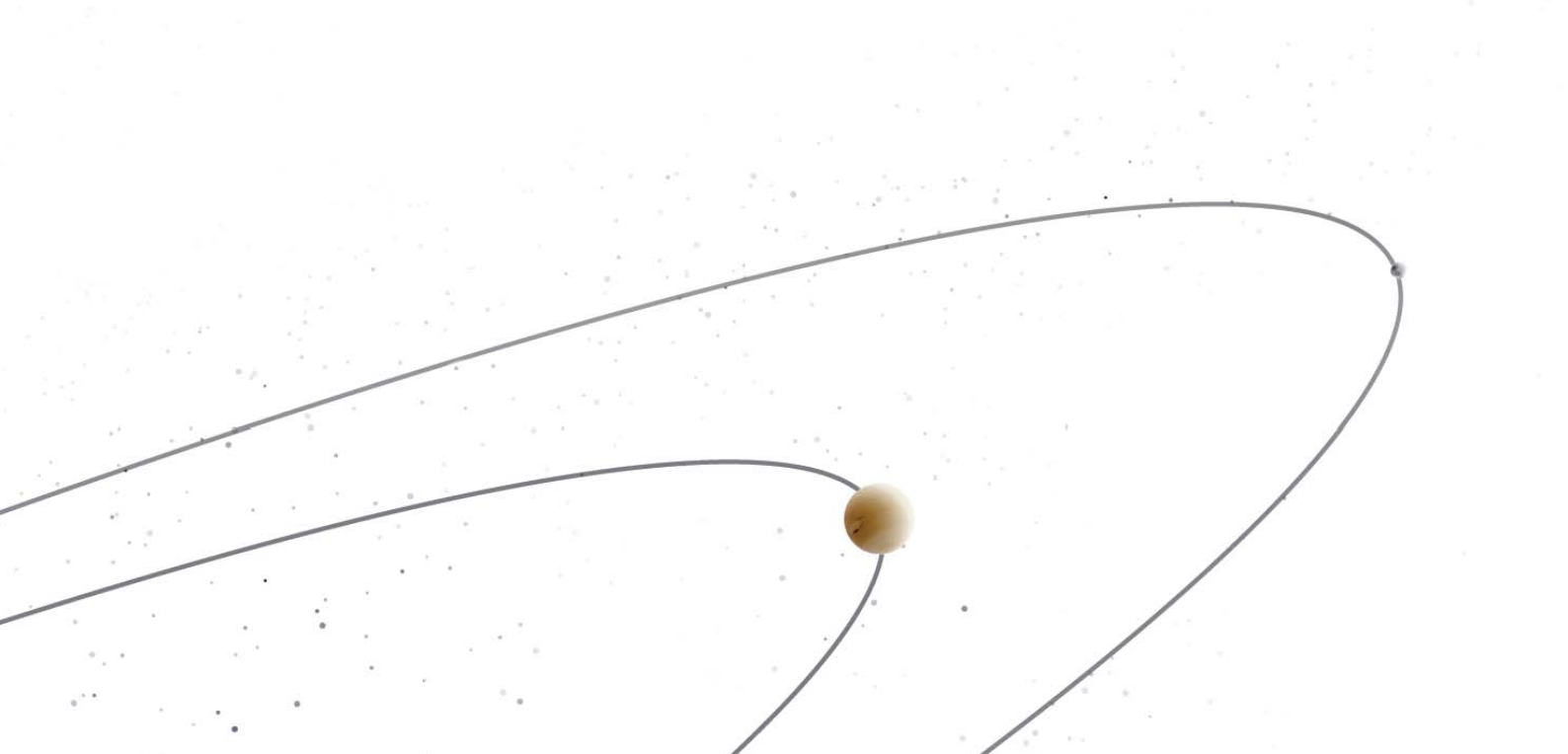


JEUNESSE DU SYSTÈME SOLAIRE

L'horloge isotopique des météorites

L'étude des proportions des isotopes (lire encadré 1) dans la nature prend son essor à partir des années 1950, dans la foulée des progrès de la physique atomiste du début du XX^e siècle et du développement des spectromètres de masse, qui permettent des identifications fines des masses des atomes présents et de leurs isotopes. C'est sous l'impulsion de scientifiques comme Harold Urey, Prix Nobel de chimie 1934 pour la découverte du deutérium en 1932, que la géochimie isotopique devient une science à part entière. Jusqu'à la fin des années 1960, cette science nouvelle étudie tous azimuts les matériaux disponibles au laboratoire, y compris les météorites. Mais c'est à partir de 1969, avec le retour des échantillons Apollo (382 kg de roches lunaires rapportés en 6 missions) et dans une moindre

