

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE LYON



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 9 — 1977

Notre couverture :

Sortie de la Société Astronomique de Lyon, au Laboratoire d'Astronomie Spaciale et à l'Observatoire de Marseille, le dimanche 13 juin 1976.

Photo : M. SAULNIER.

Ce numéro comporte exceptionnellement 24 pages (au lieu des 16 pages habituelles) afin de résorber le retard pris en matière de publication. Le prochain numéro sera aussi augmenté de sorte que ces deux numéros auront le contenu de trois bulletins classiques.

Dans le prochain numéro, vous trouverez entre autre :

- le compte-rendu de la visite au L. A. S. et à l'observatoire de Marseille ;
- le compte-rendu de l'assemblée générale de la société ;
- le texte de la Conférence de Monsieur H. AUDULLAT
- etc.....

LE CIEL INFRAROUGE REVISITE.

Madeleine LUNEL - Le 28 février 1976.

John Herschel imagina vers 1840 de projeter le spectre solaire sur une bande de papier préalablement imbibée d'alcool : plus vite sécherait l'alcool, plus la région du spectre qui la frapperait devait être chaude — ceci afin de trouver quel verre coloré il utiliserait pour se protéger l'œil. A sa grande surprise, il constata que l'évaporation se continuait en dehors du spectre lumineux, dans le prolongement du rouge. Il se rappela que 38 ans plus tôt son père William avait réalisé une semblable expérience qui était tombée dans l'oubli. William Herschel avait appelé ce rayonnement INFRAROUGE de par sa position dans le spectre.

Dès 1851, le premier «œil» sensible aux radiations infrarouges fut découvert : la pile thermoélectrique—l'échauffement d'une soudure de deux fils métalliques produit un courant dans le circuit formé par ces deux fils. Le deuxième «œil» date de 1881 avec l'invention du bolomètre constitué essentiellement par un fil de platine noirci. L'absorption d'un rayonnement infrarouge produit une élévation de température qui se traduit par une variation de sa résistance.

A la fin du XIX^{ème} siècle, il était admis que les radiations infrarouges étaient des ondes électromagnétiques à effet calorifique et de longueur d'onde variant de 0,8 micron à 1 000 microns (ou 1 mm) alors que le spectre visible s'étend de 0,4 micron vers le violet à 0,8 micron vers le rouge. L'infrarouge est limité vers les grandes longueurs d'ondes par les ondes radio-millimétriques (3 mm).

Si l'infrarouge connut d'importantes applications pratiques, si les physiciens percurent une nouvelle dimension du monde physique grâce au rayonnement infrarouge, nous allons nous demander ce que l'infrarouge a pu apporter et apporte à l'Astronomie.

Précisons d'abord que tout l'infrarouge «disponible» ne parvient pas à la surface de la terre. En fait, il en parvient seulement quelques bandes de longueur d'onde que nous appelons couramment «fenêtres de transparence».

Ces fenêtres sont grossièrement centrées sur 0,9 micron, 1,2 - 1,6 - 2,2 - 3,5 - 5 - 10 - 20 - et 350 microns. Tout le rayonnement de longueurs d'ondes comprises entre ces différentes fenêtres est obsorbé par la vapeur d'eau et le gaz carbonique en particulier. Et si l'astronome veut en profiter il ne lui reste qu'à s'élever au-dessus de 50 km. S'il veut recueillir le plus d'énergie possible dans la fenêtre il a intérêt à travailler en haute montagne. Citons pour mémoire quelques observatoires situés en altitude : le pic du Midi en France (2865 mètres), le Gornergrat en Suisse (3200 m.), le

Jungfrau Joch en Suisse (3500 m) et enfin le plus haut actuellement, le Mont Mauna aux îles Hawaï (4200). Mon but n'est pas de parler techniques mais j'aimerais préciser cependant que si l'astronomie infrarouge vieille de près de 30 ans ne porte vraiment ses fruits que depuis une quinzaine d'années c'est précisément parce que les problèmes techniques sont énormes. Pour l'œil infrarouge quel qu'il soit tout rayonne autour de lui. Pour une température ambiante de 25 °C le maximum de rayonnement se situe vers 10 microns. Vous apercevez déjà les difficultés des mesures à 10 μ : il s'agit de choisir dans une ambiance brillante -au sens infrarouge du terme- le faible flux qui nous parvient d'une étoile !

On est amené à refroidir le détecteur de ce rayonnement, le diaphragme placé devant lui —pour limiter le champ—, le filtre coloré (qui limite le domaine spectral), à basse température : celle de l'azote liquide (77° K ou -196° C) jusqu'à 5 μ , celle de l'hélium liquide au-delà (4° K). Qui dit refroidissement à de telles températures dit détecteur placé dans le vide, d'autant plus poussé que la température est plus basse. Maintenant ces techniques sont bien maîtrisées mais il y eut des pionniers qui passèrent des années à les mettre au point et je pense qu'à l'heure actuelle le premier astronome venu ne peut prétendre faire de l'astronomie infrarouge sans risquer de s'exposer à de graves ennuis.

Une technique beaucoup employée en infrarouge est la spectroscopie de Fourier : grossièrement, le faisceau intéressant après avoir traversé le diaphragme est séparé en deux faisceaux par une lame optique dite séparatrice. Chacun d'eux après réflexion, l'un sur un miroir fixe, l'autre sur un miroir mobile, retransverse la séparatrice avant d'arriver sur le détecteur. On obtient un système de franges qui correspond à des maximums et des minimums de lumière ; c'est la transformée de Fourier du spectre du rayonnement.

L'essor de l'astronomie infrarouge a été considérable ces dix dernières années. Il y eut à 8 ans d'intervalle deux colloques à Liège consacrés aux résultats acquis dans ce domaine : Le compte-rendu du colloque de 1963 comportait 95 pages, celui de 1971, pour les mêmes rubriques, en comporte 627 ! Ce progrès est lié essentiellement à la qualité des détecteurs qui sont devenus beaucoup plus performants.

Revenons au but de cette conférence : A quoi ressemble le ciel infrarouge ? Nous partirons des connaissances acquises chez nos plus proches voisins... pour nous éloigner ensuite. C'est évidemment le Soleil l'astre le plus brillant en infrarouge comme dans le visible et l'observation en différentes longueurs d'ondes infrarouges donne accès à différentes couches de l'atmosphère solaire. De même, l'observation des planètes a permis d'établir leur température et la nature de leur atmosphère. Voici quelques résultats numériques :

Mercure :	590° K	Saturne :	120° K
Vénus :	330° K	Uranus :	100° K
Mars :	260° K	Neptune :	40° K
Jupiter :	135° K		

Les astronomes ont montré par l'observation infrarouge que la Lune et Mars avaient un sol riche en silicates. De même, les spectres de la calotte polaire de Mars pris en infrarouge par Mariner VII avaient suggéré que cette calotte était constituée de glace carbonique. Confirmation vient d'être donnée à Kitt Peak : 11 raies identifiées entre 1,1 et 2,5 μ .

Utilisant un spectromètre à transformée de Fourier, Connes a pu déterminer, à partir de la terre, la composition chimique des atmosphères des planètes Vénus et Mars,

Jupiter et Saturne, découvrir la présence d'acide chlorhydrique et d'acide fluorhydrique dans l'atmosphère de Vénus, mesurer la basse pression de l'atmosphère de Mars et fixer la composition isotopique des molécules de l'atmosphère de Mars.

Un instrument de toute première utilité se révèle être le catalogue dressé par Neugebauer et Leighton qui contient plus de 5 000 mesures d'étoiles. Il s'agit en fait d'un survey en deux couleurs : I et K (le filtre I est centré vers $0,9 \mu$ et le filtre K vers $2,2 \mu$). Maintenant la plupart des objets de ce survey ont été identifiés avec des étoiles répertoriées dans des catalogues existants. Celles qui ne sont pas identifiées ont au moins des spectres connus : M2 à M8 ou M10, quelques étoiles carbonées. De plus en plus, beaucoup de chercheurs pensent que les étoiles du survey se divisent en deux groupes :

- Un groupe du type NML TAU $[m_{2,2 \mu} - m_{3,5 \mu}] = 1$

- Un groupe du type NML GYG $[m_{2,2 \mu} - m_{3,5 \mu}] = 2$

Un autre document vient de nous arriver. Il s'agit du A. F. C. R. L. (Air Force Cambridge Research Laboratories Sky Survey). Ce survey est fait en trois «couleurs» centrées sur 4,11 et 20 microns.

Parmi les étoiles détectées en infrarouge, certaines sont extrêmement bleues et chaudes... soit lointaines et situées derrière une grande quantité de matière interstellaire, soit plus proches et enveloppées de cette matière que nous appelons pour la circonstance circumstellaire.

Dans cette matière les poussières sont chauffées par les radiations de l'étoile et ce sont elles qui rayonnent en infrarouge (à partir de 5 et 10μ). En infrarouge plus proche nous observons au contraire le rayonnement de l'étoile, les radiations bleues étant beaucoup plus absorbées que les radiations rouges ou infrarouges par les fines poussières. Ainsi l'étoile centrale apparaît de plus en plus rouge (c'est ce que nous appelons une étoile «rougie»), devient même invisible et réapparaît dans l'infrarouge.

Des théoriciens se sont largement penchés sur cette question et ont expliqué en grande partie les résultats obtenus à l'aide d'un modèle d'enveloppe en grains de graphite. Récemment certains chercheurs ont suggéré que les grands excès infrarouges pouvaient être dus à la présence d'un compagnon très froid plutôt qu'à la «reradiation par la poussière».

Observant à 10μ , Becklin et Neugebauer ont repéré dans la nébuleuse d'Orion un objet ponctuel infrarouge ayant un spectre caractéristique d'un corps noir à 600°K .

