

LES
Anneaux
DE **SATURNE**
vus par la mission CASSINI-HUYGENS

par **Sébastien Charnoz**
Équipe AIM (Astrophysique Interactions
Multi-échelles) - Univ. Paris 7, CEA Saclay
charnoz@cea.fr

1 – Image en vraies couleurs de Saturne.
Notez l'ombre des anneaux portée sur la planète.

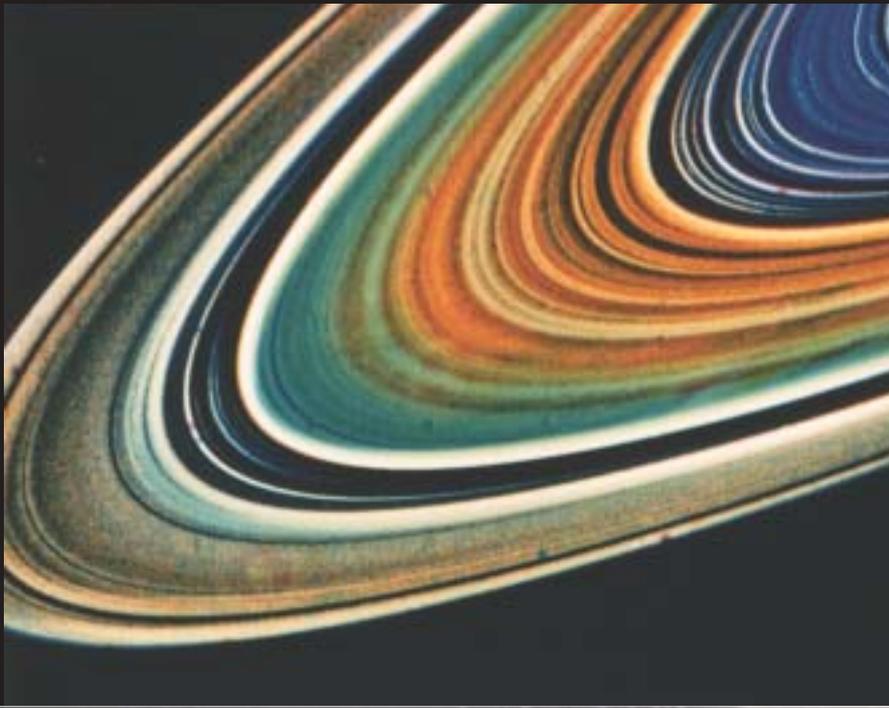
Depuis le mois de juillet 2004, la plus grande sonde spatiale jamais construite, la mission Cassini-Huygens, orbite autour de la planète aux anneaux, après un voyage de près de trois milliards de kilomètres.

Équipée de près d'une vingtaine d'instruments de mesures, la mission explore sans relâche un monde envoûtant, en perpétuelle évolution, celui de Saturne, ses anneaux et ses satellites. Jusqu'ici la mission Cassini-Huygens est un succès scientifique et technique quasi total, eu égard à sa conception innovante et à sa robustesse technique qui n'a toujours pas été mise en défaut.

La base de données des images Cassini dépend de l'université Paris 7 Denis Diderot et du CEA, et se trouve physiquement sur le plateau de Saclay. Le système de caméras à bord de la sonde, baptisé ISS (Imaging Science Subsystem), nous renvoie toutes les semaines près de 500 images, formant ainsi une des plus grandes archives d'images planétaires jamais constituées. Nous présenterons ici une sélection, infime, de ces images illustrant les richesses scientifique et esthétique d'une année d'observation de Saturne. Il est impossible de dresser un bilan complet des dernières découvertes de Cassini, tant l'activité scientifique est intense, c'est pourquoi nous ne

parlerons ici que des anneaux de Saturne, appelés par certains le "joyau" du Système solaire.

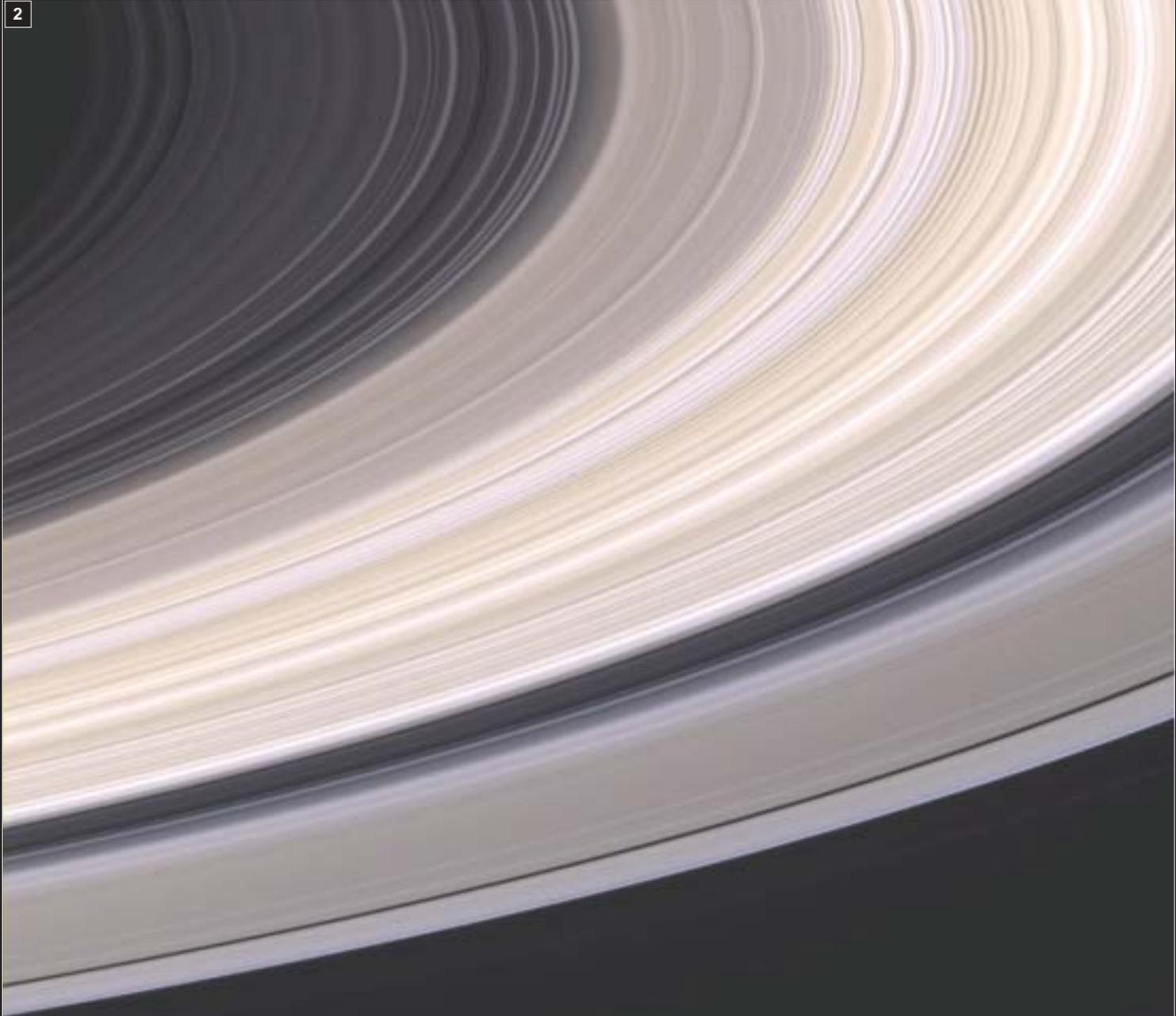
300 000 km de diamètre, 50 mètres d'épaisseur, ne pesant pas plus lourd qu'un petit satellite de Saturne, et brillant aussi intensément que la planète elle-même, les anneaux ont fasciné les hommes depuis des siècles. C'est un monde en perpétuelle évolution, déformé en permanence par les satellites proches, et à la surface duquel se propagent des ondes rappelant les vagues à la surface de la mer. C'est aussi une des structures les plus vieilles de l'Univers, au sens dynamique du terme : depuis leur origine (incertaine) les anneaux ont peut-être fait des centaines de milliards de révolution sur eux-mêmes... alors que notre galaxie n'en a fait que quelques dizaines... Sur un temps dynamique aussi long, les moindres perturbations, les structures les plus subtiles ont eu pleinement le temps de se développer, comme une gigantesque broderie de taille planétaire. Nous ferons ici un voyage en image dans ce monde fascinant...



