

A detailed microscopic image of a meteorite's interior, showing a dense field of small, angular mineral grains in various colors (brown, green, yellow, red, blue) against a dark background. Two semi-transparent dark circles are overlaid on the image, containing text.

Astrophysique

Les secrets des météorites primitives

Alan Rubin

L'analyse microscopique
des chondrites, les plus vieilles roches
du Système solaire, laisse entrevoir
ce qu'était la nébuleuse solaire
peu avant la formation des planètes.



L'ESSENTIEL

- Les météorites chondritiques sont constituées du même matériau qui a formé les planètes et les astéroïdes.
- Il existe plusieurs classes de chondrites, différenciant par leur structure et leur composition.
- Leur analyse renseigne sur leur région d'origine dans la nébuleuse solaire et sur la répartition des poussières dans le Système solaire en formation.
- Ce nuage de poussières ressemblait à celui qui entoure les étoiles de type T Tauri.

1. GEMMES CACHÉES :
sur cette micrographie en lumière polarisée d'une mince tranche de chondrite, les « joyaux » sont des chondres, de minuscules billes de cristaux de silicate.

J. Derochette

Les astronomes étudient des objets si éloignés – étoiles, galaxies, quasars – qu'ils ne les observent que sous forme d'images sur des écrans d'ordinateur ou d'ondes lumineuses projetées par des spectrographes. Mes collègues et moi, qui travaillons sur les planètes et les astéroïdes, avons beaucoup de chance. Nous avons parfois l'occasion de toucher des fragments de ces corps célestes et de les manipuler pour leur faire révéler leurs secrets les plus intimes. Lors de mes études d'astronomie, j'ai passé de nombreuses nuits glaciales à observer au télescope des amas d'étoiles et des nébuleuses, et je peux aujourd'hui témoigner qu'il est plus gratifiant émotionnellement de tenir dans ses mains un éclat d'astéroïde : c'est un lien tangible avec quelque chose qui, autrement, resterait lointain et abstrait.

Les fragments d'astéroïdes qui me fascinent le plus sont les chondrites, lesquelles représentent plus de 80 pour cent des météorites qui tombent sur Terre. Les autres sont issus d'objets plus massifs, sièges de réactions physico-chimiques ayant modifié la composition des roches au fil des temps géologiques. Au contraire, les chondrites, qui doivent leur nom aux chondres qu'elles contiennent presque toutes (de minuscules perles de matériau fondu, souvent plus petites qu'un grain de riz) se sont formées durant les premiers stades du Système solaire. Quand on examine au microscope des lames minces de chondrites, elles se révèlent d'une grande beauté, qui n'est pas sans rappeler des tableaux de Vassily Kandinsky ou d'autres peintres abstraits.

Les plus anciennes roches

Les chondrites sont les plus anciennes roches que les scientifiques aient touchées. La datation par isotopes radioactifs montre qu'elles ont plus de 4,5 milliards d'années, c'est-à-dire qu'elles datent d'avant la période de formation des planètes, quand le Système solaire n'était encore qu'une nébuleuse, un disque de gaz et de poussières turbulent et en rotation. Leur âge et leur composition indiquent qu'elles sont constituées des matériaux primordiaux à partir desquels les planètes, les lunes, les astéroïdes et les comètes se sont assemblés. La plupart des chercheurs pensent que les chondres se sont formés au cours d'événements violents, quand des agrégats de poussières riches en silicates ont fondu et formé des gouttelettes. Ces dernières se sont rapidement solidifiées et agglomérées avec des poussières, des métaux et autres matériaux, formant des chondrites qui ont poursuivi leur croissance et sont devenues des astéroïdes. Les collisions violentes entre astéroïdes ont entraîné une fragmentation, certains débris finissant par tomber sur Terre sous forme de météorites. Ces dernières sont des témoins de la naissance du Système solaire, et constituent nos liens les plus directs avec les conditions dans lesquelles la planète s'est formée.

Mais comme les paléontologues le savent bien, trouver des fossiles n'est que la première étape de la reconstitution historique. Les découvertes doivent être replacées dans un contexte. Et il a été difficile de retrouver le lieu de naissance des différentes chondrites et l'environnement qui a été leur berceau, parce que nous avons peu de données sur les structures détaillées de ces roches. Il y a quelques années, j'ai fait une analyse systématique de toutes les propriétés physiques des chondrites, comblant beaucoup de lacunes. En exploitant ces données, j'ai dressé une carte approximative de la structure de la nébuleuse dont ont émergé ces chondrites.

