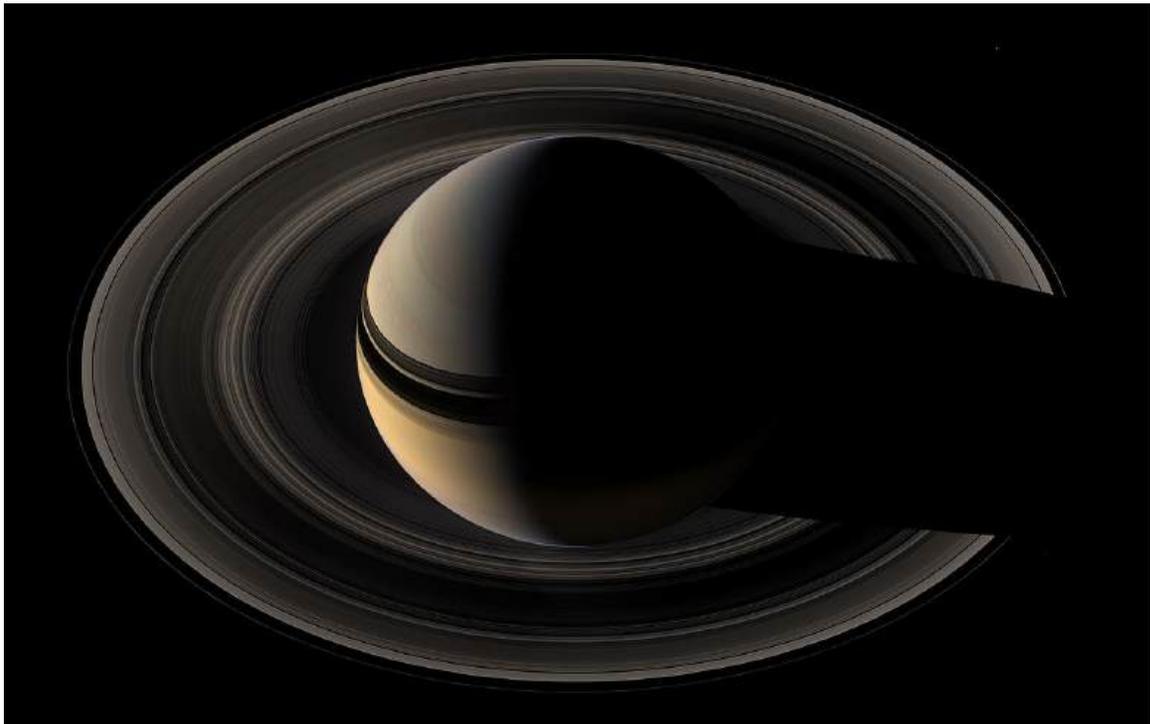


7 LES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE

De quoi sont faits les anneaux de Saturne ?



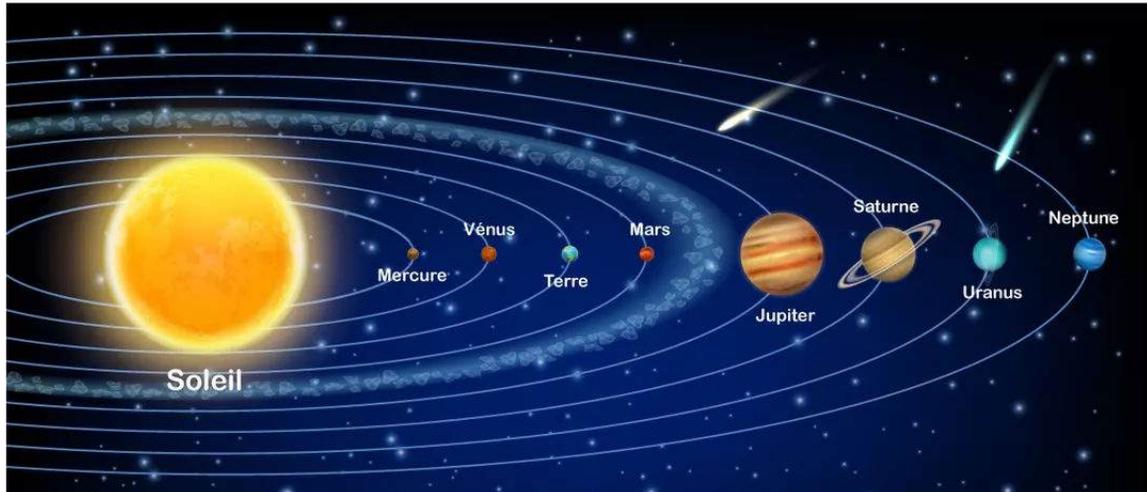
en.wikipedia.org/wiki/Rings_of_Saturn

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

7.1 LE SYSTÈME SOLAIRE

Les 8 planètes

Il y a 8 planètes dans le Système solaire.



www.hugolescargot.com/fiches-scolaires/sciences-et-decouverte/51127-systeme-solaire-planetes/

Le tableau suivant donne les paramètres des orbites des planètes.

| Planète | a (UA) | e | r_p (UA) | r_a (UA) |
|---------|----------|-------|------------|------------|
| Mercure | 0,387 | 0,206 | 0,307 | 0,467 |
| Vénus | 0,723 | 0,007 | 0,718 | 0,728 |
| Terre | 1 | 0,017 | 0,983 | 1,017 |
| Mars | 1,52 | 0,093 | 1,38 | 1,67 |
| Jupiter | 5,20 | 0,049 | 4,95 | 5,46 |
| Saturne | 9,58 | 0,057 | 9,04 | 10,12 |
| Uranus | 19,2 | 0,047 | 18,3 | 20,1 |
| Neptune | 30,1 | 0,009 | 29,8 | 30,3 |

Le Système solaire à l'échelle

L'image montrant le Système solaire en haut de la page n'est pas du tout à l'échelle. On va donc faire ici un petit modèle réduit du Système solaire, pour bien visualiser les distances entre les planètes par rapport à leur taille. On va donc imaginer que, dans ce modèle réduit, le Soleil a la taille d'un ballon de basketball. Voici à quelle distance seraient alors les planètes dans ce modèle réduit et quelle serait la taille des planètes.

| Planète | Distance | Diamètre de la planète |
|---------|----------|--------------------------|
| Mercure | 10 m | 0,84 mm (tête d'épingle) |
| Vénus | 19 m | 2,1 mm (grain de poivre) |

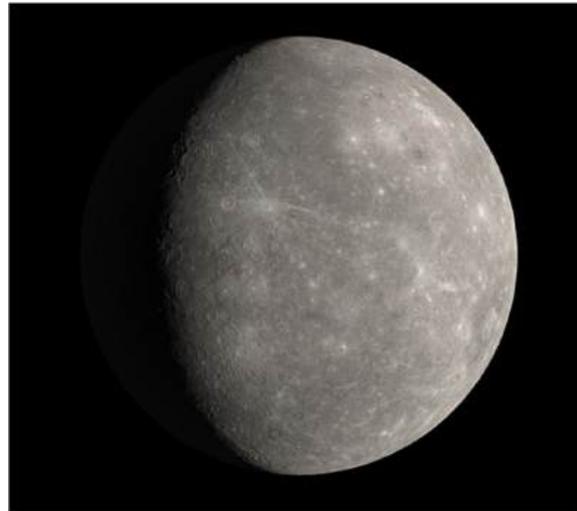
| | | |
|---------|-------|--------------------------|
| Terre | 26 m | 2,2 mm (grain de poivre) |
| Mars | 39 m | 1,2 mm (tête d'épingle) |
| Jupiter | 130 m | 25 mm (noix de Grenoble) |
| Saturne | 250 m | 21 mm (raisin) |
| Uranus | 500 m | 8,8 mm (bleuet) |
| Neptune | 780 m | 8,5 mm (bleuet) |

La plus grosse planète n'est qu'une simple noix de Grenoble à 130 m du Soleil gros comme un ballon de basketball. Dans ce modèle, l'étoile le plus près est un autre ballon de basketball à 6850 km de distance, soit environ à Moscou !

7.2 MERCURE

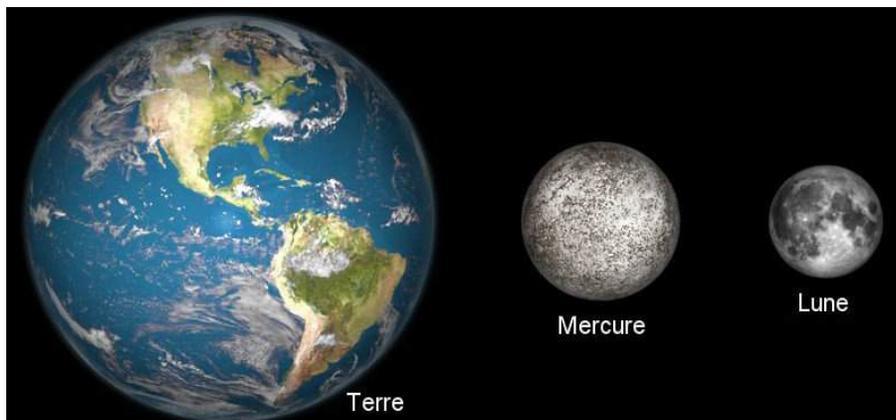
Voici un petit film de Mercure.

<https://apod.nasa.gov/apod/ap171211.html>



en.wikipedia.org/wiki/File:MESSENGER_first_photo_of_unseen_side_of_mercury.jpg

C'est une planète assez petite (38 % du rayon terrestre) et peu massive (5,6 % de la masse de la Terre).



web.utah.edu/astro/Mercury.html

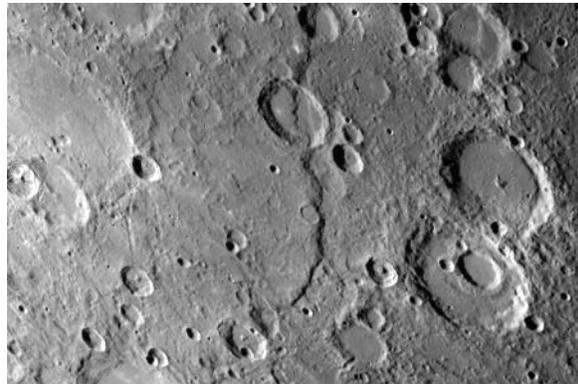
Atmosphère et surface

Mercure est trop chaude et n'est pas assez massive pour avoir une atmosphère importante. On détecte quelques gaz, mais ils proviennent de la vaporisation de la surface par la chaleur du Soleil et le vent solaire. Ces gaz se perdent assez rapidement dans l'espace et on peut dire que Mercure n'a pas véritablement d'atmosphère.

Il n'y a donc pas d'érosion à la surface de la planète, ce qui fait que les cratères faits il y a très longtemps sont toujours visibles aujourd'hui. La surface est cependant couverte de régolite, ce qui a effacé quelques petits cratères. L'absence d'atmosphère amène aussi de grandes variations de température à la surface de la planète. Les températures varient entre 430 °C et -170 °C.

Cette absence d'érosion fait en sorte que Mercure ressemble un peu à la Lune. Presque toute la surface est très vieille avec une forte densité de cratères. Il y a bien quelques cratères d'impact qui se sont remplis de lave (comme le bassin Carolis de 1300 km de diamètre), mais rien d'aussi important que ceux ayant donné naissance aux mers lunaires.

Il y a aussi de gigantesques falaises à la surface de Mercure. On peut en voir une sur l'image de droite. Ces falaises ont une hauteur de plusieurs kilomètres et une longueur de plusieurs centaines de kilomètres. On pense que ces fissures de la croûte sont apparues quand la planète s'est refroidie (et donc contractée) ou quand la baisse de la vitesse de rotation faite par les marées solaires a changé la forme de la planète (en modifiant l'aplatissement). (Notez qu'on a également découvert quelques falaises de ce type sur la Lune en 2010.)



fr.wikipedia.org/wiki/Mercure_(plan%C3%A8te)

Vous pouvez explorer la surface de Mercure avec ce genre de Google map de Mercure.
https://messenger-act.actgate.com/msg_r_public_released/react_quickmap.html

La rotation de Mercure

Mercure étant assez près du Soleil, les effets de marée faits par le Soleil sont très importants. Les forces de marée du Soleil sur Mercure sont 17 fois plus importantes que celles sur Terre. On pourrait donc s'attendre à ce que la rotation de Mercure se soit arrêtée et que Mercure présente toujours la même face vers le Soleil, d'autant plus que Mercure est peu massive et qu'il est relativement facile de ralentir sa rotation. Toutefois, ce n'est pas ce qu'on observe.

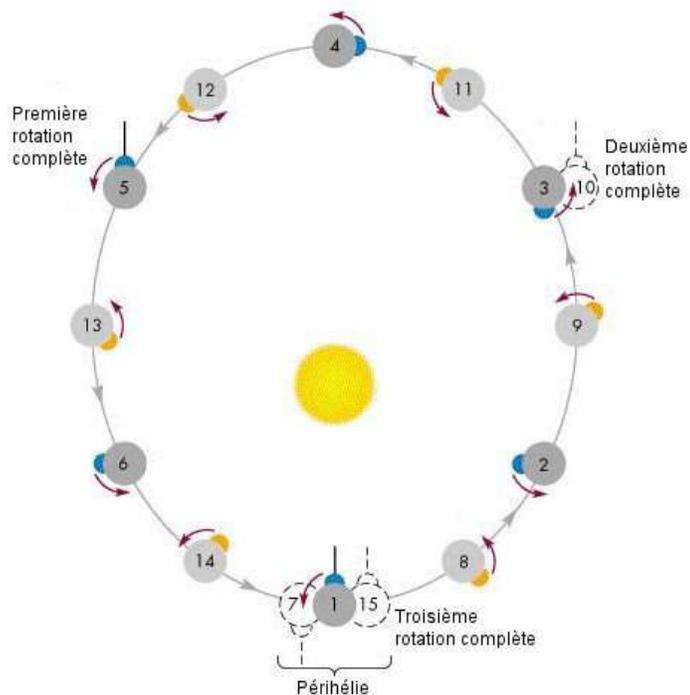
Mercure ne peut avoir toujours la même face tournée vers le Soleil parce que l'orbite de cette planète est trop elliptique. Regardons ce qui arriverait si c'était le cas. Quand Mercure

est au périhélie, elle va très vite et sa vitesse angulaire par rapport au Soleil change très rapidement. À ce moment, la rotation de la planète sur elle-même serait trop lente pour garder toujours la même face vers le Soleil. À l'aphélie, la planète va moins vite et sa vitesse angulaire par rapport au Soleil est moins grande. Alors, la rotation de la planète sur elle-même serait trop rapide pour garder toujours la même face vers le Soleil. En moyenne, on aurait toujours la même face vers le Soleil, mais il y aura de grandes oscillations d'un côté à l'autre de cette face.

Les forces de marée qui tentent de garder toujours la même face de Mercure vers le Soleil diminuent rapidement avec le cube de la distance, ce qui signifie qu'elles sont beaucoup plus importantes (3,5 fois plus grande) au périhélie qu'à l'aphélie. Les forces de marée près du périhélie ont beaucoup plus d'importance et c'est donc au périhélie que la rotation de Mercure sur elle-même se fait presque avec la même vitesse angulaire que le déplacement de Mercure sur son orbite.

En fait, la situation stable pour Mercure est la suivante : Mercure fait trois tours sur elle-même pendant qu'elle fait deux tours autour du Soleil.

Imaginons une personne sur Mercure. Quand la planète est à la position 1, il est midi pour cette personne, ce qui signifie qu'elle est sur le méridien dirigé vers le Soleil. On voit ensuite la planète qui se déplace sur son orbite et qui tourne sur elle-même de sorte qu'au bout de 58,646 jours (terrestres), elle a fait un tour complet sur elle-même (position 5). Quand la planète revient au périhélie au bout de 87,969 jours (position 7), elle a fait un tour et demi au total. Il est alors minuit pour notre personne. La rotation autour du Soleil se poursuit pour que Mercure fasse un autre tour et demi. Quand la planète revient au périhélie (position 15), il est à nouveau midi pour la personne. En d'autres mots, les forces de marée ont fait en sorte que les deux faces de Mercure sont vers le Soleil en alternance au périhélie. Au centre de ces faces qui alternent, on retrouve les longitudes chaudes de Mercure. À ces longitudes à l'équateur, on aura le Soleil exactement au zénith lors du périhélie et c'est à ces endroits que la température atteindra 430 °C.



www.mhhe.com/physsci/astronomy/fix/student/chapter10/10f03.html

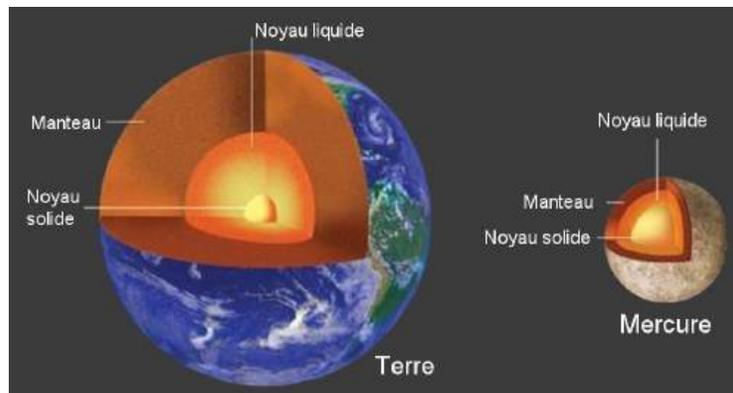
Notez aussi que ces deux rotations autour du Soleil correspondent à un seul jour sur Mercure. Ce très long jour, équivalant à 175,938 jours terrestres, contribue aux fortes variations de température entre le jour et la nuit.

Avec une telle rotation, Mercure tourne sur elle-même avec une vitesse angulaire presque égale à sa vitesse angulaire autour du Soleil au périhélie. Un observateur verrait donc le Soleil immobile dans le ciel de Mercure au périhélie. En fait, Mercure tourne sur elle-même un peu trop vite pendant 8 jours au périhélie. Un observateur verrait donc le Soleil faire un petit mouvement dans la direction inverse dans le ciel de Mercure pendant 8 jours. Ce vidéo montre une animation de ce phénomène.

<https://www.youtube.com/watch?v=yiteaS3nZhQ>

Un noyau anormalement gros

La densité moyenne de Mercure est de 5400 kg/m^3 , ce qui est assez près de celle de la Terre qui a une densité moyenne de 5500 kg/m^3 . Cependant, la compression des matériaux dans la Terre est plus grande, ce qui fait augmenter la densité de la Terre. Quand on calcule les densités décompressées de ces planètes, on arrive à 5300 kg/m^3 pour Mercure et 4400 kg/m^3 la Terre. On remarque donc que la densité de Mercure est plus grande. Cela peut s'expliquer par la présence d'un noyau métallique plus important puisque la densité du noyau métallique est plus grande que celle des roches du manteau. Mercure aurait donc un noyau proportionnellement plus gros que celui de la Terre.



messenger.jhuapl.edu/soc/highlights122011.php

Le noyau de Mercure occupe 42 % du volume de Mercure alors que le noyau de la Terre n'occupe que 17 % du volume de la Terre.

Pour l'instant, on ne sait pas exactement pourquoi le noyau de Mercure est si gros. Est-ce le résultat d'une collision ou est-ce le Soleil qui a vaporisé une bonne partie du manteau d'une Mercure initialement plus grosse ? On ne sait pas.

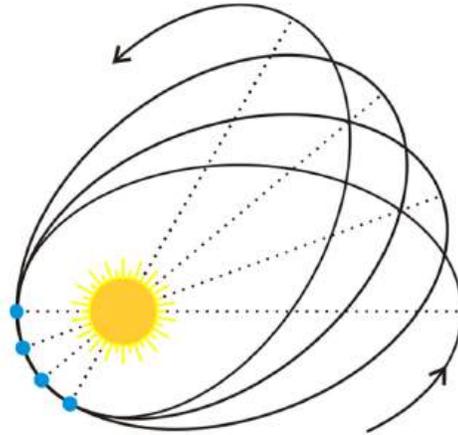
On remarque qu'une partie du noyau serait encore liquide. Cela peut sembler curieux puisque Mercure, étant petite, aurait dû se refroidir assez vite pour qu'il n'y ait plus de partie liquide dans la planète. Toutefois, les forces de marée s'exerçant sur Mercure déforment la planète et génèrent beaucoup de friction, ce qui garde l'intérieur de la planète plus chaud que prévu.

Ce noyau liquide génère un champ magnétique, mais il n'est pas très intense. Le champ magnétique de Mercure a à peine 1 % de l'intensité du champ magnétique terrestre.

La précession du périhélie de Mercure

Comme pour plusieurs planètes et satellites du Système solaire, les perturbations peuvent entraîner une modification de l'orbite. C'est effectivement ce qui se produit avec Mercure. Parmi ces perturbations de l'orbite, la précession du périhélie de Mercure a eu une importance particulière dans l'histoire des sciences. On mesure un mouvement de précession de périhélie de Mercure de 574 secondes d'arc par siècle ($0,16^\circ$ par siècle). L'image de droite montre, en exagérant beaucoup, la précession du périhélie de Mercure.

en.wikipedia.org/wiki/Apsidal_precession



L'étude des perturbations faites par les autres planètes du Système solaire nous indique que la précession due aux perturbations de ces planètes est de 531 secondes d'arc. On a remarqué la différence entre la valeur mesurée (574'') et la valeur théorique (531'') dès 1859. Urbain Le Verrier est même allé jusqu'à supposer qu'il y avait une autre planète plus près du Soleil que Mercure pour expliquer l'écart (planète qu'il appelait Vulcain). Pendant des années, il y a eu de nombreuses annonces de l'observation de cette planète par des astronomes, qui se sont toutes révélées incorrectes.

La solution a été donnée par Albert Einstein. Sa théorie de la relativité générale prévoit en effet que, même sans aucune perturbation, il y aurait précession des périhélies et que cet effet serait plus important pour Mercure. Plus incroyables encore, ses calculs montraient que la précession de Mercure due à la relativité est de 43 secondes d'arc par siècle, ce qui comble exactement l'écart observé ! Cette explication de la précession du périhélie de Mercure par la relativité générale a beaucoup contribué à faire accepter la théorie d'Einstein.

7.3 VÉNUS



en.wikipedia.org/wiki/Venus

Vénus est une planète qui a pratiquement la même taille (95 % du rayon terrestre) et la même masse que la Terre (82 % de la masse de la Terre).

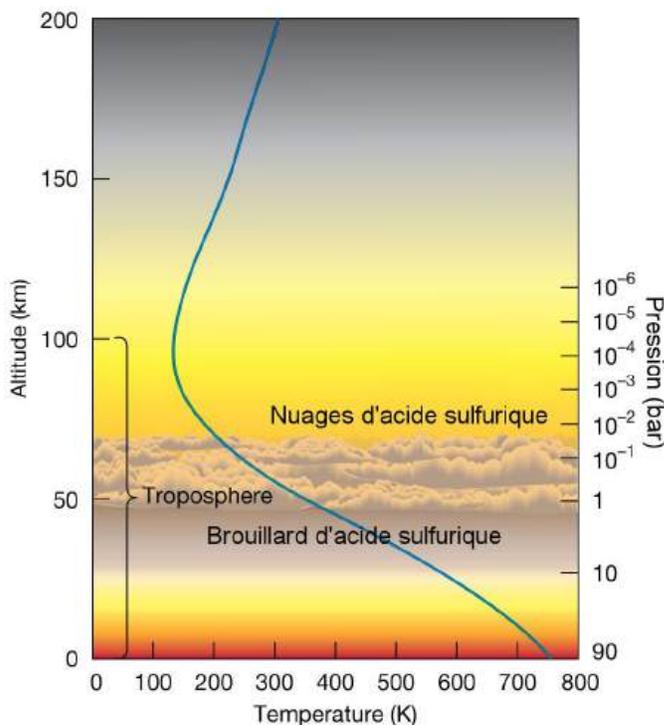


en.wikipedia.org/wiki/Colonization_of_Venus

L'atmosphère de Vénus

Sur les images de Vénus, on ne voit pas la surface de la planète. La surface est complètement cachée par une épaisse couche de nuages. Ces nuages font partie de la formidable atmosphère de Vénus.

