

Exobiologie

François Raulin et Eric Hébrard

Comment la vie est-elle apparue sur Terre ? Y-a-t'il une vie ailleurs que sur Terre ? Si oui, quelle est-elle, comment la détecter ? Ces grandes questions sont du domaine de l'Exobiologie.

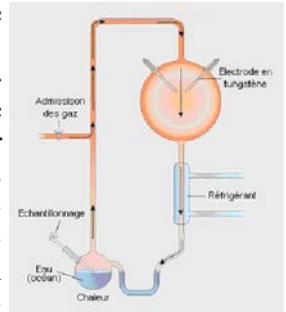
Appellation introduite dans les années 1960 par le biologiste Prix Nobel Joshua Lederberg, alors que la NASA préparait le programme Apollo et les premières missions habitées vers la lune, l'Exobiologie était initialement l'étude de la vie ailleurs que sur Terre. Ce domaine s'est depuis largement agrandi et son périmètre englobe aujourd'hui tout ce qui est lié à la vie dans l'univers. Il est ainsi devenu la science qui étudie l'origine, la distribution et l'évolution de la vie dans l'univers, ainsi que les structures et les processus qui sont liés à la vie.

Exemple par excellence de la multi et interdisciplinarité, de nombreuses approches de l'Exobiologie s'appuient sur les mathématiques et leurs outils de modélisation. Qu'il s'agisse de l'étude de l'origine de la vie sur Terre, de celle de la chimie organique dans des environnements extraterrestre, ou de la recherche de systèmes vivants présents ou passés, ou de signatures biologiques ou prébiotiques dans des environnements extraterrestres, dans le système solaire ou au-delà.

L'origine de la vie sur Terre

La vie est apparue sur Terre à la suite d'une longue évolution chimique, précédant l'évolution biologique. Ce concept, publié par le biochimiste Alexander Oparin en 1924 a été conforté par l'expérience publiée par Stanley Miller en 1953 simulant expérimentalement en laboratoire les premiers stades de cette évolution.

Cette expérience a montré que l'on peut obtenir des composés d'intérêt biologique (des acides aminés), en partant d'un mélange gazeux



Credit : Luxurion - Astrosurf.com

simple, modèle d'une atmosphère planétaire. Mais on ne peut simuler expérimentalement l'ensemble des processus, qui ont pu durer des dizaines de millions d'années sur la Terre primitive. Pour cela, il faut développer des modèles théoriques qui font appel aux équations différentielles complexes. Comprendre l'origine de la vie nécessite de comprendre l'origine de l'homochiralité, présente dans tous les systèmes vivants terrestres. Le chimiste Franck dans les années 1950 a été le premier à proposer des systèmes chimiques d'auto-amplification capables d'augmenter sélectivement la concentration d'un des deux énantiomères au détriment de

l'autre, jusqu'à la disparition totale de ce dernier. Là encore, le modèle passe par la résolution d'équations différentielles.

Crédit : Noël Blotti

L'une des propriétés fondamentales du vivant est d'être constamment maintenu hors de l'équilibre thermodynamique, grâce à sa machinerie complexe et au flux permanent d'énergie qui le traverse. Ces propriétés sont celles des systèmes loin de l'équilibre, dont la théorie a été magnifiquement développée par Ilya Prigogine, physico-chimiste belge d'origine russe, lauréat du prix Nobel de chimie en 1977 pour ses travaux sur la thermodynamique des processus irréversibles, les structures dissipatives et l'auto-organisation des systèmes. Cette théorie a de nombreuses applications, telles que les cellules de Bénard, structures régulières de convection qui apparaissent spontanément dans un liquide quand on lui applique une source de chaleur extérieure. C'est le cas aussi des réactions chimiques oscillantes, systèmes chimiques basculant régulièrement entre deux états distincts (par exemple de couleurs différentes) sans jamais atteindre un état d'équilibre.

L'exemple le plus connu est celui de la réaction de Belousov-Zhabotinskii.

Ces systèmes chimiques ondulatoires sont régis par les phénomènes de réaction et diffusion et leur modélisation s'appuie sur la résolution d'équations différentielles non linéaires.

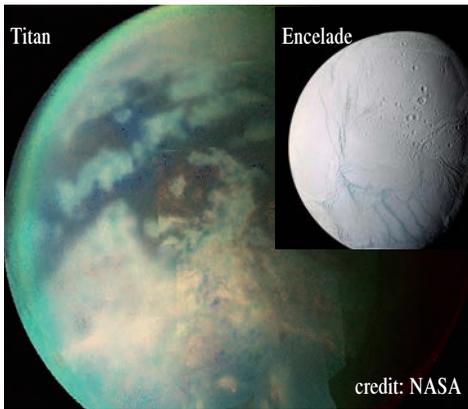


Image Crédit:
A. M. Zhabotinsky

D'après nos connaissances actuelles des processus qui ont conduit à l'émergence de la vie sur Terre trois conditions semblent indispensables à cette évolution chimique : la présence d'eau liquide et de matériaux organiques (carbonés) et celle de sources d'énergie. L'exploration exobiologique d'environnements extraterrestres s'intéresse principalement aux objets planétaires où ces ingrédients peuvent être - ou avoir été - présents.

