

## LES METEORITES ET LA CHRONOLOGIE DE LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE : CE QUI A CHANGE CES DERNIERES ANNEES. M. Chaussidon, CRPG-CNRS, BP 20, 54501 Vandoeuvres-lès-Nancy (chocho@crpg.cnrs-nancy.fr).

**Introduction:** L'étude et l'analyse isotopique des météorites primitives et différenciées ces derniers trente ans a permis d'aboutir à une chronologie de la formation du système solaire qui semble assez robuste dans ses grandes lignes [e. g. 1-5]. Selon cette "chronologie classique" la formation des premiers solides dans le système solaire aurait commencé par la condensation à haute température de minéraux réfractaires (oxydes et silicates de Ca et d'Al) dont les inclusions réfractaires (ou CAI pour Ca-Al-rich inclusions) des chondrites sont les témoins. Les CAIs sont des objets de taille centimétrique qui résultent de la cristallisation d'un liquide magmatique dans le gaz de la nébuleuse: ce sont les plus anciennes "roches" du système solaire datées il y a presque 20 ans à  $4566^{+2}_{-1}$  Ma [6]. La condensation des CAIs aurait été suivie par la formation des chondres qui ont en moyenne une composition moins réfractaire que les CAIs et qui donc ont été formés par la fusion de précurseurs condensés à plus basse température que les CAIs. Les chondrites se forment ensuite par l'accrétion des chondres, des CAIs et de minéraux de plus basse température formés à la fin de la séquence de condensation. Dans cette chronologie, l'accrétion et la différenciation de corps planétaires est considérée comme l'étape suivante se déroulant sur  $\approx 10$  à  $\approx 100$  Ma. Les chondrites les moins métamorphisées, celles qui ont subi les élévations de température les plus faibles, ont donc toujours été considérées comme les témoins des corps les plus primitifs (i.e. ayant échappé à la différenciation) formés dans le système solaire, la conséquence implicite étant que ces chondrites primitives étaient donc les plus anciennes.

Un certain nombre d'observations minéralogiques et pétrographiques et de données isotopiques récentes viennent remettre en cause plusieurs des étapes de ce scénario "classique". D'une manière générale les données récentes vont dans le sens (i) d'une superposition dans le temps des différents processus nébulaires (formation des CAIs, des chondres, ...), (ii) de la formation de protoplanètes très tôt dans l'histoire du système solaire et (iii) d'un raccourcissement des durées des processus ayant abouti à des planètes telluriques différenciées (e. g. la Terre pourrait avoir eu un noyau différencié environ 30Ma après la formation des CAIs).

**Quelle est la durée des processus nébulaires et quels sont les âges absolus des CAIs et des chondres ?** Les dernières analyses U/Pb des CAIs [7, 8] repoussent légèrement l'âge des plus anciens solides du système solaire vers  $4568,3 \pm 0.4$  Ma. Cet âge est souvent considéré comme "l'âge du système solaire"

même si le Soleil lui-même n'a jamais été daté. On considère en effet que les CAIs ont été formées près du Soleil jeune, alors dans sa phase T-Tauri : les CAIs contiennent des produits d'irradiation nucléaires (isotopes radioactifs à courte période du Be et isotopes stables du Li) très vraisemblablement fabriqués par interaction entre le rayonnement solaire et le disque d'accrétion [9, 10].

Un débat existe actuellement sur la durée de l'épisode de formation des CAIs. Ce débat provient des variations observées par différentes techniques d'analyse dans le rapport isotopique  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  des CAIs (le demi-vie de  $^{26}\text{Al}$  est de  $\approx 0,7$ Ma). Les analyses par sonde ionique des différentes phases minérales des CAIs ont montré quelles définissaient un rapport  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  dit "canonique" de  $\approx 4,5 \times 10^{-5}$  [4]. Ce rapport a longtemps été considéré comme le rapport isotopique initial de l'Al dans le système solaire. Cependant des études très récentes par ICPMS (après bombardement laser ou dissolution chimique) montrent que des rapports plus élevés, jusqu'à  $\approx 7 \times 10^{-5}$  [11,12], sont présents dans les CAIs alors qu'en roche totale ces CAIs définissent une isochrone unique de pente de  $5,85 \pm 0.05 \times 10^{-5}$  [13]. Ces résultats semblent contradictoires : l'erreur très faible sur la pente de l'isochrone unique impliquerait un événement de formation des CAIs très court durant au plus 0,1 Ma, alors que la gamme totale de variation des rapports  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  de 7 à 4,5 indiquerait que les CAIs et leurs précurseurs ont eu une histoire nébulaire qui aurait duré plusieurs centaines de milliers d'années. L'interprétation de ces observations est de plus compliquée par le fait que ces différences de rapports  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  (ceci est aussi valable pour d'autres radioactivités éteintes à courte période tel que le  $^{53}\text{Mn}$ ) reflètent peut être en partie des hétérogénéités de la distribution de ces radioactivités éteintes dans le disque d'accrétion. Ces hétérogénéités pourraient résulter du mélange de plusieurs sources nucléosynthétiques : étoiles massives en fin de vie dont l'explosion précède de moins de 1Ma la formation du système solaire ou production dans le disque d'accrétion par irradiation autour du Soleil jeune [14,15]. Ces deux scénarios correspondent à des contextes astrophysiques différents de formation du système solaire [16].

