



HAL
open science

Méthodologie pour la recherche de vie sur Mars

Frédéric Foucher

► **To cite this version:**

Frédéric Foucher. Méthodologie pour la recherche de vie sur Mars. Physique [physics]. Université d'Orléans, 2017. tel-03572179

HAL Id: tel-03572179

<https://hal.science/tel-03572179>

Submitted on 14 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Centre de Biophysique Moléculaire

HDR présentée par :

Frédéric FOUCHER

soutenue le : 26/01/2017

Discipline/ Spécialité : Physique/Exobiologie

Méthodologie pour la recherche de vie sur Mars

RAPPORTEURS :

- Muriel Gargaud** Directrice de recherche CNRS au Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux
- Jan Jehlička** Professeur et directeur de l'Institut de Géochimie, Minéralogie et Ressources Minérales à la faculté des sciences *Charles University* de Prague, République Tchèque
- Didier Gourier** Professeur à l'Institut de Recherche de Chimie de Paris, Chimie ParisTech

EXAMINATEURS :

- Mark van Zuilen** Chargé de recherche CNRS à l'Institut de Physique du Globe de Paris
- Michel Viso** Vétérinaire, responsable programme exobiologie et correspondant programme ExoMars au CNES
- Patrick Simon** Directeur de recherche CNRS au laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux: Haute Température et Irradiation d'Orléans
- Frances Westall** Directrice de recherche CNRS au Centre de Biophysique Moléculaire d'Orléans
- André Brack** Chercheur honoraire CNRS au Centre de Biophysique Moléculaire d'Orléans

Remerciements

Je souhaite avant tout remercier Jean-Claude Beloeil et Eva Jakab Toth, directeur puis directrice du Centre de Biophysique Moléculaire, pour m'avoir toujours soutenu dans mon travail et m'avoir offert la possibilité de travailler dans d'excellentes conditions.

Je tiens également à remercier Muriel Gargaud, directrice de recherche CNRS au Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, Jan Jehlička, professeur et directeur de l'Institut de Géochimie, Minéralogie et Ressources Minérales à la faculté des sciences Charles University de Prague, et Didier Gourier, professeur à l'Institut de Recherche de Chimie de Paris, Chimie ParisTech, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir acceptés d'en être les rapporteurs. Je remercie aussi Mark van Zuilen, chargé de recherche CNRS à l'Institut de Physique du Globe de Paris, Michel Viso, responsable du programme exobiologie et correspondant programme ExoMars au CNES et Patrick Simon, directeur de recherche CNRS au laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux: Haute Température et Irradiation d'Orléans pour avoir accepté d'en être examinateurs. Je les remercie également pour toutes les discussions passionnantes que nous avons eues ensemble.

Je souhaite bien évidemment remercier Frances Westall, directrice de l'équipe d'exobiologie au CBM, qui m'a énormément appris et toujours soutenu depuis mon arrivée dans l'équipe en 2007. Elle m'a fait découvrir et m'a formé à ce domaine passionnant qu'est l'exobiologie et m'a permis d'en faire mon travail. C'est un réel plaisir que de faire de la recherche avec elle.

Je remercie également André Brack pour m'avoir initié aux problématiques de l'origine de la vie, de la chimie prébiotique et de la recherche de vie extraterrestre. Il m'a aussi aidé et incité à diffuser la science et à communiquer auprès du grand public. Je suis particulièrement honoré de partager le même bureau que lui depuis maintenant près de dix ans.

Bien évidemment, je remercie tous les membres actuels et passés de l'équipe d'exobiologie avec qui ça toujours été un plaisir de travailler, à savoir Keyron Hickman-Lewis, Avinash-Vicholous Dass, Frédéric Gaboyer, Thomas Georgelin, Axelle Hubert, Marylène Bertrand, Annie Chabin, François Orange, Kathy Campbell et Barbara Cavalazzi ainsi que Florian Becette et Liane Loiselle, même s'ils ne sont pas restés longtemps dans l'équipe. Je remercie plus particulièrement Nicolas Bost avec qui j'ai partagé mon bureau et collaborer sur de nombreux projets pendant plus de 3 ans et qui m'a énormément appris dans le domaine de la géologie. Je le remercie également pour sa bonne humeur et pour toutes les tranches de rigolades qu'on a eues ensemble.

L'exobiologie c'est avant tout l'interdisciplinarité. Pour progresser, il est impératif de s'ouvrir aux autres domaines, depuis la géologie à la biologie en passant par l'astronomie, la chimie, l'ingénierie... Même si j'ai eu la chance de diversifier mes connaissances, il me paraît totalement impossible de travailler seul. Heureusement, le travail collaboratif est au centre de la recherche telle que je la conçois. Je remercie donc Guillaume Guimbretière et Ramzi Ammar avec qui je collabore dans la bonne humeur depuis plusieurs années maintenant. Je remercie aussi toutes les personnes avec qui j'ai, ou j'ai eu, la chance de collaborer et qui m'ont beaucoup appris. Fernando Rull Pérez et Guillermo Lopez Reyes avec qui j'ai travaillé sur le Raman appliqué à l'exploration martienne. Jean-Michel Bény,

Remerciements

qui m'a initié à la spectroscopie Raman. Sylvain Janiec, Nicole Lebreton, Aïcha Fonte, Pascal Perron, Pascale Chazalnoël, Frédéric Courtade et Michel Villenave pour leur participation et leur implication dans le projet LithoSpace. Philippe Martin, Jean-Luc Josset, Marie Josset, Audrey Souchon, Antoine Verhaeghe, Maitine Bergounioux, Sandrine Villette et André Debus pour tout le travail effectué sur CLUPI et CaliPhoto. Stéphanie Sorieul, pour son accueil et sa disponibilité lors de nos expériences sur la plateforme AIFIRA du CENBG. Annie Richard et Audrey Sauldubois pour les observations au centre de microscopie électronique de l'Université d'Orléans. Pour les différentes études menées dans le domaine de la Terre primitive, je remercie Pascale Gautret, Morgane Ledevin, Mathilde Bourbin, Claire Cousins, Axel Hofmann, Jean-Gabriel Bréhéret, Terence Kee, Frédéric Delarue et Claire Ramboz. Pour celles menées dans le domaine de la recherche de vie sur Mars je remercie Jorge Vago, Félipe Gomez, René Demets, Damien Loizeau et Jean-Pierre Paul de Vera. Enfin, pour les nombreuses autres études auxquelles j'ai collaboré, je remercie également Philippe Chevremont, Nicolas Charles et Pierre Poupart (étude du cratère d'impact de Rochechouart), Xavier Bourrat (étude AFM/Raman de la nacre), Malgorzata Moczydlowska-Vidal (étude de fossiles de l'Ediacarien), Cédric Pilorget (travail sur MicrOmega), Damien Devismes (travail en LIBS), Simone De Angelis (travail sur Ma_MISS), Zsuzsanna Kapui et Akos Kereszuturi (étude de la morphologie de grains volcaniques altérés), Annalisa Ferretti et Fabio Messori, (étude de fossiles du Silurien), Diego Guido (étude Raman de geysirites de Patagonie), Hervé Cottin et Kafila Saiagh (étude par AFM des échantillons Expose), Abder El Albani (étude de fossiles du Gabon), Elizabeth Chacon (étude différents fossiles), Fabrice Gaillard, Jean-Louis Auguste, Alain Meunier et Sabine Petit (réalisation et étude de basaltes artificiels), Sétareh Rad (étude de la zone critique), Aurélien Canizarès (analyses Raman au CEMHTI), Olivier Rouer et Ida Di Carlo (analyses en microscopie électronique) et David Troadec (préparation de coupes FIB à l'IEMN). Je remercie aussi Antoine Coulon, Jacques Poirier, Sandra Ory et Emmanuel Autissier Pour leur aide lors de mes travaux au CEMTHI (découpe d'échantillons et utilisation de fours).

Je remercie aussi les membres du projet EURO-CARES et plus particulièrement Jutta Zipfel, Caroline Smith, Sara Russell, Aurore Hutzler, Ludovic Ferrière, John Robert Brucato, Luigi Folco et Vinciane Debaille.

Je remercie également David Albertini, Agnès Piednoir, et Hubert Klein du CoPil du réseau RéMiSoL, Isabelle Paintrand, Isabelle Guillot, Jean-François Bergamini, Lorena Klein, Adeline Mallet, Astrid Canivet et Sandrine Lecart du groupe de travail sur le repositionnement, Vanessa Tocut et Catherine Clerc de la mission pour l'interdisciplinarité et Mahmoud Idir du réseau APOLO.

Un grand merci également à Jan Toporski, Maxime Tchaya, Thomas Deing et Andrea Jauss de chez WITec pour leur disponibilité, leur compétence et leur sympathie. Pour les mêmes raisons, je remercie également Nicolas Tcherbak de chez LOT.

Je remercie tous les étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer et de qui je garde un excellent souvenir : Joël Le Galudec, Aurélie Courtois, Etienne Marceau, Thibault Dequillbecq, Philipp Rüssmann, Jianyu Li, Thomas Platel et Charlotte Hodier.

En tant que responsable de la plateforme AFM-Raman du CBM j'ai également pu travailler sur des problématiques très variées souvent éloignées de l'exobiologie. Pour m'avoir initié à leur domaine scientifique je remercie donc Anthony Delalande avec qui on a cherché, et réussi, à coincer la bulle pour faire de l'imagerie AFM, Ivana Martinic (étude Raman de cellules HeLa), Sara Lacerda (étude

AFM de liposomes), Aurore Dissaux et Elise Lupo (étude Raman de la peau), Vitor Gaspar, Sohail Aktar, Chantal Pichon et Patrick Midoux (étude AFM de polyplexes), Hugues Raimbourg (analyse Raman d'inclusions fluides), Mohamed Bizi (analyses AFM d'imogolite), Alexandra Courtin Nomade (analyses Raman de roches riche en antimoine), Gérard Panczer (analyses Raman de powellite), Jean-Marc Malinge (analyse AFM d'oligonucléotides) et Claire Bény (analyse Raman de pigments issus de grottes ornées).

De manière générale je remercie tous les gens du CBM que j'ai côtoyés durant ces 10 années et notamment les gens de l'administration, et services technique et informatique du CBM pour leur disponibilité et leur efficacité : Patricia Legland, Nadia Bennacer, Justo Torres, Martial Bruneau, Christine Gabant, Brigitte Albert, Marie-Christine Perdereau, Isabelle Frappart, Thierry Artuso, Yannick Berteaux, Alain Boyer, Anne Braconnier ainsi que Michel Loncle, Nadège Perrier, Emmanuelle Rua, Christophe Dybal, François Magrangeas, Zorha Khaboshan, Maryvonne Pellé et Alisée Prevost.

De même, à la délégation, je tiens à remercier Florence Royer et Lynda Jeffrault du service communication, Mathieu Sammut et Thomas Rochette-castel du service valorisation, Fabien Peuch de la cellule contrats Europe, Mélissa Brinon et Jeanine Daubin pour leur aide lors de l'organisation de l'école CarboRaman, et Séverine Mousset du pôle achat, ainsi que Natacha Olivier, Gabriel Peyras et Laurent Maillard de la SATT Grand Centre.

Pour leur aide lors de l'organisation de l'école CarboRaman, qui restera pour moi une des conférences les plus marquantes de ces dernières années, je remercie aussi, en plus de Patrick Simon, Sylvie Bonnamy, Marie-Pierre Faugère, Nicole Raimboux, Anne-Marie Heuveline et Patrick Chambaret.

Enfin, pour toutes les discussions scientifiques (et pas que) que j'ai pu avoir avec eux ces dernières années, et m'en excusant par avance pour les personnes que j'aurais oubliées, je remercie Grégoire Danger, Jean-Pierre Lebreton, Cornelia Meinert, Luc Arnold, Fabien Stalport, Thomas Gautier, Louis le Sergeant d'Hendecourt, Antonio Lazcano, Robert Pascal, Patrick Tholot, Erwin Dehouck, Olivier Poch, Mohit Melwani Dswani, Mohamed Jebbar, Eric Hébrard, Annouck Ody, John Carter, Coralie Brassé, Laetitia Le Deit, Arya Udry, Anaïs Bardyn, Caroline Freissinet, Claudia Pacelli, Olivier Witasse, François Forget, Patrick Forterre, Christelle Briois, Laurent Thirkel, Andrew Steele, Delphine Nna Mvondo, François Civet, Gwenaél Jouannic, François Raulin, Jean-Pierre Bibring, Lena Noack, Lewis Dartnell, Louisa Preston, Marion Nachon, Boris Chauviré, Olivia Airault, Vassilissa Vinogradoff, Johanna Marin-Carbonne, Céline Brochier, Stéphane Tirard, François Poulet, Nicolas Mangold, François Andrieu, Sophie Dorizon, Pascaline François, Gaël Cessateur, Petra Schwendner, Philippe Labrot, Susanne Schroeder, Thomas Appéré, Ute Boettger, Zita Martins, Bernard Foing, Jim Cleaves, Stephan Fox, Claudio Maccone, Uwe Meierhenrich, Iuliia Myrgorodska, Emmanuelle Javaux, Véronique Dehant, Gloria Venegas, Philippe Nauny, Pierre De Marcellus et Ralf Moeller dans le domaine de l'exobiologie et de l'exploration martienne, Jean-Noël Rouzaud, Abdeltif Lahfid, Shiyamala Duraipandian, Christian Burlet, Ludovic Bellot-Gurlet, Jean Dubessy, Marie-Camille Caumon, Mathilde Faure, Marcos Pimenta, Encarnacion Raymundo-Piñero, Eric Quirico, Thibault Labbaye, Angéline D'Orlando, Lisseth Gavilan, Svetlana Buravleva et Pablo Sobron dans celui de la spectroscopie Raman (lors des conférences GeoRaman et CarboRaman notamment), et Aivo Lepland, Damien Do Couto, Flavien Choulet, Julie Machault, Annaelle Fantin Simonneau et Jérémy Jacob dans celui de la géologie.

Remerciements

Dans le cadre de mes interventions auprès du grand public j'ai également eu la chance de rencontrer des gens formidables, notamment à l'Astroclub d'Ouzouer-sur-Loire et au Club Vega d'Ollioules, que je tiens aussi à remercier ici, de même que Allain-Gérald Faux de la Maison pour la Science et Centre Science.

Enfin, je remercie bien évidemment ma femme Delphine et mes filles Méloé et Camille qui me soutiennent en m'apportant leur amour au quotidien.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	7
Avant-propos	9
1- Introduction.....	11
1.1- Les ingrédients de la vie	11
1.2- Les plus anciennes traces de vie sur Terre.....	12
1.3- Le recherche de vie sur Mars	14
1.4- Interaction entre les différentes études	16
2- L'expérience STONE 6.....	17
2.1- Les expériences STONE	17
2.2- Résultats de l'expérience STONE 6	18
2.3- Valorisation scientifique de l'étude	22
3- Etude de la matière carbonée de microfossiles par spectroscopie Raman	23
3.1- La spectroscopie Raman.....	23
3.2- Spectroscopie Raman des matériaux carbonés	25
3.3- Cartographie Raman de microfossiles	26
3.4- Valorisation scientifique de l'étude	28
4- Le signal Raman de minéraux métastables comme possible biosignature.....	31
4.1- Détection d'hydroxyapatite et de silice opaline par cartographie Raman	31
4.2- Analyses complémentaires	31
4.3- Origine de la silice « opaline »	33
4.5- Valorisation scientifique de l'étude	35
5- Effet du broyage sur les analyses Raman réalisées lors de la mission <i>ExoMars 2020</i>	37
5.1- La mission <i>ExoMars</i>	37
5.2- Analyse Raman d'échantillons broyés.....	39
5.3- Valorisation scientifique de l'étude	42
6- Utilisation d'analogues pour la préparation de missions spatiales.....	43
6.1- Le « Blind Test »	43
6.2- L'ISAR : une collection de roches analogues pour le test d'instruments spatiaux.....	43

6.3- Le projet <i>EURO-CARES</i>	44
6.4- Valorisation scientifique de l'étude	45
7- L'instrument <i>CLUPI</i> et le projet <i>CaliPhoto</i>	49
7.1- Le <i>Close-UP Imager</i> de la mission <i>ExoMars 2020</i>	49
7.2- La méthode <i>CaliPhoto</i>	50
7.3- Valorisation scientifique de l'étude	53
8- <i>LithoSpace</i>	55
8.1- Pétrographie par microscopie optique en lumière transmise	55
8.2- Le projet <i>LithoSpace</i>	56
8.3- Valorisation scientifique de l'étude	59
9- Bilan et perspectives	61
9.1- Bilan.....	61
9.2- Projets à court terme	61
9.3- Projets à long terme.....	63
Références.....	65
Annexe 1 - Curriculum vitae	73

Avant-propos

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il m'a semblé important de faire un petit retour sur mon parcours scientifique, à commencer par ma thèse de doctorat effectuée au sein du Laboratoire de Métallurgie Physique de Poitiers, sous la direction des professeurs Christophe Coupeau et Jérôme Colin, d'octobre 2004 à septembre 2007. Ma thèse avait pour sujet l'étude du décollement de films minces déformés, et plus particulièrement de l'effet du substrat sur ce phénomène. Dans un premier temps, j'ai réalisé des expériences de compression uni-axiale *in situ* sous microscopie à force atomique (AFM) afin d'induire et d'observer la formation de structures de cloquage simples appelées rides droites. Ces observations ont permis de valider des modélisations réalisées par Guillaume Parry, alors en thèse dans l'équipe, mettant en avant des effets importants de l'élasticité du substrat sur la contrainte critique de cloquage et sur la dimension des structures formées (Parry *et al.*, 2005a). Des tests de compression/relaxation ont également permis de mettre en évidence un phénomène de claquage (*i.e.* transition brutale) lors du passage d'une morphologie rectiligne à une morphologie en réseau de bulles, également modélisé par éléments finis (Parry *et al.*, 2005b). La majeure partie de ma thèse a été consacrée à l'étude de l'effet de la déformation plastique du substrat sur le phénomène de cloquage. En réalisant des tests de compression uni-axiale sur des monocristaux de fluorure de lithium recouverts de films minces métalliques *in situ* sous AFM, j'ai pu observer que les structures de cloquage se formaient au niveau des marches créées par l'émergence des dislocations depuis le substrat. J'ai expliqué et modélisé le phénomène par des calculs analytiques basés sur la théorie des plaques de Föppl (1907) et von Karman (1910), puis sur la théorie du délaminage développée notamment par Hutchinson et Suo (1992). Ces travaux ont donné lieu à deux articles (Foucher *et al.*, 2006 ; Foucher & Coupeau, 2007) ainsi qu'à un chapitre d'ouvrage (Foucher *et al.*, 2011a).

J'ai tenu ici à mentionner ce travail et les professeurs Christophe Coupeau et Jérôme Colin car ils m'ont appris à appréhender le travail de chercheur d'une manière générale, c'est-à-dire à m'approprier un sujet, faire la bibliographie associée, développer et mettre en place de nouveaux axes de recherche et enfin valoriser les résultats par le biais d'articles et de communications dans des congrès. Ce travail m'a également permis d'encadrer mes premiers stagiaires et d'enseigner à l'université. Enfin, c'est également à cette époque que j'ai acquis des compétences plus spécifiques dont la caractérisation de surfaces par AFM et la préparation d'échantillons (découpe, polissage, préparation de surface), compétences qui me sont toujours utiles dans le cadre de mes recherches actuelles en exobiologie.

A la suite de mon doctorat, j'ai rejoint l'équipe d'exobiologie dirigée par le Docteur Frances Westall au Centre de Biophysique Moléculaire, au CNRS, à Orléans, d'abord en tant que post-doctorant CNRS, du 1^{er} octobre 2007 au 30 septembre 2009, puis en tant qu'ingénieur de recherche

en contrat à durée déterminée, du 1^{er} octobre 2009 au 30 novembre 2010, et enfin comme ingénieur de recherche titulaire à partir du 1^{er} décembre 2010. Le sujet de post-doctorat proposé par l'équipe consistait à réaliser des analyses AFM et à développer la microscopie à force chimique (CFM) pour l'étude de microfossiles du précambrien. L'équipe disposait d'un AFM Veeco Dimension 3100 similaire à celui utilisé pendant ma thèse et c'est notamment mon autonomie sur ce système qui m'a permis d'être recruté sur ce poste. Cependant, il s'est très vite avéré que l'AFM et la CFM étaient peu adaptées à l'étude des échantillons concernés. Par contre, l'imagerie de spectroscopie Raman est rapidement apparue comme particulièrement pertinente. Je me suis donc formé à cette technique et un système WITec Alpha500 RA a été acquis par l'équipe en janvier 2009. Je me suis également formé à la microscopie optique sur le microscope Olympus BX51 disponible dans l'équipe. Ces trois instruments (AFM, Raman et microscope optique) ont alors été regroupés au sein d'une plateforme dont j'ai pris la responsabilité en juillet 2009. En tant que responsable de cette plateforme, j'ai participé à plusieurs travaux dans le domaine de la biologie et de la géologie qui ont donné lieu à plusieurs publications depuis 2007. Cependant, ne seront détaillés dans ce manuscrit que les travaux dans le domaine de l'exobiologie dont je suis le principal auteur ou pour lesquels ma participation a été particulièrement importante. L'ensemble de mes contributions scientifiques est néanmoins consultable dans mon *curriculum vitae* en annexe 1.

Afin de réaliser mon travail de recherche dans le domaine de l'exobiologie j'aurai été accompagné, formé et soutenu par Frances Westall et André Brack à qui je dois beaucoup. Ils m'ont aidé à m'intégrer à cette communauté scientifique et à m'approprier des notions dans des domaines aussi variés que la géologie, la micropaléontologie, la planétologie, l'exploration spatiale, la chimie prébiotique et interstellaire ou encore l'astronomie. Grâce à Frances, j'ai réellement découvert ce que signifiait la recherche collaborative et transdisciplinaire que j'espère ce manuscrit mettra en valeur.

Au final, ce mémoire m'offre l'opportunité d'exposer ma contribution scientifique à l'exobiologie depuis 2007. Durant ces neuf années j'aurai eu l'occasion de me pencher sur différentes problématiques du domaine au travers d'études variées, depuis le test de la survie de roches sédimentaires lors de l'entrée atmosphérique et des possibles microfossiles qu'elles pourraient contenir, au développement d'instrument spatiaux, en passant par l'analyse de microfossiles carbonés par spectroscopie Raman. Malgré la grande variété de ces travaux, je m'efforcerais de les présenter sous la forme d'un ensemble cohérent, uni par des liens logiques, tant sur le plan scientifique que technique. Enfin, afin de conserver une taille raisonnable à ce manuscrit, il ne me sera pas possible de décrire en détails les différentes études. Le lecteur intéressé pourra cependant se référer aux publications dont les références seront mentionnées à chaque fin de chapitre.

1- Introduction

L'exobiologie s'intéresse à l'origine de la vie et son évolution, sur Terre et ailleurs dans l'univers. De cette problématique découle une multitude de questions : Comment définit-on la vie ? Quels étaient les ingrédients disponibles lorsque la vie est apparue sur Terre ? Comment et dans quelles conditions ces briques se sont-elles assemblées pour former les premiers organismes vivants ? Ces conditions sont-elles réunies ailleurs dans l'Univers et si oui, la vie est-elle unique à la Terre ?...

L'exobiologie apparaît donc comme un domaine transdisciplinaire par excellence qui regroupe des géologues, des chimistes, des astronomes, des physiciens, des biologistes, des ingénieurs, des philosophes...

1.1- Les ingrédients de la vie

La vie sur Terre étant le seul exemple connu à ce jour, elle sert de référence à l'exobiologie pour définir la vie, ses caractéristiques, et les ingrédients et conditions nécessaires à son apparition et à son développement. Ainsi, on définit comme vivant toute entité capable d'autoréplication et d'évolution Darwinienne (Lazcano, 2011 ; Ruiz-Mirazo & Moreno, 2011). Pour des raisons de chimie et de physique (tétravalence, hybridations, énergie de liaison...), il est probable que seul le carbone permet de former des molécules suffisamment complexes et variées pour constituer des êtres vivants. La vie artificielle basée sur l'informatique et la robotique étant le fruit de la vie organique elle n'est considérée que de manière secondaire. Il est ainsi généralement admis que toute vie est probablement basée sur la chimie organique et notamment les éléments C, H, N, O ainsi que P et S (Brack, 2001). Le domaine de la chimie qui s'intéresse à la complexification des molécules organiques ayant conduit à l'émergence des premiers êtres vivants est la chimie prébiotique. Il ne faut pas voir l'apparition de la vie comme un événement bien défini temporellement mais plutôt comme une frontière floue dans un continuum entre chimie abiotique et biologique (de Duve, 1995).

Les premières hypothèses sur l'origine de la vie par complexification des molécules chimiques dans l'atmosphère de la Terre primitive furent émises par Alexander Oparin en 1924 puis confortées par la fameuse expérience de Urey-Miller en 1953 (Miller, 1953 ; Brack, 2013). Lors de cette expérience, en faisant traverser un mélange de gaz (H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 , CO) par un arc électrique représentant des éclairs dans l'atmosphère de la Terre primitive, Stanley Miller réussit à former des acides aminés, dont la glycine, un des 20 acides aminés protéinogènes standards (*i.e.* entrant dans la composition des protéines utilisées par les êtres vivants). Depuis, de nombreuses recherches ont été réalisées, montrant notamment que l'atmosphère de la Terre primitive contenait probablement très peu de méthane. En reproduisant l'expérience avec ces nouvelles données, la synthèse d'acides aminés est beaucoup moins importante. Quoiqu'il en soit, cette expérience marque réellement le début de la chimie prébiotique et de l'exobiologie en générale.

Des molécules organiques ont pu également se former au fond des océans, au niveau des fumeurs noirs, par des réactions de Fischer-Tropsch (de Ronde & Ebbesen, 1996). L'atmosphère et les sources chaudes sous-marines constituent donc les sources endogènes de matière organique à laquelle il faut ajouter l'apport exogène venu de l'espace. En effet, de nombreuses molécules organiques ont été détectées dans le milieu interstellaire par spectroscopie (Dickens *et al.*, 2001) et les expériences en laboratoire montrent qu'il s'en forme une grande variété dans les glaces (e.g. Danger *et al.*, 2013 ; Meinert *et al.*, 2016). On en retrouve également dans les météorites (la météorite de Murchinson contient plusieurs milliers de molécules organiques différentes, notamment 70 acides aminés dont 8 protéinogènes, Schmitt-Koppelin *et al.*, 2010), ou encore dans les comètes, comme montré récemment lors de la mission Rosetta (Altwegg *et al.*, 2016).

Les chimistes considèrent que les premiers « systèmes vivants » se sont formés par une suite de réactions chimiques impliquant ces différentes molécules. Pour que ces réactions se fassent, il est maintenant bien admis que l'eau liquide a joué un rôle essentiel, du fait notamment de ses propriétés chimiques exceptionnelles (Brack, 1993 ; 2001). La présence de substrats minéraux semble également nécessaire pour permettre la complexification des molécules (Orgel, 1998). Enfin, il faut une ou plusieurs sources d'énergie pour permettre les réactions chimiques. Au final, les chimistes spécialisés cherchent donc à complexifier des molécules organiques en les faisant réagir dans de l'eau en contact avec des substances minérales *sensu lato*, dans ce que l'on appelle la soupe prébiotique (voir e.g. Dass *et al.*, 2016 ; Westall & Brack, 2016). Les résultats récents dans ce domaine montrent qu'il est théoriquement possible de former les précurseurs des principales molécules du vivant (ARN, protéines et lipides) au sein d'un même système (Patel *et al.*, 2015).

Bien que les expériences en laboratoire permettent d'obtenir des molécules de plus en plus complexes et que la limite entre le non vivant et le vivant soit relativement floue, aucune expérience à ce jour n'a permis de reproduire l'apparition de la vie en tube à essais. Une seconde approche pour comprendre comment la vie est apparue sur Terre consiste à étudier les traces fossiles des premiers organismes vivants.

1.2- Les plus anciennes traces de vie sur Terre

La Terre a 4,5 Ga (milliards d'années) et la vie y est apparue il y a à peu près 4 Ga (Hedges, 2002 ; Rosing & Frei, 2004 ; Westall & Southam, 2006 ; Bell *et al.*, 2015). L'étude de roches de cette époque pourrait donc permettre de trouver des traces fossiles de ces premiers organismes. Malheureusement, du fait de la tectonique des plaques et du recyclage de la croûte, les plus anciennes roches terrestres contenant des fossiles bien préservés sont âgées de « seulement » 3,3 Ga et 3,5 Ga. Elles proviennent respectivement de Barberton, en Afrique du Sud, et du Pilbara, en Australie. Les analyses fines réalisées sur ces échantillons ont permis de mettre en évidence la présence de différents métabolismes déjà complexes à cette époque, chimiolithotrophes et photosynthétiques (Van Kranendonk *et al.*, 2008 ; Westall *et al.*, 2011a ; 2011b ; 2015a). Il existe bien des roches d'origine sédimentaire plus anciennes à Isua, au Groenland, âgées de 3,8 Ga, mais elles ont subi un métamorphisme de type amphibolite faciès ayant conduit à la destruction de potentiels microfossiles. Du carbone dont le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}$ est compatible avec une origine biologique, sans pour autant la démontrer, y a été détecté (Rosing & Frei, 2004 ; van Zuilen *et al.*, 2003 ; Westall & Folk, 2003). Récemment, dans la même région, des structures de 3,7 Ga faisant penser à des stromatolithes ont été observées même si cette interprétation reste encore débattue (Nutman *et al.*,

2016). Enfin, du carbone dont la composition isotopique est compatible avec une origine biologique a été trouvé dans un zircon de 4,1 Ga, là encore sans pour autant la démontrer (Bell *et al.*, 2015).

L'étude des traces de vie dans des roches de plusieurs milliards d'années est particulièrement délicate. En effet, les microfossiles de 3,5 Ga de Kitty's Gap sont de taille submicrométrique et de morphologie relativement simple, sphérique ou allongée (voir Fig.1.1).

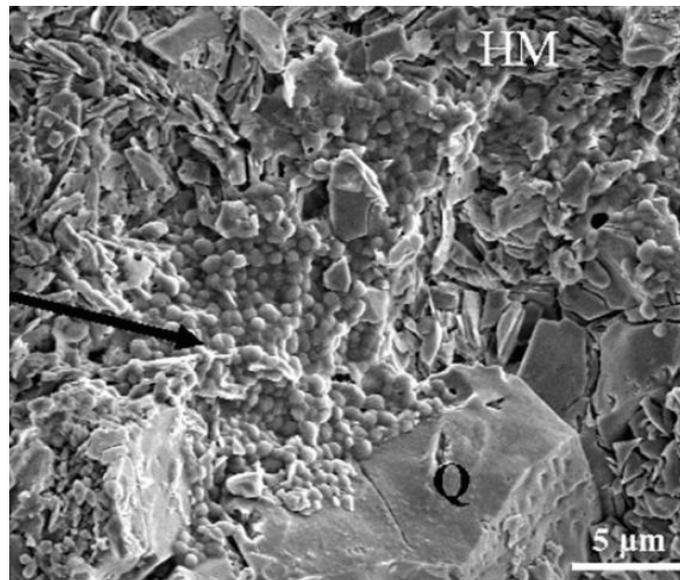


Fig.1.1. Image en microscopie électronique à balayage d'une colonie microbienne fossilisée observée dans des roches de Kitty's Gap, Australie, âgées de 3,5 Ga (flèche noire). HM = hydromuscovite, Q = quartz. (Westall *et al.*, 2011a).

Si la démonstration de la biogenité de fossiles macroscopiques est relativement aisée (le doute n'est pas permis lorsque l'on observe un squelette de dinosaure par exemple), cela devient beaucoup plus délicat pour des structures microscopiques. Premièrement, l'observation ne suffit plus. Des structures abiotiques peuvent tout à fait mimer la morphologie d'un microbe (Garcia-Ruiz *et al.*, 2003 ; Westall & Cavalazzi, 2011). Il est donc nécessaire de réaliser des observations et des analyses compositionnelles à différentes échelles. Ainsi, l'étude du contexte géologique à l'échelle macroscopique permet de comprendre l'environnement global passé. L'observation en microscopie optique permet quant à elle de localiser de potentielles colonies ou restes de colonies microbiennes. Elle est également cruciale pour comprendre l'environnement local, *i.e.* à l'échelle des organismes, et la minéralogie associée. Différentes techniques sont ensuite utilisées, telles que la spectroscopie Raman, pour identifier les phases minérales et détecter la matière carbonée à l'échelle micrométrique, la microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à des analyses EDX (*Energy Dispersive X-ray spectroscopy*), pour les observations de microfossiles individuels et l'analyse des éléments chimiques associés, ou encore des analyses par PIXE (*Proton Induced X-ray Emission*), spectroscopie IR (infrarouge), XANES (*X-ray Absorption Near Edge Structure*), AFM... Au final, seul l'accumulation d'indices permet d'affirmer ou non l'origine biologique des structures observées et leur syngénicité avec les roches qui les contiennent, *i.e.* le fait qu'elles aient le même âge et ne sont pas une contamination ultérieure. Un résumé des techniques utilisées et de leur utilité a été présenté sur un poster à différents congrès (e.g. Foucher *et al.*, 2014).

Bien que relativement simples, la variété des structures microbiennes observées dans les roches de cette époque démontre un niveau d'évolution déjà important de la vie il y a 3,5 Ga. Ces

observations viennent donc corroborer la plausibilité d'une origine de la vie autour de 4 Ga. L'absence de roches bien préservées datant de cette époque rendant toute analyse impossible, l'idée est venue d'aller chercher des traces de vie plus anciennes, ou du moins plus primitives, ailleurs que sur Terre.

1.3- Le recherche de vie sur Mars

Les exobiologistes s'intéressent à toutes les possibilités en matière de vie extraterrestre, depuis la vie microbienne actuelle ou fossile, jusqu'à de potentielles civilisations. Face à l'immensité de l'Univers, les recherches se concentrent cependant uniquement sur une vie basée sur la chimie organique et sur des corps rocheux abritant, ou ayant abrité, de l'eau liquide. Bien évidemment, ces recherches sont limitées par des contraintes techniques ; plus un astre est éloigné moins il est possible d'y détecter des formes de vie primitive ou fossile. Les chercheurs s'orientent donc vers la planète la plus proche de la Terre et susceptible d'avoir abrité la vie : Mars.

Depuis les années 60, de nombreuses missions robotisées ont été envoyées vers la planète rouge. Si aucune trace de vie n'a encore été trouvée, ces missions ont permis de démontrer que de l'eau a coulé à la surface de Mars par le passé. Les satellites européen *Mars Express* et américains *Mars Global Surveyor (MGS)* puis *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)* ont en effet observé des rivières et des fleuves asséchés (Fig. 1.2). La partie nord de Mars, *Vastitas Borealis*, est même interprétée par certains comme étant des reliques d'un océan passé (Clifford & Parker, 2001), même si cette interprétation reste débattue (Carr & Head III, 2003). Récemment, certaines structures géomorphologiques observées, tels que des jets de rive riches en glace d'eau ou des lobes blocailleux, ont été décrites comme des preuves de tsunamis passés (Rodriguez *et al.*, 2016).

