



Institut d'Astrophysique Spatiale- Université Paris-Sud

Mémoire présenté pour obtenir le
Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches
Spécialité : Physique

Par

Zahia DJOUADI-BOUALI

**Analyse et simulation en laboratoire
de matériaux extraterrestres**

Soutenance le lundi 30 septembre 2013 devant le jury composé de :

Président:	Pr. Jean-Pierre	BIBRING
Rapporteurs :	Pr. Philippe	BRÉCHIGNAC
	Dr. Karine	DEMYK
	Pr. Eric	QUIRICO
Examineurs :	Dr. Jérôme	ALÉON
	Pr. Thierry	CHIAVASSA

Table des matières

Introduction	2
1. Contexte général	5
1.1 Cycle de la poussière silicatée.....	8
1.2 Les observations astronomiques des silicates	9
1.2.1 ISO et sa révolution cristalline.....	9
1.2.2 Spitzer.....	11
1.2.3 Autres télescopes en cours et en projet.....	13
1.3 Les observations depuis le sol.....	13
1.4 Mes travaux de recherches dans ce contexte.....	15
2. Silicates « extraterrestres du laboratoire »	17
2.1 Mes recherches sur les silicates.....	17
2.1.1 Les analogues de silicates interstellaires de l'IAS.....	19
2.1.2 Simulation de processus inter/circum stellaires : Analyses <i>ex-situ</i>	20
2.1.3 Expérience PRONEXT : Analyses <i>in-situ</i>	24
3 Matière extraterrestre au laboratoire »	26
3.1 Les météorites et les micrométéorites (sur Terre)	27
3.2 Les IDPs (Stratosphère)	29
3.3 Mission Stardust (Récolte spatiale)	32
3.4 Mission de retours d'échantillons (Récolte sur corps parents)...	34
3.5 Missions d'analyses <i>in-situ</i> (Analyses sur corps parent)	35
3.6 Mes travaux sur la matière primitive	35
4 Conclusions et Perspectives	41
4.1 Analyse en laboratoire de matériaux extraterrestres.....	41
4.2 Simulation en laboratoire de matériaux extraterrestres	42
Bibliographie	44
Sélection d'articles : Abstracts	50
Curriculum Vitae	57

Introduction

Notre Système solaire issu d'un disque protoplanétaire formé par l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussières il y a ~ 4.5 milliards d'années recèle encore une multitude de vestiges qui n'ont pas pu être accrétés lors de la formation des planètes : les comètes et les astéroïdes. Ceux-ci ont contribué, avec les grains du milieu interstellaire, à "ensemencer" notre système planétaire de petites particules appelées IDPs (*Interplanetary Dust Particles*).

Certains de ces vestiges ont gardé la mémoire des premiers instants ; on parle alors de matière primitive (comme les comètes et certains astéroïdes), d'autres ont évolué, se sont différenciés et/ou ont subi de l'altération aqueuse (on parle de phénomènes secondaires) et ne renferment donc plus aucun indice de primitivité (certains astéroïdes). Des observations récentes de plusieurs astéroïdes présentant une activité cométaire, notamment dans la ceinture principale, et montrant des surfaces d'astéroïdes similaires à des surfaces cométaires, tendent à remettre en question la distinction astéroïde/comète.

Ainsi l'étude en laboratoire de matières provenant de différents comètes et astéroïdes devient indispensable ; elle permettrait de mieux cerner les différences (et/ou les liens) entre ces populations et ainsi de mieux comprendre leurs origines et leurs évolutions.

L'espace nous envoie de fascinantes "messagères" qui nous parviennent de façon spectaculaire : les météorites. Celles-ci ont d'abord suscité l'imagination de l'Homme puis sa curiosité. Elles sont des objets d'investigations scientifiques qui nous révèlent de précieuses informations sur la formation de notre Système solaire et son évolution.

Avec les avancées technologiques qui ont permis la conquête spatiale, il est possible d'aller chercher des particules dans l'espace (particules de quelques microns situées à ~ 1 UA) pour les étudier en laboratoire avec des instruments hautes résolutions, ou encore de se poser sur le corps parent pour y effectuer des analyses *in situ*. Mais comme les performances des instruments embarqués pour analyses *in situ* des objets du Système solaire, ne peuvent atteindre celles des techniques disponibles dans les différents laboratoires, les missions de retour d'échantillons demeurent alors très importantes pour l'étude du Système solaire. Par ailleurs, près de 3×10^4 IDPs tombent sur Terre par an, la collecte de ces poussières d'origine cométaire et astéroïdale dans la stratosphère terrestre, opération qui est bien moins onéreuse que les missions de retour d'échantillons, permet d'analyser en laboratoire des grains du Système solaire.

L'étude précise et fine en laboratoire de tous ces cosmomatériaux (IDPs, météorites, micro-météorites, grains cométaires, grains astéroïdaux) représente un domaine d'investigations majeur dans lequel mon groupe de recherches "Astrochimie et Origines" de l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay, que j'ai rejoint il y a maintenant dix ans, s'est très tôt impliqué et investi.

Outre l'analyse de cosmomatériaux, nous produisons en laboratoire des analogues de la matière extraterrestre. Je suis impliquée dans l'étude d'analogues de la partie réfractaire de ces grains, en l'occurrence les silicates. Nous tentons à travers nos expériences de simuler des processus physico-chimiques susceptibles de se produire sur ces grains dans différents environnements astrophysiques afin d'essayer de mieux comprendre le cycle de vie et l'évolution de la matière extraterrestre et d'expliquer les résultats des observations astronomiques. L'outil de diagnostic

que nous utilisons et que nous privilégions est la spectroscopie IR ; elle permet une comparaison directe avec les données issues des télescopes spatiaux comme ISO et Spitzer.

Dans ce qui suit je vais, dans un premier chapitre, décrire le contexte général de mes travaux de recherches en rappelant le cycle de vie de la poussière cosmique, en me concentrant essentiellement sur les silicates. Puis je décrirai de façon non exhaustive les observations astronomiques qui ont permis de détecter les silicates et de nous révéler leurs différentes facettes (nature et composition). Ces révélations ont suscité dans les laboratoires et à l'échelle mondiale de nouveaux axes de recherches et d'investigations. Je terminerai ce chapitre en décrivant mes travaux de recherches dans ce contexte.

Dans le second chapitre que j'ai intitulé "Silicates "extraterrestres" du laboratoire", je décrirai les expériences que nous avons mises en place pour simuler certaines étapes du cycle de vie des silicates interstellaires. Je poserai les questions auxquelles nous avons tenté de répondre et présenterai quelques résultats obtenus. Je terminerai ce chapitre en décrivant la nouvelle expérience PRONEXT en cours de développement.

Le chapitre trois que j'ai intitulé "Matière extraterrestre au laboratoire" débute par un rappel des différentes sources de matières extraterrestres disponibles au laboratoire pour analyses. Ainsi, il a d'abord été possible d'accéder à des échantillons trouvés sur Terre : les météorites puis un peu plus tard les micrométéorites. Depuis le début des années 80 il est devenu possible, grâce à des avions stratosphériques de la NASA, d'aller récupérer dans la stratosphère (~ 20 km d'altitude) des IDPs. Cependant, parmi les particules récoltées on peut trouver des débris spatiaux ou encore des cendres volcaniques. Un premier tri basé sur la composition élémentaire déduite d'analyses chimiques MEB-EDX permet alors de distinguer les contaminations terrestres des particules susceptibles d'être extraterrestres. Ces dernières peuvent être d'origine astéroïdale ou cométaire, il est néanmoins possible de leur attribuer une origine "probable" en se basant sur certains critères tels que leurs textures (friabilité), leurs spectres IR, la composition de leurs silicates (olivine ou pyroxène..).

Dans le contexte de récolte de grains extraterrestres en orbite, l'IAS a joué un rôle important dans l'expérience COMET (Collecte en Orbite de Matière Extraterrestre) du CNES en développant l'instrument qui consiste en un système mécanique d'ouverture-fermeture sur lequel est implantée une cassette contenant des collecteurs. Pour la dernière expérience COMET-99, les collecteurs étaient à base de surfaces métalliques multicouches et d'autres à base d'aérogel (milieu transparent constitué de dioxyde de silicium avec une densité faible ~ 0.06 g/cm³). Ce dispositif a été placé à l'extérieur de la station spatiale MIR et a pu collecter en orbite des grains cométaires de l'essaim des Léonides provenant de la queue de la comète Temple-Tuttle en novembre 1998 (cette année là l'essaim a été particulièrement dense). Collecter ces grains précieux en orbite permet de s'affranchir des effets de la traversée atmosphérique qui modifie les propriétés des grains.

Depuis le 15 janvier 2006, date d'arrivée sur Terre d'échantillons précieux prélevés en 2004 directement dans la coma de la comète 81P/Wild2, des grains d'origine sûre (cométaire) et de corps parent bien identifié (Wild2) sont disponibles pour analyses en laboratoire. Cette prouesse scientifique et technologique a cependant été entachée par la dégradation des grains lors de leur impact, à une vitesse relative de l'ordre de 6.1 km/s, sur l'aérogel, l'un des deux milieux utilisés pour leur collecte.

La mission Hayabusa de la JAXA, a certes connu quelques péripéties mais a finalement réussi à rapporter sur Terre des grains de l'astéroïde Itokawa. Cette mission qui a contribué à améliorer de manière significative la connaissance des astéroïdes grâce aux mesures effectuées à l'aide de ses instruments scientifiques embarqués et aux photos à haute résolution prises sur place a, à son tour, permis de rapporter des échantillons de corps parent bien identifié.

D'autres missions spatiales de retour d'échantillons et/ou d'analyses *in situ* sont envisa-

gées ou sont déjà en cours, je les discuterai brièvement. Je terminerai ce chapitre en décrivant quelques uns de nos résultats obtenus par l'analyse de la matière primitive.

Enfin je terminerai avec une conclusion et des perspectives en décrivant les différentes évolutions possibles de mes expériences et les pistes envisagées dans la suite de mes travaux de recherches.

Les résumés (abstracts) de quelques publications majeures de mes travaux de recherches ainsi que mon Curriculum Vitae sont donnés à la fin de ce mémoire.

Chapitre 1

Contexte général

L'espace entre les étoiles constitue le milieu interstellaire (MIS), celui-ci joue un rôle crucial dans l'évolution de la Galaxie. Le MIS est majoritairement constitué de gaz ($\sim 99\%$ en masse) dont les principales caractéristiques (densité, température) varient fortement selon la localisation. Ainsi la température peut atteindre 10^4 K dans les régions où le gaz est ionisé (on parle de région HII), où la densité peut varier de 10 cm^{-3} dans les régions diffuses à $10^3\text{-}10^4\text{ cm}^{-3}$ dans les régions les plus compactes (telle que la nébuleuse d'Orion), contre 10 K dans les nuages moléculaires où la densité peut être $> 200\text{ cm}^{-3}$ (Tielens 2005).

L'autre composante du MIS est sous forme de poussière, on parle de matière interstellaire. Sa présence a été démontrée par Robert Trumpler en 1930 par le calcul de la distance de certains amas d'étoiles (Trumpler 1930). Pour calculer les distances, il a utilisé deux méthodes, l'une s'appuyant sur la mesure du diamètre angulaire des amas, l'autre sur la détermination de leur luminosité apparente. Les deux méthodes donnaient des résultats similaires pour les amas proches, mais très différents pour les plus éloignés. En effet, dans ce dernier cas, la luminosité apparente était nettement plus faible que ce que l'effet de distance pouvait justifier. La lumière qui nous provient de ces amas éloignés est donc atténuée lors de son trajet, ce qui ne pouvait s'expliquer que par la présence, dans des régions apparemment vides, d'un milieu qui absorbait la lumière ou la diffusait.

Nous savons maintenant que ce phénomène, appelé l'extinction interstellaire, est dû à la présence de poussières qui diffusent la lumière ou l'occultent en l'absorbant pour la réémettre dans une autre gamme, notamment l'infrarouge (IR). Bien que cette poussière ne représente que $\sim 1\%$ de la masse totale du MIS, elle est capable de dévier de sa trajectoire une partie du rayonnement qui nous provient des amas et de tous les astres éloignés.

Depuis, notre connaissance de la poussière interstellaire a crû de manière considérable ces quatre dernières décennies et ce, grâce aux développements rapides de la technologie des détecteurs infrarouges et donc de la spectroscopie IR.

Ainsi, la richesse des observations d'IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*), pionnier des satellites à avoir réalisé en 1983 un *survey* du ciel dans les bandes IR à 12, 25, 60 et $100\text{ }\mu\text{m}$ avec une résolution de 0.5 minute d'arc, couplée aux données des observations depuis le sol et par des ballons ont permis de distinguer trois principales composantes de la matière interstellaire solide :

i/ Les glaces : partie volatile de la poussière interstellaire, formée dans des régions froides (où la température varie entre 10 et 100K) et dense (où le rayonnement intense ne peut pénétrer). Cette composante de poussière interstellaire, essentiellement formée de glace d'eau, CO, NH₃ CO₂ physisorbée sur les grains interstellaires réfractaires a fait et continue de faire l'objet de

plusieurs études sur des analogues de synthèse dans différents laboratoires en particulier dans notre laboratoire (Dartois 2009).

ii/ La poussière réfractaire carbonée : composée majoritairement de carbone et d'hydrogène, elle renferme une population de très petits grains nanométriques de graphite (proposé initialement pour expliquer la bosse à 2170 Å ($1/\lambda \sim 4.6 \mu\text{m}^{-1}$) dans les courbes d'extinction (Mathis et al. 1977)), de carbone amorphe et nanodiamants et d'une autre population de molécules de grandes tailles ou de grains de petite tailles, à la frontière entre phases gazeuse et solide, contenant des cycles aromatiques, les PAHs (*Poly Aromatic Hydrocarbons*).

Ces derniers, identifiés par Léger & Puget (1984) ont permis d'expliquer les bandes à 3.3, 6.2, 7.6, 8.8 et 11.9 μm dites UIRs (*Unidentified InfraRed emission features*) qui ont été observées dans différents sites astrophysiques dans la galaxie ainsi que dans des régions extragalactiques soumises à des flux UV.

ii/ La poussière réfractaire riche en oxygène, constituée de gros grains submicroniques, est composée de silicates (olivine, O/Si=4, pyroxène O/Si=3), de bandes d'absorption caractéristiques autour de 10 et 20 μm (signatures IR spectrales des modes de vibration et d'étirement des liaisons Si-O respectivement) et d'oxydes métalliques (ex : MgO, FeO). L'existence des grains de silicates a été proposée pour la première fois au début des années 1970, pour expliquer les bandes larges et sans structures aux alentours de 9.8 et 18 μm observées autour des étoiles et dans le MIS (Gammon et al. 1972). Des synthèses et études en laboratoire de silicates amorphes ont alors corroboré l'hypothèse des silicates (Day 1976) et (Day 1979). Ces travaux constituent des premières études expérimentales sur les silicates de synthèse en laboratoire analogues aux silicates extraterrestres, d'autres ont bien évidemment été réalisées, elles seront discutées dans le chapitre suivant.

L'identification de la nature physique et chimique de la poussière interstellaire a été rendue possible grâce à l'interprétation des courbes d'extinction mesurée sur des étoiles et s'étendant de l'ultraviolet (UV), domaine dans lequel la matière carbonée est étudiée, à l'infrarouge (IR) proche et lointain (nous renseignant sur la composition chimique et la structure (cristal *vs* amorphe)) en passant par le visible qui permet par la modélisation des courbes d'extinction de déduire la taille des grains. L'analyse couplée des courbes d'extinction et des courbes d'émission IR a également joué un rôle important dans l'identification des espèces.

Ainsi, le modèle MRN (Mathis, Rumpl et Nordsieck) a d'abord été utilisé pour reproduire et expliquer la courbe d'extinction interstellaire dans la gamme 0.11 à 1 μm (UV au proche IR). Les auteurs ont proposé que la matière interstellaire est composée d'un mélange de graphite, carbure de silicium (SiC), pyroxène ((Fe, Mg)SiO₃), olivine ((Fe, Mg)₂SiO₄), fer et magnétite (Fe₃O₄) avec une distribution en tailles comprise entre 0.025 et 25 μm (Mathis et al. 1977).

D'autres modèles, basés sur le modèle MRN ont ensuite été développés, citons de façon non exhaustive le modèle de Draine & Lee (1984), puis Mathis & Whiffen (1989) qui ont proposé des grains interstellaires composites de très petites particules avec beaucoup de vide entre elles.

Le modèle de Desert et al. (1990) tient compte à la fois de l'extinction interstellaire et des spectres d'émission de la poussière ou SED (*Spectral Energy Distribution*). Dans leur modèle empirique, les auteurs ont utilisé trois composantes, des grands grains (BG pour *Big Grains*) associés aux silicates et de tailles comprises entre 15 et 110 nm, des très petits grains carbonnés (VSG pour *Very Small Grains*) de tailles entre 1.2 et 15 nm et bien sûr les PAHs entre 0.4 et 1.2 nm.

Enfin citons le modèle DustEM qui est une variante du modèle précédent. DustEM est un modèle numérique versatile, il offre la possibilité de choisir et de faire varier le type de grains, leur tailles leur nature et permet de prévoir l'émission et l'extinction des grains (Compiègne et al. 2011).

La poussière cosmique n'est pas statique dans le MIS, c'est de la matière qui est sans cesse recyclée, elle subit différents processus selon l'environnement dans lequel elle se trouve, un scénario général pour le cycle de vie des grains dans le MIS a été proposé par Seab (1987). L'observation et donc la localisation de la matière cosmique permet alors de sonder les conditions physiques (température, densité, milieu ionisé ou neutre..) régnant dans les environnements dans lesquels elle est observée. Son étude à travers les modèles développés pour la modélisation des courbes d'extinction et des spectres d'émission permet par ailleurs de déterminer ses caractéristiques physiques (taille, nature) et chimiques (composition). Ces informations sont importantes pour en déduire les différents processus que subit la matière cosmique dans ses environnements.

Une bonne partie de la matière cosmique (présolaire, interstellaire, cométaire) peut se retrouver et être bien préservée dans des grains extraterrestres disponibles en laboratoire pour analyses directes tels que les fragments de météorites, les particules interplanétaires (IDPs), les micrométéorites et depuis 2006 les grains cométaires. Très récemment de la matière organique particulièrement riche en azote et provenant probablement du nuage d'Oort a été décelée dans des micrométéorites antarctiques (Dartois et al. 2013).

La matière extraterrestre disponible en laboratoire pour analyses à l'aide de techniques offrant d'excellentes résolutions spectrales et spatiales (bien meilleures que celles des satellites d'observations ainsi que celles des télescopes au sol), constitue donc également une source d'informations importantes et précieuses pour une compréhension fine de la nature et de l'évolution de la matière cosmique voire du Système solaire.

D'excellentes corrélations entre les données d'observations infrarouges et les résultats des analyses en laboratoire de matières extraterrestres par spectroscopie vibrationnelle (IR) ont été obtenues, on peut citer comme exemples :

- Pendleton (1995), a montré une excellente similitude entre les aliphatiques à 3.4 μm dans la météorite de Murchison avec ceux observés dans le milieu interstellaire.

- Les spectres infrarouges autour de 3 μm de la source IRS7 du Centre Galactique ont été comparés à ceux obtenus à partir d'extraits de la matière carbonée de la météorite Orgueil. D'excellentes similitudes ont été montrées suggérant ainsi une origine interstellaire possible pour les macromolécules dans la météorite Orgueil (Ehrenfreund et al. 1991).

- Des silicates caractérisés par les deux bandes IR autour de 10 μm et 20 μm , similaires à ceux identifiés dans les spectres d'émission de la comète Hale-Bopp dont le spectre a été obtenu à l'aide de télescope spatial ISO, ont été trouvés dans une particule interplanétaire analysée dans notre laboratoire (Brunetto et al. 2011).

- De petites inclusions très riches en matière organique possédant des signatures spectroscopiques dans l'infrarouge (s'étendant entre 3.4 μm et 6 μm) similaires à celles observées dans certains nuages moléculaires du milieu interstellaire ont été découvertes dans la météorite Paris, chondrite carbonée, analysée dans notre laboratoire (Merouane et al. 2012).

Il est ainsi clairement établi, qu'en plus du développement de modèles théoriques pour l'in-

interprétation des données d'observations astronomiques, il est nécessaire de coupler à la synthèse, le traitement et l'analyse en laboratoire d'échantillons analogues aux cosmo-matériaux, des analyses en laboratoire de matière extraterrestre dite primitive, utilisant des méthodes analytiques diverses et variées (complémentaires) de sorte à accéder à un maximum d'informations sur l'origine et l'évolution de la matière cosmique.

Dans la suite de ce chapitre, je discuterai essentiellement de la poussière cosmique silicatée.

1.1 Cycle de la poussière silicatée

Les silicates sont formés autour des étoiles évoluées riches en oxygène, en fin de vie, telles que les AGB (*Asymptotic Giant Branch*) et les supergéantes, qui perdent leurs couches externes par suite d'instabilités (Gail et al. 2009). Ce plasma en se refroidissant rapidement permet la nucléation de grains de poussières qui sont ensuite expulsés dans le milieu interstellaire par la pression de rayonnement de l'étoile. Après un séjour dans le milieu interstellaire ($\sim 10^8$ ans) (Jones et al. 1996) où les silicates se trouvent mélangés avec des gaz et d'autres grains, le cycle des poussières se termine par leur incorporation dans de nouvelles étoiles (Jones et al. 1997). Celles-ci peuvent alors donner naissance à un système solaire (tel que le nôtre), ou encore évoluer en supergéantes puis supernovae qui en explosant recyclent la matière ; voir figure 1.1 que l'on retrouve également dans Jones (2001) et Jones (2004).

