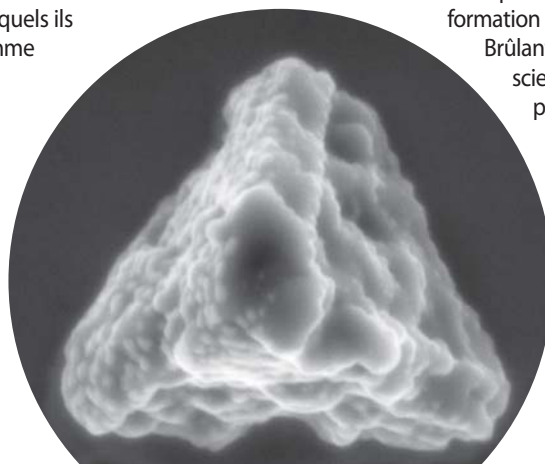


JEUNESSE DU SYSTÈME SOLAIRE (2)

Les fossiles isotopiques des météorites

L'étude isotopique des roches extraterrestres et, en particulier, des météorites révèle que ces matériaux sont très anciens et sont des fossiles de la jeunesse du Système solaire. L'horloge des isotopes radioactifs qui se désintègrent au cours du temps a notamment permis d'établir une chronologie de la jeunesse du Système solaire et de la formation planétaire (*l'Astronomie* n° 50). Les éléments qui constituent la matière ne comportent cependant pas uniquement des isotopes radioactifs, mais peuvent aussi comporter un ou plusieurs isotopes stables au cours du temps. La mesure des proportions de ces différents éléments permet d'étudier la nature et l'intensité des événements auxquels ils sont soumis (lire encadré 1 et fig. 1). Comme pour les isotopes radioactifs ou issus de radioactifs (on les qualifie alors de radiogéniques), les isotopes stables ont souvent des distributions exotiques dans les matériaux les plus anciens du Système solaire par rapport à celles observées sur Terre. Ces « anomalies » isotopiques traduisent alors des processus physico-chimiques différents de ceux impliqués dans l'histoire géologique de la Terre, et il faut faire appel à des processus astrophysiques et à des réservoirs de matière formés dans les étoiles ou dans les milieux circum- ou interstellaires pour expliquer ces observations. La cosmochimie des isotopes stables est devenue un outil puissant pour déterminer l'origine de la matière planétaire.



2. Grain présolaire (carbure de silicium, SiC) vu en microscopie électronique. Ce grain extrait de la météorite de Murchison fait moins d'un micromètre de diamètre et s'est formé il y a 4,57 milliards d'années dans le vent d'une étoile de type géante rouge. Photographie: Peter Hoppe, Max Planck Institut für Chemie (à Mainz en RFA).

Diamants, saphirs et péridots, la joaillerie stellaire

En 1964, John Reynolds et Grenville Turner mettent en évidence dans la météorite de Renazzo la présence de xénon dont la composition isotopique ne peut être expliquée que par des réactions nucléaires dans des étoiles autres que le Soleil. Le xénon est le gaz rare le plus lourd, c'est l'un des deux éléments qui possèdent le plus d'isotopes stables: il en possède neuf, de masse comprise entre 124 et 136 (l'étain en possède dix). Le xénon exotique de Renazzo est attribué à la présence de grains interstellaires synthétisés dans les éjecta d'étoiles mourantes plus anciennes que le Soleil et ayant survécu à la formation du Système solaire, des « grains présolaires ».

