

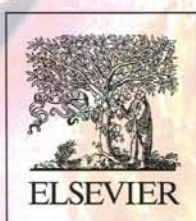
COMPTES RENDUS

Tome 8
fascicule 7

octobre / novembre 2009

ISSN 1631-0683

PALEVOL



Numéro thématique / *Thematic issue* :

Traces de vie présente ou passée : quels indices, signatures ou marqueurs?

Traces of past or present life: biosignatures and potential life indicators?

Rédacteurs invités / *Guest Editors*: Muriel Gargaud,
Christian Mustin, Jacques Reisse

ACADÉMIE DES SCIENCES — PARIS

COMPTES RENDUS PALEVOL

ACADÉMIE DES SCIENCES, PARIS

2009 — Tome 8 — N° 7

Numéro thématique / *Thematic issue:*

Traces de vie présente ou passée : quels indices, signatures ou marqueurs ?

Traces of past or present life: biosignatures and potential life indicators?

Rédacteurs invités / *Guest Editors:* Muriel Gargaud, Christian Mustin, Jacques Reisse

- | | | | |
|--|-----|---|-----|
| • Avant-propos / Foreword
Muriel Gargaud, Christian Mustin, Jacques Reisse | 593 | • Early traces of life investigations in drilling Archean hydrothermal and sedimentary rocks of the Pilbara Craton, Western Australia and Barberton Greenstone Belt, South Africa
Pascal Philippot, Martin Van Kranendonk,
Mark Van Zuilen, Kevin Lepot, Nicolas Rividi,
Yoram Teitler, Christophe Thomazo,
Marie-Madeleine Blanc-Valleron, Jean-Marie Rouchy,
Eugene Grosch, Maarten de Wit | 649 |
| • Microfossils
Emmanuelle J. Javaux, Karim Benzerara | 605 | • Biological activity and the Earth's surface evolution: Insights from carbon, sulfur, nitrogen and iron stable isotopes in the rock record
Christophe Thomazo, Daniele L. Pinti, Vincent Busigny,
Magali Ader, Ko Hashizume, Pascal Philippot. | 665 |
| • Looking for traces of life in minerals
Karim Benzerara, Nicolas Menguy | 617 | • Characterizing habitable extrasolar planets using spectral fingerprints
Lisa Kaltenegger, Franck Selsis | 679 |
| • Chemical synthesis of biomimetic forms
Jacques Livage | 629 | | |
| • Validation of astrobiology technologies and instrument operations in terrestrial analogue environments
Richard Léveillé | 637 | | |



Traces de vie présente ou passée : quels indices, signatures ou marqueurs ?

Traces of past or present life: Bio-signatures and potential life indicators?

Avant-propos

Bio-signatures et bio-indices : comment déceler des indices d'une vie présente ou passée ?

Toutes les sciences historiques sont dépendantes d'archives. Ce qui est vrai en histoire humaine l'est aussi pour l'histoire de la Vie. Dans le domaine de l'histoire humaine, nous savons ce que sont des archives : ce sont des manuscrits, des peintures, des constructions, des objets façonnés, des sculptures. Lorsque l'on s'intéresse à des périodes plus reculées dans le temps, la situation se complique. Une pierre soigneusement polie de forme symétrique est sans aucun doute une archive, mais qu'en est-il d'une pierre présentant des fractures pouvant avoir été faites par l'homme, mais pouvant tout aussi bien résulter de processus naturels d'érosion. Dans une telle situation, les anthropologues parviennent parfois à un consensus mais dans bien des cas, la question demeure sans solution. Même lorsqu'un accord se dégage sur le fait qu'il s'agit bien d'une pierre taillée, la détermination de l'époque durant laquelle la taille a été effectuée demeure une tâche ardue. Cette détermination repose le plus souvent sur des données obtenues non sur l'objet lui-même, mais plutôt sur l'environnement dans lequel il a été découvert.

Les scientifiques qui sont à la recherche de traces de vie doivent affronter les mêmes questions, en identifiant d'abord les pièces d'un puzzle et en tentant ensuite de rassembler les éléments en un tout cohérent. Il n'est pas nécessaire d'être paléontologue, pour reconnaître qu'un os de dinosaure pétrifié est un fossile mais comment être

Foreword

An introduction to bio-signatures and bio-indices: how to detect signs of extant and extinct life?

Historical sciences are based on archives. What is true for human history is also true for the history of life. In human history, archives are easily identified; they are manuscripts, paintings, buildings, sculptures, artefacts. As soon as we go further into the past, the situation becomes different. A carefully polished stone with a symmetrical shape is, without any possible doubt, an archive but what about a stone with some edges which could as well be man-made as shaped by natural processes? Anthropologists reach sometimes an agreement, but in other cases, the question remains unanswered. Even if it is an agreement about the fact that the stone is indeed a human artefact, dating an object is not obvious at all. The dating is necessarily an indirect process, based on observations, which do not concern the object itself but the context in which it was discovered.

People searching for traces of life have to face exactly the same problems: they have first to identify the pieces of a puzzle and then to put the pieces together. It is not necessary to be a palaeontologist to be sure that a petrified bone of a dinosaur is a fossil. But how can one be sure that a spherical mineral concretion in a piece of rock is the fossil of a bacteria and not "just" a mineralogical structure associated to the rock formation? For an archaeologist, the discovery of stones with irregular shapes is not proof that a church was standing at that place in a distant past, even if he knows that these irre-

