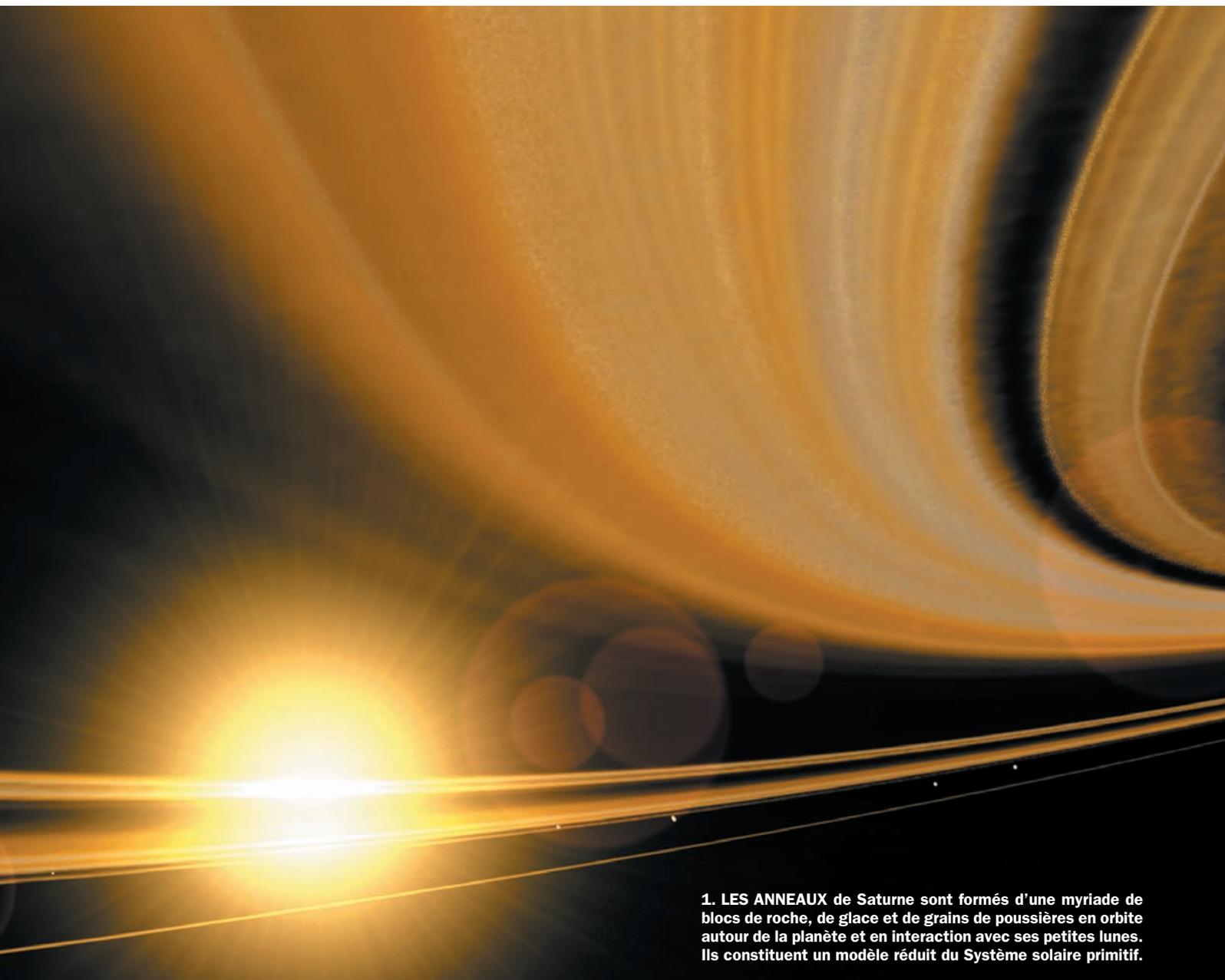


Les seigneurs des anneaux

JOSEPH BURNS • DOUGLAS HAMILTON • MARK SHOWALTER

Les quatre planètes géantes du Système solaire sont entourées d'anneaux constitués de roches, de glaces et de poussières. Les planétologues ont découvert comment la gravitation sculpte ces majestueux ornements.



1. LES ANNEAUX de Saturne sont formés d'une myriade de blocs de roche, de glace et de grains de poussières en orbite autour de la planète et en interaction avec ses petites lunes. Ils constituent un modèle réduit du Système solaire primitif.

James Clerk Maxwell, père de l'électromagnétisme et de la thermodynamique, a posé les fondements scientifiques de l'industrie et de l'économie mondiales. Toutefois, il arrivait à Maxwell de s'intéresser à des sujets plus éloignés de nos contingences matérielles, et c'est alors vers Saturne qu'il se tournait. «À ma connaissance, déclarait-il en 1857, les anneaux de Saturne n'ont jamais eu d'application pratique (...), mais quand nous les contempnons d'un point de vue purement scientifique, ils deviennent les corps célestes les plus remarquables qui soient, excepté peut-être ces corps encore moins utiles que sont les nébuleuses spirales... Quand on a observé cette grande arche qui ceint l'équateur de la planète sans aucun lien visible, l'esprit ne peut s'en détacher.» Près d'un siècle et demi plus tard, l'intérêt des astronomes pour les anneaux de Saturne ne s'est pas démenti. L'amélioration des techniques d'observation et les progrès théoriques réalisés au cours des deux dernières décennies ont considérablement modifié notre compréhension de ce phénomène spectaculaire, au

point qu'il sert désormais de modèle pour comprendre la formation du Système solaire et même la dynamique des galaxies, ces «nébuleuses spirales» chères à Maxwell.

En 1610, Galilée fut le premier à observer l'étrange aspect de Saturne, lorsqu'il tourna sa lunette vers les cieux. Les images astronomiques de l'époque étant médiocres, elles ne furent correctement interprétées que 50 ans plus tard, par Christiaan Huygens qui montra qu'un cerceau brillant entoure la planète. On ignora la présence de systèmes similaires autour d'autres planètes pendant près de 350 ans. Puis, en moins de sept ans, on découvrit ceux qui ceignent les trois autres géantes du Système solaire.

