

Des cailloux et quelques poussières pour comprendre la naissance de notre Système Stellaire

Pierre Beck et Lydie Bonal

Reçu 18.07.2014 - Accepté 09.09.2014

Résumé / Abstract / Resumen

Nous disposons aujourd'hui sur Terre d'une importante quantité de matière extra-terrestre sous la forme de météorites, de micrométéorites et de poussières interplanétaires (IDPs pour Interplanetary Dust Particles). Ces cosmomatériaux sont les objets les plus anciens du Système Solaire, et nous permettent ainsi de remonter aux premiers instants de la formation de notre système planétaire. Nous décrivons dans cet article la diversité de ces cosmomatériaux et leur lien avec les petits corps dont ils sont probablement originaires (astéroïdes et comètes). Certains cosmomatériaux sont riches en matière organique et en éléments volatiles (en particulier l'eau) ; astéroïdes et comètes ont ainsi pu apporter sur Terre les briques nécessaires au développement de la vie. Ces théories seront discutées. Enfin, l'impact des processus géologiques sur les corps parents astéroïdaux et cométaires sera présenté, ainsi que l'importance de l'exploration des petits corps (et du retour d'échantillons) dans les missions spatiales des décennies à venir.

We have today available for the scientific community a series of extra-terrestrial material, in the form of meteorites, micrometeorites and interplanetary dust particles (IDPs). These cosmomaterials are the oldest solid samples from the Solar System, and enable us to trace back the first instants of our stellar system. We describe in this article the diversity of these cosmomaterials and their relation with their parent bodies: asteroids and comets (known together as small bodies). Some are rich in organic compounds and volatile molecules (including water) and therefore small bodies might have brought to Earth the bricks of life. These theories will be discussed. Finally, the effect of geological processes on their parent bodies will be presented, as well as the importance of small bodies exploration (and sample return) in the forthcoming decades of space exploration.

Hoy disponemos de una gran cantidad de material extraterrestre sobre la Tierra en forma de meteoritos, micrometeoritos y partículas de polvo interplanetario (IDPs, del inglés Interplanetary Dust Particles). Estos cosmomateriales son los objetos más antiguos del Sistema Solar y nos permiten trazar los primeros momentos de formación de nuestro sistema planetario. En este artículo describimos la diversidad de estos

cosmomateriales y su relación con los pequeños cuerpos de los que se originan: asteroides y cometas. Algunos cosmomateriales son ricos en materia orgánica y elementos volátiles (en particular el agua), lo cual indica que los pequeños cuerpos del Sistema Solar podrían haber traído a la Tierra los ladrillos necesarios para el desarrollo de la vida. En el presente artículo se discuten estas teorías. Por último, se explica el impacto de los procesos geológicos sobre los asteroides y los cometas, así como la importancia de la exploración y el retorno de muestras de los pequeños cuerpos que serán efectuados por un número de misiones espaciales en las próximas décadas.

Mots-clé / Key Words / Palabras clave

Cosmomateriaux, Système Solaire, matière organique, astéroïdes, comètes, missions spatiales

Cosmomaterials, Solar System, organic material, asteroids, comets, space missions

Cosmomateriales, Sistema Solar, materia orgánica, asteroides, cometas, misiones espaciales

Pour la petite communauté des « météoriticiens », 2014 marquera le 150^{ème} anniversaire d'un événement astronomique fameux. Le samedi 14 mai 1864, une boule de feu va illuminer le ciel aveyronnais et plusieurs kilos d'une masse sombre minéralo-organique vont être ramassés : la météorite d'Orgueil. Cette roche, dont la masse principale est aujourd'hui conservée au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, est une célébrité au sein de la communauté météorique et plus généralement des Sciences de la Terre. Au sein de cette roche les abondances des éléments chimiques ont été quasiment inaltérées depuis sa

formation, il y a 4567 Millions d'années. La composition d'Orgueil est donc qualifiée de primitive, car non modifiée par les différents processus ayant ultimement abouti à la formation planétaire. Cette roche sert toujours aujourd'hui de référence géochimique et, cent cinquante ans après sa chute, reste une des météorites les plus étudiées et les plus demandées.

Il existe un bestiaire de météorites, peuplé de familles, classes et sous-classes. La météorite d'Orgueil fait partie d'une famille de météorites sombres, les chondrites carbonées dites de type CI. Les météorites, avec les poussières interplanétaires, et les micrométéorites, forment une suite d'objets solides extra-terrestres rassemblées sous le terme cosmomatériaux. Ces matériaux nous offrent l'opportunité d'un voyage dans le temps en nous permettant d'étudier et de reconstituer en laboratoire les premiers instants d'un système planétaire en formation, le nôtre, le Système Solaire.

1. La diversité des cosmomatériaux et de leur corps parent :

Chaque année plusieurs dizaines de gros objets (>1m de diamètre) vont intercepter l'orbite de la Terre, avec une vitesse de l'ordre de 10 km/s (36 000 km/h = MAC x 20). Ces météores¹ sont alors généralement freinés puis fragmentés par leur entrée atmosphérique, avant de chuter jusqu'à la surface de la Terre à une vitesse relativement modeste (de l'ordre de 300 km/h) par rapport à leur vitesse de rentrée. Une fois au sol, les fragments retrouvés par l'œil averti seront nommés météorites. De telles chutes de météorites ont été fréquemment relatées au cours des dernières centaines d'années. Le début du 21^{ème} siècle a été lui marqué par les observations de la rentrée explosive du bolide de Chelyabinsk dont les vidéos ont fait le tour du monde. De tels événements sont rares à l'échelle humaine et la majeure partie de la matière extra-terrestre qui tombe annuellement sur Terre (estimée grossièrement à plusieurs dizaines de milliers de tonnes) est sous la forme de petits fragments rocheux et surtout de poussières.

