

## HUIT JOURS D'AOUT 1989 AVEC VOYAGER 2 DU COTE DE NEPTUNE

L'exploration historique du système solaire entreprise en 1977 par la sonde Voyager 2 s'est achevée le 24 août 1989 quand la sonde est passée à environ sept mille kilomètres de Neptune avant de photographier Triton puis de s'éloigner définitivement vers le monde des étoiles. Nous avons été les témoins éblouis d'une grande aventure de l'histoire de l'humanité, une étape aussi importante que fut, en son temps, la découverte de l'Amérique.

On pourra dire que le vingtième siècle aura été celui du début de l'exploration spatiale et si on compare les moyens mis en oeuvre avec ceux dont disposaient Christophe Colomb et ses compagnons sur leurs caravelles, l'exploration par robot interposé aura été autrement confortable...

Avoir eu le plaisir d'être sur place, au Jet Propulsion Laboratory de Pasadena et, avec trois cents astronomes, participer en temps réel à la réception des images et des données recueillies et transmises par Voyager 2 est vraiment un moment inoubliable, un événement chargé d'émotion, le plaisir de la découverte à l'état pur :

Quelques mots sur le décor. Trois cents astronomes venus de tous les pays parmi lesquels dominaient évidemment les Américain mais venait aussitôt après en importance l'équipe des Français ; quatre ou cinq cents journalistes, plusieurs centaines de personnalités diverses et tous les techniciens et ingénieurs nécessaires au bon fonctionnement de la sonde complétaient l'assistance. Des équipes de télévision ont été fort actives, surtout les japonaises et les américaines alors que, pour la France, seule TF1 était présente et n'est restée que deux jours sur place. Il y eut un moment d'intense émotion lorsque la sonde traversa le plan équatorial de Neptune, le nombre d'impacts de particules sur la sonde augmentait d'instant en instant jusqu'à plus de trois cents impacts par seconde, on se demandait si la sonde y résisterait. On conçoit l'immense soulagement quand on constata qu'elle avait tenu, elle a finalement complètement rempli sa mission.

Il y a eu 27 heures de conférence de presse pour annoncer des résultats et cela n'a pas suffi, on n'a pas pu tout dire. C'est un véritable trésor de données qui a été recueilli, il faudra des années pour les dépouiller. Pensez que quatre personnes ont mis plusieurs années à tirer de neuf images des anneaux de Jupiter une analyse complète. La majorité des données sur Saturne n'est pas encore exploitée. L'essentiel des résultats de l'ensemble de l'expédition sortira au fur et à mesure au cours des prochaines années et au delà de l'an 2000.

Il en résulte dès maintenant un véritable essor d'une science nouvelle, la planétologie, qui requiert l'attention de spécialistes

