

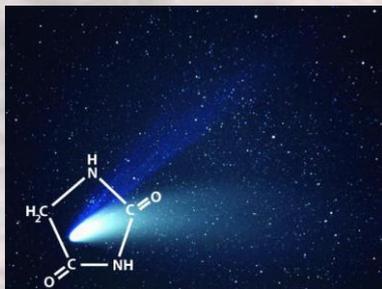
Workshop Analogues

3 décembre 2013

CNES, 2 Place Maurice Quentin, Paris

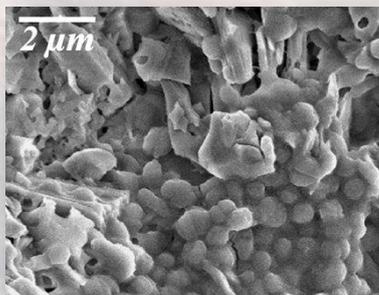


Mono Lake, USA



Comète Hale-Bopp et formule de l'hydantoïne. © N. Biver.

Compte rendu



Fossiles de Kitty's Gap, Australie
(Westall *et al.* 2011)



Komatiite, Afrique du Sud (ISAR)

Table des matières

Introduction.....	2
I. Résumé des présentations	3
I.1 Analogues géologiques.....	3
I.1.1 Sites analogues.....	3
I.1.2 Minéraux et roches analogues	5
I.2 Analogues chimiques.....	6
I.2.1 Météorites	6
I.2.2 Comètes.....	7
I.2.3 Titan.....	10
1.3 Biologie.....	11
2. Compte rendu de la table ronde	14
2.1 Bilan.....	14
2.1.1 Intérêt des analogues.....	14
2.1.2 Les types d’analogues.....	14
2.2 Perspectives.....	16
2.2.1 Référencement et classement des analogues.....	16
2.2.2 Utilisation des analogues	17
Liste des inscrits.....	19

Introduction

Ce document correspond au compte rendu du workshop dédié aux analogues qui a été organisé au CNES, à Paris, le 3 décembre 2013. L'objectif de cette journée était de faire un état de l'art des différents types d'analogues et de leur utilité pour l'exploration spatiale et la compréhension des phénomènes extraterrestres. Cette journée très interdisciplinaire était plus particulièrement destinée à la communauté scientifique française intéressée par l'exobiologie et la planétologie.

Différents types d'analogues ont été abordés, au cours de présentations orales d'une quinzaine de minutes, et ont couvert les domaines scientifiques suivants :

- la géologie, avec les sites et les collections de roches et minéraux analogues,
- la chimie, avec l'étude des processus et réactions physico-chimiques dans le milieu interstellaire, les météorites, les comètes et les satellites naturels, à l'aide de chambres de simulation,
- la biologie, avec l'étude des formes de vie vivant dans des milieux analogues de corps du système solaire et potentiellement analogues de formes de vie extraterrestre.

L'ensemble des présentations est résumé dans la première partie de ce document.

Cette journée avait aussi pour objectif de réunir des personnes issues de différents domaines dans le but de dégager une vision globale de la notion d'analogues et de leur utilité pour l'exploration spatiale. Une table ronde a donc été organisée à la suite des présentations. Le compte rendu de cette table ronde est détaillé dans la seconde partie de ce document.

Les conclusions de cette réunion seront présentées lors du séminaire de prospective scientifique du CNES qui aura lieu en mars 2014 et qui fait suite à l'appel à idées lancé fin 2012.

I. Résumé des présentations

I.1 Analogues géologiques

I.1.1 Sites analogues

I.1.1.1 Terre primitive. - Frances Westall

Frances Westall est directrice de recherche dans l'équipe d'exobiologie du Centre de Biophysique Moléculaire, à Orléans.

Durant sa prime jeunesse (la période pré-Noachien/Noachien, 4.5 à ~3.8Ga) Mars a connu des conditions géologiques relativement proches de celles qui régnaient sur Terre à la même époque. De même, à l'échelle microbienne les conditions d'habitabilité étaient semblables. Les roches (volcaniques, sédimentaires et hydrothermales : volcano-sédimentaires hydrothermalisées) terrestres, et notamment les traces de vie fossilisées qu'elles contiennent, pourraient donc constituer de bon analogues de roches martiennes d'âge équivalent.

De part le recyclage de la croûte terrestre, les sites formés de roches sédimentaires bien préservées datant de la période équivalente (de l'Hadéen à l'Archéen inférieur, < 2,5 Ga) sont rares. Seuls restent les sites de Barberton en Afrique du Sud et du Pilbara en Australie qui ont 3,45 à 3,2 milliards d'années. Cependant, Mars n'a pas, ou peu, connu de tectonique et sa surface est donc principalement constituée de roches peu métamorphisées de plus de 3 milliards d'années. Les sites terrestres de Josefsdal (3,3 Ga), à Barberton en Afrique du Sud, et surtout du Kitty's Gap (3,45 Ga), à Pilbara en Australie, pourraient donc servir de références pour l'étude du Noachien martien et pour l'étude de potentielles traces de vie fossile (Figure 1).

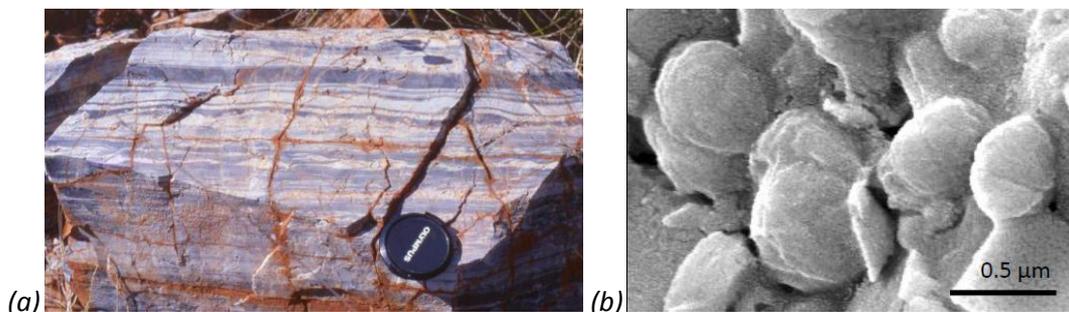


Figure 1 : (a) Affleurement de sédiments volcaniques littoraux datant de 3,45 Ga à Kitty's Gap, Pilbara, Australie, et (b) image en microscopie électronique à balayage des microfossiles de microorganismes chimiolithotrophes qu'elles contiennent.

Références :

Westall et al., *Astrobiology* 13:9, 887-897, (2013).

Westall et al., *Planetary and Space Science* 59, 1093-1106, (2011).

Westall et al., *Earth and Planetary Science Letters* 310, 468-479, (2011).

Westall et al., *LPI Contribution* 6015, (2011).

