

Formation du système solaire et de l'Univers

Décryptage au moyen des outils de la cosmochimie isotopique

Étienne Deloule

Summary

Isotopes in cosmochemistry: a tool for decoding the formation of the solar system and the Universe.

The determination of the isotopic composition of various chemical elements in meteorites provides us many useful arguments in order to better understand the formation of the Earth and the solar system, as well as the evolution of the universe. On one hand, the use of radiochronometers has allowed us to determine the age of solar system formation, and to establish a detailed chronology of accretion, from condensation of the first grains to the planetary differentiation. On the other hand, the systematic study of the isotopic composition of the different chemical elements in meteorites provides key data, firstly to better understand the origin of the elements in the solar system and stellar nucleosynthetic processes, and secondly to describe the different processes which enabled or accompanied solar system accretion.

Mots-clés

Isotope, nucléosynthèse, météorite, cosmochimie, accrétion.

Key-words

Isotope, nucleosynthesis, meteorite, cosmochemistry, accretion.

La compréhension de l'origine de la Terre est intimement liée à celle de sa composition, actuelle ou passée, ce qui est l'objet de la géochimie, dont un des premiers objectifs a été de mesurer l'abondance des différents éléments. Une fois les premiers points acquis dans cette démarche, la question suivante a été de pouvoir comparer la composition de la Terre à celle du Soleil et des autres objets du système solaire. En posant ces questions, on entre dans les domaines de la cosmochimie et de la cosmologie, l'étude de la composition et de la formation de l'Univers. Comme pour la géochimie, l'étude des compositions isotopiques des éléments va fournir des informations supplémentaires à celles fournies par la description de leur abondance, et nous permettre d'aborder les processus de la nucléosynthèse et l'origine et la formation du système solaire avec beaucoup plus de détails.

L'âge du système solaire et la durée de l'accrétion des planètes

Un premier résultat obtenu grâce à l'étude isotopique des météorites fut la détermination par Clair Patterson en 1956 de l'âge de formation du système solaire à 4,55 Ga (10^9 ans), grâce à la mesure de la composition isotopique du plomb des météorites et de sédiments océaniques, considérés représentatifs de la valeur moyenne de la Terre [1]. Cet âge a ensuite été confirmé par de nombreuses mesures, avec le radiochronomètre Rb-Sr dans un premier temps. L'amélioration des techniques analytiques a permis plus récemment d'obtenir des âges U-Pb précis pour de nombreuses météorites, allant de $4,568 \pm 0,003$ Ga pour les inclusions réfractaires de la météorite carbonée Allende, à $4,552 \pm 0,003$ Ga pour les chondrites ordinaires (St Séverin). L'écart observé suggère donc une durée d'au moins 15 Ma (10^6 ans) pour la formation du système solaire, entre la

condensation des premiers minéraux qui forment des inclusions réfractaires millimétriques et la formation des corps parents des météorites ordinaires (de taille kilométrique). L'étude des météorites a permis également de déterminer les rapports isotopiques et élémentaires initiaux de différents radiochronomètres (U-Th-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf). La connaissance des compositions initiales permet de prédire leur évolution en fonction du temps, et donc de bâtir des modèles pour l'évolution des différents réservoirs terrestres.

De nombreuses radioactivités éteintes ont été observées dans les météorites. Il s'agit de radionucléides ayant des périodes de désintégration, suffisamment courtes pour avoir entièrement disparu depuis la formation du système solaire (tableau 1). Leur présence lors de la formation des météorites est indiquée par la présence de leur produit de désintégration qui provoque des anomalies isotopiques des éléments fils.

La décroissance de ^{129}I (période 16 Ma) en ^{129}Xe produit un excès de ^{129}Xe par rapport aux autres isotopes du Xe. L'importance de l'excès de ^{129}Xe est à la fois proportionnelle au rapport I/Xe et à l'âge de la météorite, si l'on suppose que la composition isotopique de l'iode était distribuée de façon homogène dans le disque d'accrétion [2-3]. La dispersion des valeurs mesurées (figure 1) montre une durée de formation de 20 Ma en bon accord avec les âges U/Pb mesurés sur les mêmes météorites. Plusieurs autres isotopes du Xe (^{132}Xe , ^{134}Xe et ^{136}Xe) sont aussi produits par la fission du ^{244}Pu (période 82 Ma). Cette radioactivité éteinte est mise en évidence par des enrichissements en isotope lourd du Xe, et également par les traces de fissions observables dans les minéraux.

