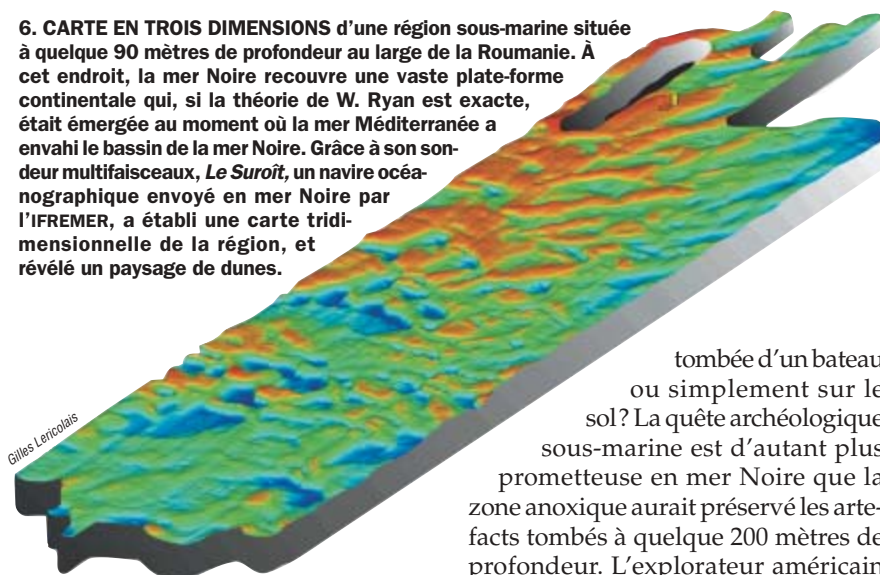


6. CARTE EN TROIS DIMENSIONS d'une région sous-marine située à quelque 90 mètres de profondeur au large de la Roumanie. À cet endroit, la mer Noire recouvre une vaste plate-forme continentale qui, si la théorie de W. Ryan est exacte, était émergée au moment où la mer Méditerranée a envahi le bassin de la mer Noire. Grâce à son sondeur multifaisceaux, *Le Suroît*, un navire océanographique envoyé en mer Noire par l'IFREMER, a établi une carte tridimensionnelle de la région, et révélé un paysage de dunes.



tombée d'un bateau ou simplement sur le sol? La quête archéologique sous-marine est d'autant plus prometteuse en mer Noire que la zone anoxique aurait préservé les artefacts tombés à quelque 200 mètres de profondeur. L'explorateur américain Robert Ballard s'est lancé dans cette quête. À l'aide d'une caméra-robot, il a notamment trouvé un navire romain dans un état exceptionnel de conservation, déposé par quelque 300 mètres de fond au large des côtes turques. La forme du fond juste après le détroit du Bosphore pourrait aussi livrer une preuve irréfutable de l'existence du Déluge. Si le Bosphore a brusquement laissé s'écouler un flot si puissant, alors les traces d'une intense érosion se trouvent à cet endroit. Une campagne d'étude du relief sous-marin devant le Bosphore devrait les révéler. Elle ne se fera qu'avec l'aval du gouvernement turc, car la forme du fond sous-marin à cet endroit est un secret militaire. Les sous-marins russes, américains et turcs ont sûrement déjà mené une telle étude. Comment auraient-ils pu se faufiler dans leurs sous-marins à travers le Bosphore pendant toute la guerre froide s'ils n'avaient eu une connaissance précise du relief sous-marin? Ces précieuses données scientifiques risquent malheureusement de rester secrètes jusqu'au prochain Déluge.

sur la plate-forme continentale de Roumanie, d'Ukraine et de Bulgarie, car on devrait y trouver de nouvelles preuves de l'existence d'un ancien rivage submergé. Les recherches archéologiques ne sont pas non plus à négliger. Ainsi, les traces des populations qui vivaient à proximité de la mer Noire ont été trouvées en Bulgarie. Les archéologues bulgares et français ont notamment retrouvé sur le rivage bulgare les sépultures laissées par une civilisation avancée d'origine mystérieuse. Datées de quelque 6 500 ans, ces tombes témoignent d'un haut degré de maîtrise de la métallurgie. Cette civilisation qui semble venir de nulle part pourrait avoir laissé plus de traces sous les eaux de la mer Noire. Les archéologues de l'Académie des sciences bulgare ont retrouvé sous la mer, des traces de bois coupés et probablement de feu... En outre, il y a 30 ans, un géologue bulgare, Petko Dimitrov, a mis au jour par hasard une assiette néolithique enfouie dans des sédiments sous 100 mètres d'eau, au Nord-Ouest de la mer Noire. Est-elle

Gilles LERICOLAIS, géologue au Département des géosciences marines, à Brest.

