

L'ORIGINE DU SYSTEME SOLAIRE

(suite)

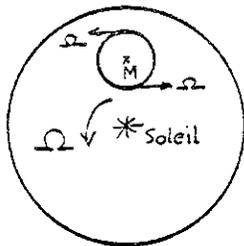
II - POURQUOI LES PLANETES SE FORMENT-ELLES ?

L'hypothèse de la formation des planètes par «instabilité gravitationnelle» a été suggéré par Kuiper. C'est un mécanisme général très important, car c'est lui qui donne naissance à la plupart des objets célestes (planètes, étoiles et même galaxies). La théorie de ce phénomène est extrêmement complexe, mais on peut en comprendre l'essentiel à partir d'un calcul très simple.

Nous ferons deux hypothèses :

- 1) le soleil se forme avant les planètes,
- 2) le résidu de matière interstellaire (grains, poussières et gaz) qui donnera naissance aux planètes forme un disque mince en rotation autour du soleil. On appelle Ω sa vitesse angulaire de rotation et la densité de matière est estimée à : $\sigma = 7 \text{ g/cm}^2$

(Elle est calculée par cm^2 et non par cm^3).



Considérons un petit disque de rayon R et de masse $M = \pi R^2 \sigma$ découpé dans le plan du disque proto-planétaire.

Une particule située sur le pourtour du petit disque est soumise à deux forces principales (comptées positivement vers l'intérieur).

- 1) La force centrifuge due à la rotation d'ensemble de la nébuleuse $= \Omega^2 R$
- 2) La force d'attraction exercée par la masse M $\frac{GM}{R^2} = G \pi \sigma$

Trois cas sont possibles suivant les valeurs de R ; Ω et σ

1) $F = \Omega^2 R - G \pi \sigma > 0$

La particule a tendance à s'évader et le système se dilate.

2) $F = 0$

L'ensemble est stable et reste tel quel.

3) $F = \Omega^2 R - G \pi \sigma < 0$ $R < \frac{G \pi \sigma}{\Omega^2}$

La force centrifuge ne peut balancer la force d'attraction et toutes les particules du petit disque tombent au centre. C'est ce qu'on appelle la contraction gravitationnelle qui va donner naissance à un petit noyau condensé qu'on appellera planétésimale. La masse de ce petit noyau de condensation peut être facilement calculée :

$M = \pi R^2 \sigma$ avec $R = \frac{G \pi \sigma}{\Omega^2}$

Ap. Numérique

$$\begin{aligned} \sigma &\approx 7 \text{ g/cm}^2 \\ \Omega &\approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \text{ (1 tr/an)} \\ G &= 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ ergs} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} R = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm} \\ M = 10^{31} \text{ g} \end{array} \right.$$

Si l'objet qui se forme a une densité de l'ordre de 5, on obtient un rayon final égal à 5 km. Ainsi, sous l'effet des forces gravitationnelles, le nuage proto-planétaire est instable et il se formera des sous-unités donnant naissance à des objets de la taille des astéroïdes. A l'heure actuelle, il subsiste encore dans le système solaire des témoins de la naissance des planètes : les chondrites carbonées.

III – GENERALITES SUR LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

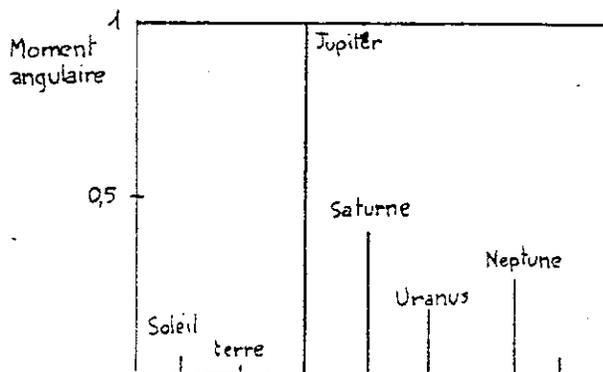
Aujourd'hui nous commençons à comprendre comment il y a 4 à 6 milliards d'années est né le système solaire. Bien que nous sommes loin d'avoir reconstitué en détail la contraction de la «nébuleuse primitive» et la formation des planètes, les grandes lignes de cette évolution sont bien connues. Il est généralement admis que le système solaire est né de la contraction d'un nuage galactique semblable en composition à la nébuleuse d'Orion qu'on appellera NEBULEUSE PRIMITIVE.

