

Nous avons tous appris que le système solaire était composé de neuf planètes, la plus lointaine étant Pluton. Située à plus de 5 milliards de kilomètres du Soleil, cette dernière a été découverte en 1930 par Clyde Tombaugh. Ses caractéristiques ont rapidement suscité un certain nombre de questions. À proximité du Soleil se trouvent les quatre planètes telluriques, c'est-à-dire dont la surface est rocheuse, à l'image de la Terre. Plus loin se trouvent la série des quatre planètes géantes gazeuses. Puis, Pluton, l'unique planète glacée, de taille inférieure à celle de la Lune. Son orbite est par ailleurs très inclinée sur le plan de l'écliptique, plus de 17°, alors que les orbites des autres planètes ne s'en éloignent pas de plus de 7°. Elle est aussi très excentrique, c'est-à-dire elliptique. Son périhélie, point le plus proche du Soleil de son orbite, est situé en deçà de l'orbite de Neptune. Ainsi, Pluton n'est pas toujours la planète la plus éloignée du Soleil. En clair, s'agit-il d'une « exception », ou du seul représentant connu d'une nouvelle classe d'objets ? Les recherches se sont multipliées pour essayer de débusquer une dixième planète, baptisée par avance « planète X ». Sans succès... En revanche, Kuiper a proposé en 1951 l'existence d'une ceinture d'objets similaires à des astéroïdes, dont les demi-grands axes des orbites seraient compris entre 30 et 50 unités astronomiques, en prenant appui sur les caractéristiques des orbites de certaines comètes. Cette hypothèse semblait indiquer que Pluton était pour le moment le seul représentant de cette ceinture. Le premier objet transneptu-

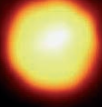
nien (OTN), ou objet de la ceinture de Kuiper, a été découvert en 1992 par Jewitt et Luu. Depuis, plus de 800 OTN ont été découverts. On estime à présent que le nombre total d'objets de diamètre supérieur à 100 kilomètres pourrait être de l'ordre de 70 000.

L'intérêt de l'étude des OTN est multiple. Ces objets sont d'abord des vestiges de la formation de notre système solaire, vraisemblablement préservés par leur éloignement au Soleil. Par ailleurs, il est clair que ces objets sont liés aux comètes à courte période. Préciser ce lien peut nous permettre de mieux comprendre les phénomènes cométaires. De plus, la compréhension des interactions gravitationnelles entre ces corps et l'évolution de leurs orbites représente un vrai défi.

L'étude de la ceinture de Kuiper se fait par l'observation et par la modélisation de son évolution dynamique. L'observation permet de rechercher de nouveaux objets, et de déterminer leurs caractéristiques physiques (taille moyenne, composition...) et orbitales. La modélisation permet notamment d'étudier leurs conditions de formation, ainsi que l'évolution et la stabilité des orbites.

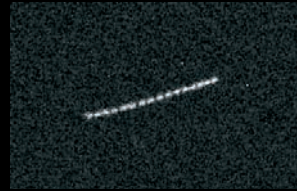
Les observations et une première classification des OTN

Les observations systématiques montrent que les OTN se répartissent en trois grandes familles selon les caractéristiques de leurs orbites.



Le couple Pluton-Charon, vu par le télescope spatial Hubble (HST). (crédit : STSCI)

Une série d'images de l'objet transneptunien Quaoar, prises par le HST, mettant en évidence son mouvement propre. (crédit : STSCI)



Les OTN classiques : la majorité des OTN appartient à cette famille. Ces objets ne s'approchent jamais à moins de 42 unités astronomiques du Soleil et ont pour la plupart des orbites quasi-circulaires. Cette distance héliocentrique considérable les préserve de toute interaction gravitationnelle avec Neptune. Leurs orbites sont donc stables et ces objets peuvent *a priori* y demeurer très longtemps.

Les OTN diffusés : il s'agit d'objets se situant sur des orbites très inclinées par rapport à l'écliptique (plus de 20°), d'excentricité importante (de l'ordre de 0,6), et très éloignés du Soleil (demi-grand axe supérieur à 80 unités astronomiques). Leurs distances héliocentriques importantes les rendent difficilement accessibles aux observations.

Les OTN résonnants, appelés Plutinos : de nombreux OTN sont en résonance 3:2 avec Neptune. Cela signifie que ces objets ont une période orbitale égale à 1,5 fois celle de Neptune. C'est notamment le cas de Pluton, et c'est pour cette raison que cette classe d'objets a été ainsi baptisée.