Westall et al., *Science* 323, 471-472, (2009).

1.1.1.2 Altération mécanique et chimique des roches volcaniques en Islande. - Nicolas Mangold

Nicolas Mangold est directeur de Recherche dans l'équipe Surfaces planétaires au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes.

L'Islande représente un analogue martien très intéressant de par sa lithologie basaltique prédominante et son climat relativement froid, bien que très humide. De nombreux sites permettent d'aborder des processus qui de près ou de loin s'apparentent à des processus ayant pu ou pouvant encore se produire sur Mars. Deux sites ont été présentés lors de l'exposé. Les plaines sableuses (ou *sandur*) sont caractéristiques de la production de particules éoliennes liée à l'érosion glaciaire et à l'absence de végétation due au climat froid et venteux (Figure 2a). Le tri éolien des minéraux produit un enrichissement en olivine qui s'apparente à celui observé dans certaines plaines martiennes. L'altération chimique est également fort intéressante, à la fois sous ces aspects d'altération météorique et hydrothermale. Un second site, dans la région de Landmannalaugar, montre comment des sources hydrothermales peuvent traverser des cônes alluviaux en cours de formation, créant la co-existence des deux types d'altération (Figure 2b).

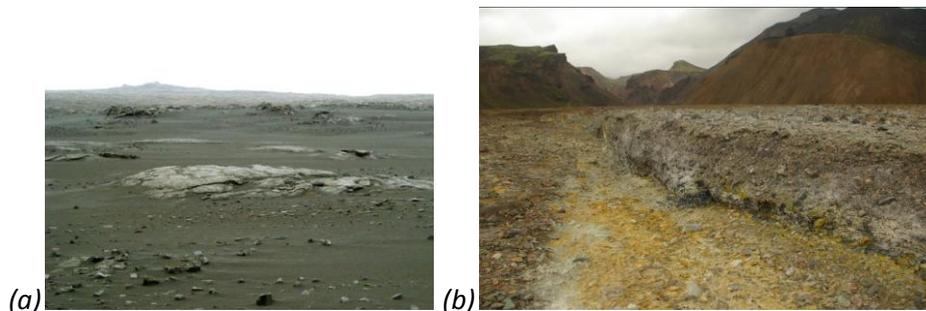


Figure 2 : Sites analogues en Islande : (a) les plaines sableuses d'Eldborgir et (b) sources hydrothermales traversant des cônes alluviaux dans la région de Landmannalaugar.

Références :

Mangold et al., *Planetary and Space Science* 72, 18-30, (2012).

Mangold et al., *Earth and Planetary Science Letters* 310, 233-243, (2011).

1.1.1.3 Un nouveau site analogue pour la formation des minéraux secondaires sur Mars : la mine de Skouriotissa. Site, minéralogie et perspectives. - Nicolas Bost

Nicolas Bost est post-doctorant au laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation, à Orléans.

Les observations les plus récentes ont montré que le substratum de la planète Mars était essentiellement composé par des roches volcaniques de type basaltique (*sensu lato*). Celles-ci sont souvent recouvertes par des « altérites » composées essentiellement d'argiles et de sulfates. Il semble utile de trouver à la surface de la Terre un site où l'ensemble des formations observées sur Mars se rencontre. La mine de Skouriotissa, à Chypre, semble présenter l'ensemble de ces caractéristiques : environnement basaltique, très faible métamorphisme, et différents facies d'altération aboutissant à la formation d'une très grande variété de paragenèses secondaires à argiles mais aussi à sulfates (Figure 3). De plus, ce site est facilement accessible pour son étude

détaillée par des scientifiques mais aussi par les équipes techniques souhaitant tester leurs instruments.



Figure 3 : La mine de Skouriotissa à Chypre.

Références :

Bost *et al.*, *soumis à Icarus*, (2013).

Ehlmann *et al.*, *Nature* 479, 53-60, (2011).

I.1.2 Minéraux et roches analogues

I.1.2.1 Opale éthiopienne : analogue de l'opale martienne ? - Boris Chauviré

Boris Chauviré est doctorant au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes.

La silice hydratée est un groupe de minéraux qui a été détecté autant par observations orbital qu'*in situ* (rover) sur la surface martienne. Les conditions de formation de cette silice hydratée peuvent permettre de contraindre le climat martien passé. Pour mieux identifier les conditions de précipitation de la silice, il a été choisi d'étudier un des plus grands gisements d'opale (silice amorphe hydratée) existant sur Terre ; le gisement de Wegel Tena en Ethiopie. Les premières investigations montrent un lien fort entre la précipitation de l'opale et la création d'un sol sur une roche riche en silice (pédogénèse). L'opale éthiopienne se trouve en association avec des phyllosilicates riches en aluminium, comme il a été décrit sur certains sites martiens. Bien que le rôle de la vie dans la précipitation de l'opale n'ait pas été clairement identifié, des racines sont conservées à l'intérieur de celle-ci. Le gisement éthiopien, constitué d'un empilement de roches volcaniques siliceuses (ignimbrite) où l'opale se forme dans des niveaux précis, présente des similitudes morphologiques avec l'opale trouvée en strates sur Mars (Figure 4). L'étude de la formation de silice terrestre pourrait participer à reconstituer les conditions climatiques qui subsistaient sur Mars dans le passé.



Figure 4 : Empilement de rhyolites en Éthiopie. De l'opale se forme dans certains niveaux formant des structures similaires à celles observées sur Mars.

Références :

Rey, *Australian Journal of Earth Science* 60:3, 291-314, (2013).

Smith et Bandfield, *Journal of Geophysical Research* 117, E06007:1-24, (2012).

Milliken *et al.*, *Geological Society of America* 36:11, 847-850 (2008).

1.1.2.2 L'International Space Analogue Rockstore – Frédéric Foucher

Frédéric Foucher est ingénieur de recherche dans l'équipe d'exobiologie du Centre de Biophysique Moléculaire, à Orléans.

Afin de préparer les prochaines missions spatiales *in situ*, une collection de roches et minéraux analogues pour le test et la calibration des instruments a été créée. Cette collection nommée International Space Analogue Rockstore (ISAR) est hébergée au CNRS et à l'Observatoire des Sciences de l'Univers en Région Centre (OSUC), à Orléans. De part l'actualité des missions spatiales *in situ*, les échantillons qui la composent sont principalement analogues de Mars (Figure 5). Certains sont actuellement utilisés pour aider à l'interprétation des données de la mission MSL et pour la calibration et le test des instruments de la mission ExoMars. La liste des échantillons et les données associées sont consultables via internet à l'adresse www.isar.cnrs-orleans.fr.

