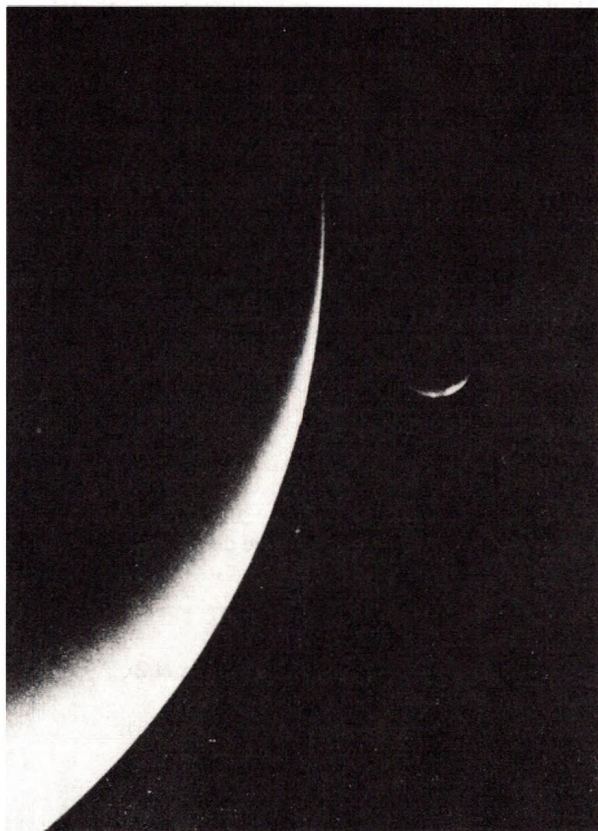

Aux confins du système solaire

J. Manfred



Un adieu à Triton, à Neptune et au système solaire.
(NASA — JPL)

Un objectif important des sondes quittant notre système solaire est de mesurer le vent solaire à des distances croissantes du Soleil, et de localiser l'héliopause, c'est-à-dire la limite de la zone d'influence de celui-ci. Au-delà de l'héliopause, le vent solaire ne se manifeste plus, et l'on entre réellement dans le milieu interstellaire.

Ces expériences sont exclusivement l'affaire de spécialistes et, pour intéressantes qu'elles soient, elles éveillent peu l'intérêt du grand public. Pour celui-ci le Grand Tour est bel et bien terminé, et les futurs objectifs concerneront l'exploration détaillée de Vénus, Jupiter, Saturne par les sondes Magellan, Galileo et autres Cassini.

C'est avec un pincement au cœur que les astronomes et ingénieurs s'occupant de Voyager 2 virent les dernières photos de Neptune. Dignes des meilleures nouvelles de science-fiction, ce sont les derniers clichés que prendra jamais la sonde qui quitte maintenant le système solaire. Jamais plus n'aura-t-elle l'occasion de photographier de près quoi que ce soit. Mais déjà on parle de prendre une vue générale du système solaire...

La mission scientifique de la sonde n'est pas terminée pour autant puisqu'elle continuera à mesurer le milieu ambiant et à analyser les étoiles dans le domaine des rayons ultra-violets, une gamme de rayonnements électromagnétiques inaccessibles depuis la surface terrestre.