La mise en évidence de la **présence d' ^{26}Al** , dont la période est 0,7 Ma, lors de la formation du système solaire par Lee *et al.* en 1976 [4] en observant les excès de ^{26}Mg (figure 2)

Tableau 1 - les principales radioactivités éteintes.

La 1^{ère} colonne donne une liste d'isotopes radioactifs présents lors de la formation du système solaire qui ont maintenant disparu. La 2^e colonne indique leur période en millions d'années (Ma), sauf pour le ⁷Be (en jours), c'est-à-dire le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des isotopes présents initialement. Les 3^e et 4^e colonnes indiquent le mode de décroissance et l'élément fils, la 5^e, leur rapport d'abondance initiale par rapport à un isotope stable.

Radionuclide	Demie-vie (Ma)	Décroissance	Élément fils	Rapport d'abondance
¹⁴⁶ Sm	103	α	¹⁴² Nd	$^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} \approx 0,005$
²⁴⁴ Pu	82	α , fission	Xe	$^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U} \approx 0,005$
¹²⁹ I	15,7	b	¹²⁹ Xe	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \approx 1.10^{-4}$
¹⁰⁷ Pd	6,52	b	¹⁰⁷ Ag	$^{107}\text{Pd}/^{108}\text{Pd} \approx 2.10^{-5}$
¹⁸² Hf	9	b	¹⁸² W	$^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf} \approx 2.10^{-5}$
⁵³ Mn	3,68	b	⁵³ Cr	$^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn} \approx 4.10^{-5}$
⁶⁰ Fe	1.46	b	⁶⁰ Ni	$^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} \approx 4.10^{-5}$
¹⁰ Be	1,5	b	¹⁰ B	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be} \approx 9,5.10^{-4}$
²⁶ Al	0,73	b	²⁶ Mg	$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \approx 5.10^{-5}$
⁷ Be	53 jours	b	⁷ Li	

radioactivités éteintes de plus longues périodes (¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd et ¹⁸²Hf-¹⁸²W) permet de mesurer la durée de formation des planètes. Ainsi, la formation de la Terre, ou au moins de 80 % de sa masse, et la différenciation de son noyau n'ont sans doute pas duré plus de 30 Ma [8-9]. Nous verrons plus loin que d'autres radioactivités fossiles ne s'interprètent pas en termes d'âge, mais en termes de production de leurs éléments pères lors de l'activité naissante du Soleil, ce qui incite à une grande prudence dans l'interprétation de ces résultats.

Les anomalies isotopiques : nucléosynthèse et processus nébulaire

L'étude systématique des éléments et de leurs isotopes tels qu'on les trouve sur nos planètes a permis aux physiciens de proposer des modèles

de nucléosynthèse. Jusqu'au début des années 60, la composition isotopique du système solaire était considérée comme homogène, le gaz protosolaire étant fortement mélangé, et suffisamment chaud pour volatiliser tout solide préexistant. Cette hypothèse fut contredite en 1960 par John Reynolds qui démontra que la composition isotopique du xénon de la chondrite Richardson était différente de la composition terrestre [2]. En effet, la plupart des neuf isotopes du Xe se trouvaient à une abondance excessive par rapport à leur abondance terrestre, alors que seul le ¹²⁹Xe est produit par la radioactivité éteinte de ¹²⁹I (voir le spectre du xénon HL en figure 3). Si certaines anomalies résultent de radioactivités éteintes, les autres témoignent d'une hétérogénéité du nuage protosolaire dont les météorites ont gardé la trace. Dès lors commençait une chasse aux anomalies isotopiques, dans le but de retrouver les signatures des différents types d'étoiles qui ont fourni les éléments du système solaire.

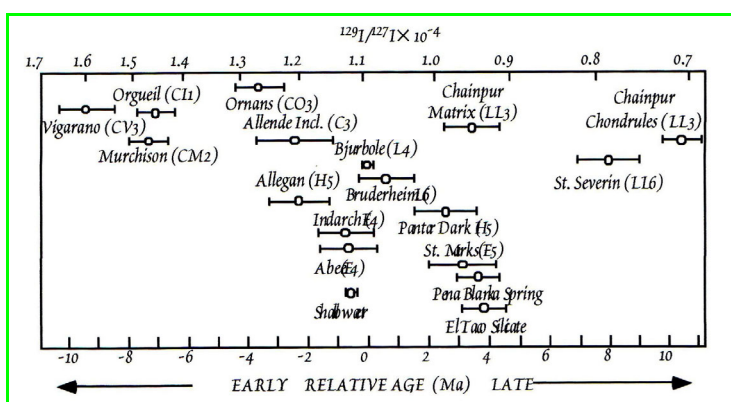


Figure 1 - Ages I-Xe des météorites.