Cette collection a démontré son intérêt lors d'un test à l'aveugle (« Blind test ») au cours duquel deux échantillons de l'ISAR ont été analysés par une partie des instruments de la charge utile du rover d'ExoMars. En effet, l'interprétation et l'identification des roches ont nécessité l'utilisation de l'ensemble des données, démontrant par la même l'utilité de réaliser une phase de calibration « scientifique » des charges utiles des missions spatiales en utilisant des échantillons analogues.

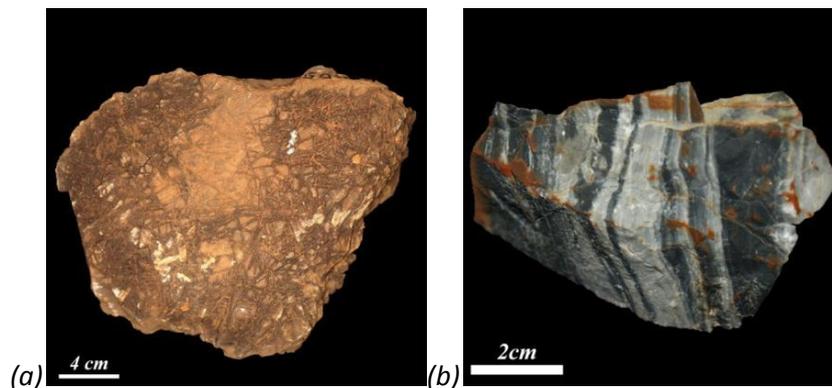


Figure 5 : Exemples d'échantillons de l'ISAR : (a) et (b). Ces échantillons ont également été utilisés pour un test à l'aveugle des instruments de la charge utile d'ExoMars.

Références :

Bost *et al.*, *Planetary and Space Science* 82-83, 113-127, (2013).

I.2 Analogues chimiques

I.2.1 Météorites

1.2.1.1 Synthèse d'analogue de matière organique insoluble de météorites carbonées. – Sylvie Derenne.

Sylvie Derenne est directrice de recherche au CNRS au laboratoire de Biogéochimie et écologie des milieux continentaux à Paris.

L'objectif est de réaliser une synthèse de matière organique (MO) analogue au squelette hydrocarboné de la MO insoluble (MOI) des météorites dans des conditions plausibles régnant dans le disque circumsoilaire au moment de la formation des premiers solides du système solaire. Le dispositif expérimental utilisé (Figure 6) est adapté de celui du Nébulotron V précédemment utilisé par F. Robert (Robert et al., 2011). Il s'agit d'un dispositif dans lequel l'échantillon est partiellement ionisé et soumis à une irradiation UV grâce à une décharge RF dans un gaz dont la pression, la température et la composition chimique sont contrôlées. Les premières expériences ont été réalisées avec du pentane et de l'octane. Nous avons vérifié que les produits formés provenaient bien du précurseur hydrocarboné en répétant l'expérience avec du pentane totalement deutéré. La fraction soluble a été analysée par CG/MS et la fraction insoluble par couplage pyrolyse/CG/SM et RMN ^{13}C . La comparaison entre le pyrolysate de la fraction insoluble obtenue dans les synthèses avec celui précédemment obtenu sur la MOI de Murchison ou Orgueil est encourageante. Cette comparaison sera poursuivie au moyen d'autres techniques (RPE, Raman, HRTEM, dégradations chimiques). C'est grâce à l'utilisation conjointe de ces différentes techniques que nous avons pu proposer un modèle de structure chimique pour la MOI des météorites (Derenne et Robert, 2010).



Figure 6 : Dispositif utilisé pour synthétiser de la matière organique analogue au squelette hydrocarboné de la matière organique insoluble (MOI) observée dans certaines météorites.

Références :

Robert et al., *Geochimica and Cosmochimica Acta* 75, 7522-7532 (2011).

Derenne et Robert, *Meteoritics and Planetary Sciences* 45, 1461-1475, (2010).

I.2.2 Comètes

I.2.2.1 Analyses des composés organiques volatiles et des résidus organiques réfractaires provenant du réchauffement d'analogues de glace cométaire/interstellaire. - Grégoire Danger

Grégoire Danger est maître de conférences au laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires, à Marseille.

Cette contribution s'est concentrée sur deux aspects des travaux réalisés, qui concernent pour l'un l'analyse des résidus réfractaires formés à partir de l'irradiation UV d'analogues de glaces, le projet RAHIIA (figure 7); et pour l'autre un nouveau projet développé depuis juin 2013 et qui a pour objectif l'analyse des composés organiques volatiles provenant du réchauffement de ces mêmes analogues, le projet VAHIIA (ANR 2013-2016 ; figure 7). La compréhension de la formation et de la constitution des résidus réfractaires, généralement appelés "Yellow Stuff", est une étape importante pour établir quelle sorte de matière organique pourrait être disponible au sein d'objets interplanétaires tels que

les comètes ou astéroïdes, et donc disponible pour le développement d'une chimie prébiotique à la surface de planètes telluriques. Les premiers résultats obtenus par analyse en spectrométrie de haute résolution (LTQ-Orbitrap, collaboration Rolland Thissen IPAG) de ces résidus ont été présentés dans une première partie. Dans une seconde partie, la présentation du projet VAHIIA a permis d'apporter de plus amples informations sur les molécules susceptibles de se sublimer lors du réchauffement des glaces interstellaires et cométaires, ainsi qu'une meilleure compréhension des processus chimiques à l'origine de la formation des résidus réfractaires.

Il a ainsi été montré que l'étude d'analogues en laboratoire permet d'obtenir des informations importantes quant à l'analyse de données issues de mission spatiale (ex. Rosetta), mais aussi dans la préparation de futures missions spatiales que ce soit pour la détermination des environnements où effectuer ces missions, ou pour l'aide à la définition et au développement d'outils analytiques pour le spatial (cf. appel à idées PILSE de la prospective scientifique 2014 du CNES).



Figure 7 : Dispositif utilisé pour les expériences VAHIIA et RAHIIA

Références :

Danger *et al.*, *Geochemica et Cosmochemica Acta* 118, 184-201 (2013).

1.2.2.2 Les analogues de glaces interstellaires en laboratoire: évolution simulée et potentiel astrobiologique. – Louis le Sergeant d'Hendecourt

Louis le Sergeant d'Hendecourt est directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay.

En chimie interstellaire, dans les nuages moléculaires, l'évolution chimique de la matière procède de réactions en phase gazeuse mais aussi de réactions en phase solide et, particulièrement dans la phase semi-volatile, celle constituée par les glaces « sales ». Alors que la phase gazeuse est accessible à l'observation, en radioastronomie et à la modélisation menant à des molécules relativement simples, la phase solide est majoritairement inobservable et mène, par la photochimie et la thermochimie à une complexification moléculaire très difficilement modélisable. Le recours à des simulations et donc à l'utilisation d'analogues en laboratoire est de ce fait absolument nécessaire pour apprécier le rôle de cette chimie en phase solide. A l'IAS, les expériences de simulations permettent de synthétiser et d'analyser en direct par spectroscopie IR les composés formés (Figure 8). De très nombreux composés organiques, et en particulier de nombreux acides aminés, sont détectés. Ce résultat démontre le potentiel astrobiologique que pourraient représenter les grains de glaces interstellaires/cométaires. (Figure 8).