En 1977, James Elliot, de l'Université de Cornell, remarqua que les étoiles qui passent à l'arrière-plan d'Uranus «clignotent» de part et d'autre de la planète. Il en conclut qu'Uranus doit être entourée d'une série de bandes étroites, légèrement elliptiques qui masquent la lumière. En 1979, la sonde *Voyager 1* photographia les anneaux diaphanes de Jupiter et, en 1984, une technique apparentée à celle



qu'utilisa J. Elliot déboucha sur la détection d'arcs (et non pas d'anneaux complets) autour de Neptune. Plus récemment, en 1995 et en 1996, on a étudié la structure des anneaux les plus ténus de Saturne, ainsi que l'orbite de ses plus petits satellites, lorsque l'orientation de la planète nous permettait d'observer son système annulaire par la tranche.

Ces quatre systèmes d'anneaux diffèrent dans les détails, mais ils partagent des caractéristiques générales. Tous sont dotés d'une texture riche et sont constitués de multiples sous-anneaux concentriques, souvent séparés par des intervalles vides de largeurs différentes. Chaque anneau est composé d'innombrables particules (des morceaux de roche et de glace) qui tournent autour de la planète indépendamment les unes des autres, en se bousculant de temps en temps. On classe les anneaux selon la densité des particules qui les constituent, c'est-à-dire selon leur transparence optique.

Les anneaux les plus denses, tels les anneaux principaux de Saturne (nommés respectivement anneau *A* et anneau *B*) ou encore les anneaux d'Uranus (désignés par des chiffres et par des lettres grecques), ne laissent filtrer que deux pour cent de la lumière reçue perpendiculairement, une propriété que l'on résume en disant que leur «profondeur optique» est de l'ordre 4 (la profondeur optique est d'autant plus grande que les anneaux sont opaques). Ces anneaux de forte densité contiennent des particules qui se heurtent plusieurs fois par orbite et dont le diamètre varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Ces chocs s'accompagnent d'une perte d'énergie (les particules s'échauffent légèrement et se déforment) et d'une redistribution du moment cinétique qui façonnent l'anneau dans son ensemble.

Gravitation et force centrifuge

Plus les particules circulent près de la planète et plus leur vitesse est grande. On sait qu'une boule de billard lancée à toute vitesse met en mouvement les billes qu'elle rencontre. De manière un peu analogue, lors d'une collision, une particule dont l'orbite est basse (proche de la planète) cédera de l'énergie cinétique aux particules plus lentes, dont les orbites sont plus hautes. Par conséquent, lors d'un choc la particule la plus basse perd de l'énergie et tombe vers la planète (elle acquiert ainsi une vitesse plus grande – ce qui peut paraître étrange – mais en tombant, son énergie *totale* diminue). La particule la plus haute, quant à elle, est éjectée sur une orbite de rayon supérieur. Ainsi, au gré des chocs successifs, l'anneau dans son ensemble tend à s'étaler radialement. En fait, ce phénomène est très lent et on peut assimiler la matière de l'anneau à un fluide visqueux qui diffuse à la fois vers la planète et vers l'extérieur. Dans le cas des anneaux principaux de Saturne, cette viscosité cinématique effective est comparable à celle de l'air.

Quelle que soit la forme initiale d'un nuage de poussières et de roches gravitant autour de la planète, il s'aplatit rapidement en un disque fin, pratiquement équatorial. La perte d'énergie due aux collisions tend à faire s'effondrer le nuage vers la planète et la conservation de son moment cinétique l'oblige à tourner de plus en plus vite sur lui-même : le nuage s'étire alors sous l'action de la force centrifuge accrue. C'est ce qui explique que les anneaux de Saturne n'ont que quelques dizaines de mètres d'épaisseur pour des centaines de milliers de kilo-

mètres de diamètre : des proportions comparables à celles d'une feuille de papier de soie de la taille d'un terrain de football. Des objets aussi divers que les galaxies et les disques de débris qui gravitent autour des jeunes étoiles sont façonnés par des mécanismes analogues.

Des ronds de fumée

Les anneaux les plus ténus, tels ceux de Jupiter ou les anneaux externes de Saturne, ont des profondeurs optiques comprises entre 10^{-8} et 10^{-6} . Les particules y sont très dispersées et ne s'entrechoquent que rarement. De ce fait, les anneaux ténus n'ont pas tendance à s'étaler radialement. En étudiant la lumière qu'ils diffusent, on constate qu'ils sont constitués de grains de poussière de quelques micromètres de diamètre, comparables aux particules de fumée : ce ne sont donc que des ronds de fumée. En raison de leur petite taille, ces particules obéissent à une dynamique complexe car, outre la gravitation, les forces électromagnétiques et la pression de radiation (la faible pression exercée par la lumière sur les surfaces réfléchissantes) peuvent altérer leur trajectoire.

Cette distinction entre les anneaux denses et les anneaux ténus est parfois subtile. Ainsi, les anneaux de Neptune se situent à mi-chemin entre ces deux catégories. En fait, le système neptunien est anormal à de multiples égards. Son anneau le plus dense n'est pas homogène, mais contient des arcs distincts qui, mis bout à bout, englobent à peine un dixième de la circonférence de la planète. On a calculé que sans la participation d'un mécanisme de confinement, ces structures devraient s'étaler complètement en moins d'une année. Dans la réalité, les images prises récemment par le télescope *Hubble* (et confirmées par des observations au sol) ont montré que la position de ces arcs a très peu changé depuis l'époque de leur découverte, il y a une quinzaine d'années. Quels sont les mécanismes qui sculptent ces formes étranges ?

Les systèmes d'anneaux denses se nichent près de leur planète et ne dépassent pas un périmètre nommé limite de Roche, qui correspond au rayon à l'intérieur duquel les forces de marée de la planète sont supérieures aux forces d'attraction qui s'exercent entre les particules. À l'intérieur de la limite de Roche, les grains ne peuvent s'agglomérer en satellites plus massifs. Toutefois, immédiatement après cette limite, de petites lunes de forme irrégulière peuvent coexister avec des anneaux plus ténus. Ainsi, l'anneau *E* de Saturne s'étend sur une vaste région qui comprend les satellites Mimas, Téthys, Dioné et Rhéa, et présente un maximum d'éclat au niveau de l'orbite d'un petit astre froid et glacé, Encelade. L'anneau *F*, quant à lui, est une tresse constituée de plusieurs brins d'épaisseur irrégulière qui occupe une position isolée, au-delà de l'anneau *A*, entre les orbites de deux autres petits satellites, Prométhée et Pandore. On retrouve ces associations de lunes et d'anneaux dans les systèmes jovien, uranien et neptunien. Certaines des caractéristiques les plus étonnantes des systèmes annulaires résultent des interactions des anneaux et des satellites.

