

surface laisse échapper de la chaleur sous forme de rayonnement vers l'espace.

En prenant en compte cette compétition entre production et perte de chaleur, ainsi que la courte demi-vie de l'aluminium 26, nous avons estimé la taille du planétésimal qui a donné naissance à Allende. Pour accumuler assez d'énergie et atteindre la température de fusion, le corps aurait eu au moins 10 kilomètres de rayon (peut-être jusqu'à 200 kilomètres) et se serait formé en seulement 2 millions d'années après la naissance du Système solaire.

Jusqu'alors, la plupart des chercheurs envisageaient que les planétésimaux fondaient intégralement ou restaient entièrement primitifs. Mais Ben Weiss et moi avons suggéré une configuration hybride formée d'un noyau fondu et d'une écorce externe non fondue préservant le matériau le plus primitif du Système solaire. Cette structure était celle qui expliquait le mieux les caractéristiques de la météorite Allende: sa composition de matériau primitif non altéré par un chauffage important et les indices de la présence d'un champ magnétique.

La surface primitive du planétésimal n'a pas fondu car l'espace environnant la refroidissait et parce que la poussière froide du disque protoplanétaire continuait à s'y agglomérer au fil du temps. N'ayant pas été touchée par le

Il semble aujourd'hui que ces planétésimaux hybrides étaient, en réalité, très communs. Les chercheurs ont trouvé pas moins de quatre autres planétésimaux précurseurs de météorites qui auraient abrité un noyau à dynamo magnétique. Par ailleurs, cette idée est confortée par le fait que d'autres sources possibles de magnétisation ont été écartées: Allende et ses homologues n'ont pas été magnétisées par un champ produit dans le Soleil, ni par le disque de poussière lui-même, ni par des panaches transitoires dus à des impacts. Si le Système solaire des tout débuts était vraiment peuplé de centaines ou même de milliers de planétésimaux différenciés, filant à toute allure et en tous sens et générant une chaleur intense et des dynamos magnétiques comme de minuscules Terres, cela implique que tout le Système solaire nouveau-né renfermait beaucoup plus de chaleur que les géologues ne le pensaient.

DES COLLISIONS RÉVISÉES

D'autres idées ont également affaibli la représentation classique d'une croissance linéaire des planètes. Pendant des années, pour des raisons de simplicité et de faisabilité numérique, toutes les simulations de formation des planètes supposaient que dans chaque collision de planétésimaux, tout le matériau des deux protagonistes se combinait pour former un nouvel objet plus gros. Cette fusion totale était la règle même quand les planétésimaux se formaient à partir de la poussière. Mais récemment, Erik Asphaug, de l'université d'État de l'Arizona, a proposé une nouvelle modélisation du processus de collision. Selon ses résultats, certaines collisions seraient constructives et produiraient des objets plus massifs, tandis que d'autres impacts seraient destructeurs: l'impacteur arracherait du matériau à l'objet cible et poursuivrait sa route en provoquant d'autres dégâts plus loin.

Dans ce contexte, c'est seulement lorsque le Système solaire a atteint l'âge d'une dizaine de millions d'années que les choses ont commencé à se stabiliser, des objets étant devenus assez gros pour le rester et survivre. En effet, à mesure que les planétésimaux sont entrés en collision et ont formé des embryons planétaires plus gros, leur masse et donc leur gravité ont augmenté. À partir d'une certaine taille, la gravité était suffisante pour qu'à chaque fois que l'orbite d'un embryon planétaire croisait celle d'un autre objet, ce dernier était soit attiré et accreté en vertu de l'attraction gravitationnelle soit projeté sur une autre orbite.

Ainsi, les planètes en cours de croissance ont commencé à nettoyer leurs orbites, une orbite bien dégagée constituant l'un des critères pour accéder au rang de planète. Dès lors, les corps de petite taille ont eu de moins en moins d'espace où occuper des orbites stables et non perturbées par les planètes de plus en plus imposantes; c'est >

Le Système solaire jeune renfermait plus de chaleur que ne le pensaient les géologues

chauffage, l'écorce a conservé une trace du champ magnétique produit par la partie interne de la structure du planétésimal, le noyau de métal fondu et sa dynamo magnétique.

Nous ne sommes pas les premiers à avoir envisagé une différenciation partielle. Le géologue John Wood avait proposé une telle structure dans sa thèse au MIT, en 1958. Mais personne n'avait poussé l'hérésie jusqu'à suggérer qu'Allende, l'archétype des météorites primitives non fondues, aurait pu voir le jour dans une telle structure hybride, ou que celle-ci était fréquente, et même déterminante, aux débuts du Système solaire.

ainsi que la ceinture d'astéroïdes est devenue l'un de ces rares refuges.

Nous avons maintenant une meilleure idée de comment les planètes se sont formées, mais certaines questions restent en suspens. Par exemple, Ben Weiss, Erik Asphaug, moi-même et d'autres voulons comprendre comment, précisément, la structure et la composition de la Terre ont émergé dans cet environnement énergétique et chaotique.

