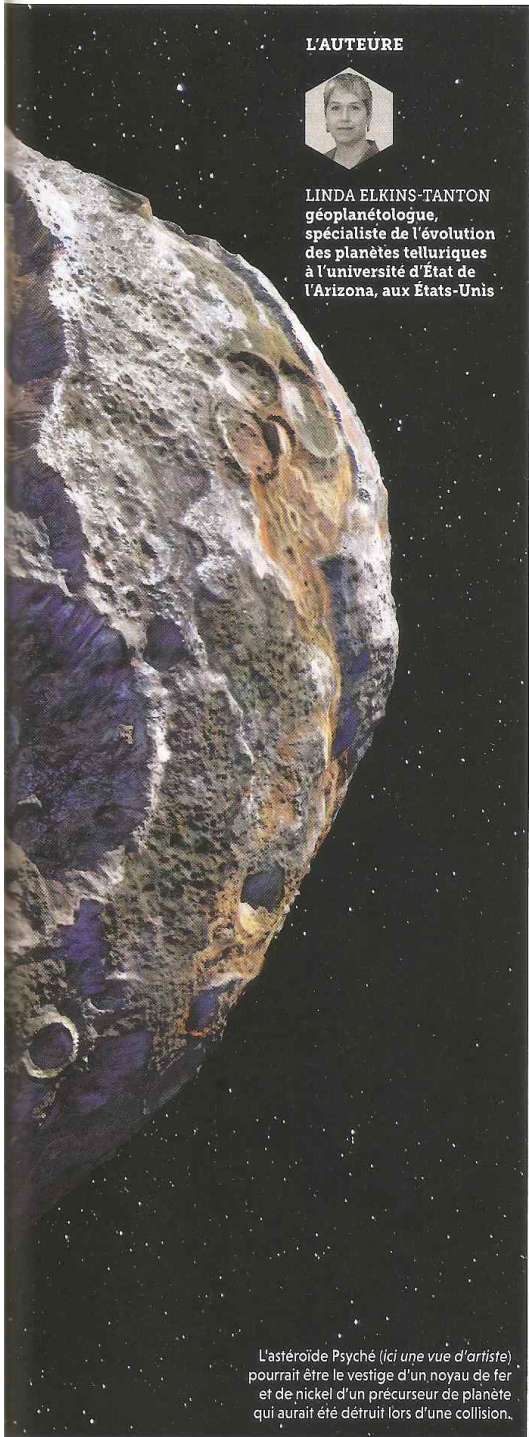




La naissance fulgurante des planètes

Une naissance lente et progressive : tel était le scénario des origines pour les planètes du Système solaire. Mais des études récentes, notamment de la météorite Allende, racontent une autre histoire, bien plus rapide et agitée.



L'AUTEURE



LINDA ELKINS-TANTON
géoplanétologue,
spécialiste de l'évolution
des planètes telluriques
à l'université d'État de
l'Arizona, aux États-Unis

L'astéroïde Psyche (ici une vue d'artiste) pourrait être le vestige d'un noyau de fer et de nickel d'un précurseur de planète, qui aurait été détruit lors d'une collision.

© Avec l'aimable autorisation de l'ASU et de Peter Rubin/Iron Rooster Studios

L'ESSENTIEL

> Jusqu'il y a tout juste dix ans, les astrophysiciens pensaient que le Système solaire s'était formé suivant un processus de croissance lent et régulier, allant de petites particules de poussière aux grosses planètes.

> Des analyses récentes de météorites, vestiges de la naissance du Système solaire, indiquent au contraire

que sa formation a été le fruit d'un processus chaotique et rapide impliquant de nombreuses collisions.

> Pour vérifier ce scénario, une sonde partira en 2022 vers Psyche, un étrange astéroïde entièrement métallique qui serait le fragment dénudé d'un ancien noyau planétaire.

A lors que je sortais d'une salle de cours au MIT (Institut de technologie du Massachusetts), où je venais de discuter avec les étudiants de la façon dont se forment les planètes, mon collègue Ben Weiss m'a invitée dans son bureau. Spécialiste du magnétisme dans les roches spatiales, il voulait me montrer les nouvelles données concernant l'un de ces cailloux, une météorite du nom d'Allende. Il était très excité, car ces résultats avaient le potentiel de chambouler presque tout ce que les géologues planétaires pensaient savoir des débuts du Système solaire.