certain, en tant que spécialiste, qu'une petite concrétion sphérique dans une roche est bien le fossile d'une bactérie et non une structure minéralogique associée à la formation de la roche ? Pour un archéologue, la découverte de pierres aux contours irréguliers n'est nullement la preuve que, dans le passé, une église était érigée en ce lieu, même si cet archéologue sait que des pierres semblables ont effectivement été utilisées dans la région pour la construction d'édifices religieux. Toutefois, pour ce même archéologue, la découverte d'un fragment de statue constituerait un indice beaucoup plus significatif, pour autant qu'existent des preuves convaincantes que le fragment en question ne provient pas d'un autre lieu et qu'il n'a été déposé là par hasard. À nouveau, une situation très semblable, voire identique est rencontrée par le scientifique qui est à la recherche de traces de vie. Trouver des « éléments de construction de base » des organismes vivants dans une roche n'est pas, à elle seule, la preuve d'une vie présente ou passée. Ces « éléments de construction de base » peuvent en effet résulter de processus abiotiques. Par exemple, l'eau, des acides aminés de type glycine ou alanine, des bases nucléiques ou encore un matériau polymérique de type kérogène font partie de ces « éléments de construction de base » trop simples pour être significatifs (voir paragraphe suivant). Pour être reconnus comme des indices certains de la présence passée ou présente d'organismes vivants, les « éléments de construction » doivent contenir des caractéristiques structurales qui ne peuvent résulter que de processus synthétiques se déroulant au sein d'organismes vivants. Pour le scientifique à la recherche d'organismes vivants contemporains ou anciens et qui isole des molécules dans un sédiment, la complexité de certaines structures moléculaires révèle, sans ambiguïté, que ces molécules résultent effectivement de synthèses enzymatiques. Pour ce scientifique, de telles molécules apportent une information semblable à celle que le fragment de statue apporte à l'archéologue. Les triterpènes ou encore des stéranes constituent d'excellents exemples de molécules qui sont de vraies bio-signatures. Toutefois, et à nouveau comme dans le cas de l'archéologue en présence du fragment de statue, il est indispensable de s'assurer que ces bio-signatures moléculaires ne proviennent pas de contaminations ou de transports de matière.

Les exemples qui viennent d'être discutés concernent la recherche de traces de vie passée ou présente sur Terre, mais une recherche semblable est menée aujourd'hui sur des corps extraterrestres ou d'origine extraterrestre. Pour des raisons évidentes, les problèmes sont beaucoup plus complexes dans ce cas, ne serait-ce que parce que l'on ne sait pas exactement ce que l'on cherche ! L'attitude la

gular stones were used to build churches in the region. For the same archaeologist, the discovery of a fragment of a statue would be much more significant if he has strong indications that the fragment does not come from another place. Again, the situation is similar, if not identical, for the scientist searching for traces of life. To find "simple" building blocks of living organisms in a rock sample is not at all the proof of contemporary or extinct life. These building blocks could also have existed on Earth in the absence of life. For example, water, amino acids, nucleic bases, polymeric material of the kerogen type are part of those non-significant indices. (see the next paragraph). To be recognized as evidence of life, building blocks must contain chemical and structural attributes univocally indicative of bio-controlled processes. For the scientist searching for traces of extant or extinct biota or living systems, the complexity of some chemical structures implies that their synthesis involved enzymatic steps. Such attributes play the same role as the statue fragment for the archaeologist. Typically, polycyclic molecules like triterpenes or sterols are significant molecules, which can be safely considered as signatures of life. Again, as in the case of the statue fragment, it is important to be sure that these significant molecules did not come from another place. One must be sure that their presence is not the result of contamination.

In all these examples, we have considered only the search for traces of life on Earth but, as it is well-known, the search for traces of life on extraterrestrial bodies is also a very active field of research. For obvious reasons, the situation is much more difficult in these cases. First, nobody knows exactly what to search for ! The simplest attitude consists in searching for traces of hypothetical organisms similar to those we know on Earth as living species or fossils. The search can be performed *in situ* as it has been done on Mars since the Viking missions (more than 30 years ago) or on Martian meteorites like ALH 8401. The problems encountered are similar to those we have briefly described for samples found on Earth. Presence of regular mineral structures, presence of water molecules or even of liquid water, presence of "simple" organic molecules or polymeric material of the kerogen type are not signatures of the presence of life on Earth and consequently, they cannot indicate the presence of extant and extinct life on other planets or satellites.

The search for traces of life on planets outside the solar system is a different problem. It is necessarily based on remote sensing methods, which combine various research strategies and spectroscopic studies of planets' atmospheres. The search for life on extrasolar planets has also been undertaken for few decades by

plus simple consiste à chercher des traces d'organismes hypothétiques semblables à ceux qui peuplent ou ont peuplé la Terre. Ces recherches peuvent être menées *in situ* comme cela se pratique sur Mars depuis les missions Viking qui datent, rappelons-le, de plus de trente ans mais elles peuvent aussi être conduites sur des météorites d'origine martienne, comme la célèbre météorite ALH 8401. Les problèmes rencontrés, pour difficiles qu'ils soient, sont très semblables à ceux que l'on rencontre dans la recherche de traces de vie sur Terre. La présence de structures minérales régulières, la présence de molécules d'eau ou même d'eau liquide, la présence de molécules organiques comme des acides aminés, des bases nucléiques ou de kérogène ne sont, pas plus que sur Terre, des preuves de la présence passée d'organismes vivants.

La recherche de traces de vie sur des planètes qui se trouvent en dehors du système solaire est un problème qualitativement différent. Elle se fonde nécessairement sur des données obtenues par observations à distance relevant de l'astronomie observationnelle et incluant la spectroscopie. Cette recherche de vie sur des planètes extrasolaires est conduite depuis des décennies et depuis bien avant donc que l'on détecte la première planète extrasolaire. Elle est basée sur les tentatives de détection par nous, humains « intelligents », de signaux électromagnétiques qui pourraient être émis par d'autres être « intelligents ». Cette recherche, connue sous l'acronyme anglais *search for extraterrestrial intelligence* (SETI), est fondée sur l'hypothèse selon laquelle il pourrait exister ailleurs, dans notre galaxie, des formes de vie qui ont évolué de manière telle que des êtres intelligents peuplent ces planètes et que de surcroît ces êtres intelligents aient acquis un développement technique qui leur permettent d'envoyer des signaux électromagnétiques de manière contrôlée. Il faut reconnaître qu'il s'agit là de contraintes fortes ! Aristote et Newton étaient sans conteste des hommes intelligents, mais leur présence sur Terre, en même temps que celle de millions de leurs contemporains, n'aurait jamais pu être détectée de l'espace, sur base de l'analyse de signaux électromagnétiques émis par la Terre !

