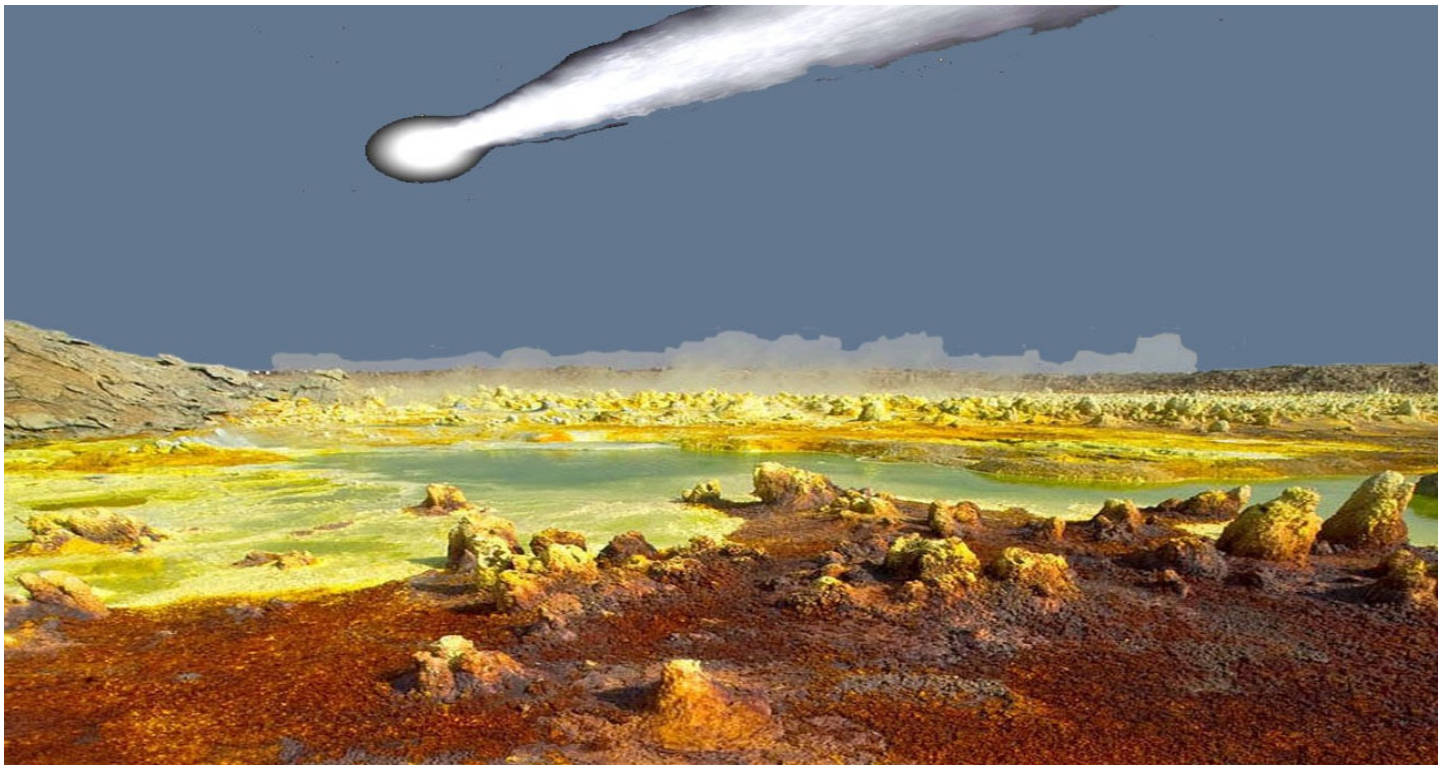
L'origine de la vie vue par un géologue qui aime l'astronomie

Auteur :
THOMAS Pierre, Professeur, Ecole normale supérieure de Lyon, Laboratoire de Géologie de Lyon

17-04-2021



La vie est née sur Terre il y a environ quatre milliards d'années, soit peu de temps après la formation de notre planète, il y a 4,54 milliards d'années. Si le passage des macromolécules complexes aux plus simples des cellules est encore mal compris, leur origine pose beaucoup moins de problèmes. Leurs constituants de base sont en effet naturellement synthétisés à la surface des grains de poussières qui ont donné comètes et météorites et dans la croute superficielle de la Terre (la lithosphère), là où de l'eau chaude est en contact avec des silicates riches en fer. Or de nombreuses météorites et comètes sont tombées sur terre jusque vers -4 milliards d'années, et des minéraux riches en silice (silicates) et en fer abondaient à, et sous, la surface de la Terre.

