

ARTICLE DE FOND

Le système de Saturne, d'un solstice à l'autre

Cécile Ferrari,

Quelles sont les dernières nouvelles de Cassini-Huygens ? Après un petit tour par Saturne et Titan, Cécile Ferrari nous propose trois énigmes en s'appuyant sur des observations, des hypothèses, des vérifications, en un mot la science en marche.

Retour vers Saturne

Saturne défraie la chronique planétaire depuis le XVII^e siècle. Ses imposants anneaux lui donnent une place à part dans la symbolique collective, Saturne est la réponse à l'injonction "Dessine-moi une planète". Il y a 30 ans, les sondes Pioneer et Voyager ouvraient la route vers Saturne. La sonde CASSINI les a suivies 25 ans plus tard. Ce fut la première mission dédiée à l'exploration du monde saturnien, elle a été mise en orbite autour de la planète en 2004 et finira sa mission en 2017. Elle a d'ores et déjà transformé notre vision de ce petit monde planétaire, cortège de plus de 60 satellites et de nombreux anneaux. À bien y regarder, les scientifiques y ont trouvé surprises, nouveautés mais aussi confirmations de leurs théories et ont résolu quelques énigmes. Un *Cahiers Clairaut* ne suffirait pas à les décrire de manière exhaustive. J'ai choisi trois énigmes qui éclairent, je l'espère, la démarche scientifique d'investigation, celle de Phœbé et Japet, celle d'Encelade et de l'anneau E et celle des hélices dans les anneaux.

Les saisons de Saturne

La planète Saturne met environ 29 ans et demi pour accomplir une révolution autour du Soleil. Son axe de rotation, de direction constante par rapport aux étoiles, est incliné de $26,7^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de son orbite héliocentrique. Tout comme la Terre, Saturne et son système subissent des saisons, rythmées par l'inclinaison apparente du Soleil au lieu où l'on se trouve. C'est Huygens qui en fit le premier la description limpide au XVII^e siècle en expliquant l'aspect changeant de Saturne dans le ciel. L'élévation du Soleil sur le plan des anneaux (qui est aussi le plan équatorial de Saturne) varie donc de $-26,7^\circ$ à $+26,7^\circ$ entre l'été austral et l'été boréal séparés d'un peu moins de 15 ans. À

l'équinoxe, le Soleil est dans le plan de l'équateur de Saturne (et la Terre est proche de ce plan) et les anneaux disparaissent de notre vue. Les satellites reçoivent aussi le rayonnement solaire préférentiellement sur leur hémisphère nord ou sud suivant les saisons et le point le plus chaud de leur surface avoisine celui où le Soleil est à la verticale. Les atmosphères de Saturne et de Titan sont aussi sensibles aux saisons. L'impact saisonnier sur la température observée des anneaux est certain.

La sonde Cassini, une machine à explorer

Rappelons-le, la sonde Cassini-Huygens est le plus gros engin d'exploration jamais lancé dans le système solaire extérieur. Six tonnes, douze instruments scientifiques dont cinq couvrant l'essentiel du spectre électromagnétique de l'ultraviolet au rayonnement radio. Sa trajectoire a été conçue pour assurer la plus grande diversité de points de vue sur les objets et l'exploration la plus exhaustive possible. C'est une trajectoire en pétales, faite d'ellipses dont le périastre et l'inclinaison varient au cours des ans. Elle est optimisée pour satisfaire au mieux les objectifs scientifiques poursuivis par les équipes scientifiques de chaque instrument embarqué.