Les objets binaires

Les observations montrent qu'un certain nombre d'objets de la ceinture de Kuiper sont en fait binaires, c'est-à-dire qu'il s'agit de deux objets en rotation l'un autour de l'autre. Ces couples sont constitués pour la plupart de corps de tailles assez voisines si bien qu'on ne peut pas à proprement parler de satellite pour le plus petit des deux corps. Pluton est ainsi accompagné de Charon, dont le

diamètre est estimé à un peu plus de la moitié de celui de Pluton (1 220 kilomètres/2 300 kilomètres). On connaît aujourd'hui une dizaine d'objets binaires dans la ceinture de Kuiper. La question qui se pose est comment ces couples peuvent-ils se former ? La vitesse relative des deux membres du couple étant initialement très élevée, il est clair que la capture gravitationnelle d'un objet par un autre nécessite l'existence d'un phénomène pour dissiper l'énergie cinétique excédentaire. Différents phénomènes peuvent être invoqués tels que leur formation par impact entre deux corps avec éventuellement échange de matière, comme dans le cas Terre - Lune (fiche III-3). L'objection principale à cette théorie est que la ceinture de Kuiper est trop peu peuplée pour que les rencontres entre objets de plus de 100 kilomètres soient suffisamment fréquentes. Quelle que soit l'explication proposée, il est difficile de conclure avec certitude aujourd'hui. Il faudra encore de nombreuses observations et déterminations d'orbites pour y parvenir.

La formation des OTN et la stabilité de la ceinture de Kuiper

Il est admis que les OTN se sont formés très tôt dans l'histoire du système solaire, lors des premières phases de condensation du nuage proto-planétaire. Mentionnons toutefois l'absence d'objets sur des orbites circulaires au-delà de 47 unités astronomiques. Cela ne signifie pas nécessairement que les OTN n'ont pas pu

se former à de telles distances, mais les modèles actuels de formation du système solaire expliquent quand même que les processus d'accrétion deviennent inefficaces à ces distances. Par ailleurs, les résonances avec Neptune ne semblent pas permettre de placer ces objets sur des orbites stables au-delà. Les raisons de l'existence de cette limite sont donc vraisemblablement multiples.

La classification précédente, basée sur les caractéristiques orbitales, suggère que la ceinture de Kuiper n'est pas un endroit où les corps peuvent imperturbablement tourner autour du Soleil depuis leur formation. Ils subissent au contraire de nombreuses interactions qui rendent les orbites et leur évolution très complexes. Physiquement, il est difficile de maintenir un corps sur une orbite très excentrique. Cela signifie qu'il a reçu de l'énergie lors de l'interaction avec un autre corps. Il est peut-être choquant pour nous de penser que la trajectoire d'un corps autour du Soleil n'est pas stable. Cela va en effet à l'encontre de notre expérience quotidienne. Les échelles de temps invoquées ici sont cependant bien plus grandes que notre seule histoire. Parmi les phénomènes pouvant expliquer la distribution actuelle des orbites, nous pouvons citer : le passage d'une étoile proche, les interactions répétées avec des corps plus grands (Neptune, ou des corps hypothétiques de la taille de la Lune), ou des interactions internes à la ceinture de Kuiper, basées sur les résonances orbitales. Ces phénomènes ont fait l'objet de simulations

numériques, qui mettent en évidence leurs capacités à expliquer seulement certaines des caractéristiques de la ceinture de Kuiper. Là aussi, il faudra encore de nombreuses observations et simulations avant de pouvoir conclure.

Cette histoire tourmentée implique aussi que certains objets soient régulièrement éjectés hors de la ceinture de Kuiper. Ils peuvent s'éloigner alors encore plus du Soleil, ou au contraire se diriger vers le système solaire interne. Certains de ces objets sont connus sous le nom de Centaures. Il s'agit d'une classe d'objets dont les orbites, souvent fortement elliptiques, se situent généralement entre Jupiter et Neptune. Les liens entre ces objets et les comètes sont encore mal compris. Ainsi, Chiron, un petit corps qui orbite entre Saturne et Uranus (fiche V-8), est le premier représentant des Centaures. Découvert en 1977, il possède une faible activité cométaire. On peut penser que les objets de la ceinture de Kuiper en général, et les Centaures en particulier, offrent une grande diversité de compositions. Depuis 2002, la recherche des objets de Kuiper (KBO) a pris une tournure spectaculaire avec la

découverte d'une dizaine d'individus qui dépasseraient en taille les 900 km. Cependant, ces chiffres restent à confirmer car la détermination de la taille de ces objets très lointains, non résolus par les télescopes, reste indirecte. À ce jour, seul 2003 EL61 a pu faire l'objet d'une détermination précise de masse grâce l'existence d'un satellite naturel. Il représente 32 % de la masse de Pluton et a un diamètre de 1 500 Km environ. À l'image de 2003 EL61, ces dix nouveaux objets de Kuiper pourraient être de véritables petites planètes glacées. Parmi les objets de Kuiper récemment révélés, un individu (provisoirement nommé 2003 UB313) a particulièrement retenu l'attention. Il tourne autour du soleil en 560 ans à une distance qui varie entre 38 et 97 UA, soit en moyenne trois fois plus loin que Pluton. Selon les dernières estimations, son diamètre ne peut être inférieur à 2 200 Km, la valeur la plus probable étant 2 860 Km, une taille supérieure à celle de Pluton ! En septembre 2005, le groupe de trois découvreurs de 2003 UB313 lui attribuait également un satellite qui serait seulement 8 fois plus petit. L'étude de sa rotation autour de 2003 UB313 permettra de déterminer leurs masses respectives.

