

PERSPECTIVES DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

RETOUR VERS URANUS ?

Cécile Ferrari, Professeure à l'Université Paris Cité

La sonde Voyager 2 a survolé la planète Uranus, ses satellites et ses anneaux en janvier 1986. Depuis cette époque les moyens d'observations terrestres se sont considérablement développés jusqu'à pouvoir enfin faire des images de ces principaux anneaux et d'en découvrir d'autres. La question des mondes-océan a émergé dans le même temps à la suite des missions Cassini et Galileo vers Saturne et Jupiter. La découverte d'un nombre important d'exoplanètes super-Terres ou mini-Neptunes a ravivé l'intérêt de comprendre la structure des géantes glacées et de préparer une deuxième mission spatiale d'envergure vers Uranus.

Six ans déjà que la mission Cassini autour de Saturne est échue. La sonde Juno a vu son mandat prolongé autour de Jupiter jusqu'en septembre 2025, ses orbites se resserrant vers la planète géante. À son 57^e périjove le 30 décembre dernier, elle a survolé le satellite Io et sa période de révolution autour de Jupiter se réduit à 33 jours désormais. La sonde New Horizons, située aujourd'hui à 59 UA de nous, a vu sa phase d'exploitation étendue aussi, jusqu'en 2029, pour sonder l'héliosphère, à la recherche d'une nouvelle cible dans la ceinture de Kuiper après le survol d'Arrokoth en 2019. Les sondes Voyager 1 & 2, elles, ont désormais à leur compteur plus de 46 ans de mission et malgré quelques pannes continuent de sonder le plasma et les flux de particules environnants entre 136 (V2) et 163 UA (V1). Voyager 1 nous offrait en février 1990, il y a 34 ans déjà, cette fameuse perspective de notre système planétaire en deçà de l'orbite de Neptune, survolée depuis peu alors par sa jumelle Voyager 2... Petits points bien pâles et pourtant si riche de surprises. Le calme est donc relatif de ce côté-ci de la ligne des glaces.

Durant ces décennies-là d'exploration spatiale, astronomes et ingénieurs ont continué de rivaliser d'habileté, depuis la mise en service des télescopes de 3,6 mètres de l'ESO (European Southern Observatory, La Serena, Chili) et celui de 4,2 m du Canada-France-Hawaii-Telescope CFHT (Mauna Kea, Hawaii, USA) en 1977 et 1979 respectivement, pour construire sur les sommets terrestres des télescopes toujours plus puissants, toujours plus en altitude pour réduire l'épaisseur de la couche atmosphérique et diminuer ainsi l'absorption des gaz, la vapeur d'eau en particulier, ainsi que la turbulence qui détériore la qualité des images du ciel.

Des télescopes spatiaux ont été envoyés en orbite dans le même temps pour observer les « couleurs » du ciel inatteignables sinon dans les domaines UV, X et γ ou dans l'infrarouge moyen (MIR) et lointain (FIR). Outre la recherche de clarté sur le plus large domaine de longueurs d'onde λ possible, la course à la résolution spatiale s'est

poursuivie. On sait que celle-ci s'exprime en résolution angulaire $\alpha \approx \lambda/D$ où D est le diamètre du télescope, et plutôt alors, en unité de seconde d'arc (1 arcsec = 1/3 600 de degré). Cette limite de diffraction peut être atteinte du sol si l'on arrive à corriger parfaitement les effets de la turbulence grâce à l'optique adaptative (AO) ou les défauts du miroir par l'optique active. À une longueur d'onde de référence de $\lambda = 5$ mm, si D = 3,6 m alors $\alpha = 0,3$ arcsec. En 2001, la mise en service des unités de télescopes (UT) de 8,2 m de diamètre du VLT (Very Large Telescope/ESO) ont permis d'atteindre une résolution de l'ordre de 0,125 arcsec alors que les deux jumeaux Keck I & II, de 10 m de diamètre, au sommet du Mauna Kea à Hawaii, mis en service en 1993 et 1996, peuvent observer le ciel entre 0,3 et 5 mm (visible et proche-infrarouge, alias VNIR) avec une résolution spatiale théorique donc de 0,06 à 0,1 arcsec.