On réuni sous le terme cosmomatériaux l'ensemble des objets solides extra-terrestres disponibles à l'analyse scientifique. On les sépare en trois catégories, définies

selon leur mode de collecte plutôt qu'à leurs caractéristiques propres. Les météorites sont des « pierres » et sont collectées soit après l'observation d'un bolide (les chutes, par exemple la météorite d'Orgueil) soit sans observation de bolide (trouvailles, par exemple la météorite de Paris à l'histoire extraordinaire). Un deuxième mode de collecte de ces cosmomatériaux se fait via la dissolution de larges volumes de glaces antarctiques, dans les régions centrales du continent, supposées être très isolées de la pollution par les aérosols volcaniques et anthropiques. Les poussières récoltées sur des filtres très fins ont des tailles de quelques microns au mm et sont appelées micrométéorites (Engrand et Maurette, 1998: 16). Enfin, un mode de collecte actif des poussières fines dérivant lentement dans l'espace interplanétaire existe. Ce mode de capture se fait haut dans l'atmosphère terrestre, par des avions « militaires », uniquement réalisée par les Etats-Unis, et abouti à la collecte des IDPs (Interplanetary Dust Particles). Pour compléter ce tableau, il faut rajouter désormais les grains cométaires ramenés par la mission Stardust (Brownlee et al., 2006: 6), ainsi que les fragments de l'astéroïde Itokawa ramenés par la sonde japonaise Hayabusa (Nakamura et al., 2011 : 4).

Dans de rares cas, la trajectoire précise du météore peut être déterminée et va alors permettre de calculer l'orbite de l'objet au sein du Système Solaire, et ainsi renseigner sur son origine. Pour la dizaine d'orbites de météores connus de façon précise, les trajectoires indiquent une provenance au sein du plan de l'écliptique², quelque part entre Mars et Jupiter. Cette région du Système Solaire est peuplée de quelques 300 000 rochers flottants, les astéroïdes dits de la ceinture principale, qui sont aujourd'hui reconnus comme les corps parents principaux des météorites. Quelques rares météorites sont d'origine lunaire et martienne. L'orbite initiale des IDPs et des micrométéorites au sein du système solaire n'est pas observable directement. Néanmoins il est aujourd'hui reconnu qu'une grande partie de ces cosmomatériaux est reliée à des objets sombres du système solaire, des corps froids et poussiéreux, les comètes.

¹ Lorsqu'un objet rocheux rentre dans l'atmosphère de la Terre, il s'échauffe via frottement avec l'atmosphère et va produire une traînée lumineuse dans le ciel ; ce phénomène est appelé météore. Les fragments rocheux issus de cet objet, lorsqu'ils seront retrouvés à la surface de la Terre seront appelés météorites.

² Le plan de l'écliptique est le plan dans lequel tournent la plupart des planètes du Système Solaire.

2 : Des matériaux primitifs

Les minéraux constituant les météorites n'ont pour la plupart rien d'exceptionnel par rapport aux minéraux que l'on observe dans les roches terrestres. On retrouve par exemple en abondance des olivines et des pyroxènes, qui sont les matériaux prédominants à l'intérieur du globe terrestre. Certes certaines phases exceptionnelles sont parfois identifiées, mais restent très anecdotiques. Dans la même lignée, les éléments chimiques qui composent les météorites n'ont rien d'original et sont évidemment les mêmes que ceux recensés sur Terre. Néanmoins leurs abondances dans certaines classes de météorites interpellent. En effet dans les chondrites dites carbonées et plus spécifiquement dans les météorites de type CI, les proportions des éléments chimiques sont identiques à quelques pourcents près à celles mesurées pour le soleil, pilier de notre système stellaire représentant plus de 98 % de sa masse totale. En d'autres termes, dans ce type de météorites, la concentration des éléments chimiques est identique à celle du système solaire dans sa globalité. Cette propriété en font des objets « primitifs », représentant en quelque sorte l'ingrédient primitif/initial, qui sera mélangé, chauffé, comprimé, altéré à différents degrés, afin d'aboutir aujourd'hui à un système planétaire riche en diversité géologique.

C'est via ces météorites que l'âge du système solaire est connu précisément (4.567 Ga) au moyen de datations d'éléments radioactifs de longues périodes de décroissance. Ces météorites servent aussi de référence compositionnelle pour les concentrations élémentaires, isotopiques, afin de comprendre comment se fait la séparation d'une planète entre enveloppes de nature chimique différentes, un phénomène appelé différenciation. Les météorites sont des objets essentiels pour comprendre notre système solaire, mais aussi fondamental pour notre compréhension de la structure et de l'évolution de la planète Terre.

