

LE MENSUEL DE RÉFÉRENCE DES SCIENCES DE L'UNIVERS

L'ASTRONOMIE

L'ASTRONOMIE

N° 121 / NOVEMBRE 2018

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE

ASTÉROÏDE MASSIF
**COMMENT ÉVITER
UNE COLLISION**



**CES ÉTRANGES
STRUCTURES : LES ARCS
GRAVITATIONNELS**



NGC 7662
**LA BOULE DE
NEIGE BLEUE**

PANORAMA

SATELLITES DE SATURNE

**UNE GRANDE DIVERSITÉ
DANS PEU D'ESPACE**

BELGIQUE / LUXEMBOURG : 6,80 € - SUISSE : 10,90 CHF

CNL
CENTRE
NATIONAL
LITTÉRAIRE

M 02605 - 121 - F: 6,20 € - RD





SATELLITES DE SATURNE

UNE GRANDE DIVERSITÉ DANS PEU D'ESPACE

On en sait aujourd'hui beaucoup plus sur le système de Saturne, en particulier qu'il s'agit de la planète du Système solaire qui est accompagnée par le plus grand nombre de satellites : plus de 200 lunes ont été observées, dont 62 confirmées et nommées individuellement.



Vue d'artiste d'une tempête sur Titan

Couverture : IPGP/Labex UnivEarthS/University Paris Diderot – C. Epitalon & S. Rodriguez

L'ESSENTIEL

Ce zoom présente une description claire et exhaustive des neuf satellites dits « historiques » de Saturne, historiques au sens où ils ont été découverts par des observations à partir du milieu du XVII^e siècle et jusqu'à la fin du XIX^e. Ce système complexe a ensuite été survolé, depuis la fin des années 1970, par quatre sondes, *Pioneer 11*, puis les deux *Voyager* et enfin plus récemment, au XXI^e siècle, par l'ensemble *Cassini-Huygens*.

L'article ne s'intéresse pas à la « fabrication » de ces objets si divers en orbite autour de la même planète, dont la caractéristique bien connue est son système d'anneaux. Au contraire, nous procéderons à une description de leur formidable diversité, en partant de Titan, le plus grand d'entre eux et en les observant, au fur et à mesure que l'on approche de Saturne: Phobé, Japet, Hypérior, Rhéa, Dioné accompagné d'Hélène et Polydeuces, Thétys accompagné de Télésto et Calypso, et enfin Encelade puis Mimas, la plus petite et la plus interne des lunes glacées de Saturne.

La planétologie comparée de ce système satellitaire permettra de confirmer ce qui a déjà été observé ailleurs dans le Système solaire, à savoir que la diversité est ce qui caractérise cet ensemble.

Le système de Saturne, sixième planète du Système solaire par ordre de distance au Soleil et deuxième après Jupiter par la taille et la masse, est scruté avec attention par les astronomes, depuis les premières observations par Galilée de la planète « entourée d'un anneau » au début du XVII^e siècle. La caractéristique principale du système de Saturne reste les anneaux encerclant la planète et formés par des milliards de particules de glace d'eau orbitant dans le plan équatorial de Saturne

Grâce au survol de ce système complexe par quatre sondes depuis la fin des années 1970, nous pouvons connaître en détail la nature du plus fascinant système de mondes qui accompagne le Soleil dans sa trajectoire galactique. La description des satellites les plus importants permet de se rendre compte de leur grande diversité. Toutes les images, les informations et les données consacrées aux

satellites de Saturne dont il est question dans cet article sont issues des observations *in situ* faites par les instruments embarqués sur les 4 sondes qui ont réalisé les différentes phases de l'exploration du système de Saturne: *Pioneer 11* (1979) fut la première sonde à survoler Titan et Saturne, suivie par *Voyager 1* (1980) et *Voyager 2* (1981) qui ont fourni une première vision d'ensemble du système de Saturne; enfin *Cassini-Huygens* (2004-2017) a été le premier satellite artificiel de Saturne (voir *l'Astronomie* n° 118, juillet-août 2018).

Cet article présente les neuf satellites « historiques », découverts à partir du sol. Il s'agit des découvertes faites depuis le XVII^e siècle, à savoir Titan puis trois couples d'objets semblables par la taille, Rhéa-Japet, Thétys-Dioné, Encelade-Mimas et enfin Hypérior et Phobé découverts au XIX^e siècle. Le tableau ci-dessous résume ces découvertes.

DÉCOUVERTE DE SATELLITES DEPUIS LE SOL

Satellite	Découverte	
	Année	Personnes
Titan	1655	Christiaan Huygens
Rhéa-Japet	1671	Giovanni D. Cassini
Thétys-Dioné	1676	Giovanni D. Cassini
Encelade-Mimas	1789	William Herschel
Hypérior	1848	William C. Bond
Phobé	1899	Edward C. Pickering

TITAN

Titan, la plus grande lune de Saturne avec un diamètre de 5 151 km, parcourt une orbite située à 1,2 million de km de la planète en 15 jours et 22 heures. Par suite des effets de marée qui lient Titan à Saturne, c'est aussi sa période de rotation autour de son propre axe. Titan présente donc toujours le même hémisphère à Saturne : on dit qu'il est lié à Saturne par une résonance spin-orbite [2].

L'atmosphère de Titan

Titan est l'unique satellite du Système solaire à être enveloppé par une dense atmosphère d'azote ($N_2 \sim 98,4\%$) et de méthane ($CH_4 \sim 1,6\%$) qui produit une pression à la surface égale à une fois et demie celle de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer. Les survols du satellite par les sondes *Voyager 1* (1980) et *Voyager 2* (1981) avaient révélé que la surface de Titan était invisible sous les électroniques des caméras de bord, à cause de cet épais brouillard, dont la composition avait fait penser que Titan aurait pu ressembler à une Terre primitive, et fournirait ainsi une clef pour comprendre