1. L'origine de la vie : une histoire de cellule

Jusqu'au milieu du 19e siècle, l'origine de la vie ne posait pas (trop) de problèmes : la vie était l'œuvre d'un Créateur. Pour les athées ou les croyants critiques, la théorie de la génération spontanée résolvait le problème : la vie (au moins les organismes simples) apparaissait spontanément à partir de substances minérales quand le milieu s'y prêtait. Quand, dans les années 1860, Pasteur démontra que cette apparition spontanée d'organismes vivants n'avait pas lieu dans les conditions naturelles et les durées compatibles avec les expériences de laboratoire, le problème devint crucial. Cent cinquante ans plus tard, comment résumer le problème ?

La vie, c'est avant tout une histoire de **cellule** (lire Origine des premières cellules). Pour faire une cellule, c'est « conceptuellement » assez facile. Cela nécessite 3 étapes que l'on peut décrire en remontant dans le temps. L'étape la plus récente correspond à la formation de la cellule elle-même. Il faut pour cela des **macromolécules organiques** complexes, des polymères comme les **protéines**, les **acides nucléiques**…, si possible douées de propriétés d'auto-réplication et de propriétés catalytiques. Il faut aussi que ces macromolécules, présentes en solution ou en suspension dans de l'eau, se regroupent, créent des **membranes**

plus ou moins perméables, s'associent en entités isolant un milieu intérieur d'un milieu extérieur. Avant cette 3e étape, il en faut une 2e, qui correspond à la fabrication de ces macromolécules par **polymérisation** de molécules carbonées plus simples mais déjà assez complexes comme des **acides aminés**, des **bases azotées**, des **sucres** simples… Et avant cette 2e étape, il en faut une 1re c'est-à-dire fabriquer ces molécules déjà complexes qui se polymériseront. Cette première étape dans l'histoire de la vie, la plus ancienne, consiste donc à synthétiser acides aminés, bases azotées… à partir de molécules simples et omniprésentes (dioxyde de carbone, CO_2 ; eau, H_2O ; ammoniac, NH_3 ; cyanure d'hydrogène, CNH …) contenant les principaux éléments constitutifs de la vie : carbone (C), hydrogène (H), oxygène (O) et azote (N).

2. Les témoins fossiles de la vie primitive sur Terre



Figure 1. Exemple de marqueur morphologique prouvant l'existence d'une vie ancienne : des stromatolithes de belle taille (ici en Afrique du Sud) datant d'environ -3 milliards d'années (photo Pierre Thomas).

Y a t-il des témoins de l'origine de la vie ? Pour savoir où en chercher, il faut d'abord essayer d'identifier le milieu, les conditions et l'époque dans lesquelles ces trois étapes ont eu lieu. Les plus vieilles traces morphologiques de vie formant consensus en 2016 datent de -3,5 milliards d'années. Ce sont des traces indirectes que l'on trouve dans des **roches sédimentaires** australiennes ou sud-africaines montrant l'existence de voiles bactériens et de stromatolithes de morphologie assez semblables à leurs équivalents actuels (Figure 1) (lire La biosphère, un acteur géologique majeur). Des restes de cellules bactériennes sont également identifiables, mais leur origine fait encore l'objet de débats. Dans ces roches sédimentaires, il y a aussi de la matière organique, enrichie en ^{12}C, l'isotope léger (et majoritaire) du carbone. Or, la synthèse de molécules organiques par des processus enzymatiques (comme le **cycle de Benson et Calvin**) enrichit la matière organique en ^{12}C dans les mêmes proportions que ce que l'on trouve dans ces vieilles roches. On ne connait pas d'indice morphologique de vie plus ancien que 3,5 milliards d'années. Mais on connait des roches métamorphiques montrant un enrichissement en ^{12}C. On en connait beaucoup au Groenland où elles datent de -3,8 milliards d'années. Les plus vieilles roches (en fait des minéraux) présentant de telles anomalies en ^{12}C ont été trouvées en Australie ; elles datent de -4,1 milliards d'années, suggérant qu'une biosphère existait déjà à cette époque. La vie serait donc apparue sur Terre à une époque où l'atmosphère et l'océan étaient dépourvus de **dioxygène** (O_2), où la Terre était encore bombardée d'innombrables comètes et météorites, où le **volcanisme** était plus abondant qu'actuellement … C'est dans un tel contexte qu'ont dû avoir lieu les 3 étapes principales qui sont à l'origine de la vie.