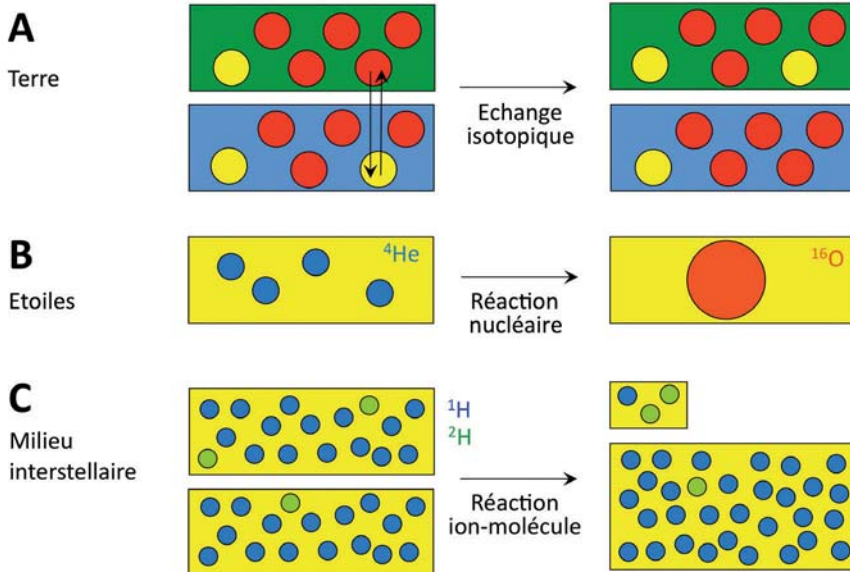
Brûlant la meule de foin pour trouver l'aiguille, les scientifiques cherchent à isoler la phase porteuse de ce xénon pendant près d'un quart de siècle à l'aide de procédures chimiques de plus en plus complexes et agressives. C'est en 1987 que ces recherches sont couronnées de succès: Roy Lewis et son équipe de l'université de Chicago isolent pour la première fois cette phase porteuse et découvrent les nanodiamants interstellaires des météorites. Ces nanoparticules de 2 à 3 nanomètres se seraient formées dans des éjecta de supernovae et représentent jusqu'à 0,3 % de la masse des météorites primitives.

Cette découverte ouvre la voie à une étude de la physique des étoiles à l'aide des grains présolaires. Ces grains sont identifiés sur la base des compositions isotopiques très exotiques de leurs éléments

1. Variations isotopiques dans la Nature : sur Terre et dans l'espace

A. Dans les conditions de pression et de température typiques de la Terre, les processus physico-chimiques conduisent à une redistribution des isotopes entre les différents réservoirs (minéral, rivière, organisme vivant, etc.) pour maximiser la stabilité du système

sans changement du nombre total d'atomes. Ce phénomène conduit à des variations de composition isotopique de quelques pour cent au maximum et dépend classiquement des masses relatives des isotopes impliqués.

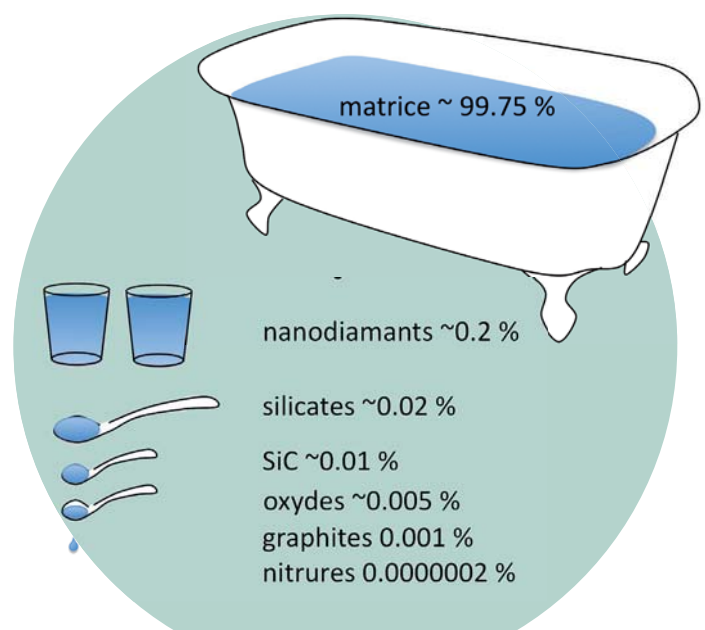


B. Dans les conditions extrêmes des milieux astrophysiques, des mécanismes différents peuvent être mis en jeu. Ainsi les températures de plusieurs millions de degrés qui règnent au cœur des étoiles permettent des réactions de fusion nucléaire. Dans l'exemple ci-contre, typique d'une supernova, un réservoir de 16O pur est produit par fusion de noyaux de 4He , quatre par quatre.