3 : Les minéraux constituant les météorites primitives :

La plupart de nos météorites sont d'origine astéroïdale. Entre Mars et Jupiter plusieurs dizaines de milliers d'astéroïdes sont présents. Evidemment, ils ne sont pas tous identiques et sont ainsi à l'origine de différentes catégo-

ries de météorites. Comme souligné précédemment, pour contraindre la formation et évolution du système solaire, nos objets de prédilection sont les météorites ayant subi le moins de modifications depuis leur formation. Ces météorites dites primitives sont appelées « chondrites » : il s'agit des fossiles du système solaire et constituent 80 % des chutes observées sur Terre. Les autres météorites proviennent de corps parent ayant connu une activité tectonique et au sein desquels le processus de différenciation a opéré. Apprenons à mieux les connaître les chondrites en passant en revue tout d'abord ce qui les constitue.

Les chondrites sont des roches sédimentaires formées de 3 composants principaux : des chondres, des inclusions réfractaires et une matrice fine les englobant (Fig. 1). Les proportions relatives de chondres, matrice, et inclusions réfractaires, et également la taille des chondres notamment permettent de distinguer plusieurs classes de chondrites. Tous ces composants se sont formés très tôt dans l'histoire du système solaire, avant la formation des astéroïdes.

Les inclusions réfractaires, sont composées de minéraux riches en calcium et aluminium, et également titane. Elles sont le siège de nombreuses anomalies isotopiques. Elles sont constituées de plusieurs minéraux se formant à très haute température (jusqu'à 1500°C) : typiquement de l'hébonite, du spinel, du diopside... Ces inclusions réfractaires sont relativement rares (de < 1 à 10 % en volume).

Les chondres sont les composants majoritaires des chondrites (d'où leur nom). Il s'agit de petites billes ayant fondu, souvent plus petites qu'un grain de riz, qui se sont formées durant les premiers stades également du système solaire dans des conditions de très faible pesanteur. Ces structures sphériques sont inconnues sur Terre. Un chondre est essentiellement formé de minéraux tels que des olivines, pyroxènes, plagioclases et de minéraux accessoires riches en fer et en magnésium.

Chondres et inclusions réfractaires sont réunis par un matériau finement cristallisé : la matrice.

Comment et où se sont formés ces différents composants ? Tout est une question de température dans la nébuleuse solaire, mélange de gaz et de poussières. Nous sommes tous familiers avec le fait que le givre se condense sous

forme de vapeur d'eau. De même, le gaz de la nébuleuse solaire s'est condensé sous forme de grains minéraux selon une séquence bien précise. A haute température, les premiers minéraux à se former sont les oxydes de calcium et d'aluminium (formant les inclusions réfractaires). Vient ensuite la condensation des principaux constituants des chondres : le fer et les silicates riches en magnésium. Ces minéraux réagissent ensuite avec le gaz environnant tandis que le refroidissement de la nébuleuse se poursuit. Des éléments volatiles se retrouvent ainsi peu à peu incorporés aux solides. Aux températures les plus basses a lieu la condensation des composés carbonés et des glaces (dans la matrice).

A cette notion de température s'ajoute des contraintes temporelles pour comprendre la formation des inclusions réfractaires et des chondres. Les inclusions réfractaires sont les premiers solides à s'être formés dans le système solaire, il y a 4,567 milliards d'années. C'est notre temps de référence, le temps « zéro » du système solaire. Leurs textures et compositions indiquent qu'elles sont issues d'épisodes de condensation et de fusion, à haute température, du mélange gaz et grains initial de la nébuleuse. Le laps de temps pendant lequel elles se sont formées semble très court. Peu de temps après (2 millions d'années plus tard) se formaient les chondres. Les détails de formation des chondres sont régulièrement débattus dans la littérature, mais la plupart des scientifiques s'accordent pour dire qu'ils se sont formés au cours d'événements violents lors desquels des agrégats de poussières riches en silicates ont fondu et ont formés des gouttelettes liquides avant leur incorporation dans leur astéroïde parent. Le refroidissement ayant été rapide, les chondres ont gardé leur forme sphérique. Nous sommes capables en laboratoire de reproduire les textures de chondres via l'utilisation de fours, contraignant ainsi les températures de formation et les temps de refroidissement, mais la source d'énergie à l'origine est toujours débattue (onde de choc, énergie solaire, éclairs, et même collisions entre astéroïdes ont été proposés). La durée de formation des chondres, d'après les datations faites en laboratoire, est plus longue que celle des inclusions réfractaires et s'étendrait sur plusieurs millions d'années.

Inclusions réfractaires et chondres sont des composés de haute température, constitués uniquement de minéraux formés dans la nébuleuse solaire. La matrice semble avoir

échappé à ces hautes températures et est formée d'un mélange de composés nébulaires et présolaires, et est riche en volatiles. En effet, en plus de nombreux minéraux, la matrice recèle les composés carbonés, une composante gazeuse, et également des très petits grains formés en dehors et avant le système solaire que l'on nomme les grains présolaires.

Etant données les températures mises en jeu, chondres et inclusions réfractaires se sont formés dans le système solaire interne (proche du soleil jeune). Toutefois l'identification de ces composés dans des échantillons cométaires (corps formés et résidant principalement dans le système solaire externe) prouve qu'il y a eu des échanges entre système solaire interne et externe.

Les chondrites sont les plus anciennes roches que les scientifiques sont amenés à toucher dans leur laboratoire. La datation par isotopes radioactifs montre qu'elles ont plus de 4.5 milliards d'années : elles précèdent la période de formation des planètes. Elles sont formées des matériaux primordiaux à partir desquels les planètes, les lunes, les astéroïdes et les comètes se sont assemblées. Elles ont échappé à la fusion et elles sont considérées comme primitives. Toutefois on ne pourrait les considérer comme totalement vierges de toute modifications ultérieures à l'accrétion des différents composants. En effet, un astéroïde est un environnement sur lequel différents processus géologiques sont à l'œuvre.

