

## ***Le scénario de condensation de la nébuleuse solaire : Conséquence sur la chimie des corps du système solaire***

Le système solaire est initialement un vaste amas de gaz de chimie proche de celle du soleil, c'est-à-dire, dominée par l'hydrogène et l'hélium (éléments formés lors de la nucléosynthèse primitive au cours du Big Bang), puis en proportion moindre C, N, O, Si, Fe, Mg ainsi que tous les autres éléments de la classification, dans des proportions que l'on retrouve dans la majorité des étoiles de type solaire.

Ces éléments sont issus du gaz éjecté par des étoiles mourantes et qui ont "pollué" la nébuleuse protosolaire. Ils ont servi de réacteur nucléaire assurant la fusion des noyaux d'hydrogène et d'hélium. Ce principe d'agglutination des nucléons explique notamment pourquoi les éléments de numéro atomique élevé sont peu abondants : à partir d'une quantité  $n$  d'hydrogène, on ne peut former que  $n/2$  noyaux d'hélium,  $n/16$  oxygène, etc....

Par ailleurs, comme ces synthèses se font les unes après les autres, et qu'il faut donc du temps, les éléments les plus lourds ne peuvent se former que dans les étoiles les plus anciennes. Or, toutes les étoiles n'atteignant pas l'âge critique de synthèse d'un élément lourd, la probabilité d'apparition de ces éléments est donc réduite.

Les éléments les plus légers sont donc les plus abondants dans la nébuleuse solaire. Dans cet amas de gaz, les atomes ne restent pas libres et peuvent s'associer entre eux pour former des molécules. H et O vont former H<sub>2</sub>O. Si, O et Mg vont former SiO<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> (pyroxène), etc...

Cet amas de gaz, sous l'action de son propre poids, se contracte. Ce faisant, il entre en rotation et s'aplatit pour ne former plus qu'une structure discoïde. En son centre, la pression et la température est maximale : lorsque les réactions nucléaires commenceront, cela donnera le Soleil...

En allant vers la périphérie du nuage, la température et la densité de gaz décroît. Il y a donc un *profil radial de température dans le nuage de gaz nébulaire*.

Ceci a une conséquence chimique fondamentale :

- au cœur du nuage, les températures étant élevées, seuls les éléments et/ou molécules réfractaires se condenseront et deviendront poussières solides (fer, silicates). Les autres éléments et molécules resteront à l'état gazeux.
- plus à la périphérie du nuage, les températures sont plus faibles et plus d'éléments ou molécules se condensent (glaces, fer et silicate. La température n'est jamais assez basse pour qu'H et He se condensent.

Il se met donc en place une *variation radiale de la chimie des poussières nébulaires*, en relation avec le caractère plus ou moins réfractaire des éléments et composés chimiques.

Des expériences de condensation de mélanges gazeux et surtout des calculs thermodynamiques ont permis de se faire une idée précise de la chimie des poussières nébulaires en fonction de la température.

Un tableau récapitulatif présente les résultats obtenus :

Température (°K)	Chimie des condensats
1 600 °K	Condensation des oxydes réfractaires (CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , oxydes de titane, etc.)
1 300 °K	Condensation de l'alliage Fer-Nickel
1 200 à 490 °K	Condensation de l'enstatite (MgSiO <sub>3</sub> , pôle magnésien de l'olivine) et réaction avec FeO pour donner de l'olivine (Fe <sub>x</sub> Mg <sub>(1-x)</sub> SiO <sub>3</sub> )
1 000 °K	Na réagit avec Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et les silicates pour former Feldspaths et minéraux alcalins
550 à 425 °K	H <sub>2</sub> O se combine aux minéraux calciques (formation de trémolite) et à l'olivine (formation de serpentinite)
175 °K	La vapeur d'eau se condense en glace
150 °K	NH <sub>3</sub> gazeux réagit avec la glace et forme un hydrate solide (NH <sub>3</sub> ,H <sub>2</sub> O)
120 °K	CH <sub>4</sub> gazeux réagit avec la glace et forme un hydrate solide (CH <sub>4</sub> ,H <sub>2</sub> O)
Moins de 120 °K	Condensation des derniers gaz résiduels (Ar, N <sub>2</sub> )
Moins de 20°K (existe en laboratoire, pas dans la nature)	Condensation de l'H et l'He (n'arrivent jamais dans la nature)

A une température donnée (donc à une distance donnée du centre de la nébuleuse), tout ce qui est au dessous de cette température est solide, tout ce qui est en dessus est gazeux.

- Dans la partie interne de la nébuleuse solaire ne condensent que des poussières de nature silicaté (75% de silicates et 25 % de fer) de composition proche de celle des chondrites, de la Terre et de toutes les planètes telluriques, poussières qui flottent dans un gaz (H<sub>2</sub> + He).
- Lorsque l'on s'éloigne du centre du nuage, les minéraux commencent à s'hydrater (incorporation de molécules d'eau dans le réseau cristallin).
- A partir d'une limite de 175° K, la vapeur d'eau (ainsi que méthane et amoniac) se condense en glaces. Les silicates et le fer sont toujours présents, mais se couvrent d'un givre glacé; il se forme alors un mélange fer-silicates-glaces dans les proportions 1/4/6. Toutes ces poussières flottent dans H<sub>2</sub> +He

De telles observations confortent *a posteriori* le modèle de condensation du gaz nébulaire...

- La chimie des poussières internes du nuage reproduit la chimie chondritique.