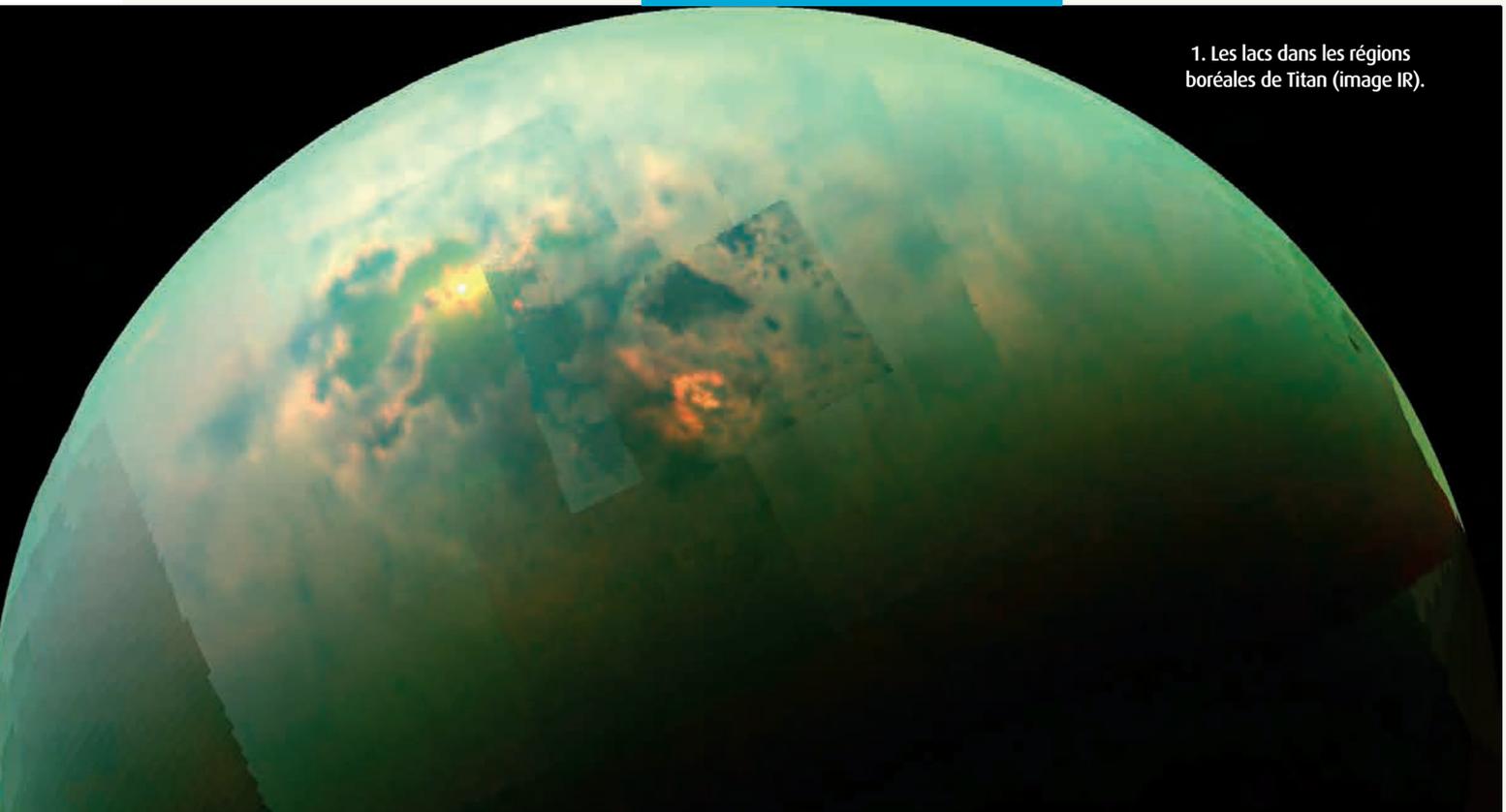
l'apparition de la vie sur Terre. Cet argument a été l'un des piliers sur lesquels a été conçue et réalisée la mission *Cassini-Huygens* qui a effectué la plus longue exploration *in situ* d'une planète et de son système de satellites. Titan a été au centre de cette exploration, survolé par la sonde *Cassini* 245 fois, mais avant tout comme cible de la mission de la sonde européenne *Huygens*, qui a accompli sa descente dans son atmosphère le 14 janvier 2005. Les multiples survols de Titan par *Cassini* ont fourni à la sonde l'assistance gravitationnelle [3] qui lui était nécessaire pour modifier ses orbites et développer ainsi son complexe programme d'observations. À chaque survol, l'un des instruments embarqués sur

Cassini pouvait effectuer des observations ; c'est leur ensemble qui nous a permis d'avoir une connaissance très détaillée de ce monde lointain, de son atmosphère, de sa surface et de son intérieur.

L'atmosphère de Titan fut découverte en 1907 par l'astronome espagnol Comas Sola et ce sont des observations spectroscopiques effectuées par Gerard Kuiper en 1948 qui ont révélé la présence du méthane. Cette présence a été l'objet de nombreuses discussions dans la communauté scientifique ; en effet, la radiation ultraviolette du Soleil est capable de dissocier la molécule du méthane et donc, depuis la formation du satellite il y a 4,5 milliards d'années, le méthane d'origine devrait être épuisé sauf s'il existe une source réinjectant dans l'atmosphère ce que la photolyse a détruit. Quelle est cette source ? Plusieurs hypothèses ont été avancées : des éruptions crypto-volcaniques, la sublimation de couches glacées d'hydrocarbures, la présence d'océans ou de lacs de méthane liquide à la surface de Titan ? C'est le radar de la sonde *Cassini* qui a confirmé la présence de grands lacs à la surface du satellite (fig. 2).

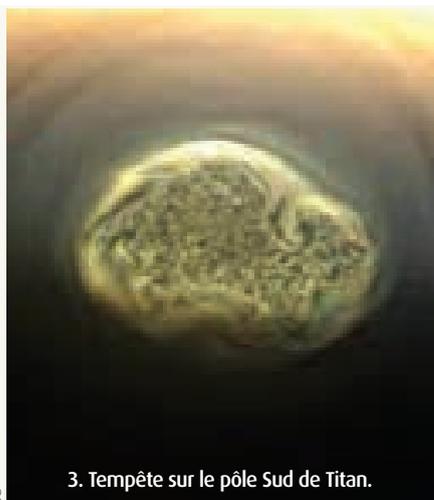
La mission *Cassini-Huygens* a effectué la plus longue exploration *in situ* d'une planète et de son système de satellites.

1. Les lacs dans les régions boréales de Titan (image IR).



La masse volumique de l'atmosphère entre 1 200 km d'altitude et la surface du satellite varie presque linéairement (entre 10^{-10} kg/m³ et 1,5 kg/m³); la pression au sol est de 1,5 bar. Le profil de température montre une atmosphère structurée, qui est le siège d'ondes de gravité au-dessus de 400 km; on distingue successivement la thermosphère (1 200-600 km), la mésosphère entre 600 et 260 km et enfin la stratosphère, où la température atteint son maximum -87 °C, alors que son minimum de -201 °C est atteint au niveau de la tropopause, à une altitude de 40 km. La température à la surface de Titan est de -180 °C. Les valeurs de pression et de température à la surface sont ainsi proches des valeurs du point triple du méthane, qui peut donc exister sous forme gazeuse, liquide ou solide. Par comparaison, à la surface de la Terre, les conditions environnementales sont proches du point triple de H₂O, ainsi l'eau passe cycliquement de l'atmosphère à la surface, par exemple avec la pluie et l'évaporation de la rosée. Titan est ainsi le seul autre corps du Système solaire connu pour avoir un cycle de fluides circulant sur sa surface, semblable à celui de l'eau sur Terre; mais sur Titan, il s'agit de méthane dont la plus grande partie réside dans son atmosphère, quand sur Terre la plupart de l'eau est à sa surface (fig. 2). Grâce au long temps passé à observer Titan, *Cassini* a détecté la formation de grandes tempêtes de méthane et vu les effets de la pluie en observant les modifications de la surface après la tempête (fig. 3).