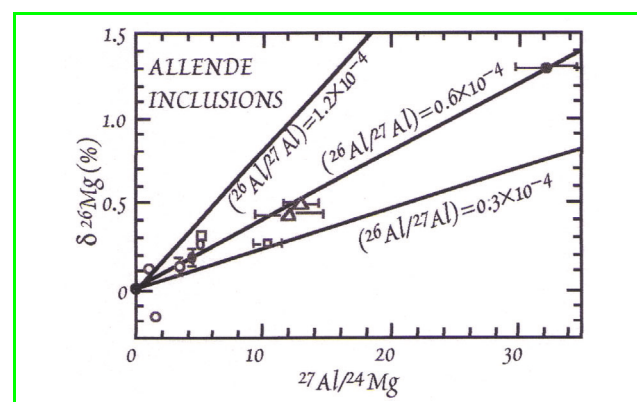
La météorite de Bjurböle est utilisée comme référence d'âge, à cause de la bonne reproductibilité des mesures (d'après W. White (1997), données de Swindle et Posodek (1988)).

allait apporter de nouvelles contraintes sur la séquence de formation du système solaire, en impliquant un intervalle de temps court entre la production de ²⁶Al dans une nova et l'accrétion du système solaire. L'abondance et la courte période de ²⁶Al en font une source de chaleur importante, capable de fondre les corps parents des météorites. L'observation d'une grande disparité du rapport ²⁶Al/²⁷Al entre les inclusions réfractaires et les chondres a alimenté un important débat sur sa répartition dans la nébuleuse protosolaire. Une distribution initiale hétérogène de ce rapport rendrait en effet impossible son utilisation comme radiochronomètre. En montrant la bonne corrélation entre les âges U-Pb et ²⁶Al mesurés simultanément sur différentes chondrites H4 et sur des inclusions réfractaires, Zinner et Gopel démontrent une distribution homogène pour au moins cette classe de météorites [5]. Un intérêt de ce chronomètre est la possibilité de mesurer les excès de ²⁶Mg *in situ* par microsonde ionique, donc individuellement sur des objets micro-métriques tels que les inclusions réfractaires des météorites les plus primitives.

La mesure d'anomalies isotopiques résultant d'autres radioactivités éteintes de courte période telles que les décroissances de ⁵³Mn en ⁵³Cr [6] ou du ⁶⁰Fe en ⁶⁰Ni [7] ont également commencé à produire des datations plus ou moins en accord avec les autres systèmes. L'utilisation de

Nucléosynthèse stellaire

L'étude des isotopes du xénon mit en évidence deux signatures isotopiques différentes, baptisées Xe HL et

Figure 2 - Diagramme Isochrone ²⁶Al des inclusions réfractaires d'Allende [4].

Les différentes droites montrent les relations entre l'excès de ²⁶Mg et le rapport ²⁴Mg/²⁷Al pour différents rapports initiaux ²⁶Al/²⁷Al. Les mesures suivantes montreront que la valeur initiale du rapport ²⁶Al/²⁷Al de ces CAI est de 5.10^{-5} .

Xe S (figure 3, [10]). La composition du Xe HL présente un enrichissement à la fois des isotopes lourds et légers, alors que celle du Xe S est appauvrie pour tous les isotopes, sauf ^{128}Xe et ^{130}Xe , et correspond à la composition théorique du Xe produit par une nucléosynthèse stellaire de type s.

Les rapports des trois isotopes du néon varient également beaucoup dans les météorites (figure 4). Jusqu'à la fin des années 60, ces variations furent attribuées à un mélange entre trois sources : les produits de spallation cosmogénique, riches en ^{21}Ne , le vent solaire riche en ^{22}Ne et le gaz planétaire, riche en ^{20}Ne . En 1969, Black et Pepin [11] mirent en évidence un quatrième pôle, baptisé Ne E, très enrichi en ^{22}Ne , extrait seulement à haute température (900-1 100 °C) de la matrice des chondrites carbonées.

