable à celle de nos cirrus, typiquement à une altitude de 10 à 20 km ; on observe de tels nuages par exemple 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 CO_2 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, 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.

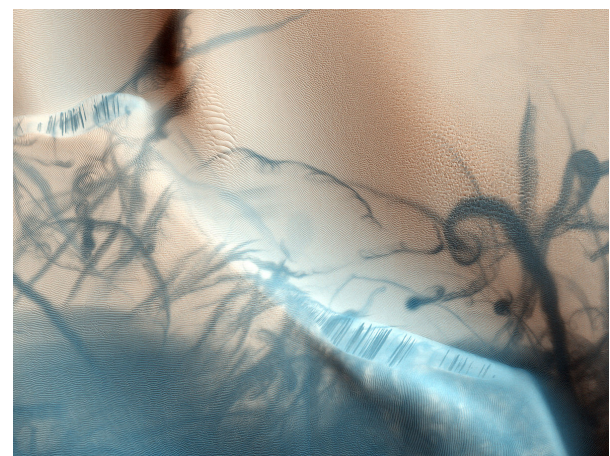
Poussières

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. Cette poussière est continuellement injectée dans l'atmosphère par des tourbillons de poussière (couramment désignés par le terme anglais *dust devils*), comme celui observé ci-dessous par le rover Spirit le 12 mars 2005 ; 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 :



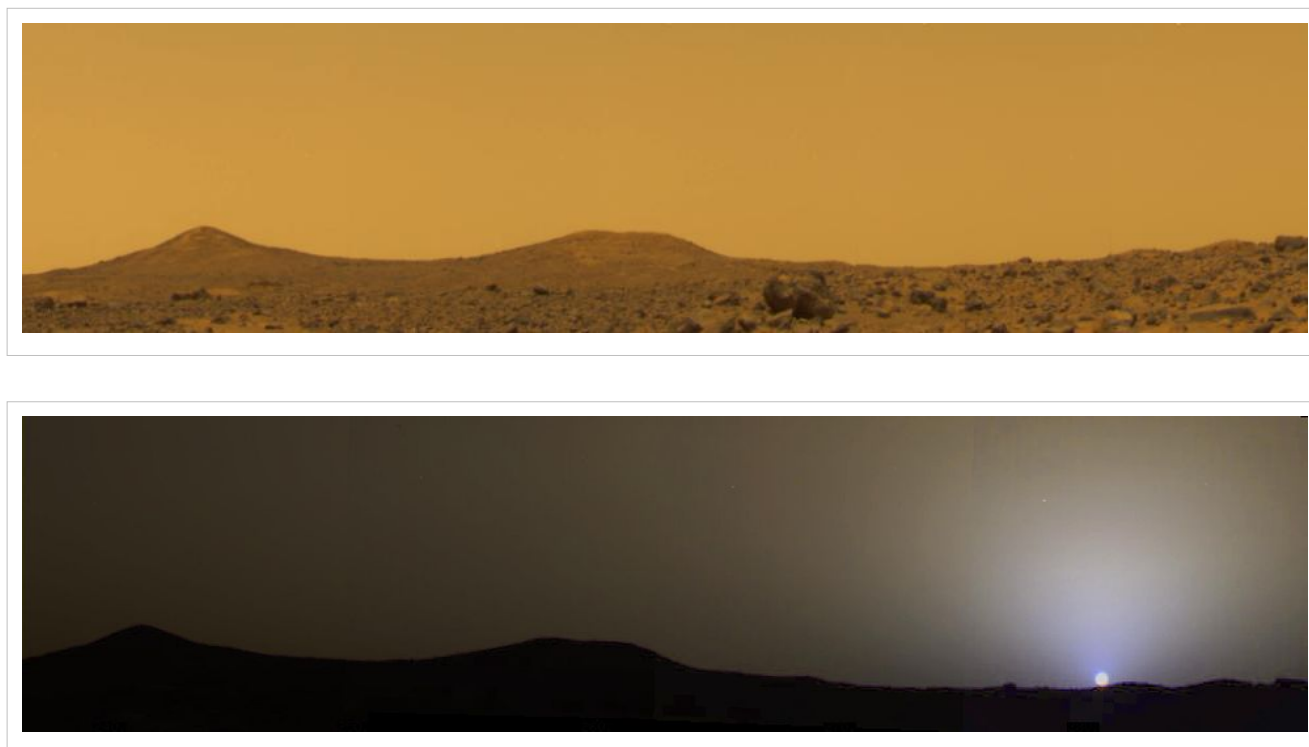
Film montrant le déplacement d'un tourbillon de poussière

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), 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 $3\ \mu\text{m}$ d'épaisseur. 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 $20\ \mu\text{m}$ 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.



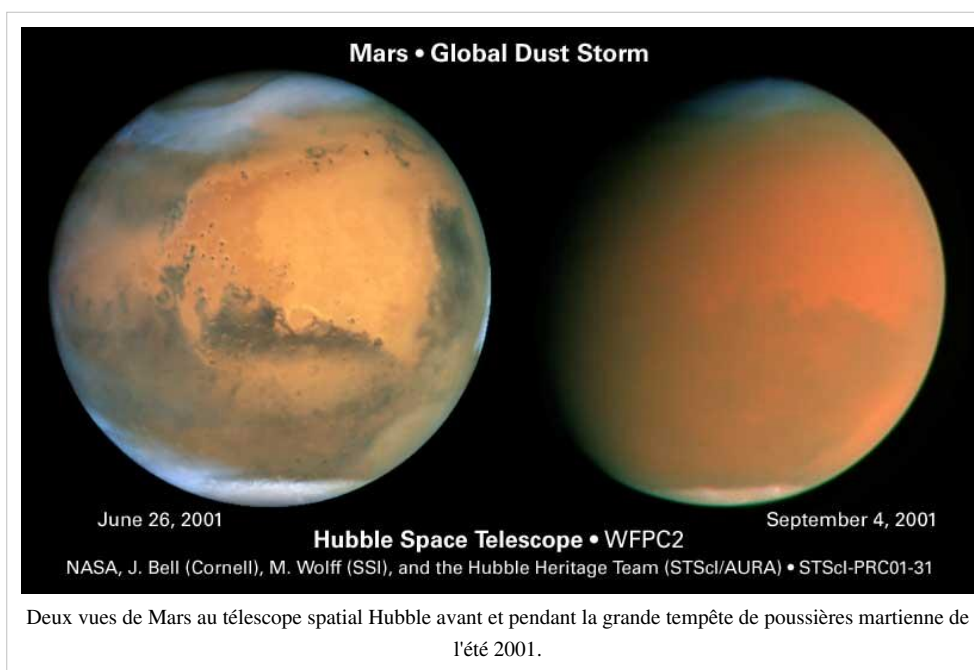
Traînées laissées par des tourbillons de poussière vues par l'instrument HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter le 24 août 2009 au nord du cratère Antoniadi par $26,7^\circ$ N et $62,8^\circ$ E [5]. La bande blanchâtre qui traverse l'image est une pente givrée sous un banc de brouillard et traversée de traînées noires.

Les grains de poussière en suspension dans l'atmosphère sont responsables de la couleur rouille de cette dernière, qui vire au bleu autour du soleil lors de son coucher, comme l'ont découvert les sondes Viking 1 et Viking 2 et que les sonde suivantes ont bien illustré par la suite :



Ciel martien à midi et au crépuscule 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 à l'échelle de la planète tout entière, comme celle qui a affecté l'ensemble de l'atmosphère martienne en été 2001.



Climat

Du fait 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 1 321 à 1 413 W/m² pour la Terre, c'est-à-dire de 37,2 % à 50,6 % entre les aphélie et les périhélie 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, tandis que les températures extrêmes — assez variables selon les sources — seraient d'environ 130 et 297 K, c'est-à-dire, en chiffres ronds, de l'ordre de -145 et +25 °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

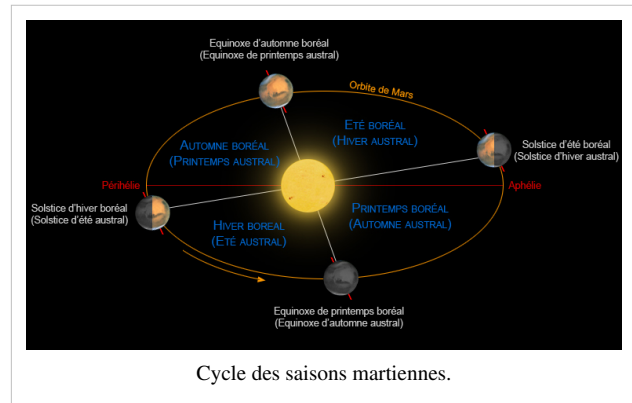
L'obliquité de Mars est proche de celle de la Terre (respectivement 25.19° contre 23.44°) mais l'excentricité de l'orbite martienne est sensiblement plus élevée (0,09332 contre 0,01671 pour la Terre) de sorte que, si Mars possède des saisons similaires à celles de la Terre, celles-ci sont d'intensité 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 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, lorsque 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. 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.



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 120 000 ans. Elle oscille entre 0° et 60° et connaît des phases relativement stabilisées entrecoupées de changements brusques, ce qui bouleverse complètement le climat martien.

Article détaillé : Théorie astronomique des paléoclimats#Mars.

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'atterrissage situé par 22,697° N et 312,778° E ^[6] dans le bassin de Chryse Planitia, à une altitude d'environ -3 300 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 : 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

Article détaillé : calottes polaires martiennes.

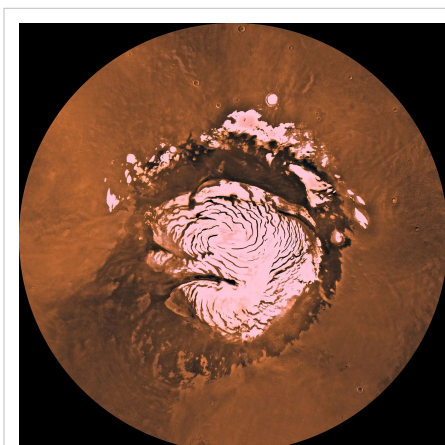
Les calottes polaires de Mars ont été observées pour la première fois au milieu du XVII^e siècle par Jean-Dominique Cassini et Christian Huygens. Leur taille varie considérablement au cours des saisons par échange de dioxyde de carbone et d'eau avec l'atmosphère. On distingue ainsi, dans les deux hémisphères, 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 (1 000 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, 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 (voir paragraphe suivant).

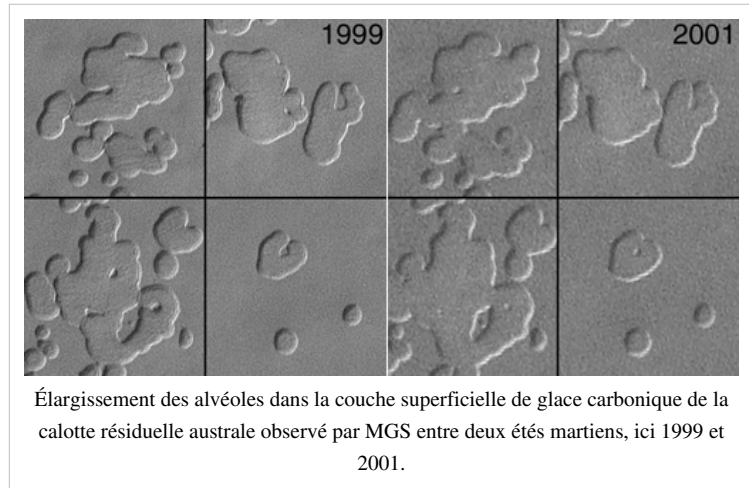
Les calottes polaires ont un impact important sur la composition atmosphérique globale de la planète. Le cycle des condensations et sublimations du CO₂ fait varier la pression atmosphérique de près d'un tiers, et, pendant l'été boréal, la glace d'eau qui compose la calotte polaire résiduelle nord se 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.



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. 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.

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'a connue la Terre il y a près de 12 000 ans, 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, 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. Et, surtout, les observations les plus récentes, notamment celles de la sonde 2001 Mars Odyssey, qui est toujours en fonctionnement^[Quand ?], ne confirment pas la tendance à long terme à la sublimation des calottes polaires, mais indiqueraient au contraire des variations annuelles autour d'une valeur stable.

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, soit un peu plus du double de celle reçue dans la station spatiale internationale, 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 et la dose cumulée admise pour un astronaute sur toute sa carrière n'excède pas quelques sieverts.

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, 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

Article détaillé : Géologie de la planète Mars.

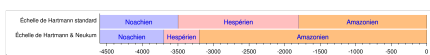
Échelle des temps géologiques martiens

Article détaillé : 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, 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:

- 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), 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 hydrosphère grâce à de grandes quantité 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 milliard 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 structure géologiques amazoniennes sont marquées par l'aridité extrême de l'environnement martien, alors totalement dépourvu d'hydrosphère — 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.

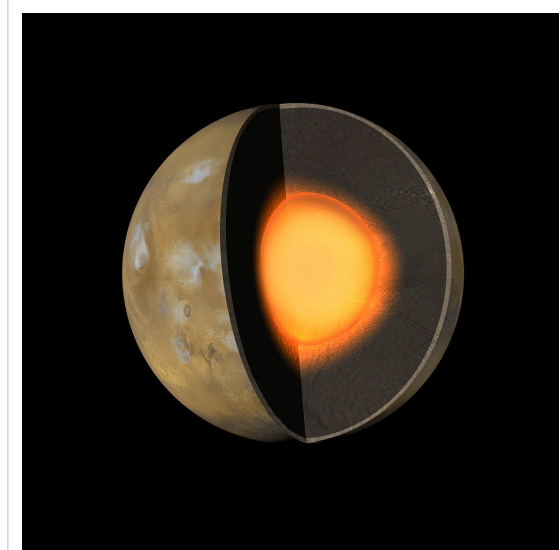
Le résultat le plus frappant est que le noyau de Mars, dont la température serait de l'ordre de 2 000 K, est très certainement liquide, au moins dans sa plus grande partie, en raison d'une charge élevée — précisément une fraction pondérale d'au moins 14,2 % — en éléments légers, notamment en soufre, 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 1 300 et 2 000 km (soit entre 38 % et 59 % du rayon de la planète), peut-être plus précisément entre 1 520 et 1 840 km (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 1 480 km comme rayon du noyau de Mars, soit 43,7 % du rayon moyen de la planète elle-même (3 389,5 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, 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 $2\,900\text{ kg/m}^3$ 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, jusqu'à 30 fois supérieur à celui de l'écorce terrestre, au-dessus de certaines régions géologiquement anciennes de l'hémisphère sud, et notamment dans la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum. Les mesures font état d'un champ magnétique atteignant $1,5\ \mu\text{T}$ à 100 km d'altitude, ce qui requiert la magnétisation d'un volume significatif d'écorce martienne, d'au moins 10^6 km^3 . Pendant neuf ans, MGS a mesuré les paramètres magnétiques au-dessus de la surface martienne, l'instrument MGS MAG (*MGS Magnetometer*) recueillant des données vectorielles depuis une altitude typiquement de 400 km,



Structure interne « standard » de Mars :
 - écorce d'environ 50 km d'épaisseur,
 - manteau d'environ 1 860 km d'épaisseur,
 - noyau d'environ 1 480 km de rayon, essentiellement, voire entièrement, liquide.

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.

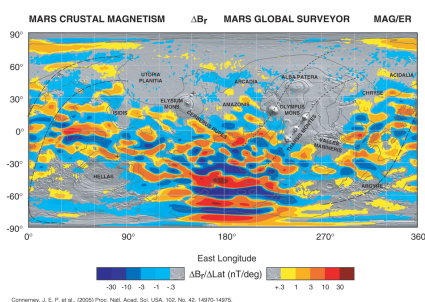
Géographie du paléomagnétisme martien et minéraux impliqués

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 en tant que 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.

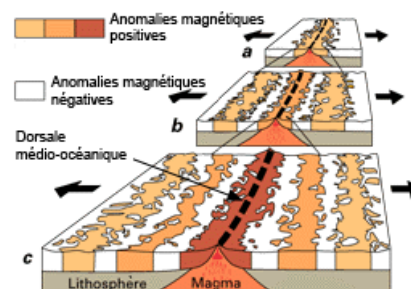
L'absence d'un tel paléomagnétisme au-dessus des bassins d'impacts de l'hémisphère sud tels qu'Hellas et Argyre est généralement interprétée comme l'indication que Mars ne possédait plus de champ magnétique global lors de ces impacts, bien qu'il soit également possible que le refroidissement des matériaux sur le lieu de l'impact ait été trop rapide pour permettre l'alignement de leur magnétisation éventuelle sur le champ magnétique global. *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. 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. 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 3 600 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, 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. 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.

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 percutant 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), 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 (l'idée n'est pas nouvelle, recoupant la théorie, assez discutée, du bassin boréal) 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. 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 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, la fonte partielle de l'écorce de l'hémisphère nord à l'origine du remodelage de sa surface, et la serpentinisation de l'écorce martienne au Noachien, 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.

Volcanisme

Article détaillé : Volcanisme sur Mars.

Le volcanisme martien aurait débuté il y a près de quatre milliards d'années, 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 1 600 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 sont plus ou moins alignés sur plus d'un tiers de circonférence martienne.

Typologie et distribution des volcans martiens

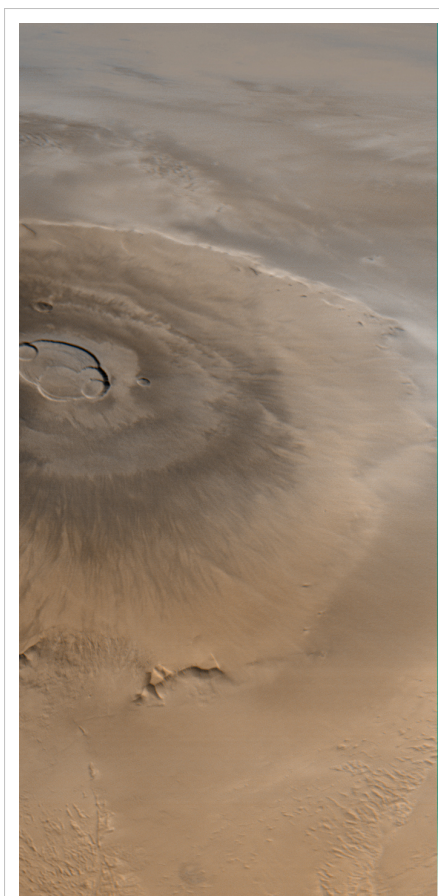
Le volcanisme martien est surtout connu pour ses volcans boucliers, les plus grands du Système solaire. Ce type de volcan est caractérisé par la très faible pente de ses flancs. Sur Terre, un tel volcan résulte d'épanchements de laves pauvres en silice, très fluides, qui s'écoulent facilement sur de grandes distances, formant des structures aplaties 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 × 60 × 3 km résultant de la coalescence de six cratères distincts. Mars possède les cinq plus hauts volcans connus du Système solaire (altitudes données par rapport au niveau de référence martien) :

1. Olympus Mons (21 229 m), en marge occidentale du renflement de Tharsis ;
2. Ascraeus Mons (18 225 m), volcan septentrional de Tharsis Montes ;
3. Arsia Mons (17 761 m), volcan méridional de Tharsis Montes ;
4. Pavonis Mons (14 058 m), volcan central de Tharsis Montes ;
5. Elysium Mons (14 028 m), volcan principal d'Elysium Planitia.

À titre de comparaison, le plus haut volcan vénusien, Maat Mons, ne culmine qu'à 8 000 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 6 600 m mais qui s'étend sur environ 1 600 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 5 500 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, 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 Theiikien, 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 Theiikien et au Sidérikien — 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 (orogénèse, 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 suggère, pour certains volcans, une activité actuellement certes très réduite, mais peut-être pas rigoureusement nulle, 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'. 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 :

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

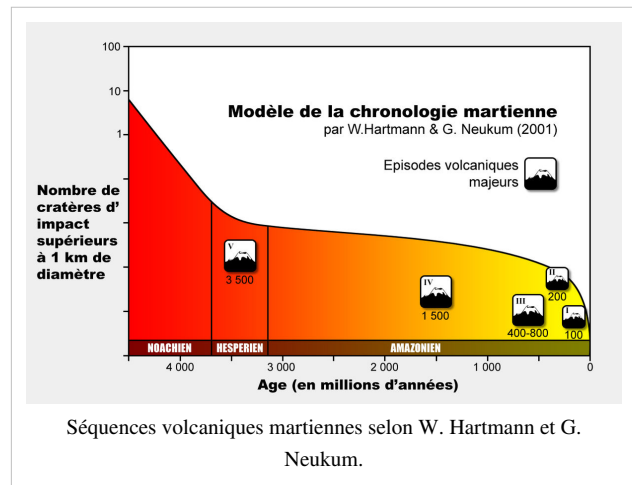
Ces datations reposent sur l'évaluation du taux de cratérisation des coulées de lave correspondantes, qui semble recoupée par les observations indirectes sur le moyen terme mais contredites par les observations directes à court terme déduites de la fréquence des impacts récents observés sur plus de dix 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), il semblerait plutôt que, sur le long terme, ce taux de cratérisation ait au contraire été divisé par trois depuis 3 milliards d'années, ce qui tendrait à « vieillir » les datations martiennes, et ce d'autant plus qu'elles sont relatives à des phénomènes récents.

Minéralogie

Article détaillé : minéralogie de la surface martienne.

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 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 « atterrisseurs », 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.



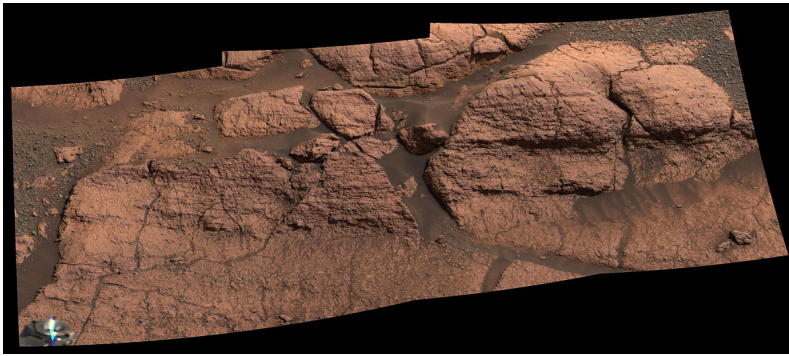
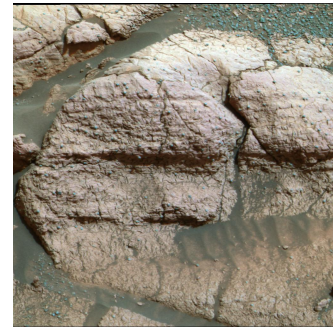


Image composite du rocher « El Capitan » vu par la caméra panoramique (PanCam) du rover Opportunity en bordure du cratère Eagle, dans la région de Meridiani Planum, en février 2004. C'est sur ce rocher qu'ont été caractérisées des sphérules d'hématite, *a priori* formées en milieu aqueux.

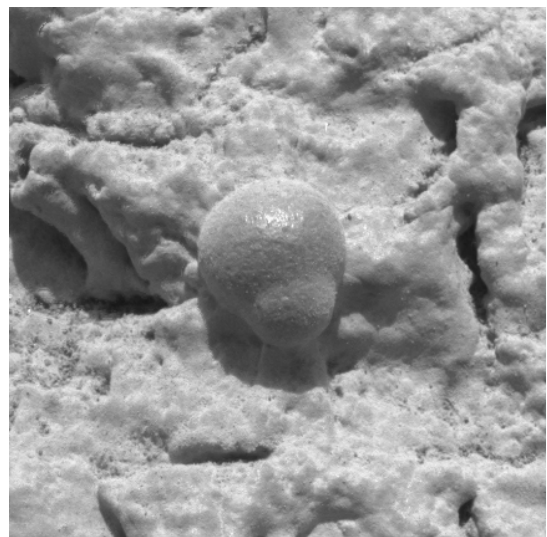


Vue du rocher « El Capitan » avec les sphérules, ou « myrtilles, » riches en hématite, à la surface et dans la roche.

Analyses in situ par les atterrisseurs

Article détaillé : Analyses *in situ* de la planète Mars.

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. 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 O_2 significatif, ce qui, en l'absence d'autres traces biologiques par ailleurs relevées, a été attribué à la présence d'ions superoxyde O_2^- . Le spectromètre APXS de Mars Pathfinder a réalisé en automne 1997 un ensemble de mesures 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) Fe_2O_3 , 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, 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.

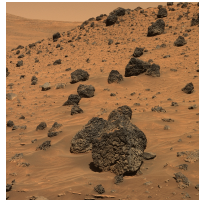
Par ailleurs, le sol de Mars analysé *in situ* par la sonde Phoenix en automne 2008 s'est révélé être alcalin ($pH \approx 7,7 \pm 0,5$) et contenir de nombreux sels, avec une abondance élevée de potassium K^+ , de chlorures Cl^- , de perchlorates ClO_4^- et de magnésium Mg^{2+} . La présence de perchlorates, notamment, a été abondamment commentée, car *a priori* assez peu compatible avec la possibilité d'une vie martienne. 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.

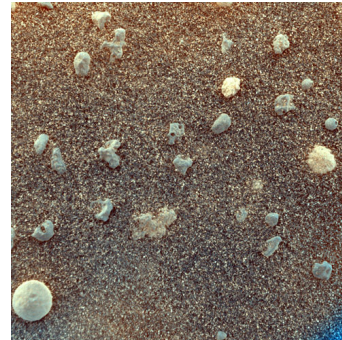
D'une manière générale, les rochers martiens se sont révélés être principalement de nature basaltique tholéitique.



Sol jonché de rochers volcaniques vu par Mars Pathfinder le 8 septembre 1999.



Autre vue du sol martien, par le rover Spirit le 13 avril 2006.



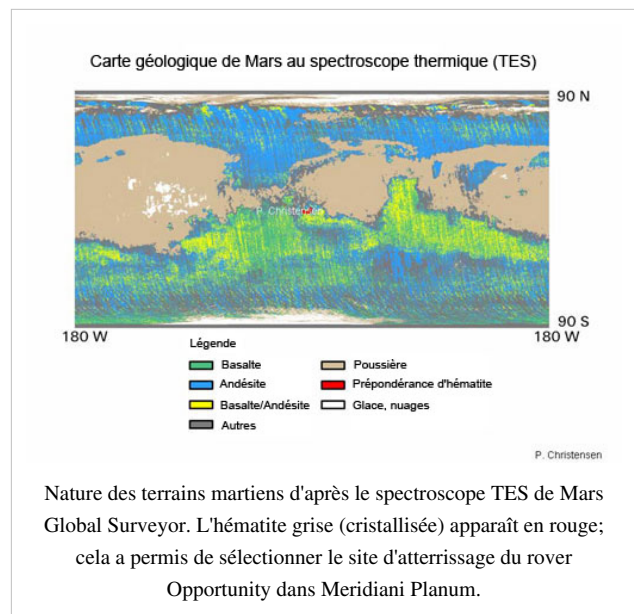
Gros plan sur le sol du cratère Eagle montrant des sphérules plus ou moins régulières sur fond de poussière fine. Le plus gros grain a un diamètre de 3 mm, tandis que l'image elle-même couvre une surface de 3 cm de côté.

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 — « Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité » — de réalisation essentiellement française, 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 bas dans les hautes terres cratérisées de l'hémisphère sud que dans le reste de la planète, où on le rencontre avec de l'olivine ; ainsi, les

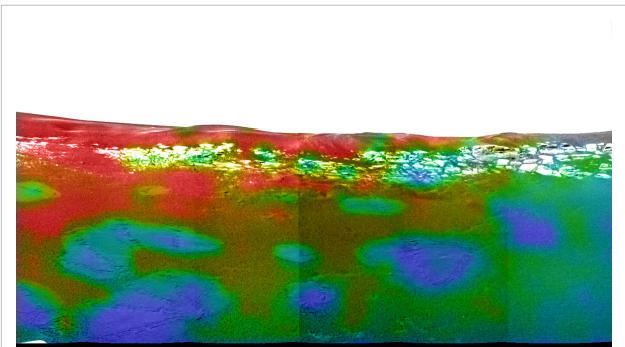


matériaux les plus anciens de l'écorce martienne se seraient formés à partir d'un manteau appauvri en aluminium et en calcium.

Olivines et pyroxènes sont les constituants principaux des péridotites, 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, 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.



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. Les taches bleues au premier plan indiquent que les rebonds des airbags protecteurs sur le sol 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 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dans la région de Meridiani Planum, voire, dans la région de Valles Marineris, des sulfates encore davantage hydratés dont il n'a pas été possible d'identifier la nature minéralogique, ainsi que des dépôts de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 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.

De vastes étendues de sulfate de calcium hydraté, vraisemblablement du gypse, ont également été détectées en bordure de la calotte polaire boréale. 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.

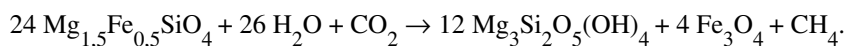
La sonde 2001 Mars Odyssey a détecté également la présence de chlorures dans les hautes terres de l'hémisphère sud, résultant de l'évaporation de plans d'eau salée ne dépassant pas 25 km^2 en divers endroits de ces terrains anciens remontant au Noachien voire, pour certains, au début de l'Hespérien.

Méthane et hydrothermalisme dans la région de Nili Fossae

L'un des résultats les plus étonnants 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. 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. 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.

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 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, détectée dès 2003) et de magnésite (carbonate de magnésium MgCO_3), révélant la présence d'argiles riches en fer, en magnésium, en olivine et en carbonate de magnésium ainsi qu'en serpentine. 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 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ en serpentine $(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, 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 :

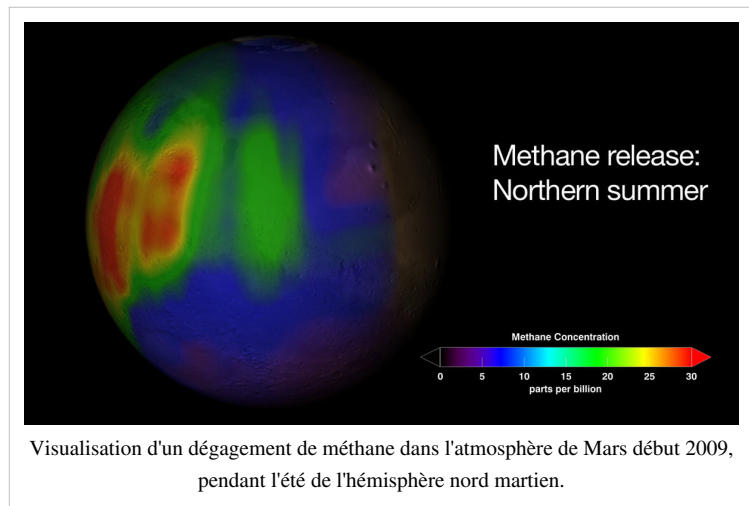


La probabilité de ce type de réactions dans la région de Nili Fossae est renforcée par la nature volcanique de Syrtis Major Planum et par l'étroite corrélation, observée dès 2004, entre le taux d'humidité d'une région et la concentration de méthane dans l'atmosphère.

Olivine et jarosite, ne subsistant qu'en climat aride

L'olivine, découverte dans la région de Nili Fossae ainsi qu'en d'autres régions martiennes 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, 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 $\text{NaFe}^{(\text{III})}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$, a permis de préciser encore davantage l'enchaînement des épisodes climatiques sur Mars. 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 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$, 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.



Histoire géologique de Mars

Article principal : géologie de la planète Mars.

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

Formation et différenciation

Article connexe : formation et évolution du Système solaire.

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 des mesures réalisées par Mars Global Surveyor.



Vue d'artiste de la phase d'accrétion des planétésimaux dans la nébuleuse solaire.

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, 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 des connaissances, 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

Articles détaillés : Noachien et Phyllosien.

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 hydrosphère centrée autour d'un océan boréal occupant l'actuelle étendue de Vastitas Borealis.

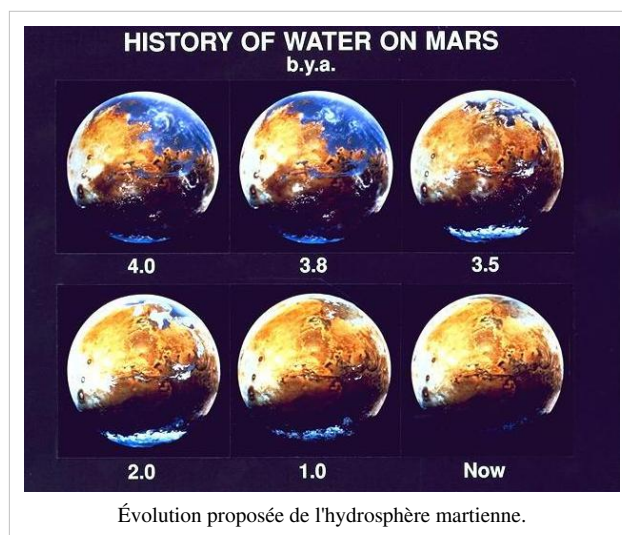
L'existence passée d'un champ magnétique global autour de Mars a été découverte à travers l'observation, réalisée dès 1998 par Mars Global Surveyor, d'un paléomagnétisme au-dessus des terrains les plus anciens de l'hémisphère sud, notamment dans la région de Terra Cimmeria et Terra Sirenum. La magnétosphère 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 CO_2 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 CO_2 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 SO_2 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 CH_4 génère un effet de serre vingt fois plus puissant que celui du CO_2) n'est peut-être pas non plus à négliger.

Indices d'une hydrosphère 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". 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 connue 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 hydrosphère 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. 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, 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, 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. 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.

L'idée d'un océan boréal au cœur d'une hydrosphère 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'hydrosphère martienne au noachien.

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'.

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^[7], tandis que d'autres théories (par exemple celle conçue à la fin du XX^e siècle par Günter Wächtershäuser^[8]) 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 H_2SO_4 , qui auraient eu accessoirement pour conséquence de permettre l'existence d'eau liquide à des températures sensiblement inférieures à $0\text{ }^\circ\text{C}$.

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 (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'abiogénèse 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, voire seulement 2,8 milliards d'années, tandis que les plus anciennes cellules eucaryotes ne remonteraient pas au-delà de 2,1 milliards d'années, et la reproduction sexuée ne daterait pas de plus de 1,2 milliards d'années.

Premiers épanchements volcaniques et grand bombardement tardif

Article connexe : 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 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. Les impacts cosmiques auraient en effet liquéfié le manteau terrestre sur peut-être 1 200 à 2 000 km d'épaisseur, portant la température de ce matériau jusqu'à $3\ 200\text{ }^\circ\text{C}$, température suffisante pour réduire le FeO en fer et en oxygène. 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 $2\ 200\text{ }^\circ\text{C}$, température insuffisante pour réduire l'oxyde de fer(II) et laissant donc inchangée la teneur en FeO du manteau martien à environ 18 %. Cela 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.

À 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.

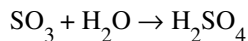
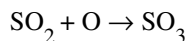
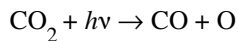
Formation des grandes structures volcaniques martiennes

Articles détaillés : Hespérien et Theiikien.

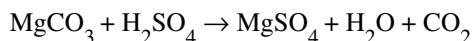
Les impacts à l'origine des grands bassins martiens ont peut-être initié le plus grand épisode volcanique de l'histoire de la planète, définissant l'époque qu'on appelle l'Hespérien. Celle-ci est caractérisée, d'un point de vue pétrologique, par l'abondance des minéraux contenant du soufre, et notamment de sulfates hydratés tels que la kiesérite $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

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, à la suite de 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 radicaux hydroxyle HO^\bullet et produit du peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , un 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 , 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 : 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 $\text{pH} > 5$) — 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 *θευκον 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

Articles détaillés : Amazonien et Sidérikien.

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, 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 à la suite de 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 CO₂ 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 sinueuses identifiées par exemple à l'est d'Æolis Mensae. 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) Fe₂O₃ (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 *sidérikien* désignant l'éon stratigraphique correspondant, forgé par les planétologues responsables de l'instrument OMEGA de la sonde Mars Express à l'ESA, à partir du grec ancien ὀσίδηρος signifiant « fer » — la racine exacte serait plutôt l'adjectif *σιδηρικός dans le sens de « ferrique » — et qui débiterait 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.

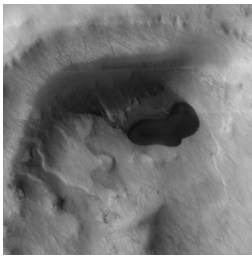
L'eau sur Mars

Article principal : Eau sur Mars.

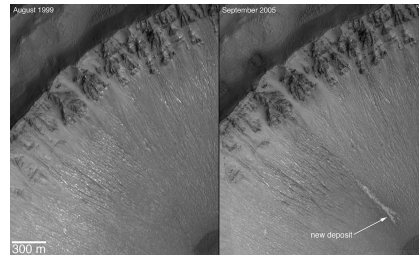
De l'abondance d'eau liquide du Noachien, il ne reste plus aujourd'hui que des traces dans l'atmosphère de Mars et, sans doute, d'importantes quantités d'eau gelée dans le sol et les calottes polaires de Mars, sous forme de pergélisol, voire de mollisol. En 2005, la sonde Mars Express a détecté, à proximité du pôle nord, un lac de glace d'eau dans un cratère. 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.

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 %.



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



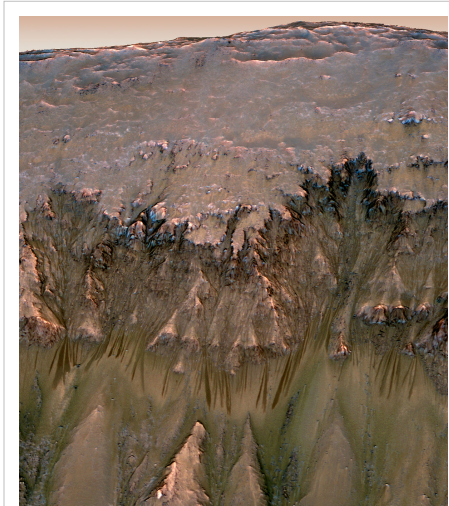
La photo de droite prise le 10 septembre 2005 par la sonde Mars Global Surveyor révèle la présence d'un dépôt blanchâtre ressemblant à de la glace d'eau et qui n'était pas présent le 30 août 1999 (image de gauche).

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 suggèreraient 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* ».
- De très brèves coulées pourraient encore avoir lieu. Ainsi, Michael Malin et Kenneth Edgett (et coauteurs), 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. Mais des analyses ultérieures ont montré que ces observations pouvaient tout aussi bien être expliquées par des écoulements secs.
- 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 (7 152 mètres sous le niveau topographique de référence) explique la pression atmosphérique en contrebas : 1 155 Pa (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) 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, et certaines saumures demeurent liquides à des températures encore plus basses, de même que certaines solutions d'acide sulfurique.

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. 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.

Les variations d'éclat, la distribution en latitude et la saisonnalité de ces manifestations suggèrent qu'elles soient provoquées par 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.

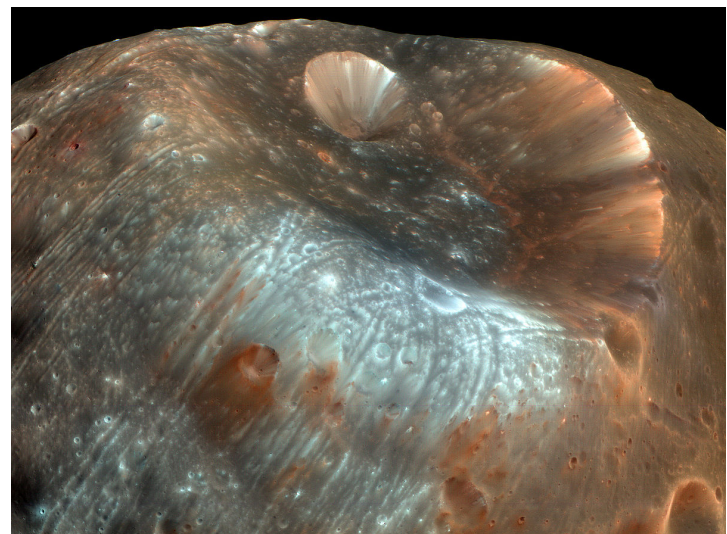


Traces d'écoulements observées par l'instrument HiRISE de la sonde MRO le 30 mai 2011 par 41,6° S et 202,3° E ^[8] sur les bords du cratère Newton.

Satellites naturels

Articles détaillés : Satellites naturels de Mars, Phobos et Déimos.

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. 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, scénarios qui présentent des difficultés par rapport à l'insuffisance de l'atmosphère de Mars pour



Cratère Stickney, de 9 km de diamètre, vu par l'instrument HiRISE de MRO à 6 000 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.

réaliser un tel freinage dans le cas de Phobos, et à l'insuffisance du temps requis pour circulariser l'orbite de Déimos. 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.

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 à la suite d'un ou plusieurs impacts majeurs de planétésimaux peu après la formation de Mars, 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 6 000 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 $1\,890 \text{ kg/m}^3$, 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. La présence d'eau en surface du satellite a clairement été écartée par plusieurs études mais ne demeure pas exclue en profondeur.



Le satellite Phobos de Mars vu le 23 mars 2008 à 6 800 km de distance par l'instrument HiRISE de la sonde MRO. Les sillons sont bien visibles. La résolution de cette image permet d'y percevoir des détails de 20 cm.

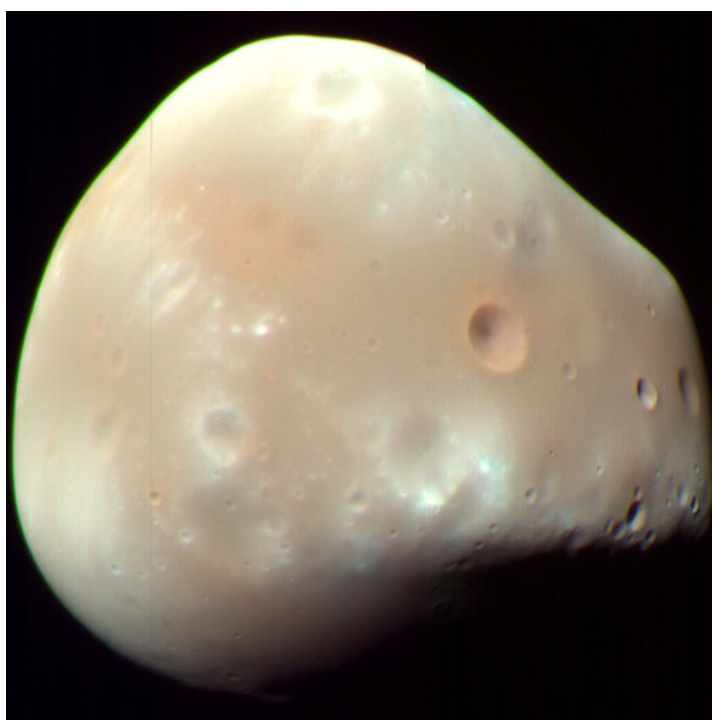
L'un des traits caractéristiques de Phobos est la présence de sillons parallèles d'au plus 30 m de profondeur, 200 m de large et 20 km de long, qui semblent envelopper le satellite radialement autour du cratère Stickney, et qui pourraient en fait être les traces de débris projetés dans l'espace lors 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 à proximité du point avant. 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 17 000 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 4 000 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 23 000 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 $1\,100 \text{ kg/m}^3$, celle du satellite dans son ensemble étant de l'ordre de $1\,470 \text{ kg/m}^3$.

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 montrant des détails de 60 m.

Propriétés des satellites naturels de Mars

Propriété	Phobos	Déimos
Dimensions	$26,8 \times 22,4 \times 18,4$ km	$15,0 \times 12,2 \times 10,4$ km
Masse	$1,072 \times 10^{16}$ kg	$1,48 \times 10^{15}$ kg
Masse volumique moyenne	$1\,887 \text{ kg/m}^3$	$1\,471 \text{ kg/m}^3$
Gravité de surface	1,9 à $8,4 \text{ mm/s}^2$	environ $3,9 \text{ mm/s}^2$
Vitesse de libération	11,3 m/s	5,6 m/s
Albédo	0,071	0,068
Demi-grand axe de l'orbite	9 377,2 km	23 460 km
Excentricité orbitale	0,0151	0,0002
Inclinaison de l'axe	$1,075^\circ$	$0,93^\circ$
Période orbitale	$0,3108418 \text{ sols} \approx 0,31891023 \text{ d}$	$1,2305 \text{ sols} \approx 1,26244 \text{ d}$

Découverte et dénomination

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'.

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 :

Ἦς φάτο, καὶ ᾧ ἵππους κέλετο Δεῖμόν τε Φόβον τε ζευγνύμεν, αὐτὸς δ' ἔντε' ἐδύσετο παμφανόωντα.

— traduction du grec ancien par Leconte de Lisle, L'Iliade - Chant XV

« 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. »

— L'Iliade - Chant XV

Dans la mythologie grecque, Phobos et Déimos sont les fils du dieu Arès, en grec ancien *Φόβος* / *Phóbos* signifie « peur » et *Δεῖμος* / *Deĩmos* « 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).

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 L_5 . Les trois autres sont 1998 VF31 (au point L_5), 1999 UJ7 (au point L_4), et 2007 NS2 (au point L_5).

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.

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 10 000 (soit 0,01 %) d'impacter Mars le 30 janvier 2008, impact qui ne s'est finalement pas produit.

Historique des observations de la planète

Article détaillé : Histoire de l'observation de Mars.

Observations antiques

« Hor-Desher »

« qui se déplace à reculons »

Mars faisant partie des cinq 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).

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

En hébreu, elle est nommée *Ma'adim* (מַאֲדִים) : *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 (荧惑, yíng huò 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

Article détaillé : Johannes Kepler#Le calcul de l'orbite de Mars.

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 six 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*.

Article détaillé : Canaux martiens.

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.

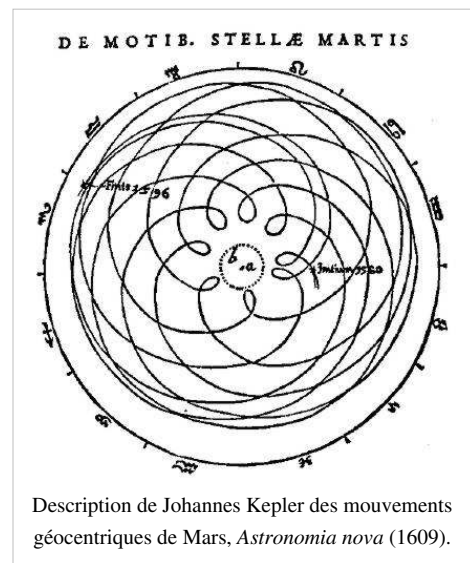
Exploration

Article détaillé : Exploration de Mars.

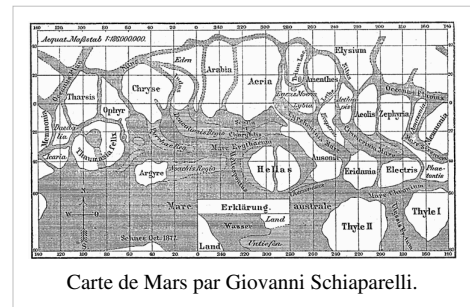
L'exploration de Mars se fait à l'aide de sondes spatiales : notamment de satellites artificiels et d'« astromobiles », appelées aussi « rovers ».

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'atterrissage sur Mars pour un *lander* (« atterrisseur »).




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





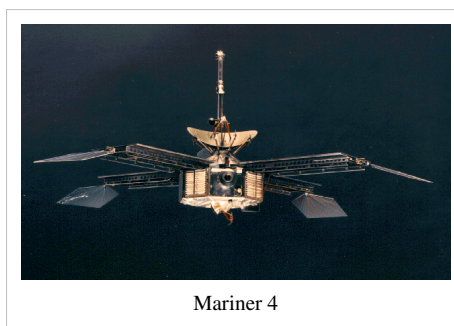
Carte de Mars par Giovanni Schiaparelli.



Missions en échec




-  Sondes soviétiques :
 - **Mars 1960A**
 - **Mars 1960B**
 - **Mars 1962A**
 - **Mars 1962B**
 - **Mars 1** (1^{er} nov. 1962 - 21 mars 1963)
 - **Mars 4**
 - **Mars 7**
 - **Zond 2**
 - **Phobos 1**
 - **Phobos 2**
 -  Sondes américaines :
 - **Mariner 3**
 - **Mariner 8**
 - **Deep Space 2**
 - **Mars Observer** (25 sept. 1992 - perte de contact le 21 août 1993)
 - **Mars Climate Orbiter** (11 déc. 1998 - 23 sept. 1999)
 - **Mars Polar Lander** (3 janv. 1999 - 3 déc. 1999)
-
-  Sondes russes:
 - **Mars 96**
 - **Phobos-Grunt** était une mission portée par la Russie dont le lancement a eu lieu le 8 nov. 2011 mais sans pouvoir placer la sonde sur son orbite de transit vers Mars, de sorte que l'engin s'est écrasé sur Terre le 15 janv. 2012 dans le Pacifique sud. L'objectif était de rapporter des échantillons du sol de Phobos.
 -  **Yinghuo 1** était une mission chinoise consistant en 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 ; l'échec de la mission Phobos-Grunt entraîna celle de Yinghuo 1.
 -  La sonde britannique **Beagle 2** (2 juin 2003 - 25 déc. 2003)
 -  La sonde japonaise **Nozomi** (のぞみ) (3 juil. 1998 - 9 déc. 2003) demeurée depuis lors en orbite héliocentrique.

Missions accomplies




-  Sondes américaines (simples survols) :
 - **Mariner 4** (28 nov. 1964 - survol le 14 juil. 1965 - mission terminée le 21 déc. 1967)
 - **Mariner 6** (24 fév. 1969 - survol le 31 juil. 1969)
 - **Mariner 7** (27 mars 1969 - survol le 5 août 1969)
-  Satellites américains :
 - **Mariner 9** (30 mai 1971 - 13 nov. 1971 - 27 oct. 1972)
 - **Mars Global Surveyor** (7 nov. 1996 - 11 sept. 1997 - 5 nov. 2006)





-  Orbiteurs soviétiques :
 - **Mars 5** (25 juil. 1973 - 12 fév. 1974 - 5 mars 1974)
-  Atterrisseurs soviétiques :
 - **Mars 2** (19 mai 1971 - 27 nov. 1971 - 22 août 1972)
 - **Mars 3** (28 mai 1971 - 2 déc. 1971 - 22 août 1972).
 - **Mars 6** (5 août 1973 - 12 mars 1974 - 12 mars 1974) données transmises uniquement pendant la descente.

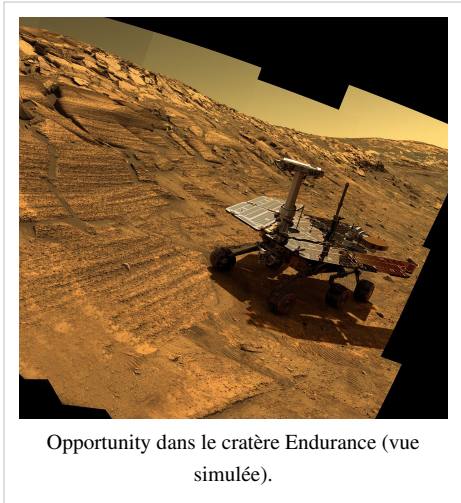
-  Programme Viking, avec atterrisseur et orbiteur :
 - **Viking 1** (20 août 1975 - 11 nov. 1982)
 - **Viking 2** (9 sept. 1975 - 11 avr. 1980)
-  Atterrisseur et rover **Mars Pathfinder** (4 déc. 1996 - 4 juil. 1997 - 27 sept. 1997)
-  Atterrisseur **Phoenix** (4 août 2007 - 26 mai 2008 - 10 nov. 2008)

Missions orbitales en cours

-  **2001 Mars Odyssey** (7 avril 2001 - ?)
-  **Mars Express** (2 juin 2003 - ?)
-  **Mars Reconnaissance Orbiter** (12 août 2005 - ?)



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. *Curiosity* s'est posé sur Mars : zone d'atterrissage Bradbury dans le cratère Gale, le 6 août 2012.




Opportunity dans le cratère Endurance (vue simulée).

Programme 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.
-  La NASA prévoit d'envoyer un rover, utilisant certaines inventions utilisées précédemment pour Curiosity, et l'enverra d'ici 2020. Son coût est estimé pour le moment à 1,5 milliards de dollars.

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.

Satellites artificiels autour de Mars

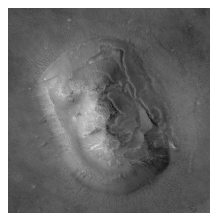
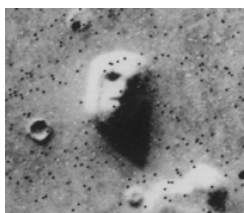
Les différentes missions martiennes ont mis en place des satellites artificiels autour de la planète. Ils servent de relais pour les télécommunications avec les modules posés au sol, et réalisent des mesures globales sur l'environnement et la surface de Mars.

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
Mars Global Surveyor	7 novembre 1996	11 septembre 1997	2 novembre 2006, perte du contact
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.



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.

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.

Volvo a intégré ce symbole dans son logo en raison de son association avec le fer, donc l'industrie sidérurgique.