Dans la haute atmosphère, les molécules de méthane et d'azote sont dissociées par la lumière ultraviolette du Soleil et par les particules de haute énergie accélérées par le champ magnétique de Saturne: les produits dissociés se recombinent pour former plusieurs molécules organiques. Certains des composés produits par la dissociation et le recyclage du méthane et de l'azote dans l'atmosphère supérieure créent un épais brouillard de couleur orange, qui cache à la vue la surface du satellite. D'autres composés riches en carbone tombent à la surface.



3. Tempête sur le pôle Sud de Titan.

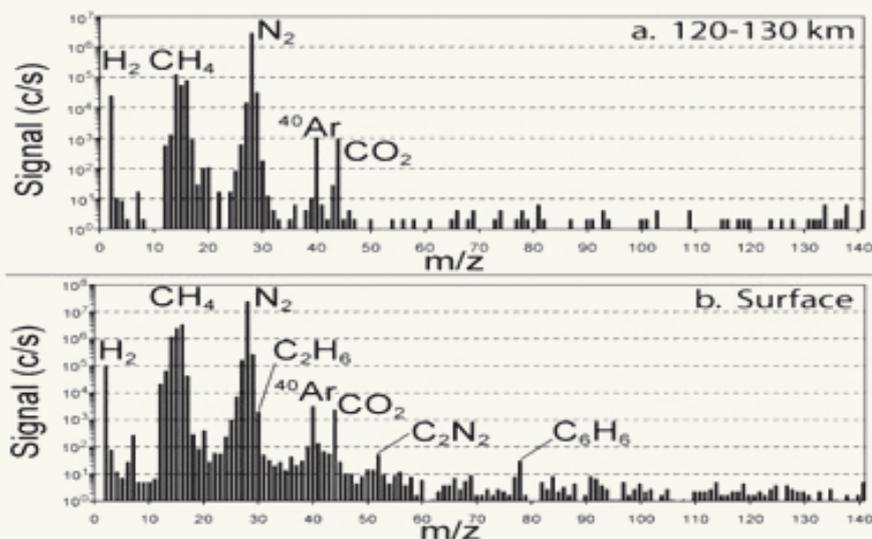
La surface de Titan

Certains des hydrocarbures qui se déposent sur la surface forment les grains composant le « sable » de vastes champs de dunes longitudinales (telles celles du désert de Namibie en Afrique) que, grâce au radar à bord de la sonde *Cassini*, on a observé sur la plupart des régions équatoriales de la surface de Titan. La vaste mer de sable enveloppe et contourne la plupart des caractéristiques topographiques de ces régions: on distingue seulement un terrain profondément érodé et, plus bas, les régions environnantes, dénommées Xanadu, qui sont libres de dunes, peut-être parce que les ruisseaux éphémères sur leurs bords balayent le sable. Xanadu semble être une des parties les plus anciennes de Titan, préservant des structures circulaires dégradées, possibles vestiges de cratères d'impact érodés. La quasi totale

absence de cratères d'impact indique que la surface subit des modifications par des processus géologiques actifs tels des dépôts éoliens (vents) et de l'érosion fluviale (ruisseaux et rivières). Ces modifications peuvent masquer une activité tectonique de plus grande échelle qui, dans certains endroits, a formé des chaînes de montagnes atteignant plus d'un kilomètre de haut.

L'érosion et le dépôt de matériaux, solides et liquides, par le vent et la pluie, modèlent la surface de Titan. Les liquides s'évaporent, formant des nuages à partir desquels les gaz reliquéfiés tombent sous forme de pluie, laquelle sculpte la surface du satellite avec des rivières et des mers et de grands lacs remplis par du méthane liquide, présent presque exclusivement aux hautes latitudes, près du pôle Nord. Les lacs se forment souvent dans des dépressions de 600 à 800 mètres de profondeur. Les trois mers de Titan, Ligeia, Punga et Kraken, s'étendent sur des centaines de kilomètres, avec des rives déchiquetées semblables à celles observées sur Terre dans les régions où le relief a été envahi par le liquide (tels les lacs dans les vallées alpines). Les mesures radar de *Cassini* ont détecté le fond des mers, fournissant des profils bathymétriques qui correspondent à des profondeurs de 100 à 200 mètres.

Des dépressions au pôle Sud pourraient être les vestiges d'anciennes mers. Cette asymétrie entre les deux pôles peut être le résultat de variations climatiques à long terme.



2. Composition de l'atmosphère (a) et de la surface (b) de Titan.

La température sur Titan est si basse que la glace d'eau joue le rôle de substrat rocheux, et l'eau, celui de la lave. La région dénommée Sotra Patera montre une activité de cryovolcanisme avec des coulées d'eau liquide sur Titan.

L'intérieur de Titan

La structure interne de Titan peut être modélisée comme un corps différencié en plusieurs couches, avec un noyau rocheux de plus de 3000 km de diamètre, entouré par plusieurs couches de différentes formes cristallines de glace d'eau mélangée à de la glace d'ammoniac et à des glaces d'hydrocarbures. Au-dessous de la surface, il semble qu'une couche liquide d'eau et d'ammoniac existe entre la croûte de glace I (la glace ordinaire) et les couches de glaces plus profondes. Un indice de l'existence d'un tel océan a été découvert par la sonde *Cassini* sous la forme d'ondes radio à très basses fréquences dans l'atmosphère de Titan; en effet, 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 observations de *Cassini* ont montré que certaines caractéristiques de la surface se sont déplacées jusqu'à 30 km entre octobre 2005 et mai 2007, ce qui suggère que la croûte du satellite est mobile et qu'elle est séparée de l'intérieur, indice supplémentaire de l'existence d'un océan souterrain sur lequel la croûte peut flotter, engendrant les déplacements observés.

