

- INTRODUCTION - L'UNIVERS OBSERVABLE -

Le but de l'astronomie est d'expliquer tous les "objets" et "événements" au-delà de l'atmosphère terrestre. On emploie beaucoup en astronomie le mot "objet" pour désigner un astre (surtout lorsqu'on ne l'a pas encore identifié...). De même pour toute variation de la luminosité, de la taille ou pour tout autre changement d'état affectant ces objets, on parle d'"événement". Nous commencerons par faire une revue d'ensemble des différentes catégories d'objets astronomiques, des plus proches de nous aux plus lointains, des planètes du système solaire au Soleil, aux étoiles, amas d'étoiles, galaxies, amas de galaxies...

I.- LE SOLEIL

(1) Le Soleil est une étoile assez moyenne et assez typique de toutes les étoiles de notre galaxie et permet donc l'étude de la physique stellaire. Ses caractéristiques (masse, luminosité...) servent d'unités pour les astrophysiciens.

Ces grandeurs sont :

$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33} \text{ ergs/s}$$

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ g}$$

$$R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10} \text{ cm ou } 0,7 \text{ millions de km, soit environ } \\ 100 \text{ fois le rayon terrestre.}$$

(Les étoiles ont des masses allant de 0,1 à 100 M_{\odot} et des luminosités de 10^{-6} à $10^6 L_{\odot}$.)

Sa densité moyenne est donc de 1,4 g/cm³ (à comparer avec 5,5 g/cm³ pour la Terre).

Sa température effective (ou de surface) est de 6000°K. Cette température est définie à partir du spectre du Soleil : c'est la température du corps noir dont le spectre serait équivalent. Cette température correspond à la photosphère, où la profondeur optique de l'atmosphère solaire devient de l'ordre de 1. (la profondeur optique τ est le taux d'absorption du milieu $dI/I = -d\tau$ -si τ est constant, à travers une lame absorbante, par exemple $I = I_0 e^{-\tau}$).

- En lumière visible on ne peut voir que la surface du Soleil, puisque l'atmosphère est opaque. L'intérieur du Soleil sera décrit de façon plus générale lorsque nous parlerons des intérieurs stellaires. Disons que la température croît vers l'intérieur jusqu'à 15 millions de degrés environ, ce qui permet les réactions nucléaires d'où le Soleil tire son énergie.

- Le fait que la température du soleil diminue vers l'extérieur explique l'assombrissement centre-bord. Le Soleil n'émet pas en fait comme un corps noir, il n'est pas isotrope (Loi de Lambert).

- Il faut deux millions d'années environ à un photon émis au centre du Soleil pour émerger à la surface (le libre parcours moyen est inférieur au cm).

(2) Définition des zones :

R	$0.25 R_{\odot}$	$0.85 R_{\odot}$	R_{\odot}			
centre du Soleil	noyau	zone radiative	zone convective	photo-sphère	chromosphère	couronne
$T(K)$	$1.5 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$		10^6
ρ (g/cm ³)	160	20	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	10^{-14}
				\longleftrightarrow 500 km \longleftrightarrow 4000 km		

La photosphère est la zone limite de l'opacité de l'atmosphère, c'est là que se forment les raies optiques, le continuum émis par le Soleil ; c'est là qu'est défini le rayon du Soleil. On peut y distinguer des taches brillantes, les facules, des taches sombres, les taches solaires, et, en toile de fond, toute une structure granulaire.

Les granules sont des taches de flux de matière, correspondant à de la convection organisée : la matière chaude ($\Delta T \sim 200$ K) monte dans des tubes (correspondant au centre du granule, plus brillant), puis la matière refroidie redescend le long des bords du granule (bords sombres). Rayon du granule ~ 700 km. Durée de vie ~ 10 minutes.

Au-dessus de la photosphère, se trouve d'abord la couche d'inversion de température. Celle-ci atteint un minimum de ~ 4500 K avant de remonter dans la chromosphère et la couronne. C'est dans cette couche plus froide que se forment les raies d'absorption du spectre solaire (Fe, Ca, ...)

Puis la chromosphère, qui doit son nom à sa couleur "rouge" due essentiellement à l'émission de raie H_{α} . La température est alors entre 7 et 10 000 K.

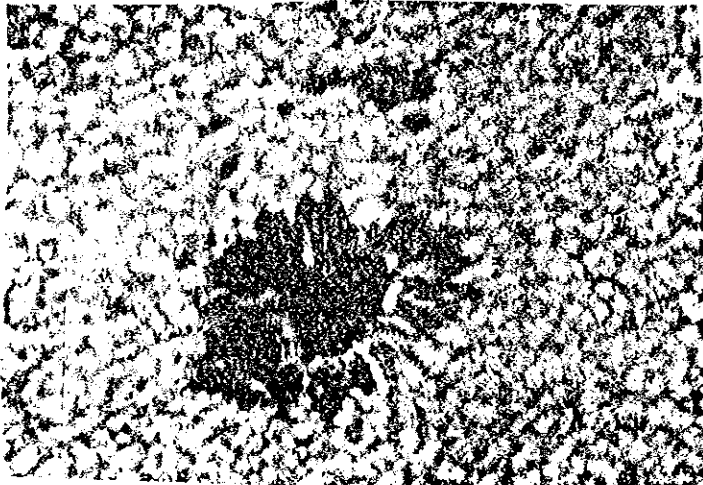
La couronne prolonge la chromosphère. Elle n'est visible que lors des éclipses, ou bien grâce à un coronographe qui occulte les rayons venant du disque solaire (inventé par Bernard Lyot en 1930).