L'atmosphère de Vénus est beaucoup plus importante que celle de la Terre. À la surface, la pression est 9200 kPa, soit 90,8 fois la pression de l'atmosphère terrestre à la surface de la Terre. La densité de l'atmosphère est si grande qu'elle vaut 6,5 % de la densité de l'eau. Même avec un scaphandre d'astronaute, on pourrait voler avec de simples ailes de carton dans une atmosphère aussi dense.



physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121/Notes/Chapter9.html

Cette atmosphère est composée à 96 % de CO₂ et à 3,5 % d'azote (N₂). Avec une telle quantité de CO₂, il y a évidemment un effet de serre très important. Cet effet de serre, combiné à la proximité du Soleil, fait monter la température moyenne à la surface de Vénus jusqu'à 462 °C. C'est assez chaud pour cuire une pizza surgelée en 7 secondes.

L'atmosphère transfère bien la chaleur à la surface de la planète et il n'y a pas beaucoup de variation de température entre le jour et la nuit.

Les nuages sont composés d'acide sulfurique. Il y a donc des pluies d'acide sulfurique, mais les gouttes s'évaporent à nouveau avant d'atteindre le sol. Ces nuages

diffusent beaucoup la lumière et ce sont eux qui nous empêchent de voir la surface de Vénus. Aussi, ces nuages reflètent beaucoup la lumière provenant du Soleil ce qui fait en sorte que Vénus a un albédo très élevé (0,7). Ainsi, une proportion assez faible de la lumière du Soleil arrive au sol de la planète. La surface de Vénus est donc plutôt sombre, même en plein jour. L'intensité lumineuse à la surface ressemble à celle que l'on a sur Terre pendant une journée nuageuse.

Il n'est donc pas étonnant que les sondes qu'on a envoyées à la surface de Vénus n'aient pas résisté très longtemps avec à une telle pression et à une telle température, d'autant plus qu'elles devaient traverser les nuages d'acide sulfurique avant d'arriver au sol. À cette température, il fait assez chaud pour que le plomb et l'étain fondent. Le record de survie pour une sonde à la surface de Vénus est de 127 minutes.

Mais pourquoi la Terre et Vénus ont-elles des atmosphères si différentes ? On pense qu'au départ, les gaz qui se dégagent par volcanisme sur les planètes rocheuses amènent toujours la formation d'une atmosphère contenant beaucoup de gaz carbonique (CO_2) et, dans une moindre mesure, de vapeur d'eau. Les deux atmosphères ne devaient donc pas être si différentes au départ. La Terre étant plus éloignée du Soleil, la température plus froide a fait en sorte que l'eau dans l'atmosphère s'est condensée pour former des océans. Le gaz carbonique s'est ensuite dissout dans l'eau. L'eau de pluie s'est également combinée avec le CO_2 pour former de l'acide carbonique. Cet acide a ensuite réagi avec le sol pour former de nouveaux types de roche, emprisonnant ainsi le gaz carbonique. Ainsi, l'eau et le gaz carbonique, dominants au départ dans l'atmosphère terrestre, ont été éliminés, réduisant ainsi la pression et l'effet de serre. Si, sur Terre, on relâchait tout le gaz carbonique des océans et des roches, on aurait une atmosphère contenant 98 % de CO_2 et ayant une pression au sol 70 fois plus grande que la pression actuelle, ce qui ressemblerait pas mal à l'atmosphère de Vénus.

Dans le cas de Vénus, l'eau ne s'est jamais condensée pour former des océans et le gaz carbonique est donc resté dans l'atmosphère. Les rayons ultraviolets du Soleil ont ensuite lentement décomposé la vapeur d'eau en haute atmosphère pour la transformer en hydrogène et en oxygène. L'hydrogène s'est ensuite échappé dans l'espace, alors que l'oxygène, très réactif, s'est combiné avec d'autres éléments au sol ou dans l'atmosphère de la planète.

La surface de Vénus

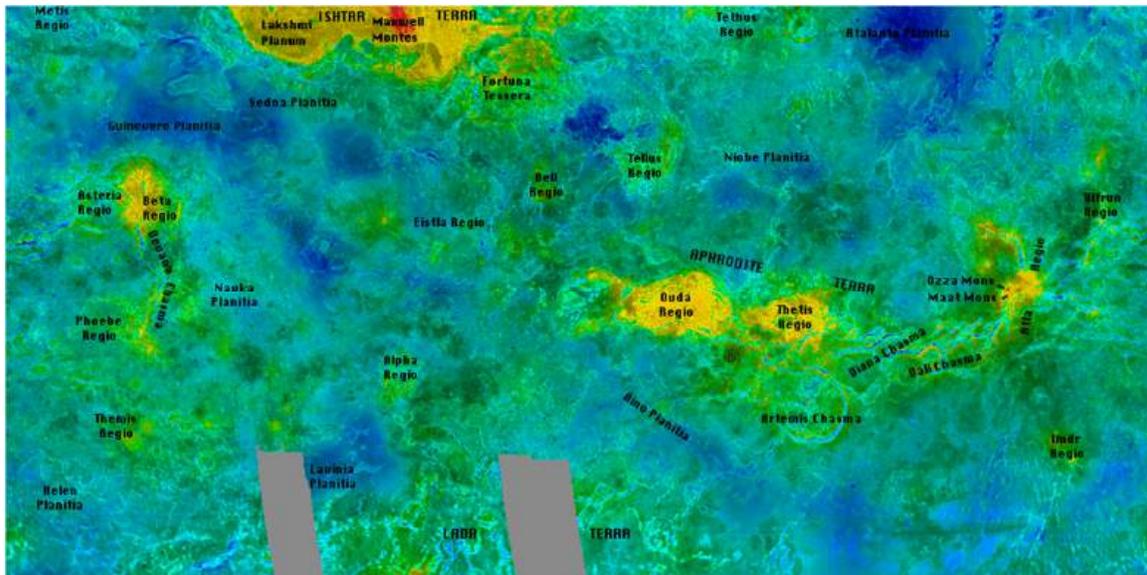
Comme on ne peut pas observer la surface de Vénus à partir de la Terre, il faut penser à d'autres moyens pour observer la surface. Les Soviétiques ont envoyé plusieurs sondes qui se sont posées à la surface de Vénus et nous ont fait parvenir quelques photos.

Voici une photo prise par la sonde Vénéra 13 en 1982. (C'est cette sonde qui a résisté 127 minutes à la surface.)



www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2090556/Life-Venus-Russian-scientist-claims-seen-scorpion-probe-photographs.html

Les sondes permettent de voir qu'une très petite partie de la surface de Vénus. Pour l'observer dans son ensemble, on a plutôt utilisé des ondes radars, ondes qui ne sont pas bloquées par les nuages de Vénus. Cette tâche a été accomplie par les sondes *Venus Pioneer* (1978) et *Magellan* (1990) placées en orbite autour de Vénus. Voici la carte de Vénus que ces sondes nous permettent d'obtenir.



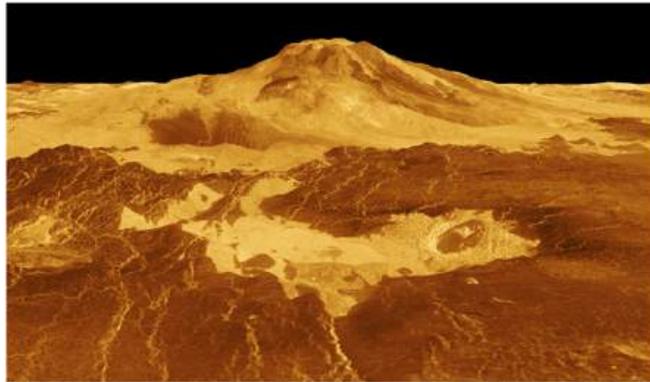
pages.uoregon.edu/soper/Venus/surface.html

La surface est relativement lisse. Sur 64 % de la surface, on a des plaines très lisses où les variations d'altitudes sont inférieures à 2 km. Sur 31 % de la surface, on a des terres basses qui sont de 2 à 3 km sous les plaines. Sur 5 % de la surface, on a des terres hautes qui sont 10 km au-dessus des grandes plaines. Il y a deux principales régions de terres hautes qui sont *Aphrodite* (près de l'équateur, environ de la taille de l'Afrique) et *Ishtar* (près du pôle Nord, environ de la taille de l'Australie).

Les 840 cratères trouvés à la surface, qui ont des diamètres variant entre 2 et 280 km, sont uniformément répartis. Cela signifie qu'il n'y a pas de région de la surface qui est plus vieille qu'une autre. Selon la quantité de cratères, la surface aurait un âge se situant en 200 et 800 millions d'années. Le fait que 52 % des cratères sont légèrement fracturés et 4,5 % se sont remplis de lave peut être une indication qu'il y a eu un événement volcanique majeur qui a recouvert la surface il y a 500 millions d'années et qu'il y a eu très peu de volcanisme depuis ce temps. Il semblerait que de 80 à 90 % de la surface a été recouverte de lave pendant 10 à 50 millions d'années. Le volcanisme de Vénus mène à des événements beaucoup plus catastrophiques que sur Terre.

Il y a peut-être encore des volcans actifs à la surface, mais ça reste à confirmer.

Les images radars permettent même une reconstruction de la surface sur ordinateur, dont voici un exemple à droite (le *Maat mons*, sur le continent Aphrodite). Comme ce sont des images radars, ce ne sont pas les vraies couleurs.

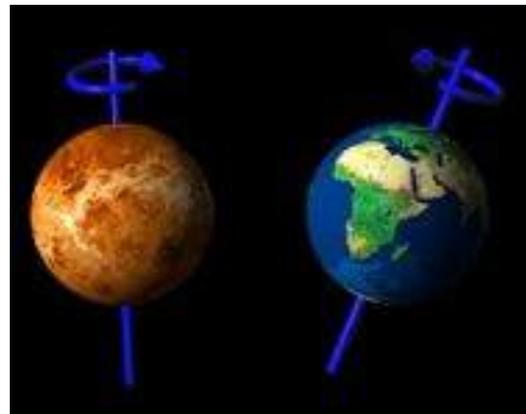


spaceplace.nasa.gov/volcanoes/en/

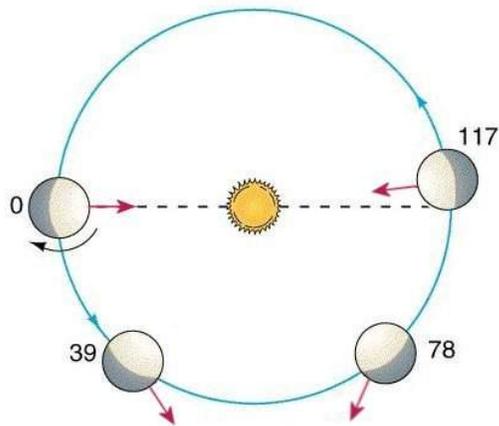
Toutefois, les images montrent que les terrains en haute altitude reflètent très bien les ondes radars (c'est pour ça qu'ils semblent plus « blancs » que le reste de la surface.) Cette grande réflectivité est due à la présence d'une substance métallique, probablement de la pyrite. Il semble que cette substance a un peu le même rôle que la neige sur les montagnes terrestres. Les conditions atmosphériques font en sorte que cette substance se condense en altitude et se dépose sur les montagnes. Notez qu'il n'y en a pas au sommet de la plus haute montagne, ce qui suggère que le phénomène est limité à une certaine plage d'altitude.

La rotation de Vénus

Vénus est un peu particulière parce qu'elle tourne sur elle-même dans le sens inverse de toutes les planètes du Système solaire, à l'exception d'Uranus. De plus, elle tourne très lentement sur elle-même puisqu'il lui faut 243 jours pour faire un tour sur elle-même, ce qui est plus long que sa période de rotation autour du Soleil, qui est de 224 jours.



www.enterprisemission.com/VenusExpress.htm



frigg.physastro.mnsu.edu/~eskridge/astr102/week10.html

Avec une telle rotation dans le sens inverse, le jour solaire a une durée de 117 jours sur Vénus. L'image de gauche nous montre comment se produit ce jour le long de l'orbite. On voit qu'il faut près de 117 jours terrestres pour que midi revienne à un endroit de la surface. Entre ces deux instants, la planète n'a même pas fait un demi-tour sur elle-même.

Cette inversion est assez particulière, mais elle n'est pas vraiment bizarre. Les perturbations des autres planètes peuvent changer l'orientation de l'axe de la Terre et elles peuvent aussi changer l'orientation de l'axe de Vénus. Il est possible que ces perturbations aillent jusqu'à inverser la

rotation de la planète, comme c'est le cas avec Vénus actuellement. Rassurez-vous, la Lune stabilise la direction de l'axe de la Terre de sorte qu'elle ne peut pas changer beaucoup. La Terre ne pourrait donc pas se retrouver dans la même situation que Vénus.

Le champ magnétique de Vénus

Pour que Vénus puisse avoir un champ magnétique, elle doit premièrement avoir un noyau externe liquide. Vénus étant environ de la même taille que la Terre, sa température interne devrait être passablement la même. Évidemment, la Terre est un peu réchauffée par les effets de marée de la Lune, mais Vénus est réchauffée par les effets de marée du Soleil, qui sont 2,6 fois plus grand sur Vénus que sur la Terre, ce qui fait que les deux situations sont assez similaires. De plus, comme on semble deviner des traces de volcanisme assez récentes à la surface de Vénus, il est clair qu'il devrait y avoir encore une partie liquide à l'intérieur de Vénus.

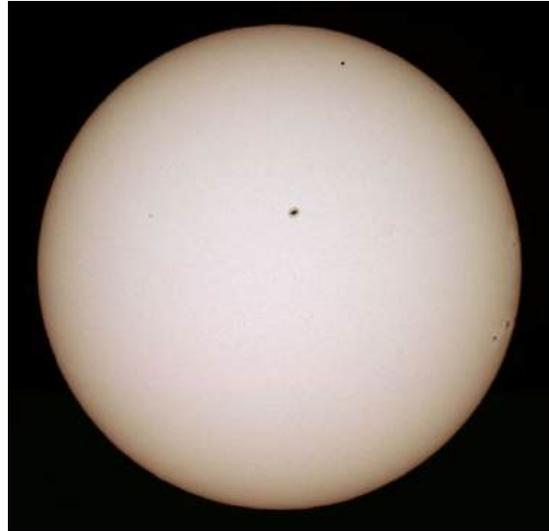
Malgré cela, Vénus n'a pas de champ magnétique. On se rappelle que pour avoir un champ magnétique, il faut que la matière conductrice liquide fasse de la convection. La seule explication possible à l'absence de champ magnétique serait donc une absence de convection dans le noyau externe. Pour l'instant, on débat toujours sur ce qui pourrait causer une telle absence de convection. Selon une de ces théories, une croûte plus épaisse que celle de la Terre emprisonnerait la chaleur interne de la planète, ce qui ferait monter la température du manteau. Ainsi, il y a moins de différence de température entre le noyau solide et le manteau, ce qui fait que la variation de température dans le noyau externe liquide n'est pas assez grande pour générer de la convection.

Les passages de Vénus

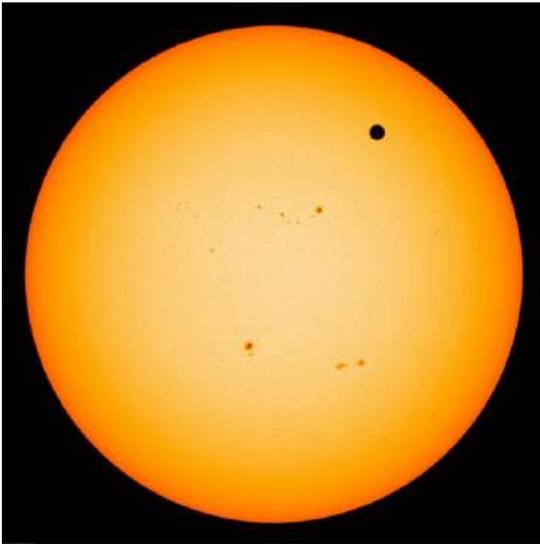
Il arrive parfois que Mercure et Vénus passent devant le Soleil. Vu de la Terre, ces planètes ne sont évidemment pas assez grandes pour cacher le Soleil au complet pour faire une

éclipse totale, mais elles en cachent une petite partie. On appelle ces passages des *transits*. Durant les transits, on voit la planète traverser le Soleil d'un côté à l'autre en quelques heures.

À droite, on peut voir une image du Soleil lors du transit de Mercure du 7 mai 2003 (Mercure est en haut, un peu à droite).



thierrylambert.free.fr/soleil/images/eos10d/soleil030507.html



Les transits de Vénus sont un peu plus évidents. Voici une image du Soleil lors du transit de Vénus du 5 juin 2012.

gbphotodidactical.ca/page-Venus-Transit-2012-06-05.html

Utilisation des transits de Vénus pour calculer la distance entre la Terre et le Soleil

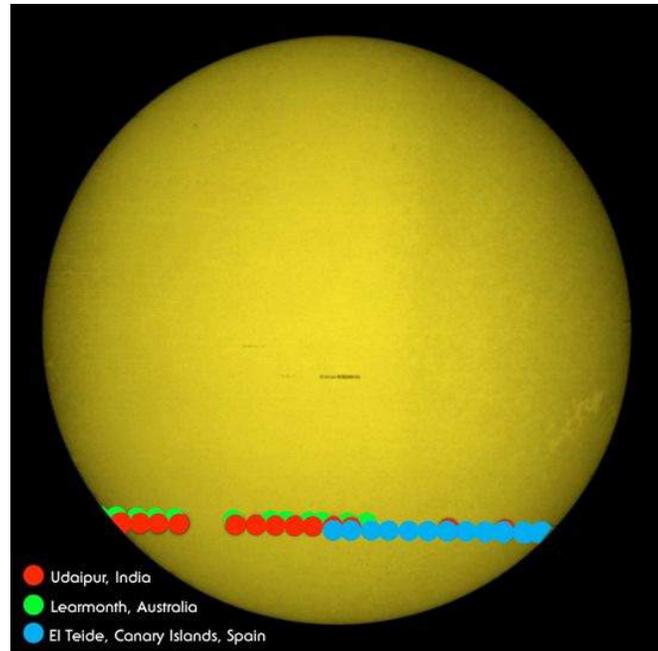
Les transits de Vénus ont été très importants dans l'histoire de la science, car il donnait une occasion de mesurer la distance entre la Terre et le Soleil. En fait, elles permettent de trouver la distance entre la Terre et Vénus, mais comme on sait que cette distance est 0,277 UA, on peut déduire la longueur de l'unité astronomique avec cette mesure.

On peut trouver la distance Terre-Vénus en observant ce transit de différents endroits sur Terre puisque Vénus ne passe pas exactement à la même place devant le Soleil selon notre position d'observation.

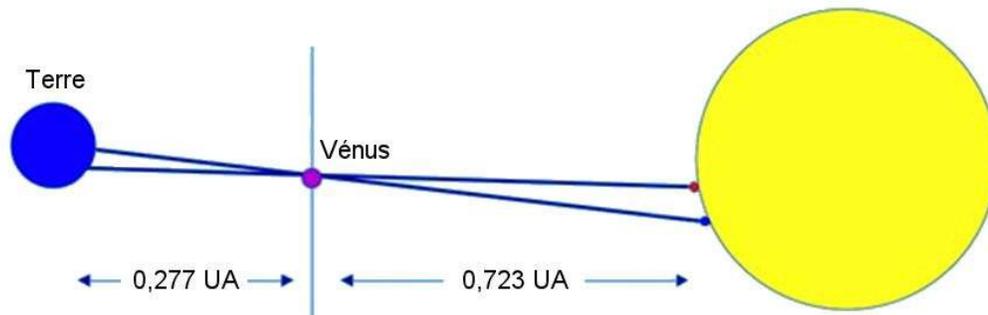
L'image de droite montre le trajet fait par Vénus devant le Soleil tel que vu à partir de 3 endroits différents sur Terre lors du transit du 8 juin 2004.

On voit que la trajectoire est légèrement différente selon les positions sur Terre.

L'image suivante (qui exagère beaucoup la taille des astres) nous explique pourquoi il y a cette différence.



www.noao.edu/image_gallery/html/im0966.html



faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/ExploringtheCosmos/lecture16.html

On voit que l'alignement entre Vénus et le Soleil n'est pas exactement le même selon notre position d'observation sur la Terre.

Avec un peu de trigonométrie, on peut calculer la distance entre la Terre et le Soleil à partir des observations faites à différents endroits sur Terre.

Historique de la méthode

En 1629, Kepler est le premier à se rendre compte qu'il peut y avoir des transits de Vénus et que le prochain sera en 1631. Toutefois, comme c'était la nuit en Europe lors de ce transit, on ne put s'en servir pour trouver la grandeur de l'unité astronomique.

En octobre 1639, Jeremia Horrocks calcule qu'il y aura un autre transit dans 4 semaines. Horrocks et son ami William Crabtree, lui aussi astronome, observent ce transit à partir de deux endroits différents en Angleterre dans l'espoir de trouver la distance de Vénus. Ils ne parviennent en fait qu'à tracer la forme de Vénus devant le Soleil et à déterminer son

diamètre angulaire. Avec une supposition erronée sur la taille de Vénus (ils supposaient que toutes les planètes, sauf Mars, avaient le même diamètre angulaire vu du Soleil...), ils arrivèrent à une distance Terre-Soleil de 97 000 000 km. C'était déjà beaucoup mieux que la distance entre la Terre et le Soleil selon Aristarque de Samos, qui était d'environ 8 000 000 km.

On se prépara mieux pour le prochain transit de Vénus. En fait, on avait bien le temps, car les transits de Vénus sont assez rares. Voici les dates des passages entre 1600 et 2200.

| | |
|------------------|-----------------|
| 7 décembre 1631 | 4 décembre 1639 |
| 6 juin 1761 | 3 juin 1769 |
| 9 décembre 1874 | 6 décembre 1882 |
| 8 juin 2004 | 6 juin 2012 |
| 11 décembre 2117 | 8 décembre 2125 |

Les transits viennent en groupe de 2 transits séparés de 8 ans, puis il faut attendre plus d'un siècle avant qu'il y ait un autre passage. Si vous avez raté ceux de 2004 et de 2012 et que votre rêve est de voir un passage de Vénus, espérez vivre très vieux...

La méthode utilisée précédemment pour trouver la valeur de l'unité astronomique fonctionne bien avec des photographies du passage de Vénus. Toutefois, on ne pouvait que travailler avec des dessins pour les passages des 17^e et 18^e siècles et les dessins ne sont pas suffisamment précis pour mesurer un décalage aussi petit de la position de Vénus sur le Soleil. Il fallait donc trouver une méthode qui permettait de déterminer précisément où passait Vénus devant le Soleil. James Gregory (1663) et Edmund Halley (1716) ont alors développé une méthode qui permet de déterminer le trajet de Vénus devant le Soleil en mesurant simplement le temps que dure le transit. Cela permet de déterminer où exactement est passée Vénus devant le Soleil, car plus Vénus passe près du centre du Soleil vu de la Terre, plus le transit est long. En mesurant le temps de transit à différents endroits à la surface de la Terre, on pouvait déduire la valeur de l'unité astronomique. Le Français Joseph-Nicolas Delisle a aussi trouvé une méthode pour calculer la grandeur de l'unité astronomique en notant simplement l'heure d'entrée de Vénus au début du transit ou l'heure de sortie de Vénus à la fin du transit. Cela permettait d'obtenir des résultats même si on ne pouvait voir que le début ou la fin du transit. Toutefois, cela demandait de connaître précisément la longitude du lieu d'observation. Aujourd'hui, c'est très facile de connaître cette longitude avec les GPS, mais au 18^e siècle, c'était tout un défi.

