

PREPARATION DU SEMINAIRE DE PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE

RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL D'EXOBILOGIE

PRIORITES ABSOLUES :

Réussir EXOMARS en 2016 avec une charge utile d'exobiologie est la priorité absolue de l'exobiologie.

Utiliser les facilités actuellement disponibles sur l'ISS pour des expériences d'exposition en orbite basse.

Contribuer au traitement des échantillons de Phobos Grunt.

Assurer la présence d'une charge utile Exobiologique française et européenne sur les éléments de la mission EJSM.

Préparer techniquement et scientifiquement des contributions à la mission de retour d'échantillons martiens et au traitement de ces derniers dans toutes les phases après leur retour sur Terre.

PRIORITES ESSENTIELLES

Préparer une participation instrumentale à la mission Marco Polo (Spectromètre de masse) et assurer la réalisation de cette mission avec un atterrisseur dans un cadre international.

Assurer et préparer des participations aux missions de détection des exoplanètes comme PLATO ou des éventuelles missions d'opportunité.

Assurer une participation instrumentale à moyen terme à des missions Européennes (Mars Next ou Mars Origins) ou internationales d'exploration de Mars.

Contribuer à toute mission vers Mars préparant le retour d'échantillon martien.

ACTIVITES TRANSVERSES INCONTORNABLES

Ces priorités supposent une action continue dans les actions de R&T et dans le soutien aux travaux de simulation, de recherche amont et de traitement des données menés dans les laboratoires. Une activité scientifique soutenant les actions d'expertise et de R&T relatives à la protection planétaire devrait être identifiée.

INTRODUCTION

L'Exobiologie (ou astrobiologie) est la science qui recherche des formes ou des traces de vies extraterrestres et qui étudie les origines de la vie terrestre. Ce vaste domaine de recherches pluridisciplinaires, connu à l'étranger sous le nom d'astrobiologie, fait appel aux sciences de l'Univers, aux sciences de la Terre, à la physique, à la chimie et à la biologie ainsi qu'à des sciences sociales comme la sociologie et l'épistémologie. Cette recherche se double d'une composante socio culturelle importante, tournée vers la société et comprend l'explication de ces recherches à un public aussi large que possible. En France, l'exobiologie se fonde sur les travaux de nombreux chercheurs individuels et quelques équipes, œuvrant essentiellement au sein de laboratoires institutionnels dont ce n'est pas l'activité principale. La coordination des exobiologistes français et de leurs thèmes de recherche s'est faite essentiellement au sein du Groupement de Recherche (GdR) « Exobiologie » du CNRS qui a joué un rôle essentiel jusqu'à son extinction en 2008. Depuis 2006, le CNRS a mis en place un programme interdisciplinaire sur l'origine des planètes et de la vie (PID-OPV) qui a pris le relais d'une partie importante des prérogatives du GdR Exobiologie. D'autre part en 2009 se crée la "Société Française d'Exobiologie" ayant pour but de continuer à fédérer et à animer la communauté exobiologique française.

De nombreuses traces historiques montrent que, la possibilité de vies extraterrestres a alimenté l'imaginaire humain. Mais comment passer du mythe à la réalité ? Que chercher ? Où chercher ? Comment chercher ?

L'exobiologie est basée sur une démarche scientifique mise en œuvre au niveau national et international qui s'alimente de nombreuses disciplines scientifiques. Les exobiologistes recherchent essentiellement les traces d'une vie se développant dans l'eau et basée sur la chimie du carbone, non pas par simple mimétisme avec la vie terrestre, mais parce que ces deux facteurs sont universels et possèdent des propriétés exceptionnelles, démontrées en laboratoire. De ce fait, la recherche d'une deuxième genèse va exploiter abondamment les travaux consacrés à l'étude de l'origine de la vie terrestre.

1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

1.1. L'émergence de la vie terrestre

Il y a environ 4 milliards d'années, un certain nombre de molécules s'auto-organisèrent dans l'eau, véritable berceau de la vie, et formèrent des assemblages chimiques capables de générer des copies conformes, produisant ainsi plus d'eux-mêmes par eux-mêmes. C'est l'auto-reproduction. Par suite de légères erreurs de montage, des assemblages plus performants apparurent et devinrent les espèces dominantes. C'est l'évolution. Auto-reproduction et évolution sont les deux propriétés qui caractérisèrent, *a minima*, le passage de la matière à la vie. On considère généralement que ces assemblages primitifs étaient déjà constitués de molécules organiques (carbonées).

La connaissance des conditions environnementales et chimiques qui régnaient sur la Terre primitive, avant que la vie n'apparaisse, est fondamentale pour replacer la physico-chimie prébiotique terrestre dans des conditions réalistes. Dans ce domaine, du fait de l'absence de toute trace directe de ce qu'était cet environnement, les questions sont nombreuses. Quel a été quantitativement l'effet des processus de formation de la Lune sur l'atmosphère, sur le

contenu en éléments volatils de la planète, sur la composition chimique du manteau et de la croûte ? Quelles en ont été les implications sur la chimie prébiotique ? Le modèle du Soleil jeune faiblement lumineux est-il exact ? Quels étaient les flux de particules et de rayonnement et leurs spectres ? Y a-t-il eu un pic de bombardement vers 3,8-4,1 Ga (milliards d'années ou giga-années), dont la décroissance brusque aurait permis le démarrage de l'évolution chimique vers la vie ? Le concept de "dernier impact stérilisateur" est-il pertinent, en particulier si l'on envisage une biosphère souterraine ? La vie est-elle suffisamment facile à engendrer pour qu'elle ait pu apparaître et disparaître plusieurs fois dans l'histoire de la Terre ?

1.1.1. Le berceau aqueux de la vie

La présence d'eau liquide en surface de la Terre, à une température modérée, est une première étape indispensable pour l'apparition de la vie sur Terre. L'eau à l'état liquide est apparue très tôt dans l'histoire de la Terre, dès 50 à 100 Ma (millions d'années) après son accréation. Quelques 50 Ma après, l'eau dégazée dans l'atmosphère s'est condensée pour former les océans. Au début de l'Archéen, il y a 3,8 Ga, les roches indiquent clairement la présence d'un océan stable. L'océan archéen était certainement plus acide et réduit que l'océan actuel, à cause de son équilibre avec une atmosphère très riche en CO₂, et sa chimie était dominée par Na et Cl en concentrations plus fortes qu'actuellement, cela étant lié à un lessivage plus important des terres émergées, à l'effet de l'hydrothermalisme sous-marin et à une probable faible interaction avec la biosphère naissante.

Quant à l'atmosphère, différents modèles ont été proposés qui s'appuient sur des données astrophysiques, géologiques et géochimiques. On suppose aujourd'hui qu'une atmosphère secondaire, constituée principalement de CO₂ et N₂ s'est formée au cours du refroidissement de la planète grâce au volcanisme et par dégazage progressif du manteau. Un enjeu important est de déterminer pour cette atmosphère la part relative provenant du dégazage interne et celle d'origine extraterrestre, via les micrométéorites, par exemple.

Y a-t-il eu érosion de l'atmosphère par les impacts géants ?

Quelles ont été les compositions des diverses phases de l'atmosphère de la Terre primitive ? Enfin, un autre paramètre fondamental consiste à déterminer quand sont apparus les premiers continents émergés, quelle était leur composition et quels furent les mécanismes de leur genèse.

En effet l'interface continent/océan est un des sites possibles pour l'apparition de la vie. De plus, l'existence de continents émergés rend possible l'isolement de microenvironnements (lacs, mares, etc.) éventuellement plus favorables à la concentration des composants prébiotiques, ce qui n'est pas le cas d'un vaste océan. La composition des océans dépend en grande partie de celle des continents, or nous savons que la croûte continentale avait une composition différente de la croûte actuelle. Nous ne savons encore que très peu de la croûte hadéenne mais les informations importantes sortent des études isotopiques (¹⁴²Nd, ¹⁴³Nd, ¹⁸⁷Hf) sur les minéraux et les roches les plus anciennes. Enfin, si aujourd'hui l'existence de continents émergés dépend étroitement de l'existence d'une tectonique des plaques, ce mécanisme était-il déjà opérationnel à l'Hadéen ? Les conditions de genèse de la croûte continentale archéenne permettaient-elles aussi son émergence et la création de reliefs ? Divers sites peuvent être envisagés comme étant les plus favorables selon l'étape de l'évolution chimique puis biologique considérée.

Les principaux sont :

- i) **l'océan profond**, qui inclut les sources hydrothermales (fumeurs noirs et blancs), la surface des roches volcaniques et des sédiments ;
- ii) **la surface de l'océan**, milieu bidimensionnel facilitant la concentration des molécules et la production d'aérosols (gouttelettes) ayant le même effet ;
- iii) **la zone littorale et subaérienne**, autour de zones émergées de la croûte ou sur le flanc de volcans, avec des bassins et des lagunes, des alternances de phases sèches et humides (marées) ;
- iv) **les zones glacées**, dans lesquelles de l'eau liquide interstitielle peut être présente.

Pour mieux comprendre l'apparition de la vie sur Terre et identifier les éléments à rechercher sur les corps du système solaire, il est nécessaire d'établir de nouvelles contraintes sur la modélisation de la composition de l'atmosphère primitive. Les études des isotopes (O, de Nd et d'Hf) dans les matériaux terrestres les plus anciens (Hadéen) sont des moyens d'établir la nature et l'évolution des premières croûtes terrestres ainsi que de déterminer la présence d'eau liquide dès cette époque.

Il est ainsi possible de préciser l'évolution temporelle des principaux paramètres physico chimiques (volume, température, pH, nature et abondance des sels) de ces océans primitifs. Un point crucial à établir fermement est l'existence de continents émergés sur la Terre hadéenne - l'apparition des premières terres émergées déterminant par leur lessivage l'évolution de certaines caractéristiques de l'océan.

Recommandation # 1 : soutenir en relation avec le Programme Interdisciplinaire Origine des Planètes et de la Vie, les études sur les nouvelles contraintes des atmosphères primitives et l'évolution chronologique des premières croûtes terrestres.

1.1.2. Origine des molécules organiques

Actuellement, trois scénarii peuvent décrire l'origine des premières molécules organiques dont l'évolution a conduit à l'apparition de la vie sur Terre. Deux d'entre eux font appel à une origine endogène de la matière organique, par synthèse soit dans l'atmosphère soit au niveau de sources hydrothermales. La dernière hypothèse fait appel à des apports exogènes de matière organique via les comètes, les météorites et les micrométéorites. Ces différentes hypothèses ne s'opposent pas forcément et peuvent avoir été complémentaires. En l'absence de trace directe des conditions qui régnaient dans l'environnement primitif terrestre il y a plus de quatre milliards d'années, lorsque la chimie prébiotique a conduit aux premiers systèmes vivants, il est essentiel de rechercher et d'étudier des environnements terrestres et extraterrestres où des processus analogues se déroulent actuellement. De tels environnements doivent tester " sur le terrain " les hypothèses sur l'origine de la vie et sur les processus prébiotiques associés.

1.1.2.1. Origine endogène

1.1.2.1.1. *Origine atmosphérique : l'exemple de Titan*

Bien que sa composition atmosphérique soit différente de celle proposée par la plupart des modèles de l'atmosphère primitive terrestre, Titan - le plus grand satellite de Saturne - est actuellement le siège de processus physiques et chimiques qui pourraient s'être produits sur la Terre primitive.

Explorer Titan aujourd'hui, c'est peut être explorer notre propre planète, il y a plus de quatre milliards d'années, si son atmosphère avait une composition favorable aux synthèses organiques sous l'action du rayonnement UV solaire et des éclairs d'orage, à l'eau liquide

près (Raulin, 2007). Les retours scientifiques de la mission Cassini-Huygens sont extrêmement riches en données essentielles pour notre compréhension de Titan, incluant les aspects exobiologiques (Raulin & Owen, 2002 ; Raulin, 2008a). Ils impliquent le développement de nombreux programmes au sol, de modélisation théorique et surtout d'études expérimentales dont les données sont indispensables, notamment pour nourrir les modèles. C'est ainsi que, par exemple, les programmes d'établissement de base de données spectroscopiques (Infrarouge en particulier) développés par les équipes françaises (Bénilan, 2004) sont un atout considérable, indispensable pour le traitement des données des instruments de Cassini et de Huygens tels que CIRS, VIMS, UVIS, INMS et DISR. Il en est de même des expériences en laboratoire simulant les processus physiques et chimiques de l'atmosphère de Titan. La mission Cassini-Huygens a analysé la composition chimique de la phase gazeuse et des aérosols de la basse atmosphère de Titan grâce aux expériences GC-MS et ACP (Niemann et al, 2005 ; Israël et al., 2005)

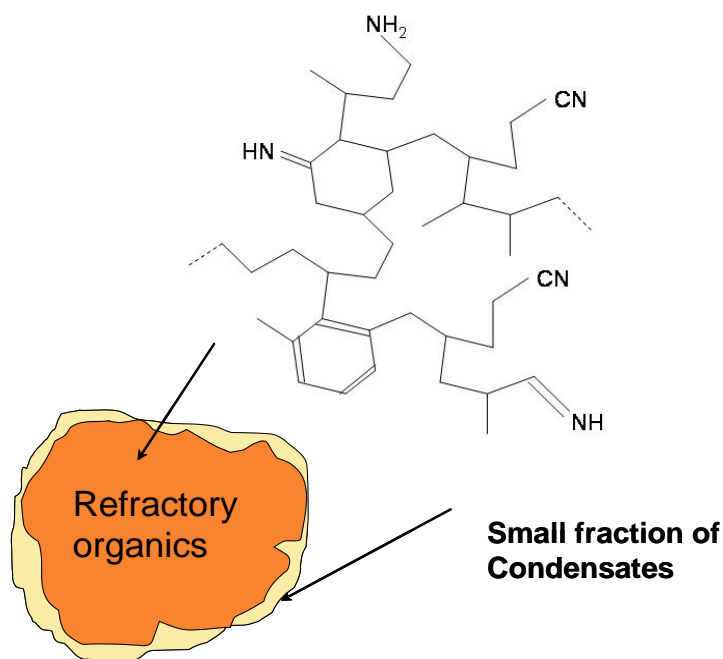


Figure 1 Modèle de structure moléculaire possible des aérosols de la basse atmosphère de Titan, d'après les données de l'expérience ACP de la mission Cassini-Huygens (Israël et al, 2005)..