La durée de la mission *Cassini* nous a permis d'observer Titan pendant plus de treize ans (presque la moitié de la période de révolution de Saturne, qui dure 29,5 ans terrestres), et de voir le changement des saisons et les fortes variations qui se produisent dans son atmosphère: emplacement et fréquence des tempêtes de méthane; structure de la température de l'atmosphère, et position du vortex polaire et son nuage géant, qui se forme toujours sur le pôle hivernal.

Titan est le meilleur corps du Système solaire pour comprendre les processus qui se sont probablement produits sur la Terre primitive; l'analyse de la chimie complexe qui se produit dans l'atmosphère de Titan améliore notre compréhension des conditions qui ont présidé à l'origine et à l'évolution de la vie sur Terre et sur d'autres mondes.

SATELLITES DE GLACE

Cette dénomination s'applique à l'ensemble des satellites historiques de Saturne, ceux qui ont été découverts après Titan mais avant le XX^e siècle. Dans ce paragraphe seront présentées leurs principales propriétés qui les caractérisent et les distinguent de tous les autres, en partant du plus extérieur, Phoebé, et approchant de Saturne, en survolant successivement Japet, Hypérion, Rhéa, Dioné, Téthys, Encelade et Mimas. Tous ces satellites, sauf Phoebé et Hypérion (qui sont probablement des objets capturés), sont liés par les marées à Saturne dans une résonance spin-orbite 1/1, et donc lui montrent toujours la même face.

PHOEBÉ

Phoebé se trouve à une distance moyenne de 12 952 000 km de la planète. Le plan de son orbite est presque perpendiculaire au plan de l'équateur de Saturne (inclinaison de 174,8°). C'est le plus grand des satellites irréguliers du groupe dit « nordique ». Récemment, grâce aux observations infrarouges du satellite

Contrairement à la plupart des grandes lunes en orbite autour de Saturne, Phoebé est très sombre et sa surface est recouverte par un matériau qui reflète seulement 6 % de la lumière solaire qu'elle reçoit (albédo de 0,06). Sa surface est cratérisée et, sur la paroi d'un de ses plus grands cratères, se trouve de la glace d'eau. Son faible albédo et son orbite rétrograde suggèrent que Phoebé



4. Phoebé

Nasa

Spitzer, a été découvert un anneau/disque de Saturne de très faible densité mais particulièrement grand (avec une largeur de 6 millions de km) qui a son bord extérieur sur l'orbite de Phoebé; ce dernier serait donc à l'origine de cet anneau lointain, alimenté par la poussière arrachée au satellite lors d'impacts météoritiques. Phoebé est à peu près sphérique avec un rayon moyen de 106,5 km; sa période de rotation autour de son axe est de neuf heures et il parcourt une orbite rétrograde autour de Saturne en 18 mois terrestres (fig. 4).

est un objet provenant du Système solaire externe, région où il y a beaucoup de matériel sombre, et qu'il a été capturé par Saturne. Certains scientifiques ont émis l'hypothèse que Phoebé est un Centaure capturé, c'est-à-dire un objet de la ceinture de Kuiper ayant migré dans le Système solaire interne. Si tel est le cas, les images et les données scientifiques de Phoebé recueillies par la sonde *Cassini* ont donné aux planétologues la première occasion d'étudier un objet primitif qui n'a jamais subi des phénomènes de différenciation, en raison de sa petite taille, et qui n'a donc jamais modifié sa composition chimique.

JAPET

Japet est, par la taille, la troisième lune de Saturne ($R = 736$ km), distante de 3 561 000 km de la planète. Il parcourt une orbite en résonance orbitale [5] 3/1 avec celle de Titan; avec une inclinaison orbitale de $17,28^\circ$, c'est le seul satellite régulier à ne pas évoluer dans le plan équatorial de Saturne.

La principale caractéristique de Japet est la forte dissymétrie de ses deux hémisphères (fig. 5) : l'une est sombre comme le charbon (albédo de 0,03-0,05), et l'autre très brillante (albédo de 0,5-0,6). Gian Domenico Cassini avait constaté la différence de luminosité de la surface de ce satellite lorsqu'il l'a découvert en 1671. Il avait noté qu'il ne pouvait voir Japet qu'à l'ouest de Saturne (quand il montre son côté brillant) et avait conclu correctement que Japet avait donc un côté beaucoup plus sombre que l'autre.

Plusieurs scénarios ont été proposés pour expliquer cette dissymétrie: 1) le balayage par Japet de particules sombres provenant de la lointaine Phœbé; 2) le cryovolcanisme [6], avec des éruptions d'hydrocarbures pouvant former les surfaces sombres, surtout suite aux réactions chimiques provoquées sur les matériaux éjectés par le rayonnement solaire; 3) l'effet de la ségrégation thermique, que l'on peut expliquer de la manière suivante: Japet a une rotation lente (plus de 79 jours), donc le cycle de tem-



5. Dichotomie évidente entre l'hémisphère qui précède (à droite) et celui qui suit (à gauche).

pérature quotidien est tellement long que le matériau sombre peut absorber la chaleur du Soleil et se réchauffer beaucoup plus que les matériaux clairs qui réfléchissent la quasi-totalité de la radiation solaire et absorbent beaucoup moins de chaleur. Ce chauffage est suffisant pour provoquer la sublimation de toutes les substances volatiles du côté sombre et leur migration vers le côté clair, plus froid. Cela entraîne une amplification du phénomène: les matériaux sombres deviennent encore plus sombres (en perdant par sublimation de plus en plus de glaces claires) et les régions froides, encore plus lumineuses (elles s'enrichissent davantage des glaces qui s'y solidifient). Peut-être que dans un passé lointain Japet a subi un petit afflux de matériaux sombres d'une source externe

(par ex. Phœbé), qui a déclenché ce processus de ségrégation thermique.

