

# Anneaux et satellites de Saturne: L'héritage de Huygens

Cécile Ferrari

<sup>(1)</sup>Laboratoire AIM, UMR 7158, Université Paris 7-Denis-Diderot & DAPNIA/DSM/CEA Saclay,  
Bât. 709, Orme des Merisiers F-91191 Gif sur Yvette cedex,  
Email: cferrari@cea.fr

## Résumé

En 1655, il y a trois cent cinquante ans, Christian Huygens (1629-1695) découvrait les anneaux de Saturne et son satellite le plus gros, Titan. Il bénéficiait pour cela d'une lunette équipée des meilleures lentilles de l'époque. Depuis, des générations d'astronomes ont poursuivi l'exploration des environs de Saturne, avec des instruments toujours plus performants, installés aux foyers de puissants télescopes terrestres ou embarqués sur des sondes spatiales. Il est remarquable de constater qu'à travers les siècles, la plupart des satellites réguliers de Saturne ont été découverts, comme Titan, lors du passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne, un phénomène qui a lieu tous les quinze ans environ. Lors de leur survol de la planète en 1980 et 1981, les sondes Voyager ont permis de transformer ces points de lumière en mondes à part entière. Elles ont aussi déniché les plus petits d'entre eux, tout près des éblouissants anneaux. C'est en 1995 que les plus gros télescopes terrestres ont été capables de les détecter, en un clin d'œil. Plus récemment, la capacité informatique de traiter d'énormes quantités de données dans un délai raisonnable a permis de découvrir du sol terrestre une grande famille de satellites irréguliers dans la banlieue lointaine de Saturne. Le relais est désormais passé à la sonde Cassini, qui a entamé en Juillet 2004 une exploration détaillée de ce long cortège pour comprendre les conditions de formation du système de Saturne. La sonde Huygens elle, détachée de la sonde Cassini en Décembre 2004, nous a renvoyé il y a peu les premiers paysages de Titan.

## Huygens découvre les anneaux de Saturne et Titan

Christian Huygens a livré ses découvertes sur la planète Saturne dans son ouvrage "Systema Saturnium"<sup>1</sup>. Celles du satellite Titan et du disque des anneaux y sont remarquablement illustrées. Un schéma, en particulier, explique très clairement que l'aspect changeant de Saturne dans le ciel est du à la présence d'un anneau autour de la planète (Fig. 1). En effet, depuis les observations de Galilée en 1610, la planète avait été observée à de multiples reprises. Son apparence dans le ciel était extrêmement variable, ressemblant parfois à une planète triple, d'autres fois à une planète aux curieux appendices, pareils à des poignées. Les observations restaient cependant trop éparses et de qualité inégale pour donner une explication à ce phénomène. P. Gassendi (1592-1655) ou J. Hevelius (1611-1687) montrèrent que ce phénomène était cyclique, d'une période de 29 ans environ.

