



mer sur l'une des faces d'un cristal de calcite, puis s'y répliquer (de récentes expériences indiquent que certaines protéines s'autorépliquent). Ainsi, la chiralité de la vie serait le fruit du hasard.

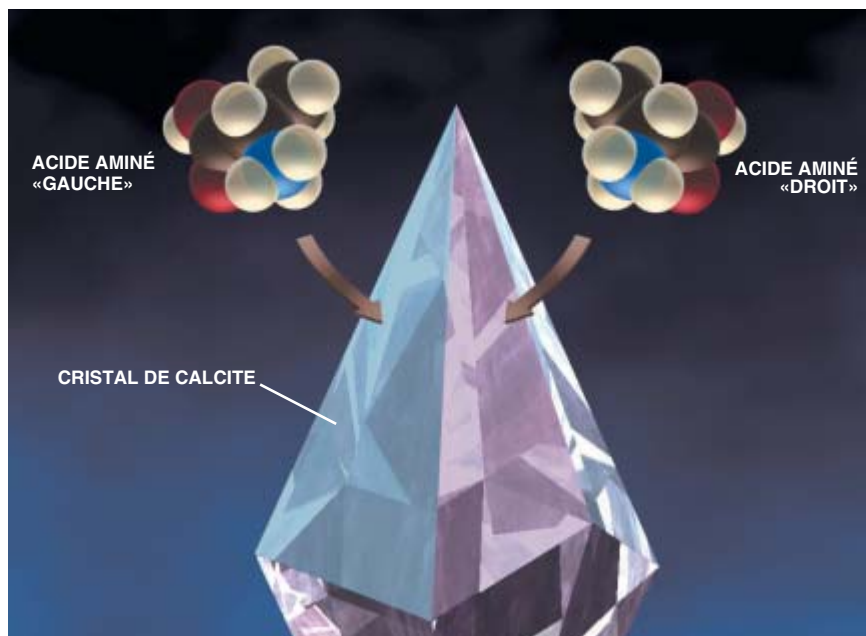
Les minéraux ont offert des niches protectrices aux ingrédients de la vie, leur ont fourni un support, ont sélectionné, concentré et organisé certains d'entre eux. Ils semblent aussi avoir favorisé les réactions biochimiques de la vie primitive, en catalysant des étapes clés de la synthèse des molécules biologiques complexes.

Les minéraux, catalyseurs de réactions

Passionné par les origines de la vie, le chimiste allemand Günter Wächtershäuser fut le premier à proposer que les minéraux avaient eu un rôle décisif dans les premières étapes de la vie. En 1988, il émit l'hypothèse que les sulfures de fer et de nickel, abondants près des sources hydrothermales, auraient servi de matrice, de catalyseur et de source d'énergie dans la formation de molécules biologiques. Selon lui, les premières entités vivantes étaient des revêtements moléculaires qui adhéraient aux surfaces chargées positivement de la pyrite, un minéral composé de fer et de soufre ; elles tiraient leur énergie des réactions chimiques produites par la pyrite. Cette hypothèse est étayée par le fait que certaines enzymes métaboliques (les molécules qui aident les cellules vivantes à transformer l'énergie) ont, en leur centre, des atomes de fer et de soufre.

Les réactions biologiques nécessitent de l'azote sous forme d'ammoniac, mais on pense que la seule forme d'azote présente sur la Terre primitive était combinée sous forme de diazote (l'azote présent dans l'atmosphère). Toutefois, on a réussi à synthétiser de l'ammoniac en mettant en présence de l'hydrogène, de l'azote et de la magnétite (de l'oxyde de fer), à des conditions de pression et de température caractéristiques de celles qui règnent près des bouches hydrothermales : la magnétite catalysa la synthèse d'ammoniac.