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.

« Mars, celui qui apporte la guerre » est le 1er mouvement de l'œuvre pour grand orchestre *Les Planètes*, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

Fiction

Articles détaillés : Mars en fiction, Mars au cinéma et Martien.

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 1960, elle est plutôt considérée comme une future planète d'accueil, prête à être terraformée, puis colonisée par l'Homme, telle une seconde Terre.

Les livres les plus connus sont :

- Herbert George Wells, *La Guerre des mondes* [« The War of the Worlds »] (1^{re} éd. 1898) — texte de *La Guerre des mondes* sur Wikisource ;
- *Le Cycle de Mars* ou *Cycle John Carter*, d'Edgar Rice Burroughs, à partir de février 1912.
- Ray Bradbury, *Chroniques martiennes* [« The Martian Chronicles »] (1^{re} éd. 1950) ;
- *La Trilogie de Mars* de Kim Stanley Robinson :
 - *Mars la rouge* [« Red Mars »] (1^{re} éd. 1992) ;
 - *Mars la verte* [« Green Mars »] (1^{re} éd. 1993) ;
 - *Mars la bleue* [« Blue Mars »] (1^{re} éd. 1996) ;
 - ainsi que *Les Martiens* [« The Martians »] (1^{re} éd. 1999) — recueil de nouvelles ;
- Stephen Baxter, *Voyage* (1^{re} éd. 1996) ;
- Dan Simmons, *Ilium* (1^{re} éd. 2003) ;
- Dan Simmons, *Olympos* (1^{re} éd. 2005) ;

Les bandes dessinées françaises les plus connues sont :

- Patrick Cothias (scénario) et Antonio Parras (dessin), *Le Lièvre de Mars*, Glénat ;
- Richard Marazano (scénario) et Jean-Michel Ponzio (dessin), *Le Complexe du Chimpanzé*, Dargaud.

Références

[1] <http://www.google.com/mars/#lat=-50&lon=-34&zoom=4&q=Argyre%20Planitia>

[2] <http://www.google.com/mars/#lat=-42.7&lon=70&zoom=4&q=Hellas%20Planitia>

[3] <http://www.google.com/mars/#lat=49.7&lon=118&q=Utopia%20Planitia>

[4] <http://www.google.com/mars/#lat=-13.8&lon=-59.2&zoom=5&q=Valles%20Marineris>

[5] <http://www.google.com/mars/#lat=26.7&lon=62.8&zoom=6&q=>

[6] <http://www.google.com/mars/#lat=22.697&lon=-47.222&zoom=5&q=Viking%201%20Lander>

[7] 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 :

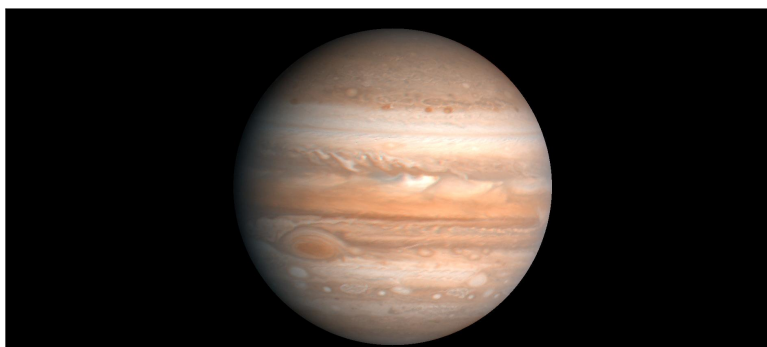
[8] <http://www.google.com/mars/#lat=-41.6&lon=-157.7&zoom=4&q=newton>

Jupiter (planète)

Pour les articles homonymes, voir Jupiter.

Cette page contient des caractères spéciaux. Si certains caractères de cet article s’affichent mal (carrés vides, points d’interrogation, *etc.*), consultez la page d’aide Unicode.

Jupiter 𐌆



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	778 412 027 km (5,20336301 UA)
Aphélie	816 620 000 km (5,46 UA)
Périhélie	740 520 000 km (4,95 UA)
Circonférence orbitale	4 888 042 310 km (32,675 UA)
Excentricité	0,04839266
Période de révolution	4 335,3545 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	275,066°
Satellites connus	67
Anneaux connus	3 principaux.

Caractéristiques physiques

Rayon équatorial	71 492 km (11,209 Terres)
Rayon polaire	66 864 km (10,517 Terres)

Rayon moyen volumétrique	69 911 km (10,973 Terres)
Aplatissement	0,06487
Périmètre équatorial	449 197 km (11,21 Terres)
Superficie	$6,14 \times 10^{10} \text{ km}^2$ (120,5 Terres)
Volume	$1,43128 \times 10^{15} \text{ km}^3$ (1 321,3 Terres)
Masse	$1,8986 \times 10^{27} \text{ kg}$ (317,8 Terres)
Masse volumique globale	$1\,326 \text{ kg/m}^3$
Gravité de surface	$24,7964249 \text{ m/s}^2$ (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)	47 051 km/h
Inclinaison de l'axe	3,12°
Albédo géométrique visuel	0,52
Albédo de Bond	0,343
Irradiance solaire	$50,50 \text{ W/m}^2$ (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	$0,16 \text{ kg/m}^3$
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	Ζεύς
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, plus volumineuse et massive que toutes les autres planètes réunies, et la cinquième planète par sa distance au Soleil (après Mercure, Vénus, la Terre et Mars). Elle doit son nom au dieu romain Jupiter. Le symbole astronomique de la planète, « ♃ », est la représentation du foudre de Jupiter.

Visible à l'œil nu dans le ciel nocturne, Jupiter est habituellement le quatrième objet le plus brillant de la voûte céleste, après le Soleil, la Lune et Vénus. Parfois, Mars apparaît plus lumineuse que Jupiter et de temps en temps Jupiter apparaît plus lumineuse que Vénus^[1].

Comme sur les autres planètes gazeuses, des vents violents, de près de 600 km/h, parcourent les couches supérieures de la planète. La Grande Tache rouge, un anticyclone qui fait trois fois la taille de la Terre, est une zone de surpression qui est observée au moins depuis le XVII^e siècle.

Caractéristiques physiques

Composition

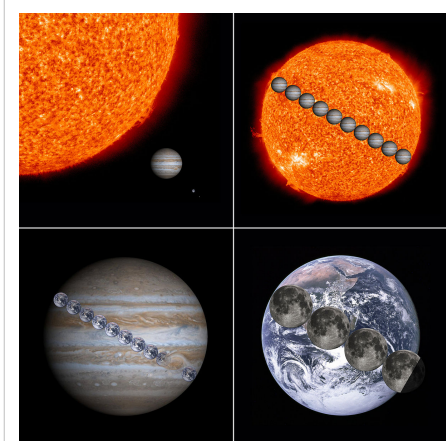
La haute atmosphère de Jupiter est composée à 93 % d'hydrogène et 7 % d'hélium en nombre d'atomes, ou à 86 % de dihydrogène et 13 % d'hélium en nombre de molécules. En masse, l'atmosphère est approximativement constituée de 75 % d'hydrogène et de 24 % d'hélium, le pourcent restant étant apporté par divers 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'hydruure de phosphore et de soufre). La couche la plus externe de la haute atmosphère contient des cristaux d'ammoniac'.

Par mesures infrarouges et ultraviolettes, des traces de benzène et d'autres hydrocarbures ont également été détectées. 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. 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^[2]. Les gaz inertes lourds sont deux à trois 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. Cependant, aucune sonde n'ayant pénétré l'atmosphère de ces géantes gazeuses, les données d'abondance des éléments plus lourds ne sont pas connues.

Masse et dimensions



En haut à droite, Jupiter a un diamètre dix fois plus petit ($\times 0.10045$) que celui du Soleil ; en bas à gauche, Jupiter a un diamètre onze fois plus grand ($\times 10.9733$) que celui de la Terre.

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 143 000 km) et on pourrait placer environ 1 321 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 cette dernière'.

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.

Des exoplanètes beaucoup plus massives que Jupiter ont été découvertes. 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. 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. Lorsque Jupiter s'est formée, elle était nettement plus chaude et son diamètre était double^[3].

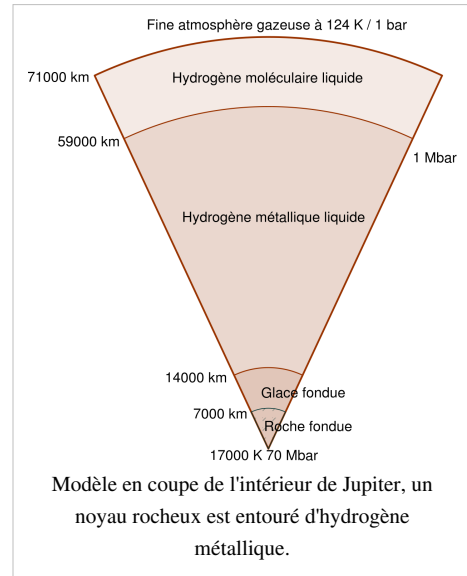
Renflement équatorial

Jupiter montre un renflement équatorial important : le diamètre au niveau de l'équateur (142 984 km) est 6 % plus important que le diamètre au niveau des pôles (133 708 km). La plupart des planètes, y compris la Terre, possèdent ce genre d'aplatissement à des degrés divers, qui dépend de la vitesse de rotation de la planète, de sa composition interne plus ou moins solide et de la masse de son noyau. Plus un noyau est massif, moins le renflement est important, toutes choses étant égales par ailleurs.

Ainsi, il est possible d'en tirer des enseignements sur la structure interne de Jupiter. Les trajectoires des sondes Voyager 1 et 2 ont été analysées, le renflement provoquant des déviations spécifiques des trajectoires. La caractérisation précise du renflement, ainsi que les données connues concernant la masse et le volume de Jupiter, montre que cette planète doit posséder un noyau dense et massif, de l'ordre de 12 masses terrestres^[4].

Structure interne

Actuellement, 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 et la pression augmentant progressivement vers le centre de la planète. Selon une autre hypothèse, Jupiter pourrait être composée d'un noyau rocheux (silicates et fer) comparativement petit (mais néanmoins de taille comparable à la Terre et de dix à quinze fois la masse de celle-ci), entouré d'hydrogène en phase métallique qui occupe 78 % du rayon de la planète^[5]. Cet état serait liquide, 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'une fine couche hydrogène gazeux. Ainsi, Jupiter est en fait une planète essentiellement liquide.



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^[6]. Entre 14 000 et 60 000 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.

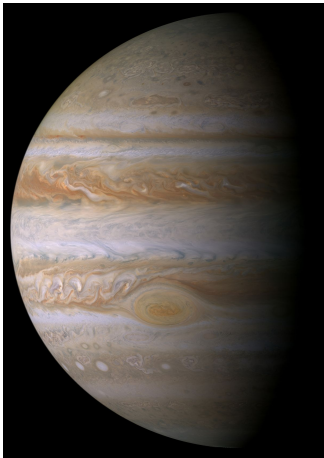
Les énormes pressions générées par Jupiter entraînent les températures élevées à l'intérieur de la planète, par un phénomène de compression gravitationnelle (mécanisme de Kelvin-Helmholtz) qui se poursuit encore de nos jours, par une contraction résiduelle de la planète.

Des résultats de 1997 du Laboratoire national de Lawrence Livermore indiquent qu'à l'intérieur de Jupiter, la transition de phase à l'hydrogène métallique se fait à une pression de 140 GPa (1,4 Mbar) et une température de 3 000 K. La température à la frontière du noyau serait de l'ordre de 15 000 K et la pression à l'intérieur d'environ 3 000 à 4 500 GPa (30-45 Mbar), tandis que la température et la pression au centre de Jupiter serait de l'ordre de 20 000 K et 70 Mbar, soit plus de trois fois plus chaude que la surface du Soleil.

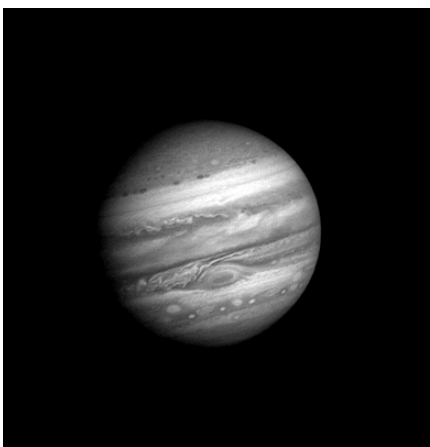
La faible inclinaison de l'axe de Jupiter fait que ses pôles reçoivent bien moins d'énergie du Soleil que sa région équatoriale. Ceci causerait d'énormes mouvements de convection à l'intérieur des couches liquides et serait ainsi responsable des forts mouvements des nuages dans son atmosphère.

Atmosphère

Article détaillé : Atmosphère de Jupiter.



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.



Mouvement de l'atmosphère de Jupiter (depuis Voyager 1).

L'atmosphère jovienne comporte trois couches de nuages distinctes :

- la plus externe serait formée de nuages de glace d'ammoniac ;
- la suivante, de nuages d'hydrogénosulfure d'ammonium (NH_4HS) ;
- la dernière de nuages d'eau et de glace.

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. La foudre engendrée est jusqu'à 1 000 fois plus puissante que celle observée sur la Terre.

L'atmosphère externe de Jupiter subit une rotation différentielle, remarquée pour la première fois par Jean-Dominique Cassini en 1690, qui a aussi estimé sa période de rotation. 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. 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 12 000 km sur 25 000 km d'une grande stabilité, puisque déjà observé avec certitude depuis au moins 1831^[7] et possiblement depuis 1665^[8]. D'autres taches plus petites ont été observées depuis le XX^e siècle[?].

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.

Grande tache rouge et autres taches

Article détaillé : Grande tache rouge.

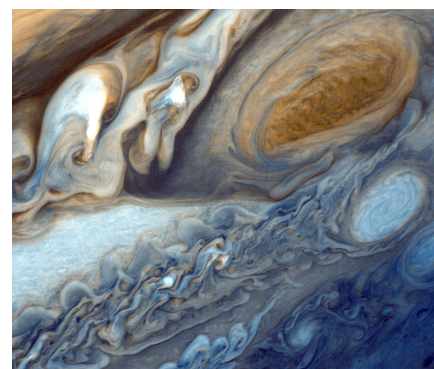
La Grande Tache rouge est une tempête anticyclonique persistante située à 22° au sud de l'équateur de Jupiter. En d'autres mots c'est un ouragan qui persiste depuis qu'on l'a découvert il y a 300 ans. Son existence est connue depuis au moins 1831 et peut-être depuis 1665. Des modèles mathématiques suggèrent que la tempête est stable et est une caractéristique permanente de la planète^[9]. 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 40 000 km de long sur 12 000 km de large, suffisamment grande pour contenir deux ou trois planètes de la taille de la Terre. 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 ; les vents soufflent à plus de 400 km/h sur ses bords.

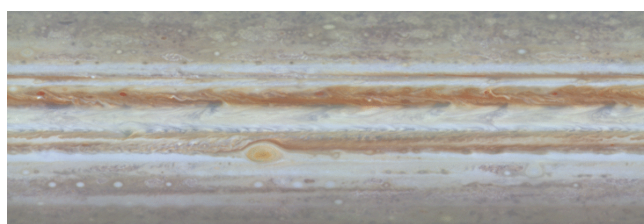
Des tempêtes de ce genre ne sont pas inhabituelles dans l'atmosphère des géantes gazeuses. Jupiter possède également des ovales blancs et bruns de plus petite taille. Les ovales blancs sont plutôt constitués de nuages relativement froids à l'intérieur de la haute atmosphère. Les ovales bruns sont plus 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".



La Grande Tache rouge prise par Voyager 1, en fausses couleurs.



La Grande Tache rouge.

Anneaux planétaires

Article détaillé : Anneaux de Jupiter.

Jupiter possède plusieurs anneaux planétaires, très fins, composés de particules de poussières continuellement arrachées aux lunes les plus proches de la planète lors de micro-impacts météoriques du fait de l'intense champ gravitationnel de la planète. 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 :

- le halo : entre 92 000 km et 122 500 km du centre de la planète ; le halo est un anneau en forme de tore, élargi par le champ magnétique de Jupiter.
- l'anneau principal : entre 122 500 km et 128 940 km du centre de Jupiter et épais de seulement 30 km ; il est probablement composé de poussières provenant des satellites Adrastée et Métis.
- l'anneau *gossamer* : entre 128 940 km et 280 000 km du centre. Avant 181 350 km, il est constitué de poussières provenant d'Amalthée. 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. 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.

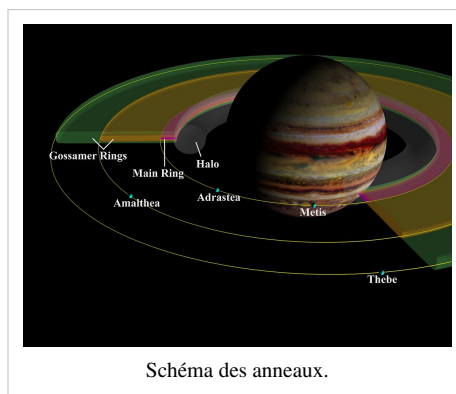


Schéma des anneaux.

Magnétosphère

Article détaillé : Magnétosphère de Jupiter.

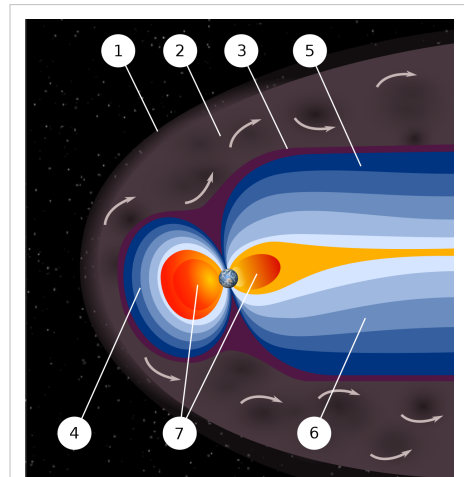
Jupiter possède un champ magnétique, 14 fois plus puissant que celui de la Terre, allant de 4,2 G à l'équateur à 10 à 14 G aux pôles, ce qui en fait le plus intense du Système solaire (à l'exception des taches solaires). Il proviendrait des mouvements de la couche très conductive d'hydrogène métallique 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 sur toute autre force.

La magnétosphère possède une forme globale semblable à une goutte d'eau très distendue. La partie incurvée fait toujours face au Soleil et dévie le vent solaire, provoquant un arc de choc à environ 75 rayons de la planète (3 millions de km). À l'opposé de Jupiter et du Soleil, une immense magnéto-queue s'étend par delà de l'orbite de Saturne, sur une distance de 650 millions de km, soit presque la distance entre Jupiter et le Soleil^[10]. Vu de la Terre, la magnétosphère apparaît cinq fois plus grande que la pleine Lune, malgré la distance plus importante. 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. Les quatre lunes principales de Jupiter sont à l'intérieur de la magnétosphère et donc protégées des vents solaires.

La magnétosphère de Jupiter est à l'origine de deux structures spectaculaires : le tore de plasma de Io, et le tube de flux de Io. Le différentiel de vitesse entre le champ magnétique en rotation rapide de Jupiter (un tour en 10 heures environ) et la rotation plus lente de Io autour de Jupiter (un tour en 40 heures) arrache de l'atmosphère de Io (ainsi que d'Europe, dans une moindre mesure) environ une tonne d'ions de soufre et d'oxygène par seconde et accélère ces ions à grande vitesse, de sorte qu'ils effectuent également un tour de Jupiter en dix heures. Ces ions forment un gigantesque tore autour de Jupiter, dont le diamètre équivaut au diamètre de Jupiter elle-même. L'interaction du tore avec Io génère une différence de potentiel de 400 000 volts avec la surface de Jupiter, produisant un puissant courant de plusieurs millions d'ampères qui circule entre Io et les pôles de Jupiter, formant un tube de flux suivant les lignes de champ magnétique^[11]. Ce phénomène produit une puissance de l'ordre de 2,5 térawatt.

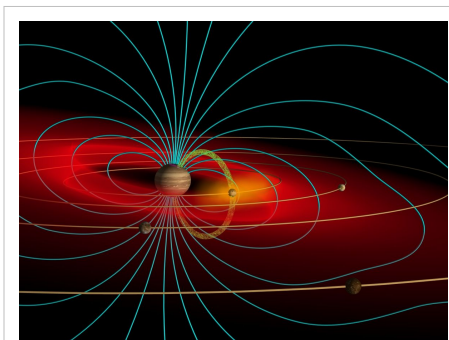
La situation d'Io, à l'intérieur d'une des plus intenses ceintures de rayonnement de Jupiter, a interdit un survol prolongé du satellite par la sonde Galileo qui a dû se contenter de 6 survols rapides de la lune galiléenne entre 1999 et 2002, en se gardant de pénétrer au sein du tore de particules englobant l'orbite du satellite, particules qui auraient été fatales au fonctionnement de la sonde.

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). Lorsque la trajectoire de la Terre intercepte ce cône d'émissions radio, celles-ci dépassent les émissions radio en provenance du Soleil.



Une représentation d'artiste du concept de magnétosphère :

- 1 : Onde de choc
- 2 : Magnétogaine
- 3 : Magnétopause
- 4 : Magnétosphère
- 5 : Lobe de magnéto-queue boréale
- 6 : Lobe de magnéto-queue australe
- 7 : Tore de plasma de Io



Tore de plasma de Io (en rouge), tube de flux (en vert) et les lignes du champ magnétique (en bleu)

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 20 000 fois l'énergie.

Orbite et rotation

La distance moyenne entre Jupiter et le Soleil est de 778 300 000 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 75 000 000 km entre le périhélie et l'aphélie.

L'inclinaison de l'axe de Jupiter est relativement faible : seulement 3,13°. En conséquence, la planète n'a pas de changements saisonniers significatifs.

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 $23,12 \text{ m/s}^2$ (la gravité de surface à l'équateur est de $24,79 \text{ m/s}^2$). La planète a ainsi une forme oblate, 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 9 275 km plus long que le diamètre polaire.

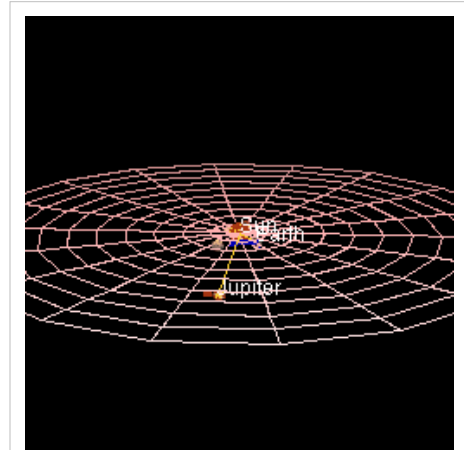
Jupiter n'étant pas un corps solide, sa haute atmosphère subit un processus de rotation différentielle. La rotation de la haute atmosphère jovienne est environ 5 minutes plus longue aux pôles qu'à l'équateur. En conséquence, trois systèmes sont utilisés comme référentiel, particulièrement pour tracer 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 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.

Satellites naturels

Article détaillé : Satellites naturels de Jupiter.

Jupiter possède 67 satellites naturels confirmés dont 50 nommés. Quatre sont de grands satellites, connus depuis plusieurs siècles et regroupés sous la dénomination de « lunes galiléennes » : Io, Europe, Ganymède et Callisto. Les 60 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 23 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.



Jupiter (rouge) complète son orbite autour du Soleil (centre) chaque 11,86 orbites de la Terre (bleue)

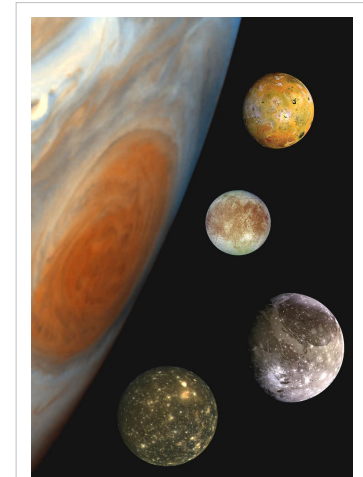
Lunes galiléennes

Article détaillé : Lune galiléenne.

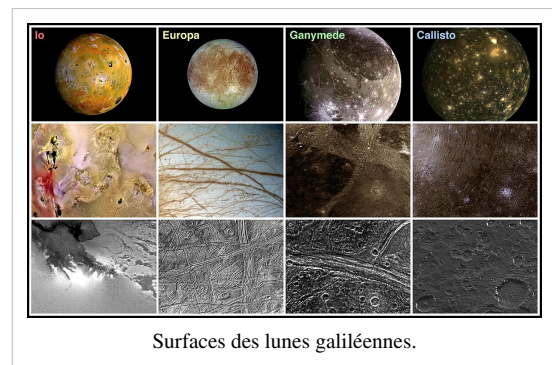
En 1610, Galilée découvrit les quatre plus importants satellites de Jupiter, les lunes galiléennes, qu'il nomma " planètes médicéennes" en l'honneur de ses protecteurs les princes de la famille Médicis. C'était la première observation de lunes autres que celle de la Terre. Ganymède, avec ses 5 262 km de diamètre, est le plus gros satellite du Système solaire. Callisto, 4 821 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 Amalthée, 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. 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.



Les quatre lunes galiléennes de Jupiter. De haut en bas : Io, Europe, Ganymède et Callisto.



Surfaces des lunes galiléennes.

Classification

Avant la mission Voyager, les lunes de Jupiter étaient parfaitement classées en quatre groupes de quatre, sur la base de leurs éléments orbitaux. Depuis lors, les découvertes de nouvelles lunes de petite taille sont venues contredire cette classification. On considère maintenant qu'il existe six groupes principaux, certains groupes étant plus particularisés 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 la recherche pense qu'ils se sont formés en même temps que la géante gazeuse. Cet ensemble peut être subdivisé en deux sous-groupes :

- Le groupe interne n'a été découvert que par la mission Voyager, à l'exception d'Amalthée. Tous ces satellites ont un diamètre de moins de 200 km et orbitent à moins de 200 000 km du centre de Jupiter, sur des orbites à peine inclinées, moins d'un demi-degré. Il s'agit du groupe d'Amalthée, lequel se compose de Métis, Adrastée, Amalthée 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 400 000 km et 2 000 000 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 la recherche pense que les éléments partagent une origine commune, peut-être un objet plus grand qui s'est fragmenté^[12] :

- 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 11 000 000 et 13 000 000 km sur des orbites inclinées de 26° à 29° : Lédä, 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, 48 représentants sont connus :
 - Le groupe d'Ananké, aux limites indistinctes, orbitant vers 21 276 000 km suivant une inclinaison de 149°.
 - Le groupe de Carmé, un groupe assez distinct situé vers 23 404 000 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 17 000 000 km et 30 000 000 km sur des orbites rétrogrades inclinées de 145° à 165°.

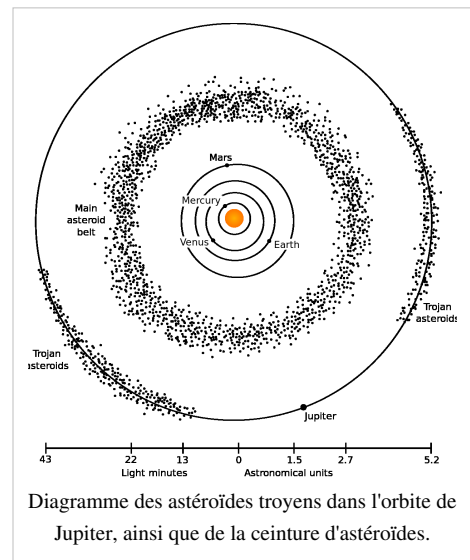
Interaction avec le Système solaire

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.

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^[13]. C'est en grande partie dû à son puits gravitationnel, ce qui lui vaut le surnom « d'aspirateur du Système solaire ».

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^[14]. 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. 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. Dans l'astrologie védique, les astrologues hindous font référence à Jupiter en tant que *Br̥haspati*, ou « Gurū », c'est-à-dire « le pesant ».

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 fut 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.

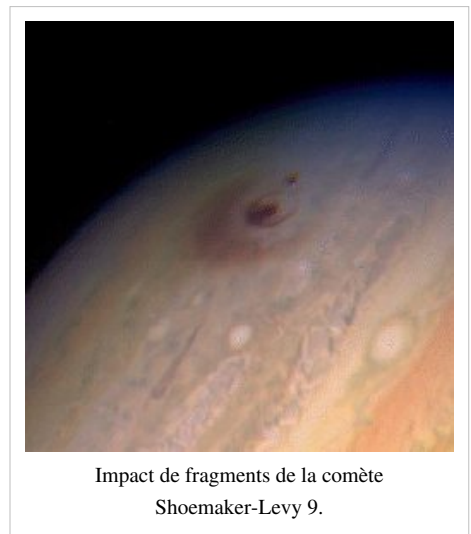
Pendant les années 1660, Cassini utilise un télescope pour découvrir des taches et des bandes de couleur sur Jupiter et observer que la planète semblait oblongue. Il fut également capable d'estimer la période de rotation de la planète. En 1690, il remarque que l'atmosphère subit une rotation différentielle.

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.

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.

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.

En 1892, Edward Barnard découvre Amalthée, le cinquième satellite de Jupiter, à l'aide du télescope de l'observatoire Lick en Californie. La découverte de cet objet assez petit le rendit célèbre rapidement. Amalthée est le dernier satellite de Jupiter à avoir été découvert par l'observation terrestre : les huit suivants le furent à l'aide de la



Impact de fragments de la comète Shoemaker-Levy 9.

mission *Voyager 1* en 1979.

En 1932, Rupert Wildt identifie des bandes d'absorption d'ammoniac et de méthane dans le spectre de Jupiter.

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*^[15].

En 1955, Bernard Burke et Kenneth Franklin détectent des accès de signaux radios en provenance de Jupiter à 22,2 MHz. 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.

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.

Le 21 juillet 2009, les astronomes ont observé un nouvel impact sur le pôle sud, de la taille de l'océan Pacifique. 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 relevé 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'.

Article détaillé : Impacts sur Jupiter.

Sondes spatiales

Article détaillé : Exploration de Jupiter.

Survols

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.

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.

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.



Voyager 2.

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^[16].

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. Le système jovien fut imagé à partir du 4 septembre 2006 ; les instruments de la sonde affinèrent les éléments orbitaux des lunes internes de Jupiter, particulièrement Amalthée. Les caméras de *New Horizons* photographièrent des dégagements de plasma par les volcans de Io et plus généralement des détails des lunes galiléennes'.

Résumé des survols

Sonde	Date	Distance (km)
Pioneer 10	3 décembre 1973	130 000
Pioneer 11	4 décembre 1974	34 000
Voyager 1	5 mars 1979	349 000
Voyager 2	9 juillet 1979	570 000
Ulysses	8 février 1992	408 894
	4 février 2004	120 000 000
Cassini	30 décembre 2000	10 000 000
New Horizons	28 février 2007	2 304 535

Galileo

Jusqu'à l'arrivée de la sonde Juno en 2016, la sonde Galileo est le seul engin à avoir orbité autour de 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 Amalthée, 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.

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.

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 .

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.

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. 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 après le Soleil et la Lune.

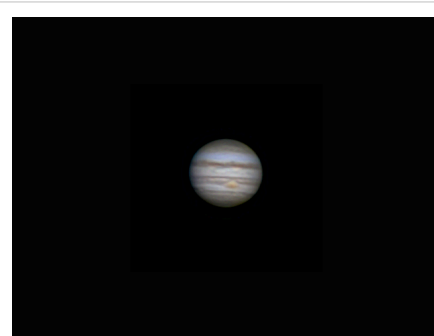
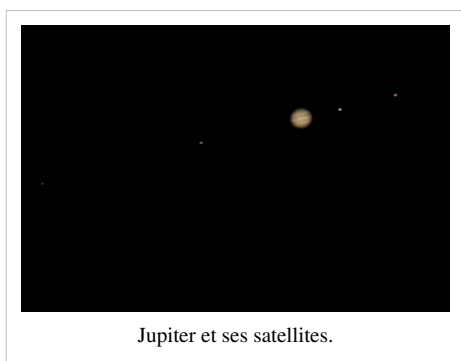


Photo astronomique prise par un amateur.



Flash lumineux causé par l'impact d'un corps céleste le 10 septembre 2012 à 11:35:30, temps universel.



Jupiter et ses satellites.

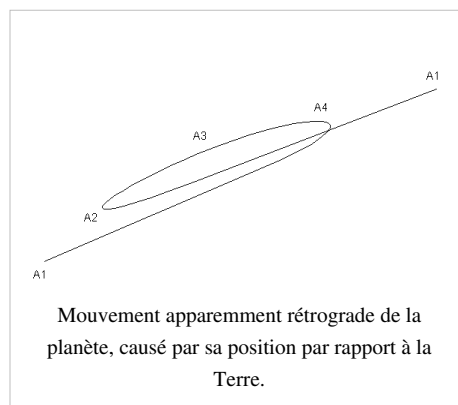
La planète est souvent considérée comme intéressante à observer du fait qu'elle dévoile nombre de détails dans une petite lunette. Comme l'a fait Galilée en 1610, on peut découvrir quatre petits points blancs qui sont les satellites galiléens. Du fait qu'ils tournent tous assez vite autour de la planète, il est aisé 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. On peut aussi observer la structure des couches gazeuses supérieures de la planète géante, visibles avec un

télescope de 60 mm^[17].

Un télescope de 25 cm permet d'observer la Grande Tache rouge (il est aussi 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.

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^[18]. Grâce à sa rapide rotation, toute la surface de Jupiter est observable en 5 h.



Un astéroïde (ou une comète) s'est écrasé sur la surface de la planète, en produisant un flash lumineux, qui a été repéré par Dan Petersen de Racine, dans le Wisconsin (USA) et filmé par George Hall, de Dallas, à 11:35:30, temps universel, le 10 septembre 2012.

C'est la sixième fois que l'on voit un objet s'écraser sur Jupiter, comme celui de la comète Shoemaker-Levy 9, en 1994^[1].

Observation radioélectrique

Article détaillé : Radioastronomie.

Avec un simple récepteur radio d'onde courte bande des 13 mètres et avec comme antenne un fil électrique de 3,5 mètres ou mieux avec une antenne-dipôle horizontale de 2 éléments 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^[19] bruit de petites vagues rapides écoutées sur haut-parleur.

La radioastronomie poussée de Jupiter est réalisée avec du matériel radioastronomique de réception dans les bandes radios dédiées à la radioastronomie.



Jupiter dans la culture

- Dans *2001, l'Odyssée de l'espace* de Stanley Kubrick, le personnage principal effectue une mission dans laquelle il se rend sur Jupiter, les noms des chapitres s'appelant d'ailleurs *La mission Jupiter*, et *Jupiter et au-delà de l'infini*. (1968) Dans sa suite *2010 : L'Année du premier contact* (1984), Jupiter est transformé en étoile par une armée de monolithes.
- Dans *Micromégas* de Voltaire, le personnage éponyme fait un voyage sur Jupiter. (1752)
- « Jupiter, celui qui apporte la gaîté » est le 4ème mouvement de l'œuvre pour grand orchestre *Les Planètes*, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

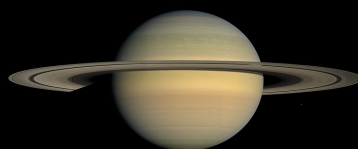
Notes et références

- [1] Site Alex-bernardini: Jupiter (<http://www.alex-bernardini.com/espace/jupiter.php>)
- [2] Futura-Sciences: Il pleut de l'hélium sur Jupiter : voilà pourquoi il y a si peu de néon. (http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/astronomie/d/il-pleut-de-lhelium-sur-jupiter-voila-pourquoi-il-y-a-si-peu-de-neon_23144/)
- [3] . .
- [4] R. Lang *The Cambridge Guide to the Solar System* Cambridge University Press 2011, p. 295
- [5] R. Lang *The Cambridge Guide to the Solar System* Cambridge University Press 2011, p. 296
- [6] . .
- [7] . .
- [8] . .
- [9] . .
- [10] *The Outer Solar System* Britannica Educational Publishing 2010, p. 103
- [11] Kenneth R. Lang *The Cambridge Guide to the Solar System* Cambridge University Press 2011, p. 304
- [12] . .
- [13] . .
- [14] . .
- [15] . .
- [16] . .
- [17] Jan Teuber (2004), , in Per Friedrichsen ; Ole Henningsen ; Olaf Olsen ; Claus Thykier ; Chr. Gorm Tortzen (eds.) , , ,
- [18] (<http://home.comcast.net/~kpheider/jup2010.txt>), anonyme. Consulté le 12 juin 2008.
- [19] Weber, Colom, Kerdraon et Lecacheux, , Bulletin du , Volume 2004-Y. Voir la figure de la .

Saturne (planète)

Pour les articles homonymes, voir Saturne.

Saturne ♄



Saturne vue par la sonde Cassini en 2008.

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	1 421 179 772 km (9,53707032 UA)
Aphélie	1 503 983 449 km (10,05350840 UA)
Périhélie	1 349 467 375 km (9,02063224 UA)
Circonférence orbitale	8 922 986 267 km (59,65 UA)
Excentricité	0,05415060
Période de révolution	10 757,7365 d (29 a 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°
Nœud ascendant	113,7153281104°
Argument du périhélie	338,71690°
Satellites connus	~ 200 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures.
Anneaux connus	7 principaux, finement divisés.
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	60 268 km (9,4492 Terres)
Rayon polaire	54 359 km (8,5521 Terres)
Rayon moyen volumétrique	58 232 km (9,014 Terres)
Aplatissement	0,09796
Périmètre équatorial	378 675 km
Superficie	43,466×10 ⁹ 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	10,44 m/s ² (1,064 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)	34 821 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 H ₂	> 93 %
Hélium He	> 5 %
Méthane CH ₄	0,2 %
Vapeur d'eau H ₂ O	0,1 %
Ammoniac NH ₃	0,01 %
Éthane C ₂ H ₆	0,0005 %
Hydruure de phosphore PH ₃	0,0001 %
Histoire	
Divinité babylonienne	Ninurta (<i>Ninib</i>)
Divinité grecque	Κρόνος
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, aussi bien en taille qu'en masse, après Jupiter^{[1],[2],[3]}. Son nom est celui du dieu romain du temps. Le symbole de Saturne, « ♄ », représente la faucille de ce dernier.

Saturne est une planète géante, au même titre que Jupiter, Uranus et Neptune, et plus précisément une géante gazeuse^{[4],[5]} de type Jupiter froid comme Jupiter. D'un diamètre d'environ neuf fois et demi celui de la Terre, elle est majoritairement composée d'hydrogène et d'hélium. Sa masse vaut 95 fois celle de la Terre^[6] et son volume 900 fois celui de notre planète. Sa période de révolution est d'environ 29 ans.

Saturne possède un 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 autour de Jupiter. Titan est plus grand que la planète Mercure et est la seule lune du Système solaire à posséder une atmosphère significative.

La vitesse du vent sur Saturne peut atteindre 1 800 kilomètres par heure, une valeur supérieure à celles relevées sur Jupiter mais moindre que sur Neptune^[7].

Caractéristiques physiques

Masse 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 % (120 536 km pour le premier, 110 449 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 aplaties, 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^{[8],[9]}. 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. 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. 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.

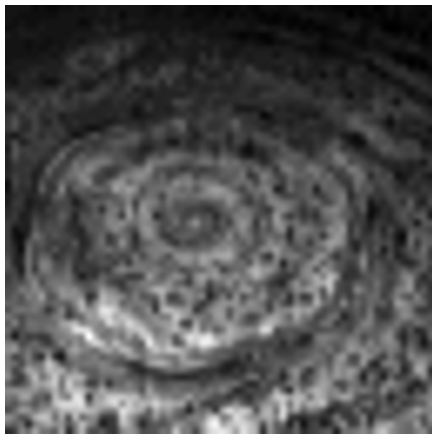
Structure interne

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.

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

Article détaillé : Atmosphère de Saturne.



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 (c'est-à-dire environ chaque année saturnienne). 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.

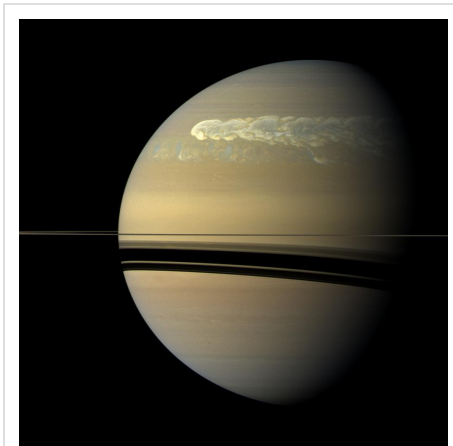
Dans les images transmises par la sonde *Cassini*, l'atmosphère de l'hémisphère nord apparaît bleue, de façon similaire à celle d'Uranus. Cette couleur est probablement causée par diffusion Rayleigh.

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*. Les bords de l'hexagone mesurent environ 13 800 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. Des formes polygonales ont été reproduites en laboratoire à l'intérieur de seaux de fluides en rotation.

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. 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. Il s'agit du seul œil jamais observé sur une autre planète que la Terre.

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 jusque là 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.



Un énorme orage photographié par la sonde Cassini en été 2011

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.

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). 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”.

Température

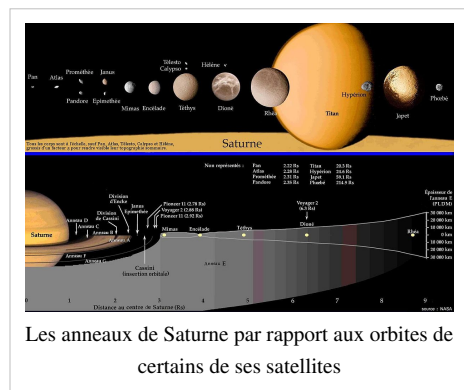
Étant donnée sa distance au Soleil, Saturne est une planète très froide en surface : sa température maximale est de 134 K (-139 °C), sa température moyenne atteint 93 K (-180 °C) et sa température minimale est de l'ordre de 72 K (-201 °C).^[réf. nécessaire]

Anneaux planétaires

Article détaillé : Anneaux de Saturne.

Saturne est reconnaissable par ses anneaux qui l'entourent. Ils sont constitués de roches et de glace^[10]. 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 depuis la Terre à l'aide de simples jumelles.

Il y règne une agitation permanente : vagues, collisions et accumulations de matières.



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	66 900	1,110	74 510	1,236	7 610	?
Division de Guérin	74 510	1,236	74 658	1,239	148	—
Anneau C	74 658	1,239	92 000	1,527	17 342	5
Anneau B	92 000	1,527	117 580	1,951	25 580	5-10
Division de Cassini	117 500	1,95	122 200	2,03	4 700	—
Anneau A	122 170	2,027	136 775	2,269	14 605	20-40
Division d'Encke	133 589	2,216	—	—	325	—
Division de Keeler	136 530	2,265	—	—	35	—
R/2004 S 1	137 630	2,284	—	—	?	?
R/2004 S 2	138 900	2,305	—	—	?	?
Anneau F	140 180	2,326	—	—	30-500	?
Anneau G	170 000	2,82	175 000	2,90	5 000	1×10 ⁵
Anneau E	181 000	3	483 000	8	302 000	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

Article détaillé : Satellites naturels de Saturne.

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.

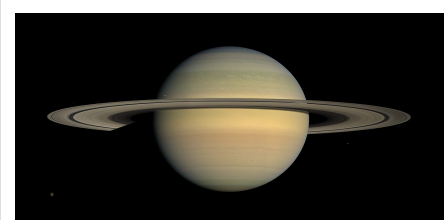
En 2009, 62^[11] satellites ont été identifiés, ainsi que 3 autres corps qui pourraient n'être que des amas dans les anneaux. 53 satellites ont été confirmés et nommés.

La plupart des lunes connues sont petites : 31 mesurent moins de 10 km de diamètre, et 13 autres moins de 50 km. 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.

Historique



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

Observations pré-télescopiques

Saturne est la plus lointaine des cinq planètes visibles à l'œil nu la nuit, des observations étant attestées depuis la préhistoire .

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.

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. La théorie de Maxwell fut prouvée correcte en 1895 par des études spectroscopiques menées par James Keeler à l'observatoire Lick.

Sondes spatiales

Article détaillé : Exploration de Saturne.

Survols

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^[12].

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	21 000
Voyager 1	12 novembre 1980	124 000
Voyager 2	25 août 1981	161 000

Cassini

Article détaillé : Sonde *Cassini-Huygens*.

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 effectue un survol de Phœbé.

L'orbiteur réalise deux survols de Titan et largue le 25 décembre 2004, le module atterrisseur *Huygens*. Celui-ci se pose sur Titan le 14 janvier 2005, transmettant un flot de photographies et de données pendant la descente et après l'atterrissage. Pendant l'année 2005, *Cassini* effectue plusieurs autres survols de Titan et d'autres satellites.



Saturne éclipsant le soleil, vu par la sonde *Cassini*.

Le 10 mars 2006, la NASA annonce que *Cassini* a mis en évidence sur Encelade, des réservoirs d'eau liquide s'échappant en geysers.

Le 20 septembre 2006, *Cassini* photographie un anneau planétaire non encore découvert, en dehors des anneaux principaux et situé à l'intérieur des anneaux E et G.

En juillet 2006, *Cassini* détecte la première preuve de lacs d'hydrocarbures près du pôle nord de Titan, ce qui sera confirmé en janvier 2007. En mars 2007, de nouvelles images du pôle mettent en évidence des mers d'hydrocarbures, la plus grande ayant presque la taille de la mer Caspienne.

La mission de la sonde devait en principe s'achever en 2008, après 74 orbites autour de Saturne, elle est dépendante de la réserve de carburant nécessaire à moduler chaque orbite ; mais début 2008, au vu des réserves encore existantes, elle a été prolongée de 2 ans.


En avril 2013, *Cassini* enregistre les images d'un vaste ouragan frappant le pôle nord de Saturne dont l'œil, de 2 000 kilomètres de diamètre, est 20 fois plus large que celui des ouragans terrestres, avec des vents supérieurs à 530 km/h. Il se peut qu'il soit là depuis plusieurs années^[13].

Culture

« Saturne, celui qui apporte la vieillesse » est le 5^{ème} mouvement de l'œuvre pour grand orchestre Les Planètes, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

Saturne est l'endroit où les deux fantômes du film Beetlejuice (1988) arrivent quand ils sortent de leur maison. Cet endroit lugubre est peuplé de vers de sable gigantesques.

Notes et références

 : document utilisé comme source pour la rédaction de cet article.

- [1] Le Système Solaire (<http://www.le-systeme-solaire.net/saturne.html>), Saturne.
- [2] La planète Saturne (<http://beaulieu.free.fr/symbolisme/astonomie/saturne.html>).
- [3] Saturne (<http://system.solaire.free.fr/saturne.htm>) dans le Système Solaire.
- [4] www.planetobs.com (<http://www.planetobs.com/planete.php?page=16>).

- [5] [www.astropolis.fr](http://www.astropolis.fr/articles/etude-du-systeme-solaire/Saturne/astronomie-saturne.html) (<http://www.astropolis.fr/articles/etude-du-systeme-solaire/Saturne/astronomie-saturne.html>).
- [6] NASA JPL (http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_discovery)
- [7] Science Channel, *The Planets (Giants)*. Consulté le 8 juin 2004.
- [8] Gaëtan Morrisette, *Astronomie Premier Contact*, p.186
- [9] Sauf que sa cohésion ne serait pas maintenue, car elle est gazeuse.
- [10] [www.astronomie.eu](http://www.astronomie.eu/planete/saturne.htm) (<http://www.astronomie.eu/planete/saturne.htm>).
- [11] <http://sse.jpl.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Saturn&Display=Moons>
- [12] [www.astronomes.com](http://www.astronomes.com/le-systeme-solaire-externe/saturne/) (<http://www.astronomes.com/le-systeme-solaire-externe/saturne/>), le Système Solaire, Saturne.
- [13] Massive storm at Saturn's north pole (<http://www.3news.co.nz/Massive-storm-at-Saturns-north-pole/tabid/1160/articleID/296026/Default.aspx>), *3News*, 30 avril 2013.

Uranus (planète)

☞ Pour les articles homonymes, voir Uranus.

Uranus ♅



Uranus vue par la sonde Voyager 2 en 1986.

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	2 876 679 082 km (19,22941195 UA)
Aphélie	3 004 419 704 km (20,08330526 UA)
Périhélie	2 748 938 461 km (18,37551863 UA)
Circonférence orbitale	18 065 794 264 km (120,76 UA)
Excentricité	0,044405586
Période de révolution	30 799,095 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	25 559 ± 4 km (4,007 Terres)
Rayon polaire	24 973 ± 20 km (3,929 Terres)
Aplatissement	0,02293
Périmètre équatorial	160 592 km
Superficie	8,1156×10 ⁹ 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)
Masse volumique globale	1 270 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)	9 320 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	
Masse volumique à 100 kPa	0,42 kg/m ³
Hauteur d'échelle	27,7 km
Masse molaire moyenne	2,64 g/mol
Hydrogène H ₂	83 %
Hélium He	15 %
Méthane CH ₄	2,3 %
Ammoniac NH ₃	0,01%
Éthane C ₂ H ₆	2,5 ppm

Acétylène C ₂ H ₂	100 ppb
Monoxyde de carbone CO	traces
Sulfure d'hydrogène H ₂ S	traces
Histoire	
Découverte par	William Herschel
Découverte le	13 mars 1781

Uranus est une planète géante de glaces de type Neptune froid. Il s'agit de la 7^e planète du Système solaire par sa distance au Soleil, de la 3^e par la taille et de la 4^e par la masse. Elle doit son nom à la divinité romaine du ciel, Uranus (Ouranos chez les Grecs), père de Saturne (resp. Cronos) et grand-père de Jupiter (resp. Zeus). Uranus est la première planète découverte à l'époque moderne. Bien qu'elle soit visible à l'œil nu comme les cinq planètes déjà connues, son caractère planétaire ne fut jamais identifié en raison de son très faible éclat, étant à la limite de la visibilité (magnitude comprise entre 5,3 et 5,7 pour les oppositions et environ 6 le reste du temps) et de son déplacement apparent très lent (période orbitale de plus de 84 ans). 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.

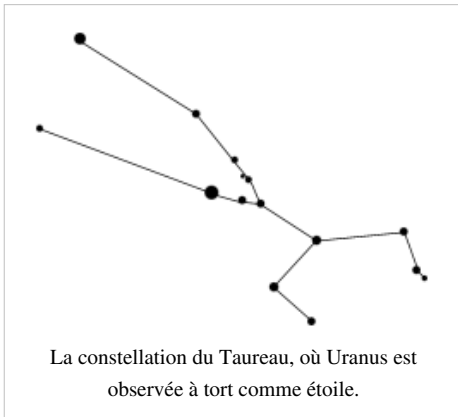
Uranus et Neptune ont des compositions internes et atmosphériques différentes de celles des deux plus grandes géantes gazeuses, Jupiter et Saturne. Les astronomes les placent donc de nos jours généralement dans une catégorie différente, celle des géantes glacées ou des sous-géantes. L'atmosphère d'Uranus, 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, le niveau zéro étant défini à une pression d'un bar). Elle a une structure nuageuse complexe : les nuages des couches les plus basses seraient constitués d'eau alors que ceux des couches les plus élevées seraient de méthane.

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. En 1986, les images de Voyager 2 ont montré Uranus comme une planète sans caractéristique particulière en lumière visible, sans couche nuageuse ou tempête 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, Uranus approchant alors de son équinoxe, qu'il a atteint en décembre 2007. Le vent à la surface d'Uranus peut atteindre une vitesse de 250 m/s, soit 900 km/h.

Histoire

Premières observations



Contrairement à Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, Uranus ne fut pas découverte dans l'Antiquité. Étant loin du Soleil et circulant lentement sur son orbite, Uranus apparaissait comme une simple étoile jusqu'au XVIII^e siècle.

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, notamment durant quatre nuits consécutives.

Uranus a peut-être été observée par Hipparque en 128 av. J.-C.. En effet, un astérisme cité dans l'Almageste de Claude Ptolémée, reprenant les travaux d'Hipparque, ne peut être résolu que par la présence d'Uranus à cette époque. Uranus à mi-avril 128 av. J.-C. était dans des conditions d'observations très favorables : proche de son périhélie, magnitude de 5,4, à 33° du zénith^{[1],[2]}.

Découverte

Sir William Herschel la découvre le 13 mars 1781 lors d'une recherche systématique d'étoiles doubles à l'aide d'un télescope. Dans le jardin de sa maison du 19 New King Street à Bath dans le Somerset en Angleterre (désormais le Musée d'astronomie Herschel) mais n'annonce la découverte que le 26 avril 1781, en tant que comète. Herschel avait entrepris une série de mesures de la parallaxe des étoiles fixes en utilisant un télescope de sa conception. 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, 1 536 et 2 010, 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.

Il écrit dans son journal : « dans le quartile près de ζ Tauri... soit [une] étoile nébuleuse soit peut-être une comète^[3]. » Le 17 mars, il note, « j'ai regardé la comète ou étoile nébuleuse et, comme elle avait changé de place, j'en ai déduit

Downloaded from nsl.royalsocietypublishing.org on January 5, 2010

[492]

XXXII. Account of a Comet. By Mr. Herschel, F.R.S.;
communicated by Dr. Watson, Jun. of Bath, F.R.S.

Read April 26, 1781.