Des indices de vie aux bio-signatures

Le mot « bio-signatures » est très largement utilisé par les scientifiques qui sont à la recherche de traces physiques ou chimiques de l'existence d'organismes vivants ou d'organismes aujourd'hui disparus. Néanmoins, il convient de se souvenir que le mot « signature » désigne un moyen d'identification univoque d'une personne au moyen d'un ensemble de lettres associées en mot ou au

analyzing electromagnetic waves coming from space. A hopeful sign of the existence of extraterrestrial life remains that one (human) could detect coded signals emitted by “intelligent” living beings. Of course, this Search for Extra Terrestrial Intelligence (the SETI program), is based on the assumption that life does not only exist on some planets, but that this life has evolved in such a way that intelligent beings are present and, moreover, that these extraterrestrial beings have developed such technical skills that they are able to send electromagnetic waves in a controlled way. This is a very hard constraint ! Aristotle and Newton were certainly extremely intelligent people, but their presence on Earth together with their millions of human brothers would never have been detected on the basis of the analyzing of electromagnetic waves emitted by the Earth!

From life indices to bio-signatures

The word, bio-signature, is commonly employed in the large spectre of scientific issues devoted to the study of physical and chemical structures produced by living organisms. Nevertheless, a signature is, by definition, a distinctive way to identify, unambiguously, a specific person through an ensemble of letters associated in a word or in a drawing. Strictly speaking, by revealing distinctive attributes of life, a bio-signature would be a clear-cut proof or mark of the presence of organisms, as living beings or as fossils. As we will see, the word bio-signature is frequently used in an abusive way. Bio-indices would be definitively a better nomenclature ! Such bio-indices include microfossils, macroscopic textures, biomineralisation and isotopic fractionation patterns.

Historically, geologists were the first scientists who have tried to find evidence of past life by studying geological strata. At the end of the 18th century, the word archive was still used to describe any trace of a phenomenon, which took place in the past. For Robert Hooke (1635–1703), “. . . these Shells and other Bodies are the Medals, Urnes or Monuments of Nature. . . These are the greatest and more lasting Monuments of Antiquity”. This sentence, written around 1667, is an extract from the excellent review article by Gohau [2]. Fontenelle, but also Buffon, also used the term “archive” to qualify shells or other fossils. It is during the 20th century that the search of bacteria fossils (the so-called microfossils) became recognized as a scientific discipline giving access to knowledge about early life on Earth before the development of multi-cellular life. Micro-

moyen d'un dessin. Au sens strict donc, une bio-signature devrait être une preuve non ambiguë de la présence d'organismes vivants ou ayant vécu. Ainsi que nous allons le voir, le mot « bio-signature » est très souvent utilisé de manière abusive. « Bio-indice » serait à coup sûr un terme plus approprié dans la plupart des cas ! On pourrait ainsi qualifier de « bio-indice » certaines structures minérales, certaines formes de minéralisation, certains fractionnements isotopiques, certaines molécules.

Historiquement, ce sont les géologues qui ont été les premiers à rechercher des preuves de l'existence de vie passée en étudiant des terrains sédimentaires. À la fin du XVIII^e siècle, le mot « archives » était utilisé pour décrire les traces d'évènements survenus dans le passé de la Terre. Ainsi, Robert Hooke (1635–1703) écrit-il «... *these Shells and other Bodies are the Medals, Urnes and Monuments of Nature. ... These are the greatest and more lasting Monuments of Antiquity* ». Cette phrase, écrite vers 1667, est extraite de l'excellent article de revue rédigé par Gohau en 2005 [2]. Fontenelle, comme Buffon, utilisent, eux aussi, le terme « archive » pour qualifier les coquilles et autres fossiles. C'est au cours du XX^e siècle, que la recherche de fossiles de bactéries (appelés microfossiles) a été reconnue comme une démarche susceptible de fournir des informations sur l'existence d'une vie sur Terre avant l'apparition des premiers multicellulaires. Les « micropaléobiologistes » participent à une compétition acharnée pour être chacun le premier à découvrir le plus vieux des microfossiles. « The oldest, the best » semble être l'un des incitants majeurs pour ce type de recherche, alors qu'il faut bien reconnaître que le fait qu'une vie microbienne soit déjà présente sur Terre il y a 3,5 milliards d'années, plutôt, qu'il y a 2,9 milliards d'années, ne change rien quant à la question fondamentale de l'origine de la vie. Chaque fois qu'un scientifique annonce la découverte du plus ancien microfossile, il se trouve d'autres scientifiques pour affirmer que les micro-objets découverts ne sont rien d'autre que des structures résultant de minéralisation très ordinaire, dans le type de roche où elles ont été découvertes. Ces critiques constituent souvent le point de départ de controverses qui peuvent durer des années. Il va de soi que ce n'est pas la seule présence de concrétions sub-millimétriques dans une roche, qui soit considérée comme une preuve de vie dans un passé lointain : le niveau de diagenèse de la roche, la texture générale de celle-ci et son environnement sont des compléments d'information indispensables mais même ainsi, les divergences d'opinions entre spécialistes sont très fréquentes. Ceci s'explique peut-être par le fait que le nombre de spécialistes est faible. Si donc, la seule obser-

paleobiologistes are competing to be the first one to find the “oldest” micro-fossil. The rule seems to be “The oldest, the best”. But whether life was already present on Earth 3.5 billions years ago or “only” 2.9 billions years ago does not make a great difference regarding the origins of life. Every time a scientist announces he has discovered the oldest micro-fossil, other authors always object. They argue that the micro-objects described are nothing else than mineralogical structures ordinarily observed in abiotic crystallization processes. These criticisms are generally the starting point of controversies, which can last for years. Obviously, it is not just the observation of sub-millimetre spherical concretions in a piece of rock which is taken as a convincing proof of the presence of life in a remote past: the level of diagenesis of the rock, its general texture, its surroundings are all complementary data, but even so, it seems difficult for specialists to agree even though they are not very numerous. Therefore, a very old trace, consisting in a close association between the mineral phase, organic components and a cell-like pattern, states a suite of bio-indices, which put all together, sign extinct life more probably.