Au cours de leur existence, tous les corps du système solaire connaissent des évolutions. Elles peuvent être de nature dynamique, ou physico-chimique, et sont souvent liées. Si un corps glacé, situé à grande distance héliocentrique, vient à se rapprocher du Soleil, sa composition s'en trouvera modifiée. De même, l'activité d'une comète peut conduire à modifier son orbite. Ces considérations nous amènent à percevoir que le système solaire n'est pas figé, et que chaque corps n'occupe pas immuablement une place qui lui est propre. Il est au contraire le siège d'une intense activité, et un objet peut changer de « famille ». Une planète géante peut capturer dans sa zone d'influence gravitationnelle un astéroïde ou une comète ; un objet transneptunien peut rejoindre le système solaire interne. Cela nous amène naturellement à dépasser la classification comète/astéroïde/satellite et à considérer plutôt l'activité et la composition chimique comme premier critère de classement.

L'augmentation du nombre d'observations et l'amélioration de leur qualité a permis de découvrir de nombreux satellites autour des planètes géantes. On connaissait depuis longtemps les satellites les plus volumineux (et donc les plus brillants depuis la Terre), mais on découvre maintenant de nombreux corps de petites dimensions, parfois de l'ordre de la dizaine de kilomètres, qui se trouvent sur des orbites très excentriques. Ces corps peuvent ainsi se trouver à très grande distance de la planète, plusieurs

centaines de fois son rayon, où le champ gravitationnel de la planète est faible. Cela rend ces satellites particulièrement sensibles aux perturbations gravitationnelles des autres corps et leurs orbites sont donc peu stables. Comment peuvent-ils se trouver sur de telles orbites ? Les modèles actuels tendent à montrer qu'un satellite issu de la même subnébuleuse planétaire que son corps parent se trouve sur une orbite quasiment circulaire stable. Il doit en outre tourner autour de la planète dans le même sens que la rotation de la planète sur elle-même : son orbite est dite « prograde », et le corps est dit « régulier ». C'est par exemple le cas des satellites galiléens de Jupiter ou de Titan autour de Saturne. On suppose donc que les satellites irréguliers, tournant sur des orbites elliptiques et inclinées, ont été capturés par le champ gravitationnel de la planète. C'est aussi vraisemblablement le cas de Triton, le plus gros satellite de Neptune, qui évolue pourtant sur une orbite circulaire, mais rétrograde (fiche V-9). Le principal obstacle à ce scénario de capture est qu'un corps s'approchant d'un autre peut retourner à sa distance initiale, selon les lois de Newton. En d'autres termes, il est nécessaire de dissiper une partie de son énergie cinétique orbitale. Les mécanismes de cette dissipation sont encore débattus, mais on peut citer le frottement sur le gaz existant encore autour de la planète peu après sa formation, des interactions gravitationnelles avec un autre satellite ou encore, plus directement, un choc avec un satellite régulier.

Ci-contre, la comète Borrelly (8 kilomètres de long) et, ci-dessous, l'astéroïde Eros, 33 kilomètres de long. (crédits : NASA/JPL-Caltech)



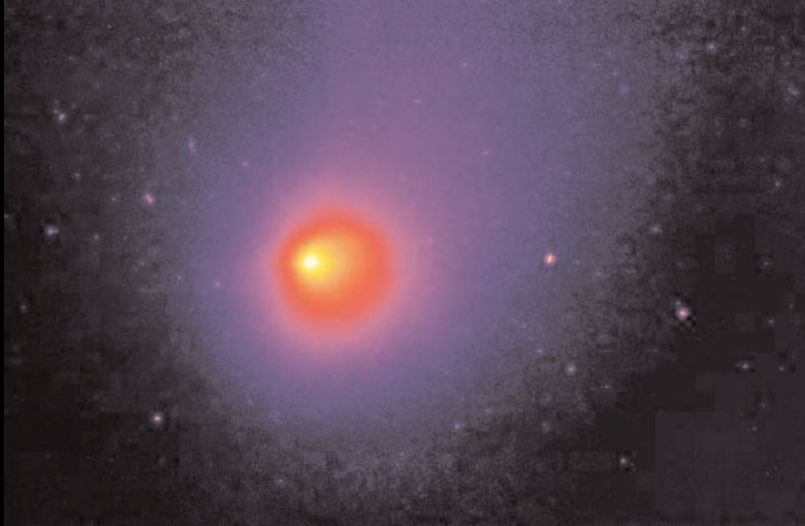
Si des objets peuvent ainsi changer de groupe, nous devrions pouvoir observer certains de ces « transfuges » en pleine évolution. Un objet découvert en 1977 a vite suscité bien des questions. Chiron, fut découvert cette année-là. Il s'agit d'un corps d'environ 200 kilomètres, situé sur une orbite très excentrique, dont l'aphélie se situe aux environs de l'orbite d'Uranus, et le périhélie en deçà de celle de Saturne. Ce corps présente une coma, ce qui témoigne d'une activité cométaire. Ces constatations posent deux problèmes majeurs. L'orbite de Chiron est instable sur une échelle de temps de l'ordre du million d'années. De plus, son activité, liée à des matériaux très volatils (essentiellement du monoxyde de carbone), est suffisante