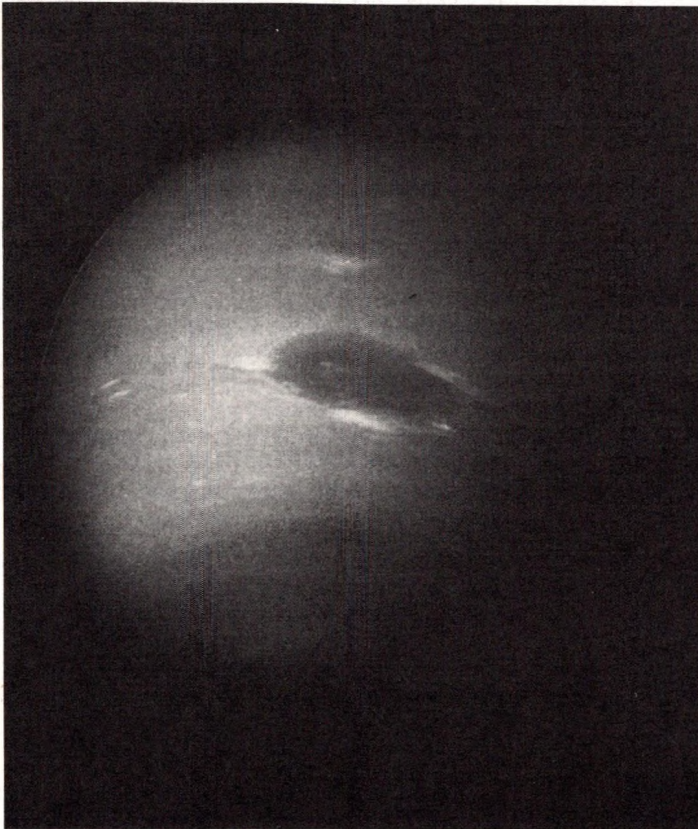
Seule Pluton reste à visiter, mais rien n'est prévu dans les tiroirs des agences spatiales américaine, européenne, russe ou japonaise. Il faudra attendre le 21^{ème} siècle pour voir se dessiner des projets en ce sens. Ce n'est pas seulement un manque d'intérêt pour cette petite planète. Bien au contraire, l'orbite curieuse de Pluton, sa taille réduite, son satellite Charon, anormalement gros par rapport à elle, en font un sujet de curiosité pour les astrophysiciens travaillant sur l'évolution du système solaire. Mais voilà, Pluton est mal située. Il n'a pas été possible de l'inclure dans le Grand Tour. Une mission plutonienne coûterait très cher, trop cher pour explorer un seul système. Et si l'on songe aux risques de pannes que peut encourir une sonde dans un aussi long voyage, on comprend aisément la réticence des agences spatiales pour se lancer dans l'aventure.

Nous ne rappellerons pas les grandes étapes de la mission Voyager 2. Elles sont décrites dans la chronique spatiale de Théo Pirard. Nous passerons simplement en revue ses grandes découvertes, telles que l'on peut les comprendre actuellement. Rappelons que l'analyse complète des myriades d'informations obtenues lors d'une telle rencontre, et leur interprétation détaillée demande des années.

Tout d'abord de quoi est constitué le système de Neptune? La planète elle-même est, comme les trois autres géantes (Jupiter, Saturne et Uranus), une énorme boule d'hydrogène, avec quelques impuretés. Ces impuretés sont surtout de l'hélium (deuxième élément de la classification de Mendéléïev) et quelques éléments plus lourds (que les astronomes s'obstinent à appeler métaux, en dépit des règles les plus élémentaires de la chimie) tels que le carbone, l'oxygène et l'azote. Certains de ces atomes se combinent et l'on sait par la spectroscopie que l'atmosphère des grosses planètes contient une quantité appréciable de méthane. Tout cela a été confirmé par Voyager 2, mais il a ajouté quelques informations essentielles pour la compréhension du système solaire.