ON Tuesday the 13th of March, between ten and eleven in the evening, while I was examining the small stars in the neighbourhood of H Geminorum, I perceived one that appeared visibly larger than the rest: being struck with its uncommon magnitude, I compared it to H Geminorum and the small star in the quartile between Auriga and Gemini, and finding it so much larger than either of them, suspected it to be a comet.

I was then engaged in a series of observations on the parallax of the fixed stars, which I hope soon to have the honour of laying before the Royal Society; and those observations requiring very high powers, I had ready at hand the several magnifiers of 227, 460, 932, 1536, 2010, &c. all which I have successfully used upon that occasion. The power I had on when I first saw the comet was 227. From experience I knew that the diameters of the fixed stars are not proportionally magnified with higher powers, as the planets are; therefore I now put on the powers of 460 and 932, and found the diameter of the comet increased in proportion to the power, as it ought to be, on a supposition of its not being a fixed star, while the diameters of the stars to which I compared it were not increased

The Royal Society is collaborating with JSTOR to digitize, preserve, and extend access to *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. www.jstor.org

[PDF] Texte de Herschel à propos de sa découverte.

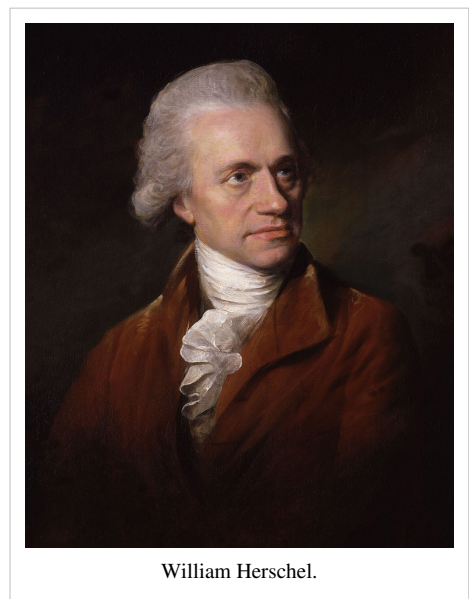
que c'était une comète et non une nébuleuse^[4]. » Lorsqu'il présente sa découverte à la Royal Society, il continue d'affirmer que c'est une comète mais la compare aussi implicitement à une planète^[5]:

« La puissance que j'avais lorsque je vis la comète pour la première fois était 227. Par expérience je sais que le diamètre des étoiles fixes n'est pas augmenté proportionnellement pour de plus grandes puissances, comme c'est le cas pour les planètes ; je mets donc maintenant la puissance à 460 et 932, et trouve que le diamètre de la comète augmente en proportion de la puissance, comme il doit l'être, en supposant qu'il ne s'agit pas d'une étoile fixe, alors que le diamètre des étoiles auxquels je l'ai comparé n'étaient pas augmentés dans les mêmes proportions. De plus, la comète étant grossie bien plus que ce que sa lumière permet, apparaissait floue et mal définie à de si grandes puissances, alors que les étoiles conservaient leur lustre et distinction que je savais depuis des milliers d'observations qu'elle garderait. La suite a montré que mes suppositions étaient bien fondées, ceci prouvant que c'est la Comète que nous avons observé plus tôt^[6]. »

Confirmation de son existence

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^[7]. »

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. 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^[8] ». Bode conclut que son orbite presque circulaire ressemble davantage à celle d'une planète que d'une comète.



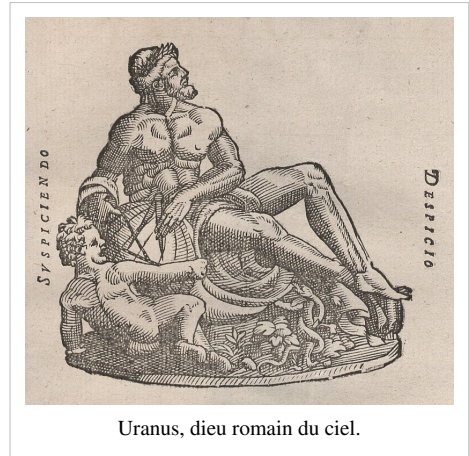
William Herschel.

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 observées. 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.

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 primaire du Système solaire. »^[9]. Le roi George 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.

Nom de la nouvelle planète

Maskelyne a demandé à Herschel de donner un nom à cette nouvelle planète, étant le découvreur de cette dernière^[10]. En réponse, Herschel a décidé de nommer l'objet « Georgium Sidus » (étoile de George), ou « Georgian Planet » (planète Géorgienne) en l'honneur de son nouveau patron, le roi George III. Il expliqua cette décision dans une lettre à Joseph Banks en déclarant que dans l'Antiquité, les appellations de Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne ont été donnés aux planètes, comme étant les noms de leurs héros et divinités principales. Dans l'ère actuelle, plus philosophique, il ne serait guère admissible d'avoir recours à la même méthode et d'appeler Junon, Pallas, Apollon ou Minerve, notre nouveau corps céleste. Pour lui, l'important pour le désigner est de savoir quand il a été découvert et sa réponse fut « sous le règne du roi George III »^[11].



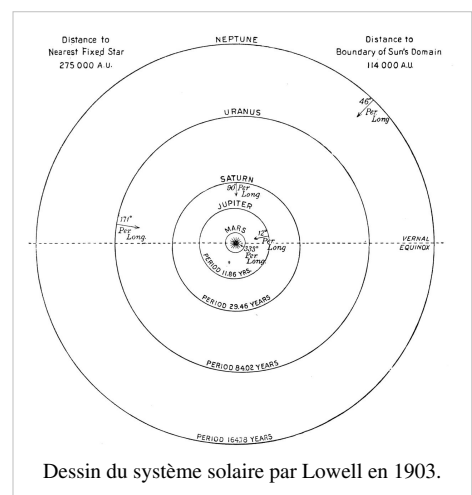
Uranus, dieu romain du ciel.

Pendant, le nom proposé par Herschel n'était pas populaire en dehors de la Grande-Bretagne, et des solutions alternatives pour un nom ont été rapidement proposées. L'astronome Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande a proposé de nommer la planète Herschel en l'honneur de son découvreur. L'astronome suédois Erik Prosperin proposa le nom de Neptune qui a été soutenu par d'autres astronomes qui ont aimé l'idée de commémorer les victoires de la flotte britannique *Royal Navy* dans le cadre de la Guerre d'indépendance des États-Unis en appelant même la nouvelle planète « Neptune George III » ou « Neptune Great Britain »^[12]. Johann Elert Bode a opté pour Uranus, la version latinisée du dieu grec du ciel, Ouranos. Bode a fait valoir que, tout comme Saturne était le père de Jupiter, la nouvelle planète devrait être nommée d'après le père de Saturne^[13]. En 1789, Martin Klaproth, le collègue de Bode à la *Royal Academy*, a nommé son élément nouvellement découvert « uranium » avec l'appui du choix de Bode^[14]. En fin de compte, la suggestion d'Uranus est devenue le plus largement utilisée, et est devenue universelle en 1850, lorsque le HM Nautical Almanac Office, le dernier obstacle, délaissa Sidus Georgium pour Uranus^[15].

Après la découverte

Au XIX^e siècle et XX^e siècle siècles, il était très difficile d'observer correctement la surface d'Uranus. La seule découverte de l'époque fut celle de Schiaparelli qui distingua malaisément quelques taches. Par spectroscopie et photométrie, les scientifiques avant 1937, purent fixer à 10 heures la rotation de la planète qui était vue comme rétrograde^[16].

Le 10 mars 1977, les anneaux d'Uranus sont découverts par hasard par les astronomes James L. Elliot, Edward W. Dunham et Douglas J. Mink, embarqués à bord de l'observatoire aéroporté Kuiper. Les astronomes veulent utiliser l'occultation de l'étoile SAO 158687 par Uranus pour étudier l'atmosphère de cette étoile^[17]. Or l'analyse de leurs observations met en évidence que l'étoile a été brièvement masquée à cinq reprises avant et après l'occultation par Uranus ; les trois astronomes concluent à la présence d'un système d'anneaux étroits.^[18] Dans leurs articles, ils désignent les cinq occultations observées par les cinq premières lettres de l'alphabet grec : α , β , γ , δ et ϵ ; ces désignations sont réutilisées par la suite pour nommer les anneaux. Peu de temps après, Elliot, Dunham et Mink découvrent quatre autres anneaux : l'un d'eux est situé entre les anneaux β et γ et les trois autres à l'intérieur de l'anneau α . Le premier est nommé η et les autres 4, 5 et 6, selon le système de numérotation des occultations adopté lors de la rédaction d'un autre article. Le système d'anneaux d'Uranus est le



Dessin du système solaire par Lowell en 1903.

second découvert dans le système solaire, après celui de Saturne.

Survol de Voyager 2

La planète géante gazeuse Uranus (50 000 km de diamètre) a un axe de rotation fortement incliné pratiquement situé dans son plan de révolution autour du Soleil. La recherche d'indices pouvant expliquer cette particularité unique dans le Système solaire est un des objectifs assignés à la sonde Voyager 2 qui est par ailleurs la première sonde à effectuer un survol de la planète. Voyager 2 met en évidence la présence d'un champ magnétique dont l'intensité est proche de celui de la Terre et qui est incliné de 60° par rapport à l'axe de rotation de la planète.

Voyager 2 découvre 10 nouvelles lunes en plus des cinq déjà connues. Toutes ces lunes sont de petite taille, la plus grande ayant un diamètre de 150 km. Les 5 lunes déjà connues sont des agglomérats de roche et de glace comme les lunes de Saturne.

Les neuf anneaux d'Uranus, découverts dans les années 1970 depuis la Terre, sont analysés par la sonde et montrent des caractéristiques différentes de ceux de Saturne et Jupiter. Ces analyses permirent de mettre en évidence qu'ils ne se sont pas formés en même temps qu'Uranus et que leur apparition est relativement récente. Les composants qui les forment sont peut-être les restes d'une lune qui aurait été fragmentée, soit par un impact avec un autre objet céleste se déplaçant à très grande vitesse, soit par les forces gravitationnelles de la planète mère^[19].

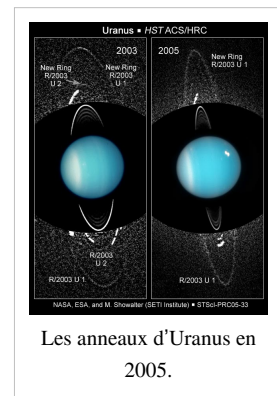
Après Voyager 2

Depuis 1997, neuf satellites irréguliers extérieurs ont été identifiés à l'aide de télescopes au sol. Deux lunes intérieures supplémentaires, Cupid et Mab, ont été découvertes grâce au *télescope spatial Hubble* en 2003. Le satellite Margaret est le dernier découvert à ce jour (2008) ; sa découverte fut publiée en octobre 2003

Le télescope spatial Hubble permit de prendre des photos correctes d'Uranus depuis la Terre. En 2003–2005, il permet de découvrir une nouvelle paire d'anneaux, baptisée par la suite système d'anneaux externe, qui porte le nombre d'anneaux d'Uranus à treize. Ils ont été nommés anneaux μ et ν (*mu* et *nu*). L'anneau μ , le plus externe, se trouve deux fois plus éloigné de la planète que l'anneau brillant η . Ces anneaux externes diffèrent des anneaux internes étroits par de nombreuses caractéristiques : μ et ν sont larges (17 000 km et 3 800 km) et très ténus ; leur épaisseur optique normale maximale sont de $8,5 \times 10^{-6}$ et $5,4 \times 10^{-6}$; leur épaisseur optique équivalente sont respectivement de 0,14 km et 0,012 km. Leur profil radial de brillance est triangulaire.



Photo d'Uranus prise par Voyager 2.



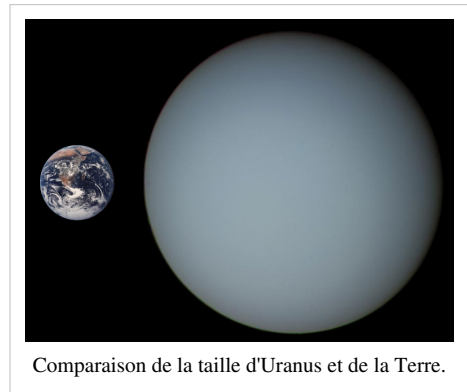
Les anneaux d'Uranus en 2005.

Caractéristiques physiques

Masse et diamètre

Avec une masse de $86,810 \times 10^{24}$ kg^[20], Uranus est un corps intermédiaire entre la Terre et les géantes gazeuses de grande taille comme Jupiter ou Saturne. Sa masse est 14 fois plus importante que celle de la Terre. Le rayon équatorial de la planète est de 25 559 km, soit environ quatre fois celui de la Terre^[21]. Uranus a la particularité d'être plus grande que Neptune (49 528 km pour Neptune contre 51 118 km pour Uranus) mais elle est moins massive que cette dernière (Neptune possède une masse de $1,0243 \times 10^{26}$ kg)^[22].

Neptune et Uranus sont souvent considérées comme une sous-classe de géante, appelée « géants de glace », en raison de leur taille plus petite et la plus forte concentration de substances volatiles par rapport à Jupiter et Saturne^[23].



Comparaison de la taille d'Uranus et de la Terre.

Champ magnétique

Avant le passage de *Voyager 2*, aucune étude de la magnétosphère uranienne n'avait pu être effectuée, sa nature restant un mystère. Avant 1986, les astronomes s'attendaient à ce que le champ magnétique d'Uranus soit aligné sur le vent solaire, puisqu'il serait alors aligné avec les pôles, qui sont sur le plan de l'écliptique.

Les relevés de *Voyager* révélèrent un champ magnétique très particulier, d'une part parce qu'il n'a pas pour origine le centre géométrique de planète, et d'autre part parce qu'il penche de 59° par rapport à l'axe de rotation. En fait, le dipôle magnétique présente même un déséquilibre vers le pôle géographique sud par rapport au centre, équivalent à un tiers du rayon planétaire. Cette géométrie inhabituelle résulte en une magnétosphère fortement asymétrique, la force du champ magnétique à la surface du pôle sud pouvant être aussi basse que 0,1 gauss ($10\mu\text{T}$), alors qu'au pôle nord, elle peut atteindre 1,1 gauss ($110\mu\text{T}$). Le champ magnétique moyen en surface a une force de 0,23 gauss ($23\mu\text{T}$). À titre indicatif, le champ magnétique terrestre est à peu près de force équivalente aux deux pôles et l'« équateur magnétique » est à peu près parallèle à l'équateur géographique. Le moment magnétique bipolaire d'Uranus est 50 fois celui de la Terre. Un tel champ magnétique penché et déséquilibré se retrouve également sur Neptune, laissant à penser qu'il s'agit d'une caractéristique commune des géantes glacées. Une des hypothèses à ce sujet est que, alors que le champ magnétique des planètes telluriques et des géantes gazeuses est engendré par leur noyau, celui des géantes glacées serait provoqué par des mouvements à des profondeurs relativement faibles, ici dans l'océan d'eau et d'ammoniaque.

Malgré son étrange alignement, la magnétosphère uranienne est, par bien des points, semblable à celle des autres planètes : on y trouve une surface de choc située à 23 fois le rayon planétaire devant elle, une magnétopause à 18 rayons uraniens, une magnétoqueue bien développée et des ceintures de radiation. En somme, la structure de la magnétosphère ne ressemble pas tant à celle de Jupiter qu'à celle de Saturne. La magnétoqueue d'Uranus s'étend dans l'espace sur des millions de kilomètres et est courbée en un long tire-bouchon par la rotation de travers de la planète.

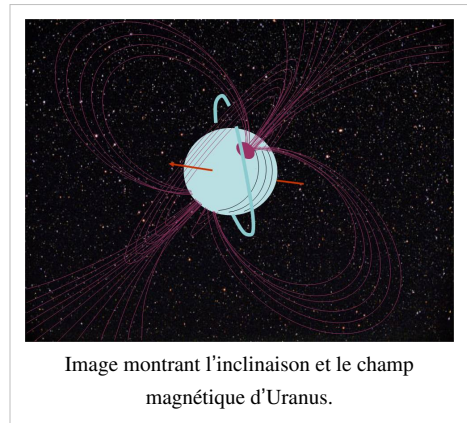
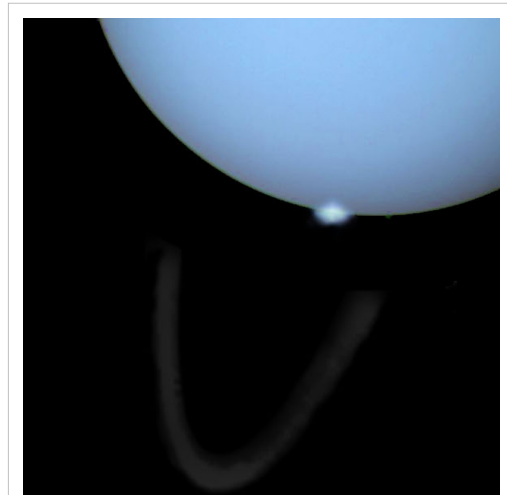


Image montrant l'inclinaison et le champ magnétique d'Uranus.

La magnétosphère d'Uranus contient des particules chargées : protons et des électrons avec une petite quantité d'ions H_2^+ . Aucun ion plus lourd n'a été détecté. Bon nombre de ces particules proviennent probablement de la couronne chaude de l'atmosphère. L'ion et les énergies d'électrons peut être aussi élevée que 4 et 1,2 mégaélectronvolts, respectivement. La densité des ions de basse énergie (inférieure à 1 kiloélectronvolt) dans la magnétosphère intérieure est d'environ 2 par cm^{-3} . La population de particules est fortement affectée par les lunes d'Uranus qui balayent la magnétosphère, laissant des lacunes importantes. Le flux de particules est suffisamment élevé pour provoquer un noircissement ou une altération des surfaces des satellites sur une échelle de temps de 100 000 ans. Cela peut être la cause de la coloration uniformément sombre des lunes et des anneaux^[24]. Uranus a des aurores polaires relativement bien développées, qui apparaissent comme des arcs lumineux autour des deux pôles magnétiques. Contrairement à Jupiter, les aurores d'Uranus semblent être insignifiantes pour le bilan énergétique de la thermosphère planétaire^[25].



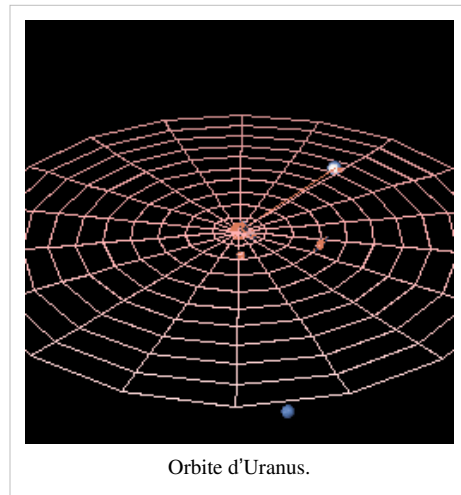
Une aurore polaire d'Uranus face à ses anneaux, prise en image par le télescope Hubble. Au contraire des aurores de la Terre ou de Jupiter, elles ne se situent pas à proximité des pôles géographiques de la planète, du fait du champ magnétique penché.

Orbite et rotation

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.

Les paramètres orbitaux d'Uranus furent calculés pour la première fois par Pierre-Simon de Laplace en 1783. Avec le temps, des différences apparurent entre l'orbite prédite et l'orbite calculée. 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 prédite par Le Verrier.

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.



Orbite d'Uranus.

Inclinaison de l'axe

Hémisphère nord	Année	Hémisphère sud
Solstice d'hiver	1902, 1986	Solstice d'été
Équinoxe de printemps	1923, 2007	Équinoxe d'automne
Solstice d'été	1944, 2028	Solstice d'hiver
Équinoxe d'automne	1965, 2049	Équinoxe de printemps

À la différence de toutes les autres planètes du Système solaire, Uranus est très fortement inclinée 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). Chacun des pôles est caché du Soleil durant 42 ans^[26].

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^[27].

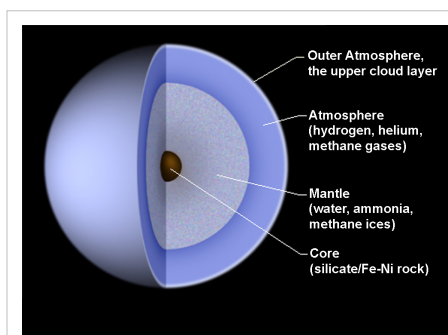
Composition d'Uranus

Composition interne

La composition interne d'Uranus serait similaire à celle de Neptune. 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 de Neptune, Uranus 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^[28].

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^[29] (University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA) à poser qu'elle soit totalement ionisée et que le méthane y soit pyrolysé 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^[30].

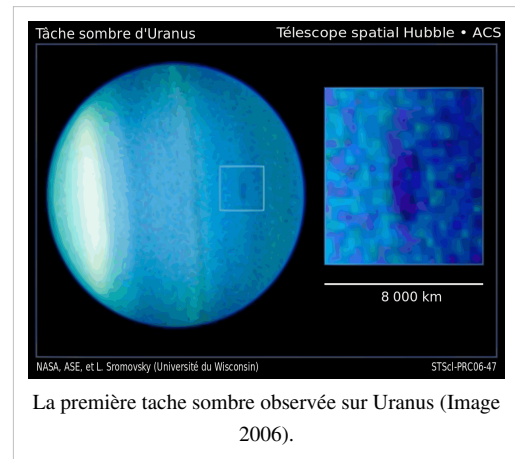


Composition d'Uranus : 1-Haute atmosphère, 2-Atmosphère composée de gaz d'hélium, d'hydrogène et de méthane, 3-Manteau composé de glaces d'eau, d'ammoniac et de méthane et 4-Noyau rocheux.

Atmosphère

Article détaillé : Atmosphère d'Uranus.

L'atmosphère d'Uranus, comme celle de Neptune, est différente des deux autres géantes gazeuses, Jupiter et Saturne. Bien que principalement composée comme elles d'hydrogène et d'hélium, elle possède une plus grande proportion de gaz volatils tels que l'eau, l'ammoniac et le méthane. Contrairement à Jupiter et Saturne, Uranus ne posséderait pas de manteau d'hydrogène métallique ou d'enveloppe en dessous de sa haute atmosphère. À la place se trouverait une région consistant en un océan composé d'ammoniac, d'eau et de méthane, dont la transition est graduelle sans limite claire avec l'atmosphère dominé par de l'hydrogène et de l'hélium. À cause de ces différences, certains astronomes regroupent Uranus et Neptune dans leur propre catégorie, celle des géantes glacées, pour les distinguer de Jupiter et Saturne.



La première tache sombre observée sur Uranus (Image 2006).

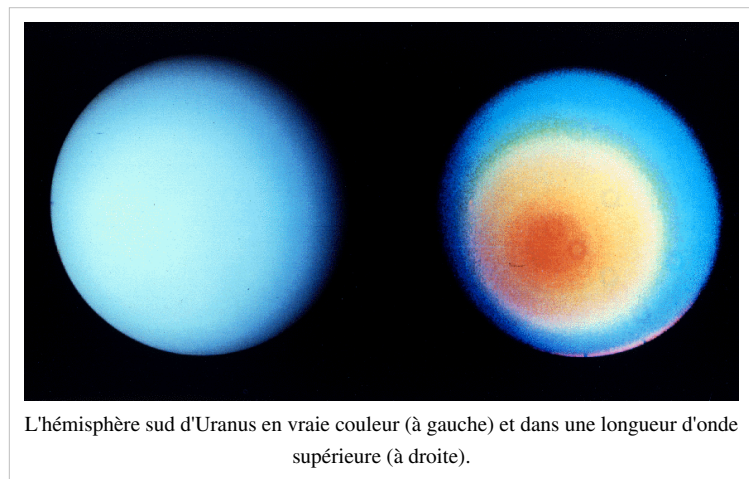
Bien qu'il n'y a pas de surface clairement définie sur Uranus, la partie la plus extérieure de l'enveloppe gazeuse d'Uranus est considérée comme son atmosphère, là où la pression est inférieure à 1 bar. Les effets de l'atmosphère sont ressentis jusqu'à environ 300 km en dessous du niveau de 1 bar, où la pression est de 100 bar et la température de 320 K. La couronne ténue de l'atmosphère s'étend jusqu'à deux fois le rayon de la planète à partir de la surface nominale située au niveau où la pression est de 1 bar^[31]. L'atmosphère uranienne peut être divisée en trois couches : la troposphère, d'une altitude de -300 à 50 km et d'une pression de 100 à 0,1 bar ; la stratosphère, d'une altitude de 50 km à 4 000 km et d'une pression allant de 0,1 à 10^{-10} bar ; et la thermosphère/couronne commençant vers 4 000 km d'altitude et allant jusqu'à près de 50 000 km de la surface. Il n'y a pas de mésosphère.

Climat

Le climat d'Uranus est fortement influencé par son manque de chaleur interne, ce qui limite l'activité atmosphérique, et son inclinaison axiale, qui induit des variations saisonnières extrêmes. L'atmosphère d'Uranus paraît remarquablement homogène aux longueurs d'onde visibles en comparaison de celle des autres géantes gazeuses, même par rapport à celle de Neptune, qui lui ressemble toutefois beaucoup.

Quand Voyager 2 passa près d'Uranus en 1986, il observa seulement dix formations nuageuses autour de la planète.

Une explication proposée pour ce manque de formations nuageuses est que la chaleur interne d'Uranus se trouve plus en profondeur que celle des autres planètes géantes ; en termes astronomiques, elle a un faible flux de chaleur. Les raisons qui font que la température interne d'Uranus est si basse ne sont pas comprises. Neptune, qui est presque la jumelle d'Uranus en ce qui concerne la taille et la composition, émet 2,61 fois plus d'énergie dans l'espace qu'elle n'en reçoit du Soleil. Uranus, en opposition, émet à peine de la chaleur. La puissance totale des émissions d'Uranus dans les infrarouges (de la chaleur) est de $1,06 \pm 0,08$ fois l'énergie solaire absorbée par l'atmosphère.



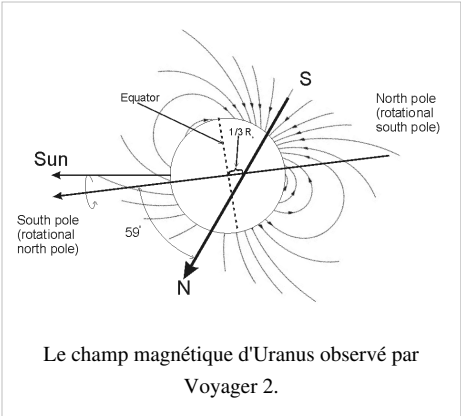
L'hémisphère sud d'Uranus en vraie couleur (à gauche) et dans une longueur d'onde supérieure (à droite).

En fait, le flux de chaleur d'Uranus est seulement de $0,042 \pm 0,047 \text{ W/m}^2$, ce qui est plus bas que le flux de chaleur interne de la Terre qui est d'environ $0,075 \text{ W/m}^2$. La température la plus basse enregistrée dans la tropopause d'Uranus est de 49 K ($-224 \text{ }^\circ\text{C}$), faisant d'Uranus la planète la plus froide du Système solaire, plus que Neptune.

Magnétosphère

Avant l'arrivée de Voyager 2, aucune mesure de la magnétosphère d'Uranus n'avait été prise, et sa nature restait un mystère. Avant 1986, les astronomes avaient espéré que le champ magnétique d'Uranus pourrait être en ligne avec le vent solaire, car il serait alors aligné aux pôles d'Uranus qui se trouvent dans l'écliptique^[32].

Les observations de Voyager 2 ont révélé que le champ magnétique d'Uranus est unique, à la fois parce qu'il ne provient pas de son centre géométrique, et parce qu'elle est inclinée à 59° par rapport à l'axe de rotation. En fait, le dipôle magnétique est décalé du centre d'Uranus vers le pôle de rotation au sud d'un tiers du rayon planétaire. Cette inhabituelles résultats de géométrie dans une très asymétrique magnétosphère, où l'intensité du champ magnétique sur la surface dans l'hémisphère sud peut être aussi bas que $0,1 \text{ gauss}$ (10 pT), tandis que dans l'hémisphère nord, il peut être aussi élevé que $1,1 \text{ gauss}$ (110 pT). Le champ moyenne à la surface est de $0,23 \text{ gauss}$ (23 pT). À titre de comparaison, le champ magnétique domaine de la Terre est à peu près aussi fort à chaque pôle, et son «équateur magnétique» est à peu près parallèle à l'équateur géographique.

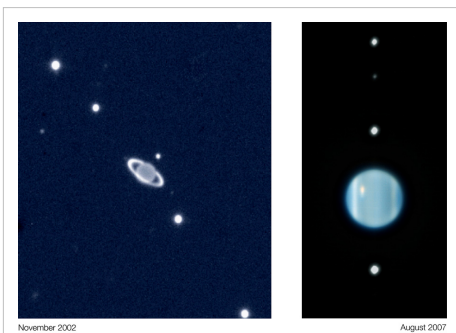


Malgré son curieux alignement, à d'autres égards la magnétosphère d'Uranus est comme celle des autres planètes : elle a une onde de choc situé à environ 23 rayons uraniens devant elle, une magnétopause à 18 rayons uraniens, et a développé une magnétoqueue et une ceinture de radiations développées. Dans l'ensemble, la structure de la magnétosphère d'Uranus est différente de Jupiter et plus semblable à Saturne.

La magnétosphère d'Uranus contient des particules chargées : les protons et les électrons avec petite quantité de H^2 + ions^[33].

Cortège d'Uranus

Anneaux planétaires

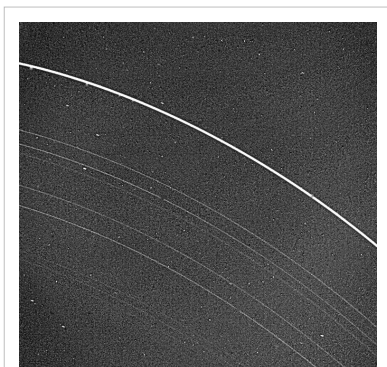


Le système uranien vu en novembre 2002 (ISAAC sur le VLT) et en août 2007 (NACO avec optique adaptative). En 2007 les anneaux étaient vus de côté, d'où le fait qu'ils soient beaucoup moins visible sur la photo.

Anneaux d'Uranus

Nom	Distance (km)	Épaisseur (km)
ζ	38 000	2
6	41 840	1 à 3
5	42 230	2 à 3
4	42 580	2 à 3
α	44 720	7 à 12
β	45 670	7 à 12
η	47 190	0 à 2
γ	47 630	1 à 4
δ	48 290	3 à 9
λ	50 020	1 à 2
ε	51 140	20 à 100
ν	~ 66 000	?
μ	97 734	?

Article détaillé : Anneaux d'Uranus.



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.

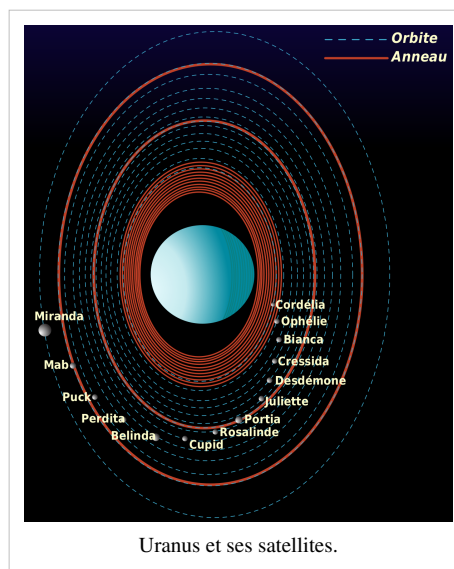
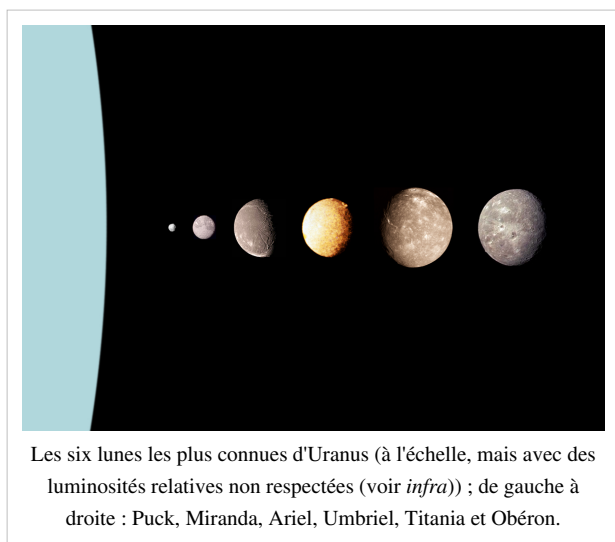
Ainsi, les observations d'Hubble portent à treize le nombre d'anneaux distincts composant le système d'anneaux d'Uranus. Ils sont appelés, par ordre de distance croissante de la planète : 1986U2R/ζ, 6, 5, 4, α, β, η, γ, δ, λ, ε, ν et μ. Leurs rayons vont de 38 000 km pour l'anneau 1986U2R/ζ à environ 98 000 km pour l'anneau μ. Il existe probablement de faibles bandes de poussière et des arcs incomplets entre les anneaux principaux. Ces anneaux sont très sombres : l'albédo des particules les composant ne dépasse pas 2 %. Ils sont probablement composés de glace et d'éléments organiques noircis par le rayonnement de la magnétosphère.

La plupart des anneaux d'Uranus sont opaques et larges de quelques kilomètres seulement. L'ensemble du système ne contient que peu de poussières : il se compose essentiellement de rochers de 0,2 à 20 m de diamètre. Cependant, certains des anneaux sont translucides : les anneaux larges et peu visibles 1986U2R/ζ, μ et ν sont faits de petites particules de poussières, tandis que l'anneau λ, peu visible également mais étroit, contient aussi des corps plus importants. La relative pauvreté en poussière des anneaux est due à la traînée aérodynamique des parties les plus externes de l'atmosphère, l'exosphère et la couronne.

Au regard de l'âge du système solaire, les anneaux d'Uranus seraient assez jeunes : leur âge ne dépasserait pas 600 millions d'années. Le système d'anneaux provient probablement de la collision et de la fragmentation d'anciennes lunes orbitant autour de la planète. Après la collision, les lunes se sont probablement brisées en de nombreuses particules, qui n'ont survécu sous la forme d'anneaux étroits et optiquement denses que dans certaines zones de stabilité maximale.

Satellites d'Uranus

Article détaillé : Satellites naturels d'Uranus.



Satellites d'Uranus

Nom	Diamètre (km)	Masse (10^{16} kg)	Rayon orbital moyen (km)
Cordélia	47	4,5 (?)	49 800
Ophélie	43	5,4 (?)	53 800
Bianca	51	9,3 (?)	59 200
Cressida	80	34,3 (?)	61 800
Desdémone	64	17,8 (?)	62 700
Juliette	94	55,7 (?)	64 400
Portia	135	168 (?)	66 100
Rosalinde	72	25,4 (?)	69 900
Cupid	12	0,12 (?)	74 800
Belinda	81	35,7 (?)	75 300
Perdita	80	40,0 (?)	76 416
Puck	162	289 (?)	86 000
Mab	16	0,28 (?)	97 734
Miranda	474	6 600	129 900
Ariel	1 159	135 000	190 900
Umbriel	1 169	117 000	266 000

Titania	1 578	352 000	436 300
Obéron	1 523	301 000	583 500
Francisco	12	0,13 (?)	4 276 000
Caliban	98	73 (?)	7 231 000
Stephano	20	0,60 (?)	8 004 000
Trinculo	10	0,075 (?)	8 578 000
Sycorax	190	540 (?)	12 179 000
Margaret	11	0,10 (?)	14 345 000
Prospero	30	2,1 (?)	16 243 000
Setebos	30	2,1 (?)	17 501 000
Ferdinand	12	0,13 (?)	20 901 000

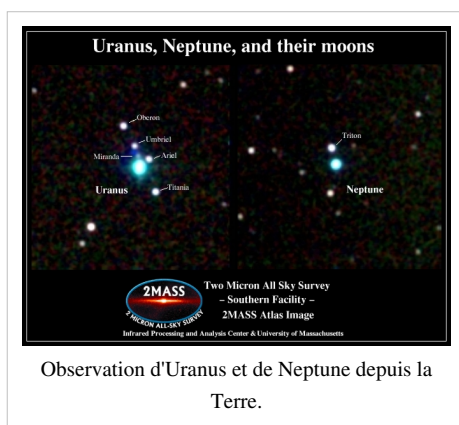
Uranus, la septième planète du Système solaire, possède 27 satellites naturels connus. Ces satellites tirent leurs noms des personnages des œuvres de William Shakespeare et Alexander Pope. William Herschel découvrit les deux premières lunes, Titania et Obéron en 1787 tandis que les autres lunes en équilibre hydrostatique furent découvertes par William Lassell en 1851 (Ariel et Umbriel) et Gerard Kuiper en 1948 (Miranda). Les autres lunes furent découvertes après 1985, pour certaines durant le survol de Voyager 2 et pour les autres par des télescopes au sol.

Les satellites d'Uranus sont divisés en trois groupes : treize satellites intérieurs, cinq satellites majeurs et neuf satellites irréguliers. Les satellites intérieurs sont de petits corps sombres qui ont des caractéristiques et une origine communes avec les anneaux de la planète. Les cinq satellites majeurs ont une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique et quatre présentent à la surface des signes d'activité interne tels que la formation de canyons ou du volcanisme. Le plus grand satellite d'Uranus, Titania, est le huitième plus grand du Système solaire avec un diamètre de 1 578 km, mais est vingt fois moins massif que la Lune. Les satellites irréguliers d'Uranus ont des orbites elliptiques et fortement inclinées (en majorité rétrogrades) et orbitent à de grandes distances de la planète.

Des études ont montré qu'il serait possible à un quasi-satellite théorique d'Uranus ou de Neptune de le rester pour la durée de vie du système solaire moyennant certaines conditions d'excentricité et d'inclinaison. De tels objets n'ont cependant pas encore été découverts.

Observation

Depuis la Terre



Observation d'Uranus et de Neptune depuis la Terre.

La magnitude apparente d'Uranus évolue entre +5,3 et +6,0^[34]. Ainsi, avec un ciel parfaitement sombre et dégagé, il est possible de la voir à l'œil nu, comme une étoile très peu lumineuse. Il est possible d'observer à l'œil nu des objets astronomiques dont la magnitude apparente est inférieure à +6^[35]. 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,

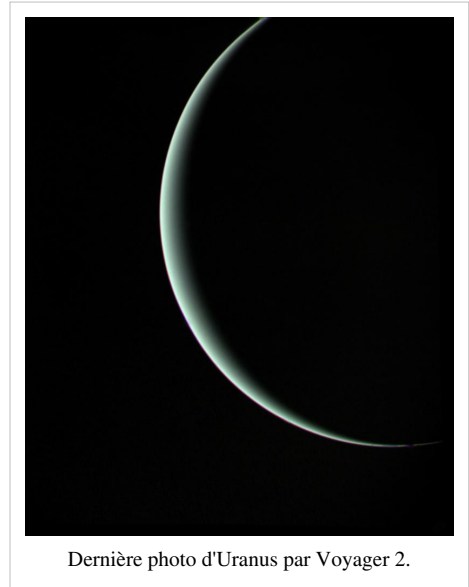
Titania et Obéron peuvent être perçus^[36].

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.

Exploration

L'**exploration d'Uranus** n'a été accomplie que par la sonde spatiale Voyager 2, et aucune autre expédition n'est prévue à ce jour. C'est le 24 janvier 1986 que la sonde atteint sa position la plus proche d'Uranus. Voyager 2 découvre au total dix nouveaux satellites naturels d'Uranus. Il étudie l'atmosphère d'Uranus, unique en raison de son inclinaison de l'axe de rotation sur le plan de l'orbite de $97,77^\circ$, et examine le système d'anneaux.

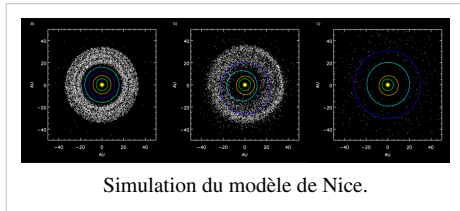
La possibilité d'envoyer la sonde Cassini-Huygens jusqu'à Uranus a été évaluée au cours d'une phase de planification de la mission d'extension en 2009. Il faudrait une vingtaine d'années pour arriver prêt du système uranien après le départ de Saturne^[37]. Un orbiteur sur Uranus nommé Uranus orbiter and probe a été recommandée par la période 2013-2022^[38].



Dernière photo d'Uranus par Voyager 2.

Formation et migration

Articles détaillés : Modèle de Nice et Formation et évolution du Système solaire.



Simulation du modèle de Nice.

La formation des géantes glacées, Neptune et Uranus, s'est avérée difficile à modéliser avec précision. Les modèles actuels suggèrent que la densité de matière dans les régions extérieures du système solaire était trop faible pour permettre la formation de ces grands corps avec la méthode traditionnellement acceptée d'accrétion de base, et différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer leur création. La première est que les géantes de glace n'ont pas été créés par accrétion de base, mais des instabilités dans le disque protoplanétaire original, ont fait sauter plus tard leurs atmosphères loin par la radiation d'une étoile massive proche de type OB^[39].

Un autre concept est qu'ils se sont formés plus près du Soleil, où la densité de matière est plus élevée, et ensuite migré vers leurs orbites actuelles, après le retrait du disque protoplanétaire gazeux^[40]. Cette hypothèse de la migration après la formation est actuellement favorisée, en raison à sa capacité à mieux expliquer l'occupation des populations de petits objets observés dans la région trans-neptunienne. Le courant le plus largement accepté des explications sur les détails de cette hypothèse est connue sous le nom modèle de Nice, qui explore l'effet d'une migration de Uranus et les autres planètes géantes sur la structure de la ceinture de Kuiper^[41].

Culture populaire

En astrologie, la planète Uranus (♅) est l'astre associé au Verseau. Depuis, Uranus est associée à la couleur cyan et à l'électricité. (la couleur bleu électrique, étant associée au signe du Verseau)^[42].

L'élément chimique uranium, découvert en 1789 par le chimiste allemand Martin Heinrich Klaproth, a été nommé d'après la planète Uranus récemment découverte^[43].

« Uranus, le magicien » est le 6ème et avant-dernier mouvement de l'œuvre pour grand orchestre Les Planètes, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

L'Opération Uranus fut une opération militaire soviétique couronnée de succès durant la Seconde Guerre mondiale, qui consistait à reprendre la ville assiégée de Stalingrad.

La ligne, *Then felt I like some watcher of the skies/When a new planet swims into his ken* (alors je me suis senti comme un observateur des cieux / Quand une nouvelle planète nage dans son horizon), de John Keats « On First Looking into Chapman's Homer » est une référence à la découverte d'Herschel d'Uranus.

Annexes

Articles connexes

- Anneaux d'Uranus
- Satellites naturels d'Uranus

Liens externes

- Caractéristiques d'Uranus^[44] sur le site de l'IMCCE
- Le Système Solaire - Uranus^[45]
- Uranus - pioneer-astro^[46]

Notes et références


Notes

- [1] René Bourtembourg, *Hipparque a-t-il observé la planète Uranus ?*, L'Astronomie, Septembre 2013
- [2] WAS URANUS OBSERVED BY HIPPARCHUS? (<http://connection.ebscohost.com/c/articles/91830686/was-uranus-observed-by-hipparchus>.)
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Journal of the Royal Society and Royal Astronomical Society 1, 30; cité dans
- [6] Traduction libre de :
- [7] 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
- [8] 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, , 1781, cité dans
- [9] 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
- [10] RAS MSS Herschel W.1/12.M, 20,
- [11] Dreyer, J. L. E., (1912). « The Scientific Papers of Sir William Herschel. 1. Royal Society and Royal Astronomical Society ». .
- [12] A. J. Lexell (1783). "Recherches sur la nouvelle planete, decouverte par M. Herschel & nominee Georgium Sidus". Acta Academia Scientiarum Imperialis Petropolitanae (1): 303–329
- [13] Daugherty, Brian. "Astronomy in Berlin". Brian Daugherty. Retrieved May 24, 2007.
- [14] James Finch (2006). "The Straight Scoop on Uranium"
- [15] Littmann, Mark (2004). Planets Beyond: Discovering the Outer Solar System. Courier Dover Publications. .
- [16] De Mercure à Pluton, planètes et satellites, Pierre Humbert, 1937, 145-147

- [17] Larousse du Ciel, 2005,
- [18] Système solaire et planètes, 2009,
- [19] Voyager RSS MISSION.CAT (<http://pds-rings.seti.org/voyager/rss/mission.html>)
- [20] Jacobson, R. A.; Campbell, J. K.; Taylor, A. H.; Synnott, S. P. (June 1992). "The masses of Uranus and its major satellites from Voyager tracking data and earth-based Uranian satellite data". *The Astronomical Journal* 103
- [21] P. Kenneth, Seidelmann, Archinal, B. A.; A'hearn, M. F. et al (2007). Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* (Springer Netherlands) 90: 155–180
- [22] David R. Williams. Neptune Fact Sheet. NASA, 1 septembre 2004. URL consultato in data 14 agosto 2007.
- [23] Boss, Alan P. (2002). Formation of gas and ice giant planets. *Earth and Planetary Science Letters* 202 (3–4): 513–523
- [24] Solarviews.com (<http://www.solarviews.com/eng/vgrur.htm>)
- [25] Krimigis, S. M.; Armstrong, T. P.; Axford, W. I.; Cheng, A. F.; Gloeckler, G.; Hamilton, D. C.; Keath, E. P.; Lanzerotti, L. J. et al. (4 July 1986). "The Magnetosphere of Uranus: Hot Plasma and Radiation Environment". *Science* 233 (4759): 97–102
- [26] News.wisc.edu (<http://www.news.wisc.edu/releases/12826.html>)
- [27] "Report of the IAU/IAG working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 2000" (<http://www.hnsky.org/iau-iag.htm>)
- [28] "Neptune's Deep Chemistry", *Science*, Hubbard, W. B. (1997).
- [29] *Nature* 292, 435-436 (30 July 1981) | doi:10.1038/292435a0; Accepted 2 June 1981
- [30] "Water-ammonia ionic ocean on Uranus and Neptune?" Atreya, S.; Egeler, P.; Baines, K. (2006)
- [31] "The Upper Atmosphere of Uranus: EUV Occultations Observed by Voyager 2" (PDF). *Journal of Geophysical Research* (http://www-personal.umich.edu/~atreya/Articles/1987_Upper_Atm_Uranus.pdf)
- [32] Ness, Norman F.; Acuña, Mario H.; Behannon, Kenneth W.; Burlaga, Leonard F.; Connerney, John EP; Lepping, Ronald P.; Neubauer, Fritz M. (Juillet 1986). *Magnetic Fields at Uranus*. *Sciences* 233 (4759): 85-89.
- [33] Krimigis, S. M.; Armstrong, T. P.; Axford, W. I.; Cheng, A. F.; Gloeckler, G.; Hamilton, D. C.; Keath, E. P.; Lanzerotti, L. J.; Mauk, B. H. (4 July 1986). "The Magnetosphere of Uranus: Hot Plasma and Radiation Environment". *Science* 233 (4759): 97–102.
- [34] Éphémérides d'Uranus (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/TYPE/TYPE.html>)
- [35] La magnitude des étoiles (<http://www.infoplease.com/ipa/A0004435.html>)
- [36] thesolarsystemplanets.com, chapitre sur Uranus (<http://www.thesolarsystemplanets.com/tag/uranus/>)
- [37] "Cassini Proposed Extended-Extended Mission (XXM)" (<http://www.lpi.usra.edu/opag/march09/presentations/pappalardo.pdf>)
- [38] site de la NASA sur le système solaire (<http://solarsystem.nasa.gov/2013decadal/>)
- [39] Boss, Alan P. (September 30, 2002). "Formation of gas and ice giant planets". *Earth and Planetary Science Letters*.
- [40] Thommes, Edward W.; Duncan, Martin J.; Levison, Harold F. (2001). "The formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn". *The Astronomical Journal* 123 (5): 2862–2883.
- [41] Smith, R.; L. J. Churcher; M. C. Wyatt; M. M. Moerchen; C. M. Telesco (2009). "Resolved debris disc emission around η Telescopii: a young solar system or ongoing planet formation?". *Astronomy and Astrophysics* 493 (1): 299–308.
- [42] Parker, Derek and Julia Aquarius. *Planetary Zodiac Library*. New York: Mitchell Beazley/Ballantine Book. 1972.
- [43] Uranium sur Answers.com (<http://www.answers.com/topic/uranium>)
- [44] <http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages1/150.html>
- [45] <http://www.le-systeme-solaire.net/modules.php?name=syssol&page=uranus>
- [46] <http://www.astrosurf.com/pioneerastro/uranus.htm>

Références

Bibliographie

- (en) Imke de Pater, Paul N. Romani et Sushil K. Atreya, « Possible Microwave Absorption in by H₂S gas Uranus' and Neptune's Atmospheres », *Icarus*, vol. 91, 1991, p. 220–223 (lien DOI ([http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90020-T](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(91)90020-T))[?], lire en ligne (http://www-personal.umich.edu/~atreya/Articles/1991_Microwave_Absorption.pdf))
- Roger Ferlet et Philippe de La Cotardière, *Larousse du ciel : comprendre l'astronomie du 21e siècle*, Paris, Larousse, 2005, 478 p. (ISBN 9782035604347).
- Anny-Chantal Levasseur-Regourd, André Brahic, Thérèse Encrenaz, François Forget *et al.*, *Système solaire et planètes*, Paris, Ellipses, 2009, 249 p. (ISBN 9782729840846)
-  Portail de l'astronomie

Neptune (planète)

Pour les articles homonymes, voir Neptune.

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	28,295449561×10 ⁹ km (189,14 UA)
Excentricité	0,00858587
Période de révolution	60 224,9036 d (164 a 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	14, notamment Triton.
Anneaux connus	5 principaux.

Caractéristiques physiques

Rayon équatorial	24 764 ± 15 km (3,883 Terres)
Rayon polaire	24 341 ± 30 km (3,829 Terres)
Rayon moyen volumétrique	24 622 km (3,865 Terres)
Aplatissement	0,0171

Périmètre équatorial	155 597 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	1 638 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)	9 660 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 %
Deutériure d'hydrogène HD	190 ppm
Ammoniac NH₃	100 ppm
Éthane C₂H₆	2,5 ppm
Acétylène C₂H₂	100 ppb
Histoire	
Découverte par	Urbain Le Verrier (calcul), Johann Gottfried Galle (obs.) sur les indications d'Urbain Le Verrier. Voir Découverte de Neptune.

Découverte le	31 août 1846 (calcul(*)) 23 septembre 1846 (obs.) (*)date de publication des résultats entrepris par Le Verrier depuis 1844.
----------------------	---

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, toutes les deux géantes de glaces, ont une composition similaire, 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.

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 inexplicables 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 ♆ est une version stylisée du trident du dieu Neptune, tandis que son symbole alternatif ♆ représente les initiales de Le Verrier.

Histoire

Article détaillé : Découverte de Neptune.

Premières apparitions

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.

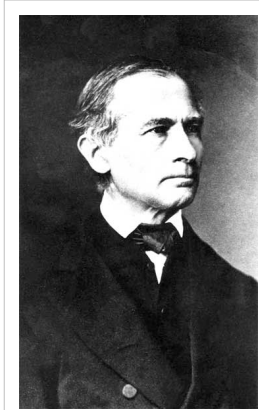
Plusieurs astronomes ont manqué de faire la découverte par les moyens traditionnels (observation au télescope). Les dessins astronomiques de Galilée montrent qu'il a observé Neptune le 28 décembre 1612 alors qu'il regardait Jupiter. La planète est alors répertoriée comme une simple étoile de magnitude 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^[2].

Neptune est également observée par Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732-1807) le 10 mai 1796 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^[3].

Déjà en 1788, la planète Uranus récemment découverte, ne semblait pas se conformer au modèle d'orbite que les astronomes avaient prédit. 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 prédit 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^[4].

Recherche d'une planète transuraniennne



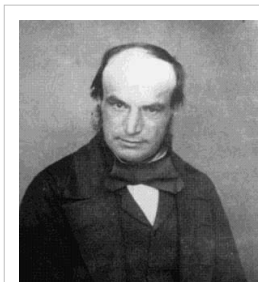
Johann Gottfried Galle.

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-uraniennne pour expliquer les perturbations du mouvement d'Uranus^[5].



Urbain Le Verrier.

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^[6].



John Couch Adams.

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

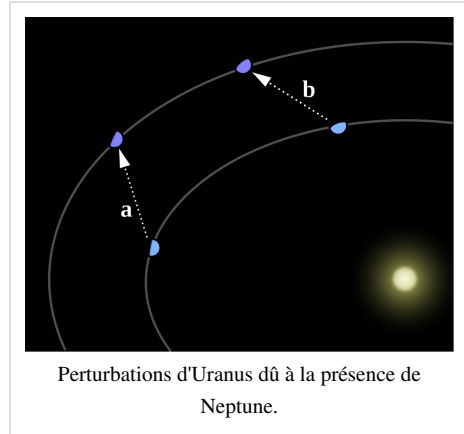
1846^[7].

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^[8].

