

MICROMETEORITES ET METEORITES : DU MILIEU INTERSTELLAIRE AUX PROCESSUS *IN SITU* DANS LE SYSTEME SOLAIRE PRIMITIF

Jean DUPRAT

*Centre de Spectrométrie Nucléaire et Spectrométrie de Masse
(IN2P3-CNRS et Université Paris-Sud)
Bât 104-108
91405 Orsay*

Résumé :

Ce cours a pour but d'illustrer par quelques exemples, la recherche sur l'analyse isotopique de poussières interplanétaires (micrométéorites). Il commence par quelques rappels sur l'architecture actuelle du système solaire et sur l'intérêt d'étudier ses petits corps (astéroïdes et comètes). A travers quelques documents historiques du début du XIX^{ème} siècle, on montre que, dès l'origine de ce domaine de recherche, la poussière était reconnue comme un constituant du flux de matériaux extraterrestres sur notre planète et son origine cométaire était discuté. Suit une présentation des collectes modernes de micrométéorites polaires, une attention particulière étant portée aux avantages des régions centrales du continent Antarctique pour ce type de recherche. Les principaux résultats obtenus dans le cadre du programme « Micrométéorites @ CONCORDIA » sont exposés. On présente ensuite deux exemples emblématiques d'analyses de matériaux extraterrestres. Le premier montre comment il est possible d'identifier un héritage du milieu interstellaire dans des météorites : les grains pré-solaires. Le second concerne des résultats obtenus récemment sur la composition isotopique de l'hydrogène dans la matière organique de micrométéorites.

Abstract :

The aim of this chapter is to illustrate the research currently performed on isotopic analysis of interplanetary dust (micrometeorites). We start by some reminders about the present day solar system architecture with emphasizing the interest to study small bodies (asteroids and comets). Based on historical documents from the early XIXth century, we show that since the very beginning of that science, the dust was recognised as a significant constituent of the extraterrestrial flux of material accreted by our planet and that its possible cometary origin was already suggested. We then present the modern collections of polar micrometeorites, giving a particular emphasis to the advantages of the central regions of Antarctica for that type of research. The main results from the "Micrometeorites @ CONCORDIA" program are summarized. We then present two emblematic examples of isotopic analyses of extraterrestrial materials. The first one shows how one can identify an interstellar heritage in meteorites: the pre-solar grains. The second example concerns the recent results obtained on the hydrogen isotopic composition of organic matter in micrometeorites.

Table des matières

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION | 3 |
| 1. ASTEROÏDES ET COMETES, METEORITES ET POUSSIÈRES. | 4 |
| 1.1. Astéroïdes & comètes | 4 |
| 1.2. Les phases solaires primitives | 6 |
| 1.3. Matière solaire et « présolaire » | 7 |
| 2. LES COLLECTES DE POUSSIÈRES EXTRATERRESTRES. | 8 |
| 2.1. Quelques aspects historiques | 8 |
| 2.1.1. Au début, il y avait déjà la poussière... | 8 |
| 2.1.2. Nordenskjöld, les premières collectes polaires | 11 |
| 2.2. Les collectes modernes de micrométéorites | 13 |
| 2.2.1. Les expéditions au Groenland | 14 |
| 2.2.2. Les collectes côtières à Cap Prud'homme | 16 |
| 2.2.3. Les collectes Américaines et Japonaises | 19 |
| 2.3. Un cas particulier : Le programme « Micrométéorites @ CONCORDIA » | 19 |
| 2.3.1. Pourquoi les régions centrales Antarctiques ? | 20 |
| 2.3.2. Le protocole expérimental | 21 |
| 2.3.3. Une collection unique, des échantillons remarquablement préservés | 22 |
| 3. DEUX EXEMPLES D'ANALYSES ISOTOPIQUES <i>IN-SITU</i> DE MATIÈRE EXTRATERRESTRE | 25 |
| 3.1. Le principe de la technique SIMS | 25 |
| 3.2. Un exemple d'héritage interstellaire | 26 |
| 3.3. Les isotopes de l'hydrogène dans les micrométéorites ultracarbonées | 29 |
| RÉFÉRENCES | 35 |

Introduction

L'analyse isotopique de matériaux extraterrestres permet d'aborder de nombreux champs de connaissances qui vont de la nucléosynthèse thermique au sein des générations d'étoiles qui ont précédé le soleil jusqu'à la différenciation planétaire...

Pourtant l'essentiel de l'activité dans ce domaine concerne le contexte astrophysique de naissance de notre étoile. Le scénario est connu dans ses grandes lignes, une zone suffisamment froide de notre galaxie (un cœur moléculaire) s'est effondrée sur elle-même pour donner naissance en son centre à la protoétoile. Pourtant de nombreuses questions restent en suspens. Schématiquement on s'intéresse à la séquence d'événements qui ont eu lieu pendant les quelques dizaines de millions d'années qui séparent l'effondrement gravitationnel de l'étoile et la dissipation de son disque d'accrétion avec l'apparition des planètes. L'une des questions majeure est de comprendre où se situe la frontière entre héritage interstellaire et processus nébulaire *in-situ*. Cette frontière peut être minéralogique, chimique et/ou isotopique.

Le but de ce cours est de présenter, pour un public non-spécialiste, quelques exemples de problématique rencontrée lors de l'analyse chimique et isotopique de matériau extraterrestre, sans rechercher aucun caractère exhaustif. On commencera par expliquer de façon succincte le cadre général de l'étude des petits corps interplanétaires. On insistera en particulier sur l'intérêt des poussières cométaires pour une meilleure compréhension de l'architecture actuelle du système solaire et de sa formation.

La seconde partie est consacrée aux collectes de poussières interplanétaires. Elle commence par un retour sur l'enfance de cette discipline au début du XIX^{ème} siècle. On expose ensuite les techniques modernes de collectes de micrométéorites. Depuis plus de vingt ans, l'équipe d'Astrophysique du Solide du CSNSM collecte et analyse des micrométéorites en Antarctique. On insistera sur les premiers résultats d'un programme de recherche de poussières cométaires emprisonnées dans la neige proche de la station franco-italienne CONCORDIA située à Dôme C dans les régions centrales du continent Antarctique. On montrera pour quelles raisons le site de Dôme C présente un intérêt majeur pour ce type de recherche.

Enfin, la dernière partie illustre avec deux exemples d'analyses isotopiques le type de questionnement rencontré. On commencera par l'analyse de la composition isotopique de l'oxygène de grains d'oxydes dans la météorite de Tieschitz. On montrera comment il est possible d'identifier le type de nucléosynthèse stellaire mise en jeu et donc le type d'étoile (ici des géantes rouges asymptotiques) dont ces grains sont issus. Le second exemple concerne l'analyse isotopique de la composition de l'hydrogène de la matière organique des micrométéorites collectées à CONCORDIA. Après quelques rappels sur les grandes lignes de l'évolution de rapport D/H depuis la nucléosynthèse primordiale de cet élément lors du Big-Bang, on décrira les principaux réservoirs actuels. En particulier, on montrera comment sont interprétés les forts enrichissements en Deutérium observés dans les comètes. On montrera ensuite pourquoi les micrométéorites Ultra-carbonées récemment découvertes dans la collection CONCORDIA présentent un intérêt majeur pour l'étude des régions froides du disque proto-planétaire.

Nota Bene : Ce cours s'adresse à des non-spécialistes souhaitant avoir un aperçu du type de problématique rencontrée dans l'analyse isotopique de matériaux interplanétaires. Pour en faciliter la lecture, la majeure partie des références ne sont pas citées dans le texte même. A la fin de chaque partie, le lecteur trouvera quelques indications bibliographiques.

1. Astéroïdes et comètes, Météorites et poussières.

Si l'on observe le système solaire actuel, force est de constater que peu de chose ont résisté à la gravitation... la quasi-totalité de la masse se retrouve dans le soleil ($3.3 \cdot 10^5 M_{\oplus}^1$), Jupiter ($318 M_{\oplus}$) et Saturne ($95 M_{\oplus}$). Par rapport à ces géants, les planètes telluriques qui forment le système solaire interne, Mercure, Vénus, la Terre, et Mars ne représentent qu'une masse négligeable ($2 M_{\oplus}$). Pourtant, ces objets sont assez massifs pour s'être rapidement différenciés : au delà de quelques kilomètres de diamètre, l'énergie dégagée par la radioactivité interne (principalement l'uranium) est suffisante pour chauffer l'objet au-dessus de la température de fusion des silicates. On assiste alors à la séparation métal-silicate, l'apparition d'un noyau sidérophile et d'un manteau lithophile. Pour trouver des phases minérales ayant conservé la mémoire des premiers millions d'années du système solaire, il faut donc se tourner vers des corps de petite taille n'ayant pas subi ces phénomènes de différenciation : les astéroïdes et les comètes.

1.1. Astéroïdes & comètes

Située entre Mars (1.5 UA^2) et Jupiter (5.2 UA), la ceinture d'astéroïdes est un réservoir de petits corps de tailles inférieures à quelques dizaines (voire centaines) de kilomètres. Leur nombre exact n'est pas connu mais les études infrarouges montrent qu'il existe de 1 à 2 millions d'objets de tailles supérieures à 1 km. La masse totale de la ceinture d'astéroïdes est de $0.04 M_{\oplus}$, la moitié de cette masse étant portée par les 4 principaux astéroïdes : Ceres (950 km), Vesta (~550 km), Pallas (~550 km) and Hygiea (500x300 km). On notera qu'à lui seul, Cérés contient à peu près un tiers de la masse totale de la ceinture. La population des astéroïdes se divise en différentes classes dont les principales sont :

- La classe C (Carbonée, 75% de la population totale) : ils ont un albédo plus faible que les autres (S et M) et dominent la population des régions externes de la ceinture. Leur composition est similaire à celle des chondrites carbonées³. Cette classe d'objet ne s'est pas différenciée, ce sont donc les objets les plus primitifs dont la composition est la plus représentative de la partie non-volatile de la nébuleuse proto-solaire.
- La classe S (Stony, 17% de la population totale). Leur composition fait apparaître un déficit en carbone et un matériau riche en silicate et en métal. Ils sont surtout présents dans la partie interne de la ceinture (2.5 UA) et ont un albédo supérieur à la classe C. Ce sont des corps qui ont, à priori, subi un épisode métamorphique.
- La classe M (Métal, 10% de la population totale, voir Figure 1). Ils sont constitués de cœurs d'astéroïdes différenciés (pour certains d'entre eux, constitués de Fer et de Nickel). Ils ont un albédo modéré. Ils sont probablement les corps parents des météorites de Fer.

¹ Masse terrestre : $M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

² Une unité astronomique (UA) égale la distance moyenne soleil-terre, soit $150 \times 10^6 \text{ km}$

³ Les chondrites carbonées sont une classe primitive de météorites non-différenciées. Elles sont principalement constituées de chondres, d'inclusions réfractaires (CAIs) et d'une matrice contenant du carbone. Leur teneur globale en carbone est de l'ordre de 1-5 % (en poids) au maximum.

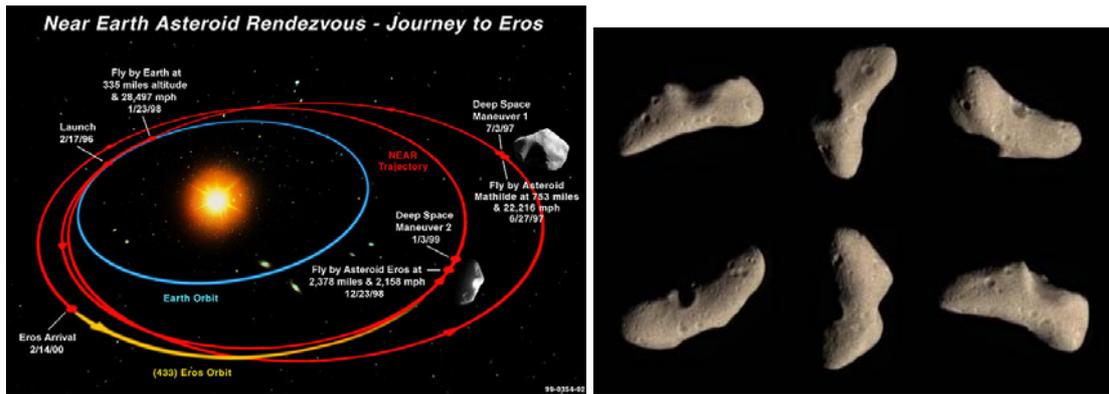


Figure 1 : En 1996 la mission NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) capture des images à haute définition de l'astéroïde de classe S, EROS (droite). EROS est un astéroïde allongé : 13 x 13 x 33 km (© Nasa web site)

Les comètes représentent l'autre source de petits corps ayant potentiellement été peu modifiés depuis leur formation. Elles existent actuellement dans deux réservoirs : la ceinture de Edgeworth-Kuiper et le nuage de Oort (voir Figure 2).

La ceinture de Edgeworth-Kuiper, comprend les objets dont les orbites sont situées entre 30 et 60 UA (i.e. au-delà de celle de Neptune). Le nom donné à ces objets varie, on trouvera dans la littérature les acronymes TNO (Trans-neptuniens objects) ou KBO (Kuipert belt objects)¹. La masse totale de la ceinture de Kuiper est mal connue mais semble être inférieure à 0.1 M_⊕.

Parmi les KBO, on retiendra les comètes Wild2, 9P/Tempel 1, qui ont fait l'objet des missions spatiales *Stardust* (NASA), *Deep Impact* (NASA) respectivement.

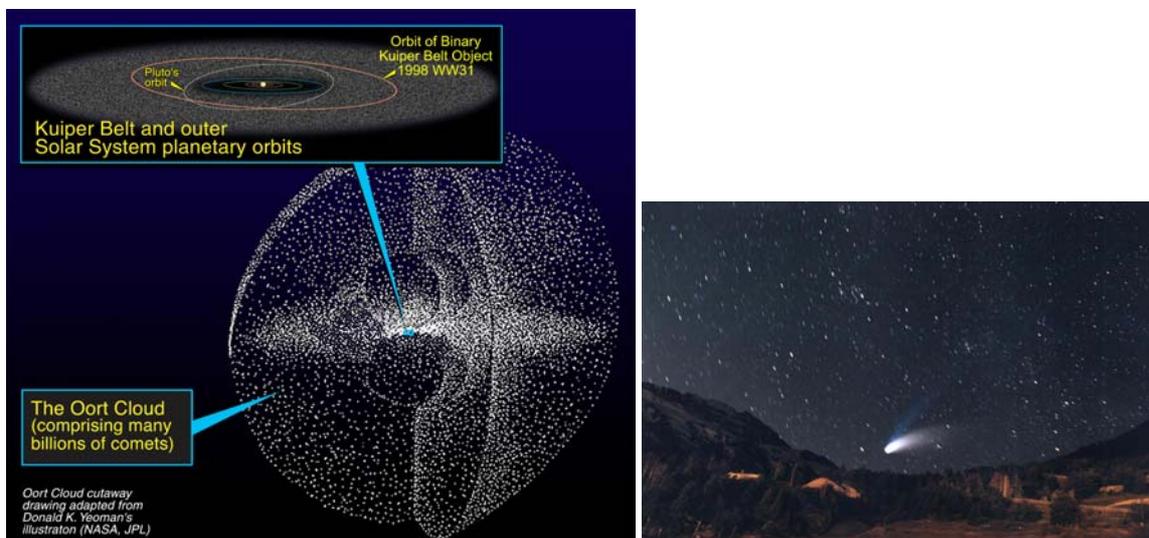


Figure 2 : Architecture du système solaire externe, ceinture de Kuiper et nuage de Oort (site www NASA). Photo de la comète de Halley Bopp © Jean Mouette IAP-CNRS.

Le nuage de Oort s'étend de 5 000 UA jusqu'aux confins du système solaire. Il contient les derniers objets liés gravitationnellement au soleil, de fait sa limite externe définit la frontière du système solaire à 150 000-200 000 UA². La masse totale du nuage de Oort est, elle aussi, mal connue, les estimations varient entre 5 et quelques centaines de masse

¹ Pluton et Charon sont des KBO

² Soit environ 2 années lumière

terrestres. On notera enfin que les comètes se sont formées beaucoup plus proches du soleil, dans les régions de formation de Jupiter, ce n'est qu'après la formation de Jupiter qu'elles ont été éjectées aux confins du système solaire.

Références bibliographiques sur les comètes et leur dynamique :
(Weissman 1983), (Gomes, Levison et al. 2005)

1.2. Les phases solaires primitives

Lorsque l'on s'intéresse au système solaire primitif, on pourrait croire qu'il est préférable d'étudier des phases de basse température - des glaces, des argiles...- c'est-à-dire des phases représentatives de ce qui a pu condenser dans la nébuleuse protosolaire ou dans le disque protoplanétaire... Pourtant, ce sont au contraire des phases de haute température qui, depuis des décennies, occupent une très large partie de la littérature : les Inclusions riches en Calcium ou Aluminium (CAIs¹) et les chondres. Les météorites non-différenciées, les chondrites, sont principalement constituée de chondres et de CAIs entourées et tenues par une matrice comprenant des silicates et de la matière organique.

Les chondres sont de petites sphérules de tailles comprises entre quelques dizaines de microns et quelques dizaines de millimètres. On les trouve inclus dans la matrice de la majorité des météorites : les chondrites. Les chondres peuvent avoir différentes textures par exemple de type porphyrique (contenant des cristaux reliques d'olivines et/ou de pyroxènes). Sur la figure 3, on distingue les chondres de type I contenant du fer à l'état de métal (réduit) ou de sulfure (FeS) et les chondres de type II où le fer est présent dans un état plus oxydé et entre dans la composition des silicates. Au cours des dernières décennies, de nombreuses expériences ont été menées pour tenter de reproduire les différents types de chondres en cristallisant des liquides silicatés.

