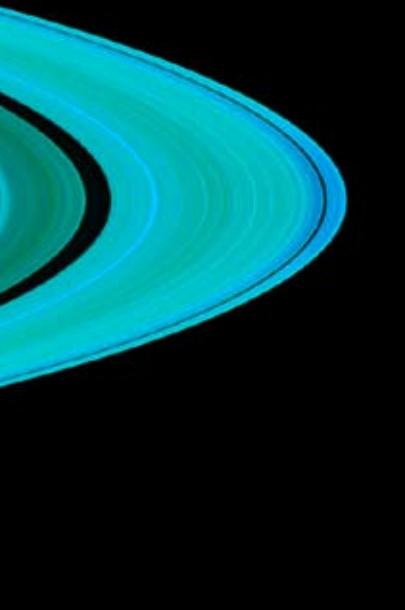


Planètes et anneaux

En passant derrière Saturne en 2003, la sonde Cassini a permis de construire une image synthétique donnant la distribution des particules dans l'anneau A et la division de Cassini avec une résolution spatiale de 10 kilomètres. Les longueurs d'onde radio de la sonde étaient de 13, 3,6 et 0,94 centimètres. Les couleurs correspondantes, rouge, vert et bleu favorisent les particules dont les dimensions sont, respectivement, plus grandes que 5 cm, plus petites que 5 cm, et plus petites que 1 cm. Le bleu aux alentours de la division de Keeler (la bande étroite au bord de l'anneau A) indique une zone active où les collisions fragmentent les particules. (ESA/NASA/JPL)

Le Système solaire s'est enrichi d'une planète aux anneaux, une découverte peu banale puisque jusqu'ici on n'en connaîtait qu'autour de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. C'est en réalité une « petite planète », un astéroïde, (10199) Chariklo qui a l'honneur de partager cette caractéristique avec les géantes du Système solaire. Peut-être y en a-t-il d'autres, cachés parmi les milliers de petits mondes tournant autour du Soleil. Il a fallu longtemps pour découvrir le premier astéroïde, on les trouve maintenant à la pelle. Il a fallu encore plus longtemps pour accepter le premier satellite d'un astéroïde – ou le premier astéroïde binaire – et maintenant ils n'étonnent plus aucun astronome. En ira-t-il de même pour les anneaux lorsque l'on étudiera avec le même soin que Chariklo d'autres petites planètes éloignées, l'avenir le dira mais, sauf hasard extraordinaire on peut imaginer que oui.



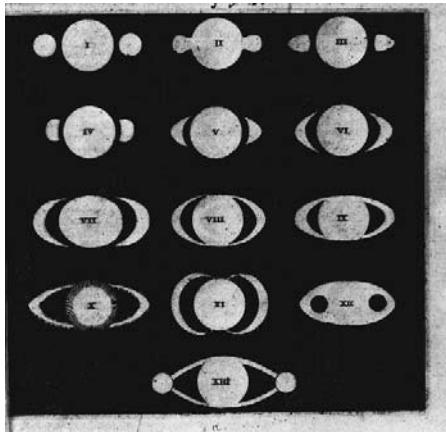
Un petit cocorico pour l'Observatoire Européen Austral et pour les astronomes liégeois qui, comme pour la découverte des anneaux de Neptune, ont joué un rôle important.

Si l'on excepte Saturne, ce sont en fait les deux seuls systèmes d'anneaux découverts uniquement depuis le sol. Profitons de la venue de ce nouveau membre pour faire une rétrospective des anneaux planétaires. À tout seigneur tout honneur, nous commencerons par Saturne, le roi des anneaux.

Saturne a longtemps été l'unique monde connu entouré d'anneaux. Ils ont été aperçus la première fois par Galilée en 1609 ou 1610. Afin de garantir la priorité de sa découverte, sans la révéler, il publia l'anagramme « s m a i s m r m i l m e p o e t a l e u m i b u n e n u g t t a u i r a s ». La solution de l'anagramme était « Altissimum planetam tergeminum observavi », ou « j'ai observé que la plus haute planète est triple »

cogniti à noi, mà da ogni nostra immaginazione. Ma quella che pone Apelle del moltrariù Saturno hora oblongo, & hor' accompagnato con due stelle à i fianchi, creda pur V. S. ch'è fata imperfessione dello strumento, ò dell'occhio del riguardante, perché rendo la figura di Saturno così , come mostrano alle perfette visite i perfetti strumenti, dove manca tal perfezione apparisce così , non si distinguendo perfettamente la separazione, e figura delle tre stelle; ma io che molte volte in diversi tempi con eccellente strumento l'ho riguardato, posso assicurarla, che in esso non si è fatta mutazione alcuna, e la ragione stessa fondata sopra l'esperienze, che hauia-

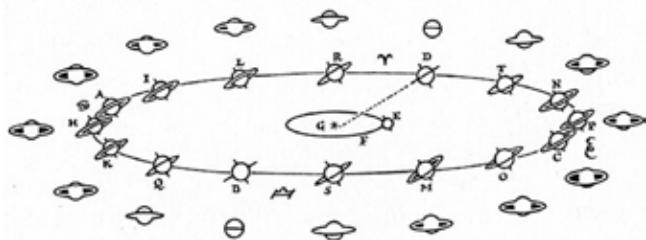
Galilée explique l'apparence variée des anneaux par la qualité de l'optique ou de la vue des observateurs. (Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari, 1613)



Source gallica.bnf.fr / Observatoire de Paris

Saturne vu par différents observateurs dans la première moitié du 17^e siècle.