La répartition de poussières sur la carte, bien que grossière, ressemble à celle de certains des systèmes stellaires T Tauri. Ces objets ont une luminosité qui varie de façon erratique et sont enveloppés d'atmosphères étendues, si bien qu'on pense qu'il s'agit d'étoiles jeunes. Beaucoup sont entourés de disques de poussières. La concordance de la carte de poussières de la nébuleuse solaire avec la structure de certains systèmes T Tauri conforte l'idée que ces derniers sont les précurseurs de systèmes solaires similaires au nôtre. Les chondrites donnent donc non seulement accès à notre propre passé lointain, mais aussi à d'autres systèmes stellaires jeunes de la Voie lactée. Ainsi, en élucidant la physique de ces systèmes, les scientifiques comprendront mieux les processus qui ont conduit à la formation des astéroïdes et planètes du Système solaire.

Une classification en douze groupes

Afin d'explorer le Système solaire primordial *via* l'analyse des chondrites, les planétologues doivent d'abord répertorier les propriétés de ces roches. Les chercheurs ont classé les chondrites en douze groupes principaux répartis en quatre classes ; ils se distinguent par des caractéristiques telles que leur composition chimique, les proportions des différents isotopes (éléments dont les noyaux ont le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons), le nombre, la taille et le type de leurs chondres, et enfin la quantité de matrice fine, qui sert de ciment aux différents composants des chondrites. Les caractéristiques distinctes de chaque groupe laissent penser que les chondrites retrouvées sur Terre doivent provenir d'astéroïdes différents.

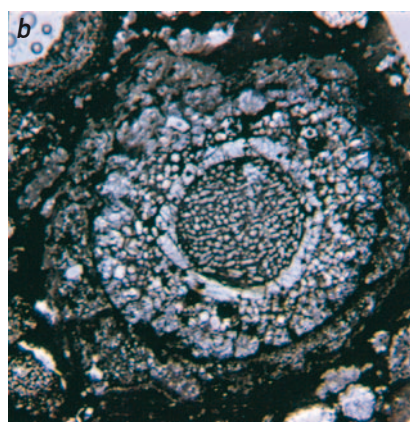
■ L'AUTEUR



Alan RUBIN est géochimiste à l'Université de Californie à Los Angeles. Il est spécialiste des météorites chondritiques.



Collection Mark Maudhner Macovitch



Alan Rubin

2. DANS LES CHONDRITES CARBONÉES (a), les chondres ont tendance à être gros et complexes. Vu au microscope, un chondre (b) contient un noyau de silicate (bille centrale de quelques centaines de micromètres de diamètre revêtue d'une mince coque), entouré d'une coquille secondaire (la bande large) et d'une couche externe nommée enveloppe ignée (la zone noire irrégulière).

Les chercheurs ont imaginé de nombreux modèles pour expliquer la formation initiale des différents groupes de chondrites. Ces modèles font intervenir des facteurs tels que la turbulence du gaz de la nébuleuse, les champs magnétiques et les différentes vitesses avec lesquelles les particules se sont agencées dans le plan nébulaire médian. Mais en définitive, est restée la conclusion vague que les divers types de chondrites s'étaient formés dans des « conditions différentes ».

Espérant me faire une meilleure idée de ce qu'étaient ces conditions, j'ai commencé en 2009 à compiler les études antérieures pour construire un tableau recensant les propriétés essentielles des principaux groupes de chondrites. J'avais l'intention de rechercher des corrélations entre les propriétés, susceptibles d'éclairer l'histoire de chaque groupe. Mais à la fin de ce travail de synthèse, mon tableau était à moitié vide ; peu de chercheurs, semblait-il, avaient jugé intéressant de récolter ce type de données.

Il ne me restait plus... qu'à le faire moi-même. J'ai ainsi examiné au microscope 91 lames minces de 53 météorites appartenant aux différents groupes chondritiques. De nombreux minéraux deviennent transparents lorsque leur épaisseur est égale ou inférieure à 30 micromètres ; il est alors possible d'étudier leurs propriétés optiques. Les lames minces ont révélé des chondres de tailles, de formes, de structures et de couleurs fort variées. Certes, l'analyse de milliers de chondres peut être fastidieuse, mais en m'astreignant à cet exercice de « microscopie astronomique », je suis parvenu à remplir mon tableau en quelques mois. Sans résoudre totalement l'énigme des « conditions différentes », mes résultats précisaient les idées que l'on avait sur l'origine, dans la nébuleuse solaire, des différents groupes de chondrites.