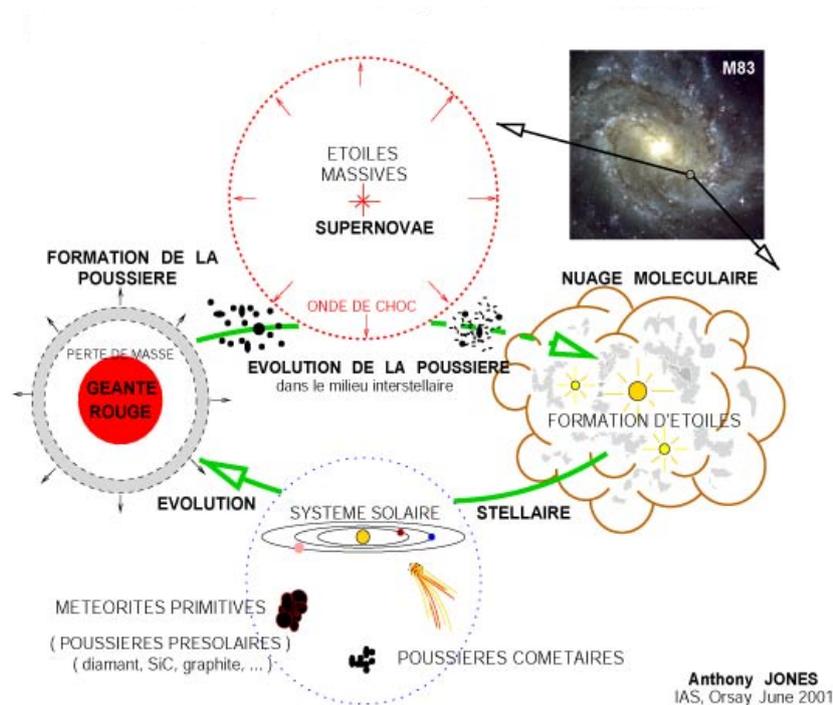


FIGURE 1.1 – Cycle de la poussière cosmique (crédit A.P. Jones, IAS).

Durant leur cycle de vie les silicates se voient confrontés à plusieurs processus pouvant modifier leurs structure et composition. Ainsi dans le MIS diffus on s'attend à ce que les silicates

soient soumis à des effets d'irradiations ioniques qui peuvent modifier leur chimie (composition) et structure (cristalline *vs* amorphe), ils peuvent subir des fragmentations dues à des collisions grains-grains par exemple (modifiant ainsi leur taille).

Dans les disques protoplanétaires on s'attend à ce que les silicates soient soumis à des effets de recuits thermiques et de sublimation (dans les régions internes du disque), de recondensation (dans les régions les plus externes), des irradiations ioniques par des vents stellaires (Henning 2010). Les différents processus physiques auxquels sont soumis les silicates dans les disques d'accrétion protoplanétaires sont discutés de façon détaillée dans le livre de Henning & Meeus (2011).

Dans les comètes, corps primitifs du Système solaire, on s'attendrait à ce que les silicates soient totalement amorphes au vu des températures locales. Mais plusieurs observations terrestres (Hanner et al. 1994), d'analyse de données d'observations spatiales (Crovisier et al. 1997), (Lisse et al. 2006) ainsi que d'analyses en laboratoire de matériaux cométaires (Brownlee et al. 2006) ont mis en évidence la présence de silicates cristallins dans la composante minérale des comètes, mettant ainsi en évidence des mélanges convectifs dans l'espace.

Les observations des silicates dans les différents environnements peuvent alors révéler les évolutions de la matière et permettent de sonder également les conditions physico-chimiques régnant dans les environnements observés mais aussi d'étudier les mouvements et mélanges possibles entre différents environnements.

1.2 Les observations astronomiques des silicates

Dans cette partie je discuterai quelques résultats marquants sur les silicates obtenus par des satellites spatiaux (ISO, Spitzer et je mentionnerai les projets spatiaux en cours et à venir) et ceux obtenus par des moyens d'observations du sol tel que le VLT (*Very Large Telescope* du Chili).

1.2.1 ISO et sa révolution cristalline

Le télescope spatial ISO (*Infrared Space Observatory*) (1995 - 1998) de l'agence spatiale européenne ESA (*European Space Agency*) a embarqué, en plus d'une caméra et d'un imageur infrarouges, deux spectromètres SWS (*Short Wavelength Spectrometer*) couvrant la gamme 2.5 à 45 μm et LWS (*Long Wavelength Spectrometer*) de 45 à ~ 200 μm . Le satellite qui a donc permis de couvrir une large gamme de longueurs d'ondes dans l'infrarouge moyen et lointain (Kessler et al. 1996), a considérablement amélioré notre connaissance de la structure et de la composition chimique des silicates interstellaires, circumstellaires et cométaires.

En effet, les spectres IR obtenus par ISO ont révélé l'existence de silicates cristallins dans différents environnements astrophysiques. Ainsi ils ont été observés autour des étoiles évoluées (Waters et al. 1996), (Molster et al. 2002), dans certaines enveloppes circumstellaires et autour d'étoiles jeunes (Malfait et al. 1998), (Malfait et al. 1999), dans des disques protoplanétaires (Waelkens et al. 1998) mais aussi dans les comètes (Crovisier et al. 1997), (Wooden et al. 1999), (Wooden et al. 2004).

Bien que les silicates cristallins aient déjà été détectés dans différentes comètes grâce à

l'analyse fine des données au sol issues du télescope IRTF (*InfraRed Telescope Facility*)¹ de la NASA (Hanner et al. 1994) mettant ainsi en évidence des mélanges entre matériaux issus d'environnements chauds et froids de la nébuleuse solaire, les données ISO qui couvrent une gamme bien plus large que celle de IRTF (7.8 μm à 13 μm) ont pu révéler les formes des deux bandes à 10 μm et 20 μm des silicates (voir figure 1.2).

Outre l'observation de la poussière dans notre galaxie, ISO a permis de détecter pour la première fois la présence de silicates cristallins circumstellaires hors de notre galaxie (Voors et al. 1999).

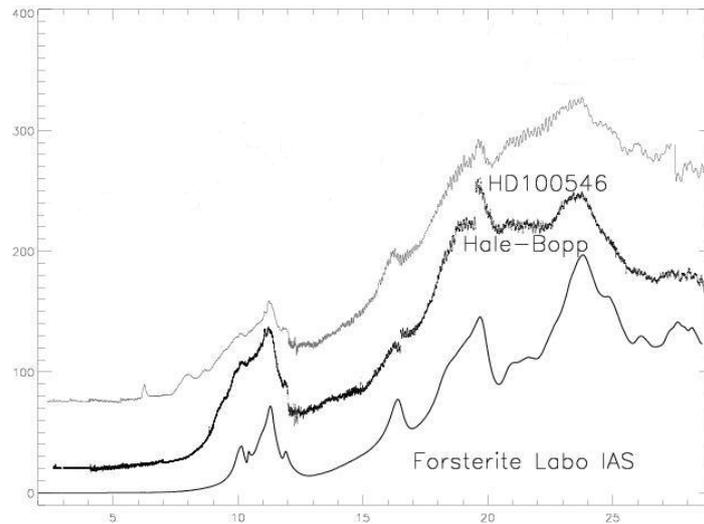


FIGURE 1.2 – Spectres ISO-SWS de la comète Hale-Bopp (Crovisier et al. 1997) et de l'étoile jeune HD100546 (Waelkens et al. 1998). Ces spectres, représentant le Flux(Jy) de lumière détectée en fonction de la longueur d'onde $\lambda(\mu\text{m})$, sont comparés dans la même gamme de longueurs d'ondes à un spectre de forstérite de laboratoire. On remarquera l'excellente correspondance entre certaines structures et positions de bandes.

Alors que l'on s'attendait à ce que les silicates, issus du milieu interstellaire diffus, soient partout amorphes et notamment dans les étoiles jeunes, cette surprenante et inattendue découverte, souvent dénommée "*La révolution cristalline*" (Jaeger et al. 1998) et (d'Hendecourt et al. 1999), a suscité de nouveaux travaux de recherches afin de comprendre les observations, engendrant ainsi de nouvelles avancées dans la compréhension du cycle de la matière finement divisée, depuis sa formation dans les étoiles évoluées, pendant son transit dans le milieu interstellaire jusqu'à son incorporation dans les disques proto-planétaires des étoiles jeunes.

Kemper et al. ont observé la poussière le long de la ligne de visée à travers le centre galactique, en utilisant le spectromètre SWS d'ISO et ont confirmé que les silicates sont amorphes dans le MIS diffus (Kemper et al. 2004) puis (Kemper et al. 2005). La bande d'absorption obtenue (voir figure 1.3) est sans aucune structure et elle est bien ajustée par un mélange de deux types de silicates amorphes, soit $\sim 15\%$ de composition pyroxène et $\sim 85\%$ de composition olivine. La limite supérieure du degré de cristallinité dans le MIS diffus déduite de cette étude est de $\sim 2\%$, valeur bien inférieure à 5% précédemment déterminée par Li & Draine (2001) pour le milieu interstellaire diffus (DISM pour *Diffuse InterStellar Medium*) mais conforme à 1-2%,

1. <http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/>

valeur déterminée par Demyk et al. (1999) pour deux objets protosolaires RAFGL7009S et IRAS 19110+1045.

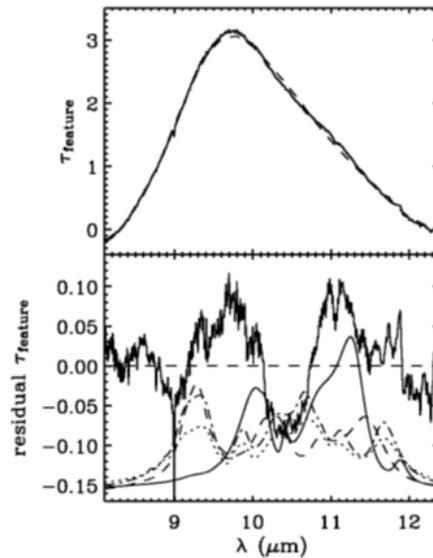


FIGURE 1.3 – Profil de la bande à 10 μm des silicates dans le milieu interstellaire. Cette allure de bande sans structure est typique des silicates amorphes. La figure du bas montre le calcul du résidu des ajustements montrant que la partie cristalline est très faible. Figure extraite de Kemper et al. (2004).

Ces diversités de structures (cristallines et amorphes) sont certainement le résultat des différents remaniements que subissent les grains lorsqu'ils interagissent avec leur environnement durant leur cycle de vie (collisions gaz-grain, collisions grain-grain, irradiations diverses dans le MIS), et qu'il a été très important de comprendre par des expériences de simulations en laboratoire.

Pour cela, des expériences simulant différents processus susceptibles de se produire dans les environnements astrophysiques par lesquels transitent les poussières lors de leurs cycle de vie ont été mises en place dans différents laboratoires, parmi lesquels notre laboratoire a joué un rôle important. Ces études seront discutées dans le chapitre suivant.

1.2.2 Spitzer

Le télescope spatial infrarouge Spitzer (SST : *Spitzer Space Telescope*), lancé en août 2003, a une sensibilité de 10 à 100 fois plus importante que celles d'IRAS et ISO, il couvre les longueurs d'ondes de 3 à 160 μm , il a pu sonder des sources très lointaines telles que les LMC (*Large Magellanic Cloud*) et les SMC (*Small Magellanic Cloud*) ; nuages hors de notre galaxie.

Ainsi grâce à la grande sensibilité du spectrographe IRS (*Infrared Spectrograph*) à bord de Spitzer, il a été possible de montrer que des silicates extragalactiques sont omniprésents. Des signatures de silicates cristallins ont été observées pour des étoiles évoluées dans les LMC, telles que HD 37974 et HD 268835 (Kastner et al. 2006), HV 2310 (Sloan et al. 2006).

Des silicates amorphes et cristallins ainsi que des phyllosilicates ont également été détectés par IRS sur les éjecta de la comète 9P/Tempel 1 dont le noyau a été impacté le 4 juillet 2005 par une cible de ~ 370 kg lancée par la sonde spatiale de la NASA *Deep Impact*² avec une vitesse de 10.2 km/s (Lisse et al. 2006). Les spectres obtenus dans cette étude sont similaires à ceux illustrés dans la Figure 1.2 et qui ont été enregistrés par ISO-SWS sur la poussière de coma de la comète C/1995 O1 (Hale-Bopp) et de l'étoile jeune HD100546.

Ces résultats montrent d'une part que les poussières de la coma (telles que celles observées lors de missions de survol de comètes) sont représentatives de la composition de la surface du noyau d'une comète (puisque *Deep Impact* a excavé de la matière sur quelques dizaines de mètres de la surface du noyau de Temple 1). D'autre part, parmi les silicates cristallins détectés, la fayalite (le pôle ferreux de l'olivine) a clairement été identifiée. Cette composante de l'olivine nécessite des températures de cristallisation de l'ordre de 1400 K, ces résultats posent alors à nouveau la question de la coexistence dans la matière cométaire de composés hautes températures (silicates cristallins en particulier la fayalite) et des composés basses températures (silicates amorphes et glaces).

Spitzer a permis également de mieux définir la nature des silicates dans différentes régions des disques protoplanétaires d'étoiles de type T Tauris. Ainsi, et contre toute attente, il a été trouvé que l'enstatite est plus abondante que la forstérite dans les régions internes des disques et donc chaudes à ~ 1 UA (Unité astronomique) alors que la forstérite est dominante dans les régions externes plus froides entre ~ 5 -15 UA (Bouwman et al. 2008).

Cette observation va à l'encontre des prédictions des calculs effectués par Gail en 2004, qui en utilisant un modèle de disque stationnaire avec un taux d'accrétion de l'ordre de 10^{-7} masse solaire/an et une étoile centrale de 1 masse solaire, préconise la présence de forstérite cristalline dans les régions internes du disque, voir FIGURE 1.4 suivante extraite de Gail (2004).

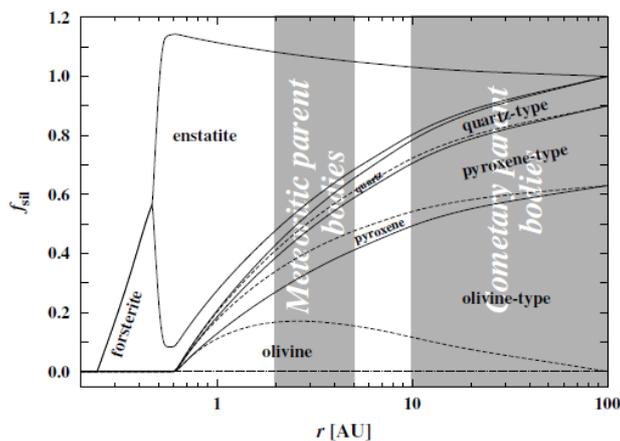


FIGURE 1.4 – Représentation de la distribution radiale dans un disque du silicium condensé dans les poussières de silicates (figure d'après Gail (2004))

En revanche, ces observations peuvent être expliquées par les expériences conduites à l'UMET de Lille sur des analogues de silicates amorphes recuits à différentes températures pour déterminer la dépendance en température de la minéralogie des silicates dans les disques protoplanétaires. Ces études ont montré que lorsque les silicates amorphes de composition enstatite

2. <http://solarsystem.nasa.gov/deepimpact/index.cfm>

(MgSiO_3) sont recuits à des températures en dessous de la température de transition vitreuse de l'enstatite ($T \sim 1040$ K) les silicates obtenus sont de composition olivine (Mg_2SiO_4), au dessus de cette température "critique" l'enstatite cristalline est formée (Roskosz et al. 2009) et (Roskosz et al. 2011). De plus, la transformation pyroxène à olivine qui conduit à la formation de silice SiO_2 expliquerait la présence de polymorphes de silice dans les régions internes des disques de T Tauris qui a été révélée grâce à Spitzer (Sargent et al. 2009).

En résumé, Spitzer a confirmé la "révolution cristalline" révélée plus tôt par ISO et a pu, grâce à sa grande sensibilité, "scruter" un peu plus loin que ISO. Il a également permis d'étudier l'évolution et la croissance des grains interstellaires dans les nuages moléculaires menant au développement d'un modèle 3D pour reproduire l'extinction de la lumière lors de son cheminement au sein du nuage, ce modèle reproduisant au mieux les observations réalisées, fait apparaître que les grains sont de plus en plus gros depuis l'extérieur du nuage jusqu'à son centre (Steinacker et al. 2010).

Grâce à l'excellent rapport signal sur bruit des spectres obtenus avec Spitzer la composition chimique des silicates dans les disques a été mieux définie et contrainte. Ainsi, il a été montré que l'on trouve essentiellement de l'enstatite et de la forstérite pures (c'est à dire des silicates dépourvus de fer) dans les disques protoplanétaires aussi bien autour d'étoiles Herbig Ae/Be (Juhász et al. 2010) que des amas de Taurus (Watson et al. 2009), alors que l'on sait que dans le milieu interstellaire une bonne partie du fer est contenue dans les inclusions ou dans les sulfures (telle que la troilite FeS) (Pollack et al. 1994), (Henning & Stognienko 1996), (Min et al. 2007).

1.2.3 Autres télescopes en cours et en projet

Herschel, le télescope spatial de l'ESA lancé en mai 2009 (avec Planck), est le seul à ce jour à effectuer des observations s'étendant de l'infrarouge lointain au submillimétrique de ~ 50 à 675 μm grâce aux trois spectromètres embarqués, PACS, SPIRE and HIFI. Les données de Herschel vont donc permettre de faire le pont entre les données des télescopes précédents dans le domaine infrarouge (IRAS, ISO, AKARI (japonais) et Spitzer) et dans le submillimétrique (SWAS (*Submillimeter Wave Astronomy Satellite*) et Odin) avec une sensibilité accrue qui constituera des observations complémentaires à celles déjà effectuées avec ISO et Spitzer.

Le JWST³ (*James Webb Space Telescope*), futur grand télescope spatial dont le lancement est prévu en 2018, est en cours de développement par la NASA avec des contributions de l'agence spatiale européenne (ESA : *European Space Agency*) et de l'agence spatiale canadienne (CSA : *Canadian Space Agency*). JWST va succéder au télescope HST (*Hubble Space Telescope*), il sera doté d'un miroir de 6.5 m de diamètre (contre 2 m pour HST), soit une sensibilité bien meilleure que celle de Hubble. Il aura comme principaux objectifs d'étudier la formation de la galaxie et son évolution, la compréhension des mécanismes de formation des étoiles et enfin l'étude des systèmes planétaires et de la formation de la vie.

1.3 Les observations depuis le sol

La principale difficulté des observations depuis le sol est la forte absorption du rayonnement électromagnétique, en particulier l'infrarouge, par l'atmosphère terrestre, rendant ainsi très diff-

3. <http://www.jwst.nasa.gov/>

ficile voire impossible la détection de certains objets. La turbulence atmosphérique a également longtemps posé problème aux observations du sol, mais avec l'avènement et le développement de l'optique adaptative (technique qui permet de corriger en temps réel les déformations des fronts d'ondes grâce à un miroir déformable), ce problème peut être maintenant contourné.

Depuis le désert d'Atacama au Chili offrant un climat aride, à une altitude de ~ 2635 m avec une couverture nuageuse quasi-inexistante, il est possible d'observer les poussières de silicates dans différentes régions des disques circumstellaires en utilisant la méthode de l'interférométrie en combinant les différents télescopes du VLT (on parle du VLTI : *Very Large Telescope Interferometer*)⁴ de l'ESO (*European Southern Observatory*)⁵, il est possible d'étudier des détails avec une précision jusqu'à 25 fois plus importante qu'avec les télescopes utilisés séparément.

En utilisant l'instrument MIDI (*Mid Infrared Interferometric Instrument*) du VLTI et en recombinaison les données issues de deux télescopes permettant d'étudier les régions internes des disques (1-2 UA), Van Boekel et al. ont pu analyser la nature physique et la composition chimique des silicates dans les régions les plus internes de trois disques protoplanétaires des étoiles de type Herbig Ae HD 163296, HD 144432 et HD 142527. Ils ont trouvé que les silicates dans les régions internes (~ 2 UA) sont de l'olivine très cristalline, bien évidemment le taux de cristallinité est plus important dans les régions internes que dans les régions externes (van Boekel et al. 2004).

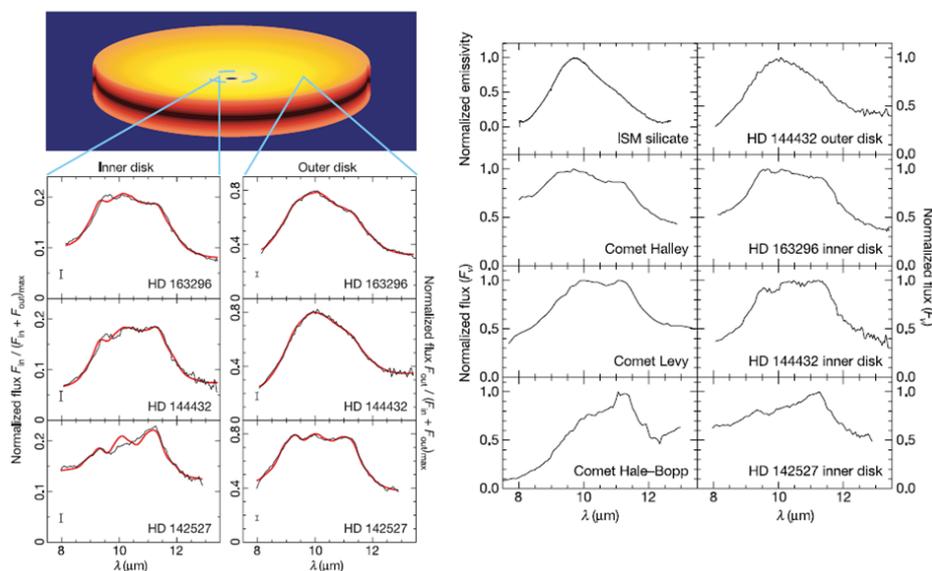


FIGURE 1.5 – *A gauche, signatures spectrales infrarouges des silicates dans des régions internes (1 à 2 UA) et externes (2 à 20 UA) des disques de trois étoiles Herbig Ae (HD 163296, HD 144432 et HD 142527). Ces figures, extraites de van Boekel et al. (2004) (voir figures 2 et 3 dans leur article), ont été obtenues grâce à l'instrument MIDI du VLTI. Elles illustrent parfaitement la présence de silicates cristallins dans les régions internes et externes des disques circumstellaires. A droite, comparaison avec les signatures amorphes des silicates interstellaires et des signatures cristallines des silicates détectées dans quelques comètes.*

Il est à noter que les résultats obtenus par van Boekel et al. (2004) sont en contradiction avec

4. <http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti/index.html>

5. <http://www.eso.org/public/>

ceux trouvés par Bouwman et al. (2008) qui en étudiant des disques d'étoiles de type T-Tauris avec Spitzer trouvent de l'enstatite dans les disques internes et de l'olivine dans les régions externes des disques (cf paragraphe 1.2.2. précédent). Bouwman et al. (2008) suggèrent alors que ces différents résultats montrent que, contrairement aux étoiles T-Tauris qu'ils ont étudiées, les étoiles Herbig observées par van Boekel et al. (2004) n'ont pas été sujettes à des mélanges radiaux importants.