2 – À gauche : Image en fausses couleurs des anneaux de Saturne obtenue depuis la sonde Voyager 2 en août 1981.

En bas : **les anneaux en vraies couleurs vus par Cassini.** De l'intérieur vers l'extérieur nous voyons l'anneau C (gris sombre), l'anneau B (ivoire/saumon), la division Cassini (noire) l'anneau A (gris) et en bordure des anneaux, l'anneau F est également faiblement visible.

2



Les précurseurs : de Galilée à Voyager

C'est Galilée qui, le premier, observe les anneaux de Saturne, en 1610, à l'aide de la même lunette qui lui avait permis d'observer les cratères de la Lune et les satellites de Jupiter. Cependant, en raison de la résolution limitée des instruments de l'époque, Galilée observe en fait des taches lumineuses entourant la planète de part et d'autre. Dans une lettre à Johannes Kepler, il décrit Saturne comme un astre triple. Mais le mystère s'épaissit au fil des années car de nouvelles observations montrent que les "astres latéraux" changent de forme au cours du temps. C'est l'astronome hollandais Huygens, en 1655, qui le premier comprend que des anneaux entourent la planète Saturne. Le changement d'apparence des anneaux au fil des années est la conséquence du mouvement relatif entre la Terre et Saturne, qui fait que sur un cycle de quinze ans, les anneaux sont vus alternativement très ouverts puis très fermés, c'est-à-dire vus par la tranche. Ensuite de nombreux scientifiques de renom se sont penchés sur la question des anneaux : Cassini, Maxwell, Poincaré, etc. Mais il faut attendre trois siècles et la découverte du voyage spatial pour vraiment commencer à deviner la richesse de ce monde lointain grâce aux missions *Pioneer* et *Voyager*.

Soyons clair sur une chose, jusqu'à l'été de l'année 2004, date à laquelle la mission Cassini-Huygens s'est mise en orbite autour de Saturne, environ 90 % de nos connaissances sur la planète, ses anneaux et ses satellites reposait sur seulement un mois d'observations par les missions spatiales américaines *Voyager 1* et *Voyager 2* (15 jours d'observations chacune). La sonde Cassini-Huygens peut être vue comme la "fille" des missions *Voyager* ; il est donc nécessaire de nous y attarder un peu ici. Les missions *Voyager 1* et *2* constituent sûrement l'un des plus grands succès technologiques, avec l'homme sur la Lune, de l'histoire de l'exploration spatiale. Les années 70-80 sont la conjonction de deux événements. Un premier événement astronomique : à cette période les planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune se trouvent relativement alignées, ce qui est propice à une mission spatiale qui survolerait toutes ces planètes. L'autre événement majeur est la maîtrise du vol spatial (technologie issue, en grande partie, des laboratoires militaires russes et allemands pendant la 2^e Guerre mondiale). Les

USA décident donc de construire deux sondes, *Voyager 1* et *2*, pour survoler les planètes Jupiter en 1979 et Saturne en 1981. Ce fut un tel succès que la sonde *Voyager 2* fut reprogrammée pour visiter ensuite Uranus et Neptune, avec la réussite que l'on connaît aujourd'hui. Nous parlons de survol pour les sondes *Voyager 1* et *2*. Insistons sur ce point, qui est totalement différent de la philosophie de la sonde *Cassini* : les sondes *Voyager 1* et *2* ont traversé le Système solaire à très grande vitesse et rencontré, sans s'y attarder, Jupiter et Saturne. Ce que nous appelons une rencontre est la période où la sonde passe très près (et très vite) de la planète et peut nous renvoyer des images meilleures que celles obtenues par les télescopes terrestres. Pour *Voyager*, une rencontre typique dure environ 15 jours. Pendant cette période, les instruments prennent des milliers de mesures, d'images, de spectres pour profiter de ce temps, très court, pendant lequel la planète se révèle dans toute sa majesté. Par exemple, *Voyager 2* se déplaçait à environ 30 km/s au moment de sa rencontre avec Saturne, et nous a renvoyé en 15 jours quelques milliers d'images.

Après le passage de *Voyager 1* et *2* auprès de Saturne les modèles et théories sur les anneaux, les satellites et l'environnement de Saturne se sont vus bouleversés (comme c'est souvent le cas). L'idée de revenir sur place, en prenant son temps, pendant plusieurs années pour étudier en détail la structure et l'évolution temporelle du système saturnien dans son entier (anneaux, satellites, atmosphère etc.) s'imposa d'elle-même. Il ne faut plus survoler la planète, mais se mettre en orbite autour, à l'instar d'un de nos satellites d'observation terrestre.