Intéressons-nous tout d'abord à une classe rare de chondrites, les chondrites à enstatite, qui représentent environ deux pour cent de toutes les météorites chondritiques recueillies sur Terre. Ces roches doivent leur nom à leur principal constituant minéral, l'enstatite (MgSiO_3). Il existe deux formes de chondrites à enstatite, EH (H pour *high*) et EL (L pour *low*), selon qu'elles contiennent beaucoup ou peu de fer. Les abondances des isotopes de l'azote, de l'oxygène, du titane, du chrome et du nickel de ces chondrites ressemblent à celles de la Terre et de Mars. Ces chondrites à enstatite se sont probablement formées à l'intérieur de l'orbite de

L'histoire géologique des chondrites

Comme le souligne Alan Rubin, les météorites sont des objets fascinants. Ils permettent aux planétologues de toucher au quotidien un monde qui peut paraître éloigné et abstrait. En particulier, les chondrites, morceaux d'astéroïdes formés il y a 4,567 milliards d'années et peu modifiés depuis, sont une fenêtre sur la naissance et les premiers instants du Système solaire. Mais le message qu'elles nous délivrent est parfois complexe à déchiffrer.

En effet, certaines chondrites ont connu des modifications lors de l'histoire géologique des astéroïdes. La décroissance radioactive d'éléments tel l'aluminium 26 a abouti à des températures de quelques dizaines ou cen-

taines de degrés Celsius pendant plusieurs milliers d'années. Cet épisode thermique a pu, par exemple, modifier la composition de la matière carbonée et des minéraux, mais aussi estomper le contour des chondres. De la glace d'eau était initialement présente au sein de certains astéroïdes. Sous l'effet de la température, elle a fondu quelques millions d'années après l'accrétion des astéroïdes. Les fluides aqueux résultants ont alors interagi avec la roche, aboutissant notamment à la production de phases minérales hydratées (par exemple des phyllosilicates ou des carbonates). Ces épisodes d'altérations aqueuse et thermique ont ainsi plus ou moins modifié la composition chimique, la pétrogra-

phie et la minéralogie initiales des chondrites : ils brouillent les pistes !

Les chondrites sont au cœur de nombreux débats, concernant notamment l'origine de la matière carbonée et de l'eau qu'elles contiennent, les implications potentielles pour la planète Terre, les liens entre astéroïdes et comètes, et entre le Système solaire et le milieu interstellaire environnant. Il est donc indispensable d'étudier l'histoire géologique des astéroïdes avant de pouvoir interpréter les caractéristiques actuelles des chondrites en termes de propriétés de la nébuleuse solaire.

De nouvelles météorites, telles Tagish Lake, Paris, Sutter's Mill, ont intégré nos collections. Aucune ne satis-

fait les caractéristiques des groupes jusqu'à maintenant définis et décrits par Alan Rubin. Nous attendons beaucoup de l'étude de ces objets particuliers, mais aussi des futurs échantillons d'astéroïdes rapportés sur Terre par des missions spatiales telles Hayabusa-2, OSIRIS-REx, et des futures météorites collectées lors des campagnes annuelles organisées par la NASA en Antarctique par exemple. Nous espérons découvrir de nouvelles informations sur la formation du Système solaire et sur les astéroïdes peuplant la ceinture située entre Mars et Jupiter.

Lydie Bonal

Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble, IPAG, Université Joseph Fourier, CNRS

Mars, ce qui est nettement plus proche du Soleil que les distances estimées pour les autres groupes de chondrites.

Une deuxième classe, celle des chondrites « ordinaires », comporte trois groupes distincts, mais proches, étiquetés H, L et LL, qui s'identifient par l'abondance de fer qu'elles contiennent et aussi par la forme chimique sous laquelle le fer est présent. Le qualificatif « ordinaire » se rapporte à la prévalence de ces chondrites : elles constituent 74 pour cent des météorites récupérées sur Terre. Ces trois groupes étant surreprésentés, cela indique que les météorites correspondantes viennent d'une région du Système solaire où les forces gravitationnelles sont favorables à leur propulsion vers la Terre.