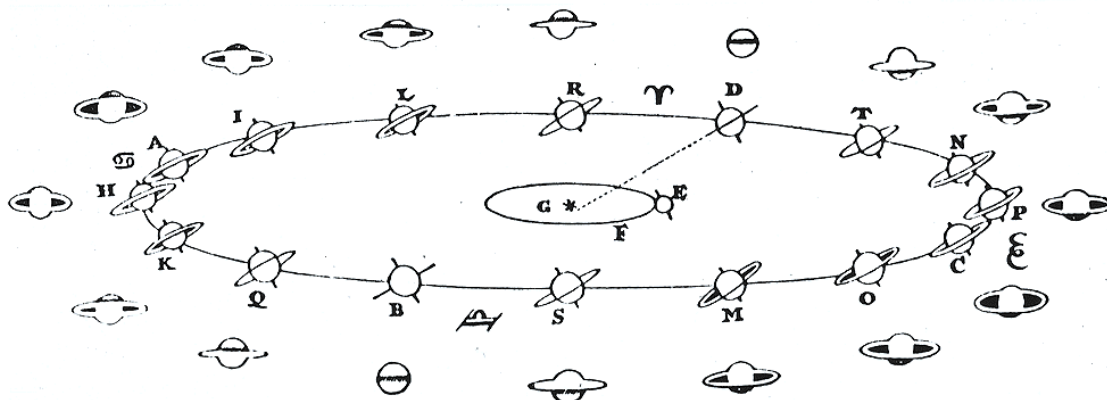


Figure 1. Schéma de Huygens publié dans *Systema Saturnium* (1659) expliquant l'origine de l'aspect variable de Saturne dans le ciel vu de la Terre (E). La période de révolution de la Terre autour du Soleil (G) est d'un an, celle de Saturne est de 29 ans. L'aspect de Saturne change parce que son axe de rotation est incliné par rapport au plan de son orbite et que la planète possède un anneau dans son plan équatorial. Lors du printemps et de l'automne saturniens (D et B, tous les 15 ans environ), les anneaux sont vus par la tranche par un observateur terrestre ; lors des étés boréal et austral (P, A) les anneaux sont ouverts au maximum (~27 degrés d'inclinaison par rapport à l'écliptique), la planète semble alors avoir des poignées (Smithsonian Institution Libraries/ Digital Collection).

C'est grâce à la qualité de son télescope de 7 cm de diamètre et 7 m de longueur focale, le plus gros du monde à l'époque, que Huygens a observé précisément les changements de Saturne et proposé qu'ils soient dus à la présence d'un anneau. Il a aussi prédit que le prochain passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne aurait lieu en 1671. J.D Cassini confirmera la justesse de la prédiction douze ans plus tard, ce qui assoira définitivement la thèse de Huygens d'un anneau autour de Saturne. Huygens a observé Saturne en Mars 1655, environ un an avant le passage de la Terre dans le plan des anneaux de 1656. C'est alors qu'il a découvert Titan, au moment où les anneaux sont vus par la tranche, donc quasiment invisibles (Figure 2). C'est à l'occasion des différents passages de la Terre dans le plan des anneaux, lorsque leur « pollution lumineuse » est moindre que de nombreux satellites de Saturne vont être découverts. La découverte de Titan à ce moment précis ouvre une nouvelle ère de l'exploration de l'environnement de Saturne pour les générations à venir.

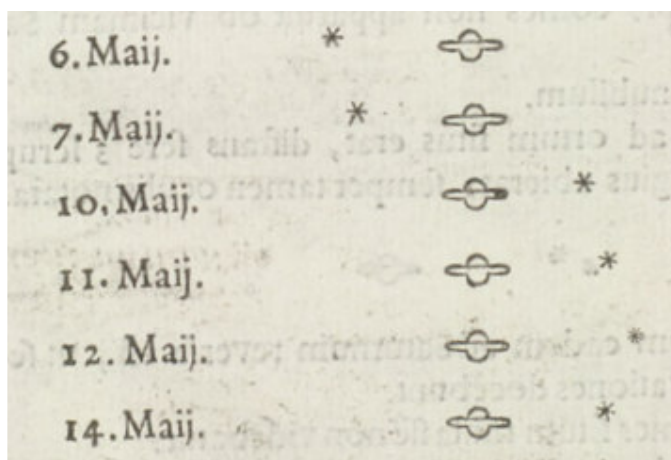


Figure 2. Schéma de Huygens rapportant sa découverte du satellite Titan (Luna Saturnia dans le texte<sup>1</sup>). Les observations couvrent ici la période du 6 au 14 Mai 1655. Titan apparaît comme une petite étoile voyageant de part et d'autre de la planète (Smithsonian Institution Libraries/ Digital Collection).

## De Titan aux plus gros blocs des anneaux de Saturne

Les moissons de nouveaux satellites vont s'échelonner régulièrement au cours des siècles à l'époque des passages de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne. Titan (le numéro VI des satellites de Saturne dans la nomenclature de l'Union Astronomique Internationale) a un diamètre de 5150 km et tourne autour de Saturne à quelques vingt rayons saturniens de distance (le rayon de Saturne vaut  $R_S = 60330$  km). J.D Cassini (1623-1712) découvre lors du passage dans le plan de 1671 les satellites Japet (VIII) et Rhéa (V), d'environ 1500 km de diamètre et tournant autour de Saturne à des distances de  $59 R_S$  et  $8.7 R_S$  respectivement. Il réitère la méthode en 1684, juste avant le prochain passage dans le plan prévu et découvre deux autres satellites de 1000 km de diamètre environ, Dioné (IV) et Téthys (III) à des distances de  $6.2$  et  $4.9 R_S$ , donc plus proches et plus petits. Son télescope a un diamètre de 15 cm et une longueur focale de 30m. Les découvertes sont rares au XVIII<sup>ième</sup> siècle. William Herschel, le découvreur de la planète Uranus, trouve pourtant deux nouveaux satellites en 1789, Mimas (I) et Encelade (II). Son télescope a un diamètre de 1,22 m et une longueur focale de 12m. Ces nouvelles lunes de Saturne sont dix fois plus petites que Titan et toujours plus proches de Saturne, à  $3.1 R_S$  et  $3.9 R_S$  de la planète respectivement. Au cours du XIX<sup>ième</sup> siècle, deux satellites deux fois plus petits encore, Hyperion (VII) par Bond et Lassell pendant le passage de 1878, et Phoebe (IX) par W. Pickering en 1898, sont découverts par contre beaucoup plus loin de Saturne, à  $24.5 R_S$  et  $214.6 R_S$  respectivement. W. Bond détecte Hypérion avec un télescope de 0,4m de diamètre seulement, celui de Lassell est de 0,6m. Phoebe est la première lune de Saturne découverte grâce à la plaque photographique sur un télescope de taille modérée. C'est aussi le seul des neuf satellites alors connus de Saturne à ne pas avoir été découvert durant un passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne.