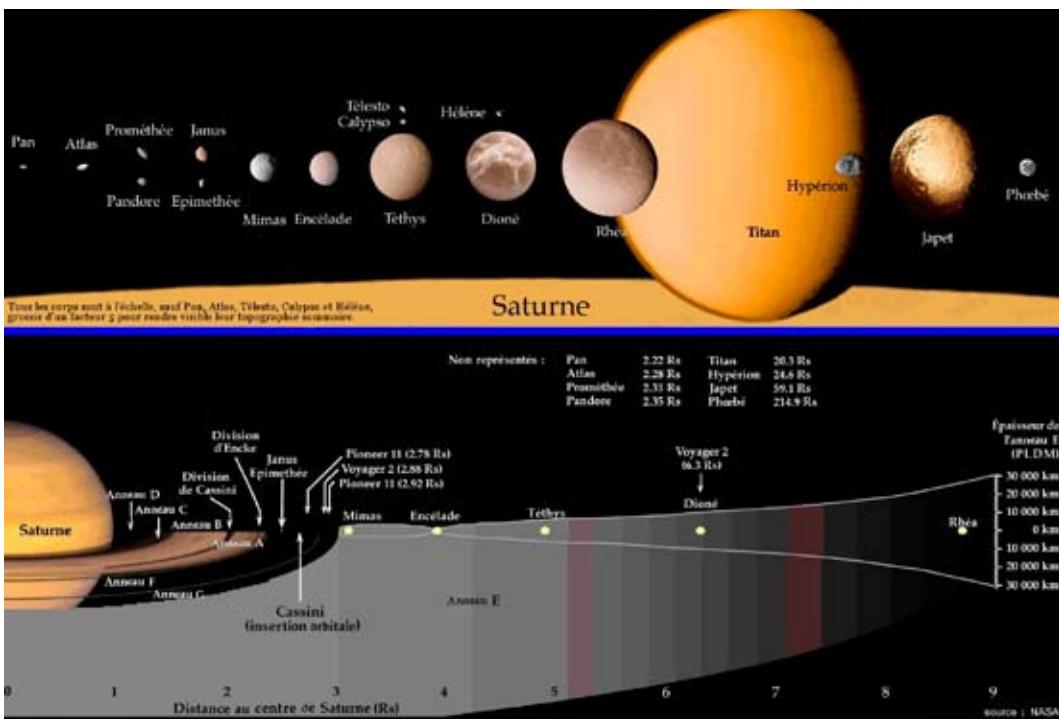
I : Galilée (1610); II : Scheiner (1614); III : Riccioli (1641 ou 1643); IV à VII : Hevelius; IX : Riccioli (1648-1650); X : Divini (1646-1648); XI : Fontana (1636); XII, XIII Biancani ?
(*Systema Saturnium ; sive, De Causis Mirandorum Saturni Phænomenon, et Comite ejus Planeta Nova, 1659;*; gallica.bnf.fr / *Observatoire de Paris*)



Ch. Huygens explique l'apparence des anneaux par les mouvements planétaires.

C'est plus de 40 ans plus tard que leur véritable nature a été reconnue par Christian Huygens. Alors qu'il suffit d'un grossissement d'une cinquantaine de fois pour les apprécier dans les télescopes actuels, la qualité optique et les grossissements disponibles à l'époque ne permettaient de distinguer que des appendices,

des anses, des oreilles, à l'aspect changeant de façon inexplicable lorsque la Terre se trouvait près du plan équatorial de Saturne. On reconnut progressivement l'existence de structures dans les anneaux, comme la division de Cassini, ou celle d'Encke. En 1705 Cassini interprète l'apparence des anneaux par « un



Carte du système saturnien. (NASA)

amas de très petits satellites qu'on ne voit point séparément ». Quant à Pierre-Simon de Laplace, en 1787, il suggère la présence d'un grand nombre d'anneaux solides... Il faudra attendre Edouard Roche en 1848 et James Clerk Maxwell, en 1859, pour démontrer qu'effectivement, les anneaux doivent être constitués de nombreux minuscules satellites, tournant tous autour de la planète, indépendamment et selon les lois de Kepler et Newton. Les arguments théoriques seront validés de belle manière par la spectroscopie en 1895 par James Keeler puis par Henry Deslandres. L'effet Doppler montre que la vitesse de rotation dans les anneaux suit bien la troisième loi de Kepler (carré de la période proportionnel au cube de la distance).

Les sondes Voyager en 1980 et 1981, et maintenant Cassini depuis 2004, ont révélé l'extraordinaire complexité des anneaux de Saturne, de nombreuses divisions ou lacunes, toute une structure dans les divisions connues auparavant. Ainsi la division de Cassini, celle que l'on distingue le plus facilement dans un télescope d'amateur, contient elle-même les divisions de Huygens, de Herschel, de Russell, de Jeffreys, de Kuiper, etc.

Les anneaux, de D à E, s'étendent de 67 000 à 483 000 kilomètres du centre de Saturne. Il faut y ajouter l'énorme anneau diffus de Phœbé situé entre 6 et 12 millions de kilomètres et découvert en 2009 au moyen du télescope spatial infrarouge Spitzer.



