



Sujet proposé pour un début de contrat en octobre 2015

**TITRE DU SUJET: Condensation et accréation des premiers solides à l'origine des corps parents des météorites primitives**

Directeur: **Marc CHAUSSIDON (DR CNRS, [chaussidon@ipgp.fr](mailto:chaussidon@ipgp.fr))**

Co-Directeur: **Frédéric MOYNIER (Prof. Université Paris Diderot, [moynier@ipgp.fr](mailto:moynier@ipgp.fr))**

Equipe d'accueil: **IPGP - équipe CAGE (Cosmochimie-Astrophysique-Géophysique Expérimentale) - UMR7154**

Financement: Contrat doctoral

---

*Plus de renseignement voir : <http://ed560.ipgp.fr>, Rubrique : Offres\_de\_thèse  
Il est indispensable de faire acte de candidature sur le site de l'Ecole doctorale*

---

Parmi les météorites, les chondrites sont considérées, de par leur composition chimique et isotopique et leur nature pétrographique et minéralogique, comme les plus primitives. Ce sont des fragments de petites planètes (les planétésimaux) formées par accréation de la poussière présente dans le plan du disque protoplanétaire durant les premiers quelques millions d'années de son histoire. Tous les modèles de formation planétaire et les modèles de composition de Terre, considèrent jusqu'à présent les chondrites comme un échantillonnage représentatif des objets à partir desquels les planètes se sont formées.

De grandes avancées ont été réalisées récemment, d'une part dans l'étude de la chronologie de formation des composants des chondrites (essentiellement grâce aux variations de concentration de  $^{26}\text{Al}$ ), et d'autre part dans la simulation astrophysique du transport et de l'accréation du gaz et des grains du disque pour former les premiers corps planétaires. Toutes ces avancées montrent que la formation des chondrites n'est pas aussi simple à comprendre qu'on le pensait jusqu'à présent. Il est par exemple évident maintenant que les différents composants des chondrites (les inclusions réfractaires ou CAIs, les chondres et la matrice) ont eu des histoires complexes (condensation, évaporation, fusion, altération) à différents endroits du disque et pendant des durées variables avant leur incorporation par accréation dans les corps parents des chondrites. Plusieurs questions clefs, parmi d'autres, se posent: (i) à quel moment dans l'évolution du disque les chondrites se sont elles formées, (ii) est ce que la formation planétaire passe obligatoirement par un stade d'objets planétaires chondritiques, (iii) quelle était la structure des corps parents des chondrites, (iv) pourquoi les chondrites ont elles une composition solaire, y a t'il une complémentarité entre chondres et matrice, et plus généralement d'où viennent les différences de composition chimique des chondrites?

L'objectif de cette thèse est de reconsidérer l'origine des chondrites et de leurs composants en développant une approche, jamais été utilisée jusqu'à présent, qui repose sur les variations, à priori faibles mais significatives, des compositions isotopiques des éléments majeurs qui contrôlent 95% de la composition des chondrites (Ca, Mg, Al et Si, ou composition CMAS) hors phase métallique, et de quelques éléments mineurs d'intérêt tels que le Ti. Certains des arguments les plus forts sur l'origine des chondrites, des CAIs et des chondres viennent des co-variations observées entre les éléments majeurs (e.g. rapports Al/Si, Mg/Si, Ca/Si, cf "diagramme de Jagoutz"). Nous souhaitons reconstruire tous ces raisonnements à partir des variations éventuelles des compositions isotopiques de ces

éléments et de leurs co-variations avec les rapports de concentration. Les variations des compositions isotopiques de Mg, Ca et Si (fractionnement des isotopes stables) sont par exemple des indicateurs des processus d'évaporation et de condensation, celles de l'isotope radiogénique du Mg ( $^{26}\text{Mg}$  provenant de la désintégration radioactive de  $^{26}\text{Al}$ ) sont des indicateurs de chronologie relative, celles du Ti (fractionnement des isotopes stables) pourraient être des indicateurs de  $f\text{O}_2$ .

