

À la recherche de la vie extraterrestre

André BRACK¹

Introduction

Sommes-nous seuls ? La vie est-elle universelle ? De tout temps, cette question a nourri l'imaginaire humain. Épicure, 300 av. J.-C., écrivait à Hérodote : « Les mondes sont en nombre infini... On ne saurait démontrer que, dans un tel monde, des germes tels que d'eux se forment les animaux, les plantes et tout le reste de ce qu'on voit, pourraient n'être pas contenus. » Un siècle avant Jésus-Christ, Lucrèce mentionne dans *De natura rerum* la possible existence d'extraterrestres : « Si la même force, la même nature subsistent pour pouvoir rassembler en tous lieux ces éléments dans le même ordre qu'ils ont été rassemblés sur notre monde, il te faut avouer qu'il y a dans d'autres régions de l'espace d'autres terres que la nôtre, et des races d'hommes différentes, et d'autres espèces sauvages. » Dans *Le Banquet des Cendres*, Giordano Bruno (1548–1600) fait également mention de la possibilité d'habitants d'autres mondes : « [...] ces mondes sont autant d'animaux dotés d'intelligence, qu'ils abritent une foule innombrable d'individus simples et composés, dotés d'une vie végétative ou d'entendement, tout comme ceux que nous voyons vivre et se développer sur le dos de notre propre monde. » Bernard Le Bovier de Fontenelle publia en 1686 ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, tandis que le physicien et astronome hollandais Christiaan Huygens publiait le *Kosmotheoros* en 1698. Emmanuel Kant fut également un fervent défenseur de l'existence d'une vie au-delà de la Terre. Et au xx^e siècle, cette idée n'a cessé d'alimenter une vaste littérature de science fiction.

Cet optimisme cache-t-il un questionnement existentiel ? Si nous sommes seuls, l'humanité porte une lourde responsabilité : si elle détruit la vie terrestre, toute intelligence aura alors disparu de l'Univers. Si nous ne sommes pas seuls, pourquoi les autres formes de vie ne se manifestent-elles pas ? Comment leur existence influera-t-elle sur le devenir de l'humanité ?

1. Centre de biophysique moléculaire, CNRS, brack@cnrs-orleans.fr

Aujourd'hui, les remarquables progrès réalisés dans la connaissance du vivant, le perfectionnement des instruments d'observation dont disposent les astronomes et les missions d'exploration du système solaire permettent d'aborder la recherche de vie extraterrestre de manière scientifique, passant ainsi de la pensée purement intuitive à l'observation.

Que chercher ? Où chercher ? Les scientifiques considèrent généralement comme vivant tout système capable de s'autoreproduire et d'évoluer. Ils recherchent essentiellement une vie se développant dans l'eau et fondée sur la chimie du carbone, non pas par simple mimétisme avec la vie terrestre, mais parce que ces deux facteurs, eau et chimie du carbone, possèdent des qualités exceptionnelles démontrées en laboratoire.

Les qualités de l'eau

Compte tenu de son poids moléculaire, l'eau devrait être un gaz à la surface de la Terre. Son état liquide résulte du réseau dense de liaisons hydrogène liant les atomes d'oxygène aux atomes d'hydrogène.

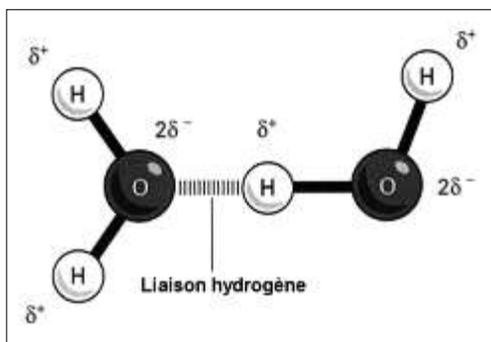
L'eau organise les molécules organiques qui possèdent deux types de groupes chimiques carbonés :

- les groupes qui ne contiennent que des atomes de carbone et d'hydrogène et qui, de ce fait, sont incapables de former des liaisons hydrogène avec l'eau. Ces groupes sont hydrophobes ;
- les groupes qui contiennent, en plus du carbone et de l'hydrogène, des atomes d'oxygène, d'azote et de soufre, sont capables d'échanger des liaisons hydrogène avec l'eau. Ces groupes sont hydrophiles.