In order to find “the oldest of the oldest” proofs of life, the only way consists to study geological formations which are the oldest known on Earth like those found in the West of Greenland. There, the metamorphism is so important that the hope to find micro-fossils is very low and, consequently, other indices are used. These indices are not morphological but chemical. Indeed, organic matter of biological origin (like the organic content of contemporary plants) is generally characterized by a low $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio compared to higher one found in molecules, which do not have a biological origin. One can explain this isotopic effect by the reactivity difference between $^{12}\text{CO}_2$ and $^{13}\text{CO}_2$ in one of the numerous steps of the photosynthetic pathway. The values of some $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio measurements in 3.8 billions years old rocks are considered by some specialists as an indication that photosynthetic bacteria were already present at the time. As one could have predicted, this conclusion is controversial!

It is time now to explain why amino-acids or nucleic bases like adenine which are the building blocks of all living beings on Earth are not, by themselves, indices of life when they are found isolated in ancient rocks. The reason is very simple: these molecules have been found in some meteorites called carbonaceous chondrites, which are fragments of small asteroids. All that we know about these asteroids leads to the conclusion that life never occurred on asteroids and therefore, all the organic molecules found in the chondritic matter

vation de la morphologie d'une microstructure n'est, tout au plus qu'un bio-indice, l'association entre la morphologie d'une structure minérale qui rappelle la forme d'une cellule et la présence de matière organique et d'une phase minérale révélatrice d'une bio-minéralisation possible constituent une somme de bio-indices qui, elle, est beaucoup révélatrice d'une vie passée.

Le seul espoir de trouver la plus ancienne preuve de vie qu'il soit possible de trouver provient de l'examen des plus anciens terrains sédimentaires connus à la surface de la Terre. Ceux-ci se trouvent à l'Ouest du Groenland et datent d'un peu plus de 3,8 milliards d'années. Ces roches ont été profondément métamorphosées et il est donc peu vraisemblable d'y trouver des microfossiles. Dans ces conditions, d'autres bio-indices doivent être utilisés. Ces indices ne sont pas morphologiques ; ils sont chimiques. En effet, la matière organique d'origine biologique (telle celle constitutive des plantes contemporaines) est caractérisée par un rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ plus faible que celui observé dans des molécules organiques provenant de synthèse abiotique. Ceci s'explique par la différence de réactivité entre $^{12}\text{CO}_2$ et $^{13}\text{CO}_2$, lors de l'une des étapes de la photosynthèse. La valeur du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans certaines roches vieilles de 3,8 milliards d'années est considérée, par certains spécialistes, comme la preuve que des organismes photosynthétiques existaient déjà en ces temps anciens. Comme on pouvait le prévoir, cette conclusion ne fait pas l'unanimité !

Il est temps maintenant de justifier notre affirmation, selon laquelle les acides aminés ou les bases nucléiques ne constituent nullement des indices de vie passée lorsqu'on les détecte dans des roches terrestres anciennes alors que, pourtant, ces molécules sont omniprésentes dans tous les organismes vivants contemporains. La justification est simple : ces molécules ont été détectées dans des météorites de la classe des chondrites carbonées qui sont elles-mêmes des fragments d'astéroïdes non différenciés. Tout ce que nous savons sur ces astéroïdes permet de conclure que jamais des formes de vie ne se sont développées en leur sein : toutes les molécules organiques trouvées dans les chondrites ont donc nécessairement une origine abiotique. En réalité, les molécules organiques sont abondantes dans notre galaxie et ceci s'explique aisément sur base de la composition élémentaire de celle-ci. L'hydrogène, l'oxygène, le carbone, l'azote sont avec l'hélium et le néon les éléments les plus abondants de notre galaxie ; il n'y a donc pas lieu de s'étonner que, dès lors que les conditions physico-chimiques nécessaires à la formation de molécules sont remplies, on trouve en abondance des molécules conte-

have necessarily an abiotic origin. In fact, organic molecules are very common in our galaxy and can be easily explained by the elementary composition of the galaxy. Hydrogen, oxygen, carbon and nitrogen, together with helium and neon, are the most abundant elements and as soon as physico-chemical conditions permit the formation of molecules why be surprised that molecules containing carbon and hydrogen, associated or not with oxygen and nitrogen, are abundant? The same comment is obviously also valid for the H_2O molecule. Reactions between C, H, O, N can lead spontaneously to molecules like amino-acids, adenine but also carboxylic acids, ketones, aldehydes and many other "simple" molecules which, indeed, are found in chondritic matter, co-existing with a polymer showing some similarities with kerogen, but which is certainly the result of abiotic reactions. This is why the "simple" molecules are definitely not bio-signatures.