On peut voir la couronne s'étendre à 810^6 km du Soleil - (température 10^6 K ; densité 10^{-14} g/cm³) - C'est un milieu ionisé, un plasma, en expansion continue, où existent d'intenses champs magnétiques. Là est l'origine du vent solaire, un flux de gaz ionisé (protons, électrons) qui s'échappe du Soleil et atteint les confins du système solaire. Au niveau de la Terre, le vent solaire représente $2.6 \cdot 10^{13}$ particules/cm²/s qui se déplacent à une vitesse de 400 km/s. La perte de masse correspondante du soleil est de $4 \cdot 10^{-14} M_{\odot}$ /an. Le problème du chauffage de la

couronne n'est pas encore entièrement résolu : il s'agit en partie de la dissipation des ondes acoustiques par ondes de choc (énergie mécanique produite par la turbulence) et surtout de la dissipation des ondes d'Alfven (viscosité "électrique", dissipation du champ magnétique). La couronne est un puissant émetteur d'ondes radio.

(3) Activité solaire :

Des taches solaires sombres apparaissent à la surface du Soleil par paires ou en groupes, et leur déplacement sur le disque solaire permet d'en déduire la rotation du Soleil (du moins en surface). Le Soleil tourne lentement, en moyenne en 28 jours, mais la rotation est différentielle, la période passant de 25 jours à l'équateur à 34 jours aux pôles. L'équateur solaire est incliné de 7° sur l'écliptique. Les plus grosses taches ont 100.000 km de diamètre, d'autres sont bien plus petites.



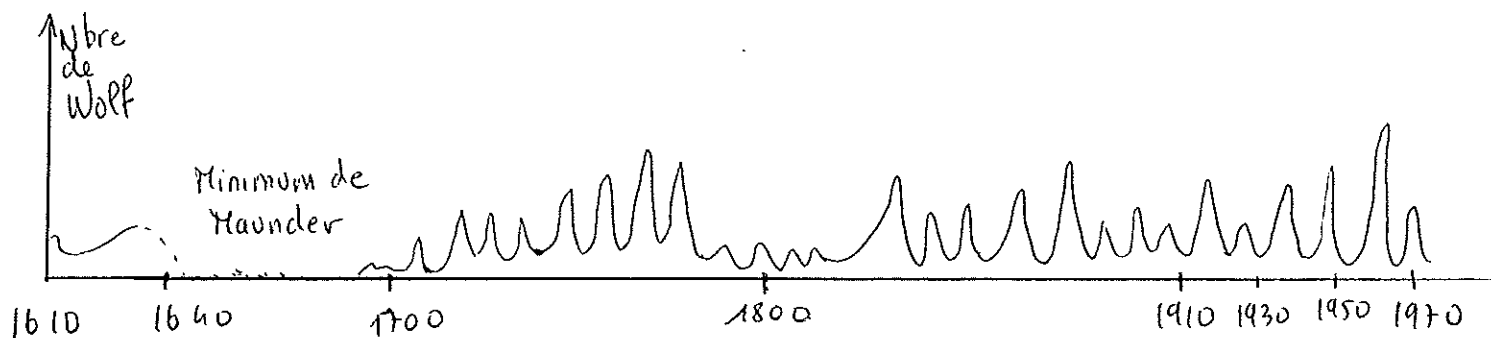
Le centre de la tache est sombre (on estime qu'il est plus froid que le reste de la surface par $\Delta T = 1700$ K environ) et est entouré d'une zone de "pénombre", constituée de filaments brillants enchevêtrés, à direction presque radiale. Un groupe évolue avec le temps, les taches de tête, plus importantes

arrivent en premier, puis les taches de queue. Grâce à l'effet Zeeman (décomposition des raies spectrales dans un champ \vec{B}) on peut mesurer en chaque point du disque solaire le champ magnétique (magnétogramme). Le champ moyen du Soleil est de quelques Gauss, mais dans les taches, il va jusqu'à $3 \cdot 10^3$ G. On mesure d'autre part, par effet Doppler, les mouvements

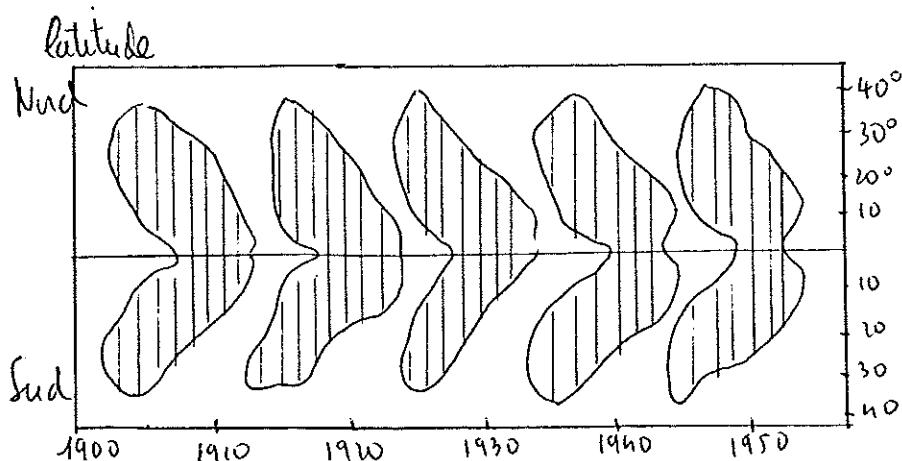
ascendant et descendant de la matière au niveau des taches. Dans les taches l'énergie magnétique domine d'un facteur 10 l'énergie thermique du gaz, ce qui pourrait expliquer pourquoi elles sont plus froides.