C. Au contraire, les températures très basses du milieu interstellaire froid permettent un pompage sélectif du deutérium (2H ou D), très rare dans l'hydrogène du gaz, car brûlé dans les étoiles, pour le concentrer jusqu'à 10000 fois dans les molécules d'eau ou les molécules organiques. Ce pompage sélectif se produit dans une réaction ion-molécule.

1. Exemples de mécanismes physiques pouvant conduire à une variation de proportion des isotopes stables.

constitutifs, héritées des réactions nucléaires dans leurs étoiles parentes. Rapidement, on découvre des carbures de silicium (SiC , fig. 2), puis des graphites, des saphirs (oxydes d'aluminium) et enfin, au début des années 2000, des silicates (comme par exemple des olivines ou péridots en joaillerie), les principaux constituants des roches et les composants essentiels de la poussière interstellaire, tous synthétisés dans des étoiles plus anciennes que le Soleil. Ces grains sont très petits, de quelques nanomètres à quelques micromètres pour les plus gros. Ils sont rares, leur concentration varie de quelques parties par milliard (nitrures) à une fraction de pour cent (diamants, silicates) (fig.3). Ils se sont formés dans une multitude d'étoiles, principalement des géantes rouges et des étoiles de la branche asymptotique, mais aussi des supernovae et plus rarement des novae. Ironie du sort, les études les plus récentes suggèrent que la majeure partie des nanodiamants, les premiers grains présolaires découverts et les plus abondants, soit en fait formée dans le Système solaire. En effet, l'abondance du xénon est telle qu'il n'y a qu'un atome de Xe pour un million de diamants. L'essentiel des diamants ne peut donc pas être caractérisé grâce aux isotopes du Xe. Or, la composition isotopique du carbone (presque 100 % du diamant) et de l'azote (présent en trace) de ces diamants est essentiellement solaire, indiquant ainsi une origine solaire de la plupart des nanodiamants.

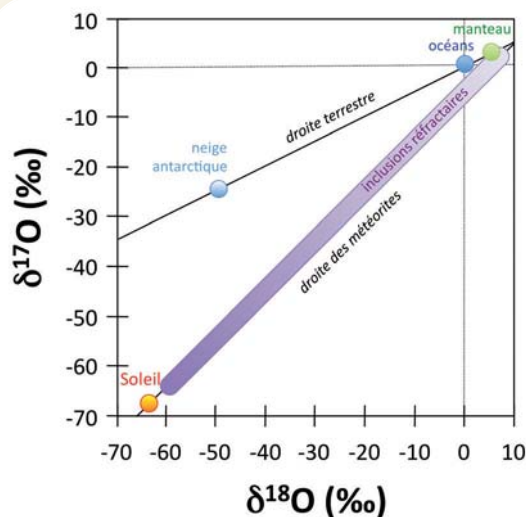


3. Abondance des principaux types de grains présolaires dans les météorites. Pour une baignoire de matrice, on trouve environ deux verres de diamants et quelques cuillères du reste.

2. Rapports isotopiques de l'oxygène

L'oxygène est le troisième élément le plus abondant dans notre Galaxie après l'hydrogène et l'hélium, qui constituent l'essentiel des étoiles et du gaz interstellaire. C'est l'élément le plus abondant dans les roches, il représente plus de 46 % de la masse de la croûte terrestre. Il possède trois isotopes stables de masse 16 (le plus abondant), 17 (le plus rare) et 18, tous synthétisés dans des étoiles plus anciennes que notre Soleil. En moyenne, dans notre Galaxie et en particulier dans le Système solaire et sur Terre, ces proportions sont de 1 atome de ^{18}O pour ~499 atomes de ^{16}O et de 1 atome de ^{17}O pour ~2635 atomes de ^{16}O . Ces proportions relatives traduisent l'efficacité de leurs processus de synthèse dans les étoiles (fusion de 4 atomes d'hélium pour ^{16}O et fusion de H avec noyau d'azote ou d'oxygène préexistants pour ^{17}O et ^{18}O). Lorsque les variations de ces proportions sont