Arrive alors le transit de 1761. Selon Richard Anthony Proctor, un astronome du 19^e siècle, 176 astronomes ont observé le transit à partir de 117 endroits différents. La plupart sont restés dans leurs observatoires, mais quelques-uns ont fait de longs et périlleux voyages en Asie, où le transit était visible d'un bout à l'autre. Cependant, la guerre de 7 ans (1756-1763), première guerre quasi mondiale (incluant le Québec), a beaucoup nui à la réalisation des travaux d'observations. Par exemple, le navire britannique qui amenait Mason et Dixon en Indonésie a été attaqué par un navire français. Malgré les 11 morts et 38 blessés qu'a fait l'attaque, l'expédition a continué. Ils sont arrivés en Afrique du Sud juste à temps pour mesurer les temps de début et de fin du passage (même si la mesure exacte du temps

d'entrée et de sortie de Vénus devant le Soleil a été plus difficile que prévu). Avec les meilleurs résultats obtenus (étonnamment, ceux de Mason et Dixon), on arriva à une valeur de l'unité astronomique se situant entre 125,3 millions de 154,8 millions de km.

Il ne faudrait pas passer sous silence l'histoire de Guillaume le Gentil, envoyé à Pondichéry en Inde pour observer le transit de 1761. À son arrivée, il constate que les Anglais bloquent l'accès au port. Le navire fait demi-tour pour se rendre à l'île Maurice dans l'océan Indien. Le jour du transit, le Gentil est toujours en mer. Le ciel étant dégagé, il peut observer le transit, mais les mouvements du navire l'empêchent de faire des mesures précises. Déçu, il décide d'attendre le transit de 1769. Après avoir cartographié la côte de Madagascar pour passer le temps. Il décide de s'installer à Manille aux Philippines pour le transit de 1769. Toutefois, le gouverneur espagnol l'accuse d'avoir falsifié ses lettres de recommandation et l'expulse. Il décide donc de retourner à Pondichéry, d'où il ne pourra voir que la fin du transit. Il attend alors patiemment plus d'un an le jour du transit... et ne peut rien observer parce qu'il y a des nuages. Après une période de dépression, il repart pour la France. Il arrive finalement en mars 1771, après un voyage marqué par une grosse tempête qui le force à demander un passage sur un navire espagnol après un long arrêt à l'île Bourbon. À son arrivée, il découvre qu'il a été déclaré légalement mort, que ses biens ont été distribués à ses héritiers, qu'il a été remplacé à l'académie des sciences et que sa femme s'est remariée. Aucune des lettres qu'il avait envoyées ne s'était rendue à destination. Utilement, il a retrouvé sa place à l'académie et il s'est remarié avec une femme plus jeune avec laquelle il vivra heureux une vingtaine d'années.

Le transit de 1769 a donné de meilleurs résultats. Le transit étant surtout visible dans le Pacifique, les observateurs ont dû effectuer un très long et périlleux périple de l'Europe jusqu'au Pacifique. Notons particulièrement l'équipe d'astronomes amenée à Tahiti par le Capitaine James Cook et qui s'est installée à un endroit qui porte encore aujourd'hui le nom de *pointe Vénus*. Les 5 meilleurs calculs de la valeur de l'unité astronomique obtenus à partir des résultats du transit de 1769 ont donné des résultats se situant entre 148,1 millions et 154,8 millions de km. En analysant à nouveau les données en 1824, Encke arriva à 153,3 millions de km. Le prestige d'Encke fit que cette valeur fut utilisée pendant plusieurs décennies.

Évidemment, les transits de 1874 (visible principalement en Asie et en Australie) et 1882 (visible principalement en Amérique) ont donné de meilleurs résultats puisqu'on pouvait désormais utiliser la photographie. Avec les données recueillies, Simon Newcomb, a déterminé que l'unité astronomique valait $149,59 \pm 0,31$ millions de km.

Les transits de 2004 et 2012 n'ont aucunement été utiles pour déterminer la distance entre Vénus et la Terre puisqu'on la mesure maintenant avec des ondes radar.

7.4 MARS

[spaceimages.esa.int/Missions/Rosetta/\(offset\)/50/\(class\)/image](http://spaceimages.esa.int/Missions/Rosetta/(offset)/50/(class)/image)



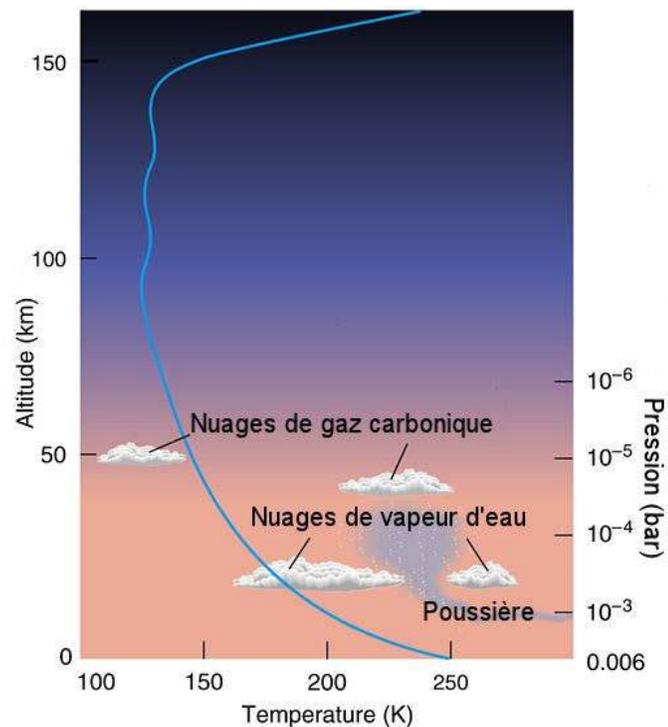
Mars est plus petite que la Terre. Son rayon est presque la moitié de celui de la Terre (53 % du rayon terrestre) et sa masse vaut 10,2 % de celle de la Terre.

commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_Mars_Comparison.jpg

L'atmosphère de Mars

Mars a une atmosphère, mais la pression à la surface n'est que de 0,6 % de la pression à la surface de la Terre. Elle a une composition similaire à celle de Vénus, avec 95,3 % de CO₂ et 2,7 % d'azote (N₂). Il y a donc un peu d'effet de serre, ce qui permet à la température moyenne de Mars d'atteindre -63 °C. L'été, à l'équateur, la température peut cependant atteindre 35 °C alors qu'aux pôles elle peut descendre jusqu'à -143 °C pendant l'hiver.

Même si la température dépasse 0 °C l'été, on ne peut pas avoir d'eau liquide à la surface de Mars. Avec une pression atmosphérique



physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121-2005/Notes/Chapter10.html

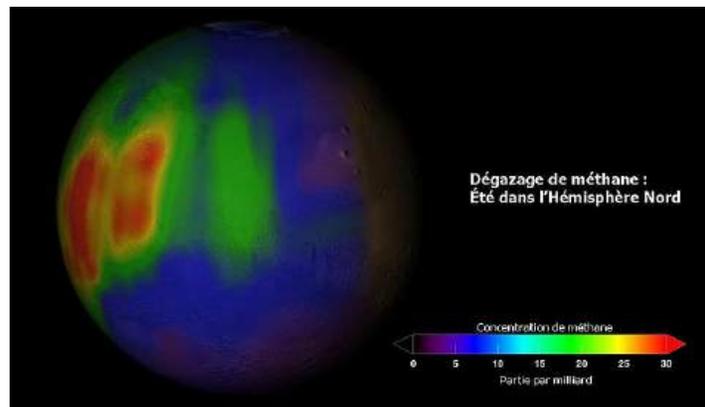
si basse, l'eau passe directement de l'état solide à l'état gazeux (avec une pression atmosphérique de 600 Pa, on est quand même assez près de la pression limite à laquelle on passe directement du solide au gaz, qui est à 611,5 Pa).

Il y a quelques nuages de gaz carbonique et d'eau dans cette atmosphère.

Il est possible que l'atmosphère de CO₂ de Mars ait été plus importante dans le passé et qu'il y ait eu plus d'effet de serre, peut-être même suffisamment pour qu'il y ait de l'eau liquide à la surface de Mars. Ainsi, il aurait pu y avoir des lacs, des rivières, des nuages et de la pluie à la surface de Mars dans le passé. Peut-être y avait-il une forme de vie primitive dans ces océans ? On ne le sait pas. Chose certaine, cette atmosphère (si elle a existé) a disparu lentement, ce qui a fait baisser l'effet de serre et la pression, jusqu'à ce que les conditions ne permettent plus qu'il y ait de l'eau liquide.

On remarque qu'il se dégage du méthane du sol martien en été. Comme le méthane est rapidement décomposé par le rayonnement ultraviolet du Soleil, il doit y avoir une source de méthane dans le sol martien qui est activée par la chaleur du Soleil. Ce pourrait être une forme de vie primitive, mais on n'exclut pas une origine géologique.

en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Mars



La surface de Mars

Voici à quoi ressemble la surface de Mars.



en.wikipedia.org/wiki/File:Rocky_Mars_Surface.jpeg

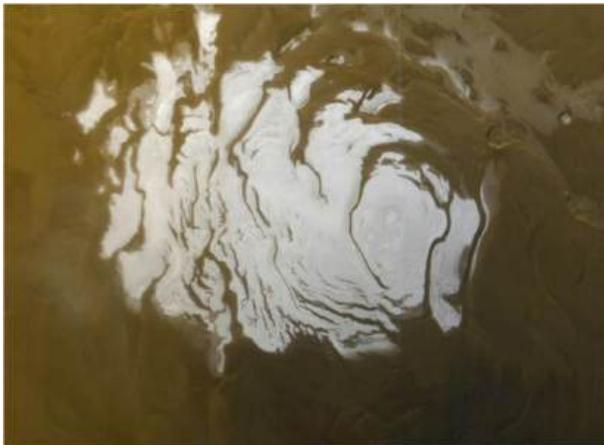
Les calottes polaires

Les calottes glaciaires aux pôles de la planète sont une des premières choses qu'on remarqua quand on observa Mars au télescope (on les a remarqués pour la 1^{re} fois en 1672).

Ces calottes sont surtout composées de glace d'eau. La calotte nord a un diamètre maximal de 3000 km et une épaisseur moyenne d'environ 2 km alors que la calotte sud a un diamètre maximal de 4000 km et une épaisseur moyenne de 3 km. Cela signifie que les deux calottes ensemble contiennent un peu plus d'eau que la calotte glaciaire du Groenland. La calotte sud est plus importante parce que l'hiver dans l'hémisphère sud se produit à l'aphélie. Ainsi, l'hiver dans l'hémisphère sud est plus froid et plus long que l'hiver dans l'hémisphère nord.



news.nationalpost.com/2012/08/11/after-nasas-curiosity-what-is-next-in-mars-exploration/

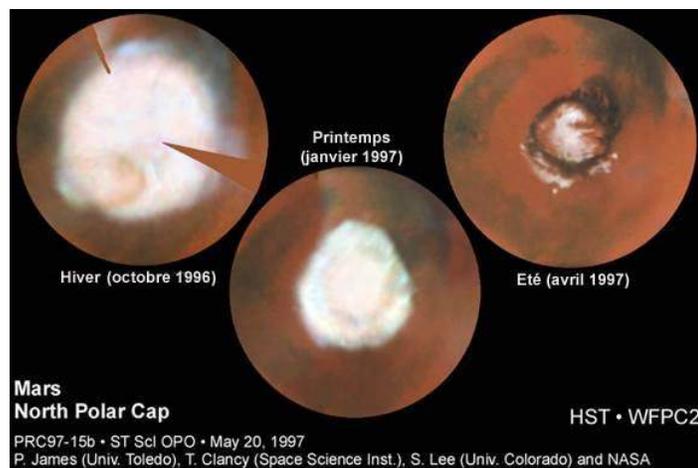


À gauche, on peut voir une image plus précise de la calotte sud en 2000.

L'hiver, les calottes grandissent parce qu'il fait tellement froid que le CO₂ de l'atmosphère se solidifie pour se déposer sur les calottes pour former une couche de neige carbonique d'environ 1 mètre d'épaisseur à la surface de la calotte. Le tiers de l'atmosphère se dépose ainsi sur les calottes nord et sud en alternance.

en.wikipedia.org/wiki/Martian_polar_ice_caps

Quand l'été arrive, cette neige carbonique se sublime et la taille de la calotte diminue. Voyez sur la figure de droite comment change une calotte selon les saisons.



planet-terre.ens-lyon.fr/article/calotte-polaire-Mars-2008.xml

Il a dû y avoir de grandes variations dans l'étendue des calottes pendant la vie de Mars parce que les simulations montrent que l'inclinaison de l'axe de la planète, actuellement de 25° , peut varier entre 11° et 49° . Cette variation entraîne de grands changements dans l'intensité des saisons, influençant ainsi le développement des calottes polaires.

Des traces d'eau

Il est certain qu'il y a de l'eau sur Mars. Il y a bien sûr les calottes glaciaires qui contiennent beaucoup d'eau, mais il y a aussi beaucoup d'eau gelée dans la surface de la planète. Il existe de nombreuses preuves de la présence de cette eau.

Par exemple, la chaleur dégagée par l'impact de ce météorite semble avoir liquéfié cette eau pour former un genre de boue qui a été projetée autour du cratère.



www2.astro.psu.edu/users/niel/astro1/slideshows/class38/slides-38.html

Évidemment, les nombreuses sondes qui se sont posées sur Mars ont détecté cette eau dans le sol.

On se demande si cette eau a été liquide dans le passé. Il y a quelques éléments qui semblent prouver cela. Par exemple, ces structures ressemblent drôlement à d'anciennes rivières.



www.scoopweb.com/Nanedi_Valles

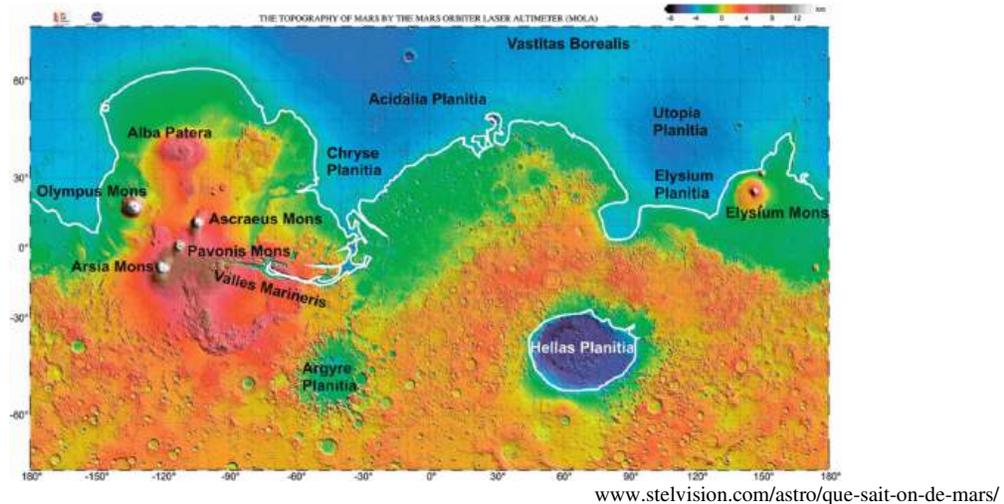
L'image suivante montre qu'il y a des roches sédimentaires à la surface de Mars. Comme ce type de roche stratifiée se forme par accumulation de sédiments dans l'eau, ces strates prouvent qu'il y a eu des lacs sur Mars à une certaine époque.



www.jpl.nasa.gov/images/pia19076-cross-bedding-at-whale-rock

La géologie de la surface de Mars

La surface de Mars est très asymétrique. Il y a beaucoup moins de cratères dans l'hémisphère Nord que l'hémisphère Sud.



Dans l'hémisphère Sud, on a essentiellement des terres hautes recouvertes de cratères. Ces terres hautes sont très anciennes (au moins 4 milliards d'années), ce qui explique le grand nombre de cratères. Deux marques d'impact plus importantes sont visibles. Ce sont les bassins de Hellas et d'Argyre qui sont des cratères qui ont été recouverts par des coulées de lave. Le bassin de Hellas, qui a un diamètre de 2300 km (34 % du rayon de Mars), est la 3^e plus grande marque d'impact du Système solaire (et le plus grand cratère visible de Système solaire). Dans l'hémisphère Nord, on a essentiellement des plaines sur lesquelles il y a très peu cratères. Ces plaines auraient été formées par vastes des coulées de lave. On ne connaît pas exactement l'âge de cette surface, mais la différence entre les hémisphères existe depuis des milliards d'années. Il y a encore de nombreux débats sur l'origine de cette différence. Il est possible que tout l'hémisphère nord soit un gigantesque cratère couvrant 40 % de la planète.

L'élément le plus impressionnant de la surface de Mars est la région de Tharsis. Une montée importante de magma est probablement à l'origine du soulèvement d'une hauteur de 7 km de cette vaste région de la surface de la taille de l'Amérique du Nord (cela représente 25 % de la surface de Mars).

Cette montée a provoqué une fracture de la croûte. Cette fracture forme maintenant un vaste canyon appelé *Valles Marineris* qui a une longueur de 5000 km, une largeur de 600 km et une profondeur de 7 km. C'est une vaste cicatrice qui fait pratiquement le quart de la circonférence de la planète.

en.wikipedia.org/wiki/Valles_Marineris



Au nord-est du renflement de Tharsis, il y a plusieurs volcans éteints (Arsia Mons, Pavonis Mons et Ascraeus Mons). Un peu plus loin au nord-ouest, il y a le mont Olympe (Olympus Mons), le plus gros volcan (bien qu'éteint) du Système solaire. Cet ancien volcan a une hauteur de 23 km (comparé à un peu moins de 9 km pour le mont Everest) et sa base a un diamètre de près de 600 km.



spoki.tvnet.lv/upload/articles/17/178957/images/_origin_Olympus-Mons-Olimpa-kalns-2.jpg

Ce sont des volcans ayant des pentes très douces parce que la lave qui s'est écoulée de ces volcans était très fluide.

Mars étant plus petite que la Terre, elle s'est refroidie plus rapidement. La partie du manteau solide est maintenant tellement épaisse qu'il n'y a plus de volcanisme possible à la surface depuis au moins un milliard d'années.

De la Terre, on ne voit pas les montagnes et les plaines à la surface de Mars. On voit cependant des zones qui réfléchissent mieux la lumière et de zones plus foncées. Les zones claires sont recouvertes d'une fine poussière alors que les zones foncées ne sont pas recouvertes de poussière. Dans ces zones sombres, le vent a complètement enlevé la poussière et les roches plus foncées sont exposées.

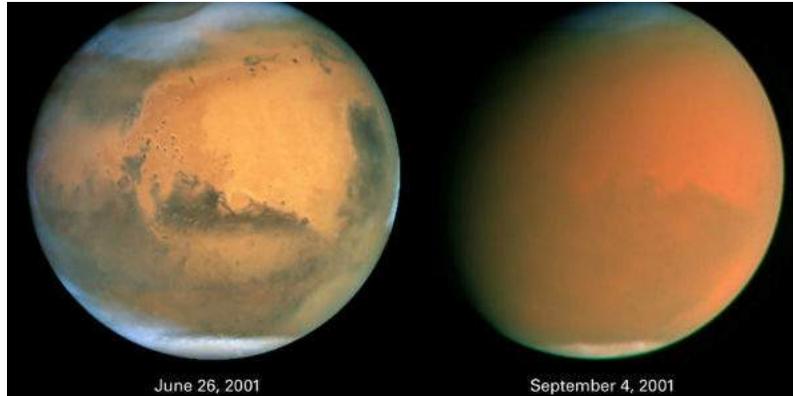


Les tempêtes

Il y a beaucoup de poussière à la surface de Mars. Ces poussières sont constamment déplacées par des tempêtes.

Il y a beaucoup de tempêtes à la surface de Mars. Dans les films (comme dans *le Martien* par exemple), on présente souvent ces tempêtes comme de véritables catastrophes qui détruisent tous les équipements de la station. Il est vrai que les vents peuvent bien atteindre les 100 km/h, mais la pression de l'air est si faible que les vents ne pourraient pas endommager grand-chose. Un vent à 100 km/h sur Mars aurait à peu près le même effet qu'une petite brise sur Terre.

Parfois (environ tous les 3 ans de Mars, ce qui correspond à 5½ ans sur Terre), il se forme une vaste tempête qui couvre pratiquement toute la surface de la planète. Ces tempêtes peuvent durer plusieurs semaines (celle de 2001, qu'on peut voir à droite sur l'image suivante, a duré 3 mois).



www.skymetweather.com/content/earth-and-nature/patterns-identified-in-mars-dust-storm-by-thermal-imaging-say-nasa-scientists/

On ne connaît pas trop le mécanisme qui mène à la formation de ces immenses tempêtes. On sait qu'elles se forment souvent lorsque c'est l'été dans l'hémisphère sud. C'est à ce moment que Mars est au plus près du Soleil. Cela amène davantage de chaleur et c'est cette chaleur qui à l'origine de la convection qui peut mener à la formation de ces tempêtes de sable planétaire. On a aussi observé que la tempête de 2001 a démarré quand plusieurs événements dans la région de bassin d'Hellas ont déclenché toute une série d'effets qui se sont rapidement propagés à la surface de Mars pour former une grande tempête.

Ce brassage de poussière lors des tempêtes locales ou planétaires laissait croire que les robots qu'on envoie se promener à la surface de Mars ne fonctionneraient pas bien longtemps. La poussière allait se déposer sur les panneaux solaires et les rendre rapidement inutilisables. En 1997, les panneaux du robot *Sojourner* perdaient 0,25 % d'efficacité par jour martien. On s'attendait donc à ce que les missions de *Spirit* et *Opportunity* durent à peine 90 jours martiens. Cependant, on a eu la surprise de constater que les panneaux se libéraient de cette poussière de temps en temps. On s'est rendu compte que la poussière était enlevée par de nombreuses mini tornades qui se forment à la surface de Mars (mini tornades qui ressemblent aux *dust-devil* qui se forment dans les déserts sur Terre).



www.nasa.gov/solar-system/the-fact-and-fiction-of-martian-dust-storms/

Quand une de ces mini tornades passe tout près du robot, le vent enlève la poussière sur les panneaux ! Ainsi, la mission du robot *Opportunity* a pu durer 15 ans (la tempête planétaire de 2018, d'une ampleur exceptionnelle, a finalement eu raison des panneaux solaires).

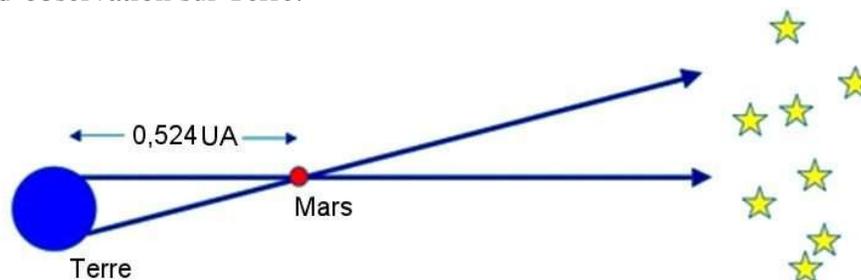
L'intérieur de Mars

L'intérieur de Mars est relativement similaire à celui de la Terre, à l'exception qu'elle s'est refroidie plus rapidement. Il y a peut-être encore des zones liquides près du centre de la planète, mais le rythme de transfert de chaleur dans ces régions est trop bas pour qu'il y ait de la convection.

Ainsi, Mars n'a pas de champ magnétique. La croûte est magnétisée dans les hautes terres du sud, mais pas dans le bassin de Hellas. C'est un signe qu'il y avait un champ magnétique quand les hautes terres de l'hémisphère sud se sont formées, mais qu'il n'y en avait plus quand le bassin de Hellas s'est formé. Le champ magnétique aurait donc disparu il y a environ 4 milliards d'années.

