

NEPTUNE

La planète Neptune
Les anneaux de Neptune
Les satellites de Neptune
Iconographie

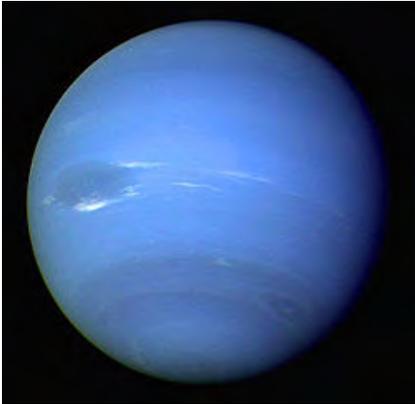


GAP 47 • Olivier Sabbagh • Avril 2015 - Révision Mars 2023

Neptune

I Neptune, la planète

Neptune est la huitième et dernière planète du Système solaire par distance croissante au Soleil. Neptune orbite autour du Soleil à une distance d'environ 30 UA avec une excentricité orbitale moitié moindre que celle de la Terre en bouclant une révolution complète en 164,79 ans. C'est la troisième planète du Système solaire par masse décroissante, elle est 17 fois plus massive que la Terre et 19 fois moins massive que Jupiter, et la quatrième par taille décroissante; Neptune est en effet à la fois un peu plus massive et un peu plus petite qu'Uranus. Neptune et Uranus, toutes les deux géantes de glaces, plus précisément des planètes de type Neptune froid, ont une composition similaire, différente de celle des deux autres planètes géantes, Jupiter et Saturne, qui sont des géantes gazeuses de type Jupiter froid. Comme ces dernières, l'atmosphère de Neptune est principalement constituée d'hydrogène et d'hélium avec des traces d'hydrocarbures et peut-être d'azote, mais contiendrait davantage de « glaces » (au sens astrophysique), c'est-à-dire de composés volatils tels que l'eau, l'ammoniac et le méthane. Ce dernier est d'ailleurs partiellement responsable de la teinte bleue de l'atmosphère de Neptune, bien que l'origine de ce bleu très soutenu, plus soutenu que celui produit par le seul méthane, soit en fait inconnue. Neptune est la seule des huit planètes connues à avoir été découverte par le calcul mathématique plutôt que par l'observation empirique. L'astronome français Alexis Bouvard avait noté des perturbations inexplicables sur l'orbite d'Uranus et conjecturé au début du XIX^e siècle qu'une huitième planète, plus lointaine, pouvait en être la cause. Les astronomes britannique John Couch Adams en 1843 et français Urbain Le Verrier en 1846 calculèrent chacun de leur côté et par des méthodes différentes la position prévisible de cette hypothétique planète, qui fut observée le 23 septembre 1846 par l'astronome allemand Johann Gottfried Galle à 1° de la position alors calculée par Le Verrier, et à 12° de celle calculée par Adams. Le nom de cette huitième planète vient de Neptune le dieu des océans dans la mythologie romaine. Son symbole astronomique ♆ est une version stylisée du trident du dieu Neptune, tandis que son symbole alternatif représente les initiales de Le Verrier.

Neptune ♆	
	
Neptune vue par la sonde Voyager 2 en 1989.	
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	4 503 443 661 km (30,10366151 UA)
Aphélie	4 553 946 490 km (30,44125206 UA)
Périhélie	4 452 940 833 km (29,76607095 UA)
Circonférence orbitale	28,295449561×10 ⁶ km (189,14 UA)
Excentricité	0,00858587
Période de révolution	60 224,9036 j (164 a 323 d 21,7 h)
Période synodique	367,4857 j
Vitesse orbitale moyenne	5,4317 km/s
Vitesse orbitale maximale	5,479 km/s

Vitesse orbitale minimale	5,385 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	1,76917°
Nœud ascendant	131,72169°
Argument du périhélie	273,24966°
Satellites connus	14, notamment Triton.
Anneaux connus	5 principaux.
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	24 764 ± 15 km (3,883 Terres)
Rayon polaire	24 341 ± 30 km (3,829 Terres)
Rayon moyen volumétrique	24 622 km (3,865 Terres)
Aplatissement	0,0171
Périmètre équatorial	155 597 km
Superficie	7,6408×10 ⁸ km ² (14,98 Terres)
Volume	62,526×10 ¹² km ³ (57,74 Terres)
Masse	102,43×10 ²⁴ kg (17,147 Terres)
Masse volumique globale	1 638 kg/m ³
Gravité de surface	11,15 m/s ² (1,14 g)
Vitesse de libération	23,5 km/s
Période de rotation	0,67125 j (16 h 6,6 min)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	9 660 km/h
Inclinaison de l'axe	29,58°
Albédo géométrique visuel	0,41
Albédo de Bond	0,29
Irradiance solaire	1,51 W/m ² (0,001 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	46,6 K (-226,4 °C)
Température de surface :	
Température à 10 kPa :	55 K (-218 °C)
Température à 100 kPa :	72 K (-201 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Masse volumique à 100 kPa	0,45 kg/m ³
Hauteur d'échelle	19,1 à 20,3 km
Masse molaire moyenne	2,53 à 2,69 g/mol
Dihydrogène H₂	80 ± 3,2 %
Hélium He	19 ± 3,2 %
Méthane CH₄	1,5 ± 0,5 %
Deutériure d'hydrogène HD	190 ppm
Ammoniac NH₃	100 ppm
Éthane C₂H₆	2,5 ppm
Acétylène C₂H₂	100 ppb
Histoire	
Découverte par	Urbain Le Verrier (calcul : 31/8/1846) - Johann Gottfried Galle (observation : 23/09/1846) sur les indications d'Urbain Le Verrier

A) Observations et découverte

Neptune est invisible à l'œil nu car sa magnitude apparente ne dépasse jamais 7,7. Les premières observations de Neptune ne sont donc possibles qu'après l'invention du télescope. Neptune a été vue par Galilée en 1613, Jérôme Lalande en 1795 et John Herschel en 1820, mais aucun n'a officiellement reconnu la planète à l'époque. Ces observations ont été très importantes plus tard pour déterminer avec précision l'orbite de Neptune. Neptune semble bien en évidence, même dans les premiers télescopes, ce qui apporte de la crédibilité aux premières observations. Les dessins de Galilée montrent qu'il a observé Neptune le 28 décembre 1612 et à nouveau le 27 janvier 1613. Lors des deux observations, Galilée croit que Neptune est une étoile fixe. Au moment de sa première observation, Neptune était immobile dans le ciel parce qu'elle commençait à ce moment son mouvement rétrograde. Son mouvement a alors été jugé trop léger et sa taille apparente trop petite, pour être considérée comme une planète dans le petit télescope de Galilée. Cependant, en juillet 2009, le physicien David Jamieson de l'université de Melbourne a annoncé que Galilée était probablement conscient qu'il avait découvert quelque chose d'inhabituel à propos de cette « étoile ». Dans un de ses carnets, Galilée a noté le mouvement d'une étoile en arrière-plan (Neptune) le 28 janvier et un point (position de Neptune) que le physicien a trouvé sur un croquis antérieur, tiré de la nuit du 6 janvier, établi dans une encre différente suggérant une recherche systématique parmi ses observations précédentes. En 1847, Sears Cook Walker de l'Observatoire naval des États-Unis, a recherché des documents historiques et il a enquêté sur des observations antérieures possibles de la planète Neptune. Il a constaté que les observations faites par l'équipe de Jérôme Lalande à l'Observatoire de Paris en 1795 étaient en direction de la position de Neptune dans le ciel. Dans les observations du catalogue du 8 et du 10 mai 1795, une étoile a été observée dans la position approximative de Neptune. L'incertitude de la position a été notée par une virgule. Cette notation a également été utilisée pour indiquer une erreur d'observation, ce n'est seulement qu'après avoir examiné les documents originaux de l'observatoire qu'il a été établi avec certitude que l'objet était Neptune et l'erreur de position dans la nuit du 8 et 10 mai était due à celle de la planète en mouvement dans le ciel. La découverte, en 1795, de ces dossiers sur la position de Neptune a permis de calculer son orbite de façon plus précise. John Herschel a découvert Neptune en 1830 par hasard tout comme son père William Herschel a découvert Uranus en 1781. Dans une lettre de 1846 adressée à Friedrich Georg Wilhelm von Struve, Herschel note qu'il a observé Neptune lors d'un balayage du ciel le 14 juillet 1830. Même si son télescope était assez puissant pour apercevoir Neptune en un petit disque bleu, permettant ainsi de la distinguer d'une étoile, Herschel ne la reconnaît pas à l'époque et pense que c'est une étoile.

1) Recherche d'une planète transuraniennne



Urbain Le Verrier



Johann Gottfried Galle



John Couch Adams

Lors d'une réunion de la British Association for the Advancement of Science, George Biddell Airy rapporta que les tables de Bouvard étaient erronées de plus d'une demi minute d'arc. Cet écart inquiétant devait absolument être résolu. Deux hypothèses s'opposèrent, celle proposée par Bouvard lui-même de l'existence d'une autre planète encore inconnue, et qui pourrait affecter les mouvements d'Uranus, ou celle d'une remise en cause de la loi universelle de la gravitation, proposée par Airy. Selon Airy, la loi de gravitation perdrait de sa validité au fur et à mesure que l'on s'éloigne du Soleil. Cependant, dès 1838, la plupart des astronomes étaient d'accord sur l'existence d'une nouvelle planète trans-uraniennne pour expliquer les perturbations du mouvement d'Uranus. Étudiant à Cambridge, John Couch Adams tomba le 26 juin 1841 sur le rapport d'Airy concernant le problème de l'orbite d'Uranus et fut intéressé par la question. Ne pouvant se pencher sur le problème immédiatement, il le nota sur un bout de papier en guise de pense-bête afin de le reprendre une fois ses études finies. En 1843, Adams se mit au travail. Il s'appuya sur la loi de Titius-Bode pour obtenir une première approximation de la distance de cette nouvelle planète au Soleil. Dans la mesure où la plupart des planètes avaient une orbite faiblement excentrique, il

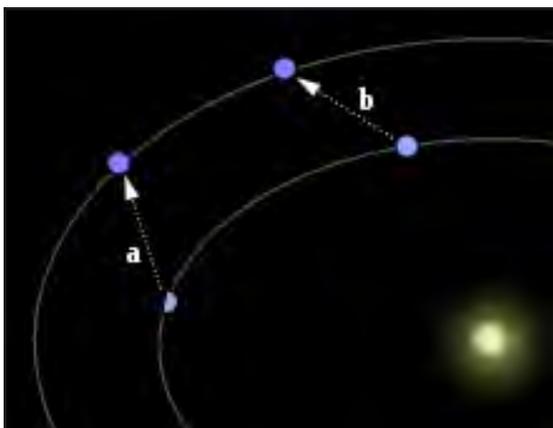
supposa également que son orbite était circulaire, afin de simplifier les calculs. Il termina ses travaux deux ans plus tard en ayant déterminé la position de Neptune avec une erreur de moins de deux degrés. Il ne lui manquait plus qu'à les confirmer par observation. Se tournant vers James Challis, directeur de l'observatoire de Cambridge, celui-ci le renvoya à l'astronome royal Sir George Biddell Airy. Adams transmet ses résultats à Airy par courrier le 21 octobre 1845, et obtint une réponse le 5 du mois suivant. Airy émit des doutes sur les travaux de son jeune collègue. Découragé par le comportement d'Airy, Adams ne lui répondra qu'un an après. Au même moment en France, François Arago, directeur de l'observatoire de Paris, encourage le mathématicien Urbain Le Verrier, spécialisé en mécanique céleste, à déterminer les caractéristiques de cette huitième planète dont l'influence gravitationnelle se faisait sentir sur la trajectoire d'Uranus. Le Verrier travaillait alors sur les comètes de courte période. Il commence ses travaux sur Uranus en 1845, ignorant totalement ceux d'Adams, et publie ses premiers résultats le 10 novembre 1845 dans *Premier Mémoire sur la Théorie d'Uranus*, puis dans *Recherche sur les Mouvements d'Uranus* le 1^{er} juin 1846. Airy, remarquant les travaux de l'astronome français, fait le parallèle avec ceux d'Adams et entre en contact avec Le Verrier. Celui-ci lui demande à son tour d'effectuer les recherches de la planète à l'aide des calculs qu'il vient de publier, mais Airy refuse. Finalement, sous la pression de George Peacock, Airy demande à Challis le 12 juillet 1846 d'entreprendre la recherche du nouvel astre au télescope. Adams, informé par le directeur de Cambridge, fournit de nouvelles coordonnées à Challis en précisant que l'objet serait de magnitude 9, mais Airy proposa à Challis d'observer une large portion du ciel et jusqu'à magnitude 11. Cette méthode demandait à Challis beaucoup plus de temps d'observation, d'autant plus qu'il ne disposait pas de cartes fiables de la zone à observer. Challis commença ses recherches le 1^{er} août 1846.

2) Découverte de Neptune

La **découverte de Neptune** est la première découverte d'un objet céleste réalisée grâce au calcul mathématique avant de l'être par l'observation. Longtemps objet de débats quant à sa paternité, elle est aujourd'hui attribuée sans conteste à l'astronome français Urbain Le Verrier, qui a prédit mathématiquement l'existence et la position de la planète. Les résultats de Le Verrier, publiés fin août 1846 après deux ans de calculs à partir de la trajectoire et des caractéristiques d'Uranus, conduisent l'astronome allemand Johann Gottfried Galle, assisté par son compatriote Heinrich Louis d'Arrest, à observer dans la nuit du 23 au 24 septembre 1846 à l'Observatoire de Berlin la planète à moins d'un degré de la position théorique déterminée par Le Verrier.

Rétrospectivement, on sait que Neptune avait été observée antérieurement par plusieurs astronomes parmi lesquels Galilée, Jérôme Lalande et John Herschel, mais ces derniers n'avaient pas détecté sa nature planétaire. La découverte mathématique de Neptune est considérée comme une confirmation supplémentaire de l'efficacité de la théorie de la gravitation de Newton. Comme le dit François Arago, « M. Le Verrier a aperçu le nouvel astre sans avoir besoin de jeter un seul regard vers le ciel; il l'a vu *au bout de sa plume* ». La paternité de la découverte a suscité une certaine controverse entre la France et l'Angleterre, où John Couch Adams a effectué des calculs antérieurs à Le Verrier sur la nature du « corps perturbateur » de l'orbite d'Uranus. La découverte de Neptune a aussi conduit à la découverte de sa lune Triton dix-sept jours plus tard par William Lassell.

Irrégularités dans l'orbite d'Uranus



En position (a), la planète extérieure (Neptune) est « en avant » par rapport à la planète intérieure (Uranus), ce qui « tire en avant » et donc accélère la planète intérieure : cette dernière sera donc un peu en avance sur son mouvement non perturbé (par symétrie, la planète extérieure, que l'on cherche, est pour sa part « tirée en arrière » de façon symétrique). À l'inverse, en (b), la planète extérieure a été « doublée » par la planète intérieure, et la première se retrouve donc « en arrière » de la seconde. Cette dernière est alors « tirée en arrière » et freinée, et est donc « en retard » sur son mouvement non perturbé. C'est l'avance et le retard d'Uranus sur sa position non perturbée qui a permis de découvrir Neptune.

En 1781, Anders Johan Lexell est le premier à remarquer des irrégularités en calculant l'orbite d'Uranus. Il suggère qu'il pourrait y avoir d'autres planètes dans le Système solaire qui perturbent l'orbite de cette planète, considérant que le Système solaire s'étend aussi loin que 100 unités astronomiques. En 1821, Alexis Bouvard publie des tables astronomiques de l'orbite d'Uranus, faisant des prédictions de positions futures basées sur les lois du mouvement de Newton et sur la gravitation. Des observations ultérieures révèlent des écarts importants dans les tables, amenant Bouvard à émettre l'hypothèse de certains corps perturbants. Ces irrégularités, ou « résidus », à la fois dans la longitude écliptique et à la distance au Soleil de la planète, pourraient s'expliquer par un certain nombre

d'hypothèses. L'effet de la gravité du Soleil, à une si grande distance, pourrait différer de la description de Newton. Les écarts pourraient également tout simplement être des erreurs d'observation. Finalement, Uranus pouvait être perturbée par une huitième planète encore inconnue. L'idée de l'existence d'une planète qui troublerait le mouvement d'Uranus était donc dans l'air bien avant l'intervention d'Adams et de Le Verrier, et il ne faut donc pas s'étonner que plusieurs astronomes aient essayé comme lui de prédire sa position par le calcul. D'ailleurs, dès avant 1840, Friedrich Wilhelm Bessel, qui avait insisté sur l'existence possible de « masses troublantes », avait chargé son élève Friedrich Wilhelm Flemming (1812-1840) de rassembler et de réduire les observations d'Uranus pour les comparer aux tables. Sans résultat, probablement à cause de la longue maladie du premier et la disparition prématurée du second.

John Couch Adams apprend les irrégularités de l'orbite d'Uranus alors qu'il est étudiant. Il est alors convaincu que l'hypothèse de la « perturbation » est bonne. Adams décide alors de calculer la masse, la position et l'orbite du corps perturbant en utilisant rien de plus que la loi de la gravitation universelle de Newton. En termes modernes, le problème est un problème inverse, i.e. une tentative de déduire les paramètres d'un modèle mathématique à partir des données observées. Bien que le problème est simple pour les outils des mathématiques, à l'époque, il demande beaucoup de calculs laborieux à la main.

Adams commence par supposer une position pour le corps hypothétique en utilisant la loi de Bode. Il calcule ensuite la trajectoire d'Uranus en utilisant la position supposée du corps troublant et calcule également la différence entre sa trajectoire calculée et les observations (i.e., en termes modernes, les résidus). Il ajuste ensuite les caractéristiques du corps troublant de la façon suggérée pour les résidus et répète le processus, par une approche similaire à celle de la régression.

Le 13 février 1844, James Challis, directeur de l'Observatoire de Cambridge, demande, pour Adams, des données sur la position d'Uranus à l'astronome royal George Biddell Airy de l'Observatoire royal de Greenwich. Par la suite, Adams fait des retouches au moins jusqu'au 18 septembre 1845. François Arago, qui est responsable de l'Observatoire de Paris, souhaite évidemment que le problème d'Uranus y soit traité. Alexis Bouvard mort, Arago ne voit personne à l'Observatoire qui soit capable d'aborder un problème aussi difficile. Au cours de l'été 1845, il demande à un jeune astronome extérieur à l'Observatoire, Urbain J.J. Le Verrier, de s'y attaquer. Peu après, le 10 novembre 1845, Le Verrier présente un mémoire sur Uranus à l'Académie des sciences de Paris, montrant que la théorie préexistante ne tenait pas compte de son mouvement. Au courant des travaux d'Adams, il tente une enquête similaire et calcule la position du corps perturbateur proposé. Il présente ses résultats le 1^{er} juin 1846 dans un second mémoire présenté à une réunion publique de l'Académie.

3) Course à la découverte

Après avoir reçu en Angleterre les nouvelles de la prédiction de juin de Le Verrier, George Airy a immédiatement reconnu la similitude des solutions de Le Verrier et Adams. Jusqu'à ce moment, le travail d'Adams avait été un peu plus qu'une curiosité, mais une confirmation indépendante de Le Verrier stimulait Airy d'organiser une tentative secrète de trouver la planète. En juillet 1846, lors d'une réunion du Conseil des visiteurs de l'observatoire de Greenwich, avec Challis et Sir John Herschel présents, Airy suggère que Challis cherche la planète d'urgence avec le télescope à monture équatoriale de 11,25 pouces de Cambridge. La recherche débute le 29 juillet. Adams continue à travailler sur le problème, en fournissant à l'équipe britannique six solutions en 1845 et 1846 qui amènent Challis à chercher dans la mauvaise partie du ciel. Ce n'est qu'après que la découverte de Neptune ait été annoncé à Paris et à Berlin qu'il devenu évident que Neptune avait été observée à Cambridge le 8 août et le 12 août. Cependant, puisque Challis n'avait pas une carte d'étoiles à jour, elle n'a pas été reconnue comme une planète. Le 31 août, Le Verrier présente un troisième mémoire à l'Académie des sciences, donnant maintenant la masse et l'orbite du nouveau corps. Peu après, il écrit à plusieurs astronomes étrangers qu'il sait disposer d'instruments puissants et surtout de bonnes cartes du Ciel qui n'existent pas non plus à l'Observatoire de Paris. D'ailleurs, malgré les efforts d'Arago, on ne découvrira pas la planète à Paris. Johann Gottfried Galle de l'Observatoire de Berlin reçoit la lettre de Le Verrier le 23 septembre et se met immédiatement au travail en observant le soir même la région suggérée par Le Verrier avec son télescope de 23 centimètres. L'étudiant de Galle, Heinrich Louis d'Arrest, suggère qu'une carte du ciel récemment dessinée de l'emplacement du ciel suggéré par Le Verrier pourrait être comparée avec les nouvelles observations afin de chercher la caractéristique de déplacement d'une planète par opposition à une étoile fixe. Galle passe au peigne fin toutes les étoiles de la région, pendant que Louis d'Arrest vérifie si l'astre observé est répertorié sur les cartes stellaires récentes de Bremiker.

