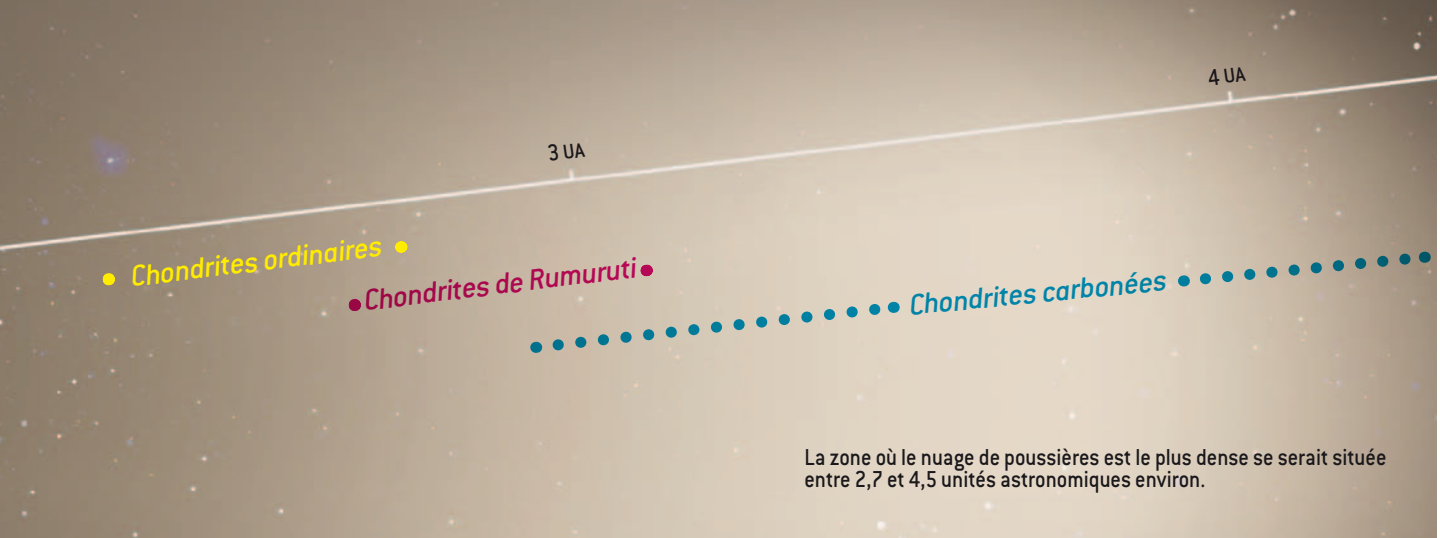


probablement à plus de trois unités astronomiques du Soleil. La concentration de poussières diminuait plus loin, là où étaient situées les chondrites CM, CO et finalement CI ; elle déclinait également dans l'autre direction, devenant très faible dans la région des chondrites à enstatite. La répartition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

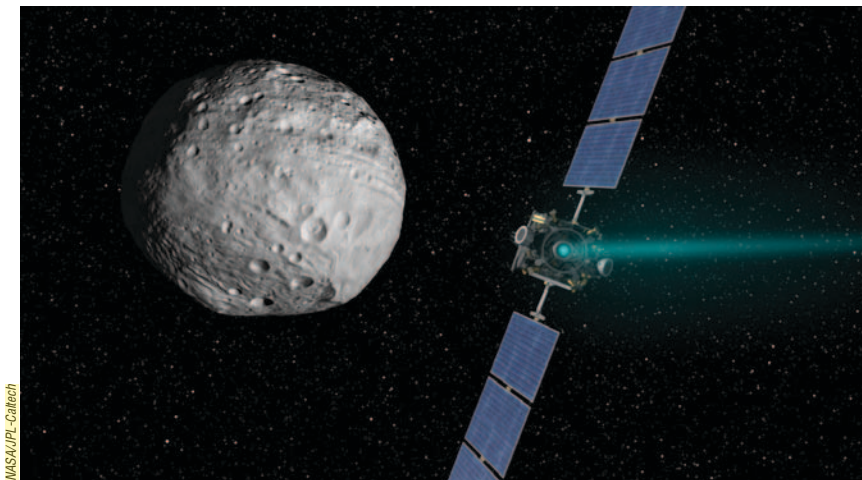
Une carte des poussières

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. ■