Un des géants attendus pour 2028 côté européen est l'ELT (Extremely Large Telescope, ESO, sommet du Cerro Armazones à 3 060 m d'altitude, Chili) dont les miroirs et la coupole sont en cours de construction. À $\lambda = 5$ mm, l'instrument METIS qui observera le ciel entre 3 à 13 mm pourra donc théoriquement résoudre des détails de l'ordre de 0,016 à 0,067 arcsec, ou encore 16-67 mas (milli-arcsec). Par ailleurs un autre géant est né en 2011 pour explorer toujours mieux la fenêtre atmosphérique ouverte dans le domaine millimétrique et radio, le télescope interférométrique ALMA (ESO/Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array, plateau de Chajnantor, Chili). Cet ensemble de 64 antennes, de 12 m de diamètre chacune, observe donc le ciel au-delà de 0,8 mm à plus de 5 100 m d'altitude). Sur une base de référence de L = 10 km de long suivant laquelle ces antennes peuvent être réparties, la résolution obtenue à $\lambda = 1$ mm est donc de $\alpha \approx \lambda/L \approx 20$ mas, c'est-à-dire équivalent à un télescope de 39 m à des longueurs d'onde cent fois plus petites. Phénoménale donc. ALMA permet donc de compléter l'exploration spectrale des objets très froids aux températures de quelques dizaines de kelvins, à bonne résolution spatiale.

Que serait ce gâteau bien garni déjà sans la cerise, le dernier né des télescopes spatiaux, le James Webb Space Telescope (JWST/NASA/ESA). Lancé en décembre 2021 avec 14 ans de retard, ce télescope de 6,5 m de diamètre, placé sur l'orbite terrestre au point de Lagrange L2, va pouvoir scruter le ciel entre 0,6 et 28 μm avec spectromètres, caméras et spectro-imageurs de résolution spectrale et spatiales variées, abrités derrière un parasoleil qui maintiendra leur température à 37 kelvins. La limite de diffraction de ce télescope sera donc sur son domaine de longueur d'onde de 30 à 110 mas, dans un ciel libre d'atmosphère turbulente et opaque.

La batterie de moyens d'exploration du Système solaire depuis le sol terrestre a donc à minima décuplé, voire centuplé, son pouvoir de résolution spatiale depuis le départ en mission des sondes Voyager. Elle est en plus quasi équivalente des domaines du visible au domaine millimétrique désormais...et l'époque des arcsec semble révolue, tout un chacun exhibant ses performances en mas, i.e. milli-arcsec.

Si l'actualité de l'exploration du Système solaire extérieur a été largement dominée par les résultats des missions Galileo, Cassini et New Horizons entre 1995 et 2017, d'autres astronomes n'ont pas quitté des yeux et des télescopes les géantes glacées Uranus et Neptune, survolées en 1986 et 1989 par Voyager 2. Loin des feux de cette rampe-là, ils ont ainsi assuré un suivi et fait progresser leur connaissance grâce aux nouveaux télescopes terrestres. Juste avant le départ des sondes Voyager en 1977, les anneaux d'Uranus ont été découverts par Elliott, Dunham et Mink, à bord du Kuiper Airborne Observatory, un avion permettant d'observer au-dessus des océans, à l'endroit opportun à ce moment-là pour capter l'occultation d'une étoile par la planète. Au moins cinq anneaux sont alors découverts, ϵ , α et β , δ et γ , qui semblent ne faire que quelques dizaines de kilomètres de large (figure 1). L'anneau η est suspecté déjà dans le profil d'occultation entre les anneaux γ et β . La finesse de ces anneaux pose alors la question de la source de leur confinement radial, c'est-à-dire du mécanisme

dynamique qui les empêche de s'étaler sous l'effet des collisions entre les particules. Dès leur découverte, des cartes photométriques vont être élaborées avec le télescope du mont Palomar (5 m de diamètre, 1 700 m d'altitude, Californie, le plus gros télescope en service jusqu'en 1975, date de la première lumière du télescope soviétique Zelentchouk de 6 m de diamètre), dont la résolution spatiale est limitée par la turbulence atmosphérique (seeing) à 2 arcsec, ce télescope ancien n'étant pas équipé alors de système d'optique adaptative.