On pense que trois mécanismes fondamentaux sont à l'œuvre. Le premier est nommé résonance orbitale : c'est l'amplification des interactions gravitationnelles des particules et des satellites en orbite autour de la planète lorsque

Jupiter

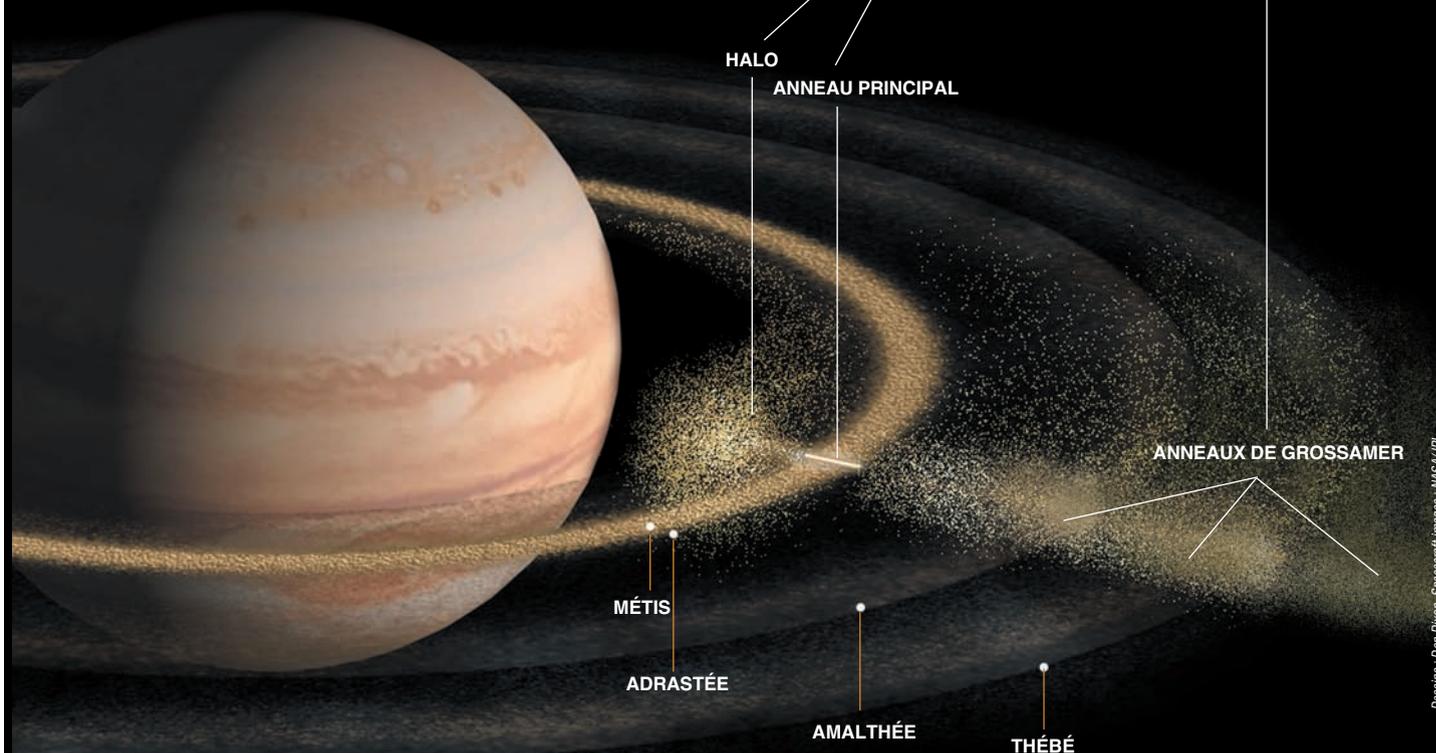
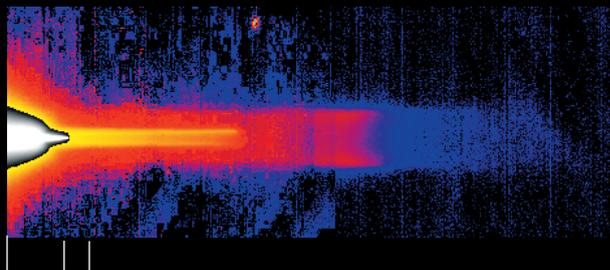
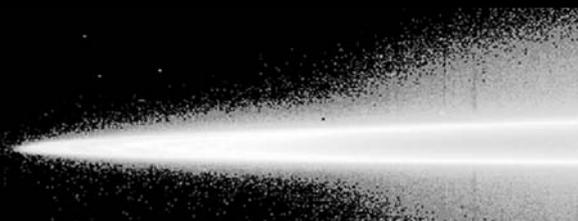
La plus grosse des planètes du Système solaire a les anneaux les plus ténus. Ils sont composés de particules plus petites que celles des autres anneaux planétaires, et sont moins aplatis.



Cette mosaïque est une image réalisée par la sonde *Galileo* ; elle montre une éclipse de Jupiter, mettant ainsi en valeur sa haute atmosphère et ses anneaux.

Un halo ténu et gonflé s'élève du bord interne de l'anneau principal, de part et d'autre du plan équatorial.

Des anneaux ténus et filiformes (en jaune, rouge et bleu) s'étendent au-delà de l'anneau principal et du halo (en noir et blanc).