La recherche des phases porteuses de ces anomalies isotopiques conduisit à isoler dans la matrice des météorites primitives des grains micrométriques, résistant à la dissolution dans HF-HCl et à l'oxydation de la matière organique [12], présents à des teneurs de l'ordre du ppm. La purification de cette phase résiduelle a mis en évidence des microdiamants (porteurs du Xe HL) [13], des grains de carbure de silicium [14-15] et de graphite [16] (porteurs du Xe S). Ces phases réfractaires ont préservé leur composition initiale durant l'accrétion du système solaire. Elles sont donc considérées comme des grains présolaires, synthétisés dans des étoiles avant la formation du système solaire. L'étude de leur composition isotopique, essentiellement réalisée par microsonde ionique, a mis en évidence des variations de compositions isotopiques de plusieurs ordres de grandeur de leurs éléments principaux, C, N et Si (figure 5). Les environnements stellaires capables de produire ces rapports isotopiques extrêmes sont assez bien identifiés par les physiciens [17].

La combustion de l'hydrogène par le cycle CNO, un cycle de réaction qui consomme de l'hydrogène pour produire de l'hélium par les réactions successives impliquant les différents isotopes de C, N et O dans les géantes rouges, produit ainsi des rapports $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ bas et $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ élevés.

La fusion du carbone dans les géantes rouges et de l'azote dans les novæ aboutit à des rapports $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ et $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ bas, alors que la fusion de l'He en ^{12}C dans les étoiles massives conduit à des rapports $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ très élevés. Sur la figure 5, on observe quelques grains (notés X) en dehors de ces trois domaines. Leur étude plus poussée a mis en évidence des excès d'un facteur 2 de ^{49}Ti par rapport à ^{48}Ti

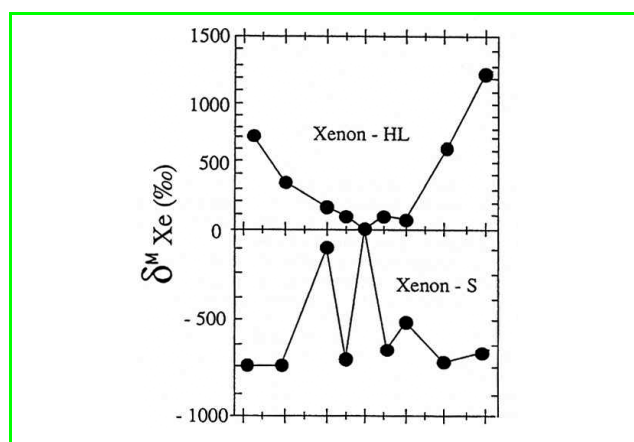


Figure 3 - Compositions isotopiques du xénon mesurées dans la phase carbonée des météorites, exprimées en écart à la composition terrestre (d'après [10]).

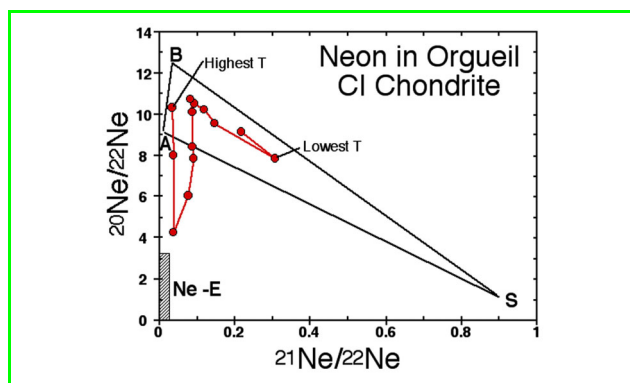


Figure 4 - Composition isotopique du néon extrait par paliers de température de la chondrite Orgueil.

Les compositions du Ne E, Ne A (solaire), Ne B (planétaire) et Ne S (produit par spallation) sont reportées (d'après [9]).

et d'un facteur 4 de ^{44}Ca par rapport à ^{40}Ca [18], résultant de la décroissance du ^{44}Ti et ^{49}V , dont les périodes sont respectivement 47 jours et 1 jour. L'origine la plus probable de ces éléments est l'explosion d'une supernova. Les compositions isotopiques du silicium des SiC se reportent sur une droite de pente 1,3 lorsque l'on représente $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ en fonction de $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$, alors qu'un fractionnement de masse isotopique normal produit un alignement sur une droite de pente 0,5. Cette observation implique la présence d'une source enrichie en ^{29}Si , non identifiée pour l'instant. L'étude systématique de ces grains présolaires permet ainsi d'observer les produits des différentes voies de