Figure 8 : Dispositif permettant la formation et la détection de molécules complexes à l'IAS, Orsay.

Références :

de Marcellus *et al.*, *Astrobiology* 11, 847, (2011).

1.2.2.3 Production d'analogues cométaires au CRPG de Nancy. - Edith Hadamcik

Edith Hadamcik est chercheuse au Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales de Guyancourt.

L'objectif de ce projet est de produire expérimentalement en un même lieu, le CRPG de Nancy, des matériaux solides organiques et silicatés qui seront utilisés dans des expériences de diffusion de la lumière (au LPC2E à Orléans) en tant qu'analogues de particules cométaires. Ces matériaux synthétiques seront consciencieusement caractérisés, et les résultats pourront être inclus dans une base de données et être utilisés pour l'interprétation des résultats de missions vers les comètes, et dans les observations à distance permettant une interprétation plus précise des variations spatiales et temporelles des grains.

Au CRPG, des silicates peuvent être fabriqués à partir de phases gazeuses permettant d'obtenir des produits poreux (Tissandier, 2002) vraisemblablement assez proches de ceux envisagés pour les grains cométaires. De même, il est nécessaire de disposer de composés formés par les éléments C, H, O, N, et de pouvoir faire varier les rapports entre gaz. Des grains avec manteaux organiques en dépôt sur des silicates de magnésium (Greenberg et Li, 1998) et/ou formés d'une matrice carbonée comme celle trouvée dans les météorites sont envisagés en complément de simples mélanges silicates-organiques.

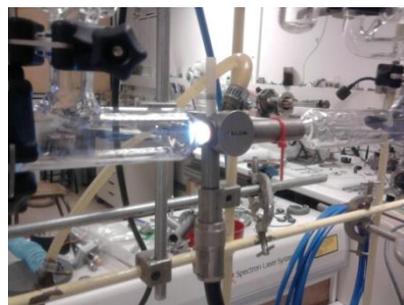


Figure 9 : Le nébulotron.

Références :

Kuga *et al.*, (2013).

Kuga *et al.*, (2012).

Marrochi *et al.*, (2011).

1.2.2.4 Synthèse d'analogues potentiels à la matière organique cométaire et préparation d'instruments embarqués à bord de sonde spatiale. – Nicolas Fray

Nicolas Fray est maître de conférences au Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, à Créteil.

Les analyses réalisées par spectrométrie de masse *in situ* en 1986 dans l'environnement de la comète 1P/Halley ont démontré que les grains cométaires contiennent une matière organique. La fraction massique de carbone dans les grains cométaires semble être plus élevée que dans les météorites carbonées. Néanmoins, la nature physique et chimique de cette matière organique reste encore très largement méconnue.

Un dispositif expérimental baptisé OREGOC (Figure 10a) permettant de photolyser à très basses températures (env. 20 K) des mélanges de glaces du type $H_2O:CO_2:CH_3OH:NH_3$, a été développé au LISA. Après réchauffement et sublimation des réactifs initiaux, il se forme une matière organique qui reste solide à hautes températures (entre 200 et 500 °K) et sous de très faibles pressions (10⁻⁸ mbars). Cette matière est un analogue potentiel à la matière organique contenue dans les comètes. Ces analogues sont étudiés en laboratoire afin d'identifier les molécules produites durant ces expériences et qui sont donc potentiellement présentes dans les comètes. D'autre part, ces analogues ont d'ores et déjà été utilisés dans le cadre de la calibration de l'instrument COSIMA qui est le spectromètre de masse à bord de l'orbiteur de la mission Rosetta et qui analysera des grains cométaires à partir de l'année prochaine et pendant une durée d'au moins 14 mois (Figure 10b).

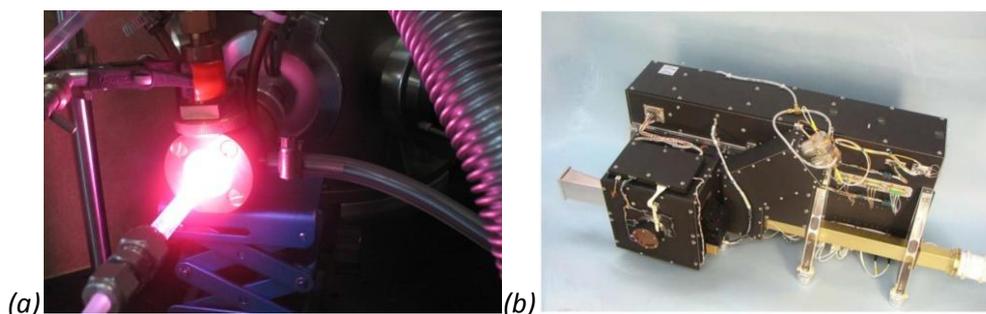


Figure 10 : (a) Expérience OREGOC servant à produire des analogues utilisés pour la calibration de l'instrument COSIMA (b), Rosetta.

Références :

Le Roy *et al.*, *Planetary and Space Science* 65, 83-92, (2012).

1.2.3 Titan

1.2.3.1 Analogues des aérosols de l'atmosphère de Titan. - Nathalie Carrasco

Nathalie Carrasco est maître de conférences au Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, à Paris.

Sur Titan, la dissociation de N_2 et CH_4 par les radiations UV du soleil et le bombardement électronique de la magnétosphère de Saturne induisent une chimie organique complexe qui conduit à la production d'aérosols solides responsables de la brume orange qui entoure Titan. Les analyses réalisées par Pyr-MS *in situ* par la sonde Huygens montrent que ces aérosols sont riches en azote. Leurs mécanismes chimiques de production, initiés en phase gazeuse, demeurent relativement inconnus et leur compréhension constitue un véritable défi pour l'astrobiologie. Des dispositifs

expérimentaux sont en cours de développement afin de reproduire et d'étudier en laboratoire ce système atmosphérique complexe. Au LATMOS, des réacteurs photochimiques et plasma (PAMPRE, Figure 11a) ont également été développés afin de synthétiser en laboratoire, des particules organiques solides, également appelées « tholins », dans le mélange de gaz réactifs (Figure 11b). Ces tholins sont analogues des aérosols photochimiques de l'atmosphère de Titan. Ce travail permet d'étudier les processus qui conduisent à la formation des aérosols dans la phase gazeuse ainsi que les propriétés physico-chimiques des tholins produits. La caractérisation chimique et spectroscopique de ces aérosols supporte l'interprétation des données en cours de la mission Cassini-Huygens. Leur étude prépare également la conception des instruments d'analyse de la matière organique pour une future exploration de Titan, comme le développement de l'instrument orbitrap de haute résolution en masse pour le spatial.