Dessins : Don Dixon, Spacecraft Images : NASA/JPL

leurs orbites respectives adoptent des périodes qui sont dans des rapports entiers (notés $m : n$). Une particule située sur le bord externe de l'anneau *B* de Saturne, par exemple, sera en résonance 2 : 1 avec le satellite Mimas, ce qui signifie qu'elle effectue précisément deux tours autour de la planète pour chaque tour de la petite lune. De même, sur le bord externe de l'anneau *A*, les particules sont en résonance 7 : 6 avec les satellites Janus et Épiméthée. Les orbites qui sont proches des zones de résonance subissent de la part des satellites des déformations beaucoup plus importantes que les autres. Sur ces orbites, l'attraction exercée par les lunes, bien que faible, se répète systématiquement, toujours de la même façon, et son effet s'accumule au cours du temps. Les conséquences d'une résonance sont plus fortes lorsque les particules gravitent assez près de la lune associée, mais pas trop, car alors différentes résonances entrent en compétition, les trajectoires des particules deviennent chaotiques et l'effet cumulatif des résonances disparaît. Ainsi, les résonances les plus fortes correspondent à des rapports où $m = n + 1$ (par exemple, 2 : 1 ou 43 : 42), et décroissent rapidement à mesure que l'écart entre m . et n augmente. Sur la vaste arène que constituent les anneaux de Saturne, seules quelques dizaines d'emplacements donnent lieu à de fortes résonances avec les satellites.

Comment ces résonances agissent-elles sur les particules qui constituent les anneaux ? Le résultat dépend, en partie, de leur intensité. Les résonances les plus fortes ont tendance à faire le ménage et à expulser les grains qui s'y trouvent vers des orbites moins perturbées. C'est ainsi que les anneaux *A* et *B* de Saturne ont des bords externes très nets. Des espaces presque vides – des divisions – apparaissent en certains endroits et l'on pense que ce type de mécanisme confine les arcs de Neptune. On trouve également des discontinuités semblables dans la ceinture d'astéroïdes en orbite autour du Soleil, entre Mars et Jupiter. Dans ce cas, c'est le Soleil qui joue le rôle de la planète, et Jupiter celui du satellite.

Autour de Saturne, les autres résonances engendrent des ondes qui se propagent au sein de l'anneau *A*. Si le satellite associé a une orbite elliptique, l'onde résultante est une onde de densité spirale, une version miniature des motifs que l'on observe dans les galaxies. Si le plan de l'orbite du satellite associé est incliné sur le plan équatorial,

les résonances engendrent une série de déformations verticales, de part et d'autre du plan équatorial, qui se propagent comme de petites vaguelettes.

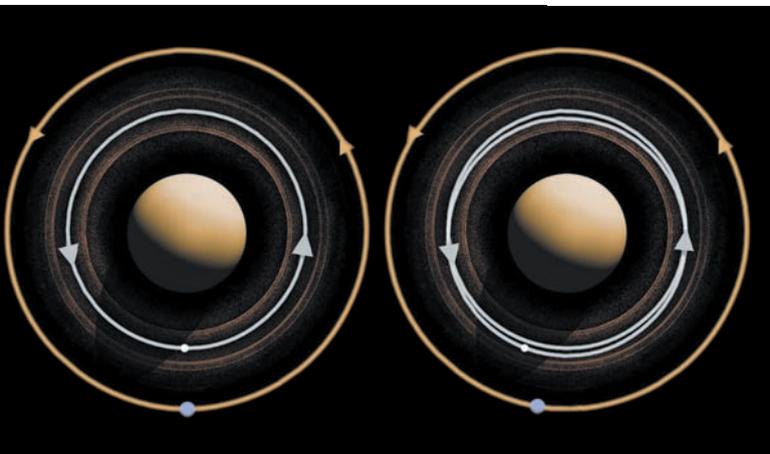
Le plus souvent, les résonances font intervenir l'influence gravitationnelle des satellites, mais toute autre force qui se répète périodiquement fait également l'affaire : ce peut être le cas des perturbations du champ de gravitation de la planète ou de forces électromagnétiques variables. De telles résonances exotiques sont particulièrement nettes dans le système de Jupiter. À l'intérieur d'un rayon de 120 000 kilomètres, l'anneau jovien gonfle brutalement et le disque fin se transforme en un tore épais. Une particule située dans cette zone de l'anneau effectue exactement trois orbites pendant que la planète fait deux tours sur elle-même et le champ magnétique de Jupiter, légèrement incliné, lui imprime une série de petites impulsions verticales. Plus bas encore, pour un rayon de 100 000 kilomètres, l'éclat de l'anneau jovien chute brusquement à cause d'une résonance électromagnétique 2 : 1 ; les particules qui dérivent jusqu'à cette position sont si dispersées que l'éclat de la planète géante les masque.

Une gravitation répulsive

Le second effet des satellites est de modifier la trajectoire des particules de l'anneau. Il arrive alors que l'attraction gravitationnelle entre un satellite et une particule produise des effets contraires à l'intuition. Si ces deux corps étaient isolés dans l'espace, ils s'attireraient simplement, se rapprocheraient et – s'il n'entraient pas en collision – leurs trajectoires seraient symétriques dans l'espace et dans le temps. La particule accélérerait, serait déviée à grande vitesse à proximité du satellite, puis émergerait de l'autre côté et ralentirait. Bien que la particule ait changé de direction, elle retrouverait, au bout du compte, sa vitesse initiale. Toutefois, dans un système d'anneaux, un satellite et une particule ne sont pas isolés, mais gravitent tous deux autour d'un troisième objet : la planète. Lors d'une rencontre rapprochée, la particule est tirée par le satellite dans le champ de gravitation de la planète : elle gagne (ou perd) de l'énergie orbitale. De ce fait, l'événement n'est pas symétrique et la particule ne retrouve jamais sa vitesse initiale (la différence d'énergie orbitale a été fournie par le satellite, mais celui-ci, du fait de sa masse importante, ne se déplace pas notablement). Pour fixer les idées, supposons que la particule ait une orbite plus basse que le satellite. Elle subira de sa part une impulsion qui la placera sur une orbite elliptique. En suivant cette orbite, elle replongera vers l'intérieur de l'anneau où elle heurtera le courant de particules rapides et retrouvera, au gré des collisions, une orbite circulaire plus basse que son orbite initiale (voir la figure 3).