Découverte de Neptune

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 vérifie si l'astre observé est répertorié sur les cartes stellaires récentes de Bremiker. Vers minuit, Galle trouve Neptune, à moins d'un degré de l'emplacement calculé. Il attend quelques heures pour vérifier si l'astre a bien bougé, avant de confirmer qu'il s'agit bien de la planète recherchée^[9].



Outre-Manche, la déception est grande. Challis apprend la découverte en lisant le *Times*. En revoyant ses notes, il découvre même qu'il a 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^{[10],[11]}.

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^{[12],[13]}.

Nom de la nouvelle planète



Neptune le dieu des mers.

Peu de temps après sa découverte, Neptune fut appelée simplement « la planète extérieure à Uranus » ou comme « planète Le Verrier ». La première suggestion pour un nom venu de Galle, qui a proposé le nom de Janus, du dieu romain des commencements et des fins, des choix et des portes. En Angleterre, Challis mettait en avant le nom d'Océan, un Titan, fils d'Ouranos (équivalent grec d'Uranus)^[14].

Revendiquant le droit de nommer sa découverte, Le Verrier a rapidement proposé le nom Neptune pour cette nouvelle planète, tout en déclarant faussement que cela avait été officiellement approuvé par le Bureau des longitudes^[15]. En octobre, il a cherché à nommer la planète Le Verrier, en son nom, ayant le soutien fidèle du directeur de l'observatoire, François Arago. Cette suggestion a rencontré une vive résistance hors de France^[16].

Wilhelm Struve s'est prononcé en faveur du nom de Neptune, le 29 décembre 1846, à l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg^[17].

Peu de temps après, Neptune est devenu le nom internationalement accepté. Dans la mythologie romaine, Neptune était le dieu de la mer. La demande pour un nom mythologique semblait être en harmonie avec la nomenclature des autres planètes, qui toutes, à l'exception de la Terre, ont été nommées d'un nom de la mythologie grecque et romaine^[18].

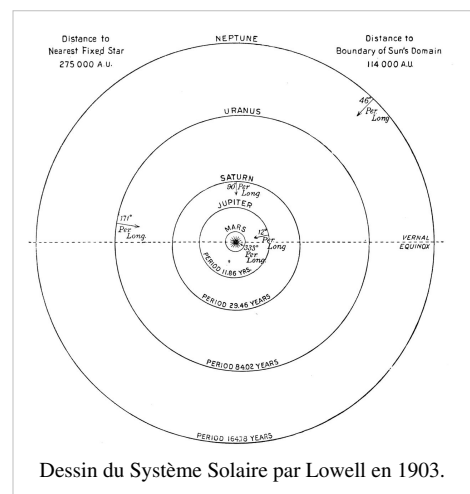
La plupart des langues d'aujourd'hui, même dans les pays qui n'ont pas de lien direct avec la culture gréco-romaine, utilisent une variante du nom « Neptune » pour la planète. En chinois, japonais et coréen, le nom de la planète a été traduit littéralement comme « étoile du roi de la mer » (海王星), puisque Neptune était le dieu de la mer. En grec moderne, cependant, la planète retient son ancien nom de Ποσειδώνας: Poseidonas, l'homologue grec de Neptune^[19].

Après la découverte

Neptune est la seule des huit planètes connues à avoir été découverte par le calcul mathématique plutôt que par l'observation empirique. 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.

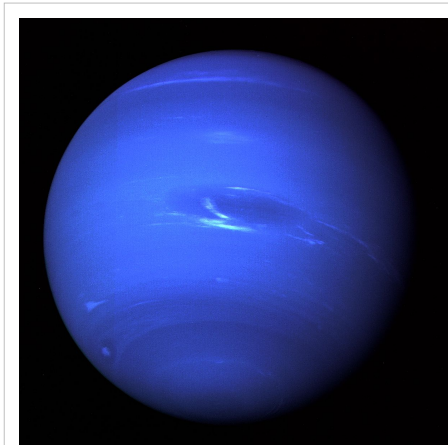
Durant le XIX^e siècle et le début du XX^e siècle, les astronomes pensaient que Neptune était, avec Uranus, une planète tellurique. En 1909, les scientifiques crurent avoir observé, dans le spectre de Neptune, la bande verte caractéristique d'une présence de la chlorophylle, et l'hypothèse de la vie végétale sur cette planète fut émise. On s'aperçut quelques années plus tard que cette bande provenait de l'emploi de plaques orthochromatiques et n'avait pas d'origine planétaire^[20].

À la fin du XIX^e siècle, il a été suggéré que les irrégularités observées dans le mouvement d'Uranus et de Neptune découlent de la présence d'une autre planète ultra-périphérique. Après des recherches approfondies, Pluton a été découvert le 18 février 1930 au point de coordonnées fournis par les calculs de William Henry Pickering et Percival



Lowell pour la Planète X. Cependant, la nouvelle planète était trop loin pour générer les irrégularités observées dans le mouvement d'Uranus, tandis que celles observées sur Neptune découlaient d'une erreur dans l'estimation de la masse de la planète (qui a été identifiée avec la Mission de Voyager 2) et qui était responsable, entre autres, des irrégularités^[21]. La découverte de Pluton est donc plutôt fortuite. En raison de sa grande distance, la connaissance de Neptune était restée faible au moins jusqu'au milieu des années 1900, quand Gerard Kuiper découvrit sa deuxième lune Néréide. Dans les années 1970 et 1980, on a accumulé des indices sur la présence probable d'anneaux ou au moins de fragments autour de Neptune. En 1981, Harold Reitsema a révélé son troisième satellite Larissa^[22].

Survol par *Voyager 2*



Neptune par Voyager 2.



La sonde Voyager 2 survolant Neptune (vue d'artiste).

Voyager 2 est la première sonde spatiale, et à ce jour la seule, à avoir survolé la planète géante gazeuse Neptune (environ 50 000 km de diamètre). La trajectoire à travers le système planétaire de Neptune est mise au point une fois le survol d'Uranus et de ses lunes achevé. Comme il doit s'agir du dernier passage de Voyager 2 près d'une planète, il n'existe pas de contraintes sur la manière de sortir du système planétaire et plusieurs choix sont possibles : l'équipe sur Terre opte pour un passage à faible distance du pôle nord de Neptune ce qui permettra d'utiliser l'assistance gravitationnelle de la planète pour faire plonger la sonde sous l'écliptique pour un survol rapproché de Triton, la principale lune de Neptune. L'éloignement de Neptune diminue encore le débit théorique permis par la liaison radio. Aussi, plusieurs mesures sont prises dans les années qui précèdent le survol pour renforcer le réseau d'antennes à Terre, notamment l'accroissement de la taille des antennes de réception existantes, la mise en service d'une nouvelle antenne à Usuda au Japon et le recours au Very Large Array au Nouveau-Mexique.

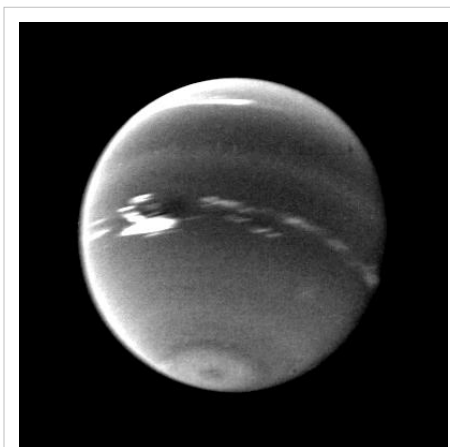
Les premières observations sont effectuées à partir de mars 1989, soit 90 jours avant le passage au plus près de Neptune et près de 3 ans après le survol d'Uranus. Elles permettent de découvrir les anneaux de Neptune, dont l'existence n'avait jusque là jamais été prouvée : ils sont composés de particules très fines qui ne permettent pas leur observation depuis la Terre. Un champ magnétique nettement plus

faible que celui d'Uranus est détecté et mesuré. Au cours de la traversée du système neptunien, 9 nouvelles lunes, de petite taille, sont découvertes (une dixième sera découverte plus tard sur des photos prises par la sonde). Compte tenu de l'éloignement de Voyager 2, il fut difficile d'envoyer à temps de nouvelles instructions pour l'observation de ces nouveaux corps célestes. Seule Protée (400 km de diamètre) fut découverte suffisamment tôt pour programmer des observations détaillées.

Le survol de Neptune a lieu le 25 août 1989 : Voyager 2 passe à 29 240 km de la planète. L'atmosphère de Neptune est analysée. Malgré le peu d'énergie reçue du Soleil du fait de son éloignement (3 % de ce que reçoit Jupiter), une dynamique atmosphérique est observée

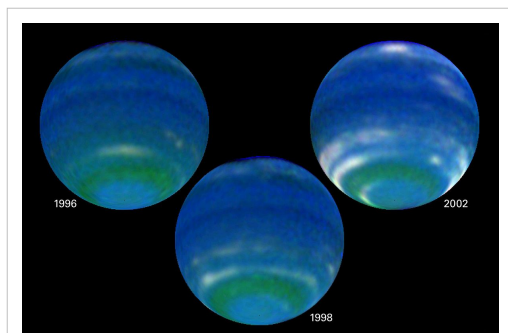
avec des manifestations comme la « Grande Tache Sombre » et des nuages. Des vents soufflant à 2 000 km/h sont mesurés. L'étude du champ magnétique permet de déterminer que la durée d'une rotation est de 16,11 heures.

Voyager 2 passe à 39 790 km de Triton et peut recueillir des données très précises sur cette lune. La communauté scientifique estimait à l'époque que son diamètre était compris entre 3 800 et 5 000 km ; la sonde permet de ramener ce chiffre à 2 760 km. Très peu de cratères sont observés, ce qui est expliqué par le volcanisme dont des manifestations sous forme de traces laissées par des geysers sont observées au pôle. Une atmosphère ténue (pression de 10 à 14 millibars soit 1/70000 de celle de la Terre), résultant sans doute de cette activité, est détectée par Voyager 2. La température de la surface mesurée, 38 kelvin, est la plus froide jamais détectée sur un corps céleste du Système solaire.



Une des premières photos de Neptune prise par la sonde.

Après Voyager



Photos prises par Hubble entre 1996 et 2002.

Trois images furent prises le 10 octobre, le 18 octobre et le 2 novembre 1994, lorsque Neptune était 4.5 milliards de kilomètres de la Terre par le télescope spatial Hubble. S'appuyant sur les découvertes initiales de Voyager, Hubble a révélé que Neptune a une atmosphère remarquablement dynamique qui change en quelques jours. Durant cette prise, la grande tache sombre avait complètement disparu, indiquant aux astronomes qu'elle avait pu être recouverte ou qu'elle avait disparu. La persistance des nuages l'accompagnant prouve que certaines taches anciennes peuvent subsister sous la forme de cyclones. Toutefois, une tache presque identique est apparue dans l'hémisphère nord de Neptune.

Cette nouvelle tache, appelée la Grande tache sombre du Nord (NGDS), est restée visible pendant plusieurs années^[23].

Halimède^[24], Sao, Laomédie et Néso^[25] (S/2002 N 1 à 4) furent, comme leur désignation temporaire l'indique, découverts lors du même programme d'observation en 2002. Psamatée (S/2003 N 1), le dernier satellite découvert, le fut en 2003^[26].

Avec une période orbitale de presque 165 ans, Neptune est retournée le 12 juillet 2011 au point où Galle l'avait observée.

Statut

Depuis sa découverte en 1846 jusqu'à la découverte de Pluton en 1930, Neptune était la planète la plus éloignée connue. Avec la découverte de Pluton, Neptune est devenu l'avant-dernière planète, sauf pour une période de 20 ans entre 1979 et 1999, lorsque l'orbite elliptique de Pluton était plus proche du Soleil que Neptune^[27].

La découverte de la ceinture de Kuiper en 1992 a entraîné de nombreux astronomes à débattre de la question de Pluton. Il s'agissait de savoir si Pluton devait être considérée comme une planète à part entière ou comme un objet, notable, de la ceinture de Kuiper. En 2006, l'Union astronomique internationale a défini le mot "planète" pour la première fois. Le reclassement de Pluton comme "planète naine" a fait de Neptune encore une fois la dernière planète du système solaire^[28].

Caractéristiques physiques

Masse et diamètre

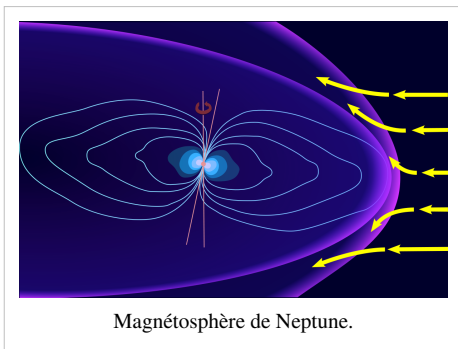
Avec une masse de $1,0243 \times 10^{26}$ kg^[29], Neptune est un corps intermédiaire entre la Terre et les géantes gazeuses de grande taille comme Jupiter ou Saturne. Sa masse est 17 fois plus importante que celle de la Terre, mais elle correspond à un 19^e de celle de Jupiter. Le rayon équatorial de la planète est de 24 764 km et est environ quatre fois plus grand que celui de la Terre^[30]. Neptune a la particularité d'être plus petite qu'Uranus (49 528 km pour Neptune contre 51 118 km pour Uranus) mais elle est plus massive que cette dernière (Uranus possède une masse de $86,810 \times 10^{24}$ kg)^[31].

Neptune et Uranus sont souvent considérées comme une sous-classe de géantes, appelées « géantes de glaces », en raison de leur taille plus petite et de la plus forte concentration de substances volatiles par rapport à Jupiter et Saturne^[32]. Dans la recherche de planètes extrasolaires, Neptune a été utilisée comme un terme de comparaison : les planètes découvertes avec une masse similaire ont en effet été qualifiées de Neptune chaud.



Comparaison de la taille de Neptune et de la Terre.

Champ magnétique



Magnétosphère de Neptune.

Neptune ressemble aussi à Uranus au niveau de sa magnétosphère, avec un champ magnétique fortement incliné par rapport à son axe de rotation à 47° et le décalage d'au moins 0,55 rayons, soit environ 13 500 km du centre physique de la planète. Avant l'arrivée de la sonde Voyager 2 à proximité de Neptune, il a été émis l'hypothèse que la magnétosphère inclinée d'Uranus était le résultat de sa rotation inclinée. En comparant les champs magnétiques des deux planètes, les scientifiques pensent maintenant que leur orientation extrême peut être caractéristique des flux venant de l'intérieur des planètes^[33].

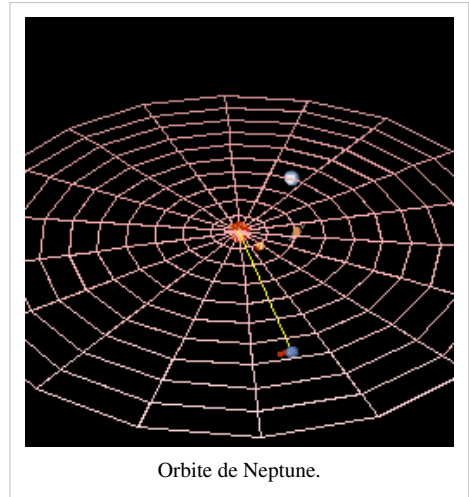
L'onde de choc de Neptune, où la magnétosphère commence à ralentir le vent solaire, se produit à une distance de 34,9 fois le rayon de la planète. La magnétopause, où la pression de la magnétosphère contrebalance le vent solaire, se trouve à une distance de 23-26,5 fois le rayon de Neptune. La queue de la magnétosphère s'étend à au moins 72 fois le rayon de Neptune, et très probablement beaucoup plus loin.

Comparant les données du champ magnétique avec celles d'Uranus, les scientifiques pensent que son inclinaison extrême est causée par les flux circulant dans les profondeurs de l'atmosphère et ne résulte pas de son décalage physique ou d'une inversion de polarité. Ce champ magnétique présente une période de rotation de 16 heures, proche de celle de l'atmosphère. Une ionosphère constituée de plusieurs couches a également été découverte entre 1 000 et 4 000 km au-dessus du niveau 1 bar^[34].

Orbite et rotation

La distance moyenne entre Neptune et le Soleil est de 4,50 milliards de km (environ 30,1 ua), et il effectue une orbite complète en moyenne tous les 164,79 ans, objet d'une variabilité de l'ordre de $\pm 0,1$ ans.

L'orbite elliptique de Neptune est inclinée de $1,77^\circ$ par rapport à la Terre. Du fait d'une excentricité de 0,011, la distance entre Neptune et le Soleil varie de 101 millions de km entre périhélie et aphélie. L'inclinaison axiale de Neptune est $28,32^\circ$, ce qui est relativement similaire à celle de la Terre (23°) ou celle de Mars (25°). En conséquence, cette planète subit les mêmes changements saisonniers. La longue période orbitale de Neptune signifie que les différentes saisons durent chacune quarante ans en années terrestres. Sa période de rotation sidérale (jour) est d'environ 16.11 heures^[35].

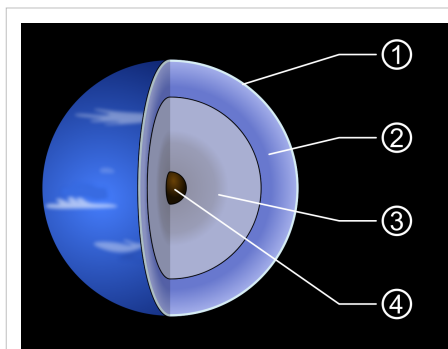


Orbite de Neptune.

Comme Neptune n'est pas un corps solide, son atmosphère subit une rotation différentielle. La large zone équatoriale tourne avec une période d'environ 18 heures, ce qui est plus lent que la rotation de 16,1 heures du champ magnétique de la planète. En revanche, l'inverse est vrai pour les régions polaires où la période de rotation est de 12 heures. Cette rotation différentielle est la plus marquée de toutes les planètes dans le système solaire, et il en résulte un fort cisaillement du vent en latitude^[36].

Composition de Neptune

Composition interne



Composition de Neptune: 1-Haute atmosphère, 2-Atmosphère composée de gaz d'hélium, d'hydrogène et de méthane, 3-Manteau composé de glaces d'eau, d'ammoniac et de méthane et 4-Noyau rocheux.

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^[37].

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, allant 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^[38] (University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA) à poser qu'elle soit totalement ionisée et que le méthane y soit pyrolysé en carbone sous forme de métal ou de diamant. Le méthane se décompose en carbone et en hydrocarbures. La précipitation du carbone libre 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^[39].

Atmosphère

Article détaillé : Atmosphère de Neptune.

L'atmosphère de Neptune, épaisse de plus de 8 000 km, est composée à haute altitude de 84 % d'hydrogène et de 12 % d'hélium avec de l'ordre de 1,5 % de méthane CH_4 . Des traces d'ammoniac (NH_3), d'éthane (C_2H_6) et d'acétylène (C_2H_2) 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^[40].

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 2 100 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^[41].

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 2 100 km/h).

Grande tache sombre

Article détaillé : Grande tache sombre.

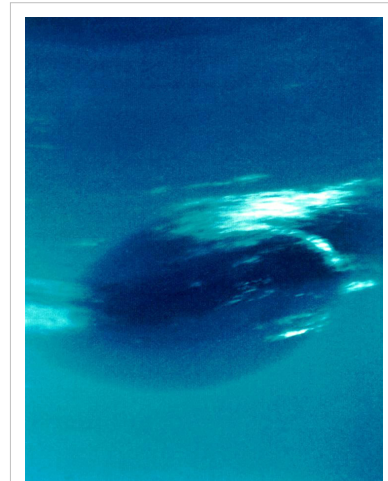
Lors du passage de Voyager 2 en 1989, la marque la plus distinctive de la planète était la « Grande tache sombre » (GTS) qui présentait à peu près la moitié de la taille de la « Grande tache rouge » de Jupiter. Les vents y soufflaient vers l'ouest à 300 m/s (1 080 km/h) ou encore, jusqu'à 2 500 km/h. Cette tache était un gigantesque ouragan sombre qui pouvait se déplacer à plus de 1 000 km/h^[42].

La grande tache sombre génère de gros nuages blancs juste en dessous de la tropopause (limite supérieure de la troposphère et la limite inférieure de la stratosphère). Contrairement aux nuages de l'atmosphère terrestre, qui sont composés de cristaux de glace, ceux de Neptune sont constitués de cristaux de méthane. Et tandis que les cirrus de la Terre se forment et se dispersent ensuite en quelques heures, ceux de la GTS sont encore présents après 36 heures (soit deux rotations de la planète). La GTS se forme dans la troposphère à basse altitude.

En novembre 1994, le télescope spatial Hubble a détecté qu'elle avait complètement disparu, indiquant aux astronomes qu'elle avait été recouverte ou qu'elle avait disparu. La persistance des nuages l'accompagnant prouve que certaines taches anciennes peuvent subsister sous la forme de cyclones. Les taches brunes peuvent se dissiper quand elles migrent trop près de l'équateur ou, éventuellement, par un phénomène inconnu. Toutefois, une tache presque identique est apparue dans l'hémisphère nord de Neptune. Cette nouvelle tache, appelée la **Grande tache**



Des nuages de hautes altitudes projettent leurs ombres sur les nuages inférieurs.



La Grande tache sombre, vue par Voyager 2

sombre du Nord (NGDS), est restée visible pendant plusieurs années.

Climat

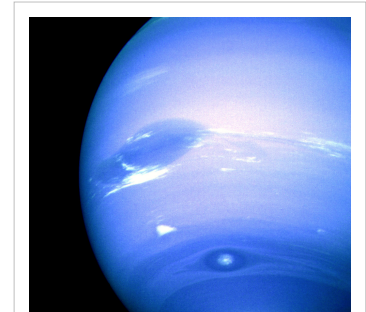
Une des différences entre Neptune et Uranus est l'activité météorologique. Quand la sonde *Voyager 2* passa devant Uranus en 1986, la planète semblait calme. Au contraire, Neptune présentait des phénomènes météorologiques durant son survol en 1989.

Le temps sur Neptune est caractérisé par un système nuageux dynamique, avec des vents atteignant les 600 m/s—soit presque deux fois la vitesse du son. La vitesse des vents varie de 20 m/s lorsqu'ils vont vers l'est à 325 m/s lorsqu'ils vont vers l'ouest. Au sommet des nuages, les vents vont de 400 m/s à l'équateur à 250 m/s aux pôles. La plupart des vents sur Neptune se déplacent dans la direction opposée au sens de rotation de la planète^[43]. Le modèle général des vents a montré une rotation prograde à hautes latitudes contre une rotation rétrograde aux latitudes inférieures. La différence de la direction des vents ne semble pas être due à un processus de la basse atmosphère. À 70° S de latitude, un courant-jet possède une vitesse de 300 m/s.

L'abondance de méthane, d'éthane et d'acétylène à l'équateur de Neptune est 10 à 100 fois plus grande qu'aux pôles. Ceci met en évidence des vents ascendants à l'équateur et descendants aux pôles^[44].

En 2007, il a été découvert que la haute troposphère du pôle sud de Neptune était environ 10 °C plus chaude que le reste de Neptune, où la température est en moyenne de −200 °C (70 K). La différence de chaleur est suffisante pour permettre au méthane d'exister sous la forme d'un gaz, alors que dans toute la région supérieure de l'atmosphère de Neptune il est gelé, qui du pôle sud s'échappe dans l'espace. Ce "point chaud" de Neptune est dû à son obliquité, qui a exposé le pôle sud au soleil pendant le dernier quart de l'année neptunienne, soit environ 40 années terrestres. Comme Neptune se déplace doucement de l'autre côté du soleil le pôle sud sera assombri et le pôle nord illuminé, entraînant le déplacement du phénomène observé au pôle sud vers le pôle nord.

À cause des changements saisonniers, les bandes nuageuses de l'hémisphère sud semblent avoir augmenté en taille et en albédo. Cette tendance a été remarquée dès 1980 et devrait durer jusqu'en 2020. La longue période orbitale de Neptune faisant qu'une saison dure 40 ans.



La Grande tache sombre (en haut), le Scooter (le petit nuage blanc au centre), et la Petite tache sombre (en bas).

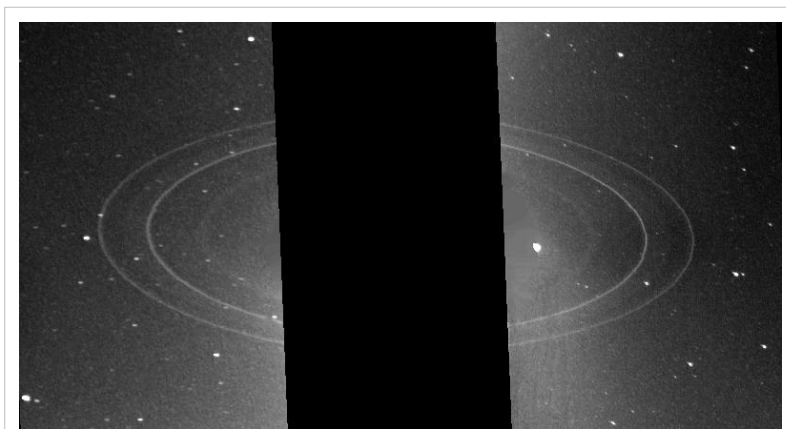
Cortège de Neptune

Anneaux planétaires

Article détaillé : Anneaux de Neptune.

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



Les anneaux de Neptune pris par Voyager 2

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^[45].

Neptune possède cinq anneaux distincts nommés (par ordre croissant de distance par rapport à la planète) Galle, Le Verrier, Lassell, Arago et Adams. Trois d'entre eux sont étroits, avec des largeurs d'environ 100 km maximum ; Galle et Lassell, en revanche, sont très larges – entre 2 000 et 5 000 km. L'anneau Adams se compose de cinq arcs clairs, pris au sein d'un anneau continu plus faible. En suivant le sens antihoraire, les arcs sont nommés : Fraternité, Égalité (1 et 2), Liberté, et Courage. Les trois premiers noms viennent de la devise française. Cette terminologie fut proposée par ceux qui en firent la découverte lors d'occultations stellaires en 1984 et 1985. Quatre petites lunes ont des orbites à l'intérieur du système d'anneaux : Naïade et Thalassa ont leurs orbites dans l'intervalle entre les anneaux de Galle et Le Verrier. Despina est juste à l'intérieur de l'anneau Le Verrier et Galatée est vers l'intérieur de l'anneau Adams^[46].

Anneaux de Neptune

Nom	Distance (km)	Largeur (km)
Galle	41 900	15
Le Verrier	53 200	15
Lassell	53 200	5 800
Arago	57 000	?
Adams	62 930	< 50

Les anneaux de Neptune contiennent une grande quantité de poussières dont la taille est de l'ordre du micromètre : la fraction de poussière selon la tranche considérée varie de 20 % à 70 %. À cet égard, ils sont semblables aux anneaux de Jupiter, dont la part de poussière est de 50 % à 100 %, et sont très différents des anneaux de Saturne et Uranus, qui contiennent peu de poussière (moins de 0,1 %). Les particules dans les anneaux de Neptune sont faites d'un matériau sombre, probablement un mélange de glace et de composés organiques transformés par le rayonnement. Les anneaux sont généralement rougeâtres ; leur albédo géométrique (0,05) et leur albédo de Bond (0,01 à 0,02) sont semblables à ceux des particules des anneaux d'Uranus ainsi qu'à ceux des lunes intérieures de Neptune ; visuellement, ils sont fins (transparents), leur épaisseur optique ne dépasse pas 0,1. Considérés dans leur ensemble,

les anneaux de Neptune ressemblent à ceux de Jupiter, les deux systèmes se composent d'annelets de poussières ténus et étroits, et de larges anneaux de poussières encore plus ténus.

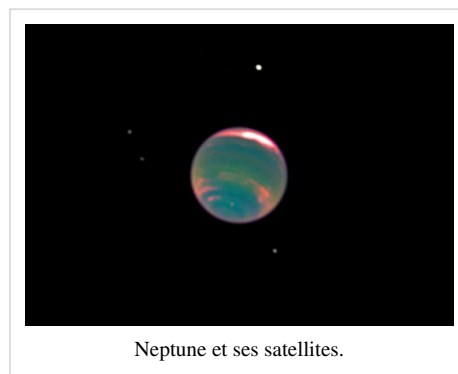
Les anneaux de Neptune, comme ceux d'Uranus, sont considérés comme relativement jeunes ; leur âge est sans doute nettement inférieur à celui du système solaire. D'autre part, comme pour Uranus, les anneaux de Neptune se sont probablement formés suite à la fragmentation d'anciennes lunes intérieures lors de collisions. Il résulte de ces collisions la formation de ceintures de petites lunes, qui sont autant de sources de poussière pour les anneaux. À cet égard, les anneaux de Neptune sont semblables aux bandes de poussières ténues que *Voyager 2* put observer entre les anneaux principaux d'Uranus^[47].

Satellites de Neptune

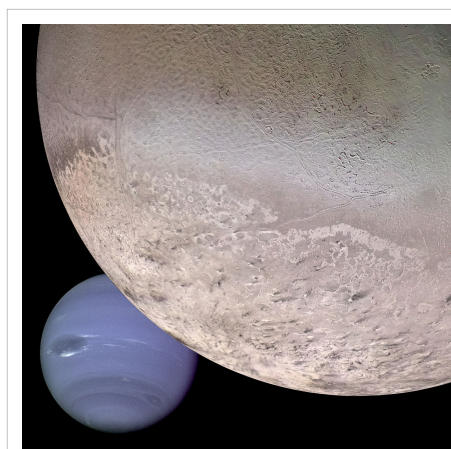
Article détaillé : Satellites naturels de Neptune.

Neptune possède au moins 14 satellites naturels dont le plus important est Triton, découvert par William Lassell 17 jours seulement après la découverte de Neptune, le 10 octobre 1846^[48]. Le second à être découvert, Néréide ne le fut qu'en 1949^[49], soit plus d'un siècle après Triton.

Avant l'arrivée de la sonde *Voyager 2* dans le système de la planète, seule Larissa fut découverte (en 1981), à la faveur d'une occultation d'étoile^[50] ; cette (3^e) lune ne put cependant être observée à nouveau avant le survol de Neptune par la sonde spatiale^[51]. L'analyse des photographies transmises par *Voyager 2* en 1989 permit de découvrir 5 nouveaux satellites : Naïade^[52], Thalassa, Despina, Galatée et Protée^[53].



Neptune et ses satellites.



Montage montrant Neptune et son satellite, Triton.

Découverts en 2002 par une équipe dirigée par Matthew Holman du "Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics" et JJ Kavelaars du "National Research Council of Canada", S/2002 N1, S/2002 N2 et S/2002 N3 portent le nombre de satellites connus de Neptune à 11. Leur découverte est un exploit du fait de la taille très petite des corps ainsi que leur distance de la Terre. En effet ces corps ne font pas plus de 40 km de large et possèdent une magnitude de 25. Puis l'équipe de Matthew J. Holman découvrit S/2002 N4 qui est la lune la plus éloignée de sa planète de tout le système solaire. En 2003, l'équipe de David C. Jewitt découvrit Psamathee (S/2003 N1) qui porte le nombre de satellites à treize. Les satellites découverts en 2002 et 2003 ont été baptisés le 3 février 2007 : Psamathee, Halimède, Sao, Laomédie et Néso^[54]. Le 1er juillet 2013, un quatorzième satellite, nommé S/2004

N1 a été découvert par Mark Showalter, de l'institut SETI à Mountain View en Californie. Les scientifiques estiment qu'elle met 23 heures pour faire le tour de sa planète. Les astronomes l'ont repérée en suivant un point blanc qui apparaissait de façon régulière dans plus de 150 photos prises avec le télescope Hubble entre 2004 et 2009^[55].

Triton est le plus gros des quatorze satellites naturels de la planète Neptune, et le 8^e par distance croissante à cette dernière. Il a un diamètre d'un peu plus de 2 700 km, ce qui en fait le 7^e satellite naturel du Système solaire par taille décroissante — et un astre plus gros que Pluton. C'est le seul gros satellite connu du Système solaire orbitant dans le sens rétrograde, c'est-à-dire inverse au sens de rotation de sa planète ; tous les autres satellites dans ce cas sont de petits corps irréguliers de quelques centaines de kilomètres dans leur plus grande longueur. Cette caractéristique orbitale exclut que Triton ait pu se former initialement autour de Neptune, et sa composition similaire à celle de

Pluton suggère qu'il s'agisse en réalité d'un objet issu de la ceinture de Kuiper capturé par Neptune. Triton orbite autour de Neptune en 5 jours et 21 heures sur une trajectoire quasiment circulaire ayant un demi grand-axe de 354 759 km^[56], une inclinaison de 156,865° (-23,135°) sur le plan de Laplace du système, et jusqu'à 129,6° (-50,4°) sur le plan orbital de sa planète^[57]. Ceci lui confère des saisons très marquées tout au long de l'année neptunienne, longue de 164,79 années terrestres ; l'hémisphère sud a ainsi passé son solstice d'été en 2000^[58].

Autre entourage de Neptune

Désignation	Point de Lagrange	Périhélie (UA)	Aphélie (UA)
2001 QR ₃₂₂	L4	29,428	31,349
2004 UP ₁₀	L4	29,351	31,259
2005 TN ₅₃	L4	28,253	32,284
2005 TO ₇₄	L4	28,733	31,824
2006 RJ ₁₀₃	L4	29,345	31,005
2007 VL ₃₀₅	L4	28,131	32,171
2008 LC ₁₈	L5	27,546	32,468
2004 KV ₁₈	L5	24,566	35,657

Comme Jupiter et Mars, Neptune possède des astéroïdes troyens, partageant son orbite autour du Soleil.

Neuf ont été confirmés à ce jour^[59] (avril 2014). 2001 QR₃₂₂ fut observé pour la première fois en août 2001 par l'équipe de Marc W. Buie sur le télescope Blanco de 4 m de l'observatoire du Cerro Tololo. Sa position relative oscille autour du point L₄ et le long de l'orbite neptunienne avec une période d'environ 10 000 ans. Son orbite est très stable, il se situe dans une région qui garantit qu'il co-orbitera encore avec Neptune pendant des milliards d'années. 2005 TN₅₃ est un troyen de Neptune découvert par Scott S. Sheppard et Chadwick Trujillo en 2005. Il a la même période orbitale que Neptune et orbite au point de Lagrange L4 de Neptune avec cependant, une inclinaison de 25 degrés. 2008 LC₁₈ est le premier troyen découvert qui se situe au point L5 de Neptune.

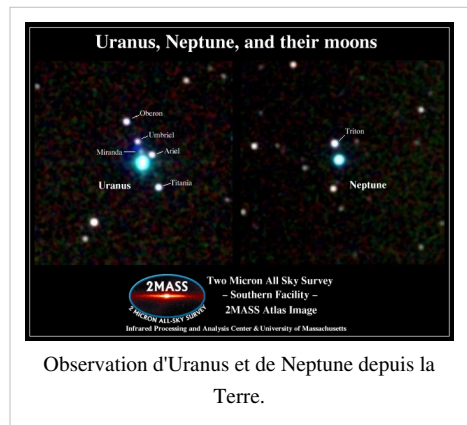
Des études ont montré qu'il serait possible à un quasi-satellite théorique d'Uranus ou de Neptune de le rester pour la durée de vie du Système solaire moyennant certaines conditions d'excentricité et d'inclinaison. De tels objets n'ont cependant pas encore été découverts.

Observation

Depuis la Terre

Neptune n'est jamais visible à l'œil nu, ayant une luminosité entre les magnitudes +7,7 et +8,0^[60], or il n'est pas possible d'observer à l'œil nu des objets astronomiques dont la magnitude apparente est supérieure à +6^[61]. Elle a été éclipsée par les lunes galiléennes de Jupiter, la planète naine Cérès et les astéroïdes Vesta, Pallas, Iris, Junon et Hèbé^[62]. Un télescope ou des jumelles fortes permettent de voir Neptune comme un petit disque bleu, semblable en apparence à Uranus^[63].

En raison de la distance entre Neptune et la Terre, le diamètre angulaire de la planète varie seulement de 2,2 à 2,4 secondes d'arc^[64], la plus petite variation des planètes du système solaire. Sa petite taille apparente fait qu'il est difficile de l'étudier visuellement. L'observation télescopique a été assez limitée jusqu'à l'avènement du télescope spatial Hubble et des grands télescopes basés au sol avec optique adaptative^[65].



Observation d'Uranus et de Neptune depuis la Terre.

Exploration

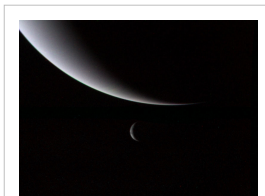


Photo prise par Voyager 2 de Neptune et Triton.

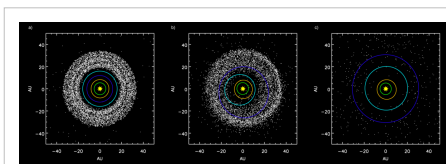
Le plus proche passage à proximité de la planète fut effectuée par Voyager 2, le 25 août 1989. Comme c'était la dernière planète majeure que la sonde pouvait visiter, il a été décidé de faire un survol rapproché de la lune Triton, quelles que soient les conséquences pour la trajectoire, similaire à ce qui a été fait pour la rencontre de Voyager 1 avec Saturne et son satellite Titan.

La sonde a vérifié l'existence d'un champ magnétique qui entoure la planète et a découvert que le champ était décalé du centre et incliné d'une manière similaire à celui d'Uranus. La question de la période de rotation de la planète a été réglée à l'aide des mesures des émissions de radio. Voyager 2 a aussi montré que Neptune avait un climat étonnamment actif. Six nouvelles lunes ont été découvertes, et il a été démontré que la planète possédait plus d'un anneau^[66].

En 2003, une proposition est faite à la « Vision Missions Studies » de la NASA pour mettre en œuvre un Orbiter avec des sondes sur Neptune semblable à celui de Cassini-Huygens pour Saturne. Le travail est effectué en collaboration avec le « Jet Propulsion Laboratory » et le « California Institute of Technology »^[67].

Formation et migration

Articles détaillés : Modèle de Nice et Formation et évolution du Système solaire.



Simulation du modèle de Nice.

La formation des géantes glacées, Neptune et Uranus, s'est avérée difficile à modéliser avec précision. Les modèles actuels suggèrent que la densité de matière dans les régions extérieures du système solaire était trop faible pour permettre la formation de ces grands corps avec la méthode traditionnellement acceptée d'accrétion de base, et différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer leur création. La première est que les géantes de glace n'ont pas été créées par accrétion de base, mais des instabilités dans le disque protoplanétaire originaire ont fait sauter plus tard leurs atmosphères loin par la radiation d'une étoile massive proche de type OB^[68].

Un autre concept est qu'elles se sont formées plus près du Soleil, où la densité de matière est plus élevée, et ont ensuite migré vers leurs orbites actuelles, après le retrait du disque protoplanétaire gazeux^[69]. Cette hypothèse de la migration après la formation est actuellement favorisée, en raison de sa capacité à mieux expliquer l'occupation des populations de petits objets observés dans la région trans-neptunienne. Le courant le plus largement accepté des

explications sur les détails de cette hypothèse est connu sous le nom modèle de Nice, qui explore l'effet d'une migration de Neptune et des autres planètes géantes sur la structure de la ceinture de Kuiper^[70].

Culture populaire

En astrologie, Neptune (♆) est la planète associée au signe des Poissons^[71].

L'élément chimique Neptunium fut découvert par Edwin McMillan et Philip Abelson en 1940. La découverte a été faite au Berkeley Radiation Laboratory de l'Université de Californie, à Berkeley, où l'équipe produisit l'isotope 239 du neptunium, d'une demi-vie de 2,4 jours, en bombardant de l'uranium (faisant référence à Uranus) 238 avec des neutrons. C'est l'étape intermédiaire menant à la production du plutonium 239 (faisant référence à Pluton)^[72].

« Neptune, le mystique » est le 7ème et dernier mouvement de l'œuvre pour grand orchestre Les Planètes, composée et écrite par Gustav Holst entre 1914 et 1916.

Après l'Opération Uranus, l'Opération Neptune est le nom de code donné au débarquement en Normandie des troupes alliées en juin 1944 lors de la Seconde Guerre mondiale. Il précède la bataille de Normandie.

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 à l'issue de la Assemblée générale de l'Union astronomique internationale.
- [2] Hirschfeld, Alan (2001). Parallax:The Race to Measure the Cosmos.
- [3] Fred William Price (2000). The planet observer's handbook. Cambridge University Press. .
- [4] "Bouvard, Alexis", Encyclopædia Britannica, Édition Deluxe CDROM
- [5] « The Autobiography of Sir George Biddell Airy », de George Biddell Airy et Wilfrid Airy (1896).
- [6] Kollerstrom, N. (2001). "A Neptune Discovery Chronology", University College London
- [7] SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS): Recherches sur les mouvements d'Uranus par U. J. Le Verrier (<http://adsabs.harvard.edu/full/1846AN.....25Q..53L>)
- [8] John Couch Adams and the discovery of Neptune, W M Smart, 1947
- [9] Aux confins du système solaire de Emmanuel Lellouch, Alain Doressoundiram, André Brahic Chapitre 1
- [10] Astrosurf.com (<http://www.astrosurf.com/notrecosmos/pages/adams.html>)
- [11] Planetastronomy.com (<http://www.planetastronomy.com/presentations/neptune.pdf>)
- [12] <http://oncle.dom.pagesperso-orange.fr> (<http://oncle.dom.pagesperso-orange.fr/astrologie/histoire/neptune/neptune.htm>)
- [13] bibnum.education.fr (<http://www.bibnum.education.fr/files/neptune-analyse.pdf>)
- [14] Expositions.obspm.fr (<http://expositions.obspm.fr/leverrier/Le-Verrier/neptune/p3-neptune.html>)
- [15] Littmann, Mark; Standish, E.M. (2004). Planets Beyond: Discovering the Outer Solar System. Courier Dover Publications
- [16] In Search of Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe, de Richard Baum et William Sheehan, 2003
- [17] Gingerich, Owen (1958). "The Naming of Uranus and Neptune". *Astronomical Society of the Pacific Leaflets* 8: 9–15
- [18] Hind, J. R. (1847). "Second report of proceedings in the Cambridge Observatory relating to the new Planet (Neptune)". *Astronomische Nachrichten* 25 (21): 309
- [19] Blue, Jennifer (December 17, 2008). "Planet and Satellite Names and Discoverers". USGS. Retrieved February 18, 2008
- [20] De Mercure à Pluton, planètes et satellites, Pierre Humbert, 1937, 149-150
- [21] [Aux confins du système solaire de Emmanuel Lellouch, Alain Doressoundiram, André Brahic]
- [22] Occultation by a possible third satellite of Neptune (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1982Sci...215..289R&db_key=AST&data_type=HTML&format=&high=444b66a47d25546)
- [23] Neptune (<http://www.solarviews.com/eng/neptune.htm>)
- [24] *MPEC 2003-A75* : *S/2002 N 1*, *2002 N 2*, *2002 N3* (<http://cfa-www.harvard.edu/mpec/K03/K03A75.html>)
- [25] *MPEC 2003-S107*: *S/2002 N 4* (<http://cfa-www.harvard.edu/mpec/K03/K03SA7.html>)
- [26] *MPEC 2003-R19* : *S/2003 N 1* (<http://cfa-www.harvard.edu/mpec/K03/K03R19.html>)
- [27] Pluton, plus froid qu'initialement pensé (http://www.flashespace.com/html/jan06/05_01.htm)
- [28] Pluton détrônée : plus que huit planètes autour du Soleil ! (<http://www.universcience.fr/fr/science-actualites/actualite-as/wl/1248100230470/pluton-detronee-plus-que-huit-planetes-autour-du-soleil/>)
- [29] David R. Williams. Neptune Fact Sheet. NASA, 1 septembre 2004. URL consultato in data 14 agosto 2007.
- [30] P. Kenneth, Seidelmann, Archinal, B. A.; A'hearn, M. F. et al (2007). Report of the IAU/IAGWorking Group on cartographic coordinates and rotational elements. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* (Springer Netherlands) 90: 155–180
- [31] Jacobson, R. A.; Campbell, J. K.; Taylor, A. H.; Synnott, S. P. (June 1992). "The masses of Uranus and its major satellites from Voyager tracking data and earth-based Uranian satellite data". *The Astronomical Journal* 103

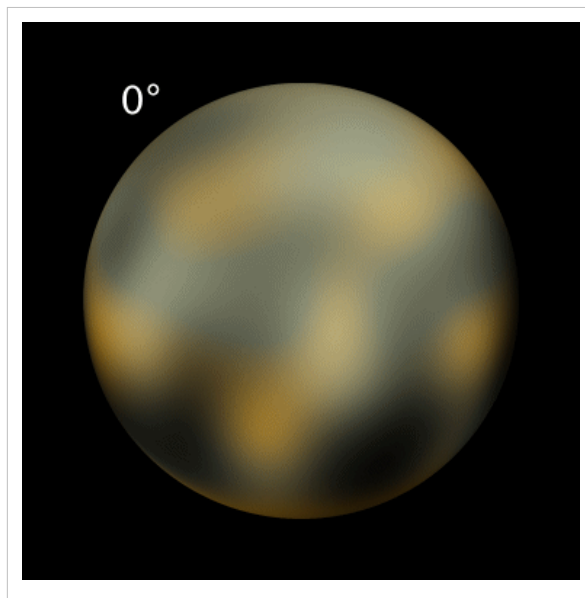
- [32] Boss, Alan P. (2002). Formation of gas and ice giant planets. *Earth and Planetary Science Letters* 202 (3–4): 513–523
- [33] Elkins-Tanton (2006):79–83.
- [34] Compendium du système solaire - Neptune (<http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-neptune2.htm>)
- [35] Yeomans, Donald K. (July 13, 2006). "HORIZONS System". NASA JPL. Retrieved August 8, 2007.
- [36] Max, C. E.; Macintosh, B. A.; Gibbard, S. G.; Gavel, D. T.; Roe, H. G.; de Pater, I.; Ghez, A. M.; Acton, D. S.; Lai, O.; Stomski, P.; Wizinowich, P. L. (2003). "Cloud Structures on Neptune Observed with Keck Telescope Adaptive Optics". *The Astronomical Journal*, 125 (1): 364–375.
- [37] "Neptune's Deep Chemistry", *Science*, Hubbard, W. B. (1997).
- [38] *Nature* 292, 435-436 (30 July 1981) | doi:10.1038/292435a0; Accepted 2 June 1981
- [39] "Water-ammonia ionic ocean on Uranus and Neptune?" Atreya, S.; Egeler, P.; Baines, K. (2006)
- [40] Astrofiles.net (<http://www.astrofiles.net/astronomie-neptune-11.html>)
- [41] URANUS FACTS (<http://space-facts.com/uranus/>)
- [42] Gaétan Morissette, *Astronomie Premier Contact édition*, .
- [43] Burgess (1991):64–70.
- [44] Jonathan I. Lunine, « The Atmospheres of Uranus and Neptune [archive] », Lunar and Planetary Observatory, University of Arizona, 1993.
- [45] [Http://spacehole.free.fr](http://spacehole.free.fr) (http://spacehole.free.fr/normal/webpage/Satellites/Neptune/anneaux/anneaux_neptune.html)
- [46] Blue, Jennifer (December 8, 2004). "Nomenclature Ring and Ring Gap Nomenclature".
- [47] Neptune: The Planet, Rings, and Satellites, Ellis D. Miner et Randii R. Wessen, 2002
- [48] W. Lassell, *Lassell's Satellite of Neptune* (<http://adsabs.harvard.edu/full/seri/MNRAS/0008/0000008.000.html>), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 8,
- [49] G. P. Kuiper, *The Second Satellite of Neptune* (<http://adsabs.harvard.edu/full/seri/PASP./0061/0000175.000.html>), *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 61, ,
- [50] H. J. Reitsema, W. B. Hubbard, L. A. Lebofsky, D. J. Tholen, *Science*, vol. 215,
- [51] *IAUC 4824: Sats OF NEPTUNE; 1989M; PU Vul; V482 Cyg* (<http://cfa-www.harvard.edu/iauc/04800/04824.html>)
- [52] *IAUC 4867: NEPTUNE; JUPITER* (<http://cfa-www.harvard.edu/iauc/04800/04867.html>)
- [53] *IAUC 3608: 1981 N 1; Sats OF SATURN; 1980I* (<http://cfa-www.harvard.edu/iauc/03600/03608.html>)
- [54] Les nouveaux satellites de Neptune (http://www.le-systeme-solaire.net/nep_new.html)
- [55] <http://www.lesoir.be/282009/article/actualite/fil-info/fil-info-sciences-et-sante/2013-07-15/nasa-decouvre-une-nouvelle-lune-autour-neptune>
- [56] NASA Jet Propulsion Laboratory Caltech Solar System Dynamics – Planetary Satellite Mean Orbital Parameters (http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_elem#neptune) « Neptune. »
- [57] UCLA Earth and Space Science Department ([http://www2.ess.ucla.edu/~nimmo/ess298/Week10.ppt#262,8,Seasonal cycles \(1\)](http://www2.ess.ucla.edu/~nimmo/ess298/Week10.ppt#262,8,Seasonal%20cycles%20(1))) Francis Nimmo, « *Outer Solar System – Triton: Seasonal cycles (1)*. »
- [58] Detection of CO in Triton's atmosphere and the nature of surface-atmosphere interactions, E. Lellouch, C. de Bergh, B. Sicardy, S. Ferron et H.-U. Käufel, 2010 (http://www.aanda.org/index.php?option=com_article&access=doi&doi=10.1051/0004-6361/201014339&Itemid=129)
- [59] List Of Neptune Trojans (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/NeptuneTrojans.html>)
- [60] Éphémérides de Neptune (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/TYPE/TYPE.html>)
- [61] La magnitude des étoiles (<http://www.infoplease.com/ipa/A0004435.html>)
- [62] D. H. Menzel, J. M. Pasachoff, *A Field Guide to the Stars and Planets*, Boston, MA, Houghton Mifflin, 1983, 391 p
- [63] Observer Neptune au télescope (<http://www.cieletespace.fr/node/5740>)
- [64] thesolarsystemplanets.com, chapitre sur Neptune (<http://www.thesolarsystemplanets.com/tag/neptune/>)
- [65] Max, C. (1999). "Adaptive Optics Imaging of Neptune and Titan with the W.M. Keck Telescope". *Bulletin of the American Astronomical Society* 31: 1512.
- [66] Ness, N. F.; Acuña, M. H.; Burlaga, L. F.; Connerney, J. E. P.; Lepping, R. P.; Neubauer, F. M. (1989). "Magnetic Fields at Neptune". *Science* 246 (4936): 1473–1478
- [67] Spilker, T. R.; Ingersoll, A. P. (2004). "Outstanding Science in the Neptune System From an Aerocaptured Vision Mission". *Bulletin of the American Astronomical Society* 36: 1094
- [68] Boss, Alan P. (September 30, 2002). "Formation of gas and ice giant planets". *Earth and Planetary Science Letters*.
- [69] Thommes, Edward W.; Duncan, Martin J.; Levison, Harold F. (2001). "The formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn". *The Astronomical Journal* 123 (5): 2862–2883.
- [70] Smith, R.; L. J. Churcher; M. C. Wyatt; M. M. Moerchen; C. M. Telesco (2009). "Resolved debris disc emission around η Telescopii: a young solar system or ongoing planet formation?". *Astronomy and Astrophysics* 493 (1): 299–308.
- [71] Parker, Derek and Julia Aquarius. *Planetary Zodiac Library*. New York: Mitchell Beazley/Ballantine Book. 1972.
- [72] Mcmillan, Edwin; Abelson, Philip (1940). "Radioactive Element 93". *Physical Review* 57 (12): 1185

Pluton (planète naine)

Pour les articles homonymes, voir Pluton.

(134340) Pluton

(134340) *Pluto*



Carte reconstituée de Pluton en vraies couleurs générée par ordinateur à partir d'images d'*Hubble*^[1] et parmi les plus hautes résolutions possibles avec la technologie actuelle. Autres photos de toute la surface ici ^[2].

Caractéristiques orbitales

Époque ??? (JJ 24?????.5)

Demi-grand axe (a)	5 906 450 638 km (39,48218387 ua)
Aphélie (Q)	7 375 927 931 km (49,31 ua)
Périhélie (q)	4 436 824 613 km (29,66 ua)
Excentricité (e)	0,25024871
Période de révolution (P_{rév})	90 613,3058 j (248 a 31 j 7,34 h)
Inclinaison (i)	17,14175°
Nœud ascendant (Ω)	110,30347°
Argument du périhélie (ω)	113,76329°
Catégorie	Plutoïde (planète naine transneptunienne), plutino

Caractéristiques physiques

Rayon équatorial ($R_{\text{éq}}$)	(1153 ± 10) km
Volume (V)	6,39×10 ⁹ km ³
Masse (m)	(1,314 ± 0,018)×10 ²² kg
Masse volumique (ρ)	(2 030 ± 60) kg/m ³
Gravité équatoriale à la surface (g)	0,655 m/s ²
Vitesse de libération	1,3 km/s
Période de rotation (P_{rot})	6,387 (rétrograde) j
Albédo (A)	0,60

Découverte

Pré-découverte	23 janvier 1914
Découvreur	Clyde W. Tombaugh
Date	18 février 1930
Nommé d'après	Pluton (dieu romain)

Pluton, officiellement désignée par **(134340) Pluton** (désignation internationale *(134340) Pluto*)^[3], est la deuxième plus grande planète naine connue dans le Système solaire^[4] après Éris, avec un diamètre de 2 306 km (celui d'Éris est de 2 326 km). Premier objet transneptunien identifié, Pluton orbite autour du Soleil à une distance variant entre 30 et 49 UA et appartient à la ceinture de Kuiper.

