



# URANUS

La planète Uranus,  
Ses anneaux,  
Ses satellites  
Le modèle de Nice  
Le grand bombardement tardif  
Iconographie

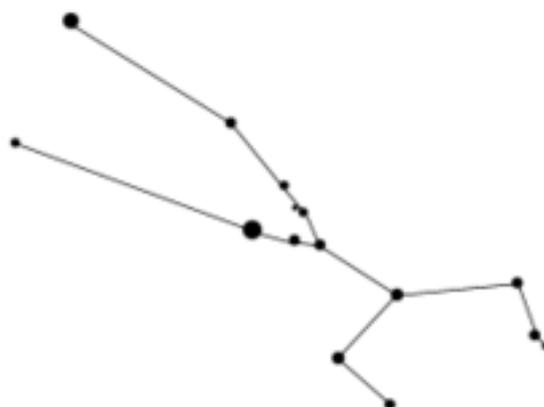


# Uranus

## I Uranus, la planète

**Uranus** est une planète géante de glaces de type Neptune froid. Il s'agit de la 7<sup>e</sup> planète du Système solaire par sa distance au Soleil, de la 3<sup>e</sup> par la taille et de la 4<sup>e</sup> par la masse. Elle doit son nom à la divinité romaine du ciel, Uranus (Ouranos chez les Grecs), père de Saturne (en grec Cronos) et grand-père de Jupiter (en grec Zeus). Uranus est la première planète découverte à l'époque moderne. Bien qu'elle soit visible à l'œil nu comme les cinq planètes déjà connues, son caractère planétaire ne fut jamais identifié en raison de son très faible éclat, étant à la limite de la visibilité (magnitude comprise entre 5,3 et 5,7 pour les oppositions et environ 6 le reste du temps) et de son déplacement apparent très lent (période orbitale de plus de 84 ans). William Herschel annonce sa découverte le 26 avril 1781, élargissant les frontières connues du Système solaire pour la première fois à l'époque moderne. Uranus est la première planète découverte à l'aide d'un télescope. Uranus et Neptune ont des compositions internes et atmosphériques différentes de celles des deux plus grandes géantes gazeuses, Jupiter et Saturne. Les astronomes les placent donc de nos jours généralement dans une catégorie différente, celle des géantes glacées ou des sous-géantes. L'atmosphère d'Uranus, bien que composée principalement d'hydrogène et d'hélium, contient une proportion plus importante de glaces d'eau, d'ammoniac et de méthane, ainsi que les traces habituelles d'hydrocarbures. Uranus est la planète du Système solaire dont l'atmosphère est la plus froide, sa température minimale étant de 49 K (-224 °C), à la tropopause (vers 56 km d'altitude et 0,1 bar, le niveau zéro étant défini à une pression d'un bar). Elle a une structure nuageuse complexe : les nuages des couches les plus basses seraient constitués d'eau alors que ceux des couches les plus élevées seraient de méthane. À l'instar des autres géantes gazeuses, Uranus a un système d'anneaux, une magnétosphère et de nombreux satellites naturels. Le système uranien est unique dans le Système solaire car son axe de rotation est pratiquement dans son plan de révolution autour du Soleil ; les pôles nord et sud sont situés où les autres planètes ont leur équateur. En 1986, les images de Voyager 2 ont montré Uranus comme une planète sans caractéristique particulière en lumière visible, sans couche nuageuse ou tempête existant sur les autres planètes gazeuses. Cette visite de la sonde se produisit près du solstice, l'hémisphère éclairé était alors principalement son hémisphère austral. Cependant, les observateurs terrestres ainsi que le télescope spatial *Hubble* ont depuis constaté des signes de changements saisonniers et une augmentation de l'activité météorologique ces dernières années, Uranus approchant alors de son équinoxe, qu'il a atteint en décembre 2007. Le vent à la surface d'Uranus peut atteindre une vitesse de 250 m/s, soit 900 km/h.

### A) Premières observations



*La constellation du Taureau, où Uranus est observée à tort comme étoile*

Contrairement à Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, Uranus ne fut pas découverte dans l'Antiquité. Étant loin du Soleil et circulant lentement sur son orbite, Uranus apparaissait comme une simple étoile jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle.

Uranus fut observée à de nombreuses occasions avant que son caractère planétaire ne soit formellement identifié : elle est en général prise pour une étoile. La plus ancienne mention date de 1690 lorsque John Flamsteed l'observe au moins six fois et la catalogue sous le nom de 34 Tauri. L'astronome français Pierre Charles Le Monnier observe Uranus au moins douze fois entre 1750 et 1769, notamment durant quatre nuits consécutives. Uranus a peut-être été observée par Hipparque en 128 av. J.-C.. En effet, un astérisme cité dans l'Almageste de Claude Ptolémée, reprenant les travaux d'Hipparque, ne peut être résolu que par la présence d'Uranus à cette époque. Uranus à mi-avril 128 av. J.-C. était dans des conditions d'observations très favorables : proche de son périhélie, magnitude de 5,4, à 33° du zénith.

## B) Découverte

Sir William Herschel la découvre le 13 mars 1781 lors d'une recherche systématique d'étoiles doubles à l'aide d'un télescope. Dans le jardin de sa maison du 19 New King Street à Bath dans le Somerset en Angleterre (désormais le Musée d'astronomie Herschel) mais n'annonce la découverte que le 26 avril 1781, en tant que comète. Herschel avait entrepris une série de mesures de la parallaxe des étoiles fixes en utilisant un télescope de sa conception. À la frontière des constellations des Gémeaux et du Taureau, Herschel remarque au milieu des points-étoiles une petite tache semblant sortir de derrière la planète Saturne. Il change alors successivement d'oculaire, passant du grossissement 227 à 460. Il note alors que la petite tache double de taille. Il change à nouveau d'oculaire pour un grossissement de 932, 1 536 et 2 010, et là encore, l'objet double de taille à chaque fois, tandis que les étoiles tout autour, très éloignées, ne varient pas en taille et restent de simples points brillants. Cela ne peut être une étoile; il écrit donc dans son journal l'observation d'un curieux objet, une nébuleuse ou une comète. Il nota la position de l'astre, puis quelques jours après reprit son observation. La petite tache avait bougé, ça ne pouvait être une nébuleuse, donc c'était une comète. Il décide alors de prévenir la communauté scientifique de sa découverte et envoie un courrier avec les détails de sa comète au directeur de l'observatoire d'Oxford, Thomas Hornsby. Il informe également l'astronome royal Nevil Maskelyne de l'observatoire de Greenwich. Celui-ci, après avoir observé la comète et constaté qu'elle se comportait différemment des autres, conseille à Herschel d'écrire à la Royal Society. Il écrit dans son journal : « dans le quartile près de  $\zeta$  Tauri... soit [une] étoile nébuleuse soit peut-être une comète. » Le 17 mars, il note, « j'ai regardé la comète ou étoile nébuleuse et, comme elle avait changé de place, j'en ai déduit que c'était une comète et non une nébuleuse. » Lorsqu'il présente sa découverte à la Royal Society, il continue d'affirmer que c'est une comète mais la compare aussi implicitement à une planète : « La puissance que j'avais lorsque je vis la comète pour la première fois était 227. Par expérience je sais que le diamètre des étoiles fixes n'est pas augmenté proportionnellement pour de plus grandes puissances, comme c'est le cas pour les planètes ; je mets donc maintenant la puissance à 460 et 932, et trouve que le diamètre de la comète augmente en proportion de la puissance, comme il doit l'être, en supposant qu'il ne s'agit pas d'une étoile fixe, alors que le diamètre des étoiles auxquels je l'ai comparé n'étaient pas augmentés dans les mêmes proportions. De plus, la comète étant grossie bien plus que ce que sa lumière permet, apparaissait floue et mal définie à de si grandes puissances, alors que les étoiles conservaient leur lustre et distinction que je savais depuis des milliers d'observations qu'elle garderait. La suite a montré que mes suppositions étaient bien fondées, ceci prouvant que c'est la Comète que nous avons observée plus tôt ».

## C) Confirmation de son existence

Herschel avertit l'astronome royal, Nevil Maskelyne, de sa découverte et reçut une réponse embarrassée de sa part le 23 avril : « Je ne sais pas comment l'appeler. Il est aussi probable que ce soit une planète située sur une orbite autour du Soleil presque circulaire, que ce soit une comète de trajectoire très elliptique. Je n'ai pas observé pour l'instant de chevelure ou de queue ».

Tandis qu'Herschel continue par précaution à appeler ce nouvel objet une comète, d'autres astronomes soupçonnent sa véritable nature. L'astronome russe Anders Johan Lexell estime sa distance à dix-huit fois la distance Terre-Soleil. Aucune comète ayant un périhélie supérieur à quatre fois la distance Terre-Soleil n'a alors jamais été observée. L'astronome berlinois Johann Elert Bode pense que la découverte d'Herschel est « une étoile mobile qui peut être considérée comme un type d'objet planétaire jusqu'alors

inconnu orbitant au-delà de l'orbite de Saturne ». Bode conclut que son orbite presque circulaire ressemble davantage à celle d'une planète que d'une comète. Les astronomes commencent alors le calcul de la trajectoire de la « comète », en prenant le modèle classique des orbites de comètes : une parabole, mais celle-ci ne semblait pas vouloir se conformer au modèle prévu. Charles Messier remarque alors qu'avec son aspect de disque, elle ressemblait plus à Jupiter qu'aux 18 autres comètes qu'il avait observées. L'astronome russe Anders Lexell tenta, lui, de calculer l'orbite en appliquant le modèle d'une planète. À sa grande surprise, cette trajectoire semblait correspondre et convainquit les autres astronomes sur la nature de l'objet : une planète et non une comète. L'objet est bientôt unanimement accepté en tant que planète.



*William Herschel*

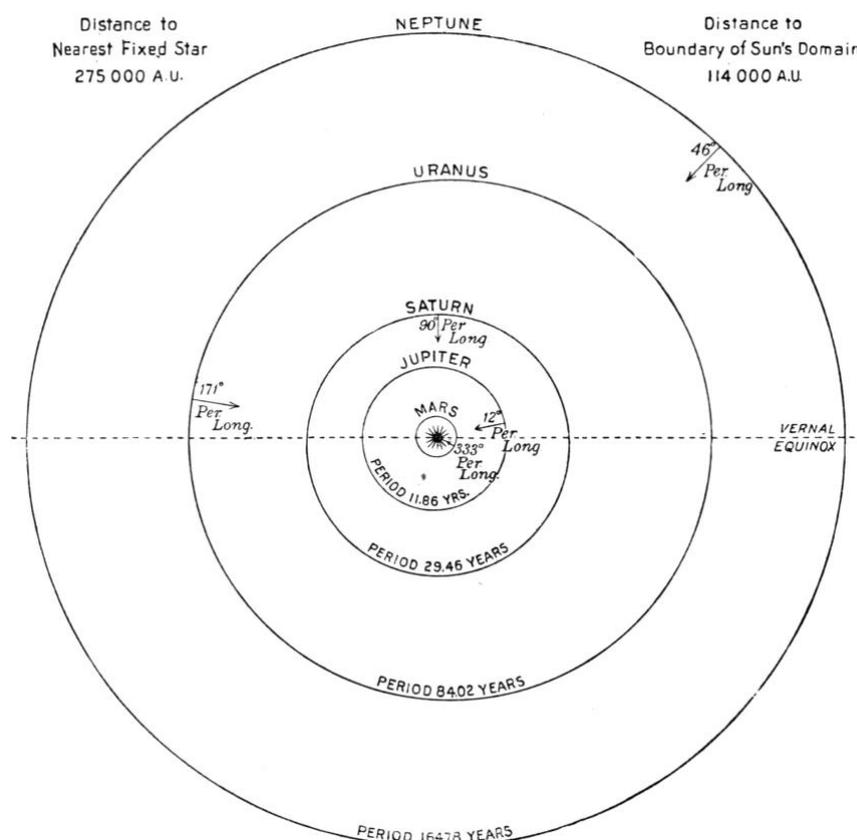
En 1783, Herschel lui-même le reconnaît auprès du président de la Royal Society Joseph Banks : « Selon les observations des plus éminents astronomes européens, il apparaît que la nouvelle étoile que j'ai eu l'honneur de leur faire découvrir en mars 1781, est une planète primaire du Système solaire ». Le roi George III récompense Herschel de sa découverte en lui attribuant une rente annuelle de 200 livres à condition qu'il s'installe à Windsor afin que la famille royale puisse regarder à travers ses télescopes.

#### **D) Nom de la nouvelle planète**

Maskelyne a demandé à Herschel de donner un nom à cette nouvelle planète, étant le découvreur de cette dernière. En réponse, Herschel a décidé de nommer l'objet « Georgium Sidus » (étoile de George), ou « Georgian Planet » (planète Géorgienne) en l'honneur de son nouveau patron, le roi George III. Il expliqua cette décision dans une lettre à Joseph Banks en déclarant que dans l'Antiquité, les appellations de Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne ont été donnés aux planètes, comme étant les noms de leurs héros et divinités principales. Dans l'ère actuelle, plus philosophique, il ne serait guère admissible d'avoir recours à la même méthode et d'appeler Junon, Pallas, Apollon ou Minerve, notre nouveau corps céleste. Pour lui, l'important pour le désigner est de savoir quand il a été découvert et sa réponse fut « sous le règne du roi George III ».

Cependant, le nom proposé par Herschel n'était pas populaire en dehors de la Grande-Bretagne, et des solutions alternatives pour un nom ont été rapidement proposées. L'astronome Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande a proposé de nommer la planète Herschel en l'honneur de son découvreur. L'astronome suédois Erik Prosperin proposa le nom de Neptune qui a été soutenu par d'autres astronomes qui ont aimé l'idée de commémorer les victoires de la flotte britannique *Royal Navy* dans le cadre de la Guerre d'indépendance des États-Unis en appelant même la nouvelle planète « Neptune George III » ou « Neptune Great Britain ». Johann Elert Bode a opté pour Uranus, la version latinisée du dieu grec du ciel, Ouranos. Bode a fait valoir que, tout comme Saturne était le père de Jupiter, la nouvelle planète devrait être nommée d'après le père de Saturne. En 1789, Martin Klaproth, le collègue de Bode à la *Royal Academy*, a nommé son élément nouvellement découvert « uranium » avec l'appui du choix de Bode. En fin de compte, la suggestion d'Uranus est devenue le plus largement utilisée, et est devenue universelle en 1850, lorsque le HM Nautical Almanac Office, le dernier obstacle, délaissa Sidus Georgium pour Uranus.

## Après la découverte



*Dessin du système solaire par Lowell en 1903*

Au XIX<sup>e</sup> siècle et XX<sup>e</sup> siècle siècles, il était très difficile d'observer correctement la surface d'Uranus. La seule découverte de l'époque fut celle de Schiaparelli qui distingua malaisément quelques taches. Par spectroscopie et photométrie, les scientifiques avant 1937, purent fixer à 10 heures la rotation de la planète qui était vue comme rétrograde. Le 10 mars 1977, les anneaux d'Uranus sont découverts par hasard par les astronomes James L. Elliot, Edward W. Dunham et Douglas J. Mink, embarqués à bord de l'observatoire aéroporté Kuiper. Les astronomes veulent utiliser l'occultation de l'étoile SAO 158687 par Uranus pour étudier l'atmosphère de cette étoile. Or l'analyse de leurs observations met en évidence que l'étoile a été brièvement masquée à cinq reprises avant et après l'occultation par Uranus ; les trois astronomes concluent à la présence d'un système d'anneaux étroits. Dans leurs articles, ils désignent les cinq occultations observées par les cinq premières lettres de l'alphabet grec :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  et  $\epsilon$  ; ces désignations sont réutilisées par la suite pour nommer les anneaux. Peu de temps après, Elliot, Dunham et Mink découvrent quatre autres anneaux : l'un d'eux est situé entre les anneaux  $\beta$  et  $\gamma$  et les trois autres à l'intérieur de l'anneau  $\alpha$ . Le premier est nommé  $\eta$  et les autres 4, 5 et 6, selon le système de numérotation des occultations adopté lors de la rédaction d'un autre article. Le système d'anneaux d'Uranus est le second découvert dans le système solaire, après celui de Saturne.

## E) Caractéristiques orbitales, physiques et atmosphériques d'Uranus

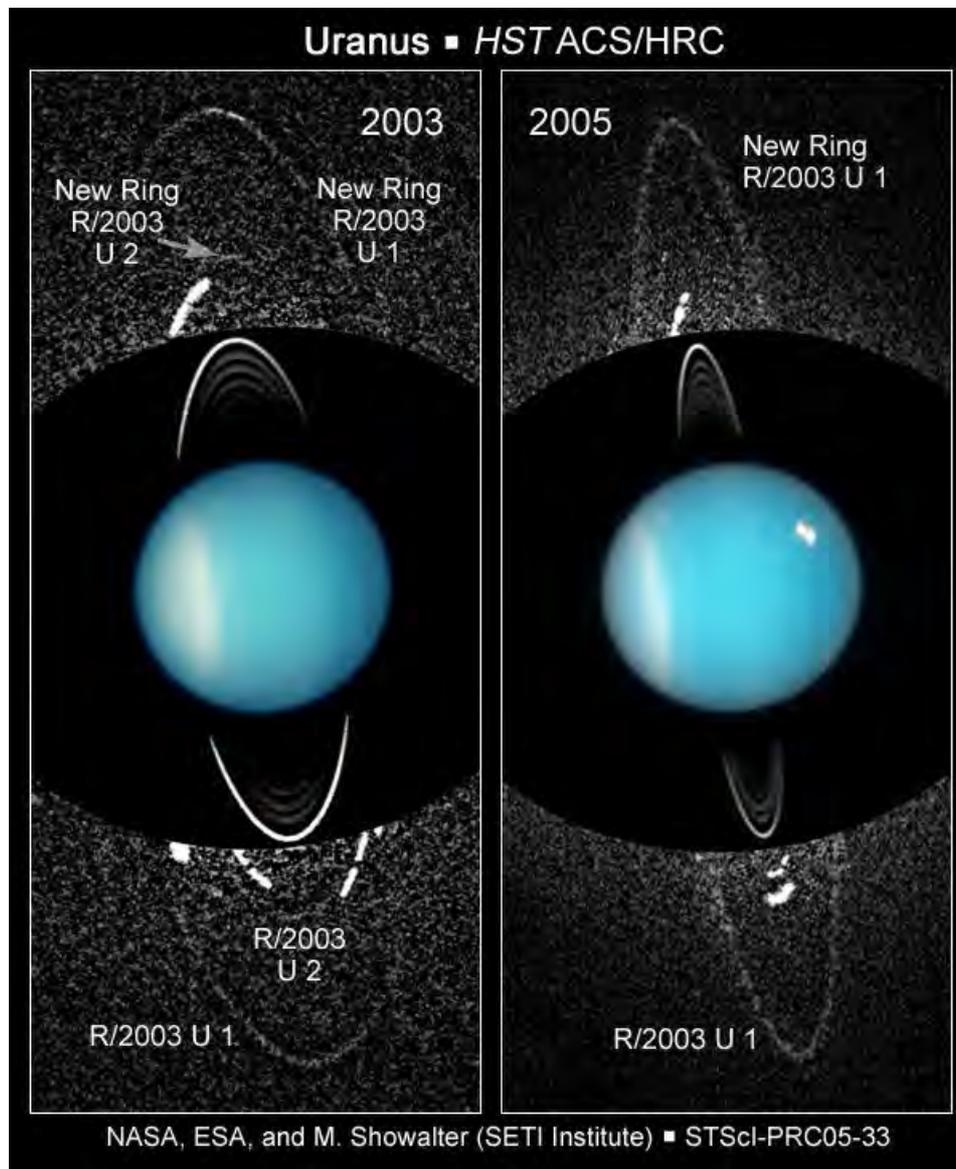
Uranus ♅	
	
Caractéristiques orbitales	
<b>Demi-grand axe</b>	2 876 679 082 km (19,22941195 UA)
<b>Aphélie</b>	3 004 419 704 km (20,08330526 UA)
<b>Périhélie</b>	2 748 938 461 km (18,37551863 UA)
<b>Circonférence orbitale</b>	18 065 794 264 km (120,76 UA)
<b>Excentricité</b>	0,044405586
<b>Période de révolution</b>	30 799,095 j (84,323326 ans)
<b>Période synodique</b>	369,66 j
<b>Vitesse orbitale moyenne</b>	6,81 km/s
<b>Vitesse orbitale maximale</b>	7,128 ? km/s
<b>Vitesse orbitale minimale</b>	6,486 ? km/s
<b>Inclinaison sur l'écliptique</b>	0,772556°
<b>Nœud ascendant</b>	73,989821°
<b>Argument du périhélie</b>	96,541318°
<b>Satellites connus</b>	27
<b>Anneaux connus</b>	13
Caractéristiques physiques	
<b>Rayon équatorial</b>	25 559 ± 4 km (4,007 Terres)
<b>Rayon polaire</b>	24 973 ± 20 km (3,929 Terres)
<b>Aplatissement</b>	0,02293
<b>Périmètre équatorial</b>	160 592 km
<b>Superficie</b>	8,1156×10 <sup>9</sup> km <sup>2</sup> (15,91 Terres)
<b>Volume</b>	68,33×10 <sup>12</sup> km <sup>3</sup> (63,086 Terres)
<b>Masse</b>	86,810 ± 0,013 ×10 <sup>24</sup> kg (14,536 Terres)
<b>Masse volumique globale</b>	1 270 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gravité de surface</b>	8,69 m/s <sup>2</sup> (0,886 g)
<b>Vitesse de libération</b>	21,3 km/s

<b>Période de rotation (jour sidéral)</b>	-0,71833 j (17 h 14 min 24 s (rétrograde))
<b>Vitesse de rotation (à l'équateur)</b>	9 320 km/h
<b>Inclinaison de l'axe</b>	97,77°
<b>Albédo géométrique visuel</b>	0,51
<b>Albédo de Bond</b>	0,300
<b>Irradiance solaire</b>	3,71 W/m <sup>2</sup> (0,003 Terre)
<b>Température d'équilibre du corps noir</b>	58,2 K (-214,8 °C)
<b>Température de surface :</b>	
<b>Température à 10 kPa :</b>	53 K (-220 °C)
<b>Température à 100 kPa :</b>	76 K (-197 °C)
<b>Caractéristiques de l'atmosphère</b>	
<b>Masse volumique à 100 kPa</b>	0,42 kg/m <sup>3</sup>
<b>Hauteur d'échelle</b>	27,7 km
<b>Masse molaire moyenne</b>	2,64 g/mol
<b>Hydrogène H<sub>2</sub></b>	83 %
<b>Hélium He</b>	15 %
<b>Méthane CH<sub>4</sub></b>	2,3 %
<b>Ammoniac NH<sub>3</sub></b>	0,01%
<b>Éthane C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	2,5 ppm
<b>Acétylène C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	100 ppb
<b>Monoxyde de carbone CO</b>	traces
<b>Sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S</b>	traces
<b>Histoire</b>	
<b>Découverte par</b>	William Herschel le 13 mars 1781

## F) Survol de Voyager 2



*Photo d'Uranus prise par Voyager 2*



*Les anneaux d'Uranus en 2005 par Hubble*

La planète géante gazeuse Uranus (50 000 km de diamètre) a un axe de rotation fortement incliné pratiquement situé dans son plan de révolution autour du Soleil. La recherche d'indices pouvant expliquer cette particularité unique dans le Système solaire est un des objectifs assignés à la sonde Voyager 2 qui est par ailleurs la première sonde à effectuer un survol de la planète. Voyager 2 met en évidence la présence d'un champ magnétique dont l'intensité est proche de celui de la Terre et qui est incliné de 60° par rapport à l'axe de rotation de la planète. Voyager 2 découvre 10 nouvelles lunes en plus des cinq déjà connues. Toutes ces lunes sont de petite taille, la plus grande ayant un diamètre de 150 km. Les 5 lunes déjà connues sont des agglomérats de roche et de glace comme les lunes de Saturne. Les neuf anneaux d'Uranus, découverts dans les années 1970 depuis la Terre, sont analysés par la sonde et montrent des caractéristiques différentes de ceux de Saturne et Jupiter. Ces analyses permirent de mettre en évidence qu'ils ne se sont pas formés en même temps qu'Uranus et que leur apparition est relativement récente. Les composants qui les forment sont peut-être les restes d'une lune qui aurait été fragmentée, soit par un impact avec un autre objet céleste se déplaçant à très grande vitesse, soit par les forces gravitationnelles de la planète mère.

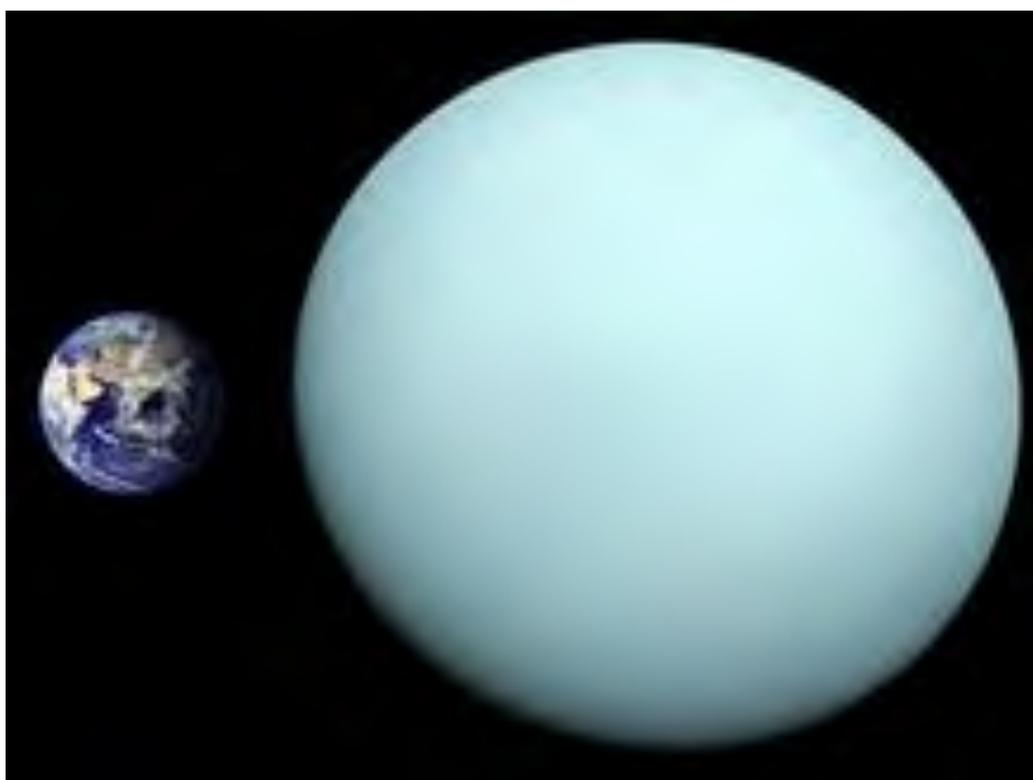
### Après Voyager 2

Depuis 1997, neuf satellites irréguliers extérieurs ont été identifiés à l'aide de télescopes au sol. Deux lunes intérieures supplémentaires, Cupid et Mab, ont été découvertes grâce au *télescope spatial Hubble* en 2003. Le satellite Margaret est le dernier découvert à ce jour (2008); sa découverte fut publiée en octobre 2003. Le télescope spatial Hubble permet de prendre des photos correctes d'Uranus depuis la Terre. En

2003–2005, il permet de découvrir une nouvelle paire d’anneaux, baptisée par la suite système d’anneaux externe, qui porte le nombre d’anneaux d’Uranus à treize. Ils ont été nommés anneaux  $\mu$  et  $\nu$  (*mu* et *nu*). L’anneau  $\mu$ , le plus externe, se trouve deux fois plus éloigné de la planète que l’anneau brillant  $\eta$ . Ces anneaux externes diffèrent des anneaux internes étroits par de nombreuses caractéristiques :  $\mu$  et  $\nu$  sont larges (17 000 km et 3 800 km) et très ténus ; leur épaisseur optique normale maximale sont de  $8,5 \times 10^{-6}$  et  $5,4 \times 10^{-6}$  ; leur épaisseur optique équivalente sont respectivement de 0,14 km et 0,012 km. Leur profil radial de brillance est triangulaire.

## G) Caractéristiques physiques

### 1) Masse et diamètre



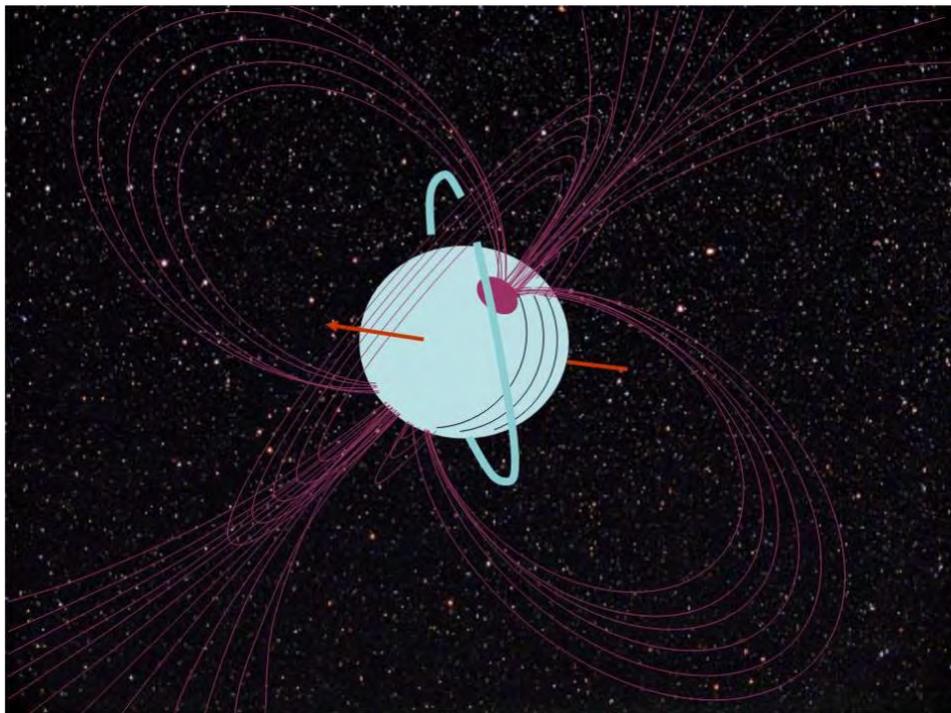
*Comparaison de la taille d'Uranus et de la Terre*

Avec une masse de  $86,810 \times 10^{24}$  kg, Uranus est un corps intermédiaire entre la Terre et les géantes gazeuses de grande taille comme Jupiter ou Saturne. Sa masse est 14 fois plus importante que celle de la Terre. Le rayon équatorial de la planète est de 25 559 km, soit environ quatre fois celui de la Terre. Uranus a la particularité d’être plus grande que Neptune (49 528 km pour Neptune contre 51 118 km pour Uranus) mais elle est moins massive que cette dernière (Neptune possède une masse de  $1,0243 \times 10^{26}$  kg). Neptune et Uranus sont souvent considérées comme une sous-classe de géante, appelée « géants de glace », en raison de leur taille plus petite et la plus forte concentration de substances volatiles par rapport à Jupiter et Saturne.

### 2) Champ magnétique

Avant le passage de *Voyager 2*, aucune étude de la magnétosphère uranienne n'avait pu être effectuée, sa nature restant un mystère. Avant 1986, les astronomes s'attendaient à ce que le champ magnétique d'Uranus soit aligné sur le vent solaire, puisqu'il serait alors aligné avec les pôles, qui sont sur le plan de l'écliptique. Les relevés de *Voyager* révélèrent un champ magnétique très particulier, d'une part parce qu'il n'a pas pour origine le centre géométrique de planète, et d'autre part parce qu'il penche de  $59^\circ$  par rapport à l'axe de rotation. En fait, le dipôle magnétique présente même un déséquilibre vers le pôle géographique sud par rapport au centre, équivalent à un tiers du rayon planétaire. Cette géométrie inhabituelle résulte en une magnétosphère fortement asymétrique, la force du champ magnétique à la surface du pôle sud pouvant être aussi basse que 0,1 gauss ( $10\mu\text{T}$ ), alors qu'au pôle nord, elle peut atteindre 1,1 gauss ( $110\mu\text{T}$ ).

Le champ magnétique moyen en surface a une force de 0.23 gauss ( $23\mu\text{T}$ ). À titre indicatif, le champ magnétique terrestre est à peu près de force équivalente aux deux pôles et l'« équateur magnétique » est à peu près parallèle à l'équateur géographique. Le moment magnétique bipolaire d'Uranus est 50 fois celui de la Terre. Un tel champ magnétique penché et déséquilibré se retrouve également sur Neptune, laissant à penser qu'il s'agit d'une caractéristique commune des géantes glacées.



*Image montrant l'inclinaison et le champ magnétique d'Uranus*

Une des hypothèses à ce sujet est que, alors que le champ magnétique des planètes telluriques et des géantes gazeuses est engendré par leur noyau, celui des géantes glacées serait provoqué par des mouvements à des profondeurs relativement faibles, ici dans l'océan d'eau et d'ammoniaque. Malgré son étrange alignement, la magnétosphère uranienne est, par bien des points, semblable à celle des autres planètes : on y trouve une surface de choc située à 23 fois le rayon planétaire devant elle, une magnétopause à 18 rayons uraniens, une magnétoqueue bien développée et des ceintures de radiation. En somme, la structure de la magnétosphère ne ressemble pas tant à celle de Jupiter qu'à celle de Saturne. La magnétoqueue d'Uranus s'étend dans l'espace sur des millions de kilomètres et est courbée en un long tire-bouchon par la rotation de travers de la planète.



*Une aurore polaire d'Uranus face à ses anneaux, prise en image par le télescope Hubble. Au contraire des aurores de la Terre ou de Jupiter, elles ne se situent pas à proximité des pôles géographiques de la planète, du fait du champ magnétique penché*

La magnétosphère d'Uranus contient des particules chargées : protons et des électrons avec une petite quantité d'ions  $H_2^+$ . Aucun ion plus lourd n'a été détecté. Bon nombre de ces particules proviennent probablement de la couronne chaude de l'atmosphère. L'ion et les énergies d'électrons peut être aussi élevée que 4 et 1,2 mégaélectronvolts, respectivement. La densité des ions de basse énergie (inférieure à 1 kiloélectronvolt) dans la magnétosphère intérieure est d'environ 2 par  $cm^{-3}$ . La population de particules est fortement affectée par les lunes d'Uranus qui balayent la magnétosphère, laissant des lacunes importantes. Le flux de particules est suffisamment élevé pour provoquer un noircissement ou une altération des surfaces des satellites sur une échelle de temps de 100 000 ans. Cela peut être la cause de la coloration uniformément sombre des lunes et des anneaux. Uranus a des aurores polaires relativement bien développées, qui apparaissent comme des arcs lumineux autour des deux pôles magnétiques. Contrairement à Jupiter, les aurores d'Uranus semblent être insignifiantes pour le bilan énergétique de la thermosphère planétaire.

### 3) Orbite et rotation

La période de révolution d'Uranus autour du Soleil est de 84 années terrestres. Sa distance moyenne au Soleil est d'environ 3 milliards de kilomètres. L'intensité du flux solaire sur Uranus est d'environ  $1/400^e$  celui reçu par la Terre.

Les paramètres orbitaux d'Uranus furent calculés pour la première fois par Pierre-Simon de Laplace en 1783. Avec le temps, des différences apparurent entre l'orbite prédite et l'orbite calculée. En 1841, John Couch Adams émit l'hypothèse qu'une planète inconnue serait la cause des perturbations constatées. En 1845, Urbain Le Verrier commença indépendamment ses travaux afin d'expliquer l'orbite d'Uranus. Le 23 septembre 1846, Johann Gottfried Galle identifia une nouvelle planète (qui sera plus tard nommée Neptune) à une position très proche de celle prédite par Le Verrier. La période de rotation des couches intérieures d'Uranus est de 17 heures et 14 minutes. Cependant, la haute atmosphère d'Uranus est le théâtre de vents très violents dans la direction de rotation, comme pour toutes les géantes gazeuses. Par conséquent, à certaines latitudes, par exemple vers  $60^\circ$  de latitude, des parties visibles de son atmosphère se déplacent beaucoup plus vite et effectuent une rotation complète en un peu moins de 14 heures.

### 4) Inclinaison de l'axe

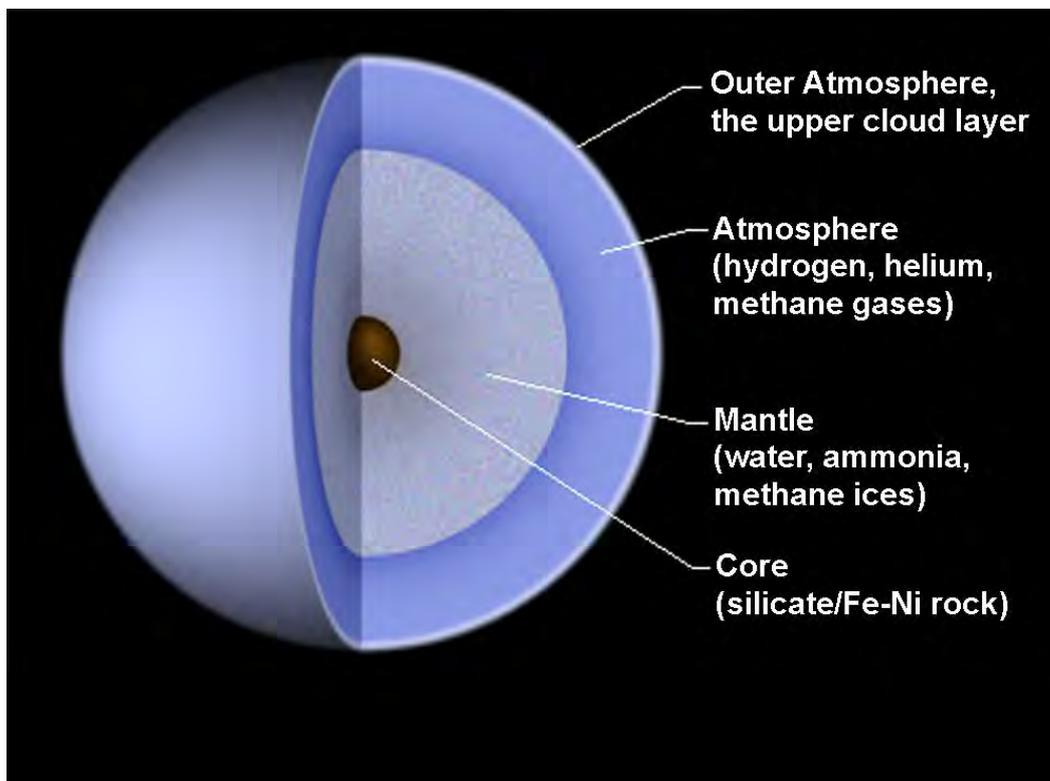
Hémisphère nord	Année	Hémisphère sud
Solstice d'hiver	1902, 1986	Solstice d'été
Équinoxe de printemps	1923, 2007	Équinoxe d'automne
Solstice d'été	1944, 2028	Solstice d'hiver
Équinoxe d'automne	1965, 2049	Équinoxe de printemps

À la différence de toutes les autres planètes du Système solaire, Uranus présente une très forte inclinaison de son axe par rapport à la normale (la perpendiculaire) à son plan orbital : cet axe est quasiment parallèle au plan orbital. La planète "roule" pour ainsi dire sur son orbite, et présente alternativement au soleil son pôle nord, puis son pôle sud. Chacun des pôles est caché du Soleil durant 42 ans. Au moment du survol de la planète par Voyager 2 en 1986, le pôle sud d'Uranus était orienté presque directement vers le Soleil. On peut dire qu'Uranus a une inclinaison légèrement supérieure à  $90^\circ$  ou encore que son axe a une inclinaison légèrement inférieure à  $90^\circ$  et qu'elle tourne alors sur elle-même dans le sens rétrograde. Ces deux descriptions sont équivalentes d'un point de vue physique, mais il en résulte une définition différente du pôle nord et du pôle sud.

### 5) Composition interne d'Uranus

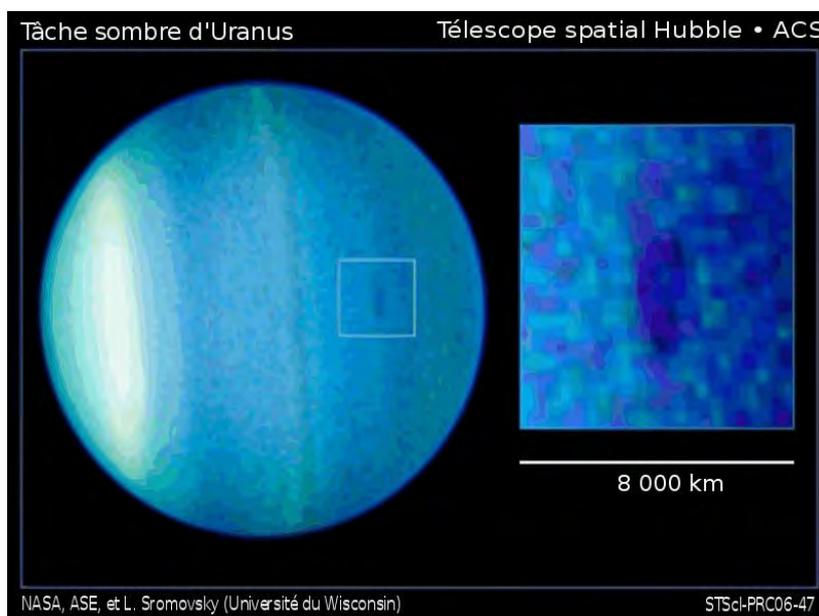
La composition interne d'Uranus serait similaire à celle de Neptune. Elle possède très probablement un noyau solide de silicates et de fer d'à peu près la masse de la Terre. Au-dessus de ce noyau, là encore à l'instar de Neptune, Uranus présenterait une composition assez uniforme (roches en fusion, glaces, 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, 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.



Composition d'Uranus : 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

## H) Atmosphère d'Uranus



La première tache sombre observée sur Uranus (Image 2006)

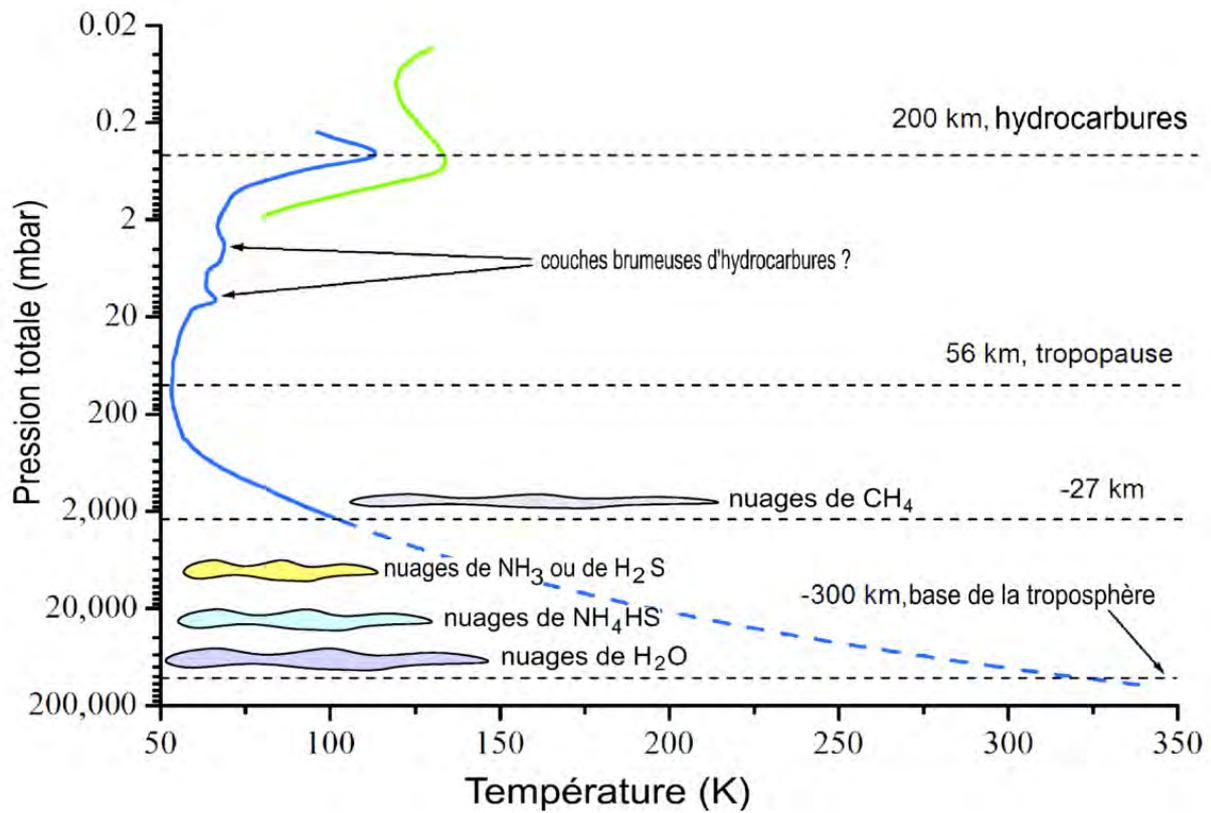
L'atmosphère d'Uranus, comme celle de Neptune, est différente des deux autres géantes gazeuses, Jupiter et Saturne. Bien que principalement composée comme elles d'hydrogène et d'hélium, elle possède une plus grande proportion de gaz volatils tels que l'eau, l'ammoniac et le méthane. Contrairement à Jupiter et Saturne, Uranus ne posséderait pas de manteau d'hydrogène métallique ou d'enveloppe en dessous de sa haute atmosphère. À la place se trouverait une région consistant en un océan composé d'ammoniac, d'eau et de méthane, dont la transition est graduelle sans limite claire avec l'atmosphère dominé par de l'hydrogène et de l'hélium. À cause de ces différences, certains astronomes regroupent Uranus et Neptune dans leur propre catégorie, celle des géantes glacées, pour les distinguer de Jupiter et Saturne. Bien qu'il n'y a pas de surface clairement définie sur Uranus, la partie la plus extérieure de l'enveloppe gazeuse d'Uranus est considérée comme son atmosphère, là où la pression est inférieure à 1 bar. Les effets de l'atmosphère sont ressentis jusqu'à environ 300 km en dessous du niveau de 1 bar, où la pression est de 100 bar et la température de 320 K. La couronne ténue de l'atmosphère s'étend jusqu'à deux fois le rayon de la planète à partir de la surface nominale située au niveau où la pression est de 1 bar. L'atmosphère uranienne peut être divisée en trois couches : la troposphère, d'une altitude de -300 à 50 km et d'une pression de 100 à 0,1 bar; la stratosphère, d'une altitude de 50 km à 4 000 km et d'une pression allant de 0,1 à  $10^{-10}$  bar; et la thermosphère/couronne commençant vers 4 000 km d'altitude et allant jusqu'à près de 50 000 km de la surface. Il n'y a pas de mésosphère.