La composition chimique des aérosols semble proche de celle des « tholins » obtenus en laboratoire lors des simulations expérimentales de la chimie de l'atmosphère de Titan. Les études par plasma froid produisent des analogues de laboratoire des phases gazeuses et solides de l'atmosphère réelle d'où il est possible de déduire des paramètres essentiels pour le traitement des données de Cassini-Huygens (Bernard et al, 2006; Nguyen, 2007 ; Nguyen et al., 2007, Quirico et al., 2008). C'est une approche actuellement suivie en particulier pour interpréter les spectres IR de réflexion de la surface de Titan collectés par l'expérience DISR, (Tomasko et al., 2005) qui pourraient être en partie expliqués par la présence des aérosols ou de leurs produits d'hydrolyse (Figure 2)

Une autre donnée inattendue de la mission Cassini-Huygens est la détection de nombreux composés organiques dans l'ionosphère de Titan par INMS (Waite et al., 2005, 2007). Ces composés, incluent des ions positifs et négatifs dont la masse atteint plusieurs milliers de Dalton, indiquant la présence d'une chimie organique très complexe dans les zones les plus

élevées (1000 km) de l'atmosphère du satellite. L'étude de cette chimie nécessite à présent de modéliser théoriquement ces processus et de les simuler expérimentalement en laboratoire en utilisant la spectrométrie de masse à très haute résolution (~100 000). Cette activité est en cours de développement en France avec le soutien du CNES et du CNRS (PID OPV).

Les données de la mission Cassini-Huygens ne nous permettront très certainement pas de répondre à toutes les questions qui se posent. C'est le cas, en particulier, de la question de la chiralité. Des missions ambitieuses post-Cassini-Huygens telles que TanDEM ou TSSM effectueraient l'exploration détaillée de la surface de Titan, couplée à une analyse chimique, moléculaire et chirale des composés qui y sont présents. La communauté nationale est dès à présent sollicitée pour participer à ces projets.

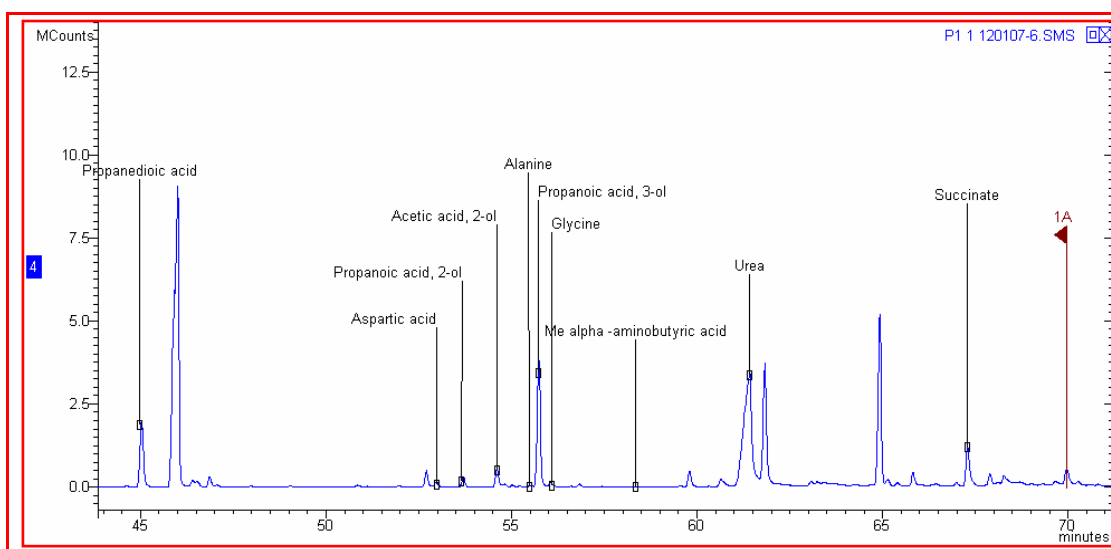


Fig. 2 Analyse par GC-MS des produits formés après hydrolyse à pH neutre de tholins de Titan (Nguyen, 2007).

Recommandation #2: Poursuivre le soutien à la communauté planétologique et exobiologique française, très fortement investie dans la mission Cassini-Huygens, pour participer au dépouillement des données jusqu'à la fin de la mission. Veiller avec les autres organismes que la relève scientifique soit assurée pour poursuivre les études au sol, modélisations théoriques et expérimentales.

1.1.2.1.2. Origine hydrothermale

Les événements hydrothermaux présentent un environnement réducteur favorable aux synthèses prébiotiques, car les gaz qui s'en échappent sont riches en hydrogène, azote, oxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, anhydride sulfureux, hydrogène sulfuré. L'énergie thermique est fournie en continu au système par le magma. Par exemple, les gaz qui s'échappent du système hydrothermal de Rainbow découvert par l'Ifremer au large des Açores renferment 45 % d'hydrogène et 43 % de monoxyde de carbone, une situation propice à la formation d'hydrocarbures par la réaction de Fischer-Tropsch. Des hydrocarbures comprenant entre 16 et 29 atomes de carbone ont été effectivement détectés dans ces fluides (Holm et Charlou, 2001). Pour l'Allemand Günter Wächtershäuser (1994), les molécules organiques primordiales se seraient formées au niveau de ces sources hydrothermales par réduction des oxydes de carbone grâce à la réaction de l'hydrogène sulfuré (H₂S) sur le sulfure de fer (FeS). En laboratoire, le sulfure de fer, l'hydrogène sulfuré et le dioxyde de carbone réagissent en

milieu anaérobie pour donner de l'hydrogène et une variété de mercaptans dont le méthane-thiol, CH₃-SH. Le méthane-thiol et l'acide acétique ont également été obtenus à partir de monoxyde de carbone, d'hydrogène sulfuré, de sulfures de fer et de nickel et de quantités catalytiques de sélénium. Dans certaines conditions, il se forme des thioesters, qui ont peut-être constitué, selon le biologiste belge Christian de Duve, le principal moteur métabolique d'un monde vivant primitif de thioesters (de Duve, 1998).

Recommandation #3: Soutenir en relation avec le PID OPV les études relatives aux sources hydrothermales modernes et leurs analogues anciens qui font aujourd'hui appel à une très large communauté, incluant microbiologistes, géologues, géochimistes et chimistes car elles peuvent fournir des informations précieuses sur des environnements extraterrestres (Mars, Europe) et des analogues de ces environnements.

1.1.2.2. Origine exogène

Deux hypothèses décrivent le déroulement du bombardement météoritique et cométaire au cours du premier milliard d'années après la formation de notre planète. Selon le modèle classique, l'intensité du bombardement de la Terre a décliné progressivement entre la fin de son accréation et environ - 3,8 milliards d'années. Selon le modèle du bombardement tardif, la Terre aurait subi un bombardement intense autour de - 4 milliards d'années, suivant une période relativement calme après sa formation. Toutefois, quel que soit le scénario privilégié, ces bombardements auront probablement apporté des quantités importantes de matériaux extraterrestres sur notre planète. Ainsi météorites, micrométéorites, et comètes ont pu contribuer à initier la chimie prébiotique.

1.1.2.2.1. *Météorites, micrométéorites et comètes*

Plus de 500 molécules ont été identifiées dans la météorite de type chondrite carbonée, dite « de Murchison ». Parmi ces molécules, plus de 80 acides aminés ont été identifiés, dont huit sont des constituants des protéines ainsi que des bases nucléiques intervenant dans l'ADN et l'ARN. L'inventaire cométaire est moins bien connu, il comprend, d'une part, de nombreuses petites molécules réactives importantes pour la chimie prébiotique (HCN, H₂CO, CH₃CN, HNCO, etc.) et des molécules plus complexes comme la formamide (NH₂CHO) et l'éthylène glycol (CH₂OH-CH₂OH). D'autre part, une matière organique réfractaire encore mystérieuse composée des éléments C, H, O, N a été mise en évidence. Elle peut comporter des polymères ou co-polymères des petites molécules précitées et, peut-être, de la matière carbonée "insoluble" analogue à celle des météorites. Une partie de ces molécules pourraient provenir de la riche chimie du milieu interstellaire, où plus de 120 espèces organiques sont recensées. Cependant, les analyses effectuées sur les grains cométaires rapportés sur Terre par la sonde Stardust ont montré que les comètes sont composées d'un mélange de matériau provenant à la fois des régions chaudes et froides de la nébuleuse solaire (Brownlee et al. 2006). Le mélange a été assuré par un brassage vigoureux au sein de la nébuleuse. La survie de matière organique interstellaire au cours de ce processus n'est pas assurée. Déterminer quantitativement la part respective de la chimie du corps parent, de la nébuleuse et du nuage interstellaire initial dans l'origine des molécules organiques des comètes et des astéroïdes carbonés est donc l'un des enjeux majeurs des prochaines années afin de contraindre l'éventuelle lignée interstellaire de la matière organique délivrée sur la Terre primitive par les impacts.

Les comètes et les astéroïdes carbonés se sont formés dans les premiers instants du système solaire. Cependant contrairement aux planètes, du fait de leur petite taille ils ne se sont jamais différenciés et ont probablement conservé intact le matériau qui composait la nébuleuse solaire à l'endroit de leur accréation. On les considère à ce titre comme des "archives"

témoignant des conditions physicochimiques qui régnaient il y a 4,6 milliards d'années. Toutes les observations tendent à montrer une grande diversité et complexité dans leur composition moléculaire, faisant d'eux un terrain d'études exobiologiques de tout premier ordre.

En ce qui concerne les comètes, grâce à **Rosetta**, nous disposerons pour la première fois d'informations directes concernant la composition moléculaire du noyau des comètes. En particulier sur sa composante organique réfractaire qui n'est, à ce jour, connue qu'au travers de simulations de laboratoire, grâce à quelques mesures non spécifiques en spectrométrie de masse directe de grains cométaires, et suite aux analyses des grains collectés par la mission Stardust (Sandford, 2006). Ces analyses ont été effectuées en partie dans des laboratoires français avec le soutien du CNES. Ces différentes approches attestent de la présence de composés de poids moléculaires élevés. Avec Rosetta, nous saurons beaucoup mieux jusqu'où peut aller la complexité de ce matériau réfractaire et **dans quelle mesure les comètes, par l'apport de briques prébiotiques plus ou moins complexes, ont pu contribuer à l'apparition de la vie sur la Terre.**

Pour ce qui concerne les astéroïdes carbonés, la mission **Marco Polo**, proposée dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA, a pour objectif de coupler l'analyse in situ et un retour d'échantillon d'un astéroïde géocroiseur carboné. Cette mission ambitieuse est probablement, parmi celles retenues à ce jour pour Cosmic Vision, celle qui a l'un des plus grand potentiel exobiologique car elle, analysera en outre la composition de ces corps qui ont ensemencé la Terre en matière organique.

De façon générale, il est indispensable de dresser un inventaire exhaustif de la richesse chimique des petits corps, astéroïdes et comètes, des fragments qui en sont issus et qui sont à l'origine des météores, des poussières interplanétaires stratosphériques (SIDP), des météorites et des micrométéorites.

Recommandation #4 : Soutenir les travaux de préparation à l'interprétation des résultats de la mission Rosetta et des autres missions spatiales en projet.

Accompagner la spatialisation d'instruments innovants et performants tels les spectromètres de masse haute résolution.

Encourager le développement d'une facilité de curation et soutenir la réflexion autour de la stratégie d'analyse des échantillons qui seront apportés sur Terre, Marco Polo pouvant servir à préparer le futur retour d'échantillons Martiens.

1.1.2.2. Origine extraterrestre de l'homochiralité biologique

Pour comprendre l'excès d'acides aminés gauche mesuré dans différentes chondrites carbonées, des films solides d'acides aminés sous les deux configurations (D) et (L) ont été irradiés avec un rayonnement synchrotron polarisé circulairement à droite et à gauche. Après photodécomposition d'environ 70 % du matériel de départ, un excès énantiomérique (%D-%L) d'environ 2 % a été observé. Des programmes analogues sont en préparation, au sol (synchrotron Soleil) et dans l'espace (Expose), pour des études plus systématiques de ces processus. Cette approche originale et déjà riche en résultats est à encourager. En parallèle, l'étude de la chiralité et de la possibilité d'homochiralité dans des environnements extraterrestres est une autre approche en fort développement, avec l'opportunité de missions spatiales pouvant embarquer une instrumentation capable d'effectuer des mesures chirales. C'est le cas de Rosetta dont l'instrument Cosac (Rosenbauer et al, 1999 ; Szopa et al, 2003) à bord de son atterrisseur inclut des colonnes de chromatographie en phase gazeuse permettant la séparation d'énantiomères. Cosac devrait ainsi fournir dans cinq ans la première mesure *in situ* de chiralité dans un noyau cométaire. Les prochaines missions d'intérêt exo/astrobiologique vers Mars devraient inclure ce même type d'instrumentation. Toutefois, son utilisation nécessite encore des développements technologiques pour la préparation de

l'échantillon et la dérivation chimique des molécules réfractaires potentiellement présentes, afin de les rendre volatiles et analysables par techniques de GC-MS (*Gas chromatography - Mass spectrometry*) ou équivalentes.