Lorsque les deux groupes sont bien séparés, comme dans les acides gras et les phospholipides, il se forme des micelles, des vésicules ou des liposomes par agrégation des groupes hydrophobes. En proche voisinage, les groupes hydrophiles et hydrophobes confèrent à la molécule des géométries spécifiques qui dépendent étroitement de l'ordre d'enchaînement de ces groupes, comme démontré

dans notre laboratoire à Orléans avec des peptides synthétiques (mini-protéines).

L'eau est également un réactif chimique qui intervient dans certaines réactions. Par exemple, la synthèse d'un acide aminé se fait habituellement selon une réaction qui implique un aldéhyde, l'acide cyanhydrique, et l'ammoniac, avec la formation intermédiaire d'un aminonitrile. Ce dernier ne peut se transformer en acide aminé que par l'addition de deux molécules d'eau.



■ Formule moléculaire de l'eau.

L'eau produit des argiles par altération des silicates. Dès que l'eau fut présente à la surface de la Terre, de grandes quantités d'argiles se trouvèrent en suspension dans les océans primitifs. Le rôle des argiles dans les processus chimiques qui ont conduit à la vie a été suggéré dès 1951 par John Desmond Bernal. Les argiles offrent une structure très ordonnée, une grande capacité d'adsorption et une protection contre les effets délétères des UV. Elles concentrent les composés organiques et servent de matrice de polymérisation.

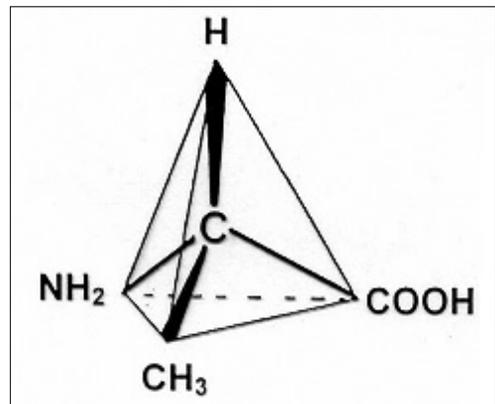
Les qualités du carbone

La tétravalence du carbone permet l'édification de molécules de plus en plus complexes nécessaires à l'évolution des systèmes vivants.

Par exemple, toute la vie terrestre repose sur la chimie macromoléculaire du carbone. Les polymères de nucléotides forment les acides nucléiques ADN et ARN, des polymères d'hydrates de carbone stockent l'énergie, des chaînes hydrocarbonées forment les lipides des membranes, les polymères d'acides aminés constituent les protéines. Toutes ces macromolécules sont construites sur une ossature d'atomes de carbone et la vie sur Terre serait tout simplement impossible sans cette ossature. Il est difficile d'imaginer un autre élément offrant la même propension à former les édifices de plus en plus complexes nécessaires au développement de la vie.

Le silicium est souvent proposé comme une alternative possible. Il est tétravalent comme le carbone et il est donc susceptible de générer les édifices moléculaires de plus en plus sophistiqués, permettant l'évolution d'éventuels systèmes vivants. Situé juste en dessous du carbone dans le tableau périodique des éléments, l'atome de silicium est plus gros. Il s'en forme donc moins dans le cœur des étoiles et, de ce fait, il est moins abondant dans l'Univers. Dans l'espace interstellaire, les radioastronomes ont identifié

11 molécules contenant du silicium et 112 molécules contenant du carbone, montrant clairement que la chimie du carbone est plus créative que celle du silicium. De par le mode de formation du Système solaire, le silicium s'est retrouvé être très abondant dans la croûte terrestre où il représente 27,7 % de celle-ci, contre 0,094 % pour le carbone. À la différence de son cousin le carbone, le silicium n'a donc jamais été une denrée rare sur Terre. Si la chimie macromoléculaire du silicium avait eu les



■ La tétravalence du carbone.

qualités requises pour se développer sur Terre, elle aurait dû donner naissance à une vie fondée sur le silicium, bien plus qu'une vie fondée sur le carbone, beaucoup plus rare. Or il n'en est rien.