4 : Les processus secondaires

L'existence de différentes catégories de chondrites (différenciées par exemple à partir des abondances relatives des chondrites, inclusions réfractaires et matrice) est attribuée à des hétérogénéités physico-chimiques dans la nébuleuse solaire. Toutefois les chondrites ont subi des processus post-accrétion qui ont modifié leurs propriétés physico-chimiques initiales. La nature et l'intensité de ces processus doivent donc être comprises avant d'interpréter les propriétés des chondrites en terme de caractéristiques de la nébuleuse solaire.

Le phénomène de différenciation a eu lieu tôt dans l'histoire du système solaire, quelques millions d'années après

la formation des chondres. La source de chaleur doit être suffisamment importante pour fournir de l'énergie thermique nécessaire aux planétésimaux³ et pour contrecarrer les pertes induites par conduction. Les éléments radioactifs tels que l'uranium, thorium, ou encore potassium (sources d'énergie planétaire) ont une cinétique trop lente par rapport à celle mise en jeu par conduction impliquant de trop grandes pertes de chaleur. Les impacts, certes nombreux, induisent une augmentation globale de la température de l'astéroïde de quelques degrés seulement. Les conséquences des impacts sont donc localisées et ne peuvent être à l'origine de la différenciation astéroïdale. L'énergie d'accrétion est négligeable pour les petits corps de quelques centaines de kilomètres de diamètre, contrairement aux planètes. Des sources de chaleur externes, telles que l'induction électromagnétique produite par le vent solaire, ont également été suggérées mais cette hypothèse n'est actuellement que peu retenue. Ainsi la source de chaleur astéroïdale la plus importante est attribuée à la décroissance d'éléments radioactifs de courte période tels que l'²⁶Al et le ⁶⁰Fe. Souvent débattu dans la littérature scientifique, le rôle du ⁶⁰Fe est plus ou moins mis en avant mais reste largement moins important que l'²⁶Al. Cet élément radioactif est caractérisé par une énergie de décroissance radioactive élevée. Les produits de décroissance ont été identifiés dans les chondrites, ainsi que dans les achondrites issues de corps parents différenciés. Sa distribution était homogène (ou quasi) dans le système solaire. Et des simulations numériques permettent de relativement bien reproduire les observations dans les objets naturels que sont les météorites.

Les chondrites ont ainsi subi du métamorphisme thermique sur leur corps parent astéroïdal. Les scientifiques s'accordent pour considérer des modèles dans lesquels des matériaux initialement froids et déséquilibrés sont accrétés et ultérieurement chauffés sur le corps parent. Le chauffage subi a été insuffisant pour induire une fusion partielle ou même l'équilibre compositionnel des minéraux constitutifs. Toutefois, cet épisode thermique correspond typiquement à des températures variant de 20 °C à > 600°C, sur des périodes de 1 à 100 millions d'années pour des astéroïdes de taille moyenne (de 2 à 200 km). Les conséquences ne sauraient donc être négligées!

Le métamorphisme thermique va ainsi induire des changements dans la composition élémentaire des silicates et

des minéraux dits opaques, la recristallisation de certaines phases initialement amorphes dans les chondres, des changements texturaux de la matrice avec une taille croissante des grains le long d'un métamorphisme croissant. L'effet le plus évident sur la texture est la disparition progressive des contours de chondres et leur intégration progressive à la matrice. D'autres propriétés, variant de façon systématique avec un degré de métamorphisme croissant, ont été utilisées pour caractériser l'histoire thermique des chondrites les plus primitives, comme par exemple : la concentration en gaz nobles et en carbone, la concentration en chrome dans les grains de métal, la composition et la taille des inclusions d'olivine...

Les astéroïdes se sont accrétés entre Mars et Jupiter, zone du système solaire où la température était suffisamment basse pour que l'eau soit sous forme de glace, rendu liquide et mobile suite aux épisodes thermiques. Cette altération aqueuse est à l'origine de la modification de certaines textures et relations pétrographiques entre composants et surtout a induit la modification de nombreuses phases minérales : modification de leur composition chimique jusqu'au stade ultime de la formation de nouvelles phases minérales. La matrice étant à grains fins et étant la phase dans laquelle l'eau était initialement présente a particulièrement été modifiée. Typiquement l'altération aqueuse a abouti à la formation de phyllosilicates hydratés (généralement des serpentines et smectites) qui peuvent être associés à des carbonates, des sulfates, des oxydes et des sulfures secondaires. Les variations minéralogiques observées dans les différentes classes chondritiques seraient dues en grande partie à différentes conditions d'altération (pression, température, quantité relative eau et roche...).

Ces processus secondaires peuvent perturber la lecture des processus antérieurs à la formation des astéroïdes parents. Même si les chondrites sont les roches les plus primitives du système solaire, on se rend facilement compte qu'elles ne sont pas exactement les mêmes que lors de leur accrétion. On ne connaît pas de roches qui nous soient parvenues intactes, telles qu'elles ont été formées lors de

³ Les planétésimaux sont des objets rocheux massifs (typiquement 10-100 km) dont l'accrétion va aboutir à la formation des planètes. Certains vont échapper à la formation planétaire et rester en orbite dans le système solaire, devenant ainsi des astéroïdes.

l'accrétion dans la nébuleuse solaire. On se doute bien que les différents processus thermiques et aqueux ayant opéré sur l'astéroïde parent ont induit des modifications qui ne pourraient être négligées. Il nous faut donc identifier les différents processus et comprendre toutes les modifications induites pour d'une part caractériser ces processus et également pour pouvoir remonter à l'information initiale.