Dans notre laboratoire, nous avons fait des expériences s'inspirant de la théorie de G. Wächtershäuser. Nous avons postulé que le métabolisme, c'est-à-dire l'ensemble des transformations chimiques qui s'accomplissent dans un organisme vivant, pouvait avoir lieu sans les traditionnels catalyseurs, les enzymes, mais en présence de minéraux,



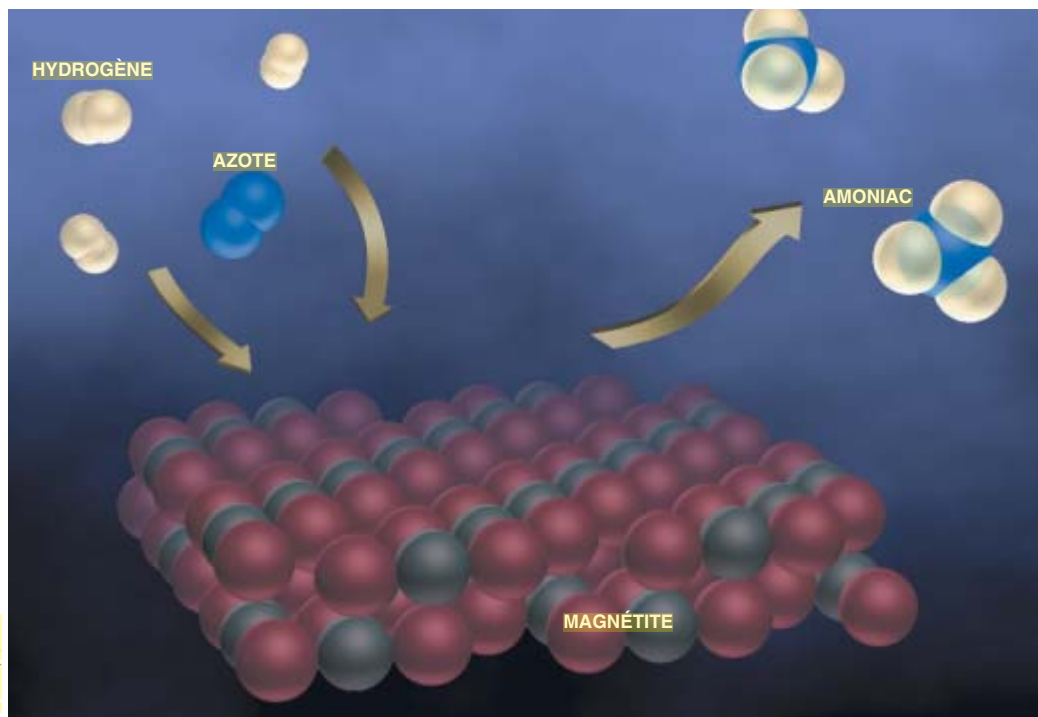
3. LES MINÉRAUX ONT SÉLECTIONNÉ UN TYPE DE MOLÉCULES. La calcite a tendance à attirer les acides aminés gauches et droits sur des faces différentes des cristaux qu'elle forme. Un tel mécanisme de sélection pourrait expliquer pourquoi la vie n'utilise que les acides aminés gauches.

Laurence Conklin

K. Eward, BioGrafix

notamment des oxydes et des sulfures. Nous avons soumis des ingrédients présents sur la Terre primitive (eau, dioxyde de carbone et minéraux) aux conditions de température et de pression des sources hydrothermales. Nous avons fait la plupart de nos expériences dans de petites capsules en or soudées, que nous placions dans une chambre en acier massif où régnait une pression de 2×10^8 pascals (2 000 atmosphères) et une température d'environ 250 °C. Nous voulions, lors de ces synthèses organiques, obtenir des molécules ayant un nombre croissant d'atomes de carbone. C'est, rappelons-le, l'une des réactions chimiques fondamentales de la vie ; elle se déroule de deux façons différentes, selon les minéraux utilisés. Quand ce sont des minéraux communs, tels des oxydes et des sulfures de fer, de cuivre et de zinc, ils favorisent l'addition de molécules de carbone par des réactions de Fischer-Tropsch, réactions de synthèse organique classiques. Lors de ce procédé de synthèse de molécules organiques à partir de carbone et d'hydrogène, ces deux types de molécules réagissent pour former du méthane, qui contient un atome de carbone. En ajoutant davantage de monoxyde de carbone et d'hydrogène, on obtient de l'éthane, une molécule à deux atomes de carbone, puis la réaction se poursuit, ajoutant un atome de carbone à chaque nouvelle étape. Dans l'industrie chimique, cette réaction autorise la production de molécules contenant pratiquement n'importe quel nombre d'atomes de carbone. Nous avons ainsi produit des molécules de plus de 30 atomes de carbone en moins d'une journée. Des molécules organiques ont sans doute été synthétisées de cette façon aux abords des sources hydrothermales dans le passé prébiotique de la Terre.