Neptune est découverte peu après minuit, après moins d'une heure de recherche et à moins de 1 degré de la position que Le Verrier avait prédite. Il attend quelques heures pour vérifier si l'astre a bien bougé, avant de confirmer qu'il s'agit bien de la planète recherchée. Après deux nuits supplémentaires d'observations dans lesquelles sa position et son mouvement sont vérifiés, Galle répond à Le Verrier : « la planète dont le lieu que vous avez [calculé] *existe vraiment* » (mis en évidence dans l'original). Outre-Manche, la déception est grande. Challis apprend la découverte

en lisant le *Times*. En revoyant ses notes, il découvre même qu'il a observé Neptune deux fois depuis le 1^{er} août. Une vive polémique s'ensuit jusque dans la presse. Les Britanniques ressortent les papiers d'Adams s'écriant que la découverte leur revient. À l'annonce de la découverte, Herschel, Challis et Richard Sheepshanks, ministre des affaires étrangères à la *Royal Astronomical Society*, annoncent qu'Adams avait déjà calculé la position et les caractéristiques de la planète. De leur côté, les Français réfutent en rappelant que seule une publication officielle peut valider la découverte, et refusent de pied ferme que le nom d'Adams figure à côté de celui de Le Verrier dans les livres d'histoire. En juin 1847, Adams et Le Verrier se sont rencontrés pour la première fois à la British Association for the Advancement of Science et ont entretenu par la suite une relation amicale. Airy a publié plus tard un compte-rendu de la situation, mais cache dans ce dernier que les calculs d'Adams étaient incomplets. Lors de nouveaux calculs sur les caractéristiques orbitales de Neptune, on s'aperçut que ceux de Le Verrier et Adams étaient faux, bien que tous deux aient annoncé la position de la planète non loin de sa position réelle. Le premier avait déterminé un rayon de 36,154 ua et une excentricité de 0,107 tandis que le second avait trouvé un rayon de 37,25 ua. Le rayon réel de l'orbite de Neptune est 30,1 ua et son excentricité inférieure à 0,009. Par ailleurs, des historiens ont trouvé des éléments qui tendent à montrer que les solutions d'Adams ne convergeaient pas mais variaient par plus de 35 degrés de longitude.

Paternité de la découverte

Une vive controverse s'est développée en France et en Angleterre à propos des mérites accordés aux deux astronomes. Airy a été fortement critiqué en Angleterre, particulièrement par le mathématicien James Whitbread, pour ne pas avoir, avec Challis, joué correctement leur rôle de mentors et d'avoir soutenu le talent d'Adams, jeune homme timide et réticent à publier des résultats pouvant ruiner sa carrière. Airy a défendu son comportement, en affirmant que la recherche d'une planète n'était pas le rôle de l'Observatoire royal de Greenwich. Dans l'ensemble, Airy a été défendu par ses biographes. Adams affirme cependant n'avoir ressenti aucune déception envers Challis et Airy. Il reconnaît avoir échoué lui-même à convaincre ses pairs de la valeur de ses travaux : « Je ne pouvais pas espérer que les astronomes d'expérience, qui étaient déjà occupés par d'importants travaux, pourraient avoir autant confiance en mes résultats que moi-même ». En France, la défense d'un Anglais inconnu a été ressentie comme portant atteinte au crédit accordé aux réalisations d'Urbain Le Verrier. L'année de la découverte, la *Royal Society* décerne la médaille Copley au scientifique pour ses réalisations, sans mentionner Adams. Malgré cela, la réputation académique d'Adams était déjà assurée.

Certains astronomes britanniques soulignent que les deux astronomes ont résolu indépendamment le problème d'Uranus et attribuent une importance égale à chacun. Cependant, Adams lui-même a reconnu publiquement que Le Verrier l'avait devancé (en n'oubliant pas de mentionner le rôle de Galle) dans un document qu'il a donné à la Société Royale d'astronomie en novembre 1846 : « Je souligne ces dates simplement pour montrer que mes résultats ont été obtenus de façon indépendante, et préalablement à la publication de ceux de M. Le Verrier, et non pas avec l'intention de nuire à ses justes revendications par rapport aux honneurs de la découverte, car il n'y a pas de doute que ses recherches ont été rendues publiques en premier et ont conduit à la découverte de la planète par le D. Galle. Les faits énoncés ci-dessus n'enlèvent rien au crédit de M. Le Verrier. »

Des critiques ont paru peu de temps après disant qu'Adams et Le Verrier avait été trop optimistes dans la précision des calculs qu'ils ont fait et qu'ils avaient surestimés la distance de la planète au Soleil. Cette critique a été analysée en détail par André Danjon en 1946, qui a illustré, à l'aide d'un diagramme, que l'hypothèse des orbites calculées à la fois par Le Verrier et Adams sont très différentes de la vraie orbite de Neptune. La nouvelle planète, d'abord appelé «*Le Verrier*» par Arago, a reçu, après consensus, le nom neutre de Neptune.

Le Verrier communique ses résultats définitifs à l'Académie des sciences le 31 août 1846. Devant le peu d'enthousiasme des astronomes français, il décide de faire alors appel à une de ses connaissances : l'astronome prussien Johann Gottfried Galle de l'observatoire de Berlin. Galle reçoit la position de Neptune par courrier le 23 septembre 1846. Le soir même, il pointe son télescope de 23 cm vers l'endroit indiqué et passe au peigne fin toutes les étoiles de la région, pendant que son assistant Heinrich Louis d'Arrest vérifie si l'astre observé est répertorié sur les cartes stellaires récentes de Bremiker. Vers minuit, Galle trouve Neptune, à moins d'un degré de l'emplacement calculé. Il attend quelques heures pour vérifier si l'astre a bien bougé, avant de confirmer qu'il s'agit bien de la planète recherchée. Outre-Manche, la déception est grande. Challis apprend la découverte en lisant le *Times*. En revoyant ses notes, il découvre même qu'il a observé Neptune deux fois depuis le 1^{er} août. Une vive polémique s'ensuit jusque dans la presse. Les Britanniques ressortent les papiers d'Adams s'écriant que la découverte leur revient. De leur côté, les Français réfutent en rappelant que seule une publication officielle peut valider la découverte, et refusent de pied ferme que le nom d'Adams figure à côté de celui de Le Verrier dans les livres d'histoire. En juin 1847, Adams et Le Verrier se sont rencontrés pour la première fois à la British Association for the Advancement of Science et ont entretenu par la suite une relation amicale. Lors de nouveaux calculs sur les caractéristiques orbitales de Neptune, on s'aperçut que ceux de Le Verrier et Adams étaient faux, bien que tous deux aient annoncé la position de la planète non loin de sa position réelle. Le premier avait déterminé un rayon de

36,154 ua et une excentricité de 0,107 tandis que le second avait trouvé un rayon de 37,25 ua. Le rayon réel de l'orbite de Neptune est 30,1 ua et son excentricité inférieure à 0,009. Par ailleurs, des historiens ont trouvé des éléments qui tendent à montrer que les solutions d'Adams ne convergeaient pas mais variaient par plus de 35 degrés de longitude.

Nom de la nouvelle planète



Neptune le dieu des mers

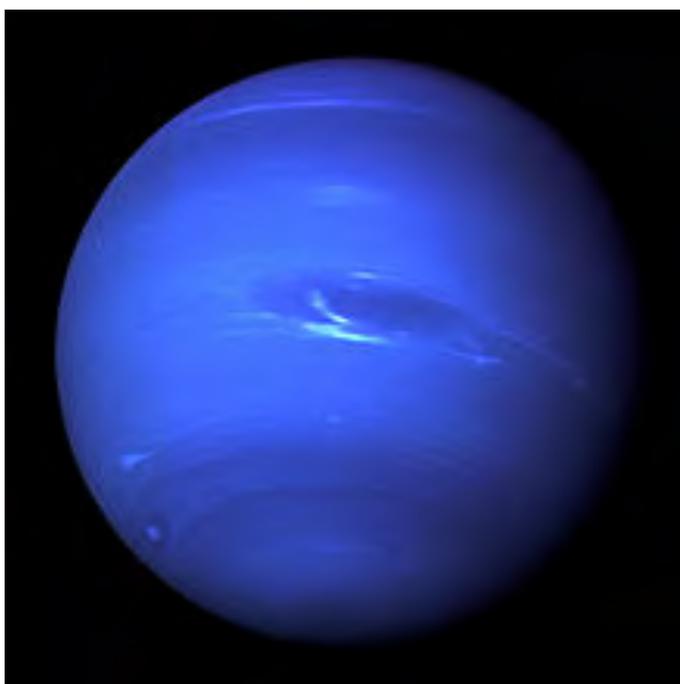
Peu de temps après sa découverte, Neptune fut appelée simplement « la planète extérieure à Uranus » ou comme « planète Le Verrier ». La première suggestion pour un nom venu de Galle, qui a proposé le nom de Janus, du dieu romain des commencements et des fins, des choix et des portes. En Angleterre, Challis mettait en avant le nom d'Océan, un Titan, fils d'Ouranos (équivalent grec d'Uranus). Revendiquant le droit de nommer sa découverte, Le Verrier a rapidement proposé le nom Neptune pour cette nouvelle planète, tout en déclarant faussement que cela avait été officiellement approuvé par le Bureau des longitudes. En octobre, il a cherché à nommer la planète Le Verrier, en son nom, ayant le soutien fidèle du directeur de l'observatoire, François Arago. Cette suggestion a rencontré une vive résistance hors de France. Wilhelm Struve s'est prononcé en faveur du nom de Neptune, le 29 décembre 1846, à l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg. Peu de temps après, Neptune est devenu le nom internationalement accepté. Dans la mythologie romaine, Neptune était le dieu de la mer. La demande pour un nom mythologique semblait être en harmonie avec la nomenclature des autres planètes, qui toutes, à l'exception de la Terre, ont été nommées d'un nom de la mythologie grecque et romaine. La plupart des langues d'aujourd'hui, même dans les pays qui n'ont pas de lien direct avec la culture gréco-romaine, utilisent une variante du nom « Neptune » pour la planète. En chinois, japonais et coréen, le nom de la planète a été traduit littéralement comme « étoile du roi de la mer », puisque Neptune était le dieu de la mer. En grec moderne, cependant, la planète retient son ancien nom de Poséidon (Ποσειδώνας: Poseidonas), l'homologue grec de Neptune.

4) Après la découverte

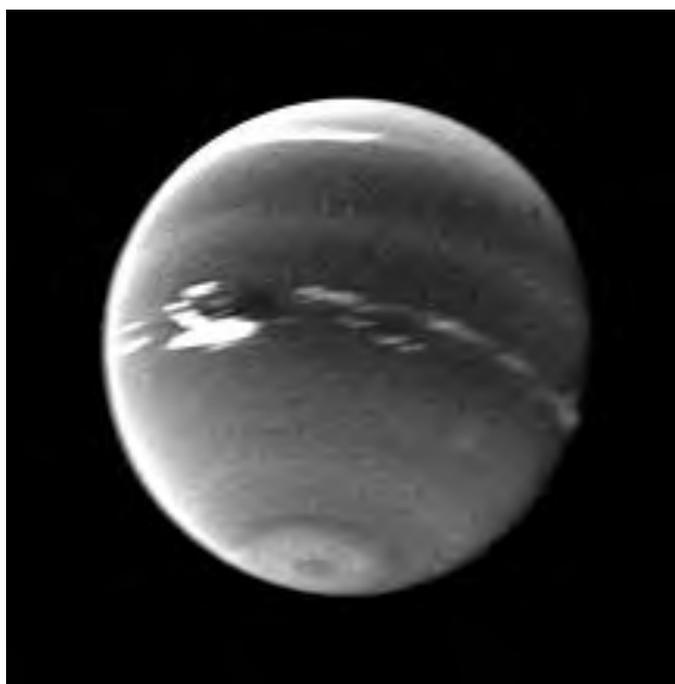
Neptune est la seule des huit planètes connues à avoir été découverte par le calcul mathématique plutôt que par l'observation empirique. Contrairement aux sept autres planètes, Neptune n'est jamais visible à l'œil nu : sa magnitude apparente de 8,0 en fait un astre environ quatre fois moins brillant que les plus pâles étoiles visibles à l'œil nu, dont la magnitude apparente ne dépasse pas 6,5. Elle n'apparaît comme un disque bleu-vert qu'à travers un télescope. Durant le XIX^e siècle et le début du XX^e siècle, les astronomes pensaient que Neptune était, avec Uranus, une planète tellurique. En 1909, les scientifiques crurent avoir observé, dans le spectre de Neptune, la bande verte caractéristique d'une présence de la chlorophylle, et l'hypothèse de la vie végétale sur cette planète fut émise. On s'aperçut quelques années plus tard que cette bande provenait de l'emploi de plaques orthochromatiques et n'avait pas d'origine planétaire. À la fin du XIX^e siècle, il a été suggéré que les irrégularités observées dans le mouvement

d'Uranus et de Neptune découlent de la présence d'une autre planète ultra-périphérique. Après des recherches approfondies, Pluton a été découvert le 18 février 1930 au point de coordonnées fournis par les calculs de William Henry Pickering et Percival Lowell pour la Planète X. Cependant, la nouvelle planète était trop loin pour générer les irrégularités observées dans le mouvement d'Uranus, tandis que celles observées sur Neptune découlaient d'une erreur dans l'estimation de la masse de la planète (qui a été identifiée avec la Mission de Voyager 2) et qui était responsable, entre autres, des irrégularités. La découverte de Pluton est donc plutôt fortuite. En raison de sa grande distance, la connaissance de Neptune était restée faible au moins jusqu'au milieu des années 1900, quand Gerard Kuiper découvrit sa deuxième lune Néréide. Dans les années 1970 et 1980, on a accumulé des indices sur la présence probable d'anneaux ou au moins de fragments autour de Neptune. En 1981, Harold Reitsema a révélé son troisième satellite Larissa.

Survol par *Voyager 2*



Neptune par Voyager 2

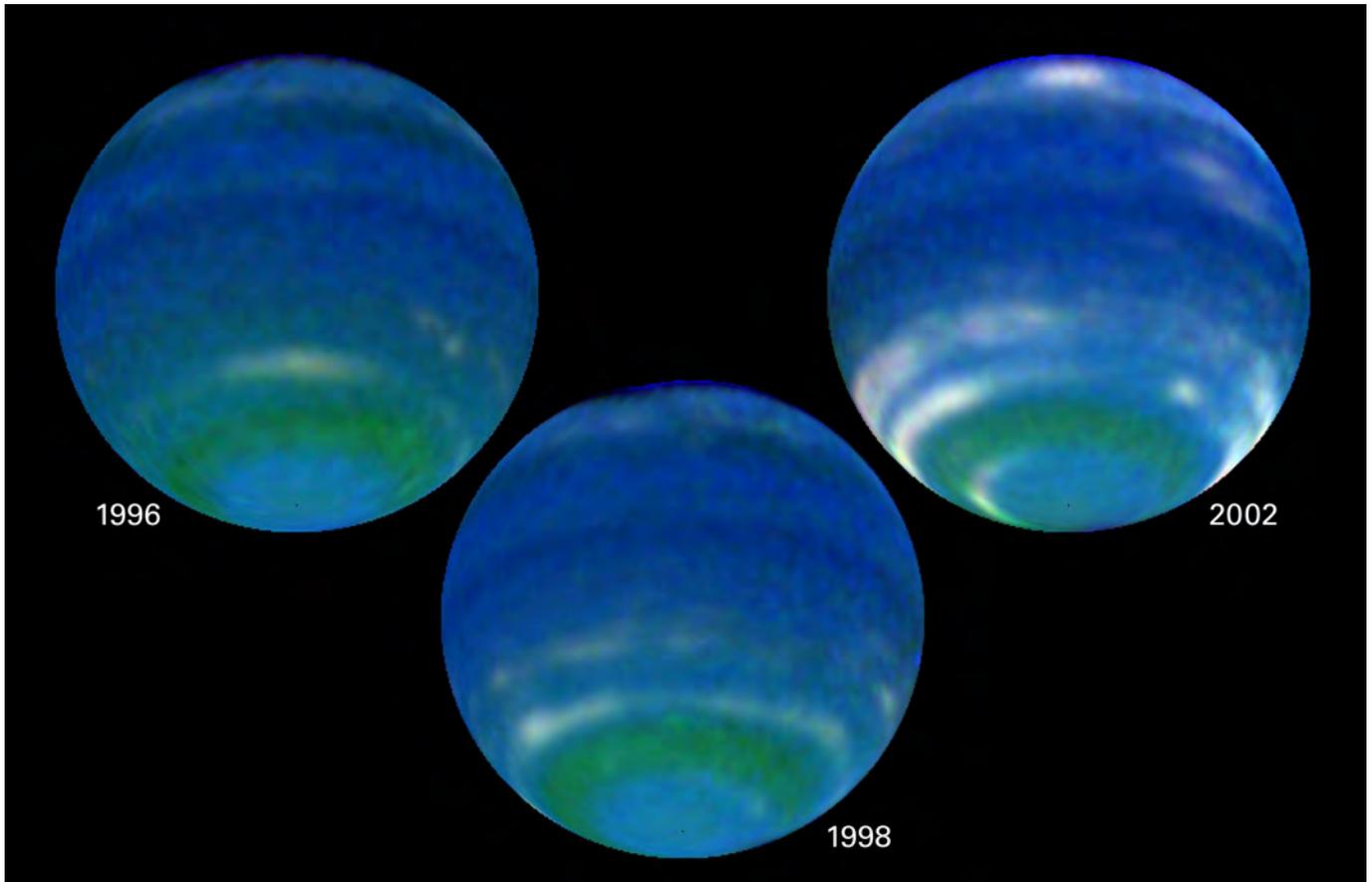


Une des premières photos de Neptune prise par la sonde

Voyager 2 est la première sonde spatiale, et à ce jour la seule, à avoir survolé la planète géante gazeuse Neptune (environ 50 000 km de diamètre). La trajectoire à travers le système planétaire de Neptune est mise au point une fois le survol d'Uranus et de ses lunes achevé. Comme il doit s'agir du dernier passage de Voyager 2 près d'une planète, il n'existe pas de contraintes sur la manière de sortir du système planétaire et plusieurs choix sont possibles : l'équipe sur Terre opte pour un passage à faible distance du pôle nord de Neptune ce qui permettra d'utiliser l'assistance gravitationnelle de la planète pour faire plonger la sonde sous l'écliptique pour un survol rapproché de Triton, la principale lune de Neptune. L'éloignement de Neptune diminue encore le débit théorique permis par la liaison radio. Aussi, plusieurs mesures sont prises dans les années qui précèdent le survol pour renforcer le réseau d'antennes à Terre, notamment l'accroissement de la taille des antennes de réception existantes, la mise en service d'une nouvelle antenne à Usuda au Japon et le recours au Very Large Array au Nouveau-Mexique. Les premières observations sont effectuées à partir de mars 1989, soit 90 jours avant le passage au plus près de Neptune et près de 3 ans après le survol d'Uranus. Elles permettent de découvrir les anneaux de Neptune, dont l'existence n'avait jusque-là jamais été prouvée : ils sont composés de particules très fines qui ne permettent pas leur observation depuis la Terre. Un champ magnétique nettement plus faible que celui d'Uranus est détecté et mesuré. Au cours de la traversée du système neptunien, 9 nouvelles lunes, de petite taille, sont découvertes (une dixième sera découverte plus tard sur des photos prises par la sonde). Compte tenu de l'éloignement de Voyager 2, il fut difficile d'envoyer à temps de nouvelles instructions pour l'observation de ces nouveaux corps célestes. Seule Protée (400 km de diamètre) fut découverte suffisamment tôt pour programmer des observations détaillées. Le survol de Neptune a lieu le 25 août 1989 : Voyager 2 passe à 29 240 km de la planète. L'atmosphère de Neptune est analysée. Malgré le peu d'énergie reçue du Soleil du fait de son éloignement (3 % de ce que reçoit Jupiter), une dynamique atmosphérique est observée avec des manifestations comme la « Grande Tache Sombre » et des nuages. Des vents soufflant à 2 000 km/h sont mesurés. L'étude du champ magnétique permet de déterminer que la durée d'une rotation est de 16,11 heures. Voyager 2 passe à 39 790 km de Triton et peut recueillir des données très précises sur cette lune. La communauté scientifique estimait à l'époque que son diamètre était compris entre 3 800 et 5 000 km; la sonde permet de ramener ce chiffre à 2 760 km. Très peu de cratères sont observés, ce qui est

expliqué par le volcanisme dont des manifestations sous forme de traces laissées par des geysers sont observées au pôle. Une atmosphère ténue (pression de 10 à 14 millibars soit 1/70000 de celle de la Terre), résultant sans doute de cette activité, est détectée par Voyager 2. La température de la surface mesurée, 38 kelvins, est la plus froide jamais détectée sur un corps céleste du Système solaire.

