

Rapport du groupe de travail « Exobiologie »

Séminaire de prospective scientifique du CNES de La Rochelle (2014)

L'Exobiologie s'intéresse à la recherche des origines de la vie sur Terre ou ailleurs et aux processus impliqués dans le passage d'une chimie simple à des systèmes organisés. La communauté exobiologique étudie donc les conditions physico-chimiques favorables à l'émergence de la vie ou au développement d'êtres vivants dans des environnements planétaires variés. Cette recherche, éminemment interdisciplinaire, est essentiellement centrée sur la détection de traces laissées par des systèmes vivants carbonés se développant dans un milieu aqueux. L'Exobiologie partage ainsi, avec d'autres disciplines comme la planétologie ou l'astronomie, des questionnements sur les interactions entre l'eau, les matières organiques et les phases solides, dans les corps célestes ou dans le milieu interstellaire. L'Exobiologie contribue ainsi à contextualiser ou à globaliser le concept interdisciplinaire de l'habitabilité. Enfin, l'exobiologie a aussi une mission culturelle et éducative.

Les recommandations 2014 sont encadrées et sont numérotées par ordre de priorité en référence à l'annexe 2

Les notations « Recomm. # » insérées dans le texte de bilan, font référence aux recommandations du séminaire de Biarritz de 2009 rassemblées dans l'Annexe 1.

1 Contexte

1.1 Contexte scientifique

L'exobiologie étant par essence une thématique interdisciplinaire, les missions spatiales concernées par ce domaine sont de nature très diverses : exploration planétaire et des petits corps, missions orbitales, vols paraboliques... Actuellement, la priorité des exobiologistes porte sur la poursuite et l'achèvement de la mission exobiologique ExoMars. D'autre part, l'exploration martienne et des environnements planétaires, associée aux connaissances acquises lors de simulations ou de modélisation rendent évidente la nécessité d'un futur retour d'échantillons de Mars ou d'autres corps célestes (astéroïdes, comètes...) pour la recherche de traces de vie ou de molécules organiques prébiotiques.

De même, la compréhension des processus de synthèse et d'évolution de la matière organique dans les milieux interplanétaires ou interstellaires avant leur incorporation au sein d'environnements planétaires est essentielle pour l'exobiologie. Les expériences d'exposition de composés organiques aux radiations solaires à bord de l'ISS s'orientent vers des protocoles combinant la préparation extemporanée d'échantillons avec une analyse *in situ* en continu des processus de transformation.

La communauté marque aussi son intérêt pour la mission planétaire JUICE, ainsi que pour la mission PLATO et les projets futurs liés à la caractérisation des atmosphères d'exoplanètes.

1.2 Contexte national et international

Le séminaire de prospective de Biarritz avait émis treize recommandations (Recomms. #1 à #13, Annexe 1). Dès son lancement en 2007, le programme interdisciplinaire du CNRS OPV « Origine des Planètes et de la Vie », a été soutenu par une contribution financière annuelle récurrente du CNES (Recomms. #1, #3, #6, et #8). Ce soutien financier du CNES a été reconduit en 2010 sur les deux dernières années du programme EPOV « Environnements Planétaires et Origine de la Vie ». Cet effort a permis de financer les recherches interdisciplinaires de nombreux laboratoires et la tenue de plusieurs colloques et ateliers de travail. De 2009 à 2013, le CNES a également soutenu l'animation d'ateliers interdisciplinaires sur : "*l'environnement de la Terre Primitive*", "*les molécules interstellaires et les molécules prébiotiques*", "*la chiralité dans l'Univers*", "*la photochimie en orbite*", "*l'Équation de Drake*", "*l'évolution de la matière organique dans les milieux interplanétaire et interstellaire*", "*Orbitrap*" et "*les analogues pour l'exobiologie*".

Dans le cadre du prolongement de la Mission Cassini-Huygens jusqu'en 2017, le CNES a poursuivi son soutien aux activités d'Inter-Disciplinary Scientist (IDS) et aux développements des moyens de calibration correspondants (synthèses de produits de référence, simulations...) (Recomm. #2). L'évolution et le renouvellement des IDS et des « participating scientists » de la mission sont directement gérés par la NASA, en concertation avec l'ESA.

La complémentarité des expériences d'exposition en orbite et des expériences menées au sol en laboratoire ou au synchrotron a été analysée et s'est traduite par des collaborations nouvelles ou renforcées. Les expériences de simulation qui participent à l'analyse de certains résultats acquis avec des sondes spatiales (Cassini) ou des observatoires (Herschel) ont été poursuivies (Recomm. #11).

La préparation de l'interprétation des résultats de la mission Rosetta est essentiellement menée par les laboratoires de planétologie (Recomm. #4). Une attention particulière a été cependant portée à la préparation de l'interprétation des résultats des analyses de la matière organique par le spectromètre de masse COSIMA (cofinancement d'une thèse et des travaux associés). L'arrivée de la sonde au voisinage de la comète et les premières analyses se dérouleront à l'automne 2014. Des équipes ayant développé des simulations sol sont co-investigateurs de COSIMA et contribueront aux analyses et à leurs interprétations.

Dans la suite de l'expérimentation EXPOSE-E, les expériences françaises pour EXPOSE R et R2 sont soutenues (Recomm. #5). D'importantes améliorations techniques et scientifiques ont été apportées au matériel utilisé et aux démarches scientifiques proposées. Les échantillons testés en vol ont été adaptés pour la nouvelle mission, à la lumière des résultats d'Expose E, de nouvelles expériences ont été associées (Biopuce, cellules « martiennes », collaboration avec l'université de Leyden).

La mission « ExoMars » de l'Agence Spatiale Européenne a eu une évolution programmatique chaotique. Elle se compose maintenant de 2 missions (2016 et 2018) et de 5 objets (TGO 2016, EDM 2016, Cruise bus 2018, Véhicule de surface 2018 et plateforme de surface 2018) (Fig. 1). La coopération avec la Russie qui prend des responsabilités programmatiques, techniques et scientifiques importantes commence à se concrétiser et à se traduire dans les coopérations scientifiques et les partenariats techniques. Le développement des instruments ou des participations instrumentales françaises suivent le calendrier du projet ESA

et les instruments ont atteint la maturité technique requise (Recomm. #12). Les instruments sont prêts à entamer les phases de conception détaillée et de fabrication.

