

Un entretien avec André Brahic sur Jupiter et ses satellites ainsi que sur la planétologie

Dans la première partie de cet entretien (Cf Cahier N°7), André Brahic nous a résumé les objectifs des missions Voyager et les premiers résultats obtenus au moment du survol de Jupiter. Avec ceux-ci, Voyager 1 avait rempli sa mission initiale d'exploration de Jupiter. L'environnement de la planète devait, de surcroît, apporter de nombreuses surprises.

La nuit sur Jupiter En passant derrière Jupiter par rapport au Soleil, Voyager put photographier ce qu'est la nuit sur la planète. Document étrange : le limbe est irisé d'une lueur d'intensité non uniforme ; dans le disque sombre de la planète, apparaissent des taches blanches éclatantes (photo prise le 5 mars à 515 000 km de la planète, six heures après l'approche minimale). Une seule interprétation possible : sur le limbe, ce sont des lueurs d'aurore boréale plus brillantes qu'on en vit jamais sur Terre, le pôle Nord de Jupiter étant approximativement au milieu de l'arc du limbe éclairé par l'aurore. Quant aux taches blanches, ce sont de formidables décharges électriques bien plus puissantes que les éclairs observés dans l'atmosphère terrestre. On soupçonnait leur existence ; on ne s'attendait pourtant pas à en observer de cette importance dans la haute atmosphère de la planète.

L'anneau Alors que toutes les autres photos étaient faites à la fraction de seconde, il fut décidé de faire une pose longue (11 minutes 12 secondes) au moment où Voyager 1 traversait le plan équatorial de Jupiter. Le but était de détecter, s'il existait, un satellite plus proche de la planète que Amalthée lui-même (dont la distance au centre de Jupiter n'est pourtant que 2,52 rayons de la planète). On se décida à viser à peu près au milieu entre la planète et l'orbite d'Amalthée.

Par une chance extraordinaire, la photo montre le bord d'un anneau très fin non observable directement depuis la Terre. Son épaisseur est inférieure à 30 km (résolution limite de la photo à cette distance de la planète) ; à côté

de la planète brillante, on ne pouvait le déceler.

Pourtant, lorsque Pioneer 10 avait traversé le plan équatorial de Jupiter à la distance de 1,44 rayon de la planète, l'instrument détecteur de particules avait décelé une discontinuité. Deux astronomes l'avait interprétée par la présence d'un petit satellite ou peut-être d'un anneau.

La photo prise par Voyager 1 ayant montré clairement l'existence de l'anneau, le programme de Voyager 2 fut modifié, à la dernière minute, pour photographier l'anneau avec une meilleure résolution. Les photos prises le 10 juillet, alors que Voyager 2 était à 1,5 million de km de la planète et derrière elle sont très révélatrices ; le Soleil paraît donc éclipsé par la planète dont seul un bord lumineux apparaît ; l'anneau, lumineux par diffusion, se détache finement sur le fond du ciel. Sur certaines photos prises par Voyager 2, on distingue un anneau d'environ 6 000 km de largeur avec un bord extérieur brillant de 800 km de largeur et qui culmine à 55 000 km au-dessus de la cime des nuages joviens (rayon de Jupiter 71 400 km). On devine la présence de matériaux à l'intérieur et à l'extérieur de l'anneau et dans son plan. Le fait que l'anneau soit très lumineux par diffusion indique la présence de particules de petites tailles (de l'ordre du micron à quelques millimètres) mais il y a aussi, probablement, des particules de plus grande taille. L'effet du rayonnement solaire élimine les particules de petite taille en un temps court par rapport à l'âge du système solaire ; il faut donc trouver une source de particules près de Jupiter.

Les anneaux de Saturne avaient longtemps intrigué par leur caractère unique. Après la découverte des anneaux d'Uranus, celle d'un anneau autour de Jupiter amène à considérer comme naturelle la présence d'anneaux autour d'une planète géante. Un disque autour d'une masse centrale est en effet une structure commune dans l'Univers comme en témoignent les galaxies spirales et les disques d'accrétion autour des objets compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs).

Amalthée Les photos prises par Voyager 1 à 425 000 km d'Amalthée montrent que ce petit satellite (découvert en 1892 par Barnard à la suite de longues nuits d'observation) est un rocher allongé de 265 km de long et 150 km de diamètre, de forme irrégulière marquée par des impacts. Le grand axe reste dirigé vers la planète.