Cet épisode remonte à 2009 et, cet automne-là, l'équipe de Ben Weiss a montré qu'Allende (qui s'est écrasée au Mexique en 1969 et qui contient certains des plus vieux matériaux connus du Système solaire) portait dans sa structure des signes de l'existence d'un champ magnétique ancien. Cette découverte était une surprise, car les astrophysiciens pensaient que les champs magnétiques étaient l'apanage des grandes planètes, comme la Terre, où se manifeste un effet de dynamo magnétique. Ce dernier est dû aux mouvements turbulents de convection du métal chaud et liquide à l'intérieur de ces planètes. Or Allende était probablement un fragment d'un planétésimal (un embryon de planète). Et d'après ce que l'on pensait à l'époque, un planétésimal ne pouvait pas atteindre une température suffisante pour que le métal qu'il contenait puisse fondre. Comment était-il alors possible, se demandait Ben Weiss, que cet ancien vestige du Système solaire ait produit une dynamo magnétique?

Mes étudiants venaient de m'assaillir de questions sur l'évolution planétaire m'incitant à revoir certaines vérités enseignées dans les manuels, et il se trouvait que j'avais les grandes lignes d'une idée nouvelle qui pouvait aider Ben Weiss. Je me suis approchée de son tableau blanc, et j'ai commencé à esquisser mon raisonnement.

On sait depuis longtemps que les planétésimaux contenaient des éléments radioactifs, des atomes instables de courte durée de vie, notamment de >

> l'aluminium 26. Lorsque celui-ci se désintègre, il libère un peu d'énergie, la même qui a servi de source de chaleur pour les planétésimaux. Or si l'on suppose que la chaleur produite par l'aluminium 26 a suffi pour que le planétésimal fonde naturellement depuis l'intérieur, les conséquences sont nombreuses pour l'évolution du corps.

Le métal liquide contenu dans le planétésimal se serait alors séparé du reste de la roche, aurait migré vers le centre du corps (car le métal est plus dense que la roche) et y aurait formé un noyau liquide. Celui-ci, mû par la rotation du caillou spatial, aurait engendré une dynamo magnétique. Entre-temps, les températures glaciales de l'espace environnant auraient refroidi l'extérieur du planétésimal. Et des roches et des poussières froides issues du disque primitif du Système solaire auraient continué à s'ajouter à cette écorce non fondue.

DAVANTAGE D'ALUMINIUM RADIOACTIF

Ainsi, les premières briques du Système solaire, les planétésimaux, auraient contenu plus d'énergie qu'on ne le supposait dans le scénario classique de formation des planètes. Ce processus était-il à revoir? A-t-il été beaucoup plus rapide qu'on ne le pensait, de sorte que l'aluminium 26 était encore présent en abondance dans les planétésimaux? Dans ce cas, cet isotope radioactif a constitué une source de chaleur importante, bien plus que si ces corps s'étaient formés en un temps plus long.

Les manuels décrivent encore souvent la formation du Système solaire comme un processus calme et ordonné qui a débuté il y a 4,567 milliards d'années. L'histoire commence avec un nuage de gaz et de poussière en rotation qui s'est aplati en un disque autour d'une jeune étoile en phase de croissance. Ce mélange de gaz et de poussière a formé une multitude de petits agglomérats dont la taille a peu à peu augmenté jusqu'à atteindre des dizaines ou des centaines de kilomètres de diamètre. En s'entrechoquant, ces planétésimaux se sont agrégés et ont donné naissance à des corps plus importants, à peu près de la taille de Mars, nommés embryons planétaires.

C'est seulement à partir de cette étape que la température dans ces planètes en devenir a commencé à augmenter notablement. En grandissant, ces embryons ont acquis une gravité suffisante pour nettoyer leurs orbites des débris environnants (soit en les absorbant, soit en les éjectant) et sont ensuite entrés en collision les uns avec les autres pour donner naissance aux planètes. Finalement, l'intérieur de ces planètes s'est réorganisé en deux parties distinctes: le noyau métallique, liquide et turbulent, et un manteau de silicates fondu, océan de magma qui allait se refroidir progressivement.