L'enseignement de Voyager

Nous savons depuis les travaux du savant anglais Maxwell (surtout connu pour ses équations du rayonnement) et plus tard à l'aide des données de *Voyager* et des télescopes au sol que les anneaux de Saturne ne sont pas solides, mais plutôt composés de milliards de petits blocs de "glace sale" qui s'échelonnent typiquement du millimètre à dix mètres, et regroupés en un disque extraordinairement plat que nous appelons "les anneaux". Des travaux (français) novateurs dans les années 60-70 avaient expliqué leur extrême finesse et ces mêmes travaux montraient que les anneaux de Saturne devaient être un disque continu, sans structure,

et devant s'étaler lentement, sous l'effet de la viscosité. En particulier, les bords de ce disque devaient être extrêmement doux et diffus. Des observations au début des années 80, alors que la Terre passait dans le plan des anneaux, ont montré que les anneaux ne font pas plus de 500 m d'épaisseur, pour un diamètre d'environ 300 000 km (la distance Terre-Lune), ce qui en fait la structure la plus fine jamais observée. On soupçonne aujourd'hui que les anneaux ne font en réalité pas plus de 50 mètres d'épaisseur ! Mais une découverte plus étonnante encore fut faite par les caméras de la mission *Voyager* : contrairement aux théories, les anneaux de Saturne ont des bords extraordinairement francs et nets, comme des murs verticaux. Par

Contrairement aux théories, les anneaux de Saturne ont des bords extraordinairement francs et nets

exemple, le bord de l'anneau A (image 2) s'arrête en moins de 1 km, pour un diamètre de presque 270 000 km ! Il en est de même pour les bords de l'anneau B. Les anneaux sont aussi parcourus de milliers de sillons, rappelant le microsilicon d'un disque vinyle. Quelques-unes seulement de ces structures sont expliquées aujourd'hui. Où les modèles s'étaient-ils trompés ? Quel est le facteur d'évolution majeur qui n'avait pas été pris en compte ? Aujourd'hui nous le savons : ce sont principalement les interactions gravitationnelles avec les nombreux satellites de Saturne qui forgent littéralement les anneaux, gravant des sillons, déformant les anneaux, propageant des ondes et stoppant les anneaux en quelques centaines de mètres par des mécanismes de confinement encore mal compris. Les anneaux de Saturne peuvent donc être vus comme une sorte de surface, de membrane, qui propage des ondes quand elle est perturbée, un peu comme les vagues à la surface de la mer.

À l'aide des images de la mission Cassini, nous espérons mieux comprendre les relations complexes qui unissent les anneaux et les satellites, mais aussi la microphysique des anneaux, c'est-à-dire comment se comporte la matière au sein des anneaux à l'échelle de quelques dizaines de mètres.

3 – Cassini sur son banc de montage. Le disque doré au milieu de la sonde est le module européen Huygens



Pourquoi les anneaux sont-ils si fins ?

Quel effet physique a pu former une structure si extraordinairement fine ? On pense aujourd'hui connaître la réponse. C'est un mécanisme très général à l'œuvre dans tout l'univers. Il y a très longtemps, on ne sait pas exactement quand, les anneaux de Saturne devaient être une sorte de nuage de débris orbitant autour de Saturne. Les particules dans ce nuage subissent des collisions qui dissipent de l'énergie orbitale sous forme de chaleur ou de déformation physique (fracturation, déformation). À l'instar d'un gaz qui se refroidit, ce nuage va ensuite se contracter pour diminuer son volume. Mais attention, bien que les collisions dissipent l'énergie, elles ne peuvent dissiper le moment cinétique du nuage (le moment cinétique est une mesure de la quantité de rotation). Cela signifie qu'au cours de sa contraction, le nuage de débris doit en moyenne toujours tourner à la même vitesse. Un nuage sphérique ne peut pas se contracter en restant sphérique, sinon il tournerait trop vite. Le seul moyen de se contracter en conservant la rotation est de s'aplatir en s'étalant. On obtient donc

un disque. Plus l'énergie à cause des collisions s'en va, plus le disque est fin. La finesse des anneaux de Saturne nous indique qu'ils sont très évolués, que chaque particule a déjà subi un très grand nombre de collisions.

Ce processus d'aplatissement ne s'applique pas seulement aux anneaux de Saturne, c'est un mécanisme très général dans l'univers, qui explique aussi la formation des disques protoplanétaires ou les disques d'accrétion (où l'énergie est dissipée par la viscosité). À l'inverse, une étoile ne s'aplatit pas car elle a une source d'énergie interne, son cœur nucléaire, qui en permanence redonne de l'énergie au système et lui permet de conserver sa forme sphérique.

Cassini-Huygens : un défi technologique

À l'issue du passage des sondes *Voyager 1* et 2, de nombreux scientifiques ont suggéré l'envoi d'une nouvelle sonde, qui se composerait de deux parties : un *orbiter*, c'est-à-dire une sonde qui se mettrait en orbite autour de la planète, et un *lander* (un module de descente) qui se poserait à la surface du plus grand satellite de Saturne : Titan. L'orbiter fut baptisé Cassini et principalement construit par l'agence

spatiale américaine, la NASA, et le module de descente, baptisé Huygens, fut construit principalement par l'Agence Spatiale Européenne (l'ESA). La mission Cassini-Huygens est une des plus chères de toute l'histoire de l'ère spatiale : environ 5 milliards de dollars au total. Soyons heureux qu'en ces temps troublés, des nations aussi puissantes investissent autant d'argent pour la découverte et la connaissance !

La conception et la construction de la mission Cassini-Huygens commencent au début des années 90 et ont nécessité environ 6 ans (image 3). C'est une machine particulièrement complexe en raison du grand nombre d'instruments à bord (12 sur Cassini et 6 sur Huygens), et aussi en raison des contraintes de l'espace lointain, où le Soleil brille si faiblement qu'il n'est pas possible d'utiliser des panneaux solaires. Pour cette raison, Cassini est équipée de générateurs électriques au plutonium qui lui assurent une alimentation électrique pour plusieurs dizaines d'années, alors que la mission nominale s'arrête en 2008... Cassini marque une étape dans l'exploration du Système solaire car sa conception innovante en fait le modèle des missions spatiales futures. Par exemple, à bord de Cassini, il y a un minimum de pièces mobiles car elles sont souvent sources de problèmes (on se souvient par exemple de la mission *Galileo* dont l'antenne-parapluie ne s'était pas ouverte... il a fallu tout le talent des ingénieurs du JPL pour pouvoir récupérer les données). Il a donc été nécessaire de concevoir à bord des enregistreurs solides de haute capacité pour stocker les données... Cette technologie se retrouve aujourd'hui dans nos clefs USB que nous pouvons acheter pour quelques dizaines d'euros dans le commerce... mais dix ans après Cassini. Cassini est également équipée des premiers gyroscopes à laser (les gyroscopes servent à s'orienter dans l'espace), encore pour éviter les pièces en rotation d'un gyroscope classique. Lors d'une conférence dans les Alpes, Jean-Pierre Lebreton, directeur de la mission Huygens a une fois qualifié Cassini de "bête increvable"... Espérons que l'avenir lui donnera raison !