William RYAN et Walter PITMAN, *Noah's Flood : The New Scientific Discoveries of the Event that Changed History*, Simon & Schuster, 1999.

Egon DEGENS et David ROSS, *Chronology of the Black Sea over the last 25 000 years*, in *Chem. Geol.*, vol. 10, pp. 1-16, 1972

W. RYAN et al., *An abrupt drowning of the Black Sea shelf*, *Marine Geology*, vol. 138, p. 119-126, 1997

Ali AKSU, Rick HISCOTT, et Durmaz YASAR, *Oscillating Quaternary water levels of the Marmara Sea and vigorous outflow into the Aegean Sea from the Marmara Sea Black Sea drainage corridor*, in *Marine Geology*, vol. 153, pp. 275-302, 1999.

D. ROSS, E. DEGENS et J. MACILVAINE, *Black Sea : recent sedimentary history*, in *Science*, vol. 170, pp. 163-165, 1970.

J. MILLIMAN, et K. EMERY, *Sea levels during the past 35 000 years*, in *Science*, vol. 162, pp. 1121-1123, 1968.

Les minéraux et la naissance de la vie

ROBERT HAZEN

Il y a quatre milliards d'années, la vie est née sur une Terre recouverte d'air, d'eau et de roches. Quel fut le rôle de chacun de ces éléments dans l'apparition des premières molécules biologiques ? La présence des minéraux aurait été déterminante.

La Terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années, mais la vie ne s'y est pas immédiatement développée. En l'absence d'atmosphère, elle était régulièrement stérilisée par de fréquentes collisions avec des astéroïdes. Près de 500 millions d'années s'écouleront encore avant que n'apparaisse, en l'espace de quelques centaines de millions d'années, une vie microscopique vite foisonnante. Nul ne sait précisément comment la vie est apparue, mais le premier organisme vivant est né des seules ressources disponibles sur la Terre primitive : l'air, l'eau et les roches.

Parmi ces trois éléments, l'air et l'eau ont longtemps été considérés comme les vedettes de l'apparition de la vie, les roches ne faisant office que de figurants ou de seconds rôles : cette distribution des rôles était une erreur. Un nombre important d'expériences récentes révèlent que les minéraux ont joué un rôle décisif dans les réactions chimiques élémentaires qui ont présidé à l'apparition de la vie.

Dans le scénario de l'apparition de la vie, le premier acte a sans doute été la formation de molécules à base de carbone capables de s'assembler. Les éléments constitutifs essentiels des organismes vivants (des sucres riches en énergie, des lipides qui sont les constituants des membranes et des acides aminés) contiennent parfois plus d'une douzaine d'atomes de carbone par molécule. Un grand nombre de ces molécules se lient à leur tour pour former des chaînes de polymères et divers

arrangements moléculaires. Or, les composés carbonés les plus abondants disponibles sur la planète primitive étaient des gaz à un seul atome de carbone par molécule, notamment du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone et du méthane. Or, l'assemblage de petites molécules en grandes structures moléculaires a sans doute été très difficile en raison de l'intense rayonnement ultraviolet solaire qui pénétrait dans l'atmosphère de la Terre primitive et rompait instantanément toute liaison moléculaire. Pour que les molécules s'assemblent, elles ont dû être protégées.