<b>Atmosphère d'Uranus</b>	
<b>Informations générales</b>	
<b>Épaisseur</b>	de -300 km à 4000
<b>Pression</b>	$1,20 \times 10^5$ Pa
<b>Composition volumétrique</b>	
<b>Dihydrogène</b>	83 %
<b>Hélium</b>	15 %
<b>Méthane</b>	1,99 %
<b>Ammoniac</b>	0,01 %
<b>Éthane</b>	0,00025 %
<b>Acétylène</b>	0,00001 %
<b>Monoxyde de</b>	Traces
<b>Sulfure d'hydrogène</b>	Traces

## 1) Structure de l'atmosphère

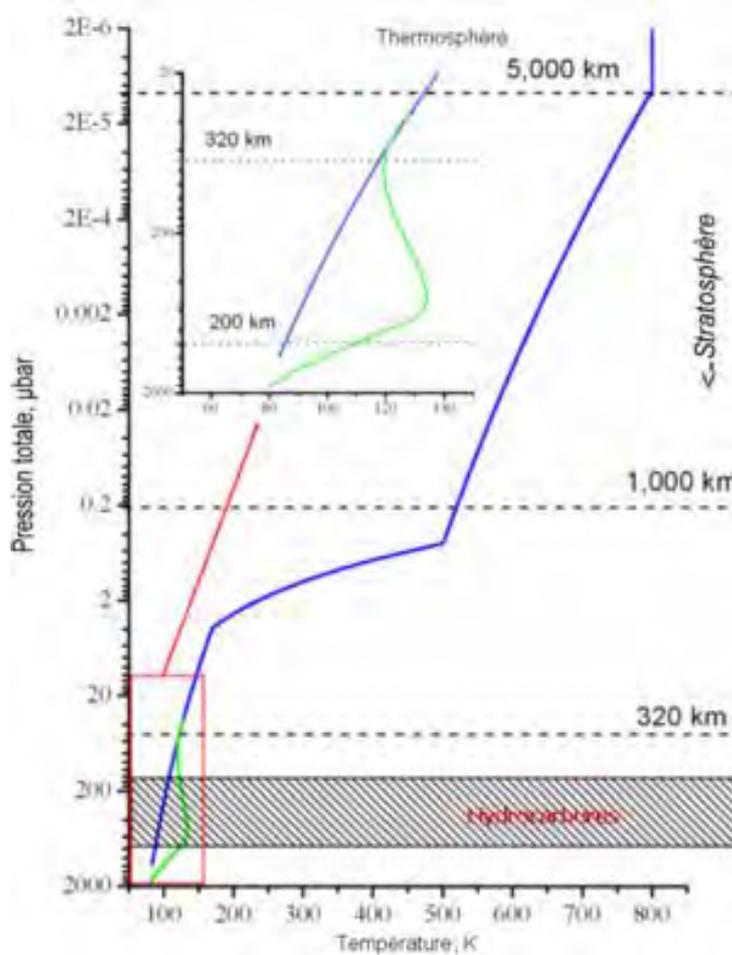
### a) Troposphère

La troposphère est la partie la plus basse et la plus dense de l'atmosphère et est caractérisée par une diminution de la température avec l'altitude. La température tombe de 320 K à la base de la troposphère située à -300 km à près de 53 K à 50 km. Les températures dans la haute région de la troposphère (la tropopause) varient entre 49 et 57 K suivant la latitude, les plus basses étant atteintes à 25° de latitude sud. La troposphère détient presque toute la masse de l'atmosphère, et la tropopause est la cause de la majorité des émissions infrarouges, déterminant donc sa température effective de  $59.1 \pm 0.3$  K. La troposphère posséderait une structure nuageuse complexe; des nuages d'eau sont supposés exister dans les régions où la pression est de 50 à 100 bar, des nuages d'hydrosulfure d'ammonium existeraient entre 20 et 40 bars, des nuages d'ammoniac ou de sulfure d'hydrogène se trouveraient entre 3 et 10 bars et finalement des nuages de méthane existeraient à des pressions allant de 1 à 2 bars. Bien que Voyager 2 ait directement constaté l'existence de nuages de méthane, toutes les autres couches de nuages sont spéculatives. La troposphère est la région la plus dynamique de l'atmosphère, avec de forts vents, des convections, des nuages et des variations saisonnières.



Profil des températures de l'atmosphère (troposphère et basse stratosphère) d'Uranus. Les couches de nuages sont indiquées

b) **Stratosphère**



La couche intermédiaire de l'atmosphère uranienne est la stratosphère, où la température augmente avec l'altitude de 53 K à la tropopause jusqu'à environ 800-850 K à la base de la thermosphère. Le réchauffement de la stratosphère est causé par l'absorption des radiations UV et IR solaires par le méthane et les autres hydrocarbures, qui se forment dans cette partie de l'atmosphère en conséquence de la photolyse du méthane. Le réchauffement provenant de la thermosphère doit lui aussi être significatif. Les hydrocarbures occupent une fine couche à une altitude comprise entre 100 et 280 km soit à une pression allant de 10 à 0,1 mbar et des températures allant de 75 à 170 K. Les hydrocarbures les plus importants sont l'acétylène et l'éthane. L'éthane et l'acétylène tendent à se condenser dans la partie la plus basse (et la plus froide) de la stratosphère, à la tropopause, en formant une couche brumeuse, qui peut être en partie responsable de l'apparence « douce » de l'atmosphère d'Uranus. La concentration d'hydrocarbures dans la stratosphère est plus faible que celle des stratosphères des autres géantes gazeuses. Ceci la rend moins opaque (au-dessus de la couche brumeuse) et, par conséquent, plus froide que les autres géantes gazeuses.

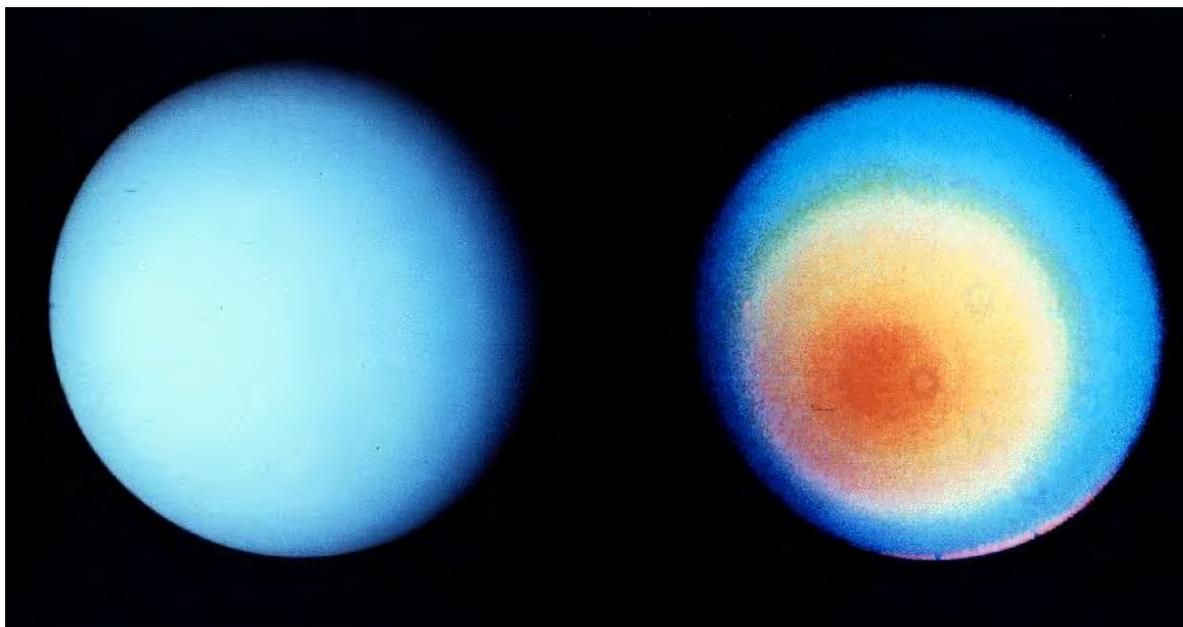
#### c) Thermosphère et couronne

La partie externe de l'atmosphère d'Uranus est la thermosphère/couronne, qui a une température uniforme de 800 à 850 K. La température y est donc plus importante que dans la thermosphère de Saturne (420 K). Les sources de chaleur nécessaires pour maintenir une température si élevée ne sont pas connues, puisque ni les radiations FUV/EUV solaires ni l'activité des aurores polaires ne fournissent l'énergie nécessaire. Il semblerait qu'il n'y ait pas d'hélium dans cette région. En plus du dihydrogène, la thermosphère-couronne contient une grande proportion d'atomes d'hydrogène. Leur faible masse et la température élevée aident à expliquer pourquoi la couronne s'étend jusqu'à 50 000 km au-dessus de la planète. Cette couronne est une caractéristique unique d'Uranus. Ses effets incluent une traînée sur de petites particules orbitant autour d'Uranus, causant une réduction générale des poussières dans les anneaux d'Uranus. La thermosphère d'Uranus produit d'intenses émissions quadrupôles d'hydrogène proche des infrarouges.

#### d) Ionosphère

L'ionosphère d'Uranus se répartit dans la partie supérieure de la stratosphère et de la thermosphère. Les sources d'informations principales concernant les ions qui la constituent sont les mesures effectuées par Voyager 2 et les émissions infrarouges d'ions  $H_3^+$  détectées depuis des télescopes terrestres. Les observations montrent que l'ionosphère se trouve entre 2 000 et 10 000 km d'altitude. L'ionosphère d'Uranus est plus dense que celle de Saturne et Neptune, qui peut résulter de la faible concentration d'hydrocarbures dans la stratosphère. L'ionosphère est principalement soutenue par les radiations d'UV solaires et sa densité dépend de l'activité solaire. Les aurores polaires ne sont pas significatives comme sur Jupiter et Saturne. La haute ionosphère (située dans la thermosphère) émet des UV, qui comme les radiations infrarouges d' $H_3^+$ , sont émis exclusivement depuis la face éclairée de la planète.

## 2) Climat



*L'hémisphère sud d'Uranus en vraie couleur (à gauche) et dans une longueur d'onde supérieure (à droite)*

Le climat d'Uranus est fortement influencé par son manque de chaleur interne, ce qui limite l'activité atmosphérique, et son inclinaison axiale, qui induit des variations saisonnières extrêmes. L'atmosphère d'Uranus paraît remarquablement homogène aux longueurs d'onde visibles en comparaison de celle des autres géantes gazeuses, même par rapport à celle de Neptune, qui lui ressemble toutefois beaucoup. Quand Voyager 2 passa près d'Uranus en 1986, il observa seulement dix formations nuageuses autour de la planète. Une explication proposée pour ce manque de formations nuageuses est que la chaleur interne d'Uranus se trouve plus en profondeur que celle des autres planètes géantes ; en termes astronomiques, elle a un faible flux de chaleur. Les raisons qui font que la température interne d'Uranus est si basse ne sont pas comprises. Neptune, qui est presque la jumelle d'Uranus en ce qui concerne la taille et la composition, émet 2,61 fois plus d'énergie dans l'espace qu'elle n'en reçoit du Soleil. Uranus, en opposition, émet à peine de la chaleur. La puissance totale des émissions d'Uranus dans les infrarouges (de la chaleur) est de  $1,06 \pm 0,08$  fois l'énergie solaire absorbée par l'atmosphère. En fait, le flux de chaleur d'Uranus est seulement de  $0,042 \pm 0,047$  W/m<sup>2</sup>, ce qui est plus bas que le flux de chaleur interne de la Terre qui est d'environ 0,075 W/m<sup>2</sup>. La température la plus basse enregistrée dans la tropopause d'Uranus est de 49 K (-224 °C), faisant d'Uranus la planète la plus froide du Système solaire, plus que Neptune. Les hypothèses expliquant la différence d'Uranus montrent qu'Uranus a probablement été renversée par un impact supermassif qui modifia son axe et qui l'inclina, cet événement a aussi causé la perte de sa chaleur primordiale, la laissant avec un noyau à faible température. Une autre hypothèse est qu'une certaine forme de barrière existe dans les couches supérieures d'Uranus ce qui empêche la chaleur du cœur d'atteindre la surface.

#### a) Bandes, vents et nuages

En 1986, Voyager 2 remarqua que l'hémisphère d'Uranus pouvait être subdivisé en deux régions : une calotte polaire brillante et des bandes équatoriales sombres. Leur frontière est située à environ -45 degrés de latitude. Une bande étroite s'étendant entre -45 et -50 degrés est la caractéristique visible la plus brillante de la planète. Elle est appelée le col polaire. La calotte et le col sont considérés comme étant une région dense composée de nuages méthane situé à des pressions allant de 1.3 à 2 bar. Malheureusement Voyager 2 arriva durant le point culminant de l'été de l'hémisphère sud et n'a donc pas pu observer l'hémisphère nord. Toutefois, au début du XXI<sup>e</sup> siècle, quand la région polaire nord devint visible, les télescopes Hubble et Keck n'observèrent aucun col ou calotte polaire dans l'hémisphère nord. Uranus semble donc asymétrique : brillante près du pôle sud et sombre et uniforme dans les régions se trouvant au nord du col sud. La structure latitudinale d'Uranus est différente de celle de Jupiter et de Saturne, qui présentent de multiples bandes étroites et colorées. En plus des bandes, Voyager 2 observa dix petits nuages brillants, se trouvant plusieurs degrés au nord du col. Sous tous ses autres aspects Uranus semblait « morte » dynamiquement en 1986. Toutefois dans les années 1990 la quantité de nuages brillants a augmenté. La majorité se trouvait dans l'hémisphère nord lorsqu'ils devinrent visibles. L'explication commune de ce fait est que les nuages brillants sont plus faciles à identifier dans la partie obscure de la planète, tandis qu'au sud, le col brillant empêche leur observation. Néanmoins il y a des différences entre les nuages de chaque hémisphère. Les nuages de l'hémisphère nord sont petits, fins et brillants. Ils semblent se trouver à haute altitude. La durée de vie de ces nuages varie beaucoup. Certains petits nuages ne vivent que quelques heures, tandis qu'au moins un des nuages de l'hémisphère sud présent lors du passage de Voyager existe encore aujourd'hui. Des observations récentes ont aussi montré que les nuages sur Uranus sont similaires à ceux existant sur Neptune, bien que ceux d'Uranus sont plus calmes. Le déplacement de nombreux nuages a permis de déterminer des vents zonaux soufflant dans la troposphère supérieure d'Uranus. À l'équateur les vents sont rétrogrades, ce qui signifie qu'ils soufflent dans la direction opposée à la rotation de la planète. Leur vitesse va de -100 à -50 m/s. La vitesse des vents augmente en s'éloignant de l'équateur, atteignant zéro près de  $\pm 20^\circ$  latitude, où la température de la troposphère est minimale. Près des pôles, les vents se déplacent de façon prograde (dans le sens de rotation de la planète). La vitesse des vents continue d'augmenter jusqu'à son maximum à  $\pm 60^\circ$  de latitude avant de retomber à zéro aux pôles. La vitesse des vents à  $-40^\circ$  de latitude est de 150 à 200 m/s. Puisque le col empêche d'observer les nuages en dessous de ce parallèle, la vitesse des vents entre  $-40^\circ$  de latitude et le pôle sud est impossible à mesurer. En opposition, dans l'hémisphère nord des vitesses allant jusqu'à 240 m/s sont observées vers +50 degrés de latitude. Ces vitesses mènent parfois aux affirmations

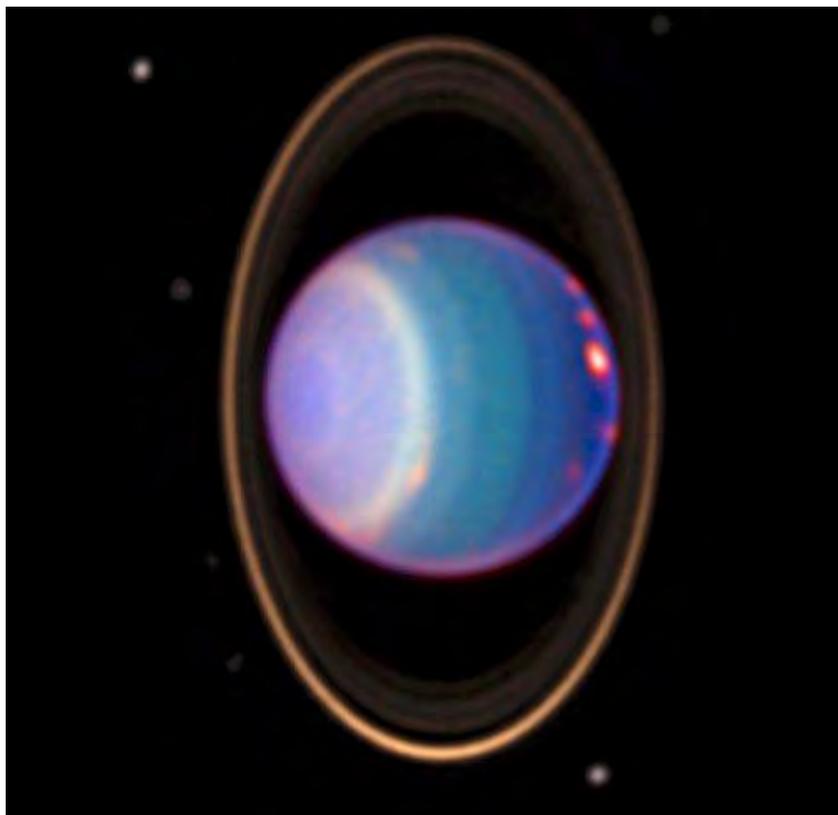
incorrectes selon lesquelles les vents sont plus rapides dans l'hémisphère nord. En fait, latitude par latitude, les vents sont légèrement plus lents au nord d'Uranus, spécialement entre  $\pm 20$  et  $\pm 40$  degrés.

#### b) Variations saisonnières

Durant une courte période en automne 2004, un certain nombre de grands nuages apparurent dans l'atmosphère d'Uranus, lui donnant une apparence semblable à Neptune. Les observations remarquèrent des vents records de 824 km/h et un orage persistant faisant penser aux "feux d'artifice du 4 juillet" (référence aux feux d'artifice le jour d'Independence Day). Le 23 août 2006, des chercheurs du Space Science Institute (Boulder, Colorado) et l'Université du Wisconsin observèrent une tache sombre sur Uranus. Les raisons de cette soudaine activité ne sont pas toutes connues, mais il apparaît que l'inclinaison de l'axe entraîne des variations saisonnières extrêmes du temps.



*Uranus en 2005. Les anneaux, le col sud et un nuage brillant dans l'hémisphère nord sont visibles*

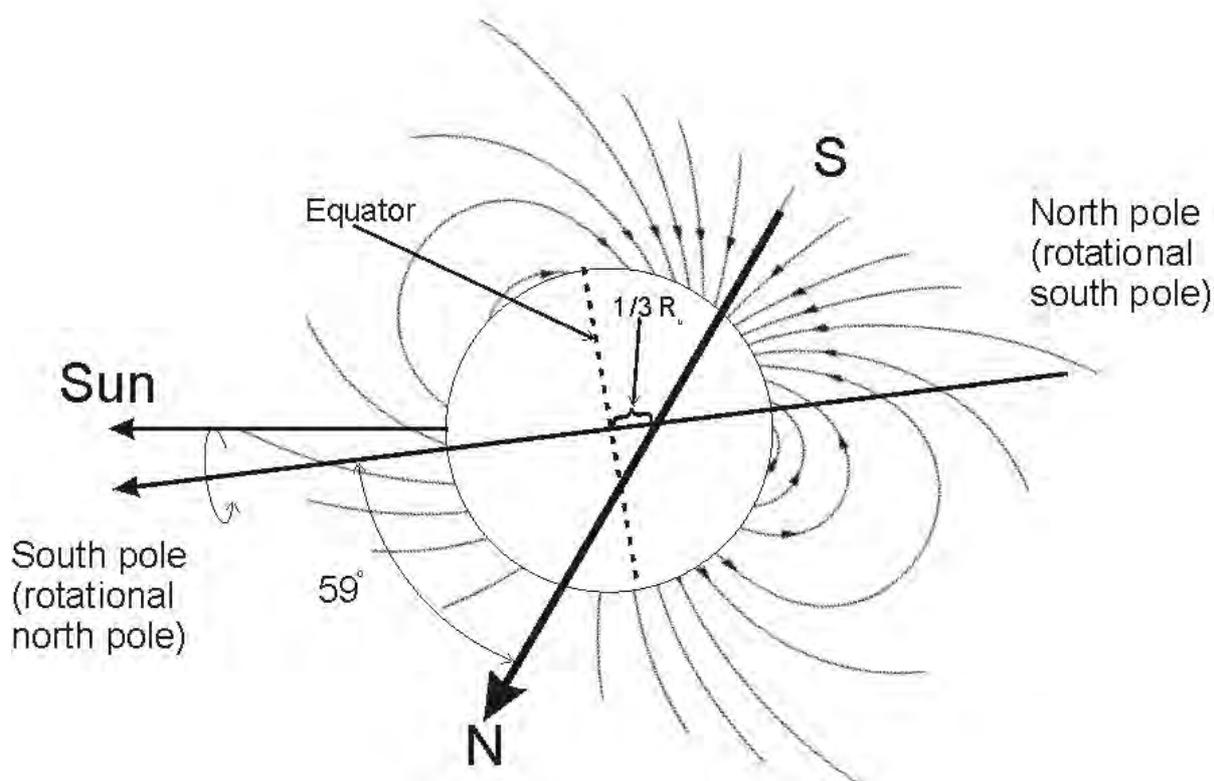


*Image prise par le télescope Hubble d'Uranus présentant des nuages dans l'hémisphère nord*

Déterminer la nature de ces variations saisonnières est difficile à cause du manque de données fiables sur Uranus car les enregistrements atmosphériques datent d'il y a moins de 84 ans, soit une année uranienne. Un certain nombre de découvertes ont toutefois été faites. La Photométrie durant la moitié de l'année Uranienne (commençant dans les années 1950) a montré des variations saisonnières de la brillance dans deux bandes spectrales, avec un maximum lors des solstices et un minimum aux équinoxes. Uranus est un globe aplati, ce qui cause le fait que sa partie visible s'est agrandie pour paraître plus grande vue depuis les pôles. Ceci explique en partie son apparence brillante durant les solstices. Uranus est connu pour avoir de fortes variations méridionales de son albédo. Par exemple, la région polaire sud d'Uranus est plus brillante que les bandes équatoriales. De plus, les deux pôles présentent une forte brillance dans les courtes longueurs d'onde du spectre. Les changements semblent donc s'agencer ainsi : les pôles, qui sont tous les deux brillants, sont visibles aux solstices, tandis que l'équateur, sombre, est visible principalement lors des équinoxes. Toutefois il y a des raisons de croire que des changements saisonniers ont lieu sur Uranus. Tandis que la planète est connue pour avoir une région polaire sud lumineuse, le pôle nord l'est assez faiblement, ce qui est incompatible avec le modèle du changement saisonnier décrit ci-dessus. Durant son précédent solstice dans l'hémisphère nord en 1944, Uranus a présenté un éclat élevé, ce qui suggère que le pôle nord n'a pas été toujours si faiblement lumineux. Ceci implique que le pôle visible brille avant le solstice et s'assombrit après l'équinoxe. Des analyses détaillées des données des bandes spectrales visibles et à faible longueur d'onde révélèrent que les changements périodiques de

luminosité ne sont pas totalement simultanés aux solstices. Finalement dans les années 1990, comme Uranus a dépassé son solstice, le télescope Hubble et d'autres télescopes terrestres révélèrent que la calotte polaire sud s'assombrissait notablement (sauf le col sud qui reste lumineux), tandis que l'hémisphère nord voit son activité augmenter, notamment par la formation de nuages et des vents plus puissants faisant penser que la calotte polaire nord devrait bientôt s'illuminer. En particulier, le col polaire présent dans l'hémisphère sud (à  $-45^\circ$ ) devrait voir son homologue apparaître dans l'hémisphère nord. Le mécanisme de ces changements n'est pas connu. Durant les solstices d'été et d'hiver, les hémisphères d'Uranus alternent entre faire face aux rayons solaires ou à l'espace. La luminosité de l'hémisphère éclairé résulte probablement de l'épaississement local des couches de nuages de méthane situés dans la troposphère.

## D) Magnétosphère



### *Le champ magnétique d'Uranus observé par Voyager 2*

Avant l'arrivée de Voyager 2, aucune mesure de la magnétosphère d'Uranus n'avait été prise, et sa nature restait un mystère. Avant 1986, les astronomes avaient espéré que le champ magnétique d'Uranus pourrait être en ligne avec le vent solaire, car il serait alors aligné aux pôles d'Uranus qui se trouvent dans l'écliptique. Les observations de Voyager 2 ont révélé que le champ magnétique d'Uranus est unique, à la fois parce qu'il ne provient pas de son centre géométrique, et parce qu'elle est inclinée à  $59^\circ$  par rapport à l'axe de rotation. En fait, le dipôle magnétique est décalé du centre d'Uranus vers le pôle de rotation au sud d'un tiers du rayon planétaire. Cette inhabituelle géométrie dans une très asymétrique magnétosphère, où l'intensité du champ magnétique sur la surface dans l'hémisphère sud peut être aussi basse que 0,1 gauss (10 pT), tandis que dans l'hémisphère nord, il peut être aussi élevé que 1,1 gauss (110 pT). Le champ moyen à la surface est de 0,23 gauss (23 pT). À titre de comparaison, le champ magnétique dans le domaine de la Terre est à peu près aussi fort à chaque pôle, et son «équateur magnétique» est à peu près parallèle à l'équateur géographique. Malgré son curieux alignement, à d'autres égards la magnétosphère d'Uranus est comme celle des autres planètes : elle a une onde de choc située à environ 23 rayons uraniens devant elle, une magnétopause à 18 rayons uraniens, et a développé une magnétoqueue et une ceinture de radiations développées. Dans l'ensemble, la structure de la magnétosphère d'Uranus est différente de Jupiter et plus semblable à Saturne. La magnétosphère d'Uranus contient des particules chargées : les protons et les électrons avec petite quantité d'ions  $H_2^+$ .

## II Les anneaux d'Uranus



November 2002



August 2007

*Le système uranien vu en novembre 2002 (ISAAC sur le VLT) et en août 2007 (NACO avec optique adaptative). En 2007 les anneaux étaient vus de côté, d'où le fait qu'ils soient beaucoup moins visibles sur la photo*

Les **anneaux d'Uranus** sont un système d'anneaux de la planète Uranus, moins complexes que les anneaux de Saturne, mais plus élaborés que ceux de Jupiter ou de Neptune. Ils ont été découverts le 10 mars 1977 par James L. Elliot, Edward W. Dunham et Douglas J. Mink. Près de deux siècles auparavant, l'astronome William Herschel avait déjà rapporté l'observation d'anneaux, mais les astronomes modernes doutent que les anneaux sombres et ténus aient pu être vus à cette époque. Deux anneaux supplémentaires ont été découverts en 1986 grâce aux images prises par la sonde spatiale *Voyager 2*, puis deux anneaux externes, en 2003-2005, sur les photos du télescope spatial Hubble. Ainsi, les observations d'Hubble portent à treize le nombre d'anneaux distincts composant le système d'anneaux d'Uranus. Ils sont appelés, par ordre de distance croissante de la planète : 1986U2R/ζ, 6, 5, 4, α, β, η, γ, δ, λ, ε, ν et μ.

Leurs rayons vont de 38 000 km pour l'anneau 1986U2R/ζ à environ 98 000 km pour l'anneau μ. Il existe probablement de faibles bandes de poussière et des arcs incomplets entre les anneaux principaux. Ces anneaux sont très sombres : l'albédo des particules les composant ne dépasse pas 2 %. Ils sont probablement composés de glace et d'éléments organiques noircis par le rayonnement de la magnétosphère. La plupart des anneaux d'Uranus sont opaques et larges de quelques kilomètres seulement. L'ensemble du système ne contient que peu de poussières : il se compose essentiellement de rochers de 0,2 à 20 m de diamètre. Cependant, certains des anneaux sont translucides : les anneaux larges et peu visibles 1986U2R/ζ, μ et ν sont faits de petites particules de poussières, tandis que l'anneau λ, peu visible également mais étroit, contient aussi des corps plus importants. La relative pauvreté en poussière des anneaux est due à la traînée aérodynamique des parties les plus externes de l'atmosphère, l'exosphère et la couronne. Au regard de l'âge du système solaire, les anneaux d'Uranus seraient assez jeunes : leur

âge ne dépasserait pas 600 millions d'années. Le système d'anneaux provient probablement de la collision et de la fragmentation d'anciennes lunes orbitant autour de la planète. Après la collision, les lunes se sont probablement brisées en de nombreuses particules, qui n'ont survécu sous la forme d'anneaux étroits et optiquement denses que dans certaines zones de stabilité maximale. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, le mécanisme qui confine les anneaux étroits n'est pas bien compris. À l'origine, les scientifiques supposaient que chaque anneau étroit était encadré par des lunes « bergères », assurant sa stabilité. Mais, en 1986, la sonde *Voyager 2* ne découvrit qu'une paire de tels bergers : Cordélia et Ophélie, qui encadrent l'anneau  $\epsilon$ , le plus brillant.

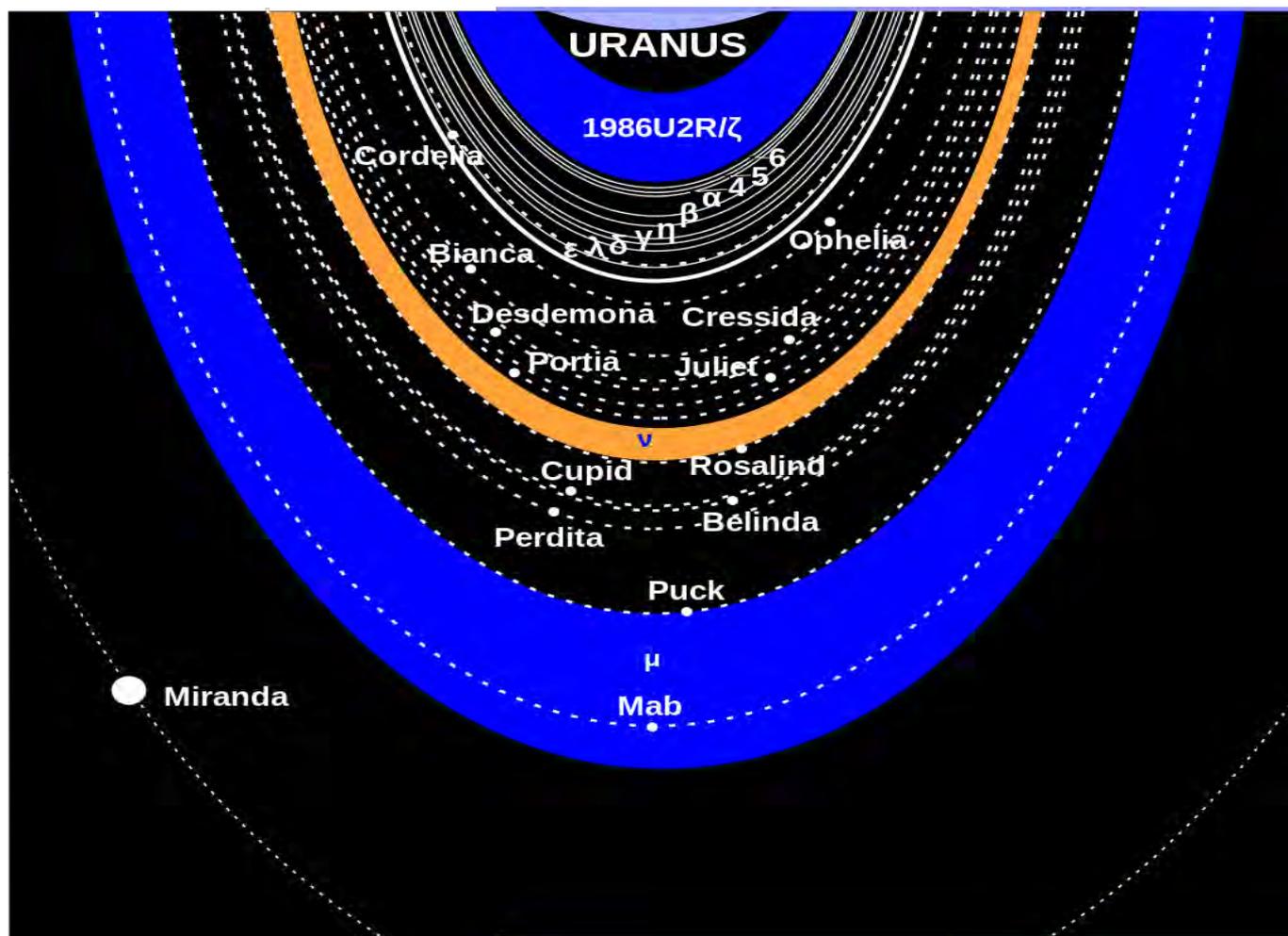


*Les anneaux d'Uranus. Seuls 9 anneaux sont visibles sur cette photo. Le plus marqué est  $\epsilon$ . Photo prise par Voyager 2*

## A) Découverte

Le système d'anneaux autour d'Uranus est mentionné pour la première fois dans les notes de l'astronome William Herschel, au XVIII<sup>e</sup> siècle, dans lesquelles il consigne ses observations de la planète : « 22 février 1789 : on soupçonne l'existence d'un anneau ». Herschel dessine un petit schéma de l'anneau et note qu'il « tire un peu sur le rouge ». Le télescope Keck de Hawaï a confirmé cette dernière observation de Herschel, au moins pour l'anneau  $\nu$ . Les notes de Herschel sont publiées en 1797 dans un journal de la *Royal Society*. Entre 1797 et 1977, soit pendant près de deux siècles, les anneaux ne sont presque jamais

plus mentionnés. La véracité de l'observation initiale des anneaux par Herschel, que plusieurs générations d'astronomes ne sont pas parvenus à confirmer par la suite, est mise en doute par la communauté scientifique. Certains pensent que Herschel ne pouvait pas avoir découvert les anneaux, compte tenu des limitations des instruments de l'époque. Ceux qui créditent Herschel de cette découverte avancent comme argument que l'astronome a donné des descriptions exactes de l'anneau  $\epsilon$ , de sa taille par rapport à celle d'Uranus, de ses changements d'aspect le long de l'arc d'orbite observé, et de sa couleur. La découverte ou redécouverte des anneaux d'Uranus est réalisée par hasard le 10 mars 1977 par les astronomes James L. Elliot, Edward W. Dunham et Douglas J. Mink, embarqués à bord de l'observatoire aéroporté Kuiper. Les astronomes veulent utiliser l'occultation de l'étoile SAO 158687 par Uranus pour étudier l'atmosphère de cette étoile. Or l'analyse de leurs observations met en évidence que l'étoile a été brièvement masquée à cinq reprises avant et après l'occultation par Uranus; les trois astronomes concluent à la présence d'un système d'anneaux étroits. Dans leurs articles, ils désignent les cinq occultations observées par les cinq premières lettres de l'alphabet grec :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  et  $\epsilon$ ; ces désignations sont réutilisées par la suite pour nommer les anneaux. Peu de temps après, Elliot, Dunham et Mink découvrent quatre autres anneaux : l'un d'eux est situé entre les anneaux  $\beta$  et  $\gamma$  et les trois autres à l'intérieur de l'anneau  $\alpha$ . Le premier est nommé  $\eta$  et les autres 4, 5 et 6, selon le système de numérotation des occultations adopté lors de la rédaction d'un autre article. Le système d'anneaux d'Uranus est le second découvert dans le système solaire, après celui de Saturne. En 1986, la sonde spatiale *Voyager 2* traverse le système d'Uranus et permet une observation directe de ses anneaux. Les images de la sonde révèlent la présence de deux anneaux étroits supplémentaires. En 2003-2005, le télescope spatial Hubble détecte une nouvelle paire d'anneaux, portant le total connu à treize. La découverte de ces anneaux externes double le diamètre du système d'anneaux connu. Hubble prend également pour la première fois des images de deux petits satellites; l'orbite de l'un d'eux, Mab, se trouve dans l'anneau extérieur récemment découvert.



*Schéma du système d'anneaux et de lunes d'Uranus. Les lignes continues montrent les anneaux, les lignes en pointillés montrent les orbites des lunes*

## B) Propriétés générales

Depuis les observations faites par le télescope Hubble en 2005, il est établi que le système d'anneaux d'Uranus comprend treize anneaux. Ils sont nommés, par ordre de distance croissante de la planète : 1986U2R/ $\zeta$ , 6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $\epsilon$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ . Ils sont divisés en trois groupes : neuf anneaux principaux étroits (6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ), deux anneaux de poussières (1986U2R/ $\zeta$ ,  $\lambda$ ) et deux anneaux externes ( $\mu$ ,  $\nu$ ). Les anneaux d'Uranus sont constitués principalement de particules macroscopiques, et renferment peu de poussières, celles-ci étant localisées surtout dans les anneaux 1986U2R/ $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$  et  $\mu$ . Outre ces anneaux bien identifiés, il y a de nombreuses bandes de poussière translucides, contenant des anneaux ténus. Ceux-ci peuvent avoir une existence temporaire, ou être composés d'arcs séparés, détectés parfois pendant les occultations; certains étaient visibles pendant le passage de la Terre par le plan des anneaux en 2007. Quelques bandes de poussières entre les anneaux ont été observées en diffusion vers l'avant quand *Voyager 2* a dépassé l'orbite d'Uranus. Tous les anneaux d'Uranus présentent des variations azimutales de brillance. Les anneaux sont composés d'une matière extrêmement foncée. L'albédo géométrique des particules ne dépasse pas 5 à 6 %, tandis que l'albédo de Bond est plus bas : environ 2 %. Les particules des anneaux présentent un pic de brillance marqué à l'opposition : un accroissement de l'albédo dans la direction dirigée vers le Soleil. Ceci signifie que leur albédo est bien plus bas quand ils sont observés légèrement hors de la direction de l'opposition, c'est-à-dire que le Soleil, l'observateur et Uranus ne sont pas exactement alignés. En outre, les anneaux tendent légèrement vers le rouge dans les parties visible et ultraviolette du spectre, et sont gris dans l'infrarouge proche. Ils ne présentent aucune des structures spectrales identifiables. La composition chimique des particules des anneaux est inconnue. Cependant elles ne peuvent pas être composées de glace pure, comme celles des anneaux de Saturne, parce qu'elles sont trop foncées, plus foncées encore que les lunes intérieures d'Uranus. Les particules sont probablement composées d'un mélange de glace et de matière sombre. La composition de cette matière n'est pas connue, mais il pourrait s'agir de composés organiques noircis par le rayonnement des particules chargées de la magnétosphère d'Uranus. Il s'agit peut-être d'un matériau semblable à celui des lunes internes, mais considérablement recuit. Dans son ensemble, le système d'anneaux d'Uranus ne ressemble ni aux anneaux de Jupiter composés de poussière ténue, ni à ceux de Saturne, qui sont larges et complexes et pour certains composés de matière très brillante, de la glace. Il existe néanmoins quelques ressemblances avec le système saturnien. Ainsi, l'anneau F de Saturne et l'anneau  $\epsilon$  d'Uranus sont tous deux étroits, assez sombres et encadrés par des lunes bergères; de même, les anneaux externes d'Uranus découverts en 2006 présentent une ressemblance avec les anneaux externes G et E de Saturne. Certains anneaux étroits au sein des anneaux larges de Saturne peuvent aussi faire penser aux anneaux étroits d'Uranus. En outre, les bandes de poussière observées entre les principaux anneaux d'Uranus peuvent ressembler aux anneaux de Jupiter. D'autre part, le système des anneaux d'Uranus est assez semblable à celui des anneaux de Neptune, bien que plus complexe, moins sombre et contenant moins de poussières; les anneaux  $\gamma$  sont également plus proches de la planète.

### 1) Anneau $\epsilon$



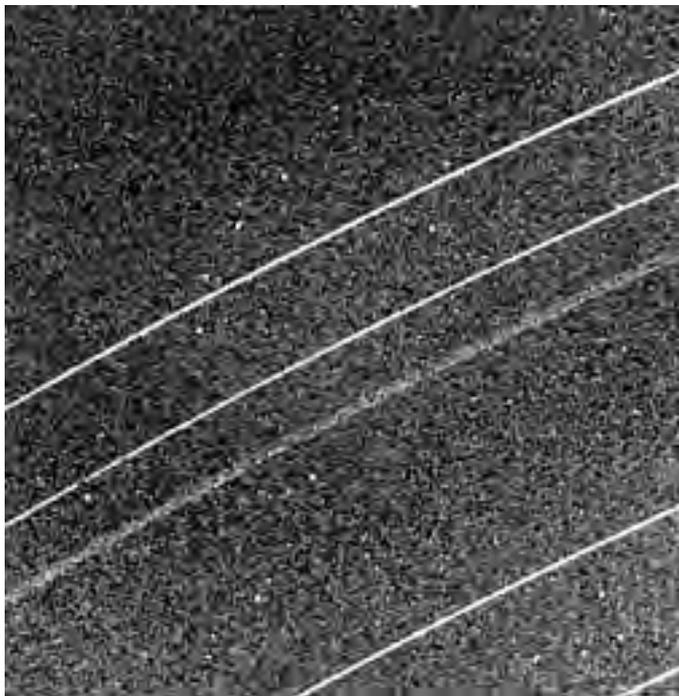
*Vue agrandie de l'anneau  $\epsilon$  d'Uranus*

L'anneau  $\epsilon$  (*epsilon*) est le plus brillant et le plus dense des éléments du système d'anneaux d'Uranus, et compte pour les deux tiers dans la lumière totale renvoyée par l'ensemble. Alors qu'il est le plus excentrique des anneaux d'Uranus, il a une inclinaison négligeable. L'excentricité de l'anneau fait varier sa brillance tout au long de son orbite. La brillance intégrée suivant le rayon de l'anneau  $\epsilon$  est maximale à l'apoapside et minimale à la périapside. Le rapport de ces brillances est de 2,5 à 3,0. Ces variations sont liées à celles de la largeur de l'anneau, qui mesure 19,7 km à la périapside et 96,4 km à l'apoapside. À mesure que l'anneau devient plus large, l'effet d'écran entre particules diminue, les rendant plus visibles, ce qui conduit à une brillance intégrée plus grande. Les variations de largeur ont été mesurées directement à partir des images de *Voyager 2*, puisque l'anneau  $\epsilon$  était le seul des deux anneaux résolus par les caméras de la sonde spatiale. Ce comportement montre que l'anneau est optiquement dense. Les observations d'occultation réalisées à partir du sol ou de l'espace ont montré que son épaisseur optique normale varie de 0,5 à 2,5, avec le maximum à la périapside. L'épaisseur équivalente  $EE = \int \tau(r) dr$  de l'anneau  $\epsilon$  est d'environ 47 km et elle est invariante le long de l'orbite.

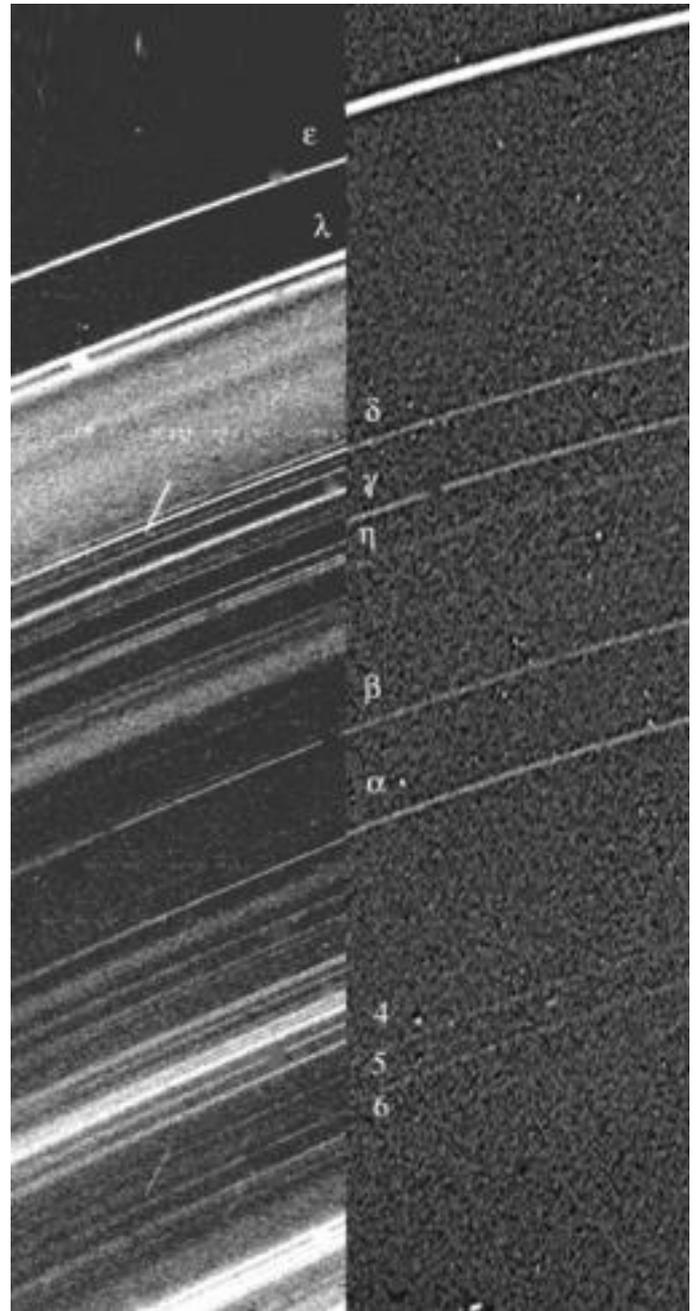
L'épaisseur géométrique de l'anneau  $\epsilon$  n'est pas connue avec précision, bien que l'anneau soit très mince, selon certains, seulement 150 m. Malgré cette dimension relativement infinitésimale, il est constitué de plusieurs couches de particules. L'anneau  $\epsilon$  est une zone plutôt encombrée, avec un facteur de remplissage estimé de 0,008 à 0,06 aux environs de l'apoapside. La taille moyenne des particules va de 0,2 à 20 m et leur séparation moyenne est d'environ 4,5 fois leur rayon. L'anneau est presque exempt de poussières, peut-être en raison de la traînée aérodynamique de la couronne atmosphérique d'Uranus. En raison de sa très faible épaisseur, l'anneau  $\epsilon$  disparaît quand on l'examine par un diamètre. Ceci est arrivé en 2007 au cours de l'observation du passage de la Terre dans le plan des anneaux. La sonde *Voyager 2* a observé un signal de l'anneau  $\epsilon$  pendant une expérience d'occultation radio. Le signal se présentait comme un renforcement marqué de la diffusion vers l'avant à 3,6 cm de longueur d'onde aux environs de l'apoapside de l'anneau. Une telle diffusion nécessite l'existence d'une structure cohérente. Le fait que l'anneau  $\epsilon$  possède une telle structure fine a été confirmé par beaucoup d'observations d'occultations : l'anneau semble constitué d'une quantité de sous-anneaux étroits et optiquement denses, certains pouvant être des arcs incomplets. Il est établi que l'anneau possède des lunes bergères interne et externe : Cordélia à l'intérieur et Ophélie à l'extérieur. Le bord interne de l'anneau est en résonance 24:25 avec Cordélia, et le bord externe en résonance 14:13 avec Ophélie. Les masses de ces lunes doivent être au moins triples de la masse de l'anneau à confiner pour être efficaces. La masse de l'anneau  $\epsilon$  est estimée à environ  $10^{16}$  kg.

## 2) Anneau $\delta$

L'anneau  $\delta$  (*delta*) est circulaire et légèrement incliné. Il présente des variations azimutales substantielles encore inexplicables (en 2011) dans son épaisseur optique normale et sa largeur. Une explication possible serait que l'anneau présente des ondulations azimutales excitées par une toute petite lune juste à son bord intérieur. Le bord extérieur bien net de l'anneau  $\delta$  est en résonance 23:22 avec Cordélia. Deux composantes peuvent d'ailleurs être distinguées. La composante étroite et externe est optiquement dense; elle est bordée par une large bande interne transparente. Sa largeur est de 4,1 à 6,1 km et a une épaisseur équivalente à 2,2 km, ce qui correspond à une épaisseur optique normale de 0,3 à 0,6. La composante large de l'anneau est de 10 à 12 km et son épaisseur équivalente est proche de 0,3 km, ce qui indique une faible épaisseur optique normale de  $3 \times 10$ . Ceci n'est connu que par des données d'occultation, parce que *Voyager 2* n'a pas pu résoudre l'anneau  $\delta$ . Quand il a vu l'anneau  $\delta$  en géométrie de diffusion vers l'avant, il apparaissait relativement brillant, ce qui est compatible avec la présence de poussière dans la composante large. Géométriquement, la composante large est plus épaisse que l'étroite. Ceci est confirmé par les observations au croisement du plan de l'orbite en 2007, où l'anneau  $\delta$  est devenu plus brillant, ce qui est cohérent avec le comportement d'un anneau simultanément géométriquement épais et optiquement ténu.



