Le seigneur des anneaux...



SATURNE

La planète
Ses anneaux
Son système satellitaire
Ses principaux satellites (détails)
La mission Cassini-Huygens
Iconographie, photos et additifs



GAP 47 • Olivier Sabbagh • Décembre 2014 - Révision Mars 2023

Saturne, ses anneaux, ses satellites

I - Saturne, la Planète, le « seigneur des anneaux »...

Historique

Mythologie

Saturne (ou *Cronos* en grec) est un dieu romain qui préside la période qui précède le solstice d'hiver, celle des Saturnales. Pendant le reste de l'année, c'est un *deus otiosus*, un dieu en sommeil, dont la statue est liée par des bandelettes dont on ne le libère qu'au moment des Saturnales. Il a été assimilé par les anciens au titan grec Cronos.

Avec son assimilation à Cronos, Saturne récupère les liens de parenté de ce dernier. Il est donc, dans la tradition de l'époque impériale, le fils cadet de la Terre Gaia/Tellus/Vesta, et du Ciel Uranus. Il est l'époux de Rhéa/Cybèle/Ops. Il est aussi le père de Jupiter (Zeus en grec), Pluton (Hadès en grec), Neptune (Poséidon en grec) et Cérès (Déméter en grec).

D'après une tradition évhémeriste (L'évhémérisme est une théorie selon laquelle les dieux sont des personnages réels qui auraient été divinisés après leur mort, leur légende étant simplifiée et embellie jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'une sorte de symbolisme absolu et universel. Elle tire son nom du mythographe grec Évhémère) transmise par Ennius et reprise plus tard par Boccace où Saturne, fils cadet d'Uranus (le Ciel) et de l'antique Tellus ou Vesta (la Terre), après avoir détrôné son père obtint de son frère aîné Titan la faveur de régner à sa place. Titan toutefois y mit une condition, c'est que Saturne ferait périr toute sa postérité, afin que la succession au trône fût réservée aux propres fils de Titan. Saturne épousa sa sœur Ops ou Opis (équivalent latin de la Crétoise Rhéa et de la Phrygienne Cybèle), dont il eut successivement cinq enfants. Sachant qu'un jour il serait lui aussi renversé du trône par un de ses fils et pour tenir la promesse faite à Titan, il exigeait de son épouse qu'elle lui livrât les nouveau-nés mâles (dans cette version, contrairement à celle d'Hésiode, les filles de Saturne n'avaient rien eu à craindre de leur père). De fait, Ops présenta à son époux Junon et Glauca, nées la première en même temps que Jupiter, la seconde en même temps que Pluton, qu'elle parvint ainsi à sauver tous deux, un autre stratagème lui ayant permis de dissimuler à Saturne la naissance de Neptune, qui contrairement à ses deux frères, n'avait pas eu de sœur jumelle. Ayant découvert le subterfuge, Titan emprisonna Saturne et Ops, après quoi Jupiter, devenu adulte, déclara la guerre à Titan et à ses fils, les vainquit, libéra ses parents et rétablit son père sur le trône. Mais ayant découvert que Saturne, peu reconnaissant, complotait contre lui, Jupiter finit par traiter ce dernier comme Uranus avait été autrefois traité par ses propres fils, après quoi il le chassa du ciel. Ainsi la dynastie de Saturne se continua au détriment de celle de Titan. Selon une autre tradition, pour éviter que ne s'accomplisse la prédiction selon laquelle il serait détrôné par l'un de ses enfants, Saturne dévora chacun d'eux à leur naissance. Mais un jour, son épouse Cybèle et sa mère Tellus réussirent à sauver Jupiter en faisant avaler à Saturne une pierre enveloppée dans des langes à la place de son fils. Plus tard, ce dernier réussit effectivement à chasser son père du pouvoir et l'obligea à régurgiter ses frères et sœurs (Neptune, Pluton, Cérès, Junon et Vesta).

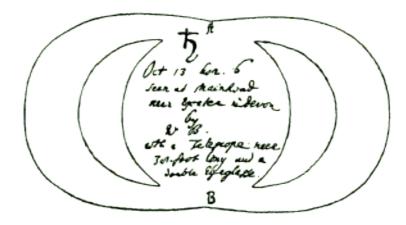
Plus grosse planète de notre Système solaire après Jupiter, Saturne a été connue de tout temps, car, bien que moins éclatante que Vénus, que Jupiter, que Mars et même que Mercure, elle brille encore comme une étoile de première magnitude, et il nous en a été conservé des observations, qui, à Babylone, remontent au **IX**^e siècle avant notre ère.

Cette planète a marqué, jusqu'à la découverte d'Uranus c'est-à-dire jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, la limite extrême du Système solaire. Cette circonstance, jointe à la lenteur de son mouvement et à sa teinte terne et plombée, l'avaient fait tenir par les Anciens et, plus tard, par les astrologues du Moyen âge, en piètre considération : c'était une divinité détrônée, un roi en exil, dont l'influence était particulièrement néfaste et, parmi les jours de la semaine, le dernier, le samedi, lui était consacré, et parmi les métaux, le plus vil d'entre eux : le plomb.

En Chine, Saturne, ou T'ien-sing, était nommée la *planète sempiternelle*, qualification due à ce fait que la lenteur de son mouvement embrasse celui de toutes les autres planètes. Cette planète était féminine chez les Chinois : elle veillait sur les femmes, soit pour les protéger, soit pour les punir.

Les anneaux

Les anneaux dont on a longtemps cru que Saturne était la seule planète à en posséder ont été vus la première fois par Galilée en 1610 (mais il n'a pas compris ce qu'il voyait) et Huygens qui en a expliqué les différentes apparences en 1655. Les astronomes ont ensuite beaucoup tardé à comprendre la nature de ces anneaux, et leur structure exacte. Ils n'ont d'abord distingué que deux anneaux, séparés par un espace apparemment vide, la division de Cassini, l'un de ses découvreurs en 1676. Mais, en 1860, Bond, et s'autres, ont découvert un troisième anneau, intérieur aux deux premiers et plus obscur. Par la suite, il a semblé que deux autres anneaux quelquefois se partageaient temporairement en plusieurs anneaux concentriques. Des circonstances qui parfois laissaient croire encore au début du vingtième siècle qu'ils étaient formés d'une matière fluide, alors même que James Clerk Maxwell avait montré dès 1857 que les anneaux devaient être constitués de petits corps solides en orbite autour de Saturne, et circulant à des vitesses conformes aux lois de Kepler, selon leur distance. Les sondes Voyager, qui ont approché Saturne au cours des années 1980, ont montré que ces anneaux, d'une épaisseur maximale d'un kilomètre, sont constitués effectivement de milliers d'anneaux concentriques plus fins. Chaque anneau abrite des milliards de petits corps recouverts de givre. Les tailles de ces corps s'échelonnent d'un grain de poussière à celle d'un rocher de quelques dizaines de mètres.



Une des premières représentations des anneaux (William Ball, 1666)

Le système satellitaire

Les satellites de Saturne ont été découverts successivement, selon leur gradation d'éclat et le progrès des instruments d'optique. Il est ainsi apparu que Saturne possède un système satellitaire très riche, et aux caractéristiques assez uniques. On y rencontre un satellite, Titan, découvert en 1655, qui est aussi le seul corps dans sa catégorie à posséder une atmosphère épaisse. Titan a été découvert par Huygens le 25 mars de cette année-là, en cherchant l'anneau alors disparu, et l'avait assez observé pour en déterminer l'orbite. Mais, par suite de l'idée préconçue que le nombre des satellites ne devait pas surpasser celui des planètes, et que ce satellite réuni à ceux de Jupiter et à la Lune complétait six corps secondaires répondant aux planètes du système, il n'en chercha pas d'autres. Autrement, avec les instruments dont il disposait, il eût pu en découvrir au moins deux autres. Ceux-là et les suivants se sont ajoutés progressivement au fil des décennies. Mais c'est seulement assez récemment que les astronomes ont pu constater la grande singularité de ce système où l'on rencontre, aussi et surtout, (comme les sondes spatiales ont permis de le constater dès les années 1980) plusieurs corps qui suivent des orbites identiques (satellites co-orbitaux) et qui entretiennent des relations étroites avec les anneaux.

C'est aussi une planète...

Ses anneaux et son système satellitaire sont tellement remarquables qu'on en oublierait presque que Saturne est aussi une planète géante, très comparable à Jupiter, et que son globe proprement dit a également été très tôt l'objet d'études. Ainsi en 1789, Herschel découvre-t-il que la planète est aplatie à ses pôles.

2



Saturne, vu par Raphaël

L'observation, par le même astronome d'une tache brillante apparue en 1790 sur la surface de Saturne, lui permet en outre d'accéder à sa période de rotation, qu'il évalue à 10 heures 16 minutes. En décembre 1876, une nouvelle tache sera visible pendant plus d'un mois, près de l'équateur et sera observée par Asaph Hall, à Washington, qui pourra en déduire pour la rotation de la planète une période de 10 heures 14 minutes 24 secondes. En 1903, une autre apparition de taches, observée notamment par Edward Barnard, conduit à la valeur de 10 heures 38 minutes. Les discordances entre les diverses valeurs trouvées sont comprises par les astronomes comme l'indication d'une rotation différentielle de la planète. A l'image de Jupiter, la période est plus courte à l'équateur qu'aux pôles : Saturne est un globe fluide.

En 1933, puis en 1960, de nouvelles taches brillantes apparaissent dans l'atmosphère saturnienne. Le rapprochement avec les apparitions antérieures de ces taches permet de déduire qu'il s'agit d'un phénomène cyclique, dont la période d'une trentaine d'années (confirmée par une nouvelle apparition en 1990) correspond à la période de révolution de Saturne autour du Soleil. Il est dès lors tentant d'essayer de comprendre l'apparition de ces taches dans le cadre de l'alternance des saisons de la planète.

Observations pré-télescopiques

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

Observations télescopiques terrestres

En 1610, Galilée, en braquant son télescope vers Saturne, en observe les anneaux mais ne comprend pas ce qu'ils sont, décrivant que la planète aurait des « oreilles ». En 1612, la Terre passant dans le plan des anneaux, ceux-ci disparaissent. En 1613, ils réapparaissent sans que Galilée puisse émettre une hypothèse quant à ce qu'il observe. En 1655, Christian Huygens, découvre un astre près de Saturne qui sera nommé plus tard Titan. En 1656, Christian Huygens, en utilisant un télescope bien plus puissant, comprend que la planète est en réalité entourée d'un anneau, qu'il pense être solide. En 1675, Jean-Dominique Cassini détermine que l'anneau est composé de plusieurs petits anneaux, séparés par des divisions; la plus large d'entre elles sera plus tard appelée la division de Cassini. En 1859, James Clerk Maxwell démontre que les anneaux ne peuvent pas être solides. Il émet l'hypothèse qu'ils sont constitués d'un grand nombre de petites particules, toutes orbitant autour de Saturne indépendamment. La théorie de Maxwell fut vérifiée en 1895 par des études spectroscopiques menées par James Keeler à l'observatoire Lick.

L'exploration spatiale

Quatre sondes seulement ont atteint Saturne à ce jour. Il s'agit de Pioneer 11, qui a survolé la planète en 1979, puis des deux sondes d'exploration des planètes géantes Voyager (Voyager 1 et Voyager 2), passées à proximité de l'objet en 1981 et 1982. Ces trois sondes ont été lancées par la Nasa. Enfin, quatrième en date de ces missions d'exploration, celle de la sonde Cassini-Huygens. Celle-ci, inscrite dans le cadre d'une collaboration entre la Nasa et l'Esa, a abondamment étudié Saturne, ses anneaux et ses satellites, dont le programme rappelle celui de Galileo autour de Jupiter. Le module principal a été satellisé autour de la planète, tandis qu'un second module a pénétré dans l'atmosphère de Titan. Cette lune possède des caractéristiques qui pourraient laisser à penser que s'y déroulent des processus analogues à ceux qui, sur la Terre, ont précédé l'apparition de la vie.

3

Demi-grand ave	SATURNE : Caractéristiques orbitales					
Aphélie						
Périhélie						
Circonférence orbitale 8 922 986 267 km (59,65 UA) Excentricité 0.05415060 Période de révolution 10 757,7365 j (29 a 165 j 11,68 h) Période synodique 378,0944 j Vitesse orbitale moyenne 9,6446 km/s Vitesse orbitale maximale 10,183 km/s Vitesse orbitale minimale 9,137 km/s Inclinaison sur l'écliptique 2,48446° Nœud ascendant 113,7153281104° Argument du périhélie 338,71690° Satellites connus -2 10 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0.09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35.5 km/s Période de rotation (a) l'équateur 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre)	-					
Excentricité						
Période de révolution						
Période synodique 378,0944.j Vitesse orbitale moyenne 9,6446 km/s Vitesse orbitale maximale 10,183 km/s Vitesse orbitale minimale 9,137 km/s Inclinaison sur l'écliptique 2,48446° Nœud ascendant 113,7153281104° Argument du périhélie 338,71690° Satellites connus ~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques						
Vitesse orbitale moyenne 9.6446 km/s Vitesse orbitale maximale 10,183 km/s Vitesse orbitale minimale 9,137 km/s Inclinaison sur l'écliptique 2,48446° Nœud ascendant 113,7153281104° Argument du périhélie 338,71690° Satellites connus ~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo g						
Vitesse orbitale maximale 10,183 km/s Vitesse orbitale minimale 9,137 km/s Inclinaison sur l'écliptique 2,48446° Nœud ascendant 113,7153281104° Argument du périhélie 338,71690° Satellites connus ~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹²² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bo	• •					
Vitesse orbitale minimale 9,137 km/s Inclinaison sur l'écliptique 2,48446° Nœud ascendant 113,7153281104° Argument du périhélie 338,71690° Satellites connus ~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon moyen volumétrique 54 359 km (8,5521 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73°	·					
Inclinaison sur l'écliptique 2,48446° Nœud ascendant 113,7153281104° Argument du périhélie 338,71690° Satellites connus ~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon polaire 54 359 km (8,5521 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir						
Nœud ascendant						
Argument du périhélie Satellites connus - 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus 13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés. Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon moyen volumétrique 54 359 km (8,5521 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir						
Satellites connus ~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi lesquels 53 ont été nommés) et environ 150 lunes mineures. Anneaux connus						
Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon polaire 54 359 km (8,5521 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)		~ 210 satellites observés, dont 62 ont leur orbite confirmée (parmi				
Caractéristiques physiques Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres) Rayon polaire 54 359 km (8,5521 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)	Anneaux connus	13 = 7 principaux (+ 6 petits ou diffus), finement divisés.				
Rayon équatorial 60 268 km (9,4492 Terres)						
Rayon polaire 54 359 km (8,5521 Terres) Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres) Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9°C)						
Rayon moyen volumétrique 58 232 km (9,014 Terres)						
Aplatissement 0,09796 Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10 ⁹ km ² (83,703 Terres) Volume 827,13×10 ¹² km ³ (763 Terres) Masse 568,46×10 ²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m ³ Gravité de surface 10,44 m/s ² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m ² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir						
Périmètre équatorial 378 675 km Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres) Volume 827,13×10¹² km³ (763 Terres) Masse 568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres) Masse volumique globale 687,3 kg/m³ Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g) Vitesse de libération 35,5 km/s Période de rotation (jour sidéral) 0,444 j (10 h 47 min 6 s) Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)						
Superficie 43,466×10° km² (83,703 Terres)						
Volume827,13×10¹² km³ (763 Terres)Masse568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres)Masse volumique globale687,3 kg/m³Gravité de surface10,44 m/s² (1,064 g)Vitesse de libération35,5 km/sPériode de rotation (jour sidéral)0,444 j (10 h 47 min 6 s)Vitesse de rotation (à l'équateur)34 821 km/hInclinaison de l'axe26,73°Albédo géométrique visuel0,47Albédo de Bond0,342Irradiance solaire14,90 W/m² (0,011 Terre)Température d'équilibre du corps noir81,1 K (-191,9 °C)		43,466×10 ⁹ km ² (83,703 Terres)				
Masse568,46×10²⁴ kg (95,152 Terres)Masse volumique globale687,3 kg/m³Gravité de surface10,44 m/s² (1,064 g)Vitesse de libération35,5 km/sPériode de rotation (jour sidéral)0,444 j (10 h 47 min 6 s)Vitesse de rotation (à l'équateur)34 821 km/hInclinaison de l'axe26,73°Albédo géométrique visuel0,47Albédo de Bond0,342Irradiance solaire14,90 W/m² (0,011 Terre)Température d'équilibre du corps noir81,1 K (-191,9 °C)						
Masse volumique globale687,3 kg/m³Gravité de surface10,44 m/s² (1,064 g)Vitesse de libération35,5 km/sPériode de rotation (jour sidéral)0,444 j (10 h 47 min 6 s)Vitesse de rotation (à l'équateur)34 821 km/hInclinaison de l'axe26,73°Albédo géométrique visuel0,47Albédo de Bond0,342Irradiance solaire14,90 W/m² (0,011 Terre)Température d'équilibre du corps noir81,1 K (-191,9 °C)	Masse					
Gravité de surface 10,44 m/s² (1,064 g)	Masse volumique globale					
Vitesse de libération35,5 km/sPériode de rotation (jour sidéral)0,444 j (10 h 47 min 6 s)Vitesse de rotation (à l'équateur)34 821 km/hInclinaison de l'axe26,73°Albédo géométrique visuel0,47Albédo de Bond0,342Irradiance solaire14,90 W/m² (0,011 Terre)Température d'équilibre du corps noir81,1 K (-191,9 °C)						
Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)	Vitesse de libération					
Vitesse de rotation (à l'équateur) 34 821 km/h Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)						
Inclinaison de l'axe 26,73° Albédo géométrique visuel 0,47 Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)						
Albédo géométrique visuel O,47 Albédo de Bond O,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)						
Albédo de Bond 0,342 Irradiance solaire 14,90 W/m² (0,011 Terre) Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)						
Irradiance solaire14,90 W/m² (0,011 Terre)Température d'équilibre du corps noir81,1 K (-191,9 °C)						
Température d'équilibre du corps noir 81,1 K (-191,9 °C)						
	Température d'équilibre du corps noir					
Température à 10 kPa : 84 K (-189 °C)	Température à 10 kPa :	84 K (-189 °C)				
Température à 100 kPa : 134 K (-139 °C)	Température à 100 kPa :	134 K (-139 °C)				
Caractéristiques de l'atmosphère						
Masse volumique à 100 kPa 0,19 kg/m³						

Hauteur d'échelle	59,5 km
Masse molaire moyenne	2,07 g/mol
Hydrogène H ₂	> 93 %
Hélium He	> 5 %
Méthane CH ₄	0,2 %
Vapeur d'eau H ₂ O	0,1 %
Ammoniac NH ₃	0,01 %
Éthane C ₂ H ₆	0,0005 %
Hydrure de phosphore PH ₃	0,0001 %

Caractéristiques physiques

Masse et dimensions

Saturne a la forme d'un sphéroïde oblate : la planète est aplatie aux pôles et renflée à l'équateur. Ses diamètres équatoriaux et polaires diffèrent de près de 10 % (120 536 km pour le premier, 110 449 km pour le second), conséquence de sa rapide rotation sur elle-même et d'une composition interne extrêmement fluide. Les autres géantes gazeuses du Système solaire (Jupiter, Uranus et Neptune) sont également aplaties, mais de façon moins marquée.

Saturne est la deuxième planète la plus massive du Système solaire, 3,3 fois moins que Jupiter, mais 5,5 fois plus que Neptune et 6,5 fois plus qu'Uranus. En comparaison avec la Terre, Saturne est 95 fois plus massive. Son diamètre étant environ 9 fois plus grand que celui de la Terre, on pourrait caser 760 Terres dans le volume occupé par la géante gazeuse.

Saturne est la seule planète du Système solaire dont la masse volumique moyenne est inférieure à celle de l'eau : 0,69 g/cm³. Cela revient à dire que si on trouvait un océan assez grand pour contenir Saturne, celle-ci flotterait. Ce chiffre masque d'énormes disparités dans la répartition de la masse à l'intérieur de la planète : si son atmosphère, essentiellement composée d'hydrogène (le gaz le plus léger), est moins dense que l'eau, son noyau l'est considérablement plus.

Composition

La haute atmosphère de Saturne est constituée à 93,2 % d'hydrogène et à 6,7 % d'hélium en termes de molécules de gaz (96,5 % d'hydrogène et 3,5 % d'hélium en termes d'atomes). Des traces de méthane CH₄, d'éthane C₂H₆, d'ammoniac NH₃, d'acétylène C₂H₂ et de phosphine PH₃ ont également été détectées. Les nuages les plus en altitude sont composés de cristaux d'ammoniac, tandis que les nuages plus bas semblent être constitués soit d'hydrosulfure d'ammonium NH4SH soit d'eau H2O. Par rapport à l'abondance des éléments du Soleil, l'atmosphère de Saturne est sensiblement plus pauvre en hélium. La quantité d'éléments plus lourds que l'hélium n'est pas connue avec précision, mais on suppose que leurs proportions correspondent aux abondances initiales lors de la formation du Système solaire. La masse totale de ces éléments est estimée à 19 à 31 fois celle de la Terre, une fraction significative étant située dans la région du noyau de Saturne.\$-

Structure interne

La structure interne de Saturne serait similaire à celle de Jupiter, avec un noyau rocheux de silicates et de fer, entouré d'une couche d'hydrogène métallique, puis d'hydrogène liquide, puis enfin d'hydrogène gazeux. Des traces de glaces diverses seraient également présentes. Les transitions entre ces différentes couches seraient progressives et la planète ne comporterait pas de surface à proprement parler. La région du noyau posséderait entre 9 et 22 fois la masse de la Terre. Saturne a une température interne très élevée, atteignant probablement 12 000 K dans le noyau, et dégage, à l'instar de Jupiter, plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. La majeure partie de cette énergie provient d'un effet de compression gravitationnelle (mécanisme de Kelvin-Helmholtz), mais cet effet ne suffit pas à lui seul à expliquer la production thermique. Une explication proposée serait une « pluie » de gouttelettes d'hélium dans les profondeurs de Saturne, dégageant de la chaleur par friction en tombant dans une mer d'hydrogène plus léger.

Atmosphère

De manière similaire à Jupiter, l'atmosphère de Saturne est organisée en bandes parallèles, même si ces bandes sont moins visibles et plus larges près de l'équateur. En fait, le système nuageux de Saturne ne fut observé pour la première fois que lors des missions Voyager. Depuis, les télescopes terrestres ont fait suffisamment de progrès pour pouvoir suivre l'atmosphère saturnienne et les caractéristiques courantes chez Jupiter (comme les orages ovales à longue durée de vie) ont été retrouvées chez Saturne. En 1990, le télescope spatial Hubble a observé un énorme nuage blanc près de l'équateur de Saturne qui n'était pas présent lors du passage des sondes Voyager. En 1994, un autre orage de taille plus modeste a été observé.

Le nuage de 1990 est un exemple de grande tache blanche, un phénomène saturnien éphémère qui se reproduit environ tous les 30 ans (c'est-à-dire environ chaque année saturnienne). Des grandes taches blanches ont été observées en 1876, 1903, 1933 et 1960. Si la périodicité se maintient, une autre tempête devrait se produire vers 2020. Dans les images transmises par la sonde Cassini, l'atmosphère de l'hémisphère nord apparaît bleue, de façon similaire à celle d'Uranus. Cette couleur est probablement causée par diffusion Rayleigh.



Un énorme orage photographié par la sonde Cassini en été 2011

L'imagerie infrarouge a montré que Saturne possède un vortex polaire chaud, le seul phénomène de ce type connu dans le Système solaire. Un système ondulatoire hexagonal existe autour du pôle nord, vers 78° de latitude. Il a été remarqué pour la première fois lors du passage des sondes *Voyager*. Les bords de l'hexagone mesurent environ 13 800 km. La structure tourne sur elle-même avec une période de 10 h 39 min 24 s. Le système ne se décale pas en longitude comme les autres structures nuageuses de l'atmosphère visible. Son origine n'est pas connue. La plupart des astronomes semblent penser qu'il s'agit d'un ensemble d'ondes stationnaires. Parmi les autres théories, il pourrait s'agir d'un type inconnu d'aurore polaire. Des formes polygonales ont été reproduites en laboratoire à l'intérieur de seaux de fluides en rotation.

Les images prises par le télescope spatial Hubble indiquent la présence au pôle sud d'un courant-jet, mais pas d'un vortex polaire ou d'un système hexagonal analogue. Cependant, la NASA a signalé en novembre 2006 que *Cassini* a observé une tempête analogue à un ouragan, stationnant au pôle sud, et qui possède un œil clairement défini. Il s'agit du seul œil jamais observé sur une autre planète que la Terre. De 2004 à 2009, la sonde Cassini a également pu observer la formation, le développement et la fin de 9 violents orages. Les orages de Saturne sont particulièrement longs. Un orage s'étala de novembre 2007 à juillet 2008. De même, un très violent orage débuta en janvier 2009 et dura plus de 8 mois. Ce sont les plus longs orages observés jusque-là dans le Système solaire. Ils peuvent s'étendre sur plus de 3 000 km de diamètre autour de la région appelée 'Allée des tempêtes' située à 35° au Sud de l'équateur. Les décharges électriques provoquées par les orages de Saturne émettent des ondes radio dix mille fois plus fortes que celles des orages terrestres.

Magnétosphère

Le champ magnétique de Saturne est plus faible que celui de Jupiter (mais néanmoins plus intense que celui de la Terre) et sa magnétosphère est plus petite.

Rotation

L'atmosphère de Saturne subissant une rotation différentielle, plusieurs systèmes ont été définis, avec des périodes de rotation propres (un cas similaire à celui de Jupiter) :

- Le premier système a une période de 10 h 14 min 00 s et concerne la zone équatoriale, qui s'étend entre le bord nord de la ceinture équatoriale méridionale et le bord sud de la ceinture équatoriale boréale.
- Le deuxième système concerne toutes les autres latitudes et possède une période de 10 h 39 min 24 s.
- Le troisième système, basé sur la rotation des émissions radio de Saturne, possède une période de 10 h 39 min 22,3 s.

Ce dernier système, mesuré lors du passage des sondes *Voyager*, était celui généralement utilisé pour parler de la rotation de la planète. Cependant, lors de son approche de Saturne en 2004, la sonde *Cassini* mesura que la période de rotation radio s'était légèrement accrue, atteignant 10 h 45 min 45 s ($\pm 36 \text{ s}$). La cause exacte du changement n'est pas connue.

En mars 2007, il a été annoncé que la rotation des émissions radio ne rend pas compte de la rotation de la planète, mais est causée par des mouvements de convection du disque de plasma entourant Saturne, lesquels sont indépendants de la rotation. Les variations de période pourraient être causées par les geysers de la lune Encelade. La vapeur d'eau émise en orbite saturnienne se chargerait électriquement et pèserait sur le champ magnétique de la planète, ralentissant sa rotation par rapport à celle de Saturne. Si ce point est vérifié, on ne connaît aucune méthode fiable pour déterminer la période de rotation réelle du noyau de Saturne.

Température

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

7

Trois des grands astronomes découvreurs de Saturne :







Christian Huygens 1629-1695

Hollandais, il découvre Titan en 1655, comprend la nature des anneaux de Saturne et formule la nature ondulatoire de la lumière. Il observe la nébuleuse d'Orion

Jean-Dominique Cassini 1625-1712

Italien, puis français, il découvre la grande tache rouge de Jupiter en 1665. Entre 1671 et 1684 il découvre également quatre satellites de Saturne:

Japet, Rhéa, Téthys et Dioné, ainsi que la division des anneaux de Saturne qui porte son nom..

William Herschel 1738-1822

Astronome allemand puis anglais, mais également compositeur, il découvre Uranus en 1781, découvre 2 de ses satellites (Titania et Obéron) en 1787 et découvre 2 satellites de Saturne en 1789 :

Encelade et Mimas.

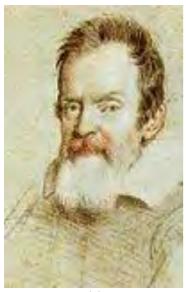
II - Les anneaux de Saturne

Les anneaux de Saturne sont les anneaux planétaires les plus importants du Système solaire, situés autour de la géante gazeuse Saturne. Bien qu'ils semblent continus vus depuis la Terre, ils sont en fait constitués d'innombrables particules de glace (95 à 99 % de glace d'eau pure selon les analyses spectroscopiques) et de poussière dont la taille varie de quelques micromètres à quelques centaines de mètres; ils ont chacun une orbite différente. Les anneaux forment un disque dont le diamètre est de 140 000 km (les anneaux principaux s'étendent de 7 000 à 72 000 km) comportant plusieurs divisions de largeurs variées et dont l'épaisseur va de 2 à 10 mètres. Invisibles de la Terre à l'œil nu, les anneaux de Saturne ont cependant une brillance suffisante pour être observés avec de bonnes jumelles. Ils ont été aperçus en 1610 par le savant italien Galilée grâce à une lunette astronomique de sa conception. Celui-ci interpréta ce qu'il voyait comme de mystérieux appendices. Bénéficiant d'une meilleure lunette que Galilée, le Hollandais Christiaan Huygens va découvrir qu'il s'agit en fait d'un anneau entourant Saturne. L'incoyable complexité du système des anneaux de Saturne, leur interaction avec les lunes de la planète et le magnétisme de celle-ci rendent l'étude des anneaux assez compliquée mais passionnante. De plus, ce système n'est pas figé, il évolue constamment au fil des nouvelles découvertes et des observations de la sonde Cassini. L'étude actuelle de cette planète, des anneaux et des satellites n'est pas définitive et n'est donc qu'un instantané, pris fin 2017.

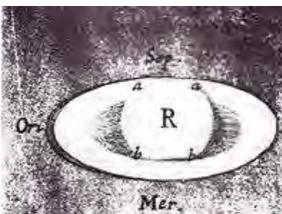
Observation

Du XVIIe au XIXe siècle

Le savant italien Galilée est le premier à observer les anneaux de Saturne en 1610 à l'aide d'une lunette de sa fabrication, mais il n'arriva pas à identifier leur forme. Il vit en ces « taches » « deux serviteurs aidant le vieux et lent Saturne à faire son chemin ». Il a également décrit Saturne comme ayant des « oreilles » ou des « anses ». En 1612, le plan des anneaux était orienté directement vers la Terre et les anneaux semblent disparaître. Mystifié, Galilée se demandait : « comment Saturne a avalé ses enfants ? », en faisant référence au dieu de la mythologie romaine Saturne, qui dévorait ses propres enfants pour les empêcher de le renverser. Lorsque les anneaux sont de nouveau visibles en 1613, Galilée est en pleine confusion.







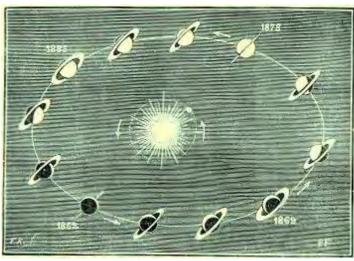
Dessin de Robert Hooke (1666)

Galilée

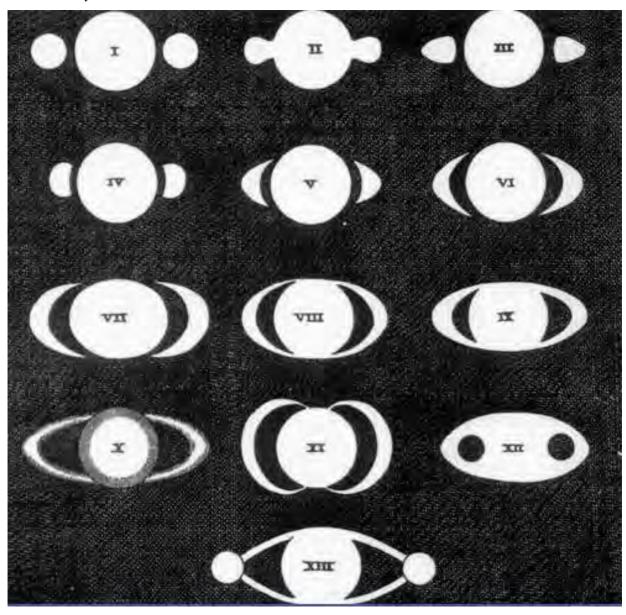
Le dessin de Galilée en 1616 est rudimentaire. Dans un dessin de 1666 (ci-dessus à droite), Robert Hooke a noté les ombres (a et b) projetées par la planète et les anneaux l'un sur l'autre. En 1655, Christiaan Huygens est le premier à suggérer que Saturne est entouré d'un anneau. Avec un télescope de qualité supérieure à la lunette de Galilée, Huygens observe la planète et écrit qu'« il [Saturne] est entouré par un anneau mince et plat qui ne touche nulle part la planète et qui est incliné sur l'écliptique ». Robert Hooke a également observé les anneaux et a noté les ombres projetées sur ces derniers.



Première publication de Huygens sur la description du système saturnien et ses anneaux, « Systema Saturnium », 1659



Différentes apparences de Saturne au XIX° siècle



Premières représentations de Saturne :

I. Galilée, 1610. II. Scheiner, 1614. - III. Riccioli, 1640. - IV à VII. Hévélius, 1640 à 1650. - VIII et IX Riccioli, 1648, 1650. - X. Eustache de Divinis, 1647. - XI. Fontana, 1648. - XII. Gassendi, 1645. - XIII. Riccioli, 1630.

En 1675, Giovanni Domenico Cassini découvre que l'anneau de Saturne est composé en fait d'un grand nombre d'anneaux concentriques séparés entre eux et émet l'hypothèse qu'ils sont constitués de cailloux s'entrechoquant. La plus grande des séparations, large de 4 800 km et située entre les anneaux A et B, sera baptisée par la suite « division de Cassini ».

En 1787, Pierre-Simon de Laplace suggère que les anneaux sont composés d'un grand nombre d'anneaux minces et solides. En 1859, James Clerk Maxwell reçoit le prix Adams en démontrant que les anneaux ne peuvent pas être solides car, dans ce cas, ils deviendraient instables et se briseraient. Il suggère que les anneaux sont composés de nombreuses petites particules, orbitant toutes de manière indépendante autour de Saturne. La théorie de Maxwell fut vérifiée en 1895 grâce à des analyses spectroscopiques effectuées par James Edward Keeler depuis l'observatoire Lick.

XXe et XXIe siècles

En 1980, le passage de la sonde Voyager 1 près de Saturne montre des détails jusqu'alors invisibles de la Terre, tels les spokes. En 2004, la sonde Cassini-Huygens se place en orbite autour de Saturne. Elle apporte des précisions sur les spokes et traverse les anneaux à plusieurs reprises. En octobre 2009, grâce au télescope spatial Spitzer, des astronomes découvrent un nouvel anneau situé à l'intérieur de l'orbite de la lune Phœbé, ne pouvant être mis en évidence qu'en infrarouge en raison de sa faible densité. Cet anneau est particulièrement étendu avec une largeur égale à 20 fois le diamètre de Saturne : son bord intérieur se situe à environ 6 millions de kilomètres de la surface de la planète tandis que son bord extérieur est situé à environ 12 millions de kilomètres. Ce dernier et l'anneau qui l'entoure sont probablement à l'origine de l'aspect particulier du satellite de Saturne Japet, qui présente une face noire et l'autre très blanche.

Caractéristiques physiques

Les anneaux principaux s'étendent de 7 000 à 72 000 km à la hauteur de l'équateur de Saturne, avec une épaisseur movenne estimée de 10 mètres. Les anneaux sont composés à 99,9 % de particules d'eau gelée avec quelques impuretés pouvant inclure du tholin et des silicates. Les anneaux principaux sont, à la base, composés de particules dont la taille varie de 1 centimètre à 10 mètres. Chaque particule décrit une orbite indépendante autour de Saturne.

Anneaux distincts de Saturne							
Nom	Rayon interne (km)	Rayon interne (R _S)	Rayon externe (km)	Rayon externe (R _S)	Largeur (km)	Épaisseur (m)	
Anneau D	66 900	1,110	73 458	1,236	7 610		
Division de Guérin	73 458	1,211	74 658	1,239	1 200		
Anneau C	74 658	1,239	92 000	1,527	17 342	5	
• Lacune de Colombo	77 800		77 900	_	100		
Lacune de Maxwell	87 500	_	87 770	_	270		
Lacune de Bond	88 690		88 720		30		
Lacune de Dawes	90 200		90 220	_	20	_	
Division de Lyot		_		_	4 200	_	
Anneau B	92 000	1,527	117 580	1,951	25 580	5 - 10	
Division de Cassini	117 500	1,95	122 200	2,03	4 700		
Lacune de Huygens	117 680	_		_	285 - 440	_	
Lacune de Herschel	118 183	_	118 285	_	102	_	
Lacune de Russell	118 597	_	118 630	_	33	_	
Lacune de Jeffreys	118 931	_	118 969	_	38	_	
• Lacune de Kuiper	119 403	_	119 406	_	3	_	
• Lacune de Laplace	119 848	_	120 086		238	_	
• Lacune de Bessel	120 236		120 246		10	_	
Lacune de Barnard	120 305		120 318	_	13	_	

Α	122 170	2.027	126 775	2.260	14.005	20 40
Anneau A	122 170	2,027	136 775	2,269	14 605	20 - 40
Lacune d'Encke	133 589	2,216			325	
Lacune de Keeler	136 530	2,265	_	_	~ 35	_
Division de Roche (ex-division de Pioneer)	136 770	_	139 380		~ 2 600	
• R/2004 S 1	137 630	2,284	_		300 ?	
• R/2004 S 2	138 900	2,305	_	_	300 ?	_
Anneau F	140 180	2,326	140 300	_	30 - 200	
R/2006 S 1 (dit de Janus et Épiméthée)	~ 151 500			_		
Anneau G	170 000	2,82	175 000	2,90	5 000	105
Anneau E	181 000	3	483 000	8	302 000	10^{7}
• R/2006 S 5 (dit de Méthone)	~ 194 230		_	_		
• R/2007 S 1 (dit d'Anthée)	~ 197 655	_	_	_	_	_
Anneau de Phœbé	~ 6 000 000	103	~16 200 000	207	10 200 000	$2,4\times10^{9}$

Anneaux distincts

La nomenclature des anneaux de Saturne est fixée par l'Union astronomique internationale et publiée par celle-ci sur Gazetteer of Planetary Nomenclature. L'Union recense sept « anneaux principaux » (en anglais : main ring, au singulier) dits simplement « anneaux » (ring, au singulier) et désignés par une lettre latine majuscule (de la lettre A à la lettre G), selon un ordre alphabétique correspondant à l'ordre chronologique de leurs découvertes. D'autre part, elle recense des « divisions » (division, au singulier), correspondant à de larges régions séparant deux anneaux principaux, telle la division de Cassini qui sépare les anneaux B et A. Enfin, elle recense des « lacunes » (gap, au singulier) qui sont de petites divisions, généralement au sein d'un anneau principal. Ci-dessus une liste des anneaux de Saturne, des divisions qui les séparent ainsi que des « lacunes » qu'ils comprennent, classés par rayon interne croissant.

Origines

Les anneaux de Saturne sont peut-être très anciens et certains remonteraient à la formation de Saturne elle-même. Il existe deux théories dominantes concernant leur origine. Selon une de ces deux théories, proposée initialement par Édouard Roche au XIXe siècle, les anneaux étaient autrefois une lune géante de Saturne dont l'orbite diminua jusqu'à ce que les forces de marée générées par la planète géante Saturne la pulvérise (la limite de Roche est de 140 000 km pour Saturne, ce qui correspond au bord externe des anneaux. L'ancienne lune géante subit le phénomène de migration planétaire, les forces de marée disloquent ce satellite différencié, le manteau du satellite allant former les anneaux tandis que son noyau tombe sur Saturne. Une variante de cette théorie, déjà esquissée en 1654 par Christiaan Huygens, est que la Lune s'est désintégrée après avoir été heurtée par une grosse comète, un astéroïde (théorie analogue à celle de l'hypothèse de l'impact géant). Cette hypothèse est rendue difficile par le fait que l'orbite synchrone de Saturne est de 10 h. Selon la deuxième théorie, les anneaux ne sont pas les débris d'une lune mais les restes du disque d'accrétion de la nébuleuse à partir de laquelle Saturne s'est formée. La conservation du moment cinétique et la perte d'énergie due aux chocs entre les débris a pour conséquence que cette perte est plus forte dans le plan vertical que le plan horizontal, d'où l'aplatissement des anneaux par la rotation képlérienne, aplatissement qui finirait par atteindre la limite de Roche, donnant naissance à des satellites. Certains astrophysiciens comme Sébastien Charnoz ou Julien Salmon pensent même que les anneaux actuels ne sont pas les seuls que la géante gazeuse ait connus au cours de son histoire, les anneaux massifs originels disparaissant au profit des satellites qui redonnent naissance aux anneaux par migration planétaire.

L'éclat et la pureté de la glace d'eau composant les anneaux de Saturne ont été cités pour appuyer une théorie selon laquelle ils seraient beaucoup plus jeunes que Saturne, peut-être de 100 millions d'années, car dans le cas contraire l'accumulation de poussières météoriques aurait conduit à un assombrissement des anneaux. Toutefois, de nouvelles recherches indiquent que l'anneau B pourrait être assez massif pour diluer le matériau météorique et éviter ainsi un assombrissement notable sur une durée s'étendant

presque jusqu'à la naissance du Système solaire. Le matériau constituant l'anneau est recyclé : des agrégats se forment puis sont dispersés par les collisions. Ce cycle expliquerait l'apparente jeunesse de certains des agrégats observés au sein des anneaux.

L'équipe de Cassini UVIS, dirigée par Larry Esposito, a utilisé l'occultation stellaire pour découvrir 13 objets, allant de 27 mètres à 10 km de diamètre, à l'intérieur de l'anneau F. Ils sont translucides, laissant penser que ce sont des agrégats temporaires de blocs de glace de quelques mètres de diamètre. Esposito est convaincu que c'est la structure de base des anneaux de Saturne : les particules s'agrègent entre elles avant se disperser. En orbite à l'extérieur des anneaux, quoique certaines soient comprises dans la masse, se trouvent plusieurs petites lunes associées aux anneaux, ce qui est une configuration typique des anneaux de toutes les planètes géantes gazeuses du Système solaire. Toutefois, les trois autres systèmes d'anneaux ne représentent, ensemble, qu'une petite fraction du volume des anneaux de Saturne. Les particules des anneaux de Saturne présentent également la particularité d'être bien plus lumineuses que celles des trois autres systèmes.

Depuis la Terre, trois anneaux sont visibles : deux anneaux principaux (A et B) et un anneau moins visible. L'espace entre A et B est connu sous le nom de « division de Cassini ». L'anneau A est divisé par une lacune moins visible, appelée lacune d'Encke (même s'il est probable que l'astronome Encke ne l'ait jamais observé). Les sondes Voyager ont détecté quatre autres anneaux nettement moins visibles. Les astronomes identifient dans les anneaux de Saturne 13 formations distinctes : les anneaux D, C, B, A, la lacune d'Encke, la lacune de Keeler, R/2004 S 1, R/2004 S 2, les anneaux F, G, E, la division de Cassini et la division de Guérin.

Les anneaux de Saturne s'étendent sur plus de 400 000 km, mais sont cependant très fins. À l'exception de l'anneau le plus externe, ils ne dépassent pas 1 km d'épaisseur. Si le matériau contenu dans les anneaux était rassemblé pour former une lune, celle-ci n'aurait pas plus de 100 km de diamètre.

L'anneau F, l'un des plus externes, est une structure extrêmement complexe formée de plusieurs anneaux plus petits « noués » entre eux. L'origine de ces nœuds est inconnue mais est probablement gravitationnelle. L'anneau E, le plus externe, s'étend sur 240 000 km et s'épaissit progressivement jusqu'à l'orbite d'Encelade atteignant une épaisseur de 60 000 km. Les anneaux de Saturne entretiennent des relations complexes avec certains des satellites de Saturne. Il est établi que certains de ceux-ci, baptisés satellites bergers (Atlas, Prométhée et Pandore), sont indispensables pour la stabilité des anneaux, que Janus, Prométhée, Épiméthée, Pandore et Atlas se sont formés il y a 100 millions d'années à partir de l'étalement des anneaux dû à la rotation képlérienne qui les fait dépasser la limite de Roche. Mimas semble responsable de la division de Cassini, Pan est situé à l'intérieur de la lacune d'Encke. Le système global des anneaux est complexe et encore mal connu en 2009.



Des anneaux de Saturne projettent leur ombre sur la planète (bandes noires). On voit bien, sur cette photo, la très faible épaisseur des anneaux - quelques mètres seulement - pour une planète dont le diamètre est de plus de 120 000 kilomètres.

Dynamique

Les lacunes entre les anneaux résultent des interactions gravitationnelles entre les nombreuses lunes de Saturne et les anneaux eux-mêmes. Les phénomènes de résonance jouent également un rôle : ceux-ci se produisent lorsque la différence des périodes orbitales entre le satellite et les anneaux est un nombre entier. Ainsi, la division de Cassini résulte de l'influence de la lune Mimas. Certaines des plus petites lunes circulent dans les lacunes ou au bord des anneaux et stabilisent ainsi leurs structures : on leur donne pour cette raison le nom de satellites bergers. Ainsi, Pandore et Prométhée confinent les particules de l'anneau F, Prométhée arrachant même périodiquement des filaments de matière à ce dernier.

La sonde spatiale Cassini a effectué des mesures et pris des photographies qui ont révélé que les bords des anneaux et la séparation entre les anneaux sont encore plus marqués qu'on ne l'avait estimé : on avait émis l'hypothèse qu'il subsistait dans les lacunes et les divisions des morceaux de glace, mais ce n'est pas le cas.

L'épaisseur extrêmement faible des anneaux est due aux collisions entre les particules. Chaque particule de glace tourne **individuellement** autour de Saturne. Ainsi, si un morceau de glace se situe au-dessus de la surface de l'anneau, il va à chaque orbite autour de Saturne traverser l'anneau : les collisions durant la traversée de l'anneau auront tendance, à la longue, à réduire la composante perpendiculaire de sa vitesse et de fait à réduire l'épaisseur de l'anneau.

Agitation des anneaux

Il règne dans les anneaux une agitation permanente : vagues, collisions, accumulations de matières.

La vie agitée des anneaux de Saturne a commencé à être étudiée depuis les missions américaines « Voyager ». Les astronomes ont pu alors constater qu'ils étaient faits d'une multitude de sillons « à la manière d'un tissu en velours côtelé ».

Depuis juillet 2004, la sonde Cassini, en orbite autour de Saturne, fournit des images de très grande qualité de la planète et de ses anneaux. Selon les théories actuelles, l'effervescence dans les anneaux serait due à la cinquantaine de satellites de Saturne qui s'y trouvent :

- certains sont situés à l'intérieur même des anneaux;
- d'autres sont situés à l'extérieur, mais créent à distance et sur des temps très longs, des vagues à la surface des anneaux, selon le même principe que la vibration d'un tambour;
- quelques satellites sont situés entre les anneaux, et même s'ils ont pour la plupart des corps relativement petits (d'une centaine de kilomètres de long) ils seraient à l'origine de nombreuses perturbations qui déplacent les particules composant les anneaux.

La sonde Cassini a permis d'améliorer de manière importante la connaissance du mécanisme des anneaux en particulier pour tout ce qui concerne leur évolution. L'anneau F a fait l'objet d'une étude approfondie; les effets de marée sont si forts qu'aucun satellite n'y survit et on n'y trouve que de fines particules. L'anneau F est entouré de deux satellites, Prométhée et Pandore, ses satellites bergers, qui sont à l'origine de sa finesse. Toutes les quinze heures, le satellite Prométhée se rapproche de l'anneau et y crée de véritables saignées en attirant à lui de la matière par sa masse. Il brise l'anneau et l'ensemble de ces morceaux forme une spirale géante qui s'étale dans tout l'anneau. Phénomène encore plus curieux : la sonde Cassini a permis de mettre en évidence l'existence de satellites éphémères, toujours à l'intérieur de l'anneau F, qui disparaissent aussi rapidement qu'ils se forment.

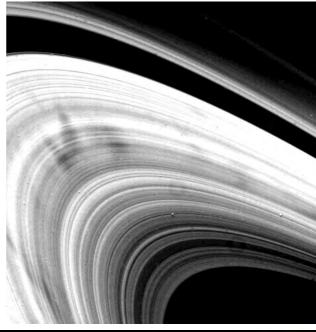
Spokes

Les spokes (rayons de vélo en anglais) sont des taches saisonnières apparaissant sur certains anneaux de Saturne (B surtout).

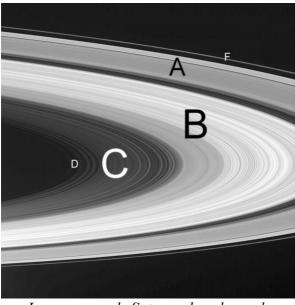
Jusqu'en 1980, on pensait que la structure des anneaux de Saturne était uniquement liée à l'action des forces gravitationnelles. Mais, les images envoyées par la sonde spatiale Voyager 1 confirmèrent la présence de bandes sombres dans les anneaux perpendiculaires à ceux-ci appelés spokes (rayons de bicyclette) qui ne peuvent pas être expliqués par ces seules forces, car leur persistance et leur déplacement dans les anneaux ne sont pas compatibles avec les lois de la mécanique céleste. Les rayons paraissent tantôt sombres, tantôt lumineux, selon l'incidence de la lumière (voir les images dans la galerie), la transition se produisant lorsque l'angle de phase est proche de 45°. Les spokes se déplacent

de manière quasi synchrone avec la magnétosphère de Saturne, aussi la principale théorie est qu'ils sont constitués de particules de poussière microscopiques en suspension au-dessus de la surface de l'anneau principal maintenus à distance par les forces de répulsion électrostatiques. Le mécanisme précis de génération des spokes est encore inconnu, bien qu'il ait été suggéré que les perturbations électriques puissent être engendrées par des éclairs dans l'atmosphère de Saturne ou les impacts de micrométéorites sur les anneaux.

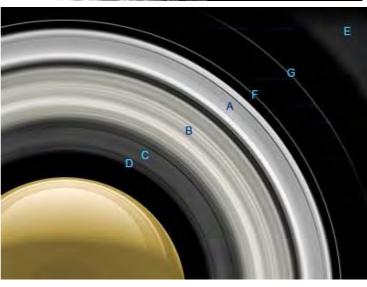
Les spokes ne seront plus observés de près jusqu'à l'arrivée de la sonde spatiale Cassini vingt-cinq ans plus tard dans la banlieue de Saturne. Les photos prises par la sonde à son arrivée début 2004 ne font plus apparaître de spokes. Certains scientifiques émirent alors l'hypothèse que le phénomène ne serait plus visible avant 2007 en s'appuyant sur la théorie utilisée pour expliquer leur formation. Mais, l'équipe de Cassini chargée de l'imagerie continua à rechercher leur présence dans les anneaux et les spokes furent détectés le 5 septembre 2005. Les spokes semblent être un phénomène saisonnier, qui disparait au milieu de l'hiver Saturnien ainsi qu'au milieu de l'été et réapparaît lorsque Saturne est proche de l'équinoxe. L'hypothèse selon laquelle les spokes constituent un phénomène saisonnier, lié à la durée d'une année orbitale de Saturne (29,7 ans) semble confirmée par leur réapparition progressive durant les dernières années de la mission Cassini.



Photomontage d'images prises par la sonde Cassini : des spokes sombres sur l'anneau B éclairé par le Soleil avec une incidence rasante



Les anneaux de Saturne dans lesquels orbitent certains de ses satellites (Photo Cassini)



Identification des principaux anneaux de Saturne (Photo Cassini)

Saturne est reconnaissable aux anneaux qui l'entourent. Ils sont constitués de roches et de glace. Les Anneaux de Saturne sont un des spectacles les plus remarquables du Système solaire et constituent la caractéristique principale de la planète Saturne. À la différence de ceux des autres géantes gazeuses, ils sont extrêmement brillants (albédo de 0,2 à 0,6) et peuvent être vus depuis la Terre à l'aide de bonnes jumelles.

Anneaux de Saturne, dans l'ordre, en partant de la planète vers l'extérieur :

L'anneau D débute à 66 900 km du centre de Saturne, soit moins de 7 000 km au-dessus de l'atmosphère de la planète, et s'étend jusqu'à 73 458 km. Il s'agit de l'anneau le plus interne du système des anneaux de Saturne; il est très peu visible. Lors du survol du système saturnien par la sonde Voyager 1, celle-ci photographia dans l'anneau D trois annelets (des structures plus lumineuses et plus denses à l'intérieur de l'anneau) qui furent désignés par D68, D72 et D73 (dans l'ordre croissant de leur distance à la planète). 25 ans après, les images prises par la mission Cassini ont indiqué que D72 s'est déplacé de 200 km vers Saturne et est devenu moins lumineux; D68 et D73 n'ont visiblement pas subi de modifications. Cassini a également mis en évidence la présence de structures concentriques en vagues distantes de 30 km l'une de l'autre entre D73 et l'anneau C.

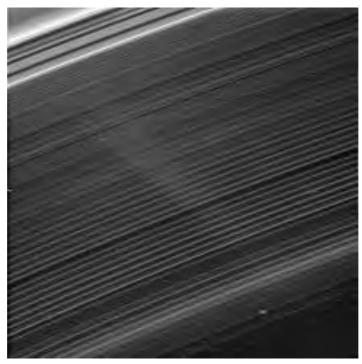


Image de l'anneau D — dont le contraste a été augmenté — prise par Cassini et montrant les annelets qu'il contient. L'anneau C, nettement plus brillant, est visible dans le coin haut-gauche.

Division de Guérin

La division de Guérin débute à 73 458 km du centre de Saturne et se termine à 74 658 km, largeur 1 200 km.

Anneau C

L'anneau C débute à 74 658 km du centre de Saturne et s'étend jusqu'à 92 000 km, compris entre l'anneau D, plus interne, et l'anneau B, plus externe et dont il est séparé par la division de Lyot. Son épaisseur est estimée à 5 m, sa masse à 1,1×10¹⁸ kg. L'anneau C contient plusieurs petites lacunes, comme la lacune de Columbo ou la lacune de Maxwell. Ces lacunes contiennent à leur tour des annelets internes et excentriques, comme l'annelet de Titan (77 871 km de rayon) ou l'annelet de Maxwell (87 491 km de rayon). Il existe également les annelets de 1,470 Rs (situé entre 88 716 et 88 732 km, soit 1,470 fois le rayon de Saturne) et de 1,495 Rs (entre 90 171 et 90 232 km), situés dans deux autres lacunes : lacune de Bond et lacune de Dawes. L'anneau C fut découvert en 1850 par William et George Phillips Bond et nommé « anneau crépon » (crepe ring) car il semblait composé de matériaux plus sombres que les anneaux A et B.

Lacune de Colombo – Rayon interne de 77 800 km - 100 km de large. Elle contient en outre l'annelet de Titan, un petit anneau étroit et brillant situé entre 77 871 et 77 896 km du centre de la planète, ainsi nommé car il correspond à une résonance avec l'orbite de Titan.

Lacune de Mawwell – Rayon interne de 87 500 km - 270 km de large. Elle contient en outre l'annelet de Maxwell, un petit anneau étroit, brillant et excentrique.

Lacune de Bond – Rayon interne de 88 690 km - 30 km de large

Lacune de Dawes – Rayon interne de 90 200 km - 20 km de large

Ces quatre « lacunes » ainsi que quatre annelets sont à l'intérieur de l'anneau C.

Division de Lyot

Elle s'étend sur 4 200 km environ, entre les anneaux B et C.

Anneau B

L'anneau B est un anneau planétaire situé autour de Saturne, le plus interne des deux anneaux les plus brillants de la planète (l'autre étant l'anneau A). L'anneau B débute à 92 000 km du centre de Saturne et s'étend jusqu'à 117 580 km, compris entre l'anneau C, plus interne et dont il est séparé par la division de Lyot, et la division de Cassini, plus externe, qui le sépare de l'anneau A. Son épaisseur est estimée entre 5 et 10 m, sa masse totale à 2,8×10¹⁹ kg, soit les trois-quarts de celle de Mimas.

À la différence de l'anneau A, l'anneau B est composé d'une multitude d'annelets, certains possédant des orbites excentriques. En outre, des taches (ou spokes, selon le terme anglais) le parcourent, composées de particules de poussières; leur origine n'est pas claire, mais semble liée aux saisons.

Division de Cassini

C'est un espace situé entre les anneaux A et B de la planète Saturne. Elle a été découverte en 1675 par l'astronome Jean-Dominique Cassini. Selon des mesures récentes sa limite interne se situe à 117 500 km du centre de Saturne et sa limite externe à 122 000 km. Elle est donc large de 4 500 km. D'autres chiffres sont aussi publiés: 117 580 et 122 170 km ou encore 117 500 et 122 200 km.

Des études récentes ont montré que la division de Cassini est une zone où la densité des particules est plus faible que dans les anneaux avoisinants mais n'est pas un endroit vide de matière. Il semble que l'attraction gravitationnelle de Mimas en soit la cause : la division de Cassini se trouvant en résonance avec l'orbite du satellite, les passages successifs de Mimas éjectent vraisemblablement les matériaux situés dans la division de Cassini (Goldreich et Tremaine 1978). Il n'y a cependant pas unanimité sur cette explication. Les anneaux de Saturne possèdent d'autres divisions ou lacunes similaires, comme la lacune d'Encke ou celle de Keeler, mais la division de Cassini est la plus grande et peut être observée sans difficulté avec un petit télescope. De nombreuses images montrant la division de Cassini, les anneaux de Saturne et Saturne elle-même sont disponibles sur le site de la mission Cassini-Huygens

Lacune de Huygens

La lacune de Huygens va de 117 680 km du centre de Saturne à 118 000 km, entre l'anneau B et la division de Cassini. Elle est causée par résonance avec l'orbite de la lune Mimas et est largement plus vide que la division de Cassini dont elle est voisine (elle-même moins dense que les anneaux). La lacune contient un petit anneau étroit, l'annelet de Huygens.

Lacune de Herschel – Rayon interne de 118 183 km - 102 km de large

Lacune de Russel—Rayon interne de 118 597 km - 33 km de large

Lacune de Jeffreys- Rayon interne de 118 931 km - 38 km de large

Lacune de Kuiper- Rayon interne de 119 403 km - 3 km de large

Lacune de Laplace—Rayon interne de 119 848 km - 238 km de large

Lacune de Bessel– Rayon interne de 120 236 km - 10 km de large

Lacune de Barnard-Rayon interne de 120 305 km - 13 km de large

Ces 8 lacunes se situent à l'intérieur de la division de Cassini.

Anneau A

L'anneau A débute à 122 170 km du centre de Saturne et s'étend jusqu'à 136 775 km, compris entre l'anneau B, plus interne et dont il est séparé par la division de Cassini, et l'anneau R/2004 S 1, plus externe. Son épaisseur est estimée entre 10 et 40 m, sa masse totale à 6,2×10¹⁸ kg, soit à peu-près celle d'Hypérion.

La limite externe de l'anneau A est déterminée par Atlas, qui joue le rôle d'un satellite berger extérieur. L'anneau A possède lui-même deux lacunes situées près de son bord extérieur. La lacune d'Encke, à 133 589 km du centre de Saturne, correspond à l'orbite de Pan. La lacune de Keeler, à 136 530 km, correspond à celle de Daphnis. Le minimum d'Encke (qui n'a rien à voir avec la lacune d'Encke, mais qui semble avoir été observé par l'astronome Johann Franz Encke) est une zone plus sombre de l'anneau A, située entre 126 430 et 129 940 km.

Lacune d'Encke

La lacune d'Encke est un espace situé à l'intérieur de l'anneau A de la planète Saturne. Elle est nommée en hommage à l'astronome Johann Franz Encke qui observa, entre autres, les anneaux de Saturne. Cependant, si Encke observa le minimum qui porte son nom, il n'a pas observé la lacune en question. La découverte de la lacune d'Encke est généralement attribuée à James Edward Keeler, mais Francesco de Vico, William Lassell et William Rutter Dawes en sont également crédités. La lacune d'Encke est centrée à 133 583 km du centre de Saturne et mesure 325 km de large. Elle est causée et façonnée par la lune Pan (diamètre de 32 km environ) qui orbite à l'intérieur. Les photographies prises par la sonde *Cassini* ont mis en évidence l'existence de trois annelets à l'intérieur de la lacune. La lacune d'Encke ne doit pas être confondue avec le *minimum* d'Encke qui est une zone plus sombre de l'anneau A située plus à l'intérieur.

Lacune de Keeler

La lacune de Keeler est un espace situé à l'intérieur de l'anneau A de la planète Saturne. Elle est nommée en hommage à l'astronome James Edward Keeler (qui, s'il observa la lacune d'Encke toute proche, n'a pas observé celle qui porte son nom). La lacune de Keeler orbite à 136 530 km du centre de Saturne et mesure 35 à 42 km de large, à 250 km du bord externe de l'anneau A. Elle est causée par la lune Daphnis (diamètre de 7 km) qui orbite à l'intérieur.

Ces deux lacunes (Encke et Keeler) se situent à l'intérieur de l'anneau A.

Division de Roche (anciennement division de Pioneer) – Rayon interne de 136 770 km – 2 600 km de large environ.

Anneau R/2004 S 1

R/2004 S 1 est un anneau planétaire situé autour de Saturne qui orbite à 137 630 km du centre de Saturne, entre l'anneau A et l'anneau R/2004 S 2, sur l'orbite de la lune Atlas. Il est large de 300 km. Il s'agit d'un anneau très fin et très peu visible, découvert sur les images transmises par la sonde *Cassini*. Découvert en 2004, R/2004 S 1 est encore une désignation provisoire.

Anneau R/2004 S 2

R/2004 S 2 orbite à 138 900 km du centre de Saturne, entre l'anneau R/2004 S 1 et l'anneau F, entre les orbites des lunes Atlas et Prométhée, sur une largeur d'environ 300 km. Il s'agit d'un anneau très fin et très peu visible, découvert sur les images transmises par la sonde *Cassini*. Découvert en 2004, R/2004 S 2 est aussi une désignation provisoire.

Ces deux anneaux (R/2004 S 1 et R/2004 S2) se situent à l'intérieur de la division de Roche.

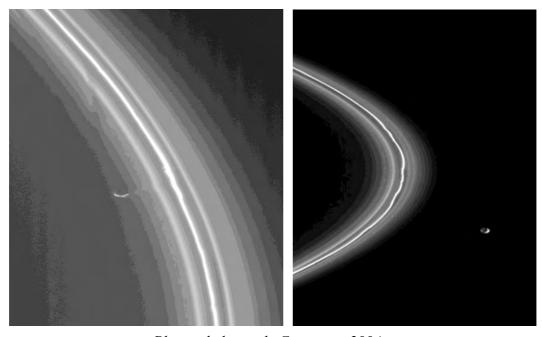
Anneau F

L'anneau F orbite à 140 180 km du centre de Saturne et s'étend sur une centaine de km de large. Découvert par Voyager 1. Très fin, l'anneau F est encadré par deux satellites bergers qui le confinent : Prométhée sur son bord intérieur et Pandore sur son bord extérieur. Ces deux lunes, qui se comportent comme des « gardiens », empêchent les particules glacées de l'anneau de s'échapper. La gravité qu'elles engendrent confine l'anneau. Les particules qui s'en éloignent sont soit renvoyées dans l'anneau soit intégrées aux lunes. Les origines de cet étrange ballet restent un mystère, mais deux chercheurs du département de planétologie de Kobe (Japon), Ryuki Hyodo et Keiji Ohtsuki, ont réalisé des simulations numériques pour tenter de percer le mystère de l'anneau F. Selon eux, la collision de deux des nombreux petits satellites qui s'accumulent au bord des anneaux principaux de Saturne et sont soumis à ses marées et à leur propre gravité, est à même de produire un système comparable à l'anneau F et ses satellites « gardiens ». Il faut pour cela que les satellites aient des noyaux plus denses (faits soit de particules denses de silicate, soit d'un gros morceau de glace rigide). Dans ce cas, une partie des satellites peut survivre à une collision.

Chaque satellite adopte alors une nouvelle orbite, différente de celle de l'autre et les particules prises entre les deux forment un anneau de poussières et de glace. En revanche, si les satellites n'ont pas de noyau et sont entièrement composés de petites particules de glace, ils sont totalement détruits par la collision et cela ne donne qu'un anneau. « La collision entre deux agrégats possédant des noyaux pourrait expliquer non seulement l'anneau F de Saturne mais aussi des éléments du système d'Uranus qui possède au moins une douzaine d'anneaux étroits avec des lunes gardiennes », souligne Aurélien Crida, de l'Institut Universitaire de France, dans un commentaire publié par *Nature*. (Informations été 2015).

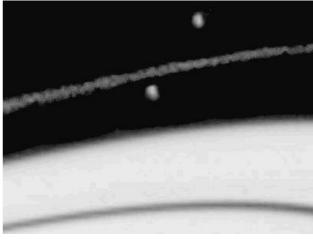
Des images prises par la sonde Cassini ont montré que l'anneau F est constitué d'un anneau central autour duquel s'enroule une structure en spirale.

Ces images ont également mis en évidence l'échange de matière entre l'anneau F et Prométhée et les nœuds que l'attraction du satellite créent dans la matière de l'anneau jusqu'à y créer parfois des agrégats de glace de quelques centaines de mètres qui, en traversant l'anneau à faible vitesse (2 m/s) et le frappant en groupe, créent différentes perturbations (mini-jets de 40 à 80 km de long, sillons et vagues).

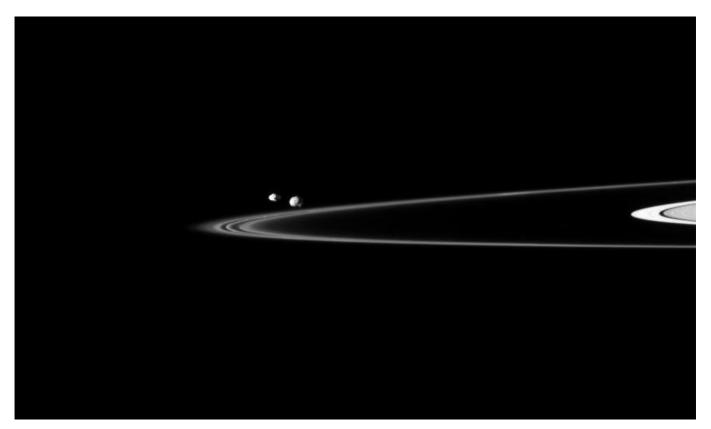


Photos de la sonde Cassini en 2004 -A gauche : L'anneau F et le satellite Prométhée avec qui il échange de la matière. A droite : L'anneau F et le satellite Pandore (84 km de diamètre).