1.1.2.2.3. *Expériences d'exobiologie en orbite*

Depuis le milieu des années 1990, plusieurs expériences d'exposition de matière organique aux conditions de l'espace ont été menées : à l'extérieur de la station MIR, ou bien de capsules automatiques russes Photon. Ces expériences qui étaient principalement consacrées à la mesure de la photostabilité d'acides aminés dans le cadre de l'étude de leur apport sur Terre par les météorites (Boillot et al, 2002), se sont considérablement diversifiées ces dernières années et couvrent désormais différents aspects de l'évolution de la matière organique dans les environnements extraterrestres (météorites, comètes, milieu interstellaire, surface de Mars et atmosphère de Titan). Trois expériences ont récemment eu lieu ou sont en cours : l'expérience UVolution (Sept. 2007) à l'extérieur d'une capsule automatique Photon, et les expériences PROCESS (Février 2008-Aout 2009) et AMINO (2009-2011) placées sur les instruments EXPOSE-E et EXPOSE-R à l'extérieur de la Station Spatiale Internationale. Ces instruments emportent aussi des expériences de scientifiques français incluses dans l'expérience ROSE dirigée par le DLR. En plus de la diversification au niveau des champs d'application décrite ci-dessus, ces trois expériences ont pour la première fois permis d'exposer des échantillons en phase gazeuse (Cottin et al. 2008) (Figure 3). Les résultats de l'expérience UVolution ont montré que les temps de vie photochimique mesurés suite à l'exposition en orbite sont différents des mesures faites en laboratoire avec des lampes simulant le rayonnement solaire dans l'UV lointain. Mais les contraintes liées actuellement à ces expériences embarquées (pas de mesure en continu de l'évolution des échantillons, ni de contrôle de la température, et un temps d'exposition effectif limité malgré de longs séjours en orbite), entachent les mesures d'une grande incertitude.



Figure 3 : Ces cellules fermées (10 mm de diamètre x 10 mm) sont utilisées lors de l'exposition en orbite d'échantillons gazeux. Elles ont été conçues et réalisées avec le financement CNES par la société COMAT Aerospace basée à Toulouse. Elles consistent en deux cylindres d'aluminium vissés l'un dans l'autre. Deux fenêtres en MgF2 ou en quartz sont collées à chacune des extrémités. Ce concept rend possible à la fois la photolyse et l'analyse par spectroscopie au travers de la cellule. Une première génération de cellules a été utilisée pour les expériences UVolution et PROCESS. En 2008, pour l'expérience AMINO, elles ont été remplacées par de nouvelles cellules développées par la société Air Liquide, cellules dont l'étanchéité est compatible avec des durées d'exposition de plusieurs années.

Recommandation #5 : Soutenir les expériences d'irradiation de matériaux organiques pour contribuer à une meilleure compréhension de l'évolution de la matière organique dans des environnements extraterrestres.

De nouveaux outils doivent être étudiés pour améliorer le suivi des expériences d'exposition et les étendre à des échantillons glacés. Ces expériences pourront se dérouler à l'extérieur de la Station Spatiale Internationale ou de sondes automatiques, mais aussi éventuellement, à plus long terme, à la surface de la Lune.

1.2. La chimie des origines de la vie: des processus élémentaires aux mécanismes et structures complexes d'auto-réplication

1.2.1. La piste cellulaire

La cellule est la plus petite unité du vivant contemporain. Elle est constituée de molécules porteuses d'information génétique (les ADN et les ARN) capables de se répliquer, de transmettre cette information à la génération suivante : les **acides nucléiques**. L'autre grande classe de molécules, les **protéines**, assure la plupart des processus métaboliques ainsi que la structure cellulaire et les mouvements intra et extracellulaires. Dans une cellule vivante, l'intérieur est séparé du milieu aqueux extérieur par une membrane constituée par des lipides associés à des protéines. À partir des petites molécules organiques, les chimistes et biochimistes se sont efforcés de reconstituer en laboratoire les trois familles de biopolymères indispensables au fonctionnement de la cellule. Ils ont plus ou moins réussi à reconstituer deux des trois familles de molécules et ont montré que l'eau joue un rôle déterminant de solvant et de réactif chimique. Par exemple, ils ont obtenu la synthèse de mini-protéines dans l'eau sur des surfaces minérales, en présence ou en absence d'activateur chimique exogène (Bertrand et al, 2001 ; Maurel et Orgel, 2000 ; Huber et al, 2003). Par contre, ils n'ont pas encore réussi à reconstituer ARN et ADN, en raison de l'instabilité du sucre ribose (le b-D-ribofuranose) qui forme le squelette de l'ARN (Figure 4). De nombreux travaux sont consacrés aujourd'hui à cette question. Ainsi, S. Benner a obtenu des complexes de ribose et de borate stable en conditions prébiotiques (Ricardo et al, 2004). Considérant que toute forme de vie doit reposer sur un transfert d'information assurant pérennité et hérédité des processus, des systèmes génétiques alternatifs, précurseurs simplifiés de l'ARN, sont également à l'étude (voir plus bas). En résumé, le transfert d'information indispensable au vivant repose sur l'appariement des bases azotées des acides nucléiques. Des bases puriques ont été trouvées en quantité non négligeable dans des météorites (Stocks et Schwartz, 1981) ce qui permet de penser que des éléments, servant de base physico-chimique au transfert d'information, existent dans des objets spatiaux. Il reste maintenant à remonter le temps en s'appuyant sur une molécule clé, l'ARN, qui bien que difficile à obtenir dans des conditions prébiotiques possède toutes les caractéristiques d'une molécule primitive dont tout le monde s'accorde à dire qu'elle a joué un rôle clé au cours des premières étapes du vivant (Orgel, L.E.1986).

1.2.2. Le monde ARN

L'existence d'Acides ribonucléiques (ARN) catalyseurs, appelés ribozymes, capables à la fois de porter une information génétique et d'exercer une activité catalytique laisse envisager l'existence passée d'un monde ARN qui aurait précédé le monde cellulaire à ADN-protéines contemporains (Gilbert, 1986 ; Gesteland et al, 1999). De nombreux éléments structuraux et métaboliques renforcent aujourd'hui cette hypothèse d'un monde ARN précurseur (Joyce, 2002 ; Maurel et Haenni, 2004). La démonstration récente que l'étape clé de la formation de la liaison peptidique au cours de la biosynthèse des protéines est réalisée par l'ARN sans intervention d'enzymes protéiques confirme l'existence probable d'un monde d'ARN ancestral. Grâce à la méthode SELEX (Selection of ligand by exponential enrichment), il est

même possible de mimer l'évolution darwinienne à l'échelle moléculaire et d'étendre considérablement le spectre d'activité catalytique des ARN. Ces derniers auraient pu ainsi jouer le rôle de catalyseurs primitifs au côté de peptides faciles à synthétiser dans des conditions prébiotiques (Meli et al, 2003). Des travaux très innovants proposent que les acides nucléiques actuels aient été précédés par des analogues, des succédanés d'ARN, véritables Systèmes génétiques alternatifs (AGS). Toute une panoplie de molécules plausibles, proches des ARN biologiques, sont aujourd'hui disponibles pour lesquels il faut tester la compatibilité " prébiotique " et leur pertinence dans des conditions interstellaires. Par exemple, les travaux d'Eschenmoser (synthèse de *Threose nucleic acid* (TNA), 2004) et de Ricardo et al (stabilisation du ribose en présence de borate,) constituent de nouvelles pistes très prometteuses.

1.2.3. Les systèmes auto-catalytiques précurseurs de l'ARN

Le monde de l'ARN a constitué vraisemblablement un épisode dans l'histoire naturelle du vivant. Reste maintenant à comprendre la formation prébiotique de l'ARN qui n'a trouvé, à ce jour, aucune explication. Il est raisonnable de penser que l'émergence du monde de l'ARN a été préparée par des systèmes plus simples comme nous l'avons évoqué plus haut. Des petites molécules d'ARN (ou analogues) ont également pu bénéficier de l'appui de cofacteurs catalytiques. Par exemple l'adénine est une molécule prébiotique, (Oro J.; Kimball A.P., , 1961) trouvée dans des météorites, dont on peut aujourd'hui tester l'efficacité en présence d'ARN (Meli et al, 2003). De plus ces systèmes auto-catalytiques peuvent être étudiés dans des conditions de pression et de température compatibles avec l'environnement prébiotique et/ou spatial (Tobé et al, 2005, Vergne et al, 2006).

1.2.4. Auto-organisation moléculaire

La complexité du vivant repose sur une organisation moléculaire qui met en jeu des régulations, des contrôles et des architectures que l'on commence à peine à appréhender à partir de quelques systèmes modèles. Les travaux consacrés à l'étude de l'autoorganisation sont souvent conduits en collaboration avec des physiciens. Ils impliquent des modélisations informatiques qui pourraient fournir des pistes de recherche expérimentale où la compréhension de comportements inconnus observés *in situ*, par exemple au cours de l'exploration spatiale. Enfin, construire une protocellule ou une cellule minimale devient aujourd'hui le but de nombreux laboratoires. Que ce soit par le biais de l'encapsulation des principaux ingrédients du métabolisme dans des vésicules phospholipidiques (Luisi et Walde, 2000 ; Chakrabarti et al, 1994 ; Deamer, 1997), ou par le biais de couplages entre les activités de molécules d'ARN liées à de l'argile et la compartimentation (Hanczyc et al, 2003), les travaux expérimentaux sont de plus en plus nombreux et doivent être encouragés au sein de la communauté exobiologiste. Les formes ancestrales de vie sur Terre ou sur Mars, ou sur tout autre objet planétaire, sont probablement toutes passées par un stade cellulaire.

Recommandation #6 : Veiller avec les autres organismes à favoriser les échanges entre les communautés concernées par les aspects suivants :

Recherche de systèmes autocatalytiques actifs sur des surfaces minérales dans l'eau.

Compréhension des premières brisures de symétrie conduisant à l'homochiralité du vivant.

Identification d'ARN capables d'exercer les actes catalytiques indispensables aux premières voies métaboliques.

1.3. A la recherche d'une vie extraterrestre: bio-signatures et application à la recherche d'une vie ailleurs

1.3.1. Biosignatures et détection de vie

Dans l'exercice précédent de prospective (2004), une série d'argument et de recommandations a été proposée pour établir une « procédure permettant d'identifier sans ambiguïté l'existence de formes de vie actives, endormies ou passées dans des échantillons extraterrestres, à partir d'un ensemble de données chimiques, biochimiques, physiques ou structurales ». Cette procédure devait *in fine* fournir une « boîte à outils » robuste pour la recherche de biosignatures et transposable à tous les types de mission : retour d'échantillons, envoi de sondes automatiques, missions habitées.

Or, depuis 2002, les orbiteurs (Mars Odyssey, Mars Express, MRO), les atterrisseurs (Phoenix) et les rovers (Spirit et Opportunity) nous ont fourni une moisson de données riches et variées sur la géomorphologie et la minéralogie des sols martiens dont l'impact sur la recherche de « biosignatures » n'est pas négligeable. De plus, les campagnes d'analyse en forage entreprises dans les roches archéennes (Pilbara, Baberton...) ou dans les milieux extrêmes (Vostok) améliorent et précisent les critères de reconnaissance de micro-fossiles ou d'environnements propices au développement du vivant. Enfin en 2006, deux ateliers « biomarqueurs et biosignatures » du GDR d'Exobiologie avec le soutien du CNES (Dourdan et Arcachon 2006) ont réuni une communauté pluridisciplinaire de chercheurs autour de la question : « si l'on organise une mission vers un objet du système solaire, quels « indices » de vie présente ou passée doit-on rechercher ? »

Ces nouveaux éléments conduisent à reformuler les recommandations précédentes.

1.3.2. Biosignatures versus bio-indices (indice d'origine biologique)

Aujourd'hui, pour une grande partie de la communauté scientifique, le caractère univoque et implicite de signature paraît être un cadre trop contraignant pour la détection de la vie, *a fortiori* lorsque celle-ci est extra-terrestre. Par définition, toute signature est une trace discernable, unique, infalsifiable et produit par un processus identifiable. Une biosignature est donc l'expression singulière d'un processus biologique (achevé ou non) parfaitement déterminé, connu ou au moins reconnaissable. Or, c'est bien le principe même de reconnaissance (qui se réfère à une connaissance précise) qui pose problème. Même si aujourd'hui nous disposons d'outils extrêmement puissants et de théories, les concepts et hypothèses formulés pour reconnaître le vivant demeurent faillibles et surtout teintés de géocentrisme. En quoi un amas organisé de structures minérales ovoïdes micrométriques riches en carbone, pourrait-il constituer une biosignature, une preuve indiscutable d'une vie microbienne passée ou extra-terrestre?