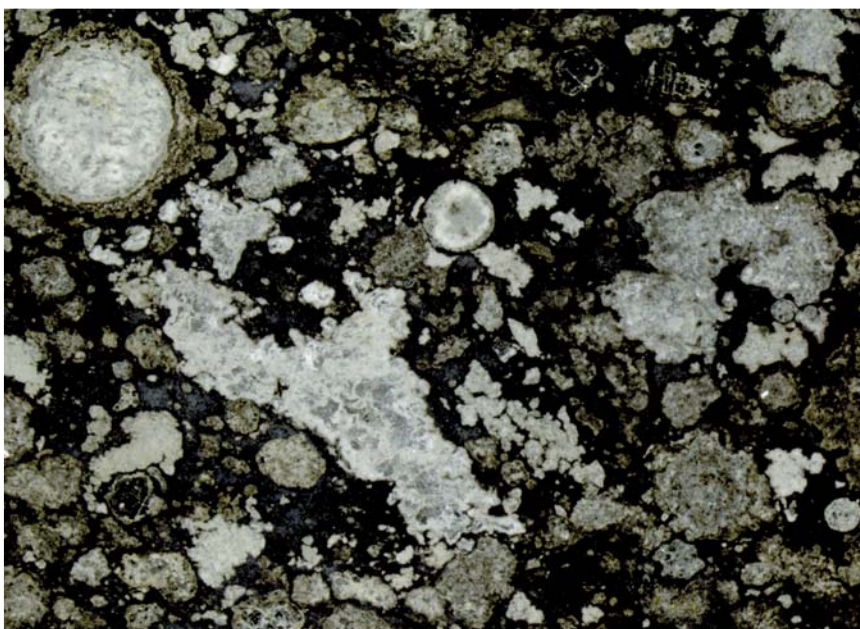
faibles (par exemple pour les processus géologiques) on définit une quantité δ qui traduit la variation relative donnée en parties par millier ou pour mille (un dixième de %) par rapport à une valeur de référence bien connue. Pour l'oxygène, la référence est classiquement la valeur moyenne de l'eau des océans terrestres. Sur Terre, l'essentiel des processus physico-chimiques conduit à une variation de ces proportions qui dépend directement des masses relatives des isotopes. Ainsi, le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (ou le $\delta^{18}\text{O}$) varie deux fois plus que le rapport $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ (ou le $\delta^{17}\text{O}$), puisque l'écart de masse entre ^{18}O et ^{16}O est deux fois plus grand qu'entre ^{17}O et ^{16}O . L'une des propriétés les plus importantes des objets planétaires (voir texte) est une relation où $\delta^{18}\text{O} \sim \delta^{17}\text{O}$, couramment appelée droite de pente 1.



4. Rapport $\delta^{17}\text{O}$ en fonction du rapport $\delta^{18}\text{O}$, pour différents objets du Système solaire.

^{16}O , chimie protoplanétaire et réservoirs de matière

Alors que les grains présolaires portent des anomalies isotopiques extrêmement grandes pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur, la matière typique du Système solaire présente aussi souvent des anomalies isotopiques de plus faible amplitude qui ne peuvent être expliquées par la préservation de matière stellaire non diluée. On fêtera l'an prochain le quarantième anniversaire de la découverte de l'anomalie isotopique de l'oxygène dans les météorites, une signature ubiquiste dont l'origine résiste encore et toujours aux tentatives d'explications. En 1973, Robert Clayton et son équipe de l'université de Chicago découvrent que, dans les minéraux anhydres de la météorite Allende, les rapports isotopiques $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ varient de façon identique plutôt que suivant le facteur 2, caractéristique de la quasi-totalité des échantillons terrestres analysés (lire encadré 2 et fig. 4), ce qui peut se traduire par l'incorporation d'un excès de ^{16}O par rapport à la Terre atteignant 5 % dans les inclusions réfractaires (fig. 5). Cette variation de la quantité de ^{16}O s'observe à différentes échelles dans tous les objets du Système solaire analysés en laboratoire, météorites primitives, poussières cométaires, croûtes planétaires (Terre vs Mars) et vent solaire. C'est donc la signature d'un processus majeur de formation de la matière planétaire dans le Système solaire, et son explication est essentielle à la compréhension de la naissance de ce dernier.