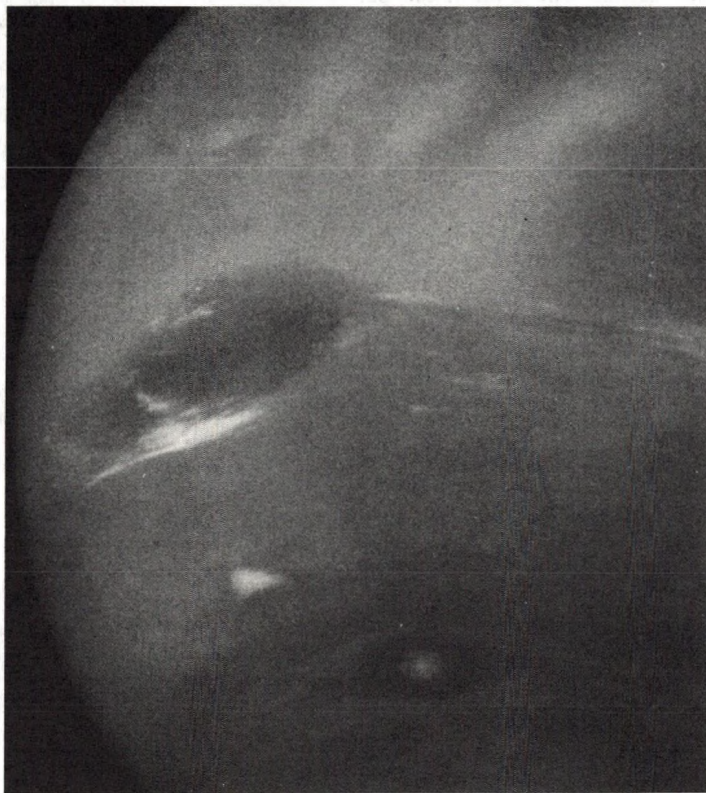
L'aspect des planètes géantes est fonction de leur distance au Soleil. Jusqu'à Uranus, on remarquait une progression régulière, depuis la topographie mouvementée de Jupiter avec ses bandes et taches très colorées, jusqu'à Uranus, uniformément morne et sans détail spectaculaire. Entre les deux extrêmes, Saturne présente quelques zones bien moins marquées que celles de Jupiter, et quelques taches peu colorées. On s'attendait donc à voir sur Neptune, le jumeau d'Uranus en ce qui concerne la taille, une absence complète de détails. Pourtant des observations faites depuis le sol avaient tout récemment permis de déduire l'existence de nuages contrastés qui, entraînés par la rotation de la planète, en font fluctuer l'éclat avec une période évaluée à 17 heures environ (voir *Le Ciel*, juin 1989, page 237). Lors de l'approche de Neptune (Voyager en est passé à 4.900 kilomètres seulement, plus près qu'aucune des autres planètes qu'il a visitées), ces formations atmosphériques ont commencé à devenir visibles dans les caméras de Voyager. L'une d'elles, découverte dès le mois de janvier, faisait irrésistiblement penser à la Tache Rouge de Jupiter, si ce n'est qu'ici elle était noire. Sa période de rotation est effectivement de l'ordre de 17 heures. Il y a aussi une petite tache noire, plus proche du pôle austral. Une troisième tache, située à une latitude intermédiaire, tourne beaucoup plus vite que les deux autres: un tour en 16 heures.

Elle gagne donc sur les taches noires un tour toutes les 16 rotations. Cette mobilité exceptionnelle lui a valu le sobriquet de Scooter. L'existence de telles différences de vitesses entre zones contiguës, sans grande dissipation d'énergie, est une observation d'une importance capitale dans la compréhension de la météorologie des planètes.



Neptune et la Grande Tache Noire (NASA — JPL)

Outre les taches noires, on voit des formations nuageuses brillantes, qui font penser à des cirrus. Certaines accompagnent la Grande Tache Noire, un peu comme les nuages accrochés au sommet d'une montagne. Tout comme en haute montagne, ces nuages se transforment continuellement et il est impossible de les reconnaître entre deux images successives.

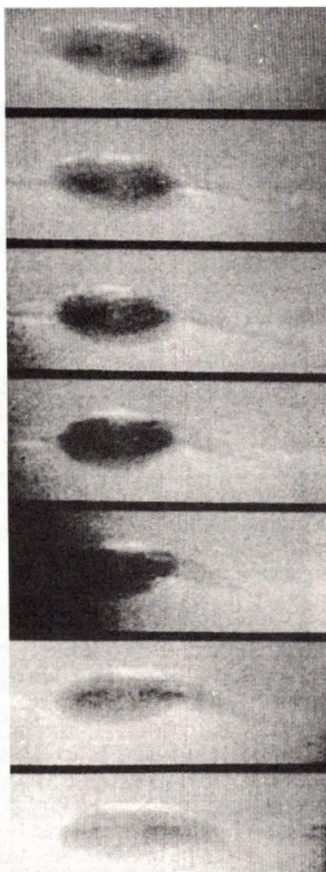


Détail de Neptune et de la Grande Tache Noire. Sous celle-ci, on peut voir un grand cirrus blanc de méthane gelé. Plus au sud, se trouve la tache blanche appelée «Scooter». Plus bas encore, une seconde tache noire. (NASA — JPL)