Les nouveaux visages des Titans et des Géants

Titan

L'événement phare de la mission Cassini restera le largage de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan avec cette caméra de descente qui va nous donner les premières images sous parachute des paysages titaniens. Images infrarouges et balayage radar vont finir par nous dévoiler un cycle

climatique installé, des rivières, des lacs et des dunes. Une question essentielle reste posée parmi tant d'autres : pourquoi et comment Titan garde-t-il une atmosphère azotée si épaisse malgré la photodissociation des molécules par les rayons ultraviolets du Soleil ? Y a-t-il un volcanisme sur Titan apte à dégazer et à l'entretenir ainsi ? Les taches sombres dans lesquelles débouchent les rivières sont-elles vraiment des lacs ? Quelle est leur composition chimique ? Est-ce du liquide ? Les caméras observant dans le domaine visible ont du mal à percer cette atmosphère épaisse. Le proche infrarouge passe et c'est le spectromètre VIMS qui peut nous donner une image de la surface. Le radar qui peut lui aussi percer l'atmosphère, à force de balayage de la surface au fil des années, nous décrit à une résolution unique d'une centaine de mètres, l'altitude et la rugosité de la surface à force de balayage de la surface au fil des années... Un monde à part entière et un article qui s'y consacre.

Phaëbé et Japet,

l'histoire d'une question résolue

Japet, un des plus gros satellites de Saturne (1 400 km de diamètre), a créé la surprise par la découverte en décembre 2004 d'un bourrelet équatorial de plus de 1 000 km de long et 13 km d'altitude dont on cherche l'origine et pour lequel plusieurs hypothèses sont émises : poussées endogènes aptes à créer des montagnes ou bien l'existence d'un autre satellite, brisé par les effets de marée de ce gros satellite qu'est Japet et dont les débris auraient heurté la surface. Mais l'énigme n'est pas là.

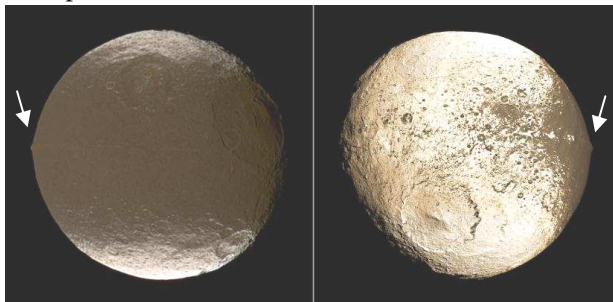


Fig.1. Image de la face "avant" de Japet (à gauche) qui apparaît très sombre comparée à la face "arrière" (à droite) relativement à la direction du mouvement orbital. Cette région très sombre couvre environ 40% de la surface et s'appelle Cassini Regio. On voit clairement sur ces deux images le bourrelet équatorial (flèches).

On sait aussi que Japet a une face sombre, celle orientée dans la direction du mouvement orbital, tel un pare-brise face à la route. En effet Japet est synchrone, il fait un tour sur lui-même dans le même temps qu'il effectue une révolution autour de

Saturne. De ce fait, c'est toujours la même face qui ouvre la route. Corrélation étrange entre cette exposition privilégiée et cette couleur sombre.

La question est posée : d'où vient cette dichotomie ? Endogène ? Un cryo-volcanisme tendant à recouvrir la surface d'un matériau sombre ? Exogène ? Une pollution venue d'ailleurs ? La réponse viendra de Phaëbé.

Là-haut dans le ciel de Japet, navigue Phaëbé, éloigné de quelques millions de kilomètres. Phaëbé est un petit satellite de Saturne de 200 km de diamètre, chef de file d'une quarantaine de petits satellites irréguliers, pour la plupart de taille inférieure à 10 km, découverts de la Terre dans les années 2000. Ils sont irréguliers parce qu'ils sont petits, très distants de Saturne et tournent souvent dans le sens inverse de la rotation de la planète sur elle-même. On les croit venus d'ailleurs, capturés par Saturne.

Car, au-delà de ses éléments orbitaux particuliers, Phaëbé affiche un sombre détonant dans la famille des satellites glacés brillants. Il reflète moins de 10% de la lumière solaire, au lieu du minimum réglementaire de 50%, au même niveau que la face sombre de Japet.

L'hypothèse jaillit d'un lien "chimique" entre les deux, bien avant l'arrivée de la sonde Cassini. Encore faut-il le démontrer ? Et comprendre comment ?