Cette mécanique bien huilée correspond à l'ancienne vision des choses. Mais, alors que Ben Weiss et moi commençons à étudier Allende et le rôle de l'aluminium 26, d'autres données indiquaient déjà que le Système solaire primordial avait été, en réalité, le théâtre de changements rapides et violents. De nos jours, cette séquence sage où l'on passe, dans l'ordre, de la poussière aux cailloux, puis aux planétésimaux, aux embryons et, enfin, aux planètes, est en train d'être supplantée par un autre scénario. La période de formation des planétésimaux,

Des planètes se sont formées, déchiquetées et reconstruites en moins de 10 millions d'années

dont on supposait il y a encore peu qu'elle s'étirait sur des centaines de millions d'années, aurait duré seulement 3 millions d'années.

À cette fenêtre de temps très réduite, il fallait ajouter le fait que si les petits composants initiaux renfermaient davantage d'énergie (comme l'énergie apportée par la radioactivité de l'aluminium et les premières collisions entre planétésimaux) qu'on ne le pensait, la différenciation en un noyau et un manteau se serait faite sans attendre. Ainsi, des planétésimaux relativement petits ont pu subir des processus que l'on croyait auparavant réservés aux planètes: fusion et dégazage, apparition d'une dynamo magnétique, volcanisme...

En outre, de nouvelles simulations indiquaient que les corps du Système solaire n'ont pas fait qu'augmenter en taille au cours du temps: souvent, lors des collisions, de gros objets ont éclaté pour en donner d'autres plus petits. En effet, si des masses sphériques de taille planétaire se sont formées au cours de ces premiers temps par accrétion de petits corps, par la suite, des collisions entre planétésimaux les ont parfois dénudés ou détruits. Leurs débris ont ensuite heurté d'autres corps sphériques et s'y sont agglomérés pour, finalement, leur conférer une taille de planète. Des planètes ont ainsi pu se former, se déchiqueter et se reconstruire en moins de 10 millions d'années.

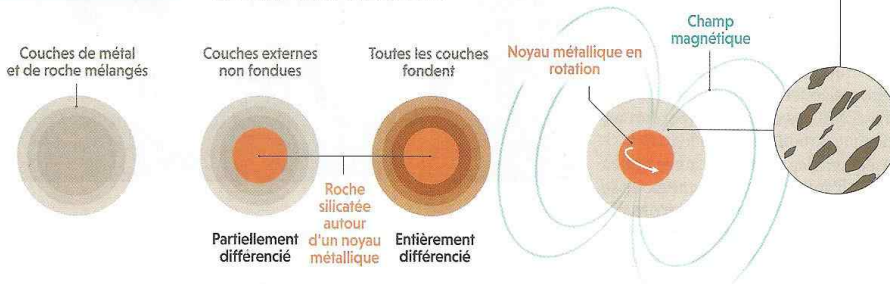
Si les planétologues ont réussi à assembler cette nouvelle vision d'un jeune Système solaire >

LA CONSTRUCTION DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE

Les planètes telles que la Terre et ses voisines ont commencé à se former quand le nuage de gaz et de poussière entourant le Soleil a constitué des grumeaux, les planétésimaux. On a longtemps considéré que ces corps étaient des graines de planète en devenir, qui accumulaient progressivement de la matière. Mais les chercheurs pensent aujourd'hui qu'ils s'entrechoquaient avec violence en tous sens et que ces processus énergétiques ont donné rapidement naissance aux planètes.

Les grains métalliques d'une couche externe fondue pointent dans la même direction que le champ magnétique et conservent la même orientation une fois que la dynamo s'est arrêtée et que la couche externe s'est refroidie.

À L'INTÉRIEUR D'UN PLANÉTÉSIMAL



PLANÉTÉSIMAL NON DIFFÉRENCIÉ

Un tel corps, d'un diamètre d'une dizaine à quelques centaines de kilomètres et une structure en oignon, contient des éléments radioactifs qui réchauffent son intérieur sans le fondre.