pour conduire à sa disparition en quelques millions d'années. Ainsi, Chiron ne peut pas être présent sur cette orbite depuis longtemps. La question de sa provenance se pose alors. S'il a préservé ses composants volatils jusqu'à nos jours, il provient probablement d'une région située à plus grande distance héliocentrique et donc plus froide. Il est séduisant de relier cet objet avec d'autres, supposés provenir de la ceinture de Kuiper. On connaît aujourd'hui d'autres objets situés sur des orbites similaires à celles de Chiron. Sont-ils des astéroïdes ou des comètes ? S'agit-il plus simplement d'objets glacés, en provenance des régions lointaines du système solaire, et en transit vers une autre partie de celui-ci ? Pour illustrer cette dualité, les

membres de ce groupe ont reçu le nom de Centaures. Chiron, initialement classé comme astéroïde, est aujourd'hui catalogué comme comète. On a ainsi une illustration de la fugacité de la limite entre comète et astéroïde.

Les astéroïdes connaissent eux aussi des histoires différentes (fiche I-2). La planétologie récente bénéficie des premières images détaillées de ces petits corps. En quelques années, ce sont en effet sept astéroïdes qui ont été survolés par des sondes spatiales. Ces survols permettent bien sûr de recueillir quelques images, mais un simple survol permet d'estimer la masse totale de l'objet en se basant sur la déviation de la sonde. Eros, Gaspra

et Ida ont ainsi des masses volumiques comprises entre de 2300 et 2700 kilogrammes par mètre cube, alors que celle de Mathilde est proche de 1300 kilogrammes par mètre cube. Il est clair que ces corps sont très différents. Les deux premiers comportent probablement bien plus de roches que le troisième. Il est encore difficile aujourd'hui de dire si ces différences sont dues aux mécanismes de formation ou à une évolution ultérieure de ces corps. Nous pouvons noter que les astéroïdes sont organisés en « familles », de même que les satellites irréguliers des planètes géantes. Cela témoigne de la richesse de l'évolution dynamique et de l'évolution physico-chimique consécutive de ces corps.



La comète périodique Schwassmann-Wachmann I tournant au-delà de Jupiter et présentant de fréquents sursauts d'activités (relâchement de gaz et éjection de poussières) est maintenant soupçonnée appartenir à la famille des Centaures.
(crédit : ISAS/JAXA-Agence Spatiale Japonaise)



L'astéroïde Itokawa, observé par la mission japonaise Muses-C, présente une surface très différentes de celles des six autres astéroïdes observés : elle est constellée de blocs jusqu'à quelques dizaines de mètre, certaines zones sont très lisses et très peu de cratères sont visibles. Itokawa appartiendrait-il à une famille particulière d'astéroïdes.
(crédit : SAXA)

Pluton et Triton

Malgré son faible diamètre d'environ 2300 kilomètres et son orbite très elliptique et inclinée, Pluton a longtemps été considérée comme la neuvième planète du système solaire, échappée de l'orbite de Neptune. Cependant la découverte des objets transneptuniens (fiche V-7) et les calculs de dynamique ont récemment montré que Pluton et son gros satellite Charon font en fait partie d'un groupe de plusieurs dizaines d'objets, surnommés depuis les « Plutinos », et qui gravitent au-delà de l'orbite de Neptune et en résonance dynamique avec celle-ci.

Triton, le plus gros satellite de Neptune (2705 kilomètres de diamètre) a quant à lui longtemps intrigué les astronomes du fait de son orbite rétrograde et très inclinée sur le plan équatorial de Neptune. Comme Pluton et Charon, Triton se serait formé au-delà de Neptune mais aurait été capturé par cette planète.

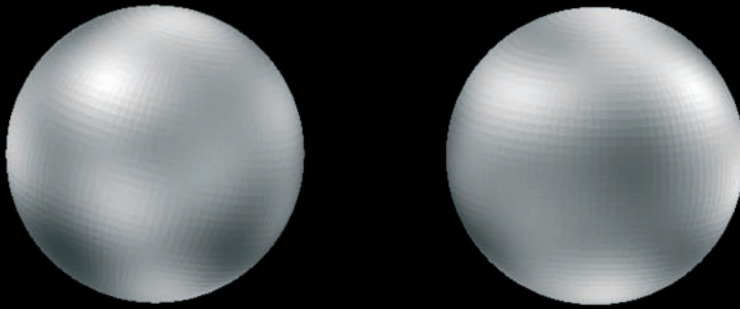
La forte similarité entre Pluton et Triton, outre leur taille, vient du fait que tous deux ont une surface très froide en grande partie couverte de glaces d'azote, de méthane et d'oxyde de carbone et une atmosphère ténue dominée par ces mêmes molécules. D'une certaine manière Titan (fiche V-10) fait aussi partie de cette famille de corps riches en azote et méthane à la différence près que sa température de surface est trop élevée pour que ces deux molécules se condensent sous forme de glaces. Des observations en 2005 ont montré que les plus

gros des objets transneptuniens, ceux capables de retenir l'azote moléculaire et le méthane, ressemblent fortement à Triton et Pluton.