5. Inclusion réfractaire de la météorite d'Allende. Macrographie d'une surface polie de la météorite d'Allende. L'inclusion, blanche, est l'objet allongé et cotonneux au centre de l'image, elle fait ~5 mm dans sa plus grande dimension. Les autres objets arrondis et à dominante grise sont des chondres. Inclusion réfractaire et chondres sont inclus dans une matrice noire à grain très fin. © Muséum national d'histoire naturelle, Paris.

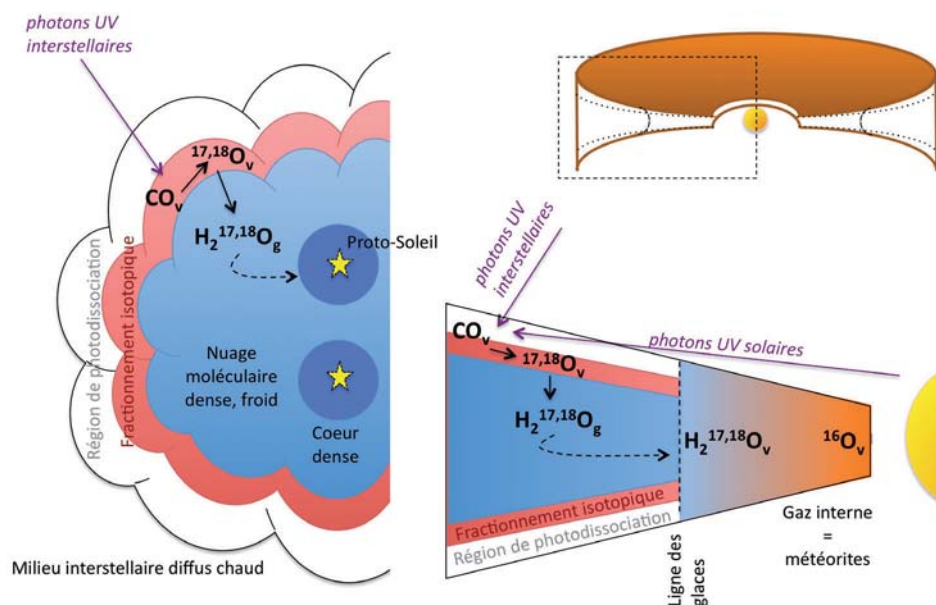
L'explication proposée en 1973 est que cet excès est dû à l'injection de ^{16}O produit efficacement par une supernova lors de la naissance du Système solaire. Cette explication a été abandonnée au début des années 2000 après une vingtaine d'années de bataille entre Bob Clayton et Mark Thieme de l'université de San Diego, qui montre en 1983 qu'un appauvrissement en ^{16}O se produit lors de réactions chimiques impliquant la molécule d'ozone et qui propose un processus similaire dans le Système solaire jeune. Actuellement, c'est l'hypothèse chimique plutôt que nucléaire qui tient le haut du pavé, mais le mécanisme chimique invoqué est différent. Il fait appel à la photodissociation du monoxyde de carbone, CO , dans des conditions qui permettent un enrichissement en ^{17}O et ^{18}O de l'oxygène atomique produit par cette photodissociation, une signature transmise par la suite à l'eau et aux roches (lire encadré 3 et fig. 6). La détermination en 2011, par Kevin McKeegan et ses collaborateurs, de la composition isotopique du Soleil grâce aux échantillons de vent solaire rapportés en 2004 par la mission spatiale *Genesis* a révélé un excès de ^{16}O de 6 à 7 % dans le Soleil par rapport à la Terre. Ce résultat supporte fortement ce modèle de photodissociation puisque le Soleil aurait ainsi la valeur initiale du gaz interstellaire alors que l'eau et les roches planétaires seraient enrichies en ^{17}O et ^{18}O comme prédit par le modèle. Il implique que c'est la Terre (et la vie) qui porte une anomalie isotopique et non les matériaux primordiaux du Système solaire !