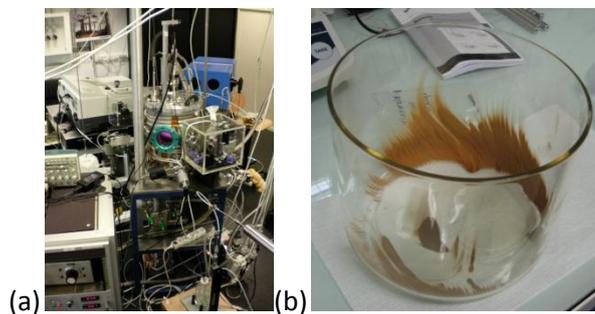


Figure 11 : (a) Dispositif de l'expérience plasma PAMPRE et (b) tholins produits.

Références :

Gautier *et al.*, *Icarus* 221, 320-327, (2012).

Mahjoub *et al.* *Icarus* 221(2), 670-677 (2012).

Carrasco *et al.* *Springer Astrophysics and Space Science Proceedings*, 35 : 145-154 (2013).

1.3 Biologie

1.3.1.1 Petit tour d'horizon des communautés microbiennes associées aux environnements analogues. – Pascale Gautret

Pascale Gautret est chargée de recherche à l'Institut des sciences de la Terre d'Orléans.

Si des organismes arrivent à se développer sur Terre dans des conditions extrêmes de température (Figure 12), de pression, de pH, d'aridité ou de rayonnement, on peut supposer que la vie peut se développer sur n'importe quelle planète où ces conditions sont présentes. L'étude des communautés microbiennes vivant dans ces environnements terrestres extrêmes (métabolismes, particularités biochimiques ou productions secondaires, *e.g.* organominéraux) permet de poser des hypothèses quant à la nature de potentielles formes de vie extraterrestres adaptées à ces conditions environnementales.

La présentation a exploré la faune microbienne de différents environnements terrestres extrêmes analogues d'environnements extraterrestres. Cette approche comparative vise à augmenter les chances de détecter de potentielles biosignatures lors de missions spatiales.



Figure 12 : Source chaude de Yellowstone, USA. La couleur jaune orangé est liée à la présence de microorganismes hyperthermophiles.

Références :

Cette présentation se base sur de nombreux articles cités dans le powerpoint.

1.3.1.2 Diversité des extrémophiles des fonds marins pour l'étude des limites physico-chimiques de la vie. – Mohamed Jebbar

Mohamed Jebbar est professeur au Laboratoire de Microbiologie des Environnements Extrêmes, à Plouzané-Brest.

Depuis une vingtaine d'années, le Laboratoire de Microbiologie des Environnements extrêmes (LM2E) consacre son activité de recherche à l'exploration des environnements océaniques profonds et à l'étude des communautés microbiennes associées. Dans un premier temps, il s'est intéressé exclusivement aux sources hydrothermales océaniques profondes. Depuis une dizaine d'années, il a étendu son champ d'investigation aux zones d'émission de fluides froids (des marges continentales, actives et passives), aux lacs hypersalés et aux sédiments marins profonds (Figure 13).

Outre la profondeur, et donc l'omniprésence du paramètre pression hydrostatique, ces environnements ont en commun d'être pratiquement indépendants de l'énergie solaire et de la production primaire photosynthétique. Il y règne des conditions extrêmes (salinité, pression, faible abondance de matière carbonée, présence de radiations, hautes températures...). Certes, l'oxygène des fonds océaniques provient de la photosynthèse, mais les procaryotes de ces écosystèmes basés sur la chimiosynthèse microbienne utilisent fréquemment d'autres accepteurs d'électrons permettant à des communautés de se développer sans recourt à l'oxygène dissout. De même, la matière organique enfouie dans les sédiments profonds a une origine photosynthétique, mais il s'agit d'un stock ancien et non d'un apport contemporain. Enfin, certains microorganismes chimio-litho-autotrophes utilisent des sources d'énergie comme l'hydrogène, dont une partie est d'origine abiotique. Ce type de microorganismes peut donc se développer dans des niches pauvres en matières carbonées. Ainsi par l'étude des limites du vivant sur Terre, le LM2E concentre ses recherches sur des environnements et des microorganismes ou communautés microbiennes pouvant être de bons analogues pour l'exploration du système solaire (Mars, Europe...). Le LM2E a décrit une centaine d'espèces d'*Archaea* et de *Bacteria* issues principalement des sources hydrothermales. Il dispose d'une collection de 407 isolats d'*Archaea* et 693 isolats de *Bacteria*. Parmi les espèces décrites ou co-décrites par le LM2E et les laboratoires préexistants, plusieurs souches ont présenté, soit du fait de leur position dans l'arbre du vivant, de leur résistance à des conditions extrêmes ou de leur intérêt biotechnologique potentiel, suffisamment d'intérêt pour voir leur génome complètement séquencé (*Pyrococcus abyssi*, *Thermococcus gammatolerans*, *Thermococcus barophilus* MP, *Thermococcus* sp TV2, *Thermococcus barophilus* CH1 et CH5, *Pyrococcus yayanosii*, *Palaecoccus*

pacificus, *Marinitoga piezophila*). L'exploration de la vie notamment sous sa forme microbienne sur Terre, est loin d'être terminée, cette vie repose sur la chimie du carbone en solution aqueuse, et dépend de l'énergie solaire (photosynthèse) et ou des couples Redox (chimiosynthèse). En présence de l'eau, du carbone et d'énergie, la vie sous sa forme procaryotique peut tolérer des conditions physico-chimiques stringentes et extrêmes.

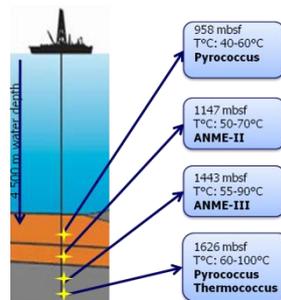


Figure 13 : Schéma d'un forage profond. Des organismes vivants ont pu être prélevés à plus 1600 m sous le fond de la mer, à 4500 m de profondeur.

Références :

- Takai *et al.*, *Environmental Microbiology*, (2009).
E. G. Roussel *et al.*, *Science* 320, (2008).

2. Compte rendu de la table ronde

2.1 Bilan

2.1.1 Intérêt des analogues

Cet atelier a démontré le fort intérêt de la communauté scientifique française pour les analogues *sensu lato*. Il a réuni des personnes issues des différents domaines que sont la géologie, la chimie, la biologie et la physique, ce qui a été fortement apprécié par les participants. Cette interdisciplinarité a également permis de mieux définir la notion d'analogues et de mettre en évidence leur intérêt pour l'exploration spatiale.

