

## I - L'AGE DU SYSTEME SOLAIRE

Aujourd'hui on connaît assez bien la chronologie de la formation du système solaire: condensation des poussières, du nuage protosolaire, agglomération et enfin formation de ses divers éléments dont la Terre. Les données actuelles recueillies par la cosmochimie sont suffisamment précises pour que l'on puisse retracer les grandes lignes de l'évolution du système solaire depuis sa formation il y a environ 4,5 milliards d'années.

Jusqu'au XIXe siècle, l'image du monde découlait de l'ancien testament et la genèse correspondait à un événement précis : au XVIe siècle, un moine anglais avait fixé l'âge de la Terre à 5738 ans.

Au XIXe, 2 écoles s'affrontent au sujet de l'ancienneté de la Terre

- . les physiciens estiment à 200 millions d'années le temps nécessaire à la Terre pour se refroidir (Kelvin)
- . les naturalistes avec Darwin ont besoin d'un âge beaucoup plus élevé pour que la théorie de l'évolution puisse être appliquée.

Le conflit sera résolu en 1896 avec la découverte de la radio-activité naturelle par Becquerel. Cette radioactivité présente dans toutes les roches dégage de grosses quantités de chaleur ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) et cette source d'énergie interne est le principal facteur de chauffage du centre de la Terre : elle pouvait donc être beaucoup plus vieille que ne le prédisait Lord Kelvin.

### 1. METHODE

Rutherford eut le premier l'intuition générale que cette radioactivité pouvait servir à déterminer les différents âges géologiques. Par unité de temps un noyau radioactif (PERE) a une certaine probabilité de se désintégrer pour donner un autre noyau (FILS). Les désintégrations radioactives se font à des vitesses différentes et on appelle période le temps nécessaire pour que la moitié du PERE soit désintégrée.

La période  $\tau$  est telle que

$$P(t) = P(t_0) \exp \{ - (t-t_0) \lambda \}$$

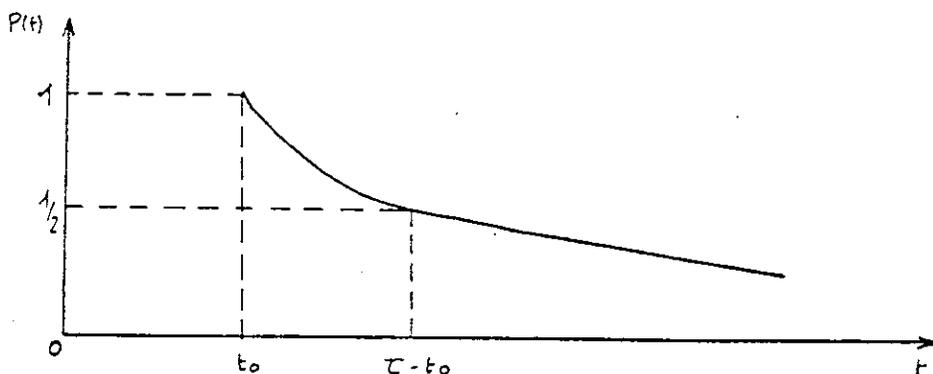
$$P(t) = P(t_0)/2$$

$$\tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69}{\lambda}$$

Exemples (Tableau 1)

Perce	Fils	$\tau$	
$\text{K}^{40}$	$\text{Ar}^{40}$	$12 \cdot 10^9$	
$\text{Rb}^{87}$	$\text{Sr}^{87}$	$50 \cdot 10^9$	
$\text{U}^{235}$	$\text{Pb}^{207}$	$0,7 \cdot 10^9$	
$\text{U}^{238}$	$\text{Pb}^{206}$	$4,5 \cdot 10^9$	$\text{C}^{14}$ 5700 ans

### PERIODE DE DESINTEGRATION



Les concentrations en Père et Fils sont reliées par l'équation :

$$F = F_0 + P_0 (1 - e^{-\lambda t}) = F_0 + P (e^{\lambda t} - 1)$$

où  $F_0$  et  $P_0$  sont les concentrations initiales ( $t_0 = 0$ )  
et  $F$  et  $P$  sont les concentrations à l'instant  $t$ .

La datation radiochronologique consiste à mesurer les quantités  $F$  et  $P$  contenues dans le matériau. Pour mesurer l'âge avec précision on choisit un nuclide dont la période est de l'ordre de grandeur de l'âge présumé.