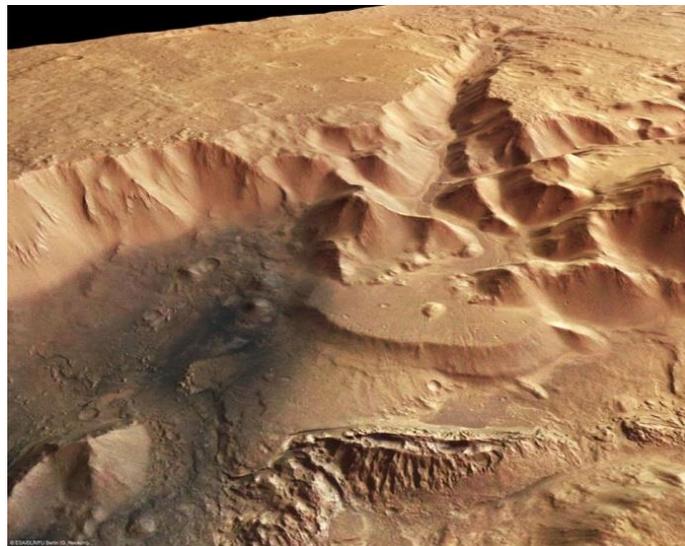


Fig.1.2. Image du delta d'une rivière asséchée se jetant dans un cratère d'impact à *Nepenthes Mensae* réalisée par la sonde *Mars Express* en janvier 2008 (crédits ESA/DLR/FU Berlin ; G. Neukum).

Les études sur la minéralogie confirment que de l'eau liquide a coulé à la surface de Mars par le passé. Les mesures réalisées par les instruments *OMEGA* et *CRISM*, respectivement sur *Mars Express* et *MRO*, ont montré la présence de phyllosilicates hydratés sous forme d'argiles (Bibring *et al.*, 2006 ; Carter *et al.*, 2010). Le rover américain *Spirit* a quant à lui réalisé des images de structures sédimentaires et détecté du gypse, de la jarosite et des petites concrétions (myrtilles) d'hématite à *Meridiani Planum* (Elwood Madden *et al.*, 2004 ; Squyres *et al.*, 2006 ; Fan *et al.*, 2010). Le rover

Spirit a également observé des carbonates et de la silice « opaline » dans le cratère de Gusev (Morris *et al.*, 2010 ; Squyres *et al.*, 2008), et le rover *Curiosity* de la mission *Mars Science Laboratory (MSL)* a récemment traversé une rivière asséchée où il a pu observer des galets, démontrant la présence d'eau liquide pendant plusieurs milliers d'années dans le cratère de Gale (Jerolmack, 2013 ; Grotzinger *et al.*, 2014). Enfin, l'eau liquide pourrait toujours être présente dans le sous-sol à quelques kilomètres de profondeur (des Marais, 2010).

Les tentatives de détection de matière organique sont par contre restées longtemps infructueuses. Les sondes *Viking I* et *II* envoyées à cet effet dans les années 70 n'ont rien mesuré à la surface de Mars (Biemann, 1979). C'est *Curiosity* qui fera la première mesure de chlorohydrocarbures en 2015 (Freissinet *et al.*, 2015). Cette difficulté à observer des molécules organiques à la surface de Mars est liée notamment à la présence de perchlorates dans le sol (détectés par la mission américaine *Phoenix* en 2008, Hecht *et al.*, 2009) qui, lorsqu'ils sont chauffés pour les besoins des expériences de pyrolyse *GCMS*, conduisent à l'oxydation rapide des molécules recherchées (Freissinet *et al.*, 2015). De plus, naturellement, de l'eau oxygénée se forme à la surface de Mars ce qui conduit à la dégradation rapide des molécules organiques (Bullock *et al.*, 1994). Cette dégradation est renforcée par un rayonnement ionique solaire important du fait de l'absence de magnétosphère. Ce bombardement est par ailleurs en partie responsable de la disparition progressive de l'atmosphère de Mars, et donc de l'eau liquide à sa surface, à partir de l'Hespérien (Bibring *et al.*, 2006).

Au final, nous savons maintenant que les conditions nécessaires à l'émergence de la vie ont été réunies à la surface de Mars durant le Noachien, *i.e.* il y a plus de 3.8 Ga (Bibring *et al.*, 2006 ; des Marais, 2010 ; Westall *et al.*, 2013). Or Mars n'a pas connu de tectonique des plaques. Des roches datant de cette époque sont donc encore présentes à sa surface et pourraient contenir des traces de vie plus primitives que celles trouvées sur Terre. Un des objectifs de la future mission *ExoMars 2020*, de l'agence spatiale européenne (ESA) et de l'agence Russe *Roscosmos*, sera de détecter ces éventuelles traces de vie passée (Vago *et al.*, 2013 ; 2016). Cependant, si une vie est apparue à la surface de Mars, il est fort probable qu'elle soit restée très primitive et on s'attend au mieux à trouver des microfossiles du type de ceux retrouvés dans les roches terrestres archéennes de 3,5 Ga (Westall *et al.*, 2015b). Or, comme expliqué précédemment (§1.2), même sur Terre il est délicat de démontrer l'origine biologique de ces anciennes traces de vie. Cela nécessite l'utilisation de multiples techniques d'analyses et d'observations peu compatibles avec des analyses *in situ* sur Mars. Afin d'avoir une chance de détecter quelque chose, il est donc indispensable de travailler sur le développement et l'optimisation des techniques embarquées et sur la recherche de biosignatures détectables. Ces problématiques constituent la majeure partie de mon travail. Ainsi, pour la mission *ExoMars 2020*, je travaille à la calibration scientifique de la charge utile du rover, notamment de la caméra haute résolution *CLUPI (Close-UP Imager)* et du spectromètre Raman. Ces travaux se basent sur l'utilisation d'échantillons terrestres analogues de Mars. Cette notion d'analogues est importante dans mon travail puisque elle est au cœur de deux projets auxquels je participe activement : la collection de roches et minéraux analogues *ISAR (International Space Analogue Rockstore)* d'Orléans, et le projet *EURO-CARES* dont l'objectif est de créer un centre européen de stockage et d'analyse d'échantillons extraterrestres et pour lequel il est prévu d'utiliser des échantillons analogues pour élaborer les protocoles d'analyses qui seront utilisés.

1.4- Interaction entre les différentes études

Mon travail de recherche en exobiologie est relativement large et explore différentes problématiques s'appuyant sur différents domaines. Bien que variées, ces études sont complémentaires et forment un ensemble cohérent schématisé par la figure 1.3. Dans ce manuscrit, les différents chapitres sont organisés afin que les travaux qui y sont décrits s'enchaînent de manière logique, mais pas nécessairement chronologique.

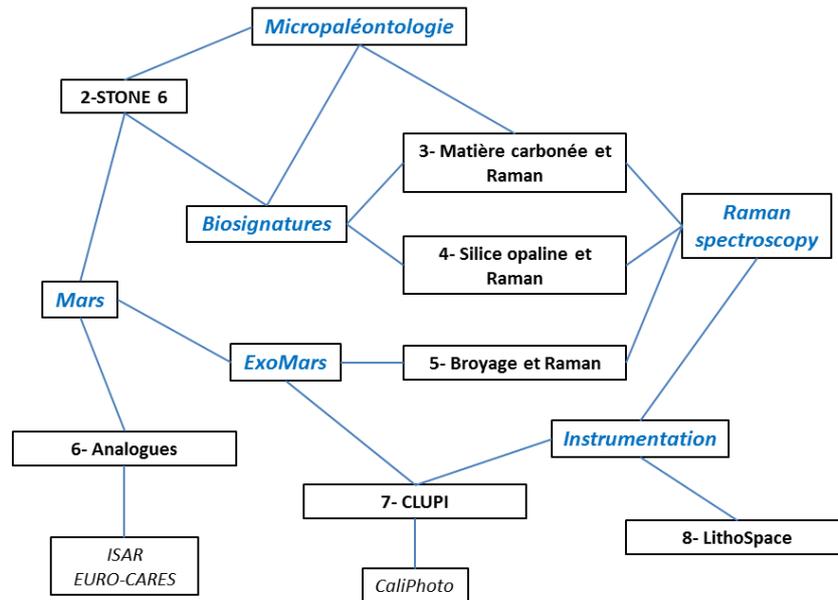


Fig.1.3. Schéma illustrant les liens entre les différentes thématiques et projets de recherche présentés dans ce manuscrit. Chaque numéro correspond au chapitre associé.

2- L'expérience STONE 6

2.1- Les expériences STONE

La possibilité que la vie soit apparue sur Mars n'est pas une hypothèse récente. Au début du 20^{ème} siècle, des auteurs tel que Camille Flammarion sont même persuadés de la présence d'une vie évoluée à la surface de la planète rouge (Flammarion, 1908). Cependant, au fur à mesure des évolutions technologiques et de l'exploration de plus en plus poussée de Mars, la probabilité d'une vie développée va se faire de plus en plus faible. Au milieu des années 90, le fait même que la vie ait pu apparaître un jour sur Mars est considéré comme extrêmement hypothétique. C'est alors qu'en 1996, une équipe de la NASA dirigée par David McKay annonce avoir découvert une structure ressemblant à un organisme fossilisé dans la météorite martienne ALH84001 (McKay *et al.*, 1996). Si la nouvelle fait grand bruit, elle est cependant très rapidement contestée (e.g. Treiman, 1998 ; Bada *et al.*, 1998) et il est maintenant admis que la fameuse structure observée est probablement d'origine abiotique ou qu'elle est le fruit d'une contamination terrestre. Un doute subsiste cependant quant à l'origine des cristaux de magnétites découverts dans la même météorite (Thomas-Keprta *et al.*, 2009). D'une manière générale, les traces de vie fossiles sont généralement observées dans des roches sédimentaires, même si l'on peut en observer dans des fractures dans des roches volcaniques. Les 96 météorites martiennes connues à ce jour¹ étant composées de roches d'origine volcanique, la découverte de biosignatures martiennes en leur sein est peu probable. Bien que non majoritaires, les roches sédimentaires sont présentes à la surface de Mars, comme ont pu l'observer les différentes sondes envoyées par la NASA et l'ESA (cf. §1.3). Afin de savoir si des météorites composées de roches sédimentaires martiennes pouvaient exister, les expériences spatiales STONE ont été initiées par René Demets et André Brack en 1996.

Les missions STONE consistaient à placer des échantillons de roches dans le bouclier thermique de capsules spatiales FOTON utilisées pour conduire des expériences en orbite basse. La première expérience, STONE 1, s'est déroulée en 1999 avec une capsule FOTON-12 et a permis de tester l'entrée atmosphérique d'un carbonate (dolomie), d'un échantillon artificiel composé de basalte (80%) et de gypse (20%), et d'un basalte de référence (dolérite). Les résultats montrèrent notamment que, contrairement aux roches volcaniques, le carbonate ne présentait pas de croûte de fusion bien que sa composition ait été modifiée par des processus de haute température (Brack *et al.*, 2002). Malheureusement les expériences qui suivirent eurent moins de succès : les échantillons de STONE 2 furent perdus lors du crash à l'atterrissage de la capsule (FOTON-12), la mission STONE 3 n'est jamais partie, et la fusée de la mission STONE 4 explosa juste après le décollage (FOTON-M1). Il

¹ Source : *International Meteorite Collectors Association*, <http://www.imca.cc/mars/martian-meteorites-list.htm>

faudra attendre 2005 et la mission STONE 5 sur la capsule FOTON-M2 pour renouer avec le succès. Tous les échantillons de la mission, à savoir une dolérite, un grès (aérinite) et une impactite gneissique furent retrouvés (Brandstätter *et al.*, 2008; Parnell *et al.*, 2008). Cette expérience avait également pour but de tester la survie de bactéries vivantes et de spores de champignons placées dans des cavités à l'arrière des échantillons et d'étudier l'hypothèse de la panspermie, c'est-à-dire la possibilité d'un transfert d'organismes vivants d'un astre à un autre par le biais de météorites. Malheureusement le centimètre d'épaisseur de roche n'a pas été suffisant pour les protéger de la carbonisation (Cockell *et al.*, 2007). Mon premier travail de recherche au sein de l'équipe d'exobiologie du CBM a consisté à faire l'étude complète d'un échantillon issu de la dernière expérience STONE : l'expérience STONE 6.

2.2- Résultats de l'expérience STONE 6

STONE 6 est la dernière expérience STONE à avoir été réalisée, le partenariat ESA/Roscosmos sur les missions FOTON ayant pris fin depuis. La capsule FOTON-M3 utilisée pour l'expérience STONE 6 est visible en Figure 2.1.



Fig.2.1. Vue d'artiste de la capsule FOTON-M3 en vol (crédits ESA)

L'objectif de l'expérience STONE 6, en plus de tester la survie lors de l'entrée atmosphérique de nouvelles roches sédimentaires et de microorganismes vivants, était de tester la survie de possibles microfossiles martiens. Les échantillons utilisés étaient donc une dolérite (référence), un sédiment lacustre âgé de 400 Ma (Dévonien) des Orcades, en Ecosse, et l'échantillon sur lequel mon étude s'est concentrée, un chert de 3,5 Ga du Kitty's Gap décrit précédemment (§1.2). Les microorganismes fossiles découverts dans ces cherts par Frances Westall peuvent être considérés comme de bons analogues de potentiels microfossiles martiens, à savoir des fossiles de microorganismes très primitifs de type chimiolithotrophe, de taille micrométrique à sub-micrométrique, composés de matière carbonée insoluble mature (kérogène) (Westall, 2009 ; Westall *et al.*, 2011b ; 2015a). A noter qu'un quatrième échantillon dédié à l'étude de la panspermie était également placé dans le bouclier thermique de la capsule pour une expérience dénommée *Lithopanspermia* (de la Torre *et al.*, 2010).

Tirant partie des conclusions de l'expérience STONE 5 sur la survie des microorganismes, il fut décidé de doubler l'épaisseur de roche protectrice en la passant de 1 cm à 2 cm. Pour ce faire, les

échantillons furent usinés en forme de dôme de 2 cm d'épaisseur à l'apex afin de pouvoir être fixés dans le bouclier thermique de la capsule (voir Fig. 2.2). L'échantillon de chert étant particulièrement fragile, il fut broyé grossièrement et mélangé avec un « ciment spatial » afin de faciliter sa mise en forme. Enfin, des microorganismes (*Chroococciopsis*) furent déposés à l'arrière de l'échantillon.

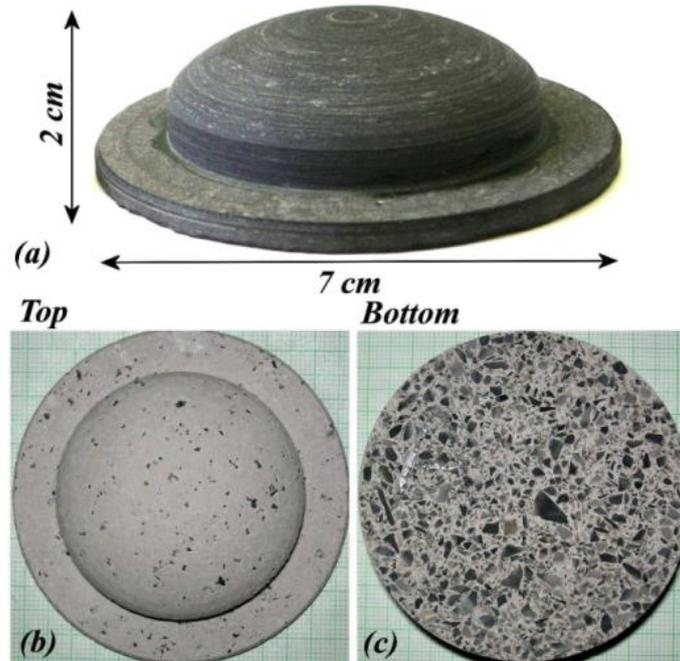


Fig. 2.2. Echantillon constitué de fragments de chert de Kitty's Gap et de « ciment spatial » utilisé pour l'expérience STONE 6 (Foucher *et al.*, 2010).

La capsule FOTON-M3 a été envoyée à l'aide d'une fusée *Soyuz-U* depuis Baïkonour (Kazakhstan) le 14 septembre 2007, et a atterri le 26 septembre 2007 dans un champ au Kazakhstan après 12 jours en orbite basse autour de la Terre, soit quelques jours avant mon arrivée au CBM. Durant la phase d'entrée dans la stratosphère, la vitesse de la capsule est de 7,6 km/s. La surface exposée de la capsule subit alors un choc thermique important, passant de quelques degrés Celsius, à plus de 2000°C à l'apex avant de redescendre à moins de 0°C en quelques dizaines de secondes. Afin de limiter le choc à l'impact, la capsule est ralentie par un parachute et par des rétrofusées. Au final, sur les quatre échantillons, seul l'échantillon de dolérite a été perdu.

Après atterrissage, la première observation a été l'aspect blanc de l'échantillon de chert (Fig. 2.3). Les météorites sont généralement reconnaissables à leur croûte de fusion noire caractéristique et qui permet de les identifier facilement dans les glaces de l'Antarctique ou dans les déserts de sable. Bien que l'aspect blanc laiteux de l'échantillon peut être attribué au ciment spatial, l'absence de croûte de fusion sombre à la surface des « météorites sédimentaires » pourrait expliquer qu'elles ne soient pas reconnues et qu'elles n'aient donc jamais été découvertes.

Une fois retiré de son support, l'échantillon a été envoyé au laboratoire pour analyse. L'épaisseur finale de l'échantillon n'était alors plus que de 1 cm, impliquant l'ablation par fusion et l'écoulement d'1 cm de l'échantillon lors de l'entrée atmosphérique. Des lames minces polies de 30 μm d'épaisseur ont été préparées par Sylvain Janiec, à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), afin d'être analysées par microscopie optique en lumière transmise sur le microscope Olympus BX51 de l'équipe. J'ai également réalisé mes premières analyses par spectroscopie Raman sur un Dylor XY, à l'ISTO, en collaboration avec Jean-Michel Bény qui m'a beaucoup appris sur la technique. J'ai réalisé

des observations en MEB, au Centre de Microscopie Electronique de l'université d'Orléans avec Frances Westall et Annie Richard. Des images ont été acquises avec l'AFM de l'équipe. Enfin, j'ai réalisé de nouvelles analyses Raman avec le système WITec Alpha500 RA dès son arrivée au CBM en janvier 2009.

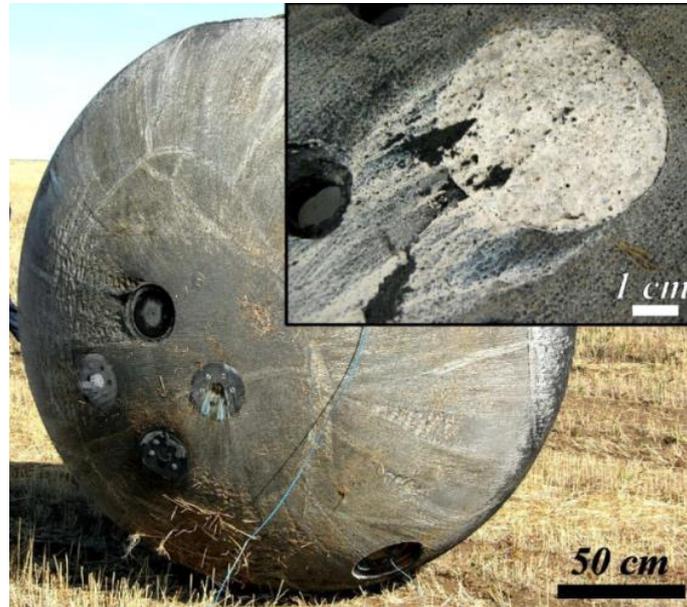


Fig. 2.3. Photo de la capsule FOTON-M3 utilisée pour la mission STONE 6 après atterrissage. En insert, zoom sur l'échantillon de chert (Foucher *et al.*, 2010).

Les observations MEB et AFM ont permis de démontrer la survie des microfossiles contenus dans la roche et ce à seulement quelques millimètres de la croûte de fusion. La Figure 2.4 montre les microfossiles avant et après l'expérience. Par contre, les microorganismes placés à l'arrière de l'échantillon ont été carbonisés. Il semblerait que des flammes aient réussi à les atteindre en se propageant entre le support et l'échantillon.

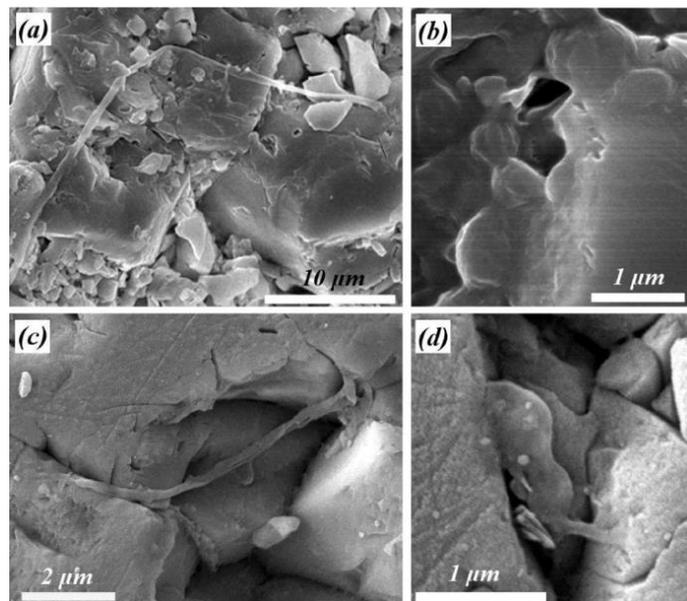


Fig. 2.4. Echantillon de chert utilisé pour l'expérience STONE 6 avant (a, b) et après (c, d) avoir subi l'entrée dans l'atmosphère observé par MEB (Foucher *et al.*, 2010).

Les analyses MEB, Raman et optiques ont permis de suivre l'évolution des différentes phases minérales au sein de l'échantillon : fusion du quartz, du ciment et de la muscovite, transformation de l'anatase en rutile et du quartz alpha en quartz beta, et déshydrogénation de la muscovite. En me basant sur l'épaisseur de la croute de fusion dans le quartz, j'ai pu modéliser et calculer le gradient de température en fonction du temps et de la profondeur. Les profils de températures ainsi obtenus apparaissent en excellent accord avec les observations minéralogiques (Fig. 2.5a). Ainsi, d'après le modèle, il semble que même si les flammes n'étaient pas passées à l'arrière de l'échantillon la température aurait atteint 600°C à cette profondeur. Les organismes auraient donc été tués quoiqu'il en soit. Les résultats complets de cette étude ont été publiés dans la revue *Icarus* en 2010 (Foucher *et al.*, 2010). Le modèle montre également qu'une épaisseur de basalte de l'ordre de 3 cm semble suffisante pour garder une température inférieure à 150°C, compatible avec la survie d'organismes vivants (Fig. 2.5b).

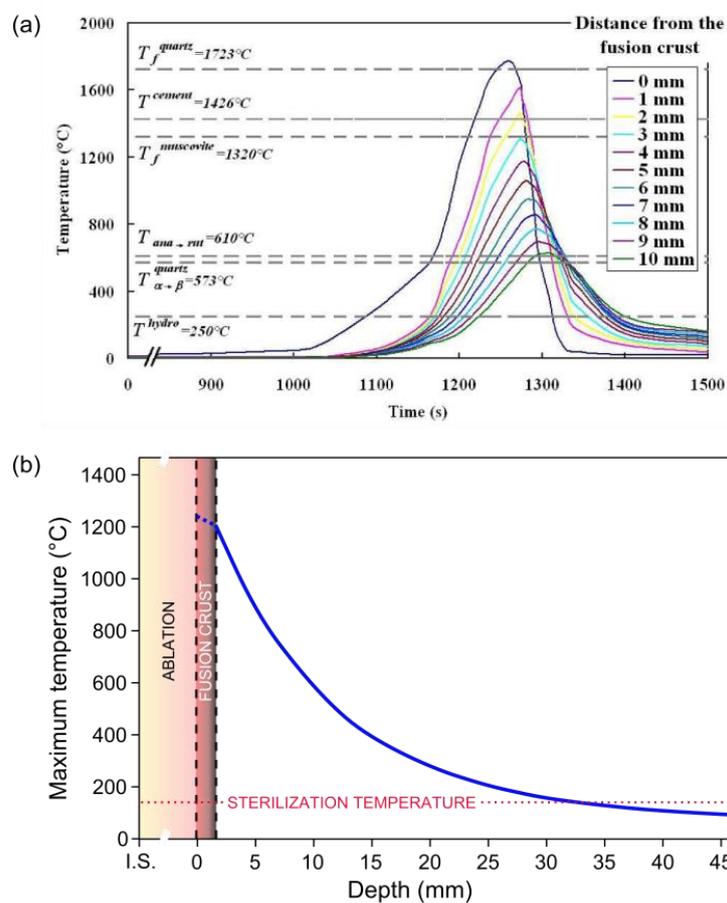


Fig. 2.5. (a) Distribution de la température au sein de l'échantillon de chert lors de l'expérience STONE 6 en fonction du temps (Foucher *et al.*, 2010). (b) Température maximale théorique en fonction de la distance par rapport à la surface finale d'une météorite de composition basaltique (I.S. = initial surface).

Au final, cette étude de l'échantillon de chert de l'expérience STONE 6 aura été un moyen particulièrement efficace pour me permettre d'appréhender certaines grandes thématiques de l'exobiologie comme la panspermie, la Terre primitive, l'origine de la vie, l'exploration spatiale... Sur le plan technique, cette étude m'aura permis de me former aux bases de la spectroscopie Raman et d'en comprendre l'intérêt pour l'étude de traces de vie fossilisée, en particulier pour l'analyse de la matière carbonée.

2.3- Valorisation scientifique de l'étude

Publication principale :

Testing the survival of microfossils in martian sedimentary meteorites during Earth's atmospheric entry: the STONE 6 experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény & A. Brack, *Icarus* 207, 616-630, (2010).

Autres publications :

Testing the survival of microfossils during entry into the Earth's atmosphere: the STONE 6 experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. Cockell, H. Edwards, G. Kurat & A. Brack, *Meteorit. Planet. Sci.* 44, Nr 7, Supplement, Abstract for the 72nd Annual Meteoritical Society Meeting No. 5055, A207, (2009).

A la recherche des origines de la vie, F. Foucher & F. Westall, *Microscop* 57, 12-13, (2009).

STONE 6 Experiment: An Investigation of the Survival of Microfossils During Atmospheric Entry, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 39, Nr 4, Special Issue : Abstracts from the 2008 ISSOL meeting, 360-361, (2009).

Communications orales :

Tester la survie de microfossiles lors de l'entrée atmosphérique : l'expérience STONE 6, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, 1^{ère} Rencontres SFE, Biarritz, France, 28-30 septembre 2010.

Testing the survival of microfossils in an artificial martian sedimentary meteorite: the STONE 6 Experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, 38th COSPAR Assembly, Brême, Allemagne, 18-25 juillet 2010.

Raman Analysis of an Artificial Sedimentary Meteorite: the STONE 6 Experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, 9th International Conference on Raman spectroscopy Applied to the Earth Sciences, GeoRaman 2010, Sydney, Australie, 28 juin- 2 juillet 2010.

Can microfossils in a meteor survive atmospheric entry? F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, *European Planetary Sciences Congress 2008*, Munster, Allemagne, 21-26 septembre 2008.

Posters :

Testing the survival of microfossils during entry into the Earth's atmosphere: the STONE 6 experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. Cockell, H. Edwards, G. Kurat & A. Brack, 72nd Annual Meeting of the Meteoritical Society, Nancy, France, 13-18 juillet 2009.

STONE-6 experiment: testing the survival of microfossils in martian analogues rocks during entry into the Earth's atmosphere, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, 40th LPSC conference 2009, Texas, USA, 23-27 mars 2009.

STONE 6 experiment an investigation of the survival of microfossils during atmospheric entry, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, XVth International Conference on the Origin of Life, ISSOL, Florence, Italie, 24-29 août 2008.

Interventions dans les médias :

Unelminen kivi saa (« Une pierre devenue rêve » en Finnois), F. Westall & F. Foucher, interview pour le journal finlandais *Tahdet ja avaruus*, août 2008.

3- Etude de la matière carbonée de microfossiles par spectroscopie Raman

Une large partie de mon travail de recherche consiste à étudier des microfossiles de différents âges afin de mettre en évidence leur biogénicité et leur syngénicité, d'obtenir des informations sur leur métabolisme (si possible), d'étudier les processus de fossilisation, et de trouver de nouvelles biosignatures potentiellement détectables sur Mars. Comme explicité dans l'introduction, prouver la biogénicité de structures microscopiques n'est pas toujours chose aisée. Pour des roches de plus 1,2 Ga, on n'observe généralement plus que des organismes unicellulaires (exception faite des organismes découverts au Gabon par Abder El Albani en 2010, El Albani *et al.*, 2010), et dans les roches de 3,5 Ga de Kitty's Gap, les fossiles détectés sont de taille sub-micrométrique (voir fig 1.1 ; Westall *et al.*, 2011b). La morphologie de type filament ou coque n'étant alors plus suffisante pour démontrer l'origine biologique des structures observées, il est nécessaire de compléter l'étude par des analyses moléculaires, élémentaires et isotopiques. La spectroscopie Raman apparait alors comme une technique particulièrement adaptée à l'étude de ces structures fossiles.

3.1- La spectroscopie Raman

L'effet Raman a été découvert par Chandrashekhara Venkata Râman en 1928 ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1930. Il est basé sur la diffusion inélastique de la lumière par la matière. Le but ici n'est pas de détailler ce phénomène complexe, l'explication suivante sera donc extrêmement simplifiée. Une description complète du phénomène peut être trouvée dans des ouvrages tels que Poilblanc & Crasnier (2006), Dieeing *et al.* (2010) ou encore Rull (2012).

Dans plus de 99% des cas la diffusion des photons par la matière est élastique, *i.e.* le photon incident et le photon diffusé ont la même énergie (diffusion Rayleigh). Lorsque l'énergie du photon diffusé est différente de celle du photon incident, on parle de diffusion Raman. Si elle est plus petite, on parle d'effet Stokes et si elle plus grande, d'effet anti-Stokes. Les écarts d'énergie associés sont directement liés aux énergies de vibration de la molécule ou du cristal étudié. L'effet Raman dépend donc de l'arrangement atomique au sein d'un échantillon et non uniquement de sa composition élémentaire ; des minéraux polymorphes tels que la brookite, le rutile et l'anatase, de composition TiO_2 , ont des spectres Raman différents. Un spectre représente le nombre de photons diffusés pendant un certain temps en fonction de leur énergie, ou de leur longueur d'onde λ . L'effet Raman étant indépendant de la longueur d'onde incidente (en première approche), il est usuel de représenter les spectres en fonction de l'écart à la longueur d'onde incidente et de travailler en nombre d'onde $\Delta\nu = 1/\Delta\lambda$, exprimé en cm^{-1} .

De manière générale, le signal Raman est extrêmement faible, en particulier le signal anti-Stokes. Le véritable essor de l'utilisation de l'effet Raman arrivera donc avec la démocratisation des lasers dans les années 70 qui permettra d'obtenir un signal beaucoup plus intense. La seconde révolution interviendra dans les années 90 avec l'apparition des capteurs CCD qui rendront les spectromètres beaucoup plus sensibles. Avec l'optimisation des instruments, il est maintenant possible d'acquérir un spectre Raman en quelques millisecondes lorsque plusieurs dizaines de minutes étaient nécessaires il y a encore une dizaine d'années.

Le système WITec Alpha 500RA utilisé au CBM a été pensé pour la cartographie Raman. Le principe de la technique consiste à balayer la zone d'intérêt de l'échantillon avec le laser tout en accumulant des spectres Raman. Cela permet d'obtenir un jeu de données où chaque spectre est associé à ses coordonnées spatiales XY qu'il est possible d'utiliser pour créer des images (voir Fig. 3.1). L'intensité d'un spectre étant directement proportionnelle à la concentration du matériau étudié, en appliquant une échelle de couleur à l'intensité d'un pic représentatif il est possible de créer une image où la couleur de chaque pixel dépend de la concentration. Il est également possible d'associer différentes couleurs aux différents matériaux afin d'obtenir une cartographie compositionnelle. Enfin, plus généralement, il est possible d'appliquer un code couleur à différents paramètres du signal Raman (position ou largeur d'un pic, rapport d'intensité...) afin d'étudier des variations de propriétés physiques et cristallines telles que l'orientation, le désordre, la température...

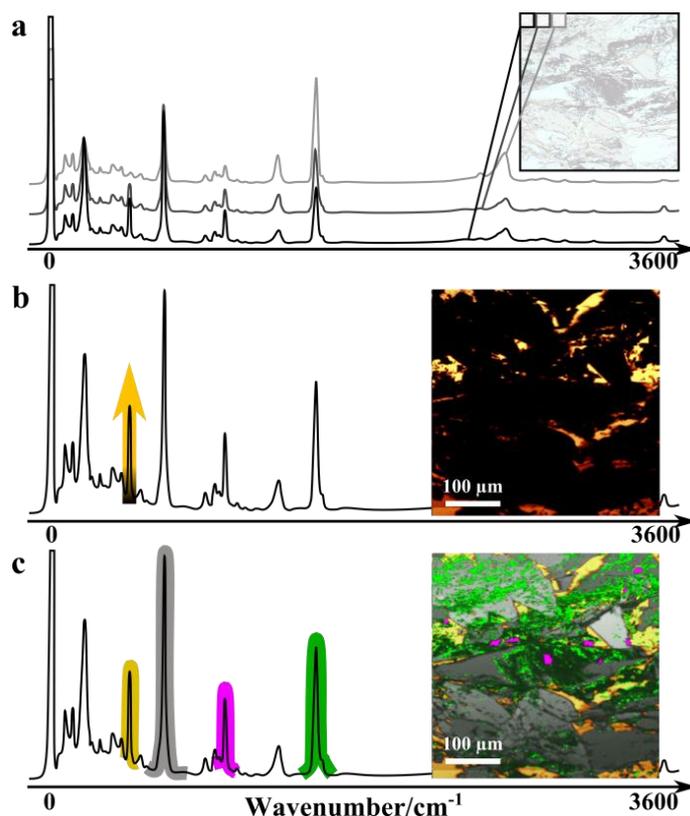


Fig. 3.1. Schéma de principe de la méthode de cartographie Raman. (a) Un spectre Raman est enregistré pour chaque point de la zone d'intérêt. Une fois le balayage terminé, il est possible de représenter la concentration en un matériau donné en associant une échelle de couleur à l'intensité d'un pic associé (b) ou d'obtenir une image de la composition en associant une couleur à chaque matériau. [Echantillon de 3,8 Ga d'Isua, Groenland. (b) cartographie de la cumingtonite, une amphibole, (c) cartographie compositionnelle avec en jaune la cumingtonite, en gris le quartz, en fuchsia l'apatite et en vert la matière carbonée] (Foucher *et al.*, 2016)

3.2- Spectroscopie Raman des matériaux carbonés

Du fait d'un effet de résonance, la spectroscopie Raman est particulièrement sensible à la matière carbonée de type graphite ou kérogène. La Figure 3.2 montre le premier ordre d'un spectre Raman typique de la matière carbonée désordonnée associée à des microfossiles entre 1100 cm^{-1} et 1900 cm^{-1} , acquis avec un laser vert de longueur d'onde 532 nm . On peut distinguer 3 bandes principales notées D_1 , G et D_2 .