Propulsion par Jupiter

John Wasson, de l'Université de Californie à Los Angeles, a proposé que les chondrites ordinaires proviennent d'une région légèrement plus proche du Soleil que le centre de la ceinture d'astéroïdes, située entre les orbites de Mars et de Jupiter. Les astéroïdes, situés à 2,5 fois la distance Terre-Soleil (2,5 unités astronomiques), décrivent trois orbites autour du Soleil en 12 ans ; c'est le temps que met Jupiter, à 5,2 unités astronomiques, pour faire une seule révolution. Le rapport entier de ces périodes conduit à un phénomène de résonance qui peut déstabiliser l'orbite des astéroïdes sous l'influence du champ gravitationnel de la planète. Certaines sont alors

dirigées vers la partie interne du Système solaire, où se trouve la Terre.

Les chondrites de Rumuruti (du nom de la localité du Kenya où la seule chute observée s'est produite) forment la troisième classe. Ces chondrites, dites R, sont rares et ressemblent aux chondrites ordinaires par beaucoup de leurs propriétés chimiques. Mais leur matrice est plus abondante, et le rapport de l'oxygène 17 sur l'isotope plus léger, l'oxygène 16, y est supérieur. De hautes températures dans la nébuleuse ont tendance à égaliser les concentrations des différents isotopes. Ainsi, plus un objet se forme loin du Soleil, plus sa composition a des chances de conserver les différences d'abondance isotopiques de l'oxygène. Le déséquilibre mesuré suggère que les chondrites R se seraient formées plus loin du Soleil que les chondrites ordinaires.

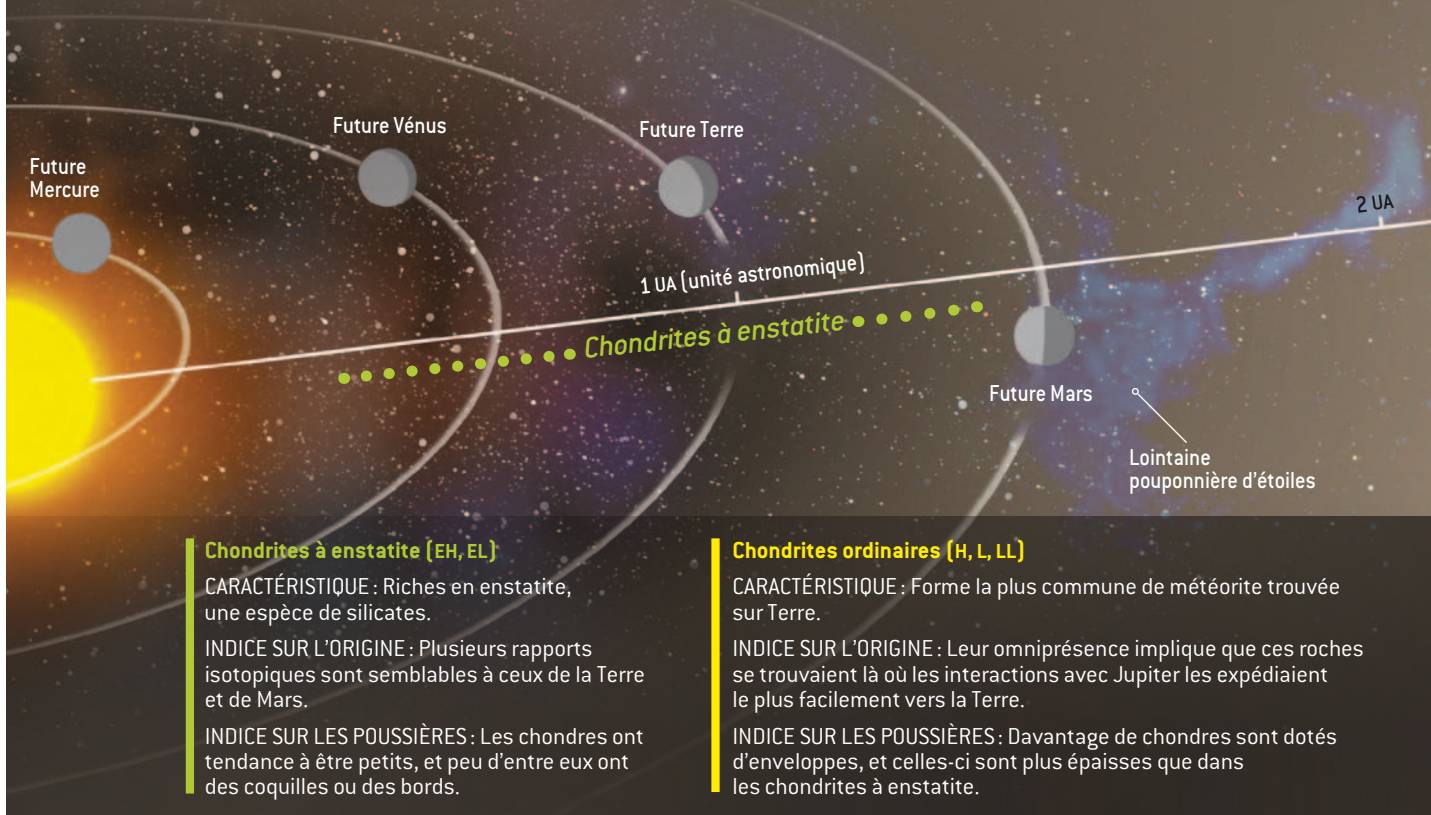
Des températures élevées ont aussi pour effet de casser les liaisons moléculaires des composés organiques, qui se trouvent en plus grande concentration dans la quatrième classe, celle des « chondrites carbonées », que dans les autres classes de chondrites. Les chondrites carbonées étaient presque certainement en orbite à des distances encore plus grandes du Soleil que les chondrites R. Les chondrites carbonées elles-mêmes se subdivisent en six groupes principaux, à chacun desquels on peut attribuer une position plus spécifique dans la nébuleuse

