

Données géologiques sur l'origine de la Vie

Tristan FERROIR (<http://tristan.ferroir.free.fr>)

Introduction

La question de l'apparition de la Vie sur Terre est toujours une question d'actualité. A l'heure où les recherches d'éventuelles vie extra-terrestre sont des branches extrêmement actives dans les politiques scientifiques et spatiales de différents pays, la question de l'origine de la Vie sur Terre n'est toujours pas élucidée. La Vie actuelle est foisonnante et très diversifiée comme le montre une simple observation du monde qui nous entoure. Cependant, même si diverses hypothèses existent sur l'apparition de la Vie sur Terre, les scientifiques ne sont toujours pas d'accord sur la nature de la première forme de vie, sur son origine ni sur son âge.

Déterminer l'époque d'apparition de la vie, ou chercher des traces de vie, implique de définir ce terme ou au moins de savoir par quelles particularités elle peut se manifester. Très généralement, une structure pourrait être qualifiée de vivante si :

- Elle présente un métabolisme, c'est-à-dire que ses constituants sont le résultat d'une synthèse à partir d'une source d'énergie et d'autres constituants prélevés dans le milieu.
- Elle est capable de s'auto-reproduire, mais avec un certain pourcentage d'erreurs à chaque fois (« mutation »), offrant la possibilité d'un processus évolutif par sélection des variants les plus efficaces.

Du point de vue du géologue, la vie va se manifester :

- soit par des structures fossiles concrètes attribuables à des organismes déjà relativement complexes (de type bactérien, au minimum) ;
- soit par des signaux (molécules particulières, signaux chimiques) typiques de certains organismes ;
- ou encore par des signaux produits par un métabolisme comparable à ceux d'organismes actuels.

Toutefois, la première borne que peut fixer le géologue est la date au-delà de laquelle l'existence même d'une vie sur Terre n'est guère envisageable.

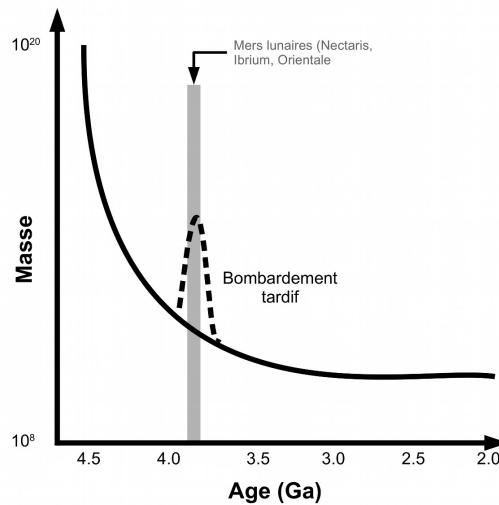


FIGURE 1 – Arguments géologiques extra-terrestres en faveur du bombardement tardif

I Où et quand chercher la Vie ?

A Depuis quand peut-il y avoir de la Vie sur Terre ?

- Il faut des conditions favorables à l'apparition de la Vie en terme physique, chimie et environnemental.
- Le fort bombardement météoritique en surface de la Terre jusqu'à 4.3Ga implique une impossibilité de l'apparition de la vie avant cette date. Par la suite, une discussion peut avoir lieu sur la date exacte à partir de laquelle la vie a pu apparaître ;
 - avant 4Ga mais un impact stérilisateur à 3.9Ga aurait tout éliminé
 - avant 4Ga mais un impact stérilisateur à 3.9Ga aurait éliminé une bonne partie de la vie mais pas tout
 - après le bombardement tardif soit après 3.9Ga
- Différentes conditions sont nécessaires à l'établissement de la Vie telle que nous la connaissons sur une planète. Tout d'abord, la Vie nécessitant de l'énergie dans le cadre de la réalisation de ses fonctions métaboliques, il est nécessaire que la planète soit présente en orbite autour d'un certain type d'étoile dont fait partie le Soleil (les étoiles avec une luminosité trop faible sont donc à exclure). Ensuite, il faut aussi que cette planète soit située dans ce qu'on appelle la zone d'habitabilité c'est à dire une zone où l'eau peut exister sous ses 3 états. Dans le système solaire, cette zone entoure la Terre.