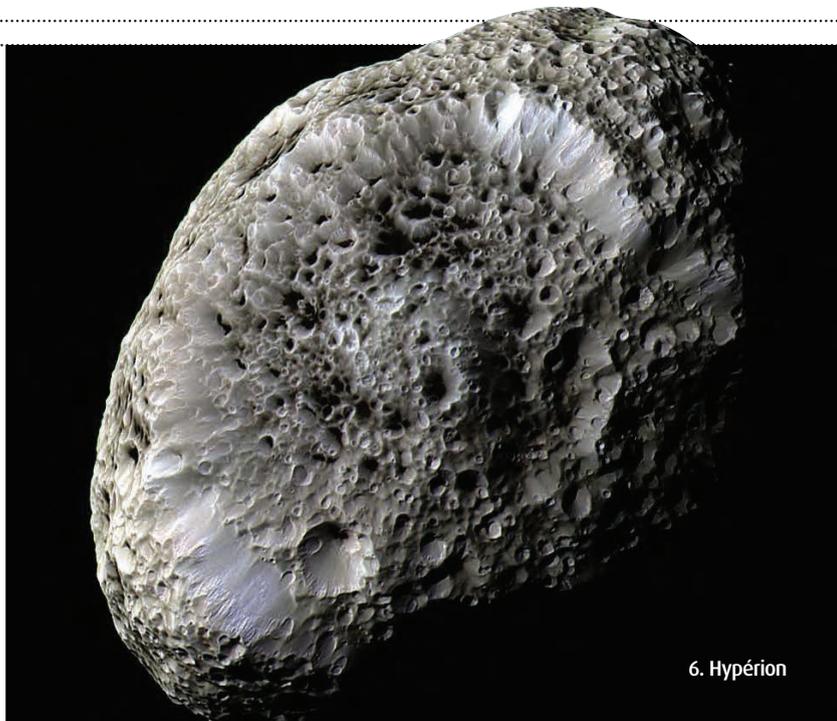
Une autre caractéristique frappante de Japet est une crête équatoriale, une chaîne de montagnes, hautes de 10 km, ceignant l'équateur de la lune, appelée le massif des *Voyagers* car les deux sondes américaines ont été les premières à l'observer en 1980 et 1981. Sur le côté qui ne voit jamais Saturne, la crête semble être brisée et l'on y a observé des montagnes isolées, avec un albédo plus élevé. Il y a deux théories sur la formation de cette crête: selon certains, la crête se serait accumulée à une époque où Japet aurait eu une rotation beaucoup plus rapide que celle d'aujourd'hui; d'autres pensent que le massif est formé de matériaux provenant de l'effondrement d'un anneau.

HYPÉRION

Hypériorion a une forme qui pourrait être contenue dans un ellipsoïde triaxial aplati, dont les trois axes mesurent respectivement 410, 260 et 220 km (fig. 6).

Hypériorion a une orbite très excentrique ($e = 0,10$) et il est distant en moyenne de 1 500 000 km de Saturne, en résonance orbitale 3:4 avec Titan: ces propriétés entraînent des variations dans la rotation de la lune autour de son axe (période d'environ 13 de nos jours). Hypériorion parcourt son orbite en 21 jours de façon chaotique, « dégringolant » (en anglais *tumbling*) à travers l'espace.

La masse volumique d'Hypériorion est un peu plus de deux fois inférieure à celle de l'eau, ce qui est probablement dû à une composition dominée par les glaces d'eau et des matériaux plus légers, tels que le dioxyde de carbone ou



6. Hypériorion

le méthane, avec une porosité de plus de 40 %. Cette composition est compatible avec l'hypothèse d'une origine « catastrophique » d'Hypérioron, qui serait le résultat de l'accrétion de petits corps de glace et de roche issus de la destruction d'une lune primordiale par un impact majeur. Le « tas de gravats » (en anglais *rubble pile*) ainsi formé n'a jamais atteint une masse suffisante pour se compacter.

La surface d'Hypérioron est parsemée de cratères particulièrement profonds qui n'ont pas d'éjecta, mais où l'on peut observer des glissements de « terrain » et des effondrements de parois et de fonds, avec

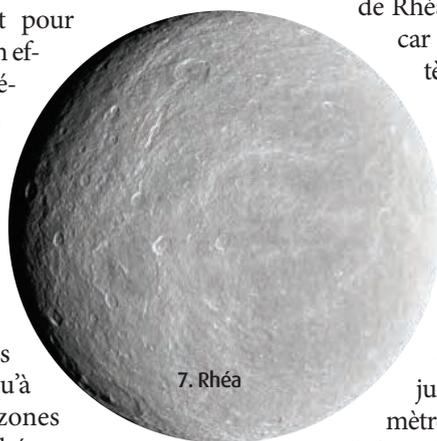
pour résultat une apparence curieuse, un peu comme une éponge ou un nid de guêpes. Les planétologues pensent que, par suite de la grande porosité et de la faible masse volumique, ces cratères auraient été formés par compression plutôt que par excavation. Beaucoup de cratères sur Hypérioron sont brillants, signe d'abondance de glace d'eau, mais les fonds des plus anciens de ces cratères ont un albédo plus faible et une couleur plus rouge, signe d'accumulation des matériaux sombres, résidus de la sublimation des substances volatiles, due à l'échauffement sous l'effet de la longue exposition diurne aux radiations solaires.

RHÉA

Rhèa est la deuxième lune de Saturne en taille, avec un rayon moyen de 764 km.

Rhèa effectue sa révolution autour de la planète en 4,5 jours terrestres. C'est le seul satellite dans le Système solaire autour duquel un disque de débris et un anneau ont été observés. Son orbite autour de Saturne est distante de 527 000 km, où les marées de Saturne n'entraînent pas un chauffage intérieur suffisant pour produire à la surface des coulées d'eau liquide qui auraient pour effet de la rajeunir, en effaçant les cratères préexistants; ainsi, Rhèa est-elle lourdement cratérisée.

Les températures à la surface de Rhèa sont de $-174\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans les zones ensoleillées et descendent jusqu'à $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans les zones non illuminées. Rhèa a un albédo élevé, indiquant que la glace d'eau constituant la majeure partie de sa surface, se comporte à ces températures comme un substrat rocheux. La masse volumique de Rhèa, qui est de 1233 kg/m^3 , suggère que l'intérieur de la lune est composé de trois quarts de glace et d'un quart de roche, avec un mélange homogène de ces deux composantes, comme indiqué par la valeur du moment d'inertie par rapport à son axe de rotation, plus grand que celui attendu si Rhèa avait eu un noyau seulement rocheux.



7. Rhèa

Les sondes *Voyager* avaient pris des images où l'on pouvait reconnaître sur Rhèa de minces lignes, qui s'étendaient sur des dizaines ou des centaines de kilomètres sur les plaines couvertes de cratères et où l'on pouvait distinguer deux régions différentes: une, plus claire, hérissée de cratères de taille supérieure à 40 km de diamètre, et une deuxième zone avec des cratères plus petits (fig. 7). Cette différence suggère qu'il y a eu un important événement ayant renouvelé la surface de Rhèa dans le passé lointain, car il n'y a pas trace de cratères jeunes et l'âge moyen des plaines est estimé à environ quatre milliards d'années.

Les images obtenues par la sonde *Cassini* montrent que ces longues lignes sont des fractures d'affaissement, des canyons profonds jusqu'à des centaines de mètres, dont les parois ont un albédo plus élevé car le matériel plus sombre tombe à l'intérieur, en exposant la glace d'eau. Ces falaises semblent témoigner de l'existence d'une activité tectonique dans le passé de Rhèa.