PLANÉTÉSIMAUX DIFFÉRENCIÉS

Si les éléments radioactifs créent davantage de chaleur, le corps fond de l'intérieur vers l'extérieur. Le métal fondu (fer et nickel) coule vers le centre. Parfois, l'écorce externe n'est pas assez chaude pour se différencier. Tous les planétésimaux différenciés ont un noyau de métal liquide.

FORMATION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Le métal en mouvement devient une dynamo magnétique, ce qui se produit quand les planétésimaux et leur noyau de métal liquide sont en rotation. Ces noyaux génèrent des champs magnétiques pointant dans des directions particulières, tout comme celui de la Terre.

DES PLANÉTÉSIMAUX AUX PLANÈTES

ACCRÉTION

Aux débuts du Système solaire, les particules de poussière s'entrechoquent et s'agglutinent en planétésimaux pouvant atteindre des centaines de kilomètres de diamètre. En à peine 500 000 ans, l'intérieur de certains de ces corps se différencie partiellement ou totalement.

IMPACTS

Dans cette période initiale de formation du Système solaire, les planétésimaux, nombreux, entrent souvent en collision en formant des corps de taille supérieure, mais certains de ceux-ci se scindent en plus petits débris.

EMBRYONS

Après de nombreuses collisions, certains planétésimaux ont assez grossi (leur diamètre atteint des milliers de kilomètres) pour former ensuite des embryons planétaires, dont la taille avoisine celle de Mars. Leur intérieur est différencié.

PLANÈTES

Quand les embryons sont assez gros, leur gravité perturbe la matière environnante. Parfois, des débris les heurtent. Les impacts géants créent de vastes océans de magma et libèrent des gaz qui forment une atmosphère primitive. D'autres fois, la gravité dévie les corps voisins vers des orbites lointaines. Ces gros objets dont l'orbite est nettoyée gagnent enfin leur statut de planète.

Aujourd'hui, l'astéroïde Psyché est peut-être le vestige d'un noyau métallique de planétésimal, mis à nu par des collisions. Psyché est la cible d'un projet de mission spatiale d'exploration.

> très actif, c'est en grande partie grâce à l'aide d'outils permettant de calculer l'âge des météorites ainsi que celui de nuages de poussière planétaires (semblables à celui du Système solaire primordial) ailleurs dans le cosmos.

Au moyen de télescopes toujours plus puissants, on a observé la croissance de jeunes étoiles dans d'autres parties de la Voie lactée; et dans certains cas, on a scruté le disque de gaz et de poussière à partir duquel l'étoile et ses planètes se développent. En estimant l'âge des étoiles autour desquelles gravitent des planètes, et en comparant ces mesures avec celles relatives aux étoiles entourées seulement de disques de poussière et de gaz, les chercheurs ont déterminé que ces disques ne perdurent, en moyenne, que 3 millions d'années.

Par conséquent, les planétésimaux n'ont eu que 3 millions d'années en moyenne pour se développer. La poussière et le gaz qui n'ont pas contribué à la formation de ces corps ont été soit happés par l'étoile soit dispersés dans l'espace interstellaire. Il ne restait alors plus aucun matériau disponible pour la construction planétaire. Les théoriciens pensaient que le processus d'accrétion avait duré des centaines de millions d'années: on peut dire que celui-ci a connu un sérieux coup d'accélérateur!

D'autres voies de recherche ont livré des échelles de temps comparables. Depuis une quinzaine d'années, les scientifiques ont développé des instruments capables d'identifier les éléments contenus dans les roches spatiales et estimer leur concentration avec une précision de quelques parties par million, voire mieux. Comme nous connaissons bien les temps que mettent les éléments radioactifs à se désintégrer, nous pouvons déterminer quand les planètes et les planétésimaux ayant perdu ces fragments se sont formés et ont subi des transformations.

Ainsi, les équipes d'Alex Halliday, aujourd'hui à l'université d'Oxford, de Thorsten Kleine, à l'université de Münster, et bien d'autres ont alors commencé à analyser des échantillons de diverses météorites. Ces chercheurs ont montré que des planétésimaux se sont formés dans les premiers millions d'années ayant suivi le début du refroidissement du disque de poussière, que de nombreuses planètes telluriques seraient nées dans les dix premiers millions d'années, et que même la Terre s'était probablement pour l'essentiel constituée et différenciée en un noyau et un manteau en quelques dizaines de millions d'années.