La Terre est donc à l'heure actuelle dans le système solaire, la seule planète

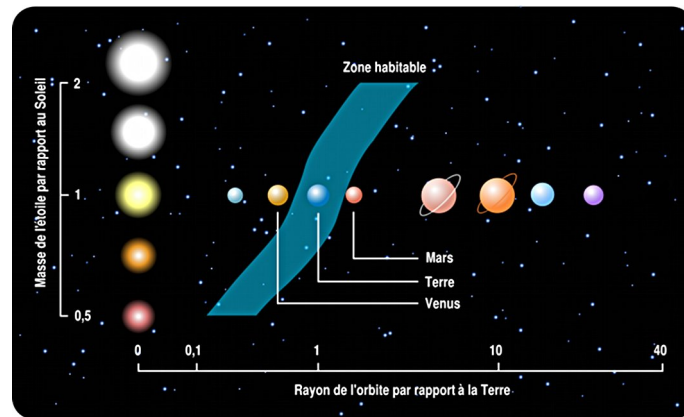


FIGURE 2 – Matérialisation de la zone continuellement habitable en fonction de la taille de l'étoile et de la distance entre l'étoile et la planète

candidate à la Vie en surface. Cependant, au début de l'histoire du système solaire, on sait que le Soleil avait une luminosité plus faible (70% de celle actuelle). La présence d'eau liquide est donc problématique. On pense que l'atmosphère avait plus de CO_2 et donc un effet de serre plus important qui permettait d'avoir de l'eau liquide. Ainsi, la notion de zone continuellement habitable qui est uniquement une vision stellaire se chevauche avec la notion d'habitabilité planétaire qui tient compte, entre autre, de la présence d'une atmosphère. Au début de son histoire, étant donné une atmosphère plus importante, Mars aurait pu être une planète habitable bien que hors de la zone continuellement habitable.

B Où chercher de la Vie sur Terre?

- Dans les roches les plus anciennes : Akilia quicorrespondrait à des BIFs métamorphisés qui contiennent des inclusions de graphite
- Dans les sédiments marins les plus anciens : Isua qui montrent des dépôts marins caractérisés par des BIFs, des pillow-lavas, des carbonates, des métasédiments dans lesquels le granoclassement est préservé.
- En Australie dans le complexe de Pilbara.

C Dans quelles conditions la Vie serait-elle apparue?

- Bombardement tardif => transparent avec cratère= $f(\text{temps})$ (expliquer comment on l'obtient) (a priori vie après cela)
- Dichotomie océan/continent → preuve d'un océan : -roches sédimentaires - zircons → preuve d'un continent: les plus vieilles roches conti-

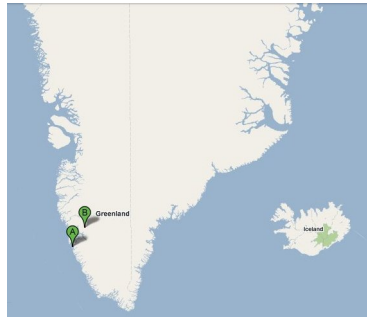


Figure 3: Localisation d'Akilia et d'Isua

nentales!

- Température → océan : -méthodes : delta O18 des silex de BIF => fig 2.4 p 51 -résultats : chaud : 50 degrés de plus qu'à l'actuel (ATTENTION : variabilité assez grande selon auteurs!) → causes : effet de serre et CO₂
- salinité/pH de l'océan = certainement plus salés étant donnée la grande quantité d'HCl rejetée par les éruptions volcaniques et la quantité de Na disponible par altération des feldspaths basaltiques. Pour information, des inclusions fluides dans des roches datées de l'archéen montrent que la concentration en NaCl des océans devait être trois fois supérieure à la salinité actuelle.
- Rayonnement solaire => pas d'ozone donc dangereux (UV)
- Bilan : conditions extrêmes => pour modéliser les premiers êtres vivants, on pourrait s'aider des extrémophiles actuels?