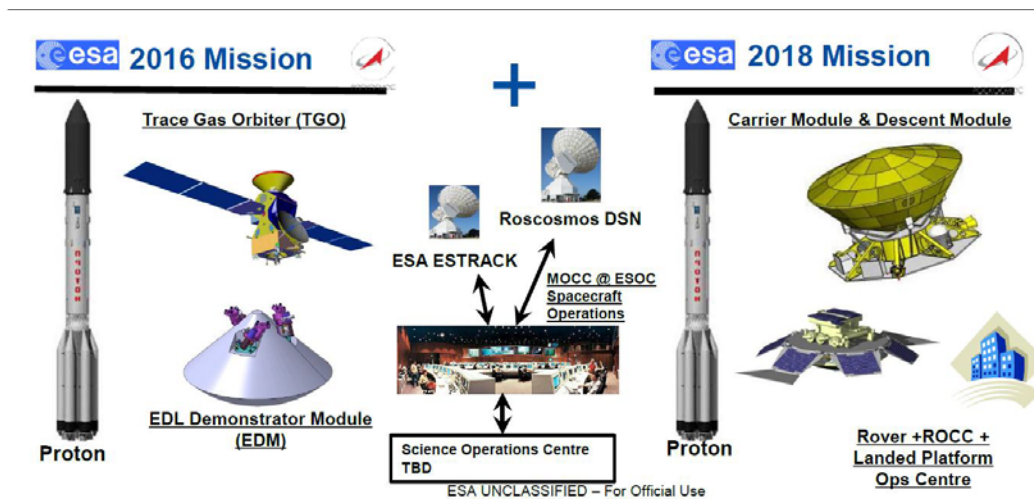


Figure 1 : Architecture de la mission ExoMars : Mission 2016 avec le Trace Gas Orbiter (TGO) et le démonstrateur d’atterrissage (EDM) ; Mission 2018 avec Le module de croisière (CM), le module de descente contenant la plateforme d’atterrissage et le véhicule (Rover).

La communauté scientifique tant en planétologie qu’en exobiologie, entraînée par les réussites de la mission MSL et forte des acquis de la préparation de la mission ExoMars, est très enthousiasmée par la mission Mars 2020 de la NASA. De nombreux laboratoires se sont déclarés prêts à y revendiquer (Recomm. #9 et # 13) une place significative proposant des instruments en tant que principal investigateur ou co-investigateur.

Les études pour l’amélioration d’instruments existants (chromatographie gazeuse), le développement de nouveaux instruments innovants (Recomm. #13) comme la spectrométrie de masse haute résolution (basée sur l’Orbitrap), la résonance paramagnétique électronique (RPE), ou l’utilisation des biopuces sont également soutenus par les programmes R&T du CNES.

2 Bilan depuis Biarritz

2.1 Résultats Scientifiques marquants

Titan et la mission Cassini-Huygens : résultats d’intérêt exobiologique

Grâce à la mission Cassini-Huygens, il a été montré que Titan est le seul satellite du système solaire ayant une atmosphère dense de N_2 avec quelques pourcents de CH_4 . Titan est une planète en pleine évolution physique et chimique, possédant en surface des réservoirs de méthane et d’éthane liquides (**Fig. 2**) dont le cycle est analogue à celui de l’eau sur Terre (précipitation, évaporation, ruissellement...). Sa surface est façonnée par des processus d’érosion éolienne et fluviale et le cryo-volcanisme. Titan abrite également une chimie organique active impliquant plusieurs composés clés de la chimie prébiotique. Les instruments GC-MS et ACP de la sonde Huygens ont montré que la matière organique complexe dans la basse atmosphère est principalement concentrée dans les aérosols atmosphériques. Les instruments INMS et CAPS de l’orbiteur Cassini ont mis en évidence la formation dans l’ionosphère de composés organiques de très haut poids moléculaire, qui alimentent les zones plus basses. Une fois en contact avec la glace d’eau ou même l’eau liquide qui peut s’y trouver de façon épisodique, ces composés peuvent évoluer ultérieurement, et former des composés d’intérêt exobiologique, y compris dans l’hypothétique océan interne de Titan. Enfin, malgré les basses températures de surface, Titan pourrait remplir les critères d’habitabilité, tous les ingrédients nécessaires à l’apparition d’une vie carbonée étant présents. Certains exobiologistes spéculent même sur la présence d’une vie exotique dans les lacs et mers d’hydrocarbures de Titan.

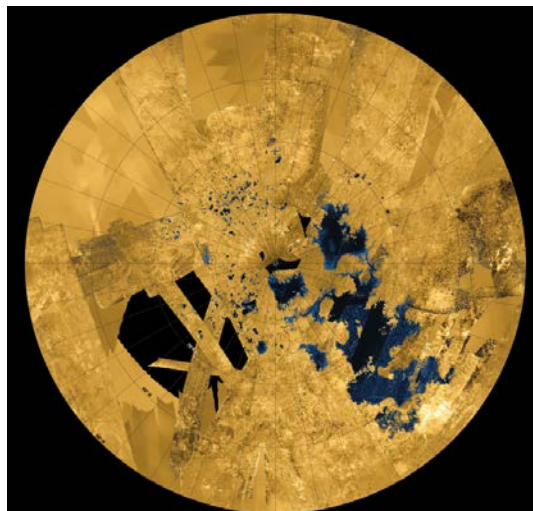


Figure 2 : en bleu la signature radar des lacs et mers de méthane et d’éthane au pôle sud de Titan ; en noir les zones non cartographiées (mission Cassini-Huygens – NASA-JPL-USGS)

La communauté française s'est largement impliquée au cours des dernières années dans l'étude expérimentale des processus permettant d'expliquer la chimie organique de l'atmosphère et de la surface de Titan et traiter au mieux les données de la sonde Cassini. On peut citer : i) le programme SET-UP (LISA), qui étudie simultanément les processus photoniques et électroniques initiaux impliqués dans l'ionosphère et la chimie atmosphérique de Titan ; ii) l'établissement de base de données (principalement Infrarouge et UV) indispensables pour le traitement des données des instruments de Cassini, en particulier CIRS, VIMS et UVIS ; et enfin iii) les programmes PAMPRE (LATMOS) et PLASMA (LISA) qui étudient les propriétés des aérosols de Titan à partir d'analogues de laboratoire (tholins). Ces études portent en particulier sur la composition chimique de ces analogues, leurs propriétés physico-chimiques (solubilité dans des solvants cryogéniques, propriétés optiques) et leurs possibilités d'évolution en présence de milieu eau-ammoniac (modèles du cryomagma de Titan). Elles ont mis en évidence la présence possible de nombreux composés d'intérêt biologiques, acides aminés et bases azotées, à la surface de Titan. Les aspects exobiologiques de la mission par la synergie des approches observationnelles (données de Cassini Huygens), des modèles et des expériences en laboratoire, ainsi que ceux impliquant la protection planétaire ont aussi été étudiés.