5 : La matière carbonée

Parmi les grandes questions fondamentales que les scientifiques cherchent à adresser se trouve la question de nos origines : origine de la vie étroitement liée à celle de l'eau et de la matière organique.

Les chondrites sont des roches carbonées qui contiennent jusqu'à 5% en masse de carbone, présent sous forme de carbonates, grains présolaires (nanodiamants, graphite, carbure de silicium) et matière organique. La composante carbonée majoritaire est la matière organique, constituée de C, H, O, et un peu de N et de S. Même si plusieurs des composés organiques trouvés dans les météorites sont également des biomolécules terrestres communes (e.g. acides aminés), il est clairement établi que la matière organique chondritique est indigène et résulte d'une synthèse chimique abiotique, c'est-à-dire synthétisée par des réactions ne faisant pas intervenir d'êtres vivants.

Il est de tradition parmi les scientifiques de distinguer deux fractions organiques, selon leur « solubilité » dans des solvants chimiques usuels. Ceci découle du protocole chimique utilisé pour extraire, isoler cette matière organique. En effet, cette matière étant « noyée » dans une matrice minérale il est nécessaire pour pouvoir tirer partie de certaines méthodes analytiques (raisons de sensibilité par exemple) de l'isoler. Ce n'est pas possible de le faire mécaniquement : la matière organique est trop intimement mélangée avec des minéraux.

Un traitement chimique est donc utilisé pour typiquement dissoudre les phases minérales et ne conserver que la matière organique. Cette opération chimique se déroule en deux temps principaux. Un premier lavage a lieu avec des solvants usuels polaires et apolaires⁴ du type méthanol, chloroforme, et dichlorométhane. Les petites molécules

organiques se solubilisant dans ces solvants sont désignées de « matière organique soluble ». Cette SOM, pour Soluble Organic Matter, est constituée de petites molécules organiques plus ou moins fonctionnalisées. Elle contient un certain nombre de molécules d'intérêt biologique, comme des acides aminés ou des sucres. L'échantillon restant est ensuite soumis à des bains dans des acides chimiques très forts pour dissoudre la plupart des minéraux. Le matériel résultant constitue ce que l'on appelle la « matière organique insoluble ». Cette IOM, pour Insoluble Organic Matter, est une macromolécule de très haut poids moléculaire⁵.

D'une chondrite à une autre, en fonction de leur histoire respective, les proportions relatives de fractions soluble et insoluble varient. L'IOM reste tout de même toujours largement majoritaire, représentant de ~ 70 à 99% de la matière organique totale. La SOM se distingue de l'IOM par un poids moléculaire beaucoup plus faible et par une abondance en hétéroatomes⁶ plus élevée. Il n'existe pas de frontière parfaitement définie entre les molécules réellement libres et solubles et les fragments plus ou moins labiles de l'IOM. Les acides aminés sont les composés solubles majoritaires comportant de l'azote et font l'objet d'un intérêt particulier en raison de leur implication dans la biologie. Parmi les 80 acides aminés extraterrestres déjà détectés, on trouve certaines des 21 molécules biotiques. Toutefois les acides aminés identifiés dans les chondrites se distinguent des acides aminés biotiques par leur stéréochimie et leur composition isotopique.

L'IOM est une macromolécule dont la composition élémentaire varie entre chondrite et a été estimée à $C_{100}H_{70}N_3O_{12}S_2$ dans la chondrite primitive de Murchison. Des

⁴ Un solvant polaire est typiquement l'eau liquide. Dans la molécule d'eau, même si celle-ci est électriquement neutre, les charges électroniques sont concentrées plutôt près de l'atome d'oxygène, et un moment dipolaire est présent. A l'opposé, les solvants apolaires (le méthanol par exemple) ne possèdent pas ou peu de moment dipolaire. Suivant leur structure chimique, les molécules seront plus solubles dans les solvants polaires que dans les solvants apolaires et l'inverse.

⁵ Le poids moléculaire est la masse d'une molécule. C'est la combinaison des poids de chacun des atomes composant cette molécule.

⁶ La matière organique est composée de carbone et d'hydrogène principalement et d'autres éléments chimiques en plus faible abondance, les hétéroatomes (principalement, O, N et S).