La dynamique des anneaux planétaires nécessite un cadre formel plus complexe que le problème à 2 corps. Souvent, les satellites présentent des orbites résonantes, tels Prométhée et Pandore, gardiens de l'anneau F, avec une résonance 121:118 (Prométhée accomplit 121 révolutions quand Pandore n'en fait que 118).



Prométhée et Pandore encadrant l'anneau F



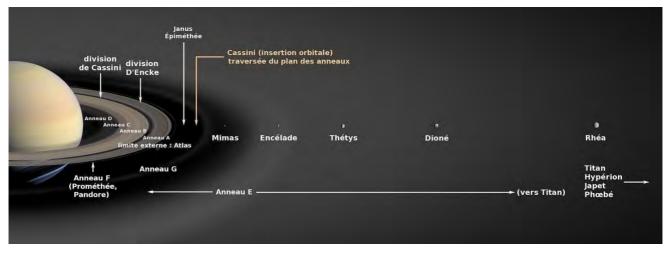
Sur cette image prise par la sonde Cassini, Pandore et Prométhée semblent survoler l'anneau F, une ceinture de poussières qui pourrait bien servir à alimenter les actuels petits satellites et à en créer de nouveaux. Crédit Nasa

Anneau Janus/Épiméthée, aussi appelé anneau R/2006 S 1

Cet anneau est situé dans la région occupée par les orbites des lunes Janus et Épiméthée. Il se trouve à environ 151 500 km du centre de Saturne. Il fut découvert sur des images prises par la sonde Cassini en 2006. Il possède une largeur d'environ 5 000 km. Il provient de particules éjectées de la surface de ces deux satellites lors d'impacts météoriques et qui forment un anneau diffus le long de leur orbite.

Anneau G

L'anneau G orbite entre 170 000 km et 175 000 km du centre de Saturne. Très fin et peu visible ce qui fait de lui l'anneau le plus mince de Saturne avec l'anneau F, il se situe à mi-chemin entre l'anneau F et l'anneau E. Il fait plus de 8 000 km de largeur.



Anneau E

L'anneau E est le plus externe et le plus large des anneaux de Saturne (mis à part le très spécial anneau de Phœbé). Il est considérablement plus grand et plus épais que les plus visibles des anneaux de Saturne : A et B. L'anneau E débute à 181 000 km du centre de Saturne et s'étend jusqu'à 483 000 km, depuis l'orbite de Mimas jusqu'à celle de Titan. Sa largeur varie considérablement; elle est la plus petite

mais plus dense au niveau de l'orbite d'Encelade et s'élargit progressivement après celle-ci, jusqu'à avoir 300 000 km de large et 10 000 km d'épaisseur. À la différence des autres anneaux de Saturne, l'anneau E est constitué de particules microscopiques plutôt que macroscopiques. Les modèles théoriques montrent que l'anneau E est instable sur une échelle de temps de l'ordre de 10 000 ans à un million d'années, ce qui impose que l'apport de particules soit très récent et témoigne d'une activité quasiment contemporaine à la nôtre à l'échelle planétaire.

Encelade orbitant à l'intérieur de cet anneau, à l'endroit où la densité est la plus élevée et où l'anneau est le moins épais, il a longtemps été soupçonné d'être, au moins en partie, la source des poussières glacées composant l'anneau. Ceci s'est vu confirmer par les observations de la sonde Cassini, deux mécanismes bien distincts conduisant à ce transfert de matière :

- d'une part, l'émission de particules de glace d'eau sous forme de jets au pôle sud d'Encelade, qui est probablement la source principale alimentant l'anneau. Si une bonne partie des particules émises finissent par retomber à la surface, un pourcent environ de celles-ci sont éjectées avec une vitesse suffisante pour échapper définitivement à l'attraction gravitationnelle du satellite, et contribuer à alimenter l'anneau.
- d'autre part, les collisions incessantes entre Encelade et les poussières interplanétaires, ou micrométéorites, qui conduiraient à la fois à l'éjection de matière et à l'« érosion » de la surface du satellite, par la formation d'un grand nombre de micro cratères. Ce phénomène n'est pas spécifique à Encelade, mais se retrouve pour toutes les autres lunes orbitant à l'intérieur de l'anneau E.

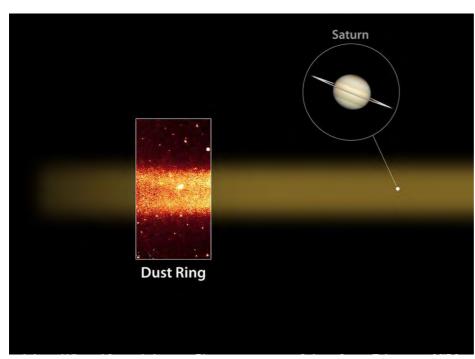
Les anneaux R/2006 S5 (dit anneau de Méthone) et R/2007 S1 (dit anneau d'Anthée), respectivement à 194 230 km et 197 665 km se sitiuent à l'intérieur de l'anneau E.

Anneau de Phœbé

En octobre 2009 un énorme anneau a été mis en évidence par le satellite Spitzer en infrarouge. Ce nouvel anneau, très peu dense, a été trouvé à l'endroit même où évolue un des satellites de Saturne, Phœbé, qui en serait peut-être à l'origine. Ce disque peut difficilement être appelé un anneau, bien que très large (la taille apparente de deux pleines lunes vues depuis la Terre) l'anneau est virtuellement invisible. Son observation, qui allait de 103 à 207 fois le rayon de Saturne, avec des calculs montrant qu'il pourrait peut-être aller jusqu'à 300 fois ce rayon. L'anneau a donc été étudié par WISE, Herschel et la sonde Cassini.

L'orbite de Phœbe autour de sa planète est à une distance moyenne de 215 rayons. L'anneau est à peu près 20 fois plus épais que le diamètre de Saturne (2,4x10⁹ m, soit 2,4 millions de km). Puisque les particules de cet anneau sont supposées provenir d'impacts (de micro-météorites à plus grandes) sur Phœbé, elles doivent partager son orbite rétrograde, ce qui est à l'inverse du mouvement orbital du satellite immédiatement plus près de la planète, Japet. Contrairement aux autres anneaux, celui-ci se situe dans le plan de l'orbite de Saturne (ou à peu près le plan de l'écliptique) et est donc incliné de 27° par rapport au plan équatorial de la planète et donc des autres anneaux. Comme Phœbé (27ème lune en partant de Saturne et 1ère à avoir un mouvement rétrograde) a une inclinaison de 175° par rapport à l'équateur de sa planète, donc de 148° par rapport à l'anneau qui porte son nom, cela l'amène à faire des excursions verticales au-dessus et en-dessous du plan de l'anneau (un peu comme un yo-yo), qui correspondent de très près à l'épaisseur obesrvée de l'anneau, soit 40 rayons de Saturne (ou 20 diamètres).

Les matériaux de l'anneau migrent vers l'intérieur à cause de la réémission des radiations solaires et doit donc frapper l'hémisphère avant de Japet (Japet, à l'instar de notre Lune, est « synchrone » et tourne sur lui-même exactement dans le même temps qu'il orbite autour de sa planète [79,33 jours]). La chute de ces matériaux provoque une coloration légèrement plus sombre et plus rouge de cet hémisphère (similaire à ce qu'on peut voir sur Oberon et Titania, les lunes d'Uranus) mais ne crée pas directement la spectaculaire coloration bicolore sur cette lune. Au contraire, la chute des matériaux génère en réaction un processus thermique positif d'auto-séparation de sublimation de la glace depuis les régions plus chaudes, suivies de la condensation de vapeur sur les régions plus froides. Cela laisse un residu de trainées de matières couvrant l'essentiel de la région équatoriale de l'hémisphère avant de Japet, qui contraste avec les dépots très brillants qui recouvrent les régions polaires et la majorité de son hémisphère arrière.

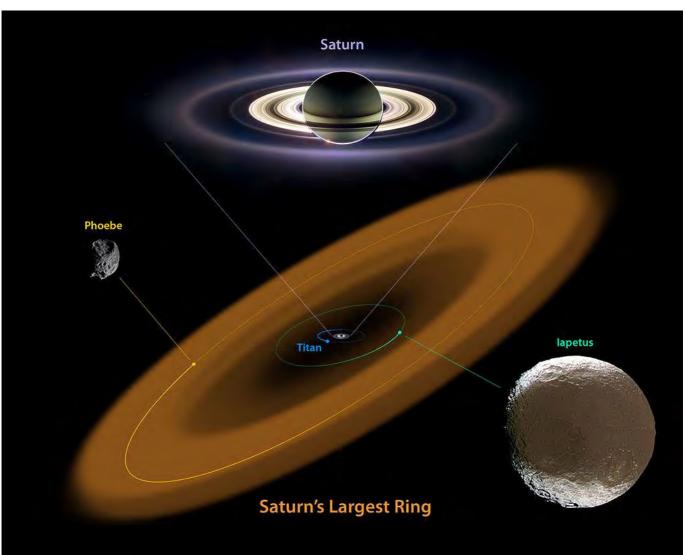


La vaste étendue de l'anneau de Phœbe fait paraître petits les autres anneaux.

Cette image montre un détail du plus grand anneau de Saturne.

L'anneau (bande rouge dans *l'insert) a été découvert par* le téléscope spatial Spitzer de la NASA, qui a détecté de la lumière infrarouge, ou de la chaleur venant des matières de cet anneau poussièreux.

Spitzer, depuis le voisinage de la Terre, était aligné avec l'anneau, vu par la tranche.



Vue d'ensemble de l'anneau de Phœbé, qui montre son inclinaison par rapport aux autres anneaux « équatoriaux » de Saturne, ainsi que sa taille immense : 10,2 millions de km de large (de son bord interne jusqu'à son bord externe) sur 2,5 millions de km d'épaisseur.

L'anneau de Phœbé est le plus large des anneaux de Saturne et des anneaux planétaires du Système solaire : s'il était observable à l'œil nu depuis la Terre, sa taille apparente dans le ciel nocturne serait de l'ordre du double de celle d'une pleine lune. Il a un diamètre total de 32,4 millions de kilomètres.

Étant très ténu, l'anneau de Phœbé n'a été découvert qu'avec le télescope spatial Spitzer de la NASA. Sa signature infrarouge a été captée par le *Multiband Imaging Photometer* (MIPS) du télescope spatial en février 2009. Sa découverte a été annoncée le 6 octobre 2009, à Fajardo (Porto Rico), lors de la 41^e conférence annuelle de la *Division for Planetary Science (DPS)* de l'American Astronomical Society (AAS). Sa première observation à la lumière visible a été annoncée le 23 janvier 2014.

L'anneau de Phœbé est ainsi désigné par référence à Phœbé, une des lunes irrégulières de Saturne. L'anneau est très ténu : sa profondeur optique est de l'ordre de 2,8×10⁻⁸. Il est composé de particules de glace et de poussière très dispersées. Comme l'anneau E, il est situé à l'extérieur de la limite de Roche associée à Saturne. **Son volume est supérieur à un milliard de fois celui de la Terre.**

Conclusions provisoires sur le système d'anneaux de Saturne :

Les derniers développements dans l'étude des anneaux de Saturne et des interactions entre les anneaux et une soixantaine de petits satellites montrent que cela s'avère difficile de « fixer » la situation de cette planète. Le nombre exact de satellites de Saturne ne sera probablement jamais connu avec certitude et ce pour deux raisons :

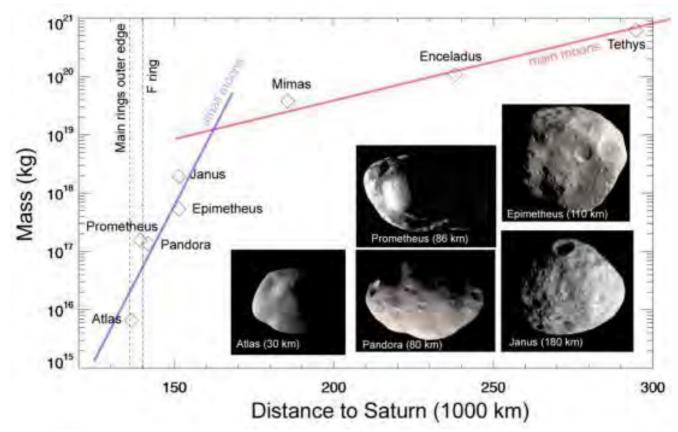
- de petits satellites naissent et meurent en permanence dans certains anneaux par le biais des échanges de matière qui s'y produisent.
- certains de ces satellites ne mesurent que quelques dizaines ou centaines de mètres. Peut-on encore appeler cela des satellites ou lunes ? Quelle est la taille minimale pour que ces objets puissent être considérés comme des lunes ?

La sonde américaine Cassini, en orbite autour de la planète Saturne depuis maintenant dix ans, n'en finit pas de révéler aux planétologues l'extraordinaire, la merveilleuse complexité des anneaux qui entourent la planète géante. Naguère considérés comme de simples disques de poussière de glace tournant sagement, les spécialistes découvrent grâce à Cassini un monde en perpétuel changement. D'abord, l'ancienne question « combien y a t-il d'anneaux autour de Saturne ? » n'a plus de raison d'être. Les classiques anneaux A, B, C découverts au XVII e siècle, ont été rejoins par de nouveaux venus, les anneaux D, E, F et G, au cours des années 1980, avant que cette classification ne vole en éclat devant les images en gros plans de la sonde américaine : les anneaux n'existent pas vraiment... En réalité, « l'anneau de Saturne » est un disque changeant, parcouru de tremblements, de vibrations, d'ondes, de vagues de glace qui s'élèvent à des kilomètres au dessus de lui, créant d'éphémères et fantastiques paysages...

Situés juste à l'extérieur de la ceinture principale d'anneaux, une myriade de petits satellites : Pan, Atlas, Prométhée, Pandore, Janus, Epiméthée, orbitent bien au-delà, des anneaux principaux, entre 138 000 km et 150 000 km et sont donc bien distincts de ce système d'anneaux. Grâce à la qualité des images de Cassini et malgré la petite taille des satellites (seulement quelques kilomètres de diamètre), leurs formes étonnantes ont été révélées. Ils sont souvent de forme allongée qui les fait parfois ressembler à des "soucoupes volantes".



Représentation d'artiste du micro-satellite Atlas (dimension 30 kilomètres environ), reconstituée à partir des images haute-résolution de la sonde Cassini. Crédits Cassini/JPL



La masse et la distribution en distance des différents petits satellites de Saturne, proches des anneaux. La position des bords externes des anneaux est marquée par les lignes pointillées verticales. Les plus petits satellites sont distribués en taille et en distance (ligne bleue) de façon très différente des plus gros satellites (ligne rouge). Crédits CEA-SAp

Ces images ont totalement surpris les scientifiques car cette myriade de micro-satellites est actuellement relativement proche de Saturne. Ils sont situés dans une zone où l'interaction avec les anneaux devrait les faire "migrer" rapidement vers l'exterieur, doublant leur distance à Saturne tous les dix millions d'années. D'autre part, ils restent très brillants, d'une couleur très proche de celle des anneaux, qui sont eux constitués de glace d'eau très réfléchissante ; or ils devraient subir le bombardement météoritique qui noircit les surfaces de corps du Système solaire. Tout semble donc suggérer que ces petites lunes de Saturne sont beaucoup plus jeunes que prévu. L'ensemble des autres satellites naturels des planètes du Système solaire (comme la Lune satellite de la Terre, ou le gros satellite de Saturne, Titan) se sont formés eux il y a plusieurs milliards d'années et leur processus de formation est depuis longtemps achevé. Quelle a été l'évolution des micro-satellites et pourquoi apparaissent-ils si différents?

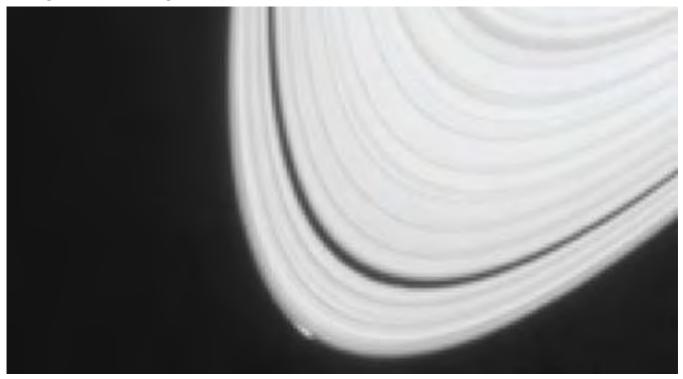
Une clé pour la formation de la Lune?

« Ce nouveau mécanisme de formation de satellites pourrait avoir d'autres applications ailleurs dans le Système solaire : notre Lune pourrait très bien avoir été formée de manière similaire par exemple, à partir du disque proto-lunaire», indique Sébastien Charnoz, du laboratoire AIM Paris-Saclay. « Ces travaux montrent que les processus de formation de nouveaux objets ne sont pas achevés dans le Système solaire, et qu'au bord des anneaux principaux de Saturne, en ce moment même, des corps sont en train de naitre ». Le même processus explique également l'origine de l'anneau F de Saturne. Riche en poussières et situé juste au-delà des anneau principaux (à 3000 km), il se trouve entre les orbites de Prométhée et Pandore, deux des petits satellites. Cet anneau très dynamique ne serait autre que la signature « poussiéreuse » de ce processus. Même si l'anneau F pourrait avoir toujours existé (car régulièrement réalimenté en petites lunes régulièrement formées), le matériau dont il est constitué ne doit pas avoir plus de dix millions d'années.

Page 24

Condensation à partir des anneaux

C'est grâce à des simulations numériques modélisant l'évolution fluide des anneaux et la couplant aux processus de formation des satellites, que les chercheurs ont pu éclaircir ce mystère. Ils ont montré que les petits satellites de Saturne sont en fait constitués du matériau-même des anneaux de Saturne et apparaissent comme des « bouts » d'anneaux condensés en agrégats, il y a quelques millions ou dizaines de millions d'années seulement. En effet, les anneaux de Saturne, comme tout disque astrophysique, s'étalent sous l'effet de leur viscosité. Les intenses forces de marées -c'està-dire les interactions entre la planète et les anneaux-maintiennent les anneaux stables. Au-delà d'une certaine distance, ils deviennent instables et se condensent spontanément en agrégats. La zone de transition s'appelle « la limite de Roche » et se trouve justement aux alentours de 138 000 km, là où les anneaux principaux s'arrêtent et où l'on commence à trouver des satellites. Quand les anneaux s'étalent et franchissent cette frontière, des agrégats de matière se détachent et se forment en petits satellites en quelques centaines d'heures. Ces petits agrégats se rencontrent et peuvent ensuite fusionner et former des corps plus gros (voir l'animation). Les chercheurs ont montré que ce processus rendait compte à la fois des masses, des tailles mais aussi de l'organisation orbitale des petits satellites de Saturne. Ce processus très lent, toujours à l'œuvre au bord externe des anneaux, explique également la faible densité et la composition chimique des satellites, proche de celle des anneaux.



En témoigne la dernière image de la zone extérieure de l'anneau A prise par Cassini le 15 avril 2013. Tout au bout de l'anneau, la sonde a photographié un nouveau « nodule » brillant, une perturbation mesurant 1.200 kilomètres de long sur 10 km de large, et marquant probablement l'apparition dans l'anneau d'un nouveau satellite, sans doute éphémère, mesurant à peu près un kilomètre de diamètre. Cette déformation est le fruit de forces gravitationnelles exercées sur les particules de glace, qui constitue les anneaux. Ce gros iceberg entraîne derrière lui un chapelet chaotique de glace.

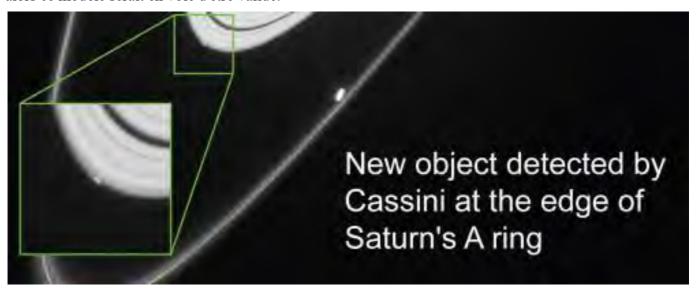
L'embryon d'une lune nommée Peggy

C'est au cœur de cette irrégularité singulière que se trouve le corps qui, selon les astrophysiciens, pourrait être une sorte d'embryon de lune en formation. Bien sûr, cet objet n'est pas visible sur l'image. Il aura fallu aux chercheurs une analyse poussée pour pouvoir le détecter. Les résultats de leur étude, publiés dans le journal Icarus, indiquent qu'il s'agit d'un petit agrégat de 8 mètres de diamètre. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un astre à proprement parler, certains ont tout de même tenu à lui donner un nom : "Peggy" en l'occurrence. Pour l'heure, l'avenir de Peggy est plus qu'incertain. Il est possible que son développement n'arrive pas à terme ou qu'elle se désagrège au fil du temps. Quoiqu'il en soit, la

découverte du processus de sa formation représente pour les chercheurs une première : "Nous n'avons jamais rien vu de tel avant. Nous pourrions être en train d'observer une naissance, celle d'un objet quittant les anneaux et se détachant pour devenir une lune à part entière", a commenté Carl Murray, de la Queen Mary University de Londres.

Or, s'il y a bel et bien une lune en cours de formation à cet endroit des anneaux de Saturne, il s'agirait d'une découverte particulièrement importante pour les astrophysiciens. En effet, à l'heure actuelle, plusieurs théories destinées à expliquer la naissance des lunes glacées de Saturne ont déjà été proposées. Mais jusqu'ici, en l'absence d'observations concrètes d'un tel évènement, il était bien délicat de tester la validité de ces différentes théories. C'est pourquoi la détection de la jeune lune Peggy serait, si ce résultat se confirme à l'avenir, éminemment précieuse : en effet, grâce aux observations de ce corps céleste au cours des années à venir, il serait alors possible de "faire le tri" entre les différents modèles proposés jusqu'ici par les astrophysiciens pour expliquer l'apparition des lunes de Saturne.

Selon les scientifiques de la NASA qui ont analysé les images rapportées par la sonde Cassini, il semblerait que cette lune en cours de formation serait en train de "sortir" des anneaux de Saturne. Un phénomène qui, s'il venait à être confirmé, présenterait un intérêt considérable : en effet, il existe une théorie qui suggère précisément que les lunes glacées naissent d'abord dans les anneaux de Saturne, avant de s'en extraire progressivement. Si Peggy est bel et bien en train de sortir des anneaux de Saturne, alors ce modèle serait en voie d'être validé.



L'origine des lunes

La découverte de Peggy est donc un véritable pas en avant dans la compréhension des mécanismes d'accrétion des lunes à partir de particules qui composent les anneaux d'une planète. Une centaine de petites lunes gravitent actuellement autour de Saturne. A ce jour, plusieurs théories ont été avancées pour expliquer la naissance de ces astres. Les lunes de Saturne varient en taille en fonction de leur proximité, les plus éloignées sont les plus grosses. Et nombre d'entre elles sont essentiellement composées de glace comme les particules qui ont formé les anneaux de la planète. Partis de là, les scientifiques pensent donc que les lunes pourraient se former à partir des particules des anneaux. Elles se déplaceraient ensuite jusqu'à se détacher de Saturne, fusionnant avec d'autres lunes sur le chemin. Toutefois, sans observations concrètes d'un phénomène de ce genre, les astrophysiciens ne disposent pas des connaissances nécessaires pour tester la validité de cette théorie. "Assister à la naissance possible d'une petite lune est un évènement inattendu et excitant", a indiqué Linda Spilker du projet Cassini au Jet Propulsion Laboratory.

La dernière lune de Saturne ?

Par ailleurs, si Peggy devenait bel et bien une lune, il pourrait s'agir de la dernière de Saturne. En effet, d'après les scientifiques, les anneaux de la planète semblent aujourd'hui trop épuisés pour donner naissance à des lunes supplémentaires. Les équipes comptent donc profiter au maximum de leurs nouvelles observations. "La théorie suggère qu'il y a longtemps, Saturne avait un système d'anneaux beaucoup plus massif capable de donner naissance à des lunes plus grosses. Vu que les lunes se sont formées près des bords, elles ont épuisé les anneaux et ont évolué, donc celles qui se sont développées le plus tôt sont les grosses et les plus éloignées", a conclu Murray dans un communiqué de la NASA. Autour de la planète géante, une soixantaine de satellites jouent les « bergers »; ce sont leurs perturbations gravitationnelles qui créent les fameuses divisions obscures dans les anneaux, des zones moins denses, en résonance avec les orbites des satellites. Et puis, les anneaux eux-mêmes génèrent des milliers de mini satellites éphémères, qui se condensent, dessinent des sillons et d'élégantes arabesques dans la glace avant de se sublimer comme neige au Soleil.

La sonde Cassini, à la fin de sa mission qui devrait intervenir en 2017, s'approchera extrêmement près des anneaux et, espérons-le, livrera des images où ceux-ci seront « résolus », c'est à dire révéleront leur véritable structure : on le sait grâce à des mesures radar, ils sont constitués de blocs de glace de quelques centimètres à quelques mètres de diamètre, s'agrégeant les uns aux autres et se dispersant constamment, au fil de leur éternelle révolution autour de Saturne.

L'inclinaison des anneaux de Saturne

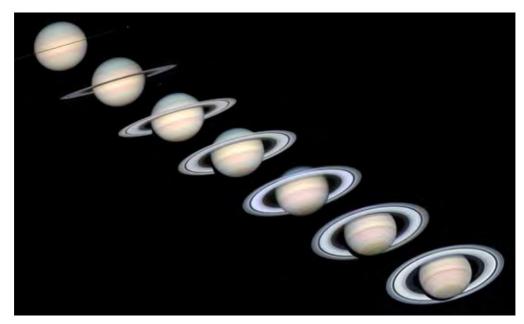
Derrière les apparences...

En 1655, Huygens dirige vers Saturne les lunettes qu'il avait perfectionnées, dont une qui grossit une cinquantaine de fois. Il suit cette planète dans sa marche à travers les constellations et, découvre la nature de l'anneau, comme il le fait savoir par un anagramme qu'il fera circuler dès 1656, auprès de ses correspondants. Lorsqu'il est déchiffré celui-ci dit : « Annulo cingitur tenui, piano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato ». Huygens sera plus explicite en 1659, quand il publiera, dans son *Systema Saturnium*, en y donnant l'explication des apparences de cet astre : « Le globe de Saturne est entouré d'une bande opaque très mince, de forme circulaire, qui ne touche pas la planète et semble un prolongement de son équateur. Cet appendice annulaire accompagne la planète dans son mouvement de translation autour du soleil et nous montre sa face éclairée sous des inclinaisons variables qui modifient son aspect. Il est si mince que les anses formées de chaque côté disparaissent le jour où la terre se trouve dans son plan et reparaissent aussitôt qu'elle l'a dépassé. »

C'est à Maraldi (*Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1715) que l'on doit les premiers travaux sur les causes de ces différentes apparences. L'astronome a montré que c'est parce que le plan des anneaux est incliné d'environ 30 degrés par rapport à l'orbite de Saturne, soit de 31 degrés 20 minutes par rapport à l'écliptique. Il a également étudié les raisons pour lesquelles ces anneaux disparaissent quelquefois. Il a ainsi distingué trois causes qui peuvent occasionner la phase ronde de la planète géante :

- 1) Lorsque Saturne est vers le vingtième degré de la Vierge ou des Poissons explique en substance Maraldi, le plan de ses anneaux se trouve dirigé vers le centre du Soleil et ils ne reçoivent de la lumière que sur leur épaisseur, qui n'est pas assez considérable pour nous renvoyer la quantité de lumière nécessaire pour nous le faire apercevoir de si loin; c'est pourquoi Saturne alors paraît rond, sans anneau. Ces anneaux ne disparaissent faute de lumière, que pendant environ un mois; «savoir, 15 jours avant, et 15 jours après le passage de Saturne par le point du ciel, qui est à 5 signes 20 degrés, ou à 11 signes 20 degrés de longitude ».
- 2) Les anneaux de Saturne disparaissent encore lorsque leur plan, étant dirigé vers la Terre, se trouve placé de façon que son prolongement passerait par notre œil. Nous ne voyons alors que leur épaisseur, qui est trop petite, ou qui réfléchit trop peu de lumière pour que nous puissions l'apercevoir. (Lalande calculera que cette cause ne doit faire disparaître l'anneau que sept à huit jours avant que la Terre soit dans le plan des anneaux.)
- 3) La troisième cause qui peut faire disparaître, pour nous, les anneaux de Saturne. C'est lorsqu'ils sont placés de façon que leur plan prolongé passerait entre le Soleil et la Terre; car alors la surface éclairée n'est plus tournée vers nous, et nous voyons Saturne sans anneaux.

Les observations de Lalande le 3 avril 1774, après celles de Maraldi, confirmeront cette façon de voir. Et de 1848 à 1852, Bond mesurera l'épaisseur de cet anneau pour en conclure qu'elle doit être moindre que 0,01".

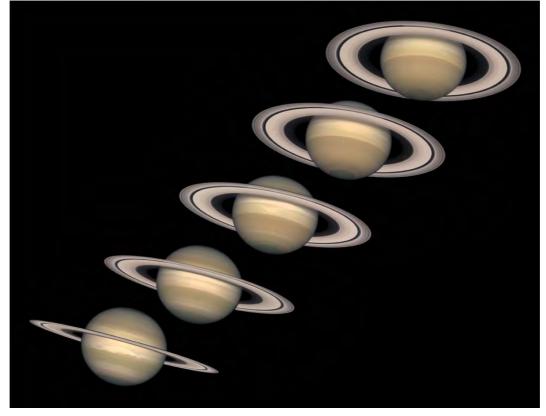


Différentes inclinaisons des anneaux de Saturne

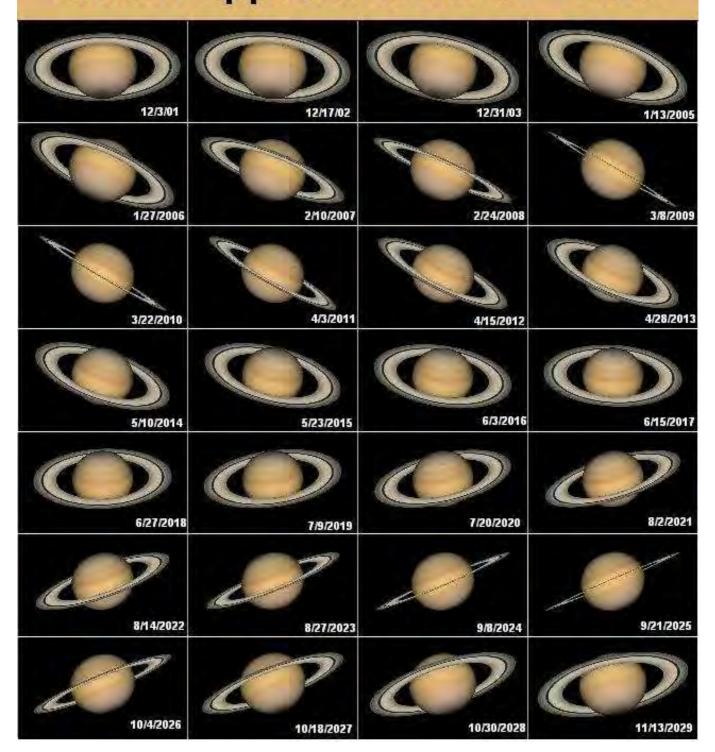
En fait, l'axe de rotation de Saturne est incliné de 26,7° sur son plan orbital, qui forme lui-même un angle de 2,5° par rapport au plan de l'écliptique. En raison des positions relatives de la Terre et de Saturne, nous voyons l'ouverture des anneaux avec un angle qui varie de 0° à près de 30°. Lorsqu'ils sont vus exactement par la tranche (dernière fois le 4 septembre 2009, prochaine fois en mai 2025) ils se dérobent complètement au regard en raison de leur très faible épaisseur.

Au cours de la rotation de Saturne autour du Soleil, les anneaux nous apparaissent sous un angle variable depuis la Terre. Tour à tour, ses faces sont éclairées par le Soleil, mais à cause de l'excentricité de l'orbite de la planète, la face Nord est éclairée pendant 15 ans et 9 mois, tandis que la face Sud ne l'est que pendant 13 ans et 8 mois.

Aux environs des équinoxes saturniens, les anneaux se trouvent alors dans le même plan que le Soleil, et ceux-ci sont éclairés très faiblement, disparaissant même pour l'observateur terrestre. Lorsqu'à son tour, la Terre traverse le plan des anneaux, Saturne paraît dépourvue d'anneaux pendant plusieurs mois.

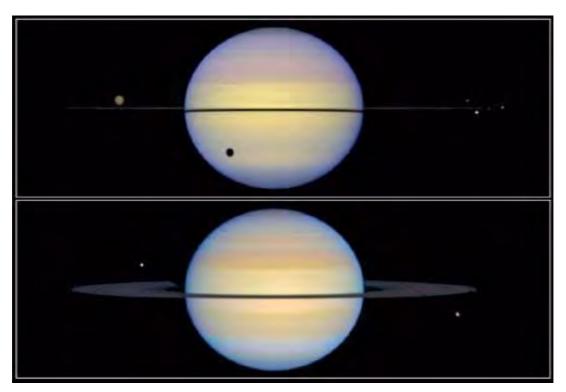


Saturn Oppositions: 2001 - 2029



Il faut presque 30 ans à Saturne pour réaliser une orbite autour du Soleil. Vus de notre observatoire mobile (la Terre), les anneaux nous apparaissent sous un angle variable.

Le montage photographique de Damian Peach débute en haut à gauche en 2004 et s'achève en bas à droite en 2015. En 2004 la face sud des anneaux est parfaitement visible, le maximum d'ouverture s'étant produit l'année précédente. L'inclinaison des anneaux n'a cessé de diminuer jusqu'au mois de septembre 2009, période pendant laquelle on voyait les anneaux par la tranche. Ensuite l'inclinaison des anneaux a repris dans l'autre sens, nous dévoilant leur face nord. L'ouverture des anneaux va se poursuivre jusqu'en 2017, puis va se remettre à décroître jusqu'au mois de mars 2025 où nous reverrons les anneaux par la tranche (donc on ne les verra pas !!).



Images de Hubble

III – Le système satellitaire de Saturne

Les satellites naturels de Saturne sont les corps naturellement en orbite autour de la planète Saturne. À l'heure actuelle, environ 210 de ces entités ont été observées, dont 62 dont l'orbite est confirmée et environ cent cinquante lunes mineures. Parmi les soixante-deux premiers satellites, l'existence de cinquante-trois est suffisamment confirmée pour qu'ils soient nommés individuellement alors que les neuf autres n'ont encore qu'une désignation temporaire. Les satellites de Saturne ont une taille très variée. On y trouve des petites lunes de moins d'un kilomètre de diamètre, mais aussi Titan, plus grand que la planète Mercure. Parmi les satellites recensés, treize ont un diamètre de plus de cinquante kilomètres. Les deux satellites les plus notables de Saturne sont Titan, qui possède une atmosphère dense constituée principalement de diazote et des lacs d'hydrocarbures à sa surface et Encelade, qui émet des geysers de gaz et de poussières et pourrait contenir de l'eau liquide sous son pôle Sud.

Vingt-quatre des lunes de Saturne sont des satellites réguliers. Ils ont une orbite prograde, presque circulaire et peu inclinée par rapport au plan équatorial de la planète. Parmi ceux-ci, on trouve les sept satellites majeurs, les quatre satellites troyens qui ont une orbite commune à un satellite majeur, Hypérion qui orbite en résonance avec Titan et les trois petites lunes (Méthone, Anthée et Pallène) entre Mimas et Encelade qui constituent le groupe des Alcyonides. Les autres satellites réguliers (S/2009 S 1, Pan, Daphnis, Atlas, Prométhée, Pandore, Janus, Épiméthée, Égéon) sont situés dans les anneaux de Saturne, de l'anneau B (S/2009 S 1) à l'anneau G (Égéon). Les satellites réguliers sont généralement nommés suivant le nom des Titans ou d'autres personnages associés au dieu Saturne.

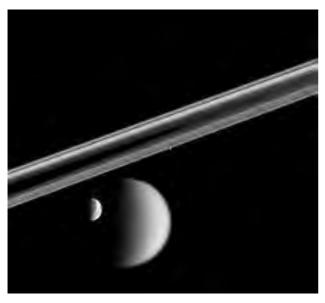
Les autres lunes sont toutes des satellites irréguliers. Leur orbite est plus éloignée de Saturne et fortement inclinée par rapport au plan équatorial de la planète. Ils ont tous une taille inférieure à trente kilomètres, à l'exception de Phœbé, neuvième satellite de Saturne découvert à la fin du XIXe siècle, et Siarnaq (groupe inuit). Ces satellites sont probablement des objets capturés par Saturne, ou des fragments d'objets capturés. Ils sont classés en trois groupes selon leurs caractéristiques orbitales : le groupe inuit, le groupe nordique (auquel appartient Phœbé) et le groupe celte.

Les anneaux de Saturne sont constitués d'une multitude d'objets, dont la taille varie de quelques micromètres à plusieurs mètres. Chacun de ces objets suit sa propre orbite autour de la planète. Il n'existe pas de frontière précise entre les innombrables objets anonymes qui constituent ces anneaux et les objets plus grands qui ont été nommés. Au moins cent cinquante lunes mineures ont été détectées dans les anneaux par les perturbations qu'elles créent dans le milieu environnant et l'on pense que cellesci ne représentent qu'une petite portion de la population totale de ces objets. Le nombre exact de satellites de Saturne ne sera donc probablement jamais connu.

Premières observations

Les huit premières lunes de Saturne furent découvertes par observation directe à l'aide de télescopes optiques. La plus grande, Titan, fut découverte en 1655 par Christian Huygens grâce à un objectif de 57 mm monté sur une lunette astronomique de sa conception. Téthys, Dioné, Rhéa et Japet furent découvertes entre 1671 et 1684 par Giovanni Domenico Cassini. Mimas et Encelade furent découvertes en 1789 par William Herschel. Hypérion fut découvert en 1848 par W.C. Bond, G.P. Bond et William Lassell. L'utilisation de plaques photographiques à longue durée d'exposition permit la découverte de nouveaux satellites. Le premier découvert par cette technique fut Phœbé, identifié en 1899 par W.H. Pickering. En 1966, le dixième satellite de Saturne fut découvert par Audouin Dollfus en observant les anneaux de Saturne par la tranche près d'un équinoxe. Il fut plus tard nommé Janus. Les astronomes réalisèrent en 1978 que les observations de 1966 impliquaient la présence d'un autre satellite dont l'orbite était similaire à Janus. Cette 11e lune de Saturne est maintenant connue sous le nom d'Épiméthée. En 1980, trois satellites supplémentaires, les troyens Hélène, Télesto et Calypso furent découverts depuis des télescopes au sol puis identifiés par la suite par les sondes du programme Voyager.

Thémis, satellite qui aurait été découvert en 1905, en fait n'existe pas.



Quatre lunes de Saturne sont visibles sur cette image de la sonde Cassini : Titan (le plus grand) et Dioné en bas, le petit Prométhée (sous les anneaux) et le minuscule Télesto au-dessus du centre.

L'étude des planètes externes du système solaire a été révolutionnée par l'usage de sondes spatiales automatisées. L'arrivée des sondes *Voyager* près de Saturne en 1980-1981 a permis la découverte de trois nouvelles lunes, Atlas, Prométhée et Pandore, amenant le nombre de lunes connues à dix-sept. De plus, les astronomes eurent la confirmation qu'Épiméthée était distinct de Janus. En 1990, Pan fut découvert dans des images d'archive de *Voyager*.

La mission *Cassini*, qui arriva autour de Saturne à l'été 2004, découvrit trois petites lunes intérieures dans un premier temps : Méthone et Pallène sont entre Mimas et Encelade et Pollux est la deuxième lune lagrangienne de Dioné. Elle détecta trois lunes qui n'ont pas fait l'objet de confirmation dans l'anneau F. En novembre 2004, les scientifiques du programme *Cassini* annoncèrent que la structure des anneaux de Saturne implique la présence de plusieurs lunes supplémentaires en orbite au sein de ces anneaux, dont une seule, Daphnis a été confirmée (en 2005). En 2007, la découverte d'Anthée est annoncée, puis celle d'Égéon en 2009.

Satellites externes

L'étude des lunes de Saturne a également été facilitée par les progrès de l'instrumentation des télescopes, avec principalement l'introduction des dispositifs numériques qui ont remplacé les plaques photographiques. Une mission d'observation menée en 2000 a permis de découvrir douze autres lunes en orbite à une grande distance de Saturne (Ymir, Paaliaq, Siarnaq, Tarvos, Kiviuq, Ijiraq, Thrymr, Skathi, Mundilfari, Erriapo, Albiorix et Suttungr). On pense actuellement qu'il s'agit de fragments de corps plus importants capturés par l'attraction gravitationnelle de Saturne.

Une équipe d'astronomes de l'université de Hawaï a découvert Narvi en 2003 au moyen du télescope Subaru de 8,2 mètres, puis vers la fin de l'année 2004, douze autres satellites extérieurs (S/2004 S 7, Fornjot, Farbauti, Ægir, Bebhionn, S/2004 S 12, S/2004 S 13, Hati, Bergelmir, Fenrir, S/2004 S 17 et Bestla). Le 26 juin 2006, la même équipe a découvert neuf petits satellites extérieurs supplémentaires : Hyrrokkin, S/2006 S 1, Kari, S/2006 S 3, Greip, Loge, Jarnsaxa, Surtur et Skoll. La découverte de Tarqeq était annoncée le 13 avril 2007 et celle de S/2007 S 2 et S/2007 S 3 suivait de près, le 1^{er} mai.

Dénomination

Les noms modernes pour les lunes de Saturne ont été suggérés par John Herschel en 1847. Il a proposé de leur donner le nom des personnages mythologiques associés au dieu romain de l'agriculture et la récolte, Saturne (assimilé au titan grec Cronos). En particulier, les sept satellites alors connus ont été nommés d'après les Titans et les Titanides. En 1848, Lassell a proposé que le huitième satellite de Saturne soit nommé Hyperion, nom d'un autre Titan. Lorsque les noms des Titans furent épuisés, les lunes ont été nommées d'après les différents personnages de la mythologie gréco-romaine ou des géants d'autres mythologies. Toutes les lunes irrégulières (sauf Phœbe) sont nommées d'après des dieux inuits et celtiques et d'après les géants de la mythologie nordique.

Formation des satellites

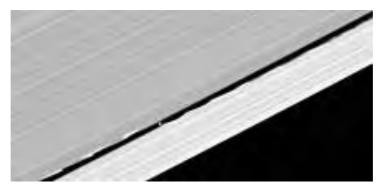
Des simulations numériques révèlent que les lunes glacées de Saturne ont pu se former à partir de l'étalement de la matière constituant les anneaux. Lors de sa formation, un anneau s'étale à la fois vers la

planète et vers l'extérieur. La matière dirigée vers la planète ne peut pas s'agréger à cause des forces de marées. En s'éloignant de la planète les forces de marées diminuent jusqu'à s'équilibrer avec les forces d'accrétion gravitationnelles. Ce cercle d'équilibre est dit la "limite de Roche". Au-delà de la limite de Roche, les forces d'accrétion prennent le dessus, la matière peut s'agréger et des satellites peuvent se former. Pour Saturne, la limite de Roche, située à 140 000 km du centre, est occupée par l'anneau F. Les simulations indiquent que des satellites glacés se forment au bord de l'anneau F. Puis ils s'éloignent à vitesse décroissante. Les plus récents rattrapent les plus anciens, ils s'agrègent et forment des lunes de plus en plus massives. Le système de lunes de Saturne est très inégal : une lune, Titan, comprend plus de 96 % de la masse en orbite autour de la planète. Les six lunes sphériques représentent environ quatre pour cent, tandis que les autres petites lunes, avec les anneaux, ne représentent que 0,04 %.

Même si leurs limites sont plutôt floues (voire subjectives), il est possible de regrouper les satellites de Saturne en

Dix groupes de satellites :

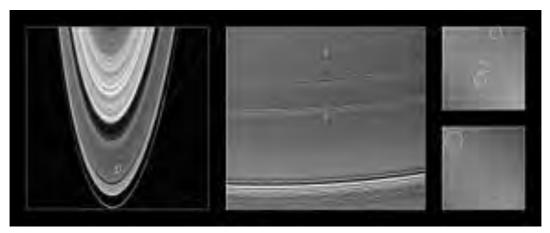
a) Satellites bergers



Le passage de Daphnis dans la lacune de Keeler provoque des vagues sur les bords de l'anneau A.

Les satellites bergers sont des lunes qui orbitent à l'intérieur ou juste à la limite d'un système d'anneaux planétaires, en sculptant les bords ou en créant des lacunes entre eux. Les satellites bergers de Saturne sont Pan (dans la lacune d'Encke), Daphnis (dans la lacune de Keeler), Atlas (satellite berger externe de l'anneau A), Prométhée (satellite berger interne de l'anneau F) et Pandore (satellite berger externe de l'anneau F). Ces lunes se sont probablement formées par accrétion de matériaux de l'anneau sur un cœur massif et dense préexistant. Ce cœur, d'environ la moitié à un tiers de la masse actuelle du satellite, pourrait être lui-même le débris de la désintégration d'un satellite plus ancien.

b) Satellites des anneaux



En mars 2006, quatre objets ont été identifiés sur les images de l'anneau A prises par la sonde Cassini lors de son insertion en orbite autour de la planète le 1er juillet 2004. Contrairement à Pan et Daphnis, qui sont assez massifs pour nettoyer l'espace autour d'eux et créer une lacune, ces minuscules satellites ne perturbent l'anneau que sur une dizaine de kilomètres en avant et en arrière de leur orbite, créant des structures en forme d'hélice (propeller en anglais) : ils sont ainsi appelés « satellites (ou lunes) d'hélices » (propeller moons en anglais). Ils apparaissent donc comme deux traits clairs sur la surface de

l'anneau. Cette découverte fut exceptionnelle car c'était la première fois que l'on découvrait à cet endroit des objets plus gros que les plus gros composants des anneaux détectés jusqu'alors (d'une taille de l'ordre d'1 cm à 10 m) mais plus petits que les plus petits satellites connus à ce moment-là (plusieurs kilomètres). Les hélices mesurent typiquement quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres de long de part et d'autre de ces lunes, lesquelles mesurent elles-mêmes quelques dizaines de mètres à un ou deux kilomètres de long. En 2007, plus de 150 objets de ce type avaient été observés. Ils sont tous situés dans 3 bandes étroites de l'anneau A entre 126 750 km et 132 000 km du centre de Saturne. Chaque bande a une largeur d'environ 1 000 km (moins de 1 % de la largeur totale des anneaux). Ces régions sont relativement libres de toute perturbation liée à une résonance avec d'autres satellites, même si ce n'est pas une condition suffisante, puisque d'autres régions peu perturbées ne contiennent pas de lune. Ces lunes sont probablement des résidus de la dislocation d'un satellite plus grand. On estime qu'il existe 7 à 8 000 satellites d'hélices de plus de 800 mètres dans l'anneau A et des millions de plus de 250 mètres. Des objets de ce type semblent également se trouver dans la partie extérieure de l'anneau A (« trans-Encke »). Certains de ces objets auraient des orbites non képlériennes. Des objets similaires pourraient exister dans l'anneau F. Dans cet anneau, on observe des jets de matière, qui pourraient être issus de collisions entre de petites lunes et le cœur de l'anneau F, ces collisions étant initiées par la présence proche de Prométhée. Une des plus grandes lunes de l'anneau F est l'objet S/2004 S 6, dont la présence n'a pas été confirmée. L'anneau F contient également des spirales de matière, dont on pense qu'elles sont dues à des objets encore plus petits (environ un kilomètre de diamètre), qui orbitent près de l'anneau F. En 2009, la découverte d'Égéon a été annoncée dans l'anneau G, entre Janus et Mimas. Son orbite est en résonance 7:6 avec Mimas : lorsqu'Égéon fait 7 fois le tour de Saturne, Mimas en fait exactement 6. Égéon, d'un diamètre d'environ 500 m est un des plus grands objets dans l'anneau, ce qui suggère qu'il en est une des principales sources de matériau. Un peu plus tard, à l'été 2009, une nouvelle lune, S/2009 S 1, était découverte dans l'anneau B. Cette lune a été découverte par l'ombre qu'elle projette sur l'anneau. Son diamètre est estimé à 300 m. Contrairement aux lunes de l'anneau A, elle ne crée pas de perturbation en forme d'hélice, probablement parce que l'anneau B est plus dense.

c) Satellites majeurs internes



Image en fausses couleurs d'**Encelade** prise par Cassini en 2005.

Les « rayures du tigre » sont situées en bas à droite, près du terminateur

Quatre satellites majeurs internes de Saturne orbitent dans l'anneau E, en compagnie des trois petites lunes du groupe des Alcyonides. Mimas, avec un diamètre de 396 km, est la plus petite des quatre. Elle est de forme ovoïde, légèrement aplatie au niveau des pôles et renflée au niveau de l'équateur. La face avant de Mimas est marquée par un large cratère de 130 kilomètres de diamètre, nommé cratère Herschel. Sa surface est dominée par la présence de cratères d'impacts, et ne présente pas de trace d'activité géologique.

Encelade a un diamètre de 504 km, et est la deuxième plus petite des lunes majeures internes de Saturne. C'est le plus petit objet géologiquement actif du système solaire. Sa surface est assez diverse avec des zones très cratérisées, tandis que d'autres ont un aspect plus lisse. En 2005, la sonde Cassini a permis la découverte au pôle sud d'Encelade de la présence de profondes fissures parallèles, d'une longueur de 130 kilomètres chacune, qui ont été nommées rayures du tigre. La température au niveau de ces rayures

Page 34

atteint les 180 K, ce qui est bien plus chaud que le reste de la lune. La sonde a également observé la présence de geysers de fines particules glacées, dont l'origine coïncide avec les points les plus chauds des rayures du tigre. La matière éjectée alimente l'anneau E, et est une source importante, sinon dominante de la magnétosphère de Saturne. La source d'énergie de cette activité pourrait être liée aux effets de marée dus à Saturne, et au déplacement de l'orbite d'Encelade sous l'influence de Dioné. Encelade pourrait contenir de l'eau liquide sous la surface du pôle sud.

Téthys, avec 1 066 km de diamètre, est la 5e plus grande lune de Saturne (et la deuxième des lunes internes). Sa surface est caractérisée par la présence d'une gigantesque faille, Ithaca Chasma, qui barre une partie de sa surface, et du cratère Odyssée, d'un diamètre de 400 km. Ithaca Chasma est presque concentrique avec le cratère Odyssée, et ces deux formations géologiques pourraient être liées. Téthys n'a pas d'activité géologique visible. La majorité de sa surface est fortement cratérisée, et l'hémisphère opposé à Odyssée présente une surface plus jeune. La densité de Téthys (0,97 g/cm³) est inférieure à celle de l'eau, ce qui indique que la lune est composée majoritairement de glace, avec une faible proportion de roches.

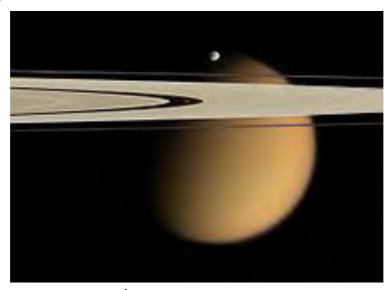
Dioné, avec ses 1 123 km de diamètre, est le 4e plus grand satellite de Saturne et la plus grande des lunes internes. La majorité de sa surface est couverte de cratères d'impact, mais fait apparaître des filaments qui correspondent à des falaises de glace de quelques centaines de mètres de hauteur, ce qui indique une activité géologique dans le passé. Les mesures de Cassini montrent que Dioné est une source de plasma dans la magnétosphère de Saturne, ce qui indique qu'il pourrait toujours être géologiquement actif, à une échelle moins importante qu'Encelade.

d) Groupe des Alcyonides

Les Alcyonides sont un groupe de trois satellites, Méthone, Anthée et Pallène, qui orbitent entre Mimas et Encelade. Avec un diamètre de moins de 5 km, ils font partie des plus petites lunes identifiées à ce iour dans le système de Saturne.

Les images de Cassini montrent des arcs très fins qui s'étendent à l'avant et à l'arrière de l'orbite de Méthone et Anthée. Ces arcs pourraient être issus de matériaux arrachés par des impacts de micrométéorites et confinés dans une étroite région de l'orbite des deux lunes par la résonance avec Mimas.

e) Lunes co-orbitales



Épiméthée devant Titan.

Janus et Épiméthée sont des lunes co-orbitales. Elles possèdent à peu près la même taille, respectivement 179 et 113 kilomètres de diamètre, et leurs orbites n'ont que quelques kilomètres d'écart. On pourrait penser qu'elles sont condamnées à entrer en collision. Cela n'est pas du tout certain : lorsque ces deux lunes s'approchent l'une de l'autre, la gravité accélère celle qui est derrière, qui se retrouve donc sur une orbite plus haute. Celle qui est devant ralentit et se retrouve donc plus bas; ainsi elles échangent leurs orbites tous les quatre ans environ.

f) Satellites trovens

Les satellites troyens sont un autre genre de co-orbitaux : ils orbitent à la même distance qu'une autre lune, mais aux points de Lagrange L₄ et L₅, c'est-à-dire qu'ils sont situés à 60° en avance ou en retard sur l'orbite de leur « lune-mère ». La stabilité d'un tel système fait que ces satellites n'entrent jamais en collision. Téthys possède deux petits satellites troyens, Télesto et Calypso; Dioné en possède également deux, Hélène et Pollux.

g) Satellites majeurs externes

Les lunes majeures externes de Saturne orbitent au-delà de l'anneau E.

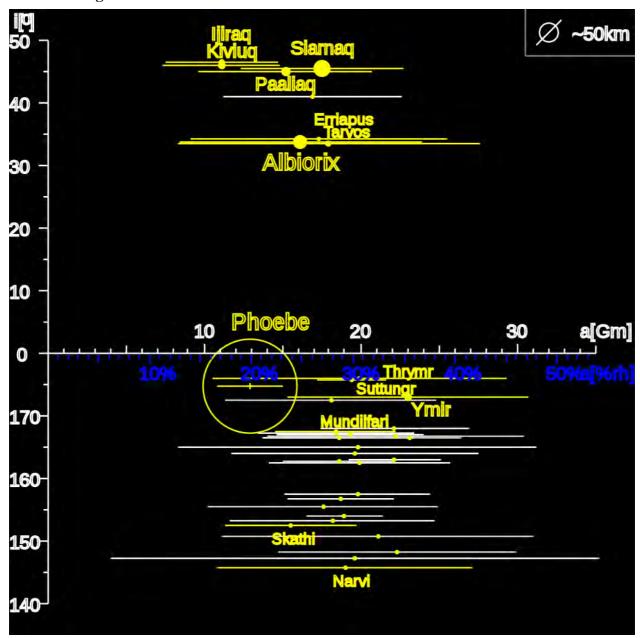
Rhéa, avec un diamètre de 1 528 km, est la deuxième plus grande lune de Saturne. Rhéa a une surface cratérisée assez classique, à l'exception de quelques marques claires. Rhéa a également deux bassins d'impact sur la face opposée à Saturne. Le premier, Tirawa, a un diamètre de 360 km, à peu près équivalent au cratère Odyssée sur Téthys. Le second, Mamaldi, a un diamètre de 480 km et est beaucoup plus ancien. En 2008, Cassini a détecté une modification du flux d'électrons piégés par le champ magnétique de Saturne, qui aurait pu être causée par la présence d'un anneau autour de la lune. Toutefois, la présence de cet anneau n'a pas pu être confirmée, et une autre explication devra être trouvée au phénomène. Aucune évidence d'activité interne n'a été observée sur Rhéa.

Titan est la plus grande lune de Saturne et son diamètre de 5.151 km en fait la deuxième plus grande lune du système solaire après Ganymède autour de Jupiter. Parmi toutes les lunes du Système solaire, c'est la seule qui possède une atmosphère dense, majoritairement composée d'azote. Titan est principalement composé d'eau sous forme glacée et de roches. Son épaisse atmosphère a longtemps empêché l'observation de sa surface jusqu'à l'arrivée de la mission Cassini-Huygens en 2004, laquelle a permis la découverte de milliers de lacs d'hydrocarbures liquides (éthane et méthane principalement) dans les régions polaires du satellite, particulièrement autour du pôle Nord où l'on en trouve 25 fois plus qu'autour du pôle Sud. Du point de vue géologique, sa surface est jeune : quelques montagnes ainsi que des cryovolcans éventuels y sont répertoriés, mais la surface de Titan demeure relativement plate et lisse avec peu de cratères d'impact observés. Le climat (qui comprend des vents et de la pluie de méthane) crée sur la surface des caractéristiques similaires à celles rencontrées sur Terre, telles des dunes et des côtes, et, comme sur la Terre, possède des saisons. Avec ses liquides (à la fois à la surface et sous la surface) et son épaisse atmosphère d'azote, Titan est perçu comme un analogue de la Terre primitive, mais à une température beaucoup plus basse. Le satellite est cité comme un possible hébergeur de vie extraterrestre microbienne ou, au moins, comme un environnement prébiotique riche en chimie organique complexe. Certains chercheurs suggèrent qu'un possible océan souterrain pourrait servir d'environnement favorable à la vie. Hypérion est le voisin le plus proche de Titan dans le système saturnien. Leurs orbites sont bloquées dans une résonance 4:3 : à chaque fois que Titan fait quatre tours de Saturne, Hypérion en fait exactement trois. Avec un diamètre d'environ 270 km, Hypérion est plus petite et légère que Mimas. Sa forme est très irrégulière, et sa densité (environ 0,55 g/cm³) indique que sa porosité dépasse les 40 %, même s'il était composé uniquement de glace. Sa surface est couverte de cratères contigus si nombreux et aux marges si fines que la vue d'ensemble de ce satellite fait penser à une pierre ponce. Les images de Voyager 2 ainsi que les mesures ultérieures de photométrie terrestre indiquent que la rotation d'Hypérion est chaotique, c'est-à-dire que son axe de rotation varie si fortement qu'il ne possède pas de pôle ou d'équateur bien défini, et que son orientation dans l'espace est impossible à prédire.

Crête équatoriale de Japet.

Japet est la troisième plus grande lune de Saturne, avec un diamètre de 1 471 km. En orbite autour de la planète à plus de 3,5 millions de km, elle est de loin la plus éloignée des grandes lunes de Saturne. Japet est connue depuis longtemps pour sa coloration, l'un de ses hémisphères étant particulièrement brillant tandis que l'autre est très sombre. On pense que le matériau sombre actuel est le résidu de la sublimation de la glace d'eau à la surface de Japet, peut-être noirci par exposition à la lumière du Soleil. La glace se sublime de préférence sur le côté sombre, qui est plus chaud, et précipite sur le côté clair et les pôles, qui sont plus froids. L'origine du matériau sombre pourrait être expliquée par la découverte en 2009 d'un vaste anneau presque invisible à l'intérieur de l'orbite de Phœbé. Les scientifiques pensent que cet anneau est composé de poussières et de particules de glace arrachées à Phœbé par l'impact de météorites. Comme Phœbé, ces particules orbitent dans le sens inverse de Japet et se déposent progressivement sur Japet, laissant une couche sombre sur sa face avant. Japet ne présente aucune trace d'activité géologique.

h) Satellites irréguliers



Les satellites irréguliers de Saturne. La position de chaque satellite représente : * Le demi-grand axe de l'orbite sur l'axe horizontal (en millions de km). * L'inclinaison sur l'axe vertical. Les satellites en dessous de l'axe horizontal (i>90) sont rétrogrades. La taille du cercle indique la taille relative du satellite. Les barres horizontales indiquent les variations de distance du satellite par rapport à Saturne. L'illustration montre les trois groupes : le groupe inuit en haut, le groupe celte juste en dessous, et le groupe nordique en dessous de l'axe horizontal.

h1) Groupe inuit

Le groupe inuit comprend cinq satellites partageant une orbite dont le demi-grand axe s'étend entre 11 et 18 millions de km, l'inclinaison entre 40° et 50° et l'excentricité entre 0,12 et 0,48. Les membres du groupe sont: Kiviuq, Ijiraq, Paaliaq, Siarnaq, et Tarqeq. Ils portent le nom de divinités inuit. À l'exception de Ijiraq, ils présentent un spectre homogène avec une origine commune résultant de la dislocation d'un objet plus grand. Mais une explication de la différence des paramètres orbitaux reste à trouver.

h2) Groupe celte

Le groupe celte est un ensemble de quatre satellites ayant une orbite prograde irrégulière autour de Saturne. Leur demi-grand axe varie entre 16 et 19 millions de km, leur inclinaison entre 35° et 40°, et leur excentricité entre 0,48 et 0,53. Ces similarités indiquent que ce groupe pourrait être le résultat de la désintégration d'un objet plus grand. Les membres du groupe celte sont Albiorix, Erriapus, Bebhionn, et Tarvos. Ils portent le nom de divinités celtes. Albiorix est le plus grand du groupe avec un diamètre de plus de 30 km.

h3) Groupe nordique

Le groupe nordique est un large ensemble de lunes irrégulières de Saturne. Ces lunes ont une orbite rétrograde, dont le demi-grand axe s'étend entre 12 et 24 millions de km, l'inclinaison entre 136° et 175° et l'excentricité entre 0,13 et 0,77.

Le groupe nordique est composé de 29 lunes externes portant pour les plus caractéristiques le nom de divinités nordiques : Phœbé, Skathi, Narvi, Mundilfari, Suttungr, Thrymr, Ymir, Ægir, Bergelmir, Bestla, Farbauti, Fenrir, Fornjot, Greip, Hati, Hyrrokkin, Jarnsaxa, Kari, Loge, Skoll, Surtur, S/2004 S 7, S/2004 S 12, S/2004 S 13, S/2004 S 17, S/2006 S 1, S/2006 S 3, S/2007 S 2 et S/2007 S 3. À l'inverse des groupes inuit et celte, les paramètres orbitaux sont assez différenciés et le groupe nordique pourrait être décomposé en plusieurs sous-groupes.

Phœbé, avec ses 214 km de diamètre, est de loin le plus grand des satellites irréguliers. Son orbite est rétrograde, et il tourne sur son axe en 9,3 heures. Phœbé a été la première lune de Saturne à être observée en détail par la sonde Cassini, en juin 2004. Au cours du survol, Cassini a pu cartographier 90 % de la surface de la lune. Phœbé a une forme presque sphérique et une densité relativement élevée de 1,6 g/cm³. Les images de Cassini ont révélé une surface sombre, constellée de cratères d'impacts (environ 130 cratères de plus de 10 km de diamètre). Phœbé évolue au sein d'un anneau, ne pouvant être mis en évidence qu'en infrarouge en raison de sa faible densité. Cet anneau est particulièrement grand, d'une épaisseur de 20 fois le diamètre de Saturne, il commence à environ 6 millions de km de sa surface et se termine à 12 millions de km environ. Phœbé serait à l'origine de cet anneau lointain, alimenté par la poussière arrachée au satellite lors d'impacts météoritiques. Il serait également la cause de l'aspect particulier de Japet, qui a une de ses faces noire et l'autre très blanche, les poussières de l'anneau percutant la surface de Japet.

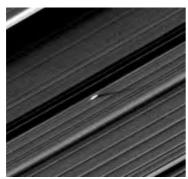
Liste complète des 62 satellites confirmés : voir la liste en Annexe I.

i) Satellites non confirmés

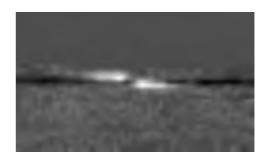
Les objets suivants (observés par Cassini) n'ont pas été confirmés comme des corps solides. Il n'est pas encore sûr que ces satellites soient réels ou simplement des amas persistants au sein de l'anneau F.

Nom	Diamètre (km)	Demi grand axe (km)	Période orbitale (j)	Position	Année de découverte
S/2004 S 6	≈ 3–5	≈ 140 130	+0,61801	Présence incertaine dans	2004
S/2004 S 3/S 4	≈ 3-5	≈ 140 300	≈ +0,619	l'anneau F	2004

j) Satellites d'hélices



La lune mineure « Earhart » de 400 mètres dans l'anneau A de Saturne, juste à l'extérieur de la lacune d'Encke



La lune Blériot

Ces mini-lunes (voir Satellites des anneaux ci-dessus) ont été informellement nommées par l'équipe de Cassini d'après des aviateurs célèbres. Parmi ces lunes, on peut citer :

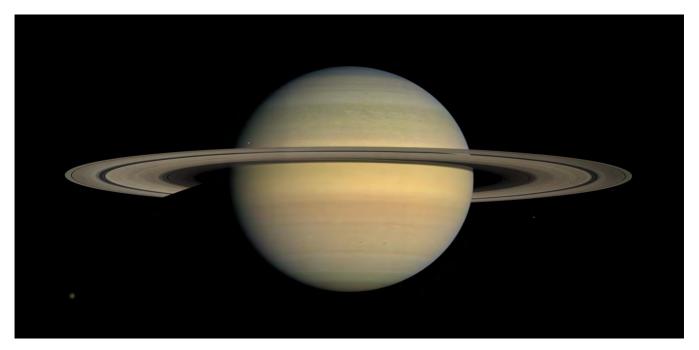
Nommés (par ordre alphabétique):

- Blériot (rayon de Hill estimé à 615 m), nommé d'après Louis Blériot
- Curtiss, nommé d'après Glenn Curtiss 0
- Earhart (rayon de Hill estimée à 370 m), nommé d'après Amelia Earhart 0
- Hinkler, nommé d'après Bert Hinkler 0
- Kingsford Smith, nommé d'après Charles Kingsford Smith 0
- Lindbergh, nommé d'après Charles Lindbergh 0
- Post, nommé d'après Wiley Post 0
- Richthofen, nommé d'après Manfred von Richthofen 0
- Santos-Dumont, nommé d'après Alberto Santos-Dumont 0
- Sikorsky, nommé d'après Igor Sikorsky 0
- Wright, nommé d'après Orville et Wilbur Wright

Numérotés mais non-nommés (observés une seule fois) :

- 116-006-A
- 035-076-0
- 070-030-A 0
- 035-296-0
- 064-163-A 0
- 070-106-0
- 070-074-A 0
- 043-069-0
- 035-153-B
- 035-193-0
- 064-076-A 0
- 064-092-0
- 064-133-A 0
- 070-136-0
- 070-028-A
- 064-222-0
- 064-114-A
- 035-189-0
- 064-007-A 0
- 035-164-0
- 043-053-A
- 064-073-0
- 043-083-A 0
- 007-199-0
- 043-212-A

Ils ont tous des diamètres estimés inférieurs à 1,2 km, les plus petits entre 50 et 100 m.