Le disque de poussières reconstitué à partir de l'étude des chondrites est très similaire à celui des disques protoplanétaires autour des étoiles T Tauri.

LE SYSTÈME SOLAIRE AVANT LES PLANÈTES

L'auteur a examiné de nombreuses caractéristiques chimiques et structurales de quatre classes de chondrites (*ci-dessous*), qui se divisent en 12 groupes principaux (repérés par leurs initiales). Il a ainsi précisé les modèles indiquant la provenance approximative des météorites de ces 12 groupes et déduit les

quantités relatives de poussières dans le voisinage à l'époque de leur formation (*sur la carte, les pointillés indiquent une plage probable de zones possibles*). Ses résultats indiquent que le maximum de poussières (*voile le plus dense*) est associé aux chondrites carbonées CR, CV et CK, qui étaient en orbite



à partir de leurs propriétés chimiques, isotopiques et structurales.

Outre leur composition chimique, les structures internes des chondrites livrent des renseignements sur la quantité de poussières présente au voisinage immédiat de leur lieu de formation. Les poussières ont joué un rôle crucial à toutes les étapes de l'évolution du Système solaire. Quand le nuage de matière initial qui a produit le Soleil et les planètes s'est effondré sur lui-même, la densité de poussières a augmenté. Le rayonnement infrarouge a été efficacement piégé, ce qui a fait croître la température au centre du nuage. Cela a donné naissance à la proto-étoile. Plus tard, les poussières (et, à plus grande distance du centre, la glace) se sont fixées dans les environs du plan médian de la nébuleuse et se sont agrégées en corps plus gros et poreux nommés planétésimaux, dont la taille allait de quelques mètres à des dizaines

de kilomètres. Certains de ces planétésimaux ont fondu avec la chaleur dégagée par les éléments radioactifs présents dans la roche. Les planétésimaux fondus sont dits « différenciés » car leur composition chimique est modifiée par rapport à celle des corps « primitifs » comme les chondrites. Les planètes se sont finalement formées à partir d'un ensemble disparate de planétésimaux fondus et non fondus ; les comètes et les astéroïdes parents des chondrites, de composition plus uniforme, proviennent uniquement de planétésimaux non fondus.