Les paires de taches sont toujours de polarité opposée. A un moment donné, dans l'hémisphère Nord, toutes les taches de tête ont une polarité Nord par exemple et les taches de queue une polarité Sud. Ces polarités sont inversées dans l'hémisphère Sud (taches de tête Sud, et de queue Nord). Ces polarités sont sujettes à la périodicité de l'activité solaire : le cycle de 11 ans.

Ce cycle a été découvert par Schwabe en 1843 et quantifié par Wolf : le nombre de Wolf est un indicateur de l'activité solaire = $k(10 n_g + n_t)$ où n_t est le nombre de taches et n_g le nombre de groupes de taches, k une constante.

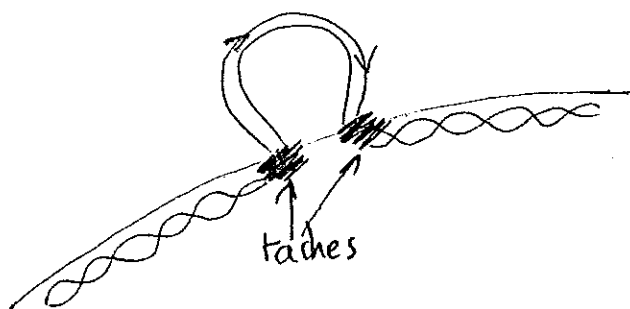


Au début d'un cycle, les taches apparaissent aux alentours de 35° de latitude, puis elles apparaissent à plus basse latitude (cf. diagramme du papillon).



L'origine des taches est magnétique. Parmi les nombreuses théories MHD qui ont été proposées; nous dégagerons le schéma simple de Babcock (1960) : Le cycle du

Soleil est en fait de 22 ans, car la polarité du champ solaire change de signe tous les 11 ans. Au début du cycle de 22 ans, le champ ressemble à celui d'un dipôle. Les lignes de champ courent juste sous la surface (profondeur de $R_{\odot}/10$) et sortent entre 30 et 40° de latitude. Mais la rotation différentielle enrôle les lignes de force (les particules chargées sont piégées autour des lignes du champ magnétique). Le nombre de lignes de force va augmenter. D'autant que les mouvements de convection dans les hautes couches vont enrôler les lignes de force en des "cordes"



de lignes de champ.

Aux endroits où les lignes de champ sont rapprochées et enchevêtrées, la pression magnétique est très forte. La pression thermique, pro-

portionnelle à la densité ρ , est alors moins forte pour équilibrer la pression extérieure. Ces endroits de plus faible densité sont projetés vers la surface, par poussée d'Archimède et instabilités. Le champ magnétique se dissipe dans l'atmosphère, les taches vont migrer sur la surface selon leur polarité, les taches de tête vers l'équateur et les taches de queue vers les pôles. A l'équateur, les taches de têtes qui sont de polarité opposée dans les deux hémisphères s'annulent. Les taches de queue, elles, vont annuler puis renverser le sens du champ magnétique solaire. On est revenu au point de départ, mais avec un champ solaire inversé. Le statu quo est obtenu au bout de 22 ans.

La durée de vie d'une tache solaire est de l'ordre de 100 jours. Les taches sont toujours accompagnées d'une protubérance, qui forme comme une arche brillante, si on la voit sur le bord du disque solaire et un filament sombre si elle est aperçue en projection sur le disque (matière

plus froide, vue en absorption). Certaines protubérances peuvent monter jusqu'à 100 000 km de la surface. Des phénomènes plus violents sont associés aussi aux groupes de taches : les éruptions. Celles-ci peuvent durer de quelques minutes à quelques heures. Elles sont particulièrement notables dans leur émission de raie H_{α} . Au cours de ces éruptions, du rayonnement ultra-violet et des particules chargées sont émises, qui atteignent la Terre et perturbent son champ magnétique (orages magnétiques).