II Quels sont les indices des premières traces de Vie?

A Les stromatolithes et structures stromatolithiques

- Les stromatolithes sont des constructions sédimentaires d'origine biologique, issues du piégeage de particules et de la cristallisation de carbonates au sein d'un mucus cyanobactérien. Il s'en forme toujours aujourd'hui dans certaines baies peu profondes, dans des eaux chaudes et claires (dans la Shark Bay, en Australie, entre autres), sous l'action de cyanobactéries photosynthétiques.
- Les plus anciennes structures semblables aux actuels stromatolithes, quoique de petite taille, proviennent du site de Warawoona (Australie)

et sont datées de -3,5 Ga. On en trouve aussi dans d'autres formations légèrement plus récentes, comme Big Tree (Afrique du Sud) en Afrique du Sud [4] (mais ils restent assez rares et peu diversifiés avant le Protérozoïque).

- À l'intérieur de certains stromatolithes plus récents, des structures carbonées ressemblant à des filaments cyanobactériens ont été découverts. On a donc également tenté de rechercher ce genre de microfossiles dans les roches les plus anciennes.
- ATTENTION : Limites de l'actualisme puisque ce sont des consortiums microbiens (algues, bactéries).

B Les fossiles bactériens

- L'examen de minuscules inclusions de graphite prises dans les silex de roches d'Australie datant de -3,465 Ga (Apex Chert, Australie) a permis d'y déceler des structures « filamenteuses » dont l'aspect rappelle, les filaments cyanobactériens. D'autres formes encore – en petites coques (coccoïdes) ou en sphérules plus ou moins regroupées (sphéroïdes) – elles aussi potentiellement d'origine bactérienne, ont été découvertes dans des roches datant de -3 Ga (Gunflit, Canada, Bitter Spring, Australie. . .)
- En 2004 (Science 304 du 23 avril), d'autres traces de vie potentielles ont encore été proposées. Il s'agit de cavités tubulaires microscopiques présentes dans la couche vitreuse de basaltes océaniques datés de 3,5 Ga. Selon les auteurs de cette découverte, ces tubules seraient semblables à ceux forés par des microorganismes lithophages dans les basaltes des fonds océaniques actuels. Toutes ces traces plausibles de formes de vie correspondraient à des organismes déjà bien organisés. D'autres indices, mettant en oeuvre des approches plus complexes que la seule observation, permettent de traquer la présence de vie dans les roches anciennes.

C Les indices

- La teneur en dioxygène dans l'atmosphère terrestre n'a pas dépassé 1% avant -2,5 Ga. Une preuve en est l'existence, jusque vers cette date, de sédiments détritiques riches en oxydes uranium UO_2 (uraninite). Dans cet oxyde insoluble, l'uranium se trouve à l'état d'oxydation $IV+$, alors que dans l'atmosphère actuelle riche en dioxygène, l'uranium devient $U(VI+)$ et forme des oxydes UO_3 , solubles. Cela n'interdit pas

de penser que du dioxygène dissous a pu être libéré bien plus tôt dans l'eau des océans par des processus photosynthétiques.