Découvertes et orbites

Pluton a été découvert en 1930 par Clyde Tombaugh alors à la recherche de l'objet supposé perturber les orbites d'Uranus et Neptune, mais il s'avéra plus tard que Pluton est bien trop petit pour cela. L'astronome en détermina la forte excentricité ($e = 0,254$) et l'inclinaison unique dans le système solaire ($17,14^\circ$) de son orbite qui la font circuler en 248 ans depuis l'intérieur de l'orbite de Neptune (périhélie 29,7 unités astronomiques) jusque vers 49,5 unités astronomiques à son aphélie. Pluton parcourt 2 fois son orbite pendant que Neptune fait 3 tours. On parle dans ce type de cas de résonance dynamique, qui est traditionnellement notée par les chiffres qui la caractérise, dans notre cas 3:2. Pluton ne s'approche jamais à moins de 17 unités astronomiques de Neptune. Cependant son orbite reste imprédictible à l'échelle de la dizaine de millions d'années.

Son satellite, Charon, ne fut découvert que près d'un demi-siècle plus tard. Son diamètre de 1220 kilomètres est tout à fait comparable à celui de Pluton. Ils tournent face à face avec une période de 6,39 jours, comme deux valseurs, et forment un système binaire totalement synchronisé, un cas unique dans le système solaire. Tout récemment (mi-2005), deux autres satellites de moins de



Variations d'albédo de la surface des deux hémisphères opposés de Pluton montrant sa forte inhomogénéité. Les zones claires sont probablement dominées par la glace d'azote alors que les zones sombres sont probablement riches en matériaux organiques produits par la destruction photochimique du méthane. Une calotte polaire semble présente au nord. (crédit : HST-NASA/ESA/A. Stern & M. Buie)

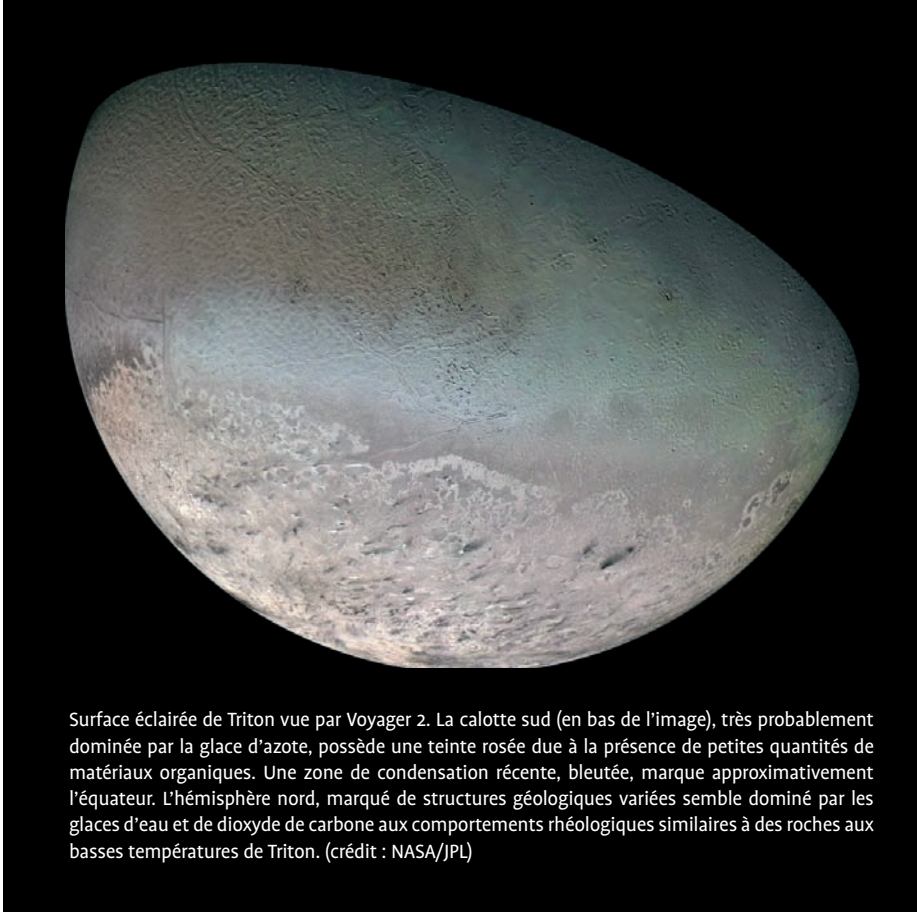
150 kilomètres ont été observés orbitant dans le même plan que Charon.