Nucléosynthèse stellaire : type s et type r

Mis à part l'hydrogène et l'hélium produits lors du BigBang, l'ensemble des éléments chimiques sont produits dans les étoiles, lors de la nucléosynthèse stellaire. Les éléments jusqu'à la masse du fer sont produits par fusion nucléaire, leur stabilité augmentant avec leur masse. Au-delà de la masse du fer, la stabilité des éléments va en décroissant, empêchant leur production par fusion nucléaire. Les éléments lourds sont donc produits par capture neutronique. Placé dans un flux de neutrons, un noyau atomique capture des neutrons et produit des isotopes de masse croissante. Pour le cadmium, par exemple, de telles réactions s'enchaînent des isotopes ^{110}Cd à ^{114}Cd : $^{110}\text{Cd} (n,\gamma) ^{111}\text{Cd} (n,\gamma) ^{112}\text{Cd} (n,\gamma) ^{113}\text{Cd} (n,\gamma) ^{114}\text{Cd}$.

Dans le cas d'un faible flux de neutrons, si un nouvel isotope produit est instable, il se désintègre par radioactivité β^- en l'élément suivant de la table périodique avant de capturer un neutron additionnel. Ainsi, ^{115}Cd se désintègre avec une période de 54 heures en ^{115}In , à partir duquel sera ensuite produit ^{116}In (période 13 s) et ^{116}Sn (stable). Une telle séquence est appelée nucléosynthèse de type s (pour « slow »), pour laquelle la production des nouveaux isotopes est suffisamment lente pour ne produire que des isotopes stables.

La production de l'isotope stable ^{116}Cd ne peut résulter de ce type de nucléosynthèse. Il faut en effet des flux de neutrons très intenses pour produire les isotopes les plus riches en neutrons, en ajoutant des neutrons aux isotopes intermédiaires instables avant leur décroissance radioactive. Ces isotopes enrichis en neutrons produiront ensuite des isotopes stables lourds par décroissance β^- . Cette nucléosynthèse est dite de type r (pour « rapid »).

Il faut noter que certains isotopes sont produits par ces deux types de nucléosyntheses. Enfin, certains isotopes peu abondants, les plus légers de certains éléments, comme ^{112}Sn et ^{114}Sn , nécessitent un autre type de réaction pour produire des noyaux riches en protons (nucléosynthèse de type p, pour « proton »).

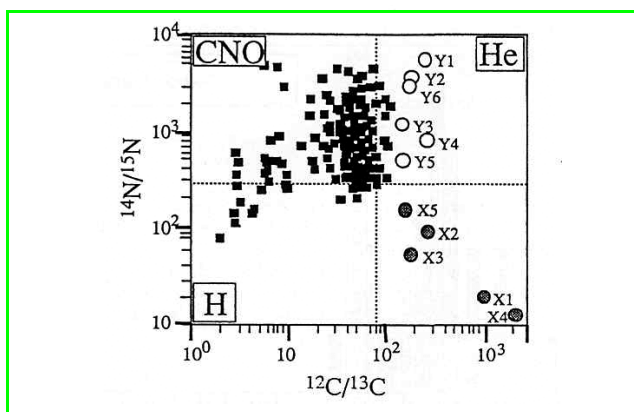


Figure 5 - Composition isotopique de l'azote et du carbone mesurée dans des grains présolaires de carbure de silicium.

Les lignes en pointillés indiquent les compositions « normales » terrestres de ces deux éléments. Les lettres font référence au processus nucléosynthétique capable de produire les compositions observées (d'après [14]).

nucléosynthèse, et d'apporter des contraintes « de terrain » à la modélisation théorique des processus stellaires.

Parallèlement à ces découvertes réalisées sur des grains présolaires, l'étude des inclusions réfractaires, des inclusions riches en oxydes d'aluminium et de calcium (CAI pour « calcium aluminium rich inclusion ») condensées à très hautes températures par un refroidissement rapide, a apporté une autre moisson de résultats sur la composition juvénile du nuage protosolaire, avec d'autres anomalies isotopiques. Certaines de ces anomalies, courantes dans ce type de matériel, consistent en un fractionnement isotopique du silicium et du magnésium associé à des cycles successifs (évaporation suivie de condensation) (figure 6). D'autres anomalies, moins fréquentes, baptisées « FUN », montrent des surabondances importantes (plusieurs pour mille) des isotopes les plus lourds des éléments proches du pic du fer (^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{64}Ni , ^{66}Zn), souvent associées à un déficit en isotope léger. Ces anomalies isotopiques sont interprétées comme la signature d'une nucléosynthèse de type r dans une supernova. Il faut noter d'ailleurs que ces inclusions réfractaires présentent les rapports $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ les plus élevés observés jusqu'à présent, avec une valeur de 5.10^{-5} définissant ainsi le temps 0 pour ce radiochronomètre.