Cette photo couleur est un assemblage de 30 clichés de Cassini depuis une distance de 1,1 million de km pris au moment de l'équinoxe Saturnien. Six satellites de Saturne sont visibles : Titan, Mimas, Janus, Pandore, Épiméthée et Encelade. Saturne possède un grand nombre de satellites naturels. Il est difficile de dire combien, dans la mesure où tout morceau de glace des anneaux est techniquement un satellite et qu'il n'est pas possible de faire la distinction entre une grande particule et une petite lune.

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

La plupart des lunes connues sont petites : 31 mesurent moins de 10 km de diamètre, et 13 autres moins de 50 km. Seules sept sont suffisamment massives pour avoir pu prendre une forme sphéroïde sous leur propre gravité. Titan, la plus grande d'entre elles, plus grande que Mercure ou Pluton, est le seul satellite du Système solaire à posséder une atmosphère dense.

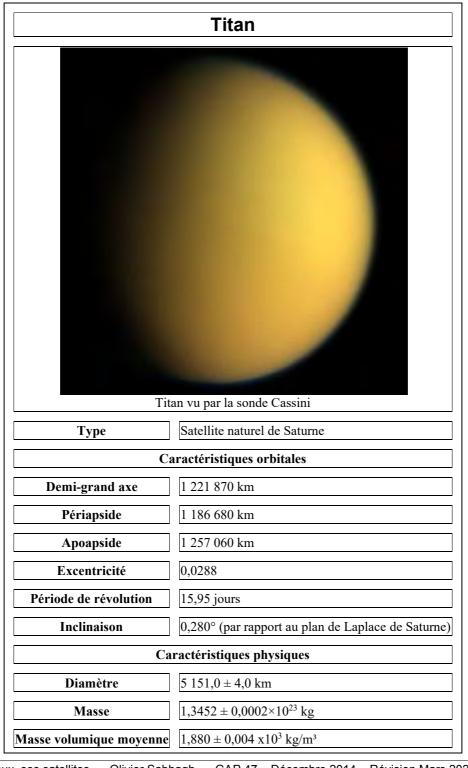
Tous les satellites pour lesquels la période de rotation est connue, à l'exception de Phœbé et d'Hypérion, sont synchrones. Les orbites des trois paires Mimas-Téthys, Encelade-Dioné et Titan-Hypérion sont en résonance : Mimas et Téthys sont en résonance 1:2 (la période de révolution de Mimas est exactement la moitié de celle de Téthys); Encelade et Dioné sont également en résonance 1:2; Titan et Hypérion sont en résonance 3:4.

Traditionnellement, la plupart des lunes de Saturne ont été nommées d'après des Titans de la mythologie grecque.

IV – Détails sur les plus gros satellites de Saturne

Il est intéressant de remarquer que, comme notre Lune, de très nombreux satellites (en général les plus gros) des planètes géantes gazeuses et notamment ceux de Saturne, sont « synchrones », c'est-àdire que leurs périodes de rotation sur eux-mêmes sont égales à leur période de révolution autour de leur planète. Ceci entraine le fait que ces satellites présentent toujours la même face à leur planète, tout comme notre Lune. En ce qui concerne Saturne, c'est le cas (entre autres), de Titan, Rhéa, Japet, Dioné, Thétis, Encelade et Mimas qui sont ses sept plus gros satellites. Les quatre plus gros satellites de Jupiter : Ganymède, Callisto, Io et Europe sont également synchrones. Beaucoup de satellites d'Uranus, particulièrement les 5 plus gros, sont synchrones : Titania, Obéron, Umbriel, Ariel et Miranda. Parmi les 14 satellites de Neptune, il n'y a qu'un seul gros satellite et il est synchrone : Triton.

a) Titan



Gravité à la surface	1,428 m/s ²	
Période de rotation	15,95 jours (synchrone)	
Albédo moyen	0,2	
Température de surface	93,7 K (- 179° C)	
Caractéristiques de l'atmosphère		
Pression atmosphérique	146,7 kPa 98,4 % N ₂ 1,6 % CH ₄	
Découverte		
Découvert par	Christian Huygens, le 25 mars 1655	

Historique Découverte



Titan est découvert le 25 mars 1655 par l'astronome hollandais Christian Huygens, inspiré par la découverte des quatre satellites de Jupiter par Galilée en 1610 à l'aide d'un télescope. Huvgens contribue lui-même à certaines avancées dans le domaine des télescopes. Il découvre Titan alors qu'il cherche à étudier les anneaux de Saturne dont la nature n'est, à cette époque, pas encore connue: il observe un point lumineux. Huygens publie sa découverte la même année dans l'ouvrage De Saturni Luna Observatio Nova

Christian Huygens

Nom

Huygens nomme sa découverte simplement Saturni Luna (ou Luna Saturni), nom latin qui signifie « lune de Saturne ». Lorsque Jean-Dominique Cassini découvre quatre autres satellites de Saturne entre 1673 et 1686, les astronomes prennent l'habitude d'appeler les cinq corps de Saturne I à Saturne V, Titan recevant le plus souvent le numéro quatre. Titan est officiellement numéroté « Saturne IV » lorsque la numérotation est gelée après 1789. Ce n'est qu'en 1847 que John Herschel, fils de William Herschel (découvreur de Mimas et Encelade en 1789), propose que les désignations numériques soient remplacées par les noms de Titans, frères et sœurs de Cronos (équivalent de Saturne dans la mythologie grecque).

Observation

Titan n'est jamais visible à l'œil nu, mais peut être observé à l'aide de petits télescopes ou de bonnes jumelles. Son observation par des amateurs est difficile à cause de la proximité du globe de Saturne et du système annulaire. C'est pourquoi les observations du satellite sont peu nombreuses avant l'âge spatial. En 1907, l'astronome espagnol Josep Comas i Solá annonce qu'il a observé un assombrissement des bords du disque de Titan et deux zones blanches et rondes en son centre. En 1940, Gerard Kuiper déduit de ses observations que Titan possède une atmosphère.

Exploration

La première sonde à visiter Saturne est *Pioneer 11* en 1979 : elle permet de déterminer que Titan est probablement trop froid pour héberger toute forme de vie. L'engin prend les premières photos de cette lune, mais celles-ci sont de faible qualité. Le premier plan rapproché de Titan est pris le 2 septembre 1979. Titan est ensuite examiné par *Voyager 1* en 1980 et *Voyager 2* en 1981. La trajectoire de *Voyager 1* est spécifiquement modifiée pour passer plus près de Titan, mais la sonde ne possède aucun instrument capable de voir à travers l'atmosphère du satellite, une caractéristique non envisagée lors de réalisation de la sonde. Plusieurs années après, un traitement intensif des images prises par *Voyager 1* à l'aide de son filtre orange suggère l'existence des régions claires et sombres connues désormais sous le nom de Xanadu et Shangri-la mais, à ce moment-là, elles ont déjà été observées dans l'infrarouge par le télescope spatial Hubble. *Voyager 2* ne passe pas à proximité de Titan. L'équipe responsable de la sonde a la possibilité de la placer soit sur une trajectoire l'amenant près du satellite soit dans la direction d'Uranus et Neptune. Du fait de l'expérience de *Voyager 1*, la deuxième option est choisie.

Titan est le plus grand satellite de Saturne. Avec un diamètre supérieur à celui de Mercure, proche de celui de Mars, Titan est par la taille le deuxième satellite du système solaire, après Ganymède. Il s'agit du seul satellite connu à posséder une atmosphère dense. Découvert par l'astronome hollandais Christian Huygens en 1655, Titan est la première lune observée autour de Saturne. Titan est principalement composé de roche et d'eau gelée. Son épaisse atmosphère a longtemps empêché l'observation de sa surface jusqu'à l'arrivée de la mission Cassini-Huvgens en 2004. Cette dernière a permis la découverte de lacs d'hydrocarbures liquides dans les régions polaires du satellite. Du point de vue géologique, la surface de Titan est jeune; quelques montagnes ainsi que des cryovolcans éventuels y sont répertoriés, mais cette surface demeure relativement plate et lisse avec peu de cratères d'impact observés. L'atmosphère de Titan est composée à 98,4 % de diazote et comporte 1,6 % de nuages de méthane et d'éthane. Le climat — qui comprend des vents et de la pluie de méthane — crée sur la surface des caractéristiques similaires à celles rencontrées sur Terre, telles des dunes et des côtes, et, comme sur la Terre, présente des saisons. Avec ses liquides (à la fois à la surface et sous la surface) et son épaisse atmosphère de diazote, Titan est perçu comme étant analogue à la Terre primitive, mais avec une température beaucoup plus basse. Le satellite est cité comme un possible hébergeur de vie extraterrestre microbienne ou, au moins, comme un environnement prébiotique riche en chimie organique complexe. Certains chercheurs suggèrent qu'un possible océan souterrain pourrait servir d'environnement favorable à la vie.

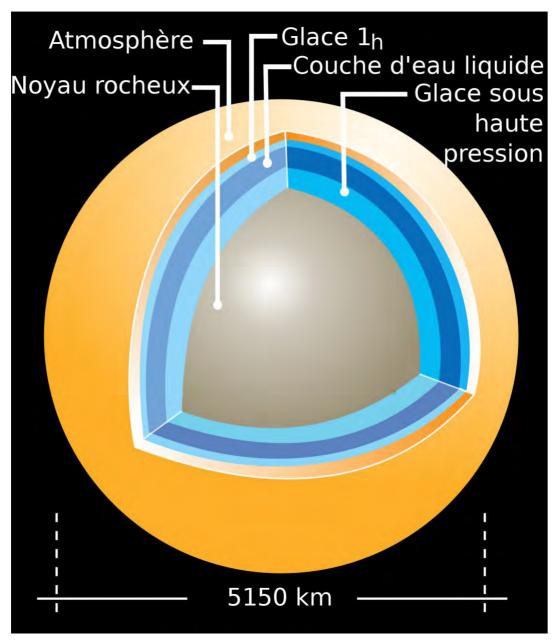
Caractéristiques physiques



Titan, comparé à la Terre

Dimensions

Titan a un diamètre de 5 151 km; en comparaison, la planète Mercure a un diamètre moyen de 4 879 km, notre Lune de 3 474 km, Mars de 6 779 km et la Terre de 12 742 km. Avant l'arrivée de *Voyager 1* en 1980, la communauté scientifique pensait Titan légèrement plus grand que Ganymède (5 262 km de diamètre), ce qui aurait fait de lui la plus grande lune du système solaire. Cette surestimation était induite par l'atmosphère dense et opaque de Titan, qui s'étend à plus de 100 kilomètres au-dessus de sa surface et augmente son diamètre apparent. Titan est donc le deuxième plus grand satellite du système solaire et le plus grand satellite de Saturne.



Structure interne de Titan

Le diamètre et la masse de Titan (et donc sa masse volumique) sont similaires à ceux des lunes galiléennes Ganymède et Callisto. Sur la base d'une masse volumique de 1,88 g·cm³, Titan serait composé à moitié de glace d'eau et à moitié de roches (silicates et fer). Ces composés plus lourds sont très peu présents en surface où la glace est le composant principal de la croûte (phénomène de différenciation). Cette glace est majoritairement de la glace d'eau mais elle est probablement mélangée avec de la glace d'ammoniac (NH₃) ainsi qu'avec des glaces d'hydrocarbures, principalement du méthane (CH₄) et de l'éthane (C₂H₆). Titan est très probablement différencié en plusieurs couches, avec un noyau rocheux de 3 400 km de diamètre entouré par plusieurs couches de différentes formes cristallines de glace. L'intérieur du satellite est peut-être toujours chaud et il est possible qu'une couche liquide d'eau et d'ammoniac existe entre la croûte de glace Ih et les couches de glaces plus internes. Un indice d'un tel océan est donné par la sonde Cassini sous la forme d'ondes radio à très basse fréquence dans l'atmosphère de Titan; on pense que la surface du satellite est un mauvais réflecteur de ce type d'ondes, lesquelles sont plutôt réfléchies par la transition liquide-glace d'un océan interne. Les données collectées par Cassini entre octobre 2005 et mai 2007 montrent que les caractéristiques de la surface se sont déplacées jusqu'à 30 km pendant cette période. Ce déplacement suggère que la croûte est séparée de l'intérieur de la lune, ce qui constitue un indice supplémentaire quant à l'existence d'un océan interne.

Atmosphère

L'atmosphère de Titan (à la différence de celle des autres satellites du système solaire) est bien développée avec une épaisseur comprise entre 200 km et 880 km (sur Terre, 99,999 % de la masse de l'atmosphère réside en dessous de 100 km d'altitude). Elle est opaque sur de nombreuses longueurs d'onde et interdit d'obtenir un spectre de réflectance complet de la surface depuis l'extérieur. Les observations des sondes Voyager montrèrent que la pression à la surface du satellite dépassait une fois et demi celle de la Terre. L'atmosphère comporte des couches de brouillard opaques qui bloquent la majorité de la lumière du Soleil. La sonde Huygens fut incapable de détecter la direction de celui-ci pendant sa descente et, bien qu'elle ait réussi à prendre des images de la surface, l'équipe de la sonde a décrit le processus comme « photographier un parking recouvert d'asphalte au crépuscule ». La température moyenne de l'atmosphère est de 94 K (-179 °C); elle atteint un minimum de 72 K (-201 °C) au niveau de la tropopause (à une altitude de 40 km).

Origine

L'énergie solaire aurait dû avoir converti l'intégralité du méthane de l'atmosphère en hydrocarbures en 50 millions d'années seulement, ce qui est une durée très brève comparée à l'âge du système solaire (4 600 millions d'années). En effet, les molécules de méthane ont tendance à remonter progressivement vers le haut de l'atmosphère où elles sont soumises au rayonnement solaire. Ceci a pour effet de les transformer en molécules plus complexes et donc plus lourdes qui retombent et sédimentent à la surface. Étant données les conditions de température et de pression à la surface de Titan, aucune réaction physique ou chimique ne permet la retransformation de ces composés organiques en méthane. En l'absence d'une autre source, celui-ci est donc irréversiblement détruit et la quantité actuelle de méthane dans l'atmosphère de Titan devrait être quasiment nulle. Il doit donc exister un réservoir de méthane sur ou dans Titan permettant de réalimenter l'atmosphère. En effet la quantité de méthane dans l'atmosphère étant plus de mille fois supérieure à celle de monoxyde de carbone, cela semble exclure une contribution significative de la part d'impacts cométaires (les comètes étant composées de plus de monoxyde de carbone que de méthane). Cette constatation est à l'origine de l'hypothèse apparue dans les années 1970 selon laquelle des réserves de méthane liquide seraient présentes à la surface ou sous la surface de Titan. Il semble également improbable que l'atmosphère de Titan date de la formation du système saturnien : car si tel était le cas, cette atmosphère contiendrait certains éléments en abondance similaire à la nébuleuse solaire, y compris de l'hydrogène et du néon. Il n'est pas non plus exclu que le méthane soit d'origine biologique.

Composition

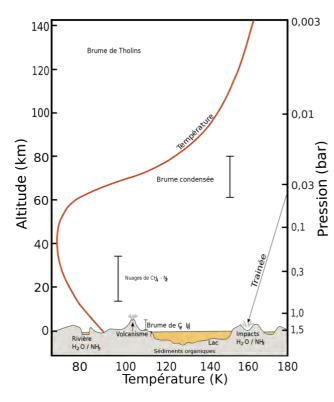
L'atmosphère de Titan est composée de 95 % à 98,4 % d'azote — c'est la seule atmosphère dense riche en azote du système solaire en dehors de la Terre —, de 1,6 % à 5 % de méthane, et de traces d'autres gaz comme des hydrocarbures (dont l'éthane, le diacétylène, le méthylacétylène, l'acétylène, le propane, le cyanoacétylène et le cyanure d'hydrogène), du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, du cyanogène, de l'argon et de l'hélium.

On pense que les hydrocarbures se forment dans la haute atmosphère, provenant de réactions de dissociation du méthane par la lumière ultraviolette du Soleil. Ces hydrocarbures produisent un épais smog orangé. Titan n'a aucun champ magnétique et orbite parfois en dehors de la magnétosphère de Saturne, l'exposant directement au vent solaire. Il est possible que certaines molécules soient ionisées et emportées en dehors de la haute atmosphère. En novembre 2007, des scientifiques ont découvert des anions lourds dans l'ionosphère de Titan et on pense qu'ils tombent vers les régions plus basses pour former le brouillard orange qui obscurcit la surface du satellite. Leur structure n'est pas connue, mais il pourrait s'agir de tholins, et ils pourraient former les bases de molécules plus complexes, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ces résidus atmosphériques pourraient avoir formé des couches plus ou moins épaisses et ainsi recouvrir certaines parties de la surface de Titan d'une sorte de goudron.

Les traces d'écoulement observées par la mission Cassini-Huygens sont bien plus sombres que le matériau sur lequel elles serpentent. Il est probable qu'elles soient recouvertes de tholins amenés par les pluies d'hydrocarbures liquides qui lessivent les parties apparaissant plus claires. Carl Sagan supposait que cette couche de tholins pourrait, grâce à l'énergie la traversant, accueillir des réactions chimiques

semblables à celles connues par notre planète au début de son histoire, réactions ayant contribué à l'apparition de la vie sur Terre. D'après ces suppositions, Titan devint un des lieux d'exploration les plus intéressants du système solaire pour l'exobiologie. Toutefois la température peut être un élément ralentissant l'apparition de la vie. Les réactions chimiques survenant dans l'atmosphère ont pour la plupart lieu à sa limite supérieure. À ce niveau, de petites molécules sont activées par le rayonnement ultraviolet du Soleil ainsi que par des particules hautement énergétiques d'origine interstellaire de telle sorte que des ions réactifs se forment. Ceux-ci conduisent à la formation d'hydrocarbures aromatiques, de composés azotés complexes et de benzène. Les particules plus lourdes, nées de cette manière, descendent lentement dans des couches profondes de l'atmosphère et forment les tholins.

Structure



Courbe de la température dans l'atmosphère de Titan en fonction de l'altitude et de la pression

La haute densité de l'atmosphère est essentiellement due aux basses températures, mais aussi aux collisions entre les molécules qui ne sont pas suffisantes pour accélérer leur vitesse et leur permettre de s'échapper dans l'espace. De plus, la chaleur générée dans la planète peut permettre l'éjection de matière dans l'atmosphère à travers les cryovolcans, rendant ainsi l'atmosphère plus épaisse.

Troposphère

La température de la troposphère va de 94 K à 72 K à la tropopause (vers 40 km d'altitude).

Stratosphère

C'est dans la stratosphère que semble se produire la majeure partie de la circulation entre les pôles. Les simulations suggèrent que tous les 12 ans la rotation de la stratosphère connaît des changements avec une période transitoire de trois ans, au cours d'une année de Titan (soit 30 années terrestres). Lors de l'hiver polaire un immense nuage se forme dans la stratosphère, qui contient de l'éthane et d'autres molécules organiques et des aérosols.

Ionosphère

L'ionosphère de Titan est plus complexe que celle de la Terre. La partie principale se situe à 1 200 km d'altitude, mais une couche additionnelle de particules chargées existe à 63 km d'altitude. L'atmosphère de Titan est donc en quelque sorte séparée en deux chambres résonnantes aux ondes radio distinctes. Titan émet des ondes à très basse fréquence dont l'origine n'est pas connue, car il ne semble pas y avoir d'activité orageuse intense.

Conditions climatiques

Circulation atmosphérique

La circulation atmosphérique suit la direction de la rotation de Titan, d'ouest en est. Les observations de l'atmosphère effectuées par *Cassini* en 2004 suggèrent que l'atmosphère tourne plus rapidement que la surface (la vitesse de rotation à l'équateur est de 12 mètres par seconde). Ce phénomène, similaire à celui connu sur Vénus, est appelé « super-rotation ». Sur la base des mesures de la vitesse des vents par Huygens pendant sa descente, des simulations ont été effectués à l'échelle du globe de Titan. Ces dernières suggèrent que l'atmosphère autour de Titans ne comporte qu'une seule, et massive, cellule de Hadley. L'air chaud monte dans l'hémisphère sud de Titan - là où se trouvait Huygens lors de sa descente - et retombe dans l'hémisphère nord. Cela conduit à une circulation de l'air à haute altitude allant du sud au nord, et de l'air à basse altitude du nord au sud. Si une seule cellule de Hadley existe sur Titan, dont la rotation est lente, alors la force de Coriolis doit être négligeable.

Climat

La température à la surface de Titan est d'environ 94 K (-179 °C). À cette température, la glace d'eau ne se sublime pas et l'atmosphère est presque entièrement dénuée de vapeur d'eau. Le brouillard de l'atmosphère contribue à un contre-effet de serre en réfléchissant la lumière du Soleil : la surface de Titan est nettement plus froide que sa haute atmosphère. Les nuages de Titan, probablement composés de méthane, d'éthane ou autres composés organiques simples, sont épars et variables et ponctuent l'ensemble du brouillard. Ce méthane atmosphérique crée quant à lui un effet de serre, sans lequel la surface de Titan serait encore plus froide. Les données de la sonde *Huygens* indiquent qu'il pleut périodiquement du méthane liquide ainsi que d'autres composés organiques depuis l'atmosphère jusqu'à la surface de la lune. En octobre 2007, des observateurs mesurent une augmentation de l'opacité apparente des nuages au-dessus de la région équatoriale de Xanadu, suggérant une « bruine de méthane », bien qu'il n'y ait aucune preuve directe de pluie.

Les simulations de la configuration des vents globale fondées sur les données de la vitesse des vents prises par *Huygens* durant sa descente ont suggéré que l'atmosphère de Titan circule dans une énorme et unique cellule de Hadley. L'air chaud monte dans l'hémisphère sud de Titan (hémisphère qui était en « été » lors de la descente de Huygens) et descend dans l'hémisphère nord. Cela entraîne un débit d'air de haute altitude du sud vers le nord et un flux d'air à basse altitude du nord au sud. Une telle cellule de Hadley n'est possible que sur un monde qui tourne lentement, ce qui est le cas de Titan. La circulation du vent de pôle à pôle semble être centrée sur la stratosphère; les simulations suggèrent qu'ils changent tous les douze ans, avec une période de transition de trois ans, au cours de l'année de Titan (30 années terrestres). Cette cellule crée une bande globale de basse pression ce qui est en effet une variation de zone de convergence intertropicale terrestre (ZCIT). Contrairement à la Terre, cependant, où les océans limitent la ZCIT aux tropiques, sur Titan, la zone se promène d'un pôle à l'autre, transportant avec lui des nuages chargés d'une pluie de méthane. Cela signifie que Titan, en dépit de ses températures glaciales, peut être considéré comme ayant un climat tropical. Le nombre de lacs de méthane visibles près du pôle sud de Titan est nettement plus petit que le nombre observé à proximité du pôle nord. Comme le pôle Sud est actuellement en été et le nord en hiver, une hypothèse se dégage selon laquelle les pluies de méthane s'abattent sur les pôles en hiver et s'en évaporent en été.

Températures

On a dit précédemment que la température de surface de Titan était d'environ -179 °C. Les températures varient peu de l'équateur aux pôles et du jour à la nuit. La température atteint rarement les -50 °C à midi.

Nuages et brume

Les hydrocarbures dans la haute atmosphère de Titan et dans les réactions résultent de la transformation du méthane par la lumière ultraviolette du Soleil, en produisant une couche opaque de brouillard. Ce brouillard a entravé les premières tentatives d'observation de la surface de Titan, stimulant ainsi la curiosité des scientifiques. La sonde *Huygens* fut incapable de détecter la direction de du Soleil pendant sa descente et, bien qu'elle ait réussi à prendre des images de la surface, l'équipe de la sonde a décrit ce processus comme « photographier un parking recouvert d'asphalte au crépuscule ». Par conséquent, il est improbable que Saturne soit visible depuis la surface de Titan. Les nuages, dispersés, sont remarquables dans un brouillard qui couvre presque toute l'atmosphère de Titan. Ces nuages sont

composés probablement de méthane, d'éthane et d'autres composés organiques simples. Les autres composés chimiques plus complexes présent en petite quantité donnent sa couleur orange à l'atmosphère depuis l'espace. La forme des nuages de méthane est limitée - ils sont proches de nos cumulus et stratus. En septembre 2006, Cassini a pris une image d'un gros nuage à une altitude de 40 km au-dessus du pôle nord de Titan. Bien que le méthane soit connu pour se condenser dans l'atmosphère de Titan, le nuage serait plus probablement composé d'éthane, car les particules détectées mesuraient seulement de 1 à 3 micromètres et que l'éthane pouvait aussi congeler à ces altitudes. En décembre 2006, Cassini a de nouveau observé la couverture nuageuse et détecté du méthane, de l'éthane et d'autres composés organiques. Le nuage mesurait plus de 2 400 km de diamètre et était toujours visible au cours d'un survol suivant un mois plus tard. Une hypothèse est qu'il pleut (ou, s'il fait suffisamment froid, qu'il neige) sur le pôle nord. Les courants descendants à des latitudes septentrionales sont assez forts pour « souffler » les particules organiques sur la surface de la lune. Ce sont là les preuves les plus solides qui plaident pour la vieille hypothèse du cycle méthanologique (analogue au cycle hydrologique terrestre) sur Titan. Les nuages ont également été trouvés dans le ciel titanien austral. Tout en couvrant généralement 1 % du disque de la lune, des explosions ont été observées dans la couverture nuageuse qui s'étend alors rapidement à pas moins de 8 %. Une hypothèse affirme que les nuages se forment lors d'accroissement de la lumière du Soleil pendant l'été titanien, générant un soulèvement dans l'atmosphère, qui contribue à la convection. Cette explication est compliquée par le fait que la formation des nuages a été observée non seulement après le solstice d'été, mais également à la mi-printemps. L'augmentation du taux d'« humidité de méthane » au pôle sud contribue éventuellement à l'augmentation rapide de la taille des nuages. Lorsque l'orbite de Saturne, qui régit le mouvement de la lune, fait pencher l'hémisphère nord vers le Soleil, donc lorsque le changement de saisons a lieu, l'éthane commence à se condenser au-dessus du pôle sud. Les modèles de recherche qui sont étayés par les observations, suggèrent que des nuages titaniens se groupent sur des zones privilégiées et que la couverture nuageuse varie selon sa distance à la surface sur les différents paysages du satellite.

Dans les régions polaires (supérieures à 60° de latitude), des nuages d'éthane répandus et durables apparaissent dans et au-dessus de la troposphère; à des latitudes inférieures, se sont principalement des nuages de méthane qui se trouvent entre 15 et 18 km d'altitude, et sont plus sporadiques et localisés. Dans l'hémisphère d'été, des nuages de méthane sont fréquents et épais mais sporadiques et semblent se regrouper autour de 40°. Les observations au sol révèlent aussi des variations saisonnières de la couverture nuageuse. Au cours de l'orbite de 30 ans de Saturne, les systèmes nuageux de Titan semblent se manifester pendant 25 ans, puis se dissiper durant les quatre à cinq années suivantes, avant de réapparaitre à nouveau.

Saisons

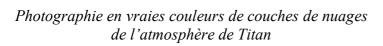
Comme la Terre, Titan connaît des saisons. Chaque saison dure 7,375 années terrestres, puisque Saturne met 29,5 années terrestres pour tourner autour du Soleil. L'observation de tempêtes au pôle Sud de Titan en juin 2005 (alors que cet hémisphère de Titan était en été) a permis de spéculer qu'une zone sombre pourrait être un réservoir de pluies de méthane sur Titan.

Cycle du méthane

Le méthane, à la température moyenne de Titan, se trouve à l'état gazeux, mais l'atmosphère de Titan détruit le méthane qui passe progressivement dans l'atmosphère supérieure dans un processus connu comme « cycle du méthane ». Cependant, les composés plus complexes du carbone, formés à partir du méthane sont liquides à ces températures. Ces composés retombent sous la forme de pluies et forment des lacs de quelques mètres de profondeur, qui peuvent être couverts par des blocs de glace d'ammoniac. Les lacs s'évaporent, mais aucun processus chimique ou physique (dans les conditions présentes sur Titan) n'autorise la retransformation de ces composés en méthane.

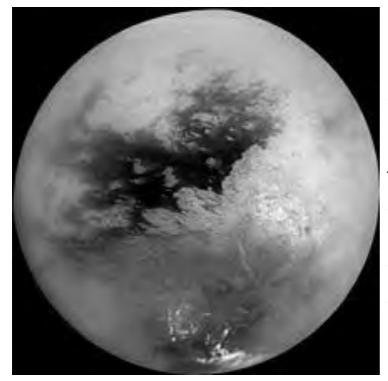
La majeure partie du méthane doit donc être originaire de la surface ou des cryovolcans qui l'acheminent vers l'atmosphère ou il se recondensera et retombera sous la forme de pluies de méthane, en complétant le cycle. Ceci signifie qu'il doit y avoir un renouvellement du méthane dans l'atmosphère. Huygens a aussi indiqué qu'il pleut périodiquement du méthane liquide (et pas un composé de ce dernier) sur la surface. Ce cycle du méthane sur Titan ressemble en partie au cycle de l'eau sur Terre.

Mais malgré cela, Titan est un monde peu approprié à être visité puisque le méthane est mortel pour l'homme et que la température est extrêmement basse. Le pôle Nord connaît beaucoup de précipitations en hiver, probablement de méthane ou d'éthane. Lors du changement de saison, le sud connaît à son tour ces pluies. Ces pluies alimentent des lacs ou des mers de méthane ou d'éthane liquide au pôle. À l'exception de l'Ontario Lacus, tous les lacs de méthane actuellement connus et portant des noms se trouvent dans l'hémisphère nord. Au site d'atterrissage de Huygens, l'humidité relative (pas celle de l'eau, mais du méthane) est de 50 %.





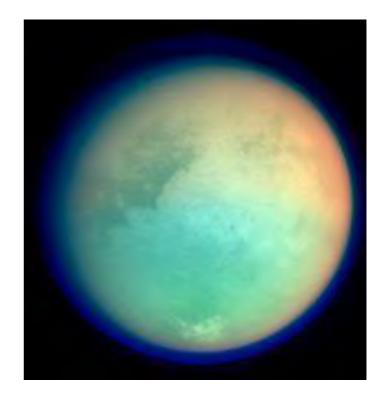
Surface



Vue de Titan par la mission Cassini, le 26 octobre 2004. Cette mosaïque de 9 images montre des variations d'éclat de la surface de Titan, et des nuages lumineux près du pôle sud. La région la plus lumineuse du côté droit et la région équatoriale portent le nom de Xanadu, tandis que la plus sombre s'appelle Shangri-la. La surface semble jeune et il n'y a pas de cratère visible. Les images de cette mosaique ont été traitées pour réduire l'effet de l'atmosphère et augmenter la netteté de la surface. L'échelle de l'image varie de 2 à 4 kilomètres par pixel.

Les détails de la surface sont plus visibles près du centre de la photo.

Les scientifiques discutent activement sur les causes possibles des processus qui ont pu créer les parties brillantes de la surface. Les images montrent une surface jeune avec aucun cratère évident. Toutefois la nature exacte de l'activité, qu'elle soit tectonique, due au vents, fluviale, marine ou volcanique reste à déterminer. Les images de cette mosaique ont été prises à des distances allant de 650.000 à 300.000 km.



Photographie de Titan en fausses couleurs, montrant des détails de la surface et de l'atmosphère. Xanadu est la région brillante située dans le centre-droit

La surface de Titan est décrite comme « complexe, produite par des fluides et géologiquement jeune ». La sonde Cassini utilise un altimètre radar et un radar à synthèse d'ouverture pour cartographier certaines zones de Titan pendant ses survols. Les premières images révèlent une géologie diversifiée, avec des régions lisses et d'autres irrégulières. D'autres semblent d'origine volcanique, probablement liées à un dégorgement d'eau mélangée à de l'ammoniac. Certaines zones sont susceptibles d'être créées par des particules poussées par le vent. Globalement, la surface est relativement plate, les quelques objets ressemblant à des cratères d'impact semblent avoir été remplis, peut-être par des pluies d'hydrocarbures ou des volcans. L'altimétrie radar suggère que les variations d'altitude sont faibles, typiquement de l'ordre de 150 m. Néanmoins certaines zones atteignent jusqu'à 500 m de dénivelé et Titan possède des montagnes, certaines hautes de plusieurs centaines de mètres, jusqu'à plus d'un kilomètre.

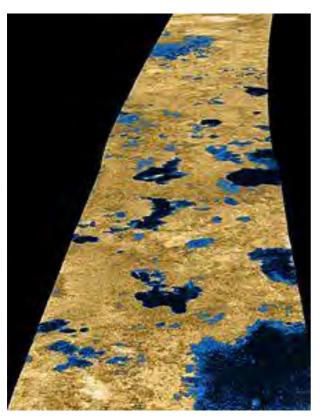
La surface de Titan est marquée par de grandes régions de terrain clair ou foncé. Parmi celles-ci, Xanadu est une zone équatoriale réfléchissante de la taille de l'Australie. Elle est identifiée pour la première fois grâce à des images prises dans l'infrarouge par le télescope spatial Hubble en 1994, puis observée par la suite par la sonde Cassini. Cette région est remplie de collines et parcourue de vallées et de gouffres. Elle est traversée par endroits par des lignes sombres sinueuses ressemblant à des crêtes ou des crevasses. Celles-ci pourraient être d'origine tectonique et indiquer que Xanadu est une zone géologiquement jeune. Il pourrait également s'agir de canaux d'origine liquide, suggérant au contraire un terrain ancien érodé par des ruisseaux. Des zones sombres de taille similaires existent ailleurs sur la lune et sont observées depuis l'espace comme depuis le sol; elles sont supposées être la trace de lacs de méthane et d'éthane, mais les observations récentes de Cassini semblent indiquer que ce n'est pas le cas.

En 2005, le module *Huygens* touche terre à l'est de la région nommée Adiri et photographie des collines pâles traversées de « rivières » sombres se dirigeant vers une plaine également sombre. Ces collines seraient composées de glace d'eau. Des composés organiques sombres, créés dans la haute atmosphère de Titan par le rayonnement ultraviolet du Soleil, pourraient pleuvoir sur ces montagnes. Ils seraient ensuite lessivés par la pluie de méthane et déposés sur les plaines.

Après s'être posé, *Huygens* photographie une plaine sombre couverte de petits rochers et de cailloux, tous deux composés de glace d'eau. Des signes d'érosion sont visibles à la base des rochers, indiquant une possible activité fluviale. La surface se révèle alors plus sombre que prévu et est composée d'un mélange d'eau et de glace d'hydrocarbures. Le « sol » visible dans les images prises par la sonde pourrait s'être formé par précipitation d'hydrocarbures. Il est possible que des régions de la surface de Titan soient recouvertes d'une couche de tholins, mais ce point n'est pas confirmé à l'heure actuelle.

Liquides

Les conditions de température et de pression à la surface de Titan permettent au méthane et à l'éthane d'exister sous forme liquide. La présence de méthane liquide à la surface permettrait d'expliquer la grande quantité de méthane dans l'atmosphère. Cette hypothèse voit le jour lorsque les planétologues se rendent compte du phénomène de destruction du méthane atmosphérique, au cours des années 1970. L'hypothèse d'un océan planétaire d'hydrocarbures est même envisagée mais les premières observations de la surface de Titan en infrarouge et en ondes radio depuis la Terre réfutent cette possibilité. Les sondes Voyager montrent que l'atmosphère de Titan est compatible avec l'existence de liquides, mais une preuve directe n'est obtenue qu'en 1995, lorsque des données de Hubble ainsi que d'autres observations suggèrent l'existence sur Titan de méthane liquide sous forme soit de poches disjointes soit de lacs et de mers de la taille d'océans.



Mosaïque en fausses couleurs d'images radar prises par Cassini autour du pôle nord de Titan, mettant en évidence des mers, lacs et rivières d'hydrocarbures. Les zones affichées ici en bleu indiquent des régions de faible réflexivité radar, probablement des étendues d'éthane liquide, de méthane ou d'azote dissout. Il est possible que la mer située dans le coin inférieur droit soit en fait deux fois plus grande qu'indiqué ici. La partie de Titan représentée fait 170 km de large.

L'existence d'océans ou de lacs de méthane liquide sur Titan a été prédite il y a plus de 20 ans. Mais, en raison des brumes denses qui empêchaient d'avoir une meilleure vision, il n'avait pas été popssible de confirmer leur présence. Les données d'images radar obtenues lors du survol apportent des preuves évidentes de grandes quantités de matière liquide. L'intensité de cette image coloriée est proportionnelle à l'intensité de la brillance des ondes radar revenues. Les couleurs ne sont pas la représentation de ce que notre œil verrait. Les lacs, plus sombres que le terrain environnant, sont colorés en bleu et bleu foncé. Les régions plus claires sont montrées en beige. Cette image a été prise par le radar de Cassini le 22 juillet 2006. Elle resprésente un terrain de 140 kilomètres de long. Les plus petits détails de cette image font environ 500 mètres.

La mission Cassini ne confirme pas immédiatement cette dernière hypothèse. En effet, lorsque la sonde arrive dans le système de Saturne en 2004, les chercheurs de la NASA et de l'ESA espèrent que des lacs d'hydrocarbures soient détectables par la réflexion du Soleil à leur surface, mais aucune réflexion spéculaire n'est initialement observée. De nombreuses images évoquant des côtes et prises par Cassini en 2004 et 2005 ne s'avèreront finalement n'être que des limites entre zones claires et zones sombres. C'est en juin 2005, au pôle sud, que le premier lac potentiel est identifié sous l'aspect d'une zone très sombre, a posteriori nommée Ontario Lacus. Ce lac a probablement été créé par les nuages qui se concentrent à cet endroit. À la suite du survol du 22 juillet 2006, Cassini image les latitudes nord du satellite et met en évidence de grandes zones lisses (et donc sombres au radar) qui constellent la surface près du pôle. Sur la base de ces observations, l'existence de lacs remplis de méthane à la surface de Titan est alors confirmée en janvier 2007. L'équipe scientifique de Cassini-Huygens conclut que les régions imagées sont selon toute vraisemblance des lacs d'hydrocarbures, les premières étendues de liquide stables découvertes en dehors de la Terre. Certaines d'entre elles gisent dans des dépressions topographiques et semblent posséder des canaux associés avec du liquide.

Cratères

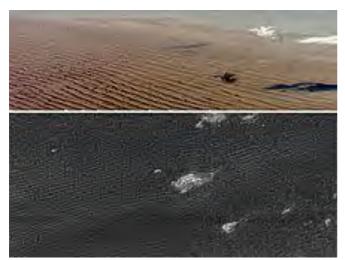
La sonde Cassini ne découvre que peu de cratères d'impact à la surface de Titan, ce qui suggère une surface jeune. Parmi les cratères découverts, les plus notables sont Menrya, le plus grand, avec un bassin de 440 km de diamètre à plusieurs anneaux, Sinlap, un cratère à fond plat de 80 km de diamètre et Ksa, un cratère de 30 km de large possédant un pic central et un plancher sombre. Cassini met également en évidence des « cratériformes », des objets circulaires à la surface de Titan qui pourraient être liés à un impact, mais qui ne possèdent pas certaines caractéristiques qui pourraient rendre leur identification certaine. Par exemple, un anneau de matériau clair de 90 km de diamètre nommé Guabonito pourrait être un cratère rempli de sédiments sombres. D'autres zones similaires sont observées dans les régions sombres Shangri-la et Aaru. Des objets circulaires sont également observés par Cassini dans la région claire nommée Xanadu lors du survol du 30 avril 2006.

Des modèles de trajectoires et d'angles d'impact réalisés avant la mission Cassini suggèrent que lors d'un impact avec la croûte d'eau glacée, une petite partie des éjectas aqueux reste à l'état liquide dans le cratère. Celle-ci pourrait demeurer à l'état liquide pendant plusieurs siècles, une durée suffisante pour la synthèse de molécules précurseurs à l'apparition de la vie. L'atmosphère de Titan pourrait également jouer un rôle de bouclier en divisant par deux le nombre de cratères à sa surface.

Cryovolcanisme et montagnes

Titan est sujet au cryovolcanisme. De l'argon-40 détecté dans l'atmosphère indique que des volcans recrachent des panaches non pas de lave mais de liquides composés d'eau et d'ammoniac. Cassini avant détecté des émissions de méthane provenant d'un cryovolcan, la communauté scientifique pense désormais que ce volcanisme est une source significative permettant la présence de méthane dans l'atmosphère. L'un des premiers objets imagés par Cassini, Ganesa Macula, ressemble à certains volcans de Vénus et est suspecté d'être d'origine cryovolcanique. La pression nécessaire pour alimenter les cryovolcans pourrait être générée par la couche de glace externe de Titan. La glace, surplombant une couche de sulfate d'ammonium liquide, pourrait flotter au-dessus et ce système instable pourrait produire des épanchements brutaux. Des grains de glace et de la cendre de sulfate d'ammonium feraient surface de cette façon. Une chaîne de montagnes mesurant 150 km de long, 30 km de large et 1,5 km de haut est découverte par Cassini en 2006. Cette chaîne, située dans l'hémisphère sud, serait composée d'un matériau glacé recouvert d'une glace de méthane. Le mouvement des plaques tectoniques, possiblement influencé par un bassin d'impact proche, pourrait avoir ouvert une brèche à travers laquelle le matériau a fait surface.

Dunes



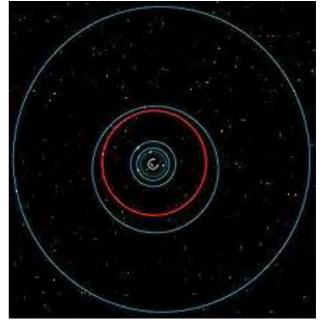
Dunes sur la Terre (en haut), comparées aux dunes observées à la surface de Titan (en bas).

Sur les premières images de la surface de Titan prises depuis la Terre au début des années 2000, de grandes régions sombres sont mises en évidence à cheval sur l'équateur. Avant l'arrivée de Cassini, les chercheurs pensent que ces régions sont des mers de matière organique, comme du goudron ou des hydrocarbures liquides. Les images radar prises par *Cassini* révèlent que certaines de ces régions sont en réalité de grandes plaines recouvertes de dunes, certaines mesurant jusqu'à 330 mètres de haut. Des dunes de ce type seraient formées par des vents modérément variables qui soufflent dans une direction

moyenne ou alternent entre deux directions distinctes. Dans le cas de Titan, des vents zonaux constants se combineraient avec des vents de marées variables. Ces derniers résultent des forces de marée de Saturne sur l'atmosphère de Titan, lesquelles sont 400 fois plus importantes que celles de la Lune sur la Terre et tendent à orienter le vent vers l'équateur.

Ces motifs de vent conduisent les dunes à se former sur de longues lignes parallèles orientées d'ouest en est. Ces dunes se brisent autour des montagnes, où la direction du vent change. Selon Athena Coustenis de l'observatoire de Paris-Meudon, ces dunes seraient au contraire formées de poussières dont la densité est bien moindre que sur Terre, où les grains de sable sont formés de silice. Des vents réguliers de faible puissance suffiraient donc à mettre les sables titaniens en mouvement. Le sable sur Titan pourrait s'être formé suite à l'écoulement du méthane liquide responsable de l'érosion du substrat de glace, peut-être sous la forme de crues. Il pourrait également provenir de solides organiques produits lors de réactions photochimiques dans l'atmosphère du satellite.

Orbite



L'orbite de Titan (en rouge) parmi les autres lunes internes principales de Saturne

Titan orbite autour de Saturne en 15 jours et 22 heures. Comme la Lune et de nombreux autres satellites des géantes gazeuses, sa période orbitale est identique à sa période de rotation: Titan est donc en rotation synchrone avec Saturne. Son excentricité orbitale atteint 0,0288 et son inclinaison 0,348° par rapport à l'équateur de Saturne. Titan est situé à 1,2 million de kilomètres de Saturne (20 rayons saturniens). Il est le 20° satellite confirmé en partant du centre de la planète, le sixième des sept satellites de la planète suffisamment grands pour posséder une forme sphérique (seul Japet est plus externe). Les orbites de Titan et Hypérion (un petit satellite irrégulier) sont en résonance 3:4 => Titan effectue quatre orbites autour de Saturne quand Hypérion en complète trois. Sur la base des modèles de formation du système saturnien, Hypérion se serait probablement formé dans cet îlot de stabilité orbitale, Titan ayant absorbé ou éjecté les objets situés en dehors.

Conditions prébiotiques et possible vie

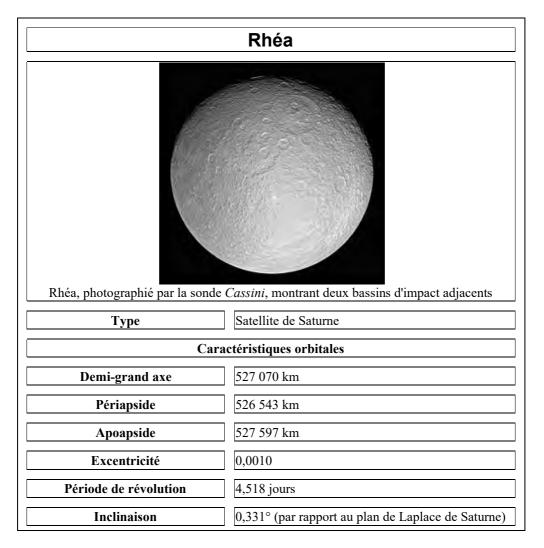
La composition actuelle de l'atmosphère de Titan semble assez proche de l'idée que l'on a de l'atmosphère primitive de la Terre, c'est-à-dire l'atmosphère de la Terre telle qu'elle était avant que les premiers êtres vivants ne commencent à libérer de l'oxygène. La présence au sein de l'atmosphère de Titan de molécules organiques complexes identiques à celles qui pourraient être à l'origine de l'apparition de la vie sur Terre fait de Titan un objet d'étude très intéressant pour les exobiologistes. L'expérience de Miller-Urey et d'autres expériences ultérieures démontrent qu'il est possible de produire des molécules complexes et des polymères comme les tholins à partir d'une atmosphère similaire à celle de Titan soumise à un rayonnement ultraviolet. Les réactions débutent par la dissociation de l'azote et du méthane, formant du cyanure d'hydrogène et de l'acétylène. Des réactions ultérieures sont le sujet de nombreuses études.

Toutes ces expériences suggèrent qu'il existe suffisamment de matière organique sur Titan pour initier une évolution chimique analogue à celle qui s'est produite sur Terre. Cette analogie suppose la présence d'eau liquide sur de plus longues périodes que ce qui est actuellement observé, mais plusieurs théories avancent que de l'eau liquide provenant d'un impact pourrait être préservée sous une couche isolante de glace. Des océans d'ammoniac liquide pourraient également exister sous la surface; un modèle suggère une couche d'eau et d'ammoniac située à 200 km de profondeur sous la croûte, des conditions qui « semblent extrêmes du point de vue terrestre, mais telles que la vie pourrait y survivre ». Les transferts de chaleur entre l'intérieur et les couches externes sont critiques dans le maintien d'une vie dans un tel océan.

La détection d'une vie microbienne sur Titan dépend de ses effets biogéniques : par exemple une origine biologique du méthane et de l'azote de l'atmosphère peut être prise en compte. L'hydrogène est cité comme une molécule capable de tester l'existence de vie sur Titan : si une forme de vie produisant du méthane consomme de l'hydrogène en volume suffisant, elle aura un effet mesurable sur leur concentration dans la troposphère.

Malgré ces possibilités, l'analogie avec la Terre est inexacte. À cette distance du Soleil, Titan est glaciale (un effet accru par l'anti-effet de serre de sa couverture nuageuse) et son atmosphère est dépourvue de dioxyde de carbone qui est gelé dans le sol, mélangé à la glace d'eau. Par contre, le méthane peut faire un effet de serre, mais seulement sur les bandes spectrales du rayonnement thermique émis à ces températures très basses. Du fait de ces contraintes, le sujet de la vie sur Titan est sans doute mieux décrit comme une expérience permettant de tester les théories traitant des conditions nécessaires précédant au développement de la vie sur Terre. Même si la vie n'y existe pas, les conditions prébiotiques de l'environnement de Titan et la possible présence d'une chimie organique, restent d'un grand intérêt dans la compréhension de l'histoire primitive de la biosphère terrestre.

b) Rhéa

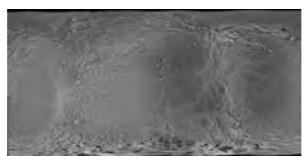


Caractéristiques physiques			
Diamètre	1 529,0±4,0 km		
Masse	2,306518×10 ²¹ kg		
Masse volumique moyenne	$1,233 \pm 0,010 \text{ x} 10^3 \text{ kg/m}^3$		
Gravité à la surface	0.264 m/s^2		
Période de rotation	4,518 jours (synchrone)		
Albédo moyen	0,6		
Température de surface	55 à 99 K (- 218 à – 174° C)		
Caractéristiques de l'atmosphère			
Pression atmosphérique	Aucune		
Découverte			
Découvert par	Cassini		
Découverte	23 décembre 1672		

Rhéa est un satellite naturel de Saturne, le deuxième plus grand satellite de la planète par la taille après Titan. Il fut découvert en 1672 par l'italien, naturalisé français, Jean-Dominique Cassini.

Cassini nomma les quatre satellites de Saturne qu'il découvrit (Japet, Téthys, Dioné et Rhéa) Sidera Lodoicea (« les étoiles de Louis » en latin) en l'honneur du roi Louis XIV de France. John Herschel proposa des noms pour les lunes, dont Rhéa qui était la femme de Cronos; lasse de ce que celui-ci dévore ses enfants, elle lui fit avaler un rocher afin de sauver son fils Zeus.

Caractéristiques physiques



Cartographie de Rhéa

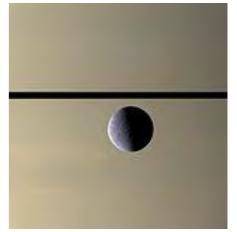
Rhéa est un corps glacé d'une masse volumique d'environ 1 233 kg·m⁻³. Cette faible valeur suggère qu'il est composée d'environ 25 % de roches (masse volumique : 3 250 kg·m⁻³) et 75 % de glace d'eau (masse volumique : 1 000 kg·m⁻³). Initialement, il était supposé que Rhéa possédait un noyau rocheux en son centre. Cependant, des mesures du moment d'inertie axial effectuées lors d'un survol de la sonde Cassini ont mis en évidence une valeur plus compatible avec un intérieur homogène (et une éventuelle compression de la glace au centre), l'existence d'un noyau rocheux impliquant une valeur de ce moment d'inertie axial. La forme générale de Rhéa concorde avec l'idée d'un corps homogène en équilibre hydrostatique. Les caractéristiques de Rhéa sont semblables à celles de Dioné, avec des hémisphères avant et arrière différenciés, ce qui laisse supposer une composition et une histoire similaires. La température à la surface de Rhéa est de - 174 °C au Soleil, et de -200 °C à -220 °C à l'ombre.

Rhéa est fortement cratérisée et sa surface est parcourue de marques claires. Celle-ci peut être divisée en deux zones géologiques différenciées par la densité des cratères : la première zone comprend des cratères de plus de 40 km de diamètre, alors que la seconde, en partie dans les régions polaires et équatoriales, est couverte de cratères de moins de 40 km de diamètre. Cela indiquerait qu'un événement majeur résultant en un resurfaçage a eu lieu durant sa formation.

L'hémisphère avant est fortement cratérisé et uniformément clair. Comme Callisto, les cratères sont dépourvus des structures au relief marqué présents sur la Lune et Mercure. L'hémisphère arrière présente un réseau de traînées claires sur un fond sombre, et peu de cratères. Ces traînées pourraient être de la matière éjectée de volcans de glace alors que Rhéa était encore liquide sous la surface.







Vue en couleurs de l'hémisphère arrière de Rhéa par Cassini

Image en plus haute résolution, montrant des falaises de glace

Rhea devant Saturne pris par Cassini

Toponymie

Les formations remarquables de la surface du satellite ont été nommées d'après des emprunts aux divers mythes de la genèse du monde. On trouve ainsi : Faro (divinité soudanaise de l'eau), Ormazd (Iran), Izanami et Izanagi (couple primordial japonais), Qat (Mélanésie), Tirawa (Amérindiens)...

Anneaux

Le 6 mars 2008, la sonde *Cassini* a rapporté des données selon lesquelles un disque de matière orbiterait autour de Rhéa. L'existence des anneaux a été déduite de la modification du flux d'électrons piégés par le champ magnétique de Saturne lorsque Cassini est passée à proximité de Rhéa. Les poussières et débris semblent s'étendre à l'extérieur de la sphère de Hill de Rhéa, mais sont plus denses près de la lune et contiendraient trois fins anneaux d'une densité encore plus élevée. Toutefois, lors d'une campagne d'observation sous plusieurs angles par la sonde Cassini, aucune trace de ces anneaux n'a pu être observée, ce qui indique qu'une autre explication doit être trouvée pour expliquer le phénomène.

Exploration

La première sonde spatiale à avoir pris des photographies de Rhéa fut Voyager 1, en novembre 1980. Rhéa a été survolé à plusieurs reprises par la sonde Cassini. Le 17 janvier 2006, la sonde a effectué un survol distant et a pris des photographies en meilleure résolution que précédemment et sous une lumière plus rasante. Ces images semblent indiquer que les raies de Rhéa sont des falaises de glace similaires à celles de Dioné. Rhéa a été photographiée à plusieurs reprises à moyenne distance par Cassini. Un survol proche fut programmé pendant la mission primaire, à la distance de 500 km, le 26 novembre 2005. Un survol proche additionnel fut réalisé le 30 août 2007 à 5 750 km de distance. Un troisième survol a eu lieu le 2 mars 2010, à 100 km d'altitude, dans le cadre de la mission Equinox au cours duquel de l'oxygène fut détecté dans l'atmosphère de la lune.

Japet



Mosaïque d'images de Japet prises par la sonde Cassini le 31/12/2004 montrant la zone sombre Cassini Regio, sa frontière avec la zone lumineuse Roncevaux Terra, plusieurs grands cratères et la crête équatoriale.

Туре	Satellite naturel de Saturne			
Caractéristiques orbitales				
Demi-grand axe	3 560 840 km			
Périapside	3 460 068 km			
Apoapside	3 661 612 km			
Excentricité	0,0283			
Période de révolution	79,33 jours			
Inclinaison	7,489° (par rapport au plan de Laplace de Saturne)			
Caractéristiques physiques				
Diamètre	1 494,8×1 424,8 km			
Masse	$1,805635 \pm 0,000375 \times 10^{21} \text{ kg}$			
Masse volumique moyenne	$1,0830 \pm 0,0066 \ x10^3 \ kg/m^3$			
Gravité à la surface	$0,223 \text{ m/s}^2$			
Période de rotation	79,33 jours (synchrone)			
Albédo moyen	0,6			
Caractéristiques de l'atmosphère				
Pression atmosphérique	Aucune			
Découverte				
Découvert par	Cassini le 25 octobre 1671			

Historique

Découverte

Japet fut découvert par Jean-Dominique Cassini en octobre 1671 sur le côté ouest de Saturne. Cassini tenta sans succès de l'observer sur le côté est de la planète au début 1672. Il observa le satellite en décembre 1672 et en février 1673, pendant une quinzaine de jours à chaque fois sur le côté ouest, mais fut également incapable de le détecter entre ces périodes, lorsqu'il aurait dû se trouver sur le côté est. Cassini finit par l'observer sur ce côté en 1705 à l'aide d'un meilleur télescope, mais constata qu'il était deux magnitudes moins lumineux que sur l'autre côté. Cassini en conclut correctement que Japet devait posséder un hémisphère sombre et un autre brillant et que sa rotation était synchrone, conservant la même face orientée vers Saturne, de telle façon que la partie brillante était visible depuis la Terre lorsque Japet se trouvait d'un côté de Saturne.

Nom

Le nom « Japetus » (ou Iapetus) fut suggéré par John Herschel (fils de William Herschel, découvreur de Mimas et Encelade en 1789) lorsqu'il proposa en 1847 que les désignations numériques soient remplacées par les noms de Titans, frères et sœurs de Cronos (équivalent de Saturne dans la mythologie grecque).

Caractéristiques physiques

Dimensions

Les mesures actuelles du diamètre de Japet suivant trois axes donnent 1 494,2 × 1 498 × 1 425,2 km, avec un diamètre moyen de 1 472 ± 2 km. Ces mesures pourraient cependant être imprécises à l'échelle du kilomètre car la totalité de la surface de la lune n'a pas été photographiée dans une résolution suffisamment élevée. À la différence de la plupart des satellites de taille comparable, Japet n'est ni sphérique, ni ellipsoïdal, mais possède un équateur protubérant et des pôles écrasés. De plus, la crête qui court le long de son équateur est tellement haute qu'elle déforme la forme de la lune, même à distance. L'aplatissement de Japet correspondrait à une période de rotation de seulement 10 heures, et non 79 jours comme observé. Il est possible que la forme de la lune ait été gelée par la formation d'une croûte épaisse peu après sa formation et que sa rotation ait été ralentie en suite par les forces de marée de Saturne jusqu'à devenir synchrone.

La masse de Japet est estimée à 1,81×10²¹ kg. Avec un rayon moyen de 736 km, la masse volumique du satellite n'est que de 1,08×10³ kg/m³, proche de celle de l'eau. Une masse volumique aussi faible, similaire à celle de Rhéa, indique que le satellite est principalement composé de glace et d'une faible quantité de matière rocheuse (environ 20 %).

Coloration

Mosaïque d'images prises par la sonde Cassini, mettant en évidence l'hémisphère brillant de Japet ainsi qu'une partie de la région sombre, visible sur la droite de l'image



La différence de couleur entre les deux hémisphères de Japet est la caractéristique principale du satellite. L'hémisphère avant, ainsi que ses côtés, sont très sombres (albédo compris entre 0,03 et 0,05) avec une légère coloration rouge-brune. L'hémisphère arrière, ainsi que les pôles, sont très brillants (albédo de 0,5 à 0,6, presque aussi brillant qu'Europe). Ainsi, la magnitude apparente de l'hémisphère brillant atteint 10,2 et celle de l'hémisphère sombre de 11,9. Le motif de coloration est analogue à un symbole yin-yang sphérique ou aux deux sections d'une balle de tennis. La partie sombre est appelée *Cassini Regio* et la partie claire *Roncevaux Terra*.

En septembre 2007, la sonde *Cassini* a survolé Japet et a montré que les deux hémisphères sont fortement recouverts de cratères. À la limite entre *Cassini Regio* et *Roncevaux Terra*, la dichotomie entre les zones brillantes et sombres existe à très petite échelle, jusqu'à la limite de résolution de 30 m de l'appareil. Du matériau sombre recouvre les zones plates et du matériau clair est situé sur les pentes des cratères faisant face aux pôles, mais aucune nuance de gris n'est visible. Ce matériau est une couche très fine, de quelques dizaines de centimètres par endroit selon le radar de *Cassini* et le fait que de petit impacts de météores l'ont traversé jusqu'à la glace sous-jacente.

On pense que le matériau sombre actuel provient d'un résidu de la sublimation de la glace d'eau de la surface de Japet, peut-être noirci par exposition à la lumière du Soleil. À cause de sa période de rotation de 79 jours (égale à sa période de révolution, et la plus longue du système saturnien), Japet possède les écarts de température de surface les plus importants entre le jour et la nuit, sans même prendre en compte les différences de couleurs. Près de l'équateur l'absorption de chaleur par le matériau sombre élève la température à 128 K le jour dans *Cassini Regio*, à comparer aux 113 K de *Roncevaux Terra*. La glace se sublime donc de préférence sur *Cassini* et précipite sur *Roncevaux* et les pôles. À l'échelle géologique des temps, toute la glace à découvert de *Cassini* a disparu vers *Roncevaux*, amplifiant encore le phénomène. On estime qu'aux températures actuelles, sur un milliard d'années, *Cassini* perd environ 20 m de glace par sublimation, tandis que *Roncevaux* n'en perd que 10 cm, sans même prendre en compte les transferts de glace entre les deux régions.

L'origine du phénomène serait cependant extérieure à Japet. On pense que le matériau sombre originel proviendrait de débris arrachés à de petites lunes rétrogrades par des impacts de météorites et agrégées sur l'hémisphère avant de Japet (situé vers le sens de sa révolution autour de Saturne). Le plus grand réservoir de matériau serait Phœbé, la plus grande lune externe de Saturne; bien que la composition de Phœbé soit plus proche de celle de l'hémisphère brillant de Japet que de son côté sombre, cette poussière aurait déclenché le processus et aurait été ensuite obscurcie par la sublimation. En 2009 est découvert un nouvel anneau de Saturne, ne pouvant être mis en évidence qu'en infrarouge en raison de sa faible densité, ce qui le rend froid et donc indétectable depuis la Terre. Au sein de cet anneau évolue Phœbé, qui serait à l'origine de cet anneau lointain, alimenté par la poussière arrachée au satellite lors d'impacts météoritiques. Ce serait donc la confirmation que Phœbé est à l'origine de l'aspect particulier de Japet.







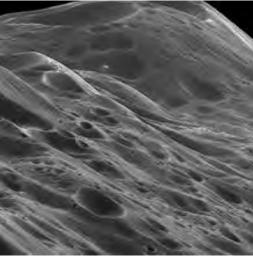
Cassini Regio

Roncevaux Terra

Gros plan sur le pôle nord

Crête équatoriale





Gros plan sur la crête équatoriale

Gros plan sur des montagnes hautes de 10 km à l'intérieur de cette crête équatoriale

Japet possède une crête équatoriale qui court au centre de Cassini Regio sur environ 1 300 km de long, 20 km de large et 13 km de haut. Elle fut découverte sur les images prises par la sonde Cassini le 31 décembre 2004 à 123 000 km de distance. Certaines parties de la crête s'élèvent à plus de 20 km audessus des plaines avoisinantes. La crête forme un système complexe contenant des pics isolés, des segments de plus de 200 km de long et des sections contenant trois crêtes presque parallèles. *Roncevaux* Terra ne possède aucune crête, mais une série de pics isolés de 10 km de haut le long de l'équateur. La crête est fortement cratérisée, indiquant qu'elle est ancienne.

L'origine de la crête n'est pas déterminée. Trois hypothèses principales ont été émises, mais aucune n'explique pourquoi elle est confinée à Cassini Regio:

- Un groupe de chercheurs associés à la mission *Cassini* a émis l'hypothèse que la crête est un résidu de la forme oblonge de Japet, lorsque le satellite tournait plus vite sur lui-même qu'actuellement. La hauteur de la crête suggère une période de rotation maximale de 17 heures. Afin de refroidir Japet suffisamment rapidement pour préserver la crête et de le conserver suffisamment plastique pour que les forces de marée de Saturne ralentissent sa période de rotation à 79 jours, Japet a dû être réchauffé par la désintégration de l'aluminium-26. Cet isotope semble avoir été abondant dans la nébuleuse solaire à partir de laquelle le système solaire s'est formé, mais s'est désintégré depuis. La quantité d'aluminium-26 nécessaire pour chauffer Japet à la température requise implique qu'il s'est formé plus tôt que prévu, seulement deux millions d'années après le début de la formation des astéroïdes.
- La crête pourrait être formée de matériau glacé remonté de sous la surface, puis solidifié.
- Il a également été suggéré que Japet aurait pu posséder un anneau pendant sa formation, du fait de sa grande sphère de Hill, et que la crête résulte de l'accrétion de cet anneau. Cependant, la crête semble trop solide pour être le résultat de l'effondrement d'un anneau. En outre, des images récentes montrent des failles d'origine tectonique la traversant, ce qui semble incohérent avec cette hypothèse.
- Fin 2010, William B. McKinnon et Andrew Dombard pensent que cette déformation provient des résidus d'un ancien petit corps orbitant autour de Japet. Les forces de marées auraient disloqué ce corps dont les débris seraient ensuite venus s'écraser sur la surface de Japet.

Cratères

Japet possède de nombreux cratères d'impact et les images prises par Cassini ont mis en évidence de grands bassins d'impact dans la région sombre, dont au moins cinq font plus de 350 km de diamètre. Le plus grand mesure plus de 500 km; son bord est extrêmement pentu et possède un escarpement de plus de 15 km de haut.

Température

La température de la surface de la région sombre atteint 130 K (-143,2 °C) à l'équateur. Les surfaces claires absorbent moins de lumière solaire et la température n'y atteint qu'environ 100 K (-173,2 °C).

Orbite

L'orbite de Japet est assez inhabituelle. Bien qu'il soit la troisième plus grande lune de Saturne, Japet orbite beaucoup plus loin que le satellite majeur le plus proche, Titan. Son plan orbital est également le plus incliné des satellites réguliers; seuls les satellites irréguliers externes, comme Phœbé, possèdent des orbites plus inclinées. La cause en est inconnue. Du fait de cette orbite lointaine et inclinée, Japet est la seule lune importante de laquelle les anneaux de Saturne seraient clairement visibles; depuis les autres satellites internes, ils seraient vus par la tranche. De Japet, Saturne mesurerait 1° 56' de diamètre (quatre fois la taille de la Lune vue de la Terre).