(4) Emission radio du Soleil :

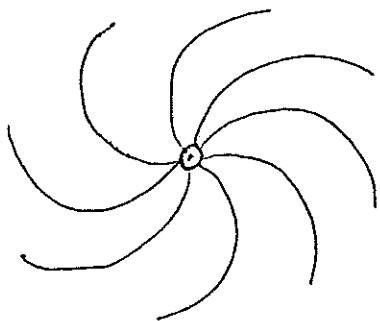
C'est surtout la couronne qui émet des ondes radio. Lorsque le Soleil est calme, il émet comme un corps noir à la température de la couronne. Lors de l'activité solaire, on détecte des sursauts radio-électriques correspondants aux éruptions. Les longueurs d'onde émises vont du mm au dam. Selon le type des sursauts, plusieurs mécanismes peuvent être mis en évidence : rayonnement de freinage des e^{-} (éjectés à grande vitesse) dans le gaz ionisé, oscillations de plasma, donc la fréquence varie en \sqrt{n} (n densité du plasma - cf. chapitres ultérieurs) ; ces ondes ont un profil caractéristique en fréquence, une dérive régulière correspondant à la propagation des oscillations dans des zones de densité décroissante. Il y a aussi du rayonnement synchrotron, émis par des particules chargées spiralant autour des lignes de champ magnétique (éruptions les plus longues). Typiquement, on enregistre un sursaut de 10^{28} ergs par jour, et un sursaut de 10^{30} ergs par mois, (parfois 10^{32} ergs)

Emission en rayons X : On ne peut observer que de l'espace (satellites OSO, skylab 1973). Alors que dans le visible, on ne voit pas la couronne, transparente, mais la photosphère opaque et très brillante, en rayons X la couronne est opaque et la photosphère est trop froide pour émettre. L'intensité en rayons X émise est très sensible à la température

et à la densité. L'image en rayons X du Soleil est très contrastée. On voit nettement les concentrations de gaz coronal. Il existe des régions très brillantes correspondant à des maxima du champ \vec{B} (et aussi à la distribution des taches photosphériques) et des "trous coronaux" sombres qui englobent toujours les pôles.

Ce sont des cavités où le champ magnétique est ouvert. La densité y est trois fois moins forte qu'ailleurs et la température y est deux fois plus faible. Ces trous et concentrations tournent autour du Soleil comme un corps solide et non de façon différentielle. Il semblerait que le vent solaire provienne principalement de ces "trous coronaux".

Le vent solaire est un flux de particules chargées émis continuellement, en fait un plasma emportant aussi son champ magnétique. Au cours des éruptions, sont en outre émises des particules de haute énergie (ou rayons cosmiques). Les protons qui peuvent avoir une énergie de 1 Mev, ont des vitesses jusqu'à 10^4 km/s, et les électrons ont $v \approx c/3$. A cause de la



rotation du Soleil, la direction du vent prend une structure de tourniquet, la courbure variant de façon inverse avec l'énergie des particules. Outre la réception

de ce vent sur les planètes, ou par les sondes interplanétaires, les comètes en sont un bon révélateur.

(5) Sismologie solaire :

Etude des modes de vibration du Soleil. Le mode le plus simple est la contraction et expansion radiale. Mais il existe des modes bien plus complexes. On distingue les vibrations acoustiques (où la force de rappel est la pression) et les vibrations gravitationnelles (où c'est la

gravité qui joue le rôle de force de rappel). La propagation de ces vibrations peut nous renseigner sur les conditions physiques à l'intérieur du Soleil (T, ρ, \dots). On les étudie par l'effet Doppler (mesure de \vec{V}) ou par les variations périodiques de l'intensité des raies (Ca, Mg, ...) ou par la mesure du diamètre du Soleil. Notons ici les oscillations de période 5 minutes, qui concernent essentiellement la surface du Soleil (ondes acoustiques). Les ondes pourraient être excitées par les mouvements de convection. Le 18 juillet 1981, la chute d'une comète sur le Soleil a engendré des ondes de surface qui ont mis 7 jours à s'amortir. Depuis 9 ans, on observe des ondes (type gravitationnel) de 160 minutes de période, grâce essentiellement à l'effet Doppler. Toutes les observations (Crimée, Pôle Sud, ...) sont cohérentes. L'origine de ces ondes est encore à l'heure actuelle inconnue.

II.- LE SYSTEME SOLAIRE :

- Remarquons, tout d'abord, que le système solaire a des dimensions très petites ; Pluton, la dernière planète est à 40 AU du Soleil. L'étoile la plus voisine est 10.000 fois plus distante du Soleil. C'est donc, à l'heure actuelle, un système pratiquement isolé, sans perturbations extérieures, ce qui ne fut probablement pas le cas lors de sa formation.

- Le Soleil représente l'essentiel de la masse. Tout le système planétaire ne constitue que $1.5 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$. L'interaction entre une planète et le Soleil peut donc être considérée en première approximation comme un système gravitationnel à deux corps.

Les orbites correspondent donc aux ellipses de Képler, dont le Soleil est un foyer. Si l'on connaît le demi-grand axe a de l'ellipse, on peut en déduire la période T selon la loi de Képler : $T^2/a^3 = \text{cste}$. Toutes les planètes tournent dans le sens direct, les astéroïdes et les comètes aussi en général, avec quelques exceptions (par exemple la comète de Halley

rétrograde).

L'excentricité des orbites des planètes est, en général, inférieure à 0.1, sauf celles de Mercure et de Pluton (0.21 et 0.25 respectivement). Par contre, celle des astéroïdes et des comètes peut approcher 1.

L'inclinaison sur l'écliptique est toujours inférieure à 5°, sauf, toujours, pour Mercure et Pluton (7° et 17°). Là encore, les orbites d'astéroïdes et comètes peuvent être plus inclinées.