Matière organique d'intérêt exobiologique : Synthèse et mécanismes

De nombreux résultats ont été obtenus au niveau d'études en laboratoire intéressant l'exobiologie en assistance aux missions en cours (Rosetta, Cassini, Herschel) ou en préparation de futures missions (ExoMars, Vitrine). A partir d'un mélange $H_2O:CH_3OH:NH_3$, l'irradiation en lumière polarisée ultraviolette a montré la formation préférentielle d'un énantiomère d'un acide aminé, l'alanine, avec un excès énantiomérique de quelques pourcents (**Fig. 3**). Ce résultat indique une origine possible d'excès énantiomériques observés dans les météorites. Amenés sur la Terre primitive par la chute des météorites, ces acides aminés ont pu, par des phénomènes d'enrichissements énantiosélectifs, conduire aux composés homochiraux considérés comme nécessaires à l'apparition de la vie. De même, sous irradiation UV, l'hydantoïne, une espèce suspectée de jouer un rôle important dans la formation de poly et oligopeptides, a été détectée. Vingt acides aminés et six acides diaminés ont été identifiés après irradiation dans ces glaces simulées du milieu interstellaire. L'analyse des spectres du résidu contient un grand nombre de molécules formées des éléments CHNO, incluant des entités de plus de 4000 daltons. Au réchauffement, l'hexaméthylènetétramine (HMT), a été identifiée comme un des composants importants du résidu réfractaire (programme OREGOC). Ces expériences en laboratoire se sont ainsi révélées être un outil déterminant pour la compréhension de l'évolution chimique de la matière organique abiotique complexe dans les milieux astrophysiques.



Figure 3 : Chiral MicMoc - Montage expérimental au synchrotron SOLEIL

Expériences d'exposition de composés organiques en orbite basse terrestre :

Au cours des dernières années, pour étudier l'évolution de la matière organique dans le cosmos sous le rayonnement UV solaire et compléter les travaux « classiques » de photochimie en laboratoire, plusieurs expériences d'astrochimie et exobiologie pilotées par le LISA se sont déroulées en orbite, soit sur la capsule russe FOTON soit sur la Station Spatiale Internationale (**Fig. 4**). Une nouvelle expérience, PSS, partira à destination de l'ISS en Juillet 2014. La section efficace de destruction de plusieurs espèces d'intérêt exobiologique a ainsi été déterminée, et comparée aux mesures en laboratoire. Les méthodes d'extrapolation aux environnements extraterrestres des mesures de laboratoire (réalisées par d'exposition à des lampes de différentes gammes spectrales) conduisent ainsi à une sous-estimation de plusieurs ordres de grandeur de la section efficace de destruction des espèces dans l'espace interplanétaire, par rapport aux valeurs déterminées grâce à leur exposition en orbite basse.



Figure 4 : Expose R à l'extérieur du module russe Zarya de la station spatiale Internationale (crédit ESA)

D'autres expériences d'exposition sont programmées avec des échantillons organiques et minéraux types représentatifs des comètes, de Mars et de l'atmosphère de Titan ou en lien avec les missions Rosetta, Curiosity et Cassini-Huygens. La stabilité au cours d'un vol spatial de capteurs de type « Biopuce » candidat sur Mars 2020 sera aussi évaluée.

Caractérisation de la matière organique (MO) extraterrestre

Les études menées autour de la synthèse et de la caractérisation de la matière organique (MO) soluble et insoluble servent à préparer les méthodes, les séquences et les instruments qui seront utilisés ou développés dans les missions spatiales futures. Ces études sont aussi indispensables pour conforter les modèles et déterminer les performances à atteindre pour confirmer les hypothèses scientifiques initiales.

Plusieurs types de matière organique (MO) ont été caractérisés pour répondre à différentes questions scientifiques. Le carbone des chondrites carbonées est essentiellement sous forme de MO majoritairement insoluble. Cette MO suscite un grand intérêt en exobiologie car elle pourrait constituer un précurseur pour les premières formes de vie. Il est important d'en connaître précisément la structure et le mécanisme de formation. Une combinaison d'approches analytiques incluant des méthodes spectroscopiques, des dégradations thermiques et chimiques, des observations en microscopie électronique à haute résolution et des mesures isotopiques sur composés individuels a été mise en œuvre pour proposer un modèle de structure moléculaire et un mécanisme de formation pour cette MO insoluble. Si le mécanisme d'incorporation de deutérium a été validé expérimentalement, il reste à valider le mécanisme de l'organosynthèse. L'étude de la MO insoluble d'une chondrite à enstatite a révélé des différences dans sa structure chimique par rapport aux chondrites carbonées peu métamorphisées principalement en raison de son altération thermique.

L'analyse et l'imagerie de la MO dans les roches anciennes (archéennes) et dans les météorites par résonance paramagnétique électronique (RPE) ont validé l'intérêt de cette technique pour l'exobiologie.

PROGRA2 en exobiologie

PROGRA2 (Propriétés Optiques des GRAins Astronomiques et Atmosphériques), porté par le LPC2E et le LATMOS, est dédié à l'étude de la matière organique dans divers objets du système solaire (planètes et satellites et leurs atmosphères, petits corps). Les propriétés optiques de particules solides carbonées (produits expérimentaux ou broyats d'échantillons extraterrestres) sont obtenues pendant leur lévitation avec une orientation aléatoire en micropesanteur lors de vols paraboliques à bord de l'A300 ZéroG (Fig. 5). Ces mesures contribuent à l'interprétation des observations astronomiques des milieux où ces grains carbonés sont présents. Il est ainsi possible de mieux connaître certaines de leurs propriétés physiques (taille, distribution en taille, porosité, indice complexe et composition...).



Figure 5: l'expérience Progra2 en fonctionnement à bord de l'Airbus A300 ZeroG (crédit ESA)

Plusieurs dizaines de courbes de diffusion ont déjà été obtenues pour différents composés carbonés de compositions chimiques variées, et parfois produits dans des conditions proches de celles attendues pour la nébuleuse primitive. Une étude de la maturation thermique de ces poussières est prévue en pensant plus précisément aux environnements cométaires, dans le cadre de Rosetta. Ces résultats sont utilisés pour interpréter des observations astronomiques de poussières cométaires, d'aérosols de Titan, de poussières interplanétaires... Un instrument dédié à ces études est en cours de développement à l'ESA pour voler sur l'ISS dans la période 2012-2016 (ICAPS).

