

EXTRAIT 1

LA DIFFICULTÉ DE TROUVER DES FOSSILES

Le premier problème dans la recherche de fossiles est que les terrains ont été enfouis périodiquement dans les profondeurs de la croûte terrestre au gré des mouvements des plaques tectoniques. Ainsi, les roches que vous voyez autour de vous sont généralement entrées dans le sous-sol plusieurs fois dans l'histoire géologique. À chaque fois, elles ont fini par émerger, profondément métamorphosées par leur séjour sous des pressions et des températures élevées ayant effacé toute trace de vie. Si l'on s'intéresse aux roches datant des débuts de la vie, on ne connaît guère que quatre endroits sur l'ensemble du globe où elles affleurent sans avoir trop subi de telles transformations. Les plus anciennes remontent au maximum à 3,8 milliards d'années. Le mouvement incessant des plaques tectoniques a largement effacé les signes tant recherchés.

En l'un de ces quatre sites, à Pilbara en Australie, on a trouvé des indices de vie remontant à 3,5 milliards d'années. Ce sont les plus anciens à faire l'objet d'un consensus scientifique. Il ne s'agit pas de fossiles d'êtres vivants, mais de concrétions rocheuses typiques formées par des bactéries. Dans les hauts fonds des océans, près de la surface, elles sécrètent des dépôts de calcaire ressemblant à des champignons dont la taille varie de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres : des *stromatolithes* (fig. 1). Des structures tout à fait similaires se forment toujours actuellement. Cette découverte montre qu'il y a 3,5 milliards d'années, des êtres complexes dotés certainement de plusieurs centaines de gènes existaient déjà. De plus, il s'agit de *cyanobactéries* tirant leur énergie de la lumière solaire par photosynthèse. Cette fonction complexe était certainement absente chez les premières espèces qui devaient plutôt vivre de substances chimiques tirées du milieu. Toujours dans la région de Pilbara, on a découvert des microfossiles filamenteux datant de la même époque en lesquels on pense reconnaître des cyanobactéries. Une confirmation donc ? Des formes rappelant des bactéries ont également été identifiées dans des roches plus anciennes, mais leur interprétation reste contestée, car elles pourraient être d'origine minérale. Toutes ces découvertes révèlent l'existence de bactéries, une forme de vie déjà sophistiquée, mais elles ne disent rien de ce qui a pu les précéder.

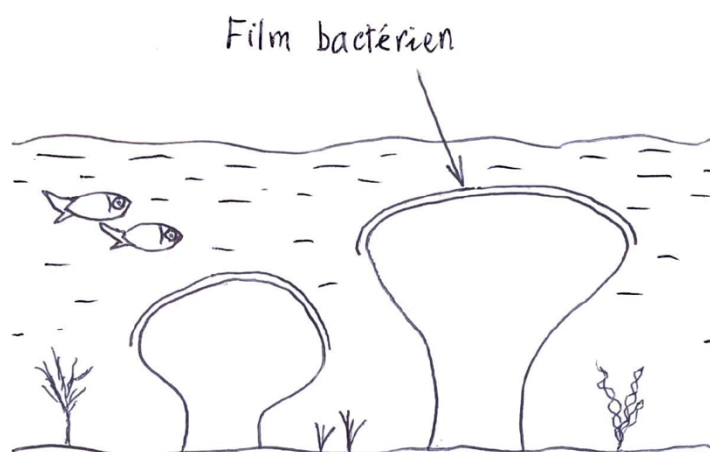


Fig. 1. Les *stromatolithes*, concrétions formées par des cyanobactéries.

Il existe pourtant un moyen de rechercher des traces de vie encore plus éloignées dans le temps : les *isotopes du carbone*. De quoi s'agit-il ? Sur Terre, l'atome de carbone existe sous trois formes possédant les mêmes propriétés chimiques, mais différant légèrement par leur masse. Ces trois variétés, appelées *isotopes*, sont liées au nombre de neutrons résidant dans leur noyau atomique. On connaît le carbone 14 (radioactif), utilisé pour la datation d'objets préhistoriques de quelques milliers d'années. Les deux autres isotopes (stables) sont le carbone 12, très prédominant, et le carbone 13 présent en petites quantités. Il se trouve qu'en raison de sa légèreté relative, le carbone 12 est plus facilement recruté dans les molécules du vivant comme les protéines, les glucides, les lipides, etc. Dès lors, un taux de carbone 12 légèrement plus élevé que la moyenne dans l'environnement est une signature de la matière vivante. Cet indicateur de vie qui se mesure relativement aisément devrait permettre de remonter plus loin dans le passé pour dater l'origine de la vie. Effectivement, on a identifié un léger excédent de carbone 12 dans des roches datées de 3,85 milliards d'années, à Isua au Groenland, un autre des quatre sites évoqués plus haut. Le problème est que cette très faible différence pourrait facilement provenir d'une pollution bactérienne survenue à un autre moment dans l'histoire géologique.