3. Les trois étapes de l'origine de la vie

3.1. Former une cellule à partir de macromolécules organiques…

Le géologue n'est pas le mieux armé pour comprendre la 3e étape : faire des cellules à partir de polymères et autres macromolécules organiques. Cette étape n'a laissé aucune trace fossile. Il ne peut que se rapporter au travail des chimistes et des biochimistes, qui sont loin d'avoir abouti en 2016. Depuis le début du 20e siècle, des expériences (et plus récemment des modélisations) indiquent des pistes et suggèrent ce qui a pu se passer : regroupement des polymères en films, transformation des films en globules, existence d'ARN ayant à la fois des propriétés catalytiques, la capacité d'effectuer des réactions d'oxydoréduction et celle de transmettre de l'information nécessaire à leur réplication…

3.2. Fabriquer des macromolécules organiques par polymérisation

Le géologue est beaucoup plus concerné par la 2e étape de l'origine de la vie : fabriquer ces macro-molécules par polymérisation de monomères organiques plus simples que sont les acides aminés, les bases azotées… En effet, cette polymérisation est grandement facilitée par des catalyseurs, et la géologie fournit de tels catalyseurs : ce sont les sulfures comme la **pyrite** (FeS_2) et

les **phyllosilicates**, dont les principaux sont les **argiles** et les **serpentines**. La surface de ces minéraux a en effet la propriété d'adsorber des monomères comme les acides aminés, de les concentrer et de grandement favoriser leur polymérisation. Or les sulfures sont fréquents dans les régions volcaniques, et argiles et serpentines sont abondantes dès que de l'eau est en contact avec des roches silicatées, en particulier les basaltes et les péridotites, roches constituant la lithosphère océanique. Si donc on a un milieu aqueux « riche » en molécules de type acide aminé et autres molécules organiques (on parle parfois de « **soupe primitive** »), en phyllosilicates et/ou en sulfures, ces étapes 2 et 3 peuvent alors « spontanément » donner naissance à des **proto-cellules** qui deviendront les premiers organismes vivants.

3.3. Fabriquer les « molécules de la vie »

Quelle(s) a (ont) été la (les) source(s) des acides aminés, bases azotées et autres monomères (que l'on appelle parfois « briques élémentaires de la vie »), première étape indispensable à l'origine des polymères complexes que sont protéines, acides nucléiques et autres macromolécules ? Les scientifiques étudiant Terre et système solaire proposent trois mécanismes à l'origine de cette première étape, trois origines non incompatibles.

L'origine atmosphérique. La première origine (chronologiquement parlant) fut proposée en 1953 : ce sont les célèbres expériences de Miller [1]. On pensait à l'époque que l'atmosphère de la Terre vers -4 milliards d'années était majoritairement constituée de méthane (CH_4), d'ammoniac (NH_3), de dihydrogène (H_2) et d'eau (H_2O). Un apport d'énergie externe (décharge électrique, photons UV…) suffit pour générer des molécules plus complexes, comme les **acides aminés** (lire Il était une fois la vie...). Mais on pense maintenant que l'atmosphère primitive de la Terre ne comprenait pas de H_2, et que son carbone était principalement sous forme de CO_2 et non pas de CH_4. Avec une telle atmosphère, les synthèses ne sont pas les mêmes, et décharges et UV forment presque exclusivement des composés trop oxydés. Les expériences de Miller ne concerneraient donc pas la Terre. Il est cependant loin d'être exclu que dans des sites particuliers, dans une atmosphère riche en composés volcaniques par exemple, de telles synthèses soient possibles. Les recherches continuent.