The information content of a molecule can be calculated by considering the molecule as a tri-dimensional graph. This content increases with the number of atoms and with the number of bonds between these atoms. The "simple" molecules we have just discussed have a low information content. On the contrary a polypeptide, i.e. an heteropolymer such that each monomer is an aminoacid residue has a high information content for a reason which can be easily explained by using an analogy: the isolated alphabetical letters have no meaning while as soon as they are ordered to form a word, they become significant. The same analogy is valid for polynucleotides. Molecules like triterpenes or steranes are not polymers but their information content is so high that their spontaneous synthesis by non-enzymatic pathways has a probability near to zero. As the condensation heteropolymers, they are also biosignatures and because their resistance to degradation is higher than that of polynucleotides or polypeptides they can be discovered in very old sediments. Consequently, they are the best chemical bio-signatures we have.

The case of water needs an additional comment. Clearly, water as vapour or ice is common in the solar system and most probably in the galaxy. Nevertheless, the presence of liquid water could be less common. In the solar system, liquid water is present on Earth and probably under the icy cover of some satellites of giant planets. Moreover, liquid water was certainly present on the surface of Mars, billions of years ago and could even be locally present in the Martian sub-surface today. Liquid water seems a necessary component of all living systems as soon as they are not in a dormant state. However, all comments suggesting that as soon as liquid water is or

nant du carbone et de l'hydrogène, associés ou non à l'oxygène et l'azote. Le même commentaire vaut aussi pour la molécule H_2O . Des réactions entre C, H, N, et O peuvent conduire, par des processus multi-étapes, à la formation spontanée d'acides aminés, d'adénine mais aussi de cétones, d'aldéhydes, d'acides carboxyliques et de bien d'autres molécules « simples » telles celles que l'on trouve dans la matière chondritique et qui coexistent dans cette matière avec un polymère semblable au kérogène et qui, lui aussi, résulte certainement de synthèses abiotiques. Ceci explique pourquoi des molécules organiques « simples » ne peuvent être considérées comme des bio-signatures.

Le contenu informationnel d'une molécule peut être calculé en traitant la molécule comme un graphe coloré à trois dimensions. Ce contenu croît avec le nombre d'atomes et le nombre de liaisons inter-atomiques. Les molécules « simples » dont il vient d'être question ont un contenu informationnel faible. En revanche, celui d'un polypeptide, c'est-à-dire un polymère de condensation dont chaque monomère est un « un acide aminé », est beaucoup plus élevé et peut être aisément expliquée par une analogie : chaque lettre de l'alphabet possède un contenu informationnel faible par rapport à un mot écrit avec ces lettres. Cette analogie est valable pour tous les polymères de condensation naturelle à l'exception des polysaccharides qui souvent sont des homopolymères i.e. dont tous les monomères sont identiques. Des molécules polycycliques comme les triterpènes ou les stéranes, sans être des polymères, ont un contenu informationnel élevé, dû au nombre de leurs atomes constitutifs et au nombre de liaisons entre ces atomes. Leur synthèse spontanée par voie abiotique est extrêmement improbable et dès lors, comme dans le cas des hétéropolymères de condensation, ce sont des bio-signatures qui offrent l'avantage d'être beaucoup plus résistantes à la dégradation que les polypeptides ou les polynucléotides. Les stéranes et polyterpènes sont donc des bio-signatures de forme de vie beaucoup plus anciennes que celles dont l'existence peut être attestée par des polymères de condensation.

Le cas de l'eau requiert un commentaire additionnel. L'eau, sous forme de vapeur et de glace, est abondante dans le système solaire et, du moins en ce qui concerne la forme gazeuse, l'eau est abondante dans la galaxie. Rien ne permet d'affirmer qu'il en est de même de l'eau sous forme liquide. Dans le système solaire, l'eau sous forme liquide est présente sur Terre et très probablement sous la croûte de glace qui recouvre certains satellites des planètes géantes et, de manière localisée et temporaire, à la surface de Mars. L'eau liquide était présente en abondance sur Mars il y a plusieurs milliards d'années

was present, life is or was also present are an unacceptable assertion. It corresponds to a voluntary confusion between two fundamental concepts in logic: a necessary condition and a sufficient condition. Having water on a planet is a necessary, but not a sufficient condition, for the emergence of life. Reciprocally, finding traces of Earth-like life is a sufficient, but not a necessary condition, for having liquid water. To date, "water-mediated" emergence of life on Earth is the unique success that we have the opportunity to portray.

These few comments concerning some bio-indices illustrate why, we have pointed out at the beginning of this paragraph, that the term bio-signature is frequently used in an abusive way. Now, the following question arises: what about the accumulation of bio-indices? Could bio-indices which, when isolated, are not bio-signatures, become a bio-signature by a summation process? Of course, it is impossible to answer this question simply by "yes" or "no" but it is obvious that a set of convergent indices is an important factor when searching for traces of life. The accumulation of observations is generally possible when the sample is studied in a laboratory but such an approach is much more difficult when *in situ* measurement are performed by robotized instruments as it is the case on the surface of extra-terrestrial objects. The accumulation of proofs is then frequently redundant. The question of "water on Mars" is an excellent illustration of this last comment. Since decades, we know that liquid water was present on the Martian surface in the past. Nevertheless, any new proof of this undisputed fact is still presented as a new argument supporting the possible existence of life on Mars in the past or even today.

The search of bio-indices on extra-solar planets

As we said previously, the only bio-indices, which can be used in this case are related to the composition of the planet atmosphere. The major components of the atmosphere can, at least in theory, be detected through their spectra. Technically, detection remains extremely difficult today but it can be predicted that we will obtain data concerning various extra-solar planets in the near future. With respect to what is known on Earth, it is tempting to say that the detection of O_2 and O_3 could be interpreted as indices that photosynthesis is taking place on the planet. Nevertheless, it is known that photodissociation of water leads to the formation of O_2 and the efficiency of this process depends on the quantity of water vapour in the atmosphere, but also on the light emission characteristics of the star.

et est peut-être encore présente aujourd'hui en certains lieux, sous la surface de la planète. L'eau liquide est, par ailleurs, un composant nécessaire à toute forme de vie sur Terre si l'on excepte des formes dormantes comme des graines ou des cellules congelées. Toutefois, les affirmations suggérant que si de l'eau liquide est ou a été présente sur une planète ou un satellite, la vie est ou a été, elle aussi, présente doivent être réfutées. Elles correspondent à une confusion, parfois volontaire, entre deux concepts fondamentaux en logique : la condition suffisante et la condition nécessaire. La présence d'eau liquide est très probablement une condition nécessaire pour l'apparition et le développement de toute forme de vie ; ce n'est nullement une condition suffisante. Jusqu'à aujourd'hui, la seule forme de vie que l'on connaisse est la vie terrestre dont l'émergence et le maintien dépendent de l'eau liquide.