Une exosphère ténue d'oxygène et de dioxyde de carbone a été détectée autour de Rhèa: le champ magnétique de Saturne, dans sa rotation diurne, balaye périodiquement la surface de la lune; les particules énergétiques piégées dans ses lignes de force interagissent avec la surface, dissociant les molécules organiques présentes et libérant oxygène et anhydrite carbonique.

DIONÉ

Dioné est un satellite de glace de taille intermédiaire (1124 km de diamètre) orbitant autour de Saturne à une distance de 377 400 km, avec une période de 2,7 jours.

Il a verrouillé gravitationnellement sur son orbite autour de Saturne deux petites lunes, appelées, par analogie avec les astéroïdes troyens [1] de Jupiter, les « Troyens » de Dioné: Helene qui se trouve à 60 degrés avant Dioné, et Polydeuces à 60 degrés derrière. Dioné est aussi en résonance orbitale avec deux autres satellites de Saturne, Mimas et Encelade. Dioné maintient Encelade à une période égale à la moitié de sa propre période orbitale, et Mimas à une période égale à 1/3 de la même période.



8. Dioné

La masse volumique de Dioné est de 1480 kg/m^3 impliquant qu'environ un tiers de la lune est composé d'un noyau dense formé probablement de silicates, le reste étant de la glace d'eau. À sa surface, la température moyenne est de $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la glace se comporte comme une roche. Une très fine poussière de glace provenant de l'anneau E, produit par les geysers d'Encelade (voir plus loin), bombarde constamment Dioné.

Les deux hémisphères, avant et arrière, de Dioné sont bien différents l'un de l'autre et les principales caractéristiques géologiques de la surface sont des terrains très cratérisés avec des cratères de 100 km de diamètre sur l'hémisphère avant, et des plaines modérément ou peu cratérisées, avec des zones fracturées à l'arrière. Logiquement, ce devrait être l'inverse, mais il semblerait que Dioné ait récemment subi un ou plusieurs impacts l'ayant fait tourner de 180° , ce qui aurait interverti les positions de ses hémisphères.

TÉTHYS

Téthys a une forme non parfaitement sphérique avec des dimensions 1 076,8 / 1 057,4 / 1 052,6 km.

Elle ressemble beaucoup à Dioné et à Rhéa, sauf qu'elle est moins cratérisée que les deux autres, parce qu'en raison de sa proximité avec Saturne, les effets de réchauffement dus aux marées sont plus importants et ont plus longuement maintenu partiellement en fusion la couche de glace au-dessous de sa surface, permettant des effusions d'eau liquide qui ont effacé et lissé les structures préexistantes (fig. 9).

L'orbite de Téthys est à 295 000 km de Saturne et le satellite la parcourt en 45,3 heures. Dans les points de Lagrange L4 et L5 de son orbite, il y a deux petits « Troyens » verrouillés gravitationnellement dans son propre sous-système, Télésto et Calypso.

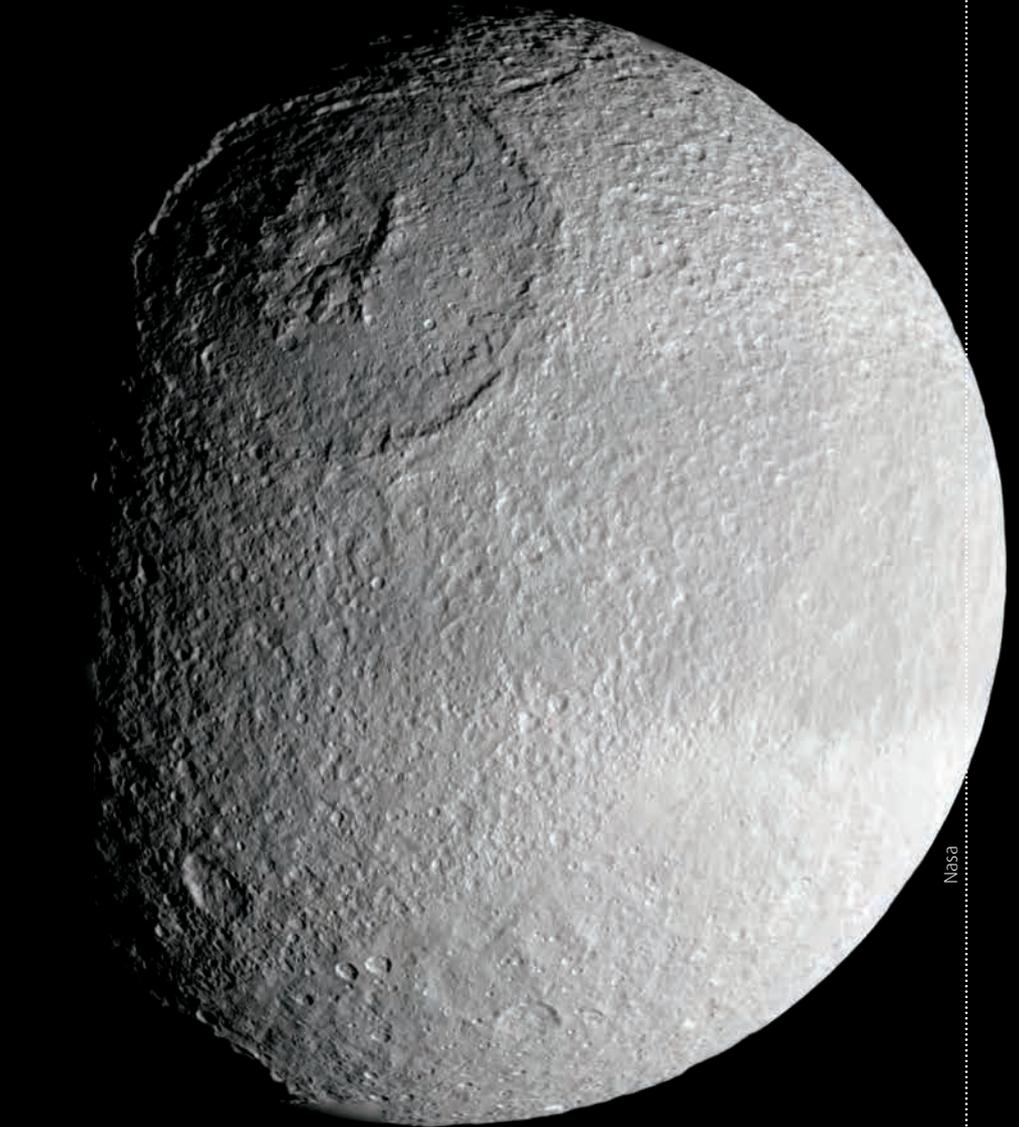
La masse volumique de Téthys est de 0,97 fois celle de l'eau liquide, son albédo moyen est de 0,8, elle est composée presque entièrement de glace d'eau. Les fonds brillants de nombreux cratères et l'effet de ponçage consécutif au bombardement de la surface de Téthys par les particules de glace de l'anneau E générés par les geysers sur Encelade contribuent à la très haute réflectivité de Téthys (albédo élevé).