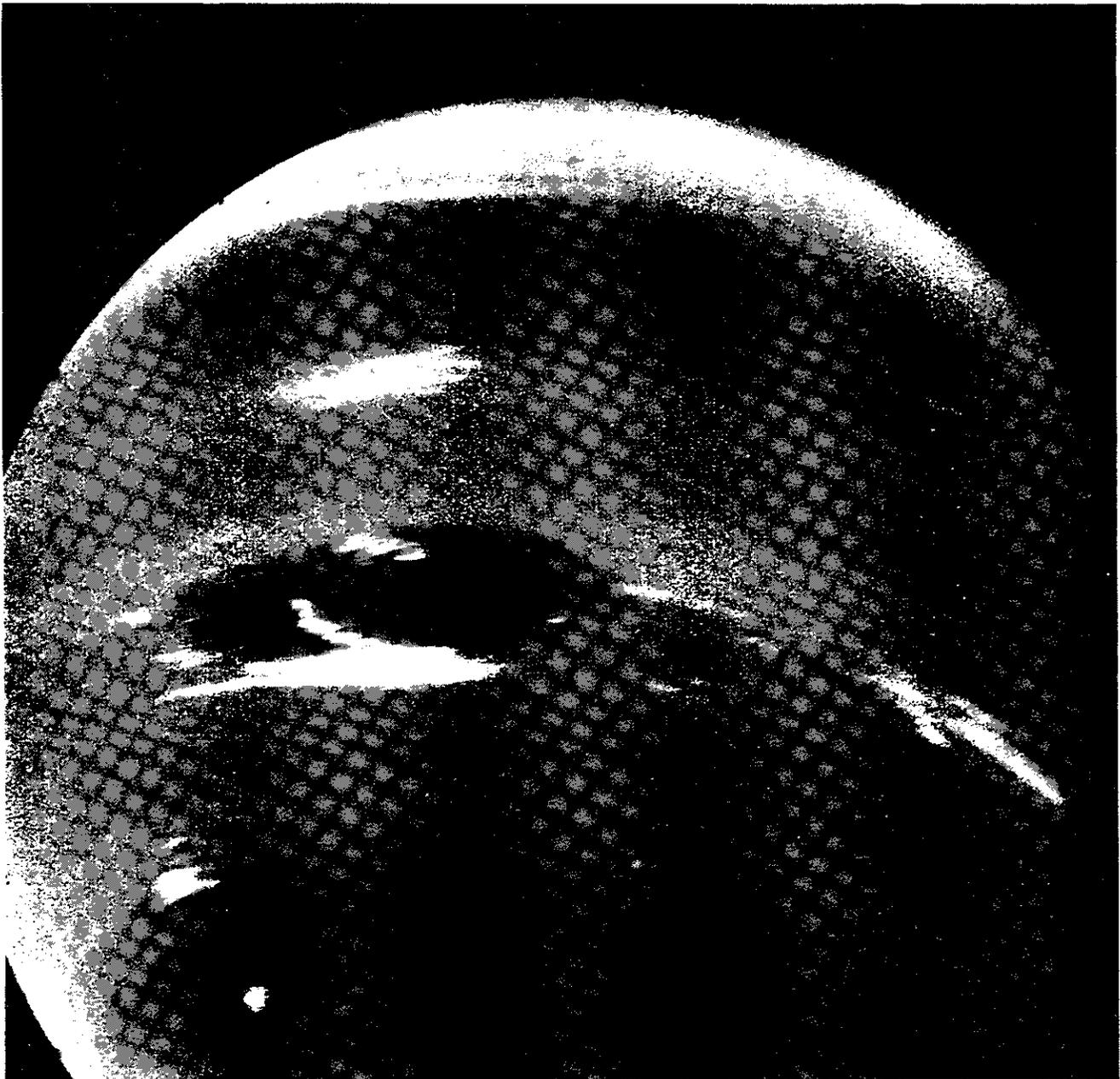


Fig.1 - 21 août 1989 - Neptune

L'image des nuages dans l'atmosphère de Neptune est le premier test de la précision des prévisions météorologiques faites huit jours plus tôt pour choisir les cibles à photographier. Trois des quatre taches sont visibles : la grande tache sombre avec son compagnon blanc à gauche du centre de la photo ; le petit "scooter" brillant est au-dessous à gauche et la seconde tache sombre avec son noyau brillant au-dessous du "scooter".

de disciplines variées, des géologues, des chimistes, des physiciens, des astronomes, des mathématiciens, des minéralogistes, des biologistes, des météorologues, des vulcanologues, etc. Pour l'heure, les données sont recueillies par des robots. On songe cependant à envoyer des hommes sur Mars, opération de prestige pas forcément très rentable du point de vue scientifique ; avec les crédits pour envoyer un homme sur Mars, on pourrait envoyer au moins cent robots partout dans le système solaire. De toute façon, on doit être bien convaincu que la recherche fondamentale est la clef du futur et il ne faudrait pas que d'autres entreprises, pour séduisantes qu'elles soient, la mettent en péril.

N'oublions surtout pas quelle prodigieuse réussite technique représente cette mission Voyager 2. Cette sonde n'avait pas été vraiment prévue pour aller jusqu'à Neptune. Initialement, tout au début, le projet des scientifiques était celui d'un grand tour de toutes les planètes, y compris Pluton. Mais quand il s'est agi de passer à la réalisation - c'était la triste époque Nixon-Pompidou-Brejnev des restrictions de crédit pour la recherche fondamentale - il a fallu se rabattre sur une mission réduite à Jupiter et Saturne. Ensuite, il y a eu la surprise du merveilleux fonctionnement de la sonde, on a pu prolonger son voyage vers Uranus puis vers Neptune. Il y a eu un incident au passage près de Saturne, un axe s'est grippé et l'orientation des instruments portés par la sonde est devenu quasiment incontrôlable. Les techniciens de la NASA ont su découvrir le défaut et trouver des remèdes. Cependant la sonde n'avait pas été conçue pour faire des observations aussi loin du Soleil alors que les conditions imposées deviennent de plus en plus difficiles. Au niveau de Neptune, il y a seulement 5% de la lumière qui était reçue au niveau de Jupiter. Et la sonde va de plus en plus vite; près de Neptune, sa vitesse atteint 27 km/s. Prendre des photos dans ces conditions exige de bouger la plate forme qui porte la caméra en sens inverse du mouvement de la sonde pour maintenir la cible au centre de l'image et assurer un temps de pose suffisant. Il a fallu injecter à l'ordinateur de bord les ordres correspondants. Songez aussi à la faiblesse des signaux envoyés par la sonde, un émetteur de 20 watts à 4,5 milliards de kilomètres, donc plus de quatre heures pour la transmission d'un ordre. C'est pourtant dans de telles conditions qu'on a pu apprendre à la sonde des manoeuvres qu'elle ne savait pas effectuer lors du lancement. On peut dire que non seulement elle a été réparée en cours de route mais encore mieux, perfectionnée.

Le prix de cette merveilleuse aventure ? 850 millions de dollars sur 17 années budgétaires soit 1F par an et par citoyen américain. A peine la moitié du prix d'un sous-marin nucléaire et c'est autrement intéressant quand on pense aux cent mille personnes engagées d'une façon ou d'une autre dans l'entreprise et surtout aux résultats. La science est



Fig.2 - 21 août 1989 -

Evolution de la grande tache sombre

Ces images montrent l'évolution des nuages autour de la grande tache sombre sur une période de quatre jours et demi. De haut en bas, ces images ont été prises lors de rotations successives de la planète (période d'environ 18 heures).

La grande tache est à une latitude sud d'environ  $20^{\circ}$  et couvre environ  $30^{\circ}$  de longitude.

La camera était munie d'un filtre violet et se trouvait à une distance de l'ordre de 17 millions de kilomètres.