Les planètes sont nées par l'accumulation de poussières : elles se comportaient comme de petits satellites en rotation autour du soleil. Il y eut des rencontres au cours desquelles des blocs se formèrent par agglomération : ainsi se trouva amorcé un processus irréversible dont la conséquence allait être la formation d'objets de plus en plus massifs : c'est la phase d'ACCRETION.

Si l'on suppose que les planètes se sont formées à partir d'une nébuleuse primitive standard, on doit expliquer pourquoi et comment elles se sont différenciées à partir d'un milieu commun.

Le fait remarquable est que les planètes telluriques sont formées à partir des matériaux qui constituent seulement 0,4 % de la masse de la nébuleuse primitive : ils ont été séparés des autres éléments dans un processus qui entra en jeu au moment de la formation des planètes.

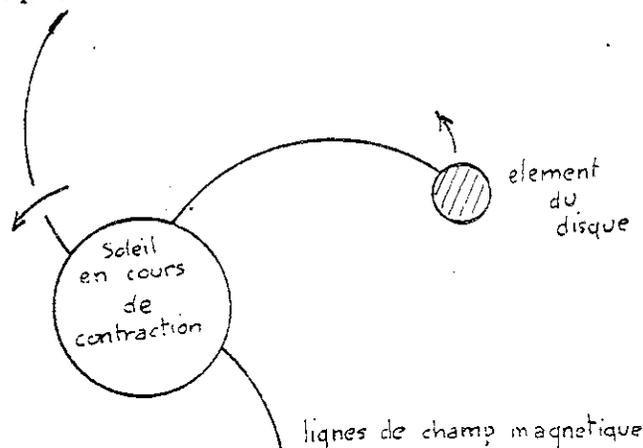
Une autre propriété non moins remarquable du système solaire est la répartition originale du moment angulaire. Bien que la masse du soleil représente environ 700 fois la masse des planètes, il ne possède que 1/30 du moment angulaire total (la majeure partie est concentrée dans Jupiter et Saturne).



Cette circonstance est entièrement incompréhensible dans la théorie de Kant-Laplace : les planètes se forment à partir d'anneaux de matière qui conservent leur moment angulaire. Dans cette théorie, le soleil devrait en posséder la majeure partie.

De toutes les idées proposées, il semble que celle de Fred Hoyle soit la plus prometteuse. Dans sa description, les planètes se forment dans une nébuleuse chaude de gaz et de poussières.

Dans le processus de condensation qui va conduire le nuage interstellaire à se transformer en étoile, la conservation du moment angulaire conduit à une vitesse de rotation du soleil proche de celle de la lumière ! Il faut donc chercher un mécanisme capable d'extraire 99 % du moment angulaire à la nébuleuse gazeuse : la solution est apportée par la présence de champs magnétiques.



On peut imaginer une ligne de champ magnétique joignant le soleil primordial et un élément du disque. D'après les lois de Kepler, cet élément tourne beaucoup plus lentement que le soleil : les lignes de forces prennent alors une forme spiralée et elles agissent en quelque sorte comme un fouet. Le proto-soleil ralentit au dépend des éléments du disque qui vont acquérir ainsi la majorité du moment angulaire.

On obtient ainsi une accélération des zones périphériques et une extension du disque planétaire.

Au moment de la formation du disque, on peut estimer la température du soleil à environ 4000°K et son rayon à 20 millions de km. A mesure que le disque s'étend, la température diminue à l'intérieur de celui-ci et de petites particules solides et liquides peuvent se condenser. Au voisinage de la Terre, la température est telle ($\sim 1600^\circ\text{K}$) que seules des substances réfractaires peuvent se condenser : Fe , MgO , SiO_2 , CaO , Al_2O_3 .

Les substances gazeuses tel l'hydrogène et l'hélium sont chassées vers l'extérieur par la pression de radiation. En conséquence, les planètes internes seront formées à partir de ces matériaux réfractaires durant la phase d'accrétion.

Le résidu volatil constituera la matière première nécessaire à l'élaboration des planètes externes : H_2 , He , NH_3 , CO_2 , H_2O , ... (H_2O est probablement le constituant majeur d'Uranus et Neptune).