De façon symétrique, si c'est le satellite qui circule en dessous de la particule, cette dernière se stabilise sur une orbite plus haute. Dans les deux cas, le champ de gravitation du satellite repousse la matière de l'anneau. Pourtant, aucune des lois de Newton n'a été enfreinte ; ce résultat étrange est une conséquence de l'interaction avec perte d'énergie de deux corps en orbite autour d'un troisième (et n'a rien à voir avec la gravité «répulsive» qui apparaît dans les théories de l'Univers en expansion).

Ce mécanisme peut, lui aussi, former des cavités dans les anneaux. Ces ouvertures s'agrandissent jusqu'à ce que

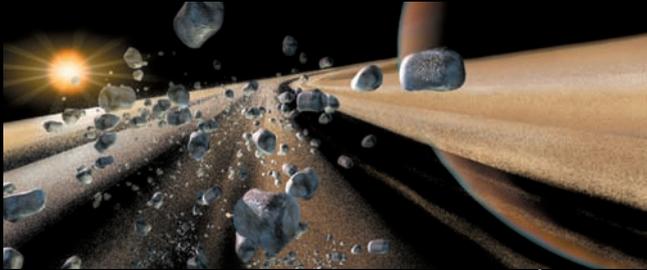


2. UNE RÉSONANCE entre un satellite (en bleu) et une particule de l'anneau (en blanc) a lieu si leurs orbites sont synchronisées. Ici, la particule fait deux tours de la planète pendant que le satellite en fait un.

Saturne

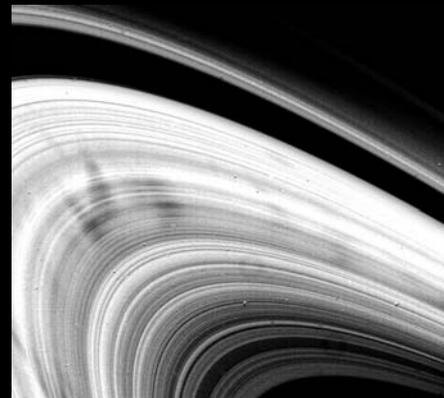
Les anneaux de Saturne, les plus spectaculaires, présentent une structure très riche qui révèle de nouveaux détails à mesure que les astronomes l'étudient de plus près. Lorsque la sonde *Cassini* enverra ses premières images, en 2004, il est possible que ces superbes photos prises par *Voyager* soient complètement démodées.

ANNEAU A



Deux divisions au moins y existent, produites par l'influence gravitationnelle de petits satellites qui dispersent les particules de l'ordre de un mètre de diamètre.

ANNEAU B



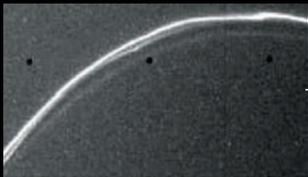
Les «spokes» sont des taches fugaces constituées de grains de poussières qui voguent en suspension au-dessus de l'anneau. On pense qu'ils résultent de perturbations de la magnétosphère de Saturne capables d'agir sur les particules les plus légères. Les innombrables anneaux très fins restent un mystère.

DIVISION D'ENCKE



Elle est ouverte par le minuscule satellite *Pan*.

ANNEAU F



Les deux satellites qui entourent cet anneau en canalisent la matière qui s'enroule en une sorte de tresse.

ANNEAU C



Cette image rehausse artificiellement les légères différences de couleur entre l'anneau C (en bleu) et l'anneau B (en doré).

ÉPIMETHÉE
JANUS

PANDORE

PAN

ATLAS

PROMÉTHÉE

DIVISION D'ENCKE

DIVISION DE CASSINI

B
A
F
G
E

les « forces répulsives » exercées par le satellite soient contrebalancées par la tendance des anneaux à s'étaler. De tels interstices sont présents sur les anneaux *A*, *C* et *D* de Saturne, ainsi que dans toute la division de Cassini (la zone qui sépare les anneaux *A* et *B*). Ce même mécanisme peut comprimer un anneau en une bande étroite, s'il est canalisé entre les orbites de deux satellites. Ainsi, en 1978, Peter Goldreich et Scott Tremaine, de l'Institut de technologie de Californie, ont postulé que ce mécanisme de guidage explique l'étonnante stabilité des anneaux filiformes d'Uranus et l'on sait, aujourd'hui, qu'au moins deux des lunes de cette planète, Cordelia et Ophelia, maintiennent l'anneau ϵ d'Uranus dans le droit chemin. Quant à l'anneau *F* de Saturne, il semble qu'il soit gardé par Prométhée et Pandore. Si la plupart des interstices et des anneaux étroits que l'on a observés restent inexpliqués, c'est peut-être qu'ils sont produits par des lunes trop petites pour qu'on les observe à l'aide des instruments actuels. On espère que la sonde *Cassini* nous aidera à repérer certains de ces marionnettistes cachés.

En attendant, on a observé que la « gravité répulsive » a un autre effet sur les anneaux : elle en festonne les bords. Un satellite voit les anneaux comme un courant de particules : celles qui gravitent au-dessous de lui passent dans un sens, celles qui se trouvent au-dessus, dans l'autre. Comme on l'a vu, au moment où les particules le dépassent, leurs orbites circulaires se transforment sous l'effet de la gravitation en orbites légèrement elliptiques. Par conséquent, les particules ne restent plus exactement à distance constante de la planète. L'ondulation imprimée au bord de l'anneau apparaît derrière le satellite si les particules circulent plus haut, et devant le satellite si elles circulent plus bas. L'un d'entre nous (M. Showalter) a analysé les motifs en feston que l'on observe sur le bord de la division Encke de Saturne (un interstice vide dans l'anneau *A*) pour prédire l'exis-