Plus d'une vingtaine d'occultations ont été observées ensuite avant

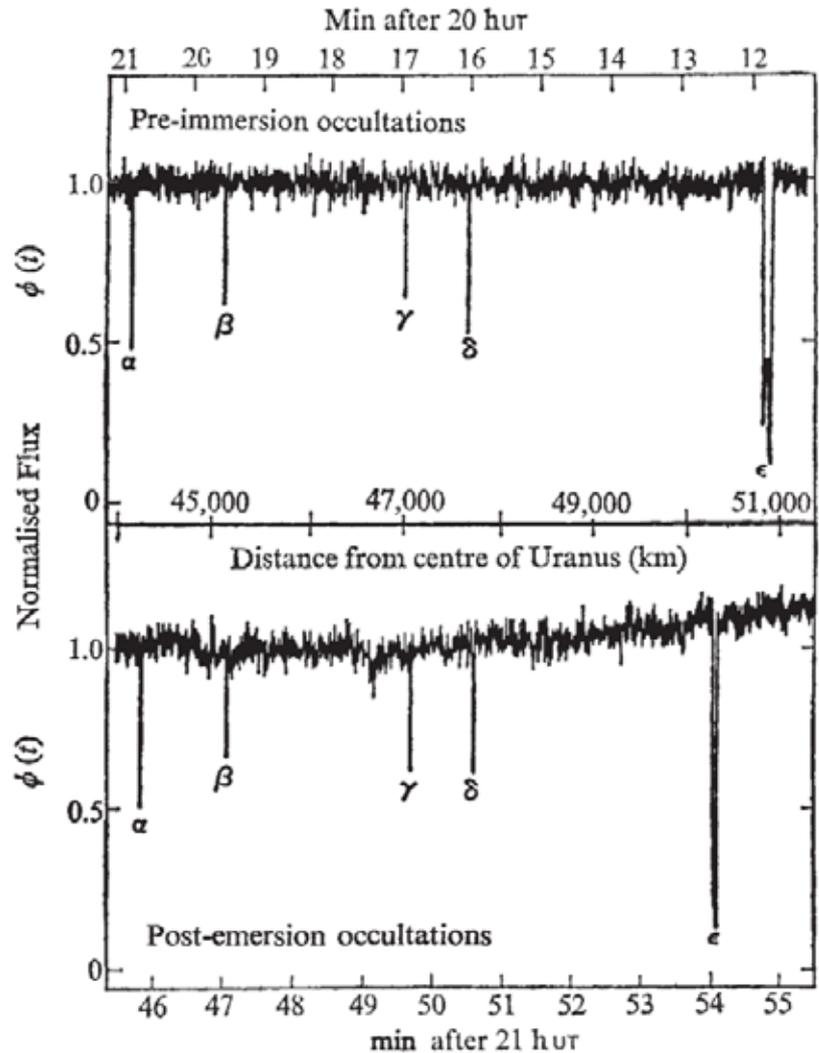


Fig.1. Luminosité de l'étoile observée à partir de l'observatoire aéroporté Kuiper en 1977 alors qu'Uranus s'approchait d'elle, montrant des baisses brutales lorsque cinq des anneaux étroits d'Uranus ont balayé l'étoile telle que vue de l'observatoire. Adapté d'Elliott et al. (1977).

l'arrivée de Voyager 2 à Uranus en janvier 1986 pour établir le compte à neuf anneaux (les précédents auxquels rajouter η , 4, 5 et 6). Les observations de la sonde Voyager 2 à plusieurs angles de phase (l'angle formé entre les directions cible-Soleil et cible-observateur) ont permis d'établir que la taille des particules dans ces anneaux s'échelonnait d'un centimètre à un mètre. À fort angle de phase, de multiples zones de poussières faites de petites particules diffusant la lumière « vers l'avant » (à l'opposé de la direction du Soleil) sont découvertes entre ces anneaux étroits (Figure 2). Aucune donnée du spectromètre IRIS-Voyager 2 observant les anneaux entre 1,4 et 170 μm , et qui aurait pu permettre de contraindre leur composition chimique, n'est exploitable.