La comparaison des rapports  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  des chondres avec ceux des CAIs montre que en règle générale les chondres sont plus jeunes de  $\approx 1$  à 3 Ma que les CAIs [17], en accord apparent avec des datations absolues U/Pb [7]. Cependant certains chondres semblent avoir des âges  $^{26}\text{Al}$  aussi vieux que les

CAIs [18], même si cette observation doit être relativisée en considérant la perturbation possible du système  $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$  par l'incorporation de fragments de CAIs dans les précurseurs des chondres [19,20]. D'autres chondres se sont formés plus tardivement ( $\approx 5\text{Ma}$  après les CAIs), peut être par impact entre des embryons planétaires [21].

**Quand sont apparus les premiers planétésimaux ?** L'origine des chondres est un sujet débattu de longue date [22] et tout le monde s'accorde sur le fait qu'une partie de leur histoire est à haute température dans le gaz de la nébuleuse. Cependant des études récentes de la minéralogie et de la composition chimique des chondres, ainsi que des expériences simulant des échanges à haute température avec le gaz nébulaire, montrent que l'effet des interactions chimiques avec le gaz a été sous estimé [23]. Les précurseurs des chondres (les grains qui en réagissant avec le gaz et en fondant partiellement auraient donné naissance aux chondres) semblent être majoritairement des cristaux d'olivine dont la texture est identique à celle de roches équilibrées dans le manteau terrestre [24]. Il semble donc que les précurseurs des chondres soient pour beaucoup d'entre eux des fragments planétaires, fragments provenant de petites planètes différenciées (les olivines contiennent des gouttes de métal) très tôt dans le système solaire, avant que les chondres ne soient formés !

**Quand se sont différenciées les planétésimaux et les planètes telluriques ?** Les isotopes radioactifs à courte période ( $^{26}\text{Al}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ,  $^{182}\text{Hf}$ ) montrent que la différenciation des planétésimaux a été très précoce. La croûte basaltique du corps parent des eucrites et des mésosidérites se serait solidifiée alors que le rapport  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  valait entre 1 et  $5 \times 10^{-6}$  [25]. Cela démontre que  $^{26}\text{Al}$  (et le  $^{60}\text{Fe}$ ) sont bien les sources de chaleur à l'origine de la différenciation de ces corps planétaires. Une datation absolue U/Pb des basaltes du corps parent des angrites donne un âge de  $4566,2 \pm 0,1 \text{ Ma}$  [26]. La différenciation métal silicate est elle aussi très précoce avec des âges  $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$  pour certaines météorites de fer magmatiques tombant dans les 5 premiers Ma après les CAIs [27, 28]. Plusieurs groupes essaient de trouver quelle était la valeur du rapport  $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$  lors de la formation de ces météorites de fer [29, 30].

**Quel est l'âge des chondrites ?** A l'inverse des chondrites ordinaires qui indiquent que leurs corps parent ont subi des températures métamorphiques élevées et des taux de refroidissement de l'ordre de la dizaine à la centaine de degrés par Ma [31], les chondrites carbonées montrent peu de transformations métamorphiques. Cela pourrait s'expliquer par une accréation tardive du corps parent des chondrites carbonées alors que l'essentiel de  $^{26}\text{Al}$  et du  $^{60}\text{Fe}$  avait déjà disparu [8]. Cette idée est contre intuitive: bien que les chondrites carbonées soient les météorites les plus primitives en termes de composition ce

ne serait pas celles qui se sont accrétées en premier. Des corps planétaires auraient été accrétés et différenciés avant le corps parent des chondrites carbonées.