Après Voyager



Photos prises par Hubble entre 1996 et 2002

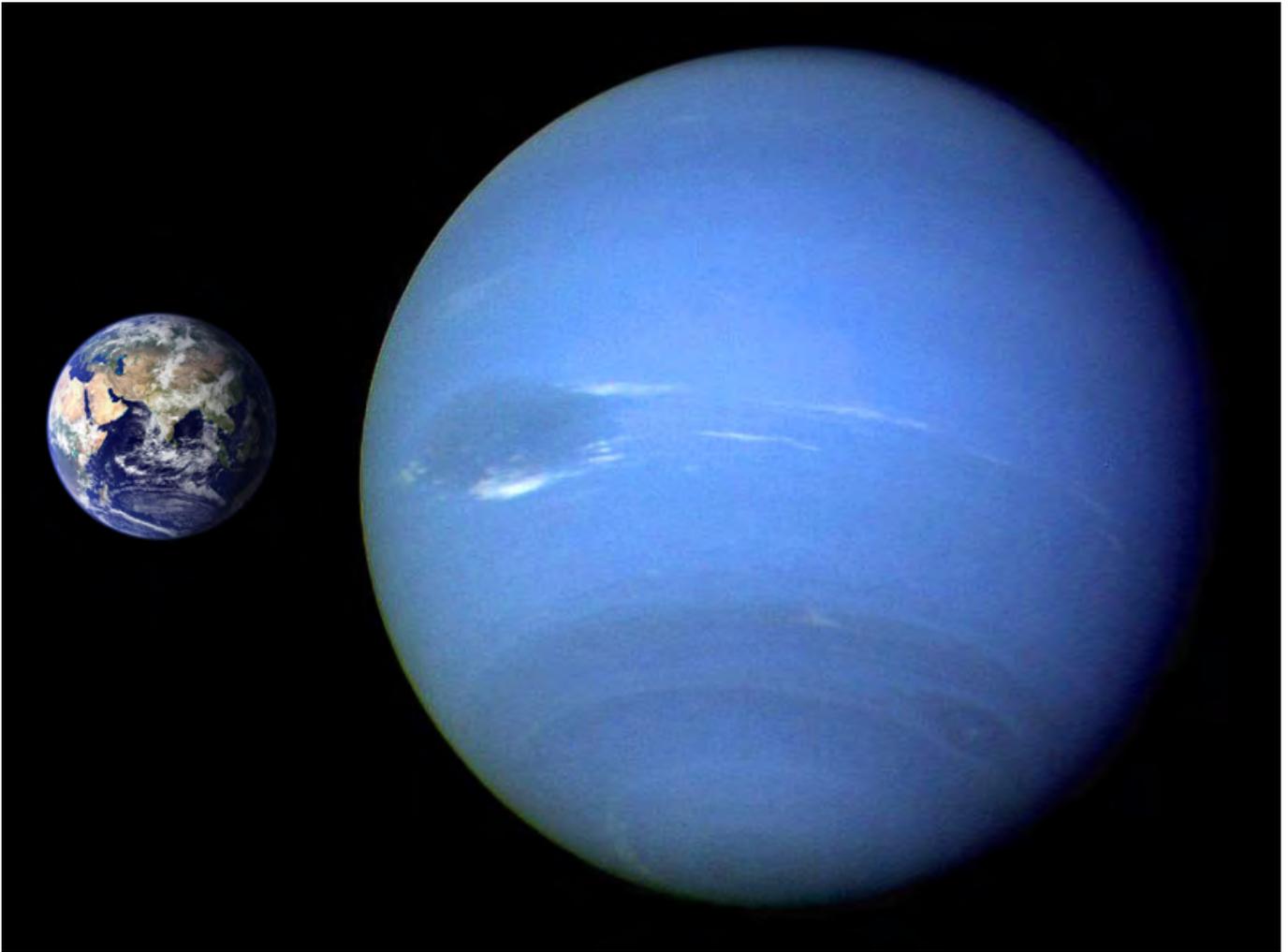
Trois images furent prises le 10 octobre, le 18 octobre et le 2 novembre 1994, lorsque Neptune était 4.5 milliards de kilomètres de la Terre par le télescope spatial Hubble. S'appuyant sur les découvertes initiales de Voyager, Hubble a révélé que Neptune a une atmosphère remarquablement dynamique qui change en quelques jours. Durant cette prise, la grande tache sombre avait complètement disparu, indiquant aux astronomes qu'elle avait pu être recouverte ou qu'elle avait disparu. La persistance des nuages l'accompagnant prouve que certaines taches anciennes peuvent subsister sous la forme de cyclones. Toutefois, une tache presque identique est apparue dans l'hémisphère nord de Neptune. Cette nouvelle tache, appelée la Grande tache sombre du Nord (NGDS), est restée visible pendant plusieurs années. Halimède, Sao, Laomédie et Néso (S/2002 N 1 à 4) furent, comme leur désignation temporaire l'indique, découverts lors du même programme d'observation en 2002. Psamatée (S/2003 N 1), le dernier satellite découvert, le fut en 2003. Avec une période orbitale de presque 165 ans, Neptune est retournée le 12 juillet 2011 au point où Galle l'avait observée.

Statut

Depuis sa découverte en 1846 jusqu'à la découverte de Pluton en 1930, Neptune était la planète la plus éloignée connue. Avec la découverte de Pluton, Neptune est devenu l'avant-dernière planète, sauf pour une période de 20 ans entre 1979 et 1999, lorsque l'orbite elliptique de Pluton était plus proche du Soleil que Neptune. La découverte de la ceinture de Kuiper en 1992 a entraîné de nombreux astronomes à débattre de la question de Pluton. Il s'agissait de savoir si Pluton devait être considérée comme une planète à part entière ou comme un objet, notable, de la ceinture de Kuiper. En 2006, l'Union astronomique internationale a défini le mot « planète » pour la première fois. Le reclassement de Pluton comme « planète naine » a fait de Neptune encore une fois la dernière planète du système solaire.

B) Caractéristiques physiques

1) Masse et diamètre



Comparaison de la taille de Neptune et de la Terre

Avec une masse de $1,0243 \times 10^{26}$ kg, Neptune est un corps intermédiaire entre la Terre et les géantes gazeuses de grande taille comme Jupiter ou Saturne. Sa masse est 17 fois plus importante que celle de la Terre, mais elle correspond à un 19^e de celle de Jupiter. Le rayon équatorial de la planète est de 24 764 km et est environ quatre fois plus grand que celui de la Terre. Neptune a la particularité d'être plus petite qu'Uranus (49 528 km pour Neptune contre 51 118 km pour Uranus) mais elle est plus massive que cette dernière (Uranus possède une masse de $86,810 \times 10^{26}$ kg). Neptune et Uranus sont souvent considérées comme une sous-classe de géantes, appelées « géantes de glaces », en raison de leur taille plus petite et de la plus forte concentration de substances volatiles par rapport à Jupiter et Saturne. Dans la recherche de planètes extrasolaires, Neptune a été utilisée comme un terme de comparaison : les planètes découvertes avec une masse similaire ont en effet été qualifiées de Neptune chaud.

2) Champ magnétique

Neptune ressemble aussi à Uranus au niveau de sa magnétosphère, avec un champ magnétique fortement incliné par rapport à son axe de rotation à 47° et le décalage d'au moins 0,55 rayons, soit environ 13 500 km du centre physique de la planète. Avant l'arrivée de la sonde Voyager 2 à proximité de Neptune, il a été émis l'hypothèse que la magnétosphère inclinée d'Uranus était le résultat de sa rotation inclinée. En comparant les champs magnétiques des deux planètes, les scientifiques pensent maintenant que leur orientation extrême peut être caractéristique des fluïdes venant de l'intérieur des planètes. L'onde de choc de Neptune, où la magnétosphère commence à ralentir le vent solaire, se produit à une distance de 34,9 fois le rayon de la planète. La magnétopause, où la pression de la magnétosphère contrebalance le vent solaire, se trouve à une distance de 23-26,5 fois le rayon de Neptune. La queue de la magnétosphère s'étend à au moins 72 fois le rayon de Neptune, et très probablement beaucoup plus loin. Comparant les données du champ magnétique avec celles d'Uranus, les scientifiques pensent que son inclinaison extrême est causée par les flux circulant dans les profondeurs de l'atmosphère et ne résulte pas de son décalage physique ou d'une inversion de polarité. Ce champ magnétique présente une période de rotation de 16

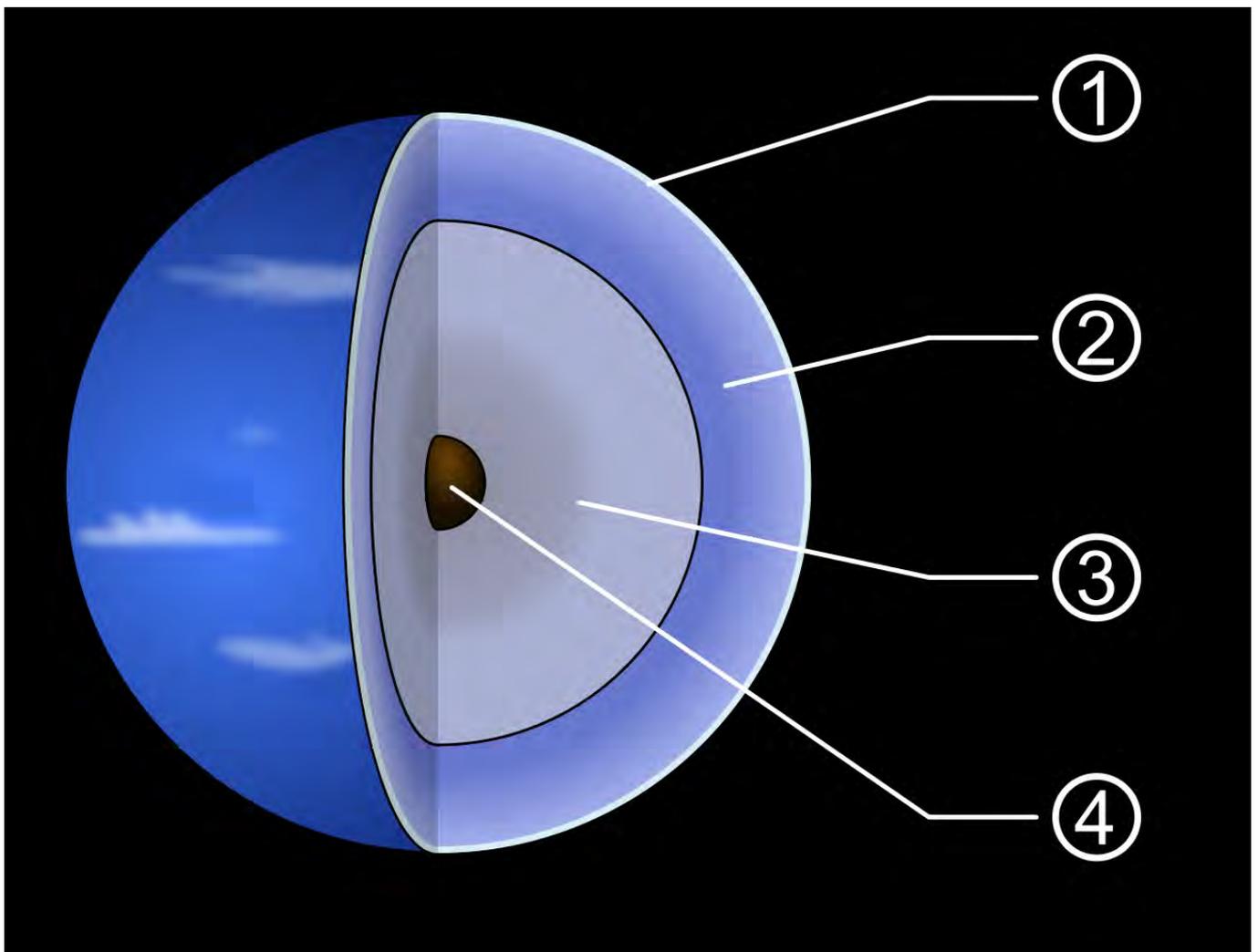
heures, proche de celle de l'atmosphère. Une ionosphère constituée de plusieurs couches a également été découverte entre 1 000 et 4 000 km au-dessus du niveau 1 bar.

3) **Orbite et rotation**

La distance moyenne entre Neptune et le Soleil est de 4,50 milliards de kilomètres (environ 30,1 ua), et il effectue une orbite complète en moyenne tous les 164,79 ans, objet d'une variabilité de l'ordre de $\pm 0,1$ ans. L'orbite elliptique de Neptune est inclinée de $1,77^\circ$ par rapport à la Terre. Du fait d'une excentricité de 0,011, la distance entre Neptune et le Soleil varie de 101 millions de kilomètres entre périhélie et aphélie. L'inclinaison axiale de Neptune est $28,32^\circ$, ce qui est relativement similaire à celle de la Terre (23°) ou celle de Mars (25°). En conséquence, cette planète subit les mêmes changements saisonniers. La longue période orbitale de Neptune signifie que les différentes saisons durent chacune quarante ans en années terrestres. Sa période de rotation sidérale (jour) est d'environ 16.11 heures. Comme Neptune n'est pas un corps solide, son atmosphère subit une rotation différentielle. La large zone équatoriale tourne avec une période d'environ 18 heures, ce qui est plus lent que la rotation de 16,1 heures du champ magnétique de la planète. En revanche, l'inverse est vrai pour les régions polaires où la période de rotation est de 12 heures. Cette rotation différentielle est la plus marquée de toutes les planètes dans le système solaire, et il en résulte un fort cisaillement du vent en latitude.

C) **Composition de Neptune**

1) **Composition interne**

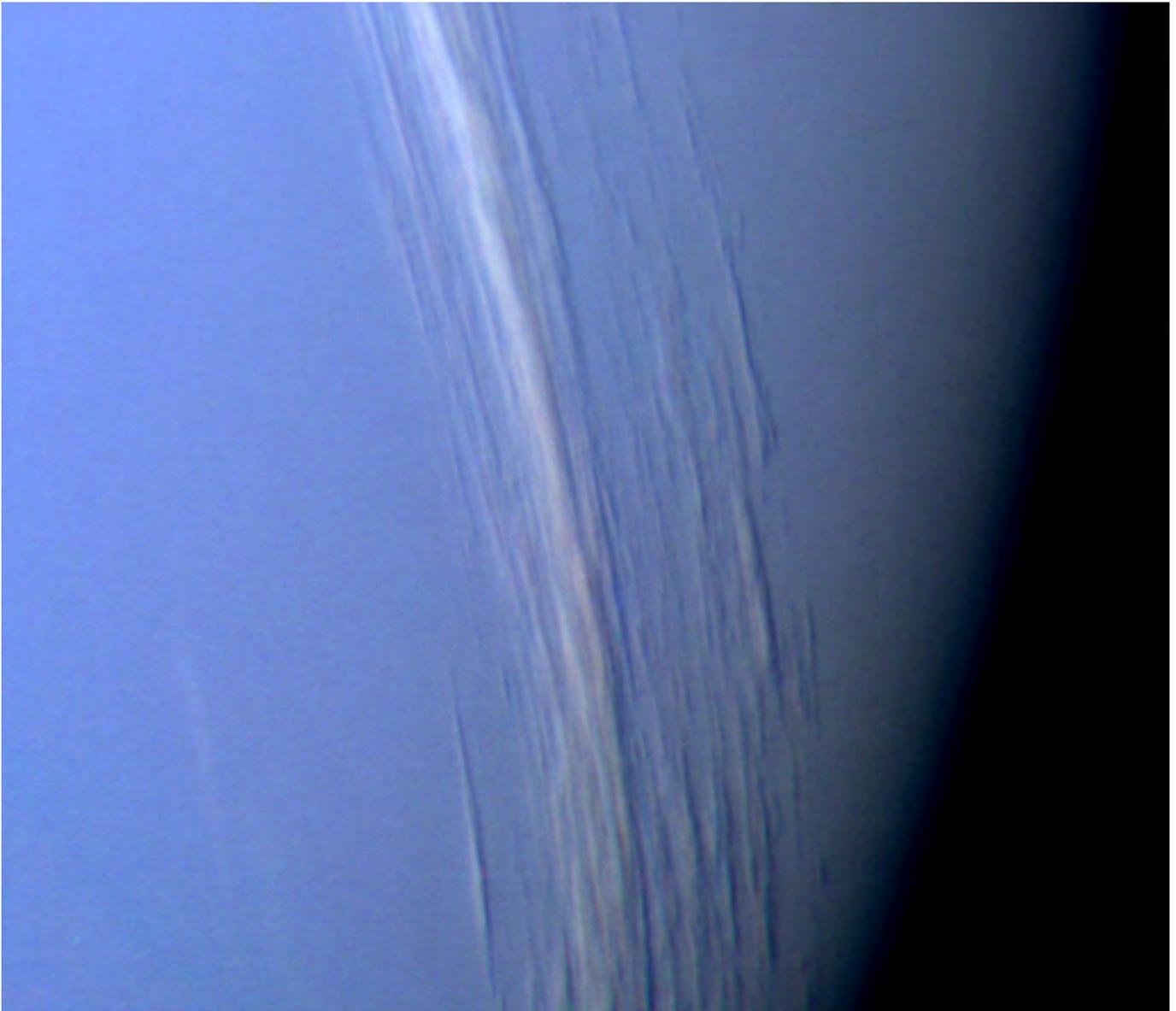


Composition de Neptune: 1-Haute atmosphère, 2-Atmosphère composée de gaz d'hélium, d'hydrogène et de méthane, 3-Manteau composé de glaces d'eau, d'ammoniac et de méthane et 4-Noyau rocheux

La composition interne de Neptune serait similaire à celle d'Uranus. Elle possède très probablement un noyau solide de silicates et de fer d'à peu près la masse de la Terre. Au-dessus de ce noyau, là encore à l'instar d'Uranus, Neptune présenterait une composition assez uniforme (roches en fusion, glaces, 15 % d'hydrogène et un peu d'hélium) et non pas une structure « en couches » comme Jupiter et Saturne. Cependant, plusieurs modèles actuels

de la structure d'Uranus et Neptune proposent l'existence de 3 couches : un cœur de type tellurique, une couche moyenne, allant de glacée à fluide, formée d'eau, méthane et ammoniac, et une atmosphère hydrogène-hélium dans les proportions solaires. La pression maximum de la couche médiane est estimée à 600 GPa (6 millions d'atmosphères) et sa température maximum à 7000 K, si bien que les études théoriques et les expériences réalisées par compression laser sur ses molécules ont conduit en 1981 Marvin Ross (University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA) à poser qu'elle soit totalement ionisée et que le méthane y soit pyrolysé en carbone sous forme de métal ou de diamant. Le méthane se décompose en carbone et en hydrocarbures. La précipitation du carbone libère de la chaleur (énergie potentielle gravitationnelle convertie en chaleur) qui entraîne des courants de convection qui libèrent les hydrocarbures dans l'atmosphère. Ce modèle expliquerait la présence d'hydrocarbures divers dans l'atmosphère de cette planète. Sous l'action de la pression, le carbone adopte un état plus stable, le diamant solide qui flotte sur un océan de carbone métallique liquide.