Quand les minéraux utilisés sont des sulfures de nickel ou de cobalt, l'addition de carbone se fait principalement par carbonylation, c'est-à-dire par insertion d'un groupe carbonyle constitué d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène. Les groupes carbonyle se lient facilement aux atomes de nickel et de cobalt, mais la liaison n'est pas suffisamment forte pour les empêcher de se lier à d'autres molécules. Groupe carbonyle après groupe carbonyle, des molécules de plus en plus longues apparaissent. En introduisant d'autres réactifs présents dans les sources hydrothermales, on obtient des molécules très proches des molécules biolo-



4. LES MINÉRAUX ONT ÉTÉ DES CATALYSEURS efficaces, favorisant certaines réactions chimiques. La magnétite, un oxyde de fer, déclenche la combinaison de l'azote et de l'hydrogène en ammoniac, principale source d'azote pour les cellules vivantes. En l'absence de magnétite, cette réaction n'aurait pas lieu.

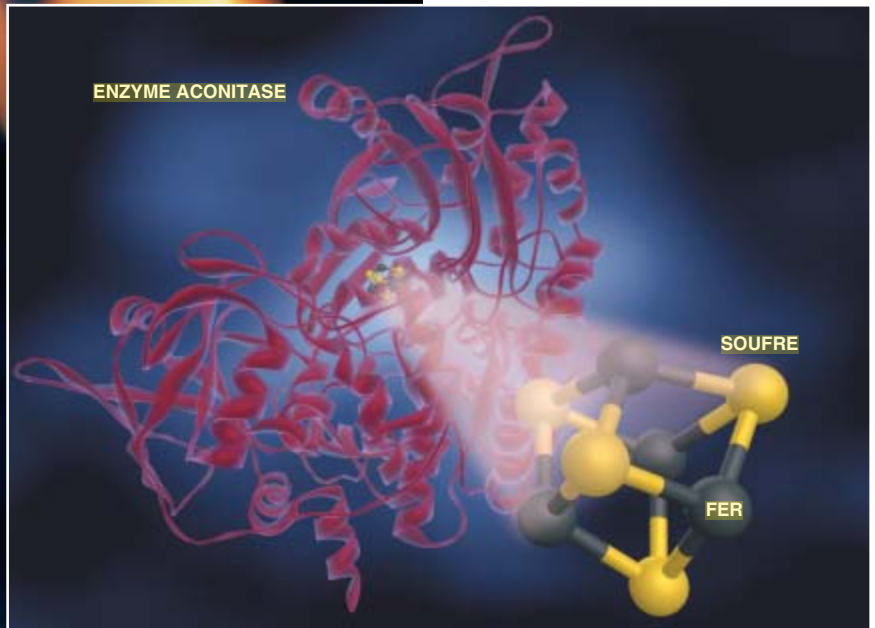
giques. Par exemple, avec un thiol (une molécule contenant du soufre) à neuf atomes de carbone, et du monoxyde de carbone, on observe l'allongement de la molécule organique en un acide à dix atomes de carbone (acide décanoïque), qui ressemble aux acides qui interviennent dans les réactions métaboliques des cellules vivantes. En répétant ces types de réactions simples, ajoutant un groupe carbonyle par-ci ou un groupe hydroxyde par-là, la synthèse de toute une variété de molécules organiques complexes est possible.

Nous avons fait... 1 500 expériences de synthèse organique hydrothermale, ce qui nous a livré un « catalogue » des molécules produites sur la Terre primitive. Ces travaux ont révélé un autre comportement des minéraux, plus complexe, qui a sans doute eu des conséquences importantes pour la chimie prébiotique. Alors que la plupart des études antérieures des origines de la vie ont considéré les minéraux comme des solides stables, où les molécules pouvaient s'assembler, nous avons observé que les minéraux se dissolvent dans les conditions de température et de pression qui règnent près des sources hydrothermales, et qu'ils libèrent alors des atomes ou des molécules qui jouent le rôle d'un réactif dans les réactions chimiques.