La météorologie des planètes est donc une science extrêmement complexe et variées. Deux planètes aussi semblables, a priori, que Neptune et Uranus montrent des phénomènes très différents. Les taches sont des cyclones, ou des anticyclones, et cela peut se déterminer par la circulation des vents: pour un anticyclone, le sens horlogique dans l'hémisphère nord, pour un cyclone l'inverse; et on change le sens pour l'hémisphère austral.

Malheureusement les changements dans les systèmes nuageux sont si rapides autour des taches que l'on n'est pas encore parvenu à décider si l'on avait affaire à des zones de haute ou de basse pression. Ce que l'on a pu déterminer, par contre, c'est la structure verticale de l'atmosphère. Certaines images font apparaître l'ombre des cirrus sur les couches nuageuses sous-jacentes. On sait ainsi qu'ils flottent à une cinquantaine de kilomètres au-dessus de celles-ci. De même on sait que les taches noires ont une altitude intermédiaire.

Les nuages bas sont constitués de sulfure d'hydrogène. Quant aux cirrus ils sont faits de méthane. Cette molécule subit apparemment un cycle assez complexe. Des hydrocarbures plus lourds (comme l'éthane et l'acétylène) se décomposeraient dans la basse atmosphère, sous l'effet de la température. Cette température élevée est due non pas au Soleil, trop lointain, mais à la chaleur interne de Neptune. Du méthane est libéré et il s'élève dans la haute atmosphère où le froid le condense en nuages. L'action du rayonnement solaire reconstitue des molécules plus lourdes qui retournent dans les couches plus profondes, où le cycle recommence. C'est au sein des taches noires que le transport vertical du méthane vers la stratosphère aurait lieu avec le plus d'efficacité.



Divers aspects successifs de la Grande Tache Noire.

L'influence du Soleil est donc limitée à une interaction superficielle. La structure thermique de l'atmosphère est gouvernée principalement par la libération de l'énergie propre de la planète provenant de divers phénomènes physico-chimiques, et du reliquat de l'énergie de formation.

Signe de l'activité interne de Neptune, un champ magnétique a été détecté par Voyager. C'est globalement celui d'un dipôle dont l'axe est incliné de 50° sur celui de la planète, et qui est en outre fortement excentré, situé aux huit dixièmes du rayon vers le pôle magnétique sud. Les raisons de cette anomalie ne sont pas encore élucidées. On pense que l'origine du champ ne doit pas être recherchée

dans le noyau de Neptune, mais plutôt dans une couche liquide, un vaste océan situé sous la surface. Le champ est faible, plus faible que celui de la Terre ou des autres grosses planètes. Rappelons que le champ d'Uranus était lui aussi très incliné sur l'axe de rotation.

Le champ magnétique tourne avec la planète en 16 heures et 3 minutes, chose démontrée par la variabilité des émissions radio de Neptune. Cette valeur correspond à l'intérieur de la planète, alors que celles mesurées pour les structures atmosphériques indiquent un milieu animé de mouvements propres (des vents) très violents, de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde.

Une des énigmes liées à la huitième planète consistait en son cortège d'anneaux et de satellites. Les deux satellites connus antérieurement ont des orbites étranges (outre Triton, dont nous avons parlé, Néréide possède l'orbite la plus excentrique des satellites du système solaire).