Pour la communauté française d'exobiologie, il est acquis que l'emploi du terme « indice de vie » ou « bio-indices » doit être préféré à celui de biosignatures (Conclusion des ateliers « biomarqueurs-biosignatures », 2006). La preuve sera obtenue à partir d'une approche multidisciplinaire et une procédure d'expertise multivariée des indices collectés et, non comme pour une biosignature, à partir d'un protocole analytique prédéfini par un groupe d'expert mono-disciplinaire. Aujourd'hui, seuls certains marqueurs lipidiques (hopanes) issus de la dégradation chimique et thermique de composés spécifiques des parois (Brocks et al, 1999, Summons et al, 1999) peuvent être considéré comme des biosignatures *sensu stricto*.

Le schème procédural de collecte de bio-indices est beaucoup moins contraignant et permet par la suite une indexation probabiliste du caractère biogène de tel ou tel indice. En d'autres termes, dans le cadre de la recherche de trace de vie, l'exobiologie doit plus s'appuyer sur une

procédure de collecte et d'identification d'indices que sur une procédure de recherche et de reconnaissance de signature du vivant.

Par conséquent, cette procédure, si elle est mise en œuvre, doit s'appuyer sur une « boîte à outils polyvalente » afin de favoriser la collecte d'un grand nombre d'indices.

1.3.3. Les bio-indices probables

Même si la recherche de traces de vie extra-terrestre doit inclure toutes les formes de vie sans *a priori*, les indices les plus pertinents concerneront :

- i) des formes cellulaires assez élémentaires, micrométriques dont les structures constitutives sont discernables (i.e paroi, septum ...) ; La détection d'organismes plus sophistiqués est sans doute plus aisée mais moins probable.
- ii) des échantillons riches en matières organiques complexes et élaborées (polymères azotés, carbonés ou soufrés)
- iii) des dépôts ou des réservoirs géologiques, signes indirects d'activité biologique (encroûtement minéraux et organiques, poches de liquides ou de gaz).

Si d'un point de vue purement formel, on pourrait distinguer trois catégories d'indices (structuraux, chimiques et biochimiques) et leur degré d'association avec la trace de vie présumée (interne, externe, proximal ou encore distal), leur validation exige aujourd'hui une approche multidisciplinaire. Ainsi, avant de qualifier l'origine biologique d'une microstructure au sein d'une roche indurée, il semble indispensable de valider son caractère endo- et syn-gène vis-à-vis de la formation géologique ou de la roche encaissante (contemporanéité).

La démonstration de l'origine biologique pourra s'appuyer ensuite sur la complémentarité des indices :

morphologiques, qualifiant des microstructures « cellulaires » plus ou moins préservées. Ils sont nécessairement très variables en fonction du type d'organismes recherchés et des morphotypes rencontrés (individu isolé, en colonie, en biofilm...), des roches (cherts siliceux, dépôts carbonatés...) et des processus taphonomiques (Schopf et Walter, 1983 ; Buick, 1990 ; Hofmann, 1994, 2004; Westall et al. 1999, 2000, Javaux et al. 2001, Westall and Folk, 2003; Brasier et al, 2005; Schopf, 2006; Sugitani et al, 2007; Botta et al, 2008). On peut y inclure aussi des structures minérales particulières possédant une cristallographie atypique (habitus, symétrie, stoechiométrie, i.e quasi-cristaux de magnétite)

chimiques, qualifiant la nature et l'origine de matières organiques ou minérales atypiques (polymères, minéralisation endo-cellulaire ou extracellulaire) carbonates, silices, sulfures/sulfates, oxydes de fer ...). Les minéraux stables et les MO insolubles et réfractaires sont de bons indices (Fortin et al. 1998, Benzerara et al ; 2006, Derenne,).

Isotopiques, qualifiant des transformations biocatalysées, des métabolismes ou le fonctionnement d'écosystèmes (microbiens) anciens en lien avec l'évolution de la composition chimique et isotopique de l'atmosphère primitive (Hayes et al, 1983 ; Schidlowski, 1988 ; Beaumont et Robert, 1999 ; Shen et al, 2001, Brantley et al, 2001, Philippot et al. 2007). Tout enrichissement significatif en isotopes légers d'éléments assimilables (^{12}C , ^{14}N ou ^{32}S par exemple) ou en isotopes lourds d'éléments essentiels (Fe, Mg, Mn) est un bon indice. Malheureusement, toutes les tentatives pour définir des biosignatures isotopiques ont échouées jusqu'à présents.

biochimiques et énergétiques, qualifiant des entités moléculaires ou des activités spécifiques au niveau de l'écosystème ou de la cellule. Ces indices comprennent la production de gaz

(oxygène, méthane), de pigmentations particulières (fluorescence), de dégagements de chaleur, de réactions redox ou d'activités catalytiques non conformes en termes d'intensité et de qualité aux prédictions de codes chimiques, de macromolécules à haute spécificité type ARN (réplication, reconnaissance),

1.3.4. Les limites

La distinction entre inerte et vivant (organique) semble *a priori* évidente lorsque des structures cristallines, organiques ou cellulaires sont reconnaissables à l'échelle du dépôt. En revanche, si l'échelle d'observation et d'analyse diminue, la frontière entre les deux mondes devient plus floue, les processus taphonomiques (fossilisation et diagenèse *post mortem*) estompant progressivement les structures vivantes originelles, limitant leur identification des structures passées [Brasier et al, 2002, Javaux]. De plus, on connaît des processus abiotiques, générant des structures des structures minérales (-Si-O-Si-, -SO₄, -CO₃..) ou organo-minérales complexes biomorphes qui miment la scissiparité cellulaire, les ornements pariétales de microfossiles ou les circonvolutions des stromatolites [Grotzinger and Rothman 1996, Cartwright et al. 2002, Garcia-Ruiz et al. 2003, Hyde et al. 2004, Livage 2009]. De même, pour les indices organiques, le métamorphisme ou la circulation de fluides hydrothermaux peuvent former des polymères de type kérogène. [Brasier et al. 2002, Van Zuilen et al. 2002]. Face à toutes ces incertitudes et la possibilité de générer un grand nombre de faux positifs ou négatifs, les procédures d'identification et de collecte d'indices devront impérativement tenir compte des dégradations occasionnées pendant les processus de fossilisation, de diagenèse et de métamorphisme. En l'absence de simulation expérimentale de fossilisation et d'analyse comparative, l'étude des formes de vie présentes ou passées, dans les roches archéennes et les milieux extrêmes, reste une référence indispensable non seulement pour circonscrire les possibilités du vivant, aussi bien au niveau fonctionnel que structural, (Rothschild & Mancinelli, 2001), mais aussi pour étudier les différents stades et condition de fossilisation de formes de vie unicellulaire.

La recherche d'indices chimiques ou structuraux dans des échantillons terrestres fortement transformés, altérés ou âgés doit être intensifiée afin de déterminer les modalités physico-chimiques et géologiques de préservation de l'information originelle. L'analyse des traces de vie et la validation des indices ne pourront pas être menées sans prendre en compte le contexte géologique ou l'histoire planétaire. Les informations géologiques obtenues par les missions récentes d'exploration de Mars (Mars Odyssey, Mars Express, MRO, MER...) qui témoignent d'une histoire martienne sans doute très différente de celle de la Terre, seront très précieuses pour contraindre les procédures d'identification, notamment dans le contexte géologique martien noachien.

1.3.5. Où prospecter?

La stratégie de prospection généralement retenue est de considérer comme cibles privilégiées pour la recherche de trace de vie passée ou présente, des roches consolidées, formées en condition aqueuse et contenant éventuellement de la matière organique. Cette approche est surtout justifiée par (i) l'existence de nombreuses techniques d'analyse organique, très sensibles et surtout spatialisables (i.e GC-MS) et (ii) le concept d'une chimie prébiotique « on the rocks » (Bernal 1953) impliquant une participation active du support minéral à la stabilisation, l'édification et l'évolution de systèmes moléculaires complexes.

On peut aussi orienter la prospection vers des roches indurées et/ou hydratées susceptibles de protéger et de stabiliser efficacement des molécules organiques ou des structures biologiques ou de fournir épisodiquement de l'eau liquide (gypse, argiles gonflantes de type smectite...). En particulier, sur Mars, les affleurements limitant la diffusion des oxydants puissants (H₂O₂) produits par le rayonnement solaire dans l'atmosphère ou par des processus photochimiques

au niveau du sol doivent être considérées avec attention. Les roches dépourvues de M.O ne sont pas pour autant de mauvaises candidates pour la recherche de trace de vie.

Toutefois, seules les sondes Viking I et II ont jusqu'à présent exploré la surface de Mars en y recherchant des traces de vie et de matière organique dans des sols peu consolidés et sur quelques centimètre). La confirmation ou l'infirmité de la présence de composés organiques à la surface et dans le sol martiens sont toujours tributaires du succès des missions MSL et ExoMars. Le choix des sites d'atterrissage et des zones de prospection sera crucial et devra maximiser les possibilités de découvrir des bio-indices sans pour autant mettre en danger le succès des missions.

1.3.6. La « boîte à outils » polyvalente .

Il faut qu'elle réponde efficacement à une approche très largement multidisciplinaire. En effet, la synergie entre la détection d'indices morphologiques et moléculaires et les analyses minéralogiques, géochimiques et isotopiques à différentes échelles des échantillons collectés est l'approche idéale pour identifier la présence d'une vie présente ou passée. Les techniques embarquées devront être complémentaires afin de dresser un inventaire étendu d'indices, voire une conduite intelligente des analyses. La longévité exceptionnelle des MER A&B (Spirit et Opportunity) suggère aussi de concevoir, si possible, des instruments non restreint en potentiel d'analyse (par exemple, sans recours à des consommables à usage unique) et de disposer d'orbiteurs relais opérationnels .

La boîte à outils pourra être construite autour de deux groupes d'instruments :

i) un premier groupe assez restreint (GR1) d'instruments dits robustes, embarqués systématiquement et destinés à l'acquisition de données récurrentes nécessaires à la constitution de base de données.

ii) un second groupe plus étoffé (GR2) constitués d'instruments innovants à risques explorant de nouvelles hypothèses, mais présentant un certain degré de redondance avec les instruments du GR1. Un instrument du GR2 pouvant à terme remplacer un instrument du GR1 sans remettre en cause les données acquises

On ne peut qu'encourager le développement de techniques innovantes et préparer leur adaptation à une utilisation dans une mission spatiale, pour la recherche d'indices de vie, mais ne peuvent être en aucun cas totalement indépendante des techniques physiques et chimiques développées pour caractériser des échantillons minéraux de sol ou des corps planétaires. Compte tenu des contraintes physiques et chimiques, nécessaire à l'apparition de systèmes biologiques suffisamment organisés (cellules discernables), l'utilisation de techniques d'observation et d'analyse, dont la résolution est micrométrique ou submicrométrique doit être privilégiée. Pour les années à venir, il s'agit de passer d'une démarche cartésienne et nécessairement réductionniste voulant établir la « preuve de vie », à celle plus exploratoire, de la collecte d'indices pour la découverte de formes ou de vestiges de vie.

Recommandation #7: Faciliter la création d'un consortium scientifique pluridisciplinaire pour définir et interpréter les données concernant les indices de vie qui pourraient être recherchés et détectés lors des missions d'exploration ; Contribuer à la définition des sites d'atterrissage appropriés à la collecte d'échantillons pour rechercher ces indices Encourager une approche rationnelle de la sélection des instruments embarqués dans les missions d'exploration. Renforcer la recherche d'indices de vie sur des échantillons terrestres anciens

1.3.7. Les limites de l'habitabilité

Les limites de l'habitabilité sont définies par la présence et la stabilité de certains composés essentiels pour la vie : de l'eau liquide et des molécules assemblant autour du carbone d'autres éléments tels que l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le phosphore et le soufre (C H N O P S). Une source d'énergie, chimique ou photonique, est également importante. Une planète peut être définie comme habitable si elle se trouve dans la zone « habitable » autour du Soleil dans laquelle l'eau liquide est stable à la surface de la planète. Cette définition est, cependant, trop limitante car il y a des situations où des planètes telluriques se trouvent en dehors de cette zone, comme la Terre et Mars il y a 4 milliard d'années. Elles avaient de l'eau liquide en abondance à cause du flux de chaleur provenant du noyau et du manteau. Elles étaient habitables en raison de l'équilibre entre leur situation astronomique et leurs propriétés intrinsèques.

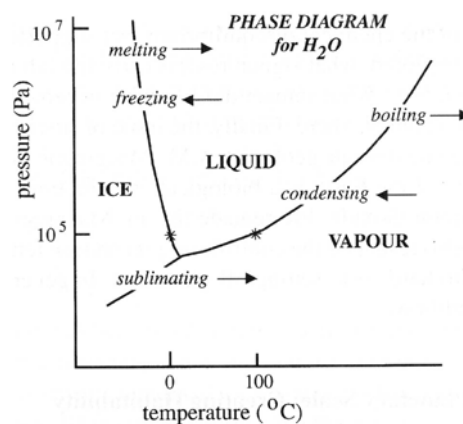


Figure 4 : Diagramme des phases de stabilité de l'eau.

En plus de la présence de composés et sources d'énergie, plusieurs facteurs environnementaux agissent sur les limites de l'habitabilité : la température, la pression (Figure 4), les radiations, la gravité, la présence d'eau, la présence d'une atmosphère, la salinité, le pH, la teneur en oxygène, et les teneurs extrêmes en espèce chimiques (gaz, métaux).

