

L'ESSENTIEL

> Deux éléments ont été indispensables à l'apparition de la vie : de l'énergie pour créer des molécules complexes et des conditions favorisant la rencontre de ces molécules.

> Un système de mares et de sources chaudes volcaniques terrestres fournit tous les ingrédients nécessaires, ainsi

que des cycles de mouillage et de séchage favorisant les interactions moléculaires et la sélection naturelle.

> Si la vie est née dans de telles mares et non au fond de l'océan, cela orientera les recherches de traces de vie dans le système solaire vers des lieux différents.

LES AUTEURS



MARTIN J. VAN KRANENDONK
directeur du Centre d'astrobiologie australien, à l'université de Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney



DAVID DEAMER
biologiste à l'université de Californie, à Santa Cruz



TARA DJOKIC
doctorante en géologie à l'université de Nouvelle-Galles du Sud

Les volcans, berceau de la vie?

An aerial photograph of a large, irregularly shaped hydrothermal pool. The water in the pool displays a vibrant color gradient, transitioning from deep blue in the center to bright green, then yellow, and finally to orange and red towards the edges. The surrounding landscape is rugged and rocky, with patches of snow or light-colored mineral deposits. A paved road curves along the bottom right edge of the pool, and several small figures of people can be seen walking on it, providing a sense of scale. The overall scene suggests a natural wonder in a high-altitude or volcanic region.

LA VIE N'A PEUT-ÊTRE PAS ÉMERGÉ AU FOND
DES OCÉANS, MAIS DANS DES SOURCES
CHAUDES À PROXIMITÉ DE VOLCANS.
TELLE EST L'HISTOIRE QUE RACONTENT
DES BULLES ANCIENNES RÉCEMMENT
TROUVÉES DANS DES ROCHES
AUSTRALIENNES.

La vie serait-elle apparue dans
un bassin d'eau chaude similaire
au Grand Prismatic Spring, dans le parc
de Yellowstone, aux États-Unis ?

Il fait nuit noire. Nous nous frayons un chemin à travers les épais sous-bois du nord-ouest de l'Australie, guidés par notre GPS. La lueur de l'écran, qui éclaire nos pas, est trop faible pour révéler les branches d'arbres jonchant le lit asséché du cours d'eau que nous suivons. Nous trébuchons sans cesse. Le plateau où nous avons garé notre véhicule paraît à des années-lumière et nous ne sommes pas certains que notre GPS aura assez de batterie pour le retour. Une infinité d'étoiles illuminent le ciel de cette nuit de juin 2014. Malheureusement, ce spectacle n'est d'aucun secours à des scientifiques cherchant leur chemin à travers le Pilbara, une région reculée du pays.

Nous sommes deux géologues – Tara Djokic et Martin Van Kranendonk – et, si nous nous trouvons à cet endroit en pleine nuit, c'est parce que nous avons passé la journée captivés par une découverte de Tara Djokic dans une formation de roches sédimentaires âgées de 3,48 milliards d'années nommée le Dresser. Certaines roches de cette formation, les geyserites, sont constituées de strates plissées orange et blanches. Un geyser volcanique les a créées à la surface de la Terre. Elles se sont révélées contenir des bulles dont les caractéristiques sont telles qu'elles se sont sans doute formées quand du gaz a été piégé dans un film collant, très probablement produit par une fine couche de microorganismes semblables à des bactéries. Ces roches et les indices de biofilm suggèrent une nouvelle réponse à l'une des plus grandes énigmes de notre planète: comment et où la vie est apparue. L'événement a pu se produire dans des sources chaudes et des mares volcaniques terrestres il y a environ 3,5 milliards d'années.

Ce tableau de l'origine de la vie est bien différent de celui dépeint par les scientifiques depuis 1977. Cette année-là, le sous-marin *Alvin* a découvert dans les profondeurs de l'océan Pacifique des sources hydrothermales d'où jaillissaient des minéraux contenant du fer, du soufre et des gaz comme le méthane et le sulfure d'hydrogène. Dans cet environnement extrême vivaient des bactéries primitives et de longs vers. Les biologistes ont depuis émis l'hypothèse que ces lieux, protégés des cataclysmes frappant la Terre il y a environ 4 milliards d'années, auraient fourni les ingrédients nécessaires à l'apparition de la vie: un abri, des nutriments et de l'énergie. Mais cette théorie a des faiblesses. En particulier, l'océan est vaste, et les molécules s'y éparpillent probablement trop vite pour interagir et former des membranes cellulaires et des métabolismes primitifs. Comme d'autres chercheurs, nous estimons que des mares terrestres qui, à répétition, s'assèchent et se remplissent à nouveau, seraient des endroits bien plus adaptés à l'apparition de la vie. Les mares cumulent plusieurs avantages: de la chaleur pour catalyser les réactions



chimiques, des périodes d'assèchement pendant lesquelles les polymères peuvent s'assembler à partir d'unités plus simples, des phases où l'eau, de retour, brasse les polymères, et de nouvelles périodes sèches qui les confinent dans de petites cavités où ils peuvent interagir, voire se concentrer dans des compartiments d'acides gras – les prototypes des membranes cellulaires.