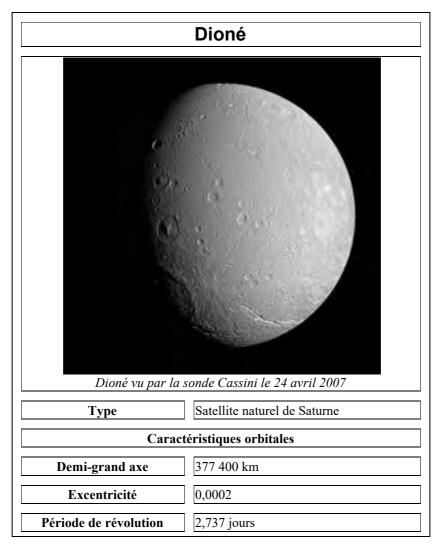
Toponymie

Japet porte le nom du titan Japet dans la mythologie grecque. Mise à part l'immense tache noire qui couvre presque la moitié du satellite et qui est baptisée « Cassini Regio » d'après le nom de son découvreur, les autres formations remarquables de la surface de Japet empruntent leur nom aux personnages de la Chanson de Roland. La région claire porte le nom de *Roncevaux Terra* et les cratères sont par exemple nommés Charlemagne, Baligant, Turgis ou Roland.

Exploration

Japet a été photographié à plusieurs reprises à moyenne distance par la sonde Cassini. L'inclinaison de son orbite rend difficile une observation proche, mais un survol a été programmé le 10 septembre 2007, à 1 227 km d'altitude, à la suite duquel les images transmises ont révélé l'existence de la crête équatoriale. La sonde ne devrait pas effectuer d'autre survol à l'avenir.

d) Dioné



Inclinaison	0,002°			
Caractéristiques physiques				
Diamètre	(à l'équateur) 1 118 km			
Masse	1,096×10 ²¹ kg			
Masse volumique moyenne	$1,50 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$			
Gravité à la surface	$0,23 \text{ m/s}^2$			
Période de rotation	2,737 jours (synchrone)			
Albédo moyen	0,6			
Température de surface	87 K (- 186° C)			
Caractéris	Caractéristiques de l'atmosphère			
Pression atmosphérique	pas d'atmosphère			
Découverte				
Découvert par	Jean-Dominique Cassini le 21 mars 1684			

Dioné est une des lunes de Saturne, découverte par Jean-Dominique Cassini (Giovanni Domenico Cassini) en 1684, la même année que Téthys.

Nom

Dioné, une nymphe Océanide et Titanide, fut l'une des femmes de Zeus précédant Héra, et eut Aphrodite et Dionysos de lui.

Description

Dioné est principalement composée d'eau sous forme de glace; mais sa densité plus élevée que celle des autres lunes de Saturne (en dehors de Titan, dont la densité est accrue par la compression gravitationnelle) laisse à penser qu'elle contient probablement une quantité assez importante de matière plus dense, telle que des roches de silicates. Dioné est similaire à Rhéa, une autre lune de Saturne, bien qu'étant légèrement plus petite. Les deux lunes ont une composition et un albédo semblables et présentent les mêmes variations de terrain; elles ont toutes deux des hémisphères avant et arrière différenciés. Sur l'hémisphère arrière de Dioné se trouve un réseau de stries claires sur un fond sombre, qui recouvrent un faible nombre de cratères d'impact visibles plus anciens. L'hémisphère avant est très cratérisé et uniformément clair. L'origine de la matière claire est quelque peu incertaine. Apparemment, il s'agit de matière d'albédo élevé suffisamment fine pour ne pas obscurcir les structures de la surface sous-jacente. Elle pourrait être due à des éruptions le long des fissures à la surface de Dioné, pour ensuite retomber à la surface sous forme de neige ou de cendre. Comme Callisto, les cratères sont dépourvus des structures au relief marqué (contrairement à ceux présents sur la Lune ou Mercure), probablement à cause de l'aplanissement de la fragile couche de glace au cours des âges. Dioné était probablement géologiquement active peu de temps après sa formation, avec certains processus comme le volcanisme glaciaire resurfaçant la majeure partie de la lune, et laissant des stries blanches sur l'ensemble de sa surface. Une fois que l'activité interne et le resurfaçage ont cessé, la formation de cratères par des corps plus petits a continué principalement sur l'hémisphère avant, y entraînant la disparition des stries.

Par le passé, l'hémisphère arrière de Dioné a été le siège d'un bombardement intense, générant des cratères de plus de 100 km de diamètre, à comparer avec les cratères plus petits de son hémisphère avant, de l'ordre de 30 km de diamètre seulement. Cet ordre des choses est contraire à l'attente de certains scientifiques. Shoemaker et Wolfe ont proposé un modèle de cratérisation pour un satellite en rotation synchrone résultant en un taux de cratérisation plus élevé pour l'hémisphère avant que pour l'hémisphère arrière. Cela voudrait dire que durant la période de bombardement intense, Dioné était en rotation synchrone avec Saturne dans l'orientation inverse d'aujourd'hui. Vu que Dioné est relativement

petite, il est possible qu'un impact provoquant un cratère d'environ 35 km ait pu renverser le satellite. Puisqu'il y a de nombreux impacts de plus de 35 km de large, Dioné peut avoir été renversée de manière répétitive durant la période de bombardement intense.



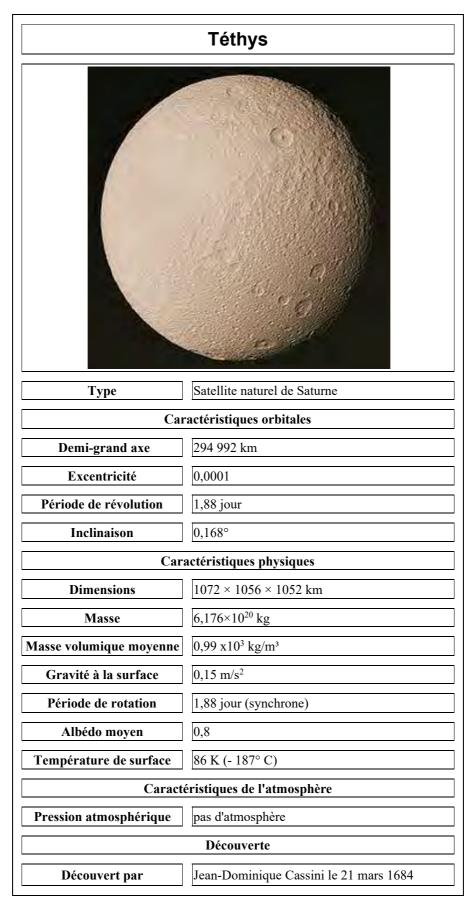
Dioné vu en couleurs par Cassini

L'agencement des cratères depuis lors ainsi que l'albédo élevé de la face avant impliquerait enfin que Dioné n'ait pas changé d'orientation depuis plusieurs milliards d'années. La lune Hélène orbite au point de Lagrange L4, 60° en avant de Dioné.

Toponymie

Les formations remarquables de Dioné ont été nommées d'après les personnages de l'Énéide de Virgile : Cassandra, Sabinus, Romulus, Remus, Dido...

e) Thétis



Téthys était la femme d'Océan et la mère des fleuves et des Océanides.

Téthys est un corps glacé, similaire en nature à Dioné et Rhéa. Sa densité, égale à celle de l'eau, indique qu'elle est principalement composée de glace. La surface de Téthys est couverte de cratères et compte de nombreuses fissures causées par des failles dans la glace. Il existe deux types de terrain sur Téthys: l'un est composé de régions fortement cratérisées; l'autre consiste en une ceinture de couleur sombre et peu cratérisée qui traverse la lune de part en part. Le faible nombre de cratères sur cette région indique que Téthys a certainement eu autrefois une activité interne, causant une remontée partielle d'un terrain plus ancien.

La raison exacte de la couleur sombre de la ceinture est inconnue, mais une interprétation possible provient des récentes images réalisées par la sonde Galileo des lunes joviennes Ganymède et Callisto, qui exhibent toutes deux des calottes polaires faites de dépôts de glace lumineux sur les pentes des cratères faisant face aux pôles. À distance, les calottes polaires semblent donc plus lumineuses à cause de ces milliers de morceaux de glace situés dans les petits cratères s'y trouvant. La surface de Téthys peut avoir une origine similaire, consistant en calottes polaires couvertes de morceaux de glace brillants indiscernables, séparés par une zone plus sombre.



Le cratère Odyssée vu par Cassini le 24 décembre 2005.

L'hémisphère occidental de Téthys est dominé par un énorme cratère d'impact nommé Odyssée, dont les 400 km de diamètre représentent près des 2/5 de Téthys. Le cratère s'est aplati et suit aujourd'hui la forme sphérique de Téthys, à la manière des cratères de Callisto, sans les grandes chaînes de montagnes en anneau et le pic central qu'on peut voir sur la Lune et Mercure, la fragile couche de glace de Téthys s'étant aplanie au cours des âges.

La seconde structure la plus visible de Téthys est une énorme vallée nommée Ithaca Chasma, large de 100 km et profonde de 3 à 5 km. Longue de 2 000 km, elle couvre près des 3/4 de la circonférence de Téthys. On pense qu'Ithaca Chasma s'est formée alors que l'eau à l'intérieur de Téthys s'est solidifiée, provoquant une expansion de la lune et un craquement de la surface pour permettre un plus grand volume intérieur. Les cratères plus anciens ayant existé avant que la lune ne se solidifie ont probablement été supprimés par l'activité géologique d'alors. Il existe une autre théorie au sujet de la formation d'Ithaca Chasma : l'impact à l'origine du grand cratère Odyssée a pu provoquer une onde de choc qui a traversé Téthys, fracturant la fragile surface glacée de la face opposée. La température à la surface de Téthys est de -187 °C.

La sonde Cassini en orbite autour de Saturne depuis le 1er juillet 2004 et toujours en activité en juillet 2007, a effectué plusieurs approches de Téthys dont l'une à moins de 1 500 km de sa surface. On attend beaucoup des résultats de l'analyse des clichés pris au travers de plusieurs filtres différents.

Les lunes co-orbitales Télesto et Calypso se trouvent sur les points de Lagrange L4 et L5, respectivement à 60 ° en avant et en arrière de Téthys sur son orbite.

Toponymie

Les formations remarquables de la surface de Téthys ont été baptisées d'après les personnages de l'œuvre d'Homère, l'Odyssée : Ithaca (Chasma (vallée)), Pénélope, Melanthius, Odysseus (cratère), Nausicaa, Telemachus, Ajax, Nestor, Laertes, Circe...

f) Encelade

Encelade (Enceladus)



Image en fausse couleur du côté opposé à Saturne prise par Cassini en 2005. Les « rayures de tigre » sont situées en bas à droite, près du terminateur

Туре	Satellite naturel de Saturne			
Caractéristiques orbitales				
Demi-grand axe	238 020 km			
Excentricité	0,004 52			
Période de révolution	1,370 jour			
Inclinaison	0,019°			
Caractéristiques physiques				
Dimensions	513 × 503 × 497 km			
Masse	8,6×10 ¹⁹ kg			
Masse volumique moyenne	1,608 x10 ³ kg/m ³			
Gravité à la surface	$0,113 \text{ m/s}^2$			
Période de rotation	1,370 jour (synchrone)			
Albédo moyen	0.99 ± 0.06			
Température de surface	moyenne 75 K (- 198° C) min. 32,9 K (- 240° C) max. 145 K (- 128° C)			
Caractéristiques de l'atmosphère				
Pression atmosphérique	vapeur d'eau : ~65 % dihydrogène : ~20 % autres : CO ₂ , CO, N ₂			
Découverte				

Découvert par

William Herschel le 28 août 1789

Encelade est un satellite naturel de la planète Saturne découvert par William Herschel en 1789. Il s'agit du sixième satellite de Saturne par la taille et du quatorzième par son éloignement.

Depuis la mission Voyager 2 et surtout la mission Cassini-Huygens arrivée en orbite saturnienne en 2004, Encelade est réputé pour posséder plusieurs caractéristiques étonnantes, dont une géologie très complexe jusque-là insoupçonnée, et une activité qui reste toujours actuellement difficile à expliquer pour un corps de si petite taille (500 km de diamètre en moyenne).

La sonde Cassini a d'ailleurs observé à sa surface des jets, qui pourraient être semblables à des geysers composés « d'une sorte d'eau carbonique mélangée à une essence de gaz naturel » selon l'agence Reuters, et qui semblent indiquer la présence d'eau liquide sous la surface. De récentes observations ont permis de confirmer cette théorie en démontrant la présence d'un océan d'eau liquide sous sa surface. Les trois ingrédients de la vie (chaleur, eau, molécules organiques) seraient donc potentiellement présents sur Encelade.

Selon les images de la sonde de Cassini, Encelade est recouvert d'une couche aux reflets bleutés, caractéristique de la neige d'eau fraîche. La neige serait épaisse d'une centaine de mètres, ce qui indique qu'il neige sur Encelade depuis au moins 100 millions d'années. Les geysers, et la source de chaleur souterraine qui les alimente, seraient donc actifs depuis très longtemps. Encelade tourne autour de Saturne au sein de l'anneau le plus externe et le plus ténu de tous, appelé anneau E; cet anneau serait alimenté en permanence en particules par les « éruptions volcaniques » actuelles (ou récentes) d'Encelade. Ce satellite est l'un des quatre seuls objets du Système solaire (avec le satellite de Jupiter, Io, celui de Neptune, Triton, et bien sûr la Terre) sur lesquels des éruptions ou des éjections de matière ont pu être directement observées.

Désignation

Il tire son nom d'Encelade, un Géant de la mythologie grecque, vaincu par Athéna lors de la Gigantomachie (la guerre des dieux contre les Géants) et enseveli sous l'île de Sicile. Le nom « Encelade » ainsi que ceux des sept satellites de Saturne connus à l'époque ont été suggérés par John Herschel, le fils du découvreur William Herschel, dans une publication de 1847.

Par la suite, les formations géologiques d'Encelade ont été nommées d'après des personnages et des lieux du recueil de contes persan Les Mille et Une Nuits.

Observation

Pour un observateur terrestre, la magnitude apparente d'Encelade à l'opposition est de +11,7, il n'est donc jamais visible à l'œil nu. Suivant les conditions d'observation et la « qualité du ciel », un télescope de 300 mm de diamètre est en général nécessaire pour réussir à l'apercevoir. Puisqu'il fait le tour de Saturne en 1,37 jour (soit un peu moins de 33 heures), il est possible, au cours d'une même nuit d'observation, de se rendre compte du mouvement d'Encelade autour de sa planète pour peu que la durée de visibilité soit suffisamment longue.

Chronologie de l'exploration d'Encelade

Avant le début des années 1980, Encelade n'avait jamais été vu autrement que comme un minuscule point blanc orbitant autour de Saturne. Les seules données connues étaient les caractéristiques de son orbite, et une estimation de sa masse, sa densité et son albédo. Les premières images d'Encelade prises par des engins spatiaux furent celles des deux sondes du programme Voyager. Voyager 1 ne put obtenir que des clichés lointains et de faible résolution en décembre 1980. Toutefois, le fait que ces images montraient une surface lisse, apparemment dépourvue de relief, alors qu'à des résolutions équivalentes des cratères étaient visibles à la surface de tous les autres satellites observés par Voyager 1 constituait déjà un indice de la relative jeunesse de sa surface.

En août 1981, Voyager 2 réussit à saisir des images de bien meilleure résolution, suffisamment détaillées pour révéler que, contrairement par exemple à Mimas qui possède une surface vieille, sombre et abondamment cratérisée, la surface d'Encelade est plutôt lisse, jeune et brillante, et le satellite montrait des signes évidents d'activité récente (à l'échelle de temps géologiques). Cette découverte fut à l'époque une grande surprise pour la communauté scientifique, aucun modèle ne pouvant alors expliquer qu'un corps aussi petit et aussi froid puisse être encore en activité.

L'étude détaillée d'Encelade dut ensuite attendre l'arrivée en orbite saturnienne de la sonde Cassini le 30 juin 2004. Compte tenu des observations réalisées à partir des images prises par Voyager 2, Encelade était considéré comme un objectif de première importance par les scientifiques et planificateurs de la mission Cassini, et plusieurs survols rapprochés, à des distances inférieures à 1500 km, furent programmés. Les moteurs de la sonde furent même mis à contribution pour réduire la distance de passage lors du survol du 14 juillet 2005 afin de la ramener à 172 km environ, nettement inférieure à celle initialement prévue (~1 000 km). En 2006, des geysers composés de particules très fines de glace (éjectées dans l'espace à plus 200 km de la surface) furent découverts dans la région australe d'Encelade. Pour les étudier, les scientifiques planifièrent un survol audacieux de la sonde le 12 mars 2008, à seulement 48 km de la surface, par Cassini. Les premiers résultats révélèrent une température plus élevée que prévue et la présence de composés organiques voire d'eau liquide. D'autres survols à plus basse altitude ont été programmés pour les années à venir.

Objectifs de la mission Cassini-Huygens

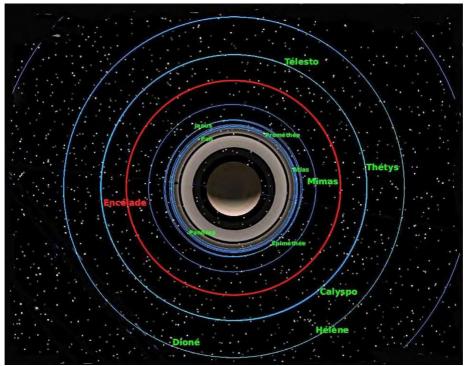
Les scientifiques de la mission Cassini-Huygens se sont fixés les objectifs principaux suivants à propos d'Encelade:

- cataloguer et analyser les caractéristiques et l'histoire géologique d'Encelade;
- définir les différents processus physiques qui ont conduit au façonnage de sa surface;
- étudier la composition et la distribution des matériaux constituant la surface, en particulier les zones sombres peut-être riches en matières organiques, ainsi que la glace;
- déterminer la composition globale et la structure interne du satellite;
- étudier les interactions d'Encelade avec la magnétosphère de Saturne et son système d'anneaux.

Caractéristiques physiques

Encelade fait partie des satellites majeurs internes du système saturnien, et se situe en quatorzième position par ordre d'éloignement à partir de Saturne; il orbite à l'intérieur de l'anneau E, le plus externe de tous, à l'endroit où la densité de matière est maximale au sein de cette couronne très large mais très ténue. Encelade se trouve de plus en résonance 2:1 avec une autre lune de Saturne, Dioné, il parcourt donc exactement deux orbites pendant que Dioné de son côté fait un tour autour de la planète.

La distance moyenne entre Encelade et Saturne est d'environ 180 000 kilomètres, soit trois fois le rayon de cette planète, dont il fait le tour en 32 heures 53 minutes environ. Comme beaucoup de satellites naturels, Encelade est en rotation synchrone autour de Saturne. L'orbite d'Encelade est quasiment circulaire, avec une excentricité de seulement 0,0045, et est inclinée de 0,019° par rapport au plan de l'équateur de Saturne.



Représentation schématique de l'orbite d'Encelade (en rouge) autour de Saturne, vue par dessus

Forme et dimensions



Comparaison à l'échelle de la taille d'Encelade et de celle de la Grande-Bretagne

Encelade est un satellite plutôt petit, avec un diamètre moyen de 500 km, soit presque sept fois inférieur à celui de la Lune. Ces dimensions réduites lui permettraient de tenir à l'intérieur des États du Colorado ou de l'Arizona, voire de la Grande-Bretagne comme le montre l'illustration ci-dessus. Il s'agit du sixième satellite de Saturne par ordre de masse et de diamètre décroissant, après Titan (5 150 km de diamètre), Rhéa (1 530 km), Japet (1 440 km), Dioné (1 120 km) et Téthys (1 050 km). C'est également l'un des plus petits satellites sphériques du système interne, tous les autres satellites plus petits ayant une forme irrégulière (mis à part Mimas avec ses 390 km de diamètre). Les dimensions précises du satellite, qui ont été calculées à l'aide des images du limbe prises par l'instrument ISS (sous-système d'imagerie scientifique) de la sonde Cassini sont de 513 (a) × 503 (b) × 497 (c) km. La dimension (a) correspond au diamètre du côté (toujours le même) tournée en direction de Saturne, (b) au diamètre du côté face à l'orbite, et (c) au diamètre entre les pôles. Encelade a donc globalement la forme d'un ellipsoïde aplati aux pôles.

Surface

Les images prises par Voyager 2 en août 1981 étaient les premières à fournir des observations topographiques intéressantes de la surface d'Encelade. L'illustration du tableau en début d'article est une mosaïque en fausse couleur des meilleurs clichés pris par la sonde. L'examen des données de Voyager a montré que la surface d'Encelade est constituée de plusieurs types de terrains, certains secteurs étant fortement cratérisés (donc vieux), tandis que d'autres sont totalement dépourvus de cratères d'impact (donc de formation récente). Ces zones, anciennes ou récentes, montrent toutes des signes de déformations très complexes et très variées, parfois de type cassant (failles, rifts...) parfois de type ductile (rides et sillons).

Compte tenu des modèles théoriques sur la fréquence des impacts météoritiques dans cette partie du Système solaire, l'absence de cratère dans les plaines montre que certaines de ces régions sont âgées de moins de 100 millions d'années, et qu'il existe donc un processus, probablement de « volcanisme aqueux », qui permet le renouvellement de la surface, et qui expliquerait que la glace « propre » reste dominante à la surface d'Encelade. La glace récente et « propre » qui recouvre la surface confère à Encelade l'albédo le plus élevé de tous les objets du Système solaire (albédo géométrique visuel de 0,99 ± 0,06). En conséquence, puisqu'il reflète la quasi-totalité du rayonnement qu'il reçoit de la part du Soleil, la température moyenne à sa surface est extrêmement faible, de l'ordre de 75 K à « midi » (soit -198 °C).

Les observations réalisées durant les trois premiers survols rapprochés d'Encelade par la sonde Cassini ont permis d'étudier les formations géologiques à sa surface avec bien plus de détails qu'auparavant, la découverte la plus spectaculaire et la plus importante étant probablement l'étrange région du pôle sud, qui semble à la fois très torturée et très active.

Désignations des caractéristiques géologiques

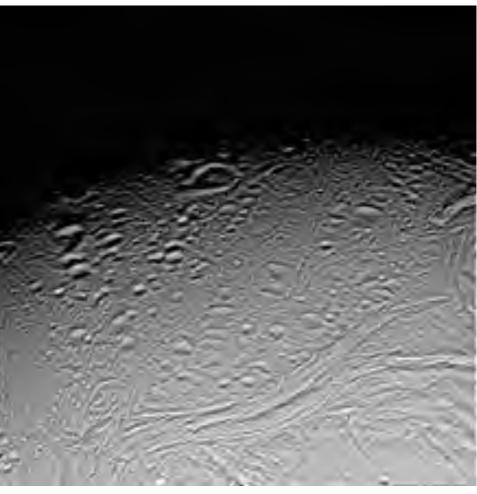
Les formations géologiques d'Encelade tirent leurs noms de personnages et de lieux présents dans le recueil de contes persans les *Mille et une nuits*. Les types de terrain suivants sont officiellement reconnus par les scientifiques :

- cratères
- fossae (singulier fossa) : dépressions ou rifts longs et étroits
- planitiae (singulier planitia) : plaines relativement dépourvues de cratères
- sulci (singulier sulcus) : longues bandes curvilignes ridées ou plissées

Ces désignations et les noms propres assignés à certaines régions ont été officiellement définis en 1982, peu de temps après le survol par *Voyager 2*. Les formations découvertes par la sonde Cassini n'ont pas encore officiellement reçu de nom.

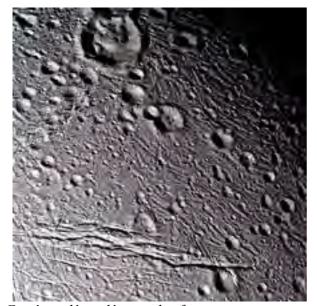
Cratères d'impact

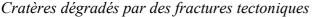
Des cratères d'impact sont présents à la surface de la plupart des objets du Système solaire, et Encelade ne fait pas exception, une bonne partie de sa surface étant couverte de cratères, la densité et le niveau de dégradation variant suivant les régions. À partir des observations de *Voyager 2*, trois types de terrain différents ont pu être identifiés : *ct1* (*cratered unit 1*), comportant de nombreux cratères déformés par relaxation visqueuse; *ct2* (*cratered unit 2*), dont les cratères sont légèrement moins nombreux et moins déformés; enfin *cp* (*cratered plains*), avec des cratères encore moins nombreux et plus petits que pour les autres régions. Bien que la densité importante des cratères de *ct1* en fasse la région la plus ancienne d'Encelade, celle-ci reste tout de même plus récente que les surfaces les plus jeunes de tout autre satellite de taille moyenne de Saturne.

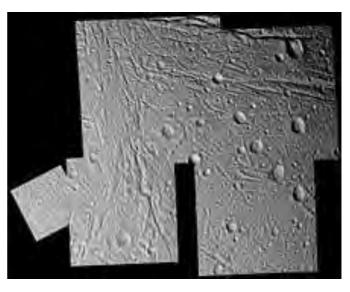


Cratères dégradés par relaxation visqueuse.
Dans la partie centrale de l'image, seules quelques traces du rebord circulaire et le centre formé en dôme permettent de deviner la présence d'anciens cratères

Les cratères d'impact sont des marqueurs importants de l'histoire géologique d'un objet, tout d'abord en indiquant à partir de quelle époque après la période de formation initiale la surface est devenue suffisamment solide pour conserver les traces des impacts; ensuite, en observant les dégradations subies par les cratères, voire l'absence totale de cratère comme c'est le cas sur certaines parties d'Encelade, ils gardent les traces chronologiques des déformations subies par la croûte du satellite depuis l'impact.







Cratères et fractures dégradés par un phénomène d'« adoucissement » des reliefs

Les observations réalisées depuis Voyager par la sonde Cassini ont permis d'obtenir beaucoup plus de détails sur ces régions cratérisées. Les images haute résolution montrent qu'une grande partie des cratères d'Encelade sont fortement dégradés, soit par relaxation visqueuse, soit par des failles apparaissant dans la croûte, ou par un processus « d'adoucissement des contours ». La relaxation visqueuse est le phénomène par lequel des cratères formés sur une croûte de glace d'eau se déforment, à des échelles de temps géologiques. La rapidité du phénomène dépend en grande partie de la température de la glace, une glace « chaude » étant moins visqueuse et, en conséquence, plus facile à déformer. Le fond des cratères ayant été déformé par relaxation visqueuse tend généralement à prendre une forme de dôme; après une très longue période, il peut ne subsister comme preuve de la présence d'un cratère que le rebord circulaire légèrement plus élevé que le sol environnant.

Se superposant au phénomène de relaxation visqueuse, la forme d'un grand nombre de cratères d'Encelade a été modifiée par des fractures tectoniques. La quasi-totalité des cratères photographiés par Cassini dans la région ct2 montrent des signes de déformations causées par des mouvements tectoniques, et notamment de nombreuses failles. Un autre phénomène tend à dégrader les cratères de la région cp et des plaines, leur donnant un aspect arrondi, les reliefs abrupts fréquents dans le cas de déformations tectoniques semblant avoir été gommés (certaines fractures affichent également ce type d'adoucissement du relief). La cause de ce phénomène n'est pas encore bien comprise, l'hypothèse la plus probable étant liée au dépôt de régolithe provenant de l'anneau E.

Tectonique

Voyager 2 a permis de découvrir plusieurs types de formations tectoniques sur Encelade, parmi lesquelles des groupes de failles linéaires et de grandes bandes ridées curvilignes. Les résultats ultérieurs obtenus par Cassini suggèrent que les mouvements tectoniques sont la principale cause de déformation de la croûte sur Encelade. L'une des manifestations les plus spectaculaires de ces mouvements tectoniques sont des rifts (appelés fossae sur Encelade) qui peuvent atteindre près de 200 km de long et 5 à 10 km de largeur, sur un kilomètre de profondeur. Ces formations semblent relativement jeunes puisqu'elles coupent à travers d'autres formations de type tectonique, et que leurs reliefs apparaissent abrupts et anguleux le long des falaises.

Autre type de déformation tectonique, les *sulci* sont de grandes bandes de « rides » et de « sillons » plus ou moins parallèles, que l'on trouve souvent à la séparation entre les régions de plaines plutôt planes et les régions de cratères. Des formations du même type sont observées sur Ganymède, un des satellites de Jupiter, mais contrairement à ce que l'on trouve sur ce dernier, les rides des *sulci* d'Encelade ne sont pas forcément toujours bien parallèles, et de nombreuses zones présentent une forme en chevron rappelant celle de certains glaciers terrestres (mais les processus de formation sont probablement très différents).

Les images de *Cassini* ont également permis de découvrir des « taches noires », de 125 à 750 mètres de large, alignées parallèlement aux lignes de fracture.



Samarkand Sulci, traversant l'image de haut en bas par le milieu, image de la sonde Cassini

Le pôle sud et sa région

L'inventaire des différentes formations de la surface d'Encelade montre que celle-ci a été modelée par une histoire géologique à la fois longue et complexe, dont l'épisode le plus récent semble lié à une région centrée sur le pôle sud. Les images prises par la sonde Cassini pendant le survol effectué le 14 juillet 2005 ont permis d'étudier en détail cette « nouvelle » région qui n'apparaissait pas clairement sur les images précédentes de *Voyager 2*.

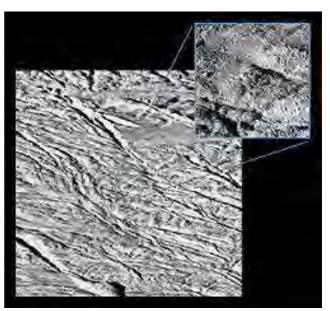
Cette zone, qui englobe le pôle sud jusqu'à une latitude de 55° sud environ, est couverte de fractures tectoniques et de failles mais ne possède aucun cratère (ou du moins aucun cratère visible avec la résolution des instruments de la sonde), suggérant ainsi qu'il s'agit de la surface la plus jeune d'Encelade. Les modèles concernant le taux théorique d'impacts dans cette région du Système solaire permettent d'en déduire que cette région serait âgée de 10 à 100 millions d'années au maximum.

Au centre de cette région se trouvent quatre grandes failles d'environ 2 km de large sur 130 km de long et 500 mètres de profondeur. Elles sont bordées par des arêtes de 100 mètres de haut et de 2 à 4 km de large. Officieusement baptisées « rayures de tigre » et séparées d'environ 35 km, elles sont presque exactement parallèles, et une analyse attentive des images, notamment des intersections entre les différentes failles de la région, montre que ces fractures sont les plus récentes formations géologiques de la zone.

L'instrument VIMS de la sonde *Cassini* (*Visible and Infrared Mapping Spectrometer* - spectromètre dans le domaine visible et infrarouge) a montré que la matière présente autour de ces « rayures de tigre » possède un spectre différent de celui du reste de la surface d'Encelade, et a également détecté des cristaux de glace à l'intérieur des rayures, ce qui implique qu'elles sont très jeunes (moins de 1 000 ans, peut-être même seulement 10 ans). En effet, lorsque de l'eau liquide ou de la vapeur se condense en glace, il se forme de la glace cristalline. Or, l'action des rayons UV en provenance du Soleil et du rayonnement cosmique transforme en surface cette glace cristalline en glace amorphe en seulement quelques dizaines d'années. La présence de glace cristalline au niveau des « rayures de tigre » montre donc que cette glace s'est formée très récemment, soit par l'arrivée d'eau liquide qui a gelé sur place, soit par de la vapeur d'eau qui a givré.



La glace cristalline, qui apparaît en bleu sur cette image, est localisée exactement à l'emplacement des « rayures de tigre »



Gros plan d'une zone proche des « rayures de tigre ». L'image de droite a une résolution d'environ 4 mètres par pixel, et montre que la surface, très fracturée, est couverte d'énormes blocs de glace de 10 à 100 mètres de large

L'environnement de l'une de ces rayures du pôle sud a été observé à très haute résolution lors du survol du 14 juillet 2005, révélant une région extrêmement déformée par les mouvements tectoniques et couverte de gros blocs de glace dont la taille varie de 10 à 100 mètres de large. L'origine de ces blocs reste inconnue.

La frontière entre cette région très active centrée sur le pôle sud et le reste de la surface est marquée par des bandes de falaises et de vallées parallèles. La forme, l'orientation et la position de celles-ci indiquent qu'elles ont été causées par une modification de la forme globale d'Encelade, et notamment par une diminution du diamètre dans la direction de l'axe de rotation, qui pourrait être due à une modification de la période de rotation, ou bien à une réorientation du satellite engendrée par la formation d'un diapir large et peu dense dans le manteau glacé.

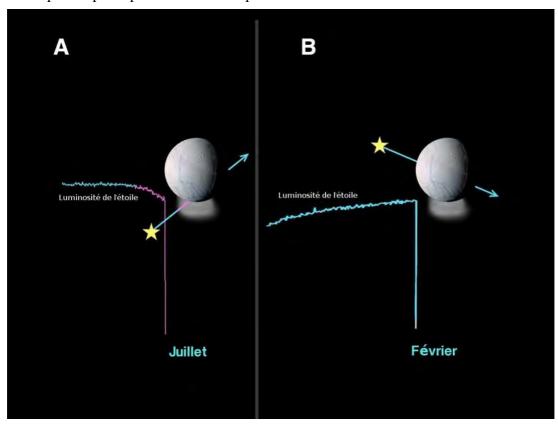
Atmosphère

À la suite du passage de *Voyager 2* au début des années 1980, les scientifiques émirent l'hypothèse qu'Encelade pourrait posséder des cryovolcans encore actifs, en se basant notamment sur la relative jeunesse de sa surface, et sur la position du satellite au cœur de l'anneau E de Saturne. Encelade semblait être la source des particules constituant celui-ci, probablement par un phénomène d'éjection de vapeur d'eau provenant des entrailles du satellite. L'une des conséquences visibles de ce cryovolcanisme actif devait être la présence d'une atmosphère, même très ténue, autour d'Encelade. Ce dernier est trop petit pour pouvoir retenir une atmosphère autour de lui par gravité, la présence d'une telle atmosphère serait donc la preuve qu'il existe un mécanisme récent ou même encore actif qui permet de la renouveler.

Les données collectées par plusieurs des instruments de la sonde Cassini ont permis de confirmer cette hypothèse. En premier lieu, le magnétomètre situé à bord de la sonde a mesuré, au cours des trois survols du 17 février, 9 mars et 14 juillet 2005, une déviation des lignes du champ magnétique de Saturne autour d'Encelade - cette déviation mesurée est cohérente avec les modèles théoriques qui prédisent qu'elle est provoquée par les courants électriques engendrés par les interactions entre les particules ionisées de l'atmosphère et le champ magnétique de la planète. Des analyses plus poussées de ces mesures ont également permis d'identifier la composition chimique des particules; dans ce cas, ce sont des molécules de vapeur d'eau ionisée qui furent observées. Lors du survol très rapproché du 14 juillet, l'équipe chargée du magnétomètre montra que les gaz de l'atmosphère d'Encelade sont concentrés au-dessus de la région du pôle sud, la densité de l'atmosphère étant beaucoup plus faible voire inexistante lorsque l'on s'éloigne de cette zone.

Ce résultat est complété par deux observations réalisées à l'aide de l'instrument UVIS (Ultraviolet Imaging Spectrograph, caméra et spectromètre dans le domaine ultraviolet) au cours de deux expériences d'occultations d'étoiles par Encelade. Lorsque l'on mesure la luminosité d'une étoile, et si la trajectoire de la sonde amène cet astre à passer derrière le satellite, la mesure de la variation de la luminosité peut indiquer la présence ou l'absence d'atmosphère. Si la luminosité de l'étoile cesse brusquement lorsque celle-ci passe derrière, alors il n'y a pas d'atmosphère visible, en revanche, si avant la disparition de l'étoile derrière le disque du satellite il y a une atténuation progressive, même légère, de la luminosité de l'étoile, c'est qu'il y a une atmosphère. La situation est symétrique lorsque l'étoile ressort de derrière Encelade.

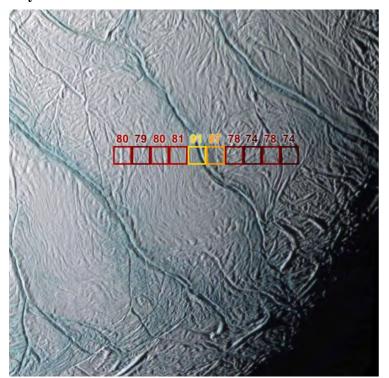
Lors du survol de février, c'est Shaula (λ Scorpii) qui fut occultée (voir schéma ci-dessous) : le suivi de la luminosité de l'étoile montre une chute brutale au moment de l'occultation, le même phénomène se répétant à la réapparition de l'autre côté d'Encelade. En revanche, lors de l'occultation le 14 juillet de Bellatrix (y Orionis), l'instrument a pu mesurer une diminution progressive de la luminosité de l'astre, au fur et à mesure qu'il se rapprochait du limbe d'Encelade près du pôle sud. La réapparition de l'étoile de l'autre côté du disque fut cette fois encore très rapide; ces deux observations montrent qu'Encelade possède bel et bien une atmosphère, mais qu'elle est très localisée, autour du pôle sud. Des analyses complémentaires du spectre de Bellatrix ont permis, en mesurant l'absorption de certaines raies spectrales bien particulières alors que l'astre était progressivement assombri, de montrer que la vapeur d'eau est le composant principal de cette atmosphère.



Représentation schématique des deux occultations d'étoiles avec en A Bellatrix le 14 juillet 2005 et en B Shaula le 17 février. La flèche montre le mouvement apparent de l'étoile derrière Encelade, et les deux courbes représentent la mesure de la luminosité des deux étoiles occultées

Pendant le survol rapproché de juillet, alors que la sonde traversait le nuage de gaz centré sur le pôle sud, l'instrument INMS (Ion and Neutral Mass Spectrometer - spectromètre de masse) détecta une nette augmentation de la quantité de vapeur d'eau (H2O), mais également du diazote (N2) et du dioxyde de carbone (CO₂). Enfin, le CDA (Cosmic Dust Analyzer - analyseur de poussières cosmiques) détecta lui aussi une augmentation du nombre de particules à l'approche d'Encelade, et notamment de microcristaux de givre, confirmant ainsi que le satellite est l'une des sources principales alimentant l'anneau E en matière. L'analyse des données du CDA et du INMS suggère que le nuage que la sonde a traversé est émis par ou très près des « rayures de tigre ».

Cryovolcanisme



Le chiffre au-dessus de chaque carré indique la température moyenne (en kelvins) de chacun. La température au niveau d'une « rayure de tigre » est de 10 à 15 K supérieure à celle des terrains environnants. Chaque carré couvre une surface de 6×6 km environ

L'atmosphère d'Encelade ne peut pas perdurer durablement sur un corps aussi petit avec une aussi faible gravité de surface (0,113 m/s², soit 0,012 fois la gravité terrestre). Si elle est encore présente, c'est qu'elle est récente et n'a pas encore eu le temps de s'échapper dans l'espace, ou qu'il existe un mécanisme permettant de la régénérer continuellement.

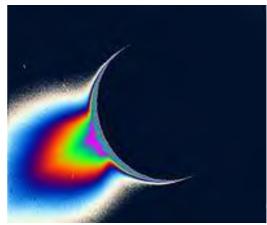
Les données acquises par les instruments INMS et CDA de Cassini ont déjà montré que cette atmosphère est située non seulement exclusivement autour du pôle sud, mais que la densité de matière est maximale aux alentours des « rayures de tigre » (voir chapitre Atmosphère). D'autres mesures effectuées à l'aide du spectromètre infrarouge de la sonde (CIRS) au cours du même survol de juillet 2005 ont mis en évidence la présence de « points chauds », situés eux aussi très près des « rayures de tigre ». La température moyenne de cette région est de 85~90 kelvins, soit une quinzaine de degrés de plus que ce que prévoit la théorie en ne tenant compte que du rayonnement reçu de la part du Soleil. De plus, en augmentant encore la résolution de la mesure, certaines régions à l'intérieur des « rayures de tigre » ont été mesurées à des températures de 140 K, bien que des températures encore plus élevées puissent exister, mais la résolution des instruments de Cassini ne permet pas de les différencier.

Les « rayures de tigre » sont donc devenus les lieux les plus probables de la source d'émission de matière dans l'atmosphère d'Encelade. La confirmation visuelle de cette émission de gaz et de poussières est venue en novembre 2005, lorsque Cassini observa des jets de particules de glace s'élevant à partir de la région du pôle sud. Les images prises à cette date montrent de nombreux jets très fins s'étendant dans toutes les directions, ainsi qu'un immense nuage de gaz, plus faible et plus diffus, qui s'étend à presque 500 km au-dessus de la surface d'Encelade. La plupart des particules de glace émises dans ces jets semblent finir par retomber à la surface, une fraction infime, environ 1 %, s'échappant finalement pour aller alimenter l'anneau E.

Ces observations montrent que, bien que le terme d'atmosphère soit toujours utilisé, celle-ci n'est en fait qu'un immense nuage de gaz et de poussières, la partie la plus diffuse des jets situés au pôle sud. Le mécanisme à l'origine de ce dégazage reste encore en bonne partie inconnu, et l'explication du phénomène dépend en grande partie du modèle utilisé pour la structure interne d'Encelade (voir cette section pour des détails). Parmi les deux hypothèses les plus développées, l'une suggère que ces jets pourraient provenir de poches de vapeur d'eau sous pression situées sous la surface, à la manière des geysers terrestres. L'autre hypothèse fait intervenir un mécanisme de sublimation de la glace de surface, réchauffée par la présence en profondeur d'une mélasse plus ou moins liquide et « chaude » composée d'eau et d'ammoniac (NH₃).



Jets de matière au-dessus du pôle sud d'Encelade



Traitement en fausses couleurs de l'image précédente, montrant la taille de la zone contenant les microparticules diffusant la lumière

Structure et composition interne

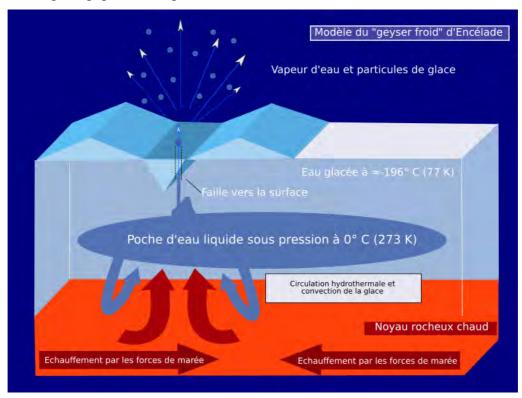
Vue en coupe de l'intérieur d'Encelade, laissant apparaître une zone d'eau liquide d'où pourrait provenir la matière s'échappant des geysers froids



L'activité géologique d'Encelade est assez étonnante pour un corps aussi petit, et l'origine de la source d'énergie déclenchant cette activité, ainsi que les modalités de celle-ci (qui impliquent la présence de liquide pour expliquer le magmatisme) restent encore aujourd'hui mal comprises. Les estimations de la masse d'Encelade réalisées à partir des données de Voyager suggéraient qu'il était composé presque exclusivement de glace d'eau. Depuis, l'équipe chargée de la navigation de la sonde Cassini a recalculé cette masse en se basant sur les effets induits sur la trajectoire de la sonde par le champ gravitationnel du satellite, conduisant à une valeur nettement plus élevée de 1,608×10³ kg/m pour la masse volumique. Cette densité est supérieure à celle des autres satellites de Saturne comparables à Encelade, et indique que la proportion de silicates et de fer (donc d'éléments radioactifs) à l'intérieur de celui-ci est plus importante que pour les autres. Ainsi, l'intérieur d'Encelade pourrait avoir connu un épisode de réchauffement plus important que ses compagnons sous l'effet des éléments radioactifs.

En ce qui concerne les processus qui gouvernent l'activité actuelle d'Encelade, l'hypothèse actuellement la plus aboutie (mars 2006) est celle dite du « geyser froid ». Selon ce modèle, les jets de vapeur et de particules de glace émanant des « rayures de tigre » proviendraient de réservoirs souterrains d'eau liquide sous pression, et s'échapperaient par des bouches de sorties ayant « percé » la croûte à cet endroit. Ces poches d'eau seraient situées à quelques dizaines de mètres sous la surface seulement. Cependant, la source de chaleur permettant à cette eau d'atteindre le point de fusion (273 K ou 0 °C) n'est que partiellement comprise. Les silicates différenciés en un noyau rocheux au centre d'Encelade contribuent pour une part au réchauffement par l'intermédiaire de la radioactivité, tout comme les frictions engendrées par les forces de marée que provoquent la présence de Saturne et des autres satellites, notamment Dioné, mais le bilan énergétique de l'ensemble est somme toute insuffisant pour

expliquer que la glace située sous la surface ait pu atteindre une telle température. Il est possible que des perturbations aient provoqué, dans un passé plus ou moins récent, des modifications de l'orbite d'Encelade, qui auraient accru de manière significative l'effet des forces de marée, notamment en « forçant » l'ellipticité de l'orbite, pour finalement accroître de manière importante la température interne du satellite. Bien qu'il ne s'agisse toujours là que d'une hypothèse, les réminiscences de cet échauffement passé, ainsi que la radioactivité et les forces marémotrices actuelles pourraient suffire à expliquer l'activité géologique contemporaine.



Modèle dit du « geyser froid ». De l'eau s'échappe de poches situées en profondeur à une température proche du point de fusion (273 K), pour se sublimer à la surface du satellite. La radioactivité du noyau, ainsi que l'action des forces de marée, contribuent à maintenir ces poches à température

Les modèles précédemment proposés prenaient pour hypothèse l'existence d'un niveau partiellement liquide en profondeur, entre la couche de glace superficielle et les silicates du noyau, qui serait composé d'un mélange d'eau et d'ammoniac. Le mélange eau/ammoniac présente en effet un eutectique (Un eutectique est un mélange de deux corps purs qui fond et se solidifie à température constante, contrairement aux mélanges habituels. Il se comporte en fait comme un corps pur du point de vue de la fusion), dont le point de fusion est de 170 K (à la pression atmosphérique). La composition de cet eutectique est d'1/3 d'ammoniac pour 2/3 d'eau, et, de même que pour le modèle du « geyser froid », les jets de vapeur observés seraient constitués de ce mélange remontant à la surface. Cependant, les proportions très faibles d'ammoniac mesurées par Cassini dans les jets du pôle sud semblent incompatibles avec cette hypothèse, ce qui explique qu'elle soit remise en cause, bien qu'elle ne puisse être totalement écartée.

Le 3 avril 2014, la NASA annonce que *Cassini* a détecté la présence d'un grand océan souterrain d'eau liquide sous le pôle sud du satellite, océan d'environ 500 kilomètres de large et d'une dizaine de kilomètres d'épaisseur recouvert d'une épaisse couche de glace cristallisée.

Interactions avec l'anneau E

L'anneau E est le plus externe et le plus étendu des anneaux de Saturne, ainsi d'ailleurs que de tous les anneaux planétaires du Système solaire. Bien que très ténu, il s'étend de l'orbite de Mimas à celui de Titan, sur presque un million de kilomètres de diamètre. Or les modèles théoriques montrent que cet anneau est instable sur une échelle de temps de l'ordre de 10 000 ans à un million d'années, ce qui impose que l'apport de particules soit très récent et témoigne d'une activité quasiment contemporaine à la nôtre à l'échelle planétaire.

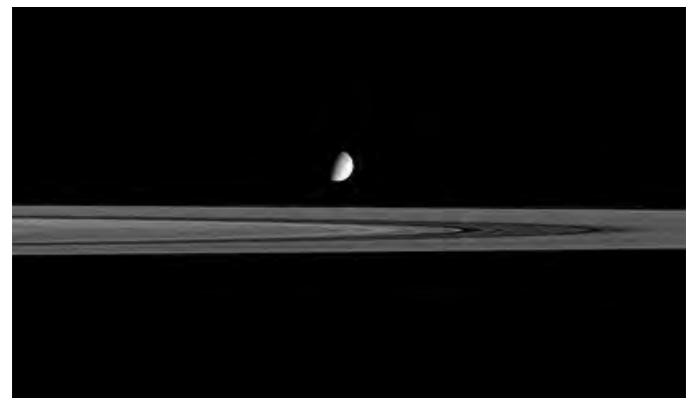
Encelade orbitant à l'intérieur de cet anneau, à l'endroit où la densité est la plus élevée et où l'anneau est le moins épais, il a longtemps été soupçonné d'être, au moins en partie, la source des poussières glacées composant l'anneau. Ceci s'est vu confirmer par les observations de la sonde Cassini, deux mécanismes bien distincts conduisant à ce transfert de matière :

- d'une part, l'émission de particules de glace d'eau sous forme de jets au pôle sud d'Encelade, qui est probablement la source principale alimentant l'anneau. Si une bonne partie des particules émises finissent par retomber à la surface, un pourcent environ de celles-ci sont éjectées avec une vitesse suffisante pour échapper définitivement à l'attraction gravitationnelle du satellite, et contribuer à alimenter l'anneau;
- d'autre part, les collisions incessantes entre Encelade et les poussières interplanétaires, ou micrométéorites, qui conduiraient à la fois à l'éjection de matière et à l'« érosion » de la surface du satellite, par la formation d'un grand nombre de micro cratères. Ce phénomène n'est pas spécifique à Encelade, mais se retrouve pour toutes les autres lunes orbitant à l'intérieur de l'anneau E.

Le ciel vu depuis Encelade

Pour un observateur situé à la surface d'Encelade, Saturne aurait un diamètre apparent de presque 30°, soit soixante fois plus grand que celui de la Lune telle qu'on la voit depuis la Terre. De plus, puisque la période de rotation et la période de révolution sidérale d'Encelade sont synchrones, Saturne occupe toujours la même position dans le ciel (avec une toute petite variation liée à l'excentricité de l'orbite autour de la planète), et donc ne serait jamais visible depuis le côté qui lui est opposé. Les anneaux quant à eux seraient vus presque exactement par la tranche grâce à la très faible inclinaison (0,019°) de l'orbite d'Encelade, mais l'ombre qu'ils projettent sur la surface de Saturne serait quant à elle nettement visible.

Comme pour la Lune également, Saturne apparaîtrait la plupart du temps sous forme d'un énorme croissant. Le Soleil vu depuis Encelade aurait en fait un diamètre apparent d'environ 3,5 minutes d'arc, presque 10 fois inférieur à celui perçu depuis la Terre. L'observateur placé sur Encelade du côté qui fait face à Saturne pourrait également voir Mimas (le plus grand des satellites dont l'orbite est située à l'intérieur de celle d'Encelade) transiter régulièrement — toutes les 72 heures environ — devant le disque de Saturne.



Encelade vu devant l'anneau B et en couleurs réelles par la sonde Cassini. L'anneau E, beaucoup trop ténu, n'est pas visible sur cette image

Mimas Mimas photographié par la sonde Cassini Satellite naturel de Saturne Type Caractéristiques orbitales Demi-grand axe 185 600 km 0,0206 Excentricité Période de révolution 0,942 jour 1,566° Inclinaison Caractéristiques physiques $418 \times 392 \times 382 \text{ km}$ **Dimensions** $3,84\times10^{19} \text{ kg}$ Masse $1,17 \text{ x} 10^3 \text{ kg/m}^3$ Masse volumique moyenne Gravité à la surface 0.064 m/s^2 Période de rotation 0,942 jour (synchrone) Albédo moyen 0,6 \simeq 85 K (\simeq - 188° C) Température de surface Caractéristiques de l'atmosphère Pression atmosphérique pas d'atmosphère Découverte William Herschel Découvert par Découverte 17 septembre 1789

Mimas est un satellite naturel de Saturne, découvert en 1789 par William Herschel. Il tire son nom de Mimas, un Géant de la mythologie grecque. Mimas est le satellite sphéroïde, parmi six autres, le plus proche de Saturne mais aussi le plus petit. Son diamètre varie de 382 à 418 km. Les 7 autres petits satellites connus situés entre son orbite et la surface de la planète géante ont tous un diamètre inférieur à 200 km, autrement dit d'une masse trop faible pour assurer une forme sphérique de cohésion. La faible densité de Mimas (1,17) laisse à penser qu'il est principalement constitué de glace d'eau avec une petite proportion de roches. Sa masse fut calculée par Hermann Struve grâce à l'effet de résonance avec Téthys, qui induit des oscillations dans les longitudes de ces deux satellites. Le rapport de celles-ci est proportionnel au rapport des masses.

Le cratère Herschel

La première chose que l'on remarque sur Mimas est l'énorme cratère d'impact de 130 km de diamètre qui porte le nom du découvreur de Mimas, Herschel. Ses flancs ont environ 5 km de haut; on y rencontre des gouffres de 10 km de profondeur et un pic central qui s'élève de 6 km au-dessus du plancher du cratère. Ces caractéristiques en font un exemple quasi parfait de cratère d'impact. Comme on peut le voir sur les photographies de Mimas, la ressemblance avec l'Étoile Noire du film Star Wars est assez frappante. Un cratère équivalent sur Terre n'aurait pas moins de 4 000 km de diamètre, soit plus grand que le Canada ou l'Europe entière. Le choc qui a produit ce cratère a manqué de peu de détruire totalement Mimas: la lune en est fracturée jusqu'à la face opposée au point d'impact, probablement à cause de l'onde de choc qui a dû traverser complètement le corps. Ce choc cataclysmique est sans doute à l'origine du diamètre très hétérogène de Mimas qui varie de 382 à 418 km, ce dernier étant 9,4 % supérieur à son plus petit diamètre. Mimas est un des plus petits corps sphéroïdes du système solaire. Cela peut laisser supposer que des corps de masse inférieure manqueraient, lors de leur formation, de force de cohésion pour former un sphéroïde de faible viscosité avant de se refroidir et de se solidifier. Par ailleurs, la surface de Mimas est presque totalement saturée de cratères de plus petites dimensions. Mais la répartition en est très hétérogène : on trouve un peu partout des cratères de plus de 40 km de diamètre, sauf dans la région du pôle Sud où aucun ne dépasse les 20 km. Les astronomes supposent qu'un phénomène encore à décrire a dû y effacer les cratères plus importants.

L'influence gravitationnelle de Mimas

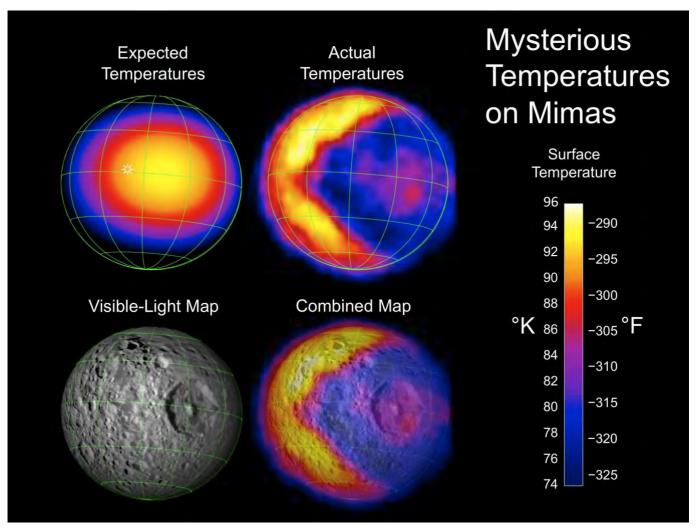
Le rôle gravitationnel de Mimas au sein du système saturnien n'est pas négligeable. Ainsi, l'orbite du satellite se trouvant en résonance avec la division de Cassini (espace large de 4 500 km situé entre les anneaux A et B de Saturne), les passages successifs de Mimas maintiendraient la faible densité de particules dans la division de Cassini qui, contrairement à d'autres divisions ou lacunes plus étroites des anneaux, n'est pas vide de matières. Mimas, par résonance également, maintiendrait la cohésion de l'anneau diffus G qui se situe juste à l'intérieur de son orbite.

Toponymie

Mis à part le cratère géant Herschel qui porte le nom du découvreur de Mimas, la nomenclature de ce petit corps s'inspire du cycle breton et anglo-normand des chevaliers de la table ronde. On y trouve ainsi : Morgane, Bors, Mordred, Bedivere, Merlin, Uther, Ygraine, Gawain, Galahad, Kay, Lancelot, Gwynevere, Tristan et Iseult...

Températures

En mars 2010, la NASA publie sur le site de la mission Cassini des images présentant la température à la surface de Mimas. La distribution obtenue diffère sensiblement de celle qui était attendue (diminuant graduellement en s'éloignant de l'équateur) avec des limites distinctes formant une image proche d'un Pac-Man gobant une pac-gomme (le cratère Herschel).



Températures mystérieuses sur Mimas

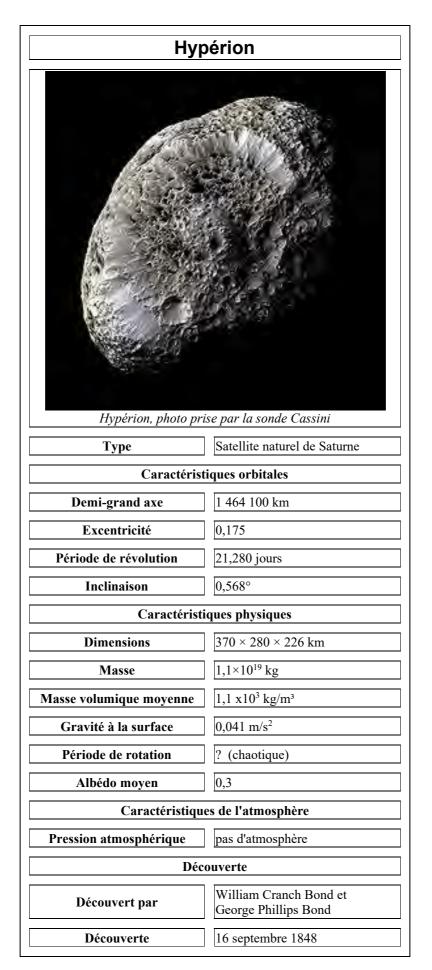
La température moyenne de la partie *chaude* approche 92 K (≃-181°C), alors que la température de la partie froide serait aux alentours de 77 K (≃-196°C). Ils expliquent ces variations de température par la présence de matériaux de conductivités thermiques différentes : la partie froide de la surface serait composée de matériaux de conductivité supérieure, absorbant l'énergie du Soleil en direction des couches inférieures au lieu de chauffer la surface elle-même. Toutefois les variations de conductivité à la surface de Mimas restent mystérieuses.

Mouvement et structure

Mimas est en rotation synchrone autour de Saturne. Mais à ce mouvement moyen se superposent des oscillations, appelées librations. Les fréquences de ces oscillations sont celles du forçage orbital agissant sur Mimas. Notamment, on y trouve les librations diurnes, dont la période (0.942 jour) est celle du mouvement orbital de Mimas autour de Saturne et ses harmoniques, ainsi que des oscillations à plus long période, dues aux perturbations gravitationnelles des autres satellites orbitant autour de Saturne. L'amplitude des librations diurnes est deux fois plus importante que prévu, c'est à dire si Mimas avait été le mélange de glace et de roches à l'équilibre hydrostatique anticipé par la communauté scientifique.

Mais cette amplitude ne corrobore pas la structure supposée. Donc, ceci permet de poser deux hypothèses quant à sa structure interne :

- soit il y a un noyau de roche de forme allongée sous le manteau de glace de Mimas;
- soit il y a un océan interne caché entre sa surface et son noyau.



Hypérion est un satellite de Saturne découvert le 16 septembre 1848 par William Cranch Bond et son fils George Phillips Bond. Deux jours plus tard, William Lassell le découvrit indépendamment. C'est ce dernier qui le baptisa, en l'honneur d'Hypérion, Titan de la lumière (un dieu solaire archaïque), fils de Gaïa et d'Uranus, père d'Hélios (le Soleil), Séléné (la Lune) et Éos (l'Aurore). C'est le plus grand corps céleste du système solaire dont la forme soit fortement irrégulière (Protée est certes plus grand, mais est quasiment sphérique).

Il semble probable qu'Hypérion soit un fragment d'un objet plus grand ayant subi un impact dans un passé lointain. Le plus grand cratère mesure approximativement 120 km de diamètre, pour une profondeur de 10 km. Comme la plupart des lunes de Saturne, la faible densité d'Hypérion indique qu'il est principalement composé de glace avec une faible quantité de roche. Cependant, à la différence des autres lunes, Hypérion a un faible albédo (0,2 à 0,3), indiquant qu'il est couvert par une fine couche de matière sombre. Il se peut que ce soit de la matière provenant de Phœbé (bien plus sombre) qui passa au-delà de Japet. Hypérion est plus rouge que Phœbé, et sa couleur coïncide avec celle de la matière sombre de Japet.



Les images de Voyager 2 ainsi que les mesures ultérieures de photométrie terrestre indiquent que la rotation d'Hypérion est chaotique, c'est-à-dire que son axe de rotation varie si fortement que son orientation dans l'espace est impossible à prédire. Hypérion est le seul objet connu du système solaire dont la rotation soit chaotique, mais les simulations semblent indiquer que, par le passé, d'autres satellites irréguliers ont eu un comportement similaire. Hypérion est unique par sa forme très irrégulière, son orbite très excentrique et sa proximité avec une autre grande lune, Titan. Ces facteurs limitent les possibilités d'une rotation stable. La résonance orbitale 3:4 entre Titan et Hypérion a probablement également un impact sur la rotation chaotique du satellite. C'est en partie grâce au grand bras de levier fourni par sa forme irrégulière que les perturbations gravitationnelles dues surtout à Titan réussissent à faire basculer de façon imprévisible son axe de rotation. La surface plus ou moins uniforme d'Hypérion est probablement due à sa rotation anormale, à la différence de la plupart des autres satellites de Saturne, qui ont des hémisphères avant et arrière très distincts.

i) Phœbé

Phœbé



Mosaïque de deux images de Phæbé prises par la sonde Cassini le 11 juin 2004

Туре	Satellite naturel de Saturne		
Caractéristiques orbitales			
Demi-grand axe	12 947 780 km		
Excentricité	0,1635		
Période de révolution	550,31 jours		
Inclinaison	175,986° (par rapport à l'écliptique)		
Caractéristiques physiques			
Dimensions	230×220×210 km		
Masse	$7,2\times10^{18}\mathrm{kg}$		
Masse volumique moyenne	$1,633 \pm 0,049 \text{ x} 10^3 \text{ kg/m}^3$		
Gravité à la surface	$0,040 \text{ m/s}^2$		
Période de rotation	0,386 jour (9 h 16 min 55 s)		
Albédo moyen	0.081 ± 0.002		
Caractéristiques de l'atmosphère			
Pression atmosphérique	aucune		
Découverte			
Découvert par	William Henry Pickering le 17 mars 1899		

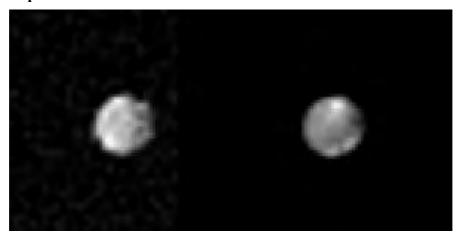
Découverte

Phœbé a été découverte par William Henry Pickering sur des plaques photographiques exposées entre le 16 et le 18 août 1898 par l'astronome américain DeLisle Stewart à la station d'observation astronomique d'Arequipa au Pérou, qui dépendait du *Harvard College Observatory*. En examinant deux de ces plaques, Pickering remarqua un objet très faiblement lumineux dont la position avait légèrement changé entre le 16 et le 18. Il retrouva alors ce même objet sur deux autres photographies datant du 16 et du 17; la position sur les deux plaques du 16 était quasiment identique, mais l'étude de son déplacement entre le 16, le 17 et le 18 montrait clairement un mouvement apparent rectiligne, exactement dans la même direction que Saturne, mais très légèrement moins rapide, ce qui démontrait qu'il s'agissait bien là d'un satellite naturel orbitant autour de cette planète. Il s'agissait du 9e satellite de Saturne à être découvert, et la nouvelle fit sensation à l'époque, puisqu'il s'agissait du premier objet du système solaire à être découvert à l'aide de l'astrophotographie. La découverte précédente d'un satellite de Saturne datait de plus de 50 ans (Hypérion en 1848), et Phœbé est restée pendant plus de 100 ans le satellite connu le plus éloigné de Saturne, jusqu'à la découverte en 2000 d'un grand nombre de nouvelles lunes par l'équipe de Brett J. Gladman.

Désignation

Le nom « Phœbé » a été proposé par William Pickering peu après sa découverte de ce satellite. En effet, cinq des neuf satellites de Saturne précédemment découverts avaient été nommés d'après les frères et les sœurs du Cronos de la mythologie grecque (que les Romains appelaient Saturne), et Phœbé est elle aussi une sœur de Cronos. Phœbé est une Titanide, fille d'Ouranos (le Ciel) et de Gaïa (la Terre), elle est mariée à son frère Céos de qui elle a pour enfants Léto et Astéria. On l'appelle aussi (moins correctement) *Phébé*. Les formations présentes à la surface de Phœbé (principalement des cratères) tirent leurs noms du mythe de Jason et des Argonautes.

Chronologie de l'exploration de Phœbé



Images de Phœbé prises par Voyager 2 le 4 septembre 1981 à une distance de 2,2 millions de kilomètres

La première sonde spatiale à avoir fourni des images de Phœbé autres qu'un minuscule point blanc est *Voyager 2*, le 4 septembre 1981. Cependant, ces images, prises à une distance de 2,2 millions de kilomètres, avaient une résolution très faible qui ne permettait pas d'étudier en détail la surface du satellite. Elles permirent néanmoins d'en évaluer le diamètre moyen à 220 kilomètres (deux fois plus que ce que les observations terrestres précédentes laissaient penser), d'estimer sa période de rotation et de montrer que sa surface est très sombre.