Les caméras de Cassini

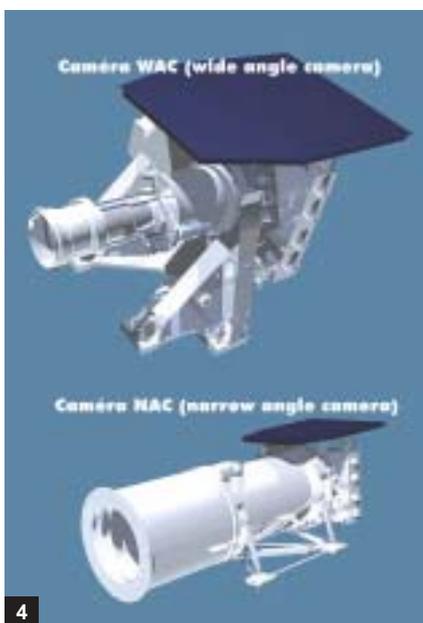
Nous allons principalement discuter ici des résultats obtenus par le système d'imagerie. Cassini embarque deux caméras (image 4), l'une à grand champ, appelée WAC (Wide Angle Camera) et un zoom puissant, appelé NAC (Narrow Angle Camera), toutes deux conçues et développées aux USA. La WAC sert à prendre des vues panoramiques et aide les ingénieurs à positionner la sonde par rapport aux étoiles. La NAC sert à prendre des photos à très haute résolution, l'instrument lui-même est énorme, presque un mètre de long ! Les deux caméras sont équipées d'une matrice CCD 1024 x 1024 pixels. Elles sont également équipées d'une vingtaine de filtres

optiques, allant du proche infrarouge jusqu'à l'ultraviolet. D'une manière générale, les filtres permettent de faire des images en couleurs, qui renseignent sur la composition chimique et l'état de surface (rugosité, porosité) des particules des anneaux. Les images en infrarouge sont particulièrement adaptées pour voir sous la couche nuageuse de Titan, que les caméras de Voyager n'avaient pas pu percer à l'époque. Les images en ultraviolet sont utilisées principalement pour étudier l'atmosphère de la planète et les surfaces des satellites.

Un voyage de trois milliards de kilomètres...

La mission Cassini a été lancée le 15 octobre 1997, depuis Cap Canaveral, à bord du plus gros lanceur américain, la fusée Titan IVB/Centaure, qui aujourd'hui n'est plus en service. Afin d'arriver aux abords de Saturne avec une faible vitesse relative, et en économisant le plus de carburant possible, Cassini a dû parcourir une trajectoire complexe dans le Système solaire, avec deux rebonds gravitationnels autour de Vénus en avril 1998 et juin 1999, un passage proche à nouveau au voisinage de la Terre en août 1999, et un dernier rebond autour de Jupiter le 30 décembre 2000. Elle arrive enfin autour de Saturne le 30 juin 2004, après sept années de voyage ! Au total la sonde a parcouru 3 milliards de kilomètres depuis son lancement. La mise en orbite de Cassini autour de Saturne

fut un moment particulièrement intense. En effet, la sonde arrive vers le pôle Sud de Saturne à la vitesse de 30 km/s. À cette vitesse, la sonde ne peut se satelliser autour de la planète aux anneaux. Il faut donc la freiner fortement à l'aide du système de fusées, et ce, en "frôlant" la planète pour la mettre sur une orbite intérieure proche de la planète et des anneaux. La manœuvre était la suivante : le 16 juin 2004, environ 2 semaines avant la mise en orbite finale plusieurs corrections de trajectoires ont été effectuées pour diriger la sonde droit vers la planète ! Le 30 juin la manœuvre de freinage commence. À environ 150 000 km de Saturne (entre les anneaux F et G) la sonde traverse le plan des anneaux pour se retrouver du côté nord de l'hémisphère de Saturne, du côté sombre des anneaux. C'est un moment périlleux pour la sonde car à cette vitesse, un grain de 1 cm peut transpercer et détruire la sonde pour de bon ; mais cette région est connue aussi pour être relativement vide de matière. Quand bien même, le détecteur de poussières de Cassini s'est mis à crépiter fortement au moment du passage. Pour minimiser les risques la majorité des instruments à bord étaient alors en mode "protection", c'est-à-dire en veille pour consacrer la totalité de l'énergie aux propulseurs. Après le passage, Cassini a littéralement "survolé" les anneaux à basse altitude à moins de 60 000 km (pour comparaison, les anneaux principaux font 280 000 km de diamètre), ouvrant alors tous ses instruments pour



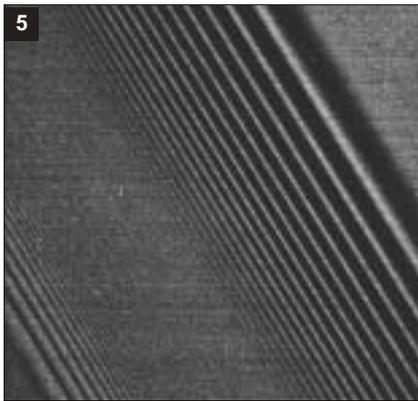
photographier le système d'anneaux comme jamais ! À ce moment les fusées de Cassini sont allumées à pleine puissance, vers l'avant, pour freiner fortement la sonde. Mais le moment le plus critique est encore à venir. La gravité de Saturne incurvant très fortement la trajectoire de la sonde, la sonde est obligée de passer dans l'ombre de la planète. Comme la Terre est proche du Soleil, nous perdons alors la communication avec la sonde, pendant environ 90 minutes. 90 minutes de silence pesant, en espérant que tout se passe comme prévu. Avec quelques minutes d'écart avec les prévisions, le réseau d'antennes terrestres, le Deep Space Network reçoit à nouveau le signal de la sonde. Tout est en état de marche, la sonde se porte bien et se trouve sur la trajectoire prévue. 6 heures plus tard, à l'aube du 1er Juillet 2004, Cassini tourne lentement son antenne de communication vers la Terre et nous renvoie ses premières données... C'est le début de quatre années de mission en orbite autour de Saturne.

Un an après cet évènement, nous pouvons dresser une première liste (il est encore trop tôt pour un bilan) des principales découvertes de Cassini concernant les anneaux de Saturne. Un premier résultat simple et parlant est une image en vraies couleurs des anneaux (image 1). Ils présentent clairement une teinte claire ivoire, légèrement orangée, signature de la forte présence de

glaces contaminées par des silicates et des éléments carbonés. On remarque également l'infinie richesse des structures dans les anneaux. Comme l'avait vu *Voyager* 20 ans plus tôt, ces derniers sont parcourus de milliers de sillons, qu'on pense formés par les satellites avoisinants.