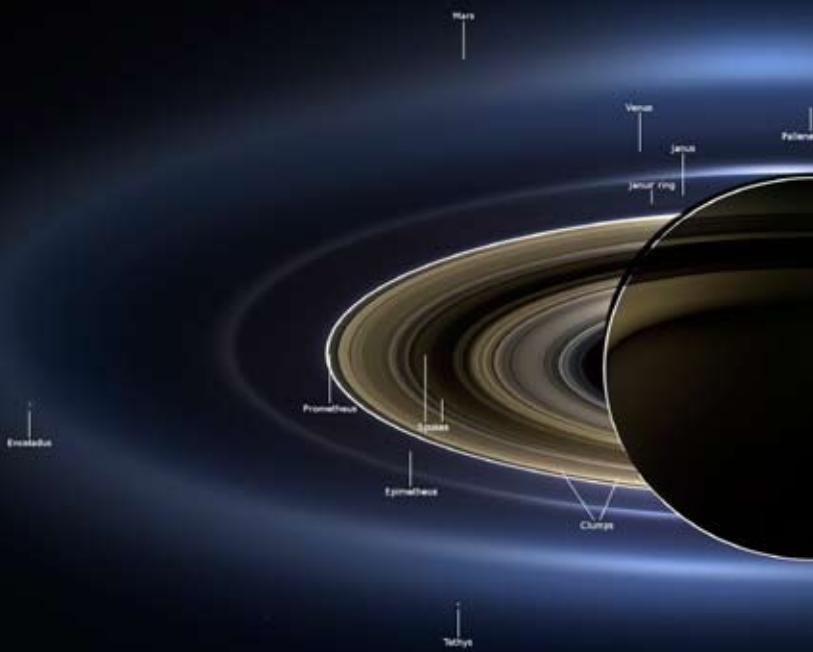
La complexité de la division de Cassini apparaît dans cette image prise par la sonde du même nom. Sous le satellite Mimas, on distingue l'anneau F, très fin, qui marque la limite du système principal des anneaux de Saturne. (NASA/JPL/Space Science Institute)

Les anneaux principaux intérieurs, ne font que quelques mètres ou dizaines de mètres d'épaisseur.

La complexité des anneaux est le résultat des interactions et résonances avec les nombreuses lunes du système de Saturne. Leur finesse s'explique par les collisions qui remettent au pas les particules qui s'écarteraient

Le 19 juillet 2013, Cassini est passée dans l'ombre de Saturne et a pris une multitude d'images. La combinaison de 141 d'entre elles donne cette mosaïque montrant la planète, sept lunes et la Terre. La vue à contre-jour des anneaux leur donne une apparence inhabituelle. (NASA/JPL-Caltech/SSI)

trop du plan. Des phénomènes électriques encore assez mystérieux sont à l'origine du déplacement de fines particules hors du plan principal pour former des structures radiales (« spokes ») plus ou moins persistantes et ne montrant pas la rotation différentielle, képlérienne des anneaux, mais plutôt un mouvement synchrone avec la magnétosphère de la planète. Des ondes en spirales, des concentrations formant des satellites éphémères, des petites structures en forme d'hélices sculptées par de petits satellites, des annelets torsadés sous l'influence périodique de lunes bergères, la diversité des ornements de Saturne défie l'imagination.

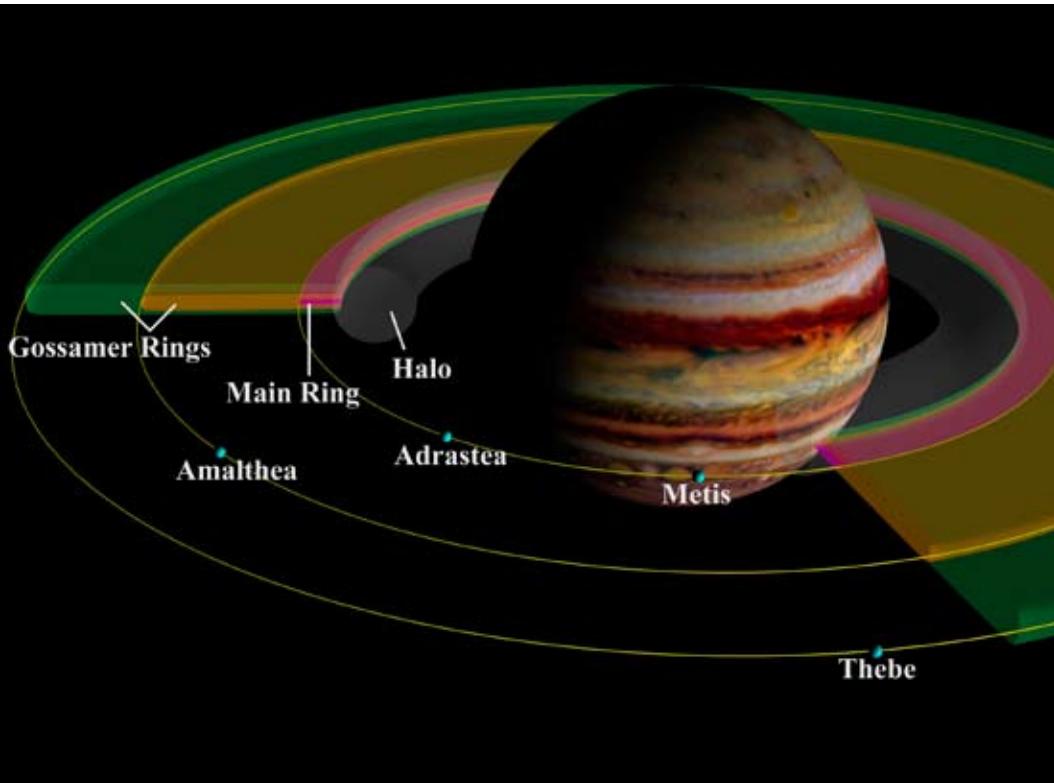


L'origine des anneaux reste mystérieuse. Sont-ils les débris d'une lune imprudente s'approchant en deçà de la limite de Roche, ou le résultat d'une collision cosmique ? En rassemblant toute la matière des anneaux on pourrait construire un astre d'une centaine de kilomètres à peine.