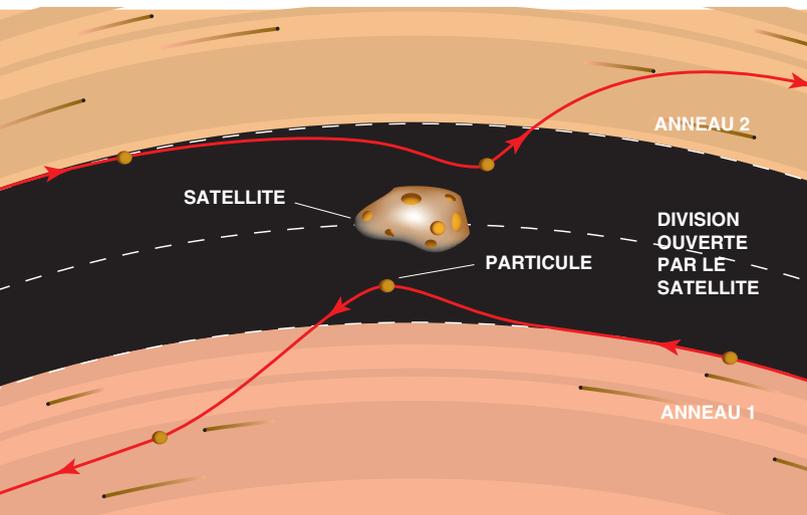
tence d'un petit satellite, Pan, qui avait échappé jusqu'à aux observateurs. L'anneau *F*, quant à lui, est marqué d'irrégularités périodiques dont on pense qu'elles sont l'œuvre de Prométhée.

L'alimentation des anneaux

Le troisième et dernier mode d'influence des satellites est leur capacité à fournir ou à absorber de la matière. Ce rôle, particulièrement vital pour les anneaux de poussières les plus ténus – tels ceux de Jupiter – a été compris grâce aux données de la sonde *Galileo*. La sonde *Voyager* a permis la découverte des anneaux joviens et de deux petites lunes, Adrastée et Métis, proches du bord externe de l'anneau principal. Ces satellites agissent-ils comme satellites bergers, contenant l'étalement de l'anneau vers l'extérieur? Sont-ils plutôt les sources de la matière de l'anneau qui, une fois mise en orbite, dérive vers l'intérieur? Comment interpréter la présence d'un anneau externe filamenteux et ténue, accompagnant l'anneau principal? Les données de *Voyager* n'étaient pas suffisantes pour répondre à ces questions.

Le système d'imagerie de *Galileo* a montré que l'anneau filamenteux disparaît brutalement au-delà de l'orbite d'Amalthée. Il a également révélé un anneau filiforme encore plus ténue s'étendant jusqu'à Thébé, mais pas au-delà. L'un d'entre nous (J. Burns) a constaté que la hauteur de l'anneau filamenteux interne est égale à l'inclinaison du plan orbital d'Amalthée, tandis que l'épaisseur de l'anneau filamenteux externe correspond exactement à l'inclinaison de Thébé. De plus, les anneaux filamenteux présentent tous deux un maximum d'éclat le long de leurs bords inférieur et supérieur, ce qui indique une accumulation de matière en ces endroits. C'est exactement ce que l'on attendrait si les particules et les satellites partageaient la même inclinaison orbitale. Cette étroite association s'explique bien si les particules sont des débris éjectés de ces satellites à la suite d'impacts météoritiques.

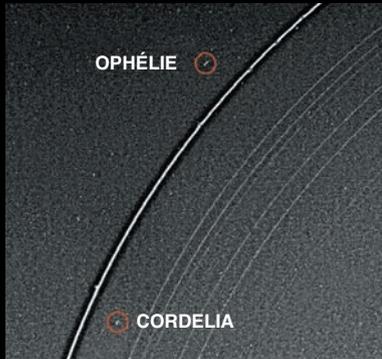
Les petites lunes doivent effectivement fournir plus de débris et de poussières que les gros satellites : bien qu'elles constituent des cibles plus petites, leur attraction gravitationnelle est moindre et elles laissent les débris s'échapper plus facilement. Dans le système jovien, le calcul montre que, pour nourrir les anneaux en débris nouveaux, la taille optimale d'une lune doit être d'environ 10 à 20 kilomètres, ce qui correspond aux diamètres d'Adrastée et de Métis. Ceci explique pourquoi ces deux petits satellites ont produit des anneaux beaucoup plus denses que Thébé ou Amalthée qui sont environ six fois plus grands. Cependant, le système de Saturne fournit un contre-exemple important : Encelade, un satellite dont on pense qu'il est à l'origine de l'anneau *E*, mesure plus de 500 kilomètres de diamètre. On pense que les impacts qui ont arraché ces débris ne sont pas produits par les trop rares projectiles interplanétaires, mais par des particules rapides issues de l'anneau *E* lui-même, ce qui expliquerait l'anormale productivité du satellite. Chaque grain qui entre en collision avec Encelade libère de multiples particules qui viennent le remplacer, de telle sorte que l'anneau *E* est peut-être autosuffisant. Partout ailleurs, les satellites capturent plus de particules qu'ils n'en libèrent et ces collisions se soldent par une absorption nette de matière.



3. LE CHAMP DE GRAVITATION d'un satellite «repousse» les particules des anneaux, ouvrant une division en leur sein. Lorsqu'une particule passe au voisinage du satellite, elle gagne ou perd de l'énergie orbitale et sa trajectoire devient elliptique. Elle s'enfonce alors dans l'anneau où les collisions avec les autres particules lui confèrent une nouvelle orbite circulaire. Cet effet de «gravitation répulsive» a ouvert la division Encke dans l'anneau *A* de Saturne (le phénomène est représenté ici dans un référentiel lié au satellite).

Uranus

Si les anneaux d'Uranus nous paraissent si étranges, c'est qu'ils sont légèrement elliptiques. Un mécanisme encore mal compris les empêche d'adopter la forme circulaire des autres anneaux.

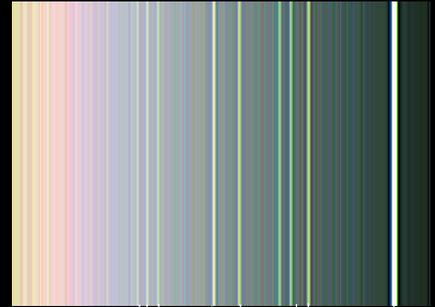


Les lunes Cordelia et Ophélie se trouvent de part et d'autre de l'anneau ϵ .