- Seuls Mercure et Vénus n'ont pas de satellites. Jupiter et Saturne en ont 16 et 17 respectivement (ces nombres ne sont pas définitifs ! De plus, Jupiter, Saturne et Uranus possèdent quelques anneaux. Les satellites, en général, tournent aussi dans le sens direct, avec quelques exceptions.

- On distingue quatre planètes telluriques (Mercure, Vénus, Terre et Mars) solides et proches du Soleil, de petite taille, (le rayon terrestre est de 6 700 km) et quatre planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) moins denses, plus loin du Soleil et de plus grandes dimensions (rayon de Jupiter : 70 000 km). Alors que la densité moyenne des planètes telluriques avoisine 5 g/cm^3 , celle des planètes géantes s'approche plutôt de 1 g/cm^3 comme le Soleil lui-même. La masse des planètes est concentrée en Jupiter (71%).

- La distance des planètes au Soleil obéit assez bien à la loi empirique de Titius et Bode (1778) : $D = 0,4 + 0,32^n \text{ AU}$.

Mais, on doit prendre $n = -\infty$ pour Mercure, 0 pour Vénus, 1 pour la Terre, etc... Il est intéressant de noter que cette loi "prédit" une planète à 2.8 AU, c'est-à-dire entre Mars et Jupiter, et que 2.8 AU représente la distance moyenne des astéroïdes au Soleil. La loi permet de retrouver les distances à 5% près, sauf pour Neptune et Pluton. Elle a l'avantage de souligner la croissance exponentielle des distances.

- Le moment angulaire total ($3 \cdot 10^{50}$ g cm²/s) est essentiellement contenu dans le système planétaire. Le Soleil lui-même, qui pourtant domine en masse, ne contribue que pour 1/200e du moment angulaire. Pourquoi le Soleil tourne-t-il si lentement ? C'est un paradoxe que doivent essayer d'expliquer les théories de formation du système solaire.

- La température des planètes décroît bien sûr avec la distance au Soleil, et grossièrement comme la racine carrée de cette distance. En effet, toutes les planètes, excepté Jupiter, ne font que réfléchir la lumière du Soleil (Jupiter émet beaucoup plus d'énergie, par lente contraction gravitationnelle).

Si l'on suppose que le disque des planètes émet comme un corps noir, on peut appliquer la loi de Stefan : l'intensité totale émise, intégrée sur les fréquences est :

$$I_p = \frac{\sigma}{\pi} T_p^4$$

Or, cette intensité I_p est égale à l'énergie reçue du Soleil par la planète, qui, elle, décroît en $1/r^2$.

En identifiant les deux expressions, on obtient $T_p \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$.

- La plupart des planètes possèdent une atmosphère (sauf Mercure) Pour les planètes géantes, cette atmosphère est constituée principalement de H, He, CH₄, NH₃ - (pour Vénus et Mars CO₂ essentiellement et N₂ sur Terre) - Titan est le seul satellite à posséder une atmosphère. La constitution d'une atmosphère dépend essentiellement de deux facteurs : la proximité du Soleil (température) et de la masse de la planète (gravité qui retient l'atmosphère).

- Le degré d'aplatissement d'une planète dépend de sa vitesse de rotation autour d'elle-même. En général, pour les planètes proches du Soleil, la rotation est freinée par effets de marée (exemple de Vénus, qui tourne même de façon rétrograde !).

. Mercury : ce n'est que récemment que ses périodes de rotation autour du Soleil et autour d'elle-même ont pu être déterminées (88 et 59 jours respectivement), par la technique de l'écho radar (effet Doppler). Jusque-là on croyait que l'année et le jour mercuriens étaient égaux, car les observations de Mercure (extrêmement difficiles en raison de sa proximité du Soleil trop brillant) étaient toujours effectuées lors de la même phase. L'orbite est assez elliptique ; longtemps on a cherché une planète supplémentaire entre le Soleil et Mercure pour expliquer la grande valeur de l'avance de son périhélie (aujourd'hui expliquée par la relativité générale).

. Venus : possède une atmosphère dense et opaque, qui ne tourne qu'en 4 jours, alors que le sol tourne en 243 jours (rétrograde). Les sondes Venera 9-10 pénètrent l'atmosphère et photographient les surfaces rocheuses. Par effet de serre, la température monte à 325° C, la pression est de l'ordre de 60 atmosphères.

. Mars : albedo plus élevé dans le rouge que dans le bleu (d'où son apparence). Existence de calottes polaires blanches, de taille variable selon les saisons (CO_2) - atmosphère très ténue (CO_2 , O_2).

. Les astéroïdes : Blocs solides, souvent de forme irrégulière. (\approx 1700 catalogués). Le plus grand, Cérès, a 770 km de diamètre. Il est possible que la grande masse de Jupiter ait empêché une planète de se former à cet endroit (ou elle aurait été détruite par forces de marée). Les orbites des astéroïdes se distribuent autour d'une distance moyenne de 2.8 AU du Soleil, mais évitent certaines régions, par phénomène de résonance, régions où leur période de rotation serait commensurable avec celle de Jupiter. En effet, s'il existe un rapport rationnel ($1/2$, $1/3$, $2/5$, ...) entre les deux périodes, la distance minimale d'approche entre Jupiter et l'astéroïde survient toujours à la même phase, et les effets

gravitationnels sont cumulatifs : ils peuvent ainsi éloigner tous les astéroïdes de cette orbite "résonnante".