La figure 3 montre différents types de CAIs en images élémentaires en X-ray (a-d; rouge = Mg, vert = Ca, and bleu = Al) et en images en électrons rétrodiffusés (e, f) :

- (a) Type A compacte (CTA)
- (b) Type B
- (c) Type C
- (d) Type B (contenant de la forsterite)
- (e, f) CAI à grain-fins contenant du spinel.

Les différents minéraux entrant dans la composition des CAIs sont indiqués sur la figure 3 sous forme abrégée : an = anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$); fo = forsterite (Mg_2SiO_4); mel = melilite (solution solide d'åkermanite ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) et de gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$); pv = perovskite (CaTiO_3); px = Al, Ti diopside; sp = spinel (MgAl_2O_4). Toutes les CAIs, à part celle à grain-fin, ont une texture ignée, elles ont cristallisé à partir d'un liquide. Les CAI à grain-fin sont formées à partir d'une agrégation de petits condensats.

Les CAI et les chondres font partie des premières phases minérales qui se sont condensées dans le jeune système solaire. Les âges absolus² de certaines de ces phases ont pu être mesurés et ils sont de $4564.7 \pm 0.6 \cdot 10^6$ ans pour un chondre de la météorite CR Acfer 059 et $4567.2 \pm 0.6 \cdot 10^6$ ans pour une CAIs de la météorite CV Efremovka. L'âge de la plus ancienne ces CAIs date la formation du système solaire, et la différence de ~ 2 à 3 million d'années entre ces deux objets semble indiquer une formation plus tardive des chondres, mais cette conclusion doit être prise avec précaution car le chondre et la CAI de cette étude ne font pas partie de la même météorite mais dépendent de deux classes de chondrites

¹ Ca, Al rich Inclusions

² Les âges absolus de ces objets ont été mesurés avec la méthode dite « Plomb-Plomb » qui consiste à mesurer les abondances relatives en $^{204,206,207}\text{Pb}$ dont les teneurs dépendent du temps puisqu'ils se situent à la fin des chaînes de décroissance d'isotopes d'uranium à très longue durée de vie ($^{235,238}\text{U}$).

différentes. L'intérêt principal des CAIs et des chondres est qu'il s'agit de phases de haute température (> 1500 K) qui ne disposent que d'une fenêtre de formation très réduite, elles nous renseignent sur les conditions physico-chimiques des régions internes du disque durant les premiers millions d'années du système solaire.

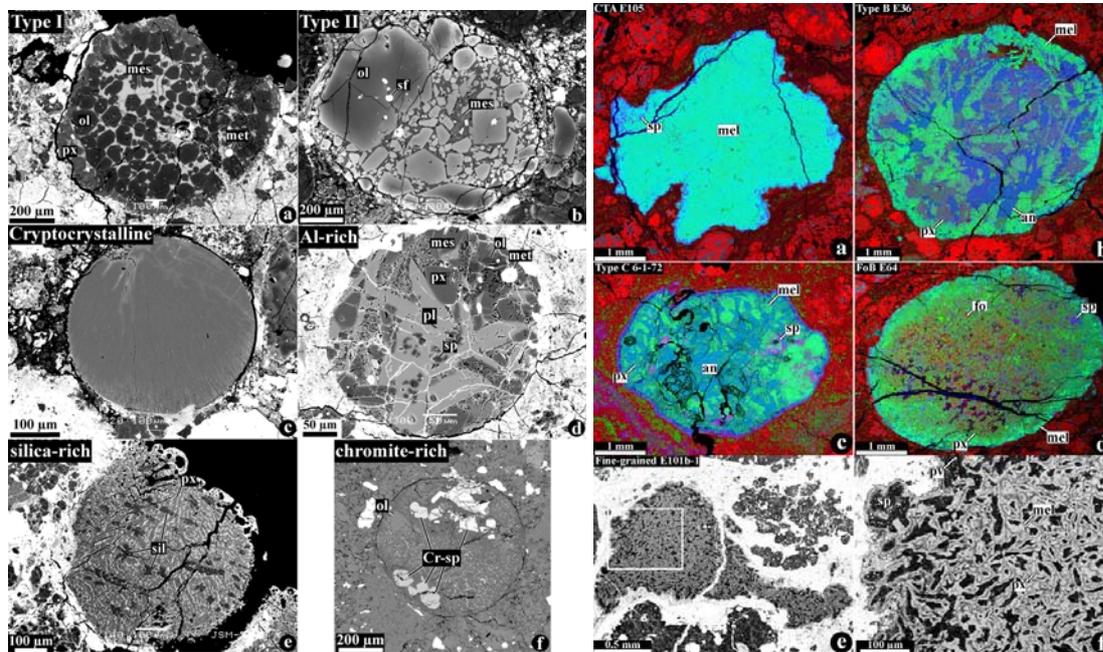


Figure 3 Gauche : Images en microscopie électronique (électrons rétrodiffusés) de différents type de chondres, Droite Images de différents types de CAI (Connolly 2005)

Indications bibliographiques :

(Connolly and Hewins 1996; Connolly and Love 1998; Connolly 2005), (Amelin, Krot et al. 2002), (Aleon 2008)

1.3. Matière solaire et « présolaire »

En plus des composants majeurs (CAIs, chondres et matrice), les météorites contiennent une proportion très faible de grains anormaux, hérités du milieu interstellaire précédant la formation du système solaire. Alors que les objets du système solaire présentent des fractionnements isotopiques de quelques ‰, ces grains « présolaires » montrent des anomalies isotopiques de plusieurs ordres de grandeurs plus élevées. Ce sont des phases minérales qui ont condensées dans différents environnements stellaires et ont survécu intactes jusqu'à nous. La comparaison des signatures isotopiques en éléments tels que Si, C, N, O, Xe, Al, Mg, ... permet pour une partie de ces grains d'identifier, par comparaison avec les modèles, le site astrophysique d'origine. L'interprétation des anomalies isotopiques de ces grains nécessite des modèles stellaires capables de calculer les compositions isotopiques attendues dans les éjectas de différents types d'étoiles : géantes rouges asymptotiques (AGB) SuperNovae (SN), Novae... La taille des grains présolaires varie entre quelques nanomètres pour les nanodiamants et quelques microns pour les autres (oxydes, graphites, SiC, ...). Leurs abondances peuvent varier fortement d'un type de météorites à un autre, l'ordre de grandeur restant au maximum de quelques dizaines de ppm (sauf pour les nanodiamants dont la concentration peut atteindre 1400 ppm) (Nittler 2003). Un exemple de l'exploitation des données isotopiques de ces grains est décrit à la fin de ce cours.

Indications bibliographiques:

(Zinner 1998; Zinner 2008)

2. Les collectes de poussières extraterrestres.

Depuis la fin des années 1980, des collectes de micrométéorites sont régulièrement organisées dans les régions polaires. Après un rapide retour sur l'enfance de cette discipline (fin XVIIIème –début XIXème), on décrira les expériences pionnières menées par M. Maurette (CSNSM) au Groenland puis en Antarctique. On expliquera ensuite l'intérêt majeur des régions centrales du continent Antarctique pour ce type de recherche.

2.1. Quelques aspects historiques

Bien que les témoignages de chutes d'objets célestes accompagnées d'explosions aient été rapportés depuis l'antiquité¹, la possibilité de trouver à la surface de notre planète des objets extraterrestres n'a finalement été complètement établie que tardivement, au début du XIXème siècle. Historiquement, c'est le livre de Chladni « *Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen*² » qui peut être considéré, avec le « Rapport Biot » comme étant à l'origine de la science sur les météorites. La paternité de l'origine extraterrestre des météorites fait l'objet de vastes controverses pour lesquelles nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage collectif (McCall, Bowden et al. 2006).

Une idée répandue dans la communauté est que l'intérêt pour les petits corps en tant que tels n'est venue que tardivement, à partir des années 1970, en liaison avec la conquête spatiale. Et si un volume impressionnant de travail a été effectué depuis ces années-là sur les météorites, la littérature sur les poussières interplanétaires est considérablement moins fournie et globalement plus récente. Pourtant si l'on scrute les papiers originaux de la discipline, on peut s'apercevoir que dès le début du XIXème siècle, météorites et micrométéorites ont été reconnues comme les deux composantes du flux de matière extraterrestre sur notre planète et qu'à la fin du XIXème siècle le géologue finlandais Adolf Erik Nordenskjöld effectue les premières observations sur l'intérêt des régions polaires pour la collecte de matériaux extraterrestres en général et de la poussière en particulier.

2.1.1. Au début, il y avait déjà la poussière...

Si l'article original de Chladni ne comporte pas de mention sur la poussière, en revanche dans son catalogue des chutes connues depuis 1478 avant notre ère jusqu'à 1824, Chladni mentionne toutes les chutes de poussières connues.

On trouvera une traduction de ce document dans Annales de chimie Physique 1826, n31 p253-270 « Nouveau catalogue des chutes de pierres ou de fer ; de poussières ou de substances molles » et l'ensemble des observations de Chladni est repris dans Astronomie Populaire d'Arago en 1854 (voir la figure 4).

¹ Parmi les chutes antiques les plus célèbres, celle de 464 avant notre ère (Grèce, Anaxagoras cité par Plin), la chute de Ensisheim (Alsace, 1492) ou encore celle de Nogata (Japon, 861).

² Sur l'origine de diverses masses de fer natif et notamment de celle trouvée par Pallas en Sibérie, Chladni 1794

§ 6. — Chutes de poussières.

L'observation attentive des chutes de poussières fait présumer qu'elles ne diffèrent pas essentiellement des chutes d'aérolithes ordinaires. Quelquefois elles ont été accompagnées de chutes de pierres, comme aussi d'un météore de feu. Les poussières paraissent contenir à peu près les mêmes substances que les pierres météoriques. Il semble qu'il n'y a d'autre différence que dans la rapidité avec laquelle ces amas de matière chaotique dispersés dans l'univers, arrivent dans notre atmosphère. Probablement dans la poussière rouge et noire, l'oxyde de fer est la principale matière colorante. Dans la poussière noire, on trouve aussi du carbone. On doit regarder les pierres noires et très-friables tombées à Alais en 1806 (voir p. 196) comme formant en quelque sorte le passage de la poussière noire aux aérolithes ordinaires.

Figure 4 : Extrait de l'astronomie Populaire de Arago et Barrat (p 208).

A propos des poussières, Chladni, puis Arago à sa suite, font trois observations marquantes:

- Elles ne diffèrent pas essentiellement des chutes de pierres
- Elles sont accompagnées de chutes de pierres
- Elles contiennent à peu près les mêmes substances que les chutes de pierres, et certaines contiennent du carbone.

Ils concluent qu'« il ne semble pas qu'il y ait d'autre différence que dans la rapidité avec laquelle elles arrivent dans notre atmosphère ». Cette observation est remarquable si on constate que, à la fin des années 1970, le débat sur l'origine cométaire ou astéroïdale des poussières se fait en grande partie sur des considérations cinétiques.

De façon assez prémonitoire, Chladni note aussi une ressemblance entre la poussière et la météorite de Alais... l'une des rares chondrites carbonées identifiées à l'époque. Il suppose aussi la présence de carbone. Enfin, on remarquera que Chladni et ses successeurs directs (dont Arago) décrivent les poussières interplanétaires comme « rouges ou noires, l'oxyde de fer est la matière colorante ». Ils décrivent aussi une matière visqueuse et rouge. Il paraît probable qu'une large partie des poussières décrites soient en fait des poussières d'origine terrestre (peut-être désertiques ou volcaniques ?)

Dans un livre publié en 1868 par Edouard Roche, « Recherches sur les Offuscations du Soleil et les Météores Cosmiques », il est possible de mesurer combien, dès l'origine de la science des météorites, poussières et objets centimétriques étaient reliés (Roche 1868). Dans les extraits indiqués ci-dessous (voir les figures 5 et 6) on notera la continuité physique qui est établie entre poussières cosmiques et les « aérolithes » ainsi que l'affirmation que ces corps interagissent, ou sont les produits de l'interaction d'un météore avec la haute atmosphère.

Plus remarquable est l'intuition clairement énoncée d'une possible liaison entre les poussières et les comètes. Dans ce texte, E. Roche cite une possible relation de causalité entre les averses d'étoiles filantes d'août et novembre (Perséides et Léonides) et la traversée d'une queue de comète. Depuis, la science moderne a effectivement établi la relation directe entre ces deux averses et les comètes 109P/Swift-Tuttle (pour les Perséides) et 55P/Tempel-Tuttle (pour les Léonides)

Chladni a consacré aux « Chutes de poussières » un chapitre de son *Catalogue*, reproduit par Arago (*Astr. pop.*, tom. IV, pag. 208). Ces phénomènes y sont moins nombreux que les aérolithes, et, parmi les exemples cités, il en est dont l'origine extra-terrestre est discutable : ils s'expliqueraient également par des émanations de volcans, et ne se distinguent guère des faits consignés plus haut.

Mais, d'autre part, la fréquence des chutes météoriques conduit à penser que, puisqu'il existe dans l'espace une immense quantité de ces corps, il doit s'en trouver de toute dimension, depuis les plus gros aérolithes jusqu'aux poudres les plus ténues. Il se peut aussi qu'une météorite de grande dimension, mais de nature friable ou peu cohérente, vienne à se désagréger dans l'air humide, et nous arrive non plus sous forme de pierre, mais à l'état pulvérulent. Tant que les corpuscules restent suspendus dans l'air, ils en modifient la transparence : de là une autre explication des brouillards secs.

C'est ordinairement avec accompagnement de lumière et de bruit que ces corps traversent notre atmosphère; ils y perdent leur vitesse et se consomment¹, ou bien ils finissent par descendre à la surface du sol, en masse ou en pluie de cendres.

Les poussières que nous appelons météoriques, ne différant pas essentiellement des aérolithes, doivent présenter des caractères analogues. C'est ainsi qu'on les distinguera des cendres volcaniques, tout en tenant compte des circonstances qui ont accompagné leur chute, telles que pluie de pierre, détonation, explosion d'un bolide ou météore lumineux.

Figure 5 : Extrait de « Recherches sur les Offuscations du Soleil et les Météores Cosmiques » publié en 1868 par Edouard Roche (page 60).

Enfin, quelques-uns ont pensé que la Terre venant à rencontrer une queue de comète, celle-ci pourrait déposer dans l'air la substance même du brouillard sec. Cette opinion n'est appuyée jusqu'à présent sur aucun fait positif. Cependant, ce que nous avons vu plus haut de l'origine des étoiles filantes montre que la rencontre d'une comète avec la Terre donnerait lieu à des phénomènes atmosphériques de ce genre; mais comment savoir *à priori* quels seraient ces phénomènes? Une comète de nature analogue aux essaims d'août et de novembre, produirait sans doute une pluie d'étoiles filantes. Quelque autre, se rapprochant de la nature des aérolithes, pourrait bien laisser en suspension dans l'air un nuage de poussière, et diminuer ainsi, pour un temps, sa transparence. Toutes ces suppositions sont plausibles, et il serait aisé de les varier encore, de manière à rendre compte des diverses circonstances d'une offuscation; seulement il leur manque le contrôle de l'expérience.

Mais c'est trop s'arrêter à ces considérations hypothétiques. Ce sont plutôt des faits que nous avons voulu réunir dans notre travail; laissons au lecteur le soin d'en tirer les conséquences et de se former une opinion probable sur un sujet encore incertain.

Figure 6 : Extrait de « Recherches sur les Offuscations du Soleil et les Météores Cosmiques » publié en 1868 par Edouard Roche (page 63).

En conclusion on notera que E. Roche insiste sur le fait qu'une partie au moins des phénomènes d'« offuscation » est effectivement lié à l'entrée de particules dans l'atmosphère et il conjecture une relation possible entre poussières et comètes. Dans tous ces textes, les auteurs établissent (sur des critères minéralogiques) la proche relation entre les poussières et les météorites et, en particulier, celles qui formeront plus tard la classe particulière des chondrites carbonées (Orgueil, Alais). Même si dans cette littérature précoce il existe un flou entre *poussières* et *poudre de météorites*, force est de constater que, dès le début XIX^{ème} siècle, les fondations de la science des micrométéorites étaient déjà solidement plantées.

2.1.2. Nordenskjöld, les premières collectes polaires

Adolf Erik Nordenskjöld¹ est un géologue minéralogiste finlandais qui explora l'arctique à la fin du XIX siècle. Il est surtout connu pour sa collection de cartes géographiques qui fait partie du patrimoine international de l'Unesco (Memory of the World Register). La raison pour laquelle Nordenskjöld s'intéresse à la poussière cosmique est sans aucun doute liée à sa formation². Nous connaissons ses découvertes à travers les traductions de Daubré publiées dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (voir les figures 7 et 8).

En 1871 Nordenskjöld fait mention des "poussières météoritiques tombées, en même temps que les météorites proprement dites à Hessel près d'Upsal le 1^{re} janvier 1869 ». Cette poussière contenait de petites paillettes de fer métallique. On notera que, pour Nordenskjöld, il ne fait aucun doute que cette poussière est associée aux météorites. Dans une lettre écrite de la station d'hiver du Spitzberg (Mossel-Bay, 79°53') le 9 septembre 1872, Nordenskjöld rapporte deux observations :

- en décembre 1871, chute très importante de neige à Stockholm : Nordenskjöld prélève et fond cette neige pensant qu'elle a pu recueillir des poussières en suspension, il note la présence d'une forte quantité de poussières noire.
- il y note la présence de fer métal mais soupçonne la fumée des cheminées de Stockholm

Ainsi, Nordenskjöld est, à notre connaissance, le premier à comprendre et très clairement expliquer l'intérêt majeur de la neige et des régions polaires pour ce type de recherche. Dans la suite du CR de l'académie 1864 (p465) M. Daubrée rappelle dans son commentaire la possibilité que certains corps puissent se fragmenter à l'entrée atmosphérique et se retrouver ainsi sous forme de poussières. Si cela peut effectivement avoir lieu pour des météorites friables comme les chondrites carbonées, on verra plus loin que malgré leurs similarités, les poussières ne sont pas des chondrites carbonées réduites en poudre. On notera à nouveau la liaison entre micrométéorites et la classe particulière des chondrites carbonées.