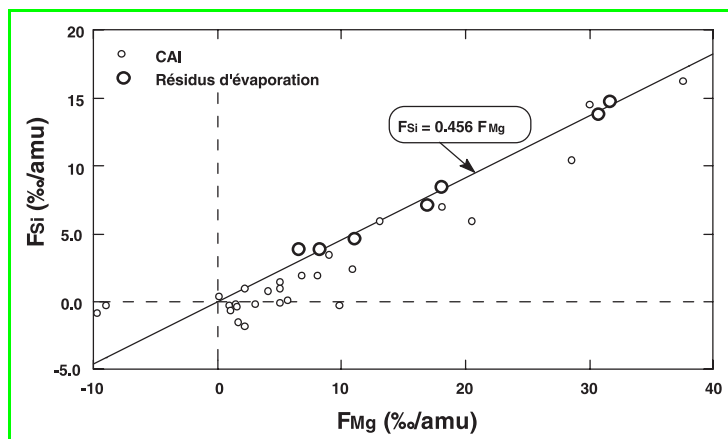


Figure 6 - Fractionnement isotopique de Si et Mg dans les résidus d'évaporation expérimentale, dans les CAI de la littérature (d'après [24]).

Processus nébulaire

Jusqu'en 1973, les variations de composition isotopique de l'oxygène dans les météorites ont été attribuées à des fractionnements isotopiques normaux, dépendant de la masse des isotopes. La mesure en 1973 par R. Clayton des trois isotopes de l'oxygène, dont ^{17}O qui ne représente que 0,037 % de O, a mis en évidence des variations de compositions indépendantes de la masse [19]. Sur un graphe représentant $\delta^{17}\text{O}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$, un fractionnement dépendant de la masse produit une droite de pente $1/2$, et les points représentatifs des échantillons terrestres s'alignent sur une telle droite. Les différentes classes de météorites s'alignent au contraire sur une droite de pente 1. La première interprétation a été un mélange entre de l'oxygène « normal » et de l'oxygène 16 presque pur, tel qu'il peut être produit par la fusion de l'hélium. Cette hypothèse est controversée depuis les expériences de Thieme et Heidenreich [20] produisant un enrichissement égal en ^{17}O et ^{18}O lors de la production d'ozone par décharges à haute fréquence, donc un fractionnement indépendant de la masse. Il est intéressant de noter que ce fractionnement indépendant de la masse atteint des valeurs très élevées dans les CAI (jusqu'à 70 %), comparées à des valeurs de quelques ‰ à l'échelle globale d'une météorite. La distribution de cette anomalie parmi les objets primitifs du système solaire et son origine restent des sujets largement débattus.

La mise en évidence plus récente de la présence de ^{10}Be lors de la formation des chondres [21] et des CAI [22] a modifié de façon importante l'interprétation des anomalies isotopiques. Le ^{10}Be se transforme en ^{10}B avec une période de 1,5 Ma, et sa présence se traduit par un excès de ^{10}B qui atteint plusieurs centaines de ‰ (figure 7). La particularité de cette anomalie isotopique est que le Be n'est pas produit par une nucléosynthèse stellaire, mais par spallation dans le milieu interstellaire ou nébulaire. La présence de ^{10}Be dans les CAI et les chondres implique sa production à l'intérieur de la nébuleuse protosolaire, par interaction entre le rayonnement solaire précoce et le gaz nébulaire. D'autres éléments radioactifs de courte période, tels ^{26}Al ou ^{41}Ca , ont donc pu aussi être produits lors de la formation de la nébuleuse. L'importance qu'a pu prendre cette production est largement débattue. La production du ^{10}B dans le nuage protosolaire a été confirmée par la mise en évidence de ^7Be dans les mêmes CAI [23]. Le ^7Be décroît en ^7Li avec une période de 53 jours, ce qui exclut qu'il ait pu être produit en dehors du système solaire. De plus, la détermination du rapport de production de ces deux nuclides apporte des contraintes importantes sur les conditions qui prévalaient dans le système solaire primitif.