Cette approche n'a jamais été réalisée, et cela pour deux raisons: d'une part la question de l'origine des chondrites a été considérée (à tort) comme résolue pendant une vingtaine d'années, et d'autre part les mesures des compositions isotopiques des éléments CMAS et Ti n'étaient pas possibles à haute précision avec un protocole qui permette de les réaliser en nombre (une approche un peu statistique sera nécessaire). L'ambition analytique de ce sujet est de mettre au point certaines de ces mesures isotopiques (Si, Mg) en utilisant le couplage entre ablation laser (laser Excimer 192nm Photon Machines récemment installé à l'IPGP) et la spectrométrie de masse à source plasma et multi-collection (MC-ICPMS) Neptune, les autres étant faites par une approche plus classique (chimie + MC-ICPMS Neptune par exemple pour les isotopes du Ti). La réalisation de mesures isotopiques en haute précision par ablation laser nécessitera une mesure simultanée de la composition chimique, ce qui sera fait en couplant l'ablation laser à la fois au MC-ICPMS et à un ICPMS quadripolaire (aussi récemment installé à l'IPGP). L'ensemble de ces développements devrait permettre d'obtenir des mesures isotopiques de haute précision (mieux que  $\pm 0,1\%$  à 2 sigma) sur les différents composants des chondrites à l'échelle de la centaine de micromètres, ainsi que des mesures semi-roche totale sur des masses un peu plus grandes d'échantillon prélevées par micro-échantillonnage avec un système micro-drill. Dans certains cas, il sera peut être nécessaire d'étudier certains échantillons avec une résolution spatiale plus importante en utilisant les sondes ioniques à multi-collection (MC-SIMS) du service national INSU du CRPG de Nancy. Quelques chondrites emblématiques (par exemple la CV3.5 Allende qui contient un grand nombre d'inclusions réfractaires et a été beaucoup étudiée et est très importante bien qu'elle ait subi un métamorphisme jusqu'à  $\approx 500^\circ\text{C}$ , la chondrite CM Paris, quelques chondrites ordinaires et à enstatite) seront étudiées.

Plan de travail prévu:

- mise au point de la mesure des compositions isotopiques (fractionnement des isotopes stables) de Mg ( $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ ) et Si ( $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$  et  $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ ) par couplage entre ablation laser, MCICPMS Neptune, et ICPMS quadripolaire (calibration des effets de matrice, préparation de standards analysés par chimie-MCICPMS, ...)
- mise au point de la mesure des compositions isotopiques du Ti dans des olivines réfractaires de chondres et dans les CAIs (chimie-MCICPMS)
- expériences de réduction d'olivines dans un flux d'hydrogène gazeux pour rechercher les fractionnements isotopiques éventuels du Ti et déterminer les cinétiques de réaction
- analyses isotopiques (Ca, Mg, Si et Ti) dans les différents composants de plusieurs types de chondrite.
- interprétation de ces résultats dans le contexte de ce qui est connu de la composition des chondrites et de leurs composants (éléments majeurs et mineurs) et des processus tels que l'évaporation ou la condensation.
- intégration de ces résultats dans un modèle physico-chimique du disque et de l'accrétion (cette thèse se fera en parallèle avec une approche de modélisation astrophysique menée en collaboration par Sébastien Charnoz et Marc Chaussidon et qui est l'objet d'un autre sujet de thèse)

**Financement:**

- Cette thèse sera financée au début sur des reliquats de crédits ERC (ERC Senior Grant 2008-2013, Marc Chaussidon), sur des crédits liés à la chaire d'excellence de Frédéric Moynier et si nécessaire des crédits ERC (ERC starting grant 2015-2020 de Frédéric Moynier). Ce sujet rentre dans le cadre des financements du Labex UnivEarths attribués à Marc Chaussidon et Frédéric Moynier (WP dirigé par Sébastien Charnoz).

- Une demande ANR sur une problématique englobant ce sujet a été soumise au défi de tous les savoirs. Des demandes au Programme National de Planétologie seront soumises chaque année.