. Jupiter : la plus grosse planète du système solaire (317 fois la masse de la Terre). Son rayonnement total correspond à deux fois et demie l'énergie reçue du Soleil : ce surcroît d'énergie est dû à sa lente contraction gravitationnelle, c'est pourquoi on parle de Jupiter comme d'une étoile manquée. En fait, sa masse est bien au-dessous du seuil de formation d'une étoile. Son atmosphère est très dense, en rotation différentielle comme le Soleil, et forme comme des ceintures de couleur caractéristiques. La tache rouge de dimension 13.000×40.000 km serait une perturbation cyclonique stable (ou bien un soliton ?). Jupiter possède un fort champ magnétique, incliné de 15° sur l'axe de rotation, et c'est un puissant émetteur radio.

. Saturne : son atmosphère présente aussi quelques bandes colorées. Un important système d'anneaux orbite autour de Saturne, qui fait varier sa brillance de 70% selon l'orientation vers la Terre. L'épaisseur du plan des anneaux est de l'ordre de 20 km. Ces anneaux sont constitués de petits rochers en rotation différentielle autour de la planète. Un satellite ne pourrait exister à des distances aussi proches de la planète sans être détruit par forces de marée. (ce qui explique la présence des anneaux). Essayons d'évaluer une distance limite : considérons un satellite de masse M_S et de rayon R_S tournant autour de la planète (M_P, R_P) avec une vitesse de rotation ω et à la distance r . La force gravitationnelle équilibre la force centrifuge et l'on a : $GM_P / r^2 = \omega^2 r$
(on suppose $M_P \gg M_S$, et le centre de masse confondu avec la planète).
Le point du satellite S le plus éloigné de la planète est soumis à deux forces qui tendent à l'éloigner du centre de S :

- l'attraction de la planète est moins forte :

$$\Delta g = \frac{GM_P}{r^2} - \frac{GM_P}{(r + R_S)^2} \sim \frac{2GM_P R_S}{r^3} \quad (R_S \ll r)$$

- la force centrifuge est plus grande :

$$\omega^2 (r + R_S) - \omega^2 r = \omega^2 R_S = \frac{GM_P R_S}{r^3}$$

Si on veut maintenir la cohésion du satellite, il faut :

$$\frac{3GM_P R_S}{r^3} < \frac{GM_S}{R_S^2}$$

On obtient une distance limite $r = 3^{1/3} \left(\frac{\rho_P}{\rho_S}\right)^{1/3} R_P$

ρ_P et ρ_S sont les densités moyennes de la planète et du satellite respectivement. Le calcul plus exact de Roche (1850) aboutit au seuil :

$$r = 2,44 \left(\frac{\rho_P}{\rho_S}\right)^{1/3} R_P$$

Notons que le plus grand des anneaux est à une distance de $r = 2,3 R_P$ et le premier satellite Janus à $r = 2.8 R_P$.

Certaines régions des anneaux sont dépeuplées et le phénomène peut s'expliquer en grande partie par des résonances, comme pour les astéroïdes. Par exemple, la région la plus importante de dépeuplement, la division Cassini, correspondrait à une période de révolution égale à 1/2 celle de Mimas et 1/3 et 1/4 celle de deux prochains satellites. Toutefois, les missions Voyager ont dévoilé une bien plus grande complexité dans la structure des anneaux (notamment des condensations radiales).

. Uranus : découverte en 1781 par Herschel, possède 9 anneaux très étroits. Son axe de rotation est très incliné sur l'orbite.

. Neptune : découverte par Le Verrier en 1845 par les perturbations créées sur l'orbite d'Uranus.

. Pluton : un satellite, Charon, est découvert en 1978 ; la masse de Pluton est de $2 \cdot 10^{-3}$ celle de la Terre, et son satellite Charon n'est que 10 fois moins massif, c'est le plus grand satellite du système solaire en proportion.

. Les comètes : environ 6 sont découvertes chaque année.

On distingue le noyau (environ 200 km de diamètre) la tête ($2 \cdot 10^4$ à $2 \cdot 10^5$ km) où l'on trouve les molécules N_2 , O, C_2 , C_3 , CN, CH, NH, OH, NH_2 , et la queue (10^7 à 10^8 km) où l'on détecte les ions N_2^+ , OH^+ , CO^+ , CO_2^+ , CH^+ . Les comètes ont des trajectoires très excentriques autour du Soleil ; au périhélie la matière est vaporisée et forme deux traînées distinctes :

- une traînée en ligne droite, à l'opposé du Soleil, dans la direction du vent solaire (à quelques degrés du vecteur comète-soleil), formée de molécules ionisées et de radicaux. C'est le vent solaire qui repousse le gaz en arrière de la comète.

- une traînée incurvée, plus large, formée de particules de poussière qui diffusent la lumière du Soleil. C'est ici la pression de radiation qui repousse la matière. Les comètes orbitent aux confins du système solaire. Elles ont une grande importance cosmogonique : ce sont des matériaux qui peuvent témoigner de l'abondance des éléments à l'origine du système solaire.