Jupiter a été la première planète après Saturne autour de laquelle on a reconnu la présence d'anneaux. Ceux-ci ont été découverts en 1977, lorsque la planète géante fut visitée par la sonde Voyager 1 mais leur existence avait été prédicté en 1975 à partir des observations des ceintures de radiation de Jupiter faites par la sonde Pioneer 11. Les observations des sondes Voyager 2, Galileo, Cassini et New

Horizons ont chacune apporté des informations supplémentaires. Sombres et constitués de poussières provenant de plusieurs lunes, ils s'étalent de 100 000 à 225 000 kilomètres du centre de la planète, le gros anneau « halo », de forme torique, l'anneau « principal », fin, et l'anneau « gossamer », large, épais, que l'on subdivise lui-même en trois parties. Les poussières constituant les anneaux proviennent de l'effritement et de l'érosion de petits satellites. Les poussières éjectées tombent lentement en spirale vers la planète sous l'action du rayonnement solaire (effet Poynting–Robertson). La structure des anneaux est influencée par le violent environnement magnétique et les interactions gravifiques des lunes.

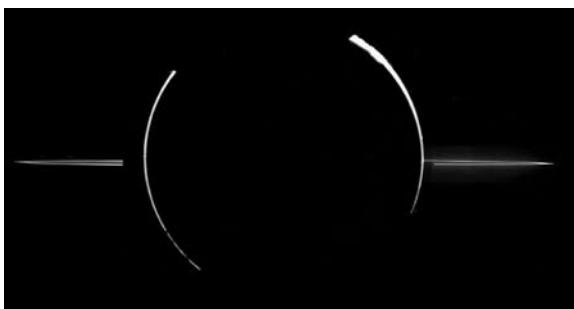




*Structure des anneaux de Jupiter.
(NASA/JPL/Cornell University)*

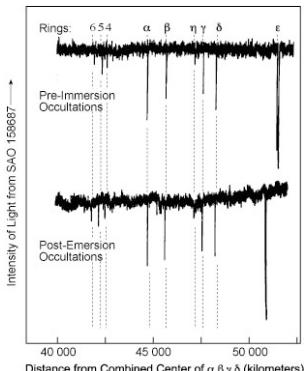
Les anneaux d'Uranus constituent aussi une première, puisque ce sont les premiers après ceux de Saturne à avoir été découverts depuis la Terre, sinon depuis le sol. Sans doute faut-il écarter les observations de William Herschel qui les aurait observés dès 1789, bien que l'on puisse envisager qu'il étaient plus brillants à l'époque. C'est en mars 1979, à la faveur d'une occultation de l'étoile SAO 158687 que des astronomes observant avec l'observatoire volant Kuiper remarquent cinq diminutions d'éclat de l'étoile de part et d'autre d'Uranus. L'existence de cinq anneaux ne faisait aucun doute. On les baptisa α , β , γ , δ et ε . Des astronomes à

Mosaïque de Jupiter prise lorsque le Soleil était éclipsé. (NASA/JPL/Galileo)