L'origine extraterrestre. Comètes et météorites constituent la deuxième source possible de l'origine des molécules de la vie (Figure 2). On sait depuis 1864 avec la chute de la météorite d'Orgueil (Tarn et Garonne) que certaines météorites (les chondrites carbonées) contiennent ces fameuses « **briques élémentaires de la vie** ». On a prouvé dès les années 1960 que ces molécules organiques étaient intrinsèques à la météorite et ne provenaient pas d'une pollution terrestre, contrairement ce qu'on évoquait (voire invoquait) dès la chute de la météorite d'Orgueil. Une tonne de cette classe de météorite contient 60 grammes d'acides aminés, soit la masse d'un œuf de poule, et 1,3 grammes de bases azotées.



Figure 2. Comète et météorite. A gauche, un échantillon de chondrite carbonée. De telles météorites contiennent jusqu'à 5% de carbone, dont 60 ppm d'acides aminés (échantillon/photo Pierre Thomas). A droite, image de la comète 67P-CG (dite Churyumov-Gerasimenko, ou Chury) photographiée le 26 septembre 2014 par la sonde européenne Rosetta. Photo © Esa, Rosetta, NavCam. Les analyses (encore préliminaires) montrent que cette comète est riche en molécules organiques.

Des molécules organiques simples sont détectables (par des analyses spectrales) dans la queue des comètes. Les analyses *in situ* faites par la sonde *Giotto* (1986) et par la mission *Rosetta-Philae* (2014-2016) ont confirmé la présence de molécules organiques dans les comètes. Quel dommage que l'atterrisseur *Philae* n'aie pas pu mener à bien ses analyses du sol de la comète 67P-CG (dite *Tchourioumov-Guerassimenko* ou plus simplement Tchouri). Mais rien qu'en analysant les composés volatils s'échappant de ce sol, *Philae* a identifié 16 molécules carbonées dont certaines sont des précurseurs de la synthèse d'acides aminés (lire Les molécules organiques des comètes). Et un des grains cométaires ramenés sur Terre en 2006 par la sonde américaine *Stardust* contenait de la glycine, le plus simple des acides aminés. De la glycine a d'ailleurs d'être détectée dans la queue de la comète Tchouri grâce à l'instrument *Rosina*, installé sur la sonde *Rosetta*.

Quand des météorites ou des fragments et poussières cométaires arrivent sur Terre, la majorité est brulée par la traversée de

l'atmosphère ; cependant, une partie non négligeable arrive intacte à la surface. En se basant sur le flux actuel de météorites et sur celui du passé (déduit des études lunaires), et en fonction de la teneur de ces objets en carbone organique, on a pu estimer à 10^{15} à 10^{16} kg la masse de molécules organiques arrivées sur Terre sans être détruites entre -4,5 et -4 milliards d'années. Ces molécules organiques extraterrestres dateraient pour une bonne part de l'origine du système solaire. Les poussières externes de la nébuleuse pré-solaire (celles qui se sont rassemblées pour devenir des comètes et des chondrites carbonées) devaient être riches en glaces d'H_2O et autres petites molécules (CO, CO_2, CH_4, NH_3, CH_3O …). Et quand on irradie un tel mélange de glaces avec des photons UV ou des rayons cosmiques, des molécules plus complexes se forment, dont nos fameuses briques élémentaires.