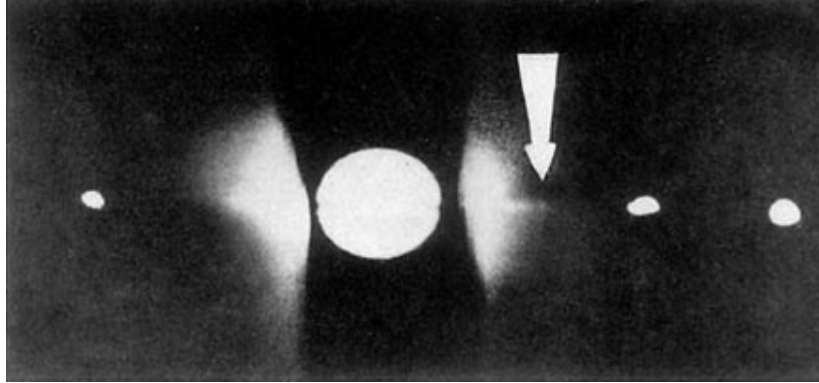


Figure 3. Photographie de Saturne avec le télescope de 1,07m de l'Observatoire du Pic du Midi le 15 Décembre 1966. Le temps d'exposition est de 20 mn. Janus apparaît clairement près des anneaux principaux vus par la tranche (pointé par la flèche). Dioné est visible à gauche de Saturne, Titan est la tâche la plus brillante sur la droite, Encelade et Téthys forment le point entre Titan et Janus. La lumière de Saturne a été significativement atténuée par un filtre absorbant.

A cette époque, il devient difficile de sonder l'environnement proche de Saturne, en deçà de  $3 R_S$ . La lumière diffuse de la planète et des anneaux, qui s'étendent jusqu'à  $2.3 R_S$ , reste très gênante. Les détections directes à l'œil sont maintenant peu efficaces et il faut faire appel à de nouvelles techniques pour pousser plus loin l'exploration. Le satellite Janus (X), de 190 km de taille est découvert à une distance de  $2.5 R_S$  par A. Dollfus durant le passage dans le plan de 1966, en utilisant une technique de type coronographique sur un télescope de 1,07m de diamètre. La lumière de Saturne est bloquée et sa lumière diffusée n'atteint pas la plaque photographique (Figure 3). Le temps d'exposition utilisé est alors de 20 mn. Le compagnon

orbital de Janus, Epiméthée (XI) est détecté par Walker à la même époque. Comme leur orbite sont identiques, il naît à cette époque une confusion sur leur identité jusqu'au travail de Fountain et Larson<sup>2</sup> en 1977 qui montrent que ces deux objets sont bien différents. Dans les années 70, grâce à l'avènement des caméras électroniquegraphiques montées sur des télescopes de 1 à 2m de diamètre, de nouveaux satellites, plus petits, sont découverts assez loin de Saturne. Pendant le passage dans le plan de 1980, Hélène (XII), de 30 km environ, est découvert sur la même orbite que Dioné, à 6.2  $R_S$  de Saturne, Télésto (XIII) et Calypso (XIV), d'une taille de 25 km, sont eux découverts sur la même orbite que Téthys, à 4.9  $R_S$ .