Cette mesure peut être cependant délicate : elle repose sur la mesure de la variation relative de la quantité du nuclide fils laquelle dépend de  $F_0$ . Si le nuclide père est peu abondant, peu de noyaux fils apparaîtront et la datation sera imprécise.

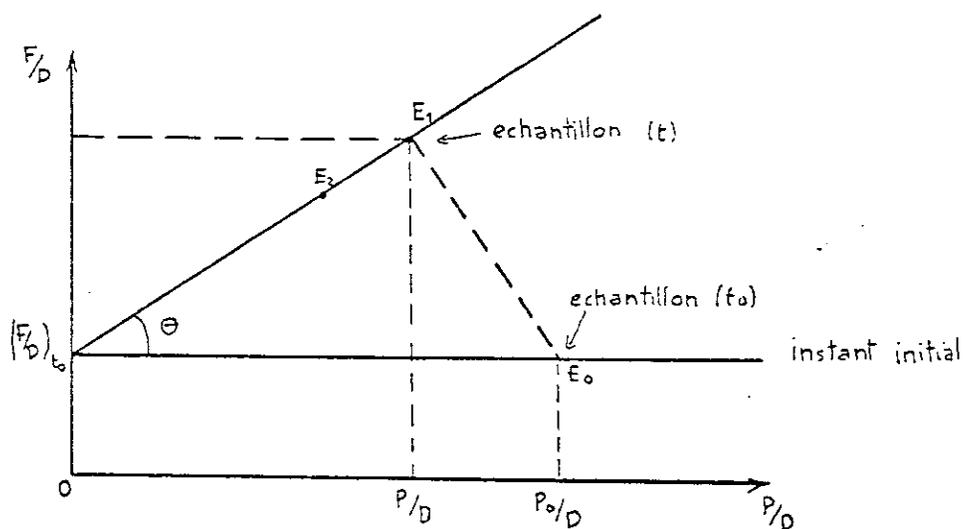
Quand on date une roche, l'âge mesuré est celui de la dernière modification due à des phénomènes physico-chimiques : ce dernier fractionnement est aussi appelé la «fermeture» du système. La nature de l'événement correspondant est très variée : fusion de la roche, cristallisation, métamorphisme.

Les couples de nuclides utilisables sont en nombre assez limité. Tous ces nuclides sont peu abondants dans la nature à l'exception du potassium. Les spectromètres de masse perfectionnés à l'occasion des analyses des échantillons lunaires atteignent des sensibilités de l'ordre de  $10^{-12}g$  !

## 2. UTILISATION DES ISOTOPES

La difficulté principale est la connaissance de la concentration initiale  $F_0$  et en général, toutes les roches d'un système considéré n'ont pas les mêmes concentrations initiales. La datation est encore possible en ne considérant plus les concentrations absolues mais les concentrations relatives à celle d'un isotope stable.

Prenons comme exemple le cas de  $Rb^{87} \rightarrow Sr^{87}$ . Le strontium possède un isotope stable  $Sr^{86}$  et à l'instant  $t_0$ , tous les échantillons ont le même rapport  $Sr^{87} / Sr^{86}$  : on fait l'hypothèse que les deux isotopes d'un même élément sont quasi identiques et que du point de vue chimique il n'existe pas de ségrégation.



Si D est la concentration de l'isotope stable, dans un diagramme (F/D, P/D) les différents échantillons se situent sur une droite à l'instant initial. Au cours du temps, le point représentatif de l'échantillon E passe de  $E_0$  en  $E_1$  : il se déplace vers la gauche et vers le haut P diminue et F augmente :

$$\frac{F}{D} = \left(\frac{F}{D}\right)_0 + \frac{P}{D} (e^{\lambda t} - 1)$$

L'angle  $\theta$  est tel que :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{F}{D} - \left(\frac{F}{D}\right)_0}{\frac{P}{D}} = e^{\lambda t} - 1$$

indépendant de  $F_0$  et  $P_0$ . A un instant t, tous les échantillons de même âge se situent sur une droite ( $E_1, E_2$ ) dont le point d'intersection avec l'axe  $P = 0$  fixe la valeur de  $F_0$  : ce point correspondrait à une partie du système ne contenant pas de nucléide père.

Grâce à la mesure des concentrations des isotopes, on a accès facilement aux concentrations initiales.

### 3. DATATION DU SYSTEME SOLAIRE

Pour déterminer la date de la création du système solaire, il est nécessaire d'établir une corrélation entre l'événement modifiant les concentrations chimiques et l'événement géologique. Le second problème consiste à choisir les échantillons représentatifs de cette formation. L'évolution des magmas planétaires (Terre, Lune) remet à 0 les horloges radiochronologiques en mélangeant les roches de différents âges et c'est pour cette raison que l'on préfère étudier les météorites meilleurs témoins de la naissance du système solaire.