1.4 Mes travaux de recherches dans ce contexte

Mes activités de recherches peuvent être présentées en deux parties distinctes mais néanmoins tout à fait complémentaires.

Ainsi je suis impliquée d'une part, dans l'analyse en laboratoire de matière extraterrestre dite primitive dont les propriétés (composition, structure) permettent de cerner les premiers temps de la nébuleuse solaire et les processus physico-chimiques qui ont pu s'y dérouler il y a $\sim 4,5$ milliards d'années. Je caractérise par spectroscopie infrarouge auprès du synchrotron SOLEIL les composantes minérales et organiques présentes dans les IDPs, les grains de la comète Wild2 et tout récemment quelques fragments de la météorite Paris.

Pour l'étude des IDPs, la bibliographie est riche et variée en travaux relatifs à l'analyse et discussion de la partie minérale (silicates), ou de la partie organique (aliphatiques, aromatiques), très peu d'études ont été menées en considérant les deux composantes (Flynn et al. 2003), (Starkey & Franchi 2013). Nous nous sommes proposées, avec ma doctorante, de nous intéresser de façon systématique lors de nos analyses d'IDPs aux deux composantes et rechercher s'il existe (ou pas) une corrélation entre elles. Les résultats originaux obtenus, qui sont en cours de publication, seront exposés dans le troisième chapitre de ce mémoire.

L'autre volet de mes travaux de recherches concerne la synthèse, le traitement physico-chimique et l'analyse en laboratoire d'analogues à la partie réfractaire de la matière extraterrestre : les silicates. Ces travaux constituent une nécessité pour l'interprétation des résultats obtenus aussi bien par l'analyse en laboratoire de la matière primitive et des résultats des données d'observations astronomiques. Ainsi je mets en place des expériences qui permettent de simuler des processus physiques susceptibles de se produire dans différents environnements astrophysiques où peuvent se trouver les silicates afin d'essayer de comprendre les évolutions physico-chimiques de ces poussières ; évolutions révélées par les observations astronomiques.

Mon travail expérimental consiste alors en des simulations en laboratoire des différentes étapes du cycle de vie de la poussière silicatée interstellaire ou interplanétaire. Nous tentons à travers nos études de mieux comprendre le rôle de chacun des effets rencontrés par les grains au cours de leur cycle de vie (les irradiations ioniques et/ou recuits thermiques) sur leur évolution, depuis leur synthèse autour des étoiles évoluées jusqu'à la formation de la nébuleuse solaire et son évolution vers la formation de comètes, astéroïdes et planétésimaux, qui eux-mêmes donneront naissance aux planètes.

Actuellement, nous mettons en place une nouvelle expérience baptisée PRONEXT (pour PROcessus Nébulaires sur la surface des grains EXTraterrestres) qui est une extension naturelle de mes travaux précédents sur les silicates de synthèse. Tous mes travaux (actuels et précédents) seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Il est important de noter que le couplage des analyses effectuées sur les échantillons naturels à celles des analogues de synthèse permet de mieux comprendre l'évolution de la matière solide non seulement au sein de notre Système solaire, mais aussi dans le milieu interstellaire, thème général développé dans notre groupe.

Tout récemment j'ai été associée à l'expérience MUE (*Miller – Urey Experiment*) de l'ESA (*European Space Agency*). Cette expérience, envisagée sur la station spatiale internationale (ISS) vers novembre 2013, consiste en la reproduction de la célèbre expérience en laboratoire de Miller (1953) en microgravité. Il est alors envisagé de tenter de produire de la matière organique sur des grains de silicates représentés par des billes de SiO_2 de quelques dizaines de microns de diamètre recouvertes par de la glace d'eau et 'flottant' dans un mélange de gaz.

Deux mélanges de gaz seront utilisés, l'un simulant la composition de la nébuleuse solaire primitive comportera du CO , N_2 et H_2 . Le second, plus réducteur et similaire au mélange utilisé par S. Miller et H. C. Urey lors de leur expérience, sera composé de CH_4 , NH_3 et H_2 .

Les objectifs scientifiques de cette expérience sont multiples :

- Fournir une base expérimentale pour la synthèse de matières organiques abiotiques qui peuvent avoir été à l'origine d'une chimie prébiotique dans les atmosphères planétaires.

- Fournir un aperçu des processus chimiques dans la nébuleuse solaire primitive, y compris la comparaison de la matière organique formé au cours de l'expérience avec la matière organique détectée et analysée dans les chondrites primitives.

- Fournir des informations sur la formation de minéraux secondaires (argiles, carbonates), communément trouvés dans les chondrites primitives et qui sont liés à la transformation des phases primaires composant les silicates.

Cette nouvelle activité ne sera pas discutée dans la suite de ce mémoire de mon habilitation à diriger des recherches. J'aimerais juste indiquer que cette expérience me permet de mettre un pied dans l'étrier du spatial.

Chapitre 2

Silicates "extraterrestres" du laboratoire

2.1 Mes recherches sur les silicates

Les travaux de recherche sur les analogues des silicates interstellaires ont débuté dans notre groupe avec la thèse de K. Demyk (2000) où les effets des irradiations ioniques, telles que celles attendues dans le MIS, sur les modifications physico-chimiques des silicates ont été étudiés.

Afin de simuler l'implantation ionique dans les grains interstellaires due aux chocs dans le MIS, de l'olivine cristalline a été irradiée avec de l' He^+ à des énergies de 4 keV et 10 keV et des fluences variant entre $5 \cdot 10^{16}$ et $10^{18} \text{ He}^+/\text{cm}^2$, valeurs compatibles avec celles attendues dans le MIS.

L'analyse par microscopie électronique en transmission (MET) des échantillons irradiés a clairement montré que l'irradiation a causé l'amorphisation de l'olivine pour toutes les fluences utilisées et que l'épaisseur de la couche d'amorphisation augmente avec l'énergie des ions incidents. Les images MET obtenues ont révélé la formation de bulles dans les échantillons irradiés et l'analyse chimique a montré que la couche irradiée (amorphe) est déficiente en O et Mg par rapport à la composition cristalline de l'olivine. Les rapports O/Si et Mg/Si décroissent lorsque la fluence des ions incidents augmente.

D'autres silicates cristallins analogues à ceux observés autour des étoiles évoluées avant leur injection dans le MIS ont été utilisés (olivine, diopside, enstatite..), ces silicates ont été irradiés avec des ions légers H^+ et He^+ à des énergies de l'ordre de la dizaine de keV. Les échantillons ont été analysés par spectroscopie IR et le passage de l'état cristallin (avant irradiation) à amorphe (après irradiation) a clairement été observé (voir figure 2.1 extraite de Demyk et al. (2004)).

Il apparaît suite à ces travaux que les irradiations ioniques dans le MIS de silicates issus des étoiles évoluées, sont à l'origine des changements de leur structure physique (cristalline autour des étoiles évoluées puis amorphe dans le MIS) et de leur composition chimique (olivine dans le MIS puis pyroxène autour des protoétoiles) (Demyk et al. 2001) et (Carrez et al. 2002).

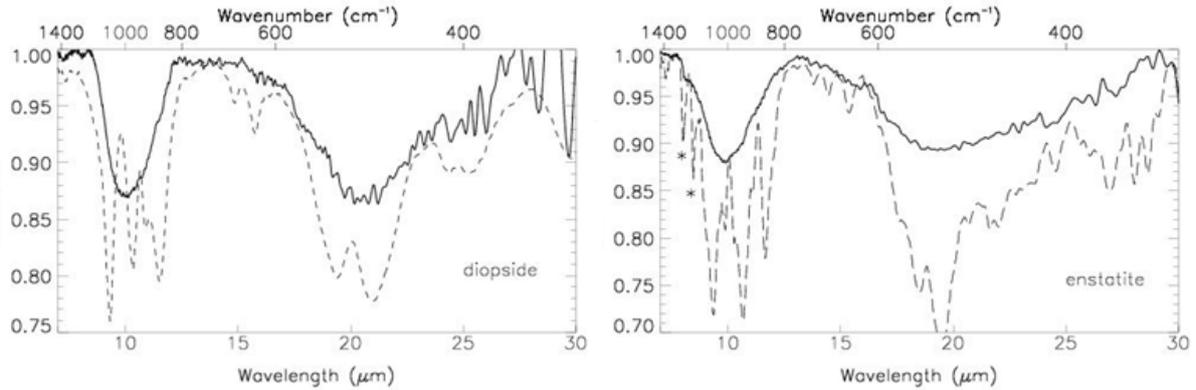


FIGURE 2.1 – Spectres de transmittance en fonction de la longueur d’onde pour la diopside à gauche et l’enstatite à droite. Les spectres en pointillés sont obtenus pour les minéraux dans leur état cristallin (avant irradiation) et les spectres en traits pleins sont obtenus après irradiation. Notez la disparition des structures des bandes à 10 et 20 μm après irradiation. Figure extraite de Demyk et al. (2004).

Après leur transit dans le milieu interstellaire, le cycle des poussières se termine par leur incorporation dans de nouvelles étoiles (voir Figure 1.1). La présence de grains cristallins dans les environnements des étoiles jeunes (Waelkens et al. 1998); (Malfait et al. 1998) montre que les silicates issus du MIS ont évolué de la structure amorphe vers une structure cristalline. Il se pourrait que la recristallisation ait été provoquée par le rayonnement de l’étoile elle-même chauffant la matière.

La présence de silicates cristallins dans les comètes ou dans les disques proto-planétaires est difficile à expliquer par un processus global uniquement activé thermiquement. On pensait en effet que la température de formation de ces différents objets était beaucoup trop basse. Plusieurs modèles ont été mis en place pour prendre en compte ces différents paramètres sans pour autant qu’il soit nécessaire d’invoquer une température élevée dans tout le disque, on peut citer :

- Les modèles invoquant un transport radial de matière des régions chaudes (région internes du disque, proches du soleil en formation) vers des régions plus froides (Shu et al. 1996), (Nuth et al. 2000), (Gail 2001), (Bockelée-Morvan et al. 2002) et (Gail 2004).

- Le modèle d’échauffements locaux provoqués par des ondes de chocs provoquées par des instabilités gravitationnelles proposé par Harker & Desch (2002). En supposant une vitesse de choc de l’ordre de 5 km.s^{-1} , valeur plausible pour les chocs entraînés par des instabilités gravitationnelles, ces auteurs calculent les températures maximales de grains submicroniques de pyroxènes et d’olivines amorphes dans des conditions typiques des disques protoplanétaires à 5-10 UA et montrent que la cristallisation *in situ* peut se produire. Leur modèle ne requiert donc pas de transport radial à grande échelle.

- Le modèle de *lightning* ou décharges qui provoqueraient des échauffements très intenses amenant ainsi à des recuits *in situ* (Pilipp et al. 1998), (Desch & Cuzzi 2000). Notons que ces modèles avaient été développés pour expliquer la formation des chondres, mais que ce processus de *lightning* a été évoqué par van Boekel et al. (2004) comme source possible de cristallisation de silicates *in situ* dans les régions externes des disques protoplanétaires.

Dans tous les cas, les silicates sont les témoins de transformations durant l'étape pré-accrétionnelle. La température de recristallisation des silicates amorphes est devenue un paramètre clé qui permet de préciser l'état thermique des disques ou l'ampleur des mouvements de convection qui l'animent. Plus généralement, le taux de cristallinité des disques proto-stellaires permettrait de pouvoir dater plus finement le stade d'évolution des systèmes proto-planétaires en formation. Enfin, la connaissance de la nature exacte de ces poussières ou de leurs conditions de formation est fondamentale car elles sont considérées comme les briques élémentaires de la nébuleuse protosolaire.

Plusieurs études avaient déjà été menées sur la recristallisation de silicates amorphes. Citons comme exemples, Thompson et al. (2002) qui ont utilisé de la poudre de pyroxène amorphe ou encore Rietmeijer et al. (2002) qui ont utilisé de la fumée de silicates magnésiens obtenue par condensation de vapeur de Mg-SiO-O₂-H₂ sur solide. La plupart des études converge vers une température de transition amorphe-cristal de l'ordre de 1000 K. Cependant aucune de ces études n'avait pris en compte le séjour de ces poussières dans le MIS. Les matériaux en question ont pourtant été modifiés, en particulier, ils ont été largement irradiés dans le MIS avant d'être incorporés dans le nuage moléculaire, toute première étape de la formation d'une étoile. Ils doivent donc avoir un état structural fortement différent des verres de synthèse de laboratoire. En particulier, les grains de poussières du milieu interstellaire ont été irradiés par le gaz ionisé et accéléré dans les ondes de choc de supernova qui pénètrent l'ensemble du milieu interstellaire et par les rayons cosmiques. L'état thermodynamique des grains et donc leur réactivité doivent ainsi en être dépendants.

Ainsi et afin de mieux simuler les différentes étapes du cycle de vie des silicates nous nous sommes proposés d'aborder les questions suivantes :

- Est-ce qu'un silicate irradié verrait ses propriétés thermodynamiques modifiées ? A savoir, est ce qu'un silicate irradié serait plus prompt à une cristallisation à plus basse température comparé à un silicate non irradié ? Si c'est le cas ceci expliquerait-il l'existence de silicates cristallins dans des environnements froids, comètes, disques protoplanétaires et par voie de conséquence dans certains IDPs ?

- Que se passe-t-il si les silicates sont irradiés par des protons ? Rappelons que les protons sont abondants dans le MIS et sont plus réactifs que les ions He⁺.

- Quel(s) rôle(s) auraient pu jouer les silicates dans l'apport de volatils (eau et/ou matière organique) lors de la formation des planètes ?

Pour tenter de répondre à ces questions, nous avons entrepris de synthétiser en laboratoire des silicates amorphes compatibles avec ceux observés dans le MIS, de leur faire subir des processus comme ceux attendus durant leur cycle de vie (des irradiations dans le MIS, des recuits thermiques dans les environnements circumstellaires..) et étudier leurs évolutions possibles qui expliqueraient les résultats des observations astronomiques et les caractéristiques physiques observées lors de l'analyse en laboratoire de cosmomatériaux.

2.1.1 Les analogues de silicates interstellaires de l'IAS

Pour simuler les silicates interstellaires caractérisés par un fort rapport surface sur volume, nous synthétisons des films fins (~ 100 nm d'épaisseur) sur des substrats de quelques mm de diamètre. Les films sont obtenus par évaporation cathodique de silicates terrestres sous un vide de

l'ordre de 10^{-7} mbar, le précurseur utilisé est généralement de l'olivine de San-Carlos, forstérite de formule stoechiométrique $Mg_{1.8}Fe_{0.19}Ni_{0.01}SiO_4$ (rappelons que l'olivine est majoritaire dans le MIS (Kemper et al. 2004)) et le choix du substrat est conditionné par l'expérience envisagée.

La figure ci-dessous représente les deux bandes infrarouges caractéristiques des silicates dues aux modes d'étirement et de pliage des liaisons SiO obtenues respectivement à $\sim 10 \mu m$ et $20 \mu m$. Les graphes (a) et (c) représentent les spectres des silicates amorphes obtenus respectivement après la synthèse du film fin et après irradiation ionique. Les bandes à 10 et $20 \mu m$ sont larges et sans structures car les liaisons vibrent et s'étirent aléatoirement et la distribution obtenue est Gaussienne. Le graphe (b) représente les signatures obtenues après recuit à $1050^\circ C$ pendant 30 minutes, les pics fins et bien structurés signent l'ordre dans le réseau cristallin.

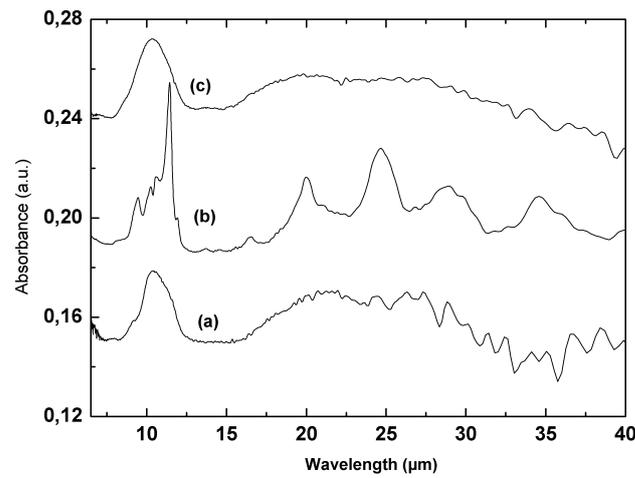


FIGURE 2.2 – Signatures IR de films fins d'olivine San Carlos (a) après évaporation sur un substrat de diamant, (b) après recuit à $1050^\circ C$ pendant 30 minutes et enfin (c) après irradiation ionique avec des ions He^+ à une énergie de 5 keV et une fluence de 10^{17} at/cm². On remarquera la disparition de toutes les structures vues dans le spectre (b).

2.1.2 Simulation de processus inter/circum-stellaires : Analyses *ex situ*

Nous avons tout d'abord examiné le rôle d'une irradiation ionique sur des matériaux silicatés synthétiques. Les irradiations étudiées, des ions He^+ de quelques dizaines de keV à des fluences compatibles avec celles attendues dans le MIS du fait de la propagation des ondes de choc de supernovae, ont pour principal effet de rendre amorphe un silicate cristallin. Nous avons examiné l'effet d'une telle irradiation sur les propriétés thermodynamiques des silicates et sur leur capacité (ou pas) à cristalliser dans un environnement froid.

Pour ce faire, nous avons dans un premier temps synthétisé un silicate amorphe que nous avons recristallisé par recuit à $1050^\circ C$ dans un four tubulaire sous vide pendant 30 minutes. Nous démarrons ainsi d'un silicate cristallin analogue à ce qui est observé autour des étoiles évoluées. Pour simuler son passage dans le milieu interstellaire, nous l'avons irradié avec un faisceau d'ions He^+ à une énergie de 5 keV et une fluence de 10^{17} at/cm². Les irradiations ioniques ont été effectuées auprès du séparateur d'isotopes SIDONIE¹ du CSNSM d'Orsay.

1. <http://www-csasm.in2p3.fr/-Le-separateur-d-isotopes-SIDONIE-/>

La dernière étape a consisté à recristalliser le film de silicates par recuit progressif à 750°C (1023 K) et à suivre, par spectroscopie infrarouge, l'évolution de la bande à 10 μm caractéristique des silicates. Bien évidemment la température de recuit utilisée lors de nos expériences n'est pas représentative de celles des régions externes des disques protoplanétaires, mais comme l'énergie d'activation de cristallisation, qui est une fonction du temps et de la température, représente une propriété physique intrinsèque au matériau, l'utilisation de hautes températures en laboratoire nécessite des temps d'expériences plus courts que ceux requis dans les sites astrophysiques "froids" (des centaines de milliers d'années). Nous avons donc utilisé une loi d'Arrhenius pour déterminer l'énergie d'activation de (re)cristallisation et nous avons trouvé $E_a/k=41700\pm 2400$ K. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celles déterminées précédemment par Hallenbeck et al. (1998) (45500 K), Fabian et al. (2000) (39100 \pm 400 K) et par Brucato et al. (2002) (40400 K) pour la cristallisation de silicates de type Mg_2SiO_4 .

Ainsi, notre travail a permis de montrer qu'indépendamment de l'histoire du silicate, l'énergie de cristallisation reste la même, ce qui conforte l'idée que la présence de silicates cristallins dans les environnements non propices à une cristallisation locale, en particulier dans les comètes résulterait d'un mélange de la matière entre les disques internes et externes d'un système planétaire en formation (Djouadi et al. 2005).

Toujours dans le souci de comparer nos analogues de synthèses, à des matériaux naturels, nous avons dans la suite étudié par microscopie électronique par transmission (MET), la microstructure de nos films de silicates recuits. Ce travail a été effectué en étroite collaboration avec Hugues Leroux de Lille, nous avons alors transféré des parties des films minces de silicates sur des grilles MET. L'étude de la répartition des différents éléments Mg, Si, O et Fe dans les parties de films analysées, a révélé la présence de billes métalliques de fer dans la matrice de silicate qui s'est retrouvée totalement dépourvue de fer. Le fer a dû migrer et se ségréger dans la matrice (voir Figure 2.3).

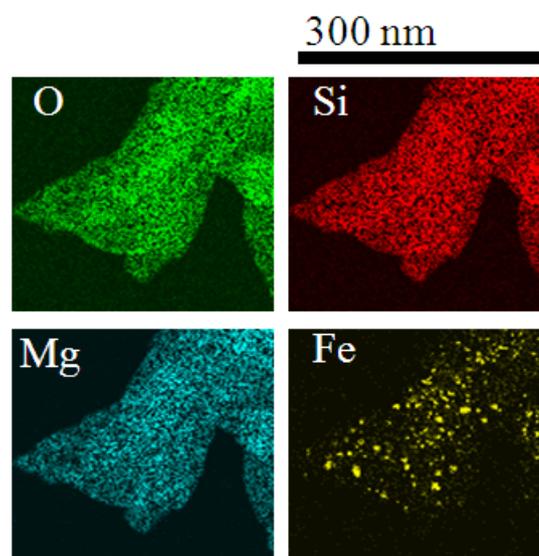


FIGURE 2.3 – *Distribution des éléments O, Si, Mg et Fe dans un film de silicates recuit dans une atmosphère réductrice. Cette figure illustre clairement la formation des billes de Fe dans nos silicates synthétiques.*

Ce résultat est doublement intéressant car :

- d'une part, les signatures obtenues des silicates astronomiques sont essentiellement attribuées à de la forstérite (Mg_2SiO_4) et le fer n'est jamais détecté. Nos résultats nous ont alors amenés à proposer l'existence du fer cosmique sous forme d'inclusions métalliques de tailles nanométriques dans les silicates interstellaires, ce qui pourrait expliquer la déplétion du fer, situation mal comprise si l'on suit les modèles de condensation à l'équilibre de solides dans une enveloppe stellaire.