Deux explications sont possibles :

- s'il s'agit d'un nuage de poussières chauffé par une étoile centrale, il suffit que celle-ci ait une luminosité égale à 1000 fois celle du Soleil,

- s'il s'agit d'une étoile rougie par les poussières qui ont absorbé sa lumière bleue, l'étoile devrait avoir une luminosité égale à 10 millions de fois celle du Soleil.

Observant à 20μ , une autre équipe (Kleinman-Low) a découvert une source infrarouge étendue ($30''$). Cet objet très brillant possède un spectre caractéristique d'un corps noir à 70°K . Ce doit être un important nuage chauffé par une ou plusieurs étoiles centrales.

L'objet de Becklin intrigue beaucoup les astronomes. Deux hypothèses s'affrontent :

ou il s'agit d'une «protostar», c'est à dire une étoile en formation, avec une température de surface de 600°K ,

ou il s'agit d'une étoile normale extrêmement rougeie.

Dans le premier cas, si c'est une supergéante M, elle serait affectée d'une absorption de 35 magnitudes. Mais si c'est une étoile d'un type spectral moins avancé, F par exemple, les données d'observations exigeraient 80 magnitudes d'absorption, ce qui est assez impressionnant.

Le problème sera résolu le jour où on arrivera à faire un spectre sinon dans le visible, tout au moins dans le très proche infrarouge. Il l'a été pour NML Cyg (du nom de ses «découvreurs») et pour IRC+10216 grâce à des spectres dans le très proche infrarouge ($0,75$ à $0,87\ \mu$). La première est une géante M6, la seconde une étoile carbonée.

D'après Stein, le seul argument en faveur de la protostar vient de sa situation «géographique» ; elle est en effet située dans une région active, c'est-à-dire un centre probable de formation stellaire.

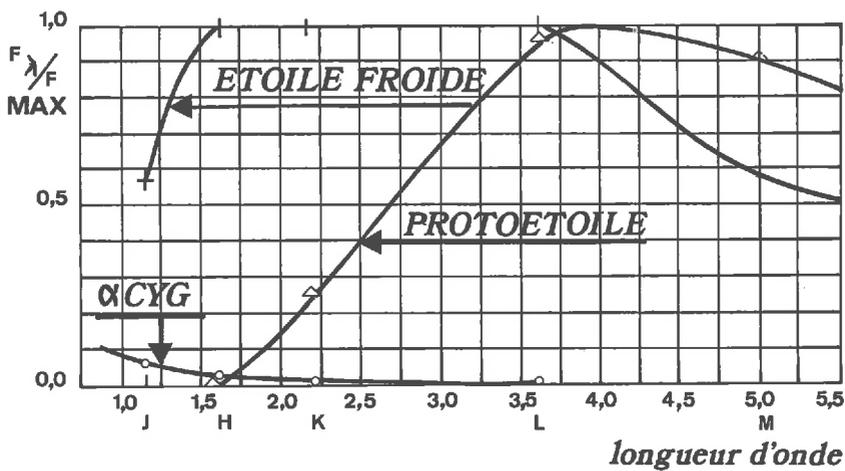
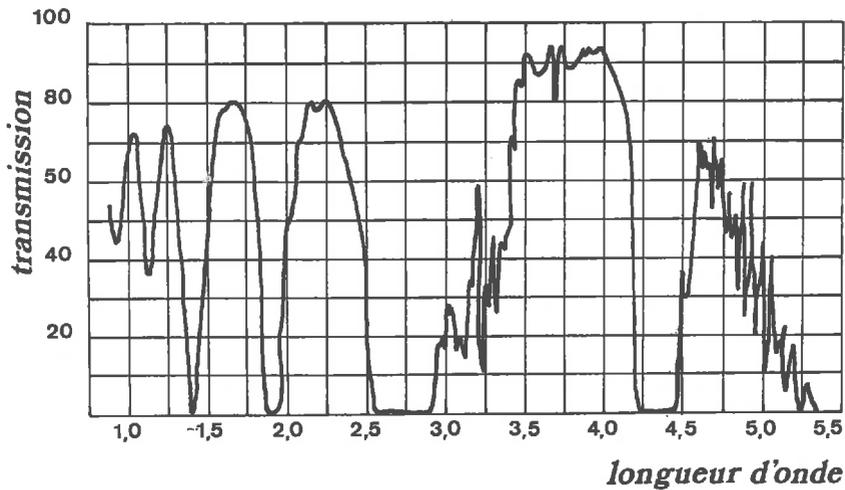
Parmi les régions très étudiées, citons également le Centre Galactique. A $2,2\ \mu$, Becklin et Neugebauer ont mis en évidence l'existence d'un amas stellaire très dense qui est la plus grande concentration d'étoile de la Galaxie. A $100\ \mu$, observant en ballon, Hoffman et Fredrick ont mis en évidence, près de ce noyau, une source ponctuelle infrarouge. A $350\ \mu$, Auman et Low lui ont trouvé un diamètre inférieur à $3'$, soit 10 parsecs. D'autres observations ont été faites mais l'interprétation est loin d'être au point. L'énergie émise doit être considérable mais elle est absorbée presque en totalité par les nuages de poussières situés autour de ce noyau. Le maximum d'émission se situerait autour de $60\ \mu$. On ne sait pas si l'émission est d'origine thermique ou d'origine synchrotron. D'aucuns pensent que le processus synchrotron ne peut pas expliquer l'émission d'objets compacts.

Pour terminer, jetons un coup d'œil sur l'astronomie extragalactique. Un certain nombre de galaxies ont été étudiées par Kleinman et Low : l'émission infrarouge des noyaux semble être une propriété très courante. Les observations montrent toutes :
un continuum infrarouge
l'existence d'explosions dans certains cas
la luminosité totale pour 11 galaxies est comprise entre 10^8 et $10^{15}\ L_{\odot}$ ($10^{15}\ L_{\odot}$ pour notre galaxie).

Des chercheurs ont montré que lorsque la contribution stellaire d'une galaxie spirale typique était soustraite du flux observé ce qui reste est remarquablement semblable à ce qui est émis par un quasar.

Je reprendrai pour conclure la conclusion de Becklin et Neugebauer dans «Scientific American» d'avril 1973 :

«Nous pensons avoir compris les sources les plus brillantes à 2 microns, nous avons beaucoup à apprendre au sujet de celles à 20 microns, nous commençons d'explorer le ciel à 100 microns. Néanmoins pour une discipline encore infantile, l'astronomie infrarouge a déjà donné beaucoup d'informations».



NOTRE SOLEIL

Conférence de Monsieur Maurice JACOB
Société Astronomique de Lyon - 6 décembre 1975

Le Soleil apparaît dans le ciel comme un disque brillant à bords nets, de diamètre apparent moyen égal à 32 minutes d'arc (qui monte à 32'35" quand la Terre est au périhélie, le 2 janvier, et descend à 31'31" quand elle est à l'aphélie le 4 juillet). Sa distance moyenne à la Terre est de 149,6 millions de kilomètres.

C'est une sphère gazeuse dont le rayon vaut 696 000 kilomètres (103 fois celui de la Terre) et la masse $1,983 \times 10^{30}$ kilogrammes (333 442 fois celle de la Terre). Sa masse volumique moyenne vaut donc 1410 kilogrammes par mètre cube (3,9 fois moins que celle de la Terre).

Ce globe de gaz tourne sur lui-même autour d'un axe qui fait, avec la normale au plan de l'écliptique, un angle de $7^{\circ} 18'$. Cette rotation est dite «différentielle», les régions équatoriales tournant plus vite que les régions polaires. La période sidérale de cette rotation est de 25,2 jours à l'équateur et 34 jours au pôle (la période synodique, pour un observateur placé sur la Terre, étant de 27 jours à l'équateur).

Ces variations dans la rotation n'affecteraient d'ailleurs que les régions superficielles de l'astre, les cent mille premiers kilomètres quand on se dirige vers le centre, la partie centrale tournant sans doute d'un seul bloc.

Ce gaz serait formé pour 70 % d'hydrogène, pour 27 % d'hélium et pour 3 % seulement des autres éléments plus lourds.

Du centre du Soleil jusqu'au tiers sensiblement du rayon (donc sur plus de deux cent mille kilomètres) on trouve *le cœur*.

La température y passe, du centre au bord, de 15 millions à 5 millions de Kelvins et la pression de 220 à 10 milliards de bars. Deux cycles de réactions thermonucléaires s'y accomplissent, expliquant le dégagement considérable d'énergie du Soleil, avec un flux pratiquement constant depuis cinq milliards d'années :

a) le «cycle du carbone» (ou de BETHE) qui intervient seulement au voisinage du centre, dans les régions les plus chaudes et fournit 1 % environ du flux d'énergie observé.

Un proton (noyau d'hydrogène) heurtant un carbone y donne un azote radioactif qui se transmute en un autre carbone en libérant un électron positif et un neutrino. Ce carbone heurté par un proton donne un azote stable qui, heurté par un troisième proton donne un oxygène radioactif. Il se transmute en donnant un azote, un électron positif et un neutrino. Le heurt d'un quatrième proton sur cet azote redonne le carbone initial et un atome d'hélium.

Au total 4 hydrogènes donnent 1 hélium, 2 neutrinos, 2 électrons positifs et naturellement des radiations électromagnétiques γ très pénétrantes.

b) le «cycle proton-proton» (ou de CRITCHFIELD) qui fournit 99 % du flux d'énergie. Le choc de deux protons y donne un deutérium, un électron positif et un neutrino. Le choc d'un proton sur ce deutérium donne un hélium 3. Le choc de deux héliums 3 donne un hélium 4 et deux protons. Le bilan est exactement le même que dans le premier cycle.

Cette «centrale» thermonucléaire fournit les $3,9 \times 10^{26}$ watts rayonnés par le Soleil, en transformant par seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. Cela donne, au niveau de la Terre, la «constante solaire» de 0,136 watts reçus sur une surface de 1 cm², normale aux rayons, placée au-delà de l'atmosphère.