macromolécules aussi larges sont classiquement étudiées par résonance magnétique nucléaire, ou décomposées en différents fragments organiques par pyrolyse ou dégradation chimique. D'un point de vue structural, des travaux datant des années 70 ont abouti à une structure générale qui reste encore valable aujourd'hui: l'IOM est un ensemble de petits domaines aromatiques (prédominance des entités formées de 1 à 4 cycles aromatiques) avec des substitutions hétéroatomiques, liés entre eux par de nombreuses fonctions chimiques oxygénées telles des fonctions alkyl ou ether. Les différences majeures par rapport à des matériaux terrestres, tels des kérogènes considérés comme des analogues d'un point de vue structural, résident dans la composition isotopique de cette IOM. En effet celle-ci est caractérisée par des enrichissements en ^{15}N et D par rapport à des échantillons terrestres, et également par rapport à la nébuleuse protosolaire. Les compositions exactes varient d'une chondrite à une autre. Ces variations peuvent notamment s'expliquer en grande partie par la prise en compte des processus secondaires. Les plus forts enrichissements en azote lourd (jusqu'à 260 pourmil) et en D (jusqu'à 1500 pourmil) sont ainsi mesurées dans les chondrites les plus primitives pétrographiquement, appelées les chondrites carbonées CR. Depuis l'avènement des techniques micrométriques, telles la microsonde ionique, des enrichissements très forts jusqu'à 19000 pourmil en deutérium à l'échelle du micron ont également été mesurés. De plus, une hétérogénéité isotopique au niveau moléculaire de la matière organique insoluble a également été révélée. Les chondrites sont ainsi caractérisées par une large variabilité isotopique en deutérium et azote (^{15}N) entre classes chimiques de chondrites, au sein d'une même chondrite et également au niveau moléculaire.

L'origine de la matière organique est actuellement débattue car encore aujourd'hui que partiellement comprise. En effet, aucun des modèles de formation proposés ne permet de rendre compte de toutes les caractéristiques moléculaires et isotopiques observées. Deux principales écoles sont en opposition, la première est en faveur d'une origine solaire (signifiant une formation initiée dans la nébuleuse solaire) et la seconde en faveur d'une origine interstellaire (sous-entendant la notion d'héritage par la nébuleuse de molécules formées initialement dans le milieu interstellaire environnant). Ces différentes écoles de pensées s'accordent toutefois sur le fait de la nécessité d'une chimie en

milieu froid et ionisé (nuage interstellaire ou disque protoplanétaire externe) pour rendre compte des compositions isotopiques enrichies en éléments lourds (^{15}N et D). Etant donnée la difficulté à reproduire un composé similaire à l'IOM, il est de plus en plus souvent envisagé qu'il soit le résultat de la succession de plusieurs processus impliquant une évolution ultime sur le corps parent.

De nos jours, cette matière organique extraterrestre constitue un apport non négligeable sur Terre à travers les micrométéorites, mais dans les premiers moments de la Terre, ces apports ont pu être beaucoup plus importants. Ainsi la matière organique extraterrestre contenue dans les météorites a pu être une source importante pour la vie primitive et a pu influencer le développement des premières formes de vie. Cet apport en matière organique a pu être accompagné d'un apport en eau non négligeable par les astéroïdes. En effet nombre de scientifiques aujourd'hui s'accordent sur le rôle non exclusif des comètes quant à l'apport de l'eau de sur Terre.

6 : Météorites et petits corps

Il existe un lien orbital entre météores et astéroïdes ; les météorites semblent fournir un échantillonnage naturel des astéroïdes. Néanmoins, il existe plusieurs centaines de milliers d'astéroïdes et « seulement » quelques centaines de famille de météorites. Soit notre échantillonnage de la ceinture d'astéroïde est biaisé (et les biais possibles sont très nombreux), soit des familles chimiques d'astéroïdes sont présentes, qui se font l'écho des familles de météorites.

De telles familles d'astéroïdes existent, basée tout d'abord sur leurs propriétés orbitales. Il y a des groupes d'astéroïde dont les orbites sont similaires (demi-grand axe, excentricité, inclinaison). La formation de telles familles est aujourd'hui expliquée par des collisions, qui vont fragmenter un astéroïde parent (en général massif) et produire de nombreux fragments plus petits, avec des paramètres orbitaux « rappelant » ceux de l'astéroïde parent. C'est généralement le cas des très gros astéroïdes, comme Thémis, Vesta ou encore Pallas. Curieusement, l'astéroïde le plus gros du système solaire (Cérès, 900 km de diamètre) n'a pas de famille.

A ces notions de familles dynamiques, vient s'ajouter une notion de familles compositionnelles. Il est aujourd'hui impossible de déterminer la composition chimique précise des astéroïdes depuis la Terre, néanmoins des indices compositionnels peuvent être obtenus par spectroscopie en réflectance. Cette technique consiste à mesurer la lumière du soleil réfléchi par les astéroïdes et à l'analyser spectralement. Certains composés (surtout les phases hydratées et les minéraux riches en fer) peuvent absorber à certaine longueur d'onde. Ainsi cette méthode permet d'avoir une information, biaisées certes, sur la nature chimique des composés en surface. Certains grands programmes d'études ont permis d'obtenir des spectres sur plusieurs milliers d'astéroïdes (les plus gros) et ainsi des classes chimiques ont été construites. Une dizaine de classes spectrales d'astéroïdes ont été définies, parfois reliées à certains groupes de météorite. Si ces liens sont parfois fort et ont pu être vérifiés via mission spatiale (DAWN/NASA, HAYABUSA/JAXA) ils sont ténus dans la plupart des cas. Certains type d'astéroïdes ne sont peut être pas présents dans la collection de météorites. C'est le cas des astéroïdes de type D qui sont interprétés comme d'anciens noyaux cométaires.

Une comète est une production importante de poussière issue de la sublimation d'un objet typiquement kilométrique appelé noyau. Ce noyau est quasiment invisible au cours de la majeure partie de son orbite (et indifférentiable d'un astéroïde), mais lorsque que la comète se rapproche du soleil et se réchauffe la sublimation de volatiles et à la source de l'éjection d'une grande quantité de poussière qui va former la queue (très étendue, de plusieurs millions de km). Historiquement, la vision des petits corps était dichotomique avec astéroïdes rocheux d'un côté (formé près du soleil) et noyaux cométaires riche en glace de l'autre côté (formés loin du soleil). Différentes découvertes sont venues chambouler cette vision, et flouter la limite entre astéroïdes et comètes.