2) Atmosphère



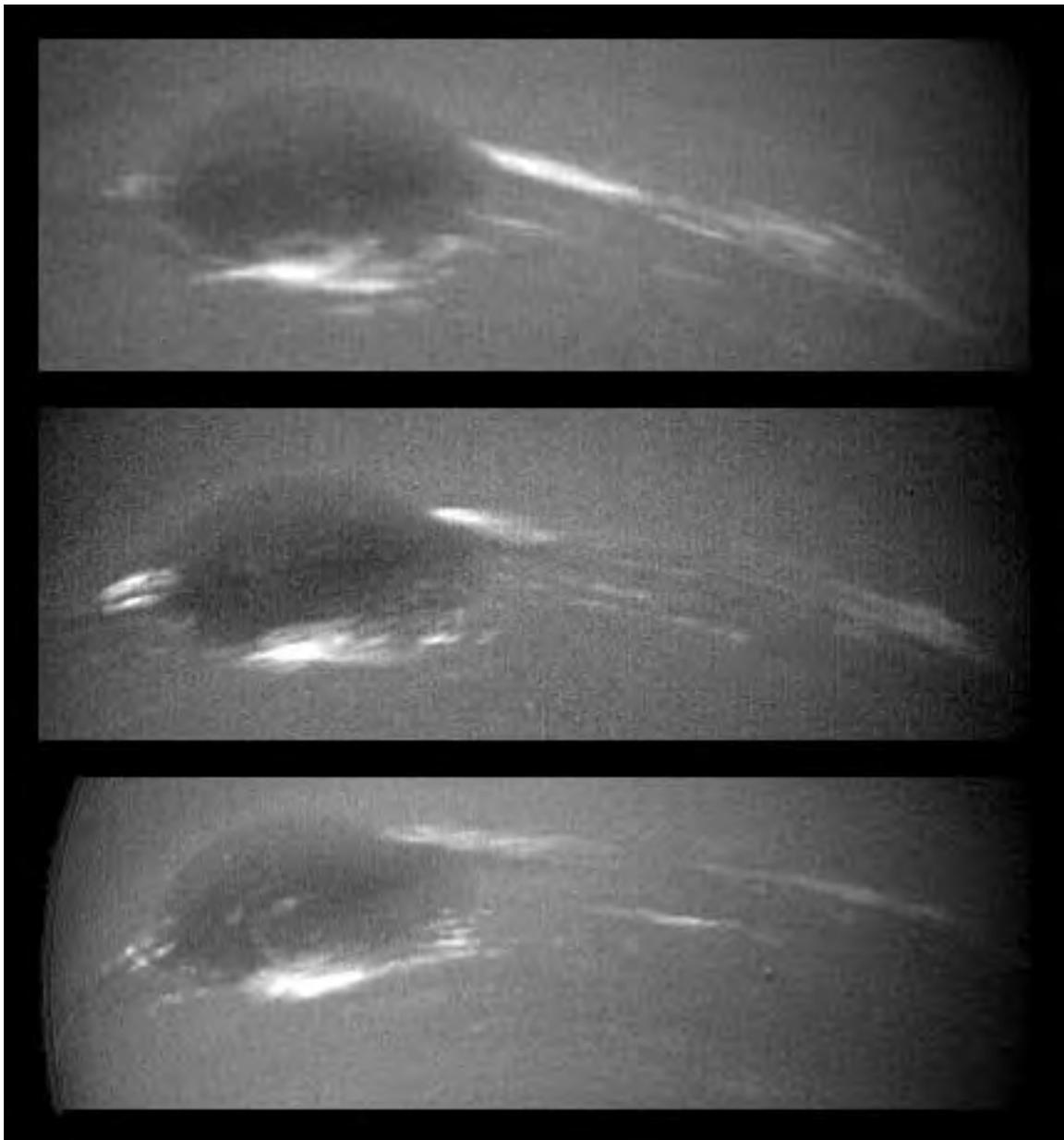
Des nuages de hautes altitudes projettent leurs ombres sur les nuages inférieurs

L'atmosphère de Neptune, épaisse de plus de 8 000 km, est composée à haute altitude de 84 % d'hydrogène et de 12 % d'hélium avec de l'ordre de 1,5 % de méthane CH_4 . Des traces d'ammoniac (NH_3), d'éthane (C_2H_6) et d'acétylène (C_2H_2) ont également été détectées. La couleur bleue de Neptune provient principalement du méthane qui absorbe la lumière dans les longueurs d'onde du rouge. Cependant, la couleur azur de l'atmosphère de Neptune ne peut être expliquée par le seul méthane, qui donnerait une couleur plus proche de l'aigue-marine d'Uranus, et d'autres espèces chimiques, pour l'heure non identifiées, sont certainement à l'origine de cette teinte particulière. Cette atmosphère présente des formations météorologiques bien visibles, contrairement à celle, uniforme, d'Uranus, avec notamment une Grande tache sombre observée en été 1989 par Voyager 2 dont la nature semble similaire à

celle de la Grande tache rouge de Jupiter (à la différence près que celle de Neptune a disparu depuis) et des vents dont la vitesse a été estimée à 2 100 km/h, de loin les vents les plus rapides du Système solaire. La température mesurée dans les couches supérieures de l'atmosphère est de l'ordre de 55 K (-218 °C), moyenne la plus basse mesurée sur une planète du Système solaire, après Uranus. Neptune, comme les autres géantes gazeuses, possède un système éolien composé par des vents rapides confinés dans des bandes parallèles à l'équateur et d'immenses orages et vortex. Les vents de Neptune peuvent dépasser 580 m/s (environ 2 100 km/h).

3) La grande tache sombre

La **Grande Tache sombre** (aussi connue sous le nom **GDS-89** (GDS pour *Great Dark Spot* ou **GTS** en français) est une série de taches sombres sur Neptune d'apparence similaire à la Grande Tache rouge de Jupiter. La première a été observée en août 1989 par la NASA grâce à la sonde Voyager 2. Comme celle de Jupiter, c'est une tempête anticyclonique. Toutefois, l'intérieur de la GTS possède relativement peu de nuages, et contrairement à celle de Jupiter, qui existe depuis des centaines d'années, sa durée de vie semble être beaucoup plus courte, son apparition et sa disparition survenant avec un intervalle de quelques années. Sur la base d'observations effectuées par Voyager, et par la suite par le télescope spatial Hubble, Neptune semble présenter une GTS un peu plus de la moitié du temps. Presque tout ce que l'on sait de Neptune est basé sur les recherches effectuées par la sonde Voyager 2 lors de son survol. La Grande Tache sombre possède une forme elliptique (avec des dimensions initiales de 13 000 × 6 600 km), soit environ la même taille que la Terre, et est similaire en apparence à la Grande Tache rouge de Jupiter. Autour de la GTS, les vents soufflent jusqu'à 2 400 kilomètres à l'heure, ce qui en fait la tempête la plus rapide du Système solaire. La GTS représente un trou dans les couches de méthane des nuages de Neptune.

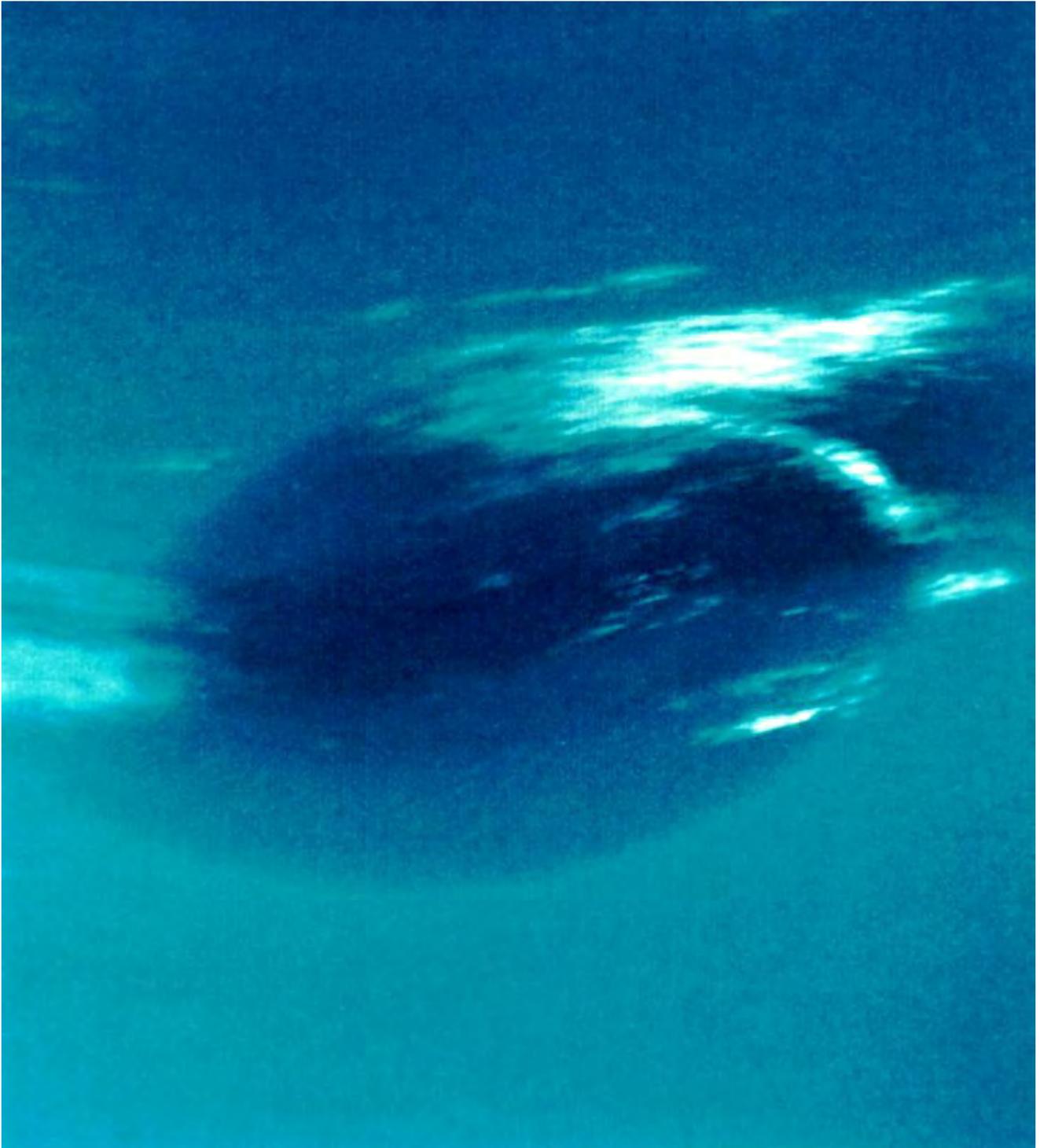


Évolution de la Grande Tache sombre

La Grande Tache sombre génère de gros nuages blancs juste en dessous de la tropopause (limite supérieure de la troposphère et la limite inférieure de la stratosphère). Contrairement aux nuages de l'atmosphère terrestre, qui sont composés de cristaux de glace, ceux de Neptune sont constitués de cristaux de méthane. Et tandis que les cirrus de la Terre se forment et se dispersent ensuite en quelques heures, ceux de la GTS sont encore présents après 36 heures (soit deux rotations de la planète). La GTS se forme dans la troposphère à basse altitude.

Disparition

En novembre 1994, le télescope spatial Hubble a détecté qu'elle avait complètement disparu, indiquant aux astronomes qu'elle avait été recouverte ou qu'elle avait disparu. La persistance des nuages l'accompagnant prouve que certaines taches anciennes peuvent subsister sous la forme de cyclones. Les taches brunes peuvent se dissiper quand elles migrent trop près de l'équateur ou, éventuellement, par un phénomène inconnu. Toutefois, une tache presque identique est apparue dans l'hémisphère nord de Neptune. Cette nouvelle tache, appelée la **Grande Tache sombre du Nord** (NGDS *Northern Great Dark Spot*, GTSN en français), est restée visible pendant plusieurs années.



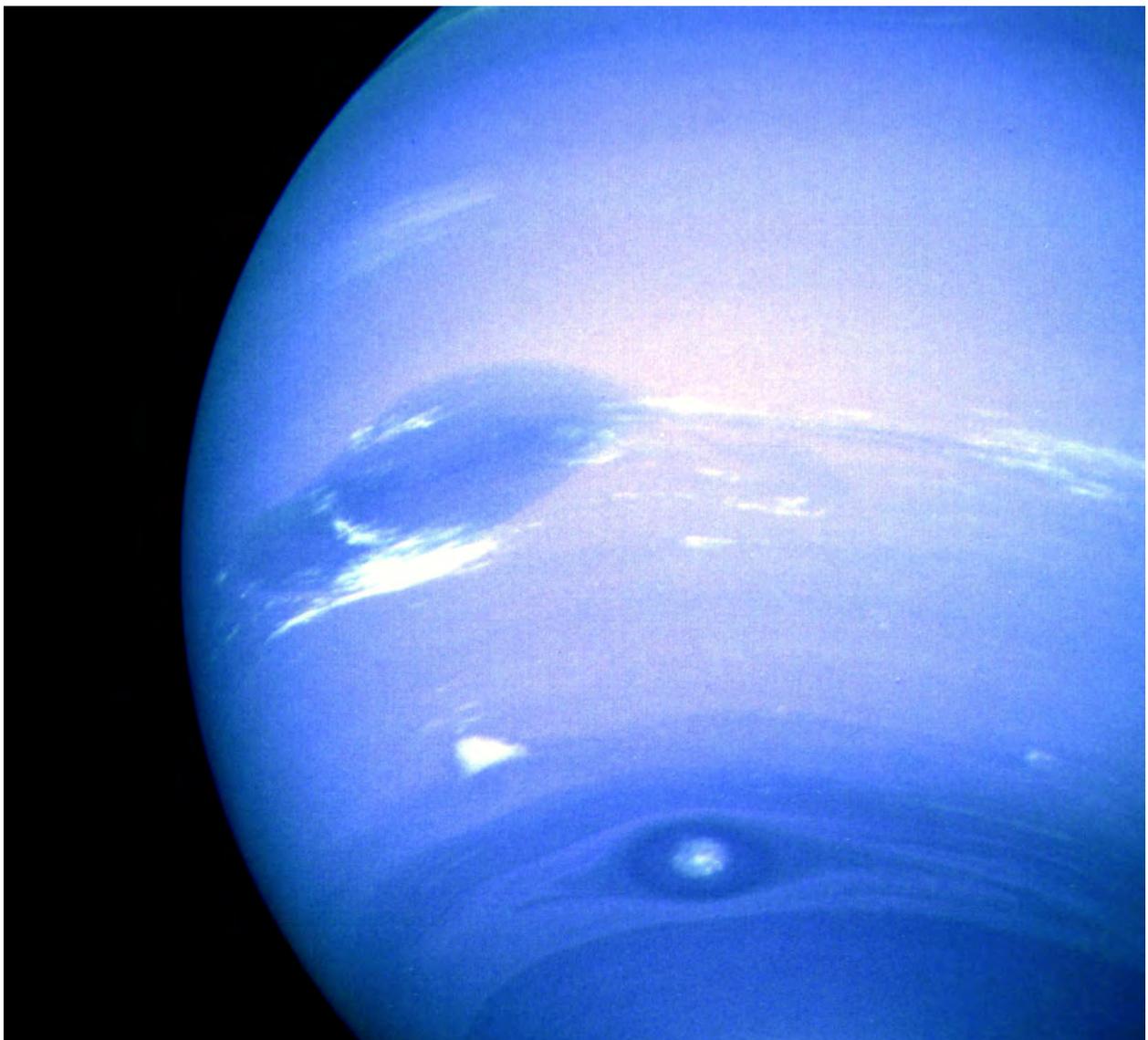
Gros plan de la Grande tache sombre, vue par Voyager 2

Climat

Une des différences entre Neptune et Uranus est l'activité météorologique. Quand la sonde *Voyager 2* passa devant Uranus en 1986, la planète semblait calme. Au contraire, Neptune présentait des phénomènes météorologiques durant son survol en 1989.

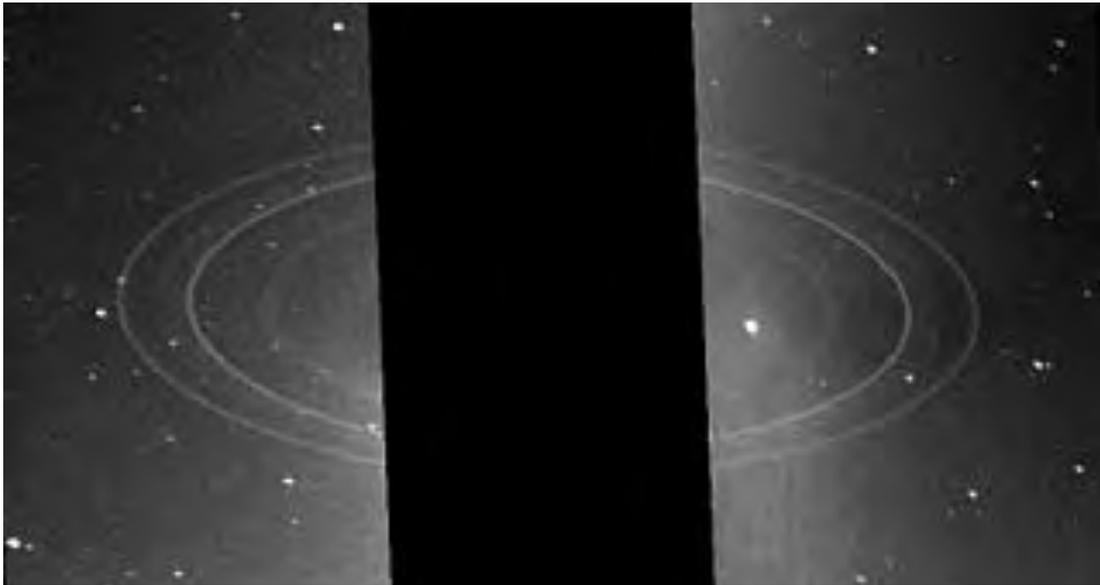
Le temps sur Neptune est caractérisé par un système nuageux dynamique, avec des vents atteignant les 600 m/s, soit presque deux fois la vitesse du son. La vitesse des vents varie de 20 m/s lorsqu'ils vont vers l'est à 325 m/s lorsqu'ils vont vers l'ouest. Au sommet des nuages, les vents vont de 400 m/s à l'équateur à 250 m/s aux pôles. La plupart des vents sur Neptune se déplacent dans la direction opposée au sens de rotation de la planète. Le modèle général des vents a montré une rotation prograde à hautes latitudes contre une rotation rétrograde aux latitudes inférieures. La différence de la direction des vents ne semble pas être due à un processus de la basse atmosphère. À 70° S de latitude, un courant-jet possède une vitesse de 300 m/s.

L'abondance de méthane, d'éthane et d'acétylène à l'équateur de Neptune est 10 à 100 fois plus grande qu'aux pôles. Ceci met en évidence des vents ascendants à l'équateur et descendants aux pôles. En 2007, il a été découvert que la haute troposphère du pôle sud de Neptune était environ 10 °C plus chaude que le reste de Neptune, où la température est en moyenne de -200 °C (70 K). La différence de chaleur est suffisante pour permettre au méthane d'exister sous la forme d'un gaz, alors que dans toute la région supérieure de l'atmosphère de Neptune il est gelé, qui du pôle sud s'échappe dans l'espace. Ce "point chaud" de Neptune est dû à son obliquité, qui a exposé le pôle sud au soleil pendant le dernier quart de l'année neptunienne, soit environ 40 années terrestres. Comme Neptune se déplace doucement de l'autre côté du soleil le pôle sud sera assombri et le pôle nord illuminé, entraînant le déplacement du phénomène observé au pôle sud vers le pôle nord. À cause des changements saisonniers, les bandes nuageuses de l'hémisphère sud semblent avoir augmenté en taille et en albédo. Cette tendance a été remarquée dès 1980 et devrait durer jusqu'en 2020. La longue période orbitale de Neptune faisant qu'une saison dure 40 ans.



La Grande tache sombre (en haut), le Scooter (le petit nuage blanc au centre), et la Petite tache sombre (en bas)

II Les Anneaux de Neptune



Les anneaux de Neptune pris par Voyager 2

Les **anneaux de Neptune** se composent principalement de cinq anneaux dont la présence fut découverte (comme « arcs ») en 1984 au Chili, d'une part par Patrice Bouchet, Reinhold Häfner et Jean Manfroid à l'Observatoire de La Silla (ESO) qui conduisaient un programme d'observation d'occultation d'étoile proposé par André Brahic, Bruno Sicardy et Françoise Roques de l'Observatoire de Paris-Meudon, et d'autre part par F. Vilas et L.-R. Elicer pour un programme conduit par Williams Hubbard. Ils furent finalement photographiés en 1989 par la sonde Voyager 2.

Là où ils sont le plus denses, ils sont comparables aux parties les moins denses des anneaux principaux de Saturne, comme l'anneau C et la division de Cassini. La majeure partie du système d'anneaux neptunien est assez raréfiée, ténue et poussiéreuse, ressemblant davantage aux anneaux de Jupiter. Les anneaux de Neptune sont nommés d'après les astronomes qui ont contribué à d'importants travaux sur la planète : Galle, Le Verrier, Lassell, Arago, et Adams. Neptune a également un anneau ténu sans nom qui coïncide avec l'orbite de la lune neptunienne Galatée. Trois lunes orbitent entre les autres anneaux : Naïade, Thalassa et Despina. Les anneaux de Neptune sont faits de matière extrêmement sombre, vraisemblablement des composés organiques transformés sous l'effet de rayonnement, et semblable à celle se trouvant dans les anneaux d'Uranus. La proportion de poussière dans les anneaux (entre 20 % et 70 %) est forte, alors que leur épaisseur optique est faible.