Nos échantillons de synthèse donnent alors accès à des informations qui peuvent expliquer les données astronomiques.

- d'autre part, ces inclusions métalliques dans une matrice amorphe (voir figure 2.4), présentent de fortes analogies avec les GEMS (*Glass with Embedded Metal and Sulfides*) très souvent trouvés dans les IDPs (Bradley 1994). La seule différence à noter est l'absence du Soufre qui n'est pas contenu dans nos échantillons de synthèse.

Ces résultats, obtenus dans le cadre d'une collaboration entre l'IAS et l'équipe de H. Leroux du LSPES (maintenant UMET de Lille), ont donné lieu à une publication commune (Davoisne et al. 2006).

Il est alors ainsi clairement établi la nécessité d'étudier en laboratoire des analogues de synthèse pour expliquer aussi bien des données astronomiques que des observations sur les échantillons naturels.

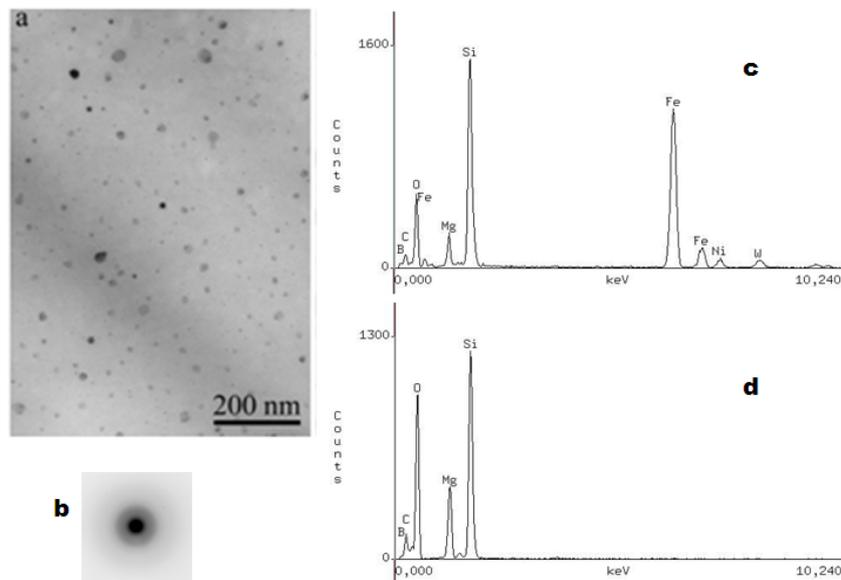


FIGURE 2.4 – Analyse au microscope électronique de la microstructure des échantillons et analyses par diffraction électronique des rayons X de la composition chimique de nos échantillons recuits. a/ représente l'image obtenue de la partie du film analysé et qui illustre la présence d'inclusions nanométriques dans la matrice. b/ est un cliché de diffraction confirmant l'état amorphe de la matrice contenant les billes de fer. c/ est le spectre issu de l'analyse chimique (par rayons X) des inclusions de Fe, notez la présence des pics de Fe et Ni. Enfin d/ correspond au spectre de l'analyse chimique de la matrice, notez l'absence totale des pics du Fe et du Ni.

La formation de nano-billes métalliques à l'intérieur de la matrice de silicates a par ailleurs conféré à nos échantillons des propriétés magnétiques que nous avons déterminées en collaboration avec J. Gattacceca et P. Rochette du CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) à Aix en Provence.

Les mesures effectuées à des températures aussi basses que celles des grains interstellaires (~ 20 K) ont montré que nos échantillons, contenant des inclusions de fer de diamètres variant de 2 à 50 nm, peuvent garder une magnétisation rémanente importante qui pourrait contribuer à leur alignement sous l'effet de champs magnétiques faibles (de l'ordre de quelques μG) (Djouadi et al. 2007).

Les résultats obtenus sur nos analogues de synthèses peuvent apporter un éclairage au phénomène de polarisation de la lumière par des grains alignés sous l'effet d'un champ magnétique galactique. Ce phénomène observé vers la fin des années 40 (Hiltner 1949), (Hall 1949) reste à ce jour un phénomène débattu et pas totalement élucidé (Lazarian & Hoang 2008).

Nous avons récemment étudié les effets d'une irradiation par des ions réactifs en l'occurrence des protons de quelques keV (qui sont également prédominants dans le MIS) de silicates amorphes simulant ceux observés dans le MIS. Nous avons alors montré la possibilité de former des hydroxyles (-OH) dans les silicates qui pourraient jouer un rôle majeur dans l'apport de l'eau lors de la formation de planètes telluriques (Djouadi et al. 2011).

Ce travail expérimental mené en étroite collaboration avec l'équipe de F. Robert du MNHN (Muséum National de l'Histoire Naturelle) de Paris, a permis de coupler des analyses IR avec des mesures de rapports isotopiques D/H avec une microsonde NanoSIMS afin de distinguer les OH formés par irradiations de ceux qui auraient pu être adsorbés par nos échantillons.

En effet, les analyses IR permettent d'évaluer la bande OH autour de 3500 cm^{-1} et d'étudier son évolution post-irradiation. La figure ci-dessous montre que la bande OH observée dans nos films de silicates a augmenté de 45% suite à une irradiation avec des protons à différentes énergies ; 3.5, 2.5 puis 1.5 keV afin d'implanter des ions sur différentes profondeurs de l'échantillon.

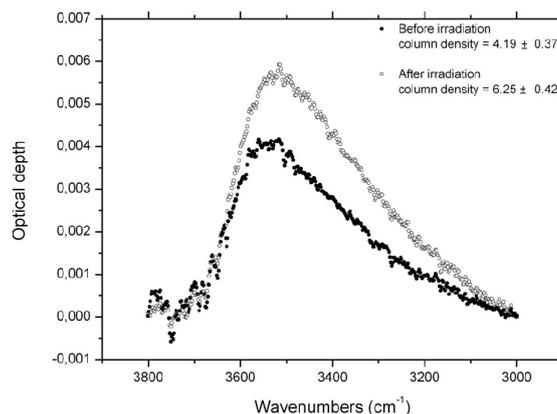


FIGURE 2.5 – Evolution de la densité de colonne de la bande OH pour un film de silicates irradié avec des protons à différentes énergies ; 3.5, 2.5 puis 1.5 keV et une fluence totale de $10^{17}\text{ H}^+/\text{cm}^2$, avant (points noirs) et après (points gris) irradiation. La valeur de la densité de colonne déterminée pour chaque échantillon est indiquée en haut à droite du graphique en unités $10^{15}\text{ OH}/\text{cm}^2$.

La Figure 2.5 obtenue à partir d'un spectre de transmission du film de silicates, ne permet pas de distinguer les OH adsorbés sur le film (qui devient particulièrement poreux suite à une irradiation) des OH à l'intérieur du silicate. C'est ainsi que nous avons décidé d'utiliser la Nano-SIMS. Les protons implantés sont isotopiquement marqués ($D/H = 0$) puisque préselectionnés par le séparateur d'isotopes lors de l'irradiation, alors que l'eau atmosphérique a un rapport $D/H \sim (140 \pm 10) \cdot 10^{-6}$.

L'utilisation croisée des deux techniques expérimentales nous a permis de démontrer que nous obtenons une hydroxylation relative (donnée par le rapport des densités de colonnes des liaisons SiO et OH) maximale de $\sim 3\%$ et que seuls 2% des protons incidents ont pu former une nouvelle liaison OH dans le silicate irradié. Ces résultats pourraient expliquer l'absence d'observation de liaisons OH dans le milieu interstellaire diffus et montrent que les silicates interstellaires peuvent jouer un rôle de vecteur de OH lors de la formation des planètes relançant ainsi l'hypothèse d'une origine d'eau sur les planètes dans les régions internes des disques par une accrétion de matériaux «humides» (Djouadi et al. 2011).

2.1.3 Expérience PRONEXT : Analyses *in situ*

L'expérience PRONEXT (PROcessus Nébulaires à la surface des grains EXTraterrestres) est une cellule environnementale adaptée à notre spectromètre IR (Vertex70 de chez Bruker) dans laquelle il est possible de varier la composition de notre nébuleuse solaire simulée (gaz : $H_2, H_2O, CO, CO_2, N_2, CH_4$), la température et/ou la pression.



FIGURE 2.6 – Photographie du dispositif expérimental avec à droite le système d'introduction et d'évacuation des gaz de réactions. Au centre du spectromètre, dans le compartiment de l'échantillon la cellule PRONEXT (capot ouvert ici pour la photo).

L'un des principaux avantages (et point essentiel) de PRONEXT est de pouvoir analyser *in situ* l'échantillon, accédant ainsi à la mesure des cinétiques des réactions de métamorphisme. Nous obtiendrons alors des données qui contribueraient à contraindre les modèles d'évolution de la nébuleuse.

Cette expérience, qui s'inscrit dans la continuité de mes travaux précédents, vise donc à faire

évoluer mes travaux sur les silicates simulant ceux du milieu interstellaire vers une thématique plus axée sur le rôle des surfaces silicatées dans la formation et l'apport de volatils sur la surface de la Terre primitive. Cette perspective va par ailleurs faire converger notre thématique de simulation de grains interstellaires à mes activités concernant l'analyse de matières extraterrestres.

Avec PRONEXT nous avons réalisé une étude préliminaire sur l'évolution d'un film de silicate amorphe obtenu par évaportaion de forstérite de ~ 100 nm d'épaisseur dans une atmosphère riche en vapeur d'eau à 20 mbar de pression et à température ambiante. Nous avons ainsi pu suivre l'évolution de la bande d'hydratation autour de 3500 cm^{-1} en fonction du temps d'exposition. Après évacuation de la vapeur d'eau dans la cellule, des spectres sont acquis à différentes pressions résiduelles (autour de 10^{-5} mbar), les premières courbes de l'évolution de la densité de colonne de la bande OH dans le film de silicates en fonction du temps est donnée en Figure 2.7 pour deux pressions résiduelles.

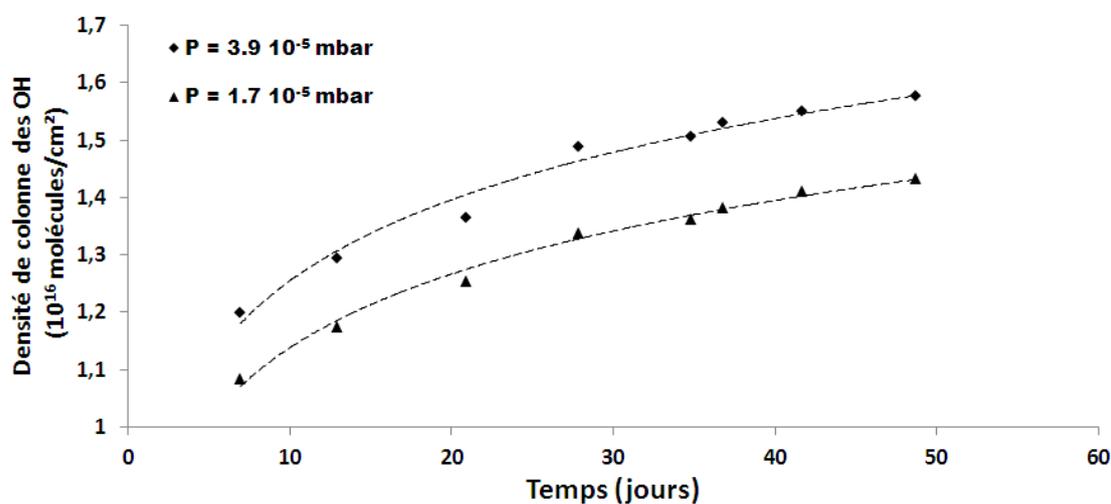


FIGURE 2.7 – Evolution de la densité de colonne de la bande OH (exprimée en 10^{16} molécules/cm 2) en fonction du temps (jours) déterminée *in situ* pour un film de silicate amorphe soumis à température ambiante à une atmosphère de vapeur d'eau.

Cette figure montre une augmentation de la densité de colonne des OH de façon non linéaire avec le temps suggérant ainsi le début de l'établissement d'un régime de saturation. Nous avons dans la suite pompé dans la cellule en continu pendant une semaine, nous avons montré que le film a pu retenir une quantité de OH qui représente au final un taux d'hydroxylation de l'ordre de 7% (Djouadi et al. 2013). Ce résultat préliminaire montre que la formation des hydroxyles OH est ~ 3 fois plus efficace par adsorption d'eau à température ambiante que par irradiation par des protons à basses énergies telles que nous avons précédemment étudié (Djouadi et al. 2011). Toutefois il faut garder en mémoire que ces premières courbes sont obtenues à température ambiante, des expériences à plus hautes températures sont envisagées pour la suite.

Cette expérience est encore en cours de développement mais la faisabilité est ici démontrée et ces résultats préliminaires sont prometteurs. Les expériences envisagées avec ce nouveau dispositif seront discutées dans les conclusions et perspectives.

Chapitre 3

Matière extraterrestre au laboratoire

Outre les échantillons lunaires rapportés sur Terre par les missions américaines Apollo 11 et 12 (en 1969), 14 et 15 (en 1971), 16 et 17 (en 1972) et les missions soviétiques Luna 16 (en 1970), 20 (en 1972) et 24 (en 1976), la matière extraterrestre disponible en laboratoire pour analyses fines avec des instruments beaucoup plus sensibles que ceux embarqués par les missions spatiales, nous provient essentiellement des comètes et des astéroïdes.

Ces petits corps du Système solaire sont des vestiges de la formation des planètes, ils constituent donc des témoins précieux des premiers instants du Système solaire. Parmi ces corps, certains se sont différenciés (certains astéroïdes) et d'autres non, on parle alors de matière primitive. Celle-ci qui a peu ou pas été altérée depuis la formation du Système solaire constitue une source d'informations précieuses sur la phase solide du MIS et de la nébuleuse solaire primitive.

La matière primitive peut se retrouver dans les poussières interplanétaires appelées IDPs (*Interplanetary Dust Particles*) qui sont récoltées par la NASA à l'aide d'avions stratosphériques (Brownlee 1978). Les premières récoltes spatiales de cette matière primitive datent du début des années 1980 avec les collectes en orbites basses LEO (*Low Earth Orbit*) entre 300 et 800 km. A ces altitudes la matière extraterrestre n'est pas affectée par des interactions avec l'atmosphère qui pourraient d'une part en modifier sa composition (par altération thermique) et détruire les grains de petites tailles (par évaporation). Ainsi dans les collections LEO, outre les grains de petites tailles, les débris orbitaux font également partie des grains collectés (ce qui constitue une des faiblesses de la méthode). De plus, ces expériences requièrent un temps d'exposition très long, citons comme exemples les expériences LDEF (*Long Duration Exposure Facility*) et PIE (*Particle Impact Experiment*).

LDEF est un satellite qui a volé en orbite basse terrestre pendant 69 mois (entre 1984 et 1990), différents collecteurs métalliques (Aluminium, Or, Nickel) ont été utilisés O'Neal & Burton Lightner (1991). Ces collecteurs destructifs ont permis la détermination de la distribution en tailles des particules et des mesures de leurs flux (Mandeville & Borg 1992) mais aussi d'accéder à des informations sur la composition des plus petits grains par analyses des impacts sub-microniques qui peuvent révéler des informations sur l'environnement de l'orbite basse terrestre (Stadermann et al. 2009).

L'expérience COMET (Collecte en Orbite de Matière Extraterrestre) proposée par J.P. Bibring dans les années 1980 en collaboration avec les agences spatiales soviétique puis russe, a consisté en la collection en orbite de grains dans des périodes bien précises, pendant la traversée

d'essais cométaires, afin d'augmenter la statistique des grains cométaires d'origine connue dans les collections (Bibring et al. 1983), les récoltes qui ont eu lieu, résumées dans Borg (2002), sont les suivantes :

- COMET-I du 4 au 26 octobre 1985, à bord de Salyut 7 à une altitude de ~ 350 km, il a été utilisé des collecteurs métalliques d'Au et Ni de très haute pureté ($> 99,99\%$). La collecte a eu lieu pendant la traversée du flux de météores Draconides liée à la comète Giacobinni-Zinner, en conséquence le flux de particules incidentes enregistré a été 10 fois plus important que la valeur moyenne de fluence de météoroïdes à 1 UA. Les analyses chimiques des résidus fondus des cratères ont révélé la présence de matériau riche en C et O, signant probablement la présence de particules CHON telles que celles observées lors du survol de la comète P Halley en 1986 (Borg et al. 1993).

- EUROMIR-95 du 18 octobre 1995 au 8 février 1996 à bord de la station spatiale MIR. Durant cette expérience des collecteurs métalliques denses tels que ceux utilisés lors de l'expérience COMET-I et des collecteurs de densité plus faibles ; des mousses de polymère ($0,01 \text{ g/cm}^3$) et de l'aérogel ($0,06 \text{ g/cm}^3$) ont été utilisés (Bibring et al. 1997). La collecte a eu lieu lors de la rencontre par la Terre du flux de météores Orionid associé à la comète P/Halley.

- COMET-99 du 19 novembre 1998 à la mi-avril 1999 à bord de la station spatiale MIR, les collecteurs métalliques et des blocs d'aérogel ont été utilisés. La collecte a ciblé des grains de l'essaim des léonides provenant de la comète Temple Tuttle.

Les différentes expériences COMET ont permis, par l'analyse des cratères d'impacts par microscopie électronique à balayage, de discriminer les particules extraterrestres des débris orbitaux, de déterminer les fluences et tailles des particules incidentes. Les collecteurs en mousses se sont révélés inappropriés pour ce type d'expériences car il est difficile de localiser optiquement les particules piégées dans la mousse pour les en extraire pour analyses. La seule technique analytique possible dans ce cas est l'analyse *in situ* chimique par rayons X auprès de synchrotron (Borg 2002).

Enfin citons l'expérience ODCE (*Orbital Debris Collection Experiment*) qui a eu lieu entre mars 1996 et octobre 1997 sur la station spatiale MIR. Lors de cette expérience, des collecteurs d'aérogel ont été déployés, démontrant ainsi la capacité de ce milieu peu dense de capturer de la "poussière naturelle" en orbite basse terrestre (Hörz et al. 1998).

COMET, ODCE, ont été des expériences préliminaires à la mission plus ambitieuse de la NASA ; Stardust. Celle-ci a consisté en l'envoi d'une sonde dans l'espace qui a collecté des grains provenant de la queue de la comète 81P/Wild2. Des collecteurs d'aérogel et des plaques d'aluminium ont été utilisés. Cette expérience sera décrite dans la suite.

Dans ce qui suit, je rappelle brièvement les différentes sources de matières extraterrestres primitives disponibles dans les laboratoires et discuterai celles que j'ai eues à analyser dans le cadre de mes travaux de recherches.

3.1 Les météorites et les micrométéorites (sur Terre)

Les météorites sont les premiers objets extraterrestres auxquels a eu accès l'Homme, ce sont des fragments de matière extraterrestre qui survivent à l'entrée dans l'atmosphère. La plupart des météorites collectées proviennent de la ceinture principale d'astéroïdes située entre les planètes

Mars et Jupiter. On distingue :

- Les météorites métalliques, métallo-pierreuses et les achondrites qui sont issues d'astéroïdes différenciés : leurs compositions chimique et minéralogique ne sont donc plus représentatives des phases initialement accrétées.

- les chondrites qui sont issues de corps parents non différenciés. Elles sont ainsi susceptibles de renfermer des signatures dites primitives. Les chondrites renferment notamment un certain nombre de phases minoritaires directement issues du milieu interstellaire, telles des grains de graphite, des nanodiamants ou encore des grains de SiC (carbure de silicium) présolaires (Anders & Zinner 1993).

Les chondrites sont parmi les objets les plus primitifs du Système solaire. Elles contiennent des chondres (chondrules) qui sont des petites inclusions généralement sphériques de quelques μm à quelques mm de diamètre, composées d'un assemblage de silicates qui se sont formés dans la nébuleuse très tôt dans l'histoire du Système solaire à haute température (1500-2000°C) et qui se sont refroidis très rapidement (Hewins & Radomsky 1990).

Les chondrites sont certes les objets rocheux les moins fractionnés chimiquement par rapport au soleil, mais présentent des traces de processus secondaires, métamorphisme thermique et/ou altération aqueuse. Ainsi leur classification utilise une combinaison de caractéristiques primaires basées sur la composition chimique et des caractéristiques secondaires basées sur leur altération. On distingue :

- Les chondrites ordinaires (les plus abondantes), divisées en H, L, et LL selon leur teneur en fer métal (H sont celles qui en contiennent le plus).

- Les chondrites à enstatite les EH et EL (selon leur teneur en fer métal également).

- Les chondrites carbonées, qui ne représentent que $\sim 4\%$ des chutes de météorites, dont les CI, CM, CR, CV, CO, CK et CH, dont la composition est la plus proche de celle du Soleil, voir figure suivante extraite de Ringwood (1979). La deuxième lettre fait référence à un spécimen du groupe, R comme Rennazzo, I comme Ivuna.

L'utilisation de la NanoSIMS (*Secondary Ion Mass Spectrometry*) technique analytique mesurant les rapports isotopiques des éléments par spectrométrie de masse à l'échelle du nanomètre, a permis de découvrir des grains présolaires dans des échantillons de météorites primitives, comme par exemple Acfer094 (Mostefaoui & Hoppe 2004).