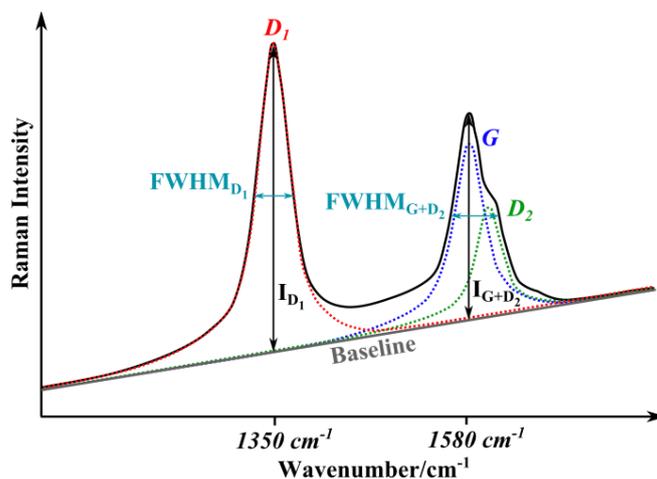


Fig. 3.2. Spectre Raman typique de la matière carbonée désordonnée (Foucher *et al.*, 2015a)

Le pic G (pour graphite) est associé aux vibrations des liaisons sp^2 dans le plan. Les matériaux carbonés désordonnés sont systématiquement associés avec l'apparition de nouveaux pics particulièrement intenses du fait de processus de résonance, les principaux étant D_1 et D_2 situés à $\sim 1350\text{ cm}^{-1}$ et $\sim 1620\text{ cm}^{-1}$ (e.g. Jehlicka et Bény, 1999 ; Quirico *et al.*, 2009). Les bandes D_1 et D_2 correspondent respectivement aux phonons² optiques transversaux et longitudinaux induits par les défauts. La bande G du graphite est située à 1580 cm^{-1} mais pour des nanocristaux, l'effet de confinement de phonons peut induire son décalage jusqu'à $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ (Ferrari, 2007). C'est également le cas pour les kérogènes et la matière carbonée très désordonnée caractérisés par la présence de petits « cristallites » de graphite (Jehlicka & Bény, 1999 ; Quirico *et al.*, 2009 ; Sforza *et al.*, 2014). Du fait de ce décalage, les bandes G et D_2 se superposent.

La microstructure de la matière carbonée incluse dans une roche va évoluer sous l'effet des processus géologiques. Au fur et à mesure que le degré de métamorphisme augmente, elle va subir une phase de carbonisation, puis de pré-graphitisation et enfin de graphitisation (Rouzaud & Oberlin, 1989 ; Bustin *et al.*, 1995). La forme de son spectre Raman évolue alors en fonction (Fig. 3.3).

La grande sensibilité de la spectroscopie Raman aux kérogènes et la possibilité de miniaturiser la technique en font un outil de choix pour l'exploration planétaire et particulièrement l'exploration de Mars. Ainsi, un spectromètre Raman est prévu dans la charge utile Pasteur du rover de la mission *ExoMars 2020* (l'instrument *Raman Laser Spectrometer*) et figure parmi les instruments de la future mission américaine *Mars 2020* (les instruments *SHERLOC* et *SuperCam*). Cependant, après de nombreuses controverses (Schopf *et al.*, 2002a,b ; Brasier *et al.*, 2002 ; Pasteris & Wopenka 2002 ; 2003 ; Marshall *et al.*, 2012 ; Marshall & Marshall, 2013), il est maintenant bien admis par la communauté scientifique que le spectre Raman seul ne peut être utilisé pour démontrer l'origine biologique de la matière carbonée de manière simple (Marshall *et al.*, 2010).

²Un phonon est un quantum d'énergie de vibration dans un solide cristallin.

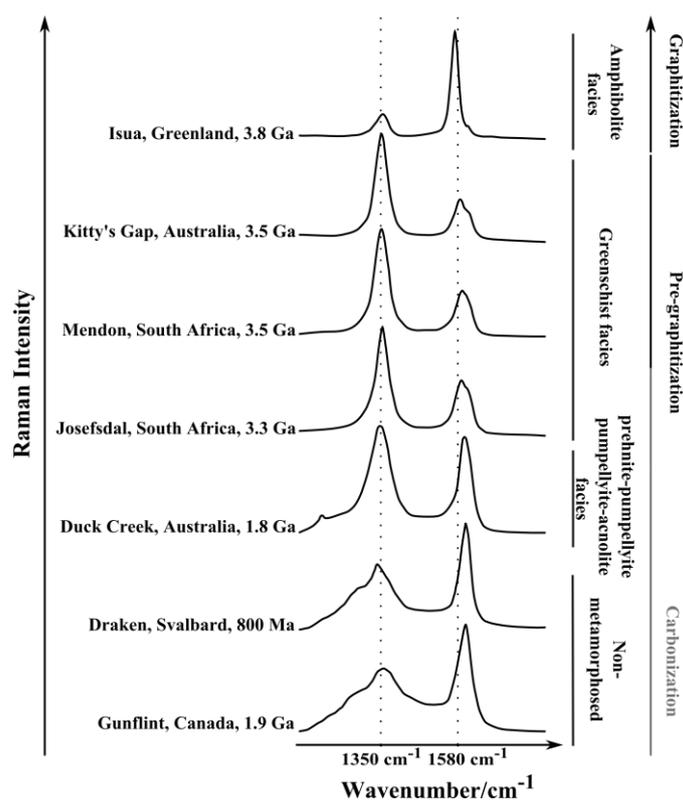


Fig. 3.3. Spectre Raman de la matière carbonée contenue dans des roches ayant subi différents degrés de métamorphisme (Foucher *et al.*, 2015a).

3.3- Cartographie Raman de microfossiles

Nous avons donc entrepris une étude fine de la distribution spatiale du kérogène et des minéraux associés au sein de structures silicifiées afin de détecter de possibles biosignatures par cartographie Raman. Pour ce faire, nous avons étudié des échantillons de la formation Draken, Svalbard, âgée de 800 Ma. Cette formation est un conglomérat dolomitique avec des lentilles de cherts contenant des fossiles de tapis de cyanobactéries et d'organismes planctoniques particulièrement bien préservés (Knoll, 1982). Les cartographies Raman réalisées ont permis de mettre en évidence des variations dans le rapport d'intensité des bandes D_1 sur $G+D_2$, noté R , entre les différents organismes mais également au sein d'un même fossile où ces variations sont réparties de manière non aléatoire, en lien avec la morphologie de l'organisme (Fig. 3.4).

Ces variations dans le signal Raman s'expliquent par des différences structurales dans l'organisation et la composition de la matière carbonée. Initialement, des organismes de différentes espèces et les différentes parties d'un organisme (membrane et cytoplasme) présentent des différences compositionnelles. Notre hypothèse était donc que ces différences se traduisent, après fossilisation, par des différences de structures dans la matière carbonée et donc par des variations dans le signal Raman associé. Si tel est le cas, la répartition non aléatoire observée devrait être liée au caractère ordonné propre à la matière biologique et ne devrait pas être observé dans le cas de structures abiotiques. Nous avons donc entrepris l'étude de structures abiotiques silicifiées présentant des similitudes morphologiques avec les organismes présents dans la formation Draken. Des échantillons de ce type sont particulièrement délicats à trouver. Au final, nous avons donc étudié des structures carbonées issues de veines hydrothermales de la formation de Mendon (3.3 Ga), en

Afrique du Sud, 10 fois plus large en taille et présentant un degré de métamorphisme plus important (cf. Fig. 3.3). Cependant, il s'est avéré qu'en effet les variations du signal Raman de la matière carbonée étaient alors distribuées de manière aléatoire sur les cartographies (Figure 3.5).

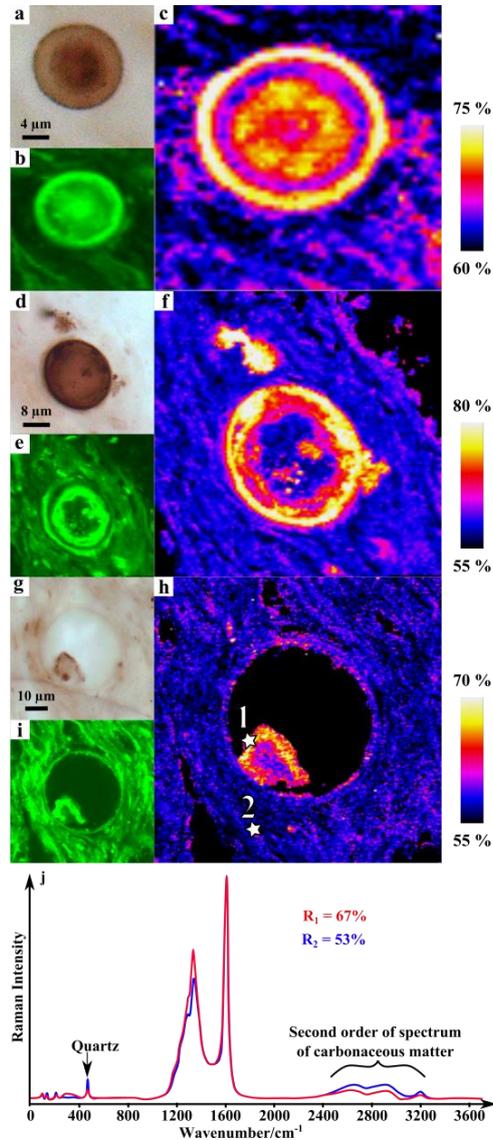


Fig. 3.4. Microfossiles de la formation Draken. Images optiques (a, d, g) et cartographies Raman de la matière carbonée (b, e, i) et du rapport d'intensité R des pics D_1 sur $G+D_2$ (c, f, h). (j) spectres Raman associés aux étoiles 1 et 2 sur (i) (Foucher *et al.*, 2015a).

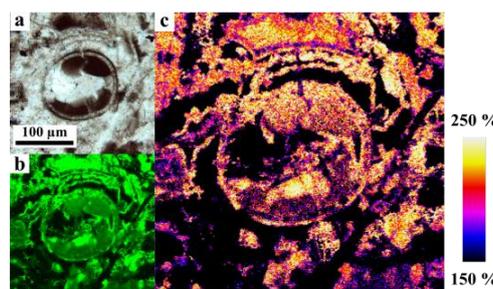


Fig. 3.5. Structures carbonées abiotiques de la formation Mendon, Afrique du Sud. (a) Images optiques et cartographie Raman (b) de la matière carbonée et (c) du rapport d'intensité R des pics D_1 sur $G+D_2$. (Foucher *et al.*, 2015a)

Les résultats de ces travaux, réalisés en collaboration avec Mohamed-Ramzi Ammar du laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation (CEMHTI), à Orléans, ont été publiés en 2015 dans *Journal of Raman Spectroscopy* (Foucher *et al.*, 2015a).

Au final, il apparaît que le spectre Raman de la matière carbonée peut être utilisé comme une biosignature si l'on considère la réparation spatiale non aléatoire des variations du signal observée sur les cartographies. Malheureusement, pour des raisons techniques, la réalisation de cartographies comparables à celles décrites ici sera impossible avec les spectromètres Raman qui seront embarqués lors des futures missions spatiales *ExoMars 2020* et *Mars 2020*. Cette biosignature pourrait permettre de détecter de potentielles traces de vie fossile dans des roches martiennes avec de futurs instruments plus performants ou dans des roches rapportées sur Terre lors d'une future mission de retour d'échantillons.

3.4- Valorisation scientifique de l'étude

Publication principale :

Revealing the biotic origin of silicified Precambrian carbonaceous microstructures using Raman spectroscopic mapping, a potential method for the detection of microfossils on Mars, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *Journal of Raman Spectroscopy* 46, 873-879, (2015).

Séminaires invité :

Techniques used in studying carbonaceous phases (abiogenic or biogenic) in ancient rocks, F. Foucher, *Habitats and inhabitants on the early Earth and Mars*, Le Studium, Orléans, France, 17-18 novembre 2015.

The search for ancient life on Mars using Raman spectroscopy, F. Foucher, M.-R. Ammar, G. Lopez-Reyes, N. Bost., F. Rull-Pérez, P. Russmann & F. Westall, 12th *Symposium Confocal Raman Imaging, WITec, Ulm, Allemagne*, 28-30 septembre 2015.

Spectroscopie Raman de la matière carbonée pour l'exobiologie, F. Foucher & J. Jehlicka, *Ecole thématique CarboRaman, Nouan le Fuzelier, Loire et Cher*, 12-17 octobre 2014.

Communications orales :

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *GeoRaman, Novosibirsk, Russie*, 9-13 juillet 2016.

Détection de biosignatures fossiles par spectroscopie Raman, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *Assemblée Générale de la Société Française d'Exobiologie*, 19 novembre 2015.

Detection of biosignatures in silicified rocks using raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, 15th *meeting of the European Astrobiology Network Association, ESA-Estec, Noordwijk, Pays-Bas*, 6-9 octobre 2015.

Detection of Biosignatures in Silicified Rocks Using Raman Mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *AbSciCon 2015, Chicago, USA*, 14-19 juin 2015.

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *Origins 2014, Nara, Japon*, 6-11 juillet 2014.

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni*, 08-13 septembre 2013.

Raman mapping of silicified biological remains, F. Foucher & F. Westall, *GeoRaman 10, Nancy, France*, 11-13 juin 2012.

Posters :

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, 12th EANA workshop, Stockholm, Suède, 15-17 octobre 2012.

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, European Planetary Science Congress, Madrid, Espagne, 24-28 septembre 2012.

Biosignatures observed by Raman mapping in silicified materials, F. Foucher, F. Westall & A. Knoll, EGU, Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.

Raman spectroscopy of Precambrian microfossils from the Draken formation: a useful tool for identifying biosignatures in ancient materials, F. Foucher, J. Jehlicka, J.-N. Rouzaud & F. Westall, *Origins 2011*, Montpellier, France, 3-8 juillet 2011.

Micro-RAMAN characterization of precambrian permineralized cells, Draken Formation: preliminary results, F. Foucher, B. Cavalazzi & F. Westall, 9th European Workshop on Astrobiology EANA'09, Bruxelles, Belgique, 12-14 octobre 2009.

4- Le signal Raman de minéraux métastables comme possible biosignature

Comme expliqué précédemment, il est très délicat de distinguer la matière carbonée d'origine biologique de la matière carbonée d'origine abiotique par spectroscopie Raman (Pasteris & Wopenka, 2003 ; Marshall *et al.*, 2012). Cependant, la matière carbonée n'est pas la seule trace laissée par les microorganismes. En effet, de par leur activité métabolique, les microbes peuvent induire la précipitation de minéraux (pyrite, carbonates, phosphates...) ou conduire à la formation de structures caractéristiques telles que les stromatolithes. La matière organique produite par les microorganismes peut également induire des effets sur la cristallisation de minéraux remplaçant la structure. La recherche de biosignatures détectables *in situ* en spectroscopie Raman se focalise donc aussi sur les phases minérales associées aux organismes fossiles.

4.1- Détection d'hydroxyapatite et de silice opaline par cartographie Raman

Au CBM, les cartographies Raman réalisées sur les microfossiles silicifiés de 800 Ma dans les cherts de Draken (cf. Chapitre 3) ont ainsi permis de détecter des minéraux tels que la pyrite ou, plus intéressant, l'hydroxyapatite (Fig. 4.1). L'hydroxyapatite est un biominéral (e.g. c'est le principal constituant des dents et des os). Sa détection est donc un bon indice de l'origine biologique de la structure observée.

Les cartographies Raman ont aussi permis de mettre en évidence la présence d'un pic large et peu intense autour de 300 cm^{-1} dont la répartition spatiale semblait suivre la morphologie des microorganismes comme le montre la Figure 4.1. Ce signal a été interprété comme celui d'une phase plus amorphe de silice, qualifiée de silice « opaline », dont la nature sera confirmée par des analyses complémentaires.

4.2- Analyses complémentaires

Une coupe FIB (*Focussed Ion Beam*) dans un des fossiles a été préparée en collaboration avec David Troadec de l'Institut d'Electronique, de Micro-électronique et de Nanotechnologie (IEMN) de Lille, en vue de réaliser des mesures par microscopie électronique en transmission (MET). Ces observations, faites en collaboration avec Jean-Noël Rouzard à L'École Normale Supérieure (ENS) de Paris, ont permis de mettre en évidence la nature « amorphe » de la silice associée à la membrane et au cytoplasme collapsé de la structure fossile (Figure 4.2). Des mesures par microsonde électronique (cf. Fig. 4.1), en collaboration avec Olivier Rouer du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), et par MEB, en collaboration avec Annie Richard du Centre de Microscopie Electronique de l'université d'Orléans, ont été réalisées afin de compléter l'étude. Enfin, des images AFM ont été acquises sur différents fossiles. Toutes ces analyses corroborent la présence de silice « opaline » associée avec la membrane et le cytoplasme collapsé des organismes fossilisés.

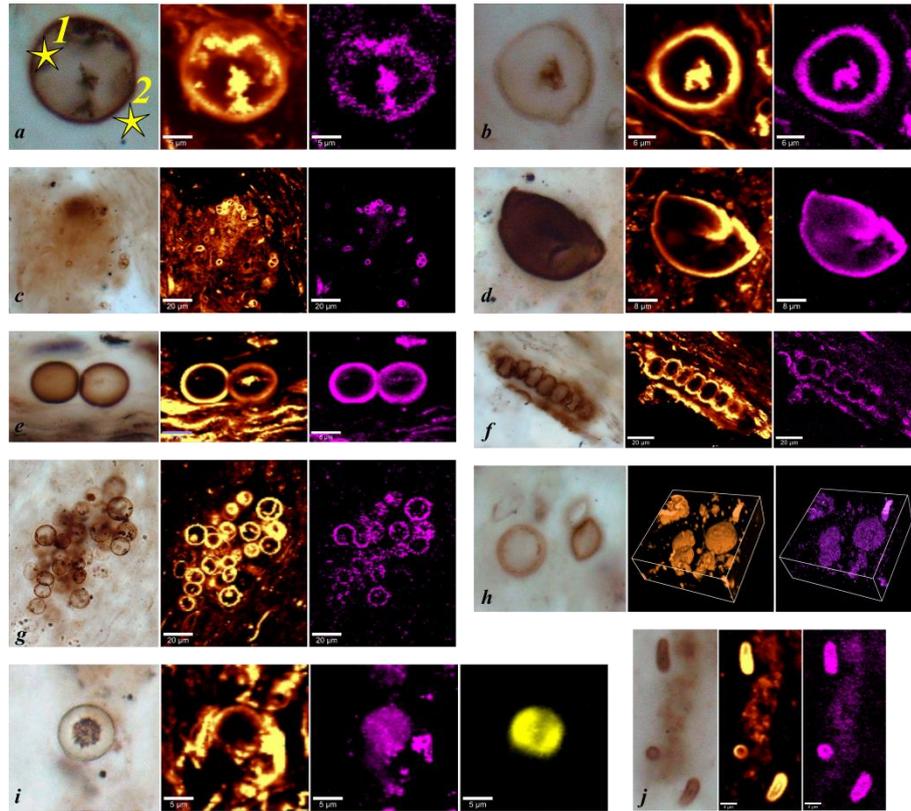


Fig. 4.1. Microfossiles de la formation Draken. Pour chaque microfossile, de gauche à droite, (a-h, j) image optique, cartographie Raman de la matière carbonée et cartographie Raman de la silice « opaline », et pour (i) cartographie Raman de l'hydroxyapatite. La cartographie de la zone (h) a été réalisée en 3 dimensions, dans l'épaisseur de la lame mince ($50 \times 50 \mu\text{m}^2$ sur $30 \mu\text{m}$ d'épaisseur). Les étoiles en (a) correspondent aux endroits où des analyses par microsonde électronique ont été réalisées, (1) $98,11\% \text{ SiO}_2 + 1,89\% \text{ H}_2\text{O}$ et (2) $98,78\% \text{ SiO}_2 + 1,29\% \text{ de H}_2\text{O}$ (Foucher & Westall, 2013).

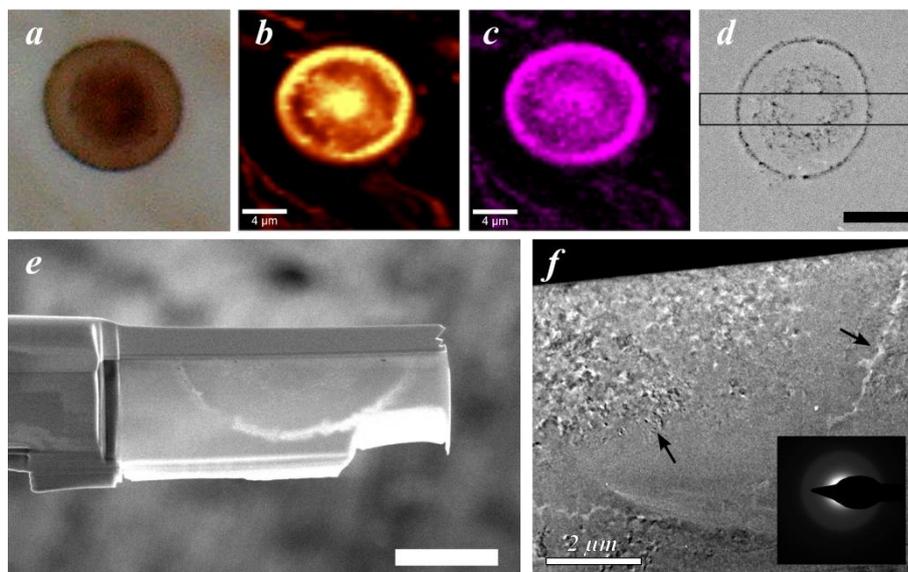


Fig. 4.2. Microfossile de la formation Draken. (a) Image optique. (b) Cartographie Raman de la matière carbonée. (c) Cartographie Raman de la silice « opaline ». (d) Image MEB avant préparation de la coupe FIB, vue de dessus. (e) Image MEB de la coupe FIB réalisée à l'emplacement du rectangle noir en (d), vue de profil. (f) Image MET de la coupe. La membrane et le cytoplasme sont visibles (flèches noires). Le diffractogramme associé à la silice « opaline » est reporté en insert (Foucher & Westall, 2013).

Des analyses ont également été réalisées sur des échantillons de 1,9 Ga de la formation Gunflint (Canada) où de la silice opaline associée à des structures fossiles avait déjà été détectée par MET (Moreau & Sharp, 2004). Le signal Raman de la silice opaline a également été mesuré dans ces échantillons (Fig. 4.3). Enfin, l'opale étant une phase minérale métastable, elle devrait normalement recristalliser en quartz avec le temps du fait des processus de métamorphisme, même faibles. Des échantillons de Duck Creek en Australie, de 1.8 Ga, contenant des structures fossiles comparables à celles observées dans la formation Gunflint mais ayant subi un métamorphisme légèrement supérieur (faciès à zéolites) ont donc également été analysés (Wilson *et al.*, 2010). Dans ce cas, la présence de silice « opaline » associée avec la matière carbonée n'a pu être détectée (Fig. 4.3). On notera sur la Figure 4.3 la similarité entre les spectres Raman de la matière carbonée des formations Draken et Gunflint par comparaison avec le signal associé à la formation Duck Creek en accord avec un métamorphisme plus élevé (cf. Chapitre 3, Fig. 3.3).

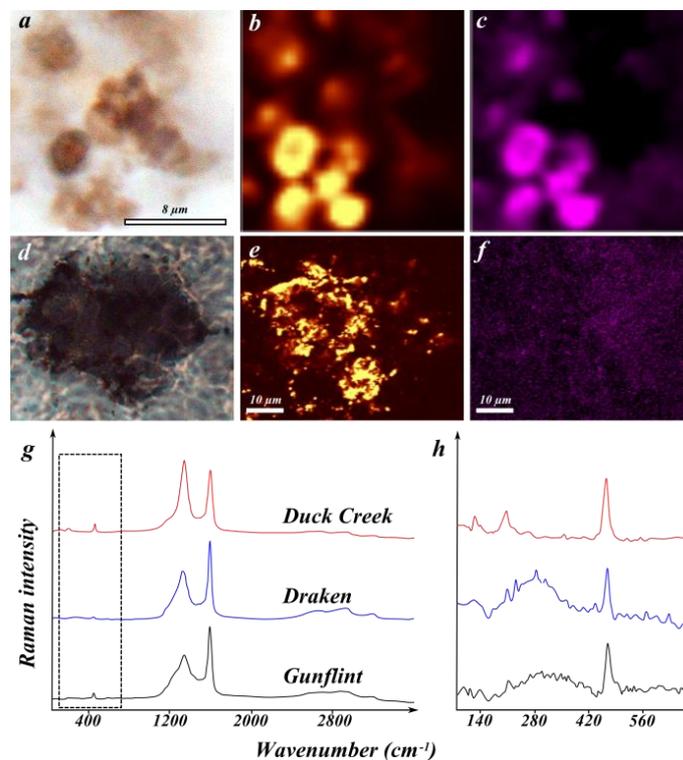


Fig. 4.3. Microfossiles (a-c) de la formation Gunflint et (d-f) de la formation Duck Creek. (a,d) Images optiques. (b,e) Cartographies Raman de la matière carbonée. (c,f) Cartographies Raman de la silice « opaline ». (g) Spectres Raman associés et (h) zoom sur la zone encadrée en (g) montrant la présence de silice « opaline » dans les formations Draken et Gunflint (Foucher & Westall, 2013).

4.3- Origine de la silice « opaline »

Des expériences de silicification artificielle réalisées dans les années 90 avaient montré que la précipitation de silice sous forme de silice « opaline » était favorisée par les groupes fonctionnels associés à la membrane et au cytoplasme des organismes lors du processus de minéralisation (Westall *et al.*, 1995). La minéralisation se poursuivant ensuite à partir de ces noyaux jusqu'à former des dépôts de silice macroscopiques. La préservation de cette phase minérale pendant plusieurs centaines de millions d'années peut s'expliquer par la structure fine du mélange matière carbonée/opale qui gêne la recristallisation de la silice sous forme de quartz, contrairement au reste de la roche. Ainsi, dans le cas de matière carbonée d'origine abiotique (hydrothermale ou

météoritique), il est probable que ce processus ne survienne pas. Celle-ci étant déjà sous forme de matière carbonée lorsque la silicification intervient, la précipitation n'est alors plus favorisée par les groupes fonctionnels associés à la matière organique. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons étudié de la matière carbonée présente dans des veines de quartz hydrothermales de Mazerier, dans le Massif Central. La difficulté a été de trouver de la matière carbonée d'origine abiotique ayant été silicifiée et n'ayant pas été soumise à un métamorphisme ou une température trop importante (<300°C). Les analyses Raman réalisées n'ont pas permis de détecter de silice « opaline » associée avec la matière carbonée (Fig. 4.4). Encore une fois, on notera sur la Figure 4.4 la similarité entre les spectres Raman de la matière carbonée de la formation Draken et de la veine de Mazerier démontrant un degré de métamorphisme proche (cf. Chapitre 3).

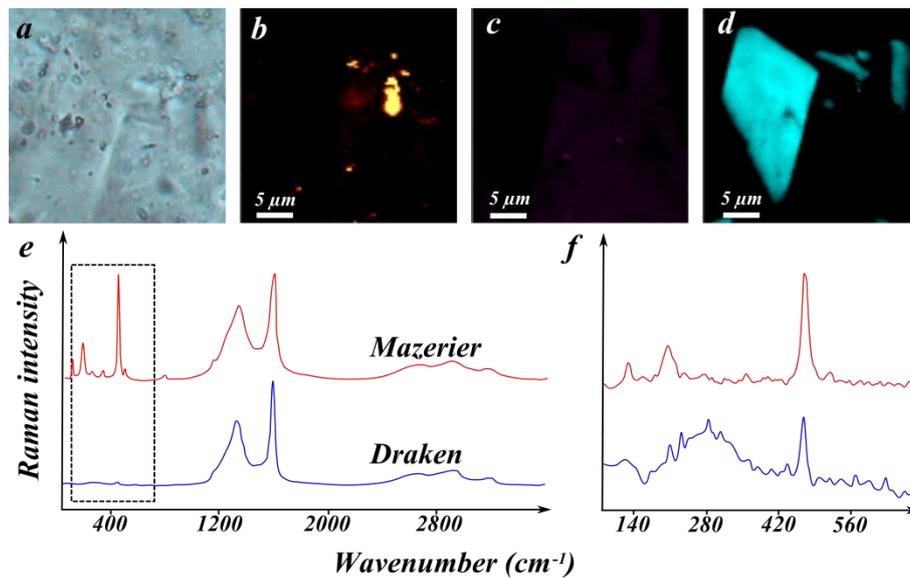


Fig. 4.4. Matière carbonée observée dans une veine hydrothermale de Mazerier. (a) Image optique. (b) Cartographie Raman de la matière carbonée. (c) Cartographie Raman de la silice « opaline ». (d) Cartographie Raman d'orthoclase. L'orthoclase détritique provient du granite dans lequel la veine est observée. (e) Comparaison entre le spectre Raman associé et celui de la formation Draken. (f) Zoom sur la zone encadrée en (e) montrant l'absence de silice « opaline » dans la veine de Mazerier (Foucher & Westall, 2013).

Au final, l'association de matière carbonée et d'un minéral métastable (la silice opaline) détectée par spectroscopie Raman peut être considérée comme une biosignature particulièrement pertinente pour l'exploration de la surface de Mars. Ces résultats ont été publiés dans la revue *Astrobiology* en 2013 (Foucher & Westall, 2013).

Bien évidemment, seul, ce signal Raman ne saurait constituer une preuve irréfutable d'évidence d'une vie passée sur Mars. Les conséquences d'une telle découverte seraient tellement importantes qu'avant toute annonce il sera nécessaire d'effectuer toute une série d'analyses complémentaires. Malheureusement, les contraintes imposées par le spatial sont particulièrement limitantes. La détection de biosignature telles que celles décrites ici sera particulièrement délicate *in situ*. En particulier, lors de la mission *ExoMars 2020*, les analyses Raman seront réalisées après broyage des échantillons rendant toute observation optique de potentielles structures fossiles impossible.

4.5- Valorisation scientifique de l'étude

Publication principale :

Raman imaging of metastable opal in carbonaceous microfossils of the 700-800 Ma old Draken Formation, F. Foucher & F. Westall, *Astrobiology* 13-1, 57-67, (2013).

Séminaires invité :

The search for ancient life on Mars using Raman spectroscopy, F. Foucher, M.-R. Ammar, G. Lopez-Reyes, N. Bost., F. Rull-Pérez, P. Russmann & F. Westall, 12th *Symposium Confocal Raman Imaging, WITec, Ulm, Allemagne, 28-30 septembre 2015.*

What biosignatures facilitate life detection? F. Foucher, 3rd *AstRoMap Workshop: What bio-signatures facilitate life detection? Definition of science goals, Madrid, Espagne, 8-9 mai 2014.*

Communications orales :

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *GeoRaman, Novosibirsk, Russie, 9-13 juillet 2016.*

Détection de biosignatures fossiles par spectroscopie Raman, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *Assemblée Générale de la Société Française d'Exobiologie, 19 novembre 2015.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *15th meeting of the European Astrobiology Network Association, ESA-Estec, Noordwijk, Pays-Bas, 6-9 octobre 2015.*

Detection of Biosignatures in Silicified Rocks Using Raman Mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *AbSciCon 2015, Chicago, USA, 14-19 juin 2015.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *Origins 2014, Nara, Japon, 6-11 juillet 2014.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013.*

Analyses par cartographie Raman d'organismes silicifiés, F. Foucher & F. Westall, 2^{èmes} *Rencontres de la Société Française d'Exobiologie, Fréjus, France, 11-14 novembre 2012.*

Raman mapping of silicified biological remains, F. Foucher & F. Westall, *GeoRaman 10, Nancy, France, 11-13 juin 2012.*

Micro-Raman study of Precambrian Permineralized Cells from the Draken Formation, F. Foucher & F. Westall, *EGU General Assembly, Vienne, Autriche, 03-08 avril 2011.*

Posters :

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, 12th *EANA workshop, Stockholm, Suède, 15-17 octobre 2012.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *European Planetary Science Congress, Madrid, Espagne, 24-28 septembre 2012.*

Biosignatures observed by Raman mapping in silicified materials, F. Foucher, F. Westall & A. Knoll, *EGU, Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.*

Raman spectroscopy of Precambrian microfossils from the Draken formation: a useful tool for identifying biosignatures in ancient materials, F. Foucher, J. Jehlicka, J.-N. Rouzard & F. Westall, *Origins 2011, Montpellier, France, 3-8 juillet 2011.*

Micro-RAMAN characterization of precambrian permineralized cells, Draken Formation: preliminary results, F. Foucher, B. Cavalazzi & F. Westall, 9th *European Workshop on Astrobiology EANA'09, Bruxelles, Belgique, 12-14 octobre 2009.*

Prix et distinction :

Silver WITec paper award 2014, Pour « Raman imaging of metastable opal in carbonaceous microfossils of the 700-800 Ma old Draken Formation », F. Foucher & F. Westall, Astrobiology 13-1, 57-67, (2013).

5- Effet du broyage sur les analyses Raman réalisées lors de la mission *ExoMars 2020*

5.1- La mission *ExoMars*

La mission *ExoMars* est la première mission du programme optionnel de l'agence spatiale européenne (ESA), baptisé *Aurora*, et dont l'objectif global est l'exploration du système solaire, même s'il se concentre principalement sur la planète Mars (Vago *et al.*, 2013 ; 2016). Ainsi, à la suite de la mission *ExoMars*, sont prévues la participation à une mission de retour d'échantillons (*Mars Sample Return*, ou *MSR*) et à l'exploration de la planète rouge par l'homme. Initialement prévue à l'horizon 2030, celle-ci se fera plus probablement après 2050, même si la société privée *SpaceX* et son PDG Elon Musk prévoit un atterrissage de l'homme sur Mars dès 2025.

Après l'échec de la sonde *Beagle 2*, l'ESA cherche à démontrer ses compétences dans le domaine de l'exploration planétaire. Les objectifs premiers de la mission *ExoMars* sont donc avant tout techniques et consistent à démontrer que l'Europe est capable de se poser, de se déplacer et de forer à la surface de Mars. Sur le plan scientifique, l'objectif principal est la recherche de traces de vie actuelle ou passée, la recherche de molécules organiques et la recherche de méthane. La mission a connu plusieurs reports et réorganisations. Finalement, elle se fait en partenariat avec l'agence Russe *RosCosmos* et se décompose en deux parties :

- *ExoMars 2016* est composée d'un module de descente européen, l'*EDM* (*Entry, descent and landing Demonstrator Module*), nommé Schiaparelli en référence à l'astronome Giovanni Schiaparelli qui avait décrit des canaux à la surface de Mars à la fin du XX^{ème} siècle, et d'un satellite nommé *TGO* (*Trace Gas Orbiter*) dont l'un des objectifs est la détection et la quantification du méthane dans l'atmosphère de Mars. Ce satellite servira également de relais pour les futures missions martiennes. Le 19 octobre 2016, l'ESA a confirmé la mise en orbite de *TGO*. Ce dernier devrait mettre un an à se placer sur son orbite nominale par aéofreinage, *i.e.* en se freinant sur les couches supérieures de l'atmosphère martienne. Par contre, l'atterrissage de l'*EDM* ne s'est pas déroulé comme prévu. Les rétrofusées se sont arrêtées de fonctionner trop tôt conduisant à une chute libre de 19 s suivie du crash du module.

- *ExoMars 2020* correspond à la mission d'exploration de la surface de Mars à l'aide d'un rover. L'atterrissage de ce dernier se fera en partenariat avec l'agence russe pour qui se sera également une première.