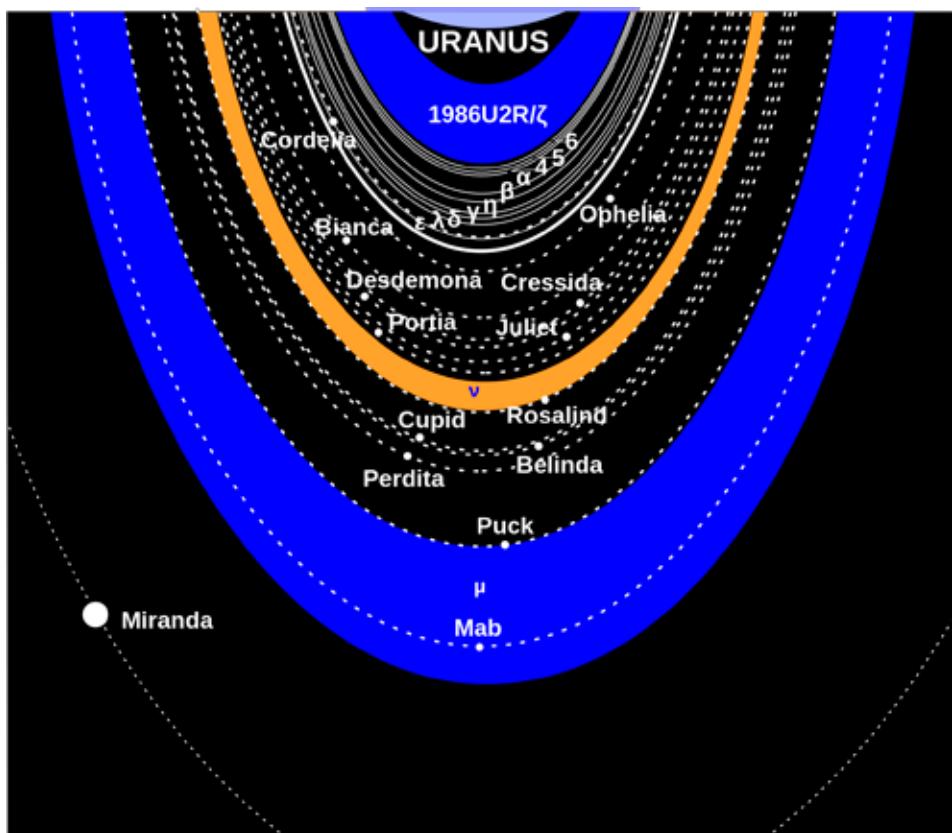


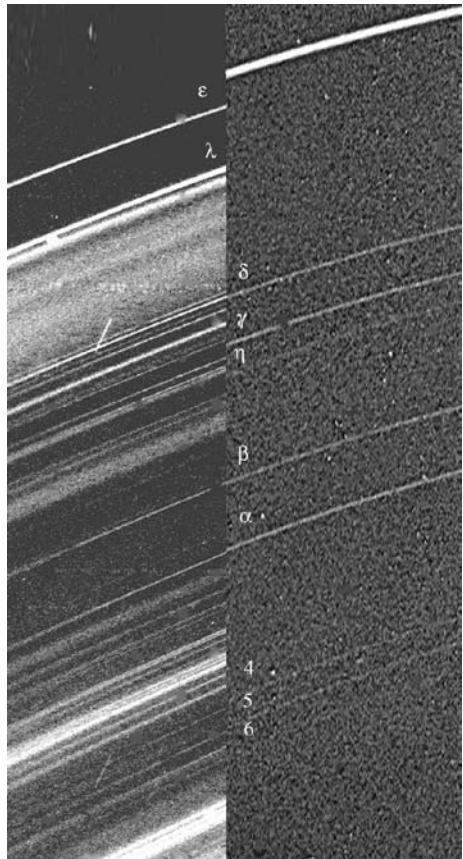
l'observatoire de Perth avait également suivi l'occultation mais ont mis plus de temps à en tirer les conclusions. Des occultations ultérieures, et les observations de la sonde Voyager 2 en 1986 complétèrent la description du système qui, loin d'être aussi complexe que celui de Saturne, n'en est pas moins très varié. Plus d'une quinzaine d'anneaux s'éparpillent entre 32 000 et 103 000 kilomètres du centre d'Uranus. Des anneaux supplémentaires ont été découverts en 2003 grâce au télescope spatial Hubble. Les anneaux les plus apparents sont minces, opaques, tandis que d'autres très ténus sont beaucoup plus larges. D'après les théoriciens, les anneaux d'Uranus sont jeunes – quelques centaines de millions d'années – en comparaison de l'âge du Système solaire. On ne comprend pas bien les mécanismes qui créent, maintiennent ou modifient une telle structure : désintégration de petits satellites,

Système d'Uranus. (Wikimedia)



Courbe de lumière de l'occultation de l'étoile SAO 158687 démontrant la présence d'anneaux autour d'Uranus. (Elliot et al, 1979)





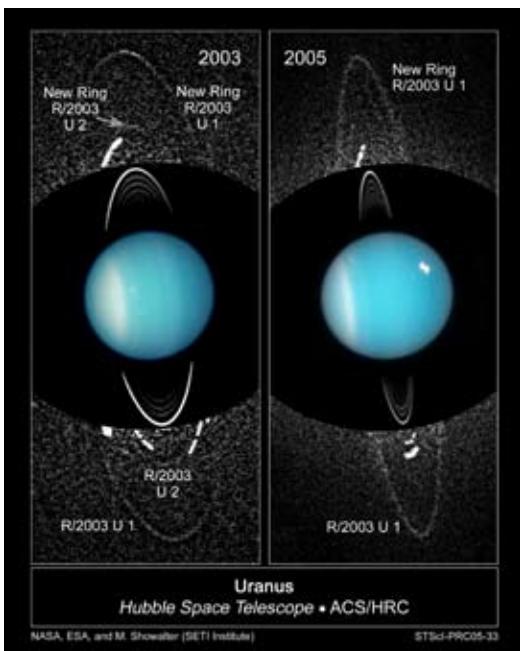
Les anneaux d'Uranus vus par transparence (à gauche), et par réflexion. Cette dernière circonstance favorise les particules de plus grosses dimensions. Les défauts de coïncidence sont dus à l'excentricité d'anneaux comme ε. (NASA)

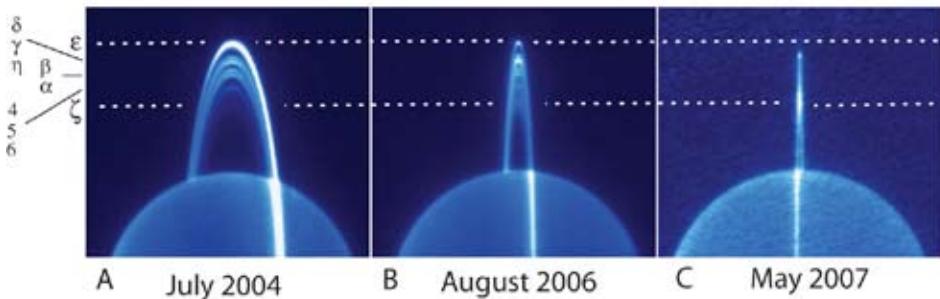
dispersion des poussières formant les bandes, confinement de plus grosses particules en anneaux minces...

Après la découverte des anneaux d'Uranus, les astronomes ont recherché sans grande conviction des anneaux de Neptune jusqu'à l'occultation décisive de l'étoile SAO 186001 en 1984. Nous avons eu la chance de participer aux observations depuis le site de l'ESO à La Silla (Chili) dans le ca-

dre d'un projet international. L'idée était d'étudier l'atmosphère de Neptune en détaillant la manière dont s'éteignait et se rallumait l'étoile. L'événement a été suivi au moyen des télescopes de 50 cm et 1 m de l'observatoire dans deux longueurs d'onde différentes, 0,8 et 2,2 microns. Neptune a raté de peu l'étoile, et l'atmosphère n'a pu être étudiée, mais les courbes de lumière qui se traçaient en direct aux télescopes ont révélé un bref affaiblissement signalant la présence d'un objet étroit près de la planète. Un satellite peut-être ? Mais un satellite avait déjà été occulté lors d'une observation en 1981. La coïncidence d'alignements aussi rares était troublante à moins d'envisager la planète enguirlandée de petits satellites. Le doute subsista de longues semaines jusqu'à ce que des astronomes américains réalisent qu'ils avaient également enregistré

Au début du siècle, le télescope spatial Hubble a ajouté des anneaux à la panoplie d'Uranus. (NASA, ESA, M. Showalter/SETI Institute)





Tous les 42 ans, Uranus nous présente ses anneaux de profil. Aidé d'un système d'optique adaptative, le télescope Keck a enregistré le phénomène.