Il serait plus exact de parler du couple que forme Pluton avec Charon (diamètre 1 207 km) au sein du système plutonien, le centre de gravité de ce couple se situant dans le vide les séparant.

Après sa découverte par l'astronome américain Clyde Tombaugh en 1930, Pluton était considérée comme la neuvième planète du système solaire. À la fin du XX^e siècle et au début du XXI^e siècle, de plus en plus d'objets similaires furent découverts dans le système solaire externe, en particulier Éris, légèrement plus grand et plus massif que Pluton. Cette évolution amena l'Union astronomique internationale (UAI) à redéfinir la notion de planète en août 2006, Cérés, Pluton et Éris étant depuis cette date classées comme des planètes naines^[5]. L'UAI a également décidé de faire de Pluton le prototype d'une nouvelle catégorie d'objet transneptunien. Suite à cette modification de la nomenclature, Pluton a été ajoutée à la liste des objets mineurs du système solaire et s'est vue attribuer le numéro 134340 dans le catalogue des objets mineurs. Le 24 août 2006, l'UAI a décidé de la classer dans la catégorie des planètes naines.

Pluton est principalement composée de roche et de glace de méthane, mais aussi de glace d'eau. Son diamètre est d'environ les deux tiers de celui de la Lune. Le couple que forme Pluton avec son grand satellite, Charon, est généralement considéré comme un système double, puisque la différence de masse entre les deux objets est l'une des plus faibles de tous les couples planétoïdes/satellites du système solaire (rapport 8 pour 1), et surtout parce que le barycentre de leurs orbites ne se situe pas à l'intérieur d'un des deux corps.

Deux autres satellites naturels nettement plus petits, Nix et Hydre, ont été découverts en 2005. Le 20 juillet 2011, la NASA a annoncé que le télescope spatial *Hubble* avait permis d'identifier un quatrième satellite, nommé en juillet 2013 Kerbéros, qui ferait entre 14 et 34 kilomètres de diamètre^{[6],[7]}. Un cinquième satellite nommé Styx et mesurant entre 10 et 25 kilomètres a été découvert en juillet 2012.

Aucune sonde spatiale n'a encore survolé Pluton, mais la sonde *New Horizons*, lancée en janvier 2006 par la NASA pour explorer le système plutonien, doit le survoler durant l'été 2015, après un voyage de 6,4 milliards de kilomètres.

Historique

Découverte



Clyde Tombaugh, l'homme qui a découvert Pluton.

Pluton fut découvert en 1930 lors de la recherche d'un corps céleste permettant d'expliquer les perturbations orbitales de Neptune, hypothèse proposée par Percival Lowell comme étant la Planète X.

Ayant fait fortune dans les affaires, Lowell se fait construire en 1894 un observatoire à plus de 2 000 mètres d'altitude dans l'Arizona et entreprend la recherche d'une neuvième planète au-delà de Neptune. Il pense suivre la même méthode que celle qui avait conduit à la découverte de cette dernière en étudiant son orbite, mais la précision des instruments de l'époque ne permettant pas de mesurer de façon précise les anomalies orbitales, il doit se rabattre sur celles d'Uranus. Sa planète (baptisée « X ») serait située à 47,5 ua, aurait une période de 327 ans et une masse de deux cinquièmes de celle de Neptune. En 1905, il lance une première campagne photographique de trois ans, mais celle-ci ne donne rien de concluant, notamment, comme il fut démontré par la suite, parce que ce programme était focalisé sur l'écliptique et que l'orbite fortement inclinée de Pluton la plaçait à cette époque en dehors du champ des photographies. Lowell ne baisse pas les bras pour autant et décide de redoubler d'efforts, notamment lorsqu'il voit apparaître un concurrent : William Pickering. Celui-ci annonce en 1908 la présence d'une planète qu'il nomme « O » de deux masses terrestres, à une distance de 52 ua et d'une période de 373 ans. En 1911, Lowell fait l'acquisition d'un comparateur à clignotement, machine destinée à l'analyse photographique lui permettant de comparer les clichés beaucoup plus vite (deux séries de photos sont prises à quelques jours d'intervalle pour repérer le mouvement éventuel d'un astre) et entame une nouvelle série de photographies. Un nouvel échec qui le mènera à se désintéresser de sa planète X.



Astrographe de l'observatoire Lowell ayant servi à la découverte de Pluton.
En métal gris, le dispositif photographique.

Percival Lowell meurt en 1916 mais laisse dans son testament de quoi poursuivre les recherches sans se soucier des problèmes d'argent, bien que des problèmes d'héritage avec sa femme finissent par réduire le budget de l'observatoire. Or dix ans plus tard, l'observatoire nécessite un nouvel instrument. Abbott Lawrence Lowell, le frère de Percival Lowell, accepte de donner dix mille dollars pour la construction d'un télescope de 13 pouces que Clyde W. Tombaugh sera chargé de piloter pour cette lourde tâche qu'est la cartographie minutieuse du ciel, à la recherche de la planète X. Tombaugh réorganise son plan de travail et procède à trois prises au lieu de deux afin d'augmenter les chances de percevoir le mouvement de la planète. La troisième série de clichés prend fin le 29 janvier 1930 et commence alors l'analyse des plaques

photographiques. Le 18 février à 16 heures, il remarque un point de magnitude +15 bouger d'une plaque à l'autre sur deux photographies prises les 23 et 29 janvier. L'équipe de l'observatoire Lowell, après avoir pris d'autres

photographies permettant de confirmer la découverte, télégraphie la nouvelle au Harvard College Observatory le 13 mars 1930.

De nombreux observatoires se mettent alors à observer cette nouvelle planète, afin de déterminer son orbite le plus précisément possible. En reprenant des clichés antérieurs, Pluton est rétroactivement observée sur des plaques photographiques remontant jusqu'à 1909.

La planète est nommée à la fois en référence au dieu romain des enfers et à Percival Lowell dont les initiales forment les deux premières lettres de Pluton. Ses initiales forment le symbole de Pluton (♇)^[8]. Le nom fut suggéré par Venetia Burney, une jeune fille de onze ans d'Oxford, en Angleterre. Passionnée de mythologie et d'astronomie, Venetia Burney trouva approprié d'associer le nom du dieu du monde souterrain à ce monde obscur et glacé. Son grand-père qui travaillait à la bibliothèque universitaire d'Oxford en parla à l'astronome Herbert Hall Turner, qui transmit l'idée à ses confrères américains^[9]. Le nom de Pluton fut officialisé le 24 mars 1930^[10].

Pluton et la planète X

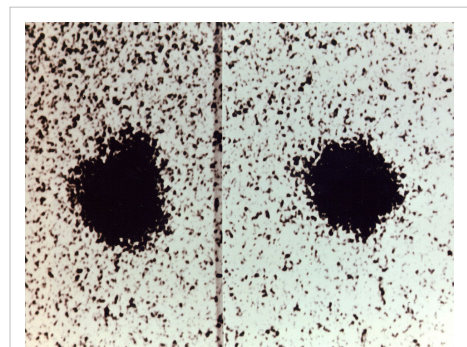
À l'origine, la découverte de Pluton est liée à la recherche systématique d'une planète permettant d'expliquer les perturbations observées dans les orbites d'Uranus et Neptune, mais le doute est très vite jeté sur le fait que Pluton serait bien la planète X que Percival Lowell recherchait.

À cette époque, Pluton est si lointaine que son diamètre ne peut pas être déterminé avec précision, mais sa faible luminosité et son absence de disque apparent laissent présager un corps plutôt petit, comparable en taille aux planètes telluriques déjà connues, probablement plus grand que Mercure mais pas plus que Mars, pense-t-on à l'époque. Il devient donc rapidement clair que Pluton ne peut pas être la source des perturbations dans les orbites de Neptune et Uranus. Clyde Tombaugh

et d'autres astronomes persévèrent dans la recherche de la planète X pendant 12 ans, mais ne découvrent que des astéroïdes et des comètes. Les astronomes sont amenés à imaginer que de nombreux autres corps similaires à Pluton pourraient orbiter autour du Soleil au-delà de Neptune. On pense alors que le système solaire pourrait être constitué de plusieurs zones regroupant les corps célestes par familles, planète tellurique, planète géante, « objets ultra-neptuniens ». Cette hypothèse sera formalisée plus tard au cours des années 1940 et 1950 par Kenneth Edgeworth puis Gerard Kuiper, et est désormais connue sous le nom de ceinture de Kuiper.

Le premier satellite de Pluton fut découvert le 22 juin 1978 lorsque James W. Christy réalisa que l'image de Pluton apparaissant sur des plaques photographiques prises dans les deux mois précédents semblait présenter une protubérance tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. La protubérance fut confirmée sur d'autres plaques, dont la plus ancienne remontait au 29 avril 1965. Des observations ultérieures de la protubérance montrèrent qu'elle était causée par un petit corps. La périodicité de la protubérance correspondait à la période de rotation de Pluton, laquelle était connue à partir de sa courbe de luminosité, indiquant une orbite synchrone et suggérant qu'il s'agissait d'un effet réel et pas un artefact d'observation. Le nom de Charon fut donné au satellite.

En 1993, les calculs de la trajectoire de survol de Neptune par la sonde Voyager 2 en août 1989 ont montré que Neptune avait une masse inférieure aux hypothèses précédentes, et en tenant compte de cette nouvelle mesure, le mathématicien Myles Standish montre que les divergences dans les mouvements des planètes Uranus et Neptune deviennent négligeables devant l'incertitude de la mesure liée à la précision des instruments. L'hypothèse d'une planète X perturbatrice ne tient donc plus, et c'est donc sur la base d'une prédiction de position fautive que Pluton fut découverte.

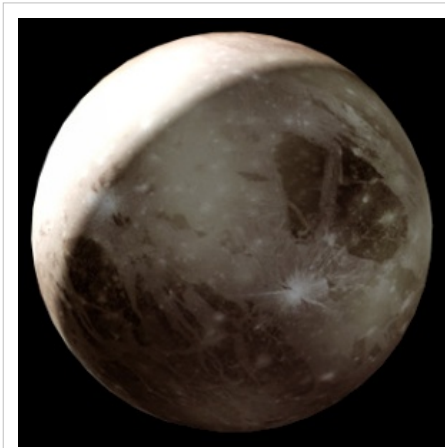


Découverte de Charon satellisant Pluton.

Statut de planète naine

Masse estimée de Pluton

Année	Masse	Notes
1931	1 Terre	Nicholson & Mayall ^[11]
1948	0,1 (1/10) Terre	Kuiper ^[12]
1976	0,01 (1/100) Terre	Cruikshank, Pilcher, & Morrison ^[13]
1978	0,002 (1/500) Terre	Christy & Harrington ^[14]



Vue d'artiste de Pluton.

Dans la dernière décennie du XX^e siècle, la découverte de nombreux objets transneptuniens (plus d'un millier), dont certains ont une dimension estimée voisine de celle de Pluton pousse à la remise en question de son statut de planète.

Parmi ceux-ci, de très nombreux corps sont découverts qui possèdent une orbite de période de révolution égale à celle de Pluton, et sont comme lui en résonance 2:3 avec Neptune.

Certains scientifiques proposent alors de reclasser Pluton en planète mineure ou en objet transneptunien. D'autres, comme Brian Marsden du *Minor Planet Center*, penchent pour lui attribuer les deux statuts, en raison de l'importance historique de sa découverte. Marsden annonce le 3 février 1999 que Pluton serait classée comme le 10 000^e objet du catalogue recensant justement 10 000 planètes mineures. Le numéro

rond de 10 000 serait attribué à Pluton en son honneur pour la « célébration » de ce compte atteint. L'Union astronomique internationale (UAI), l'organisme coordinateur de l'astronomie au niveau international, chargé de la dénomination des corps célestes ainsi que de leur statut, fit alors une mise au point, rappelant qu'elle seule était habilitée à déterminer le statut de Pluton.

Historiquement, les quatre premiers astéroïdes découverts de 1801 à 1807 — (1) Cérès, (2) Pallas, (3) Junon et (4) Vesta — furent eux aussi considérés comme des planètes pendant plusieurs décennies (leurs dimensions n'étaient pas connues avec précision à l'époque). Certains textes astronomiques du début du XIX^e siècle font référence à onze planètes (incluant Uranus et les quatre premiers astéroïdes). Le cinquième astéroïde ((5) Astrée) fut découvert en 1845 peu de temps avant la découverte de Neptune, suivi de plusieurs autres dans les années suivantes. Dans les années 1850, on cessa de considérer ces objets de plus en plus nombreux comme des « planètes », pour les nommer « astéroïdes » ou « planètes mineures ».

La découverte en 2005 de (136199) Éris^[15], d'un diamètre et d'une masse légèrement supérieurs à ceux de Pluton, contribue à relancer le débat. Le diamètre d'Éris, qui avait initialement été estimé à 3 600 km (il était alors notablement plus grand que Pluton) était encore en 2006 du même ordre de grandeur que celui de Pluton, même après avoir été revu à la baisse (2 400 km ± 100 km). Selon une étude publiée dans *Science* du 14 juin 2007, sa masse serait supérieure à celle de Pluton d'environ 27 %^[16]. De nombreux autres corps ont également été découverts à cette époque, tels que (136472) Makémaké, (90482) Orcus ou (90377) Sedna, régulièrement annoncés comme étant la dixième planète du système solaire.

La classification en neuf planètes devient difficilement tenable. Le dernier mot revient à l'UAI, qui, lors de son 26^e congrès tenu le 24 août 2006 en République tchèque, a décidé au terme d'une semaine de débats de compléter la définition de planète, disant qu'une planète élimine de son voisinage tous les objets ayant une taille qui lui soit

comparable. Ce qui n'est pas le cas de Pluton, qui partage son espace avec d'autres objets transneptuniens et qui est reclassé en planète naine". Le Minor Planet Center lui attribua le 7 septembre 2006 le numéro d'objet mineur 134340.

Néanmoins, suite au vote, une pétition ayant réuni en cinq jours les signatures de plus de 300 planétologues et astronomes majoritairement américains (Pluton ayant été la première planète découverte par un américain) a été lancée pour contester la validité scientifique de la nouvelle définition de planète qui déclassait Pluton ainsi que son mode d'adoption et inviter à la réflexion sur une autre définition plus appropriée. Catherine Cesarsky, présidente de l'UAI, clôt le débat en décidant que l'assemblée de l'UAI d'août 2009 ne reviendrait pas sur la définition de planète^[17].

Pluton conserve son importance

Environ 150 objets orbitant comme Pluton avec une résonance 2:3 avec Neptune étaient recensés en février 2006, ce qui tend à montrer que Pluton est le plus grand représentant d'une vaste famille de corps plus ou moins massifs. Les astronomes David Jewitt et Jane Luu proposent de les nommer « Plutinos ».

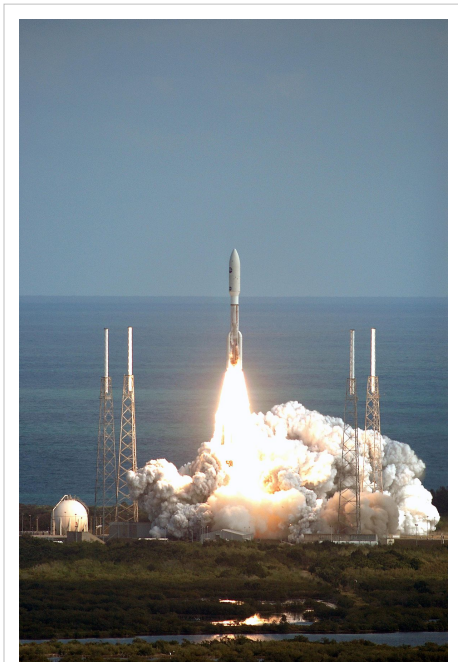
Une nouvelle sous-catégorie, les plutoïdes, est créée par l'UAI pour les planètes naines qui passent la majeure partie de leur révolution orbitale à l'extérieur de l'orbite de Neptune, dont Pluton fait partie.

Exploration de Pluton

Pluton est un objectif difficile pour l'exploration spatiale, à cause de la grande distance la séparant de la Terre, de la forte inclinaison de son orbite (17°) sur l'écliptique et de sa très faible masse, et n'a donc jusqu'à présent été visité par aucune sonde spatiale, ce qui explique en partie le peu de données disponibles.

La sonde Voyager 1 aurait éventuellement pu l'atteindre, mais l'exploration de Titan (le plus grand satellite parmi les innombrables que comporte Saturne) et des anneaux de Saturne fut jugée plus importante, ce qui eut pour effet de rendre sa trajectoire incompatible avec un rendez-vous avec Pluton. Voyager 2 n'était pas en mesure de l'atteindre car la trajectoire théorique de la sonde pour réaliser ce rendez-vous supposait de traverser la planète Neptune.

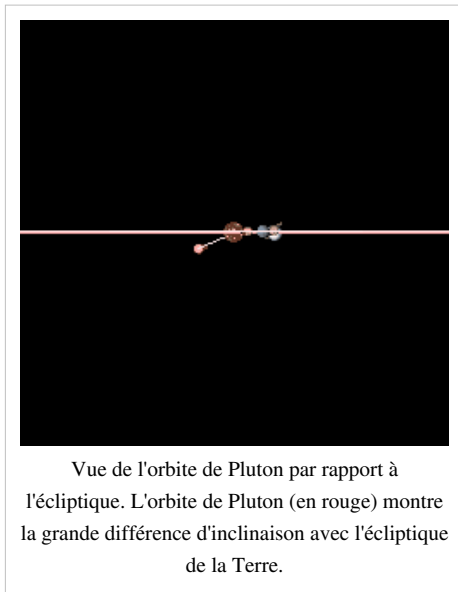
La NASA étudia en 1991 un projet de sonde vers Pluton, qui fut révisé à la baisse en 1992 puis abandonné en 1994. Un nouveau projet américano-russe, la mission *Pluto Kuiper Express*, démarra en 1995. Il aurait eu pour but le survol vers 2012 du couple Pluton/Charon, et d'au moins un objet de la ceinture de Kuiper. La Nasa l'annula en 2000, pour des raisons budgétaires. Elle a finalement été remplacée par une mission similaire, *New Horizons*. La sonde *New Horizons*, lancée le 19 janvier 2006, sera donc la première sonde spatiale à visiter Pluton, bénéficiant en février 2007 de l'assistance gravitationnelle de Jupiter^[18] pour arriver au plus près de la planète naine le 14 juillet 2015, après un voyage de 6,4 milliards de kilomètres. Les observations débiteront environ cinq mois avant le plus proche passage et devraient continuer environ un mois après. Le survol sera toutefois si rapide que seul un hémisphère sera photographié avec la résolution la plus élevée^[19]. L'engin spatial emporte à son bord des instruments d'imagerie, de spectrométrie et d'autres appareils de mesure, afin de déterminer les caractéristiques géologiques et morphologiques de Pluton et de sa lune Charon, mais aussi cartographier les éléments composant leur surface et étudier l'atmosphère de Pluton (composition et taux d'évasion). La mission prévoit également un survol des objets de la ceinture de Kuiper jusqu'en 2025.



Lancement de la sonde *New Horizons* par une fusée Atlas V.

Orbite

L'orbite de Pluton autour du Soleil a été observée pendant plus de 90 ans (le cliché le plus ancien sur lequel on repère Pluton remonte à janvier 1914), durée de parcours d'un peu plus du tiers de sa trajectoire annuelle, mais suffisante pour mesurer avec précision ses caractéristiques orbitales.



Paramètres orbitaux

Orbite

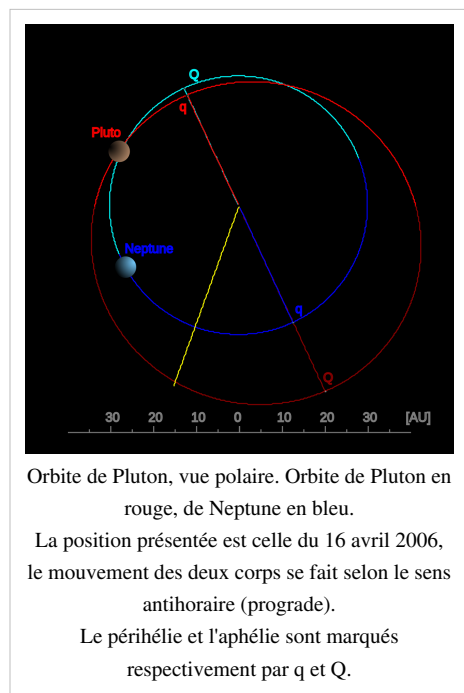
Le demi-grand axe de l'orbite de Pluton est de 39,88 ua^[20], mais du fait de l'excentricité prononcée de cette orbite, la distance entre Pluton et le Soleil varie entre 29,7 ua au périhélie et 49,5 ua à l'aphélie, et l'année plutonienne dure 248,1 années terrestres^[21].

Inclinaison

En comparaison des planètes classiques du système solaire, l'orbite de Pluton est fortement inclinée par rapport au plan de l'écliptique ($17,14175^\circ$) et excentrique (0,24880766). Les orbites des planètes classiques sont quasi circulaires et coplanaires de l'écliptique (seule Mercure possède une orbite inclinée (7°) et excentrique (0,2) de manière significative).

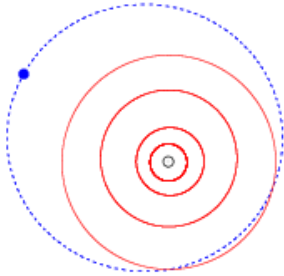
Comparaison avec Neptune

Le périhélie de Pluton est situé à plus de 8,0 ua au-dessus du plan de l'écliptique, soit 1,2 milliard de km, et c'est près de cette position de son orbite que la planète naine se trouve plus proche du Soleil que Neptune. Ce fut le cas pendant vingt ans entre le 7 février 1979 et le 11 février 1999. À l'opposé, Pluton s'éloigne de 13 ua au-dessous du plan de l'écliptique.



Croisements avec d'autres astéroïdes

L'orbite de Pluton étant très excentrique, elle croise celle de nombreux autres objets ; parmi les astéroïdes numérotés, ces hadéocroiseurs comptaient (en juillet 2004) 10 frôleurs intérieurs (dont (5145) Pholus), 24 frôleurs extérieurs (dont (19521) Chaos), 17 croiseurs (dont (38628) Huya) et 37 coorbitaux (dont (20000) Varuna, (28978) Ixion et (50000) Quaoar)^[22].

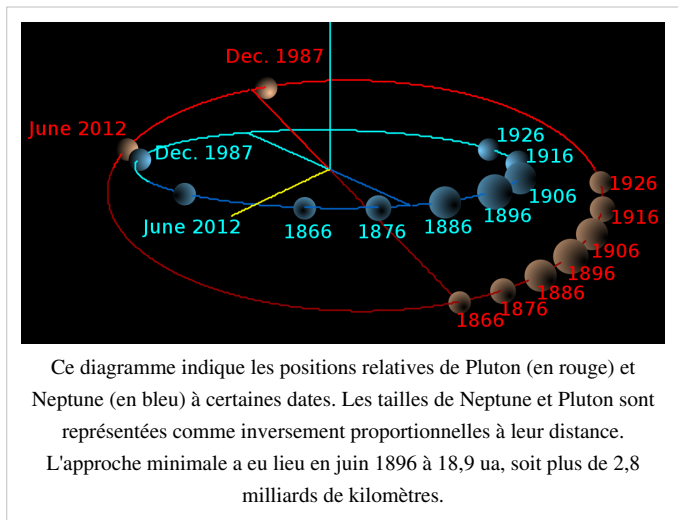


Résonance orbitale

Bien que Pluton soit parfois plus proche du Soleil que Neptune, les orbites des deux objets ne se croisent jamais, en raison de la forte inclinaison (environ 17°) de l'orbite de Pluton par rapport au plan de l'écliptique. Les nœuds de l'orbite de Pluton (les points où l'orbite traverse le plan de l'écliptique) sont situés à l'extérieur de l'orbite de Neptune.

Pluton est objets en résonance avec Neptune de rapport 3:2, c'est-à-dire que sur une durée de 496 ans Pluton effectue deux révolutions autour du Soleil pendant que Neptune en réalise trois. Cette résonance est stable : une perturbation de l'orbite de Pluton serait corrigée par l'attraction de Neptune. À cause de ce phénomène, Pluton et Neptune ne sont jamais plus proches que 18,9 ua, tandis que Pluton peut s'approcher à 12 ua d'Uranus. Quand Neptune dépasse le point où les deux orbites sont les plus proches, la résonance maintient une séparation angulaire Neptune-Soleil-Pluton supérieure à 50° et Pluton reste près de 30 ua derrière Neptune, soit près de 4,5 milliards de kilomètres. Le vrai point de rapprochement se situe de l'autre côté de l'orbite. Neptune « dépasse » toujours Pluton quelque 30 ans après l'aphélie de ce dernier.

D'autres objets transneptuniens qui gravitent sur une orbite dont le demi-grand axe est de 39,4 ua possèdent une telle résonance orbitale 3:2 avec Neptune et sont appelés des plutinos, par référence à Pluton^{[23],[24]}. En 2009, on en compte plus de 200.



Caractéristiques physiques

Si la trajectoire de Pluton a pu être déterminée sans grande difficulté, ses caractéristiques physiques (diamètre, masse, et partant densité, pouvoir réflecteur, état de la surface) sont restées longtemps mal connues et controversées : son diamètre apparent est inférieur à $\frac{1}{4}$ de seconde d'arc, tandis que les turbulences de l'atmosphère terrestre rendent difficile l'observation de détails inférieurs à une seconde d'arc^[25]. La finesse des observations s'est accrue à partir des années 1980, par l'usage de l'optique adaptative, de la spectrométrie, et du télescope spatial Hubble. La découverte en 1978 d'un satellite de Pluton, Charon, offrit des moyens d'investigation supplémentaires. Néanmoins en 2010, les valeurs publiées diffèrent encore quelque peu selon que l'on se réfère à la NASA ou à des publications récentes^[26]. Le survol en 2015 par la mission New Horizons et les effets gravitationnels du couple Pluton-Charon sur la sonde permettront d'ajuster les valeurs de son champ de gravité, selon l'observation de l'effet Doppler sur les signaux de la sonde et la déduction qui en résulte des variations de sa vitesse et de son accélération induite par Pluton et Charon^[27].

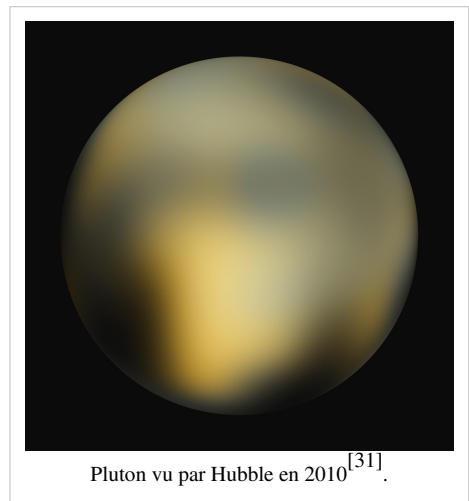
Rotation

En 1955, on observe que les variations de la luminosité de Pluton sont de l'ordre de 30 % et sont périodiques. On en déduit que Pluton tourne sur elle-même en 6,387 jours, soit 6 jours, 9 heures et 17 minutes^[28]. Son axe de rotation est incliné de $57,5^\circ$ par rapport à son plan orbital, ce qui est plutôt élevé et inhabituel dans le système solaire (seule Uranus a une inclinaison comparable). Aux points de solstice de son orbite, Pluton expose donc un pôle au Soleil pendant plusieurs années, et aux points d'équinoxe, soit tous les 124 ans, il tourne comme sur une broche face au Soleil, tandis que la Terre voit verticalement sa ligne d'équateur ainsi que l'orbite de Charon, qui passe alternativement devant et derrière Pluton.

L'action des forces de marée a contraint la période de rotation de Pluton jusqu'à la synchroniser avec la période de révolution de son principal satellite, Charon : les deux périodes étant égales, Charon se trouve donc toujours à la verticale du même point de la surface de Pluton^[29], et Charon paraît donc immobile dans le ciel plutonien^[30].

Albédo et surface

Les variations de luminosité de Pluton témoignent d'une inégale brillance entre les différentes régions à sa surface. Pluton réfléchit la lumière solaire avec un albédo de 58 % en moyenne, ce qui est une valeur élevée, (elle est de 31 % pour la Terre, et monte à 72 % pour Vénus grâce à sa couche nuageuse). Le pôle Nord est particulièrement brillant, avec un albédo estimé à 80 %, le pôle sud est un peu moins lumineux, tandis que l'équateur présente une bande sombre 5 fois moins réfléchissante, et les zones intermédiaires des contrastes marqués. Les zones d'albédo élevé sont interprétées comme des parties couvertes de neige ou de glace de formation récente, non encore obscurcie par des dépôts d'impuretés, tandis que les parties sombres pourraient être des composés carbonés. La cartographie de ces zones a été affinée par l'analyse des variations lumineuses lors des passages de

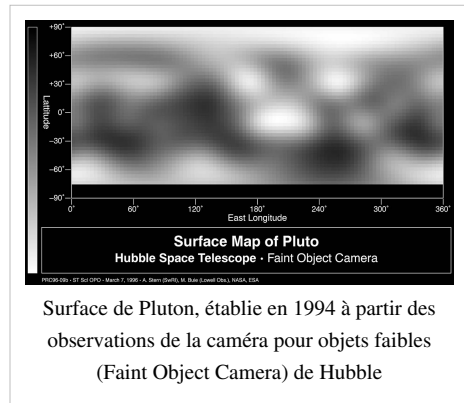


Pluton vu par Hubble en 2010^[31].

Charon devant Pluton, et confirmée en 1994 par les observations directes de Hubble. L'image d'ensemble, prise grâce à la caméra pour objets à luminosité réduite (*Faint Object Camera*), demeure toutefois très floue, car elle n'est constituée que d'une centaine de pixels, mesurant chacun 200 km de côté. Un nouvel équipement de Hubble,

L'*Advanced Camera for Surveys*, fournit en 2002-2003 des vues complètes de Pluton, encore floues mais montrant des modifications de coloration par rapport aux précédentes images.

Les analyses par spectroscopie infrarouge ont identifié plusieurs types de glace à la surface de Pluton : glace de méthane en 1976, puis à partir de 1992, glace d'azote, la plus abondante avec une proportion de l'ordre de 98 %, glace de monoxyde de carbone, glace d'eau et glace d'éthane. La température moyenne au sol est évaluée à -223 °C , avec des variations selon les zones, -213 °C pour les zones sombres et entre -238 °C et -233 °C pour les parties les plus réfléchissantes.



Surface de Pluton, établie en 1994 à partir des observations de la caméra pour objets faibles (Faint Object Camera) de Hubble

Sur sa surface, de la glace de méthane (CH_4) et d'azote (N_2) a été détectée aux pôles par une observation dans l'infrarouge^[32], en calottes dont la taille varie selon l'éloignement de la planète par rapport au Soleil. À la date du cinq février 2010, certains spécialistes ont remarqué que la glace au pôle Nord est devenue plus brillante, alors que celle du pôle Sud s'est assombrie. Sous la croûte plutonienne se trouve vraisemblablement un manteau glacé.

Au cours des dernières années, la couleur de Pluton a pris une teinte rouge de 20 à 30 % plus élevée qu'en 2000, alors qu'elle n'avait pas changé de toute la période allant de 1954 à 2000. Ce changement de teinte serait dû au méthane, composé présent sur la planète naine. L'hydrogène contenu dans le méthane, frappé par des vents solaires, libérerait le carbone constituant l'autre partie du méthane, produisant des teintes de rouge et de noir à la surface de Pluton.

Masse et dimensions

Le diamètre de Pluton est l'un des paramètres physiques les moins bien connus et les plus difficiles à mesurer, et la source principale d'incertitude sur les autres paramètres dérivés, tels que la masse volumique. Sa très grande distance combinée à sa petite taille font qu'il est impossible de résoudre avec précision le disque de Pluton, et empêche donc les mesures « directes » de ses dimensions, que ce soit avec le télescope spatial Hubble ou avec les instruments terrestres dotés d'une optique adaptative. Les mesures actuelles se fondent sur les occultations d'étoile par Pluton et les occultations de Pluton par Charon ne concordent pas exactement, et les explications permettant d'expliquer ces différences dépendent des modèles utilisés pour analyser les données, notamment concernant l'atmosphère de la planète naine. La valeur et la marge d'erreur généralement retenue de $2\,306 \pm 20\text{ km}$ de diamètre incluent en fait les différences de résultat des différentes méthodes de mesure.



La taille de Pluton (en bas à droite) comparée avec celles de Ganymède, Titan, Callisto, Io, la Lune, Europe et Triton.

La masse de Pluton, tout comme son diamètre, ont été largement surestimés durant les décennies suivant sa découverte. Percival Lowell espérait trouver une planète comparable à Neptune, de l'ordre de 10 fois la masse terrestre. La magnitude observée étant plus faible que prévue, on abaissa l'évaluation à une masse terrestre. Les estimations qui tablaient sur une taille comprise entre celles de Mercure et de Mars ont continuellement été revues à la baisse avec l'amélioration des instruments d'observation. En 1976, l'analyse de la lumière de Pluton fit supputer une surface glacée, donc un éclat fourni par une surface plus petite, et une masse réduite à un centième de celle de la Terre. La découverte de Charon en 1978 a permis, par application de la troisième loi de Kepler, de déterminer beaucoup plus précisément la masse totale du couple planétaire. La masse de Pluton est estimée en 2006 à $1,314 \times 10^{22}\text{ kg}$, soit 5,6 fois moins que celle de la Lune ou le cinq centième de la masse terrestre. En extrapolant

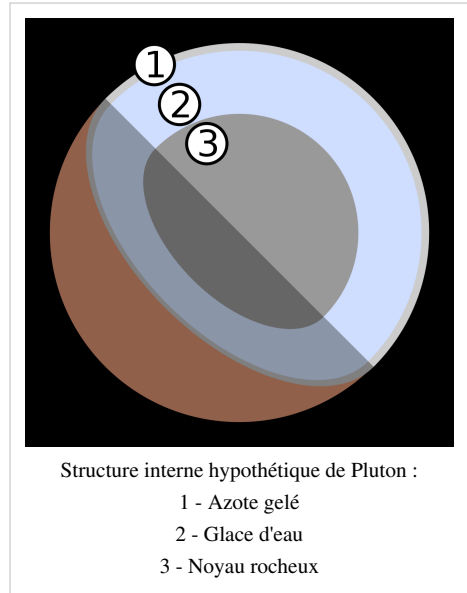
cette baisse continue, deux astronomes facétieux sont allés jusqu'à annoncer la disparition complète de Pluton pour 1984.

Compte tenu de sa masse et de son diamètre, Pluton est plus petite et moins massive que la Lune (3 476 km de diamètre) et que six des satellites naturels de Jupiter : Ganymède (5 262 km), Callisto, Io, Europe (3 122 km), de Saturne : Titan (5 150 km), et de Neptune : Triton (2 706 km).

Composition interne

La composition interne de Pluton est pour l'instant inconnue. S'il y a eu différenciation planétaire, il pourrait y avoir un noyau rocheux. Si l'on accorde à Pluton une densité de 2, valeur approximative, la densité voisine de 1 des glaces détectées en surface doit être compensée par une masse rocheuse, de densité de l'ordre de 4 ou 5, en proportion égale aux glaces d'eau et d'éléments volatils (azote, méthane, oxyde de carbone). Ces roches pourraient affleurer à la surface sans être visibles car dépourvues de signatures spectrales caractéristiques, ou bien être recouvertes d'un manteau de glaces.

Avec une teneur en glace d'eau de l'ordre de 50 % ou plus pour la masse de Pluton, la présence en profondeur d'eau liquide sous l'effet de la haute pression est envisageable dans les couches profondes, coexistant avec de la glace sous haute pression^[33].



Atmosphère

Article détaillé : Atmosphère de Pluton.



Atmosphère de Pluton.

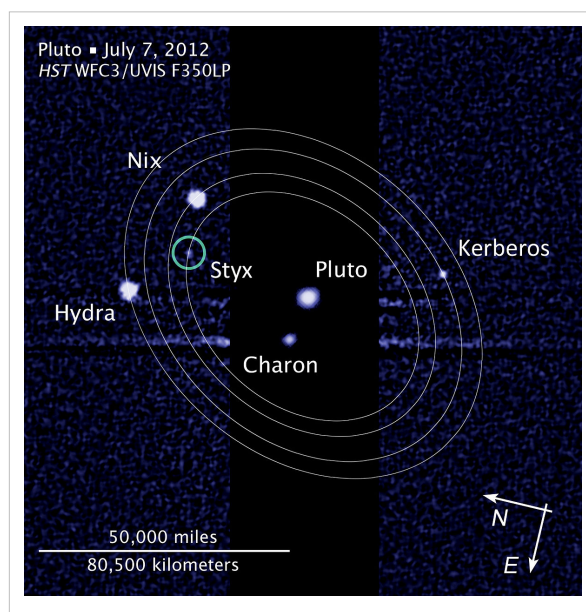
Pluton ne possède pas d'atmosphère significative. Mais d'après les lois de la physique, les glaces de sa surface doivent être en équilibre thermodynamique avec des phases gazeuses, elle serait donc entourée d'une mince enveloppe de gaz qui serait composée d'azote (N_2) à 90 %, car c'est l'élément le plus volatil parmi ceux détectés à la surface, et de monoxyde de carbone (CO) à 10 %, ainsi que des traces de méthane (CH_4).

L'atmosphère de Pluton a été découverte lors d'une occultation stellaire en 1985 et confirmée par une autre occultation en 1988. Lorsqu'un objet dépourvu d'atmosphère passe devant une étoile, cette étoile d'arrière-plan disparaît de manière brutale ; dans le cas de Pluton, la luminosité de l'étoile masquée a graduellement diminué. De l'évolution de cette courbe de luminosité, une mince atmosphère de 0,15 Pa a été déterminée, soit environ $1/700\,000^{\circ}$ de celle de la Terre. Cette atmosphère pourrait n'exister que lorsque la planète est à son périhélie et geler lorsqu'elle s'éloigne du Soleil. En effet, l'énergie du Soleil reçue par Pluton varie de 10 K entre le périhélie et l'aphélie^[34]. Lorsque Pluton s'écarte de son périhélie, une partie de son atmosphère gèle et retombe à la surface. Quand elle s'en rapproche, la température de la surface augmente et l'azote se sublime. À la manière de la sueur qui s'évapore sur la peau, cette sublimation refroidit la surface et des recherches ont montré que la température de Pluton est 10 K inférieure à ce qui était attendu (température moyenne en surface : $-228\text{ }^{\circ}\text{C}$). .

En 2002, une autre occultation stellaire par Pluton a été observée par plusieurs équipes dirigées par Bruno Sicardy, Jim Elliot et Jay Pasachoff. De manière surprenante, la pression atmosphérique a été estimée à 0,30 Pa, bien que Pluton soit plus éloignée du Soleil qu'en 1988 et donc plus froide. L'hypothèse privilégiée à l'heure actuelle est que le pôle sud de Pluton serait sorti de l'ombre en 1987 pour la première fois depuis 120 ans et qu'un surplus d'azote aurait alors sublimé une partie de la calotte polaire sud. Cet excès d'azote devrait mettre vraisemblablement des décennies avant de se condenser à l'autre pôle, selon un phénomène cyclique.

Le système plutonien

Pluton



Le système plutonien, le 9 juillet 2012.

Caractéristiques orbitales

Époque 24?????.5

Type	Objet principal du système plutonien
Demi-grand axe (a)	2 390 km par rapport au barycentre du système
Excentricité (e)	$0,00000 \pm 0,00007$
Période de révolution ($P_{\text{rév}}$)	$(6,3872304 \pm 0,0000011)$ j (6 d 9 h 17 m 36.7 \pm 0.1 s)
Inclinaison (i)	0°(par rapport à l'équateur de Pluton)

Caractéristiques physiques

Dimensions	(2306 ± 20) km (diamètre)
Période de rotation (P_{rot})	6,3872304 j Synchrone

Découverte

Découvreur Clyde W. Tombaugh

Date 18 février 1930

Description

Article détaillé : Système plutonien.

Les recherches d'un satellite de Pluton partaient du postulat qu'un éventuel satellite devait être beaucoup plus petit que sa planète, comme c'est le cas dans le reste du Système solaire, et donc moins lumineux que Pluton. Des clichés réalisés dans les années 1950 et 1960 très surexposés par des temps de pauses longs ne donnèrent aucun résultat. La théorie de Gerard Kuiper qui proposait de voir en Pluton un ancien satellite de Neptune éjecté de son orbite, impliquait que Pluton ne pouvait probablement pas avoir de lune, ce qui n'incitait pas à sa recherche. La découverte d'un satellite près de 50 ans après celle de Pluton fut donc fortuite.

Pluton possède cinq satellites naturels connus, le plus grand étant Charon qui fut identifié dès 1978. Deux satellites plus petits ont été découverts en 2005 et nommés Hydra et Nix (connus jusqu'en juin 2006 par leurs désignations provisoires S/2005 P 1 et S/2005 P 2). Le cinquième membre du système, nommé provisoirement S/2011 (134340) 1 et informellement P4, fut découvert en 2011. La découverte d'un dernier satellite, provisoirement connu comme S/2012 (134340) 1 et informellement surnommé P5, est annoncée le 11 juillet 2012.

Le 11 février 2013, le SETI Institute lance la campagne *Pluto Rocks!* qui permet aux internautes de voter pour les noms qu'ils préféreraient voir attribués à P4 et P5. Le site permettait aussi de proposer des noms tant qu'ils respectent les règles de l'Union Astronomique Internationale^[35]. La campagne se termine après avoir recueilli près de 450000 votes. Le nom le plus populaire est *Vulcain*, proposé par l'ancien acteur de Star Trek, William Shatner, suivi de *Cerberus*. Cependant, d'autres objets portant déjà ces noms et pour éviter toute confusion, l'orthographe grecque *Kerberos* est préférée à sa version latine *Cerberus*, et *Styx*, troisième du classement, est préféré à *Vulcain*. Le 2 juillet 2013, l'Union astronomique internationale confirme les noms de Kerbéros pour P4 et Styx pour P5^[36].

Une particularité du système plutonien est que le barycentre du couple Pluton/Charon n'est pas situé à l'intérieur du premier mais dans le vide entre les deux corps.

La distribution des satellites de Pluton est concentrée au centre du système. Potentiellement, un satellite pourrait orbiter autour de Pluton jusqu'à 53 % du rayon de sa sphère de Hill (soit environ 6×10^6 km) dans le sens direct et 69 % dans le sens rétrograde, mais le système plutonien est resserré dans les 3 % internes de cette zone. À titre de comparaison, Psamatée orbite Neptune à 40 % du rayon de sa sphère de Hill. Selon les termes des découvreurs de Nix et Hydra, le système plutonien est « hautement compact et largement vide ».

Charon

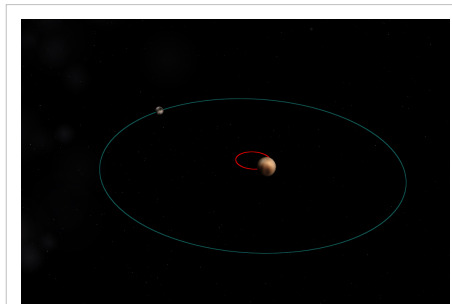


Schéma de la rotation de Pluton et de Charon autour d'un barycentre commun.

Article détaillé : Charon.

Charon fut découvert en 1978, lors d'une campagne d'astrométrie destinée à affiner la mesure de position de Pluton. James Christy remarqua sur la tache lumineuse des clichés de Pluton une excroissance placée différemment selon les clichés, dont l'examen révéla une périodicité d'une semaine. Christy annonça sa découverte le 7 juillet 1978 et proposa de la nommer Charon.

Comparativement à Pluton, Charon est un très gros satellite (son rayon de 600 km environ est la moitié de celui de Pluton, estimé à 1 170 km), et le barycentre des deux corps se trouve au-delà de la surface de Pluton (à un peu plus de deux rayons plutoïens). Il s'agit du plus grand système de ce genre dans le système solaire (certains astéroïdes binaires possèdent également ce trait, comme (617) Patrocle ; le barycentre du Soleil et de Jupiter est également situé à l'extérieur du premier) et il y est parfois fait référence comme un système binaire d'astéroïdes.

Sous l'effet de marée gravitationnelle, Pluton et Charon sont tous les deux en rotation synchrone, avec une période de 6,387 jours : Charon présente toujours la même face à Pluton et Pluton la même face à Charon, un fait inhabituel dans le système solaire pour deux objets de cette taille (mais non exceptionnel, certains astéroïdes binaires possèdent cette propriété).

La découverte de Charon a permis en exploitant de 1985 à 1990 les occultations de Charon par Pluton et les transits de Charon devant Pluton de préciser la masse totale du système double et de déterminer que celle-ci était inférieure aux estimations précédentes. En fait, elle a amené les astronomes à revoir totalement leur estimation de la taille de Pluton. À l'origine, on pensait que Pluton était plus grande que Mercure (on lui donnait environ 6 800 km de diamètre) et plus petite que Mars, mais les calculs étaient fondés sur le fait qu'un seul objet était observé (on ne distinguait pas Charon de Pluton). Une fois le système double découvert, l'estimation de la taille de Pluton a été revue à la baisse. Il est possible aujourd'hui, avec des instruments modernes, de distinguer le disque de Pluton séparément de celui de Charon (voir l'image établie par Hubble en 2006).

En conséquence, l'albédo de Pluton a dû aussi être recalculé et revu à la hausse : la planète étant bien plus petite que les premières estimations, sa capacité à réfléchir la lumière devait être plus importante que ce que l'on pensait. Les estimations actuelles lui donnent une valeur moyenne de 58 %, tandis que Charon avec 36 % apparaît beaucoup plus sombre. Charon n'a pas retenu le méthane, seule de la glace d'eau et d'ammoniac y a été détectés.

Hydra et Nix

Articles détaillés : Hydra et Nix.

Pluton possède deux autres satellites, qui furent photographiés le 15 mai 2005 lors d'une campagne d'observation du télescope spatial Hubble, temporairement nommés S/2005 P 1 et S/2005 P 2 puis baptisés Hydra (du nom du monstre l'Hydre) et Nix (de Nyx, mère de Charon). Ils ont été repérés par une équipe du *Southwest Research Institute* sur des clichés pris pour préparer la nouvelle mission d'exploration lointaine du système solaire, *New Horizons*. Leur existence fut confirmée par l'examen de photographies prises par Hubble et datant du 14 juin 2002.

D'après les premières observations, le demi-grand axe de l'orbite de Nix mesure 49 000 km avec une période de 24,9 jours et celui de l'orbite d'Hydra 65 000 km avec une période de 38,2 jours. Les deux satellites semblent orbiter dans le sens prograde dans le même plan que Charon et sont deux et trois fois plus éloignés que celui-ci, avec une résonance orbitale proche de (mais pas égale à) 4:1 et 6:1.

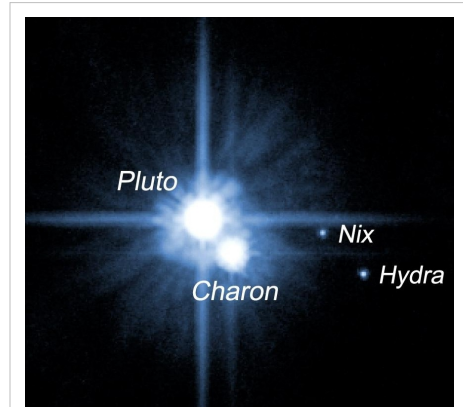
Les observations se poursuivent pour déterminer les caractéristiques des deux astres. Hydra est parfois plus brillant que Nix, soit parce qu'il est plus grand, soit parce que la luminosité de sa surface varie suivant les zones. Le spectre des satellites est similaire à celui de Charon, ce qui suggère un albédo similaire d'environ 0,35 ; dans ce cas, le diamètre de Nix est estimé à 46 km et celui de Hydra à 61 km. Une limite supérieure peut être déterminée en supposant un albédo de 0,04 similaire aux objets les plus sombres de la ceinture de Kuiper : 137 ± 11 km pour Nix et 167 ± 10 km pour Hydra. Dans ce cas, la masse des satellites serait 0,3 % de celle de Charon (0,03 % de la masse de Pluton).

Autres objets orbitant autour de Pluton

Les observations effectuées par le télescope spatial Hubble ont placé des limites quant à l'existence de satellites additionnels dans le système plutonien. Avec une probabilité de 90 %, aucune lune de plus de 12 km et d'un albédo similaire à celui de Charon (soit 0,38) n'existe dans une zone de 5" autour de Pluton. Pour un albédo plus sombre de 0,041, cette limite est portée à 37 km. Avec une probabilité de 50 %, cette limite descend à 8 km.

Dans un article publié dans la revue *Nature*, une équipe de scientifiques américains conduite par S. A. Stern (du *Southwest Research Institute*) a annoncé que Nix et Hydra se sont très probablement formés lors du même impact géant qui a donné naissance à Charon. L'équipe a émis l'hypothèse que d'autres grands objets binaires de la ceinture de Kuiper pourraient également abriter de petites lunes et que celles qui gravitent autour de Pluton pourraient générer des anneaux de débris autour de la planète naine. À l'heure actuelle, les données provenant de la caméra de prospection avancée d'Hubble suggèrent qu'aucun anneau n'existe. Dans le cas contraire, il s'agit d'un anneau ténu comme ceux de Jupiter ou de moins de 1 000 km de large.

Lors d'une nouvelle campagne d'observation réalisée à l'aide du télescope spatial Hubble, une nouvelle lune fut observée, le 28 juin 2011. Cette observation a été confirmée par d'autres le 3 et le 18 juillet. La petite lune nommée *Kerberos* (quelquefois francisé en Cerbère ; provisoirement S/2011 (134340) 1 ou P4) et dont la taille doit être



Pluton et trois de ses cinq satellites connus, vus par Hubble le 15 février 2006.

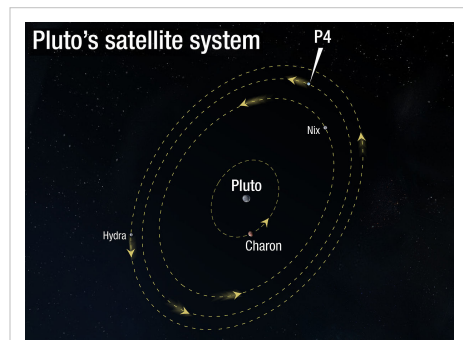


Schéma des orbites du système plutonien. S/2011 (134340) 1 orbite entre les lunes Nix et Hydra.

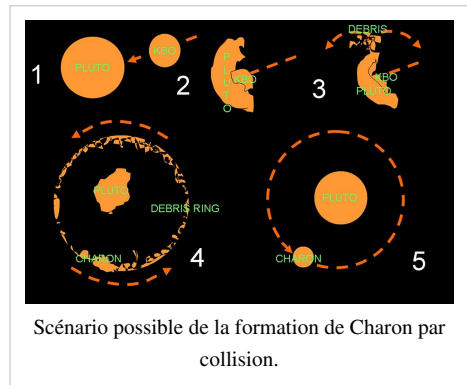
comprise entre 13 et 34 kilomètres, a une orbite inscrite entre celles de Nix et d'Hydra.

Une nouvelle lune appelée Styx (provisoirement S/2012 (134340) 1 ou P5), a été découverte entre le 26 juin et le 9 juillet 2012^[37], elle fut baptisée par l'Union Astronomique Internationale, le 2 juillet 2013^[38].

Selon Mark Showalter, la mission *New Horizons* qui atteindra Pluton en juillet 2015 permettra probablement de découvrir un ou plusieurs nouveaux satellites autour de la planète naine^[39]. Selon des simulations, une dizaine de satellites pourraient être en orbite autour de Pluton.

Théories sur l'origine de Pluton

Des théories ont été formulées pour expliquer la petite taille de Pluton, similaire à celle de satellites de la géante voisine Neptune. Le mathématicien britannique Raymond Lyttleton a envisagé en 1936 que Pluton et Triton tournaient ensemble autour de Neptune, et qu'une perturbation gravitationnelle avait éjecté Pluton hors de l'orbite planétaire, tandis qu'elle replaçait Triton sur une orbite rétrograde. Cette idée eut cours assez longtemps, et Gerard Kuiper l'a reprise en voyant dans Pluton un ancien satellite de Neptune ; Triton semble en outre partager certaines caractéristiques atmosphériques et géologiques avec Pluton. Même si ces points ont été évoqués pour soutenir une origine neptunienne de Pluton, le consensus actuel est que ce dernier n'a jamais fait partie des satellites de Neptune. Actuellement, l'orbite rétrograde de Triton laisse penser que celui-ci était à l'origine un objet de la ceinture de Kuiper sur une orbite solaire et qu'il fut capturé par Neptune.



Scénario possible de la formation de Charon par collision.