- En l'absence de cet oxydant puissant, les océans des premiers milliards d'années de la Terre étaient plus réducteurs qu'aujourd'hui, et la présence localisée de dioxygène libre aurait donc pu provoquer l'oxydation de certains éléments métalliques, dissous dans l'eau à l'état réduit, comme le fer Fe^{2+} , provoquant leur dépôt sous forme d'oxydes. C'est effectivement ce que l'on peut observer dans des formations dites de fer rubané (Banded iron Formation, ou B.I.F.), dans lesquelles des couches de silice amorphe (cherts) alternent avec des dépôts riches en oxydes de fer ferriques (hématite, Fe_2O_3 et magnétite, Fe_3O_4) (figure 4). Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer la mise en place de ces terrains et la régularité des alternances lithologiques, tous les B.I.F. n'ayant pas forcément la même origine.
- Néanmoins, les scénarii les plus courants attribuent l'oxydation du fer à l'accumulation de dioxygène d'origine photosynthétique dans l'eau, donc à la présence d'organismes photosynthétiques¹. Or les plus anciens B.I.F. remontent à -3,8 Ga. D'autres indices indirects de la présence d'organismes ou d'activités biologiques sont encore recherchés sous la forme de molécules organiques d'origine biologique ou encore de compositions chimiques particulières des minéraux ou des composés organiques des roches anciennes.

D Les indices moléculaires

- L'extraction du kérogène encore présent dans les roches même très âgées et métamorphisées, permet d'en isoler par chromatographie et enfin d'en caractériser les composants. Quoique la diagenèse et le métamorphisme aient pour effet d'hydrogéner les liaisons insaturées et de faire disparaître les groupements fonctionnels (alcools, thiols, cétones, acides, etc. . .), certains composés peuvent conserver un squelette carboné typique de certaines molécules biologiques. Ces molécules dégradées signent donc la présence, dans la matière organique initiale, des organismes qui possédaient leurs précurseurs fonctionnels.
- On parle alors pour désigner ces « fossiles moléculaires » de biomarqueurs. Ainsi, des **stéranes, fossiles de stérols typiques des Eucaryotes**, ont été isolés de kérogène âgés de 2,5 Ga. Cependant, ces fossiles chimiques ne permettent guère de retrouver des traces de vie beaucoup plus anciennes. Aussi a-t-on recours à des signaux chimiques encore différents pour attester la présence de vie.

E Les indices isotopiques

- Il a été retrouvé dans les roches métamorphiques d'Isua au Groenland des inclusions de graphite. En étudiant la composition isotopique de ce graphite, on constate qu'il est pauvre en ^{13}C ($-25\text{‰} < \delta^{13}\text{C} < -6\text{‰}$). De telles signatures légères en carbone 13 sont habituellement observées lors de la photosynthèse. On peut donc penser que les organismes photosynthétiques auraient pu exister dès cette époque. Les détracteurs de cette théorie lui opposent la contamination possible par de la matière organique actuelle ou bien encore le fait que les réactions métamorphiques peuvent aussi conduire à des fractionnements isotopiques similaires.

III Quels scénarii pour l'origine de la Vie?

A Comment amener les briques élémentaires de la Vie?

- L'origine atmosphérique : A l'époque de Stanley Miller (1952) on pensait que l'atmosphère primitive était composée d' H_2 , CH_4 , NH_3 et H_2O . Miller réalisa donc une expérience où il introduisit cette composition atmosphérique et sous laquelle il fit bouillir de l'eau et éclater des décharges électriques, analogues d'éclairs que l'on supposait être abondants dans l'atmosphère terrestre en ces temps reculés. Au bout de plusieurs mois de fonctionnement, des réactions entre tous les composés avaient produit de très nombreuses molécules organiques, dont des acides aminés que l'on retrouvait en solution dans l'eau. Si cette expérience permettait de produire ces molécules, on sait maintenant que l'atmosphère primitive ne contenait pas de CH_4 et de NH_3 .
- L'origine océanique : Le manteau, principalement constitué d'olivines et de pyroxènes, ou bien des basaltes ont rapidement interagi avec l'eau des océans. Ce manteau devait être beaucoup plus chaud que le manteau actuel, des circulations hydrothermales devaient s'établir, et l'eau devait réagir avec l'olivine et permettre la formation de serpentine et de H_2 (réaction de Fischer-Tropsch). L'hydrogène ainsi libéré peut réagir avec du CO_2 ou du N_2 dissout dans l'eau et former du méthane, de l'ammoniac (exemple : $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$), qui peuvent ensuite réagir entre eux pour être à la base d'une synthèse de molécules organiques type acides aminés ou bases azotées. On peut opposer à cette proposition pour l'origine de la Vie la faible stabilité des molécules d'ARN et d'ADN à haute température.