- Un grand nombre de corps célestes tombent dans notre atmosphère, ils se vaporisent et rayonnent : ce phénomène lumineux est un "météore". On appelle "météorites" les débris qui parviennent au sol (de quelques mg à quelques tonnes). Ces objets sont extrêmement précieux pour les études d'abondances. On distingue les météorites pierreuses, et les météorites de fer. On pense qu'elles proviennent de la ceinture des astéroïdes, ou bien sont les débris d'une comète désintégrée à son périhélie. Elles permettent de mieux comprendre l'évolution du système solaire.

. La lumière zodiacale témoigne de l'existence d'un milieu interplanétaire : il s'agit de grains de poussière qui diffusent la lumière du soleil. Cette poussière est située dans le plan de l'écliptique, elle s'étend au moins jusqu'à l'orbite de la Terre.

L'émission de cette poussière a été observée récemment en infra-rouge avec le satellite IRAS (1983) ; à 12 et 25 μ cette émission est même supérieure à celle de la Voie Lactée.

III.- L'ORIGINE DU SYSTEME SOLAIRE

Beaucoup d'éléments doivent être expliqués : moment angulaire, ségrégation des masses, orbites, composition chimique, âge, ... Le problème est que nous ne pouvons compter que sur notre système planétaire : il existe certainement d'autres systèmes planétaires autour d'étoiles de notre galaxie, mais il est encore impossible de les observer, les planètes ont un éclat lumineux beaucoup trop faible -(peut-être avec le Télescope Spatial ?)- Il existe toutefois quelques indices. Notons l'observation par le satellite IRAS (1983) d'un excès infrarouge à 100 μ dans la direction de Véga. L'analyse de l'émission de Véga dans quatre bandes infrarouges conduit à l'existence sur 80 AU de distance autour de Véga d'un disque de poussières de taille macroscopique (quelques dizaines de microns au minimum).

Aujourd'hui, le système solaire semble isolé des autres étoiles. Mais il faisait certainement partie d'un groupe d'étoiles lors de sa formation. En effet, nous voyons aujourd'hui se former les étoiles au sein des nuages moléculaires. A divers endroits du nuage, il peut y avoir des condensations qui s'amplifient par instabilité gravitationnelle. Une

fois la première étoile formée, la perturbation engendrée sur le reste du nuage (ondes de choc, compression dues aux vents stellaires, à l'explosion des supernovae, etc ...) va déclencher la formation d'autres étoiles (:la formation est contagieuse). Les étoiles sont formées avec des vitesses propres aléatoires. Comme elles n'interagissent plus par collision avec le milieu, elles vont progressivement s'éloigner du nuage et des étoiles voisines formées au même endroit. Ce qui explique l'isolement actuel du Soleil. Toutefois, on devrait retrouver dans la composition chimique du système solaire actuel les traces de la proximité éventuelle d'étoiles au début : par exemple, si une supernova a explosé très près, on devrait retrouver trace des éléments lourds qu'elle rejette dans le milieu interstellaire.

Que peut-on déduire de l'abondance des éléments dans le système solaire ?

Pour les 92 éléments naturels, de l'hydrogène à l'Uranium, toutes les données obtenues à partir du Soleil (raies d'absorption, vent solaire) de la Lune et des planètes (échantillons de roches), des météorites, des comètes... sont compatibles avec une formation commune du Soleil et des planètes à partir d'une matière grossièrement homogène. Les différences essentielles peuvent être expliquées par les différences de température, de gravité régnant dans tout le système. Pour avoir des renseignements plus quantitatifs, on étudie les rapports d'abondance entre les divers isotopes du même élément (rapports isotopiques) : on s'affranchit ainsi du problème des conditions physiques de formation.

. 1er exemple : hydrogène et deutérium. Le rapport D/H a été mesuré dans la matière interstellaire : $D/H = 2 \cdot 10^{-5}$. Dans le système solaire, Jupiter notamment, il est aussi égal à cette valeur de $2 \cdot 10^{-5}$. Par contre, dans le Soleil il est 10^2 fois plus petit. Ceci s'explique par la destruction du deutérium par des réactions nucléaires à haute température (si T dépasse quelques millions de degrés). Le deutérium est détruit à l'intérieur du Soleil, et par convection et brassage de la matière, cette déficience se retrouve dans l'atmosphère solaire. Le rapport D/H est donc un bon indicateur du recyclage de la matière à l'intérieur des étoiles (rappelons que son origine est essentiellement primordiale).

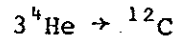
Puisque $D/H = 2 \cdot 10^{-5}$ dans tout le système solaire, cela montre donc que la matière n'a pas été processée dans une étoile et n'a subi aucun événement violent ayant pu porter la température au-dessus de quelques 10^6 K. Ce qui permet tout de suite d'éliminer plusieurs scénarios pour l'origine du système solaire :

- le soleil aurait été, au départ, une étoile double, après explosion du compagnon, les débris auraient formé le système planétaire ;
- le soleil aurait arraché, par interaction gravitationnelle avec une étoile proche, de la matière stellaire qui aurait formé le système planétaire en se refroidissant.

Les mêmes conclusions sont obtenues avec l'abondance du lithium, dont l'origine est essentiellement primordiale (plus réactions de spallation) et qui est détruit dans les étoiles.