La mesure de l'unité astronomique avec Mars

On peut aussi utiliser Mars pour mesurer la longueur de l'unité astronomique. En fait, ce fut la première méthode fiable utilisée pour trouver la longueur de l'unité astronomique. Cette méthode consiste à faire des observations très précises de Mars à partir de deux endroits sur Terre. En déterminant exactement la position de Mars dans le ciel par rapport aux étoiles, on peut mettre en évidence que la position n'est pas exactement la même selon notre point d'observation sur Terre.



faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/ExploringtheCosmos/lecture16.html

L'image suivante superpose deux images de Mars prises simultanément de Paris et de l'île de la Réunion.



experiencesaphelie.wordpress.com/les-experiences-daphelie/parallaxe-mars/mesure/

On dirait qu'il n'y a qu'une seule image de Mars, mais on voit qu'il y a deux images décalées quand on regarde les lignes de diffraction faite par l'appareil photo. Pour une image, ces lignes sont ces petites lignes verticales et horizontales alors qu'elles sont en diagonale pour l'autre image. On voit que les points de croisement de ces lignes ne sont pas exactement à la même place. Dans ce cas, l'écart de position était d'environ 16 secondes d'arc ($0,0044^\circ$). En procédant de la même façon qu'avec Vénus, on peut trouver la distance entre la Terre et Mars, et donc la distance entre la Terre et le Soleil puisqu'on sait que Mars est à 0,524 UA de la Terre à l'opposition.

Cette méthode a été utilisée pour la première fois en 1672 par Jean-Dominique Cassini, qui a fait ses observations à partir de Paris, et Jean Richer, qui a fait ses observations à partir de Cayenne en Amérique du Sud. Au moment de faire les observations, Mars passait tout près de l'étoile ψ des Poissons dans le ciel, ce qui facilitait la mesure de la position.

À partir de ces mesures, ils ont obtenu une distance Terre-Soleil d'environ 138 millions de km ($\pm 10\%$). C'était la première véritable mesure de cette distance. Avant cette date, plusieurs utilisaient encore la valeur de 8 millions de km d'Aristarque de Samos.

Cette méthode s'est améliorée sans cesse au cours des ans. On l'a utilisée ensuite avec des astéroïdes ayant des orbites passant plus près de la Terre que celle de Mars, ce qui donnait un angle plus grand, donc plus facilement mesurable. On l'a fait avec l'astéroïde Flora en 1875 et l'astéroïde Éros en 1900 et en 1931. Ces mesures ont permis d'obtenir une unité astronomique de $149\,674\,000 \pm 16\,000$ km (la vraie valeur est $149\,597\,871$ km). C'était la meilleure mesure de l'unité astronomique avant qu'on la mesure au radar.

Les satellites de Mars

Mars possède deux satellites. Ce sont Phobos et Deimos.



apod.nasa.gov/apod/ap121028.html et apod.nasa.gov/apod/ap090316.html

Ces satellites sont vraiment petits. Phobos a un « diamètre » de 27 km, alors que Deimos a un « diamètre » de 15 km.

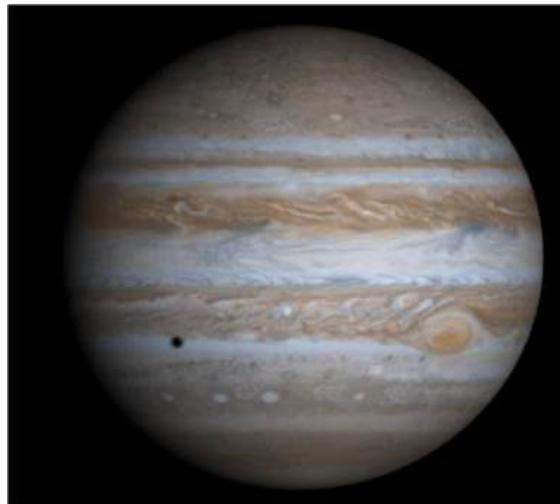
Phobos est vraiment très près de Mars. C'est le satellite qui a le plus petit rayon orbital de tout le Système solaire. Il est tellement près que, vu de la surface de Mars, Phobos n'a que la moitié du diamètre angulaire de la Lune vue de la Terre. Sa proximité de Mars fait aussi en sorte qu'il tourne autour de Mars plus vite que Mars tourne sur elle-même. Ainsi, Phobos se déplace à l'envers dans le ciel de Mars par rapport à Deimos et au Soleil.

Deimos est probablement un astéroïde capturé, mais Phobos a une densité très différente de celle des astéroïdes. De plus, les observations montrent que sa composition est très similaire à celle de la surface de Mars. Il se pourrait donc que Phobos se soit formé à partir de débris éjectés de la surface de Mars.

Phobos est tout près de la limite de Roche de Mars. Le rayon de son orbite est à 2,76 fois le rayon de Mars, alors que la limite de Roche est à 2,1 fois le rayon de Mars. Cela signifie que les forces de marées sur Phobos sont très importantes et qu'il est près d'être déchiré par ces forces. Il se pourrait que les grandes lignes d'une vingtaine de kilomètres de long observées à la surface de Phobos soient des failles faites par les forces de marée (à condition que Phobos ne soit pas trop solide, c'est-à-dire qu'il ait été formé par une accumulation de débris).

Phobos est condamné, car les forces de marée font en sorte que les satellites qui tournent autour de la planète plus vite que la planète tourne sur elle-même s'approchent de la planète. Cela fait perdre lentement de l'altitude à Phobos (2 m par siècle) et il atteindra la limite de Roche dans 30 à 50 millions d'années. Phobos va alors se désintégrer lentement en de nombreux petits cailloux qui formeront un anneau autour de Mars.

7.5 JUPITER



photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA02873_modest.jpg

Jupiter est la plus grosse et la plus massive des planètes du Système solaire. Son rayon est 11 fois plus grand que celui de la Terre, ce qui veut dire que Jupiter a un volume équivalent à 1330 celui de la Terre. Son rayon est environ 10 % de celui du Soleil. Sa masse est



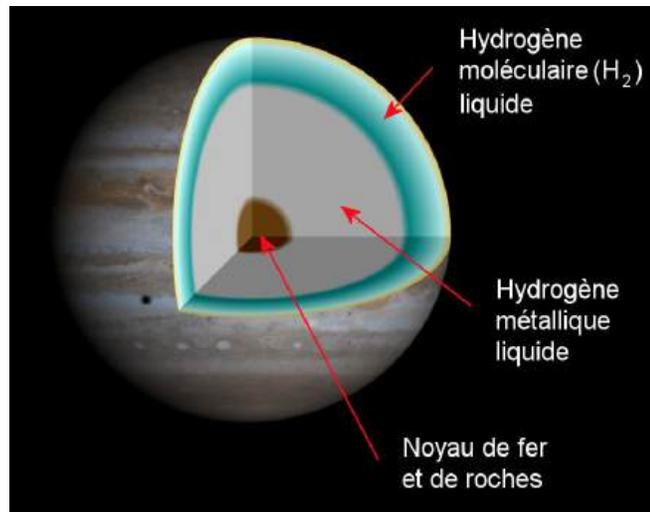
318 fois plus grande que celle de la Terre et elle représente 70 % de la masse de toutes les planètes du Système solaire. Elle ne représente cependant que 1/1047 de la masse du Soleil.

commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupiter-Earth-Spot_comparison.jpg

La structure de Jupiter

Jupiter est essentiellement composé d'hydrogène (71 % de la masse) et d'hélium (24 % de la masse). C'est une composition similaire à celle du Soleil, mais sa masse (0,1 % de la masse du Soleil) n'est pas suffisante pour que les réactions nucléaires se soient enclenchées à l'intérieur de Jupiter puisqu'il faut au moins 8,5 % de la masse du Soleil pour que la fusion nucléaire de l'hydrogène s'amorce (comme on le verra dans un prochain chapitre).

La structure de Jupiter est complètement différente de celle des planètes rencontrées jusqu'ici. Ce n'est pas une boule de roche et de métal comme la Terre, mais une boule d'hydrogène et d'hélium. Cette composition donne une densité relativement faible de 1 326 kg/m³ à la planète (comparé à 5515 kg/m³ pour la Terre).



commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupiter_interior.png

L'hydrogène moléculaire

Près de la surface, l'hydrogène est gazeux et sous forme moléculaire (H₂), mais il devient liquide à mesure qu'on s'enfonce dans la planète. À environ 1000 kilomètres sous les plus hauts nuages de la haute atmosphère, la pression devient suffisamment grande (10 fois la pression atmosphérique terrestre) pour que l'hydrogène devienne liquide. Cette transition ne se fait pas brutalement, mais de façon graduelle de sorte qu'il n'y a pas vraiment de surface sur Jupiter. Il y a plutôt formation d'un brouillard qui devient de plus en plus dense jusqu'à devenir un liquide à mesure qu'on s'enfonce dans la planète.

L'hydrogène métallique

À une profondeur de 14 000 km (le rayon de Jupiter est de 71 500 km), la pression atteint 1 million de fois la pression atmosphérique terrestre. Il y a alors une nouvelle transition de phase. L'hydrogène devient métallique (tout en restant un liquide).

Il y a sûrement une zone de convection importante dans cet hydrogène métallique liquide, car Jupiter possède un champ magnétique vraiment très important. Le moment magnétique du champ est 18 000 fois plus grand que celui de la Terre, ce qui fait que la grandeur du champ est 14 fois plus grande que le champ magnétique terrestre à la « surface » de Jupiter. C'est aux pôles Jupiter qu'on retrouve le champ magnétique le plus intense du Système solaire, si on fait exception du champ dans les taches solaires.

Le noyau

Au centre de la planète, on pense qu'il y a un noyau composé de roche et de métal. La masse de ce noyau est très incertaine. Les estimations de sa masse varient entre 2 fois la masse de la Terre et 45 fois la masse de la Terre. Ce noyau serait complètement liquide puisqu'on estime que sa température serait de l'ordre de 36 000 °C.

Une planète de gaz, vraiment ?

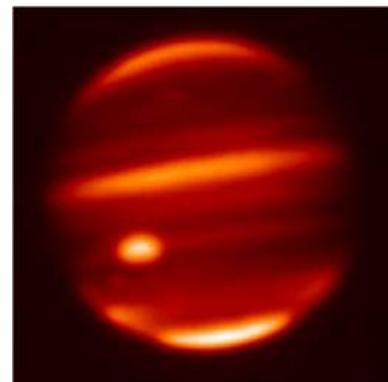
On peut souvent lire que Jupiter est une planète gazeuse ou une boule de gaz. On devrait plutôt dire que c'est une boule de liquide, mais composée d'éléments qui sont normalement gazeux à la surface de la Terre.

Une planète qui émet plus d'énergie qu'elle en reçoit

Jupiter émet plus d'énergie qu'elle en reçoit du Soleil. Elle reçoit $5,1 \times 10^{17}$ W du Soleil et elle émet $8,7 \times 10^{17}$ W. Jupiter émet donc $3,6 \times 10^{17}$ W de plus que ce qu'elle reçoit.

On peut souvent lire que cette énergie émise est générée par une contraction gravitationnelle de Jupiter, mais ce n'est pas totalement vrai. Une partie de l'énergie excédentaire émise vient de l'énergie thermique initiale qu'avait la planète et une partie vient de la contraction. En fait, les deux phénomènes sont liés parce que la baisse de température interne provoque la contraction de la matière qui compose la planète. Ainsi, le rayon de Jupiter diminue d'environ 1 mm par an.

L'image de droite montre Jupiter en infrarouge. On peut voir facilement où la chaleur de Jupiter est émise.



atmos.nmsu.edu/~nchanove/A105S04/lecture_25.htm

La plus grosse planète

Notez que Jupiter a presque la taille maximale que peut avoir une planète. À partir d'une certaine masse, la taille commence à diminuer quand la masse augmente parce qu'une masse plus grande signifie des forces gravitationnelles plus grandes et cela augmente la densité de la planète. À partir d'une certaine masse, l'augmentation de densité est si grande que la planète est plus petite même si on ajoute de la masse. La taille maximale correspond environ à 2 fois la taille de Jupiter.

L'atmosphère de Jupiter

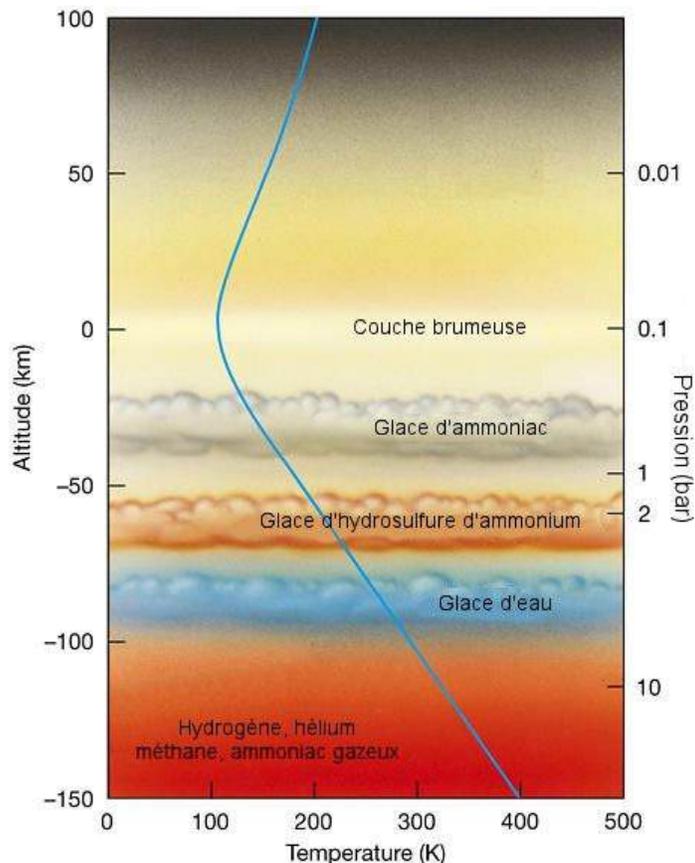
L'atmosphère de Jupiter est la mince partie gazeuse de la planète, qui a environ 5000 km d'épaisseur. Tout comme la planète, elle est composée principalement d'hydrogène (90 %) et d'hélium (10 %), mais on retrouve également du méthane (0,3 %), de l'ammoniac (0,026 %) et de l'eau.

On retrouve trois couches de nuages dans l'atmosphère de Jupiter.

- 1) La plus haute couche est composée de nuages d'ammoniac.
- 2) La couche suivante est composée de nuages d'hydrosulfure d'ammonium (NH_4HS).
- 3) La couche la plus basse est composée de nuages d'eau et de glace.

Notez que la couche brumeuse a une température de 125 K, alors qu'elle devrait être de 105 K s'il n'y avait que la chaleur du Soleil qui chauffait Jupiter. La différence semble petite, mais une couche nuageuse à 125 K rayonne 2 fois plus d'énergie qu'une couche à 105 K. La couche nuageuse est plus chaude parce qu'elle est aussi réchauffée par la chaleur interne de Jupiter.

Quand la sonde Galileo pénétra dans l'atmosphère de Jupiter en décembre 1995, elle survécut



physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121-2005/Notes/Chapter11.html

jusqu'à ce qu'elle soit à 150 km sous la couche brumeuse, donc jusqu'au bas de la figure montrant l'atmosphère de Jupiter. À cette profondeur, elle fut écrasée par l'énorme pression de l'atmosphère.

Les nuages s'organisent en bandes. Ces bandes sont formées par la convection dans l'atmosphère de Jupiter et par la rotation rapide de la planète sur elle-même en un peu moins de 10 h. La situation est très similaire à ce qui se passe sur Terre où la rotation de la Terre génère des bandes de vents dominants dans les zones de convection de l'atmosphère terrestre. Toutefois, sur Jupiter, ces vents dominants peuvent atteindre 400 km/h. La convection atmosphérique semble davantage créée par la chaleur interne de Jupiter que par la chaleur arrivant du Soleil.

Les différentes couleurs brunes sont dues à des composées qui changent de couleur sous l'effet du rayonnement ultraviolet du Soleil. La composition de ces substances est encore incertaine. Comme les bandes ne sont pas toutes à la même altitude, l'effet de la lumière du Soleil n'est pas le même pour chaque bande, ce qui leur donne donc des colorations différentes.

À travers les bandes nuageuses, on retrouve aussi de grands tourbillons, dont la célèbre grande tache rouge, dont la longueur est d'environ deux fois le diamètre de la Terre.

C'est une vaste tempête qui perdure depuis des siècles (au moins depuis 1664, date à laquelle Robert Hooke observa la tache pour la première fois) et qui fait un tour sur elle-même en 6 jours. Sa taille diminue lentement depuis plusieurs décennies. Elle a maintenant une longueur de 16 500 km, alors qu'elle avait une longueur de 23 300 km en 1979 et une longueur de 41 000 km au 19^e siècle.



commons.wikimedia.org/wiki/File:PIA00065_Jupiter's_Great_Red_Spot_Region.jpg

Les satellites de Jupiter

Jupiter possède 95 satellites. La plupart de ces satellites sont minuscules et difformes. L'image de droite en montre quelques-uns.



archiv.rhein-eitung.de/on/98/09/16/topnews/jupiter.html

Il y a toutefois 4 satellites beaucoup plus gros (les 91 autres satellites représentent 0,003 % de la masse totale des satellites). Dans l'ordre, en s'éloignant de Jupiter, on retrouve Io, Europe, Ganymède et Callisto. Puisqu'ils furent découverts par Galilée (les 7 et 8 janvier 1610), on les appelle les *satellites galiléens*. Il a fallu attendre 1892 avant qu'on découvre un 5^e satellite autour de Jupiter (Amalthee).

21 des satellites tournent autour de Jupiter dans le même sens que Jupiter tourne sur elle-même. 74 satellites tournent autour de Jupiter dans le sens contraire de la rotation de Jupiter sur elle-même. Ces 74 satellites sont tous très petits et très loin de Jupiter.

Io

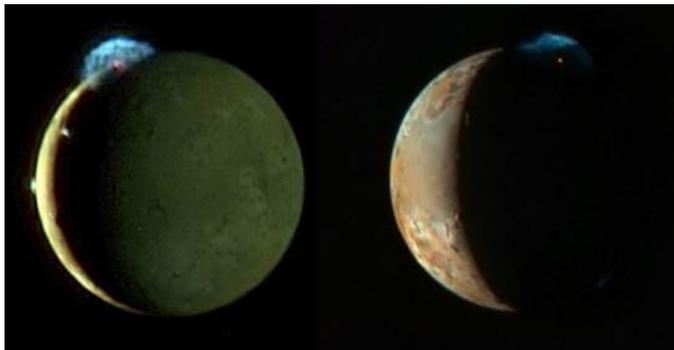
La distance entre Io et Jupiter est 1,1 fois plus grande que la distance entre la Terre et la Lune. Io fait le tour de Jupiter en 1 769 jour. Io est un peu plus grosse que la Lune (1,2 fois sa masse et 1,05 fois son diamètre), mais a un aspect complètement différent.

Cette surface bien différente est due à la présence de nombreux volcans à la surface d'Io. Ces volcans, toujours actifs, éjectent une lave très fluide qui recouvre la surface, éliminant toute trace de cratère.



fr.wikipedia.org/wiki/Io_(lune)

Ces volcans éjectent aussi des gaz, essentiellement du soufre et SO_2 (alors que sur Terre ce sont surtout de l'eau et du CO_2 qui sont éjectés). Ces gaz, qui se cristallisent très rapidement en une sorte de neige, sont éjectés avec une vitesse de 1 km/s et montent très haut au-dessus de la surface (environ 200 km) puisque l'accélération gravitationnelle est faible. On peut voir la matière éjectée par un volcan d'Io sur cette image.



teebsrant.wordpress.com/2014/07/27/

Dans le vidéo suivant, vous pouvez voir un de ces volcans en action.

<https://www.youtube.com/watch?v=wmQHOUFIuzQ>

La matière éjectée en altitude retombe ensuite sur la surface comme de la neige. Le SO_2 est alors blanc, alors que le soufre peut prendre une teinte noire, orange ou jaune selon son rythme de refroidissement. C'est ce qui donne cette variété de couleurs à la surface d'Io. Il s'accumule ainsi 1 mm par année de soufre et de SO_2 à la surface d'Io.

Une partie des gaz éjectés s'échappe même d'Io et se retrouve en orbite autour de Jupiter sur la même orbite qu'Io. Ce gaz forme alors un genre de beigne de soufre autour de Jupiter.

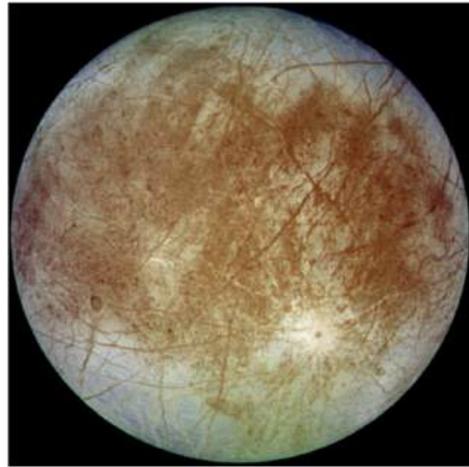
Bien qu'ayant une taille similaire à la Lune, Io est encore très active géologiquement. Elle est donc beaucoup plus chaude qu'elle devrait l'être selon sa taille. Cette chaleur supplémentaire provient des effets de marée de Jupiter, qui sont très importants sur Io. Les

forces de marée étirent Io de près de 100 m. Ces effets de marée ont rapidement arrêté la rotation d'Io de sorte qu'elle a toujours la même face tournée vers Jupiter. Il y a toutefois une certaine oscillation d'Io qui vient du fait que Io est sur une orbite dont l'excentricité est élevée. Ce sont les perturbations des 3 autres satellites galiléens qui font que l'excentricité reste élevée. Les bosses de marée se déplacent alors avec les oscillations et cela génère beaucoup de chaleur par friction. Cette chaleur produite garde alors l'intérieur d'Io suffisamment chaud pour qu'il y ait encore des volcans à la surface d'Io.

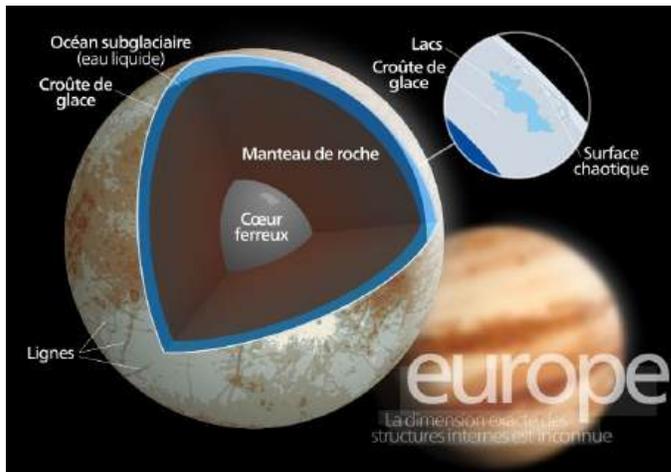
Europe

La distance entre Europe et Jupiter est 1,75 fois plus grande que la distance entre la Terre et la Lune. Europe fait le tour de Jupiter en 3,551 jours. Europe est un peu plus petite que la Lune (0,7 fois sa masse et 0,9 fois son diamètre).

Europe a aussi un aspect complètement différent de celui de la Lune. Encore une fois, il n'y a pas vraiment de marques d'impact météoritique à la surface d'Europe. Ce qu'on voit est une surface glacée plus lisse, en proportion, qu'une boule de billard. Les variations d'altitude à la surface atteignent 1 km au maximum.



[en.wikipedia.org/wiki/Europa_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Europa_(moon))



Environ 10 % de la masse d'Europe provient de la glace. On parle ici de glace d'eau, mais aussi de glace de CO₂, de méthane (CH₄), d'ammoniaque (NH₃) ou d'azote (N₂). Toute cette glace se retrouve en une couche de 100 km d'épaisseur en surface du satellite.

en.wikipedia.org/wiki/File:Europa_poster.svg

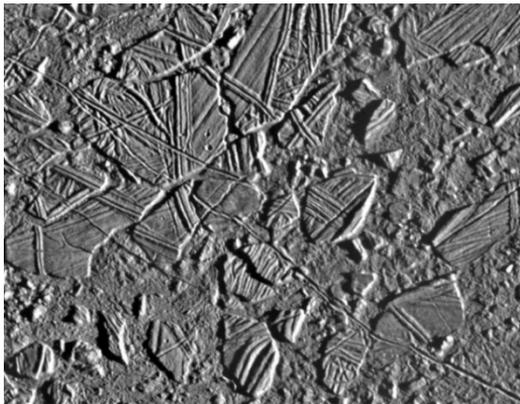
Les forces de marées étant aussi très intenses sur Europe, ce satellite a toujours la même face tournée vers Jupiter et son intérieur est chauffé par le mouvement d'oscillation des bosses de marée. Dans le cas d'Europe, le réchauffement par effet de marée n'est pas suffisant pour générer du volcanisme, mais il est suffisant pour faire fondre une partie de la couche de glace en surface. Ainsi, il est fort possible qu'il y ait un océan liquide sous une couche de glace de 10 à 30 km d'épaisseur. La structure du champ magnétique d'Europe laisse d'ailleurs penser que ce dernier est généré par un courant dans un océan

liquide et salé sous la surface de glace. Cet océan aurait le double du volume des océans de la Terre et ce pourrait être un endroit propice au développement de la vie. De plus, il est possible qu'il y ait des geysers d'eau à la surface d'Europe, mais ce n'est pas encore confirmé.