Cette chronologie a été déterminée en utilisant l'horloge que constitue la désintégration des éléments radioactifs. Dans sa version la plus simple, un élément instable se désintègre en un élément stable suivant une loi bien connue. En comparant les quantités de ces deux éléments présentes aujourd'hui dans un



échantillon, on mesure depuis quand ces horloges « tournent ». Les météorites datées de cette façon proviennent de morceaux d'astéroïdes tombés sur Terre, qui sont eux-mêmes des vestiges des planétésimaux primitifs.

Une application bien connue de ces horloges est la datation de la formation du noyau terrestre. L'un des isotopes radioactifs du hafnium a une grande affinité pour les minéraux silicatés et est resté préférentiellement dans le manteau lorsque celui-ci et le noyau se sont différenciés. Mais l'isotope de hafnium se désintègre en un isotope du tungstène qui se combine facilement avec les métaux dont est constitué le noyau planétaire. Cette désintégration se produit à un rythme régulier: la moi-

La météorite Allende est de type chondrite carbonée. Sa matrice gris foncé contient des chondres de couleur claire et des inclusions blanches de calcium-aluminium. Les chondres et les inclusions sont datés d'environ 4,567 milliards d'années. Ils correspondent aux plus vieux matériaux connus du Système solaire et déterminent l'âge de ce dernier.

En grossissant, les petits agrégats de poussière finissent par atteindre la barrière du mètre

tié d'une quantité donnée de hafnium se transforme en tungstène en 9 millions d'années. Ainsi, lors de la différenciation, les métaux ont emporté le tungstène déjà formé par la désintégration d'une partie du hafnium. Après la formation du noyau, les atomes de



Coupe d'un échantillon de la météorite Allende, observée au microscope en lumière polarisée. L'étude du matériau de la météorite a révélé des traces d'un champ magnétique dont était doté le planétésimal parent.

hafnium restant dans le manteau ont continué à se désintégrer en tungstène. En mesurant les concentrations de hafnium et de tungstène restés dans le manteau, on a pu estimer que la formation du noyau terrestre s'est achevée environ 30 millions d'années après la naissance du Système solaire.

De la même façon, des mesures isotopiques réalisées sur des météorites ferreuses ont montré qu'elles provenaient d'objets formés dans les 500 000 ans qui ont suivi les premières condensations de gaz et de poussière du disque protoplanétaire. Si les météorites ferreuses sont des fragments du noyau de planétésimaux qui ont volé en éclats à la suite d'impacts, cela voudrait dire que les planétésimaux ont effectivement dû se former, fondre et créer des noyaux de fer dans cette minuscule fenêtre temporelle.

FORMATION PLANÉTAIRE ACCÉLÉRÉE

Des données expérimentales montrant clairement que le Système solaire s'est formé beaucoup plus vite qu'on ne le pensait, les spécialistes devaient désormais expliquer comment les planètes ont pu apparaître aussi vite. La balle était de nouveau dans le camp des théoriciens. Par quel mécanisme la poussière et les cailloux, de taille comprise entre quelques micromètres et quelques centimètres, tous en orbite autour du jeune Soleil, ont-ils réussi à s'assembler pour former des objets jusqu'à 10 millions de fois plus gros (des planétésimaux de 100 kilomètres de diamètre) en seulement 500 000 ans ?

La réponse est tout sauf évidente. La physique classique indique que de petits agrégats de poussière qui entrent en collision peuvent facilement se lier grâce aux forces électromagnétiques, un peu comme l'électricité statique tend à créer des moutons de poussière

domestique. Par ailleurs, un effet d'amortissement des impacts, l'énergie du choc étant absorbée par compression et perte de porosité, aide les amas à rester collés plutôt qu'à rebondir les uns sur les autres et à se séparer.

