

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.

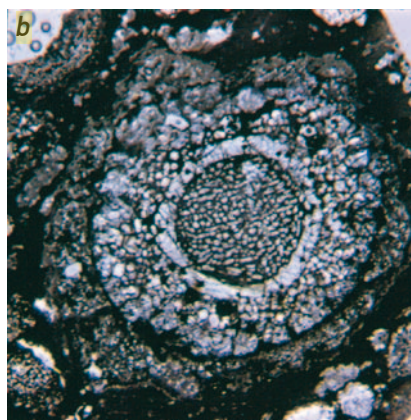
L'AUTEUR



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.