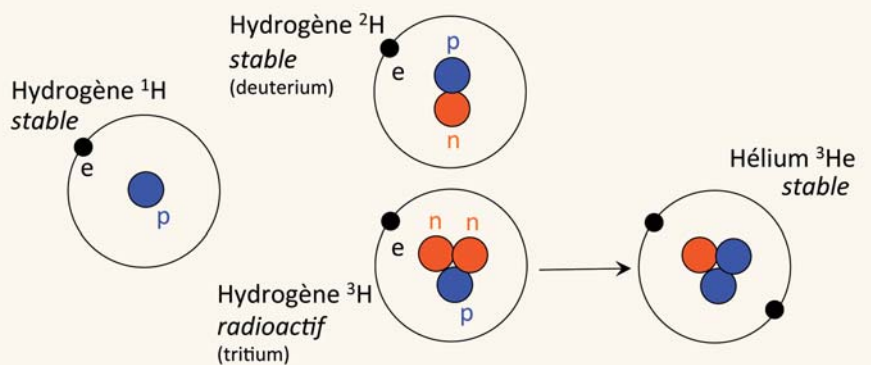


1. Des sondes nucléaires de la matière

Les éléments chimiques qui composent la matière existent dans la nature avec différentes variantes nucléaires. Chaque atome comporte un certain nombre d'électrons chargés négativement et peu massifs qui lui confèrent ses propriétés chimiques et le définissent en tant qu'élément. Ces électrons gravitent autour d'un noyau constitué de protons et de neutrons, plus massifs. Les protons sont chargés positivement et leur nombre est égal au nombre d'électrons pour assurer la neutralité électrique de l'atome. Les

neutrons ne sont pas chargés et leur masse avoisine celle du proton. **Les isotopes sont les différentes variantes d'un élément dont le nombre de neutrons n'est pas le même.** La principale différence entre différents isotopes d'un même élément est donc leur masse, couramment exprimée en nombre de masse atomique, qui est le nombre de nucléons (protons + neutrons). Selon leur nombre de neutrons, certains sont stables dans le temps, d'autres se désintègrent spontanément, ils sont radioactifs.

mesure la chute spectaculaire de la météorite d'Allende (météorite primitive de 2 tonnes tombée au Mexique le 8 février 1969, fig. 1), que certains géochimistes se spécialisent dans l'étude isotopique des matériaux extraterrestres et en particulier des météorites. Très vite, il apparaît que ces matériaux sont très anciens et sont des reliques des premières phases de formation du Système solaire. Bon nombre d'éléments y montrent des compositions isotopiques « exotiques », souvent qualifiées d'anomalies par comparaison avec ce que l'on mesure dans les roches terrestres. Ces anomalies signent des processus physico-chimiques inconnus sur Terre et l'on sait maintenant qu'elles sont dues à des processus astrophysiques à l'œuvre lors de la naissance du Soleil et de ses planètes. La cosmochimie isotopique est née. Cet article décrit l'histoire de la formation planétaire telle qu'elle est enregistrée par l'horloge des isotopes radioactifs. Un article ultérieur présentera les réservoirs de matière mis en jeu et les processus astrophysiques enregistrés par les isotopes stables.



Exemple des isotopes de l'hydrogène. Trois isotopes de l'hydrogène sont représentés avec leurs électrons (e) et leur noyau constitué de protons (p) et de neutrons (n). Les isotopes notés ^1H et ^2H (également noté D) sont stables, l'isotope ^3H comporte trop de neutrons par rapport aux protons pour être stable, il se désintègre spontanément. Tous n'ont qu'un électron et un proton, ce sont bien des atomes d'hydrogène. Lors de la désintégration de ^3H , le neutron excédentaire conduit à la formation d'un proton et d'un électron. Le nouvel atome possède deux protons et deux électrons, ses propriétés chimiques sont donc différentes, c'est un atome d'hélium noté ^3He . Le temps nécessaire pour que la moitié des atomes de ^3H soit convertie en ^3He est appelé la demi-vie, elle vaut 12,32 ans.