Les longues lignes à la surface d'Europe seraient des fissures dans la glace provoquées par les déformations dues aux forces de marée. Les fissures les plus récentes ont effectivement la forme et la position qu'elles devraient avoir si c'est bien ce mécanisme qui provoque ces fissures. Les fissures plus vieilles ne se conforment pas cependant à ce mécanisme. Peut-être que cela est seulement une indication que la couche de glace peut se déplacer librement par rapport à la planète en flottant sur l'eau liquide.



www.space-pictures.com/view/pictures-of-planets/planet-jupiter/europa-moon/europa-moon-surface-features.php



L'image de gauche nous montre aussi que la surface de glace peut parfois se briser pour ensuite se reformer.

hethoughtstash.wordpress.com/2012/05/03/space-scenery-europa/

Ganymède

La distance entre Ganymède et Jupiter est 2,79 fois plus grande que la distance entre la Terre et la Lune et Ganymède fait le tour de Jupiter en 7,155 jours. Ganymède est plus gros que la Lune (2 fois sa masse et 1,5 fois son diamètre) ce qui fait de lui le plus gros satellite du Système solaire. Il est même plus gros que Mercure.

Ganymède est très peu dense. Alors que la densité de la Lune est de 3340 kg/m³ et que celle d'Io est de 3530 kg/m³, celle de Ganymède n'est que de 1936 kg/m³. Sa densité est plus petite parce que la moitié de la masse de Ganymède vient de roches alors que l'autre moitié vient de la glace qui recouvre le satellite.

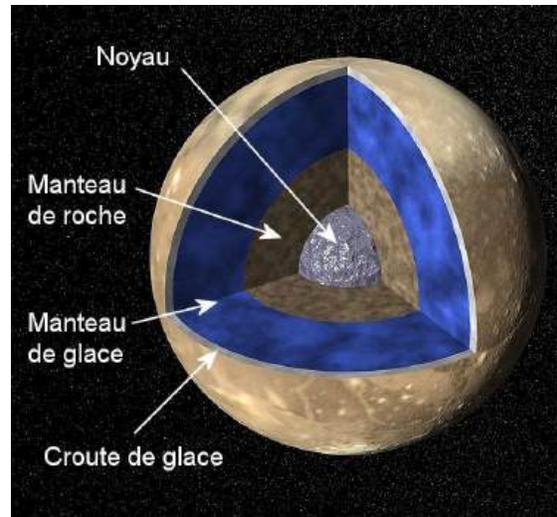


solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Jup_Ganymede&Display=Gallery

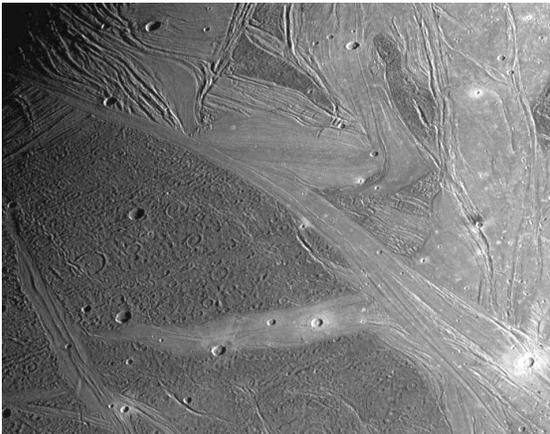
On obtient alors la structure montrée sur la figure de droite.

Le noyau de Ganymède doit être en partie liquide, car Ganymède est le seul satellite du Système solaire à avoir un champ magnétique important.

Il n'est pas impossible qu'il y ait une partie de la glace qui soit liquide sous une croûte de glace solide.



en.wikipedia.org/wiki/File:PIA00519_Interior_of_Ganymede.jpg



dept.astro.lsa.umich.edu/ugactivities/Labs/craters/cr_worksheets.html

La surface de glace s'est salie un peu en accumulant des débris rocheux au cours du temps. On remarque que les impacts de météorites ont dégagé une surface plus propre, ce qui a créé des taches blanches à la surface de Ganymède.

On observe aussi des lignes à la surface de Ganymède, dont l'origine est probablement similaire à celles d'Europe.

Callisto

La distance entre Callisto et Jupiter est 4,9 fois plus grande que la distance entre la Terre et la Lune et Callisto fait le tour de Jupiter en 16,69 jours. Callisto est plus grosse que la Lune (1,5 fois sa masse et 1,4 fois son diamètre) ce qui fait de lui le 3^e plus gros satellite du Système solaire. Il est pratiquement de la même grosseur que Mercure.

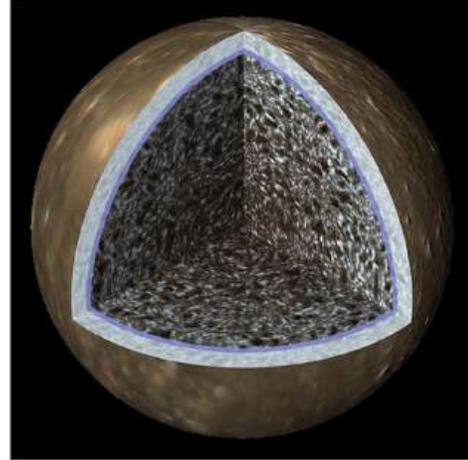
Callisto a une densité et une composition similaire à celle de Ganymède.



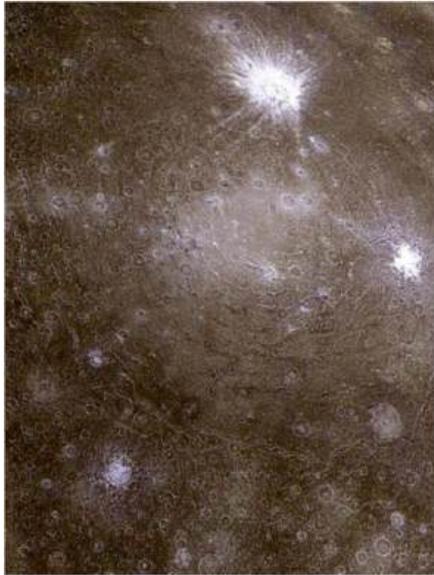
en.wikipedia.org/wiki/File:Callisto.jpg

Callisto a aussi une croûte de glace sous laquelle on pourrait trouver un océan. La présence de cet océan est suggérée par le fait que Callisto agit comme une sphère conductrice dans le champ magnétique de Jupiter. Un océan salé liquide expliquerait ces observations.

Les mesures semblent toutefois indiquer qu'il n'y a pas eu de séparation entre la glace et la roche à l'intérieur de la planète. On aurait de la glace, des roches et des métaux mélangés, avec une concentration de roche et de métal un peu plus grande au centre. Cela voudrait dire que la température à l'intérieur de Callisto lors de sa formation n'a pas suffisamment monté pour faire fondre ces substances, ce qui peut sembler surprenant puisque la formation d'objet plus petit, comme la Lune, a permis la fonte des roches. Ce serait toutefois possible si Callisto s'est formée très lentement, ce qui aurait permis à la chaleur de sortir du satellite, évitant ainsi que la température atteigne la température de fusion de la roche et du métal.



en.wikipedia.org/wiki/File:PIA01478_Interior_of_Callisto.jpg



Tout comme Ganymède, Callisto a une surface glacée sale. Parfois, un impact de météorites dégage une surface glacée plus propre.

ettss.arc.nasa.gov/collection/details/callisto-surface/

Les trois principaux types de planètes

Le système de Jupiter regroupe les trois types de planètes qu'on retrouve dans le Système solaire. Les trois types sont

1) Planètes telluriques

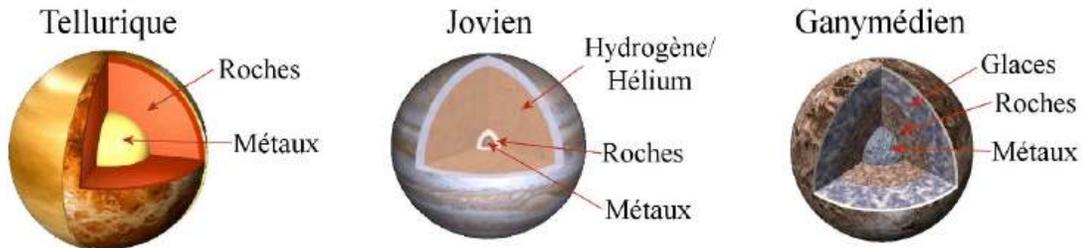
Ce sont des planètes essentiellement composées de roches et de métaux. On retrouve dans cette catégorie Mercure, Vénus, la Terre, la Lune, Mars et Io.

2) Planètes joviennes ou gazeuses

Ce sont des planètes qui ont une importante atmosphère de gaz. On retrouve dans cette catégorie Jupiter, à laquelle on ajoutera Saturne, Uranus et Neptune.

3) Planètes ganymédiennes

Ce sont des planètes qui sont composées de métaux, de roches et de glaces. Les glaces constituent environ la moitié de la masse de la planète. On retrouve dans cette catégorie Ganymède et Callisto. Nous y ajouterons tous les autres satellites de forme sphérique de Saturne, Uranus et Neptune.



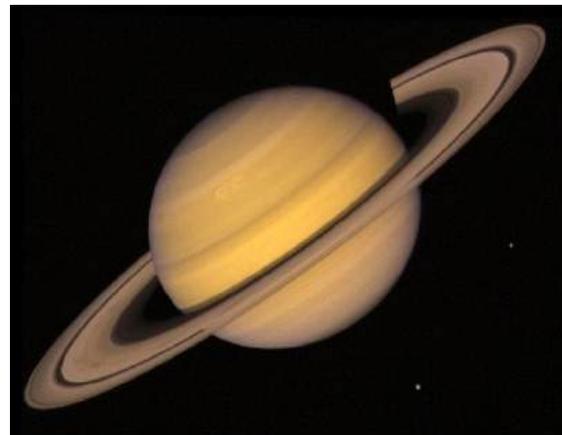
planets.oma.be/VENUS/venus_terre.php

www.le-systeme-solaire.net/jupiter.html

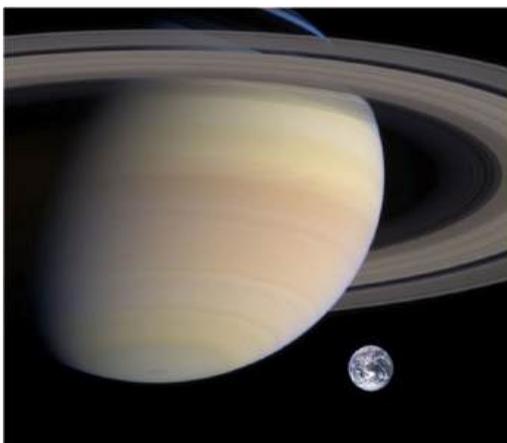
www.le-systeme-solaire.net/ganymede.html

Europe est la seule qui n'entre pas dans une de ces catégories. Sa faible proportion de glace fait qu'elle se situe quelque part entre les planètes telluriques et les planètes ganymédiennes.

7.6 SATURNE



pwg.gsfc.nasa.gov/stargaze/FP9saturne.htm



Saturne est la deuxième plus grosse et plus massive des planètes du Système solaire. Son rayon est environ 9 fois plus grand que celui de la Terre et sa masse est 95 fois plus grande que celle de la Terre.

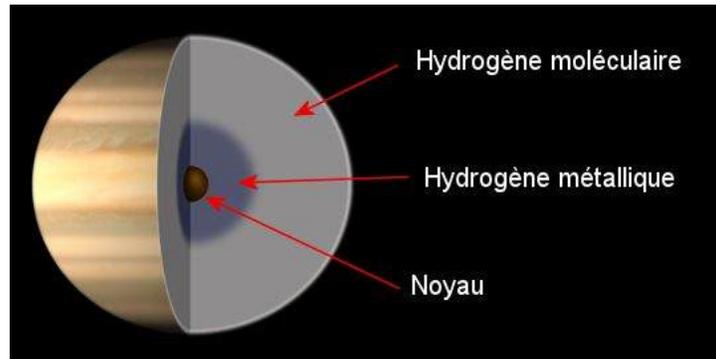
en.wikipedia.org/wiki/File:Saturn,__Earth_size_comparison.jpg

La structure de Saturne

Saturne est une planète jovienne et sa structure est similaire à celle de Jupiter.

Le noyau aurait une masse se situant entre 9 et 22 fois la masse de la Terre.

Les forces gravitationnelles étant moins grandes pour Saturne, le gaz est moins comprimé que sur Jupiter, ce qui fait que la densité moyenne de Saturne n'est que de 687 kg/m^3 , ce qui est inférieur à la densité de l'eau (1000 kg/m^3).



astronomyonline.org/SolarSystem/SaturnIntroduction.asp

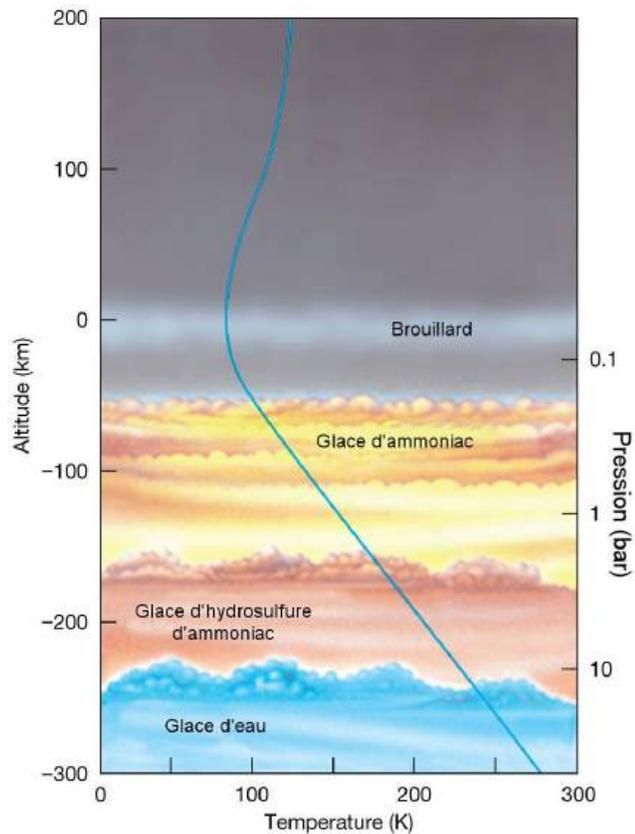
Il doit y avoir un peu de convection dans l'hydrogène métallique liquide puisque Saturne possède un champ magnétique. Le moment magnétique de Saturne est 580 fois plus grand que celui de la Terre, ce qui donne cependant un champ magnétique à la « surface » de Saturne est un peu plus faible que celui de la Terre (à peu près la moitié).

L'atmosphère de Saturne

L'atmosphère de Saturne est assez semblable à celle de Jupiter. Nous y retrouvons les mêmes couches de nuages, bien qu'elles soient un peu plus séparées les unes des autres que sur Jupiter.

Les nuages sur Saturne sont toutefois moins colorés que ceux de Jupiter. Ces couleurs étant provoquées par l'effet des rayons ultraviolets du Soleil sur des impuretés, il est normal que l'effet soit moins important puisque le rayonnement ultraviolet est beaucoup moins intense sur Saturne que sur Jupiter.

L'atmosphère de Saturne est aussi moins perturbée par des tempêtes que celle de Jupiter. Les mouvements atmosphériques étant en partie



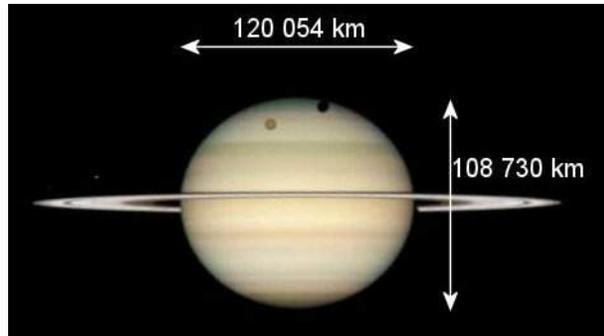
physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121/Notes/Chapter12.html

provoqués par la chaleur du Soleil, il est normal qu'elles soient moins importantes pour des planètes plus éloignées du Soleil.

Notons finalement que Saturne émet 2,5 fois plus de rayonnement qu'elle en reçoit du Soleil. Tout comme pour Jupiter, cette énergie supplémentaire provient de la chaleur interne.

La planète la plus aplatie

On a déjà vu que la rotation de la Terre amenait un aplatissement de la Terre et toutes les planètes subissent un tel aplatissement. Saturne est cependant la planète ayant le plus grand aplatissement du Système solaire. Cette figure vous montre la différence entre les diamètres polaire et équatorial.



pgj-new.pagesperso-orange.fr/0309-nouvelles.htm

L'aplatissement est plus grand pour Saturne parce qu'elle tourne très rapidement sur elle-même (période de rotation de 10 h 34 min). Bien sûr, Jupiter tourne plus vite sur elle-même que Saturne, mais le champ gravitationnel à la surface de Jupiter est de 24,8 N/kg alors qu'il est de 10,4 N/kg pour Saturne. C'est la combinaison de champ plus faible et d'une rotation assez rapide qui amène un tel aplatissement pour Saturne.

Les anneaux

Observations des anneaux

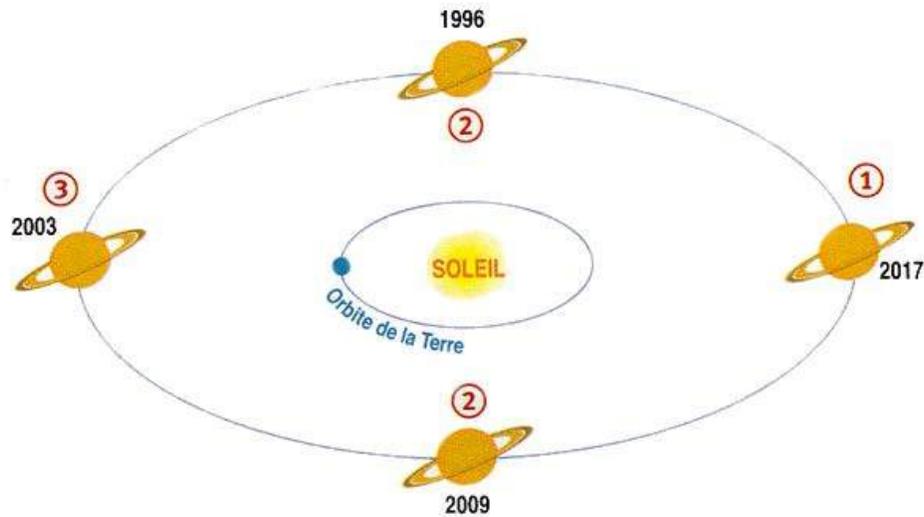
En 1610, Galilée a été le premier à observer Saturne au télescope. Avec des lentilles polies à la main, l'image était floue et il ne comprenait pas très bien ce qu'il voyait. Il devait voir quelque chose qui ressemble à ce qu'on peut voir sur l'image. Il devait se demander ce qu'étaient ces deux boules de chaque côté de Saturne.



www.astromatic.net/2009/05/23/see-saturn-as-galileo-did

Il faut attendre 1655 pour que Huygens ait un télescope suffisamment performant et se rende compte qu'il s'agit d'un anneau entourant Saturne. Cet anneau a une largeur d'environ 70 000 km, c'est-à-dire près de 5 fois le diamètre de la Terre, alors que son épaisseur est entre 10 m et 1 km.

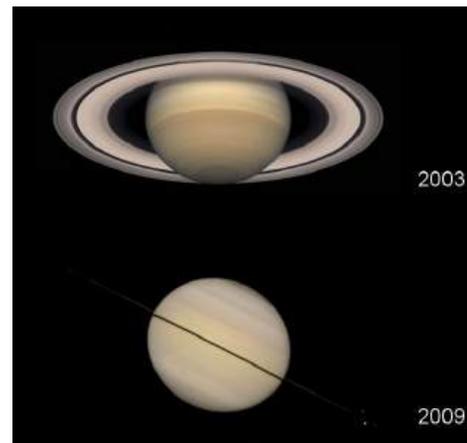
L'aspect des anneaux vu de la Terre change lentement avec les années parce que l'axe de rotation de Saturne est incliné de 27° par rapport au plan de l'orbite.



www.astrosurf.com/toussaint/dossiers/lesplanetes/saturne/obser_saturne/saturne1.htm

En 2003, on voyait bien les anneaux (en fait, le dessous de l'anneau). En 2009, on voyait maintenant les anneaux par la tranche. Comme ils sont très minces, l'anneau était pratiquement invisible.

D'ailleurs, Galilée a été un peu surpris quand il a observé de nouveau Saturne en 1612, deux ans après la première observation. Les deux boules de chaque côté de Saturne avaient disparu...



www.astronet.ru/db/xware/msg/1196154/lordofrings_hst_big.jpg.html et mydarksky.org/2009/09/04/saturn's-ring-plane-crossing/

La nature des anneaux

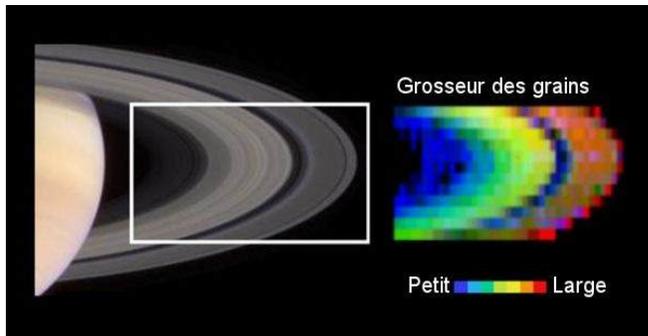
Les anneaux ne sont pas des objets solides. En 1857, James Clerk Maxwell démontra que la rotation d'un anneau solide autour d'une planète ne pourrait pas être stable. La moindre petite perturbation ferait en sorte que l'anneau ne pourrait pas rester centré sur la planète et un des côtés intérieurs finirait par frapper Saturne.

Les anneaux sont plutôt composés de multiples particules en orbite autour de Saturne. Cela a été confirmé en 1895 quand James Keeler a mesuré la vitesse de rotation de l'anneau grâce à l'effet Doppler de la lumière. Ces mesures montraient que la vitesse de rotation de l'anneau diminue à mesure qu'on s'éloigne de Saturne. C'est exactement ce que prévoient les lois de Newton : les particules en orbite près de Saturne doivent avoir une vitesse plus grande que les particules en orbite plus loin de Saturne. Les anneaux ne tournent donc pas autour de Saturne comme un seul bloc.



www.black-cat-studios.com/planetparks/Saturns_Rings.html

La spectroscopie de la lumière réfléchiée par l'anneau montre que 99,9 % des particules qui composent l'anneau sont principalement composées de glace d'eau (ou elles sont au moins recouvertes d'eau). De plus, les particules de glaces près de Saturne sont plus sales (puisqu'elles reflètent moins bien la lumière) que celles loin de Saturne. Comme les anneaux sont presque exclusivement faits de glace, l'anneau a un albédo assez élevé, ce qui le rend facilement visible.



planet-terre.ens-lyon.fr/article/anneaux-Saturne-Cassini-2004.xml

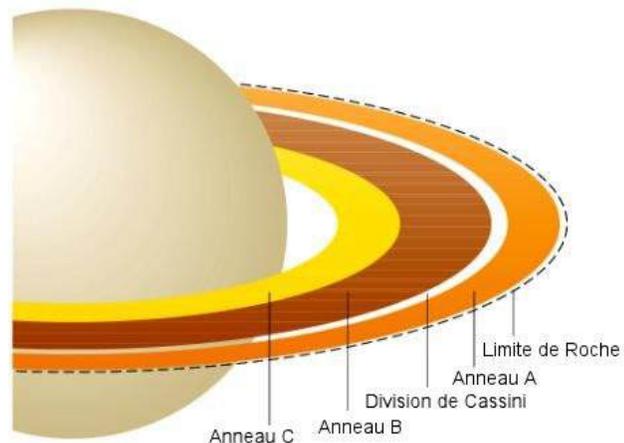
Ces « particules » peuvent avoir des tailles allant du centimètre jusqu'à environ 10 m, avec quelques objets atteignant environ 100 m. La taille des grains de glace varie selon la position dans l'anneau. Ils sont plus petits près de Saturne.

