

Avis de Soutenance

Monsieur Enguerrand CARLIER

Sciences de l'Univers

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés
L'origine des micrométéorites

Travaux dirigés par Madame Caroline FITOUSSI

Soutenance prévue le **mardi 23 juin 2026** à 15h00

Lieu : Amphithéâtre Anne l'Huillier ENS de Lyon, 46 allée d'Italie, 69007, Lyon 7ème

Composition du jury proposé

Mme Caroline FITOUSSI	Chargée de recherche	CNRS Lyon	Directrice de thèse
M. Matthieu GOUNELLE	Professeur du Muséum national d'histoire naturelle	MNHN Paris	Examinateur
M. David NESVORNY	Chercheur	Institut de Recherche du Sud-ouest - Colorado (USA)	Rapporteur
Mme Aurélie GUILBERT-LEPOUTRE	Directrice de recherche	CNRS Lyon	Examinatrice
Mme Anne TRINQUIER	Chercheure	IFREMER Plouzané	Examinatrice
Mme Cathy QUANTIN-NATAF	Professeure des universités	Lyon 1 Université	Examinatrice
M. Alessandro MORBIDELLI	Professeur	Collège de France Paris	Rapporteur

Mots-clés : Cosmochimie, micrometeorites, Formation du système solaire, Isotope stable, AMS, Anomalies nucléosynthétiques

Résumé :

Chaque année, la Terre reçoit un flux de plusieurs dizaines de milliers de tonnes de matière extraterrestre. On compte notamment les météorites, débris d'astéroïdes présents sur notre planète, assez connues du grand public. Pourtant, elles ne représentent que 10 tonnes par an, ce qui est une part infime du flux de matière extraterrestre. En réalité, la part essentielle des apports extraterrestres provient des « micrométéorites », des grains silicatés d'une taille inférieure au millimètre. On parle ici d'environ 40 000 tonnes par an et autour de 5000 tonnes par an présents sous forme solide. Cependant, la question de l'origine des micrométéorites n'est pas résolue à l'heure actuelle. Des études du nuage zodiacal, l'ensemble des poussières présentes dans le système solaire, suggèrent que près de 70 % des micrométéorites sont associées aux comètes de la famille de Jupiter. Le reste du flux est lui associé aux astéroïdes et aux comètes de type Halley. Afin de contraindre l'importance des réservoirs sources des micrométéorites, en utilisant une caractérisation directe de ces grains, je me suis intéressé à l'influence du rayonnement cosmique.

En effet, le rayonnement cosmique, un flux de protons et de particules alpha, va tout au long du trajet des micrométéorites, mais aussi lorsque que la micrométéorite est au sein de son corps parent (on parle alors de pré-exposition), interagir avec la matière et ainsi produire des isotopes cosmogéniques. Grâce aux teneurs en isotopes cosmogéniques présents dans les micrométéorites et au développement d'un modèle prédictif, une méthode a été développée afin de retracer l'origine des micrométéorites. Appliquée à des grains individuels et à des sets de micrométéorites, il a été possible de contraindre l'origine des grains dont le diamètre est supérieur à 100 μm . Les résultats obtenus montrent que les sphérules cosmiques (micrométéorites fondues lors de l'entrée atmosphérique) sont associées aux astéroïdes et aux comètes de la famille de Halley. Les micrométéorites non fondues sont majoritairement associées aux comètes de la famille de Jupiter. Ces résultats sont cohérents avec les études du nuage zodiacal qui montrent, sur la base de la vitesse d'entrée des grains dans l'atmosphère terrestre, une dépendance de l'origine en fonction de la taille et de l'entrée atmosphérique. Afin de mieux contraindre les réservoirs sources, j'ai mesuré la composition isotopique du chrome dans les micrométéorites. Cela a nécessité le développement d'une chimie couplée permettant de coupler l'analyse des isotopes cosmogéniques et du chrome. Le chrome est un élément porteur d'anomalies nucléosynthétiques qui permettent de tracer les réservoirs primitifs du Système Solaire. Les résultats montrent une évolution en fonction de la taille du ratio entre astéroïdes de type S et de type C dans les sphérules cosmiques. Cette observation vient corroborer les données isotopiques de l'oxygène présentes dans la littérature.

Summary:

Every year, Earth receives a flow of tens of thousands of tons of extraterrestrial material. This includes meteorites, fragments of asteroids found on our planet, which are fairly well known to the general public. However, they account for only 10 tons per year, which is a tiny fraction of the total flow of extraterrestrial material. In reality, the bulk of extraterrestrial material comes from "micrometeorites", silicate grains smaller than a millimeter. They represent about approximately 40,000 tons per year, with around 5,000 tons per year reaching the ground as solid grain. However, the question of the origin of micrometeorites remains unresolved at this time. Studies of the zodiacal cloud, the totality of dust present in the solar system, suggest that nearly 70% of micrometeorites are associated with Jupiter-family comets. The remainder of the flux is associated with asteroids and Halley-type comets. In order to determine the importance of the source reservoirs for micrometeorites by directly characterizing these grains, I investigated the influence of cosmic radiation. Indeed, cosmic radiation, a flux of protons and alpha particles, interacts with matter throughout the micrometeorite's travel to Earth, as well as when the micrometeorite is within its parent body (a process known as pre-exposure), thereby producing cosmogenic isotopes. Using the cosmogenic isotope content in micrometeorites and the development of a predictive model, a method was developed to trace the origin of micrometeorites. Applied to individual grains and sets of micrometeorites, it was possible to constrain the origin of grains with a diameter greater than 100 μm . The results show that cosmic spherules (micrometeorites melted upon atmospheric entry) are associated with asteroids and comets of the Halley family. Unmelted micrometeorites are predominantly associated with Jupiter-Family comet. These results are consistent with studies of the zodiacal cloud, which show, based on the entry velocity of the grains into Earth's atmosphere, that origin depends on size and atmospheric entry conditions. To better constrain the source reservoirs, I measured the isotopic composition of chromium in micrometeorites. This required the development of a coupled chemistry to analyze both cosmogenic isotopes and chromium. Chromium is an element that carries nucleosynthetic anomalies, which allow us to trace the primordial reservoirs of the Solar System. The results show a trend depending on the ratio of S-type to C-type asteroids in cosmic spherules' source reservoir. This observation corroborates the oxygen isotope data reported in the literature.