Contributions à la préparation des missions et d'instruments: développement d'échantillons de calibration

Les activités du groupe Exobiologie en amont des missions concernent principalement les missions martiennes et surtout ExoMars, Mars 2020, Mars Sample Return (MSR), mais sont aussi pertinentes pour la mission MSL ainsi que diverses missions *in situ* (Rosetta, Lune, astéroïdes, etc).

L'objectif d'ExoMars étant la recherche de traces de vie, les conditions de l'habitabilité microbienne de Mars ont été étudiées et les objectifs scientifiques pour l'étude de vie sur Mars ont été réévalués par le MEPAG. Le groupe Exobiologie a été fortement impliqué dans les groupes de travail ESA /NASA en préparation des missions futures et du retour d'échantillons martiens (MSR).

Une lithothèque (ISAR, International Space Analogue Rockstore) constituée d'analogues naturels ou artificiels (roches et minéraux) de matériaux martiens a été construite au CBM (Orléans) avec l'objectif de tester et calibrer les instruments d'une charge utile pour mieux interpréter les données obtenues lors d'une mission dédiée à l'exobiologie comme ExoMars (Fig. 6). ISAR est associé à une base de données qui référence l'ensemble des caractéristiques structurales, texturales, géochimiques et géotechniques des échantillons. Quelques échantillons ont en particulier été utilisés dans un test en aveugle pour évaluer la complémentarité des données fournies par les instruments d'ExoMars (e.g. argiles, basaltes, évaporites...)



Figure 6 : Barberton (Afrique du sud) lieu de prélèvement de roches analogues aux roches martiennes pour la constitution de la lithothèque ISAR.

Des échantillons organiques tels que ceux utilisés pour la calibration des expériences de Cassini-Huygens (voir ci-dessus) sont également développés pour d'autres applications, en particulier pour Rosetta. Le groupe Exobiologie participe à la préparation de l'exploitation de cette mission, en particulier via l'analyseur de poussières COSIMA.

2.2 Programmatique

Le programme ExoMars est le point qui a préoccupé le plus la communauté des exobiologistes. Le programme a été profondément modifié à deux reprises. La nouvelle configuration se traduit par la division en deux missions du programme, un changement des dates de lancement, une reconfiguration de la charge utile, des changements d'interfaces. Le CNES a suivi avec attention les activités de l'ESA et a accompagné les cinq équipes scientifiques françaises impliquées (Recomm. #13). L'accord entre l'ESA et Roscosmos a été signé en 2013 et les lancements sont maintenant prévus en 2016 et 2018.

Les activités de protection planétaires sont placées sous l'égide de l'ESA. La France participe au « Planetary Protection Working Group » de l'ESA et est observatrice au « NASA Planetary Protection Sub-Committee » (Recomm. #8). Pays de lancement potentiel (utilisation d'Ariane 5 ou de Soyouz à partir de Kourou), la France devra s'assurer du respect des règles internationales (en ce qui nous concerne : les recommandations pour la protection planétaire). Le CNES aura vis-à-vis de l'état français un rôle de certification du lancement. Ce rôle justifie la poursuite de la participation du CNES aux forums internationaux qui traitent de ces questions.

3 Propositions programmatiques

Les propositions ci-dessous sont construites en particulier à partir des réponses à l'appel à idées émis par le CNES et par l'analyse qui en a été faite par le groupe de travail Exobiologie. Quatre ateliers ont été organisés à l'initiative du groupe de travail pour préparer le séminaire de prospective scientifique: La photochimie en orbite, Evolution de la matière organique dans les milieux interplanétaire et interstellaire, Orbitrap (avec des contributions du groupe système solaire), Les analogues pour l'exobiologie.

3.1 Projets prioritaires dans le cadre ESA

ExoMars

Le programme ExoMars est mené dans le cadre du programme optionnel d'exploration de l'ESA. Il s'agit d'une mission d'exploration robotique de Mars, avec pour premier objectif scientifique la recherche d'éventuelles traces de vie et d'habitabilité. C'est d'abord une mission technologique pour démontrer les capacités de l'Europe à se poser, se déplacer et à analyser des roches à la surface de Mars (**Fig. 7**). La communauté rappelle son très fort attachement à cette mission, étape incontournable dans le programme européen d'exploration martienne. Nous soutenons donc la réalisation d'ExoMars en partenariat avec la Russie et la poursuite d'un programme multi-missions ESA/NASA dans la perspective du projet Mars Sample Return. Il est rappelé que la priorité donnée à une mission de retour d'échantillons martiens a été affichée à plusieurs reprises à l'occasion de séminaires de prospective du CNES.



Figure 7 : Modèle de rover d'ExoMars en test dans le désert d'Atacama (Chili), portant les instruments CLUPI, WISDOM et PANCAM

Recommandation #1 : Réussir ExoMars 2016-2018 dans sa nouvelle configuration.

JUICE

Un des objectifs prioritaires de la mission JUICE (Jupiter ICy moon Explorer - lancement prévu 2022) est d'étudier l'émergence de planètes habitables dans le système solaire. Il s'intéressera principalement à Ganymède, Callisto et Europa. Leurs survols apporteront des informations sur la structure de ces satellites, qui confirmeront ou infirmeront les hypothèses issues des modèles. La texture des surfaces de ces satellites est probablement déterminée par les activités tectoniques et la présence d'océans sous glaciaires perchés ou au contraire en contact direct avec le manteau rocheux. L'identification des conditions physico-chimiques qui règnent au sein des océans de ces satellites aura une influence importante sur la notion d'habitabilité et pourra servir de modèle pour certaines planètes extrasolaires. La mission pourra de plus analyser la composition des poussières en orbite.

Recommandation #5 : Soutenir les communautés d'exobiologie et de planétologie fortement investies dans les missions Cassini-Huygens et Rosetta jusqu'à la fin des opérations. Encourager des équipes scientifiques à préparer les futures missions planétaires d'exploration d'intérêt exobiologique vers les systèmes de Jupiter et de Saturne (Juice et TSSM...).

Exoplanètes : CHEOPS, JWST, PLATO

L'exobiologie s'intéresse à la diversité des conditions physico-chimiques dans lesquelles une vie pourrait *a priori* émerger et se développer à la surface d'exoplanètes présentes dans la "zone habitable" (Fig. 8). Des méthodes spectroscopiques pourront à terme caractériser la composition de l'atmosphère de ces exoplanètes. Les missions CHEOPS et PLATO identifieront des exoplanètes en transit devant des étoiles brillantes. L'observatoire spatial infrarouge JWST et les observatoires au sol type ELT amélioreront les spectres qui caractérisent l'atmosphère des exoplanètes. La spectro-photométrie des atmosphères en émission et/ou en réflexion demandent une maturation technologique (missions de type L), mais seront prometteuses pour l'exobiologie (Darwin, Terrestrial Planet Finder, Spices, ...).