C'est la première fois qu'on photographie un objet de forme irrégulière aussi gros et d'aussi près (Phobos et Deimos sont beaucoup plus petits : 27 et 15 km). La théorie confirme que l'accrétion de matériaux ne conduit à la forme sphérique qu'à partir d'un diamètre de l'ordre de 500 km.

Io Ce sont les documents sur Io, le premier des satellites galiléens, qui ont été les plus surprenants. Rappelons que dans les télescopes terrestres, aucun détail ne pouvait être dessiné avec certitude sur aucun des quatre gros satellites. Grâce aux Voyager, on peut dire qu'on les connaît aussi bien que la Lune vue au télescope depuis la Terre, tout au moins quant à l'apparence ; et chacun des quatre a sa personnalité !

Celle de Io est la plus extraordinaire. Les astronomes hésitèrent dans l'interprétation des images obtenues : les couleurs, l'aspect complexe d'une étrange pizza. Une mesure faite sur une photo du limbe apporta une réponse : un appareil automatique devait suivre le limbe pour préciser la position du satellite sur le fond des étoiles (l'objectif de la mesure était donc un problème de mécanique céleste) ; devant un détail, l'appareil s'arrête, il ne distingue plus le bord net de l'image ; en effet, se détachant sur le fond noir du ciel, une éruption lance un flot de gaz à plus de 200 km au-dessus de la surface : il s'agit bien d'un volcan, retrouvé sur d'autres clichés. [Ainsi va la découverte : on trouve un volcan alors qu'on se préoccupait de mécanique céleste...]

En fait, Voyager 1 a découvert huit volcans en activité sur Io. Parmi les sept qui ont pu être revus par Voyager 2, quatre mois après, six étaient encore en activité. La surface de Io serait la plus active de tout le système solaire. C'est la surface la plus jeune de tous les corps connus du système solaire. Ces volcans se présentent comme des trous

dans un sol composé de produits sulfurés, de SO_2 en particulier, qui concourent à donner aux images obtenues ces colorations rouges, orangées et noires.

Ici doit être citée l'histoire du travail d'un astronome américain, Peale, spécialiste de mécanique céleste, connu en particulier par ses travaux sur les effets de marée. Se proposant de vérifier ceux-ci sur Jupiter et ses satellites, cela l'amena à des conclusions inattendues. Partant du fait que l'excentricité de l'orbite de Io est pratiquement nulle, son attention fut attirée par des très faibles variations de celle-ci, de l'ordre de 0,0014, par un phénomène de résonance avec les autres satellites galiléens. En raison de la proximité de Jupiter et de sa masse, les faibles variations de distance de Io à la planète devaient entraîner des effets de marée très importants. Peale calcula l'échauffement résultant et le trouva si grand qu'il en déduisit qu'on devrait retrouver à la surface de Io des traces d'activité volcanique.

Cette recherche avait lieu en 1978 et Peale savait que Voyager 1 passerait près de Io le 5 mars 1979. Il réussit à trouver une revue scientifique américaine, Science, pour publier dans un délai exceptionnellement rapide ses calculs et sa conclusion formulée d'ailleurs très prudemment : "Io pourrait bien ne ressembler à aucun autre corps céleste et manifester à sa surface quelques traces d'activité volcanique." L'article parut dans le numéro de Science du 2 mars. Le 5, Voyager 1 photographiait des volcans sur Io. On est tenté de reprendre le mot d'Arago sur Le Verrier : "Peale a découvert les volcans de Io au bout de sa plume!"

Europe, Ganymède et Callisto Bien qu'a priori moins spectaculaires, les trois autres satellites galiléens présentent de nombreux phénomènes inattendus.

Europe, le plus brillant, est recouvert par une couche de glace probablement peu épaisse (au plus 100 km) fracturée en de nombreux endroits. C'est le seul corps connu du système solaire sur lequel on ne distingue ni montagnes ni cratères. L'effet de marée doit entretenir, sous la couche de glace une certaine chaleur, dix fois moindre toutefois qu'à la surface de Io.