Ces quelques commentaires à propos des bio-indices expliquent pourquoi nous avons fait remarquer que le terme bio-signature est souvent utilisé de manière abusive. Se pose alors la question : se peut-il que la somme d'observations qui, chacune isolément, n'est qu'un bio-indice puisse devenir une bio-signature non ambiguë ? Il est évidemment impossible de répondre par « oui » ou « non » à une telle question, mais il est évident aussi qu'une somme d'indices convergents constitue un élément important dans la recherche de traces de vie. L'accumulation d'indices est souvent possible lorsque l'échantillon est étudié au laboratoire, mais elle est généralement beaucoup plus difficile lorsque les observations sont réalisées *in situ* grâce à des engins robotisés. Dans ce cas, les indices, même s'ils sont multiples, sont souvent redondants. La question de la présence d'eau liquide sur Mars permet d'illustrer ce dernier commentaire. Depuis des décennies, nous savons que de l'eau liquide a été présente à la surface de Mars et qu'elle n'est plus présente aujourd'hui sauf, éventuellement, de manière très épisodique. Malgré cela, toute preuve nouvelle de la présence passée d'eau sur Mars et qui est apportée par les robots qui explorent la surface de Mars est, à chaque fois, présentée comme un argument neuf en faveur de l'existence possible de vie sur Mars.

La recherche de bio-indices sur des planètes extra-solaires

Ainsi que nous l'avons dit précédemment, les seuls bio-indices utilisables dans le cas des planètes extra-solaires ne peuvent résulter que d'informations sur la composition de l'atmosphère de la planète. Les composants majeurs de cette atmosphère peuvent être identi-

The presence of CH₄ in the atmosphere of a planet with an oxygen rich composition would certainly mean that the atmosphere is an out-of-equilibrium system and that methane is continuously injected into the atmosphere. It could be the proof that methanogenic microorganisms are living on the planet, together with photosynthetical living species. But, it will never be a true bio-signature. At best, it will indicate a possible biological activity. Indeed, other sources of methane can easily be found, which do not require a biological activity. This short discussion shows the difficulty to find indices of life on an extra-solar planet. On Earth, oxygenic photosynthesis led to a very slow accumulation of oxygen in the atmosphere and during more than one billion years, life was present on Earth, but had no significant effects on the atmospheric composition. Thus, on the basis of spectroscopic data on a planet's atmosphere, it will never be possible to exclude the presence of life. Interestingly enough the situation is similar to what was said about the Search of Extraterrestrial Intelligence. Remote sensing reduces dramatically the kind of life, which could be discovered!

Conclusions

In this short introduction, we have tried to point out the difficulty of finding, in very ancient rocks, indices of extinct microbiological life which are unambiguous and which can be safely considered as true bio-signatures. We have also pointed out the reason why some observations too frequently considered as bio-indices can be easily explained without taking into account "a hypothetical" biological activity. We have briefly explained the reasons why the search or traces of present or past life on extraterrestrial objects is even much more difficult. We have insisted on the fact that, frequently, conclusions by one author are challenged by another author's conclusion.

As demonstrated in the following articles, the quest for earlier bio-indices in the geological record on Earth or other planets appears as a highly complex process from various points of view. Determining from analysis of gases in a planet's atmosphere, stable isotopes in drill core samples or bio-minerals or microfossils in rocks, if living organisms have been present at some earlier epoch, or in an extra-terrestrial sample, remains an important issue which needs to combine various research strategies with multiple analytical techniques. The crucial question "how to identify morphological fossils form which became altered, and subsequently how to improve the ability to recognize them" is reviewed by

fiés, du moins en principe, par analyse spectroscopique. Aujourd'hui, cette télédétection demeure techniquement très difficile, mais tout permet d'augurer que cette situation s'améliorera dans un futur proche.

Sur Terre, la présence d'oxygène dans l'atmosphère et celle de l'ozone synthétisé dans la stratosphère par voie photochimique au départ de O₂, résulte d'une photosynthèse intense et donc de la présence d'organismes photosynthétiques. La présence simultanée de méthane dans l'atmosphère terrestre est la preuve d'un apport permanent de ce gaz qui, sans cet apport, devrait très normalement disparaître par oxydation. Cet apport est réalisé sur Terre par des bactéries méthanogènes. Dès lors, la détection de ces trois gaz dans l'atmosphère d'une planète extra-solaire amènerait-elle à conclure qu'il s'agit d'une biosignature ? La réponse est malheureusement négative : la photodissociation de la vapeur d'eau peut conduire, après plusieurs étapes de synthèse, à de l'oxygène et de l'ozone. Par ailleurs, il existe des processus abiotiques qui conduisent à la formation de méthane. Tout au plus peut-on dire que l'observation de ces trois gaz en mélange nécessairement hors-équilibre constituerait un bio-indice que certains ne manqueraient pas de considérer comme une bio-signature. Sur Terre, la photosynthèse oxygénique a conduit, après des milliards d'années, à l'accumulation d'oxygène dans une atmosphère qui en était initialement dépourvue. Durant un temps très long, la vie était présente sur Terre sans que cela se traduise par un changement dans la composition atmosphérique. La situation est semblable à celle évoquée précédemment pour le programme SETI : la télédétection réduit de manière drastique le type de vie qui est susceptible d'être détecté.