¹ à ne pas confondre avec son neveu Nils Otto Gustaf Nordenskjöld (1868-1928) autre explorateur polaire, mais en Antarctique et un demi siècle plus tard.

² Il étudia en détail la chimie et la minéralogie du fer et du cuivre dans les mines de Tagilsk avec son père qui était minéralogiste.

« Je saisis l'occasion du retour de nos navires pour vous faire part d'une observation qui se rattache à une question qui, je le sais, vous intéresse beaucoup.

» Dans le mois de décembre 1871, il est tombé à Stockholm la quantité de neige la plus grande peut-être dont mémoire d'homme ait gardé le souvenir. Il neigea sans discontinuité pendant cinq ou six jours et telle fut cette quantité, qu'on eut à déplorer plusieurs victimes aux environs de la capitale. Pensant que les impuretés flottant dans l'atmosphère avaient dû se déposer avec les neiges des premiers jours, j'ai attendu la fin de leur chute pour recueillir, avec toutes les précautions possibles, les parties superficielles, et je les ai fait fondre pour voir si elles contenaient des parties solides. A mon grand étonnement, je m'aperçus bientôt que la neige ainsi obtenue renfermait une forte quantité de poussière noire comme de la suie et consistant en une substance organique riche en carbone. Cette substance ressemble tout à fait aux poussières météoriques tombées, en même temps que les météorites proprement dites, à Hesse près Upsal, le 1^{er} janvier 1869. Cette poussière contenait aussi de très-petites paillettes de fer métallique.

» Il était possible que la poussière charbonneuse, malgré le soin avec lequel elle avait été recueillie, fût due aux cheminées de Stockholm et que le fer métallique provînt aussi du fer dont sont faits la plus grande partie des toits de cette ville. Cependant, jugeant l'observation digne d'être étudiée, j'écrivis à mon frère, Carl Nordenskiöld, qui demeure dans une partie assez déserte de l'intérieur de la Finlande et qui s'occupe de météorologie, le priant de faire la même expérience. Ayant cherché à éviter les principales causes d'erreur et ramassé la neige dans une plaine entourée de forêts, il obtint aussi une poussière noire qu'il m'envoya. Mes analyses me prouvèrent qu'elle était de la même nature que celle de Stockholm; de l'une comme de l'autre on pouvait extraire, au moyen de l'aimant, des paillettes magnétiques qui, triturées dans un petit mortier d'agate, furent reconnues comme du fer métallique.

» Ayant fait recueillir de la neige pendant le printemps, en deux endroits de la Suède, cette neige me laissa également des paillettes de fer.

» On connaît la propriété que possèdent les vents de transporter les matières à de très-grandes distances. Aussi, je me proposai de reprendre cette question dans mon voyage arctique, où les circonstances devaient être plus favorables. A notre premier essai pour pénétrer vers notre station d'hiver, à travers les champs de glace, j'eus une excellente occasion de renouveler cette observation sur une glace flottante; j'observai à sa surface et à quelques centimètres plus bas une poussière grise mêlée de petits grains magnétiques. La neige recueillie dans ces conditions me fournit, après fusion, un résidu peu abondant. La poussière grise consistait, pour la plus grande partie, en diatomées entières ou brisées, et les points noirs, d'une grandeur atteignant un quart de millimètre, contenaient du fer métallique entouré d'oxyde de fer et contenant probablement aussi du charbon. A plusieurs reprises, j'ai constaté la présence du fer métallique, qui se décèle aussi en précipitant le cuivre d'une dissolution de sulfate de ce dernier métal.

» Cette dernière observation me paraît prouver que la neige et la pluie amènent des poussières cosmiques en petites quantités.

Figure 7 : Lettre de Adolf Erik Nordenskiöld (Mossel-Bay, 79°53') le 9 septembre 1872 (traduction de M. Daubrée CR 1873).

» Pendant l'hiver, j'espère pouvoir faire des observations nouvelles, et amasser une assez grande quantité de cette poussière pour en faire une analyse quantitative. Je désire aussi que quelqu'un en France puisse vérifier mes expériences. »

» A cette occasion, M. Daubrée rappelle l'observation qu'il présentait lors de la chute des météorites charbonneuses, qui eut lieu, le 14 mai 1864, aux environs d'Orgueil (Tarn-et-Garonne) (1). Les météorites de cette chute sont non-seulement tendres et friables, mais elles se réduisent en une poussière impalpable aussitôt qu'elle prend le contact de l'eau et que le sel soluble qui lui sert de ciment se trouve dissous. Ce fait apprendrait qu'il peut être parfois difficile de distinguer les corps pulvérulents arrivant des espaces planétaires de ceux qui sont enlevés à l'écorce terrestre par les vents, les trombes ou les phénomènes volcaniques. Le passage de météorites de ce genre à travers une simple pluie ou des nuages suffit, en effet, pour les déliter complètement et les rendre méconnaissables.

» L'exemple des météorites d'Orgueil faisait donc supposer que bien des chutes de ce genre doivent échapper journellement à l'observation, et montrait combien il importe d'être attentif aux masses pulvérulentes qui tombent à la surface de notre globe.

» Il est à espérer que, depuis que cette lettre a été écrite, M. Nordenskiöld aura recueilli, dans les régions polaires, assez de substances pulvérulentes pour pouvoir y constater à son retour un fait caractéristique, la présence ou l'absence du nickel. »

M. DAUBRÉE fait hommage à l'Académie d'une « Notice nécrologique sur M. Sauvage », qu'il vient de publier.

Figure 8 : Compte rendu de l'académie 1864 M. Daubrée p465

Indications bibliographiques : (Knöfel and Rendtel 1994) (McCall, Bowden et al. 2006) et (Gounelle 2006) (Arago and Barral 1854)

2.2. Les collectes modernes de micrométéorites

Après les observations de Nordenskiöld s'écoule une longue période durant laquelle l'étude de la poussière interplanétaire se concentre sur des expériences de collectes dans les fonds marins, l'étude de la lumière zodiacale et la collecte de sphérules cosmiques dans différents sédiments. L'essentiel de ces études se trouve résumé dans le livre « Interplanetary Dust » (Hodge 1981). La Table 1 résume la situation actuelle des nombreux endroits où la poussière extraterrestre (en particulier des sphérules cosmiques) a pu être collectée (Taylor and Lever 2001).

On notera, en particulier les collectes de sphérules cosmiques dans les fonds marins (Blanchard, Brownlee et al. 1980).

A la fin des années 1960, une série d'expériences menées par des équipes belges sont réalisées à partir de neige antarctique pour tenter de mesurer le flux de matière extraterrestre à la surface du globe (Brocas and Picciotto 1967) et (Hanappe, Vosters et al. 1968) (mesures d'éléments du groupe du platine par activation neutronique). Ces tentatives de collectes se sont poursuivies dès le milieu des années 1970 par la capture de petites micrométéorites dans la stratosphère terrestre par la NASA (voir Brownlee 1985). Pourtant, les collectes modernes de micrométéorites non fondues de "grandes" tailles (>25 µm) ont été

initiées par M. Maurette (CSNSM) et C. Hammer (NBI, Copenhague) au Groenland (Maurette et al., 1987). Les collectes ultérieures se sont poursuivies en Antarctique.

Table 1

Micrometeorite collections from sediments, sedimentary rocks, and polar deposits. The type column refers to the types of cosmic spherules recovered. When 'all' is used, both melted and unmelted micrometeorites were recovered.

| Deposits | Age | Collection Technique | No. Examined | Type | Size Range (µm) | Reference |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------|----------|-----------------|----------------------------------|
| <i>Sediments</i> | | | | | | |
| Deep sea | ? | cores | 100s | S & I | 60–500 | Murray and Renard, 1883, 1891 |
| Deep sea | ? | magnetic rake | >300 | S & I | 100–500 | Brunn et al., 1955 |
| Deep sea | <7 Ma | core from top 3 m | 732 | S & I | 10–230 | Laevastu and Mellis, 1955 |
| Deep sea | <200 ka | magnetic sieve | 4413 | ? | 30–250 | Pettersson and Fredriksson, 1958 |
| Deep sea | ? | 750 kg sieved, mag. sep. | 1200 | I | 149–351 | Millard and Finkelman, 1970 |
| Deep sea | 0–100,000 yr(?) | magnetic rake | 100s | S, G & I | ≤5000 | Brownlee et al., 1979 |
| Deep sea | 0–500,000 yr | mag. sep. box core | >700 | S, G & I | 100–000 | Blanchard et al., 1980 |
| Deep sea | 0–700,000 yr | 1 m clam shell sample | 935 | S & I | 149–750 | Murrell et al., 1980 |
| Deep sea | 0–350,000 yr | 0–35 cm core, mag. sep. | 258 | S, G & I | 50–500 | Kyte, 1983 |
| Desert sand | ? | magnetic collector | 32 | I | 30–300 | Fredriksson and Gowdy, 1963 |
| Beach sand | recent–1.6 Ma | hand magnet | ? | I | 80–650 | Marvin and Einaudi, 1967 |
| <i>Sedimentary rocks</i> | | | | | | |
| Hardgrounds | 145–185 Ma | crush and dissolve | ? | I | 100–300 | Czajkowski et al., 1983 |
| Hardgrounds | 180 Ma | ? | 12 | I | ? | Jehanno et al., 1988 |
| Claystones | recent–500 Ma | dissolution, magnetic sep. | ? | ? | <40 | Crozier, 1960 |
| Carbonates | 30–40 Ma | dissolution, magnetic sep. | 28 | S & I | >100 | Taylor and Brownlee, 1991 |
| Salt deposits | ~250 & ~400 Ma | dissolution, magnetic sep. | 243 | ? | <40 | Mutch, 1966 |
| Sandstones | 1.4 Ga | mineral separation | 4 | S | 60–125 | Deutsch et al., 1998 |
| <i>Polar ice and sediment</i> | | | | | | |
| Greenland | | | | | | |
| Cryoconite | ? | heavy liq. separation | ? | S? | 100–200 | Wulfing, 1890 |
| Cryoconite | 0–3000 yr | suction, filter and pick | ~3500 | all | 50–300 | Maurette et al., 1987 |
| Cryoconite | <2 ka | suction, filter and pick | >100 | all | 100–1000 | Maurette et al., 1986 |
| Antarctica | | | | | | |
| Eolian deposits | <2.5 Ma(?) | sieved and hand picked | 840 | S | 125–500 | Hagen et al., 1990 |
| Eolian deposits | 0–100,000 yr(?) | wet sieved and hand picked | >100 | S | 64–1000 | Harvey and Maurette, 1991 |
| Ice cores | 1800–1961 AD | melt and filter | ? | I | 15–180 | Thiel and Schmidt, 1961 |
| Ice cores | 2300–100 BC | melt and filter | 5 | S, G, V | 50–160 | Yiou and Raisbeck, 1987 |
| Ice | ? | melt and filter | 76 | all | 50–400 | Maurette et al., 1991 |
| Snow and ice | 1100–1500 AD | suction bottom and filter | 1600 | all | 50–800 | Taylor et al., 1998 |

Tableau 1 : Résumé de l'ensemble des collectes de micrométéorites provenant de différents sédiments (Taylor and Lever 2001)

2.2.1. Les expéditions au Groenland

Dans le cadre de la collaboration entre M. Maurette et C. Hammer, 3 expéditions ont eu lieu au Groenland : Blue Lake I (juin 1984), Blue Lake II-III (juin 1987) et Hanstausen 1995 (voir Figure 9). Par la suite, une tentative de collecte d'une pluie des Léonides a été effectuée par l'équipe du CSNSM en 2006 sur le site de North Grip (75,1 N and 42,3 W).



Figure 9 : Carte de Groenland (Reeh, Oerter et al. 2002).

La technique de collecte mise au point par M. Maurette et C. Hammer utilise la fonte naturelle de la calotte glaciaire qui forme des lacs 'bleus' saisonniers et de trous à la surface des glaciers Groenlandais. Au fond de ces lacs et de ces trous se forme une boue noire, la cryoconite¹ (voir Figure 10). Elle est composée de matière organique et encapsule les particules de poussières (terrestres et extraterrestres). Cette boue est recueillie par pompage, puis désagrégée et filtrée pour obtenir un sable qui comporte principalement des grains terrestres de couleur claire et une faible proportion de micrométéorites (<1%), reconnaissables aisément du sable terrestre par leur couleur foncées (voir Figure 11).

Tout en étant la première tentative réussie de collecte à grande échelle de micrométéorites non fondues (le volume cyclé dans les lacs bleus chaque année étant énorme, la cryoconite s'enrichit peu à peu en grains extraterrestres). Cette technique présente les inconvénients de biaiser la collecte en faveur des grains les plus résistants et de contaminer les poussières (en particulier en matière organique terrestre).

Ces échantillons de cryoconite sont encore exploités au CSNSM où ils sont désagrégés par deux voies séparées ou complémentaires : i) chimique (eau oxygénée) et/ou ii) mécanique (brossage sur des tamis inox).

¹ La cryoconite fut pour la première fois décrite par Nordenskjold, N.E. (1875): Cryoconite found 1870, July 19th-25th, on the inland ice, east of Auleitsivik Fjord, Disco Bay, Greenland; Geol. Mag., Decade 2, 2, 157-162

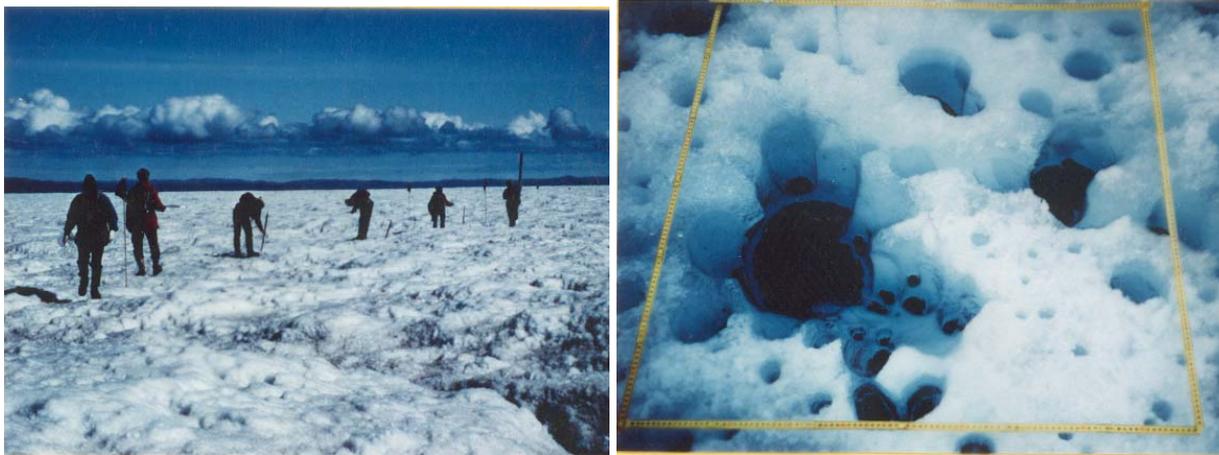


Figure 10 : Expédition Blue Lake menée par M. Maurette et C. Hammer (droite). Trou à cryoconite (gauche) (© M. Maurette, CSNSM)..

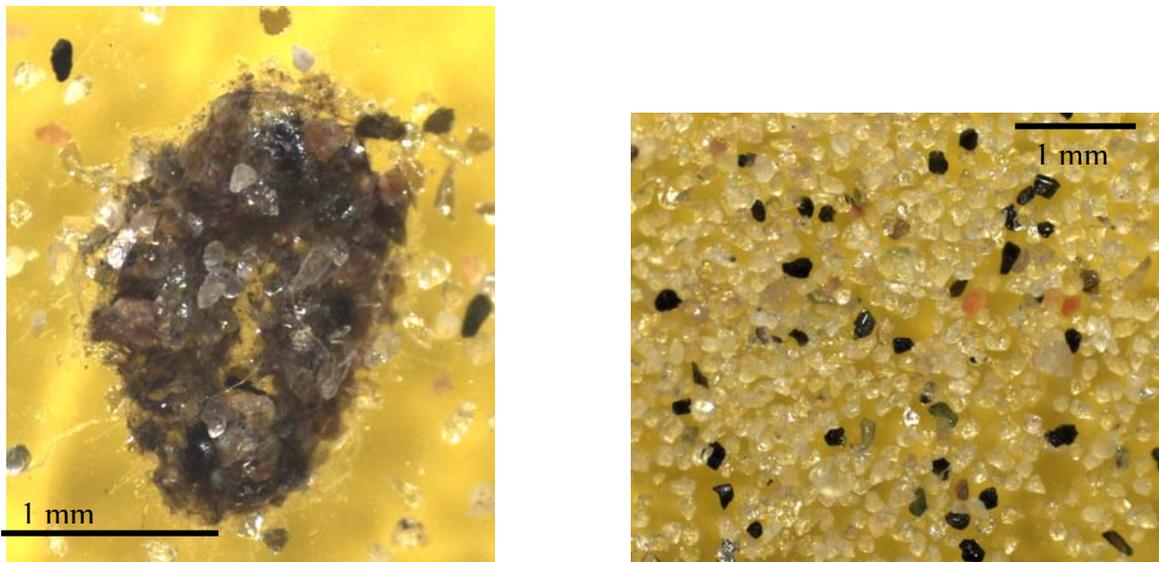


Figure 11 : gauche : cocon de cryoconite. Droite résidu obtenu après désagrégation de cryoconite, les grains de couleur claire sont terrestres alors qu'une large partie des grains de couleur sombre sont des micrométéorites (© CSNSM).