. 2e exemple : le rapport $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Dans tout le système solaire (vent solaire, planètes, comètes), ce rapport vaut 89. Par contre, les mesures faites dans les nuages moléculaires (plus incertaines) donnent

une valeur voisine de 40. L'explication de cette différence réside dans l'évolution du rapport $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ interstellaire avec le temps : en effet ^{12}C et ^{13}C ne se forment pas de la même façon dans les étoiles. Le carbone ^{12}C est formé lors de la fusion de l'hélium dans les étoiles, par une séquence de réactions dont le bilan est :



On dit que cet élément est "primaire", car il est engendré dans les étoiles de première génération, dont la matière n'est pas encore enrichie en éléments lourds. ^{13}C est par contre un élément "secondaire", qui n'est synthétisé en grandes quantités que dans les étoiles de deuxième génération. Il se forme à partir de ^{12}C dans le cycle CNO (cycle de Bethe). Au commencement de la formation d'étoiles, et à mesure que celles-ci rejettent des éléments synthétisés dans le milieu interstellaire (supernovae, vents stellaires), les nuages moléculaires s'enrichissent, progressivement d'abord, en ^{12}C , puis en ^{13}C . Aujourd'hui, ils contiennent plus de ^{13}C qu'il y a 5 milliards d'années, l'âge présumé du système solaire. L'homogénéité du rapport $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ dans le système solaire prouve d'ailleurs que tout le système a grossièrement le même âge.

. 3e exemple : l'oxygène. Cet élément existe sous trois formes stables : ^{16}O (le plus abondant), ^{17}O et ^{18}O . Des différences de rapports isotopiques assez fines (de l'ordre de quelques centièmes) ont été détectées dans les météorites par rapport à l'ensemble Terre-Lune.

Ces différences ont été interprétées comme la preuve de l'enrichissement par des étoiles massives, voisines du Soleil au début de sa formation, de la nébuleuse protoplanétaire en ^{16}O .

- On peut également déduire de la composition chimique des divers corps du système solaire les conditions physiques dans lesquelles ils se sont formés, et remonter à l'évolution thermodynamique de la nébuleuse solaire. La teneur minéralogique des différentes météorites permet d'en déduire leur température de condensation (entre 400 et 1000 K). On pense ainsi que le système solaire s'est condensé à une température bien supérieure à sa température actuelle (sans doute due à l'effet de serre, car la nébuleuse primitive était opaque). La pression requise pour expliquer les condensations est de 10^{-3} à 10^{-6} atmosphère. On estime ainsi la masse du système protoplanétaire entre quelques $10^{-2} M_{\odot}$ et quelques M_{\odot} .

- L'âge du système solaire est évalué, grâce aux éléments radioactifs. On observe sur Terre des éléments dont la demi-vie est supérieure à 10^9 ans, mais assez peu d'éléments dont la demi-vie est inférieure, ce qui fixe déjà l'ordre de grandeur de l'âge du système. Plus précisément, on se sert du rapport entre les abondances de ^{235}U ($= 10^9$ ans), ^{238}U ($T_{1/2} = 6.5 \cdot 10^9$ ans) et ^{232}Th ($T_{1/2} = 20 \cdot 10^9$ ans) et celle du plomb (produit final des désintégrations) pour quantifier l'âge des planètes et des météorites. L'âge de tous les corps du système solaire semble concorder autour d'une même valeur : $4.6 \cdot 10^9$ ans.

- Tous ces indices permettent d'ébaucher un scénario probable : un nuage de gaz se condense par instabilité gravitationnelle. Probablement d'ailleurs il s'agit d'une des multiples condensations au sein d'un nuage moléculaire. Par conservation du moment angulaire, la contraction accélère la rotation du nuage sur lui-même autour d'un axe quelconque (où existait un faible mouvement aléatoire de rotation). La contraction est freinée perpendiculairement à l'axe de rotation par la force centrifuge : le

système s'aplatit pour former un disque. La densité et la pression croissent surtout au centre, où la température va monter assez haut pour déclencher des réactions nucléaires et former le soleil. En attendant, il se forme des noyaux dans le disque nébulaire par agglomération des grains de poussière ; les tourbillons, les instabilités gravitationnelles forment des embryons de planètes.

Lorsque le soleil commence à briller, le mouvement des atomes, molécules vers le centre va s'inverser. Le vent solaire va balayer le système de tous les éléments gazeux volatils, des poussières légères. Peu à peu, la nébuleuse opaque au début devient transparente. C'est à ce moment là que se produisent les nombreuses collisions entre planètes, blocs rocheux... Les grosses planètes ramassent la matière sur leur passage. De cette époque datent tous les nombreux cratères et impacts qui caractérisent les planètes ou satellites sans atmosphère (sans érosion). Dans les collisions, les diverses planètes perdent leur mouvement relatif. Tout finit par tourner dans le même sens et le même plan, de façon ordonnée, minimisant les collisions. Seules les comètes sont les vestiges de cette période mouvementée.

Le Soleil perd peu à peu sa rotation et son moment angulaire, en éjectant continuellement les particules du vent solaire. Ces particules parviennent à sortir du système et le moment angulaire n'est donc pas transféré aux planètes, mais aux confins du système. Ce qui explique non seulement la faible valeur relative du moment angulaire du Soleil, mais aussi la faible valeur du moment total.