Triton, découvert 17 jours après Neptune par William Lassell en 1846, orbite de façon synchrone en 5,88 jours à moins de 15 rayons de sa planète sur une orbite quasi-circulaire, rétrograde et fortement inclinée (157°). Contrairement aux systèmes de Jupiter, Saturne et Uranus, Triton, outre ses caractéristiques orbitales uniques, est le seul satellite de sa classe de taille orbitant autour de Neptune, tous les autres faisant moins de 420 kilomètres de diamètre.

Composition de la surface et de l'atmosphère

Après une première identification du méthane sur Triton et Pluton à la fin des années 1970, l'azote a été observé sur

Triton puis sur Pluton. Le monoxyde de carbone a finalement été détecté sur ces deux objets. Après avoir un temps rêvé à un océan d'azote sur Triton, les modèles spectroscopiques couplés à des mesures en laboratoire ont déterminé que la glace d'azote domine à la surface et contient de petites quantités de méthane (0,1-0,5 %) et d'oxyde de carbone (0,05-0,2 %). L'abondance du méthane est nettement supérieure sur Pluton où de larges zones de glace de méthane pur coexistent aussi avec celles d'azote. Des zones sombres sont interprétées comme probablement couvertes de matériaux organiques provenant de la dissociation du méthane par le rayonnement ultraviolet solaire (chapitre VI). Des matériaux sombres sont aussi présents sur Triton mais semblent enfouis sous les glaces volatiles. Ils sont réinjectés sporadiquement en surface par les geysers actifs observés par



Surface éclairée de Triton vue par Voyager 2. La calotte sud (en bas de l'image), très probablement dominée par la glace d'azote, possède une teinte rosée due à la présence de petites quantités de matériaux organiques. Une zone de condensation récente, bleutée, marque approximativement l'équateur. L'hémisphère nord, marqué de structures géologiques variées semble dominé par les glaces d'eau et de dioxyde de carbone aux comportements rhéologiques similaires à des roches aux basses températures de Triton. (crédit : NASA/JPL)

Voyager 2. La couleur rougeâtre de Triton et de Pluton, observée dès les années 1950 et confirmée par les spectres, est liée à la présence de ces matériaux organiques. Leur plus grande abondance sur Pluton correspond à un rougissement sensiblement plus marqué que sur Triton.

Triton est l'un des objets les plus réfléchissants du système solaire. Il renvoie en effet 55 % à 70 % du rayonnement

qu'il reçoit. On parle d'un albédo compris entre 0,55 et 0,7. L'albédo de Pluton varie entre 0,44 et 0,61 en fonction de la longitude, démontrant une forte inhomogénéité de surface. L'albédo élevé de la surface de Triton combiné à sa grande distance au Soleil conduit à une température de sa calotte de glaces d'azote de -235°C : la plus basse connue du système solaire ! Celle de Pluton est à peine plus élevée, et semble varier de -233°C pour la glace d'azote à -215°C pour les terrains

probablement dominés par la glace de méthane et les dépôts organiques sombres. Malgré ces très basses températures, des geysers d'azote gazeux sont générés sur Triton par le chauffage solaire de matériaux sombres déposés sous quelques mètres de glace d'azote transparente. Ces matériaux sont entraînés dans l'atmosphère jusqu'à huit kilomètres d'altitude puis redéposés à la surface dans la direction des vents dominants. La sonde interplanétaire Voyager 2 en a observé au moins deux actifs sur ce monde que l'on croyait transi !

Sur aucun de ces deux objets l'on ne connaît l'épaisseur des matériaux organiques et des dépôts de glaces volatiles, dominés soit par le méthane soit par l'azote. Sur Triton, la hauteur des reliefs n'excède pas un kilomètre. Mais leur recouvrement par la calotte montre que son épaisseur peut varier localement du mètre à plusieurs centaines de mètres. Ces glaces volatiles reposent sur un substrat non volatil composé sur Triton de glaces d'eau et de dioxyde de carbone, apparaissant largement dans l'hémisphère nord alors que sur Pluton seule la glace d'eau semble émerger localement des dépôts. Ces différences peuvent venir soit d'une plus grande quantité de glaces volatiles sur Pluton, soit plus probablement d'une différence dans leur distribution du fait des transports saisonniers. Contrairement à Pluton, la surface de son petit mais faux jumeau Charon semble constituée essentiellement de glace d'eau, à l'image des satellites d'Uranus.

Les atmosphères de Pluton et de Triton sont en équilibre avec les glaces volatiles

(azote moléculaire, méthane et monoxyde de carbone) en surface : la pression et la composition atmosphérique près du sol sont contraintes par la température et la composition de ces glaces. Sur Triton, Voyager 2 a découvert une atmosphère de 14 microbars principalement composée d'azote contenant des traces de méthane (~0,05 %) et probablement une quantité similaire d'oxyde de carbone. Sa structure est particulière. La basse couche, la troposphère, est épaisse de huit kilomètres et contient des aérosols et de fins nuages. Elle est surmontée directement d'une thermosphère et d'une ionosphère (chapitre VI) jusque vers 400 kilomètres. L'atmosphère de Pluton, beaucoup moins bien connue, semble aussi dominée par l'azote avec de faibles quantités d'oxyde de carbone et de méthane (0,1 à 1 %). Sa pression au voisinage du périhélie, en 1989, est du même ordre de grandeur ou un peu plus faible que celle de Triton. Charon semble quant à lui avoir totalement perdu son atmosphère peut-être à cause de sa gravité plus faible.