Il nous est impossible (contrairement à ce qui est suggéré dans certains films de science-fiction à succès ou dans le célèbre roman de Jules Verne) d'aller regarder de près ce qui se passe au centre de la Terre. Le noyau est trop profond et les pressions y sont trop élevées pour y prélever le quelconque échantillon. Mais il est possible qu'un certain astéroïde, vestige d'un ancien planétésimal, soit un substitut intéressant. Il y a près de quatre ans, avec plusieurs de mes collègues, nous avons commencé à concevoir une mission spatiale pour explorer cette possibilité.

Nous nous sommes réunis dans une salle du laboratoire JPL de la Nasa, conçue pour favoriser la créativité en mettant à disposition du matériel de dessin et de construction: carton, roues, fil de fer, Legos, papier, marqueurs, mousse... Nous voulions explorer un objet qui aurait le potentiel de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses. Et nous avons convenu que la meilleure destination était un monde fait de métal: l'astéroïde métallique Psyché.

MISSION VERS PSYCHÉ, UN MONDE MÉTALLIQUE

Les météorites ferreuses qui arrivent sur Terre sont souvent altérées lors de leur entrée dans l'atmosphère. Il serait donc intéressant d'aller voir un astéroïde intact de près. Psyché est, avec ses 200 kilomètres de diamètre, l'un des plus gros astéroïdes connus. Il occupe une orbite située entre Mars et Jupiter. Toutes les informations dont nous disposons (grâce aux ondes qui se réfléchissent sur l'objet et captées par les radiotélescopes au sol) indiquent qu'il est constitué presque exclusivement de fer et de nickel. Psyché aurait l'aspect d'un noyau planétésimal mis à nu, lors d'une de ces collisions non frontales qui perturbaient les objets aux jeunes temps du Système solaire.

En scrutant de près Psyché, nous pourrions déterminer l'orientation des particules à l'intérieur de l'astéroïde: telles de minuscules aiguilles de boussole, elles nous révéleraient s'il recelait une dynamo magnétique. Il pourrait aussi subsister quelques vestiges de son extérieur rocheux pour nous dire à quoi ressemblait le manteau profond des planétésimaux. S'il y a eu des impacts de surface sur le métal à nu, nous pourrions comparer leurs formes à celles des cratères d'impact des astéroïdes rocheux ou glacés.



Chacune des personnes présentes dans la salle de réunion a apporté son expertise et des compétences bien précises: Ben Weiss pour la mesure des champs magnétiques dans les météorites, William Bottke pour la dynamique des corps en orbite, Erik Asphaug pour les effets des collisions, Bruce Bills pour le calcul du champ gravitationnel des corps célestes, Daniel Wenkert pour la gestion de données et des opérations, Damon Landau pour le calcul des trajectoires. John Brophy organisait nos réunions et j'apportais ma connaissance des compositions, de la fusion, de la solidification et des processus de différenciation. Nous étions unis par notre enthousiasme et notre passion pour l'exploration: l'humanité n'a jamais visité un corps métallique, et nous ne savons même pas à quoi Psyché ressemble exactement.

Plusieurs années ont passé depuis cette réunion, et nos jeux avec de la mousse et des pièces de Lego se sont concrétisés en un projet porté par une équipe d'environ 75 personnes. Le fruit de notre travail est une petite sonde, alimentée par une combinaison de cellules solaires, avec un propulseur ionique. L'engin transportera un magnétomètre pour détecter les champs magnétiques, un spectromètre à rayons gamma pour identifier les éléments composant l'astéroïde et deux caméras.

En janvier 2017, notre projet a été sélectionné par la Nasa pour intégrer le programme Discovery, qui finance de petites missions d'exploration du Système solaire aux objectifs très ciblés (à l'exception du satellite *Kepler* qui a traqué des exoplanètes en orbite autour d'autres étoiles). Le lancement était initialement prévu pour 2023, mais il a été avancé à 2022 afin de profiter d'une assistance gravitationnelle de la planète Mars. La sonde devrait alors se placer autour de l'astéroïde Psyché en 2026, pour 21 mois d'observations scientifiques. Et si tout va bien, nous aurons alors sous nos yeux les images d'un étrange vestige de la construction planétaire, témoin d'une histoire chaotique et bien moins tranquille que prévue. ■

En 2026, une sonde se mettra en orbite autour de l'astéroïde Psyché (vue d'artiste). Ses instruments de mesure analyseront le champ magnétique et la composition de ce corps qui est probablement le vestige métallique d'un noyau de planétésimal. Cette mission spatiale devrait nous renseigner sur la différenciation au sein des planètes et notamment sur le noyau terrestre, qui est inaccessible.

BIBLIOGRAPHIE

L. T. Elkins-Tanton et B. P. Weiss (éd.), **Planetesimals. Early Differentiation and Consequences for Planets**, Cambridge University Press, 2017.

K. Batygin et al., **Le Système solaire, une exception née du chaos**, *Pour la Science*, n° 473, mars 2017.

E. Asphaug, **Astéroïdes et comètes: des tas de cailloux**, *Pour la Science*, n° 273, juillet 2000.