Conclusions

Dans cette courte introduction, nous avons tenté de signaler quelles étaient les difficultés que doivent affronter ceux qui cherchent à découvrir, dans des roches anciennes, les preuves incontestables d'une vie microbienne passée au point de les considérer comme des biosignatures. Nous avons aussi signalé les raisons pour lesquelles certaines observations, trop fréquemment considérées comme bio-indices, peuvent être aisément expliquées sans avoir recours à une hypothétique activité biologique. Nous avons brièvement expliqué les raisons pour lesquelles la recherche de traces de vie présente ou passée sur des corps extraterrestres est encore beaucoup plus difficile. Enfin, nous avons souligné l'existence fréquente de désaccords entre spécialistes quant au caractère de bio-indice de telle ou telle observation.

Javaux and Benzerara [3]. Also, criteria to distinguish their biogenic from non-biogenic attributes must be established and, as shown by Benzerara and Menguy [1], this topic can be advanced by developing process-based models. As suggested here by J. Livage [6] it is possible via chemical morphogenesis to synthesize shapes usually typical of life. Beyond the extensive diversity of structures of biomimetic minerals and microfossils, arises the following question: Are we (or will we be) really capable of distinguishing between non-biogenic and biogenic indices? A quick overview to deal with this, is given in the present issue.

From another point of view, many of the bio-indices detection approaches presented in this issue were guided by studies of suitable lithologies (e.g. sedimentary rocks) for the accumulation and preservation of earliest life trace on Earth. These approaches require careful mapping of the physico-chemical characteristics of: (i) deposits associated with earlier sedimentary and hydrothermal systems; or (ii) places with geological or environmental conditions that could exist on an extra-terrestrial body. The benefit of "analogue studies" for planetary exploration and life detection is presented by R. Lévillé [5] while P. Philippot et al. [7], on the one hand, and C. Thomazo et al. [9] on the other, review some recent issues on Archean deposits: the most promising Earth locations for preserving a trace of micro-biota, or for constraining the chemistry of the earliest ocean and atmosphere.

Such approaches are essential to test technical strategies suitable for the collection of bio-indices or biosignatures at several levels. They are likely to maximize the chances of success in the identification of extinct life in an extraterrestrial sample. One rational way to validate indices of life is certainly to facilitate the development of synergistic methodologies for data and sample analysis without any human assistance. The potential effectiveness of computer-assisted analysis (as demonstrated in the medical domain: diagnostic pattern, prognostic triage...) can eventually be generalized to the task of discovering the "early stage" of Earth life and the relevant suite of bio-indices for the detection of extant or extinct life in other planets.

Finally, in contrast with the detection of a trace of life based on direct analysis of solid samples, remote sensing analysis of simple organic molecules (e.g., methane) has provided a foundation for understanding the distribution and evolution of carbon-bearing material. Detection will play a key role in the protocol for the eventual remote spectroscopic assessment of the habitability of extrasolar planets. It will be also an important part of the overall

Comme cela se trouve illustré dans les articles qui suivent, la quête de bio-indices dans les couches géologiques de la Terre ou sur d'autres planètes apparaît comme une tâche ardue et ceci pour de multiples raisons. En effet, il est très difficile de déterminer si des organismes vivants étaient présents dans un passé lointain sur Terre et plus encore sur des corps extrasolaires, autant par analyse isotopique d'échantillons obtenus par forage, que par détection de bio-matériaux ou de microfossiles dans de roches ou d'analyse de gaz dans une atmosphère planétaire. La question cruciale de la reconnaissance des microfossiles sur une base morphologique est traitée par Javaux et Benzerara [3] à partir des processus d'altération qui accompagnent la fossilisation. Les critères qui permettent de distinguer des microstructures d'origine biogénique de celles qui ne sont pas associées à une activité biologique sont examinés par K. Benzerara et Menguy [1]. Ces auteurs montrent l'intérêt de modéliser les processus conduisant à ces structures. J. Livage [6] quant à lui montre la diversité de structures minérales qui peuvent être obtenues de manière strictement abiotique et ceci dans des conditions qui, pour beaucoup d'entre elles, peuvent se trouver réunies naturellement. Certaines de ces structures présentent des similitudes étonnantes avec d'autres structures provenant, elles, de biominéralisation. La question « sommes-nous capables de trouver à ce niveau de bons bio-indices à défaut de vraies bio-signatures ? » est ainsi posée.

Plusieurs exemples de recherche d'indices, présentés dans cette revue, font référence à l'environnement géologique et lithographique dans lequel ces indices sont détectés. Ce sont ces environnements qui conditionnent leur accumulation et leur préservation et qui contribuent à leur donner valeur de bio-indices. Ces approches nécessitent une étude physico-chimique approfondie des dépôts anciens, qu'ils soient sédimentaires ou hydrothermaux. Dans le cas de corps extra-terrestres, et ainsi que nous l'avons déjà dit, ces approches nécessitent l'obtention de données géologiques et lithographiques. L'intérêt de procéder par analogie lors de l'exploration planétaire est souligné par R. Léveillé [5], alors que P. Philippot et al. [7], d'une part, et C. Thomazo et al. [9], d'autre part, détaillent des faits nouveaux concernant les dépôts archéens qui, sur Terre, constituent les lieux les plus propices pour retrouver des traces de vie microbienne passée et pour obtenir des informations quant aux conditions qui prévalaient dans les océans et dans l'atmosphère primitive.

Toutes ces approches sont indispensables pour mettre au point des stratégies de collecte de bio-indices ou de bio-signatures et pour optimiser les chances de

effort to assess the existence of past or present life in the solar system, as suggested here by Kaltenecker and Selsis [4].