L'originalité du rover de la mission de 2020 réside dans sa foreuse/carotteuse. Cette dernière devrait permettre de prélever des carottes de roche de 3 cm de long et 1 cm de diamètre jusqu'à 2 m de profondeur, l'idée étant de pouvoir analyser des échantillons préservés des conditions oxydantes et des radiations importantes régnant en surface et qui conduisent à la dégradation des molécules

organiques jusqu'à ~1.5 m de profondeur (cf. §1.3). Ces carottes seront ensuite analysées à l'intérieur du rover avec la charge utile Pasteur (Vago *et al.*, 2013).

Le rover sera équipé de divers instruments d'analyse et d'observation, situés à l'extérieur comme à l'intérieur (Fig. 5.1).

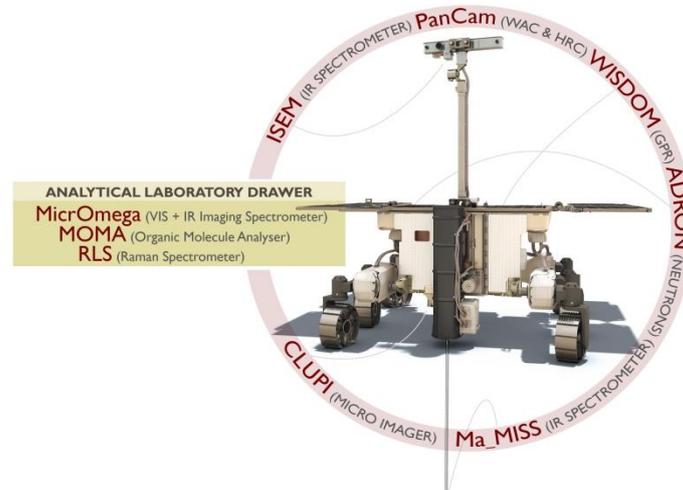


Fig. 5.1. Rover de la mission ExoMars 2020 et localisation des différents instruments (crédits ESA).

A l'extérieur :

- *PanCam*, est un système d'observation panoramique situé en haut du mat équipant le rover. Il est composé en réalité de 3 caméras : une caméra haute résolution *HRC*, et deux caméras grand-angle équipées de 12 filtres de couleurs permettant de faire de la spectroscopie UV-visible (Cousins *et al.*, 2012). Il est sous responsabilité anglaise.

- *CLUPI*, pour *Close-Up Imager*, est une caméra haute résolution permettant de réaliser des observations générales de l'environnement géologique, mais également des observations rapprochées des affleurements et des carottes extraites comme le ferait un géologue avec une loupe (Josset *et al.*, 2016). *CLUPI* est sous responsabilité franco-suisse (voir Chapitre 7 pour plus d'information).

- *WISDOM*, pour *Water Ice and Subsurface Deposit Observation on Mars*, est un radar pour détecter la présence de glace dans le sous-sol et pour aider à la sélection des sites de forage. Il est sous responsabilité française.

- *Ma_MISS*, pour *Mars_Multispectral Imager for Subsurface Studies*, dont la sonde placée à l'intérieur du foret permet de faire des analyses en spectroscopie infrarouge du sous-sol. Il est sous responsabilité italienne.

- *ISEM*, pour *Infrared Spectrometer for ExoMars*, est un instrument russe fixé sur le mat du rover pour l'analyse infrarouge à distance.

- *ADRON-RM*, le second instrument russe, est un détecteur de neutron pour la détection et la quantification de l'hydrogène dans le premier mètre de sol martien.

A l'intérieur de Pasteur, il y aura 3 instruments :

- le *RLS*, pour *Raman Laser Spectrometer*, un spectromètre Raman sous responsabilité espagnole (Rull-Pérez & Martinez-Frias, 2006 ; Lopez-Reyes, 2015),

- *MicrOmega*, un microscope infrarouge sous responsabilité française (Pilorget & Bibring, 2013),

- MOMA, pour *Mars Organics Molecule Analyser*, un chromatographe phase gazeuse et spectromètre de masse (GC-MS) et spectromètre de masse par désorption laser (LD-MS) permettant l'identification des molécules organiques.

Bien qu'un spectromètre Raman soit embarqué lors de la mission *ExoMars 2020 (RLS)* il ne sera malheureusement pas possible de réaliser des cartographies comparables à celles décrites aux chapitres précédents. De plus, pour des raisons pratiques, les carottes seront broyées avant d'être analysées par les instruments du laboratoire de la charge utile Pasteur. En effet, le broyage des roches avant analyse est une méthode relativement simple d'obtenir des échantillons de taille standard. Dans le cas d'*ExoMars 2020*, les poudres ainsi obtenues viendront remplir des cavités creusées dans un plateau rotatif (le *Sample Preparation and Distribution System* ou *SPDS*) et le trop plein sera ôté avec une lame métallique afin d'obtenir une surface plane (Fig. 5.2).

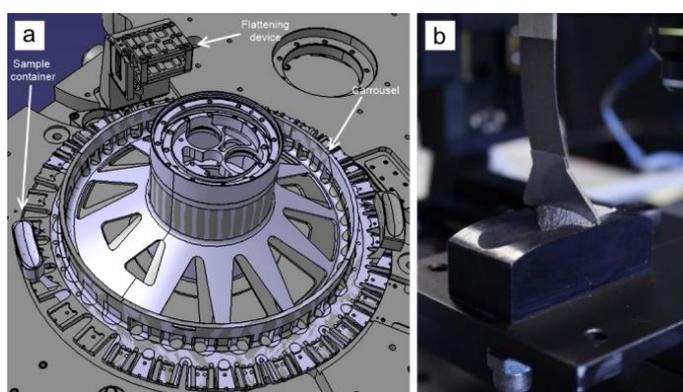


Fig. 5.2. (a) Le *Sample Preparation and Distribution System (SPDS)* de la mission *ExoMars 2020*. (b) Une lame métallique vient ôter le surplus de poudre afin d'obtenir une surface « plane » (Lopez-Reyes, 2015).

Ainsi, s'il sera possible de détecter la matière carbonée avec le *RLS*, il sera délicat de déterminer si elle est d'origine biologique, d'autant plus que ce signal ne pourra pas être relié à une quelconque microstructure observée par microscopie optique. Plus largement, les expériences montrent que le signal Raman est généralement dégradé lors de l'analyse de matériaux en poudre par rapport à des échantillons massifs. Nous avons donc cherché à identifier et quantifier cette dégradation du signal en vue de les prendre en compte lors de la mission *ExoMars 2020*.

5.2- Analyse Raman d'échantillons broyés

D'une manière générale, le broyage des échantillons est particulièrement préjudiciable puisqu'il conduit à la perte des informations de texture et de structure des roches. De plus, les analyses sur poudres sont connues pour être particulièrement délicates car associées à une augmentation du bruit et du niveau de base sur les spectres Raman. Une étude a donc été initiée dans le cadre du stage de M1 Physique et Sciences Pour l'Ingénieur de l'université d'Orléans de Philipp Rübmann, en 2011, sous ma direction, afin de quantifier ces phénomènes de manière plus précise. Différents minéraux (quartz, silicium, graphite) et différentes roches (basalte et chert contenant des traces de vie fossile) ont été sélectionnés pour leurs propriétés spectrales et/ou pour leur représentativité pour Mars avant d'être broyés puis tamisés afin d'obtenir des poudres de différentes granulométries. Pour chaque échantillon les poudres obtenues ont été disposées côte-à-côte et la technique de cartographie a été utilisée pour mettre en évidence les changements même très faibles dans le spectre des matériaux. L'exemple du silicium est donné en Figure 5.3.

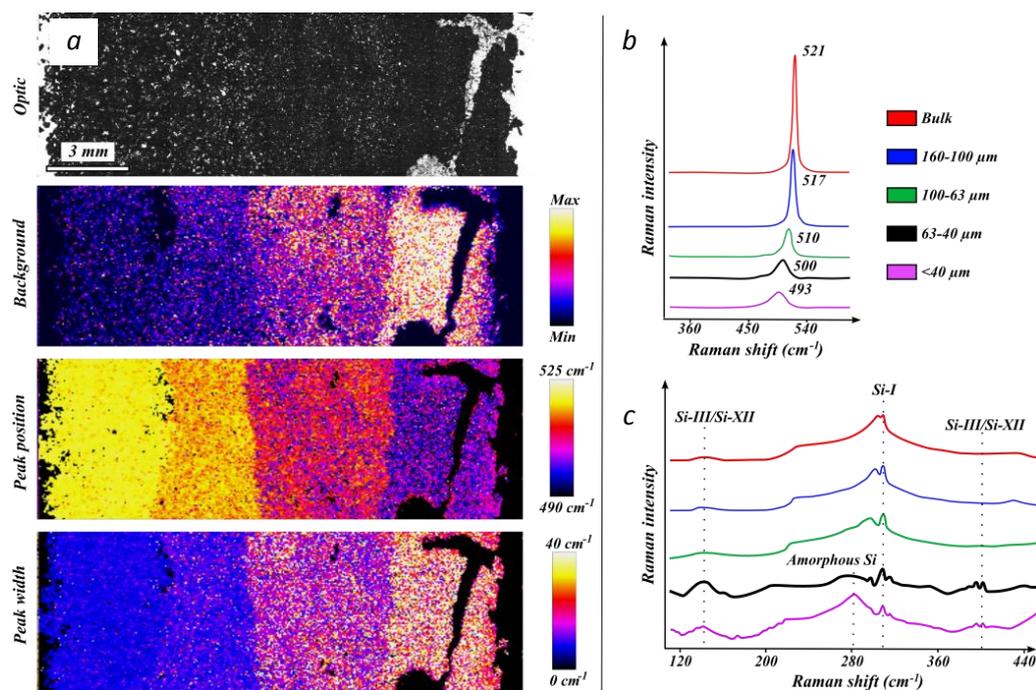


Fig. 5.3. Analyse Raman de poudres de silicium. (a) Photographie et cartographie Raman associées (taille de grains décroissante de gauche à droite) montrant, de haut en bas, l'évolution du niveau de base et la position et la largeur à mi-hauteur du pic principal. (b) Spectres moyens au niveau du pic principal de l'échantillon massif et de chaque poudre. (c) Détail du spectre pour la poudre la plus fine (<40 μm) montrant des bandes autour de 280 cm⁻¹ (Foucher *et al.*, 2013).

Les analyses montrent que le broyage induit une augmentation du bruit de fond sur les spectres Raman et peut conduire à un décalage des pics (particulièrement important sur le silicium) et l'apparition de nouveaux pics (silicium et quartz). L'identification de minéraux se faisant généralement à partir de bases de données de spectres, les modifications observées peuvent conduire à de mauvaises interprétations. Pour le basalte et le chert, on obtient un spectre correspondant à une combinaison des spectres des différents constituants de la roche. Au final, le broyage apparaît bien comme un facteur de dégradation des spectres Raman. Ces premiers résultats intéressants ont permis à Philipp Rübmann de participer durant son stage à la rédaction d'un abstract pour l'*European Planetary Science Congress 2011*, à Nantes, lors duquel les résultats ont été présentés sous forme de poster (Foucher *et al.*, 2011b).

Afin de prendre en compte ces effets lors de la mission *ExoMars 2020*, nous avons continué ce travail en collaboration avec Fernando Rull Pérez, en charge du RLS à l'université de Valladolid, en Espagne, et de son doctorant Guillermo Lopez-Reyes. Des tests complémentaires ont été réalisés avec le prototype de l'instrument. Il est apparu que les effets observés au CBM étaient beaucoup plus limités avec le système spatial, voire inexistant. Les différents tests réalisés ont finalement permis d'imputer l'origine de ces effets à la chaleur induite par le laser. En effet, un matériau en poudre est moins à même de dissiper la chaleur qu'un matériau massif du fait de la diminution de diffusion thermique liée à la porosité inter-granulaire. En utilisant un système Horiba Jobin Yvon iHR320 disponible à Valladolid, nous avons pu estimer l'augmentation de température avec la diminution de granulométrie à partir du rapport d'intensité des spectres Stokes et anti-Stokes. Dans le cas du silicium, la température peut atteindre plusieurs centaines de degrés comme le montre la Figure 5.4.

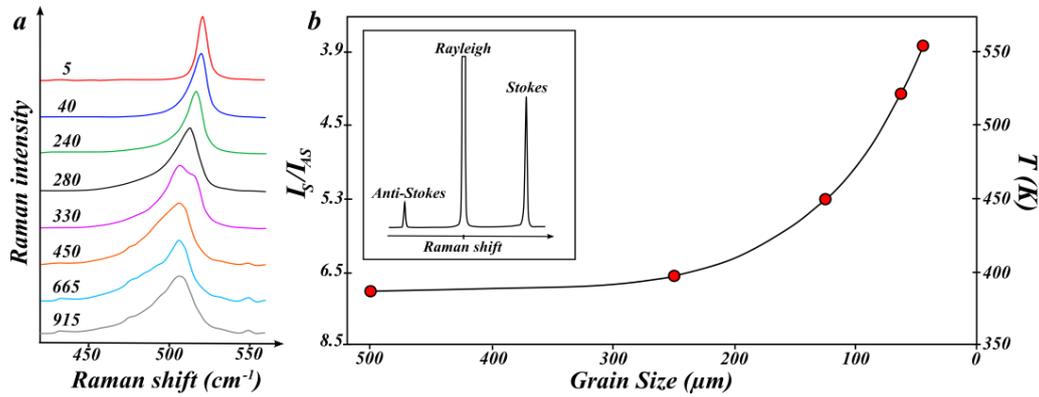


Fig. 5.4. (a) Pic principal de la poudre de silicium de granulométrie <40 μm pour différentes puissances laser (en kW/cm²) et (b) rapport d'intensité Stokes/anti-Stokes et température associée en fonction de la granulométrie des poudres de silicium (Foucher *et al.*, 2013).

Cet effet est d'autant plus important que la taille du spot laser est faible, l'énergie par unité de surface étant d'autant plus grande. Avec un objectif de microscope d'ouverture numérique 0,46 tel que l'objectif 20x utilisé pour les expériences au CBM, la taille du spot laser (diamètre de la tache de Airy) vaut 1,4 μm avec un laser de longueur d'onde 532 nm. Avec un laser d'une puissance de 10 mW seulement, l'énergie équivalente par unité de surface atteint donc 650 kW/cm² expliquant ainsi les températures importantes induites dans l'échantillon. Dans le cas du *RLS*, la taille du spot laser est de 50 μm. Avec le même laser et la même puissance, l'énergie associée n'est alors plus que de 500 W/cm², *i.e.* 1300 fois plus faible. De plus, lors de la mission *ExoMars 2020*, les échantillons seront broyés avec une taille de grains de 250 μm permettant une meilleure diffusion de la chaleur.

Au final, les tests montrent que la plupart des effets liés à la température induite par le laser seront négligeables lors des analyses sur Mars. Par contre, l'apparition de nouveaux pics reste possible. C'est le cas du quartz où le pic à 520 cm⁻¹ est associé à des orientations cristallines de surfaces particulières qui peuvent se créer lors du broyage. Enfin, la perte de texture associée au broyage reste un problème important ne permettant pas de différencier certaines roches de compositions minéralogiques identiques ou de détecter des traces de vie fossile. Ces travaux ont été publiés en 2013 dans la revue *Journal of Raman Spectroscopy* (Foucher *et al.*, 2013).

Paradoxalement, si l'on prend en considération les limitations liées aux contraintes des missions spatiales évoquées précédemment, et notamment le nombre limité de spectres qu'il sera possible d'acquérir, les analyses Raman sur poudre apparaissent comme étant particulièrement pertinentes pour l'étude des roches avec le *RLS*. En effet, le broyage a pour conséquence d'uniformiser la composition des échantillons. Ainsi, très peu de spectres sont nécessaires pour détecter l'ensemble des minéraux constitutifs de la roche, d'autant que les caractéristiques de l'instrument ont été optimisées en conséquence (la taille importante du spot notamment). Il a par exemple été possible de déterminer la proportion de chaque minéral dans des mélanges artificiels de gypse et de calcite en poudre (Lopez-Reyes *et al.*, 2013).

Néanmoins, reste que sur le plan purement exobiologique, la destruction de la texture liée au broyage, la taille relativement grande du spot et l'absence de cartographie vont rendre particulièrement délicate l'identification de potentielles structures fossiles. Il est donc crucial de travailler en amont de la mission sur l'optimisation des protocoles et, d'une manière générale, sur la corrélation des données acquises par les différentes techniques embarquées.

5.3- Valorisation scientifique de l'étude

Publication principale :

Effect of grain size distribution on Raman analyses and the consequences for in situ planetary missions, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull Pérez, P. Rüßmann & F. Westall, *Journal of Raman Spectroscopy* 44, 916-925, (2013).

Autre publication :

Analysis of the scientific capabilities of the ExoMars Raman Laser Spectrometer instrument, G. Lopez-Reyes, F. Rull, G. Venegas, F. Westall, F. Foucher, N. Bost, A. Sanz, A. Catala-Espi, A. Vegas, I. Hermosilla, A. Sansano & J. Medina, *European Journal of Mineralogy* 25, 721-733, (2013).

Séminaire invité :

Effect of grain size distribution on Raman analyses: consequences for Mars-2018 measurements, F. Foucher, N. Bost, P. Rüßmann, F. Westall & F. Rull team, *Conférence invitée à Unidad Asociada UVa-CSIC a través del Centro de Astrobiología, Boecillo (Valladolid), Espagne, 2 novembre 2011.*

Communications orales :

Strategy for the geological exploration of Mars during the ExoMars mission: effect of sample preparation on Raman spectroscopy measurements and payload calibration, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann, F. Westall, J. Vago & M. Viso, *GeoRaman, St Louis, USA, 15-20 juin 2014.*

Effects of powdering rock and mineral samples on optical observations and Raman analyses: consequences for ExoMars measurements, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull Pérez, P. Rüßmann & F. Westall, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013.*

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, F. Westall, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez & P. Rüßmann, *39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, Inde, 14-22 juillet 2012.*

Posters :

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann & F. Westall, *GeoRaman 10, (2012), Nancy, 11-13 juin 2012.*

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, G. López Reyes, N. Bost, F. Rull, P. Rüßmann & F. Westall, *EGU, Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.*

Effect of grain size distribution on Raman analyses: consequences for ExoMars-C measurements, F. Foucher, N. Bost, P. Rüßmann & F. Westall, *EPSC-DPS joint meeting, Nantes, France, 2-7 octobre 2011.*

Encadrement de stage :

Analyse de l'évolution de la qualité des spectres Raman en fonction de la granulométrie de poudres de roches. Aide à la recherche de traces de vie fossile in-situ sur Mars, Maître de stage de Philipp Rüßmann, étudiant en Master 1 Physique et Sciences Pour l'Ingénieur de l'Université d'Orléans. *Stage co-encadré par N. Bost au CBM, 2011.*

6- Utilisation d'analogues pour la préparation de missions spatiales

Comme expliqué précédemment, pour des raisons techniques, de nombreux instruments ne sont pas compatibles avec les missions spatiales et pour ceux qui le sont, leurs performances sont bien souvent beaucoup plus limitées que celles de leurs homologues de laboratoire. De ce fait, il apparaît particulièrement important d'élaborer des protocoles d'analyses basés sur la complémentarité des instruments. Afin de démontrer cette assertion, un test à l'aveugle des instruments de la charge utile de la mission *ExoMars 2020* a été réalisé à l'initiative de Nicolas Bost alors en thèse au sein de l'équipe (thèse CNES/Région Centre 2009-2012).

6.1- Le « Blind Test »

Le test à l'aveugle, ou « Blind Test », des instruments de la charge utile de la mission *ExoMars 2020* a été réalisé en 2012. Pour ce faire deux échantillons considérés comme représentatifs de Mars ont été envoyés aux équipes en charge du *RLS*, de *Ma_MISS*, de *CLUPI* et de *MicrOmega*, soit sous forme de poudre, soit sous forme de morceaux centimétriques, sans aucune indication sur leur nature. Chaque équipe a alors réalisé des analyses puis a renvoyé les résultats avec une première interprétation. L'ensemble des données a été rassemblé et complété par des images de terrain et des images satellitaires afin de reproduire l'ensemble des informations disponibles en 2020. Deux géologues, Nicole Lebreton et Claire Ramboz de l'ISTO, ont ensuite réalisé le travail d'indentification. En recoupant les différentes informations, elles ont été capables d'identifier avec précision les roches, à savoir un chert et une komatiite. De par la texture particulièrement singulière de ces roches, respectivement sédimentaire et spinifex, il est important de noter que l'interprétation s'est faite quasi-simplement en se basant sur les images optiques, les analyses complémentaires ne venant que conforter l'identification. Cependant, lors des analyses *in situ*, les observations seront réalisées sur les carottes de roches issues du forage. L'identification optique sera donc beaucoup plus délicate. De plus, bien que l'identité des roches ait pu être établie lors de l'examen visuel, les informations relatives à leur altération par de l'eau, cruciale en termes d'habitabilité, ont été déduites des mesures spectrales. Au final, l'ensemble des instruments sera donc indispensable pour réaliser une interprétation correcte et poussée des roches à la surface de Mars. Ces résultats ont été publiés dans la revue *Planetary and Space Science* en 2015 (Bost *et al.*, 2015).

6.2- L'ISAR : une collection de roches analogues pour le test d'instruments spatiaux

Comme démontré par le « Blind Test », la caractérisation complète d'un échantillon nécessite de recouper les informations issues de différents instruments et aucune technique ne saurait se prévaloir d'être universelle et parfaite. Il apparaît donc important d'élaborer des protocoles d'analyse prenant en compte l'ensemble d'une charge utile. Cela implique pour les équipes

responsables des différents instruments embarqués, de travailler de concert en utilisant des échantillons de référence. Il est ici important de distinguer les standards des échantillons de références. Les premiers sont utiles pour le développement et la calibration d'un instrument alors que les seconds servent à tester un instrument et à optimiser les protocoles d'analyse ; les premiers n'ont pas besoin d'être représentatifs de l'astre visité contrairement aux seconds qui doivent être analogues des matériaux susceptibles d'être rencontrés lors de la mission.

Ainsi, l'équipe d'exobiologie a eu l'idée de créer une collection de roches et minéraux analogues de Mars, et d'autres corps du système solaire, au sein de l'Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre (OSUC), dans le but de proposer des échantillons de référence parfaitement caractérisés aux équipes en charge des développements instrumentaux pour l'exploration spatiale *in situ*. Cette collection devait être accompagnée d'une base de données accessible en ligne et permettant de rechercher des échantillons en fonction de différents critères tels que leur analogie, leur minéralogie, leur format... Une première étude, prémices de cette collection, a été réalisée par Axelle Hubert lors d'un stage de L3 Sciences et Techniques, mention Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement de l'université de Tours début 2009, sous la direction de Frances Westall, stage que j'avais co-encadré. Cependant, la collection est réellement née lors de la thèse CNES de Nicolas Bost de 2009 à 2012, sous la direction de Frances Westall et Claire Ramboz, et pour laquelle j'ai largement participé. En particulier, j'ai travaillé à la conception de la base de données et du site web associé, ainsi qu'à l'étude et à la caractérisation de certains échantillons, par spectroscopie Raman notamment. Un travail de réflexion important a également été mené sur la nomenclature à utiliser pour référencer les échantillons. Enfin, quelques échantillons ont été sélectionnés et analysés durant le stage de M1 de Sciences de la Terre et de l'Environnement de l'université d'Orléans de Thibaud Dequillbecq en 2010, et d'autres ont été analysés par Floriant Becette en 2011 lors d'un CDD de deux mois, tous deux co-encadrés par Frances Westall, Nicolas Bost et moi-même.

Au final, cette collection a été baptisée *International Space Analogue Rockstore (ISAR)*. Son site web associé est consultable à l'adresse : www.isar.cnrs-orleans.fr. La quarantaine d'échantillons qu'elle comporte est régulièrement utilisée pour le test et la calibration de différents instruments de la mission *ExoMars 2020 (Ma_MISS, CLUPI et RLS)*, pour aider aux interprétations des données fournies par *Curiosity*, ou encore pour différentes études scientifiques où l'utilisation d'analogues est pertinente. La description de l'*ISAR* a été publiée en 2013 dans la revue *Planetary and Space Science* (Bost *et al.*, 2013).

Depuis sa création, l'*ISAR* a permis à l'équipe de se positionner à l'échelle internationale comme experte en matière d'analogues et de renforcer auprès de la communauté scientifique l'importance de ce type d'échantillons.

6.3- Le projet *EURO-CARES*

Du fait des contraintes inhérentes à l'exploration spatiale évoquées précédemment, il est nécessaire de rapporter des échantillons sur Terre pour réaliser des analyses fines. C'est en partant de ce constat que sont nées la mission *Stardust* de la NASA et la mission *Hayabusa* de l'agence spatiale japonaise (JAXA) qui ont respectivement rapporté sur Terre des poussières cométaires et astéroïdales. C'est également le cas des échantillons lunaires rapportés sur Terre lors des missions américaines *Apollo* et des missions russes *Luna*.

Excepté pour les roches lunaires, dont plus de 600 kg de matériel ont été rapportés sur Terre, les quantités transportées sont généralement petites. Ainsi, le projet de *Mars Sample Return* ne prévoit le retour que d'un peu plus de 500 grammes d'échantillons martiens sur Terre à l'horizon 2025-2030

(Clark, 2007 ; iMARS Working Group, 2008). Cette rareté rend les roches spatiales particulièrement précieuses et les procédures d'analyses doivent donc être optimisées afin de limiter la perte de matière. De plus, ces échantillons nécessitent des conditions de stockage particulières afin d'éviter toute contamination, dans un sens comme dans l'autre. L'Europe ne disposant pas encore de ce type d'infrastructures, le projet *EURO-CARES* a pour objectif de réfléchir à la création d'un centre Européen de curation d'échantillons extraterrestres.

Le projet *EURO-CARES*, pour *European Curation of Astromaterials Returned from Exploration of Space*, est financé par le programme de recherche et d'innovation *Horizon 2020* de l'Union Européenne. Il est coordonné par Sara Russell et Caroline Smith du Muséum d'Histoire Naturelle de Londres et implique des chercheurs et ingénieurs anglais, français, allemands, autrichiens, italiens et belges, issus de 14 institutions différentes et de formations différentes (géologues, biologistes, physiciens, chimistes, etc.). Le projet est découpé en groupes de travail, ou *Work Packages* (WP), chacun dédié à un aspect particulier de l'étude.

La visibilité de l'équipe d'exobiologie sur le thème des analogues pour l'exploration spatiale a permis à Frances Westall de prendre la tête du *WP5* dédié aux analogues, en collaboration avec Jutta Zipfel, conservatrice de la collection de météorites du *Senckenberg Institut* de Francfort, en Allemagne. Ce *WP* est composé d'un groupe d'experts dont je fais partie. Les différents échantillons sélectionnés pour constituer la collection du futur centre de curation serviront à élaborer et optimiser les protocoles de préparation et d'analyses des échantillons, à s'entraîner à leur manipulation, à calibrer les instruments, à valider et suivre dans le temps les conditions de stockage, ou encore à tester les procédures de stérilisation.

6.4- Valorisation scientifique de l'étude

Publications principales :

Testing the ability of the ExoMars 2018 payload to document geological context and potential habitability on Mars, N. Bost, C. Ramboz, N. Lebreton, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, S. De Angelis, M. Josset, G. Venegas, A. Sanz-Arranz, F.R. Pérez, J. Medina, J.-L. Josset, A. Souchon, E. Ammannito, C. Carli, J. L. Vago. & F. Westall, *Planetary and Space Science* 108, 87-97 (2015).

Missions to Mars: Characterisation of Mars analogue rocks for the International Space Analogue Rockstore (ISAR), N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, A. Meunier, S. Petit, I. Fleischer, G. Klingelhöfer & J. Vago, *Planetary and Space Science* 82-83, 113-127, (2013).

Autres publications :

L'Europe se prépare au retour d'échantillons extraterrestres, F. Westall & F. Foucher, *Microscop HS octobre 2016*, 26-27, (2016).

Microimaging VIS-IR spectroscopy of ancient volcanic rocks as Mars analogues, P. Manzari, S. D. Angelis, M. C. D. Sanctis, T. D. Iorio, E. Ammannito, N. Bost, F. Foucher & F. Westall, *Earth and Space Science* 3, 14p. (2016).

Calibration and testing of payload instrument for in situ space missions, F. Westall, N. Bost & F. Foucher, *Report of the COSPAR 2014, Russia, Space research in France, 40th scientific assembly*, 48-49, (2014).

Compte rendu du Workshop Analogues du 3 décembre 2013, CNES, Paris, F. Foucher, F. Westall, N. Bost & M. Viso, pp. 22, (2013).

L'International Space Analogue Rockstore, F. Foucher & F. Westall, *Microscop* 68, 20-21, (2013).

Synthesis of a spinifex-textured Basalt as an analog to Gusev crater basalts, Mars, N. Bost, F. Westall, F. Gaillard, C. Ramboz & F. Foucher, *Meteoritics & Planetary Science* 47, 820-831, (2012).

Séminaires invité :

EURO-CARES WP5: Analogues and instrumentation, F. Westall, J. Zipfel, F. Foucher, J. Bridges, V. Debaille, L. Folco, J. Michalski, P. Woznikiewicz, J. Martines-Frias, K. Joy, M. Lee, J.R. Brucato, M. Viso, N. Bost, A. Hutzler, G. Kminek, H. Schroeven-Deceuninck, M. E. Zolensky, C. Smith, O. Bacon, M. Van Ginneken & L. Ferrière, *EURO-CARES WP4 workshop, Paris, France, 13 octobre 2016*.

Analogues for planetary missions: the engineer point of view, F. Foucher, F. Westall, J. Zipfel, N. Bost & the ISAR and Euro Cares teams, *EURO-CARES WP5 workshop, Francfort, Allemagne, 1 juin 2016*.

Analogues for Planetary Missions, F. Foucher, F. Westall, J. Zipfel & N. Bost, *Missions to Habitable Worlds, Budapest, Hongrie, 28-29 octobre 2015*.

Communications orales :

Reflections on the definition of analogues and consequences for the EURO-CARES project, F. Westall, J. Zipfel, F. Foucher, J. Bridges, V. Debaille, L. Folco, J. Michalski, P. Woznikiewicz, J. Martines-Frias, K. Joy, M. Lee, J. R. Brucato, M. Viso, N. Bost, A. Hutzler, G. Kminek, H. Schroeven-Deceuninck, M. E. Zolensky, C. Smith, O. Bacon, M. Van Ginneken & L. Ferrière *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016*.

Report of the 2013 CNES Analogues Workshop. F. Foucher, F. Westall & N. Bost, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014*.

A Blind Test to assess the future ExoMars instruments using samples from the ISAR collection. F. Foucher, F. Westall, N. Bost & ISAR team, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014*.

Strategy for the geological exploration of mars during the ExoMars mission: effect of sample preparation on Raman spectroscopy measurements and payload calibration. F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann, F. Westall, J. Vago & M. Viso, *GeoRaman, St Louis, USA, 15-20 juin 2014*.

L'International Space Analogue Rockstore, F. Foucher & ISAR team, *Workshop Analogues, CNES, Paris, 3 décembre 2013*.

ExoMars: Mars analogue rocks in the European lithothèque at Orleans, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, I. Fleischer, G. Klingelhöfer, M. Viso, J. Vago & T. Zegers, *EGU General Assembly, Vienne, Autriche, 03-08 avril 2011*.

Posters :

EURO-CARES: EUROpean Curation of Astromaterials Returned from Exploration of Space, The EUROCARES consortium, *Journées de la SFE, Lyon, France, 22-24 novembre 2016*.

The International Space Analogue Rockstore (ISAR) for in situ instrument testing: relevance for Martian missions. F. Westall, N. Bost, F. Foucher, C. Ramboz, L. Loiseau & ISAR team, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013*.

The European Space Analogue Rockstore: a Key Tool for Determining Habitability in In Situ Missions on Mars, N. Bost, F. Westall, F. Foucher & D. Pullan, *The International Conference: Exploring Mars Habitability and MEPAG, Lisbonne, Portugal, 13-17 juin 2011*.

Constitution of a Mars analogues rockstore and data base for space missions, the key role of Raman spectroscopy, N. Bost, F. Foucher, F. Westall, C. Ramboz & the Orléans-Lithothèque Team, *Workshop Mars III, Les Houches, France, 28 mars-2 avril 2010*.

Co-encadrement de thèse :

Caractérisation de roches analogues de Mars pour la lithothèque d'Orléans. Co-encadrement de Nicolas Bost, doctorant en Géologie pour l'Université d'Orléans, le CNES et la région Centre. *Thèse sous la direction de F. Westall (CBM) et C. Ramboz (ISTO) encadrée au CBM de 2009 à 2012*.

Encadrement de stages :

Caractérisation de roches analogues de Mars, participation à la lithothèque d'Orléans. Co-encadrement de Thibaud Dequillbecq, étudiant en Master 1 de Géologie à l'Université d'Orléans. Stage sous la direction de F. Westall, co-encadré par N. Bost au CBM en 2010.

Étude de roches analogues de Mars. Co-encadrement d'Axelle Hubert, étudiante en Licence 3 de Géologie à l'Université de Tours. Stage sous la direction de F. Westall encadré au CBM en 2008.

Participation à des programmes de recherche :

Euro-Cares (Horizon 2020), Préparation d'un Centre de stockage et d'analyses d'échantillons rapportés sur Terre lors missions spatiales. Participation au Working package WP5: Analogue Samples. Porteur du projet : Caroline Smith (NHM Londres). Responsables working package : F. Westall (CBM), Jutta Zipfel (Senckberg Gesellschaft für Naturforschung, Allemagne). Depuis 2015.

ISAR, Collection d'échantillons analogues de roches et minéraux extraterrestres pour le test et la calibration d'instruments. Gestion de la collection et webmaster du site internet associé. Responsable scientifique : F. Westall, Responsable technique : F. Foucher. Depuis 2010.

Organisation de colloques et congrès :

Session LF3 Planetary analogue samples and environmental simulators, Convener: F. Foucher, Co-Conveners: G. Danger , O. Prieto-Ballesteros , F. Gómez , B.H. Foing , F. Westall , L. Rodrigues , L. Preston & A. Elsaesser, EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 septembre 2014.

Workshop Analogues CNES, Comité d'organisation: F. Westall, F. Foucher et N. Bost, CNES, Paris, 3 décembre 2013.

7- L'instrument *CLUPI* et le projet *CaliPhoto*

7.1- Le *Close-UP Imager* de la mission *ExoMars 2020*.

Lors de la mission *ExoMars 2020*, des images optiques seront réalisées à l'aide de l'instrument *CLUPI* dont Frances Westall est *co-principal investigator (co-PI)* (cf. §5.1). Cet instrument est développé au *Space-X Institute* de Neuchâtel, en Suisse, sous la direction de Jean-Luc Josset (*PI* de l'instrument) (Josset *et al.*, 2016). Une partie du développement (l'encapsulation du détecteur) se fait sous la responsabilité de Philippe Martin, ingénieur de recherche au Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPC2E) à Orléans. Dans ce cadre, l'équipe d'exobiologie du CBM participe très largement à la calibration scientifique de l'instrument en utilisant notamment les échantillons analogues de l'*ISAR*.