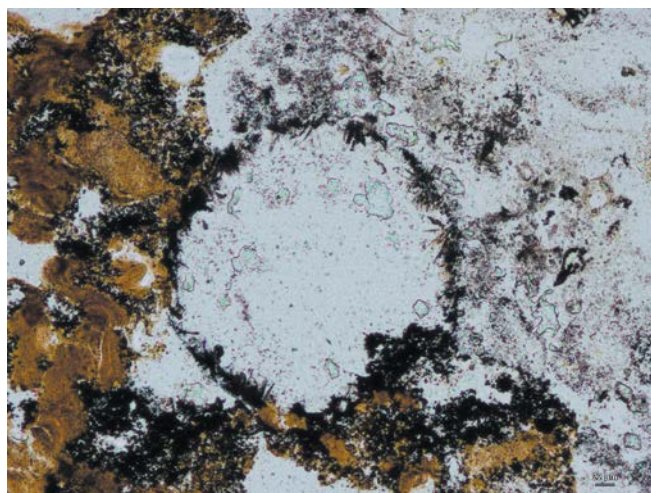
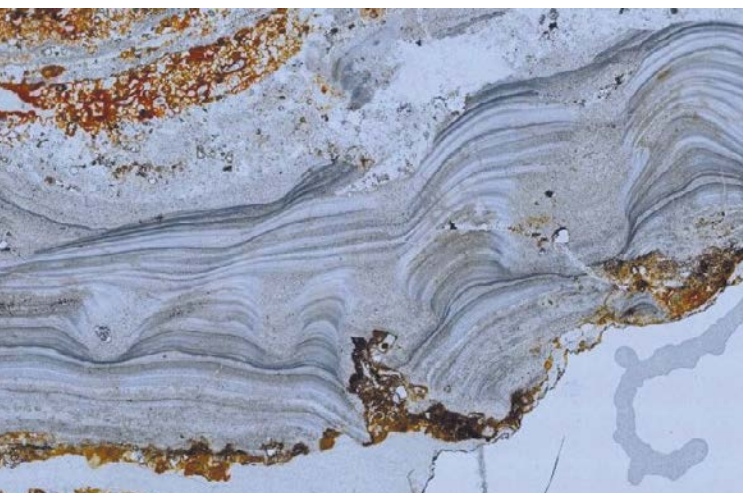
Grâce à sa découverte, Tara Djokic a apporté une preuve géologique majeure que le Dresser, devenu un environnement chaud et aride, a un jour été une terre semblable aux mares de vapeur et aux geysers en éruption du parc de Yellowstone, une zone géothermale active. Or partout dans le Dresser, on trouve des signes de vie fossilisée intimement liés à l'ancien système de sources chaudes. Ainsi, même si le Dresser n'est pas le lieu de la vie la plus primitive (des traces de vie plus anciennes de 500 millions d'années auraient été découvertes ailleurs), on sait désormais que les environnements hydrothermaux terrestres étaient présents très tôt dans l'histoire de la Terre. En 1871, Charles Darwin a suggéré que la vie microbienne était apparue dans quelque petit étang chaud. Aujourd'hui, nombre de scientifiques de différents domaines pensent qu'il a eu là une intuition importante. Et les implications de ces idées s'étendent bien au-delà de notre planète: elles orientent nos recherches de vie extraterrestre dans le Système solaire vers d'autres endroits et d'autres planètes que la théorie d'une apparition de la vie dans les fonds océaniques.

UNE MOUSSE BLANCHE DANS UNE MARE BOUILLONNANTE

Dix ans avant notre excursion nocturne au craton de Pilbara, un autre d'entre nous, David Deamer, avait montré que des sources volcaniques pouvaient favoriser l'assemblage de membranes, les frontières essentielles de toute vie cellulaire. Il avait mené un groupe de scientifiques à Mutnovsky, un volcan actif dans la péninsule de Kamchatka, à l'est de la Russie. Le

DES BULLES DANS DES ROCHES

Dans le Pilbara, en Australie, des roches orange nommées geyserites sont constituées de projections minérales issues de geysers, des sources chaudes jaillissant par intermittence (à gauche). Observées de plus près (au centre, un zoom de largeur 1 cm), ces roches portent une signature typique: une succession de bandes sombres, riches en titane, et claires, enrichies en potassium. Dans les régions marron, ferrugineuses, les auteurs ont observé des bulles minéralisées de quelques dizaines de micromètres (à droite). Préservées depuis 3,5 milliards d'années, elles se seraient formées dans des biofilms collants.



groupe explorait un analogue de site prébiotique: une région qui donne une idée de la Terre il y a quatre milliards d'années, avant que la vie n'émerge. David Deamer pensait qu'exposées aux cycles de mouillage et de séchage caractéristiques de sources chaudes terrestres, des molécules élémentaires s'assembleraient en polymères porteurs d'information comme les acides nucléiques, ingrédients indispensables à la réplication de toute vie primitive. D'autres polymères clés, les peptides, se formeraient de même à partir d'acides aminés. Enfin, des lipides se regrouperaient au sein de compartiments microscopiques qui protégeraient les acides nucléiques. La vie aurait ainsi tous les éléments pour se mettre en route. Or Mutnovsky regorge de sources chaudes et de geysers où tester ce scénario.

David Deamer avait apporté une bouteille de poudre blanche contenant les ingrédients probablement présents sur la Terre prébiotique: quatre acides aminés (les constituants des protéines), quatre bases azotées qui composent les acides nucléiques, ainsi que des phosphates, des glycérols et des lipides. Il versa ce mélange au centre d'une mare bouillonnante. Quelques minutes plus tard, une mousse blanche apparut sur les rebords de la mare. La mousse était composée d'innombrables petites vésicules, chacune contenant des constituants qui devaient être présents dans la soupe originelle.