C'est alors que commence la fantastique aventure de l'exploration spatiale des planètes géantes du Système Solaire. La sonde Pioneer 11 ouvre la route vers Saturne en 1973 et survole la planète en Septembre 1979. Les sondes Voyager 1 et 2 suivent en 1980 et 1981. Leurs caméras ne sont plus éblouies par la lumière des anneaux et peuvent aisément les explorer dans tous les sens. Trois nouveaux satellites sont détectés en quelques dixièmes de secondes de temps de pose : Atlas (XV), Prométhée (XVI) et Pandore (XVII). Atlas, de 40 km de taille environ, tourne près du bord des anneaux principaux à une distance de 2.28  $R_S$ . Prométhée et Pandore, d'une centaine de km de taille, eux gardent l'anneau F, étroit et hétérogène, dans la banlieue très proche, à une distance d'environ 2.3  $R_S$  (Figure 4). Le dix-huitième satellite de Saturne, Pan (XVIII), est découvert dans la division de Encke de l'anneau A, dix ans après que les images aient été prises. D'autres satellites ont été repérés au passage par les sondes mais jamais confirmés. Trois cent trente six ans après la découverte de Titan, on connaît dix-huit satellites de Saturne (Figure 5); les plus petits sont au moins deux cents fois plus petits que Titan; plus des deux tiers d'entre eux ont été découverts pendant ces époques très particulières que constituent les passages de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne.

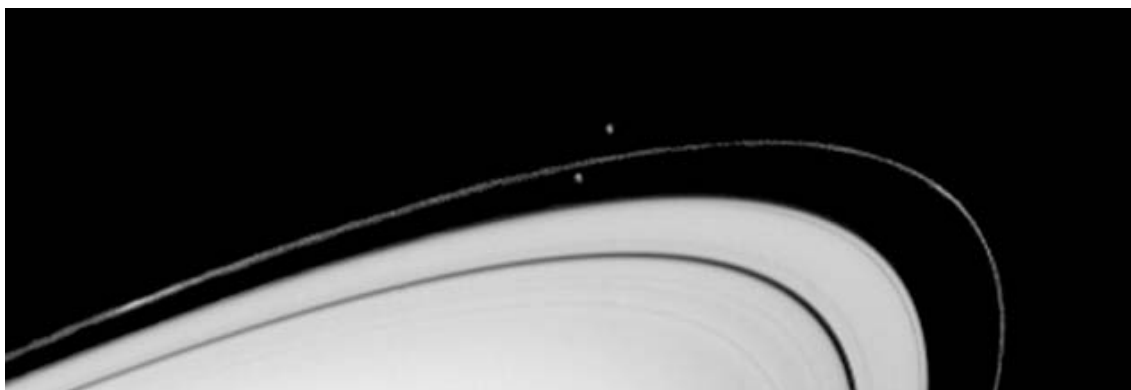


Figure 4. Une image des sondes Voyager montrant l'anneau A de Saturne, le plus dense et le plus brillant ici, coupe par la division de Encke, ainsi que l'anneau F et ces deux satellites gardiens, Prométhée (intérieur) et Pandore (extérieur). On peut voir des variations de densité le long de l'anneau F, appelés arcs par analogie structurelle avec les arcs de Neptune (NASA/JPL).

En 1995, les astronomes sont prêts pour observer une série exceptionnelle de passages dans le plan des anneaux de Saturne : trois passages de la Terre et un passage du Soleil entre Mai 1995 et Février 1996. Une légion impressionnante de télescopes de nouvelle génération équipée d'instruments de grande sensibilité est à l'affût. Le Télescope Hubble, d'un diamètre de 2,4m est en orbite autour de la Terre depuis 1990. Sa situation privilégiée lui permet de produire des images non troublées par les turbulences atmosphériques. La génération des télescopes de 4m à 10m de taille basés sur Terre (Keck, ESO, CFH, etc...) est, elle, équipée de dispositifs d'optique adaptative permettant de corriger en direct ces mêmes distorsions

engendrées par l'atmosphère. Des caméras CCD opérant dans le domaine infrarouge proche sont montées à leur foyer. Elles permettent d'observer Saturne dans la bande d'absorption du méthane, dans une couleur où sa lumière diffuse est réduite afin d'explorer l'environnement très proche de la planète. Des petits champs de vue sont utilisés aussi pour rejeter la planète hors du champ tout en regardant le voisinage des anneaux. Les systèmes d'optique adaptative sont alors tout récents et vont prouver leur efficacité pour l'occasion.