- La température d'apparition de la glace d'eau correspond à une distance au centre du système solaire d'environ  $750 \cdot 10^6$  km, distance compatible avec la limite entre système tellurique (Mercure, Vénus, Terre, Mars) et système solaire externe (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et leur satellites, Pluton, les comètes etc ).
- Ce modèle explique pourquoi Vénus, la Terre et Mars ont une *atmosphère* : leur position orbitale correspond à un lieu du système solaire où les silicates ont subi une importante hydratation et un fort enrichissement en éléments volatiles (A 150 millions de km du centre [distance Terre-Soleil] commence l'hydratation des silicates. Un peu avant [100 millions de km correspondant à la distance Vénus-Soleil] débute l'hydratation des minéraux calciques).

Une fois que le soleil s'est formé, apparaît le *vent solaire* : il s'agit d'un flux de particules, issues du soleil, et produites en continu par les réactions nucléaires internes. Ce vent va souffler le gaz nébulaire sans pouvoir toutefois affecter les protoplanètes qui entament leur accréation. Les petits corps qui découlent de cette agglomération vont alors être concentrés en éléments relativement lourds et rares du gaz nébulaire (Si, Mg...) et appauvris en éléments légers et abondants tels que C, N ou H<sub>2</sub>O. Une fois l'accréation terminée, le *dégazage* libère les gaz de la roche. Est alors libéré de la *vapeur d'eau* (les silicates se déshydratent par effet thermique), et un peu de *diazote* dans les proportions chondritiques. Au cours du dégazage, la faible quantité de matière organique (hydrocarbures) incorporé dans les météorites réagit avec les silicates (oxydation) pour former du *dioxyde de carbone* gazeux (il y a également libération des atomes d'azote organique et formation du diazote). L'atmosphère formée est alors dominée par la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub>, les deux volatiles les mieux fixés dans les poussières silicatées (par hydratation des silicates et incorporation des hydrocarbures).

- Ce modèle permet de comprendre la *chimie* des planètes géantes et la présence de satellites :  
 Au delà de 750 millions de km du centre du nuage de gaz, la glace d'eau apparaît à partir d'hydrogène et d'oxygène, deux des éléments les plus abondants dans le gaz nébulaire. De ce fait, la glace, en se formant, domine la chimie des poussières (à 60 % constituées de glace). Ces dernières sont riches en ammoniac et hydrocarbures.  
 Ces poussières s'agglomèrent, forment des gros corps glacés. Ces gros corps glacés, dans un environnement froid où les molécules de gaz vont lentement, acquièrent alors une gravité suffisante pour commencer à retenir l'hydrogène et l'hélium de la nébuleuse. Quatre corps faits de fer, silicate et surtout glaces (les noyaux des futurs Jupiter Saturne, Uranus et Neptune) s'entourent d'une énorme masse de gaz, et deviennent de ce fait les 4 planètes géantes.  
 Dans leur voisinage, les corps glacés sont trop petits pour capturer et retenir H<sub>2</sub> et He, et deviennent satellite de glaces. La grosse masse de ces 4 géantes expulse sur des orbites extérieurs à Neptune tous les corps glacés qui n'ont pas été satellisé. Ainsi sont nés Pluton, les corps de la ceinture de Kuiper, et même les comètes.

Deux satellites de Jupiter sont particuliers : Io, purement ferro-silicatés, et Europe corps ferro-silicaté recouvert de seulement une centaine de km d'eau. Deux hypothèses peuvent expliquer ces 2 satellites exceptionnels.

1/ En se formant, Jupiter a reproduit dans son voisinage les conditions de hautes pressions et hautes températures que l'on retrouve à proximité du soleil. Dans de telles

conditions, il ne se forme uniquement que des poussières silicatées dans les environs du futur Jupiter. Ceci expliquerait entre autres pourquoi Jupiter est entouré d'un cortège de satellites telluriques comme Io puis, dans les parties les plus externes, par un ensemble de satellites de glace, comme Ganymède et Callisto.

2/ Les interactions de marées entre Jupiter et ses 4 satellites produisent sur ces derniers des marées importantes, très fortes sur Io (le satellite le plus proche), et de moins en moins forte avec l'éloignement. Ces marées dégagent de l'énergie qui chauffe le satellite. Très chauffé, Io a perdu toute son eau. Europe, moins chauffé, a presque perdu toute son eau, mais il en reste un peu. Ganymède et Callisto, peu chauffés, on garde l'intégralité de leur glace...

- Enfin, ce modèle permet de comprendre la *chimie des atmosphères de Titan (atmosphère dense) et de Triton (atmosphère très ténue)*, les seuls satellites assez gros et froid pour avoir pu garder une atmosphère : Une fois agglomérées en un corps de grande taille, les poussières de glace se dégagent et libèrent les hydrocarbures qu'elles contiennent (les hydrates solides se décomposent sous l'effet de la montée en température). La faible proportion de silicates dans ce type de satellites ne permet pas l'oxydation des hydrocarbures qui atteignent ainsi la surface en restant à l'état réduit. Il n'y a donc pas de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Et même s'il y en avait, la température à la surface de Titan (-180°C) empêcherait qu'il soit à l'état gazeux dans l'atmosphère (il serait sous forme de glace carbonique).

A cela s'ajoute la dissociation des hydrates d'ammoniac : NH<sub>3</sub> au cours du dégazage forme du diazote qui vient dominer la chimie de l'atmosphère. Aux températures régnant sur les satellites de glace, l'eau reste à l'état solide et ne participe pas à l'atmosphère. Enfin, un peu de gaz rares viennent s'ajouter à l'ensemble. L'atmosphère obtenue est alors proche de celle observée à la surface de Titan ou Triton.