

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.

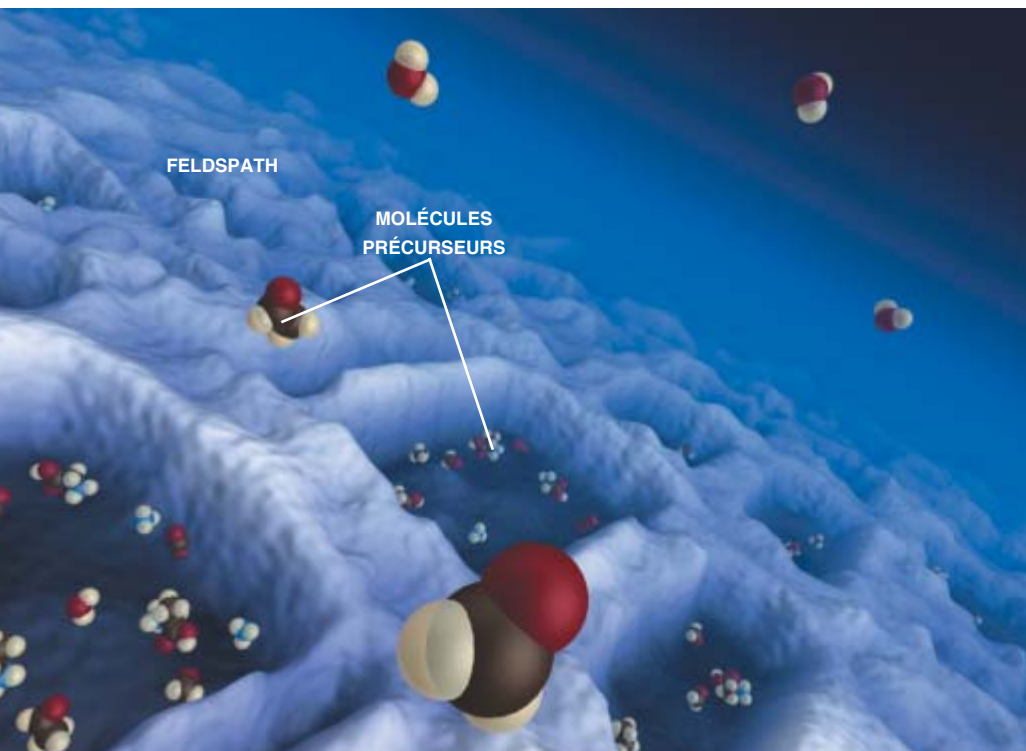
Même si les acides aminés étaient en sûreté en un lieu protégé, que ce soit une pièce d'eau, une petite cavité dans un minéral ou encore au cœur d'une source hydrothermale, quels sont les lieux clos où ils se sont concentrés et assemblés pour donner des molécules complexes ?

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, BioGrak

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.

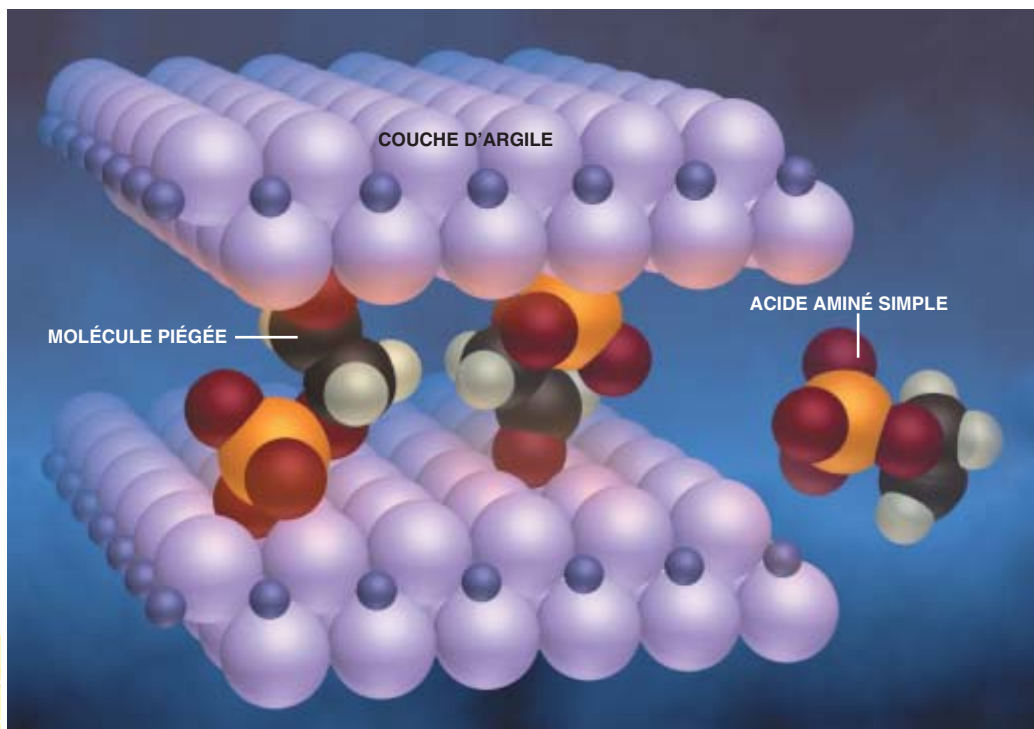
Plus récemment, les équipes de James Ferris de l'Institut polytechnique Rensselaer et de Gustaf Arrhenius, de l'Institut océanographique Scripps, ont démontré que les argiles et d'autres minéraux stratifiés favorisent l'assemblage de toute une variété de molécules organiques qu'ils attirent. L'équipe 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-