Ganymède, le plus gros satellite de Jupiter (une fois et demi le rayon de la Lune) montre l'imbrication complexe de sols brillants et jeunes et de sols sombres et anciens. On distingue à sa surface d'étranges fractures et vallées parallèles un peu comme si un jardinier y avait passé un rateau géant. On distingue aussi des failles plus importantes que la faille de San Andreas, ce qui pourrait indiquer la présence d'une activité tectonique.

Callisto, le plus éloigné des quatre par rapport à Jupiter, est le plus marqué par les impacts ; sa surface est la surface la plus ancienne jamais observée dans le système solaire, son sol est saturé de cratères d'impacts qui se recouvrent les uns les autres.

Rappelons que chacun des satellites galiléens garde la même face dirigée vers la planète. De ce fait, c'est toujours la même région du satellite qui se trouve en avant sur son orbite et se trouve donc plus exposée au bombardement des météorites. Mais le fait le plus marquant est la diversité de ces quatre satellites galiléens alors qu'on s'attendait à trouver des corps à peu près semblables. On peut, en particulier, se demander pourquoi Ganymède et Callisto qui sont de tailles et de densités comparables ($1,9 \text{ g/cm}^3$) ont des surfaces aussi différentes.

La magnétosphère de Jupiter Elle est la plus importante et la plus active des structures semblables dans le système solaire. L'existence du fort champ magnétique de Jupiter a pour conséquence la présence en son voisinage d'un plasma ionisé, chaud, actif et de structure très complexe qui réagit en permanence avec le vent solaire. La queue de la magnétosphère de Jupiter s'étend au delà de l'orbite de Saturne. Les satellites galiléens et l'anneau baignent dans cette magnétosphère. L'interaction complexe de ce plasma et de ces satellites est à étudier. En particulier, Io se déplace dans un tore d'hydrogène, d'hélium, de soufre et de potassium qui interagit avec la magnétosphère et qui est probablement alimenté par les volcans de Io.

Le quinzième satellite Enfin, les sondes Voyager ont identifié un quinzième satellite de Jupiter qui a reçu la désignation provisoire 1979J1. Est-ce d'ailleurs bien le quinzième ? Après la série des Léda, Himalia, Lysithea et Elara (à 11 millions de km de Jupiter), Ananke, Carme, Pasiphae et Sinope (entre 20 et 24 millions de km), Kowal en avait découvert un quatorzième qui n'a pas été revu. En tout cas, quatorzième ou quinzième, les sondes qui visiteront Jupiter dans l'avenir découvriront certainement d'autres petits objets de ce genre.

°°°

Ayant ainsi passé en revue les premières acquisitions dues aux sondes Voyager, André Brahic a bien voulu nous dire quelques mots sur la planétologie d'aujourd'hui et sur quelques projets d'exploration spatiale.

La planétologie S'il est une science en pleine évolution, c'est bien la planétologie. Après une longue période caractérisée par les lents progrès dus à des observateurs d'une grande habileté, les nouveaux moyens d'investigation, en particulier les sondes planétaires, ont permis de recueillir des données en très grand nombre qu'il faut, maintenant, interpréter. Ce travail est par essence pluridisciplinaire ; l'astronome reste maître d'oeuvre mais il a besoin du géologue, du météorologue, du chimiste, du géophysicien, du sismologue... Et même du biologiste, le problème de l'apparition de la vie sur la Terre restant, pour le moment, un exemple unique. Si on trouvait sur une planète ou un satellite un certain nombre de conditions réunies : un sol dur, une atmosphère, du méthane (donc des molécules déjà assez complexes), en pourrait y chercher des chaînes d'atomes encore plus complexes, c'est à dire un des premiers maillons vers l'apparition de la vie. Cela sera-t-il possible quand les Voyager passeront près de Titan ?

Intérêt méthodologique de la planétologie actuelle D'abord, personne n'y est vraiment spécialiste du fait que toute interprétation requiert la coopération de spécialistes divers. Surtout, la planétologie comparée devient une réalité. Un

exemple : faire un modèle en climatologie terrestre est particulièrement difficile, les échanges entre atmosphère et océans étant très importants ; de plus on ne dispose que de ce seul exemple ; enfin la Terre tourne très vite sur elle-même. Au contraire, Vénus ne tourne pas vite sur elle-même, la pression y est cent fois plus forte que sur la Terre et il n'y a pas d'océans. On devrait parvenir à faire un modèle valable pour Vénus qui serait une étape vers le modèle pour la Terre.