Cycles climatiques

Le fort allongement de l'orbite de Pluton conduit à une modulation du flux solaire d'un facteur 2,8 entre son périhélie et son aphélie. Couplé à ceci la très grande obliquité de Pluton (~120°) et son inclinaison sur le plan de l'orbite conduisant à des variations saisonnières extrêmes de l'insolation de sa surface et donc de sa température. La première conséquence est que l'atmosphère de Pluton connaît elle aussi des variations saisonnières extrêmes. Sa pression peut varier de 2 à

3 ordres de grandeur et doit s'effondrer complètement à l'approche de l'aphélie.

La combinaison des inclinaisons de l'axe de Neptune (29,6°) et de l'orbite de Triton (157°) conduit aussi à des cycles saisonniers très marqués et complexes. Sur Terre, la latitude du point faisant face au Soleil varie entre les deux tropiques, 23°26' nord et sud. Sur Triton, ce point peut parfois atteindre 52°, comme c'est le cas actuellement.

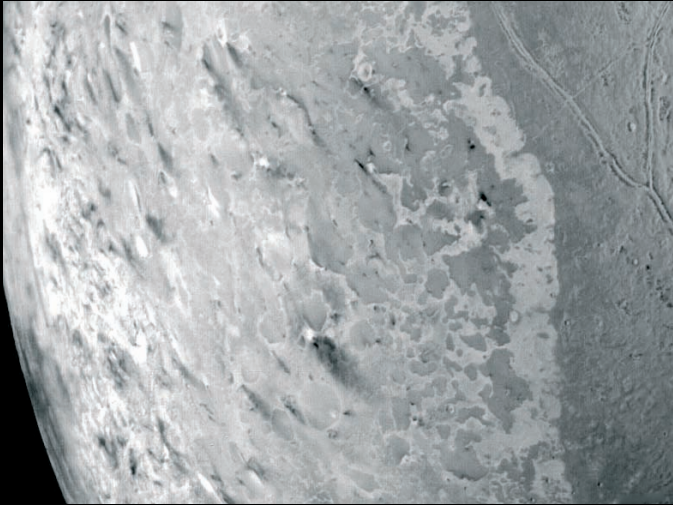
Ces cycles d'insolation et la grande volatilité des glaces d'azote, d'oxyde de carbone et de méthane conduisent à d'importants transferts d'un hémisphère à l'autre. Les modèles estiment que des épaisseurs de l'ordre du mètre de glace, essentiellement de l'azote, sont ainsi déplacées au cours de chaque cycle climatique, respectivement de 164 et 248 ans sur Triton et Pluton. La distribution actuelle des différentes glaces est donc le résultat de ces transports. Mais celle-ci est encore loin d'être bien comprise si l'on considère par exemple la persistance inattendue d'une calotte dans l'hémisphère sud de Triton, actuellement constamment éclairé, et l'absence apparente de condensation dans l'hémisphère nord.

Structure interne et géologie

Triton et Pluton ont des masses volumiques très similaires de l'ordre de 2 000 kilogrammes par mètre cube, impliquant une composition dominée par les roches, entre 60 et 80 % suivant leur hydratation. Aucune information directe n'est cependant disponible sur le degré de dif-

férenciation de leurs structures internes, probablement très évoluées. Dans les deux cas, un épais manteau de glaces d'environ 400 kilomètres entoure probablement un noyau de silicates et éventuellement un noyau métallique. La faible fraction de glace d'eau comparée aux autres satellites de Saturne et d'Uranus pourrait être due soit à une composition de la nébuleuse solaire dominée par de l'oxyde de carbone plutôt que par de l'eau ou du méthane dans la zone de formation de ces objets, soit à la perte d'une partie des glaces lors du choc à l'origine du système Pluton-Charon, et lors de la capture de Triton par Neptune.

La première impression à la vue des images de Triton obtenues par Voyager est une surface très peu cratérisée, donc très jeune. Trois principales unités géologiques peuvent être distinguées sur les 40 % de surface qui ont été observés : une calotte polaire sud brillante très étendue, approchant l'équateur en certains endroits, et striée de dépôts noirs en éventail ; un terrain très complexe consistant en un réseau dense de dépressions elliptiques régulières d'environ 30 kilomètres de diamètre, attribuées à des phénomènes de diapirisme. Produits par la remontée d'un matériau peu dense à travers une couche de surface plus dense, entrecoupées de failles tectoniques linéaires ; et finalement des plaines lisses en terrasse, probablement créées par des épanchements (récents ?) de cryovolcanisme, c'est-à-dire des épanchements de glaces fluides au niveau de failles de la surface venant du manteau sous-jacent. La capture de Triton, la cir-



Détails de la géologie de la surface de Triton (Voyager 2) : ci-dessus, la calotte polaire sud et les dépôts sombres créés par ses geysers. (crédits : NASA/JPL).