Des ondes à l'infini

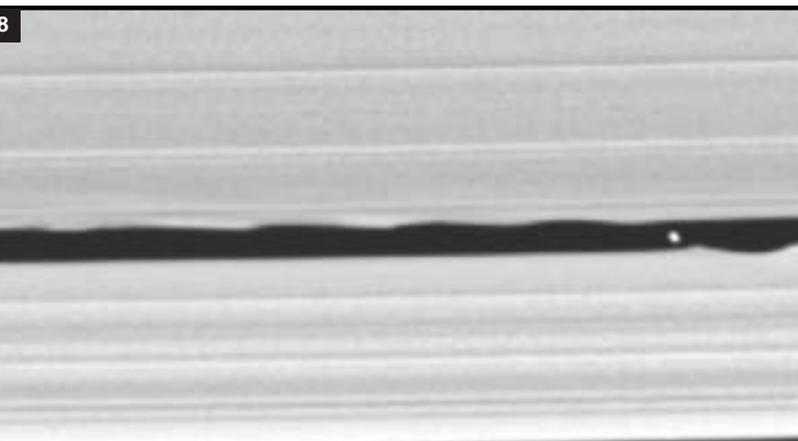
Au moment de la mise en orbite, certaines de ces ondes ont été observées à haute résolution, comme sur l'image 5, où un pixel représente environ 300 mètres (contre 10 km pour *Voyager*). Deux familles d'ondes sont visibles ici,



5 – Ondes dans l'anneau A

formant comme des cordes de guitares. En haut à droite nous voyons une onde de courbure déclenchée par une résonance avec le satellite Mimas. Le maté-

riau dans les anneaux de Saturne entre en résonance avec un satellite quand la période orbitale de l'un est commensurable avec celle de l'autre. Dans le cas présent les particules des anneaux font 5 tours autour de Saturne quand Mimas en fait exactement 3 (résonance 5 : 3). Comment se déclenche une onde de courbure ? Mimas est sur une orbite légèrement inclinée par rapport aux anneaux, donc une fois par orbite, Mimas attire verticalement le matériau tantôt vers le haut, tantôt vers le bas. Cette perturbation verticale déclenche une onde verticale, en forme de "tôle ondulée" se propageant vers Saturne. L'onde visible en bas à gauche est déclenchée par le satellite Prométhée, qui orbite juste à l'extérieur des anneaux (résonance 12 : 11). La forme de cette onde est différente de celle de la précédente car c'est une onde de densité : à l'endroit de la résonance le matériau est comprimé à cause de la perturbation. S'ensuit alors un cycle de compressions-décompressions sous la forme d'une onde s'enroulant autour de la planète, en direction du satellite perturbateur. De telles ondes, visibles un peu partout dans les anneaux sont de formidables outils de diagnostics pour les anneaux. En effet, la forme de ses ondes permet de déduire plusieurs paramètres fondamentaux des anneaux : leur densité locale (environ quelques dizaines de grammes par centimètres carrés), leur viscosité, mais

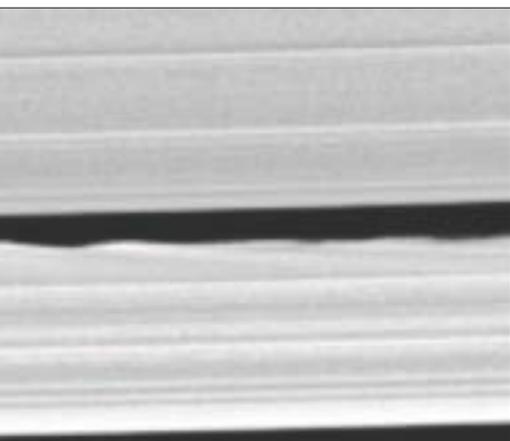


6 – La division de Encke en haute résolution.

8 – Une lune dans la division de Keeler déclenche des ondes sur son passage.

aussi permet de déterminer la masse du satellite perturbateur ! Un formidable exemple nous est donné par les bords de la division de Encke, située à environ 133 000 km de Saturne, à l'intérieur de l'anneau A (image 6). Cette division dans les anneaux fait environ 300 km de large. Des annelets fins de matière sont visibles au milieu de la division, mais le plus étonnant ce sont les bords de la division, en particulier le bord interne fortement ondulé. Une observation attentive de l'image révèle que, sur le bord, à chaque crête est déclenchée une onde spirale plus claire qui s'enroule autour de Saturne. Ces ondes sont déclenchées par un petit satellite appelé Pan orbitant au beau milieu de cette division qui a été découvert dans les images de *Voyager*. Elles sont appelées wake en anglais, que l'on peut traduire par sillage gravitationnel en français. Des résultats récents montrent que la forme des bords est en réalité plus complexe qu'une simple sinusoïde, et qu'ils se déplacent dynamiquement de quelques dizaines de kilomètres après chaque passage de Pan. La complexité de cette onde entraîne une forte ambiguïté pour le calcul de la masse du satellite, il faudrait peut-être diminuer la masse de Pan par deux par rapport aux travaux précédents.

Des annelets fins sont également visibles au milieu de la division, mais ils sont en réalité très fortement discontinus : des grumeaux de matière apparaissent çà et là, dont le nombre et l'ex-