Comme expliqué au Chapitre 5, l'originalité du rover de la mission *ExoMars 2020* sera la possibilité de forer le sol de Mars afin de prélever des carottes à plus de 2 m de profondeur. *CLUPI*, qui était à l'origine fixé sur un bras robotisé, s'est vu déplacé sur le carénage de la foreuse lors de la suppression du bras pour des raisons de réorganisation de la mission. Cependant, la boîte de la foreuse étant mobile, *CLUPI* conserve une certaine liberté de prise de vue. Ainsi, en jouant avec les différentes possibilités offertes par le positionnement et l'orientation de la boîte de la foreuse, et par l'utilisation d'un habile jeu de miroirs, *CLUPI* pourra réaliser des images rapprochées et à distance (à l'infini) des affleurements, du sol et de la carotte intacte après prélèvement et avant broyage. De plus, lors des phases de forage, ce dernier réalisera des observations du tas de poudre se formant en surface (Fig. 7.1.).

Lors de cette phase de forage seul *Ma_MISS* devrait fournir une information sur la composition des roches traversées à l'aide d'une sonde IR placée dans le foret (cf. §5.1). Bien que peu intéressantes de prime abord, les images de poudres issues du forage réalisées par *CLUPI* lors de ces phases pourraient fournir une information complémentaire sur la nature du sol martien. L'étude de roches à partir de l'image de leur poudre ne présente pas d'intérêt sur Terre où il est plus facile d'identifier une roche à partir d'échantillons bruts. Cependant, la configuration de la mission et les limitations inhérentes à l'exploration spatiale en font une information non négligeable afin d'exploiter au maximum les données obtenues. J'ai donc initié une étude sur cette approche.

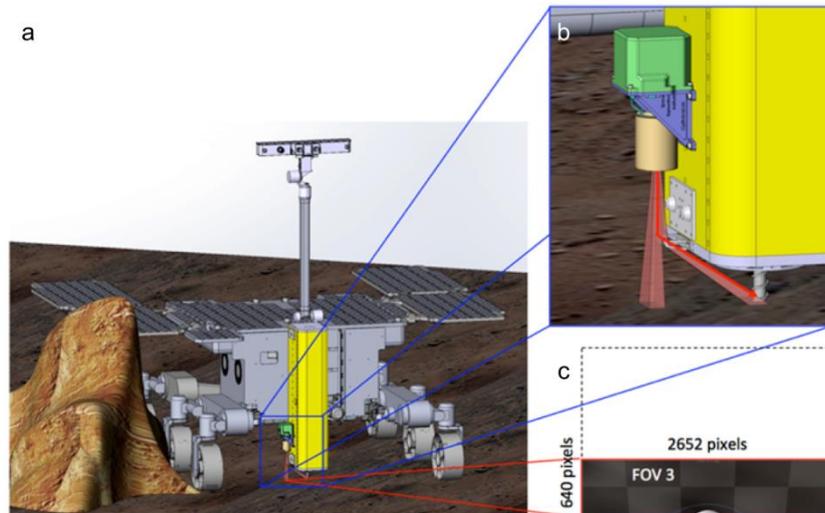


Fig. 7.1. (a) Rover de la mission *ExoMars 2020* durant la phase de forage. (b) zoom sur *CLUPI*. Le champ de vue de *CLUPI* et scindé en deux à l'aide d'un miroir. La partie inférieure des images permettra d'observer le tas de poudre se formant en surface lors des forages, *FOV3* en (c) (d'après Josset *et al.*, 2016).

7.2- La méthode CaliPhoto

Une première étude a été réalisée afin de déterminer s'il était possible de différencier des roches une fois celles-ci réduites en poudre. J'ai ainsi encadré en 2014, avec Guillaume Guimbretière et Nicolas Bost du CEMHTI, un stagiaire de M1 en Science de la Terre et Environnement de l'université d'Orléans, Etienne Marceau, avec lequel nous avons prélevé dans le Massif Central des roches représentatives pour Mars. L'idée était de couvrir plus moins dans sa totalité le diagramme *TAS* (*Total Alkali Silica*) servant à classier les roches volcaniques (Fig. 7.2).

Les roches ont ensuite été broyées puis photographiées montrant une variation de couleur évidente (Fig. 7.3.).

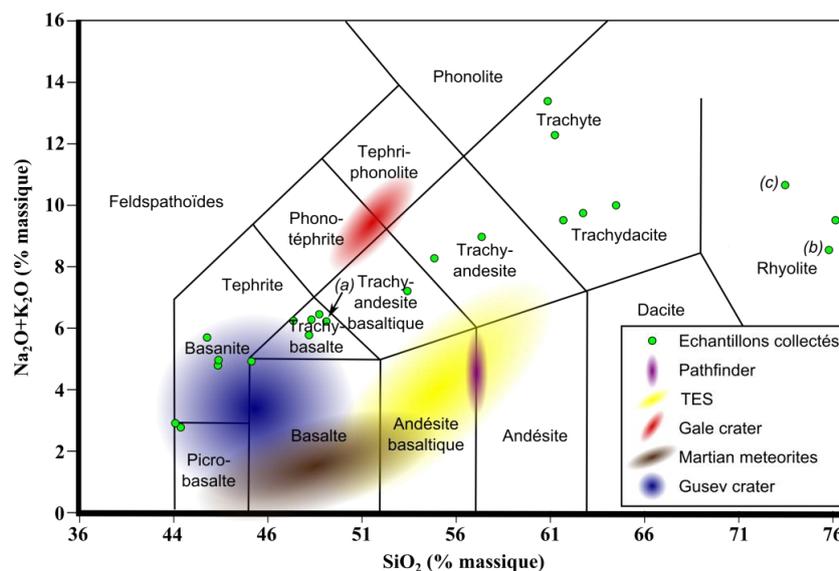


Fig. 7.2. Diagramme *TAS* et composition des roches martiennes, d'après McSween *et al.*, 2009 et Stolper *et al.*, 2013, et des échantillons utilisés pour l'étude (points verts). Les données *TES* (*Thermal Emission Spectrometer, Mars Global Surveyor, NASA*) peuvent provenir de phases altérées. Les points (a), (b) et (c) correspondent aux compositions des échantillons présentés en Figure 7.4.



Fig. 7.3. Photographie des roches volcaniques prélevées dans le Massif Central après broyage.

Nous avons alors cherché le lien qui pouvait exister entre la couleur des poudres et leur composition. Premièrement, il est apparu que la luminance, c'est-à-dire la moyenne des valeurs R, G, B, augmentait avec la diminution de la granulométrie, *i.e.* plus une poudre est fine plus elle est claire. Les poudres ont donc été broyées puis tamisées pour avoir la même granulométrie. Les tests réalisés montrent que la granulométrie des poudres obtenues par forage est relativement constante ($<60 \mu\text{m}$). Cette gamme a donc été choisie pour la suite de l'étude.

Dans un premier temps, afin de s'affranchir des conditions d'éclairage, toutes les poudres ont été prises sur une même photo. Il est ainsi apparu que la luminance augmentait avec la teneur en silice des roches volcaniques. En particulier, des roches ayant une composition chimique identique mais ayant des couleurs très différentes à l'état massif ont des couleurs proches une fois réduites en poudre comme le montre Figure 7.4 avec le cas particulièrement flagrant de l'obsidienne.



Fig. 7.4. Photographies de roches volcaniques avant et après broyage (a) trachy-basalte du Massif Central, (b) obsidienne de Californie, et (c) rhyolite du Massif Central. La composition chimique de l'obsidienne est très proche de celle de la rhyolite (cf. Figure 7.2).

Ces résultats très encourageants ont permis à Etienne Marceau de rédiger un abstract pour l'EPSC 2014 lors de son stage (Marceau *et al.*, 2014). J'ai fait la présentation orale associée en septembre 2014 à Lisbonne, au Portugal.

La composition des roches volcaniques semblant influencer la couleur des poudres associées, l'idée est apparue de créer une méthode d'identification se basant sur la couleur. Le problème majeur d'une telle méthode est de pouvoir s'affranchir des conditions d'éclairage. En effet, en fonction de ces dernières les poudres vont apparaître plus ou moins sombres. De plus, *in situ* chaque roche sera photographiée séparément. Les travaux se sont donc poursuivis avec le stage de M1 en Mathématiques Traitement du Signal et de l'Image de l'université d'Orléans d'Aurélié Courtois, que j'ai encadrée en 2015, toujours avec Guillaume Guimbretière et Nicolas Bost, afin de trouver une méthode permettant de s'affranchir des conditions de prises de vue. Le principe final de la méthode élaborée, appelée *CaliPhoto*, est résumé sur la Figure 7.5. Il se décompose en deux étapes : (a) la constitution d'une base de données d'échantillons de référence et (b) l'utilisation de la base de données pour identifier ou « analyser » un échantillon inconnu.

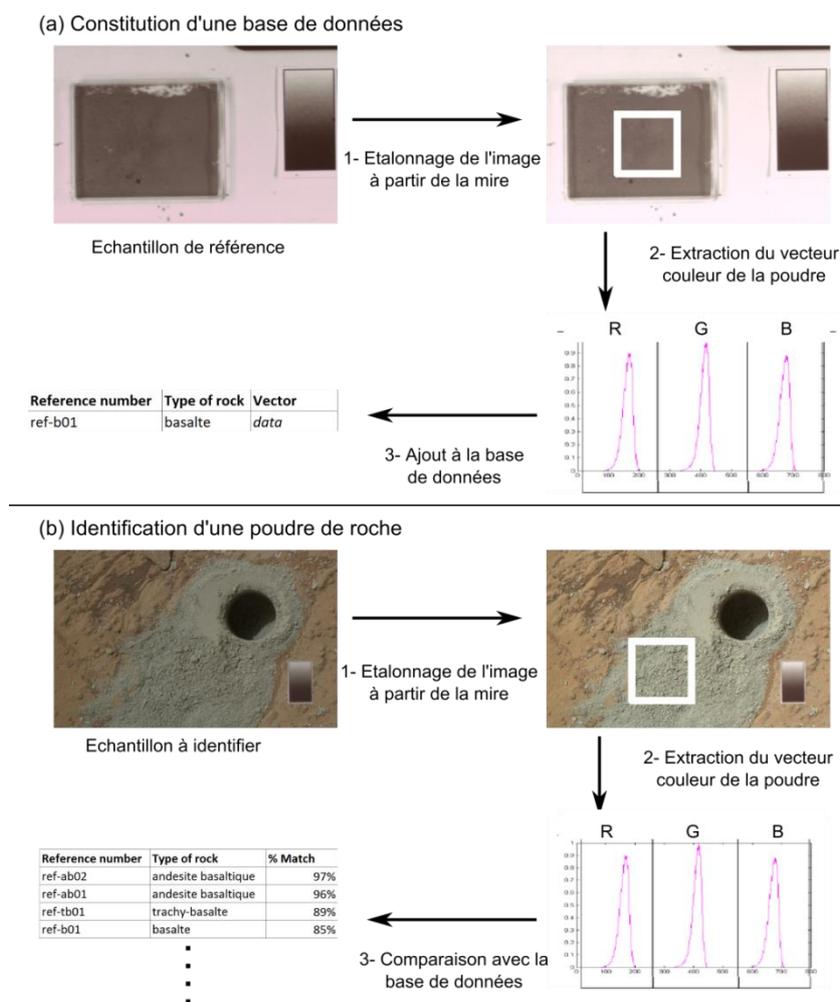


Fig. 7.5. Principe de la méthode d'identification *CaliPhoto*. (a) Phase de constitution d'une base de données et (b) phase d'identification d'une poudre de roche.

L'étape (a) consiste 1) à prendre en photo des échantillons de référence à côté d'une mire d'étalonnage et à corriger les photos à partir de la mire afin qu'elle soit identique sur toutes les photos, 2) à extraire le vecteur couleur de l'échantillon défini en mettant à la suite les histogrammes R, G et B normalisés par la valeur la plus élevée, et 3) à constituer une base de données avec les vecteurs couleurs obtenus (Fig. 7.5a).

L'étape (b) consiste 1) à prendre en photo l'échantillon inconnu à côté de la mire d'étalonnage et à étalonner la photo à partir de la mire pour que celle-ci soit identique à celle utilisée pour la constitution de la base de données, 2) à extraire le vecteur couleur de la zone correspondant à l'échantillon, et 3) à comparer ce vecteur avec ceux de la base de données. Au final, on obtient un tableau avec les pourcentages de correspondance avec les vecteurs de la base classés par ordre décroissant (Fig. 7.5b).

Les premiers résultats se sont montrés très prometteurs et ont même dépassé le champ d'application à *CLUPI*. Un brevet sur la méthode générale a été déposé et est en cours de valorisation dans le milieu industriel avec le soutien de la Société d'Accélération de Transfert de Technologie (SATT) Grand Centre. Le projet implique maintenant des chercheurs et ingénieurs du CBM, du CEMHTI, du LPC2E, de l'ISTO et du laboratoire MAPMO (Mathématiques - Analyse, Probabilités, Modélisation – Orléans) d'Orléans, ainsi que du *Space-X Institute* à Neuchâtel et la SATT Grand Centre. Un article dans la revue *Microscop* du CNRS est paru pour la fête de la science de 2015

(Foucher *et al.*, 2015b). Une publication est également en cours dans une revue scientifique internationale à comité de lecture.

Bien évidemment, de par la grande diversité des matériaux géologiques, la méthode *CaliPhoto* seule ne sera probablement jamais suffisante pour identifier des roches. Ainsi, l'étude s'est jusqu'à présent concentrée sur l'identification de roches volcaniques saines et elle devrait se poursuivre avec l'ajout de phases altérées et de roches sédimentaires à la base de données, et avec l'étude de mélanges. La méthode devra alors être couplée avec des méthodes d'analyses complémentaires. Cependant, dans l'optique d'une identification basée sur la complémentarité des instruments telles que décrite au paragraphe 6.1, la méthode pourrait s'avérer cruciale pour l'interprétation des observations et des analyses qui seront réalisées lors de la mission *ExoMars 2020*.

7.3- Valorisation scientifique de l'étude

Brevet

Brevet CaliPhoto, Inventeurs : F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost & A. Courtois, *brevet n°BNT220287FR01*, (2015).

Publications principales :

Colorimetric analysis to help identification of drilled rock powders on Mars: the CaliPhoto method, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, A. Courtois, E. Marceau, P. Martin, M. Bergougnieux, J.L. Josset, A. Verhaeghe, M. Josset, A. Souchon, N. Le Breton & F. Westall, *in prep.* (2017)

The Close-Up Imager (CLUPI) on board the ESA ExoMars Rover: Objectives, description, operations, and science validation activities, J.-L. Josset, F. Westall, B.A. Hofmann, J. Spray, C. Cockell, S. Kempe, A.D. Griffiths, M. Cristina de Sanctis, L. Colangeli, D. Koschny, K. Föllmi, E. Verrecchia, L. Diamond, M. Josset, E. J. Javaux, F. Esposito, M. Gunn, A.L. Souchon, T. Bontognali, O. Korablev, S. Erkman, G. Paar, S. Ulamec, F. Foucher, P. Martin, A. Verhaeghe, M. Tanevski, J. L. Vago, *Astrobiology, in press* (2016).

Autre publication :

Un selfie pour la planète rouge? F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, P. Martin, E. Marceau, A. Courtois & F. Westall, *Microscoop HS2015, 12-16*, (2015).

Séminaire invité :

Powder calibration target : CaliPhoto project, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, J.-L. Josset, A. Verhaeghe, E. Marceau, A. Courtois, P. Martin & F. Westall, *Conférence pour le CLUPI Science Team Meeting, Institut Space-X, Neuchâtel, Suisse, 11 Mars 2016*.

Communications orales :

Colorimetric analysis to help identification of drilled rock powders on Mars: the CaliPhoto method, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, A. Courtois, E. Marceau, P. Martin, M. Bergougnieux, J.-L. Josset, A. Verhaeghe, N. Le Breton & F. Westall, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016*.

Colorimetric analysis of rocks powders helping for the calibration of Close-up Imager (CLUPI) of the ExoMars mission. E. Marceau, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, F. Westall & the Exobiology Team, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014*.

Encadrement de stages :

Etalonnage colorimétrique du Close-Up Imager (CLUPI) de la mission ExoMars 2018 : aide à l'identification de roches en poudres. Tuteur de projet d'Aurélié Courtois pour son projet de fin d'études de Master 2 en

Mathématiques, Traitement du Signal et de l'Image à l'Université d'Orléans. *Projet co-encadré par G. Guimbretière au CEMHTI et M. Bergounioux au MAPMO en 2016.*

Etalonnage colorimétrique du Close-Up Imager (CLUPI) de la mission ExoMars 2018 : aide à l'identification de roches en poudres. Maître de stage d'Aurélié Courtois, étudiante en Master 1 Mathématiques, Traitement du Signal et de l'Image à l'Université d'Orléans. *Projet co-encadré par G. Guimbretière au CBM et au CEMHTI en 2015.*

Analyse colorimétrique de poudres de roches in situ pour la calibration du Close-up Imager de la mission ExoMars. Maître de stage d'Etienne Marceau, étudiant en Master 1 Sciences de la Terre et Environnement à l'Université d'Orléans. *Stage co-encadré par G. Guimbretière et N. Bost au CEMHTI et par P. Martin au LPC2E.*

8- LithoSpace

8.1- Pétrographie par microscopie optique en lumière transmise

Même en optimisant les instruments spatiaux, l'analyse *in situ* reste délicate et certaines techniques standard en laboratoire ne sont toujours pas compatibles avec des missions spatiales. Les trois principaux domaines d'intérêt des missions *in situ* sont les sciences de l'atmosphère, la géologie (planétologie) et l'exobiologie. Hormis pour l'étude de l'atmosphère, l'objet d'étude principale est donc la matière rocheuse (glaces comprises), que ce soit pour étudier la géologie, y trouver des molécules organiques ou y chercher d'éventuelles traces de vie passée ou présente. L'étude des roches permet de comprendre l'histoire géologique du corps visité, aussi bien les processus internes (volcanisme, tectonique...) que les processus de surface (altérations, système hydrique, sédimentologie...). Ces informations sont cruciales afin de déterminer les conditions d'habitabilité de l'astre et de savoir si la vie aurait pu y apparaître.

Sur Terre, l'approche standard pour étudier une roche consiste 1) à réaliser des observations (photographies et schémas) plus ou moins locales des paysages et des affleurements du lieu de prélèvement pour en déterminer le contexte, 2) à observer à l'œil ou à la loupe la roche afin de sélectionner et prélever les échantillons pertinents, 3) à réaliser l'étude pétrographique des échantillons prélevés en laboratoire par microscopie optique. Cette dernière étape indispensable nécessite la préparation de lames minces afin d'observer la microstructure de la roche (texture, minéraux, fossiles...) par transparence (Fig. 8.1). Elle est utilisée depuis plus de 200 ans ; la fabrication de la première lame mince par William Nicol datant de 1815. L'identification de la plupart des minéraux se fait en lumière polarisée/analysée (LPA) sur des lames minces d'une trentaine de microns d'épaisseur à l'aide notamment d'une table de Michel-Lévy (Michel-Lévy, 1888). Cette méthode d'observation permet généralement d'avoir une analyse quasi-complète de la roche. Des analyses locales plus poussées peuvent cependant être nécessaires (spectroscopies Raman et IR, microsonde électronique, diffraction des rayons X, microscopies électroniques...) afin de confirmer la minéralogie, identifier des phases mineures, réaliser une datation, analyser les éventuelles traces de matière organique, observer des fossiles sub-micrométriques... Quoiqu'il en soit, les zones à analyser sont généralement choisies d'après les observations réalisées en microscopie optique.

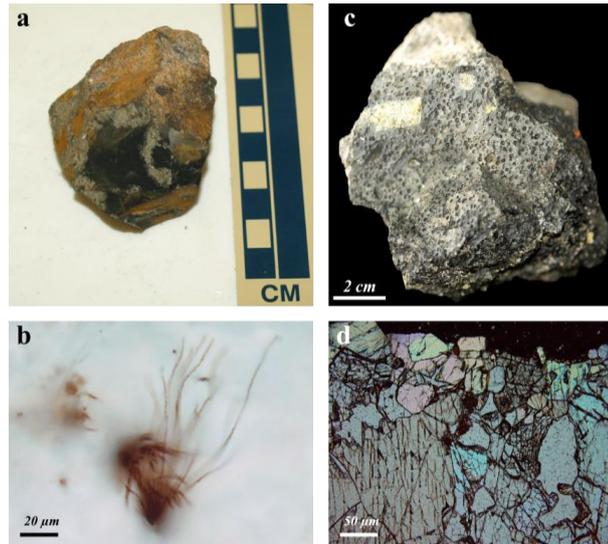


Fig. 8.1. (a) Photo d'une roche brute de la formation Gunflint (-1,9 milliard d'années) et (b) image en microscopie optique en lumière transmise de la lame mince associée dans laquelle on observe des microfossiles autrement invisibles. (c) Basalte de Svalbard et (d) observation de la lame mince associée au microscope optique en lumière polarisée/analysée.

L'approche est différente lors des missions spatiales *in situ*. En effet, bien que l'observation au microscope optique en transmission soit une méthode de base indispensable pour l'étude des roches, elle est actuellement impossible *in situ* du fait de l'absence de système de préparation de lames minces. Sur Mars, les instruments actuels travaillent sur des échantillons bruts ou sur des poudres de roches issues du broyage. D'une manière générale, la préparation des échantillons est quasi inexistante lors des missions *in situ*. Les *Mars Exploration Rovers* de la NASA disposent d'un outil d'abrasion placé sur un bras afin de décaper la surface des roches (le *Rock Abrasion Tool*) et le rover *Curiosity* (NASA) dispose d'une foreuse de 10 cm de long. Enfin, comme expliqué au Chapitre 5, les carottes réalisées lors de la mission *ExoMars 2020* seront broyées avant analyse.

8.2- Le projet *LithoSpace*

L'objectif du projet *LithoSpace*, initié par moi-même et Nicolas Bost en 2011, est de développer un instrument de préparation de lames polies automatisé fonctionnant *in situ*. Depuis 2014, il fait l'objet d'une R&T du CNES que je coordonne. Ce projet implique notamment Nicolas Bost, Sylvain Janiec (ISTO), Nicole Lebreton (ISTO), Aïcha Fonte (PRISME), Pascal Perron (Lycée B. Franklin), Frances Westall (CBM), Pascale Chazalnoël (CNES), Michel Viso (CNES) et Frédéric Courtade (CNES).

La possibilité de pouvoir disposer de lames minces *in situ* permettrait de faire une avancée significative dans la compréhension des roches extraterrestres, d'améliorer la qualité des analyses réalisées avec des instruments déjà spatialisés ou en cours de spatialisation (microscopie optique, spectromètre Raman, *LIBS...*), et d'ouvrir la porte à de nouveaux instruments scientifiques tel que le microscope optique en lumière transmise. Partant des mêmes constatations, un projet américain de développement d'un instrument de préparation de lames minces *in situ* a également vu le jour aux Etats-Unis (Dreyer *et al.*, 2013a ; b), démontrant la faisabilité et l'intérêt d'un tel instrument.

Depuis 2014, le cahier des charges fonctionnel (CDCF) a été rédigé et des réflexions ont été menées sur les différentes étapes, leur automatisation et la consommation énergétique d'un tel système. Au final, le principe standard de préparation d'une lame mince a été conservé, à savoir : 1) découpe d'un morceau de roche (sucre) dans l'échantillon, 2) induration/enrobage du sucre dans la

résine et collage sur une lame de verre, 3) découpe puis rodage du sucre parallèlement à la lame de verre pour amincissement jusqu'à une épaisseur de 30-35 μm et 4) polissage afin d'avoir une surface lisse et d'obtenir l'épaisseur standard de 30 μm . Les différentes étapes sont résumées en Figure 8.2.

Après optimisation, le protocole utilisé pour le projet LithoSpace est tel que décrit en Figure 8.3. Pour des raisons de simplification, il a été décidé que le système préparerait des lames minces à partir d'échantillons de taille standard, à savoir des carottes de 3 cm de long et 1 cm de diamètre, similaires à celles qui seront préparées lors de la mission *ExoMars 2020*.

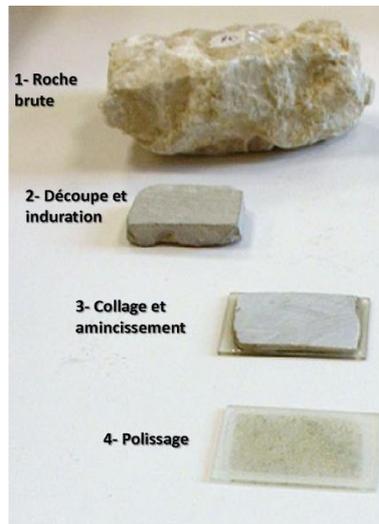


Fig. 8.2. Étapes nécessaires à la préparation d'une lame mince pétrographique.

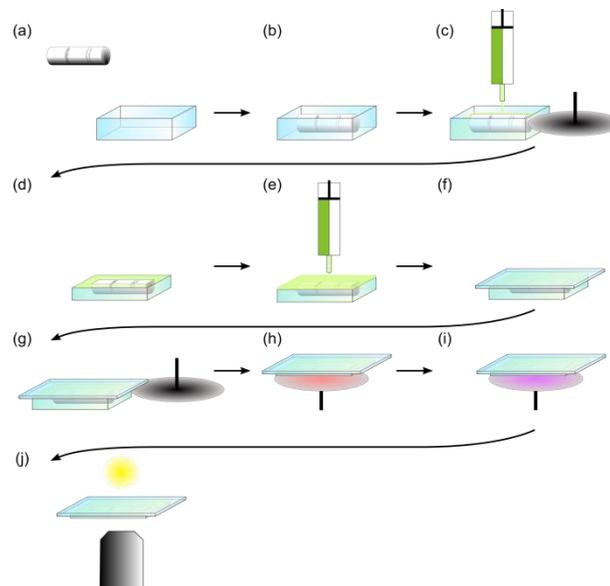


Fig. 8.3. Protocole de préparation d'une lame mince pétrographique permettant l'automatisation du procédé. (a-b) Un échantillon de taille standard (carotte) tombe dans un bac. (c-d) L'échantillon est enrobé avec une résine bi-composants de type époxyde avant d'être sciée en son centre. (e) Une fine couche de résine est déposée sur la surface et (f) une lame de verre est collée. (g) Une nouvelle découpe est réalisée afin d'obtenir une section de roche d'approximativement 100 μm d'épaisseur. Une phase de rodage (h) puis de polissage (g) est réalisée afin de diminuer l'épaisseur à 30 μm et d'obtenir une surface polie. (j) Finalement l'échantillon peut être observé par microscopie optique en lumière transmise, ou analysé par diverses techniques.

Ce protocole permettant d'obtenir un échantillon répondant au CDCF, une réflexion sur l'automatisation de ce procédé a été entamée. Au final, j'ai proposé un système constitué de trois plateaux circulaires pouvant tourner indépendamment les uns des autres comme explicité en Figure 8.4.

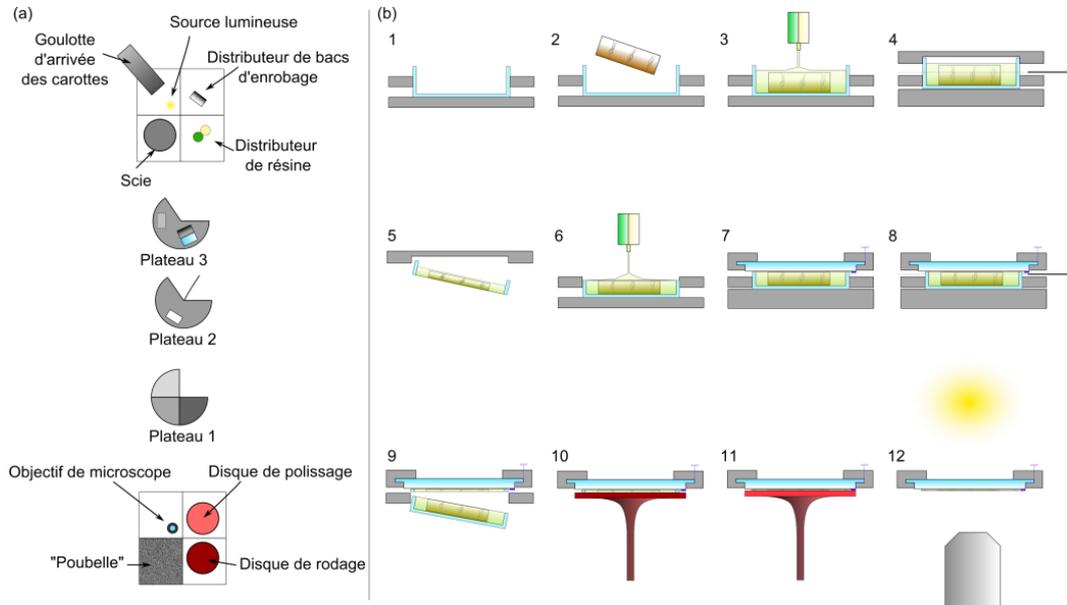


Fig. 8.4. Protocole automatisé de préparation de lames minces pétrographiques. (a) Le système est composé de 3 plateaux circulaires pouvant tourner indépendamment. (b) En faisant tourner les plateaux, il est possible de réaliser les différentes étapes de préparation.

Dans le cadre d'un projet de 5^{ème} année en Mécatronique et Conception de Systèmes à l'école d'ingénieur Polytech' Orléans, que j'ai co-encadré avec Aïcha Fonte du laboratoire PRISME (laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique et Energétique), une étude sur l'amélioration de ce protocole a été réalisée par deux étudiants, Jianyu Li et Thomas Platel, en janvier et février 2016. Il a permis d'optimiser certaines étapes et d'élaborer une première ébauche numérique 3D d'un modèle de démonstration. Ces plans devraient être prochainement finalisés puis utilisés par les étudiants en BTS IPM (Industrialisation des Produits Mécaniques) et en Licence Pro COTEMI (Coordinateur Technique des Méthodes d'Industrialisation) au Lycée Benjamin Franklin, sous la responsabilité de Pascal Perron. L'idée est de réaliser une maquette servant de preuve de concept pouvant être proposée à des agences spatiales. Au final, nous utilisons donc également le projet LithoSpace pour sensibiliser les étudiants à l'exploration spatiale en les faisant participer activement à son développement. C'est également un bon moyen de mettre à profit les compétences scientifiques et techniques locales.

Sur le plan scientifique, un tel système serait une avancée importante dans le domaine de l'exploration planétaire. Non seulement il permettrait l'utilisation de nouvelles techniques, dont la microscopie optique en transmission, mais il permettrait également d'améliorer de manière conséquente les techniques existantes. Les équipes en charges des spectromètres Raman et LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) se sont par exemple déjà montrées particulièrement intéressées. Une publication sur ce système est cours de rédaction.

8.3- Valorisation scientifique de l'étude

Programmes de recherche et développement instrumental :

R&T CNES LithoSpace : Développement d'un instrument de préparation de lames minces pétrographiques in situ. Porteurs du projet : F. Foucher (CBM), N. Bost (CEMHTI), S. Janiec (ISTO), F. Westall (CBM), P. Perron (lycée B. Franklin), N. Le Breton (ISTO), M. Tagger (LPC2E), A. Fonte (PRISME), M. Viso (CNES), P. Chazalnoël (CNES), F. Courtade (CNES) & M. Villenave (CNES). *Depuis 2014.*

Publication principale :

LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars, F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *in prep.* (2017).

Rapport technique :

Cahier des Charges Fonctionnel, LithoSpace : Dispositif de préparation de lames minces pétrographiques in situ, document réalisé par un groupe de travail composé de F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, N. Le Breton, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *CdCF - DCT/PO/PM 2015-4917.* (2015).

Communications orales :

LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars, F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

Poster :

LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars, F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

Encadrement de stage :

LithoSpace, Maître de stage de Jianyu Li et Thomas Platel, étudiants en 5ème année Mécatronique et Conception de Systèmes à l'école PolyTech' Orléans. *Stage co-encadré par A. Fonte au laboratoire PRISME et par N. Bost au CEMHTI en 2016.*

Prix et distinction :

Poster award, pour « *LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars* », F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

9- Bilan et perspectives

9.1- Bilan

Bien que très variées et pluridisciplinaires, les différentes études décrites dans ce rapport ont toutes en filigrane le même objectif qui est d'optimiser la détection de possibles traces de vie passée sur Mars. Elles sont également le fruit de réflexions plus générales sur l'origine de la vie et la recherche de vie extraterrestre (e.g. Westall *et al.*, 2013 ; 2015b). Si l'étude STONE 6 aura permis de démontrer la possibilité de retrouver d'hypothétiques microfossiles dans des météorites sédimentaires martiennes, il apparaît quand même que l'analyse de roches martiennes *in situ* reste une meilleure solution car elle permet de sélectionner les échantillons et de limiter les risques de faux positifs. Cependant, de par la nature subtile des traces de vie attendues et des limitations technologiques associées à ce type de missions, il est indispensable de travailler sur la détection de biosignatures avec les méthodes disponibles. La détection d'un minéral métastable (la silice opaline) et de variations dans le spectre Raman de la matière carbonée associée à des microfossiles silicifiés en sont un bon exemple. Il est également important de travailler en amont de la mission sur les instruments, comme nous l'avons fait pour le spectromètre Raman, mais également sur leur complémentarité et sur l'optimisation des protocoles avec des échantillons analogues tels que ceux de l'ISAR. Enfin, le développement de nouvelles méthodes et instruments comme *CaliPhoto* et *LithoSpace* est également très important. Ainsi, ces recherches s'articulent autour d'un fil conducteur commun (la recherche d'une vie passée sur Mars) tout en s'appuyant sur différents aspects, des plus fondamentaux aux plus appliqués.

9.2- Projets à court terme

ExoMars, CLUPI et CaliPhoto : La seconde partie du programme *ExoMars* étant prévue pour 2020, une large partie de mes recherches dans les quatre années à venir devraient concerner la préparation de cette mission. Notamment, les recherches sur l'indentification de roches à l'aide de *CLUPI* par la méthode *CaliPhoto* vont continuer. Il est prévu d'augmenter le nombre de roches de référence dans la base de données et de l'étendre à des roches sédimentaires et à des roches volcaniques altérées. La méthode restant à optimiser et la mission étant déjà en phases C/D (définition détaillée, qualification et production) il n'est pas possible d'ajouter une mire d'étalonnage dédiée sur le rover. *CLUPI* dispose bien d'une mire de calibration fixée au rover mais cette dernière n'est pas dans le champ de vision lors des forages. Par contre, il est possible de réaliser une image du sol avant le forage avec cette mire dans le champ de vision. L'idée est donc d'utiliser la mire existante pour étalonner la couleur du sol à l'endroit où va se dérouler le forage puis d'utiliser le sol étalonné

comme mire lors des phases de forage, *i.e.* effectuer un transfert de mire. Pour ce faire, il sera cependant nécessaire de prendre en considération les ombres projetées par le rover sur la zone observée. Des tests sur le prototype du rover sont prévus dès 2017, en collaboration avec le *Space-X Institute* de Neuchâtel. Comme expliqué à la fin du Chapitre 7, la méthode ne pourra se satisfaire à elle-même du fait de la grande variété des roches susceptibles d'être rencontrées sur Mars. Une collaboration avec Simone De Angelis et l'instrument *Ma_MISS* est donc également en cours afin de combiner les résultats obtenus par spectroscopie IR avec ceux obtenus par *CLUPI/CaliPhoto*.