Dans l'état actuel de nos connaissances, ces cycles paraissent les seuls susceptibles d'expliquer le rayonnement solaire. Ils s'accompagnent tous deux d'une émission de neutrinos considérable. Un physicien de Brookhaven, DAVIS, les a recherchés ces dernières années, en se plaçant à 1 500 mètres de profondeur dans une mine d'or. Quatre cents mètres cubes de perchloréthylène C₂Cl₄ sont placés dans le compteur. Le choc d'un neutrino sur un chlore 37 donne un argon radioactif de période égale à 35 jours. On balaie le compteur de temps en temps avec de l'argon normal et on recherche la radioactivité dans le gaz : on ne trouve rien, ce qui est bien mystérieux. Les interactions des neutrinos avec la matière sont naturellement hautement improbables, mais cette technique de détection a été testée auprès du grand synchrotron et devrait donner un résultat. Certains physiciens n'hésitent pas à conclure que la centrale ne fonctionne plus et que nous sommes au seuil de grandes catastrophes bien que le Soleil n'ait consommé encore, depuis l'origine, que la moitié de son hydrogène.

Après le cœur, on trouve la *zone d'équilibre radiatif*, jusqu'à 200 000 kilomètres de la surface. La température n'y permet plus des réactions nucléaires. Elle descend progressivement jusqu'à 2 millions de Kelvins et la pression jusqu'à 60 millions de Bars. Le transfert d'énergie s'y fait par absorption et réémission du rayonnement avec diminution progressive de l'énergie des photons, les rayons devenant des rayons X, les rayons X des ultra violets, puis des visibles, puis des infrarouges, puis des hertziens.

Au-dessus de la zone d'équilibre radiatif se trouve la *zone convective* qui va jusqu'au bord du Soleil et qui a donc 200 000 kilomètres d'épaisseur. Le transfert d'énergie s'y fait surtout avec transport de matière, provoquant la rotation différentielle, des ondes acoustiques et des tourbillons.

On trouve enfin l'*atmosphère solaire* formée de trois couches. La première est la *photosphère* qui n'a que 300 kilomètres d'épaisseur, une température de l'ordre de 6 000 Kelvins, une pression de l'ordre du dixième de Bar. Elle est formée, pour 86,8 % d'hydrogène non ionisé, pour 13 % d'hélium et pour 0,2 % seulement d'éléments plus lourds. C'est d'elle que provient pratiquement la totalité du rayonnement du Soleil, avec un maximum d'émission pour 4 700 angströms, dans le violet —un spectre d'émission brillant continu, barré par les 24 000 raies d'absorption de Fraunhofer.

La structure de photosphère est granulaire, avec des *granules*, ou «grains de riz» vus sous un diamètre apparent de l'ordre de la seconde et qui ont donc des dimensions linéaires de l'ordre de 700 kilomètres. Ces granules viennent de la zone convective. Ils montent à une vitesse de l'ordre du kilomètre par seconde et subsistent une dizaine de minutes avant de disparaître. Ces chocs de matière venant de l'intérieur donnent à la photosphère une oscillation dont la période est de 5 minutes et qui est à l'origine des ondes acoustiques dont l'énergie en se dissipant élèvera beaucoup la température des couches supérieures.

Au-dessus de la photosphère on trouve la *chromosphère* (elle apparaît colorée en rose dans les éclipses) à laquelle on attribue une épaisseur de l'ordre de 14 000

kilomètres. La température y monte à quelques dizaines de milliers de Kelvins, ce qui y provoque l'ionisation de l'hydrogène (il y en a un pourcentage de 81,76%) puis de l'hélium (dont il y a 18,17%). Les coronographes (dont le premier a été imaginé par Lyot en 1930) et les spectrohéliographes en permettent l'étude en-dehors des éclipses. Elle émet un spectre discontinu où apparaissent en raies d'émission les raies de Fraunhofer.

Elle est constamment traversée de *spicules*, filaments de quelques milliers de kilomètres de long qui montent à des vitesses de l'ordre de 30 kilomètres par seconde et disparaissent dans la *couronne*, de forme irrégulière et changeante s'étendant sur plus d'un million de kilomètres, avec une couronne interne, plasma très fortement ionisé et raréfié, à une température de l'ordre du million de Kelvins et une couronne externe qui n'est plus qu'une diffusion de la lumière solaire par des poussières. La lumière émise par la couronne ne représente que la millionième partie du rayonnement du Soleil. Elle est polarisée et provient d'éléments chimiques tels que le fer, le nickel, le calcium ayant perdu un très grand nombre de leurs électrons. Elle émet aussi des ondes radio. Elle n'est pas en équilibre et une partie de ce plasma s'échappe avec une vitesse qui augmente avec la distance au Soleil et atteint 350 kilomètres par seconde au niveau de la Terre : c'est le *vent solaire*.

Le Soleil que nous venons de décrire est dit «calme». En fait il apparaît fréquemment dans l'atmosphère solaire des *formations actives*, liées à un champ magnétique local considérable, plusieurs milliers de fois plus intense que le champ terrestre et qu'on détermine par effet Zeeman.

Ce sont d'abord, dans la photosphère, des *facules* qui peuvent subsister pendant des semaines, formées de filaments et de points brillants, puis des *taches* sombres qui se forment souvent par paires (tache de tête à l'Ouest, tache de queue à l'Est, plus petite et plus près de l'Equateur). La température y est plus basse à cause d'une action du champ magnétique sur les phénomènes de convection. Ces taches subsistent parfois pendant deux mois. Leur étude a provoqué la naissance d'une science nouvelle, la magnétohydrodynamique, en grand développement actuellement sur la Terre.

Ce sont ensuite, dans la chromosphère, des *flocules*, brillantes et qui apparaissent au-dessus des taches de la photosphère, et des *éruptions* chromosphériques avec émission de rayons cosmiques, augmentation brusque du rayonnement X et du rayonnement radio et formation de courants corpusculaires (électrons et protons) qui se déplacent à 1 000 kilomètres par seconde et provoquent sur la Terre la formation des aurores polaires, les orages magnétiques et la perturbation des transmissions radioélectriques. Enfin dans la couronne s'observent des *protubérances*, jets immenses de matière liés à l'évolution des taches solaires.

Toutes ces manifestations de l'activité solaire ont une intensité qui varie périodiquement avec un cycle de onze ans. La découverte remarquable de ce cycle a été faite en 1843 par un astronome amateur Schwabe, après vingt-cinq années d'observations et de photographies des taches solaires. Son origine semble devoir se placer, avec une action magnétique, à la base de la photosphère. Une théorie générale, approchée, en a été proposée récemment par Babcock.

Les conséquences de ce cycle sur la Terre sont controversées. Le plus sûr est que le nombre de peaux de renards et de lynx qui se rendent dans la baie d'Hudson suit cette activité solaire et sûrement parce que la fréquence des aurores boréales a une influence directe sur l'efficacité des chasseurs pendant la nuit.

Le Soleil est l'une des cent milliards d'étoiles de notre Galaxie, lancé sur un bras spirale à 234 kilomètres par seconde par rapport au centre, trop loin de toute autre étoile pour qu'une interaction avec un autre astre puisse s'envisager.

Les astronomes étudient l'évolution des étoiles ; ils en voient qui naissent et d'autres qui meurent. Compte tenu de la masse et de l'âge du Soleil leur prédiction la plus originale (à l'exception des pessimistes auxquels nous avons fait allusion) est que cela peut durer encore sans changement important pendant cinq milliards d'années.

LA LUNE APRES APOLLO

par G. ADAM.

Après avoir passionné les astronomes, en raison de sa proximité, la Lune était tombée dans un oubli relatif au début du XXème siècle ; le formidable développement de l'astrophysique en faisait un objet secondaire. Elle devait faire un retour en fanfare, au premier plan de l'actualité scientifique, en Juillet 1969, avec le débarquement de deux hommes d'Apollo II. Depuis, douze astronautes y ont travaillé pendant cent soixante heures, parcourant cent kilomètres et prenant trente mille photographies, des engins automatiques en ont exploré la surface, près de quatre cents kilogrammes d'échantillons de terrain ont été ramenés sur Terre. Quelques-unes des questions que posait notre satellite ont reçu leur réponse, d'innombrables autres se sont posées.

On sait aujourd'hui que la Lune n'a pas de champ magnétique à l'échelle planétaire, mais que son sol recèle des dalles magnétisées isolées, d'origine inconnue, donnant à la surface un champ très variable de point en point. Un faible champ fossile a aussi été découvert, qui donne à penser que la Lune aurait possédé, comme la Terre actuelle, un champ magnétique dipolaire, disparu depuis trois milliards d'années. Un tel champ, selon l'explication couramment admise, provient de courants électriques dans un noyau conducteur fondu. Certaines expériences de séismologie lunaire donnent en effet à penser qu'il existerait, au centre de la Lune, un petit noyau à demi liquide. La planète s'est d'ailleurs révélée sensiblement plus active qu'on le pensait, avec en particulier un intérieur relativement chaud ; l'origine de ce dégagement de chaleur doit être recherché dans la radioactivité naturelle, comme pour la Terre. Ce chauffage ne semble toutefois pas suffisant pour fondre les couches centrales, bien que les épanchements de lave dans les «mers» lunaires prouvent clairement qu'une partie au moins de la Lune a été fondue à une certaine époque. La naissance de la Lune, selon un processus qui n'est pas connu précisément, remonte sans doute à 4,6 milliards d'années, ce qui en fait une contemporaine de notre Terre, comme de tout le système solaire d'ailleurs. Sa faible masse permet d'expliquer sa déficience en certains éléments par l'élimination préférentielle des plus volatils d'entre eux lors de la condensation de la planète à partir de la nébuleuse primitive. A part cela, la Terre et la Lune sont formées des mêmes corps, dans des proportions un peu différentes toutefois. Quelques formations, propres à la Lune, s'expliquent par les conditions particulières régnant à sa surface : absence d'atmosphère, faible pesanteur. C'est par exemple le cas des cratères dont l'origine météoritique n'est plus discutée. Pour la biologie, notons que, comme on s'y attendait, aucune trace de vie n'a été relevée sur la Lune ; le carbone lui-même, principal composant des molécules organiques, y est extrêmement rare. Aucune trace concluante d'eau ou d'oxygène n'y a été trouvée non plus. L'atmosphère de la Lune, enfin, correspond à ce qu'on appelle sur Terre un vide très poussé.