Selon le scénario de formation du système solaire actuellement le mieux admis (modèle de Nice), Pluton et Charon se sont formés par accrétion en même temps que d'autres corps, et ont été ensuite chassés au-delà de l'orbite de Neptune par l'influence gravitationnelle des planètes géantes. Alors qu'une partie de ces corps étaient éjectés aux confins du système solaire, ceux qui subsistaient forment la ceinture de Kuiper. Les corps qui orbitaient en résonance 2:3 avec Neptune gardaient une orbite stable, parmi ceux-ci Pluton^[40]. Le couple Pluton - Charon se serait formé par capture mutuelle lors d'un frôlement ou d'une collision entre ces deux objets, et Nix et Hydra seraient peut-être des vestiges de cette rencontre.

Pluton inspire Walt Disney

En 1931, dans le film *La Chasse à l'élan*, le créateur américain de films d'animation Walt Disney baptise un de ses personnages en l'honneur de la planète récemment découverte. C'est le chien Pluto.

Notes et références

Notes

- [1] Les observations du télescope spatial *Hubble* ont été faites dans deux longueurs d'onde, ce qui est insuffisant pour obtenir directement une image en vraies couleurs. Les cartes de la surface à chacune de ces longueurs d'onde limitent le spectre réel que pourraient produire les matériaux en surface de Pluton. Ces spectres, générés pour chaque point résolu à la surface, sont ensuite convertis en les couleurs RVB vues ici. Voir Buie *et al.*, 2010.
- [2] <http://www.boulder.swri.edu/~buie/pluto/plutomap1.html>
- [3] (134340) Pluton est la désignation officielle de l'Union astronomique internationale depuis le 13 septembre 2006. Voir la Circulaire de l'Union astronomique internationale n°8747 (IAUC 8747) (<http://www.cbat.eps.harvard.edu/iauc/08700/08747.html>).
- [4] En réalité Pluton dispute à Éris le statut de plus grosse planète naine connue étant donné les tailles très proches et les incertitudes sur les diamètres des deux objets, qui mesurent respectivement et .
- [5] « Pluton n'a plus le statut de planète », lire en ligne (<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/5350-pluton-na-plus-le-statut-de-planete.php>) sur le site du CNES

- [6] NASA's Hubble Discovers Another Moon Around Pluto (http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/pluto-moon.html)
- [7] Un nouveau satellite de Pluton découvert par Hubble (<http://ciel.science-et-vie.com/2011/07/20/un-nouveau-satellite-de-pluton-decouvert-par-hubble/>)
- [8] NASA, solar System Exploration, Pluto's symbol image du symbole de Pluton (http://sse.jpl.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=263)
- [9] *The Girl Who Named Pluto, Interview With Venetia Burney Phair* nasa.gov (http://www.nasa.gov/multimedia/podcasting/transcript_pluto_naming_podcast.html)
- [10] *The Trans-Neptunian Body: Decision to call it Pluto*, The Times du 27 mai 1930, p. 15
- [11] Royal Astronomical Society (1931). "The Discovery of Pluto". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91: 380–385
- [12] Kuiper, Gerard P. (1950). "The Diameter of Pluto". *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 62 (366): 133–137
- [13] Crosswell, Ken (1997). *Planet Quest: The Epic Discovery of Alien Solar Systems*. New York: The Free Press
- [14] Christy, James W.; Harrington, Robert Sutton (1978). "The Satellite of Pluto". *Astronomical Journal* 83 (8): 1005–1008.
- [15] Connu jusqu'en 2006 sous la désignation , et parfois désigné par les médias sous le nom de Xéna avant qu'il ne reçoive son nom définitif.
- [16] « Pluto status suffers another blow », lire en ligne (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/6751975.stm>) sur le site de la BBC
- [17] Revue Ciel et Espace Hors série n° 15, octobre 2010, p. 86
- [18] *NASA Spacecraft En Route to Pluto Prepares for Jupiter Encounter* nasa.gov (http://www.nasa.gov/home/hqnews/2007/jan/HQ_07012_New_Horizons.html)
- [19] New Hubble maps of Pluto show surface changes nasa.gov (http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/pluto-20100204.html)
- [20] *Les confins du système solaire*, Appendice II-1, Astronomie Flammarion, 1985, (ISBN 978-2-08-012048-9), p. 575
- [21] André Brahic, *Enfants du soleil l'histoire de nos origines*, Odile Jacob, 1999, 366 pages, p. 56
- [22] voir tableau des principaux OTN dans *Le système solaire*, de Thérèse Encrenaz, etc., cité en bibliographie, p. 38
- [23] Thérèse Encrenaz, *Le système solaire*, p. 455
- [24] Fabrice Thomas, *La dynamique résonnante dans le système solaire, application au mouvement des objets transneptuniens*, 1998, thèse (<http://www.sudoc.abes.fr/DB=2.1/SET=3/TTL=11/SHW?FRST=12>)
- [25] André Brahic, *Les confins du système solaire*, Astronomie Flammarion, 1985, , p. 508
- [26] Christophe Sotin, Olivier Grasset, Gabriel Tobie, *Planétologie, géologie des planètes et des satellites*, Dunod, 2009, , p. 323
- [27] Christophe Sotin, *Planétologie, géologie des planètes et des satellites*, p. 50-51
- [28] Christophe Sotin, Olivier Grasset, Gabriel Tobie, *Planétologie, géologie des planètes et des satellites*, Dunod, 2009, , p. 322
- [29] Aux légères variations dues à l'excentricité près, voir libration.
- [30] James T. Shipman, Jerry D. Wilson, Aaron Todd, *An Introduction to Physical Science*, Houghton Mifflin (Academic), 2008, (ISBN 978 0618935963), page 488
- [31] HubbleSite – juin 2010 (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2010/06/image/c/>) « *New Hubble Maps of Pluto Show Surface Changes.* »
- [32] Éric Quirico, *Études spectroscopiques infrarouges de solides moléculaires. Application à l'étude des surfaces glacées de Triton et Pluton*, thèse 1995GRE10237, 1995
- [33] Christophe Sotin, *Planétologie, géologie des planètes et des satellites*, pp. 22 et 24
- [34] Christophe Sotin, Olivier Grasset, Gabriel Tobie, *Planétologie, géologie des planètes et des satellites*, ouvrage précité, p. 325 et 342
- [35] Aidez-nous à nommer les lunes de Pluton! (<http://www.plutorocks.com/home/francais>)
- [36] <http://www.wired.com/wiredscience/2013/07/plutos-tiny-moons-are-named/>
- [37] <http://www.spacetelescope.org/news/heic1212/>
- [38] <http://www.space.com/21814-pluto-moons-named-kerberos-styx.html?cmpid=514630/>
- [39] *Pluto Rocks!* Blog (<http://www.plutorocks.com/blog>).
- [40] Steven Soter, *Les systèmes solaires sont-ils plein à craquer*, In Dossier pour la Science n°64, Juillet-Septembre 2009, pp. 114-115

Références

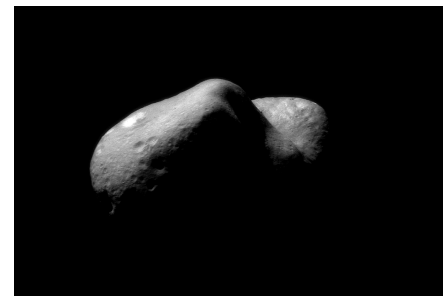
Astéroïde

Un **astéroïde** est un petit corps du Système solaire composé de roche, de métaux et de glace, de forme irrégulière et dont les dimensions varient de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres^[1]. Quand ces petits corps entrent dans l'atmosphère terrestre, ils deviennent météorites (météores)

Le premier fut découvert en 1801, on en dénombre actuellement plus de 560 000. Une grande partie évolue sur une orbite située entre Mars et Jupiter : la ceinture d'astéroïdes. Un autre groupement important est situé au-delà de l'orbite de Neptune : la ceinture de Kuiper. La composition des astéroïdes de la ceinture de Kuiper est plus riche en glace et plus pauvre en métaux et en roche, ce qui les apparente à des noyaux cométaires^[2]. Contrairement aux comètes les astéroïdes sont inactifs, cependant quelques-uns ont été observés avec une activité cométaire.

On suppose que les astéroïdes sont des restes du disque protoplanétaire qui ne se sont pas regroupés en planètes pendant sa formation.

Certains astéroïdes croisant l'orbite de la Terre (appelés géocroiseurs) sont considérés comme objets potentiellement dangereux, à cause du risque de collision, et sont surveillés par des systèmes automatisés.

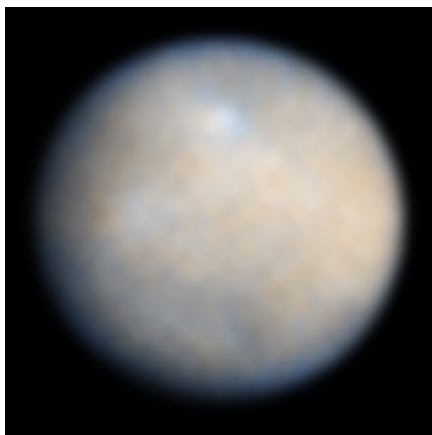


L'astéroïde géocroiseur 433 Éros où s'est posée la sonde NEAR Shoemaker.



(243) Ida ainsi que sa lune Dactyl. Dactyl est la première lune astéroïdale à avoir été découverte.

Premières découvertes



La planète naine 1 Cérès vue par le télescope spatial Hubble.

Le premier astéroïde fut découvert tout à fait par hasard par Giuseppe Piazzi, directeur, à l'époque, de l'observatoire de Palerme, en Sicile. Le 1^{er} janvier 1801, alors qu'il menait des observations dans la constellation du Taureau afin de rédiger un catalogue stellaire, il repéra un nouvel astre. Le lendemain, il constata avec surprise que celui-ci s'était déplacé vers l'ouest. Il suivit le déplacement de cet objet pendant plusieurs nuits. Son collègue, Carl Friedrich Gauss, utilisa ces observations pour déterminer la distance exacte de cet objet inconnu à la Terre. Ses calculs placèrent l'astre entre les planètes Mars et Jupiter. Piazzi le nomma Cérès, du nom de la déesse romaine qui fait sortir la sève de la terre et qui fait pousser les jeunes pousses au printemps, et également déesse protectrice de la Sicile.

Selon la loi empirique de Titius-Bode, formulée en 1766 par Johann Daniel Titius et divulguée par Johann Elert Bode, une planète aurait dû graviter entre Mars et Jupiter. Une campagne d'observation, initiée par Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande en 1796, avait été lancée afin de la localiser. Piazzi, sans le vouloir, avait devancé ses collègues avec la découverte de Cérès sur l'orbite de l'hypothétique planète.

Entre 1802 et 1807, trois autres objets furent découverts sur la même orbite : Pallas, Junon et Vesta. Les quatre nouveaux corps furent alors considérés comme des planètes à part entière. Le terme de *petites planètes* était généralement employé, cependant dès 1802, William Herschel proposa l'appellation d'*astéroïde*, qui signifie littéralement « en forme d'étoile », à cause de leur aspect au télescope, différent de celui en forme de disque régulier des autres planètes. Avec, de plus, leur petite taille ou l'inclinaison orbitale élevée de Pallas, il s'agissait selon lui d'objets du Système solaire à distinguer des planètes.

Il fallut attendre 1845 pour qu'une nouvelle *petite planète* soit découverte, Astrée, par Karl Ludwig Hencke. Dès lors, les découvertes ne cessent de se multiplier et l'appellation proposée par Herschel s'imposera. En juillet 1868, cent astéroïdes étaient connus. La millième découverte homologuée eut lieu en novembre 1921 (969 Leocadia) et la dix-millième en octobre 1989 ((21030) 1989 TZ₁₁). En règle générale, l'ordre des dates de découvertes ne correspond pas à l'ordre de numérotation des astéroïdes, car l'octroi d'un numéro dépend de l'établissement d'une orbite fiable.

Heinrich Olbers, qui découvrit Pallas et Vesta, avait émis l'hypothèse que les astéroïdes étaient les fragments d'une planète qui avait été détruite. Cette supposée planète fut même baptisée plus tard Phaéon. L'hypothèse la plus communément admise aujourd'hui est que les astéroïdes sont des résidus du Système solaire primitif qui n'ont pu s'agglomérer pour former une planète, à cause notamment de l'influence gravitationnelle de Jupiter. Ils sont donc considérés comme des reliques du Système solaire, leur étude plus poussée et leur exploration permettraient d'en savoir davantage sur la formation du Système solaire.

La majorité des découvertes d'astéroïdes se font dans la zone comprise entre Mars et Jupiter, et appelée la ceinture d'astéroïdes (ou ceinture principale). Mais d'autres sont découverts en dehors de cette zone, soit parce qu'ils possèdent une orbite qui les fait s'éloigner de la ceinture principale, soit parce qu'ils sont situés dans une toute autre zone du Système solaire (voir Principaux groupements).

L'étude des astéroïdes fut longtemps délaissée par les astronomes. Nous les connaissons depuis maintenant plus de deux cents ans, mais ils étaient considérés comme les rebuts du Système solaire. On sait maintenant que les astéroïdes sont une clé importante de la compréhension de la formation du Système solaire et c'est pour cette raison que les astronomes montrent un plus grand intérêt envers ces objets.

Méthodes de détection

Jusqu'en 1998, les astéroïdes étaient découverts à l'aide d'un processus en quatre étapes ^[réf. incomplète] :

1. Tout d'abord, une région du ciel était photographiée à l'aide d'un télescope à large champ. Des paires de photographies étaient prises à intervalles réguliers – typiquement une heure – et ce, sur une durée de plusieurs jours ;
2. deuxièmement, deux films de la même région sont observés dans un stéréoscope. Tout corps en orbite autour du Soleil aura alors bougé légèrement. Dans le stéréoscope, l'image de ce corps apparaîtra alors comme flottant légèrement sur le fond des étoiles ;
3. troisièmement, une fois qu'un objet se déplaçant a été identifié, sa position était mesurée précisément en utilisant un microscope, la position étant mesurée relativement à celle d'une étoile connue.

Note : ces trois premières étapes ne constituent pas une découverte d'un astéroïde : l'observateur n'a trouvé qu'une *apparition*.

4. l'étape finale de la découverte était d'envoyer la position et l'heure de la découverte à Brian G. Marsden du *Minor Planet Center* qui, à l'aide de programmes informatiques, calcule si cette apparition est reliée à d'autres apparitions sur la même orbite. Si c'est le cas, l'observateur de l'apparition finale est déclaré le découvreur et obtient l'honneur de nommer l'astéroïde. Le nom proposé doit néanmoins être approuvé par l'Union astronomique internationale.

Depuis 1998, la plupart des astéroïdes sont découverts à l'aide de systèmes automatisés qui comprennent des caméras CCD et des ordinateurs reliés directement aux télescopes. Voici les principales équipes utilisant de tels systèmes,

classées par le nombre de découvertes au 30 janvier 2010 :

- l'équipe du Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) : 111 628 astéroïdes découverts ;
- Spacewatch : 27 547 astéroïdes ;
- l'équipe du Near Earth Asteroid Tracking (NEAT) : 22 647 astéroïdes ;
- l'équipe du Lowell Observatory Near-Earth-Object Search (LONEOS) : 14 227 astéroïdes ;
- le Catalina Sky Survey : 7 119 astéroïdes.

En orbite autour de la Terre, le satellite de la NASA WISE à quant à lui découvert 33 000 astéroïdes, au 1^{er} février 2011.

Inventaire

Au 9 décembre 2011, le *Minor Planet Center* dénombre 310 376 astéroïdes numérotés, dont 16 863 nommés, et 262 918 astéroïdes non numérotés ; soit un total de 573 294 orbites connues^[3].

Observation à l'œil nu

Les astéroïdes sont presque impossibles à observer à l'œil nu. Ils sont bien plus petits que les planètes et très peu lumineux. L'astéroïde 4 Vesta en est l'exception puisque c'est le seul qu'il soit parfois possible d'observer sans appareil optique. Sa luminosité n'étant toutefois pas très grande, il faut donc savoir où poser le regard.

Un astéroïde ressemble plus ou moins à une étoile qui brille dans le ciel nocturne. Le meilleur moyen pour partir à la chasse aux astéroïdes avec ses jumelles ou son télescope est d'observer le fond étoilé plusieurs nuits d'affilée et de détecter les points lumineux qui se déplacent par rapport au fond, qui, lui, paraît stable. Certains catalogues répertorient la position des astéroïdes et il est alors plus facile de pointer le télescope au bon endroit.

Liste d'astéroïdes connus

Certains astéroïdes sont relativement bien connus, du fait de leur taille importante ou encore parce qu'ils sont géocroiseurs.

Cérès	Ceinture principale
Pallas	Ceinture principale
Junon	Ceinture principale
Astrée	ceinture principale
Hébé	Ceinture principale
Lutetia	Ceinture principale
Cléopâtre	Ceinture principale
Mathilde	Ceinture principale
Ida	Ceinture principale
Éros	Géocroiseur
Gaspra	Ceinture principale
Icare	Géocroiseur
Toutatis	Géocroiseur
Adonis	Géocroiseur
Castalia	Géocroiseur
Phaéthon	Géocroiseur
Midas	Géocroiseur

Géographos	Géocroiseur
Cuno	Géocroiseur
Hypnos	Géocroiseur
Itokawa	Géocroiseur
Apophis	Géocroiseur

Dénomination

Article détaillé : Désignation des astéroïdes.

Dans les premières décennies du XIX^e siècle, les astéroïdes furent affublés d'un symbole astronomique (♃ pour Cérès, ♄ pour Pallas, ♃ pour Junon, etc.), à l'instar des planètes du Système solaire. Les astéroïdes étaient à cette époque considérés comme des planètes à part entière. En 1851, devant leur nombre grandissant, le spécialiste allemand Johann Franz Encke prit la décision de remplacer ces symboles par une numérotation.

En 1947, l'américain Paul Herget, directeur de l'observatoire de Cincinnati, est chargé par l'Union astronomique internationale de fonder le *Minor Planet Center*. Depuis, la désignation des astéroïdes est assurée par ce centre.

Quand l'orbite d'un astéroïde est confirmée, l'apparition reçoit une première désignation constituée de l'année de découverte suivie d'une lettre représentant la quinzaine durant laquelle s'est produite la découverte, et d'une seconde lettre indiquant l'ordre de découverte pendant cette quinzaine (la lettre I n'est pas utilisée). Si plus de 25 objets sont découverts dans une quinzaine, on recommence l'alphabet en ajoutant un numéro qui indique combien de fois la seconde lettre est réutilisée (exemple : 1998 FJ₇₄).

L'astéroïde reçoit ensuite un numéro permanent, noté entre parenthèses, accompagnant la première désignation (exemple : (26308) 1998 SM₁₆₅), puis parfois, et plus tard, un nom qui remplace la première désignation (exemple : (588) Achille). Les premiers ont reçu les noms de personnages de la mythologie grecque ou romaine, à l'instar des planètes et de leurs satellites, d'autres mythologies ont ensuite été utilisées (nordique, celtique, égyptienne...) ainsi que des noms de lieux, des prénoms ou des diminutifs, des noms de personnages fictifs, d'artistes, de scientifiques, de personnalités des milieux les plus divers, des références à des événements historiques... Les sources d'inspirations pour nommer un astéroïde sont désormais très variées.

Ces dernières années, le rythme de découverte est tel que les astéroïdes sans noms sont majoritaires. Quelques groupes d'astéroïdes ont des noms ayant un thème commun. Par exemple, les Centaures sont nommés d'après les Centaures de la mythologie et les Troyens sont nommés d'après les héros de la Guerre de Troie. Au 9 décembre 2011, sur 310 376 astéroïdes numérotés, le dernier nommé était (301638) Kressin, et le premier astéroïde sans nom était (3708) 1974 FV₁.

Exploration des astéroïdes

Les premières images rapprochées d'un astéroïde sont l'œuvre de la sonde Galileo envoyée vers 951 Gaspra et 243 Ida en 1991.

La sonde NEAR Shoemaker (*Near Earth Asteroid Rendezvous - Shoemaker*) fut lancée le 17 février 1996 par la NASA dans le but d'étudier en détail l'un des plus gros astéroïdes géocroiseurs : 433 Éros. Après avoir établi une cartographie complète de la surface de 433 Éros entre avril et octobre 2000, et bien que cela ne fût pas prévu au départ de sa mission, la sonde NEAR Shoemaker s'est finalement posée sur l'astéroïde le 12 février 2001 sans subir de dommages. Le dernier signal de la sonde a été reçu le 28 février 2001.

En 2003, la JAXA a lancé une sonde baptisée Hayabusa vers l'astéroïde Itokawa, avec pour objectif de s'y poser en douceur et d'en prélever des échantillons. Malgré plusieurs pannes et incidents, la sonde est finalement revenue sur Terre le 13 juin 2010, sans que l'on sache à l'époque si elle contenait effectivement des échantillons d'Itokawa .

Le 16 novembre 2010, la Jaxa a annoncé que l'analyse des particules récoltées par Hayabusa avait confirmé leur origine extraterrestre. Le Japon devient ainsi le premier pays à s'être posé sur un astéroïde et en avoir rapporté des échantillons sur notre planète.

En 2013, une exploitation minière des astéroïdes est prévue par la compagnie Deep Space Industries.

Principaux groupements

Ceinture principale

La ceinture dite *principale* ou « jovio-martienne », entre les orbites de Mars et Jupiter, distante de deux à quatre unités astronomiques du Soleil, est le principal groupement : plus de 520 000 objets y ont été répertoriés à ce jour. L'influence du champ gravitationnel de Jupiter les a empêché de former une planète. Cette influence de Jupiter est également à l'origine des lacunes de Kirkwood qui sont des orbites vidées par le phénomène de résonance orbitale.

Géocroiseurs

Les astéroïdes géocroiseurs sont des astéroïdes dont l'orbite est relativement proche de celle de la Terre. Au 3 septembre 2011, on en dénombre 8 113.

Les Amors, dont 433 Éros fait partie, les Atens et les Apollos en sont les principaux groupes.

Seuls les Atens et les Apollos croisent l'orbite de la Terre et l'intérêt grandissant qu'on leur porte est lié à la crainte de les voir entrer en collision avec celle-ci. Ces croiseurs sont appelés ECA *Earth-Crossing Asteroids* ou NEO *Near Earth Objects* en anglais.

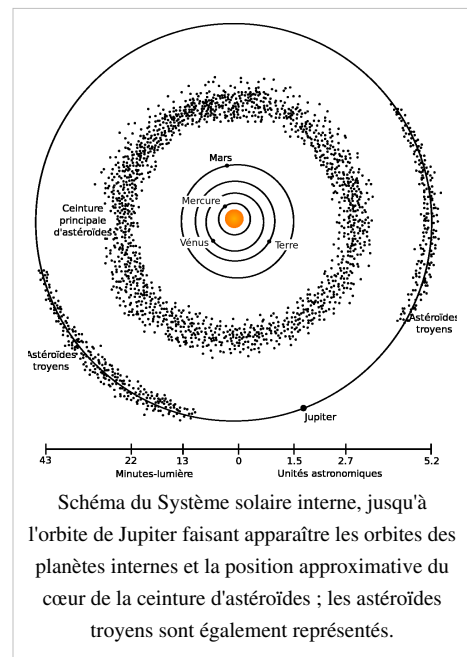
L'agence spatiale européenne (ESA) a entamé en 2004 un projet à long terme de protection de la Terre contre les géocroiseurs. Voir Services publics dans le monde.

Troyens

Les astéroïdes troyens sont situés sur l'orbite d'une planète, aux deux points de Lagrange, L_4 et L_5 . On en compte 4 990 au 3 septembre 2011.

La quasi-totalité des Troyens sont sur l'orbite de Jupiter. Mars possède sept astéroïdes troyens, Neptune neuf, et la Terre un seul (2010 TK₇, découvert en 2010 par le télescope spatial WISE^[4]).

À ce jour les autres planètes ne semblent pas en posséder, sans doute en raison de l'influence soit du Soleil, soit des planètes voisines susceptibles de perturber les points de Lagrange, ou n'ont pas encore été découverts.



Ceinture de Kuiper

La ceinture de Kuiper, située au-delà de l'orbite de Neptune, semble être potentiellement la plus grande concentration de petits corps du Système solaire. Au 3 septembre 2011, 1 229 objets transneptuniens sont dénombrés par le *Minor Planet Center*.

Le premier membre découvert de cette ceinture fut Pluton, longtemps le seul objet connu de cette zone. Son unicité et sa taille supposée similaire à celle de la Terre ont fait qu'il a longtemps été considéré comme planète. Néanmoins, la confirmation en 1978 de son compagnon, Charon, ont permis de définitivement savoir que Pluton était bien plus qu'imaginé. Il faudra ensuite attendre 1992 pour qu'un autre objet de Kuiper soit découvert : ce sera (15760) 1992

QB₁, classé par la suite dans la catégorie des cubewanos ou objets classiques de la ceinture de Kuiper. La découverte de ce corps attira l'attention des astronomes sur les objets « transneptuniens », leur laissant dire que comme prédit il devait en exister en grandes quantités. Aujourd'hui, plusieurs membres de la ceinture de Kuiper de taille comparable à celle de Pluton ou de Charon sont connus.

Le plus grand objet identifié dans la ceinture d'astéroïde est Pluton — (136199) Éris —, de taille à peine supérieure mais clairement plus massif, est un objet épars, la plupart du temps situé bien au-delà des limites de la ceinture de Kuiper.

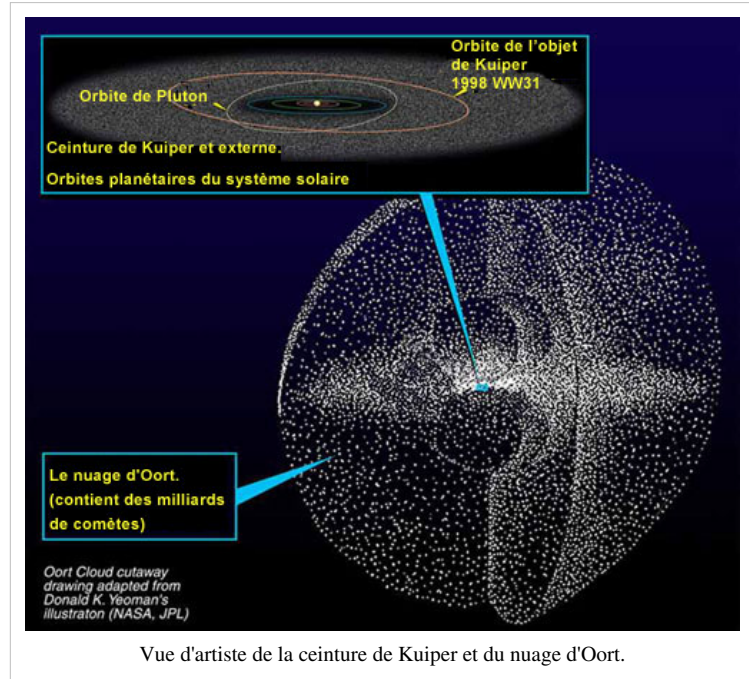
Cette ceinture serait la source de près de la moitié des comètes qui sillonnent le Système solaire.

Objets épars et objets détachés

En 2005 fut découvert un objet épars dont la taille était initialement estimée à près de 3000 kilomètres. Cet objet, depuis lors nommé Éris et dont la taille a été aujourd'hui réévaluée à 2326 kilomètres (soit seulement une vingtaine de kilomètres de plus que Pluton), a relancé le débat sur la démarcation entre les *gros objets* et les planètes du Système solaire. Ainsi, en août 2006, l'Union astronomique internationale décide de créer le statut de planète naine, aussitôt décerné à Pluton qui perd celui de planète, à (136199) Éris, tous deux transneptuniens, et à (1) Cérés, le plus gros astéroïde de la ceinture principale. D'autres objets de la ceinture de Kuiper sont candidats à ce nouveau statut.

Nuages de Hills et d'Oort

Le nuage de Hills, parfois nommé nuage d'Oort interne, serait un disque de débris situé entre 100 à 3 000 et 30 000 à 40 000 unités astronomiques du Soleil. Le nuage d'Oort ('ort), aussi appelé le nuage d'Öpik-Oort ('öpik), est un vaste ensemble sphérique hypothétique de corps situé à environ 50 000 ua du Soleil ($\approx 0,8$ année-lumière). Ces deux structures sont donc situées bien au-delà de l'orbite des planètes et de la ceinture de Kuiper. La limite externe du nuage d'Oort, qui formerait la frontière gravitationnelle du Système solaire, se situerait à plus d'un millier de fois la distance séparant le Soleil et Pluton, soit environ une année-lumière et le quart de la distance à Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil. Il n'est d'ailleurs pas exclu qu'il existe un continuum entre le nuage d'Oort "solaire" et une structure similaire autour du système Alpha Centauri.



Vue d'artiste de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort.

Centaures

Les Centaures sont des astéroïdes qui naviguent autour du Soleil entre les orbites des planètes géantes (au nombre de 319 au 3 septembre 2011, en incluant certains objets épars). Le premier qui fut découvert est 2060 Chiron, en 1977. On suppose généralement que ce sont des astéroïdes ou des comètes provenant probablement de la ceinture de Kuiper qui ont été éjectés de leurs propres orbites.

Astéroïdes croisant l'orbite des autres planètes

Outre les géocroiseurs, il existe d'autres regroupements d'astéroïdes suivant qu'ils croisent l'orbite d'une autre planète du Système solaire. Certains astéroïdes peuvent faire partie de plusieurs regroupements. Il est à noter que si le terme de géocroiseur est répandu, ceux qui suivent sont très rarement employés.

- Herméocroiseurs : croisent l'orbite de Mercure
- Cythérocroiseurs : croisent l'orbite de Vénus
- Géocroiseurs : croisent l'orbite de la Terre
- Aréocroiseurs : croisent l'orbite de Mars
- Zénocroiseurs : croisent l'orbite de Jupiter
- Kronocroiseurs : croisent l'orbite de Saturne
- Ouranocroiseurs : croisent l'orbite d'Uranus
- Poséidocroiseurs : croisent l'orbite de Neptune
- Hadéocroiseurs : croisent l'orbite de Pluton (lequel n'est plus reconnu comme planète depuis 2006).

Astéroïdes ou planètes ?

Les avancées techniques aidant, dès 1980, le nombre d'objets découverts augmenta considérablement et des corps très massifs, de la taille de Pluton, alors considérée comme une planète, furent observés. Les scientifiques en vinrent alors à se demander comment différencier une planète d'un gros astéroïde.

Rappelons aussi que, selon la théorie de Laplace (astronome en 1796), les planètes et le Soleil seraient nées simultanément d'un nuage de gaz et de poussières en rotation. Issus de ce nuage, une multitude de planétoïdes seraient le résultat d'une histoire mouvementée, caractérisée par une succession de processus antinomiques d'accrétion et de collisions. Astéroïdes et planètes ayant été formés à partir de la même matrice protoplanétaire, on peut se demander sur quels critères physiques s'appuyer pour les différencier. La très grande majorité des astéroïdes est de forme très irrégulière, ce qui contraste avec les formes quasi-sphériques des planètes ; cependant, les très gros astéroïdes, tels Cérès, sont également quasi-sphériques. La nature de la surface n'entre pas non plus en compte dans la différenciation. La différenciation se fait essentiellement par la taille :

Un astéroïde se définit implicitement comme un corps n'excédant pas 1 000 km de diamètre et gravitant autour du Soleil. Ce diamètre correspond approximativement à celui de Cérès, le plus gros astéroïde de la ceinture principale.

Toutefois, de nouveaux objets découverts ont défrayé la chronique : (20000) Varuna, (28978) Ixion, (50000) Quaoar, (90377) Sedna, (90482) Orcus et (136199) Éris. Détectés soit sur des orbites similaires à Pluton, soit au-delà, ces objets ont des tailles comprises entre 1 300 km et 2 600 km et se situent à la frontière entre planètes et astéroïdes.

En août 2006, l'Union astronomique internationale, a revu la notion de planète et défini une nouvelle classe d'objets, les planètes naines. Ainsi, Pluton, Éris et Cérès furent classés dans la catégorie « planète naine », bien que Cérès continue à être également considérée comme un astéroïde.

Astéroïdes et comètes

Article détaillé : Astéroïde cométaire.

Astéroïdes et comètes sont des petits corps du Système solaire. Les premiers ne présentent pas d'activités lorsqu'ils passent au périhélie (formation d'une chevelure ou d'une queue). Une minorité a cependant été observée avec une activité cométaire, comme le Centaure (2060) Chiron ou 133P/Elst-Pizarro dans la ceinture principale. Ces objets sont catalogués à la fois comme astéroïde et comète.

Les astéroïdes appartenant à la catégorie des damocloïdes sont des objets possédant une orbite à longue période et une forte excentricité tout comme les comètes périodiques. Il s'agit peut-être de noyaux cométaires devenus inactifs.

Selon une étude publiée dans la revue *Nature* en 2009, 20 % des objets de la ceinture principale seraient des noyaux cométaires. Ces noyaux, provenant de la ceinture de Kuiper, auraient été propulsés vers le Système solaire interne lors du grand bombardement tardif provoqué notamment par la migration de Neptune.

Classification selon leur composition

Article détaillé : Classification spectrale des astéroïdes.

La composition des astéroïdes est évaluée d'après leur spectre optique mesurant la lumière réfléchi, qui correspond à la composition de leur surface. Celle des météorites est connue avec l'analyse des fragments retrouvés sur Terre.

Le système classique de classification spectrale des astéroïdes, élaboré en 1975, les classe selon un système basé sur leur couleur, leur albédo et leur spectre optique. Ces propriétés étaient censées correspondre à la composition de leur surface. Il faut noter, cependant, que certains types sont plus facilement détectables que d'autres. Ainsi, ce n'est pas parce que la proportion d'astéroïdes d'un type donné est plus importante qu'ils sont effectivement plus nombreux. Il existe des systèmes de classification plus récents, dont deux se démarquent : Tholen et SMASS.

À l'origine, la classification des astéroïdes se basait sur des suppositions au sujet de leur composition :

- type C - carbone
- type S - silice
- type M - métallique

Ceci a porté à confusion, car le type spectral d'un astéroïde ne garantit pas sa composition.

Astéroïdes notables

Numéro	Nom	Diamètre (km)	Date de découverte	Commentaire
87	Sylvia	260,9	16 mai 1866	Premier système triple d'astéroïdes
243	Ida	56×24×21	29 septembre 1884	Visité par Galileo
	S/1993 (243) 1 Dactyl	1,4	28 août 1993	Lune d'Ida
253	Mathilde	66×48×46	12 novembre 1885	Visité par NEAR Shoemaker
433	Éros	13×13×33	13 août 1898	Visité par NEAR Shoemaker, il est le premier géocroiseur à avoir été découvert ^[5]
624	Hector	105	10 février 1907	Plus grand astéroïde troyen Jovien découvert



253 Mathilde, de classe C.

951	Gaspra	19×12×11	30 juillet 1916	Visité par Galileo
2060	Chiron	200	18 octobre 1977	1 ^{er} Centaure découvert
3753	Cruithne	5	10 octobre 1986	Orbite particulière co-orbitale avec la Terre
4179	Toutatis	4,5×2,4×1,9	4 janvier 1989	Croisa de près la Terre en 2004
4769	Castalia	1,8×0,8	9 août 1989	Premier astéroïde dont on a eu une image radar
5261	Eurêka		20 juin 1990	Premier astéroïde Troyen martien découvert (point L ₅)

Les astéroïdes et la Terre

Les risques d'impacts avec la Terre

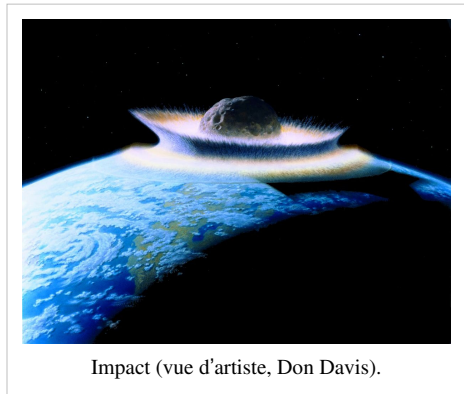
Les astronomes doivent conventionnellement communiquer leurs observations d'astéroïdes nouveaux au Minor Planet Center ^[6]. Le risque est identifié et fait l'objet d'une remédiation autant que possible : lire *stratégies de déviation des astéroïdes*.

Cette section **ne cite pas suffisamment ses sources** (juillet 2010). Pour l'améliorer, ajouter en note des références vérifiables ou les modèles {{Référence nécessaire}} ou {{Référence souhaitée}} sur les passages nécessitant une source.

Lorsqu'un astéroïde ou un fragment d'astéroïde pénètre dans l'atmosphère de la Terre, les frottements avec cette dernière provoquent sa combustion. Si l'objet est assez volumineux, cette combustion n'est pas complète et il percute alors la surface de la Terre. On le nomme alors météorite^[7].

En 2010, plus de 5 400 astéroïdes et comètes ont été détectés dans un rayon de 195 millions de kilomètres autour du Soleil, assez près de notre planète pour que les astronomes les classent dans la catégorie des objets proches de la terre (*Near Earth Objects*, NEO) ou géocroiseurs. Ceux qui mesurent plus de 140 m de large et passent à moins de 7,4 millions de kilomètres de l'orbite de la Terre sont considérés comme dangereux. Au 30 avril 2008, les astronomes avaient catalogué plus de 900 corps célestes de ce type, dont (99942) Apophis, un astéroïde qui passera à 32 000 km de la terre en 2029. La probabilité qu'un de ces objets dangereux entre en collision avec la Terre est quasi nulle à l'échelle du temps humain, mais quasi certaine à l'échelle du temps cosmique, le phénomène d'accrétion n'étant nullement terminé. C'est la raison pour laquelle des observateurs surveillent constamment leur position — recalculant leur orbite et les risques d'impact qu'ils présentent — et scrutent les régions voisines de l'espace à la recherche de nouvelles menaces.

Par exemple l'observatoire de Remanzacco a signalé que le 27 juin 2011, à 17 heures TU, un astéroïde d'un diamètre compris entre 5 et 20 m était passé à 12 300 km de la Terre. Cet évènement se reproduit, en moyenne, une fois tous les six ans d'après la NASA.



Impact (vue d'artiste, Don Davis).

Risques d'impacts selon la taille

- Taille du corps : < 10 m :
 - Fréquence d'impact : 200 fois par an ;
 - Conséquence d'une chute sur la Terre : désintégration dans l'atmosphère.
- Taille du corps : 10 à 100 m :
 - Fréquence d'impact : une fois par siècle (exemples connus : Meteor Crater, Arizona, il y a 50 000 ans ; Tounghouska, Sibérie, 30 juin 1908) ;
 - Conséquence d'une chute sur la Terre : destruction d'une ville, raz-de-marée.
- Taille du corps : 100 m à 1 km :
 - Fréquence d'impact : une fois tous les 5 000 à 30 000 ans
 - Conséquence d'une chute sur la Terre : environ cinq millions à cent millions de morts.
- Taille du corps : > 5 km :
 - Fréquence d'impact : une fois tous les 100 millions d'années ;
 - Conséquence d'une chute sur la Terre : hiver d'impact, disparition de l'humanité, catastrophe globale.
- Taille du corps : de 100 à 200 km
 - Fréquence d'impact : une fois tous les 1 milliard d'années ;
 - Conséquence d'une chute sur la Terre : vaporisation des océans, disparition de toute forme de vie sur Terre.

Exploitation minière des astéroïdes

Dans les années 2010, des projets d'exploitation minière des astéroïdes sont lancés par des sociétés privées du secteur spatial, Planetary Resources et Deep Space Industries. Les astéroïdes sont en effet riches en matériaux précieux, tels les métaux lourds et les terres rares, présents sur leur surface car ces corps sont trop petits pour avoir subi la différenciation planétaire : la valeur commerciale d'un km³ d'astéroïde, hors frais d'exploitation, est estimée à 5000 milliards d'euros^[8]. La NASA a également pour ambition de capturer un petit astéroïde (de 7 à 10 mètres de diamètre, avec un poids maximal de 500 tonnes) et de le mettre en orbite stable autour de la Lune. Les faisabilités et le coût de ces projets font l'objet de débats, seule la sonde Hayabusa ayant réussi en 2010 à ramener quelques poussières de l'astéroïde Itokawa.

Notes et références

- [1] Marc Séguin et Benoit Villeneuve. *astronomie et astrophysique*, éditions du renouveau pédagogique. .
- [2] « Bestiaire des petits corps du Système solaire », in Ciel et Espace Hors Série , octobre 2010.
- [3] MPC Archive Statistics, "Orbits and Names" (<http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/ArchiveStatistics.html>)
- [4] « Découverte du premier astéroïde troyen de la Terre » (http://www.maxisciences.com/astéroïde/decouverte-du-premier-asteroïde-troyen-de-la-terre_art16027.html), **Maxisciences**, **29 juillet 2011**
- [5] Astronomie, premier contact de Gaétan Morissette.
- [6] Astéroïdes : de la vie à la mort (http://www.arte.tv/fr/content/tv/02__Universes/U1__Comprendre__le__monde/03-Dossiers/2011.08.06_20La_20Nuit_20des_20etoiles/01_20Programmes/07_20ART_20Asteroides/4059588.html), dans le cadre du programme "La nuit des étoiles" sur Arte
- [7] Christiane FROESCHLÉ, Claude FROESCHLÉ, Patrick MICHEL, « ASTÉROÏDES », Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 22 octobre 2012. URL : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/asteroides/>
- [8] Jean-Pierre Luminet, « Pourquoi et comment exploiter les astéroïdes ? », émission *Science publique* sur France Culture, 26 avril 2013

Comète

🔗 Pour les articles homonymes, voir comète (homonymie).

Une **comète** est, en astronomie, un petit corps constitué d'un noyau de glace et de poussière en orbite (sauf perturbation) autour d'une étoile. Lorsque son orbite, qui a généralement la forme d'une ellipse très allongée, l'amène près de cette étoile (par exemple le Soleil dans le Système solaire), la comète est exposée à diverses forces émanant de cette dernière : vent stellaire, pression de radiation et gravitation. Le noyau s'entoure alors d'une sorte de fine atmosphère brillante constituée de gaz et de poussières, appelée chevelure ou *coma*, souvent prolongée de deux traînées lumineuses composées également de gaz et de poussières, les queues (une de gaz ionisé et une de poussières), qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de millions de kilomètres.

Dans le Système solaire, quand elles s'approchent suffisamment de la Terre ou que leur magnitude est importante, les comètes deviennent visibles à l'œil nu (parfois même de jour) et peuvent être spectaculaires ; elles sont alors classées comme « grandes comètes ».

Les comètes se distinguent des astéroïdes, autres petits corps, par l'activité de leur noyau. Cependant, les observations récentes de plusieurs astéroïdes présentant une activité cométaire, notamment dans la ceinture principale, tend à rendre de plus en plus floue la distinction entre comète et astéroïdes. Elles proviendraient de deux réservoirs principaux du Système solaire : ceinture de Kuiper et nuage d'Oort, tandis que les comètes interstellaires, ayant une origine extérieure restent hypothétiques.



La comète Hale-Bopp en 1997.

Origine du nom

Le mot « comète » vient du grec *komētēs* (κομήτης) qui signifie « chevelu ».

Description

Une comète se compose essentiellement de trois parties : le noyau, la chevelure et les queues. Le noyau et la chevelure constituent la tête de la comète.

Lors du dernier passage de la comète de Halley en 1986, six sondes spatiales (ICE, Vega-1, Vega-2, Sakigake, Suisei et Giotto) ont frôlé la comète et enregistré des données et des images précieuses pour notre connaissance des comètes.

Le noyau

Article détaillé : Noyau d'une comète.

L'hypothèse de constitution du noyau la plus communément admise et confirmée par les récentes expériences spatiales de spectroscopie, est qu'il serait un corps solide constitué pour environ moitié de glaces (essentiellement d'eau, puis de monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, éthane, acétylène) et environ moitié de matières météoritiques agglomérées (modèle dit de la « boule de neige sale » proposé par Fred Whipple en 1950, « modèle en couche » proposé par Michael J. Belton (en) suite à la mission *Deep Impact*). Ces glaces se subliment (lorsque la comète est à une distance de 1 à 3 unités astronomiques du Soleil) sous l'action du rayonnement solaire et donnent naissance à la chevelure, puis aux queues^[1].

Le diamètre du noyau (non sphérique, certaines parties étant lisses, d'autres rugueuses) est estimé entre quelques centaines de mètres et quelques dizaines de kilomètres. La période de rotation va de 5 à 70 heures.

Le noyau de comète de plus grande dimension est celui de la comète de Halley : de forme oblongue, il mesure environ 15 kilomètres, pour un volume estimé à 500 kilomètres cubes et une masse de 10^{14} kilogrammes, ce qui correspond à une masse volumique moyenne de 200 kilogrammes par mètre cube (un cinquième de celle de l'eau dans les conditions standards à la surface de la Terre).

La présence de molécules organiques dans les comètes est un élément en faveur de la théorie de la panspermie. Un scientifique de la NASA, Richard B. Hoover (en), prétend ainsi en 2011 avoir trouvé des bactéries fossiles extraterrestres dans des comètes, mais la NASA a pris ses distances avec ces travaux, leur reprochant un manque d'évaluation par les pairs.

La chevelure

La chevelure, ou *coma*, est constituée d'atomes, de gaz et de poussières issus du noyau de la comète et libérés sous forme de jets. Très rapidement^[Quand ?], le rayonnement ultraviolet provenant du Soleil casse les atomes et les molécules (phénomène d'ionisation). La brillance de la chevelure est plus forte à proximité du noyau.

Son diamètre est généralement compris entre 50 000 et 250 000 kilomètres, avec des limites extrêmes de 15 000 et 1 800 000 kilomètres. La chevelure s'identifie fréquemment avec la tête de la comète, étant donné le faible diamètre relatif du noyau.

Les analyses du gaz de la chevelure de la comète de Halley indiquent que celle-ci contient 80 % d'eau, 10 % de monoxyde de carbone, 3 % de dioxyde de carbone, 2 % de méthane, moins de 1,5 % d'ammoniac et 0,1 % d'acide cyanhydrique.

Les queues

Article détaillé : Queue (comète).

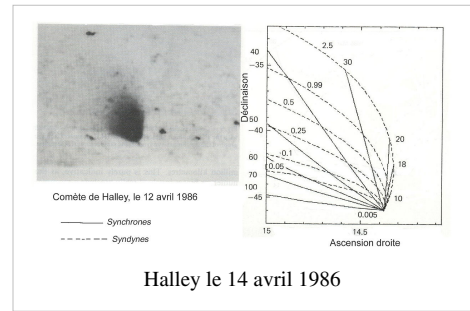
Une comète importante possède en général deux queues visibles :

- Une queue constituée d'un plasma, rectiligne et se maintenant à l'opposé du Soleil (comme une ombre), poussée à haute vitesse (de l'ordre de 500 km/s) par le vent solaire ; les changements de polarité du vent solaire produisent des ruptures dans la queue de plasma qui se reconstitue dans les heures qui suivent.



Queue bleue d'Hale-bopp, due essentiellement à l'ion CO^+ ^[2]

- Une queue plus large constituée de poussières poussées par la pression de radiation solaire, et incurvée dans le plan de l'orbite par la gravité du soleil. Grâce aux travaux de Michael Finson et Ronald Probstein (1968), qui ont mis en œuvre les hypothèses de Fiodor Bredikhine (1885) qui faisaient elles-mêmes suite à celles de Bessel, on peut modéliser la queue de poussières. Les trajectoires (képlériennes) des grains peuvent ainsi être analysées en fonction de la durée d'émission (synchrones) ou en fonction de leur taille (syndynes).



- Une troisième enveloppe, invisible avec des instruments optiques, mais décelée grâce à la radioastronomie, est la queue d'hydrogène qui s'étend sur des dimensions considérables.
- Une anti-queue, constituée de gros grains qui, par effet de perspective lorsque la Terre traverse le plan de l'orbite cométaire, semble pointer vers le Soleil.

Leurs dimensions sont considérables : des longueurs de 30 à 80 millions de kilomètres sont relativement fréquentes.

Orbites

Comme toute orbite céleste, celles des comètes sont définies à l'aide de six paramètres (éléments orbitaux) : la période P , argument du périhélie ω , la longitude du nœud ascendant Ω , l'inclinaison i , la distance du périhélie q et l'excentricité e . Lorsqu'on découvre une nouvelle comète, après au moins trois observations distinctes, on modélise une première orbite en prenant $e = 1$: par défaut, l'orbite est supposée parabolique. Lorsque plus d'observations ont pu être effectuées, une meilleure orbite osculatrice est calculée en affinant la valeur de l'excentricité.

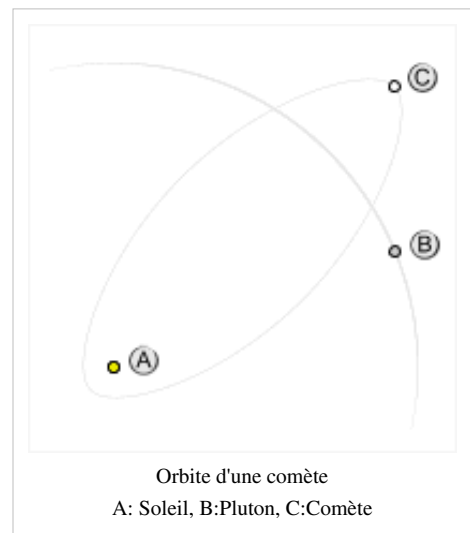
La majorité des comètes répertoriées ont une orbite elliptique et gravitent autour du Soleil : ce sont les comètes périodiques, leur période pouvant être modifiée par des perturbations gravitationnelles.

Les comètes sont dites, par convention, à courte période quand leur période est inférieure à 200 ans. Celles-ci seraient originaires de la ceinture de Kuiper, passeraient par un stade de centaure avant d'atteindre le Système solaire interne.

Les comètes dont la période est supérieure à 200 ans, appelées comètes à longue période, sont supposées provenir du Système solaire externe (objets détachés, objets éjectés dans le nuage de Hills ou le nuage d'Oort par le passage d'étoiles et de nuages moléculaires et réinjectés dans le Système solaire par le même type de perturbation gravitationnelle).

Les comètes attachées au Système solaire ont une orbite dont l'excentricité est inférieure à 1 (orbites elliptiques, donc comètes périodiques). Il existe quelques rares cas de comètes dont l'excentricité est supérieure à 1 (orbites hyperboliques, donc comètes non périodiques) : soit il s'agit de comètes provenant de l'extérieur du Système solaire (moins d'une par siècle^[3]), soit il s'agit de comètes dont l'orbite a subi des perturbations gravitationnelles telles que, en l'absence de perturbations supplémentaires modifiant leur orbite en sens inverse, elles vont sortir du Système solaire.

Les comètes rasantes se caractérisent par un périhélie extrêmement proche du Soleil, parfois à quelques milliers de kilomètres seulement de la surface de celui-ci. Alors que les petites comètes rasantes peuvent complètement s'évaporer lors d'un tel passage, celles de plus grandes tailles peuvent survivre à plusieurs passages au périhélie.



Cependant, l'importante évaporation et les forces de marée entraînent souvent leur fragmentation.

Modification des éléments orbitaux

Lorsqu'une comète passe à proximité des grosses planètes (essentiellement Jupiter), elle subit des perturbations gravitationnelles qui peuvent modifier certains de ses éléments orbitaux. C'est ainsi que la comète Shoemaker-Levy 9, initialement en orbite autour du Soleil, a été capturée par Jupiter puis a finalement percuté cette dernière en 1994 parce que lors de son précédent passage, cette comète était passée suffisamment près de cette planète pour qu'à la fois son orbite soit modifiée et son noyau décomposé en une multitude d'éléments répartis le long de l'orbite.

Les éléments orbitaux d'une comète peuvent aussi être modifiés de manière non prévisible par l'activité du noyau (perturbations non gravitationnelles).

Pour ces raisons les éléments orbitaux d'une comète ne sont jamais définitifs et doivent être recalculés lors de chaque passage (dans le cas des comètes à courte période).

Paramètres de quelques comètes

Voici quelques-uns des paramètres de quelques comètes connues.

Comète	Période (années)	Paramètres de l'orbite		
		Excentricité	Aphélie (ua)	Périhélie (ua)
1P/Halley	75,31	0,967	35,1	0,586
2P/Encke	3,30	0,847	4,096	0,339
Hale-Bopp (C/1995 O1)	2537	0,994	371,146	0,914
108P/Ciffréo	7,23	0,542	5,774	1,713
13P/Olbers	69,51	0,930	32,635	1,178
West (C/1975 V1-A)	558306	0,999	13560,217	0,196
109P/Swift-Tuttle	133,28	0,963	51,225	0,959
3D/Biela	6,64	0,751	6,190	0,879
Bradfield (C/2004 F4)	3679	0,999	476,543	0,168
Bennett (C/1969 Y1)	1678	0,996	281,892	0,537
Morehouse (C/1908 R1)	∞	1,0007	∞	0,945

Comètes et étoiles filantes

Les essaims d'étoiles filantes (par exemple : Perséides, Orionides, Géminides) sont associés à des comètes. Les poussières perdues par une comète lors d'un passage se répartissent le long de l'orbite de celle-ci en formant une sorte de vaste nuage. S'il advient que la Terre, dans son mouvement orbital annuel, traverse un tel nuage, on assiste alors à une pluie d'étoiles filantes plus ou moins dense suivant l'activité et la nature de la comète. Ces « étoiles filantes » semblent provenir d'un même point du ciel appelé le radiant, un peu comme lorsqu'on est dans un tunnel rectiligne et que l'on a l'impression que les bords de celui-ci convergent vers un même point. L'essaim est nommé d'après la constellation où est situé le radiant (par exemple : Persée pour les Perséides, les Gémeaux pour les Géminides).