3. Scénarios pour le fractionnement isotopique de l'oxygène par photodissociation du CO .

Dans notre Galaxie, le monoxyde de carbone est le gaz le plus abondant après l'hydrogène (H et H_2) et l'hélium (He). Il est photodissocié par des photons UV issus des étoiles. Cependant, les photons UV qui dissocient la molécule isotopique la plus abondante de CO , c'est-à-dire contenant les isotopes majeurs de C et O (^{12}C et ^{16}O), n'ont pas la même longueur d'onde que ceux qui dissocient les molécules de CO comportant des isotopes mineurs (^{13}C , ^{17}O et ^{18}O). Lorsque l'abondance de CO est favorable, les photons qui dissocient $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ peuvent être épuisés mais pas ceux qui dissocient $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ ou $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ (couches rouges dans la figure). Il se produit alors une accumulation de $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ non dissocié, le gaz de CO devient plus riche en ^{16}O . Par contraste, l'oxygène atomique issu de la dissociation des molécules isotopiques mineures s'enrichit en ^{17}O et ^{18}O . C'est cet oxygène atomique lourd qui va ensuite être incorporé dans l'eau et dans les roches et faire varier leur composition isotopique. Le paramètre qui contrôle alors le changement isotopique n'est pas la masse mais l'abondance. Le site de photodissociation responsable des variations dans le Système solaire n'est pas encore déterminé avec certitude. Les observations astronomiques indiquent que cet effet appelé auto-écranage existe dans les nuages interstellaires et dans les disques autour des étoiles jeunes. Elle a donc pu avoir lieu soit dans une région peu opaque du nuage moléculaire parent du Système solaire, soit dans les régions hautes et externes du disque protoplanétaire du Soleil (fig. 6). Le scénario 1 montre les régions externes d'un nuage moléculaire dense dans lequel des cœurs denses se contractent pour donner naissance à de nouvelles étoiles. Le scénario 2 montre une section radiale de disque protoplanétaire avec le Soleil jeune au centre et une coupe verticale dans l'épaisseur du disque. Dans les deux cas, l'oxygène atomique lourd (indice v) produit dans la région rouge est ensuite

incorporé dans la glace d'eau (indice g) et transporté vers les régions internes du Système solaire en formation. Là il sera évaporé, ce qui conduira à une modification de composition isotopique du gaz (gradient de couleur), enregistrée ensuite dans les roches.

6. Scénarios pour le fractionnement isotopique de l'oxygène par photodissociation du CO .



Scénario 1. Milieu interstellaire

Scénario 2. Disque protoplanétaire

La distribution et l'amplitude de cette anomalie au sein des différents objets du Système solaire en font un traceur puissant de leurs relations de parenté, puisqu'elle ne peut pas être modifiée au sein d'un même objet. Les isotopes de l'oxygène ont ainsi permis de montrer que l'essentiel des poussières interplanétaires et les échantillons de la comète Wild-2 font partie d'une même famille d'objets qui inclut les chondrites carbonées (lire *l'Astronomie* n° 50) et pourrait regrouper la majeure partie des astéroïdes des régions externes de la ceinture d'astéroïdes, les comètes à courte période et potentiellement les centaures. Ces objets sont formés de matériaux typiques du Système solaire très proches des matériaux terrestres et non d'aggrégats de poussières interstellaires comme on l'a longtemps pensé. Le même outil a récemment permis de montrer que les échantillons de l'astéroïde Itokawa de type S sont des chondrites ordinaires (fig. 7). Enfin les isotopes de l'oxygène varient également suivant leur masse lors des processus géologiques de basse température et sont notamment utilisés pour tracer les interactions eau-roche et étudier l'origine de l'eau dans le Système solaire.



7. Astéroïde Itokawa (540 m, 270 m, 210 m) vu par la sonde Hayabusa. Suite à de nombreux problèmes techniques, la rencontre a duré de novembre 2005 à avril 2007. Le 13 juin 2010, *Hayabusa* rapporte sur Terre quelques centaines de grains infra-millimétriques du régolite d'Itokawa dont l'étude isotopique est encore en cours.
© Nasa.