Des microorganismes qui peuvent vivre ou survivre dans des conditions très éloignées de celles acceptables par la plupart des organismes multicellulaires ont été identifiés.

- Température - hyperthermophiles - jusqu'à 113°C
- psychrophiles présentant un métabolisme anabolique jusqu'à - 28°C
- Radiation - radiorésistantes à plusieurs millions de rads
- Pression - piezophiles tolérant jusqu'à 130 MPa de pression
- Gravité - hypergravité (inconnu)
- hypogravité –organismes et microorganismes survivant sans gravité ou avec une faible gravité (microgravité) dans les conditions du vol spatial
- Vide - certains microorganismes peuvent survivre un certain temps dans un vide proche des conditions spatiales
- Dessiccation - xerophiles : vivant dans un milieu extrêmement sec.
- Salinité - halophiles :capables de vivre en présence de concentrations en sel de 2 à 5 molaire en NaCl
- pH - alkalophile (>pH9)
- acidophile (<pH 1)
- Oxygène - anaérobie stricte (O₂ non-toleré) ou facultative
- aérobie (O₂ nécessaire)
- métaux - tolérance aux concentrations élevées de métaux tel que Cu, As, Cd ; Zn, Hg, Pb, Fe etc.

L'étude des limites de la vie est très importante non seulement pour la recherche de vie dans des environnements extrêmes mais aussi pour évaluer la survie d'organismes terrestres dans les conditions extrêmes sur d'autres planètes.. Cet aspect de contamination, qui relève de la protection planétaire est très étudié, notamment pour les missions *destinées à pénétrer* dans les zones d'habitabilité potentielle, par exemple sur Mars (notion de Special region définie par le COSPAR).

Recommandation #8 : Aider au rapprochement des planétologues élaborant des modèles d'environnement planétaire et des biologistes étudiant les microorganismes adaptés aux conditions extrêmes

Poursuivre un programme de microbiologie en relation avec la protection planétaire contribuant à évaluer les risques et les probabilités de contamination des environnements planétaires par des microorganismes d'origine terrestre

1.4. À la recherche d'une vie extraterrestre dans le système solaire

1.4.1. Mars

Les observations faites par les nombreuses missions martiennes Mariner 9, Viking 1 et 2, Mars Pathfinder, Mars Global Surveyor, Odyssey, Mer (Opportunity & Spirit), MRO, Phoenix et Mars Express (Bibring J.P. 2005 ; Bibring J.P, 2006) indiquent clairement que Mars a connu dans sa jeunesse de l'eau à sa surface de manière permanente. La présence permanente d'eau suppose une température plus clémente qu'aujourd'hui, température atteinte probablement grâce à l'existence d'une atmosphère dense générant un effet de serre important. Grâce à cette atmosphère, la planète a pu accumuler des micrométéorites à sa surface, à l'instar de la Terre. En 1976, les deux sondes Viking ne détectèrent ni molécules organiques ni vie à la surface de Mars sur une profondeur de quelques centimètres. En fait, le sol martien semble renfermer des oxydants puissants produits par le rayonnement solaire dans l'atmosphère et/ou par des processus photochimiques et électrochimiques dans la basse atmosphère et au niveau du sol. La présence d'oxydants exclut toute accumulation de molécules organiques à la surface de la planète. On dispose cependant aujourd'hui d'une cinquantaine de météorites ignées qui proviennent très probablement de Mars. Ce sont les météorites SNC, dont la fameuse météorite ALH 84001, supposée renfermer des nanobactéries martiennes fossilisées. Cette affirmation est aujourd'hui battue en brèche. Dans l'expérience Stone, des roches artificielles ont été enchâssés dans le bouclier thermique d'un satellite Photon afin de mimer la pénétration atmosphériques de météorites. Les roches sédimentaires choisies, plus aptes à contenir des fossiles, résistaient-elles à l'entrée atmosphérique ? Une fraction de la dolomie (un carbonate de calcium et de magnésium) résista à l'entrée atmosphérique, suggérant que la Terre pourrait abriter certaines météorites martiennes sédimentaires (Brack et al, 2002) En tout état de cause, certaines des météorites SNC renferment des molécules organiques martiennes. Les ingrédients qui ont permis l'apparition de la vie sur Terre étaient rassemblés sur Mars. Il est dès lors tentant de penser qu'une vie élémentaire de type terrestre ait pu apparaître et se développer sur la planète rouge. Elle pourrait y être encore présente, comme le suggèrent d'ailleurs les détections très récentes d'émission de méthane dans l'atmosphère. La présence passée d'eau étant avérée à la surface de Mars, il est impératif d'y confirmer la présence des molécules organiques et d'y rechercher d'éventuelles traces de vie présente ou passée. La mission *Mars science laboratory* de la Nasa le fera en 2011 tandis que l'Esa prépare ce type d'exploration dans le cadre de la mission ExoMars du programme Aurora prévue pour être lancée en 2016.

Il est important de souligner que cette hypothétique vie martienne, même si elle a pu apparaître par des processus d'évolution chimique similaires à ceux qui ont conduit à la vie sur Terre, pourrait être notablement différente de la vie terrestre actuelle. Elle aurait pu, par exemple, s'arrêter au stade équivalent à celui du monde ARN ou pré-ARN terrestre. Il est donc essentiel de rechercher des traces de vie dans un large éventail d'indices chimiques et morphologiques.

1.4.2. Europe

Europe, satellite de Jupiter, pourrait bien présenter des environnements ressemblant aux sources sous-marines terrestres. Europe est le plus petit des satellites galiléens de Jupiter avec un rayon légèrement inférieur à celui de la Lune. Il orbite à une distance d'environ 600 000 kilomètres de Jupiter, suffisamment près pour être réchauffé par l'effet de marée dû au champ gravitationnel très important de la planète géante. En 1979 et 1980, la mission Voyager avait déjà photographié Europe et montré que sa surface était recouverte par de la glace entaillée de profondes crevasses. Depuis, le vaisseau spatial Galiléo a fourni de très nombreuses images, montrant notamment des blocs de glace ayant pivoté sur eux-mêmes. Le peu de cratères d'impacts, sur la surface suggère un remodelage continu par des phénomènes cryovolcaniques ou tectoniques. Selon l'un des modèles de structure interne proposé, il y aurait un océan d'eau liquide sous quelques kilomètres de banquise (Figures 8-a et 8-b). La chaleur nécessaire au maintien de l'eau à l'état liquide étant apportée par les effets de marée sur le corps solide du satellite. La surface présente également des stries en forme d'arcs, interprétées comme provenant d'un stress dû à des marées océaniques sous-glaciaires. Des dépôts de sels ont été observés à la surface d'Europe par spectroscopie dans le proche infrarouge, dépôts qui pourraient provenir de remontées d'eau océanique salée. Enfin, Galiléo a enregistré un champ magnétique induit dans le champ magnétique de Jupiter traduisant la présence d'un important volume conducteur d'électricité. L'océan d'eau salée pourrait très bien jouer ce rôle de conducteur électrique. Toutes ces observations plaident en faveur de l'existence d'un océan sous-glaciaire d'eau salée. De plus, les modèles de structure interne suggèrent fortement que cet océan reposerait sur un fond rocheux. Il est maintenant important de savoir s'il existe sur Europe un magma capable de transférer la chaleur du cœur planétaire vers le fond océanique pour créer des sources hydrothermales et générer une chimie organique complexe. L'énergie de marée induite par Jupiter est-elle suffisante pour fondre les silicates à des températures supérieures à 1200°C ? La mise en évidence d'un magma sur Europe fait partie des objectifs prioritaires, et d'importance pour l'Exobiologie, de l'exploration de ce satellite. Si Europe a maintenu une activité de marée et une activité hydrothermale sous-glaciaire, une vie fondée sur des microorganismes a pu y apparaître et y est peut-être encore active aujourd'hui. Europe apparaît de plus en plus comme un lieu privilégié du système solaire pouvant héberger de l'eau liquide et des formes de vie en activité.

La mission EJSM pourrait apporter des réponses aux questions d'intérêt exobiologique de Europe. Une cartographie détaillée de l'ensemble du satellite, avec la recherche de possibles émissions gazeuses émanant de sa structure interne pourrait identifier d'éventuels indices de vie gazeux. Toutefois, la disponibilité d'un atterrisseur à la surface du satellite serait bien évidemment un élément essentiel pour la recherche *in situ* d'indices de vie.

1.4.3. Titan

Titan, satellite de Saturne, intéresse l'exobiologie non seulement par ses analogies avec des stades d'évolution qu'aurait pu connaître la Terre et la présence d'une chimie organique active, mais aussi comme un site potentiel pouvant abriter la vie.

La mission Cassini-Huygens a clairement montré l'existence d'un cycle du méthane sur Titan, analogue à celui de l'eau sur la Terre (Lunine et Atreya, 2008). La découverte de lacs dans les

zones polaires et la récente confirmation (Brown et al, 2008) qu'ils sont constitués d'hydrocarbures liquides – principalement méthane et d'éthane - a conduit certains exobiologistes à spéculer sur la présence potentielle de microorganismes dans ce liquide. Leur métabolisme pourrait utiliser la réaction de réduction de l'acétylène en méthane (McKay et Smith, 2005). Si de telles hypothèses sont hautement spéculatives, compte tenu des basses températures de la surface de Titan, en revanche les lacs sont des sites très intéressants pour l'exobiologie (Raulin, 2008b). Ils pourraient contenir une très grande variété de composés, en particulier organiques, à des concentrations très supérieures à celles de l'atmosphère (Tableau 1). Ils constitueraient de véritables réacteurs organiques à étudier de très près.

Tableau 1 : Ordre de grandeur de la concentration de constituants dans les lacs de Titan (concentration en partie par million en volume, sauf autre indication)

Solutés	Concentration (ppm if not %)		Solutés	Concentration (ppm if not %)	
	Lake	Atmosphère		Lake	Atmosphère
Hydrocarbons			Nitriles		
Alkanes			Alkanitriles		
Ethane C ₂ H ₆	65%	10	Methanenitrile HCN	3	s 0.1
Propane C ₃ H ₈	2%	0.5	Ethanenitrile C ₂ H ₅ CN	30	s 0.02
Butane C ₄ H ₁₀	4000		Ethanedinitrile (cyanogen) C ₂ N ₂	0.6	s 1x10 ⁻³
2-Methylpropane (CH ₃) ₃ CH	4000		Propanenitrile C ₂ H ₅ CN	50	s
Pentane C ₅ H ₁₂	400		Butanenitrile C ₃ H ₇ CN	1	
2-Methylbutane (CH ₃) ₂ CC ₂ H ₅	400		2-Methylpropanenitrile (CH ₃) ₂ CHCN	1	s
Dimethylpropane (CH ₃) ₄ C	400		2-Methylbutanenitrile (CH ₃) ₂ CHCH ₂ CN	1	
Hexane C ₆ H ₁₄	40		Alkenenitriles		
2-Methylpentane (CH ₃) ₂ CHC ₃ H ₇	40		Propenenitrile (acrylonitrile) CH ₂ CHCN	10	s
2,2-Dimethylbutane (CH ₃) ₃ C ₃ H ₇	40		2-Butenenitrile CH ₃ CHCHCN	1	s
2,3-Dimethylbutane (CH ₃) ₂ CC(CH ₃) ₂	40		2-Methylpropenenitrile CH ₂ C(CH ₃)CN	1	s
3-Methylhexane C ₂ H ₅ C ₄ (CH ₃)C ₃ H ₇	4		2-Butenenitrile CH ₂ CHCH ₂ CN	1	s
Alkenes, Benzene			Alkyenenitriles		
Ethene (ethylene) C ₂ H ₄	4%	0.4	Propyenenitrile (cyanoacetylene) HC ₃ N	3	s 1x10 ⁻³
Propene C ₃ H ₆	50		2-Butyenenitrile CH ₃ CCCN	2	s
2-Methylpropene CH ₂ C(CH ₃) ₂	5				
1-Butene CH ₂ CHC ₂ H ₅	5		Other compounds		
2-Butene (cis & trans) CH ₃ CHCHCH ₃	5		N-Heterocycles		
1,3-Butadiene CH ₂ CHCHCH ₂	5		Pyrimidine C ₄ H ₄ N ₂	2	?
Benzene C ₆ H ₆	5	s 3x10 ⁻⁴	Adenine C ₅ H ₅ N ₅	0.01	?
Alkynes, Allene			Inorganics		
Ethyne (acetylene) C ₂ H ₂	400	s 2	Carbon dioxide CO ₂	10	s 1.6x10 ⁻³
Propyne (methylacetylene) CH ₃ CCH	30	s 8x10 ⁻³	Carbon monoxide CO	4	s 45
1-Butyne CHCC ₂ H ₅	400	s	Water H ₂ O	2x10 ⁻⁷	s 4x10 ⁻⁴
1,3-Butadiyne (diacetylene) C ₄ H ₂	0.5	s 1x10 ⁻³	Ammonia NH ₃	5	?
Allene CH ₂ CCH ₂	100	s			

En fait, même en se restreignant à la vie telle que nous la connaissons, tous les ingrédients indispensables à son apparition, son maintien et son développement – matière organique, eau liquide et énergie – sont présents sur Titan. D'après les modèles de structure interne (Figure 5) et les données de la mission Cassini-Huygens, il semble de plus en plus probable que Titan possède un océan interne d'eau liquide. Celui-ci contiendrait de l'ordre de 10% d'ammoniac et aurait une épaisseur d'environ 100 km. Il serait situé actuellement entre deux épaisses couches de glace d'eau. Toutefois, les modèles d'évolution du satellite indiquent que pendant les premières dizaines de millions d'années qui ont suivi la formation de Titan, cet océan devait être en contact direct avec l'atmosphère et reposait sur un fond rocheux. Cette situation aurait alors été analogue à celle des océans terrestres, permettant d'envisager la présence de sources hydrothermales sous-marines et des conditions favorables à l'émergence et au développement de la vie. On ne peut donc exclure l'hypothèse que la vie ait pu alors apparaître dans cet océan interne et éventuellement s'y maintenir jusqu'à aujourd'hui.