De par sa taille plus grande, l'atome de silicium forme des liaisons généralement plus faibles avec les autres atomes et génère des polymères plus fragiles, tout au moins dans les conditions environnementales qui ont prévalu à la surface de la Terre tout au long de son histoire. Placé dans des conditions extrêmes de température et de pression, le silicium peut néanmoins conduire à des polymères relativement stables mais se pose alors un problème de solubilité. Une autre difficulté du silicium a trait aux composés qu'il forme avec l'oxygène. Dans les processus métaboliques, certains polymères biologiques carbonés sont oxydés avec un dégagement de dioxyde de carbone gazeux qui est recyclé dans la photosynthèse. Le procédé équivalent produirait de la silice, difficilement recyclable.

Trois filières pour la fabrication des molécules carbonées

Les formes de carbone les plus simples capables de conduire aux molécules carbonées sont gazeuses : dioxyde de carbone (CO_2), monoxyde de carbone (CO) et méthane (CH_4). L'idée que des acides aminés, les briques élémentaires des protéines, aient pu être synthétisés dans l'atmosphère de la Terre primitive se trouva vérifiée en 1953 par l'expérience remarquable de Stanley Miller, qui obtint quatre acides aminés en soumettant un mélange de méthane, d'hydrogène, d'ammoniac et d'eau à des décharges électriques. Toutefois, lorsque l'on refait l'expérience de Miller en passant progressivement du méthane au dioxyde de carbone, conditions plus proches de la réalité historique, la formation d'acides aminés devient de plus en plus difficile. L'atmosphère primitive ne fut probablement pas la source exclusive de la matière organique nécessaire à l'émergence de la vie terrestre.

Les sources hydrothermales sous-marines présentent un environnement favorable à la chimie du carbone. Les gaz qui s'échappent de certains systèmes hydrothermaux sous-marins présentent un intérêt particulier car ils sont riches en hydrogène, azote, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, anhydride sulfureux, hydrogène sulfuré, conditions qui favorisent la synthèse des molécules organiques. Par exemple, des concentrations élevées en hydrogène (plus de 40 % des fluides) et du méthane ont été détectés dans les fluides du système hydrothermal *Rainbow* de la dorsale océanique, au large des Açores. Des hydrocarbures renfermant de 16 à 29 atomes de carbone y ont été identifiés. De petites quantités d'acides aminés ont été obtenues en laboratoire en simulant les conditions des fluides hydrothermaux.

Les météorites carbonées, représentées typiquement par les météorites d'Orgueil et de Murchison, renferment des composés organiques comme des hydrocarbures aliphatiques. Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (fullerènes) sont également présents. Des composés plus proches des composés biologiques

ont été identifiés : acides carboxyliques, acides aminés, hétérocycles azotés, amines, amides, alcools, etc. La météorite carbonée de Murchison renferme plus de 70 acides aminés différents. Au nombre de ceux-ci on trouve huit acides aminés protéiques.

Les collectes de micrométéorites dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique par Michel Maurette et son équipe, en relation avec l'équipe d'exobiologie du Centre de biophysique moléculaire d'Orléans, permettent d'évaluer la

quantité de micrométéorites accrétées par la Terre pendant les 200 millions d'années du bombardement intense. La matière carbonée accumulée par les micrométéorites équivalait à une couche de goudron de 40 m d'épaisseur sur l'ensemble du globe terrestre.

La mission *Stardust* de la NASA a collecté des grains cométaires dans la chevelure de la comète *Wild 2* qui furent ramenés sur Terre en janvier 2006. Les grains contiennent de la matière organique (alcool, cétone, aldéhyde, acide carboxylique, amides, nitrile, glycine) et présentent de grandes analogies avec les micrométéorites. D'où l'énorme intérêt de la mission européenne Rosetta lancée en mars 2004 vers la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko.