A l'issue des présentations, il apparaît clairement que les analogues sont essentiels afin de mieux appréhender et comprendre les processus extraterrestres géologiques, chimiques et potentiellement biologiques. Ils permettent également de tester les charges utiles des missions spatiales de manière globale. En effet, il est important de distinguer standard de calibration et analogue. Un standard de calibration est utile et nécessaire au développement, au réglage et l'étalonnage d'un instrument. Celui-ci n'a pas à être représentatif de l'astre qui sera visité et est choisi par rapport à la technique elle-même, e.g. une mire couleur pour une caméra ou un morceau de silicium pour un spectromètre Raman. L'utilisation de standards analogues naturels est même délicate, les échantillons naturels ayant généralement une trop grande variabilité pour que les mesures réalisées soient reproductibles. Les analogues artificiels sont alors une solution. Cependant, que ce soit pour les analogues organiques ou minéralogiques, la production en quantité suffisante pour la calibration des instruments reste chère et délicate.

Par contre, une fois les instruments d'une charge utile calibrés, l'utilisation d'analogues pour préparer les protocoles d'exploration apparaît particulièrement utile même si cela n'est que rarement fait. Ils apparaissent comme étant le meilleur moyen de valider l'ensemble d'une charge utile en amont de la mission et comme un outil précieux pour l'interprétation des résultats en cours de mission.

2.1.2 Les types d'analogues

D'une manière générale, on peut classer les analogues en deux grandes familles, les analogues naturels et les analogues simulés, qui peuvent être également divisées en plusieurs sous catégories selon la Figure 14. Parmi les analogues naturels on peut distinguer : les sites analogues pour les aspects logistiques et techniques d'une mission, les sites analogues pour les processus géologiques qui s'y déroulent, les sites analogues pour la pétrologie et minéralogie et les sites pertinents sur le plan biologique. Les analogues simulés correspondent aux « échantillons » fabriqués dans des conditions analogues de conditions extraterrestres n'existant pas sur Terre. Ces sont par exemple les cultures ou la fossilisation de microorganismes dans des conditions contrôlées, les échantillons minéralogiques synthétisés car n'existant pas sur Terre ou dans l'objectif d'obtenir des standards analogues, les chambres de simulation de conditions spatiales pour l'étude des processus physico chimiques qui s'y déroulent, et les molécules détectées dans le milieu extraterrestre.

Il est important de noter que la notion d'analogue est à considérer avec retenue en ce qui concerne les échantillons biologiques. En effet, aucune forme de vie extraterrestre n'ayant été découverte à ce jour, l'analogie avec des formes de vie terrestre ne se base que sur les environnements dans lesquels elles se développent, souvent des environnements considérés comme extrêmes, et où ces traces ont pu être préservées. Ces hypothétiques analogues sont cependant particulièrement utiles pour

comprendre les possibles métabolismes utilisés dans des conditions extraterrestres, pour aider à la détection de traces de vie actuelle ou passée à partir de son impact sur l'environnement et de sa préservation (biosignatures), et pour tester la survie d'organismes terrestres dans des conditions environnementales extraterrestres afin de prévenir toute contamination (protection planétaire). Enfin, la question est posée quant aux modèles numériques de savoir s'ils peuvent être considérés comme des analogues à proprement parler.

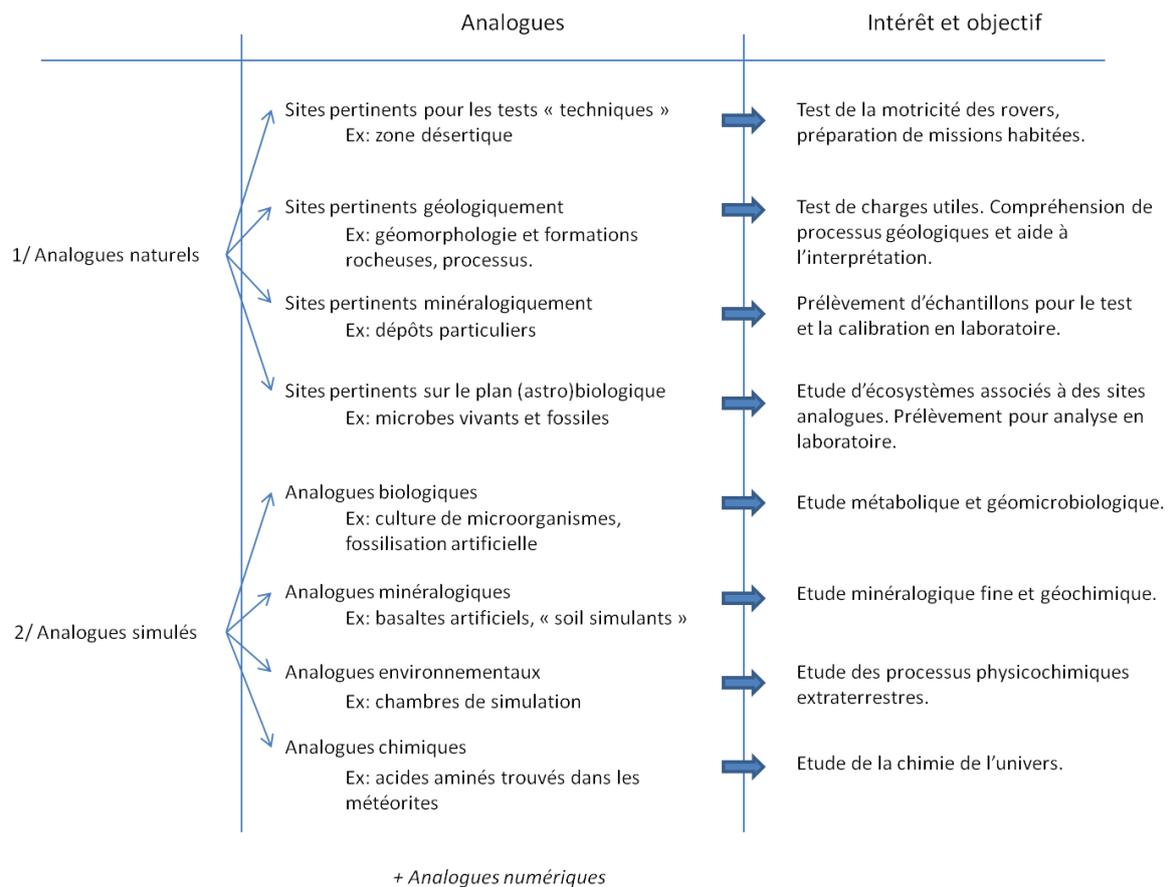


Figure 14 : Tableau recensant les différents types d'analogues et leur intérêt pour l'exploration spatiale.