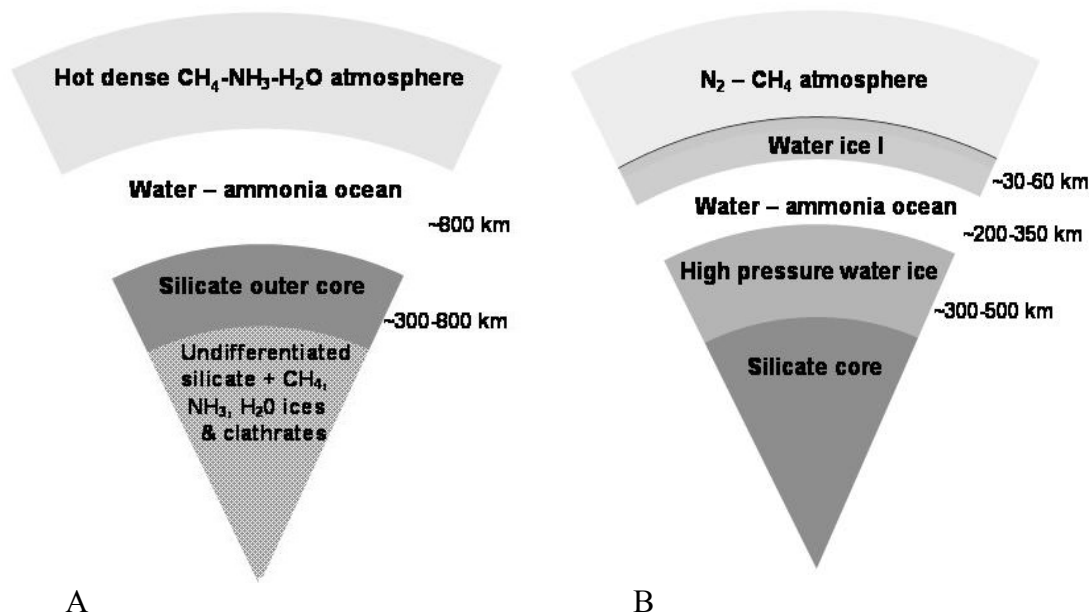


Figure 6 : Modèle de structure interne de Titan : A – initiale, B - actuelle (Fortes, 200)

1.4.4. Encelade

Un des découvertes totalement inattendues de la mission Cassini-Huygens a été l'observation de l'activité géophysique d'un autre satellite de Saturne, Encelade. Plusieurs des instruments de la mission ont mis en évidence la présence de gigantesques panaches, énormes geysers de plusieurs centaines de km, émis par ce satellite, dix fois plus petit que Titan (avec un diamètre de seulement 500 kilomètres). Ils émanent de failles visibles à sa surface, au pôle sud, qui sont d'ailleurs plus chaudes de 10 à 30 °C (Fig. 7) que le reste de la surface environnante.

L'analyse de ces panaches par les instruments de Cassini montre qu'ils sont principalement constitués de glace et de vapeur d'eau, mais contiennent aussi de nombreux composés organiques. Ces geysers pourraient être dus à la présence de réservoirs internes d'eau liquide sous pression, en contact, au moins partiellement, avec un magma rocheux. Les conditions indispensables à l'apparition et au développement de la vie seraient donc présentes dans Encelade. Ceci conduit certains exobiologistes à faire d'Encelade, malgré sa faible taille, une cible exobiologique de choix, susceptible d'abriter la vie.

Le projet commun NASA-ESA de mission d'exploration de Titan et Encelade, TSSM (Titan/Saturn System Mission) propose d'étudier Titan et Encelade de près. Cette très ambitieuse mission serait lancée vers 2020. Elle comprend un vaisseau qui atteindra le système de Saturne 7-9 ans plus tard. L'orbite autour de Saturne étudiera son système et en particulier Encelade, par télédétection et mesures in situ. Le vaisseau sera ensuite mis en orbite autour de Titan. Il larguera une montgolfière dans son atmosphère et plusieurs petits modules d'analyse à sa surface. Ces éléments l'analyseront in situ différents endroits de la surface de Titan. La détermination de la composition chimique de sa surface, et la recherche d'éventuels biomarqueurs pourrait révéler une activité biologique de l'océan interne dont les produits pourraient être transportés en surface par cryo-volcanisme.

Figure 7 : Les panaches d'Encelade sortent des "rayures de tiges" présent à la surface des régions du pôle sud satellite. Ces rayures sont plus chaudes de plusieurs dizaines de °C, comme mis en évidence par les observations de CIRS. Crédit: NASA/JPL/GSFC/Space Science Institute (PIA06433).



Mars tout d'abord, puis Europe, sont les deux objets prioritaires à explorer dans le système solaire pour la recherche d'une vie extraterrestre présente ou passée. Titan, et plus récemment Encelade sont aussi intéressants, avec la présence probable de réservoirs d'eau liquide en sous-surface. Les futures missions vers Mars devront inclure dans leurs objectifs prioritaires recherche des indices de vie. Une large communauté en France est prête à y participer, qu'il s'agisse de missions de l'Esa, de la Nasa ou de missions conjointes. L'exploration avec une instrumentation appropriée d'Europe, de Titan et d'Encelade sont de nouveaux objectifs d'exploration du système solaire d'intérêt majeur pour l'Exobiologie .

Recommandation #9: Encourager dès à présent les équipes scientifiques à préparer les futures missions planétaires d'exploration vers Mars, Europe, Titan et Encelade même si elles apparaissent encore lointaines.

Susciter et soutenir un effort de R&T sur les instruments préparant les analyses in situ et le retour d'échantillons de divers corps du système solaire.

1.5. À la recherche d'une vie extraterrestre en dehors du système solaire

Pour la première fois dans l'histoire, nous avons la perspective d'obtenir un début de *réponse objective* à une question posée depuis l'Antiquité grecque : "Sommes nous seuls dans l'Univers ? ". Au milieu des années 90, le sujet est passé brutalement du domaine de la spéculation à celui de l'observation avec la découverte des premières planètes extrasolaires. Depuis quinze ans, les avancées dans ce domaine se sont succédées à une vitesse soutenue. Nous connaissons aujourd'hui plus de 300 planètes extrasolaires. Pour la plupart, il s'agit de planètes géantes orbitant à proximité de leur étoile, ce qui les situe en dehors de la « zone habitable ». Mais une fraction grandissante de ces planètes présente un intérêt pour l'exobiologie. Déjà, plus d'une dizaine de planète avec une masse inférieure à 10 masses terrestres sont connues, ces planètes sont très probablement des planètes de nature tellurique. Le record de densité a récemment été établi avec Corot-Exo-7b qui pourrait avoir une densité supérieure à 10 g/cm^3 , la situant clairement parmi les planètes telluriques. De plus, nous savons également que parmi les planètes découvertes, certaines pourraient se situer dans la zone habitable. Il n'en reste pas moins que pour chaque cas individuel la réponse à cette question récurrente (« cette planète X se situe-t-elle dans la zone habitable ? ») demande de faire un bilan détaillé en tenant compte de nombreux phénomènes interconnectés qui dépendent des propriétés tant de la planète que de son étoile. Ainsi, la planète orbitant autour de Gliese 581 pourrait être moins favorable qu'il n'y paraît *a priori* ; et, *a contrario*, bien qu'orbitant à 40 UA d'une étoile naine rouge, OGLE-2005-BLG-390Lb pourrait avoir abrité un océan sub-glaciaire pendant plusieurs milliards d'années. Il ressort des observations et des modèles quelles génèrent que la question de l'habitabilité est un champ nouveau d'exploration qui nécessite de faire le lien entre des disciplines différentes comme la planétologie, l'astrophysique et la géophysique.

Après quinze années de découverte et plus de 300 planètes identifiées, nous pouvons désormais faire des statistiques retraçant l'origine et l'évolution des systèmes planétaires. Mais les résultats les plus marquants ne se limitent pas à la « simple » découverte des planètes. Malgré les défis technologiques, **le sondage détaillé de l'atmosphère de deux planètes a déjà été fait**. Celles-ci transitent devant leur étoile rendant possible l'observation du spectre de transmission de l'atmosphère lors des transits primaires, et le spectre d'émission lors des transits secondaires. Les équipes françaises jouent depuis le début de cette aventure un rôle majeur sur toutes les questions relatives aux transits d'exoplanètes : recherche de transit depuis le sol (SOPHIE, HARPS) ou depuis l'espace (COROT), observations spatiales pour obtenir le spectre de l'atmosphère de ces planètes de l'ultraviolet à l'infrarouge (HST, SPITZER), projets futurs (PLATO). Des résultats marquants ont été obtenus par les équipes Françaises tels que l'évaporation des Jupiters-Chauds ou le sondage détaillé de l'atmosphère de HD189733b et HD209458b. Ces observations ont montré la présence d'un grand nombre d'espèces atomiques et moléculaires comme le TiO, le VO, ou le CO (la détection de H₂O dans un spectre de transmission de HD189733b a récemment été infirmée, mais il n'en reste pas moins que H₂O a pu être détecté dans un spectre en émission). La diffusion Rayleigh par la molécule H₂ dans un cas, et par des aérosols dans l'autre cas a été détectée. Les profils verticaux de température, de pression et d'abondance du sodium le long du limbe d'une exoplanète ont même été mesurés.

Ces expériences montrent la richesse des données apportée par l'observation des transits. le soutien au projet PLATO est essentiel pour que cette mission soit effectivement sélectionnée dans le cadre du programme Cosmic Vision. Il est aussi nécessaire de réfléchir aux contours d'une éventuelle mission pour l'étude spectroscopique des planètes qui seront découvertes

dans les prochaines années. Les premiers succès de COROT montrent que l'Europe, et la France en particulier, ont joué un rôle de pionnier sur toutes ces questions.

A plus long terme, les missions de type DARWIN/TPF pourront fournir des informations uniques sur les spectres d'émission des planètes telluriques dans la zone habitable. Les équipes Françaises ont joué un rôle majeur tant dans le développement des technologies de spectro-interférométrie que dans la recherche de la caractérisation des biosignatures. Il apparaît que trois des composés clés pour la recherche de biosignature (CO_2 , H_2O et O_3) ont des bandes actives en infrarouge thermique (6–20 μm). Une mission de type DARWIN d'étude spectroscopique de la lumière de la planète déterminera la présence et l'abondance de ces molécules. Celles-ci ont aussi des signatures dans les domaines UV, visible et proche infrarouge dans lesquels la planète réfléchit de façon sélective la lumière de son étoile. Toutefois, pour avoir l'ensemble des informations nécessaires à l'identifier de biosignatures nécessite des données spectroscopiques sur un très large domaine spectral (0,25 – 2,5 μm) qu'il est difficile de couvrir dans sa totalité.

Recommandation #10: Favoriser la constitution d'équipes pluridisciplinaires travaillant sur le thème de l'habitabilité et des indices de vie.

Poursuivre le soutien au développement de la mission PLATO dans le cadre de la sélection ESA pour le programme Cosmic Vision et organiser une réflexion sur les limites de la spectroscopie de transit sur des planètes de type terrestre.

Soutenir la réflexion sur une future mission spatiale destinée à l'étude spectroscopique des exoplanètes pour la recherche de biosignatures notamment à des missions de type Pégase/Darwin ou TPF.

Etudier la possibilité de participer à des missions d'opportunité d'études des exoplanètes (Simlite et FKSI par exemple)

2. MOYENS SPATIAUX POUR REpondre AUX OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

2.1. Plateformes en orbite terrestre

L'étude de la formation et de l'évolution de la matière organique sous l'influence des radiations solaires dans l'espace interplanétaire, les comètes et leur coma, les atmosphères planétaires ou des satellites, les glaces se fondent sur des expériences qui se développent dans les laboratoires ou pour certaines en exposant des échantillons directement aux radiations solaires. Ces expérimentations qui se déroulent dans l'espace nécessitent l'accès à des plateformes en orbite basse. Le programme EXPOSE qui fait suite aux expériences BIOPAN est en cours de réalisation sur le module européen « Columbus » ainsi que sur le module Russe « Zarya ». Les expériences à venir devront tenir compte de l'évolution de la station spatiale internationale et rendre possible des mesures au cours de l'exposition. Des études de R&T ont commencé sur le projet VITRINE.

Recommandation #11: Poursuivre le soutien aux expériences en laboratoire étudiant la formation et l'évolution de la matière organique et la chimie pré-biotique conduisant à sa formation.

Encourager les scientifiques à répondre aux appels à proposition internationaux pour les expériences d'exposition sur la Station Spatiale Internationale.

Poursuivre les études de R&T sur des projets comme VITRINE et étudier la possibilité de lancer une phase de conception au terme de l'étude entreprise.