*Vue agrandie des anneaux d'Uranus; de haut en bas :  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\beta$  et  $\alpha$ . L'anneau  $\eta$  résolu montre la composante large, optiquement mince*



*Comparaison des anneaux d'Uranus en lumière diffusée vers l'avant et vers l'arrière (images obtenues par Voyager 2 en 1986)*

L'anneau  $\delta$  (*delta*) est circulaire et légèrement incliné. Il présente des variations azimutales substantielles encore inexplicées (en 2011) dans son épaisseur optique normale et sa largeur. Une explication possible serait que l'anneau présente des ondulations azimutales excitées par une toute petite lune juste à son bord intérieur. Le bord extérieur bien net de l'anneau  $\delta$  est en résonance 23:22 avec Cordélia. Deux composantes peuvent d'ailleurs être distinguées. La composante étroite et externe est optiquement dense; elle est bordée par une large bande interne transparente. Sa largeur est de 4,1 à 6,1 km et a une épaisseur équivalente à 2,2 km, ce qui correspond à une épaisseur optique normale de 0,3 à 0,6. La composante large de l'anneau est de 10 à 12 km et son épaisseur équivalente est proche de 0,3 km, ce qui indique une faible épaisseur optique normale de  $3 \times 10$ . Ceci n'est connu que par des données d'occultation, parce que *Voyager 2* n'a pas pu résoudre l'anneau  $\delta$ . Quand il a vu l'anneau  $\delta$  en géométrie de diffusion vers l'avant, il apparaissait relativement brillant, ce qui est compatible avec la présence de poussière dans la composante large. Géométriquement, la composante large est plus épaisse que l'étroite. Ceci est confirmé par les observations au croisement du plan de l'orbite en 2007, où l'anneau  $\delta$  est devenu plus brillant, ce qui est cohérent avec le comportement d'un anneau simultanément géométriquement épais et optiquement ténu.

### 3) Anneau $\gamma$

L'anneau  $\gamma$  (*gamma*) est étroit, optiquement dense et légèrement excentrique. Son inclinaison orbitale est à peu près nulle. La largeur de l'anneau varie de 3,6 à 4,7 km, bien que son épaisseur optique équivalente soit constante à 3,3 km. L'épaisseur optique normale de l'anneau est de 0,7 à 0,9. Pendant un événement de croisement du plan de l'orbite en 2007, l'anneau  $\gamma$  a disparu, ce qui montre qu'il est géométriquement mince, comme l'anneau  $\varepsilon$ , et sans poussière. La largeur et l'épaisseur optique normale de l'anneau montrent des variations azimutales marquées. Le mécanisme du confinement d'un anneau si étroit n'est pas connu, mais il a été remarqué que le bord interne bien net de l'anneau est en résonance 6:5 avec Ophélie.

### 4) Anneau $\eta$

L'anneau  $\eta$  (*êta*) a une excentricité et une inclinaison orbitale nulles. Comme l'anneau  $\delta$ , il est constitué de deux composantes : une étroite et optiquement dense, et une bande large quasi-transparente, extérieure cette fois. Cette dernière est large d'environ 40 km et son épaisseur équivalente voisine de 0,85 km, ce qui indique une faible épaisseur optique normale de  $2 \times 10$ . L'anneau a été résolu sur les images de *Voyager 2*. En diffusion vers l'avant, il paraît brillant, ce qui indique la présence d'une quantité considérable de poussières, probablement dans la partie large. Géométriquement, la partie large est bien plus épaisse que la partie étroite. Cette conclusion est soutenue par les observations au croisement du plan de l'anneau en 2007, où l'anneau  $\eta$  a présenté une brillance croissante, devenant le deuxième plus brillant du système des anneaux. Ceci est cohérent avec un anneau géométriquement épais mais optiquement mince. Comme la majorité des anneaux, il présente des variations azimutales marquées en épaisseur optique normale et en largeur. La composante étroite disparaît même à certains endroits.

### 5) Anneaux $\alpha$ et $\beta$

Les anneaux  $\alpha$  et  $\beta$  (*alpha* et *bêta*) sont les anneaux d'Uranus les plus brillants après l'anneau  $\varepsilon$ . Comme celui-ci, ils présentent des variations de brillance et de largeur. Ils ont une brillance et une largeur maximale sur un secteur de  $30^\circ$  au niveau de l'apoapside, et minimale dans les  $30^\circ$  autour du périapside. Ces deux anneaux ont une excentricité et une inclinaison non négligeables. Les largeurs varient respectivement de 4,8 à 10 km et de 6,1 à 11,4 km. Les épaisseurs optiques équivalentes sont de 3,29 km et 2,14 km, ce qui correspond à des épaisseurs optiques normales de 0,3 à 0,7 pour le premier et de 0,2 à 0,35 pour le second. Lorsque la Terre a croisé le plan orbital des anneaux en 2007, ceux-ci n'ont plus été visibles, ce qui prouve qu'ils sont peu épais, comme l'anneau  $\varepsilon$ , et dépourvus de poussière. Mais ce même événement a mis en évidence une bande de poussière épaisse et d'un point de vue optique faiblement opaque, juste à l'extérieur de l'anneau  $\beta$ , qui avait déjà été observée par *Voyager 2*. La masse des anneaux  $\alpha$  et  $\beta$  est estimée à environ  $5 \times 10^{15}$  kg chacune, soit la moitié de celle de l'anneau  $\varepsilon$ .

### 6) Anneaux 6, 5 et 4

Les anneaux 6, 5 et 4 sont les anneaux étroits les plus internes et les moins brillants d'Uranus. Ce sont aussi ceux qui présentent les plus fortes inclinaisons et excentricités avec l'anneau  $\varepsilon$ . En fait, leur inclinaison ( $0,06^\circ$ ,  $0,05^\circ$  et  $0,03^\circ$ ) était suffisante pour que *Voyager 2* puisse les observer au-dessus du plan équatorial d'Uranus (de 24 à 46 km). Ils sont également les plus étroits avec une largeur de, respectivement, 1,6 à 2,2 km, de 1,9 à 4,9 km et de 2,4 à 4,4 km. Leur épaisseur optique équivalente est de 0,41 km, 0,91 km et 0,71 km, correspondant à des épaisseurs optiques normales de 0,18 à 0,25, de 0,18 à 0,48 et de 0,16 à 0,3. Lorsque la Terre a coupé le plan orbital des anneaux en 2007, ils sont devenus invisibles en raison de leur faible épaisseur et de l'absence de poussière.

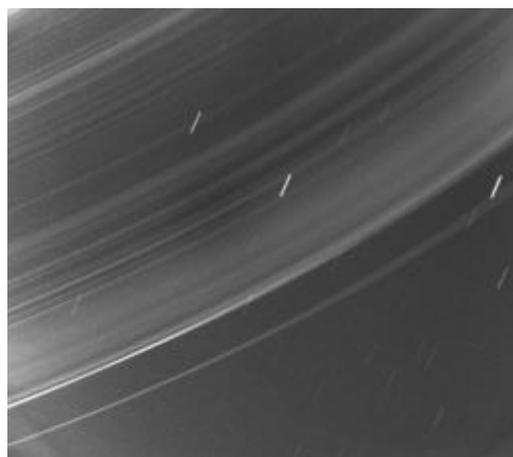
## Anneaux de poussières

### 7) Anneau $\lambda$

L'anneau  $\lambda$  (*lambda*) est un des deux anneaux découverts par *Voyager 2* en 1986. C'est un anneau étroit et ténu, situé juste à l'intérieur de l'anneau  $\varepsilon$ , entre l'anneau et sa lune bergère, Cordélia. Cette lune a nettoyé une bande vide juste au milieu de l'anneau  $\lambda$ . Quand il est examiné en lumière diffusée vers l'arrière, l'anneau  $\lambda$  est extrêmement étroit : de 1 à 2 km et a une épaisseur optique équivalente de 0,1 à 0,2 km à la longueur d'onde de  $2,2 \mu\text{m}$ . L'épaisseur optique normale est de 0,1 à 0,2. L'épaisseur optique de l'anneau  $\lambda$  présente une forte dépendance de la longueur d'onde de la lumière, ce qui est atypique pour

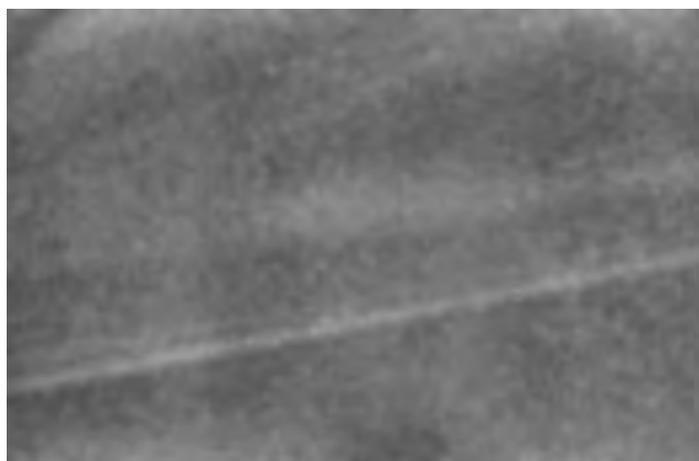
le système d'anneaux d'Uranus. L'épaisseur optique équivalente s'élève à 0,36 km dans l'ultraviolet, ce qui explique pourquoi l'anneau  $\lambda$  n'a été détecté au début que dans les occultations stellaires UV par *Voyager 2*. La détection à la longueur d'onde de 2,2  $\mu\text{m}$  par occultation stellaire n'a été annoncée qu'en 1996. L'aspect de l'anneau  $\lambda$  change radicalement quand il est observé en lumière diffusée vers l'avant, comme l'a fait *Voyager 2* en 1986. Dans cette perspective, l'anneau devient la structure la plus brillante du système d'anneaux d'Uranus, plus brillante encore que l'anneau  $\epsilon$ . Cette observation, conjuguée à la dépendance de l'épaisseur optique en fonction de la longueur d'onde de la lumière, indique que l'anneau  $\lambda$  contient une quantité appréciable de poussière de la taille de l'ordre du micromètre. L'épaisseur optique normale de cette poussière est de  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$ . Les observations faites en 2007 par le télescope Keck pendant l'événement de croisement du plan de l'anneau ont confirmé cette conclusion; l'anneau  $\lambda$  est alors devenu une des structures les plus brillantes du système d'anneaux.

Une analyse détaillée des images de *Voyager 2* a révélé des variations azimutales de la brillance de l'anneau  $\lambda$ . Les variations semblent périodiques, évoquant une onde stationnaire. L'origine de cette structure détaillée de l'anneau  $\lambda$  reste mystérieuse.



*Photo en pose longue des anneaux internes d'Uranus, prise vers l'arrière par Voyager 2. Le Soleil se trouve à 7,5° du centre du cliché. En diffusion en avant de la lumière, les bandes de poussière non visibles sous d'autres perspectives peuvent être vues, comme les autres anneaux*

## 8) Anneau 1986U2R/ $\zeta$



*Cliché qui a permis la découverte de l'anneau 1986U2R*

En 1986, *Voyager 2* a détecté une bande large mais ténue de matière à l'intérieur de l'anneau  $\delta$ . Cet anneau a reçu la désignation temporaire de 1986U2R. Il a une épaisseur optique normale de  $10^{-3}$  ou moins, et il est extrêmement ténu. Il va de 37 000 à 39 500 km du centre d'Uranus, c'est-à-dire seulement 12 000 km au-dessus des nuages. Il n'a plus été vu jusqu'en 2003 - 2004, à son observation par le télescope Keck. Cette bande a été nommée « anneau  $\zeta$  » (*zêta*). Cependant la

position de cet anneau diffère de façon significative de celle observée pour 1986U2R en 1986 : il est situé de 37 850 à 41 350 km du centre de la planète. Il y a une extension qui va vers l'intérieur en s'atténuant jusqu'à 32 600 km au moins. L'anneau  $\zeta$  a été encore observé pendant le croisement du plan de l'anneau en 2007, et il y est même devenu l'élément le plus brillant de tout le système d'anneaux, surpassant même en luminosité tout le reste. L'épaisseur optique équivalente de cet anneau approche 1 km (0,6 km pour l'extension interne), tandis que l'épaisseur optique normale ne dépasse pas  $10^{-3}$ . Les aspects assez différents des anneaux 1986U2R et  $\zeta$  peuvent être causés par les différentes géométries de l'observation : diffusion vers l'arrière en 2003 – 2007, et diffusion vers le côté en 1986. Cependant, il ne peut pas être exclu que des changements dans la répartition de la poussière, que l'on suppose dominante dans l'anneau, soient survenus entre 1986 et 2007.

## 9) Autres bandes de poussière

Outre les anneaux 1986U2R/ $\zeta$  et  $\lambda$ , il existe d'autres bandes de poussière très ténues dans le système des anneaux d'Uranus. Elles sont invisibles pendant les occultations en raison de leur épaisseur optique négligeable, malgré leur brillance en diffusion vers l'avant. Les images de *Voyager 2* en lumière diffusée vers l'avant révèlent l'existence de bandes de poussière brillantes entre les anneaux  $\lambda$  et  $\delta$ , entre  $\eta$  et  $\beta$ , et entre  $\alpha$  et 4. Beaucoup de ces bandes ont été détectées à nouveau en 2003 - 2004 par le télescope Keck, et pendant le croisement du plan de l'anneau en 2007 en lumière diffusée vers l'arrière, mais leurs positions précises et leurs brillances relatives étaient différentes de celles observées par *Voyager 2*. L'épaisseur optique normale de ces bandes de poussière ne dépasse pas environ  $10^{-5}$ . Les scientifiques pensent que la distribution des dimensions des particules de poussières suit une loi de puissance d'indice  $p = 2,5 \pm 0,5$ .

## 10) Système d'anneaux externes

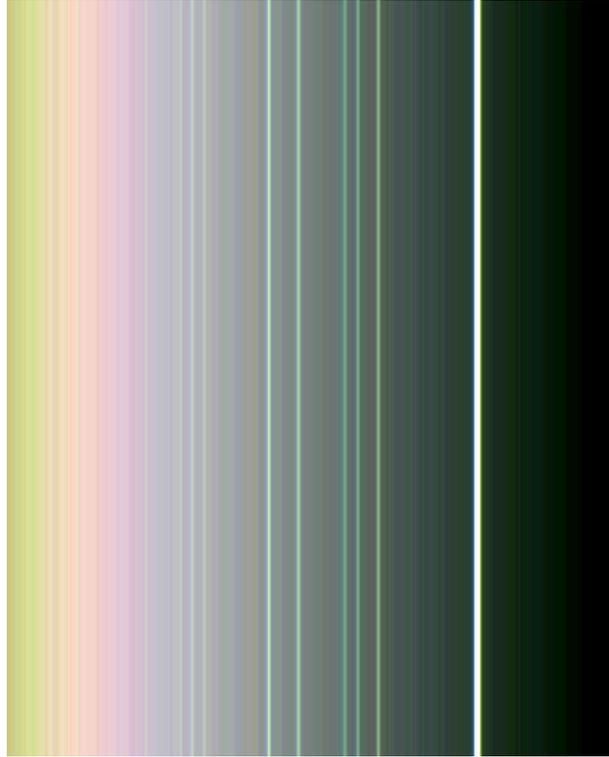
En 2003–2005, le télescope spatial Hubble permet de découvrir une nouvelle paire d'anneaux, baptisée par la suite système d'anneaux externe, qui porte le nombre d'anneaux d'Uranus à treize. Ils ont été nommés anneaux  $\mu$  et  $\nu$  (*mu* et *nu*). L'anneau  $\mu$ , le plus externe, se trouve deux fois plus éloigné de la planète que l'anneau brillant  $\eta$ . Ces anneaux externes diffèrent des anneaux internes étroits par de nombreuses caractéristiques :  $\mu$  et  $\nu$  sont larges (17 000 km et 3 800 km) et très ténus; leur épaisseur optique normale maximale sont de  $8,5 \times 10^{-6}$  et  $5,4 \times 10^{-6}$ ; leur épaisseur optique équivalente sont respectivement de 0,14 km et 0,012 km. Leur profil radial de brillance est triangulaire. La brillance maximale de l'anneau  $\mu$  se trouve presque le long de l'orbite de la petite lune Mab, qui est probablement la source des particules de l'anneau. L'anneau  $\nu$  se situe entre les satellites naturels Portia et Rosalinde, et ne contient pas de lune en son sein. Une nouvelle analyse des images de *Voyager 2* en lumière diffusée vers l'avant montre clairement les anneaux  $\mu$  et  $\nu$ . Dans cette géométrie, les anneaux sont bien plus brillants, ce qui indique qu'ils contiennent beaucoup de poussières micrométriques. Ils peuvent être semblables aux anneaux G et E de Saturne : comme l'anneau G, les anneaux  $\mu$  et  $\nu$  manquent de tout corps qui pourrait l'alimenter en poussière, et comme l'immense anneau E, ils reçoivent de la poussière d'Encelade. L'anneau  $\mu$  pourrait être constitué entièrement de poussières, sans aucune particule de grande taille. Cette hypothèse est renforcée par des observations du télescope Keck, qui n'a pas réussi à détecter l'anneau  $\mu$  dans l'infrarouge proche à 2,2  $\mu\text{m}$ , mais a pu détecter l'anneau  $\nu$ . Ceci montre que l'anneau  $\mu$  est de couleur bleue et qu'il est donc composé en majorité de particules submicrométriques. Cette poussière pourrait être constituée de glace. L'anneau  $\nu$  est plutôt coloré en rouge.

## 11) Dynamique et origine

Le mécanisme de confinement des particules dans les anneaux étroits n'est toujours pas élucidé en 2011. Un tel mécanisme est nécessaire pour que les anneaux ne se dispersent pas radialement en moins d'un million d'années. La théorie la plus courante, proposée à l'origine par Goldreich et Tremaine, est qu'une paire de lunes, les bergers interne et externe, interagissent gravitationnellement avec chaque anneau, et agissent respectivement comme source et puits pour compenser les fluctuations de moment cinétique (ou aussi bien d'énergie cinétique). Ils maintiennent ainsi la cohésion de l'anneau, mais s'en écartent progressivement. Pour être efficaces, la masse de chaque berger doit dépasser celle de l'anneau par un facteur d'au moins 2 ou 3. Ce mécanisme est à l'œuvre pour l'anneau  $\varepsilon$ , où Cordélia et Ophélie jouent le rôle de bergers. Cordélia est aussi le berger externe de l'anneau  $\delta$  et Ophélie celui de l'anneau  $\gamma$ . Cependant, aucune lune de plus de 10 km n'est connue à portée des autres anneaux. La distance actuelle de Cordélia et Ophélie de l'anneau  $\varepsilon$  permet d'estimer son âge. Les calculs montrent qu'il ne peut être plus vieux que  $6 \times 10^8$  années.

La jeunesse apparente des anneaux peut être expliquée par le renouvellement continu de la matière qui les compose. Celle-ci pourrait provenir de la collision et la fragmentation continue de plus grands objets. Selon les estimations de l'astronome Larry W. Esposito en 2002, une lune de la taille de Puck pourrait produire suffisamment de débris pour que l'anneau dure quelques milliards d'années. Cependant, la durée de vie d'un satellite plus petit est bien plus courte. Donc toutes les lunes et anneaux internes pourraient être les produits de quelques lunes de la taille de Puck brisées (par exemple par les forces de marées d'Uranus) durant les derniers 4,5 milliards d'années. Les satellites ainsi brisés déclenchent une cascade de collisions broyant rapidement tous les gros fragments en particules bien plus petites, jusqu'aux plus fines

poussières. Finalement la majorité de la masse initiale devrait être dispersée dans l'espace ou retombée sur Uranus, et les particules restantes seraient celles stabilisées par des résonances mutuelles et des effets de berger.



*Un schéma des anneaux internes, en couleurs renforcées, selon Voyager 2*

À la fin de cette évolution, il ne devrait rester qu'un système d'anneaux étroits. Mais dans la configuration actuelle, quelques mini-lunes pourraient subsister au sein des anneaux. Leur diamètre serait alors probablement limité à environ 10 km. L'origine des bandes de poussière pose moins de problèmes. La poussière a un temps de vie très court, de 100 à 1 000 ans. Les bandes doivent donc être alimentées en continu par des collisions entre particules plus grandes, issues des anneaux, des mini-lunes et des météoroïdes provenant de l'extérieur du système uranien. Les ceintures de mini-lunes et de particules elles-mêmes sont invisibles, en raison de leur faible épaisseur optique, alors que la poussière se révèle en diffusion de la lumière vers l'avant. Les anneaux étroits principaux et les ceintures de mini-lunes qui créent les bandes de poussière diffèrent probablement dans la distribution des tailles. Les anneaux principaux ont plus de corps entre le centimètre et le mètre. Ce type de distribution accroît la surface des objets dans les anneaux, ce qui conduit à une haute densité optique en lumière diffusée vers l'arrière. En revanche, les bandes de poussière contiennent peu de grosses particules, ce qui résulte en une basse épaisseur optique.

La jeunesse apparente des anneaux peut être expliquée par le renouvellement continu de la matière qui les compose. Celle-ci pourrait provenir de la collision et la fragmentation continue de plus grands objets. Selon les estimations de l'astronome Larry W. Esposito en 2002, une lune de la taille de Puck pourrait produire suffisamment de débris pour que l'anneau dure quelques milliards d'années. Cependant, la durée de vie d'un satellite plus petit est bien plus courte. Donc toutes les lunes et anneaux internes pourraient être les produits de quelques lunes de la taille de Puck brisées (par exemple par les forces de marées d'Uranus) durant les derniers 4,5 milliards d'années. Les satellites ainsi brisés déclenchent une cascade de collisions broyant rapidement tous les gros fragments en particules bien plus petites, jusqu'aux plus fines poussières. Finalement la majorité de la masse initiale devrait être dispersée dans l'espace ou retombée sur Uranus, et les particules restantes seraient celles stabilisées par des résonances mutuelles et des effets de berger. À la fin de cette évolution, il ne devrait rester qu'un système d'anneaux étroits. Mais dans la configuration actuelle, quelques mini-lunes pourraient subsister au sein des anneaux. Leur diamètre serait alors probablement limité à environ 10 km. L'origine des bandes de poussière pose moins de problèmes. La poussière a un temps de vie très court, de 100 à 1 000 ans. Les bandes doivent donc être alimentées en continu par des collisions entre particules plus grandes, issues des anneaux, des mini-lunes et des

météoroïdes provenant de l'extérieur du système uranien. Les ceintures de mini-lunes et de particules elles-mêmes sont invisibles, en raison de leur faible épaisseur optique, alors que la poussière se révèle en diffusion de la lumière vers l'avant. Les anneaux étroits principaux et les ceintures de mini-lunes qui créent les bandes de poussière diffèrent probablement dans la distribution des tailles. Les anneaux principaux ont plus de corps entre le centimètre et le mètre. Ce type de distribution accroît la surface des objets dans les anneaux, ce qui conduit à une haute densité optique en lumière diffusée vers l'arrière. En revanche, les bandes de poussière contiennent peu de grosses particules, ce qui résulte en une basse épaisseur optique.

## 12) Exploration

Les anneaux ont été étudiés de manière approfondie par les instruments la sonde spatiale *Voyager 2* durant son survol de la planète en janvier 1986. Deux nouveaux anneaux ténus,  $\lambda$  et 1986U2R, ont été ainsi découverts, portant à l'époque leur nombre total à onze. Les anneaux ont été étudiés par occultation dans les gammes radio, ultraviolette et optique. *Voyager 2* a observé les anneaux sous diverses perspectives par rapport au Soleil, donnant des images en lumière diffusée en arrière, sur le côté et en avant. L'analyse de ces images a permis la détermination complète de la brillance en fonction de la phase et des albédos géométrique et de Bond des particules des anneaux. Deux anneaux,  $\varepsilon$  et  $\eta$ , ont été résolus sur les images, révélant une structure fine et compliquée. L'analyse des images de *Voyager 2* a aussi permis la découverte de dix lunes internes, dont les deux bergers de l'anneau  $\varepsilon$ , Cordélia et Ophélie. Le télescope Hubble, par une observation depuis l'espace, a finalement porté le nombre des anneaux d'Uranus à treize par la découverte des anneaux  $\mu$  et  $\nu$  en 2005.

## 13) Propriétés

Le tableau suivant rassemble les propriétés connues du système d'anneaux planétaires d'Uranus :

Nom	Rayon (km)	Largeur (km)	Épaisseur optique normale (ÉON)	Épaisseur (m)	Excentricité	Inclinaison (°)	Notes
$\zeta_c$	32 000 - 37 850	3 500	$\sim 10^{-4}$	?	?	?	Extérieur intérieur de $\zeta$
<b>1986U2R</b>	37 000 - 39 500	2 500	$< 10^{-3}$	?	?	?	Anneau ténu de poussière
$\zeta$	37 850 - 41 350	3 500	$< 10^{-3}$	?	?	?	
<b>6</b>	41 837	1,6 - 2,2	0,18-0,25	?	$1 \times 10^{-3}$	0,062	
<b>5</b>	42 234	1,9 - 4,9	0,18-0,48	?	$1,90 \times 10^{-3}$	0,054	
<b>4</b>	42 570	2,4 - 4,4	0,16-0,30	?	$1,1 \times 10^{-3}$	0,032	
<b><math>\alpha</math></b>	44 718	4,8 - 10	0,3-0,7	?	$0,8 \times 10^{-3}$	0,015	
<b><math>\beta</math></b>	45 661	6,1 - 11,4	0,20-0,35	?	$0,4 \times 10^{-3}$	0,005	
<b><math>\eta</math></b>	47 175	1,9 - 2,7	0,16-0,25	?	0	0,001	
<b><math>\eta_c</math></b>	47 176	40	$2 \times 10^{-2}$	?	0	0,001	Extérieur large de $\eta$
<b><math>\gamma</math></b>	47 627	3,6 - 4,7	0,7-0,9	150?	$0,1 \times 10^{-3}$	0,002	
<b><math>\delta_c</math></b>	48 300	10 - 12	$3 \times 10^{-2}$	?	0	0,001	Extérieur large de $\delta$
<b><math>\delta</math></b>	48 300	4,1 - 6,1	0,3-0,6	?	0	0,001	
<b><math>\lambda</math></b>	50 023	1 - 2	0,1-0,2	?	0?	0?	
<b><math>\varepsilon</math></b>	51 149	19,7 - 96,4	0,5-2,5	150?	$7,9 \times 10^{-3}$	0	Bergers : Cordélia et Ophélie
<b><math>\nu</math></b>	66 100 - 69 900	3 800	$5,4 \times 10^{-6}$	?	?	?	Entre Portia et Rosalinde. Brillance et ÉON maximale à 67 300 km
<b><math>\mu</math></b>	86 000 - 103 000	17 000	$8,5 \times 10^{-6}$	?	?	?	Brillance et ÉON maximale à 97 700 km

### III Les satellites d'Uranus

**Uranus**, la septième planète du Système solaire, possède **27 satellites naturels connus**. Ces satellites tirent leurs noms des personnages des œuvres de William Shakespeare et Alexander Pope. William Herschel découvrit les deux premières lunes, Titania et Obéron en 1787 tandis que les autres lunes en équilibre hydrostatique furent découvertes par William Lassell en 1851 (Ariel et Umbriel) et Gerard Kuiper en 1948 (Miranda). Les autres lunes furent découvertes après 1985, pour certaines durant le survol de Voyager 2 et pour les autres par des télescopes au sol.

Les satellites d'Uranus sont divisés en trois groupes : treize satellites intérieurs, cinq satellites majeurs et neuf satellites irréguliers. Les satellites intérieurs sont de petits corps sombres qui ont des caractéristiques et une origine communes avec les anneaux de la planète. Les cinq satellites majeurs ont une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique et quatre présentent à la surface des signes d'activité interne tels que la formation de canyons ou du volcanisme. Le plus grand satellite d'Uranus, Titania, est le huitième plus grand du Système solaire avec un diamètre de 1 578 km, mais il est vingt fois moins massif que la Lune. Les satellites irréguliers d'Uranus ont des orbites elliptiques et fortement inclinées (en majorité rétrogrades) et orbitent à de grandes distances de la planète.

#### A) Découverte

William Herschel découvrit les deux premiers satellites (Titania et Obéron) le 11 janvier 1787, six ans après avoir découvert Uranus. Dans les années suivantes, Herschel crut découvrir quatre satellites supplémentaires (*voir paragraphe suivant*) et peut-être un anneau. Durant une cinquantaine d'années, Herschel fut le seul à avoir observé les satellites d'Uranus. Durant les années 1840, de meilleurs instruments et la position favorable d'Uranus dans le ciel permirent des observations suggérant la présence de lunes supplémentaires. Ariel et Umbriel furent découvertes par William Lassell en 1851. La numérotation des lunes d'Uranus en chiffres romains resta incertaine durant très longtemps et les publications hésitèrent entre la numérotation de Herschel (dans laquelle Titania et Obéron sont II et IV) et celle de Lassell (où ils sont parfois I et II). Avec la confirmation de l'existence d'Ariel et d'Umbriel, Lassell attribua les numéros I à IV par ordre croissant de distance à Uranus. Cette convention fut finalement adoptée. En 1852, le fils de Herschel, John Herschel attribua des noms aux quatre lunes d'Uranus alors connues.

Aucun autre satellite ne fut découvert durant le siècle suivant. En 1948, Gerard Kuiper découvrit Miranda, le plus petit et le dernier des cinq grands satellites sphériques d'Uranus, à l'observatoire McDonald. Des décennies plus tard, le survol d'Uranus par la sonde *Voyager 2* en janvier 1986 permit d'identifier dix lunes intérieures. Puck fut découvert dès la fin de l'année 1985, puis dans le courant de janvier 1986, Juliette, Portia, Cressida, Desdémone, Rosalinde, Belinda, Cordélia, Ophélie et Bianca. Un autre satellite, Perdita, fut découvert en 1999 en étudiant de vieux clichés *Voyager 2* (découverte publiée en 2001). Caliban et Sycorax furent découverts par des télescopes terrestres en 1997. Setebos, Stephano et Prospero le furent en 1999, Trinculo, Francisco et Ferdinand en 2001, Margaret, Mab et Cupid en 2003. Uranus fut la dernière planète géante sans satellite naturel irrégulier connu. Depuis 1997, neuf satellites irréguliers extérieurs ont été identifiés à l'aide de télescopes au sol. Deux lunes intérieures supplémentaires, Cupid et Mab, ont été découvertes grâce au télescope spatial *Hubble* en 2003. Le satellite Margaret est le dernier découvert à ce jour (2008); sa découverte fut publiée en octobre 2003.

#### ***Fausse découverte de quatre satellites supplémentaires par Herschel***

Après que Herschel eut découvert Titania et Obéron le 11 janvier 1787, il crut avoir identifié quatre satellites supplémentaires, deux en 1790 (18 janvier et 9 février) et deux en 1794 (28 février et 26 mars). Durant plusieurs décennies, les astronomes crurent qu'Uranus avait six satellites, bien que les quatre derniers n'aient jamais été observés par d'autres astronomes. En 1851, William Lassell découvrit Ariel et Umbriel ce qui invalidait les observations de Herschel. En effet, Herschel aurait dû découvrir Ariel et Umbriel s'il avait effectivement découvert quatre satellites supplémentaires, mais les paramètres orbitaux d'Ariel et d'Umbriel ne correspondent pas à ceux de ces quatre satellites. Selon Herschel, les quatre satellites avaient des périodes sidérales de 5,89 jours (entre Uranus et Titania), 10,96 jours (entre Titania

et Obéron), 38,08 et 107,69 jours (au-delà d'Obéron). Les astronomes conclurent que les quatre satellites supplémentaires découverts par Herschel n'existaient pas, Herschel ayant peut-être pris pour des satellites de petites étoiles se trouvant dans le voisinage d'Uranus. La découverte d'Ariel et d'Umbriel fut donc attribuée à Lassell.

## B) Dénomination

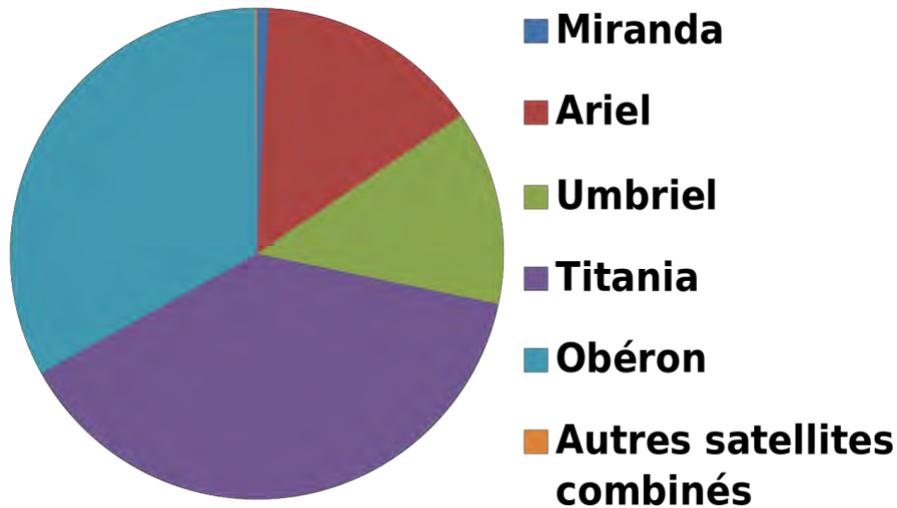
Les deux premières lunes d'Uranus furent découvertes en 1787 mais ne reçurent pas de nom avant 1852, un an après que deux lunes supplémentaires eurent été découvertes. C'est John Herschel, fils du découvreur d'Uranus, qui eut la responsabilité de les baptiser. John Herschel ne choisit pas les noms dans la mythologie grecque comme c'était souvent le cas mais parmi les esprits magiques de la littérature anglaise : les fées Obéron et Titania dans *Le Songe d'une nuit d'été* de William Shakespeare et les sylphes Ariel et Umbriel dans *La Boucle de cheveux enlevée* d'Alexander Pope (Ariel est également un esprit dans *La Tempête* de Shakespeare). John Herschel aurait en effet estimé qu'il était logique qu'Uranus, dieu du ciel et de l'air, soit accompagné d'esprits de l'air. Les noms des satellites découverts au XX<sup>e</sup> siècle ne suivent pas le thème des esprits de l'air (à l'exception de Puck et Mab). Les noms sont désormais choisis dans les œuvres utilisées par Herschel. Miranda, découverte en 1949, fut nommée par son découvreur Gerard Kuiper d'après un personnage mortel de *La Tempête* de Shakespeare. La pratique actuelle de l'Union astronomique internationale consiste à tirer les noms des satellites des personnages des pièces de Shakespeare et de *La Boucle de cheveux enlevée* : seuls Ariel, Umbriel et Belinda ont des noms issus de cette dernière pièce, tous les autres ont pour origine les œuvres de Shakespeare. À l'origine, toutes les lunes extérieures devaient leur nom à une pièce, *La Tempête*. Cependant, cette tendance s'est arrêtée car Margaret est nommée d'après *Beaucoup de bruit pour rien*.

- *La Boucle de cheveux enlevée* (un poème d'Alexander Pope) :
  - Ariel, Umbriel, Belinda
- Pièces de William Shakespeare :
  - *Le Songe d'une nuit d'été* : Titania, Obéron, Puck
  - *La Tempête* : (Ariel), Miranda, Caliban, Sycorax, Prospero, Setebos, Stephano, Trinculo, Francisco, Ferdinand
  - *Le Roi Lear* : Cordélia
  - *Hamlet* : Ophélie
  - *La Mégère apprivoisée* : Bianca
  - *Troïlus et Cressida* : Cressida
  - *Othello* : Desdémone
  - *Roméo et Juliette* : Juliette, Mab
  - *Le Marchand de Venise* : Portia
  - *Comme il vous plaira* : Rosalinde
  - *Beaucoup de bruit pour rien* : Margaret
  - *Le Conte d'hiver* : Perdita
  - *Timon d'Athènes* : Cupid

Plusieurs lunes d'Uranus partagent leur nom avec des astéroïdes : (171) Ophélie, (218) Bianca, (593) Titania, (666) Desdémone, (763) Cupidon et (2758) Cordelia.

## C) Caractéristiques et groupes

Le système de satellites de la planète Uranus est moins massif que ceux des trois autres géantes gazeuses. La masse combinée de ses cinq satellites majeurs est inférieure à la moitié de celle de Triton, la septième plus grande lune du Système solaire. Le rayon du plus grand satellite, Titania, est de 788,9 km, soit la moitié de celui de la Lune, mais légèrement plus élevé que la moitié de celui de Rhéa, la deuxième plus grande lune de Saturne; Titania est la huitième plus grand satellite du Système solaire. La masse d'Uranus est d'environ 10 000 fois celle de ses lunes.



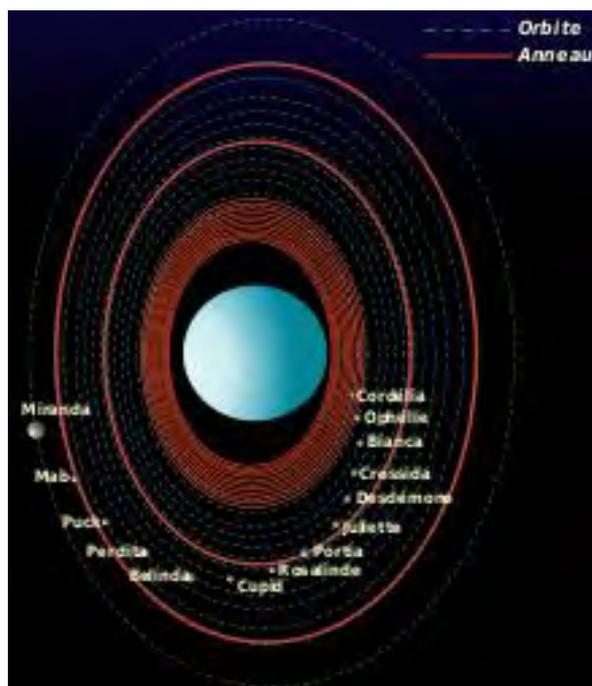
*Les masses relatives des satellites d'Uranus. Les cinq satellites majeurs de 0,7 % de la masse totale pour Miranda à 40 % pour Titania. Les autres satellites représentent ensemble 0,1 % de la masse totale et sont difficilement visibles sur le graphique*

### 1) Lunes intérieures

À l'heure actuelle (2008), treize satellites intérieurs ont été détectés autour d'Uranus. Leur orbite est située à l'intérieur de celle de Miranda. Toutes les lunes intérieures sont fortement liées aux anneaux d'Uranus qui sont probablement issus de la fragmentation d'une ou plusieurs lunes intérieures. Les deux lunes les plus intérieures (Cordélia et Ophélie) sont des « bergers » pour l'anneau  $\epsilon$  d'Uranus, tandis que la petite lune Mab est probablement la source de l'anneau  $\mu$ , le plus extérieur.

Puck est de loin le plus grand satellite intérieur d'Uranus avec un diamètre de 162 km et le seul pour lequel les photos prises par Voyager 2 montre des détails. Puck et Mab sont les deux plus externes des satellites intérieurs d'Uranus. Toutes les lunes intérieures sont des objets sombres : leur albédo géométrique est inférieur à 10 %. Elles sont composées de glace d'eau contaminée par un matériau sombre qui est probablement issu de composés organiques ayant subi l'effet des radiations.

Les petites lunes intérieures se perturbent constamment les unes les autres. Le système est chaotique et apparemment instable. Des simulations montrent que les lunes pourraient se perturber suffisamment pour que leurs orbites se croisent, ce qui pourrait conduire à des collisions entre des lunes. Desdémone pourrait entrer en collision soit avec Cressida soit avec Juliette durant les 100 prochains millions d'années.



*Schéma des lunes intérieures, de Miranda et des anneaux d'Uranus*



*Les six lunes les plus connues d'Uranus (à l'échelle, mais avec des luminosités relatives non respectées); de gauche à droite : Puck, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Obéron.*

## 2) Satellites majeurs

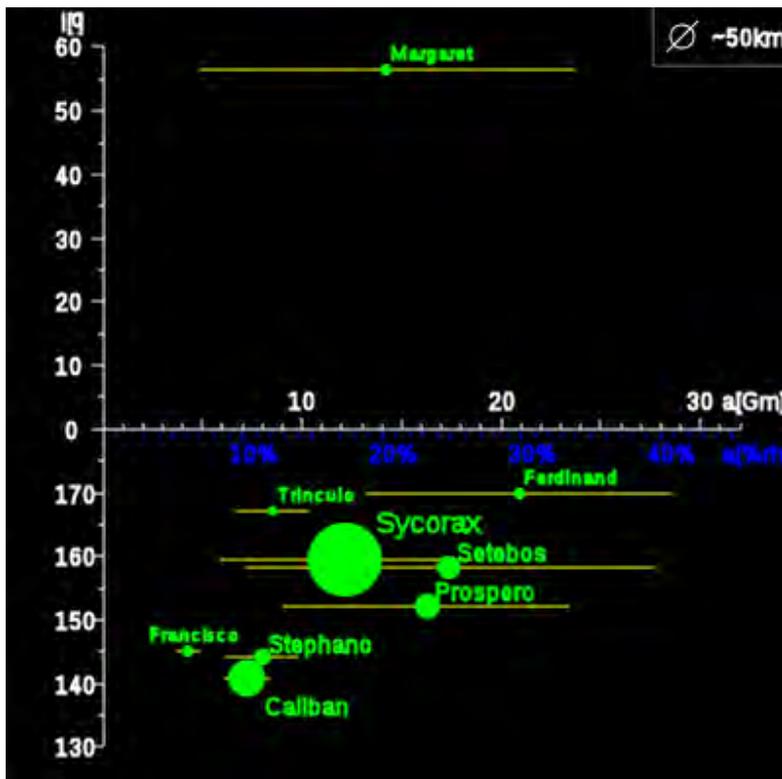
Uranus a 5 satellites majeurs : Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Obéron. Leur diamètre va de 472 km pour Miranda à 1 578 km pour Titania. Toutes les grandes lunes sont des objets relativement sombres. Leur albédo géométrique est compris entre 30 et 50 %. Leur albédo de Bond est compris entre 10 et 23 %. Umbriel est la lune la plus sombre tandis qu'Ariel est la plus lumineuse. La masse des lunes est comprise entre  $6,7 \times 10^{19}$  kg (Miranda) et  $3,5 \times 10^{21}$  kg (Titania). À titre de comparaison, la masse de la Lune est  $7,5 \times 10^{22}$  kg. Les satellites majeurs d'Uranus se seraient formés dans le disque d'accrétion qui était présent autour d'Uranus durant quelque temps après sa formation ou résultait d'un gros impact dont Uranus fut victime au début de son histoire. Toutes les lunes majeures sont composées, en quantités approximativement égales, de roches et de glace, à l'exception de Miranda qui est composée principalement de glace. La glace pourrait contenir de l'ammoniac et du dioxyde de carbone. Leurs surfaces sont fortement cratérisées, bien que tous les satellites (sauf Umbriel) présentent des signes de resurfaçage endogène sous la forme de linéaments (canyons) et dans le cas de Miranda, de structures ovoïdes appelées couronnes. Des processus d'expansion associés à des diapirs sont probablement à l'origine des couronnes. La surface d'Ariel est la plus jeune car elle présente le moins de cratères d'impact tandis que la surface d'Umbriel serait la plus ancienne. Le réchauffement responsable de l'activité endogène passée d'Ariel et Titania serait dû à d'anciennes résonances orbitales 3:1 entre Miranda et Umbriel d'une part et 4:1 entre Ariel et Titania d'autre part. Une des preuves de telles résonances passées serait l'inclinaison orbitale élevée de Miranda ( $4,34^\circ$ ) qui est surprenante pour un corps si proche de la planète. Les plus grandes lunes uraniennes pourraient être différenciées en un noyau rocheux au centre et un manteau glacé. Titania et Obéron pourraient posséder une couche océanique liquide à la frontière entre le noyau et le manteau. Les satellites majeurs d'Uranus ne possèdent pas d'atmosphère notable. Par exemple, aucune atmosphère d'une pression supérieure ou égale à 10-20 nanobars n'a été détectée sur Titania.



Les 5 satellites majeurs et sphériques d'Uranus avec des tailles et luminosités relatives correctes.  
De gauche à droite : Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Obéron

### Ensoleillement aux solstices uraniens

Le parcours quotidien du Soleil dans le ciel d'Uranus et de ses lunes au solstice d'été est relativement similaire à celui de la plupart des autres planètes du Système solaire. Les satellites majeurs ont presque exactement la même obliquité qu'Uranus; leur axe de rotation est parallèle à celui d'Uranus. Le Soleil trace un cercle dans le ciel autour du pôle céleste d'Uranus et est au plus près à environ  $7^\circ$  de celui-ci. À l'équateur, le Soleil apparaît pratiquement au nord ou au sud selon le solstice considéré. À partir des latitudes moyennes (plus hautes que  $7^\circ$ ), le Soleil trace un cercle d'environ  $15^\circ$  de diamètre dans le ciel d'Uranus (ainsi que de ses satellites) au cours d'un jour local et ne se couche jamais, jusqu'à l'approche de l'équinoxe.



Ce diagramme présente les orbites des satellites irréguliers d'Uranus connus en 2009.

L'excentricité des orbites est représentée sur l'axe horizontal par les segments (de périhélie à aphélie) tandis que l'inclinaison est représentée sur l'axe vertical.

Les satellites au-dessus de l'axe horizontal sont progrades, ceux au-dessous sont rétrogrades.

Le demi-grand axe est exprimé en millions de km et en pourcentage du rayon de la sphère de Hill.

Le demi-grand axe de la sphère de Hill d'Uranus est approximativement de 73 millions de kilomètres.

### 3) Satellites irréguliers

En 2005, neuf satellites irréguliers sont connus autour d'Uranus. Leur orbite est au-delà de celle d'Obéron, la grande lune la plus éloignée d'Uranus. Ils ont probablement tous été capturés par Uranus peu après sa formation. Leur diamètre est compris entre 18 km pour Trinculo et 150 km pour Sycorax. Contrairement aux satellites irréguliers de Jupiter, aucune corrélation n'a pas pu être trouvée entre les demi-grands axes et l'inclinaison. Cependant, les lunes rétrogrades peuvent être réparties en deux groupes selon leur excentricité orbitale. Le groupe interne inclut les satellites plus proches ( $a < 0.15 r_H$ ) sur des orbites modérément excentriques ( $e \sim 0.2$ ) : Francisco, Caliban, Stephano et Trinculo. Le groupe externe ( $a > 0.15$

r<sub>H</sub>) comprend les satellites sur les orbites très excentriques ( $e \sim 0.5$ ) : Sycorax, Prospero, Setebos et Ferdinand. Aucun satellite n'a une inclinaison comprise entre  $60^\circ$  et  $140^\circ$  en raison de l'instabilité de Kozai. Dans cette zone d'instabilité, les perturbations solaires à l'apoapse modifient les orbites des lunes; elles acquièrent de grandes excentricités qui mènent à des collisions avec les satellites intérieurs ou à leur éjection. La durée de vie dans la zone d'instabilité est entre dix millions et un milliard d'années. Margaret est le seul satellite irrégulier d'Uranus connu ayant une orbite prograde. C'est également le satellite du Système solaire ayant l'orbite la plus excentrique, bien que la lune de Neptune, Néréide, ait une excentricité moyenne plus élevée. En 2008, l'excentricité de Margaret est de 0,7979.

## D) Détails sur les principaux satellites d'Uranus

### 1) Titania

<b>Titania</b>	
 <p>La meilleure image de Titania prise par Voyager 2 (24 janvier 1986, NASA)</p>	
<b>Type</b>	Satellite naturel d'Uranus
<b>Caractéristiques orbitales</b>	
<b>Demi-grand axe</b>	435 910 km
<b>Excentricité</b>	0,0011
<b>Période de révolution</b>	8,706234 j
<b>Inclinaison</b>	0,340°
<b>Caractéristiques physiques</b>	
<b>Diamètre</b>	1577,8 ± 3,6 km (0.1235 Terre)
<b>Masse</b>	3,527 ± 0,09 × 10 <sup>21</sup> kg (5 908 × 10 <sup>-4</sup> Terre)
<b>Gravité à la surface</b>	0,38 m/s <sup>2</sup>
<b>Période de rotation</b>	? j (supposée synchrone)
<b>Magnitude apparente</b>	13,49 (à l'opposition)
<b>Albédo moyen</b>	0,35 (géométrique) 0,17 (Bond)
<b>Température de surface</b>	(Solstice) <b>min</b> : 60 K <b>max</b> : 89 K <b>moy</b> : 70 ± 7 K
<b>Caractéristiques de l'atmosphère</b>	
<b>Pression atmosphérique</b>	Dioxyde de carbone ?
<b>Découverte</b>	
<b>Découvert par</b>	William Herschel le 11 janvier 1787

**Titania**, également appelé **Uranus III**, est le plus grand satellite naturel d'Uranus et le huitième du Système solaire. Découvert par William Herschel en 1787, il doit son nom à Titania, la reine des fées de la pièce de Shakespeare, *Le Songe d'une nuit d'été*. Son orbite autour d'Uranus est entièrement située au sein de la magnétosphère de la planète. Titania est constitué de glace et de roche en quantités approximativement égales. Le satellite est probablement différencié en un noyau rocheux et un manteau glacé. Une couche d'eau liquide pourrait être présente à l'interface entre le noyau et le manteau. La surface de Titania, sombre et légèrement rouge, a été modelée à la fois par les impacts d'astéroïdes et de comètes, et par les processus endogènes. Elle est couverte de nombreux cratères d'impacts, certains atteignant jusqu'à 326 km de diamètre, mais est moins cratérisée que la surface d'Obéron, le grand satellite le plus externe du système uranien. Titania a probablement connu un épisode de resurfaçage endogène qui a recouvert les surfaces les plus anciennes très cratérisées. Par la suite, l'expansion de son intérieur a engendré sur la surface de Titania un réseau de canyons et d'escarpements de faille. À l'instar de toutes les lunes majeures d'Uranus, elle s'est probablement formée à partir du disque d'accrétion qui entourait Uranus juste après la formation de la planète. Le système uranien n'a été étudié de près qu'une seule fois, par la sonde *Voyager 2* en janvier 1986, qui a pris plusieurs images de Titania, permettant ainsi de cartographier environ 40 % de la surface de cette lune.