Le grand nuage brillant au bord sud de la grande tache est un compagnon plus ou moins permanent de celle-ci. Le mouvement apparent des plus petits nuages à la périphérie de la grande tache suggère une rotation de celle-ci dans le sens opposé des aiguilles d'une montre.

une grande oeuvre collective.

... Et pour un résultat d'autant plus surprenant qu'on ne s'attendait pas à grand chose d'intéressant. Neptune ? Un astre mort, sans doute, si loin du Soleil. Ses anneaux ? Une équipe française prétendait les avoir découverts, on n'y croyait guère. Triton enfin ? Un petit astre sans doute cratérisé et sans grand intérêt.

La surprise a été d'autant plus grande. La planète Neptune est un astre très actif. Les anneaux existent bien et posent de nouveaux problèmes. Quant à Triton, il a bien été le clou du spectacle, son sol et son atmosphère offrent des particularités surprenantes. Bref, Neptune et son voisinage valaient le déplacement !

Et on ne l'a pas raté. La trajectoire calculée a été réalisée à 1 km près à la distance de 4,5 milliards de kilomètres. On avait des inquiétudes sur le comportement de la sonde et de ses instruments lors de la traversée du plan équatorial de Neptune. On craignait que la sonde heurte des fragments ou des poussières plus ou moins importants associés aux anneaux. Et si on passait plus au large, on risquait de manquer Triton. Le compromis auquel on est parvenu a consisté à passer à 7500 km seulement de la planète au niveau du pôle et à un peu plus de 80 000 km du centre de la planète lors de la traversée du plan équatorial. Grâce à quoi tout s'est très bien passé. A titre de comparaison, Voyager 2 s'était approché d'Uranus à plus de cent mille kilomètres et la plupart des photos de Jupiter, Saturne et Uranus avaient été prises à des distances de l'ordre de 200 000 km à un million de kilomètres.

## NEPTUNE

En s'approchant de Neptune, des détails commencèrent à apparaître. Une tache ressemble alors à celle que dessina Galilée lors de ses premières observations de Jupiter. Des photos prises à quelques heures d'intervalle montrent que la tache a tourné. On s'approche encore et des bandes parallèles à l'équateur apparaissent. Trois taches semblent des formations permanentes, la grande tache sombre surnommée la "limace" dans l'hémisphère sud, une tache plus claire et une petite tache blanche baptisée "le scooter".

L'atmosphère de Neptune est agitée de vents d'une extrême violence. La tache sombre qui tourne sur elle-même dans le sens direct, fait un tour du globe en 17 h 52 alors que la période de rotation des bandes n'est que de 16 heures, d'où une vitesse des vents qui doit dépasser 250 mètres par seconde, les vents les plus violents que Voyager 2 ait enregistré à l'exception des zones équatoriales de Saturne. On ne sait pas pour l'instant quelle est la source d'énergie associée à des vents aussi violents. Ou bien il n'y a pas de frottement entre les nuages et alors il n'y a pas de problème. Ou bien il y a un frottement raisonnable et on ne voit pas



Fig.3 - 26 août 1989 - Les anneaux et les trois arcs

La première image à montrer en détail les anneaux de Neptune avec les trois arcs brillants de l'anneau extérieur. Cette image a été prise alors que Voyager 2 s'éloignait de la planète et voyait les anneaux sous un angle de phase de  $135^{\circ}$ .

pour l'instant d'où peut provenir l'énergie de la haute atmosphère d'une planète qui reçoit à peine 5% de l'énergie envoyée par le Soleil sur Jupiter. On a aussi observé l'existence d'une source d'énergie interne : Neptune rayonne 2,7 fois plus de chaleur qu'elle n'en reçoit et les astronomes s'interrogent sur ce phénomène.

La raison d'être des bandes parallèles à l'équateur, comme sur Jupiter et sur Saturne, reste, là comme ailleurs, inexpliquée. Une hypothèse consiste à y voir la conséquence de mouvements de convection en profondeur selon une structure de cylindres emboîtés. En coupant de tels cylindres par la surface d'une sphère on retrouverait le tracé des bandes. Selon une autre hypothèse, il ne faudrait voir dans ces bandes que des mouvements superficiels étalés par la rotation différentielle de la planète sur elle-même. Il faudra retourner près des planètes géantes pour mieux comprendre.

L'atmosphère de la planète, composée surtout d'hydrogène et d'hélium contient aussi des nuages de méthane et de l'acétylène, des bandes de cirrus dont l'ombre apparaît sur les couches inférieures donnant l'idée d'une structure à trois dimensions qui n'avait encore été observée nulle part ailleurs. La tache la plus au sud semble bien être un cyclone alors que celle qui est plus au nord semble survolée par des vents violents.

Une des découvertes les plus surprenantes a été celle du champ magnétique de la planète. Non seulement l'axe magnétique de Neptune est incliné de 50° par rapport à l'axe de rotation mais les deux axes ne se coupent pas au centre géométrique du globe mais à 0,4 rayon neptunien de ce centre. Cette structure a compliqué la compréhension de ce qu'on observait : alors qu'on croyait observer une zone proche de l'équateur magnétique neptunien, on était en fait beaucoup plus proche d'un pôle magnétique. En passant à travers les régions polaires magnétiques, on a recueilli des données dans une zone encore inexplorée dans le cas des autres planètes.