Indications bibliographiques :

(Maurette, Hammer et al. 1986; Maurette, Jéhano et al. 1987)

2.2.2. Les collectes côtières à Cap Prud'homme

En 1987, M. Maurette initie le premier programme de recherche de Micrométéorites dans les champs de glace bleue voisins de la station de Cap Prud'homme qui est située en bordure du continent Antarctique. Six collectes de micrométéorites ont eu lieu à Cap Prudhomme. En Décembre 1987-Janvier 1988, sous la responsabilité de M. Maurette (CSNSM), une première collecte a lieu en collaboration étroite avec G. Pourchet (LGGE). En Janvier 1991 une nouvelle collecte a lieu, sous la responsabilité de M. Maurette dans le cadre de la collaboration EUROMET. En Décembre 1994-Janvier 1995, une 3eme expédition a lieu toujours sous la responsabilité de M. Maurette avec le concours de G. Immel (CSNSM). Cette collecte est, à l'heure actuelle, la collection côtière de micrométéorites la plus performante jamais réalisée. En Janvier 1998 dans le cadre de la thèse de doctorat de M.

Gounelle effectuée sous la direction de M. Maurette, une nouvelle expédition applique le même principe de collecte mais sur le glacier de l'Astrolabe voisin de la station Cap Prudhomme (M. Gounelle et G. Immel). Deux collectes de faible statistique ont été effectuées à proximité de la station Cap Prudhomme par J. Duprat et G. Immel (Janvier 2000), J. Duprat et C. Engrand (Janvier 2002).

Le principe de collecte utilisée à Cap Prudhomme consiste à réaliser des poches d'eau en injectant de l'eau chaude dans une amorce de trou réalisé avec un carottier. L'eau est pompée en surface de la poche à l'aide de pompe immergée en inox, réchauffée par une ou plusieurs chaudières au fioul (70° C), puis réinjectée dans la poche. Au bout de plusieurs heures une poche de 2-4 m³ est réalisée. Le principal problème pouvant être rencontré dans ce type de technique est la vidange intempestive de la poche lorsque sa progression atteint une fissure du champ de glace bleue. Une fois la poche réalisée, le sédiment déposé au fond est pompé et tamisé à travers une série de filtres de 400, 100, 50 et 25 µm.

Cette technique, mise au point et perfectionnée par M. Maurette, G. Pourchet et G. Immel s'avère particulièrement efficace dans les champs de glace bleue stagnante où, d'année en année, les couches de glace subissent une érosion progressive (par les vents et/ou le soleil). On assiste alors à une concentration progressive des particules à la surface du champ de glace. La profondeur à laquelle les particules se stabilisent dépend de nombreux facteurs non-maitrisés et pouvant évoluer rapidement : taux d'érosion de la surface, vitesse de sublimation de la neige, profondeur de pénétration de l'onde thermique solaire ... Dans tous les cas cette profondeur d'équilibre (sans doute comprise entre quelques cm et quelques dizaines de cm) est inférieure à la profondeur des poches réalisées (environ 2m). Ainsi, la collecte des poussières contenues dans la poche permet d'intégrer le processus d'accumulation sur des échelles de temps allant de quelques centaines années à plusieurs dizaines de milliers d'années et d'obtenir sur une surface donnée (d'environ 1-2 m²) un nombre important de particules (plusieurs milliers par poche).

Toutefois, si cette technique a de nombreux avantages, elle présente aussi des biais. Les collections effectuées à Cap Prudhomme sont dominées par les poussières terrestres (>80%) provenant de la moraine située sous le glacier. Ainsi, avant de procéder aux analyses chimiques et isotopiques qui établissent de façon non ambiguë l'origine extraterrestre de la particule, il faut procéder à une présélection manuelle des grains au microscope. Cette présélection repose essentiellement sur l'aspect de la surface extérieure des micrométéorites connues à ce jour : elles présentent une couche superficielle de magnétite (oxyde de Fer, Fe₃O₄) acquise lors de leur freinage brutal dans les hautes couches de l'atmosphère. Cette couche d'aspect sombre permet de « reconnaître » très efficacement ces grains parmi des centaines de grains de sable glaciaire de couleur plus claire. Une telle présélection présente clairement le risque d'introduire un biais dans notre connaissance des différents types de matériaux extraterrestres accrétés par notre planète. Il est tout à fait envisageable qu'il existe des classes de micrométéorites dont la composition chimique, les caractéristiques minéralogiques et/ou les vitesses et angles d'entrée dans la haute atmosphère sont telles qu'elles ne présentent que très peu ou pas de couche superficielle de magnétite. Ainsi, une analyse de la composition isotopique en Néon a démontré l'origine extraterrestre de particules qui avaient été classées comme d'origine terrestre.

Concernant les micrométéorites collectées dans les champs de glace bleue de Cap Prudhomme, plusieurs étapes peuvent s'avérer particulièrement destructrices. Elles subissent de fortes contraintes mécaniques lors de leur transport dans le fleuve de glace depuis leur point de chute jusqu'à leur point de collecte. Durant leur longue période d'accumulation proche de la surface du champ de glace bleue, elles subissent très probablement de nombreux cycles de congélation-décongélation qui peuvent s'avérer particulièrement destructeurs pour les objets poreux et friables. Enfin, même si sous l'impulsion de M. Maurette de nombreux progrès ont été accomplis dans ce domaine, les

techniques de vidange des poches d'eau continuent à faire intervenir un pompage mécanique qui, à son tour, peut s'avérer fatal aux échantillons les plus fragiles. L'exposé, même succinct, des nombreux résultats obtenus à partir de ces objets dépasse de loin le cadre de ce cours. On conseillera donc vivement au lecteur intéressé un livre récent de M. Maurette (Maurette 2006) et un article de revue (Engrand and Maurette 1998) où se trouve résumé l'essentiel de cette problématique.

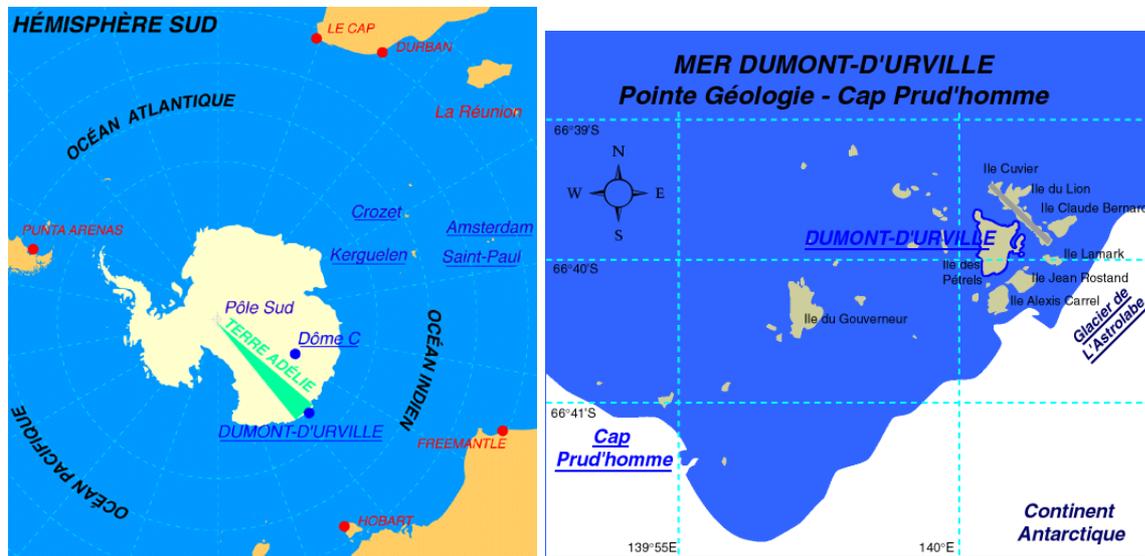


Figure 12 : Carte de la position de la terre Adélie et de la base côtière de Cap Prud'homme (© IPEV)

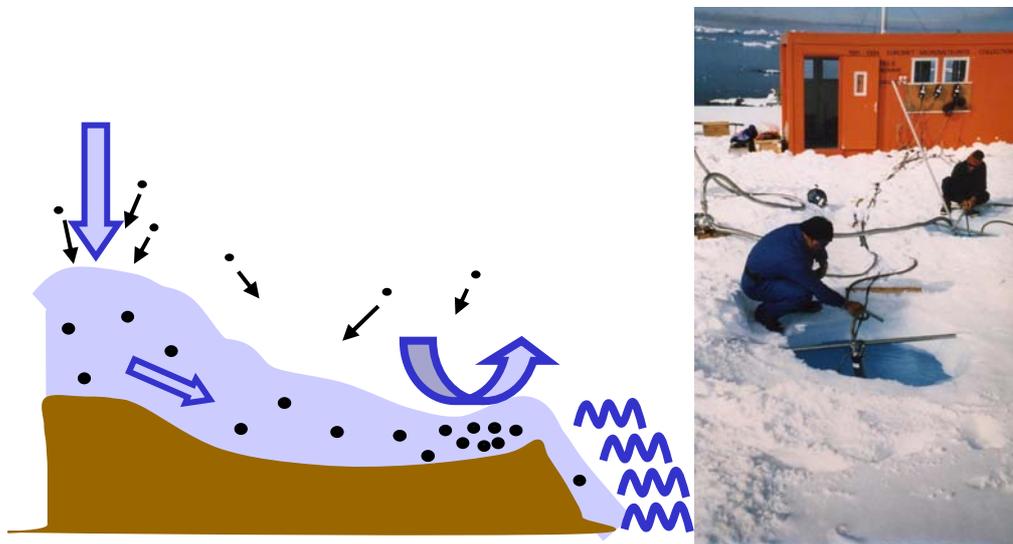


Figure 13 : principe de collecte de micrométéorites dans les champs de glace proches de la base de Cap Prud'homme.

Indications bibliographiques :

(Olinger, Maurette et al. 1990), (Maurette, Olinger et al. 1991), (Maurette, Immel et al. 1992), (Maurette, Immel et al. 1994), (Engrand and Maurette 1998), (Gounelle, Maurette et al. 1999), (Maurette 2006).

2.2.3. Les collectes Américaines et Japonaises

A la suite de travail pionnier de M. Maurette, des équipes américaines et japonaises ont développé des programmes de collectes de micrométéorites. L'équipe américaine a obtenu des résultats spectaculaires en pompant le fond du puits d'eau potable de la station South-Pole. Cette collecte a permis d'obtenir une valeur minimale du flux de sphérules cosmiques sur terre : 1600 ± 300 tonnes /an.

Depuis plus d'une décennie, les expéditions polaires japonaises ont développé un programme de recherche de micrométéorites. Ces collectes se sont concentrées à Dôme F (Dome Fuji, 77.3° S, 39.7° W) et dans les champs de glaces bleues proches de Tottuki Point, à 17km au nord ouest de la station permanente Syowa. Les collectes effectuées à Dôme Fuji ont été réalisées dans l'unité de production d'eau potable de la station.

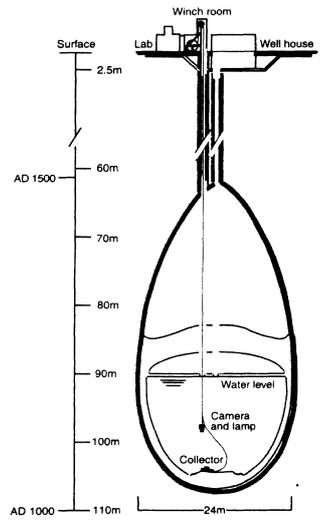
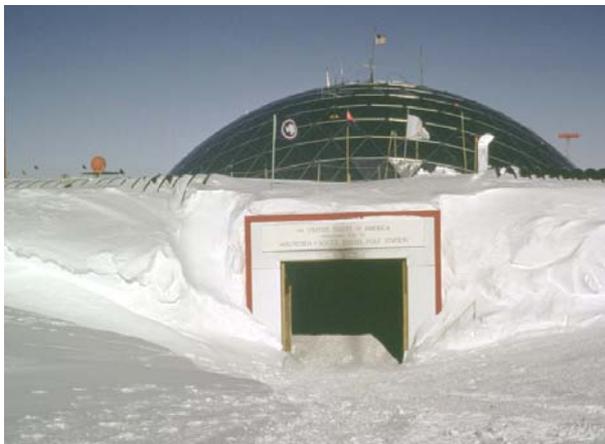


Figure 14 : Puits d'eau potable de la Station polaire Amundsen-Scott (Pole Sud), les micrométéorites ont été extraites grâce à un collecteur (pompe) dirigé par une camera (Taylor, Lever et al. 1998).

Indications bibliographiques :

(Taylor, Lever et al. 1998), (Taylor, Lever et al. 1995; Taylor, Lever et al. 1996) (Nakamura, Imae et al. 1999)

2.3. Un cas particulier : Le programme « Micrométéorites @ CONCORDIA »

Peu de pays sont parvenus à construire des stations scientifiques dans les régions centrales du continent Antarctique : South Pole-Scott-Admusen (USA), Vostok (RU), Dome Fuji (Jp). Depuis 1999, l'équipe d'Astrophysique du Solide du CSNSM a initié un nouveau programme de collecte de micrométéorites dans les régions centrale du contient Antarctique. On commencera par décrire les avantages des régions centrales du continent Antarctique pour ce type de recherche, puis le programme de recherche « Micrometeorites @ CONCORDIA » est décrit.

2.3.1. Pourquoi les régions centrales Antarctiques ?

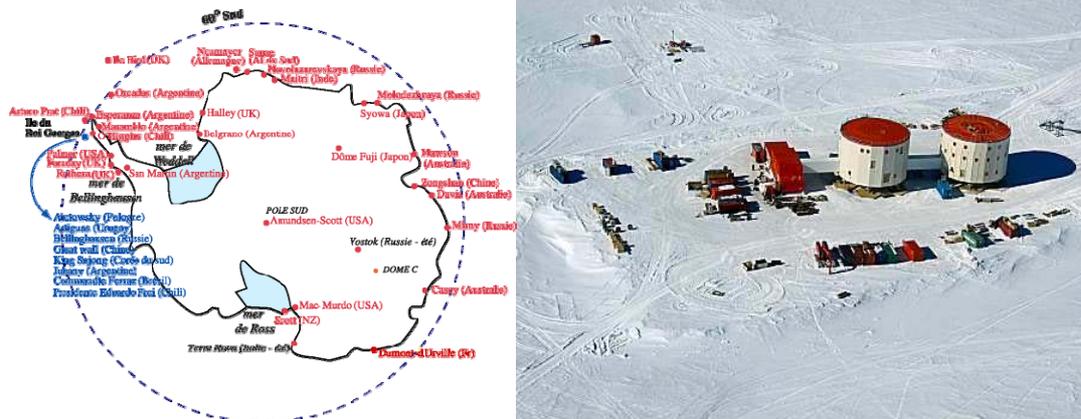


Figure 15 : Localisation de la base CONCORDIA (droite) à Dôme C (75°S, 123°E). (© IPEV)

Le site de Dôme C (75°S, 123°E) est situé sur les hauts plateaux de la partie ouest du continent (voir Figure 15). Entre 1998 et 2005, les instituts polaires français (IPEV) et italien (PNRA) y ont construit la base CONCORDIA. Ce site a été choisi pour le programme de forage profond EPICA.

Le site de Dôme C présente des avantages significatifs pour la recherche de poussières extraterrestres et les collectes effectuées à CONCORDIA peuvent donc nous permettre de nous affranchir de biais présents dans les collectes côtières à la surface des champs de glace bleue.

Le taux annuel d'accumulation de neige y est très faible, d'environ 10 cm par an (3.5 g/an/cm²). Les couches de neiges correspondant aux niveaux de 1965-66 sont situées à une profondeur de 3-4 mètres. Elles sont donc accessibles en creusant une tranchée à l'aide d'un engin et de larges surfaces de neiges peuvent en être extraites sans logistique lourde.

La valeur moyenne de cette accumulation annuelle de neige a fait l'objet, sur ce site, d'études détaillées de différentes équipes de glaciologie (LGGE Grenoble, CEA Saclay). Pour la période 1955-79, des mesures du taux de radioactivité β en fonction de la profondeur ont permis de clairement mettre en évidence les années 1955 et 1965 correspondant à l'arrivée sur le site des retombées de différentes séries d'essais nucléaires atmosphériques.

La neige de Dôme C est très isolée de toute source de poussière terrestre. Le site de Dôme C se situe à plus de 1000 km des côtes et le régime de vents dominants souffle de l'intérieur vers l'extérieur du continent : il s'agit d'un site exceptionnellement préservé de toute source naturelle de poussière terrestre. Contrairement aux champs de glace bleue côtiers qui présentent une contamination en sable issue de moraines, à Dôme C, le lit rocheux est situé à plus de 3,5 km profondeur ce qui nous élimine toute contamination de ce type. En traitant dans des conditions de propreté adéquate plusieurs tonnes de neige provenant de niveaux antérieurs à l'arrivée de la logistique sur place en 1994, il est possible de recueillir les grains initialement contenus dans la neige et d'analyser la totalité des particules de poussière collectées sans aucune présélection sur leur aspect extérieur. Grâce à sa localisation même, le site de Dôme C présente donc un fort potentiel de découverte de nouveaux types de poussières interplanétaires.

A Dôme C, les micrométéorites se trouvent, sur leur point de chute, piégées dans une couche de neige à très basse température. Elles ne subissent que de très faibles contraintes mécaniques et, la température sur le site de Dôme C ne s'élevant jamais au delà de -20° C, elles ne subissent aucune altération aqueuse. Ainsi, en adoptant une technique de fonte et de filtrage sans contraintes mécaniques fortes, on peut espérer trouver des poussières friables impossibles à collecter ailleurs.