### Découverte

Titania est découvert par William Herschel le 11 janvier 1787, le même jour qu'Obéron, la seconde plus grande lune d'Uranus. Herschel signale par la suite la découverte de quatre satellites supplémentaires, mais qui se sont révélés être des erreurs d'observation. Durant les cinquante années suivant leur découverte, Titania et Obéron ne seront observées par aucun autre astronome que Herschel, bien que ces satellites puissent en 2008 être observés depuis la Terre avec un télescope amateur haut de gamme. Toutes les lunes d'Uranus sont nommées d'après des personnages des œuvres de William Shakespeare ou d'Alexander Pope. Le nom Titania est issu de *Titania*, la reine des fées dans *Le Songe d'une nuit d'été*. Les noms des quatre satellites d'Uranus ont été suggérés par le fils de Herschel, John, en 1852, à la demande de William Lassell, qui, l'année précédente, avait découvert les deux autres lunes, Ariel et Umbriel. Titania fut initialement désigné comme « le premier satellite d'Uranus » et, en 1848, reçut la désignation **Uranus I** par William Lassell, bien qu'il ait parfois utilisé la numérotation de William Herschel (où Titania et Obéron sont II et IV). En 1851, Lassell attribua finalement aux quatre satellites connus des chiffres romains en fonction de leur éloignement de la planète et depuis Titania est appelé **Uranus III**.

### Orbite

Titania est en orbite autour d'Uranus à une distance d'environ 436 000 km. C'est le second plus éloigné des cinq grands satellites de la planète. L'excentricité et l'inclinaison par rapport à l'équateur d'Uranus de l'orbite de Titania sont faibles. Titania est en rotation synchrone autour d'Uranus, c'est-à-dire que sa période orbitale et sa période de rotation ont la même durée, d'environ 8,7 jours; sa face en regard de la planète est toujours la même. L'orbite de Titania est intégralement située au sein de la magnétosphère d'Uranus. L'hémisphère arrière (c'est-à-dire opposé au mouvement orbital) des satellites dont l'orbite est entièrement située au sein de la magnétosphère de la planète est influencé par le plasma magnétosphérique qui est en rotation avec la planète. Ce bombardement peut conduire à l'assombrissement des hémisphères arrière, comme c'est le cas pour toutes les lunes d'Uranus à l'exception d'Obéron. L'axe de rotation d'Uranus étant très fortement incliné par rapport à son plan orbital, ses satellites, qui sont en orbite sur son plan équatorial, connaissent des cycles saisonniers extrêmes. Les pôles nord et sud de Titania ont des cycles de 42 ans d'éclairement continu, puis de nuit continue. Tous les 42 ans, lors des équinoxes d'Uranus, le plan équatorial de cette planète se confond avec celui de la Terre. Les lunes d'Uranus peuvent à cette occasion s'occulter les unes les autres. Ce phénomène s'est produit à plusieurs reprises en 2007 et 2008, notamment les 15 août et 8 décembre 2007 lorsque Titania a occulté Umbriel.

### Caractéristiques physiques

#### Composition et structure interne

Titania est la plus grande et la plus massive des lunes d'Uranus et la huitième plus massive du Système solaire. La densité élevée de Titania (1,71 g/cm, bien supérieure à celle des satellites de Saturne par exemple), indique qu'il est constitué en proportions à peu près égales de glace d'eau et d'un matériau

dense autre que la glace. Ce matériau pourrait être composé de rochers et de matériaux carbonacés parmi lesquels des composés organiques de masse élevée. Des observations spectroscopiques infrarouge menées entre 2001 et 2005 ont montré la présence d'eau glacée cristalline à la surface du satellite. Les raies d'absorption de la glace sont légèrement plus intenses sur l'hémisphère avant de Titania que sur son hémisphère arrière. C'est le contraire de ce qui est observé sur Obéron, où l'hémisphère arrière présente des traces d'eau plus importantes. La raison de cette asymétrie est inconnue, mais elle pourrait être due au bombardement par des particules chargées de la magnétosphère d'Uranus qui est plus importante sur l'hémisphère arrière. Les particules énergétiques ont tendance à éroder la glace, à décomposer le méthane présent dans la glace sous forme d'hydrate et à assombrir les autres composés organiques, laissant un sombre résidu riche en carbone à la surface. Le seul composé autre que l'eau identifié à la surface de Titania par spectroscopie infrarouge est le dioxyde de carbone qui est principalement concentré sur l'atmosphère arrière. L'origine du CO<sub>2</sub> n'est pas complètement identifiée. Il pourrait être produit à la surface à partir de carbonates ou de composés organiques sous l'effet des radiations ultraviolettes du Soleil ou de particules chargées issues de la magnétosphère d'Uranus. Ce dernier processus pourrait expliquer l'asymétrie de sa distribution car l'atmosphère arrière est sujette à une influence plus importante de la magnétosphère que l'atmosphère avant. Une autre source possible est le dégazage du CO<sub>2</sub> primordial piégé par la glace d'eau à l'intérieur de Titania. L'échappement du CO<sub>2</sub> de l'intérieur pourrait être lié à l'activité géologique passée de la lune.

Titania pourrait être différencié en un noyau rocheux entouré d'un manteau glacé. Si tel est le cas, le rayon du noyau (520 km) serait d'environ 66 % celui du satellite, et sa masse d'environ 58 % celle du satellite, valeurs qui dépendent de la composition du satellite. La pression au centre de Titania est d'environ 0,58 GPa (5,8 kbar). L'état physique du manteau de glace est inconnu. Si la glace contient assez d'ammoniac ou d'autres antigels, Titania pourrait posséder une couche océanique liquide à la frontière entre le noyau et le manteau. L'épaisseur de cet océan, s'il existe, serait inférieure à 50 km et sa température d'environ 190 K, soit -83°C. Toutefois, la structure interne de Titania dépend fortement de son histoire thermique, qui est mal connue en 2009.



*Cette image de Titania prise par Voyager 2 montre d'énormes rifts*



*Les principales caractéristiques de la surface de Titania*

## Géologie

Parmi les grands satellites d'Uranus, la luminosité de Titania est intermédiaire entre les satellites plus sombres (Umbriel et Obéron) et les plus lumineux (Ariel et Miranda). Sa surface présente un fort effet d'opposition : sa réflectivité diminue de 35 % à un angle de phase de 0° (albédo géométrique) à 25 % à un angle d'environ 1°. L'albédo de Bond (également appelé albédo global ou albédo planétaire) de Titania est faible à 17 %. Sa surface est en général légèrement rouge, mais moins que celle d'Obéron. Cependant, les jeunes dépôts d'impact sont légèrement bleus, tandis que les plaines situées sur l'hémisphère avant, près

du cratère Ursula et le long de certains grabens sont plus rouges. Les hémisphères arrière et avant sont asymétriques : l'hémisphère avant est plus rouge que l'hémisphère arrière de 8 %. Cependant, la différence est liée aux plaines lisses et pourrait être due au hasard. La coloration rouge des surfaces pourrait être due au bombardement des surfaces de Titania par des particules chargées et des micrométéorites issues du milieu spatial sur des échelles de temps de l'ordre de l'âge du Système solaire. Cependant, il est plus probable que l'asymétrie de couleur de Titania soit due au dépôt de matériau rouge provenant des parties externes du système uranien (peut-être des satellites irréguliers) qui se serait principalement déposé sur l'hémisphère avant. Les scientifiques ont identifié trois types de caractéristiques géologiques sur Titania : les cratères d'impact, les chasmata (canyons) et les rupes (escarpements de faille). Les surfaces de Titania sont moins cratérisées que celles d'Obéron et Umbriel, ce qui est le signe qu'elles sont beaucoup plus jeunes. Le diamètre des cratères va de quelques kilomètres à 326 kilomètres pour le plus grand cratère connu, Gertrude. Certains cratères (par exemple, Ursula et Jessica) sont entourés par des éjectas d'impact brillants (des rayons de glace relativement fraîche). Tous les grands cratères de Titania ont un fond plat et un piton central. La seule exception est Ursula qui a une dépression en son centre. À l'est de Gertrude se trouve une zone présentant une typographie irrégulière, appelée « bassin sans-nom » (*unnamed basin* en anglais), qui pourrait être un autre bassin d'impact très dégradé d'un diamètre de 330 km. Les planchers des plus grands cratères, Hamlet, Othello et Macbeth, sont composés de matériaux très sombres déposés après leur formation. La surface de Titania est parcourue par un immense système de failles normales ou d'escarpements de faille. Dans certains régions, deux failles parallèles sont le signe de dépressions dans la croûte du satellite, forment des grabens qui sont parfois appelés canyons. Le plus grand canyon de Titania est Messina Chasma, d'une longueur de 1 500 km, qui s'étend de l'équateur presque jusqu'au pôle sud.

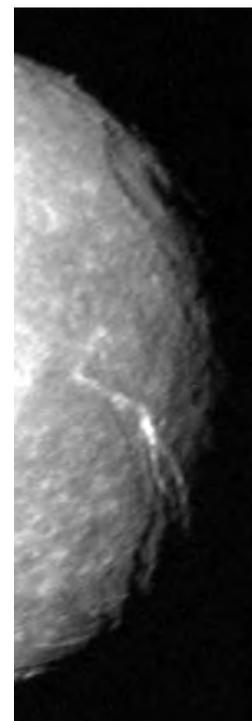
#### ***Messina Chasma—un grand canyon de Titania***

*La région du terminateur de Titania, est montrée dans cette image de Voyager 2 prises dans les premières heures du 24 janvier 1986. Voyager 2 était à environ 500 000 kilomètres de Titania.*

*Cette vue à angle réduit est orientée vers le terminateur, cette ligne entre la face éclairée et celle qui est dans l'ombre.*

*Cet éclairage rasant montre très bien le relief de la surface. Parmi les éléments visibles, de longues vallées linéaires de 50 à 100 km de large et de plusieurs centaines de km de long.*

*Deux failles sont visibles, tout comme de nombreux cratères d'impacts circulaires attribués à des débris cosmiques. La résolution de cette image est de 9 km par pixel.*



Les grabens sur Titania ont une largeur de 20 à 50 km et une profondeur de 2 à 5 km. Les escarpements qui ne sont pas liés aux canyons sont appelés rupes, comme Rousillon Rupes près du cratère Ursula. Les régions le long des escarpements et près d'Ursula apparaissent lisses à la résolution de *Voyager 2*. Ces plaines lisses ont probablement connu un épisode de resurfaçage à une époque postérieure de l'histoire géologique de Titania, après que la majorité des cratères se sont formés. Le resurfaçage aurait pu être soit de nature endogène (éruption de matériau fluide provenant de l'intérieur par cryovolcanisme), soit être dû au recouvrement par des éjectas d'impact issus des grands cratères voisins. Les grabens sont probablement les caractéristiques géologiques les plus jeunes de Titania car ils traversent les cratères et certaines plaines lisses. La géologie de Titania a été influencée par deux phénomènes majeurs : la formation de cratères d'impact et le resurfaçage endogène. Le premier processus existe depuis la création de Titania et a eu une influence sur toutes les surfaces de la lune. Le second, le resurfaçage endogène, eut

également des effets globaux mais fut uniquement actifs durant quelque temps suivant la formation de la lune. Ces deux processus auraient transformé les anciennes surfaces fortement cratérisées, expliquant le relativement faible nombre de cratères d'impact visibles sur la surface actuelle de la lune. D'autres épisodes de resurfaçage pourraient s'être produits ultérieurement et conduit à la formation des plaines lisses. Une autre hypothèse est que les plaines lisses soient dues au dépôt d'éjectas d'impact des cratères voisins. Les procédés endogènes les plus récents étaient principalement de nature tectonique et sont responsables de la formation des canyons, d'immenses craquelures dans la croûte glacée. Ces craquelures sont dues à l'expansion d'Obéron par un facteur d'environ 0,7 %.

## Atmosphère

La présence de dioxyde de carbone à la surface suggère que Titania pourrait avoir une atmosphère saisonnière et ténue de CO<sub>2</sub>, semblable à celle de la lune jovienne de Callisto. D'autres gaz comme l'azote ou le méthane ne sont probablement pas présents à la surface de Titania car sa faible gravité ne pourrait les empêcher de s'échapper dans l'espace. À la température maximale atteignable durant le solstice d'été de Titania (89 K), la pression de vapeur saturante du dioxyde de carbone est d'environ 3 nbar. Le 8 septembre 2001, Titania a occulté une étoile de magnitude apparente 7,2 (HIP106829); cet événement a permis de préciser le diamètre et l'éphéméride de la lune et d'identifier une éventuelle atmosphère. Aucune atmosphère d'une pression supérieure ou égale à 10-20 nanobars n'a été détectée. Toutefois, la pression maximale possible de dioxyde de carbone à la surface de Titania est plusieurs fois inférieure à 10-20 nanobars; la mesure effectuée n'a donc pas permis de placer de contraintes sur les paramètres de l'atmosphère. Si Titania est pourvue d'une atmosphère, celle-ci doit être beaucoup plus faible que celle de Triton et Pluton. En raison de la géométrie particulière du système uranien, les pôles des satellites reçoivent plus d'énergie solaire que les régions équatoriales. La pression de vapeur saturante de CO<sub>2</sub> augmentant fortement avec la température, le dioxyde de carbone pourrait s'accumuler dans les zones de faible latitude, où il pourrait exister sous forme stable sur les taches d'albédo élevé et les zones de la surface à l'ombre de la surface sous forme de glace. Durant l'été, Titania est le théâtre d'un cycle du carbone : quand les températures polaires atteignent 85-90 K, le dioxyde de carbone se sublime et migre vers le pôle opposé et les régions équatoriales. Le dioxyde de carbone accumulé peut être éjecté des zones froides par les particules de la magnétosphère qui érodent la surface. Titania aurait ainsi perdu une proportion significative de son dioxyde de carbone depuis sa formation il y a 4,6 milliards d'années.

## Origine et évolution

Titania se serait formé à partir d'un disque d'accrétion ou sous-nébuleuse, c'est-à-dire un disque de gaz et de poussières. Celui-ci aurait soit été présent autour d'Uranus pendant quelque temps après sa formation, soit il aurait créé par l'impact géant auquel Uranus doit son obliquité. La composition précise de la sous-nébuleuse est inconnue, mais la densité relativement élevée de Titania et d'autres lunes d'Uranus par rapport aux lunes de Saturne indique qu'elle devait être pauvre en eau. Cette nébuleuse aurait pu être composée d'importantes quantités d'azote et de carbone présents sous forme de monoxyde de carbone (CO) et de diazote (N<sub>2</sub>) et non pas sous forme d'ammoniac ni de méthane. Les satellites formés dans cette sous-nébuleuse contiendraient moins de glace d'eau (avec du CO et de N<sub>2</sub> piégés sous forme de clathrates) et davantage de roches, ce qui expliquerait leur densité élevée. L'accrétion de Titania dura probablement plusieurs milliers d'années. Les impacts qui accompagnèrent l'accrétion ont chauffé la couche externe du satellite. La température maximale d'environ 250 K a été atteinte à la profondeur d'environ 60 km. Après la fin de la formation du satellite, la couche sub-surfacique s'est refroidie, tandis que l'intérieur de Titania fut échauffé par la décomposition des éléments radioactifs présents dans les roches. La couche refroidie sous la surface s'est contractée, tandis que l'intérieur s'est dilaté. Cela entraîna de fortes contraintes dans la croûte du satellite et provoqua des craquelures. Ce processus qui dura environ 200 millions d'années pourrait être à l'origine du système de canyons visible sur Titania. Toute activité endogène a cessé il y a plusieurs milliards d'années. L'échauffement initial suite à l'accrétion et la désintégration radioactive des éléments a sans doute été suffisamment intense pour faire fondre la glace si un antigel tel l'ammoniac (sous la forme d'hydrate d'ammoniac) était présent. Une fusion importante pourrait avoir séparé la glace des roches et engendrer la formation d'un noyau rocheux entouré d'un manteau de glace. Une couche d'eau liquide (océan) riche en ammoniac dissous pourrait s'être formée à la frontière entre le noyau et le manteau. La température de fusion de ce mélange est de 176 K. Si la température a chuté en dessous de cette valeur, l'océan serait désormais gelé. La solidification de l'eau

aurait conduit à l'expansion de l'intérieur, une autre cause possible de la formation des canyons. Néanmoins, les connaissances actuelles sur l'évolution passée de Titania restent très limitées.

### Exploration

À l'heure actuelle (octobre 2009), les seules images disponibles de Titania sont des clichés de faible résolution pris par la sonde Voyager 2, qui a photographié la lune lors de son survol d'Uranus en janvier 1986. La distance minimale entre la sonde Voyager 2 et Titania ayant été de 365 200 km, les meilleures images de la lune ont une résolution spatiale d'environ 3,4 km (seules Miranda et Ariel furent photographiées avec de meilleures résolutions). Les images couvrent environ 40 % de la surface, mais seuls 24 % de la surface furent photographiés avec une qualité suffisante pour effectuer une cartographie géologique. Lors du survol de Titania, l'hémisphère sud était pointé vers le Soleil et par conséquent l'hémisphère nord était sombre et ne put donc pas être étudié. Aucune autre sonde spatiale n'a visité Uranus et Titania depuis. Le programme *Uranus orbiter and probe*, dont le lancement pourrait être programmé pour les années 2020 à 2023, devrait apporter des précisions sur la connaissance des satellites d'Uranus et notamment sur Titania.

## 2) Obéron

**Obéron**, également appelé **Uranus IV**, est le plus éloigné des grands satellites naturels d'Uranus. C'est le deuxième satellite de cette planète tant par sa taille que sa masse et le neuvième du Système solaire en masse. Découvert par William Herschel en 1787, Obéron doit son nom à un personnage de la pièce de Shakespeare *Le Songe d'une nuit d'été*. Son orbite autour d'Uranus est partiellement située en dehors de la magnétosphère d'Uranus. Obéron est constitué de glace et de roche en quantités approximativement égales. Le satellite est probablement différencié en un noyau rocheux et un manteau glacé. Une couche d'eau liquide pourrait être présente à l'interface entre le noyau et le manteau. La surface d'Obéron, qui est sombre et légèrement rouge, semble avoir été principalement modelée par les impacts d'astéroïdes et de comètes. Il est couvert par de nombreux cratères d'impacts, certains atteignant jusqu'à 210 km de diamètre. Obéron a probablement connu un épisode de resurfaçage endogène qui a recouvert les surfaces les plus anciennes très cratérisées. Par la suite, l'expansion de son intérieur a engendré sur la surface d'Obéron un réseau de canyons et d'escarpements de faille. À l'instar de toutes les lunes majeures d'Uranus, Obéron s'est probablement formé à partir du disque d'accrétion qui entourait Uranus juste après la formation de la planète. Le système uranien n'a été étudié de près qu'une seule fois, par la sonde Voyager 2 en janvier 1986. Voyager 2 a pris plusieurs images d'Obéron, permettant ainsi de cartographier environ 40 % de la surface de cette lune.

<b>Obéron</b>	
	
La meilleure image d'Obéron prise par Voyager 2 (24 janvier 1986, NASA)	
<b>Type</b>	Satellite naturel d'Uranus
<b>Caractéristiques orbitales</b>	
<b>Demi-grand axe</b>	583 520 km

<b>Excentricité</b>	0,0014
<b>Période de révolution</b>	13,463234 j
<b>Inclinaison</b>	0,058°
<b>Caractéristiques physiques</b>	
<b>Diamètre</b>	1522,8 ± 5,2 km (0,1194 Terre)
<b>Masse</b>	3,014 ± 0,075 × 10 <sup>21</sup> kg (5 046 × 10 <sup>-4</sup> Terre)
<b>Gravité à la surface</b>	0,348 m/s <sup>2</sup>
<b>Période de rotation</b>	? j (supposée synchrone)
<b>Magnitude apparente</b>	14,1 (à l'opposition)
<b>Albédo moyen</b>	0,31 (géométrique) 0,14 (Bond)
<b>Température de surface</b>	70–80 K
<b>Caractéristiques de l'atmosphère</b>	
<b>Pression atmosphérique</b>	Pas d'atmosphère
<b>Découverte</b>	
<b>Découvert par</b>	William Herschel le 11 janvier 1787

## Découverte

Obéron est découvert par William Herschel le 11 janvier 1787, le même jour que Titania, la plus grande lune d'Uranus. Herschel signale par la suite la découverte de quatre satellites supplémentaires, mais qui se sont révélés être des erreurs d'observation. Durant les cinquante années suivant leur découverte, Titania et Obéron ne seront observés par aucun autre astronome que Herschel, bien que ces satellites puissent en 2008 être observés depuis la Terre avec un télescope amateur haut de gamme. Obéron fut initialement désigné comme « le deuxième satellite d'Uranus » et, en 1848, reçut la désignation **Uranus II** par William Lassell, bien qu'il ait parfois utilisé la numérotation de William Herschel (où Titania et Obéron sont II et IV). En 1851, Lassell attribua finalement aux quatre satellites connus des chiffres romains en fonction de leur éloignement de la planète et depuis Obéron est appelé **Uranus IV**.

## Nom

Toutes les lunes d'Uranus sont nommées d'après des personnages des œuvres de William Shakespeare ou d'Alexander Pope. Obéron, roi des fées dans différentes légendes, est un personnage majeur de la pièce *Le Songe d'une nuit d'été*. Les noms des quatre satellites d'Uranus ont été suggérés par le fils de Herschel, John, en 1852, à la demande de William Lassell, qui, l'année précédente, avait découvert les deux autres lunes, Ariel et Umbriel. L'adjectif dérivé de Obéron est obéronien.

## Orbite

Obéron est en orbite autour d'Uranus à une distance d'environ 584 000 km. C'est le plus éloigné des cinq grands satellites de la planète. L'excentricité et l'inclinaison par rapport à l'équateur d'Uranus de l'orbite d'Obéron sont faibles. Obéron est en rotation synchrone autour d'Uranus, c'est-à-dire que sa période orbitale et sa période de rotation ont la même durée d'environ 13,5 jours; sa face en regard de la planète est toujours la même. Une proportion significative de l'orbite d'Obéron est située en dehors de la magnétosphère d'Uranus. Sa surface est donc parfois directement frappée par le vent solaire. L'hémisphère arrière (c'est-à-dire opposé au mouvement orbital) des satellites, dont l'orbite est entièrement située au sein de la magnétosphère de la planète, est influencé par le plasma magnétosphérique qui est en rotation avec la planète. Ce bombardement peut conduire à l'assombrissement des hémisphères arrière, comme c'est le cas pour toutes les autres lunes d'Uranus. L'axe de rotation d'Uranus étant très fortement incliné par rapport à son plan orbital, ses satellites, qui sont en

orbite sur son plan équatorial, connaissent des cycles saisonniers extrêmes. Les pôles nord et sud d'Obéron ont des cycles de 42 ans d'éclairement continu, puis de nuit continue. Tous les 42 ans, lors des équinoxes d'Uranus, le plan équatorial de cette planète se confond avec celui de la Terre. Les lunes d'Uranus peuvent à cette occasion s'occulter les unes les autres, comme par exemple l'occultation d'Umbriel par Obéron qui s'est produite le 4 mai 2007 et dura six minutes.

## Caractéristiques physiques

### Composition et structure interne

Obéron est la seconde plus grande et la seconde plus massive des lunes d'Uranus après Titania, et la neuvième plus grande lune du Système solaire. La densité élevée d'Obéron (1,63 g/cm), supérieure à celle des satellites de Saturne par exemple, indique qu'il est constitué en proportions à peu près égales de glace d'eau et d'un matériau dense autre que la glace. Ce matériau pourrait être composé de rochers et de matériaux carbonacés parmi lesquels des composés organiques de masse élevée. Des observations spectroscopiques ont montré la présence d'eau glacée cristalline à la surface du satellite. Les raies d'absorption de la glace sont plus intenses sur l'hémisphère arrière d'Obéron que sur son hémisphère avant. C'est le contraire de ce qui est observé sur les autres lunes d'Uranus, où l'hémisphère avant présente des traces d'eau plus importantes. La raison de cette asymétrie est inconnue, mais elle pourrait être due au bombardement par des particules chargées de la magnétosphère d'Uranus qui est plus important sur l'hémisphère avant. Les particules énergétiques ont tendance à éroder la glace, à décomposer le méthane présent dans la glace sous forme d'hydrate et à assombrir les autres composés organiques, laissant un sombre résidu riche en carbone à la surface. Obéron pourrait être différencié en un noyau rocheux entouré d'un manteau glacé. Si tel est le cas, le rayon du noyau (480 km) serait d'environ 63 % celui du satellite, et sa masse d'environ 54 % celle du satellite, valeurs qui dépendent de la composition du satellite. La pression au centre d'Obéron est d'environ 0,5 GPa (5 kbar). L'état physique du manteau de glace est inconnu. Si la glace contient assez d'ammoniac ou d'autres antigels comme des sels dissous, Obéron pourrait posséder une couche océanique liquide à la frontière entre le noyau et le manteau. L'épaisseur de cet océan, s'il existe, serait inférieure à 40 km et sa température d'environ 180 K. Toutefois, la structure interne d'Obéron dépend fortement de son histoire thermique, qui est mal connue en 2009.

### Géologie



*Une image récréée par ordinateur d'Obéron en couleur artificielle. La région à gauche (lisse) n'a jamais été photographiée par une sonde. Le plus grand cratère dont le fond est sombre est Hamlet. Le cratère Othello est en bas à gauche de celui-ci et Mommur Chasma en haut à gauche*

Obéron est la seconde lune la plus sombre après Umbriel parmi les grands satellites d'Uranus. Sa surface présente un fort effet d'opposition : sa réflectivité diminue de 31 % à un angle de phase de 0° (albédo géométrique) à 22 % à un angle d'environ 1°. Obéron a un faible albédo de Bond (également appelé albédo global ou albédo planétaire) d'environ 14 %. Sa surface est en général légèrement rouge, à

l'exception des jeunes dépôts d'impact, qui sont spectralement neutres (c'est-à-dire gris) ou légèrement bleus. Obéron est le plus rouge des satellites d'Uranus. Les hémisphères arrière et avant sont asymétriques : l'hémisphère avant est plus rouge que l'hémisphère arrière car il contient davantage de matériau rouge sombre. La coloration rouge des surfaces pourrait être due au bombardement des surfaces d'Obéron par des particules chargées et des micrométéorites issues du milieu spatial sur des échelles de temps de l'ordre de l'âge du Système solaire. Cependant, il est plus probable que l'asymétrie de couleur de Titania soit due au dépôt de matériau rouge provenant des parties externes du système uranien (peut-être des satellites irréguliers) qui se serait principalement déposé sur l'hémisphère avant. Les scientifiques ont identifié deux types de caractéristiques géologiques sur Obéron : les cratères d'impact et les chasmata (canyons). Les surfaces anciennes d'Obéron sont les plus cratérisées de toutes les lunes d'Uranus. La densité de cratères est proche de la saturation, c'est-à-dire que la formation de nouveaux cratères est contrebalancée par la destruction de cratères plus anciens. Le diamètre des cratères va de quelques kilomètres à 206 kilomètres pour le plus grand cratère connu, Hamlet. Beaucoup de grands cratères sont entourés par des éjectas d'impact brillants (des rayons de glace relativement fraîche). Les planchers des plus grands cratères, Hamlet, Othello et Macbeth, sont composés de matériaux très sombres déposés après leur formation. Une montagne d'une altitude d'environ 11 km a été observée au sud-est sur certains clichés de Voyager. Il pourrait être le pic central d'un bassin d'impact (c'est-à-dire d'un grand cratère d'impact) d'un diamètre d'environ 375 km. La surface d'Obéron est parcourue par un système de canyons, qui sont cependant moins répandus que ceux de Titania. Les canyons sont probablement des failles normales ou des escarpements de faille, qui peuvent être anciens ou récents. Les escarpements traversent les dépôts brillants de certains vieux grands cratères; leur formation est donc postérieure à celle des cratères. Le plus grand canyon d'Obéron est le Mommur Chasma. La géologie d'Obéron a été influencée par deux phénomènes majeurs : la formation de cratères d'impact et le resurfaçage endogène. Le premier processus existe depuis la création d'Obéron et est à l'origine de son apparence actuelle. Le second, le resurfaçage endogène, fut actif durant quelque temps suivant la formation de la lune. Ces procédés endogènes étaient principalement de nature tectonique et sont responsables de la formation des canyons, d'immenses craquelures dans la croûte glacée. Les canyons recouvrent une partie des plus anciennes surfaces d'Obéron. Ces craquelures sont dues à l'expansion d'Obéron par un facteur d'environ 0,5 %. Celle-ci se produisit en deux phases, menant à la création des vieux canyons et des jeunes canyons. La nature des taches sombres, qui sont majoritairement présentes sur l'hémisphère avant et dans les cratères, est inconnue. Certains scientifiques supposent qu'elles sont d'origine cryovolcanique, telles les maria lunaire. Selon d'autres, les impacts auraient mis au jour du matériel sombre précédemment enfoui sous la croûte de glace pure. Cette dernière hypothèse signifierait qu'Obéron serait au moins partiellement différenciée avec une croûte de glace en surface, tandis que l'intérieur du satellite ne serait pas différencié.

### **Origine et évolution**

Obéron se serait formé à partir d'un disque d'accrétion ou sous-nébuleuse, c'est-à-dire un disque de gaz et de poussières. Celui-ci aurait soit été présent autour d'Uranus pendant quelque temps après sa formation, soit il aurait été créé par l'impact géant auquel Uranus doit son obliquité. La composition précise de la sous-nébuleuse est inconnue, mais la densité relativement élevée d'Obéron et d'autres lunes d'Uranus par rapport aux lunes de Saturne indique qu'elle devait être pauvre en eau. Cette nébuleuse aurait pu être composée d'importantes quantités d'azote et de carbone présents sous forme de monoxyde de carbone et de diazote et non pas sous forme d'ammoniac ni de méthane. Les satellites formés dans cette sous-nébuleuse contiendraient moins de glace d'eau (avec du CO et de N<sub>2</sub> piégés sous forme de clathrates) et davantage de roches, ce qui expliquerait leur densité élevée. L'accrétion d'Obéron dura probablement plusieurs milliers d'années. Les impacts qui accompagnèrent l'accrétion ont chauffé la couche externe du satellite. La température maximale d'environ 230 K a été atteinte à la profondeur d'environ 60 km. Après la fin de la formation du satellite, la couche sub-surfacique s'est refroidie, tandis que l'intérieur d'Obéron fut échauffé par la décomposition des éléments radioactifs présents dans les roches. La couche refroidie sous la surface s'est contractée, tandis que l'intérieur s'est dilaté. Cela entraîna de fortes contraintes dans la croûte du satellite et provoqua des craquelures. Ce processus qui dura environ 200 millions d'années pourrait être à l'origine du système de canyons visible sur Obéron. Toute activité endogène a cessé il y a plusieurs milliards d'années. L'échauffement initial consécutif à l'accrétion et la désintégration radioactive des éléments a sans doute été suffisamment intense pour faire fondre la glace si un antigel tel que

l'ammoniac était présent (sous la forme d'hydrate d'ammoniac). Une fusion importante pourrait avoir séparé la glace des roches et engendrer la formation d'un noyau rocheux entouré d'un manteau de glace. Une couche d'eau liquide (océan) riche en ammoniac dissous pourrait s'être formée à la frontière entre le noyau et le manteau. La température de fusion de ce mélange est de 176 K. Si la température a chuté en dessous de cette valeur, l'océan serait désormais gelé. La solidification de l'eau aurait conduit à l'expansion de l'intérieur, une autre cause possible de la formation des canyons. Néanmoins, les connaissances actuelles sur l'évolution passée d'Obéron restent très limitées.

### Exploration

À l'heure actuelle (avril 2011), les seules images disponibles d'Obéron sont des clichés de faible résolution pris par la sonde Voyager 2, qui a photographié la lune lors de son survol d'Uranus en janvier 1986. La distance minimale entre la sonde Voyager 2 et Obéron ayant été de 470 600 km, les meilleures images de la lune ont une résolution spatiale d'environ 6 km. Les images couvrent environ 40 % de la surface, mais seuls 25 % de la surface furent photographiés avec une qualité suffisante pour effectuer une cartographie géologique. Lors du survol d'Obéron, l'hémisphère sud était pointé vers le Soleil et par conséquent l'hémisphère nord était sombre et ne put donc pas être étudié. Aucune autre sonde spatiale n'a visité Uranus et Obéron depuis. Le programme *Uranus orbiter and probe*, dont le lancement pourrait être programmé pour les années 2020 à 2023, devrait apporter des précisions sur la connaissance des satellites d'Uranus et notamment sur Titania.

### 3) Umbriel

<b>Umbriel</b>	
 <p>La meilleure image d'Umbriel prise par Voyager 2 (24 janvier 1986, NASA)</p>	
<b>Type</b>	Satellite naturel d'Uranus
<b>Caractéristiques orbitales</b>	
<b>Demi-grand axe</b>	266 000 km
<b>Excentricité</b>	0,0039
<b>Période de révolution</b>	4,144 j
<b>Inclinaison</b>	0,128°
<b>Caractéristiques physiques</b>	
<b>Diamètre</b>	1 169,4 ± 5,6 km
<b>Masse</b>	1,172 ± 0,135 × 10 <sup>21</sup> kg, ≈ 2 × 10 <sup>-4</sup> M <sub>Terre</sub>
<b>Masse volumique moyenne</b>	1,4 × 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
<b>Gravité à la surface</b>	0,23 m/s <sup>2</sup>

<b>Période de rotation</b>	4,144 j – Probablement synchrone
<b>Magnitude apparente</b>	14,47 (à l'opposition)
<b>Albédo moyen</b>	0,21 - géométrique : 0,26 - Bond : 0,10.
<b>Température de surface</b>	75 K (moyenne) Max 85 K
<b>Caractéristiques de l'atmosphère</b>	
<b>Pression atmosphérique</b>	Pas d'atmosphère
<b>Découverte</b>	
<b>Découvert par</b>	William Lassell le 24 octobre 1851

**Umbriel**, également appelé **Uranus II**, est le troisième satellite naturel d'Uranus par la taille. Découvert en 1851 par William Lassell, en même temps qu'Ariel, il reçoit alors le nom d'un personnage du poème *La Boucle de cheveux enlevée* d'Alexander Pope. Umbriel est principalement constitué de glace, et d'une fraction substantielle de roche. Sa structure interne pourrait être différenciée entre un noyau rocheux et un manteau de glace. Sa surface est la plus sombre parmi celles des lunes d'Uranus, et aurait été principalement façonnée par des impacts météoritiques. Cependant, la présence de canyons suggère l'existence de processus endogènes dus à l'expansion de son intérieur au début de son évolution. Le satellite pourrait avoir subi un resurfaçage endogène qui aurait recouvert une partie des surfaces les plus anciennes. Parmi les satellites d'Uranus, Umbriel a la surface la plus marquée par des cratères d'impact après Obéron, certains mesurant jusqu'à 210 km de diamètre. La principale caractéristique géologique à la surface d'Umbriel est un anneau de matériaux clairs au fond du cratère Wunda. Comme tous les satellites d'Uranus, Umbriel s'est probablement formé à partir d'un disque d'accrétion entourant la planète juste après sa formation. Le système d'Uranus a été étudié de près une seule fois, par la sonde *Voyager 2*, en janvier 1986. Elle a pris plusieurs images d'Umbriel, qui ont permis de cartographier environ 40 % de sa surface.

### Découverte

Umbriel est découvert par William Lassell le 24 octobre 1851. Bien que William Herschel, le découvreur de Titania et d'Obéron, ait revendiqué à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle avoir observé quatre lunes additionnelles d'Uranus, ces observations n'ont pas été confirmées. Ces quatre objets sont maintenant considérés comme des erreurs d'observation. Tous les satellites d'Uranus ont reçu des noms de personnages des œuvres de William Shakespeare ou d'Alexander Pope. Les quatre premiers noms ont été suggérés par John Herschel, le fils de William, en 1852 à la demande de Lassell. « Umbriel » est le nom d'un personnage de *La Boucle de cheveux volée* du poète Alexander Pope. Dans cette œuvre, Umbriel est le « sombre farfadet mélancolique » et son nom fait référence au latin *umbra* signifiant l'ombre. Les noms des formations remarquables sur le satellite ont également été choisis parmi les esprits du mal et du monde souterrain de différentes mythologies : Zlyden, Setibos, Minepa, Alberich, Fin, Gob, Kanaloa, Peri, Skynd, Vuver (voir Table). En 1851, Lassell attribua finalement aux quatre satellites connus des chiffres romains en fonction de leur éloignement de la planète et, depuis, Umbriel est également appelé **Uranus II**.

### Orbite

Umbriel est en orbite autour d'Uranus à une distance moyenne d'environ 266 000 km. C'est le troisième plus éloigné des cinq grands satellites de la planète. Son orbite a une faible excentricité et une très petite inclinaison par rapport à l'équateur d'Uranus. Sa période orbitale est d'environ 4,1 jours terrestres et coïncide avec sa période de rotation. En d'autres termes, Umbriel est en rotation synchrone, et a toujours la même hémisphère en regard de la planète. De même, elle possède un « hémisphère avant » qui fait face au mouvement orbital et un « hémisphère arrière » qui lui est opposé. Cette rotation synchrone résulte des frottements qu'ont entraînés les importantes marées causées par Uranus. L'orbite d'Umbriel est intégralement située à l'intérieur de la magnétosphère d'Uranus. Ceci est important, car les hémisphères arrières des satellites (qui sont dépourvus d'atmosphère et qui orbitent au sein d'une magnétosphère, comme Umbriel) sont heurtés par le plasma magnétosphérique qui tourne en synchronisme avec la

planète. Ce bombardement peut conduire à un obscurcissement des hémisphères arrière, qui est effectivement observé sur toutes les lunes d'Uranus, sauf Obéron. Cette dernière passe une fraction significative de son temps hors de la magnétosphère d'Uranus. Umbriel sert de « puits » pour les particules chargées de la magnétosphère. Ainsi en 1986, alors que la sonde *Voyager 2* était dans le voisinage de l'orbite de cette lune, elle observa une baisse dans le décompte des particules énergétiques qu'elle réalisait. Comme l'axe de rotation d'Uranus est proche du plan de son orbite autour du Soleil et que les orbites des satellites sont proches de son plan équatorial, celles-ci sont dans un plan à peu près perpendiculaire au plan de l'orbite d'Uranus. Les satellites sont donc soumis à un cycle saisonnier extrême : chacun des pôles passe alternativement 42 années terrestres dans l'obscurité complète et 42 années continuellement éclairé, avec le Soleil près du zénith d'un des pôles au solstice. Le passage de *Voyager 2* en 1986 a coïncidé avec le solstice d'été de l'hémisphère sud, avec près de la totalité de l'hémisphère nord dans l'obscurité. Tous les 42 ans, à l'équinoxe d'Uranus, la Terre traverse son plan équatorial et des occultations entre les lunes d'Uranus deviennent observables. En 2007 et 2008, un certain nombre de ces événements se sont produits. Parmi ces événements, il est possible de citer deux occultations de Titania par Umbriel le 15 août et le 8 décembre 2007, et une occultation d'Ariel par Umbriel le 19 août 2007. Actuellement, Umbriel n'est impliqué dans aucune résonance orbitale avec un autre satellite d'Uranus. Cependant, dans le passé, il peut avoir été en résonance 3:1 avec Miranda. Cela pourrait avoir conduit à augmenter l'excentricité orbitale de Miranda. Cette excentricité orbitale aurait contribué à l'échauffement interne et à l'activité géologique de la lune, alors que, dans le même temps, l'orbite d'Umbriel n'aurait été que faiblement perturbée. Uranus est plus faiblement aplatie à ses pôles, mais aussi plus petite, au regard de ses satellites, que Jupiter ou Saturne. De ce fait, ces lunes peuvent plus facilement se soustraire aux forces qui maintiennent leur orbite en résonance. Après que Miranda se soit échappé de cette résonance (par le biais d'un mécanisme qui l'a probablement entraîné dans son inclinaison orbitale actuelle, anormalement élevée), son excentricité aurait été amoindrie, désactivant ainsi la source de chaleur qui alimentait l'activité géologique ancienne de Miranda.

### **Composition et structure interne**

Umbriel est la troisième en taille et le quatrième en masse décroissante des lunes d'Uranus. Sa masse spécifique est en effet de  $1,39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , ce qui indique que l'astre est principalement composé de glace d'eau. Par ailleurs, un composant dense encore inconnu, différent de la glace d'eau, constitue environ 40 % de la masse totale. Cette substance pourrait être formée de roche et/ou de matière carbonée, y compris des composés organiques lourds formant du tholin. La présence de glace d'eau est étayée par les observations en spectroscopie infrarouge, qui ont révélé la présence de glace d'eau cristallisée à la surface de l'astre. Les bandes d'absorption de la glace d'eau sont plus marquées sur l'hémisphère avant d'Umbriel que sur l'hémisphère arrière. Les causes de cette asymétrie ne sont pas connues. Elles peuvent, cependant, être reliées au bombardement, par les particules chargées de la magnétosphère d'Uranus, plus intense sur l'hémisphère arrière, en raison de la co-rotation du plasma. Les particules énergétiques tendent à faire gicler de la glace d'eau, à décomposer le méthane qui y est piégé sous forme de clathrate, et le noircissent avec les autres matériaux organiques, laissant un résidu foncé et riche en carbone. À part l'eau, le seul autre composé chimique identifié à la surface d'Umbriel par spectroscopie infrarouge est le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), qui est concentré principalement sur l'hémisphère arrière. Son origine n'est pas clairement expliquée. Il pourrait être produit sur place à partir des carbonates ou de matériaux organiques sous l'influence des particules énergétiques provenant de la magnétosphère d'Uranus, ou par le rayonnement solaire ultraviolet. Cette dernière hypothèse expliquerait l'asymétrie de sa distribution, puisque l'hémisphère arrière est soumis à une influence magnétosphérique plus intense que l'hémisphère avant. Une autre source possible serait le dégazage de  $\text{CO}_2$  primordial piégé par la glace d'eau à l'intérieur d'Umbriel. La fuite de ce  $\text{CO}_2$  de l'intérieur pourrait être reliée à l'activité géologique passée de ce satellite. Umbriel peut s'être différencié en un noyau rocheux surmonté par un manteau de glace. Dans ce cas, le rayon du noyau (317 km) serait environ 54 % du rayon de la lune, et sa masse environ 40 % celle de la lune – proportions dépendant de la composition de ce satellite. La pression au centre d'Umbriel serait d'environ 0,24 GPa (2,4 kbar). L'état du manteau glacé n'est pas connu, bien que l'existence d'un océan sous la surface soit considérée comme improbable.

## Structures en surface

Umbriel est le plus sombre des satellites d'Uranus, qui sont eux-mêmes plus sombres que les satellites des planètes plus proches du Soleil. Par exemple, la surface d'Ariel, un satellite jumeau d'à peu près la même taille, est plus de deux fois plus lumineuse. Umbriel a un albédo de Bond d'environ 10 %, à comparer aux 23 % d'Ariel. La réflectivité de la surface du satellite décroît de 26 % à l'angle de phase de 0° (albédo géométrique) à 19 % pour un angle de phase de 1°, c'est l'effet d'opposition. Contrairement à ce qui est observé pour Obéron (une autre lune uranienne sombre), la surface observée d'Umbriel est légèrement bleuâtre. En plus, des dépôts récents d'impact apparaissent, très clairs et au bleu encore plus prononcé (notamment dans le cratère Wunda, près de l'équateur). Il se peut qu'il y ait une asymétrie entre les hémisphères avant et arrière. Ce dernier paraîtrait ainsi plus rouge que le premier. Cette asymétrie n'est pas complètement établie car la surface du satellite n'est connue qu'à 40 %. Le rougissement de la surface serait la conséquence de l'érosion spatiale due au bombardement par les particules chargées et les micrométéorites depuis le début du Système solaire. Cependant, l'asymétrie de couleur d'Umbriel est probablement aussi causée par l'accumulation de matériaux rougeâtres provenant des parties externes du système d'Uranus, peut-être des satellites irréguliers. Cette accumulation se produirait de préférence sur l'hémisphère avant. La surface d'Umbriel est relativement homogène : elle ne présente pas de fortes variations en albédo ou en couleur. Les spécialistes n'ont jusqu'à présent identifié avec certitude qu'une classe de structures géologiques à la surface d'Umbriel : les cratères d'impact. La surface d'Umbriel a bien plus de cratères, et de plus grands, que celle d'Ariel ou de Titania, et est également la moins active géologiquement. Seul Obéron a plus de cratères d'impact qu'Umbriel. Les diamètres des cratères observés vont de quelques kilomètres à 210 km pour le plus grand qui ait été clairement identifié, Wokolo. Tous les cratères connus sur Umbriel ont des pics centraux, mais aucun ne possède de système d'éjectas radiaux.



*Carte d'Umbriel montrant les polygones à sa surface*

C'est près de l'équateur d'Umbriel que se situe la structure de surface la plus spectaculaire : le cratère Wunda, d'un diamètre d'environ 131 km. Le fond de Wunda montre un grand anneau de matériaux clairs, qui paraissent être des éjecta d'impact. À proximité, près du terminateur, apparaissent les cratères Vuver et Skynd, qui n'ont pas de bords clairs, mais possèdent chacun un pic central clair. Les études du profil du disque d'Umbriel ont abouti à l'analyse selon laquelle il pourrait s'agir d'une très grande structure d'impact, de 400 km de diamètre et d'environ 5 km de profondeur. Comme sur les autres satellites d'Uranus, la surface d'Umbriel est rayée par un système de canyons de tendance générale NE – SO. Cependant, ils ne sont pas officiellement reconnus. Ceci est dû à la faible résolution des images, et à l'aspect généralement uniforme de ce satellite, qui rend difficile sa cartographie géologique. La surface fortement cratérisée d'Umbriel est probablement restée stable depuis le Grand bombardement tardif. Les seuls signes de l'activité interne ancienne sont les canyons et les polygones sombres, taches sombres de formes complexes, mesurant des dizaines ou des centaines de kilomètres. Les polygones ont été identifiés à partir d'une photométrie de précision sur les images de *Voyager 2*; ils sont distribués plus ou moins uniformément à la surface

d'Umbriel avec une tendance NE – SO. Certains polygones correspondent à des dépressions de quelques kilomètres de profondeur, et peuvent avoir été formés pendant des épisodes tectoniques primitifs. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, il n'y a pas d'explication de l'aspect si sombre et si uniforme d'Umbriel. La surface est peut-être recouverte d'une couche relativement fine de poussières sombres en provenance d'un impact ou d'une éruption volcanique explosive. Une autre possibilité encore serait que la croûte d'Umbriel est composée entièrement de matière sombre, ce qui aurait empêché la formation de structures claires comme les éjecta radiaux autour de ses cratères. Cependant, la présence de la structure claire de Wunda semble contredire cette dernière hypothèse.