Deux des anneaux de Neptune sont bien visibles sur cette image. Le chapelet d'arcs de l'anneau extérieur avait été détecté depuis la Terre et résiste aux efforts d'explication des astronomes. (NASA — JPL)

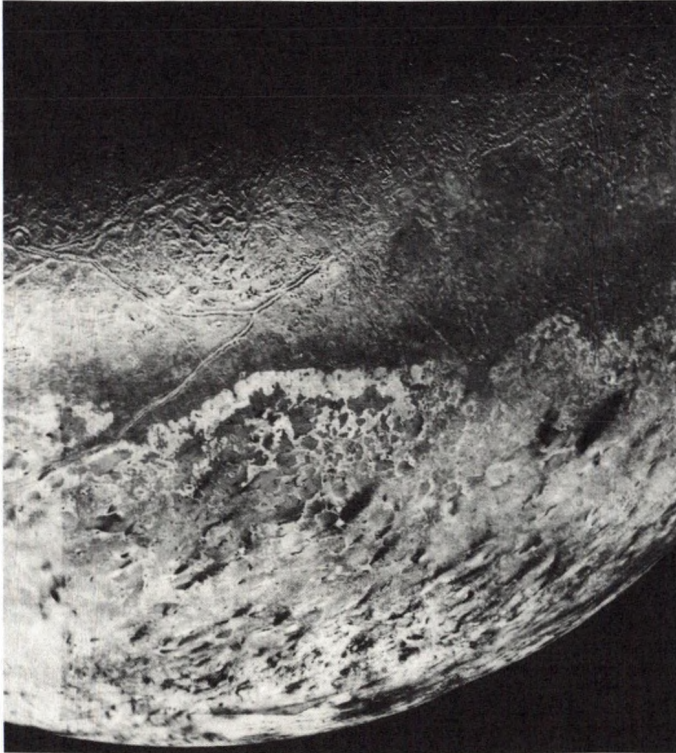
Les anneaux détectés depuis la Terre étaient aussi très curieux. Ne paraissant pas entourer complètement Neptune, ils jouaient à cache-cache avec les observateurs, et défiaient les théoriciens. Satellites et anneaux sont souvent associés. Souvenons-nous des satellites bergers ou gardiens, qui confinent certains des anneaux de Saturne et Uranus dans des orbites particulières. On a ainsi évoqué des satellites à l'orbite inclinée sur l'équateur de Neptune pour expliquer la fragmentation d'un anneau en un chapelet d'arcs.

Des anneaux fins, des anneaux diffus (des bandes) et des satellites ont bien été découverts par la sonde américaine, et la liste en est donnée dans une table de la chronique de Théo Pirard. Les anneaux sont continus. Tous encerclent complètement la planète, mais l'un d'eux, le plus extérieur, comporte des renflements (les fameux arcs tant attendus) alignés comme des saucisses, le long d'un secteur de quelques dizaines de degrés. Plus d'une demi-douzaine de petits satellites (de 10 à 20 km de diamètre) auraient été détectés dans l'un de ces arcs. L'un des satellites principaux circule bien sur une orbite inclinée. Cela ne correspond pas exactement à ce qu'imaginaient les spécialistes annélistes, qui supposaient par exemple l'existence de deux systèmes d'arcs à 52.000 et 67.000 km du centre de la planète. On suggérait même tout récemment que le nombre d'arcs s'établissait entre 10 et 100. Le satellite incliné est bien trop petit pour confirmer les théories des astronomes. On en est donc encore réduit aux simples hypothèses. Il semble se dégager de celles-ci l'idée que, loin d'être une figure bien stable, chaque anneau soit le siège d'une grande activité désordonnée, guidée par le hasard des collisions et des interactions avec les satellites. Les arcs apparaîtraient pour ensuite disparaître et se reformer ailleurs. Soyons certains que les mois qui viennent verront la formulation de belles théories expliquant tout cela.