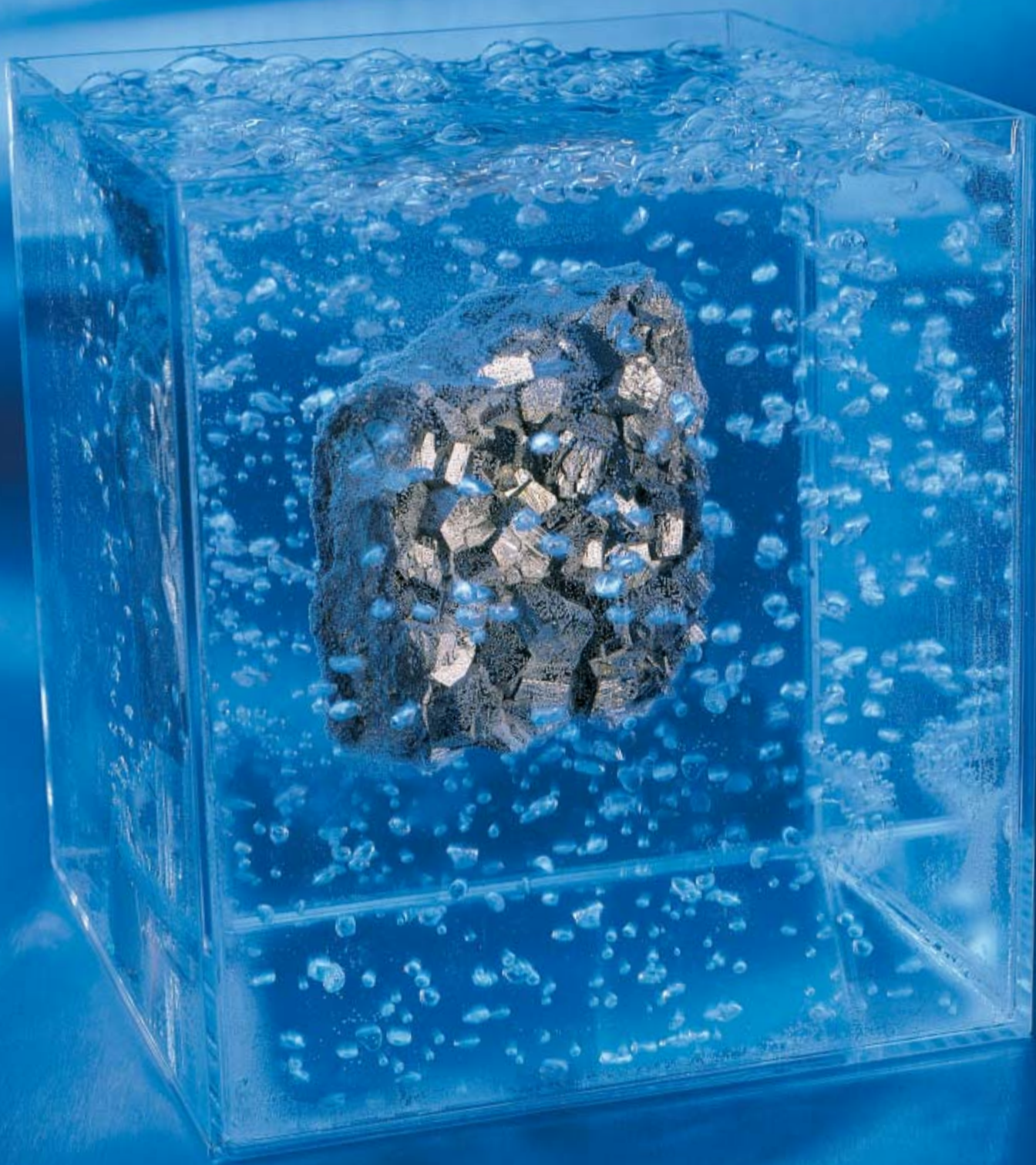
Aujourd'hui, on suppose que ce sont les minéraux qui ont fourni protection et assistance aux molécules carbonées. Les minéraux ont eu au moins cinq fonctions importantes. Ils ont procuré de minuscules havres où des molécules simples se sont accumulées ; ces compartiments ont servi de support pour que les molécules s'assemblent et croissent ; les surfaces cristallines de certains minéraux ont « sélectionné » des molécules qui allaient revêtir une importance biologique toute particulière ; les ions métalliques d'autres minéraux ont permis des réactions essentielles, notamment la transformation de molécules banales en entités capables d'autoréplication ; enfin, on a récemment découvert que les minéraux dissous ont sans doute été incorporés aux molécules biologiques. Ainsi, les minéraux n'auraient pas simplement été des figurants dans la naissance de la vie, mais des acteurs à part entière.

Les minéraux, havres protecteurs

La question de l'origine de la vie a donné lieu à de nombreux scénarios, certains accordant aux minéraux un rôle particulier. Toutefois, les preuves manquaient.

Puis, en 1953, Stanley Miller, à l'Université de Chicago, tenta de reproduire les conditions atmosphériques et océaniques de la Terre primitive dans une bouteille. Il enferma, dans une bouteille en partie remplie d'eau, du méthane, de l'ammoniac et d'autres gaz censés composer l'atmosphère primitive. Lorsqu'il soumit le gaz à des décharges électriques pour imiter la foudre d'une tempête préhistorique, l'eau claire devint rose, puis brune, à mesure qu'elle s'enrichissait d'acides aminés et de diverses molécules organiques. Grâce à cette méthode simple, mais élégante, Miller fit passer la recherche sur les origines de la vie du stade de la réflexion philosophique à celui de science expérimentale. Cette découverte fit sensation, et l'on se prit à penser que l'on verrait bientôt des insectes de synthèse sortir des tubes à essais. La communauté scientifique fut plus réservée, mais de nombreux chercheurs crurent que l'on savait désormais créer la vie en laboratoire.