Les poussières cométaires, lorsqu'elles pénètrent dans la haute atmosphère de la Terre s'échauffent et s'ionisent, produisant la traînée lumineuse que l'on connaît.

L'intensité d'un essaim météoritique est variable et dépend notamment du réensemencement en poussières lors de chaque passage des comètes.

L'eau sur Terre découlerait probablement des comètes, si ce n'est des astéroïdes

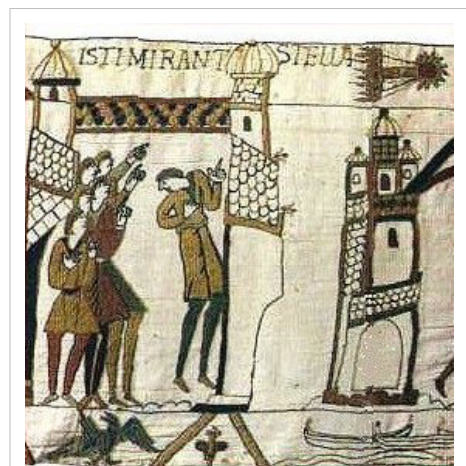
Une équipe internationale a pu décrypter, par les données du télescope spatial Hershel, que l'eau de la comète Hartley 2 ressemblait parfaitement, au niveau chimique, à celle des océans de la terre. Jusqu'ici, on croyait que les astéroïdes étaient les sources les plus crédibles d'avoir pu amener de l'eau sur notre planète. Lors de sa formation, la Terre était très chaude et ses petites réserves d'eau se seraient évaporées. L'eau que l'on retrouve aujourd'hui serait présente grâce au bombardement de corps célestes, quelques dizaines de millions d'années après la naissance de la Terre. La plupart des comètes viennent du nuage de Oort autour du Système solaire. Les comètes de ce secteur renferment environ 50 % de glaces d'eau, bien que des analyses aient démontré que cette eau contenait beaucoup plus de deutérium que celle de nos océans. Les chondrites carbonées, astéroïdes issus de la ceinture située entre Mars et Jupiter, similaire à notre eau, s'avéraient alors être les meilleurs candidats. Dorénavant, les comètes de type Hartley 2 rivalisent avec eux, ne provenant pas du nuage de Oort mais de la ceinture de Kuiper^[4].

Histoire

Premières observations

Dans l'Antiquité, les premières traces écrites d'observations de comètes figurent dans des annales chinoises (à l'époque ces chroniques sont essentiellement de la scapulomancie gravée sur carapace de tortues ou omoplates d'animaux) de la dynastie Shang datant de 1059 av. J.-C. (le plus ancien passage attesté de la comète de Halley remontant à l'an 240 avant J.-C est consigné dans ces archives chinoises^[5]), mais aussi à la même époque sur des tablettes en écriture cunéiforme chaldéennes^[6]. Le plus ancien dessin date du IV^e siècle av. J.-C. : sur un livre de soie découvert en 1974 dans la tombe du marquis de Dai en Chine, sont représentés 29 types de comètes^[7].

Les premières interprétations sur la nature des comètes viennent de la philosophie naturelle grecque. Aristote dans son traité *Du ciel* divise le cosmos en monde céleste, composé d'éléments sphériques parfaits et monde sublunaire avec ses objets imparfaits. Dans son traité *Meteorologia*, Aristote classe les comètes dans le monde sublunaire : elles sont selon lui des phénomènes atmosphériques de la sphère de l'air remontant dans la sphère du feu. Au contraire, les pythagoriciens considèrent qu'il s'agit de planètes rarement observables. Diodore de Sicile y voit des poutres enflammées alimentant le soleil^[8]. Chez les Romains, Sénèque reprend la théorie d'Apollonius de Rhodes^[9] selon laquelle les comètes sont des astres errants revenant à des périodes trop longues à l'échelle d'une vie humaine^[10]. Malgré ces interprétations de savants et de philosophes, la croyance populaire en fait à cette époque (et jusqu'au XX^e siècle) des signes annonciateurs, le plus souvent de mauvais augure, plus rarement propitiatoires : ainsi les Chaldéens et les Mésopotamiens leur offrent de l'encens pour infléchir le funeste présage ; certaines femmes grecques et romaines en deuil délient leurs cheveux (d'où le terme de komêtês, « chevelu ») pour manifester leur chagrin ; certains astrologues égyptiens pensent que sacrifices et prières ne peuvent conjurer leur pouvoir annonciateur ; les astrologues au Moyen Âge les associent à des morts illustres : comète de 451 pour la mort d'Attila, de 632 pour Mahomet, de 1223 pour Philippe-Auguste, comète de Halley pour Henri IV, etc. Outre ces présages funestes, elles sont également associées à des batailles (bon augure pour les Normands, mauvais pour les Anglo-saxons lors de la Bataille d'Hastings)^[11]. En 1472, l'astronome Johann Müller observe une comète à Nuremberg. Il fonde la cométographie. Paolo Toscanelli observe les comètes de 1433, 1449, 1456 et calcule leur position.



Comète de Halley dessinée sur la tapisserie de Bayeux, présage guerrier sur la bataille d'Hastings ?

Leur nature véritable comme leur périodicité n'ont été trouvées qu'à partir de la Renaissance. En 1531, Petrus Apianus et Girolamo Fracastoro observent indépendamment que la queue des comètes est orientée à l'opposé du Soleil (des astronomes chinois au VII^e siècle l'avaient déjà remarqué), mettant ainsi en évidence l'effet des vents solaires. Tycho Brahe montre en 1577, grâce au phénomène de parallaxe, que les comètes ne sont pas un phénomène sublunaire comme on le croyait couramment à son époque. En 1609, Johannes Kepler suppose, dans son ouvrage *De cometis*, que les comètes naissent par génération spontanée et suivent une trajectoire rectiligne à une vitesse variable. En 1652, il est contredit par Pierre Gassendi qui, dans son *Traité sur les comètes*, leur attribue une vitesse constante et par Seth Ward qui comprend qu'elles suivent des ellipses, d'où le fait qu'elles ne soient visibles que lorsqu'elles sont suffisamment proches de la terre et du soleil.

Puis Edmond Halley, grâce à ses travaux effectués depuis 1682 sur le calcul de la trajectoire cométaire par la gravitation, émet en 1705 l'hypothèse que les apparitions cométaires de 1531, 1607 et 1682, ne sont en fait qu'une seule et même comète dont il prédit l'apparition suivante en 1758 (voir comète de Halley), ce qui fit sa célébrité.

John Flamsteed propose en 1680 une relation d'attraction-répulsion entre comètes et le Soleil.

Après avoir d'abord réfuté cette théorie, Isaac Newton prouve dans son œuvre majeure, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, que les comètes obéissent aux mêmes lois de mécanique céleste que les planètes, et possèdent une masse.

Connaissances actuelles

Une comète est un objet céleste de forme irrégulière, pouvant atteindre une dizaine de kilomètres de diamètre, constitué de glace et de poussière. Les comètes étaient vues à l'origine comme un halo lumineux qui apparaissait épisodiquement dans le ciel, et qui était interprété, selon son aspect et la période historique, comme un signe de bon ou mauvais augure. En fait, elles ne deviennent visibles que quand elles se rapprochent du Soleil, l'action de ce dernier provoque des émissions de gaz et de poussières qui réfléchissent la lumière solaire.

Les premiers résultats obtenus par la mission Stardust ont considérablement modifié les hypothèses concernant la formation des comètes. En effet les grains prélevés dans la coma de la comète Wild 2 par cette mission et ramenés sur Terre contiennent de l'olivine, matériau qui ne peut être synthétisé qu'à de très hautes températures (1 300 K). On est donc amené à penser que les noyaux de comètes ont été formés à proximité du Soleil et ont par la suite été éjectés vers le Nuage d'Oort. Pourtant les premières interprétations données de l'analyse des grains rapportés par Stardust doivent être prises avec circonspection : on soupçonne des interactions entre le matériau qui les contenait (aérogel) avec l'atmosphère terrestre.

Notamment du fait des expériences spatiales, l'étude scientifique des comètes au XX^e siècle a révélé leur vraie nature.

La récupération in situ n'est pas l'unique moyen de récupérer de la matière cométaire. La Terre traverse continuellement divers nuages de poussières stellaires et notamment de la matière cométaire lorsque l'orbite de la Terre coïncide avec le sillage d'une comète. C'est ainsi que depuis 1982, la NASA récupère à l'aide d'avion pouvant voler à haute altitude de la poussière cométaire.

Les missions spatiales

Les connaissances sur les comètes, notamment celles de leurs noyaux, ont bien progressé depuis l'avènement des expériences spatiales. Au total, ce sont actuellement près de dix missions spatiales qui ont contribué à mieux connaître les noyaux cométaires.

- La sonde européenne Giotto, lancée le 2 juillet 1985 par une fusée Ariane 1 pour approcher le noyau de la comète de Halley à moins de 500 km.
- La sonde japonaise Sakigate, en direction de Halley.
- La sonde japonaise Suisei, en direction de Halley.
- Les deux sondes soviétiques Vega 1 et Vega 2, qui, après avoir détaché un module vers la planète Vénus a pris un certain nombre de clichés de la comète de Halley.
- La sonde américaine Deep Space 1, lancée en 2001, qui a étudié le noyau de la comète 19P/Borrelly.
- La sonde américaine Deep Impact, lancée en 2004, avait pour objectif de creuser un cratère artificiel par collision entre le noyau de la comète Tempel 1 et un impacteur ; rebaptisée EPOXI elle a survolé la comète 103P/Hartley en novembre 2010.
- La sonde américaine Stardust, lancée le 7 février 1999, a rencontré la comète Wild 2 le 2 janvier 2004, prélevé de la poussière cométaire ramenée sur Terre le 15 janvier 2006 ; en février 2011 elle est réutilisée pour survoler la comète Tempel 1.
- La sonde européenne Rosetta lancée en 2005 en direction de la comète 67P/Tchourioumov-Guerassimenko qu'elle atteindra en novembre 2014.
- La sonde européenne SoHO destinée à étudier le Soleil en continu et qui de ce fait a permis de découvrir des comètes qui finissaient leur vie en « tombant » dans le Soleil, appelées comètes rasantes.
- Les satellites jumeaux de la mission américaine STEREO destinée à l'étude du Soleil, ont permis, tout comme SoHO, la découverte de nombreuses comètes rasantes.

Désignation

Bien avant la publication en 1705 d'Edmond Halley sur la comète portant son nom, ces petits corps du Système solaire étaient considérés comme des phénomènes isolés, uniques et non périodiques, aussi les comètes ne portaient pas de nom.

Mise à part la comète de Halley, ou celle de Encke, le nom d'une comète est attribué officiellement par une commission de l'Union Astronomique Internationale (UAI, IAU en anglais), dont le siège est à Washington, D.C.. Certaines comètes historiques, spectaculaires et aisément visibles à l'œil nu, n'ont aucun nom officiel et sont simplement désignée comme *grande comète*. Par exemple la grande comète de 1811.

Traditionnellement, on donne aux comètes le nom de son (ou de ses) découvreur(s), jusqu'à trois noms maximum. Dans le cas des comètes Halley, Encke ou Lexell, il s'agit du nom des personnes qui ont déterminé la périodicité de ces astres. Quelques comètes sont nommées d'après le lieu de leur découverte (la comète Lulin) et un nombre de plus en plus important reçoit le nom d'un programme de recherche automatique, comme LINEAR ou NEAT, ou bien celui d'un satellite artificiel, comme SOHO.

En plus du nom, les comètes reçoivent une référence officielle dont l'attribution obéit à un nouveau procédé (préfixe selon la période suivie d'une désignation séquentielle suivant l'ordre des découvertes : l'année, puis une lettre majuscule identifiant le demi-mois de la découverte, puis un nombre indiquant l'ordre de la découverte dans ce demi-mois) depuis le 1^{er} janvier 1995^[12].

Ancien procédé

Avant le 1^{er} janvier 1995 les comètes recevaient une désignation provisoire constituée par l'année de la découverte suivie d'une lettre en minuscule correspondant à l'ordre de la découverte. Par exemple, 1965, sixième comète trouvée pendant l'année 1965. Plus tard, le nom définitif lui était attribué selon les critères suivants : l'année du passage au périhélie, suivie d'un numéro noté en chiffres romains indiquant l'ordre chronologique du passage au périhélie (exemple : 1994 IV, quatrième comète passée au périhélie en 1994).

Ce procédé comportait de nombreux inconvénients : la multiplication des découvertes épuisait l'alphabet. Quand on découvrait une 27^e comète dans l'année, il fallait recommencer l'alphabet en faisant suivre la lettre du chiffre 1 (comme 1991a1). Les découvertes de comètes après leur passage au périhélie rendaient difficile une désignation officielle cohérente. Les comètes à courte période multipliaient les désignations, une nouvelle étant attribuée à chacun de leurs retours.

Nouveau procédé

Depuis le 1^{er} janvier 1995, une nouvelle nomenclature, inspirée par celle appliquée aux astéroïdes, est attribuée comme ceci :

1. Une lettre servant à identifier le type de comète : C indique une comète à longue période (supérieure à 200 ans) ou non périodique. P indique une comète à courte période (inférieure à 200 ans). C'est utilisé pour les comètes disparues ou éteintes. X pour une comète dont l'orbite n'a pu être calculée.
2. L'année de la découverte.
3. Une lettre majuscule correspondant à la quinzaine du mois de la découverte (Voir tableau).
4. Un chiffre précisant l'ordre chronologique de découverte durant cette quinzaine.
5. Le nom du (ou des) découvreur(s).

Ainsi pour C/1995 O1 Hale-Bopp :

- C/ indique qu'il s'agit d'une comète à longue période (éventuellement non périodique).
- 1995 indique que la comète a été découverte en 1995.
- O indique qu'elle a été découverte au cours de la deuxième quinzaine de juillet.
- 1 indique qu'il s'agit de la première comète découverte au cours de cette période.
- Hale-Bop est le nom de ses deux découvreurs, Alan Hale et Thomas Bop.

Lorsqu'il a été vu plusieurs comètes à l'occasion d'une même observation, un numéro d'ordre est ajouté après le nom de l'observateur (comète Hartley 2 par exemple).

Pour les comètes périodiques dont le retour a été observé au moins une fois, la désignation subit une légère modification.

Par exemple la comète P/2001 JO ENTA a été retrouvée en 2008, conformément aux calculs de sa période orbitale. Sa périodicité ne faisant aucun doute, elle a reçu l'appellation définitive 2D/ENTA, indiquant qu'il s'agit de la 207^e comète périodique confirmée.

Tableau de correspondance des lettres aux quinzaines

Note : les lettres I et Z ne sont pas utilisées.

Mois	Quinzaine	Lettre
Janvier	du 1 ^{er} au 15	A
	du 16 au 31	B
Février	du 1 ^{er} au 15	C
	du 16 au 28 ou 29	D
Mars	du 1 ^{er} au 15	E
	du 16 au 31	F
Avril	du 1 ^{er} au 15	G
	du 16 au 30	H
Mai	du 1 ^{er} au 15	J
	du 16 au 31	K
Juin	du 1 ^{er} au 15	L
	du 16 au 30	M
Juillet	du 1 ^{er} au 15	N
	du 16 au 31	O
Août	du 1 ^{er} au 15	P
	du 16 au 31	Q
Septembre	du 1 ^{er} au 15	R
	du 16 au 30	S
Octobre	du 1 ^{er} au 15	T
	du 16 au 31	U
Novembre	du 1 ^{er} au 15	V
	du 16 au 30	W
Décembre	du 1 ^{er} au 15	X
	du 16 au 31	Y

Liste de comètes

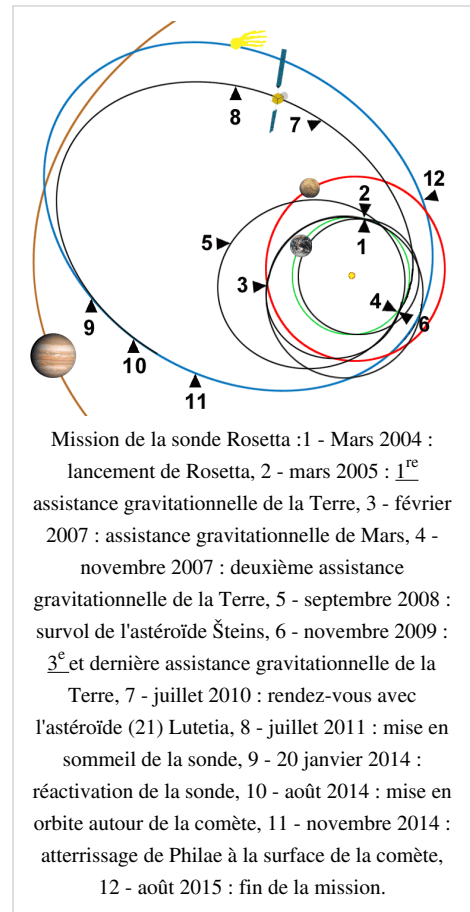
Article détaillé : Liste de comètes.

Le Minor planet Center répertorie à l'heure actuelle 3 800 comètes^[13]. L'une des plus célèbres est la comète de Halley, qui réapparaît tous les 75 ou 76 ans.

Parmi les autres comètes les plus célèbres, on peut citer :

- C/2006 P1 McNaught, très brillante,
- C/1995 O1 (Hale-Bopp), probablement la comète la plus observée, ayant été visible pendant 18 mois,
- C/1996 B2 Hyakutake, également baptisée Grande comète de 1996,
- D/1993 F2 Shoemaker-Levy 9, détruite par collision avec Jupiter en juillet 1994,
- 109P/Swift-Tuttle,
- 55P/Tempel-Tuttle,
- 19P/Borrelly, visitée par la sonde Deep Space 1,
- 9P/Tempel, première comète à être visitée par deux sondes : Deep Impact en 2005, qui lui a envoyé un impacteur, et Stardust en 2011,
- Wild 2, survolée par la sonde Stardust,
- Hartley 2, survolée par la sonde Deep Impact.

Enfin, comète 67P/Tchourioumov-Guerassimenko, a été définie par l'ESA comme objectif d'une visite par la sonde Rosetta, prévue vers août 2014' au terme d'une mission qui aura duré une dizaine d'années (cf. schéma ci-contre).



Notes et références

- [1] Olivier Groussin, *À la rencontre des comètes*, conférence du Bureau des longitudes, 6 avril 2011
- [2] La queue des comètes (<http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-cometes3.htm>) sur Astrosurf
- [3] Nicolas Biver, « Les comètes, archives glacées du Système solaire », *Ciel et espace radio*, 12 janvier 2009
- [4] <http://www.sciencesetavenir.fr/espace/20111007.OBS1951/les-cometes-ont-elles-apporte-l-eau-sur-terre.html>
- [5] La comète de Halley (<http://www.cosmovisions.com/comHalleyChrono01.htm>)
- [6] M. Festou, op. cité,
- [7] Les comètes (<http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-cometes.htm>) sur le site Astrosurf
- [8] Diodore de Sicile, *Bibliothèque historique*, XV, c.50
- [9] Sénèque : *Naturales quaestiones*, VII, 24
- [10] History of comets (<http://www.eso.org/public/events/astro-evt/DeepImpact/Background/comet-history-1.html>) site de l'Observatoire européen austral
- [11] Peurs et superstitions des comètes (<http://www.lisa.univ-paris12.fr/GPCOS/Hc/H211.htm>)
- [12] Cometary Designation System (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/CometResolution.html>)
- [13] Minor Planet Center, chiffres de Mai 2014 (<http://www.minorplanetcenter.net/>)

Sources et contributeurs de l'article

Système solaire *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104927004 *Contributeurs*: 20ce, A2, ADM, Aaaf-wiki, Abracadabra, Abrahami, Acer11, Across.land.and.time, Actarus Prince d'Euphor, Acélan, Agentpikwa, Akzo, Alain r, Alef Burzmali, Alex-F, AlexOo, Alno, Alphos, Anarchimede, Ange Gabriel, Anthere, Apollon, Aratal, ArséniureDeGallium, Assdfg, Astro vienne, Astroprc, AviaWiki, Azertyintim, Baran1999, Barbetorte, Baronnet, Barraki, Basile II, Bastien Sens-Méyé, Benjamin Lefevre, Bernardilt, Birdie, Bob Saint Clar, Bollym3, Bouette, Bub's, Calo, Cantons-de-l'Est, Carrotou, Carthagea, Caton, Caverna, Cdiot, Cec50, Cedric.ch, Cham, Chennir, Chmlal, Cody escadron delta, Cogiati, CommonsDelinker, ComputerHotline, Coyau, Coyote du 86, Creasy, Crochet.david, Cépey, Céréales Killer, D4m1en, DENIS 48, Dake, Damouns, Daniel*D, Darkoneko, David Berardan, Denniss, Denys, Derkleinebaueraufdemriesenschachbrett, Dfeldmann, Dhatier, Dhenry, Didier, Didier.gilbert, Dionysos-999, Doch54, Docnette, DocteurCosmos, Domsau2, Dududul, Démocrite, E Bernal, EDUCA33E, Einstein, Emmanuel legrand, En passant, Enirac Sum, Enrevseluj, Escaladix, Esprit Fugace, Estonius, Et caetera, Excesilior, Fabrice Ferrer, Fafnir, Faiztah13, Ffx, Fm790, Fmaunier, Fotaun, François Rey, Fruge, GLec, GaMip, Ganondorf, Gaspra951, Gb2000, Gdgourou, Gede, Gemme, Genton, Geoffrey06, Gh, Graffity, Gribeco, Grimlock, Grondin, Groul, Guillaume70, Guilll, Guillom, Guymartin1, Gvf, Gyrocompa, Gyrostat, Gz260, Hannapiere, Harry cot, Hashar, Haugure, Hemmer, Herr Satz, Hibisco-da-Ilha, Hunsu, Héman, IAlEx, Ico, Igel 14, Inisheer, Io Katai, JB, JLM, JackPotte, Jaefverol, Jean-Christophe BENOIST, Jean-Louis Lascoux, Jerome66, Jerome72, Jeune aldebaran, Jfpierce, Jibeem, Jmfayard, Joal ban Kluane, Jocelyn, Jogadyl, JohnD, Joub, Jules78120, Jyp, Kalviner, Kanabiz, Kelson, Kenny32, Keul, Kriss Baxter, LaVoiture-balai, Laddo, Lady9206, Laurent, Laurent Nguyen, Laurent75005, Le pro du 94), Leag, Lebossdu641, LesCorbiers, Letartean, Liaret, Lightman18, Like tears in rain, Lilian, Linedwell, Loic rossi, Lolomalin, Lomita, Looxix, Loveless, Lucas0231, Lézard, MIMATA, MOB, MacFarlaneW, Mafiu44, Maloq, Malost, Malta, Man132, Mandrak, Mangatome, Manuguf, Marc Liger, Marc Mongenet, Markov, Matrix76, Med, Medium69, Meodudlye, Mephista, Michel421, Mike Coppolano, Milegue, Mizalcor, Mnémosyne, MohamedSaheed, Mokona, Moutmousse13, Mr H., Mro, Musicaline, Mustrum Ridicule, Mutatis mutandis, Naevus, Nataraja, Necrid Master, Neef, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Nias, Nicolas Lardot, Nicolas Pawlak, Nicolas Wälchli, Nicolas de Marqué, Nicolas-b-m, Nomadi, Oblic, Océanne bouchard, Olizekatz, Olimparis, Ollamh, Orkirin1998, Orsatelli, Orthogaffe, Os-max, Oxo, PP Tom, PST, Padawane, Palamède, Papatt, Patreides, Pautard, Pelsou, He, Pierre cb, Pierre-louis, Pioneer6014, Pixeltoo, Pk-Undying, Pld, Pline, Pok148, Poutauxchats, Poppy, Portbou, Poulos, Poulpy, Poxtrol02, Pseudomoi, Punx, Quentin57, Raizin, Ratigan, Rene1596, RogueLeader, Romain C, Rominandreu, Roucas, Rpa, RémiH, Salamander724, Salsero35, Sam Hocevar, Samleog2, Sanao, Sbrunner, Sebleouf, Semnoz, SenseiAC, Settimo, Shehank61, Simoes, Simon Villeneuve, Simon-kempf, Skull33, Sloyvy, Sophocle, Spleenico, Stanlekub, Stéphane33, Subar6, Sublimo69, Tadamem dmqm, Tejgad, Teofilo, Terror Belli, ThF, The Dav21, The RedBurn, The Titou, Theoliane, Thierry Caro, Thierry65, Thébaud, Tibou77, Tilux, Timoram26, Topeil, Toto Azéro, Totodotage, Tpa2067, Trafalgar, Traroth, Treehill, Uop, Urhixidur, Utl, VIGNERON, Val nantes, Vanished2012, Vicostar, Vivi-1, Vlaam, Wantoknow, Warm-Ice, Woww, Wynette, XaVieR, Xfispower, Xiloynah, Xofc, Yanodu11, Yelkrokoyade, Zakke, Zandr4, Zeld, Zeroheure, Zetud, script de conversion, 692 modifications anonymes

Soleil *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105140912 *Contributeurs*: Abracadabra, Abrahami, Acélan, Adelop1, Aither, Akeron, Alain r, Alchemica, Alex-F, Alex10081998, Alibaba, Alaphatwo, Alphos, Alvaro, Amarylis, Amelie S, Anarchimede, Anne Barnley, Ansaldo, AntonyB, ApprentiMiam, Archeos, Archibald Tuttle, Aristoi, Aristry88, Arkanosis, ArnoLagrangé, Arria Belli, ArséniureDeGallium, Artvill, Asavaa, Asram, Astronomie04, Astronomie05, Azertyintomy, Balougoum, Baronnet, Baruch, Bayo, Beaced2, Benoît.thierry, Bernardlt, Bertol, Besnier.m, Bilou, Biwak57, Bloodmaratas, Blub, Blue02, BlueGinkgo, Bob Saint Clar, Bobby, Bobvix, Bobyjackjobob, Bond never dies, Bradipus, Buzz, Caca51, Cantons-de-l'Est, Captainm, Carlotto, Caro15189, Caumette, Cempg, Cdang, Cessna150, Cfoellmi, Cham, Charlie Pinard, Charlylejaradinier, Chatsam, Chesnok, Christophe95, Cit vésco, Clashman, Clauchau, Cmagnan, Coccico2345, Coccopudepoil, Cody escadron delta, CommonsDelinker, ComputerHotline, Coolmen, Coyau, Coyote du 86, Creasy, Croc, Crocodile terrifiant, Cyberblade, Céline, Céréales Killer, Daniel Case, Daniel*D, Dauphiné, Deansfa, Dfeldmann, Dhenry, Diderot1, Didier, Didier Favre, Didierv, Dirac, Djedjee, Djmoa, Djyboob, Doalex, Doch54, DocteurCosmos, DocteurJackson, DoctoratDepartHistoire, Droopy nico, Dumbhead2004, DuoSRX, EDUCA33E, Effacez ce compte, Eiffele, Einstein, Elemlah, Elfix, En passant, Encyclopédeur, EnergieVair, Enrevseluj, EoWinn, Erlvert, Erwan Kerzreho, F5ZV, Fafnir, Faispartie, Fanfwah, Felix Gagnon, Ffx, Florival fr, Flying jacket, Forcimonie, Former user 1, Fpaletou, Frakir, Francois Trazzi, Frankioli, Franz53sda, Fred, Fremichel, GLec, GaMip, Gede, Gemini1980, Gemme, Gheravica4, Ghoster, Ginkgo, Giordano Bruno, Graffity, Graouly, Gratus, Grimlock, Grondin, Gronico, Groom Da Oger, Guiguich08, Guillaume70, Guillom, Guérin Nicolas, Gypaete, Gz260, Gzen92, HB, HPaul, Haltopub, Harmonia Amanda, Hbbk, Hejsa, Helldjinn, Hengirt, Henrik7, Hercule, Herr Satz, Hevydevy81, Hlm Z., Héman, IAlEx, Ico, Ingried, Inisheer, JB, JLM, Jaccard, Jacques gourvèse, Jean-Christophe BENOIST, Jef-Infojef, Jejecam, Jerome Charles Potts, Jerome.Abela, Jerome66, Jerome72, Jhésite, Jotun, Jrcourtois, Jules78120, Julien Laurent Jacob, Jusjih, Jyp, Kakapoop, Keanur, Keitaro-59, Kellybanana22, Kelson, Khellendros, Khrys63, Kilith, Klein, Koaral1, Kokin, Korg, Korrigan, Kropotkine 113, Kyle the hacker, Kyro, LD93, LaVoiture-balai, Lamiot, Laurent Nguyen, Laurent75005, Le Père Odin, Le gorille, Le pro du 94), Le sotré, LeGrenadier, Leag, Legalpower, Lekium85, Leodekri, Lepsyloon, Lequeurre, Letartean, Lilho, Lin Dan4, Linedwell, Lithium57, Litlok, Lomita, Looxix, Lopomolo, Louperivois, Loveless, Lu-VIC, Lucien Duval, Lviatour, Lylvic, MKasser, MPO man, Mafiu44, Maloq, Mancho, Manu181, Marc Mongenet, MarieLove6, Matthieu Deuté, Matthieu Kretzschmar, Maurilbert, Maxdoz, Mayonaise, Med, Medium69, Mehditamel, MeI995, Meodudlye, MerveillePédia, MetalGearLiquid, MicroCitron, Mig, Milord, Moez, Mohamedmerah, Moutmousse13, Moyyyotavir, Mr Patate, Mr velin, Nakor, Nanoxyde, Nataraja, Nath2, Natmaka, Necrid Master, Neef, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Nerdy99, Neuromancien, Nias, Nicodeme, Nicolas Lardot, Nicolas998, Nikodo59, Nodulation, O. Morand, Oblic, Olizekatz, Olikiki980, Olrick, Orlodrim, Orthogaffe, Oxo, Oyvé, P@c, Pallas4, Pano38, Pascal57, Pascalou petit, Patriksson, Patrinet, Pautard, Pelister, Pem, Peter 111, Phe, Phil2000, Pierre Guillard, Pierre-Alain Guainvic, Pinockio007, PivWan, Pixeltoo, Pld, Plevy1u, Pline, Ploum's, Pmiize, Poloboss77, Pooplooser69, Portalian, PouX, Poulos, Poulpy, Prométhée33, Pseudomoi, Pipro71, Pymouss, Remi, Rinaldum, Riovas, RobertFeldle, Rogilbert, Romary, Rominandreu, Rouss, Ryo, RémiH, Saforets, Salsero35, Samm, Sanao, Sbrunner, Schiste, Scripserrimus, Sebleouf, Serge Harvey-Gauthier, Seudo, Shitrfeggevgvvh cvjrhkld, Sigo, Simon Villeneuve, Simorg, Sismarinho, Sixsous, Sol17, Solensean, Sophocle, Souleydu78, Stanlekub, Stéphane33, SuperHeron, Superjuju10, Suprememangaka, SwagYoloHeHeSwag, Tarap, The RedBurn, The Titou, Thelionblak, Theoliane, Tieu512, Tiititium59, Timocent, Tintinus, Titulint, Tomiuous67, Tonygainaki, Tonypop2080, Toto Azéro, Tpa2067, Treanna, Treehill, Trixt, Trololo123123321, Tsaag Valren, Tu'imalila, Tuirkngkjfhtrkjfdk, Twentycent90, Ulysse2000, Universimmedia, Urhixidur, VIGNERON, Valf, Vali103, Vincnet, Vivarés, Vlaam, VonTasha, Wanderer999, Weft, Wiki-User03, Wiolshit, Xafrire, XbY, Xofc, Xx-maxm-xx, Yanajin33, Yelkrokoyade, Zeld, Zetud, Ziigloop, Zorlot, Zoukini, Émeric, 824 modifications anonymes

Mercure (planète) *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104599052 *Contributeurs*: A2, Akwa, Alain r, Alex-F, Alexandref, Aliesin, Alno, Ampon, Amqui, Ange Gabriel, Anne97432, Anthere, Apoz, Arnaud.Serander, Arrakis, ArséniureDeGallium, Artvill, Astro vienne, AviaWiki, Azerty78510, Baronnet, Bastien Sens-Méyé, BernardM, Bernardlt, Best friend fr, Bibi Saint-Pol, Bilou, Binabik155, Bob Saint Clar, Bokken, Bouchecl, Bouette, Bpollet, Bub's, Buzz, Calo, Carrotou, Cempg, Cdang, Ceedjee, Chennir, Chico75, Chmlal, Chris93, Coconut31, Cody escadron delta, Coyote du 86, Crouchineki, Curry, Cédric Boissière, Céréales Killer, DanyGangnon, Dation, David Berardan, David-suisse, David602b, De Wikischim, Delaroyas, Dhatier, Dhenry, Didier, Dreoven, Droop, Démocrite, EDUCA33E, Efilgubt, El Comandante, El Jj, Elfix, Elg, En passant, Enguerrand0013, Enrevseluj, Estonius, Etudiant Metz, Fabizor, Fabrice75, Feldo, FvdP, GLec, GaMip, Galdrad, Garsd, Gemini1980, Gemme, Gordjazz, GrahamHill, Grecha, Greduin, Gribeco, Grigg Skjellerup, Grim Reaper, Grimlock, Guadalu, Guillaume70, Guillaumehf, Gz260, Harry cot, Hercule, Herr Satz, Heymanu1984, Hibisco-da-Ilha, Hunsu, Huntster, Héman, ImBeast16, Io Herodotus, Iznogodo, JC (Exeter), JLM, Jastrow, Jblnd, Jean-Frédéric, Jef-Infojef, Jeffsexbyouy, Jerome72, Jlheudier, Jmicht, Jojolegogo, Jules78120, Juntier1978, Jyp, K'Iroman, Kanabiz, Kapitannovv, Kelson, Kndiaye, Korg, Kosame, Kropotkine 113, Kyro, Lady9206, Laurent Nguyen, Le gorille, Le sotré, LeToff, Leag, LeonardoRob0t, Lhcoache, Lilyu, Lisaël, Litlok, Looxix, Loreleil, Lulu78, Lylvic, MIMATA, Mancho, Manuguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Martinwilke1980, Mattho69, Maurilbert, Med, Medium69, Meodudlye, Moutmousse13, MuDavid, Naevus, Nanoxyde, Nataraja, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Neuceu, Nias, Nicolas Lardot, Nikai, Nk, Nono64, Nonopoly, Nykozof, O. Morand, Olizekatz, Olimparis, Orthogaffe, PST, Pa0lo3109, Padawane, Pagir, Pantxoa, Paoloo31, Papier K, Pautard, Phe, Phido, PieRRoMaN, Piku, Pinpin, Pioneer6014, Pld, Pline, Podzemnik, Pok148, Polauret, Poppy, Poulos, Poulpy, Priper, Prv, Pymouss, Quebenaute, Reclame, Restefond, Romainhk, Romanc19s, Rome2, Rominandreu, Rpa, RémiH, Salle, Sam Hocevar, SamuelFrel, Sanao, Sav, Seb35, Sebleouf, Semnoz, SenseiAC, Shawn, Sherbrooke, Simon Villeneuve, Sisyph, Skull33, Speculos, Spooky, Spundun, Stanlekub, Ste281, Sublimo69, Superjuju10, The Obento Musubi, Theon, Thewayforward, Tieu512, Titulint, Tontonfingueur, Traroth, Tronck-11, Tython, Urhixidur, Ursus, VIGNERON, Valéry Beaud, Vargenau, Vince66, Vincent.vaquin, Vincnet, VonTasha, Witoki, Woaha, Wynette, XBadWolf, Yann, YolanC, Zeld, Zetud, НиколаБ, 262 modifications anonymes

Vénus (planète) *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105473944 *Contributeurs*: 157.104.202.62, dial.bluewin.ch, 44leen, Agrafian Hem Rarko, Alain r, Alphos, Anarchimede, Andre Engels, AnnieAstronomie, Apoz, Arkam, ArmenG, Arrakis, Arsaël, ArséniureDeGallium, Artb33, Asasdfg, Astro vienne, Aucassin, B3N0!7, Baboo ellbboobo, Balougador, Balrogou, Baronnet, Bastien Sens-Méyé, Bastique, Bernardlt, Blogbreather, Blood Destructor, Bluespark, Bob Saint Clar, Bob08, Bouchecl, Buzz, Cantons-de-l'Est, Carrotou, Chaps the idol, Chmlal, Christophe Marcheux, Clashman, Cody escadron delta, CommonsDelinker, ComputerHotline, Crom1, Crouchineki, Cyril5555, Céréales Killer, DBP, DC2, David Berardan, David Cena, Denys, Dfeldmann, Dhatier, Dhenry, Didier, Duckysmolton, EDUCA33E, El Comandante, El Jj, Emercipro, En passant, Ender, Enrevseluj, Epsilon0, Erasmus, Eresterbian, Eria, EricGall23, Escaladix, Estonius, EyOne, FR, FRF 1, Fabrice Dury, Fabrice Ferrer, Factory, Fafnir, Federix, Feldo, Fluti, Frakir, Fv, FvdP, G de gonjasufi, GLec, GaMip, Gemme, Gene.arboit, Ggl3x, Gloup gloup, Grecha, Gribeco, Grigg Skjellerup, Grondin, Groom Da Oger, Guadalu, Guillaume70, Guymartin1, Gypaete, Gz260, HYUK3, Helldjinn, Hercule, Herr Satz, Hikielt, Hudsonmanu, Hégésippe Cormier, IAlEx, Ida Shaw, Immanuel Giel, Io Herodotus, JLM, Jastrow, Jean-Frédéric, Jef-Infojef, Jerome72, Jeromelap56, JihedM, Jmax, Jmc, Jplm, Jyp, Kanabiz, Kelson, Kevex91, Khrys63, Kilianours, Kirtap, Korrigan, Kriss Baxter, Kropotkine 113, Laddo, Laurent75005, Le pro du 94), Le sotré, LeGrenadier, Leag, LeonardoRob0t, Letartean, Lgd, Lilyu, Linguiste, Litlok, Lolcolopo, Lomita, Loostik, Looxix, LordAnatar, Lozère, Ltrlg, Lucas0231, Lulu78, Lyréa, M-le-mot-dit, M.patato, MG, MIMATA, Macassar, Mafiu44, Maggic, Mandudwar, Manuguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Martinwilke1980, Mattho69, Maurilbert, Maximini1010, Medium69, Meodudlye, MetalGearLiquid, Mntngbrl, Mnémosyne, Moutmousse13, Moyg, Mr. Frank, MuDavid, Nataraja, Nbouchard, Necrid Master, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Ngyuenlnd, Nias, NivoV, Nicolas Eynaud, Nicolas Lardot, Nilfanion, Nonopoly, Noritaka666, Ofenis, Olizekatz, Orlodrim, Orthogaffe, Paskalo, Pautard, Pegasus, Perdita, PetitDej, Phe, Phido, Philtr, Phosphoros, Piku, Pinpin, Pioneer6014, Piotr Ilich Tchchaïkovski, Pixeltoo, Plaisir, Pld, Polauret, Popolon, Poulpy, Prosopée, Reclame, Roby, Romanc19s, Rominandreu, RémiH, SaReVoK MuAd DiB, Sanao, Sanguinez, Sardur, Satfr, Scanoine, SenseiAC, Sephiroth669, Sherbrooke, Simon Villeneuve, Sisyph, Slamhoud, Snif, Sombrespit, Speculos, Spandun, Stanlekub, Spooky, Spundun, Stanlekub, Sublimo69, Sylenius, Sylveno, Sémhur, Tavernier, The Nick, The Obento Musubi, The Titou, Thecyberman, Thedreamstree, Thunderbird, Tieu512, Tokerboy, Tonymainaki, Tpa2067, Traroth, Treehill, Trol, Une Ame, Urhixidur, VIGNERON, Vdefourny, Vincent Ramos, Vixounet, Vlaam, Vol de nuit, VonTasha, Wanderer999, Wanditoast, Wynette, Xigloffe, Yves-Laurent, Z653z, Zed90, Zeld, Zetud, script de conversion, Ælfgar, Çi³³⁰²⁰²i, Éric Messel, НиколаБ, 327 modifications anonymes

Terre *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105274623> *Contributeurs*: -JaIomax-203-, 1020.adam, 321 BOUM, A.BourgeoisP, A2, A3 nm, Abujoy, Achambily, Adrien Cornet, Ahmed kaaris, Akeron, Alain r, Alchemica, Aleks, Almacha, Alphos, Alvaro, Amin34, Anmqui, Andfillcan, Andre315, AnneJea, Anthere, Antioviaque, Apokrif, Apollofox, Aporie, Apoz, Apprenons, Archibald, Arduus Petus, Arflam, Arglanir, Aristarché, Arnaud.Serander, ArnolLagrange, Arrakis, Arria Belli, Arslan-San, ArséniureDeGallium, Artb33, Artvill, Astro vienne, Astrophysique, Azertyerjkbvkhjvkhjkhjkhj, Azurfrog, BTH, Baronnet, Barraki, Bdc43, Bdoïn, Benjism89, BernardM, Bernardlt, Bertol, Bibisoul, Bigballs, Bigi11, Bionet, Bkaro, BlanchardJ, Bob Saint Clar, Bob-Marley-life, Bob08, BobJoe59, Boretti, Boréal, Boungawa, BrightRaven, Buisson, Camille2002, Cantons-de-l'Est, Carlassimo, Ccmpg, Cđang, Cessa150, Charlie Pinard, Chewbie 67, Chit draco, Cilantro, Cit vésco, Clem23, Clement54000, Coccico2345, Consulnico, Copleyft, Coyau, Coyote du 86, Crazymars, Cymbella, Céphée, Céréales Killer, D4m1en, DC2, DREED, DSCH, Daniel SANNIER, Darwinius, Dauphiné, David Berardan, DavidL, Delroth, Desideria20, Dhatier, Dhenry, Didier, Dirac, Dkessas, Doc Carbur, DocteurCosmos, Dr gonzo, EDUCA33E, EarthLover22, Eden2004, El Comandante, El Jj, Elfie, Eltarys II, Emericpro, Emirix, En passant, Enreveluj, Environnement2100, Epitalon, Epsilon0, Eric.LEWIN, Ersmïno, Escaladix, Eskimo, Esprit Fugace, Etudiant Metz, Evpok, Exocet, Fab97, Fabrice Ferrer, Fabrice75, Fabriceboulet, Fafnir, Filippus van Aelst, Fimac, Fluti, Fm790, Former user 1, Foufoune deco, Frakir, Francois Trazzi, Freshgod, Fucmcuffins, Fuhïro, FvdP, GLec, GaMïp, Gablebiz, Gaetan Poix, Gdgourou, Gede, Gemini1980, Gemme, Gentil Hibou, Geologeek, Givrali, Glacier, Goku, Goussedail, Graffity, Grecha, Gribeco, Grimlock, Grondili, Grondin, Grook Da Oger, Guadalou, Guerinsylvie, Guirry, Guillaume70, Gyrostat, Gz260, Habertix, Haicaure, Harmonia Amanda, Harry cot, Hawk-Eye, Haypo, Herr Satz, Hesoneofus, Hunsu, Huronoi, Hégésippe Cormier, IAlEx, Indeed, Inike, Iznogood, JLM, JSDX, Jack Rabbit Slim's, Jahsensie, Jarfe, Jastrow, Jean.Bomber, Jef-Infojef, Jejecam, Jeremy7186, Jerome72, Jide, Jmc, Jmh20, Jrcourtois, Jules78120, Juraastro, Jusjih, Jymm, Jyp, Jëik omłç, K'Iroman, Kamar seraike, Kanabiz, Karl1263, Kataklim, Kelson, Kethu, Khrys63, Kilitih, King Willan, Kinopano, Klipper, Kolossus, Korrgan, Kyro, La pinte, La porte, Lachaume, Laddo, Lady9206, Lapetitefille, Laurent Nguyen, Laurent Verset, Le gorille, Le sotré, Le sourcier de la colline, LeMouchoir, LeYaYa, Leag, Lepysleon, Leridant, Letelousain, SenseiAC, Shaihlud, Sherbrooke, Letartean, Like tears in rain, Linan, Litlok, Lmaltier, Lolo1303130, Lomita, Looxix, Lorán O, Loreleil, Louperivois, Luc7418, Lucas thierry, Luludu07, Lylvic, Lyréa, MG, MIMATA, MOB, Madhif, Madiot, Mafïou44, MakiZen, Malgovert, Malost, Manalfer, Manuguf, Marc Mongenet, Marinmessy, Martinwilke1980, Mastregreg82, Mathias Poujol-Rost, MathsPoetry, Mavericklist70, Mañkemañke, Mbenoist, Med, Medium69, Mekong Bluesman, Melkor73, Meodudlye, MetalGearLiquid, MicroCitron, Mightymights, Mikayé, Mike Coppolano, Mirgloth, Mnémosyne, Moala, Moez, MohamedSaheed, Moulins19, Mousse13, Mouna75, Moyg, Moyogo, Mr H., Mr. Frank, MuDavid, Mutatis mutandis, Mythos, N'importe lequel, Nakor, Nataraja, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Ngnth, Nguyenld, Nias, Nicname123, NicoRay, NicoV, Nicolas Lardot, NicolasBertoni, Nikopole, Nk, Nnemo, Nonodesiko, Nonopoly, Noritaka666, NouvelUtilisateur, Nupar, Nyro Xeo, ObiWan Kenobi, Oblic, Oliezekat, Olivier.descout, Ollamh, Olyvar, Orion 8, Orlodrim, Orthogaffe, Oxam Hartog, P.e, PABLO du 93, Padawane, Pailetromain, Palamède, Colamal, ChongDae, Chouca, Christophe Marcheux, Clashman, Coccico2345, CommeCeci, CommonsDelinker, ComputerHotline, Corsaire, Courcelles, Coyote du 86, Crouchineki, Cépey, Céréales Killer, D4m1en, DG-IRAQ, Damoums, Daniel*D, Darkoneko, David Berardan, Deelight, Deep silence, Denys, Dfeldmann, Dhatier, Dhenry, Didier, Dkchacha, DocteurCosmos, Dr Brains, Druth, E Bernal, EDUCA33E, Ediacara, El Jj, El Marsupio, Elapied, Emshef, Enogaël, EoWinn, Eric.LEWIN, EricGall23, Esnic030, Esprit Fugace, Estonius, FIZ0R, FR, FabienGomez, Fafnir, Fandepanda, Faschion-coco, Feldo, Fidibus, Florn88, FoeNyx, Fphilibert, François-Dominique, Freewol, Freshgod, Frombenny, Frór, FvdP, GLec, Gemme, Gene.arboit, Ggal, Ggl3x, Ghislain Montvernay, Graffity, Greatpatton, Grecha, Greewi, Greudin, Grigg Skjellerup, Grimlock, Gronico, Grook Da Oger, Guadalou, Gual-25, Guillaume70, Gz260, Götö, HAL, Habertix, Hadrien, Harry cot, Hashar, Heljfyf, Hemmer, Hexasoft, Hunsu, IAlEx, Ianare, Ice Scream, Insheer, Intelligence, Io Herodotus, Ithilsul, Iznogood, Jb, Jbmimimimimimimimif", J.C (Exther), JLM, JLTB34, Jarfe, Jd, Jean-eud-maurice, Jean-luc koldert, Jeangagnon, JF-Infojef, Jeffdeleone, Jerome pi, Jerome66, Jerome72, Jeune aldebaran, Jmc, Jmfayard, Jmicht, Jonathan Eo, Jotun, Jplm, Jules78120, Jumpinglade, Jyp, K-o-x, Kai Fr, Kallot, Kapitannov, Karta24, Keforal, Kelson, Kertraon, Khrys63, Kilitih, Killer eagle, Korrgan, Koyuki, Kropotkine 113, KuSh, Kwak, Kyle the hacker, LD, LUDOVIC, Lades, Lady9206, Laurent75005, Le sotré, Leag, Lekium85, LeonardoRob0t, Like tears in rain, Lilyu, Lin Dan2, Lithium57, Lololopol, Lomita, Looxix, Louis-garden, Loveless, Lv242819, Lylvic, MIMATA, MIRROR, MPO man, Madon.olivier, Maggic, Maniak, Manuaguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Markadet, Marsu15, Martelju, Martinwilke1980, Matbey31, Mathieu, Mathioze, MathsPoetry, Maurilbert, Med, Medium69, Meodudlye, MicroCitron, Mikaa, Mith, Miuki, Mnémosyne, Moimoi45, Morray1, Mousse13, MuDavid, Naevus, Nanoxyde, Nataraja, Nebula38, Necrid Master, Nemesis 12, NemesisIII, Nemoi, NeptuneGalaxy, Nias, Nicolas Lardot, Nicolas Ray, Nk, Nokami, Noritaka666, Oblic, Octavius, Okki, Oliezekat, Olimparis, Ollamh, Olybrius, Orfidana75, Orion74500, Orlodrim, Orthogaffe, P.e, PST, Papatt, Patangel, Patrick78901, PatrickLapointe, Pautard, Perdita, Peter17, PetitDej, Phe, Phido, Philippe.petrikon, Pioneer6014, Pixeltoo, Pld, Pline, Ploum's, Polaret, Popolon, Poppy, Poulpy, Pousi, Prosopée, Pseudomoi, Ptyx, Punx, Purodha, Pwet-pwet, R, Reclame, Rene1596, Restefond, Rhym, Riba, Rioult Michel, Ripounet, Romanc19s, Rominandreu, Roony1092, Roymail, Rune Obash, Ryo, RémiH, Sakharov, Salsero35, Sam Hocevar, Sanao, Sardur, Scaoine, Schiste, Sebleouf, Seblepacific, Semnoz, SenseiAC, Sephiroth669, SergeiPoulp, Shaihlud, Shakkï, Sherbrooke, SilbournTheProton, Simon Villeneuve, Simonauxx, Sïndor, Sïsqj, Slamhound, Snap, Splenicoo, Spooky, Spundun, Stanlekub, Starus, Stephane Simard, Sting, Stéphane33, Sublimo69, Sum, Suprememangaka, Swek60, Syllvs, Tados, TaraO, Tarquin, The Nick, The Obento Musubi, The Titou, Theoliane, TiChou, Tïeum512, Titlutin, Tognopop, Tohuwabohu, Tom007, Tonymainaki, Tonypop2080, Traroth, Treehill, Tsaag Valren, TuSex, Turb, Tython, Urban, Urhixidur, VIGNERON, Valéry Beaud, Vargenau, Vascobello, Vazkor, Vengeur, Vikingmars, Vikingmars76, Vincent.vaquin, Vinz1789, Vivarés, Vlaam, VladoobidoOo, Wart Dark, Who killed Bambi ?, Wiki-User03, WikiPatrol, Xic667, Xillimianus, Xofc, Yann, Yelkrokoyade, Yodaspirine, YolanC, Yvako, Yves-Laurent, Yves1953, Zak Anderson, Zeld, Zetud, Éric Messel, Švitrigaila, 637 modifications anonymes