[1] Wasserburg G. J. (1987) *Earth Planet. Sci. Lett.* 86,129-173. [2] Podosek F. A. & Swindle T. D. (1988) Dans *Meteorites and the Early Solar system* (Eds J. Kerridge & M. Matthews) p1093-1113 et p1114-1126. [3] Podosek F. A. & Cassen P. (1994) *Meteoritics* 29, 6-25. [4] McKeegan K. D. & Davis A. M. (2003). Dans *Treatise on geochemistry* Vol I (eds H. Holland & K. Turekian), p 431-460. [5] Chaussidon M. (2005) Dans *Des atomes aux planètes habitables* (eds M. Gargaud, P. Claeys & H. Martin) p57-78. [6] Manhès G., Göpel C. & Allègre C. J. (1988) *Comptes Rendus ATP Planétologie*, 323-327. [7] Amelin Y., Krot A. N., Hutcheon I. D., & Ulyanov A. A. (2002) *Science* 297, 1679-1683. [8] Bouvier A., Blichert-Toft J., Moynier F., Vervoort J. D. & Albarède F. (soumis) *Geochim. Cosmochim. Acta*. [9] Chaussidon M., Robert F. & McKeegan K.D. (2006) *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 224-245. [10] Chaussidon M. & Gounelle M. (2005) Dans *Meteorites and Early Solar System II* (Eds D. S. Lauretta & H. Y. McSween), 323-340. [11] Galy A., Hutcheon I. D. & Grossman L. (2004) *LPS XXXV*, Abstract#1790. [12] Young E. D., Simon J. I., Galy A., Russel S. S., Tonui E. & Lovera O. (2005) *Science* 308, 223-227. [13] Thrane K., Bizzarro M. & Baker J. (2006) *LPS XXXVII*, Abstract #1973. [14] Goswami J. N., Marhas K. K., Chaussidon M., Gounelle M. & Meyer B. S. (2005) Dans *Chondrites and the protoplanetary disk* (eds A. N. Krot & E.R.D Scott), p 485-514. [15] Gounelle M., Shu F. H., Shang H., Glassgold A.E., Rehm K.E. & Lee T. (2006) *Ap. J.* 640, 1163-1170. [16] Montmerle T., Augereau J.-C., Chaussidon M., Gounelle M., Marty B. & Morbidelli A. (sous presse) *Earth, Moon and Planets*. [17] Mostefaoui S., Kita N. T., Togashi S., Tachibana S., Nagahara H. & Morishita Y. (2002) *Meteor. Planet. Sci.* 37, 421-438. [18] Bizzarro M., Baker J. A. & Haack H. (2004) *Nature* 431, 275-278. [19] Galy A., Young E. D., Ash R. D. & O'Nions R. K. (2000) *Science* 290, 1751-1753. [20] Chaussidon M., Libourel G. & Krot A. N. (2006) *LPS XXXVII*, Abstract 1335. [21] Krot A., Amelin Y., Cassen P. & Meibom A. (2005) *Nature* 436, 989-992. [22] Zanda B. (2004) *Earth Planet. Sci. Lett.* 224, 1-17. [23] Libourel G., Krot A.N. & Tissandier L. (sous presse) *Earth Planet. Sci. Lett.* [24] Libourel G. & Krot A.N. (sous presse) *Earth Planet. Sci. Lett.* [25] Bizzarro M., Baker J. A., Haack H. & Lundgaard K. L. (2005) *Ap. J.* 632, L41-L44. [26] Baker J., Bizzarro M., Wittig N., Connelly J. & Haack H. (2005) *Nature* 435, 1127-1131. [27] Kleine T., Mezger K., Palme H., Scherer E. & Münker C. (2005) *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 5805-5818. [28] Schersten A., Elliott T., Hawkesworth C., Russel S. & Masarik J. (2006) *Earth Planet. Sci. Lett.* 241, 530-542. [29] Bizzarro M., Ulfbeck D. & Thrane K. (2006) *LPS XXXVII*, Abstract #2020. [30] Quitté G., Meier M., Latkoczy C., Halliday A. & Günther D. (2006) *Earth Planet Sci. Lett.* 242, 16-25. [31] Göpel C., Manhès G. & Allègre C. J. (1994) *Earth Planet. Sci. Lett.* 121,153-173.