La sonde a tiré parti de l'assistance gravitationnelle de la Terre (3 fois) et de Mars (1 fois) pendant son long voyage, avant de se mettre en orbite autour de sa cible en août 2014, après un périple de 7 milliards de kilomètres et une mise en sommeil de 31 mois. La sonde comprenait deux éléments : un orbiteur équipé de 11 instruments dont le spectromètre ROSINA chargé de mesurer le rapport deutérium sur hydrogène de la vapeur d'eau expulsée par la comète. Le rapport est plus de trois fois supérieur à celui de l'eau des océans terrestres. ROSINA détecta également de la glycine dans la queue cométaire, confirmant ainsi les résultats de *Stardust*, ainsi que du phosphore. Un autre instrument, le spectromètre de masse COSIMA, montra la présence de matière carbonée complexe similaire à la matière organique insoluble présente dans les météorites carbonées.



Micrométéorites (50-100 m) collectées dans la glace de l'Antarctique.

Crédit Michel Maurette.



La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko.

Crédit ESA.

La mission comportait également un petit atterrisseur, Philae, qui se posa sur la comète en novembre 2014, réalisant ainsi le premier atterrissage sur une comète. Il portait 9 instruments, dont COSAC conçu pour identifier les molécules organiques présentes dans les carottages de la glace. Malheureusement, Philae rebondit deux fois avant de s'immobiliser dans une position empêchant la charge des batteries par les panneaux solaires. Toutefois, lors du premier rebond, la sonde pu renifler et analyser les éclaboussures de glace. Seize composés organiques purent ainsi être identifiés.

Malgré l'échec de Philae, la moisson de résultats fournis par Rosetta démontre que les comètes ont probablement joué un rôle important dans l'origine de la vie terrestre.

À la recherche de la vie extraterrestre

Où trouver ailleurs des conditions voisines de celles qui ont permis le passage de la matière à la vie sur Terre, à savoir eau et chimie du carbone ?



Echus Chasma, région martienne riche en traces d'eau, photographiée par la caméra stéréo à haute résolution de Mars Express.

Crédit ESA.

Mars

La planète Mars est l'objet d'une attention toute particulière. Les résultats fournis par les missions martiennes *Mariner 9*, *Viking 1* et *2*, *Mars Pathfinder*, *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey*, *Mars Express*, les deux *Mars Exploration rovers* (spatiomobiles) *Spirit* et *Opportunity*, la sonde *Phoenix* et le rover *Curiosity* indiquent clairement que Mars a abrité de grandes quantités d'eau à sa surface.

La présence permanente d'eau suppose une température constamment voisine ou supérieure à 0° C, 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. Les ingrédients qui ont permis l'apparition de la vie sur Terre étaient donc 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. Les sondes *Viking* n'ont pas trouvé de molécules organiques à la surface de Mars, mais certaines météorites martiennes renferment des molécules organiques. Parmi ces météorites figure la fameuse météorite ALH 84001 présentée comme renfermant des nanobactéries martiennes fossilisées. Cette interprétation est aujourd'hui abandonnée.

Les océans martiens ont déposé des sédiments, observés par les caméras des orbiteurs *Mars Global Surveyor* et *Mars Express* et par les rovers *Opportunity* et *Curiosity*. *Curiosity* a découvert les vestiges d'un lac d'eau douce contenant des argiles et du gypse. Le pH de l'eau était relativement neutre et les éléments atomiques nécessaires à l'émergence de la vie (carbone, hydrogène, oxygène, phosphate, soufre) étaient présents.

En mars 2016, l'agence spatiale européenne, en collaboration avec l'agence spatiale russe, a lancé la première partie de la mission EXOMARS comportant un orbiteur et l'atterrisseur/démonstrateur Schiaparelli. Ce dernier s'est écrasé sur Mars en octobre 2016 en raison du dysfonctionnement de la sonde d'altitude durant moins d'une seconde. En 2020, un rover sera déposé à la surface de Mars pour y rechercher les traces de vie avec la suite d'instruments Pasteur comportant notamment une foreuse pouvant atteindre une profondeur de deux mètres.

En 2020, la NASA enverra un rover martien qui devra rechercher des traces de vie fossilisées, collecter et stocker des échantillons dans une cache pour être ultérieurement ramenés sur Terre, tester une technologie permettant de protéger une mission habitée des dangers présentés par les poussières martiennes, tester une technologie permettant de collecter le dioxyde de carbone, qui pourrait constituer une source d'oxygène et de combustible pour la fusée de retour.