L'exploration in situ : L'obtention de données scientifiques *in situ* en conditions extrêmes ou dans des environnements difficiles d'accès est un enjeu majeur dans de nombreux domaines en plus de l'exploration planétaire, comme la volcanologie ou l'archéologie par exemple. Les principales difficultés inhérentes à ces recherches sont les limitations techniques en termes de volume, masse et consommation des instruments utilisables et le risque de contamination d'environnements sensibles, auxquels il faut ajouter la possible mise en danger des personnes ou le risque de détérioration de matériels coûteux. Ainsi, depuis plusieurs années on observe la miniaturisation de techniques de laboratoire permettant de les rendre compatibles avec des explorations *in situ*. Les instruments spatiaux décrits dans ce manuscrit en sont le parfait exemple. Les contraintes techniques liées à l'exploration *in situ* conduisent également au développement de nouvelles méthodes d'analyse telle que *CaliPhoto*.

En parallèle de ces développements, le marché des drones connaît un essor exceptionnel depuis quelques années. Leur intérêt est multiple : ils sont peu énergivores, relativement peu coûteux, extrêmement maniables et suffisamment petits pour être transportés et pour accéder à des endroits difficiles, et ils peuvent être déployés rapidement. Ces engins pilotables à distance pourraient donc ouvrir de nouvelles possibilités pour l'exploration scientifique *in situ* moyennant une optimisation instrumentale. C'est pourquoi, une collaboration, avec notamment Guillaume Guimbretière du CEMHTI, vient de débiter afin d'initier le développement d'un modèle de drone scientifique d'exploration embarquant la méthode *CaliPhoto* et un spectromètre d'absorption *UV-Vis-NIR* pour la caractérisation de matériaux en milieux extrêmes, contraints et/ou difficiles d'accès. Cette étude se basera aussi sur une analyse multi-échelle permettant de relocaliser des données ponctuelles dans un contexte géologique globale. A plus long terme, l'objectif est de développer un drone pour l'exploration planétaire et de travailler sur des méthodes d'identification de biosignatures par une approche multi-échelle et multi-modale optimisée.

Enfin, la méthode *CaliPhoto* a obtenu un soutien de la SATT Grand Centre pour l'année 2017 afin d'être utilisée dans le domaine industriel pour le contrôle non destructif. Des développements scientifiques afin d'adapter la méthode à ces applications sont déjà prévus.

Spectroscopie Raman, PIXE et matière carbonée : La spectroscopie Raman restera une des méthodes centrales dans mes travaux. En particulier, les études des microfossiles doivent se poursuivre afin de comprendre précisément l'origine des variations locales observées dans le signal Raman de la matière carbonée. Un projet de couplage de la technique Raman avec les techniques *PIXE* et *ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis)*, en collaboration avec la plateforme AIFIRA du CENBG (Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan) et Mohamed-Ramzi Ammar du CEMHTI d'Orléans, est en cours afin de relier composition structurale et composition élémentaire. Un programme permettant l'importation des données *PIXE* dans le logiciel WITec Project utilisé pour le

traitement d'images hyperspectrales a déjà été développé pour faciliter la confrontation des techniques. Ces études se concentrent principalement sur les minéraux et les matériaux carbonés.

LithoSpace : Le projet *LithoSpace* doit se poursuivre avec la construction d'une maquette par les étudiants du lycée Benjamin Franklin d'Orléans en 2017-2018. L'objectif est de disposer d'une maquette « fonctionnelle » servant de preuve de concept et qui pourrait être présentée lors du congrès *COSPAR* de 2018.

STONE X : Une étude vient de commencer sur la faisabilité d'une pseudo-expérience *STONE*, nommée *STONE X*, consistant à simuler en laboratoire l'échauffement induit au sein d'un échantillon lors de l'entrée atmosphérique. Le stage de Master 1 de Joël Le Galudec, que j'ai encadré en collaboration avec Frédéric Gaboyer en juillet-août 2016, a déjà permis d'obtenir des résultats prometteurs que j'ai présentés lors de la conférence *EANA16* à Athènes, en Grèce, en septembre 2016 (Le Galudec *et al.*, 2016). Ainsi, même si le protocole reste encore à optimiser, les premiers tests ont permis de reproduire une croute de fusion à la surface d'échantillons basaltiques relativement proche de celle observée à la surface des météorites chondritiques. L'usinage et la préparation des échantillons ont également été optimisés afin de pouvoir mesurer le gradient de température post-mortem et de réaliser des tests de panspermie. L'étude devrait donc se poursuivre en 2017.

Spectroscopie Raman, irradiation et exobiologie : Des études d'irradiation ioniques avec un suivi *in situ* des matériaux par spectroscopie Raman devrait commencer en 2017, en collaboration avec le CEMHTI (Cyclotron) et le DLR de Berlin. L'objectif sera de mieux comprendre les effets des conditions régnant à la surface de Mars sur la préservation des molécules organiques et sur la matière carbonée d'intérêt exobiologique, en contact avec des phases minérales.

9.3- Projets à long terme

Une fois le rover de la mission *ExoMars 2020* posé, je serai amené à travailler sur l'interprétation des données fournies par les différents instruments. A plus long terme, mon travail devrait se poursuivre avec la participation à la préparation d'une possible mission de retour d'échantillons martiens à l'horizon 2025, étant déjà impliqué dans le projet *EURO-CARES*.

De manière plus générale, il y a de nombreux projets de recherche qu'il serait intéressant de développer telles que l'utilisation de nano-satellites pour faire des expériences Nano-Stone (Foucher & Westall, 2015), l'étude de la minéralisation de microorganismes inclus dans des geysérites silicieuses (Campbell *et al.*, 2015), l'optimisation des méthodes pour la détection de traces de vie sur les satellites glacés Encelade ou Europe...

Jusqu'à présent, les différentes études que j'ai réalisées se sont enchaînées de manière logique. Elles sont nées au gré des réflexions, des résultats obtenus, attendus ou non, et des nombreuses discussions dans des congrès. De nombreuses collaborations sont ainsi nées et de nouveaux axes de recherches sont apparus, axes que j'ai eu la chance de pouvoir suivre. C'est pourquoi, d'une manière générale, il est délicat de se projeter trop en avant dans le domaine scientifique. Je considère qu'il est important de garder une certaine liberté de réaction, quand c'est possible, pour pouvoir suivre une nouvelle piste intéressante et saisir les opportunités qui se présentent.

Références

- Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Berthelier J.-J., Bieler A., Bochsler P., Briois C., Calmonte U., Combi M.R., Cottin H., Keyser J.D., Dhooghe F., Fiethe B., Fuselier S.A., Gasc S., Gombosi T.I., Hansen K.C., Haessig M., Jäckel A., Kopp E., Korth A., Roy L.L., Mall U., Marty B., Mousis O., Owen T., Rème H., Rubin M., Sémon T., Tzou C.-Y., Waite J.H. & Wurz P. (2016) Prebiotic chemicals-amino acid and phosphorus-in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Science Advances* **2**:e1600285, 1-5.
- Bada J.L., Galvin P., McDonald G.D. & Becker L. (1998) A Search for Endogenous Amino Acids in Martian Meteorite ALH84001, *Science* **279**, 362-365.
- Bell E.A., Boehnke P., Harrison T.M. & Mao W.L. (2015) Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **112**:47, 14518-14521.
- Bibring J.-P., Langevin Y., Mustard J.F., Poulet F., Arvidson R., Gendrin A., Gondet B., Mangold N., Pinet P., Forget F. & the OMEGA team (2006) Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data, *Science* **312**, 400-404.
- Biemann K. (1979) The implications and limitations of the findings of the Viking Organic Analysis Experiment, *Journal of Molecular Evolution* **14**, 65-70.
- Bost N., Westall F., Ramboz C., Foucher F., Pullan D., Meunier A., Petit S., Fleischer I., Klingelhöfer G. & Vago J. (2013) Missions to Mars: Characterisation of Mars analogue rocks for the International Space Analogue Rockstore (ISAR), *Planetary and Space Science* **82-83**, 113-127.
- Bost N., Ramboz C., Breton N.L., Foucher F., Lopez-Reyes G., Angelis S.D., Josset M., Venegas G., Sanz-Arranz A., Pérez F.R., Medina J., Josset J.-L., Souchon A., Ammannito E., Carli C., Vago J.L. & Westall F. (2015) Testing the ability of the ExoMars 2018 payload to document geological context and potential habitability on Mars, *Planetary and Space Science* **108**, 87-97.
- Brack A. (1993) Liquid Water and the Origin of Life, *Origin of Life and Evolution of the Biosphere* **23**, 3-10.
- Brack A. (2001), Chapter 6- Water, The Spring of Life, in *Astrobiology. The Quest for the conditions of life*, C. Baumstark-Khan and G. Horneck (Ed.) Springer, Berlin, 79-88.
- Brack A., Baglioni P., Borruat G., Brandstätter F., Demets R., Edwards H.G.M., Genge M., Kurat G., Miller M.F., Pillinger C.T., Roten C.-A. & Wäsch E. (2002) Do meteoroids of sedimentary origin survive terrestrial atmospheric entry? The ESA artificial meteorite experiment STONE, *Planetary and Space Science* **50**, 763-772.
- Brack A. (2013) Avant la vie, la chimie prébiotique, *Biofutur* **345**, 34-37.
- Brandstätter F., Brack A., Baglioni P., Cockell C.S., Demets R., Edwards H.G.M., Kurat G., Osinski G.R., Pillinger J.M., Roten C.-A. & Sancisi-Frey S. (2008) Mineralogical alteration of artificial meteorites during atmospheric entry. The STONE-5 experiment, *Planetary and Space Science* **56**, 976-984.
- Brasier M.D., Green O.R., Jephcoat A.P., Kleppe A.K., Kranendonk M.J.V., Lindsay J.F., Steele A. & Grassineau N.V. (2002) Questioning the evidence for Earth's oldest fossils, *Nature* **416**, 76-81.
- Bullock M.A., Stoker C.R., McKay C.P. & Zent A.P. (1994) A coupled soil-atmosphere model of H₂O₂ on Mars, *Icarus* **107**, 142-154.
- Bustin R.M., Rouzaud J.N. & Ross J.V. (1995) Natural Graphitization of Anthracite: Experimental Considerations, *Carbon* **33**, 679-691.

- Campbell K.A., Guido D.M., Gautret P., Foucher F., Ramboz C. & Westall F. (2015) Geyselite in hot-spring siliceous sinter: Window on Earth's hottest terrestrial (paleo)environment and its extreme life, *Earth-Science Reviews* **148**, 44-64.
- Carr M.H. & Head-III J.W. (2003) Oceans on Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate, *Journal of Geophysical Research* **108:E5**, 5042.
- Carter J., Poulet F., Bibring J.-P. & Murchie S. (2010) Detection of Hydrated Silicates in Crustal Outcrops in the Northern Plains of Mars, *Science* **328**, 1682-1686.
- Clark B.C. (2007) Mars sample return: The critical next step, *Acta Astronautica* **61**, 95-100.
- Clifford S.M. & Parker T.J. (2001) The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains, *Icarus* **154**, 40-79.
- Cockell C.S., Brack A., Wynn-Williams D.D., Baglioni P., Brandstätter F., Demets R., Edwards H.G.M., Gronstal A.L., Kurat G., Lee P., Osinski G.R., Pearce D.A., Pillinger J.M., Roten C.-A. & Sancisi-Frey S. (2007) Interplanetary Transfer of Photosynthesis: An Experimental Demonstration of a Selective Dispersal Filter in Planetary Island Biogeography, *Astrobiology* **7:1**, 1-10.
- Cousins C.R., Gunn M., Prosser B.J., Barnes D.P., Crawford I.A., Griffiths A.D., Davis L.E. & Coates A.J. (2012) Selecting the geology filter wavelengths for the ExoMars Panoramic Camera instrument, *Planetary and Space Science* **71**, 80-100.
- Danger G., Orthous-Daunay F.-R., de Marcellus P., Modica P., Vuitton V., Duvernay F., Flandinet L., d'Hendecourt null L.L.S., Thissen R. & Chiavassa T. (2013) Characterization of laboratory analogs of interstellar/cometary organic residues using very high resolution mass spectrometry, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **118**, 184-201.
- Dass A.-V., Hickman-Lewis K., Brack. A., Kee T. P. & Westall F. (2016) Stochastic prebiotic chemistry within realistic geological systems, *ChemistrySelect* **1**, 4906-4926.
- de Duve C. (1995) The Beginnings of Life on Earth, *American Scientist*, septembre-octobre 1995.
- de Ronde W. & Ebbesen C.E.J. (1996) 3.2 b.y. of organic compound formation near sea-floor hot springs, *Geology* **24:9**, 791-794.
- Dieing T., Hollricher O., and Toporski J. (2010) Confocal Raman Microscopy, Springer Series in Optical Sciences 156, edited by Dieing T., Hollricher O., and Toporski J., published by Springer, Berlin, Germany.
- des Marais D.J. (2010) Exploring Mars for Evidence of Habitable Environments and Life, *Proceedings of the American Philosophical Society* **154:4**, 402-421.
- Dickens J., Irvine W., Nummelin A., Mollendal H., Saito S., Thorwirth S., Hjalmarson A. & Ohishi M. (2001) Searches for new interstellar molecules, including a tentative detection of aziridine and a possible detection of propenal, *Spectrochimica Acta Part A* **57**, 643-660.
- Dreyer C.B., Zacny K., Steele J.P.H., Schwendeman J.R., Paulsen G., Andersen R.C. & Skok J. (2013a) Development of a thin section device for space exploration: Overview and system performance estimates, *Advances in Space Research* **51**, 1659-1673.
- Dreyer C.B., Schwendeman J.R., Steele J.P.H., Carrell T.E., Niedringhaus A. & Skok J. (2013b) Development of a thin section device for space exploration: Rock cutting mechanism, *Advances in Space Research* **51**, 1674-1691.
- de la Torre R., Sancho L.G., Horneck G., de los Ríos A., Wierzbos J., Olsson-Francis K., Cockell C.S., Rettberg P., Berger T., de Vera J.-P.P., Ott S., Martínez-Frías J., Melendi P.G., Lucas M.M., Reina M., Pintado A. & Demets R. (2010) Survival of lichens and bacteria exposed to outer space conditions – Results of the Lithopanspermia experiments, *Icarus* **208**, 735-748.
- El Albani A., Bengtson S., Canfield D.E., Bekker A., Macchiarelli R., Mazurier A., Hammarlund E.U., Boulvais P., Dupuy J.-J., Fontaine C., Fürsich F.T., Gauthier-Lafaye F., Janvier P., Javaux E., Ossa F.O., Pierson-Wickmann A.-C., Riboulleau A., Sardini P., Vachard D., Whitehouse M. & Meunier A. (2010) Large colonial organisms with coordinated growth in oxygenated environments 2.1 Gyr ago, *Nature* **466**, 100-104.
- Elwood Madden M.E., Bodnar R.J. & Rimstidt J.D. (2004) Jarosite as an indicator of waterlimited chemical weathering on Mars, *Nature* **431**, 821-823.

- Fan C., Xie H., Schulze-Makuch D. & Ackley S. (2010) A formation mechanism for hematite-rich spherules on Mars, *Planetary and Space Science* **58**, 401-410.
- Ferrari A.C. (2007) Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects, *Solid State Communications* **143**, 47-57.
- Flammarion C. (1908) La planète Mars, siècle de la vie, *L'illustration* **3407**, 400-401.
- Föppl A. (1907) B. G. Teubner, L. (Ed.), *Unk, Vorlesungen über Technische Mechanik V Dritte Auflage. Bd. 1: Einführung in die Mechanik Unk*, 132-144.
- Foucher F., Coupeau C., Colin J., Cimetière A. & Grilhé J. (2006) How Does Crystalline Substrate Plasticity Modify Thin Film Buckling?, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 096101.
- Foucher F. & Coupeau C. (2007) Effect of the dislocation emergence on the mechanical behavior of coated materials: Elastic energy relaxation or adhesion modification, *Surface & Coatings Technology* **202**, 1094-1097.
- Foucher F., Westall F., Brandstätter F., Demets R., Parnell J., Cockell C.S., Edwards H.G.M., Bény J.-M. & Brack A. (2010) Testing the survival of microfossils in artificial martian sedimentary meteorites during entry into Earth's atmosphere: The STONE 6 experiment, *Icarus* **207**, 616-630.
- Foucher F., Coupeau C., Colin J., Cimetière A. & Grilhé J. (2011a) Cao, Z. (Ed.) Thin film growth - Physics, materials science and application, 13: Understanding substrate plasticity and buckling of thin films, *Woodhead Publishing Limited*, 317-339.
- Foucher F., Bost N., Russmann P. & Westall F. (2011b) Effect of grain size distribution on Raman analyses: consequences for ExoMars-C measurements, *EPSC Abstracts EPSC-DPS Joint Meeting, Nantes, France, October 02-07, abstract 6:EPSC-DPS2010-426*
- Foucher F. & Westall F. (2013) Raman Imaging of Metastable Opal in Carbonaceous Microfossils of the 700–800Ma Old Draken Formation, *Astrobiology* **13:1**, 57-67.
- Foucher F., Lopez-Reyes G., Bost N., Pérez F.R., Russmann P. & Westall F. (2013) Effect of grain size distribution on Raman analyses and the consequences for in situ planetary missions, *Journal of Raman Spectroscopy* **44**, 916-925.
- Foucher F., Westall F. & the exobiology team (2014) Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars, *European Planetary Science Congress 2014, Cascais, Portugal, 07-12 September, abstract 9:470-1*
- Foucher F., Ammar M.R. & Westall F. (2015a) Revealing the biotic origin of silicified Precambrian carbonaceous microstructures using Raman spectroscopic mapping, a potential method for the detection of microfossils on Mars, *Journal of Raman Spectroscopy* **46**, 873-879.
- Foucher F., Westall F., Guimbretière G., Bost N., Martin P., Marceau E. & Courtois A. (2015b) Un selfie pour la planète rouge ?, *Microscop HS2015*, 12-16.
- Foucher F. & Westall F. (2015) Nano-Stone, *conference pour le Topical team meeting on Nano-satellites, ESA ESTEC, Pays-Bas, 23 mars 2015*.
- Foucher F., Guimbretière G., Bost N. & Westall F. (2016) Petrographical and Mineralogical Applications of Raman Mapping, in *Raman Spectroscopy*, ed. K. Maaz, pub. InTech, in press.
- Freissinet C., Glavin D.P., R.Mahaffy P., E.Miller K., Eigenbrode J.L., Summons R.E., Brunner A.E., Buch A., Szopa C., Jr. P.D.A., Franz H.B., Atreya S.K., Brinckerhoff W.B., Cabane M., P.Coll, Conrad P.G., Marais D.J.D., Dworkin J.P., Fairén A.G., François P., Grotzinger J.P., Kashyap S., ten Kate I.L., Leshin L.A., A.Malespin C., Martin M.G., Martin-Torres F.J., McAdam A.C., Ming D.W., Navarro-González R., Pavlov A.A., Prats B.D., Squyres S.W., Steele A., Stern J.C., Sumner D.Y., Sutter B., Zorzano M.-P. & the MSL Science Team (2015) Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars, *Journal of Geophysical Research: Planets* **120**, 495-514.
- Garcia-Ruiz J.M., Hyde S.T., Carnerup A.M., Christy A.G., Kranendonk M.J.V. & Weldham N.J. (2003) Self-Assembled Silica-Carbonate Structures and Detection of Ancient Microfossils, *Science* **302**, 1194-1197.
- Grotzinger J.P., Sumner D.Y., Kah L.C., Stack K., Gupta S., Edgar L., Rubin D., Lewis K., Schieber J., Mangold N., Milliken R., Conrad P.G., DesMarais D., Farmer J., Siebach K., III F.C., Hurowitz J., McLennan S.M., Ming D., Vaniman D., Crisp J., Vasavada A., Edgett K.S., Malin M., Blake D., Gellert R., Mahaffy P., Wiens R.C., Maurice S.,

- Grant J.A., Wilson S., Anderson R.C., Beegle L., Arvidson R., Hallet B., Sletten R.S., Rice M., III J.B., Griffes J., Ehlmann B., Anderson R.B., Bristow T.F., Dietrich W.E., Dromart G., Eigenbrode J., Fraeman A., Hardgrove C., Herkenhoff K., Jandura L., Kocurek G., Lee S., Leshin L.A., Leveille R., Limonadi D., Maki J., McCloskey S., Meyer M., Minitti M., Newsom H., Oehler D., Okon A., Palucis M., Parker T., Rowland S., Schmidt M., Squyres S., Steele A., Stolper E., Summons R., Treiman A., Williams R., Yingst A. & Team M.S. (2014) A Habitable Fluvio-Lacustrine Environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars, *Science* **343**, 1242777-1-14.
- Hecht M.H., Kounaves S.P., Quinn R.C., West S.J., Young S.M.M., Ming D.W., Catling D.C., Clark B.C., Boynton W.V., Hoffman J., DeFlores L.P., Gospodinova K., Kapit J. & Smith P.H. (2009) Detection of Perchlorate and the Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site, *Science* **325**, 64-67.
- Hedges S.B. (2002) The origin and evolution of model organisms, *Nature Reviews Genetics* **3**, 838-849.
- Hutchinson J.W. & Suo Z. (1992) Mixed Mode Cracking in Layered Materials, *Adv. Appl. Mech.* **29**, 63-191.
- iMARS Working Group (2008) Preliminary Planning for an International Mars Sample Return Mission, *NASA/JPL*,
- Jehlicka J. & Bény C. (1999) First and second order Raman spectra of natural highly carbonified organic compounds from metamorphic rocks, *Journal of Molecular Structure* **480-481**, 541-545.
- Jerolmack D.J. (2013) Pebbles on Mars, *Science* **340**, 1055-1056.
- Josset J.-L., Westall F., Hofmann B.A., Spray J., Cockell C., Kempe S., Griffiths A.D., Cristina de Sanctis M., Colangeli L., Koschny D., Föllmi K., Verrecchia E., Diamond L., Josset M., Javaux E.J., Esposito F., Gunn M., Souchon A.L., Bontognali T., Korablev O., Erkman S., Paar G., Ulamec S., Foucher F., Martin P., Verhaeghe A., Tanevski M. & Vago J.L. (2016) The Close-Up Imager (CLUPI) on board the ESA ExoMars Rover: Objectives, description, operations, and science validation activities, *Astrobiology*, in press.
- Knoll A.H. (1982) Microfossils from the late Precambrian Draken Conglomerate, Ny Friesland, Svalbard, *Journal of Paleontology* **56:3**, 755-790.
- Lazcano A. (2011), *Origin of life* in *Encyclopedia of Astrobiology*, (Ed.) Muriel Gargaud *et al.*, published by Springer, volume 2, pp. 1183-1190.
- Le Galudec J., Foucher F., Gaboyer F., Brack A. & Westall F. (2016) Simulating meteorite atmospheric entry and its consequences for microbial life: the STONE X experiment, *European Astrobiology Network Association meeting 2016, Athènes, Grèce, 27-30 septembre, abstract*.
- Lopez-Reyes G. (2015) Development of algorithms and methodological analyses for the definition of the operation mode of the Raman Laser Spectrometer instrument, *Universidad de Valladolid*, PhD thesis.
- Lopez-Reyes G., Rull F., Venegas G., Westall F., Foucher F., Bost N., Sanz A., Catala-Espi A., Vegas A., Hermosilla I., Sansano A. & Medina J. (2013) Analysis of the scientific capabilities of the ExoMars Raman Laser Spectrometer instrument, *European Journal of Mineralogy* **25**, 721-733.
- Marceau E., Foucher F., Guimbretière G., Bost N. & Westall F. (2014) Colourimetric analysis of rock powders for the calibration of the Close-up Imager (CLUPI), ExoMars, *European Planetary Science Congress 2014, Cascais, Portugal, 07-12 September, abstract* **9:474-1**
- Marshall C.P. & Marshall A.O. (2013) Raman Hyperspectral Imaging of Microfossils: Potential Pitfalls, *Astrobiology* **13:10**, 920-931.
- Marshall C.P., Edwards H.G.M. & Jehlicka J. (2010) Understanding the Application of Raman Spectroscopy to the Detection of Traces of Life, *Astrobiology* **10:2**, 229-243.
- Marshall A.O., Emry J.R. & Marshall C.P. (2012) Multiple Generations of Carbon in the Apex Chert and Implications for Preservation of Microfossils, *Astrobiology* **12:2**, 160-166.
- McKay D.S., Gibson E.K., Thomas-Keprta K.L., Vali H., Romanek C.S., Clemett S.J., Chillier X.D.F., Maechling C.R. & Zare R.N. (1996) Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001, *Science* **273**, 924-930.
- McSween H.Y., Taylor G.J. & Wyatt M.B. (2009) Elemental Composition of the Martian Crust, *Science* **324**, 736-739.

- Meinert C., Myrgorodska I., de Marcellus P., Buhse T., Nahon L., Hoffmann S.V., Le Sergeant d'Hendecourt L. & Meierhenrich U.J. (2016) Ribose and related sugars from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogs, *Science* **352:6282**, 208-212.
- Michel-Lévy A. (1888) Les minéraux des roches, *Librairie Polytechnique Baudry et cie* (Paris).
- Miller S.L. (1953) Production of amino acids under possible primitive earth conditions, *Science* **117**, 528-529.
- Moreau J.W. & Sharp T.G. (2004) A Transmission Electron Microscopy Study of Silica and Kerogen Biosignatures in ~1.9 Ga Gunflint Microfossils, *Astrobiology* **4:2**, 196-210.
- Morris R.V., Ruff S.W., Gellert R., Ming D.W., Arvidson R.E., Clark B.C., Golden D.C., Siebach K., Klingelhöfer G., Schröder C., Fleischer I., Yen A.S. & Squyres S.W. (2010) Identification of Carbonate-Rich Outcrops on Mars by the Spirit Rover, *Scienceexpress* **10.1126:1189667**, 1-5.
- Nutman A.P., Bennett V.C., Friend C.R.L., Van Kranendonk M.J. & Chivas A. R. (2016) Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures, *Nature* **537**, 535-538.
- Orgel L.E. (1998) Polymerization on rocks: theoretical introduction, *Origin of Life and Evolution of the Biosphere* **28**, 227-234.
- Parnell J., Mark D. & Brandstätter F. (2008) Response of sandstone to atmospheric heating during the STONE 5 experiment: Implications for the palaeofluid record in meteorites, *Icarus* **197:1**, 282-290.
- Parry G., Colin J., Coupeau C., Foucher F., Cimetière A. & Grilhé J. (2005a) Effect of substrate compliance on the global unilateral post-buckling of coatings: AFM observations and finite element calculations, *Acta Mater.* **53**, 441-447.
- Parry G., Colin J., Coupeau C., Foucher F., Cimetière A. & Grilhé J. (2005b) Snapthrough occurring in the postbuckling of thin films, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 081905.
- Patel B.H., Percivalle C., Ritson D.J., Duffy C.D. & Sutherland J.D. (2015) Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism, *Nature Chemistry* **7**, 301-307.
- Rosing M.T. & Frei R. (2004) U-rich Archaean sea-floor sediments from Greenland-indications of > 3700Ma oxygenic photosynthesis. *Earth Planet Sci Lett* **217**, 237-244.
- Pasteris J.D. & Wopenka B. (2002) Images of the Earth's earliest fossils?, *Nature* **420**, 476-477.
- Pasteris J.D. & Wopenka B. (2003) Necessary, but Not Sufficient: Raman Identification of Disordered Carbon as a Signature of Ancient Life, *Astrobiology* **3:4**, 727-738.
- Pilorget C. & Bibring J.-P. (2013) NIR reflectance hyperspectral microscopy for planetary science: Application to the MicrOmega instrument, *Planetary and Space Science* **76**, 42-52.
- Poilblanc R. and Crasnier F., (2006) Spectroscopies Infrarouge et Raman, edited by Collection Grenoble Sciences, Jean Bornarel, published by EDP Sciences, Les Ulis, France.
- Quirico E., Montagnac G., Rouzaud J.N., Bonal L., Bourot-Denise M., Duber S. & Reynard B. (2009) Precursor and metamorphic condition effects on Raman spectra of poorly ordered carbonaceous matter in chondrites and coals, *Earth and Planetary Science Letters* **287**, 185-193.
- Rodriguez J.A.P., Fairén A.G., Tanaka K.L., Zarroca M., Linares R., Platz T., Komatsu G., Miyamoto H., Kargel J.S., Yan J., Gulick V., Higuchi K., Baker V.R. & Glines N. (2016) Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early Martian ocean, *Scientific Reports* **6**, 25106.
- Rouzaud J.-N. & Oberlin A. (1989) Structure, microtexture, and optical properties of anthracene and saccharose-based carbons, *Central European Journal of Physics* **27:4**, 517-529.
- Ruiz-Mirazo K. and Moreno A. (2011) Life, in *Encyclopedia of Astrobiology - vol.2, first edition*, edited by M. Gargaud *et al.*, published by Springer reference, 919-921.
- Rull F. (2012) Chapter 1. The Raman effect and the vibrational dynamics of molecules and crystalline solids, in *Raman Spectroscopy applied to Earth Sciences and Cultural Heritage*, Edited by Dubessy J., Caumon M.-C. and Rull. F., EMU notes in Mineralogy 12, published by The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, Twickenham, United Kingdom, 1-60.
- Rull-Pérez F. & Martínez-Frias J. (2006) Raman Spectroscopy goes to Mars, *Spectroscopy Europe* **18:1**, 18-21.

Schmitt-Kopplin P., Gabelica Z., Gougeon R.D., Fekete A., Kanawati B., M. Harir, Gebefuegi I., Eckel G. & Hertkorn N. (2010) High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **7:7**, 2763-2768.

Schopf J.W., Kudryavtsev A.B., Agresti D.G., Wdowiak T.J. & Czaja A.D. (2002) Laser-Raman imagery of Earth's earliest fossils, *Nature* **416**, 73-76.

Schopf J.W., Kudryavtsev A.B., Agresti D.G., Wdowiak T.J. & Czaja A.D. (2002) Images of the Earth's earliest fossils? Schopf et al., reply, *Nature* **420**, 477.

Sforna M.C., van Zuilen M.A. & Philippot P. (2014) Structural characterization by Raman hyperspectral mapping of organic carbon in the 3.46 billion-year-old Apex chert, Western Australia, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **124**, 18-33.

Squyres S.W., Knoll A.H., Arvidson R.E., Clark B.C., Grotzinger J.P., Jolliff B.L., McLennan S.M., Tosca N., III J.F.B., Calvin W.M., Farrand W.H., Glotch T.D., Golombek M.P., Herkenhoff K.E., Johnson J.R., Klingelhöfer G., McSween H.Y. & Yen A.S. (2006) Two Years at Meridiani Planum: Results from the Opportunity Rover, *Science* **313**, 1403-1407.

Squyres S.W., Arvidson R.E., Ruff S., Gellert R., Morris R.V., Ming D.W., Crumpler L., Farmer J., des Marais D.J., Yen A., McLennan S.M., Calvin W., III J.F.B., Clark B.C., Wang A., McCoy T.J., Schmidt M.E. & de Souza Jr. P.A. (2008) Detection of Silica-Rich Deposits on Mars, *Science* **320**, 1063-1067.

Stolper E.M., Baker M.B., Newcombe M.E., Schmidt M.E., Treiman A.H., Cousin A., Dyar M.D., Fisk M.R., Gellert R., King P.L., Leshin L., Maurice S., McLennan S.M., Minitti M.E., Perrett G., Rowland S., Sautter V., Wiens R.C. & Team M.S. (2013) The Petrochemistry of Jake_M: A Martian Mugarite, *Science* **341**, 1239463.

Thomas-Keppta K.L., Clemett S.J., McKay D.S., Gibson E.K. & Wentworth S.J. (2009) Origins of magnetite nanocrystals in Martian meteorite ALH84001, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**, 6631-6677.

Treiman A.H. (1998) The history of ALH84001 revised: Multiple shock events, *Meteoritic and Planetary Science* **33**, 753-764.

Vago J., Witasse O. & Rodionov D. (2013) ExoMars Trace Gas Orbiter, EDM, and Rover 5th ExoMars Science Working Team Meeting (ESWT 5) Final Report, *ESA*.

Vago J., Westall F. & the Pasteur Teams (2016) Habitability on Early Mars and the Search for Biosignatures with the ExoMars Rover, soumis à *Astrobiology*.

Van Kranendonk M.J., Philippot P., Lepot K., Bodorkos S. & Pirajno F. (2008) Geological setting of Earth oldest fossils in ca. 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara Craton, Western Australia, *Precambrian Research* **167**, 93-124.

von Kármán T. (1910) Festigkeitsprobleme in maschinenbau, *Ency. der. Math. Wissenschaften* **IV/4C**, 311-385.

Westall F., Boni L. & Guerzoni E. (1995) The Experimental Silicification of Microorganisms, *Paleontology* **38**, 495-528.

Westall F. & Folk R.L. (2003) Exogenous carbonaceous microstructures in Early Archaean cherts and BIFs from the Isua Greenstone Belt: implications for the search for life in ancient rocks, *Precambrian Research* **126**, 313-330.

Westall F. & Southam G. (2006) The Early Record of Life, *Archean Geodynamics and Environments* **164**, 283-304.

Westall F. (2009) Life on an Anaerobic Planet, *Science* **323**, 471-472.

Westall F. & Cavalazzi B. (2011) Biosignatures in rocks, dans *Encyclopedia of Geobiology*, édité par V. Thiel & J. Reitner, Springer, Berlin, 189-201.

Westall F., Foucher F., Cavalazzi B., de Vries S.T., Nijman W., Pearson V., Watson J., Verchovsky A., Wright I., Rouzaud J.N., Marchesini D. & Anne S. (2011a) Volcaniclastic habitats for early life on Earth and Mars: A case study from ~ 3.5 Ga-old rocks from the Pilbara, Australia, *Planetary and Space Science* **59**, 1093-1106.

Westall F., Cavalazzi B., Lemelle L., Marrocchi Y., Rouzaud J.-N., Simionovici A., Salomé M., Mostefaoui S., Andreazza C., Foucher F., Toporski J., Jauss A., Thiel V., Southam G., MacLean L., Wirick S., Hofmann A., Meibom

A., Robert F. & Defarge C. (2011b) Implications of in situ calcification for photosynthesis in a ~3.3 Ga-old microbial biofilm from the Barberton greenstone belt, South Africa, *Earth and Planetary Science Letters* **310**, 468-479.

Westall F., Loizeau D., Foucher F., Bost N., Bertrand M., Vago J. & Kminek G. (2013) Habitability on Mars from a Microbial Point of View, *Astrobiology* **13:9**, 887-897.

Westall F., Campbell K.A., Bréhéret J.G., Foucher F., Gautret P., Hubert A., Sorieul S., Grassineau N. & Guido D.M. (2015a) Archean (3.33 Ga) microbe-sediment systems were diverse and flourished in a hydrothermal context, *Geology* **43**, 615-618.

Westall F., Foucher F., Bost N., Bertrand M., Loizeau D., Vago J.L., Kminek G., Gaboyer F., Campbell K.A., Bréhéret J.G., Gautret P. & Cockell C.S. (2015b) Biosignatures on Mars: What, Where, and How? Implications for the Search for Martian Life, *Astrobiology* **15:11**, 998-1029.

Westall F. & Brack A. (2016) The importance of water for life, dans *Water and Planets*, édité par M. Blanc M. Space Science Reviews, Springer, in review.

van Zuilen M.A., Lepland A., Teranes J., Finarelli J., Wahlen M. & Arrhenius G. (2003) Graphite and carbonates in the 3.8 Ga old Isua Supracrustal Belt, southern West Greenland, *Precambrian Research* **126**, 331-348.