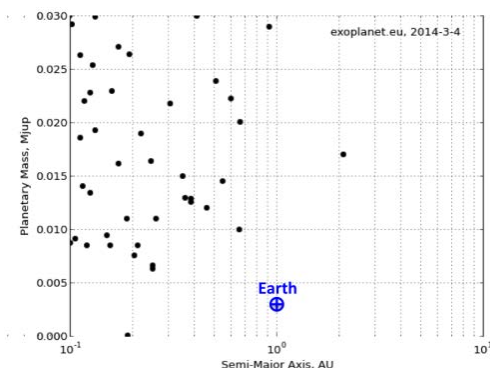


Figure 8 : répartition des planètes extrasolaires de 0 à 10 masses terrestres (env. : 0,030 MJup) ayant un demi grand axe compris entre 0,1 et 10 UA (Données Exoplanetes.eu au 24/03/2014).

3.2 Propositions prioritaires de missions multilatérales

Retour d'échantillons (Mars, Phobos, Lune)

Malgré l'échec de Phobos-Grunt en 2011, mission à laquelle plusieurs équipes françaises participaient, le retour d'échantillons martiens (MSR) reste une priorité pour l'exobiologie et la planétologie, malgré toutes les difficultés techniques d'une telle mission. Pour valider certaines hypothèses sur l'évolution géochimique ou biochimique de la planète, il est nécessaire de disposer d'une série d'échantillons diversifiés de sols, de roches et d'atmosphère de Mars. Envisagée successivement sur 2005-2008, puis sur le créneau 2015-2020, la programmation de MSR semble aujourd'hui repoussée à l'horizon 2030. La collecte raisonnée, le conditionnement *in situ* ou la conservation des échantillons pendant leur transport et sur Terre sont des étapes à franchir pour le succès d'une telle mission, dans l'optique des objectifs scientifiques visés. Les véhicules MER et MSL ont clairement démontré la possibilité de réaliser des analyses *in situ* de plus en plus pointues. Cependant, les charges utiles des véhicules en opération ou qui sont envisagés pour les prochaines années (ExoMars 2018, Mars 2020) demeurent limitées. La variété, la précision, la sensibilité des analyses réalisables *ex situ* (i.e. dans les laboratoires terrestres) seront toujours largement supérieures à celles des instruments embarqués. Les analyses *in situ* demeurent cependant indispensables pour effectuer une collecte raisonnée et suffisamment variée d'une faible quantité d'échantillons (~1kg) à rapporter sur Terre. La mission Mars 2020 de la NASA inaugurera probablement la première phase de collecte et de mise en réserve (caching) d'échantillons. Les missions complémentaires pour les rapatrier éventuellement sur Terre sont encore à concevoir et financer.

Des missions 'plus modestes' de retour d'échantillons de Phobos (PhootPrint, 2022, hors programme obligatoire) ou de la Lune pourraient aussi constituer des étapes intermédiaires destinées à valider les protocoles de collectes, de conservation et d'analyse d'échantillons potentiellement fragiles (riches en substances volatiles, minéraux hydratés...).

3.3 Missions d'opportunité à mettre en avant

Mars 2020

La communauté française exobiologique structurée autour de la mission ExoMars est prête à participer à un bon niveau à la mission NASA Mars 2020. Dans le contexte programmatique chaotique d'ExoMars, cette participation est importante, en particulier car Mars 2020 constitue potentiellement une première étape au retour d'échantillon. La communauté exobiologie souhaite pouvoir participer à la réflexion sur la sélection du (ou des) sites d'atterrissage et de potentiel retour d'échantillons.

Missions de retour d'échantillon de corps primitifs (Hayabusa II, OSIRIS-REx,)

La communauté exobiologique française regrette que la mission européenne Marco Polo-R de retour d'échantillon d'un astéroïde carboné exceptionnel n'ait pas été sélectionnée dans le cadre de Cosmic Vision M3. Le retour d'échantillons d'astéroïdes primitifs

pourra être envisagé dans le cadre de 2 missions d'opportunités : Hayabusa II (JAXA, lancement 12/2014 – retour 2020) et OSIRIS-REx (NASA, lancement 09/2016 – retour 2023). Un instrument français (MicrOmega) sera présent sur Hayabusa 2. Des co-Is scientifiques français participent à OSIRIS-REx.

Recommandation #3 : Préparer les missions de retour d'échantillons martiens et de petits corps primitifs du système solaire. Cela impose de participer à bon niveau au programme facultatif ESA MREP-2 (Mars Robotic Exploration Preparation Programme). Il est aussi indispensable de contribuer aux missions d'opportunité vers Mars (Mars 2020) ou vers des petits corps (Phootprint, Hayabusa II, OSIRIS-REx...). Contribuer à la définition des sites d'atterrissage appropriés et optimaux.

Missions de caractérisation des exoplanètes

CHEOPS et PLATO fourniront un catalogue de cibles de premier choix pour la caractérisation par spectroscopie des transits (spectres d'absorption) et des éclipses (spectres d'émission). Il sera alors important de pouvoir participer à une éventuelle mission qui aurait pour objectif de caractériser les atmosphères de ces planètes dans l'infrarouge (équivalent "Finesse") ou dans l'UV. Avec Spitzer et HST, les équipes des laboratoires français ont montré qu'elles avaient toutes les compétences nécessaires pour participer à ce type de programme scientifique.

3.4 Exploitations à poursuivre de manière prioritaire

(Voir recommandation #5 de 2014, déjà citée ci-dessus).

Cassini et sa suite IDS

Le programme d'InterDisciplinary Scientist « Titan's chemistry & Exobiology » de la mission Cassini-Huygens va s'étendre jusqu'à la fin de la mission, fin 2017. Dans ce cadre, il est prévu de développer les études des tholins, largement entamées au cours des dernières années, avec deux directions principales: leur caractérisation physico-chimique et l'étude de leur évolution dans des conditions plausibles de la surface de Titan. Ce programme inclut aussi la participation aux sessions du Cassini PSG (sessions plénières et « Executive sessions »), et l'animation du « Titan Working Group », pour les aspects scientifiques.

ROSETTA

La caractérisation in situ de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko par la mission ROSETTA fournira des informations cruciales pour l'exobiologie en terme d'apport potentiel de matière prébiotique par les comètes. Il est important de soutenir la participation à ces analyses à partir de l'automne 2014.