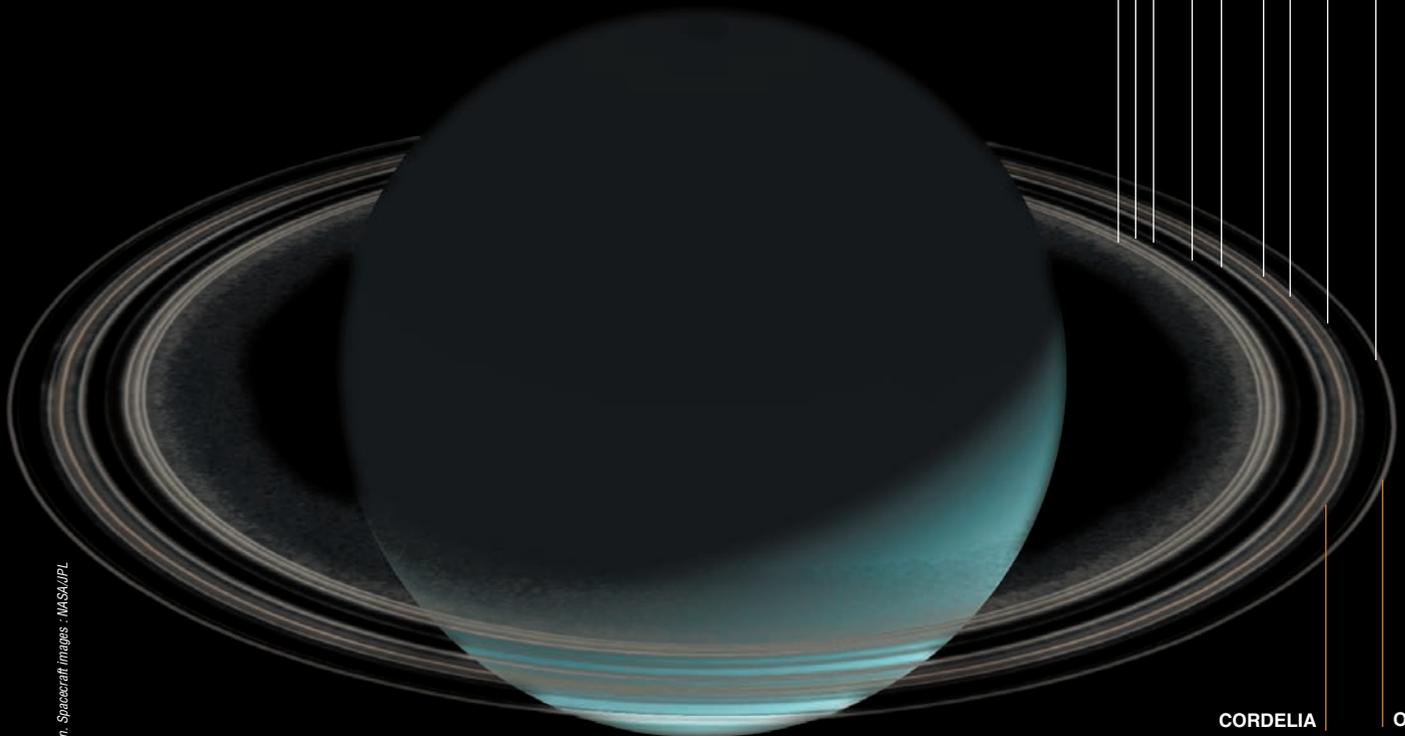


En prenant un angle de vue différent et en augmentant le temps de pose, *Voyager* a détecté la poussière qui circule entre les anneaux principaux.

Cette image en fausses couleurs fait apparaître la diversité de composition des anneaux.



6 5 4 α β η δ λ ϵ



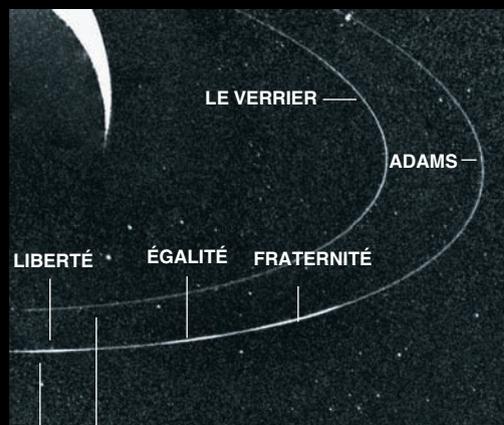
CORDELIA

OPHÉLIE

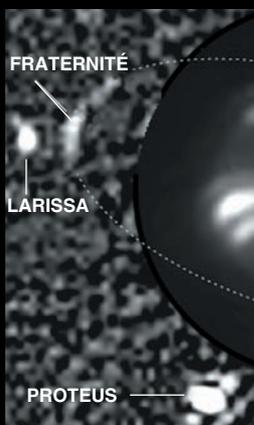
Neptune

Les anneaux de Neptune sont les plus mystérieux. Ils sont hétérogènes et leur texture est grumeleuse. La visite d'une nouvelle sonde sera peut-être nécessaire pour en comprendre la formation.

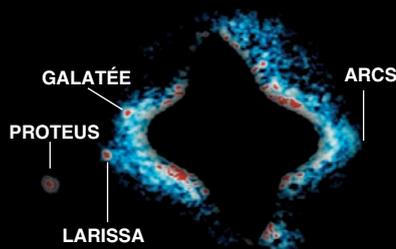
LES ANNEAUX LE VERRIER ET ADAMS



Les images de *Voyager*, datant de 1989, révèlent dans l'anneau le plus extérieur des grumeaux liés à des résonances complexes avec le satellite Galatée.



Les arcs denses de l'anneau Adams apparaissent également sur cette image prise par le télescope spatial *Hubble* en 1998.



En 1998, des observations au sol ont montré que les arcs ont perduré, et qu'ils se déplacent autour de la planète un peu plus lentement que prévu.