#### Les chondrites carbonées

Il existe une catégorie spéciale de météorites utilisée pour la datation du système solaire : ce sont des chondrites ainsi nommées parce qu'elles contiennent des chondres, c'est-à-dire de petites sphères silicatées qui témoignent d'un phénomène de fusion. Elles ont une composition chimique assez uniforme, très proche de celle du soleil (hormis H et He) et on peut dire que se sont des témoins de la condensation de la nébuleuse primitive.

Parmi les météorites, certaines semblent s'être différenciées à l'intérieur de corps planétaires de la taille présumée d'astéroïdes. Les chondrites quant à elles apparaissent constituées de minéraux qui n'auraient subi que peu de transformations.

Dans les chondrites carbonées, les chondres sont dispersées dans un substrat noir enrichi en carbone qui peut contenir quelques inclusions blanches. Ces oxydes de silicates riches en Ca et Al seraient apparus à une température de l'ordre de 1600 K ce qui indique que ces minéraux sont des témoins de la condensation initiale.

#### Age des chondrites

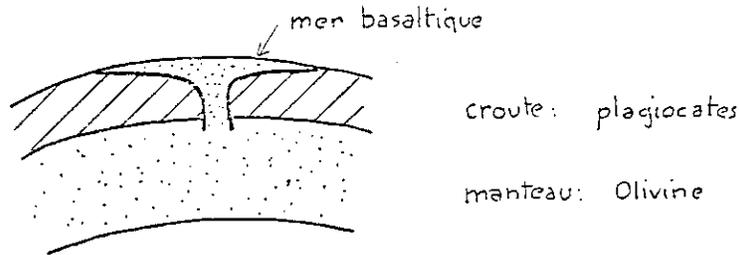
Les différents chronomètres (Rb, U, Th) s'accordent pour donner un âge de l'ordre de 4,6 milliards d'années pour les chondrites carbonées. Le résultat le plus remarquable est la faible dispersion des âges des différentes météorites carbonées : elles définissent un intervalle de condensation de l'ordre de 15 millions d'années.

#### Age de la Terre et de la Lune

Les seuls échantillons accessibles de la croûte terrestre ont été soumis à un fractionnement chimique au cours des temps géologiques. Les plus vieux massifs ont un âge d'environ 3,6 milliards d'années. En comparant l'évolution de la composition isotopique du plomb dans la croûte terrestre et en combinant les résultats avec les mesures de composition initiale du plomb faites sur les météorites, l'âge de différenciation de la Terre est d'environ 4 milliards d'années.

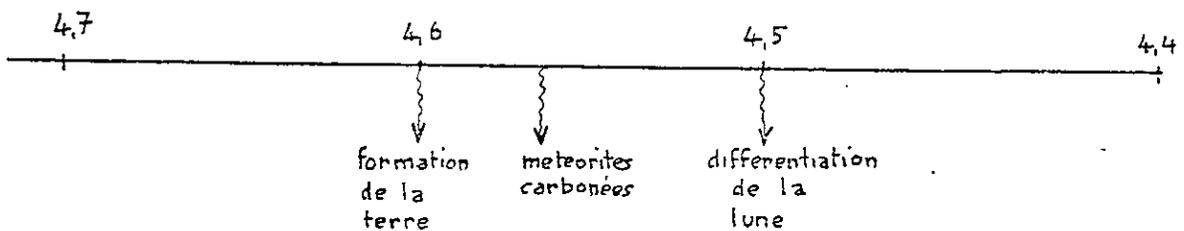
Depuis quelques années, un autre objet est accessible à la mesure : c'est la Lune. La surface de la Lune se compose de :

- 1) Montagne anorthosique constituée de 90 % d'un feldspath de la famille des plagioclases calciques. L'âge de ces montagnes est difficile à mesurer car les impacts météoritiques ont profondément bouleversé la surface.
  - 2) Les mers basaltiques
- L'étude des échantillons provenant des mers est plus simple : on obtient un âge de l'ordre de 3,2 à 4 milliards d'années.



Très peu de temps après la formation de la Lune, le manteau s'est différencié en deux parties distinctes : la croûte formée des matériaux les plus légers (plagioclases) et le manteau inférieur constitué d'olivine. Entre 3,5 et 4 milliards d'années, d'importants bombardements météoritiques ont fracturé la croûte à travers laquelle le magma est sorti et a rempli les cratères météoritiques donnant naissance aux mers lunaires.