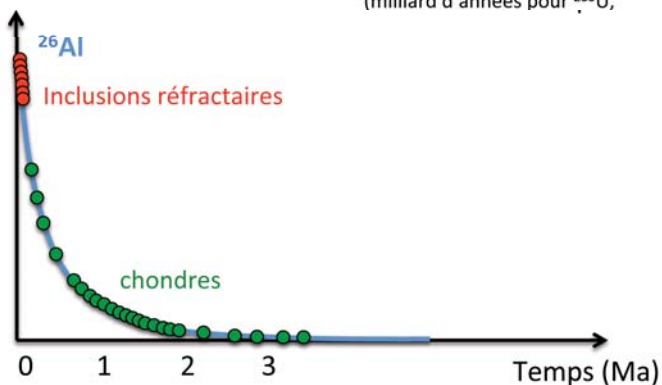
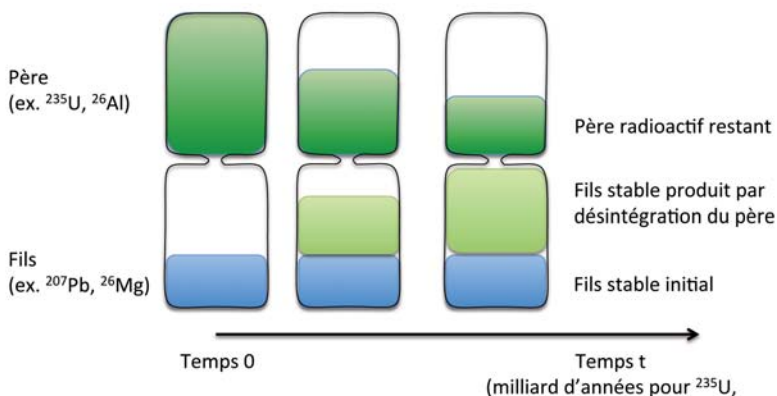
Les isotopes du plomb et l'âge du Système solaire

L'information la plus directe et la plus fondamentale que l'on puisse extraire des météorites à l'aide de leur composition isotopique est très probablement leur âge de cristallisation extrêmement ancien. Il existe de nombreux systèmes isotopiques permettant de mesurer précisément l'écoulement du temps grâce à la désintégration d'un isotope père radioactif en un isotope fils stable (fig. 2), le système uranium-plomb étant certainement le plus utilisé en géosciences pour dater la formation des roches. C'est un double chronomètre qui utilise la décroissance de ^{238}U en ^{206}Pb (demi-vie de 4,47 milliards d'années) conjointement à la décroissance de ^{235}U en ^{207}Pb (demi-vie de 704 millions d'années), tous deux par une chaîne d'émissions successives de noyaux d'hélium-4 (^4He).

C'est en 1956 que Clair Patterson publie pour la première fois l'âge du Système solaire mesuré à l'aide des isotopes du plomb dans la météorite de fer de Canyon Diablo (fig. 3), ramassée au fond du Meteor Crater en Arizona. Il obtient un âge de 4,55 milliards d'années avec une incertitude de 70 millions d'années. 56 ans après la publication de ce résultat majeur, les progrès de la mesure des isotopes du plomb ont permis d'établir que les inclusions réfractaires des météorites non différenciées sont les premières roches formées dans le Système solaire, il y a 4,567-4,568 milliards d'années (encadré 2). Étant les objets les plus anciens du Système solaire, leur instant de formation est pris comme temps zéro. L'incertitude sur cet âge est maintenant inférieure au million d'années. À l'exception des météorites martiennes et lunaires