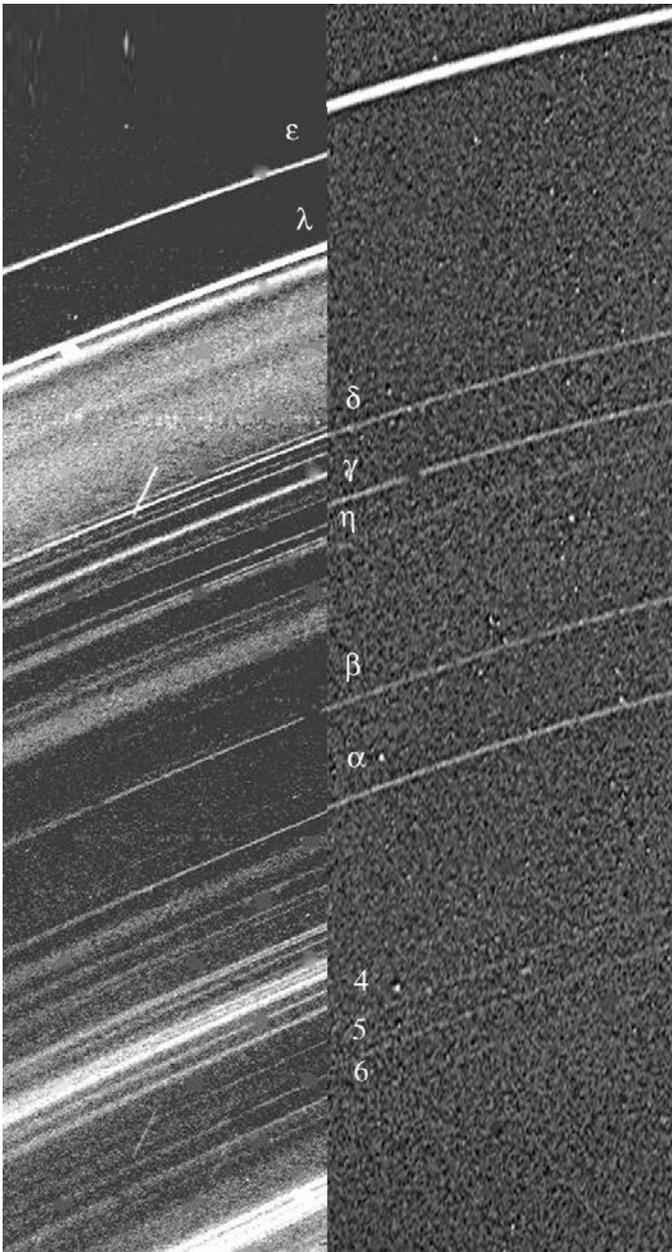


Fig.2. Image composite des principaux anneaux d'Uranus en lumière diffusée vers « l'avant » (à gauche) et en rétrodiffusion (à droite). L'image de gauche est la seule image des anneaux d'Uranus prise avec un angle de phase élevé par Voyager 2. Ces images montrent que les anneaux principaux denses sont entrelacés avec un réseau de structures de poussière. L'origine de cette structuration est inconnue. Crédit photo : NASA/JPL.

