

des satellites irréguliers est par conséquent le signe d'une origine différente.

Les modèles classiques ne rendent pas bien compte de cette famille d'objets, et une vague de nouveaux travaux théoriques est en cours. Il semblerait que les satellites irréguliers soient des survivants d'une époque révolue depuis longtemps, où l'attraction gravitationnelle exercée par les planètes nouvellement formées a extirpé les petits corps de leurs orbites initiales. Leur étude permettra de mettre en lumière les premières étapes du développement du Système solaire.

Bien que la première lune irrégulière connue, Triton, satellite de Neptune, ait été découverte dès 1846, la plupart d'entre elles n'ont été détectées que récemment, car elles sont souvent plus petites, donc moins lumineuses, que leur cousines régulières. S'ajoute aux difficultés le fait qu'elles soient distribuées dans une région de l'espace beaucoup plus vaste.

Par exemple, le satellite régulier de Jupiter le plus externe, Callisto, est en orbite à 1,9 million de kilomètres de la planète géante, alors que ses satellites irréguliers sont répartis dans un rayon de 30 millions de kilomètres. Cette taille est comparable à celle du domaine d'influence gravitationnelle de Jupiter, ou sphère de Hill, au-delà de laquelle le Soleil arracherait tout satellite à la planète. Si elle était visible à l'œil nu, la sphère de Hill aurait un diamètre apparent de dix degrés, soit 20 fois celui de la pleine Lune. C'est énorme comparé au champ de vision de la plupart des télescopes.

Des lunes à foison

Pour explorer une telle région à la recherche de satellites, il faut disposer des capteurs numériques les plus modernes et analyser presque 100 gigaoctets de données par nuit (voir l'encadré page 68). Notre propre relevé, *Hawai Moon survey*, entre 2000 et 2003, s'est focalisé initialement sur Jupiter, dont la proximité nous permet de détecter des petites lunes qui seraient trop faibles pour être vues autour des autres planètes géantes, plus lointaines. Des équipes menées par Brett Gladman, de l'Université de Colombie-Britannique, Mathew Holman, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et de John Kavelaars, de l'Institut d'astrophysique Herzberg, au Canada, ont mené des recensements similaires pour Saturne, Uranus et Neptune.

Les quatre planètes géantes se révèlent être accompagnées de lunes irrégulières. En extrapolant les découvertes actuelles, on estime que chacune d'entre elles possède environ 100 satellites irréguliers ayant un diamètre de plus d'un kilomètre. Ces corps célestes occupent une large gamme de tailles, les plus petits étant beaucoup plus représentés. Dans le cas de Jupiter, les tailles des lunes irrégulières vont de 180 kilomètres pour la plus grosse, J6 Himalia, jusqu'à des objets qui ne font qu'un ou deux kilomètres.

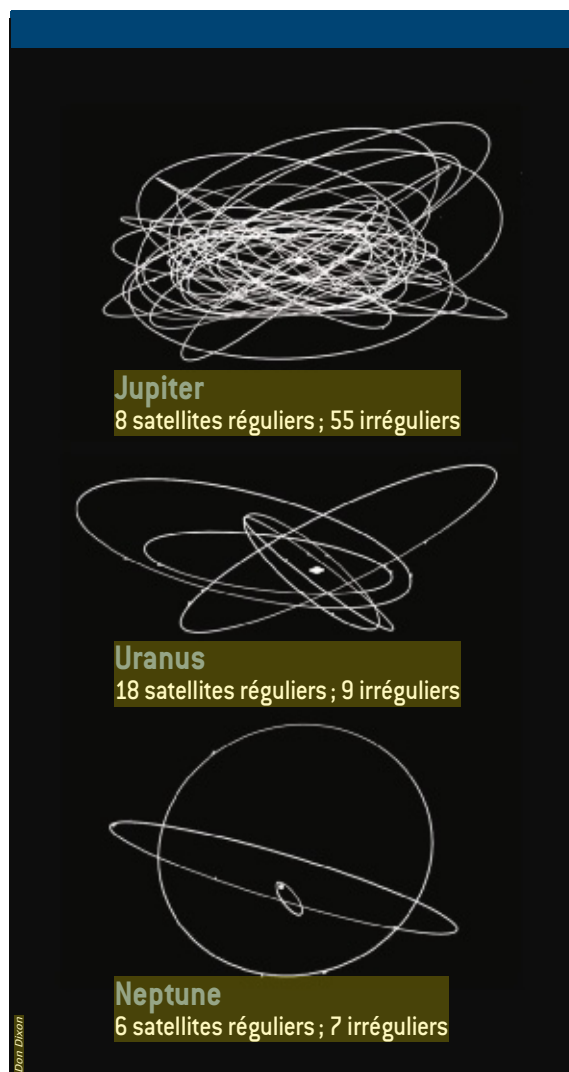
Résonances célestes

Les orbites de ces lunes sont parmi les plus compliquées du Système solaire. Comme elles gravitent loin de leur planète-hôte, elles sont tiraillées entre l'attraction du Soleil et celle de leur planète, si bien que leurs orbites ont un fort taux de précession (décalage du grand axe de l'ellipse au fil du temps). La précession est souvent si rapide qu'il n'est même pas adéquat de considérer que la trajectoire est une boucle fermée. Ces lunes irrégulières tracent dans le ciel des orbites étranges, semblables à des rosaces.