La sonde survole Phaëbé à son entrée dans le système saturnien en juin 2004. Elle en fait pour la première fois des spectres avec le spectro-imageur VIMS, en mesurant la quantité de lumière solaire réfléchie en fonction de la longueur d'onde entre 0,3 et 5 μm .

Les mêmes mesures sont effectuées sur Japet en décembre 2004. L'allure des spectres est étonnamment semblable.

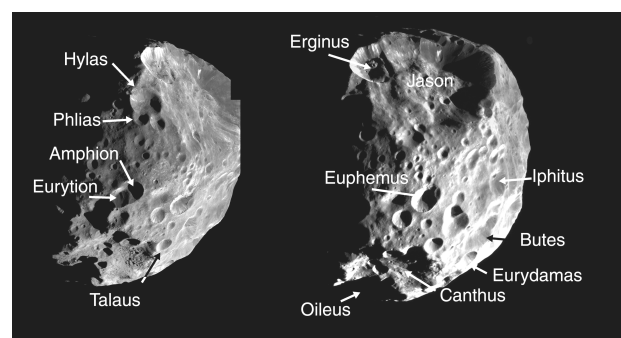


Fig.2. Deux images du satellite Phaëbé prises par la sonde Voyager2 en juin 2004 ; c'est un corps très sombre qui réfléchit moins de 10% de la lumière qu'il reçoit. Son diamètre est d'environ 200 km. Vingt-quatre cratères ont été nommés du nom des Argonautes.

La pollution est bien exogène, de Phœbé vers Japet, encore faut-il décrire comment elle se déroule, et vérifier la vraisemblance des hypothèses.

Et c'est le télescope Spitzer, observateur infrarouge en orbite autour de la Terre, qui va répondre à la question en octobre 2009. Observant dans le domaine infrarouge thermique, à 24 μm , là où les poussières sombres et donc chaudes émettent un rayonnement infrarouge suffisant pour être détecté, il va scruter le système de Saturne.

Des scientifiques bien avertis savent qu'un satellite peut relâcher moult poussières dans l'espace sous l'effet du bombardement météoritique (qui a lieu chez nous comme ailleurs mais qui laboure les surfaces sans atmosphère).

Phœbé ne perdrait-il pas ainsi de sa matière sombre dans un vaste anneau de poussière, matière qui tomberait doucement en trajectoire spirale vers Saturne, sous l'effet de forces dissipatives d'énergie, ... un nuage dans lequel Japet, en orbite inférieure, passerait et collecterait d'innombrables échantillons.

Il s'agit donc de répondre à la question spécifique de savoir s'il y a un anneau de poussières entre Phœbé et Japet, très peu dense sans doute, et donc difficile à détecter... Les poussières sont sombres, donc chaudes (détectables par Spitzer en infrarouge).

Si on regarde cet anneau de poussières par la tranche, son épaisseur apparente va augmenter et la section efficace remplie par les poussières aussi. Spitzer a réussi à détecter l'anneau de Phœbé dans le même plan d'orbite que le satellite, preuve de son lien dynamique avec Phœbé. Et l'anneau s'étend bien jusqu'à l'orbite de Japet. Trente ans donc pour répondre avec certitude à la question.

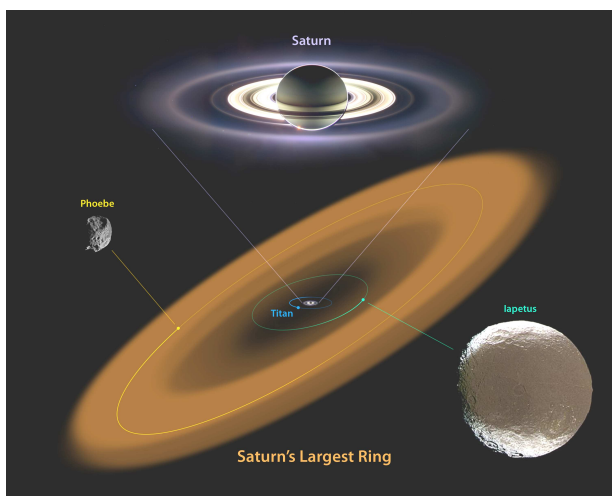


Fig.3. Schéma descriptif des orbites relatives des satellites Japet et Phœbé et de la structure du nouvel anneau découvert.