La première référence à des anneaux autour de Neptune remonte à 1846, lorsque William Lassell, le découvreur de Triton (le plus grand satellite de Neptune), crut avoir vu un anneau autour de la planète. Toutefois, la découverte qu'il revendiquait ne fut jamais confirmée, et il est probable qu'il s'agissait là d'un artefact. La première détection fiable d'un anneau fut réalisée en 1968 par occultation stellaire, bien que ce résultat soit passé inaperçu jusqu'en 1977, au moment où les anneaux d'Uranus furent découverts. Peu de temps après la découverte d'Uranus, une équipe de l'Université de Villanova dirigée par Harold J. Reitsema se mit à chercher des anneaux autour de Neptune. Le 24 mai 1981, ils purent détecter une nette réduction de la luminosité d'une étoile au cours d'une occultation; cependant la manière dont l'étoile s'estompait n'évoquait pas un anneau. Par la suite, après le survol de Voyager, on établit que l'occultation était due à la petite lune neptunienne Larissa, un événement très peu commun.

Dans les années 1980, les occultations importantes furent bien plus rares pour Neptune que pour Uranus, qui se trouvait près de la Voie lactée à l'époque et était donc en mouvement devant un champ d'étoiles plus dense. L'occultation suivante de Neptune, le 12 septembre 1983, donna lieu à une détection possible d'un anneau. Cependant, l'observation au sol ne permit pas de tirer de conclusion. Au cours des six années qui suivirent, on put observer environ 50 autres occultations, dont seulement environ le tiers donnait des résultats positifs. À n'en point douter, il y avait bel et bien quelque chose autour de Neptune (probablement des arcs incomplets), mais les caractéristiques du système d'anneaux n'étaient pas moins mystérieuses. Voyager 2 permit d'établir définitivement l'existence des anneaux neptuniens au cours de son survol de la planète en 1989. La sonde confirma que les occultations régulières observées jusqu'alors étaient bien causées par les arcs de l'anneau Adams (voir infra). Après le survol de Voyager, les anneaux les plus clairs (Adams et Le Verrier) furent mis en images grâce au télescope spatial Hubble et aux télescopes au sol, suite aux progrès accomplis en résolution optique et en technique de captage de la lumière.

Ils sont visibles, légèrement au-delà du niveau du fond diffus cosmologique, dans les longueurs d'onde absorbant le spectre du méthane, et pour lesquelles la luminosité de Neptune est nettement réduite. Les anneaux les plus ténus sont, quant à eux, bien en deçà du seuil de visibilité.

1) Propriétés générales

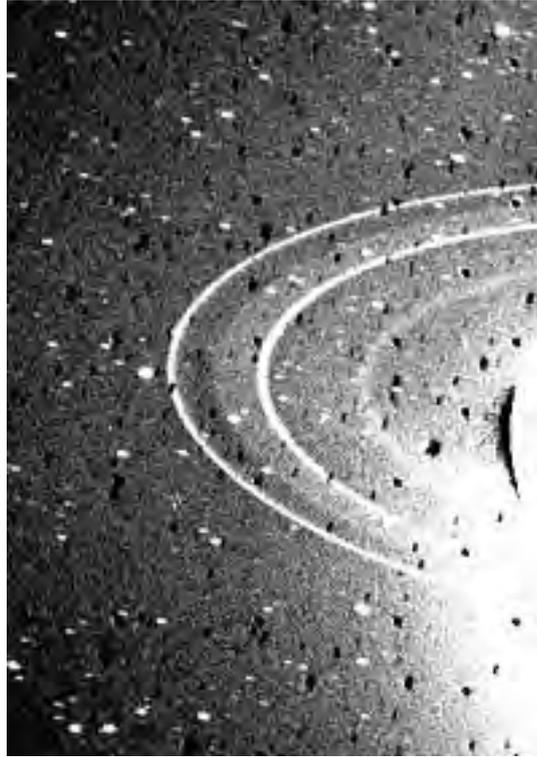


Image d'anneau prise par Voyager, montrée en luminosité accrue pour faire ressortir des nuances plus fines

Neptune possède cinq anneaux distincts nommés (par ordre croissant de distance par rapport à la planète) Galle, Le Verrier, Lassell, Arago et Adams. Trois d'entre eux sont étroits, avec des largeurs d'environ 100 km maximum; Galle et Lassell, en revanche, sont très larges, entre 2 000 et 5 000 km. L'anneau Adams se compose de cinq arcs clairs, pris au sein d'un anneau continu plus faible. En suivant le sens antihoraire, les arcs sont nommés : Fraternité, Égalité (1 et 2), Liberté, et Courage. Les trois premiers noms viennent de la devise française. Cette terminologie fut proposée par ceux qui en firent la découverte lors d'occultations stellaires en 1984 et 1985. Quatre petites lunes ont des orbites à l'intérieur du système d'anneaux : Naïade et Thalassa ont leurs orbites dans l'intervalle entre les anneaux de Galle et Le Verrier. Despina est juste à l'intérieur de l'anneau Le Verrier et Galatée est vers l'intérieur de l'anneau Adams.

Les anneaux de Neptune contiennent une grande quantité de poussières dont la taille est de l'ordre du micromètre : la fraction de poussière selon la tranche considérée varie de 20 % à 70 %. À cet égard, ils sont semblables aux anneaux de Jupiter, dont la part de poussière est de 50 % à 100 %, et sont très différents des anneaux de Saturne et Uranus, qui contiennent peu de poussière (moins de 0,1 %). Les particules dans les anneaux de Neptune sont faites d'un matériau sombre, probablement un mélange de glace et de composés organiques transformés par le rayonnement. Les anneaux sont généralement rougeâtres; leur albédo géométrique (0,05) et leur albédo de Bond (0,01 à 0,02) sont semblables à ceux des particules des anneaux d'Uranus ainsi qu'à ceux des lunes intérieures de Neptune; visuellement, ils sont fins (transparents), leur épaisseur optique ne dépasse pas 0,1. Considérés dans leur ensemble, les anneaux de Neptune ressemblent à ceux de Jupiter, les deux systèmes se composent d'annelets de poussières ténus et étroits, et de larges anneaux de poussières encore plus ténus. Les anneaux de Neptune, comme ceux d'Uranus, sont considérés comme relativement jeunes; leur âge est sans doute nettement inférieur à celui du système solaire. D'autre part, comme pour Uranus, les anneaux de Neptune se sont probablement formés suite à la fragmentation d'anciennes lunes intérieures lors de collisions. Il résulte de ces collisions la formation de ceintures de petites lunes, qui sont autant de sources de poussière pour les anneaux. À cet égard, les anneaux de Neptune sont semblables aux bandes de poussières ténues que Voyager 2 put observer entre les anneaux principaux d'Uranus.

2) Anneaux intérieurs

L'anneau le plus intérieur de Neptune est appelé **anneau de Galle**, en l'honneur de Johann Gottfried Galle qui fut le premier à voir Neptune grâce à un télescope (1846). Il fait environ 2 000 km de large et orbite entre 41 000 km et

43 000 km de la planète. C'est un anneau ténu, d'épaisseur optique moyenne de l'ordre de 10^{-4} , et d'une épaisseur équivalente de 0,15 km. La part de poussières dans cet anneau est évaluée entre 40 % et 70 %. L'anneau suivant est nommé **anneau Le Verrier**, en l'honneur d'Urbain Le Verrier, qui prédit la position de Neptune en 1846. D'un rayon orbital de près de 53 200 km, il est étroit, d'une largeur d'environ 113 km. Son épaisseur optique est de $0,0062 \pm 0,0015$, ce qui correspond à une épaisseur équivalente de $0,7 \pm 0,2$ km. La part de poussières dans l'anneau Le Verrier est de 40 % à 70 %. La petite lune neptunienne Despina, qui est en orbite près de sa bordure intérieure sur un rayon de 52 526 km, favorise sans doute le confinement de l'anneau en agissant comme un berger.

3) Anneau Lassell

L'anneau Lassell est l'anneau le plus large du système neptunien. Il doit son nom à William Lassell, l'astronome anglais qui découvrit Triton, la plus grande lune de Neptune. L'anneau s'étale en une couche ténue dans l'intervalle entre l'anneau Le Verrier à environ 53 200 km et l'anneau Arago (voir infra) à 57 200 km. Son épaisseur optique moyenne normale est d'environ 10^{-4} , ce qui correspond à une épaisseur équivalente de 0,4 km. L'anneau est composé de poussières à raison de 20 % à 40 %. L'anneau Lassell présente un petit pic de luminosité près du bord extérieur, situé à 57 200 km de Neptune et d'une largeur de 100 km, que certains astronomes appellent l'**anneau Arago** en l'honneur de François Arago. La distinction n'est cependant pas toujours établie dans les publications.

4) Anneau Adams



Arcs dans l'anneau Adams (de gauche à droite: Fraternité, Égalité, Liberté), ainsi que l'anneau Le Verrier à l'intérieur

L'anneau Adams extérieur, dont l'orbite a un rayon de 63 930 km, est l'anneau qui fut le plus étudié. Il doit son nom à John Couch Adams, qui put prédire la position de Neptune indépendamment des travaux de Le Verrier. Cet anneau est fin, légèrement excentrique et incliné, d'une largeur totale d'environ 35 km (de 15 km à 50 km), et son épaisseur optique normale est d'environ $0,011 \pm 0,003$ hors des arcs, ce qui correspond à une profondeur équivalente d'à peu près 0,4 km. L'anneau est composé de poussières à raison de 20 % à 40 % (moins que dans les autres anneaux fins). La petite lune Galatée, en orbite le long de la bordure intérieure de l'anneau Adams à 61 953 km, fait office de satellite berger et maintient les particules de l'anneau dans un petit intervalle orbital en suivant une résonance orbitale de 42:43. L'influence gravitationnelle de Galatée forme dans l'anneau Adams 42 perturbations radiales, dont l'amplitude est d'environ 30 km. Cela permet de calculer la masse de Galatée.

5) Arcs

Les arcs, qui sont les parties les plus brillantes de l'anneau Adams, furent les premiers éléments du système d'anneaux de Neptune à être découverts. Les arcs sont des régions distinctes au sein de l'anneau, où le cortège de matière est plus dense et forme des blocs sur l'anneau. L'anneau Adams contient cinq arcs courts, qui occupent une gamme de longitudes assez restreinte, sur 52° . En 1986, ils étaient situés respectivement à :

- 247-257° (Fraternité),
- 261-264° (Égalité 1),
- 265-266° (Égalité 2),
- 276-280° (Liberté),
- 284,5-285,5° (Courage).

L'arc le plus long et le plus clair était Fraternité; le plus ténu était Courage. L'épaisseur optique des arcs mesurée se trouve dans une fourchette de 0,03 à 0,09 ($0,034 \pm 0,0005$ pour la bordure antérieure de l'arc Liberté, mesurée lors d'une occultation d'étoile). Leur largeur radiale est approximativement la même que celle de l'anneau continu, soit environ 30 km. La profondeur équivalente des arcs varie entre 1,25 km et 2,15 km ($0,77 + 0,13$ km pour la bordure antérieure de l'arc Liberté). Les arcs sont composés de poussière à hauteur de 40 % à 70 %. Les arcs dans l'anneau Adams sont assez semblables à l'arc dans l'anneau G de Saturne. Les images de Voyager 2 prise à la plus haute résolution révèlent que l'arc présente une répartition nettement "grumeleuse", où les amas observés sont généralement séparés par des interstices de 0,1 à 0,2°, ce qui équivaut à 100-200 km le long de l'anneau. Étant donné qu'il ne fut pas possible de ramener l'étude de ces amas à celle de leurs éléments plus petits, ils pourraient éventuellement contenir des corps assez grands, mais sont sûrement associés à des concentrations de poussières microscopiques, comme en témoigne leur luminosité accrue lorsqu'ils sont rétro-éclairés par le Soleil. Les arcs sont des structures assez stables. Ils furent détectés par des observations au sol lors d'occultations stellaires dans les années 1980, par Voyager 2 en 1989 et par le télescope spatial Hubble et des télescopes au sol, de 1997 à 2005. Toutefois, on put observer certains changements. La luminosité de l'ensemble des arcs a diminué depuis 1986. L'arc Courage a fait un bond en avant de 8°, pour se situer à 294° de longitude (sans doute passant d'une position stable de résonance co-rotationnelle à la suivante), tandis que l'arc Liberté avait presque disparu en 2003. Les arcs Fraternité et Égalité (1 et 2) ont montré des variations irrégulières de luminosité. Leur dynamique observée est probablement liée à l'échange de poussière entre eux. Courage, arc très ténu qui fut découvert lors du survol de la planète par Voyager, est apparu d'une luminosité flamboyante en 1998, bien différente de l'aspect obscur habituel qu'on lui connaît de nouveau. Les observations en lumière visible montrent que la quantité totale de matière dans les arcs est restée à peu près constante, bien que ceux-ci soient maintenant plus sombres dans les longueurs d'onde infrarouges qui avaient déjà été observées auparavant.

6) Confinement des arcs

L'existence surprenante des arcs de l'anneau Adams n'a toujours pas reçu d'explication satisfaisante. La dynamique orbitale élémentaire permet de supposer qu'ils devraient se dissiper jusqu'à former un anneau uniforme en quelques années. Plusieurs théories furent proposées afin de rendre compte de cette tendance des arcs à perdurer. Celle ayant fait le plus d'écho soutient que c'est Galatée qui maintient les arcs dans leurs limites par *résonance co-rotationnelle d'inclinaison* (RCI) de rapport 42:43. La résonance crée 84 sites stables le long de l'anneau, chacun occupant 4° de section d'orbite, les arcs occupant les sites adjacents. Néanmoins, les mesures du Mouvement moyen des anneaux (la vitesse angulaire moyenne sur l'orbite) grâce au télescope Hubble et à l'Observatoire W. M. Keck en 1998 permirent de conclure que les anneaux ne sont pas en RIC avec Galatée.

Un modèle ultérieur suggéra que le confinement des arcs était la conséquence d'une *résonance co-rotationnelle d'excentricité* (RCE). Le modèle prend en compte la masse finie de l'anneau Adams, ce qui est requis pour rapprocher la résonance de l'anneau. Cette théorie motiva une estimation de la masse de l'anneau Adams, environ 0,2 % de la masse de Galatée. Une troisième théorie proposée en 1986 suppose qu'une lune supplémentaire est en orbite à l'intérieur de l'anneau, les arcs étant pris au piège dans les points de Lagrange stables de celle-ci. Cependant, les observations de Voyager 2 apportent des contraintes importantes sur la taille et la masse d'éventuelles lunes inconnues, ce qui fragilise une telle théorie. D'autres théories plus complexes supposent qu'un certain nombre de petites lunes sont prises au piège dans des résonances co-rotationnelles avec Galatée, et assurent ainsi le confinement des arcs tout en leur apportant des poussières.

7) Exploration

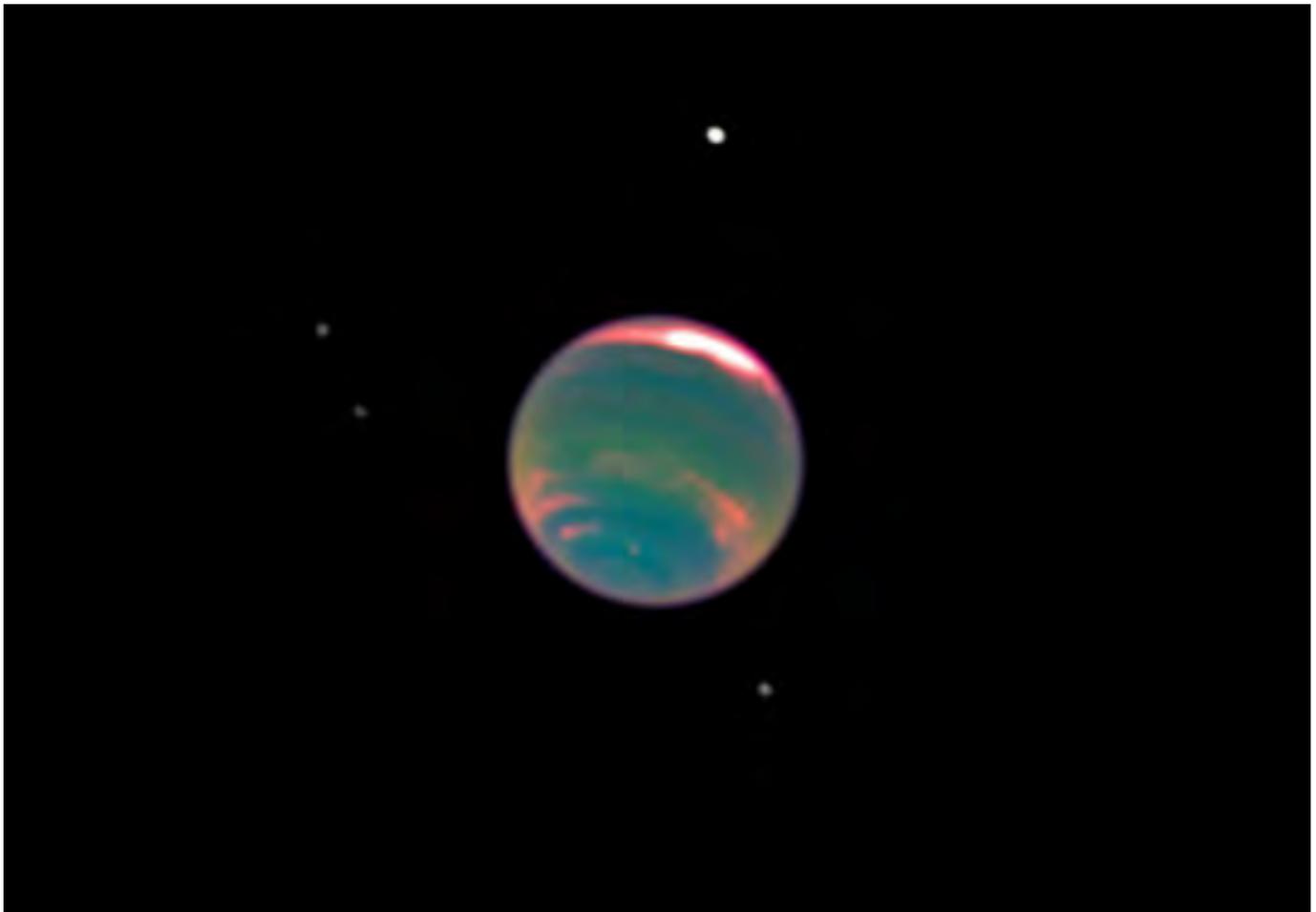
Les anneaux ont été scrutés en détail au cours du survol de la sonde Voyager 2 en août 1989. Ils ont été étudiés par imagerie optique, et avec des observations d'occultations dans l'ultraviolet et la lumière visible. Voyager 2 a observé les anneaux sous plusieurs angles par rapport au Soleil, produisant des images de la lumière diffusée de face, traversant les anneaux et comme diffractée, ou les éclairant selon un angle intermédiaire. L'analyse de ces images permit de déduire la fonction de phase des particules de l'anneau (i.e. la réflectivité de l'anneau selon l'angle entre l'observateur et le Soleil), ainsi que les albédos géométrique et de Bond des particules de l'anneau. L'analyse des images de Voyager a également conduit à la découverte de six lunes intérieures de Neptune, dont Galatée, le berger de l'anneau Adams.

Propriétés

Nom de l'anneau	Rayon (en km)	Largeur (en km)	Épaisseur équivalente (en km)	Épaisseur optique normale	Proportion de poussière, %	Excentricité	Inclinaison (en °)	Remarques
Galle (N42)	40 900 – 42 900	2 000	0,15	$\sim 10^{-4}$	40 – 70	?	?	Anneau large et peu dense
Le Verrier (N53)	53 200 ± 20	113	$0,7 \pm 0,2$	$6,2 \pm 1,5 \times 10^{-3}$	40 – 70	?	?	Anneau étroit
Lassell	53 200 – 57 200	4 000	0,4	$\sim 10^{-4}$	20 – 40	?	?	L'anneau Lassell est une fine couche de matière peu dense qui s'étend de Le Verrier à Arago
Arago	57 200	< 100	?	?	?	?	?	
Adams (N63)	62 932 ± 2	15 – 50	0,4 1,25 – 2,15 (en arcs)	0,011 \pm 0,003 0,03 – 0,09 (en arcs)	20 – 40 40 – 70 (en arcs)	$4,7 \pm 0,2 \times 10^{-4}$	$0,0617 \pm 0,0043$	Cinq arcs brillants

III Les satellites de Neptune

A) Généralités



Neptune et ses satellites

Neptune, huitième et dernière planète du Système solaire par distance croissante au Soleil, possède 14 **satellites naturels** dont l'existence est confirmée. Le plus gros d'entre-eux, Triton, est le premier à être découvert, en octobre 1846, dix-sept jours seulement après la première observation de la planète elle-même. Le deuxième à être découvert, Néréïde, l'est plus d'un siècle plus tard, en 1949. Larissa est ensuite découverte en 1981 puis c'est grâce à différents programmes d'observation qu'en 1989, 2002, 2003 et 2013 sont découverts 11 autres satellites. La découverte du dernier en date, S/2004 N 1, est annoncée le 15 juillet 2013 par la NASA.