La volcanologie doit profiter des exemples très différents fournis par les volcans éteints de Mars et les volcans en pleine activité de Io. Les photos prises par Voyager montrent sur Ganymède des failles qui devront être étudiées par les théoriciens de la tectonique. Ces études ont même des applications pratiques : les méthodes d'exploration géologique par photo aérienne ayant abouti, sur Mars, à des résultats contradictoires, on a été amené à corriger les méthodes utilisées pour l'exploration terrestre.

Le lien qui unit les chercheurs de toutes les spécialités, en planétologie, est le problème passionnant de la formation du système solaire et de l'apparition de la vie. Bien sûr, pour certains astronomes, spécialistes de l'observation visuelle, cela pose le problème d'une nouvelle orientation de leurs recherches. Mais aussi bien pour les spécialistes de mécanique céleste que pour les astrophysiciens classiques, la planétologie ne manque pas de problèmes à proposer à leur sagacité.

Rappelons en passant que deux théories sont en compétition pour décrire la formation du système solaire. L'une, dite catastrophique, est due à Buffon : le passage proche d'une étoile (ou, pour Buffon qui ignorait la nature de ces tout petits objets, d'une comète) aurait arraché au Soleil la matière des planètes. L'autre est celle de la nébuleuse de Laplace : la condensation d'un grand disque de matière aurait entraîné la formation simultanée du Soleil et des planètes. Cette dernière théorie a été longtemps rejetée parce qu'elle prévoyait une rotation du Soleil sur lui-même plus rapide que celle qui est observée. Mais ce ralentissement du Soleil

peut être expliqué par la perte de moment angulaire grâce à son champ magnétique. Les âges du Soleil et des planètes déterminés par différentes méthodes de datation semblent bien être les mêmes, ce qui est un très fort argument en faveur de la théorie de Laplace. De plus, on a maintenant démontré qu'un filament de matière arraché au Soleil par l'effet de marée d'une étoile passant au voisinage ne s'étendrait pas au-delà de quelques rayons solaires, ou bien étant très chaud, s'évaporerait du système solaire. Tous arguments qui rendent très peu probable la formation du système solaire par rencontre avec une étoile.

D'autres systèmes solaires

Découvrir un autre système planétaire, ce serait la grande découverte du siècle ; elle serait d'un apport extraordinaire pour la planétologie. Se poser le problème de l'existence de tels systèmes n'est pas irréaliste : sur les 10^{11} étoiles de la Galaxie (et il y a des milliards de galaxies), que le système planétaire du Soleil soit un exemplaire unique est hautement improbable. Seulement déceler une planète auprès d'une étoile, c'est vouloir apercevoir une bougie au voisinage d'un phare de marine...

Certains phénomènes font penser que des systèmes planétaires pourraient exister. Le mouvement compliqué de l'étoile de Barnard pourrait être expliqué par la présence d'un corps obscur gravitant autour de l'astre brillant, sans qu'on puisse bien savoir si c'est une étoile faible ou une planète plus grosse que Jupiter. Les déplacements apparents de l'étoile sont si faibles qu'on a peu d'espoir d'améliorer les mesures de manière significative.

On a pensé à un autre caractère susceptible de signaler les étoiles entourées de planètes. Certaines étoiles tournent très vite sur elles-mêmes, d'autres lentement. C'est justement le cas du Soleil (période de 27 jours) si bien que 99% du moment angulaire du système solaire se trouve dans les planètes, comme si le Soleil avait perdu du moment angulaire au profit de celles-ci. Selon cette théorie, on aurait donc plus de chances de trouver des systèmes planétaires autour des étoiles à rotation lente. Ce n'est pas sûr, réplique l'astrophysicien Evry Schatzman, le freinage des étoiles

n'a rien à voir avec les planètes , un fort champ magnétique suffirait à l'expliquer.