L'étape suivante de l'exploration de Phœbé est le survol effectué par la sonde Cassini le 11 juin 2004, alors qu'elle était en route pour Saturne. Phœbé a d'ailleurs été le premier satellite de Saturne auquel la sonde Cassini a rendu visite lors de son arrivée dans ce système planétaire, après un voyage de près de 7 ans. Ce survol, le seul durant toute la durée de la mission Cassini, s'est déroulé à une distance de seulement 2068 kilomètres au point le plus proche, et a donc permis d'obtenir une grande quantité d'informations à la fois sur la forme, les dimensions, et l'ensemble des caractéristiques physiques de la surface en général. La quasi-totalité des données actuelles sur Phœbé provient de ce survol par la sonde Cassini.

Orbite

Phœbé orbite autour de Saturne en un petit peu plus de 550 jours, plus de 18 mois (terrestres), à une très grande distance, variant entre 11 millions et 15 millions de kilomètres environ, ce qui est quatre fois plus éloigné que son plus proche voisin de taille majeure (Japet). L'orbite de Phœbé est également très inclinée, de plus de 175°. Cette valeur d'inclinaison, comme celle mentionnée dans le tableau ci-contre, est exprimée par rapport au plan de l'écliptique du système solaire plutôt qu'à celui de l'équateur de Saturne, le plan de Laplace étant lui-même fortement incliné à la distance à laquelle se trouve Phœbé (26,2°) et donc presque confondu avec le plan de l'écliptique.

La particularité principale de l'orbite de Phœbé est surtout qu'elle est rétrograde, ce satellite tournant autour de Saturne dans le sens opposé à celui de la rotation de la planète sur elle-même. Ce mouvement rétrograde est l'un des principaux indices permettant de penser que Phœbé ne s'est pas formée sur place à partir du disque protoplanétaire ayant conduit à la formation de Saturne et de la plupart de ses satellites intérieurs, mais qu'il s'agit d'un objet qui a été capturé plus tard par l'attraction gravitationnelle de la planète géante, et par interaction avec ses satellites. Phœbé a également ceci de particulier que sa rotation n'est pas synchrone, à la différence des lunes intérieures (à l'exception notable d'Hypérion).

Phœbé évolue au sein d'un anneau, ne pouvant être mis en évidence qu'en infrarouge en raison de sa faible densité. Cet anneau est particulièrement grand, d'une épaisseur de 20 fois le diamètre de Saturne, il commence à environ 6 millions de kilomètres de sa surface et se termine à 12 millions de kilomètres environ. Phœbé serait à l'origine de cet anneau lointain, alimenté par la poussière arrachée au satellite lors d'impacts météoritiques. Il serait donc également la cause de l'aspect particulier du satellite de Saturne Japet, qui a une de ses faces noire et l'autre très blanche, les poussières de l'anneau percutant la surface de Japet.

Le groupe nordique

En plus de ses nombreuses lunes intérieures, Saturne est entourée, à partir de 11 millions de kilomètres de distance environ, par trois groupes de satellites irréguliers. Le plus important est dominé par Phœbé, et est constitué de lunes rétrogrades aux orbites inclinées de 134 à 176 degrés environ. Leurs excentricités sont marquées, allant de 0,13 à 0,77, et leurs demi-grands axes varient de 11 à 24 millions de kilomètres. Les trois groupes coexistent (ou sont entremêlés, selon le point de vue) en distance, s'étendant jusqu'à 24 millions de kilomètres de Saturne.

L'union astronomique internationale a choisi de regrouper les lunes externes de Saturne en différents groupes, le regroupement étant fait sur la base des inclinaisons des orbites de chacun d'eux. Le groupe nordique, auquel Phœbé appartient, tient son nom du fait que les noms des satellites qui en font partie sont choisis parmi des divinités de la mythologie nordique (à part bien sûr Phœbé qui a été découverte bien avant). Rien ne prouve en revanche que les satellites de ces groupes soient reliés entre eux d'une autre manière que par leur inclinaison similaire, et de fait rien ne prouve à l'heure actuelle (2006) qu'ils aient une origine commune.

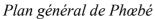
Surface, composition

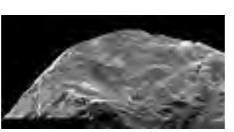
Les lunes intérieures de Saturne ont une surface très lumineuse, mais l'albédo de Phœbé est seulement de 0,08 (8 %).

Ces différents facteurs laissent penser qu'il peut s'agir d'un astéroïde capturé dont la composition n'a pas changé depuis l'époque où il s'est formé dans le système solaire lointain. Phœbé ressemble à la classe commune des astéroïdes carbonés dont la composition chimique est restée primitive, et que l'on pense être composés des matériaux solides qui se sont condensés à partir de la nébuleuse solaire : à cause de leur petite taille, ils ne se sont jamais réchauffés suffisamment pour modifier leur composition chimique. Si c'est le cas, Phœbé est le premier objet de ce type à avoir été photographié de suffisamment près pour en déterminer la forme et la luminosité.

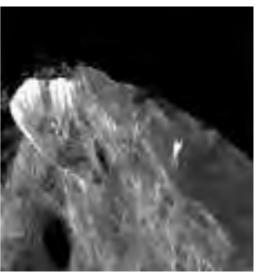
Il est possible que la matière éjectée de la surface de Phœbé par les impacts microscopiques de météorites soit responsable de la surface sombre d'Hypérion ainsi que de l'hémisphère avant de Japet.







Cette image a été obtenue à une distance de 13 000 km. I pixel représente environ 80 mètres

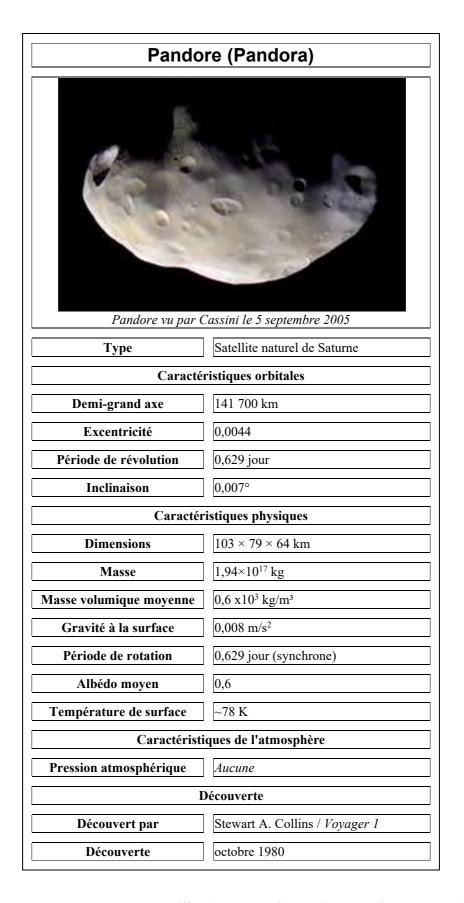


Plan rapproché sur le cratère de Jason

Origine

Phœbé serait un corps de la ceinture de Kuiper, la gravitation de Neptune l'aurait éjecté de son orbite et serait devenu un centaure (astéroïdes qui croisent l'orbite des planètes externes), il serait ensuite passé à proximité de Saturne et aurait été capturé par sa gravitation.

j) Pandore



Découverte

Pandore a été découvert par Stewart A. Collins (et D. Carlson selon certaines sources) sur des images prises par la sonde Voyager 1. Sa désignation temporaire fut S/1980 S 26. La circulaire de l'Union astronomique internationale annonçant sa découverte le 25 octobre mentionne laconiquement que Pandore et Prométhée ont été observés « à la mi-octobre ». Le satellite porte le nom de Pandore, la première femme dans la mythologie grecque.

Caractéristiques

Pandore est un petit satellite irrégulier. Il présente plus de cratères que son voisin Prométhée, au moins deux d'entre eux étant larges d'une trentaine de kilomètres. Il ne présente apparemment pas de vallées ou de falaises mais sa surface présente quelques stries caractéristiques mais non expliquées, comme on en observe sur d'autres petits corps solides du système solaire tels que Phobos ou encore Lutetia.

Sa faible densité et son albédo élevé semblent indiquer que Pandore est un astre glacé très poreux. Pandore agit comme satellite berger externe de l'anneau F de Saturne.

Liste des satellites confirmés de Saturne par taille décroissante (Satellites de plus de 20 km de diamètre)

N°	Rang en partant de la planète vers l'extérieur	Nom des satellites	Diamètre en kilomètres
1	22	Titan	5 151,00
2	21	Rhéa	1 528,60
3	24	Japet	1 471,20
4	18	Dioné	1 123,40
5	15	Téthys	1 066,00
6	14	Encelade	504,20
7	10	Mimas	396,40
8	23	Hypérion	266,00
9	27	Phœbé	214,40
10	7b	Janus	179,20
11	7a	Épiméthée	113,40
12	5	Prométhée	86,20
13	6	Pandore	80,60
14	34	Siarnaq	40,00
15	18a	Hélène	33,00
16	30	Albiorix	32,00
17	4	Atlas	30,20
18	2	Pan	28,40
19	15a	Télesto	24,80
20	28	Paaliaq	22,00
21	15b	Calypso	21,20

V – La sonde spatiale Cassini – Huygens



Saturne vue par Voyager 2

Les précurseurs : Pioneer 11 et les sondes Voyager 1 et 2

Les premiers projets américains d'exploration de Saturne et son système (anneaux et lunes) par une sonde spatiale qui se placerait en orbite autour de la planète géante remontent aux débuts des années 1970. À cette époque Pioneer 11 est en route pour le premier survol de Saturne et les sondes du programme Voyager qui doivent suivre sa trace sont en cours de développement. En 1973 le Centre de recherche Ames de la NASA fait étudier le développement d'une mission vers Saturne réutilisant les technologies développées pour Pioneer Venus et la future sonde Galileo. Les autorités scientifiques recommandent en 1975 l'envoi d'une sonde dédiée à l'étude de Saturne, ses anneaux et ses lunes, notamment Titan. Les observations depuis la Terre de cette lune, la deuxième du système solaire par la taille après Ganymède, ont permis de détecter la présence d'une atmosphère dans laquelle se trouvent des traces de méthane et sans doute d'hydrocarbures complexes qui la font ressembler à la Terre primitive. Le centre Ames commande une étude pour un engin d'exploration de Titan. Plusieurs types d'engins spatiaux sont envisagés car on sait peu de choses des caractéristiques de l'atmosphère et en particulier de sa densité. En 1976 le centre JPL de la NASA envisage dans le cadre de son programme Purple Pigeons l'envoi simultané d'un engin qui doit se poser en douceur à la surface de Titan et d'une sonde qui doit se mettre en orbite autour de Saturne préfiguration de la mission Cassini Huygens. Cet ensemble doit être lancé depuis la Navette spatiale américaine avec un étage Centaur chargé de lui donner l'impulsion lui permettant d'atteindre la planète Saturne. Pour la conception de l'atterrisseur on envisage une atmosphère dont la densité est comprise entre 20 et 100 % de l'atmosphère terrestre et un atterrissage à la surface de lacs d'hydrocarbures. Le survol du système de Saturne par Voyager 1 (1980) et Voyager 2 (1981) augmentent l'intérêt d'une mission dédiée à l'exploration de la planète géante. En ce qui concerne Titan, un des principaux objectifs du programme Voyager, les informations recueillies sont limitées car la surface de la lune est entièrement masquée par une épaisse couche de nuages. Seul un radar ou un atterrisseur pourraient percer cet obstacle. Par ailleurs le survol du système saturnien par les sondes Voyager s'est fait à grande vitesse (30 km/s) et dans ces conditions le recueil des données a été limité par la durée de la traversée du système saturnien soit une quinzaine de jours et a été largement tributaire de la trajectoire suivie. La NASA étudie dans ce contexte le lancement d'une sonde spatiale dérivée de Galileo et emportant deux engins chargés d'étudier les atmosphères de Saturne et Titan.

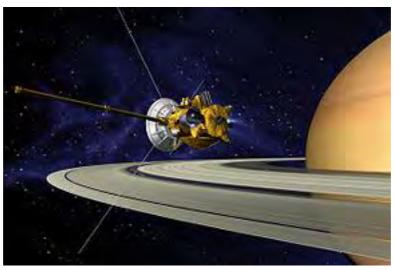
Dans le dernier quart du XX^e siècle, Saturne fut visitée par plusieurs sondes spatiales, Pioneer 11 en 1979, Voyager 1 en 1980 et Voyager 2 en 1981.

Pioneer 11 passa à 22 000 km des nuages de Saturne en septembre 1979. La sonde prit des photographies en basse résolution de la planète et de quelques-uns de ses satellites, lesquelles n'étaient pas assez bonnes pour distinguer les caractéristiques de leur surface. Elle étudia l'étalement des anneaux, découvrit l'anneau F et le fait que les divisions et lacunes ne sont pas vides de matériaux. Pioneer 11 mesura également la température de Titan.

En novembre 1980, Voyager 1 visita le système saturnien. La sonde renvoya les premières images en haute résolution de la planète, de ses anneaux et de ses satellites. Les surfaces de plusieurs lunes furent vues pour la première fois. Voyager 1 effectua un survol de Titan, accroissant les connaissances sur l'atmosphère de cette lune. Cependant, elle prouva également que cette atmosphère était imperméable aux longueurs d'onde de la lumière visible. Le survol éjecta la sonde hors du plan du Système solaire.

En août 1981, Voyager 2 continua l'étude de Saturne. Elle prit plus de gros plans des lunes et apporta des preuves d'évolution de l'atmosphère et des anneaux. Malheureusement, pendant le survol, la plateforme de caméra orientable resta coincée pendant deux jours et certaines photographies ne purent être prises selon l'angle prévu. La gravité de Saturne fut utilisée pour diriger la sonde vers Uranus (voir cette planète) qui, à son tour, la dirigea vers Neptune. Les sondes découvrirent et confirmèrent plusieurs satellites orbitant près ou à l'intérieur des anneaux de Saturne. Elles découvrirent également la lacune de Maxwell et la lacune de Keeler.

La sonde Cassini-Huygens



Vue d'artiste de l'insertion de la sonde Cassini-Huygens dans l'orbite de Saturne

Genèse du projet (1980-1989)

Au début des années 1980, Daniel Gautier de l'Observatoire de Meudon et Wing-Huan Ip de l'institut Max Planck suggèrent de développer un partenariat entre l'Europe et les États-Unis pour l'exploration de Saturne en reprenant le modèle de la mission germano-américaine Galileo. Avec 27 autres chercheurs européens, les deux hommes proposent en 1982 un projet qu'ils baptisent Cassini, en réponse à un appel à candidatures de l'Agence spatiale européenne. L'Europe doit développer l'orbiteur tandis que la NASA est chargée de la mise au point de l'atterrisseur car elle seule dispose de l'expertise nécessaire. Des contacts sont pris avec les chercheurs américains par l'intermédiaire de Tobias Owen de l'université de Hawaï. À la même époque le rapport du Comité d'exploration du système solaire de la NASA (Solar System Exploration Committee) qui fixe les objectifs de la NASA pour la décennie à venir recommande le développement de quatre missions : Venus Radar Mapper, Mars Geoscience/Climatology Orbiter, Comet RendezVous/Asteroid Flyby (CRAF) et un orbiteur chargé d'étudier Saturne. La même année la Fondation européenne de la science et la National Academy of Sciences américaine créent ensemble en 1982 un groupe de travail pour définir des projets d'exploration du système solaire communs. Ce groupe recommande le développement d'une mission d'exploration du système de Saturne comportant à la fois un orbiteur et un atterrisseur reprenant ainsi la proposition Cassini. L'orbiteur doit réutiliser la plateforme très sophistiquée en cours de développement pour la sonde Galileo qui permet l'emport d'un atterrisseur et la collecte de nombreuses informations scientifiques. Il est prévu que l'ESA développe l'atterrisseur tandis que la NASA fournit l'orbiteur. Dans ses études la NASA choisit toutefois, pour des raisons de coût, de développer une plateforme plus simple, baptisée Mariner Mark II dérivée des engins du programme Mariner. Il est prévu que celle-ci soit d'abord mise en œuvre par la mission CRAF puis par la mission vers Saturne. La prise d'une décision est toutefois repoussée à la fin de la décennie. De

1984 à 1985 la NASA et l'ESA mènent des études de faisabilité techniques sur le projet. En 1986 le rapport décennal d'exploration du système solaire publié par les instances académiques américaines (National Academy of Sciences) place en tête des priorités l'exploration de Saturne et de son système. L'ESA continuait seule les études sur le projet en 1986, alors qu'en 1987, l'astronaute Sally Ride défend l'idée d'un projet commun entre la NASA et l'ESA dans un rapport rendu sur le sujet.

L'agence spatiale européenne est la première à franchir le pas en sélectionnant le 25 novembre 1988 dans le cadre son programme scientifique Horizon 2000 l'atterrisseur Huygens chargé de se poser sur Titan parmi quatre propositions. La NASA inclut la même année dans son budget un projet groupant l'orbiteur Cassini et la sonde spatiale CRAFT qui utilisent la même plateforme mais n'obtient un feu vert financier qu'en novembre 1989 avec un budget inférieur à sa demande. Selon les premiers plans la mission devait être lancée initialement en 1994 par la Navette spatiale américaine. Mais à la suite de l'accident de la navette Challenger qui interdit l'emport de l'étage Centaur G, il faut se rabattre sur le lanceur militaire Titan IV. Trois fenêtres de lancement en décembre 1995, avril 1996 et 1997 sont identifiées et celle de 1996 est retenue. Il est prévu que la sonde spatiale ait recourt à l'assistance gravitationnelle de Vénus, la Terre et Jupiter, qu'elle effectue un survol à faible distance de l'astéroïde (66) Maja et qu'elle arrive dans le système de Saturne en 2002. La charge utile est sélectionnée simultanément en septembre 1990 par les deux agences spatiales. Il est prévu que les opérations de l'orbiteur Cassini soient contrôlées par le centre JPL de la NASA tandis que Huygens doit être piloté depuis le centre de l'ESA situé à Darmstadt. Le porteur Mariner Mark II utilisé par l'orbiteur Cassini doit comporter un module orientable permettant de pointer les instruments de télédétection et un deuxième module en rotation constante pour les instruments de mesure des champs et particules.

Conception et construction de la sonde spatiale (1990-1997)

Une première modification des plans initiaux est apportée en 1991 : le lancement est avancé en 1995. La sonde spatiale durant son transit doit utiliser l'assistance gravitationnelle à deux reprises (Vénus puis la Terre) et survoler l'astéroïde [302) Clarissa. Mais ces plans sont rapidement bouleversés par les coupures budgétaires que subit la NASA qui repoussent le lancement à 1997. Quelques mois plus tard le développement de la mission jumelle CRAFT mené conjointement par la NASA et l'agence spatiale allemande est annulé pour permettre au projet Cassini de survivre. Mais le développement de la plateforme commune Mariner Mark II, qui ne se justifie plus dans ce nouveau contexte, ne survit pas à cette annulation. En 1992 pour faire face à l'escalade des coûts du projet le concept des modules scientifiques orientables est abandonné et l'antenne grand gain est rendue fixe ce qui permet d'économiser 250 millions \$ au prix d'une sérieuse dégradation des capacités de la sonde spatiale. Celleci ne peut plus à la fois recueillir des données scientifiques et les transmettre en temps réel vers la Terre. Dans la nouvelle configuration le transfert de données comme l'utilisation de certains instruments nécessite la réorientation de la sonde spatiale toute entière. La vitesse de rotation de l'orbiteur étant 18 fois plus faible que celle envisagée pour les modules orientables, ces changements réduisent fortement la souplesse opérationnelle de Cassini. Pour étaler les coûts la sonde doit être lancée avec des logiciels incomplets dont le développement doit se poursuivre durant le voyage vers Saturne. Dans ces conditions il n'est plus prévu d'effectuer de survol d'astéroïde durant le transit. Pour réduire encore les coûts un accord est conclu entre la NASA et l'Agence spatiale italienne (l'ASI) pour que cette dernière prenne en charge le développement d'une partie du système de télécommunications, du radar et du spectromètre en lumière visible et infrarouge de l'orbiteur. En 1994 la NASA, de nouveau placée sous la pression budgétaire, envisage l'annulation du projet. L'administrateur de la NASA Daniel Goldin vient de lancer son programme de missions interplanétaires à bas coût avec le slogan Better, Cheaper, Faster qu'il oppose à l'approche des missions complexes, coûteuses et à développement lent dont Cassini lui semble un parfait représentant. L'ESA, qui a déjà investi beaucoup d'argent dans le projet, adresse directement une lettre par l'intermédiaire de son directeur Jean-Marie Luton au vice-président des États-Unis Al Gore pour l'alerter sur les risques que comporteraient l'annulation de Cassini pour les projets scientifiques conjoints entre l'Europe et les États-Unis en soulignant une fois de plus le manque de fiabilité du partenaire américain. Cette pression exercée par l'agence spatiale européenne contribue à repousser l'annulation cette année-là ainsi qu'une nouvelle tentative du Congrès en 1995. D'autres mesures d'économie sont prises : l'antenne dédiée qui devait être utilisée par l'orbiteur pour relayer les émissions radio de Huyguens est abandonnée et les pièces détachées du programme Voyager fournissent la caméra grand angle. A contrario, comme la production du type de plutonium utilisée par les RTG avait été abandonnée faute d'application, il faut relancer à grands frais la chaine de fabrication pour fournir le combustible nécessaire à la mission.

Finalement le budget total de la mission est évalué à 3,27 milliards de dollars américains. La contribution de la NASA est de 2,6 milliards tandis que l'ESA participe à hauteur de 500 millions et l'ASI pour 160 millions. Le coût de la mission se ventile de la manière suivante :

- 1,422 milliard pour le développement de l'orbiteur Cassini et de l'atterrisseur Huygens;
- 710 millions pour la mission en elle-même;
- 422 millions pour le lanceur Titan IV et les opérations de lancement;
- 54 millions pour les opérations de télécommunications via le réseau d'antennes Deep Space Network de la NASA

La sonde spatiale porte le nom de deux astronomes ayant joué un rôle majeur dans l'étude du système de Saturne : Giovanni Domenico Cassini, astronome français, né dans le comté de Nice (état de Savoie) au XVII^e siècle, qui a découvert 4 satellites et la division de l'anneau de Saturne et Christian Huygens, astronome néerlandais du même siècle, qui a découvert Titan.

Polémique sur les RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator = générateur thermoélectrique à radio-isotope)



Le générateur thermoélectrique à radio-isotope (RTG), la source d'énergie de Cassini

Comme la sonde évolue très loin du Soleil, il n'était pas envisageable d'utiliser des panneaux solaires pour fournir l'énergie nécessaire à la sonde. C'est pourquoi elle embarque trois GPHS-RTG : ces modèles de générateur thermoélectrique à radioisotope produisent de l'électricité directement à partir de la chaleur produite par la désintégration naturelle du plutonium 238. Les RTG ont une durée de vie qui dépasse de beaucoup les 11 ans de la mission. La sonde Cassini-Huygens embarque 32,8 kg de plutonium (essentiellement du ²³⁸Pu, très radioactif), ce qui a provoqué une controverse avec des écologistes, des physiciens et d'anciens membres de la NASA. Concernant les risques de contamination, les estimations officielles étaient les suivantes : la probabilité d'une fuite de plutonium durant les trois premières minutes et demie était de 1 sur 1 400, d'une fuite durant la montée de la fusée de 1 sur 476, de contamination terrestre ultérieure inférieure à 1 sur un million, avec un risque de 120 morts sur 50 ans si un tel événement se produisait. De nombreux observateurs donnaient d'autres estimations. Par exemple, le physicien Michio Kaku prévoyait 200 000 morts si le plutonium contaminait une zone urbanisée, à cause de la dispersion atmosphérique, même si la trajectoire de lancement avait été prévue de manière à passer loin des grandes métropoles et si le RTG est conçu de manière à diminuer les risques de dispersion du plutonium en cas de défaillance du lanceur. De même, un risque supplémentaire provenait du second passage à proximité de la Terre le 18 août 1999. La NASA a publié des informations se voulant exhaustives et rassurantes quant aux risques liés au générateur RTG.

Objectifs de la mission

Lorsque la mission Cassini-Huygens est développée, trois sondes spatiales - Pioneer 11, Voyager 1 et Voyager 2 - ont déjà étudié Saturne. Elles ont fourni beaucoup d'informations et ont permis de découvrir l'importance scientifique de Titan. Mais leur bref survol n'a fourni qu'un aperçu de la complexité du monde saturnien. Une étude en profondeur reste à faire. Aussi les objectifs fixés à la mission Cassini-Huygens sont nombreux. Ils portent à la fois sur chacun des types de corps célestes présents dans le

système saturnien - Saturne, ses anneaux, Titan, les lunes glacées de Saturne et la magnétosphère de la planète géante - et sur les interactions entre ces différents composants.

Titan est le sujet principal de la mission. Il doit être étudié à la fois par l'atterrisseur Huygens et l'orbiteur Cassini. Les objectifs scientifiques le concernant sont :

- 1) Déterminer la composition de l'atmosphère de Titan y compris les gaz nobles et les isotopes des composants les plus fréquents. Déterminer des scénarios de formation et d'évolution de Titan et de son atmosphère.
- 2) Déterminer la distribution verticale et horizontale des gaz présents à l'état de trace; rechercher les molécules organiques complexes; déterminer les sources d'énergie utilisées par la chimie atmosphérique; modéliser la photochimie de la stratosphère; étudier la formation et la composition des aérosols.
- 3) Mesurer les vents et les températures globales; étudier la physique des nuages, la circulation atmosphérique générale et l'impact des saisons sur l'atmosphère; rechercher les décharges des éclairs
- 4) Étudier l'atmosphère supérieure de Titan, son ionisation et son rôle dans la production des particules neutres et ionisées de la magnétosphère.

Magnétosphère de Saturne

- 1) Déterminer la configuration du champ magnétique de Saturne et sa relation avec la modulation de l'onde radio kilométrique de Saturne.
- 2) Déterminer les systèmes de courant, la composition, les sources et les puits des particules chargées de la magnétosphère
- 3) Étudier les interactions ondes-particules et la dynamique de la magnétosphère côté jour et de la queue magnétique de Saturne ainsi que ses interactions avec le vent solaire, les lunes et les anneaux
- 4) Étudier l'effet des interactions de l'atmosphère de Titan avec le vent solaire et le plasma de la magnétosphère
- 5) Étudier les interactions de l'atmosphère de Titan et de l'exosphère avec le plasma environnant.

Anneaux de Saturne

Depuis la découverte des anneaux de Saturne ceux-ci constituent un des objets les plus étudiés du système solaire.

- 1) Étudier la configuration des anneaux et les processus dynamiques (gravitation, viscosité, érosion, électromagnétisme) responsables de leur structure
- 2) Cartographier la composition et la distribution par taille des matériaux composant les anneaux
- 3) Déterminer les relations entre anneaux et les lunes de Saturne
- 4) Déterminer la concentration de la poussière et des météorites au voisinage des anneaux
- 5) Étudier les interactions entre les anneaux, la magnétosphère de Saturne, l'ionosphère et l'atmosphère

Lunes de Saturne

- 1) Déterminer les caractéristiques générales des lunes et leur histoire géologique;
- 2) Déterminer les mécanismes internes et externes à l'origine des modifications de la croûte et de la surface
- 3) Étudier la composition et la distribution des matériaux en surface en particulier des matériaux sombres, riches en matériau organique et les volatiles condensés ayant une température de fusion peu
- 4) Mesurer les caractéristiques ayant un rôle dans la structure interne et la composition des lunes
- 5) Étudier les interactions avec la magnétosphère, les anneaux et les injections de gaz dans la magnétosphère

Saturne

- 1) Mesurer les températures, les propriétés des nuages et la composition de l'atmosphère de Saturne
- 2) Réaliser des mesures globales des vents; étudier les propriétés synoptiques des nuages et les processus en jeu
- 3) Déterminer la structure interne et la vitesse de rotation de l'atmosphère profonde
- 4) Étudier les variations diurnes et le contrôle magnétique de l'ionosphère de Saturne

- 5) Obtenir les contraintes découlant des observations (composition des gaz, ratios des isotopes, flux thermique...) qui jouent un rôle dans les scénarios de formation et d'évolution de Saturne
- 6) Étudier l'origine et la structure des éclairs de Saturne.

Cassini-Huygens est une mission d'exploration spatiale de la planète Saturne et ses lunes par une sonde spatiale développée par l'agence spatiale américaine de la NASA avec des participations importantes de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Agence spatiale italienne (ASI). Lancé en octobre 1997 l'engin s'est placé en orbite autour de Saturne en 2004. En 2005 l'atterrisseur européen *Huygens* après s'être détaché de la sonde mère s'est posé à la surface de la lune Titan et a pu retransmettre des informations collectées durant la descente et après son atterrissage. L'orbiteur Cassini orbite depuis autour de Saturne et poursuit l'étude scientifique de la planète géante en profitant de ses passages à faible distance de ses satellites pour collecter des données détaillées sur ceux-ci. La mission d'une durée initiale de 4 ans a été prolongée à deux reprises : de 2008 à 2010 (*Equinox mission*) et de 2010 à 2017 (*Solstice Mission*). Il est prévu que la sonde spatiale s'écrase sur la planète Saturne à l'issue de cette dernière phase.

Le principe d'une mission d'étude du système de Saturne émerge en 1982 à la fois dans les communautés scientifiques américaine et européenne. Après avoir travaillé sur des projets séparés, la NASA et l'Agence spatiale européenne lancent à la fin des années 1980 le développement d'une mission conjointe : la NASA développe l'orbiteur et l'ESA l'atterrisseur qui doit se poser sur Titan. Le projet frôle à plusieurs reprises l'annulation à la suite des difficultés budgétaires de la NASA. Des mouvements écologistes tentent d'interdire le lancement de la sonde spatiale à cause du plutonium embarqué pour alimenter en énergie la sonde spatiale. Finalement la sonde spatiale est lancée le 15 octobre 1997 par un lanceur lourd Titan IV-B.

Cassini-Huygens est une mission particulièrement ambitieuse et coûteuse (3,26 milliards \$) rattachée à ce titre au programme Flagship de la NASA. Avec une masse totale de 5,6 tonnes (dont 3,1 tonnes de carburant et 350 kg pour l'atterrisseur Huygens) il s'agit du plus gros engin spatial lancé vers les planètes externes. L'orbiteur Cassini embarque 12 instruments scientifiques dont un radar tandis que Huygens en emporte six. Cassini est stabilisé trois axes et son énergie est fournie par trois générateurs thermoélectriques à radioisotope utilisant du plutonium.

La mission Cassini-Huygens a rempli tous ses objectifs scientifiques en fournissant une moisson de données sur Saturne, sa magnétosphère, ses anneaux, Titan et les autres lunes de la planète géante. Les caméras de l'orbiteur ont également fourni certaines des plus belles images du système solaire. Cassini a notamment permis d'obtenir les premières images détaillées de Phœbé, d'analyser en détail la structure des anneaux de Saturne, d'étudier Titan de manière approfondie et de découvrir une dizaine de nouvelles lunes de Saturne de petite taille (moins de 10 km), portant le nombre total de satellites saturniens à 62 (nombre connu au 1er mai 2014). La sonde a permis également de découvrir de nouveaux anneaux de Saturne.

Caractéristiques techniques de l'orbiteur Cassini



Cassini en cours d'assemblage

Pesant 5 712 kg au lancement, soit le double de la sonde Galileo qui tourna autour de Jupiter (1995-2003), elle est composée de deux modules :

- 1) L'orbiteur Cassini (sonde spatiale) chargé de l'étude du système planétaire de Saturne et équipé au total de 12 instruments scientifiques;
- 2) l'atterrisseur *Huygens* chargé d'une étude in situ de Titan, le plus gros satellite de Saturne et qui doit à cette fin se poser sur son sol.

L'orbiteur *Cassini* est développé par le centre spatial JPL de la NASA avec une participation de l'ESA pour le module PSE (Probe Support Equipment) servant de relais avec Huygens et de l'ASI pour l'antenne de communication à grand gain. La sonde spatiale mesure plus de 6,7 m de haut pour 4 m de large. La sonde spatiale est constituée d'un empilement de 4 compartiments. De haut en bas on trouve l'antenne grand gain de 4 mètres de diamètre, le module d'équipement supérieur, le module de propulsion et le module d'équipement inférieur. À cet ensemble sont attachés sur les côtés une palette regroupant les instruments scientifiques de télédétection (caméras...), une palette regroupant les instruments scientifiques dédiés à l'étude des champs et des particules et l'atterrisseur Huygens. Une bôme de 11 mètres supportant les capteurs du magnétomètre et trois antennes permettant l'étude du plasma sont déployées en orbite perpendiculairement à l'axe de la sonde spatiale. La masse à vide de Cassini est de 2 125 kg à laquelle s'ajoutent 3 627 kg de carburant ainsi que la sonde Huygens (350 kg). Le carburant est utilisé pour les corrections de trajectoire durant le transit vers Saturne et les modifications d'orbite durant sa mission dans le système saturnien afin d'optimiser les survols au-dessus des lunes. La majorité de la masse de carburant est utilisée pour insérer la sonde spatiale en orbite autour de Saturne. L'orbiteur porte le nom de l'astronome Giovanni Domenico Cassini, qui a étudié les anneaux de Saturne en détail et découvert certaines des principales lunes de la planète géante (Japet, Rhéa, Téthys et Dioné).

Propulsion

La propulsion principale est assurée par deux moteurs-fusées à ergols liquides ayant une poussée fixe et non orientable d'environ 445 Newtons. Ces propulseurs réallumables brûlent un mélange d'hydrazine et de peroxyde d'azote qui sont mis sous pression avec de l'hélium.

Système de contrôle d'attitude

La sonde est stabilisée sur 3 axes durant toutes les phases de la mission. Le système de contrôle d'attitude est chargé de maintenir l'orientation de la sonde spatiale. Pratiquement tous les équipements de l'orbiteur étant fixes, il revient à ce système d'assurer le pointage de ceux-ci vers leurs cibles. Ceci inclut notamment le pointage des antennes vers la Terre pour les sessions de télécommunications, l'utilisation de l'antenne grand gain en tant qu'émetteur/récepteur radar ou pour les séances de radioscience, l'orientation de l'axe optique des instruments de télédétection (caméras...) vers l'objet visé et le maintien de l'orientation lorsque les propulseurs principaux sont mis en marche. Le contrôle de l'orientation est effectué principalement à l'aide de viseurs d'étoiles, capteurs de Soleil et centrale à inertie qui sont tous présents à deux exemplaires pour pouvoir faire face à une panne. Les modifications d'orientation sont effectuées à l'aide de quatre roues de réaction dont une de secours et quatre groupes de quatre petits propulseurs mono-ergols brulant de l'hydrazine¹⁷.

Trois générateurs thermoélectriques à radioisotope fournissent l'énergie électrique en convertissant la chaleur produite par la radioactivité du plutonium en électricité. Ce système rend le satellite indépendant de l'éclairage solaire qui est cent fois plus faible au niveau de l'orbite de Saturne qu'en orbite terrestre. Les trois RTG fournissent ensemble 885 Watts en début de mission et 630 Watts à l'issue de la mission nominale en 2008. L'électricité est distribuée sous la forme d'un courant continu à 30 Volts.

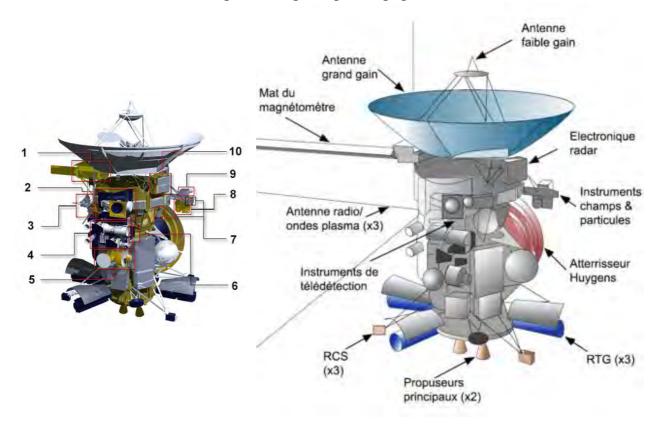
Télécommunications

Pour les télécommunications avec la Terre, Cassini utilise trois antennes différentes : 1 antenne à grand gain fixe de 4 mètres de diamètre et 2 antennes à faible gain. Le signal met entre 68 à 84 minutes à parvenir jusqu'à la Terre en fonction de la position de Saturne sur son orbite. Les télécommunications se font en bande X (8,4 Ghz en émission, 7,2 Ghz en réception) avec une puissance d'émission de 20 Watts.

Instrumentation scientifique

Le schéma suivant montre l'emplacement des différents instruments scientifiques de l'orbiteur Cassini à l'exception du détecteur de poussière cosmique et du boitier de radio science qui se trouvent sur la face non visible de la sonde spatiale.

Les instruments scientifiques et les principaux équipements de l'orbiteur Cassini



1 Magnétomètre MAG - 2 Spectromètre visible et infrarouge VIMS - 3 Analyseur plasma et ondes radios RPWS - 4 Caméras ISS - 5 Spectromètre infrarouge CIRS - 6 Spectrographe ultraviolet UVIS - 7 Imageur magnétosphère MIMI - 8 Spectromètre plasma CAPS - 9 Spectromètre de masse ion et atomes neutres INMS - 10 Radar



Le spectromètre de masse INMS

L'orbiteur Cassini embarque dix instruments. Quatre d'entre eux sont des instruments de télédétection, c'est-à-dire d'observation à distance. Tous ceux-ci sont fixés sur une platine non mobile et leurs axes optiques sont co-alignés. Pour viser un point donné, tout le satellite doit être réorienté. Ces instruments sont:

- ISS (Imaging Science Subsystem) est une caméra fonctionnant dans le visible, le proche ultraviolet et le proche infrarouge.
- UVIS (*Ultraviolet Imaging Spectrograph*) est un spectrographe permettant l'analyse en ultraviolet des atmosphères et des anneaux afin d'en étudier les structures, la chimie et la composition.
- VIMS (Visible and Infrared Mapping Spectrometer) est un spectromètre chargé d'identifier les compositions chimiques des surfaces, atmosphères et anneaux de Saturne et de ses lunes par la mesure des couleurs émises ou réfléchies en lumière visible et dans le proche-infrarouge.
- CIRS (Composite Infrared Spectrometer) est un spectromètre infrarouge qui mesure le rayonnement infrarouge des surfaces, des atmosphères de Saturne et de ses satellites naturels ainsi que de ses anneaux pour étudier leur température et leur composition.

Six autres instruments sont consacrés à l'étude des champs et particules et effectuent leurs mesures in situ c'est-à-dire dans l'environnement entourant leurs capteurs. Ils sont montés sur différents emplacements. CAPS, INMS et deux des capteurs de MIMI sont placés sur la même platine fixe. L'instrument MIMI est monté sur la même platine que les instruments de télédétection et son axe de visée est aligné sur celui-de ces instruments. Ces instruments sont :

- CAPS (Cassini Plasma Spectrometer) est un spectromètre qui permet l'étude du plasma (gaz fortement ionisé) à proximité ou à l'intérieur du champ magnétique de Saturne.
- CDA (Cosmic Dust Analyser) est un instrument d'analyse de la glace et des grains de poussière situés dans le système de Saturne à proximité de la sonde spatiale.
- INMS (Ion and Neutral Mass Spectrometer) est un spectromètre de masse qui permet l'analyse des particules neutres et chargées à proximité de Titan, Saturne et de ses lunes pour mieux connaître l'étendue de leurs atmosphères et ionosphères.
- MAG (Dual-Technique Magnetometer) est un magnétomètre utilisé pour étudier le champ magnétique de Saturne et ses interactions avec le vent solaire, les anneaux et les lunes de Saturne.
- RPWS (Radio and Plasma Wave Spectrometer) analyse les ondes plasma générées par le vent solaire, les émissions naturelles d'ondes radio et la poussière.
- MIMI (Magnetospheric Imaging Instrument) est un instrument chargé de cartographier la magnétosphère de Saturne et de mesurer les interactions entre la magnétosphère et le vent solaire.

Cassini embarque par ailleurs :

- Un radar pour cartographier la surface de Titan qui a la capacité de percer le voile nuageux. Il est aussi utilisé pour mesurer les hauteurs des éléments de la surface.
- RS (Radio Science Subsystem) est une expérience de radioscience qui utilise l'oscillateur ultrastable de l'émetteur radio pour analyser l'atmosphère de Titan et de Saturne, la structure et la composition des anneaux et pour mesurer le champ de gravité de Saturne et de ses lunes par analyse de l'effet Doppler.

L'atterrisseur Huygens



Bouclier arrière de la sonde Huygens



Instruments et équipements à l'intérieur de l'atterrisseur

Cassini sert également au transport de *Huygens*, un module d'exploration de 318 kilogrammes destiné à pénétrer dans l'atmosphère de Titan, la plus grosse lune de Saturne et, après Ganymède, la deuxième plus grosse lune du système solaire, dont la composition comprend des hydrocarbures et autres molécules à l'origine de la vie. Le module, réalisé par l'ESA, a été baptisé d'après l'astronome Christian Huygens, qui a découvert le satellite en 1655. Huygens est composé de deux sous-ensembles : le module de rentrée atmosphérique (*Entry Assembly* ou ENA) et le module de descente (*Descent Module* ou DM). Le premier assure le transport du second depuis la séparation de Cassini jusqu'à Titan, sert de protection thermique durant la rentrée dans l'atmosphère de Titan, et ralentit la sonde à l'aide de ses parachutes avant de libérer le module de descente. Ce dernier contient toute l'instrumentation scientifique ainsi que ses propres parachutes pour la phase finale de la descente et le système de contrôle d'orientation de la sonde.

L'instrumentation de Huygens située dans le module de descente comprend les instruments suivants :

- HASI (*Huygens Atmospheric Structure Instrument*) est un ensemble d'instruments chargé d'étudier les propriétés physiques et électriques de l'atmosphère de Titan et la détection d'éventuels éclairs d'orage.
- DWE (*Doppler Wind Experiment*) est un système de mesure de l'effet Doppler pour l'étude des vents dans l'atmosphère de Titan et la reconstitution de la trajectoire suivie par Huygens durant sa descente.
- DISR (*Descent Imager/Spectral Radiometer*) est un imageur spectromètre pour la mesure de la composition chimique atmosphérique, l'étude de la structure des nuages et la réalisation de photographies de la surface.
- ACP (*Aerosol Collector and Pyrolyser*) est un système de pyrolyse qui doit permettre l'étude de la composition chimique des aérosols de l'atmosphère de Titan.
- GCMS (*Gas Chromatograph and Mass Spectrometer*) est un chromatographe et d'un spectromètre pour l'analyse des constituants atmosphériques, leur répartition en fonction de l'altitude et leur mode de formation.
- SSP (*Surface Science Package*) est un ensemble de senseurs pour la caractérisation de l'état et de la composition du site d'atterrissage de Huygens.

Déroulement de la mission Le lancement



Lancement de la sonde Cassini-Huygens le 15 octobre 1997 à Cap Canaveral par la fusée Titan-IVB/Centaur

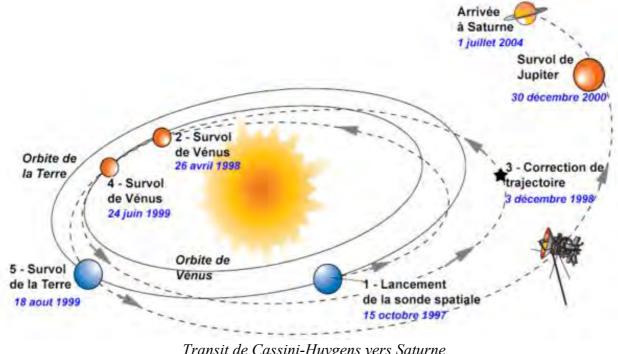
La fusée Titan-IVB/Centaur choisie pour lancer la sonde spatiale est le plus puissant des lanceurs existants. La version Titan IV B n'a jusque là volé qu'une seule fois en avril 1997 pour placer en orbite un satellite militaire américain. L'utilisation d'un étage Centaur sur cette version est complètement inédite. D'un coût particulièrement élevé (422 millions \$ à l'époque) cette fusée ne sera plus jamais utilisée pour lancer une sonde spatiale. Huygens et Cassini arrivent à la base de lancement de Cap Canaveral en avril et mai 1997 pour un dernier test avant d'être assemblé avec leur lanceur.

Il était impératif de lancer Cassini-Huygens durant la fenêtre de tir allant du 6 octobre au 15 novembre 1997 car c'était la dernière à permettre à la sonde spatiale de bénéficier d'une assistance gravitationnelle de Jupiter. Les solutions de tir suivantes faisaient arriver la sonde spatiale dans le système de Saturne en 2009 au lieu de 2004. Un mois avant l'ouverture de la fenêtre, une installation de climatisation défectueuse endommage la protection thermique de la sonde Huygens. Il faut démonter la sonde spatiale

déjà installée sur son lanceur en place sur sa rampe de lancement, remplacer le revêtement endommagé et replacer la sonde sous la coiffe. Toutes ces tâches ne peuvent être achevées que le 13 octobre. Après un dernier incident du à un problème d'ordinateur qui repousse de deux jours le lancement, la fusée s'élance depuis le pas de tir n° 40 de Cap Canaveral le 15 octobre 1997 à 8h43 Temps Universel (4h43 en heure locale). L'étage Centaur place la sonde spatiale sur une orbite de parking puis, 19 minutes plus tard, est rallumé durant 7 minutes 15 secondes pour placer Cassini-Huygens sur une orbite héliocentrique. Le tir est presque parfait et ne nécessite qu'une correction minime de 2,7 m/s effectuée le 9 novembre.

Assistance gravitationnelle des planètes internes (1997-1999)

Malgré la puissance de son lanceur, Cassin-Huygens ne peut pas parvenir sur sa seule lancée jusqu'à Saturne. Pour y parvenir il aurait été nécessaire que la fusée Titan puisse accélérer la sonde spatiale à une vitesse de 15,1 km/s or compte tenu de la masse de celle-ci, le lanceur n'a pu lui communiquer qu'une vitesse de 12,4 km/s. Les concepteurs de la mission ont donc prévu d'obtenir la vitesse manquante en utilisant l'assistance gravitationnelle de Vénus (deux fois), de la Terre. Une dernière assistance gravitationnelle de Jupiter est utilisée pour raccourcir la durée du voyage. La sonde spatiale se dirige d'abord vers Vénus. Comme elle se rapproche du Soleil la vaste parabole de l'antenne grand gain est interposée entre l'astre et le corps de l'engin spatial pour limiter l'échauffement. Le 27 avril 1998 Cassini frôle la planète en passant à 287 km de la surface ce qui lui permet d'infléchir sa trajectoire de 70°, 'accélère de 3,7 km/s (dans le référentiel héliocentrique) et la place sur une orbite dont l'apogée se situe au-delà de Mars. Le 3 décembre 1998 la propulsion principale est utilisée pour effectuer une importante correction de vitesse (et donc de trajectoire) de 452 m/s qui ramène la sonde spatiale pour la deuxième fois au-dessus de Vénus le 24 juin 1999 à 603 km d'altitude. Avec l'accélération obtenue (3,1 km/s dans le référentiel héliocentrique) la sonde spatiale survole la Terre seulement 56 jours plus tard à une altitude de 1166 km le 18 août 1999. L'assistance gravitationnelle liée à ce survol procure à son tour une accélération supplémentaire de 4,1 km/s et porte la vitesse de la sonde spatiale à 19,1 km/s ce qui lui permet désormais d'atteindre Saturne. Faute de budget tous les survols de Vénus sont effectués sans aucune investigation scientifique. Les instruments sont utilisés pour des opérations de calibrage durant le survol de la Terre et son passage près de la Lune. Le 1er décembre 1999 l'orientation de la sonde spatiale est modifiée de manière à ce que l'antenne grand gain soit pointée vers la Terre : compte tenu de l'éloignement du Soleil il n'est plus nécessaire qu'elle s'interpose entre le Soleil et le corps de la sonde spatiale. Le 23 janvier 2000 la sonde spatiale passe à 1,5 millions de kilomètres de l'astéroïde (2685) Masursky. Ce sera le seul astéroïde survolé par Cassini durant son transit vers Saturne et l'éloignement est tel que Masursky n'apparait que comme un simple point sur la photo prise avec le téléobjectif de Cassini.



L'anomalie du système de télécommunication de Huygens

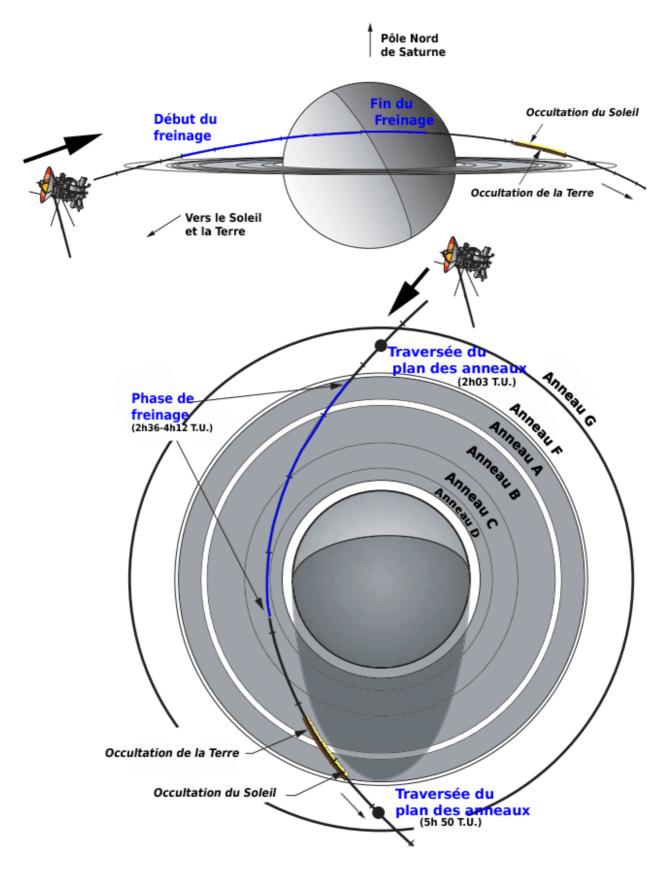
En février 2000 des tests de performance réalistes simulant les liaisons radio entre Huygens et Cassini mises en œuvre durant la descente vers le sol de Titan, détectent que, dans ces conditions, 90 % des données émises par Huygens sont perdues. Une investigation menée par une commission comportant des représentants de l'ESA, de la NASA et des industriels concernés - Alenia Spazio en tant que concepteur du système de télécommunications et Alcatel ex-Aerospatiale en tant qu'intégrateur - permet de déterminer que les changements intervenus dans la conception de Cassini ont induit un certain flou dans le cahier des charges du système de télécommunications de Huygens. Il en résulte que les données sont transmises par Huygens dans une plage de fréquence située pratiquement à l'extérieur des capacités du récepteur de Cassini après application de l'effet Doppler induit par les mouvement relatifs des deux engins spatiaux. Pour contourner cette anomalie une modification majeure de la trajectoire de l'orbiteur et du scénario de séparation des deux engins est décidée en juillet 2001. Pour limiter l'effet Doppler la distance entre l'orbiteur et l'atterrisseur au moment de l'arrivée de ce dernier sur Titan est portée de 1 200 km à 65 000 km ce qui diminue fortement la vitesse relative d'un engin par rapport à l'autre. Mais pour obtenir ce résultat il est nécessaire de réduire la première orbite autour de Saturne de 148 à 116 jours ce qui diminue d'un quart à un tiers la quantité d'ergols disponible pour la suite de la mission. Celle-ci s'en trouve potentiellement raccourcie de 8 à 10 mois.

Le survol de Jupiter (décembre 2000)

Les premières véritables données scientifiques de la mission sont recueillies lors du survol de Jupiter. Celui-ci a pu être programmé grâce à une conjonction exceptionnelle des deux planètes géantes qui ne se reproduit que tous les 19,88 ans. Ce survol a été planifié principalement pour permettre à la sonde spatiale de bénéficier de l'assistance gravitationnelle de la planète géante et de regagner ainsi 2,1 km/s faisant passer sa vitesse à 11,6 km/s à la sortie du système de Jupiter. Le gain obtenu permet de réduire de 2 ans la durée du voyage vers Saturne. La sonde passe à relativement grande distance de Jupiter (9,72 millions de km) pour que l'accélération obtenue ne soit pas trop importante ce qui aurait nécessité une plus grande quantité de carburant pour freiner la sonde spatiale et la placer en orbite autour de Saturne. Le volet scientifique de ce survol comprend l'étude de la magnétosphère de la planète ainsi que des particules et des champs électrique et magnétique de manière conjointe avec la sonde Galileo en orbite autour de Jupiter depuis 1996. Cassini doit également prendre des photos de la planète (celle-ci remplit le champ de la caméra à partir d'une distance de 23,3 millions de km) pour permettre l'étude de son atmosphère. La sonde spatiale débute officiellement sa campagne d'observation le 1er octobre 2000 en effectuant une première photo de la planète géante alors que celle-ci se trouve encore à 84,4 millions de km. Mais le 15 décembre 2000 une des roues de réaction assurant le contrôle d'orientation de la sonde spatiale montre des signes de frottement anormaux. Le logiciel embarqué qui supervise le fonctionnement de la sonde confie immédiatement le contrôle d'orientation aux petits propulseurs RCS brûlant de l'hydrazine. L'incident n'est détecté par les ingénieurs de la NASA que deux jours plus tard. Les instruments nécessitant des corrections permanentes de l'orientation tels que les caméras sont arrêtés pour limiter la consommation de carburant. Seuls restent en fonctionnement les instruments de mesure in situ. Le 18 aout 2000 Cassini passe à 4,42 millions de km d'Himalia, une des lunes de Jupiter mais compte tenu des mesures prises peu d'informations sont recueillies. Les ingénieurs de la NASA parviennent à déterminer que le problème de friction est du à une mauvaise lubrification lorsque la roue de réaction tourne à faible vitesse sur de longues périodes mais que le problème disparait lorsque la roue atteint une vitesse de rotation importante. Le fonctionnement de la sonde et de ses instruments retourne à la normale le 28 décembre soit 2 jours avant que Cassini passe au plus près de Jupiter. Mais les observations des lunes et des anneaux, programmées principalement durant cette interruption ne peuvent être menées à bien. Le 30 décembre 2000 Cassini passe au plus près de la planète géante qui est alors distante de 9,72 millions de km. La sonde réalise une suite continue de photos de l'atmosphère de Jupiter sur une période exceptionnellement longue qui permet d'observer le comportement dynamique de celleci. La campagne d'observation de Jupiter s'achève le 22 mars 2001.

Page 101

L'insertion en orbite autour de Saturne (1er juillet 2004)



Trajectoire de l'arrivée Cassini dans le système de Saturne.

Sur Terre, depuis le départ de Cassini, de nombreuses observations du système de Saturne ont été effectuées à l'aide du télescope spatial Hubble, du radiotélescope d'Arecibo et des télescopes optiques terrestres les plus puissants désormais équipés d'optique adaptative. Les résultats ont permis de découvrir de nombreux satellites irréguliers de Saturne. La présence de mers d'hydrocarbure à la surface

de trajectoire. Une des roues de réactions présente de manière sporadique des signes de frottement anormaux et elle est remplacée dans son rôle par une des roues de réserve. L'instrument RPWS commence à capter des signaux radio produits par Saturne alors que la sonde spatiale se trouve encore à 2,5 U.A. de la planète géante. Les observations systématiques de l'atmosphère de Saturne et de ses anneaux débutent en décembre 2003 alors que la sonde se trouve à 111 millions km de son objectif. Les premières prises d'image de Saturne sont effectuées le 6 février 2004 et celles de Titan en avril. Tous les autres instruments scientifiques sont progressivement mis en marche. Les membres de la mission recherchent avec les instruments de la sonde spatiale et des télescopes basés sur Terre la présence d'éventuels obstacles sur la trajectoire que doit suivre Cassini lorsque la sonde coupera le plan des anneaux. Les photos prises par la sonde spatiale permettent de découvrir deux petits satellites de quelques kilomètres de diamètre, Méthone et Pallène, qui se trouvent sur une orbite proche de Mimas. Cassini pénètre dans le système de Saturne en effectuant un survol de la lune Phœbé qui orbite à 13 millions de kilomètres de la planète et dont le diamètre est d'environ 200 km. Phœbé est le plus important des satellites irréguliers de la planète géante caractérisés par leur éloignement de celle-ci et l'inclinaison importante et dans certains cas rétrograde de leur orbite. Ces satellites, compte tenu de ces spécificités, ne se sont pas formés avec Saturne mais ont été capturés par la planète géante. Le 11 juin 2004 la sonde spatiale passe à 2 071 km de la lune qui n'avait jusque là jamais été observée de près. Les photos de Phœbé montrent un monde irrégulier couvert de cratères de grande dimension. Il reste 3 semaines avant la manœuvre qui doit permettre d'insérer la sonde spatiale en orbite autour de Saturne. Le 1 juillet vers 2h00 (en Temps Universel) la sonde spatiale, qui navigue sous le plan orbital des anneaux de Saturne, le traverse à la vitesse de 22 km/s en s'insinuant dans l'espace théoriquement libre d'obstacles situé entre le mince anneau F qui marque la limite de Roche de la planète et l'anneau G (cf schéma). Cette traversée s'effectue avec l'antenne grand gain pointée vers l'avant pour protéger le corps de Cassini d'éventuelles particules. Une demi-heure plus tard, après que la sonde a pivoté de 180° pour présenter ses tuyères vers l'avant, le propulseur principal est allumé pour réduire la vitesse de Cassini et permettre son insertion en orbite autour de Saturne. Le moteur-fusée fonctionne durant 96 minutes en consommant 830 kg d'ergols et la vitesse chute de 622 m/s. Durant cette phase la sonde passe à 19 880 km du sommet des nuages de la planète soit 0,3 fois le rayon de Saturne. La sonde est le premier objet artificiel à se placer en orbite autour de Saturne : cette orbite est parcourue en 116 jours avec un périgée se situant à 78520 km du centre de Saturne (18000 km au-dessus de la couche des nuages), une apogée à 9,06 millions km et une inclinaison de 16,8°. Immédiatement après l'arrêt de la propulsion Cassini utilise les instruments VIMS et UVIS pour prendre des images des anneaux, dont elle ne sera plus jamais aussi proche durant le reste de la mission. L'objectif est notamment d'obtenir des informations sur la structure de ceux-ci. A 5h50 la sonde spatiale traverse à nouveau le plan orbital des anneaux entre les anneaux F et G. Le jour suivant, la sonde spatiale effectue son premier survol de Titan mais celui-ci se fait à grande distance (339 000 km) et les instruments fournissent peu d'informations. L'orbite sur laquelle circule Cassini est temporaire car elle fait passer la sonde à travers les anneaux. Aussi la propulsion principale est utilisée pour la dernière fois le 23 aout durant 51 minutes pour ralentir la sonde de 398 m/s et faire passer son périgée à 300 000 km c'est-à-dire à l'extérieur des anneaux les plus denses.

de Titan est un sujet controversé mais les observations effectuées ne permettent d'apporter aucune preuve décisive. Au cours du trajet entre Jupiter et Saturne, Cassini effectue plusieurs petites corrections

Premiers survols de Titan et premières découvertes (26 octobre 2004)

Le 26 octobre 2004 la sonde spatiale Cassini effectue un premier passage à faible distance (1 200 km) de Titan. Le satellite entouré d'un voile opaque de nuages a, jusque là, révélé peu de choses sur sa nature malgré les nombreuses observations effectuées depuis la Terre ou durant son survol par les sondes Voyager. Beaucoup d'informations sont attendues du passage de la sonde grâce à la faible distance et la présence du radar capable d'observer la surface à travers les nuages. Parmi les objectifs principaux de ce survol figurent la validation de la modélisation de l'atmosphère pour la mise au point du scénario de descente de Huyguens vers le sol de Titan et la mesure de l'expansion verticale de l'atmosphère de Titan en vue de survols ultérieurs à plus faibles altitudes. Tous les instruments étant fixes le pointage du radar vers la surface entre en conflit avec d'une part la mise en œuvre des instruments de télédétection (caméras,...) et certains instruments de mesure des champs et particules qui n'ont pas les mêmes axes de visée. Aussi l'utilisation du radar est relativement brève et ne concerne qu'une bande étroite de terres de 120 km de large sur 2000 km de long, soit moins de 1 % de la surface de la lune, avec une résolution maximale de 300 mètres. Les informations collectées par le radar et les caméras fonctionnant en lumière visible et en infrarouge permettent de distinguer une surface jeune c'est-à-dire pratiquement dépourvue de cratères d'impact, aux caractéristiques très variées reflétant une géologie dynamique avec la présence de chenaux et peut-être de cryovolcans rejetant un mélange de glace d'eau et de méthane enfouis sous la surface. Selon les théories élaborées avant le survol, la présence de mers de méthane était nécessaire pour expliquer la présence d'une atmosphère comportant une proportion notable de ce gaz à la durée de vie pourtant relativement courte. Mais aucune surface liquide de grande étendue n'est détectée. Le magnétomètre indique que Titan ne génère pas de champ magnétique. Deux jours plus tard l'orbiteur atteint son périgée et boucle ainsi sa première orbite autour de Saturne avant de commencer à s'éloigner de la planète géante. Un deuxième survol de Titan a lieu le 16 décembre à une altitude pratiquement identique. Cette fois le radar n'est pas utilisé et les observations portent plus particulièrement sur le comportement de l'atmosphère et sa composition. L'assistance gravitationnelle de Titan est utilisée pour ajuster précisément le prochain passage au-dessus de Titan qui doit s'accompagner de l'atterrissage de Huyguens.

L'atterrissage de Huygens sur Titan (14 janvier 2005)

Le 16 décembre la sonde Cassini modifie sa trajectoire en utilisant ses propulseurs durant 85 secondes de manière à pouvoir placer l'atterrisseur Huygens, dépourvu de moyens de manœuvrer, sur une trajectoire de collision avec Titan. Le 23 décembre une dernière petite correction est effectuée et deux jours plus tard l'atterrisseur se détache de Cassini : des ressorts lui impriment un léger surcroit de vitesse de 33 cm/s qui l'éloigne progressivement de son vaisseau porteur. Auparavant Huyguens a été mis en rotation autour de son axe (7,5 tours par minute) pour que son orientation reste stable jusqu'à son arrivée aux abords de Titan 22 jours plus tard. Le 28 décembre l'orbiteur Cassini corrige sa trajectoire en utilisant ses propulseurs durant 153 secondes pour passer au large de Titan. Le 31 décembre 2004 l'orbiteur passe à relativement faible distance (123 000 km) de l'hémisphère éclairé de Japet ce qui lui permet d'obtenir des images de bonne qualité avec une résolution maximale de 700 mètres. Aucune photo détaillée n'avait jusque là pu être prise de cette lune qui présente un contraste inexpliqué de couleur entre sa face avant (dans le sens de sa progression sur l'orbite) et sa face arrière. Plusieurs caractéristiques intriguent les scientifiques dans les données recueillies lors du survol : Japet possède une crête équatoriale de 20 km de large et 13 km de haut qui court tout au long de son équateur. Ses dimensions, 749x747x713 km, lui confèrent une forme ovale inexplicable pour un objet céleste de cette taille. Les analyses spectroscopiques de la surface ne fournissent pas dans un premier temps d'explication satisfaisante au contraste de couleur des deux faces.

Rentrée atmosphérique

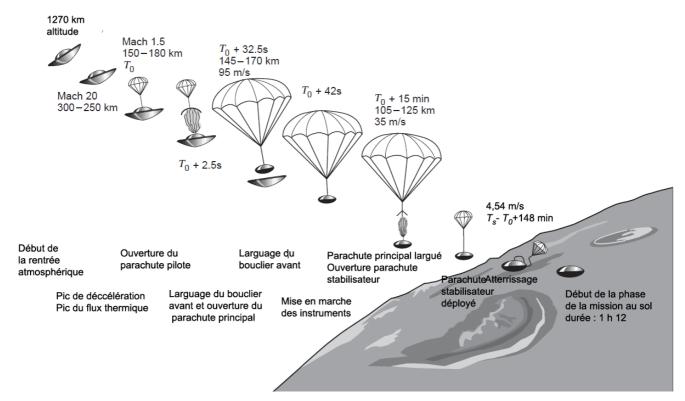
À compter de sa séparation avec Cassini, Huyguens a été mise en sommeil. Alors qu'elle arrive à proximité de Titan le 14 janvier, les équipements de la sonde sont réactivés. L'orbiteur Cassini qui suit une route parallèle pivote pour pointer son antenne grand gain vers l'atterrisseur alors que celui-ci s'apprête à pénétrer dans l'atmosphère. L'orbiteur relativement proche peut recevoir un volume de données plus important et va servir de relais entre Huygens et les stations à Terre. Néanmoins plusieurs radio-télescopes terrestres sont également à l'écoute des émissions de Huygens pour détecter l'onde radio porteuse qui doit signaler le déploiement réussi du parachute principal. A 9 h6 T.U. Huygens pénètre dans l'atmosphère de Titan à 1 270 kilomètres d'altitude à une vitesse de 5 km/s. Les frottements à grande vitesse dans l'atmosphère portent le bouclier thermique de la sonde à température de 1700°C tout en la ralentissant avec une décélération qui culmine à 13 g.

Trois minutes plus tard, alors que la vitesse de l'engin spatial a chuté à moins de 1 400 km/h et qu'il se trouve à 160 km d'altitude, un premier parachute pilote de 2,6 mètres de diamètre est déployé et éjecte le bouclier thermique arrière. Le parachute principal de 8,3 mètres de diamètre est déployé 2,5 secondes plus tard. Il s'écoule une minute puis le bouclier thermique avant est largué et l'émetteur radio de Huygens est mis en marche. Le signal émis est capté de manière très atténuée par le radio-télescope terrestre de Green Bank environ 67 minutes plus tard (temps mis par le signal pour cheminer à la vitesse de la lumière). Les instruments de l'atterrisseur sont mis en marche. La caméra DISR prend une première image alors que la sonde se trouve entre 143 et 140 km et restitue une atmosphère faiblement éclairée. Le chromatographe à gaz GCMS commence à collecter des données tandis que le pyroliseur ACP commence ses prélèvements à 130 km. Les capteurs de la suite instrumentale HASI sont déployés et le spectromètre de masse GCMS effectue une première analyse de l'atmosphère à 140 km d'altitude et en effectue trois autres avant l'atterrissage à 85, 55 et 20 km. Le SSP est également mis en route, mesurant des propriétés de l'atmosphère. Huygens commence à transmettre les données collectées en direction de Cassini qui défile à une distance 60 000 kilomètres.