Découvertes

Triton fut découvert en premier, le 10 octobre 1846, seulement 17 jours après la première observation de Neptune. Le second à être découvert, Néréïde ne le fut qu'en 1949, soit plus d'un siècle après Triton. Avant l'arrivée de la sonde *Voyager 2* dans le système de la planète, seule Larissa fut découverte (en 1981), à la faveur d'une occultation d'étoile; cette (3e) lune ne put cependant être observée à nouveau avant le survol de Neptune par la sonde spatiale. L'analyse des photographies transmises par *Voyager 2* en 1989 permit de découvrir 5 nouveaux satellites : Nàïade, Thalassa, Despina, Galatée et Protée. Halimède, Sao, Laomédie et Néso (S/2002 N 1 à 4) furent, comme leur désignation temporaire l'indique, découverts lors du même programme d'observation en 2002. Psamatée (S/2003 N 1) fut découvert en 2003. Le dernier en date a été découvert grâce au télescope Hubble. Il est désigné S/2004 N 1 et a été annoncé par la NASA le 15 juillet 2013.

Liste

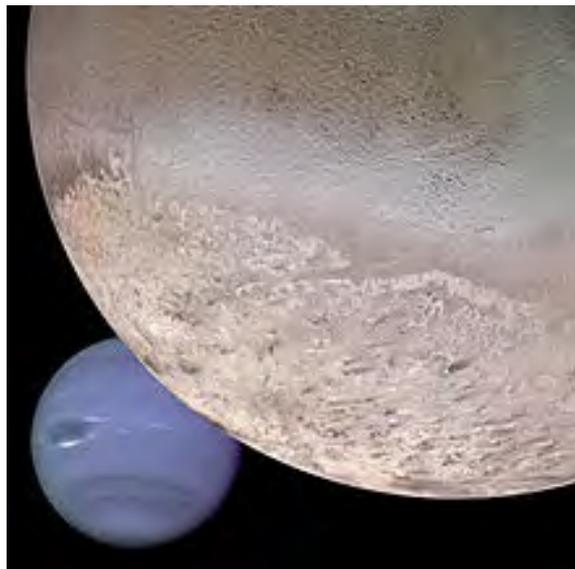
Vous trouverez en Annexe 1 la liste des satellites connus de Neptune, classés par demi-grand axe croissant (du plus proche au plus éloigné de la planète). Les valeurs numériques proviennent de données de la NASA.

Noms

Triton ne posséda pas de nom officiel avant le XX^e siècle; bien qu'il fût suggéré dès 1880 par Camille Flammarion et proposé de façon indépendante par plusieurs autres astronomes au fil des années, il ne fut pas utilisé de façon

commune avant les années 1930, Triton étant simplement désigné comme « le satellite de Neptune » (le deuxième satellite ne fut pas découvert avant 1949). Deux astéroïdes partagent le même nom qu'un satellite de Neptune : (74) Galatée et (1162) Larissa.

Découverts en 2002 par une équipe dirigée par Matthew Holman du "Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics" et JJ Kavelaars du "National Research Council of Canada", S/2002 N1, S/2002 N2 et S/2002 N3 portèrent le nombre de satellites connus de Neptune à 11. Leur découverte est un exploit du fait de la taille très petite des corps ainsi que leur distance de la Terre. En effet ces corps ne font pas plus de 40 km de large et possèdent une magnitude de 25. Puis l'équipe de Matthew J. Holman découvrit S/2002 N4 qui est la lune la plus éloignée de sa planète de tout le système solaire. En 2003, l'équipe de David C. Jewitt découvrit Psamathee (S/2003 N1), ce qui porta le nombre de satellites à treize. Les satellites découverts en 2002 et 2003 ont été baptisés le 3 février 2007 : Psamathee, Halimède, Sao, Laomédie et Néso. Le 1er juillet 2013, un quatorzième satellite, nommé S/2004 N1 a été découvert par Mark Showalter, de l'institut SETI à Mountain View en Californie. Les scientifiques estiment qu'elle met 23 heures pour faire le tour de sa planète. Les astronomes l'ont repérée en suivant un point blanc qui apparaissait de façon régulière dans plus de 150 photos prises avec le télescope Hubble entre 2004 et 2009. Triton est le plus gros des quatorze satellites naturels de la planète Neptune, et le 8^e par distance croissante à cette dernière. Il a un diamètre d'un peu plus de 2 700 km, ce qui en fait le 7^e satellite naturel du Système solaire par taille décroissante, et un astre plus gros que Pluton. C'est le seul gros satellite connu du Système solaire orbitant dans le sens rétrograde, c'est-à-dire inverse au sens de rotation de sa planète; tous les autres satellites dans ce cas sont de petits corps irréguliers de quelques centaines de kilomètres dans leur plus grande longueur. Cette caractéristique orbitale exclut que Triton ait pu se former initialement autour de Neptune, et sa composition similaire à celle de Pluton suggère qu'il s'agisse en réalité d'un objet issu de la ceinture de Kuiper capturé par Neptune. Triton orbite autour de Neptune en 5 jours et 21 heures sur une trajectoire quasiment circulaire ayant un demi grand-axe de 354 759 km, une inclinaison de 156,865° (-23,135°) sur le plan de Laplace du système, et jusqu'à 129,6° (-50,4°) sur le plan orbital de sa planète. Ceci lui confère des saisons très marquées tout au long de l'année neptunienne, longue de 164,79 années terrestres; l'hémisphère sud a ainsi passé son solstice d'été en 2000.



Montage montrant Neptune et son satellite, Triton

Autre entourage de Neptune

Désignation	Point de Lagrange	Périhélie (ua)	Aphélie (ua)
2001 QR ₂₂	L4	29,428	31,349
2004 UP ₁₀	L4	29,351	31,259
2005 TN ₅₃	L4	28,253	32,284
2005 TO ₇₄	L4	28,733	31,824
2006 RJ ₁₀₃	L4	29,345	31,005
2007 VL ₃₀₅	L4	28,131	32,171
2008 LC ₁₈	L5	27,546	32,468
2004 KV ₁₈	L5	24,566	35,657

Comme Jupiter et Mars, Neptune possède des astéroïdes troyens, partageant son orbite autour du Soleil.

Neuf ont été confirmés à ce jour (avril 2014). 2001 QR₃₂₂ fut observé pour la première fois en août 2001 par l'équipe de Marc W. Buie sur le télescope Blanco de 4 m de l'observatoire du Cerro Tololo. Sa position relative oscille autour du point L₄ et le long de l'orbite neptunienne avec une période d'environ 10 000 ans. Son orbite est très stable, il se situe dans une région qui garantit qu'il co-orbitera encore avec Neptune pendant des milliards d'années. 2005 TN₃₃ est un troyen de Neptune découvert par Scott S. Sheppard et Chadwick Trujillo en 2005. Il a la même période orbitale que Neptune et orbite au point de Lagrange L₄ de Neptune avec cependant, une inclinaison de 25 degrés. 2008 LC₁₈ est le premier troyen découvert qui se situe au point L₅ de Neptune. Des études ont montré qu'il serait possible à un quasi-satellite théorique d'Uranus ou de Neptune de le rester pour la durée de vie du Système solaire moyennant certaines conditions d'excentricité et d'inclinaison. De tels objets n'ont cependant pas encore été découverts.

Observation

Depuis la Terre

Neptune n'est jamais visible à l'œil nu, ayant une luminosité entre les magnitudes +7,7 et +8,0, or il n'est pas possible d'observer à l'œil nu des objets astronomiques dont la magnitude apparente est supérieure à +6. Elle a été éclipsée par les lunes galiléennes de Jupiter, la planète naine Cérès et les astéroïdes Vesta, Pallas, Iris, Junon et Hébé. Un télescope ou des jumelles fortes permettent de voir Neptune comme un petit disque bleu, semblable en apparence à Uranus. En raison de la distance entre Neptune et la Terre, le diamètre angulaire de la planète varie seulement de 2,2 à 2,4 secondes d'arc, la plus petite variation des planètes du système solaire. Sa petite taille apparente fait qu'il est difficile de l'étudier visuellement. L'observation télescopique a été assez limitée jusqu'à l'avènement du télescope spatial Hubble et des grands télescopes basés au sol avec optique adaptative.

Exploration

Le plus proche passage à proximité de la planète fut effectuée par Voyager 2, le 25 août 1989. Comme c'était la dernière planète majeure que la sonde pouvait visiter, il a été décidé de faire un survol rapproché de la lune Triton, quelles que soient les conséquences pour la trajectoire, similaire à ce qui a été fait pour la rencontre de Voyager 1 avec Saturne et son satellite Titan.



Photo prise par Voyager 2 de Neptune et Triton

La sonde a vérifié l'existence d'un champ magnétique qui entoure la planète et a découvert que le champ était décalé du centre et incliné d'une manière similaire à celui d'Uranus. La question de la période de rotation de la planète a été réglée à l'aide des mesures des émissions de radio. Voyager 2 a aussi montré que Neptune avait un climat étonnamment actif. Six nouvelles lunes ont été découvertes, et il a été démontré que la planète possédait plus d'un anneau.

En 2003, une proposition est faite à la « Vision Missions Studies » de la NASA pour mettre en œuvre un Orbiter avec des sondes sur Neptune semblable à celui de Cassini-Huygens pour Saturne. Le travail est effectué en collaboration avec le « Jet Propulsion Laboratory » et le « California Institute of Technology ».

Formation et migration

La formation des géantes glacées, Neptune et Uranus, s'est avérée difficile à modéliser avec précision. Les modèles actuels suggèrent que la densité de matière dans les régions extérieures du système solaire était trop faible pour permettre la formation de ces grands corps avec la méthode traditionnellement acceptée d'accrétion de base, et différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer leur création. La première est que les géantes de glace n'ont pas été créées par accrétion de base, mais des instabilités dans le disque protoplanétaire originaire ont fait sauter plus tard leurs atmosphères loin par la radiation d'une étoile massive proche de type OB. Un autre concept est qu'elles se sont formées plus près du Soleil, où la densité de matière est plus élevée, et ont ensuite migré vers leurs orbites actuelles, après le retrait du disque protoplanétaire gazeux. Cette hypothèse de la migration après la formation est actuellement favorisée, en raison de sa capacité à mieux expliquer l'occupation des populations de petits objets observés dans la région trans-neptunienne. Le courant le plus largement accepté des explications sur les détails de cette hypothèse est connu sous le nom modèle de Nice, qui explore l'effet d'une migration de Neptune et des autres planètes géantes sur la structure de la ceinture de Kuiper.

Culture populaire

En astrologie, Neptune (Ψ) est la planète associée au signe des Poissons. L'élément chimique Neptunium fut découvert par Edwin McMillan et Philip Abelson en 1940. La découverte a été faite au Berkeley Radiation Laboratory de l'Université de Californie, à Berkeley, où l'équipe produisit l'isotope 239 du neptunium, d'une demi-vie de 2,4 jours, en bombardant de l'uranium (faisant référence à Uranus) 238 avec des neutrons. C'est l'étape intermédiaire menant à la production du plutonium 239 (faisant référence à Pluton).

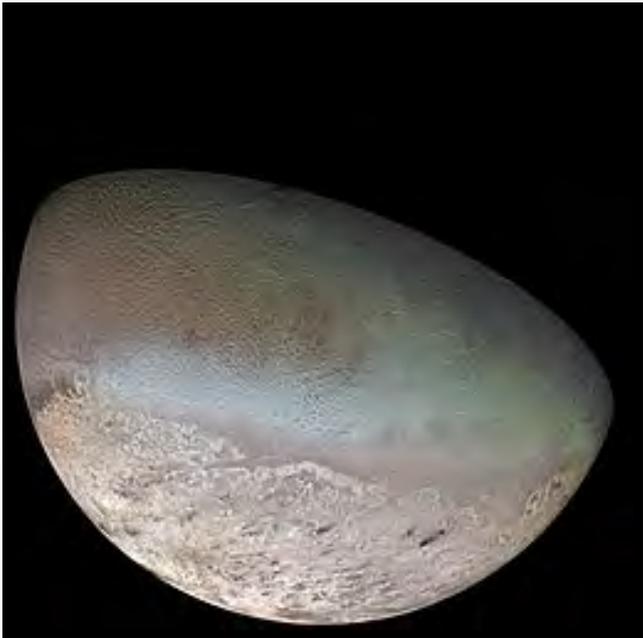
B) Triton

Triton est le plus gros des quatorze satellites naturels de Neptune et le septième par distance croissante à cette dernière. Il a été découvert le 10 octobre 1846 par l'astronome britannique William Lassell, 17 jours après la découverte de Neptune. Il a un diamètre d'un peu plus de 2 700 kilomètres, ce qui en fait le septième satellite naturel du Système solaire par taille décroissante, et un astre plus gros que les planètes naines dont Pluton et Éris. C'est le seul gros satellite connu du Système solaire orbitant dans le sens rétrograde, c'est-à-dire inverse au sens de rotation de sa planète; tous les autres satellites dans ce cas sont de petits corps irréguliers de quelques centaines de kilomètres dans leur plus grande longueur. Cette caractéristique orbitale exclut que Triton ait pu se former initialement autour de Neptune et sa composition similaire à celle de Pluton suggère qu'il s'agit en réalité d'un objet issu de la ceinture de Kuiper capturé par Neptune. Triton orbite autour de Neptune en 5 jours et 21 heures sur une trajectoire quasi circulaire ayant un demi-grand axe de 354 759 kilomètres, une inclinaison de 156,865° (-23,135°) sur le plan de Laplace du système, et jusqu'à 129,6° (-50,4°) sur le plan orbital de sa planète. Ceci lui confère des saisons très marquées tout au long de l'année neptunienne, longue de 164,79 années terrestres; l'hémisphère sud a ainsi passé son solstice d'été en 2000 avec une inclinaison proche du maximum possible par rapport au Soleil, ce qui est à l'origine d'un réchauffement général de l'hémisphère sud depuis le passage de Voyager 2 le 25 août 1989. Triton est un corps de masse volumique moyenne légèrement supérieure à 2 grammes par centimètre cube, constitué vraisemblablement d'un important noyau métallique et rocheux entouré d'un manteau de glace d'eau et d'une croûte d'azote gelé à environ 38 kelvins (-235 °C) en surface. Une atmosphère ténue apparentée à celle des comètes enveloppe le satellite à une pression d'environ 4 pascals selon des mesures récentes réalisées depuis la Terre, composée presque uniquement d'azote N₂, avec des traces de monoxyde de carbone CO et de méthane CH₄; du néon et de l'argon y sont certainement présents sans avoir pu y être quantifiés, n'excédant donc sans doute pas quelques pourcents du total. De l'hydrogène moléculaire H₂ et atomique H sont également présents dans la haute atmosphère en quantités significatives, résultant de la photolyse du méthane par les ultraviolets du rayonnement solaire. Cette atmosphère est probablement issue de geysers dont les traces ont été observées sur la calotte polaire australe de Triton, l'un des rares satellites naturels connus pour avoir une activité géologique significative et assez récente, notamment sous la forme de cryovolcanisme. Ceci expliquerait l'âge très récent des terrains observés par la sonde Voyager 2 en été 1989, qui couvrent environ 40 % de la surface du satellite, où très peu de cratères d'impact

ont été relevés, donnant à l'ensemble un âge n'excédant pas la centaine de millions d'années — soit une valeur très brève à l'échelle des temps géologiques.

Découverte et dénomination de la nouvelle lune

Triton a été découvert par l'astronome britannique William Lassell le 10 octobre 1846, 17 jours à peine après la découverte de Neptune par les astronomes allemands Johann Gottfried Galle et Heinrich Louis d'Arrest, à partir des coordonnées calculées par l'astronome et mathématicien français Urbain Le Verrier. Brasseur de son état, Lassell commença par fabriquer des miroirs pour son télescope amateur en 1820. Quand John Herschel apprit la découverte récente de Neptune, il écrivit à Lassell, lui suggérant de rechercher de possibles satellites autour de la planète. Lassell s'exécuta et découvrit Triton après huit jours de recherches. Lassell annonça aussi avoir découvert des anneaux; néanmoins, bien que Neptune ait effectivement des anneaux, dont la première détection avérée, alors passée inaperçue, remonte à une occultation stellaire en 1968, ils sont si ténus et si sombres que cette affirmation initiale paraît peu vraisemblable compte tenu de la technologie de l'époque, et est très probablement due à un artefact dans son télescope. Triton a été nommé ainsi en référence au dieu marin Triton, fils de Poséidon dans la mythologie grecque, car Poséidon est assimilé au Neptune de la mythologie romaine. Ce nom a été proposé pour la première fois par Camille Flammarion en 1880 dans son ouvrage *Astronomie Populaire*, bien qu'il n'ait été officiellement adopté que plusieurs dizaines d'années plus tard, car on préférait l'appeler plus simplement « le satellite de Neptune ». La découverte, en 1949, d'un second satellite de Neptune, Néréide, nécessita toutefois de lever l'ambiguïté qui en résultait en baptisant explicitement chacun des deux astres. Lassell n'avait pas donné de nom à sa propre découverte, mais suggéra quelques années plus tard le nom à donner au huitième satellite de Saturne, Hypérion, qu'il avait découvert après Triton. Les troisième et quatrième satellites d'Uranus (Ariel et Umbriel), que Lassell découvrit en 1851, furent baptisés, quant à eux, par John Herschel.

Triton	
	
Vue de Triton par Voyager 2 en 1989	
Type	Satellite naturel de Neptune
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	354 759 km
Excentricité	0,000016
Période de révolution	-5,877 j (rétrograde)
Inclinaison	156,865° (par rapport au plan de Laplace de Neptune)
Caractéristiques physiques	
Diamètre	2 706,8 ± 1,8 km

Masse	2,140×10 ²² kg
Masse volumique moyenne	2,1 x10 ³ kg/m ³
Gravité à la surface	0,78 m/s ²
Période de rotation	5,877 j (synchrone)
Magnitude apparente	13,54 (à l'opposition)
Albédo moyen	0,76
Température de surface	~ 36 à 38 K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	1,4 Pa (1989) 4,0 à 6,5 Pa (2010)
Découverte	
Découvert par	William Lassell le 10 octobre 1846

Capture par Neptune

Les satellites orbitant dans le sens rétrograde ne peuvent s'être formés autour de leur planète, seuls les satellites progrades le peuvent, et ont nécessairement été capturés gravitationnellement par cette dernière. Sa composition remarquablement proche de celle de Pluton fait suspecter Triton d'être issu de la ceinture de Kuiper, qui regroupe un ensemble de petits corps et de planètes naines constitués principalement de composés volatils gelés (tels que l'eau, le méthane et l'ammoniac) et orbitant autour du Soleil à une distance comprise entre celle de Neptune (environ 30 UA) et 55 UA. De cette ceinture proviendraient la plupart des comètes périodiques de période inférieure à 200 ans, ainsi que les centaures, tels que Chiron, et les objets épars. S'y trouvent également une classe d'objets massifs, les plutoïdes, qui regroupent actuellement quatre planètes naines, dont Pluton; Triton aurait pu être l'un de ces plutoïdes, avant d'être capturé par Neptune.

Cette capture expliquerait plusieurs particularités du système de Neptune, notamment la très grande excentricité orbitale de Néréide et la relative rareté en petits satellites pour une planète de cette taille, 13 satellites pour Neptune contre au moins 27 pour Uranus. Triton aurait eu une orbite très excentrique lors de sa capture par Neptune, perturbant fortement tous les petits satellites naturels et acquis autour de Neptune au point d'en éjecter la plupart hors du système et de susciter des collisions entre ceux qui n'auraient pas été expulsés, collisions dont les actuels petits satellites intérieurs seraient le résultat après accréation subséquente une fois l'orbite de Triton circularisée. Autre conséquence de cet épisode, les déformations dues aux forces de marée exercées par Neptune sur son nouveau satellite lors de la circularisation de son orbite ont dû fortement réchauffer l'intérieur de Triton au point de le maintenir liquide pendant peut-être un milliard d'années, ce qui aurait favorisé sa différenciation interne et probablement contribué à renouveler entièrement sa surface. Le mécanisme de capture lui-même aurait pu être de deux ordres. Afin d'être capturé par une planète, un objet doit perdre suffisamment d'énergie pour n'avoir plus qu'une vitesse relative inférieure à la vitesse de libération.

L'une des premières théories plausibles élaborées pour expliquer ce phénomène est celle d'une collision du proto-Triton avec un proto-satellite de Neptune. Une explication plus récente part du constat que nombre de corps massifs de la ceinture de Kuiper sont en fait des objets multiples, avec de nombreux couples d'objets massifs, tels que le couple Pluton-Charon dont les diamètres respectifs sont d'environ 2 300 km et 1 200 km, Pluton est un peu plus petit que Triton. Un tel couple pourrait plus facilement permettre la capture de l'un de ses membres par Neptune en transférant l'énergie excédentaire du système dans l'autre membre, qui serait expulsé avec une énergie accrue en laissant le corps principal orbiter au sein du système satellitaire de Neptune. Cette capture se serait produite simplement du fait de l'interaction gravitationnelle avec Neptune, sans collision majeure avec un proto-satellite de Neptune suffisamment massif pour ralentir le proto-Triton et permettre la capture de ses restes.