In this issue, we have not addressed the problem of molecular bio-signatures and instrumental techniques needed to detect them. To retrieve and decipher such information, one could consult an excellent and recent review published in *Space Science Review* [8]. The authors also address how these biomarkers might become altered during diagenesis and planetary processing.

We hope that the articles of this issue, all written by specialists having a first-hand knowledge of the subjects they are writing on, will help the readers to understand the difficulty but also the huge interest of this quest for traces of life in a very remote past on Earth or the quest for traces of life, extinct or still present, on extraterrestrial bodies. No glimpse will satisfy everyone and this field of research will remain pregnant for very long. Technical and conceptual developments, we believe, will drive innovative research in the identification of bio-indices during the next years.

Acknowledgements

This special issue on bio-signatures and bio-indices is resulting from two workshops organised by the "Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux", and financially supported by the "Université de Bordeaux", the "Conseil régional Aquitaine", the "GDR Exobiologie", the "Centre national de la recherche scientifique" (CNRS), and the "Centre national d'études spatiales" (CNES). We thank very deeply all of these organisms for their scientific and financial support.

Muriel Gargaud

Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux,
CNRS/université Bordeaux-1, 2, rue de
L'Observatoire, 33271 Floirac cedex, France

Christian Mustin*

LIMOS, UMR 7137 du CNRS, Nancy université, BP
70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France

Jacques Reisse

Université libre de Bruxelles (CP 165/64),
ingénierie moléculaire, avenue F.-Roosevelt,

50, B-1050 Bruxelles, Belgique

christian.mustin@limos.uhp-nancy.fr

(C. Mustin)

5 octobre 2009

succès dans l'identification de traces de vie dans des échantillons extra-terrestres. Une manière rationnelle de valider des bio-indices et de les transformer en une bio-signature univoque consiste à utiliser des méthodologies différentes, à créer entre elles des synergies pour l'obtention et l'analyse des données et de rendre l'ensemble du processus, indépendant du jugement humain, grâce à des techniques d'intelligence artificielle. L'efficacité de ce type d'approche intégrée et assistée par ordinateur a fait ses preuves en analyse et pronostic médical ; son implémentation dans la recherche des premières traces de vie sur Terre, ou à la détection de formes de vie présentes ou passées sur d'autres planètes ou satellites, semble donc un projet réaliste.

Enfin, et de manière très différente de ce qui peut se pratiquer sur la base d'analyse directe d'échantillon, la télédétection de molécules organiques simples (i.e. le méthane) a posé les bases de notre compréhension de la distribution et de l'évolution des molécules organiques dans le système solaire et en dehors de celui-ci. Comme le suggèrent Kaltenegger et Selsis [4], l'éventuelle habitabilité de planètes extrasolaires peut être étudiée, grâce à des méthodes spectroscopiques fondées sur de telles observations.

Dans cette publication, le problème spécifique des bio-signatures moléculaires et des techniques mises en jeu pour les obtenir n'est pas abordé. L'excellente revue publiée récemment dans *Space Science Review* [8] fournit d'excellentes informations à ce propos, en discutant également les possibilités d'altération de ce type d'information durant la diagenèse. Nous espérons que les articles qui suivent, tous écrits par des spécialistes qui ont une connaissance de première main des sujets traités, aideront les lecteurs à percevoir les difficultés, mais aussi l'immense intérêt que revêt cette recherche de traces de vie sur Terre dans un passé lointain, ou encore celle de traces de vie présente ou passée sur des objets extraterrestres. Cette recherche de bio-indices devrait connaître dans les prochaines années d'importants développements techniques.

Remerciements

Le travail de synthèse sur les bio-signatures et indices de vie présenté dans ce numéro spécial résulte de deux ateliers de travail organisés par le Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux et financièrement soutenus par l'université de Bordeaux, le Conseil régional Aquitaine, le GDR Exobiologie, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), ainsi que le Centre

national d'études spatiales (CNES). Nous remercions vivement tous ces organismes pour leur soutien moral et financier.

References

- [1] K. Benzerara, N. Menguy, Looking for traces of life in minerals, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2009.03.006.
- [2] G. Gohau, La géologie, première science historique ? *Cahiers* 9–10 (2005) 67–81.
- [3] E.J. Javaux, K. Benzerara, Microfossils, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2009.04.004.
- [4] L. Kaltenegger, F. Selsis, Characterizing habitable extrasolar planets using spectral fingerprints, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2009.07.001.
- [5] R. Lévillé, Validation of astrobiology technologies and instrument operations in terrestrial analogue environments, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2009.03.005.
- [6] J. Livage, Chemical synthesis of biomimetic forms, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2008.11.009.
- [7] P. Philippot, M. Van Kranendonk, M. Van Zuilen, K. Lepot, N. Rividi, Y. Teitler, C. Thomazo, M.M. Blanc-Valleron, J.M. Rouchy, E. Grosch, M. de Wit, Early traces of life investigations in drilling Archean hydrothermal and sedimentary rocks of the Pilbara Craton, western Australia and Barberton Greenstone Belt, South Africa, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2009.06.006.
- [8] R. Summons, P. Albrecht, G. McDonald, J. Moldowan, Molecular Biosignatures, *Space Science Review* 135 (2008) 133–159, in: O. Botta, S. Javier Gomez Elvira, E. Javaux, J. L. Bada (Eds.), Special issue "Strategies of Life Detection" Springer, Netherlands, 380p.
- [9] C. Thomazo, D.L. Pinti, V. Busigny, M. Ader, K. Hashizume, P. Philippot, Biological activity and Earth's surface evolutions: Insights from carbon, sulfur, nitrogen and iron stable isotopes in the rock record, *C.R. Palevol* 8 (2009) this issue; DOI: 10.1016/j.crvp.2009.02.003.