Si les vésicules s'asséchaient, leurs contenus, déjà à proximité, s'assembleraient-ils en polymères? Pour le savoir, de retour au laboratoire, David Deamer et ses collègues ont mélangé des acides nucléiques simples (des nucléotides) avec des lipides. Ce cocktail a ensuite été soumis aux cycles de mouillage et de séchage, dans des conditions d'acidité et de haute température comparables à celles du bassin de Kamchatka. Résultat: de longs polymères de 10 à plus de 100 nucléotides sont apparus. Par la suite, leur analyse par diffraction aux rayons X a montré qu'ils ressemblaient à de l'acide ribonucléique,

ou ARN. En outre, ces polymères se trouvaient encapsulés au sein de compartiments lipidiques microscopiques, nommés protocellules. Si ces protocellules ne sont pas considérées comme des entités dotées de vie, elles sont en tout cas une étape cruciale vers le vivant.

Dans ses expériences, David Deamer n'a soumis son mélange qu'à quelques cycles de mouillage-séchage et a obtenu des molécules relativement simples. L'un de ses collègues de l'université de Californie à Santa Cruz, l'informaticien Bruce Damer, soupçonnait qu'un nombre plus important de cycles ajouterait une nouvelle donnée: la survie du plus apte. Chaque



La vie a pu apparaître dans des sources chaudes et des mares volcaniques terrestres



phase sèche causerait l'ouverture de la membrane des vésicules, provoquant le mélange des polymères et des nutriments. Ensuite, en présence d'eau, les membranes réencapsuleraient de nouvelles combinaisons de polymères. Les protocellules les plus complexes auraient les meilleures chances de survie: grâce à la plus grande diversité de leur mélange moléculaire, elles résisteraient mieux à des conditions variées. Elles transmettraient ainsi leurs combinaisons de polymères aux protocellules formées pendant le cycle suivant. >

> En 2015, l'informaticien ajouta une troisième phase au cycle: une étape intermédiaire entre les phases mouillées et sèches. L'idée lui vint lors d'une sortie de terrain sur le Dresser à la recherche de stromatolithes, des strates fossilisées de tapis bactériens qui représentent l'une des plus anciennes formes de vie sur Terre. Bruce Damer avançait dans le désert quand son regard fut attiré par des tapis microbiens bruns asséchés, logés dans de petits creux de l'affleurement rocheux. Par curiosité, il y versa de l'eau: les tapis bactériens, devenant verts et semblables à du gel, reprirent vie. Il comprit que si les cycles de mouillage-séchage incluaient aussi une phase de gélification pendant laquelle les protocellules qui ont résisté aux phases précédentes restaient au contact les unes des autres au sein d'un gel de ce type, les polymères et les nutriments pourraient se mélanger et s'échanger à travers les barrières membranaires. Cette communauté de protocellules coopérantes aurait encore plus de chances de trouver les meilleures molécules pour leur survie.

DES BASSINS PROPICES À LA VIE

Les études que nous avons menées ces dernières années nous ont convaincus que les bulles et la composition minérale observées par Tara Djokic dans la formation de Dresser en font un endroit particulièrement propice à un cycle en trois étapes. Lorsque nous nous sommes aperçus que la surface du Dresser avait été recouverte de sources chaudes volcaniques terrestres, nous avons compris qu'elle avait aussi contenu nombre d'ingrédients et de structures requises pour que la vie émerge.

On y trouvait une source d'énergie sous la forme de fluides hydrothermaux circulants, riches en hydrogène et chauffés par le magma en dessous. Les roches contenaient des quantités importantes de bore, un ingrédient crucial de la synthèse du ribose, un sucre entrant dans la composition des acides nucléiques comme l'ARN. De plus, des minéraux de phosphate dissous, provenant des roches sous-jacentes, y rejoignaient la circulation des fluides hydrothermaux acides. Or le phosphate est un constituant non seulement des acides nucléiques, mais aussi de l'ATP, la molécule qui fournit de l'énergie aux cellules. De surcroît, les sources hydrothermales et les dépôts des lacs volcaniques évaporés du Dresser contiennent de fortes concentrations de zinc et de manganèse, des constituants de nombreuses enzymes. Enfin, le Dresser offrait aussi de l'argile, qui peut agir comme catalyseur dans la synthèse de molécules organiques complexes grâce aux couches chargées électriquement des surfaces minérales qu'il contient.

Le trait le plus excitant du Dresser est peut-être son incroyable diversité. Aujourd'hui, le Dresser est sec et rocheux, mais dans leur jeunesse, des zones de sources chaudes

LES PRÉMICES DE LA VIE

Des terres volcaniques émergées émaillées de sources chaudes, mares et geysers auraient déclenché les processus chimiques nécessaires à l'apparition de la vie sur Terre, selon un des scénarios proposés. Le procédé aurait compté sept étapes, de la synthèse chimique à la colonisation d'un nouveau territoire.