4 Phases 0/A à démarrer

4.1 Vitrine

Un atelier a été organisé autour de l'exposition de composés organiques directement au flux lumineux du soleil. Les moyens de reproduire ces expériences au sol, soit avec des lampes de laboratoire, soit au synchrotron, ont été abondamment discutés. Il n'est pas possible de reproduire fidèlement et exhaustivement en laboratoire le spectre solaire. Les expériences de laboratoires doivent cependant impérativement précéder une éventuelle expérience spatiale. Les expériences qui pourront être menées dans l'avenir devront obligatoirement assurer des mesures *in situ* par opposition aux analyses avant/après qui sont pratiquées actuellement dans les expériences EXPOSE. Il est nécessaire d'achever une phase 0/A pour l'instrument Vitrine en l'envisageant comme une « facilité » à l'extérieur de l'ISS (en prenant en compte l'hypothèse de sa prolongation à 2024) ou sous forme d'expériences simplifiées à bord de nano-satellites dédiés.

Recommandation #9 : Poursuivre le soutien aux expériences d'exposition en orbite (ISS) et en laboratoire pour l'étude des processus de synthèse abiotique et d'évolution de la matière organique sous irradiation. Étudier les possibilités offertes par les nanosatellites.

4.2 Orbitrap (Martien)

L'exploration de Mars pendant les années 2020 et 2030 reste une priorité de la communauté avec en ligne de mire le retour d'échantillons martiens à un horizon encore incertain. L'exploration se poursuivra dans des sites de mieux en mieux caractérisés à partir d'observations orbitales. Cependant, pour être bien choisis, les échantillons devront être partiellement caractérisés lors de leur collecte. Dans ce scénario, la spectrométrie de masse à haute résolution (Orbitrap) à appliquer *in situ* est un atout français à valoriser rapidement en Europe et au-delà. En se fondant sur les études menées au cours des dernières années en R&T, il faudrait rapidement se fixer comme objectif le développement d'une phase d'étude pour déterminer les actions à mener pour que cet instrument atteigne une maturité suffisante afin de candidater sur la charge utile des prochaines missions.

Recommandation #4 : Poursuivre et accélérer la spatialisation de la spectrométrie de masse à haute résolution (Orbitrap)

4.3 Autres instruments (RPE, HPLC, Lithospace ...)

D'autres instruments sont en cours d'étude en R&T (voir paragraphe 5) et devraient dans les 5 prochaines années être proposés pour des phases 0 instrumentales afin d'en définir les contours techniques et budgétaires une fois les points durs identifiés et en voie de résolution.

Recommandation #6 : Poursuivre les études sur la spatialisation de moyens d'analyse *in situ* comme la résonance paramagnétique-électronique (RPE) et la chromatographie en phase liquide (HPLC) ainsi que de techniques de préparation d'échantillons *in situ* (Lithospace).

5 Grands axes de R&T ; propositions de démonstrateurs

5.1 Spectrométrie de masse haute résolution, Orbitrap

Sept réponses à l'appel à idée proposent des applications différentes de la spectrométrie de masse haute résolution basée sur un "cœur" de trappe ionique de type Orbitrap (Fig. 9). Un atelier a mis en lumière l'approche différenciée nécessaire pour le développement d'instruments spatiaux en fonction des objectifs analytiques et de l'environnement spatial envisagé (Mars, Titan,...). Les actions entreprises actuellement par le consortium français Orbitrap sont centrées autour de la trappe ionique, de son système d'alimentation en haute tension, du système de mesure et d'acquisition de données. Ce cœur est essentiellement commun aux différentes applications spatiales envisagées.

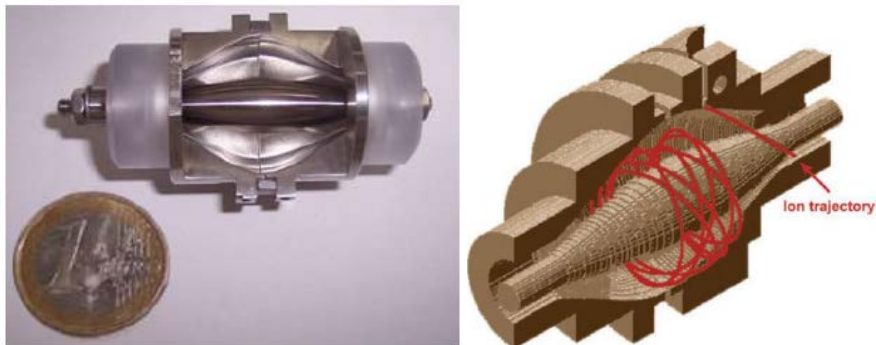


Figure 9 : Trappe ionique cœur des spectromètres de masse Haute résolution (A. Makarov ; Anal. Chem. ; 2000).

La conception et la fabrication d'un instrument nécessiteront des coopérations internationales. Les usages de laboratoires et les premiers travaux de R&T ont démontré l'intérêt scientifique des performances actuellement atteignables. La haute résolution (>100 000) sur une large plage de masse moléculaire fera franchir à l'analyse *in situ* un pas qualitatif significatif tant en planétologie (analyse des minéraux et des isotopes) qu'en exobiologie (analyse de la matière organique et des isotopomères). La résolution visée (100 000 à la masse 400) générera des quantités de données très importantes. D'ores et déjà, anticipant les missions spatiales envisageables, il serait nécessaire de travailler sur les algorithmes de réduction des données spectrales obtenues sans perte de l'information.

L'intérêt d'une large communauté en France, s'intéressant aux petits corps, à Titan, et à Mars, justifie la préparation d'instruments de ce type en coopération européenne ou internationale. D'autres communautés pourraient être concernées par les capacités de cet instrument. Le développement d'un modèle compact et opérationnel d'Orbitrap pour des études de la haute atmosphère sous ballon, sera un pas significatif vers une démonstration des capacités de spatialisation d'un tel instrument. L'avance acquise grâce à la coopération étroite avec l'industriel ne sera conservée que si l'effort est maintenu et développé dans les prochaines années.

5.2 Résonance Paramagnétique Electronique (RPE)

Le prototype d'un spectromètre RPE basse fréquence (250 MHz) ultra léger, spatialisable et adapté à la recherche et à la caractérisation *in situ* non invasive de carbone fossile dans les roches sédimentaires est en cours de développement. La partie radiofréquence (génération-détection) et le résonateur sont déjà manufacturés. La partie magnétique, l'interfaçage et le pilotage sont en cours d'achèvement. Si ce prototype (~4 kg) donne des résultats intéressants, une deuxième version plus adaptée à la spatialisation pour une mission martienne sera développée.