Les minéraux, des réactifs chimiques

Nous avons découvert fortuitement la réactivité des minéraux au cours de nos expériences de catalyse dans les capsules d'or. Outre l'acide décanoïque à dix atomes de carbone, les réactions de carbonylation ont produit des quantités notables de soufre, de sulfures organiques, de méthanthiol et d'autres composés soufrés. Nous savons qu'une partie de ces réactions se produit près des sources hydrothermales, puisque de spectaculaires colonnes de sulfure de plusieurs mètres de hauteur s'y dressent. Ces colonnes se forment à mesure que des panaches d'eau chaude riche en minéraux remontent du plancher océanique, entrent en contact avec de l'eau froide des profondeurs et déposent leurs minéraux (la solubilité des minéraux dissous dans l'eau diminue quand la température baisse, de sorte qu'ils précipitent).

Nous avons aussi découvert que du fer est libéré dans les capsules ; il colore les solutions aqueuses qui y sont contenues. À mesure que le minéral se dissout, le fer forme des complexes organométalliques brillants rouges et orangés, où des atomes de fer sont entourés de diverses molécules organiques. Aujourd'hui, nous



K. Enari, BioGrafix

5. LES MINÉRAUX ONT FOURNI DES RÉACTIFS pour diverses réactions chimiques essentielles. Ainsi, le sulfure de fer, dans les conditions extrêmes de température et de pression qui règnent aux abords des sources hydrothermales, se «dissout» en fer et en soufre, des éléments qui constituent le centre actif de certaines enzymes biologiques, telle l'aconitase.

cherchons dans quelle mesure ces complexes potentiellement réactifs pourraient avoir agi comme des enzymes, favorisant la synthèse de nouvelles molécules. Aujourd'hui il semble confirmé que les minéraux dissous ont joué un rôle important dans l'apparition de la vie.

Les mécanismes d'apparition de la vie ont certainement été trop complexes pour s'être produits en une seule fois. Plusieurs événements se sont succédé, dont chacun a ajouté un degré d'ordre et de complexité au monde des molécules prébiotiques. La première étape a dû être la synthèse des tout premiers éléments constitutifs. Un demi-siècle de recherches a révélé que les molécules de la vie ont été produites en abondance, au sein de la nébuleuse dont est issu le Système solaire, à la surface des océans et au voisinage des sources hydrothermales. La Terre primitive abritait une diversité de molécules bien supérieure à celle dont la vie pouvait faire usage.

Les minéraux ont contribué à imposer de l'ordre dans ce chaos, d'abord en confinant et en concentrant les molécules, puis en les sélectionnant et en les assemblant, ce qui

a favorisé l'apparition des premiers systèmes moléculaires autoréplicatifs. Ces minéraux ne sont d'ailleurs pas exclusivement terrestres. Des micrométéorites ont peut-être été sources de vie : elles contiennent des composés organiques, elles sont poreuses, et renferment des sulfures métalliques, des oxydes et des argiles. Au contact de l'eau, elles auraient pu jouer un rôle tout à fait similaire à celui des minéraux des sources hydrothermales. L'hypothèse des micrométéorites complète celle des sources hydrothermales.

Les premiers systèmes autoréplicatifs n'ont pas créé la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui, mais ils ont pu, pour la première fois, inventer des propriétés indispensables à la vie. Dans ce scénario, une molécule autorépliquative serait apparue, puis aurait utilisé au mieux les ressources de son environnement. Des mutations seraient apparues dans des «molécules-filles», et les mieux adaptées auraient été «sélectionnées». Par cette sélection moléculaire naturelle, les systèmes moléculaires autoréplicatifs auraient commencé à évoluer, devenant inéluctablement de plus en plus efficaces et plus complexes.

Nous recherchons des réactions chimiques simples qui conduisent à un système autoréplicatif, peut-être un système lié aux cycles métaboliques communs à toutes les cellules vivantes. Nous sommes loin de recréer la vie en laboratoire et peut-être ne parviendrons-nous jamais à identifier les transformations chimiques qui ont donné naissance à la vie sur la Terre. Aujourd'hui, nous pouvons seulement affirmer que les minéraux ont joué un rôle essentiel dans l'apparition de la vie.