Nature physico-chimique et structure interne

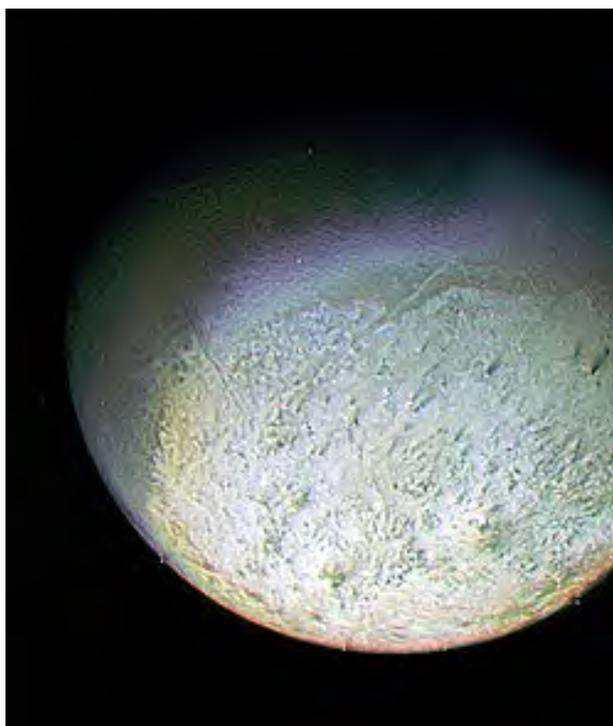
Composition

Avec un diamètre d'environ 2 707 km, Triton est le septième plus gros satellite naturel du Système solaire, après Ganymède (5 268 km), Titan (5 151 km), Callisto (4 817 km), Io (3 636 km), la Lune (3 474 km), et Europe (3 121 km). Il est également plus gros que les planètes naines actuellement connues, Éris ayant un diamètre estimé à 2 397 ± 100 km tandis que celui de Pluton serait de l'ordre de 2 306 ± 20 km. Triton représente à lui seul plus de 99,5 % de la masse de tous les objets en orbite autour de Neptune, y compris les anneaux de Neptune et les douze

autres satellites naturels de Neptune; c'est précisément ce constat qui a fait penser que la capture gravitationnelle de Triton par Neptune aurait pu avoir expulsé ou détruit l'essentiel du système neptunien originel. En fait, toutes ses propriétés globales, taille, masse, composition, température, masse volumique moyenne, rapprochent Triton de Pluton.

Comme celle de Pluton, la surface de Triton est composée majoritairement d'azote N_2 gelé, avec une forte proportion de glace d'eau H_2O et, dans une moindre mesure, de dioxyde de carbone CO_2 gelé; environ 10 % de la surface de Triton serait recouverte de glace carbonique presque pure. D'autres composés gelés y sont présents, notamment du méthane CH_4 , responsable de la teinte rosée plus ou moins jaunâtre de la calotte polaire australe, et du monoxyde de carbone CO ; la maille cristalline de l'azote gelé en surface de Triton, déterminée par spectroscopie, a révélé l'absence d' α - N_2 , limitant à 10 % le taux de CO pouvant être contenu en solution solide dans la glace de N_2 . Le monoxyde de carbone est caractéristique des corps formés dans une nébuleuse froide; dans une région plus chaude (comme celle où s'est formée Neptune, plus proche du Soleil qu'aujourd'hui, dans le scénario décrit par le modèle de Nice aujourd'hui le mieux accepté), CO aurait été réduit en CH_4 , libérant de l'oxygène O_2 , susceptible de former davantage d'eau H_2O en se combinant avec l'hydrogène H_2 de la nébuleuse solaire, ce qui aurait chargé la masse rocheuse en glace d'eau et en aurait abaissé la masse volumique globale autour de $1,5 \text{ g/cm}^3$, valeur typique des satellites naturels de Jupiter et de Saturne.

La présence d'ammoniac NH_3 est également envisageable à la surface à partir du dihydrate $NH_3 \cdot 2H_2O$ peut-être présent dans la lithosphère. La teinte rosée à rouge observée par Voyager 2 sur la calotte australe de Triton résulterait de l'action du rayonnement solaire sur la glace de méthane qui serait convertie en carbone sous l'effet des ultraviolets. La surface de Triton est très réfléchissante, avec un albédo variant localement de 62 % à 89 % et en moyenne 80 % niveau de la calotte polaire australe, par comparaison, la Lune a un albédo moyen de seulement 13,6 %.



Mosaïque de vues d'approche de Triton par Voyager 2 le 24 août 1989 en fausses couleurs (filtres vert, bleu et ultraviolet). Cela fait apparaître certaines zones en bleu, couleur autrement absente de la surface de Triton, autour de la calotte polaire australe, qui apparaît ici en blanc cassé alors qu'elle est en fait rosâtre

Structure

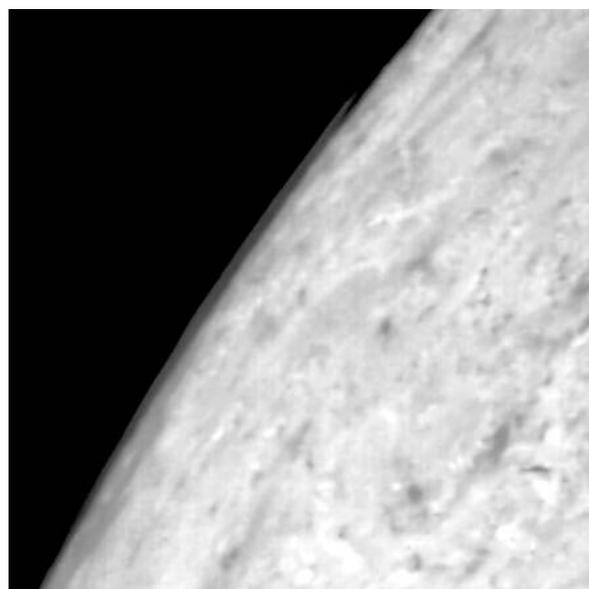
La topographie observée par Voyager 2 sur Triton indique une longue histoire géologique ayant abouti au renouvellement récent de la quasi-totalité de sa surface, de sorte que les modèles de sa constitution interne considèrent que l'intérieur de ce satellite est entièrement différencié, avec un noyau, un manteau et une croûte. La masse volumique moyenne de Triton, mesurée à $2 061 \text{ kg/m}^3$, est compatible avec une constitution globale de 30 % de glace d'eau et de composés volatils, formant *a priori* le manteau, les 70 % restants étant constitués de matériaux métalliques et rocheux formant le noyau. La différenciation planétaire rendue possible par la chaleur induite par les forces de marée à l'œuvre lors de la circularisation de l'orbite de Triton consécutive sa capture aurait ainsi conduit à la formation d'un noyau de 950 km de rayon, lui-même stratifié en une graine métallique de 600 km de rayon entourée d'une gangue rocheuse de 350 km d'épaisseur et jusqu'à 1,5 GPa de pression, au centre d'une enveloppe

d'eau plus ou moins gelée avec diverses impuretés minérales et organiques épaisse de 400 km pour une pression maximum de 400 MPa. La masse de ce noyau (environ les deux tiers de la masse totale du satellite) serait suffisante pour entretenir une source de chaleur interne par désintégration radioactive de ses radioisotopes, thorium 232, uranium 238 et potassium 40, comme dans le noyau terrestre, et générer une convection mantellique, voire maintenir un océan d'eau liquide entre 20 et 140 km sous la surface. Ce chauffage radiogénique pourrait également porter le manteau au-dessus de 177 K (environ -96 °C), température suffisante pour faire fondre un eutectique d'eau et d'ammoniac, qui aurait tendance à s'accumuler à l'interface entre les niveaux de glace II (rhomboédrique avec une densité 1,18) et de glace I_h (cubique à faces centrées avec une densité 0,94), où il pourrait toutefois geler à nouveau si la conductivité thermique de la glace I_h est suffisamment élevée.

Atmosphère

Triton possède une atmosphère ténue composée presque uniquement d'azote N₂, avec des traces de monoxyde de carbone CO et, près de la surface, de méthane CH₄, lequel se photolyse en libérant de l'hydrogène H₂ dans la haute atmosphère. CO est plus abondant que CH₄, dont la concentration au niveau du sol avait été estimée à 0,01 % en 1989, mais la pression partielle de CH₄ augmente rapidement depuis une décennie en raison du réchauffement saisonnier de l'hémisphère sud, actuellement en plein été. La pression au sol avait été évaluée à 1,4 Pa au passage de Voyager 2 en 1989, mais serait actuellement plutôt de l'ordre de 4 à 6,5 Pa. La température de surface est au moins de 35,6 K (-237,55 °C), température minimale à laquelle l'azote gèle dans une maille hexagonale, β-N₂, dont la signature spectroscopique a été observée, contrairement à celle de la maille cubique de l'α-N₂, dans laquelle gèle l'azote en dessous de cette température. La borne supérieure de la température de surface peut également être déduite de la pression de N₂ gazeux en équilibre avec N₂ gelé à la surface, donnant une valeur d'une quarantaine de kelvins, tandis que la température effective a été déterminée à 38 K (-235 °C). En cette époque de grand réchauffement saisonnier, l'atmosphère de Triton ne serait peut-être pas à l'équilibre, et sa structure semble assez variable d'une mesure à l'autre. Les turbulences au-dessus du sol créeraient une troposphère, jusqu'à une altitude communément admise de 8 km, mais que des mesures récentes situeraient jusqu'à 10 km, voire 50 km. Au-dessus se trouverait directement la thermosphère, comprenant une ionosphère vers 125 à 130 km d'altitude, la thermosphère devenant à peu près isotherme au-dessus de 400 km avec un maximum de 102 K (-171 °C) à 600 km d'altitude avant de redescendre à 96 K. L'exosphère commencerait vers 800 km d'altitude, marquant la limite supérieure de l'atmosphère proprement dite.

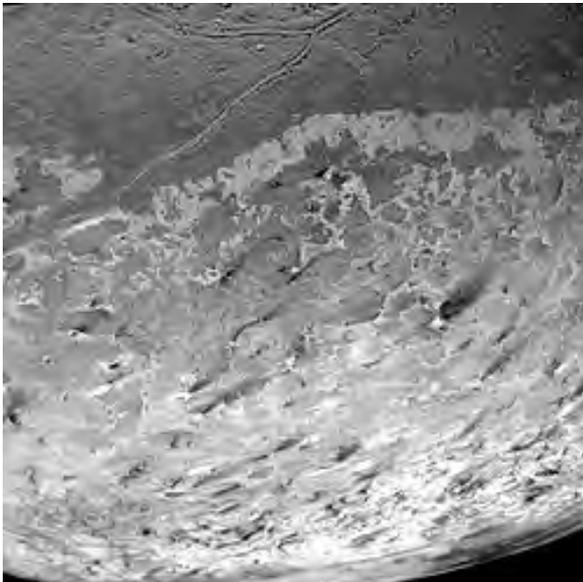
L'atmosphère de Triton possède des nuages d'azote condensé évoluant typiquement de 1 à 3 km au-dessus de la surface, tandis que la troposphère dans son ensemble serait parcourue par une brume d'aérosols composés d'hydrocarbures et de nitriles formés par l'action des ultraviolets du rayonnement solaire sur le méthane et l'azote de cette atmosphère. Celle-ci semble être en équilibre avec les calottes polaires, comme l'atmosphère de Mars, composée de dioxyde de carbone, qui est en équilibre avec les calottes polaires martiennes, constituées de CO₂ gelé. L'action du soleil sur la calotte polaire australe de Triton aurait pour effet de sublimer l'azote des régions polaires, générant des vents en surface mesurés avec une vitesse de l'ordre de 5 m/s se déplaçant depuis le point subsolaire et déviés par la force de Coriolis. Les aérosols troposphériques pourraient modérer cet effet en interceptant partiellement le rayonnement solaire, contribuant à limiter le réchauffement de la surface tout en réchauffant davantage l'atmosphère.



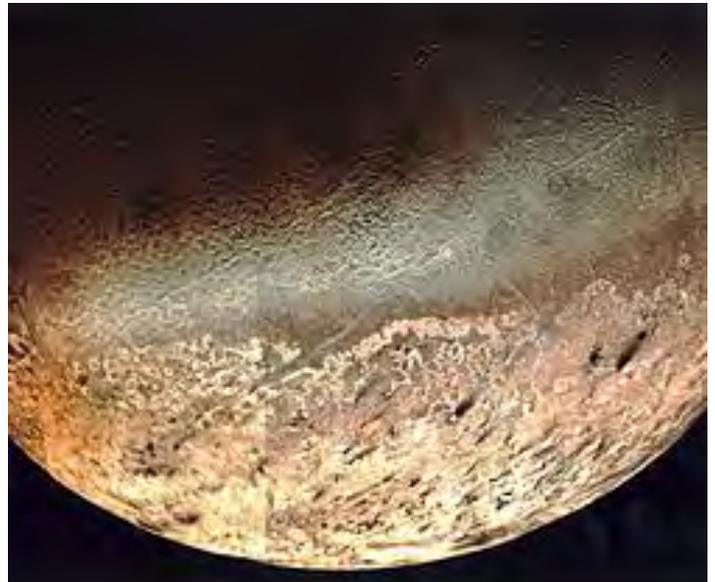
Nuage se détachant au-dessus du limbe de Triton.

Géologie et topographie

Toutes nos connaissances relatives à la surface de Triton proviennent de l'unique survol de ce satellite par une sonde spatiale, en l'occurrence Voyager 2, le 25 août 1989, au cours de laquelle environ 40 % de la surface a pu être observé plus ou moins en détail, essentiellement dans l'hémisphère sud, alors à la fin du printemps. Ces observations ont révélé une surface sans grands reliefs, le dénivelé total ne dépassant pas 1 km, marquée par une assez grande diversité de terrains et surtout une relative rareté en cratères d'impact, Triton n'en comptant en tout peut-être pas plus de quelques centaines, pour fixer les idées, le satellite Miranda d'Uranus en compte plus de 800 sur une surface 30 fois plus petite, un taux de cratérisation qui équivaldrait à observer entre 25 000 et 30 000 cratères sur Triton. La datation d'une surface planétaire à partir de son taux de cratérisation est toujours un exercice difficile entaché de nombreuses incertitudes, mais une estimation vraisemblable conduit à dater celle de Triton de moins d'une centaine de millions d'années, plus précisément entre 50 et 6 Ma, ce qui est géologiquement très jeune, en comparaison, l'âge des terrains lunaires se chiffre en milliards d'années. La surface de Triton présente de fortes similitudes avec celle du satellite Encelade de Saturne, un astre à peu près sphérique d'environ 500 km de diamètre caractérisé par une surface très claire (albédo de 99 %), de grands sillons formant des motifs appelés « rayures de tigre », et un cryovolcanisme actif. Elle rappelle également par certains aspects celle de la planète Mars, notamment par ses calottes polaires et ses traînées sombres d'apparence très semblable produites semble-t-il par des geysers et orientées en fonction des vents dominants. Trois grandes régions ont été définies sur Triton à partir des clichés reçus de la sonde Voyager 2 fin août 1989, les seuls dont nous disposons à l'heure actuelle et pour encore de nombreuses années :



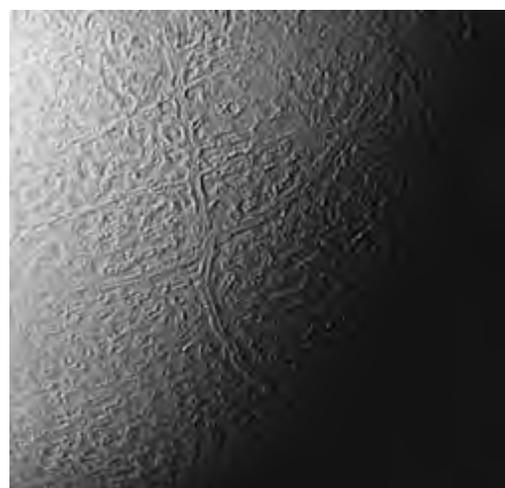
Calotte polaire australe de Triton avec une cinquantaine de traînées sombres attribuées à des formes de geysers. La plus grande traînée visible ici est Namazu Macula, sur la droite



Mosaïque de vues de la calotte polaire australe de Triton, soulignant les traînées sombres de Namazu, Doro et Viviane, sans doute laissées par autant de geysers



Ruach Planitia, un probable bassin d'impact sur Triton, avec le petit cratère Amarum



Terrains dits « en peau de melon cantaloup »

- Uhlanga Regio, de loin la plus claire avec une teinte rosée tirant sur le jaune et un albédo atteignant localement 89 %, qui correspond à la calotte polaire australe, constellée de traînées sombres vraisemblablement produites par des geysers
- Monad Regio, nettement plus sombre avec un gris tirant localement sur le vert et correspondant à l'hémisphère « avant » du satellite dans le sens de sa révolution autour de Neptune, marquée par des bassins d'impact et, peut-être, des plaines de « cryolave »
- Bubembe Regio, la plus sombre avec un gris tirant sur le bleu — mais le reflet de la surface bleue de Neptune y est peut-être aussi pour quelque chose — et caractérisée par des terrains dits « en peau de melon cantaloup ».



Terrains tourmentés au sud de Ruach Planitia, le nord étant ici à droite

Uhlanga Regio – calotte polaire australe et geysers

La calotte polaire australe, Uhlanga Regio, a été la première région observée par Voyager 2 lors de son approche de Triton : les premières vues du satellite révélant quelques détails en surface étaient prises alors que la sonde se trouvait encore face à l'hémisphère éclairé de Triton, la calotte polaire australe occupant alors presque toute la surface. La sonde s'est ensuite décalée en se rapprochant du satellite, pour ne plus en voir qu'un quartier lors du survol rapproché du 25 août 1989. Ces clichés ont révélé une surface irrégulière de teinte rosée et globalement très réfléchissante, constellée de multiples dépressions aux bords festonnés et, surtout à l'est, de cratères d'impact.

D'une manière générale, la plupart des formations topographiques observées à la surface de Triton sont à la fois récentes et endogènes, c'est-à-dire qu'elles proviennent de processus géologiques internes plutôt que de phénomènes extérieurs tels que des impacts cosmiques. C'est notamment le cas des traînées sombres découvertes sur la calotte polaire australe, correspondant *a priori* à la manifestation de geysers d'azote sublimé sous la surface et sortant sous pression en entraînant des particules de poussières sombres. Ces poussières formeraient des panaches de 2 à 8 km de haut, qui retomberaient à la surface après avoir dérivé dans le sens du vent local en formant les traînées observées sur toute la surface d'Uhlanga Regio, traînées qui rappellent beaucoup les formations similaires étudiées sur Mars. Ces dernières sont d'ailleurs préférentiellement situées dans les régions proches des pôles martiens, et les geysers de Triton semblent être les plus nombreux à des latitudes de 50 à 57° S, correspondant à des régions actuellement situées à proximité du point subsolaire mais qui n'avaient pas connu cette situation depuis cinq siècles.

L'albédo élevé de la calotte polaire australe serait due au fait qu'elle est constituée de glace d'azote « fraîche », déposée au cours des siècles précédents d'hivers intenses et d'étés tièdes, par contraste avec la glace de N₂ davantage chargée en impuretés, et donc plus sombre, constituant le reste de la surface de Triton. Ce contraste d'albédo favoriserait également la formation des geysers par l'absorption plus efficace de la chaleur du rayonnement solaire dans les couches sous-jacentes à la calotte polaire plutôt qu'en surface de celle-ci, qui serait translucide pour ces rayonnements. Bien que spectaculaires, ces manifestations ne relèvent pas d'une activité cryovolcanique, dans la mesure où les geysers sont des phénomènes superficiels essentiellement gazeux limités à la croûte d'une planète ou d'un satellite, alors que les volcans sont des manifestations plus profondes de l'activité du manteau. On suppose que Triton possède également une calotte polaire boréale, mais celle-ci se situerait à l'opposé de l'hémisphère actuellement observable, et son existence ne peut donc être confirmée.