La masse totale de l'anneau est de $1,5 \times 10^{19}$ kg, ce qui nous donnerait une boule de 300 km de diamètre si on prenait toute cette masse pour en faire un satellite.

La limite de Roche

La limite de Roche de Saturne est à 121 000 km du centre de la planète.

Or, les anneaux se terminent à environ 120 000 km de centre de Saturne, ce qui signifie que les anneaux sont à l'intérieur de la limite de Roche. (En fait, ils sont presque tous à l'intérieur. Il y a d'autres petits anneaux de poussière à l'extérieur de la limite de Roche.)



astro.physics.uiowa.edu/~srs/2952_EXW/Locus21_EXW.htm

Les particules de l'anneau ne peuvent donc pas s'agglomérer avec la force gravitationnelle pour former un satellite puisqu'à l'intérieur de la limite de Roche, la force de marée qui sépare les morceaux est plus grande que l'attraction gravitationnelle entre les morceaux.

Cette constatation nous amène à deux théories possibles pour la formation de l'anneau.

Il est possible que les anneaux se soient formés lors de la formation du Système solaire. De la matière s'est retrouvée en orbite autour de la planète et n'a pas pu s'agglomérer par la force gravitationnelle pour former un satellite parce que la force de marée qui sépare les particules de l'anneau est plus grande que l'attraction gravitationnelle entre ces particules. Selon cette théorie, les anneaux seraient donc très vieux.

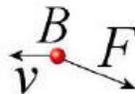
Il est possible aussi que les anneaux se soient formés beaucoup plus tard quand un satellite ganymédien de taille moyenne s'est retrouvé à l'intérieur de la limite de Roche de Saturne. Il fut alors détruit en morceaux par les forces de marée pour finalement former un anneau. Selon cette théorie, les anneaux seraient donc beaucoup plus jeunes.

Pour l'instant, on ne sait pas avec certitude laquelle de ces théories est la bonne, mais les données recueillies par la sonde Cassini suggèrent que l'hypothèse de l'origine récente des anneaux est la plus plausible. Selon les estimations actuelles, les anneaux auraient environ 100 millions d'années (mais les observations ne s'accordent pas toutes avec l'hypothèse d'un anneau récent).

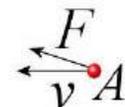
L'interaction entre les particules des anneaux

Voyons ce qui arrive quand 2 particules de l'anneau passent près l'une de l'autre. On va voir que l'attraction gravitationnelle agit de telle sorte que c'est comme s'il y avait une répulsion entre les objets dans l'anneau ! C'est un résultat vraiment contre-intuitif.

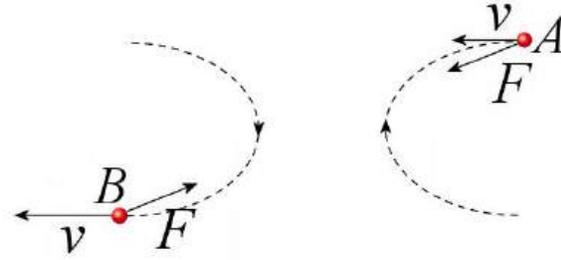
Pour comprendre comment cela est possible, examinons ce qui se passe lorsque 2 particules de l'anneau se rencontrent. L'objet A, qui est plus près de Saturne, va plus vite (parce que la vitesse orbitale diminue avec la distance) et il rattrape l'objet B (Saturne est donc loin en bas sur l'image). On pourrait donc croire que l'objet A va dépasser l'objet B.



L'attraction gravitationnelle sur l'objet A fait un travail positif et donne donc de l'énergie à l'objet. Cette augmentation d'énergie permet à l'objet A de monter sur une orbite plus haute où sa vitesse devient plus petite qu'initialement. L'attraction gravitationnelle sur l'objet B fait un travail négatif et enlève donc de l'énergie à l'objet. Cette baisse d'énergie permet à l'objet B de descendre sur une orbite plus basse où sa vitesse devient plus grande qu'initialement.



L'objet A ne dépasse donc pas l'objet B. En gagnant de l'énergie, l'objet A monte sur une orbite plus loin de Saturne tout en restant derrière l'objet B. Il monte tellement qu'il est maintenant plus loin de Saturne que l'objet B (figure de droite). À cet endroit, sa vitesse est maintenant plus petite que celle de l'objet B, ce qui veut dire que l'objet B s'éloigne maintenant de l'objet A. L'objet A s'est donc approché de l'objet B puis s'en est éloigné tout en restant derrière l'objet B. C'est comme si l'objet A avait été repoussé par l'objet B.



En perdant de l'énergie, l'objet B est passé sur une orbite plus près de Saturne tout en restant devant l'objet A. Il s'approche tellement de Saturne qu'il est maintenant plus près de Saturne que l'objet A. À cet endroit, sa vitesse est plus grande que celle de l'objet A, ce qui veut dire que l'objet B s'éloigne maintenant de l'objet A. L'objet B s'est donc approché de l'objet A puis s'en est éloigné tout en restant devant l'objet A. C'est comme si l'objet B avait été repoussé par l'objet A.

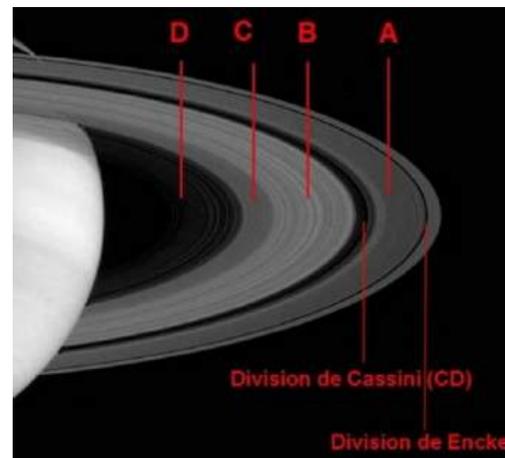
Globalement, tout s'est passé comme si les 2 particules dans l'anneau se repoussaient ! Globalement, tout s'est passé comme si les 2 particules dans l'anneau se repoussaient ! En fait, ça devient un peu moins surprenant quand on réalise que cette répulsion est en fait la force de marées qui éloigne ainsi les 2 particules l'une de l'autre.

La répulsion résultante entre les particules de l'anneau implique que, lentement, l'anneau s'étend. Son bord externe s'éloigne de Saturne pendant que son bord interne s'approche de Saturne. Quand le bord externe arrive à la limite de Roche, les particules qui traversent la limite de Roche peuvent former des satellites.

La résonance orbitale

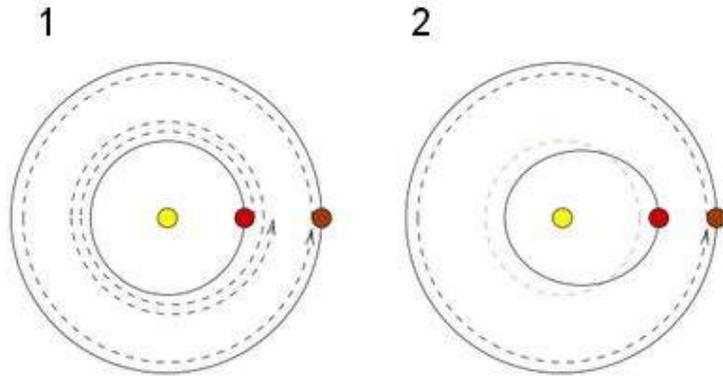
Il y a toute une série de bandes dans les anneaux. Les anneaux ont été séparés en anneaux A, B, C et D, qu'on voit sur la figure. Il y a 8 autres anneaux, nettement moins importants, qui sont plus loin de Saturne que l'anneau A.

On remarque qu'il y a des zones pratiquement vides dans l'anneau, dont la plus importante est la division de Cassini. Ces zones vides sont le résultat des perturbations faites par les satellites de Saturne. Dans ce cas-ci, on parle de résonance orbitale.



irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_actu.php?id_ast=1204

Il y a résonance orbitale quand les périodes de rotation de deux objets en rotation autour d'une étoile ou d'une planète forment un rapport de petits nombres entiers. Dans le cas de la division de Cassini, une particule en orbite circulaire autour de Saturne dans cette région est en résonance orbitale 2 : 1 avec le satellite Mimas. Cela veut dire que la période de rotation de Mimas autour de Saturne est exactement deux fois plus grande que celle de la particule de l'anneau. Ainsi, quand Mimas fait un tour autour de Saturne, une particule dans la division de Cassini a fait exactement 2 tours autour de Saturne (figure 1).



carolynmissingplanet.blogspot.ca/2012/06/introduction-to-gravity-in-solar-system.html

Cela signifie que la perturbation gravitationnelle maximale faite par Mimas sur la particule de l'anneau se fait toujours dans la même direction et toujours quand la particule est au même endroit sur son orbite. Les perturbations s'accumulent donc, chaque fois que Mimas complète une rotation. Cette perturbation allonge lentement l'orbite pour la rendre elliptique (figure 2). Cela amène la particule de l'anneau dans une autre région de l'anneau, où les interactions entre les particules de l'anneau transformeront à nouveau l'orbite en orbite circulaire, mais ayant un rayon différent du rayon initial. La résonance orbitale a donc changé l'orbite de la particule pour la sortir de cette région. Les orbites en résonance orbitale sont donc instables pour les objets très légers comme les particules de l'anneau et c'est pour ça qu'il y a des régions vides dans les anneaux.

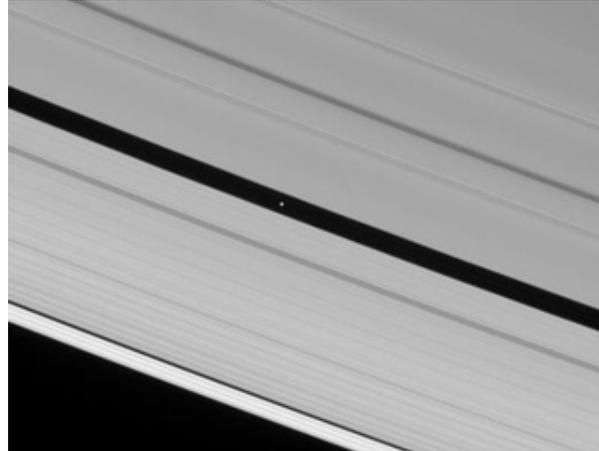
Si les périodes ne forment pas des rapports de petits entiers, les perturbations se font à différents endroits sur l'orbite et dans différentes directions selon la position des deux objets quand ils sont le plus près les uns des autres. Les perturbations maximales étant dans toutes les directions au cours du temps, elles ont plutôt tendance à s'annuler avec le temps, au lieu de s'accumuler.

La division de Cassini est très large. Normalement, la résonance gravitationnelle ne pourrait pas générer des zones vides aussi larges dans des anneaux si récents (c'est-à-dire 100 millions d'années comme on semble le penser actuellement). Toutefois, les forces de marées éloignent lentement Mimas de Saturne, ce qui fait que la zone de résonance se déplace lentement vers l'extérieur dans l'anneau. Ainsi, Mimas a lentement balayé une zone dans les anneaux en s'éloignant vers l'extérieur pour créer une division de Cassini relativement large.

Notez qu'il y a résonance orbitale entre les satellites de Jupiter Io, Europe et Ganymède, ce qui garde l'excentricité de l'orbite d'Io élevée. Cette excentricité élevée fait que les bosses de marée sur Io se déplacent et réchauffent Io par friction.

Le nettoyage par un satellite

Il est aussi possible qu'un objet plus massif présent dans l'anneau crée une zone vide dans l'anneau. C'est le cas avec le satellite Pan, d'un rayon approximatif de 30 km (il n'est pas sphérique), qui crée la division d'Encke. On peut apercevoir ce satellite dans la division sur cette image.

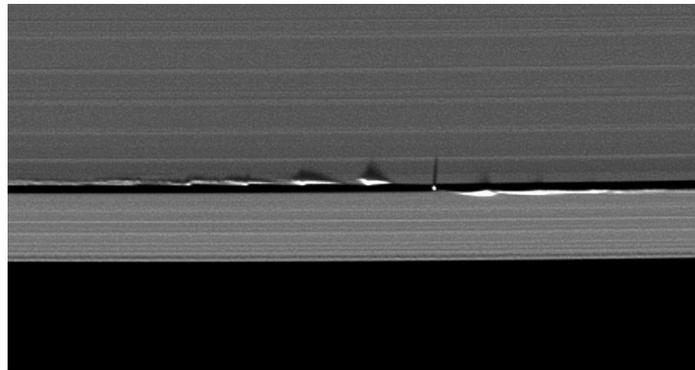


io9.com/5853004/beautiful-new-nasa-photo-captures-the-diversity-of-saturns-many-moons

On pourrait penser que le satellite a simplement attiré les particules et que les particules de l'anneau font désormais partie du satellite. C'est probablement vrai pour quelques particules, mais ce n'est pas ce qui a créé cet espace vide.

On a vu que lors de la rencontre entre 2 particules de l'anneau, tout va se passer comme si les 2 particules se repoussaient. Il se passe la même chose entre des petites particules et un petit satellite : tout se passe comme si les 2 objets se repoussaient. Dans ce cas, l'effet n'est pas très grand sur le satellite puisque sa masse est plus grande. Toutefois, la répulsion apparente pousse les petites particules de l'anneau loin du satellite et cela crée une zone vide près de l'orbite du satellite.

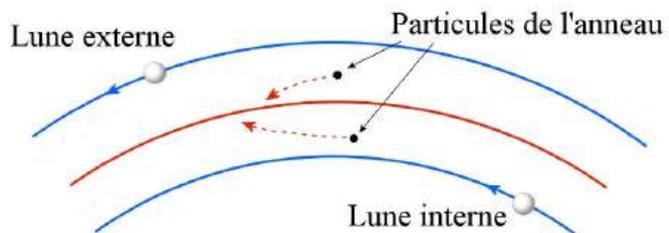
L'interaction entre l'anneau et le satellite est assez complexe, comme on peut le voir sur cette image de Daphnis, un satellite responsable de la division de Keeler. Il y a toute une série d'ondulation créée dans les anneaux de chaque côté de la division.



en.wikipedia.org/wiki/File:Daphnis_edge_wave_shadows.jpg

Les satellites bergers Pandore et Prométhée

L'anneau F est un anneau qui n'est pas très large. Il y a deux lunes, appelées *lunes bergères*, de chaque côté de cet anneau qui maintiennent cet anneau dans un espace confiné. La lune externe repousse les particules vers l'intérieur alors que la lune interne repousse les particules de l'anneau vers l'extérieur.

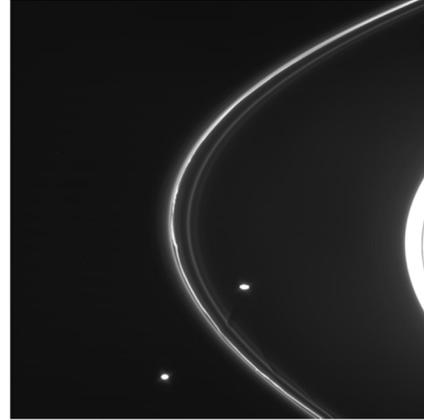


Voici une image de Pandore (lune externe) et de Prométhée (lune interne) et de l'anneau F.

On peut voir les interactions complexes entre l'anneau et les satellites en remarquant les oscillations dans l'anneau. On peut encore mieux voir l'interaction dans ce clip.

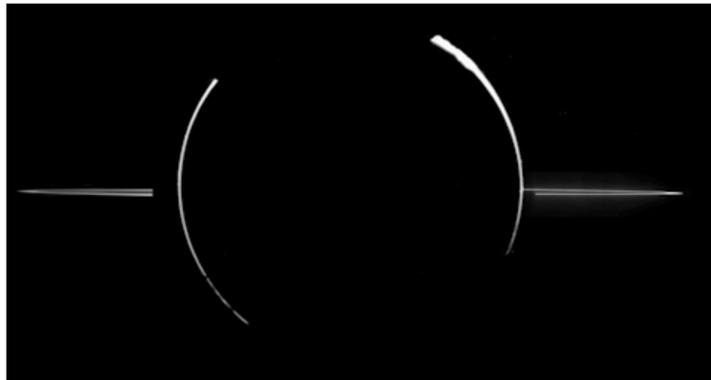
<https://www.youtube.com/watch?v=fdUlpeUffxI>

www.universetoday.com/92555/astronomers-find-saturns-possible-cosmic-doppelganger/



Les anneaux de Jupiter

Saturne n'est pas la seule planète à posséder des anneaux, mais les anneaux de Saturne sont de loin les plus spectaculaires. Jupiter aussi possède un anneau, mais il est pratiquement invisible. Il est composé de roches beaucoup plus sombres (albédo de 5 %) que les cristaux de glace qui compose l'anneau de Saturne (albédo de 60 %) et il est beaucoup moins massif. Sa masse n'est que de 10^{11} kg, ce qui nous donnerait une sphère ayant un diamètre d'à peine 300 m si on formait un satellite avec la matière de l'anneau de Jupiter. L'anneau de Jupiter est tellement difficile à voir que les sondes n'ont pu le détecter qu'à contrejour.

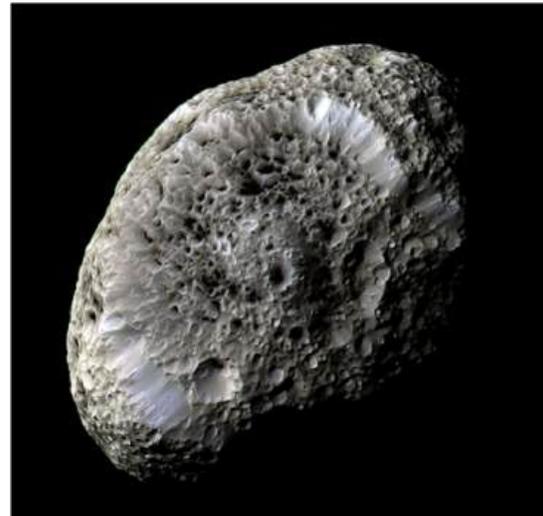


pds-rings.seti.org/jupiter/

Il semble que la matière formant l'anneau de Jupiter provienne de roches arrachées aux satellites Adrasteé et Métis dont les orbites se situent à l'intérieur de la limite de Roche de Jupiter. Deux autres anneaux plus externes sont formés de roches arrachées aux satellites Amalthée et Thebe.

Les satellites de Saturne

Saturne possède 274 satellites confirmés. Ce nombre n'inclut pas les milliers de petits satellites dans les anneaux. La plupart sont très petits et ressemblent au satellite Hypérior montré à droite.



[fr.wikipedia.org/wiki/Hypérior_ \(lune\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Hyp%C3%A9rior_(lune))

24 des satellites sont appelés des *satellites réguliers*. Ils tournent autour de Saturne dans le même sens que Saturne tourne sur elle-même et les plans des orbites ne sont pas très inclinés par rapport à l'équateur de Saturne (à l'exception de Japet). Les 250 autres satellites, qui ont des diamètres entre 2 et 213 km, orbitent très loin de Saturne. Les orbitent sont parfois très inclinés et plusieurs de ces satellites tournent autour de Saturne dans le sens contraire de la rotation de Saturne sur elle-même.

Seulement 13 des satellites réguliers ont un diamètre supérieur à 50 km (dont Hypérion) et 7 seulement sont suffisamment gros pour avoir une forme sphérique. Ces 7 satellites sont, dans l'ordre en partant de Saturne :

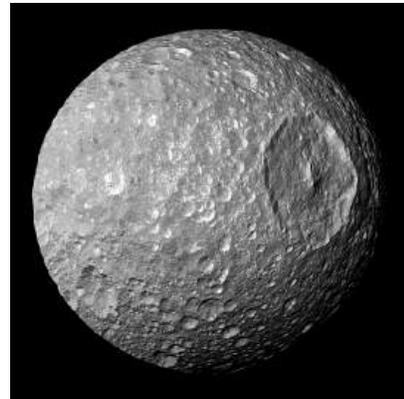
- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 - Mimas (diamètre : 396 km) | 5 - Rhéa (diamètre : 1527 km) |
| 2 - Encelade (diamètre : 504 km) | 6 - Titan (diamètre : 5150 km) |
| 3 - Téthys (diamètre : 1062 km) | 7 - Japet (diamètre : 1470 km) |
| 4 - Dioné (diamètre : 1123 km) | |

Titan est de loin le plus gros satellite de Saturne. À lui seul, Titan contient plus de 96 % de la masse de tous les satellites de Saturne.

Ces 7 satellites ont toujours la même face tournée vers Saturne. Ils sont tous de type ganymédien, ce qui signifie qu'environ la moitié de la masse du satellite est composée de glace. Avec une telle surface glacée, les satellites ont souvent un albédo très élevé, de l'ordre de 95 %.

Mimas

Avec une orbite ayant un demi-grand axe de 185 000 km, Mimas est très près de Saturne puisque cette distance est environ la moitié de la distance Terre-Lune. C'est aussi une lune très petite avec un diamètre valant seulement 12 % de celui de la Lune et une masse d'à peine 0,05 % de la masse de la Lune. L'aire de sa surface est environ égale à celle de l'Espagne. La planète est tellement petite que, normalement, la gravitation n'aurait pas été assez grande pour que ce satellite ait une forme sphérique. Il est fort probable que les forces de marée, très grandes sur Mimas, ont provoqué un réchauffement qui a liquéfié Mimas un peu après sa formation, ce qui lui a permis de prendre une forme ronde. Mimas est aussi célèbre pour ce gigantesque cratère (par rapport à la taille du satellite) qui lui donne l'allure de l'étoile de la mort dans *Star Wars*.



[en.wikipedia.org/wiki/Mimas_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mimas_(moon))

Encelade

Le demi-grand axe de l'orbite d'Encelade est de 238 000 km, ce qui représente 62 % de la distance entre la Terre et la Lune. C'est aussi une lune très petite puisque son diamètre est

14 % du diamètre de la Lune et sa masse n'est que de 0,2 % de la masse de la Lune. L'aire de sa surface est approximativement égale à celle du Texas.

Certaines parties de la surface d'Encelade sont extrêmement jeunes. On note particulièrement la partie en bas de la photo de droite, appelée *les rayures du tigre*. À ces endroits, la glace est particulièrement propre et a un albédo de 99 %. Des mesures montrent que la glace dans cette région est parfois très jeune (à peine 10 ans).

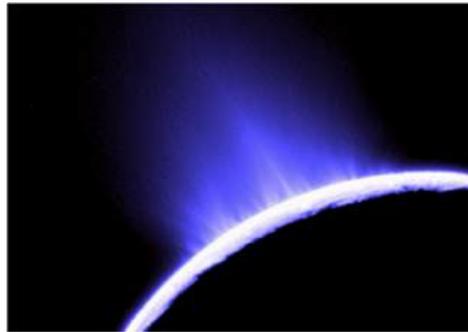
Il semble donc clair qu'il y a un océan liquide sous une surface glacée et que cette surface glacée est très mince à certains endroits. Les forces de marée faites par Saturne, très grandes pour ce satellite près de Saturne, contribuent à chauffer l'intérieur de ce satellite et à garder la température assez élevée pour que l'eau soit liquide. Encelade a toujours la même face vers Saturne, mais une résonance orbitale 2 : 1 avec Dioné garde l'orbite assez excentrique pour que les bosses de marée se déplacent un peu à la surface, ce qui génère beaucoup de chaleur.