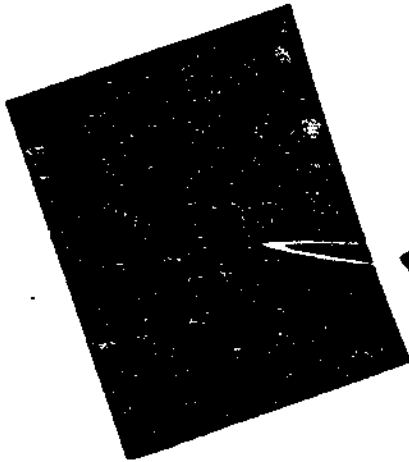
Quelles seraient, en tout cas, les méthodes d'observation susceptibles de donner des résultats ?

Citons-en quatre :

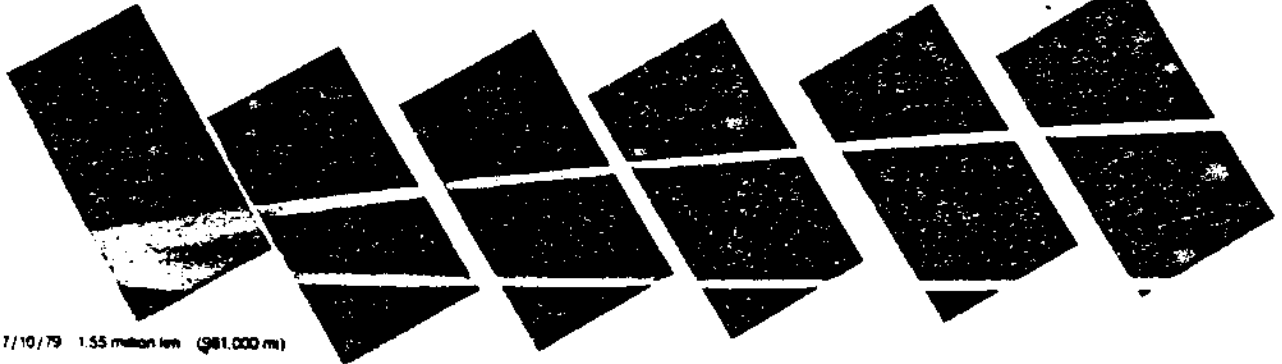
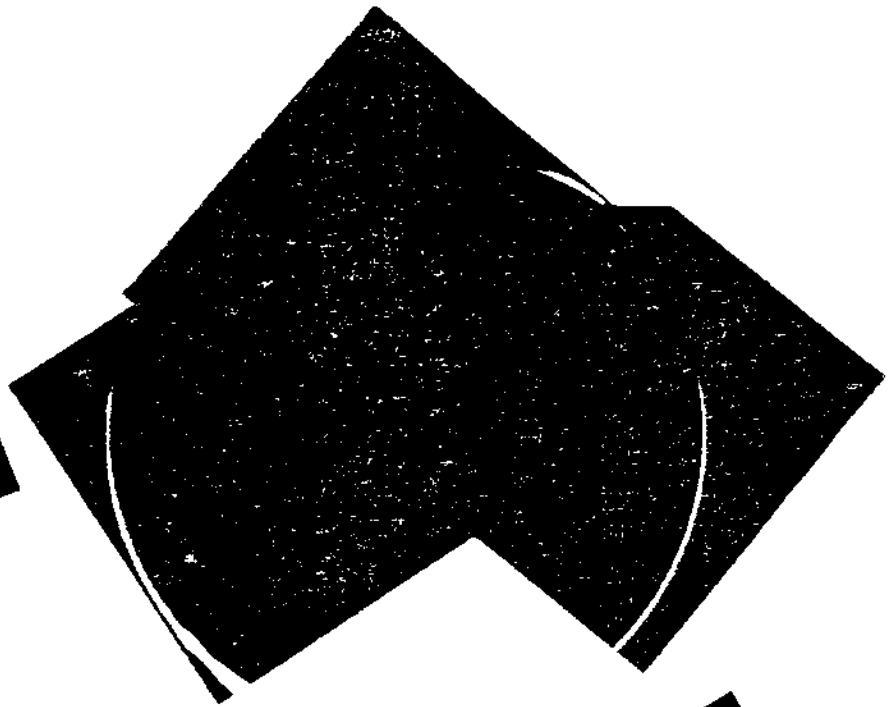
- 1) L'interférométrie optique à partir de la Terre qui consiste à aligner des miroirs et à les diriger dans la même direction au micron près ; la méthode a déjà été expérimentée au CERGA de Grasse par Antoine Labeyrie. Les résultats sont prometteurs : des étoiles doubles qu'on croyait simples ont été ainsi séparées.
- 2) Le télescope spatial de 2,40 m qui doit être mis en orbite quand la navette de la NASA sera au point, permettra un progrès considérable des mesures de position (et par conséquent du mouvement propre des étoiles) : mesures à 0",007 près au lieu de 0",1.
- 3) La spectro-photométrie peut être mise à contribution. L'infra rouge peut révéler la présence d'un compagnon obscur d'une température comparable à celle des planètes.
- 4) Un programme d'observation des occultations d'étoiles par la Lune pourrait être proposé au télescope spatial : par chance, au moment où une étoile est occultée par le bord sombre de la Lune, une planète pourrait être devinée, un très bref instant.