Écoutons deux enregistrements sonores d'éclairs dans l'atmosphère terrestre et dans l'atmosphère de Neptune, cela nous donne une petite idée de la richesse des données recueillies et de l'étendue des problèmes d'interprétation qui restent posés.

La magnifique couleur bleue de l'ensemble de la planète est en partie due à la présence de méthane qui absorbe la lumière rouge dans la haute atmosphère. Quel choix heureux d'avoir baptisé cette planète Neptune !

Quant à sa structure interne, on pense à un noyau d'hydrogène et d'hélium mélangé avec de la matière ionisée et entourant un sous-noyau d'éléments encore plus lourds. Mais pour Jupiter et pour Saturne les colossales pressions internes entraînaient la présence d'hydrogène liquide et métallique (c'est à dire conductrice de courant électrique), ce qui ne

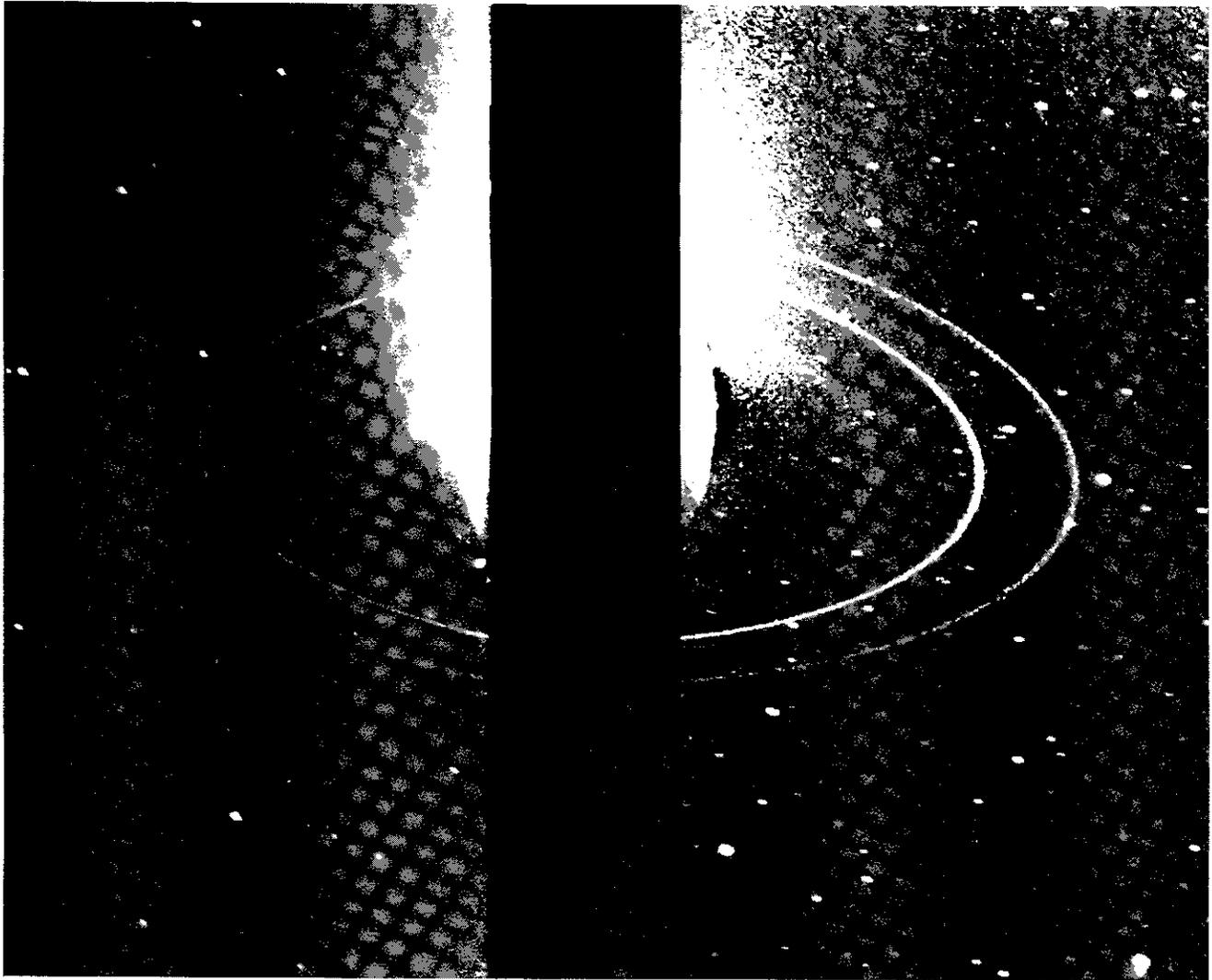


Fig.4 - 27 août 1989 - Le système complet des anneaux

Ces deux photos ont été prises avec filtre clair par la camera grand-angle de la sonde à la distance de 280 000 kilomètres. Le temps écoulé entre les deux poses fut de une heure et vingt-sept minutes. Durant ce temps, les arcs brillants de l'anneau extérieur n'étaient malheureusement pas visibles car ils étaient de l'autre côté de la planète.