L'astre des poètes est bien aussi inhospitalier que le pensaient les astronomes. Mais de la solution des problèmes soulevés par les observations Apollo émergera peut-être un jour une profonde compréhension de l'enfance du système solaire ; c'est là le grand espoir que le monde scientifique place dans ce qui fut avant tout un formidable succès technologique.

I - LA LUNE DES ASTRONOMES

Après avoir passionné les astronomes pendant des siècles, en raison de sa proximité, la lune était tombée, au début du XXème siècle, dans un oubli relatif. Le formidable développement de l'astrophysique stellaire en faisait un objet secondaire :

tout n'avait-il pas été dit quand les mécaniciens comme Poincaré ou Delaunay, pour ne citer que deux Français, avaient contribué à déterminer le mouvement orbital de la lune avec une précision largement surabondante ? Quant à savoir de quoi était faite la Lune, on savait au moins qu'il n'y aurait jamais là-dessus que des hypothèses, formulées depuis longtemps déjà d'ailleurs. Non, décidément, la Lune était passée de mode.

Elle devait faire un retour en fanfare en juillet 1969 avec l'alunissage de deux hommes d'Apollo II. La prodigieuse moisson de documents recueillis depuis, et qui demandera des années de travail à des dizaines de laboratoires, la replace au premier plan de l'actualité scientifique.

Entre-temps, l'astre des poètes n'avait pas été totalement abandonné par les astronomes. Au début du siècle, deux grands atlas de la surface lunaire avaient été publiés par les observatoires de Lick et de Paris, résolvant des détails de l'ordre de quelques kilomètres. Dès le début du siècle, l'orbite de la Lune était connue à moins d'un kilomètre près, ce qui est amplement suffisant pour les vols spatiaux. L'absence d'atmosphère lunaire était un fait démontré par diverses observations. L'hypothèse d'un sol lunaire poudreux en raison de l'incessant concassage par les météorites était avancée, et les mesures polarimétriques et photométriques confirmaient ce point de vue : la courbe photométrique de la surface lunaire (intensité réfléchie en fonction des angles d'éclairément et de visée) et la courbe polarimétrique (polarisation de la lumière réfléchie en fonction des mêmes angles) étaient caractéristiques des poudres très aérées (non tassées). Même résultat pour les études en infra-rouge qui mettaient en évidence le refroidissement extrêmement rapide de la surface lunaire lors d'une éclipse, indice d'une couche superficielle très isolante. Les mesures radio donnaient à penser que la couche de poussière, dont on n'avait aucun moyen de connaître l'épaisseur, était tassée, et plus compacte, à quelques centimètres de profondeur. Dans les cratères récents, la conductivité thermique plus forte donnait à penser que la couche de poussière avait été soufflée par l'impact, car on était déjà pratiquement certain de l'origine météorique des cratères lunaires, de structure très éloignée de toute forme volcanique connue. Des phénomènes secondaires de volcanisme n'étaient pas exclus, quelques rares observations donnaient même à penser qu'il existait encore une certaine forme de volcanisme, ou au moins d'expulsion de gaz. Une grande question restait en suspens : la Lune possède-t-elle, comme la Terre, un noyau fluide conducteur, générateur de champ magnétique ? Cette question est celle de l'état thermique de la Lune. Pour la résoudre, il fallait disposer de trois informations : la conductivité thermique de la Lune, raisonnablement connue, la température initiale et la répartition des matériaux radioactifs, inconnues l'une et l'autre. Le problème était donc insoluble. Il l'est toujours d'ailleurs, ce qui n'a rien d'étonnant puisqu'il n'a pas encore été résolu pour la Terre elle-même.

En surface, le très faible pouvoir réflecteur du sol lunaire (albedo de 0,073 au lieu de 0,39 environ pour la Terre), indiquant des roches plus sombres que toutes les roches connues, était expliqué par l'effet du bombardement protonique dû au «vent solaire», le flot de particules qu'expulse cette étoile.

Jusqu'en 1960, on en était à peu près là. Depuis, plus de 50 engins ont été lancés vers la Lune. Vingt-quatre hommes l'ont approchée, douze ont foulé au pied une poussière vieille de millions d'années. Ils ont passé 160 h sur notre atellite, parcourant cent kilomètres, prenant 30 000 photos. Les missions Apollo et les sondes automatiques Luna 16 et 20 ont rapporté près de quatre cents kilos de roches lunaires (381,478 kg+0,151 kg).

Certaines des interrogations précédentes ont trouvé leur réponse, et d'innombrables questions nouvelles se sont posées. Nous allons tenter, point par point, de faire une esquisse du bilan de dix ans d'exploration lunaire :

II - LES PREMIERS RESULTATS :

Le 4 octobre 1959, un engin soviétique obtenait la première photographie de la face cachée de la Lune. Zond III (1965) et surtout Lunar Orbiter I et II (1966) allaient permettre de dresser des cartes très précises du relief lunaire. Un fait extraordinaire se révélait déjà : la face «cachée» de la Lune était presque totalement dépourvue des grandes mers sombres qui parsèment la face qui nous est familière. Il ne peut s'agir d'un hasard, et ce fait inexplicable doit être d'une grande importance pour la compréhension de l'évolution du système Terre-Lune.

Le 13 septembre 1959, avant de s'écraser sur la Lune, Luna II mesurait le champ magnétique à 50 km d'altitude : il est indétectable. Mais le 3 avril 1966, Luna X en orbite circumlunaire trouvait un champ magnétique relativement important et surtout extrêmement variable.

En 1960, Explorer XXXV ne détectait aucun champ à 820 km ! On ne savait plus que penser, et c'est la mission Apollo XII qui devait fournir la réponse.

Un autre problème surgissait aussi : en approchant des grandes «mers» lunaires, les Lunar Orbiter accéléraient, et étaient freinés en s'en éloignant. On était amené à supposer l'existence d'une concentration de masse («Mascon») sous les mers lunaires. On pensait par exemple à l'enfouissage d'une partie de la météorite géante responsable de la formation de la mer.

Passons enfin à l'état actuel de nos connaissances.

III - MORPHOLOGIE DE LA LUNE :

L'absence totale d'érosion hydrologique sur la Lune facilite l'étude de la formation de la planète. Si on suppose que ce processus est universel, des retombées au bénéfice de la géologie sont prévisibles.

Le passage de Mariner II près de la Lune en 1962 a permis, par l'étude de son orbite, une excellente détermination de la masse de la Lune : 0,01227 fois celle de la Terre. On en déduit sa densité, qui est seulement de 3,33 contre 5,52 pour la Terre. Certains pensent que cette faible densité est due à une déficience en fer, ce qui en ferait un objet très spécial parmi les autres planètes. En fait, 2 à 3 % d'eau par exemple, suffiraient à expliquer cette différence.

Les calculs montrent que la Lune ne peut pas être un corps homogène ou à densité croissant régulièrement vers l'intérieur. Plusieurs hypothèses sont en présence :

- La Lune est rigide, ce qui est au moins vrai pour la croûte, et l'intérieur n'a jamais été fondu.

- La Lune est formé d'un conglomérat de corps solides de densités différentes, et il n'y a jamais eu de fusion dans les régions centrales.

- L'intérieur de la Lune est fluide et les déséquilibres proviennent des courants de convection (de même que l'eau frémit dans une casserole chauffée). Les calculs conduisent à des différences de températures difficiles à accepter.

La seule méthode expérimentale pour l'étude de l'intérieur lunaire est en fait la séismologie : lors d'un tremblement de Lune, la vibration imprimée aux terrains se propage dans le sous-sol. L'étude de cette progression et de ses caractéristiques permet de sélectionner certains types de terrains, d'après l'expérience terrestre dont on dispose

déjà. A cette fin, la station scientifique A L S E P dont étaient munis les différents L. E. M. (Module d'Exploration Lunaire) comprenait deux expériences : une de sismologie passive (Apollo XI, XII, XIV, XV, XVI) formée d'un ensemble de séismomètres de type terrestre, et chargée «d'écouter» les vibrations du sol lunaire sous les impacts naturels (météorites) et sous l'effet des tensions et relaxations de l'écorce lunaire (tremblements de Lune) ; et une expérience de sismologie active (Apollo XIV et XVI) dont les séismomètres étaient chargés «d'écouter» la résonance du globe lunaire sous des impacts artificiels (écrasement des lanceurs Saturn, de l'étage ascendant du L. E. M., explosion de grenades lancées par un mortier incorporé tirant jusqu'à 1,5 km, marteau tamponneur actionné par les astronautes, grenades installées par les astronautes avant leur départ). Différents résultats ont été obtenus : d'abord, les séismes lunaires sont notablement plus faibles que les séismes terrestres, et prennent naissance à des profondeurs de 600 à 700 km, soit dix fois plus profond que sur Terre. La structure interne des deux globes semble donc absolument différente. Les séismes sont plus fréquents quand la Lune est au périgée, c'est-à-dire au point de son orbite situé le plus près de la Terre. On peut donc, peut-être, les attribuer à la déformation de la croûte lunaire sous l'effet de l'attraction terrestre. Cette déformation atteint plusieurs kilomètres. Un second résultat tient au mode de propagation des ondes sismiques : la Lune semble résonner interminablement sous les choc, et de plus l'arrivée de l'ébranlement est progressif. Par exemple, lors du vol d'Apollo XII, le dernier étage Saturn de 14 tonnes s'est écrasé sur la Lune à 2,5 km des séismomètres : les vibrations ont duré quatre heures, au lieu de quelques dizaines de secondes sur la Terre dans les mêmes conditions.