### Origine et évolution

Umbriel se serait formé à partir d'un disque d'accrétion ou sous-nébuleuse, c'est-à-dire un disque de gaz et de poussières. Celui-ci aurait soit été présent autour d'Uranus pendant quelque temps après sa formation, soit aurait été créé par l'impact géant auquel Uranus doit son obliquité. La composition précise de la sous-nébuleuse est inconnue. Cependant, la densité relativement élevée d'Umbriel et d'autres lunes d'Uranus par rapport aux lunes de Saturne indique qu'elle devait être pauvre en eau. Cette nébuleuse aurait pu être composée d'importantes quantités d'azote et de carbone présents sous forme de monoxyde de carbone (CO) et de diazote (N<sub>2</sub>) et non pas sous forme d'ammoniac ni de méthane. Les satellites formés dans cette sous-nébuleuse contiendraient moins de glace d'eau (avec du CO et de N<sub>2</sub> piégés sous forme de clathrates) et davantage de roches, ce qui expliquerait leur densité élevée. L'accrétion d'Umbriel dura probablement plusieurs milliers d'années. Les impacts qui accompagnèrent l'accrétion ont chauffé la couche externe du satellite. La température maximale d'environ 180 K a été atteinte à la profondeur d'environ 3 km. Après la fin de la formation du satellite, la couche sub-surfacique s'est refroidie, tandis que l'intérieur d'Umbriel fut échauffé par la décomposition des éléments radioactifs présents dans les roches. La couche refroidie sous la surface se contractait, tandis que l'intérieur se dilatait. Cela entraîna de fortes contraintes dans la croûte du satellite et provoqua des craquelures. Ce processus qui dura environ 200 millions d'années pourrait être à l'origine du système de canyons visible sur Umbriel. Toute activité endogène a cessé il y a plusieurs milliards d'années. L'échauffement initial engendré par l'accrétion d'une part, et la désintégration radioactive des éléments d'autre part, a probablement été suffisamment intense pour faire fondre la glace; ceci à condition qu'il ait existé dans sa géologie un antigel tel que l'ammoniac (sous la forme d'hydrate d'ammoniac). Une fusion importante pourrait avoir séparé la glace des roches et engendré la formation d'un noyau rocheux entouré d'un manteau de glace. Une couche d'eau liquide (océan) riche en ammoniac dissous pourrait s'être formée à la frontière entre le noyau et le manteau. La température de fusion de ce mélange est de 176 K. Il est cependant probable que la température ait chuté en dessous de cette valeur et qu'en conséquence, cet océan soit gelé depuis longtemps. Umbriel est la lune d'Uranus qui fut la moins soumise au phénomène de resurfaçage endogène, bien qu'elle ait pu connaître, comme les autres lunes d'Uranus, un épisode de ce type, très tôt dans son existence.

### Exploration

À l'heure actuelle (avril 2011), les seules images disponibles d'Umbriel sont des clichés de faible résolution pris par la sonde *Voyager 2*. Celle-ci a photographié la lune lors de son survol d'Uranus en janvier 1986. La distance minimale entre la sonde et Umbriel ayant été de 325 000 km, les meilleures images de l'astre ont une résolution spatiale d'environ 5,2 km. Les images couvrent environ 40 % de la surface, mais seuls 20 % de la surface furent photographiés avec une qualité suffisante pour effectuer une cartographie géologique. Lors du survol d'Umbriel, l'hémisphère sud était pointé vers le Soleil et par conséquent l'hémisphère nord était sombre et ne put donc pas être étudié. Aucune autre sonde spatiale n'a visité Uranus et Umbriel. Le programme *Uranus orbiter and probe*, dont le lancement pourrait être programmé pour les années 2020 à 2023, devrait apporter des précisions sur la connaissance des satellites d'Uranus et notamment sur Umbriel.

#### 4) Ariel

**Ariel**, également connu sous le nom d'**Uranus I**, est un satellite naturel d'Uranus. Découvert le 24 octobre 1851 par William Lassell, il est nommé d'après un esprit de l'air apparaissant dans le poème *La Boucle de cheveux enlevée* d'Alexander Pope et la pièce de théâtre *La Tempête* de William Shakespeare. Il n'a été survolé que par une seule sonde spatiale, *Voyager 2*, en 1986, et seulement 35 % de la surface de l'astre a pu être photographiée à cette occasion. Ariel est la plus brillante des lunes en orbite autour d'Uranus, ainsi

que la troisième plus massive et la quatrième plus grande. Elle est principalement composée, à parts égales, de glaces et de roches. À l'instar des autres lunes d'Uranus, son orbite est inscrite dans un plan perpendiculaire à l'orbite de la planète autour du Soleil, ce qui provoque des variations saisonnières extrêmes en surface. En cela, elle suit la rotation atypique de la planète qui tourne selon un axe quasiment parallèle au plan de son orbite autour du Soleil. Pour cette raison, Ariel, comme les autres lunes d'Uranus, s'est très probablement formée à partir d'un disque d'accrétion qui entourait la planète peu de temps après sa formation. Sa structure interne s'est différenciée pour former un noyau de roche et un manteau de glace. Ariel a une surface complexe comprenant de vastes terrains marqués par des cratères d'impact et traversés par un réseau de failles escarpées, de canyons et de crêtes. Cette surface montre des signes d'une activité géologique plus récente que les autres lunes d'Uranus, résultant des importantes forces de marées exercées par la planète. L'énergie ainsi accumulée a été dissipée sous forme de chaleur dans le manteau de l'astre.

<b>Ariel</b>	
 <p style="text-align: center;">Ariel, photographiée le 24 janvier 1986 à une distance d'environ 130 000 000 km.</p>	
<b>Type</b>	Satellite naturel d'Uranus
<b>Caractéristiques orbitales</b>	
<b>Demi-grand axe</b>	190 900 km
<b>Excentricité</b>	0,0012
<b>Période de révolution</b>	2,520 j
<b>Inclinaison</b>	0,041°
<b>Caractéristiques physiques</b>	
<b>Diamètre</b>	1157,8 ± 1,2 km
<b>Masse</b>	1,4 × 10 <sup>21</sup> kg
<b>Masse volumique moyenne</b>	1,66 × 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
<b>Gravité à la surface</b>	0,27 m/s <sup>2</sup>
<b>Période de rotation</b>	2,520 j (Synchrone)
<b>Magnitude apparente</b>	14,4 (à l'opposition)
<b>Albédo moyen</b>	0,39
<b>Température de surface</b>	~80 K
<b>Caractéristiques de l'atmosphère</b>	
<b>Pression atmosphérique</b>	Pas d'atmosphère
<b>Découverte</b>	
<b>Découvert par</b>	William Lassell le 24 octobre 1851

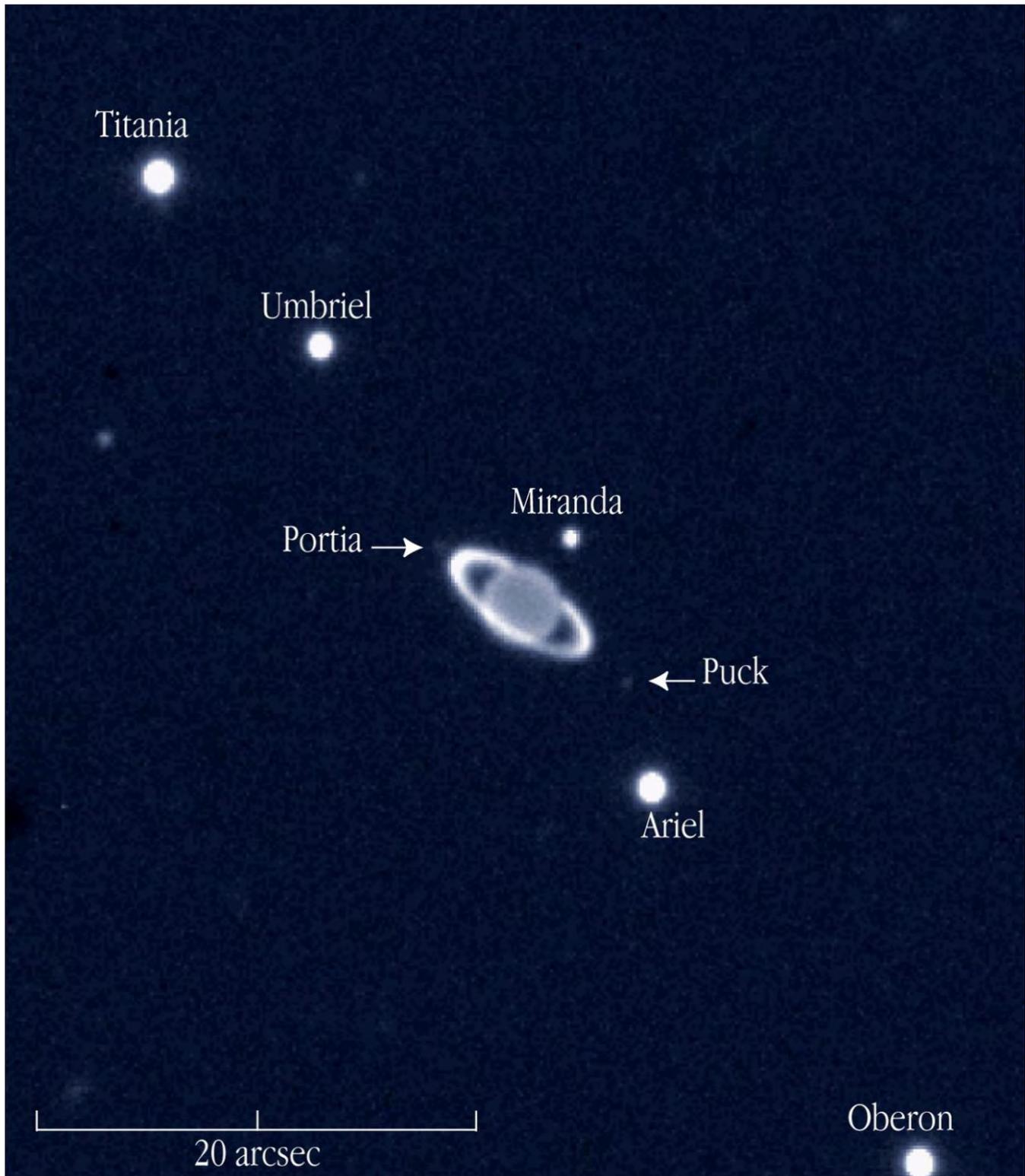
## Découverte et étymologie

Ariel est découvert par William Lassell le 24 octobre 1851, en même temps qu'Umbriel, une autre lune d'Uranus. William Herschel, le découvreur des deux premières lunes d'Uranus, Titania et Obéron, affirmait avoir vu quatre autres satellites autour de la planète, mais ses observations n'ont pas pu être confirmées.

L'appellation « Ariel » vient du génie aérien bienfaisant au service de Prospero dans la pièce *La Tempête* de William Shakespeare. Les formations géologiques remarquables portent les noms de bons esprits et ceux de la lumière dans les différentes mythologies : Rima, Yangoor, Domovoy, Agape, Mélusine, Finvara, Berylune, etc. Les quatre autres lunes connues à cette époque portent également le nom de différents personnages de Shakespeare ou d'Alexander Pope, tous suggérés par John Herschel en 1852 à la demande de William Lassell. Par ailleurs, cette lune est pareillement désignée sous l'appellation « Uranus ».

## Orbite

Après Miranda, Ariel est la seconde plus proche des cinq lunes majeures d'Uranus. Son orbite est distante d'approximativement 190 000 km avec une faible excentricité orbitale et une inclinaison minime avec le plan équatorial d'Uranus. Sa période orbitale est d'approximativement 2,5 journées terrestres et coïncide avec sa période de rotation. Ainsi, Ariel montre toujours la même face à la planète Uranus. Elle possède aussi un « hémisphère avant » (parfois noté apex orbital) qui fait face au mouvement orbital et un « hémisphère arrière » (ou antapex orbital) qui lui est opposé. Cette configuration est connue sous le nom de rotation synchrone. Elle est la conséquence des forces de marées produites par Uranus sur sa lune. Ces forces de marées ont engendré des frottements qui ont progressivement freiné la rotation d'Ariel sur elle-même. Ce phénomène s'est interrompu lorsque la révolution de l'astre autour d'Uranus coïncida avec sa rotation. L'orbite d'Ariel est complètement inscrite dans la magnétosphère d'Uranus. De ce fait, son hémisphère arrière est influencé par le plasma magnétosphérique qui est en rotation avec la planète. Ce bombardement pourrait entraîner l'assombrissement des hémisphères arrières de l'ensemble des satellites majeurs uraniens, à l'exception d'Obéron. Ariel capture en effet les particules magnétosphériques chargées. En 1986, la sonde *Voyager 2* permit d'observer une baisse prononcée du nombre de particules énergétiques à proximité de l'orbite des lunes uraniennes. À l'instar des autres satellites connus d'Uranus, Ariel orbite dans le plan équatorial de la planète. Cependant l'axe de rotation d'Uranus est quasiment inscrit dans son plan orbital. Ainsi, les pôles géographiques de la lune sont continuellement éclairés pendant 42 ans, puis plongés dans la nuit pour une même durée. De ce fait, Ariel est sujette à des cycles saisonniers extrêmes, tels qu'ils sont observés sur Terre depuis les pôles (voir Nuit polaire ou Jour polaire) autour des solstices. Son survol par *Voyager 2* coïncida avec le solstice d'été de l'hémisphère sud de 1986, alors que la quasi-totalité de l'hémisphère nord était dans l'obscurité. Une fois tous les 42 ans, lorsqu'Uranus connaît une équinoxe et que la Terre s'inscrit dans son plan équatorial, les lunes d'Uranus peuvent s'occulter les unes les autres. Un certain nombre de ces événements ont eu lieu en 2007–2008, incluant une occultation d'Ariel par Umbriel le 19 août 2007. Actuellement, Ariel n'est en résonance orbitale avec aucun autre satellite uranien. Dans le passé, cette lune pourrait avoir été en résonance 5:3 avec Miranda. Ce faisant, Ariel aurait été partiellement responsable d'une importante élévation de température observée sur Miranda (bien que la chaleur produite par une ancienne résonance 1:3 d'Umbriel avec Miranda était probablement environ trois fois plus importante). L'orbite d'Ariel pourrait aussi avoir été verrouillée par une résonance 4:1 avec Titania, qui s'est ensuite échappée. Échapper à un mouvement de résonance est plus facile pour les lunes d'Uranus que pour les lunes de Jupiter ou de Saturne, en raison du degré moindre d'aplatissement de la planète. Cette résonance, qui aurait eu lieu il y a environ 3,8 milliards d'années, aurait augmenté l'excentricité orbitale d'Ariel. Cette excentricité est à son tour responsable de forces de marées uraniennes, variant avec la position de l'astre sur son orbite. Les forces de marées génèrent d'importantes frictions au sein de la lune, et pourraient avoir causé un échauffement des structures internes d'Ariel d'au moins 20 K.



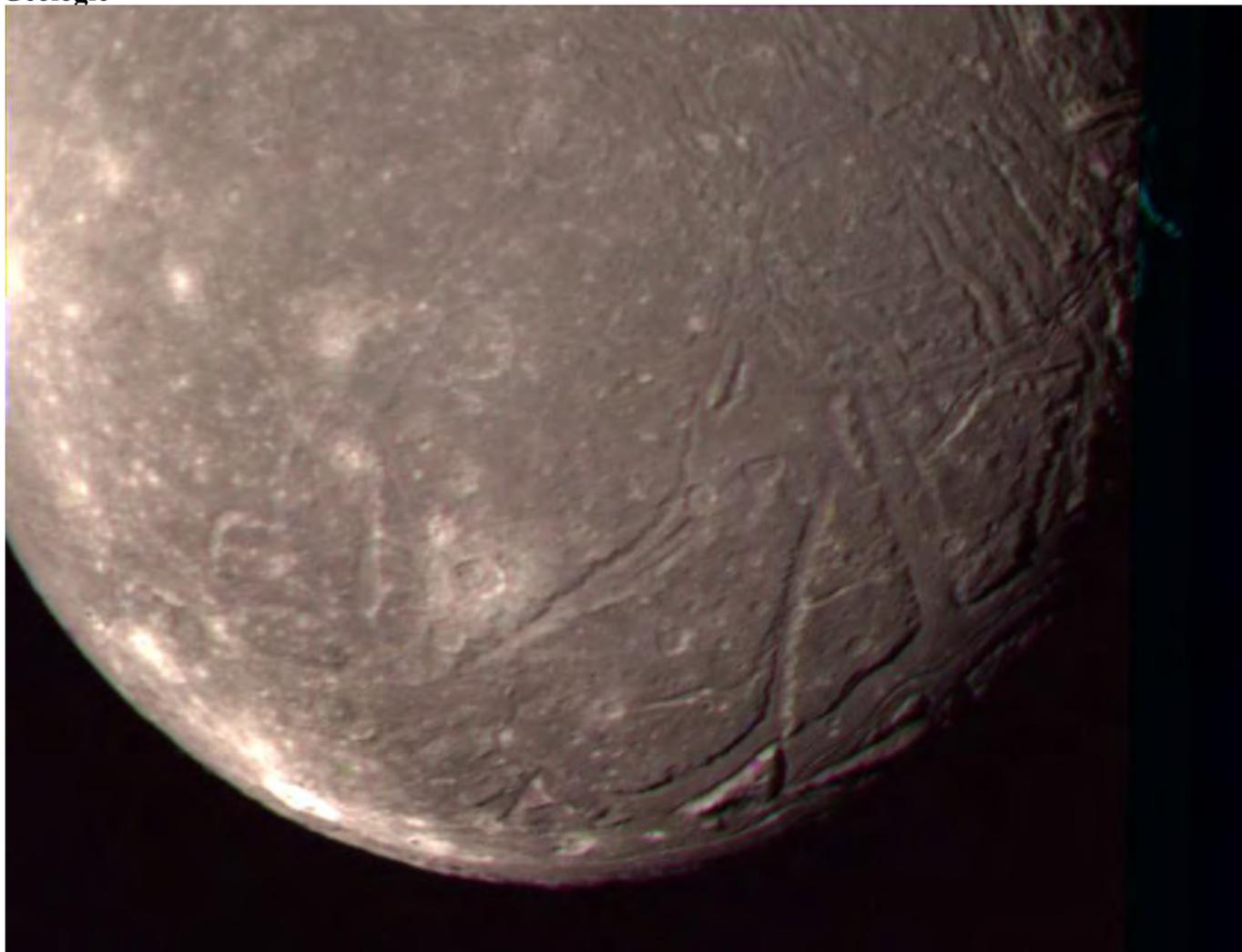
*Ariel, Uranus et les autres lunes photographiées par l'Observatoire du Cerro Paranal*

### **Composition et structure internes**

Cette lune est la quatrième plus grande lune d'Uranus et elle pourrait être la troisième plus massive. La densité de ce satellite naturel est de  $1,66 \text{ g/cm}^3$ . Au regard de sa densité et de ses dimensions, le modèle interne des lunes de taille moyenne proposé par H. Hussmann établit une composition en quantités approximativement égales de glace et d'autres matériaux. Ces derniers pourraient être constitués de roches et de matériaux carbonacés incluant des composés organiques lourds nommés tholins. La présence de glace d'eau sous forme essentiellement cristalline a été révélée par les observations spectroscopiques infrarouges, à la surface de la lune. Cette glace ne serait pas seulement formée d'eau mais aussi de méthane. Les bandes d'absorption de la glace d'eau sont plus fortes sur son hémisphère avant, celui qui est perpétuellement face au mouvement de l'astre autour d'Uranus, que sur son hémisphère arrière. Cette

asymétrie pourrait trouver son origine dans le bombardement de particules chargées en provenance de la magnétosphère d'Uranus, qui est plus important dans l'hémisphère arrière (induit par le plasma en co-rotation). Ces particules énergétiques provoquent une pulvérisation cathodique de la glace d'eau. Cette pulvérisation décompose le méthane capturé par la glace en hydrate de méthane, clathrates et autres composés organiques sombres. Ce sont ces résidus chimiques qui recouvriraient la surface sombre et riche en carbone qui a été observée. Le seul autre composé chimique identifié par spectroscopie infrarouge à la surface d'Ariel est le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), qui est principalement concentré sur l'hémisphère arrière. Ariel est le satellite uranien où la présence de CO<sub>2</sub> est la mieux établie; c'est aussi là qu'il fut découvert en premier lieu. Ce CO<sub>2</sub> pourrait être produit sur place à partir des carbonates ou des matériaux organiques, sous l'influence des particules chargées de la magnétosphère d'Uranus ou des rayonnements ultraviolets du Soleil. Cette hypothèse pourrait expliquer l'asymétrie dans sa distribution, puisque l'hémisphère arrière est sujet à une influence magnétosphérique plus importante que l'hémisphère avant. Une autre source possible de ce CO<sub>2</sub> pourrait être le produit du dégazage de nucléides primordiaux capturés par la glace d'eau, dans le cœur d'Ariel. La fuite de CO<sub>2</sub> depuis l'intérieur de la lune pourrait être associée à une activité géologique passée. Conformément à sa taille, à sa composition faite de roche et de glace, et à la présence possible de sel ou d'ammoniac en solution qui aurait abaissé la température de gel de l'eau, Ariel pourrait avoir connu une différenciation planétaire. Cette différenciation pourrait avoir entraîné la formation d'un noyau rocheux surmonté d'un manteau de glace. Le rayon de ce noyau, de 372 km, représenterait environ 64 % du rayon total de la lune, et sa masse serait approximativement 56 % de la masse totale. La pression en son centre serait d'environ 0,3 GPa. L'état actuel du manteau n'est pas clairement établi, mais la présence d'un océan liquide dans le sous-sol d'Ariel est improbable.

## Géologie

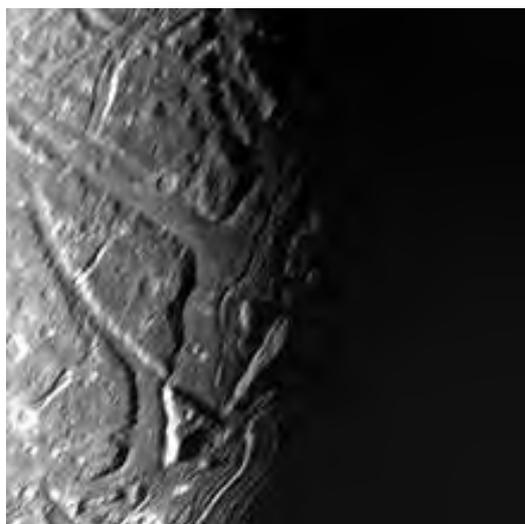


*L'image d'Ariel de plus haute résolution prise par Voyager 2.  
Les canyons couverts par des plaines lisses y sont visibles dans le coin inférieur droit.*

Parmi les lunes d'Uranus, Ariel est le satellite le plus brillant. Sa surface montre un important effet d'opposition : la réflexivité décroît de 53 % pour un angle de phase de 0° (albédo géométrique) à 35 % pour un angle de 1°. Son albédo de Bond, d'environ 23 %, est le plus élevé parmi les satellites d'Uranus. La surface d'Ariel est généralement de couleur neutre. Il peut y avoir une asymétrie entre l'hémisphère avant (qui fait face au mouvement orbital) et l'hémisphère arrière. Ce dernier apparaît 2 % plus rouge que le premier. La surface d'Ariel ne présente généralement aucune corrélation entre géologie et albédo ni couleur. Ses canyons ont par exemple la même couleur que ses cratères. Des dépôts d'impacts brillants autour de certains cratères récents sont néanmoins légèrement bleutés, rapprochant ainsi parfois couleur et structure géologique. Il y a aussi quelques points légèrement bleutés qui ne correspondent à aucune structure géologique connue.

## Géographie

La surface d'Ariel présente trois types de zones géologiques distinctes : des cratères, des plaines et des crêtes. Les principales structures géologiques observées sont les cratères d'impact, les canyons, les escarpements de faille, les crêtes et les dépressions.

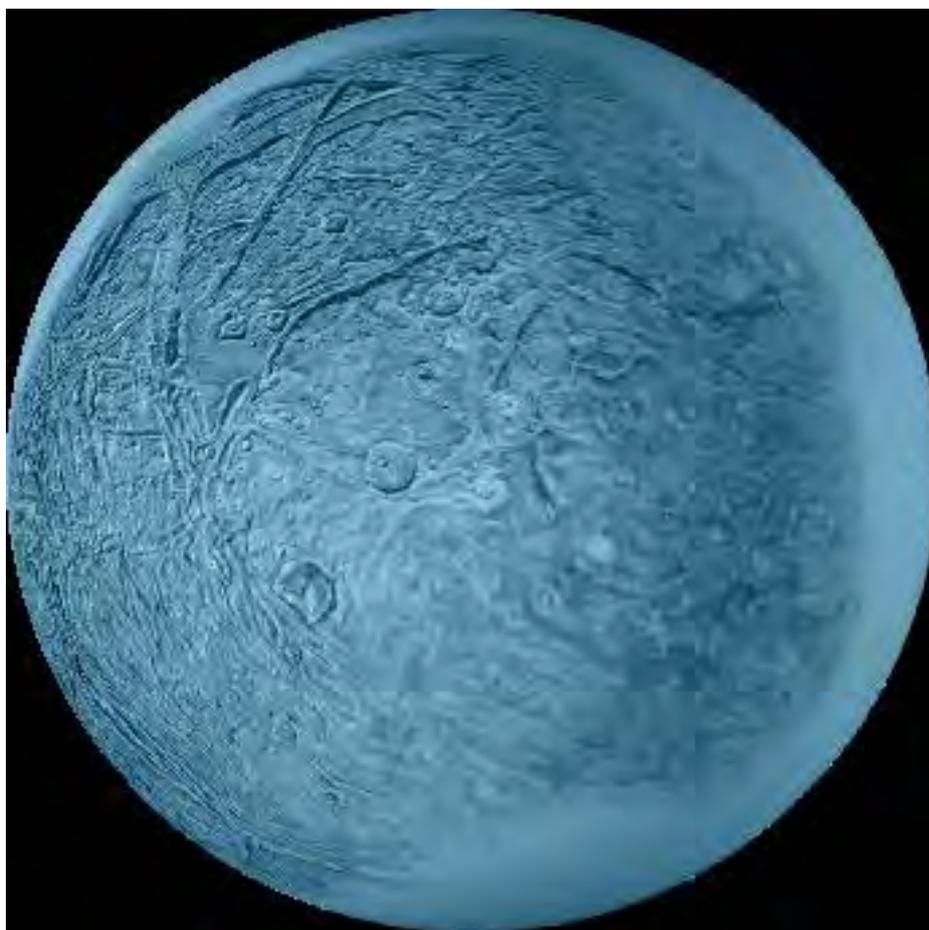


*Graben à la surface d'Ariel. Le sol est couvert d'un matériau lisse probablement extrudé depuis le sous-sol*

Le pôle sud d'Ariel présente la plus grande étendue géographique connue de cette lune. Il s'agit d'une vaste surface ondulée marquée de nombreux cratères d'impacts. De ce fait, cette zone est considérée comme la plus ancienne qui ait été observée sur Ariel. Elle est recoupée par un réseau de canyons (appelés graben) et de crêtes escarpées qui se manifestent principalement sous les tropiques, dans les latitudes moyennes de l'hémisphère sud d'Ariel. Ces canyons, connus sous le nom de *chasmata*, sont très probablement des grabens formés par l'écartement de l'écorce durcie de l'astre. Cet écartement résulterait d'une tension globale exercée par le gel progressif de l'eau (ou de l'ammoniaque) située plus en profondeur. Les *chasmata* mesurent entre 15 et 50 km de large et sont essentiellement orientés en direction de l'est ou du nord-est. Le sol de nombreux canyons est convexe, se surélevant d'un à deux kilomètres. Parfois, les sols sont séparés des parois des canyons par des gorges (sortes de fossés) d'environ un kilomètre de large. Le plus grand graben a des gorges qui courent le long des crêtes de son fond convexe, ce sont les valles. Le plus long canyon est *Kachina Chasma*, d'une longueur totale de 620 km. La seconde étendue géographique la plus notable est un terrain de type strié par des bandes de crêtes et de creux, sur des étendues de plusieurs centaines de kilomètres. Elle est bordée par un terrain piqué de cratères et découpé en polygones. Chaque bande, qui peut mesurer de 25 à 70 km de large, est parcourue d'arêtes (crêtes) et de fossés mesurant jusqu'à 200 km de long, séparés les uns des autres par des distances de 10 à 35 km. Ces bandes de terrains sont fréquemment formées en continuation de canyons. Ceci suggère qu'elles peuvent être une forme modifiée des grabens ou le résultat d'une réaction différente de l'écorce au même écartement résultant d'un gel progressif des profondeurs.

Les terrains les plus récents à la surface d'Ariel sont les plaines : des surfaces lisses et relativement basses qui doivent s'être formées sur une longue période de temps. La durée de cette période est établie en dénombrant les cratères d'impact observés en ces lieux. Les plaines se trouvent au fond des canyons et

dans quelques dépressions irrégulières au milieu de cratères. Dans ce dernier cas, elles sont séparées du reste de la surface du cratère par des frontières nettes, parfois en forme de lobes. L'origine la plus probable de ces plaines est un processus volcanique. La géométrie linéaire de leurs événements ressemble à celle des volcans boucliers. Les différentes lisières topographiques suggèrent que les liquides éjectés étaient très visqueux, peut-être une solution d'eau/ammoniac surfondue, ou encore un volcanisme de glaces solides. L'épaisseur de ces flux de cryolaves hypothétiques est estimée entre 1 et 3 km. Les canyons doivent donc s'être formés à une époque où le resurfaçage endogène était d'actualité sur Ariel. Ariel semble être assez uniformément recouverte de cratères par rapport aux autres lunes d'Uranus. La rareté relative des grands cratères suggère que la formation de sa surface soit postérieure à la formation du Système solaire. Cela indique qu'Ariel ait été complètement remodelée lors d'un épisode de son histoire géologique. L'activité géologique passée d'Ariel est supposée avoir été engendrée par les forces de marée et par la chaleur qui en résultait, alors que son orbite était plus excentrique qu'aujourd'hui. Le plus grand cratère observé sur Ariel, dénommé Yangoor, a un diamètre de 78 km, et montre des signes de déformations subséquentes. Tous les grands cratères (observés) ont un fond plat et des crêtes centrales, et peu sont entourés par des dépôts d'éjectas brillants. De nombreux cratères sont polygonaux, indiquant que leur apparition a été influencée par la structure préexistante de la croûte. Dans les plaines piquées de cratères, il n'y a que peu de larges (100 km) taches de lumière qui pourraient être des cratères d'impacts dégradés. Si tel était le cas, ils seraient semblables aux palimpsestes de la lune galiléenne Ganymède de Jupiter. Il a été suggéré que la dépression circulaire de 245 km de diamètre localisée à 10°S 30°E soit une grande structure d'impact, fortement dégradée.



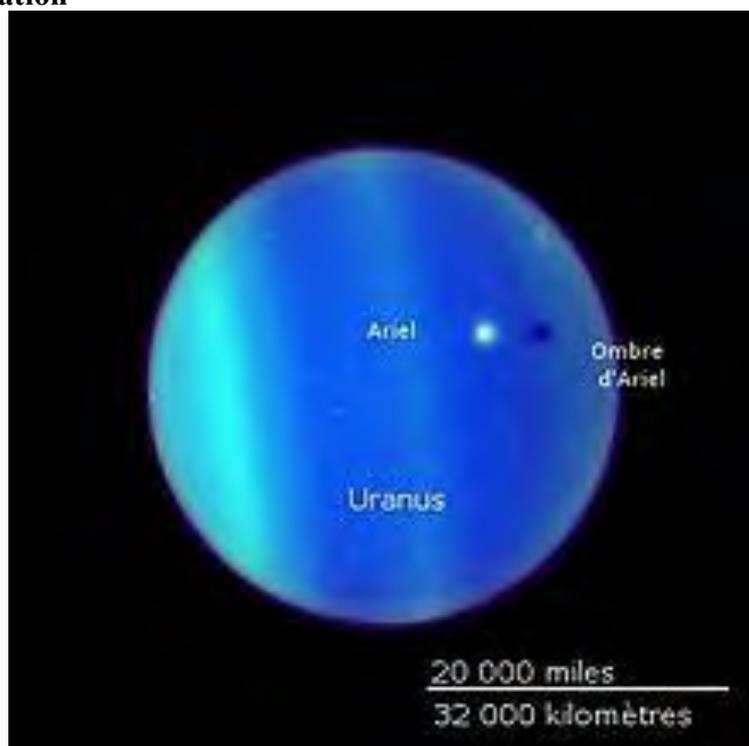
*Image en fausse couleur d'Ariel. Le cratère légèrement au-dessous et à gauche du centre est Yangoor. Une partie de celui-ci a été effacée par un relief strié.*

### **Origine et formation**

Il existe plusieurs hypothèses quant à l'origine d'Ariel. L'une d'elles postule qu'elle résulterait de l'accrétion d'un disque de gaz et de poussières appelé « sous-nébuleuse ». Cette sous-nébuleuse, soit a existé autour d'Uranus quelque temps après sa formation, soit a été créée suite à un impact cosmique qui aurait donné sa grande obliquité à l'axe de rotation d'Uranus. Bien que la composition précise de cette

sous-nébuleuse ne soit pas connue, la densité des lunes d'Uranus (plus grande que celles de Saturne) indique que la sous-nébuleuse était relativement pauvre en eau. Des quantités significatives d'azote et de carbone peuvent avoir été présentes sous la forme de monoxyde de carbone (CO) et de diazote (N<sub>2</sub>) au lieu d'ammoniac et de méthane. Les lunes qui se sont formées dans une telle sous-nébuleuse contiendraient moins de glace (avec CO et N<sub>2</sub> sous forme de clathrate) et plus de roche, ce qui expliquerait leurs hautes densités. Le processus d'accrétion a probablement duré plusieurs milliers d'années avant qu'Ariel soit complètement formée. Les modèles suggèrent que les impacts de formation aient provoqué le réchauffement de la couche extérieure de la lune atteignant une température maximale autour de 195 K sur une profondeur de 31 km. Depuis la fin de sa formation, la couche sous la surface d'Ariel s'est refroidie, alors que l'intérieur d'Ariel s'est réchauffé en raison de la présence d'éléments radioactifs dans ses roches. La couche de surface en se refroidissant s'est contractée, alors que l'intérieur a subi une expansion. Ceci a provoqué de fortes tensions internes dans la croûte de la lune atteignant 30 MPa et auraient causé des fissures. Quelques précipices et canyons pourraient être le résultat de ce processus, qui a duré à peu près 200 millions d'années. L'accrétion initiale, couplée à la désintégration des éléments radioactifs et probablement aussi la dissipation de chaleur résultant des frictions du manteau induites par les forces de marées, ont pu provoquer la fonte de la glace. Cette fonte n'a cependant pu avoir lieu qu'à la condition d'existence d'un antigel comme de l'ammoniac (sous forme de hydrate) ou de sel en moindre quantité. Cette fonte aurait pu causer la différenciation planétaire de la glace et des rochers aboutissant à la formation d'un noyau rocheux entouré d'un manteau glacé. Une couche d'eau liquide (océan) riche en ammoniac dissous a alors pu s'être formée à la frontière entre le noyau et le manteau. La température eutectique de ce mélange est de 176 K. Toutefois, cet océan souterrain a probablement gelé il y a longtemps. Le gel de l'eau a pu causer la dilatation de l'intérieur de l'astre, ce qui aurait été responsable de la formation des canyons et de l'ensevelissement des surfaces pré-existantes. De plus, les liquides provenant de l'océan situé en profondeur ont pu atteindre la surface sous forme d'éruptions cryovolcaniques, inondant canyons et cratères d'impacts. La modélisation thermique de Dioné, une des lunes de Saturne (qui a une taille, une densité et une température de surface similaires à Ariel) suggère que la convection de l'état solide a pu durer à l'intérieur d'Ariel pendant des milliards d'années. Cette modélisation suggère également que ces températures dépassant 173 K (le point de fusion de l'ammoniac aqueux) ont pu persister près de sa surface pendant des centaines de millions d'années après la formation et près de son noyau pendant un milliard d'années.

### Observation et exploration



*Passage d'Ariel devant Uranus photographié par le télescope spatial Hubble.  
L'ombre du satellite est visible à droite de ce dernier.*

La magnitude apparente d'Ariel est de 14,4, similaire à celle de Pluton à l'approche de sa périhélie. Cependant, alors que Pluton peut être vue par l'intermédiaire d'un télescope de 30 cm d'ouverture, Ariel, au regard de sa proximité à l'éclat d'Uranus, n'est pas observable, même à travers un télescope de 40 cm d'ouverture. Les seules images en gros plan d'Ariel ont été prises par la sonde spatiale *Voyager 2*, qui a photographié la lune durant son survol d'Uranus en janvier 1986. La plus proche distance entre *Voyager 2* et Ariel fut de 127 000 km, significativement moins que la distance de la sonde à toutes les autres lunes uraniennes à l'exception de Miranda. Les meilleures images d'Ariel ont une résolution spatiale de 2 km et couvrent environ 40 % de sa surface, mais seulement 35 % ont été photographiés avec une qualité requise pour pouvoir en dresser une cartographie géologique et en dénombrer les cratères. Au moment du survol, l'hémisphère sud d'Ariel (comme celui des autres lunes) était pointé vers le Soleil, de sorte que l'hémisphère nord (plongé dans la pénombre) n'a pas pu être étudié. Aucun autre engin spatial n'a jamais visité Uranus (et Ariel). Le programme *Uranus orbiter and probe*, dont le lancement pourrait être programmé pour les années 2020 à 2023, devrait apporter des précisions sur la connaissance des satellites d'Uranus et notamment sur Ariel.

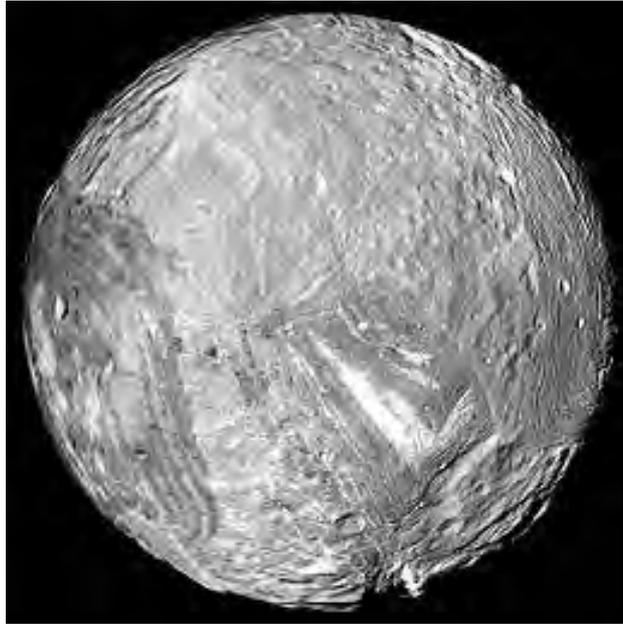
### Transits

Le 26 juillet 2006, le télescope spatial Hubble a photographié l'un des transits d'Ariel sur la face d'Uranus, au cours duquel le satellite a jeté une ombre qui pouvait être vue sur le sommet des nuages d'Uranus. De tels événements sont rares et n'ont lieu qu'autour des équinoxes, car le plan orbital des lunes d'Uranus est alors incliné de 98° par rapport au plan orbital d'Uranus autour du Soleil. Un autre transit fut enregistré en 2008 par l'Observatoire européen austral.

## 5) Miranda

**Miranda**, également connue sous le nom d'**Uranus V**, est un satellite naturel d'Uranus. Cette lune fut découverte en 1948 par Gerard Kuiper. Elle porte le nom de Miranda, la fille du magicien Prospero qui apparaît dans la tragi-comédie *La Tempête* de William Shakespeare. Miranda n'a été approchée qu'une seule fois, par la sonde *Voyager 2* en janvier 1986. De tous les satellites naturels d'Uranus, Miranda est celui dont la sonde a fait les meilleures images. Néanmoins, durant le survol de la sonde, l'hémisphère nord était plongé dans la nuit; les observations se sont donc limitées à l'hémisphère sud. Miranda est la plus petite des cinq principales lunes en orbite autour d'Uranus. Elle est aussi la plus proche de cette planète, à seulement 129 900 km et la moins dense. Sa surface semble composée de glace d'eau mêlée à des composés de silicates et de carbonates ainsi qu'à de l'ammoniac. À l'instar des autres lunes d'Uranus, son orbite est inscrite dans un plan perpendiculaire à l'orbite de la planète autour du Soleil, ce qui provoque des variations saisonnières extrêmes en surface. En cela, elle suit la rotation atypique de la planète qui tourne selon un axe quasiment parallèle au plan de son orbite autour du Soleil. Comme les autres lunes d'Uranus, Miranda s'est très probablement formée à partir d'un disque d'accrétion, appelé sous-nébuleuse, qui entourait la planète peu de temps après sa formation ou après que l'événement catastrophique, qui lui a donné son inclinaison, se fut produit. Cependant, Miranda présente une inclinaison de 4,338 ° par rapport au plan de l'équateur uranien, inclinaison qui est la plus marquée parmi celles des lunes majeures. Cette petite lune, qui aurait pu n'être qu'un corps glacé et inerte couvert de cratères d'impacts, est en fait un surprenant, et unique, patchwork de zones très variées. La surface de Miranda comprend de vastes plaines vallonnées piquées de cratères et traversés par un réseau de failles escarpées et de rupes. Cette surface présente surtout trois impressionnantes couronnes, aussi appelées « *coronae* », dont les diamètres dépassent les 200 km. Ces formations géologiques ainsi que l'inclinaison anormale de l'orbite signent une activité géologique et une histoire complexe. Miranda aurait été marquée par des forces de marée, des mécanismes de résonances orbitales, un processus de différenciation planétaire partielle ainsi que par des mouvements de convection, d'expansion de son manteau et des épisodes de cryovolcanisme.

## Miranda



*Vue du pôle sud de Miranda en janvier 1986.  
Photomontage photographique réalisé par la NASA.*

### Type

Satellite naturel d'Uranus

### Caractéristiques orbitales

#### Demi-grand axe

129 900 km

#### Excentricité

0,0013

#### Période de révolution

1,413479 j

#### Inclinaison

4,338°

### Caractéristiques physiques

#### Diamètre

471,6 ± 1,4 km

#### Masse

6,59×10<sup>19</sup> kg

#### Masse volumique moyenne

1,20 x10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>

#### Gravité à la surface

0,079 m/s<sup>2</sup>

#### Période de rotation

1,413479 j (Synchrone)

#### Magnitude apparente

15,8 (à l'opposition)

#### Albédo moyen

0,32

#### Température de surface

~ 86 K

### Caractéristiques de l'atmosphère

#### Pression atmosphérique

Pas d'atmosphère

### Découverte

#### Découvert par

Gerard Kuiper le 16 février 1948

### Découverte et étymologie

Miranda est découverte le 16 février 1948 par l'astronome américano-hollandais Gerard Kuiper, depuis l'observatoire McDonald au Texas, 97 ans après la découverte de Titania et Obéron. Kuiper cherchait en

fait à obtenir des données précises concernant les magnitudes relatives des quatre lunes d'Uranus alors connues : Ariel, Umbriel, Titania et Obéron. À la suite d'une proposition de John Herschel, fils du découvreur d'Uranus William Herschel, toutes les lunes d'Uranus sont nommées d'après des personnages des œuvres de William Shakespeare ou d'Alexander Pope. Miranda est la fille du magicien Prospero, duc de Milan, dans la comédie *La Tempête*. Par ailleurs, cette lune est aussi appelée « Uranus V ». Dans le même esprit, les noms des formations géologiques remarquables de Miranda proviennent des lieux où se déroulent les principales intrigues de l'œuvre de Shakespeare.

## Orbite

Miranda est le plus proche des principaux satellites naturels d'Uranus. Éloignée d'approximativement 129 900 km d'Uranus, cette lune est sur une orbite qui possède une inclinaison et une excentricité notables par rapport au plan de l'équateur uranien. Son excentricité est d'un ordre de magnitude supérieur à celui des autres satellites naturels d'Uranus. Ces paramètres orbitaux pourraient être la conséquence de résonances orbitales anciennes avec d'autres lunes uraniennes. Ainsi Miranda pourrait avoir été en résonance 3:1 avec Umbriel. Elle pourrait aussi avoir été, dans le passé, en résonance 5:3 avec Ariel. Uranus est plus faiblement aplatie à ses pôles et également est plus petite, au regard de ses satellites, que Jupiter ou Saturne. De ce fait, ces lunes peuvent plus facilement se soustraire aux forces qui maintiennent leur orbite en résonance. C'est en échappant à ces résonances que Miranda aurait gagné son excentricité et surtout son inclinaison orbitale singulière. La période orbitale de Miranda est de 1,413 journées terrestres, et elle coïncide avec sa période de rotation. Ainsi Miranda est en rotation synchrone, de sorte que, vue d'Uranus, elle présente toujours la même face. Cette orbite donne à la petite lune un hémisphère uranien (toujours orienté vers Uranus) et un hémisphère anti-uranien (qui tourne en permanence le dos à la planète). De même elle possède un hémisphère à l'apex du mouvement orbital, c'est-à-dire qui fait en permanence face à la direction vers laquelle se déplace Miranda, et un hémisphère à l'anti-apex qui est en permanence rivée dans la direction d'où provient la lune. Cependant ces hémisphères (et les pôles géographiques qu'ils impliquent) n'ont pas toujours été ceux qu'a observé la sonde *Voyager 2* lors de son passage, mais des preuves ont été trouvées de l'existence d'une ancienne orientation. Cette ancienne orientation était associée à un paléopôle (le pôle autour duquel l'astre tournait alors) ainsi qu'à un paléopex puisqu'il semble qu'elle fut alors déjà en rotation synchrone.

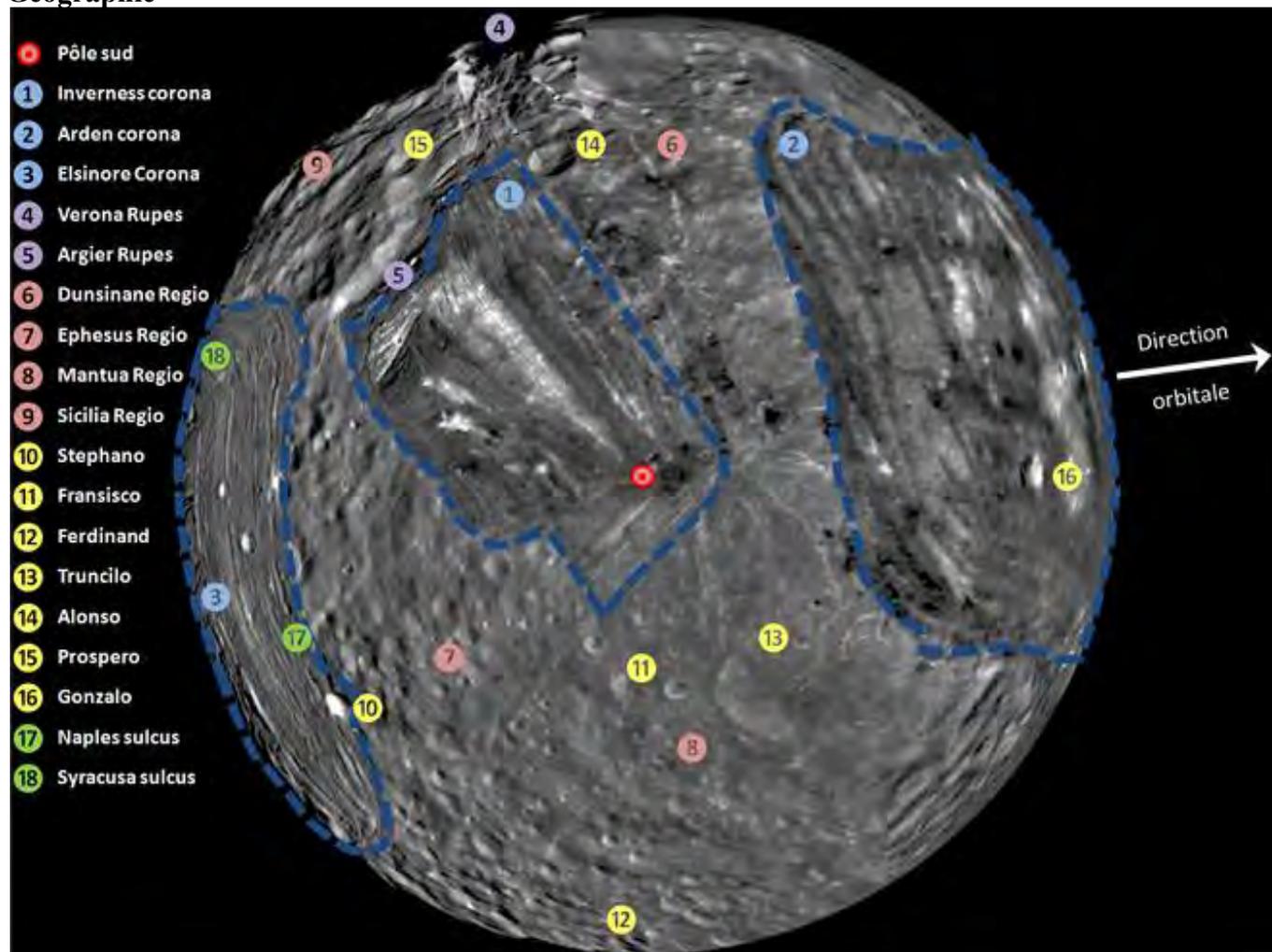
L'orbite de Miranda est complètement inscrite dans la magnétosphère d'Uranus. L'hémisphère arrière des satellites dont l'orbite est entièrement située au sein de la magnétosphère de la planète est influencé par le plasma magnétosphérique qui est en rotation avec la planète. Ce bombardement pourrait entraîner l'assombrissement des hémisphères arrières de l'ensemble des satellites majeurs uraniens à l'exception d'Obéron. Miranda capture en effet les particules magnétosphériques chargées. En 1986 la sonde *Voyager 2* permit d'observer une baisse prononcée du nombre de particules énergétiques à proximité de l'orbite des lunes uraniennes. À l'instar des autres satellites d'Uranus, Miranda orbite dans le plan équatorial uranien. Cependant l'axe de rotation d'Uranus est quasiment inscrit dans son plan orbital. Ainsi, les pôles géographiques de la lune sont continuellement éclairés durant 42 ans, puis plongés dans la nuit pour la même période de temps. Aussi, Miranda est sujette à des cycles saisonniers extrêmes tels qu'ils sont observés sur Terre aux pôles (voir Nuit polaire ou Jour polaire) autour des solstices. Le survol de *Voyager 2* coïncida avec le solstice d'été de l'hémisphère sud de 1986, alors que la quasi-totalité de l'hémisphère nord était dans l'obscurité. Une fois tous les 42 ans, quand Uranus a une équinoxe et que la Terre s'inscrit dans son plan équatorial, les lunes d'Uranus peuvent s'occulter les unes les autres. Un certain nombre de ces événements ont eu lieu en 2006–2007, incluant une occultation d'Ariel par Miranda le 15 juillet 2006 à 00:08 UT et une occultation d'Umbriel par Miranda le 6 juillet 2007 à 01:43 UT.