Les deux anneaux principaux sont respectivement à 53 000 km et 63 000 km de Neptune. Sur ces images on distingue aussi l'anneau intérieur à 42 000 km de la planète ainsi que la bande très pâle qui s'étend à partir de l'anneau à 53 000 km jusqu'à mi-distance entre les deux anneaux brillants.

On distingue bien que les anneaux sont complets et continus.

Les points brillants tout autour sont des étoiles, la lueur centrale, celle de la planète.

peut être le cas dans Uranus et Neptune. La sonde étant passée très près de Neptune, l'analyse fine de sa trajectoire (qui demandera plus d'un an de travail) permettra de connaître les premiers termes du développement limité du potentiel gravitationnel de Neptune et donc d'avoir une idée de la structure interne.

#### LES SATELLITES

Des esprits audacieux avaient prédit qu'en raison de l'orbite "irrégulière" de Triton (rétrograde) et de Néréide (excentrique), Neptune ne pouvait avoir ni un système régulier de satellites ni des anneaux.

Nouvelle invitation à se méfier des théories audacieuses, la sonde a identifié six nouveaux satellites dont cinq forment un système régulier (orbites circulaires dans le plan équatorial) et il y en a probablement d'autres. Ils ont été provisoirement répertoriés 1989 N1, N2, ... N6 ; il faudra maintenant leur trouver des noms dans les mythologies de la mer. Ces nouveaux satellites sont situés entre 48 000 et 110 000 km de la planète et avec des diamètres allant jusqu'à 450 km comme pour N1 sur lequel on a découvert des montagnes de plus de huit kilomètres de haut...

#### LES ANNEAUX

Leur découverte est une longue histoire qui vaut d'être rappelée. Le 10 mars 1977, un système d'anneaux étroits était découvert autour d'Uranus au cours de l'occultation d'une étoile par la planète. Deux ans plus tard, le 10 juillet 1979, Voyager 2 photographiait les anneaux de Jupiter. La structure d'anneaux qui avait été durant trois siècles l'étrange particularité de Saturne, devenait plus commune. Il devenait opportun de rechercher si des anneaux existaient autour de Neptune.

La campagne de recherche a commencé le 10 mai 1981. Le 24 mai, alors que certaines équipes ne voyaient rien de particulier, une équipe américaine décelait "quelque chose" (on reconnaîtra plus tard qu'elle avait observé l'occultation de l'étoile considérée par un satellite de Neptune).

En 1983, une grande campagne mobilisait tous les grands télescopes disponibles du bassin du Pacifique. Sans aucun résultat. Si bien qu'il fut généralement admis qu'il n'y avait pas d'anneaux autour de Neptune.

Quand, en 1984, je postulai pour observer une occultation d'étoile par Neptune depuis l'observatoire européen austral, on refusa de m'accorder du temps puisque "il n'y avait pas d'anneaux autour de Neptune" et, à la place, on me donna du temps de télescope pour observer une occultation par Uranus. Il fallut beaucoup de démarches et de discussions pour obtenir finalement à la dernière minute deux télescopes grâce auxquels nous avons pu avec Bruno Sicardy observer l'occultation par Neptune et trouver une interruption de signal d'un côté de la planète et pas de l'autre.