2.2. Missions d'exploration planétaire

L'importance de Mars et Europe pour la compréhension de l'apparition de la vie dans le système solaire, déjà soulignée à plusieurs reprises dans ce document, nécessite un véritable programme international d'exploration de ces deux corps.

2.2.1. Mars

Seule la mission Viking a jusqu'à présent exploré la surface de Mars en y recherchant des traces de vie et de matière organique. La mission Européenne Mars Express, les missions Américaines (Mars Exploration Rovers et Mars Reconnaissance Orbiter) nous fournissent actuellement des données inestimables dont beaucoup ont un grand intérêt pour l'Exobiologie. Pour l'Exobiologie, il est à présent essentiel que les prochaines missions vers Mars puissent sélectionner les sites à explorer, adapter le prélèvement des échantillons à la configuration géologique en explorant la sous surface des affleurements rocheux ou éventuellement le sous-sol (forage de quelques centimètres à quelques mètres). Dans ce domaine, les questions de protection planétaire (voir plus loin) sont aussi essentielles (Figure 11). Les contributions aux missions Américaines comme Mars Science Laboratory (2011) ou Russes comme Phobos Grunt (2009) apportent une grande expérience des missions planétaires à la communauté scientifique française de planétologie et d'exobiologie. Le projet Exomars de l'Esa dans le cadre du programme Aurora, malgré ses incertitudes conjoncturelles, est une opportunité essentielle pour l'Europe pour développer un programme d'exploration exobiologique préparant une mission internationale de retour d'échantillons martiens. La réussite de la mission EXOMARS avec une charge utile instrumentale capable d'étudier l'habitabilité de la planète et de chercher des traces de matière organique et en déterminer le cas échéant l'origine biotique est la priorité absolue de la communauté exobiologique française et européenne

2.2.2. Exploration des lunes glacées des planètes géantes

Les discussions entre la NASA et l'ESA ont conduit à la sélection de missions d'exploration des satellites glacés de planètes géantes. Les agences ont considéré que les deux missions proposées d'exploration l'une du système de Jupiter l'autre du système de Saturne étaient d'un grand intérêt scientifique. Les agences ont recommandé dans un premier temps l'étude et la réalisation d'une mission combinée vers le système de Jupiter avec des orbiteurs des satellites Io et Europe ainsi que des satellites Ganymède et Callisto. La contribution Européenne à cette mission sera en compétition avec les autres missions sélectionnées dans le cadre de la première vague de mission de « Cosmic Vision ». Récemment L'institut des sciences spatiales de Russie (IKI) a fait part de son intention d'étudier une mission consistant à faire atterrir une plateforme à la surface d'Europe en liaison avec la mission conjointe de l'ESA et de la NASA. L'IKI a organisé un premier colloque scientifique en Février 2009 et prépare les phases ultérieures d'étude de cette avec une large ouverture à la coopération internationale.

La mission à destination du système de Saturne sera proposée dans le cadre du deuxième appel à proposition du programme « Cosmic Vision ». Les défis technologiques posés par le projet de montgolfière et de stations pour l'étude de la surface doivent, dès maintenant faire l'objet d'un effort de R&T tant pour certains de leurs systèmes que pour leurs instruments éventuels

2.2.3. Comètes, NEO,

Plusieurs projets d'exploration sont en discussion pour ces petits corps du système solaire. L'étude de la nature et de l'évolution de la matière organique dans l'environnement cométaire

et sur le noyau reste une question importante pour l'exobiologie. Les projets de retour sur Terre d'échantillons cométaires devraient conduire à des données essentielles sur la composition chimique et moléculaire du noyau, très complémentaires de celles attendues de la mission Rosetta.

2.3. Observatoires en orbite

La communauté exobiologique française soutient fortement le projet Darwin (ou sa fusion avec TPF), qui recherchera des biosignatures spectrales dans l'atmosphère des exoplanètes de type tellurique. De nombreux exobiologistes français participent à ce projet et certains y jouent un rôle important. Le développement du vol en formation pour appliquer l'interférométrie à grandes distances à l'étude des exoplanètes est donc à soutenir.

2.4. Aspects technologiques

2.4.1. L'instrumentation de mesure in situ :

Dans la perspective des futures missions d'exploration planétaire *in situ* d'intérêt exobiologique, le développement d'instrumentation d'analyse exobiologique couplée à l'instrumentation géologique, chimique et physique, pour l'exploration de corps susceptibles d'avoir abrité la vie, ou même de l'abriter encore aujourd'hui (Mars et Europe), est indispensable. C'est tout particulièrement le cas pour :

- i) mesure de chiralité par séparation et analyse quantitative d'énantiomères : développement de techniques spatialisées de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse avec dérivation chimique, de HPLC et/ou de microélectrophorèse capillaire ;
- ii) analyse moléculaire quantitative de composés organiques complexes ;
- iii) éventuellement instrumentation de microbiologie et de biologie moléculaire.

2.4.2. Les mesures en laboratoire

Dans la perspective de retour d'échantillons extraterrestres (Stardust, Phobos Grunt, futures missions MSR et équivalentes cométaires), il est essentiel de développer des techniques d'analyse chimique, isotopique, moléculaire et chirale adaptées à l'étude de très petits échantillons. Les études déjà effectuées sur les micrométéorites illustrent parfaitement les défis que posent de telles analyses. Les travaux menés dans les laboratoires et des actions ciblées de R&T sont nécessaires pour maintenir la place de la communauté française et européenne dans la compétition internationale.

2.5. La protection planétaire

L'exo/astrobiologie est directement concernée par les problèmes de protection planétaire dans la mesure où il faut impérativement éviter de transférer sur la cible (Mars, Europe, etc.) des micro-organismes terrestres susceptibles d'interférer avec les mesures exobiologiques, produisant ainsi des faux positifs. Ceci est particulièrement important pour toutes les mesures nécessitant une amplification du signal (PCR par exemple), ou une observation ponctuelle (microscopie). La communauté française active dans tous les domaines de l'exploration du système solaire et le CNES se sont déjà impliqués dans les réflexions nationales et internationales au sujet de la protection de Mars et des satellites glacés des planètes géantes. Cette implication est d'autant plus importante qu'en hébergeant à Kourou le port spatial de l'Europe, la France se trouve de facto état de lancement et doit assumer l'ensemble des conséquences qui en découlent. Le CNES avec

l'adoption de la loi spatiale voit ses responsabilités définies. Ceci est également vrai pour les missions de retour d'échantillons sur Terre, le retour de micro-organismes terrestres ayant survécu au voyage aller-retour risquant de faire apparaître de faux positifs lors de l'analyse des échantillons.

Recommandation #12 :

Réussir Exomars 2016 est la priorité absolue pour l'Exobiologie.

Recommandation #13 : Poursuivre la préparation des futures missions d'exploration ou d'observation tant au niveau de la définition des missions que de l'amélioration des instruments.

Commencer en avance de phase le travail sur les instruments des charges utiles afin qu'ils puissent atteindre un niveau de maturité technique de 3 ou 4 lors des réponses aux appels à propositions européens ou internationaux.

Programmation des missions : priorités

Les priorités sont résumées ans le texte et le tableau ci-dessous :

Priorités Absolues (Priorité 0) :

Réussir EXOMARS en 2016 avec une charge utile d'exobiologie est la priorité absolue de l'exobiologie.

Utiliser les facilités actuelles disponibles sur l'ISS pour des expériences d'exposition en orbite basse.

Contribuer au traitement des échantillons de Phobos Grunt.

Assurer la présence d'une charge utile Exobiologique française et européenne sur les éléments de la mission EJSM.

Préparer techniquement et scientifiquement des contributions à la mission de retour d'échantillons martiens et au traitement de ces derniers dans toutes les phases après leur retour sur Terre.

Priorités Essentielles (Priorités 1)

Préparer une participation instrumentale à la mission Marco Polo (Spectromètre de masse) et assurer la réalisation de cette mission avec un atterrisseur dans un cadre international.

Assurer et préparer des participations aux missions de détection des exoplanètes comme PLATO ou des éventuelles missions d'opportunité.

Assurer une participation instrumentale à moyen terme à des missions Européennes (Mars Next ou Mars Origins) ou internationales d'exploration de Mars.

Contribuer à toute mission vers Mars préparant le retour d'échantillon martien.

Activités transverses incontournables

Ces priorités supposent une action continue dans les actions de R&T et dans le soutien aux travaux de simulation, de recherche amont et de traitement des données menés dans les laboratoires. Une activité scientifique soutenant les actions d'expertise et de R&T relatives à la protection planétaire devrait être identifiée.

Priorités pour l'EXOBILOGIE

Type de mission	Projets en développement	CV1	CV2/ Aurora	Micro-satellites	Missions d'opportunité	Instrumentation spécifique (R&T)
	<p>0. ExoMars</p> <p>0. Exposition en orbite basse (ISS et Foton)</p> <p>0. PHOBOS-Grunt</p>	<p>(M)</p> <p>1. Plato</p> <p>1. Marco Polo</p> <p>(L)</p> <p>0. EJSM</p>	<p>(L)</p> <p>0. TSSM</p> <p>(Aurora)</p> <p>0 Mars Sample Return</p> <p>0. Mars-Origins</p> <p>1. Mars-NEXT</p>			<p>Vitrine (ISS)</p> <p>Spectro de masse</p> <p>Mars Origins</p> <p>Ballon Titan</p> <p>Mars Sample Return (incluant la protection planétaire)</p>

Passage en Phase B2/C/D

Passage en Phase B

Etude de Phase A

Etude de Phase 0

R&T, suivi technique

CV1: missions pré-sélectionnées

après l'AO - CV1 (M & L)

CV2/Aurora: missions en attente de soumission à CV2 (M & L) et au programme facultatif Auror

DOCUMENTATION ASSOCIEE FICHES EXOBIOLOGIE

Huit fiches regroupant les principales propositions ont été rédigées. Elles ont été préparées par les membres du groupe de travail mais n'ont pas vraiment donné lieu à une discussion approfondie. Elles regroupent cependant, sans les hiérarchiser, les grandes orientations qui ressortent des réponses à l'appel à idées reçues .

Missions

TSSM

Observatoires pour des Exoplanètes

Mars Origins

Il n'y a pas de fiche sur le retour d'échantillons martiens bien que ce soit une priorité pour l'exobiologie. Cette mission n'est pas actuellement suffisamment définie bien que les enjeux sont parfaitement connus. Ils sont parfaitement résumés dans la fiche élaborée par le groupe de travail du système solaire.

Le retour d'échantillons martien est cependant abondamment traité dans la fiche sur la protection planétaire qui s'intéresse à la préparation du traitement au sol des échantillons tant dans la quarantaine que lors des phases d'identification/caractérisation ou de curation.

Instruments

Analyse de la matière organique

Spectrométrie de masse

Vitrine

Ces fiches regroupent les propositions instrumentales par grandes familles. Certains de ces instruments pourront être candidats sur des missions envisageables dès maintenant. Certains pourront postuler s'ils sont suffisamment avancés sur des missions d'opportunité à venir. Enfin certaines actions se proposent d'améliorer des instruments ou des procédés déjà utilisés dans les missions spatiales. Les niveaux de maturité technique sont très variables et varient de 2 à 4. De nombreuses actions de R&T ont déjà commencé et demandent à être poursuivies.

Actions structurantes pour la communauté

Analogues terrestres

Protection planétaire

Ces deux fiches se proposent de servir de point de départ ou d'accompagnement à des actions menées dans les laboratoires (analogues terrestres) ou coordonnées par le CNES (protection planétaire) pour fédérer les communautés françaises, afin de leur donner plus de poids dans les discussions internationales à venir. Cette structuration est d'autant plus nécessaire que l'imbrication des agences dans les missions est complexe, les arrangements sont variables au cours du temps et la mise en place de ces structures demande du temps et de la stabilité. Ces fiches ont pour objectif de susciter un élan destiné dans tous les cas à s'élargir rapidement à la communauté scientifique Européenne avec le concours de l'ESA et avec le soutien national du CNES.