En fait, on observe même de l'activité géologique à la surface d'Encelade. On a découvert des geysers d'eau dans cette partie sud du satellite.

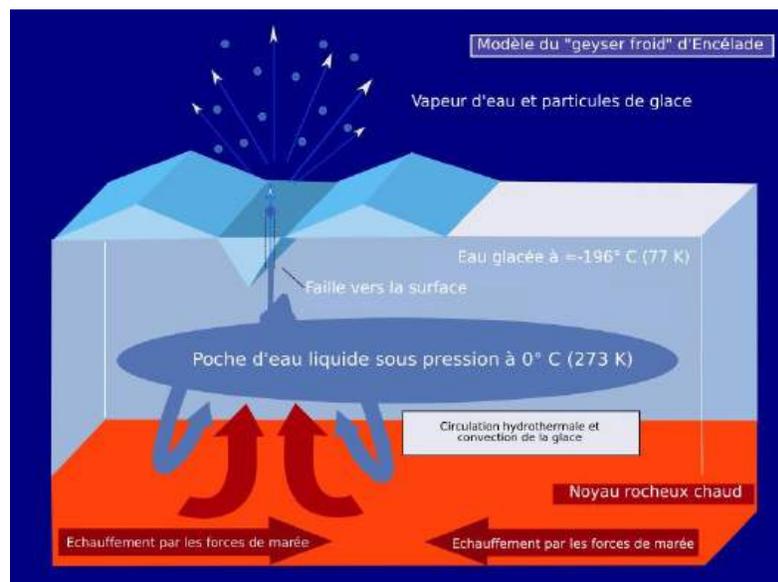
Le mécanisme de formation des geysers serait assez similaire à celui des geysers sur Terre. Une poche d'eau est chauffée par la chaleur interne d'Encelade jusqu'à ce que la grande pression génère une fuite à travers la croûte par où s'échappe la vapeur. La vapeur éjectée cristallise aussitôt pour se déposer ensuite, en partie, à la surface d'Encelade.



apod.nasa.gov/apod/ap050906.html



en.wikipedia.org/wiki/Enceladus



commons.wikimedia.org/wiki/File:Geyser_froid.svg

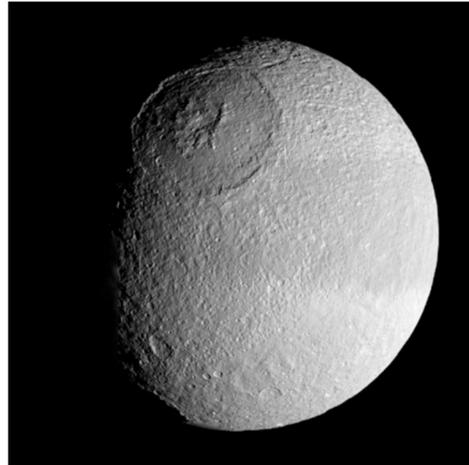


Une partie de l'eau est éjectée dans l'espace pour se retrouver en orbite autour de Saturne sur la même orbite qu'Encelade. Cette eau forme l'anneau E de Saturne. L'image de gauche nous montre Encelade dans l'anneau E. Cet anneau est un des rares anneaux en dehors de la limite de Roche. Ce genre d'anneau n'est pas plat et ne peut survivre que si Encelade rajoute continuellement de la matière dans l'anneau.

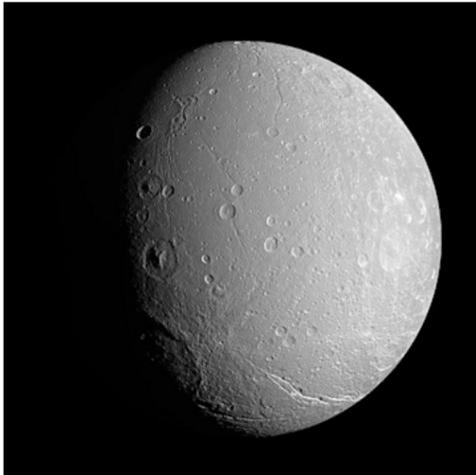
en.wikipedia.org/wiki/File:E_ring_with_Enceladus.jpg

Téthys

Le demi-grand axe de l'orbite de Téthys est de 295 000 km (77 % de la distance entre la Terre et la Lune). Avec un diamètre valant 30 % de celui de la Lune et une masse de seulement 0,8 % de la masse de la Lune, c'est aussi un petit satellite. C'est une lune ganymédienne recouverte de cratères (dont un est très gros par rapport à la taille du satellite).



planetologie.destination-orbite.net/thetys.php



Dioné

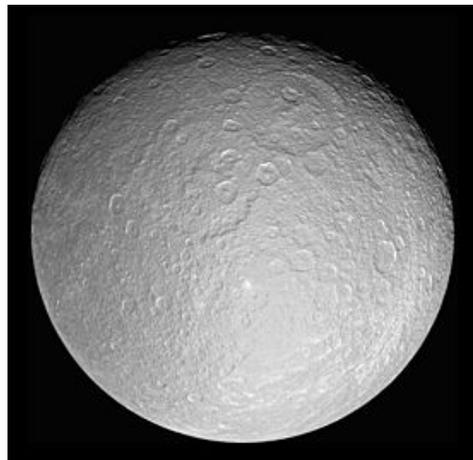
Le demi-grand axe de l'orbite de Téthys est de 377 000 km (98 % de la distance entre la Terre et la Lune). Avec un diamètre de 32 % du diamètre de la Lune et une masse de seulement 1,5 % de la masse de la Lune, c'est aussi un petit satellite. Tout comme Téthys, Dioné est recouverte de cratères.

apod.nasa.gov/apod/ap070801.html

Rhée

Le demi-grand axe de l'orbite de Rhée est de 527 000 km (137 % de la distance entre la Terre et la Lune). Son diamètre vaut 44 % de celui de la Lune et sa masse n'atteint que 3 % de la masse de la Lune. Tout comme Téthys et Dioné, la surface glacée de Rhée est recouverte de cratères. Il se pourrait que Rhée possède un petit anneau.

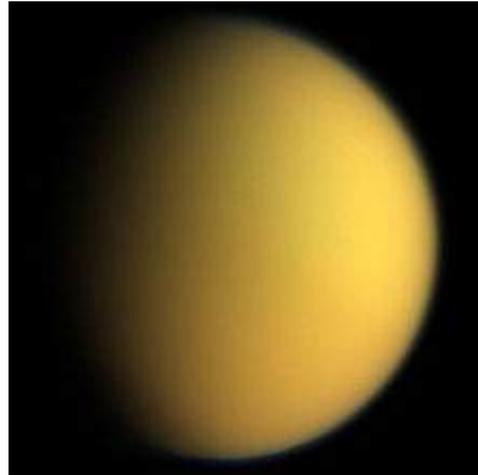
[en.wikipedia.org/wiki/Rhea_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rhea_(moon))



Titan

Le demi-grand axe de l'orbite de Titan est de 1 222 000 km (3,2 fois la distance entre la Terre et la Lune). Son diamètre est 1,48 fois plus grand que celui de la Lune et sa masse est 1,8 fois plus grande que la masse de la Lune. Cela fait de Titan le 2^e plus gros satellite du Système solaire, juste après Ganymède. Titan est même un peu plus gros que Mercure.

On remarque que l'aspect de Titan est complètement différent de celui des autres satellites. C'est que Titan possède une atmosphère très brumeuse qui nous empêche de voir la surface glacée de Titan.

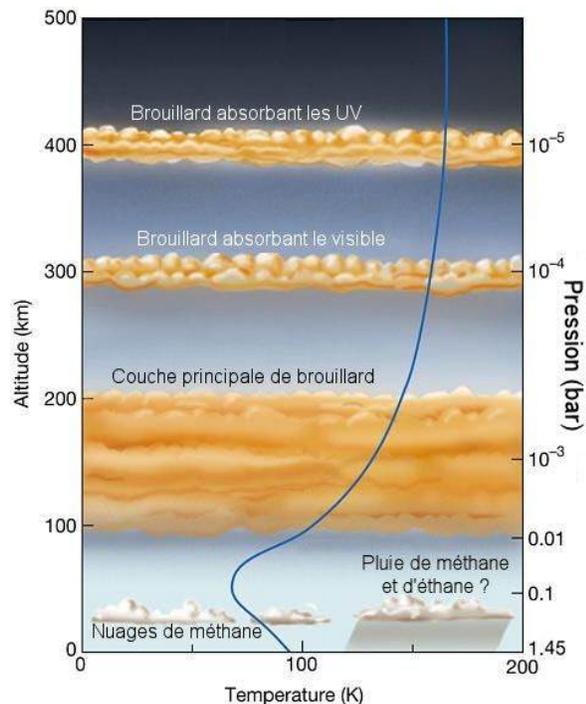


[en.wikipedia.org/wiki/Titan_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Titan_(moon))

Il semble curieux qu'un satellite aussi peu massif puisse posséder une atmosphère, mais il ne faut pas oublier que la présence d'atmosphère est déterminée par le rapport de la vitesse de libération sur la vitesse des molécules de gaz. La vitesse de libération de Titan est assez basse (2,639 km/s), mais la vitesse des molécules est aussi basse. À cette distance du Soleil et avec un albédo de 0,22, la température moyenne est de -180 °C à la surface de Titan. Les molécules d'azote, qui constituent l'essentiel de l'atmosphère de Titan, ont alors une vitesse moyenne de 234 m/s. La vitesse de libération étant plus de 11 fois plus grande que la vitesse des molécules, on a les conditions nécessaires pour garder une atmosphère.

La pression atmosphérique au sol est de 1,45 fois la pression atmosphérique à la surface de la Terre. Le champ gravitationnel étant plus faible à la surface de Titan que sur Terre, la pression diminue plus lentement que sur Terre avec l'altitude. Ainsi, l'atmosphère de Titan est 10 fois plus épaisse que celle de la Terre. Cela fait que l'atmosphère de Titan contient environ 10 fois plus de gaz que toute l'atmosphère de la Terre.

Avec une gravitation plus faible que sur Terre, on pourrait voler en se collant des ailes sur les bras. À la surface, l'atmosphère est constituée principalement d'azote (95 %) et de méthane (4,9 %). C'est la seule atmosphère dominée par l'azote à part celle de la Terre. Le méthane en haute



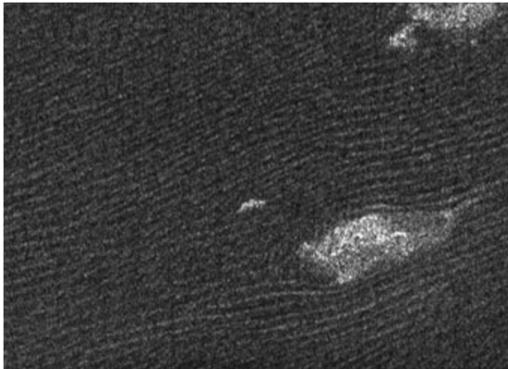
physics.uoregon.edu/~jimbrau/astr121/Notes/Chapter12.html

atmosphère réagit avec les rayons ultraviolets du Soleil pour créer toute une série d'hydrocarbures qui forment ce smog orange qui rend l'atmosphère opaque. Ces composés organiques retombent lentement à la surface de Titan et se mélangent à la glace. Ce qui rend la situation intéressante, c'est qu'à ces températures et pressions, le méthane peut exister sous forme solide, liquide et gazeuse, tout comme l'eau sur Terre. Il peut donc y avoir des pluies de méthane sur Titan.

Comme l'atmosphère nous cache la surface en lumière visible, on a envoyé des sondes munies de radar pour cartographier la surface.



www.dlr.de/saturn/en/DesktopDefault.aspx/tabid-307/467_read-9583/gallery-1/gallery_read-Image.9.3604/



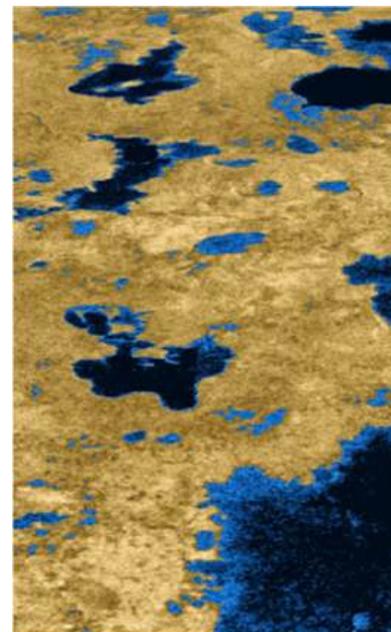
On remarque des zones sombres et des zones plus claires. Xanadu, au centre de l'image de gauche, est une de ces zones claires à la surface. Elle est environ de la taille de l'Australie. Ce sont des régions plus accidentées, avec des vallées et des collines. Les zones sombres sont des régions très peu accidentées recouvertes de dunes de particules. On peut voir une de ces dunes sur l'image de gauche.

saturn.jpl.nasa.gov/photos/imagetdetails/index.cfm?imageId=2116

Les particules composant ces dunes sont probablement faites de glaces et d'hydrocarbures.

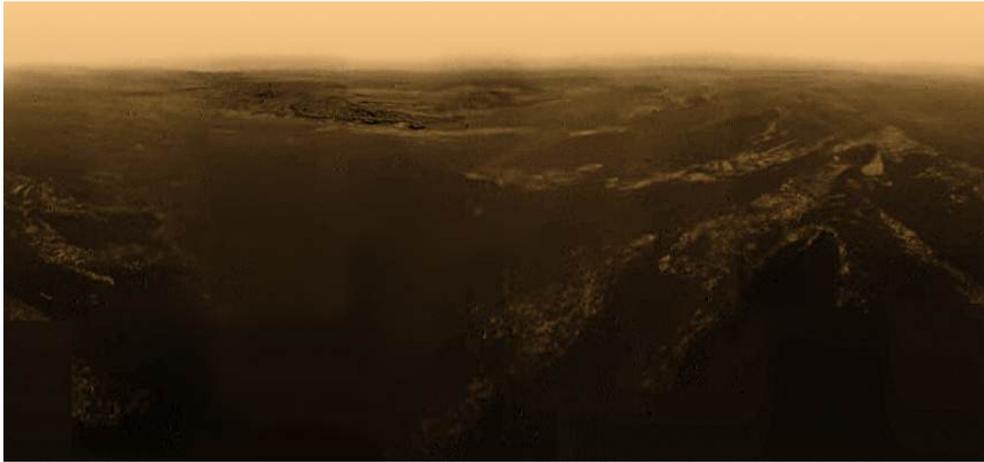
On ne distingue que très peu de cratères d'impact. Les quelques rares cratères découverts se remplissent lentement de cristaux de glace et d'hydrocarbure.

Sur l'image de droite, les régions peu réfléchives au radar, qu'on a mises en bleu sur cette figure, sont des lacs de méthane à la surface de Titan. Ces lacs sont concentrés près des pôles et ne couvrent qu'une infime partie de la surface de Titan. On a quand même découvert quelques lacs près de l'équateur.



[en.wikipedia.org/wiki/Titan_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Titan_(moon))

Pour en connaître davantage, on a envoyé une sonde se poser à la surface de Titan (Huygens, en janvier 2005). Voici un montage d'images prises en altitude.

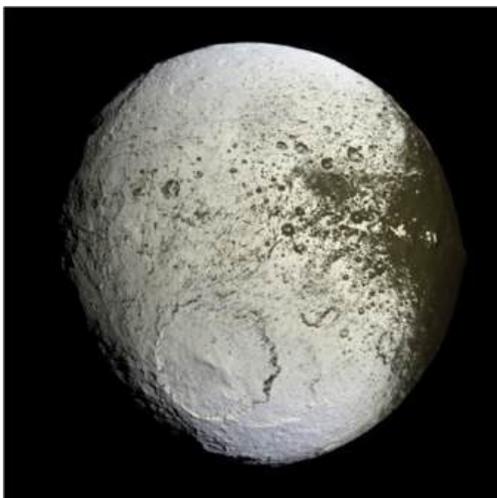


anthony.liekens.net/index.php/Main/Huygens

Et voici une image prise à la surface de Titan. N'oubliez pas que tous ces cailloux sont faits de glace d'eau.

Les forces de marée chauffent également l'intérieur de Titan et il est presque certain qu'un océan d'eau liquide, contenant toutefois beaucoup d'ammoniac, se retrouve à environ 100 km sous la surface glacée de Titan. Cet océan aurait une épaisseur d'une douzaine de kilomètres. Il est possible également qu'il y ait des volcans d'eau à la surface de Titan, mais ce n'est pas encore confirmé. Ces volcans pourraient éjecter du méthane dans l'atmosphère, expliquant ainsi sa présence malgré les pertes dues aux rayons ultraviolets du Soleil. Ils pourraient aussi expliquer certains reliefs ressemblant à des coules de lave observés à la surface de Titan.

[en.wikipedia.org/wiki/Titan_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Titan_(moon))



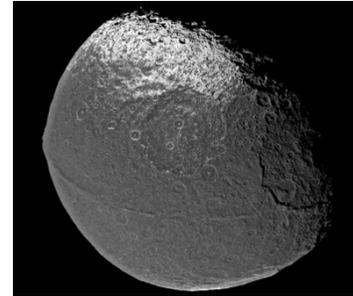
Japet

Le demi-grand axe de l'orbite de Japet est de 3 560 000 km (9,3 fois la distance entre la Terre et la Lune). Avec un diamètre de 42 % du diamètre de la Lune et une masse de seulement 2,5 % de la masse de la Lune, c'est aussi un petit satellite. Tout comme beaucoup de satellites ganymédiens, Japet a une surface de glace recouverte de cratères.

www.cidehom.com/recherche.php?_mots=japet+lune+saturne&quoi_aff=3&_page=050201

Japet a cependant deux particularités. Premièrement, il possède une crête équatoriale, un genre de bourrelet à l'équateur. D'une hauteur de 20 km, il s'agit de la plus haute chaîne de montagnes du Système solaire. On ne connaît pas l'origine de cette crête pour l'instant.

www.cidehom.com/apod.php?_date=050201



solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/iapetus/in-depth/

Japet a aussi un côté particulièrement sombre, ayant un albédo de seulement 5 %, et un côté particulièrement brillant, ayant un albédo d'environ 60 %. Le côté sombre est du côté vers où le satellite se déplace.

(Animation : <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/iapetus/in-depth/>)

On dirait que Japet a foncé dans des débris qui ont sali sa surface. La matière vient probablement de Phoebe. Phoebe, le satellite suivant, perd de la matière qui forme un très vaste anneau. Comme Phoebe et son anneau tournent dans le sens contraire de la rotation de la plupart de satellites de Saturne, plusieurs forces font en sorte que la matière de l'anneau tombe lentement vers Saturne. C'est en s'approchant de Saturne que la matière de l'anneau rencontre Japet. Une fois les débris en place, ils ont provoqué une différence d'albédo, ce qui fait que la température maximale le jour du côté sale, plus sombre, s'élève davantage le jour que celle du côté propre. Cela provoque davantage de sublimation de glace du côté sale, libérant ainsi davantage de saletés emprisonnées dans la glace, ce qui a amplifié encore plus la différence de brillance.

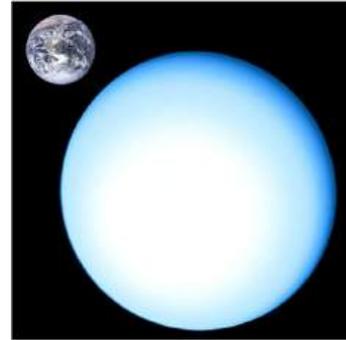
7.7 URANUS

Les anciens astronomes ne connaissaient pas Uranus même si, avec une magnitude maximale de 5,3, Uranus est théoriquement visible à l'œil nu. Après l'invention du télescope, quelques astronomes l'ont observé, mais ils n'ont pas remarqué qu'ils avaient affaire à une planète. La plus ancienne observation connue est celle de John Flamsteed en 1690 (qui la liste dans son catalogue d'étoiles). William Herschell, qui l'observe à son tour à partir du 13 mars 1781, note qu'elle change lentement de position. Au départ, les astronomes



en.wikipedia.org/wiki/File:Uranus2.jpg

pensent avoir affaire à une comète, mais il devient évident que c'est une planète après le calcul de l'orbite en 1783 par Anton Lexell. Au départ, Herschell veut nommer la nouvelle planète *planète de George* en l'honneur du roi d'Angleterre Georges III, un choix évidemment peu populaire hors d'Angleterre. D'autres proposent *Neptune* pour commémorer les récentes victoires navales britanniques, alors que l'astronome allemand Johann Elert Bode propose *Uranus*. Saturne étant le père de Jupiter dans la mythologie, il propose de suivre la même logique et nommer la nouvelle planète du nom du père de Saturne, Uranus. (Petite note historique : un des collègues de Bode à l'académie royale de Suède, Martin Klaproth, donna le nom d'uranium au nouvel élément qu'il venait de découvrir pour supporter le nom proposé par Bode.) C'est finalement le nom *Uranus* proposé par Bode qui l'emportera vers 1850.

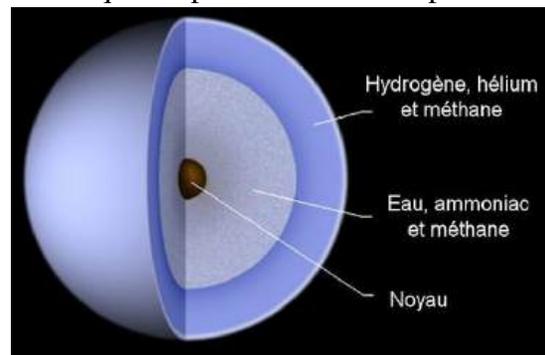


en.wikipedia.org/wiki/File:Uranus,_Earth_size_comparison.jpg

Uranus est la troisième plus grosse planète du Système solaire. Son rayon est 4 fois plus grand que celui de la Terre, ce qui veut dire qu'Uranus a un volume équivalent à 63 celui de la Terre. Sa masse est 14,3 fois plus grande que celle de la Terre.

La structure d'Uranus

Uranus est aussi une planète jovienne, ce qui veut dire qu'elle possède une atmosphère très importante, quoique le noyau est plus important, toute proportion gardée, que pour Jupiter et Saturne.



fr.wikipedia.org/wiki/Uranus_(planète)

Le noyau rocheux et métallique

Au centre de la planète, on retrouve un noyau rocheux et métallique. Ce noyau aurait une masse se situant entre $0,5 M_{\oplus}$ et $3,7 M_{\oplus}$.

La couche d'eau, d'ammoniac et de méthane

La masse de la couche d'eau, d'ammoniac et de méthane se situe entre $9,3 M_{\oplus}$ et $13,5 M_{\oplus}$. En fait, la masse de cette couche représente entre 65 % et 95 % de la masse de la planète (les estimations varient parce qu'on ne sait pas vraiment la taille du noyau rocheux). L'eau, l'ammoniac et le méthane forment un liquide chaud, dense et conducteur d'électricité.

La couche d'hydrogène, d'hélium et de méthane

Par-dessus la couche d'eau, d'ammoniac et de méthane, on retrouve une épaisse couche d'hydrogène (83 %), d'hélium (15 %) et de méthane (2,3 %). La masse de cette couche se

situé entre $0,5 M_{\oplus}$ et $1,5 M_{\oplus}$. En profondeur, ces éléments forment un liquide alors qu'on les retrouve sous forme gazeuse près de la surface. Ce sont donc ces éléments qui forment l'atmosphère de la planète.

Une géante de glace ?

Cette structure ressemble à la structure d'une grosse planète ganymédienne, mais recouverte d'une importante couche d'hydrogène, d'hélium et de méthane. Comme les planètes ganymédienne sont composées de glaces en grande partie, on donne parfois le nom de *géante de glace* aux planètes ayant cette structure, bien que, curieusement, il n'y ait pas de glaces dans cette structure. La température interne est beaucoup trop élevée pour que ces éléments soient sous forme de glaces. On devrait plutôt dire que c'est une boule de liquide, mais composée d'éléments qui sont normalement sous forme de glaces à cette distance du Soleil.