2.3.2. Le protocole expérimental

Dans le cadre de ce programme, nous avons effectué trois expéditions à Dôme C. En Janvier 2000, la première expédition (Duprat, Immel CSNSM) a permis de faire une démonstration de faisabilité. Nous avons collecté des échantillons de neige de surface (prélevé jusqu'à 30 km de la station) où nous avons constaté la présence de pollutions de suie noire provenant essentiellement de l'activité humaine sur le site (fumée d'engin, centrale thermique). Pour obtenir des échantillons propres, nous avons développé une nouvelle technique en collectant la neige dans des tranchées de 4-6 mètres de profondeur. La neige prélevée correspond à des couches tombées entre 1950 et 1970, une époque bien antérieure à l'arrivée de toute activité humaine dans ce secteur en 1994. Toutefois, le fondoir utilisé n'était pas performant (simple cuve, échangeur interne) et une quarantaine de particules extraterrestres seulement ont finalement pu être collectées.

En janvier 2002, la mission de terrain comprenait deux chercheurs du CSNSM : C. Engrand et J. Duprat. A cause d'importantes difficultés logistiques due à des conditions climatiques particulièrement rudes, l'essentiel du matériel n'a pu être débarqué du bateau cette année-là et une partie a été perdue à l'eau¹. Malgré ces difficultés, cette expédition a pu être menée à bien grâce à un fondoir de secours et la collecte a été fructueuse : plus de 250 particules d'origine extraterrestre collectées (soit presque 10 fois plus que lors de l'expédition de collecte précédente).

Enfin, en Décembre 2005-Janvier 2006 (J. Duprat/M. Gounelle), nous avons été en mesure d'utiliser l'ensemble du dispositif mis au point au CSNSM. La neige a été fondue dans un fondoir double cuve en inox (qualité 316L) de 1m³ équipé d'une chaudière Chaffoteaux et Maury² de 35kW fonctionnant au propane pour limiter au maximum la production de suie (voir Figure 16).

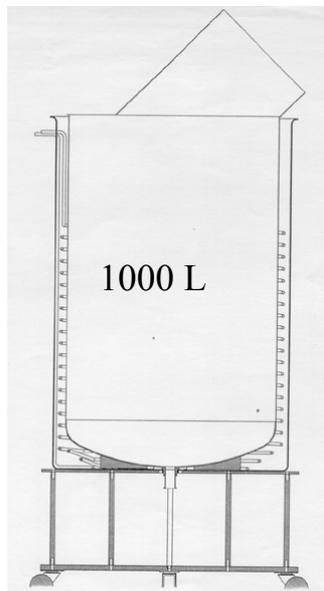


Figure 16 : Fondoir utilisé lors de la troisième expédition de collecte de micrométéorites à CONCORDIA (Janvier 2006)

¹ Deux caisses de matériel ont été emportées par les vents sur la piste du Lion devant la station de Dumont d'Urville.

² Depuis le début du programme à Dôme C, cet industriel nous a constamment aidé en nous fournissant le matériel et de l'aide technique (J. Berthelot).

| Date | Neige traitée m ³ | Volume effectif m ³ | Prof. | Fondoir | Temps exposition à l'eau | Efficacité | N | ET/T | Pollution |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|------------|--------|--------|-------------------------------------------------|
| Janvier 2000 | 9 | 3 | 0-80 cm 2-4 m | Cuve 1 m ³ | 100 heures | 30 % | 40 | 1-5 % | Fibres, Glycol, poussières ... |
| Janvier 2002 | 12 | 11 | 2-4 m | Double Cuve 100 L | 48 heures | > 60 % | 500 | 10-50% | Fibres textile, rares poussières |
| Janvier 2006 | 25 | 24 | 3-5 m | Double Cuve 1000 L | 12 heures | > 80 % | > 1300 | >50 % | Très faible (fibres, éclats de peintures) |

Tableau 2 : Résumé des différentes campagnes de collectes de micrométéorites à CONCORDIA. La colonne ET/T indique le rapport entre particules d'origine extraterrestre et d'origine terrestre observé dans les filtres.

2.3.3. Une collection unique, des échantillons remarquablement préservés

Les particules collectées en 2000, 2002 et en 2006 ont été caractérisées en collaboration avec le NHM de Vienne (Pr. G. Kurat) et l'Université de Lille (Pr. H. Leroux). Différents types sont montrés sur la figure 17. L'origine extraterrestre de plus de 1000 grains a pu être établie sur la base de leurs caractéristiques minéralogiques et de leur composition en éléments majeurs (voir le spectre de la Figure 18). Ces particules forment la Collection CONCORDIA. Il est à noter que, grâce aux améliorations apportées à l'ensemble du protocole d'extraction/fonte/filtration, nous avons pu atteindre en 2006 une proportion de grains extraterrestre (par rapport aux contaminations terrestres, voir le rapport ET/T dans le tableau 2) supérieur à 50%. La majorité des poussières terrestres observées proviennent de contaminations apportées lors du processus de collecte lui-même et/ou de l'activité humaine sur le site. Ce résultat démontre que, dans le domaine des tailles supérieures à 50 µm, l'essentiel des poussières contenues dans la neige de Dôme C est d'origine extraterrestre. Collectées dans une neige de surface, il s'agit là, avec la nouvelle collection Japonaise provenant de Dôme Fuji, des premières micrométéorites contemporaines collectées à ce jour (l'âge de chute de celles collectées antérieurement à Cap-Prudhomme, est évalué à 50.000 ans).

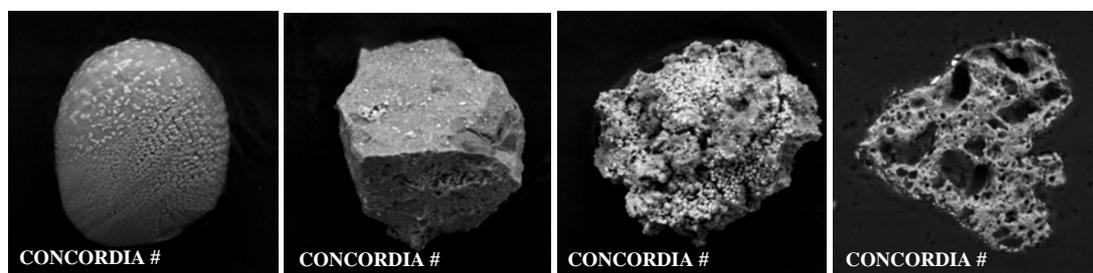


Figure 17 : Différents types de micrométéorites, de gauche à droite : une sphérule cosmique, une micrométéorite cristalline, une micrométéorite à grain fin et une section polie d'une micrométéorite à grain fin présentant des vésicules dues au dégazage de la particule à l'entrée atmosphérique.

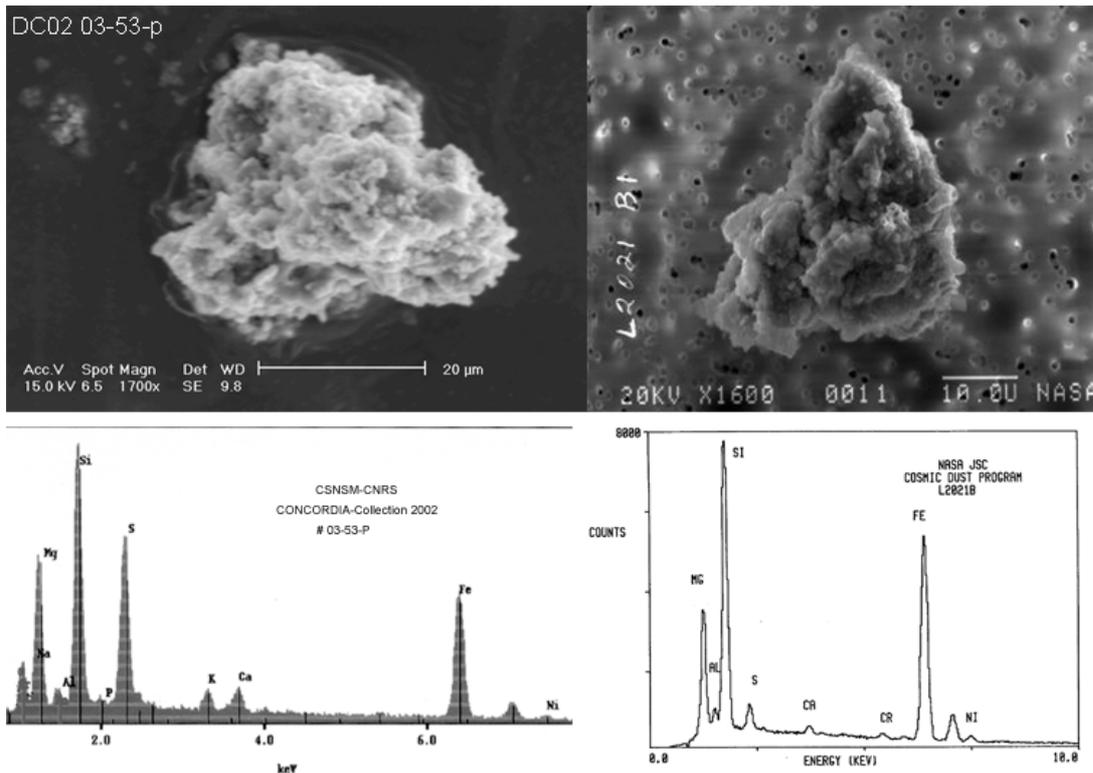


Figure 18 : (gauche) Micrométéorite de la CONCORDIA-Collection (CSNSM-CNRS) (Duprat, Engrand et al. 2004); (droite) Poussière Interplanétaire stratosphérique (NASA)

La Collection CONCORDIA a révélé l'existence d'une nouvelle famille de micrométéorites caractérisée par une matrice à grains fins avec une texture très friable (voir Figure 18). L'absence de ce type de particules fragiles dans les collections antérieures peut s'expliquer par leur destruction par contraintes mécaniques soit durant leur transport dans le fleuve de glace, soit durant les cycles de congélation/décongélation lors du processus d'accumulation, soit enfin par le pompage mécanique lors de leur collecte (Duprat, Engrand et al. 2003). Ce type de micrométéorites est particulièrement intéressant car sa texture fragile indique qu'elle n'a été que très peu altérée lors de son entrée atmosphérique. La découverte de ces micrométéorites friables permet d'espérer pouvoir enfin faire le lien entre les deux types de poussières interplanétaires actuellement disponibles en laboratoire : les micrométéorites polaires et les poussières interplanétaires collectées dans la stratosphère par la NASA (Interplanetary Dust Particles, IDPs).

Les micrométéorites de la CONCORDIA-Collection sont caractérisées par une présence massive d'inclusions de sulfures de fer; 65% des micrométéorites en contiennent alors qu'elles étaient beaucoup plus rares (<15%) dans les collectes précédentes. Une analyse a permis d'identifier dans la CONCORDIA-Collection une dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. C'est la première fois qu'un carbonate est mis en évidence dans une micrométéorite polaire. Les sulfures de fer et les carbonates étant des phases minérales particulièrement solubles dans l'eau, ces résultats démontrent que, dans les régions centrales Antarctiques, il est possible de collecter des particules ayant subi une altération terrestre minimale. La comparaison de ces sulfures de fer et des carbonates avec ces mêmes phases observées dans les IDPs et les chondrites carbonées peut nous apporter de précieuses contraintes sur la température et les réservoirs de formation de ces différents objets dans le système solaire primitif.

Grâce à la collection de micrométéorites du CSNSM, nous avons pu comparer la CONCORDIA-Collection avec les micrométéorites à grains fins collectés dans les champs de glace bleue de Terre Adélie. Une analyse quantitative de la matrice à grains fins des micrométéorites de CONCORDIA nous a permis de montrer que sa composition en éléments majeurs est compatible avec la composition solaire de référence (celle des météorites

chondrites carbonées de type CI) alors que celle des micrométéorites collectées précédemment est caractérisée par d'importants appauvrissements en S, Ca et Ni (Figure 19). L'origine de ces appauvrissements était débattue : altération terrestre, dégazage lors de l'entrée atmosphérique, caractéristique intrinsèque... Le résultat obtenu avec la CONCORDIA-Collection a permis de trancher : ces appauvrissements sont dus à une altération terrestre lors du séjour des micrométéorites dans les champs de glace bleue.

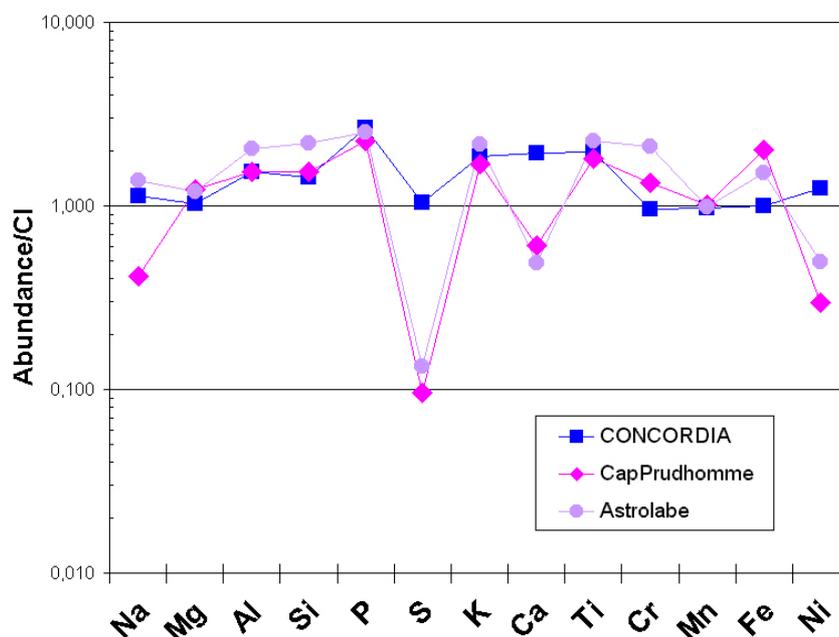


Figure 19 : Comparaison de la composition globale des micrométéorites de la CONCORDIA-Collection avec celles des micrométéorites collectées dans les champs de glace bleue (Cap Prud'homme et Glacier de l'Astrolabe). Les compositions sont normalisées à la composition solaire de référence (celle des météorites chondrites carbonées de type CI (Duprat, Engrand et al. 2004)

Grâce au travail effectué sur la collection de Janvier 2006, plus de 500 particules ont été analysées. Chaque grain a été fragmenté en salle blanche, puis analysé par microscopie électronique à balayage et sa composition chimique déterminée. Ces analyses ont été effectuées en partie à l'Université de Lille, au laboratoire IDES-Orsay et grâce à la Centrale de micro-nano-technologie IEF-MINERVE.

Parmi les particules extraterrestres identifiées et caractérisées minéralogiquement, une dizaine présentent une matrice à grain très fin comprenant une matière exceptionnellement riche en carbone : ce sont des micrométéorites 'ultracarbonées' (UCAMM). Une particule similaire avait été reportée dans la collection de micrométéorites japonaise. L'analyse en microscopie à transmission (TEM) de ces particules fait apparaître une texture poreuse présentant un grand nombre de sulfures de Fer ainsi que de nombreuses phases minérales de taille micronique et sub-micronique intimement liées à la matière organique des UCAMM. Les résultats obtenus renforcent le lien entre les micrométéorites ultracarbonées, les particules de poussières interplanétaires collectées dans la stratosphère par la NASA (IDPs) et les grains CHON observés dans la comète de Halley.

Indications bibliographiques :

(Pinglot, Pourchet et al. 1981; Petit, Jouzel et al. 1982)

(Kurat, Koeberl et al. 1994)

(Duprat, Hammer et al. 2001; Duprat, Engrand et al. 2005) (Duprat, Engrand et al. 2007)

(Nakamura, Noguchi et al. 2005) (Dobrica, Engrand et al. 2008)

3. Deux exemples d'analyses isotopiques *in-situ* de matière extraterrestre

3.1. Le principe de la technique SIMS

La spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), ou microsonde ionique, initialement conçue par G. Slodzian, permet d'atteindre une haute résolution spatiale ($\sim 1 \mu\text{m}$ pour les microsondes ioniques conventionnelles et $\sim 100 \text{ nm}$ pour le NanoSIMS¹). L'impact d'un faisceau d'ions d'une dizaine de keV d'énergie sur la surface de l'échantillon solide produit une émission d'ions secondaires qui sont analysés par un spectromètre de masse. Cette méthode permet de réaliser des mesures *in situ* sur de très petits volumes de matière (de l'ordre de $50 \mu\text{m}^3$ ou quelques ng). Le type de précision sur les mesures isotopiques est de l'ordre de 0.1% (soit 1 ‰).

On distingue deux types d'utilisation :

- le mode fixe où le faisceau primaire assez intense (jusqu'à une dizaine de nA, avec une taille $< 20\text{-}30 \mu\text{m}$ de diamètre) est ajusté sur la plage à analyser. Typiquement les courants secondaires peuvent atteindre de l'ordre de $< 10^6$ ions/sec dans le cas de comptage par compteur discret (multiplicateur d'ion) ou quelques $10^8\text{-}10^9$ ions/sec dans le cas de comptage par cage de Faraday.
- Le mode image où le faisceau primaire est balayé sur l'échantillon (sur des zones de l'ordre pouvant atteindre $100 \times 100 \mu\text{m}$) et le système de comptage mis en coïncidence afin d'obtenir une cartographie isotopique. Dans ce cas, on utilise des courants primaires moins intenses (quelques dizaines de pA) mais la taille du faisceau peut être réduite à 100 nm dans le meilleur des cas.