Il est difficile de remonter plus loin dans le temps. On sait simplement qu'un *bombardement cométaire* intense a frappé la Terre, comme la Lune ou Mars, aux alentours de -3,9 milliards d'années. Si la Lune a conservé la trace visible de tous les cratères d'impact datant de cette époque, il n'en va pas de même pour notre planète où la tectonique des plaques et l'érosion les ont pratiquement tous éliminés. Cet épisode cataclysmique a probablement empêché la vie de se développer, mais on a la preuve qu'auparavant, dès - 4,2 milliards d'années, il y avait déjà de l'eau sur Terre. De tout cela, on retiendra que la vie serait apparue aux alentours de - 4 milliards d'années, un peu avant ou un peu après le bombardement cométaire. On peut aussi en retenir que trouver des fossiles des premières formes de vie avant les bactéries, tient de la gageure. Alors, que reste-t-il pour résoudre l'énigme de nos origines ?

Trois types de méthodes sont utilisées intensivement de nos jours...

.../...

EXTRAIT 2

LE FONCTIONNEMENT D'UNE CHEMINÉE HYDROTHERMALE

Il s'agit d'un magnifique exemple de système auto-organisé. Il ressemble à une termitière : une grande colonne poreuse parcourue de galeries et d'alvéoles. Les cavités de la termitière sont occupées par les insectes et celles de la cheminée hydrothermale par diverses espèces chimiques, ainsi que les bactéries qui en dépendent. Toutefois, il existe une différence majeure entre ces deux édifices : le premier a été bâti par des êtres vivants, tandis que le second résulte d'un phénomène auto-organisé purement minéral et préexistant à la vie. Il est fascinant de constater à quel point des constructions similaires et aussi complexes, peuvent voir le jour tant dans le monde dit *inerte* que dans celui du vivant. À ce titre, on peut se demander si le mot *inerte* est vraiment approprié pour qualifier le minéral, compte tenu de la diversité des milieux naturels et de leur incessante évolution.

La figure 20 montre la formation des fumeurs. Dans les dorsales, la lave se rapproche de la surface. En dégazant, elle envoie les matières les plus volatiles vers le haut. Elles sont de nature réductrice : H_2 , CH_4 (méthane), H_2S (hydrogène sulfuré), etc. On y trouve aussi toutes sortes d'ions métalliques. En parallèle, un autre flux apparaît : l'eau de l'océan s'infiltré dans le plancher poreux des profondeurs où sa température est portée au-delà de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les deux flux se mélangent. Chargée des différentes substances du flux montant, l'eau réapparaît dans l'océan froid à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. À cette température, une partie des matériaux dissous précipite sous forme de sulfates et de carbonates. Ces dépôts s'accumulent et construisent petit à petit une sorte de « stalagmite » s'élevant à plusieurs dizaines de mètres. L'eau ressort par de nombreux orifices à des températures diverses selon la hauteur.

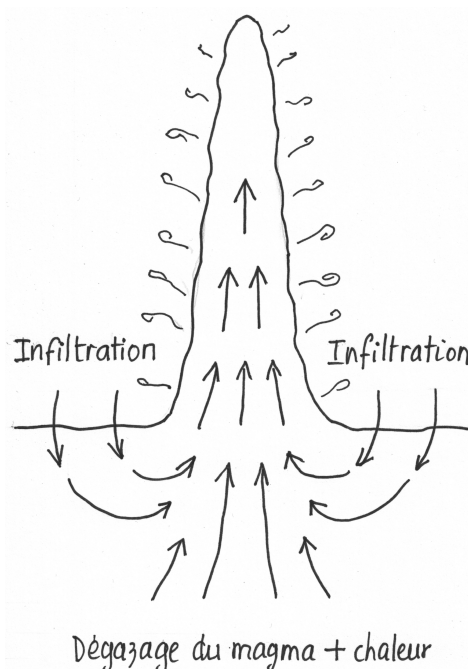


Fig. 20. Les flux dans une cheminée hydrothermale.

Aujourd'hui, cet environnement est bien différent de ce qu'il était il y a 4 milliards d'années, un fait dont il faut tenir compte si l'on cherche à simuler les réactions ayant conduit à la vie. D'abord, les océans étaient chauds : 70 °C en surface et plus encore en profondeur. Ensuite, la composition chimique de l'eau était beaucoup moins oxydante qu'aujourd'hui où l'oxygène est omniprésent. Enfin, elle était probablement plus salée et plus acide. Cependant, on considère que le fonctionnement général de la cheminée hydrothermale était déjà en place il y a 4 milliards d'années.