Une structure en couches

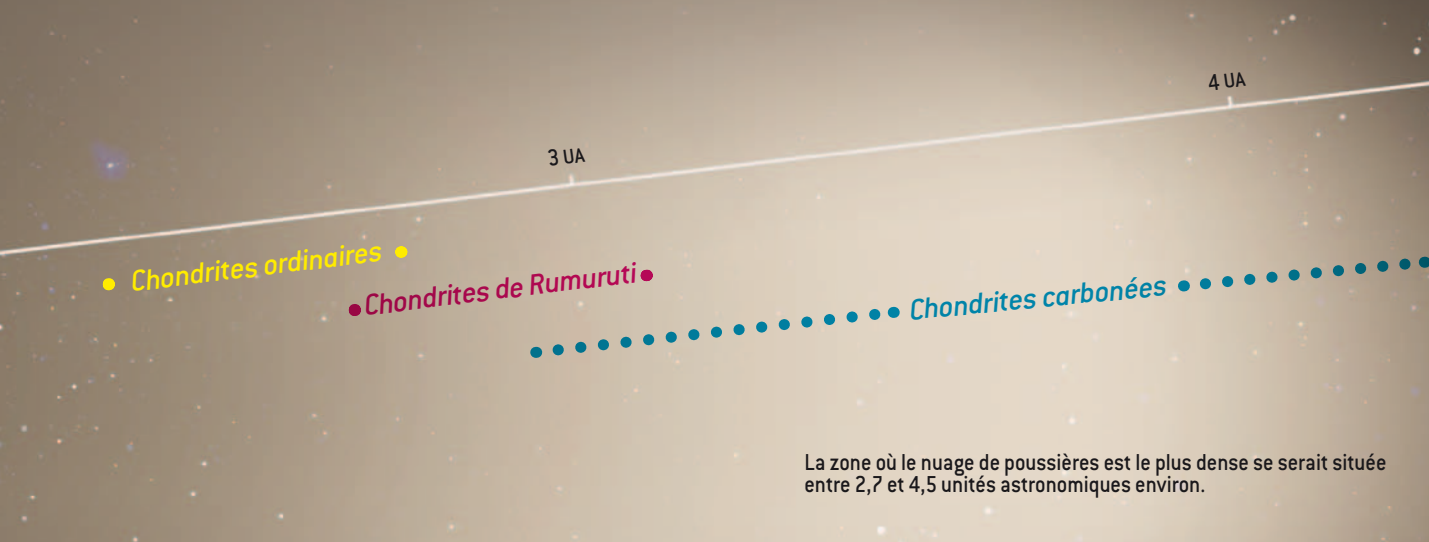
Les chondrites permettent d'estimer l'abondance de poussières à l'endroit où un groupe donné de chondrites s'est formé. En effet, dans les chondrites, les chondres sont constitués de coquilles (plus souvent

qualifiées d'anneaux, car les chondrites sont étudiées en lames minces) chargées de poussières entourant un noyau de silicate. Les chondres de certaines météorites carbonées, par exemple, comportent souvent un noyau, ou chondre « primaire », pris dans une coquille sphérique secondaire de matériau fondu – ou igné – de composition similaire au chondre primaire. La coquille secondaire est souvent elle-même entourée d'une coquille tertiaire, l'enveloppe ignée, qui est composée de grains de minéraux plus fins que ceux du noyau central (*voir la figure 2*).

De nombreux spécialistes des météorites ont suggéré que les coquilles secondaires ont été créées quand un chondre, solidifié après l'événement de fusion initial, a acquis une coquille poreuse de poussières dont la couche externe, (mais pas le chondre interne) a subi une fusion dans un second temps. Par la suite, des phénomènes

probablement à plus de trois unités astronomiques du Soleil. La concentration de poussières diminuait plus loin, là où étaient situées les chondrites CM, CO et finalement CI ; elle déclinait également dans l'autre direction, devenant très faible dans la région des chondrites à enstatite. La répartition des

poussières qui se dessine ainsi ressemble à celle de certains systèmes stellaires actuels de type T Tauri. Cela suggère que l'information recueillie sur la physique de ces systèmes peut nous révéler des détails concernant la naissance du Système solaire, et inversement.



Chondrites de Rumuruti (R)

CARACTÉRISTIQUE : Leur composition diffère légèrement de celle des chondrites ordinaires.

INDICE SUR L'ORIGINE : Certains rapports isotopiques impliquent une position plus éloignée du Soleil que celle des chondrites ordinaires.

INDICE SUR LES POUSSIÈRES : La proportion de matériau servant de matrice autour des chondres est beaucoup plus importante que dans les chondrites ordinaires.

Chondrites carbonées (CR, CV, CK, CM, CO, CI)

CARACTÉRISTIQUE : Riches en composés organiques.

INDICE SUR L'ORIGINE : La présence de composés organiques signifie que ces météorites se sont formées loin du Soleil qui, sinon, aurait dégradé leur matière organique.

INDICE SUR LES POUSSIÈRES : Les chondrites CR, CV et CK ont les plus gros chondres et les enveloppes ignées les plus épaisses ; les groupes CM et CO ont des chondres plus petits et des enveloppes ignées plus fines ; les météorites CI sont dépourvues de chondres.

Ron Miller

moins intenses ou plus brefs ont produit l'enveloppe ignée. En d'autres termes, les groupes de chondrites qui contiennent de nombreux chondres à coquilles gigognes semblent s'être formés dans des environnements poussiéreux.