1 SYNTHÈSE

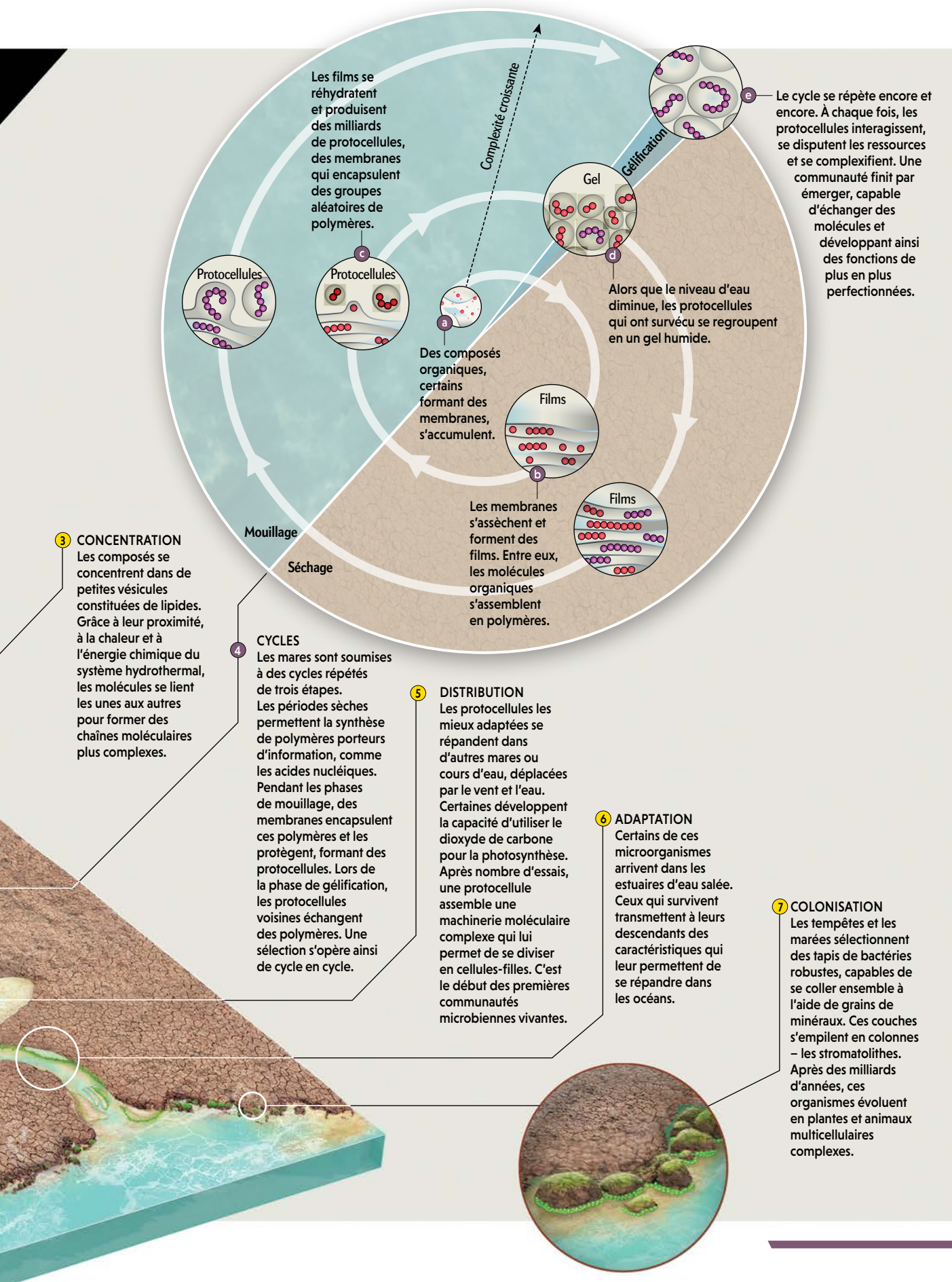
La plupart des blocs élémentaires de la vie, tels que les acides aminés, sont formés dans l'espace puis tombent sur Terre.

2 ACCUMULATION

Dans une région volcanique, les molécules organiques venant de l'espace s'accumulent dans des mares hydrothermales, de même que celles produites dans les sources chaudes alentour.



© Jose Miguel Mayo (illustration) et Jen Christiansen (cycle)



UN PAYSAGE À TRAVERS LES ÂGES

Quand j'ai mis les pieds pour la première fois sur les terres vieilles de 3,5 milliards d'années du Pilbara, qui abritent des traces des débuts de la vie, j'ai été extrêmement déçu. C'était en 1994. J'avais conduit avec entrain depuis la ville de Port Hedland sur la côte ouest, mais pendant les 150 premiers kilomètres, seule la vue de quelques arbres décharnés et brûlés par le soleil était venue tromper la monotonie des plaines poussiéreuses qui s'étendaient à perte de vue. Je me sentais désespéré, assommé par une chaleur intense, à laquelle s'ajoutaient les piqures d'innombrables moustiques.

Mais tandis que nous filions sur l'autoroute en direction de Marble Bar, la ville la plus chaude du pays, de grandes collines commencèrent à pointer à l'horizon. Nous croisions désormais des criques sablonneuses et des rivières.

Alors que nous suivions une piste de terre, les paysages désertiques laissaient peu à peu place à des collines recouvertes d'une herbe à la fois stupéfiante et diabolique: le spinifex. Cette plante pousse en buissons de quelques dizaines de centimètres à un mètre de diamètre, dont les brins s'effilent en aiguilles tranchantes constituées presque exclusivement de silice pure. Ces terribles aiguilles s'insinuent partout. Mon directeur enfila des guêtres, mais il ne m'avait pas averti du danger. Sans équipement approprié, je me suis transformé en porc-épic en quelques minutes, la peau constellée de bouts d'aiguilles qui y restaient pendant des mois.

Mais je n'ai pas regretté le déplacement. Je marchais là sur des roches parmi les plus anciennes et les mieux



Le Pilbara, en Australie, aujourd'hui une terre sèche parsemée de spinifex, a hébergé à une lointaine époque des sources chaudes et des geysers.

préservées sur Terre, contenant des traces de vie remontant presque aux débuts de notre planète. Alors que je regardais des structures ridées qui reposaient sous d'anciens sédiments, j'ai pris conscience que je contemplais les restes de nos plus lointains ancêtres: les précurseurs de toute vie complexe sur Terre.