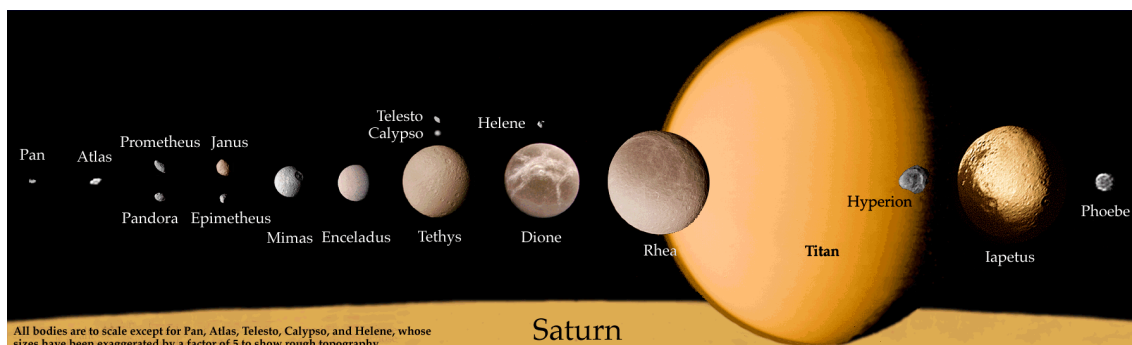


Figure 5. Les dix huit satellites de Saturne découverts entre 1655 et 2000. Treize d'entre eux ont été découverts lors de passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne (Crédit D. Seal).

Entre les deux passages de la Terre dans le plan des anneaux de Mai et Août 1995, pas moins de six circulaires de l'Union Astronomique Internationale<sup>3,4,5</sup> vont annoncer la découverte de 19 nouveaux objets par le télescope Hubble et les télescopes de 3.6m de l'Observatoire Européen Austral (ESO) et du Télescope franco-canadien d'Hawaii (CFHT). Certains satellites sont détectés plusieurs fois par des équipes différentes; après vérification, il en reste onze. Tous se trouvent dans la région de l'anneau F (Figure 6). Au moins deux d'entre eux sont allongés, ressemblant en tout point aux arcs observés par les sondes Voyager quinze ans plus tôt. On détecte même des grumeaux à l'intérieur de ces arcs. Ces nouveaux satellites sont tout petits, entre 10 et 20 km de dimension. La plupart ont été découvert du sol grâce aux systèmes d'optique adaptative et à des caméras CCD utilisant des temps de pose de quelques secondes seulement. Cette nouvelle génération de télescopes s'est montrée aussi performante que les sondes Voyager dans les conditions très spécifiques du passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne.

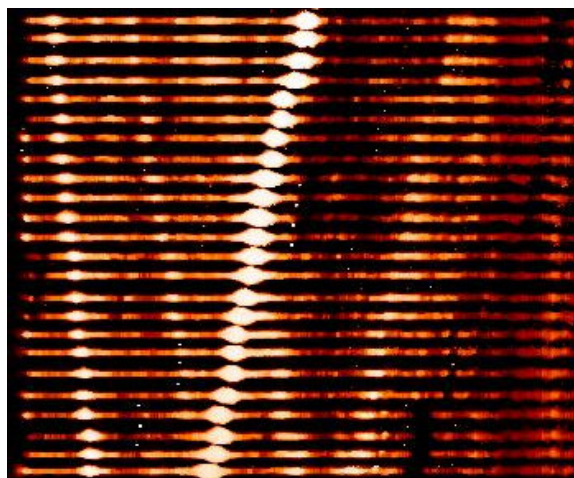


Figure 6. Mosaïque d'images empilées montrant les anneaux de Saturne vus par la tranche en fonction du temps. Le temps croît vers le haut de l'image, la série s'étend sur 15 mn environ, le temps

*de pose pour chaque image est de quelques secondes. Les images ont été prises le 10 Août 1995 avec le télescope CFH équipé du système d'optique adaptative de l'Université d'Hawaii. L'extrémité des anneaux est sur la gauche, Saturne est en dehors du champ sur la droite. La ligne oblique la plus brillante au milieu de la mosaïque est la trace de Janus qui passé devant les anneaux. La ligne oblique sur la gauche est celle de Prométhée qui passe derrière les anneaux et qui va arriver à l'anse. Trois autres lignes presque parallèles à la trace de Prométhée sont des grumeaux de l'anneau F (Figure 4). Un arc de l'anneau F laisse son empreinte oblique et large à droite de la trace de Janus.*