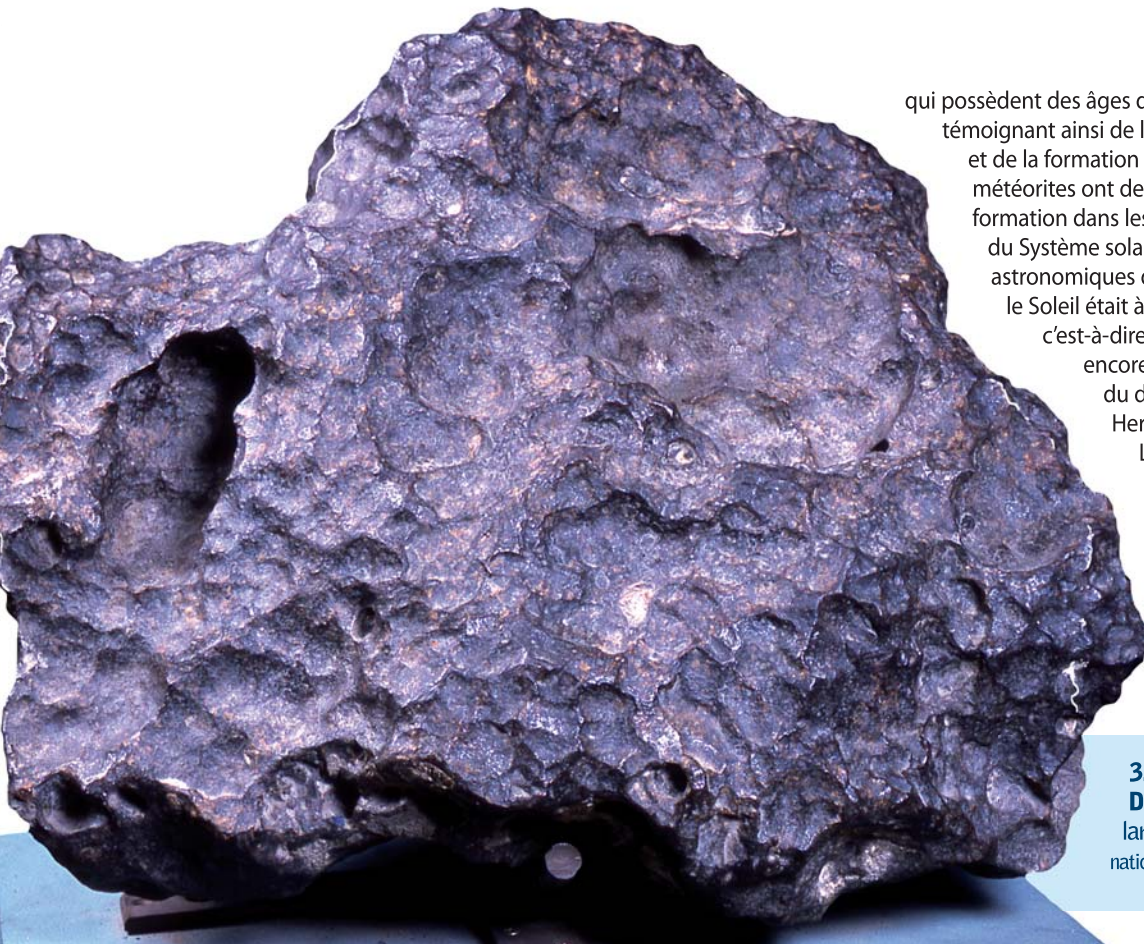


1. Météorite d'Allende. La photographie montre l'une des mille et une pierres trouvées aux abords du village d'Allende au Mexique en 1969 et résultant de la fragmentation du bolide dans l'atmosphère. La pierre montrée ici fait approximativement 9 cm de large. © Museum national d'histoire naturelle, Paris.



2. Principe de la datation à l'aide de la décroissance radioactive.

La période écoulée depuis la formation de l'objet peut être déterminée grâce à la quantité d'isotope fils (radiogénique) produit par désintégration du père tout en connaissant la période de désintégration (*i. e.* la demi-vie). Pour cela, il est nécessaire de connaître la quantité initiale de fils que l'on détermine à l'aide du rapport entre l'isotope fils et un autre isotope stable non radiogénique de l'élément fils. Pour un système à demi-vie comparable ou plus longue que l'âge du Système solaire (ex. ^{238}U), le père est toujours présent et peut être mesuré. Pour un système à demi-vie courte (ex. ^{26}Al), le père n'existe plus et il est nécessaire de connaître en plus les proportions père-fils initiales. La courbe du bas montre l'évolution de la quantité de ^{26}Al dans le Système solaire, depuis le temps 0 (formation des inclusions réfractaires) jusqu'au moment où la quantité de ^{26}Al devient trop faible pour être mesurée. Alors que la formation des inclusions réfractaires est un processus court, les chondres se forment sur un laps de temps plus long. La formation des chondres culmine 1 à 2 millions d'années après le temps 0, mais certains chondres dépourvus de ^{26}Al se forment plus tard (par exemple les chondres de la comète Wild-2).



qui possèdent des âges de cristallisation plus jeunes, témoignant ainsi de l'activité géologique de Mars et de la formation de la Lune, toutes les autres météorites ont des âges U-Pb en accord avec une formation dans les dix premiers millions d'années du Système solaire. Les observations astronomiques des étoiles jeunes indiquent que le Soleil était à cette époque une proto-étoile, c'est-à-dire une étoile jeune n'ayant pas encore atteint la séquence principale du diagramme couleur-luminosité de Hertzsprung-Russell, son état actuel. Le Soleil jeune était probablement entouré d'un disque de poussières et de gaz s'accrétant sur l'étoile comme on l'observe autour des étoiles T Tauri (étoiles jeunes de type solaire) grâce en

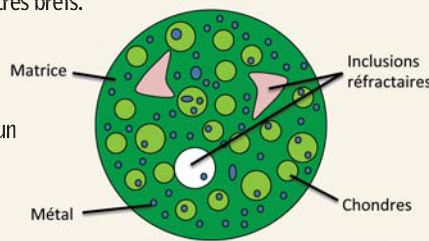
3. Météorite de fer de Canyon Diablo. Bloc d'environ 60 cm de large, soit 300 kg. © Muséum national d'histoire naturelle, Paris.