J'ai pris conscience que je contemplais les restes de nos plus lointains ancêtres

Le Pilbara a beaucoup changé depuis sa formation il y a 3,5 milliards d'années. À cette époque, j'aurais eu sous les yeux une terre volcanique noire, dépourvue de toute végétation. Au-delà des collines, j'aurais peut-être entrevu une mer verte, riche en fer, sous un ciel orangé chargé en dioxyde de carbone et dénué d'oxygène. À proximité, j'aurais traversé des champs de sources chaudes, premières taches colorées sur le sol sombre. Des traînées blanches, jaunes et rouges auraient témoigné de la présence de soufre, d'argile et de fer au milieu des mares de boue bouillonnante et des jets des geysers. Et dans certaines mares, peut-être aurais-je

aperçu des touches de beige, de rouge et de violet: des colonies de microbes adaptés à la chaleur et à la chimie locales. Voire quelques pointes de vert, provenant d'organismes photosynthétiques primitifs.

Si une machine à voyager dans le temps pouvait me transporter un milliard d'années plus tard, je verrais le Pilbara disparaître sous des coulées de lave et de sédiments volcaniques; j'assisterais au mouvement des masses continentales à la surface du globe, puis à leur collision, entraînant la formation des chaînes de montagnes.

Il y a environ 2,5 milliards d'années, j'observerais les océans s'emplir de vie, les mers peu profondes se garnir de stromatolithes, ces petits monticules édifiés couche après couche par des cyanobactéries. Le ciel deviendrait bleu à mesure que ces cyanobactéries photosynthétiques libéreraient de l'oxygène dans l'atmosphère en échange de dioxyde de carbone.

Près de deux milliards d'années plus tard, la planète fut entièrement recouverte d'un manteau de glace, effaçant presque toute forme de vie. Quand celui-ci fondit, la concentration d'oxygène dans l'atmosphère augmenta à nouveau. La vie put enfin s'épanouir. Les animaux et de nouveaux types de plantes ont lentement colonisé les continents. La Terre verdit pour de bon et une grande diversité d'organismes apparut dont, malheureusement pour moi, le spinifex.

M. V. K.

> géothermales comme celle-ci comportent des centaines de mares, chacune avec une acidité et une température légèrement différentes, et des compositions et concentrations variées en ions et autres substances chimiques dissoutes. En outre, la complexité chimique est riche dans des terrains comme celui-ci parce qu'ils contiennent trois interfaces très réactives: entre l'eau et la roche, entre la roche et l'air, et entre l'eau et l'air.

Mélangez le tout: les cycles de mouillage-séchage se produisant plusieurs fois par jour, les conditions chimiques variées des bassins, les interfaces hautement réactives, la capacité des mares à échanger des composants par le biais des geysers, et un réseau de fractures souterraines, interconnectées et remplies de liquide. Faites le calcul, et vous verrez qu'un terrain géothermal contenant une centaine de sources chaudes peut produire un million ou plus de nouvelles combinaisons de conditions chaque année! Ce nombre suggère que la vie a pu apparaître et commencer à évoluer en seulement 10 millions d'années et ce, dès l'installation d'une croûte stable émaillée de masses volcaniques terrestres au milieu des océans, il y a plus de quatre milliards d'années.

SUR TERRE OU DANS L'OCÉAN ?

Tous les scientifiques ne partagent pas notre conviction. L'hypothèse des sources hydrothermales sous-marines a toujours le vent en poupe. Au laboratoire Jet Propulsion de la Nasa, le biochimiste Michael Russell a ainsi développé un modèle alternatif élégant (mais pas encore prouvé) à partir de la découverte du sous-marin *Alvin*. Dans son modèle, des membranes minérales qui constituent de minuscules pores à l'intérieur des roches des cheminées séparent l'eau alcaline de l'eau plus acide. Cela produit un gradient d'acidité qui constitue une forme d'énergie exploitable: les bactéries actuelles l'utilisent pour produire l'ATP dont elles ont besoin. L'autre source d'énergie de ces lieux provient du mélange de gaz dissous tels que l'hydrogène et le dioxyde de carbone. Michael Russell et ses collègues ont émis l'hypothèse que lorsque l'hydrogène sortait de la cheminée hydrothermale et se mélangeait avec le dioxyde de carbone présent dans l'eau de mer ancestrale, un transfert d'électrons s'opérait de l'hydrogène vers le dioxyde de carbone, offrant de l'énergie pour synthétiser plus de composés organiques complexes. Dans ce modèle, les compartiments minéraux ressemblent aux cellules, et l'énergie issue du gradient d'acidité et de l'hydrogène évoluerait en un métabolisme primitif nécessaire aux toutes premières formes de vie.

Les implications de ces deux scénarios s'étendent au-delà des recherches des plus anciennes traces de vie sur Terre: le choix du modèle influe aussi sur la stratégie à adopter dans la quête de vie sur d'autres planètes et

leurs lunes. Si la théorie des sources hydrothermales sous-marines est correcte, les océans glacés d'Encelade, lune de Saturne, et d'Europe, lune de Jupiter, sont des cibles pertinentes. En revanche, si notre modèle est juste, il est peu probable que ces lieux hébergent la vie.

Qu'en est-il de Mars? Des traces témoignent de la présence sur cette planète de mers peu profondes dans un passé lointain, mais pas de l'existence d'un vaste océan ni de zones tectoniques comme celles qui ont créé des cheminées hydrothermales sous-marines sur Terre. Si la vie



Seulement dix millions d'années auraient suffi pour que la vie émerge et commence à évoluer



est apparue dans de telles cheminées, il est peu probable qu'elle ait émergé sur Mars. Mais si elle a débuté sur Terre dans des sources chaudes volcaniques, alors un phénomène similaire a aussi pu se produire sur la planète rouge. En effet, en 2008, le robot explorateur Spirit a découvert sur Mars, dans les collines Columbia, des dépôts de sources chaudes vieux de 3,65 milliards d'années.