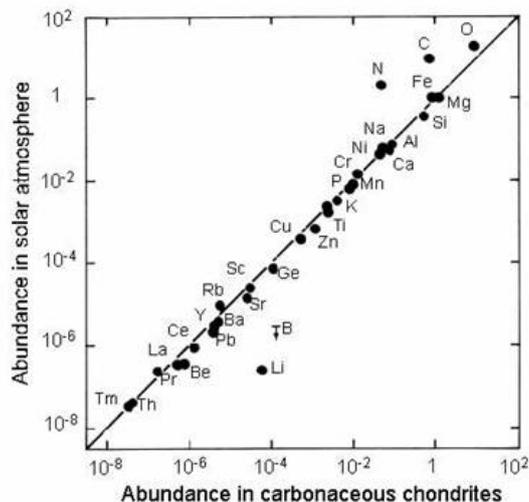


FIGURE 3.1 – Corrélation entre les abondances élémentaires entre l’atmosphère solaire et les chondrites carbonées, figure d’après Ringwood (1979).

Les micrométéorites sont de très petites météorites de quelques dizaines de microns qui ont survécu à l’entrée atmosphérique. En France, le groupe "astrophysique du solide" du CSNSM (Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse) d’Orsay, collecte les micrométéorites dans les glaces antarctiques depuis 1984 (Maurette et al. 1991) et dans la neige des régions centrales Antarctiques, dôme C de la base franco-italienne CONCORDIA, depuis 2000 (Duprat et al. 2007). Ces poussières extraterrestres de composition proche de celle des chondrites carbonées, renferme une classe de micrométéorites particulièrement riche en matière organique ; les UCAMMs (*Ultra Carbonaceous Micro Meteorites*), qui se sont révélées contenir des teneurs en azote exceptionnellement élevées (Dartois et al. 2013).

3.2 Les IDPs (Stratosphère)

Les IDPs sont des particules interplanétaires représentant une partie importante de la poussière atmosphérique terrestre, elles sont collectées par la NASA depuis la fin des années 1970 à l’aide d’avions stratosphériques à ~ 20 km d’altitude (Brownlee 1978), (Brownlee 1985), (Sandford 1987).

Les premières preuves de la nature extraterrestre de quelques IDPs ont été apportées par les mesures des gaz rares solaires (^4He) (Rajan et al. 1977), (Hudson et al. 1981) puis de l’enrichissement en deutérium pouvant atteindre 500 à 1100 ‰ par rapport à la valeur standard terrestre SMOW (*Standard Mean Ocean Water*) (Zinner et al. 1983).

Depuis 1981, la NASA récolte de façon routinière des IDPs dans la stratosphère. Pour cela, elle utilise des collecteurs enduits d’huile de silicone (polydimethylsiloxane, $n(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$). Ce milieu transparent permet une localisation facile des grains, est ensuite évacué par rinçages successifs des IDPs avec de l’hexane, qui malheureusement pourrait altérer la matière organique soluble des grains.

En 2006, un collecteur de mousse de polyuréthane a été exposé pendant 8 heures, les pre-

mières analyses des grains (collectés par cette méthode dite sèche) a démontré qu'il n'y a pas de réelles différences de minéralogie de ces grains avec ceux collectés dans la graisse de silicone (Messenger et al. 2012a). Pour le matériau carbonné, il a effectivement été montré qu'il est anormalement enrichi en N^{15} mais les valeurs déterminées (δN^{15} variant de 300 à 1000 ‰) sont totalement compatibles avec celles déterminées sur les IDPs collectés dans la graisse (Messenger et al. 2012b). Ces premiers résultats montrent donc que le rinçage des IDPs collectés dans la graisse de silicone n'affecte pas la matière organique dite insoluble, cependant des analyses et investigations sur la matière organique "soluble" sont envisagées (Messenger et al. 2012b).

Les IDPs, composées d'un assemblage hétérogène de matériaux du Système solaire primitif, sont de tailles typiques de quelques microns (entre 5 et 25 μm). Ils se présentent parfois sous forme de plus gros grains $\sim 100 \mu\text{m}$ qui se fragmentent en une multitude de petits fragments lors de leurs collectes, on parle de *cluster*. Les IDPs stratosphériques fournissent un échantillonnage représentatif des astéroïdes de la ceinture principale et des comètes à courte période, qui sont les principaux "producteurs" de poussière dans le Système solaire. Ce sont de précieuses sources d'informations sur des processus qui ont pu exister aussi bien dans les régions internes de la nébuleuse solaire (où les astéroïdes se sont formés) que dans la région de la ceinture de Kuiper au delà de 50 UA (où la plupart des comètes de la famille de Jupiter (JFC : *Jupiter Family Comets*) et donc à courtes périodes se sont formées) (Brownlee et al. 1995).

Nesvorný et al. (2010) ont démontré par un modèle numérique que le taux d'accrétion des particules astéroïdales est de ~ 15.000 tonnes/an, ce qui représente seulement $\sim 15\%$ du taux d'accrétion des particules cométaires de la famille de Jupiter. Ils déduisent donc que les particules astéroïdales ne devraient représenter qu'une fraction relativement faible des IDPs et des micrométéorites dans nos collections. Ainsi, plus de 80% des IDPs seraient d'origine cométaire.

Au laboratoire, la combinaison de différentes techniques analytiques permet d'attribuer aux IDPs une origine possible, une des approches consiste à étudier les effets thermiques sur la minéralogie des grains, subis lors de leur entrée atmosphérique donnant des indications sur leurs orbites et donc leurs provenances astéroïdale ou cométaire (Flynn 1989), (Sandford & Bradley 1989). Une autre approche est basée sur l'étude des rapports isotopiques des phases hydrogénées, la détermination des deux rapports isotopiques D/H et C/H dans les IDPs permet de discuter les différentes origines possibles mais aussi les processus d'altération aqueuse ou échanges isotopiques qu'auraient subi les corps parents (voir Fig;4 dans Aléon et al. (2001)).

Il existe deux classes d'IDPs bien identifiées et distinctes :

- Les CP-IDPs (*Chondritic Porous – IDPs*) : de structure poreuse et d'abondance élémentaire moyenne chondritique, ils sont constitués d'un mélange hétérogène de matériaux carbonés et de minéraux anhydres (Forstérite, Enstatite). Les IDPs peuvent également renfermer des sulfures de fer et des GEMS (*Glass with Embedded Metal and Sulfides*). Les CP-IDPs sont classés comme étant d'origine cométaire (Brownlee et al. 1995).

Le CP-IDP L2021C5 (voir figure 3.2) a été étudié dans notre laboratoire, il s'est révélé avoir des signatures de silicates totalement similaires à celles observées pour la comète Hale Bopp, signe qu'il est effectivement d'origine cométaire (Brunetto et al. 2011).

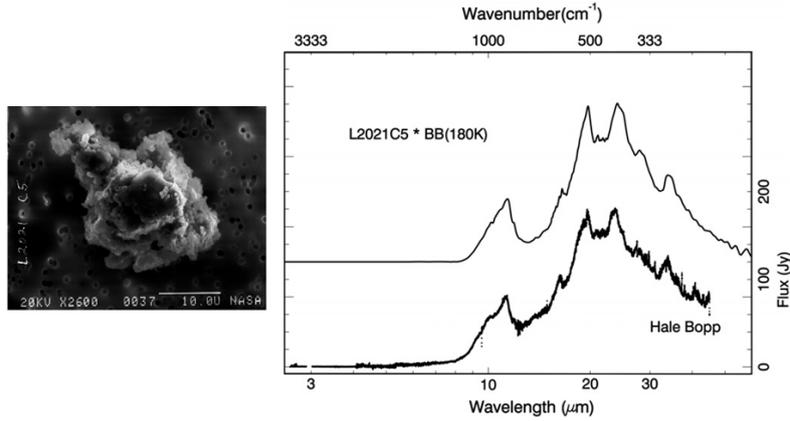


FIGURE 3.2 – A gauche, image MEB (Crédit la NASA) de l’IDP poreux L2021C5 étudié dans notre laboratoire. A droite, comparaison du spectres IR d’émission de la comète Hale Bopp au spectre IR en transmission de l’IDP L2021C5 obtenu sur la ligne SMIS du synchrotron SOLEIL et corrigé de l’émission du corps noir à 180K (Brunetto et al. 2011).

La figure ci-dessus montre une parfaite adéquation entre le spectre infrarouge de l’IDP obtenu sur la ligne SMIS de SOLEIL avec celui de la comète Hale-Bopp obtenu avec ISO. Cette excellente similitude signifierait qu’un grain de quelques dizaines de microns analysé en laboratoire peut rendre compte de la composition globale d’une comète donnée.

- Les CS-IDPs (*Chondritic Smooth – IDPs*) : de structure plus lisse que les CP-IDPs et de composition moyenne chondritique, ils sont principalement constitués de phyllosilicates, de quelques carbonates, des sulfures et du matériau carboné avec quelques inclusions de silicates cristallins anhydres (voir Figure 3.3). Les CS-IDPs sont classés comme étant d’origine astéroïdale.

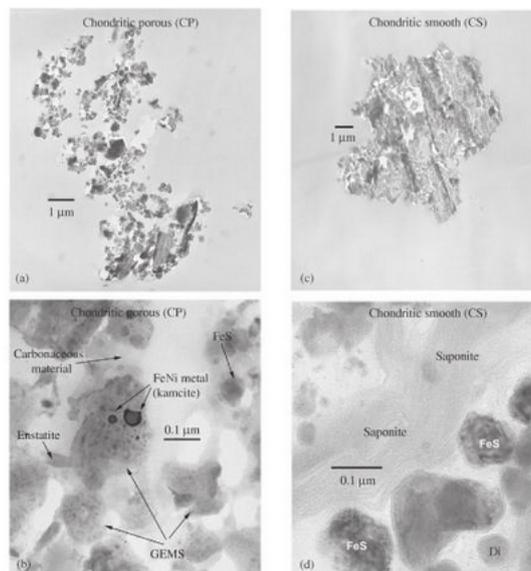


FIGURE 3.3 – Cette figure extraite de Bradley (2003) représente des sections fines d’IDPs de type CP en (a) et CS en (c). Noter la différence de textures entre les deux familles. En (b) et (d) sont données les identifications des différentes composantes des deux classes d’IDPs, la présence de GEMS, d’enstatite et de FeNi dans une matrice carbonée pour le CP-IDP et la présence de saponite (silicate hydraté) et de sulfure de fer pour le CS-IDP.

Depuis l'avènement et l'essor de l'analyse avec la Nano-SIMS qui permet des mesures de rapports isotopiques, il est possible d'analyser les IDPs micrométriques avec une résolution spatiale de quelques nanomètres, ce qui a permis de découvrir des silicates extrasolaires dans certains IDPs, leurs origines extrasolaires sont démontrées par leurs compositions isotopiques en oxygène extrêmement anormales (Messenger et al. 2003).

3.3 Mission Stardust (Récolte spatiale)

Le 15 Janvier 2006, la mission spatiale américaine de la NASA, lancée le 7 février 1999, a rapporté sur Terre quelques milliers de grains collectés lors du survol en Janvier 2004 de la comète 81P/Wild2 par la sonde spatiale Stardust¹. Les échantillons rapportés, de taille typique comprise entre 1 et 100 μm constituent donc les premiers grains extraterrestres d'origine connue (cométaire) et surtout de corps parent bien identifié (81P/Wild2) disponibles en laboratoire pour analyses avec des instruments hautes résolutions (Brownlee et al. 2006).

Durant cette mission, deux milieux de collecte ont été utilisés pour récolter des grains de la comète Wild2. Des blocs d'aérogel, milieu de ralentissement transparent composé d'un gel de silice de très faible densité (0.01 à la surface des blocs à 0.05 g/cm^3 à 3 cm de profondeur), qui a malheureusement endommagé les grains incidents avec une vitesse de ~ 6 km/s, et les armatures en aluminium séparant les blocs d'aérogel dans lesquels les grains cométaires, qui sont venus les percuter, ont formé des cratères d'impact contenant des résidus fondus des particules incidentes. Les feuilles d'aluminium représentent $\sim 15\%$ en surface des collecteurs utilisés. Selon la taille et la nature (friable ou pas) des grains incidents, plusieurs formes de traces d'impacts dans les blocs d'aérogel ont été obtenues (Hörz et al. 2006).

Les grains cométaires collectés dans l'aérogel couvrent une gamme de taille du sub- μm le long des traces d'impact dans l'aérogel à plusieurs dizaines de μm pour les particules terminales ou près des fins de traces (Burchell et al. 2008). Il est alors possible d'analyser "*in situ*" les grains déposés le long des traces ou encore les grains terminaux trouvés en fin de trace en utilisant les "*keystones*". Cette technique d'extraction des traces a été mise au point à l'université de Berkeley en Californie (Westphal et al. 2002), (Westphal et al. 2004). Une autre méthode de préparation des échantillons contenus dans l'aérogel est également utilisée, elle a été développée par Matrajt & Brownlee (2006) et consiste en la préparation de sections minces obtenues par ultramicrotomie.

Il est également possible d'analyser les résidus fondus trouvés dans les feuilles d'aluminium. L'étude des petits cratères donne accès à une population de grains cométaires plus petite que celle extraite des collecteurs d'aérogel et les résidus fondus trouvés dans les plus petits cartères sont très probablement issus des grains sub-microniques lâchés par la comète et qu'il est impossible de collecter avec l'aérogel.

Les analyses préliminaires menées en 2006 ont vite fait apparaître que les grains de Wild2 sont constitués d'un mélange de phases réfractaires (minéraux formés à hautes températures dans les régions internes de la nébuleuse solaire) et de phases plus froides (minéraux amorphes) (Brownlee et al. 2006) et (Zolensky et al. 2006). Depuis ces analyses préliminaires d'autres études sont venues conforter ces premiers résultats et confirment donc la nécessité d'un mélange à grande échelle entre les régions internes et externes des disques au delà le l'orbite de Neptune (Simon

1. <http://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html>

et al. 2008), (Ogliore et al. 2012), (Brownlee et al. 2012).

La présence de silicates cristallins a été corroborée par les analyses effectuées dans les cratères d'impact. Leroux et al. (2008b) ont analysé par microscopie électronique à transmission (MET) des sections fines préparées avec la technique FIB (*Focused Ion Beam*) et ont montré que la plupart des grains étaient initialement cristallins (Leroux et al. 2008b).

La recherche des grains présolaires dans la matière extraterrestre a toujours constitué un enjeu important. La présence de ces grains, condensés dans des environnements stellaires avant d'être inclus dans différents corps "hôtes" durant la formation d'un Système solaire, peut renseigner sur les différents degrés d'altération subis par le corps dans sa phase pré-acréationnelle, et permet de mieux contraindre les processus astrophysiques, tels que la nucléosynthèse dans les étoiles, les paramètres de condensation, l'évolution chimique de la galaxie.

Dans les "grains Stardust", et contre toute attente, la recherche de grains présolaires n'a pas été très fructueuse. En effet, les premières analyses isotopiques $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ effectuées dans les résidus fondus trouvés dans les cratères d'impact sur les feuilles d'aluminium, ont montré que les grains présolaires sont rares dans les échantillons Stardust (McKeegan et al. 2006), (Stadermann et al. 2008), (Leitner et al. 2010). La présence de grains présolaires attestée par les mesures isotopiques de l'oxygène est bien évidemment impossible à effectuer sur des grains contenus dans l'aérogel puisque ce dernier est majoritairement composé de Si et O

Tout récemment, la présence de grains présolaires avec des abondances similaires à celles observées dans les IDPs primitifs a été démontrée par Floss et al. (2013). Pour cela, les auteurs ont bombardé des feuilles d'aluminium avec des grains de la chondrite carbonée Acfer094, l'une des météorites contenant le plus de grains présolaires, à une vitesse de 6 km/s et ont montré que plus de 90% des grains présolaires riches en oxygène sont perdus lors de l'impact sur les feuilles d'aluminium. Les grains de carbure de silicium (SiC) sont, quant à eux, mieux préservés car plus résistants. Ainsi, en mesurant dans les résidus fondus une teneur en grains présolaires de l'ordre de 37 ppm, les auteurs ont estimé que le grain Stardust impactant devait avoir une teneur de l'ordre de 600-830 ppm, valeur compatible avec celles des IDPs les plus primitifs (Floss et al. 2013).

Les organiques également ont été recherchés dans les échantillons Stardust. Bien évidemment la question sous-jacente était de voir le rôle joué par les matériaux organiques cométaires dans l'apport de molécules prébiotiques sur Terre, de la glycine et différents acides aminés ont pu être identifiés dans des grains capturés dans l'aérogel (Glavin et al. 2008). La principale difficulté rencontrée lors de l'étude des organiques dans ces échantillons est de pouvoir distinguer les organiques propres aux grains de ceux de contamination. Un article de synthèse sur les organiques dans les échantillons Stardust a été publié par Sandford (2009).

Les modifications subies par les grains lors de leur ralentissement dans l'aérogel ont également été étudiées. L'analyse par MET de sections fines obtenues par ultra-microtomie de grains extraits de leur traces, a révélé la coexistence par endroits d'aérogel fondu et non fondu, ceci met en évidence un fort gradient thermique à l'échelle sub-micronique. Par ailleurs, des inclusions sphériques de métal et de sulfures ont été trouvées. Celles-ci sont la signature d'un chauffage rapide, au point de faire fondre l'aérogel et les silicates des grains cométaires, puis refroidissement rapide et formation des gouttelettes. Finalement, la présence de "*patches*", tâches opaques riches en Mg-Al-Ca indique que la température atteinte lors du ralentissement n'a pas atteint la température de miscibilité des silicates avec l'aérogel, soit 2000°C (Leroux et al. 2008a).

Les échantillons de la mission Stardust, bien que dégradés par l'aérogel, continuent d'être étudiés en laboratoire, nous avons ainsi récemment analysé en collaboration avec A. Rotundi de Naples, deux grains issus d'une même trace initiale. En combinant trois méthodes analytiques complémentaires (μ -spectroscopie infrarouge, μ -spectroscopie Raman et microscopie électronique à balayage), nous avons pu caractériser la minéralogie et la matière organique des deux grains écrasés avec leur aérogel dans des enclumes à diamant. Ainsi, nous avons identifié de la gehlenite du groupe des mélilites (phases minérales réfractaires) dans les deux grains, sa présence est, en général, signe de transformations géologiques importantes telles que celles qui font suite à la différenciation, ici cette transformation est probablement due à la haute température subie par les grains lors de leur décélération dans l'aérogel. La matière organique a, quant à elle, pu être identifiée dans l'une des deux particules, cette matière semble être identique à celle trouvée dans les IDPs relativement bien chauffés lors de leur entrée atmosphérique. Les résultats obtenus, comparés aux données sur les grains Stardust analysés à ce jour, viennent d'être soumis à MAPS pour publication.

3.4 Missions de retour d'échantillons (Récolte sur corps parents)

La mission Hayabusa japonaise de la JAXA (*Japan Aerospace eXploration Agency*) a été la première mission de récolte sur corps parent depuis les missions lunaires. Cette mission a ramené sur Terre des échantillons de la surface de l'astéroïde 25143 Itokawa, appartenant à la classe S la plus évoluée des astéroïdes. De plus, des mesures de télédétection, (*remote sensing measurements*), ont été effectuées et ont confirmé la compatibilité d'Itokawa avec les chondrites ordinaires de type LL5 et LL6, confirmant ainsi les résultats obtenus à partir des mesures sur Terre. Les analyses en laboratoire des échantillons rapportés ont permis de faire le lien direct entre les chondrites ordinaires de type L et de type LL et des grains des l'astéroïde de type S (Nakamura et al. (2011) et les références qui s'y trouvent).

Deux autres missions de retour d'échantillons d'astéroïdes géocroiseurs de type C, d'albédo faible (astéroïdes supposés donc contenir du matériau riche en carbone qui n'a pas encore été altéré par les processus de formation planétaire, qui fondent et mélangent le matériau originel) sont en cours d'étude pour une sélection finale de mission de type M3 de cosmic vision (ESA) concernant la mission MarcoPolo-R, et programmée, pour la mission de la NASA OSIRIS Rex.

- La mission de la NASA OSIRIS Rex², la première mission américaine qui vise à étudier un astéroïde et à en rapporter un échantillon (~ 60 g) sur Terre doit être lancée en septembre 2016 pour un voyage de deux ans vers sa cible, l'astéroïde géocroiseur (NEA : *Near Earth Asteroid*) 1999 RQ36. OSIRIS-REx transportera à son bord cinq instruments scientifiques qui cartographieront l'astéroïde dans les domaines du visible, de l'infrarouge et des rayons X mais aussi un système de collection d'échantillons le TAGSAM (*Touch And Go Sample Acquisition Mechanism*). Le retour de cette capsule transportant les grains et régolithe de l'astéroïde est prévu pour 2023 dans le désert de l'Utah.

- La mission MarcoPolo-R (MP-R) est un projet de mission européenne de retour d'échantillons et d'analyses *in – situ* de l'ESA avec une collaboration de la NASA. Si la mission est retenue, la sélection définitive est prévue pour février 2014, sa fenêtre de lancement se situe entre 2022 et 2024, donc un retour d'échantillons vers 2028 au maximum. La cible prévue pour cette mission est l'astéroïde primitif 2008 EV5 pour lequel des données d'observations existent, son

2. *Origins Spectral Identification Resource Identification Security – Regolith Explorer*

spectre ressemble à ceux des météorites de type CI (les plus primitives), sinon ce sera le système binaire (175706) 1996FG3.

Les astéroïdes primitifs ciblés par OSIRIS Rex et MarcoPolo-R devraient contenir de la matière organique. La possibilité offerte par ses deux missions d'analyser en laboratoire la structure de la matière organique à un niveau de détail très élevé est cruciale pour déterminer si ce type d'objets a pu avoir délivré le matériau pré-biotique qui a conduit à la formation de la Vie sur Terre. Ces deux missions ont donc comme objectifs en commun de lever le voile sur les questions fondamentales de la formation de notre Système solaire et de l'origine de la vie et de fournir des informations cruciales sur les géocroiseurs pour développer des stratégies appropriées pour protéger la Terre d'un impact de l'un de ces objets potentiellement dangereux.