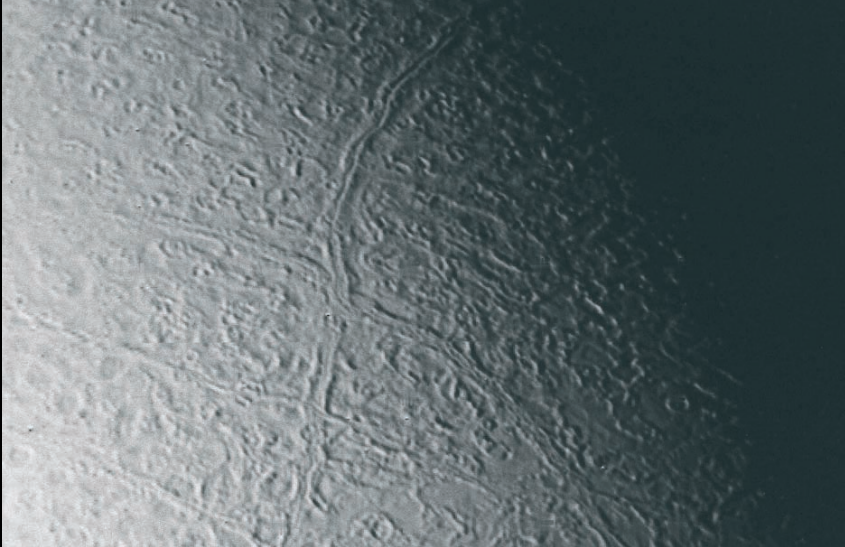
cularisation de son orbite et la synchronisation de sa rotation ont certainement entraîné par le passé des effets de marée colossaux qui ont fortement chauffé l'intérieur du satellite, lui ont permis de se différencier et ont produit une intense activité géologique en surface. La question de la persistance actuelle d'une activité reste ouverte.

Rien n'est actuellement connu sur la géologie de Pluton, mais la mission spatiale New Horizons (NASA, décollage en janvier 2006) qui la survolera en 2015 devrait permettre d'en connaître plus sur l'évolution de cet objet transneptunien. Vu leurs histoires dynamiques et thermiques extrêmement différentes, on peut s'attendre à

des structures géologiques radicalement différentes de celles de Triton.

Origine

La première théorie de Lyttleton en 1938 supposait que Pluton s'était formé avec Triton dans la subnébuleuse de Neptune et aurait été éjecté par ce dernier lors du rapprochement de leurs orbites. Cependant cette théorie ne permet pas d'expliquer de nombreuses contraintes observationnelles, dont l'existence de Charon. La théorie actuellement admise considère que le système Pluton-Charon aurait été créé suite à un impact entre deux objets transneptuniens, Pluton et un proto-Charon, de façon analogue à la



Détails de la géologie de la surface de Triton (Voyager 2) : un réseau de dépressions et de failles tectoniques. (crédits : NASA/JPL)

formation du système Terre-Lune. Quant à Triton, il aurait été capturé par Neptune suite à une collision avec un de ses satellites réguliers et aurait acquis son orbite circulaire au prix d'une intense dissipation d'énergie de marée sur quelques centaines de millions d'années. Triton aurait alors fondu pratiquement intégralement, conduisant à une différenciation complète de sa structure et peut-être à une perte partielle de ses composants les plus volatils.

Pluton, Triton ainsi que le proto-Charon pourraient en fait être les reliques d'une famille de petites planètes, d'un diamètre supérieur à 1 000 kilomètres, transneptu-

niennes, formées entre 30 et 50 unités astronomiques. Les objets constituant la famille des « Plutinos » (fiche V-7), dont Pluton et Charon, auraient ensuite été piégés avec des excentricités élevées dans la résonance 3:2 avec Neptune lorsque l'orbite de celle-ci migra vers l'extérieur.

L'étude détaillée de ces objets permettrait de fournir d'importantes informations sur les conditions de formation des corps glacés aux confins de notre système planétaire. Une première mission d'exploration (New Horizons, NASA) sera sur place d'ici 2015-2020. Elle consacrerait ses observations à l'étude de la géologie, de la composition et de la température



Détails de la géologie de la surface de Triton (Voyager 2) : des plaines lisses en terrasses formées par cryovolcanisme. Un cratère d'impact est visible au centre. (crédits : NASA/JPL)

de la surface et de l'atmosphère du couple Pluton-Charon et de ses deux petits satellites ainsi que d'un ou deux objets transneptuniens de 50 à

100 kilomètres de diamètre. Souhaitons-lui bon voyage vers la banlieue de notre système solaire !