L'origine de la vie est comme un puzzle comportant beaucoup de pièces, dont nous ignorons encore trop de choses pour placer chaque morceau au bon endroit. Concernant le Dresser, par exemple, nous ne savons pas ce qui augmente la concentration de certains éléments dans différentes mares ni comment les zones géothermales évoluent, ni même comment leurs différents composants interagissent pour synthétiser ou dégrader des molécules organiques. Des expériences plus sophistiquées de chimie prébiotique dans une série de petites mares chaudes, où l'on étudie comment les molécules organiques complexes se forment, interagissent et se combinent lorsqu'elles sont encapsulées au sein de membranes, nous en diront certainement plus. La route est encore longue, mais, que ce soit sur terre ou dans la mer, les lois de la chimie et de la physique livrent peu à peu des indices pour compléter le puzzle. Et c'est particulièrement grisant de voir ainsi le chemin se dessiner vers la solution. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Djokic et al., **Earliest signs of life on land preserved in ca. 3.5 Ga hot spring deposits**, *Nature Communications*, vol. 8, article n° 15263, 2017.

B. Damer, **A field trip to the archaean in search of Darwin's warm little pond**, *Life*, vol. 6(2), article n° 21, 2016.

D. W. Deamer et al., **Hydrothermal conditions and the origin of cellular life**, *Astrobiology*, vol. 15(12), pp. 1091-1095, 2015.

D. Deamer, **First life : Discovering the connections between stars, cells, and how life began**, University of California Press, 2011.

**FRANCES
WESTALL**

est exobiologiste au Centre de biophysique moléculaire, à Orléans, et membre de l'équipe scientifique de la mission européenne *ExoMars 2020*.



Mars, un autre laboratoire pour explorer les origines de la vie



OÙ ET QUAND LA VIE EST-ELLE APPARUE SUR TERRE ? DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES SONT ENVISAGÉES. COMMENT INFLUENT-ELLES SUR LA PRÉPARATION DES DEUX MISSIONS QUI PARTIRONT EN 2020 À LA RECHERCHE DE TRACES DE VIE SUR MARS, L'EUROPÉENNE EXOMARS 2020 ET L'AMÉRICAINNE MARS 2020 ?
LE POINT AVEC FRANCES WESTALL.

Pensez-vous que la vie a pu apparaître dans des sources chaudes terrestres, comme le suggèrent David Deamer et ses collègues (voir l'article page 28)?

Le travail en laboratoire de David Deamer et ses collègues est intéressant: dans les années 1990, ils ont fait subir à un mélange de nucléotides et de lipides des cycles de sécheresse et d'humidité, dans des conditions d'acidité et de température qui imitaient celles observées dans les sources terrestres actuelles, et ils ont obtenu des sortes de précurseurs de cellules: des molécules ressemblant à de l'ARN encapsulées dans des vésicules lipidiques.

Leurs protocoles sont assez plausibles. L'hypothèse de l'apparition de la vie dans des sources chaudes terrestres présente cependant plusieurs problèmes. D'une part, l'eau d'une source arrive à la surface de la Terre sous pression. Lorsqu'elle sort de terre, la pression chute, ce qui entraîne des recombinaisons moléculaires. Ainsi, en sortant de sa source sur la Terre primitive et en arrivant dans une atmosphère constituée essentiellement de CO_2 , l'eau chaude a dû se dissocier pour produire de l'eau oxygénée (H_2O_2), laquelle a sans doute oxydé toute matière organique.

D'autre part, les sources chaudes terrestres étaient très probablement des environnements instables et peu fréquents. Enfin, si jamais des protocellules sont apparues à la surface du peu de terres émergées qui existaient alors, comment ont-elles survécu, notamment, au rayonnement ultraviolet intense et aux impacts causés par le volcanisme proche, ou par des

météorites? Et comment sont-elles arrivées jusqu'à l'océan? Sans compter le flux rapide de l'eau à la sortie du geyser, qui risquait de les détruire... Ainsi, il se peut tout à fait qu'il y ait eu des processus prébiotiques dans ces environnements, mais la survie des molécules prébiotiques produites, voire des protocellules, y est peu probable.

Quelles sont les autres thèses envisagées?

Selon l'un des scénarios proposés, des radeaux de pierre ponce – une roche volcanique très poreuse – flottant à la surface de l'océan ont pu offrir des conditions propices à l'apparition de la vie: les pores auraient joué le rôle de miniréacteurs, favorisant la concentration de composants prébiotiques dans un environnement protégé de l'extérieur, à une température inférieure à 70 °C. Puis les protocellules éventuellement produites auraient aussi été protégées, tout en recevant continuellement des nutriments. Toutefois, des expériences en laboratoire ont montré que cette géométrie ne favorise pas la formation de ribose, un sucre clé dans la fabrication de l'ARN. De plus, la pierre ponce ne contient pas de carbone. Comment celui-ci, nécessaire à la vie, y est-il arrivé?

D'après un autre scénario, la vie serait née dans des bassins d'eau marine sur les flancs des volcans, semblables à ceux qui bordent des îles volcaniques comme La Réunion. Mais comme les sources terrestres, ces bassins n'offrent pas de protection contre les rayons ultraviolets ni contre les impacts liés aux éruptions volcaniques. De plus, l'acidité n'y favorise pas non plus la formation de ribose.