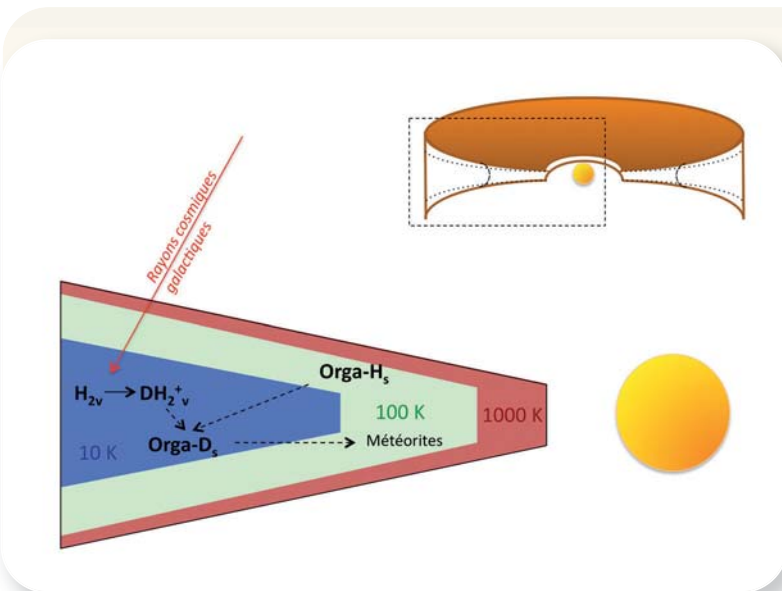
Des glaces interstellaires aux océans prébiotiques

En 1954, Giovanni Boato mesure les proportions des isotopes de l'hydrogène (^1H et ^2H ou D pour deutérium) dans les chondrites carbonées et montre qu'elles sont comparables à celle des océans terrestres. Cette observation, renforcée plus récemment par la mesure de la composition isotopique du chlore présent dans les sels marins, est une pierre angulaire de l'hypothèse à présent bien acceptée de l'origine extraterrestre des océans. La Terre s'est probablement accrétée à partir d'un matériau essentiellement anhydre, ou a perdu son eau primordiale par dégazage d'un océan magmatique. Elle a par la suite acquis son atmosphère et ses océans du fait d'un bombardement secondaire par des petits corps, soit sous forme d'un bombardement continu de poussières ou plus probablement grâce à un nombre limité d'impacts géants.

Cependant, toutes les météorites ne contiennent pas une eau identique à celle des océans terrestres. C'est François Robert, alors étudiant au Commissariat à l'énergie atomique, qui découvre en 1979 que les chondrites ordinaires contiennent de deux à cinq fois plus de deutérium que les océans. Une telle quantité de deutérium ne peut pas être expliquée par des processus thermodynamiques à l'équilibre dans le Système solaire

8. Pierre de la météorite d'Orgueil. Cette météorite de 14 kg tombée en 1864 dans le village d'Orgueil, près de Montauban, est la plus riche en matière organique (plus de 5 % en poids). Sa composition chimique identique à celle de la photosphère du Soleil est la référence pour l'abondance des éléments rocheux dans notre Galaxie. Dès les premières études, comme celle de l'astronome Camille Flammarion, sa matière organique solide y est décrite comme une matière charbonneuse. C'est dans les météorites d'Orgueil et de Murchison que la matière organique primitive a été le plus étudiée. Photographie: P. Lafàite © Muséum national d'histoire naturelle.





9. Chimie organique dans le disque, déduite de la composition isotopique de la matière organique. Section radiale de disque protoplanétaire, coupe verticale (cf. fig. 6). La matière organique se condense sous forme de grains carbonés solides riches en H (Orga-H₂) à une température supérieure à 100 K, puis réagit avec des ions formés par les rayons cosmiques et deutérés en phase vapeur à une température inférieure à 20 K (DH₂⁺_v). La matière organique solide ainsi deutérée (Orga-D₂) est ensuite transportée à nouveau dans les régions internes où elle sera incorporée dans les planétésimaux en formation.

PUBLICATIONS MAJEURES

1954

G. Boato, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, mesure la composition isotopique de H des chondrites carbonées.