La figure 14 met en évidence le fait que seules certaines caractéristiques d'un analogue sont analogues. Ainsi, un site géographique peut être pertinent du point de vue de géologique sans que l'environnement soit analogue du corps étudié (e.g. présence de végétation). De manière générale, un analogue doit donc être choisi en fonction des objectifs recherchés. Une zone désertique sera pertinente pour tester l'aspect logistique d'une mission habitée sur Mars ou pour étudier les stratégies utilisées par la vie pour se développer dans de telles conditions, même si la géologie du site n'est pas représentative de Mars. Au final, même si un site, un échantillon ou une chambre de simulation peut avoir plusieurs caractéristiques analogues, l'analogue parfait n'existe pas.

2.2 Perspectives

2.2.1 Référencement et classement des analogues

Lors de précédents workshops dédiés aux sites analogues, il a été proposé d'évaluer la pertinence et de quantifier le degré d'analogie des sites en utilisant les Tables 1 à 4 (Hipkin *et al.*, 2013).

Scientific evaluation of an analogue site							
Priority based on key scientific question(s)	Feature	Relevance to Mars missions and science					
		Excellent	Good	Moderate	Poor	NA	Comments
	Mineralogy/chemistry						
	Sedimentology						
	Geomorphology						
	Geological/environmental setting						
	Other: _____						
	Other: _____						
	Relevant mission: _____						

Table 1 : Fiche d'évaluation scientifique d'un site analogue.

Most important features and processes (Ranked)	
Category of feature or process	Applicability
Mineralogy/petrology	
Chemistry	
Sedimentology	
Stratigraphy	
Geomorphology	
Hydrology	
Biology	
Ecology	
Geological setting	
Environmental setting	
Gradients	
Fluxes and transport	
Metabolism	
Other _____	
Other _____	

Table 2 : Fiche de classement des caractéristiques et processus d'un site en fonction de leur degré d'analogie.

Analogue site detailed scientific evaluation. Study site: _____.
Science question/hypothesis: (one sentence description)
Rank
Category of feature or process (top 3 or more from important features table)
Detailed feature or process
How expressed at study site
How expressed on Mars
Similarity/relevance
Limitations
Mission impact

Table 3 : Fiche d'évaluation des trois caractéristiques les plus pertinentes d'un site analogue.

Logistics						
Feature of concern	None	Minor	Significant +	Significant -	Impractical	Comments
Permitted accessibility to site (e.g. is the land protected? Is sampling allowed?)						
Feasibility of site access for researchers (e.g. weather or vehicle restrictions?)						
Suitability for in situ equipment/instrumentation deployment (weather, dust, etc.)						
Human influences on the Site (contamination, human engineering, degradation, experiment disruption, etc.)						
Environmental Impact of Research						
Cost for site access						
Logistical support/local infrastructure (communications, power, etc.)						
Safety issues						
Other						

Table 4 : Fiche pratique d'un site analogue pour l'aspect logistique.

Il apparaît judicieux d'étendre ce système d'évaluation aux autres types d'analogues afin de les recenser et de les classer en fonction de leur pertinence, de leurs possibles analogies multiples, de leur valeur financière, de leur dangerosité... Ces données pourraient être regroupées au sein d'une base de données permettant de favoriser la mise en relation des différentes équipes de recherches et de développement instrumental. Par exemple, l'ESA a récemment entrepris un recensement de site analogues terrestres (Preston *et al.*, 2013). Avant de financer des missions ou des projets coûteux, il serait peut-être judicieux de faire une importante recherche bibliographique pour chaque genre d'analogue. Ce point a d'ailleurs déjà été soulevé lors de précédentes conférences dédiées au site analogues: souvent les sites ont été bien étudiés pour d'autres choses que leur analogie et les scientifiques qui y recherchent des analogies refont ce qui a déjà été fait. Il pourrait être pertinent de créer des groupes de recherche bibliographique sur les différents types d'analogues qui se réuniraient régulièrement au cours d'ateliers pour discuter et croiser les résultats de leurs recherches.

Les collections d'échantillons analogues bien caractérisées sont très importantes pour tester toute la charge utile d'une mission, éventuellement lors de la phase de croisière. L'atelier a souligné que la diversité des domaines couverts par l'exploration spatiale implique une approche interdisciplinaire des analogues. Il serait donc particulièrement utile de constituer une base de données générale recensant des informations pertinentes pour tous les domaines associés aux missions spatiales. Cependant, la question de la gestion d'une telle collection reste posée, les instances potentiellement intéressées n'ayant pas les moyens financiers et humains pour prendre en charge d'un tel projet. L'ESA semble être l'organisme qui offrirait le plus de visibilité à la collection.

2.2.2 Utilisation des analogues

D'une manière générale, il apparaît que les analogues ne sont pas assez utilisés par la communauté en charge de développer les instruments spatiaux. Plusieurs facteurs entrent en compte pour justifier cet état de fait :

- 1- Les personnes travaillant sur les analogues ne sont pas forcément en relation avec les personnes en charge du développement des instruments spatiaux.
- 2- Le découpage du CNRS en instituts thématiques, eux-mêmes découpés en sections, ne favorise pas l'interdisciplinarité et les collaborations entre les différents domaines impliqués.
- 3- La variabilité compositionnelle des analogues naturels les rend difficiles à utiliser pour la calibration (différence entre un standard et un analogue expliquée précédemment).

L'utilisation des analogues doit donc intervenir une fois la calibration faite. Or, les deadlines serrés des missions spatiales permettent à peine de finir la phase de calibration.

- 4- Les missions sur le terrain avec tout le matériel sont relativement coûteuses.

Afin de favoriser l'utilisation des analogues il est proposé que le CNES travaille à la mise en relation des différentes communautés. Sans pour autant imposer des phases de test sur échantillons analogues, il serait pertinent que le CNES favorise puis standardise leur utilisation.

Les analogues sont principalement utilisés dans le but de tester un instrument ou d'aider à l'interprétation des données qu'il fournit. Pourtant, ils pourraient être une aide précieuse pour l'élaboration de protocoles d'analyses basés sur la complémentarité des instruments d'une charge utile en favorisant par là même les collaborations entre les équipes de développement. De plus, ils pourraient être particulièrement utiles pour définir la composition des charges utiles en fonction des objectifs d'une mission. La connaissance des techniques nécessaires à l'analyse des analogues de l'astre visité, permettrait d'orienter les prospectives sur les futurs instruments à développer, de mettre en évidence le couplage nécessaire de certaines techniques et de justifier la cohérence de la composition d'une charge utile.