Monad Regio – bassins d'impact et cryovolcanisme

Les vastes plaines orientales, visibles sur la droite du limbe de Triton observé par Voyager 2 à proximité du terminateur, ont été appelées Monad Regio. Elles semblent recouvrir des reliefs plus anciens qui apparaissent parfois encore discernables sous une couche de matériaux plus lisses aux ondulations adoucies. Certains reliefs, des cratères et des fractures, semblent même recouverts partiellement par ces dépôts aux contours nets, qui présentent ainsi toutes les caractéristiques d'une coulée de « cryolave » (par exemple de la glace d'eau mélangée à de l'ammoniac jouant le rôle d'antigel) avec diverses impuretés conférant à l'ensemble des viscosités très variables proches des laves terrestres. On serait ainsi en présence de plaines de « cryolave » récentes, la plus explicite étant peut-être Cipango Planum, bordée au nord par un système de formations topographiques complexe évoquant des fissures cryovolcaniques (Set Catena et Kraken Catena) se croisant au niveau d'une vaste caldeira cryovolcanique (Leviathan Patera) et se prolongeant jusqu'à un cône plus petit à l'est (Kibu Patera).

Quatre « plaines à rebord » de forme plus ou moins circulaire sont visibles sur les clichés transmis par Voyager 2, correspondant vraisemblablement à des bassins d'impact au fond rempli de « cryomagma ». Ce sont les régions les plus lisses de la surface connue du satellite, avec des dénivelés ne dépassant pas 100 m, les rebords atteignant localement 200 m de haut. Ruach Planitia serait ainsi un bassin d'environ 200 à 250 km de large avec une surface parfaitement plate, un cratère d'impact significatif (le cratère Amarum) et une zone centrale plus irrégulière avec une cavité (Dilolo Patera) et une petite fracture résultant peut-être d'une relaxation isostatique ou d'un épanchement plus récent. Au nord-ouest de Ruach s'étend Tuonela Planitia, deux fois plus vaste et de forme oblongue, peut-être issue de deux impacts ou, plus probablement, d'un impact oblique, avec également une région centrale plus chaotique au milieu d'une plaine extrêmement lisse. Abatos Planum, en bordure orientale du limbe de Triton, apparaît maculé de grandes taches sombres auréolées de blanc, Zin Maculae, dont l'origine n'est pas connue; il pourrait s'agir de résidus de la calotte polaire, photographiée par Voyager 2 à la fin d'un printemps particulièrement chaud et donc après s'être vraisemblablement retirée significativement.

Bubembe Regio – sillons et terrains « en peau de cantaloup »

La partie occidentale du limbe de Triton observé par Voyager 2, Bubembe Regio, est composée de terrains d'apparence très particulière dits en peau de cantaloup (*cantaloupe-skin terrains* en anglais) en raison de leur ressemblance avec l'aspect du melon cantaloup. Son origine géologique n'est pas certaine, mais une datation relative sommaire en fait les plus anciens terrains à la surface de Triton, dans la mesure où les fractures et les plaines de « cryolave » en altèrent la surface et lui seraient donc postérieures.

La rareté des cratères d'impact caractérisés dans cette région, située à l'arrière du satellite dans le sens de sa révolution autour de Neptune, signifierait peut-être que les surfaces correspondantes (dont la couleur et la disposition évoquent les régions sombres du satellite Ganymède de Jupiter, correspondant aux terrains les plus anciens de cet astre) auraient été régulièrement « refondues », égalisant les reliefs tout en laissant cette apparence dépolie de bosses, de cavités et de failles évoquant une sorte de bouillonnement figé et résultant sans doute de l'activité géologique sous-jacente. Les nombreuses cavités en forme de cratère identifiées sur ces terrains ont d'ailleurs une distribution particulière évoquant davantage une origine cryovolcanique explosive plutôt que météoritique. Un certain nombre de grandes fractures ou sillons zèbrent la surface de Triton sur de grandes longueurs en s'entrecroisant par endroits, formant des structures rappelant celles observées à la surface du satellite Europe de Jupiter, bien qu'à une échelle différente, celles de Triton sont dix fois plus larges que celles d'Europe. Ces sillons, larges typiquement de 15 km et longs en moyenne de 1 000 km, sont présents dans toutes les régions mais plus particulièrement dans Bubembe Regio, et tendent à se regrouper, à l'exemple de Boyne Sulci, qui semble traverser la calotte polaire australe et qui est rejoint par Slidr Sulci à l'extérieur de celle-ci.

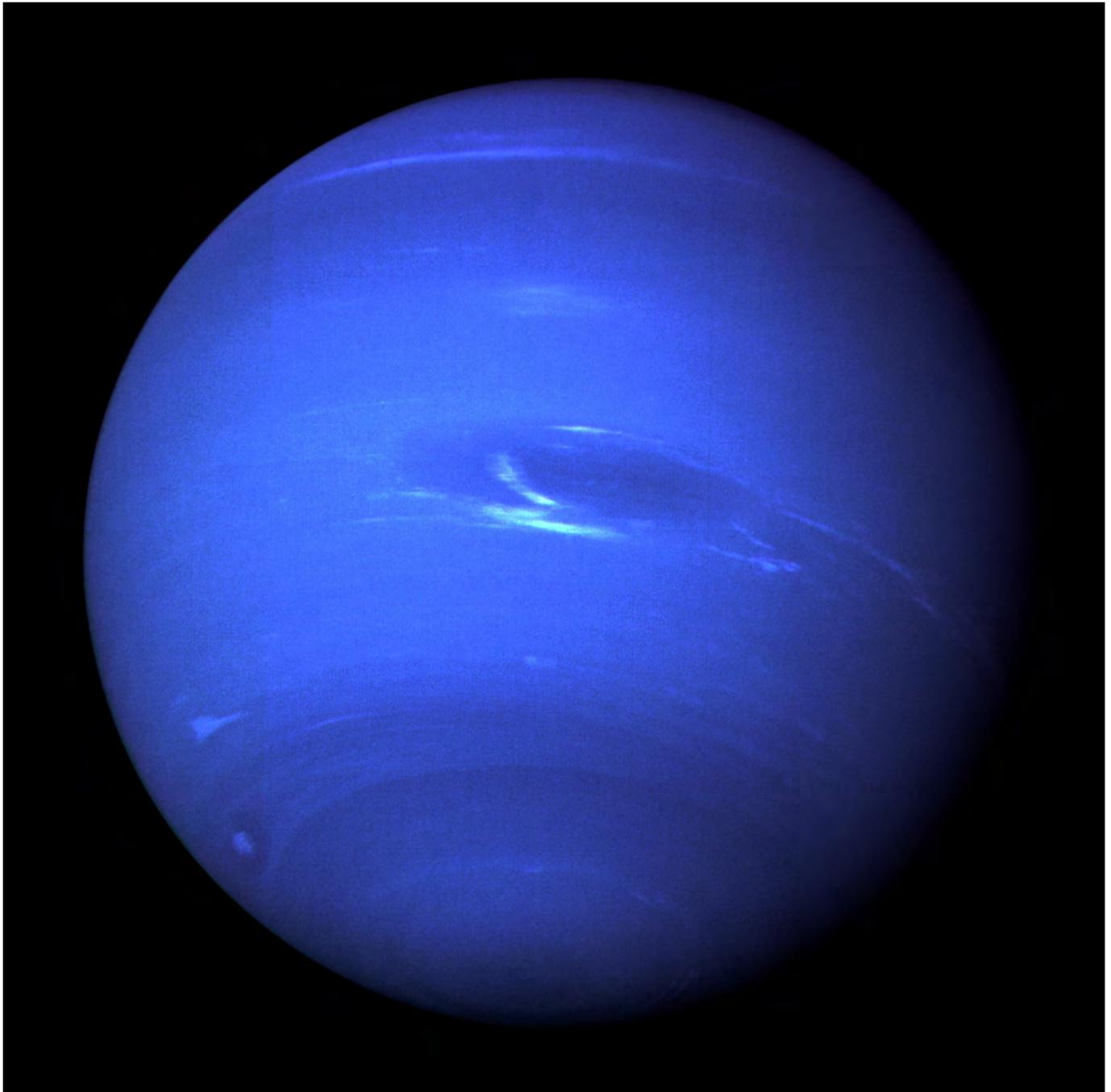
Cratères d'impact

Ce sont en tout 179 structures formellement identifiées comme cratères d'impact qui ont été dénombrées sur les clichés pris par Voyager 2, lesquels ne couvrent qu'environ 40 % de la surface de Triton. Cela ferait 450 à 500 cratères extrapolés à toute la surface du satellite, quand un taux de cratérisation similaire à celui observé sur le satellite Miranda d'Uranus, qui sert de référence dans cette région du Système solaire et compte 835 cratères d'impact, conduirait plutôt à dénombrer de 25 000 à 30 000 cratères d'impact sur Triton. Le taux de cratérisation observé sur Triton, qui est environ soixante fois plus faible que celui de Miranda, indique que l'ensemble des processus géologiques à l'œuvre sur Triton en a récemment renouvelé la presque totalité de la surface photographiée : seuls y subsistent des cratères de moins de 27 km de diamètre, taille du cratère Mazomba, dans la région d'Abatos Planum. Les rares cratères visibles se concentrent préférentiellement à l'avant du satellite dans le sens de sa révolution autour de Neptune, de sorte qu'il est possible que la face arrière du satellite compte encore moins de cratères que sa face avant, faisant davantage chuter le taux de cratérisation global.

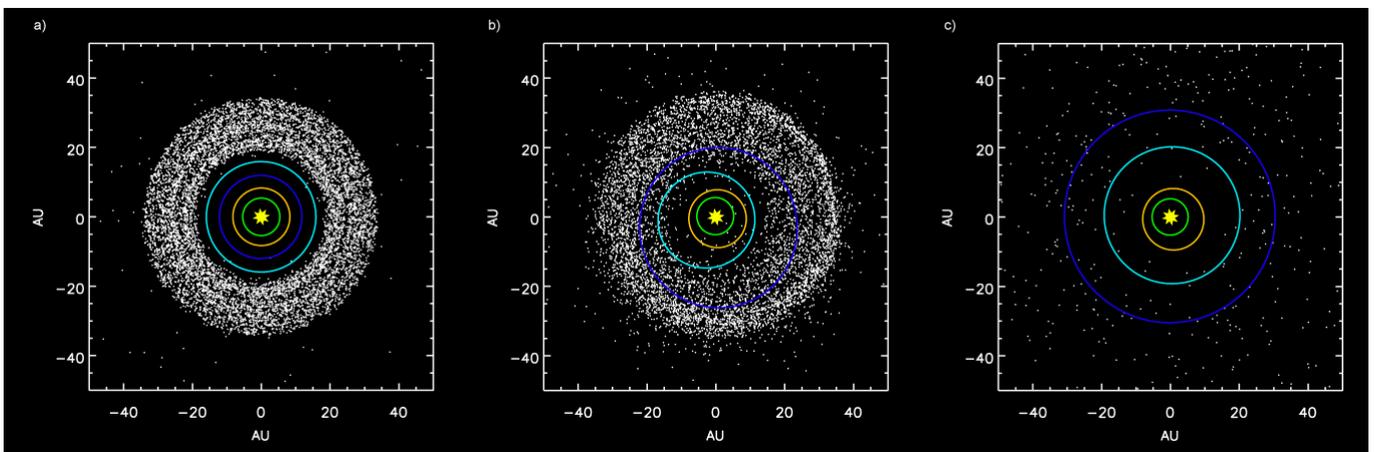
IV Iconographie



Cette vue saisissante des croissants de Neptune et de Triton a été prise lors de l'approche de Voyager 2 (le nord est à droite). La sonde plonge alors vers le sud, ce qui confère à cette vue une géométrie unique. La sonde était à une distance de 4,86 millions de kilomètres de Neptune. L'échelle de cette photo est d'environ 90 km par pixel. La couleur de Neptune n'est pas habituelle à travers les filtres orange et verts, puis à cause de l'atmosphère qui absorbe la lumière rouge à cet angle de 134 degrés.



Neptune par Voyager 2



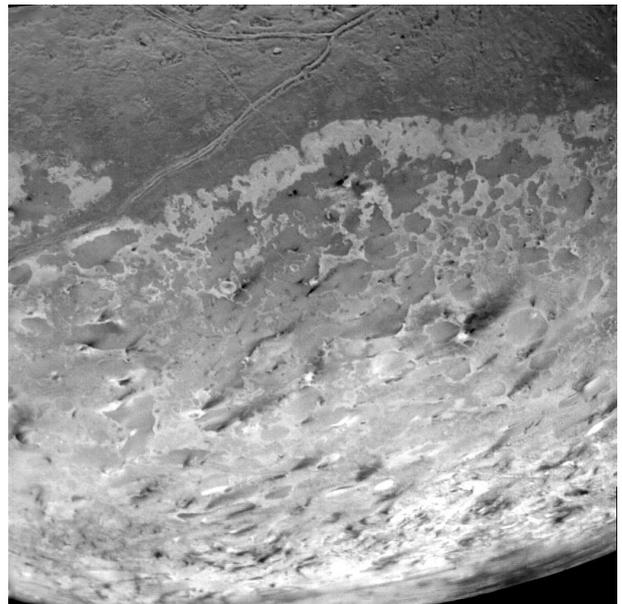
Simulation montrant les planètes externes et la ceinture de Kuiper : a) Avant la résonance 2:1 de Jupiter et Saturne. b) Dispersion des objets de la ceinture de Kuiper dans le système solaire après la migration de Neptune. c) Après l'éjection d'objets de la ceinture de Kuiper par Jupiter. L'orbite de Jupiter est représentée en vert, Saturne en orange, Uranus en bleu clair et Neptune en bleu foncé. Simulation créée sur la base de données du Modèle de Nice



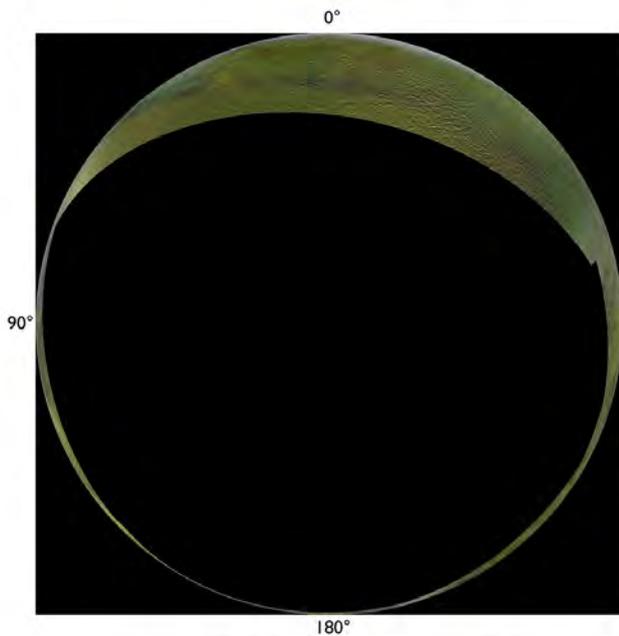
Anneaux de Neptune pris par la caméra grand-angle de Voyager 2. Les deux principaux anneaux sont clairement visibles et apparaissent complets. Ces deux anneaux sont constitués de matière sur leurs orbites entières et sont donc continus (ce qui n'est pas le cas de tous les anneaux de Neptune)



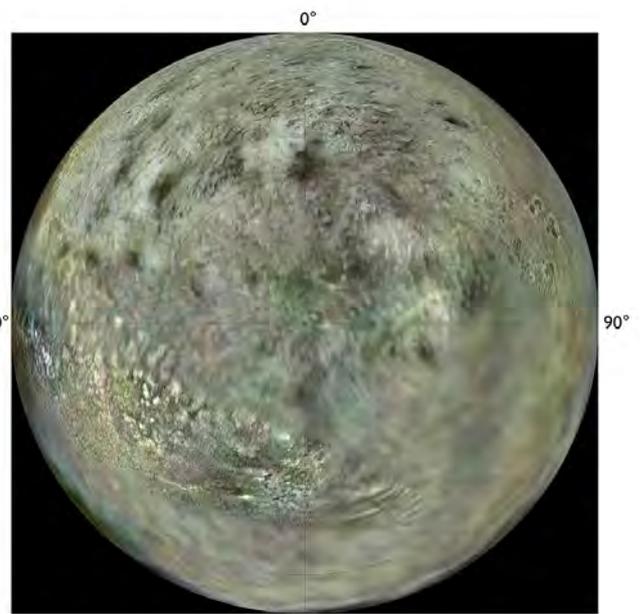
Mosaïque de vues d'approche de Triton par Voyager 2 le 24 août 1989 en fausses couleurs (filtres vert, bleu et ultraviolet)¹⁹. Cela fait apparaître certaines zones en bleu, couleur autrement absente de la surface de Triton, autour de la calotte polaire australe, qui apparaît ici en blanc cassé alors qu'elle est en fait rosâtre



Mosaïque de vues de la calotte polaire australe de Triton, soulignant les traînées sombres de Namazu, Doro et Viviane, sans doute laissées par autant de geysers



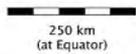
Northern Hemisphere
Orthographic map projection at 600 meters/pixel



Southern Hemisphere
Orthographic map projection at 600 meters/pixel

Global 3-Color Map of Triton (Or-Gr-BI)

August 2014



Cartographic control and digital mosaic construction by Dr. Paul Schenk (LPI, Houston)
from Voyager 2 images acquired August 1989.



Les couleurs ont été renforcées pour apporter un meilleur contraste de photos de Voyager 2 qui ont été utilisées pour réaliser ces « cartes ». La résolution est de 600 mètres par pixel. Les images ont été faites en utilisant des filtres orange, verts et bleus, mais donnent quand même une impression d'ensemble assez réaliste de Triton.

Table des matières

I Neptune, la planète	1
A) Observations et découverte	3
1) Recherche d'une planète transuraniennne	3
2) Découverte de Neptune	4
3) Course à la découverte	5
4) Après la découverte	7
B) Caractéristiques physiques	10
1) Masse et diamètre	10
2) Champ magnétique	10
3) Orbite et rotation	11
C) Composition de Neptune	11
1) Composition interne	11
2) Atmosphère	12
3) La grande tache sombre.....	13
II Les anneaux de Neptune	16
1) Propriétés générales	17
2) Anneaux intérieurs	17
3) Anneau Lassell	18
4) Anneau Adams	18
5) Arcs	18
6) Confinement des arcs	19
7) Exploration	19
III Les satellites de Neptune	21
A) Généralités	21
B) Triton	24
IV Iconographie	32
Table des matières	36
Annexe 1 : Liste des satellites de Neptune avec leurs caractéristiques.....	A

Liste des satellites connus de Neptune, du plus éloigné de la planète

En blanc : satellites réguliers - En bleu clair : satellites progrades irréguliers – En vert clair : satellites rétrogrades irréguliers

N°	Nom	Désignation temporaire	Diamètre (km)	Masse (10 ¹⁶ kg)	Demi-grand axe (km)	Excentricité	Inclinaison (°)	Période orbitale (j)	Période de rotation (j)	Masse volumique moyenne (kg/m ³)	Gravité à la surface (m/s ²)	Température de surface (K)	Albédo moyen	Pression atmosphérique (Pa)	Décou verte
1	Naiade	S/1989 N 6	67 (96×60×52)	~19	48 227	0,0004	4,746	0,294		1,3e3	0,010	~71	0,07	0	1989
2	Thalassa	S/1989 N 5	83 (108×100×52)	~35	50 075	0,0002	0,209	0,311		1,3e3	0,013	~70	0,09	0	1989
3	Despina	S/1989 N 3	152 (180×150×130)	~210	52 526	0,0002	0,064	0,335		1,3e3	0,023	~70	0,09	0	1989
4	Galatée	S/1989 N 4	175 (204×184×144)	212	61 953	0,0000	0,062	0,429		1,3e3	0,030	~71	0,08	0	1989
5	Larissa	S/1981 N 1, S/1989 N 2	195 (216×204×164)	~420	73 548	0,0014	0,205	0,555		1,3e3	0,034	~70	0,09	0	1981
6	S/2004 N 1	S/2004 N 1	~19		105 250			0,96							2013
7	Protée	S/1989 N 1	418 (436 × 416 × 402)	~5 000	117 647	0,0005	0,026	1,122		1,3e3	0,075	~70	0,10	0	1989
8	Triton	—	2 707	2 140 000	354 800	0,000016	156,865	-5,877	5,877 (Synchrone)	2,1e3	0,78	~36-38	0,76	4,0 à 6,5	1846
9	Néréide	—	340	~3 100	5 513 400	0,7512	7,232	360,14	0,48	1,5e3	0,071		0,16		1949
10	Halimède	S/2002 N 1	60	~9	15 728 000	0,5711	134,101	-1 879,71		1,5e3	0,010		Albédo	0	2002
11	Sao	S/2002 N 2	38	~9	22 422 000	0,2931	48,511	2 914,07		1,5e3	0,010		0,16	0	2002
12	Laomédie	S/2002 N 3	38	~9	23 571 000	0,4237	34,741	3 167,85		1,5e3	0,010		0,16	0	2002
13	Psamathee	S/2003 N 1	28	~1,5	46 695 000	0,450	137,4	-9 115,91		1,5e3			0,04	0	2003
14	Néso	S/2002 N 4	60	~9	48 387 000 (0,32 ua)	0,495	132,6	-9 373,99		1,5e3			0,04	0	2002