Don Dixon (dessins) - NASA/JPL (à gauche) ; From Nature, vol. 200, n° 6746, 1999 ; Sicardy et al., Canada-France-Hawaii Telescope (à droite) et C. Dumras et al., Hubble Space Telescope, JPL and California Institute of Technology (au centre)

L'existence de sources et de puits de matière agissant sur les anneaux montre que ce sont des structures en perpétuelle évolution. Ceci nous amène à une vieille question qui n'a toujours pas de réponse définitive : les anneaux que l'on observe aujourd'hui sont-ils anciens et permanents, ou bien jeunes et éphémères ? La première hypothèse suppose que les anneaux datent approximativement de la formation du Système solaire. À l'époque où le protosoleil était encore entouré d'un nuage aplati de gaz et de poussières d'où émergeaient les planètes, chacune des géantes gazeuses avait capturé son propre nuage dans son environnement proche au sein de la nébuleuse primitive. À proximité de chaque planète, à l'intérieur de la limite de Roche, les forces de marée empêchaient cette matière de s'agglomérer pour former des satellites. Cette matière demeura sous forme d'anneaux jusqu'à aujourd'hui.

Des structures éphémères

Selon la seconde hypothèse, les anneaux n'ont vu le jour que beaucoup plus tard. On peut imaginer qu'un petit corps (un astéroïde ou un satellite) soit tombé à l'intérieur de la limite de Roche et y ait été brisé en morceaux, ou encore qu'un satellite ait été désintégré par une collision à grande vitesse avec une comète. Aujourd'hui, un faisceau d'indices suggère que la plupart des anneaux sont jeunes. Tout d'abord, les grains les plus petits doivent avoir une courte durée de vie. Même s'ils survivent aux assauts des micrométéorites et des plasmas piégés dans la magnétosphère de leur planète, ils ne sauraient échapper à la force exercée par le rayonnement solaire, force qui les pousse inexorablement à tomber en spirale vers la planète. On pense qu'à moins d'être régulièrement reconstitués, les anneaux les plus ténus doivent disparaître en quelques milliers d'années. D'autre part, certaines lunes sont situées très près des anneaux, alors que la loi de l'action et de la réaction impose qu'en provoquant des ondes de densité dans les anneaux, ils modifient leur énergie orbitale et s'éloignent progressivement.

En troisième lieu, avec le temps, les anneaux auraient dû être pollués par des débris cométaires très sombres. Pourtant, les particules glacées que l'on y trouve sont, en général, très brillantes. De plus, les satellites situés juste au-delà des anneaux de Saturne ont des densités remarquablement faibles, comme s'il s'agissait d'empilements de débris. Enfin, certaines lunes sont enchâssées à l'intérieur des systèmes d'anneaux. Si les anneaux sont constitués de matériau primordial qui n'est pas parvenu à s'agglomérer, comment ces lunes y sont-elles parvenues ? Leur présence est plus facile à expliquer s'il s'agit de gros morceaux issus d'un petit corps céleste qui a volé en éclats. Ainsi, Luke Dones, de l'Institut de recherche de Boulder, dans le Colorado, a suggéré que les anneaux de Saturne sont des débris issus d'une lune disloquée qui aurait eu, à l'origine, 300 ou 400 kilomètres de diamètre.

Nous ne savons pas si tous les anneaux ont eu une origine aussi violente, mais nous savons qu'ils ne sont pas immuables. Joshua Colwell et Larry Esposito, de l'Université du Colorado, ont ainsi proposé l'existence d'un mécanisme de recyclage faisant passer la matière des satellites aux anneaux et réciproquement. Les satellites accu-

muleraient graduellement des particules pour les expulser ensuite lors de collisions violentes. Les conditions d'établissement de cet équilibre détermineraient l'étendue et le nombre des anneaux dans les différents systèmes. Des variations de composition, d'histoire et de taille des planètes et de leurs satellites suffiraient alors à expliquer la remarquable diversité de leurs parures annulaires.

Un anneau martien ?

Ce modèle émergent explique aussi pourquoi la plupart des planètes internes n'ont pas d'anneaux : il leur manque une escorte de satellites susceptibles de fournir les poussières et les cailloux nécessaires. Dans le cas de la Terre, la Lune est trop grosse et dès qu'une poussière de taille micrométrique se détache de sa surface, elle est en général emportée par l'attraction gravitationnelle et par la pression de radiation du Soleil. Mars, avec ses deux minuscules satellites, possède plus probablement des anneaux. L'année dernière, deux d'entre nous (D. Hamilton et M. Showalter) ont tenté d'en déceler la présence à l'aide du télescope *Hubble*, sans toutefois y parvenir. Nous en déduisons que s'il existe, l'anneau martien doit être extrêmement ténu, sa profondeur optique étant inférieure à 10^{-8} .

Comme souvent en science, une poignée de principes fondamentaux suffit à expliquer des phénomènes qui ne présentent, de prime abord, aucun lien entre eux. Le Système solaire et les autres systèmes planétaires peuvent être envisagés comme des anneaux géants entourant leur étoile. Les astronomes ont déjà repéré, dans certains des disques de poussières qui entourent de jeunes étoiles voisines, des interstices et des déformations qui sont probablement le fruit de résonances provoquées par la présence de corps massifs en orbite au sein de ces disques. De même, on a trouvé autour d'étoiles autres que le Soleil des planètes géantes qui gravitent très près de leur étoile (contrairement aux géantes de notre Système), et sur des orbites très elliptiques (alors que les planètes du Soleil sont sur des orbites quasi circulaires). Ces caractéristiques étonnantes s'expliquent si l'on considère que ces planètes tournent autour de leur étoile dans un disque de poussières massif auquel elles ont cédé du moment cinétique. Ainsi, les anneaux planétaires ne sont plus de simples curiosités célestes, mais constituent peut-être la pierre de Rosette grâce à laquelle nous déchiffrerons les mécanismes de formation des planètes.

Joseph BURNS est professeur d'ingénierie et d'astronomie à l'Université de Cornell. Douglas HAMILTON est professeur à l'Université du Maryland. Mark SHOWATER est chercheur à l'Université de Stanford.

Philip D. NICHOLSON et al., *Observations of Saturn's Ring-Plane Crossings in August and November 1995*, in *Science*, vol. 272, pp. 509-515, 26 avril 1996.

Joseph A. BURNS et al., *The formation of Jupiter's Faint Rings*, in *Science*, vol. 284, pp. 1146-1150, 14 mai 1999.

Christophe DUMAS et al., *Stability of Neptune's Ring Arcs in Question*, in *Nature*, vol. 400, pp. 733-735, 19 août 1999.

Joseph A. BURNS, *Planetary Rings*, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen et Andrew Chalken, Cambridge University Press, 1999.