En 1995 sont réalisées les premières images dans les bandes spectrales nommées J, H et K (entre $\lambda = 1,2$ et $2,4$ μm) des anneaux avec le télescope de l'IRTF (diamètre de 3 m, optimisé pour l'observation infrarouge, Mauna Kea) avec une résolution angulaire de l'ordre de $0,7$ arcsec. À la même époque le télescope spatial Hubble (HST, orbite terrestre, $2,5$ m de diamètre) va en faire aussi des images dans le domaine visible avec une résolution de $0,1$ arcsec à $0,91$ μm où l'on distingue alors seulement les groupes d'anneaux ϵ , $\delta\eta\gamma$ et $\alpha\beta$. Avec un nouveau système d'AO monté sur le télescope Keck (Figure 3), la résolution obtenue à $\lambda = 2,2$ μm est équivalente à celle du HST dans le domaine visible et, comme attendu, 4 fois supérieure à celle du HST aux mêmes longueurs d'onde. On distingue en plus dans les images, le groupe 456 et un

disque intérieur ζ déjà observé avec les sondes Voyager mais en diffusion vers l'avant (à fort angle de phase).

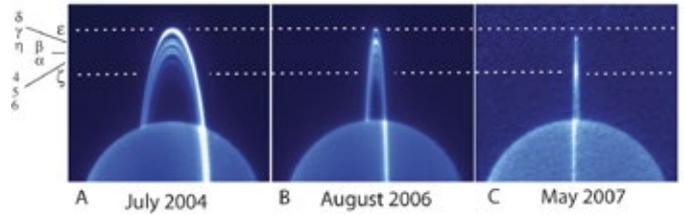


Fig.3. Images des anneaux d'Uranus prises par le télescope Keck II en 2004 et 2006 avant le passage de la Terre et du Soleil dans le plan des anneaux (deux images de gauche) et le 28 mai 2007, au moment où la Terre est du côté non éclairé des anneaux (à droite). Les pointillés indiquent la position des anneaux ϵ (ligne supérieure) et ζ (ligne inférieure), les autres anneaux étant indiqués. Imke de Pater (UC Berkeley), Heidi B. Hammel (SSI, Boulder) et l'Observatoire W. M. Keck.

Avec le HST en 2006, des astronomes vont pousser le temps d'exposition à 21 h, en 4 séances d'observation, dans le filtre visible à $0,55$ μm , pour tenter de détecter des objets très faibles, au-delà du système d'anneaux connus. Après un traitement d'images élaboré, deux nouveaux satellites, U XXVI Mab et U XXVII Cupid ainsi que deux nouveaux anneaux R1, co-orbital à Mab, et R2 situé entre Portia & Rosalind, vont être découverts. Les astronomes challengers du Keck vont tenter leur détection dans la bande K avec des temps de pose de 48 min à 1,5 h et vont voir R2 et pas R1, dont ils vont cependant donner une limite supérieure de brillance dans la bande K.

À l'instar de ce qui se passe pour Saturne tous les 15 ans et qui est mieux connu, la Terre et le Soleil passent dans le plan des anneaux d'Uranus tous les 42 ans environ. Le passage de 2007 a été observé par l'équipe du télescope Keck, en bande K, là où la planète est la moins brillante du fait de la forte absorption du méthane présent dans l'atmosphère. La Terre passant chronologiquement avant le Soleil de l'autre côté du plan des anneaux (du côté sombre...), le télescope observe la face non éclairée des anneaux, cette face donc vue pour la dernière fois en 1986 mais à angle phase fort. Ici, prisonniers de l'orbite terrestre, nous ne pouvons observer Uranus qu'avec le Soleil dans le dos, donc à faible angle de phase. On y voit à cet instant-là, toujours les grosses particules rétrodiffusantes, mais dans des anneaux fins optiquement qui laissent passer la lumière solaire. Les anneaux η et ζ se sont alors éclairés fortement (Figure 3). En comparant ces observations aux images de la sonde Voyager 2, il semble que la distribution spatiale des poussières dans les anneaux ait évolué en 21 ans donc, ce qui va pourtant à l'encontre de la stabilité observée dans la structure générale des anneaux de Saturne sur les 13 ans de la mission Cassini.