D'autres grumeaux et arcs de l'anneau F ont été découverts cent jours plus tard lors du passage du Soleil dans le plan des anneaux en Novembre 1995<sup>3,4,6</sup>. Cette géométrie est tout à fait particulière car lorsque le Soleil se couche sur les anneaux, ils s'éteignent doucement et disparaissent presque. Il est alors facile d'inspecter les environs à la recherche d'objets peu brillants. La détection d'arc à plusieurs jours d'intervalle a permis de déterminer leur orbite avec une grande précision<sup>6</sup>, pas suffisante cependant pour extrapoler leur position cent jours plus tôt. On ne peut donc dire si ces arcs sont ceux détectés au mois d'Août. Ces structures azimutales sont inattendues car elles devraient être détruites très rapidement à cause de la rotation différentielle due au mouvement de Kepler. La question de leur durée de vie est donc un point-clé pour comprendre leur nature et leur origine. On sait depuis les missions Voyager que les grumeaux et les arcs de cet anneau se trouvent sur des orbites différentes, éloignées typiquement de 90 km<sup>7</sup>. En cent jours, leur position relative a donc pu changer de plus de 60 degrés de longitude et il est donc difficile de les reconnaître ou bien ces objets se sont détruits et d'autres ont été créés par un mécanisme encore à découvrir. On pense cependant que ces structures résultent de l'interaction gravitationnelle de Prométhée avec l'anneau<sup>8</sup>, mais ce n'est pas encore prouvé observationnellement<sup>9</sup>. Du fait de leur longévité incertaine, ces nouveaux objets n'ont pas reçu le label de satellites de Saturne.

Au gré des saisons saturniennes, la moisson de nouveaux satellites nous permet de mesurer le progrès des techniques d'observations. Trois cent cinquante ans après Huygens, on peut détecter en un clin d'œil des cailloux mille fois plus petits que Titan, en fait les plus gros blocs des anneaux de Saturne.

## De titans en géants

Parmi les dix huit satellites officiellement reconnus en 1991, tous sauf un sont des satellites réguliers, tournant autour de Saturne sur des orbites quasi-circulaires et très peu inclinées, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre si l'on se place au dessus du pôle Nord de la planète. Le lointain Phoebe affiche sa différence. La quête de nouveaux satellites continue après 1995. Si les proches alentours de Saturne redeviennent inaccessibles, les banlieues lointaines peuvent être sondées et les recherches systématiques commencent en 2000. On s'attend à y trouver des satellites irréguliers : petits, sur des orbites très elliptiques et inclinées, des débris errant dans le milieu interplanétaire et capturés un jour dans la sphère d'influence de la planète, là où la gravité de Saturne l'emporte sur la force de marée du Soleil.

La mise à disposition au foyer de gros télescopes, de grandes caméras CCD couvrant plusieurs degrés carrés dans le ciel va permettre de fouiller cette sphère de manière efficace. La capacité à traiter chaque nuit une quantité gigantesque de données va par ailleurs permettre aux scientifiques d'augmenter leur chance de découverte de nouveaux satellites de ce genre. Les télescopes de 3,6m du CFH et de 2,2m de l'ESO vont récolter une fabuleuse moisson de nouveaux candidats satellites à l'été 2000<sup>10</sup>. Ils se trouvent tous très loin de Saturne, entre 187 R<sub>S</sub> et 383 R<sub>S</sub>. Ils semblent se répartir en trois groupes d'orbites d'inclinaison similaire :

Phoebe et le groupe d'Ymir à une inclinaison de 170 degrés, sur une orbite rétrograde donc, le groupe d'Albiorix à 34 degrés d'inclinaison et les groupes de Siarnaq à 46 degrés d'inclinaison. Réobservés et confirmés par différents observateurs, ils acquièrent le statut de satellites et prennent, malgré leur petite taille (6 à 32 km) les noms de géants de diverses mythologies: Ymir (XIX), Paaliaq (XX, Figure 7), Tarvos (XXI), Ijiraq (XXII), Suttung (XXIII), Kiviuq (XXIV), Mundilfari (XXV), Albiorix (XXVI), Skadi (XXVII), Errapio (XXVIII), Siarnaq (XXIX) et Thrym (XXX). Ils complètent la procession des satellites réguliers, les Titans de la mythologie gréco-romaine et leurs descendants.