(Imke de Pater/UC Berkeley, Heidi B. Hammel/SSI, Boulder, W. M. Keck Observatory)

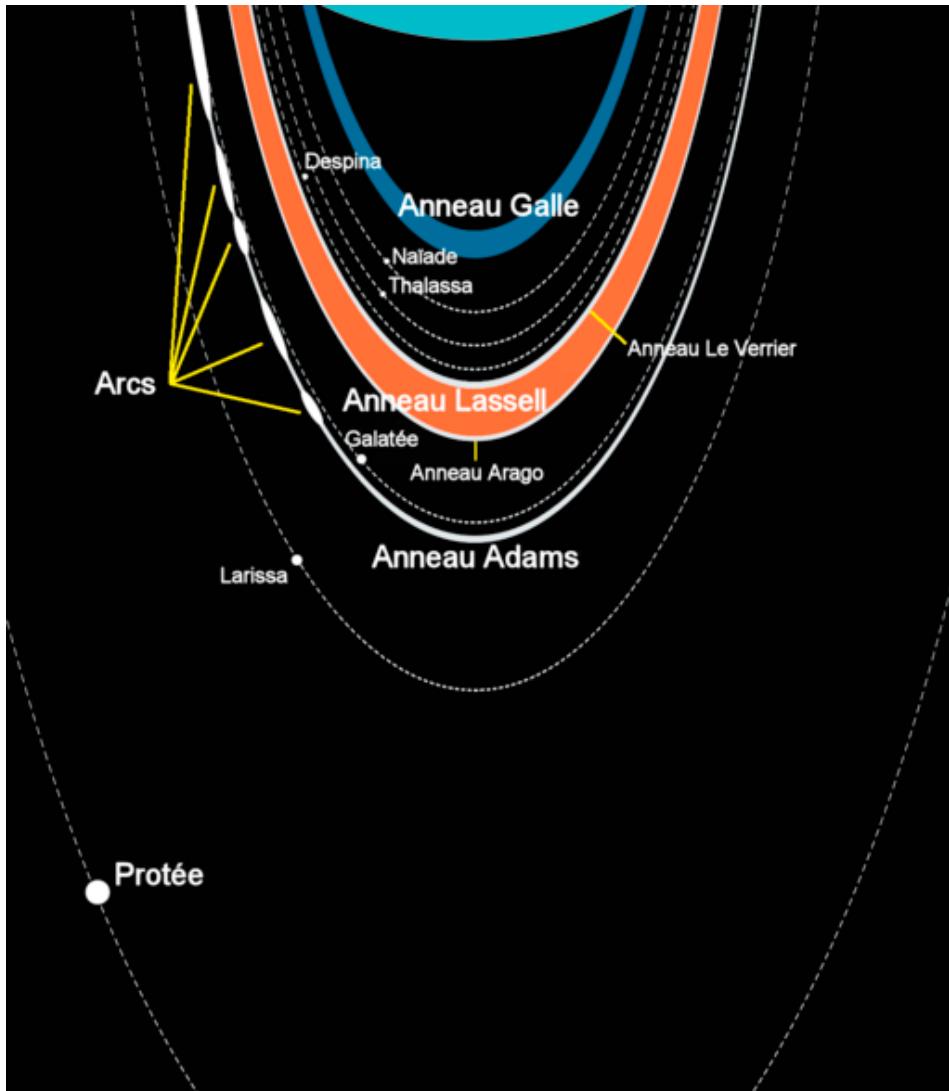
le phénomène lors de leur observation de SAO 186001 depuis l'observatoire inter-américain de Cerro Tololo. Situé à une distance « projetée » – c'est-à-dire mesurée perpendiculairement à la ligne de visée et au trajet de l'ombre – d'une centaine de kilomètres cela ne pouvait être dû qu'à un objet très étiré, un arc d'anneau. Des occultations ultérieures, puis les observations de Voyager 2 en 1989 établirent la structure complexe du système de Neptune. L'occultation de 1984 était le fait d'un des arcs de l'anneau Adams, un chapelet de cinq concentrations (dénommées Fraternité, Égalité 1 et 2, Liberté et Courage) s'étendant sur une cinquantaine de degrés en longitude autour de Neptune, à une distance de 63 000 kilomètres du centre de la planète.

Les cinq anneaux principaux (Galle, Le Verrier, Lassell, Arago et Adams) se distribuent entre 41 000 et 63 000 kilomètres et présentent une diversité de largeur et de densité. L'anneau Adams est le seul à pouvoir provoquer des occultations notables. La nature des poussières et leur répartition font que les anneaux Adams et le Verrier peuvent être décelés depuis le sol ou par le télescope spatial

Hubble, permettant ainsi un suivi de leur évolution. On a ainsi pu constater des variations de luminosité des arcs de l'anneau Adams suggérant des transferts de matière entre eux, ainsi que de légers mouvements relatifs. La stabilité du système s'explique sans doute par des résonances complexes avec des lunes, connues et inconnues. Comme pour Uranus, le système d'anneaux paraît relativement jeune.