Europe

Europe, le satellite de Jupiter, pourrait bien présenter des environnements marins ressemblant aux sources sous-marines terrestres. Europe tourne autour de Jupiter à une distance d'environ six cent mille kilomètres, donc 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 Galileo a fourni de très belles images montrant, notamment des blocs de glace ayant pivoté sur eux-mêmes. La surface présente peu de cratères d'impacts, ce qui suggère un remodelage continu de la surface par des phénomènes cryovolcaniques ou tectoniques. Des dépôts de sels ont été observés à la surface d'Europe, dépôts qui pourraient provenir de remontées d'eau océanique salée. Enfin, la sonde Galileo a enregistré un champ magnétique induit dans celui de Jupiter traduisant la présence d'un conducteur électrique, très probablement de l'eau salée. Toutes ces observations plaident en faveur de l'existence d'un océan sous-glaciaire. 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, par conséquent, des molécules organiques. Europe apparaît de plus en plus comme un lieu privilégié du système solaire pouvant héberger de l'eau liquide et une vie microscopique en activité.

En 2022, l'agence spatiale européenne lancera la mission d'exploration JUICE, pour *JU*pter *ICy* moons *E*xplorer, qui atteindra Jupiter en 2030. Elle étudiera en continu l'atmosphère et la magnétosphère de Jupiter. Elle visitera Callisto et effectuera deux survols d'Europe. JUICE mesurera pour la première fois l'épaisseur de la croûte glacée et recensera des sites adaptés à une future exploration *in situ*. Le satellite se mettra ensuite en orbite autour de Ganymède en 2032, d'où il étudiera la surface glacée et la structure interne de cette lune, ainsi que son océan de subsurface.

Titan

Titan, le plus gros satellite de Saturne, possède une atmosphère dense de 1,5 bar constituée essentiellement d'azote (plus de 90 %), mais aussi de méthane et d'un peu d'hydrogène. L'atmosphère renferme également d'épais brouillards d'aérosols organiques. Les observations recueillies par les missions *Voyager* et Cassini-Huygens et les mesures faites à partir de la Terre indiquent clairement la présence de nombreux hydrocarbures et de nitriles dans ce milieu. Parmi ces composés organiques figurent l'acide cyanhydrique, l'acétylène, le cyanoacétylène, véritables passages obligés de la chimie prébiotique. Titan représente donc un véritable laboratoire de production de composés prébiotiques à l'échelle planétaire.

Bien que des traces de vapeur d'eau aient été détectées par le satellite ISO dans la haute atmosphère, la température très basse, de l'ordre de -180°C , régnant près de la surface y interdit la présence d'eau liquide. Toutefois, les modèles de structure interne et les données de la mission Cassini-Huygens, suggèrent la présence d'aquifères profonds. Cet océan contiendrait de l'ordre de 10 % d'ammoniac et aurait une épaisseur d'environ

100 kilomètres. Il serait situé entre deux épaisses couches de glace d'eau. Il est possible que pendant les premières dizaines de millions d'années qui ont suivi la formation de Titan, cet océan ait été en contact avec l'atmosphère sur un fond rocheux, une situation analogue à celle des océans terrestres. Il est dès lors possible d'y envisager l'émergence d'une vie.

Encelade

L'orbiteur saturnien Cassini a observé l'activité géophysique d'Encelade, un autre satellite de Saturne. Plusieurs des instruments de la mission ont mis en évidence la présence de gigantesques panaches de plusieurs centaines de kilomètres, émis au pôle sud. Ces panaches sont principalement constitués de glace et de vapeur d'eau, mais contiennent aussi de nombreux composés organiques : méthane, acétylène, propane. Ces geysers pourraient provenir de réservoirs internes d'eau liquide sous pression, en contact avec un magma rocheux, hypothèse confortée par la présence de sel dans les panaches. Les conditions indispensables à l'apparition et au développement de la vie seraient donc présentes au sein d'Encelade.