Quand les différentes influences gravitationnelles agissent de façon synchrone, la situation peut devenir très complexe. Par exemple, si le taux de précession d'un satellite est égal à la période de révolution de la planète autour du Soleil, le satellite entre dans une résonance dite d'éviction. L'attraction du Soleil est alors maximale toujours au même endroit de l'orbite et ses effets s'accumulent avec le temps, ce qui déstabilise l'orbite. L'ellipse s'allonge au point que la Lune entre en collision avec sa planète ou, au contraire, s'échappe de la sphère de Hill et tombe sous l'emprise gravitationnelle du Soleil.

Les orbites lunaires progrades sont plus vulnérables à ce phénomène que les orbites rétrogrades, l'influence du Soleil et de la précession se combinant dans le premier cas et se compensant en partie dans l'autre. Si les lunes irrégulières étaient autrefois équitablement réparties entre les deux sens, ce mécanisme de résonance pourrait expliquer que la plupart d'entre elles sont aujourd'hui rétrogrades.

Une autre résonance, connue sous le nom de résonance de Kozai, couple l'inclinaison et la forme de l'orbite. Les orbites inclinées deviennent très excentriques (l'ellipse s'allonge), ce qui conduit aussi poten-

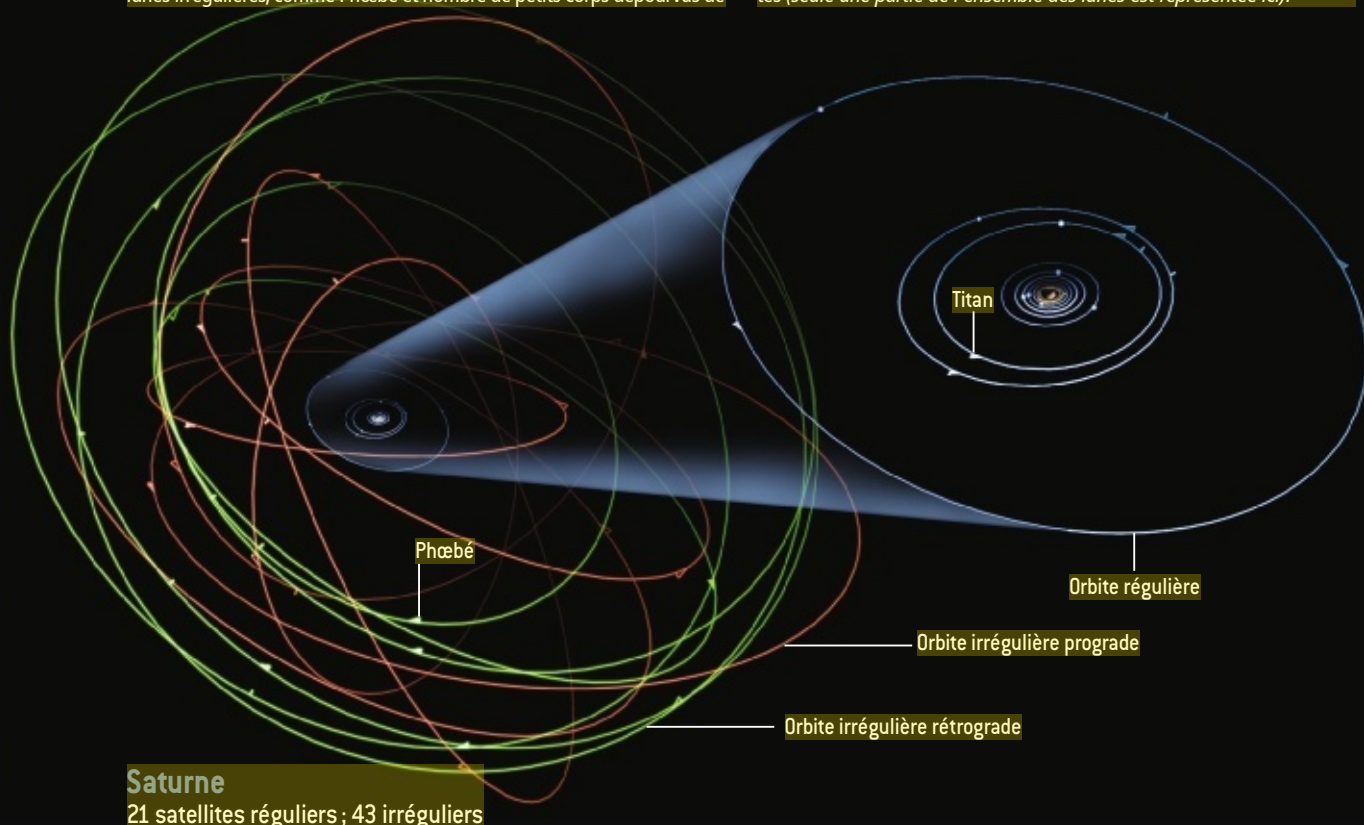


tiellement à l'éjection ou la destruction du satellite. C'est peut-être pourquoi on n'observe pas de lunes dont l'inclinaison s'écarte de plus de 50 degrés par rapport au plan équatorial de la planète.

Pour résumer, les satellites irréguliers actuels semblent être les survivants d'interactions gravitationnelles qui ont détruit nombre de leurs semblables. D'autres caractéristiques orbitales des satellites irréguliers n'ont cependant rien à voir avec les interactions gravitationnelles. Les lunes appartiennent à des groupes distincts, ou familles, dont les membres ont des paramètres orbitaux très proches. Les familles de satellites de Jupiter comptent par exemple jusqu'à 17 membres. Selon l'interprétation la plus simple, les membres d'une famille sont les restes d'une lune plus grande qui a été fragmentée par un impact, ses morceaux continuant à suivre des orbites proches de celle de l'objet

L'étendue du cortège de satellites de Saturne était encore mal connue il y a quelques années. Ses membres se répartissent en deux catégories. Les lunes régulières (*en bleu*), comme Titan et Japet, sont relativement proches de la planète et évoluent quasiment dans son plan équatorial. Les lunes irrégulières, comme Phœbé et nombre de petits corps dépourvus de

nom, sont bien plus éloignées et ont des orbites orientées de diverses façons. Certaines tournent dans le même sens que Saturne sur elle-même (*progrades, en rouge*), d'autres tournent dans le sens inverse (*rétrogrades, en vert*). Des systèmes similaires entourent chacune des planètes géantes (*seule une partie de l'ensemble des lunes est représentée ici*).