Chimie interstellaire

La composition isotopique de l'hydrogène, exprimée par le rapport D/H, montre des variations spectaculaires à l'intérieur du système solaire. La valeur initiale du Soleil ($\text{D}/\text{H} = 20.10^{-6}$), déduite de son rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$ [25], est semblable à celle mesurée sur les planètes géantes. Par contre, la Terre a un rapport D/H proche de 150.10^{-6} , les comètes des valeurs autour de 300.10^{-6} et les météorites des valeurs allant de 100 à 1000.10^{-6} . L'étude de la composition isotopique de l'hydrogène de l'eau dans les chondrites carbonées nous a permis de mettre en évidence la présence d'eau très enrichie en D à la fois dans la matrice [26] et dans les chondres [27]. Les enrichissements observés

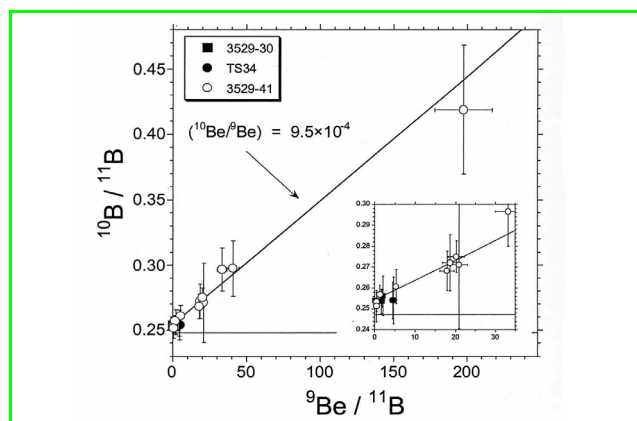


Figure 7 - Composition isotopique du bore et rapport Be/B mesurés dans les inclusions réfractaires (CAI) de la météorite Allende.

La corrélation linéaire entre les différents points démontre la décroissance *in situ* du ^{10}Be . La pente donne un rapport initial $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ de $9,5 \cdot 10^{-4}$.

(+ 8 000 %) sont trop importants pour pouvoir résulter d'un processus nébulaire. Ils sont par contre représentatifs du fractionnement isotopique attendu lors de réactions ions-molécules dans le milieu interstellaire. La distribution des isotopes de l'hydrogène dans le système solaire représente ainsi un mélange entre de l'eau formée dans le milieu interstellaire et l'hydrogène solaire (figure 8). Les mesures effectuées sur les météorites suggèrent que 10 à 15 % de l'eau des planètes et des météorites est ainsi d'origine interstellaire, peut-être 50 % pour les comètes.

Conclusion

Les différents points présentés ci-dessus cherchent à illustrer quelques unes des principales découvertes réalisées grâce aux mesures des compositions isotopiques des éléments dans le domaine de la cosmochimie, tant sur les processus de formation du système solaire que sur l'origine des éléments qui le composent. Il est important de préciser que le développement de nouvelles méthodes analytiques, ou leur amélioration constante, permettent d'aborder maintenant des mesures impossibles il y a dix ans. On assiste ainsi au développement :

- de mesures de très haute précision grâce aux MC ICP MS (torches à plasma couplées à des spectromètres de masse à multicollection), qui permettent de rechercher de nouvelles anomalies isotopiques pour des éléments tels que Cu, Zn ou Mb, ou de mesurer plus précisément les composition isotopiques de Nd ou W, pour utiliser les radioactivités éteintes ^{146}Sm - ^{142}Nd ou ^{182}Hf - ^{182}W pour l'étude de la croissance et la différenciation des planètes ;
- de mesures à toutes petites échelles avec le développement d'une sonde ionique ayant une résolution spatiale de 50 nanomètres, permettant d'analyser individuellement les différents composants des poussières interplanétaires, ou les variations à très petites échelles dans les objets les plus primitifs.

Ces développements analytiques sont indispensables pour étudier en détail les différents processus qui ont gouverné l'accrétion du système solaire.

Références

- [1] Patterson C., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **1956**, 10, p. 230.
- [2] Reynolds J.H., *Phys. Rev. Lett.*, **1960**, 4, p. 8.