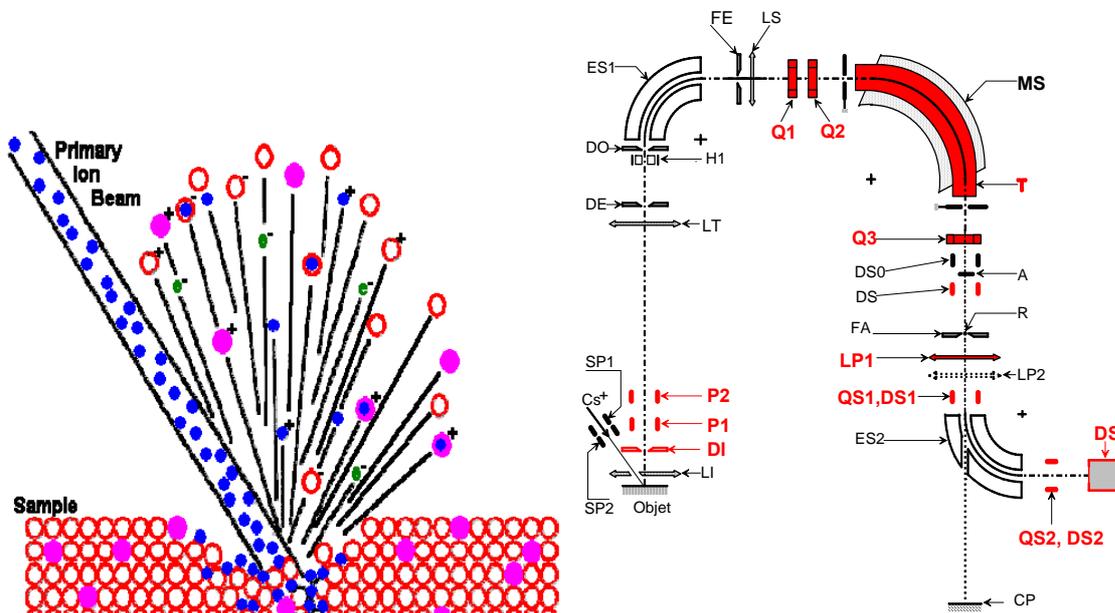


Figure 20 : Principe de la technique de spectrométrie de masse par émission ionique secondaire (microsonde ionique). Des atomes de l'échantillon sont pulvérisés par le faisceau primaire (Cs^+ ou O^-). La partie ionisée est ensuite triée en masse dans un spectromètre comprenant un secteur électrostatique (ES1) et magnétique (MS) (voir partie droite).

¹ La machine NanoSIMS développée par G. Slodzian (Univ. Paris XI / Onera) est commercialisée par CAMECA.

3.2. Un exemple d'héritage interstellaire

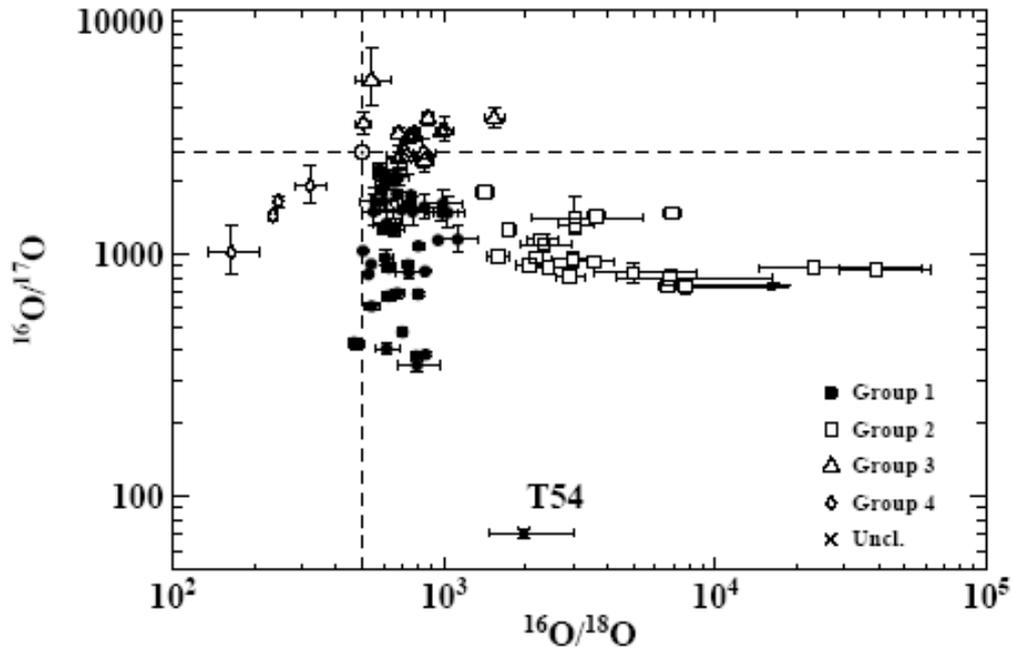


Figure 21 : Composition isotopique de l'oxygène dans des grains présolaires d'oxydes identifiés dans la météorite de Tieschitz (Nittler 1996). Les traits en pointillés indiquent les valeurs solaires.

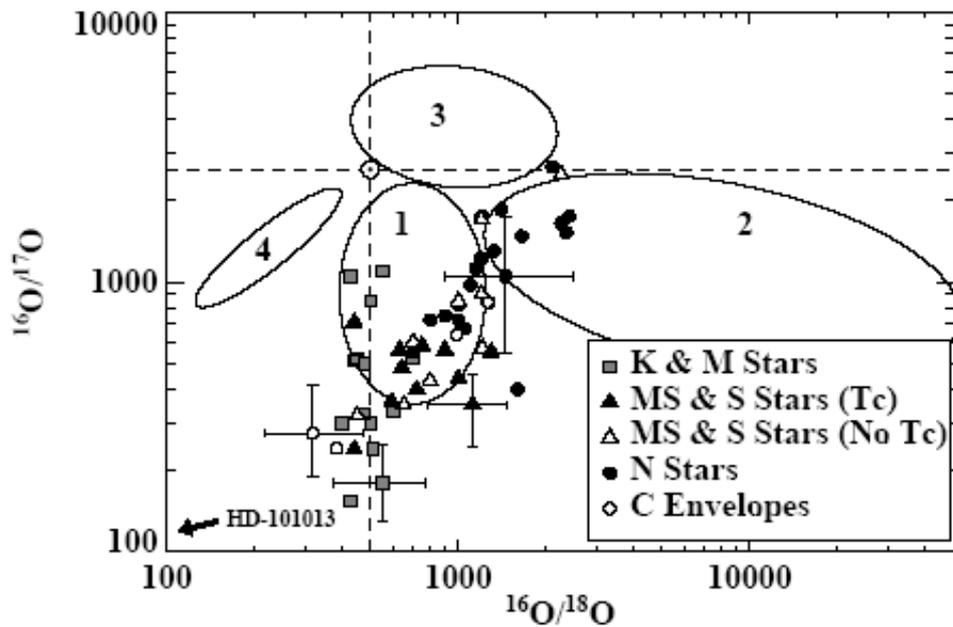


Figure 22 : Composition isotopique des différentes classes de géantes rouges (Nittler, Alexander et al. 1997). Les ellipses indiquent les différentes familles de grains présolaires (voir la figure 21).

La littérature sur les grains présolaires est extrêmement riche, on se contente ici de montrer sur un exemple emblématique le type de raisonnement suivi dans ce domaine. En 1997, plusieurs dizaines de grains présolaires d'oxydes (principalement Al_2O_3) ont été identifiés dans la météorite de Tieschitz. La composition isotopique en oxygène de ces grains est indiquée sur la Figure 21. Les données permettent d'identifier 4 familles de grains :

- Groupe 1 : forts excès en ^{17}O et faibles appauvrissements en ^{18}O . Certains de ces grains présentent des excès en ^{26}Mg d'origine radiogénique¹.
- Groupe 2 : excès en ^{17}O et forts appauvrissements en ^{18}O . Ces grains présentent de fort excès en ^{26}Mg d'origine radiogénique.
- Groupe 3 : rapports $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ et $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ très supérieures aux valeurs solaires (présentant de fort appauvrissements en 17 et 18)
- Groupe 4 : forts enrichissements en ^{17}O et ^{18}O .

La discussion détaillée de l'origine stellaire de l'ensemble de ces familles dépasse de loin le cadre de ce document, on se restreindra donc ici à une présentation succincte des hypothèses nucléosynthétiques envisagées pour les groupes 1 et 2. La composition isotopique de ces familles de grains pré-solaire peut alors être comparée à celles observée dans différentes étoiles de type géantes rouges (voir Figure 22).

Les compositions isotopiques des groupes 1 et 2 sont compatibles avec une nucléosynthèse dans des étoiles peu massives (0.5 à quelques masses solaires) qui sont passées par le stade de *first dredge-up* des géantes rouges.

Rappelons que lors de leur évolution, les étoiles de faible masse ($< 10 M_{\odot}$) passe d'abord par la *séquence principale*² puis à la phase *Géante Rouge* où le cœur d'He est constitué, se contracte sous l'effet de la gravité et la luminosité de l'étoile augmente alors considérablement³. La combustion de H en couche au dessus du cœur d'He est associée à une augmentation du diamètre de l'étoile et une baisse de sa température de surface. Dans cette phase l'étoile quitte la séquence principale (voir la partie droite de la figure 23) pour peupler la branche des géantes rouges (GR). A fur et à mesure que son l'enveloppe refroidit, l'étoile commence à évacuer son énergie par convection plutôt que par radiation. La limite interne de la couche convective descend alors jusqu'aux zones profondes de l'étoile où a lieu la combustion en couche de H : c'est ce que l'on appelle le *first dredge-up*. Dans ce processus des couches contenant les produits du cycle CNO (le ^{14}N) sont remontées à la surface. Le ^{17}O est un noyau secondaire formé par capture de proton sur ^{16}O , donc dans la zone de combustion de l'hydrogène (cycle NO). Ainsi, on peut obtenir un enrichissement relatif en ^{17}O à la surface des GR après la phase du *first dredge-up*.

Plus tard dans l'évolution de l'étoile, lorsque le cœur devient suffisamment dense, la fusion de He peut y commencer et l'étoile quitte la phase GR pour entrer dans la phase dite Branche Horizontale. Il existe à ce stade une forte différence entre les étoiles de faible masse ($< 3 M_{\odot}$) dont le cœur devient dégénéré puis atteint une température suffisante (10^8 K) pour que la fusion de l'He se fasse de façon brutale via la chaîne 3α (flash hélium) et les étoiles plus massives où la température de départ de la fusion de l'He est atteinte avant que la densité du cœur ne soit suffisante pour provoquer la dégénérescence électronique du cœur. Dans ce dernier cas, la fusion de l'He a lieu sur une plus longue période (pas de flash de l'hélium).

Lorsque le cœur a consommé son He, l'étoile est constituée d'un cœur inerte de C et O, d'une couche de combustion d'He puis d'une couche de combustion de H et enfin d'une enveloppe (voir la partie gauche de la Figure 23). A ce stade l'étoile entre dans la phase AGB

¹ C'est-à-dire issus de la décroissance de ^{26}Al

² Combustion de H au cœur de l'étoile

³ D'un facteur 10^3 - 10^4

(Asymptotic Giant Branch) qui peut être divisée en deux périodes : E-AGB (early-AGB) puis TP-AGB (Thermal pulse AGB). Pendant la phase E-AGB, l'énergie est fournie par la combustion de He en couche et le diamètre de l'étoile augmente à nouveau jusqu'à atteindre celui correspondant à la phase géante rouge, puis la combustion de l'He s'achève temporairement. Dans la phase TP-AGB, l'énergie de l'étoile est alternativement fournie par la combustion de H en couche puis par He en couche. En effet, durant cette phase l'étoile passe de façon cyclique (avec une période de 10 000-100 000 ans) par des phases de *pulses* thermiques durant lesquels la combustion de He en couche reprend de façon brève (quelques centaines d'années). Durant ces pulses, la combustion de He en couche permet la synthèse de noyaux proches de la vallée de stabilité¹ grâce à la production de neutrons par les réactions $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ et $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$. Dans la couche de combustion de H, de l' ^{26}Al est produit via la capture de proton sur ^{25}Mg . La convection de l'enveloppe fait remonter à la surface les produits de combustion des couches H et He, ainsi après de multiples épisodes de *dredge-up* la surface de l'étoile peut atteindre des rapports $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ compris entre 10^{-2} et 10^{-3} (Gallino, Raiteri et al. 1994). Cette propriété des TP-AGB en font des candidats probables pour les grains pré-solaires de type 1 et 2 (voir Figure 21 et Figure 22).

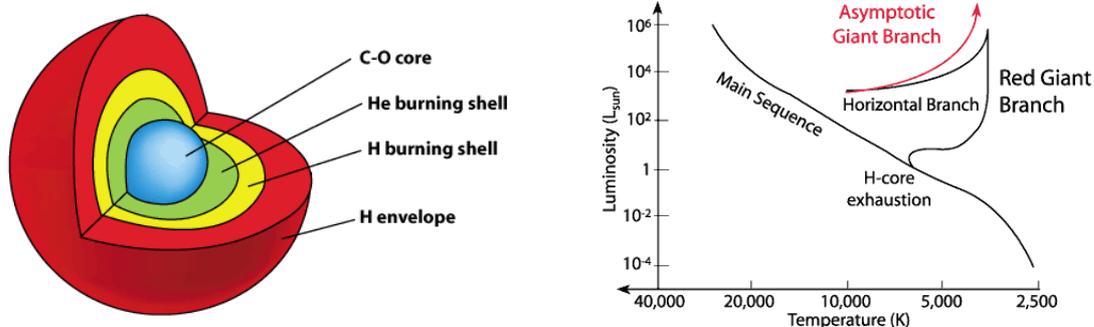


Figure 23 : Structure et diagramme HR pour une AGB. (source site [www National Optical Astronomy Observatory](http://www.NationalOpticalAstronomyObservatory))

Différentes hypothèses ont été envisagées pour expliquer l'appauvrissement en ^{18}O des grains de type 2 (*Hot Bottom Burning* et *Cool Bottom Processing*). Le traitement détaillé de ces processus dépasse de loin de cadre de cette présentation et repose sur d'autres contraintes isotopiques (les rapports $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$)... On se contentera ici de noter que dans le cadre du *Hot Bottom Burning*, la base de la couche convective de l'enveloppe de l'étoile dans sa phase TP-AGB peut atteindre des températures suffisantes pour avoir des réactions de combustion de H. Dans ce cas, le ^{18}O présent dans l'enveloppe peut être très efficacement détruit par la réaction $^{18}\text{O}(p,\gamma)^{19}\text{F}$. La surface de l'étoile est alors progressivement appauvrie en ^{18}O . Pourtant les calculs détaillés de ce processus indiquent que : i) la destruction de ^{18}O devrait être quasi-complète; et ii) les rapports $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ maximums attendus² devraient être de l'ordre de 600. Parce que le *Hot Bottom Burning* ne semble pas être en mesure d'expliquer les compositions isotopiques du groupe 2, Boothroyd, Sackmann et al. 1995 ont proposé l'existence d'un processus complémentaire, le *Cool Bottom Processing*, où il existe une possibilité de mélange entre la partie basse de l'enveloppe convective et la région de combustion de H.

Indications bibliographiques :
 (Nittler, Alexander et al. 1997)
 (Boothroyd, Sackmann et al. 1995)

¹ Ce sont les *noyaux* s

² Dans ce processus le rapport final $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ résulte de la compétition entre sa production par capture de proton sur ^{16}O , et sa destruction par $^{17}\text{O}(p,\gamma)^{18}\text{F}$ et $^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$

3.3. Les isotopes de l'hydrogène dans les micrométéorites ultracarbonées

L'évolution de la composition isotopique de l'hydrogène (D/H) au cours de l'histoire de l'univers est singulière : elle nous apporte des informations depuis la nucléosynthèse primordiale jusqu'aux réactions chimiques à basse température dans les disques protoplanétaires. L'hydrogène est de très loin l'élément le plus abondant de l'univers : environ 90% des atomes, soit 75% en masse. Outre le fait d'être le plus abondant, l'hydrogène est l'élément dont la composition isotopique présente la plus grande plage de variation : les rapports D/H varient de près de 5 ordres de grandeurs selon les différents réservoirs où il est observé. Revenons brièvement sur l'histoire de cet élément.

Historiquement, c'est C. Payne, une jeune astronome britannique travaillant aux US, qui la première fera la constatation que le spectre des étoiles est dominé par l'hydrogène et l'hélium. On notera, que même si C. Payne semble elle-même prendre avec beaucoup de précautions les abondances qu'elle observe¹, c'est tout de même son travail pionnier qui montre que, aussi complexe soit-il, notre univers est essentiellement constitué de l'élément, le plus simple, l'hydrogène.

La totalité du deutérium actuellement visible a été produit lors de la nucléosynthèse primordiale (BBN). Au cours de la BBN, les neutrons se combinent aux protons pour former du Deutérium (D). Puis, par captures de proton et/ou de neutron successives, on arrive jusqu'à l'⁴He qui est le noyau le plus stable de cette région de masse. Environ 1 seconde après le *Big-Bang*, la température descend en dessous de $3 \cdot 10^9$ K et le rapport proton/neutron se fige à une valeur de 1/7. En combinant tous les neutrons avec des protons pour faire des ⁴He on obtient alors un rapport primordial H/He = 12. C'est effectivement ce qui est observé dans les étoiles les plus anciennes. Les étoiles plus récentes, comme le soleil, ont un rapport H/He légèrement plus faible² dû à l'enrichissement en noyaux lourds progressif du milieu interstellaire (MIS) par la nucléosynthèse stellaire.

Si la BBN avait pu se poursuivre indéfiniment, tous les neutrons, et par conséquent tout le D, auraient été convertis en ⁴He. Le fait même qu'il existe du deutérium indique que ce processus n'a pu avoir lieu de façon complète : l'expansion de l'Univers fait chuter sa densité en dessous d'une valeur critique où les neutrons ne peuvent plus s'assembler en D. Une petite fraction des neutrons libres est alors conservée sous forme de D et de ³He (dans des proportions voisines, quelques 10^{-5} de H). Ainsi, le D/H initial est relié à la densité baryonique de l'univers (10^{-30} g/cm³).