Les scénarios qui me paraissent les plus probables sont ceux qui font apparaître la vie dans des systèmes hydrothermaux sous-marins, qu'il s'agisse de minéraux poreux dans des sources hydrothermales sous-marines ou de sédiments marins poreux à proximité de flux hydrothermaux. La température, comprise entre 50 et 150 °C, et l'acidité y facilitent les interactions moléculaires. Leurs surfaces favorisent les interactions des molécules réactives qui les constituent avec la matière organique. L'environnement est protégé des ultraviolets et des impacts, et le flux des fluides hydrothermaux, assez important, diffuse les nutriments. Ce sont, enfin, des environnements très répandus...

Où en est-on de la compréhension des traces potentielles de vie vieilles de plus de 3,7 milliards d'années découvertes au Groenland en 1999?

Il existe peu de roches de la Terre primitive préservées à cause de la destruction de la croûte par la tectonique des plaques. Les roches de plus de 3,5 milliards d'années sont très métamorphisées ➤

Après un voyage de neuf mois, la mission *ExoMars 2020* déposera un rover (ci-dessous) sur un site martien où des traces de vie ont pu être préservées. Ce dernier effectuera des prélèvements en profondeur et les analysera à la recherche de telles traces.



> – elles ont subi beaucoup de transformations. Aussi, même s'il y a eu de la vie sur ces roches, ses traces sont très altérées.

C'est pourquoi Minik Rosing, du Muséum géologique de Copenhague, et ses collègues ont recherché, en 1999, des indices indirects de la présence de vie, tels qu'une signature isotopique particulière du carbone, dans des roches de plus de 3,7 milliards d'années. Ils ont ainsi repéré, dans des roches sédimentaires et minérales de la formation d'Isua, dans l'Ouest du Groenland, une abondance de l'isotope carbone 13 compatible avec un métabolisme biologique. L'analyse des isotopes de plomb de ces roches leur a alors indiqué que l'uranium avait été plus abondant que le thorium dans ces roches, avant que l'un et l'autre ne se désintègrent en un isotope (différent) de plomb.

Pour Minik Rosing et ses collègues, l'abondance de l'uranium suggère que cet élément a été séparé chimiquement du thorium *via* une réaction d'oxydation, c'est-à-dire en présence d'oxygène. L'oxygène aurait été apporté par une forme de photosynthèse produisant de l'oxygène à partir de la lumière. C'est possible, mais peu probable. De plus, il reste un doute dû au fait que l'on ne sait pas quel effet l'altération métamorphique a eu sur les molécules étudiées, notamment sur la signature isotopique...

En 2016, Allen Nutman, de l'université de Wollongong, en Australie, et ses collègues ont découvert dans la même formation des structures de 3,7 milliards d'années ressemblant aux stromatolithes de Pilbara, en Australie. Ils y voient, comme à Pilbara, des traces de vie ancienne, mais on ne peut exclure qu'il s'agisse de strates rocheuses plissées par la pression. Si leur hypothèse se confirme, elle renforcerait aussi celle de Minik Rosing.

Une équipe japonaise vient de publier la découverte d'une trace de vie remontant à 3,95 milliards d'années au Canada. Qu'apporte cette découverte au débat sur le lieu où la vie a pu émerger ?

Takayuki Tashiro, de l'université de Tokyo, et ses collègues ont analysé la composition isotopique de graphite trouvé dans des roches métasédimentaires (des dépôts sédimentaires qui se sont solidifiés et ont subi des transformations métamorphiques) vieilles de 3,95 milliards d'années. Comme l'équipe de Minik Rosing, ils ont détecté une teneur en carbone 13 qui suggère que le matériau a été produit par des microorganismes. Avant toute interprétation ou conjecture, il faut déjà confirmer l'âge de ces roches. Par ailleurs, là aussi, on ignore quel a été l'effet de la transformation métamorphique sur la composition isotopique...

Un retour d'échantillons martiens est envisagé, mais ne sera pas possible avant 2030

Où cherche-t-on les plus anciennes traces de vie aujourd'hui ?

Les plus anciennes traces de vie bien préservées se trouvent dans des roches de l'Archéen inférieur (il y a environ 3,5-3,3 milliards d'années), surtout en Afrique du Sud, où les mieux préservées sont à Barberton, et en Australie, dans le Pilbara. Ces roches sont étudiées par des méthodes diverses et de plus en plus pointues. Il s'agit aussi de chercher de nouveaux types de biosignatures qui permettraient de détecter des traces très subtiles, comme celles qu'auraient pu laisser des bactéries chimiotrophes.

Quelles sont les implications de ces recherches pour les missions d'exobiologie ?

Tous les travaux montrent la difficulté de déterminer les biosignatures et d'être sûr que les phénomènes dégagés sont vraiment issus de la vie. Cela signifie qu'il sera difficile pour des missions *in situ* sur Mars, comme *ExoMars*, d'être sûres d'avoir trouvé des traces de vie. Néanmoins, si *ExoMars* arrive à identifier de la matière organique martienne, et si cette matière est bien d'origine biologique et est préservée, il est possible que l'on soit capable d'y détecter des traces chimiques de la vie, comme la structure des molécules et leur chiralité. La matière organique préservée dans le sous-sol de Mars devrait être mieux conservée que sur Terre, car la gravité de Mars est beaucoup moins importante, et donc les effets du métamorphisme aussi. Mars est de fait un autre laboratoire très prometteur pour explorer les origines de la vie. Mais si *ExoMars* trouve un indice, il faudra alors rapporter le matériel sur Terre pour des analyses plus approfondies.