Encelade et l'anneau E, une activité surprenante

L'anneau E est un anneau diffus très étendu autour de Saturne, à des distances comprises entre 3 et 8 rayons saturniens. Il a été découvert en 1980 dans des conditions d'observations similaires à celui de Phœbé, depuis un télescope terrestre, au moment où la Terre passait dans le plan des anneaux de Saturne et les voyait par la tranche, une technique éprouvée pour la détection d'anneaux ténus...

Apparaissant beaucoup plus dense au niveau de l'orbite d'Encelade, l'hypothèse la plus probable pour l'origine de cet anneau semble être celle d'un Encelade géniteur. Par quel processus ? Bombardement météoritique qui laboure la surface et éjecte de la poussière dans l'espace ? Mais pourquoi lui, le petit satellite de 500 km, plutôt que Téthys, Dioné ou Rhéa, au moins 2 fois plus gros et qui baignent aussi dedans ? Première anomalie lors d'un survol d'Encelade : sa cartographie thermique montre un point chaud au pôle Sud du satellite au lieu d'être situé au voisinage du point sub-solaire où le Soleil est au zénith. Ce point chaud se trouve dans la région des Griffes du Tigre, au sud, région traversée par de grandes fissures. Il faut noter que la surface d'Encelade, satellite recouvert de glace d'eau, n'exhibe dans certaines régions, dont celle-là, que très peu de cratères d'impact, signe que la surface a fortement évolué depuis quelques milliards d'années.

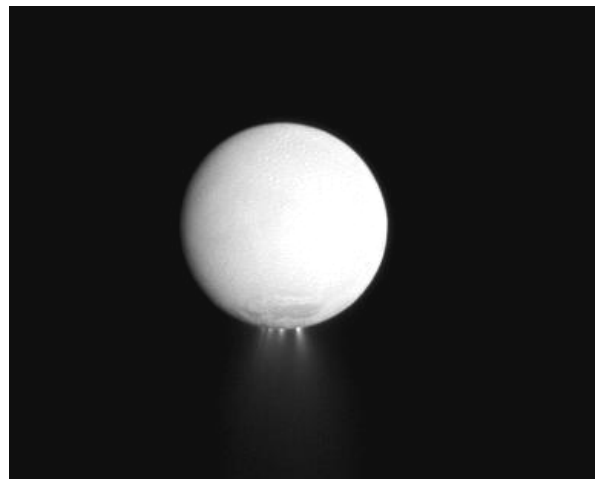


Fig.4. Cette image montre l'hémisphère d'Encelade éclairée par Saturne seulement. Les quatre jets sont vus grâce à la lumière du Soleil qu'ils diffusent, le Soleil étant caché derrière Encelade. C'est la meilleure manière pour détecter des poussières micrométriques. L'image a été prise en décembre 2009.

Les caméras sont reprogrammées et découvrent en 2005 des jets de glace et de poussière qui

s'échappent d'Encelade jusqu'à des altitudes comparables à la taille du satellite. Cette activité est complètement inattendue pour un satellite si petit. D'où vient son énergie ? ! La dissipation d'énergie par friction due à des effets de marée n'est apparemment pas suffisante pour provoquer cette activité. On croyait aussi le satellite trop petit pour avoir une réserve d'énergie radioactive apte à faire fondre la glace en souterrain, qui sous pression pourrait être expulsée sous forme de jets. Le spectromètre infrarouge CIRS est repointé sur les failles au cours de passage à basse altitude et montre qu'elles sont bien plus chaudes que les alentours. Les images de plus en plus précises ont été faites jusqu'à très récemment (février 2011) et permettent maintenant d'en donner les dimensions. Mais l'énigme de la source d'énergie apte à alimenter une telle évolution géologique sur un corps si petit n'est toujours pas résolue. Quel est le moteur d'évolution de ce petit corps glacé ? L'analyse des poussières montre qu'il y a des sels de sodium et de potassium ainsi que des carbonates dans les jets tendant à prouver l'existence d'un océan liquide entre la croûte de glace et un noyau central rocheux dont les minéraux se dissoudraient dans l'océan. Il y aurait donc peut-être suffisamment de roches pour que la radioactivité fasse son office.