Une planète qui ne perd pas beaucoup de chaleur

Uranus n'émet que 106 % de l'énergie reçue du Soleil. Il y a bien un 6 % de plus qui provient de la chaleur interne d'Uranus, mais cette valeur est anormalement basse. En fait, la « surface » d'Uranus n'émet que $0,042 \text{ W/m}^2$, ce qui est bien peu pour une planète de cette taille. (La Terre émet $0,075 \text{ W/m}^2$ grâce à sa chaleur interne.) On ne sait pas pourquoi si peu de chaleur interne atteint la surface d'Uranus. L'intérieur est-il plus froid que prévu ou y a-t-il une couche très isolante dans Uranus qui empêche la chaleur interne d'atteindre la surface ? On ne sait pas.

L'atmosphère d'Uranus

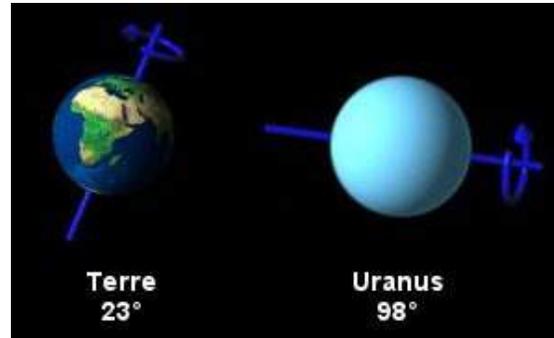
L'ammoniac, important dans les atmosphères de Jupiter et Saturne, est absent de l'atmosphère d'Uranus. La température plus froide d'Uranus ne permet pas à l'ammoniac d'être sous forme gazeuse dans l'atmosphère. L'ammoniac, qui cristallise à ces températures, est donc tombé dans Uranus pour se retrouver dans le manteau d'eau pour former de l'ammoniaque, une solution aqueuse d'ammoniac, dont le point de fusion est très bas et qui conduit l'électricité.

Il y a donc beaucoup moins d'ammoniac et plus de méthane dans l'atmosphère d'Uranus que dans les atmosphères Jupiter et Saturne. C'est ce méthane de l'atmosphère, qui absorbe certaines couleurs, qui donne cette couleur bleu-vert à Uranus.

On note, à l'occasion, des petits nuages blancs, composés de méthane, dans l'atmosphère. La faible chaleur interne d'Uranus arrivant à la surface fait en sorte que l'atmosphère d'Uranus est assez froide. La couche la plus froide de l'atmosphère d'Uranus a une température de 49 K ($-224 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ce qui est la température la plus froide rencontrée sur les 8 planètes du Système solaire.

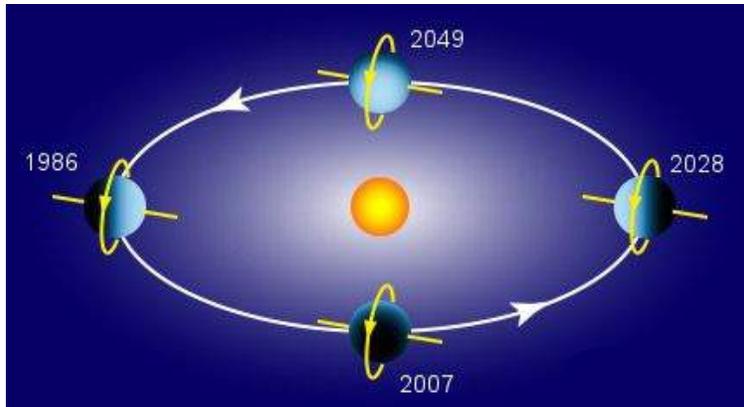
Une planète dont l'axe de rotation est très incliné

L'axe de rotation d'Uranus est très incliné par rapport au plan de rotation de la planète autour du Soleil. La planète est pratiquement couchée sur le côté. On ne sait pas pourquoi il en est ainsi, mais cela fait en sorte que les saisons sont assez extrêmes sur Uranus.



atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/lecture11.html

Par exemple, quand la sonde Voyager 2 est arrivée à Uranus en 1986, le pôle Sud pointait presque directement vers le Soleil. Le côté sud de la planète était constamment éclairé, malgré la rotation de la planète sur elle-même, alors que le côté nord était toujours dans

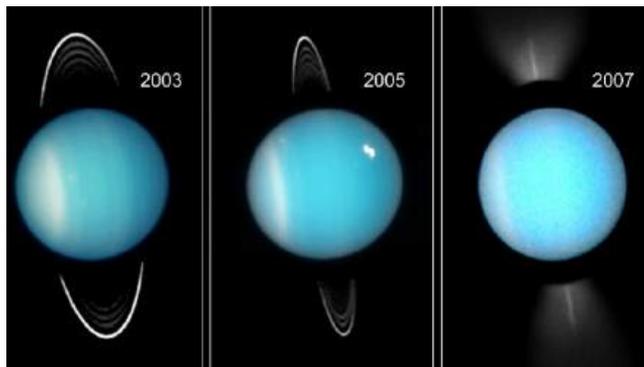


l'obscurité. Il semble que cette configuration n'était pas très favorable à la formation de structure nuageuse parce que la surface d'Uranus se révéla presque totalement uniforme à ce moment, comme sur notre première image d'Uranus de cette section.

www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch09/ch09.html

(Selon la définition favorisée par l'union astronomique internationale, le pôle Nord est celui qui pointe au-dessus du plan de rotation autour du Soleil, peu importe le sens de rotation de la planète.)

Une vingtaine d'années plus tard, en 2007, c'est l'équinoxe sur Uranus. Dans cette configuration, il y a alternance de jours et de nuits partout sur la planète. Les deux pôles reçoivent alors de la lumière, quoique très peu étant donné la grande distance entre Uranus et le Soleil. Cette configuration semble plus favorable à la formation de structure dans l'atmosphère d'Uranus, comme le montrent ces images plus récentes d'Uranus.



astrobob.areavoices.com/2011/03/

Il semble alors y avoir une différence importante entre l'hémisphère sud, éclairé depuis des décennies, et l'hémisphère nord, dans l'obscurité depuis des décennies. L'hémisphère sud est plus blanc que l'hémisphère nord.

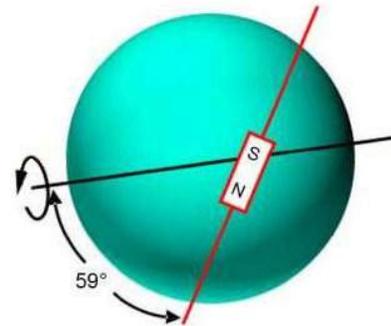
Depuis ce temps, le pôle Sud est tombé dans l'obscurité pour 42 ans. L'hémisphère sud sera de plus en plus plongé dans l'obscurité alors que l'hémisphère nord sera de plus en plus éclairé.

Le champ magnétique d'Uranus

C'est la convection dans la couche d'eau, d'ammoniac et méthane, conductrice d'électricité, qui devrait être la source du champ magnétique d'Uranus. La convection doit être un peu particulière parce que le champ magnétique est très incliné par rapport à l'axe de rotation de la planète (59°) et aussi parce qu'il n'est pas centré sur la planète.

La forte inclinaison de la planète ne devrait pas être à l'origine de ces particularités parce que Neptune, qui a une structure interne similaire à celle d'Uranus sans avoir cette inclinaison prononcée, a aussi un champ ayant les mêmes caractéristiques.

Le champ magnétique à la « surface » d'Uranus est un peu plus grand que la moitié du champ à la surface de la Terre.



phys.org/news/2021-03-strange-planets-neptune-uranus-mysterious.html

Les anneaux

Comme toutes les planètes gazeuses du Système solaire, Uranus possède des anneaux. Ils sont beaucoup moins importants que ceux de Saturne puisque leur masse est plus petite (10^{13} kg pour les anneaux d'Uranus, comparativement à 10^{20} kg pour ceux de Saturne) et leur albédo est nettement inférieur (5 % pour Uranus et 60 % pour Saturne). Ce sont quand même les anneaux les plus imposants après ceux de Saturne. Chose certaine, ils sont assez imposants pour qu'on puisse les voir sur les images d'Uranus. Ils semblent composés de glace recouverte d'un genre d'hydrocarbure, ce qui diminue leur albédo.



www.squidoo.com/solar_system_exploration_NASA_missions

Beaucoup de satellites d'Uranus orbitent entre les anneaux. Comme leurs orbites sont instables, ils ne pourraient pas rester longtemps dans cette configuration (10 millions d'années). Cela laisse penser qu'il est possible qu'il y ait un échange de matière entre les anneaux et les satellites. Des satellites se forment à partir de la matière jusqu'à ce qu'une collision importante pulvérise le satellite. Ce cycle recommencerait sans cesse.

Les satellites d'Uranus

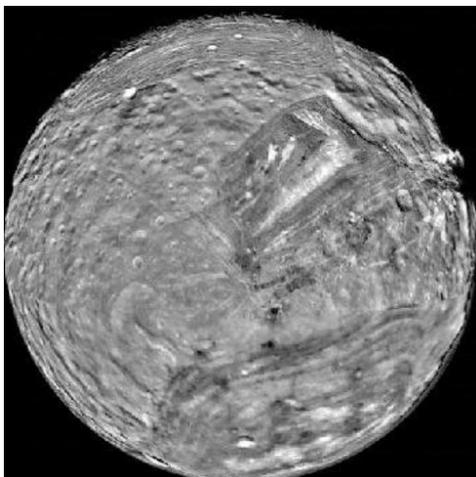
Uranus possède 28 satellites, dont 5 sont suffisamment massifs pour avoir une forme sphérique. Notez que les petits satellites ont des noms souvent tirés des œuvres de William Shakespeare et d'Alexander Pope.

22 des satellites tournent autour d'Uranus dans le même sens que Uranus tourne sur elle-même. 6 satellites tournent autour d'Uranus dans le sens contraire de la rotation d'Uranus sur elle-même. Ces 6 satellites sont tous très petits et très loin de Uranus.

Les 5 gros satellites sont Miranda (diamètre = 472 km), Ariel (diamètre = 1158 km), Umbriel (diamètre = 1169 km), Titania (diamètre = 1577 km) et Obéron (diamètre = 1523 km). Ils sont tous relativement petits puisque le plus gros n'a que 45 % du diamètre de la Lune et 4,8 % de la masse de la Lune. On présume qu'ils ont toujours la même face tournée vers Uranus. Ce sont toutes des planètes ganymédiennes, ce qui signifie qu'ils ont essentiellement des surfaces glacées recouvertes de cratères.



www.daviddarling.info/encyclopedia/U/Uranusmoons.html

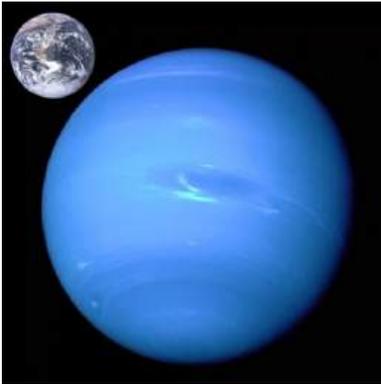


Il faut noter toutefois l'aspect très particulier de la petite Miranda.

De toute évidence, il s'est passé quelque chose pour que Miranda soit à ce point défigurée, mais on ne sait pas exactement ce qui a bien pu se produire. Il est possible que les forces de marée aient eu un rôle à jouer puisque Miranda est très près d'Uranus (33 % de la distance Terre-Lune).

www2.astro.psu.edu/users/niel/astro1/slideshows/class41/slides-41.html

7.8 NEPTUNE



fr.wikipedia.org/wiki/Neptune_(planète)

Neptune est la quatrième plus grosse planète du Système solaire. Son rayon est 3,85 fois plus grand que celui de la Terre, ce qui veut dire que Neptune a un volume équivalent à 58 celui de la Terre. Sa masse est 17 fois plus grande que celle de la Terre. Neptune est donc un peu plus petite qu'Uranus, mais elle est un peu plus massive qu'Uranus.

astrobob.areavoices.com/2010/08/18/chillin-with-the-blue-orb/

La découverte de Neptune

Comme Uranus, Neptune a été observé quelques fois au télescope avant qu'on se rende compte que c'était une planète. La première observation a été faite par Galilée dès 1612, mais il a pensé que c'était une étoile.

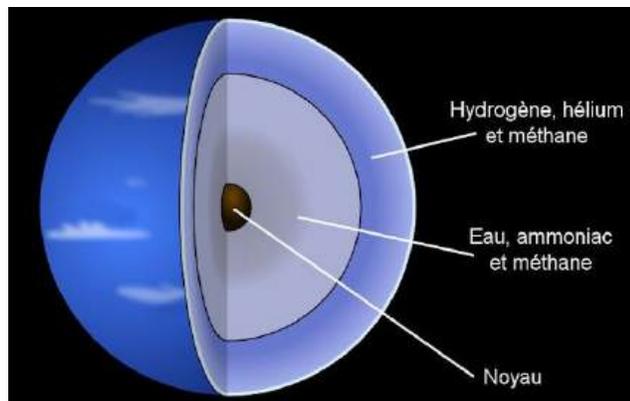
Après la découverte d'Uranus par William Herschell en 1781, on étudie en détail l'orbite de cette planète. En 1820, il devient clair qu'il y a un problème. Uranus semble dévier de l'orbite prévue. Certains pensent alors qu'une autre planète inconnue située au-delà de l'orbite d'Uranus perturbe le mouvement de celle-ci. (Effectivement, en 1821, Uranus et Neptune étaient le plus près l'un de l'autre et la force de perturbation était alors à son maximum.) John Couch Adams et Urbain Le Verrier se lancent alors tous les deux dans le calcul de la position de l'objet perturbateur et arrivent sensiblement à la même position pour Neptune. Évidemment, le résultat est un peu approximatif, car il y a quelques suppositions à faire concernant la distance et la masse de la nouvelle planète. Lorsqu'Adams envoie ses résultats à l'observatoire de Greenwich en septembre 1845, les astronomes ne parviennent pas à confirmer ses résultats. Il faut dire qu'ils mettent peu d'effort pour y arriver, car le directeur de l'observatoire n'est pas tellement impressionné par la méthode employée. Selon lui, il faudrait mettre beaucoup d'effort pour un résultat incertain. Puis, en juin 1846, Le Verrier publie le résultat de ses calculs. La similarité de ses résultats avec ceux d'Adams convainc alors les observateurs de Greenwich que les calculs d'Adams sont probablement bons et ils recommencent la recherche de la planète, mais de façon plus soutenue cette fois. Pendant ce temps, le Verrier envoie ses résultats à

l'observatoire de Berlin en septembre 1846, après avoir tenté, en vain, d'intéresser les astronomes français. À cet observatoire, ils ont une excellente carte du ciel de l'endroit où devrait se retrouver Neptune selon Le Verrier. Cette carte leur permet de voir le moindre changement dans cette région du ciel. Ainsi, en moins d'une heure, les astronomes de Berlin découvrent Neptune à environ un degré de la position prévue par Le Verrier. Après l'annonce de cette découverte, les astronomes de Greenwich s'aperçoivent qu'ils avaient observé Neptune deux fois sans s'en rendre compte... Tout ça pour dire que la loi de la gravitation a permis de découvrir Neptune par calcul. C'est un des plus grands succès de la théorie de la gravitation de Newton.

La structure de Neptune

Neptune a sensiblement la même structure qu'Uranus.

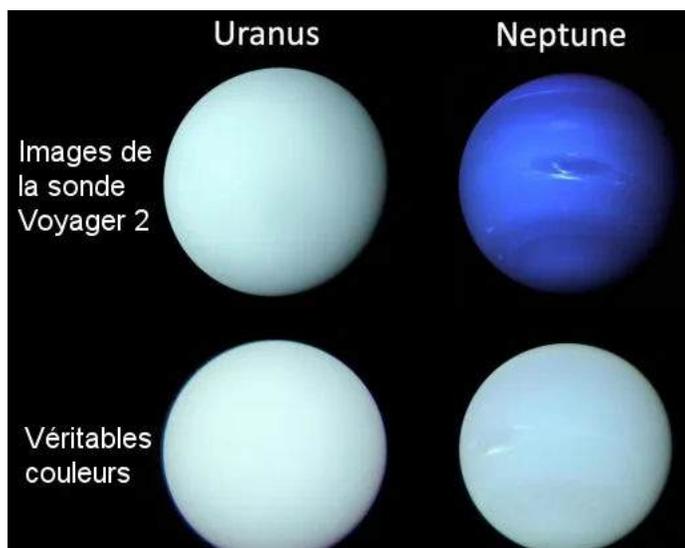
L'atmosphère de Neptune est un peu plus active que celle d'Uranus. On observe davantage de nuages de méthane et de taches sombres que sur Uranus, bien qu'Uranus s'approche de ce niveau d'activité lors de ses équinoxes. Il faut dire que l'inclinaison de l'axe d'Uranus rend la situation un peu particulière.



commons.wikimedia.org/wiki/File:Neptune_diagram.svg

La chaleur interne s'échappe beaucoup mieux de Neptune que d'Uranus. En effet, Neptune émet 2,6 fois plus d'énergie qu'elle en reçoit du Soleil. Cette chaleur interne qui s'échappe fait que l'atmosphère de Neptune est un peu plus chaude que celle d'Uranus, bien que la planète ne reçoive que 40 % de l'énergie solaire que reçoit Uranus. La partie la plus froide de l'atmosphère de Neptune est à 55 K, alors qu'elle est à 49 K sur Uranus.

Les images de Neptune prises par la sonde Voyager 2 laissent penser qu'elle a une teinte différente de celle d'Uranus. Neptune semble être d'un bleu plus profond qu'Uranus. Cependant, les images de Neptune ont été modifiées pour amplifier les contrastes. En réalité, Uranus et Neptune ont pratiquement la même couleur.



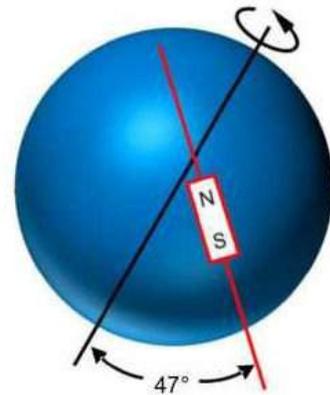
www.the-sun.com/tech/10017998/neptune-real-colour-uranus/

Le champ magnétique de Neptune

Le champ magnétique de Neptune serait aussi généré dans la couche d'ammoniaque à l'intérieur de Neptune. Comme pour Uranus, le champ est très incliné par rapport à l'axe de rotation et décentré par rapport à la planète.

L'intensité du champ à la « surface » de Neptune est environ égale au tiers du champ magnétique à la surface de la Terre.

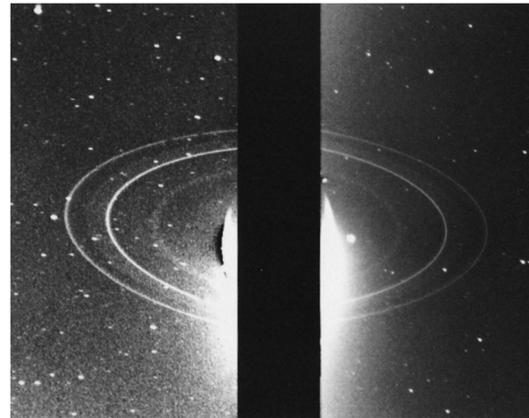
phys.org/news/2021-03-strange-planets-neptune-uranus-mysterious.html



Les anneaux de Neptune

Neptune possède aussi des anneaux très sombres et peu massifs (10^{13} kg, soit environ la même masse que ceux d'Uranus).

Il y a aussi beaucoup de satellites qui orbitent entre les anneaux. Il est possible qu'il y ait un échange de matière entre les anneaux et les satellites comme dans les anneaux d'Uranus.



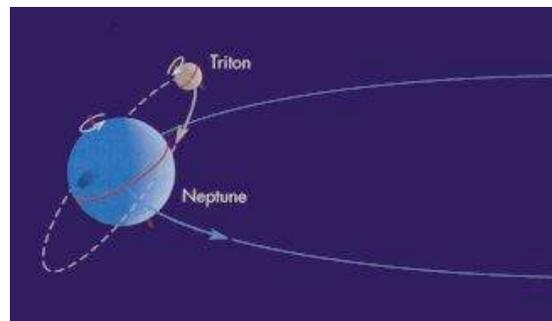
www.britannica.com/blogs/2011/08/fantastic-voyager-picture-essay-day/

Les satellites de Neptune

Neptune possède 16 satellites. 10 des satellites tournent autour de Neptune dans le même sens que Neptune tourne sur elle-même. 6 satellites tournent autour de Neptune dans le sens contraire de la rotation de Neptune sur elle-même. Parmi ces satellites qui tournent dans le sens contraire, il y a Triton, le seul satellite de Neptune qui a une masse suffisante pour avoir une forme sphérique. Avec un diamètre de 2720 km (79 % du diamètre de la Lune), il est le 7^e plus gros satellite du Système solaire. À lui seul, il contient 99,6 % de la masse de tous les satellites de Neptune.

Triton est le seul gros satellite du Système solaire à tourner dans le sens contraire de la rotation sur elle-même de la planète autour de laquelle le satellite tourne.

facstaff.gpc.edu/~fbuls/weblabs/moons/moons11.htm



La distance entre Neptune et Triton est de 92 % de la distance entre la Terre et la Lune et il présente toujours la même face vers Neptune. Il fait le tour de Neptune en 5,88 jours. L'inclinaison de l'orbite est aussi assez grande.

Comme on ne peut pas concevoir qu'un gros satellite puisse se former en même temps que la planète tout en ayant une rotation dans le sens inverse de la rotation de la planète sur elle-même et en ayant une orbite avec une si grande inclinaison, on pense que Triton est un satellite capturé par Neptune après sa formation.

Avec une orbite allant dans le sens contraire, les forces de marées font que Triton s'approche lentement de Neptune et traversera la limite de Roche dans 3,6 milliards d'années. Triton sera alors détruit par les forces de marée pour former un anneau spectaculaire autour de Neptune.

Triton est la cinquième planète du Système solaire, avec la Terre, Io, Europe et Encelade, à avoir une activité géologique. Dans ce cas, il s'agit d'une activité basée sur l'azote. La distance entre Triton et le Soleil est si grande que la température moyenne est de seulement 38 K (-235 °C). C'est aux environs de cette température que l'azote se solidifie. Une grande partie (55 %) des glaces qui recouvre la surface de Triton est donc formée de glace d'azote. On a donc une structure ganymédiennne, avec une surface d'azote glacée.

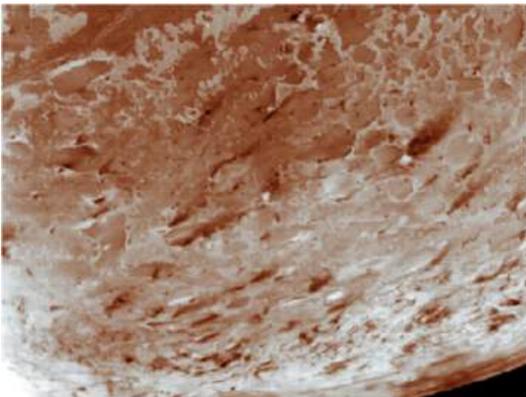


lasp.colorado.edu/education/outerplanets/moons_op.php



en.wikipedia.org/wiki/Pluto

Toutefois, cette glace se réchauffe quand elle est du côté éclairé par le Soleil et l'azote se sublime en formant des geysers. Un zoom de la partie éclairée nous permet de voir ces geysers. Les geysers sont les taches noires qui parsèment la surface. Elles sont noires, car l'azote entraîne avec elle un peu de poussières présentes dans la glace. L'azote, qui se recristallise, monte jusqu'à 8 km de haut pour ensuite retomber sous forme de neige. La surface de Triton se renouvelle donc constamment, oblitérant ainsi toute trace de cratère. Cette surface jeune est aussi très propre et, ainsi, l'albédo de Triton est élevé (76 %).



apod.nasa.gov/apod/ap950805.html

Ces éruptions font aussi en sorte que Triton possède une atmosphère d'azote très ténue, avec une pression à la surface de surface 70 000 fois plus petite que celle à la surface de la Terre.