Sur le plan scientifique et exobiologique notamment, il apparaît que certains types de processus analogues devraient être plus étudiés. En particulier, ont été cités : les analogues des processus d'interaction entre microorganismes et surfaces minérales et la fossilisation/préservation des traces de vie microbienne et des biosignatures associées.

2.2.3 Collecte des analogues

Les missions de terrain étant chères, il a été suggéré que l'on profite des missions ayant d'autres objectifs pour récolter des échantillons analogues ou pour étudier un site terrestre analogue *in situ*. Un apport du CNES pour de telles missions sera bienvenu.

Références :

V.J. Hipkin, M.A. Voytek, M.A. Meyer, R. Léveillé, S.D. Domagal-Goldman, 2013. *Analogue sites for Mars missions: NASA's Mars Science Laboratory and beyond – Overview of an international workshop held at The Woodlands, Texas, on March 5–6, 2011. Icarus, 224, 261-267.*

Preston L. J., Barber S., Grady M. (2013) *CAFE - Concepts for Activities in the Field for Exploration - TN2: the Catalogue of Planetary Analogues.*

http://esamultimedia.esa.int/docs/gsp/The_Catalogue_of_Planetary_Analogues.pdf

Liste des inscrits

Ninette Abou Mrad, PIIM-Marseille, ninette.belleslimeul@univ-amu.fr
Marylène Bertrand, CBM-Orléans, marylene.bertrand@cnrs-orleans.fr
Kasia Biron, MNHN-Paris, k.wlodarek@yahoo.com
Nicolas Bost, CBM-Orléans, nicolas.bost@cnrs-orleans.fr
André Brack, CBM-Orléans, andre.brack@cnrs-orleans.fr
Céline Brochier-Armanet, LBBE-Lyon, celine.brochier-armanet@univ-lyon1.fr
Michel Cabane, LATMOS-Guyancourt, michel.cabane@latmos.ipsl.fr
Nathalie Carrasco, LATMOS-Guyancourt, nathalie.carrasco@latmos.ipsl.fr
Boris Chauviré, LPG-Nantes, boris.chauvire@etu.univ-nantes.fr
Julien Cochonneau, LMCM MNHN-Paris, jcochonneau@mnhn.fr
Hervé Cottin, LISA-Paris, herve.cottin@lisa.u-pec.fr
Athéna Coustenis, LESIA-Paris, Athena.Coustenis@obspm.fr
Grégoire Danger, PIIM-Marseille, gregoire.danger@univ-amu.fr
Marc David, LISA-Paris, marc.david@lisa.u-pec.fr
Yves Daydou, IRAP-Toulouse, yves.daydou@irap.omp.eu
Sylvie Derenne, BIOEMCO-Paris, sylvie.derenne@upmc.fr
Fabrice Duvernay, PIIM-Marseille, fabrice.duvernay@univ-amu.fr
Yves Ellinger, LCT-Paris, yves.ellinger@lct.jussieu.fr
Cécile Engrand, IN2P3-Orsay, cecile.engrand@csnsm.in2p3.fr
Frédéric Foucher, CBM-Orléans, frederic.foucher@cnrs-orleans.fr
Pascaline François, LISA-Paris, Pascaline.Francois@lisa.u-pec.fr
Nicolas Fray, LISA-Paris, Nicolas.Fray@lisa.u-pec.fr
Pascale Gautret, ISTO-Orléans, pascale.gautret@cnrs-orleans.fr
Marie-Claire Gazeau, LISA-Paris, Marie-Claire.Gazeau@lisa.u-pec.fr
Edith Hadamcik, LATMOS-Guyancourt, Edith.Hadamcik@latmos.ipsl.fr
Louis le Sergeant d'Hendecourt, IAS-Orsay, Louis.DHendecourt@ias.u-psud.fr
Mohamed Jebbar, LM2E-Brest, mohamed.jebbar@univ-brest.fr
Bruno Labe, Lyon, mblabe.hy48@orange.fr
Sydney Leach, LERMA-Paris, sydney.leach@obspm.fr
Damien Loizeau, LGL TPE-Lyon, damien.loizeau@univ-lyon1.fr
Nicolas Mangold, LPG-Nantes, nicolas.mangold@univ-nantes.fr
Pierre de Marcellus, IAS-Orsay, pierre.demarcellus@ias.u-psud.fr
Paola Modica, IAS-Orsay, paola.modica@ias.u-psud.fr
Marion Nachon, LPG-Nantes, marion.nachon@etu.univ-nantes.fr
François-Régis Orthous-Daunay, IPAG-Grenoble, imfrod@gmail.com
Françoise Pauzat, LCT-Paris, francoise.pauzat@lct.jussieu.fr
Thomas Pinot, ISMO-Orsay, thomas.pino@u-psud.fr
William Rapin, IRAP-Toulouse, william.rapin@irap.omp.eu
François Raulin, LISA-Paris, francois.raulin@lisa.u-pec.fr
Laurent Remusat, MNHN-Paris, remusat@mnhn.fr
Jean-Baptiste Renard, LPC2E-Orléans, jbrenard@cnrs-orleans.fr
Sara Rivas, IMPMC-Paris, Sara.Rivas@impmc.upmc.fr
François Robert, MNHN-Paris, robert@mnhn.fr
Violaine Sautter, MNHN-Paris, vsautter@mnhn.fr
Fabien Stalport, LISA-Paris, fabien.stalport@lisa.u-pec.fr
Robert Sternberg, LISA-Paris, robert.sternberg@lisa.u-pec.fr
Laurent Thirkell, LPC2E-Orléans, Laurent.thirkell@cnrs-orleans.fr
Patrick Thollot, LGL TPE-Lyon, patrick.thollot@ens-lyon.fr
Laurent Tissandier, CRPG-Nancy, tix@crpg.cnrs-nancy.fr
Odile Vandennebeele-Trambouze, LM2E-Brest, Odile.Trambouze@univ-brest.fr
Mihayl Varbanov, SRSMC-Nancy, mihayl.varbanov@univ-lorraine.fr
Vassilissa Vinogradoff, LISA-Paris, vass_vino@yahoo.fr
Michel Viso, CNES-Paris, michel.viso@cnes.fr
Frances Westall, CBM-Orléans, frances.westall@cnrs-orleans.fr

Workshop Analogues
3 décembre 2013
CNES, 2 Place Maurice Quentin, Paris

Version du rapport du 9 janvier 2014

Comité d'organisation :
Frances Westall, directrice de recherche CNRS,
Frédéric Foucher, ingénieur de recherche CNRS,
Nicolas Bost, post-doctorant,

Centre de Biophysique Moléculaire,
UPR CNRS 4301,
rue Charles Sadron,
45071 Orléans Cedex 2

Contact : isar@cns-orleans.fr

A la demande de :
Michel Viso,

Centre National d'Etudes Spatiales,
2 place Maurice Quentin
75039 Paris Cedex 1