5.3 Spatialisation de la chromatographie liquide

La Chromatographie Liquide à Haute Performance (HPLC) est un moyen très classique de séparation et d'identification des molécules polaires organiques dans les laboratoires de biochimie et de biologie. Elle est particulièrement adaptée à l'analyse de la matière organique qui est présente sur les petits corps du système solaire et éventuellement dans les sédiments martiens. Les premières études de conception et de spatialisation pour un usage à la surface d'un corps planétaire, ont débuté et devraient se poursuivre au cours des prochaines années.

5.4 Préparation de prélèvements minéraux (Lithospace)

L'identification des roches et des minéraux par des moyens optiques lors des missions martiennes sera d'autant plus importante que les échantillons à analyser ou à rapporter sur Terre devront être sélectionnés. Les moyens d'observation optiques (CLUPI, Pancam,) ou d'analyse minérale par spectrométrie (Raman laser spectrometer, MicrOméga, Chemcam) abondent mais les échantillons sont bruts. Au sol, la base des observations géologiques des roches demeure l'observation de lames minces notamment en lumière polarisée. Une équipe se propose d'étudier la possibilité de concevoir un système de litho-lamellage automatique pour fabriquer *in situ* de tels objets et ensuite les observer avec les moyens optiques développés par ailleurs. Des premières activités en R&T devraient définir un cahier des charges fonctionnelles, passer en revue des solutions techniques existantes et identifier les points durs techniques. Un tel instrument pourrait être adapté ultérieurement pour l'exploration d'autres corps telluriques ou glacés du système solaire.

6 Propositions d'actions de structuration de la communauté à mettre en place en concertation avec les autres organismes

La communauté française en exobiologie s'est structurée dès 1999 en créant le Groupement de Recherche en exobiologie du CNRS « Exobio » avec pour action principale de renforcer les collaborations entre les chercheurs français et sensibiliser les jeunes scientifiques à cette science. A la fin du GDR Exobio en décembre 2008, la communauté créa la Société Française d'Exobiologie, SFE. GDR et SFE remplirent leur mission en organisant deux colloques et sept ateliers de travail. Une action spécifique a été menée

vers les jeunes scientifiques avec les rencontres Exobio pour Doctorants, organisées chaque année depuis 2007, et en 2013 une première conférence nationale organisée pour de jeunes chercheurs en exobiologie.

En parallèle de l'aide pérenne du CNES, les exobiologistes français ont été accompagnés par le programme interdisciplinaire de recherche du CNRS "Origines des planètes et de la vie (OPV 2007-2009)" suivi par le programme "Environnements planétaires et origines de la vie (EPOV 2010-2012)" qui avaient comme objectif de susciter des collaborations nouvelles, d'encourager et d'accompagner des projets novateurs. Ces programmes ont permis de renforcer les échanges entre les communautés existantes en finançant des programmes et en organisant des colloques. Le programme OPV a donné l'impulsion initiale aux travaux autour de l'Orbitrap en fédérant une communauté dépassant largement le cadre de l'exobiologie. Le programme EPOV a aussi contribué au premier congrès International « Origins » (2011), qui fédérait pour la première fois l'International Society for the Search of the Origin of Life et la commission Bioastronomy de l'International Astronomical Union.

Recommandation #2 : Favoriser la création d'un programme scientifique pluridisciplinaire (chimie, astronomie, biologie, géologie, planétologie...) autour des thématiques exobiologiques, par exemple sur des concepts fédérateurs comme l'habitabilité en soulignant aussi les liens avec la Protection Planétaire..

7 Avis et recommandations du groupe sur les questions transverses

7.1 Aspects trans-groupes

L'exobiologie est par nature extrêmement interdisciplinaire. Les thèmes qu'elle aborde sont donc naturellement en recouvrement avec celles de plusieurs autres thématiques. Certaines lignes de partage peuvent cependant se dégager car les communautés mobilisées et les approches méthodologiques sont différentes.

- la formation des planètes, petits corps et comètes sont du ressort de la planétologie ainsi que la notion d'habitabilité définie par des grandeurs physiques (modélisées, théorisées ou mesurées)

- L'origine de la vie (chimie dans l'eau), les conditions de maintien des métabolismes, leurs interactions et les traces qu'elles laissent, les biosignatures ou les biomarqueurs sont du ressort de l'exobiologie.

- Les apports d'eau et de matière organique (d'origine locale ou interplanétaire par les comètes et les météorites grands et petits) et leur devenir au cours de l'évolution abiotique de la planète sont un domaine partagé avec la planétologie comme la synthèse de matière organique interstellaire est partagée avec l'astronomie.

- La recherche de biomarqueurs (mesurés) ou de biosignatures (observées) *in situ* est un point de convergence et de complémentarité entre les deux disciplines qui peuvent avoir recours à des instruments identiques (MS, GCMS, HPLC, Raman, RPE...) ou spécifiques (Biopuces...). De même la recherche de biomarqueurs sur des exoplanètes est un point de convergence entre les communautés d'Exobiologie, de Planétologie et d'Astronomie.

Cette répartition pourra être utilisée pour définir les points de convergences entre les communautés scientifiques autour des thèmes de l'habitabilité, des origines de la vie et de sa pérennité.

Recommandation #10 : Organiser une réflexion élargie sur les biosignatures spectroscopiques éventuelles détectables sur des planètes de type terrestre par les télescopes au sol ou en orbite (Hubble, JWST...).

7.2 Laboratoire de curation et de caractérisation

La mission de retour d'échantillons martiens est toujours en toile de fond des programmes des agences spatiales mais son horizon demeure incertain. Les organismes internationaux comme le COSPAR, les agences spatiales (groupe ISSEG) et l'Union Européenne conservent cependant des études sur les contraintes qu'impose l'hébergement d'échantillons extraterrestres. Quatre types de laboratoires sont envisagés. Les trois premiers peuvent avoir de sévères contraintes imposées par les exigences de conservation des échantillons et les règles de protection planétaire :

- Le laboratoire d'accueil des échantillons lors de leur retour sur Terre. Cette unité est unique et dédiée à l'ouverture du module de rentrée, l'extraction, la classification des échantillons, leur transfert dans des récipients de conservation.
- Les laboratoires de caractérisation physico-chimique préliminaire et le cas échéant (échantillons martiens) de recherche de contaminants biologiques d'origine extraterrestre (Biohazard testing).
- Les laboratoires de curation des échantillons qui assurent la garde, la conservation et la gestion des échantillons.
- Les laboratoires d'analyse scientifique des échantillons qui répondent aux appels à propositions scientifiques et qui ne demandent pas de régime particulier s'il n'y a pas de restriction pour des raisons de protection planétaire.