Une explication est que la couche superficielle de la Lune (jusqu'à 20 Km environ) est extrêmement fragmentée, formée de régolithe espèce de basalte broyé. Il y aurait de multiples réflexions des ondes, étalant beaucoup le signal émis au point d'impact. Il faut noter que les «carottes» (cylindres découpés verticalement dans le sol par un tube tranchant) ramenées par les astronautes ont révélé parfois une très nette stratigraphie : à la surface, les matériaux lunaires sont déposés en couches, comme sur la Terre. Bien entendu, on ne peut invoquer dans ce cas le transport par des eaux de ruissellement. Mais l'existence même de phénomènes de transport autres que les projections par explosion de météorites a été une grande surprise. On pense par exemple à des effets électrostatiques : les grains de poussière, chargés électriquement par le vent solaire formé de particules chargées, auraient tendance à s'agglutiner, ou à se déplacer. Cette théorie propose une explication de la dissymétrie des faces : l'influence de la «queue magnétique» de la Terre (opposée à la direction du Soleil) ferait que la face visible serait plus soumise au transport électrostatique des poussières, alors que sur la face cachée, les cratères seraient moins remplis, à la longue, par la poussière.

Les vols Apollo ont révélé, par ailleurs, que certains sites constituaient des aires de réception pour la poussière environnante : 2 à 5 cm de poussière à Fra Mauro, contre 15 à 30 cm au site Hadley.

Notons que la Lune, si elle échappe à l'érosion par les vents et les eaux de ruissellement, subit une certaine érosion cosmique : son sol est sans cesse frappé par les rayons cosmiques (d'où une radioactivité dix fois supérieure à celle de la Terre), le vent solaire (en 50 millions d'années, ce qui n'est rien, 10 puissance 22 particules par centimètre carré !), les météorites. Sur un kilomètre carré, on relève dans une zone fortement bombardée : 6 cratères de diamètre supérieur à 300 m, 30 entre 100 et 300 m, 120 entre 20 et 100 m, 500 entre 10 et 20 m, 1 500 entre 3 et 10 m, etc... Le nombre de micrométéorites était, lui, astronomique !

Il faut noter que la poussière lunaire est très riche en sphérules, cylindres, etc... de matériaux vitrifiés, que l'on interprète comme résultant de la fragmentation puis

solidification en chute libre dans le vide (d'où les formes sphéroïdales) de fils de matière fondue éjectée, telles des éclaboussures, par l'impact des grandes météorites. Les plus petites de ces sphères sont géométriquement parfaites, comme le montrent les tests interférométriques capables de mettre en évidence des irrégularités de quelques dixièmes de microns. Leur surface est parfois piquetée de microcratères ou de rayures qui attestent de leur histoire mouvementée.

Le problème de la formation des mers, et de l'épanchement de lave qui en a résulté, n'est pas totalement résolu. N'oublions pas que ces mers sont associées en général aux mystérieux «mascons». Une interprétation souvent admise, et née des mesures de gravité faites par les équipages des missions Apollo, est la suivante : la Lune aurait une croûte de quelques dizaines de kilomètres, formée de roches relativement légères (anorthosite, roche assez rare sur Terre, peut-être parce que l'érosion et les bouleversements de la surface nous ont caché ce qui fut la croûte originelle de notre planète). Il y a quatre milliards d'années, une énorme météorite de plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre se serait jetée sur la Lune, créant par exemple la mer des pluies. La croûte crevée, rejetée sur les côtés, laissait voir la roche dense sous-jacente. La disparition de la croûte avait créé un défaut de pression en ce point de la Lune, qui se serait compensé par un relèvement de la roche dense, sans que le trou soit complètement comblé du fait de la plus grande densité de cette roche. A ce stade, l'équilibre serait rétabli, mais ensuite les phénomènes de transport évoqués plus haut auraient fini de combler le trou, créant cette fois un excès de matière et donc de gravité : d'où le mascon.

On voit qu'avec cette explication il ne doit pas y avoir de mascon sur la face cachée.

Il existe bien d'autres théories : impact de météorites de grande densité, envahissement d'un bassin préexistant par des laves denses, rétrécissement de la croûte forçant la sortie de la lave, etc...

La Lune s'est révélée dissymétrique, son centre de masse étant plus près de la Terre que son centre géométrique. Ceci entraînerait une croûte plus mince côté Terre, donc plus facile à percer. On explique par exemple ainsi l'absence de grande mer sur la face cachée.

IV - L'ATMOSPHERE LUNAIRE :

On s'étonnera sans doute de l'emploi de cette expression : la pression de cette atmosphère est de l'ordre de un millionième de millionième de celle de l'atmosphère terrestre ! Pour nous, c'est un excellent vide. En fait, nous ne connaissons jamais sa composition originelle exacte : chaque mission Apollo lui ajoute huit tonnes de gaz, ce qui est une pollution définitive. Elle semble formée de gaz carbonique et de gaz rares (Néon, etc...) et sa dissipation très rapide pose le problème de sa régénération. On pense à l'apport dû au vent solaire, à la sublimation de certains matériaux sous la chaleur solaire, peut-être à des gaz jaillis des profondeurs. Certains cônes de cendres aperçus dans la région de Littrow seraient peut-être les embouchures de telles conduites de gaz.

Certains vols Apollo possédaient dans leur ALSEP un détecteur d'atmosphère.

V - LE MAGNETISME LUNAIRE :

On a déjà vu que les résultats des mesures en altitude étaient passablement contradictoires.

Les missions sur le sol lunaire ont permis de comprendre ce qui se passait : la Lune n'a pas de champ magnétique général, comme la Terre. Par contre, dans son sous-sol sont réparties des dalles magnétiques isolées, d'où l'extrême variété des champs magnétiques relevés par les différents équipages : Apollo XII, 60 gammas - XIV et XV, 130 gammas, alors que le champ terrestre à l'équateur est de 40 000 gammas. Cette étude était confiée d'une part à un magnétomètre de surface (LSME) d'autre part à des sub-satellites largués de la cabine Apollo en orbite lunaire. On ignore tout de l'origine de ces dalles magnétiques.

L'existence du champ magnétique dipolaire de la Terre est associée à celle d'un noyau fluide conducteur. Or, on s'est aperçu que les roches lunaires gardaient en fait la trace d'un très faible champ fossile qui aurait existé il y a trois milliards d'année. Ce fait est capital pour certaines théories de l'évolution de la Lune, comme on le verra plus loin.

VI - LA LUNE EST-ELLE CHAUDE ?

Une expérience de «flux de chaleur» (HFE) était présente dans l'A L S, E P. Elle consistait à mesurer la température du sol à des profondeurs croissantes, dans différentes conditions.

Les violentes controverses au sujet de la température interne actuelle de la Lune se sont un peu affaiblies : l'absence de champ magnétique dipolaire rend peu probable l'existence d'un noyau conducteur fluide parcouru de courants de convection. Le problème se pose maintenant ainsi : la Lune a-t-elle été fondue et à quelle époque ?

On sait depuis longtemps que la température superficielle passe de 110°C (midi) à -179°C (avant l'aube). Mais en profondeur, la température augmente régulièrement. Il existe donc un flux de chaleur issu du centre. Par ailleurs, les sismomètres ont enregistré le 17 juillet 1972 un phénomène exceptionnel : l'impact d'une météorite de plus d'une tonne sur la face cachée. Les ondes ont donc traversé la Lune de part en part, et leur comportement semblerait indiquer un petit noyau liquide.

Pour différentes raisons, dont une température insuffisante, il ne serait pas en fer comme sur la Terre. Peut-être en un mélange de fer et de soufre ? Il serait en tout cas bien pratique pour expliquer le faible champ fossile dont témoignent les roches lunaires, et qui devait être de l'ordre de 1 000 gammas il y a 3,5 milliards d'années.

VII - LA COMPOSITION CHIMIQUE, DE LA LUNE ET SON HISTOIRE

Ces deux points ne sont pas séparables, comme on va le voir. L'analyse des échantillons rapportés de la Lune demandera des années, mais on sait déjà que la Lune semble riche en éléments réfractaires (calcium, tantale,...) et pauvre en éléments volatils (soium, plomb,...). Le carbone, constituant privilégié de toute matière vivante, y est très rare, et semble bien provenir uniquement du vent solaire et des météorites.

Les six endroits échantillonnés ont produit principalement quatre sortes de roches :

Basalte (mers),

Feldspath anorthosite (plateaux et montagnes),
Kreep (mer des pluies, Océan des Tempêtes) : il s'agit d'un type inconnu sur
Terre, riche en potassium (K), terres rares (REE) et phosphore (P),
Basalte à haute teneur en aluminium.

Les mers sont des lacs de basalte fondu, où se sont produits des phénomènes très complexes de cristallisation fractionnée (comme dans un sirop sursaturé où le sucre se cristallise et se dépose au fond) et de distillation (facilitée par le fait qu'à la surface de la Lune règne le vide). On a donc des roches très hétérogènes, dont la composition initiales est très difficile à retrouver :

Les montagnes sont formées d'anorthosite, roche claire assez légère (densité 2,8) et riche en oxyde de Calcium, Aluminium et Silicium.

Les roches ramenées ont des âges de l'ordre de 4 milliards d'années. La Lune semble donc bien contemporaine de la Terre. Comment s'est-elle formée ? Après l'abandon de la théorie de la filiation (la Lune aurait été arrachée au manteau de la Terre) et des épousailles (la Terre aurait capturé la Lune qui passait dans le voisinage) les efforts semblent se concentrer sur la théorie fraternelle (les deux planètes seraient nées ensemble, à peu près).