L'accord entre la réalité et les prévisions du modèle sont remarquables : on comprend très bien pourquoi à faible distance du soleil les germes ne purent être constitués que par des matériaux à haut point de fusion (silices et oxydes métalliques). A grandes distances, les cristaux de glace se mêlèrent aux poussières et le processus donna naissance à de gros objets qui purent largement retenir les gaz de la nébuleuse primitive.

La première phase de la formation du système solaire ainsi amorcée va entraîner la nébuleuse primitive dans la phase critique : l'accrétion du gaz et des poussières.

Récemment, ce tournant dans l'histoire du système solaire a été reconstitué grâce à une simulation sur ordinateur (programme ACRETE) : des planétoïdes (10 km de diamètre : 10^{15} kg) sont injectés dans un nuage formé de gaz et de poussières et l'ordinateur étudie l'évolution de ce système : on peut ainsi connaître les différents types de systèmes planétaires et savoir si d'autres planètes Terre existent. Au vu des résultats, des configurations très différentes apparaissent.

- 1) Un cas répandu est celui de la formation de systèmes doubles ou multiples : plus la masse initiale est grande, plus le nombre d'étoiles est important.
- 2) Dans une nébuleuse chétive, seules des planètes telluriques se forment : il existe même des cas où la nébuleuse reste sous forme d'astéroïdes.
- 3) Les planètes joviennes sont toujours accompagnées de planètes telluriques : leur masse inférieure est de l'ordre de 2 fois la masse de la Terre.

- 4) Le nombre moyen de planètes est égal à 9.
- 5) En ce qui concerne les planètes telluriques, il faut admettre que 5 x Terre est une limite supérieure.
- 6) Si les expériences montrent l'existence d'une grande variété de systèmes planétaires, elles invitent au contraire à considérer les simili-Terre comme assez répandues ($\sim 10\%$).

Du point de vue des observations, de grands progrès sont à attendre dans le domaine infra-rouge. En 1977, un groupe d'astronomes de l'université de l'Arizona a mis en évidence l'existence d'un disque protoplanétaire autour d'une étoile dans la constellation du Cygne. L'étoile centrale a une masse d'environ $30 M_{\odot}$ et un rayon de $10 R_{\text{solaire}}$: le disque a un rayon apparent d'environ 10 fois le diamètre de l'étoile. Ce disque constitué de poussières et d'hydrogène serait la première nébuleuse protoplanétaire observée (la masse de ce disque est d'environ 1/100 de masse solaire).

IV - POURQUOI LES PLANETES SONT-ELLES DES SPHERES ?

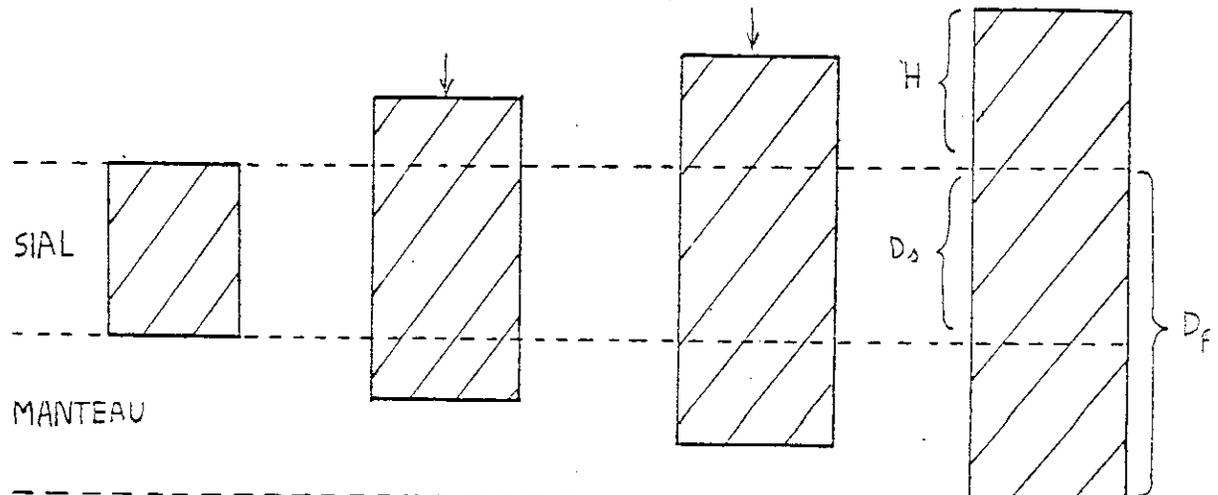
La matière d'un corps massif comme une planète va tendre lentement vers une position d'équilibre jusqu'à ce que toutes les forces appliquées s'annulent. La croûte terrestre par exemple est en équilibre sous l'effet des forces de gravitation et des processus thermiques qui tendent à faire jaillir de la matière vers l'extérieur. On peut se demander dans quelles circonstances la forme d'équilibre n'est pas régulière, c'est-à-dire peut-il exister des planètes qui ne soient pas sphériques ?