Des épisodes multiples de fusion, entrecoupés de périodes au cours desquelles les chondres se sont enveloppés de poussières, auraient produit des chondres plus gros, dotés d'une coquille secondaire et d'une enveloppe ignée, toutes deux épaisses. Les chondres pris dans les poussières se sont par ailleurs refroidis plus lentement que les autres, parce que leur chaleur s'évacue moins facilement. Ce lent refroidissement aurait à son tour facilité l'évaporation des éléments volatils, tels que le sodium et le soufre. Cependant, ils auraient été piégés par les poussières voisines et, à terme, incorporés dans les chondrites. Néanmoins, une fraction notable aurait été perdue. Les

teneurs en sodium et en soufre des groupes de chondrites présentant de gros chondres chargés de poussières devraient donc être inférieures à celles des groupes de chondrites dont les chondres se sont formés dans des environnements pauvres en poussières. Et c'est bien ce que j'ai observé.

En combinant ces informations et d'autres avec les orbites présumées des astéroïdes dont ces chondrites sont issues, j'ai dressé une carte grossière des abondances en poussières dans le Système solaire jeune (voir l'encadré ci-dessus).

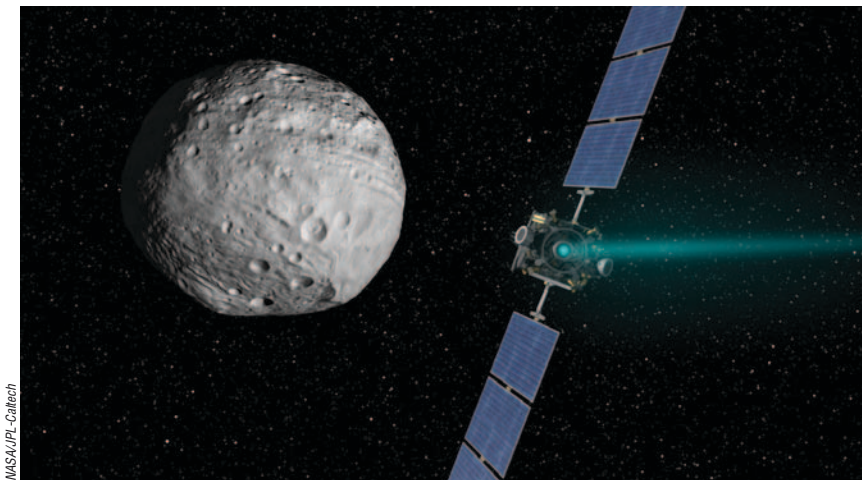
Une carte des poussières

Les chondrites à enstatite, qui se sont sans doute formées entre le Soleil et l'orbite actuelle de Mars, se trouvaient dans une région vraisemblablement pauvre en poussières ; elles contiennent, par exemple, peu de chondres à coquilles ou à enveloppes

ignées, et parmi les chondres ayant des enveloppes, ces dernières sont minces.

Les chondrites ordinaires et les chondrites R, plus éloignées du Soleil, présentent davantage de preuves de formation dans un environnement riche en poussières ; par exemple, la proportion de chondres à enveloppes ignées est plus élevée et les enveloppes sont plus épaisses que dans les groupes à enstatite.

La concentration de poussières semble avoir été maximale dans la région occupée par les corps parents des chondrites carbonées, qui contiennent les plus gros chondres et le plus grand nombre de chondres enfermés dans des coquilles secondaires et des enveloppes ignées (les groupes notés CR, CV et CK). Cette concentration diminue ensuite à proximité de la région de deux groupes de chondrites carbonées (CM et CO) encore plus distantes du Soleil. Les chondres de



NASA/JPL-Caltech

3. LA SONDE DAWN S'APPROCHE DE L'ASTÉROÏDE VESTA, sur cette vue d'artiste, pour en étudier la composition et la structure. Une autre mission, *Hayabusa* de l'Agence spatiale japonaise, a récolté des poussières sur l'astéroïde Itokawa et les a rapportées sur Terre pour qu'elles soient analysées. Ces missions spatiales permettront d'obtenir des informations supplémentaires sur la formation de ces astéroïdes et sur la jeunesse du Système solaire.

BIBLIOGRAPHIE

A. E. Rubin, **Physical properties of chondrules in different chondrite groups: implications for multiple melting events in dusty environments**, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 74(16), pp. 4807-4828, 2010.