Ce bref aperçu des méthodes envisageables suffit à souligner la difficulté de l'observation. Des astronomes anglais ont conçu un objet plus audacieux (dénommé Dedalus) : une sonde d'abord lancée vers Jupiter s'y ravitaillerait en matériaux nucléaires utiles à sa propagation, elle serait accélérée puissamment pour quitter le système solaire, visiterait une étoile "voisine" bien choisie et communiquerait à la Terre ses observations de quelques heures ... dans une cinquantaine d'années. Projet non irréalisable, certes, mais non résolu technologiquement et qui peut paraître très couteux en période de récession économique ...

Conclusion pour les lecteurs des Cahiers Clairaut :
merci à André Brahic de nous avoir fait un peu
participer au travail qu'il mène avec un enthousiasme communicatif. pour la rédaction, G.W.



7/10/79 1.45 million km (900.000 ms)



7/10/79 1.55 million km (981.000 ms)



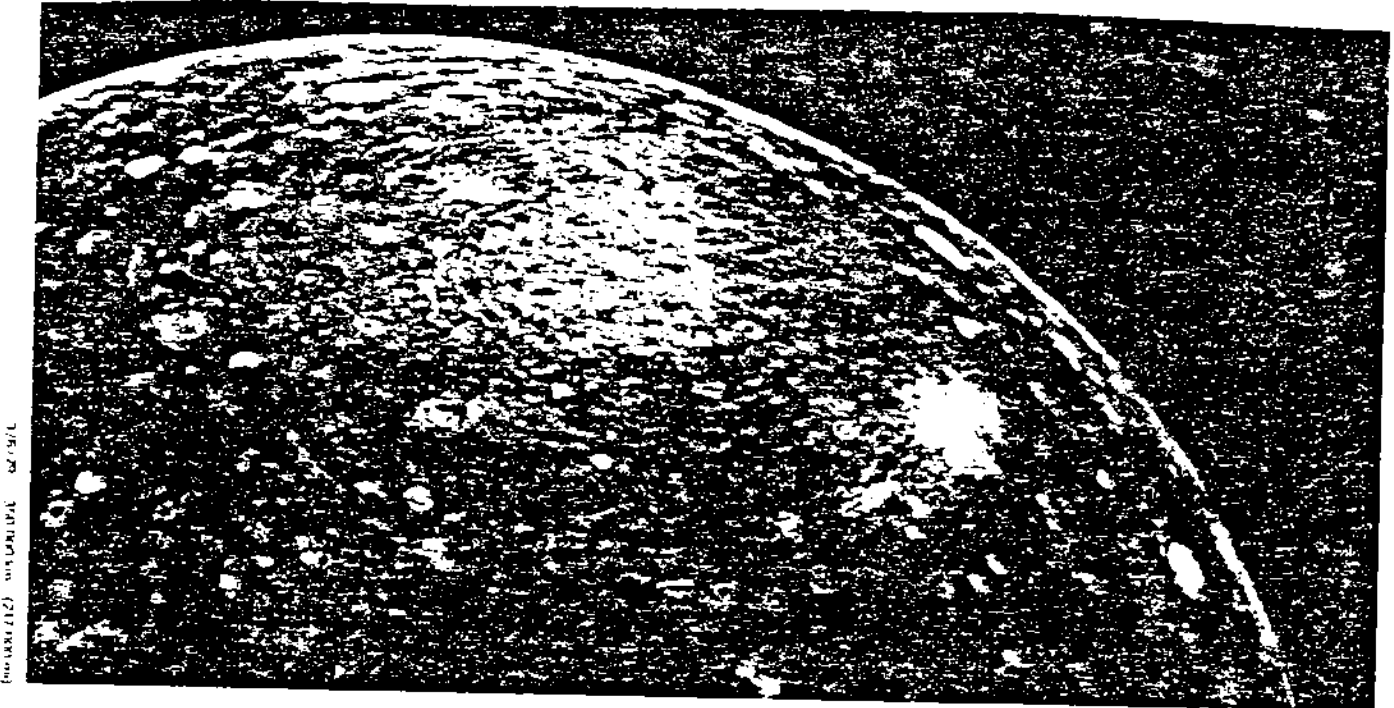
7/10/79 1.45 million km (900.000 ms)