Mais, en grossissant, ces corps finissent par atteindre un obstacle: la « barrière du mètre ». En effet, à partir d'une certaine taille, ces cailloux deviennent trop gros pour être tenus par les forces électromagnétiques, et ils sont encore trop peu massifs pour être maintenus en un seul bloc par l'attraction gravitationnelle. Les impacts, même à très faible vitesse, entraînent la destruction plutôt que l'accrétion de ces agglomérats. Il semble alors impossible d'obtenir des corps de un mètre de diamètre ou plus. Pourtant, nous savons que cette barrière du mètre a été franchie: la planète sur laquelle nous nous tenons aujourd'hui le prouve. D'autres processus doivent donc être en jeu.

Plusieurs idées ont été proposées pour résoudre cette énigme. La plupart font intervenir des mécanismes qui compriment et concentrent le matériau du disque protoplanétaire. Les pistes font notamment intervenir des effets de turbulence qui projettent les particules les unes sur les autres. Ces forces tourbillonnaires pourraient inclure des phénomènes tels que les ondes de Kelvin-Helmholtz, qui se développent entre le gaz et la couche de poussière du disque. La compression de certaines régions riches en matériau les unes sur les autres pourrait former des objets plus gros.

Anders Johansen, de l'université de Lund, en Suède, a proposé un mécanisme d'instabilité de courant. Indépendamment d'Hal Levison, de l'institut de recherche du Sud-Ouest, à San Antonio, au Texas, il a travaillé, avec Michiel Lambrechts, sur un autre modèle, dit d'« accrétion de galets ». Ses calculs indiquent que même les plus petits morceaux de poussière et de gravier se seraient accumulés, par des effets gravitationnels et par friction avec le gaz, sur certaines orbites pour venir s'ajouter à un planétésimal en croissance, et cela suffisamment vite pour que des planétésimaux naissent très tôt dans l'histoire du Système solaire.

Si ces scénarios expliquent comment les planétésimaux se sont formés en un temps relativement court, ils sont insuffisants pour déclencher la différenciation de ces corps en un noyau et un manteau. Si les planétésimaux s'étaient initialement formés à partir de matériaux du disque primordial où métaux et silicates étaient intimement mêlés, alors seules des températures élevées et une fusion interne au moins partielle auraient assuré que le métal coule vers le centre et forme un noyau. Des calculs montraient notamment que la chaleur libérée quand ces objets relativement petits se fracassent les uns sur les autres est insuffisante pour atteindre le point de fusion. Par conséquent, les >

LA NAISSANCE ACCÉLÉRÉE DES PLANÈTES

Les scientifiques pensaient que la formation des planètes dans le Système solaire avait été un processus lent et régulier, qui aurait commencé il y a environ 4,5 milliards d'années et se serait étendu sur plus de 500 millions d'années (*chronologie en bleu ci-dessous*). De nouvelles données, fournies par des météorites, par les taux de désintégration radioactive

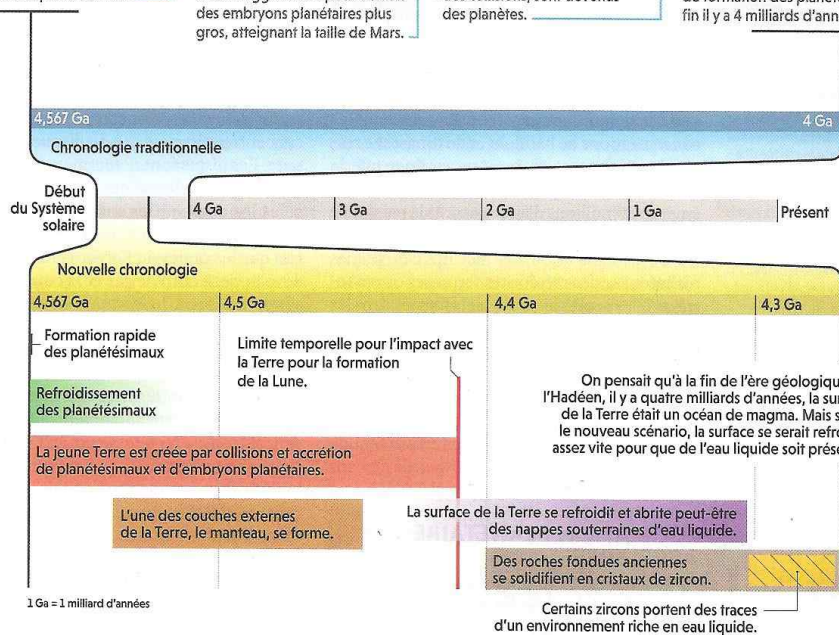
des éléments et par les observations des disques protoplanétaires autour des étoiles lointaines, indiquent que le Système solaire (y compris la Terre dans ses jeunes années) a évolué beaucoup plus vite (*chronologie en jaune*), en moins de 3 millions d'années, dans un tumulte de violentes collisions entre planétésimaux qui ont grandi, se sont détruits et reconstruits.