Toutefois, l'enthousiasme retomba rapidement. Miller avait certes découvert un moyen de produire de nombreux éléments constitutifs du vivant à partir d'eau et des gaz existant sur la Terre primitive, mais il n'avait trouvé ni comment, ni où ces unités simples



s'étaient assemblées en structures moléculaires complexes comme les protéines ou l'ADN.

On imagina alors que les molécules organiques, celles qui contiennent du carbone, flottant dans l'eau de mer, se seraient échouées dans des étangs découverts à marée basse, situés le long de côtes ; elles se seraient peu à peu concentrées au fil des cycles successifs d'évaporation, comme une soupe qui s'épaissit dans une casserole qui reste longtemps sur le feu.

Pour tenter d'élucider ce mystère, on a récemment émis l'hypothèse que les ingrédients de la vie se seraient accumulés dans des réservoirs très petits, à l'intérieur de certaines roches qui, telle la pierre ponce volcanique, sont criblées de trous créés par les gaz qui se sont dilatés dans la roche en fusion. D'autres minéraux, tel le feldspath, contiennent des cavités microscopiques créées sous l'action des intempéries. Dans chaque minuscule cavité de chacune des roches de la Terre primitive une réaction particulière d'auto-organisation moléculaire aurait eu lieu. Au terme d'une multitude de telles réactions chimiques, les molécules de la vie seraient apparues, par hasard.

Jusqu'en 1977, on pensait que la vie s'était développée près de la surface de l'océan, produit des réactions chimiques

qui tiraient leur énergie du Soleil. C'est alors que l'on découvrit, dans l'océan profond divers écosystèmes luxuriants à proximité des cheminées volcaniques, qui se dressent sur le plancher océanique. La lumière ne parvient pas à ces profondeurs et pourtant la vie foisonne. L'énergie nécessaire aux organismes provient de la chaleur dégagée par les sources chaudes ; la source d'énergie n'est pas le Soleil, mais la chaleur interne de la Terre. Quelques biologistes se demandèrent alors si les réactions organiques à l'origine de la vie avaient pu se produire dans la chaleur intense et à la pression élevée des sources hydrothermales.

Miller et ses collègues refusèrent l'hypothèse de l'origine hydrothermale de la vie, car les acides aminés se décomposent quand ils sont chauffés. Puis germa l'idée que les minéraux avaient peut-être abrité les ingrédients de la vie, empêchant leur dégradation. Jay Brandes, à l'Institut des sciences marines à Port Aransas, au Texas, proposa alors que certains minéraux maintiennent l'intégrité des acides aminés. En 1998, nous avons fait ensemble une expérience qui montra qu'un acide aminé, la leucine, placé dans de l'eau sous pression à 200 °C, se dégrade en quelques minutes. Quand nous ajou-

tions au mélange du sulfure de fer, présent aux abords des sources hydrothermales, la leucine restait intacte pendant des jours, suffisamment longtemps pour avoir le temps de réagir avec d'autres molécules.

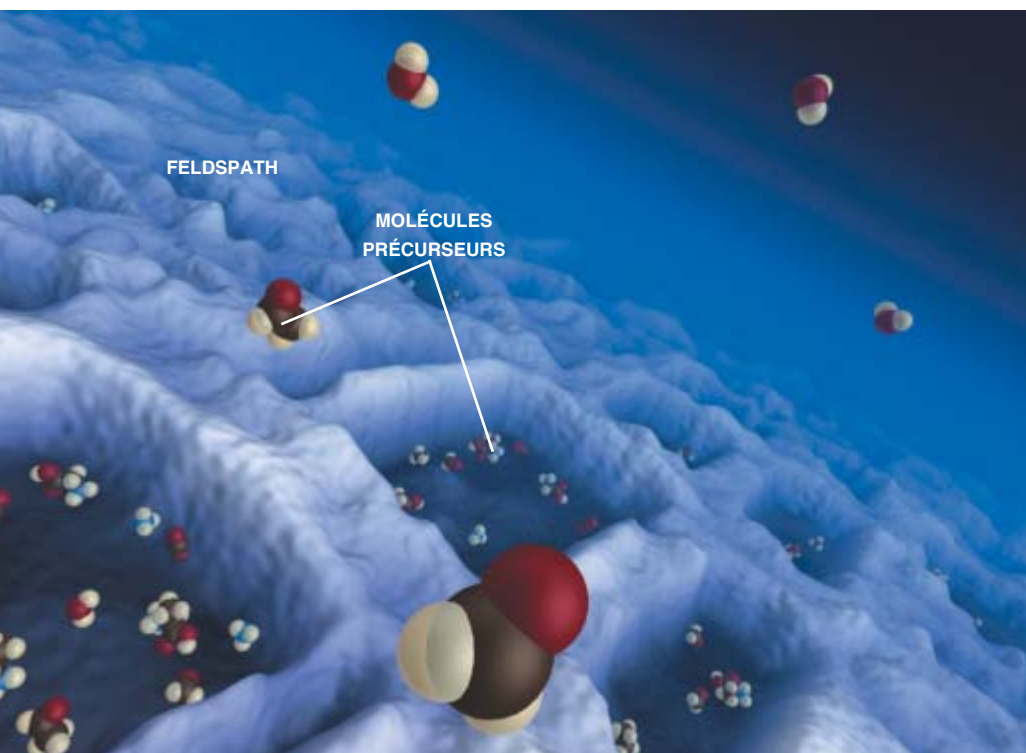
Même si les acides aminés étaient en sûreté en un lieu protégé, que ce soit une pièce d'eau, une petite cavité dans un minéral ou encore au cœur d'une source hydrothermale, quels sont les lieux clos où ils se sont concentrés et assemblés pour donner des molécules complexes ?