Un retour d'échantillons sur Terre est-il réellement envisagé ?

Oui, mais ce ne sera sans doute pas possible avant les années 2030...

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

F. Westall et al., **A hydrothermal-sedimentary context for the origin of life**, *Astrobiology*, sous presse.

J. L. Vago et al., **Habability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars rover**, *Astrobiology*, vol. 17, pp. 471-510, 2017.

T. Tashiro et al., **Early trace of life from 3,95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada**, *Nature*, vol. 549, pp. 516-518, 2017.

A. P. Nutman et al., **Rapid emergence of life shown by discovery of 3,7-million-year-old microbial structures**, *Nature*, vol. 537, pp. 535-538, 2016.

M. Rosing et R. Frei, **U-rich archaean sea-floor sediments from Greenland – indications of >3 700 Ma oxygenic photosynthesis**, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, vol. 217, pp. 237-244, 2004.

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY JACQUES CHIRAC

En librairie
le 6 décembre
2017

LA REVUE GRADHIVA★



En croire ses sens

L'intérêt croissant des anthropologues pour les cultures matérielles a fourni ces dernières années un nouveau cadre méthodologique et théorique à l'étude des religions, montrant que celles-ci ne relèvent pas uniquement du domaine de la pensée ou de la foi.

Elles sont le produit de gestes ordinaires et répétitifs, de contraintes relationnelles, économiques et spatiales, de déterminismes techniques et de potentialités médiatiques. Les récents travaux sur la fabrication d'objets culturels, l'action des humains et non-humains sur les espaces liturgiques, l'exécution de gestes rituels ou encore l'éducation corporelle des pratiquants, plaident pour une approche pragmatique du fait religieux. Dans la continuité de cette démarche, ce numéro porte l'attention sur le faire plus que sur le croire et développe une réflexion sur les dimensions matérielles et sensorielles de l'expérience religieuse.

À partir d'ethnographies détaillées qui font dialoguer les mondes afro-cubains, chrétiens et musulmans, il explore la manière dont la religiosité s'expérimente en marchant, touchant, récitant, lisant, entendant ou voyant. Quels types de connaissances émergent-ils des divers modes de contact avec la matière ? En quoi les qualités esthétiques conduisent-elles à la formation, la transmission et l'incorporation de savoirs spécifiques ?

Comment la sensorialité structure-t-elle l'expérience, l'imagination et la praxis ?

L'ESSENTIEL

> Les voyages dans l'espace ont toujours été dangereux, mais de nouveaux résultats montrent que les rayons cosmiques sont encore plus nocifs pour le cerveau qu'on ne le pensait.

> Pour simuler les effets des rayons cosmiques sur les astronautes, des chercheurs ont exposé des souris à un flux de particules chargées. Ils ont

observé à la fois des altérations comportementales et des dommages neuronaux.

> Des blindages renforcés pour les vaisseaux, des combinaisons spatiales plus performantes et des médicaments pour protéger le cerveau seront nécessaires pour permettre aux humains de séjourner de longues durées dans l'espace.

L'AUTEUR



CHARLES LIMOLI
neuroscientifique et
radiobiologiste à la faculté
de médecine de l'université
de Californie à Irvine,
aux États-Unis

Le cerveau, interdit de voyage spatial

DES EXPÉRIENCES SUR DES SOURIS MONTRENT QUE LE RAYONNEMENT COSMIQUE DÉTRUIT DES CONNEXIONS NEURONALES ET DÉGRADE LES PERFORMANCES COGNITIVES. UN OBSTACLE PLUS SÉRIEUX QU'ON NE LE PENSAIT POUR LES VOYAGES INTERPLANÉTAIRES HABITÉS.

Depuis des millénaires, les hommes regardent le ciel et rêvent de voyager vers les étoiles. Maintenant que certains ont marché sur la Lune et vécu parfois plusieurs mois en orbite dans la Station spatiale internationale, il semble inévitable que nous tentions d'aller plus loin : Mars, le reste du Système solaire, voire au-delà. Ce rêve est partagé par de nombreuses cultures et occupe les agences spatiales de plusieurs nations.

Et pourtant, nous savons que l'espace est un milieu hostile. Chaque fois que des astronautes quittent la Terre, ils sont confrontés à un froid extrême, à l'absence d'atmosphère, à la microgravité et à l'exposition au rayonnement cosmique. Ces dangers ont jusqu'à présent été considérés comme surmontables : essentiellement des problèmes que les ingénieurs font leur possible pour régler et des risques que les courageux voyageurs spatiaux acceptent de prendre. Mais plusieurs équipes, dont la mienne, ont montré récemment que les

radiations dans l'espace pourraient être plus nocives que nous ne le pensions, en particulier pour le cerveau humain, un organe fragile et néanmoins essentiel. Les chercheurs suspectaient depuis des décennies un tel impact, mais ce n'est que depuis peu que nous avons des indices concrets donnant toute la mesure des effets des rayons cosmiques sur le cerveau.

En soumettant des souris à un rayonnement comparable à celui auquel s'exposent les astronautes dans l'espace, mes collègues et moi avons observé des troubles cognitifs importants et durables, qui se retrouveraient probablement chez les humains et compromettraient potentiellement le succès des missions spatiales. Si les astronautes de la Station spatiale internationale, qui est en orbite relativement basse (à environ 400 kilomètres d'altitude), sont dans une large mesure protégés par le champ magnétique terrestre, le risque pour les voyageurs vers Mars et au-delà est autrement plus sérieux.

Notre capacité à réduire ces dangers pour les astronautes est pour l'instant limitée. En >