3.5 Missions d'analyses *in situ* (Analyse sur corps parent)

La mission Rosetta, lancée par l'ESA en mars 2004, a pour objectif l'étude exhaustive de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P/CG) (Glassmeier et al. 2007) permettant ainsi une avancée sur la connaissance des comètes à courte période. Rosetta a embarqué un atterrisseur (*lander*), qui va se poser sur la comète pour y effectuer des prélèvements et analyses *in situ*, il n'est pas prévu de retour d'échantillons pour analyses en laboratoires. Cette prouesse technologique sera une première mondiale. Une vingtaine d'expériences, réparties entre l'orbiteur et l'atterrisseur, sont embarquées à bord de la sonde dont COSIMA un spectromètre de masse d'ions secondaires à temps de vol (TOF-SIMS). Son but est de déterminer la composition chimique des grains cométaires qu'il va collecter (Kissel et al. 2007). Rosetta sera en orbite autour de la comète vers juillet 2014 et vers novembre 2014 l'atterrisseur PHILAE se posera pour des analyses *in situ* pour quelques jours, l'orbiteur, de son côté, poursuivra ses observations alors que la comète s'approche du Soleil et devient de plus en plus active et après 18 mois passés en orbite autour de la comète, il est prévu que la mission s'achève en décembre 2015 alors que la comète s'éloigne de nouveau du Soleil.

3.6 Mes travaux sur la matière primitive

Lorsque j'ai rejoint l'équipe en 2002, J. Borg était responsable de l'analyse de la matière primitive en laboratoire. L'une des principales activités à cette époque là était la préparation de la chaîne d'analyses à effectuer sur les échantillons Stardust qui étaient attendus pour Janvier 2006. Pour ce faire, nous avons utilisé des grains des collections ODCE, piégés dans de l'aérogel (ils représentaient les meilleurs analogues aux échantillons Stardust). Les échantillons de la mission ODCE étaient préparés sous forme de "*keystone*" par l'équipe d'A. Westphal de Berkeley (USA).

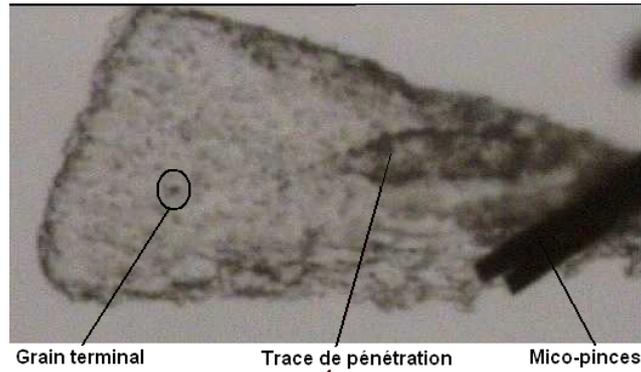


FIGURE 3.4 – Exemple de Keystone tel que préparé par l'équipe de Berkeley. On y voit le grain terminal en bout de la trace de pénétration ainsi que les microforklifts (micro-pinces) qui permettent de manipuler le Keystone.

La microspectroscopie IR sur ce type d'échantillons, un grain de tout au plus une dizaine de microns contenu dans un morceau d'aérogel de taille de quelques mm, s'est très vite révélée impossible. En effet, l'aérogel, qui est un gel de silice expansé, a une signature principale à 10 μm très importante saturant le reste du spectre. Nous avons alors entrepris d'effectuer des analyses de la composition chimique par fluorescence X auprès de la ligne ID21³ de l'ESRF. Cette étude a permis de montrer que malgré le chauffage subi par les grains lors de leur ralentissement dans l'aérogel, la minéralogie est préservée entre le grain incident et le grain terminal en bout de trace. En revanche, les grains laissés le long de la trace et en entrée de trace ont montré un état d'oxydation du Fe différent par rapport à celui du grain terminal. L'analyse des grains laissés le long de la trace de ralentissement devrait donc être faite en tenant compte des effets de chauffage lors du ralentissement dans l'aérogel (Grossemy et al. 2007).

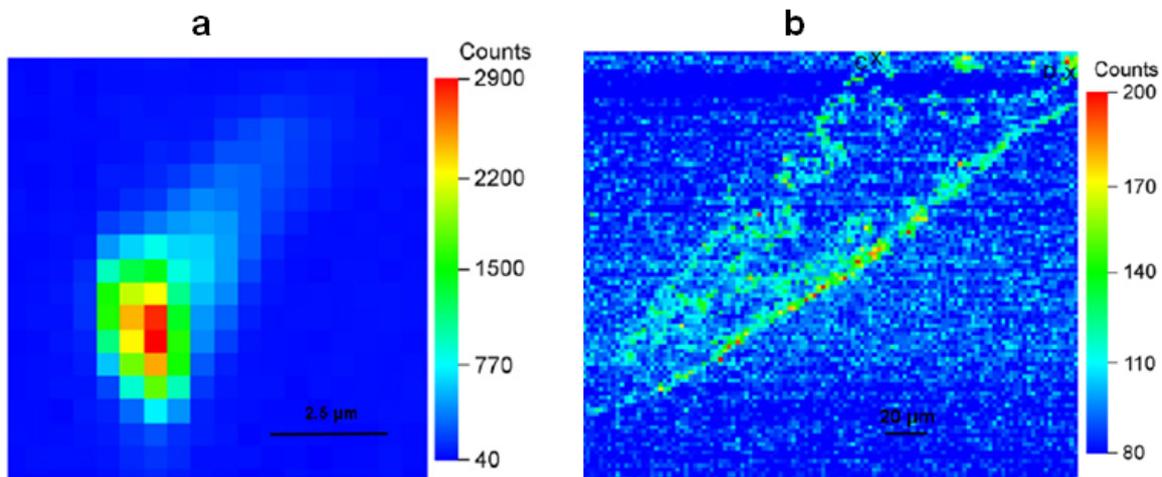


FIGURE 3.5 – Distribution du Fer dans le grain terminal (figure-a-) et le long de la trace de pénétration (figure-b-) qui mesure $\sim 250 \mu\text{m}$. Ces cartes sont obtenues avec une résolution spatiale de $2 \mu\text{m}$. La teneur en Fe du grain final en bout de trace est bien plus importante que celle des grains dispersés le long de la trace (voir les échelles données en coups/secondes). Cette figure est extraite de Grossemy et al. (2007).

3. <http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/Imaging/ID21/>

Grâce à l'expertise et au savoir-faire acquis tant dans l'analyse que dans la micro-manipulation d'échantillons extraterrestres, j'ai eu le privilège de faire partie des ~ 200 chercheurs sélectionnés par la NASA pour constituer des groupes de recherches internationaux pour les premières analyses des grains cométaires de la mission Stardust (PET : "*Preliminary Examination Teams*"). J'ai ainsi pu participer et contribuer aux premières analyses des grains de la comète Wild-2 dès leur arrivée sur Terre. Nous avons effectué ces travaux en un temps très court ; 6 mois d'intenses échanges avec les collègues de différents laboratoires américains et européens, qui ont donné lieu à des publications dans la revue Science en décembre 2006, Volume 314, Issue 5806. J'ai été cosignataire de cinq de ces papiers (Brownlee et al. 2006), (Flynn et al. 2006), (Hörz et al. 2006), (Keller et al. 2006) et (Sandford et al. 2006).

Durant ces études, nous avons combiné trois techniques analytiques : la micro-spectroscopie Raman (analyse de la matière organique aromatique), la micro-spectroscopie infrarouge (analyse moléculaire et identification des liaisons chimiques présentes) et la microscopie électronique à balayage (FESEM-EDX) qui permet d'identifier les éléments chimiques présents. L'utilisation combinée de ces trois techniques complémentaires nous a permis de caractériser au mieux six grains de la mission Stardust. Nous avons montré que les caractéristiques de ces grains sont similaires à celles des IDPs et des météorites les plus primitives ; longueurs de chaînes aliphatiques proches de celles des IDPs et plus longues que celles du MIS, des silicates hydratés ont été observés dans deux particules analysées et probablement des carbonates dans l'une d'elles (Rotundi et al. 2008)

A cette époque, dans le cadre des travaux de thèse de F. Grossemy (que j'ai co-encadrée), nous avons mis au point une nouvelle technique de préparation des échantillons qui consiste à écraser les IDPs dans une enclume à diamant afin de s'affranchir des effets de taille et d'améliorer les lignes de bases des spectres IR obtenus ce qui permet une meilleure identification des espèces moléculaires présentes (Grossemy 2008). Les effets de taille des grains sur la qualité des spectres IR avait déjà été démontrés par P.I Raynal qui avait mis au point une technique d'écrasement des IDPs dans une fenêtre de KBr (Raynal 2003). La technique d'écrasement permet certes d'améliorer considérablement la qualité des spectres obtenus, mais elle présente les inconvénients de faire perdre l'information spatiale initiale et surtout il est difficile de récupérer le grain écrasé pour d'autres études avec des techniques analytiques complémentaires (telles que la NanoSIMS).

En utilisant ce protocole de préparation des échantillons, et en combinant les différentes techniques analytiques évoquées ci-dessus, nous avons récemment avec ma doctorante S. Merouane, analysé des fragments, de quelques dizaines de microns, de la météorite "Paris", fournis par B. Zanda du MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle) de Paris. Cette chondrite carbonée de type CM2 (c'est à dire qu'elle a subi une altération aqueuse pas très importante) est constituée de deux lithologies bien distinctes dont l'une plus altérée que l'autre. Notre étude a porté sur la caractérisation en spectroscopie infrarouge des deux lithologies afin de les comparer. Nous avons alors trouvé que les deux lithologies comportaient les mêmes signatures en général à quelques exceptions près :

- Dans la lithologie la plus altérée nous avons trouvé des inclusions de carbonates (non trouvée dans la lithologie la moins altérée). Leur présence est un indicateur d'altération aqueuse.

- Dans la lithologie la moins altérée nous avons détecté des inclusions de silicates anhydres que nous n'avons pas vu dans la lithologie la plus altérée (cette dernière est essentiellement constituée de phyllosilicates).

- Enfin dans la lithologie la moins altérée nous avons trouvé des inclusions de quelques

microns particulièrement riches en matière organique par rapport au reste de l'échantillon.

La figure 3.6 compare une partie du spectre centrée sur les bandes à 3.4 μm et 6 μm , régions des organiques aliphatiques de type CH et aromatiques de type CC respectivement, obtenue dans la lithologie non altérée (*Bulk*, voir spectre du haut) à celle obtenue pour les inclusions particulières ("*excavated*" *grains*, voir spectre du bas).

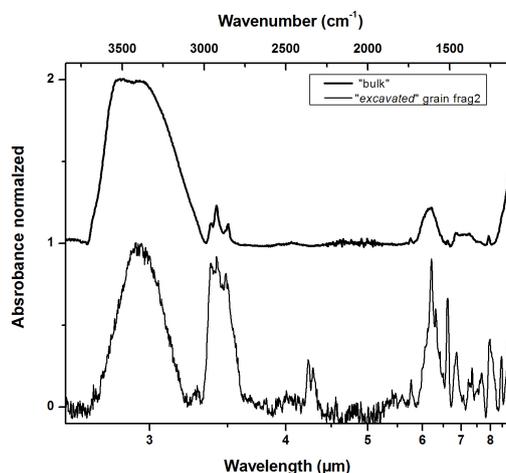


FIGURE 3.6 – Comparaison, dans la gamme 2.5 à 8 μm , du spectre d'un échantillon d'une cinquantaine de microns de la météorite Paris (spectre du haut) à celui obtenu à partir d'une inclusion très riche en matière organique (spectre du bas) trouvée dans cet échantillon.

Les signatures obtenues ici sont extraordinaires en ce sens qu'elles n'ont jamais été obtenues dans les matériaux extraterrestres habituellement analysés dans notre laboratoire. Nous les avons alors comparées aux données des observations du MIS dans la direction du centre galactique fournies par le spectromètre SWS embarqué par ISO (cf Figure 3.7 ci-dessous).

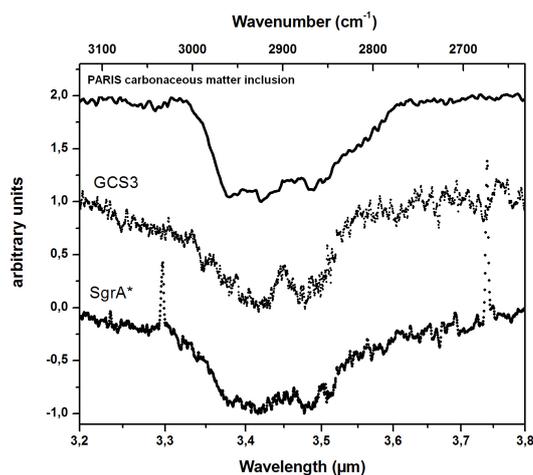


FIGURE 3.7 – Comparaison des bandes autour de 3.4 μm des inclusions dans la météorite Paris (spectre de transmittance en traits pleins) à celles observées dans la ligne de visée du centre galactique, les sources GCS3 et SgrA*. Ces deux derniers spectres (flux de lumière) ont été fournis par SWS embarqué par ISO.

Cette comparaison montre une grande similitude entre les aliphatiques des inclusions de Paris et les deux spectres fournis par ISO et issus du MIS. Ce résultat publié en 2012 (Merouane et al. 2012) montre alors que la chondrite carbonée Paris pourrait renfermer des phases issues du MIS qui peuvent être détectées par nos techniques analytiques hautes résolutions spatiales sans avoir recours à des extractions de la matière organique par des attaques chimiques, telles que celles utilisées par Ehrenfreund et al. (1991) et qui pourraient altérer l'échantillon.

Il est à noter par ailleurs que ce résultat est en bon accord avec les travaux de Leroux et al. (2013) qui, en analysant la microstructure par MET de sections fines issues de la lithologie la moins altérée de Paris, ont mis en évidence l'existence de phases ressemblant à des GEMS. Ces derniers dont l'origine interstellaire a été proposée (Bradley et al. 1999) sont souvent trouvés dans les IDPs les plus primitifs (Messenger et al. 2003). La convergence de nos travaux indique alors que la chondrite carbonée Paris représente un objet d'investigations très intéressant.

Les IDPs représentent également une bonne partie de mes travaux de recherches. Ces dernières trois années et dans le cadre des travaux de thèse de ma doctorante nous avons effectué des analyses systématiques par microspectroscopie IR sur \sim une vingtaine d'IDPs auprès du synchrotron SOLEIL⁴, ces analyses ont été combinées à des analyses Raman et MEB-EDX.

Les IDPs nous ont été confiées par le CAPTEM⁵ dirigé par Mike Zolensky à Houston (*Johnson Space Center*). Nous en avons tout d'abord sélectionné les IDPs anhydres pour une analyse quantitative de leur composante minérale (silicates, bande autour de 10 μm). L'analyse de la matière organique aliphatique (bande à 3.4 μm) menée en parallèle, a permis de mettre alors en évidence une corrélation entre matière organique aliphatique et le type de silicates anhydres présents ; olivine (ol) ou pyroxène (px) (Merouane et al. 2013).

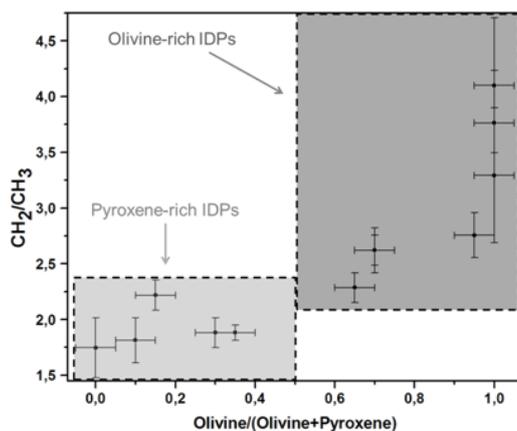


FIGURE 3.8 – Longueur des chaînes aliphatiques donnée par le rapport CH_2/CH_3 en fonction de la composition en silicates donnée par le rapport (olivine/(olivine+pyroxène)). Ce rapport varie de 0 indiquant une composition 100% pyroxène à 1 pour une composition 100% olivine. Cette représentation montre bien que les IDPs riches en olivine (ayant un rapport $> 0,5$) ont des longueurs de chaînes plus longues que les IDPs riches en pyroxènes (définis par un rapport $< 0,5$).

4. <http://www.synchrotron-soleil.fr>

5. *Curation and Analysis Planning for Extraterrestrial Materials*

La Figure 3.8 montre clairement que les IDPs riches en olivine ($ol/(ol+px)>0.5$) présentent des chaînes aliphatiques plus longues que les IDPs riches en pyroxène ($ol/(ol+px)<0.5$). Nous avons déterminé une longueur de chaînes $CH_2/CH_3 = 1.9 \pm 0.2$ pour les IDPs riches en pyroxène contre 3.1 ± 0.7 pour les IDPs riches en olivine. La valeur moyenne ~ 2.5 est conforme à la valeur 2.46 précédemment déterminée par Flynn et al. (2003) sur une dizaine d'IDPs anhydres dont la composition silicatée n'avait pas été étudiée en détail. Ainsi, l'originalité de notre travail est d'avoir mis en évidence l'existence de deux familles d'IDPs, caractérisée chacune par une longueur de chaînes aliphatiques plus ou moins grande par rapport à l'autre. Ces résultats viennent d'être soumis pour publication dans ApJ et l'article est en cours de révision.

La corrélation établie dans ce travail peut être la conséquence soit d'un processus primaire (formation des organiques sur les surfaces des silicates) soit d'un processus secondaire (altération aqueuse et/ou métamorphisme thermique sur le(s) corps parent(s)). Cependant, l'analyse des données Raman nous a permis d'exclure les effets de métamorphisme thermique et d'altération aqueuse (cette dernière est également exclue du fait de l'absence de minéraux hydratés puisque nous avons étudié les IDPs anhydres).

Ainsi, nous proposons que la corrélation entre la nature des silicates et les aliphatiques présents dans les IDPs anhydres est la conséquence d'un processus primaire (et probablement que les silicates jouent un rôle catalytique dans la formation des organiques sur leurs surfaces). Afin de vérifier cette hypothèse, des expériences de simulation en laboratoire sont envisagées, elles seront discutées dans les perspectives.

Chapitre 4

Conclusions et Perspectives

Mes études sur les analogues de synthèse de la matière cosmique sont centrées sur la partie minérale ; les silicates. J'ai étudié les effets des irradiations ioniques et/ou de recuits thermiques sur les modifications physico-chimiques subies par les silicates interstellaires lors de leur cycle de vie tout en veillant à faire le lien avec les observations sur la matière naturelle, les IDPs essentiellement, que j'analyse également en laboratoire. Pouvoir mener de front des analyses de cosmomatériaux et des simulations en laboratoire sur les analogues de synthèse de la matière cosmique permet de tester des scénarii de sa formation et son évolution.

La spectroscopie IR reste l'outil de diagnostic privilégié pour les premières analyses des échantillons naturels et de nos matériaux de synthèse. Connue comme étant non destructive, elle permet de faire un lien direct avec les données IR des observations issues des télescopes spatiaux et terrestres. Toutefois, nos différentes expériences ont toujours montré qu'il est indispensable de coupler à nos analyses IR d'autres techniques analytiques (Raman, MEB-EDX, MET, NanoSIMS..) pour une caractérisation plus complète et plus fine (au sens de résolution spatiale) de tous nos échantillons qu'ils soient extraterrestres ou de synthèse.

Je décris ci-dessous les perspectives, à moyen et court termes, de mes travaux de recherches.

4.1 Analyse en laboratoire de matériaux extraterrestres

Concernant l'analyse des matériaux extraterrestres, les IDPs restent à mon sens les objets d'études des plus intéressants et des plus primitifs disponibles en laboratoire pour analyses, du moins comparés aux grains Stardust, d'origine sûre, certes, mais qui ont subi de fortes altérations par l'aérogel lors de leur collecte. Dr Mike Zolensky (*Cosmic Dust Sample Curator*) a reconnu la validité expérimentale de notre approche pour la préparation et l'analyse des grains et l'obtention des IDPs (collection NASA) se fait maintenant de manière routinière.

Dans le cadre de l'analyse des IDPs les points suivants vont être abordés :

i/ A court terme, j'envisage de coupler à nos trois techniques analytiques couramment utilisées pour la caractérisation des IDPs, des analyses des rapports isotopiques par NanoSIMS. A cet effet, des discussions sont déjà entamées avec Dr Ian Franchi de Open University (UK) pour mener ces analyses combinées en collaboration avec lui et son équipe. Si ce couplage des tech-

riques réussit, j'envisage alors d'analyser à nouveau des grains de la lithologie la moins altérée de la chondrite carbonée Paris pour retrouver des inclusions riches en matière organique, telles que celles que nous avons trouvées précédemment (Merouane et al. 2012). Il serait intéressant de procéder à des analyses isotopiques aussi bien sur cette matière organique que sur les silicates anhydres qui leur sont associés.

ii/ Les analyses d'IDPs anhydres par micro-spectroscopie IR, micro-spectroscopie Raman et MEB-EDX, menées ces trois dernières années, ont ouvert une nouvelle voie d'investigation que j'aimerais explorer dans les mois à venir. En effet, comme expliqué dans le chapitre précédent, l'analyse systématique des silicates et des aliphatiques sur treize IDPs, nous a permis de trouver une corrélation entre nature de silicates et longueurs de chaînes aliphatiques associées. Afin d'expliquer ce résultat récent, nous allons étudier les réactions gaz/surface en utilisant des surfaces de silicates de compositions différentes (olivine, pyroxène, mélange de deux espèces), de natures différentes (amorphes et cristallines) et des mélanges de gaz simulant au mieux les gaz de la nébuleuse primitive ; CO, N₂ et H₂ conformément aux travaux de Nuth et al. (2008). Les premières expériences seront effectuées dans un four tubulaire (dont nous disposons) qui permet de traiter plusieurs échantillons en même temps, et leurs analyses IR seront alors effectuées *ex situ*. Si cette étape préliminaire se solde par un succès nous passerons à l'étape suivante : l'étude de la cinétique de formation des organiques sur les surfaces de silicates en utilisant PRONEXT.