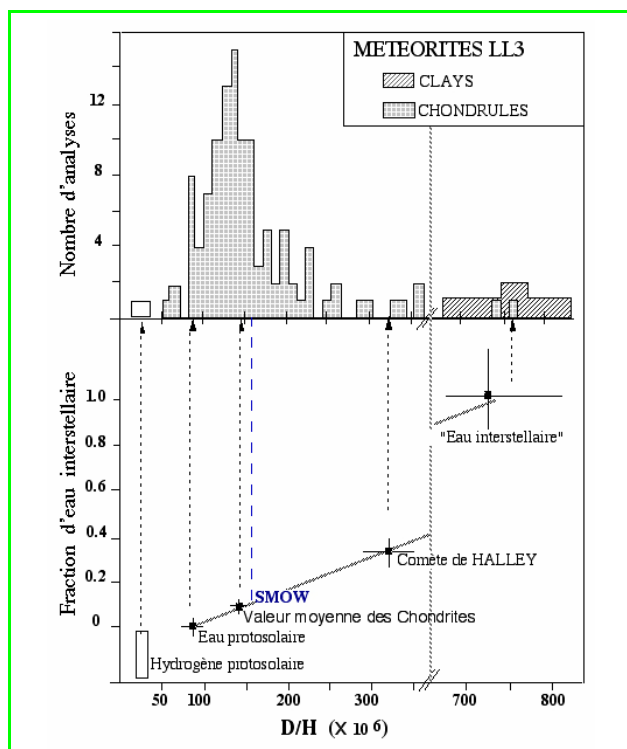


Figure 8 - Distribution du rapport D/H dans les météorites ordinaires (LL3), interprétée comme un mélange entre l'eau protosolaire et l'eau interstellaire.

- [3] Posodek F.A., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **1970**, 34, p. 341.
- [4] Lee T., Papanastasiou D.A., Wasseburg G.J., *Geophys. Res. Lett.*, **1976**, 3, p. 41.
- [5] Zinner E., Göpel C., *Meteoritics and Planetary Science*, **2002**, 37, p. 1001.
- [6] Birck J.L., Allègre C.J., *Nature*, **1988**, 331, p. 579.
- [7] Shukolyukov A., Lugmair G.W., *Science*, **1993**, 259, p. 1138.
- [8] Yin Q., Jacobsen S.B., Yamashita K., Blichert-Toft J., Télouk P., Albarede F., *Nature*, **2002**, 418, p. 949.
- [9] Kleine T., Münker C., Mezger K., Palme H., *Nature*, **2002**, 418, p. 952.
- [10] Reynolds J.H., Turner G.J., *Geophys. Res.*, **1964**, 69, p. 3263.
- [11] Black D.C., Pepin R.O., *Earth planet. Sci. Lett.*, **1969**, 6, p. 365.
- [12] Lewis R.S., Srinivasan B., Anders E., *Science*, **1975**, 190, p. 1251.
- [13] Lewis R.S., Tang M., Wacker J.E., Anders E., Steel E., *Nature*, **1987**, 326, p. 160.
- [14] Bernatowicz T., Fraundorf G., Ming T., Anders E., Wopenka B., Zinner E., Fraundorf P., *Nature*, **1987**, 330, p. 728.
- [15] Zinner E., Tang M., Anders E., *Nature*, **1987**, 330, p. 730.
- [16] Amari S., Anders F., Virag A., Zinner E., *Nature*, **1990**, 345, p. 238.
- [17] Amari S., Zinner E., Lewis R.S., *Lunar Planet. Sci. Conf. XXII*, **1991**, 19.
- [18] Amari S., Hoppe P., Zinner E., Lewis R.S., *Astrophys. J.*, **1992**, 394, p. L43.
- [19] Clayton R.N., Grossman L., Mayeda T.K., *Science*, **1973**, 182, p. 485.
- [20] Thiemens M.H., Heinrich J.E., *Science*, **1983**, 219, p. 1073.
- [21] Chaussidon M., Robert F., *Nature*, **1995**, 374, p. 337.
- [22] McKeegan K.D., Chaussidon M., Robert F., *Science*, **2000**, 289, p. 1334.
- [23] Chaussidon M., Robert F., McKeegan K.D., Krot A.N., *Lunar. Planet. Sci.*, **2001**, 32, p. 1862.
- [24] Davis A.M., Hashimoto A., Clayton R.N., Mayeda T.K., *Nature*, **1990**, 347, p. 655.
- [25] Geiss J., Reeves H., *Astron. Astrophys.*, **1972**, 18, p. 126.
- [26] Deloule E., Robert F., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **1995**, 59, p. 4695.
- [27] Deloule E., Robert F., Doukhan J.-C., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **1998**, 62, p. 3367.



Étienne Deloule

est directeur de recherche au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG-CNRS) à Vandœuvre-lès-Nancy*.

* CRPG-CNRS, BP 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.
Tél. : 03 83 59 42 21.
E-mail : deloule@crpg.cnrs-nancy.fr