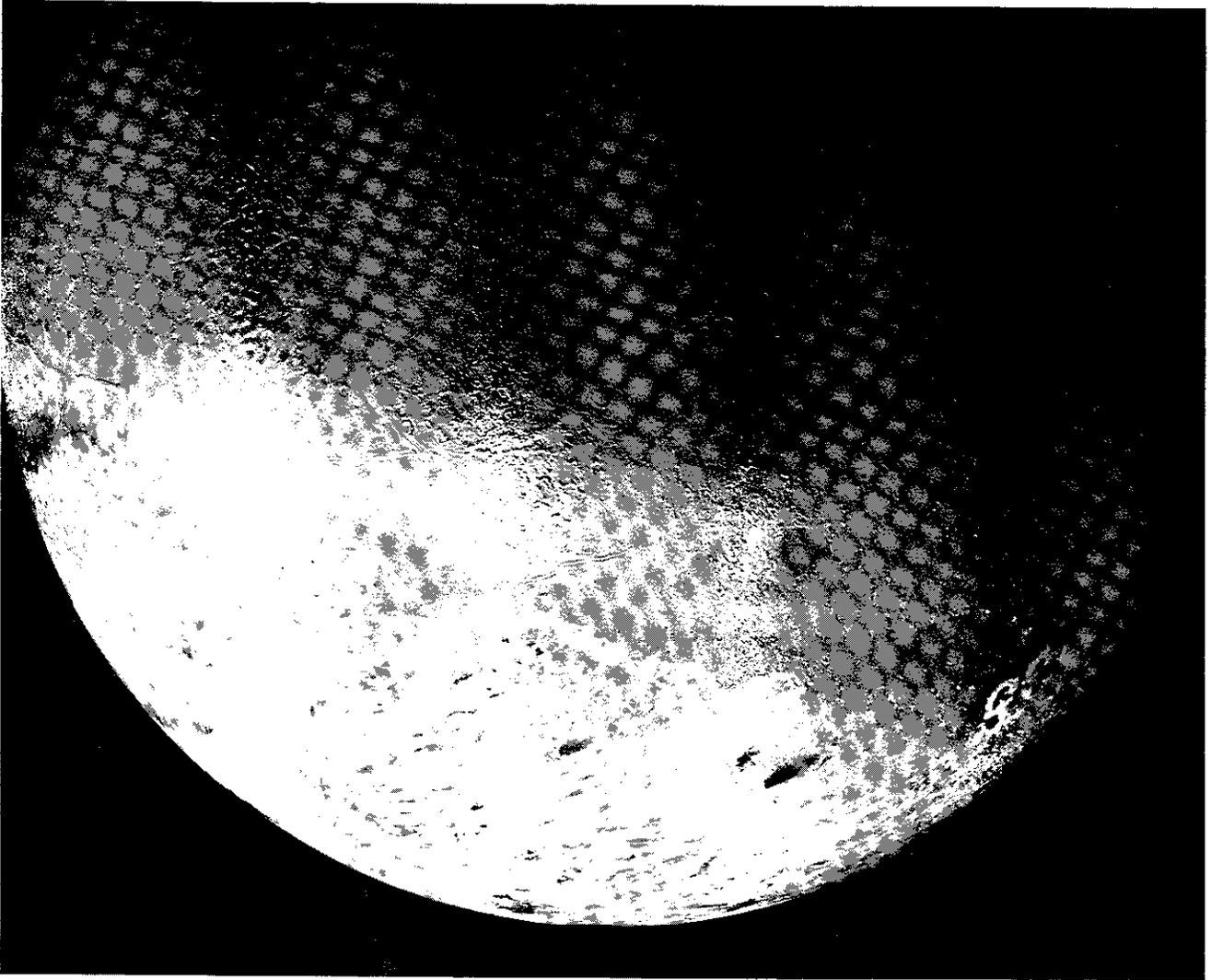


Fig.5 - 29 août 1989 - Triton

Cette image composite à partir de quatorze poses révèle la grande variété des détails découverts à la surface du satellite. En bas de l'image sont visibles les environs de la calotte polaire sud avec ses trainées sombres alignées vers le nord-est. Bien plus sombres que les détails environnants, ils réfléchissent pourtant presque dix fois plus de lumière que la surface de notre Lune.

A l'ouest (à gauche sur la photo), la moitié du disque est la région qualifiée de terrain "cantaloup". On y trouve des petites tranchées aux rives abruptes et de faibles dépressions centrales.

Vers le Sud, ce terrain luit comme s'il était couvert de glace.

Au nord-est (en haut à droite), des plaines et des régions qui rappellent un peu l'aspect des "mers" de notre Lune.

A droite, près du limbe oriental, on distingue aussi trois taches sombres.

Une seule autre équipe, autour du Professeur Hubbard, a observé cette occultation depuis un observatoire situé à 80 km plus au sud dans la Cordillère des Andes. Au moment de l'occultation, l'équipe française enregistra "quelque chose" sur bande magnétique alors que l'étudiant américain chargé de l'opération n'avait enregistré qu'un point toutes les trois secondes sur une bande de papier et était donc "passé à travers" ; la détection est un événement qui ne dure qu'une fraction de seconde. Heureusement, l'enregistrement sur bande magnétique révélait bien quelque chose qui confirmait notre découverte.

De quoi s'agissait-il ? Un objet de 80 km de long sur 15 de large et partiellement transparent, une sorte de cigare ? Ou bien des arcs ou des fragments d'anneaux ? En tout cas un résultat suffisant pour décider les comités d'attribution de temps de télescope des observatoires à nous accorder par la suite tout le temps dont nous avons besoin. Au télescope de Hawaï, on a retrouvé le "quelque chose" et, de 1984 à 89, une centaine d'occultations ont été observées dont six ou sept furent positives. La confirmation de l'existence des anneaux et les vues rapprochées par Voyager 2 étaient donc attendues, on le comprend, avec impatience. Douze jours avant la rencontre, on put modifier la trajectoire de la sonde et reprogrammer ses observations, bel exemple de la complémentarité d'observations depuis la Terre et d'observations depuis la sonde : les premières ont permis de découvrir les anneaux et de programmer les observations de la seconde, les secondes nous ont révélé une image complète du système des anneaux et des arcs de Neptune.

En tout cas, le 11 août 1989, cent quarante trois ans après la découverte de Neptune, Voyager 2 a photographié un système complet d'anneaux. Sur certaines photos, on distingue bien l'ombre de la planète sur les anneaux dont la brillance varie beaucoup selon l'angle de phase et selon la dimension des poussières constitutives de l'anneau. Il reste beaucoup à trouver sur les données recueillies pour comprendre comment une structure aussi fine peut perdurer. Sur une photo "un peu ratée" (parce que l'effet de bougé a été mal compensé), on met en évidence des agglomérations de matière. C'est probablement un indice important pour comprendre le confinement et la dynamique des anneaux et des arcs d'anneaux autour de Neptune.

#### T R I T O N

Des photos et des spectres pris de la Terre en 1979 et depuis montraient qu'il y avait des variations de couleur sur ce satellite. On attendait donc de grandes révélations et la nuit durant laquelle Voyager 2 a photographié Triton fut un des grands moments d'émotion durant ce séjour à Pasadena.