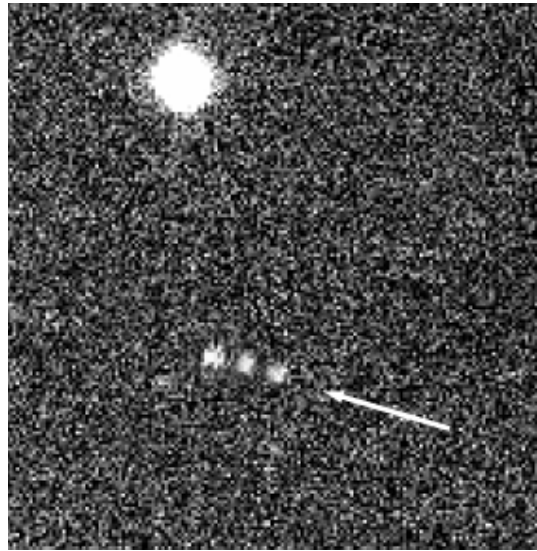


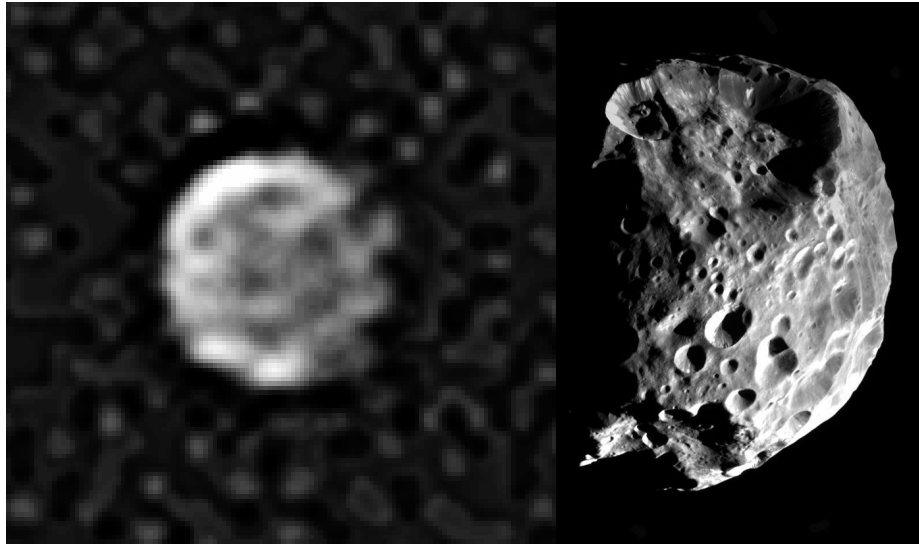
Figure 7. Superposition de trois images du satellite irrégulier Paaliaq (XX) découvert avec le télescope de 2.2 m de l'ESO le 7 août 2000. Les trois images ont un temps d'exposition de 100 s et sont séparées de 15 mn. (Crédit ESO). La grande tâche brillante dans le haut de l'image est une étoile du champ.

On pense que ces regroupements sont le résultat de la fragmentation de corps plus gros capturés par la planète. Cette capture est favorisée si leur énergie orbitale est dissipée par friction dans l'enveloppe de gaz dans laquelle la planète vient de se former. L'étude de ces satellites peut donc nous renseigner sur les conditions régnant aux alentours de la planète à la fin de sa formation. Bien après sa capture, le corps parent est cassé par le bombardement cométaire incessant. Les collisions entre les fragments sont alors trop rares pour qu'ils se recollent à cette distance de Saturne et des groupes se forment<sup>10</sup>. Phoebe est de loin le plus gros de cette tribu de satellites irréguliers. Il est sombre, la fraction de lumière que sa surface renvoie du Soleil n'est que de 8%. Le fait qu'on ait récemment détecté de la glace d'eau à sa surface<sup>11</sup> nous a fait penser que Phoebe est plutôt un corps venant du Système Solaire extérieur, un Centaure ou un objet de la ceinture de Kuiper qu'un astéroïde primitif.

## La mission Cassini-Huygens

La sonde CASSINI-HUYGENS a été lancée le 15 Octobre 1997. Elle est devenue un satellite artificiel de Saturne le 1<sup>er</sup> Juillet 2004 et elle le restera au moins jusqu'en 2008. C'est le plus puissant laboratoire scientifique qu'on ait jamais lancé vers Saturne pour étudier en profondeur ses origines et son évolution. Avant la dernière manœuvre préparant la mise en orbite, le 11 Juin 2004, la sonde a survolé Phoebe à moins de 2000 km d'altitude, survol

d'autant plus exceptionnel qu'il sera le seul de toute la mission. En quelques jours, ce satellite lointain est devenu un monde à part entière (Figure 8). Sa surface est constellée de cratères de toute taille, de 50m à plus de 100 km de diamètre, c'est-à-dire de la moitié de sa taille ! Elle a donc sûrement plus de 4 milliards d'années, un âge cohérent avec la théorie d'une capture très tôt après la formation de Saturne, au moment où le Système Solaire extérieur est encore peuplé d'un grand nombre de petits débris.



