

Étude nano-spectroscopique et nano-isotopique du continuum astéroïde-comète à travers les échantillons de l'astéroïde Ryugu et les micrométéorites Antarctique (AMMs)

Mots clés : Astéroïde carboné, comète, poussière interplanétaire, AFM-IR, NanoSIMS

Astéroïdes et comètes se distinguent par leurs orbites, circulaires entre Mars et Jupiter pour les astéroïdes, et elliptiques pour les comètes. De plus, les surfaces cométaires présentent des glaces résiduelles en surface, ce qui n'est pas le cas pour les astéroïdes. Cependant, l'hypothèse d'un continuum entre astéroïdes et comètes, plutôt que d'une dichotomie, a été étayée grâce aux analyses d'échantillons prélevés sur la comète 81P/Wild2. Des phases cristallines formées à haute température y ont été découvertes, présentant des similitudes avec leurs homologues dans les météorites primitives (astéroïdales).

Afin d'étudier le continuum astéroïde-comète, nous avons analysé des échantillons provenant de l'astéroïde carboné Ryugu rapportés par la mission japonaise Hayabusa2, et les avons comparé à des météorites et micrométéorites (MMs). Les MMs sont aujourd'hui l'apport dominant de matière extraterrestres sur Terre, et sont collectées dans la neige en Antarctique. Des simulations numériques montrent que les MMs auraient principalement une origine cométaire, une minorité d'entre-elles ayant une origine astéroïdale.

Ryugu a été associé aux chondrites CI, dont la composition élémentaire est proche de celle de la photosphère solaire. La collection de MMs Concordia contient aussi ~3% de particules de type CI. Les objets de type CI, sont composés de mélanges complexes de minéraux et de matière organique (MO), qui sont des témoins des conditions de formation et d'évolution à basse température des matériaux présents au début du système solaire, et de leur évolution sur le corps parents.

Cette thèse se concentre sur la caractérisation chimique et isotopique de la MO des échantillons de Ryugu, des MMs de type CI et des chondrites CI, en utilisant des méthodes analytiques de pointe à l'échelle micro et nanométrique.

L'objectif est de comparer et de relier ces matériaux entre eux en explorant leur composition, permettant ainsi de retracer les processus de formation, et leur affiliation dans le système solaire pour les situer dans le continuum astéroïde-comète.

Des techniques avancées, telles que l'analyse isotopique à l'échelle nanométrique (NanoSIMS) et la nanospectroscopie IR (AFM-IR) ont ensuite été employées, et un protocole pour corréler les analyses AFM-IR et NanoSIMS a été développé avec succès, permettant de mesurer les compositions isotopiques et chimiques de patches organiques sub-micrométriques au sein de la matrice minérale à une échelle spatiale sans précédent. Ces techniques permettent d'éviter l'extraction de la MO, qui en dégrade les fractions moléculaires. Ce travail est la première étude systématique de matériaux extraterrestres par AFM-IR.

La MO étudiée est hétérogène et peut être trouvée sous forme de patches sub-micrométriques ou sous forme diffuse intimement liée à la matrice. Dans les MMs, elle est riche en C=C avec une contribution mineure de C=O et CH_x dans les patches, tandis que dans Ryugu les patches et la MO diffuse sont riches en C=O. Les compositions isotopiques en H, C et N de ces patches dans les MMs sont comparables à celles des échantillons d'Orgueil et de Ryugu, à l'exception d'une MM de type CI qui présente de forts enrichissements en ¹⁵N et D et des appauvrissements en ¹³C. Il n'y a pas de corrélation systématique entre les compositions chimiques et isotopiques. Ces résultats indiquent que la MO dans les MMs de type CI provient à la fois des régions internes (astéroïdales) et externes (cométaires) du disque protoplanétaire, ce qui en fait des échantillons idéaux pour étudier le continuum astéroïde-comète. Ils suggèrent aussi la présence possible de minéraux hydratés dans la matière cométaire.

Nano-spectroscopic and nano-isotopic study of the asteroid-comet continuum through the asteroid Ryugu samples and Antarctic MicroMeteorites (AMMs)

Keywords : Interplanetary dust, carbonaceous asteroid, comet, AFM-IR, NanoSIMS

Asteroids and comets are dynamically distinguished by their orbital trajectories, roughly circular between Mars and Jupiter for asteroids, and elliptical for comets. Other major differences are the remnant ices at the surface of comets and not of asteroids. However, the hypothesis of an asteroid-comet continuum, rather than a dichotomy, has gained support thanks to the analyses of samples returned from the Stardust space mission, which sampled comet 81P/Wild2. Crystalline phases formed at high temperature were in particular discovered in these samples, showing large similarities with their counterparts in primitive (asteroidal) meteorites.

To investigate the asteroid-comet continuum, we analyzed samples returned from the C-type asteroid Ryugu by the JAXA space mission Hayabusa2, and compared them to meteorites and micrometeorites (MMs). MMs dominate the extraterrestrial material input on Earth nowadays, and they have been collected at Dome C (Concordia station, Antarctica) for several decades. Based on numerical simulations, MMs are believed to have a cometary origin for the most part, and an asteroidal origin for a minor fraction of them.

The analyses of Ryugu show a link with CI chondrites, a rare type of meteorites showing the most similar elemental composition to that of the Solar photosphere. The Concordia MM collection also contain a small proportion of CI-like particles. CI chondrites, CI-like MMs and Ryugu samples consist of complex mixtures of minerals with a small fraction of organic matter (OM), which recorded conditions in the low-temperature reservoirs of the accretion region and the subsequent chemical and isotopic evolutions on their parent bodies.

This thesis focuses on the chemical and isotopic characterization of the OM in Ryugu samples, CI-like MMs, and CI chondrites, using state-of-the-art micro- to nano-scale analytical methods. The aim is to compare and link these materials, exploring the composition of organics at different scales, to retrace their formation processes, dynamics, and evolution, ultimately placing them on the asteroid-comet continuum.

The mineralogy of CI chondrites, CI-like MMs and Ryugu samples show evidence for significant aqueous alteration on their parent body. We used Fourier transmission infrared microscopy (μ -FTIR) to provide an overview of the OM distribution within this mineral matrix. Advanced techniques, such as nanoscale isotopic analysis (NanoSIMS) and IR nanospectroscopy (AFM-IR) were then employed, and a protocol for correlating AFM-IR and NanoSIMS analyses has been successfully developed, allowing to measure the isotopic and the chemical compositions of sub-micrometer organic patches at an unprecedented spatial scale within the mineral matrix. Furthermore, these techniques also prevent the need for extraction of OM from the mineral matrix, which degrades the molecular fractions of OM. The AFM-IR technique combines the spatial resolution of AFM with IR spectroscopy, and this work is the first systematic study of extraterrestrial materials by AFM-IR.

In the samples studied, OM is heterogeneous and can be found at the nanoscale as sub-micrometer sized patches in the matrix or as a diffusely scattered phase. In MMs the OM is C=C-rich with minor contributions of C=O & CH in patches, while in Ryugu both patches and diffuse OM is C=O-rich. The H, C & N isotopic compositions of these patches in the MMs are comparable to that of the CI Orgueil and Ryugu samples, except for one CI-like MM, which shows exceptional ^{15}N and D enrichments, as well as ^{13}C depletions. No systematic correlations between the chemical and isotopic compositions were found. These results point toward diverse origins for the OM within individual CI-like MMs, from both the inner (asteroidal) and the outer (cometary) regions of the protoplanetary disk, placing them as ideal samples to study the asteroid-comet continuum. They also suggest the possible presence of hydrated minerals in cometary matter.