2. Les météorites et leurs composants

Les météorites peuvent être globalement séparées en deux grands groupes. On distingue d'une part les météorites issues de corps parents non différenciés, c'est-à-dire formés directement par agrégation de la poussière présente dans le disque protoplanétaire du Soleil jeune. Elles sont appelées **chondrites** car elles contiennent des chondres, des billes de roches fondues dans le vide par des événements de haute température (> 1800 K) très brefs. Elles contiennent également des inclusions réfractaires formées dans les régions internes chaudes du disque à une température de l'ordre de 1 500 à 1 700 K par condensation d'un gaz de composition chimique identique à celui de la photosphère du Soleil. Ces composants millimétriques à centimétriques sont cimentés dans une matrice non fondue de poussière micrométrique à nanométrique. Le métal des chondrites est présent dans la matrice et dans les chondres principalement, mais aussi dans certaines inclusions réfractaires. Les chondrites sont elles-mêmes divisées en plusieurs familles et sous-familles.

Le second grand groupe de météorites contient **les météorites issues de la fragmentation de corps différenciés**, c'est-à-dire ayant subi une ségrégation des roches et du métal en couches concentriques, une structure analogue à celle de la Terre avec un noyau métallique, un manteau et une croûte rocheuse, silicatée.

Au total, on compte actuellement plus de 50 000 météorites groupées par affinités minéralogiques, chimiques et isotopiques en près de 70 familles différentes. La plupart des météorites sont des fragments d'astéroïdes et sont des reliques des planétésimaux formés dans les premiers millions d'années du Système solaire, mais certaines météorites différenciées proviennent de la Lune et de Mars.

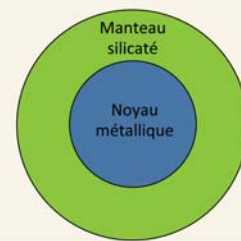


Météorites non différenciées

- Chondrites ordinaires
- Chondrites à enstatite
- Chondrites carbonées

Micrométéorites
Poussières cométaires

Matériaux de départ



Météorites différenciées

- Fers
- Mixtes
- Achondrites

Météorites planétaires
(Lune, Mars)

Evolution précoce des planètes

4. Disque protoplanétaire autour d'une étoile jeune de type solaire. Vue d'artiste. © Nasa.

particulier aux télescopes spatiaux comme *Hubble* (fig. 4). L'essentiel des matériaux planétaires se sont formés et accrétés au sein de ce disque protoplanétaire qui se dissipe au bout d'une dizaine de millions d'années. La méthode U-Pb est une mesure qui, du fait de demi-vies comparables à l'âge du Système solaire, est particulièrement adaptée à une datation absolue de sa formation. Cependant, ces longues demi-vies ne sont pas adaptées à la résolution fine des premières étapes d'évolution du Système solaire, et d'autres méthodes chronologiques spécifiques aux météorites ont été développées pour comprendre ces étapes en faisant appel à des radioactivités à courte période comme celles de l'aluminium-26 (^{26}Al) ou de l'hafnium-182 (^{182}Hf) décrites ci-dessous.

^{26}Al , du milieu interstellaire aux océans magmatiques

Les étoiles jeunes se forment par effondrement gravitationnel d'un cœur dense, une région très froide au sein d'un nuage moléculaire du milieu interstellaire. Le Soleil n'a probablement pas fait exception à la règle et, rapidement, les scientifiques ont cherché dans les météorites des traces de l'environnement galactique dans lequel le Soleil est né et des traces du mécanisme ayant déclenché l'effondrement du cœur dense parent du

Système solaire. Le Soleil est-il né en compagnie d'étoiles très massives de type O ou B? Dans quelle mesure l'explosion en supernova(e) de telles étoiles ayant une durée de vie très courte a-t-elle pu avoir un rôle dans la formation du Système solaire? Cette recherche a mené en 1977 une équipe sino-américaine à la mise en évidence d'aluminium-26 (^{26}Al) dans le Système solaire jeune.

^{26}Al est un radioélément à vie courte (demi-vie de 737 000 ans), produit efficacement lors de la nucléosynthèse stellaire et en plus faible quantité par irradiation par les rayons cosmiques. Il décroît en ^{26}Mg avec émission d'un positon. La mesure de deux isotopes stables du magnésium (^{26}Mg et ^{24}Mg) dans une inclusion réfractaire d'Allende, par Typhoon Lee et ses collaborateurs du California Institute of Technology, a révélé une corrélation directe entre le rapport $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ et le rapport Al/Mg, une observation qui traduit la présence de ^{26}Al dans l'inclusion au moment de sa formation dans une proportion de $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ par rapport au ^{27}Al stable. L'enrichissement en ^{26}Mg par rapport à sa valeur solaire normale s'explique alors par la décroissance de ^{26}Al présent à l'origine. De nombreuses études d'inclusions réfractaires ont par la suite montré la présence systématique de ^{26}Al au moment de leur formation et le rapport $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ initial du Système solaire est actuellement estimé à

$5,23 \cdot 10^{-5}$. Plusieurs modèles astrophysiques ont été proposés pour expliquer cette présence de ^{26}Al dans le Système solaire jeune, incluant la production dans différents types d'étoiles ayant pu ensemercer (ou déclencher?) sa naissance (supernova, étoile géante de la branche asymptotique du diagramme de Hertzsprung-Russell, étoile fugueuse supermassive de Wolf-Rayet...). Une production par des rayons cosmiques (galactiques et produits par le Soleil jeune alors 100 000 fois plus actif) a aussi été proposée, mais cette hypothèse ne permet pas de produire ^{26}Al en assez grande quantité. Un scénario récent de formation séquentielle d'étoiles propose que le Soleil soit une étoile de troisième génération, formée dans la coquille d'éjecta d'une supernova elle-même issue d'une seconde génération d'étoiles toutes formées suite à l'effondrement de la même région du nuage moléculaire parent...