## Composition et structure interne

Il existe une distinction claire entre les différents satellites selon leur forme. Leur taille implique qu'ils sont sphériques ou non. Les satellites ayant un diamètre supérieur à 400 km sont sphériques et la taille de leur relief est alors négligeable devant la taille de l'astre. Avec un rayon moyen de 235 km, Miranda est proche de cette limite. Il est le moins dense des satellites majeurs d'Uranus. Sa densité de  $1,15 \pm 0,15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  est proche de celle de la glace d'eau. L'observation de sa surface dans les longueurs d'onde de l'infrarouge a permis de caractériser, en surface, la présence de glace d'eau mêlée à des composés de

silicates et de carbonates. Les mêmes observations de surface pourraient aussi caractériser la présence d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) dans une proportion de 3 %. Au regard des mesures faites par la sonde *Voyager 2*, la proportion de roches représenterait entre 20 et 40 % de la masse totale de la lune. Miranda pourrait s'être partiellement différenciée en un noyau de silicates et un manteau de glaces. Dans ce cas, le manteau gelé aurait une épaisseur de 135 km alors que le noyau aurait un rayon d'environ 100 km. Selon cette configuration, l'évacuation de la chaleur interne de la lune se serait alors opérée par conduction thermique. Cependant l'observation des coronae pourrait être le témoignage d'un mouvement de convection thermique en surface. Ce mouvement est issu des profondeurs de la lune, qui se serait alors substitué au phénomène de conduction, justifiant une différenciation partielle.

## Géographie



*Illustration des positions des principales structures géologiques sur une image de Miranda*

Miranda possède une surface étonnante et unique en son genre. Parmi les structures géologiques qui la recouvrent figurent fractures, failles, vallées, cratères, crêtes, gorges, dépressions, falaises et des terrasses. En effet, cette lune de la taille d'Encelade est une surprenante mosaïque de zones très variées. Certaines régions sont anciennes et ternes. À ce titre, elles portent de très nombreux cratères d'impacts comme cela est attendu d'un petit corps inerte. D'autres régions sont faites de bandes rectangulaires ou ovoïdes. Elles comportent des ensembles complexes de crêtes et de rupes (escarpements de failles) parallèles ainsi que de nombreux affleurements de matériaux brillants et sombres, suggérant une composition exotique. Cette lune n'est très probablement composée que de glace d'eau en surface, ainsi que de roches de silicate et d'autres composés organiques plus ou moins ensevelis.

Principales structures géologiques visibles sur la partie connue de Miranda (toutes nommées en références à des œuvres de William Shakespeare)					
Nom	Type	Longueur (diamètre) (km)	Latitude (°)	Longitude (°)	Origine du nom
<i>Mantua Regio</i>	Regiones	399	-39.6	180.2	Région italienne d'une partie de l'intrigue des <i>Deux Gentilshommes de Vérone</i>
<i>Ephesus Regio</i>		225	-15	250	La maison des jumeaux en Turquie dans <i>La Comédie des erreurs</i>
<i>Sicilia Regio</i>		174	-30	317.2	Région italienne de l'intrigue du <i>Conte d'hiver</i>
<i>Dunsinane Regio</i>		244	-31.5	11.9	Région du château de Grande-Bretagne dans lequel <i>Macbeth</i> est vaincu
<i>Arden corona</i>	Coronae	318	-29.1	73.7	Forêt de Grande-Bretagne où se déroule l'intrigue de <i>Comme il vous plaira</i>
<i>Elsinore corona</i>		323	-24.8	257.1	Région du château danois d' <i>Hamlet</i>
<i>Inverness corona</i>		234	-66.9	325.7	Région du château écossais de <i>Macbeth</i>
<i>Argier Rupes</i>	Rupes	141	-43.2	322.8	Région française où se déroule le début de l'intrigue de <i>La Tempête</i>
<i>Verona Rupes</i>		116	-18.3	347.8	Région italienne où se déroule l'intrigue de <i>Roméo et Juliette</i>
<i>Alonso</i>	Cratères	25	-44	352.6	Roi de Naples dans <i>La Tempête</i>
<i>Ferdinand</i>		17	-34.8	202.1	Fils du roi de Naples dans <i>La Tempête</i>
<i>Francisco</i>		14	-73.2	236	Un seigneur de Naples dans <i>La Tempête</i>
<i>Gonzalo</i>		11	-11.4	77	Un honnête vieux conseiller de Naples dans <i>La Tempête</i>
<i>Prospero</i>		21	-32.9	329.9	Duc légitime de Milan dans <i>La Tempête</i>
<i>Stephano</i>		16	-41.1	234.1	Un majordome ivre dans <i>La Tempête</i>
<i>Trinculo</i>		11	-63.7	163.4	Un bouffon dans <i>La Tempête</i>

### Les regiones

Les regiones identifiées sur les images prises par la sonde *Voyager 2* sont nommées « *Mantua Regio* », « *Ephesus Regio* », « *Sicilia Regio* » et « *Dunsinane Regio* ». Elles désignent des régions de Miranda où se succèdent les terrains vallonnés et les plaines, plus ou moins fortement marqués de cratères d'impacts anciens. Des failles normales marquent aussi ces anciennes régions. Certains escarpements de faille sont aussi anciens que la formation des regiones alors que d'autres sont beaucoup plus récents et semblent s'être formés après les coronae. Ces failles sont accompagnées de grabens caractéristiques d'une activité tectonique ancienne. La surface de ces régions est assez uniformément sombre. Cependant les falaises bordant certains cratères d'impacts révèlent, en profondeur, la présence de matériaux beaucoup plus lumineux.

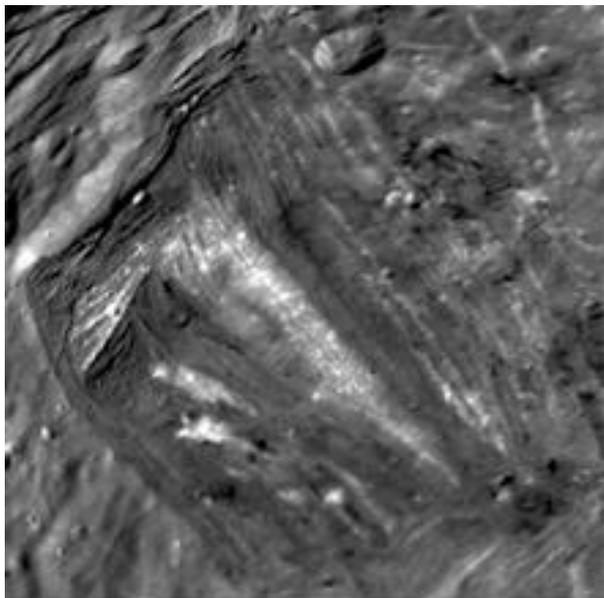
### Les coronae

Miranda est l'un des rares astres du système solaire à posséder des couronnes (aussi appelées coronae). Les trois couronnes observées sur Miranda sont nommées « *Inverness* » à proximité du pôle sud, « *Arden* » à l'apex du mouvement orbital de la lune et « *Elsinor* » à l'antapex. Les contrastes d'albédo les plus élevés à la surface de Miranda se manifestent au sein des coronae *Inverness* et *Arden*.

### Inverness

La couronne *Inverness* est une région trapézoïdale d'environ 200 km de côté qui se trouve près du pôle sud. Cette région est caractérisée par une structure géologique centrale qui prend la forme d'un chevron lumineux, une surface à l'albédo relativement élevé et par une série de gorges qui se déploient vers le nord à partir d'un point situé près du pôle sud. À une latitude d'environ  $-55^\circ$  les gorges orientées nord-sud ont tendance à en croiser d'autres, qui suivent une direction est-ouest. La limite extérieure d'*Inverness*, aussi bien que ses motifs internes de crêtes et de bandes d'albédos contrastées, forment de nombreux

angles saillants. Elle est délimitée sur trois côtés (sud, est et nord) par un système complexe de failles. La nature de la côte ouest est moins claire, mais peut aussi être tectonique. Au sein de la couronne, la surface est dominée par des gorges parallèles espacées de quelques kilomètres. Le faible nombre de cratères d'impacts permet d'établir qu'*Inverness* est la plus jeune parmi les trois coronae observées à la surface de Miranda



*La corona Inverness est caractérisée par son « chevron » central blanc. Le cratère Alonso est visible en haut à droite, ainsi que les falaises d'Argier Rupes dans la partie supérieure gauche.*

### **Arden**

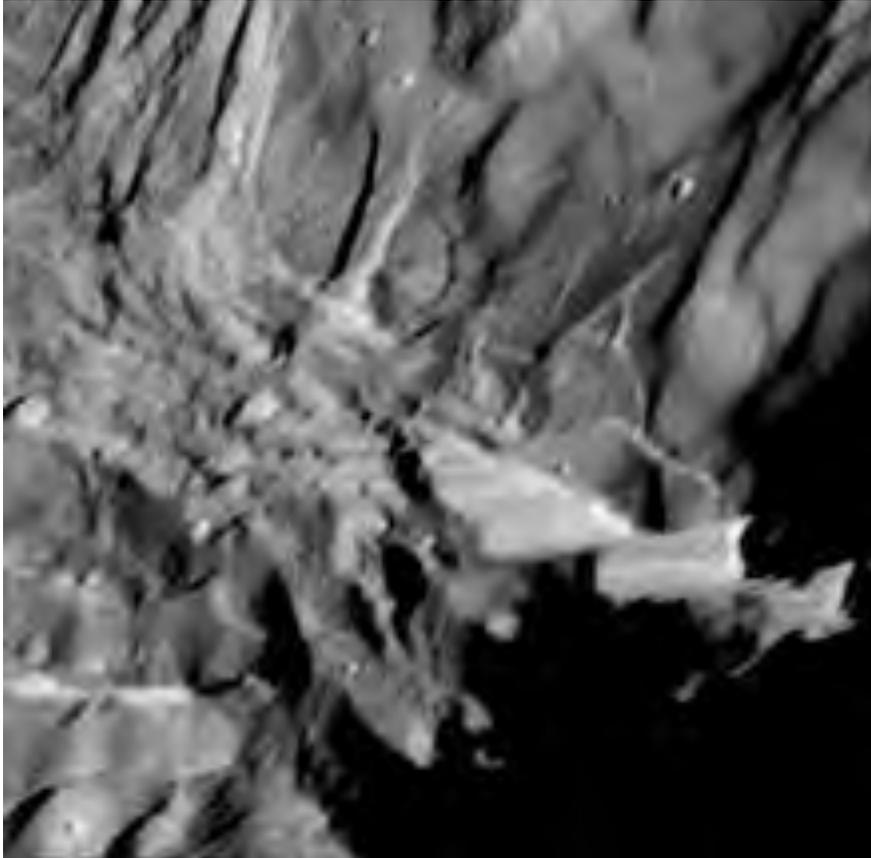
La couronne géologique *Arden*, présente dans l'hémisphère avant de Miranda, s'étend sur environ 300 km d'est en ouest. L'autre dimension, par contre, reste inconnue car le terrain s'étendait par-delà le terminateur (sur l'hémisphère plongé dans la nuit) lorsque *Voyager 2* l'a photographiée. La marge extérieure de cette corona forme des bandes parallèles et sombres qui ceinturent selon des courbes douces un noyau plus nettement rectangulaire sur au moins 100 km de large. Le tout forme une sorte d'« ovoïde de lignes ». L'intérieur et la ceinture d'*Arden* montrent des morphologies très différentes. La topographie intérieure apparaît régulière et douce. Elle se caractérise aussi par un motif marbré résultant de larges plaques d'un matériau relativement lumineux dispersées sur une surface généralement sombre. La relation stratigraphique entre les marques claires et sombres n'a pas pu être déterminée à partir des images fournies par *Voyager 2*. La zone en marge d'*Arden* est caractérisée par des bandes d'albédo concentriques qui s'étendent de l'extrémité ouest de la couronne où ils croisent un terrain cratérimorphe (près de 40° de longitude) et sur le côté est, où ils s'étendent au-delà du terminateur, dans l'hémisphère nord (près de 110° de longitude). Les bandes d'albédo contrastées sont composées de faces extérieures d'escarpement de faille. Cette succession d'escarpements enfonce progressivement le terrain dans un creux profond le long de la frontière entre *Arden* et le terrain cratérimorphe nommé « *Mantua Regio* ». *Arden* s'est formée lors d'un épisode géologique qui a précédé la formation d'*Inverness* mais qui est contemporain de la formation d'*Elsinor*.

### **Elsinor**

*Elsinor* désigne la troisième corona, qui a été observée dans l'hémisphère arrière de Miranda, le long du terminateur. Elle est globalement similaire à *Arden* en ce qui concerne sa taille et sa structure interne. Elles ont toutes les deux une ceinture extérieure d'environ 100 km de large, qui s'enroule autour d'un noyau interne. La topographie du cœur d'*Elsinor* se compose d'un ensemble complexe d'intersections de creux et de bosses qui sont tronqués par cette ceinture extérieure qui est marquée par des crêtes linéaires à peu près concentriques. Les creux comprennent également de petits segments de terrains vallonnés et craterisés. *Elsinor* présente aussi des segments de sillons, appelés « *sulcus* », comparables à ceux observés sur Ganymède, lune de Jupiter.

## Les rupes

Miranda présente aussi d'énormes escarpements de failles qui peuvent être retracés à travers la lune. Certains d'entre eux sont plus âgés que les coronae, d'autres plus jeunes. Le système de failles le plus spectaculaire commence à une profonde vallée visible au terminateur. Ce réseau de failles débute sur le côté nord-ouest d'*Inverness* où il forme une gorge profonde sur le bord externe de l'ovoïde qui ceinture la couronne. Cette formation géologique est nommée « *Argier Rupes* ». La faille la plus impressionnante s'étend ensuite jusqu'au terminateur, en prolongement du sommet du « chevron » central d'*Inverness*. Près du terminateur, une gigantesque falaise lumineuse, nommée « *Verona Rupes* » forme des grabens complexes. La faille est d'une largeur d'environ 20 km, le graben au bord lumineux est de 10 à 15 km de profondeur. La hauteur de la falaise en à-pic est de 5 à 10 km. Bien qu'elle n'ait pu être observée par la sonde *Voyager 2* sur la face plongée dans la nuit polaire de Miranda, il est probable que cette structure géologique s'étende au-delà du terminateur dans l'hémisphère nord.



*Vue rapprochée de Verona Rupes, une falaise de 5 km de haut*

## Les cratères d'impacts

Lors du survol rapproché de *Voyager 2* en janvier 1986, seuls les cratères sur l'hémisphère sud de Miranda ont pu être observés. Ils avaient des diamètres de 500 m à 50 km. Ces cratères ont des morphologies très variées. Certains ont des bordures bien définies et sont parfois ceinturés de dépôts d'éjecta caractéristiques des cratères d'impacts. D'autres sont très dégradés et parfois à peine reconnaissables, tant leur topographie a été altérée. L'âge d'un cratère ne donne pas d'indication sur la date de formation du terrain qu'il a marqué. Par contre, cette date dépend du nombre de cratères présents sur un terrain, indépendamment de leur âge. En effet, plus un terrain est marqué de cratères d'impacts, plus il est ancien. Les scientifiques utilisent ces « chronomètres planétaires », ils décomptent des cratères observés pour dater la formation des terrains de satellites naturels inertes et dépourvus d'atmosphères, comme Callisto. Aucun cratère à anneau multiple, ni aucun cratère complexe, présentant un piton central, n'a été observé sur Miranda. Des cratères simples, c'est-à-dire dont la cavité est en forme de bol, et des cratères transitoires (à fond plat) sont la norme, sans que leur diamètre soit corrélé à leur forme. Ainsi des cratères simples de plus de 15 km sont observés alors qu'ailleurs des cratères transitoires de 2,5 km ont été identifiés. Les dépôts d'éjectas sont rares, et ne sont jamais associés à des cratères de plus de 15 km de diamètre. Les éjectas qui entourent parfois les cratères d'un diamètre inférieur à 3 km semblent

systématiquement plus lumineux que la matière qui les entourent. D'autre part, les éjectas associés à des cratères d'une taille comprise entre 3 km et 15 km sont généralement plus sombres que ce qui les entoure (l'albédo de l'éjecta est inférieur à celui de la matière qui les entoure). Enfin quelques gisements d'éjectas, associés à des diamètres de toutes tailles, sont d'un albédo comparable à celui de la matière sur laquelle ils reposent.

### **Dans les regiones**

Dans quelques regiones, et particulièrement dans celles de la partie visible de l'hémisphère anti-uranien (qui tourne continuellement le dos à la planète), les cratères sont très fréquents. Ils sont parfois collés les uns aux autres avec un très faible espace entre chacun. Ailleurs, les cratères sont moins fréquents et sont séparés par de vastes surfaces faiblement ondulées. Le rebord de nombreux cratères est encerclé par un matériau lumineux alors que des traînées de matériaux sombres sont observées sur les murs qui ceinturent le fond des cratères. Dans la *Matuna regio*, entre les cratères *Truncilo* et *Fransesco*, on observe une gigantesque structure géologique circulaire de 170 km de diamètre qui pourrait être un bassin d'impact très fortement dégradé. Ces constatations permettent de penser que ces régions contiennent un matériau brillant en faible profondeur, alors qu'une couche d'un matériau sombre (ou d'un matériau qui s'assombrit au contact du milieu extérieur) est présente, plus en profondeur.

### **Dans les coronae**

Les cratères sont statistiquement jusqu'à dix fois moins nombreux dans les coronae que dans les regiones anti-uraniennes, ce qui indique que ces formations sont plus jeunes. La densité de cratères d'impacts a pu être établie pour différentes zones d'*Inverness*, et a permis d'établir l'âge de chacune. Au regard de ces mesures, l'ensemble de la formation géologique s'est formé dans une relative unité de temps. Cependant d'autres observations permettent d'établir que la zone la plus jeune, au sein de cette couronne, est celle qui sépare le « chevron », d'*Argier Rupes*. La densité des cratères d'impacts dans le noyau et dans la ceinture d'*Arden* diffère mais reste statistiquement similaire. Les deux parties distinctes de cette formation doivent donc s'être inscrites dans un épisode géologique commun. Néanmoins, la superposition de cratères sur des bandes du noyau central d'*Arden* indique que sa formation a précédé celle des escarpements qui l'entourent. Les données issues des cratères d'impacts peuvent être interprétées comme suit : l'intérieur et les zones marginales de la couronne, dont la plupart des bandes albédo, se sont formés durant la même période de temps. Leur formation a été suivie d'évolutions tectoniques postérieures qui ont produit les escarpements de faille en haut-relief observés le long du bord de la couronne à proximité de la longitude 110°.

La densité de cratères d'impacts semble la même dans la structure qui entoure *Elsinor* que dans son noyau central. Là encore, les deux zones de la couronne semblent s'être formées durant une même période géologique. Néanmoins d'autres éléments géologiques permettent de penser que le pourtour d'*Elsinor* est plus jeune que son noyau.

### **Autres observations**

Par ailleurs, il est observé que le nombre de cratères devrait être plus élevé dans l'hémisphère à l'apex du mouvement orbital qu'à l'antapex. Cependant c'est l'hémisphère anti-uranien qui est le plus dense en cratères. Cette situation pourrait être expliquée par un événement passé ayant provoqué une réorientation de l'axe de rotation de Miranda de 90° par rapport à celui qui est connu actuellement. Dans ce cas, l'hémisphère du paleoapex de la lune serait devenu l'hémisphère anti-uranien actuel. Cependant le décompte des cratères d'impacts étant limité au seul hémisphère sud, illuminé lors du passage de la sonde Voyager 2, il est possible que Miranda ait connu une réorientation plus complexe et que son paleoapex se trouve quelque part dans l'hémisphère nord, qui n'a pu être photographié.

### **Origine et formation**

Miranda soulève un intéressant problème géologique. Plusieurs scénarios sont proposés pour expliquer sa formation et son évolution géologique. L'un d'eux postule qu'elle résulterait de l'accrétion d'un disque de gaz et de poussières appelé « sous-nébuleuse ». Cette sous-nébuleuse, soit a existé autour d'Uranus quelque temps après sa formation, soit a été créée à la suite d'un impact cosmique qui aurait donné sa grande obliquité à l'axe de rotation d'Uranus. Cependant cette relativement petite lune présente des étendues étonnamment jeunes par rapport à l'échelle des temps géologiques. Il semble en effet que les

formations géologiques les plus récentes ne datent que de quelques centaines de millions d'années. Toutefois les modèles thermiques applicables aux lunes de la taille de Miranda prédisent un refroidissement rapide et l'absence d'évolution géologique consécutive à son accréation depuis une sous-nébuleuse. Une activité géologique durant sur une si longue période ne peut être justifiée ni par la chaleur résultant de l'accréation initiale, ni par la chaleur générée par la fission des matériaux radioactifs impliqués dans la formation. Miranda a la plus jeune surface parmi celles des satellites du système uranien, ce qui indique que sa géographie a connu les évolutions les plus importantes. Cette géographie serait expliquée par une histoire géologique complexe incluant une combinaison encore méconnue de différents phénomènes astronomiques. Parmi ces phénomènes figureraient les forces de marée, les mécanismes de résonances orbitales, les processus de différenciation partielle ou encore des mouvements de convection.

L'étonnant patchwork géologique qui compose sa géographie pourrait être en partie le fruit d'une collision catastrophique avec un impacteur. Cet événement pourrait avoir complètement disloqué Miranda après sa formation initiale. Les différents morceaux se seraient ensuite ré-assemblés, puis progressivement réorganisés sous la forme sphérique photographiée par la sonde *Voyager 2*. Certains scientifiques parlent même de plusieurs cycles de collision/ré-accréation de la lune. Cette hypothèse géologique est cependant dépréciée en 2011 au bénéfice des hypothèses impliquant les forces de marées uraniennes. Ces dernières auraient tiré et tourné les matériaux présents sous *Inverness* et *Arden* pour créer des escarpements de failles. Les étirements et la distorsion engendrée par la gravité d'Uranus pourraient avoir fourni, seuls, la source de chaleur nécessaire pour alimenter ces soulèvements. Les plus anciennes régions connues à la surface de Miranda sont les plaines cratérisées telles que *Sicilia Regio* et *Ephesus Regio*. La formation de ces terrains fait suite à l'accréation de l'astre puis à son refroidissement. Les fonds des plus anciens cratères sont ainsi partiellement recouverts d'un matériau venu des profondeurs de la lune que la littérature scientifique appelle « resurfaçage endogène ». Le fait que ce petit corps céleste présente des traces évidentes de resurfaçage endogène postérieure à sa formation a été une complète surprise. La jeunesse géologique de Miranda démontre en effet qu'une source de chaleur a pris alors le relais de la chaleur initiale fournie par l'accréation de l'astre. L'explication la plus satisfaisante à l'origine de la chaleur qui a animé la lune est celle qui a expliqué quelques années plus tôt le volcanisme sur Io : une situation de résonance orbitale maintenant sur Miranda un important phénomène de force de marée engendré par Uranus.

Après cette première époque géologique, Miranda a connu une période de refroidissement qui a engendré une extension globale de son noyau et produit en surface des morcellements et des craquelures de son manteau, sous la forme de grabens. Il est en effet possible que la configuration des satellites Miranda, Ariel et Umbriel aient connu plusieurs importantes résonances des paires : Miranda/Ariel, Ariel/Umbriel et Miranda/Umbriel. Toutefois, contrairement à ceux observés sur la lune de Jupiter Io, ces phénomènes de résonances orbitales entre Miranda et Ariel n'ont pas pu conduire à une capture stable de la petite lune. Au lieu d'être capturée, la résonance orbitale de Miranda avec Ariel et Umbriel a pu conduire à l'accroissement de son excentricité et de son inclinaison orbitale. En échappant successivement à plusieurs résonances orbitales, Miranda a alterné des phases de chauffe et de refroidissement. Ainsi tous les grabens connus de Miranda ne se sont pas formés lors de ce second épisode géologique. Une troisième époque géologique majeure survient avec la réorientation orbitale de Miranda et la formation d'*Elsinore* et *Arden*. Un volcanisme singulier, fait de coulées de matériaux solides pourrait alors avoir eu lieu, au sein des coronae en formation. Une autre explication proposée pour la formation de ces deux coronae serait le produit d'un diapir qui se serait formé dans le cœur de l'astre. À cette occasion Miranda se serait au moins partiellement différenciée. En considérant la taille et la position de ces coronae, il est possible que leur formation ait contribué à changer le moment d'inertie de la lune. Cela aurait pu provoquer une réorientation de 90° de Miranda. Un doute subsiste cependant quant à la concomitance de ces deux formations. Il est possible qu'à cette époque, la lune ait été déformée au point que son asphéricité et son excentricité l'aient, temporairement, entraînée dans un mouvement de rotation chaotique, tel que celui observé sur Hypérion. Si la réorientation orbitale de Miranda est survenue avant que les deux coronae ne se soient formées en surface, alors *Elsinore* serait plus ancienne qu'*Arden*. Des phénomènes de mouvements chaotiques engendrés par l'entrée en résonance 3:1 entre l'orbite de Miranda et celle d'Umbriel pourraient avoir contribué à un accroissement de l'inclinaison orbitale de Miranda supérieur à 3°.

Un dernier épisode géologique consiste en la formation d'*Inverness* qui semble avoir induit des tensions de surface qui ont donné lieu à la création de grabens additionnels au nombre desquels figure *Verona Rupes* et *Argier Rupes*. À la suite de ce nouveau refroidissement de Miranda, son volume total pourrait avoir augmenté de 4 %. Il est probable que ces différents épisodes géologiques se soient enchaînés sans interruption. Finalement, l'histoire géologique de Miranda pourrait s'être étalée sur une période de plus de 3 milliards d'années. Elle aurait débuté il y a 3,5 milliards d'années avec l'apparition des régions fortement cratérisées pour se terminer il y a quelques centaines de millions d'années, avec la formation des coronae. Les phénomènes de résonances orbitales, et principalement celui associé à Umbriel, mais aussi, dans une moindre mesure, celui d'Ariel, auraient eu une incidence importante sur l'excentricité orbitale de Miranda. À ce titre, ils auraient aussi contribué à l'échauffement interne et à l'activité géologique de la lune. L'ensemble aurait induit des mouvements de convections dans son substrat et permis un début de différenciation planétaire.

Dans le même temps, ces phénomènes n'auraient que faiblement perturbé les orbites des autres lunes impliquées, qui sont plus massives que Miranda. Cependant, la surface de Miranda peut sembler trop torturée pour être le seul produit de phénomènes de résonance orbitale. Après que Miranda s'est échappé de cette résonance avec Umbriel, par le biais d'un mécanisme qui l'a probablement entraîné dans son inclinaison orbitale actuelle, anormalement élevée, son excentricité aurait été amoindrie. Les forces de marées auraient alors gommé l'excentricité et la température au cœur de l'astre. Ceci lui aurait permis de retrouver une forme sphérique, sans lui permettre d'effacer les impressionnants artefacts géologiques tel que *Verona Rupes*. Cette excentricité étant la source des forces de marée, son amoindrissement aurait désactivé la source de chaleur qui alimentait l'activité géologique ancienne de Miranda, faisant de Miranda un astre froid et inerte.

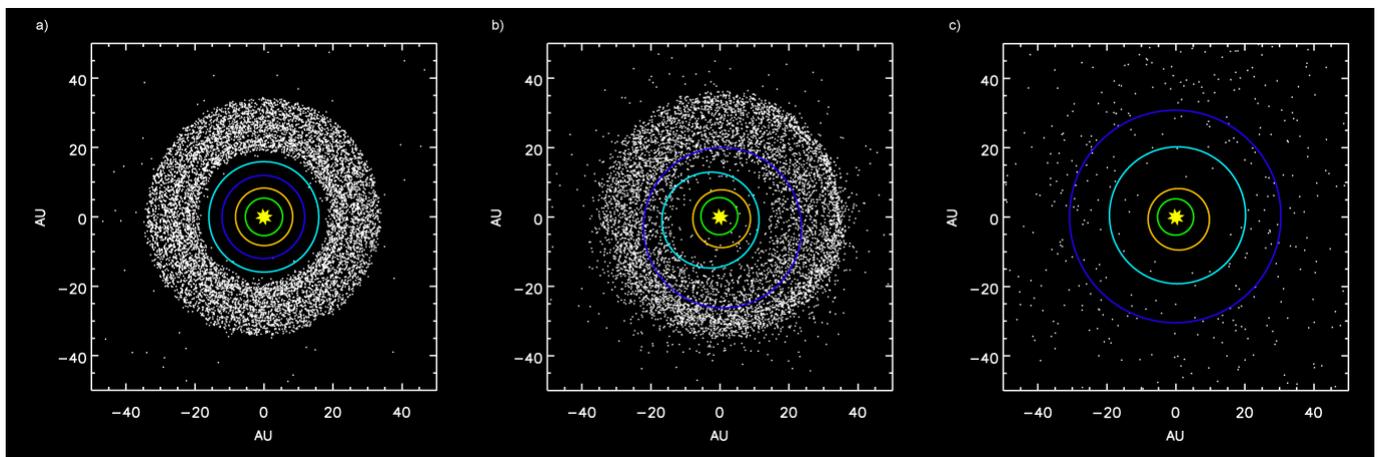
### **Exploration**

Les seules images en haute résolution de Miranda ont été prises par la sonde spatiale *Voyager 2*, qui a photographié la lune durant son survol d'Uranus en janvier 1986. La plus proche distance entre *Voyager 2* et Miranda a été de 31 000 km, significativement moins que la distance de la sonde à toutes les autres lunes uraniennes. Les meilleures images de Miranda ont une résolution spatiale de 500 m avec la qualité requise pour pouvoir en dresser une cartographie géologique et en dénombrer les cratères. Au moment du survol, l'hémisphère sud de Miranda (comme celui des autres lunes) était pointé vers le Soleil, de sorte que l'hémisphère nord (plongé dans la pénombre) n'a pas pu être étudié. Aucun autre engin spatial n'a jamais visité Uranus (et Miranda). Le programme *Uranus orbiter and probe*, dont le lancement pourrait être programmé pour les années 2020 à 2023, devrait apporter des précisions sur la connaissance des satellites d'Uranus et notamment sur Miranda.

**Un tableau complet des satellites d'Uranus et de leurs caractéristiques principales se trouve en Annexe 1, à la fin de ce document.**

## IV Le modèle de Nice

Le **modèle de Nice** est un scénario décrivant la formation et l'évolution du Système solaire. Il est nommé ainsi car il fut initialement développé à l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice en France. Il propose que les planètes géantes aient migré depuis une configuration initiale compacte vers leurs positions actuelles, longtemps après la dissipation du disque de gaz protoplanétaire. En cela, ce scénario diffère des modèles plus anciens de formation du Système solaire. Cette migration planétaire est utilisée dans les simulations dynamiques du Système solaire pour expliquer les événements historiques tel que le bombardement massif tardif du Système solaire interne, la formation du nuage d'Oort, l'existence des populations de petits corps du Système solaire incluant la ceinture de Kuiper, les astéroïdes troyens de Jupiter et de Neptune, et le nombre des objets en résonance transneptunienne dominés par Neptune. Il parvient à expliquer nombre des situations observées au sein du Système solaire, et à ce titre, il est aujourd'hui largement accepté comme le modèle le plus réaliste connu, pour expliquer l'évolution du Système solaire. Il n'est cependant pas universellement accepté au sein des planétologues. Il ne parvient notamment pas à expliquer complètement la formation du système de satellites extérieurs et la ceinture de Kuiper (voir ci-dessous).



*Simulation montrant les planètes extérieures et la ceinture planétésimale : A) configuration initiale, avant que Jupiter et Saturne n'atteignent la résonance 2:1 B) Éparpillement des planétésimaux dans le Système solaire interne après le changement de l'orbite de Neptune (bleu foncé) et d'Uranus (bleu clair). C) éjection de planétésimaux par les planètes*

### Description

Le cœur du modèle de Nice est un triplet d'articles publiés dans la revue scientifique généraliste *Nature* en 2005 par une collaboration internationale de scientifiques : Rodney Gomes (Rio de Janeiro, Brésil), Hal Levison (Boulder, Colorado), Alessandro Morbidelli (Nice, France) et Kleomenis Tsiganis (Thessaloniki, Grèce). Dans ces publications, les quatre auteurs proposent qu'après la dissipation du gaz et de la poussière du disque solaire primordial, les quatre géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) étaient, à l'origine, placées sur des orbites quasi-circulaires à des distances d'environ 5.5 à 17 unité astronomique (UA), donc bien plus proches et plus compactes qu'à présent. Un disque dense et large de petits planétésimaux de roches et de glaces, représentant au total environ 35 masses terrestres, s'étendait de l'orbite de la plus lointaine géante jusqu'à quelque 35 UA. Si l'on examine l'évolution de ce système planétaire on constate que les planétésimaux du bord intérieur du disque passent occasionnellement à proximité des géantes gazeuses, et leurs orbites en sont modifiées sous l'effet de l'assistance gravitationnelle. Les planètes intérieures se dispersent en échangeant leurs moments cinétiques avec la majorité des petits corps glacés qu'ils rencontrent, ce qui a pour conséquence d'éloigner les planètes vers l'extérieur pour préserver le moment angulaire global du système. Ces planétésimaux se dispersent de la même façon lors de leurs rencontres successives, se déplaçant progressivement des orbites de Saturne, Uranus et Neptune vers l'extérieur. Malgré le mouvement instantané, chaque échange du moment cinétique peut entraîner que, par accumulation, ces planétésimaux fassent migrer les orbites des planètes de façon significative. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les planétésimaux

interagissent directement avec la plus massive et la plus intérieure des planètes géantes, Jupiter, dont l'immense gravité les envoie sur des orbites très elliptiques ou qu'il les éjecte même littéralement du Système solaire. Ceci amène, en revanche, Jupiter à se déplacer légèrement vers l'intérieur. Le faible taux de rencontre orbitale gouverne l'allure à laquelle les planétésimaux s'échappent du disque, et le taux de migration correspondant. Après plusieurs centaines de millions d'années d'une migration lente et graduelle, Jupiter et Saturne, les deux plus importantes planètes géantes, franchissent leur résonance orbitale 1:2. Cette résonance accroît leurs excentricités orbitales. Cela déstabilise entièrement le système planétaire. La disposition des planètes géantes se modifie alors rapidement et considérablement. Jupiter déplace Saturne jusqu'à sa position actuelle, et cette délocalisation cause des rencontres gravitationnelles mutuelles entre Saturne et les deux autres géantes de glaces (Neptune et Uranus), qui sont propulsées sur des orbites bien plus excentriques. Ces deux géantes creusent alors des sillons dans le disque externe, dispersant des dizaines de milliers de planétésimaux depuis leurs orbites jadis stables vers le Système solaire extérieur. Cette perturbation disperse quasiment entièrement le disque primordial, le dépossédant de 99 % de sa masse, un scénario qui explique l'absence actuelle d'une dense population d'objets transneptuniens. Certains de ces planétésimaux sont jetés dans le Système solaire interne, produisant un soudain afflux d'impacts sur les planètes telluriques : le bombardement massif tardif.

Enfin, les planètes géantes atteignent leurs orbites actuelles demi-grand axe, et les frictions dynamiques (en) avec le reste du disque planétésimal réduisent leurs excentricités et rendent les orbites d'Uranus et de Neptune à nouveau circulaires.

Dans presque 50 % des modèles initiaux de Tsiganis et de son équipe, Neptune et Uranus échangent aussi leur ordre après un milliard d'années (un cinquième de l'âge du Système Solaire). Toutefois, les résultats ne correspondent à une équirépartition de la masse dans le disque protoplanétaire, et ne rendent compte de la masse des planètes, que si l'interversion a bien eu lieu.

### **Principaux traits du Système solaire**

Pour étudier l'évolution du Système solaire, des simulations numériques ont donc été effectuées. Selon les conditions initiales programmées, les simulations dynamiques ont établi la formation de populations d'objets épars ayant des caractéristiques différentes. En étudiant les différentes configurations initiales possibles les astrophysiciens observent d'importantes variations dans la taille des populations, et les propriétés orbitales de leurs membres. Prouver un modèle d'évolution du début du Système solaire est ardu, puisque cette évolution ne peut être directement observée. Néanmoins, le succès de tout modèle dynamique peut être jugé en comparant les prévisions de population à partir des simulations aux observations astronomiques de ces populations. À l'heure actuelle, les modèles informatiques du Système solaire, qui sont configurés avec les conditions initiales du scénario de Nice correspondent le mieux à de nombreux aspects du Système solaire observé.

### **Bombardement tardif**

La liste et les caractéristiques des cratères de la Lune et de notre Terre sont l'un des témoignages forts qui attestent du bombardement massif tardif : une intensification du nombre d'impacteurs, environ 600 millions d'années après la formation du Système solaire. Les nombreux planétésimaux qui auraient atteint la Lune selon le modèle de Nice est cohérent avec la liste et la chronologie des cratères d'impacts observés sur la Lune pendant le grand bombardement tardif. ([Voir détails au Chapitre V](#)).

### **Corps troyens et astéroïdes de la ceinture principale**

Durant la période faisant suite à la résonance 2:1 entre Jupiter et Saturne, des perturbations orbitales combinées aux influences gravitationnelles des géantes qui migraient, auraient rapidement déstabilisé tout groupe troyen pré-existant sur les points de Lagrange L<sub>4</sub> et L<sub>5</sub> de Jupiter et de Neptune. Durant cette période également, la région co-orbitale troyenne est dite « dynamiquement ouverte ». Selon le modèle de Nice, les planétésimaux quittant le disque perturbé croisent cette région en grands nombres, pour l'occuper temporairement. À la fin de la période d'instabilité orbitale, la région Troyenne est "dynamiquement fermée", elle capture alors les planétésimaux qui y sont présents. Les populations troyennes actuelles ont été acquises parmi ces planétésimaux dispersés de la ceinture primordiale. La population simulée a le même angle de libération, la même excentricité et les larges inclinaisons orbitales

que les astéroïdes troyens de Jupiter. Leurs inclinaisons n'avaient jusqu'alors jamais été expliquées. Ce mécanisme génère de la même façon les astéroïdes troyens de Neptune.

Un grand nombre de planétésimaux auraient également été capturés dans la partie extérieure de la ceinture principale, à une distance supérieure à 2,6 UA, et dans la région de la Famille d'Hilda. Ces objets capturés auraient alors subi une érosion induite par des collisions, engendrant le broyage de la population en plus petits fragments qui auraient pu ensuite être déplacés par l'action du vent solaire et de l'effet YORP, éliminant plus de 90 % d'entre eux (Bottke). La taille et la fréquence de distribution des populations établies par simulation à la suite de l'érosion concordent parfaitement avec les observations astronomiques. Cela suggère que les Troyens Joviens, Hildas et quelques-uns de la ceinture extérieure principale, tous les Astéroïdes de type D, sont les planétésimaux restant de cette capture et du processus d'érosion, et peut-être même la planète naine Cérés.

### **Satellites du système extérieur**

Toutes les populations originaires des satellites irréguliers capturées par des mécanismes traditionnels, trainées ou poussées depuis les disques d'accrétion, auraient été perdues lors de l'interaction des planètes pendant la période d'instabilité du système planétaire. Dans le modèle de Nice, un grand nombre de planétésimaux interagissent avec les planètes extérieures à cette époque, et certains sont capturés aux cours d'interactions avec les planètes. La probabilité pour chaque planétésimal d'être capturé par un géant de glace est relativement élevée, quelque  $10^{-7}$ . Ces nouveaux satellites pourraient être captés selon n'importe quel angle ou presque, donc, contrairement aux satellites réguliers de Saturne, Uranus et Neptune, ils ne sont pas nécessairement sur l'orbite équatoriale des planètes. L'orbite de Triton, la plus grande lune de Neptune, peut être expliquée par une capture impliquant une interaction à trois corps, perturbant un planétoïde binaire, dont Triton était le membre le moins massif (Cuk & Gladman 2005). Néanmoins, ces perturbations binaires ne seraient pas à l'origine, en général, d'un grand nombre de petits satellites irréguliers. En effet certains satellites irréguliers pourraient avoir été échangés entre les planètes. Les irrégularités orbitales obtenues correspondent bien avec celles des populations observées, au regard de leurs demi-grands axes, de leurs inclinaisons et de leurs excentricités, mais pas au regard de la distribution de leur taille. Les collisions subséquentes entre ces différents satellites capturés pourraient avoir créé les supposées familles d'impactés qui sont observées aujourd'hui. Ces collisions sont également nécessaires pour expliquer l'érosion et la distribution des tailles actuelles de la population. Il n'y aurait pas eu assez d'interactions avec Jupiter dans les simulations réalisées pour expliquer le cortège des satellites irréguliers de Jupiter. Cela suggère, soit qu'il y ait eu un second mécanisme concernant cette planète, soit que les paramètres du modèle de Nice nécessitent d'être révisés.

### **Formation de la ceinture de Kuiper**

La migration des planètes extérieures est également nécessaire pour rendre compte de l'existence et des propriétés des régions les plus éloignées du Système solaire. À l'origine, la ceinture de Kuiper était bien plus dense et proche du soleil, avec une périphérie située approximativement à 30 UA. Sa bordure intérieure débutait probablement juste au-delà de l'orbite Uranus et de Neptune, qui étaient alors bien plus proches du soleil (le plus vraisemblablement entre 15 et 20 UA), et sur des orbites plus ou moins diamétralement opposées, Uranus étant alors plus éloignée du soleil que Neptune. Quelques-uns des objets épars, notamment Pluton, deviennent alors gravitationnellement liés à l'orbite de Neptune, contraints à une résonance orbitale. Le modèle de Nice explique de manière privilégiée la place actuelle de la ceinture de Kuiper en résonance orbitale avec Neptune, particulièrement la résonance 2:5. Au moment où Neptune migre vers l'extérieur, elle s'approche d'objets de la proto-ceinture de Kuiper, capturant certains d'entre eux dans différentes résonances et en envoyant d'autres sur des orbites chaotiques. On soupçonne que les objets épars ont été placés sur leurs positions actuelles par des interactions avec des résonances temporaires lors de la migration de Neptune. Cependant, le modèle de Nice ne parvient toujours pas à rendre compte de bon nombre des caractéristiques de cette distribution. Il peut rendre compte des populations chaudes (populations des objets placés sur des orbites fortement inclinées) de la ceinture de Kuiper, mais pas de la faible inclinaison des populations froides.

Les deux populations ne possèdent pas seulement des orbites différentes, mais des compositions différentes, la population froide est nettement plus rouge que la chaude, ce qui suggère qu'elle a été formée dans une région différente. La population chaude est censée s'être formée près de Jupiter, et s'être

fait éjecter par les mouvements entre les géantes gazeuses. La population froide, elle, est supposée s'être formée plus ou moins autour de sa position actuelle, même si elle peut avoir également été par la suite balayée vers l'extérieur par Neptune au cours de sa migration. Citant l'un des articles scientifiques, « les problèmes continuent de défier les techniques analytiques et la simulation informatique par des matériels et des logiciels plus performants ».

### **Disque épars et nuage d'Oort**

Les corps dispersés par Jupiter sur des orbites très elliptiques expliqueraient la formation du nuage d'Oort et les corps dispersés sur des orbites moins elliptiques par la migration de Neptune auraient selon ce modèle formé la ceinture de Kuiper actuelle en dispersant le disque.

## V Le grand bombardement tardif

Le **Grand bombardement tardif** (ou *Late Heavy Bombardment* : **LHB** en anglais) est une période théorique de l'histoire du système solaire s'étendant approximativement de 4,1 à 3,9 milliards d'années, durant laquelle se serait produite une notable augmentation des impacts météoriques ou cométaires sur les planètes telluriques. L'existence de cette période de grands bombardements météoriques n'est pas avérée, mais elle est déduite des datations des roches lunaires rapportées par les missions du programme Apollo qui ont atteint la Lune, qui indiquent que ses sols ont un âge d'environ 4 milliards d'années, soit plusieurs centaines de millions d'années de moins que le Système solaire lui-même. Ce résultat surprit la communauté scientifique qui pensait alors que la période de bombardement intense des planètes par les corps de plus petite taille avait eu lieu essentiellement immédiatement après la formation du Système solaire. L'existence d'un bombardement plus tardif conduisit à l'élaboration d'un scénario dans lequel un événement astronomique notable a pu causer une reprise de ce bombardement sur la Lune, et plus largement, l'ensemble du Système solaire interne, plusieurs centaines de millions d'années après sa formation. Le modèle de Nice qui présente un scénario convaincant de la formation du système solaire<sup>1</sup>, explique ce grand bombardement tardif par la migration des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), qui aurait produit diverses résonances, conduisant à déstabiliser les ceintures d'astéroïdes existantes à cette période.

### Données suggérant son existence

Les sites d'atterrissage des trois dernières missions Apollo à s'être posées sur la Lune, Apollo 15, Apollo 16 et Apollo 17, furent choisis à proximité de grands bassins d'impacts : respectivement la Mer des Pluies (*Mare Imbrium*), la Mer des Nectars (*Mare Nectaris*) et la Mer de la Sérénité (*Mare Serenitatis*). La datation des échantillons de roches lunaires rapportés sur Terre révéla que leur âge s'étalait sur une fourchette relativement étroite, aux alentours de 3,8 à 4,1 milliards d'années. L'hypothèse, suggérée par ces observations, d'une abondance d'impacts à cette époque ne fut pas acceptée tout de suite, mais peu à peu confortée par la datation des météorites trouvées sur Terre et ayant pour origine la Lune, après en avoir été expulsées suite à un impact important. Les météorites lunaires offrent en effet l'opportunité de sonder l'ensemble de la surface lunaire, et pas seulement les quelques sites d'atterrissage des missions Apollo. Leur analyse récente indique qu'aucune d'entre elles n'est plus vieille que 3,92 milliards d'années, avec des âges parfois plus récents, mais concernant un nombre décroissant de météorites.