Les minéraux, supports de molécules

Que les matières premières de la vie se soient trouvées dans des étangs découverts à marée basse, dans des sources hydrothermales ou dans des cavités au sein de certains minéraux, elles étaient en suspension dans l'eau. Pour réagir les unes avec les autres, il leur fallait un support, sur lequel réagir.

On peut envisager que des molécules « errantes » se sont retrouvées à la surface calme d'un étang découvert à marée basse ou d'une « nappe de pétrole » primitive formée de composés piégés à la surface de l'eau, mais on s'interroge sur la façon dont elles se seraient assemblées. À cette époque, la foudre de violentes tempêtes et le rayonnement ultraviolet frappaient la jeune Terre, et détruisaient les liaisons chimiques de toute nouvelle molécule complexe.

L'idée selon laquelle les minéraux auraient eu un rôle de support des réactions chimiques a été émise il y a une cinquantaine d'années. On supposait alors que les argiles « attiraient » les molécules organiques. Les argiles sont lisses au toucher lorsqu'elles sont mouillées, car leurs atomes sont arrangés en couches régulières. Ces dernières portent souvent des charges électriques qui ont pu attirer les molécules organiques et les maintenir à la surface. Des expériences ont confirmé cette hypothèse. À la fin des années 1970, un groupe israélien a fait évaporer l'eau d'une solution aqueuse d'acides aminés dans un récipient contenant des argiles, et a constaté que les acides aminés se concentrent sur les surfaces argileuses, puis, qu'ils s'y assemblent en courtes chaînes qui ressemblent aux protéines. Les conditions de cette expérience ressemblent à celles qui ont pu régner dans une mare peu profonde



K. Eward, BioGrax

1. LES MINÉRAUX ONT SERVI D'ABRI aux premières molécules complexes. Des trous microscopiques sont présents sur les surfaces érodées du feldspath et de divers minéraux. Les précurseurs des molécules de la vie se sont accumulés dans ces minuscules cavités protectrices.

ou dans un étang à fond boueux et découvert à marée basse.