Observations atmosphériques

15 minutes après le début de la rentrée atmosphérique le parachute principal est largué et un autre parachute plus petit (3 mètres de diamètre) prend le relais. La vitesse a en effet suffisamment chuté et l'atterrisseur doit atteindre rapidement le sol pour que ses batteries soient en mesure de fournir l'énergie après l'atterrissage alors que l'orbiteur est encore au-dessus de la ligne d'horizon. A 9h42 alors que la sonde se trouve à 60 kilomètres d'altitude, Huygens met en marche son altimètre radar qui doit désormais mesurer son altitude. Les images du sol qui sont prises sont beaucoup moins nettes que prévues car l'atterrisseur traverse des couches de brume épaisse constituée de méthane à saturation.

Le premier panorama du sol dans lequel on peut distinguer de vagues formes brillantes et sombres est pris entre 50 et 29 km d'altitude. Vers 35 km la sonde qui se déplace horizontalement à 20 m/s est secouée par de fortes turbulences. L'atmosphère s'éclaircit vers 30 km. A 11h 23 à proximité de la surface, Huygens allume une lampe qui doit fournir une lumière homogène et aux caractéristiques connues pour les prises d'images ultérieures. A 11 h 38, soit deux heures 30 après avoir entamé la rentrée atmosphérique, Huygens touche le sol à une vitesse de 17 kilomètres par heure. La nature du terrain est inconnue mais selon toute vraisemblance, ce pourrait être de la glace.



Déroulement de l'atterrissage de Huygens

Opérations sur le sol de Titan

Le Surface Science Package commence à transmettre des informations peu après l'atterrissage de Huyguens. Une heure et demie après l'atterrissage, Cassini passe sous l'horizon de Titan, empêchant toute transmission de données de la part de Huyguens. L'atterrisseur est parvenu à transmettre 474 mégaoctets de données depuis le début de la descente. À la suite d'une erreur de programmation de l'atterrisseur, la moitié des 1215 photos prises durant la descente et au sol ainsi que toutes les mesures de vent réalisées par l'instrument DWE sont perdues.

Les opérations durant la mission primaire (2004-2008)

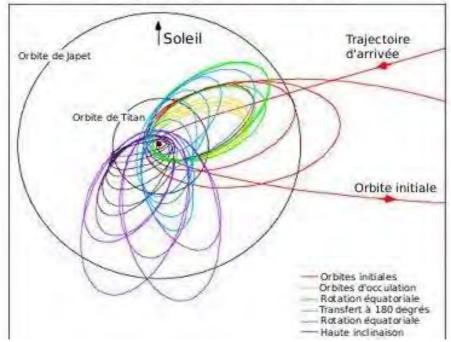
La phase d'étude du système de Saturne par l'orbiteur a une durée initiale de 4 années (2004-2008).

Caractéristiques de la trajectoire de Cassini dans le système de Saturne. Objectifs imposés à la trajectoire : durant son séjour dans le système de Saturne, Cassini ne peut pas se contenter de se maintenir sur son orbite car, pour répondre aux objectifs scientifiques, la sonde spatiale doit survoler différents objets (la planète, les anneaux, les lunes et la magnétosphère) en respectant des contraintes de positionnement. Il s'agit selon le cas de passer à faible distance de l'objet observé, de se situer sur une inclinaison par rapport au plan des anneaux, ou dans une position relative par rapport au Soleil ou à la Terre, etc... L'orbite doit donc suivre une trajectoire soigneusement calculée nécessitant de fréquentes manœuvres tout en économisant le peu d'ergols dont elle dispose. Les principaux objectifs imposés à la trajectoire sont les suivants :

- Selon les plans d'origine la sonde doit effectuer entre 45 et 55 survols à faible distance et ciblés des satellites de Saturne durant la mission primaire qui court de 2004 à 2008. Un survol est dit ciblé lorsqu'il est conçu pour que la sonde spatiale passe à un point bien précis - défini par sa longitude, sa latitude et son altitude - au-dessus du satellite visé. La plupart des survols ciblés se font au-dessus de Titan par ce que ce satellite de Saturne est l'objectif scientifique majeur de la mission mais également parce qu'il s'agit du seul satellite assez massif pour permettre des modifications importantes de l'orbite grâce à l'assistance gravitationnelle.
- L'observation de Saturne nécessite généralement que la sonde circule au-dessus de la face éclairée de la planète géante. Les occultations de la Terre par Saturne permettent d'obtenir de nombreuses informations lorsque les émissions radio du satellite traversent les couches de l'atmosphère de Saturne pour parvenir jusqu'à notre planète. *Les déformations du signal, radio lorsqu'il traverse la mince couche des anneaux, fournissent également de nombreuses informations sur leur composition chimique, leur épaisseur et la taille de leurs composants élémentaires.
- Il est également important de recueillir des vues des anneaux prises à des latitudes supérieures ou égales à 55° pour avoir une vue globale de ceux-ci. L'étude de la magnétosphère nécessite d'étudier in situ les caractéristiques du plasma, des particules chargées et neutres, des champs,... à grande distance du Soleil et dans toutes les directions en particulier dans la magnétogaine qui s'étend à l'opposé du Soleil jusqu'à 50 à 60 rayons de Saturne.
- L'observation des aurores boréales de la planète nécessite d'effectuer des observations depuis des latitudes élevées, dans l'idéal comprises entre 75 et 80°.

Orbite théorique de Cassini autour de Saturne

Vue depuis le pôle nord de Saturne



Représentation schématique de l'orbite théorique de la sonde Cassini-Huygens autour de Saturne. Elle est supposée faire 74 fois le tour de Saturne entre le 1^{er} juillet 2004 et le 1^{er} juillet 2008

Mise en œuvre

Les changements d'orbite de la sonde Cassini utilisent essentiellement l'assistance gravitationnelle de Titan. Chaque survol de Titan permet, s'il se produit à une altitude suffisamment faible, un changement de trajectoire équivalent à une modification de la vitesse de 850 m/s alors que les ergols disponibles pour les manœuvres à bord de Cassini ne permettent qu'un changement de vitesse total de 500 m/s sur toute la durée de la mission. Les autres lunes de Saturne ne permettent pas de modifier de manière importante l'orbite de Cassini : Rhéa, le satellite de Saturne le plus lourd après Titan, n'a que 2 % de sa masse. La contrainte qui en résulte est que chaque survol de Titan doit ramener la sonde spatiale à proximité de Titan (éventuellement après plusieurs orbites) pour que les modifications de trajectoire puissent continuer. Différents types de modifications de trajectoire peuvent être obtenues en fonction de l'angle sous lequel la lune est abordée. En passant sur l'arrière de Titan (par rapport à sa progression sur son orbite), la sonde spatiale augmente sa vitesse et accroit la période de son orbite. Inversement en passant devant Titan, la sonde diminue sa période orbitale. Ces manœuvres modifient également la ligne des apsides. Sous d'autres angles, la période de l'orbite est conservée mais c'est l'excentricité de l'orbite et son inclinaison qui sont modifiées.

Les trois premières orbites de Cassini autour de Saturne ont pour objectif de réduire à la fois l'inclinaison qui est pratiquement annulée et la période de l'orbite qui est ramenée de 48 à une vingtaine de jours. Par ailleurs la ligne des apsides de l'orbite est modifiée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre de manière à ce qu'elle se confonde avec l'axe Saturne-Soleil et à ce que l'apogée soit côté Soleil. La sonde spatiale dispose ainsi de temps pour effectuer des observations de l'atmosphère de Saturne du côté de sa face éclairée. Un survol de Titan permet ensuite d'orienter la ligne des nœuds pour qu'elle soit pratiquement perpendiculaire à la Terre ce qui permet au cours des 7 orbites suivantes d'obtenir des occultations de la Terre par Saturne.

Au cours de la seconde phase de la mission primaire qui débute en octobre 2005 après une série rapprochée de survols ciblés des satellites glacés de Saturne, l'orbite est pivotée par une série de survols de Titan alternant la face tournée vers Saturne et celle tournée vers l'extérieur. L'objectif est d'analyser « in situ » la magnétogaine. Durant la troisième phase de la mission primaire qui débute en juillet 2006 l'inclinaison est progressivement relevée tandis que la période est maintenue à 16 jours ce qui permet d'effectuer des observations des anneaux à faible distance sous un angle permettant d'obtenir de nouvelles informations. Après avoir culminée à 55° l'inclinaison est abaissée jusqu'à 0° tandis que la ligne des apsides pivote de 180° en faisant coïncider la ligne des nœuds dans l'axe Saturne-Soleil. La phase 4 qui est entamée en aout 2007 a pour objectif principal d'augmenter autant qu'il est possible l'inclinaison de l'orbite (environ 75°) pour l'étude des anneaux et les mesures in situ des champs et particules.

Faits marquants de la mission primaire

Le 17 février 2005 la sonde Cassini passe à 1 577 km de la lune Encelade. Celle-ci présente la particularité d'avoir un albédo très proche de 1 réfléchissant pratiquement toute la lumière reçue. Les photos prises par les caméras, 10 fois plus détaillées que celles des sondes Voyager, montrent une boule de glace pratiquement vierge de cratère d'impact parcourue de sillons et de renflements à l'apparence très proche des lunes de Jupiter, Ganymède et Europe. Les analyses spectrales démontrent que la surface est constituée de glace d'eau presque pure ce qui explique son albédo élevé. Durant un deuxième passage effectué le 16 mars le magnétomètre de la sonde spatiale détecte une modification du champ magnétique de Saturne qui révèle la présence d'une atmosphère. Celle-ci, compte tenu de la faiblesse du champ de gravité de la lune, trahit sans doute l'éjection de gaz par une forme d'activité volcanique. Au cours de ces survols, le détecteur de poussières met en évidence une densité particulièrement importante de particules qui pourraient avoir pour origine soit Encelade soit l'anneau E. Pour lever l'incertitude sur leur source, il est décidé d'abaisser l'altitude du survol suivant qui doit avoir lieu en juillet. Le 10 mai le JPL confirme la découverte d'une nouvelle lune provisoirement baptisée S/2005 S1 qui prendra plus tard le nom de Daphnis. Celle-ci avait déjà été détectée en mai 2004 mais son existence est confirmée grâce à une photographie prise durant le survol des anneaux. Le 14 juillet la sonde spatiale effectue un nouveau survol à basse altitude (175 km) au-dessus d'Encelade. Les images prises montrent que les terrains du pôle sud sont géologiquement jeunes. Ils sont barrés par quatre failles énigmatiques et

jonchés de blocs de glace qui peuvent atteindre la taille d'un immeuble. Les quatre failles longues d'environ 130 km et distantes de 40 km qui ont été baptisées "rayures du tigre" sont à l'échelle géologique très jeunes (entre 10 et 1000 ans). On y trouve les évents qui éjectent en permanence de la vapeur et de la glace d'eau. La température au pôle sud mesurée par le spectromètre infrarouge est beaucoup plus élevée que ce prédisent les modèles compte tenu de l'albédo élevé de la surface et de l'incidence rasante des rayons du Soleil à ces latitudes. Le spectromètre de masse a mesuré que l'atmosphère qui entoure la lune est composée à 65% de vapeur d'eau, à 20% d'hydrogène moléculaire avec des proportions plus faibles de dioxyde de carbone, d'azote moléculaire et de monooxyde de carbone

Le 23 septembre 2005 Cassini survole Téthys à 1 500 km. Le 25 septembre 2005 la sonde passe à 514 km d'Hypérion. C'est le seul survol d'Hypérion planifié durant la mission primaire : il permet de révéler de façon très détaillée la structure étonnante de sa surface semblable à une éponge qui découlerait des impacts répétés sur une lune à faible densité et forte porosité. Un survol à relativement grande distance d'Encelade permet la mesure spectrale des jets de matière du pôle sud et permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle ceux-ci sont à l'origine du matériau de l'anneau E.

- 11 octobre 2005 : Survols de Dioné à 500 km et, le même jour, du satellite Télesto à 10 000 km.
- 28 octobre 2005 : Survol de Titan à moins de 1 350 km.
- 26 novembre 2005 : Survol de Rhéa à 500 km.
- 21 juillet 2006 : Survol de Titan à l'altitude minimale de 950 km.
- 30 août 2007 : Second survol de Rhéa, à 5 737 km.
- 10 septembre 2007 : Second et dernier survol de Japet à moins de 1 650 km.

Le 12 mars 2008 Cassini s'approche à moins de 50 km d'altitude d'Encelade en traversant ses gevsers. Les photos prises montrent que le pôle nord contrairement au pôle sud est fortement cratérisé donc ancien mais qu'il est également parcouru de fissures parallèles créées par une activité tectonique. Les mesures de températures à haute résolution réalisées à l'aide du spectromètre infrarouge montrent que la température le long des rayures du tigre peut atteindre -93°C soit 115° de plus que dans les autres régions de la lune. Compte tenu de ces températures élevées il est probable qu'il existe un océan liquide sous la surface d'Encelade. Les caractéristiques des matériaux éjectés par les geysers sont étonnamment proches de la matière composant les comètes.

Première extension de mission : Cassini Equinox Mission (2008-2010)

La mission primaire du programme Cassini doit s'achever le 30 juin 2008 après avoir orbité durant 4 ans et effectué 76 révolutions autour de Saturne. À cette date la sonde dispose toujours de réserves de propergols qui lui permettent de modifier plusieurs fois par mois son orbite pour survoler ses diverses cibles satellitaires. Le 15 avril 2008 la NASA décide au vu des réserves encore existantes de prolonger de 2 ans la mission à partir du 1^{er} juillet 2008. L'extension de la mission est rebaptisée *Cassini Equinox* Mission car l'équinoxe de Saturne doit se produire le 11 août 2009. Par contre, si la mission avait dû se terminer à la date prévue de la mi-2008, aucune décision n'avait encore été prise pour faire plonger la sonde dans l'atmosphère de Saturne (à l'instar de la sonde Galileo dans celle de Jupiter en 2003), ni pour l'insérer sur une orbite définitive qui lui permettrait de continuer de photographier passivement le système saturnien et de l'analyser au moyen de ses nombreux instruments de mesure qui sont en parfait état de marche pour encore de nombreuses années grâce, notamment, à l'énergie électrique assurée par son générateur thermoélectrique à radioisotope de type GPHS-RTG, au plutonium 238. Cette première extension de la mission (1^{er} juillet 2008-30 juin 2010) consiste en 60 orbites supplémentaires autour de Saturne, incluant un supplément de 21 survols de Titan, 7 d'Encelade, 6 de Mimas, 8 de Téthys et 1 de Dioné, de Rhéa et d'Hélène.`

Le 11 aout 2008 la sonde survole Encelade et parvient à effectuer des photos à haute résolution des terrains d'où jaillissent les geysers. Les images montrent que les failles baptisées rayures de tigre sont profondes de 300 mètres avec une section en V. D'après les premières analyses les points d'émergence des geysers sont rapidement obturés par la glace au bout de quelques mois ou quelques années et se déplacent donc de manière continue. Deux autres survols ont lieu les 9 et 31 octobre 2008. Les données recueillies donnent à penser que Encelade est le siège d'une forme de tectonique des plaques mais contrairement à ce qui se passe sur Terre le déplacement se fait dans une seule direction.



Synthèse des survols effectués par Cassini sur l'ensemble de la mission

Les réflexions sur une deuxième extension de mission sont engagées avant même que débute la première extension. En février 2010 la NASA annonce qu'elle a dégagé un budget de 60 millions \$ pour financer un prolongement de 7 ans de la mission de Cassini courant de juillet 2010 jusqu'en septembre 2017. La nouvelle mission est baptisée *Cassini Solstice Mission* car elle doit permettre d'observer le système de Saturne au moment du solstice d'été de son hémisphère nord qui a lieu en mai 2017. Au cours de cette phase, Cassini doit boucler 155 orbites autour de Saturne, effectuer 54 survols de Titan dont 38 à moins de 2 000 km, 11 d'Encelade dont deux à faible distance, trois de Dione et trois de Rhéa. Néanmoins ce prolongement se déroule dans des conditions moins favorables : la quantité d'ergols limitée ne permet pas d'approcher comme cela était souhaité Japet et le support apporté par les équipes au sol durant les survols est limité à quelques jours pour réduire les coûts. Durant cette phase Cassini doit observer les processus dépendant des changements temporels et saisonniers affectant Saturne, Titan, les lunes glacées et les anneaux. Cette phase doit permettre de compléter des observations sur Titan et Encelade. Enfin dans sa phase finale elle doit permettre de mener une étude comparative de Saturne et de Jupiter étudiée par la sonde spatiale Juno qui entamera ses observations en aout 2016.

Le 2 novembre 2010, la sonde s'est mise automatiquement en mode de sauvegarde en raison d'une inversion de bit au sein de son ordinateur (un bit de valeur 0 devient 1, ou le contraire, au sein des données informatiques), un mode dans lequel l'engin coupe tout équipement de bord non indispensable lorsqu'il rencontre une anomalie de fonctionnement. Pour les sondes et satellites, ceci se produit parfois en raison des rayonnements cosmiques, capables de perturber les électroniques de bord.

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

Le scénario de fin de mission (septembre 2017)

Plusieurs scénarios ont été écartés pour la fin de mission désormais planifiée en 2017. Les contraintes suivantes ont du être prises en compte : la sonde spatiale doit éviter de traverser les anneaux car elle pourrait être endommagée et il faut éviter tout risque de contamination de Titan et d'Encelade par des organismes terriens emportés par l'orbiteur. L'envoi de la sonde spatiale vers une autre planète externe ou vers un astéroïde centaurien situé entre Jupiter et Neptune a été écarté car le transit nécessiterait trop de temps. L'équipe de la mission a envisagé de placer Cassini sur une orbite stable à l'extérieur de celle de Phoebée ou de Titan. La solution finalement retenue a été sélectionnée parce qu'elle fournit des résultats scientifiques majeurs qui ne peuvent être obtenus que dans le cadre d'une fin de mission. Elle consiste à abaisser le périgée de Cassini de manière à ce que la sonde spatiale se glisse pour ses dernières orbites entre l'anneau D, le plus proche de la surface de Saturne, dont le bord intérieur se situe à 65 000 km du centre de Saturne et la partie la plus dense de la couche atmosphérique supérieure de la planète géante qui culmine à 62 000 km. La phase finale va de novembre 2016 à septembre 2017. Elle débute par 20 orbites rasant l'extérieur de l'anneau F permettant d'obtenir des images à haute résolution des anneaux F et A suivi de 22 "orbites de proximité" passant à l'intérieur de l'anneau D. La mission s'achève par le plongeon de la sonde spatiale au cœur de la planète géante le 15 septembre 2017. L'ensemble de ces manœuvres nécessite seulement un changement de vitesse de 5 à 30 m/s compatible avec les réserves de carburant. Les dernières orbites placent la sonde dans une position idéale pour réduire l'incertitude sur la masse des anneaux qui devrait chuter de 100 à 5 %, analyser la structure interne de Saturne, collecter des données sur l'ionosphère et la ceinture de radiation et étudier la structure de l'anneau D

En 13 ans autour de la planète, l'apport de la sonde Cassini dans notre connaissance de Saturne, de ses satellites et de ses anneaux est considérable. On connaît, à ce jour, 62 satellites référencés et nommés qui gravitent autour de Saturne. Mais on sait également qu'au moins 150 satellites supplémentaires existent, d'un diamètre de 5 km ou plus. Le problème dans ce compte est que des satellites sont nichés dans des anneaux (ou à proximité) et qu'ils échangent en permanence de la matière avec les anneaux. Certains de ces objets vont "naître" de l'agglomération de matière et, eux ou d'autres, peuvent disparaître aussi vite par dispersion de cette matière vers les anneaux. De ce fait on ne saura probablement jamais le décompte exact des satellites de Saturne, car c'est un nombre qui change constamment! Les interactions gravitationnelles entre Saturne, ses satellites et ses anneaux sont très complexes. Un seul exemple : tous les gros satellites des planètes du système solaire sont en rotation "synchrone" autour de leurs planètes respectives. C'est vrai aussi pour Saturne mais, ce qui est totalement inhabituel et/ou apparemment anormal c'est qu'une bonne dizaine de très petits satellites de Saturne sont également en rotation synchrone. Il est vraisemblable que le confinement dans (ou à proximité) des anneaux, associé aux forces de marée de Saturne, contribuent à cette stabilité jamais vue ailleurs avec des satellites de moins de 300 km de diamètre. Ces mini-satellites synchrones ne sont absolument pas sphériques (plutôt "patatoïdes") et ont des dimensions extrêmes allant de 179 et 113 km de long pour les 2 plus grands (Janus et Épiméthée) jusqu'à 500 mètres de largeur pour le plus petit (Égéon).

Le voyage de Cassini a pris fin le 15 septembre 2017 quand, à court de carburant, la sonde est allée se désintégrer dans la haute atmosphère de Saturne. 20 ans dans l'espace dont treize autour de Saturne. Une moisson extraordinaire d'informations, de mesures, de photos a été réalisée au long de ces 13 ans. Parmi toutes les données que nous connaissons à ce jour sur cette planète, on en doit au moins 95% à Cassini et Huygens.

Résultats scientifiques

Les principales découvertes effectuées par la mission Cassini-Huygens sont les suivantes :

Jupiter



Image de Jupiter prise le 30 décembre 2000 par Cassini

La sonde *Cassini-Huygens* a pu observer Jupiter pendant presque 6 mois du 1^{er} octobre 2000 au 22 mars 2001. Elle s'en est approchée à une distance minimale de 9,7 millions de kilomètres le 30 décembre 2000 et a pu effectuer plusieurs mesures. Durant ce survol ont été pris environ 26 000 clichés de la planète parmi lesquels on trouve les plus précis jamais réalisés (voir illustration à gauche). Sur certaines photos, les plus petits détails visibles mesuraient environ 60 km.

Une découverte majeure fut annoncée par la NASA le 6 mars 2003 et concernait la nature de la circulation atmosphérique de Jupiter. Certains clichés représentaient des bandes sombres alternant avec des zones plus claires dans l'atmosphère. Les scientifiques ont longtemps considéré ces zones, avec leurs nuages clairs, comme étant des zones de courants ascendants, partant du fait que sur Terre, les nuages se forment principalement dans des mouvements d'air ascendant. Mais l'analyse des clichés pris par Cassini a donné une autre explication. Des cellules individuelles de tempête, comportant des nuages blancs qui remontent, trop petites pour être observées depuis la Terre, émergent pratiquement partout, y compris dans les zones sombres. D'après Anthony Del Genio du Goddard Institute for Space Studies de la NASA, « We have a clear picture emerging that the belts must be the areas of net-rising atmospheric motion on Jupiter, with the implication that the net motion in the zones has to be sinking » (Nous avons une bonne illustration montrant que les ceintures claires ou des orages avec des nuages clairs doivent être les zones de mouvement ascensionnel de l'atmosphère de Jupiter, avec la conséquence que les bandes sombres sont des zones de descente ou de redescentede l'atmosphère).

Les autres observations atmosphériques ont révélé une structure ovale sombre et tourbillonnante dans la haute atmosphère, d'une taille similaire à la grande tache rouge, près du pôle nord de Jupiter. Les clichés infrarouges ont, quant à eux, révélé certains aspects de la circulation atmosphérique près des pôles. Ils ont révélé une structure en forme de bandes ceinturant la planète, bordées de bandes adjacentes dans lesquelles les vents soufflent dans des directions opposées.

Cette même annonce a permis de remettre en question la nature des anneaux de Jupiter. La dispersion de la lumière par les particules des anneaux a révélé que ces particules avaient des formes très irrégulières et étaient susceptibles d'avoir pour origine de la matière éjectée à la suite de l'impact de micrométéorites sur les très petits satellites de Jupiter, probablement sur Métis et Adrastée dont le champ de gravitation (la pesanteur) est excessivement faible.

Saturne et son environnement



Saturne et ses anneaux photographiés en 2004 par la sonde Cassini

Étude de la période de rotation sidérale de Saturne mesurée en radio

La détermination de la période de rotation sidérale d'une planète est essentielle pour l'étude de tous les phénomènes physiques qui y sont associés puisqu'on se base sur cette période de rotation sidérale pour l'établissement du système de longitude de la planète. Dans le cas des planètes telluriques, il suffit d'observer le sol pour obtenir cette période de rotation. Dans le cas des planètes gazeuses, il n'y a pas de 'sol' et le cœur est enfoui très profondément sous l'atmosphère de la planète. La seule chose observable qui est liée à la rotation du cœur de ces planètes est leur champ magnétique. On étudie donc les modulations induites par la rotation du champ magnétique de la planète étudiée sur ses émissions radios naturelles pour connaître sa période de rotation sidérale. Dans le cas de Jupiter, la période de rotation sidérale a été mesurée de cette manière. La période obtenue (9h 55m 29.68s) est ainsi déterminée avec une très grande précision (l'écart entre chaque mesure ne dépasse pas 0,08 s, ce qui fait une précision relative de 0,0001 %). Dans le cas de Saturne, la période de rotation fut d'abord déterminée grâce aux données de la sonde Voyager. La période sidérale de Saturne était donc de 10h 39m et 24s (avec une précision relative de 0,02 %). En 2000, des scientifiques (utilisant les données radio de la sonde Ulysses) ont observé que la période de modulation des émissions radio de Saturne avait changé depuis les mesures de Voyager. Les nouvelles mesures donnent une période 1 % plus longue que celle mesurée par Vovager. Les mesures radios obtenues avec l'instrument Cassini/RPWS/HFR confirme la variation de la période des modulations des émissions radio de Saturne. Des observations effectuées sur les 2 premières années d'orbites autour de Saturne (2004-2005) semblent montrer que la période radio varie lentement (à l'échelle de l'année) de quelques fractions de pour-cents.

Comme la vitesse de rotation sidérale du cœur de Saturne ne peut pas varier, c'est l'interprétation des modulations des émissions radios qu'il faut probablement revoir. Que sait-on sur ces émissions ? Elles sont majoritairement émises sur le côté jour de la magnétosphère de Saturne et elles sont fortement corrélées avec la pression dynamique du vent solaire. Différentes interprétations existent :

- effet saisonnier : la hauteur du Soleil sur le plan des anneaux change la quantité d'électrons libres sur les lignes de champs magnétiques et donc change les conditions d'émission des ondes radio.
- effet du cycle solaire : les propriétés du milieu interplanétaire et du vent solaire varient fortement avec l'activité solaire. Il a été montré que les émissions radio aurorales de Saturne sont très fortement corrélées avec les fluctuations des paramètres du vent solaire.
- effet de battement : fluctuation non aléatoire de la localisation de la région active en radio dans un secteur de temps local. Des simulations numériques ont montré qu'on peut très facilement obtenir des périodes de rotation apparente différentes de la période réelle par effet de battement.
- système de convection du cœur de Saturne : théorie inspirée par ce qui se passe dans le Soleil, mais peu probable.

Mais aucune n'explique encore vraiment la variabilité observée, ni ne permet d'obtenir la période de rotation sidérale de Saturne.

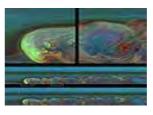
Le problème de la définition d'un système de longitude à Saturne reste donc entier. Le problème est particulièrement épineux car, si la période de rotation de Saturne est effectivement 1 % plus lente que la période mesurée par Voyager, tout le système atmosphérique de Saturne serait alors en super-rotation (c'est-à-dire qu'il tournerait plus vite que le cœur de la planète) ce qui est difficilement explicable.



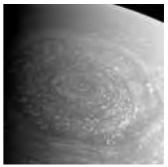




Tempête dans l'hémisphère nord (2012)



Détail la tempête en fausses couleurs montrant l'opacité plus ou moins importante de la couche de nuages supérieure



Structure hexagonale des nuages au pôle nord

Les anneaux de Saturne Origine des anneaux

Deux scénarios sont évoqués en ce qui concerne l'origine des anneaux : résultat de la destruction d'une lune désagrégée par les forces gravitationnelles agissant à l'intérieur de la limite de Roche ou relique de la formation de la planète géante. Bien que les données recueillies par Cassini ne permettent pas début 2013 de trancher, le caractère hétérogène du matériau observé par l'instrument UIS semble exclure une origine cataclysmique qui ferait d'une unique lune la source du matériau. Les anneaux remonteraient donc à 4,5 milliards d'années. L'accumulation de poussière depuis cette époque qui aurait du rendre les anneaux beaucoup moins brillants selon les opposants à ce scénario, serait compensée par l'agitation permanente régnant au sein des anneaux qui répartirait la matière sombre.



Taches (Spokes) de l'anneau B

Structure et composition des anneaux

Cassini a découvert plusieurs anneaux qui n'avaient pas été détectés depuis la Terre ni par les sondes spatiales antérieures. Un premier anneau large de 5 000 km, peu dense, se situe au niveau de l'orbite de Janus et Épiméthée. Des portions d'anneau, appelés arcs, ont été détectées en septembre 2006 au niveau de l'orbite de Methone (portion de 10° de l'orbite), en juin 2007 au niveau de l'orbite d'Anthée et en 2006 sur l'orbite de Pallene. Les instruments de Cassini ont permis de déterminer que le matériau de l'anneau E, situé entre les orbites de Mimas et de Rhéa et caractérisé par le diamètre très faible de ses constituants élémentaires, est fourni par les geysers d'Encelade.

L'orbiteur a également permis de découvrir l'origine de la lacune de Keeler située dans l'anneau A non loin de sa bordure extérieure. Ce sillon large de 42 km est créé par une petite lune, Daphnis, révélée à cette occasion. L'orbite de celle-ci s'écarte légèrement du plan orbital des anneaux ce qui génère des Saturne, ses anneaux, ses satellites Olivier Sabbagh GAP 47 Décembre 2014 – Révision Mars 2023 Page 113

ondulations ayant une composante verticale pouvant atteindre une hauteur de 1,5 km. Ce phénomène exceptionnel dans un anneau épais généralement de quelques dizaines de mètres a été révélé par son ombre portée visible au moment de l'équinoxe de Saturne. L'anneau F est connu depuis le survol de Pioneer 11 de 1979. Cet anneau large de quelques centaines de kilomètres est encadré par deux satellites bergers, Prométhée et Pandore, qui en assurent la stabilité. Des images spectaculaires prises par Cassini ont mis en évidence l'évolution constante de l'anneau soumis à l'attraction gravitationnelle de Prométhée qui arrache des filaments de matière sur son passage formant des draperies dans lesquelles se créent parfois des mini-lunes de glace d'un diamètre d'un kilomètre attirées également par cette lune.

Collecte d'informations sur les spokes

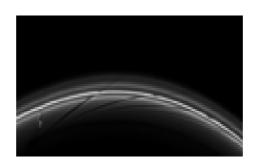
Les spokes (littéralement « rayons de bicyclette ») sont des taches observées sur les anneaux de Saturne (et perpendiculaires à ceux-ci) par la sonde Voyager dans les années 1980. Cassini-Huygens a permis de vérifier la réalité de ce phénomène et d'invalider certaines théories qui ne prévoyaient pas leur réapparition avant 2007.

Occultation radio des anneaux de Saturne

En mai 2005, Cassini a commencé une série d'expériences d'occultation, conçues pour déterminer la répartition des tailles des particules des anneaux et effectuer des mesures de l'atmosphère de Saturne. La sonde a effectué des orbites spécifiquement étudiées à cet effet. Dans ce but, la sonde traverse les anneaux et émet des ondes radio en direction de la Terre. Les variations de puissance, de fréquence et de phase de ces ondes sont alors étudiées afin de déterminer la structure des anneaux.



L'ombre des anneaux de Saturne projetée sur la surface de la plan<u>è</u>te géante



Le matériau de l'anneau F est perturbé par Prométhée



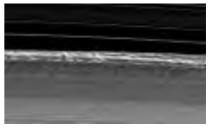
Prométhée et Pandore encadrent l'anneau F



La lacune Encke



La lumière du Soleil masquée par Saturne permet de distinguer les anneaux externes diffus E et G



Des structures verticales culminant à 2,5 km sont visibles en bordure de l'anneau

Magnétosphère de Saturne

Les caractéristiques de la magnétosphère de Saturne étaient mal connues avant l'arrivée de Cassini car résultant uniquement des brèves observations effectuées par Pioneer 11 et les sondes Voyager lors de leur survol de Saturne dans les années 1970 et 1980. Cassini a permis d'effectuer des observations sur plusieurs années avec des instruments beaucoup plus précis. La mission a permis de découvrir que,

contrairement aux autres planètes du système solaire dotées d'un champ magnétique, celui de Saturne a un axe qui coïncide exactement avec l'axe de rotation. Cassini a déterminé que le champ magnétique de la planète subit une importante fluctuation qui se répète avec une périodicité de 10 heures 47 minutes.

Cette modulation, que les scientifiques n'expliquent toujours pas fin 2012, a sa correspondance dans le domaine des ondes radio (Saturn kilometric radiation ou SKR). Les instruments scientifiques de la sonde ont permis de découvrir que la matière présente dans la magnétosphère avait pour origine principale des geysers situés au pôle sud de la lune Encelade. La composition de ces matériaux est dominée par les ions et molécules produits par la combinaison des composants de l'eau éjectés par les geysers. Contrairement aux hypothèses des scientifiques on ne trouve pas de quantités notables de l'azote qui devrait s'échapper de l'atmosphère de Titan. L'instrument MIMI a détecté la présence d'une ceinture de radiations en forme de beignet à l'intérieur de l'anneau D le plus proche de surface de Saturne.

Titan

Environnement sur Titan

Après un voyage de près de sept ans et 3,5 milliards de kilomètres parcourus dans le système solaire sur le dos de Cassini, Huygens s'est donc posée sur Titan, grâce à ses boucliers thermiques et au déploiement correct de ses deux parachutes, le 14 janvier 2005 renvoyant sur Terre, distante d'un milliard deux cent millions de kilomètres, des informations et des images (envoyées par le DISR à l'antenne de Cassini) d'une qualité jusqu'alors inégalée.

Le module scientifique de surface (SSP) révèle qu'à cet endroit, sous une croûte dure et mince, le sol a la consistance du sable. Les paysages de Titan présentent des similitudes avec ceux de la Terre, a expliqué Martin G. Tomasko, responsable du DISR, l'instrument qui a pris les images. Brouillards, traces de précipitations, érosions, abrasion mécanique, réseaux de chenaux de drainage, systèmes fluviaux, lacs asséchés, paysages côtiers et chapelets d'îles : «les processus physiques qui ont façonné Titan sont très proches de ceux qui ont modelé la Terre. Les matériaux, en revanche, sont plus «exotiques», dit Martin Tomasko de l'ESA. Puisque l'eau (H₂O) y est remplacée par du méthane (CH₄), qui peut exister sous forme liquide ou gazeuse à la surface de Titan. Quand il y pleut, ce sont des précipitations de méthane mêlées de traces d'hydrocarbures qui déposent sur le sol des substances provenant de l'atmosphère. Des pluies seraient d'ailleurs tombées «dans un passé peu éloigné» précise encore Martin Tomasko, le 21 janvier 2005.

D'après ces informations, Titan possède donc bien une atmosphère uniforme faite de différents gaz (méthane, azote...) et, au sol, une activité cryovolcanique, des rivières et de l'eau en abondance. Sur son sol gelé à -180 °C (mesuré sur place), se trouvent d'innombrables galets de glace parfois aussi volumineux que des automobiles.

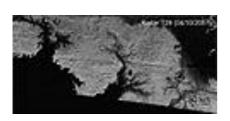
Analyses

L'atterrissage lui-même soulève quelques questions. La sonde devait sortir de la brume à une altitude comprise entre 50 et 70 km. En fait, Huygens a commencé à émerger des nuages à 30 kilomètres seulement au-dessus de la surface. Cela pourrait signifier un changement dans le sens des vents à cette altitude. Les sons enregistrés lorsque la sonde s'est posée laissent penser qu'elle s'est posée sur une surface plus ou moins boueuse, au moins très souple. « Il n'y a eu aucun problème à l'impact. L'atterrissage fut beaucoup plus doux que prévu. »

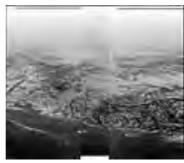
- « Des particules de matière se sont accumulées sur l'objectif de l'appareil photo à haute résolution du DISR qui pointait vers le bas, ce qui suggère que :
- soit la sonde a pu s'enfoncer dans la surface.
- soit la sonde a vaporisé des hydrocarbures à la surface et ils se sont rassemblés sur l'objectif.
- « Le dernier parachute de la sonde n'apparaît pas sur les clichés après l'atterrissage, aussi la sonde n'est probablement pas orientée à l'est, où nous aurions vu le parachute ». Quand la mission a été conçue, il a été décidé qu'une lampe d'atterrissage de 20 watts devrait s'allumer 700 mètres au-dessus de la surface et illuminer le site au moins 15 minutes après l'atterrissage. « En fait, non seulement la lampe d'atterrissage s'est allumée à exactement 700 mètres, mais elle a continué à fonctionner plus d'une heure après, tandis que Cassini disparaissait au-delà de l'horizon de Titan pour continuer sa mission autour de Saturne » a

encore indiqué Tomasko. Le spectromètre de masse embarqué à bord de Huygens et qui sert à analyser les molécules de l'atmosphère a détecté la présence d'un épais nuage de méthane, haut de 18 000 à 20 000 mètres au-dessus de la surface. D'autres indications transmises par le DISR, fixé à l'avant pour déterminer si Huygens s'était enfoncé profondément dans le sol, a révélé ce qui semble être du sable mouillé ou de la terre glaise. John Zarnecki, responsable du « Gas Chromatograph and Mass Spectrometer (GCMS) » qui analyse la surface de Titan, a déclaré : « Nous sommes surpris mais nous pouvons penser qu'il s'agit d'un matériau recouvert d'une fine pellicule, sous laquelle se trouve une couche d'une consistance relativement uniforme comme du sable ou de la boue ».

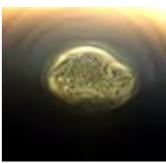
On doit à cette mission la découverte de l'Ontario Lacus, un lac d'éthane liquide qui fut le premier endroit du système solaire (hors de la Terre) où du liquide a été détecté en surface.



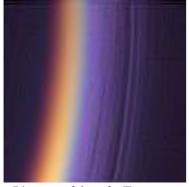
Vallée fluviale vers le pôle nord de Titan



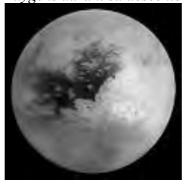
Photographie d'une côte située en bordure d'un lac prise par Huygens durant sa descente



Un cyclone permanent stagne au-dessus du pôle sud de Titan



L'atmosphère de Titan est composée de nombreuses couches différenciées superposées visible sur cette image prise dans l'ultraviolet



Titan dans l'infrarouge



Une partie d'un cratère d'impact récent imagé par le radar de Cassini

Les autres lunes de Saturne Phœbé

Phœbé est la plus éloignée des lunes de taille significative : elle se trouve quatre fois plus loin (13 millions de km) de la surface de Saturne que la lune suivante Japet. Elle circule sur une orbite rétrograde avec une inclinaison quasi polaire (173°). Ayant une forme sphérique irrégulière elle a un diamètre d'environ 220 km et est très sombre. Les seules images antérieures à la mission Cassini ont été prises par Voyager 2 en 1981. Elles ont fourni peu d'informations compte tenu de la distance (plus de deux millions de km) d'où elles ont été prises. Cassini n'a survolé qu'une seule fois la lune, 16 jours avant son insertion en orbite autour de Saturne, car elle est située à l'extérieur de l'orbite de la sonde spatiale. Le 11 juin 2004 Cassini est passée à 2 068 km de Phoebé et est parvenu à photographier pratiquement toute sa surface grâce à la vitesse de rotation de la lune. Celle-ci présente une surface très sombre (albédo de 0,06), couverte de cratères qui ont pour certains 80 km de diamètre avec des parois pouvant atteindre 16 km de haut. L'hypothèse d'un astéroïde capturé par Saturne est battue en brèche par l'observation de matériaux beaucoup plus clairs à l'intérieur des cratères signalant la présence de glace d'eau dissimulée sous une couche de poussière pouvant atteindre 300 à 500 mètres de diamètre. La glace d'eau représenterait 30 % de la masse de Phœbé (contre 50 % pour les principales lunes glacées de Saturne). Phœbe est sans doute une protoplanète, aux caractéristiques proches de Pluton, qui s'est formée dans la

ceinture de Kuiper au tout début de l'histoire du système solaire. Elle a subi un processus de différenciation planétaire au début de son existence. Après s'être refroidie sa surface a été martelée par les impacts lui donnant sa forme irrégulière actuelle. Elle a été par la suite capturée par la planète Saturne.

Encelade

En 2005 les mesures effectuées au cours des deux premiers survols de la petite lune Encelade (500 km de diamètre) ont mis en évidence la présence d'une atmosphère. Celle-ci est créée par une forme de volcanisme qui génère des geysers et une déviation du champ magnétique du satellite a aussi été constatée. Ce type de variation du champ magnétique est caractéristique d'une atmosphère mince mais significative. D'autres mesures semblent montrer que cette atmosphère est essentiellement composée de vapeur d'eau ionisée. En 2006, des geysers composés de particules très fines de glace (éjectées dans l'espace à plus 200 km de la surface) furent découverts dans la région australe d'Encelade. Pour les étudier, les scientifiques planifièrent un survol de la sonde le 12 mars 2008, à seulement 48 km de la surface, par Cassini. Les premiers résultats révélèrent une température plus élevée que prévue et la présence de composés organiques, voire d'eau liquide. D'autres survols à plus basse altitude ont été programmés en 2008 et au-delà, dans le cadre de la mission étendue de la sonde (après le 30 juin 2008).

Hypérion

Cassini fournit les premières observations détaillées d'Hypérion, le plus grand des satellites irréguliers (non sphérique) du système solaire. Voyager II, qui l'avait survolé en 1981 à grande distance, avait toutefois permis de dresser un premier portrait de cette lune en forme de patate (410 × 260 × 220 kilomètres) couverte de cratères profonds et avec un axe de rotation chaotique, résultant sans doute de la destruction d'un corps céleste d'une taille plus importante. Les photos spectaculaires prises par Cassini montrent un monde évoquant une éponge. Les cratères très profonds, qui criblent sa surface pratiquement sans trace d'éjectas, sont liés sans doute à la très grande porosité et à la faible densité de la lune : le bombardement des météorites n'a pas éjecté les matériaux mais les a comprimés. Les parois des cratères sont brillantes trahissant la présence de glace d'eau. Le fond des cratères est par contre sombre et rougeâtre car la température très basse (-180°C) a entrainé la sublimation des matériaux volatiles et l'accumulation de matériaux plus sombres. Selon une théorie controversée la profondeur exceptionnelle des cratères découlerait de la concentration des rayons solaires par le matériau sombre qui entrainerait à son tour la sublimation de la glace d'eau. L'excentricité de l'orbite de la lune serait entretenue par la proximité de Titan (260 000 km d'écart entre les orbites moyennes des deux lunes) avec laquelle Hypérion est en résonance orbitale. Le faible albédo (0,3) d'Hypérion serait du à la présence de dioxyde de carbone et d'autres hydrocarbones dont du méthane échappé de Titan. Compte tenu de la faible densité mesurée de Hypérion (un peu plus de 0,5) celle-ci est sans doute constituée d'un empilement de corps plus petits que la gravité relativement faible n'a pas comprimés.

Nouvelles lunes de Saturne

La mission Cassini-Huygens a permis de découvrir fin 2012 une dizaine de nouvelles lunes de petite taille (moins de 10 km de diamètre) qui sont venus à s'ajouter à la cinquantaine de lunes connues ou découvertes ces dernières années à l'aide de télescopes basés à Terre. Plusieurs d'entre elles ne portent à cette date qu'un numéro d'ordre provisoire en attendant des observations complémentaires confirmant leur existence. En 2004 sont découverts Méthone (diamètre 1,6 km) et Pallène (3 km de diamètre) situées entre Mimas et Encelade et formant le sous-groupe des Alcyonides ainsi que Pollux (3 km de diamètre) qui partage l'orbite de Dioné autour du point de Lagrange arrière L5 de Saturne. Daphnis (8 km de diamètre) découverte en 2005 est, après Pan (26 km), le second satellite par la taille circulant dans les anneaux de Saturne. Il est à l'origine de la lacune de Keeler (42 km de large) qui divise l'anneau A de Saturne tout près de sa périphérie et au-delà de la lacune d'Encke. Son passage déblaie la lacune mais son champ de gravité génère également des vagues à l'intérieur de l'anneau A sur plusieurs centaines de kilomètres de profondeur, comme le montrent les clichés pris par Cassini. En 2007 l'équipe d'imagerie de Cassini a découvert Anthée, une lune de 2 km de diamètre située comme Méthone et Pallène entre Mimas et Encelade. Égéon, découverte en 2008 et d'un diamètre de 500 mètres, circule dans l'anneau G, sans doute formé par des débris éjectés par les collisions affectant cette lune.

Page 117

Vérification de la théorie de la relativité générale

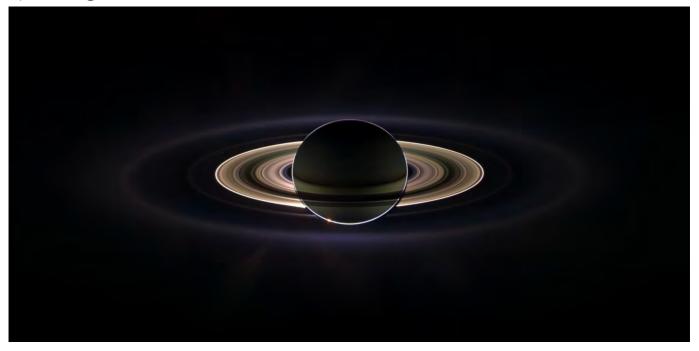
Le 10 octobre 2003, l'astrophysicien italien Bruno Bertotti de l'université de Pavie et ses collègues Luciano Iess de l'université de Rome « La Sapienza » et Paolo Tortora de l'université de Bologne ont présenté les résultats du test de la théorie de la relativité d'Einstein que la sonde Cassini avait effectué l'année précédente. Durant l'été 2002, la Terre, le Soleil et la sonde Cassini-Huygens ont été exactement alignés, le Soleil se trouvant entre la Terre et la sonde.

Lors des communications avec la sonde et grâce à l'antenne de quatre mètres de diamètre de celle-ci ainsi qu'à la nouvelle station au sol du NASA Deep Space Network à Goldstone en Californie, l'équipe d'astrophysiciens italiens a pu observer un glissement de fréquence dans les ondes radio reçues ou émises par Cassini-Huygens, lorsque ces ondes voyageaient à proximité du Soleil. D'après la théorie de la relativité générale, un objet massif tel que le Soleil est censé courber l'espace-temps autour de lui. Ainsi, un rayon lumineux ou une onde radio qui passe à proximité de l'étoile doit parcourir une distance plus grande à cause de cette courbure. Ce surplus de distance qu'ont dû parcourir les ondes émises par la sonde pour atteindre la Terre a retardé leur réception et ce retard a pu être mesuré et quantifié et a permis de vérifier la théorie avec une précision cinquante fois supérieure à celle des expériences précédentes effectuées avec les sondes Viking.

Bien que des déviations par rapport à la relativité générale soient prévues par certains modèles cosmologiques, aucune n'a été observée dans cette expérience. Les mesures effectuées se sont trouvées en accord avec la théorie avec une précision de l'ordre de 1 sur 50 000.

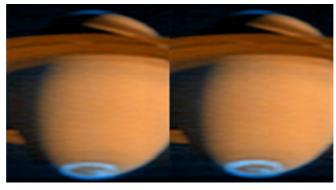
VI – Iconographie, photos (et explications complémentaires)

A) Images de Saturne



Saturne à contre-jour, éclipsant le Soleil, vue par la sonde Cassini

Avec la géante Saturne suspendue dans l'obscurité et abritant Cassini de l'éclat aveuglant du Soleil, la sonde a pu voir les anneaux comme jamais auparavant, révélant des anneaux inconnus à peine visibles. Cette merveilleuse vue panoramique a été créée en combinant un total de 165 images prises par la caméra grand angle de Cassini durant 3 heures le 15 septembre 2006. La couleur a été créée numériquement en composant des vues avec des filtres en ultraviolet, infrarouge et neutre, puis assemblées pour ressembler aux vraies couleurs. La mosaique d'images a été acquise pendant les 12 heures où la sonde était dans l'ombre de Saturne, permettant une multitude de nouvelles observations des particules microscopiques qui composent les très fins anneaux de la planète. Durant cette observation, Cassini a détecté deux nouveaux anneaux à peine visibles : l'un coïncide avec les orbites des satellites Janus et Epimetheus, l'autre coïncide avec l'orbite de Pallene. Le très étroit anneau G se voit facilement ici, à l'extérieur des principaux anneaux brillants. Entourant le système entier se trouve le très vaste anneau E. Les panaches glacés d'Encelade, dont les éruptions alimentent l'anneau E en particules, trahissent la présence du satellite sur le bord gauche de l'anneau E. A l'interieur de l'anneau G et au-dessus des principaux anneaux brillants se trouve le point pâle de la Terre. Cassini regarde son point d'origine à plus d'un milliard de kilomètres, dans les profondeurs glacées du système solaire externe. Les petites particules sont bousculées par la lumière du Soleil et les forces électromagnétiques. Ainsi leur distribution nous informe beaucoup sur l'environnement local de l'espace. Cassini était à peu près à 2,2 millions de kilomètres de Saturne quand les images de cette mosaique ont été prises. L'échelle de l'image est d'environ 260 kilomètres par pixel.



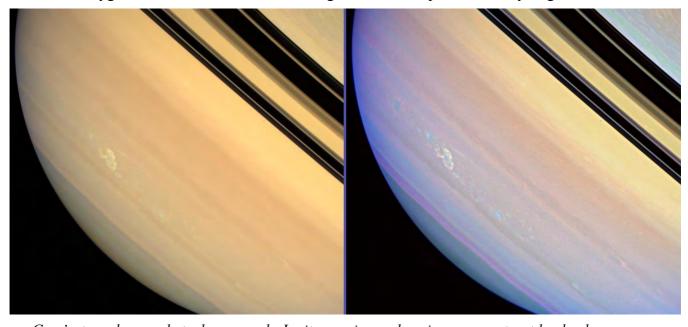
Aurores australes de Saturne

Page 119

La sonde Cassini a obtenu de nouvelles images d'aurores de Saturne, comparables aux aurores boréales ou australes de la Terre. Ces images prises le 21 juin 2005, avec le spectrographe en ultraviolet de Cassini sont les premières de la mission à saisir l'ovale entier de ces aurores au pôle sud de Saturne. Dans ces deux images en fausses couleurs, le bleu represente les émissions de l'aurore qui sont de l'hydrogène excité par des bombardements d'électrons, tandis que la couleur rouge-orangée est le reflet de la lumière du Soleil. Ces images montrent que la lumière de ces aurores des régions polaires réagit rapidement aux changements des vents solaires.

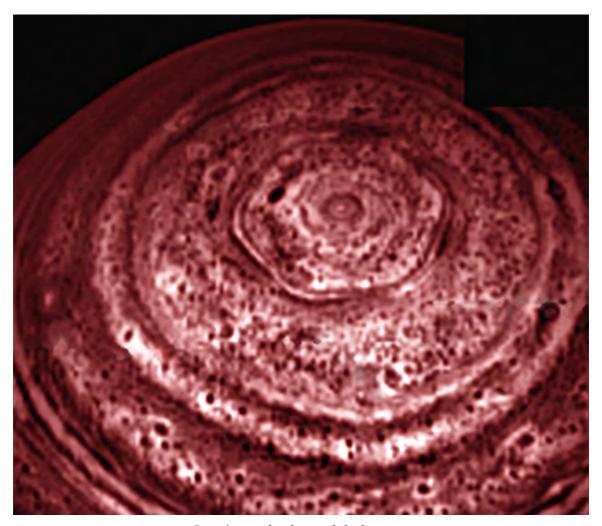
On voit bien les modifications de cerre aurore polaire dans ces deux photos prises à une heure d'intervalle. Le point le plus brillant à gauche diminue et un autre point brillant apparaît au milieu de l'aurore dans la seconde image. Réalisées en scannant lentement les images prises avec le spectrographe ultraviolet sur l'ensemble de la planète, les images contiennent plus de 2.000 longueurs d'ondes d'informations spectrales dans chaque image, ce qui permet aux chercheurs d'étudier les aurores, les gaz, les brumes et brouillards de Saturne et leurs modifications.

Tout comme celles de notre Terre, les aurores de Saturne sont de forme ovale à de hautes latitudes autour des pôles, avec leurs taches et leurs bandes. Les images du spectrographe ultraviolet montrent que les aurores de Saturne durent au moins une heure, mais que de petits changements sont visibles entre deux images prises dans ce laps de temps. Le même processus produit des aurores sur les deux planètes : des variations dans l'environnement du plasma laissent échapper des électrons captifs qui forment alors des lignes de champ magnétique dans la haute atmosphère. Là, ils entrent en collision avec atomes et molécules, en les excitant vers de plus grandes énergies. Les atomes et molécules relâchent cette énergie additionnelle en émettant de la lumière avec des caractéritiques particulières de couleur et de longueurs d'ondes. Sur Terre, cette lumière provient essentiellement des molécules d'atomes d'oxygène et d'azote. Sur Saturne, il s'agit d'émissions provenant d'hydrogène.



Ce n'est pas la grande tache rouge de Jupiter, mais ces deux images montrent le plus long orage électrique jamais obesrvé à ce jour sur Saturne par la sonde Cassini

Ces photos ont été prises plus de trois mois après que l'orage ait été détecté grâce à des éclairs produits par des décharges radio le 27 novembre 2007. Les spécialistes des images de Cassini pensent que l'orage est une grande perturbation verticale qui va de la basse vers la haute troposphère de Saturne. Ces images ont été réalisées avec des filtres spectraux bleu, rouge et vert et montrent Saturne dans des couleurs conformes à ce que verrait un œil humain. Cet orage ressort très clairement dans la vue renforcée de droite. Cette dernière combine des images prises dans l'infrarouge, le vert et le violet, respectivement à 939, 567 et 420 nanomètres et représentent une expansion des longueurs d'ondes du spectre électromagnétique visible par l'œil. Ces images ont été prises par la caméra grand-angle de Cassini le 4 mars 2008, à une distance d'environ 1,3 millions de kilomètres de Saturne. L'échelle de l'image est de 74 kilomètres par pixel.



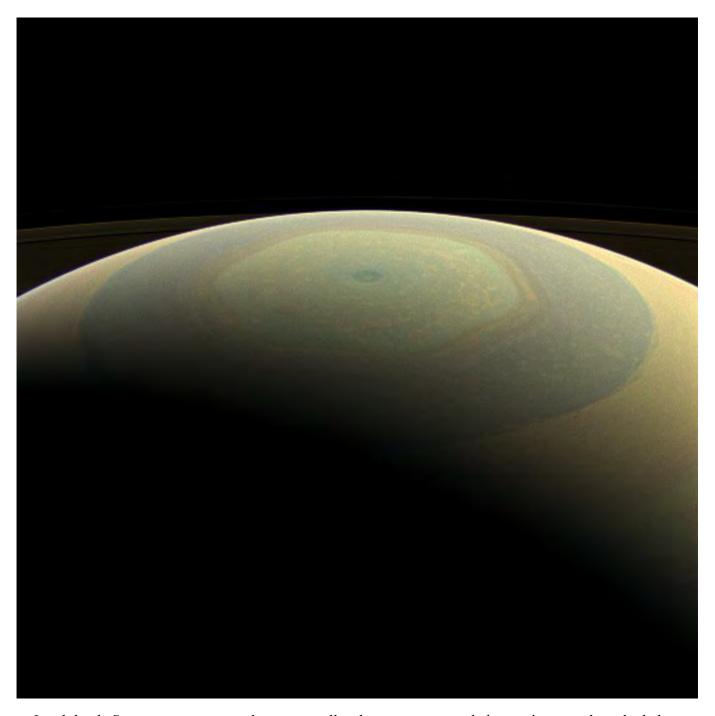
Le très actif pôle nord de Saturne

Un étrange polygone à six côtés encerclant le pôle nord de Saturne à une latitude nord de 78 degrés a été vu par le spectromètre de la sonde Cassini travaillant en lumière visible et infrarouge. C'est l'une des toutes premières images jamais prise de la région polaire nord. Initialement découvert et vu la dernière fois par les sondes Voyager au début des années 1980, ces nouvelles images montrent cet hexagone polaire fin 2006 et prouvent ainsi que c'est une caractéristique de longue durée sur Saturne.

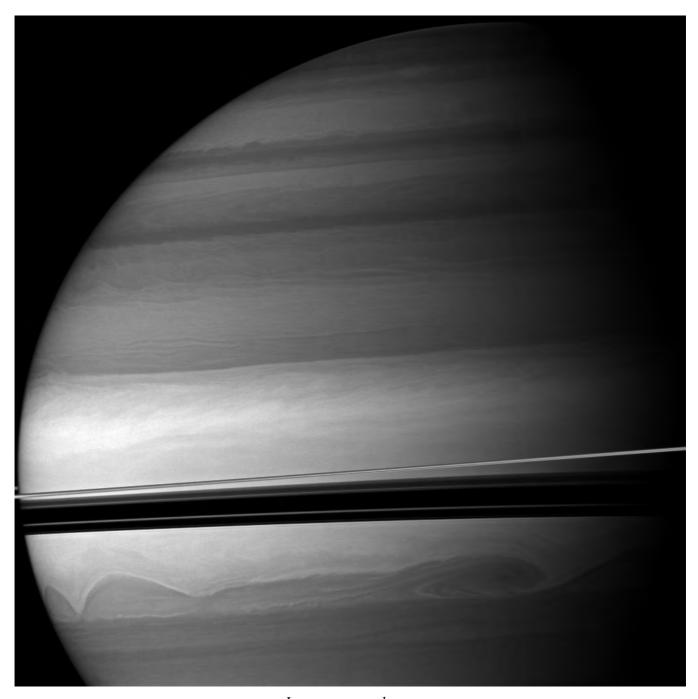
Cette image est la première à montrer la chose dans son entier, en une prise et c'est aussi la première vue polaire à utiliser le rougeoiement de Saturne à 5 microns (sept fois la longueur d'onde visible pour l'œil humain) comme source lumineuse. Cela permet de voir le pôle nord pendant la nuit de l'hiver « saturnien ». Les précédentes images prises par Voyager et par des télescopes terrestres souffrent de mauvaises conditions de vue et d'angle en présentant cette caractéristique du pôle nord en vue rasante du nord de la planète.

Pour voir cette atmosphère profonde la nuit, les instruments en infrarouge montrent le rougeoiement venant des profondeurs de Saturne. Ces nuages rouges évoluent environ 75 kilomètres plus bas que les nuages situés dans des longueurs d'ondes visibles. Sans infrarouge les nuages supérieurs bloqueraient ce rougeoiement qui apparaît foncé dans cette image. Pour montrer ces différents nuages, l'image originale a été contrastée à l'envers. Les éléments imbriqués, alternant le clair et le foncé indiquent que ce complexe hexagonal s'étend très profondément dans l'atmosphère, au moins à une pression équivalente à 3 atmosphères terrestres.

De multiples images prises pendant 12 jours entre le 30 octobre et le 11 novembre 2006 montrent que ce polygone est stationnaire et est probablement une vague planétaire qui encercle le pôle et s'étend profondément dans l'atmosphère. Cette image a été prise le 29 octobre 2006, à une distance d'environ 902.000 kilomètres au-dessus de ces nuages de Saturne.



Le globe de Saturne, vu ici en couleurs naturelles dans cette image de la caméra grand-angle de la sonde Cassini. La forme hexagonale caractéristique de la tempête permanente du pôle nord de Saturne, jaunâtre ici, est visible. Au pôle nord, une version saturnienne d'un cyclone à très haute vitesse, avec son œil et le reste. Cette image a été prise le 22 juillet 2013.

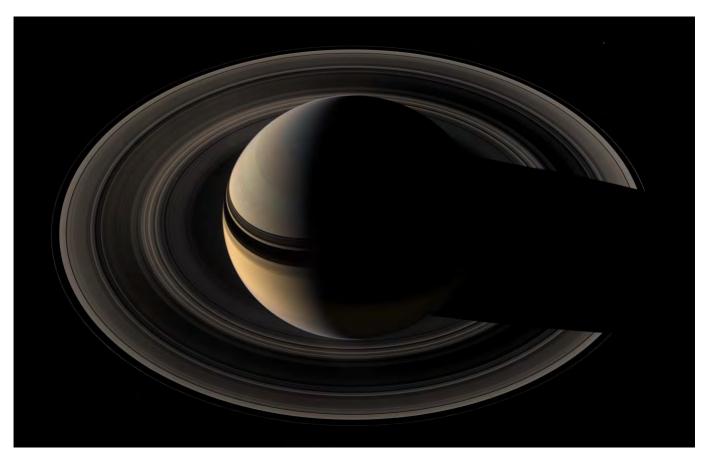


Importantes volutes

D'immenses nuages forment des volutes aux latitudes sud de Saturne où les anneaux projettent des ombres impressionantes.

Cette image montre le côté nord des anneaux éclairés par le Soleil, depuis une position située juste audessus du plan des anneaux.

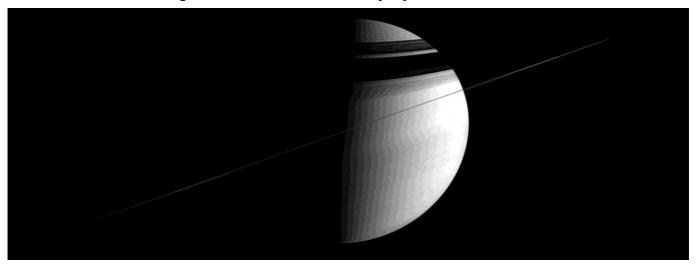
Photo prise par la caméra grand-angle de la sonde Cassini le 30 avril 2010 en utilisant un filtre spectral sensible aux longueurs d'onde du proche infrarouge centrées à 728 nanomètres. Prise à une distance approximative de 1,4 million de kilomètres de Saturne. L'échelle de l'image est de 79 kilomètres par pixel.



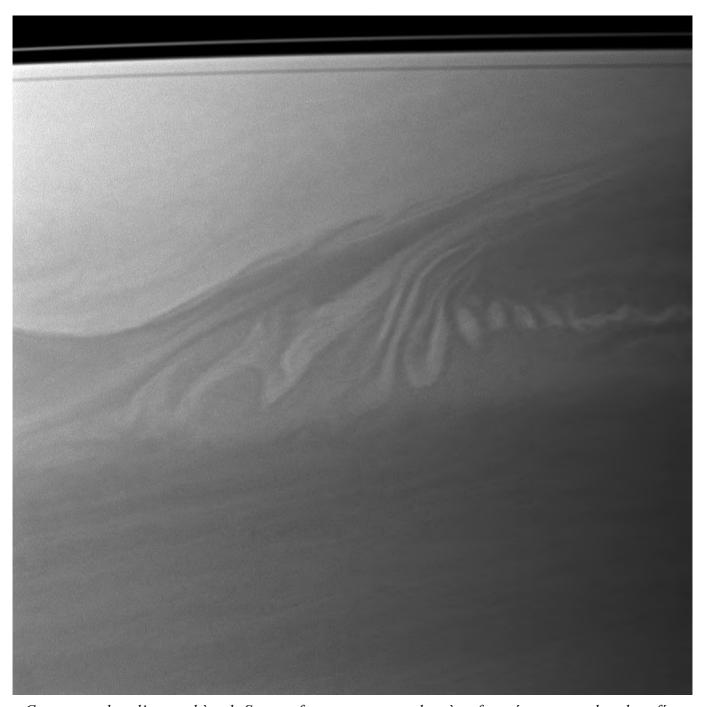
Saturne nichée dans ses anneaux de glace

Cette mosaïque en couleurs réelles a été prise par la sonde Cassini, située à 39 degrés au-dessus du côté éclairé des anneaux. Une lumière faible trace son chemin à trabers les anneaux vers Cassini, faisant apparaître les anneaux assez sombres en comparaison de la planète réfléchissante. De brillants nuages jouent dans les ciels bleu-gris du nord. L'ombre des anneaux continue à caresser la planète tandis qu'ils glissent au sud vers leur disparition provisioire de l'équinoxe de 2009. La lumière réfléchie des anneaux illumine le côté sud de la planète.

Trois des lunes de Saturne sont (théoriquement) visibles dans cette image: Mimas (397 km de diamètre) à 2 heures, Janus (181 km de diamètre) à 4 heures et Pandora (84 km de diamètre) à 8 heures. Pandora est une toute petite tache juste en-dehors du mince anneau F. Cette vue est une combinaison de 45 images: 15 dans chaque couleur de rouge, vert et bleu, prises sur une durée d'environ 2 heures. Les images ont été prises le 9 mai 2007, à une distance approximative de 1,1 million de kilomètres de Saturne. L'échelle de l'image est d'environ 62 kilomètres par pixel.

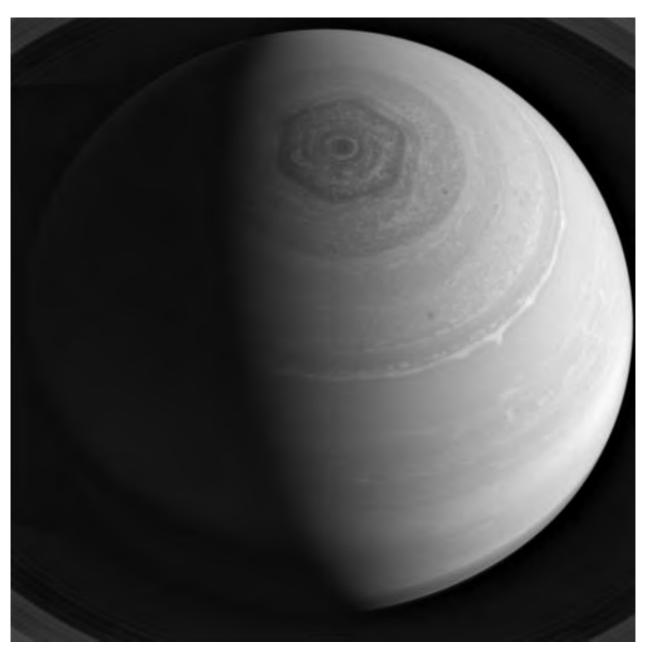


Ici, l'extrême finesse des anneaux de Saturne est évidente. Ils sont vus par la tranche et l'on voit leur ombre projetée sur la planète par les rayons du soleil.