La présence de ^{26}Al en abondance dans le Système solaire jeune a plusieurs implications extrêmement importantes: s'il est distribué de façon homogène dans le Système solaire (ce qui est maintenant admis par la plupart des cosmochimistes), sa courte demi-vie en fait un chronomètre pertinent pour dater les événements ayant eu lieu dans les 3 ou 4 premiers millions d'années après la formation des inclusions réfractaires. Ainsi, la mesure des isotopes du

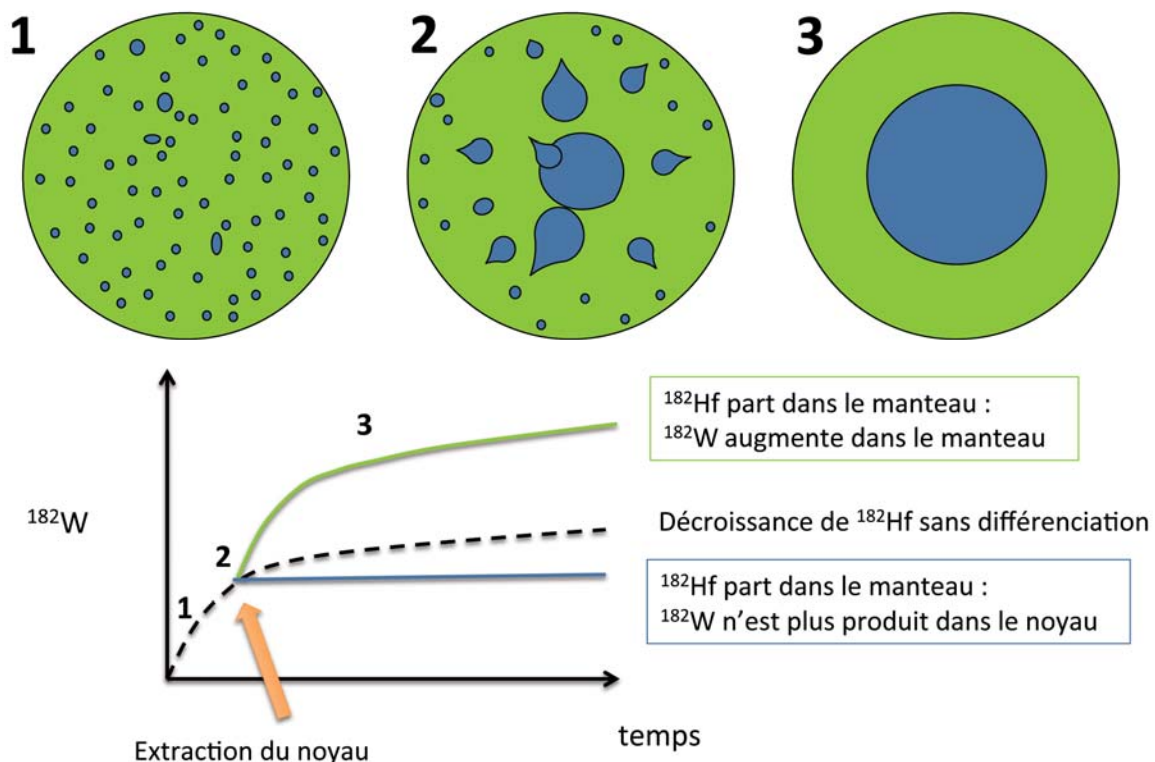


5. Noyau de la comète Wild-2 (5 km) vue par la sonde *Stardust*. Le 2 janvier 2004, *Stardust* croise la comète et collecte quelques milliers de micrograins à 240 km du noyau. La composition isotopique de ce matériau a été mesurée par différents laboratoires dès le retour de la sonde en janvier 2006. © NASA