On voit donc les choses ainsi : il y a 4,6 milliards d'années, la nébuleuse primitive est condensée et se présente sous la forme du Soleil entouré d'un disque de matière protoplanétaire. Dans ce disque apparaissent des condensations qui, chacune, vont donner naissance à une planète et ses satellites le cas échéant. La partie centrale de la proto-Terre donnera donc la Terre elle-même. Les parties externes, moins denses, vont se concentrer pour donner la Lune. A ce stade, deux points à signaler : la configuration est instable, et il y a de fortes chances pour que la Terre «gobe» la Lune ; en admettant que cela n'a pas eu lieu, comme tout le monde peut le constater, le vent solaire est alors capable de souffler les éléments très volatils (eau, plomb, bismuth, tantale,...) de la partie externe, transparente de la nébuleuse. La Lune sera donc privée, dès sa naissance, de ces éléments. La Terre, protégée par l'opacité de la nébuleuse dans ces régions centrales, les conservera. Les éléments très légers (hydrogène, hélium, carbone, azote,...) ont par ailleurs plus ou moins tendance, à ce stade, à quitter la nébulosité (contrairement à ce qui se passera pour Jupiter, où l'énorme force de gravitation retiendra jusqu'à l'hydrogène).

Les deux planètes terminent alors leur condensation (100 millions d'années environ). La Lune est alors à basse température. Il y a 4,5 milliards d'années, un processus externe fait alors fondre la couche superficielle de la planète. Le processus de chauffage n'est pas compris pour l'instant : énergie gravitationnelle d'accrétion (aurait dû être rayonnée dans l'espace, sauf présence d'une atmosphère temporaire opaque), énergie récupérée par le freinage de la rotation de la Lune par les marées dues à la Terre, énergie nucléaire due à des radio-éléments à courte vie (pratiquement impossible, tous les radio-éléments à courte vie convenables étant «morts» depuis longtemps à l'époque de la formation de la Lune), énergie électrique provenant de courants induits dans la Lune par une phase cataclysmique de l'évolution solaire ?

Suit un refroidissement et la formation des cratères. Il se crée une couche fragmentée très isolante qui permet à la radioactivité interne de fondre cette fois une partie de l'intérieur lunaire, à moins que des collisions catastrophiques s'en chargent.

On en est là. Les théories sont nombreuses et les résultats des missions Apollo ont permis surtout leur multiplication. La théorie fraternelle exposée ci-dessus à des opposants farouches. Ils disent par exemple : «Pourquoi Vénus, dont la masse et la

distance au Soleil sont voisines de celles de la Terre, n'a-t-elle pas de Lune ? » Et ils préfèrent invoquer pour la formation des grandes planètes un processus d'agglomération de corps pré-planétaires de la taille de la Lune. Cette explication permet au moins de rendre compte de la disparité des inclinaisons des axes de rotation des planètes sur le plan de l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil, et dont sont voisins les plans de la plupart des orbites des planètes). Il resterait à voir pourquoi les satellites tournent dans le plan équatorial de leur planète mère, par contre.

Pour ne pas terminer sur cette brassée de points d'interrogation, résumons un peu la situation.

VIII - LA LUNE RESSEMBLE-T-ELLE A LA TERRE ?

- Aucune trace de vie n'a été relevée sur la Lune.

 - On n'y trouve ni eau, ni oxygène.

- Quelques traces d'oxyde de fer ont été relevées sur des échantillons Apollo. Il peut s'agir de glace cométaire, d'eau contenue dans une météorite, voire d'une contamination lors de la manipulation de l'échantillon.

- L'atmosphère de la Lune correspond à ce que l'on appellerait sur Terre un vide poussé. On a coutume de prendre l'exemple suivant : toutes les molécules d'un centimètre cube d'atmosphère terrestre, mises « bout à bout », feraient une ligne dont la longueur serait plus de deux fois la distance Terre-Lune. Avec un centimètre cube d'atmosphère lunaire, cela donnerait la longueur d'un crayon.

- Les structures internes sont différentes, avec des points communs tout de même : stratification, intérieur chaud.

 - même âge : 4,6 milliards d'années, pour les deux planètes.

- Le rayon de la Lune est à peu près le quart du rayon terrestre, sa densité les trois cinquièmes de la densité de la Terre.

- Le champ magnétique de la Terre est un champ dipolaire, celui de la Lune semble ne provenir que d'échantillons magnétisés superficiels.

- La Lune est formée des mêmes éléments chimiques que la Terre, mais en proportions différentes.

Quelques questions ont trouvé leurs réponses, des dizaines d'autres ont surgi : le programme Apollo n'a apporté que peu de certitudes, mais la promesse d'années de travail fructueux pour les chercheurs du monde entier. Rappelons pour finir la réflexion désabusée d'un spécialiste : « Il serait beaucoup plus facile d'expliquer l'absence de la Lune... ».

CONNAISSANCES ACTUELLES DE JUPITER

14 février 1976

par Madame M.T. MARTEL

L'an dernier, le 30 novembre 1975, lorsque je vous ai parlé de Mercure, Vénus et Jupiter vus par les dernières sondes spatiales, j'ai eu l'impression d'avoir trop brièvement brossé le tableau de nos connaissances sur la dernière planète citée Jupiter. Aussi, j'ai cru bon de revenir cette année encore sur les découvertes faites par les deux sondes américaines Pioneer X et Pioneer XI.

PIONEER X

Pioneer X a été lancé le 2 mars 1972. Après 641 jours de vol, soit un trajet d'environ 1 milliard de kilomètres à une vitesse moyenne de 16,6 km/seconde, la sonde contourna Jupiter le 4 décembre 1973 à une distance de 131 400 km et à une vitesse de 36,7 km/s. Cet engin a poursuivi en 1974 et 1975 l'exploration de régions interplanétaires encore jamais visitées au-delà de l'orbite de Jupiter. Toujours en bon état de fonctionnement, il continue à transmettre ses mesures. Pioneer X croisera l'orbite de Saturne en 1976, celle d'Uranus en 1979, celle de Neptune en 1983, celle de Pluton en 1987. Puis il quittera le système solaire à la vitesse de 11,4 km/s. pour voyager dans l'espace intersidéral.

PIONEER XI

Pioneer XI a été lancé le 6 avril 1973. Le 3 décembre 1974, presque exactement un an après Pioneer X, cet engin est passé près de Jupiter à la vitesse de 48 km/s. à la distance de 42 000 km seulement, au-dessus des couches nuageuses de la planète géante, soit à une distance trois fois plus proche que ne l'avait fait Pioneer X et bien à l'intérieur de l'orbite Amalthée, le satellite (V) le plus près de Jupiter. En outre, alors que, par rapport à la planète, Pioneer X avait suivi une trajectoire presque équatoriale, la courbe décrite par Pioneer XI était sinon quasi polaire du moins fortement inclinée sur l'équateur Jovien et décrite dans le sens rétrograde. Cette forte inclinaison de 50° a permis pour la première fois de bien observer les régions polaires de Jupiter. Pioneer XI s'est approché de Jupiter par le sud, monta rapidement en latitude et s'éloigna de la planète par une large boucle hyperbolique au-dessus des régions boréales. Puis, après son passage près de Jupiter, Pioneer XI fut placé sur une nouvelle orbite héliocentrique inclinée de 16° sur le plan de l'écliptique qui ramène la sonde à l'intérieur de l'orbite de Jupiter. En juin 1976, Pioneer XI passera par son périhélie à 3,75 unité astronomique du Soleil. Fin avril 1977, Pioneer XI traversera de nouveau l'orbite de Jupiter et passera près de Saturne en septembre 1979.

Plusieurs résultats obtenus à partir des instruments de mesures embarqués sur Pioneers X et XI ont bouleversé certaines de nos connaissances telles que la structure interne de la planète. D'autres ont permis de préciser certaines données telles que les caractéristiques principales de Jupiter et de ses satellites -masse, dimensions, aplatissement, température, composition- soit par l'analyse des mesures transmises par les appareils, soit tout simplement par l'étude des trajectoires suivies par ces deux sondes et par la détermination précise de leur vitesse.

Masse :

Les véhicules spatiaux eux-mêmes ont servi de support aux expériences de mécanique céleste. Les perturbations des trajectoires de chaque engin ont permis de déterminer la masse totale de Jupiter, la masse des satellites galiléens, l'aplatissement polaire de Jupiter et les anomalies de gravité sur Jupiter.

Auparavant, la masse de Jupiter était assez bien connue par l'analyse des perturbations sur les mouvements des planètes avoisinantes, par les mouvements de ses satellites et par les perturbations exercées sur les comètes. La masse de Jupiter par rapport à la masse de la Terre prise comme unité s'élevait à 317,5. Pioneers X et XI ont amélioré la précision de cette valeur et donnèrent pour Jupiter une masse de 317,8 fois la masse de la Terre. Ainsi d'après les deux sondes la masse de Jupiter serait plus élevée d'une fois la masse de la Lune.

Densité :

Une autre donnée très intéressante pour connaître la nature et la composition d'une planète est la valeur de sa densité. Or, la densité ou masse volumique est le rapport de la masse sur le volume du corps. Pour avoir la densité il faut déterminer le *volume*, c'est-à-dire les *dimensions* du corps. Pour connaître les dimensions d'un corps qu'on ne peut observer qu'à distance, il faut évaluer cette *distance*. Or, Jupiter fait partie du système solaire et son mouvement est régi par les lois de Képler. La troisième loi de Képler nous renseigne sur les durées de révolution et les distances des planètes au Soleil ; elle s'énonce ainsi : « Les carrés de révolution sont proportionnels aux cubes des demi-grands axes des ellipses décrites autour du Soleil ». En première approximation, on assimile les ellipses à des cercles et les demi-grands axes aux distances moyennes des planètes au Soleil. Nous écrirons donc en désignant par T la durée de révolution et d la distance au Soleil en considérant la Terre (T, d) et Jupiter (T_J, d_J).

$$\frac{T^2}{T_J^2} = \frac{d^3}{d_J^3} \quad \text{mais } T = 1 \text{ an}$$
$$\text{et } d = 1 \text{ U. A. } (*)$$

Ce calcul mathématique est très simple, mais pour avoir d_J il faut connaître T_J.