L'anneau de Jupiter photographié par Voyager 2 (en haut à gauche, à contre-jour, l'anneau, lumineux par diffusion, se détache finement sur le fond du ciel).

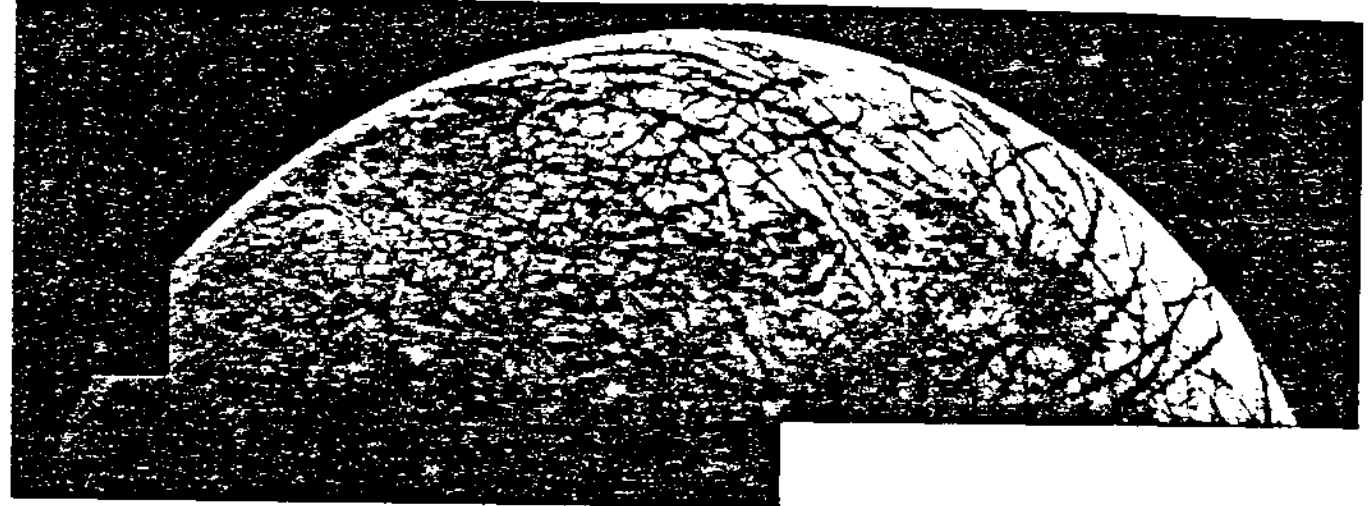


Photographie de Io prise le 4 mars 1979 par Voyager 1 qui se trouvait alors à 862 000 km du satellite.

N.D.L.R. - Notre entretien avec André Brahic avait eu lieu quand nous avons lu le très bon article de Laurence Soderblom dans le numéro de mars 1980 de Pour la Science. Nous y renvoyons nos lecteurs ; ils y trouveront en particulier la reproduction en couleurs des belles photos de la NASA, ce que les Cahiers Clairaut ne peuvent pas encore se permettre d'offrir à leurs lecteurs.