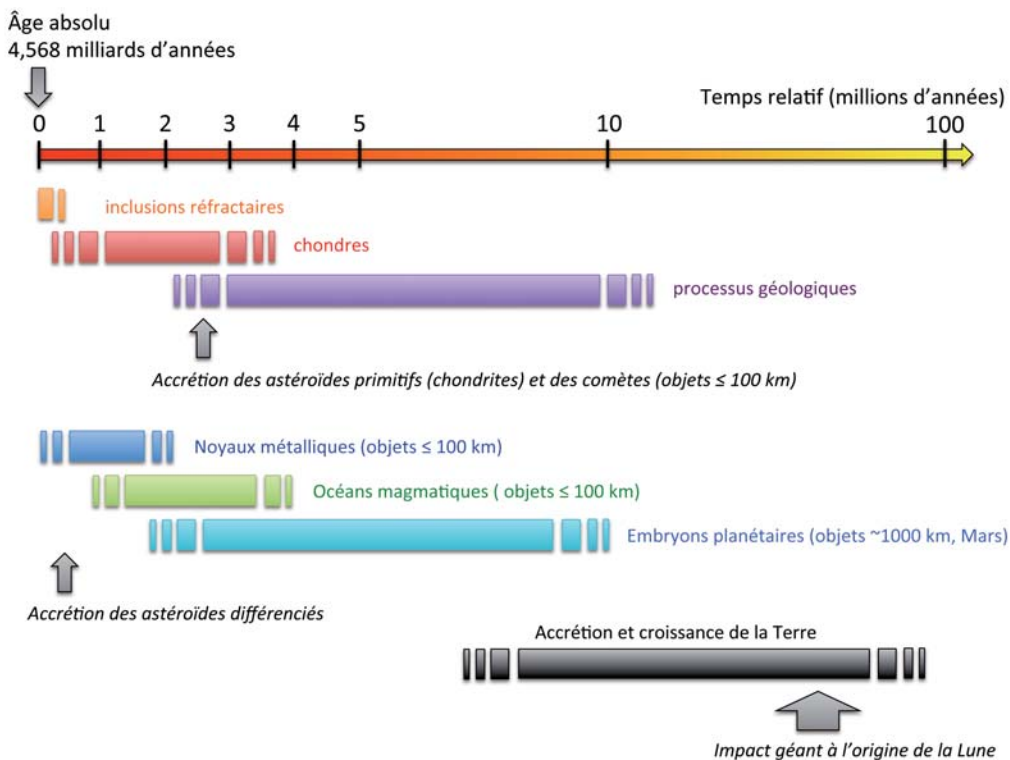
Mg montre que les chondres, les constituants principaux des chondrites, se sont formés 1 à 2 millions d'années après les inclusions réfractaires (voir la courbe fig. 2). Les fragments de chondres dépourvus de ^{26}Al découverts parmi les échantillons de la comète Wild-2 (fig. 5) ramenés par la mission *Stardust* en 2006 (en faisant ainsi un membre de la grande famille des chondrites) ont été formés dans les régions internes du disque protoplanétaire après la décroissance de ^{26}Al (plus de 3 millions d'années), ce qui indique que les comètes de la famille de Jupiter sont parmi les objets les plus jeunes accrétés dans le Système solaire. Par ailleurs, la datation des achondrites basaltiques à l'aide des isotopes du Mg révèle que ces roches ont cristallisé dans des océans magmatiques issus de la fusion pratiquement totale du manteau silicaté de micro-planètes différenciées pas plus tard que 3 à 4 millions d'années après la naissance du Soleil.

Hafnium, le père qui aime les roches, Tungstène, le fils qui aime le métal et les premiers noyaux planétaires

La chaleur dégagée par la décroissance de ^{26}Al dans les roches est le moteur principal de la fusion des roches dans les micro-planètes de plus d'une dizaine de km de diamètre, les planétésimaux. Les premiers planétésimaux formés, riches en ^{26}Al , ont vu leur température interne croître très vite jusqu'au point de fusion du fer, qui a alors pu percoler par densité et s'accumuler au cœur des planétésimaux, leur donnant ainsi une structure en couches, analogue à celle de la Terre avec un noyau métallique et un manteau rocheux silicaté (fig. 6). Ce scénario a trouvé une confirmation éclatante avec le développement de la radiochronométrie hafnium-tungstène. ^{182}Hf se transforme en ^{182}W , stable, avec une demi-vie de 8,9 millions d'années. L'affinité de l'hafnium pour les roches silicatées (on dit que c'est un élément lithophile) et l'affinité du tungstène pour le métal (on dit que c'est un élément sidérophile) font du système Hf-W un traceur idéal pour dater le moment auquel le noyau métallique s'est séparé du manteau silicaté lors de la différenciation planétaire (fig. 6).