Sur Terre, si les traces de ces impacts très anciens sont quasi-inexistantes du fait de l'érosion, la datation des roches terrestres ne dépassait jamais les 4 milliards d'ancienneté. À une époque, ce résultat fut considéré comme une preuve que la Terre était longtemps restée liquide, et ne s'était solidifiée en surface qu'à cette époque. Les modèles actuels indiquent que le temps de solidification fut bien plus bref; résultat qu'un calcul précis des flux du rayonnement émis par une surface terrestre à haute température, et des sources potentielles nécessaires pour assurer cet approvisionnement énergétique, aurait dû laisser deviner. D'autant plus, qu'on trouve un âge de 4,404 milliards d'années pour des zircons dans le craton d'Yilgarn, en Australie occidentale, formés en conditions aquatiques. La théorie du grand bombardement tardif permet d'expliquer la relative jeunesse de la croûte terrestre, dans les conditions d'un taux de refroidissement initial bien plus court, lors de l'Hadéen. Le bassin Caloris sur Mercure; ainsi que le bassin d'Hellas sur Mars, qui sont les plus grands bassins d'impacts de leur planète respective, dateraient aussi de cette époque.

### Caractéristiques

Le grand bombardement tardif tel que théorisé, semble affecter de manière globale les planètes telluriques : la Lune, la Terre, Mars, Vénus, Mercure ainsi que (4) Vesta. Sa durée estimée est de 50 à 150 millions d'années, centrées sur 3,9 milliards d'années. Le taux de bombardement est estimé à 20 000 fois celui actuellement observé sur Terre, ce qui correspond par exemple à un impact d'un objet de plus de 1 km tous les 20 ans.

### Cause(s)

Un bombardement cataclysmique, tardif par rapport à la formation du système solaire, n'est envisageable que s'il existe un réservoir de petits corps restés stables pendant 600 millions d'années, avant d'être

déstabilisés par un élément déclencheur. L'élément déclencheur pourrait être une modification dans la structure orbitale des planètes géantes. L'actuelle ceinture d'astéroïdes est vraisemblablement trop peu massive pour expliquer le bombardement observé. Un réservoir de petits objets, considérablement plus important, semble nécessaire. Un tel réservoir aurait pu exister après la formation des planètes du système solaire, laissant dans des régions plus externes (au-delà des orbites d'Uranus et Neptune) une masse importante (plus de 30 masses terrestres) d'objets. Le scénario le plus abouti pour expliquer ce bombardement a été proposé en 2005. Ce scénario propose comme élément déclencheur le passage par une résonance orbitale 2:1 entre Jupiter et Saturne, c'est-à-dire que Saturne aurait vu sa période de révolution autour du Soleil passer à exactement deux fois celle de Jupiter. Ce phénomène serait à l'origine d'une déstabilisation massive des corps de petite masse du système solaire externe, dont certains auraient alors été dotés d'orbites à forte excentricité, leur permettant d'atteindre les régions internes du système solaire où ils auraient pu entrer en collision avec les planètes telluriques. Cette proportion d'objets demeure faible : seulement 0,1 %, mais est suffisante étant donnée la masse initiale de planétésimaux disponibles. Dans ce scénario, Jupiter et Saturne sont au départ relativement proches de leur configuration actuelle, Saturne étant plus près du Soleil qu'actuellement et Jupiter plus loin, et Saturne restant plus éloigné du Soleil que Jupiter. À ce moment-là, le rapport des périodes de révolution des deux planètes est légèrement inférieur à 2. Uranus et Neptune sont également plus près du Soleil qu'aujourd'hui, Neptune en étant même plus proche qu'Uranus (distance de 12 et 14 unités astronomiques respectivement). La phase initiale de formation des planètes géantes a nettoyé le système solaire interne de tous les débris (planétésimaux) qui s'y trouvaient initialement. Il ne subsiste qu'un disque assez massif (entre 30 et 50 masses terrestres) au-delà des orbites d'Uranus et Neptune.

### Déroulement du scénario

Tant que Jupiter et Saturne ne sont pas en résonance orbitale, la configuration est dans un état relativement stationnaire. Au moment du passage en résonance 2:1 de Saturne, celle-ci acquiert une excentricité orbitale importante, lui permettant d'atteindre lors de l'aphélie de son orbite des régions éloignées du Système solaire. Elle devient alors susceptible d'interagir avec Uranus et Neptune, qui se trouvent fortement perturbés. En particulier Neptune connaît une très brusque variation du rayon de son orbite (variation expliquée par le modèle de Nice), celui-ci faisant plus que doubler, devenant plus grand que celui d'Uranus, qui augmente également. Cette augmentation du rayon de l'orbite de Neptune perturbe très fortement le disque externe de planétésimaux, dont une partie est expulsée du système solaire, une seconde partie migre vers des régions plus externes, donnant naissance à la ceinture de Kuiper, et une dernière petite partie migre vers des régions plus internes<sup>7</sup>. Cette dernière va pour partie entrer en collision avec les planètes telluriques, causant le grand bombardement tardif. Les planétésimaux expulsés forment de loin la population la plus importante : plus de 99 % de la masse totale.

**Précisions sur les planétésimaux :** Un corps céleste constitué dans un disque protoplanétaire ou un disque de débris est appelé **planétésimal**. Il s'agit d'un concept introduit par l'une des principales théories actuellement acceptées en matière de formation des planètes, appelée *hypothèse des planétésimaux* de Victor Safronov, qui repose sur la coalescence de grains de poussière en corps compacts d'au plus quelques dizaines de kilomètres de long susceptibles de s'attirer gravitationnellement pour constituer des protoplanètes de la taille d'une planète naine. Le terme *planétésimal* est directement emprunté à l'anglais *planetesimal* où il est un calque sur le vocable *infinitesimal* pour signifier qu'il s'agit des plus petites fractions d'une planète, en quelque sorte les briques élémentaires à partir desquelles les planètes se seraient formées. La définition suivante a été formulée par les experts du sujet lors d'une conférence en 2006 : « Un planétésimal est un corps solide formé lors de l'agrégation des planètes dont la cohésion interne est dominée par sa propre gravité et dont la dynamique orbitale demeure suffisamment indépendante des effets de frottement sur le gaz de la nébuleuse circumstellaire. Ceci correspond aux objets de dimension supérieure à environ un kilomètre ». Cette définition n'est cependant pas admise par l'UAI, et d'autres sources peuvent proposer des définitions différentes. De surcroît, la distinction n'est pas tranchée entre *planétésimal* et *protoplanète*, et les deux termes sont souvent utilisés l'un pour l'autre. D'une manière générale, les corps de taille inférieure à quelques kilomètres seraient trop peu massifs pour s'agglomérer autrement qu'à la faveur des turbulences dans le disque protoplanétaire. Les planétésimaux se formeraient néanmoins dans le plan central de ce disque, là où la densité de poussières est la plus

élevée, à la faveur d'instabilités gravitationnelles localisées susceptibles de déclencher la coalescence des grains de poussière qui s'y trouvent.

De nombreux planétésimaux finissent par voler en éclats à la faveur de collisions entre eux, comme cela s'est peut-être produit par exemple pour les astéroïdes (4) Vesta et (90) Antiope. Un petit nombre d'entre eux subsistent néanmoins et peuvent croître par accréation gravitationnelle jusqu'à atteindre la taille de planètes naines, voire de planètes. On considère généralement qu'après l'hypothétique grand bombardement tardif, c'est-à-dire passé 3,8 milliards d'années avant le présent, la plupart des planétésimaux de la nébuleuse solaire ont été ou bien éjectés du Système solaire, ou bien relégués sur des orbites lointaines — de l'ordre de 0,25 pc et au-delà — dans le nuage d'Oort, ou bien détruits lors de collisions à la suite des perturbations gravitationnelles induites par les planètes géantes, en particulier par Jupiter et Neptune. Une infime minorité d'entre eux pourrait se retrouver aujourd'hui parmi les petits satellites naturels irréguliers aux orbites atypiques tels que Phobos et Deimos autour de Mars, ou encore les satellites aux orbites très inclinées des planètes géantes tels que les groupes de Carmé, d'Ananké ou de Pasiphaé autour de Jupiter, ou les groupes dits *inuit*, *nordique* et *celte* autour de Saturne par exemple. Ils pourraient également faire partie des astéroïdes troyens, des comètes, des objets de la ceinture de Kuiper, des objets épars, etc.

Les planétésimaux actuellement subsistants sont considérés par les astronomes comme des témoins privilégiés de la formation du Système solaire, altérés seulement en surface par les rayons cosmiques et conservant en leur cœur des matériaux directement issus de la nébuleuse solaire.

### **Éléments cohérents avec cette théorie**

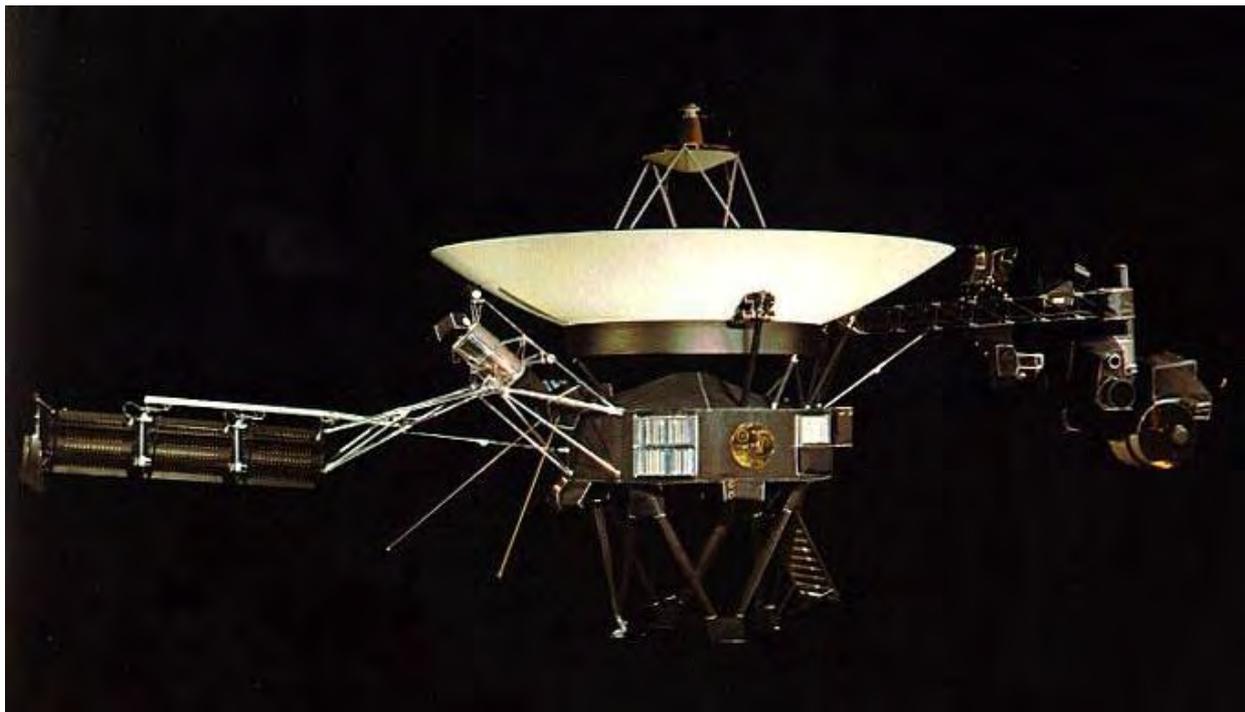
Outre sa capacité à expliquer une formation des croûtes terrestre et lunaire 600 millions d'années plus récentes que la formation du système solaire, le scénario du grand bombardement tardif explique un certain nombre d'autres caractéristiques du système solaire :

- Certains planétésimaux sont capturés sur l'orbite de Jupiter, aux points de Lagrange L4 et L5 (c'est-à-dire le long de l'orbite de Jupiter, mais 60° en avance ou en retard sur la planète), donnant naissance aux astéroïdes troyens. Le scénario rend compte de façon satisfaisante de l'abondance des statistiques orbitales de ces populations.
- Certains de ces astéroïdes troyens ont leur densité connue, car ils possèdent un compagnon en orbite (c'est le cas de (617) Patrocle). Les propriétés de tels systèmes ne correspondant pas à celles de la ceinture principale, mais à celles des objets de la ceinture de Kuiper, suggérant une origine commune.
- Les différentes caractéristiques de la ceinture d'astéroïdes semblent pouvoir être reproduites, comme les statistiques orbitales de la partie de la population principale en résonance orbitale 3:2 avec Jupiter.
- La masse de la ceinture de Kuiper, de seulement 0,1 masse terrestre, est considérablement plus faible que la masse du disque transneptunien initial, conformément au scénario qui prédit que plus de 99 % de la masse de ce dernier est expulsée. Incidemment, celui-ci indique que le nombre d'objets de masse comparable avec Pluton était à l'origine très élevé, atteignant peut-être 1 000 unités.

## VI Le programme Voyager - Voyager 2

### A) Les sondes Voyager

Le **programme Voyager** est un programme d'exploration robotique de l'agence spatiale américaine de la NASA dont l'objectif est d'étudier les planètes extérieures du Système solaire. Il comprend deux sondes spatiales identiques *Voyager 1* et *Voyager 2* lancées en 1977 qui ont survolé les planètes Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune ainsi que 48 de leurs satellites. Les données collectées par les 9 instruments portés par chaque sonde en font sans doute la mission d'exploration du Système solaire la plus fructueuse sur le plan scientifique de toute l'histoire spatiale. Les sondes Voyager sont les premières à effectuer un survol d'Uranus et Neptune et les secondes à étudier Jupiter et Saturne. Voyager 1 et 2 ont permis d'obtenir des informations détaillées sur l'atmosphère de Jupiter, Saturne et Uranus et ont amélioré notre compréhension de la composition de l'atmosphère de Jupiter. Les sondes Voyager ont révélé de nombreux détails sur les anneaux de Saturne, permis de découvrir les anneaux de Jupiter et ont fourni les premières images détaillées des anneaux d'Uranus et de Neptune. Les sondes ont découvert en tout 33 nouvelles lunes. Elles ont révélé l'activité volcanique de Io et la structure étrange d'Europe. La NASA met sur pied en 1972 le programme Voyager pour exploiter une conjonction des planètes extérieures exceptionnelle qui doit permettre aux sondes de survoler plusieurs des planètes pratiquement sans dépense en carburant, en utilisant l'assistance gravitationnelle. Malgré les contraintes budgétaires liées à un climat économique et politique peu favorable à l'espace, la NASA après avoir renoncé à un projet plus ambitieux, parvient à construire deux engins parfaitement adaptés à ce programme complexe comme vont le prouver la longévité et la qualité du matériel scientifique récolté par les deux sondes. Voyager 1 et 2 sont dans leur catégorie des engins lourds, 800 kg à comparer aux 235 kg des sondes Pioneer chargées de jouer le rôle d'éclaireur, car elles emportent plus de 100 kg d'instrumentation scientifique. Les sondes Voyager sont, en 2014, toujours en état de fonctionnement; plusieurs de leurs instruments continuent à transmettre des informations sur le milieu environnant. Voyager 1 a quitté l'héliosphère en décembre 2004 pour se diriger vers l'héliopause qui marque la limite de l'influence du vent solaire. En septembre 2013, la sonde devient officiellement le premier objet de fabrication humaine à sortir de notre Système solaire, mais elle en était déjà sortie depuis le mois d'août 2012. Se déplaçant à plus de 17 km/s par rapport au Soleil, Voyager 1, porteur d'un message symbolique de l'Humanité, devrait être la première sonde spatiale à passer à proximité d'une autre étoile dans 40 000 ans. Bien avant, vers 2020, la sonde aura cessé de fonctionner du fait de la défaillance des thermocouples des générateurs thermoélectriques à radioisotope qui lui fournissent son énergie.



*Voyager 2*

## 1) Genèse du projet

Au début de l'ère spatiale l'exploration du Système solaire se limite à l'envoi de sondes spatiales vers les planètes intérieures : Mars, Vénus et Mercure. En effet les planètes extérieures du Système solaire, de Jupiter à Pluton, sont des objectifs difficiles à atteindre pour un engin spatial : pour les atteindre celui-ci doit être lancé avec une vitesse qui nécessite un lanceur très puissant qui n'est pas disponible au début des années 1960, la durée du transit s'accompagne d'une dégradation progressive de certains organes et augmente la probabilité de panne, la diminution du rayonnement solaire réduit l'énergie disponible et la distance limite le débit des transmissions et nécessite un fonctionnement en quasi autonomie.

L'origine du programme Voyager remonte au milieu des années 1960. À l'époque, Michael Minovich du Jet Propulsion Laboratory (JPL), établissement de la NASA spécialisé dans l'exploration robotisée du Système solaire, attire l'attention sur le fait que la gravité très élevée de Jupiter peut être utilisée pour accélérer une sonde spatiale (mécanisme d'assistance gravitationnelle) vers les planètes les plus lointaines du Système solaire. Trois ans plus tard, Gary Flando également du JPL, constatant une conjonction unique de planètes qui doit se produire entre 1976 et 1978, met au point des trajectoires utilisant cette technique qui doivent permettre à une sonde spatiale de visiter plusieurs planètes extérieures. Une sonde lancée durant cette période pourra au choix survoler successivement soit Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, soit Jupiter, Uranus et Neptune, soit enfin Jupiter, Saturne et Pluton. La Nasa décide de concevoir une sonde spatiale pouvant profiter de cette conjonction. À la fin des années 1960, dans l'euphorie des succès du programme Apollo, la NASA imagine de lancer plusieurs sondes de grande taille en utilisant la fusée lunaire Saturn V. Dans cette optique l'agence spatiale définit les caractéristiques d'une nouvelle famille de sondes dédiées à l'exploration des planètes extérieures qui est baptisée « Thermoelectric Outer Planets Spacecraft » (TOPS); ces sondes doivent avoir recours à des générateurs thermoélectriques à radioisotope qui fournissent l'énergie en se substituant aux panneaux solaires utilisés habituellement. Le projet « Grand Tour Suite » renommé par la suite « Outer Planets Grand Tour Project » (OPGTP) est mis sur pied en 1969. Il prévoit le lancement de 4 à 5 sondes reposant sur le concept TOPS dont deux, lancées en 1976 et 1977, doivent survoler Jupiter, Saturne et Pluton tandis que deux autres, lancées en 1979, doivent survoler Jupiter, Uranus et Neptune. Le programme est évalué à l'époque à 700 millions \$.

Le début des années 1970 est une période de récession économique pour les États-Unis qui se traduit notamment par une forte réduction des budgets accordés à la NASA. Par ailleurs la compétition avec l'Union soviétique n'est plus aussi vive et ne permet pas de motiver les décideurs politiques comme l'opinion publique à investir dans le spatial. Le programme Grand Tour est annulé. À la place, il est décidé la fabrication de deux sondes dérivées de la famille Mariner utilisées pour l'exploration des planètes intérieures. Une enveloppe budgétaire de 250 millions \$ doit couvrir à la fois les coûts de fabrication et les coûts opérationnels : les sondes baptisées à l'époque Mariner 11 et 12, sont conçues pour une durée de vie de 4 ans, contre 10 ans pour les sondes TOPS projetées. Les ingénieurs impliqués dans la réalisation des sondes, contrevenant à ces spécifications, définissent un engin aux caractéristiques très proches des sondes TOPS. Le projet est lancé officiellement le 1<sup>er</sup> juillet 1972 et la fabrication des sondes spatiales démarre en mars 1975 avec l'achèvement de la phase de conception. Les sondes Pioneer 10 (lancée en 1972), et 11 (lancée en 1973), chargées de reconnaître le parcours, apportent des informations vitales sur la forme et l'intensité du rayonnement autour de la planète Jupiter qui sont prises en compte dans la conception des Voyager.

## 2) Caractéristiques générales des sondes Voyager

Les sondes Voyager 1 et 2 sont pratiquement identiques : Voyager 1 dispose d'une électronique mieux blindée car la sonde s'approche plus près de Jupiter tandis que Voyager 2 a des générateurs thermoélectriques à radioisotope plus puissants car elle doit visiter la planète la plus éloignée de la Terre. La sonde Voyager a une masse de 825,5 kg dont 104,8 kg d'instrumentation scientifique à comparer aux 235 kg de Pioneer 10. Les ordinateurs et le système de télécommunication se trouvent logés au centre de celle-ci dans un cylindre aplati de 178 cm de diamètre et de 47 cm de hauteur au cœur duquel se trouve le réservoir de carburant utilisé par les moteurs. Tous les autres composants de la sonde se rattachent à ce cylindre. Les instruments scientifiques qui doivent être orientés vers les planètes et lunes (ISS, IRIS et PPS) sont installés sur une plateforme située au bout d'une perche s'étendant jusqu'à environ 2,5 m du

centre de la sonde : la plateforme est orientable selon deux degrés de liberté avec une précision de  $0,1^\circ$ . Les magnétomètres sont installés sur une perche de 13 m de long. Une troisième perche porte à son extrémité les générateurs thermoélectriques à radioisotope (RTG) produisant l'énergie nécessaire à la mission. Les instruments radio PRA et PWS fonctionnent quant à eux grâce à deux antennes de 10 m, perpendiculaires l'une par rapport à l'autre. Tous les instruments scientifiques sont installés de manière à être au moins à 6,4 mètres du RTG pour limiter l'incidence du rayonnement émis par la décomposition radioactive du plutonium 238. Pour garantir le fonctionnement de la sonde durant les 5 ans de la mission, une durée exceptionnelle pour l'époque, chaque système vital est doublé : ordinateurs, senseur solaire et d'étoile, équipement radio, système de propulsion, etc. C'est ainsi que sur la sonde Voyager 1 c'est l'ordinateur principal de secours qui remplace le système d'origine tombé en panne.

### **3) Propulsion**

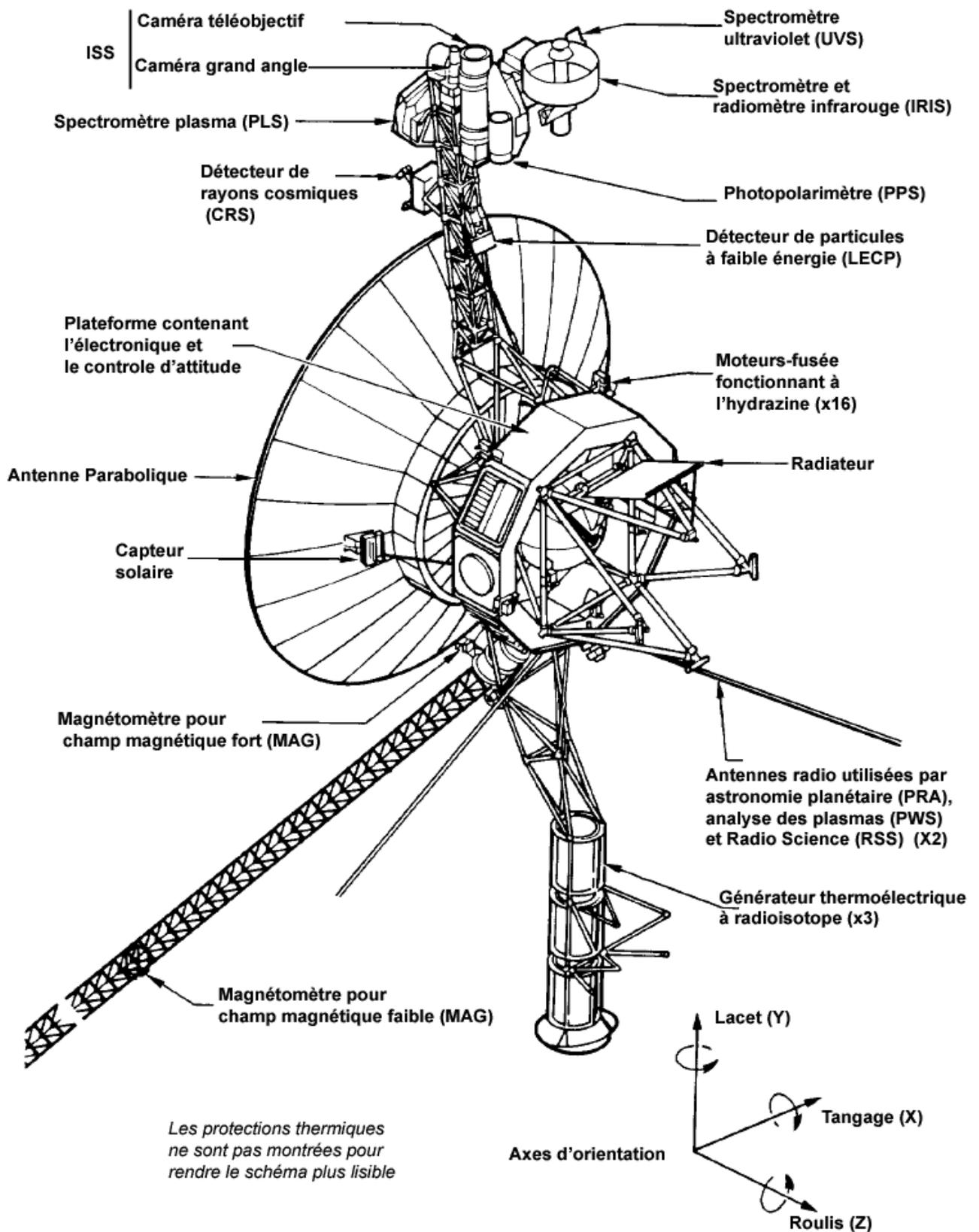
Le système de propulsion est constitué par 16 propulseurs utilisant de l'hydrazine qui en se décomposant sur un catalyseur fournit une poussée de 0,89 Newton par moteur. Pour la première fois sur une sonde spatiale, les mêmes moteurs sont utilisés pour contrôler l'orientation et corriger la trajectoire permettant de réduire la masse du système. Seuls huit moteurs sont nécessaires : 2 pour faire pivoter la sonde sur chaque axe et 2 pour accélérer ou freiner l'engin. Les huit autres moteurs sont là en secours. Les moteurs-fusée et le réservoir, qui contient au départ 90 kg d'hydrazine, sont situés dans le corps central de la sonde. Ce carburant qui permet de fournir un delta-v de 143 m/s s'est révélé largement suffisant, grâce à la précision de la trajectoire suivie (20 km d'erreur contre 200 km prévus au maximum) puisqu'il subsistait encore plus du tiers du carburant en l'an 2000 bien après l'achèvement des manœuvres de survol.

### **4) Contrôle de l'orientation**

La sonde est stabilisée sur ses 3 axes : le contrôle de l'orientation de la sonde et celle de la plateforme portant les instruments est assurée par le système de contrôle de l'attitude et de la plateforme (Attitude and Articulation Control Subsystem AACS). L'orientation de la sonde est contrôlée à l'aide de deux senseurs : un senseur d'étoile qui pointe vers Canopus (Voyager 1 utilise également l'étoile Rigel sur certaines portions de son trajet) et un senseur solaire installé sur l'antenne parabolique. Lorsque l'étoile visée s'écarte du champ de vision du senseur de plus de  $0,05^\circ$ , les moteurs-fusée effectuent automatiquement une correction. Pour de courtes périodes (quelques jours) le contrôle de l'orientation est confié à un ensemble de gyroscopes par exemple lorsque le Soleil est masqué ou durant les corrections de trajectoire.

### **5) Informatique embarquée**

La sonde embarque trois types d'ordinateurs (commande depuis la Terre, instructions/collecte des données et position/mouvement) en deux exemplaires chacun. La capacité mémoire des ordinateurs de chaque sonde s'élève à 512 kilobits, bien peu comparé aux ordinateurs modernes. Les données scientifiques qui ne peuvent pas être transmises directement vers la Terre sont stockées sur un enregistreur à bande magnétique à 8 pistes DTR (Digital Tape Recorder). Celui-ci peut enregistrer des informations à une vitesse de 115,2 kilobits par seconde, ce qui correspond au débit en sortie de la caméra, ou les restituer en lecture à 21,6 kb. Lorsqu'il est utilisé simultanément en lecture et en écriture, le débit est de 7,2 kb. Chaque piste permet d'enregistrer l'équivalent de 12 photos; la capacité de stockage totale est équivalente à 586 mégabits.



*Schéma des sondes Voyager*

## 6) Énergie



*Deux des trois RTG fournissant l'énergie*

Pour disposer de suffisamment d'énergie aux confins du Système solaire, les panneaux solaires photovoltaïques, peu efficaces à grande distance du Soleil, sont remplacés par trois générateurs thermoélectriques à radioisotope. L'énergie électrique est produite par la chaleur émise par la décroissance radioactive du plutonium 238 embarqué. Les 7 000 watts de chaleur fournissent 470 watts d'énergie électrique au début de la mission en 1977, distribuée sous la forme d'une tension électrique continue de 30 volts. La décroissance de la radioactivité du plutonium entraîne une diminution de l'énergie électrique produite de 7 watts par an. Le contrôle au sol maintient la consommation de manière à disposer d'une marge de 12 watts pour éviter des dysfonctionnements. Chacun des 3 générateurs a la forme d'un cylindre de 50,8 cm de hauteur pour 40,6 cm de diamètre.

## 7) Télécommunications

Les communications avec la Terre sont assurées par un émetteur-récepteur radio fonctionnant à la fois en bande S (13 cm) et en bande X (3,6 cm) relié à une antenne parabolique grand gain de 3,66 m de diamètre qui émet avec un angle d'ouverture de 2,3° en bande S et de 0,6° en bande X. Une antenne à faible gain est montée sur la structure portant la parabole et émet dans l'hémisphère centrée sur l'axe de la grande parabole. Le système de télécommunications est doublé pour faire face à une défaillance, Il permet de transmettre les données scientifiques recueillies avec un débit compris entre 4,8 et 115,2 kilobits par seconde en bande X et les mesures télémétriques avec un débit de 40 bits par seconde en bande S. Les instructions du contrôle de mission sur la Terre sont reçues avec un débit de 16 bits par seconde.

## 8) Instruments scientifiques

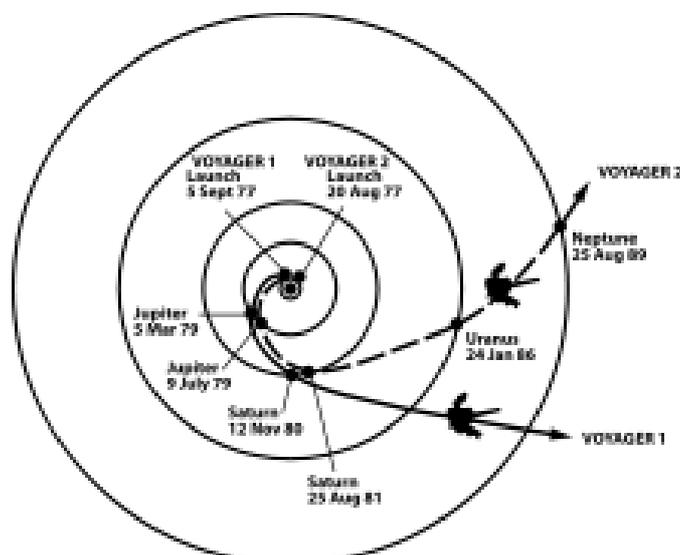
Avec une caméra couleur grand angle de résolution 0.64 MP (800\*800) et une deuxième avec un objectif standard, les instruments de mesures scientifiques se composent de :

- un capteur de rayons cosmiques (CRS), un détecteur de plasmas (PLS), ainsi qu'un capteur de particules faible énergie (LECP). Ces trois instruments sont des détecteurs de particules, destinés à l'étude des rayons cosmiques, du vent solaire et des magnétosphères de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- un magnétomètre (MAG). Cet instrument est destiné à mesurer les variations du champ magnétique solaire en fonction du temps et de la distance, ainsi qu'à étudier les champs magnétiques des planètes rencontrées et leurs interactions avec les satellites ou anneaux.

- un récepteur radio astronomique de planète (PRA) et un récepteur d'ondes émises par les plasmas (PWS). Le PRA et le PWS sont des récepteurs d'ondes radio, le premier pour des fréquences de 20,4 kHz à 1300 kHz et de 2,3 MHz à 40,5 MHz et le second pour des fréquences de 10 Hz à 56 kHz. Ils sont destinés à l'écoute des signaux radio émis par le Soleil, les planètes, les magnétosphères... Ils sont reliés à deux antennes placées perpendiculairement, afin de capter les rayonnements dans deux polarisations décalées de 90°.
- un photopolarimètre. Cet instrument mesure l'intensité et la polarisation de la lumière de huit longueurs d'onde entre 235 nm et 750 nm. Il permet de déterminer la composition des atmosphères de Jupiter et Saturne ainsi que de leurs anneaux, la texture et la composition probable des surfaces de leurs satellites... Durant les survols planétaires, il est utilisé pour la recherche des éclairs et des aurores. Celui de Voyager 1 est défectueux.
- un interféromètre, spectromètre, radiomètre infrarouge (IRIS). IRIS permet aux scientifiques de déterminer la température d'un corps, de repérer la présence de certaines substances dans une atmosphère ou sur une surface et de mesurer quelle proportion de la lumière solaire reçue par un corps est réfléchi par ce dernier.
- un spectromètre ultraviolet (UVS). Cet instrument sensible aux rayons ultraviolets permet de détecter la présence de certains atomes ou ions, ces derniers absorbant certaines fréquences de lumière.

Instrument	Masse kg	Consommation W	Débit bit/s
Cosmic Ray System (CRS)	7,50	5,4	
Imaging Science System (ISS)	38,20	21,5	115.200
Infrared Interferometer Spectrometer (IRIS)	19,57	12,0	1.120
Low-Energy Charged Particles (LECP)	7,50	3,8	
Photopolarimeter System (PPS)	2,55	0,7	0,6 – 1.023
Planetary Radio Astronomy (PRA)	7,70	5,5	266
Plasma Spectrometer (PLS)	9,90	8,1	32
Plasma Wave System (PWS)	1,40	1,3	32 – 115.200
Radio Science (RSS)	44,00		
Triaxial Fluxgate Magnetometer (MAG)	5,60	2,2	120
Ultraviolet Spectrometer (UVS)	4,50	3,5	

## 9) Lancement et transit jusqu'à Jupiter



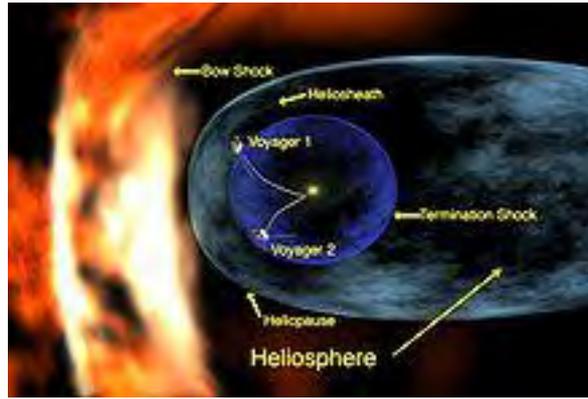
*Trajectoires de Voyager 1 et Voyager 2*

Voyager 2 fut lancée la première le 20 août 1977 et sa jumelle Voyager 1 le 5 septembre. Construites pour durer seulement cinq ans, les sondes sont en 2010 plus de trois fois et demie plus éloignées de la Terre que Pluton. Toujours en état de fonctionnement, elles foncent vers l'héliopause, limite de l'influence magnétique du Soleil, où débute « officiellement » l'espace interstellaire. Ces deux engins de 800 kilogrammes dotés d'une douzaine d'instruments et de caméras quittaient la Terre pour un grand tour du Système solaire. La mission avait été conçue pour profiter d'un alignement planétaire exceptionnel, survenant une fois tous les 175 ans, qui permettait, avec une dépense minimale de temps et de carburant, de rendre visite aux quatre planètes gazeuses du Système solaire : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. À l'origine, la NASA ne disposait pas d'un financement suffisant pour prolonger la recherche au-delà de Saturne, mais s'appuyant sur le principe que l'on ne sait jamais ce qui peut arriver, les ingénieurs américains avaient programmé pour Voyager 2 une trajectoire incluant le survol d'Uranus et de Neptune. Chaque survol rapproché d'une de ces planètes géantes, donnait un coup d'accélérateur suffisant aux sondes pour les propulser au voisinage de la planète suivante. C'est ce qu'on appelle la technique de « *fronde gravitationnelle* » ou d'« *assistance gravitationnelle* ». La première phase de la mission permit à Voyager 1 de rendre visite à Jupiter le 5 mars 1979 à 350 000 km de la planète et à Saturne le 12 novembre 1980 à une distance de 124 000 km, puis sortant du plan de l'écliptique en prenant de l'avance sur Voyager 2 elle poursuivit sa route pour aller à la rencontre de l'héliopause. Le 17 février 1998, Voyager 1 dépassa la sonde Pioneer 10 pour devenir l'objet le plus distant de la Terre jamais envoyé dans l'espace. Elle est actuellement à plus de 15 heures-lumière de la Terre (le 30 juillet 2010, il fallait 31 h 31 m-lumière aux signaux pour faire l'aller-retour entre Voyager 1 et la Terre). Quant à Voyager 2, elle approcha pour sa part Jupiter le 9 juillet 1979 à 71 400 km de la planète et Saturne le 25 août 1981 à une distance de 101 000 km, puis les ingénieurs de la NASA comprirent que Voyager 2 serait probablement capable de voler jusqu'à Uranus avec tous ses instruments en ordre de marche. Ce fut chose faite le 24 janvier 1986 avec un survol de la planète à 107 000 km, Voyager 2 réussissant à transmettre à la NASA des photos et données uniques de cette planète, de ses lunes et champs magnétiques. Après son passage à 48 000 km de Neptune le 25 août 1989, Voyager 2, au bout de ces 12 ans de voyage, prit à son tour une direction la faisant sortir du Système solaire.

## 10) Principales découvertes

Le programme Voyager est sans doute la mission d'exploration du Système solaire la plus fructueuse sur le plan scientifique de toute l'histoire spatiale. Les sondes Voyager ont été les premières à effectuer un survol de Uranus et Neptune et les secondes à étudier Jupiter et Saturne. Voyager 1 et 2 ont permis d'obtenir pour la première fois un profil détaillé de l'atmosphère de Jupiter, Saturne et Uranus et ont amélioré notre compréhension de la composition de l'atmosphère de Jupiter. Les sondes Voyager ont révélé de nombreux détails sur les anneaux de Saturne, permis de découvrir les anneaux de Jupiter et ont fourni les premières images détaillées des anneaux d'Uranus et de Neptune. Les sondes ont découvert en tout 33 nouvelles lunes orbitant autour des planètes extérieures. Des mesures plus fines des magnétosphères de Jupiter et Saturne ont été effectuées et les magnétosphères d'Uranus et Neptune ont été découvertes. La plus grande surprise du programme a été la découverte de volcans en activité à la surface de Io, bien que ce phénomène ait été prédit peu avant son observation : pour la première fois un tel phénomène était observé ailleurs que sur Terre. Des photos de panaches de 9 volcans montant jusqu'à 300 kilomètres au-dessus de la surface ont été prises par les deux sondes. L'énergie nécessaire à l'activité de ces volcans émane d'un échauffement interne du satellite, provoqué par les effets de marée qu'engendre l'orbite elliptique du satellite autour de Jupiter qui se perpétue du fait d'un phénomène de résonance avec les autres lunes. Les sondes ont également découvert sur Europe, un autre satellite de Jupiter, une surface peu marquée par les cratères d'impact qui trahit un remodelage récent. Un réseau de multiples coutures balafrant comme autant de lignes de fracture la surface est selon l'hypothèse élaborée à l'aide des données recueillies plus tard par la sonde Galileo correspond à une croûte de glace d'une vingtaine de kilomètres d'épaisseur recouvrant un océan souterrain. Enfin les sondes ont découvert la présence d'une atmosphère très épaisse et très dense autour de Titan, le principal satellite de Saturne et les geysers de Triton, la plus grosse lune de Neptune.

## Statut du programme en 2010



*Fin 2004 Voyager 1 a quitté l'héliosphère et se dirige désormais vers l'héliopause*

Aujourd'hui, Voyager 1 est plus éloigné de la Terre que tout autre engin jamais lancé par l'Homme dans l'espace, et continue de s'éloigner à la vitesse de 17 km/s. Les deux sondes continuent à envoyer des données qui sont reçues par le Réseau d'antennes de la NASA (DSN), dans le cadre d'un projet qui a été rebaptisé Mission interstellaire Voyager.

En quittant l'héliosphère pour atteindre l'héliopause, limite de l'influence magnétique du soleil, les sondes pourront mesurer les particules et ondes interstellaires non affectées par les vents solaires, une première dans l'histoire de l'exploration spatiale. Les sondes Voyager ont encore assez d'énergie pour fonctionner jusqu'en 2020, selon les estimations des ingénieurs de la NASA. À cette date, elles seront respectivement à 20 et 16,8 milliards de kilomètres du soleil. Voyager 1 devrait passer dans la périphérie de l'étoile « AC+79 3888 » dans la constellation de la Girafe dans 40 000 ans et Voyager 2 rendre visite à Sirius, la plus brillante des étoiles de notre ciel dans 296 000 ans. Le coût total de la mission Voyager incluant le lancement et le suivi des sondes s'établit aujourd'hui à 895 millions de dollars, dont une rallonge budgétaire de 30 millions accordée par la NASA en 1990 pour la poursuite de la mission. « *Aujourd'hui, malgré leur grand âge, les deux sondes sont en mode d'alerte* » explique Rosine Lallement, directeur de recherches au Service d'aéronomie du CNRS. « *On surveille ce qu'il en sort, car on guette un changement dans les données concernant le plasma, le gaz ionisé* ». Voyager 1, la plus rapide et la plus éloignée des deux sondes, se situe actuellement à plus de 15 milliards de kilomètres et approche de la zone où le vent solaire « bute » sur le nuage de gaz interstellaire que traverse le Soleil. Les chercheurs veulent donc déterminer l'emplacement de cette zone de choc.

Une fois franchie cette frontière, les Voyager feront partie, avec les sondes Pioneer, des tout premiers objets fabriqués par l'homme à naviguer hors de la bulle de protection du Soleil. Même si les signaux des Voyager mettent plusieurs heures à nous parvenir, les chercheurs espèrent bien obtenir des informations sur la densité du nuage interstellaire, sur les radiations qui le traversent et dont l'héliosphère nous protège. On ignore notamment la densité de toute une classe de particules relativement énergétiques, qui peuvent faire des dégâts sur les êtres humains - dans le cadre futuriste d'un voyage interstellaire - et sur le matériel électronique des sondes. Pour l'heure, les Voyager sont en relative bonne santé. Les astronomes comptent recevoir leurs mesures jusqu'en 2020. Aux alentours de 2025, 2030, le générateur thermoélectrique à radioisotope fonctionnant au plutonium 238, après la fourniture de près d'un demi-siècle d'énergie électrique, sera épuisé. Les deux sondes Voyager, ainsi que Pioneer 10, sont les premiers engins conçus par l'homme à se diriger vers l'extrême frontière du Système solaire qui est englobé dans l'héliosphère. Cette dernière est une sorte d'immense bulle balayée par les particules très énergétiques émises par le Soleil. Au-delà, les petits engins rencontreront l'héliopause, la zone qui constitue la limite entre l'héliosphère et le milieu interstellaire. En théorie, les astronomes placent l'héliopause à une distance de 100 unités astronomiques par rapport au Soleil (une UA = 150 millions de kilomètres). Mais ils ignorent encore sa forme exacte ainsi que les caractéristiques précises de ce milieu. Grâce à leur longévité, la mission des sondes Voyager a été étendue par les responsables de la NASA de façon à étudier plus précisément cette zone inconnue. Néanmoins, les difficultés budgétaires de la NASA pour la préparation de l'exploration de Mars pourraient amener l'agence spatiale à interrompre brutalement le programme au moment même où il peut rapporter des informations à caractère absolument unique.

## 11) Les sondes Voyager au-delà du Système solaire

La publication dans la revue *Science* du 23 septembre 2005 d'une série d'articles concordants officialise l'événement : depuis le 16 décembre 2004, Voyager 1 est la première création humaine à naviguer au-delà de l'une des principales frontières du Système solaire, l'héliosphère. Cette frontière, le choc terminal, se trouve à environ 14,1 milliards de kilomètres du Soleil, soit 94 unités astronomiques. Voyager 1 doit à une chance inouïe la possibilité de témoigner de ces phénomènes. Car, dans les années 1970, ses concepteurs ignoraient tout de la direction du Soleil par rapport à la Voie lactée. De ricochet en ricochet autour des planètes visitées, le hasard a voulu que la sonde quitte le Système solaire par l'avant, vers le nez que forme l'héliosphère en rencontrant la résistance du milieu interstellaire. Le 15 août 2006, Voyager 1 a dépassé la barrière symbolique des 100 UA de distance par rapport au Soleil, soit 15 milliards de kilomètres. De son côté, Voyager 2 a franchi le choc terminal le 30 août 2007. La sonde était alors située à environ 84 UA du Soleil. Elles poursuivent leur route à la frontière du Système solaire vers la zone que l'on appelle l'héliopause, limite de l'influence du vent solaire. Voyager 1 dépassa officiellement Pioneer 10 le 17 février 1998 pour devenir l'objet le plus distant de la Terre jamais envoyé dans l'espace. Les sondes s'éloignent dans l'espace à des vitesses vertigineuses : 17 kilomètres par seconde (61 200 km/h) pour Voyager 1; 15 km/s (54 000 km/h) pour Voyager 2. Cette vitesse leur permet de parcourir plus de 500 millions de kilomètres par an. Elles envoient encore des données qui sont collectées par le réseau de communication avec l'espace lointain (DSN) de la NASA, dans le cadre d'un nouveau programme : la Mission Interstellaire Voyager. Contrairement aux sondes du programme Pioneer, aucune accélération ou décélération anormale des sondes Voyager n'a été mise en évidence. La NASA confirme officiellement le 12 septembre 2013, après analyse des données recueillies par la sonde, que *Voyager 1*, à plus de 18 milliards de kilomètres du Soleil, a quitté la zone d'influence directe de ce dernier, l'héliosphère (zone de prédominance magnétique, la sonde étant toujours dans la zone de prédominance gravitationnelle de notre étoile). Elle se trouve désormais dans l'espace interstellaire.

### Deux bouteilles dans l'infini



*Le disque de Voyager 2*

Les deux sondes Voyager, comme les sondes Pioneer 10 (1972) et 11 (1973) qui les ont précédées, transportent, de manière symbolique, un message tentant de résumer quelques éléments clés sur l'humanité. Ces informations sont gravées sur un disque de cuivre qui est accompagné d'une cellule et d'une aiguille permettant de le lire. Les données, sélectionnées par un comité présidé par l'astrophysicien Carl Sagan, comprennent une série de 116 photos de différents lieux symboliques sur Terre, des schémas donnant la position de la Terre dans le Système solaire, une espèce de pierre de Rosette définissant le système numérique en usage ainsi que les grandeurs employées en physique ainsi que des extraits sonores comprenant 27 morceaux de musique ainsi que des enregistrements variés reflétant l'activité humaine. Les sondes approcheront pour la première fois une étoile dans 40 000 ans.

## B) Voyager 2

**Voyager 2** est la seconde des deux sondes spatiales du programme Voyager. Son lancement a eu lieu le 20 août 1977. Comme Voyager 1, elle a été conçue et réalisée au Jet Propulsion Laboratory près de Pasadena en Californie. Techniquement identique à Voyager 1, Voyager 2 a été lancée sur une trajectoire plus lente et plus courbée, ce qui a permis de la maintenir dans le plan de l'écliptique (où se trouvent les planètes du Système solaire). Ainsi, elle a pu être dirigée vers Uranus et Neptune en utilisant l'assistance gravitationnelle lors des survols de Saturne en 1981 et d'Uranus en 1986. En raison de la trajectoire choisie, Voyager 2 n'a pas pu se rapprocher autant que Voyager 1 de Titan, le plus grand satellite de Saturne. Cependant, c'est aujourd'hui le seul engin spatial à avoir survolé Uranus et Neptune. La configuration particulière des quatre géantes gazeuses qui a rendu leur survol possible ne se reproduit que tous les 176 ans. La mission Voyager 2 conjointement à celle de Voyager 1 a pu être menée à bien pour un coût nettement inférieur à celui des programmes plus avancés et plus spécialisés qui ont suivi, Galileo et Cassini-Huygens. Avec Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1 et New Horizons, Voyager 2 est l'une des cinq sondes spatiales à suivre une trajectoire quittant le Système solaire. En 2010, la sonde a parcouru depuis la Terre une distance de 21 milliards de km et continue à envoyer des données scientifiques sur son environnement 33 ans après son lancement. Au 1<sup>er</sup> février 2015, la sonde est à 107,1 UA (environ 16 milliards de km) du Soleil et à 107,8 UA (environ 16,1 milliards de km) de la Terre.