Il y a 4,567 milliards d'années, un nuage de gaz et de poussière s'est aplati en un disque autour d'une jeune étoile en formation, le futur Soleil. Le gaz et la poussière ont constitué de nombreux petits cailloux.

Chaque caillou a grossi progressivement jusqu'à faire quelques dizaines ou quelques centaines de kilomètres de diamètre, formant des planétésimaux. Ces derniers se sont agglomérés pour donner des embryons planétaires plus gros, atteignant la taille de Mars.

Ces embryons planétaires sont devenus assez massifs pour nettoyer leurs orbites des débris qui les encombraient. Les embryons, qui ont continué à grossir avec la poursuite des collisions, sont devenus des planètes.

La structure interne des planètes (dont la Terre) s'est différenciée en un noyau métallique et un manteau silicaté. Puis les planètes ont commencé à se refroidir. Le processus de formation des planètes a pris fin il y a 4 milliards d'années.



> chercheurs étaient bien en peine de dire où les planétésimaux avaient pu trouver l'énergie requise pour la fusion du métal.

C'est à ce stade qu'interviennent les idées sur l'aluminium radioactif. Chaque fois qu'un de ces atomes se désintègre, il produit une minuscule quantité de chaleur. En additionnant ces petites contributions, il serait possible d'obtenir une puissante source d'énergie dans le Système solaire primordial. Comme l'aluminium est l'un des six éléments les plus abondants dans les matériaux rocheux (avec le silicium, le magnésium, le fer, l'oxygène et le calcium), l'aluminium 26, qui a une demi-vie

d'environ 700 000 ans, aurait facilement chauffé au moins certains planétésimaux jusqu'à atteindre des températures de fusion.

Mais qu'est-ce qui les aurait empêchés de fondre complètement sachant que les nouvelles observations indiquent clairement que certains des planétésimaux avaient des écorces extérieures non fondues, comme c'est par exemple le cas du corps dont est issu Allende? Deux effets s'opposent concernant la chaleur du planétésimal. Plus un planétésimal est massif et grand, plus son intérieur contient d'aluminium 26 et produit de la chaleur. Mais, à l'inverse, plus un planétésimal est gros, plus sa

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.

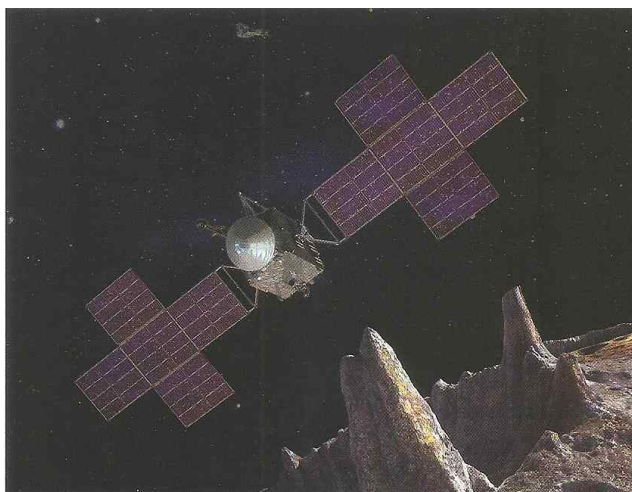
Il nous est impossible (contrairement à ce qui est suggéré dans certains films de science-fiction à succès ou dans le célèbre roman de Jules Verne) d'aller regarder de près ce qui se passe au centre de la Terre. Le noyau est trop profond et les pressions y sont trop élevées pour y prélever le quelconque 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.