initial. De fait, lorsqu'on simule en remontant le temps les orbites des membres d'une famille, celles-ci se fondent en une seule. Ainsi, une fraction importante des satellites observés serait en fait des lunes de seconde génération.

Semblables à des résidus de comètes

David Nesvorný, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest à Boulder, dans le Colorado, et ses collègues ont modélisé la destruction des lunes par des collisions. Ils ont montré qu'aujourd'hui, il est rare qu'une lune entre en collision avec une autre (ou avec une comète). C'est pourquoi l'existence de familles suggère une époque ancienne où les populations de satellites irréguliers ou de comètes étaient bien plus importantes que maintenant, et les collisions plus fréquentes.

Au-delà des orbites, les connaissances des astronomes ont progressé sur d'autres aspects des satellites irréguliers. La plupart de ces lunes sont si petites qu'on ne peut pas apprendre grand-chose sur leur composition. Ni leur masse ni leur spectre de lumière réfléchie, ou couleur, ne peuvent être déterminés avec précision. Tommy Grav, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et des collègues ont cependant découvert que les lunes d'une même famille tendent à avoir la même couleur. Cela suggère une parenté de composition entre les membres d'une famille, et appuie l'hypothèse de la fragmentation d'un corps parent.

L'un des rares satellites irréguliers que les astronomes connaissent en détail est Phœbé, une lune de Saturne observée par la sonde *Cassini* en juin 2004. *Cassini* a obtenu des images de haute résolution montrant une grande densité de cratères à la

surface de Phœbé ; la sonde y a aussi détecté par spectroscopie la présence de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Les deux lunes de Neptune observées par la sonde *Voyager 2* en 1989, Néréide et Triton, ont elles aussi des surfaces gelées. Cela indique que ces corps se sont formés relativement loin du Soleil, comme les comètes.

Les satellites irréguliers de Jupiter sont noirs comme de la suie et semblent dépourvus de glace, probablement parce qu'ils sont plus proches du Soleil. Ils ressemblent à des résidus de comètes qui auraient perdu leurs composés volatils au fil du temps.

Les propriétés des satellites irréguliers – en particulier leurs orbites rétrogrades – suggèrent que ces corps ne se sont pas formés *in situ*. Il s'agirait plutôt de matériaux de construction planétaire inutilisés, comme les astéroïdes ou les comètes, qui gravitaient à l'origine autour du Soleil et