Il est à noter que ces expériences nous permettront à nouveau d'allier directement nos travaux de simulation en laboratoire à nos résultats obtenus par l'analyse de la matière extraterrestre primitive.

iii/ A court terme et dans le cadre de la collaboration Franco italienne (équipe de A. Rotundi de Naples) nous avons récemment analysé deux grains Stardust et les résultats sont en cours de publication. Un troisième grain avait été demandé à la NASA, je contribuerai à son analyse dès son arrivée.

iv/ A plus long terme, j'aimerais étendre le même travail développé pour les analyses des IDPs anhydres aux IDPs hydratés. Réaliser une analyse quantitative de leur minéralogie et rechercher d'éventuelles liens avec les aliphatiques (ou la matière organique en général).

Enfin notons que l'arrivée prochaine (2014) des données issues des analyses de la sonde Rosetta sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, permettra de comparer les données récoltées *in situ* aux données obtenues en laboratoire sur les objets primitifs. Rosetta va apporter des informations sur la composition de grains cométaires qui n'auront subi aucune altération liée à leur collecte.

4.2 Simulation en laboratoire de matériaux extraterrestres

Concerant les travaux effectués sur les analogues de synthèse, mon objectif sur le long terme est d'étudier les cinétiques des transformations structurales et physico-chimiques de la matière silicatée interstellaire (présente dans le nuage moléculaire initial) au contact des conditions physiques régnant dans la nébuleuse primitive. Il est, en effet, important de noter que du point de vue astrophysique, la coexistence de gaz et de particules solides (telles que les silicates) dans les disques d'accrétion à partir desquels notre Système solaire a été formé nous pousse naturellement à envisager un rôle commun joué par ces deux composantes lors de l'apport des «volatils», sur les surfaces telluriques.

L'expérience PRONEXT qui commence à fournir des résultats, a été développée dans ce cadre. J'utiliserai des mélanges de gaz dont la composition suivra celle proposée dans les modèles d'évolution de la nébuleuse, à des températures comprises entre 300 et 1100 K et des pressions variables (choisies en particulier pour augmenter la cinétique de la simulation à comparer avec des processus naturels bien plus lents). Les points suivants seront alors étudiés :

i/ Réactions de catalyse à la surface des grains silicatés pour la formation de molécules organiques prébiotiques. L'interaction entre les gaz de la nébuleuse et les surfaces silicatées pourrait déboucher sur de nombreuses réactions de surface qui permettraient de synthétiser des molécules organiques. L'hypothèse la plus probable est celle de réactions de type Fischer-Tropsch à la surface de grains ainsi que postulé par Nuth & Hill (2001, 2002).

ii/ Transformation nébulaire de silicates amorphes en phyllosilicates et carbonates. L'échantillon sera chauffé progressivement en présence de CO ou CO₂ et de la vapeur d'eau, il sera tout d'abord caractérisé *in situ* par spectroscopie IR et son évolution en fonction du temps pourra être suivie de manière à mesurer la cinétique de transformation afin d'essayer d'en déduire des échelles de temps d'évolution dans la nébuleuse solaire. De plus, après récupération d'une partie du film de silicate transformé, et son transfert sur un substrat adéquat avec la microscopie électronique en transmission (MET), la minéralogie et cristallographie de l'échantillon pourront être étudiées *ex situ* en collaboration avec H. Leroux de l'UMET. Enfin nous pourrions également envisager une analyse par microscopie à force atomique (AFM : *Atomic Force Microscopy*) ; technique avec laquelle il est possible de sonder l'état de surface de l'échantillon analysé, qui permettra par ailleurs d'établir (ou non) une corrélation entre la rugosité de la surface et la formation des carbonates et/ou phyllosilicates. Les analyses AFM sont possibles dans la plateforme technologique CTU (Centrale de Technologie Universitaire) de l'IEF (Institut d'Electronique Fondamentale) d'Orsay où nous effectuons régulièrement les analyses MEB-EDX des IDPs que nous étudions.

En résumé, mon projet avec PRONEXT vise essentiellement à comprendre l'interaction gaz/grains dans la nébuleuse primitive, à juger du rôle qu'ont pu jouer les silicates dans l'apport des volatils, voire matière organique (par des réactions de type Fischer-Tropsch, FT) sur la surface de la Terre primitive. En effet, ce mécanisme de formation des organiques météoritiques est depuis longtemps envisagé et bien qu'il soit souvent abordé dans la communauté internationale (Llorca & Casanova 1998) ; (Hill & Nuth 2003) ; (Nuth et al. 2008), notre approche consiste à comparer, d'une part, des scénarii possibles de formation de volatils (irradiation par protons versus adsorption pour les OH, étude en cours) et d'autre part à étudier *in situ* les cinétiques des réactions.

Bibliographie

- Aléon, J., Engrand, C., Robert, F., & Chaussidon, M. 2001, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 4399
- Anders, E. & Zinner, E. 1993, *Meteoritics*, 28, 490
- Bibring, J.-P., Borg, J., Bunch, T., et al. 1997, *Advances in Space Research*, 20, 1477
- Bibring, J.-P., Borg, J., Langevin, Y., Rocard, F., & Vassent, B. 1983, in *Lunar and Planetary Inst. Technical Report, Vol. 14, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 37–38
- Bockelée-Morvan, D., Gautier, D., Hersant, F., Huré, J.-M., & Robert, F. 2002, *A&A*, 384, 1107
- Borg, J. 2002, *Planetary and Space Science*, 50, 889
- Borg, J., Bibring, J.-P., Langevin, Y., Salvétat, P., & Vassent, B. 1993, *Meteoritics*, 28, 641
- Bouwman, J., Henning, T., Hillenbrand, L. A., et al. 2008, *ApJ*, 683, 479
- Bradley, J. P. 1994, *Science*, 265, 925
- Bradley, J. P. 2003, *Treatise on Geochemistry*, 1, 689
- Bradley, J. P., Keller, L. P., Snow, T. P., et al. 1999, *Science*, 285, 1716
- Brownlee, D., Joswiak, D., & Matrajt, G. 2012, *Meteoritics and Planetary Science*, 47, 453
- Brownlee, D., Tsou, P., Aléon, J., et al. 2006, *Science*, 314, 1711
- Brownlee, D. E. 1978, *Microparticle studies by sampling techniques*, ed. J. A. M. McDonnell, 295–336
- Brownlee, D. E. 1985, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, 147
- Brownlee, D. E., Joswiak, D. J., Schlutter, D. J., et al. 1995, in *Lunar and Planetary Inst. Technical Report, Vol. 26, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 183
- Brucato, J. R., Mennella, V., Colangeli, L., Rotundi, A., & Palumbo, P. 2002, *PSS*, 50, 829
- Brunetto, R., Borg, J., Dartois, E., et al. 2011, *Icarus*, 212, 896
- Burchell, M. J., Fairey, S. A. J., Wozniakiewicz, P., et al. 2008, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 23
- Carrez, P., Demyk, K., Cordier, P., et al. 2002, *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 1599

- Compiègne, M., Verstraete, L., Jones, A., et al. 2011, *A&A*, 525, A103
- Crovisier, J., Leech, K., Bockelee-Morvan, D., et al. 1997, *Science*, 275, 1904
- Dartois, E. 2009, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 414, *Cosmic Dust - Near and Far*, ed. T. Henning, E. Grün, & J. Steinacker, 411
- Dartois, E., Engrand, C., Brunetto, R., et al. 2013, *Icarus*, 224, 243
- Davoisne, C., Djouadi, Z., Leroux, H., et al. 2006, *A&A*, 448, L1
- Day, K. L. 1976, *ApJ*, 210, 614
- Day, K. L. 1979, *ApJ*, 234, 158
- Demyk, K. 2000, *Les silicates interstellaires : composition physico-chimique et évolution*. Thèse de doctorat de l'université de Paris XI
- Demyk, K., Carrez, P., Leroux, H., et al. 2001, *A&A*, 368, L38
- Demyk, K., d'Hendecourt, L., Leroux, H., Jones, A. P., & Borg, J. 2004, *A&A*, 420, 233
- Demyk, K., Jones, A. P., Dartois, E., Cox, P., & D'Hendecourt, L. 1999, *A&A*, 349, 267
- Desch, S. J. & Cuzzi, J. N. 2000, *Icarus*, 143, 87
- Desert, F.-X., Boulanger, F., & Puget, J. L. 1990, *A&A*, 237, 215
- d'Hendecourt, L., Joblin, C., & Jones, A., eds. 1999, *Solid Interstellar Matter : The ISO Revolution*
- Djouadi, Z., D'Hendecourt, L., Leroux, H., et al. 2005, *A&A*, 440, 179
- Djouadi, Z., Gattacceca, J., D'Hendecourt, L., et al. 2007, *A&A*, 468, L9
- Djouadi, Z., Merouane, S., & d'Hendecourt, L. 2013, *LPI Contributions*, 1719, 1990
- Djouadi, Z., Robert, F., Le Sergeant D'Hendecourt, L., et al. 2011, *A&A*, 531, A96
- Draine, B. T. & Lee, H. M. 1984, *ApJ*, 285, 89
- Duprat, J., Engrand, C., Maurette, M., et al. 2007, *Advances in Space Research*, 39, 605
- Ehrenfreund, P., Robert, F., D'Hendecourt, L., & Behar, F. 1991, *A&A*, 252, 712
- Fabian, D., Jäger, C., Henning, T., Dorschner, J., & Mutschke, H. 2000, *A&A*, 364, 282
- Floss, C., Stadermann, F. J., Kearsley, A. T., Burchell, M. J., & Ong, W. J. 2013, *ApJ*, 763, 140
- Flynn, G. J. 1989, *Icarus*, 77, 287
- Flynn, G. J., Bleuet, P., Borg, J., et al. 2006, *Science*, 314, 1731
- Flynn, G. J., Keller, L. P., Feser, M., Wirick, S., & Jacobsen, C. 2003, *GCA*, 67, 4791
- Gail, H.-P. 2001, *A&A*, 378, 192
- Gail, H.-P. 2004, *A&A*, 413, 571

- Gail, H.-P., Zhukovska, S. V., Hoppe, P., & Tieloff, M. 2009, *ApJ*, 698, 1136
- Gammon, R. H., Gaustad, J. E., & Treffers, R. R. 1972, *ApJ*, 175, 687
- Glassmeier, K.-H., Boehnhardt, H., Koschny, D., Kührt, E., & Richter, I. 2007, *Space Science Reviews*, 128, 1
- Glavin, D. P., Dworkin, J. P., & Sandford, S. A. 2008, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 399
- Grossemy, F. 2008, *Des grains cométaires en laboratoire : premiers résultats de la mission Stardust*. Thèse de doctorat de l'université de Paris XI
- Grossemy, F., Borg, J., Djouadi, Z., et al. 2007, *Planetary and Space Science*, 55, 966
- Hall, J. S. 1949, *Science*, 109, 166
- Hallenbeck, S. L., Nuth, J. A., & Daukantas, P. L. 1998, *Icarus*, 131, 198
- Hanner, M. S., Lynch, D. K., & Russell, R. W. 1994, *ApJ*, 425, 274
- Harker, D. E. & Desch, S. J. 2002, *ApJ Letters*, 565, L109
- Henning, T. 2010, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48, 21
- Henning, T. & Meeus, G. 2011, *Dust Processing and Mineralogy in Protoplanetary Accretion Disks*, ed. P. J. V. Garcia, 114–148
- Henning, T. & Stognienko, R. 1996, *A&A*, 311, 291
- Hewins, R. H. & Radomsky, P. M. 1990, *Meteoritics*, 25, 309
- Hill, H. G. M. & Nuth, J. A. 2003, *Astrobiology*, 3, 291
- Hiltner, W. A. 1949, *Science*, 109, 165
- Hörz, F., Bastien, R., Borg, J., et al. 2006, *Science*, 314, 1716
- Hörz, F., Zolensky, M., Cress, G., et al. 1998, in *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, Vol. 29*, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, 1773
- Hudson, B., Flynn, G. J., Fraundorf, P., Hohenberg, C. M., & Shirck, J. 1981, *Science*, 211, 383
- Jaeger, C., Molster, F. J., Dorschner, J., et al. 1998, *A&A*, 339, 904
- Jones, A. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 243, From Darkness to Light : Origin and Evolution of Young Stellar Clusters*, ed. T. Montmerle & P. André, 37
- Jones, A. P. 2004, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 309, Astrophysics of Dust*, ed. A. N. Witt, G. C. Clayton, & B. T. Draine, 347
- Jones, A. P., Tielens, A. G. G. M., & Hollenbach, D. J. 1996, *ApJ*, 469, 740
- Jones, A. P., Tielens, A. G. G. M., Hollenbach, D. J., & McKee, C. F. 1997, in *American Institute of Physics Conference Series, Vol. 402, American Institute of Physics Conference Series*, ed. E. K. Zinner & T. J. Bernatowicz, 595–613
- Juhász, A., Bouwman, J., Henning, T., et al. 2010, *ApJ*, 721, 431

- Kastner, J. H., Buchanan, C. L., Sargent, B., & Forrest, W. J. 2006, *ApJ Letter*, 638, L29
- Keller, L. P., Bajt, S., Baratta, G. A., et al. 2006, *Science*, 314, 1728
- Kemper, F., Vriend, W. J., & Tielens, A. G. G. M. 2004, *ApJ*, 609, 826
- Kemper, F., Vriend, W. J., & Tielens, A. G. G. M. 2005, *ApJ*, 633, 534
- Kessler, M. F., Steinz, J. A., Anderegg, M. E., et al. 1996, *A&A*, 315, L27
- Kissel, J., Altwegg, K., Clark, B. C., et al. 2007, *Space Science Reviews*, 128, 823
- Lazarian, A. & Hoang, T. 2008, *ApJ Letter*, 676, L25
- Leitner, J., Hoppe, P., & Heck, P. R. 2010, in *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, Vol. 41, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 1607
- Leroux, H., Cuvillier, P., Zanda, B., & Hewins, R. H. 2013, *LPI Contributions*, 1719, 1528
- Leroux, H., Rietmeijer, F. J. M., Velbel, M. A., et al. 2008a, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 97
- Leroux, H., Stroud, R. M., Dai, Z. R., et al. 2008b, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 143
- Léger, A. & Puget, J. L. 1984, *A&A*, 137, L5
- Li, A. & Draine, B. T. 2001, *ApJ Letter*, 550, L213
- Lisse, C. M., VanCleve, J., Adams, A. C., et al. 2006, *Science*, 313, 635
- Llorca, J. & Casanova, I. 1998, *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 33, 94
- Malfait, K., Waelkens, C., Bouwman, J., de Koter, A., & Waters, L. B. F. M. 1999, *A&A*, 345, 181
- Malfait, K., Waelkens, C., Waters, L. B. F. M., et al. 1998, *A&A*, 332, L25
- Mandeville, J. C. & Borg, J. 1992, in *LDEF : 69 Months in Space. First Post-Retrieval Symposium*, 419–434
- Mathis, J. S., Rumpl, W., & Nordsieck, K. H. 1977, *ApJ*, 217, 425
- Mathis, J. S. & Whiffen, G. 1989, *ApJ*, 341, 808
- Matrajt, G. & Brownlee, D. E. 2006, *Meteoritics and Planetary Science*, 41, 1715
- Maurette, M., Olinger, C., Michel-Levy, M. C., et al. 1991, *Nature*, 351, 44
- McKeegan, K. D., Aléon, J., Bradley, J., et al. 2006, *Science*, 314, 1724
- Merouane, S., Djouadi, Z., & D’Hendecourt, L. 2013, *LPI Contributions*, 1719, 1981
- Merouane, S., Djouadi, Z., Le Sergeant d’Hendecourt, L., Zanda, B., & Borg, J. 2012, *ApJ*, 756, 154
- Messenger, S., Keller, L. P., Nakamura-Messenger, K., & Clemett, S. J. 2012a, in *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, Vol. 43, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 2696

- Messenger, S., Keller, L. P., Stadermann, F. J., Walker, R. M., & Zinner, E. 2003, *Science*, 300, 105
- Messenger, S., Nakamura-Messenger, K., Keller, L. P., Clemett, S. J., & Nguyen, A. N. 2012b, *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 75, 5334
- Miller, S. L. 1953, *Science*, 117, 528
- Min, M., Waters, L. B. F. M., de Koter, A., et al. 2007, *A&A*, 462, 667
- Molster, F. J., Waters, L. B. F. M., Tielens, A. G. G. M., & Barlow, M. J. 2002, *A&A*, 382, 184
- Mostefaoui, S. & Hoppe, P. 2004, *ApJ*, 613, L149
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tanaka, M., et al. 2011, *Science*, 333, 1113
- Nesvorný, D., Jenniskens, P., Levison, H. F., et al. 2010, *ApJ*, 713, 816
- Nuth, J. A., Hill, H. G. M., & Kletetschka, G. 2000, *Nature*, 406, 275
- Nuth, III, J. A. & Hill, H. G. M. 2001, in *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, Vol. 32, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 2061
- Nuth, III, J. A. & Hill, H. G. M. 2002, in *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, Vol. 33, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 1814
- Nuth, III, J. A., Johnson, N. M., & Manning, S. 2008, *ApJ*, 673, L225
- Ogliore, R. C., Huss, G. R., Nagashima, K., et al. 2012, *ApJ Letter*, 745, L19
- O'Neal, R. L. & Burton Lightner, E. 1991, in *NASA Conference Publication*, Vol. 3134, *LDEF, 69 months in space : first post-retrieval symposium*, ed. A. S. Levine, 3
- Pendleton, Y. J. 1995, *PSS*, 43, 1359
- Pilipp, W., Hartquist, T. W., Morfill, G. E., & Levy, E. H. 1998, *A&A*, 331, 121
- Pollack, J. B., Hollenbach, D., Beckwith, S., et al. 1994, *ApJ*, 421, 615
- Rajan, R. S., Brownlee, D. E., Tomandl, D., et al. 1977, *Nature*, 267, 133
- Raynal, P. I. 2003, *Etude en laboratoire de matière extraterrestre : implications pour la physico-chimie du Système Solaire primitif. Thèse de doctorat de l'université de Paris 6*
- Rietmeijer, F. J. M., Hallenbeck, S. L., Nuth, J. A., & Karner, J. M. 2002, *Icarus*, 156, 269
- Ringwood, A. E. 1979, *Origin of the earth and moon*
- Roskosz, M., Gillot, J., Capet, F., Roussel, P., & Leroux, H. 2009, *ApJ Letter*, 707, L174
- Roskosz, M., Gillot, J., Capet, F., Roussel, P., & Leroux, H. 2011, *A&A*, 529, A111
- Rotundi, A., Baratta, G. A., Borg, J., et al. 2008, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 367
- Sandford, S. A. 1987, *Fundamentals of Cosmic Physics*, 12, 1
- Sandford, S. A. 2009, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 420, *Bioastronomy 2007 : Molecules, Microbes and Extraterrestrial Life*, ed. K. J. Meech, J. V. Keane, M. J. Mumma, J. L. Siefert, & D. J. Werthimer, 113

- Sandford, S. A., Aléon, J., Alexander, C. M. O. ., et al. 2006, *Science*, 314, 1720
- Sandford, S. A. & Bradley, J. P. 1989, *Icarus*, 82, 146
- Sargent, B. A., Forrest, W. J., Tayrien, C., et al. 2009, *ApJ*
- Seab, C. G. 1987, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 134, *Interstellar Processes*, ed. D. J. Hollenbach & H. A. Thronson, Jr., 491–512
- Shu, F. H., Shang, H., & Lee, T. 1996, *Science*, 271, 1545
- Simon, S. B., Joswiak, D. J., Ishii, H. A., et al. 2008, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 1861
- Sloan, G. C., Devost, D., Bernard-Salas, J., Wood, P. R., & Houck, J. R. 2006, *ApJ*, 638, 472
- Stadermann, F. J., Floss, C., Brownlee, D. E., & Rodruck, M. 2009, in *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, Vol. 40, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 2120
- Stadermann, F. J., Hoppe, P., Floss, C., et al. 2008, *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 299
- Starkey, N. A. & Franchi, I. A. 2013, *GCA*, 105, 73
- Steinacker, J., Pagani, L., Bacmann, A., & Guieu, S. 2010, *A&A*, 511, A9
- Thompson, S. P., Fonti, S., Verrienti, C., et al. 2002, *A&A*, 395, 705
- Tielens, A. G. G. M. 2005, *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*
- Trumpler, R. J. 1930, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 42, 267
- van Boekel, R., Min, M., Leinert, C., et al. 2004, *Nature*, 432, 479
- Voors, R. H. M., Waters, L. B. F. M., Morris, P. W., et al. 1999, *A&A*, 341, L67
- Waelkens, C., Malfait, K., & Waters, L. B. F. M. 1998, *Astrophysics and Space Science*, 255, 25
- Waters, L. B. F. M., Molster, F. J., de Jong, T., et al. 1996, *A&A*, 315, L361
- Watson, D. M., Leisenring, J. M., Furlan, E., et al. 2009, *ApJ Supplement*, 180, 84
- Westphal, A. J., Snead, C., Borg, J., et al. 2002, *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 855
- Westphal, A. J., Snead, C., Butterworth, A., et al. 2004, *Meteoritics and Planetary Science*, 39, 1375
- Wooden, D. H., Harker, D. E., Woodward, C. E., et al. 1999, *ApJ*, 517, 1034
- Wooden, D. H., Woodward, C. E., & Harker, D. E. 2004, *ApJ Letter*, 612, L77
- Zinner, E., McKeegan, K. D., & Walker, R. M. 1983, *Nature*, 305, 119
- Zolensky, M. E., Zega, T. J., Yano, H., et al. 2006, *Science*, 314, 1735

Sélection d'articles: Abstracts

First determination of the (re)crystallization activation energy of an irradiated olivine-type silicate.