On calcule la *durée de révolution* à partir de la *révolution synodique* ou intervalle de temps qui sépare deux oppositions, c'est-à-dire les positions de deux planètes pour lesquelles leur distance est minimum. La planète vue de la Terre aura alors des dimensions maximales. La durée de révolution synodique S Terre-Jupiter étant de 1 an 34 jours, on établit facilement que

$$\frac{1}{T_J} = \frac{1}{T} - \frac{1}{S}$$

De cette relation on trouve que T_J = 12 ans 10 mois 17 jours. On déduit ensuite de la relation (1) la distance moyenne de Jupiter au Soleil, soit 5,2 U.A.

Maintenant l'observation au télescope permettra de déterminer les *dimensions angulaires* de la planète. Sur une photographie on mesure en millimètres les diamètres équatoriaux et polaire. La distance focale du télescope utilisé nous permet de déduire les dimensions angulaires de l'image. On trouve par exemple que, lors d'une opposition, le diamètre équatorial de Jupiter vaut en moyenne 47" et le diamètre polaire 44". La distance Terre-Jupiter de 4,2 U.A. lors de l'opposition permet de trouver les diamètres de Jupiter. On résout le triangle que forment l'observateur terrestre et les deux extrémités du diamètre planétaire. Les meilleures déterminations faites du sol terrestre :

pour le rayon équatorial, 71 350 km

pour le rayon polaire, 66 600 km.

L'aplatissement de Jupiter est donc considérable puisque le rayon varie de 4750 km.

Les mesures faites par les sondes spatiales, d'après les photographies transmises, la durée d'occultation des signaux radio et les perturbations exercées par le bourrelet équatorial de Jupiter, donnent, au niveau d'un millibar de pression, 71 404 km ± 6 et 66 812 km ± 4 pour les rayons équatoriaux et polaires soit une différence de rayon de près de 4688 km.

Rien n'est plus simple maintenant que d'évaluer la *densité*. Le volume de Jupiter est d'environ 1331 fois plus gros que celui de la Terre. Les mesures faites à partir du sol terrestre conduisent à des valeurs de la densité

$$\frac{317,5}{1331} = 0,24 \text{ fois la densité de la Terre (qui est de 5,52 par rapport à l'eau.)}$$

La densité de Jupiter est égale à 0,24 x 5,52 soit 1,31 par rapport à l'eau.

Les mesures faites à partir des deux sondes conduisent à des valeurs de la densité très concordantes, sensiblement les mêmes de 1,33 par rapport à l'eau.

(*) 1 U.A. 1 unité astronomique 149 x 10⁶ Km.

Rotation de la Planète :

La rotation des nuages que nous voyons à la surface de Jupiter est connue depuis longtemps par des *mesures optiques*. On détermine l'intervalle de temps séparant deux passages successifs, à travers le méridien central, d'une caractéristique de longue durée de l'atmosphère (par exemple un des bords de la grande tache rouge). Mais rien n'est simple dans les mouvements de l'atmosphère jovienne car on trouve pour la bande centrale située de part et d'autre de 10° de l'équateur une durée de rotation de 9 h 50' 30" (système I).

Pour des caractéristiques situées à des latitudes plus élevées on trouve une période de rotation plus longue de 9 h 55' 41" (système II). Le désaccord s'explique probablement par des variations systématiques des vents de Jupiter.

Une autre détermination de la rotation de Jupiter nous est apportée par l'*observation des émissions radio* dans la bande des ondes décimétriques décelée depuis 1955. Les radio-astronomes ont trouvé que ces émissions sont polarisées et orientées en direction par le champ magnétique jovien. Les signaux reçus sur la Terre varient en intensité et en direction de la polarisation. Ces variations sont en synchronisation avec la rotation de Jupiter dont l'axe de rotation fait un angle de 11° par rapport à l'axe du dipôle magnétique. La période déduite des mesures radio est de 9 h 55' 30" en bon accord avec les mesures optiques du système II, c'est-à-dire des couches de latitudes élevée. Les mesures radio fournissent donc une méthode pour mesurer la rotation du champ magnétique qui doit être très élevé au moins de 4 gauss. Or, les courants qui engendrent le champ magnétique prennent naissance dans la profondeur de la planète. Par conséquent, la rotation, déduite des mesures radio représente probablement plus exactement la rotation de Jupiter dans son ensemble.

Température :

L'intensité du rayonnement infrarouge a permis de calculer la température des couches élevées de l'atmosphère jovienne :

Dès 1962, Opik a trouvé une température de radiation effective de 130° Kelvin (soit de -140° C). Or cette température ne peut pas uniquement s'expliquer par la radiation solaire reçue par Jupiter. Elle est trop élevée. Il existe donc une source de chaleur supplémentaire qui provient de la planète elle-même. Opik trouve que ce surplus de chaleur par rapport à la chaleur solaire atteint $1,6 \pm 0,4$ fois la chaleur solaire.

En 1968 des mesures infrarouges en avion, faites à une altitude de 15 km, ont décelé pour Jupiter une température de $134^\circ \pm 4$ Kelvin ce qui conduit à une chaleur interne par rapport à la chaleur solaire reçue de 1,7.

En 1971 et 1972, des observations semblables faites en avion, dans l'infrarouge lointain de 30 à 300 μ , ont confirmé les résultats précédents.

Pioneer X et Pioneer XI emportaient dans leur voyage vers Jupiter des radiomètres à deux canaux, isolant respectivement les bandes de 14 à 25 μ et de 25 à 56 μ .

La température de radiation effective mesurée à partir des radiomètres sur les deux véhicules spatiaux s'élève à $125^\circ \pm 3$ K ce qui correspond à un rapport, de la chaleur planétaire interne à la chaleur solaire, égal à $0,9 \pm 0,2$ ce qui est un accord tolérable avec les anciennes mesures terrestres. Donc il est bien établi maintenant que Jupiter rayonne 2 fois plus de chaleur qu'il n'en reçoit du soleil. L'origine de cette source de chaleur sera cherchée lorsque nous disposerons de toutes les données physiques concernant Jupiter.

Constituants :

Il nous reste à déterminer maintenant quels sont les éléments qui constituent Jupiter et quelles sont les abondances de ces éléments. Une expérience montée sur les

Pioneers X et XI nous permet de répondre avec certitude à cette dernière question. Il s'agit de l'expérience utilisant un photomètre pour l'ultra-violet lointain isolant les radiations de 1216 \AA et de 584 \AA . Des intensités lumineuses observées correspondant à ces deux radiations, on déduit les abondances en hélium et en hydrogène. On trouve 10 molécules d'hydrogène pour un atome d'hélium. Ce résultat confirme pour la première fois la présence de l'hélium sur Jupiter, présence dont on soupçonnait l'existence depuis fort longtemps. En effet, nous avons montré que la masse de Jupiter est énorme : près de 318 fois celle de la Terre, soit environ deux fois et demie la masse de toutes les autres planètes réunies du système solaire. La densité de Jupiter est par contre très faible : de 1,33 par rapport à l'eau alors que celle de la Terre atteint 5,52 et celle du Soleil 1,41. Donc Jupiter doit être formé en abondance d'éléments légers et parmi eux les plus légers que sont l'hydrogène et l'hélium. Jupiter est si massif qu'il a pu retenir en totalité les éléments légers. Le calcul du temps nécessaire pour qu'une quantité significative échappe à l'influence gravitationnelle de Jupiter indique un temps bien supérieur à l'âge du système solaire, de 4,6 milliards d'années. Une raison supplémentaire de penser que Jupiter a une composition semblable à celle du Soleil est une raison cosmogonique. Si le Soleil et les planètes se sont tous formés à partir d'un seul nuage de gaz et de poussière, il est probable que chacun a reçu une part approximative de tous les matériaux de nuage. Maintenant nous pouvons l'affirmer : Jupiter est formé comme le Soleil à 85 % d'hydrogène, 15 % d'hélium et d'éléments lourds sous forme de traces.

Structure interne :

Nous savons que Jupiter a une rotation très rapide. En 9 h 55' 30" cette énorme masse effectue un tour complet sur elle-même. Nous savons aussi que le fort aplatissement d'une planète résulte de sa rotation rapide.

Les trajectoires expérimentales des Pioneers X et XI, lorsque ces véhicules sont passés près de Jupiter, nous ont fait connaître la forme détaillée du champ gravitationnel jovien. Ces trajectoires se sont en effet écartées des trajectoires prédites par le calcul effectué en supposant que toute la masse de Jupiter était rassemblée en son centre-masse de la planète assimilée à une masse ponctuelle. De l'analyse gravitationnelle des trajectoires expérimentales il résulte que le corps solide au-dessous de l'atmosphère de Jupiter est en fait un corps liquide.

D'après les observations des Pioneers X et XI, les astronomes américains Anderson et Hubbard, reprenant une ancienne hypothèse émise en 1951 par les astronomes soviétiques Feskov et Massievitch, ont imaginé un modèle de l'intérieur de Jupiter satisfaisant au champ magnétique, au champ gravitationnel de la planète et aux études en laboratoire de l'hydrogène.