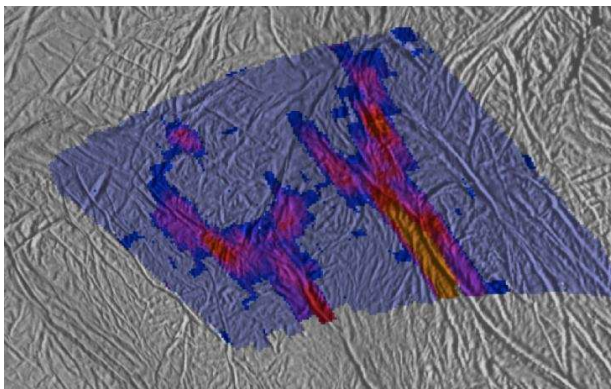


Fig.5. Failles d'Encelade – Carte d'émission thermique des failles d'Encelade dans la région sud des Griffes du Tigre faite par le spectromètre infrarouge CIRS embarqué sur la sonde Cassini. La couleur orange correspond aux flux les plus importants mesurés entre 11 et 16 μm de longueur d'onde et donc à des températures plus importantes. Les jets prennent leur source dans ces failles.

Hélices dans les anneaux

Le lien de parenté entre anneaux et satellites n'est pas encore clair...qui de la poule et de l'œuf ?...Les anneaux ont-ils été formés à partir d'un satellite qui s'est fragmenté dans la limite de Roche de Saturne sous les effets de marée ou bien

les anneaux sont-ils un satellite qui n'a pu s'agglomérer à partir d'un disque de particules ? Certains avancent maintenant aussi que les petits satellites au voisinage des anneaux se sont formés à partir de particules des anneaux, qui se seraient étendus au delà de la limite de Roche. On constate que de petites lunes kilométriques peuvent survivre aux effets de marée à l'intérieur de la limite de Roche, telles Pan (13 km) et Daphnis (5 km) dans les divisions d'Encke et de Keeler. Celles-ci sont-elles des satellites formés plus loin et ayant migré vers l'intérieur des anneaux ou sont-elles les particules les plus grosses des anneaux de Saturne ? Il nous manquait jusqu'à récemment un maillon dans la distribution des tailles entre les particules des anneaux, de taille comprise entre le centimètre et quelques mètres et ces petites lunes. Le manque d'objets de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de taille posait question : s'ils n'existent pas, quel processus empêche leur formation sans altérer la formation de corps plus gros ? S'ils existent, pourquoi n'ont-ils pas été détectés ? S'ils sont le produit d'une fragmentation de corps plus gros, pourquoi ne les voit-on pas ? Il faut noter à ce point que les lunes kilométriques étaient à la limite des possibilités de détection des sondes Voyager, les dernières à être passées dans les environs en 1980 et 1981.

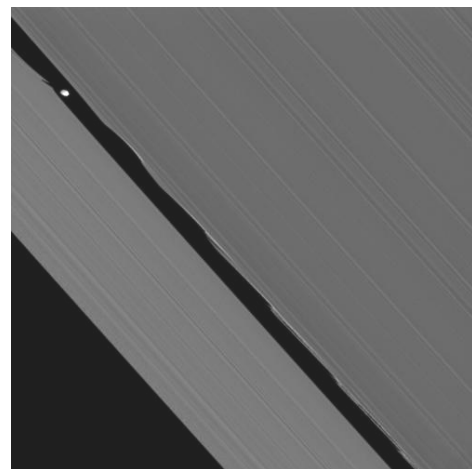


Fig.6. Daphnis dans la division de Keeler.