Tout d'abord certains objets du système solaire avec des caractéristiques orbitales d'astéroïdes ont montré la présence d'une activité cométaire (Hsieh and Jewitt, 2006). Ces objets sont dénommés aujourd'hui sous le terme de Main-Belt Comet (MBC). Ces MBC suggèrent que certains astéroïdes de la ceinture principale contiennent des éléments volatiles (vraisemblablement de la glace d'eau)

dans leur intérieur sous une couche de poussière sèche. Des impacts récents ont peut être mis à nu cette glace profonde, instable une fois en surface.

Des observations spectroscopiques en réflectance d'un des gros astéroïdes de l'extérieur de la ceinture principale, 24-Thémis, on montré la présence d'une absorption particulière avec un maximum à 3.1 μm (Campins et al., 2010 : 3). Ces observations suggèrent la présence de glace à la surface de Thémis et challengent les modèles de stabilités de glace d'eau en surface dans le système solaire. Autre particularités de Thémis, la présence de composé organiques, détectés par de faibles absorptions autour de 3.4 - 3.5 microns (Rivkin and Emery, 2010 : 3). La surface de Thémis semble donc ressembler à la vision classique d'une comète, un mélange de glace, d'organiques et de poussière.

Tout récemment, une grosse surprise est venue d'observations du plus gros astéroïde connu, Cérés, qui a une taille de 900 km de diamètre environ. Des observations dans la gamme millimétriques de Cérés (Küppers et al., 2014 : 3), ont révélé la présence d'une exosphère⁷ d'eau, c'est à dire que Cérés semble auréolé d'une atmosphère tenue roche en eau. Du fait de la faible masse de Cérés, qui n peut pas garde une atmosphère aujourd'hui, la présence de cette exosphère riche en eau suggère que Cérés pourrit contenir en son intérieur une grande quantité de glace d'eau. L'origine de cette exosphère reste à comprendre, et les résultats de la mission DAWN, qui doit arriver sur Cérés en 2015 (après avoir visité l'astéroïde Vesta) sont très attendus de la part de la communauté des petits corps.

7 : L'Europe et l'exploration des petits corps

Les observations des petits corps, objets sombres et de tailles modestes, sont difficiles depuis notre planète. L'exploration spatiale de ces objets est ainsi très précieuse. L'Europe, au travers son agence spatiale, est un des moteurs actuels de cette exploration, en parallèle avec les

⁷ L'exosphère est une enveloppe gazeuse très diluée autour d'une planète ou d'un astéroïde. Contrairement à une atmosphère, une exosphère est beaucoup plus diluée, et à une beaucoup plus grande étendue.

agences spatiales japonaise, russe, et américaine. La mission ROSETTA (ESA), une mission phare de l'ESA, est désormais dans sa dernière phase d'approche de la comète Churyumov-Gerasymenko (67/P). Cette mission est unique en son genre sur bien des aspects, à commencer par sa durée. Telle mission prends sa source au milieu des années 90, fut ensuite développée pendant une dizaine d'années, et quitta l'attraction de la Terre en Mars 2004. Les premiers résultats scientifiques devraient arriver d'ici quelques mois, c'est à dire près de 25 ans après le design original des instruments scientifiques.

ROSETTA n'est pas la première mission à survoler une comète. La sonde GIOTTO fut pionnière en arrivant s'approcher et à imager le noyau de la célèbre comète Halley (1986). L'originalité de ROSETTA repose tout d'abord sur son orbitographie. Elle va intercepter le noyau cométaire lorsque celui-ci est encore relativement loin du soleil (4 u.a.), alors que l'activité de production de poussière est limitée. Elle pourra ainsi cartographier sa composition chimique, et caractériser de possibles structures géologiques. Grande première au niveau internationale, un atterrisseur, nommée Philaé, va aller s'accrocher à la surface du noyau, et fournira des informations très attendues sur la nature et la structure physique des matériaux présent en surface. Alors que la comète se rapprochera du soleil et que la production de poussières se fera plus intense, l'orbiteur prendra un peu de recul, et suivra l'évolution de l'activité, la nature des composants éjectés par la comète, alors que celle-ci se rapproche progressivement du soleil.

Si les mission spatiales sont riches en surprises et sont souvent des « Landmark », toutes les techniques analytiques ne sont pas « spatialisables », et certains détails subtils mais cruciaux (citons par exemple les compositions isotopiques des phases réfractaires) ne sont pas atteignables avec les technologie actuelle. Dans l'attente incertaine de ruptures technologiques, une alternative couteuse existe, le retour d'échantillons.

L'agence spatiale américaine a été la première à échantillonner activement des roches extra-terrestres au travers du programme Apollo. Elle a conservée ce leadership en étant la première à ramener des fragments de poussière cométaires via la mission Stardust (Brownlee et al., 2006 : 6), avec un léger bémol car la technique d'échantillonnage

a profondément modifié les particules ramenées sur Terre. Plus récemment, l'agence spatiale japonaise a ramené pour la première des échantillons prélevée à la surface d'un astéroïde, nommée Itokawa (Nakamura et al., 2006 :4). La quantité de matière ramenée est modeste, mais cette mission représentait un extraordinaire succès technologique. Le succès de cette mission a motivé une seconde assez similaire par la JAXA, et la NASA a développé sa propre mission de retour d'échantillon d'astéroïdes, OSIRIS-REX. Dans le cas de ces deux dernières missions, les astéroïdes cibles sont des astéroïdes de type C, attendus comme les corps parents des chondrites carbonées.