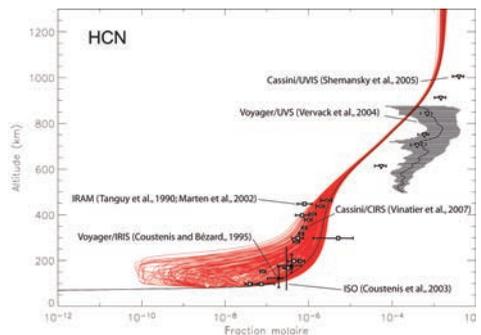
La chimie organique dans des environnements extraterrestres.

Dans le système solaire, outre la Terre, des molécules organiques ont été détectées dans l'atmosphère des planètes géantes, et dans celle de Titan, le plus gros satellite de Saturne et le seul satellite du système solaire possédant une atmosphère dense. De nombreux composés organiques ont aussi été détectés dans les comètes, et, très récemment dans l'environnement d'Encelade, un petit satellite de Saturne. Titan et Encelade intéressent tout particulièrement les exobiologistes car ces deux satellites possèdent très probablement un large réservoir d'eau liquide dans leur structure interne.



La compréhension de cette chimie organique, et plus généralement des processus responsables de la complexification de la matière organique dans l'Univers, s'appuie sur les observations, les expériences en laboratoire et les modèles théoriques. C'est le cas par exemple de Titan, dont l'atmosphère riche en méthane est le siège d'une chimie organique très active. La modélisation théorique d'un tel système atmosphérique consiste à étudier l'évolution spatiale et temporelle des abondances de ses composés atmosphériques en tenant compte des différents processus physico-chimiques susceptibles de modifier leurs abondances (les échanges avec l'extérieur, les processus de transport, les processus chimiques, les changements de phase, etc). Comme dans toute autre démarche scientifique, pour assurer la pertinence de nos modèles théoriques de Titan, il est très important d'évaluer leur précision, en étudiant notamment leur sensibilité aux incertitudes expérimentales, souvent non négligeables, attachées aux données

d'entrée. Les algorithmes utilisés pour ce faire sont des approches statistiques basées sur l'utilisation des nombres aléatoires et ainsi regroupés sous le terme générique de méthode de Monte-Carlo, en référence aux casinos situés dans la principauté du même nom. Cette méthode se distingue des autres approches numériques conventionnelles par son caractère stochastique non-déterministe, particulièrement adapté aux études de propagation des incertitudes propres aux données d'entrée utilisées lors de la simulation d'un système non-linéaire aux nombreuses variables étroitement couplées. Les désaccords existants encore entre les résultats théoriques des différents modèles photochimiques et les observations disponibles de l'atmosphère de Titan, sont difficiles à apprécier en l'absence d'une telle quantification précise de leur incertitude globale attachée. Pour certains composés particuliers, les incertitudes théoriques sont souvent plus importantes que les incertitudes sur les données observationnelles et il devient alors difficile, voire impossible, de contraindre certains paramètres essentiels dans l'étude des atmosphères planétaires.

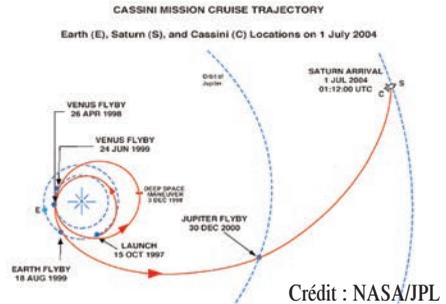


Crédit : Eric Hébrard

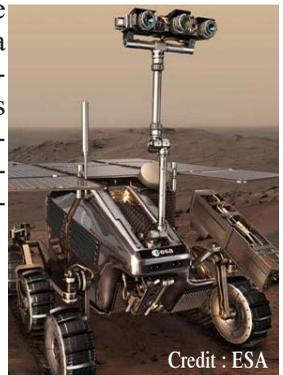
Les missions spatiales et l'exploration exobiologique du système solaire