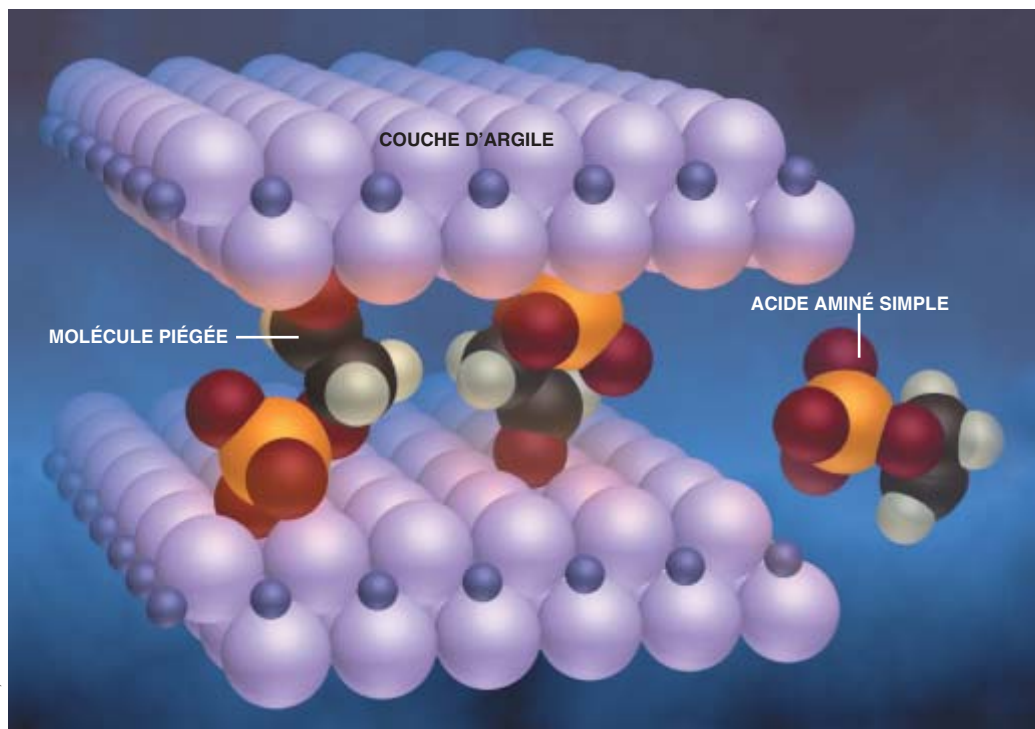
Plus récemment, les équipes de James Ferris de l'Institut polytechnique Rensselaer et de Gustaf Arrhenius, de l'Institut océanographique Scripps, ont démontré que les argiles et d'autres minéraux stratifiés favorisent l'assemblage de toute une variété de molécules organiques qu'ils attirent. L'équipe de J. Ferry a notamment découvert que les argiles offrent un support aux éléments constitutifs de l'ARN, la molécule qui, dans les organismes vivants, traduit les informations génétiques en protéines.

Une fois les molécules organiques fixées sur une armature minérale, diverses molécules complexes ont pu apparaître, mais seules quelques-unes furent incorporées dans les cellules vivantes. Ainsi, les molécules primitives qui allaient devenir importantes pour la vie ont été sélectionnées par leur support. De récentes expériences montrent, une nouvelle fois, que les minéraux ont sans doute joué un rôle central dans cette sélection.

Les minéraux, sélectionneurs de molécules

L'épisode le plus mystérieux de la sélection est peut-être celui qui a doté tous les organismes vivants d'une étrange prédominance d'un certain type d'acides aminés. Comme de nombreuses molécules organiques, les acides aminés se présentent sous deux formes possibles : la gauche et la droite. Elles contiennent les mêmes atomes, mais une des deux molécules est l'image de l'autre dans un miroir : on dit que les molécules sont chirales (la forme gauche est dite L, la droite D). Les expériences de synthèse organique produisent invariablement des mélanges à parts égales d'acides aminés L et D, alors que la proportion des acides aminés L dans les organismes vivants est proche de 100 pour cent.

Les chercheurs ont proposé plusieurs théories, des plus sensées aux plus exotiques, pour expliquer ce phénomène étrange. Certains astrophysiciens ont avancé que, lors de la formation de la Terre à partir de nuages de poussières et de gaz contenus dans le Système solaire, certains mécanismes auraient favorisé un excès d'acides aminés L. Toutefois, quels que soient les mécanismes envisagés, ils n'expliquent que des écarts de concentrations en molécules L ou D inférieurs à un pour cent.



2. LES MINÉRAUX ONT SERVI DE SUPPORT aux éléments constitutifs de ce qui allait devenir les molécules de la vie. Des minéraux stratifiés, tels que les argiles, peuvent piéger des molécules organiques errantes entre leurs feuillets rigides et bien ordonnés d'atomes. Maintenus en contact les uns avec les autres, des molécules simples peuvent ainsi réagir pour former des composés plus complexes.

On peut aussi imaginer que le mélange initial en acides aminés L et D était équilibré, mais que l'environnement physique a sélectionné l'une des deux formes au détriment de l'autre. Selon moi, les meilleurs environnements susceptibles de réaliser cette sélection sont les faces cristallines des minéraux, qui sont des images l'une de l'autre dans un miroir (voir la figure 3). Ainsi, j'ai étudié la calcite, un minéral présent dans le calcaire et le marbre, et dont certaines des faces sont des images l'une de l'autre dans un miroir. Or, dans de nombreux coquillages, la calcite que contient la coquille fixe les acides aminés. J'ai alors émis l'hypothèse que les surfaces de calcite présentent des sites bien adaptés à l'un ou à l'autre des deux types d'acides aminés. Avec mes collègues Timothy Filley et Glenn Goodfriend de l'Université George Washington, nous avons réalisé de nombreux essais pour tester cette hypothèse.