Z. Djouadi, L. d'Hendecourt, H. Leroux, A.P. Jones, J. Borg, D. Deboffle and N. Chauvin.

Astronomy & Astrophysics, 2005, 440, 179-184.

Abstract

To study the evolution of silicate dust in different astrophysical environments we simulate, in the laboratory, interstellar and circumstellar ion irradiation and thermal annealing processes. An experimental protocol that follows different steps in the dust life-cycle was developed. Using the silicate 10 μm band as an indicator, the evolution of the structural properties of an ion-irradiated olivine-type silicate sample, as a function of temperature, is investigated and activation energy for crystallization is determined. The obtained value of $\{E_a\}/k = 41\,700 \pm 2400$ K is in good agreement with previous determinations of the activation energies of crystallization reported for non-ion-irradiated, amorphous silicates. This implies that the crystallization process is independent of the history of the dust. In particular, the defect concentration due to irradiation appears not to play a major role in stimulating, or hindering, crystallization at a given temperature. This activation energy is an important thermodynamical parameter that must be used in theoretical models which aim to explain the dust evolution from its place of birth in late type stars to its incorporation into young stellar environments, proto-stellar discs and proto-planetary systems after long passage through the interstellar medium.

The origin of GEMS in IDPs as deduced from microstructural evolution of amorphous silicates with annealing

C. Davoisne, **Z. Djouadi**, H. Leroux, L. d'Hendecourt, A. Jones and D. Deboffle , **2006**,

Astronomy & Astrophysics, 2006, 448, L1-L4.

Abstract

Aims. We present laboratory studies of the micro-structural evolution of an amorphous ferro-magnesian silicate, of olivine composition, following thermal annealing under vacuum.

Methods. The amorphous silicate was prepared as a thin film on a diamond substrate. Annealing under vacuum was performed at temperatures ranging from 870 to 1020 K. After annealing the thin films were extracted from the substrate and analysed by transmission electron microscopy to infer their microstructural and compositional evolution.

Results. Spheroidal metallic nano-particles (2-50 nm) are found within the silicate films, which are still amorphous after annealing at 870 K and partially crystallized into forsterite for annealing up to 1020 K. We interpret this microstructure in terms of a reduction of the initial amorphous silicate FeO component, because of the carbon-rich partial pressure in the furnace due to pumping mechanism. Annealing in a controlled oxygen-rich atmosphere confirms this interpretation.

Conclusions. The observed microstructures closely resemble those of the GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulphides) found in chondritic IDPs (Interplanetary Dust Particles). Since IDPs contain abundant carbonaceous matter, a solid-state reduction reaction may have occurred during heating in the hot inner regions of the proto-solar disc. Related to this, the presence of forsterite grains grown from the amorphous precursor material clearly demonstrates that condensation from gaseous species is not required to explain the occurrence of forsterite around young protostars and in comets. Forsterite grains in these environments can be formed directly in the solid phase by thermal annealing of amorphous ferro-magnesian silicates precursor under reducing conditions. Finally, locking iron as metallic particles within the silicates explains why astronomical silicates always appear observationally Mg-rich.

Ferromagnetic inclusions in silicate thin films: insights into the magnetic properties of cosmic grains

Z. Djouadi, J. Gattacceca, L. d'Hendecourt, P. Rochette, A.P. Jones, C. Davoisne, H. Leroux and J. Borg.

Astronomy & Astrophysics, 2007, 468. L9-L12.

Abstract

Context: We recently reported the formation of metallic inclusions in an amorphous and/or crystalline silicate matrix by thermal annealing of thin films in reducing atmospheres. Experimentally, the obtained microstructures closely resemble those of the glass with embedded metal and sulphides (GEMS) found in chondritic porous interplanetary dust particles (CP IDPs). We present here the magnetic properties of these synthetic samples.

Aims: In this paper we report the detection and measurements of single domain and super paramagnetic ferromagnetic inclusions (SD/SP) in annealed silicate thin films of composition analogous to interstellar silicates and discuss the implications for the alignment of cosmic grains in astrophysical environments, in the presence of weak magnetic fields.

Methods: We investigate the magnetic properties of synthesized laboratory silicate samples by measuring their magnetization when subjected to a given magnetic field. The measurements were performed at different temperatures including those compatible with interstellar dust.

Results: The high values of remanent magnetization at saturation obtained in this work suggest the ability of our samples to indefinitely maintain a significant magnetization which may contribute to their alignment in weak magnetic fields.

Conclusions: From our laboratory experimental simulation we propose that interstellar grains contain iron in form of nm-sized metallic beads. This can explain the non-detection of iron in interstellar grains. These inclusions could play a role in the alignment of grains. We propose a possible scenario for the magnetization of the cosmic grains and give a minimum value for the magnetic susceptibility for GEMS.

In-situ Fe XANES of extraterrestrial grains trapped in aerogel collectors: An analytical test for the interpretation of Stardust samples analyses

F. Grossemy, J. Borg, **Z. Djouadi**, A. Simionivici, L. Lemelle, D. Eichert, D. Deboffle, A.J. Westphal and C.J. Snead ;

Planetary and Space Science, 2007, Volume 55, Issue 7-8, p. 966-973

Abstract

On 15 January 2006, the NASA Stardust Capsule Sample Return came back to Earth with its load of cometary and contemporary interstellar grains trapped in aerogel collectors. These cometary grains are the first samples of known parent body and their study in the laboratory will give new clues on the nature of the cometary materials. Using Synchrotron X-ray Microscopy (SAXM), some analogues of Stardust's samples were analysed. The aim was to develop an analytical protocol and to study the effects of the slowing down of hypervelocity particles into aerogel on the physical and chemical properties of the collected grains. Our samples originate either from the NASA Orbital Debris Collection Experiment (ODCE) deployed outside the MIR station, or from light gas gun shots of Allende meteorite grains into aerogel at velocities of 6 km/s. They consist of grains trapped in pieces of aerogel, a few hundreds of microns large. Using synchrotron X-ray microbeam, micro-fluorescence mappings and X-ray absorption near-edge structure (XANES) spectra were performed, bringing information on elemental analysis, repartition and speciation of Fe in our samples. In particular, the XANES studies obtained at the iron K-edge show that iron is present in different oxidation states in the samples, rather in a ferric form at the track entrance while rather in a ferrous form at the end of the track as well as in the final grain. The tests performed on the Allende meteorite dust grains for which the $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio is a priori known, tend to show that the final particle presents the same oxidation state as the initial incident one, a very encouraging clue for the validity of the future interpretation of Stardust samples analyses.

Combined micro-Raman, micro-infrared, and field emission scanning electron microscope analyses of comet 81P/Wild 2 particles collected by Stardust

Rotundi, A.; Baratta, G. A.; Borg, J.; Brucato, J.R.; Busemann, H.; Colangeli, L.; D'Hendecourt, L.; **Djouadi, Z.**; Ferrini, G.; Franchi, I.A.; Fries, M.; Grossemy, F.; Keller, L. P.; Mennella, V.; Nakamura, K.; Nittler, L. R.; Palumbo, M. E.; Sandford, S. A.; Steele, A.; and Wopenka, B.

Meteoritics & Planetary Science, 2008, Vol. 43, Issue 1, p.367-397

Abstract

We report combined micro-infrared, micro-Raman, and field emission scanning electron microscope (FESEM) analyses of particles collected by the Stardust spacecraft during its flyby of comet 81P/Wild 2 on 2 January 2004 and successfully returned back to Earth on 15 January 2006. We present mid-infrared (IR) spectra of six of these particles. The CH_2/CH_3 ratios inferred from the infrared data are greater than those seen in organics in the diffuse interstellar medium, possibly indicating the presence of longer or less branched aliphatic chains. The micro-Raman data offer insights into the state of the order of the carbonaceous component present in the particles. Raman parameters for most of the particles span a similar range to that observed in interplanetary dust particles (IDPs) and the most primitive meteorites. Both the IR and Raman data imply the presence of a very labile carbonaceous component. Hydrated silicates may be present in two particles of Track 35, one of which may also contain carbonates, but further investigations with other techniques need to be performed to confirm these findings. In some cases, the analyses are difficult to interpret because of the presence of compressed aerogel mixed with the grains.

Hydroxyl radical production and storage in analogues of amorphous interstellar silicates: a possible "wet" accretion phase for inner telluric planets

Z. Djouadi, F. Robert, L. d'Hendecourt, S. Mostefaoui, H. Leroux, A. Jones et J. Borg.

Astronomy & Astrophysics, 2011, 531, A96, p.1-9

Abstract

Context. Interstellar silicate grains are thought to be amorphized by interaction with high- and low-energy particle interactions in astrophysical environments. In addition, low energy (a few keV) particles will implant atoms within the grains.

Aims: In this paper we experimentally investigate the consequence of the implantation of H^+ at low irradiation energies into analogues of interstellar silicate grains, and look for the formation of hydroxyl radicals within the silicate matrix.

Methods: Thin amorphous silicate films (~100 nm) were sequentially irradiated with H^+ ions at low energies (3.5, 2.5 and then 1.5 keV) ensuring an implantation of the ions through the full depth of the films. The fluences used, 3×10^{16} , 10^{17} and $3 \times 10^{17} H^+/cm^2$, are compatible with those expected in shocks in the interstellar medium. We used infrared spectroscopy to monitor and quantify the OH band evolution after irradiation. In order to distinguish the newly formed OH groups from those originating from unavoidable atmospheric contamination, the D/H depth ratios were measured with a NanoSIMS ion microprobe.

Results: An increase in the OH band strength in the infrared spectra after irradiation reveals the formation of OH bonds within the irradiated silicate thin films. NanoSIMS measurements of the D/H signature in the region of ion implantation show that the newly-formed OH groups make up about 40% of the observed OH band in the IR, the rest are due to an atmospheric hydroxylation of the sample. Only about 2% of the incident ions lead to OH bond formation and, at most, the irradiated silicates retain about 3% of the incident protons as OH groups within their structure.

Conclusions: Our laboratory experimental simulations show a possible production and storage of hydroxyl radicals in amorphous laboratory silicates. In the astrophysical context, such OH radicals, strongly bonded to pre-accretion material, could constitute a non negligible reservoir of -OH, thus water. These experimental results allow us to revisit and reinstate the hypothesis of a possible "wet" accretion of the telluric planets early in the history of the formation of the Solar System.

Hydrocarbon materials of likely interstellar origin from the Paris meteorite

S. Merouane, **Z. Djouadi**, L. Le Sergeant d'Hendecourt, B. Zanda, J. Borg,

The Astrophysical Journal, 2012, ApJ, Volume 756, Issue 2, article id. 154

Abstract

We have examined some grains from the Paris meteorite through infrared and Raman micro-spectroscopy in order to investigate their carbonaceous and mineralogical components. In the mid- as well as far-infrared regions, the raw and global spectra of Paris resemble those of CM meteorites. However, we have obtained rather peculiar infrared spectra for some aromatic-rich micron-sized fragments of Paris displaying a very good match between its organic signatures both in the 3.4 μm and 6 μm regions, and the ones observed from the diffuse interstellar medium infrared sources toward the Galactic center, suggesting that this meteorite may have indeed preserved some organic matter of interstellar origin.

Curriculum Vitae

DJOUADI-BOUALI, Zahia
Née le 27 Juillet 1967 en Algérie.
Mariée, 1 enfant
Maître de Conférences, Classe Normale

Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS),
Université Paris-Sud 11, Bâtiment 121, 91405
ORSAY Cedex France.
zahia.djouadi@ias.u-psud.fr

1. Titres Universitaires

- 1985 :** Baccalauréat série Maths avec mention A.B, Algérie.
1989: Diplôme d'Etudes Supérieures DES (Algérie). (équivalent à Bac+4)
1990-1992: Thèse de Magister (équivalent 3^{ème} cycle) à l'université d'Alger,
1997-2000: Doctorat de l'université Paris-Sud 11, Orsay,

2. Parcours

Depuis 01/09/02 : Maître de conférences classe Normale à l'IAS.

15/05/01-31/08/02 : Cadre au CERMA (Centre d'Etudes et de Recherches en Mécanique et Automatismes). En poste à temps partiel, j'ai été chargée de missions auprès des PME et PMI du Val-de-Marne dans le cadre du transfert de technologie. En parallèle, PAST (à temps partiel) à l'IUP de Cachan dans le département de Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII).

01/02/01-14/05/01: Stage postdoctoral au CSNSM (Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse) d'Orsay.

De 1993 à 1997: Maître assistante en physique à l'université d'Alger (USTHB).

1990 à 1992: Enseignement à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP) et à l'Université d'Alger (USTHB : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène).

3. Activités d'enseignements

Voici une liste des enseignements que j'ai eu à effectuer depuis mon recrutement en tant que Maître de conférences à Paris-Sud.

- TD de physique en PCEM1
- TDs et TPs de phys 103 (MPI, PCST) en L1
- TP ondes mécaniques L2
- Cours en amphitheâtre d'ondes mécaniques en L2 (étudiants parcours PC et C).

- Cours-TD en PCSO (radioactivité en S1 et ondes en S2).
- TDs physique nucléaire en M1 (PAM)
- TP de physique nucléaire M1 physique fondamentale.
- TP de méthodologie en M2 (encadrement de binômes d'étudiants de M2 Recherche Astrophysique et Astronomie).

4. Activités liées à l'administration

- Membre élue à la Commission de Spécialistes d'Etablissement (CSE) section 34, de 2004 à la fin 2008.
- Membre de la Commission Consultative de Spécialistes de l'Université (CCSU) section 29-34 depuis 2009.
- Vice-présidente B de la CCSU 29-34 depuis décembre 2012.
- Membre élue représentante des chercheurs et enseignants-chercheurs au Conseil de Laboratoire de l'IAS, (Période 2006 – 2010).
- Responsable Physique du parcours PC (Physique-Chimie), L2 de l'université Paris-Sud.
- Participation à plusieurs groupes de travail dans le cadre de la réflexion menée par l'UFR sur notre offre de formation de Licence, à définir pour les prochaines maquettes d'habilitation.

5. Activités liées à la recherche

- Reviewer publication (PSS : *Planetary and Space Science*)
- Membre des organisateurs des séminaires scientifiques de l'IAS (entre 2006 et 2009).
- Membre du SFT (*Science Facility Team*) de l'expérience MUE (*Miller-Urey in space Experiment*) de l'ESA (*European Space Agency*) programmée sur la station spatiale internationale (ISS) vers novembre 2013. Je suis responsable de l'analyse Infrarouge des échantillons constitués de billes de silicates, je dois les caractériser avant leur départ à l'ISS (évaluation de possibles problèmes de contamination organique) et à leur retour sur Terre (évaluation du contenu organique lié à la simulation effectuée dans l'ISS).
- Responsable (en remplacement de J. Borg partie à la retraite) de la collection des échantillons extraterrestres lunaires et cométaires détenus au sein de notre laboratoire.
- Collaborations nationales et coordination dans le cadre de financements obtenus auprès du PNP (Programme National de Planétologie) pour mes travaux de recherches sur les analogues des silicates interstellaires. Ces travaux ont nécessité des collaborations avec l'UMET, (Unité Matériaux et Transformations) de Lille, avec le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) d'Aix en Provence, le MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle) de Paris.

6. Encadrement

- Encadrement d'une thèse de doctorat en cours, doctorante S. Merouane, soutenance prévue mi-octobre 2013.
- Encadrement du stage de Master 2^{ème} année Astrophysique de S. Merouane, Avril à fin juin 2010/
- Co-encadrement (~40%) de la thèse de F. Grossemy (2004-2008).

- Co-encadrement du stage de DEA de F. Grossemy (Mars-juin 2004),
- Encadrement de binômes d'étudiants en M2 (Master Recherche Astronomie et Astrophysique) dans le cadre de leur stage de méthodologie en laboratoire.
- Encadrement de différents stages de niveau L3, M1.

7. Liste de publications à comité de lecture

- 1- "*Hydrocarbon materials of likely interstellar origin from the Paris meteorite*"
S. Merouane, **Z. Djouadi**, L. Le Sergeant d'Hendecourt, B. Zanda, J. Borg, **2012**, ApJ, 756, p154.
- 2- "*Hydroxyl radical production and storage in analogues of amorphous interstellar silicates: a possible "wet" accretion phase for inner telluric planets*"
Z. Djouadi, F. Robert, L. d'Hendecourt, S. Mostefaoui, H. Leroux, A. Jones et J. Borg, **2011**, Astron. & Astrophys., 531, A96, p.1-9
- 3- "*Mid-IR, Far-IR, Raman micro-spectroscopy, and FESEM-EDX study of IDP L2021C5: Clues to its origin*"
Brunetto, R., Borg, J., Dartois, E., Rietmeijer, F.J.M., Grossemy, F., Sandt, C., Le Sergeant d'Hendecourt, L., Rotundi, A., Dumas, P., **Djouadi, Z.**, Jamme, F., **2011**, Icarus, Vol 212, Issue2, p.896-910
- 4- "*Discovery of non-random spatial distribution of impacts in the Stardust cometary collector*"
Westphal, A. J.; Bastien, R. K.; Borg, J.; Bridges, J.; Brownlee, D. E.; Burchell, M. J.; Cheng, A. F.; Clark, B. C.; **Djouadi, Z.**; Floss, C.; Franchi, I.; Gainsforth, Z.; Graham, G.; Green, S. F.; Heck, P. R.; Horányi, M.; Hoppe, P.; Horz, F. P.; Huth, J.; Kearsley, A.; Leroux, H.; Marhas, K.; Nakamura-Messenger, K.; Sandford, S. A.; See, T. H.; Stadermann, F. J.; Teslich, N. E.; Tsitrin, S.; Warren, J. L.; Wozniakiewicz, P. J. and Zolensky, M. E. , **2008** , MAPS Vol.31, Issue 1, p.415-429.
- 5- "*Chemical and morphological evolution of a silicate surface under low-energy ion irradiation*"
C. Davoisne, H. Leroux, M. Frère, J. Gimblot, L. Gengembre, **Z. Djouadi**, V. Ferreiro, L. d'Hendecourt, and A. Jones, **2008** , Astron. & Astrophys., 482. 541-548.
- 6- "*Combined micro-Raman, micro-infrared, and field emission scanning electron microscope analyses of comet 81P/Wild 2 particles collected by Stardust*"
Rotundi, A.; Baratta, G. A.; Borg, J.; Brucato, J. R.; Busemann, H.; Colangeli, L.; D'Hendecourt, L.; **Djouadi, Z.**; Ferrini, G.; Franchi, I. A.; Fries, M.; Grossemy, F.; Keller, L. P.; Mennella, V.; Nakamura, K.; Nittler, L. R.; Palumbo, M. E.; Sandford, S. A.; Steele, A.; and Wopenka, B., **2008**, Meteoritics & Planetary Science, vol. 43, Issue 1, p.367-397.
- 7- "*Ferromagnetic inclusions in silicate thin films: insights into the magnetic properties of cosmic grains*"
Z. Djouadi, J. Gattacceca, L. d'Hendecourt, P. Rochette, A.P. Jones, C. Davoisne, H. Leroux and J. Borg, **2007** , Astron. & Astrophys., 468. L9-L12.

- 8- *“In-situ Fe XANES of extraterrestrial grains trapped in aerogel collectors: An analytical test for the interpretation of Stardust samples analyses”*
F. Grossemy, J. Borg, **Z. Djouadi**, A. Simionivici, L. Lemelle, D. Eichert, D. Deboffle, A.J. Westphal and C.J. Snead, **2007**, Planetary and Space Science, Vol. 55, Issues 7-8.
- 9- *“Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope”*
D. Brownlee et al., **2006**, Science, V314, Issue 5806, p.1711.
- 10- *“Impact Features on Stardust: Implications for Comet 81P/Wild 2 Dust”*
F. HÖRZ et al., **2006**, Science, V314, Issue 5806, p.1716.
- 11- *“Organics Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft”*
S. A. Sandford et al., **2006**, Science, V314, Issue 5806, p. 1720.
- 12- *“Infrared Spectroscopy of Comet 81P/Wild 2 Samples Returned by Stardust”*
L.P Keller et al., **2006**, Science, V314, Issue 5806, p. 1728.
- 13- *“Elemental Compositions of Comet 81P/Wild 2 Samples Collected by Stardust”*
G.J Flynn et al., **2006**, Science, V314, Issue 5806, p. 1731.
- 14- *“The origin of GEMS in IDPs as deduced from microstructural evolution of amorphous silicates with annealing”*
C. Davoisne, **Z. Djouadi**, H. Leroux, L. d’Hendecourt, A. Jones and D. Deboffle , **2006**, Astron. & Astrophys. 448, L1-L4.
- 15- *“Silicate dust: from observations to the laboratory”*
Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics Eds : D. Barret, F. Casoli, G. Lagache, A. Lecavelier, L. Pagani, **2006**, p.577.
- 16- *“Microstructural study of micron-sized craters simulating Stardust impacts in Aluminium 1100 targets”*
H. Leroux, J. Borg, D. Troadec, **Z. Djouadi** and F. Hörz, **2006**, MAPS, 41, 181-196.
- 17- *“Synchrotron X-rays in situ analysis of extraterrestrial grains trapped in aerogel”*
Borg, J.; **Djouadi, Z.**; Grossemy, F.; Eichert, D.; Martinez-Criado, G.; Westphal, A. J.; Deboffle, D.; Snead, C. J.; Somogyi, A., **2006**, Advances in Space Research, Volume 38, Issue 9, p. 2068-2074 .
- 18- *“First determination of the (re)crystallization activation energy of an irradiated olivine-type silicate”*
Z. Djouadi, L. d’Hendecourt, H. Leroux, A.P. Jones, J. Borg, D. Deboffle and N. Chauvin, **2005**, Astron. & Astrophys., 440, 179-184.
- 19- *“FTIR and Raman analyses of the Tagish Lake meteorite: Relationship with the aliphatic hydrocarbons observed in the Diffuse Interstellar Medium”*
Matrajt, G.; Borg, J.; Raynal, P. I.; **Djouadi, Z.**; d’Hendecourt, L.; Flynn, G.; Deboffle, D., **2004**, Astron. & Astrophys, V.416, p. 983.