La valeur initiale du rapport D/H du système solaire peut être contrainte de différentes façons : à partir des rapports ³He/⁴He dans le soleil actuel³ mais aussi à partir de la composition isotopique de l'atmosphère des planètes géantes gazeuses (en particulier Jupiter) qui ont capturé une partie du gaz de la nébuleuse protosolaire. La valeur communément retenue est $(2,1 \pm 0,5) \times 10^{-5}$.

On notera que la valeur actuelle du milieu interstellaire est légèrement inférieure à cause de la progression combustion du D dans les étoiles.

Le deutérium est peu stable, avant même d'atteindre la séquence principale, les étoiles brûlent la totalité de leur deutérium qui ne peut survivre à des températures supérieures à une dizaine de 10^6 K (formation d'³He par capture de proton). Par la suite, lors de la combustion de l'hydrogène du soleil, malgré une production continue par $p(p, e^+ \nu)D$, la totalité du D produit est convertie en He par $D(p, \gamma)^3\text{He}$.

¹ C. Payne écrit : "The stellar abundance deduced for these elements... [Hydrogen and helium]... is improbably high, and is almost certainly not real."

² H/He=10 dans le cas du soleil

³ où tout le D a été converti en ³He par $D(p, \gamma)^3\text{He}$

Lorsque l'on regarde la situation dans les réservoirs moléculaires (H₂O, HCN, matériaux organiques) la situation est très différente : on constate un enrichissement, parfois extrêmement élevé, en deutérium. Le Tableau 3 résume la situation de différents réservoirs.

| Lieu/Echantillon | D/H x 10 ⁻⁵ | Référence |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| H ₂ primordial | (2-5) | (Geiss and Gloeckler 1998) |
| H ₂ protosolaire | 2 | (Geiss and Gloeckler 1998) |
| H ₂ Local ISM | 1.5 | (Linsky 1998) |
| Molécules (HCO ⁺ , NH ₃ , HCN, H ₂ CO...) dans les nuages moléculaire froids (T ~ 10 K) | 1000-3000 | e.g. (Robert, Gautier et al. 2000) |
| H ₂ O Terrestre | 15 | e.g. (Robert, Gautier et al. 2000) ou (Javoy 2005) |
| H ₂ O Comètes | 30 | e.g. (Bockelée-Morvan, Gautier et al. 1997), (Altwegg and Bockelée-Morvan 2003) |
| HCN Comètes | 230 | (Meier, Owen et al. 1998) |
| H ₂ O dans les phyllosilicates des météorites primitives (chondrites ordinaires L3, chondrites carbonées CR) | 30-75 | (Deloule and Robert 1995) |
| H ₂ O dans les Micrométéorites Antarctiques | 10-19.5 | (Engrand et al. 1999) |
| Matière Organique (MO) dans les chondrites carbonées (CI et CM) (mesures bulk) | 20-30 | (Alexander, Fogel et al. 2007) |
| MO dans les IDPS (imagerie) | 10-150 | (Messenger 2000), (Aléon, Engrand et al. 2001) |
| MO dans les chondrites carbonées de type CR (imagerie) | 75-250 | (Busemann, Young et al. 2006) |
| MO dans les micrométéorites Antarctiques Ultracarbonées (imagerie) | 2-450 | Duprat, Dobrica et al 2009 |

Tableau 3 : Compilation des compositions isotopiques de l'hydrogène dans différents réservoirs

On notera en particulier:

- la valeur extrêmement élevée observée dans les nuages moléculaires froids
- la valeur des océans terrestres¹, $D/H_{SMOW} = 15.6 \cdot 10^{-5}$, est enrichie de près d'un facteur 10 par rapport à la valeur de la nébuleuse proto-solaire ($D/H_{SMOW} = 2 \cdot 10^{-5}$)
- les comètes contiennent des réservoirs enrichis en D (eau et molécules organiques)
- les valeurs élevées observées dans la matière organique (MO) des météorites primitives, des IDPS et des micrométéorites.

¹ SMOW : Standard Mean Ocean Water

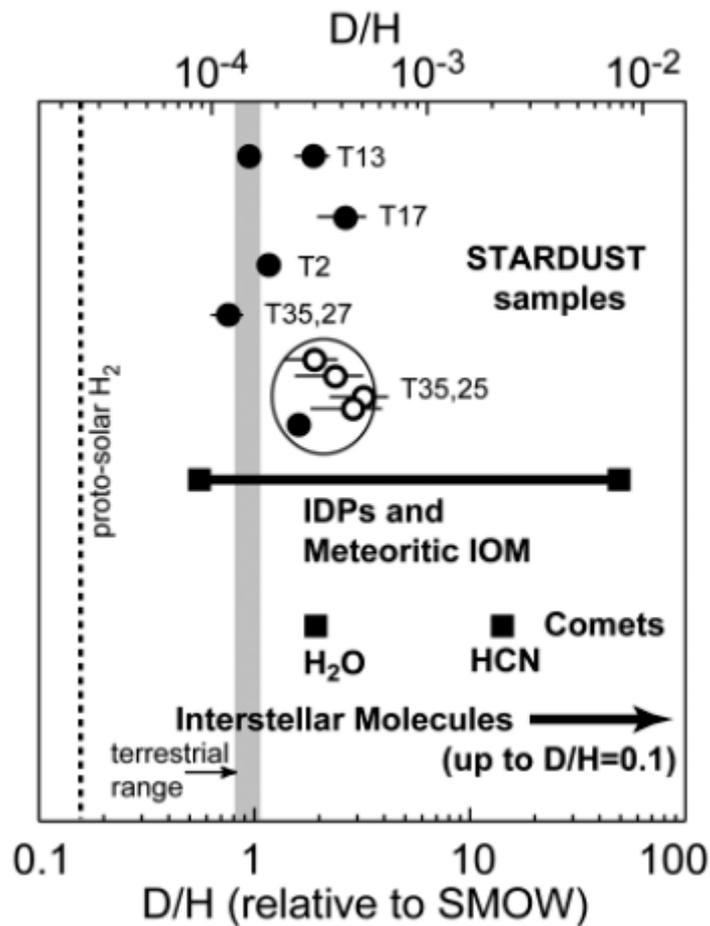


Figure 24 : Récapitulatif des rapports D/H dans différents réservoirs incluant les données STARDUST (ronds pleins et vides) (McKeegan, Aléon et al. 2006)

De nombreuses approches ont été proposées pour expliquer l'enrichissement en D de ces réservoirs (Robert, Gautier et al. 2000). L'explication communément acceptée actuellement est qu'il s'agit d'un fractionnement isotopique dû à des interactions ions-molécules à basse température. Effectivement, les réactions ions-molécules peuvent avoir lieu à très basse température car elles sont exothermiques et ne présentent pas de barrière d'activation. Or à très basse température, l'énergie de point zéro de la molécule deutérée (H_2D^+ ou DCN) est légèrement inférieure à celle de son équivalent hydrogénée (H_3^+ ou HCN). Ceci est dû au fait que l'énergie de l'état fondamental ($h\omega/2$) de vibration de la molécule deutérée est inférieure à celle de la molécule hydrogénée.

Cette idée a été particulièrement développée pour expliquer l'enrichissement extrêmement élevé des espèces deutérées dans la phase gazeuse des nuages moléculaires froids. Ainsi, dans l'essentiel de la littérature, les enrichissements en D des réservoirs météoritiques ou cométaires sont expliqués comme un héritage de la chimie interstellaire¹ (sous forme de molécules simples et/ou de matière organique).

Depuis près de deux décennies, de nombreuses études ont montré que la composition isotopique de l'hydrogène est un traceur pertinent pour différencier les différents réservoirs de formation des corps du système solaire (Robert 2001; Robert 2002). Ainsi, l'imagerie isotopique des IDPs a montré des enrichissements en D à l'échelle du micron (voir la figure

¹ une composante provenant des nuages moléculaires froids

25). Par analogie avec les valeurs élevées observées dans les comètes, ces grains ont été répertoriés comme étant cométaires.

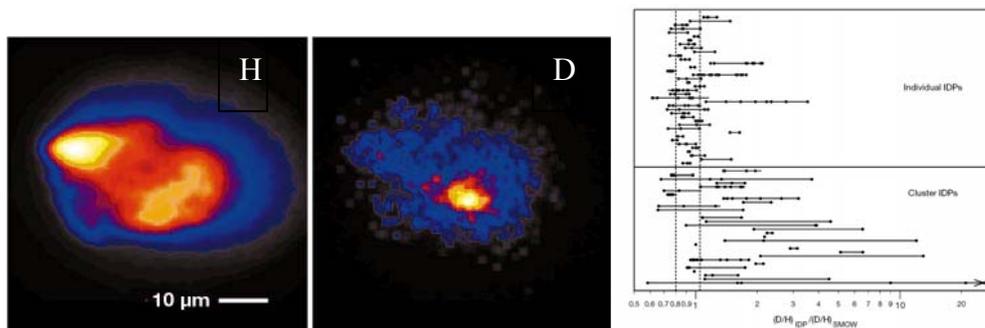


Figure 25 : Gauche : image isotopique H et D d'une IDP, Droite : systématique des rapports D/H dans les IDPs (Messenger 2000).

Par la suite, Aléon et al. (2001) ont pu identifier dans des IDPs trois types de matière organique présentant différentes signatures isotopiques (notés OM1, OM2, OM3 sur la Figure 26). Ces données permettent une meilleure compréhension de la distribution du D/H dans la nébuleuse protosolaire. En particulier, la présence dans un même grain d'une composante de matière organique de type « chondritique » ($D/H = 25 \cdot 10^{-5}$) et d'une composante de type « cométaire » ($D/H = 150 \cdot 10^{-5}$) suggère fortement l'existence d'un lien entre les chondrites carbonées et les comètes. On notera que ce lien s'est trouvé confirmé de façon spectaculaire par les récents résultats de la mission Stardust.

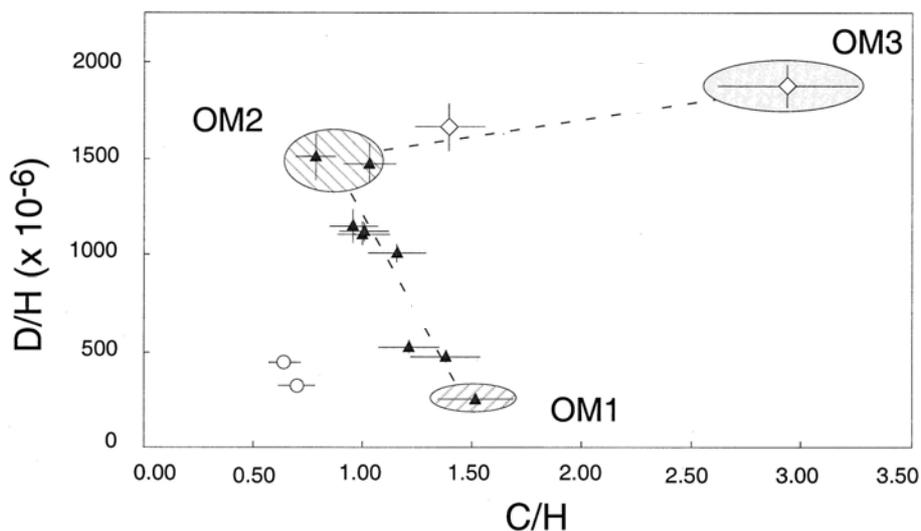


Figure 26 : Diagramme de corrélation montrant l'identification des phases porteuses de l'hydrogène des IDPs de taille inférieure à 50 μm (l'eau n'apparaît pas sur le diagramme). (Aléon et al., 2001).

La situation pour les micrométéorites antarctiques est plus énigmatique. Les rapports D/H mesurés dans les phases hydratées d'une série de 52 micrométéorites varient entre $D/H = 10 \times 10^{-5}$ et 19.5×10^{-5} , avec une valeur moyenne de 15.4×10^{-5} , c'est-à-dire qu'ils sont compatibles avec la valeur des océans terrestres (SMOW). Cette constatation a poussé M. Maurette à proposer un scénario dans lequel les micrométéorites jouent un rôle prépondérant pour l'apport des océans (et de l'atmosphère) sur la terre primitive. Bien que ces analyses D/H ne concernent que les phases hydratées des micrométéorites (et non

l'hydrogène organique), il est surprenant que la série des micrométéorites étudiées ne comprenne aucune particule présentant des rapports D/H élevés compatibles avec le réservoir cométaire. On s'attend en effet à la présence de grains cométaires dans le flux de poussières interplanétaires accrété par notre planète. Comme nous l'avons mentionné plus haut (Table 4), les micrométéorites ultracarbonées (UCAMMs) présentent des caractéristiques qui rappellent celles des grains cométaires, nous avons donc entrepris la caractérisation isotopique de ces particules.

En Janvier 2008, nous avons réalisé les premières cartographies isotopiques complètes à haute résolution spatiale (150 nm) de 2 fragments de 20 x 20 µm d'UCAMMs. Les mesures en H, D, ¹²C, ¹³C, ¹⁴N, ¹⁵N, ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O, ²⁸Si et ³²S ont été réalisées sur le NanoSIMS de l'UMS Nanoanalyses-LEME (MNHN). Les cartes en δ¹³C, et δ¹⁸O font apparaître une distribution isotopiquement quasi homogène et compatible avec les données publiées précédemment. En revanche les cartes en D/H révèlent, pour les deux UCAMMs, des D/H extrêmement élevés (jusqu'à 450 10⁻⁵, soit près de 30 fois supérieures aux valeurs communément observées sur Terre). Ces enrichissements sont indiqués sur les Figures 27 et 28 en unités δD :

$$\delta D = \left(\frac{\left(\frac{D}{H} \right)_{sample}}{\left(\frac{D}{H} \right)_{SMOW}} - 1 \right) \times 1000$$

Il s'agit là des enrichissements en deutérium parmi les plus élevés observés in-situ avec la technique SIMS dans du matériau extraterrestre. Les excès en Deutérium sont clairement associés à la matière organique des UCAMMs (voir Figure 27). Contrairement à tout ce qui a été observé à ce jour, ces excès ne se présentent pas sous forme de « hotspots » de taille micro ou sub-micronique mais au contraire sur des échelles spatiales de l'ordre d'une centaine de µm². De telles anomalies isotopiques n'avaient jamais été observées sur d'aussi larges échelles spatiales.

Les rapports D/H de la matière organique des UCAMMs se trouvent dans la plage de variations des rapports les plus élevés observés dans les comètes (dans la molécule DCN). En appliquant le formalisme et les exothermicités de la réaction d'échange entre le réservoir HD et la molécule H₂D⁺, il est possible d'obtenir une contrainte sur la température du réservoir au sein duquel cet échange a pu avoir lieu. Les valeurs extrêmes observées dans les UCAMMs indiquent que les précurseurs de cette matière organique ont été formés dans un réservoir dont la température ne dépassait pas 50 K. L'ensemble de ces observations renforce considérablement l'hypothèse d'une origine cométaire des UCAMMs.

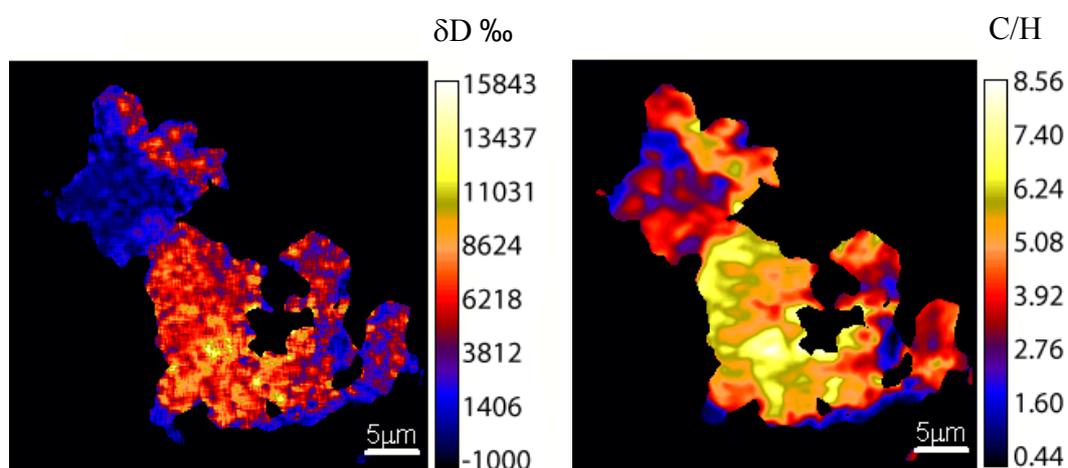


Figure 27 : Cartographie en D/H (gauche) et en C/H (droite) d'une UCAMM (DC06-09-19). Le D/H est indiqué en ‰ de la valeur SMOW (voir texte).