Le modèle admet un *petit noyau rocheux* au centre de la planète où la température est supposée de $30\,000^\circ \text{ Kelvin}$. Le noyau serait composé principalement de fer et de silicates, matériaux qui constituent la plus grande partie de la masse de la Terre. On s'attendait à un tel noyau pour des raisons cosmogoniques. Si la composition de Jupiter est semblable à celle du Soleil, la planète doit contenir une petite proportion de ces éléments. Puisque ces éléments sont relativement denses ils doivent s'agglomérer au centre. Le noyau ne peut pas être détecté à partir d'études de la gravitation, de sorte que son existence ne peut pas être prouvée.

Au-dessus du noyau hypothétique se trouve une couche épaisse dans laquelle l'hydrogène est de loin l'élément le plus abondant. L'hydrogène est séparé en deux couches toutes deux liquides mais dans des états physiques différents.

- la couche la plus interne s'étend du noyau jusqu'à une distance de $46\,000 \text{ km}$ du centre sous une pression de 3 millions d'atmosphères terrestres et à une température de $11\,000^\circ \text{ K}$. Dans cette couche l'hydrogène est dans l'état *métallique liquide*. Cet état n'a pas été, jusqu'à présent, observé en laboratoire, parce qu'il ne doit exister sous cette forme que sous des pressions extrêmement élevées. Dans l'état métallique liquide, les molécules d'hydrogène sont dissociées en atomes. Le fluide est alors conducteur électrique.

- La couche la plus externe s'étend jusqu'à la surface de Jupiter, c'est-à-dire jusqu'à 70 000 km environ. Elle consiste principalement en *hydrogène* liquide sous sa forme *moléculaire*. Sa température varie en fonction de la distance, à la surface elle serait de 2 000 °K, à 3 000 km de profondeur la température serait de 5 500 °K et la pression de 90 000 atmosphères.

- au-dessus se trouve l'atmosphère gazeuse d'une épaisseur de 1000 km dont la température des nuages supérieurs serait de -125 °K.

Ce modèle de la structure interne de Jupiter a l'avantage d'expliquer simplement l'origine de l'excès de chaleur rayonné par Jupiter. C'est le reste de chaleur engendré quand une masse unique s'est formée à partir de la nébuleuse solaire c'est-à-dire au moment de la formation de la planète.

Il est alors facile de révoquer les mécanismes suggérés antérieurement pour expliquer l'énergie thermique de Jupiter, telles que la radioactivité ou la contraction (léger tassement de Jupiter de 1 mm par an). Puisqu'un liquide est incompressible Jupiter ne peut pas rayonner de la chaleur parce qu'il se contracte, au contraire, il se contracte parce qu'il se refroidit légèrement. Ce modèle planète liquide exige que l'excès de chaleur due à la formation primitive de Jupiter soit intérieur à la planète et qu'une grande partie de la masse liquide soit remuée par des courants de convection. Ces courants contribuent probablement à créer le champ magnétique. Ces courants dans la couche d'hydrogène liquide peuvent former des boucles de courant électrique et ces boucles engendrent un champ magnétique à la façon dont un champ magnétique est créé à l'intérieur d'un solénoïde.

Aspect de l'atmosphère :

Quant à l'atmosphère de Jupiter elle fut présentée sous forme de clichés tels que nous les ont transmis Pioneer X et Pioneer XI.

Pour la première fois, grâce à Pioneer XI, les astronomes ont pu examiner les régions polaires de Jupiter avec ses formes nuageuses.

L'atmosphère se répartit en zones claires et ceintures sombres parallèles à l'équateur. Ces zones seraient des nuages blancs formés principalement de cristaux d'ammoniaque. La coloration orange des ceintures est probablement due aux traces de corps chimiques tels que les sulfites.

La Magnétosphère :

La magnétosphère de Jupiter s'étend à des distances de près de 80 rayons planétaires, soit 26 millions de kilomètres, ce qui correspond à 80 % de la distance entre les orbites de Vénus et la Terre. Dans Jupiter tout est vraiment à une échelle gigantesque, sans comparaison avec nos dimensions terrestres.

Elle est formée de deux régions :

- la région la plus interne dont on a représenté les lignes de force en forme de deux immenses ailes de papillon. L'axe des pôles magnétiques fait un angle de 11° avec l'axe de rotation. Le pôle sud magnétique est situé au nord géographique. Pioneers X et XI ont mis en évidence de grandes concentrations de particules, l'une entre 65 et 25 rayons joviens, une autre avec un maximum vers 3, 4 rayons joviens. Il semble que la distribution des protons au-dessous de 3 rayons joviens soit due à un balayage par le satellite le plus proche *Amalthee*. Les mouvements de Io et de Ganymède à l'intérieur de la magnétosphère semblent également avoir un effet (renforcement des émissions radioélectriques suivant l'emplacement de Io constaté depuis plusieurs années). Aucun effet n'a été trouvé, associé à Europe.

- la région plus extérieure comprend des particules ionisées, échappées dans l'espace du fait de la forte rotation de la planète. Elle forme une nappe de courant

électrique qui en tournant parallèlement à l'équateur de la planète produit un champ magnétique à grande distance et différent du champ de Jupiter.

Les deux régions sont entourées par une enveloppe dont l'épaisseur reste inférieure à 10 rayons joviens. Elle est représentée en grisé sur la figure 2, elle est limitée par la surface à l'onde de choc du vent solaire et par la magnétopause.

Satellites de Jupiter :

Jupiter possède 13 lunes: En septembre 1974, Kowal a découvert la 13ème lune de Jupiter, le satellite XIII, sur un cliché du télescope Schmidt du Mont Palomar. Cette découverte fut confirmée les 16 et 17 octobre par d'autres clichés montrant Jupiter XIII point lumineux de 19ème magnitude. Le tableau suivant rassemble les principales caractéristiques connues des 13 satellites. Les masses et les températures sont obtenues à partir des mesures des sondes Pioneer. La masse est évaluée en nombre de masses lunaires et la densité par rapport à l'eau.

SATELLITES DE JUPITER

Satellite	Durée de révolution	Distance à Jupiter (*)	Diamètre en Km	Massa en masses lunaires	Densité	Température côté jour
Amalthée (V)	11 h 57'	2,54	150	?		
Io (I)	1 j 18 h 17'	5,91	3 640	1,22	3,5	- 145 C
Europe (II)	3 j 13 h 14'	9,40	3 100	0,67	3,4	- 145 C
Ganymède (III)	7 j 3 h 42'	14,99	5 270	2,02	1,94	- 145 C
Callisto (IV)	16 j 16 h 42'	26,36	5 000	1,44	1,62	- 145 C
VI	250 j 15 h	160				
X	260 j 1 h	164	entre 18			
VII	260 j	165	et 60 Km			
XIII	282 j	199 ?				
XII	600 j	293				
XI	692 j	317	très petits			
VIII	739 j	329	non			
IX	745 j	338	chiffrés			

Les ondes radio sondant l'atmosphère de Io ont montré que Io avait une atmosphère ténue. Sa densité est 20 000 fois moindre que celle de la Terre et son épaisseur de 115 Km au-dessus de la surface du satellite. Io est le plus petit corps du système solaire qui possède une atmosphère. Une ionosphère était aussi découverte qui s'étend sur 700 Km au-dessus de la surface, côté jour. La densité ionosphérique varie de 60 000 électrons/cm³ côté jour à 9000 électrons côté nuit. Io est aussi entourée d'un anneau en forme de tore, composé d'un nuage d'hydrogène. Une lumière jaune, caractéristique du sodium, enveloppe Io. Elle est produite par la diffusion de la lumière solaire sur les atomes de sodium déposés à la surface du satellite.

Pioneers X et XI étaient trop éloignés d'Europe pour fournir de bonnes images de ce satellite qui montre des régions claires et obscures assez visibles.

Les clichés transmis de Ganymède révèlent par contre des détails de 400 km. On distingue une mer centrale de 800 km et une région brillante vers le pôle nord.

Quant à Callisto, les sondes se sont bornées à déterminer sa masse, sa température, ses dimensions.

Les quatre satellites suivants ont des diamètres de 18 à 60 km, des orbites inclinées de 28° sur le plan équatorial de Jupiter. Parmi ces quatre, se classe le satellite XIII.

Les quatre derniers satellites sont des corps miniatures du système jovien.

Les deux groupes de satellites résultent peut-être de la fragmentation de deux satellites primitifs de Jupiter.

L'exploration de Jupiter commencée en 1972 avec la mission Pioneer X connaîtra un regain d'activité avec les missions M J S 1977 (signifiant Mariner Jupiter Saturne) qui doit comprendre le lancement en 1977 de deux sondes du type Mariner, semblables à celles déjà expédiées vers Vénus et Mercure (Mariner X) (1) et vers Mars (Mariner IX) (2). Ces vaisseaux spatiaux atteindront Jupiter au bout d'un an et demi à deux ans et Saturne en trois ans et demi environ. Suivant le choix de la trajectoire et de la date de lancement la mission M J S étudiera en détails vers Jupiter soit les satellites Europe et Ganymède, soit Callisto. Quant à Saturne, Mariner passera en 1981 au milieu même de l'anneau, à travers la division de Cassini. Mais en 1979 si Pioneer XI fonctionne toujours, il sera le premier satellite artificiel à observer Saturne dans l'espace. Aussi je vous donne rendez-vous en 1979 pour vous exposer les découvertes récentes concernant Saturne.

(1) - Description et résultats exposés le 30 novembre 1974 - Bulletin Société Astronomique de Lyon - 1975 N 4.

(2) - Conférence de Monsieur Jacob - 1973.

Société Astronomique de Lyon

69230 – Saint Genis Laval

Sommaire

- 1 – Le ciel infrarouge revisité
par Madeleine Lunel.
- 2 – Notre Soleil
conférence par M. Jacob.
- 3 – La Lune après Apollo
par G. Adam
- 4 – Connaissances actuelles de Jupiter
par M. T. Martel

Prix : 5 F