L'hémisphère Nord de Téthys a été beaucoup remanié par les impacts : le cratère Tirésias, par exemple, est tellement dégradé et érodé par les impacts qu'une seule trace circulaire de monticules subsiste à l'emplacement de l'ancien cratère. Dans les régions équatoriales, il y a moins de cratères, ce qui implique que dans le passé une activité interne a renouvelé le terrain. Ces régions sont aussi plus sombres, en particulier, une bande composée de ces matériaux plus sombres, traversant un des hémisphères de Téthys.

La morphologie de la surface de Téthys est marquée par deux structures géantes : un immense cratère d'impact et une très longue vallée. Le cratère

Odysseus (400 km de diamètre) occupe l'hémisphère Ouest de la lune : l'énergie libérée par l'impact qui l'a produit aurait pu détruire le satellite si celui-ci avait été complètement solide, ce qui implique qu'au moment de la collision, l'intérieur de Téthys était encore partiellement liquide. Les bords du cratère et le pic central se sont effondrés, laissant une cavité peu profonde, ce qui suggère aussi que les terrains sous-jacents étaient dans un état suffisamment plastique pour changer de forme, alors qu'ailleurs sur la surface on peut observer des falaises plutôt raides.

L'Ithaca Chasma est une vallée, large de 100 km, longue de 2 000 km, profonde de 2 à 3 km, qui traverse Téthys du pôle Nord au pôle Sud, aux antipodes d'Odysseus. Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer l'origine de cette immense structure : 1) l'expansion des glaces, consécutive à la solidification de l'eau liquide interne après la solidification finale de la surface, aurait provoqué la fracturation de la surface ; 2) l'impact qui a créé Odysseus a engendré des ondes sismiques qui ont interagi de façon destructive aux antipodes du cratère, causant la fracturation de la surface.



Nasa

9. Thétyis



ENCELADE

Encelade a un rayon moyen de seulement 252 km et accomplit sa révolution autour de Saturne à une distance de 238 000 km en 32,9 heures. Il est verrouillé par les marées dans une résonance spin-orbite avec Saturne, présentant ainsi toujours la même face vers la planète, et il est aussi dans une résonance orbitale 2:1 avec Dioné (c'est-à-dire qu'Encelade décrit deux orbites autour de Saturne dans exactement le même temps que Dioné en parcourt une), ce qui accroît son excentricité orbitale, réduite par les forces de marée; l'énergie mise en jeu dans ce processus chauffe l'intérieur d'Encelade et, peut-être, gouverne son activité géologique.

Encelade est l'un des objets les plus brillants de notre Système solaire (fig. 10). Couvert de glace d'eau, Encelade reflète presque 100 % de la lumière qu'il reçoit du Soleil, ce qui implique que la température de sa surface est extrêmement basse, environ $-201\text{ }^{\circ}\text{C}$. Encelade a cinq différents types de terrains. Certains sont couverts de cratères ayant jusqu'à 35 km de diamètre. Dans d'autres zones il n'y a pas de cratères du tout, ce qui implique des événements de re-surfacement dans un passé géologiquement très récent. Il y a des fissures, des plaines, des terrains ondulés et des geysers.

La région du pôle Sud, en particulier, est parsemée de blocs de glace de la taille d'une maison et la surface est sculptée par des formes tectoniques absentes des autres régions: de profondes crevasses ou fissures où la température est des dizaines de degrés plus élevée que sur le reste de la surface, indiquant qu'au-dessous de la croûte glacée, il pourrait y avoir de l'eau liquide.

Depuis le survol du système de Saturne par les *Voyagers*, Encelade avait intrigué les planétologues: la morphologie particulière de sa surface et la coïncidence de son orbite avec l'anneau E de Saturne avaient fait avancer l'hypothèse d'une activité éruptive sur Encelade qui pouvait être la source même de l'anneau. Les données recueillies par *Cassini* pendant les 13 ans de son exploration du système saturnien (Encelade a été survolé 23 fois) ont confirmé cette hypothèse: on a en effet observé des panaches de vapeur d'eau et des jets de particules de glace sortant par des conduits larges d'une dizaine de mètres qui constellent de longues fissures jusqu'à 130 km, baptisées « rayures de tigre » (*tiger stripes*) qui se croisent sur toutes les régions autour du pôle Sud de la lune. Les panaches contiennent aussi des composés organiques, gaz volatils, méthane, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, des sels et des nanoparticules de silice. Les particules d'eau glacée ont la taille de quelques microns et, comme les gaz, s'échappent de la surface à

une vitesse d'environ 400 mètres par seconde. Les éruptions sont modulées par le parcours d'Encelade autour de Saturne et éjectent en moyenne 200 kg/s de matière, qui rajeunit la surface et engendre autour d'Encelade un halo de fine poussière de glace alimentant l'anneau E.

Ces geysers témoignent de l'existence d'un océan souterrain; les données recueillies par *Cassini* montrent en effet qu'au-dessous de la croûte glacée d'Encelade existe une anomalie de gravité qui peut s'expliquer par la présence d'une masse d'eau liquide à 30-40 kilomètres au-dessous du pôle Sud. L'étude des libérations de la lune (c'est-à-dire des lentes oscillations d'un satellite tel que vu à partir du corps céleste autour duquel il orbite) a confirmé que la croûte est partout séparée de l'intérieur, et que la couche liquide est donc globale.

Plusieurs scénarios ont été proposés pour expliquer la nature de la « tuyauterie » qui relie le réservoir de liquide du sous-sol aux jets de gaz et de particules. Une idée est qu'il s'agirait d'un « océan Perrier »: tandis que l'eau (dans laquelle sont dissous les gaz) s'approche de la surface glacée, la pression diminue et les gaz dissous s'échappent de la solution formant des bulles de CO_2 qui poussent les jets hors des conduits. Une autre hypothèse est que le gaz est accéléré de l'océan jusqu'à la surface à travers des conduits qui agissent comme un nez de fusée. Selon une autre idée, l'eau remontant de l'océan sépare les bords solides des fissures et les forces de marée ferment et ouvrent les fissures en empêchant l'eau de geler.