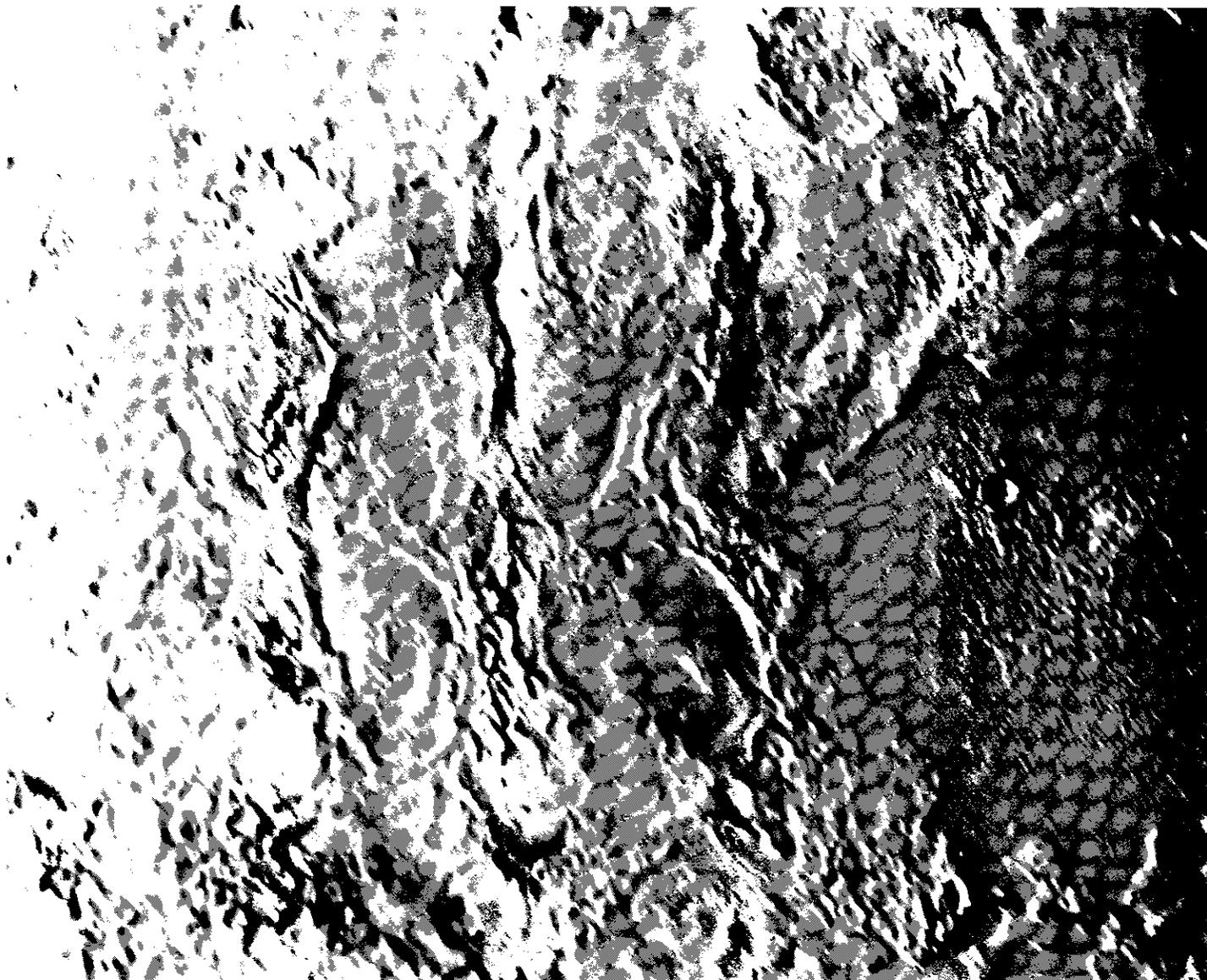


Fig.6 - 27 août 1989 - L'hémisphère nord de Triton

Cette image a été prise à 80 000 kilomètres, le Soleil étant juste à l'horizon de la zone photographiée. les détails du relief sont rendus très visibles. La grande région plate, à droite, montre un cratère isolé qui résulte d'un impact sans doute relativement récent.

Beaucoup de falaises peu élevées sont brillantes quand elles sont éclairées par le Soleil couchant.