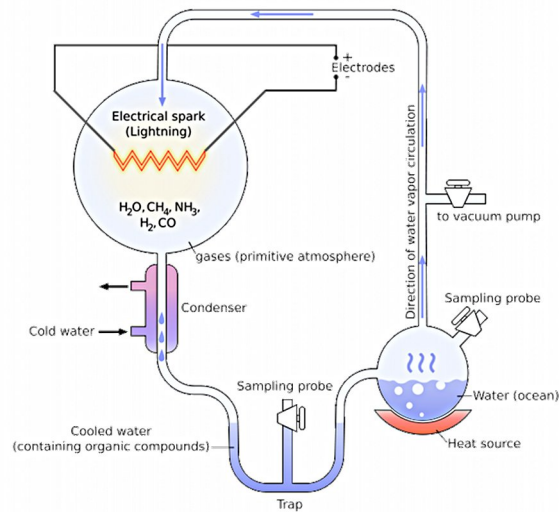


FIGURE 4 – Schéma de l'expérience menée par Stanley Miller en 1952

- L'origine extraterrestre : les comètes et les chondrites carbonées contiennent de la matière organique et celle-ci peut être plus ou moins complexe. On trouve bien sûr de l'eau sous différentes formes mais aussi des molécules organiques que ce soient des acides aminés (glycine et alanine par exemple) ou des bases azotées (purine et pyrimidine). Si cette matière est arrivée sur Terre lors du bombardement tardif, elle pourrait bien avoir aussi un rôle dans l'origine de la Vie.

B Comment passer des briques aux cellules?

- Une fois ces premières molécules prébiotiques arrivées sur Terre, il a fallu ensuite les polymériser ce qui n'est pas forcément le plus facile.
- Certains pensent que les surfaces minérales auraient pu avoir un rôle important dans ce mécanisme. En effet, les molécules organiques peuvent s'adsorber sur les surfaces de argiles et ainsi être mises en contact les unes avec les autres permettant ainsi leur polymérisation. Ces argiles, lorsqu'il y a trop d'eau peuvent même séparer les feuillets dont elles sont constituées. Si ce feuillet s'assemble avec un autre feuillet sur lequel il n'y a pas de molécules organiques, celles d'en face vont donc se disposer en créant une séquence complémentaire : certains pensent que l'origine de la réplication pourrait venir de là.
- D'autres pensent au contraire que le monde a été au départ uniquement à ARN surtout après la découverte d'ARN autocatalytique que sont les ribozymes dans les années 80.

C Y a-t-il de la Vie ailleurs ?

- Etant donné les origines diverses évoquées pour la Vie, notamment celle extraterrestre, et la possibilité d'existence d'eau liquide au sein de certains corps du système solaire, il n'est pas impossible que la Vie ait existé ou existe ailleurs dans le système solaire. Cette dernière aurait cependant une différence majeure avec celle de la Terre, elle n'est pas visible.
- On peut notamment signaler que l'existence d'océan liquide dans les satellites de glace pourrait renfermer de la Vie surtout après la découverte de formes bactériennes dans le lac Vostok situé en Antarctique et qui est situé sous 4000m de glace.
- La découverte aussi du quadruplet fossile morphologique + carbonate + matière organique + magnétite ressemblant à celle produite par les bactéries magnétosensible dans la météorite martienne ALH84001 ne permet pas d'exclure une vie endogée sur Mars. Enfin, la présence de méthane sous forme liquide, gazeuse et solide sur Titan fournirait un analogue de l'eau terrestre dans lequel pourrait ou aurait pu apparaître la Vie. De plus, la présence d'ammoniac rendrait possible les réactions de Miller et permettrait de créer des molécules prébiotiques.

Conclusion

Bibliographie