Ces nuages dans l'atmosphère de Saturne forment une sorte de crème fouettée tournant dans le café

Cette vue est centrée sur la région située 15 degrés au sud de l'équateur de la planète. L'image a été prise avec la caméra à champ étroit de la sonde Cassini le 18 juillet 2010 en utilisant un filtre spectral sensible aux longueurs d'onde du proche infrarouge centrées à 727 nanomètres. Prise à une distance approximative de 2,4 millions de kilomètres de Saturne. L'échelle de l'image est de 14 kilomètres par pixel.



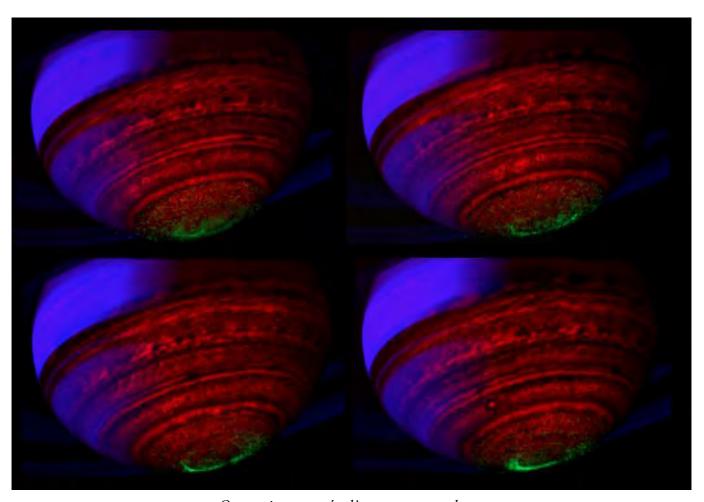
Les vents de Saturne font rage autour de la planète, soufflant à des vitesses dépassant 1 000 km/h à l'équateur. En faisant ainsi, ils forment des ceintures et des zones distinctes qui encerclent la planète et ses pôles, ainsi que le fameux hexagone polaire. Ces vents de zones forment remous et tourbillons qui sont des tempêtes significatives par elles-mêmes.

Cette vue est prise de 51 degrés au-dessus du plan des anneaux avec la caméra grand-angle de la sonde Cassini le 27 décembre 2013 en utilisant un filtre spectral sensible aux longueurs d'ondes du proche infrarouge, centrées à 752 nanomètres. Prise à une distance approximative de 1,3 million de kilomètres de Saturne. L'échelle de l'image est de 120 kilomètres par pixel.

Dans l'illustration suivante, un quatuor d'images composites en fausses couleurs montre la danse des lumières méridionales de Saturne prise par la sonde Cassini. Ces images sont parmi les premières à être extraites d'une étude focalisée sur les aurores de Saturne prises par le spectromètre en visible et en infrarouge.

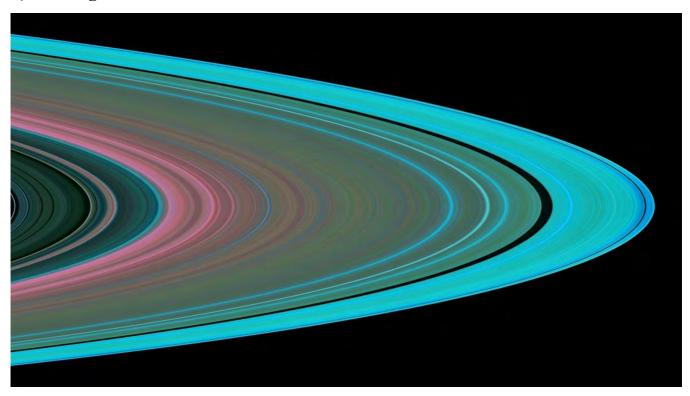
Ici les images sont construites à partir de données situées dans le proche infrarouge et l'émission des aurores apparaît en vert. Les données représentent des émissions d'ions H (hydrogène) dans des longueurs d'onde de 3 à 4 microns. En général, le bleu indique le Soleil reflété à une longueur d'onde de 2 microns, le vert indique le Soleil reflété à une longueur d'onde de 3 microns et le rouge le Soleil reflété à une longueur d'onde de 5 microns. Les anneaux de Saturne reflètent le Soleil à 2 microns, mais pas à 3 et 5 microns, donc ils apparaissent bleu foncé. La brume de la haute atmosphère de Saturne

reflète la lumière du Soleil à 2 et 3 microns mais pas à 5 microns et donc apparaît vert à bleu-vert. L'émission de chaleur venant de l'intérieur de Saturne est vue seulement à 5 microns et ainsi apparaît rouge. Les points sombres et les bandes de l'image sont des nuages et des petites tempêtes qui soulignent le système météorologique profond et les schémas de circulation des vents de la planète. Ils sont illuminés par en-dessous par les émissions thermiques de Saturne et apparaissent en silhouette. Ces images qui forment le composite ont été prises le 24 mai 2007.



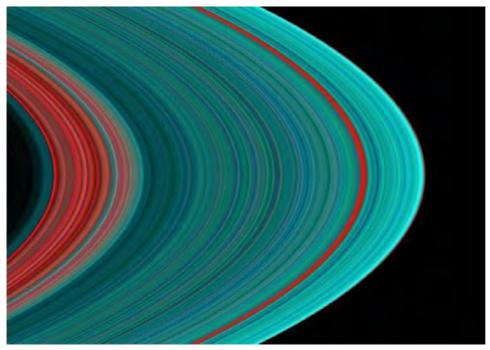
Quatre instantanés d'aurores australes

B) Images des anneaux



Vagues et petites particules dans l'anneau A

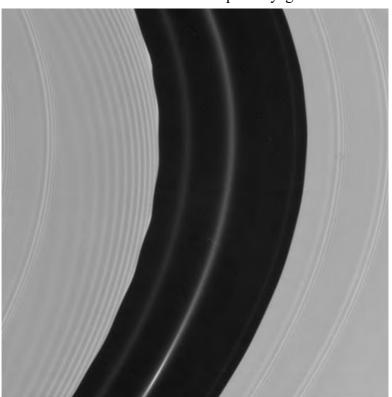
Cassini se place le 3 mai 2005 de façon à avoir la Terre masquée, en occultation par les anneaux de Saturne. Trois signaux radio simultanés, à des longueurs d'onde de 0,94 - 3,6 et 13 centimètres (bandes Ka-, X- et S) ont été envoyés de Cassini vers la Terre au travers des anneaux de Saturne. Les changements observés dans chaque signal alors que Cassini passait derrière les anneaux a fourni un profil de la distribution de la matière des anneaux et un profil d'épaisseur optique. Cette image simulée a été construite à partir des profils d'épaisseur de la division de Cassini et de l'anneau A. Cela décrit la structure observée avec une résolution de 10 kilomètres. L'image montre la même région de l'anneau A, en utilisant des variations de couleurs destinées à améliorer la vue d'un ensemble remarquable de plus de 40 caractéristiques de « vagues » appelées vagues de densité découvertes ce jour là lors de l'occultation. La couleur est utilisée pour représenter des informations quant à la taille des particules composant les anneaux, basées sur les effets mesurés des 3 signaux radio. Les teintes de rouge indiquent les régions où il y a un manque de particules de moins de 5 centimètres de diamètre. Les teintes vertes et bleues montrent des régions où se trouvent des particules de taille inférieure à, respectivement, 5 centimètres et 1 centimètre. Remarquez l'augmentation graduelle des teintes de vert au niveau du bord extérieur de l'anneau A. Cela montre l'augmentation progressive de l'abondance des particules de 5 centimètres et moins. Voyez également les teintes bleues au voisinage de la lacune de Keeler (la bande sombre et étroite près du bord de l'anneau A): Elles indiquent une plus grande abondance de toutes petites particules (< 1 cm). Les collisions fréquentes entre les plus grosses particules des anneaux dans cette région très active fragmentent probablement ces particules en particules de plus petite taille.

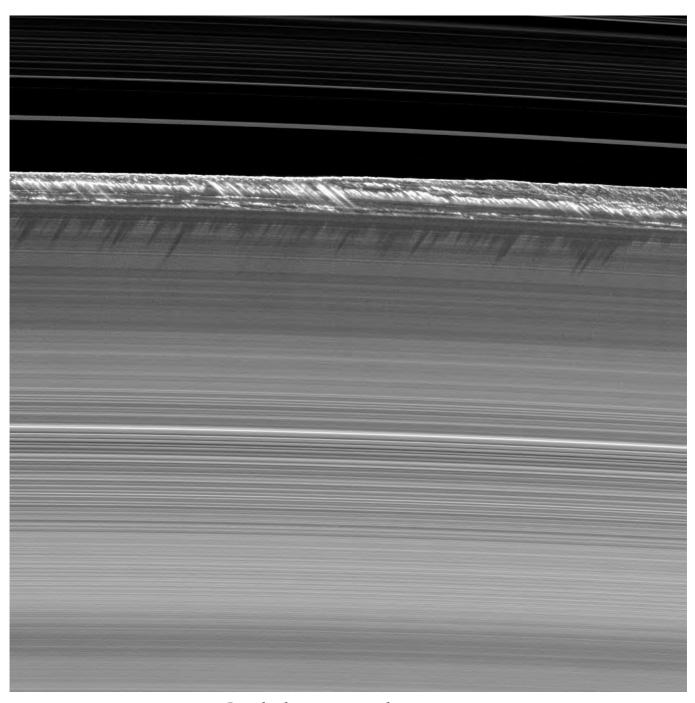


Cette magnifique vue des anneaux de Saturne dans l'ultraviolet montre qu'il y a plus de glace dans la partie extérieure des anneaux que vers l'intérieur, nous donnant des indices quant à l'origine et l'évolution des anneaux

L'image ci-dessus montre les variations dans la composition des anneaux A, B et C. En partant de l'intérieur, la division de Cassini est rouge pâle, suivie de l'anneau A en entier. La division de Cassini à gauche contient des anneaux plus fins et plus « sales » que l'anneau A turquoise, montrant ainsi plus de glace dans sa composition. La bande rouge qui se situe aux trois-quarts vers l'extérieur de l'anneau A est connue sous le nom de « minimum d'Encke ». (à ne pas confondre avec la lacune d'Encke). Le système d'anneaux commence, en partant de l'intérieur avec les anneaux D, C, B et A, suivis par les anneaux F, G et E. Le rouge des images montre de petits anneaux clairsemés de petites roches, plus petites que les particules de glace des anneaux turquoise. Cette image a été prise avec le spectrographe ultraviolet, capable d'une résolution des anneaux permettant de voir des détails de 97 kilomètres, environ 100 fois meilleure que la resolution des données en ultraviolet obtenues par Voyager 2.

La lacune d'Encke comme jamais vue auparavant. Cette image montre avec de superbes détails cette région des anneaux de Saturne. Elle a été prise avec la caméra à angle étroit de Cassini après que la sonde ait pénétré dans l'orbite de Saturne. La vue montre le côté des anneaux éclairé par le Soleil





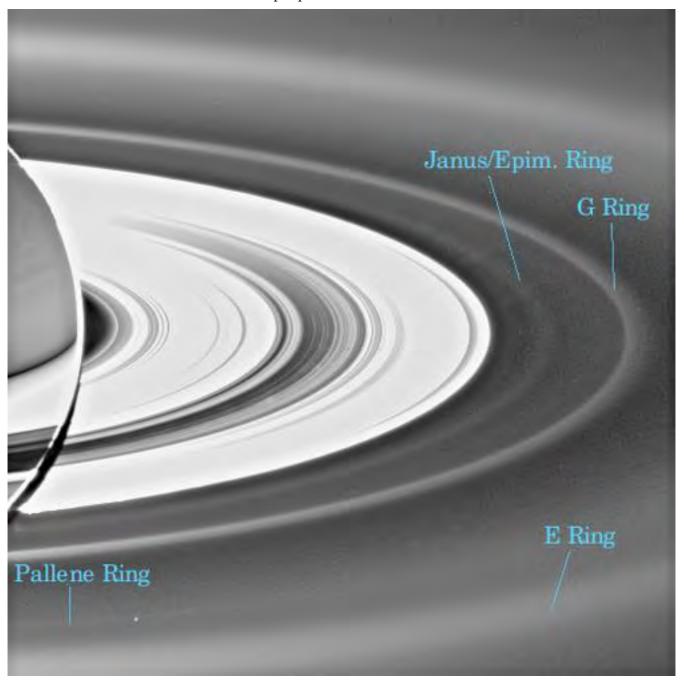
Les plus hauts sommets des anneaux

Des structures verticales, parmi les plus hautes observées dans les principaux anneaux de Saturne, s'élèvent brusquement depuis le bord extérieur de l'anneau B pour projeter de grandes ombres sur l'anneau dans cette image de Cassini, prise 2 semaines avant l'équinoxe d'août 2009. Une partie de la division de Cassini, entre les anneaux B et A, apparaît en haut de l'image, montrant des annelets dans la division interne. Cette image, prise avec la caméra à angle réduit, montre une section d'arc de 1 200 kilomètres de long de la partie extérieure de l'anneau B. Les structures verticales sont des « tours » d'une hauteur allant jusqu'à 2,5 kilomètres au-dessus du plan de l'anneau – une déviation significative par rapport à l'épaisseur verticale des anneaux A, B et C, qui est généralement d'environ 10 mètres ! Les scientifiques pensent que c'est une région (l'extérieur de l'anneau B) où des plus gros corps ou mini-lunes d'une taille de 1 kilomètre ou plus sont fréquents et que ces corps affectent le matériau des anneaux et poussent la matière vers le haut, comme en l'éclaboussant.

Cette image et d'autres comparables ne sont possibles que lors des équinoxes de Saturne, ce qui n'arrive que toutes les demi-années saturniennes, soit tous les 15 ans de notre Terre. La géométrie lumineuse qui accompagne les équinoxes abaisse la lumière du Soleil dans l'angle du plan des anneaux et permet de voir les longues ombres portées sur les anneaux par les structures. La « saison » de l'équinoxe permet

aux ombres d'apparaître sur les anneaux lors des mois précédant ou suivant l'équinoxe et la dernière équinoxe s'est produite le 11 août 2009, alors que le Soleil éclairait les anneaux par la tranche.

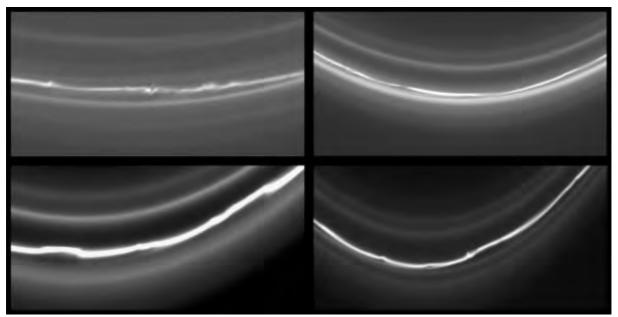
Cette image, en lumière visible, prise le 26 juillet 2009 a été prise à environ 336 000 kilomètres de Saturne et son échelle est de 2 kilomètres par pixel.



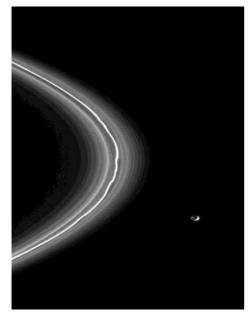
Des lunes faites avec des anneaux

Cette image, faite avec le Soleil placé derrière Saturne, révèle un très faible anneau de matière, jusqu'alors inconnu et qui coïncide avec l'orbite de la petite lune Pallène. Un autre nouvel anneau diffus (déjà annoncé) que l'on voit ici coïncide avec les satellites Janus et Epiméthée. L'angle de vue montre l'extrême brillance des microscopiques particules de glace. Cassini a passé 12 heures dans l'ombre de Saturne le 15 septembre 2006 à faire des observations comme celle-ci. Le nouvel anneau de Pallène est une bande étroite et peu visible d'environ 2 500 kilomètres de large, entre les anneaux E et G. L'anneau Janus/Epiméthée est visible entre l'anneau G et les grands anneaux brillants d'une largeur d'environ 5 000 kilomètres. La photo montre l'emplacement de ces éléments. Pallene, découvert plus tôt par les caméras de Cassini, a une largeur de 4 kilomètres. Pallene tourne autour de Saturne entre les satellites Mimas et Encelade. Le point brillant dans l'anneau de Pallène n'est pas une lune, mais vraisemblablement une étoile en arrière-plan. Bien qu'il ne soit pas inattendu que des impacts puissent

se produire sur Janus, Epiméthée et Pallène et enlever de la matière de la surface des ces lunes pour les mettre en orbite autour de Saturne, il est toutefois surprenant que ces structures soient si bien définies. L'image a été prise en lumière visible avec la caméra grand-angle de Cassini à une distance approximative de 2,2 millions de kilomètres de Saturne. L'échelle de l'image est d'environ 250 kilomètres par pixel.

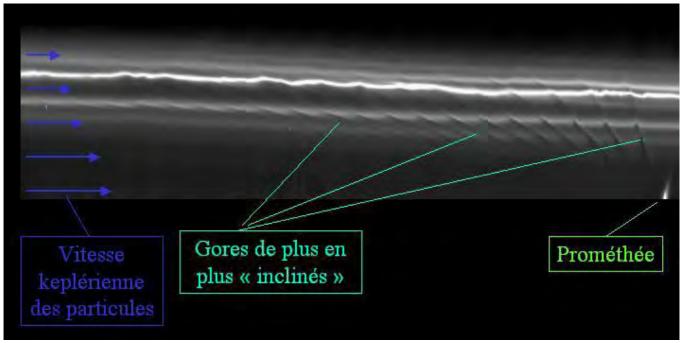


L'anneau F s'est encore montré plus variable qu'on ne le connaissait. Ici quatre images prises les 3 et 4 mai 2005 d'une distance comprise entre 950.000 et 730.000 km. Cet anneau F semble "tordu" par des forces extérieures.



Ces photos révèlent partiellement l'origine de cette déformation des anneaux:

- à gauche, l'action gravitionnelle du satellite gardien Pandore (84 km)
- ci-dessous, l'action gravitionnelle du satellite gardien Prométhée (102 km)



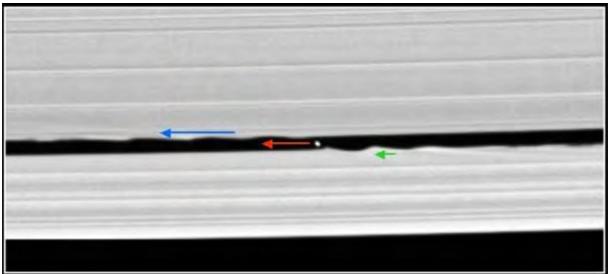
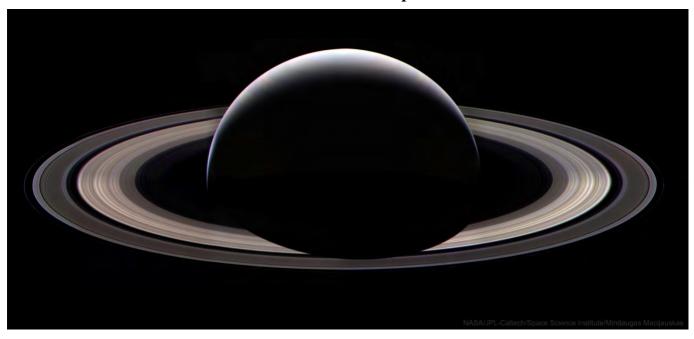


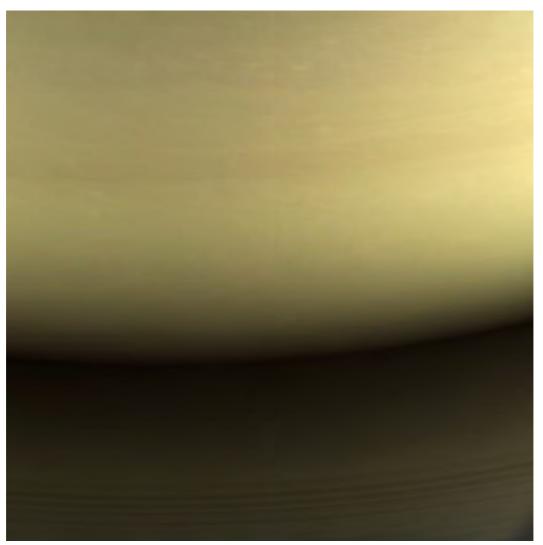
Image de la division de Keeler montrant un nouveau petit satellite (7 km de diamètre) et les déformations des bordures occasionnées par son passage Image prise le 2 mai 2005. Comme dans la division de Encke, l'anneau interne est déformé après avoir été doublé par le satellite, et l'anneau externe est ondulé après s'être fait doubler par ce satellite.

© 2005 NASA/JPL/Space Science Institute, annoté

Les dernières photos de Saturne par la sonde Cassini avant son auto-destruction le 15 septembre 2017

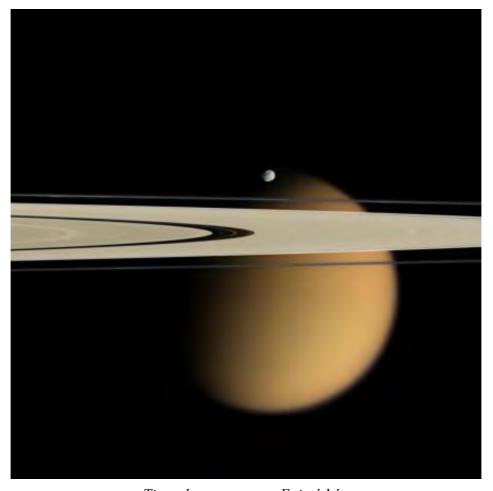


Dernière photo de l'ensemble des anneaux prise le 12 septembre 2017, 3 jours avant son autodestruction

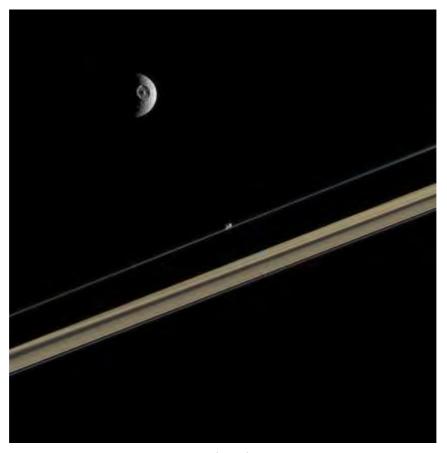


La toute dernière photo prise par Cassini lors de son dernier plongeon entre l'anneau D et la haute atmosphère de Saturne, quelques instants avant que le sonde ne se désintègre

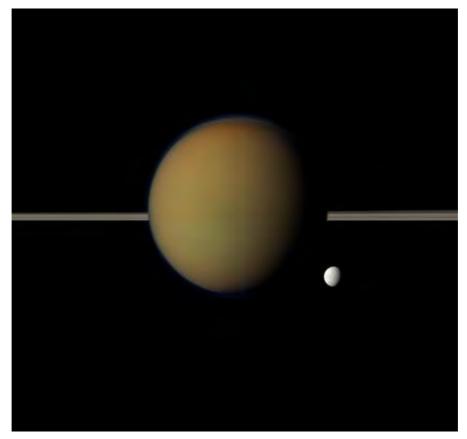
Images des anneaux et de certains satellites **C**)



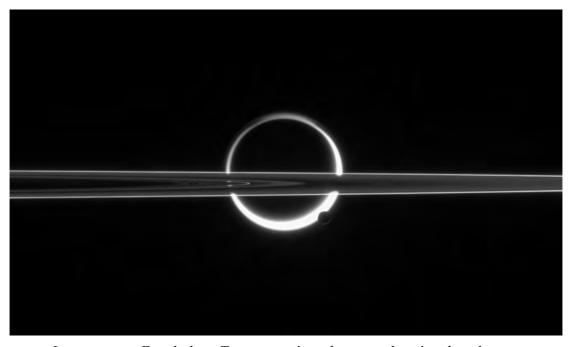
Titan, les anneaux et Epiméthée



Mimas et Prométhée dans un anneau



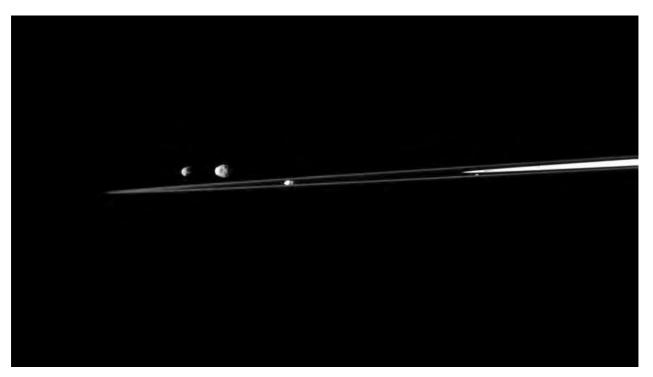
Titan & Thétis



Les anneaux, Encelade et Titan en arière-plan : une lumière dans le noir

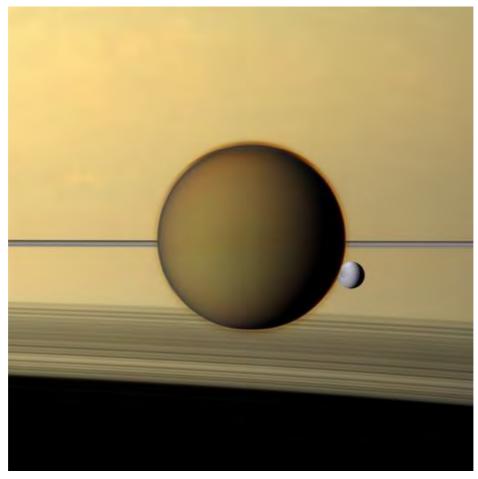
Les anneaux de Saturne tranchent dans une scène à donner le frisson qui est dominée par le croissant lumineux de Titan et de son atmosphère, scène perturbée par la petite lune Encelade, dont les jeysers glacés sont à peine visibles sur son pôle sud. La lumière diffuse autour de Titan (5 150 kilomètres de diamètre) rend sa surface visible en silhouette. Encelade (505 kilomètres de diamètre) profite de ciels plus clairs que sa géante lune sœur.

Cette photo montre le côté ombre des anneaux de Saturne. La photo a été prise en lumière rouge visible par la caméra à angle étroit de la sonde Cassini le 10 juin 2006 à une distance d'environ 3,9 millions de kilomètres d'Encelade et à 5,3 millions de kilomètres de Titan. L'echelle de l'image est d'environ 23 kilomètres par pixel sur Encelade et 32 kilomètres sur Titan.

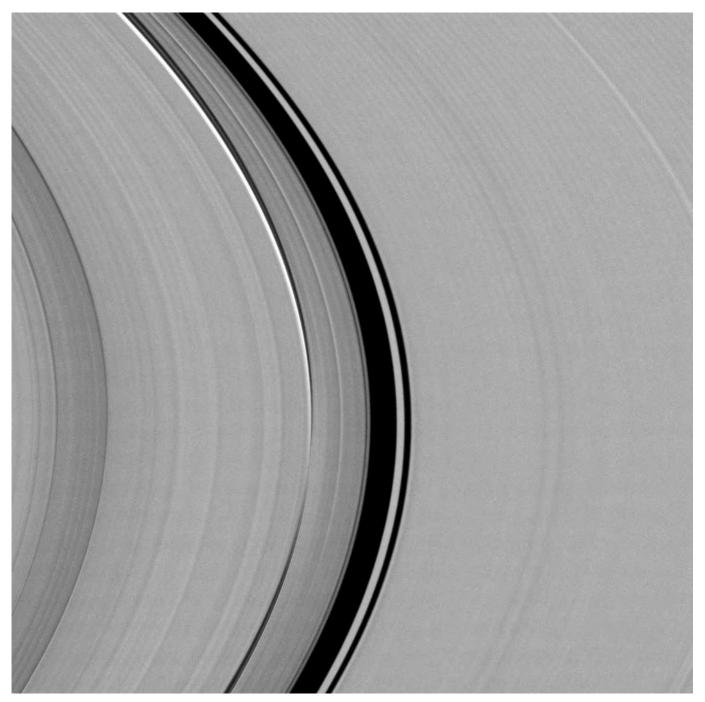


Quartet de lunes : Epiméthée, Janus, Prométhée et Atlas

Un quartet de lunes de Saturne est ici avec une tranche d'anneaux. De gauche à droite, on aperçoit Epiméthée (113 km), Janus (179 km), Prométhée (86 km) et Atlas (30 km, au ras de l'anneau). La vue est prise juste au-dessus de la face éclairée des anneaux. Image prise en lumière visible avec la caméra à angle étroit de Cassini le 27 juillet 2010. La photo a été prise à une distance d'environ 1,3 million de kilomètres de Janus, Prométhée et Atlas et à 1,2 million de kilomètres d'Epiméthée. L'échelle est de 8 kilomètres par pixel sur Janus, Prométhée et Atlas et de 7 kilomètres par pixel sur Epiméthée.

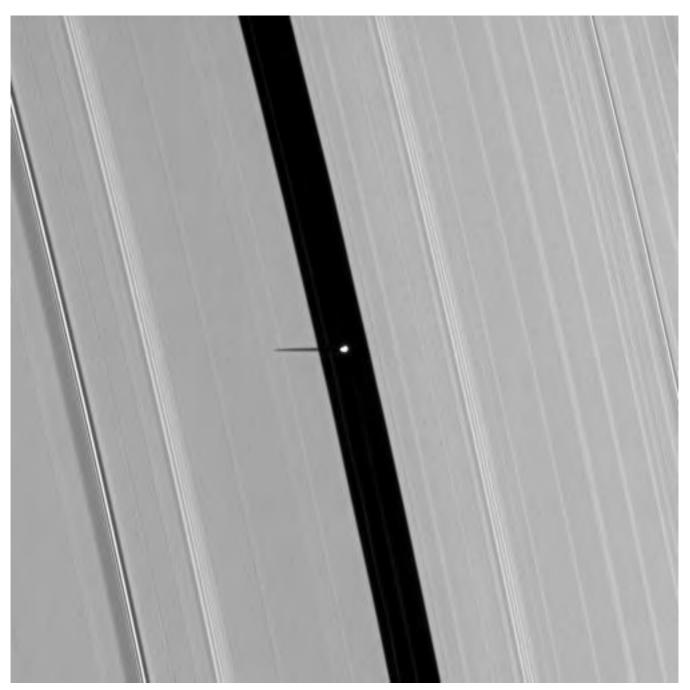


Titan et Dioné devant les anneaux



Des interactions dynamiques existent entre le plus gros satellite de Saturne, Titan, et ses anneaux, ici prise par la sonde Cassini le 20 Septembre 2009. On voit nettement une compression sur la gauche.

N'importe où dans les anneaux de Saturne, des particules orbitent avec une périodicité particulière, un rythme. Cette image montre deux endroits proches mais séparés où ces rythmes sont synchronisés avec différents aspects de l'orbite de 16 jours de Titan, créant ainsi des « effets signés » à distance par Titan.

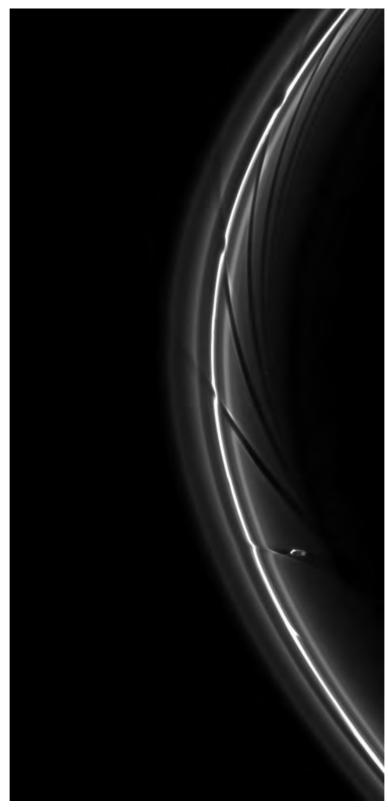


Pan

La petite lune Pan, brillamment surexposée, jette une ombre courte sur l'anneau A dans cette image prise avant l'équinoxe d'août 2009.

Pan (28 kilomètres de large) orbite dans la lacune d'Encke de l'anneau A. La proximité de l'équinoxe fait baisser la lumière du Soleil qui devient rasante, assombrit les anneaux et fait apparaître comme extrêmement brillants les objets qui jettent des ombres sur les anneaux. Les caméras de Cassini ont aisni pu voir, non seulement les ombres projetées de certaines lunes de Saturne mais également les ombres d'autres structures présentes dans les anneaux eux-mêmes.

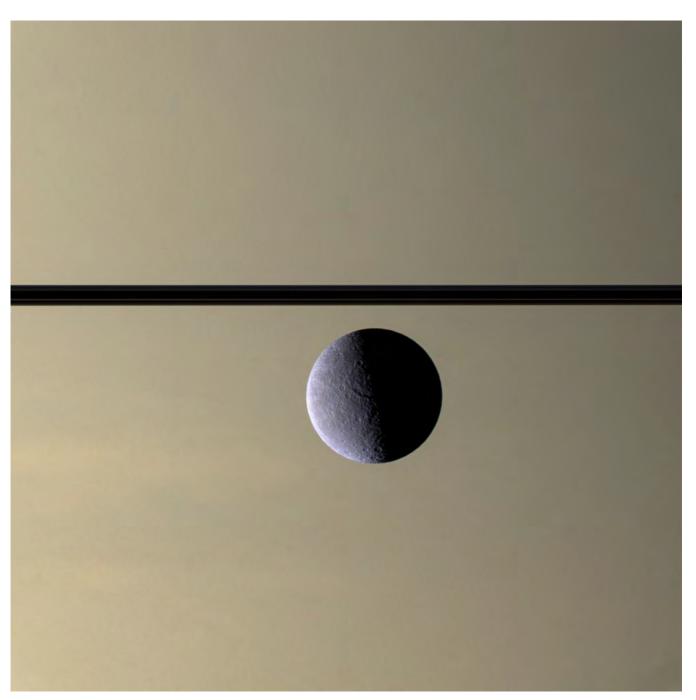
Cette image a été prise en lumière visible avec la caméra à angle étroit de Cassini le 9 mai 2009. Elle a été prise à une distance d'environ 908 000 kilomètres de Pan. L'échelle est de 5 kilomètres par pixel.



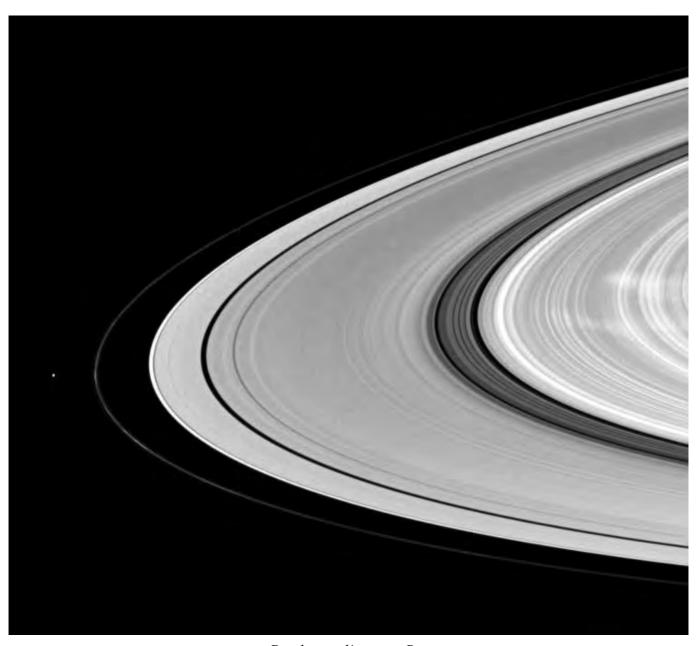
Prométhée s'enfuyant de la scène Prométhée, lune de Saturne continue son orbite après avoir perturbé l'anneau F

La gravité de ce satellite en forme de pomme de terre (86 kilomètres de long) crée périodiquement des canaux en forme de serpentins dans l'anneau F et le travail de Prométhée se voit parfaitement ici sur fond noir.

Cette image a été prise en lumière visible avec la caméra à angle étroit de Cassini le 1er juin 2010 à une distance d'environ 1,3 million de kilomètres de Saturne. L'echelle de l'image est de 7 kilomètres par pixel.



La sonde Cassini regarde le paysage glacé et couvert de cratères de Rhea devant la ligne sombre du plan des anneaux. L'atmosphère brumeuse et jaunâtre de Saturne est en arrière-plan. Rhea, deuxième plus grosse lune de Saturne est ici photographiée par Cassini, situé moins d'un degré au-dessus du plan des anneaux. Les images ont utilisé des filtres spectraux combinés rouge, vert et bleu pour recréer les couleurs réelles. Elles ont été réalisées le 17 juillet 2007 avec la caméra à angle réduit de Cassini à environ 1,2 million de kilomètres de Rhéa. L'échelle est de 7 kilomètres par pixel



Pandore et l'anneau B

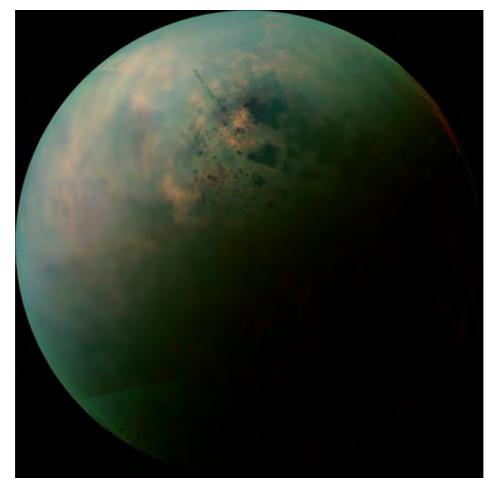
La lune **Pandore** partage l'affiche avec les taches (spokes clairs) de l'anneau B. Pandore (81 km de large) est à gauche. Les taches ou spokes sont radiales dans l'anneau B à droite de l'image.

Cette image a été traitée avec une compression qui réduit la taille des données image sur l'enregistreur de la sonde et provoque une légère pixellisation dans la texture des anneaux. Cette vue est prise en direction du nord, le côté éclairé des anneaux, à 9 degrés au-dessus du plan des anneaux.

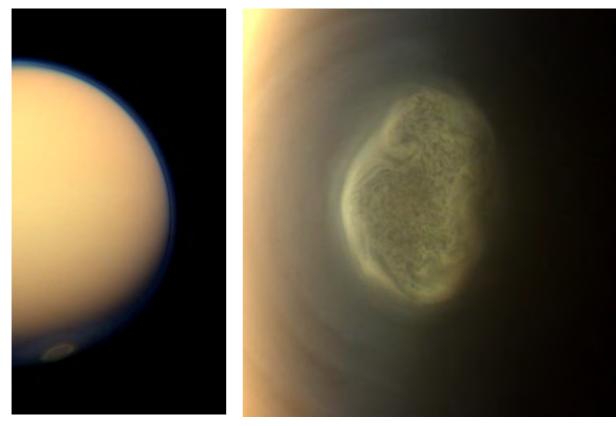
La photo a été prise en lumière visible avec la caméra grand-angle de Cassini, le 11 janvier 2010, à une distance approximative de 630 000 kilomètres de Saturne. L'échelle est de 34 kilomètres par pixel.

C) Images des satellites

1) Titan



Titan en infrarouge



Vortex polaire sur Titan (pôle sud)



Entouré d'une brume stratosphérique violette, Titan apparaît comme une sphère brillante dans cette image colorée prise par Cassini lors du survol de ce satellite

L'image qui précède montre deux fines couches de brume. La couche extérieure est détachée et semble flotter haut dans l'atmosphère. A cause de sa finesse, la couche haute se voit mieux en lumière rasante. L'image a été prise avec un filtre spectral sensible aux longueurs d'onde de l'ultraviolet centrées à 338 nanomètres. Elle est en fausses couleurs : Le globe de Titan conserve cette teinte d'un orange pâle que nos yeux voient habituellement, et à la fois la brume athmosphérique principale ainsi que la fine couche détachée ont été éclaircies et teintées d'une couleur violette pour améliorer leur visibilité.

La meilleure observation possible de la couche détachée est faite en lumière ultraviolette parce que les petites particules de brume qui peuplent cette partie de la haute atmosphère de Titan éparpillent de courtes longueurs d'onde plus efficacement que des longueurs d'onde plus longues du visible ou de l'infrarouge.

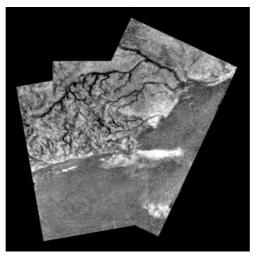
Des images comme celles-ci révèlent quelques unes des étapes-clés dans la formation et l'évolution de l'atmosphère de Titan. On pense que le processus commence dans la haute atmosphère, à une altitude supérieure à 400 kilomètres, où la lumière ultraviolette casse les molécules de méthane et d'azote. Il est probable que ces produits réagissent et forment des molécules organiques plus complexes contenant du carbone, de l'hydrogène et de l'azote qui peuvent se combiner et former de très petites particules, vues comme un brouillard. La partie basse de la couche de brume détachée se trouve quelques centaines de kilomètres au-dessus de la surface et est épaisse d'environ 120 kilomètres.

Cette image a été prise en lumière visible avec la caméra à angle étroit de Cassini le 3 juillet 2004 à une distance de 798 000 kilomètres de Titan. L'échelle de l'image est de 4,7 km par pixel.



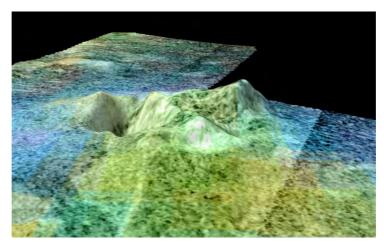
Première vue en couleurs de la surface de Titan

L'image ci-dessus a été envoyée le 14 janvier 2005 par la sonde Huygens lors de son atterrissage réussi sur Titan. La vue colorisée donne une meilleure indication sur la couleur réelle de la surface. Alors que l'on croyait que les éléments de la photo étaient des rochers ou des blocs de glace, elles sont en fait plus des cailloux ou galets. Les deux éléments les plus saillants de cette image sont d'une taille de 15 cm (à gauche) et 4 cm (à droite) et situés à 85 cm de Huygens. La surface est plus sombre que prévu initialement et consiste en un mélange de glace d'eau et de CO². La preuve d'une érosion à la base de ces objets indique l'éventualité d'une activité fluviale. L'image a été prise avec le radiomètre imageur spectral de descente de la sonde Huygens.



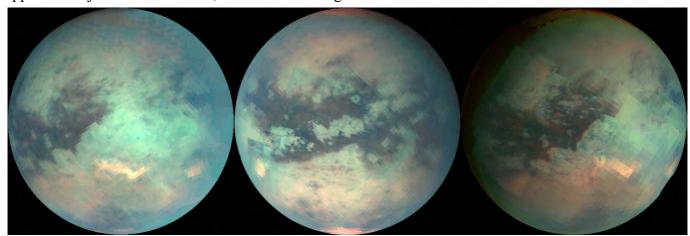
Mosaïque de lits de rivières et zone de crêtes sur Titan

Cette mosaïque de trois images du radiomètre imageur spectral de descente de Huygens fournit des détails sans précédents sur cette zone de crêtes et arêtes autour du flux du lit d'une rivière majeure, venant de différentes sources.



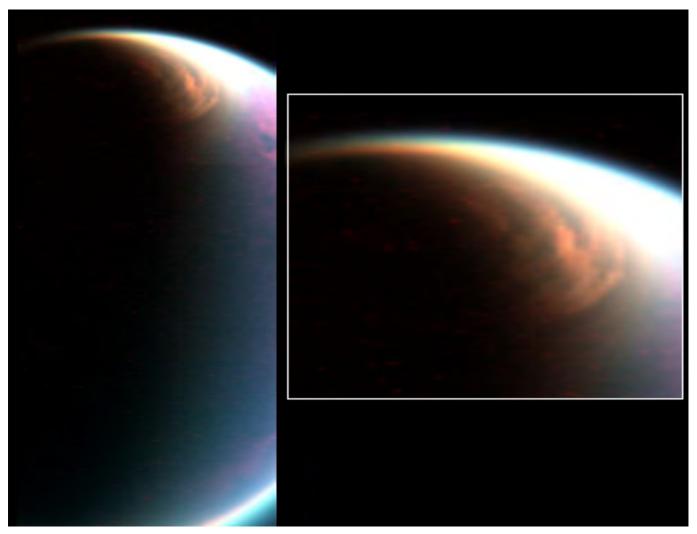
Le survol de « Sotra Facula » sur Titan

Cette image est issue d'une animation faite par Cassini lors de son survol d'une zone de Titan appelée Sotra Facula. Les scientifiques pensent que Sotra est le meilleur exemple d'un volcan de glace -- ou cryovolcan -- sur Titan. Le survol montre deux pics de plus de 1 000 mètres d'altitude et de multiples cratères profonds jusqu'à 1 500 mètres. Il montre aussi des traces d'écoulements. Toutes ces caractéristiques indiquent un cryovolcanisme. La topographie en 3-D vient du radar de Cassini. La topographie a été exagérée verticalement d'un facteur 10. Les fausses couleurs montrent différents composants dans le matériau de surface, tel que détectés par le spectromètre visuel et infrarouge de Cassini. Les dunes ont l'air brun-bleu. Le bleu suggère une présence de glace. Les scientifiques pensent que les zones claires sont recouvertes de matière organique qui cache la glace. Les traces de coulées apparaissent jaune-blanc brillant, comme les montagnes et la caldera.



Cartographie des changements sur Titan

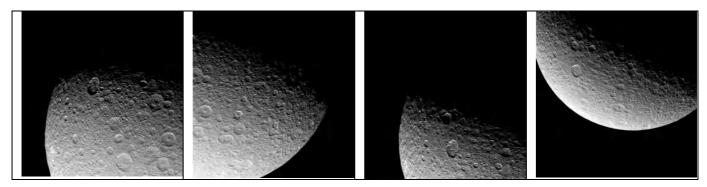
Les 3 mosaïques ci-dessus ont été composées avec la caméra de Cassini en visuel et infrarouge lors des derniers survols de Titan les 28 octobre 2005 (à gauche) 26 décembre 2005 (au centre) et 15 janvier 2006 (à droite). Ces images en fausses couleurs ont été créées à partir de longueurs d'onde de 1,6 micron (bleu), 2,01 microns (vert) et 5 microns (rouge). Plusieurs caractéristiques importantes sont à noter sur ces images : le système nuageux du pôle sud est très clair en décembre (au centre) comparé à octobre et janvier ce qui montre que l'atmosphère du pôle sud est très dynamique. En décembre (au centre) une sorte de capuchon recouvre le pôle nord (plus clair) dont la composition est inconnue. Ce capuchon est à peine visible sur les deux autres images. Visibles en octobre et janvier, juste au sud de l'équateur, se trouve la région de Tui Reggio, surnommée le 'chevron'. Cette region est très claire à 5 microns et est la plus claire de Titan à cette longueur d'onde. On pense que Tui Reggio est un dépôt en surface, probablement d'origine volcanique et peut-être composé d'eau et/ou de dioxyde de carbone gelé après évaporation.



Le nuage géant du pôle nord de Titan

L'imageur visuel et infrarouge de Cassini a pris des images d'un énorme système nuageux au pôle nord de Titan. Cette image composite montre le nuage à une distance de 90 000 kilomètres lors d'un survol le 29 décembre 2006. Ce nuage couvre le pôle nord et descend jusqu'à une latitude de 62° N à toutes les longitudes observées. Un tel nuage était attendu en fonction de la circulation athmosphérique de Titan, mais n'avait jamais été observé avec autant de détails. La condensation peut être la source des liquides qui emplissent les lacs récemment découverts par le radar de Cassisni. Cette image a été codée avec des couleurs de bleu, vert et rouge à 2, 2,7 et 5 microns respectivement.

2) Rhéa



Quatre vues de Rhéa prises par Cassini

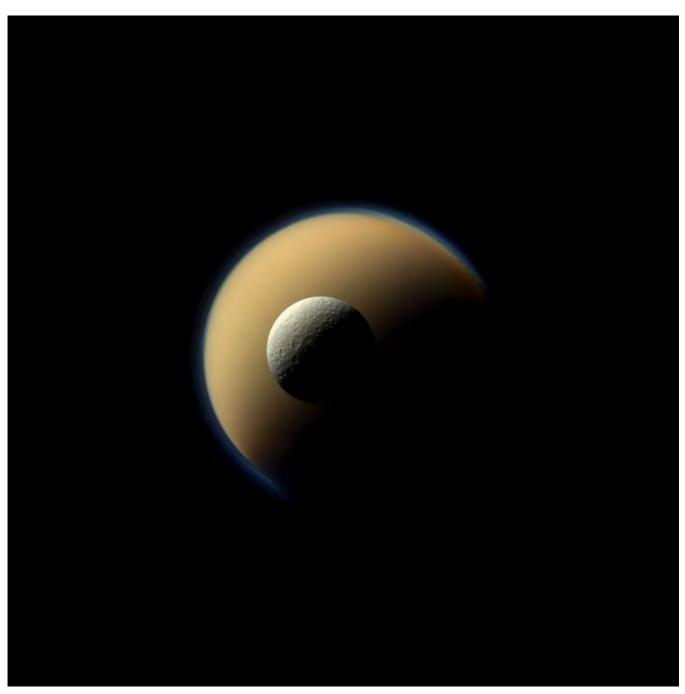


Rhéa en couleurs naturelles

Cet hémisphère de Rhéa, lune de Saturne, vue ici en couleurs naturelles montre une surface brillante et clairsemée, comparable à celle de Dioné, autre lune saturnienne. Toutefois, à cette distance, la nature de ce sol demeure énigmatique et hors de portée des caméras de Cassini.

Ce terrain ressemble à une couche peinte sur la surface de Rhéa. Les images de Cassini de décembre 2004 révèlent que, vu avec une résolution modérée, ce terrain est constitué de fractures étroites et entrelacées.

Les images composées de photos prises avec des filtres rouge, vert et bleu ont été combinées pour créer cette vue en couleurs naturelles. Les images ont été prises en lumière visible avec la caméra à angle étroit de Cassini le 16 janvier 2005 à une distance de 496 500 kilomètres de Rhéa. L'echelle de l'image est de 3 kilomètres par pixel. L'image a été tournée de façon à ce que le pôle nord soit en haut. Le contraste a été augmenté et l'image agrandie 2 fois pour une meilleure visibilité.



Rhéa, comme posée sur Titan...

3) Japet

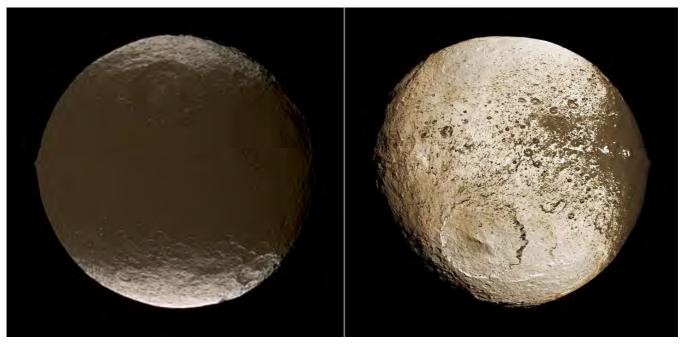
La vue (page suivante) prise par Cassini en couleurs presque réelles révèle la surface intrigante de Japet avec une précision sans égale. L'utilisation de la couleur sur Japet est particulièrement utile pour distinguer les ombres (qui apparaissent noires) du terrain, naturellement très sombre (qui apparaît marron). L'image montre la partie nord de la région sombre appelée « Cassini Regio » et la transition vers une surface plus claire des hautes latitudes nord.

Les photos suivantes ont été prises avec des filtres infrarouges (centrés à 930 nanomètres), vert (568 nanomètres) et ultraviolet clair (338 nanomètres) combinés pour composer cette image. Les images ont été prises avec la caméra à angle étroit de Cassini le 31 décembre 2004 à une distance de 172 900 kilomètres de Japet. L'echelle originale de l'image est de 1 kilomètre par pixel. Ensuite, l'image a été agrandie 2 fois pour une meilleure visibilité des caractéristiques de la surface.



Japet taché de sombre

Note : Cassini Regio est une zone sombre qui couvre la moitié de Japet. La région porte le nom de Jean-Dominique Cassini, découvreur de Japet. En nomenclature planétaire, une regio est une grande zone qui diffère nettement des zones voisines par la couleur ou l'albédo. L'autre zone est Roncevaux Terra, qui est très claire et couvre l'autre moitié de Japet. On ne connaît pas la composition de la couche sombre, mais cette couche semble être très mince. Elle pourrait résulter d'un cryovolcanisme, de la sublimation de la glace sous-jacente ou même d'un autre satellite plus extérieur.



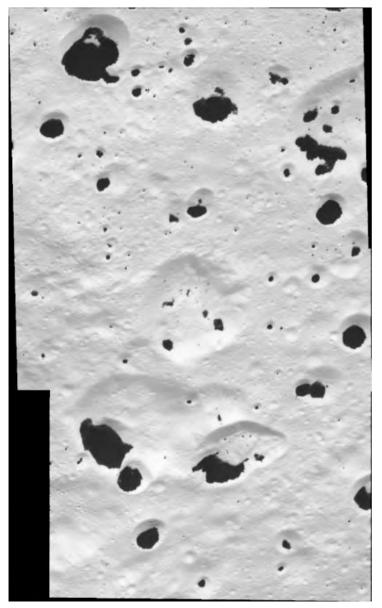
Vue globale de la dichotomie de Japet

Ces deux images de Japet montrent la dichotomie extrême de la couleur sur la surface de cette lune très particulière. La photo de gauche montre l'hémisphère avant tandis que celle de droite montre le côté arrière. Tandis que les latitudes basses et moyennes de la face A, visible depuis la planète, montrent une surface presque aussi sombre que du charbon, de grandes étendues de terrain sur la face opposée sont presque aussi claires que de la neige. La partie sombre (Cassini Regio) couvre environ 40 % de la surface. Les parties claires sont Roncevaux Terra (au nord) et Saragossa Terra (au sud). Sur les deux hémisphères, le paysage dominant est constitué de cratères d'impact. Le plus grand cratère de Japet, appelé **Turgis**, a un diamètre d'environ 580 kilomètres. Il se situe à 17° N de latitude et 28°O de longitude sur le bord est de la sombre Cassini Regio et est visible sur la droite de la photo de gauche (un peu au-dessus de l'équateur de Japet). Le gros cratère sur le bas de la photo de droite est **Engelier** (41°S, 265°O) qui a un diamètre de 504 kilomètres.

La cause de la dichotomie extrême de la couleur sur Japet est probablement la ségrégation thermique de la glace d'eau à une échelle globale. Les effets thermiques sont supposés agir dans le sens des latitudes, les zones polaires sont plus froides que les zones équatoriales dans la plupart des cas à cause de l'angle oblique de l'irradiation solaire. Mais un processus additionnel est nécessaire à expliquer les différences dans le sens des longitudes. Dans un modèle, la poussière sombre et marron se dépose de préférence sur l'hémisphère avant, ce qui serait suffisant pour permettre à l'effet thermique d'évaporer complètement la glace d'eau du côté sombre, mais seulement beaucoup moins sur la face opposée. La rotation extrêmement lente de Japet (1.904 heures), sa distance au Soleil, sa taille relativement petite, la faible gravité en surface et sa position très extérieure dans le sytème des satellites de Saturne sont aussi des conditions qui contribuent à faire fonctionner ce mécanisme tel qu'il est observé. A gauche, un coposite de 3 images prises avec des filtres en infrarouge, vert et ultraviolet (à 752, 568 and 338 nanomètres) le 27 décembre 2004 à environ 717 000 kilomètres de Japet. A droite, une mosaïque de 60 images différentes prise le 10 septembre 2007. L'echelle dans l'image originale de gauche était de 4 km par pixel. Pour une comparaison facile les échelles ont été fixées toutes les deux à 1 400 mètres par pixel.



Cassini saisit l'hémisphère arrière de Japet. Mosaïque en fausses couleurs réaliésé en septembre 2007. On a une bonne vue sur la région compliquée de la transition entre la face avant (sombre) et la face arrière (claire). Première révélation ici des structures géologiques et cratérisées, surtout dans les régions polaires



En haute résolution, le terrain situé dans la transition entre les hémisphères clair et sombre de Japet révèle un aspect tacheté rappelant le pelage d'un dalmatien. La matière claire est de la glace d'eau et la matière sombre est probablement faite de composés carbonés.

La matière sombre est surtout présente au fond des cratères. La brillante glace d'eau forme la base de Japet tandis que la matière sombre semble avoir été « posée » sur la glace.

Cette mosaïque de 2 images est centrée sur un terrain situé à 42°S et 209,3°O, sur la face opposée à Saturne. Echelle de 32 mètres par pixel.

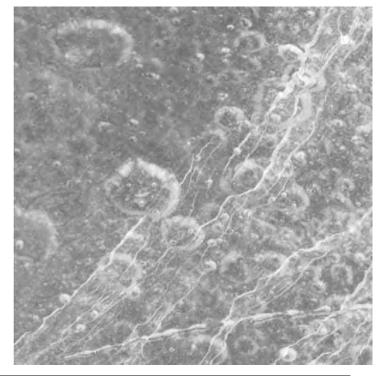
Image de la caméra à angle réduit de Cassini prise le 10 septembre 2007 à environ 5 500 km de Japet.

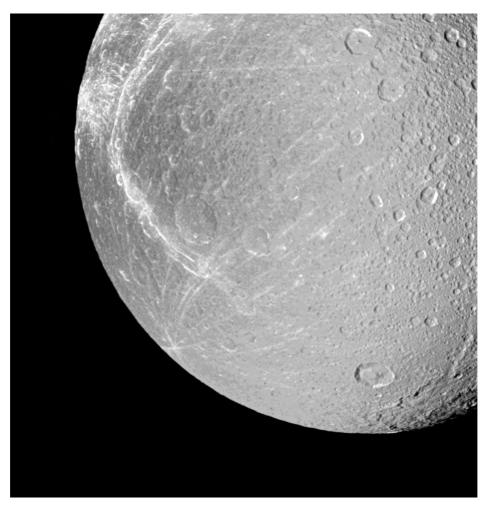
4) Dioné

Dione : Carthage Linea

La surface glacée de Dioné est marquée par des cratères et de multiples générations de jeunes fractures. De nombreuses rainures linéaires presque parallèles courent sur le terrain en haut à gauche. La plupart des cratères vus ici ont des parois claires et des dépôts sombres de matière au fond. Comme sur d'autres lunes de Saturne, des glissements de terrain peuvent révéler de la glace propre, tandis que le matériau sombre s'accumule dans les régions plus basses.

La zone vue ici est à 15,4°N et 330,3°O dans une région appelée Carthage Linea. Image prise en lumière verte visible le 11 octobre 2005, à une distance de 19 600 kilomètres de Dioné. L'échelle est de 230 mètres par pixel.





Le sol de Dioné

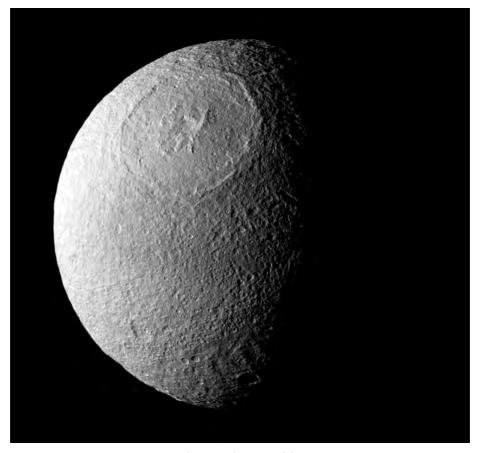
De maigres filets semblent s'enrouler sur le sol de l'hémisphère arrière de Dioné dans cette vue prise par Cassini le 27 janvier 2010 lors d'un survol non programmé. Cassini est passé à 45 000 kilomètres durant ce survol mais la photo a été prise à 137 000 kilomètres de Dioné. Le nord est en haut. Cette image a été prise en lumière visible avec la caméra à angle réduit de Cassini. L'échelle de l'image est de 819 mètres par pixel.



Image de Dioné montrant le complexe torturé des stries de sa surface. En bas à droite, la région appelée Cassandra laisse voir des lignes rayonnant dans de multiples directions. L'hémisphere arrière de Dioné est vu ici dans cette image prise en lumière verte polarisée par Cassini le 24 juillet 2006 avec sa caméra à angle réduit à environ 263 000 kilomètres de Dioné. L'échelle est de 2 km par pixel

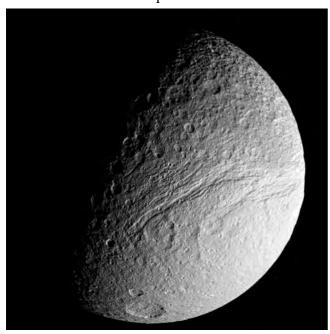
5) Thétis

Des falaises escarpées et des montagnes abruptes catactérisent la gigantesque structure d'impact (450 kilomètres de diamètre) nommée Odysseus, sur Téthys. Quelques petits cratères sont visibles à l'intérieur d'Odysseus, prouvant que la structure n'est pas toute jeune. Mais une comparaison de la densité des cratères entre l'intérieur et l'extérieur d'Odysseus montre que ce grand bassin est « relativement récent ».



Sur Thetys: le grand bassin

Odysseus est sur l'hémisphère avant de Téthys (1 071 kilomètres de diamètre). L'image a été prise en lumière ultraviolette polarisée avec la caméra à angle réduit de Cassini le 24 décembre 2005 à environ 196 000 kilomètres de Téthys. La résolution est d'un kilomètre par pixel. L'image a été agrandie 2 fois et le contraste renforcé pour une meilleure visibilité.

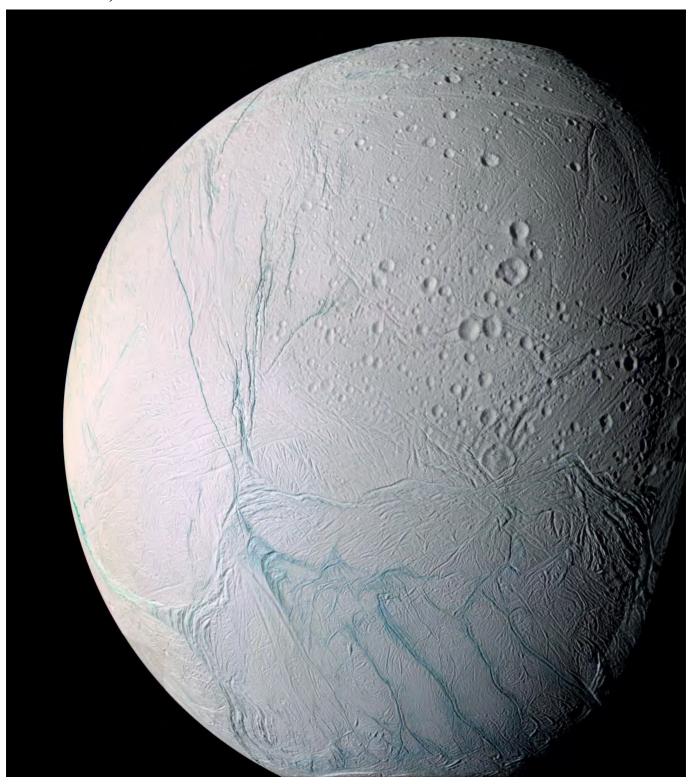


Sur Téthys : le côté du canyon

Cassini nous montre une belle vue de l'extrémité sud du grand rift de Téthys : Ithaca Chasma.

Cette vue est centrée à 43°S, 52°O. L'image a été prise en lumière verte visible par la caméra à angle réduit de Cassini le 10 mai 2008 à 183 000 km de Téthys, l'échelle est de 1 km par pixel.

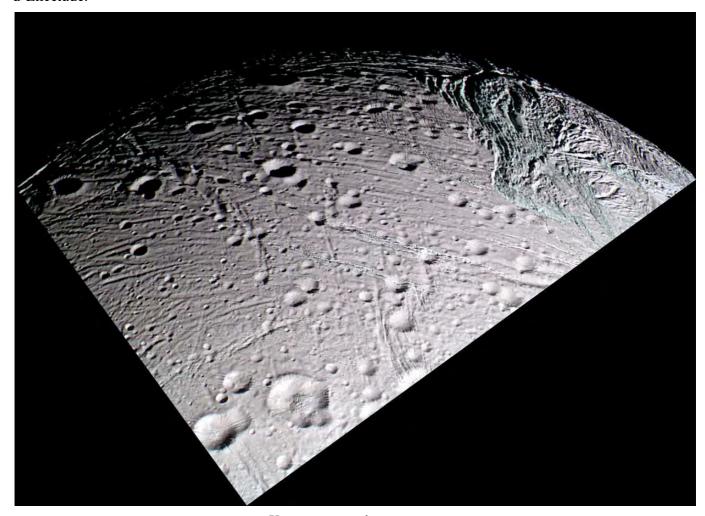
6) Encelade



Encelade le raconteur d'histoires

Un chef d'œuvre d'un ancien temps et de torsion gravitationnelle, la surface torturée d'Encelade et sa fascinante activité géologique en action racontent les histoires du passé et du présent qui luttent sur ce petit monde. Cette image en couleurs renforcées nous montre surtout l'hémisphère sud et le pôle en bas de l'image. D'anciens cratères demeurent en parfait état de conservation à certains endroits, mais d'autres se sont clairement affaissés. Des fractures vers le nord, probablement causées par un changement de la vitesse de rotation de cette lune et, en conséquence, l'aplatissement de la forme d'Encelade, tracent vers l'hémisphère sud. La région du pôle sud est marquée par des stries de fractures bleues encerclées par des mouvements de terrain, chaines de plissements et crêtes. Cela prouve l'existence de formidables forces qui sont en action sur Encelade.