REFERENCES

- Barker W.W., Welch S.A., Chu S., and Banfield J.F. (1998) Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralogist* **83**, 1551-1563.
- Beaumont V. and Robert F. (1999). Nitrogen isotope ratios of kerogens in Precambrian cherts: a record of the evolution of atmospheric chemistry? *Precambrian Res.* **96**, 63-82.
- Bénilan Y (2004+). Base de données spectroscopique, Programme SCOOP (Spectroscopie de Composés Organiques Oriétés pour la Planétologie, site Web : <http://www.lisa.univ-paris12.fr/GPCOS/SCOOPweb/SCOOP.html>.
- Benzerara K., Menguy N., López-García P., Yoon T.H., Kazmierczak J., Tylliszczak T., Guyot F., Brown, G.E. Jr. (2006). Nanoscale detection of organic signatures in carbonate microbialites. *PNAS*. **103**, 9440-9445.
- Bernard JM, Quirico E, Brissaud O et al (2006) Reflectance spectra and chemical structure of Titan's tholins: Application to the analysis of Cassini–Huygens observations. *Icarus* **185**: 301-307.
- Berthelin J. (1985) Microbial weathering processes in natural environments. In *Physical and chemical weathering in geochemical cycles*, Vol. **251** (ed. A. Lerman and M. Meybeck). Kluwer Academic Publishers.
- Bertrand M., Buré C., Fleury F. et Brack A. (2001). Prebiotic polymerisation of amino acid thioesters on mineral surfaces, in *Geochemistry and the Origin of Life*, Eds. S. Nakashima, S. Maruyama, A. Brack & B.F. Windley, Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japon 51-60.
- Bibring J.P., Langevin Y., Gendrin A., Gondet B., Poulet F., Berthé M., Soufflot A., Arvidson R., Mangold N., Mustard J., Drossart P. and the OMEGA team. (2005). Mars Surface Diversity as Revealed by the OMEGA/MarsExpress Observations. *Science* **307**
- Bibring J.P., Langevin Y., Mustard J.-F., Poulet F., Arvidson R., Gendrin A., Gondet B., Mangold N., Pinet P., Forget F. and the OMEGA team. (2006). Sources Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA / Mars Express Data. *Science* **312** : 400-403.
- Boillot F., Chabin A., Buré C., Venet M., Belsky A., F-Urbaniak M., Delmas A., Brack A. et Barbier B. (2002). The Perseus exobiology mission on MIR: behaviour of amino acids and peptides in Earth orbit, *Origins Life Evol. Biosphere* **32**, 359-385.
- Brack A., Baglioni P., Borruat G., Brandstätter F., Demets R., Edwards H.G.M., Genge M., Kurat G., Miller M.F., Newton E.M., Pillinger C.T., Roten C.-A. et Wäsch E. (2002). Do meteoroids of sedimentary origin survive terrestrial atmospheric entry? The ESA artificial meteorite experiment "STONE", *Planet. Space Science* **50**, 763-772.
- Brantley S.L., Liermann L., and Bullen T.D. (2001) Fractionation of Fe isotopes by soil microbes and organic acids. *Geology* **29**, 535-538.
- Brasier M.D., Green O.R., Jephcoat A.P., Klepepe A.K., van Kranendonk M., Lindsay J.F., Steele A., Grassineau N. (2002). Questioning the evidence for Earth's oldest fossils. *Nature* **416**, 76-81.
- Brocks J.J., Logan G.A., Buick R., Summons R.E. (1999). Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science* **285**; 1033-1036.
- Brown R.H., Soderblom L.A., Soderblom J.M., Clark R.N., Jaumann R., Barnes J.W., Sotin C., Buratti B., Baines K.H. and Nicholson P.D. (2008). The identification of liquid ethane in Titan's Ontario Lacus. *Nature* **454**, 607-610.
- Buick R. (1990): Microfossil recognition in Archean rocks: an appraisal of spheroids and filaments from a 3500 m.y. old chert-barite unit at North Pole, Western Australia. *Palaaios* **5**, 441-459.
- Cartwright J.H.E., Garcia-Ruiz J.M., Novella M.L., Otorola F. (2002) Formation of chemical Gardens, *J. Colloid Interface Sci.* **256** : 351-62.
- Chakrabarti A.C., Breaker R., Joyce G.F. and Deamer D.W. (1994). Production of RNA by a polymerase encapsulated within lipid vesicles. *J. Mol. Evol.* **39**:555-559.
- Coll P., Bernard J.M., Navarro-Gonzalez R. et Raulin F. (2003). Oxirane: An exotic oxygenated organic compound in Titan? *Astrophys. J.* **598**, 700-703.
- Deamer D.W. (1997). The first living systems: A bioenergetic perspective. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* **61**, 239 – 262.
- Despois, D. and Cottin, H. (2004 in press). Comets: Potential Sources of Prebiotic Molecules for the Early Earth. in *Lectures in Astrobiology vol I*, eds. M.Gargaud, B.Barbier, H.Martin and J.Reisse, Springer.

- De Duve C. (1998). Possible starts for primitive life. Clues from present-day biology: the thioester world. In *The molecular origins of life: assembling pieces of the puzzle*, ed. Brack A., pp. 219-236, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ehrlich H.L. (1998) Geomicrobiology: its significance for geology. *Earth-Science Reviews* **45**, 45-60.
- Eschenmoser, A. (2004). The TNA-family of Nucleic Acid Systems : Properties and Prospects. *Origins of Life Evol. Biosphere* **34**, (3), 307-321.
- Fisk M.R, Giovannoni S.J, Thorseth I.H. (1998). Alteration of oceanic volcanic glass: textural evidence of microbial activity. *Science* **281**, 978-980.
- Fortin D., Ferris F. G. and Scott S. D. (1998). Formation of Fe-silicates and Fe-oxides on bacterial surfaces in samples collected near hydrothermal vents on the Southern Explorer Ridge in the northeast Pacific Ocean. *American Mineralogist* **83**: 1399-1408.
- Garcia-Ruiz J.M., Hyde S.T., Carnerup A.M., Van Kranendonk M.J., Welham, N.J. (2003). Self-assembled silica-carbonate structures and detection of ancient microfossils, *Science* **302** :1194-1197.
- Gilbert W. (1986). The RNA world, *Nature* **319**, 618.
- Gesteland R.F., Cech T.R. and Atkins J.F.(1999).*The RNA world*, second edition. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, New York.
- Grotzinger J.P., Rothman D.H.. (1996). An abiotic model for stromatolite morphogenesis, *Nature* **383** : 423-425.
- Hanczyc M.M., Fujikawa S.M. and Szostak J.W. (2003). Experimental models of primitive cellular compartments. *Science* **302** , 618-622.
- Hayes J.M., Kaplan I.R., Wedeking K.W. (1983). Precambrian organic chemistry, preservation of the record. In: *Earth's earliest biosphere* ed. J.W. Schopf, p. 93-134, Princeton Univ. Press.
- Holm N.G.and Charlou J.-L.(2001). Initial indication of abiotic formation of hydrocarbons in the Rainbow ultramafic hydrothermal system, Mid-Atlantic ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.* **191**, 1-8.
- Hyde S.T., Carnerup A.M., Larsson A.K., Christy A.G., Garcia-Ruiz J.M., (2004). Self-assembly of carbonate-silica colloids : between living and non-living form, *Physica A* **339** : 24-33
- Israël G, Szopa C, Raulin F et al. (2005) Evidence for the presence of complex organic matter in Titan's aerosols by in situ analysis. *Nature* 438: 796-799.
- Javaux, E.J., Knoll, A.H. and Walter, M.R. (2001) Morphological and ecological complexity complexity in early eukaryotic ecosystems. *Nature* **412**, 66-69.
- Joyce G. (2002). The antiquity of RNA-based evolution. *Nature* **418**, 214- 221.
- Kalinowski B.E., Liermann L.J., Givens S., and Brantley S.L. (2000). Rates of bacteria-promoted solubilization of Fe from minerals: a review of problems and approaches. *Chemical Geology* **169**, 357-370.
- Lunine J.I. and Atreya S.K. (2008).The methane cycle on Titan. *Nature Geoscience* **1**, 159-164.
- Luisi L. and Walde P. (2000). *Giant vesicles*, John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Marion, P., Mustin, C., Monroy, M., and Berthelin, J. (1991). Effect of auriferous sulfide minerals structure and composition on their bacterial weathering. In : Pagel M. and Leroy J. (Editors), *Source, Transport and Deposition of Metals*. Balkema, Rotterdam. p 561-564 .
- Maurel M-C. and Haenni A.L (2004). The RNA world : Hypotheses, facts and experimental results. In *Lectures in Astrobiology*, Editors : Barbier B., Gargaud M., Martin H., and Reisse J. Springer-Verlag, in press.
- Maurel M-C. and Orgel L.E. (2000). Oligomerization of thioglutamic acid. *Origins of Life Evol. Biosphere* **30**, 423-430.
- McKay CP and Smith HD (2005) Possibilities for methanogenic life in liquid methane on the surface of Titan. *Icarus* **178**: 274-276.
- Meli M., Vergne J. and Maurel M-C. (2003). In vitro selection of adenine-dependent hairpin ribozymes, *J. Biol. Chem.* **278**, 11, 9835-9842.
- Munoz Caro G.M., Meierhenrich U.J., Schutte W.A., Brabier B., Argones Segovia A., Rosenbauer H., Thiemann W.H.-P., Brack A., Greenberg J.M. (2002). Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues, *Nature* **416**, 403-405.

- Mustin C., Berthelin J., Marion P. and de Donato P. (1992). Corrosion and electrochemical oxidation of a pyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Appl. Env. Microbiol.* **58**, 1175-1182.
- Nguyen MJ (2007) *PhD thesis*, University Paris 12, December 2007
- Nguyen MJ, Raulin F, Coll P et al (2007) Carbon isotopic enrichment in Titan's tholins? Implications for Titan's aerosols. *Planet Space Sci* **55**: 2010–2014.
- Niemann HB, Atreya SK, Bauer SJ et al (2005) The abundances of constituents of Titans' atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature* **438**:779-784.
- Owen T. (1980). in *Strategy for the Search for Life in the Universe*, ed. Papagiannis M. D., Reidel, p 177-185.
- Quirico E., Montagnac G., Lees V., Mcmillan P.F., Szopa C., Cernogora G., Rouzaud J-N., Simon P., Bernard J-M., Coll P., Fray N., Minard R.D., Raulin F., Reynard B. and Schmitt B. (2008). New experimental constraints on the composition and structure of tholins. *Icarus* **198**, 218–231.
- Philippot P., van Zuilen M., Lepot K., Thomazo C., Farquhar J., van Kranendonk M., (2007). Early Archean microorganisms preferred elemental sulfur, not sulfate, *Science* **317** :1534-1535.
- Raulin F. et Owen T. (2002). Organic chemistry and exobiology on Titan *Space Science Review* **104** (1-2), 379-395.
- Raulin F. (2007). Question 2 : Why an astrobiological study of Titan will help us understand the origin of Life. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* **37**, 345-349..
- Raulin F (2008a) Astrobiology and habitability of Titan. *Space Sci. Rev.* 135 (1-4): 37-48.
- Raulin F (2008b) Planetary sciences. Organic lakes on Titan. *Nature* **454**: 587-589.
- Ricardo A., Carrigan M. A., Olcott A. N. and Benner S. A. (2004). Borate mineral stabilize Ribose. *Science* **303**, 196.
- Rosenbauer H., Fuselier S. A., Chielmetti A., Greenberg J. M., Goesman F., Ulamec S., Israel G., Livi S., Mcdermott J.A., Matsuo T., Pillinger C.T., Raulin F., Roll R. and Thiemann W. (1999). The COSAC experiment on the lander of the Rosetta mission. *Adv. Space Res.* **23** (2), 333-340.
- Rothschild L.J. & Mancinelli R.L. (2001). Life in extreme environments. *Nature* **409**, 1092-1101.
- Schidlowski, M. (1988). A 3800 million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. *Nature* **333**, 313-318.
- Schopf J.W., Walter M.R. (1983). Archean microfossils: new evidence of ancient microbes, in *Earth's earliest biosphere*, ed. J.W. Schopf, p.214-239, Princeton Univ. Press, Princeton.
- Selsis F., Despois D. and Parisot J.-P. (2002). Signature of life on extrasolar planets : can Darwin produce false positive detection ? *A & A* **388**, 985-1003.
- Selsis F., Léger A. et Ollivier M. (2004). Signatures spectroscopiques de vie sur les exoplanètes. Les missions Darwin et TPF. In *Les Traces du vivant*, ed. Gargaud A., pp. 343-369, Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux..
- Shen Y., Buick R., Canfield D.E., (2001). Isotopic evidence for microbial sulphate reduction in the early Archean era. *Nature* **410**, 77-81.
- Summons R.E., Jahnke L.L., Hope J.M., Logan J.H. (1999). 2-Methylhopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis. *Nature* **400**, 554-7.
- Szopa C., Sternberg R., Raulin F. and Rosenbauer H. (2003). What can we expect from the in situ chemical investigation of the 46/P Wirtanen cometary nucleus by gas chromatography: first results from laboratory studies. *Planet. Space Sci.* **51**, 863-877.
- Tomasko MG, Archinal B, Becker T, Bézard B et al. (2005) Rain, winds and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface. *Nature* **438**: 765-778.
- Van Zuilen M.A., Lepland A., Arrhenius G. (2002). Reassessing the evidence for the earliest traces of life, *Nature* **418** : 627-630.
- Wächtershäuser G. (1994). Life in a ligand sphere, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **91**, 4283-4287.

Waite Jr H, Niemann H, Yelle RV, Kasprzak WT et al. (2005), Ion Neutral Mass Spectrometer Results from the First Flyby of Titan. *Science* **308**: 982-986.

Waite Jr JH, Young DT, Cravens TE et al. (2007) The process of tholin formation in Titan's upper atmosphere. *Science* **316**: 870-875.

Westall F., 1999. The nature of fossil bacteria. *J. Geophys. Res.* **104**, 16,437-16,451.

Westall F. and Drake F. (2004). Is life an unavoidable planetary phenomenon given the right conditions. In Earth System Analysis for sustainability, W.C. Clark, P.J. Crutzen and H.-J Schellnhuber (Eds.), Dahlem Konferenzen, Berlin, in press.

Westall F., Steele A., Toporski J. Walsh M., Allen C., Guidry S., Gibson E., Mckay D., Chafetz H., (2000). Polymeric substances and biofilms as biomarkers in terrestrial materials: Implications for extraterrestrial samples. *J. Geophys. Res. Planets* **105**:24,511-24,527.

Westall F., Orberger B., Rouchon V., Rouzaud J.-N., Wright I. (2004). On the identification of Early Archaean microfossils in *Cherts from Barberton and the Pilbara*. Barberton Field Forum, Univ. Witwatersrand, in press.