6. Schéma de principe de la ségrégation du noyau au cours de la différenciation planétaire et de sa datation par la méthode Hf-W. Au cours de l'étape 1, la roche non différenciée contient la totalité de l'hafnium et du tungstène du système. Lorsque la température atteint le point de fusion du fer, le noyau se forme rapidement par percolation par densité (étape 2, point d'intersection sur la courbe). Par la suite (étape 3), Hf part dans le manteau et W dans le noyau, le ^{182}W produit par décroissance de ^{182}Hf (^{182}W) n'est plus produit que dans le manteau, le rapport isotopique de W cesse de croître dans le noyau.



Bien que la présence de ^{182}Hf dans le Système solaire précoce soit connue depuis le début des années 1990, c'est en 2005 que Thorsten Kleine et ses collaborateurs de Mayence et Cologne en Allemagne datent pour la première fois simultanément des météorites de fer et des inclusions réfractaires en mesurant les isotopes du W. Ils montrent alors que les météorites de fer sont les objets planétaires les plus anciens du Système solaire. Elles sont issues de planétésimaux ayant acquis un noyau dans les deux premiers millions d'années suivant la formation des inclusions réfractaires, impliquant l'accrétion de corps de rayon compris entre 10 et 100 km au cours du premier million d'années, un processus bien expliqué par une accrétion « boule de neige » conduisant à la formation d'embryons planétaires de la taille de Mars ou de la Lune au bout de quelques millions d'années. La détermination précise récente du rapport élémentaire Hf/W des météorites martiennes suggère ainsi que Mars est un de ces embryons planétaires, qui aurait acquis l'essentiel de sa masse en moins de 5 millions d'années, en accord avec les simulations dynamiques qui suggèrent que la migration de Jupiter a pu empêcher Mars de finir sa croissance. Les datations Hf-W ont révolutionné la chronologie du Système solaire puisqu'elles ont montré que les corps les plus évolués sont finalement les plus précoces alors que les corps les plus primitifs sont les plus tardifs (fig. 7)!

La cosmochimie isotopique, une science d'avenir

De nombreux chronomètres isotopiques qui n'ont pas été abordés ici ont permis d'apporter d'autres précisions au scénario expliqué dans ses grandes lignes (comme par exemple ^{53}Mn ou ^{129}I). L'étude isotopique des reliques de la naissance de notre Système solaire est une science qui a déjà contribué à de nombreuses découvertes, et on pourrait se demander si une telle approche sera encore utile une fois l'exploration de tout le tableau périodique des éléments terminée. Néanmoins, l'étude isotopique de la matière extraterrestre a probablement encore de beaux jours devant elle. Le raffinement constant des méthodes de mesure, qui amène à une précision sans cesse croissante, a parfois des conséquences inattendues pouvant conduire à renverser une théorie, comme l'a par exemple montré l'amélioration des mesures isotopiques du tungstène. La résolution spatiale croissante des analyses est aussi un facteur de progrès et de découvertes.

De plus, si chaque météorite est un objet unique qui apporte son lot d'informations sur le Système solaire jeune, l'utilisation de méthodes isotopiques bien rodées permet une révolution scientifique à pratiquement chaque retour d'échantillons spatiaux, comme l'ont montré les résultats des missions *Stardust* (comète Wild-2), *Genesis* (vent solaire) ou dernièrement *Hayabusa* (astéroïde Itokawa). Il reste à souhaiter que

7. Chronologie de formation du Système solaire telle qu'elle est déduite des mesures isotopiques dans les météorites et les matériaux planétaires.

Les processus de formation planétaire sont extrêmement rapides, la vitesse de formation d'une planète est typiquement du même ordre de grandeur que la formation d'une chaîne de montagnes sur Terre (ex. l'âge des Alpes est d'environ 35 millions d'années). Ainsi, la radioactivité de l'iode-129 (^{129}I) qui décroît en xénon-129 (^{129}Xe) permet d'évaluer l'âge de l'atmosphère terrestre *i. e.* la fin de la formation de la Terre, un âge récemment réévalué à environ 50 millions d'années. Les estimations par la méthode Hf-W de l'âge de l'impact géant ayant donné naissance à la Lune varient de 30 à 80 millions d'années après le temps 0.

les missions de retours d'échantillons redeviennent une priorité dans les années à venir tant leur valeur scientifique est importante. Enfin, les signatures isotopiques observées restent très souvent incomprises ou mal comprises du fait de la méconnaissance des processus astrophysiques en jeu, et la compréhension des objets naturels ne pourra se faire qu'avec un couplage étroit avec l'expérimentation en laboratoire et la modélisation astrophysique. **J. Aléon ■**

PUBLICATIONS MAJEURES

1956

C. C. Patterson, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, mesure l'âge Pb-Pb de la météorite de fer de Canyon Diablo.

1977

T. Lee *et al.*, *Astrophysical Journal*, mettent en évidence la présence de ^{26}Al dans les inclusions réfractaires d'Allende.

2005

T. Kleine *et al.*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, mesurent l'âge Hf-W du début de la différenciation planétaire.