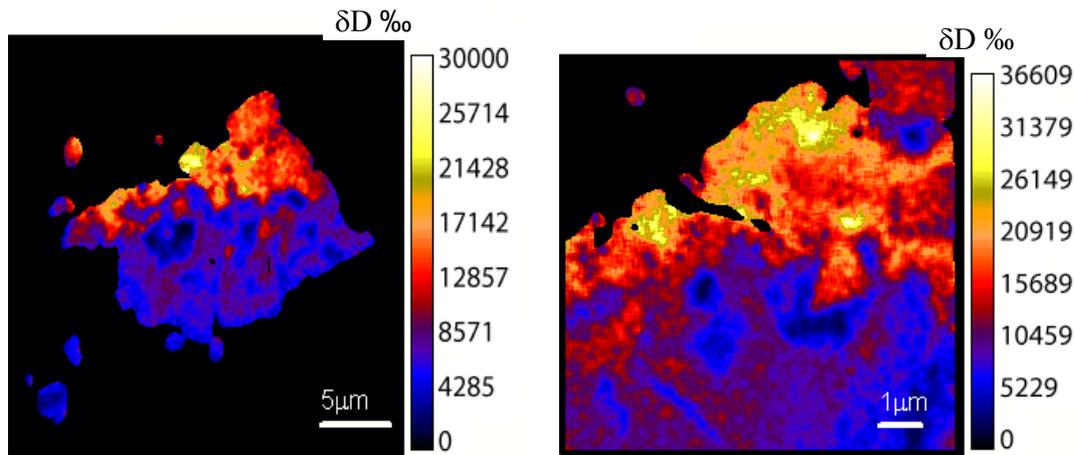


Figure 28 : Cartographie en D/H d'une UCAMM (DC06-09-19) (gauche). A droite: zoom sur la partie haute de la particule. (Duprat, Dobrică et al. 2009)

La comparaison avec les données de la mission Stardust est encore difficile dans la mesure où les analyses effectuées à ce jour suggèrent que les teneurs en D initiales des particules de la comète Wild2 ont été soit fortement perturbées par l'épisode de chauffage violent lors de la capture dans l'aérogel soit présentent un mélange entre le matériel cométaire et l'aérogel lui-même. On remarquera que les D/H mesurés dans les résidus des particules capturées par la mission Stardust sont marginalement enrichis en D (d'un facteur 2-3), ou compatibles avec la valeur SMOW.

Reste enfin la question du contexte astrophysique dans lequel la matière organique des UCAMMs a acquis ces enrichissements en D. Comme nous l'avons mentionné plus haut, de forts enrichissements isotopiques peuvent être expliqués par des réactions ions-molécules à basse température. Ainsi, pour des températures de 10 à 50 K, la réaction $H_3^+ + HD \rightleftharpoons H_2D^+ + H_2$ peut très efficacement transférer du D du réservoir principal (HD) vers un réservoir moléculaire de faible concentration mais qui présentera alors des D/H très élevés. Cette idée a été particulièrement développée pour expliquer l'enrichissement extrêmement élevé des espèces deutérées dans la phase gazeuse des nuages moléculaires froids. Des études récentes sur la matière organique insoluble extraite de différentes chondrites carbonées a permis de mettre en évidence de très fort enrichissement en D à l'échelle moléculaire. Le fait que les groupements moléculaires les plus enrichis en D soient ceux présentant les énergies de liaison les plus faibles suggère l'interaction de molécules pauvres en D avec un réservoir gazeux riche en D. On notera que cette hypothèse s'oppose à l'origine interstellaire des molécules riches en D (formées dans les nuages moléculaires froids) interagissant ensuite avec le gaz de la nébuleuse proto-solaire pauvre en D. Ce fait expérimental marquant suggère une synthèse et une deutération de la matière organique dans le système solaire lui-même.

Cette hypothèse paraît tout à fait défendable, dans la mesure où les rapports D/H mesurés dans la phase gazeuse entourant des étoiles en formation font apparaître des fractionnements isotopiques comparables à ceux observés dans les nuages moléculaires froids (Ceccarelli, Caselli et al. 2007). Ces enrichissements sont observés dans différentes molécules (H_2H^+ , H_2CO , NH_3) et semblent résulter eux aussi de réactions ions-molécules à basse température dans les zones profondes et externes du disque protoplanétaire.

Les D/H extrêmes observés dans les UCAMMs ne sont pas liés à un apport de phases minérales pré-solaires habituellement associées à la conservation d'un héritage interstellaire (SiC, diamants, graphite...). Nous n'avons observé aucune variation de la composition isotopique du carbone ou de l'oxygène signant la présence de grains présolaires dans les

UCAMMs. Il est tout à fait possible que l'enrichissement en deutérium ne provient pas d'un héritage d'une chimie interstellaire mais d'un mélange avec un réservoir riche en deutérium situé dans les régions profondes de la partie externe du disque protoplanétaire. De ce point de vue, il sera particulièrement intéressant de mieux caractériser cette matière organique et d'étudier les phases minérales qui lui sont associées¹. Parce qu'elles donnent accès sans pré-traitement chimique (attaque acide) à une matière organique très primitive, les UCAMMs délivreront certainement dans les années à venir de précieuses informations sur les processus physico-chimiques qui étaient à l'œuvre dans les régions froides du jeune système solaire.

Indications bibliographiques :

Sur l'hydrogène et le deutérium dans l'univers :

(Payne 1925), (Robert, Gautier et al. 2000), (Lodders 2003),
(Geiss and Gloeckler 1998), (Linsky 1998), (Javoy 2005),
(Millar, Bennett et al. 1989), (Meier, Owen et al. 1998)

Sur les données Stardust : (McKeegan, Aléon et al. 2006) (Brownlee, Tsou et al. 2006)

Sur les analyses de matière organique insoluble dans les météorites :

(Remusat, Derenne et al. 2005; Remusat, Derenne et al. 2005)
(Remusat, Palhol et al. 2006), (Gourier, Robert et al. 2008)

Sur les analyses dans les micrométéorites, les IDPS et les UCAMMS :

(Aléon, Engrand et al. 2001), (Duprat, Dobrică et al. 2009), (Aléon and Robert 2004),
(Maurette, Duprat et al. 2000,) (Engrand, Deloule et al. 1999), (Duprat, Dobrică et al. 2009)

Sur le flux de micrométéorites sur terre :

(Levasseur-Regourd, Renard et al. 1991; Liou, Dermott et al. 1995; Liou, Zook et al. 1996)

Remerciements :

Je tiens à remercier chaleureusement Delphine Nguyen pour son aide dans la recherche des documents sur la partie historique, ainsi que Cécile Engrand, Vincent Tatischeff et Marie-Geneviève Porquet pour leur relecture attentive du manuscrit.

Références

- Aleon, J. (2008). Meteorites and the physico-chemical conditions in the early solar nebula.
Aléon, J., C. Engrand, et al. (2001). "Clues on the origin of interplanetary dust particles from the isotopic study of their hydrogen-bearing phases." Geochimica et Cosmochimica Acta **65**: 4399-4412.
Aléon, J. and F. Robert (2004). "Interstellar chemistry recorded by nitrogen isotopes in Solar System organic matter." Icarus **167**: 424-430.
Alexander, C. M. O. D., M. Fogel, et al. (2007). "The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromolecular organic matter." Geochimica et Cosmochimica Acta **71**(17): 4380-4403.
Altwegg, K. and D. Bockelée-Morvan (2003). "Isotopic abundances in comets." Space Science Reviews **106**: 139-154.
Amelin, Y., A. N. Krot, et al. (2002). "Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions." Science **297**: 1678-1683.
Arago, F. and J. A. Barral (1854). Astronomie populaire.
Blanchard, M. B., D. E. Brownlee, et al. (1980). "Meteoroid ablation spheres from deep-sea sediments." EPSL **46**: 179-190.

¹ Cette étude est en cours et fait l'objet de la thèse de E. Dobrica sous la direction de C. Engrand.

- Bockelée-Morvan, D., D. Gautier, et al. (1997). "Deuterated water in comet C/1996 B2 (Hyakutake) and its implications for the origin of comets." Icarus **133**: 147-162.
- Boothroyd, A. I., I. J. Sackmann, et al. (1995). Hot bottom burning in asymptotic giant branch stars and its effect on oxygen isotopic abundances. Astrophysical Journal. **442**: L21-L24.
- Brocas, J. and E. Picciotto (1967). Nickel Content of Antarctic Snow: Implications of the Influx Rate of Extraterrestrial Dust. Journal of Geophysical Research. **72**: 2229.
- Brownlee, D., P. Tsou, et al. (2006). "Comet 81P/Wild 2 under a microscope." Science **314**: 1711-1716.
- Busemann, H., A. F. Young, et al. (2006). "Interstellar chemistry recorded in organic matter from primitive meteorites." Science **312**(5774): 727-730.
- Ceccarelli, C., P. Caselli, et al. (2007). Extreme Deuteration and Hot Corinos: The Earliest Chemical Signatures of Low-Mass Star Formation. Protostars and Planets V: 47-62.
- Connolly, H. C., Jr and R. H. Hewins (1996). Constraints on chondrule precursors from experimental data. Chondrules and the protoplanetary disk. R. H. Hewins, R. H. Jones and E. R. D. Scott, Cambridge University Press: 129-135.
- Connolly, H. C., Jr and S. G. Love (1998). "The formation of chondrules: petrologic tests of the shock wave model." Science **280**: 62-67.
- Connolly, H. C., Jr. (2005). Refractory Inclusions and Chondrules: Insights into a Protoplanetary Disk and Planet Formation. Chondrites and the Protoplanetary Disk. **341**: 215.
- Deloule, E. and F. Robert (1995). "Interstellar water in meteorites?" GCA **59**: 4695-4706.
- Dobrica, E., C. Engrand, et al. (2008). "Classic and exotic particles in the 2006 Concordia Antarctic micrometeorite collection." LPSC XXXIX: #1672 (CD-ROM).
- Duprat, J., E. Dobrică, et al. (2009). Extreme Deuterium Enrichment in Organic Matter from Cometary Antarctic Micrometeorites. LPSC.
- Duprat, J., C. Engrand, et al. (2004). "The CONCORDIA-collection : micrometeorites from central Antarctica." Advances in Space Research: submitted.
- Duprat, J., C. Engrand, et al. (2004). The Micrometeorite Program at CONCORDIA. Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting, CESR, Toulouse.
- Duprat, J., C. Engrand, et al. (2003). "The CONCORDIA-collection: Pristine contemporary micrometeorites from central antarctica surface snow." LPSC 34: 1727.
- Duprat, J., C. Engrand, et al. (2005). The micrometeorite program at Dome C. Dome C Astronomy and Astrophysics Meeting. M. Giard, F. Casoli and F. Paletou, EAS Pub. Series. **14**: 51-56.
- Duprat, J., C. Engrand, et al. (2007). "Micrometeorites from Central Antarctic snow: The CONCORDIA collection." Adv. Space Res. **39**: 605-611.
- Duprat, J., C. Hammer, et al. (2001). "Search for past and future "frozen" Leonid showers in Antarctica and Greenland." LPSC XXXII: #1641 (CD-ROM).
- Engrand, C., E. Deloule, et al. (1999). "Extraterrestrial water in micrometeorites and cosmic spherules from Antarctica : an ion microprobe study." MAPS **34**: 773-787.
- Engrand, C. and M. Maurette (1998). "Carbonaceous micrometeorites from Antarctica." MAPS **33**: 565-580.
- Gallino, R., C. M. Raiteri, et al. (1994). The puzzle of silicon, titanium, and magnesium anomalies in meteoritic silicon carbide grains. Astrophysical Journal. **430**: 858-869.
- Geiss, J. and G. Gloeckler (1998). Abundances of Deuterium and Helium-3 in the Protosolar Cloud. Space Science Reviews. **84**: 239-250.
- Gomes, R., H. F. Levison, et al. (2005). "Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets." Nature **435**: 466-469.

- Gounelle, M. (2006). The meteorite fall at L'Aigle and the Biot report: exploring the cradle of meteoritics. The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds.
- Gounelle, M., M. Maurette, et al. (1999). "Comparison of the 1998 "Cap-Prudhomme" and "Astrolabe" Antarctic micrometeorite collections with the 1996 "South Pole" collection : preliminary implications." LPSC XXX: # 1564 (CD-ROM).
- Gourier, D., F. Robert, et al. (2008). "Extreme deuterium enrichment of organic radicals in the Orgueil Meteorite; revisiting the interstellar interpretation?" Geochimica et Cosmochimica Acta **72**(7): 1914-1923.
- Hanappe, F., M. Vosters, et al. (1968). Chimie des neiges antarctiques et taux de déposition de matière extraterrestre - deuxième article. Earth and Planetary Science Letters. **4**: 487.
- Hodge, P. W. (1981). Interplanetary dust.
- Javoy, M. (2005). Where do the oceans come from? Comptes Rendus Geosciences, vol. 337, issue 1-2, pp. 139-158. **337**: 139-158.
- Knöfel, A. and J. Rendtel (1994). Chladni and the cosmic origin of fireballs and meteorites. Two hundred years of meteor astronomy and meteorite science. WGN, Journal of the International Meteor Organization. **22**: 217-219.
- Kurat, G., C. Koeberl, et al. (1994). "Petrology and geochemistry of Antarctic micrometeorites." GCA **58**: 3879-3904.
- Levasseur-Regourd, A. C., J. B. Renard, et al. (1991). The zodiacal cloud complex. Origin and evolution of interplanetary dust. A. C. Levasseur-Regourd and H. Hasegawa, Kluwer Academic Publishers: 131-138.
- Linsky, J. L. (1998). Deuterium Abundance in the Local ISM and Possible Spatial Variations. Space Science Reviews. **84**: 285.
- Liou, J. C., S. F. Dermott, et al. (1995). "The contribution of cometary dust to the zodiacal cloud." PSS **43**: 717-722.
- Liou, J. C., H. A. Zook, et al. (1996). "Kuiper belt dust grains as a source of interplanetary dust particles." Icarus **124**: 429-440.
- Lodders, K. (2003). "Solar system abundances and condensation temperatures of the elements." Astrophysical Journal **591**(1220): 1220-1247.
- Maurette, M. (2006). Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins.
- Maurette, M., J. Duprat, et al. (2000). "Accretion of neon, organics, CO₂, nitrogen and water from large interplanetary dust particles on the early Earth." PSS **48**: 1117-1137.
- Maurette, M., C. Hammer, et al. (1986). "Placers of cosmic dust in the blue ice lakes of Greenland." Science **233**: 869-872.
- Maurette, M., G. Immel, et al. (1994). "The 1994 EUROMET collection of micrometeorites at Cap-Prudhomme, Antarctica, (abstract)." Meteoritics **29 suppl.**: 499.
- Maurette, M., G. Immel, et al. (1992). "The 1991 EUROMET collection of micrometeorites at Cap-Prudhomme, Antarctica : discussion of possible collection biases." LPSC XXIII: 859-860.
- Maurette, M., C. Jéhano, et al. (1987). "Characteristics and mass distribution of extraterrestrial dust from the Greenland ice cap." Nature **328**: 699-702.
- Maurette, M., C. Olinger, et al. (1991). "A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tons of Antarctic blue ice." Nature **351**: 44-47.
- McCall, G. J. H., A. J. Bowden, et al. (2006). The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds. The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds.
- McKeegan, K. D., J. Aléon, et al. (2006). "Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust." Science **314**: 1724-1728.

- Meier, R., T. C. Owen, et al. (1998). "Deuterium in Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) : Detection of DCN." Science **279**: 1707-1710.
- Messenger, S. (2000). "Identification of molecular-cloud material in interplanetary dust particles." Nature **404**: 968-971.
- Millar, T. J., A. Bennett, et al. (1989). "Deuterium fractionation in dense interstellar cloud." Astrophysical Journal Letters **340**: 906-920.
- Nakamura, T., N. Imae, et al. (1999). "Antarctic micrometeorites collected at the Dome Fuji Station." Antarctic Meteorite Research **12**: 183-198.
- Nakamura, T., T. Noguchi, et al. (2005). "Mineralogy of ultracarbonaceous large micrometeorites." Meteoritics **40 Suppl.**: #5046.
- Nittler, L., C. M. O. D. Alexander, et al. (1997). "Stellar Sapphires: the properties and origins of presolar Al₂O₃ in meteorites." APJ **483**: 485.
- Nittler, L. R. (1996). "Oxygen and aluminum isotopic ratios in presolar Al₂O₃ from the Tieschitz meteorite." LPSC XXVII: 965-966.
- Nittler, L. R. (2003). "Presolar stardust in meteorites: recent advances and scientific frontiers." Earth and Planetary Science Letters **209**: 259-273.
- Payne, C. H. (1925). Astrophysical Data Bearing on the Relative Abundance of the Elements. Proceedings of the National Academy of Science. **11**: 192-198.
- Reeh, N., H. Oerter, et al. (2002). Comparison between Greenland ice-margin and ice-core oxygen-18 records. Annals of Glaciology. **35**: 136-144.
- Remusat, L., S. Derenne, et al. (2005). "New insight on aliphatic linkages in the macromolecular organic fraction of Orgueil and Murchison meteorites through ruthenium tetroxide oxidation." Geochimica et Cosmochimica Acta **69**: 4377-4386.
- Remusat, L., S. Derenne, et al. (2005). "New pyrolytic and spectroscopic data on Orgueil and Murchison insoluble organic matter: A different origin than soluble?" Geochimica et Cosmochimica Acta **69**: 3919-3932.
- Remusat, L., F. Palhol, et al. (2006). "Enrichment of deuterium in insoluble organic matter from primitive meteorites: A solar system origin?" Earth and Planetary Science Letters **243**: 15-25.
- Robert, F., D. Gautier, et al. (2000). "The solar system D/H ratio : observations and theories." SSR **92**: 201-224.
- Roche, É. (1868). Recherches sur les Offuscations du Soleil et les Météores Cosmiques.
- Taylor, S., J. Lever, et al. (1995). "A micrometeorite collector for the south pole water well (abstract)." LPSC XXVI: 1401-1402.
- Taylor, S., J. Lever, et al. (1996). "A new source of micrometeorites: the South Pole water well." LPSC XXVII: 1319-1320.
- Taylor, S. and J. H. Lever (2001). Seeking unbiased collections of modern and ancient micrometeorites. Accretion of extraterrestrial matter throughout earth's history B. P.-E. a. B. Schmitz. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Taylor, S., J. H. Lever, et al. (1998). "Accretion rate of cosmic spherules measured at the South Pole." Nature **392**: 899-903.
- Weissman, P. R. (1983). The mass of the Oort cloud. Astronomy and Astrophysics. **118**: 90-94.
- Zinner, E. (1998). "Trends in the study of presolar dust grains from primitive meteorites." MPS **33**: 549-564.
- Zinner, E. (2008). "Stardust in the laboratory." Publications of the Astronomical Society of Australia **25**(1): 7-17.