Avec son océan souterrain, sa composition chimique unique et sa chaleur interne, Encelade offre une piste prometteuse dans notre recherche de mondes où la vie pourrait exister. En particulier, la présence de nanoparticules de silice dans les plumes d'Encelade confirme que la couche liquide est en contact avec un noyau rocheux: les températures de l'eau pour former ces particules doivent être très élevées ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$), suggérant qu'Encelade a des sources hydrothermales sur ses fonds marins; or, dans les fonds des océans terrestres, les sources hydrothermales accueillent une vie en plein essor malgré l'environnement extrême. L'océan interne d'Encelade est-il siège de vie?



10. Encelade

Nasa

MIMAS

Mimas a la forme d'un ellipsoïde triaxial (avec des demi-grands axes de 207/197/191 km, respectivement), c'est la plus petite et la plus interne des lunes glacées de Saturne.

Sa faible masse volumique suggère qu'elle est composée essentiellement de glace d'eau, la seule substance détectée sur sa surface. Mimas parcourt son orbite à une distance moyenne de Saturne de 186 000 km en 22 heures et 36 minutes, montrant toujours le même hémisphère à Saturne. En plus de cette résonance spin-orbite avec Saturne, Mimas est lié par des résonances orbitales avec Théthis (2:1), Dioné (3:1) et Encelade (3:2). Mimas interagit gravitationnellement avec toutes les particules de l'anneau B de Saturne, dont la période de révolution est double de la sienne (qui sont donc en résonance 1:2), créant des divisions dans l'anneau B et des vagues de densité dans l'anneau A.

Mimas perturbe fortement les orbites des petites lunes Methone (D = 3 km), Pallene (D = 4 km) et Anthe (D = 2 km), qui orbitent entre Mimas et Saturne, formant le groupe dit des Alcyonides parce

qu'elles portent le nom de trois des filles du géant Alcyonée; celles-ci, désespérées par sa mort, se précipitèrent dans la mer où elles furent changées par Amphitrite en martins-pêcheurs (alcyons en grec).

La majeure partie de la surface de Mimas est saturée de cratères de 40 km de diamètre, mais au pôle Sud les cratères sont généralement plus petits (D = 20 km ou moins). Cela suggère que des épisodes de fusion de la croûte glacée ou que certains autres processus de rajeunissement de la surface se sont produits plus tard que sur le reste de la lune.

La caractéristique distinctive de Mimas est le cratère géant (fig. 11) Herschel (D = 130 km), qui s'étend sur un tiers de sa surface, avec des bords hauts d'environ 5 km et un pic central haut de 6 km. Si le corps qui a frappé Mimas, formant le cratère Herschel, avait eu une énergie un peu plus importante, la lune aurait pu se fragmenter. Les ondes de choc produites par l'impact ont probablement causé les fractures, dites chasmata, que l'on observe sur le côté de Mimas aux antipodes de Herschel.

La présence d'une surface si lourdement cratérisée, sans trace de fusion ou liquéfaction, implique que l'intérieur de Mimas est



11. Mimas avec le cratère Herschel bien visible au centre de l'image.

constitué par de la glace solide, capable de préserver tous ces cratères. Cela représente un paradoxe: étant plus près de Saturne et avec une orbite beaucoup plus excentrique que celle d'Encelade, Mimas devrait subir des effets de marée plus importants que ceux qui sont à l'origine de la chaleur interne sur Encelade, laquelle entraîne l'activité des geysers observés par la sonde *Cassini*, et donc montrer une activité encore plus importante.

En conclusion le survol de ces satellites, dits « historiques », parce qu'observés bien avant l'utilisation de sondes spatiales pour approcher des objets du Système solaire, permet de découvrir l'énorme disparité entre des astres voisins, qui ont pour seule caractéristique commune d'orbiter autour de Saturne. Comme pour Jupiter, où chacune des lunes est différente des autres, chacun d'entre eux a une histoire propre, que les chercheurs cherchent encore à décrypter. ■

[1] Un Troyen est un astéroïde ou un satellite naturel qui partage la même orbite qu'une planète ou un autre satellite plus massif, mais qui n'entre pas en collision avec cette planète ou ce satellite en raison de sa position près de l'un des deux points stables de Lagrange (L4 ou L5), qui sont deux des cinq solutions exactes du problème du mouvement relatif de trois corps (où deux corps ont une grande masse et dominent le système, et la masse du troisième corps est négligeable; par exemple, Saturne-Thétis-Télesto) sous l'influence de la force gravitationnelle. Dans les 5 points de Lagrange, le troisième corps reste fixe par rapport aux deux premiers.

[2] Un satellite orbitant autour d'une planète est en résonance spin-orbite si le rapport entre sa période de rotation et sa période de révolution est un nombre rationnel. Le cas le plus courant est la rotation synchrone, qui est une résonance spin-orbite 1:1. Dans ce cas l'orientation du satellite par rapport à la planète reste constante, les deux périodes sont

égales et le satellite présente toujours la même face à la planète (comme dans le cas de la Lune et de la Terre). Dans le cas des satellites synchrones peuvent être définis six différents hémisphères: les hémisphères Nord et Sud (qui contiennent le pôle Nord et le pôle Sud respectivement); les hémisphères proche et lointain (la planète est au zénith du premier et au nadir du deuxième); l'hémisphère qui précède (défini comme la moitié du satellite dans la direction de révolution) et à ses antipodes se trouve l'hémisphère qui suit. Un autre exemple de résonance spin-orbite est le cas de Mercure, qui fait trois tours sur elle-même quand elle fait deux tours autour du Soleil (résonance spin-orbite 3:2).

[3] L'assistance gravitationnelle consiste dans l'utilisation volontaire de l'attraction d'un corps céleste (planète, satellite) pour modifier en direction et en vitesse la trajectoire d'une sonde spatiale.

[4] L'albédo est la fraction de la lumière que réfléchit

ou diffuse un corps non lumineux.

[5] Une résonance orbitale a lieu lorsque deux objets orbitant autour d'un troisième ont des périodes de révolution dont le rapport est une fraction entière simple. Cela implique que les deux corps se retrouvent périodiquement dans la même position relative au troisième corps et que donc s'amplifie leur interaction gravitationnelle mutuelle, qui se répète à des intervalles de temps identiques. Les effets de ce type de résonance peuvent être capables de stabiliser ou bien déstabiliser la configuration des trois corps, en fonction de leurs masses et de leurs positions respectives.

[6] Le cryovolcanisme est un volcanisme résultant de la fusion de glace sur plusieurs objets du Système solaire: satellites des planètes géantes, objets trans-neptuniens, planètes naines. L'énergie requise pour faire fondre la glace et produire le cryovolcanisme sur les satellites de Saturne provient des forces de marée.