Comme lors de chacune des précédentes étapes de l'odyssée de Voyager, un satellite s'est distingué par quelques singularités remarquables. Pensons à Io, Titan ou Miranda. Ici c'est Triton qui a suscité l'enthousiasme des observateurs. Il était à peu près certain que Triton était un monde inerte et glacé. Une récente théorie due à des astronomes californiens suggérait cependant que Triton a eu une vie très mouvementée. Il aurait d'abord été une planète orbitant autour du Soleil. (Remarquons ici que cet astre, avec son diamètre de 2720 km, aurait été très semblable à Pluton.) Passant près de Neptune, la planète aurait heurté un de ses satellites, se faisant ainsi capturer sur une orbite très excentrique. Les effets de marée dans le nouveau système maintinrent une température élevée dans Triton, et réduisirent progressivement l'excentricité de son orbite. En balayant ainsi l'espace au-delà de 5 rayons neptuniens, Triton élimina les satellites extérieurs, sauf Néréide, beaucoup trop éloigné, et dont l'orbite fut perturbée en celle que l'on connaît. En deçà de 5 rayons planétaires, des satellites peuvent exister, mais avec des orbites inclinées, toujours à cause des perturbations de Triton.

Cette belle théorie expliquait, ou plutôt permettait l'existence de satellites à orbite inclinée et avait donc l'avantage d'expliquer la présence d'anneaux irréguliers. C'était là une courageuse tentative de résoudre en une fois tous les mystères de Neptune, juste avant l'arrivée de Voyager. Ce dernier ne mit à mal qu'une partie du bel édifice. Sur un point au moins les chercheurs californiens avaient été

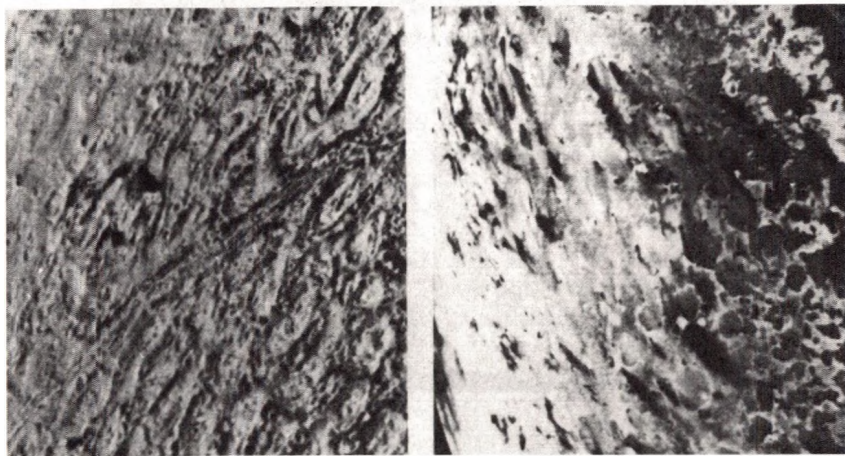
des visionnaires: Triton a été un astre actif. Il l'est d'ailleurs peut-être encore maintenant, mais pour une autre raison que celle invoquée par la théorie. On a découvert sur Triton, après la Terre et Io, le troisième exemple connu d'astre manifestant une activité volcanique.



Triton, satellite principal — et mystérieux — de Neptune. Au sud, la calotte polaire est recouverte de givre d'azote et de méthane, ce dernier lui donnant une couleur rosée. On remarquera la faible cratérisation et les vallées qui sillonnent la surface du satellite. (NASA — JPL)

Les images de Voyager confirment que Triton a mis bien longtemps pour se solidifier. Quand il l'a fait, le bombardement intensif par les planétésimales primordiales du système solaire avait cessé. Les marques de ces impacts sont donc effacées et la surface actuelle de Triton ne présente que peu de cratères, comparée à celles de la Lune ou de Mercure par exemple. Les formations les plus récentes n'ont pas plus de 500 millions d'années. Face aux 4 milliards et demi d'années du système solaire, ce n'est pas très long. Il n'est donc pas absolument certain que l'intérieur de Triton soit tout à fait inerte. Peut-être est-il simplement en sommeil?