Les premiers spectres des anneaux d'Uranus dans les bandes J, H et K ne vont arriver qu'en 2013, grâce au Keck toujours. Leur faible réflectivité dans ce domaine

est bien confirmée à quelques pourcents (3 % environ) et le spectre apparaît plat, sans signature détectable de glace d'eau. Ce spectre « gris » est compatible avec des tailles de particules supérieures au cm. La dernière pépite est apportée en 2017-2018 par le télescope ALMA, qui propose des images splendides des anneaux dans le domaine millimétrique entre 1,3 et 3,1 mm de longueur d'onde avec des temps d'exposition de 20 à 40 min seulement. C'est ici l'émission thermique des anneaux que l'on mesure et si leur albédo est de 5 % alors la température déduite des flux dans les trois bandes est estimée à 77 K environ. Ces particules sont donc relativement « chaudes », ce qui s'explique si elles ont une faible inertie thermique et une rotation lente. La résolution spatiale y est de 200-300 mas et le profil radial de brillance permet de penser que l'on est sensible à l'émission thermique du groupe 456. Cette émission thermique a aussi été captée avec MIR par l'instrument VISIR/VLT à 19 mm avec une sensibilité et résolution spatiale moins bonnes. À l'examen des premières observations des anneaux d'Uranus par le télescope James Webb en février et décembre 2023 (Figure 4), gageons que d'ici quelques mois nous aurons des nouvelles intéressantes quant à leur composition chimique, 47 ans après leur découverte. Nul doute que cette mise en perspective nous permettra de mieux en apprécier la saveur.

L'exploration poussée des géantes glacées Uranus et Neptune par une mission « amirale » (type Cassini, de plusieurs tonnes) a été mise en priorité en 2022 par l'Académie des Sciences américaine pour une mise en orbite à l'horizon 2040-2050. Les découvertes des exoplanètes faites ces dernières décennies ont en effet ravivé l'intérêt pour ces planètes géantes de taille modérée et de structure interne sans doute différente de nos géantes

Jupiter et Saturne, dont la taille semble représenter le commun d'un cortège exo-planétaire de super-Terres ou de mini-Neptunes, de quelques masses terrestres donc, un chaînon manquant dans notre système, mais dont nous avons les extrêmes à portée.

Les missions Galileo et Cassini ont par ailleurs fait émerger la question des mondes océans dans notre Système solaire, ces satellites glacés en surface, mais dont les couches internes pourraient abriter des océans d'eau liquide, salée si en contact avec un noyau rocheux. De là à penser à l'existence de fumeurs sur leur plancher océanique, entourés de créatures aquatiques, à l'instar de ce qui a été observé dans les abysses terrestres, telle l'abysse Challenger Deep de la fosse des Mariannes..., il n'y a qu'un pas. La vie s'est-elle développée ailleurs dans le Système solaire ? Une activité frénétique s'est emparée de la communauté scientifique pour préparer en ce sens les missions ESA/JUICE et NASA/EUROPA-Clipper.

Outre la question majeure de la structure interne de ces planètes géantes glacées, que nous n'abordons pas ici, se pose donc désormais la question de la capacité de leurs satellites à abriter des océans souterrains. Les contingences ont-elles été réunies, à l'instar des satellites galiléens, pour que la chaleur interne ait été suffisante pour maintenir de l'eau liquide en profondeur au cours de milliards d'années. En effet, dans le cas des satellites galiléens de Jupiter, les résonances de Laplace, entre Europa, Ganymède et Callisto, entretiennent l'excentricité de leur orbite et amplifient effets des marées et dissipation de chaleur en leur sein, propre à aider au maintien d'un océan d'eau liquide en profondeur. Si l'existence d'un océan souterrain en contact avec le plancher océanique dans le cas d'Europe est compatible avec les modèles, celui de Ganymède pourrait être prisonnier de deux couches de glace d'eau, isolé du noyau rocheux. Une étude