Hormis le laboratoire d'accueil qui est unique, qui peut être accolé à une des unités de caractérisation, de test ou de curation, toutes les autres unités peuvent être dupliquées et réparties en différents pays. Pour faciliter les transferts d'échantillons et leur analyse sous confinement (pour les protéger ou pour des raisons de protection planétaire), il faut aussi disposer d'un conteneur de transport fiable, hermétique et adapté. C'est autour des unités de type caractérisation et curation que doivent porter les réflexions de la communauté scientifique au sein d'un consortium européen. La gestion d'échantillons de petits corps (pas de contraintes de protection planétaire) sont aussi un moyen d'acquérir une expérience et un savoir-faire qui préparent l'accueil d'échantillons martiens avec de fortes contraintes de protection planétaire.

Recommandation #7 : Encourager l'étude et le développement d'une facilité de caractérisation préliminaire et de curation d'échantillons extraterrestres en Europe, englobant non seulement les enjeux scientifiques mais aussi ceux de la protection planétaire. Profiter des contributions aux missions en cours (Hayabusa II, OSIRIS-REx) pour participer aux programmes de curation d'échantillons extraterrestres.

Des actions concrètes comme le développement de banques d'échantillons de référence (ISAR et collection d'analogues minéraux et organiques) sont de premiers supports à la mise en place de collaborations préparant ces projets plus ambitieux et fédérateurs.

Recommandation #8 : *Poursuivre le développement à moyen terme au niveau français ou européen d'une collection d'échantillons de référence et de standards analytiques (analogues naturels ou artificiels de matériaux extraterrestres) et leurs bases de données associées. Contribuer aux travaux internationaux sur l'échantillonnage et la détectabilité de traces de vie diluées dans de petites quantités d'échantillons hétérogènes.*

8 Entrées pour la prospective « Ballons »

La spectrométrie de masse à haute résolution (Orbitrap) est prometteuse pour, entre autres, l'analyse des poussières et des atmosphères planétaires. Un démonstrateur issu de la R&T doit être embarqué sous ballon pour effectuer des mesures pour la communauté Terre, Environnement et Climat. Cette étape est maintenant indispensable à la qualification des solutions techniques proposées pour la spatialisation de cet instrument qui présente un intérêt partagé entre l'exobiologie et la planétologie au sein des sciences de l'univers.

9 Entrées pour la prospective INSU

Après avoir bénéficié d'un soutien institutionnel français de 1998 à 2012 au travers des Programmes Interdisciplinaires du CNRS, l'Exobiologie a obtenu récemment le soutien de l'Europe via un programme européen COST « Origins » TD1308 (Cooperation in Science and Technology). Ce réseau thématique « Origins and evolution of life on Earth and in the Universe » a pour objectif de soutenir la recherche et la collaboration en exobiologie (ou astrobiology) entre différents pays européens, via des conférences, échange d'informations scientifiques et publications. Toutefois, les fonds versés et partagés entre scientifiques des états membres de l'UE au titre du COST ne permettront pas de soutenir les actions et nouvelles thématiques aux frontières des disciplines dégagés par la communauté exobiologique française. A l'heure actuelle, seule la Société Française d'Exobiologie (SFE créée en 2009) essaie, sans moyens particuliers, de structurer cette discipline qui devient, au niveau international, aussi visible scientifiquement et médiatiquement que la Cosmologie.

Pour conforter le rôle de la large communauté scientifique française dans ce champ interdisciplinaire en plein essor, il est nécessaire de lui attribuer un soutien financier pérenne inter-instituts (INSU, INEE, INC, INP, INSB, INSHS, INSIS...). La communauté scientifique française est en mesure de promouvoir des thématiques fortes et interdisciplinaires par exemple autour de « l'habitabilité, émergence et maintien de la vie » pouvant aboutir à moyen terme à la création d'un « Institut Interdisciplinaire des Origines ». Ce soutien fournirait un prolongement institutionnel très fort dans un domaine dans lequel la France joue un rôle moteur au niveau européen (Présidence de l'EANA) et international (GdR Exobiologie et SFE membres associés du NASA Astrobiology Institute, Organisation du congrès « Origins » en 2011).

10 Intérêt pour les nanosatellites.

Les nanosatellites (entre 1 et 50kg) ont fait leur apparition il y a une dizaine d'années. D'abord construits par des laboratoires ou dans le cadre de projets étudiants. L'atelier organisé par le CNES en préparation du séminaire a montré que les technologies devenaient industrialisées et standardisées. La miniaturisation des systèmes de service (contrôle d'attitude, énergie, radiocommunication...) et de certains composants standards autorise à envisager des unités au coût de fabrication limité pour répondre à des questions scientifiques nécessitant une mise en orbite. L'évolution rapide parallèle des charges utiles (imagerie, spectrométrie...) doit inciter à envisager des utilisations diversifiées (exploration). Plusieurs centaines de nanosatellites sont en cours de conception ou de construction dans le monde. Ce nouvel outil est prometteur même si les systèmes de lancement et les orbites sur lesquelles ils peuvent évoluer demeurent des questions délicates. Pour se l'approprier et en mesurer l'intérêt réel, il est nécessaire de commencer dès maintenant un travail de recensement des possibilités et de le confronter avec les besoins scientifiques exprimés. En exobiologie une réflexion pour la mise en œuvre d'une partie des objectifs de Vitrine pourrait conduire à l'issue d'une phase O/A à une proposition pour une phase de conception avancée (voir recommandation #9).

Conclusion

Au fil des ans, l'exobiologie rassemble des scientifiques qui proviennent autant de laboratoires spatiaux que de laboratoires conventionnels du CNRS. La communauté s'organise, est active et est reconnue internationalement. Sa priorité demeure l'exploration de la planète Mars avec comme objectif la réussite de la Mission ExoMars, la préparation des missions futures comme Mars 2020 et les suivantes. L'objectif à moyen terme est de se placer au sein de l'Europe et au sein de la communauté internationale pour jouer un rôle significatif, avec l'aide du CNES, dans une mission de retour d'échantillons martiens. Il est aussi nécessaire de préparer l'exploration à long terme vers les satellites glacés des planètes géantes ainsi que la caractérisation à venir des exoplanètes et la recherche de biosignatures éventuelles. Cette communauté suscite des questions transverses qui, avec la participation de disciplines variées s'étendant des sciences humaines à l'astronomie, élargissent la réflexion de domaines déjà en débats (habitabilité, protection planétaire) ou de domaines nouveaux (Biosignatures).