VOYAGER 1 05/08/1979 02/57C

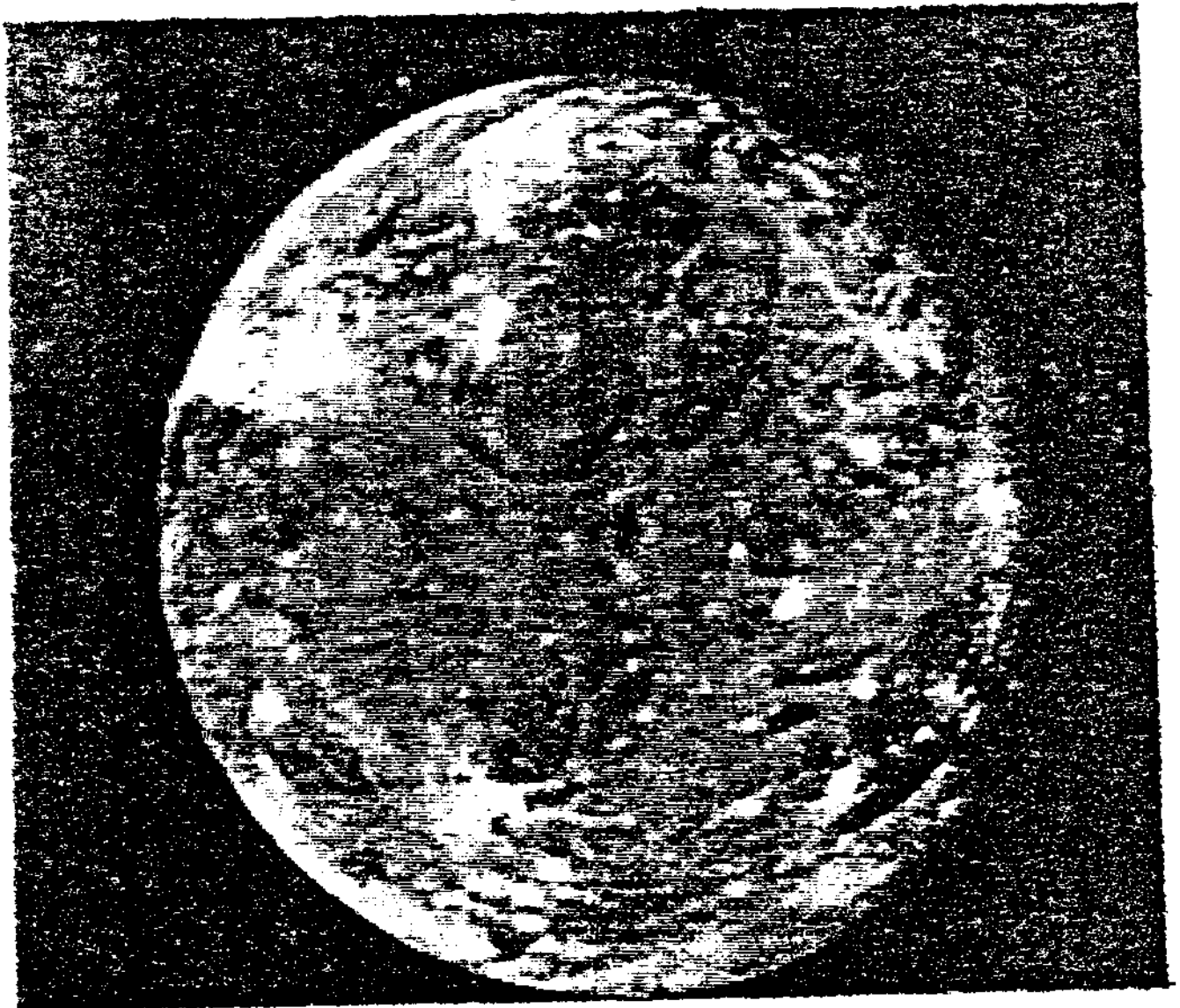


VOYAGER 2 07/10/79 02/1074

04/79 1,25 million km (780 000 mi)



- + en haut, Callisto avec ses très nombreux cratères (photo Voyager 1)
- + au milieu, Europa avec les curieuses zébrures de sa surface (photo Voyager 2)
- + ci-contre, Amalthee vue de 1,25 million de km par Voyager 1



Ganymède photographié
par Voyager 1 qui s'en
trouvait, le 4 mars
1979, à 2,6 million de
kilomètres.

Ci-contre, l'étrange
"ratissage" de sa
surface.