La réponse est venue très tôt, en 2004 au moment où la sonde Cassini a été mise en orbite autour de Saturne et s'est confirmée tout au long de la mission initiale jusqu'en 2008. Au moment de sa capture par la planète, le 1^{er} juillet 2004, la sonde a frôlé les anneaux à 20 000 km d'altitude, autorisant une résolution de 50 mètres dans l'anneau A de Saturne le plus extérieur, celui dans lequel naviguent **Pan** et **Daphnis** et où les effets de marée sont plus réduits. Ces images ont permis de détecter quelques traces étranges comme des sillons

entrouverts dans l'anneau, très effilées et allongées qu'on a appelé les "hélices". On leur a donné d'ailleurs plus tard (une fois leur caractère éphémère définitivement rejeté) les noms de célèbres pilotes pionniers de l'aviation. On disposait alors de nombreux modèles dynamiques d'interaction entre anneau et satellites nichés dans les anneaux, ce qui a permis de montrer que les formes observées étaient tout à fait compatibles avec l'image que donneraient des petites lunes de quelques dizaines à centaines de mètres qui balaieraient sur leur passage les particules du disque ouvrant ainsi un vide, qui se reboucherait tout de suite après leur passage, expliquant ainsi la forme d'hélice. Seules des lunes d'un kilomètre au moins peuvent ouvrir une division de l'anneau. La dimension de ces structures permet d'estimer la masse et donc la taille de l'objet au centre. La taille des premières découvertes s'échelonnait entre 40 m et 120 m. D'autres ont été découvertes plus tard avec le même ordre de grandeur en taille. Il semble même qu'elles soient distribuées en ceintures de petites lunes au sein de l'anneau A, la plus dense étant centrée à 129 000 km de la planète. On en compte plus de 150 maintenant ! Leur nombre sur une surface donnée permet d'estimer leur nombre total dans les anneaux. Ces nouveaux objets assurent dorénavant une continuité parfaite dans la distribution des tailles des particules. On les pense plutôt en phase d'agglomération dans la banlieue de Saturne, côtoyant d'autres structures, éphémères, trains de particules qui se forment par attraction gravitationnelle mutuelle des particules, les "wakes".

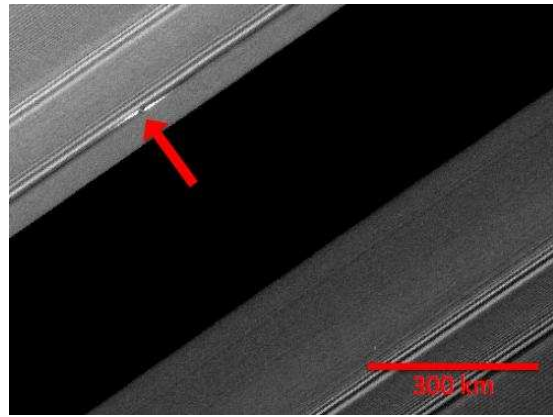


Fig.7. Une "hélice" (propeller en anglais), située aux abords de la division d'Encke dans l'anneau A de Saturne. La lune à l'origine de cette structure a environ un kilomètre de diamètre. L'hélice fait 5 km de large et 60 km de long. Elle porte le nom de Earhart, en mémoire de l'aviatrice américaine Amélia Earhart.

La mission Cassini est une source inépuisable d'histoires de science et d'investigation. La connaissance avance sur des échelles de temps intergénérationnelles, essentiellement grâce au progrès technique, à la transmission du savoir et des questions en suspens, dans une alternance entre observations, élaborations d'hypothèses, tests d'hypothèses et de modèles, théorie analytique ou simulations numériques, et enfin confrontations à de nouvelles données. La complémentarité entre l'exploration spatiale et l'observation depuis les télescopes terrestres n'est plus à démontrer. Tâchons d'inspirer nos élèves, de les rendre curieux et de former les plus désireux à poursuivre cette aventure. ■