### 1) Caractéristiques de la sonde Voyager 2

Voyager 2 est une sonde spatiale relativement lourde qui pèse 815 kg au départ de la Terre. C'est une copie de Voyager 1 à quelques détails près. Sans les différents appendices elle tient dans un cube de 4 mètres de côté dont le composant le plus proéminent est l'antenne parabolique de 3,7 mètres de diamètre. Différents équipements font saillie dont le magnétomètre de 13 mètres de long, les deux antennes radio de 10 mètres, les générateurs radio-isotopiques installés sur un mat de 3,7 mètres et la plate-forme scientifique installée au bout d'un mat qui l'écarte de 3 mètres du corps central de la sonde. Voyager 2 emporte les mêmes instruments scientifiques que la sonde jumelle Voyager 1. Elle possède d'une part une panoplie d'instruments montés sur une plate-forme orientable pour l'observation des planètes comportant deux caméras vidicon (ISS) un spectromètre ultraviolet (UVS) et un interféromètre radiomètre infrarouge (IRIS), un récepteur d'ondes radio astronomique (PRA) et pour les plasmas (PWS), un photopolarimètre (PPS), un magnétomètre (MAG) et un détecteur de rayons cosmiques (CRS).

### 2) La mission de Voyager 2

Voyager 2 comme Voyager 1 doit collecter des données scientifiques sur les planètes extérieures (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) qui à l'époque du lancement du programme Voyager sont pratiquement inexplorées : seules Pioneer 10 et Pioneer 11, des sondes beaucoup plus légères, se sont jusqu'à présent approchées de Saturne et de Jupiter. La NASA a lancé ce programme au début des années 1970 pour profiter d'une conjonction exceptionnelle des planètes extérieures qui permet aux sondes de passer de planète en planète sans consommer de carburant et avec une trajectoire tendue limitant le temps de transit. L'objectif principal assigné aux deux sondes est de recueillir des données permettant de mieux connaître les deux planètes géantes, Saturne et Jupiter, leur magnétosphère et leurs satellites. Ceux-ci, qui sont pour certains de la taille d'une planète, sont très mal connus. L'étude de la lune Titan, dont on sait déjà à l'époque qu'elle possède une atmosphère évoluée, est jugée aussi importante que l'exploration de Saturne sa planète mère. Enfin l'étude des deux autres planètes géantes du Système solaire, Neptune et Uranus, sur laquelle on détient très peu d'informations du fait de l'éloignement, constitue un objectif majeur à partir du moment où Voyager 1 a achevé avec succès sa mission. Voyager 2, qui suit sa sonde jumelle, a d'abord pour objectif de poursuivre la mission de Voyager 1 au cas où celle-ci tomberait en panne avant d'avoir mené à bien l'exploration de Jupiter, Saturne et de leurs lunes en particulier de Titan. Voyager 1 ayant réalisé sans encombre sa mission, Voyager 2 peut exécuter un programme venant compléter l'exploration des planètes extérieures entamée par Voyager 1. Celui-ci comprend :

- Le survol de Jupiter et de Saturne avec une trajectoire différente de celle de sa sonde jumelle permettant d'observer de plus près certaines lunes ou de faire des observations des planètes géantes sous un angle différent

- L'exploration d'Uranus et Neptune les deux planètes géantes situées aux confins du Système solaire qui n'avaient jusque-là jamais été survolées par une sonde spatiale.

La sonde utilise l'assistance gravitationnelle de chaque planète survolée pour se diriger vers la planète suivante. Grâce à une conjonction exceptionnelle ne se reproduisant que tous les 176 ans, Voyager 2 peut ainsi survoler 4 planètes sans pratiquement utiliser ses moteurs-fusées aux capacités de toute façon très limitée : la sonde n'emporte en effet que 90 kg d'hydrazine pouvant fournir sur l'ensemble du périple un changement de vitesse de 143 m/s. Pluton est à l'époque la dernière planète extérieure du Système solaire. Voyager 2 n'a pu approcher Pluton car il aurait fallu que la sonde « traverse » Neptune pour que l'assistance gravitationnelle de celle-ci la mène à cette planète.

### 3) Déroulement de la mission - Lancement et transit vers Jupiter

La sonde spatiale Voyager 2 est lancée par une fusée Titan IIIE-Centaur le 20 août 1977. Elle entame alors un vol de transit qui doit l'amener à proximité de Jupiter 2 ans plus tard. Bien que lancée 3 semaines avant Voyager 1, elle n'effectue le survol de Jupiter que quatre mois après sa jumelle du fait d'une trajectoire différente. Dès le départ la sonde est victime de plusieurs incidents. Peu après le lancement l'ordinateur dédié au contrôle du vol diagnostique à tort un problème d'orientation et entame des manœuvres qui entraînent une coupure de la liaison radio avec la Terre de 2 heures. L'informatique embarquée finit par régler de manière autonome le problème qui avait pour origine l'introduction de mauvais paramètres dans le système de contrôle d'orientation. Quelques semaines plus tard, l'équipe des contrôleurs au sol, accaparée par de nouveaux projets, omet d'envoyer un message radio à la sonde. Celle-ci interprète l'absence de message comme un dysfonctionnement de son récepteur radio et bascule sur son récepteur de secours. Mais celui-ci présente une défaillance réelle et subtile qui interdit toute communication et l'ordinateur de la sonde tente à plusieurs reprises de recevoir les messages en basculant du récepteur primaire au récepteur de secours. Un fusible de l'alimentation électrique du récepteur primaire finit par sauter mettant définitivement celui-ci hors service. L'équipe au sol parvient par la suite à reprendre contact avec la sonde via l'émetteur de secours qui restera par la suite toujours capricieux mais continue de fonctionner en 2010.



*Lancement de Voyager 2 le 20 août 1977 par une fusée Titan IIIE/Centaur.*

### 4) Survol de Jupiter et de ses lunes

Trois mois avant de croiser Jupiter la sonde commence à effectuer des prises de vues; celles-ci continueront jusqu'en août et 13 350 photos de Jupiter et des lunes seront prises. La sonde Voyager 2 effectue, 18 semaines après Voyager 1, le survol de Jupiter le 9 juillet 1979 à 22 h 28 en passant à 721 670 km du centre de la planète. La trajectoire retenue doit permettre de compléter les données recueillies par Voyager 1 avec en particulier un passage à faible distance de la lune Europe (63 130 km), l'observation de l'atmosphère sud de la planète géante ainsi qu'une étude détaillée de la queue magnétique

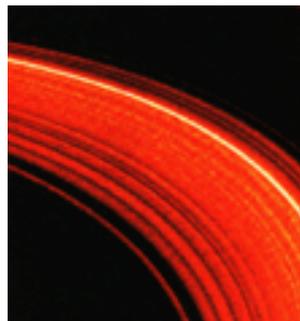
de Jupiter. La sonde passe également non loin de Ganymède (62 130 km) et de Callisto (214 930 km). La sonde confirme l'activité volcanique détectée sur Io par Voyager 1.



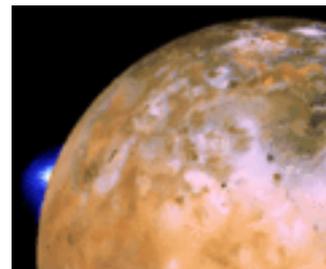
*Jupiter en vraies couleurs*



*Détail sur Jupiter*



*Les anneaux de Jupiter en fausses couleurs*



*Éruption sur Io*



*La lune Callisto*



*Le cratère Valhalla sur Callisto (au centre droit).*



*La lune Ganymède*



*Gros plan sur Europe*

### 5) Survol de Saturne et de ses lunes

Le vol de transit vers la planète géante gazeuse Saturne dure 22 mois. Durant le trajet les séquences d'opérations à exécuter, une fois la destination atteinte, sont développées par les équipes au sol et testées. Voyager 2 passe à 161 000 km du centre de la planète le 26 août 1981, 9 mois après Voyager 1. Les caméras de Voyager 2, plus sensibles que celles de Voyager 1, permettent de détecter de nombreuses configurations dans l'atmosphère de la planète. À l'aide de son instrumentation radio Voyager 2 parvient à sonder les couches externes de l'atmosphère de la géante gazeuse. Des températures passant de 82 kelvins au niveau de pression 70 millibars à 143 kelvins au niveau de pression 1 200 millibars sont mesurées. La sonde est dirigée de manière à pouvoir obtenir de meilleures vues des lunes que Voyager 1. Deux heures après être passé au plus près de Saturne, la plate-forme orientable supportant les instruments se bloque temporairement entraînant l'annulation des mesures par l'ordinateur principal et la perte d'une quantité importante de données. 24 heures plus tard, le problème de plate-forme est résolu mais la situation est définitivement rétablie 3 jours plus tard après envoi d'instructions par les équipes au sol. La trajectoire retenue permet à la sonde d'utiliser l'assistance gravitationnelle de Saturne pour se diriger vers sa destination suivante : Uranus.



*Saturne en vraies couleurs avec les lunes Tethys, Dione et Rhea*



*L'anneau S de Saturne en fausses couleurs*



*Hyperion*



*Janus*



*Une photo à basse résolution de Prométhée*



*Encelade*



*La lune Titan*



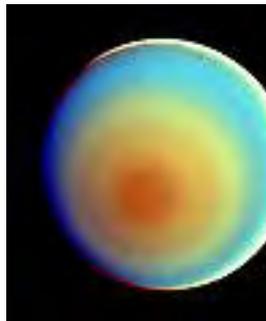
*La lune Japet*

### 6) **Survol d'Uranus et de ses lunes**

La planète géante gazeuse Uranus (50 000 km de diamètre) a un axe de rotation fortement incliné pratiquement situé dans son plan de révolution autour du Soleil. La recherche d'indices pouvant expliquer cette particularité unique dans le Système solaire est un des objectifs assignés à la sonde Voyager 2 qui est par ailleurs la première sonde à effectuer un survol de la planète. Voyager 2 met en évidence la présence d'un champ magnétique dont l'intensité est proche de celui de la Terre et qui est incliné de 60° par rapport à l'axe de rotation de la planète. Voyager 2 découvre 10 nouvelles lunes en plus des cinq déjà connues. Toutes ces lunes sont de petite taille, la plus grande ayant un diamètre de 150 km. Les 5 lunes déjà connues sont des agglomérats de roche et de glace comme les lunes de Saturne. Titania comporte d'énormes failles et canyons indiquant un passé géologique actif, sans doute d'origine tectonique. Ariel est la plus brillante des lunes d'Uranus et sa surface, marquée par des failles et des écoulements de glace, est la plus jeune du système. Umbriel et Obéron semblent avoir connu peu d'activité géologique car leur surface est ancienne et sombre.



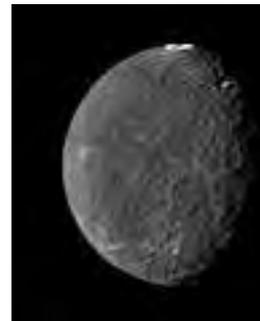
*Uranus en vraies couleurs*



*Uranus en fausses couleurs*



*Gros plan sur la surface de Miranda*



*La lune Umbriel*



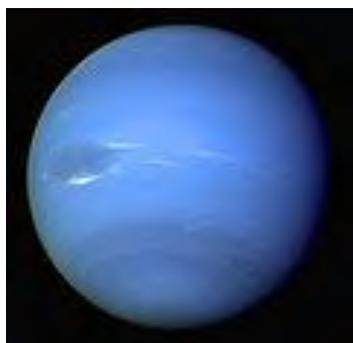
*Ariel*

Voyager 2 a permis d'effectuer des observations détaillées de la lune Miranda, la plus proche d'Uranus, qui ont révélé un monde particulièrement étrange parcouru par des canyons profonds de 20 km et des structures en gradin avec un mélange de terrains jeunes et anciens. Selon une des théories en cours, ces caractéristiques résulteraient de l'agrégation des fragments de la lune d'origine qui aurait subi l'impact d'un autre corps céleste. Les neuf anneaux d'Uranus, découverts dans les années 1970 depuis la Terre, sont analysés par la sonde et montrent des caractéristiques différentes de ceux de Saturne et Jupiter. Ils ne se sont pas formés en même temps qu'Uranus et leur apparition est relativement récente. Les composants qui les forment sont peut-être les restes d'une lune qui aurait été fragmentée soit par un impact avec un autre objet céleste se déplaçant à très grande vitesse soit par les forces gravitationnelles de la planète mère.

### 7) **Survol de Neptune et de ses lunes**

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 mis 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.



*La planète Neptune*



*La lune Triton*



*La « grande tache sombre » de Neptune*



*Les anneaux de Neptune*



*La lune Proteus*



*Une autre photo de Triton*

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<sup>2</sup>. 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 laissés par des geysers sont observées au pôle. Une atmosphère ténue (pression de 10 à 14 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 K, est la plus froide jamais détectée sur un corps céleste du Système solaire.

## 8) La mission interstellaire

Après avoir traversé le système planétaire de Neptune, Voyager 2 quitte l'écliptique avec un angle de -30°. La plate-forme orientable portant une partie des instruments est désactivée mais certains des instruments restants continuent à recueillir des données sur l'environnement. Au moment de l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter, Voyager tente d'effectuer des mesures avec le spectromètre ultraviolet mais sans résultat. Voyager 2 franchit les limites de l'héliosphère en août 2007 à 84 unités astronomiques du Soleil et devrait définitivement quitter le Système solaire magnétique, délimité par l'héliopause, vers 2017. La sonde se dirige vers les constellations du Sagittaire et du Paon. Dans environ 40 000 ans, Voyager 2 doit passer à une distance de 1,7 année-lumière de l'étoile Ross 248 située dans la constellation d'Andromède.

### Statut actuel

#### Situation de la sonde Voyager 2 au 31 janvier 2023

Voyager 2		
Distance du Soleil (Km)	19 815 859 780 km	132,460 882 09 ua
Distance de la Terre (Km)	19 925 958 404 km	133,196 846 16 ua
Vitesse relative par rapport au Soleil (Km/sec)	15,374 km/s	3,24 ua/an

Position actuelle (selon les prévisions établies jusqu'à 2015) :

- Temps de transit d'une communication (aller) : 17 h 54 min 51 s
- Carburant restant : 25,27 kg (environ 67 % utilisé)
- Puissance du RTG : 255,8 W (environ 55 % de la puissance initiale)
- Débit moyen des communications : 0,016 kbit/s (avec une antenne de 34 m du Deep Space Network)
- Débit maximal des communications : 1,4 kbit/s (avec une antenne de 70 m du DSN, situation en 1999)

## 9) Etat des instruments à bord

### Situation en novembre 2021

Instrument	Statut	Désactivation
CRS (Cosmic Ray System)	Opérationnel	
ISS (Imaging Science System)	Désactivé	Décembre 1989 – Economies d'énergie
IRIS (InfraRed Interferometer Spectrometer)	Désactivé	Février 2007 – Economies d'énergie
LECP (Low Energy Charged Particles instrument)	Opérationnel	
PPS (PhotoPolarimeter System)	Désactivé	Avril 1991 – Performances dégradées
PLS (Plasma Spectrometer)	Opérationnel	
PWS (Plasma Wave System)	Opérationnel	
PRA (Planetary Radio Astronomy investigation)	Désactivé	Février 2008 – Economies d'énergie
RSS (Radio Science System)	Désactivé	
MAG (Triaxial fluxgate MAGnetometer)	Opérationnel	
UVS (UltraViolet Spectrometer)	Désactivé	Novembre 1998 – Economies d'énergie

**Derniers faits majeurs :** Le 25 janvier 2020, la sonde a brusquement basculé dans un mode de sauvegarde d'urgence qui a nécessité l'intervention de la NASA. En effet, *Voyager 2* devait tourner sur elle-même à 360° afin de prendre diverses mesures ; mais la puissance nécessaire à cette manœuvre était plus importante que ce que pouvaient fournir les RTG. Cela a poussé *Voyager 2* à se mettre en mode urgence en coupant tous les appareils scientifiques pour garder uniquement l'énergie pour les communications avec la Terre.

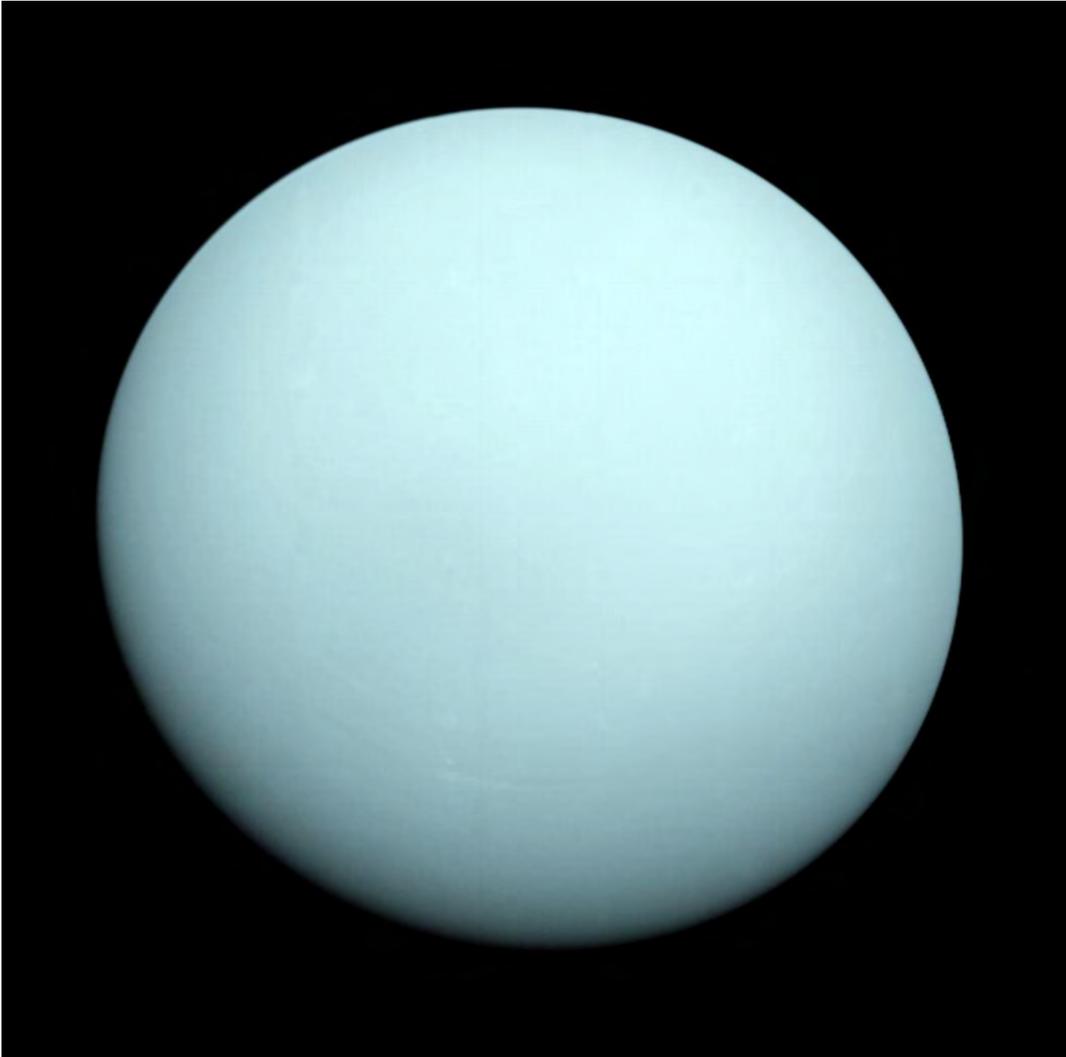
**Futur :** Le générateur électrique de *Voyager 2* produisant de moins en moins d'énergie, ne sont actuellement laissés en marche qu'un minimum d'instruments. Vers 2025, il est probable qu'on ne puisse plus alimenter qu'un seul instrument à la fois et transmettre de faibles messages radio, puis qu'on ne puisse alimenter plus aucun instrument. La sonde devrait alors avoir fonctionné 48 à 50 ans.

## VII Iconographie et compléments sur les satellites

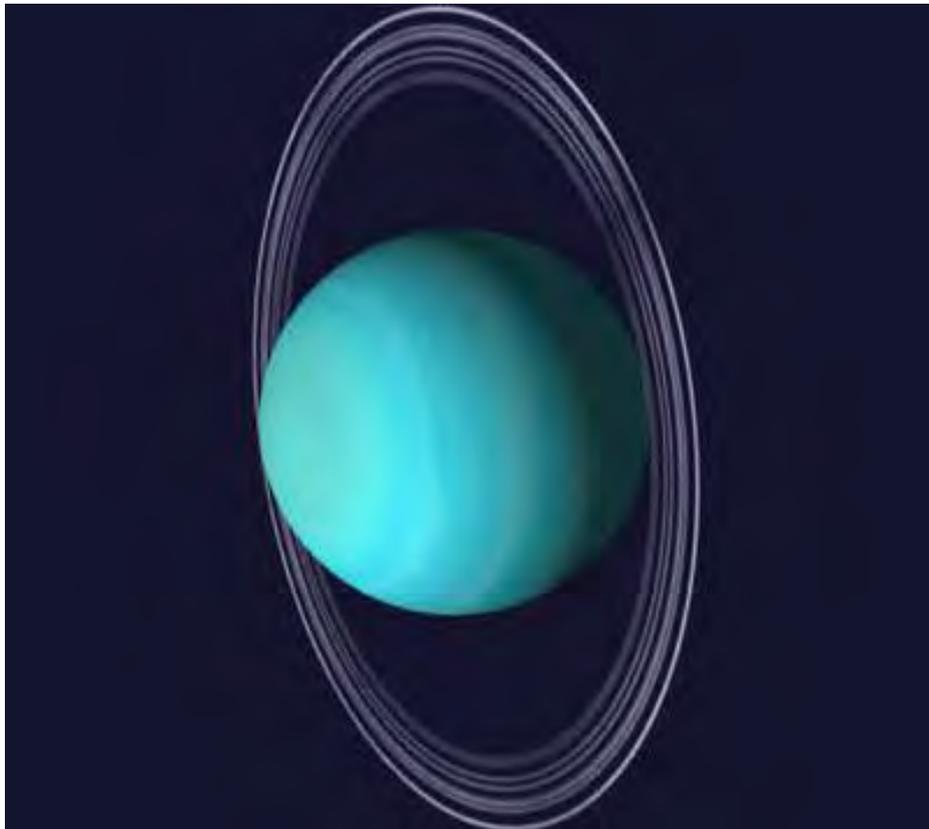
### A) Uranus



*Dernière photo d'Uranus par Voyager 2*

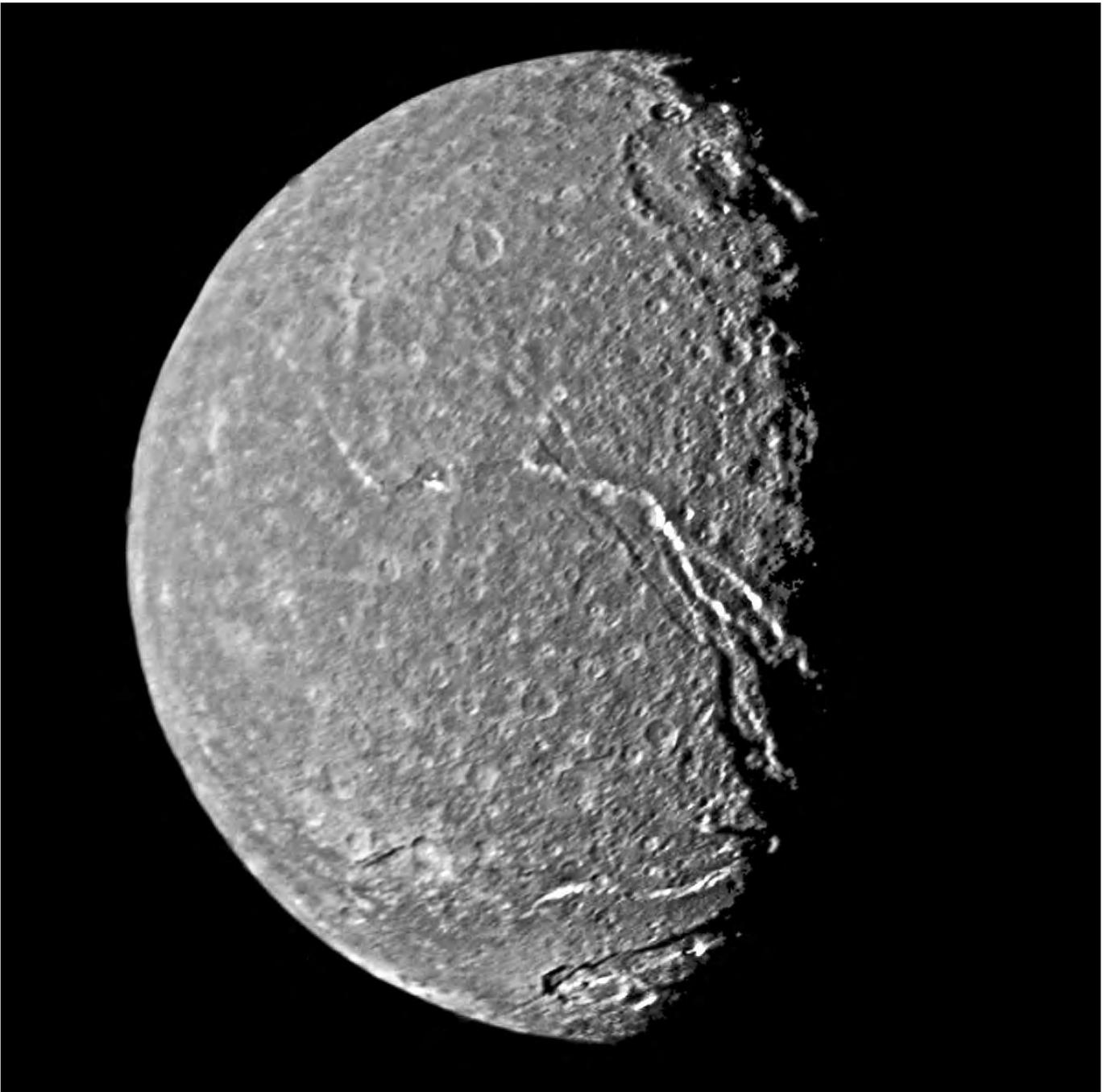


*Uranus par Voyager 2*



## B) Satellites d'Uranus

### 1) Titania



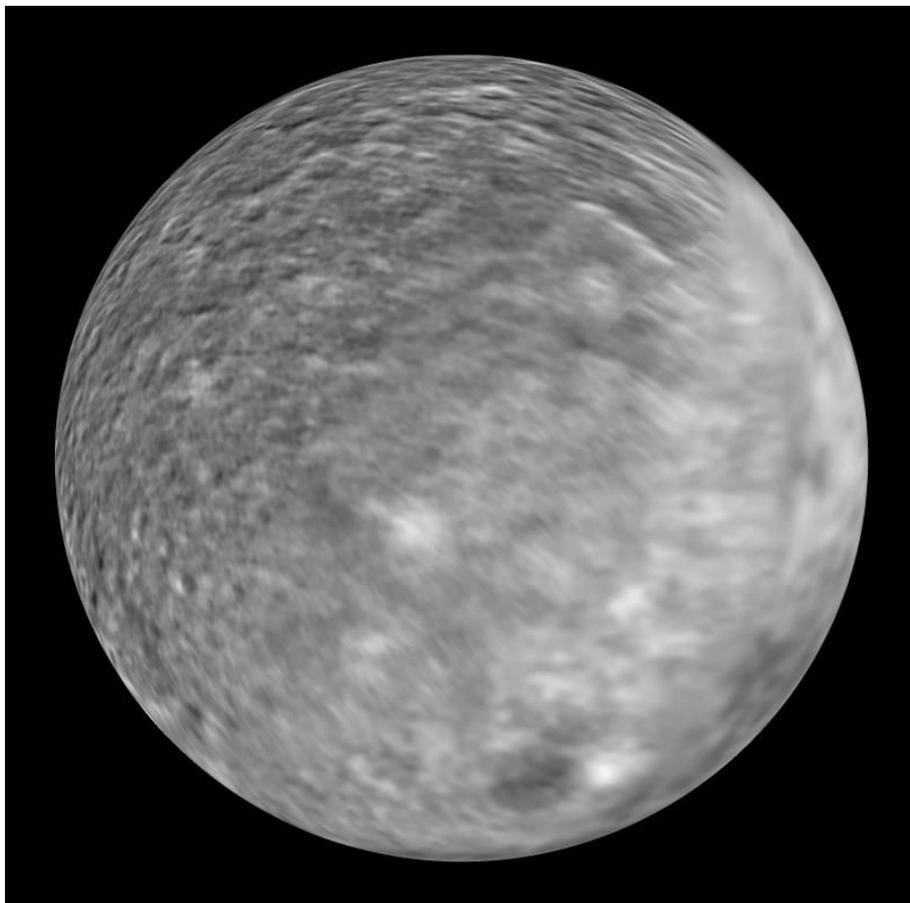
## 2) Obéron



### 3) Umbriel



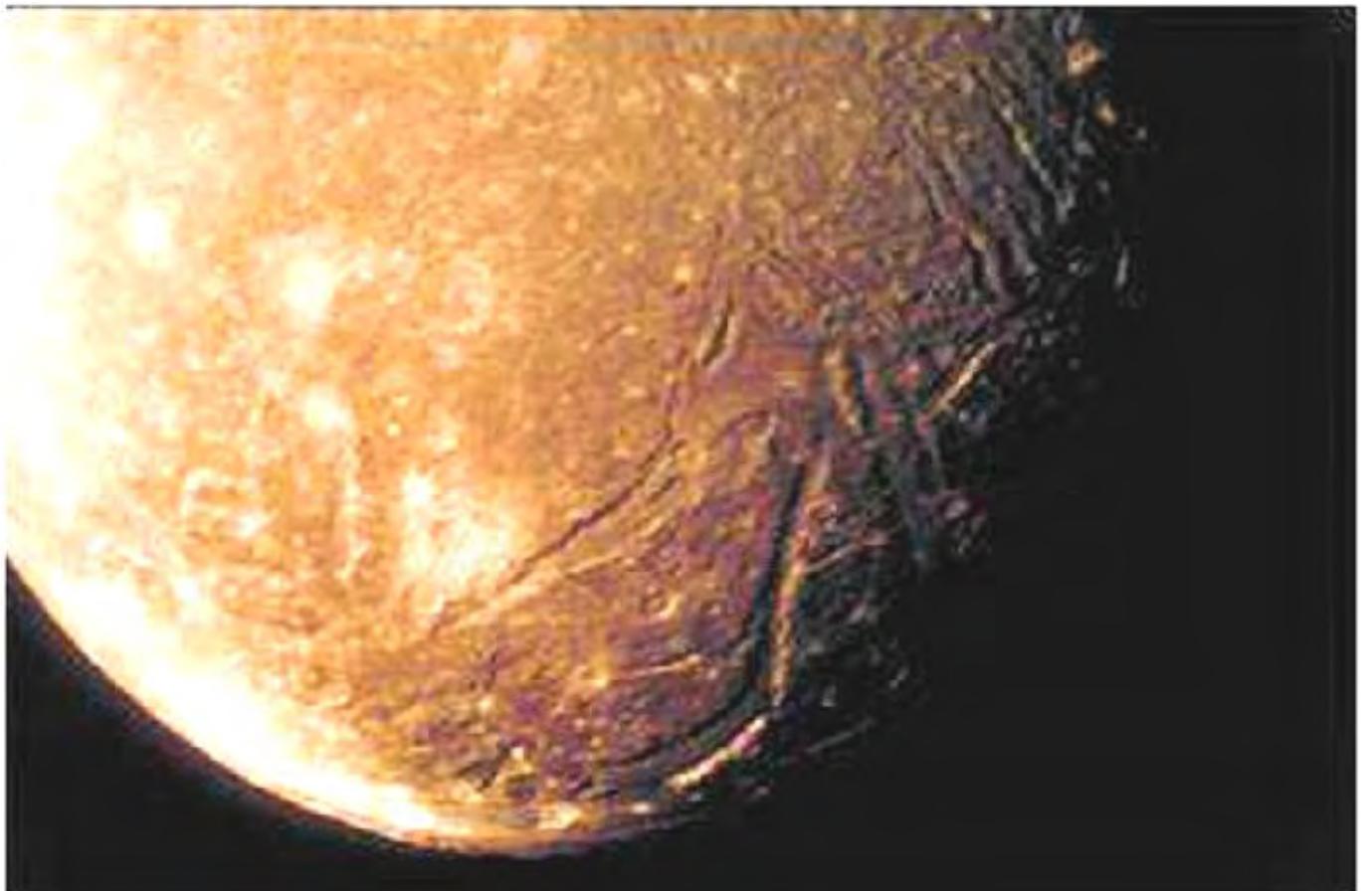
*Umbriel*



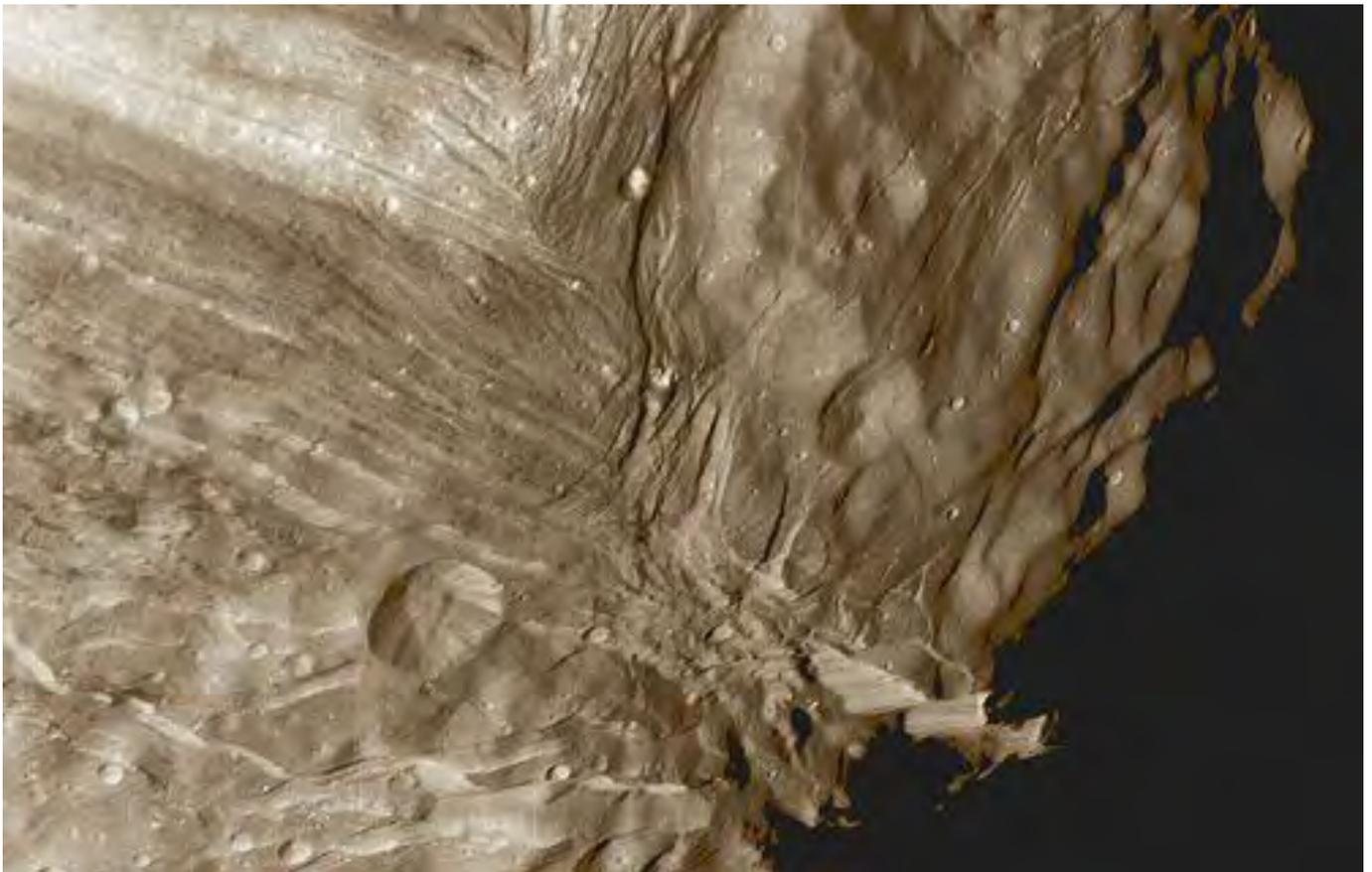
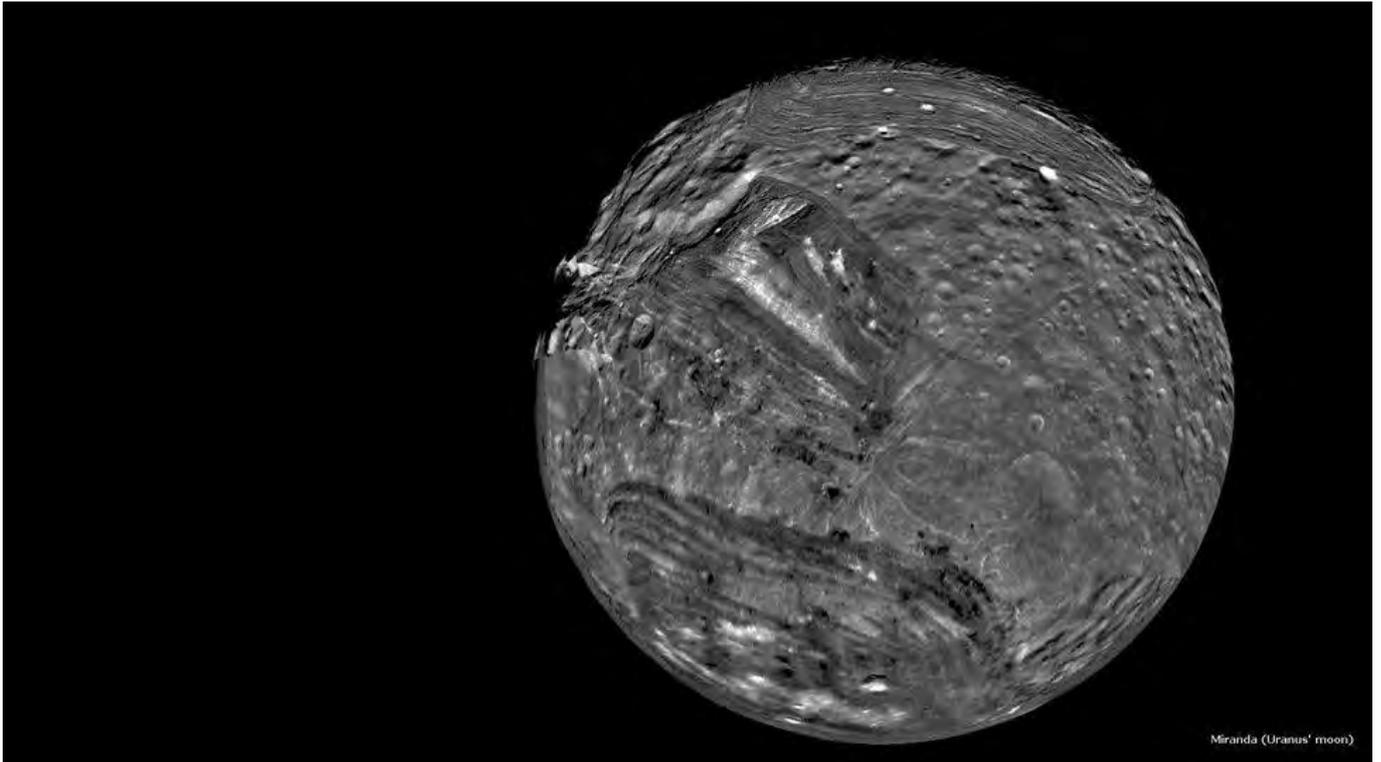
#### 4) Ariel



*Ariel*



## 5) Miranda



# Table des matières

<b>I Uranus, la planète</b> .....	<b>1</b>
A) Premières observations .....	1
B) Découverte .....	2
C) Confirmation de son existence .....	2
D) Nom de la nouvelle planète .....	3
E) Caractéristiques orbitales, physiques et atmosphériques d'Uranus .....	5
F) Survol de Voyager 2 .....	6
G) Caractéristiques physiques .....	8
1) Masse et diamètre .....	8
2) Champ magnétique .....	8
3) Orbite et rotation .....	10
4) Inclinaison de l'axe .....	10
5) Composition interne d'Uranus .....	10
H) Atmosphère d'Uranus .....	11
1) Structure de l'atmosphère .....	12
a) Troposphère .....	12
b) Stratosphère .....	13
c) Thermosphère et couronne .....	14
d) Ionosphère .....	14
2) Climat .....	14
a) Bandes, vents et nuages .....	15
b) Variations saisonnières .....	16
I) Magnétosphère .....	17
<b>II Les anneaux d'Uranus</b> .....	<b>18</b>
A) Découverte .....	19
B) Propriétés générales .....	21
1) Anneau $\epsilon$ .....	21
2) Anneau $\delta$ .....	22
3) Anneau $\gamma$ .....	24
4) Anneau $\eta$ .....	24
5) Anneaux $\alpha$ et $\beta$ .....	24
6) Anneaux 6, 5 et 4 .....	24
7) Anneau $\lambda$ .....	24
8) Anneau 1986U2R/ $\zeta$ .....	25
9) Autres bandes de poussière .....	26
10) Système d'anneaux externes .....	26
11) Dynamique et origine .....	26
12) Exploration .....	28
13) Propriétés .....	28
<b>III Les satellites d'Uranus</b> .....	<b>29</b>
A) Découverte .....	29
B) Dénomination .....	30
C) Caractéristiques et groupes .....	30
1) Lunes intérieures .....	31
2) Satellites majeurs .....	32
3) Satellites irréguliers .....	33
D) Détails sur les principaux satellites d'Uranus .....	34
1) Titania .....	34
2) Obéron .....	39
3) Umbriel .....	43
4) Ariel .....	47
5) Miranda .....	55

<b>IV Le modèle de Nice.....</b>	<b>65</b>
<b>V Le grand bombardement tardif .....</b>	<b>69</b>
<b>VI Le programme Voyager – Voyager 2 .....</b>	<b>72</b>
<b>A) Les sondes Voyager .....</b>	<b>72</b>
1) Genèse du projet .....	73
2) Caractéristiques générales des sondes Voyager.....	73
3) Propulsion.....	74
4) Contrôle de l'orientation .....	74
5) Informatique embarquée .....	74
6) Énergie .....	76
7) Télécommunications .....	76
8) Instruments scientifiques .....	76
9) Lancement et transit jusqu'à Jupiter.....	77
10) Principales découvertes .....	78
11) Les sondes Voyager au-delà du Système solaire .....	80
<b>B) Voyager 2.....</b>	<b>81</b>
1) Caractéristiques de la sonde Voyager 2.....	81
2) La mission de Voyager 2 .....	81
3) Déroulement de la mission - Lancement et transit vers Jupiter.....	82
4) Survol de Jupiter et de ses lunes.....	82
5) Survol de Saturne et de ses lunes.....	83
6) Survol d'Uranus et de ses lunes .....	84
7) Survol de Neptune et de ses lunes.....	84
8) La mission interstellaire.....	86
9) Etat des instruments à bord.....	86
<b>VII Iconographie et compléments sur les satellites .....</b>	<b>87</b>
<b>A) Uranus .....</b>	<b>87</b>
<b>B) Les satellites d'Uranus .....</b>	<b>89</b>
1) Titania.....	89
2) Obéron .....	90
3) Umbriel.....	91
4) Ariel .....	92
5) Miranda .....	93
<b>Table des matières .....</b>	<b>94-95</b>
<b>Annexe 1 : Liste des satellites d'Uranus avec leurs caractéristiques .....</b>	<b>A</b>

# Liste des satellites d'Uranus, du plus proche au plus éloigné de la planète

Les satellites d'Uranus sont classés ici par période orbitale croissante. Les satellites suffisamment massifs pour que leur surface ait formé un sphéroïde sont soulignés en violet clair et sont en gras. Les satellites irréguliers dont les orbites sont progrades sont en gris clair, ceux dont les orbites sont rétrogrades sont en gris foncé.

Ordre	Label	Nom	Diamètre (km)	Masses ( $10^{18}$ kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale	Inclinaison (°)	Excentricité	Année de découverte	Découvreur
1	VI	Cordélia	40,2 ± 6	0,044	49 751	0,355034	0,08479°	0,00026	1986	Terrile (Voyager 2)
2	VII	Ophélie	42,8 ± 8	0,053	53 764	0,376400	0,1036°	0,00992	1986	Terrile (Voyager 2)
3	VIII	Bianca	51,4 ± 4	0,092	59 165	0,434579	0,193°	0,00092	1986	Smith (Voyager 2)
4	IX	Cressida	79,6 ± 4	0,34	61 766	0,463570	0,006°	0,00036	1986	Synnott (Voyager 2)
5	X	Desdémone	64,0 ± 8	0,18	62 658	0,473650	0,11125°	0,00013	1986	Synnott (Voyager 2)
6	XI	Juliette	93,6 ± 8	0,56	64 360	0,493065	0,065°	0,00066	1986	Synnott (Voyager 2)
7	XII	Portia	135,2 ± 8	1,70	66 097	0,513196	0,059°	0,00005	1986	Synnott (Voyager 2)
8	XIII	Rosalinde	72 ± 12	0,25	69 927	0,558460	0,279°	0,00011	1986	Synnott (Voyager 2)
9	XXVII	Cupid	~18	0,0038	74 800	0,618	0,1°	0,0013	2003	Showalter et Lissauer
10	XIV	Belinda	90 ± 16	0,49	75 255	0,623527	0,031°	0,00007	1986	Synnott (Voyager 2)
11	XXV	Perdita	30 ± 6	0,018	76 420	0,638	0,0°	0,0012	1986	Karkoschaka (Voyager 2)
12	XV	Puck	162 ± 4	2,90	86 004	0,761833	0,3192°	0,00012	1985	Synnott (Voyager 2)
13	XXVI	Mab	~25	0,01	97 734	0,923	0,1335°	0,0025	2003	Showalter et Lissauer
14	V	Miranda	471,6 ± 1,4	66 ± 7	129 390	1,413479	4,232°	0,0013	1948	Kuiper
15	I	Ariel	1 157,8 ± 1,2	1 350 ± 120	191 020	2,520379	0,260°	0,0012	1851	Lassell
16	II	Umbriel	1 169,4 ± 5,6	1 170 ± 130	266 300	4,144177	0,205°	0 ?	1851	Lassell
17	III	Titania	1 577,8 ± 3,6	3 530 ± 90	435 910	8,705872	0,340°	0,0011	1787	Herschel
18	IV	Obéron	1 522,8 ± 5,2	3 010 ± 70	583 520	13,463239	0,058°	0,0014	1787	Herschel
19	XXII	Francisco	~22	0,0072	4 276 000	-266,56	147,459°	0,1459	2001	Holman <i>et al.</i>
20	XVI	Caliban	~72	0,25	7 231 000	-579,73	139,885°	0,1587	1997	Gladman <i>et al.</i>
21	XX	Stephano	~32	0,022	8 004 000	-677,37	141,873°	0,2292	1999	Gladman <i>et al.</i>
22	XXI	Trinculo	~18	0,0039	8 504 000	-749,24	166,252°	0,2200	2001	Holman <i>et al.</i>
23	XVII	Sycorax	~150	2,30	12 179 000	-1288,28	152,456°	0,5224	1997	Nicholson <i>et al.</i>
24	XXIII	Margaret	~20	0,0054	14 345 000	1687,01	51,455°	0,6608	2003	Sheppard et Jewitt
25	XVIII	Prospero	~50	0,085	16 256 000	-1978,29	146,017°	0,4448	1999	Holman <i>et al.</i>
26	XIX	Setebos	~48	0,075	17 418 000	-2225,21	145,883°	0,5914	1999	Kavelaars <i>et al.</i>
27	XXIV	Ferdinand	~20	0,0054	20 901 000	-2805,51	167,346°	0,3682	2001	Holman <i>et al.</i>