On a bien suggéré que les satellites Nix et Hydra de Pluton pourraient être à l'origine d'anneaux autour de l'ex-neuvième planète, ce qui aurait constitué une belle séquence de systèmes d'anneaux de la cinquième à la neuvième planète. La belle dichotomie entre planètes géantes avec anneaux et planètes telluriques sans anneaux aurait été troublée. Les observations n'ont cependant rien révélé et, Pluton ayant de toute façon perdu son statut de planète normale, les jeux sont faits en ce qui concerne les « vraies » (au sens de l'Union Astronomique) planètes.

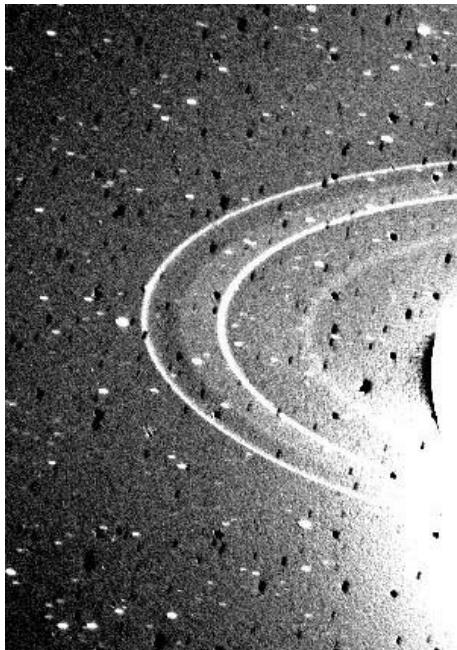
Vient alors l'astéroïde (10199) Chariklo, « centaure » et peut-être planète naine. Centaure, parce que c'est ainsi que l'on dénomme les astéroïdes se cantonnant aux domaines des planètes géantes – il existe en réalité plusieurs définitions concurrentes différant légèrement. Chariklo tourne entre Saturne et Uranus et satisfait à ce critère. L'astéroïde (2060) Chiron fut longtemps le prototype de la classe, et c'est la conjonction de caractéristiques cométaires (certains Centaures ont montré une coma) et astéroïdales qui a poussé les astronomes à choisir pour ces astres le nom



*Structure des anneaux de Neptune.
(Wikimedia)*

d'une créature mi-homme, mi-cheval. Chariklo pourrait aussi appartenir à la classe des planètes naines, c'est-à-dire celle des astéroïdes que la gravité a rendus bien « lisses » en effaçant les grosses irrégularités. Les planètes naines

sont donc sphériques ou aplatis en ellipsoïdes par une rotation rapide. Le problème est que les astéroïdes sont souvent trop lointains pour qu'on en connaisse la forme exacte. On pense qu'un astre rocheux de plus de 900 kilomètres est nécessairement sphérique (ou ellipsoïdal). Un astre de glace pourrait se contenter de 400 kilomètres, voire moins, peut-être même 200,



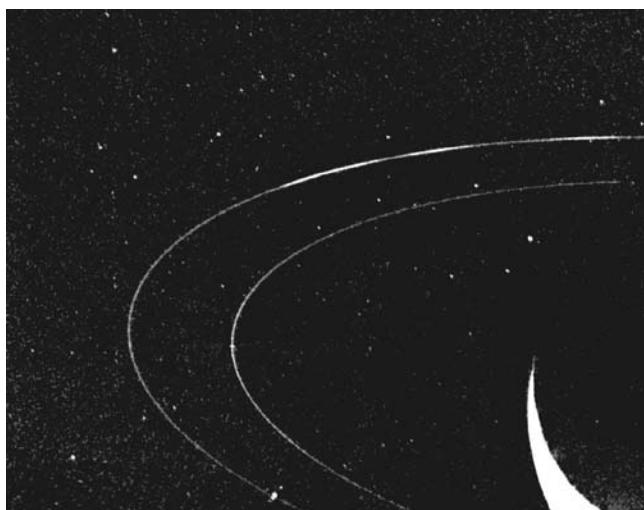
Les anneaux de Neptune vus par Voyager 2 en 1989. (NASA)

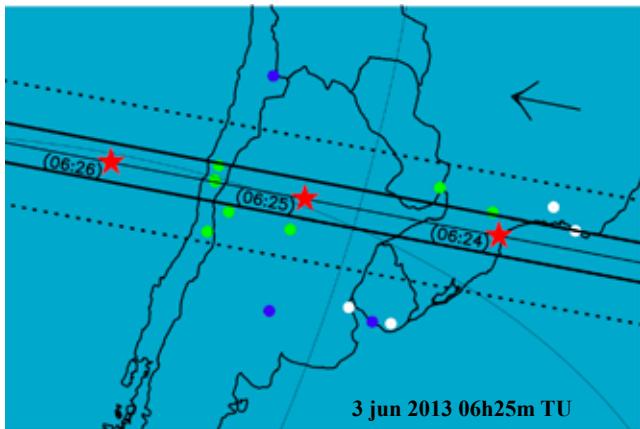
ce qui pourrait convenir à Chariklo avec ses 250 kilomètres s'il était de glace, ce qui reste à démontrer.