Wilson J.P., Fischer W.W., Johnston D.T., Knoll A.H., Grotzinger J.P., Walter M.R., McNaughton N.J., Simon M., Abelson J., Schrag D.P., Summons R., Allwood A.C., Andres M., Gammon C., Garvin J., Rashby S., Schweizer M. & Watters W.A. (2010) Geobiology of the late Paleoproterozoic Duck Creek Formation, Western Australia, *Precambrian Research* **179**, 135-149.

Annexe 1 - Curriculum vitae



Foucher Frédéric

Ingénieur de recherche CNRS

Responsable de la plateforme microscopie à force atomique et spectroscopie Raman.

Centre de Biophysique Moléculaire
UPR CNRS 4301
Rue Charles Sadron
45071 Orléans Cedex 2
France

Tél. : +33 (0)2 38 25 76 41, Portable : +33 (0)6 62 89 11 19, Fax : +33 (0)2 38 63 15 17

e-mail : frederic.foucher@cnrs-orleans.fr

Nationalité : Français

Date de naissance : 06.02.1980

Situation : Marié, deux enfants

Membre de la *Société Française d'Exobiologie*, de l'*European Astrobiology Network Association*, de l'*International Society for the Study of the Origin of Life and Astrobiology Society* et du réseau des microscopies à sonde locale.

Titres universitaires

2007 *Thèse de doctorat en physique des matériaux*, Laboratoire de Métallurgie Physique, Université de Poitiers, Futuroscope, Équipe Instabilités de revêtements de surface contraints, Directeurs : Pr. C. Coupeau et Pr. J. Colin, *Influence du substrat sur le phénomène de cloquage de matériaux revêtus*. Thèse soutenue le 26 septembre 2007 à Poitiers.

2004 *Diplôme d'Études Approfondies, Propriétés Physiques et Mécaniques des Matériaux (P2M2)*, Mention bien, Université de Poitiers.

2003 *Maîtrise de Physique, Option matériaux*, Université de Poitiers.

2002 *Licence de Physique*, Université de Poitiers.

2001 *DEUG de Science de la Matière*, Mention assez bien, Université de Poitiers.

Formations

2015 *Minéralogie au microscope optique polarisant*, Orléans, France, mars-avril 2015.

2012 *Média training*, Orléans, France, 17-18 décembre 2012.

2012 *Entretien Annuel d'Activités : Évalués*, Orléans, France, 10 avril 2012.

2011 *WorkShop : Les dernières innovations en microscopie optique*, Orléans, France, 6-9 juin 2011.

2010 *WITec Academy*, Ulm, Allemagne, 10-11 novembre 2010., *Advanced Instruments & Software Operation Training*.

2010 *Workshop Mars III*, Les Houches, France, 28 mars-2 avril 2010. *Formation à la géologie Martienne, l'exploration de Mars et l'exobiologie*.

2009 *Initiation à la géologie pratique (formation BRGM)*, Lodève, France, 8-12 juin 2009. *Formation aux grands domaines, concepts, méthodes et techniques de la géologie appliquée*.

2009 *Formation WITec*, Orléans, France, 28-30 janvier 2009. *Formation à l'utilisation et la maintenance d'un AFM/Raman confocal Alpha 500RA*.

2009 *Workshop WITec*, Orléans, France, 27 janvier 2009. *Introduction on coupled AFM and confocal Raman spectrometry*.

Annexe 1 - Curriculum vitae

- 2008 *Forum microscopie à sonde locale*, La Londe les Maures, France, 17-21 mars 2008. *Formation à la microscopie non-contact et présentation des dernières avancées techniques en microscopie champ proche.*
- 2007 *Introduction à la microscopie Raman confocale*, WITec GmbH, Ulm, Allemagne, 10-11 octobre 2007. *Principe de la technique et initiation au fonctionnement d'un microscope Raman confocal couplé avec un microscope à force atomique.*
- 2007 *Communication et développement personnel*, Université de Poitiers.
- 2006 *Conduite de projet et sa valorisation*, Université de Poitiers.
- 2005 *École d'été*, Nant, France, septembre 2005. *Contraintes Internes : de leurs Origines à leur Utilisation dans les Matériaux à Propriétés Électroniques.*
- 2005 *Management*, Université de Poitiers.
- 2005 *Formation sur une polisseuse de précision*, Logitech Ltd., Glasgow, Ecosse, U.K., janvier 2005. *Formation à l'utilisation et la maintenance d'une polisseuse de précision PM-5.*

Compétences

Compétences techniques

- Analyse en spectroscopie Raman : *Caractérisation spectrale ponctuelle et cartographie compositionnelle. Autonome sur appareil WITec Alpha 500RA.*
- Caractérisation de surfaces par Microscopie en Champ Proche : *Microscopie à force atomique en mode contact, acoustique, magnétique, force latérale, Pulsed Force Mode... Expérience en microscopie à effet tunnel. Autonome sur appareils Veeco Dimension 3100 et MultiMode, et sur WITec Alpha 500RA.*
- Imagerie en microscopie optique.
- Imagerie et analyse par Microscopie Électronique à Balayage.
- Expérience en Microscopie Électronique en Transmission.
- Expérience en spectroscopie infrarouge.
- Tests d'endommagement par nano-indentation et par sollicitation uni-axiale.
- Préparation d'échantillons : *découpe, polissage, préparation de surface.*
- Expérience en élaboration de films minces par dépôt physique en phase vapeur (PVD) et magnétron.

Compétences informatiques

- Langages Web : *HTML, CSS, PHP, SQL.*
- Calcul et traceur : *Mathematica, Matlab, Origin, Excel, PsTricks, OpenOffice.*
- Logiciels dédiés : *WITec project, Nanoscope, WSxM, OMNIC, BioImage XD.*
- Bureautique : *LATEX, Microsoft Office, OpenOffice.*
- Traitement d'image : *GIMP, Inkscape, Paintshop Pro, MacBiophotonic Image.*

Langues étrangères

-Anglais: *compréhension : bon, parlé : bon, écrit : bon.*

Permis de conduire

Catégorie B

Carrière Scientifique

- Ingénieur de recherche titulaire depuis décembre 2010*, Centre de Biophysique Moléculaire, Orléans, Équipe Exobiologie, Directrice : Dr. F. Westall, *Responsable de la plateforme microscopie à force atomique et spectroscopie Raman. Gestion et conception du site internet de l'ISAR (International Space Analogue RockStore).*
- 2009-2010 *Ingénieur de recherche CDD*, Centre de Biophysique Moléculaire, Orléans, Équipe Exobiologie, Directrice : Dr. F. Westall, *Responsable de la plateforme microscopie à force atomique et spectroscopie Raman.*
- 2007-2009 *Post-doctorat*, Centre de Biophysique Moléculaire, Orléans, Équipe Exobiologie, Directrice : Dr. F. Westall, *Étude des plus anciennes traces de vie sur Terre (microfossiles inclus dans des roches sédimentaires de l'Archéen) par diverses techniques d'analyses dont la microscopie à force atomique, la microscopie électronique à balayage et la spectroscopie Raman. Analyses de l'échantillon de l'expérience Stone 6 visant à tester la survie de microfossiles dans des météorites sédimentaires martiennes.*
- 2004-2007 *Doctorat*, Laboratoire de Métallurgie Physique, Université de Poitiers, Futuroscope, Equipe Instabilités de revêtements de surface contraints, Directeurs : Pr. C. Coupeau et Pr. J. Colin, *Étude de l'influence du substrat sur le phénomène de cloquage des films minces : observations par microscopie à force atomique et modélisation analytique.* Thèse soutenue le 26 septembre 2007 à Poitiers.
- 2004 *Stage*, Diplôme d'Études Approfondies, Laboratoire de Métallurgie Physique, Université de Poitiers, Futuroscope, Directeurs : Pr. C. Coupeau et Pr. J. Colin, *Étude du cloquage des films minces.* Soutenu le 28 juin 2004.

Enseignement et encadrement

- 2016 *Maître de stage, 1^{ère} année à l'École Supérieure de Biotechnologie de Strasbourg (ESBS)*, Etudiant : Joël Le Galudec, *STONE-7*, Stage co-encadré par F. Gaboyer au CBM.
- 2016 *Maître de stage, 5^{ème} année Mécatronique et Conception de Systèmes à l'école PolyTech' Orléans*, Etudiants : Jianyu Li et Thomas Platel, *LithoSpace*. Stage co-encadré par A. Fonte au laboratoire PRISME et par N. Bost au CEMHTI.

- 2016 Tuteur de projet du projet de fin d'études de Master 2 en Mathématiques, Traitement du Signal et de l'Image, Etudiante : Aurélie Courtois, *Etalonnage colorimétrique du Close-Up Imager (CLUPI) de la mission ExoMars 2018 : aide à l'identification de roches en poudres*. Projet co-encadré par G. Guimbretière au CEMHTI et M. Bergounioux au MAPMO.
- 2015-2016 Responsable de l'action de formation *Origine de la vie et vie extraterrestre*, Offre de développement professionnel pour l'enseignement des sciences en primaire et au collège, Maison pour la Science en Centre/ Val de Loire, Fondation La Main à la Pâte. Co-responsable : F. Westall, CBM.
- 2015 Maître de stage, Master 1 en Mathématiques, Traitement du Signal et de l'Image, Etudiante : Aurélie Courtois, *Etalonnage colorimétrique du Close-Up Imager (CLUPI) de la mission ExoMars 2018 : aide à l'identification de roches en poudres*. Stage co-encadré par G. Guimbretière au CEMHTI.
- 2014 Maître de stage, Master 1 en Sciences de la Terre et Environnement, Etudiant : Etienne Marceau, *Analyse colorimétrique de poudres de roches in situ pour la calibration du Close-up Imager de la mission ExoMars*. Stage co-encadré par G. Guimbretière et N. Bost au CEMHTI et par P. Martin au LPC2E pour l'Université d'Orléans.
- 2009-2012 Co-encadrement d'un doctorant en Géologie, Etudiant : Nicolas Bost, *Caractérisation de roches analogues de Mars pour la lithothèque d'Orléans*. Thèse sous la direction de F. Westall (CBM) et C. Ramboz (ISTO) encadrée au CBM pour l'Université d'Orléans, le CNES et la région Centre.
- 2012 Maître de stage, collégienne de 3^{ème}, Etudiante : Charlotte Hodier, Stage co-encadré par N. Bost au CBM.
- 2011 Maître de stage, Master 1 en Physique et Sciences Pour l'Ingénieur, Etudiant : Philipp Rübmann, *Analyse de l'évolution de la qualité des spectres Raman en fonction de la granulométrie de poudres de roches. Aide à la recherche de traces de vie fossile in-situ sur Mars*. Stage co-encadré par N. Bost au CBM pour l'Université d'Orléans.
- 2010 Co-encadrement d'un stagiaire de Master 1 en Géologie, Etudiant : Thibaud Dequillebecq, *Caractérisation de roches analogues de Mars, participation à la lithothèque d'Orléans*. Stage sous la direction de F. Westall, co-encadré par N. Bost au CBM pour l'Université d'Orléans.
- 2009 Encadrement de stagiaires de 3^{ème}, *Étude de microfossiles par microscopie optique, spectroscopie Raman et microscopie à force atomique*. Stage encadré au CBM.
- 2009 Co-encadrement d'une stagiaire de Licence 3 en Géologie, Etudiante : Axelle Hubert, *Étude de roches analogues de Mars*. Stage sous la direction de F. Westall au CBM pour l'Université de Tours.
- 2006-2007 Co-encadrement de stagiaires de Master 1 - Génie des Matériaux, *Étude de couches d'oxydes de nickel*. Stage sous la direction de C. Coupeau et X. Milhet, encadré au LMP pour les Universités de Poitiers et de La Rochelle.
- 2005-2007 Encadrement de travaux pratiques en science des matériaux, Première et deuxième année d'IUT Génie Mécanique et Productique, Université de Poitiers.

Programmes de recherche et développement instrumental

- Depuis 2015 Euro-Cares (Horizon 2020), *Préparation d'un Centre de stockage et d'analyses d'échantillons rapportés sur Terre lors missions spatiales. Working package Analogue Samples*, Porteur du projet : Caroline Smith (NHM Londres). Responsables working package : F. Westall (CBM), Jutta Zipfel (Senckberg Gesellschaft für Naturforschung, Allemagne).
- Depuis 2014 CaliPhoto, *Analyse colorimétrique de poudres de roches avec un appareil photo commercial. Aide à la calibration du Close-up Imager de la mission ExoMars*. Porteurs du projet : F. Foucher (CBM) et G. Guimbretière (CEMHTI). Co-porteurs : N. Bost (CEMHTI), P. Martin (LPC2E), N. le Breton (ISTO) et F. Westall (CBM).
- Depuis 2014 LithoSpace (R&T CNES), *Développement d'un instrument de préparation de lames minces pétrographiques in situ*. Porteurs du projet : F. Foucher (CBM), N. Bost (CEMHTI), S. Janiec (ISTO), F. Westall (CBM), P. Perron (lycée B. Franklin), N. Le Breton (ISTO), M. Tagger (LPC2E), M. Viso (CNES), P. Chazalnoël (CNES), F. Courtade (CNES) & M. Villenave (CNES).
- Depuis 2011 Plateforme AFM-Raman, *Responsable de la plateforme AFM, spectroscopie Raman et microscopie optique du CBM*.
- Depuis 2010 ISAR, *Collection d'échantillons analogues de roches et minéraux extraterrestres pour le test et la calibration d'instruments. Gestion de la collection et webmaster du site internet associé*. Responsable scientifique : F. Westall, Responsable technique : F. Foucher.
- 2009-2013 Archaeomat (ANR), *Les tapis microbiens et l'évolution de la photosynthèse sur la Terre primitive. Analyse d'échantillons par microscopie optique, spectroscopie Raman et PIXE*. Responsable scientifique : F. Westall.
- Depuis 2008 Mars GeoMicroPal (CNES), *Participation à ExoMars*, Responsable scientifique : F. Westall.

Participation à des comités scientifiques

- Depuis 2016 Réseau des microscopies à sonde locale (RéMiSol), MI CNRS, *Membre du comité de pilotage*
- Depuis 2015 Groupe de Travail Repositionnement, MI CNRS, *Animateur du GT*
- Depuis 2015 Conseil d'administration de la Société Française d'Exobiologie, *Secrétaire adjoint*

Organisation de colloques et congrès

- 2016 Journée thématique repositionnement-relocalisation, MI du CNRS, Porteurs du projet : F. Foucher, I. Paintarnd, A. Canivet, A. Mallet, I. Gillot, L. Klein et J.-F. Bergamini, *Institut Pasteur, Paris, France, 29 juin 2016*.
- 2015 Session AB1 Astrobiology, Convener: F. Gómez, Co-Convener: F. Foucher & F. Westall, EPSC 2015, Nantes, France, 27 septembre-2 octobre 2015.

- 2015 Session AB4 *The importance of organic matter evolution from the Interstellar medium to planetary systems*, Convener: G. Danger, Co-Conveners: L. Le Sergeant d'Hendecourt, F. Foucher & F. Westall, *EPSC 2015, Nantes, France, 27 septembre-2 octobre 2015*.
- 2014 *Ecole Thématique du CNRS CarboRaman*, Porteurs du projet : F. Foucher et P. Simon, *Domaine de Chalès, Nouan le Fuzelier, France, 12-17 octobre 2014*.
- 2014 Session LF3 *Planetary analogue samples and environmental simulators*, Convener: F. Foucher, Co-Conveners: G. Danger, O. Prieto-Ballesteros, F. Gómez, B.H. Foing, F. Westall, L. Rodrigues, L. Preston & A. Elsaesser, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 septembre 2014*.
- 2014 Session AB1 *Astrobiology*, Convener: F. Gómez, Co-Conveners: F. Foucher & F. Westall, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 septembre 2014*.
- 2013 Session AB1 *Astrobiology*, Convener: F. Gómez, Co-Conveners: F. Foucher & R. Amils, *EPSC 2013, Londres, Royaume-Uni, 8-13 septembre 2013*.
- 2013 *Workshop Analogues CNES*, Comité d'organisation: F. Westall, F. Foucher et N. Bost, *CNES, Paris, 3 décembre 2013*.
- 2013 Session AB1 *Astrobiology*, Convener: F. Gómez, Co-Conveners: F. Foucher & R. Amils, *EPSC 2013, Londres, Royaume-Uni, 8-13 septembre 2013*.
- 2012 Session AB3 *Astrobiology*, Convener: F. Westall, Co-Conveners: F. Foucher, F. Gómez & R. Amils, *EPSC 2012, Madrid, Espagne, 23-28 septembre 2012*.
- 2012 Session *Biogeosciences, BG8- Astrobiology and Early Evolution of Life, BG8.1 Biosignatures and their applicability to astrobiology and primitive life*, Convener: F. Foucher, Co-Conveners: N. Bost, C. Heim, B. Cavalazzi & F. Westall, *EGU 2012, Vienne, Autriche, 27 avril 2012*.
- 2011 Session *Biogeosciences, BG1.4- Compositional imaging: at the cutting edge*, Convener: C. Heim, Co-Conveners: B. Cavalazzi, F. Foucher, F. Westall & V. Thiel, *EGU 2011, Vienne, Autriche, 4 avril 2011*.

Rapport technique et brevets

- 2015 *Brevet CaliPhoto*, Inventeurs : F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost & A. Courtois, *brevet n°BNT220287FR01*.
- 2015 *Cahier des Charges Fonctionnel, LithoSpace : Dispositif de préparation de lames minces pétrographiques in situ*, document réalisé par un groupe de travail composé de F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, N. Le Breton, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *CdCF - DCT/PO/PM 2015-4917*.

Communications scientifiques et publications

Articles (31 dont 11 en premier auteur)

2016 (2 dont 0 en premier auteur)

L'Europe se prépare au retour d'échantillons extraterrestres, F. Westall & F. Foucher, *Microscop HS octobre 2016*, 26-27, (2016).

Microimaging VIS-IR spectroscopy of ancient volcanic rocks as Mars analogues, P. Manzari, S. D. Angelis, M. C. D. Sanctis, T. D. Iorio, E. Ammannito, N. Bost, F. Foucher & F. Westall, *Earth and Space Science* 3, 14p. (2016).

2015 (8 dont 2 en premier auteur)

Biosignatures on Mars: What, Where, and How? Implications for the Search for Martian Life, F. Westall, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand, D. Loizeau, J. L. Vago, G. Kminek, F. Gaboyer, K. A. Campbell, J. G. Bréhéret, P. Gautret & C. S. Cockell *Astrobiology* 15:11, 998-1029, (2015).

Tracing Biosignature Preservation of Geothermally Silicified Microbial Textures into the Geological Record, K.A. Campbell, B.Y. Lynne, K.M. Handley, S. Jordan, J.D. Farmer, D.M. Guido, F. Foucher, S. Turner & R.S. Perry, *Astrobiology* 15:10, 858-882, (2015).

Un selfie pour la planète rouge? F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, P. Martin, E. Marceau, A. Courtois & F. Westall, *Microscop HS2015*, 12-16, (2015).

Archean (3.33 Ga) microbe-sediment systems were diverse and flourished in a hydrothermal context, F. Westall, K. A. Campbell, J.-G. Bréhéret, F. Foucher, P. Gautret, A. Hubert, S. Sorieul, N. Grassineau & D. M. Guido, *Geology* 43, 615-618, (2015).

Revealing the biotic origin of silicified Precambrian carbonaceous microstructures using Raman spectroscopic mapping, a potential method for the detection of microfossils on Mars, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *Journal of Raman Spectroscopy* 46, 873-879, (2015).

Bioreducible poly(2-ethyl-2-oxazoline)-PLA-PEI-SS triblock copolymer micelles for co-delivery of DNA minicircles and Doxorubicin, V.M. Gaspar, P. Baril, E.C. Cost, D. de Melo-Diogo, F. Foucher, J.A. Queiroz, F. Sousa, C. Pichon & I.J. Correia, *Journal of Controlled Release* 213, 175-191, (2015).

Geyserite in hot-spring siliceous sinter: Window on Earth's hottest terrestrial (paleo)environment and its extreme life, K. A. Campbell, D. M. Guido, P. Gautret, F. Foucher, C. Ramboz & F. Westall, *Earth-Science Reviews* 148, 44-64 (2015).

Testing the ability of the ExoMars 2018 payload to document geological context and potential habitability on Mars, N. Bost, C. Ramboz, N. Lebreton, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, S. De Angelis, M. Josset, G. Venegas, A. Sanz-Arranz, F.R. Pérez, J. Medina, J.-L. Josset, A. Souchon, E. Ammannito, C. Carli, J. L. Vago. & F. Westall, *Planetary and Space Science* 108, 87-97 (2015).

2014 (1 dont 0 en premier auteur)

Microstructure and Biogeochemistry of the Organically Preserved Ediacaran Metazoan Sabellidites, M. Moczyłowska, F. Westall & F. Foucher, *Journal of Paleontology* 88(2), 224-239, (2014).

2013 (8 dont 3 en premier auteur)

Cherts of the Barberton Greenstone Belt, South Africa: Petrology and Trace-element Geochemistry of 3.5 To 3.3 Ga Old Silicified Volcaniclastic Sediments, A. Hofmann, R. Bolhar, B. Orberger & F. Foucher, *South African Journal of Geology* 116 (2), 297-322, (2013).

Habitability on Mars from a Microbial Point of View, F. Westall, D. Loizeau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand, J. Vago & G. Kminek, *Astrobiology* 13:9, 887-897, (2013).

L'International Space Analogue Rockstore, F. Foucher & F. Westall, *Microscop* 68, 20-21, (2013).

Analysis of the scientific capabilities of the ExoMars Raman Laser Spectrometer instrument, G. Lopez-Reyes, F. Rull, G. Venegas, F. Westall, F. Foucher, N. Bost, A. Sanz, A. Catala-Espi, A. Vegas, I. Hermosilla, A. Sansano & J. Medina, *European Journal of Mineralogy* 25, 721-733, (2013).

Missions to Mars: Characterisation of Mars analogue rocks for the International Space Analogue Rockstore (ISAR), N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, A. Meunier, S. Petit, I. Fleischer, G. Klingelhöfer & J. Vago, *Planetary and Space Science* 82-83, 113-127, (2013).

Effect of grain size distribution on Raman analyses and the consequences for in situ planetary missions, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull Pérez, P. Rübmann & F. Westall, *Journal of Raman Spectroscopy* 44, 916-925, (2013).

Lanthanide-Based, Near-Infrared Luminescent and Magnetic Lipoparticles: Monitoring Particle Integrity, S. Lacerda, C. S. Bonnet, A. Pallier, S. Villette, F. Foucher, F. Westall, F. Buron, F. Suzenet, C. Pichon, S. Petoud and E. Toth, *Small X*, 1-5, (2013).

Raman imaging of metastable opal in carbonaceous microfossils of the 700-800 Ma old Draken Formation, F. Foucher & F. Westall, *Astrobiology* 13-1, 57-67, (2013).

2012 (3 dont 0 en premier auteur)

From black-and-white to colour in the Silurian, A. Ferretti, B. Cavalazzi, R. Barbieri, F. Westall, F. Foucher & R. Todesco, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 367-368, 178-192, (2012).

Synthesis of a spinifex-textured Basalt as an analog to Gusev crater basalts, Mars, N. Bost, F. Westall, F. Gaillard, C. Ramboz & F. Foucher, *Meteoritics & Planetary Science* 47, 820-831, (2012).

Weathering of Sb-rich mining and smelting residues: Insight in solid speciation and soil bacteria toxicity, A. Courtin-Nomade, O. Rakotorisoa, H. Bril, M. Grybos, L. Forestier, F. Foucher & M. Kunz, *Chemie der Erde* 72, 29-39, (2012).

2011 (3 dont 0 en premier auteur)

Implications of in situ calcification for photosynthesis in a ~3.3 Ga-old microbial biofilm from the Barberton greenstone belt, South Africa

F. Westall, B. Cavalazzi, L. Lemelle, Y. Marrocchi, J.-N. Rouzaud, A. Simionovici, M. Salomé, S. Mostefaoui, C. Andreatza, F. Foucher, J. Toporski, A. Jauss, V. Thiel, G. Southam, L. MacLean, S. Wirick, A. Hofmann, A. Meibom, F. Robert & C. Defarge.

Earth and Planetary Science Letters 310, 468-479, (2011).

Potential fossil endoliths in vesicular pillow basalt, Coral Patch Seamount, eastern North Atlantic Ocean

B. Cavalazzi, F. Westall, S. L. Cady, R. Barbieri & F. Foucher, *Astrobiology* 11, 619-632, (2011).

Volcaniclastic habitats for early life on Earth and Mars: A case study from 3.5 Ga-old rocks from the Pilbara, Australia

F. Westall, F. Foucher, B. Cavalazzi, S. T. de Vries, W. Nijman, V. Pearson, J. Watson, A. Verchovsky, I. Wright, J.-N. Rouzaud, D. Marchesini, & S. Anne,

Planetary and Space Science 59, 1093-1106, (2011).

2010 (2 dont 2 en premier auteur)

Micro-RAMAN Characterization of Precambrian Permineralized Cells, Draken Formation: Preliminary Results

F. Foucher, B. Cavalazzi & F. Westall

Origins of Life and Evolution of Biospheres 40, Nr 6, Special Issue: Abstracts from the 9th European Workshop on Astrobiology, 528-529, (2010).

Testing the survival of microfossils in martian sedimentary meteorites during Earth's atmospheric entry: the STONE 6 experiment

F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény & A. Brack, *Icarus* 207, 616-630, (2010).

2009 (4 dont 3 en premier auteur)

Testing the survival of microfossils during entry into the Earth's atmosphere: the STONE 6 experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. Cockell, H. Edwards, G. Kurat & A. Brack, *Meteorit. Planet. Sci.* 44, Nr 7, Supplement, Abstract for the 72nd Annual Meteoritical Society Meeting No. 5055, A207, (2009).

Annexe 1 - Curriculum vitae

In situ analysis of the molecular organic and elemental composition of a 3.33 Ga microbial mat from Barberton, F. Westall, L. Lemelle, A. Simionovici, M. Salome, Y. Marrocchi, F. Foucher, B. Cavalazzi, A. Meibom, F. Robert, S. Mostafaoui, A. Jauss, J. Toporski, L. Lacleau, G. Southam, S. Wirick, S. Villette, F. Jamme & P. Dumas, *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 73, *Goldschmidt abstract* 1430, (2009).

A la recherche des origines de la vie, F. Foucher & F. Westall, *Microscop* 57, 12-13, (2009).

STONE 6 Experiment: An Investigation of the Survival of Microfossils During Atmospheric Entry, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 39, Nr 4, *Special Issue : Abstracts from the 2008 ISSOL meeting*, 360-361, (2009).

2007 (1 en premier auteur)

Effect of the dislocation emergence on the mechanical behavior of coated materials: elastic energy relaxation or adhesion modification... F. Foucher & C. Coupeau, *Surf. & Coat. Tech.* 202, *Issues 4-7*, 1094-1097, (2007).

2006 (1 en premier auteur)

How Does Crystalline Substrate Plasticity Modify Thin Film Buckling? F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Phys. Rev. Lett.* 97, 096101, (2006).

2005 (2 dont 0 en premier auteur)

Snap-Trough Occurring in Post-Buckling of Thin Films, G. Parry, J. Colin, C. Coupeau, F. Foucher, A. Cimetière & J. Grilhé, *Appl. Phys. Lett.* 86, 081905, (2005).

Effect of Substrate Compliance on the Global Unilateral Post-Buckling of Coatings: AFM Observations and Finite Element Calculations, G. Parry, J. Colin, C. Coupeau, F. Foucher, A. Cimetière & J. Grilhé, *Acta Mater.* 53, 441-447, (2005).

Chapitres d'ouvrages (1 en premier auteur)

Understanding substrate plasticity and buckling of thin films, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, Chapter 13, 317-339, in "Thin film growth, Physics, materials science and applications", Edited by Cao Zexian, Woodhead Publishing Limited, (2011).

Actes de congrès (4 dont 3 en premier auteur)

Calibration and testing of payload instrument for in situ space missions, F. Westall, N. Bost & F. Foucher, *Report of the COSPAR 2014, Russia, Space research in France, 40th scientific assembly*, 48-49, (2014).

Compte rendu du Workshop Analogues du 3 décembre 2013, CNES, Paris, F. Foucher, F. Westall, N. Bost & M. Viso, pp. 22, (2013).

Investigating the Oldest Traces of Life by AFM/Confocal Raman Spectroscopy: Applications for the Analysis of Martian Rocks, F. Foucher & F. Westall, *Proceedings of the Conference on Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies in the Earth and Planetary Sciences, AIP Conference Proceedings* 1163, 47-58, (2009).

Influence of Dislocation Emergence Process on Buckling: an AFM Experimental Investigation, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 12, 1021-HH06, (2007).

Abstracts (89 dont 42 en premier auteur)

2016 (7 dont 5 en premier auteur)

Simulating meteorite atmospheric entry and its consequences for microbial life: the STONE X experiment, J. Le Galudec, F. Foucher, F. Gaboyer, A. Brack & F. Westall, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, abstract p. B129-130*.

Reflections on the definition of analogues and consequences for the EURO-CARES project, F. Westall, J. Zipfel, F. Foucher, J. Bridges, V. Debaille, L. Folco, J. Michalski, P. Woznikiewicz, J. Martinez-Frias, K. Joy, M. Lee, J. R. Brucato, M. Viso, N. Bost, A. Hutzler, G. Kmínek, H. Schroeven-Deceuninck, M. E. Zolensky, C. Smith, O. Bacon, M. Van Ginneken & L. Ferrière, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, abstract p. B44-45*.

LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars, F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, abstract p. B23-24*.

Colorimetric analysis to help identification of drilled rock powders on Mars: the CaliPhoto method, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, A. Courtois, E. Marceau, P. Martin, M. Bergougnieux, J.-L. Josset, A. Verhaeghe, N. Le Breton & F. Westall, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, abstract p. B22-23*.

Relocalisation « manuelle » par superposition, F. Foucher, *Journée thématique Repositionnement-Relocalisation, abstract p. 15*.

Introduction de la journée et de la problématique du repositionnement au travers d'un exemple d'analyse en microscopie multi-échelle et multimodale, F. Foucher, J.-F. Bergamini, A. Canivet, I. Gillot, L. Klein, A. Mallet & I. Paintrand *Journée thématique Repositionnement-Relocalisation, abstract p. 1*.

Detection of biosignatures in silicified rocks using raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *XIIth International Conference GeoRAMAN-2016, abstract p.34*.

2015 (8 dont 6 en premier auteur)

- Techniques used in studying carbonaceous phases (abiogenic or biogenic) in ancient rocks*, F. Foucher, *Habitats and inhabitants on the early Earth and Mars abstract*, p. 13.
- Détection de biosignatures fossiles par spectroscopie Raman*, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *Assemblée Générale de la Société Française d'Exobiologie*.
- Analogues for Planetary Missions*, F. Foucher, F. Westall, J. Zipfel & N. Bost, *Missions to Habitable Worlds, abstract 7*, pp. 15-16.
- The search for ancient life on Mars using Raman spectroscopy*, F. Foucher, M.-R. Ammar, G. Lopez-Reyes, N. Bost., F. Rull-Pérez, P. Russmann & F. Westall, *12th Symposium Confocal Raman Imaging, WITec abstract*.
- Detection of biosignatures in silicified rocks using raman spectroscopic mapping*, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *15th meeting of the European Astrobiology Network Association, abstract 13*, p.28.
- Identification of biomarkers during mineralisation of a extremotolerant bacterium isolated from a mars analogue environment*, F. Gaboyer, M. Bohmeier, F. Foucher, P. Gautret, C. L. Milbau, F. Westall & the MASE team, *15th meeting of the European Astrobiology Network Association, abstract 72*, p.89.
- Detection of Biosignatures in Silicified Rocks Using Raman Mapping*, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *AbSciCon 2015, abstract 7043*.
- Distribution of carbon in Mars-Analogue volcanic sediments*, F. Westall, F. Foucher, K.Campbell, A. Hubert, P. Gautret, F. Gaboyer & C.S. Cockell, *AbSciCon 2015, abstract 7289*.

2014 (9 dont 6 en premier auteur)

- Report of the 2013 CNES Analogues Workshop*. F. Foucher, F. Westall & N. Bost, *EPSC 2014, abstract 475*.
- Colourimetric analysis of rocks powders helping for the calibration of Close-up Imager (CLUPI) of the ExoMars mission*. E. Marceau, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, F. Westall & the Exobiology Team, *EPSC 2014, abstract 474*.
- A Blind Test to assess the future ExoMars instruments using samples from the ISAR collection*. F. Foucher, F. Westall, N. Bost & ISAR team, *EPSC 2014, abstract 472*.
- Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars*. F. Foucher, F. Westall & exobiology team, *EPSC 2014, abstract 470*.
- Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy*. F. Foucher & F. Westall, *Origins 2014, abstract 1121279*.
- Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars*. F. Foucher, F. Westall & exobiology team, *Origins 2014, abstract 1121277*.
- Microbial-scale habitability on Mars, the concept of punctuated habitability, and the consequences for life on Mars*. F. Westall, D. Loizeau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand, J. Vago & G. Kminek, *Origins 2014, abstract 1143217*.
- Strategy for the geological exploration of mars during the ExoMars mission: effect of sample preparation on Raman spectroscopy measurements and payload calibration*. F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann, F. Westall, J. Vago & M. Viso, *GeoRaman, abstract 5003*.
- Habitability from a microbial point of view*. F. Westall, D. Loizeau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand, J. Vago & G. Kminek, *EGU General Assembly 2014, Geophysical Research Abstracts 16*.

2013 (13 dont 4 en premier auteur)

- L'International Space Analogue Rockstore*, F. Foucher & ISAR team, *Workshop Analogues, CNES 2013*.
- The International Space Analogue Rockstore (ISAR) for in situ instrument testing: relevance for Martian missions*. F. Westall, N. Bost, F. Foucher, C. Ramboz, L. Loiselle & ISAR team, *EPSC 8, abstract 207*.
- Heterogenous microbial habitability on Mars and its implications for the search for life*. F. Westall, D. Loizeau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand, J. Vago & G. Kminek, *EPSC 8, abstract 514*.
- The Rochechouart-Chassenon impactite, France. A laboratory for (extraterrestrial) life in hydrothermal veins?* N. Bost, C. Ramboz, H. Brill, F. Westall, P. Chèvremont & F. Foucher, *EPSC 8, abstract 644*.
- The Skouriotissa mine: a new terrestrial analogue for hydrated mineral formation on Early Mars*. N. Bost, C. Ramboz, F. Foucher & F. Westall, *EPSC 8, abstract 621*.
- A Blind Test to test the future ExoMars instruments*. N. Bost, C. Ramboz, N. Le Breton, G. Lopez-Reyes, C. Pilorget, S. De Angelis, F. Foucher & F. Westall, *EPSC 8, abstract 662*.
- Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars*. F. Foucher, F. Westall & the Exobiology team, *EPSC 8, abstract 201*.
- Effects of powdering rock and mineral samples on optical observations and Raman analyses: consequences for ExoMars measurements*. F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull Pérez, P. Rüßmann & F. Westall, *EPSC 8, abstract 200*.
- Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy*. F. Foucher & F. Westall, *EPSC 8, abstract 199*.
- The Skouriotissa mine: a new terrestrial analogue for hydrated mineral formation on early Mars*. N. Bost, C. Ramboz, F. Foucher & F. Westall, *Analog Sites for Mars Missions II: past, present and future missions to Mars abstract*.
- The International Space Analogue Rock Collection (ISAR) for In Situ Instrument Testing: Relevance for Martian Missions*. F. Westall, N. Bost, L. Loiselle, C. Ramboz, F. Foucher & the ISAR team, *44th Lunar and Planetary Science Conference abstract*.
- The Skouriotissa Mine: a New Terrestrial Analogue for Hydrated Mineral Formation on Early Mars*. N. Bost, C. Ramboz, F. Foucher & F. Westall, *44th Lunar and Planetary Science Conference abstract*.