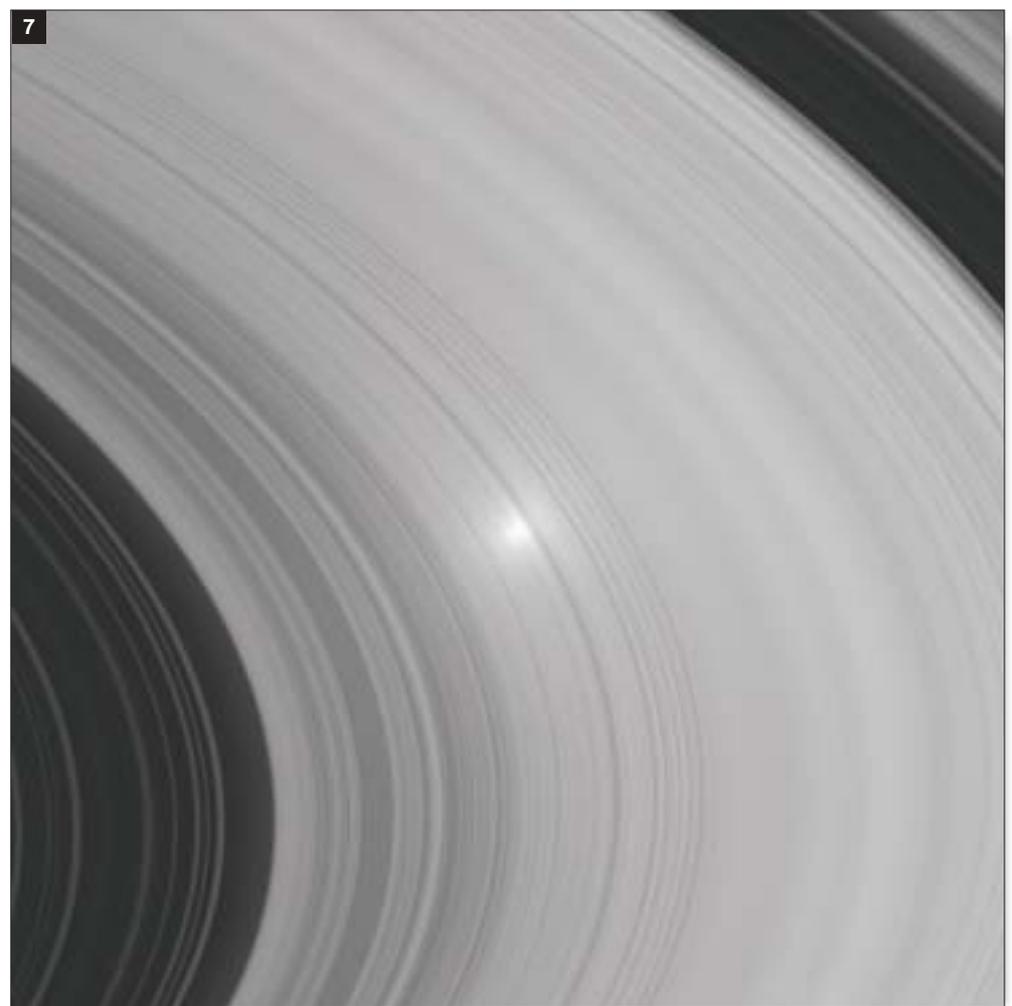


tension change orbite après orbite. Une analyse dynamique attentive révèle que les particules dans ces annelets sont en orbite "à fer à cheval" avec Pan. Cela signifie qu'elles sont sur une orbite très proche de Pan et qu'elles rencontrent périodiquement ce dernier. Au moment de la rencontre, l'orbite est alors légèrement déplacée soit vers l'extérieur soit vers l'intérieur et les particules repartent en s'éloignant du satellite. Ce

joli scénario ne marche que si les orbites sont strictement circulaires. Des simulations numériques récentes ont montré que ce mécanisme est capable de briser et de régénérer des grumeaux de matière dans les annelets. En effet quand un grumeau s'approche trop près de Pan, au moment de la rencontre, l'interaction gravitationnelle avec le petit satellite peut briser le grumeau en plusieurs morceaux... Cassini devrait nous renvoyer prochainement des films de la division de Encke où nous espérons pouvoir voir cela en temps réel.

Le reflet du Soleil

Cassini peut avoir des points de vue sur les anneaux impossibles depuis la Terre. L'image 7 illustre cela superbement : c'est une vue de l'anneau B, prise il y a quelques semaines. Le point brillant au centre de l'image n'est autre que ... le reflet du Soleil sur les anneaux. Les particules dans les anneaux de Saturne reflètent en général la lumière dans toutes les directions, à l'instar des nuages terrestres. Cependant, la majeure partie de la lumière est renvoyée en arrière dans la direction exacte du Soleil. On appelle cela l'effet d'opposition. C'est ce que nous voyons ici. Au moment de la prise de cette image, Cassini était exactement devant le Soleil et a donc pu photographier cet effet, qui rappelle vivement le reflet du Soleil sur la mer. Il est impossible d'observer l'effet d'opposition depuis la Terre. Cette image



7 - Reflet du Soleil sur l'anneau B de Saturne.

fait partie d'une série où nous voyons lentement dériver le reflet du Soleil depuis l'anneau A jusqu'à l'anneau C. Un film sera disponible prochainement. L'étude de ces images permettra de contraindre un peu mieux les propriétés physiques des particules qui composent les anneaux.

Des satellites dans les anneaux

Au mois de mai 2005, on a découvert un nouveau petit satellite au sein de la division de Keeler (136 000 km), qui se trouve dans l'anneau A de Saturne (image 8). La présence d'une telle lune était soupçonnée au sein de la division de Keeler, car depuis la découverte de Pan dans la division de Encke, on sait que des petites satel-

lites sont capables d'ouvrir des divisions dans les anneaux. Une séquence d'images prise avec la caméra NAC montre le passage de la lune juste sous nos yeux, et montre comment les anneaux se déforment en temps réel sous l'action de la gravité du petit corps. On voit (dans la partie inférieure de l'image) le bord de l'anneau A, et au milieu de la bande sombre de la division de Keeler, une petite lune se déplaçant vers la gauche. Les bords interne et externe (séparés d'environ 50 km) sont parcourus d'ondes qui sont le sillage gravitationnel de la petite lune. L'extérieur des anneaux est situé en bas de l'image. On remarquera alors que l'onde supérieure est en avance sur la lune (plus à gauche) et que l'onde inférieure est en retard (plus à droite). Cela s'explique simplement par la rotation keplerienne : en effet, depuis Newton, nous savons que plus un corps est proche d'une planète, plus il tourne vite. Ainsi, les particules sur le bord interne de la division (bord supérieur) se déplacent plus rapidement que le satellite (la situation est inversée pour le bord externe). En conséquence, la perturbation gravitationnelle induite par le satellite sur le bord interne gagne toujours de l'avance sur le satellite. Cela explique donc pourquoi les ondes internes et externes ne sont pas au même endroit. Le petit satellite fait environ 7 km de diamètre. Des images à plus hautes résolutions montrent que l'onde est très sinusoïdale au passage du satellite, et après trois périodes elles deviennent turbulentes. Cela a été modélisé récemment à l'aide de simulations numériques assez lourdes, cependant le mécanisme à l'œuvre est encore mal compris.

Une lutte sans fin contre les marées

Comment se sont formées toutes ces petites lunes ? C'est une question bien difficile, qui n'a toujours pas de réponse satisfaisante. Les anneaux de Saturne sont si près de leur planète qu'ils sont fortement soumis aux effets de marée. Les effets de marées sont ces forces gravitationnelles qui déforment deux corps trop proches l'un de l'autre (comme les océans sur Terre sont déformés par la présence proche de la Lune). À l'aide d'un calcul simple, on peut montrer qu'un corps à moins de 140 000 km de Saturne ne peut pas accréter de matériau par gravité pour former un satellite. Cette région s'appelle la limite de Roche. Cela est très satisfaisant pour l'esprit, car les anneaux principaux de

La limite de Roche

C'est l'astronome français, Edouard Albert Roche (1820-1883), qui a défini la limite qui porte aujourd'hui son nom. C'est un concept général en astrophysique, que l'on rencontre aussi bien en planétologie, en physique stellaire qu'en physique des galaxies. Deux corps pesants et proches se déforment mutuellement en raison des effets de marées. La limite de Roche est l'endroit où les forces de marées engendrées par le corps principal (ici Saturne) deviennent supérieures aux forces de cohésion d'un petit satellite de cette planète. Si le petit satellite passe dans la région de Roche, alors il se brise. Dans sa version classique, la limite de Roche est définie pour un petit satellite fluide, très fragile, dont la seule force de cohésion interne est sa propre gravité (auto-gravité), comme un amas de rochers tenus ensemble par la seule force de gravitation "rubble piles". On pense que beaucoup des petits satellites de Saturne sont des "rubble piles", ainsi que certains astéroïdes. Pour calculer la limite de Roche, il faut comparer la force de marée engendrée par la planète avec l'auto-gravitation du satellite. La force de marée est la différence de force gravitationnelle qu'exerce la planète entre deux points opposés à la surface du satellite. Si cette différence est supérieure à la force de gravité du satellite, ce dernier se brisera en morceaux. Avec les caractéristiques de Saturne et celles des ses petits satellites, nous trouvons que la limite de Roche se situe à $d \approx 140\,000$ km. Cela a deux implications :

1- Tout "rubble pile" passant à moins de 140 000 km de Saturne sera déchiré par les forces de marées.