Une vaste campagne internationale d'observation avait été lancée à l'occasion de l'occultation d'une étoile relativement brillante – UCAC248-108672 – par Chariklo le 3 juin 2013, le but étant de préciser les données concernant le centaure et de déceler d'éventuels signes d'activité. Des mesures astrométriques avaient permis de tracer avec un bon degré de confiance la trace de l'ombre sur la Terre, un trajet qui favorisait l'Amérique du Sud, du Brésil au Chili. Pas moins de 13 télescopes

répartis dans 7 observatoires ont participé avec des succès divers, certains se révélant hors de la zone d'ombre, d'autres étant sous les nuages. L'occultation par la planète fut détectée par quatre télescopes dont – comme pour l'arc de Neptune – deux à La Silla et un à Tololo. Ainsi le télescope liégeois TRAPPIST, installé à La Silla et piloté par E. Jehin et C. Opitom, enregistra un affaiblissement net durant une quinzaine de secondes, ce qui correspondait à trois points de mesure, la discrimination temporelle étant d'un peu moins de 6 secondes. La plupart des caméras utilisées pour la campagne avaient un échantillonnage de quelques secondes, se divisant en temps de pose et temps de lecture du capteur. On recherchait en effet un compromis entre les deux en réduisant la taille qui est lue de la matrice tout en gardant un champ suffisant contenant des étoiles de comparaison. Si le temps de lecture est grand, on perd beaucoup d'événements ; si le temps de pose est long, on lisse des variations. L'un des instruments, le télescope danois de 1 m 54 de La Silla se distinguait des autres en disposant

Image de Neptune prise par Voyager 2 et mettant en évidence les arcs Liberté, Égalité et Fraternité de l'anneau Adams. (NASA)





L'ombre de Chariklo (comprise entre les traits pleins) se déplaçait de droite à gauche sur cette carte d'Amérique du Sud. Les pointillés encadrent l'ombre des anneaux. Les points verts sont les observatoires ayant détecté une occultation. Les observatoires bleus ne l'ont pas détectée, quant aux blancs, leur ciel était bouché. (F. Ribas et al., 2014)

Les observations ont été effectuées au moyen du télescope danois de 1,54 m et du télescope TRAPPIST à La Silla ainsi qu'au moyen d'instruments installés à l'observatoire de Santa Marina au Chili; les télescopes PROMPT à Cerro Tololo au Chili; l'observatoire Pico dos Dias au Brésil; le télescope SOAR à Cerro Pachon (Chili); le télescope Caisey Harlington de 20 pouces du réseau Searchlight Observatory Network et le télescope de R. Sandness des Explorations Célestes à San Pedro de Atacama (Chili); l'observatoire de l'université d'État de Ponta Grossa au Brésil; l'observatoire de Los Molinos en Uruguay; l'observatoire de Bosque Alegre en Argentine et l'observatoire Casimiro Montenegro Filho Polo à Foz do Iguaçu (Brésil).

d'une caméra avec un mode de lecture rapide, le « Lucky Imager », au nom prédestiné. Avec un temps de pose d'un dixième de seconde, et sans temps mort entre les poses, cette caméra pouvait suivre comme aucune autre les variations très rapides d'une courbe de lumière. Nous avons eu l'occasion de pouvoir traiter rapidement les données brutes à Liège et de constater de brèves atténuations – quelques dixièmes de seconde – du signal de part et d'autre de l'occultation principale. Un jet cométaire pouvait-il encercler la petite planète ? La brièveté et la symétrie ne laissaient guère de doute sur la présence d'anneaux.

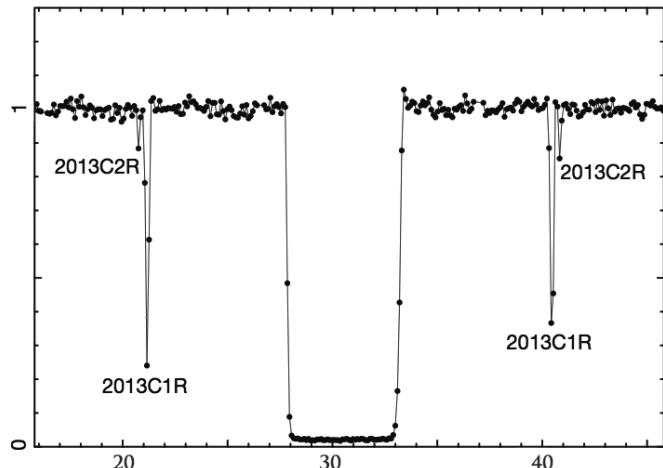
Les résultats des différents sites révélèrent que de nombreux télescopes avaient eux aussi enregistré les anneaux, tout en lissant considérablement les courbes de lumière.

L'analyse rigoureuse de toutes ces observations et la modélisation du système conduisirent à une représentation cohérente de Chariklo et de ses anneaux. Ceux-ci sont situés à 391 et 405 kilomètres du centre de la petite planète et ont une largeur de 7 et 3 kilomètres. Il est très probable qu'un ou plusieurs petits satellites maintiennent en place cette configuration. La contribution des anneaux à l'éclat de Chariklo est importante. Celui-ci avait diminué de moitié en 2008, et l'explication est que la Terre se trouvait alors dans le plan des anneaux. Plus sombres que ceux de Saturne, mais plus brillants que ceux d'Uranus ils contiennent une bonne proportion de glace. Ils pourraient être les débris d'un impact ayant affecté Chariklo alors que l'astre

était bien plus loin du Soleil que maintenant. L'orbite de Centaure qu'il occupe actuellement est en effet instable et ne peut remonter à plus de quelques millions d'années.

Peut-être qu'un jour ces débris fusionneront en un nouveau petit satellite, suivant ainsi le même processus que l'on avance pour expliquer la naissance de la Lune.

Il est amusant de constater qu'une propriété jusqu'ici réservée aux planètes géantes, un système d'anneaux, soit exhibée par un astre insignifiant qui les côtoie.



*Courbe de lumière obtenue au télescope danois de 1m50 à La Silla. Le temps porté en abscisses est compté en secondes. L'affaiblissement important est dû à l'astéroïde. Les pics doubles disposés symétriquement sont dus aux anneaux.
(F. Ribas et al)*



*Vue d'artiste des anneaux tels qu'ils pourraient apparaître depuis la surface de l'astéroïde Chariklo.
(ESO/L. Calçada/Nick Risinger)*