**Figure 8 - Gauche** – La meilleure image du satellite Phoebe avant 2004, vue par la sonde Voyager 2 en 1981. Le temps d'exposition est de 2 s et le satellite couvre 10 pixels de la caméra, c'est-à-dire 220 km. Il apparaît à peu près sphérique et de grandes variations de brillance à sa surface semblent associées à des cratères. **Droite** – Phoebe vue par la sonde Cassini-Huygens le 10 Juin 2004. Les plus petits détails visibles ici mesurent 200m environ. Cette image révèle effectivement une surface constellée de cratères de toute taille, donc vraisemblablement très ancienne (Crédit NASA/JPL).

Une recherche systématique en phase d'approche de Saturne a aussi révélé l'existence de 3 nouveaux petits satellites, dont deux, Méthone et Pallene, situés entre les orbites de Mimas et d'Encelade, Polydeuces, lui, est sur la même orbite que Dione et Hélène. Tous ont une taille de 3 km environ. Trois objets ont été découverts dans l'anneau F de Saturne. De part le doute qui subsiste encore à l'heure actuelle sur leur nature et leur pérennité, ils n'ont pas reçu de nom. L'exploration ne fait que commencer et l'actualité est déjà riche de nombreuses découvertes<sup>13</sup>.

Enfin, le 25 Décembre 2004, la sonde européenne Huygens s'est détachée du vaisseau mère Cassini, entamant une historique et glorieuse chute vers le satellite Titan. Le 14 Janvier 2005, la caméra de descente nous a révélé les douces collines de la plus grosse lune de Saturne, les autres instruments nous en donnant les informations météorologiques locales. Trois cent cinquante ans après la découverte de Huygens et ses successeurs réalisent l'exploration in situ de Titan, la plus lointaine jamais effectuée, à plus d'un milliard et demi de kilomètres de la Terre. Et ils rêvent déjà d'y retourner....

## References



1. Huygens, C. *Systema Saturnium*, 1659. The Smithsonian Institution Libraries, Digital collection, 1999.
2. Fountain, J.W. and Larson, S.M. A new satellite of Saturn, *Science*, Vol. 197, 915 - 917, 1977.
3. Nicholson, P.D. et al. Observations of Saturn's ring-plane crossings in August and November 1995, *Science*, 272, 509 - 515, 1996
4. Poulet, F. et al. Saturn's ring plane crossings of August and November 1995: a model for the new F-ring objects, *Icarus*, 144, 135 - 148, 2000.
5. Roddier, F. et al. Adaptive optics observations of Saturn's ring plane crossing in August 1995, *Icarus*, 143, 299 - 307, 2000
6. Charnoz, S. et al. Detection of arcs in Saturn's F ring during the 1995 Sun ring plane crossing, *A&A*, 365, 214-221, 2001.
7. Ferrari, C. et al. Azimuthal distribution of arcs and clumps in the F ring of Saturn during August 1995 ring plane crossing, *BAAS*, 29, 3, 998, 1997.
8. Showalter, M.R. and Burns, J.A. A numerical study of Saturn's F ring, *Icarus*, 52, 526 - 544, 1982.
9. Kolvoord, R.A, Burns, JA. And Showalter, M.R. Periodic features in Saturn's F ring: evidence for nearby moonlets, *Nature*, Vol. 345, 695 – 697, 1990
10. Gladman, B. et al. Discovery of 12 satellites of Saturn exhibiting orbital clustering, *Nature*, Vol. 412, 163 -166, 2001.
11. Owen, T.C. et al. Detection of water ice on Saturn's satellite Phoebe, *Icarus*, 140, 379 - 382, 1999.
12. Porco, C., C. and the Cassini Imaging Team, Cassini Imaging Science: new results on Saturn's rings and small satellites, *Science*,xx,xx, 2005.
13. <http://saturn.jpl.nasa.gov> (site NASA/JPL de la mission Cassini-Huygens et <http://sci.esa.int> (site de l'Agence Spatiale Européenne)