Les exoplanètes

Au-delà du Système solaire, la chimie du carbone est universelle et la recherche de la vie ne peut se faire que par télé-détection. Pour qu'une exoplanète puisse héberger de l'eau, et donc la vie au sens où nous l'entendons, il faut qu'elle ait la bonne taille et se trouve à la bonne distance de l'étoile. Fin 2016, le catalogue des exoplanètes comptait 3 549 planètes extrasolaires, 44 d'entre elles étant considérées comme habitables. En août 2016, les astronomes ont annoncé la détection d'une planète gravitant autour de Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche de nous, distante « seulement » de 4,2 années-lumière. Sa masse est environ 1,3 fois celle de la Terre et sa période de 11,2 jours.

La recherche de la vie sur une planète extrasolaire ne peut se faire que par l'analyse spectrale de singularités dans l'atmosphère. Sur Terre, par exemple, l'oxygène atmosphérique est une singularité à deux titres : il est surabondant par rapport à la croûte terrestre et il devrait normalement disparaître par recombinaison avec les roches. Sa présence permanente est liée à l'existence d'une vie intense à la surface de la terre et ne manquerait pas d'attirer l'attention de tout extraterrestre observant la Terre à la recherche de vie. Pour des raisons pratiques, il est plus facile de rechercher la signature de l'ozone. La présence simultanée d'ozone (donc d'oxygène), de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone apparaît aujourd'hui comme une signature probante d'une vie planétaire exploitant largement la photosynthèse. L'analyse d'une atmosphère extrasolaire pourrait se faire soit par interférométrie à l'aide d'une flottille de télescopes spatiaux, soit par l'examen de l'atmosphère planétaire lorsque la planète passe devant son étoile.

Conclusion

Épicure rêvait d'une infinité de mondes vivants, rêve repris plus tard par de grands penseurs comme Giordano Bruno, Bernard Le Bovier de Fontenelle, Christiaan Huygens, Emmanuel Kant. Certes, ce rêve ne s'est pas encore concrétisé. Cependant, on connaît de mieux en mieux les conditions qui ont permis l'émergence de la vie sur Terre. De même, les sites extraterrestres où règnent des conditions similaires sont de mieux en mieux identifiés. La pertinence de cet acharnement à comprendre, et des moyens financiers investis à cette fin, est quelquefois remise en cause, mais c'est cette curiosité et cet impérieux besoin de comprendre qui ont élevé l'espèce humaine jusqu'aux connaissances actuelles et à la plénitude des arts. Au-delà de ce besoin de comprendre, ces recherches fournissent une preuve de l'importance de l'eau, partenaire incontournable de la vie, ainsi que de la précarité de l'espèce humaine, entité minuscule perdue dans l'immensité de l'univers. La découverte de la première vie extraterrestre sera déterminante, car elle sortira la vie terrestre de sa solitude cosmique. Les Pirahâs, membres d'une tribu d'à peine 200 personnes de chasseur-cueilleurs d'Amazonie vivant principalement sur les rives du rio Maici, au Brésil, ont simplifié leur arithmétique : ils comptent jusqu'à 2 puis après 2, ils globalisent à beaucoup. D'une manière un peu similaire, la découverte d'une deuxième genèse, véritable graal des exobiologistes, permettrait de généraliser la possibilité de la vie à tout l'Univers. ■

Bibliographie

- BRACK (André) et LECLERCQ (Bénédicte), *La vie est-elle universelle ?*, EDP Sciences, 2003.
- BRACK (A.), *Et la matière devint vivante*, Le Collège de la Cité, Éditions Le Pommier, 2004.
- BRACK (A.), « L'exobiologie ou l'origine chimique de la vie », <http://astro.u-strasbg.fr/goutelas/g2005/>
- CLANCY (Paul), BRACK (André), HORNECK (Gerda), *Looking for life. Searching the Solar System*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- BRACK (A.), *Découvrir la vie extraterrestre*, Minipomme, le Pommier, 2007.
- BRACK (André), COLIOLO (Fiorella), *La vie dans l'Univers, entre mythes et réalités*, Éditions La Martinière, 2009.
- BRACK (A.), « L'exobiologie : de l'origine de la vie sur Terre à la vie dans l'Univers », *Études*, Juin 37 : 46, 2013.
- Catalogue des exoplanètes : <http://www.obspm.fr/encycl/catalog.html>
- Catalogue des météorites martiennes : http://www.nirgal.net/meteorite_table.html
- Catalogue des molécules interstellaires : http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.html