Un corps paraîtra disymétrique si il possède des bosses (montagnes) importantes et on va chercher dans quelles conditions ces montagnes peuvent atteindre une altitude de l'ordre du rayon de la planète.

1 - 1ère méthode :

Si la planète possède une croûte supportée par un magma en fusion, on va chercher les limites de stabilité du système. La croûte de la Terre par exemple (SIAL) a une densité ρ_{Δ} de l'ordre de 2,8 et elle est supportée par le manteau plus dense ($\rho_m \simeq 3,3$). La température de fusion du SIAL est supérieure à celle du manteau ce qui permet à la croûte de s'enfoncer profondément dans le manteau visqueux.

Soit D_f la profondeur de l'isotherme de fusion de la croûte. Si D_s l'épaisseur du sial est supérieure à D_f , aucun relief ne peut s'élever car il flotte sur un liquide de même densité.



Dans le cas contraire, le sial est complètement solidifié. Si on le charge, le niveau supérieur émerge soutenu par la poussée d'Archimède exercée par le manteau sur le morceau de sial immergé. Si on continue à le charger, le niveau supérieur va s'élever à une altitude maximale H, telle que la base de la croûte atteigne la profondeur D_f.

Bilan des forces (le bloc a une surface S)

- poids du bloc : $(D_f + H) S \times \rho_s$

- poussée d'Archimède : $(D_f - D_s) S \cdot \rho_m + D_s S \rho_s$

A l'équilibre : $H = (D_f - D_s) \left(\frac{\rho_m}{\rho_s} - 1 \right)$
 $\approx 0,16 (D_f - D_s)$

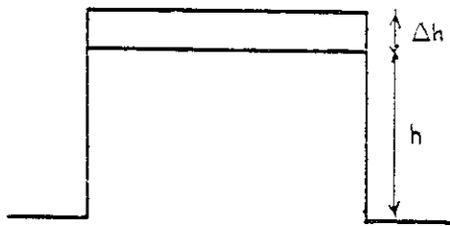
sur Terre, $D_s \approx 40 \text{ km}$ et $D_f \approx 100 - 150 \text{ km}$

$\Rightarrow H \approx 10,2 \text{ km}$

Localement certaines anomalies peuvent exister et la compensation hydrostatique n'est plus valable : le relief peut alors atteindre des altitudes supérieures à cette estimation théorique, mais néanmoins ces «bosses» sont très petites devant le rayon terrestre.

2 - 2ème méthode :

Un solide tel qu'une montagne est un corps très résistant à toute déformation. On peut fixer une limite supérieure à l'énergie nécessaire pour déformer un solide comme étant la chaleur de fusion.



Considérons une montagne idéalisée. Quand elle se déforme (sous l'effet d'un glissement de terrain par exemple), elle descend d'une hauteur Δh .

La diminution d'énergie potentielle est compensée par un échauffement de la montagne. Soient S la surface à

la base, ρ la densité, et Q la chaleur de fusion du matériau constituant la montagne ($\text{cal} \cdot \text{g}^{-1}$)

- variation d'énergie potentielle : $S h \rho \cdot g \cdot \Delta h$

- énergie absorbée : $\rho \Delta h S \times Q$

En égalisant :

$$h_m = \frac{Q}{g}$$

Si la hauteur de la montagne est supérieure à Q/g , le bloc est instable et toute déformation conduira à un affaissement et à une diminution de cette hauteur.

Si on prend

$Q \approx 60 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$

(montagne en quartz)

	g	h
Mercure	3,73	67
Venus	8,85	28
Terre	9,80	25
Mars	3,77	66

$h_m \text{ (km)} = \frac{250}{g}$

g en ms^{-2}

J.P. PARISOT