A. E. Rubin, **Les astéroïdes ont eu chaud**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

R. H. Jones *et al.*, **Chemical, mineralogical and isotopic properties of chondrules: clues to their origin**, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 341, pp. 251-285, 2005.

ces groupes sont beaucoup plus petits et présentent beaucoup moins souvent des coquilles secondaires et des enveloppes ignées. La quantité de poussières diminue encore plus au voisinage du groupe de chondrites carbonées le plus lointain (CI), qui ne contiennent pratiquement pas de chondres. Il s'agit cependant de vraies chondrites, car le principal critère pour appartenir à cette classe de roches est d'avoir une composition chimique en éléments non volatils (autres que hydrogène, carbone, azote, soufre...) semblable à celle du Soleil.

La répartition des poussières, reconstituée à partir de l'étude des chondrites, se révèle très similaire à celle de plusieurs disques protoplanétaires autour des étoiles T Tauri. Ces astres, semblables au Soleil d'autrefois, sont encore jeunes dans leur évolution; ils ne sont pas encore entrés dans un cycle stable de combustion de l'hydrogène. De plus, la masse estimée du disque des étoiles T Tauri et celle du Système solaire jeune sont semblables (environ deux pour cent de la masse du Soleil). Ces observations suggèrent que les étoiles T Tauri pourraient refléter ce qu'était le Système solaire dans sa jeunesse.

L'étude des chondrites a permis d'obtenir des informations importantes sur l'évolution de notre Système solaire et ce à quoi il a pu ressembler à ses débuts. Cependant, les chondrites soulèvent encore des questions: en particulier, par quels processus les chondres ont-ils été créés? La première chose que tout modèle de formation des chondres doit expliquer,

ce sont les signes de fusion répétée. Le processus a dû aussi être à l'œuvre dans toute la nébuleuse solaire, sinon il n'aurait pas abouti à la présence de chondres dans presque tous les groupes de chondrites. Malheureusement, on n'a trouvé aucun mécanisme convaincant de chauffage qui rende compte de toutes les propriétés des chondres. La fusion multiple de tant de chondres exclut tous les processus ponctuels, tels que les ondes de choc dues à des supernovae ou les sursauts de rayons gamma provenant de l'espace lointain. La source de chaleur devait être capable, d'une part, de fondre des chondres entiers (dont certains de plusieurs millimètres de diamètre) et, d'autre part, de ne fondre que les minces manteaux de poussières entourant d'autres chondres tout en laissant l'intérieur intact.

Problèmes de chauffage

Le modèle de formation des chondres actuellement privilégié par les astrophysiciens met en jeu un chauffage par ondes de choc. Ces dernières auraient pu être produites, par exemple, par des nuages de poussières tombant de l'extérieur sur la nébuleuse. La propagation des ondes de choc à travers des régions poussiéreuses de la nébuleuse aurait pu produire assez de chaleur pour faire fondre les chondres.

Mais les modèles qui font intervenir les ondes de choc ont leurs défauts. Tout d'abord, on n'a pas encore observé d'ondes de choc dans des disques protoplanétaires; leur existence n'est donc pas prouvée. Ensuite, des chocs chaufferaient en même temps des myriades de chondres, mais semblent incapables de limiter la fusion à la partie externe de chondres (pour former des coquilles secondaires et des enveloppes ignées). Enfin, les ondes de choc étant des phénomènes localisés, il semble improbable qu'elles aient produit des chondres dans des régions de la nébuleuse très éloignées. Le principal mécanisme de formation des chondres reste donc à élucider.

Les chondrites et les chondres sont une mine d'informations sur la nature et l'évolution de la nébuleuse solaire, la formation des planètes, certaines étapes de l'évolution du Soleil et les échelles temporelles de tous ces processus. Les planétologues ont encore beaucoup à apprendre, même si le tableau que dessinent ces messagers de l'aube du Système solaire se précise. ■

POUR LA
SCIENCE

Plus de 25% de réduction



TROUVEZ LA BONNE FORMULE

...ABONNEZ-VOUS! 1 an • 12 n^{os} • **56 €** au lieu de 24,90 €

BULLETIN D'ABONNEMENT

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90 382 • 75 281 Paris cedex 06

Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* :

☐ 1 an • 12 numéros • **56 €** au lieu de 24,90 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €.

☐ 2 ans • 24 numéros • **106 €** au lieu de 149,80 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25 € – autres pays 51 €.

Pour 20 € de plus, découvrez *Dossier Pour la Science* tous les trimestres !

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 n^{os}/an) + *Dossier Pour la Science* (4 n^{os}/an)

☐ 1 an • 16 numéros • **76 €** au lieu de 102,70 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35 €.

☐ 2 ans • 32 numéros • **143 €** au lieu de 205,40 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34 € – autres pays 72 €.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule).

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐

PLS425 • Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.03.2013