2- Il n'est pas possible d'accréter un satellite à moins de 140 000 km du centre de Saturne.

Il est intéressant de noter que les anneaux principaux de Saturne s'arrêtent brutalement à 140 000 km (ils occupent donc toute la région de Roche), au-delà on trouve une myriade de satellites. En théorie, il n'est pas possible de trouver des anneaux denses au-delà de cette limite. Notons également que les anneaux de poussières de Saturne (anneaux E et G) sont au-delà de cette limite, mais toute accréation y est impossible car les poussières se rencontrent à trop grande vitesse pour s'accréter.

La limite de Roche définie ainsi ne s'applique qu'à des objets très fragiles, et non à des objets solides et résistants. Par exemple, les humains, les plantes et rochers à la surface de la Terre sont très à l'intérieur de la limite de Roche de notre planète, cependant, ils résistent aux forces de marée car leurs forces de cohésion internes (les liaisons chimiques) sont très puissantes, bien supérieures à leur auto-gravitation.

Pour en savoir plus : http://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Roche
<http://scienceworld.wolfram.com/physics/RocheLimit.html>

Saturne occupent justement tout l'espace de la région de Roche de Saturne en dessous de 140 000 km. Au-delà de 140 000 km, on trouve les satellites qui eux, clairement, ont pu s'accréter. Les anneaux de Saturne occuperaient donc cette zone où toute accréation est impossible, où la matière peut seulement subsister sous forme de petits grains. Mais des satellites comme Pan ou le petit dernier découvert dans la division de Keeler sont très à l'intérieur de la limite de Roche, et on voit difficilement comment ils ont pu se former ici. Peut-être sont ils nés à l'extérieur de cette limite ? Ou peut-être ont-ils un cœur si dense qu'il permettrait de contrebalancer les effets de marées ? Les mesures de densité suggèrent cependant qu'ils sont très poreux. Le mystère reste donc entier... Mais en réalité une certaine forme d'accréation est cependant possible au sein des anneaux, mais très limitée. En effet des simulations numériques montrent qu'en dépit des effets de marées, la matière a tendance à se regrouper en "grumeaux" organisés en filaments éphémères et déchirés en permanence par la marée. Si cela est vrai, les

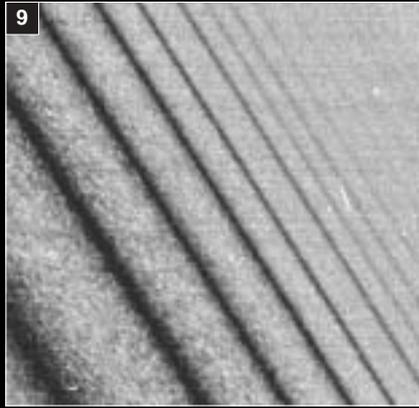
anneaux de Saturne ressembleraient à une sorte de structure cotonneuse à l'échelle de quelques centaines de mètres. On appelle cela des ondes de Jeans. Ces ondes sont des instabilités gravitationnelles classiques dans les disques. On les retrouve à toutes les échelles dans l'univers et dans tous les systèmes autogravitants. Par exemple lors de la formation d'une étoile dans une nébuleuse, le gaz s'effondre dans un disque et des ondes de Jeans se forment. Le même type de mécanisme est invoqué dans les disques protoplanétaires pour former certaines planètes géantes. Mais dans les anneaux de Saturne, à la différence des deux exemples précédents, ces ondes ne peuvent pas former de corps sphériques car la marée l'empêche et étale en permanence ces grumeaux en filaments. Il semble que Cassini ait observé certaines de ces ondes dans l'anneau A de Saturne (image 9). Dans cette image à très haute résolution (1 pixel \approx 200 m), prise au moment de la mise en orbite de Cassini, pour la première fois la microstructure des anneaux se révèle à nos yeux : nous voyons que les anneaux

à cet endroit ne sont pas constitués d'un nuage homogène de grains mais plutôt de filaments cotonneux. Il est probable que ce sont là les mêmes ondes que celles obtenues dans les simulations numériques.

L'anneau F, en perpétuel changement

En bordure de la limite de Roche de Saturne, à 140 000 km, nous sortons du royaume des anneaux. À cet endroit très précisément se trouve un des objets les plus étonnant du Système solaire : l'anneau F. À lui seul, cet anneau ténu épuise le tiers des publications sur les anneaux planétaires. Voyage dans un monde au seuil de la destruction...

L'anneau F est le dernier des anneaux principaux, un ruban étroit de 1 000 km de large se déroulant à 4 000 km à l'extérieur de l'anneau A (image 10). Il fut découvert par les sondes Voyager et Pioneer. C'est une des structures les plus dynamiques du Système solaire, que l'on voit évoluer en quelques heures seulement. Il est flanqué de deux petits satellites, Prométhée et Pandore qui orbitent à l'intérieur et à l'extérieur de l'anneau, et qui le déforment périodiquement. L'anneau F présente de très nombreuses structures (des "grumeaux", des "torsades", des "veines"). On pense depuis longtemps que Prométhée et Pandore



9 – La structure filamenteuse des anneaux de Saturne.

sont à l'origine d'une grande partie de ces structures. Cassini en a apporté récemment la preuve éclatante: Prométhée, le plus massif des deux est si proche de l'anneau F qu'il le rencontre périodiquement et en arrache des filaments de matière (image 11). De part et d'autre du filament on voit clairement que la trajectoire des annelets est déformée. En effet l'orbite de Prométhée est légèrement elliptique, celle de l'anneau F aussi, mais ces deux ellipses ne sont pas alignées. Si l'on dessine deux ellipses non alignées sur une feuille, on s'aperçoit que dans une certaines région elles sont au plus proches et que

180° après elles sont au plus loin. Donc, Prométhée a une rencontre proche une fois par orbite avec l'anneau. Entre deux rencontres avec Prométhée l'anneau F a tourné de 4 degrés seulement. Ces déformations périodiques s'organisent en draperies quand elles s'éloignent du satellite. Comme un petit satellite perturbant un anneau déclenche une perturbation périodique, certains auteurs ont suggéré dans les



11 – Le satellite Prométhée arrachant un filament de matière à l'anneau F.

années 80 et 90 qu'une analyse de toutes les structures périodiques dans un anneau fin, ici l'anneau F, révélerait la présence de tous les satellites environnants. L'idée est

10 – Vue du bord externe des anneaux. De l'intérieur vers l'extérieur (de gauche à droite) : la partie interne de l'anneau A, la division de Encke avec le petit satellite Pan, la partie externe de l'anneau A, la division de Keeler (ligne noire), et après 4 000 km de vide, l'anneau F.