Dans une salle blanche qui nous permettait d'éviter toute contamination par des acides aminés omniprésents dans notre environnement, nous avons immergé un cristal de calcite d'une dizaine de centimètres de côté, dans une solution contenant à parts égales des deux formes (L et D) de l'acide aspartique, un acide aminé commun. Au bout

de 24 heures, nous avons retiré le cristal de la solution, nous l'avons lavé à l'eau et avons soigneusement récolté tous les acides aminés qui s'étaient fixés sur chacune des faces du cristal. Nous avons observé que les faces L de la calcite sélectionnaient préférentiellement les acides aminés L et vice versa (les différences atteignant parfois 40 pour cent).

Nous avons constaté que, plus les atomes des faces de la calcite étaient organisés en terrasses, mieux elles sélectionnaient une des deux formes. Nous en avons déduit que les acides aminés L et D s'alignent régulièrement sur leurs faces respectives. Dans des conditions environnementales appropriées, ces rangées organisées d'acides aminés auraient établi des liaisons chimiques et auraient formé des molécules constituées uniquement d'acides aminés gauches ou d'acides aminés droits ressemblant à des protéines. Les faces gauches et droites des cristaux sont aussi fréquentes les unes que les autres dans la nature, de sorte que la sélection chirale des acides aminés n'a probablement pas eu lieu partout au même moment, mais que le précurseur de toutes les variétés de formes de vie sur la Terre aurait imposé sa chiralité et serait apparu à un moment et en un endroit particuliers. Une protéine a pu se for-



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.

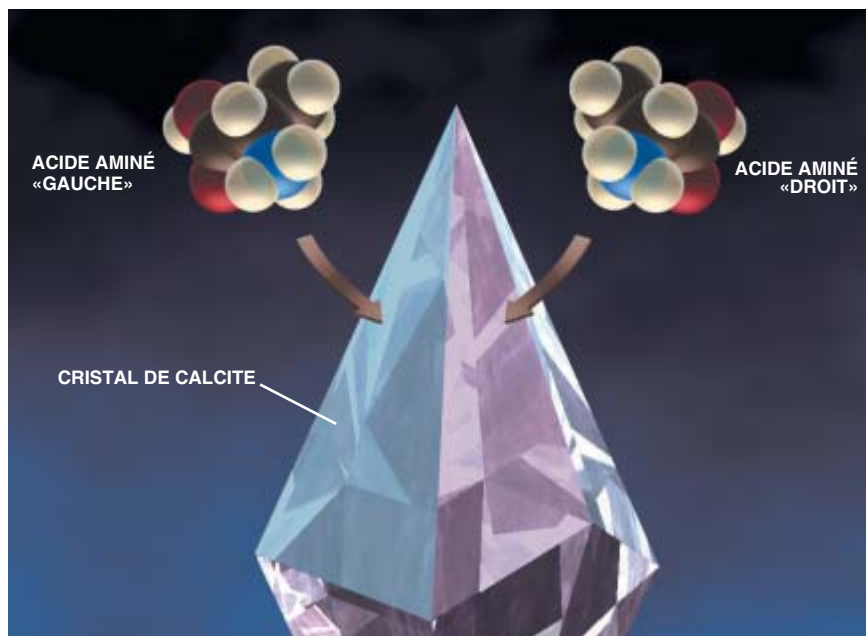
Les minéraux ont offert des niches protectrices aux ingrédients de la vie, leur ont fourni un support, ont sélectionné, concentré et organisé certains d'entre eux. Ils semblent aussi avoir favorisé les réactions biochimiques de la vie primitive, en catalysant des étapes clés de la synthèse des molécules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