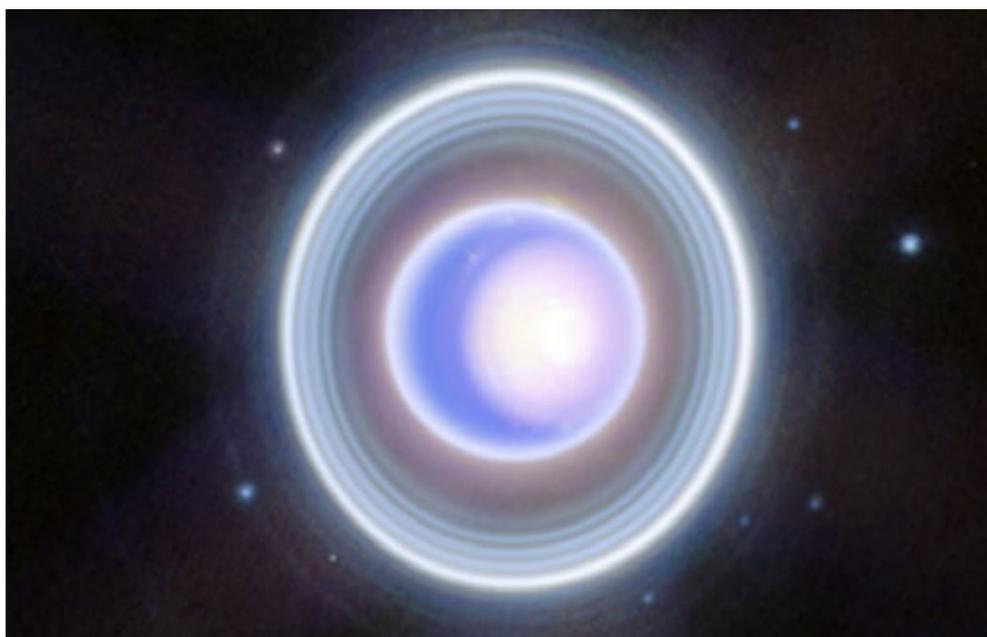


Fig.4. Image réalisée par l'instrument NIRCам du télescope James Webb où l'on voit le pôle Nord de la planète, les groupes d'anneaux principaux ϵ , $\delta\gamma\eta$, $\beta\alpha$, 456 et ζ (de l'extérieur vers l'intérieur). On distingue d'autres anneaux extérieurs ainsi que 9 des 27 lunes connues d'Uranus.

récente s'est penchée à nouveau sur la possible structure interne des satellites d'Uranus, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Oberon (alias M-A-U-T-O). Ces satellites-là n'offrent pas à l'heure actuelle pas une telle contingence dynamique apte à maintenir une activité géologique à l'échelle de celle observée pour les galiléens. L'existence d'un océan semble exclue pour Miranda. Les quatre autres pourraient avoir préservé un océan de quelques dizaines de kilomètres de profondeur. La glace d'ammoniac NH_3 , pourrait jouer son rôle d'antigel et permettre de maintenir un océan en dessous du point de congélation de l'eau. Une possible résonance entre Ariel et Umbriel il y a 1 milliard d'années a pu aussi aider à maintenir avec cet antigel des océans souterrains, pas forcément très épais, et une activité géologique qui pourrait expliquer la « jeunesse » de la surface d'Ariel, parcourue de failles diverses, estimée à 1 milliard d'années (*Figure 5*). Les données manquent cependant pour bien contraindre ces modèles de leur structure interne.

Une mission vers Uranus, appelons-là UOP (Uranus Orbiter Probe) à ce stade, pourrait être lancée à l'horizon 2031 pour croiser Jupiter fin 2032 et arriver autour d'Uranus en 2042. La trajectoire choisie devrait permettre, par des survols appropriés de la planète et des satellites, de sonder leur champ de gravitation et contraindre leur inhomogénéité. La mesure in situ du champ magnétique le long des trajectoires pourrait permettre de détecter des anomalies. Elles peuvent être provoquées par l'induction d'un champ magnétique local né d'un courant