Mars (planète) *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104771478> *Contributeurs*: Abracadabra, Agramisudo, Agrafian Hem Rarko, Alain r, Alamandar, Almak, Alonso, Alvaro, Anarchimede, Ancalgan, Antaj7co, Anthere, Antonov14, Apollofox, Apoz, Arglanir, ArkAm, Arnaud.Serander, Arria Belli, Artb33, Artvill, Assurbanipal, Astro vienne, B3N017, BIGDAVID, Baffab, Baronnet, Bassminier, Bastien Sens-Méyé, Benji Eo, Bernardlt, Berru, BetoCG, Bibi Saint-Pol, Bilou, Bob Saint Clar, Boooo, BrightRaven, Brome, Bryan spartan11, Bublegun, Caesius, Calo, Cantons-de-l'Est, Capitain, Cascade65, Cattzillat, Cđang, Cdiot, Chaps the idol, Chmlal, ChongDae, Chouca, Christophe Marcheux, Clashman, Coccico2345, CommeCeci, CommonsDelinker, ComputerHotline, Corsaire, Courcelles, Coyote du 86, Crouchineki, Cépey, Céréales Killer, D4m1en, DG-IRAQ, Damoums, Daniel*D, Darkoneko, David Berardan, Deelight, Deep silence, Denys, Dfeldmann, Dhatier, Dhenry, Didier, Dkchacha, DocteurCosmos, Dr Brains, Druth, E Bernal, EDUCA33E, Ediacara, El Jj, El Marsupio, Elapied, Emshef, Enogaël, EoWinn, Eric.LEWIN, EricGall23, Esnic030, Esprit Fugace, Estonius, FIZ0R, FR, FabienGomez, Fafnir, Fandepanda, Faschion-coco, Feldo, Fidibus, Florn88, FoeNyx, Fphilibert, François-Dominique, Freewol, Freshgod, Frombenny, Frór, FvdP, GLec, Gemme, Gene.arboit, Ggal, Ggl3x, Ghislain Montvernay, Graffity, Greatpatton, Grecha, Greewi, Greudin, Grigg Skjellerup, Grimlock, Gronico, Grook Da Oger, Guadalou, Gual-25, Guillaume70, Gz260, Götö, HAL, Habertix, Hadrien, Harry cot, Hashar, Heljfyf, Hemmer, Hexasoft, Hunsu, IAlEx, Ianare, Ice Scream, Insheer, Intelligence, Io Herodotus, Ithilsul, Iznogood, Jb, Jbmimimimimimimif", J.C (Exther), JLM, JLTB34, Jarfe, Jd, Jean-eud-maurice, Jean-luc koldert, Jeangagnon, JF-Infojef, Jeffdeleone, Jerome pi, Jerome66, Jerome72, Jeune aldebaran, Jmc, Jmfayard, Jmicht, Jonathan Eo, Jotun, Jplm, Jules78120, Jumpinglade, Jyp, K-o-x, Kai Fr, Kallot, Kapitannov, Karta24, Keforal, Kelson, Kertraon, Khrys63, Kilitih, Killer eagle, Korrgan, Koyuki, Kropotkine 113, KuSh, Kwak, Kyle the hacker, LD, LUDOVIC, Lades, Lady9206, Laurent75005, Le sotré, Leag, Lekium85, LeonardoRob0t, Like tears in rain, Lilyu, Lin Dan2, Lithium57, Lololopol, Lomita, Looxix, Louis-garden, Loveless, Lv242819, Lylvic, MIMATA, MIRROR, MPO man, Madon.olivier, Maggic, Maniak, Manuaguf, Marc Mongenet, Marie Becker, Markadet, Marsu15, Martelju, Martinwilke1980, Matbey31, Mathieu, Mathioze, MathsPoetry, Maurilbert, Med, Medium69, Meodudlye, MicroCitron, Mikaa, Mith, Miuki, Mnémosyne, Moimoi45, Morray1, Mousse13, MuDavid, Naevus, Nanoxyde, Nataraja, Nebula38, Necrid Master, Nemesis 12, NemesisIII, Nemoi, NeptuneGalaxy, Nias, Nicolas Lardot, Nicolas Ray, Nk, Nokami, Noritaka666, Oblic, Octavius, Okki, Oliezekat, Olimparis, Ollamh, Olybrius, Orfidana75, Orion74500, Orlodrim, Orthogaffe, P.e, PST, Papatt, Patangel, Patrick78901, PatrickLapointe, Pautard, Perdita, Peter17, PetitDej, Phe, Phido, Philippe.petrikon, Pioneer6014, Pixeltoo, Pld, Pline, Ploum's, Polaret, Popolon, Poppy, Poulpy, Pousi, Prosopée, Pseudomoi, Ptyx, Punx, Purodha, Pwet-pwet, R, Reclame, Rene1596, Restefond, Rhym, Riba, Rioult Michel, Ripounet, Romanc19s, Rominandreu, Roony1092, Roymail, Rune Obash, Ryo, RémiH, Sakharov, Salsero35, Sam Hocevar, Sanao, Sardur, Scaoine, Schiste, Sebleouf, Seblepacific, Semnoz, SenseiAC, Sephiroth669, SergeiPoulp, Shaihlud, Shakkï, Sherbrooke, SilbournTheProton, Simon Villeneuve, Simonauxx, Sïndor, Sïsqj, Slamhound, Snap, Splenicoo, Spooky, Spundun, Stanlekub, Starus, Stephane Simard, Sting, Stéphane33, Sublimo69, Sum, Suprememangaka, Swek60, Syllvs, Tados, TaraO, Tarquin, The Nick, The Obento Musubi, The Titou, Theoliane, TiChou, Tïeum512, Titlutin, Tognopop, Tohuwabohu, Tom007, Tonymainaki, Tonypop2080, Traroth, Treehill, Tsaag Valren, TuSex, Turb, Tython, Urban, Urhixidur, VIGNERON, Valéry Beaud, Vargenau, Vascobello, Vazkor, Vengeur, Vikingmars, Vikingmars76, Vincent.vaquin, Vinz1789, Vivarés, Vlaam, VladoobidoOo, Wart Dark, Who killed Bambi ?, Wiki-User03, WikiPatrol, Xic667, Xillimianus, Xofc, Yann, Yelkrokoyade, Yodaspirine, YolanC, Yvako, Yves-Laurent, Yves1953, Zak Anderson, Zeld, Zetud, Éric Messel, Švitrigaila, 637 modifications anonymes

Jupiter (planète) *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105488586> *Contributeurs*: AEIOU, Aboumael, Abracadabra, Akzo, Alchemica, Alex-F, Alvaro, AméliorationsModestes, Anarchimede, AnnieAstronomie, Apollofox, Arct, Aristidebriand, Arnauds, ArséniureDeGallium, Artvill, Astro vienne, Astronomie16, Bapts, Baronnet, Belin2002, Bernardlt, Bertol, Bibi Saint-Pol, Bibop, Bob Saint Clar, Bob08, Calame, Camico, Camster, Cantons-de-l'Est, Captainm, Carrotou, Cascade65, Castagna, Ccmpg, Cđang, Chmlal, Chris93, CommonsDelinker, ComputerHotline, Corsaire, Critias, Crouchineki, Céphide, Céréales Killer, Daniel Cell, Darkoneko, Daxr 73, David Berardan, Dhatier, Dhenry, Didier, Dijim, DocteurCosmos, Domsau2, Duckysmokton, EDUCA33E, El Jj, Elyrick, Erik Warmelink, Erwan73, Eunostos, EyOne, Fijimm, Fluti, Flying jacket, FvdP, Fylyp22, GLec, GaMïp, Gemini1980, Gemme, Gene.arboit, Ghuber001, Gilles MAIRET, Goliadkine, Gordjazz, Grecha, Gribeco, Grigg Skjellerup, Grum, Guadalou, Guillaume70, Guillom, Gzen92, Götö, Hashar, Hemmer, Henri4, Hunsu, Hégésippe Cormier, IAlEx, Ice Scream, Ico, Indeed, Insheer, Io Herodotus, Iznogood, JABORSKA Alexandre, Jackske85, Jaipasdepseudo, Jarfe, Jean Gomet, Jean-Christophe BENOIST, Jeanot, Jeansenien, Jef-Infojef, Jerome72, Jiray 92, Jmc, Jmicht, Joaquín Martínez Rosado, Jules78120, Jyp, K90, KMan, Kelson, Kertraon, Khrys63, Kilitih, Klavierteror, KoS, Korrgan, Koyuki, Kropotkine 113, LD, Laddo, Lalancette, Laurent75005, Le sotré, Leag, Leopolxy, Letartean, Like tears in rain, Lilyu, Lionel Allorge, Litlok, Lomita, Looxix, M-le-mot-dit, MIMATA, MPO man, Manuaguf, Marc BERTIER, Marc Mongenet, Marc-andré18, Marie Becker, Marie Kiki, Marsyas Panique, Martinwilke1980, Med, Medium69, Meodudlye, MetalGearLiquid, MP9000, Mishkoba, Mnémosyne, Moez, Monsieur Meuble, Mosaffa, Mousse13, MuDavid, Mutichou, Naevus, Nataraja, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Neualiluj, Nias, Oblic, Oliezekat, Onc, Orikrin1998, Orion74500, Orlodrim, Orthogaffe, Ouranos, P. S. F. Freitas, PST, Pallas4, Pamputt, Paoloo31, Pautard, Pem, Perdita, Peter17, PetitDej, Phe, Pioneer6014, Pld, Pline, Ploum's, Plyd, Popolon, Poppy, Poss Jean-Louis, Poulpy, Punx, Purodha, Rhadamante, Ripounet, Rominandreu, Ryo, Saig, Salsero35, Sam Hocevar, Samstag, Sanao, Scientif38, Sebcana, Sebleouf, SenseiAC, Sephiroth669, Septelophloppe, Simon Villeneuve, Simon-kempf, Sisebut, Sisyph, Sixsous, Smily, Speculos, Springslord, Spundun, Stanlekub, Ste281, Stéphane33, Sublimo69, Super10, Superjuju10, Suziecat, Séraphin 01, Taguelmoust, Tanguy Vaz, Tc168, Thaze, Thesupermaxou, Tïeum512, Titi3, Titlutin, Tognopop, Traroth, Treehill, Urhixidur, Utilisateur disparu, Vincent.vaquin, Vivarés, Weft, WikiMoi, Wikinade, Wikisof*, Wiklol, Wozze, Xfigpower, Xofc, Yvan Rivierre, Zandra4, ZeroJanvier, Zetud, Émi07, Éric Messel, 286 modifications anonymes

Saturne (planète) *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105177456> *Contributeurs*: Aitbent, Alain r, Alecs.y, Alex-F, AlexRenou, Allison connors, Alvaro, Arbautjc, Asabengurtza, Astro vienne, Balougador, Baronnet, Bastien Sens-Méyé, Bb98, Bernardlt, Bestter, Bibi Saint-Pol, BiffTheUnderstudy, Bigboss2012, Binabik155, Bob Saim Clair, Buzzy, C2rik, Calcineur, Captainm, Caro15189, Carrotou, Cđang, Chaps the idol, Chmlal, ComputerHotline, Crouchineki, Céréales Killer, Darkoneko, Davgrps, David Berardan, Dhatier, Dhenry, Didier, Dielerv, DocteurCosmos, Domsau2, Dr Brains, Drongou, EDUCA33E, El Jj, Elyrick, En passant, Ender, Enreveluj, EricGall23, Etiennekd, Fabrice Ferrer, Fafnir, Florn88, Fm790, Frank9321, FvdP, GLec, GaMïp, Galaxandre, Gemini1980, Gemme, Gene.arboit, Ghalloun, Grecha, Greudin, Grimlock, Gronico, Grum, Guadalou, Guillaume70, Gz260, Gzen92, Harmonia Amanda, Hashar, Io Herodotus, JLM, Jef-Infojef, Jerome66, Jerome72, Jplm, Jules78120, Jyp, Kassa, Kataklim, Kelaway, Kelson, Khrys63, Kilitih, Killer eagle, Kirk39, Kokoyaya, Korrgan, KuSh, LERK, Lady9206, Laurent Nguyen, Laurent75005, Le pro du 94), Le sotré, LeGrenadier, Leag, Lekium85, Letartean, Lgd, Lomita, Long John Silver, Looxix, Luludu78, M.A.D.company, Mötty, MIMATA, MPO man, MakiZen, Malta, Marc Mongenet, Marie Becker, Marie Kiki, Med, Medium69, Meodudlye, Mnémosyne, Moal8e, Moez, Mousse13, MuDavid, Nataraja, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Nias, Nicolas Lardot, Nicoluc2, Nnariotzi, Noritaka666, Obourgain, Ohkami, Oliezekat, Olyvar, Orthogaffe, Ouhpinaise, Ouranos, P.e, P. S. F. Freitas, Padawane, Phae, Phe, Phido, Pinpin, Pld, Pline, Ploum's, Plyd, Pmx, Popolon, Poulpy, Psi, Purodha, Reclame, Riba, Rmehd78, Roger1313, Rune Obash, Saig, Sam Hocevar, Sanao, Seblotelousain, Semnoz, SenseiAC, Shaihlud, Simon Villeneuve, Sisyph, Sixsous, Souris2002, Spooky, Spundun, Stanlekub, Stephane Orts, Sublimo69, Sylfred1977, Teigad, Tengu84, TiChou, Tïeum512, Titlutin, Toto Azéro, Toutoune25, Traroth, Trazfr, Treehill, Urhixidur, VIGNERON, Vivarés, Vlaam, VonTasha, Vykk, Widar, Wizou, Wynette, XaViER, Xfigpower, Xofc, Yann, script de conversion, -Pyb, Éclusette, 317 modifications anonymes

Uranus (planète) *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104785651> *Contributeurs*: Aadri, Akiry, Alain r, Alvaro, Andre Engels, Astronomie01, AvatarFR, Azerty78510, Balougador, Baronnet, Benji Eo, Bernardlt, Bibi Saint-Pol, Bilou, Bob Saint Clar, Bouchecl, Bruno2wi, Cantons-de-l'Est, Carrotou, Cđang, Chmlal, Clackhamms, Clatourre, CommonsDelinker, Céréales Killer, DC2, David Berardan, Denys, Derekson, Dhenry, Didier, Didier Misson, DocteurCosmos, Droopy nico, Durandal, Démocrite, EDUCA33E, El Jj, Eleni242, Elisa, Erasmus.new,

Escaladix, Esprit Fugace, Et caetera, Etudiant Metz, EyOne, FDo64, FR, FvdP, G1ck, GLec, GaMip, Gbboys, Graffiti, Grecha, Grigg Skjellerup, Grondin, Grum, Guadelou, Guillaume70, Gyrocompa, Gz260, Hashar, Heby03, Herr Satz, Hégésippe Cormier, Io Herodotus, Iznogood, Jacques Ballieu, Jef-Infojef, Jerome72, JihemD, Jdumas, JmCor, Julien1978, Jusjih, Jyp, Kelson, Kolossus, Korrigan, Koyuki, Lacrymocéphale, Lalancette, Laurent Jerry, Laurent Nguyen, Leag, Leluthier, Litlok, Lomita, Long John Silver, Looxix, MIMATA, MV500, Manuguf, Marc Mongenet, Marc-André Beauchamp, Marie Becker, Mathis B, Maxiém11, Med, Medium69, Menerlach, Meodudlye, MetalGearLiquid, Miramaze, Mistig, Mnémosyne, Mokona, Monsieur Meuble, Mutichou, Mvdpb, Nanoxyde, Nataraja, Nba jules, Necrid Master, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Nias, Nicolas Eynaud, Nicolas Ray, Nono64, Norman 62, Oblic, Olizekat, Orthogaffe, PST, Padawane, PetitDej, Phe, Pioneer6014, Pld, Pline, Ploum's, Poppy, Poulpy, Purodha, Quentin57, Quinoapremier, RenaultR83, Rominandreu, Sanao, Semnoz, SenseiAC, Shawn, Simon Villeneuve, Slamhound, Soufflereve, Spoirier, Spooky, Spundun, Stanlekub, Sublimo69, Superjuju10, Sémhur, ThF, The Obento Musubi, Tieum512, Traroth, Treehill, Urhixidur, Vivarés, XaVieR, Xansandre, Xic667, script de conversion, 196 modifications anonymes

Neptune (planète) *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105493720> *Contributeurs*: Alain r, Alec Orca, Allstars, Alphos, Almine, Alvaro, Ange Gabriel, Arrakis, Ash Crow, Askwhyale, Astronomie01, Autiwa, Baronnet, BeatrixBelibaste, Bebelou, Bernardtlt, Bilou, Bob Saint Clar, Bob08, Bvs-aca, Carrotou, Cdang, Chaps the idol, Chatsam, Cj73, Clatourre, Cmagnan, Conchita, Coyau, Crouchineki, Céréales Killer, David Berardan, Dfeldmann, Dhenry, Didier, DonCamillo, Dragonpoop, EDUCA33E, El Jj, Elphifou, EmilienKia, Emmanuel legrand, Enzino, EricGall23, Eurocommuter, EyOne, FripOuille69, FvdP, G4BOX Metin2, GLec, GaMip, Galpha, Gene.arboit, GrahamHill, Grecha, Grum, Guadelou, Guillaume70, Hashar, Hemmer, Hémant, Io Herodotus, JLM, Jackgemini, Jef-Infojef, Jerome66, Jerome72, Jilibi, Joffrey P., Johann Grimm, Jyp, Kanabiz, Katakism, Kelson, Kom Image, Korrigan, L'nono, Labé, Lady9206, LairepoNite, Laurent Nguyen, LeMorvandiau, Leag, Letartean, Lomita, Long John Silver, Looxix, Louis2004, M.Tanguay, MIMATA, Macassar, Maniak, Marc Mongenet, Marie Becker, Med, Medium69, Meodudlye, Mnémosyne, Nataraja, Nemesis 12, NemesisIII, NeptuneGalaxy, Nias, Nico 5 M., Nicolas Lardot, Numbo3, Oblic, Olizekat, Orthogaffe, Otto Didakt, Ouhpinace, P. S. F. Freitas, Pierre.Lescanne, Patoche 77, Pautard, Phe, PetetheJock, Pffenge, Phe, Pld, Pline, Ploum's, Popolon, Poppy, Poulpy, Pymouss, Raminagrobis, Reclame, Regis.gallois, Rhadamante, Rominandreu, STYx, Sam Hocevar, Sanao, Semnoz, SenseiAC, Shadock90, Shipbegan, Simeo, Simon Villeneuve, Slamhound, SofiaNadezda, Sofronie II, Spooky, Spundun, Stanlekub, Sublimo69, Teuxe, Theon, Tibauk, Tidus1188, Tieum512, Tonypop2080, Traroth, Treehill, Triaxx, Urhixidur, Valérie75, Visu, VonTasha, Weft, Wiz, Wrangel, Yann, Zeld, 178 modifications anonymes

Pluton (planète naine) *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105444818> *Contributeurs*: 16@r, Aadri, Adolescent14, Alain r, Alamueller, Alexander Doria, Alibaba, Aliesin, Alandro, Altor, Alvaro, AntonyB, Aragane, Astroalex33, AvatarFR, Babaz, Baronnet, Barraki, Basilus, Benj05, Bernardtlt, Bertol, BetoCG, Bibi Saint-Pol, Bob Saint Clar, Bouche1, Bouette, Campi, Carrotou, Catzty, Cent20, Ch3w13, Chaoborus, Chaps the idol, Charles Lavoie, Chris93, Clashman, Cody escadron delta, CommonsDelinker, ComputerHotline, Coyote du 86, Céréales Killer, DC2, DSCH, Darkoneko, David Berardan, Deelight, DeepBlue, Denys, Dereckson, Dhatier, Dhenry, Didier, Didier Misson, Dr Brains, EDUCA33E, El Jj, Elemiah, Eltar, Emirix, Encolpe, Enzino, Eretribian, Erwan Corre, Esprit Fugace, Estonius, Eurocommuter, Eytanspp, Fcarcena01, Fgi, FoeNyx, Fortan, François-Dominique, FredA, Freewol, FvdP, Fylyp22, GLec, GaMip, Gauss, Gemini1980, Ggal, Graffiti, Grecha, Gregoun, GretaGarbo, Grondin, Grum, Guiguilolive, Guillaume Lamy, Gzen92, HAF 932, Hashar, Hbbk, Heby03, Heddryin, Hemmer, Herr Satz, Hibisco-da-Ilha, Hunsu, Hégésippe Cormier, Hémant, IAlex, Iafss, Inisher, Io Herodotus, Iznogood, JLM, JLTB34, Jaymz Height-Field, Jef-Infojef, Jeje54sp, Jerome72, JihemD, Jld1966, Jmicht, Julien Catalano, Juraastro, Jusjih, Jyp, JANNICK Jérémy, Kassus, Katakism, Kelson, Khardan, Khrys63, Kimox33, KoS, Kolossus, Koyuki, Kriss Baxter, Kropotkine 113, Kyle the hacker, Kyrieli, LLM, Lamiot, Laurent Nguyen, Le Beau Lot, Le sourcier de la colline, LeGéantVert, LeYaYa, Leag, Lebelot, Lecool1000, Leridant, Leuviah, Lgd, Like tears in rain, Lilisasa, Liometallo, Liquid 2003, Litlok, Localhost, Loicwood, Loloveto, Long John Silver, Looxix, Loquesea, Loreleil, Louperivois, Lucas0231, Lyréa, M-le-mot-dit, MIMATA, MaCRoEco, Maggic, Maloq, Marc Mongenet, Marcos Elias de Oliveira Júnior, MarkHavel, Markov, MatP, Matei13, MattF, Medium69, Meodudlye, Messire Hephgé, MetalGearLiquid, MicroCitron, Mimi3131, Mirgolth, Mithridates, Mkende, Moala, Monarghel, Mousse13, Moyg, Mr Patate, Mr hixe, Mutatis mutandis, N3odyme, Nataraja, Necrid Master, Nemesis 12, Neptune10, NeptuneGalaxy, Nias, Nicolas Lardot, Noritaka666, Obi76, Oblic, Olizekat, Olivier, Olmec, Olrick, Olyvar, Orlodrim, Orthogaffe, P. S. F. Freitas, PST, Pabix, Pablo029, Pacman1897, Pamputt, Paolo031, Paskalo, Patbateman84, Pautard, Pffenge, Phe, Phido, Phil, Philgin, Pierregil83, Pino, Pinpin, Pixeltoo, Pld, Plic, Pline, Popolon, Poppi Pocketo, Poppy, Poulpy, Powersex, Prisu, Purodha, Pédophilédunet, Quark67, Riba, RogueLeader, Rominandreu, Romulfé, Rune Obash, RémiH, Salsero35, Sam Hocevar, Sammyday, Sanao, SenseiAC, Sevelap, Shanon11, Sherbrooke, Simon Villeneuve, Sixsoux, Something14, Spooky, Spundun, Stabilo, Stanlekub, Ste281, Stendhalconques, Sublimo69, Supporterthinois, Tarquin, Terror Belli, The ABC94200, The RedBurn, Thierry Le Provost, Titlutin, Tognopop, Traroth, TwoWings, ULulo, Urhixidur, Ursus, VIGNERON, Valéry Beaud, Visu, Vivarés, Wiz, Wku2m5rr, Woozy, XaVieR, Yotna, Zakke, Zivi, Zonzon, script de conversion, -Pyb, 2^o10^o, Švitrigaila, Ω, 361 modifications anonymes

Astéroïde *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105004812> *Contributeurs*: Abcabcabcz, Adnergie, Alain r, Alain843, Aldoo, Alidirse, Aliesin, Almak, Alno, Alvaro, Amstramrampikepiketelegram, Anarchimede, AngusYoungACDC, Anthere, Apollofox, ArnoLagrange, Astronomie07, Astronomie11, Atlantidae, AviaWiki, B-noa, BTH, Badhoua, Bcoconni, Bernard J. Noël, Bernard Morin, Besnier.m, Bibi Saint-Pol, Bilou, Binabik155, Bob Saint Clar, Bozo3666, CUSENZA Mario, Calcineur, Cantons-de-l'Est, Carlotto, Ceedjee, Ciel&Espace EL, Clatourre, Clouso, Cody escadron delta, Colinda, CommonsDelinker, Creasy, Cépey, Denys, Dhenry, Didier, DocteurCosmos, EDUCA33E, Ebolavir, Einstein, En passant, Enoril, Epsilon0, EricGall23, Escaladix, Esprit Fugace, Estonius, Fluti, FoeNyx, FrankyLeRoutier, Freewol, FrereTox, GL, GLec, Gemini1980, Gene.arboit, Geneamichaud, Genton, Grondin, Gz260, Gzen92, Hank, Hemmer, Hunsu, Hémant, Iafss, Io Herodotus, JB, JLM, JackPotte, Jackgemini, Jaipasdespseudo, Jdc-meteorite, Jean-Louis Lascoux, Jeanot, JohnD, Jybet, Jyp, K-o-x, Kelson, Kepler69, Kilith, Kom Image, Kyro, La Cigale, Laurent Nguyen, LeMorvandiau, Leag, LedesPines, Legrosbaumé, Letartean, Like tears in rain, Lionel Allorge, Looxix, Lucas0231, M.Tanguay, MIMATA, MOSSOT, MaCRoEco, Martinwilke1980, Mathieuudu68, Matovitch, Meadi, Med, Meszigues, MetalGearLiquid, Moolligan, Nakor, NeptuneGalaxy, Neuceu, Nias, NicolasMachiavel, Noritaka666, Nucleo3, Nweider, O. Morand, Orlodrim, Orthogaffe, P. S. F. Freitas, Paskalo, Pautard, Pem, PetetheJock, Phe, Phido, PieRRoMaN, Pilot2009, Pino, Pinpin, Pioneer6014, Pixeltoo, Pld, Polmars, Poppy, Poulos, Poulpy, Praxinoa, Pseudomoi, Purodha, Qpzm, R, RM77, Rawet05, Rehtse, Rvweb, Ryo, Salle, Salsero35, Sam Hocevar, Sanao, Sayan, Sebleouf, SenseiAC, Shaihlud, Simon Villeneuve, Ske, Smaxe, Speculos, Stanlekub, Ste281, Stéphane33, Sval, Symaski62, Taguelmoust, Taupage nocturne, Theoliane, TigH, Tokerboy, Toto Azéro, Trotoman, UKE-CH, Ultragothe, Urhixidur, VIGNERON, Vargenau, Vlaam, Volcosim231, Vyk, Wiki-User03, XaVieR, Xiglofre, Zeld, Zelectron, ZeroJanvier, script de conversion, Émilie 90, Épiphémie, 219 modifications anonymes

Comète *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104601652> *Contributeurs*: Abrahami, Akasha, Akzo, Alain r, Alamandar, Alchemica, AlexPoGi, Alphos, Amstramrampikepiketelegram, Anarchimede, Anthere, Apprenti Paléontologue, Arrakis, Asram, BTH, Baboben5, Barnate, Bernardtlt, Bertol, Bob Saint Clar, CUSENZA Mario, Camille-palladio, Cantons-de-l'Est, Captainm, Chaps the idol, Chuckloris84, Clatourre, ComputerHotline, Coyau, Curry, Dhenry, DocteurCosmos, Démocrite, En passant, Enzino, Epsilon0, Eric.LEWIN, Ertezoute, Estonius, Ethaniel, FDo64, Fchristiaens, Foux, Franki88, Franky Bouchard, GLec, Gemme, Ggal, Gonioul, Graffiti, Greudin, Grimlock, Guillaume70, Gz260, Gérard Garitan, Hashar, Hiob, IAlex, Iafss, Ianux, Io Herodotus, JB, Jackgemini, Jdc-meteorite, Jean-luc goudet, Jef-Infojef, Jlheudier, Jplaprise, Jusjih, Jygh, Jyp, Kelson, Kikuyu3, Kolossus, Kriss06, Kropotkine 113, LPLT, Larrystourne, Leag, LeonardoRob0t, Letartean, Litlok, Lomita, Long John Silver, Looxix, Lucas0231, Lugvar, MIMATA, Maasklin, Maggic, Malburet, Malta, Marc Mongenet, Maurilbert, Meadi, Med, Medium69, Miguel-0409, Mizalcor, NVar, Naruto1778, Nemesis 12, Nguyenld, Nias, Nicolas Lardot, Oblic, Olivier, Olivier LPB, Olybrius, Orlodrim, Orthogaffe, P. S. F. Freitas, Pamputt, Pantelis, Patreides, Pem, Phe, Pixeltoo, Pld, Pline, Polmars, Poppy, Poulpy, Preem Palver, Purodha, Raph, Rawet05, Rehtse, Rinjin, Rock132000, Romanc19s, Romuald 2, Rune Obash, Ryo, RémiH, Saja0, Salsero35, Sam Hocevar, Sanao, Sbsa, Schlum, SenseiAC, Sherwood, Sisqi, Ske, Sorw, Spundun, Stanlekub, Stéphane33, Sum, Tados, Tarawneh, Tejgad, Thouny, TiChou, Tikaw, Toro a 6, Tournachon, Traroth, Trassiorf, Urhixidur, Valéry Beaud, Vargenau, Vlaam, Wanderer999, Xic667, Xiglofre, Yolowagfagbeachesbelike, Youri bouche trou, Zeld, script de conversion, 218 modifications anonymes

Source des images, licences et contributeurs

Fichier:Solar System size to scale fr.svg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_System_size_to_scale_fr.svg *Licence*: Creative Commons Zero *Contributeurs*: Hégésippe Cormier, Jogadyl, 3 modifications anonymes

Image:Gtk-dialog-info.svg *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gtk-dialog-info.svg> *Licence*: GNU Lesser General Public License *Contributeurs*: David Vignoni

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:Solar_System size to scale fr.svg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_System_size_to_scale_fr.svg *Licence*: Creative Commons Zero *Contributeurs*: Hégésippe Cormier, Jogadyl, 3 modifications anonymes

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:solarsystem.jpg *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solarsystem.jpg> *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: Kaktuse

File:Taille relative du Soleil et des planètes (distances échelle à un terrain de football).jpg *Source*:

[http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Taille_relative_du_Soleil_et_des_planètes_\(distances_échelle_à_un_terrain_de_football\).jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Taille_relative_du_Soleil_et_des_planètes_(distances_échelle_à_un_terrain_de_football).jpg) *Licence*: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs*: User:Lsmppascal, User:Tdadamemd dqmb

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:Amanece en Mojarcar 02.jpg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Amanece_en_Mojarcar_02.jpg *Licence*: Creative Commons Attribution 2.0 *Contributeurs*: David Sanchez

Fichier:HRDiagram-Fr.png *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:HRDiagram-Fr.png> *Licence*: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs*:

HRDiagram.png: Richard Powell derivative work: Leovilok (talk)

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*: AndrewBuck, Dim Grits, Dronempv, Evrik, JorisvS, Manco Capac, Masur, Mianreg, Michaeldsuarez, Njaelkies Lea, Orion 8, Packa, Patrick Rowe, RNLion, Torsch, Urutseg, Voldamag, باسم, 5 modifications anonymes

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:1e12m comparison Kuiper belt and smaller.png *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:1e12m_comparison_Kuiper_belt_and_smaller.png *Licence*: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs*: Paul Stansifer, and User:84user (see "source")

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:Eurocommuter

Fichier:Pluto moon P5 discovery with moons' orbits.jpg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_moon_P5_discovery_with_moons'_orbits.jpg *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: Fotaun, Morio, WolfmanSF, 1 modifications anonymes

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:Eurocommuter

Fichier:Eris and dysnomia2.jpg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Eris_and_dysnomia2.jpg *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: Ford TTT, Jan.Kamenicek, John800104, Kalki, Krinkle, Laïm, Ruslik0, Shorenster, 2 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:Solarmap.png *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solarmap.png> *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: ComputerHotline, Magog the Ogre, Narfiol, Sir48

Fichier:Distance moyenne des objets célestes par rapport au soleil en UA.pdf *Source*:

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Distance_moyenne_des_objets_célestes_par_rapport_au_soleil_en_UA.pdf *Licence*: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs*: Yanodu11

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).

Fichier: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*: Andrew Z. Colvin

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*: User:Solipsis (Andrew Dunn)

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*: Alan Liefing, Benzband, Emijrp, Kenyon, Nard the Bard, Superm401, 6 modifications anonymes

Fichier:Celestia.png *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Celestia.png> *Licence*: GNU General Public License *Contributeurs*: 555, Bourrichon, Cody escadron delta, ComputerHotline, CyberSkull, Czeror, Gildemax, Go for it!, Nnemo, Rocket000, Rursus, Tony Wills, XBrain130

Image:Disambig colour.svg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Disambig_colour.svg *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: Bub's

Fichier:Sun symbol.svg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Sun_symbol.svg *Licence*: inconnu *Contributeurs*: Andrea Coppola, AnonMoos, Aquantrum, Artem Karimov, Bobeats, Bvs-aca, Don-vip, Er Komandante, Fibonacci, Gabrielchihonglee, Juiced lemon, Liftarn, Lucas, MAXXX-309, Melian, Nagy, Orrling, Roomba, Rursus, Samuel Grant, Sarang, Sergey Liverko, WolfgangRieger, Wst, 18 modifications anonymes

Fichier:Solar prominence from STEREO spacecraft September 29, 2008.jpg *Source*:

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_prominence_from_STEREO_spacecraft_September_29_2008.jpg *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: NASA

Fichier:Sun STEREO 4dec2006 lrg.jpg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Sun_STEREO_4dec2006_lrg.jpg *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: NASA (Original uploader was Tainter at en.wikipedia)

Fichier:Vue du soleil.jpg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Vue_du_soleil.jpg *Licence*: GNU Free Documentation License *Contributeurs*: Tablizer traduit par Kokin

Fichier:Structure du Soleil.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Structure_du_Soleil.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Graphium, Kokin, Sebm81, 2 modifications anonymes

Fichier:FusionintheSun.svg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:FusionintheSun.svg> *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Borb, Clark89, Cmglee, Extra999, Harp, Jynto, Njaelkies Lea, Wondigoma, Yannismc, Zanssieh, 7 modifications anonymes

Fichier:Sun920607.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Sun920607.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:HI6563_fulldisk.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:HI6563_fulldisk.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* CWitte, ComputerHotline

Fichier:Solar eclipse 1999 4 NR.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_eclipse_1999_4_NR.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Luc Viatour

Fichier:Vectb.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Vectb.jpg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs:* Pascalou petit

Fichier:Ring of fire.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ring_of_fire.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Northern Lights, Greenland.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Northern_Lights_Greenland.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution 2.0 *Contributeurs:* Nick Russell from Cardiff, UK

Fichier:Planets and sun size comparison.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Planets_and_sun_size_comparison.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 *Contributeurs:* User:Lsmaspascal

Fichier:Heliocentric.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Heliocentric.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Andreas Cellarius

Fichier:Smm.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Smm.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bricktop, GDK, Ploum's

Fichier:Sun.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Sun.jpg> *Licence:* Creative Commons Attribution 3.0 *Contributeurs:* Olivier Herold

Fichier:Coucher de soleil sur Moorea.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Coucher_de_soleil_sur_Moorea.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Rioga98

Image:Mercury symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Aquantrum, Badseed, Basilicofresco, Cathy Richards, Don-vip, Herbythyme, Lexicon, Mrcht, Rursus, Ruslik0, Sarang, Sergey Liverko, Stanmar, Starwiz, Urhixidur, WolfgangRieger, 6 modifications anonymes

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:* NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington. Edited version of Image:Mercury in color - Prockter07.jpg by Papa Lima Whiskey.

Fichier: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

Fichier:Transit of Mercury, 2006-11-08.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Transit_of_Mercury_2006-11-08.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier: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

Fichier:PIA12366 modest.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA12366_modest.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Fichier:Chao Meng-Fu crater.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Chao_Meng-Fu_crater.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Inset-mercury.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Inset-mercury.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bob Jackson, Bryan Derksen, Lotse

Fichier:Rupes discovery.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Rupes_discovery.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User:Lotse

Fichier:Lunar cataclysm.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Lunar_cataclysm.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 *Contributeurs:* Timwether

Fichier:Merc fig2sm.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Merc_fig2sm.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Quote from : "NASA photo by..."

Fichier: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

Fichier: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

Fichier: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 ()

Fichier:Caloris basin mercure.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Caloris_basin_mercure.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Dhenry at fr.wikipedia

Fichier:Mercury Magnetic Field NASA.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_Magnetic_Field_NASA.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Joancreus, Materials scientist, Ruslik0, Soerfm

Fichier:Mercure Lefebvre Louvre MR1857 noir.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercure_Lefebvre_Louvre_MR1857_noir.jpg *Licence:* Creative Commons Zero *Contributeurs:* User:Jebulon

Fichier: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

Fichier: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

Fichier: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

Fichier:Mercury shadow.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mercury_shadow.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Mercury.jpg: created by NASA derivative work: Wilfredo Rodríguez (talk)

Fichier:Mariner10.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mariner10.gif> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:MESSENGER first photo of unseen side of mercury.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:MESSENGER_first_photo_of_unseen_side_of_mercury.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Image:Venus symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Kyle the hacker

Image:Venus-real.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus-real.jpg> *Licence:* inconnu *Contributeurs:* NASA/Ricardo Nunes

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

Fichier: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 structure.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_structure.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* User:Vzb83

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, RémiH, TheDJ

Fichier: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

Fichier:TerraformedVenus.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:TerraformedVenus.jpg> *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Original uploader was Ittiz at en.wikipedia

Fichier: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 symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Venus_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Kyle the hacker

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

Image:Earth symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earth_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* OsgoodeLawyer

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/Apollo 17 crew; taken by either Harrison Schmitt or Ron Evans

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 poster-fr.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Earth_poster-fr.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* Hawk-Eye Traduction by Hawk-Eye too (fr:wp) Original diagram by Kelvinsong

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, Micheletb, Santosga, Sting, Ævar Arnfjörð Bjarmason

Fichier:AYool topography 15min.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:AYool_topography_15min.png *Licence:* Creative Commons Attribution 2.5 *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 Wikipédia, 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:* NASA

Fichier:Full moon partially obscured by atmosphere.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Full_moon_partially_obscured_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 NASA. SVG rendering by Aaron Kaese. French translation by William Crochot.

Fichier:Obliquite plan ecliptique.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Obliquite_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, Denniss, Melikamp, Objix, Orion 8, Samulili, Santosga, Saperaud, Sertion, Kapma2, 5 modifications anonymes

Fichier:2006-RH120-orbit.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:2006-RH120-orbit.jpg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Ohms law

Fichier:Lagrange points2.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Lagrange_points2.png *Licence:* Creative Commons Attribution 3.0 *Contributeurs:* User:Xander89

Fichier:Lagrange points Earth vs Moon.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Lagrange_points_Earth_vs_Moon.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* G.dallorto, Madacs, Vulpecula

Fichier: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.

Fichier: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

Fichier: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 symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_symbol.svg *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Ahmadi, Aquantrum, Ariv photography, Cathy Richards, Chmee2, Don-vip, Fibonacci, Galphi, Herbythyme, Juiced lemon, Missionary, Rursus, Sarang, Savh, Sergey Liverko, Snow Blizzard, TFCforever, Tlustá, Urhixidur, W559, WolfgangRieger, 10 modifications anonymes

Image:Mars Valles Marineris EDIT.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Valles_Marineris_EDIT.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Mars_Valles_Marineris.jpeg: NASA picture derivative work: Lošmi (talk)

Fichier:Mars Earth Comparison.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Earth_Comparison.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User:RHorning, User:Scouter20

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:* NASA/JPL-Caltech/Cornell

Fichier:Mars Géolocalisation 2.JPG *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Géolocalisation_2.JPG *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Agamitsudo

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/GSFC

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

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: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:* Public Domain *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, 5 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

Image:Rocher El Capitan gros plan avec spherules Opportunity sur Mars.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Rocher_El_Capitan_gros_plan_avec_spherules_Opportunity_sur_Mars.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/Cornell

Fichier:Nasa mars opportunity rock water 150 eng 02mar04.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Nasa_mars_opportunity_rock_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 rgbstretch-B011R1 br.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mib_color1_rgbstretch-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:* NASA/P. Christensen; Traduction de l'image originale ©Éréales Kille@ UNIQ-nowiki-0-4ef4be504fad0fe-QINU © UNIQ-nowiki-1-4ef4be504fad0fe-QINU en ce 30 mars 2006 à 12:15 (CEST)

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:* William K. Hartmann, Planetary Science Institute, Tucson, Arizona UNIQ-ref-0-4ef4be504fad0fe-QINU

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, Yakuzai, Zoz, 4 modifications anonymes

Image:Mars Potentially Lake (resized)- Multinational Research in the Southern Hemisphere (Released 22 April 2004).png *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Potentially_Lake_\(resized\)-_Multinational_Research_in_the_Southern_Hemisphere_\(Released_22_April_2004\).png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Mars_Potentially_Lake_(resized)-_Multinational_Research_in_the_Southern_Hemisphere_(Released_22_April_2004).png) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Christensen, P.R., N.S. Gorelick, G.L. Mehall, and K.C. Murray, THEMIS Public Data Releases, Planetary Data System node, Arizona State University

Image:Centauri Montes Region of Mars, 1999 and 2005.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Centauri_Montes_Region_of_Mars,_1999_and_2005.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:Stickney crater on Phobos.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Stickney_crater_on_Phobos.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, Cspan64, Frank C. Müller, Nichalp, Ragesoss, Roomba, Ruslik0, Sreejithk2000 AWB, 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:* BLaueFiSH.as, Badseed, Bryan Derksen, David Kernow, Marco, Sophus Bie, Startaq, Stefan Kühn, W!B!, 2 modifications anonymes

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, Beetsyres34, Brandmeister, Cathy Richards, Counny, Cync, Denniss, Dynamicwork, Eleschev, Endless-tripper, Ericmetro, EugeneZelenko, F1 a n k e r, Fred J. Fry1989, G.dallorto, Karynysmon, Herbythyme, Homo lupus, Illegitimate Barrister, Jake Wartenberg, MaggotMaster, MrAustin390, Ms2ger, Nightstallion, Palosirkka, Patrickpedia, PeaceKeeper97, Pianist, R-41, Rainforest tropicana, Sebyugez, SkeeziX1000, Solbris, Storkk, Str4nd, Tabasco, ThomasPusch, Toben, Twilight Chill, Xgeorg, Zscout370, Полиционер, Серп, Тонь4, 65 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 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:Denelson83 and User:Zscout370 Recode by cs:User:-xfi- (code), User:Shizhao (colors)

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 Acts of Union 1800SVG 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, Huntster, Li-sung, Ruslik0

Image: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: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:* inconnu *Contributeurs:* Ahmadi, Aquantrum, Ariv photography, Cathy Richards, Chmee2, Don-vip, Fibonacci, Galphi, Herbythyme, Juiced lemon, Missionary, Rursus, Sarang, Savh, Sergey Liverko, Snow Blizzard, TFCforever, Tlustá, Urhixidur, W559, WolfgangRieger, 10 modifications anonymes

Fichier:Crystal Clear app fonts.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Crystal_Clear_app_fonts.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Bobarino

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:SolarSystem OrdersOfMagnitude Sun-Jupiter-Earth-Moon.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:SolarSystem_OrdersOfMagnitude_Sun-Jupiter-Earth-Moon.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Tdadamem

Fichier:Jupiter - Coupe intérieure.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_-_Coupe_intérieure.svg *Licence:* Creative Commons Attribution 3.0 *Contributeurs:* User:Jean-Christophe BENOIST

Fichier: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

Fichier: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

Fichier: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

Fichier: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

Fichier:PIA01627 Ringe.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA01627_Ringe.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/Cornell University

Fichier:Magnetosphere Levels.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Magnetosphere_Levels.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Magnetosphere_Levels.jpg; Dennis Gallagher derivative work: Frédéric MICHEL

Fichier:Jupiter magnetosphere schematic.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_magnetosphere_schematic.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Original uploader was Volcanopele at en.wikipedia

Fichier:Solarsystem3DJupiter.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solarsystem3DJupiter.gif> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Lookang

Fichier:Jupitermoon.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupitermoon.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL/DLR

Fichier: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, Shogiru, Urhixidur

Fichier: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.

Fichier:Jupitersatelliteimpact.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupitersatelliteimpact.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Ariadacapo, Bricktop, Friendlystar, Gentgeen, LeaMaimone, Ruslik0

Fichier:voyager2.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Voyager2.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bomazi, Loveless, Pline, Zscout370

Fichier: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

Fichier:Jupiter 10 9 2012.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jupiter_10_9_2012.png *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Jeanserien

Fichier: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)

Fichier:Retrogadation1.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Retrogadation1.png> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* W1B:

Fichier:Antenne-dipole VHF.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Antenne-dipole_VHF.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Vincent

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 Storm.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Saturn_Storm.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Graphium, Kirk39, Manlleus, Newone, Torsch, 4 modifications anonymes

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](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

Fichier:Nuvola apps ksig horizonta.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Nuvola_apps_ksig_horizonta.png *Licence:* GNU Lesser General Public License *Contributeurs:* David Vignoni

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/JPL

Fichier:Taurus (stjärnbild).png *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Taurus_\(stjärnbild\).png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Taurus_(stjärnbild).png) *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Original uploader was Kjell André at sv.wikipedia

Fichier:Herschel-Account of a Comet.pdf *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Herschel-Account_of_a_Comet.pdf *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Friedrich Wilhelm ("William") Herschel (1738-1822)

Fichier:William Herschel01.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:William_Herschel01.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Andrew Gray, ArtMechanic, Boo-Boo Baroo, Dcoetzee, EMStephens, Ecummenic, Laura1822, Leyo, Madmedea, Materialscientist, Peppe83, Victuallers, WeHaKa, Yann, 霧木諒二

Fichier:Fotothek df tg 0000641 Astronomie ^ Forschung.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Fotothek_df_tg_0000641_Astronomie^Forschung.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Germany *Contributeurs:* Common Good, Ervaude, Kilom691, Martin H., Umnik

Fichier:The Solar System - Lowell - Fig. 02.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_Solar_System_-_Lowell_-_Fig_02.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* LaosLos (from a pdf file)

Fichier:Inset-uranus.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Inset-uranus.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Outer Uranian rings.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Outer_Uranian_rings.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Uranus Earth Comparison.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_Earth_Comparison.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* ComputerHotline, Huntster, Juiced lemon, Metrónomo, StaryTG, Urhixidur

Fichier:Magnetic field of Uranus.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Magnetic_field_of_Uranus.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Mungany

Fichier:Uranuslight.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranuslight.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Uranus Orbit.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_Orbit.gif *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Lookang

Fichier:Uranus-intern-en.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus-intern-en.png> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Uranus-intern-de.png; FrancescoA derivative work: WolfmanSF (talk)

Fichier:Uranus Dark spot-fr.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_Dark_spot-fr.svg *Licence:* Public domain *Contributeurs:* Uranus_Dark_spot.jpg; Original uploader was Ruslik0 at en.wikipedia derivative work: Treehill (fr) Treehill

Fichier:Uranuscolour.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranuscolour.png> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Deuar, Remember the dot, Ruslik0, UV

Fichier:Uranian Magnetic field.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranian_Magnetic_field.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Auntof6, El., Inductiveload, McZusatz, Nanite, Shizhao, Stassats, Yarl

Fichier:The Uranus System (VLT) - ESO.jpg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_Uranus_System_\(VLT\)_-ESO.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:The_Uranus_System_(VLT)_-ESO.jpg) *Licence:* inconnu *Contributeurs:* SenseiAC

Image:Uranus rings PIA01977 modest.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranian_rings_PIA01977_modest.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Uranus moons.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_moons.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User:Vzb83

Fichier:Uranian system schematic-fr.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranian_system_schematic-fr.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASAOriginal uploader was Kwamikagami at en.wikipedia. Converted into SVG and translation into french by lilyu.

Fichier:Uranus, Neptune, and their moons (2MASS).jpg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus,_Neptune,_and_their_moons_\(2MASS\).jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus,_Neptune,_and_their_moons_(2MASS).jpg) *Licence:* inconnu *Contributeurs:* Two Micron All Sky Survey (2MASS), a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation.

Image:Uranus Final Image.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus_Final_Image.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Lhborbits.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Lhborbits.png> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs:* en>User:AstroMark

Fichier:Uranus's astrological symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uranus's_astrological_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Lexicon

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:* NASA/JPL

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:* W559

Fichier:Johann-Gottfried-Galle.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Johann-Gottfried-Galle.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* (unknown)

Fichier:Urbain Le Verrier.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Urbain_Le_Verrier.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User Magnus Manske on en.wikipedia

Fichier:John Couch Adams.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:John_Couch_Adams.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* GDK, Ra'ike, Wutsje

Fichier:Gravitational perturbation.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gravitational_perturbation.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* RJHall

Fichier:Neptuno colosal (Museo del Prado) 02a.jpg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptuno_colosal_\(Museo_del_Prado\)_02a.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptuno_colosal_(Museo_del_Prado)_02a.jpg) *Licence:* Creative Commons Attribution 2.0 *Contributeurs:* Ecelan, FlickreviewR, G.dallorto, Jeanhousen, TeleComNasSprVen, Zaqarbal

Fichier:Neptune Full.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_Full.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Coriolis ende, Danim, Ischa1, Körnerbrötchen, Li-sung, O'Dea, Ruslik0, Str4nd, WinstonSmith, 2 modifications anonymes

Fichier:SunsetNeptune.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:SunsetNeptune.png> *Licence:* Creative Commons Attribution 3.0 *Contributeurs:* NFRANGA at en.wikipedia

Fichier:PIA02222.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA02222.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Danim, Fishercd, Kilom691, Ruslik0

Fichier:Neptune seasons.JPG *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_seasons.JPG *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* GeorgHH, Ruslik0, WinstonSmith

Fichier:Neptune Earth Comparison.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_Earth_Comparison.png *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Juiced lemon, Metrónomo, Rursus, StarryTG, Urhixidur

Fichier:Jovian magnetosphere vs solar wind.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Jovian_magnetosphere_vs_solar_wind.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Jovian_magnetosphere_vs_solar_wind.jpg: NASA/JPL derivative work: Frédéric MICHEL

Fichier:Neptune Orbit.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_Orbit.gif *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Lookang

Fichier:Neptune diagram.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_diagram.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* NASA; Pbroks13 (redraw)

Image:Neptune clouds.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_clouds.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA / Jet Propulsion Lab

Image:Neptune darkspot.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_darkspot.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Neptune storms.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune_storms.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Voyager 2 Team

Image:PIA02202 Neptune's full rings.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:PIA02202_Neptune's_full_rings.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Jet Propulsion Lab

Fichier:Neptune-Methane.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neptune-Methane.jpg> *Licence:* Public domain *Contributeurs:* Hubble Space Telescope

Fichier:Montage of Neptune and Triton - GPN-2000-001983.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Montage_of_Neptune_and_Triton_-_GPN-2000-001983.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Fichier:Voyager 2 Neptune and Triton.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Voyager_2_Neptune_and_Triton.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA / Jet Propulsion Lab

Fichier:Pluto symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Lexicon

Fichier:Pluto animiert.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_animiert.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Aineias, NASA, ESA, and M. Buie (Southwest Research Institute) derivative work: Aineias (talk)

Fichier:ClydeTombaugh2.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:ClydeTombaugh2.gif> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* anonymous

Fichier:Lowell astrograph.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Lowell_astrograph.jpg *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Taken by Pretzelpaws with a Casio Exilim EX-Z750 camera. Cropped 8/16/05 using the GIMP.

Fichier:Charon Discovery.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Charon_Discovery.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* U.S. Naval Observatory

Fichier:Pluto concept.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_concept.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA, ESA and G. Bacon (STScI)

Fichier:New Horizons Liftoff.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:New_Horizons_Liftoff.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/Kim Shiflett

Fichier:Plutoorbit1.5sideview.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Plutoorbit1.5sideview.gif> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Lookang

Fichier:TheKuiperBelt Orbits Pluto Polar.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:TheKuiperBelt_Orbits_Pluto_Polar.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* User:Eurocommuter

Fichier:AnimatedOrbitOf134340Pluto.gif *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:AnimatedOrbitOf134340Pluto.gif> *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* WilyD

Fichier:TheKuiperBelt Orbits Pluto Neptune2.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:TheKuiperBelt_Orbits_Pluto_Neptune2.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* User:Eurocommuter

Fichier:Pluto-map-hs-2010-06-c180.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto-map-hs-2010-06-c180.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA, ESA, and Marc W. Buie (Southwest Research Institute)

Fichier:Surface Map of Pluto.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Surface_Map_of_Pluto.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Alan Stern (Southwest Research Institute)/Marc Buie (Lowell Observatory)/NASA/ESA

Fichier:Pluto compared2.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_compared2.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* User:Eurocommuter

Fichier:Pluto-cutaway.svg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto-cutaway.svg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs:* RP88 Original uploader was RP88 at en.wikipedia Later version(s) were uploaded by Dream out loud at en.wikipedia.

Fichier:Charon 2.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Charon_2.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Bastique, Brallan, ComputerHotline, Kameraad Pjotr, NGerda, Ruslik0, Supportstorm, 1 modification anonymes

Fichier:Pluto-Charon double planet.png *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto-Charon_double_planet.png *Licence:* Public domain *Contributeurs:* Lanthanum-138 at en.wikipedia

Fichier:Pluto and its satellites (2005).jpg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_and_its_satellites_\(2005\).jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pluto_and_its_satellites_(2005).jpg) *Licence:* Public domain *Contributeurs:* H. Weaver (JHU/APL), A. Stern (SwRI), and the HST Pluto Companion Search Team

Fichier:Orbit of Pluto's moon P4.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Orbit_of_Pluto's_moon_P4.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Kheider, Rehman, 2 modifications anonymes

Fichier:Creation of the moons of Pluto.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Creation_of_the_moons_of_Pluto.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Acom

Image:433eros.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:433eros.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/NEAR Project (JHU/APL).

Image:243 ida.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:243_ida.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA/JPL

Image:Ceres optimized.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ceres_optimized.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA, ESA, J. Parker (Southwest Research Institute), P. Thomas (Cornell University), and L. McFadden (University of Maryland, College Park)

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, Sarilho1, Urhixidur, 4 modifications anonymes

Image:2Pallas symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:2Pallas_symbol.svg *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Klaus Röder

Image:Juno symbol.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Juno_symbol.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Lexicon, Sarang, Urhixidur, 1 modifications anonymes

Fichier:Asteroid Belt-fr.svg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Asteroid_Belt-fr.svg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Etiennekd, Flappiefh

Image:(253) mathilde.jpg *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:\(253\)_mathilde.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:(253)_mathilde.jpg) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

Image:Planetoid_crashing_into_primordial_Earth.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Planetoid_crashing_into_primordial_Earth.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Don Davis (work commissioned by NASA)

Image:Comet-Hale-Bopp-29-03-1997 hires adj.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Comet-Hale-Bopp-29-03-1997_hires_adj.jpg *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Contributeurs:* Philipp Salzgeber

Fichier:Halebopp031197.jpg *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Halebopp031197.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Geoff Chester

Fichier:Halley 860412.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Halley_860412.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Ph. Malburet

Fichier:Comet animation.gif *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Comet_animation.gif *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Original uploader was Pixel at pl.wikipedia

Fichier:Tapestry of bayeux10.jpg *Source:* http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Tapestry_of_bayeux10.jpg *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* AnonMoos, Arnomane, Cherubino, ElRaki, GDK, Harp, Jappalang, Morgan Riley, Olivier, Tttrung, Urban, 5 modifications anonymes

Image:Trajectoire-Rosetta.png *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Trajectoire-Rosetta.png> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs:* Pline

Licence

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)