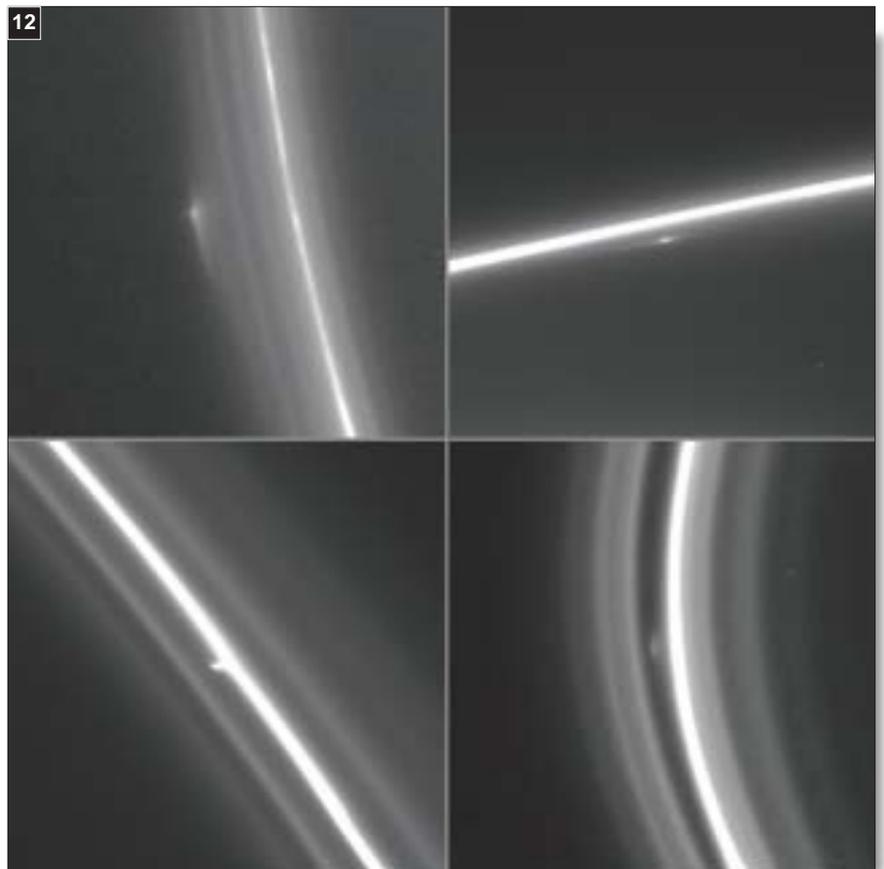
simple et le résultat étonnant. Quand on prend une image de l'anneau F et que l'on en fait une transformée de Fourier (un outil mathématique qui révèle toutes les périodicités d'une structure)... on trouve des dizaines de périodes différentes ! La période de 4° due à Prométhée se retrouve très bien, celle due à Pandore a récemment été trouvée en utilisant des images Cassini, mais on ne sait pas quels satellites pourraient causer toutes les autres... Sur la base de ces résultats de nombreux auteurs pensent que l'anneau F abrite une population de tous petits satellites qui impriment leur périodicité dans l'anneau F. Cette idée, en fait, remonte à l'époque de la sonde Pioneer où déjà certains auteurs avaient suggéré, avant même d'avoir observé l'anneau F, la présence d'une population de petites lunes à cet endroit. Nous voyons qu'une fois de plus les anneaux sont un outil de diagnostics pour les satellites !

Que nous apprend Cassini sur cette population hypothétique de petites lunes ? Nous l'avons peut-être trouvé... mais le résultat est étonnant : on a découvert une dizaine de petits satellites étranges. Étranges car ils n'ont été observés que dans quelques images, et semblent ensuite disparaître... C'est peut-être une nouvelle famille d'objets dans le Système solaire des anneaux (traduction de l'anglais ringmoons), visibles sur l'image 12. L'image révèle que ce ne sont pas simplement des points de lumière, mais plutôt des structures allongées avec une zone brillante suggérant un cœur plus dense entouré d'une cohorte de particules qui peut-être s'étale avec le temps. L'un d'entre eux, appelé S6, a été trouvé en novembre 2004, puis perdu, puis retrouvé à nouveau quelques mois plus tard... Ces petites lunes sont peut-être des satellites éphémères. Que nous dit la théorie ? L'anneau F se trouve précisément à la limite de la zone de Roche de Saturne, là où les forces de marées contrebalancent exactement les forces d'accrétion entre grains. On pense donc qu'à cet endroit, des grumeaux de matière peuvent s'accréter, subsister pendant quelques orbites, et ensuite disparaître dans un nuage de fragments sous l'effet destructeur des forces de marées ou des collisions. Il est fort probable que la structure si complexe et changeante de l'anneau F soit le reflet de cet équilibre instable de la matière, au bord de l'accrétion, au bord de la destruction. Les multiples structures périodiques identifiées dans l'anneau F pourraient être la signature de cette population éphémère.

Mais l'anneau F nous réserve encore bien des surprises. Des travaux très récents montrent même que les filaments à l'intérieur et à l'extérieur de l'anneau sont organisés en spirale, un peu à l'instar des bras spiraux des galaxies lointaines. Cette spirale peut être formée après une collision d'un satellite avec l'anneau F... Cela est encore en cours d'étude, mais nous avons peut-être trouvé là le premier anneau spiral de Saturne, s'enroulant autour de l'anneau F. Mais le spectacle continue ! Saturne est une planète très aplatie aux pôles à cause de la forte force centrifuge à sa surface (un jour dure 10 h seulement sur Saturne). Cette déformation

À la découverte d'un monde vivant...

Il y aurait encore tant à dire sur les résultats de la mission Cassini. Nous n'avons qu'effleuré le sujet ici en parlant des anneaux principaux de Saturne. Cassini nous a fait également découvrir le monde caché de Titan, celui glacé d'Encelade, a révélé des arcs de matière dans les anneaux de poussières et la présence de la plus grande tornade dans l'atmosphère de Saturne. La sonde n'est en orbite que depuis un an, ce n'est donc qu'un début. C'est un monde vivant en évolution constante que nous



12 – Petits satellites éphémères observés dans l'anneau F de Saturne.

du globe induit une précession des orbites autour de la planète (le grand axe des orbites elliptiques tourne dans le temps). On pourrait montrer qu'à la fin de l'année 2009 les orbites de Prométhée et de l'anneau F seront anti-alignées, ce qui signifie que Prométhée va physiquement traverser l'anneau F. On s'attend à une déformation extrêmement sévère de l'anneau. Assister à cet événement nous permettra de mieux comprendre de quoi est fait l'anneau F et les processus à l'œuvre en son sein.

découvrons. Quatre années ne suffiront pas à dépouiller tous les résultats. À l'heure actuelle, Cassini nous transmet pas loin de 500 nouvelles images chaque semaine et l'archive approche les 100 000 images ! Le flux de données est tel que seule une petite fraction de cette information est exploitée actuellement. Mais Cassini n'est pas seulement une mission scientifique dans l'espace, c'est aussi une aventure humaine dans le temps qui impliquera au moins trois générations de chercheurs et d'ingénieurs. ■

Toutes les images © NASA/JPL