électrique circulant dans un océan d'eau salée, lui-même induit par le champ magnétique d'Uranus, donc l'intensité peut varier au niveau de la lune, au cours de sa révolution autour de la planète. Des doutes existent cependant quant à la détectabilité d'un tel champ induit du fait de la présence de « l'antigel » qui peut réduire considérablement la conductivité électrique de l'océan. Ariel devrait être une cible privilégiée de la mission à cet égard. L'instrumentation embarquée devrait pouvoir permettre donc aussi de répondre aux questions qui restent posées pour les anneaux : leur composition chimique, leur structure générale, leur masse et la distribution de taille des particules. Le confinement radial des anneaux pour les maintenir très étroits reste inconnu, l'évolution dynamique des bandes de poussière qui les séparent, telle qu'elle a été proposée à la suite des observations du télescope Keck est encore à préciser. ■

Source des images :

Fig. 1 : <https://www.planetary.org/space-images/discovery-of-uranus-rings>.

Fig. 2 : https://www.researchgate.net/publication/269105705_The_science_case_for_an_orbital_mission_to_Uranus_Exploring_the_origins_and_evolution_of_ice_giant_planets_Planetary_and_Space_Science/figures?lo=1

Fig. 3 : <https://www.planetary.org/space-images/uranus1>

Fig. 4 : <https://www.nasa.gov/missions/webb/nasas-webb-rings-in-holidays-with-ringed-planet-uranus/>

Fig.5 : <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01534>

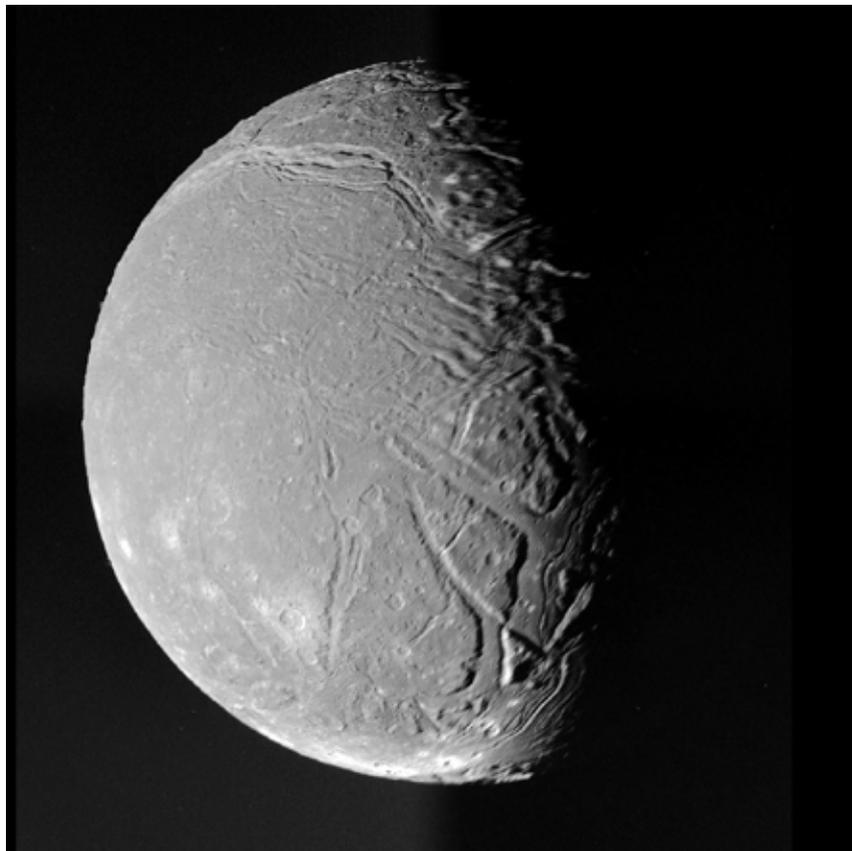


Fig.5. Mosaïque des quatre images à haute résolution faite du satellite Ariel par Voyager 2 le 24 janvier 1986. La résolution est de 2,4 km, le diamètre du satellite est d'environ 1 200 km. Les failles visibles auraient été produites par l'étirement de la croûte sous les effets de marée.