La recherche et la détection de ces composés sont effectuées en particulier par des observations à partir d'instruments scientifiques placés sur des vaisseaux spatiaux, tels les spectromètres IR (CIRS) et UV(UVIS) et le spectromètre de masse (INMS) placé sur l'orbiteur Cassini de la mission Cassini-Huygens. Des premiers stades de développement de la mission à la récupération des données des instruments et de leur traitement, les mathématiques sont présentes partout. En particulier sur le pas de tir, lors du lancement dont le déroulement nécessite des calculs d'une extrême précision. C'est aussi le cas lors du trajet, qui peut durer plusieurs années. Les missions vers les cibles lointaines nécessitent souvent de faire appel à l'assistance gravitationnelle des planètes croisées pendant le voyage. Ces trajectoires, dont le calcul - là encore - fait appel aux Mathématiques, sont établies à partir des lois de la mécanique céleste. Le vaisseau de la mission cométaire Rosetta, lancé le 2 mars 2004 de Kourou, n'atteindra la comète Churyumov-Gerasimenko qu'en... 2014, après 3 survols de la Terre (en 2005, 2007 et 2009) et un survol de Mars (en 2007). Le vaisseau Cassini, lancé le 15 octobre 1997 de Cap Canaveral, a effectué une trajectoire complexe avec 2 passages au voisinage de Vénus, puis de la Terre, avant de partir vers Jupiter puis Saturne, dont il est devenu un satellite (artificiel)

le 1er juillet 2004. Chacun de ces passages a fourni au vaisseau une accélération lui permettant de continuer son voyage jusqu'à la destination finale.



Bien évidemment, l'exploration spatiale est un moyen essentiel pour la recherche directe de traces de vie dans les environnements extraterrestres du système solaire. Dans ce domaine la cible prioritaire reste Mars. La planète rouge est aujourd'hui très inhospitalière, avec une atmosphère ténue et une surface aride au sol très oxydant. Toutefois, Mars a été très semblable à la Terre au début de son histoire, avec de l'eau liquide en abondance à sa surface et une atmosphère plus dense, au moment même où la vie émergeait sur Terre. Il est donc possible que la vie soit alors aussi apparue sur Mars. Elle est peut-être encore présente, enfouie dans le sous-sol encore habitable de la planète. Les futures missions vers Mars devront donc creuser pour la rechercher.



Credit : ESA

Europe, l'un des satellites de Jupiter est aussi une cible de choix, comme Titan et Encelade, par la présence probable d'un océan interne d'eau liquide proche de sa surface glacée.

Toutes ces instrumentations exobiologiques font bien sûr appel aux mathématiques (tels, par exemple, le traitement d'image pour les données des caméras, la transformée de Fourier pour les données spectroscopiques, et les systèmes de conversion pour l'acquisition et la transmission des données mesurées).

L'Exobiologie hors du système solaire

Nous n'avons pas (encore) mis en évidence de façon claire et non ambiguë la présence d'une vie extraterrestre dans le système solaire. Mais les recherches dans ce domaine sont récentes, et les habitats potentiels n'ont été que peu étudiés avec des moyens nécessaires pour une telle recherche. Si une vie extraterrestre existe dans le système solaire, il est très probable qu'elle doive se limiter à une vie microscopique. Les extraterrestres éventuels de notre système planétaires doivent être des micro-organismes, analogues aux microbes terrestres, capables de vivre dans des environnements aux conditions extrêmes, comme le font de nombreux *extrémophiles* sur Terre.

Pour avoir une chance de trouver une vie extraterrestre évoluée, il faut donc chercher ailleurs, hors du système solaire. Les détections de planètes autour d'autres étoiles se multiplient (près de 300 à ce jour) depuis la première découverte d'une *exoplanète* en 1995, et



Credit : HST

ouvrent des horizons nouveaux pour l'exobiologie.

François Raulin et Eric Hébrard

Pour en savoir (un peu) plus

Gargaud M., D. Despois, J.-P. Parisot et J. Reisse (Eds)
Les traces du vivant Presses Universitaires de Bordeaux (2003)

Raulin F.

A la recherche de la vie extraterrestre Le Pommier - CSI,
Collection "Le Collège de la Cité", (octobre 2006).

Raulin-Cerceau F. A l'écoute des planètes, Ellipses, 2006

Sites web incluant de nombreux liens utiles:

LISA : <http://www.lisa.univ-paris12.fr>

Groupe exobiologie du LISA : <http://www.lisa.univ-paris12.fr/GPCOS/>

GDR Exobio : <http://www.exobio.cnrs.fr/>

Site de M. Babin - De l'origine de la vie à la vie extraterrestre :
<http://exobio.chez.tiscali.fr/>

Site de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) (Cassini-Huygens, Rosetta, Mars Express, ...) :
<http://www.esa.int/esaSC/index.html>

Sites de la NASA : <http://www.jpl.nasa.gov/missions/>

En particulier :

Cassini-Huygens : <http://saturn.jpl.nasa.gov/home/index.cfm>

Missions martiennes "MER" :

<http://www.jpl.nasa.gov/missions/current/marsexplorationrovers.html>

Réactions chimiques oscillantes :

<http://www.faidherbe.org/site/cours/dupuis/jouport.htm>