1964

J.H. Reynolds & G. Turner, *Journal of Geophysical Research*, découvrent les anomalies isotopiques du X^e dans la chondrite carbonée Renazzo.

1973

R. N. Clayton *et al.*, *Science*, découvre l'anomalie isotopique de O dans les inclusions réfractaires d'Allende.

1979

F. Robert *et al.*, *Nature*, découvrent les grands excès de D des chondrites ordinaires.

1983

M. Thiemens & Heidenreich, *Science*, produisent une anomalie isotopique de O par chimie de l'ozone.

1987

R. Lewis *et al.*, *Nature*, découvrent les nanodiamants interstellaires dans la météorite de Murchison.

2006

K. D. McKeegan *et al.*, *Science*, mesurent la composition isotopique de O de la comète Wild-2.

2011

K. D. McKeegan *et al.*, *Science*, mesurent la composition isotopique de O du Soleil.

2011

H. Yurimoto *et al.*, *Science*, mesurent la composition isotopique de O de l'astéroïde Itokawa.

jeune. En revanche l'observation d'excès de D atteignant un facteur 10000 dans les molécules gazeuses du milieu interstellaire froid suggère que cette composition isotopique signe une origine interstellaire de l'eau des météorites primitives et des poussières cométaires et par là même des océans terrestres. Les très grands excès de deutérium (dix à trente fois plus que sur Terre) découverts par la suite dans certaines fractions organiques (fig. 8) ont étendu cette conclusion à la matière organique. Ces molécules, dont le rôle dans l'apparition de la vie sur Terre reste à élucider, auraient été synthétisées dans le cœur dense parent du Système solaire à des températures aussi basses que 10 K (-263 °C) par des réactions chimiques mettant en jeu une molécule non chargée électriquement et un ion chargé produit par le rayonnement cosmique. Ce résultat accepté pendant 25 ans a été remis en cause ces dix dernières années grâce à l'étude isotopique à l'échelle moléculaire de la matière organique des chondrites, qui a montré que les plus grands excès de D sont associés aux liaisons les plus fragiles. La matière organique aurait donc plutôt été synthétisée dans les régions plus chaudes du disque protoplanétaire (fig. 9) et aurait subi un ajout tardif de D dans les régions froides du disque. Les études les plus récentes de la composition isotopique de l'azote (deux isotopes stables ¹⁴N et ¹⁵N) et la mesure d'un déficit important de ¹⁵N dans le vent solaire par la mission *Genesis* suggèrent aussi un ajout tardif d'azote lourd dans une matière organique initialement solaire, également en faveur de ce scénario d'organosynthèse.

Des météorites à ALMA et au JWST, du micromètre au parsec

La composition isotopique des météorites et des autres matériaux primitifs du Système solaire permet de brosser un tableau de la formation planétaire. Chaque objet planétaire analysé en laboratoire, avec des méthodes de plus en plus pointues, permet d'ajouter une pièce très détaillée à ce tableau. Cependant, le mode d'emploi précis pour l'assemblage de ces pièces et obtenir un tableau complet manque encore. À l'heure des grands télescopes spatiaux ou au sol comme *Herschel*, ALMA ou le James Webb Space Telescope (JWST), les progrès des observations astronomiques permettent maintenant de réaliser des mesures isotopiques dans le milieu interstellaire et les étoiles jeunes à une échelle qui s'approche de celle requise pour tester les modèles construits à partir de l'étude des météorites. Les observations astronomiques et les modèles astrophysiques déduits de ces observations devraient donc avoir un rôle essentiel dans les années qui viennent pour nous permettre d'assembler les pièces du puzzle météoritique. La combinaison de l'étude des météorites, des observations astronomiques et des missions spatiales de retour d'échantillons d'autres objets du Système solaire ouvre donc une nouvelle ère pour l'exploration des systèmes planétaires et une meilleure compréhension de la formation des planètes et de l'apparition de la vie.

J. Aléon ■

Remerciements

Pour cet article ainsi que le précédent, l'auteur tient à remercier Alice Aléon-Toppiani et Ghylaine Quitté pour leurs relectures ainsi que Peter Hoppe et Brigitte Zanda pour leurs contributions photographiques.