D'après toutes ces déterminations, l'âge de la condensation du nuage protostellaire et l'âge de différenciation de la Terre et de la Lune semblent très proches : l'agglomération des planètes s'est produite très peu de temps après la condensation du nuage protostellaire.



J.P. PARISOT

Astronome à l'Observatoire de  
Besançon

NDLR: Nous publierons dans les prochains numéros des Cahiers la suite de l'article, consacrée à la formation du système solaire et à l'évolution des atmosphères planétaires.

## L'ORIGINE DU SYSTEME SOLAIRE

Si elle nous semble moins mystérieuse que l'origine de l'univers, l'origine du système solaire est un événement encore assez mal compris.

Il y a environ 5 milliards d'années, un grand nuage de matière interstellaire composé de gaz et de poussières s'est contracté à proximité d'un bras spiral de notre galaxie. A mesure que la contraction s'accélérait, le nuage s'est mis à tourner de plus en plus vite tout en s'aplatissant comme un disque. La zone centrale était si massive, si chaude et si dense que des réactions nucléaires donnèrent naissance à une étoile : le soleil.

Ces idées concernant la formation du système solaire ont déjà 300 ans. C'est René Descartes qui, le premier, proposa le concept de nébuleuse primitive : un disque de gaz et de poussières en rotation à partir duquel les planètes et les satellites se forment. Un siècle plus tard, Buffon propose un second mécanisme : un objet très massif (une autre étoile ?) est passé si proche du soleil que de la matière en a été arrachée et s'est lentement transformée en planètes. Durant les deux siècles suivants, les différentes théories se partagent entre les deux voies tracées par Buffon et Descartes. La théorie la plus intéressante est certainement celle proposée par Kant et Laplace qui améliorent l'idée originale de Descartes en expliquant comment les particules de matières de la nébuleuse tournent de plus en plus vite à mesure qu'elles se rapprochent du centre de la nébuleuse : Laplace suggère qu'une série d'anneaux se forment.

Aujourd'hui la théorie catastrophique de la formation du soleil à partir de la rencontre serrée de deux étoiles est abandonnée. Le calcul de la probabilité selon laquelle le système solaire s'est ainsi formé n'offre aucune difficulté : la possibilité d'une telle collision dépend de la taille du soleil et de la distance moyenne entre les étoiles. Nous prendrons comme taille du soleil  $D = 10^6$  km et la distance moyenne entre les étoiles égale à 1 année-lumière  $10^{13}$  km. Le soleil se déplace au milieu des étoiles à une vitesse de l'ordre de 30 km/s.

Pour se ramener à des dimensions terrestres, divisons toutes ces valeurs par  $10^9$

Diamètre du soleil	$\approx 1$ m
Distance entre les étoiles	$\approx 10^4$ km
Vitesse	$\approx 1$ km/an    3 m/jour.

La probabilité pour que deux étoiles se rencontrent est la même pour que deux voitures se déplaçant aléatoirement à la surface de la terre à la vitesse moyenne de 3 m/jour se télescopent !

C'est pourquoi il n'existe que d'infimes chances pour qu'une telle collision se produise. Pêchant par un autre point faible, la théorie des collisions s'avère incapable d'expliquer pourquoi les orbites planétaires sont pour la plupart circulaires. La raison majeure de la grande variété de théories originales de la formation du système solaire provient principalement du manque d'informations pour les appuyer. L'histoire de la terre n'est connue que sur une durée qui couvre moins de 10 % de son évolution. Le but des théories était d'expliquer :

- l'orientation des axes de rotation des planètes parallèle au plan de l'écliptique,
- l'espacement des planètes en accord avec la loi établie par Titus et Bode (fin du XVIIIe). La distance moyenne  $r$  d'une planète (exprimée en unités astronomiques : distance moyenne Terre - Soleil) est donnée par la loi empirique

$$r = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

valant  $-\infty$  pour Mercure, 0 pour Venus, 1 pour la Terre, ...

(Elle conduit à une erreur d'un facteur 2 pour Pluton : elle donne 40 au lieu de 77).

Ces quelques données n'imposaient que peu de contraintes et permettent ainsi la prolifération des théories. Dans les 20 dernières années la situation a changé catégoriquement : une quantité fantastique de nouvelles informations sont venues enrichir la connaissance du système solaire grâce à l'exploration spatiale.