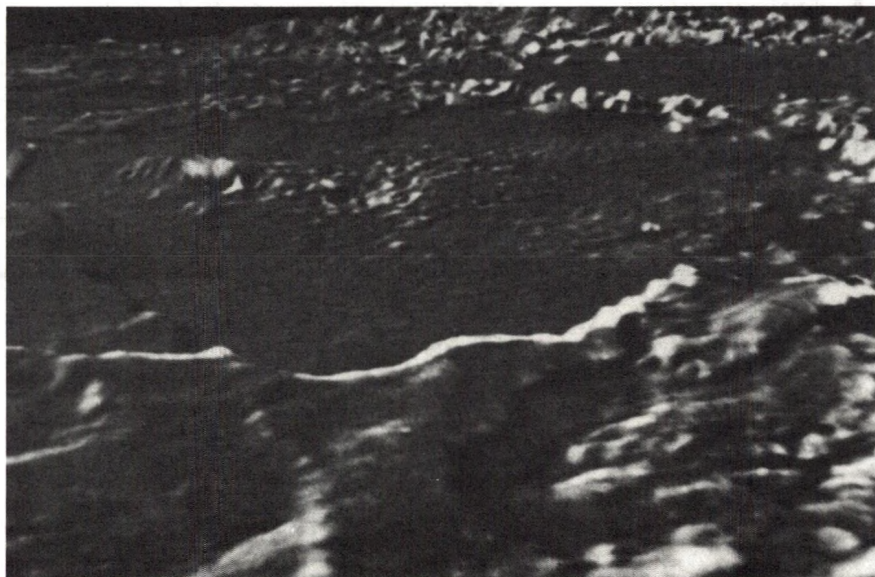
Le volcanisme que l'on a découvert n'est pas de type terrestre. Il est plutôt analogue à celui de Io. Nous avons vu que la chaleur interne de Triton est sans doute pratiquement négligeable et ne peut animer une activité tectonique. C'est la chaleur solaire qui est à l'origine de l'activité présente. Cette chaleur entretient à la surface de Triton une température d'environ 37° Kelvin. Ce n'est pas grand chose; c'est même la plus basse valeur connue pour un astre du système solaire. Mais c'est juste suffisant pour maintenir l'azote au bord de son point de fusion. On avait pensé jusqu'ici que des océans d'azote existaient sur Triton, mais on sait maintenant qu'il y fait un peu trop froid et ce sont en fait des glaciers d'azote et de méthane qui remplissent les vallées. De la neige recouvre la calotte polaire australe (la seule visible lors du passage). Cette neige (également d'azote et de méthane) est teintée de rose par des molécules organiques créées par l'action du rayonnement solaire sur le méthane.



Deux zooms de régions très différenciées de la surface de triton. A gauche on aperçoit des vallées, des ravins et des dépressions circulaires. A droite, dans la calotte polaire, les dépôts blanchâtres de neige d'azote et de méthane voisinent avec des traînées noires de matière éjectée par les volcans d'azote. (NASA — JPL)

A quelque vingt ou trente mètres sous la surface, la pression devient suffisante pour liquéfier des poches d'azote qui peuvent alors exploser, projetant la matière à des dizaines de kilomètres au-dessus du sol. L'azote se recondense, et retombe lentement avec les autres constituants. Un mécanisme analogue, mais faisant intervenir le soufre, se manifeste sur Io.

On a décelé une atmosphère extrêmement ténue (dix microbars) sur Triton. On y trouve même des nuages et des brumes. Et elle est le siège de vents qui peuvent étaler les projections volcaniques en de longues traînées sombres (coloration due aux hydrocarbures). L'existence de ces traînées a été l'argument décisif pour adopter l'hypothèse volcanique. En effet dans une atmosphère si peu dense, les vents sont bien incapables de soulever eux-mêmes les poussières du sol. Il faut qu'elles soient déjà en suspension, ce dont se chargent les volcans.



L'étude des ombres projetées par le relief de Triton a permis aux super-ordinateurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory) de reconstituer cette vue en perspective d'une région accidentée du satellite de Neptune. (JPL)

Ainsi les derniers close-ups de Voyager ont-ils à nouveau révélé un monde unique et merveilleux. Quel adieu magnifique pour cette expérience qui restera l'une des plus belles aventures de l'humanité.