Synthesis of Western Basalts as an Analog to Gusev Crater Basalts, Mars: Interest for Astrobiology. N. Bost, L. Loiseau, F. Foucher, C. Ramboz & F. Westall, 44th Lunar and Planetary Science Conference abstract.

2012 (24 dont 12 en premier auteur)

Techniques utilisées pour l'observation et l'analyse de microfossiles terrestres et martiens, F. Foucher, F. Westall & l'équipe d'exobiologie, 2^{èmes} Rencontres de la Société Française d'Exobiologie abstract.

Analyses par cartographie Raman d'organismes silicifiés, F. Foucher & F. Westall, 2^{èmes} Rencontres de la Société Française d'Exobiologie abstract.

L'International Space Analogue Rockstore (ISAR) une collection de matériaux pour aider l'exploration planétaire et la recherche de vie, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher & l'ISAR team, 2^{èmes} Rencontres de la Société Française d'Exobiologie abstract.

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, EANA workshop abstract, P4.24.

Habitability and early life on Mars, F. Westall, M. Bertrand, F. Foucher & N. Bost, EANA workshop abstract, P4.08.

Martian exploration: Do not underestimate the volcanic rocks as a possible habitat, N. Bost, F. Westall, M. Bertrand, B. Cavalazzi & F. Foucher, EANA workshop abstract, O2.5.

The International Space Analogue Rock Store (ISAR): A key tool for future planetary, and astrobiological exploration, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz & F. Foucher, EANA workshop abstract, P4.12.

Hydrothermal, deuteric and acidic basalt alteration at the Skouriotissa mine, Cyprus: relevance for Mars and astrobiological implications, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz & F. Foucher, EANA workshop abstract, P4.12.

Habitability in the Solar System, F. Westall, D. Loiseau, F. Foucher, N. Bost & J. Vago, 63rd International Astronautical Congress 2012, abstract 14930.

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, EPSC abstract 7, 936.

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, F. Westall, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez & P. Rüßmann, 39th COSPAR Scientific Assembly abstract, B0.2-0016-12.

The International Space Analogue Rock Store (ISAR): A blind test for helping calibrate the Mars-2018 mission instruments. N. Bost, F. Westall, C. Ramboz & F. Foucher, 39th COSPAR Scientific Assembly abstract, B0.2-0013-12.

Biosignatures for Mars. F. Westall, B. Cavalazzi, F. Foucher & N. Bost, 39th COSPAR Scientific Assembly abstract, B0.6-0003-12.

Raman mapping of silicified biological remains, F. Foucher & F. Westall, GeoRaman 10 abstract, p. 37.

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann & F. Westall, GeoRaman 10 abstract, p. 143.

AFM-Raman coupling to study mesocrystal polymorphism in nacre. X. Bourrat, F. Foucher, R. Guegan, Q. Feng, P. Stemfle, D. Chateigner, F. Westall, GeoRaman 10 abstract, p. 27.

Techniques involved in the study of early traces of life. F. Foucher & F. Westall, Third Conference on Early Mars (2012), abstract 7021.

A philosophical approach to the search for life on Mars and its practical implications. F. Westall, D. Loiseau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand & J. Vago, Third Conference on Early Mars (2012), abstract 7009.

The influence of subsurface processes on Martian basalts: an example of hydrothermal and acidic basalt alteration at the Skouriotissa mine, Cyprus. N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, A. Meunier, E. Georgiou-Morisseau & F. Foucher, Third Conference on Early Mars (2012), abstract 7018.

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, G. López Reyes, N. Bost, F. Rull, P. Rüßmann & F. Westall, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-4318-1.

Biosignatures observed by Raman mapping in silicified materials, F. Foucher, F. Westall & A. Knoll, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-4287.

Hydrothermal, deuteric and acidic basalt alteration at the Skouriotissa Mine, Cyprus: relevance for Mars, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, C. Fontaine, A. Meunier & F. Foucher, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-1407-1.

The International Space Analogue Rock Store (ISAR): A key tool for future planetary exploration. N. Bost, F. Westall, C. Ramboz & F. Foucher, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-1403.

Biosignatures in Vesicular Basalts, B. Cavalazzi, F. Westall, S. L. Cady, R. Barbieri, F. Foucher & N. J. Beuckes, Conference on Life Detection in Extraterrestrial Samples Abstracts, LPI contribution 6017.

2011 (10 dont 2 en premier auteur)

The European Space Analogue Rock Collection (ESAR) at the OSUC-Orleans for in situ planetary missions. F. Westall, D. Pullan, N. Bost, C. Ramboz, F. Foucher, B. Hofmann, J. Bridges & ISAR team, EPSC-DPS 2011 abstract, vol.6, 684.

New Synthetic Martian Basalts from Spirit data, Gusev crater. N. Bost, F. Westall, F. Gaillard, C. Ramboz & F. Foucher, EPSC-DPS 2011 abstract, vol.6, 398.

Raman spectroscopy of Precambrian microfossils from the Draken formation: a useful tool for identifying biosignatures in ancient materials. F. Foucher, J. Jehlicka, J.-N. Rouzaud & F. Westall, Origins 2011 abstracts, P2-19, (2011).

Habitability in Noachian/Hesperian Materials on Mars: Relevance of Early Archean Volcanic and Sedimentary Rocks for the Preservation of Ancient Habitability, F. Westall, F. Foucher, T. Zegers, N. Bost, A. Hoffmann & J. Vago, The International Conference: Exploring Mars Habitability abstracts, 34-35, (2011).

The European Space Analogue Rockstore: a Key Tool for Determining Habitability in In Situ Missions on Mars, N. Bost, F. Westall, F. Foucher & D. Pullan, *The International Conference: Exploring Mars Habitability abstracts*, 50-51, (2011).

Micro-Raman study of Precambrian Permineralized Cells from the Draken Formation, F. Foucher & F. Westall, *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-2946 (2011).

Raman and cathodoluminescence imagery: complementary tools for Martian Geology and the search Early Life on Mars, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher & D. Do Couto, *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-12707-1 (2011).

ExoMars: Mars analogue rocks in the European lithothèque at Orleans, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, I. Fleischer, G. Klingelhöfer, M. Viso, J. Vago & T. Zegers, *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-748-1 (2011).

2018 MAX-C/ExoMars Mission: The Orleans Mars-analogue Rock Collection for Instrument Testing, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, I. Fleischer, G. Klingelhöfer, A. Steele, H. E. F. Amundsen, M. Viso, J. Vago, T. Zegers, S. Petit & A. Meunier, *LPI Contribution No. 1608, 1347, 42th LPSC conference*, (2011).

Mars Exobiology Mission 2018 (MAX-C/ExoMars) and the Mars Analogue Rock Collection at the OSUC, Orleans. F. Westall, D. Pullan, N. Bost, C. Ramboz, F. Foucher & the Mars-analogue rock collection team, *LPI Contribution No. 1608, 1346, 42th LPSC conference* (2011).

2010 (5 dont 3 en premier auteur)

Tester la survie de microfossiles lors de l'entrée atmosphérique : l'expérience STONE 6, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, *1^{ère} Rencontres SFE*, (2010).

Testing the survival of microfossils in an artificial martian sedimentary meteorite : the STONE 6 Experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, *38th COSPAR Assembly*, (2010).

ExoMars : Mars analogue rocks in the European lithothèque at Orleans, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, J. Vago & T. Zegers, *38th COSPAR Assembly*, (2010).

2010 Raman Analysis of an Artificial Sedimentary Meteorite: the STONE 6 Experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, *9th International Conference on Raman spectroscopy Applied to the Earth Sciences, GeoRaman 2010*, (2010).

Constitution of a Mars analogues rock store and data base for space missions, the key role of Raman spectroscopy, N. Bost, F. Foucher, F. Westall, C. Ramboz & the Orléans-Lithothèque Team, *Workshop Mars III*, (2010).

2009 (5 dont 3 en premier auteur)

Micro-RAMAN characterization of precambrian permineralized cells, Draken Formation : preliminary results, F. Foucher, B. Cavalazzi & F. Westall, *9th European Workshop on Astrobiology EANA'09*, (2009).

Traces of life on Mars are likely to be very small and very challenging to find, F. Westall, F. Foucher & B. Cavalazzi, *Geophysical Research Abstracts 11, EGU General Assembly*, (2009).

Investigating the oldest traces of life by AFM/Confocal Raman Spectroscopy: applications for the analysis of martian rocks, F. Foucher & F. Westall, *LPI Contribution No. 1473, 3007, Conference on Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies in the Earth and Planetary Sciences*, (2009).

STONE-6 experiment: testing the survival of microfossils in martian analogues rocks during entry into the Earth's atmosphere, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, *LPI Contribution No. 1468, 1583, 40th LPSC conference*, (2009).

No Stromatolites on Mars? F. Westall, F. Foucher & B. Cavalazzi, *LPI Contribution No. 1468, 1759, 40th LPSC conference*, (2009).

2008 (6 dont 3 en premier auteur)

Des balbutiements de la vie à la recherche de vie dans le système solaire, F. Westall, A. Brack, M. Bertrand, A. Chabin & F. Foucher, *Abstract pour les Journées du Centre de Biophysique Moléculaire*.

Can microfossils in a meteor survive atmospheric entry? F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, *EPSC Abstracts 3, EPSC2008-A-00273, EPSC 2008*, (2008).

STONE 6 : Sedimentary meteors from Mars, F. Westall, R. Demets, F. Brandstätter, H. G. M. Edwards, C. S. Cockell, J. Parnell, F. Foucher, G. Kurat & A. Brack, *EPSC Abstracts 3, EPSC2008-A-00407, EPSC 2008*, (2008).

Atomic Force Microscopy study of microfossils, F. Foucher, F. Westall, & F. Orange, *Geophysical Research Abstracts Vol. 10, EGU2008-A-12075, EGU General Assembly*, (2008).

Astrobiological implications of microbes in basaltic pillow lava crusts (Atlantic Ocean), B. Cavalazzi, F. Westall, R. Barbieri & F. Foucher, *Geophysical Research Abstracts Vol. 10, EGU2008-A-04565, EGU General Assembly*, (2008).

Étude de microfossiles par microscopie à force atomique, F. Foucher, F. Westall, B. Cavalazzi & F. Orange, *Abstract 146, Forum Microscopie à Sonde Locale*, (2008).

2007 (2 en premier auteur)

Effect of Crystalline Substrate Plasticity on Thin Film Buckling Phenomenon, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *2007 MRS Spring Meeting*, (2007).

Cloquage des films minces : Influence de la nature du substrat et phénomène de claquage, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière, G. Parry & J. Grilhé, *Colloque Plasticité 2007*, (2007).

2006 (2 en premier auteur)

Influence de la Nature du Substrat sur le Cloquage des Films Minces, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière, G. Parry & J. Grilhé, *JMC10 (10^{èmes} Journées de la Matière Condensée)*, (2006).

Influence de l'Émergence de Dislocations sur le Cloquage des Films Minces, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Colloque Plasticité 2006*, (2006).

2005 (2 en premier auteur)

Étude du Cloquage des Films Minces Sous Contrainte de Compression : Phénomène de Claquage et Effet du Substrat, F. Foucher, G. Parry, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Contraintes Internes : de leurs Origines à leur Utilisation dans les Matériaux à Propriétés Électroniques*, (2005).

Évolution Morphologique des Structures de Flambage : Etude de la Transition Ride-Bulles et Phénomène de Claquage, F. Foucher, G. Parry, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Colloque Plasticité 2005*, (2005).

Séminaires invité (17)

2016 (5)

EURO-CARES WP5: Analogues and instrumentation, F. Westall, J. Zipfel, F. Foucher, J. Bridges, V. Debaille, L. Folco, J. Michalski, P. Woznikiewicz, J. Martinez-Frias, K. Joy, M. Lee, J.R. Brucato, M. Viso, N. Bost, A. Hutzler, G. Kmínek, H. Schroeven-Deceuninck, M. E. Zolensky, C. Smith, O. Bacon, M. Van Ginneken & L. Ferrière, *EURO-CARES WP4 workshop, Paris, France, 13 octobre 2016*.

Introduction de la journée et de la problématique du repositionnement au travers d'un exemple d'analyse en microscopie multi-échelle et multimodale, F. Foucher, J.-F. Bergamini, A. Canivet, I. Gillot, L. Klein, A. Mallet & I. Paintrand, *Journée thématique Repositionnement-Relocalisation, Institut Pasteur, Paris, 29 juin 2016*.

Analogues for planetary missions: the engineer point of view, F. Foucher, F. Westall, J. Zipfel, N. Bost & the ISAR and Euro Cares teams, *Conférence pour le EURO-CARES WP5 workshop, Francfort, Allemagne, 1 juin 2016*.

Powder calibration target : CaliPhoto project, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, J.-L. Josset, A. Verhaeghe, E. Marceau, A. Courtois, P. Martin & F. Westall, *Conférence pour le CLUPI Science Team Meeting, Institut Space-X, Neuchâtel, Suisse, 11 Mars 2016*.

Atomic Force Microscopy and associated image processing, F. Foucher, *Séminaire externe, laboratoire MAMPO, Orléans, France, 2 Mars 2016*.

2015 (4)

Techniques used in studying carbonaceous phases (abiogenic or biogenic) in ancient rocks, F. Foucher, *Habitats and inhabitants on the early Earth and Mars, Le Studium, Orléans, France, 17-18 novembre 2015*.

Analogues for Planetary Missions, F. Foucher, F. Westall, J. Zipfel & N. Bost, *Missions to Habitable Worlds, Budapest, Hongrie, 28-29 octobre 2015*.

The search for ancient life on Mars using Raman spectroscopy, F. Foucher, M.-R. Ammar, G. Lopez-Reyes, N. Bost., F. Rull-Pérez, P. Russmann & F. Westall, *12th Symposium Confocal Raman Imaging, WITec, Ulm, Allemagne, 28-30 septembre 2015*.

Nano-Stone, F. Foucher & F. Westall, *Topical team meeting on Nano-satellites, ESA ESTEC, Pays-Bas, 23 mars 2015*.

2014 (2)

Spectroscopie Raman de la matière carbonée pour l'exobiologie, F. Foucher & J. Jehlicka, *Conférence invité pour l'école thématique CarboRaman, Nouan le Fuzelier, Loire et Cher, 12-17 octobre 2014*.

What biosignatures facilitate life detection? F. Foucher, *3rd AstRoMap Workshop: What bio-signatures facilitate life detection? Definition of science goals, Madrid, Espagne, 8-9 mai 2014*.

2013 (1)

De l'origine de la vie à la recherche de la vie sur Mars, F. Westall, M. Bertrand, F. Foucher, A. Hubert & L. Loisele, *Séminaire interne « Café », Centre de Biophysique Moléculaire, Orléans, France, 12 avril 2013*.

2011 (3)

Aux origines de la vie, F. Foucher, *Conférence à destination des enseignants du secondaire, Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, 17 novembre 2011*.

Effect of grain size distribution of Raman analyses: consequences for Mars-2018 measurements, F. Foucher, N. Bost, P. Rüßmann, F. Westall & F. Rull team. *Conférence invité à Unidad Asociada UVa-CSIC a traves del Centro de Astrobiología, Boecillo (Valladolid), Espagne, 2 novembre 2011*.

Traces de vie fossiles identifiées par spectroscopie Raman et microscopie à force atomique, F. Westall & F. Foucher, *Rencontres de technologies spatiales, RTS 2011, CNES, Biarritz, France, 19 mai 2011*.

2010 (1)

Aux origines de la vie, F. Foucher, *Rencontres enseignants-chercheurs, CDDP de Tours, France, 3 février 2010*.

2009 (1)

De l'analyse des plus anciennes traces de vie terrestres à la recherche d'une vie passée sur Mars, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. Cockell, H. Edwards, A. Brack & G. Kurat, *Séminaire interne, Centre de Biophysique Moléculaire, Orléans, France, 23 janvier 2009.*

Communications orales en premier auteur ou présentées (30)**2016 (5)**

Reflections on the definition of analogues and consequences for the EURO-CARES project, F. Westall, J. Zipfel, F. Foucher, J. Bridges, V. Debaille, L. Folco, J. Michalski, P. Woznikiewicz, J. Martinez-Frias, K. Joy, M. Lee, J. R. Brucato, M. Viso, N. Bost, A. Hutzler, G. Kminek, H. Schroeven-Deceuninck, M. E. Zolensky, C. Smith, O. Bacon, M. Van Ginneken & L. Ferrière, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars, F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

Colorimetric analysis to help identification of drilled rock powders on Mars: the CaliPhoto method, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, A. Courtois, E. Marceau, P. Martin, M. Bergougnieux, J.-L. Josset, A. Verhaeghe, N. Le Breton & F. Westall, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

Relocalisation « manuelle » par superposition, F. Foucher, *Journée thématique Repositionnement-Relocalisation, Institut Pasteur, Paris, 29 juin 2016.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *GeoRaman, Novosibirsk, Russie, 9-13 juillet 2016.*

2015 (3)

Détection de biosignatures fossiles par spectroscopie Raman, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *Assemblée Générale de la Société Française d'Exobiologie, 19 novembre 2015.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopic mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *15th meeting of the European Astrobiology Network Association, ESA-Estec, Noordwijk, Pays-Bas, 6-9 octobre 2015.*

Detection of Biosignatures in Silicified Rocks Using Raman Mapping, F. Foucher, M.-R. Ammar & F. Westall, *AbSciCon 2015, Chicago, USA, 14-19 juin 2015.*

2014 (5)

Report of the 2013 CNES Analogues Workshop. F. Foucher, F. Westall & N. Bost, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014.*

Colorimetric analysis of rocks powders helping for the calibration of Close-up Imager (CLUPI) of the ExoMars mission. E. Marceau, F. Foucher, G. Guimbretière, N. Bost, F. Westall & the Exobiology Team, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014.*

A Blind Test to assess the future ExoMars instruments using samples from the ISAR collection. F. Foucher, F. Westall, N. Bost & ISAR team, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy. F. Foucher & F. Westall, *Origins 2014, Nara, Japon, 6-11 juillet 2014.*

Strategy for the geological exploration of Mars during the ExoMars mission: effect of sample preparation on Raman spectroscopy measurements and payload calibration. F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann, F. Westall, J. Vago & M. Viso, *GeoRaman, St Louis, USA, 15-20 juin 2014.*

2013 (3)

L'International Space Analogue Rockstore, F. Foucher & ISAR team, *Workshop Analogues, CNES, Paris, 3 décembre 2013.*

Effects of powdering rock and mineral samples on optical observations and Raman analyses: consequences for ExoMars measurements. F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull Pérez, P. Rüßmann & F. Westall, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy. F. Foucher & F. Westall, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013.*

2012 (3)

Analyses par cartographie Raman d'organismes silicifiés, F. Foucher & F. Westall, *2^{èmes} Rencontres de la Société Française d'Exobiologie, Fréjus, France, 11-14 novembre 2012.*

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, F. Westall, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez & P. Rüßmann, *39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, Inde, 14-22 juillet 2012.*

Raman mapping of silicified biological remains, F. Foucher & F. Westall, *GeoRaman 10, Nancy, France, 11-13 juin 2012.*

2011 (2)

Micro-Raman study of Precambrian Permineralized Cells from the Draken Formation, F. Foucher & F. Westall, *EGU General Assembly, Vienne, Autriche, 03-08 avril 2011.*

Annexe 1 - Curriculum vitae

ExoMars: Mars analogue rocks in the European lithothèque at Orleans, N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, F. Foucher, D. Pullan, I. Fleischer, G. Klingelhöfer, M. Viso, J. Vago & T. Zegers, *EGU General Assembly, Vienne, Autriche, 03-08 avril 2011.*

2010 (3)

Tester la survie de microfossiles lors de l'entrée atmosphérique : l'expérience STONE 6, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, *1^{ère} Rencontres SFE, Biarritz, France, 28-30 septembre 2010.*

Testing the survival of microfossils in an artificial martian sedimentary meteorite: the STONE 6 Experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, *38th COSPAR Assembly, Brême, Allemagne, 18-25 juillet 2010.*

Raman Analysis of an Artificial Sedimentary Meteorite : the STONE 6 Experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. S. Cockell, H. G. M. Edwards, J.-M. Bény, A. Brack & G. Kurat, *9th International Conference on Raman spectroscopy Applied to the Earth Sciences, GeoRaman 2010, Sydney, Australie, 28 juin- 2 juillet 2010.*

2009 (2)

Investigating the oldest traces of life by AFM/Confocal Raman Spectroscopy : applications for the analysis of martian rocks, F. Foucher & F. Westall, *Conference on Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies in the Earth and Planetary Sciences, Mayence, Allemagne, 2-4 avril 2009.*

L'AFM-Raman confocal au service de l'exobiologie, F. Foucher & F. Westall, *Workshop: Introduction on coupled AFM and confocal Raman spectrometry, Orléans, 27 janvier 2009.*

2008 (2)

Des balbutiements de la vie à la recherche de vie dans le système solaire, F. Westall, A. Brack, M. Bertrand, A. Chabin & F. Foucher, *Journées du Centre de Biophysique Moléculaire, Nouan le Fuzelier, France, 13-14 novembre 2008.*

Can microfossils in a meteor survive atmospheric entry? F. Foucher, F. Westall, J.-M. Bény, F. Brandstätter & R. Demets, *European Planetary Sciences Congress 2008, Munster, Allemagne, 21-26 septembre 2008.*

2007 (1)

Effect of Crystalline Substrate Plasticity on Thin Film Buckling Phenomenon, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *2007 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, 9-13 avril 2007.*

2005 (1)

Évolution Morphologique des Structures de Flambage : Etude de la Transition Ride-Bulles et Phénomène de Claquage, F. Foucher, G. Parry, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Colloque Plasticité 2005, La Rochelle, France, avril 2005.*

Posters premier auteur ou présentés (30)

2016 (3)

EURO-CARES: EUROpean Curation of Astromaterials Returned from Exploration of Space, The EUROCARES consortium, *Journées de la SFE, Lyon, France, 22-24 novembre 2016.*

Simulating meteorite atmospheric entry and its consequences for microbial life: the STONE X experiment. J. Le Galudec, F. Foucher, F. Gaboyer, A. Brack & F. Westall, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

LithoSpace: an automated system for in situ petrographic thin section preparation on Mars, F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016.*

2014 (2)

Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars. F. Foucher, F. Westall & exobiology team, *EPSC 2014, Lisbonne, Portugal, 7-12 octobre 2014.*

Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars. F. Foucher, F. Westall & exobiology team, *Origins 2014, Nara, Japon, 6-11 juillet 2014.*

2013 (2)

The International Space Analogue Rockstore (ISAR) for in situ instrument testing: relevance for Martian missions. F. Westall, N. Bost, F. Foucher, C. Ramboz, L. Loisel & ISAR team, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013.*

Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars. F. Foucher, F. Westall & the Exobiology team, *EPSC 2013, University College London, Londres, Royaume-Uni, 08-13 septembre 2013.*

2012 (9)

Techniques utilisées pour l'observation et l'analyse de microfossiles terrestres et martiens, F. Foucher, F. Westall & l'équipe d'exobiologie, *2^{èmes} Rencontres de la Société Française d'Exobiologie, Fréjus, France, 11-14 novembre 2012.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *12th EANA workshop, Stockholm, Suède, 15-17 octobre 2012.*

Detection of biosignatures in silicified rocks using Raman spectroscopy, F. Foucher & F. Westall, *European Planetary Science Congress, Madrid, Espagne, 24-28 septembre 2012.*

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, G. Lopez-Reyes, N. Bost, F. Rull-Perez, P. Rüßmann & F. Westall, *GeoRaman 10, (2012), Nancy, 11-13 juin 2012.*

Techniques involved in the study of early traces of life. F. Foucher & F. Westall, *Third Conference on Early Mars (2012), Lake Tahoe, USA, 21-25 mai 2012.*

A philosophical approach to the search for life on Mars and its practical implications. F. Westall, D. Loizeau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand & J. Vago, *Third Conference on Early Mars (2012), Lake Tahoe, USA, 21-25 mai 2012.*

The influence of subsurface processes on Martian basalts: an example of hydrothermal and acidic basalt alteration at the Skouriotissa mine, Cyprus. N. Bost, F. Westall, C. Ramboz, A. Meunier, E. Georgiou-Morisseau & F. Foucher, *Third Conference on Early Mars (2012), Lake Tahoe, USA, 21-25 mai 2012.*

Effect of the crushing process on Raman analyses: consequences for the Mars 2018 mission, F. Foucher, G. López Reyes, N. Bost, F. Rull, P. Rüßmann & F. Westall, *EGU, Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.*

Biosignatures observed by Raman mapping in silicified materials, F. Foucher, F. Westall & A. Knoll, *EGU, Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.*

2011 (3)

Effect of grain size distribution on Raman analyses: consequences for ExoMars-C measurements, F. Foucher, N. Bost, P. Rüßmann & F. Westall, *EPSC-DPS joint meeting, Nantes, France, 2-7 octobre 2011.*

Raman spectroscopy of Precambrian microfossils from the Draken formation: a useful tool for identifying biosignatures in ancient materials. F. Foucher, J. Jehlicka, J.-N. Rouzard & F. Westall, *Origins 2011, Montpellier, France, 3-8 juillet 2011.*

The European Space Analogue Rockstore: a Key Tool for Determining Habitability in In Situ Missions on Mars, N. Bost, F. Westall, F. Foucher & D. Pullan, *The International Conference: Exploring Mars Habitability and MEPAG, Lisbonne, Portugal, 13-17 juin 2011.*

2010 (2)

Constitution of a Mars analogues rockstore and data base for space missions, the key role of Raman spectroscopy, N. Bost, F. Foucher, F. Westall, C. Ramboz & the Orléans-Lithothèque Team, *Workshop Mars III, Les Houches, France, 28 mars-2 avril 2010.*

Micro-RAMAN characterization of precambrian permineralized cells, Draken Formation: preliminary results, F. Foucher, B. Cavalazzi & F. Westall, *9th European Workshop on Astrobiology EANA'09, Bruxelles, Belgique, 12-14 octobre 2009.*

2009 (2)

Testing the survival of microfossils during entry into the Earth's atmosphere: the STONE 6 experiment, F. Foucher, F. Westall, F. Brandstätter, R. Demets, J. Parnell, C. Cockell, H. Edwards, G. Kurat & A. Brack, *72nd Annual Meeting of the Meteoritical Society, Nancy, France, 13-18 juillet 2009.*

STONE-6 experiment: testing the survival of microfossils in martian analogues rocks during entry into the Earth's atmosphere, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Béný, F. Brandstätter & R. Demets, *40th LPSC conference 2009, Texas, USA, 23-27 mars 2009.*

2008 (3)

STONE 6 experiment an investigation of the survival of microfossils during atmospheric entry, F. Foucher, F. Westall, J.-M. Béný, F. Brandstätter & R. Demets, *XV International Conference on the Origin of Life, ISSOL, Florence, Italie, 24-29 août 2008.*

Atomic Force Microscopy study of microfossils, F. Foucher, F. Westall, B. Cavalazzi, F. Orange & J.-M. Beny, *European Geosciences Union General Assembly 2008, Vienna, Autriche, 13-18 avril 2008.*

Étude de microfossiles par microscopie à force atomique, F. Foucher, F. Westall, B. Cavalazzi, F. Orange & J.-M. Beny, *Forum microscopie à sonde locale, La Londe Les Maures, France, 17-21 mars 2008.*

2007 (1)

Cloquage des films minces : Influence de la nature du substrat et phénomène de claquage, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière, G. Parry & J. Grilhé, *Colloque Plasticité 2007, Poitiers, France, mars 2007.*

2006 (2)

Influence de la Nature du Substrat sur le Cloquage des Films Minces, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière, G. Parry & J. Grilhé, *JMC10 (10^{èmes} Journées de la Matière Condensée), Toulouse, France, août 2006.*

Influence de l'Émergence de Dislocations sur le Cloquage des Films Minces, F. Foucher, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Colloque Plasticité 2006, Sévrier-Annecy, France, mars 2006.*

2005 (1)

Étude du Cloquage des Films Minces Sous Contrainte de Compression : Phénomène de Claquage et Effet du Substrat, F. Foucher, G. Parry, C. Coupeau, J. Colin, A. Cimetière & J. Grilhé, *Contraintes Internes : de leurs Origines à leur Utilisation dans les Matériaux à Propriétés Électroniques, École d'été, Nant, France, septembre 2005.*

Communications grand public et dans les médias

Communications grand public (18)

2016 (3)

Retransmission du décollage d'ExoMars 2016. F. Foucher & J.-P. Lebreton, *Diffusion du décollage en direct et conférence, OSUC, Orléans, 14 mars 2016.*

A la recherche de vie extraterrestre. F. Foucher, *Conférence pour la Journée de formation, Maison pour la Science, CBM, Orléans, 4 mars 2016.*

A la recherche de vie sur Mars. F. Foucher, *Conférence pour la Journée de formation, Maison pour la Science, CBM, Orléans, 4 mars 2016.*

2015 (1)

De l'origine de la vie à la recherche de vie extraterrestre. F. Foucher, *Conférence grand public pour 3^{èmes} rencontres astronomiques d'Ouzouer-sur-Loire, St Benoît sur Loire, 9 mai 2015.*

2014 (4)

L'exobiologie: de l'origine de la vie sur Terre à la recherche de civilisations extraterrestres. F. Foucher, *Conférence grand public à l'invitation du club Vega, Ollioules, France, 22 août 2014.*

Comment chercher la vie dans l'Univers. F. Foucher, *Conférence grand public pour 3^{èmes} rencontres astronomiques d'Ouzouer-sur-Loire, 24 mai 2014.*

L'exobiologie: de l'origine de la vie sur Terre à la recherche de civilisations extraterrestres. F. Foucher, *Conférence grand public dans le cadre du concours C'Génial, Orléans, France, 9 avril 2014.*

Etude pétrographique de lames minces de chert. F. Foucher, *Intervention auprès du grand public pour l'inauguration de l'espace Dupanloup et le réveil de la sonde Rosetta, Orléans, France, 20 janvier 2014.*

2013 (2)

L'odyssée vers la vie sur Mars, F. Foucher, *Conférence grand public à l'invitation de L'Astro Club d'Ouzouer sur Loire, 2èmes rencontres astronomiques, Ouzouer sur Loire, France, 11 mai 2013.*

L'odyssée vers la vie sur Mars, F. Foucher, *Conférence grand public à l'invitation de Action Science Jargeau, journée Le Ciel et l'Espace, Jargeau, France, 16 février 2013.*

2012 (1)

De la recherche de vie sur Mars à l'origine de la vie, F. Foucher, *Conférence grand public, fête de la science, CNRS Orléans, France, 13 octobre 2012.*

2010 (4)

De l'origine de la vie à la recherche de vie sur Mars, F. Foucher, *Conférence grand public à l'invitation la Société Astronomique de Touraine, Tauxigny, France, 22 octobre 2010.*

A la recherche de vie sur Mars, F. Foucher, *Conférence grand public à l'invitation du club Vega, Ollioules, France, 11 juin 2010.*

A la recherche de l'origine de la vie, F. Foucher, *Conférence pour des Lycéens, Lycée Jean Moulin, Montmorillon, France, 30 avril 2010.*

Aux origines de la vie, F. Foucher, *Rencontres Jeunes Chercheurs, Faculté des sciences de Bourges, France, 26 mars 2010.*

2009 (3)

La recherche d'une vie sur Mars, F. Foucher, *Conférence grand public à l'Université de Limoges, Limoges, France, 13 novembre 2009.*

A la recherche de l'origine de la vie, F. Foucher, *Conférence grand public à la médiathèque Odyssée, Dreux, France, 22 octobre 2009.*

La recherche de vie sur Mars, F. Foucher, *Colloque scientifique du bicentenaire de l'Académie d'Orléans, 1809-2009, Orléans, France, 30 septembre 2009.*

Interventions dans les médias

2016

Le Loiret à la conquête de la planète rouge, F. Westall, A. Brack, F. Foucher & J.-P. Lebreton, *Reportage pour la France 3 Centre, 20 mars 2016.*

ExoMars 2016, F. Foucher & J.-P. Lebreton, *Reportage pour France 3 Centre, 14 mars 2016.*

2015

L'exobiologie sur Orléans, F. Foucher, *Interview pour la république du Centre, 30 juin 2015.*

Les météorites sous surveillance du CNRS, M. Tagger, F. Westall & F. Foucher, *Reportage pour France 3 Centre, 15 avril 2015.*

2013

La vie ailleurs, F. Westall, A. Hubert & F. Foucher, *Reportage pour la chaîne Encyclo*, 12 novembre 2013.

L'exobiologie au CNRS d'Orléans, F. Westall, M. Bertrand, N. Bost & F. Foucher, *Reportage sur l'équipe d'exobiologie pour TV Tours Val de Loire*, octobre 2013.

Sommes-nous vraiment seuls dans l'Univers? F. Westall, M. Bertrand, N. Bost & F. Foucher, *Reportage pour Le Point* 2146, 111-126, 31 octobre 2013.

Objectif ExoMars 2018, N. Bost & F. Foucher, *Interview pour Apostrophe* 45, septembre 2013.

Des Orléanais à la conquête de Mars, N. Bost & F. Foucher, *Interview pour The Sky at Night, BBC One*, septembre 2013.

Des Orléanais à la conquête de Mars, F. Foucher, *Interview pour Le Point Orléans* 2126, 111, 13 juin 2013.

2012

La recherche de vie sur Mars, F. Foucher, *interview en direct pour France Bleu Orléans*, 10 octobre 2012.

Première image de MSL, N. Bost, F. Westall & F. Foucher, *reportage pour France 3 Centre*, 10 août 2012.

2011

La recherche de vie sur Mars, F. Foucher, *interview en direct pour France Bleu Orléans*, 10 octobre 2012.

2010

Life and space, F. Westall & F. Foucher, *interview pour la chaîne NHK Japon*, octobre 2010.

2008

Unelmien kivi saa (« Une pierre devenue rêve » en Finnois), F. Westall & F. Foucher, *interview pour le journal finlandais Tahdet ja avaruus*, août 2008.

Prix et distinctions

Poster award, pour « LithoSpace: an automated system for *in situ* petrographic thin section preparation on Mars », F. Foucher, N. Bost, S. Janiec, F. Westall, P. Perron, A. Fonte, N. Le Breton, J. Li, T. Platel, M. Tagger, M. Viso, P. Chazalnoël, F. Courtade & M. Villenave, *EANA16 meeting, Athènes, Grèce, 27-30 juillet 2016*.

Prix du meilleur poster, pour « Techniques used in astrobiology to search for past or present extraterrestrial life, in particular on Mars. », F. Foucher, F. Westall & exobiology team, *Origins 2014, Nara, Japon, 6-11 juillet 2014*.

Silver WITec paper award 2014, pour « Raman imaging of metastable opal in carbonaceous microfossils of the 700-800 Ma old Draken Formation », F. Foucher & F. Westall, *Astrobiology* 13-1, 57-67, (2013).