La constitution interne de la cheminée est importante : elle est faite d'alvéoles communiquant entre elles, à l'image de l'intérieur d'une éponge. Les plus petites ont la taille d'une bactérie, les plus grandes atteignent le millimètre. Ces alvéoles développent une grande surface dont on connaît la vertu catalytique. Si à cela, on ajoute le fait que leurs parois se métallisent grâce aux métaux provenant du sous-sol, on comprend que la cheminée hydrothermale constitue l'équivalent d'un pot catalytique. Comme ses parois sont recouvertes de fer, de nickel et de sulfures, une grande variété de réactions chimiques peut s'y produire en s'affranchissant des barrières d'activation.

.../...

EXTRAIT 3

LA CATALYSE SE SPÉCIALISE

Jusqu'à présent, nous avons mentionné les catalyseurs « généralistes » susceptibles d'accompagner une large gamme de réactions : les surfaces, les alvéoles et les métaux. Un autre type de catalyseurs bien plus sélectifs apparaît au sein des cheminées, car une partie des molécules créées présentent elles-mêmes des vertus catalytiques. En effet, par le seul hasard, la forme de telle ou telle molécule peut se révéler complémentaire d'une autre, ce qui est de nature à favoriser des assemblages. La figure 29 en donne une illustration.

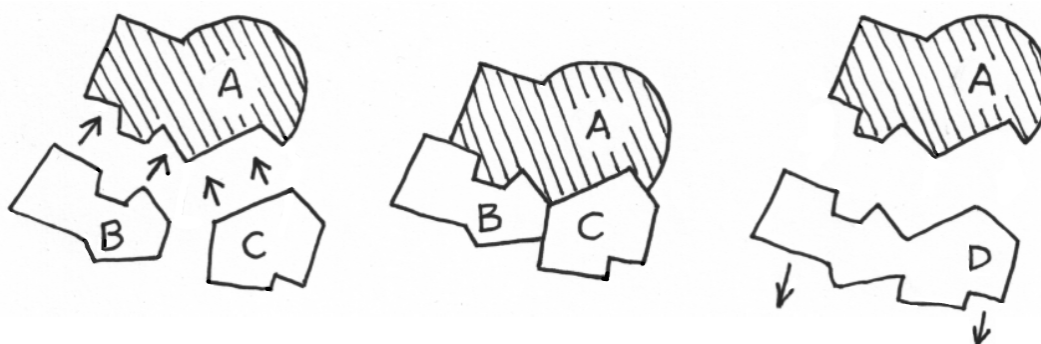


Fig. 29. L'assemblage de deux molécules $B + C \rightarrow D$ est catalysé par une autre A possédant la forme idoine. Le catalyseur A reste intact et disponible pour recommencer.

On y voit une molécule A (le catalyseur) dont la forme rappelle partiellement celle de deux autres B et C (les réactifs). Sur l'une de ses faces, la molécule B vient adhérer. Il en va de même de la seconde C, comme le font les pièces d'un puzzle. Pour que le dessin soit complet, il faudrait y ajouter des charges électriques superficielles susceptibles de s'attirer : une charge positive sur une molécule en regard d'une charge négative sur l'autre. Si ces conditions de formes et de charges superficielles sont vérifiées, la molécule A attire les deux autres, B et C, ce qui engendre un complexe ABC. Si, de surcroît, les deux réactifs B et C se trouvent placés précisément dans la position où ils peuvent interagir, alors ils se lient solidement, formant ainsi une nouvelle substance D. L'assemblage de D modifie la répartition des charges dans les molécules du complexe, ce qui a généralement pour effet de désolidariser la molécule D. Alors, elle s'échappe, laissant le catalyseur A intact et disponible pour réitérer l'opération. En résumé, le catalyseur A « organise » la réaction



sans en faire lui-même partie.

On peut naturellement se dire que tout cela représente une chaîne de coïncidences hautement improbables : les trois molécules doivent présenter des formes idoines, ainsi qu'une répartition des charges positives et négatives dans une configuration favorable. C'est vrai, mais il faut préciser que le nombre de molécules susceptibles d'émerger spontanément dans les cheminées hydrothermales se chiffre en millions

d'espèces différentes. Dès lors, même une coïncidence peu probable, ne survenant qu'avec une probabilité d'un sur un million dans une collection de molécules de formes différentes, a beaucoup de chances de voir le jour. De plus, on notera que si le hasard fait apparaître un catalyseur A pour une réaction donnée, cette unique molécule A pourra catalyser ladite réaction des millions de fois d'affilée avant d'être dégradée.

* *

*