Robert HAZEN, professeur des sciences de la Terre à l'Université George Mason, mène ses recherches dans le Laboratoire Washington de géophysique de l'Institut Carnegie.

H. MOROWITZ, *Beginnings of Cellular Life*, Yale University Press, 1992.

D. DEAMER et G. FLEISCHAKER, *Origins of Life : The Central concepts*, Jones and Barlett, 1994.

J. HOLLAND, *Emergence : From Chaos to Order*, Helix Books, 1998.

N. LAHAV, *Biogenesis : Theories of Life's Origin*, in Oxford University Press, 1999.

Les fureurs du Soleil

Sur la Terre, on cherche à prévoir les caprices du temps, les ouragans, les tempêtes et les orages pour minimiser les dégâts qu'ils pourraient causer. On évacue les personnes lorsqu'un ouragan est annoncé, on lance des avis de tempête pour que les marins regagnent le port le plus proche, ou encore on décide d'avancer une récolte de quelques jours avant qu'un orage de grêle ne la détruise.

Pourquoi s'intéresse-t-on à la météorologie de l'espace? Parce que pendant les éruptions du Soleil, les perturbations subies par l'atmosphère ont parfois de lourdes conséquences sur les réseaux électriques, sur les satellites, sur les composants électroniques miniaturisés ou encore sur les astronautes.

Trois types de perturbations sont en cause : des ondes électromagnétiques, telles des bouffées de rayonnements ultraviolet et X sont émises ; des particules accélérées sont éjectées en masse, tels des protons, des électrons et des noyaux d'atomes ionisés ; enfin, le vent solaire (un flux de particules chargées) est perturbé et des ondes de choc interplanétaires lors d'une éjection coronale, s'y propagent. Les éruptions ayant lieu dans les régions actives qui entourent les taches solaires engendrent de grandes variations du flux des rayonnements ultraviolet et X. De plus, ces mêmes éruptions créent les variations du vent solaire et des ondes de choc interplanétaires. En revanche, on ignore encore l'origine précise des particules accélérées : sont-elles accélérées par le Soleil ou par l'onde de choc interplanétaire? Les astrophysiciens en débattent.

Aujourd'hui, l'un des enjeux des astrophysiciens est de prévoir ces éruptions solaires. James Burch (voir *Éjections coronales et tempêtes spatiales*, page 46) examine ici les mécanismes des éjections coronales, tandis que Pierre Lantos et Tahar Amari (voir *Éruptions solaires et météorologie de l'espace*, page 54) s'intéressent aux éruptions solaires et à leurs conséquences. À défaut de pouvoir éliminer les sautes d'humeur du Soleil, on les surveille étroitement et on cherche à les prévoir.

Lors des éruptions du Soleil, les particules et les rayonnements émis ont parfois des conséquences néfastes sur les circuits électriques et sur les dispositifs électroniques à terre ou embarqués sur les avions et, *a fortiori*, à bord des satellites et des navettes spatiales. L'enjeu des astrophysiciens est aujourd'hui de prévoir ces éruptions pour en évaluer les conséquences possibles et tenter de les minimiser. Les principaux équipements menacés par les éruptions solaires (*en bleu*) et les éjections coronales (*en vert*) ont été rassemblés dans ce tableau (les perturbations découvertes le plus récemment, en 2000, sont indiquées dans le haut du tableau, les plus anciennes, découvertes vers 1960, figurent en bas).

Les conséquences des fureurs du Soleil

Rayonnements X et ultraviolets

Particules solaires

- Constellations de satellites
- Surveillance du lancement des satellites
- Systèmes de localisation et altimétrie
- Risques liés aux rayonnements (avions)
- Rentrée des satellites dans l'atmosphère
- Électronique embarquée (satellites et avions)
- Phénomènes de charges dans les satellites géostationnaires
- Explorations en géophysique
- Réseau de distribution de l'électricité
- Câbles téléphoniques
- Panneaux solaires de satellites
- Risques d'irradiation des astronautes
- Télécommunications avec les sous-marins
- Radars transhorizon
- Prévion de l'orbite des satellites
- Télécommunications par ondes courtes

Particules de la magnétosphère

Activité géomagnétique