La mosaïque de 21 images en fausses couleurs a été prise par Cassini le 9 mars et le 14 juillet 2005. Les images ont été prises avec des filtres ultraviolets, en lumière visible et en infrarouge. Centrée à 46,8°S et 188°O. L'image a une échelle de 67 mètres par pixel et a été prise entre 11 100 et 61 300 kilomètres d'Encelade.



Vieux et jeune à nouveau

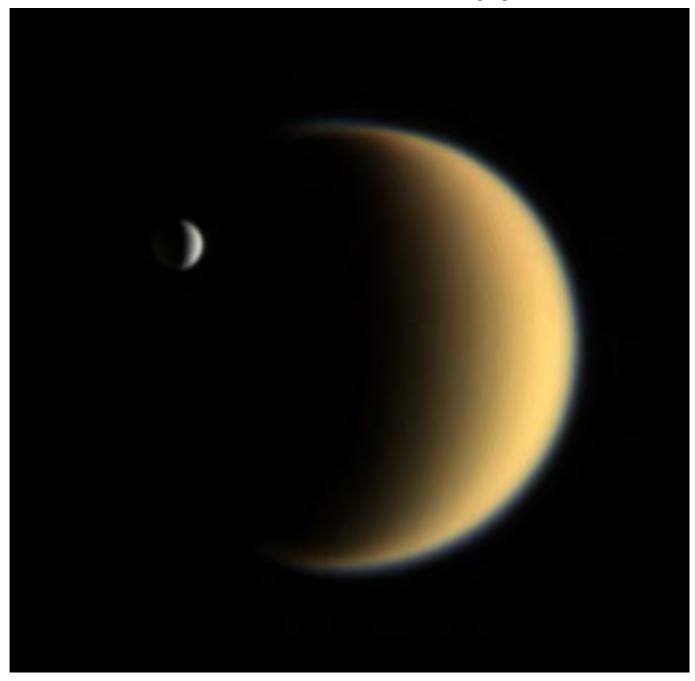
Cette mosaïque en fausses couleurs d'Encelade par Cassini montre, en une seule photo, la grande diversité géologique de cette lune glacée. Les cratères couvrent l'essentiel du paysage. L'accumulation relativement dense de ceux-ci montre que c'est un terrain très ancien de la surface d'Encelade. En bas de la photo, un cratère de 20 km de diamètre dispose d'une structure proéminente en son centre. Toute la zone est traversée par un réseau complexe de fractures et failles; certaines, étroites, ne font que quelques centaines de mètres de large, d'autres peuvent atteindre 5 km d'un bord à l'autre.

Les bords et intérieurs de nombreux cratères semblent tranchés par un système omniprésent de sillons étroits et parallèles ou lignes qui font, typiquement, un kilomètre de large. La grande variété d'aspect de ces fractures atteste du fait que la surface d'Encelade a été formée par une longue histoire d'activité tectonique. Les plus vieilles fractures sont atténuées par les traces de multiples cratères d'impact. Les plus récentes présentent un relief qui est plus net et vif et il semble qu'elles recouvrent des cratères préexistants et de plus vieilles fractures.

A la droite de l'image, un inextricable réseau de failles forme une région distincte d'Encelade. Pauvre en cratères, cette zone doit être relativement jeune. Cette vue est un composite utilisant des filtres en ultraviolet, vert et proche infrarouge et a été traitée pour accentuer les subtiles différences de couleur. La partie haute est d'une couleur uniformément grise suggérant qu'elle est couverte de matéraux homogènes en nature et en taille. Toutefois, beaucoup de fractures sont d'une couleur différente (représentée ici par des tons bleu-clair). Ces fractures colorées semblent pénétrer vers des matériaux sensiblement différents des matériaux de surface.

Il est possible que les murs de ces fractures montrent des affleurements de glace solide ou de glace avec une texture différente, en comparaison avec la surface plus poudreuse qui recouvre les parties plates. Il est également possible que la couleur identifie des différences de composition entre la glace enterrée et la glace de surface. La couleur distinctive des murs des jeunes fractures est presque absente dans les plus vieilles fractures. Ceci est cohérent avec la possibilité que les vieilles fractures soient recouvertes de matière qui les « habillent ».

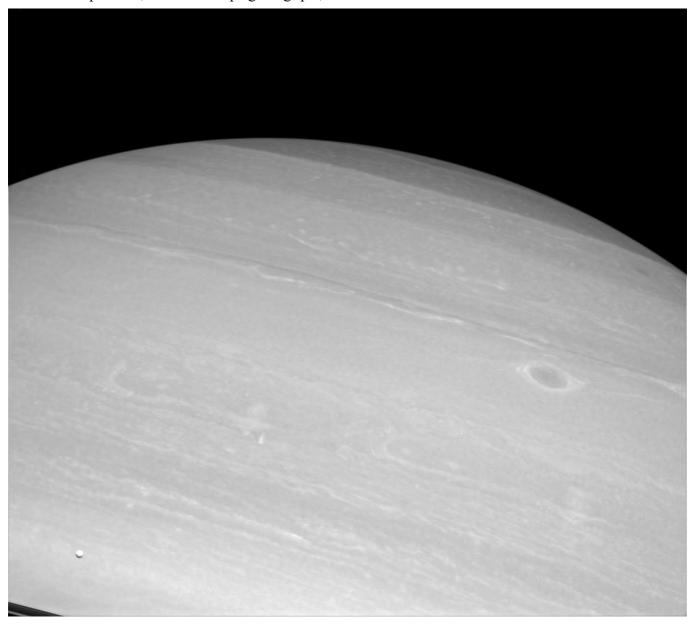
Au début des années 1980, la mission Voyager a révélé des dispositions semblables sur Miranda, une lune glacée d'Uranus. Miranda (470 km de diamètre) est presque aussi grosse qu'Encelade (504 km). Les ressemblances en taille et en histoire tectonique peuvent suggérer que des processus physiques semblables ont contrôlé les évolutions séparées de ces corps. Les images de cette mosaïque ont été prises avec la caméra à angle réduit de Cassini le 9 mars 2005, et prises en lumière visible verte à environ 29 000 kilomètres d'Encelade avec une résolution de 170 mètres par pixel.



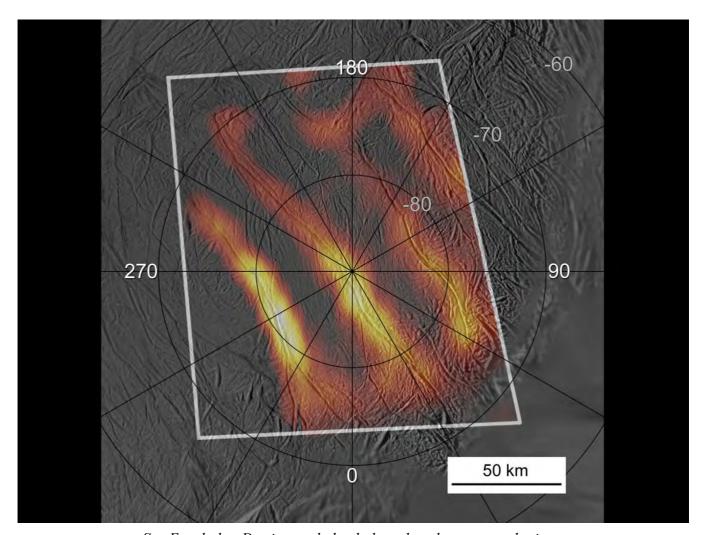
Encelade et Titan: Un conte de deux lunes

Beaucoup de corps du système saturnien portent un manteau gris uniforme de glace sombre, mais pas ces deux lunes. Le corps le plus brillant du système solaire, Encelade, forme un contraste avec l'obscurité dorée et brumeuse de Titan.

Ironiquement, ce que ces deux lunes ont en commun leur donne ce contraste de couleurs : les deux corps sont, à des degrés divers, géologiquement actifs. Pour Encelade, ses conduits du pôle sud émettent un aérosol de particules glacées qui recouvre cette petite lune, lui donnant un aspect blanc et propre. Sur Titan, des processus encore indéfinis alimentent, en méthane et autres composants dissociés par la lumière, une atmosphère. Ces éléments chimiques créent cet épais brouillard jaune-orange qui s'étend dans l'atmosphère et, au fil du temps géologique, retombe et couvre la surface.



Devant la planète géante Saturne (120.500 km de diamètre), sa « petite » lune Encelade (500 km), en bas à gauche, 6° satellite de Saturne par sa taille.



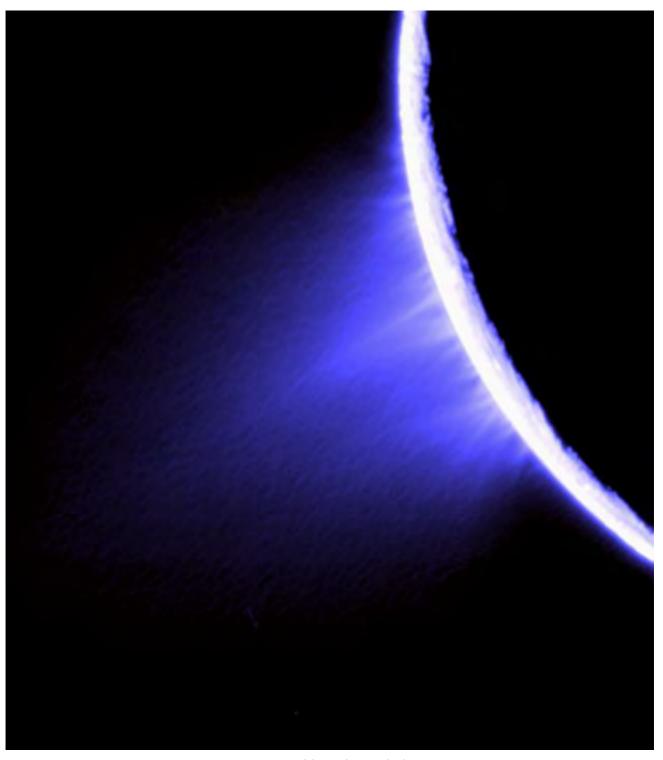
Sur Encelade : Des jets et de la chaleur dans les rayures du tigre

La chaleur irradie de toute la longueur de ces fractures de 150 km sur cette carte du pôle sud d'Encelade. Les parties les plus chaudes des fractures sont localisées aux endroits, précédemment identifiés, d'où les jets sortent. Les mesures ont été obtenues par le spectromètre infrarouge composite de Cassini lors d'un survol le 12 mars 2008.

Des températures remarquablement hautes, au moins 180 K (-93°C) ont été enregistrées le long de la fracture la plus claire, appelée « Damascus Sulcus », dans la partie en bas à gauche de l'image. Par comparaison, les températures de surface ailleurs, dans la région polaire sud, sont inférieures à 72 K (-201°C).

La chaleur s'échappe de l'intérieur d'Encelade le long de ces fractures (rayures du tigre) qui sont aussi la source des jeysers qui font éruption dans cette région polaire méridionale. Les radiations infrarouges ont été décelées aux longueurs d'onde de 12 et 16 microns. Les données infrarouges, montrées ici en fausses couleurs, ont été superposées sur une mosaïque de photos en gris (prise le 14 juillet 2005) au cours d'un survol précédent.

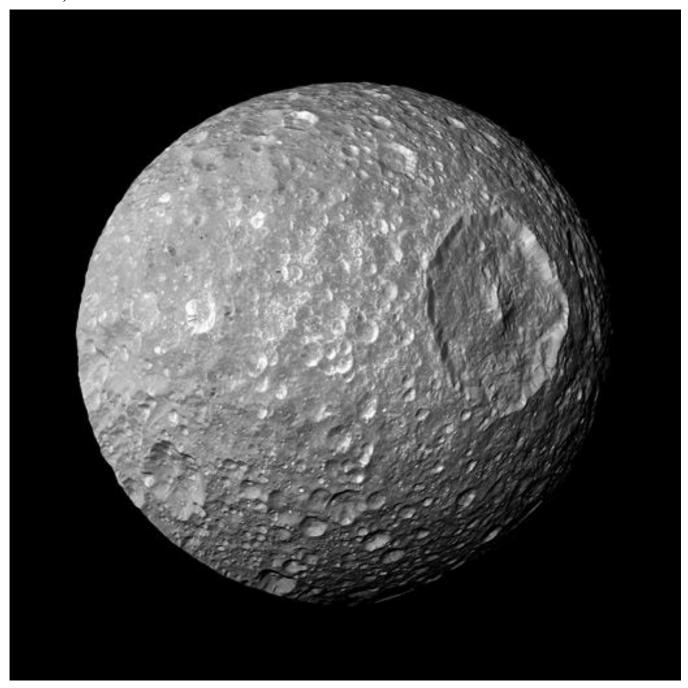
Cette nouvelle vue montre au moins 3 des fractures du pôle sud actives sur toute leur longueur. La quatrième, à droite, n'était que partiellement décelée ici. Le niveau d'activité varie beaucoup le long des fractures. Les parties les plus chaudes sont à des endroits où sdes jeysers ont été identifiés précédemment. Les principales rayures du tigre ne sont pas l'unique source de chaleur, d'autres zones, moins précises, apparaissent ici. Cette carte a été faite en scannant le pôle sud, 16 à 37 minutes après le plus proche survol de Cassini au-dessus d'Encelade, à une distance entre 14 000 et 32 000 kilomètres.



Les jets bleus d'Encelade

Les scientifiques de Cassini utilisent des vues comme celle-ci pour les aider à localiser la source de ces jets individuels faisant jaillir des particules de glace, de la vapeur d'eau et des traces de composants organiques de la surface d'Encelade. Leur étude (parue le 11 octobre 2007 dans le journal Nature) identifie 8 sources de jaillissement, toutes dans les fractures des « rayures de tigre » dans la région du pôle sud du satellite. Certains de ces jeysers s'activent dans des régions pas encore observées par le spectromètre infrarouge de Cassini et les chercheurs s'attendent à ce que Cassini puisse observer des températures élevées. Cette image en fausses couleurs a été créée en combinant 3 images : les fontaines d'Encelade. Une image a été traitée pour renforcer les jets qui composent le panache. Une autre a été traitée pour révéler les subtilités de la brillance du panache entier qui inclut les jets. Le résultat final a été coloré en bleu pour un effet plus saisissant. Les images ont été prises avec la caméra à angle réduit de Cassini le 27 novembre 2005 à environ 148.000 kilomètres d'Encelade avec une résolution de 880 mètres par pixel.

7) Mimas



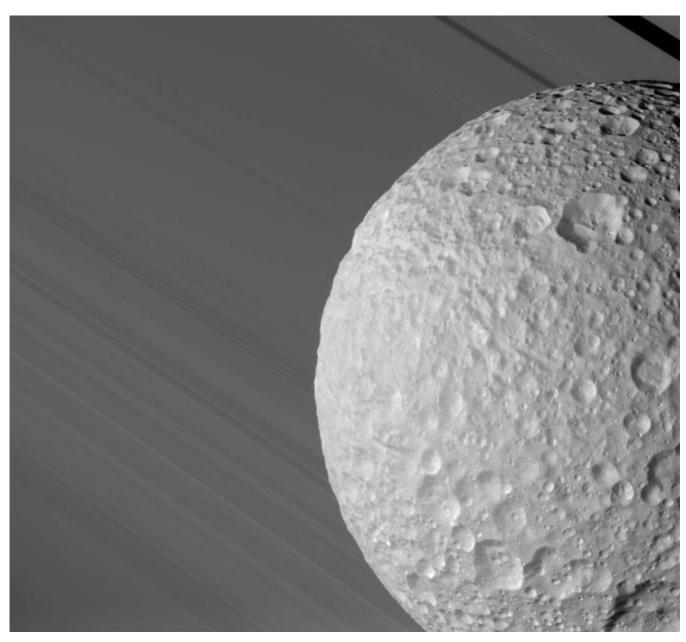
Mimas ou l'étoile noire?

Dans cette vue prise par Cassini lors de son plus proche survol de Mimas, le grand cratère « Herschel » domine le satellite, donnant à cette lune l'aspect de « l'étoile noire » dans le film StarWars. Le cratère Herschel a un diamètre de 130 kilomètres et recouvre une bonne partie de la droite de cette image.

La sonde Cassini est passée à 9 500 kilomètres de Mimas le 13 février 2010. Cette mosaïque de 6 images prise en couleurs réelles avec la caméra à champ étroit de Cassini. Cette vue montre une partie de la face visible de Saturne et une partie de la face cachée. Mimas a un diamètre de 396 kilomètres. Cette vue est centrée sur une zone située à 11°S et 158°O. Le nord est en haut. Vue prise à environ 50 000 kilomètres de Mimas avec une échelle de 240 mètres par pixel.



Gros plan sur le cratère Herschel de Mimas



Mimas, au-dessus des anneaux de Saturne

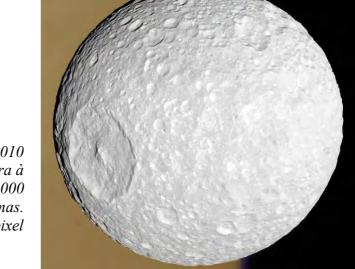
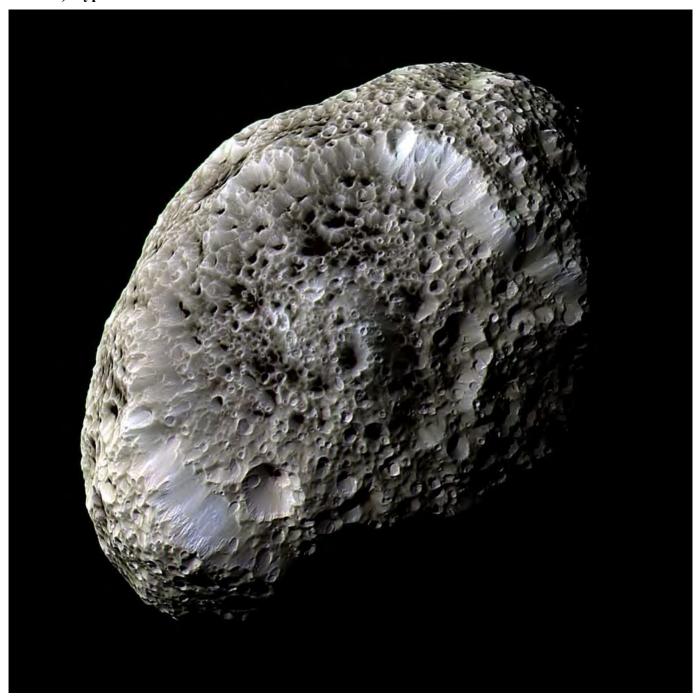


Image de Mimas par Cassini le 13 février 2010 prise en lumière verte visible avec la caméra à angle réduit à une distance d'environ 70 000 kilomètres de Mimas.

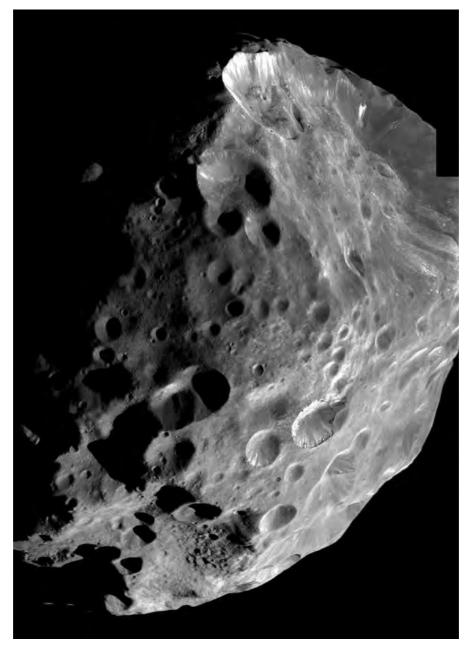
L'échelle est de 418 mètres par pixel



Hyperion : Monde étrange

L'étonnante vue en fausses couleurs de la lune saturnienne Hyperion revèle des détails précis sur l'étrange et tumultueuse surface. Les différences de couleur représentent des différences dans la composition des matériaux de surface. La photo a été prise le 26 septembre 2005. Hyperion a une couleur particulièrement rougeâtre quand il est vu en couleurs naturelles. Le rouge a été amoindri et les autres teintes renforcées pour mieux discerner les subtiles différences de couleurs. Les scientifiques de Cassini pensent que l'apparence inhabituelle d'Hyperion peut être attribuée au fait qu'il a une densité très faible (proche de 1) pour un objet aussi gros (370 × 280 × 226 km), donnant cet faible gravité et haute porosité. Ces caractéristiques permettent de préserver les formes originales des cratères sur cette lune, en limitant la quantité de matière rejetée lors des impacts. Les météorites ont ici tendance à faire des cratères en compressant la matière de la surface plutôt qu'en la pulvérisant. De plus, la faible gravité d'Hyperionet donc la faible vitesse d'échappement associée fait que la matière éjectée a de fortes chances de quitter cette lune aussi. Les images ont été prises en infrarouge, vert et ultraviolet puis combinées pour réaliser cette photo. Les images de cette photo ont été prises avec la caméra à angle réduit de Cassini à environ 62 000 kilomètres d'Hypérion avec une résolution de 362 mètres par pixel.

9) Phœbé



Mosaïque haute résolution de Phæbe

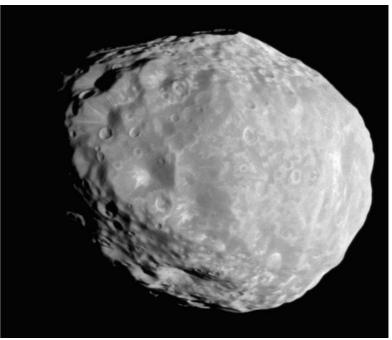
Phœbe montre une inhabituelle variation de luminosité sur sa surface en raison de l'existence de matière claire sur les pentes de ses cratères (que l'on pense être de la glace) sur ce qui est l'un des plus sombres corps connus du système solaire.

Des touches claires sur le bord du grand cratère du nord (en haut de cette image) peuvent avoir été révélées par l'effondrement de matière sombre le long du mur du cratère. Le grand cratère sous le centre-droit de cette image montre à l'évidence des dépôts alternés de matière sombre et claire.

Des indices sur la topographie irrégulière de Phœbe peuvent être aperçues émergeant des ombres près des parties gauches (bas et haut) de cette image. Ce sont des caractéristiques réelles – des bords de cratères ou des pics montagneux – qui sont juste éclairés par le lever de Soleil sur Phœbe. La surface de Phœbe montre de nombreux cratères, grands et petits. Il est possible que cette lune ait été une partie de la population des corps glacés de type cométaire, dont certains résident maintenant dans la ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune. Les images de cette mosaïque ont été prises en lumière visible avec la caméra à angle réduit de Cassini, à des distances comprises entre 15 974 kilomètres et 12 422 kilomètres. L'échelle de l'image est de 74 mètres par pixel. Le contraste a été légèrement augmenté pour améliorer la visibilité.







Janus montre les cicatrices des impacts formant ses cratères. Cette lune qui ne fait que 179 km de long a été prise ici en lumière visible le 7 avril 2010, à environ 75 000 km. L'échelle est de 448 mètres par pixel

Janus et Épiméthée partagent pratiquement la même orbite, la confusion régna longtemps sur leurs caractéristiques orbitales; il est évidemment impossible de réconcilier les observations de deux corps distincts en une seule orbite.

Découverte

La découverte de Janus est attribuée au premier observateur : Audouin Dollfus, le 15 décembre 1966. Auparavant, Jean Texereau avait photographié Janus le 29 octobre 1966 sans s'en apercevoir. Le 18 décembre, Richard L. Walker fit une observation similaire qui est maintenant attribuée à Épiméthée. Douze ans plus tard, en octobre 1978, Stephen M. Larson et John W. Fountain ont réalisé que les observations de 1966 correspondaient à deux objets distincts (Janus et Épiméthée) partageant la même orbite. Janus fut également observé par la sonde Pioneer 11 lors de son passage saturnien le 1er septembre 1979 : trois compteurs de particules énergétiques observèrent son « ombre ». Janus fut observé par Dan Pascu le 19 février 1980 puis par John W. Fountain, Stephen M. Larson, Harold J. Reitsema et Bradford A. Smith le 23. La sonde Voyager 1 confirma définitivement son existence le 1er mars 1980. Tous ces gens partagent donc, à des degrés divers, le titre de découvreur de Janus.

Orbite

Janus partage la même orbite avec Épiméthée constituant ensemble des satellites "co-orbitaux". En fait, les orbites de Janus et d'Épiméthée ne sont distantes que d'environ 50 km et, vu leurs dimensions excédant les 100 km de large, ils ne pourraient donc passer l'un à côté de l'autre sans se heurter. Épiméthée et Janus pourraient provenir d'un même objet qui se serait scindé en deux, mais cette séparation serait alors très ancienne. Tous les quatre ans environ, ils se rapprochent l'un de l'autre et « échangent » alors leurs orbites : le plus intérieur devient le plus extérieur, et inversement. La lune intérieure rattrape l'extérieure par derrière et son attraction gravitationnelle ralentit cette dernière qui « tombe » alors sur l'orbite intérieure, tandis que la lune intérieure est accélérée par l'attraction de la lune extérieure et « monte » donc sur l'orbite extérieure. Le rayon orbital indiqué ici était valide le 1er juillet 1981.

Surface

La surface de Janus est couverte de cratères dont plusieurs de plus de 30 kilomètres de diamètre, mais présente peu d'autres structures de surface. Si on la compare avec ses voisines, sa surface semble plus ancienne que celle de Prométhée mais plus récente que celle de Pandore. Étant donné sa densité très faible et son albédo très élevé, la plupart des observateurs supposent qu'il s'agit d'un corps très poreux comportant beaucoup de glace d'eau.

Anneau

La sonde Cassini a mis en évidence en 2006 la présence d'un très faible anneau de poussières au voisinage des orbites de Janus et d'Épiméthée, dont l'extension radiale serait de 5 000 km environ. Ces particules proviendraient des impacts de météores entrant en collision avec la surface des deux petits corps

11) Épiméthée

Epimethée est un satellite de Saturne. Son nom vient d'Épiméthée, un Titan de la mythologie grecque, fils de Japet et frère d'Atlas et de Prométhée (tous les noms d'autres lunes de Saturne).

Richard L. Walker a observé soit Épiméthée, soit Janus en 1966; Stephen M. Larson et John W. Fountain déterminèrent en octobre 1978 que ces observations et celles d'Audouin Dollfus (considéré comme le découvreur de Janus) portaient en fait sur deux lunes distinctes. La confirmation a été obtenue le 1er mars 1980 par Voyager 1 et l'équipe de Stephen M. Larson, John W. Fountain, Bradford A. Smith et Harold J. Reitseman. Peu de temps auparavant, une série d'observations eurent lieu, la première par Dale P. Cruikshank le 26 février 1980. Tous ces gens partagent donc le titre de découvreur d'Épiméthée.

Orbite

Épiméthée partage la même orbite avec Janus constituant ensemble des satellites "co-orbitaux". Voir « orbite de Janus », page précédente.

Surface

La forme de ce satellite est irrégulière et sa surface présente des vallées et des sillons. On peut y apercevoir plusieurs cratères de plus de 30 kilomètres de large. On estime son âge à plusieurs milliards d'années.

Anneau

Voir id sur Janus, page précédente.

Topologie

Cratères: Tout comme Janus, les cratères d'Épiméthée font référence à la légende de Castor et Pollux.







Les deux photos à gauche et au centre ont été prises le 7 avril 2010 à une distance de 107.000 kilomètres. La zone éclairée est celle qui fait face à Saturne. Ce satellite a une taille de 113 kilometers. Image prise en lumière visible avec la caméra à angle réduit de Cassini. L'échelle est de 641 mètres par pixel

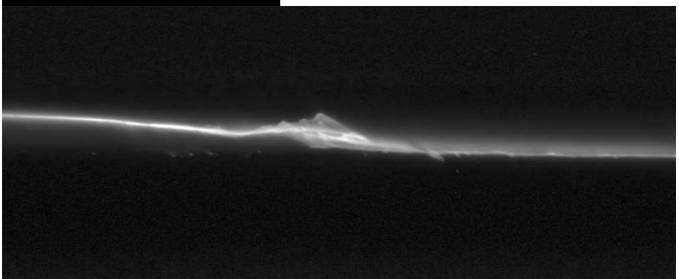
A droite: Photo en fausses couleurs prise le 30 mars 2005 à une distance de 74 600 kilomètres d'Epiméthée. Les couleurs d'Epiméthée apparaissent ici varier d'une manière non-uniforme sur les différentes faces de la surface irrégulière de cette lune. La couleur rougeâtre en bas à gauche est un cratère nommé Pollux. Le grand cratère sous le centre est Hilairea, qui a un diamètre de 33 kilomètres. Avec une taille de 116 kilomètres, Epiméthée est légèrement plus petit que son compagnon Janus (181 kilomètres), qui orbite à la même distance de Saturne. L'échelle est de 450 mètres par pixel

12) Prométhée



Apparaissant comme des yeux sur une pomme-deterre, des cratères couvrent la surface à peine éclairée de la lune Prométhée (86 km de long).

C'est l'image la plus proche prise par Cassini le 27 janvier 2010. L'image, prise en lumière visible à une distance de 34 000 kilomètres de Prométhé. L'echelle est de 200 mètres par pixel



Le « dynamisme » de l'anneau F causé par Prométhée

La sonde Cassini a révélé des détails de l'anneau F, jamais vus auparavant, dont l'évidence des effets perturbateurs des petites lunes orbitant dans ou près du cœur brillant de cet anneau. Alors que d'autres petits satellites se rapprochent du cœur de l'anneau F, ils laissent une signature gravitationnelle. Dans certains cas ils peuvent attirer de la matière hors de l'anneau, une version miniature de l'interaction que Cassini a obesrvée entre Prométhée et la matière de l'anneau F. La dynamique de cette interaction est la même, mais l'échelle est différente. Les scientifiques pensent qu'il peut y avoir plusieurs petites lunes, d'une grande variété de tailles impliquées des la création de structures telles que celle vue ci-dessus. L'image a été prise en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini le 25 septembre 2006 à environ 255 000 km de Saturne. L'échelle originale était d'un kilomètre par pixel. L'image a été agrandie 2 fois et le contraste renforcé.



La lune Prométhée en forme de pomme-de-terre a été rendue en 3-D dans ce gros plan de Cassini fait de plusieurs images. L'extrémité de Prométhée en bas à droite fait face à Saturne. Les images prises en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini le 26 décembre 2009 à une distance de 57 000 kilomètres de Prométhée. L'échelle est de 339 mètres par pixel



Cette image brute, non-traitée, a été prise par la caméra à angle réduit de Cassini en lumière visible à 36.000 km

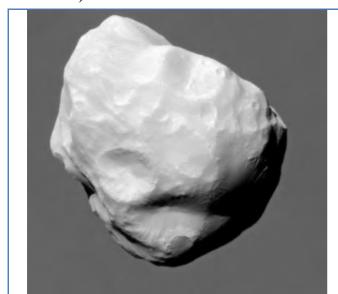
13) Pandore



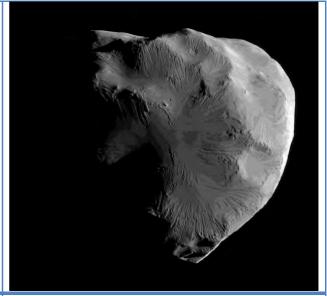
Gros plan sur Pandore

Le meilleur gros plan du satellite berger de l'anneau F de Saturne, Pandore, montre que cette petite lune des anneaux rdt recouverte d'une fine couche de matière poussiéreuse. Les cratères formés sur cet objet par des impacts apparaissent couverts par des débris. Les sillons et les crêtes de Pandore (84 kilomètres) suggèrent que les fractures affactent la matière recouvrante. Les cratères nets et pointus observés sur Hyperion, fournissent un exemple opposé de cratères différents sur un autre objet. Images prises en infrarouge, vert et ultraviolet le 5 septembre 2005, combinées pour rendre cette photo en fausses couleurs, par la caméra à angle réduit de Cassini à une distance d'environ 52 000 kilomètres de Pandore. L'échelle est de 300 mètres par pixel.

14) Hélène



Gros plan sur Helene



Hélène, petite lune troyenne de Dioné (elle précède Dioné de 60° sur son orbite) prise le 18/6/2011 par Cassini. Image brute, non traitée

La sonde Cassini a fait de gros plan de la petite lune Hélène lors d'un survol le 3 mars 2010. L'atmosphère de Saturne compose l'arrière-plan de cette image. Cette vue montre le côté d'Hélène (33 km de diamètre) opposé à Saturne. L'image a été prise en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini à environ 19 000 kilomètres d'Hélène. L'échelle originale est de 113 mètres par pixel.

15) Pan

Découverte

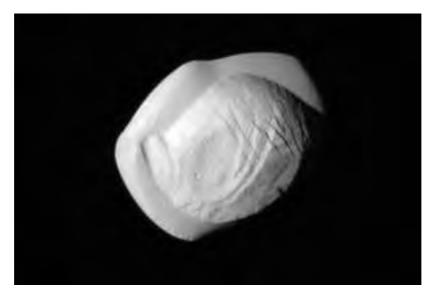
Pan, qui porte le nom du dieu grec Pan, a été découvert par Mark R. Showalter dans la lacune d'Encke de l'anneau A de Saturne, en ré-analysant en 1990 les photographies de la sonde Voyager 2 prises lors de son survol du système saturnien en 1981. L'existence d'un tel corps dans la lacune d'Encke a été prédite par Jeffrey N. Cuzzi et Jeffrey D. Scargle en 1985. Mark R. Showalter et son équipe en déduisirent son orbite et sa masse en 1986 en modelant les perturbations gravitationnelles qu'un tel satellite induirait dans l'anneau. Ils aboutirent à une prédiction très précise de 133 603 ± 10 km pour le demi-grand axe et une masse de 5 à 10×10^{-12} masses de Saturne et conclurent qu'une seule lune était présente à l'intérieur de la lacune. Le demi-grand axe réel de Pan est 133 584 km et sa masse 4,95×10¹⁵ kg, soit 8×10⁻¹² masses de Saturne. Pan fut par la suite observé à 1° de la position prédite. Sa recherche fut entreprise en considérant toutes les photographies prises par Voyager 2 et en déterminant informatiquement si la lune pouvait être visible dans chacune d'entre elles. Toutes les photographies éligibles et possédant une résolution supérieure à 50 km/pixel firent clairement apparaître Pan. En tout, le satellite apparaît sur 11 images prises par Voyager 2. Voir photo de Pan dans la lacune d'Encke page 115.

Caractéristiques

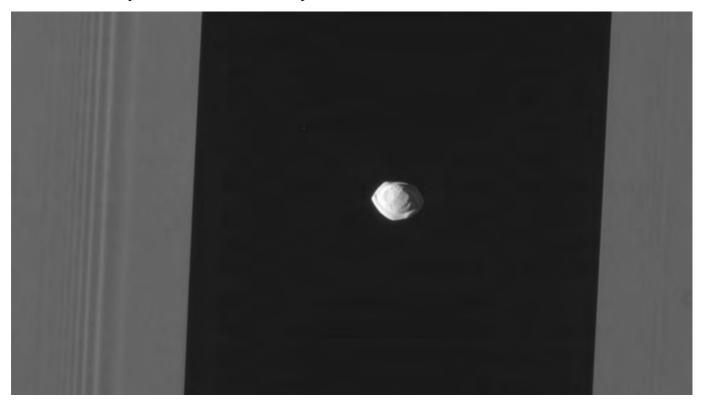
Pan est actuellement le deuxième satellite le plus proche de Saturne que l'on connaisse. De forme irrégulière, son diamètre moyen, initialement estimé à 20 km, a vu sa valeur portée à 35 km à partir de diverses vues rapprochées obtenues par la sonde Cassini au cours des années 2006 à 2008, puis en 2016. Pan est un satellite berger et est probablement le corps qui maintient la lacune d'Encke ouverte en ratissant régulièrement cet espace. Sa petite taille n'avait pas permis son observation en 1981, mais sa présence provoque des ondulations dans les anneaux environnants sur plusieurs centaines de kilomètres en profondeur. C'est ce phénomène qui a mené à des recherches plus fines aux endroits probables de sa présence. De la même manière, il est possible que d'autres petits satellites existent dans les anneaux de Saturne. Daphnis, par exemple, orbite dans la lacune de Keeler, une autre lacune de l'anneau A, située près du bord externe de celui-ci. Le demi-grand axe de l'orbite de Pan est égal à 133 584 km; le satellite orbite donc au centre de la lacune d'Encke (large de 325 km), selon une orbite quasiment circulaire (excentricité mesurée de 0,000) et équatoriale (inclinaison de 0,0° par rapport à l'équateur de Saturne).



La sonde Cassini, lors d'un dernier survol au plus près des anneaux de Saturne, a pris les meilleures images connues de Pan, une petite lune de 35 km de diamètre entourée d'un surprenant bourrelet. Les astronomes se doutaient que la petite lune Pan qui tourne au milieu des anneaux de Saturne avait une forme étrange, assez aplatie. Mais les meilleures images, prises à trop grande distance, ne montraient aucun détail. La sonde Cassini de la Nasa a révélé ces derniers jours, avec un passage au plus près de la planète géante que la forme de Pan était en fait plus étrange que tout ce qu'on pouvait imaginer. Avec un fin bourrelet autour de son équateur, le petit satellite de 35 km de diamètre ressemble au choix à un ravioli, ou à une soucoupe volante. Les meilleures images ont été prises le 7 mars, à une distance record de « seulement » 24.500 km de l'étrange corps rocheux.



Pan, qui tire son nom du dieu berger de la mythologie grecque, orbite autour de Saturne et a été découverte en 1990 sur des clichés pris en 1981 par la sonde Voyager 2. Sa trajectoire a « nettoyé » une bande de 300 km de large au milieu des anneaux de la planète géante, un sillon noir appelé division d'Encke. Le bandeau qui entoure le satellite doit faire quelques kilomètres de haut, et s'est très probablement formé par accrétion de poussières prises aux anneaux de Saturne. En raison de la très faible gravité à la surface de la petite lune, la matière qui s'est accumulée autour de l'équateur est restée sous forme de disque, sans retomber vers les plus hautes latitudes.



16) Atlas

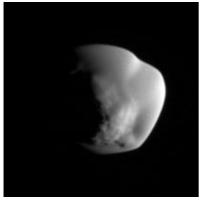
Découverte

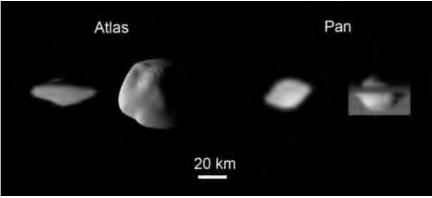
Atlas a été découvert en 1980 par Richard J. Terrile, qui l'a identifié sur des photographies prises par la sonde *Voyager 1*. La découverte a été annoncée le 13 novembre 1980 et le corps a reçu la désignation temporaire S/1980 S 28; la meilleure photographie d'Atlas date du 12 novembre (mais il est possible qu'une image antérieure existe). Lorsque la Terre passa dans le plan des anneaux de Saturne le 22 mai 1995, les photographies prises par le télescope spatial Hubble semblèrent indiquer l'existence de plusieurs nouveaux satellites et l'un d'eux fut désigné S/1995 S 1. À la suite d'observations ultérieures, il s'avéra qu'il s'agissait à chaque fois de lunes connues et S/1995 S 1 fut identifié à Atlas. Le satellite

porte le nom d'Atlas, la divinité de la mythologie grecque qui soutenait les cieux sur ses épaules, allusion à la fonction de cette lune, qui est de marquer la limite extérieure du principal anneau de Saturne.

Caractéristiques

Atlas est un petit satellite d'une trentaine de kilomètres de diamètre. Les images en haute résolution prises en juin 2005 par la sonde Cassini mettent en évidence une lune en forme de soucoupe volante possédant une large dorsale équatoriale. Atlas semble être un satellite berger de l'anneau A; son demigrand axe de 137 700 km est proche de la limite supérieure de cet anneau (136 775 km). Son orbite est par ailleurs parfaitement circulaire (excentricité de 0,000 0) et équatoriale (inclinaison de 0,000°). En 2004, un petit anneau, temporairement désigné par R/2004 S 1 a été découvert à l'intérieur de l'orbite d'Atlas.

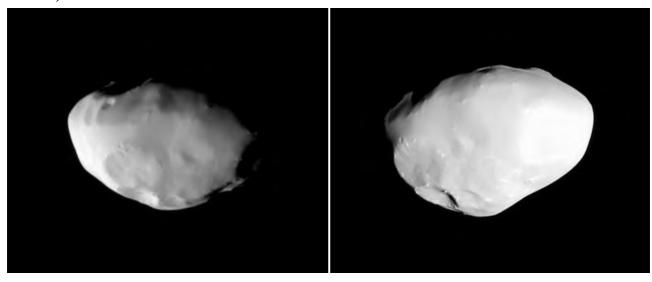




Atlas Atlas et Pan

Les images de la plus haute résolution montrent Pan et Atlas avec des formes de « soucoupes volantes » avec de proéminentes crêtes équatoriales absentes sur d'autres petites lunes de Saturne. Les images ont été prises en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini entre 2005 et 2007. Pan est large de 33 kilomètres et fait 21 kilomètres de pôle à pôle; Atlas est large de 39 kilomètres à l'équateur et fait 18 kilomètres de pôle à pôle.

17) Télesto



Ces vues montrent les caractéristiques de la surface et des variations de couleur sur la lune troyenne Télesto. La surface lisse de cette lune suggère que, comme Pandore, elle est recouverte d'un fin manteau de matière glacée et fine

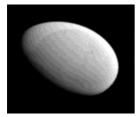
L'origine des différences de couleur ne sont pas encore comprises, mais existent peut-être en raison de subtiles différences dans la taille des grains qui composent le sol glacé. Le petit Télesto fait à peine 24 kilomètres de large. L'image a été prise en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini le 25 décembre 2005 à environ 20 000 km de Télesto. L'échelle est de 118 mètres par pixel.



Gros plan sur Calypso

La rencontre de la sonde Cassini avec Calypso (21 kilomètres de large) a produit cette vue incroyablement détaillée de ce petit satellite troyen. D'une forme irrégulière, Calypso est l'une des deux lunes troyennes de la plus grosse lune Tethys; Calypso suit Tethys à 60° sur son orbite. Comme Télesto, la surface douce de Calypso ne porte pas la marque d'une cratérisation intense au contraire d'autres lunes de Saturne. L'image a été prise en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini le 13 février 2010 à environ 21 000 km de Calypso. L'échelle originale était de 128 mètres par pixel. L'image a été agrandie 2 fois et le contraste renforcé.

19) Méthone

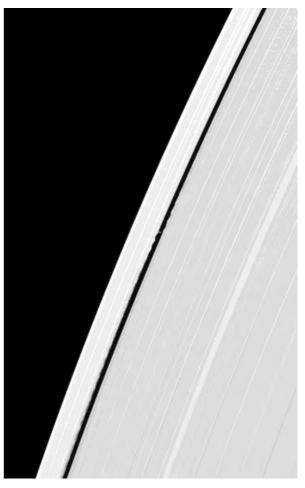


Cet œuf, c'est la lune Méthone (3 km de long). Prise en lumière visible par la caméra à angle réduit de la sonde Cassini le 30 mai 2012 à 4 000 km de distance. L'échelle de l'image est de 27 mètres par pixel.

20) Daphnis

Perturbations causées par Daphnis =>

A peine visible sur le fond noir de la lagune de Keeler où elle réside (à peu près au centre de l'image), la lune Daphnis soulève des vagues dans la matière de l'anneau lors de son passage. Caractéristique des vagues soulevées par une lune sur les bords d'une très étroite lacune comme celle de Keeler, la vague commence avec des formes cohérentes près de Daphnis et le sont de moins en moins au fur et à mesure que la distance s'éloigne. Daphnis a une taille de 7 kilomètres. L'image a été prise en lumière visible par la caméra à angle réduit de Cassini le 17 janvier 2007 à environ 768 000 km de Daphnis. L'échelle est de 5 kilomètres par pixel.



Glossaire: explications sur certains mots peu courants employés dans ce texte

Albedo (albédo): L'albédo ou albedo (sans accent), est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. C'est une grandeur sans dimension, comparable à la réflectivité, mais d'application plus spécifique, utilisée notamment en astronomie et climatologie — ainsi qu'en géologie. Le mot, d'origine latine signifiant blancheur, a été introduit au XVIIIe siècle en optique et en astronomie par le mathématicien et astronome suisse Johann Heinrich Lambert.

L'albédo, dans sa définition la plus courante dite albédo de Bond, est une valeur comprise entre 0 et 1 : un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1. D'autres définitions, dont celle de l'albédo géométrique, peuvent donner des valeurs supérieures à 1.

L'albédo est utilisé en astronomie pour avoir une idée de la composition d'un corps trop froid pour émettre sa propre lumière, en mesurant la réflexion d'une source lumineuse externe, comme le Soleil. On peut différencier ainsi facilement les planètes gazeuses, qui ont un fort albédo, des planètes telluriques qui ont elles, un albédo faible.

Les astronomes ont affiné cette définition en distinguant d'une part l'albédo de Bond, correspondant à la réflectivité globale d'un astre pour toutes les longueurs d'onde et tous angles de phase confondus, et d'autre part l'albédo géométrique, correspondant au rapport entre l'intensité électromagnétique réfléchie par un astre à angle de phase nul et l'intensité électromagnétique réfléchie à angle de phase nul par une surface équivalente à réflectance idéalement lambertienne (c'est-à-dire isotrope quel que soit l'angle de phase) : conséquences de ces définitions, l'albédo de Bond est toujours compris entre 0 et 1, tandis que l'albédo géométrique peut être supérieur à 1.

Tholins: Le **tholin** (du grec ancien $\theta \circ \lambda \circ \zeta / thol \circ s$, « encre de seiche », en référence à l'aspect et à la couleur), ou la tholine (le genre n'est pas fixé par l'usage), est une substance organique plus ou moins azotée de masse moléculaire élevée (~ 8 kDa), de couleur rouge brun (sépia) et de structure mal connue, qu'on trouve à la surface de nombreux astres du Système solaire externe. Le tholin est composé de molécules diverses, ce qui fait qu'on l'écrit également au pluriel : les tholins, les tholines, en référence aux composés ou aux molécules qui le constituent (toutes ces formes lexicales se rencontrent dans la littérature francophone).

Les mécanismes exacts de la formation du tholin ne sont pas connus, mais il s'en forme sous l'action du rayonnement ultraviolet sur des composés organiques simples, tels que des hydrocarbures légers (méthane CH₄, éthane C₂H₆, éthylène C₂H₄, etc.), en présence d'azote N₂ et/ou d'eau H₂O. On ne trouve pas de tholin à la surface de la Terre mais on en trouve au contraire en abondance sur les satellites des planètes géantes, ainsi que, sans doute, sur les planètes naines et les petits corps du Système solaire. On en a également détecté dans le système stellaire de l'étoile binaire HR 4796 à l'aide de l'instrument NICMOS du télescope spatial Hubble. Généralement de couleur rouge-brun, le tholin a une structure moléculaire difficile à caractériser car les résidus sont essentiellement insolubles.

Les tholins de Titan et de Triton, satellites respectivement de Saturne et de Neptune, sont des substances organiques riches en azote du fait de l'action des ultraviolets sur des mélanges d'azote N2 et de méthane CH₄ : l'atmosphère de Titan est en effet composée d'azote avec 1,4 % de méthane dans la stratosphère, taux qui augmente en se rapprochant du sol pour atteindre 4,9 % en dessous de 8 km d'altitude, où on trouve également des traces d'autres hydrocarbures légers tels que l'éthane C2H4, le diacétylène C₄H₂, le méthylacétylène C₄H₄, l'acétylène C₂H₂ et le propane C₃H₈, ainsi que du cyanoacétylène HC₃N, du cyanure d'hydrogène HCN et divers autres gaz; l'atmosphère de Triton, quant à elle, est un peu moins bien connue et semble composée essentiellement d'azote N2 avec des traces de méthane CH₄. A contrario, le tholin « de glace » résulte de l'irradiation de clathrates de méthane CH₄ et d'éthane C₂H₆ dans de la glace d'eau et est donc dépourvu d'azote; le plutino Ixion serait particulièrement riche en ce genre de composés.

Kelvin: Notez bien que la plupart des températures mentionnées dans ce document sont exprimées en Kelvins, échelle la plus utilisée par les scientifiques. Zéro Kelvin (le zéro absolu) est équivalent à -273,15 ° C. Il faut donc retrancher 273,15 aux températures en K pour les obtenir en °C (Celsius ou centigrades). Ex: 84 K = 84 - 273 = -189°C. On ne dit pas « un degré Kelvin », mais simplement « un kelvin ».

Divisions et lacunes : auparavant, les séparations qui se trouvent entre les anneaux de Saturne étaient toutes appelées « divisions ». Maintenant, on distingue les « divisions » (qui font généralement 1 000 km de large ou plus), alors qu'on nomme désormais « lacunes » des petites divisions qui font 500 km de large ou moins.

Anneaux et annelets : les annelets sont de tout petits anneaux très fins que l'on trouve généralement dans les divisions ou les lacunes des anneaux de Saturne. De plus, ils semblent être d'une nature différente des anneaux en ce sens qu'ils semblent souvent être spiralés et qu'ils ont parfois des orbites plus excentriques que les anneaux. Ils sont souvent en interaction avec des très petites lunes de Saturne. Les anneaux et les annelets échangent fréquemment de la matière avec de petits satellites voisins et cela fonctionne dans les deux sens : le satellite prend de la matière à l'annelet ou, au contraire lui en donne.

Hémisphère avant, hémisphère arrière: Cette dénomination pourrait n'avoir aucun sens dans l'espace, mais elle est due à la nécessité de préciser dans le cas de Saturne et d'autres planètes, l'orientation de certains satellites. En anglais, on parle de « leading » hemisphere et de « trailing » hemisphere. Cela ne s'applique qu'aux satellites synchrones qui tournent sur eux-même dans le même temps qu'ils effectuent une orbite autour de leur planète. En conséquence ils présentent toujours la même face à leur planète-mère. Ici la notion d'hémisphère avant décrit la face du satellite (toujours la même) qui est tournée vers la direction de son orbite, donc vers l'avant de sa course. C'est donc celle qui est la plus exposée à recevoir de la matière provenant des anneaux. L'hémisphère arrière est naturellement opposé à l'avant et ne reçoit donc que peu d'éléments, ce qui, à l'instar de Japet, explique des différences de couleur sur les deux faces avant et arrière.

Table des Matières

l -	Saturne, la Planète, le « seigneur des anneaux »	
	Mythologie	
	Les anneaux	
	Le système satellitaire	
	C'est aussi une planète	
	Observations pré-télescopiques	3
	Observations télescopiques terrestres	3
	L'exploration spatiale	3
	Caractéristiques de Saturne	4
	Caractéristiques physiques	
	Masse et dimensions	
	Composition	
	Structure interne	
	Atmosphère	
	Magnétosphère	
	Température	
	•	
II –	Les anneaux de Saturne Caractéristiques des anneaux – Tableau des anneaux	
	Anneaux de Saturne dans l'ordre, de l'intérieur vers l'extérieur	
	L'inclinaison des anneaux de Saturne	
III –	Le système satellitaire de Saturne	
	Premières observations	
	Satellites externes	
	Dénomination	
	Formation des satellites	
	Dix groupes de satellites	
	a) Satellites bergers	
	b) Satellites des anneaux	
	c) Satellites majeurs internes	
	e) Lunes co-orbitales	
	f) Satellites troyens	
	g) Satellites majeurs externes	
	h) Satellites irréguliers	
	i) Satellites non confirmés	
	j) Satellites d'hélices	39
IV –	Détails sur les plus gros satellites de Saturne	
	1) Titan	
	2) Rhéa	
	3) Japet	
	4) Dioné	
	5) Thétis	
	6) Encelade	
	7) Mimas	
	8) Hyperion	82
	9) Phœbe	84
	10) Pandore	88
V –	La sonde spatiale Cassini – Huygens	90
	Genèse du projet	
	Conception et construction de la sonde Cassini	
	•	

Objectifs de la mission	
Caractéristiques techniques de l'orbiteur Cassini	95
L'atterrisseur Huygens	
Déroulement de la mission	
Lancement	
L'anomalie du système de communication de Huygens	
Le survol de Jupiter (Décembre 2000)	
L'insertion en orbite autour de Saturne	
Premiers survols de Titan	
Atterrissage de Huygens	
Rentrée athmosphérique	
Observations athmosphériques	
Faits marquants de la mission primaire	
Première extension de mission	
Scénario de fin de mission	
Résultats scientifiques	
Jupiter	
Saturne et son environnement	
Les anneaux de Saturne	
Titan	
Les autres lunes de Saturne	
Vérification de la théorie de la relativité générale	
VI - Iconographie, photos (et explications complément	aires)119
A) Images de Saturne	119
B) Images des anneaux	128
C) Images des anneaux et de certains satellites	
D) Images des satellites	
1) Titan	
2) Rhéa	
3) Japet	
4) Dioné	
5) Thétis	
6) Encelade	
7) Mimas	
8) Hyperion	
9) Phœbé	
10) Janus	
12) Prométhée	
13) Pandore	
14) Hélène	
15) Pan	
16) Atlas	
17) Télesto	
18) Calypso	
19) Méthone	
20) Daphnis	
Classina sunlications our santaina materialistica in the	474
Glossaire – explications sur certains mots peu courants	5174
Table des matières	176
Annexe : Liste des satellites confirmés de Saturne	I à VII

 ${\it Cr\'edits:} \qquad {\it Photos et textes: Wikipedia (Fr \ et \ US), NASA, ESA, diverses sources \ Internet \dots}$

Textes anglais traduits par Olivier SABBAGH

Satellites de Saturne confirmés

Les satellites de Saturne sont classés ici par période orbitale croissante.

Les satellites suffisamment massifs pour que leur surface ait formé un sphéroïde sont en gras. Les satellites irréguliers sont en rouge, orange ou gris.

ites majeurs	ritan † Autres satellites majeurs	Légende	‡ ♦ Groupe celte Groupe nordique
	Autres sa		ites majeurs

Découvreur	Cassini-Huygens	Mark Showalter	Cassini-Huygens	Cassini-Huygens Voyager 2	Cassini-Huygens Voyager 2 Voyager 2
Année de découverte	2009 Cass	1990 Marl	2005 Cass		
Position	Division de Cassini 20	Division d'Encke	Lacune de Keeler 20		
Excentricité	0 ≈	0,000,0	0.000	0,000	
Inclinaison (°)	≈ 0°	0,0°	0.0°	3°	
Période orbitale (j)	0,4715	0575,0+	+0,594		
Demi-grand axe (km)	≈ 117 000	133 583	136 500		
Masse (10 ¹⁸ kg)	< 0,0000001	0,00495 ± 0,00075	0,000084 ± 0,000012	900	0000
Diamètre (km)	≈ 0,3	28,4 ± 2,6 (35×32×21)	7,8 ± 1,6 (9x8x6)	8	8 3 19 (19)
Image		1			
Nom	S/2009 S 1	Pan	Daphnis	Daphnis Atlas	Daphnis Atlas Prométhée
Ordre	1	2	3	<u>к</u> 4	ε 4 ς

ANNEXE - Satellites de Saturne classés par durée de révolution autour de la planète (donc du plus proche au plus éloigné)

Ordre	Nom	Image	Diamètre (km)	Masse (10 ¹⁸ kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Inclinaison (°)	Excentricité	Position	Année de découverte	Découvreur
7a	Épiméthée		113,4 ± 3,8 (116×117×106)	0,5307 ± 0,0014	151 410	+0,6942	0,351°	8600'0	Co-orbital avec Janus	1977	J. Fountain and S. Larson
7b	Janus		179,2 ± 4 (195×194×152)	1,8891 ± 0,005	151 460	+0,6945	0,163°	0,0068	Co-orbital avec Épiméthée	1966	A. Dollfus
6	Égéon	111	≈ 0,5	~0,0000001	167 500	+0,8081	0,001°	0,0002	Dans l'anneau G	2008	Cassini-Huygens
10	†Mimas	8	396,4 ± 1,0 (415×394×381)	37,493 ± 0,031	185 520	+0,9424218	1,53°	0,0202		1789	W. Herschel
11	Méthone	b	3,2 ± 1,2	~0,00002	194 440	+1,01	0,0072°	0,000,1	Groupe des Alcyonides	2004	Cassini-Huygens
12	Anthée		≈ 2	~0,000005	197 700	+1,04	0,1°	0,001	Groupe des Alcyonides	2007	Cassini-Huygens
13	Pallène	P	4,4 ± 0,6 (5×4×4)	90000°0~	212 280	+1,14	0,1810°	0,0040	Groupe des Alcyonides 2004	2004	Cassini-Huygens
14	†Encelade		504.2 ± 0.4 (513×503×497)	108,022 ± 0,101	238 020	+1,370218	°00,0	0,0045	Anneau E	1789	W. Herschel

ANNEXE - Satellites de Saturne classés par durée de révolution autour de la planète (donc du plus proche au plus éloigné)

Ordre	Nom	Image	Diamètre (km)	Masse (10 ¹⁸ kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Inclinaison Excentricité	Excentricité	Position	Année de découverte	Découvreur
15	†Téthys	•	$ \begin{array}{c} 1.066 \pm 2.8 \\ (1081 \times 1062 \times 1055) \end{array} $		294 660	+1,887802	1,86°	0,000,0		1684	G. Cassini
15a	Télesto		24,8 ± 0,8 (31x24x21)	~0,010	294 660	+1,8878	1,158°	0,001	Point de Lagrange avant de Téthys	1980	B. Smith, H. Reitsema, S. Larson, and J. Fountain
15b	Calypso		21,2 ± 1,4 (30x23x14)	~0,0065	294 660	+1,8878	1,473°	0,001	Point de Lagrange arrière de Téthys	1980	D. Pascu, P. Seidelmann, W. Baum, and D. Currie
18	†Dioné		$\begin{array}{c c} 1.123,4 \pm 1,8 \\ (11128 \times 1112 \times 1121) \end{array}$ 1 095,452 \pi 0,168	1 095,452 ± 0,168	377 400	+2,736915	0,02°	0,0022		1684	G. Cassini
18a	Hélène		33 ± 1,2 (39×37×25)	~0,02446	377 400	+2,7369	0,0°	0,005	Point de Lagrange avant de Dioné	1980	P. Laques and J. Lecacheux
18b	Pollux	•	2,6 ± 0,8 (3×2×2)	~0,00001	377 200	+2,74	0,1774°	0,0192	Point de Lagrange arrière de Dioné	2004	Cassini-Huygens
21	†Rhéa		1 528,6 ± 4,4 (1534×1525×1526) 2 306,518 ± 0,353		527 040	+4,517500	0,35°	0,0010		1672	G. Cassini

Ordre	Nom	Image	Diamètre (km)	Masse (10 ¹⁸ kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Inclinaison (°)	Excentricité	Position	Année de découverte	Découvreur
22	♦ Titan		5 151 ± 4	134 520 ± 20	1 221 830	+15,945421	0,33°	0,0292		1655	C. Huygens
23	†Hypérion		266 ± 16 (328×260×214)	5,584 ± 0,068	1 481 100	+21,276609	0,43°	0,1042	En résonance orbitale 3:4 avec Titan	1848	W. Bond G. Bond W. Lassell
24	†Japet		1 471,2 ± 6,0	1 805,635 ± 0,375	3 561 300	+79,330183	14,72°	0,0283		1671	G. Cassini
25	‡Kiviuq		≈ 16	~0,00279	11 110 000	+449	48,7°	0,334	Groupe inuit	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
26	‡Ijiraq		≈ 12	~0,00118	11 120 000	+451	49,1°	0,316	Groupe inuit	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
27	♣†Phœbé		214,4 ± 12,4 (230×220×210)	8,292 ± 0,010	12 944 000	-548	174,8°	0,164	Groupe nordique	1899	W. Pickering
28	‡Paaliaq		≈ 22	~0,00725	15 200 000	+687	47,2°	0,364	Groupe inuit	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
29	♣ Skathi		8 ≈	~0,00035	15 540 000	-728	148,5°	0,270	Groupe nordique	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
30	♦ Albiorix		≈ 32	~0,0223	16 180 000	+783	34,0°	0,469	Groupe celte	2000	M. Holman

ANNEXE - Satellites de Saturne classés par durée de révolution autour de la planète (donc du plus proche au plus éloigné)

	Nom	Image	Diamètre (km)	Masse (10 ¹⁸ kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Inclinaison (°)	Excentricité	Position	Année de découverte	Découvreur
♣S/2007 S 2	7 S 2		9 ≈	~0,00015	16 730 000	808	176,7°	0,218	Groupe nordique	2007	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna, B. Marsden
♦ Bebhionn	ionn		9 ≈	~0,00015	17 120 000	+835	35,0°	0,469	Groupe celte	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
◆Erriapus	snd		≈ 10	89000'0~	17 340 000	+871	34,6°	0,474	Groupe celte	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
‡Siarnaq	ıaq		≈ 40	~0,0435	17 530 000	968+	45,6°	0,295	Groupe inuit	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
& Skoll	1		≈ 6	~0,00015	17 670 000	-878	161,2°	0,464	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
◆Tarvos	so		≈ 15	~0,0023	17 980 000	+926	33,8°	0,531	Groupe celte	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
‡Tarqeq	bəl		~ 7	~0,00023	18 010 000	+888	46,1°	0,160	Groupe inuit	2007	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
& Greip	qi		9 ≈	~0,00015	18 210 000	-921	179,8°	0,326	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
♣S/2(♣S/2004 S 13		9≈	~0,00015	18 400 000	-933	167,4°	0,273	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
Hyr	♣Hyrrokkin		∞ ≈	~0,00035	18 440 000	-932	151,4°	0,333	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
ınW∢	&Mundilfari		<i>z</i>	~0,00023	18 690 000	-953	169,4°	0,210	Groupe nordique	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
♣ Jarnsaxa	saxa		9 ≈	~0,00015	18 810 000	-965	163,3°	0,216	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
₽ S/2(♣S/2006 S 1		9 ≈	~0,00015	18 980 000	-1015	154,2°	0,130	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna

ANNEXE - Satellites de Saturne classés par durée de révolution autour de la planète (donc du plus proche au plus éloigné)

Image Diamètre (km) Masse (10 ¹⁸ kg)	Image Diamètre (km) Masse (10 ¹⁸ kg)	iamètre (km) Masse (10 ¹⁸ kg)	$[0^{18}\mathrm{kg})$ D	Demi-gra axe (kn	pun (t	Période orbitale (j)	Inclinaison (°)	Excentricité		Année de découverte	Découvreur S. Shennard D. Iewitt 1.
♣ S/2007 S 3 \approx 5 \sim 0,00009 18 980 000	≈ 5 ~0,00009	-00000		18 980	000	-978	177,2°	0,130	Groupe nordique	2007	S. Sneppard, D. Jewitt, J. Kleyna
Anarvi ≈ 7 $\sim 0,00023$ 19 010 000	~0,00023	~0,00023		19 010 (000	-1 004	145,8°	0,431	Groupe nordique	2003	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
	~0,00015	~0,00015		19 340	000	-1006	158,5°	0,142	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
♣ S/2004 S ≈ 4 $\sim 0,00005$ 19 450 000	~0,00005	~0,00005		19 450	000	986-	166,6°	0,259	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
♦ Suttungr ≈ 7 ~0,00023 19 460 000	~0,00023	~0,00023		19 460	000	-1 017	175,8°	0,114	Groupe nordique	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
♣Hati ≈ 6 ~0,00015 19 860 000	~0,00015	~0,00015		19 860	000	-1 039	165,8°	0,372	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
	60000,0~	60000,0~		19 890	000	-1 046	164,0°	0,401	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
♣Bestla ≈ 7 $\sim 0,00023$ $\approx 100000000000000000000000000000000000$	~0,00023	~0,00023		20 130	000	-1 084	145,2°	0,521	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
Farbauti ≈ 5 $\sim 0,00009$ 20 390 000	60000,0~	60000,0~		20 390	000	-1 086	156,4°	0,206	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
	~0,00023	~0,00023		20 470	000	-1 094	175,0°	0,470	Groupe nordique	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
	6 ~0,00015	6 ~0,00015		20 74(000	-1 117	166,7°	0,252	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
♣ S/2004 S 7 \approx 6 \sim 0,00015 21 000 000	≈ 6 ~0,00015	~0,00015		21 00	0 000	-1 140	165,1°	0,580	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
\clubsuit S/2006 S 3 ≈ 6 ~0,00015 22 1C	≈ 6 ~0,00015	~0,00015		22 1C	22 100 000	-1 227	150,8°	0,471	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna

ANNEXE - Satellites de Saturne classés par durée de révolution autour de la planète (donc du plus proche au plus éloigné)

Ordre	Nom	Image	Diamètre (km)	Diamètre (km) Masse (10 ¹⁸ kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Inclinaison (°)	Excentricité	Position	Année de découverte	Découvreur
57	♣Kari		<i>z</i> 7	~0,00023	22 120 000	-1 234	156,3°	0,478	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
58	♣ Fenrir		≈ 4	~0,00005	22 450 000	-1 260	164,9°	0,136	Groupe nordique	2004	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
59	♣Surtur		9 ≈	~0,00015	22 710 000	-1 298	177,5°	0,451	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
09	♣ Ymir		≈ 18	~0,00397	23 040 000	-1 312	173,1°	0,335	Groupe nordique	2000	B. Gladman, J. Kavelaars, et coll.
61	♣ Loge		9 ≈	~0,00015	23 070 000	-1 313	167,9°	0,187	Groupe nordique	2006	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna
62	♣ Fornjot		9≈	~0,00015							