Notre compréhension du système solaire a considérablement évoluée à chaque retour d'échantillon. Sans les échantillons Apollo, nous n'aurions aucune idée de l'échelle de temps des processus géologiques se déroulant à la surface des objets du système solaire interne. Nous n'aurions aucune idée du lien génétique unissant la Terre et la Lune. Les échantillons de comète Tempel-1 ramenés par la mission Stardust ont changé notre vision des comètes. Contrairement à ce qui était attendu, les poussières de cette comète ne sont pas primitives, froides, mais contiennent des composants de haute température. Ces observations faites sur quelque μg de poussière cométaire sont une contrainte très forte sur les modèles de disque d'accrétion du système solaire jeune. Chaque mission spatiale avec retour d'échantillon a marqué une rupture, dans notre compréhension du système solaire. L'Europe avait la volonté de se doter de sa technologie de retour d'échantillons, via la mission Marco-Polo, mais celle-ci n'est pas sortie vainqueur de l'intense compétition pour les missions de classe M3⁸. Cet échec est une forte déception pour les communautés des petits corps et des cosmochimistes. Espérons que l'Europe via son agence spatiale reste dans la course pour participer à l'un des grands objectifs scientifiques du siècle en cours, le retour d'échantillons provenant de la planète Mars.

Enfin, pour terminer, l'Europe c'est aussi aujourd'hui un territoire de 4.5 millions de km^2 , et donc une centaine de tonnes matière extra-terrestre qui s'accumule. Si la pous-

⁸ Le programme spatial Cosmic Vision de l'ESA contient des missions larges (L) et moyennes (M) en terme de coup. La mission M3 est la 3^{ème} mission de classe M.

sière est difficilement récupérable, des actions sont possibles pour maximiser la quantité de météorite retrouvée annuellement. La France est en train de se doter d'un réseau de caméra plein champ, ayant pour objectif la détection de bolide, de prédire la zone de chute et de faciliter la récupération de fragments. Ce réseau permettra aussi d'augmenter grandement les statistiques sur les orbites initiales des météores, et donc l'origine au sein du système solaire. Un tel réseau a aussi été mis en place en Espagne. Une telle initiative à l'échelle de l'union européenne verra peut-être le jour dans les années à venir.

Figure

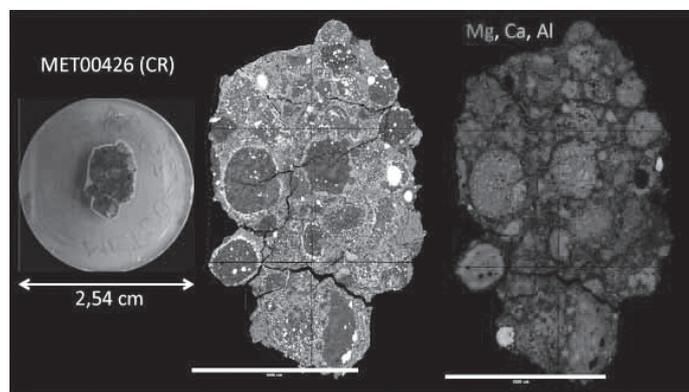


Fig. 1 : MET00426 : météorite dite chondrite carbonée de type CR.

Les échantillons sont souvent découpés sous forme de lame très fine (épaisseur de l'ordre de 30 microns, photo de gauche) adaptée à l'utilisation de plusieurs techniques analytiques. Une image par Microscopie à Balayage Electronique permet d'avoir une image en contraste de gris (les électrons rétro-diffusés permettent de distinguer les éléments ou les phases suivant leur numéro atomique : Z élevé en blanc et Z faible en noir) à haute résolution (image centrale). Des analyses par rayons X permet d'accéder aux compositions élémentaires et de faire ainsi des images composées (image de droite) permettant de facilement mettre en évidence les différents composants pétrographiques. Sur ces images, les inclusions rondes sont des chondres. Ce qui apparaît blanc sur l'image centrale sont des grains de métal. Le tout baigne dans une matrice fine. Les inclusions réfractaires sont très rares. Une apparaît sur l'image de droite : enrichie en Ca et Al elle apparaît avec cette couleur bleu-vert.

Références :

- BROWNLEE Donald et al. (2006) Comet 81P/Wild 2 under a microscope, *Science* 314 1711-1716.
- CAMPINS Humberto et al. (2010) Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis, *Nature* 464, 1320-1321.
- ENGRAND Cécile, MAURETTE Michel (1998) Carbonaceous micrometeorites from Antarctica, *Meteoritics & Planetary Sciences* 33, 565-580.
- HSIEH Henry H. and JEWITT David (2006) A population of comets in the main asteroid belt, *Science* 312, 561-563.
- KÜPPERS Michael et al. (2014) Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres, *Nature* 505, 525-527.
- NAKAMURA Tomoki et al. (2011) Itokawa dust particles : A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites, *Science* 333, 1113-1116.
- RIVKIN Andrew S. and EMERY Joshua P. (2010) Detection of ice and organics on an asteroidal surface, *Nature* 464, 1322-1323.