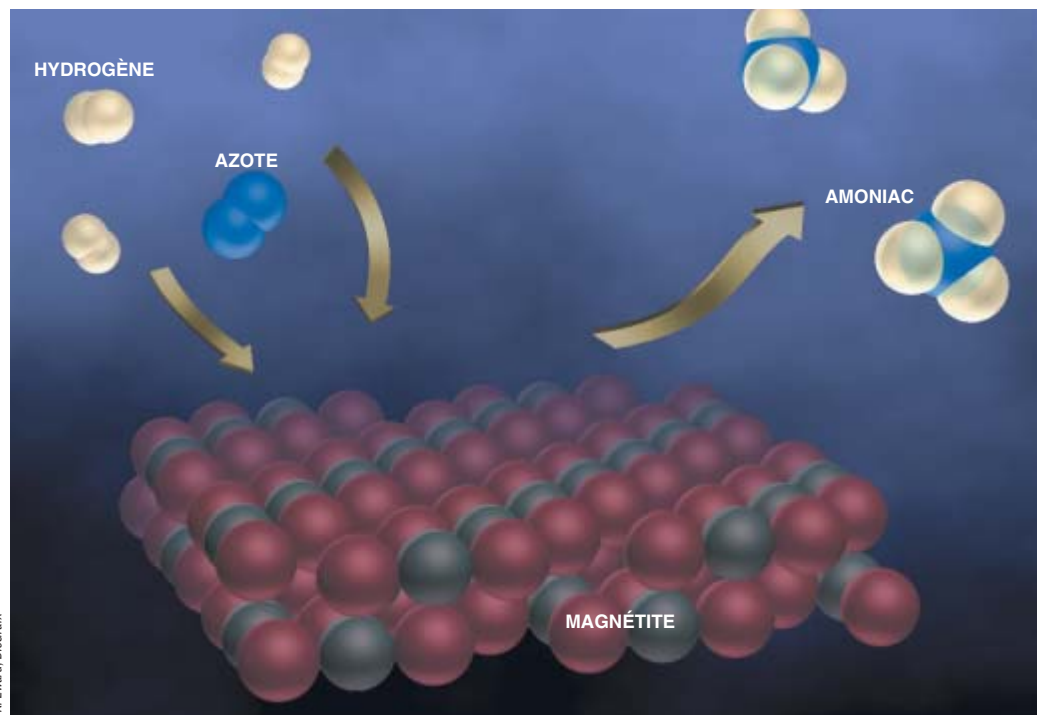
3. LES MINÉRAUX ONT SÉLECTIONNÉ UN TYPE DE MOLÉCULES. La calcite a tendance à attirer les acides aminés gauches et droits sur des faces différentes des cristaux qu'elle forme. Un tel mécanisme de sélection pourrait expliquer pourquoi la vie n'utilise que les acides aminés gauches.

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.

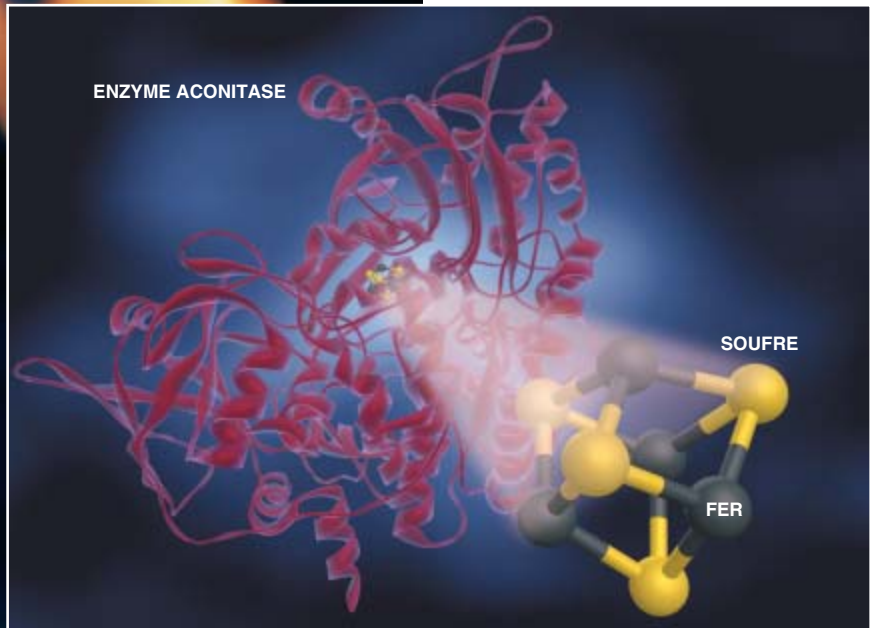
giques. Par exemple, avec un thiol (une molécule contenant du soufre) à neuf atomes de carbone, et du monoxyde de carbone, on observe l'allongement de la molécule organique en un acide à dix atomes de carbone (acide décanoïque), qui ressemble aux acides qui interviennent dans les réactions métaboliques 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. Ewari, BioGraX

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 autoréplcatifs. 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 autoréplcatifs n'ont pas créé la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui, mais ils ont pu, pour la première fois, inventé des propriétés indispensables à la vie. Dans ce scénario, une molécule autoréplcatrice 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 autoréplcatifs 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 autoréplcatif, 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
- Préviation de l'orbite des satellites
- Télécommunications par ondes courtes

Particules de la magnétosphère

Activité géomagnétique