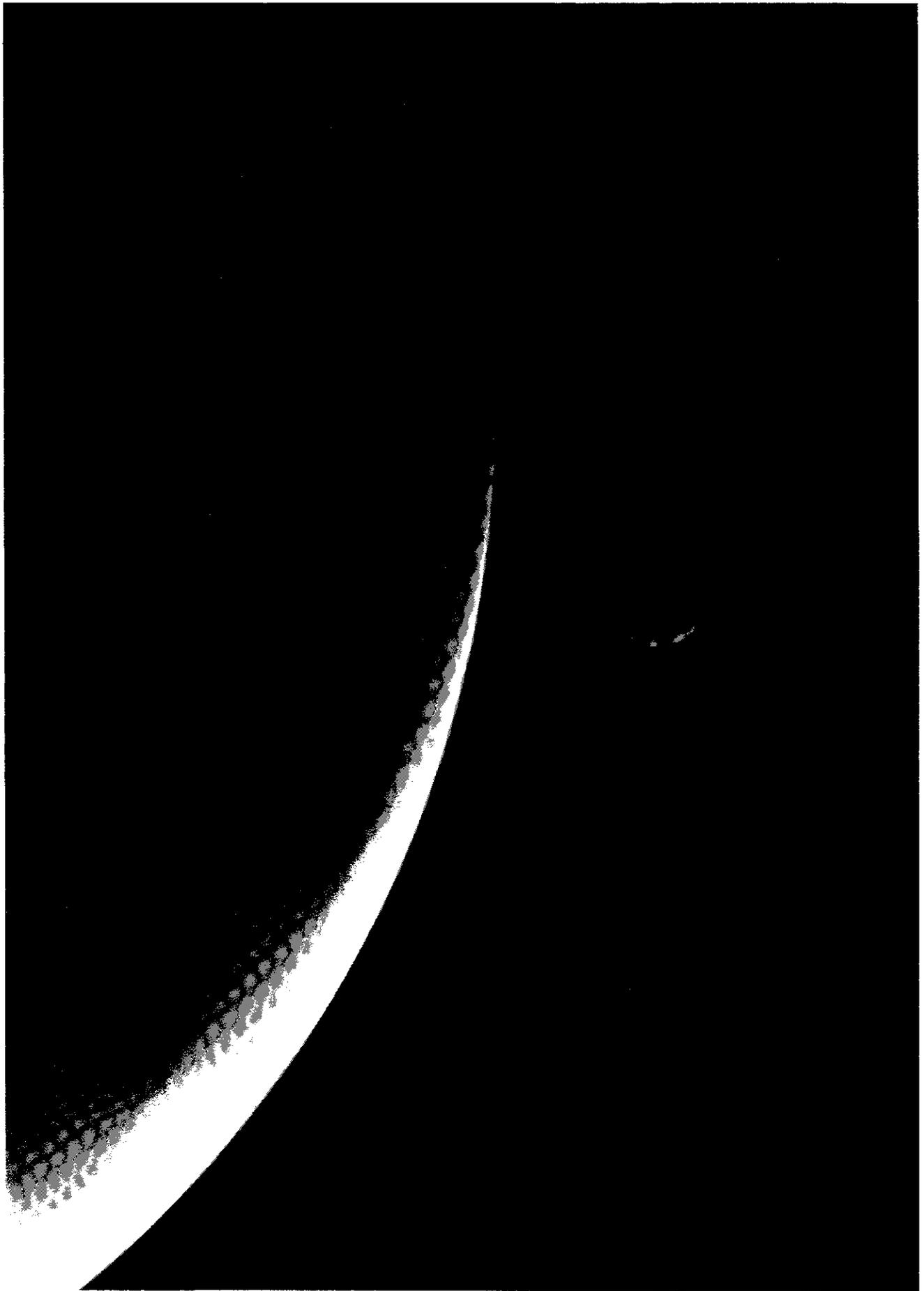


Fig.7 - 29 août 1989 - Adieu planètes !  
Cette vue pleine de nostalgie montre les croissants de Neptune et de Triton envahis par la nuit. Voyager plonge à  $48^\circ$  sur le plan de l'écliptique et va s'éloigner définitivement du monde de nos planètes...

On n'a pas été déçu, des révélations étonnantes, une foule de questions qui se posent et donnent du grain à moudre aux géologues, aux planétologues, pour des années. En vrac, quelques unes de ces données: une atmosphère de méthane et surtout d'azote (le troisième astre du système solaire, après la Terre et Titan, à posséder cette particularité) mais à une pression très faible de l'ordre de dix microbars et à 37 K. Des nuages à huit kilomètres du sol. Un sol peu cratérisé sur au moins plus de la moitié de la surface avec des traces d'une sorte d'activité volcanique, des caldéras ; on a découvert une éjection de matière, une sorte de geyser géant, qui s'élève à huit kilomètres d'altitude pour s'étaler en un nuage horizontal dont on voit l'ombre sur la surface du satellite. Autre particularité : une composition du sol d'aspects très différents sur les hémisphères nord et sud. Malgré l'atmosphère et les nuages, le sol apparaît ; par traitement des images, les techniciens américains ont réalisé un film étonnant qui reconstitue ce qu'on verrait d'un avion survolant Triton.

Par sa composition, par son aspect, par ses dimensions, Triton s'apparente à Pluton. Ce qui pose sans doute un problème d'origine commune.

#### POUR CONCLURE

Une dernière photo prise par Voyager 2 montre la nuit qui envahit Neptune et Triton, la sonde les a dépassés et entreprend sa fuite au delà des confins du système solaire. Ce n'est pas la fin de sa mission, elle aura encore beaucoup à nous apprendre tant qu'elle pourra envoyer des signaux. Pourra-t-elle nous renseigner sur la limite entre le monde planétaire et celui des étoiles ? On devrait pouvoir capter ses signaux jusqu'aux environs de 2015.

En tout cas, depuis son lancement en 1977 et la première récolte en 1979 sur le monde jovien, la réussite de Voyager 2 pendant douze années a été complète...

ANDRE BRAHIC

(rédaction et mise en page Gilbert Walusinski. Notre ami André dit qu'il est beaucoup trop paresseux pour écrire ; il a tout de même pris le temps de corriger ce texte et de choisir les illustrations qui sont toutes d'authentiques documents de la NASA.)