L'origine géologique. Le fond des océans et/ou le sous-sol des continents constituent la 3e source possible de l'origine de la vie sous forme de molécules organiques. On sait faire des molécules organiques avec de l'H_2 et du CO_2 à haute ou moyenne température en présence de catalyseurs adéquats : $CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4$ (et autres molécules plus complexes) + $2\ H_2O$ (réaction de type *Fischer-Tropsch*). En présence d'NH_3 (ammoniac) ou d'HCN (cyanure d'hydrogène), il peut y avoir synthèses d'acides aminés et de bases azotées (réaction de type *Strecker*). Or quand de l'eau pas trop froide (T ≥ 80°C) est au contact de silicates contenant du fer sous le forme Fe^{2+} (olivine, pyroxène …) il se produit une réaction dont le type peut être résumé par l'équation suivante :

Olivine + $H_2O \rightarrow$ serpentine + brucite + magnétite + H_2



Figure 3. Dégagement enflammé d'un mélange de méthane, éthane, propane et dihydrogène sortant d'un sol de serpentine dans le sud de la Turquie. Ce site, nommé « la Chimère » prouve la réalité des réactions d'organosynthèse type Ficher-Tropsch, puisqu'elles ont lieu de nos jours dans le sous-sol turc (photo Pierre Thomas).

Il peut donc y avoir synthèse d'H_2 dès que de l'eau (eau de mer, eau souterraine …) est en contact avec des roches chaudes riches en olivine comme les péridotites (Figure 3). Cette réaction produit de la magnétite (Fe_3O_4) et de la serpentine. Or il se trouve que la magnétite est un catalyseur favorisant les réactions de type Ficher-Tropsch. De plus la brucite ($Mg[OH]_2$) entretient un milieu basique favorisant les réactions de type Strecker. Et il se trouve que la serpentine est un très bon catalyseur pour la polymérisation des monomères organiques.

Ces sites où de l'eau est en contact avec des olivines chaudes avaient donc « tout ce qu'il faut » pour que soit apparue la vie : des monomères types acides aminés, et un catalyseur pour les polymériser. Les deux autres mécanismes proposés (monomères apportés par des météorites ou comètes, ou synthétisés dans l'atmosphère puis tombés sur le sol) nécessitent une autre condition : qu'ils soient arrivés dans une zone géographique riche en phyllosilicates. Mais les phyllosilicates ne manquent pas.

4. Conclusion et perspectives de l'origine de la vie

Tout ce qui précède suggère fortement que l'origine de la vie est un phénomène spontané « assez facile » à se réaliser car ne nécessitant aucune condition exceptionnelle ; la « rapidité » avec laquelle la vie est apparue sur Terre renforce cette impression. Les termes « facile » et « rapide » doivent évidemment être compris au sens géologique. « Rapide », cela signifie que la vie a mis moins de 400 millions d'années pour apparaitre, soit moins de 8 % de l'histoire de la Terre. Et « facile » doit être compris au sens où l'on dit qu'un puzzle est « facile » quand il se fait « vite ». Tout cela suggère aussi que la vie a pu apparaître partout où il y avait de l'eau liquide, des arrivées de météorites et de comètes et/ou de l'eau en contact avec de l'olivine ou des pyroxènes. De tels sites ne manquent pas dans le système solaire, avec en particulier Mars, Europe (satellite de Jupiter), Encelade (satellite de Saturne), sans compter d'innombrables planètes extra-solaires. Les recherches à venir diront ce qu'il en est ! Pour ce qui est de Mars, Europe et Encelade, il « n'y a qu'à » aller voir sur place, car elles sont accessibles depuis la Terre à l'aide de sondes spatiales. Pour les planètes extra-solaires, impossibles à étudier *in situ* dans un avenir prévisible, il faudra se contenter d'études

spectrales de leur atmosphère et de leur surface. Une des pistes les plus faciles à explorer, bien qu'encore hors de notre portée instrumentale en 2016, ce sera de chercher dans l'atmosphère d'une exo-planète la coexistence de raies spectrales de composés fortement oxydant (comme l'O_2) et fortement réducteur (comme CH_4). Cette coexistence prouvera(it) qu'il existe un fort déséquilibre chimique dans cette atmosphère. Or la vie est une formidable source de déséquilibre chimique !

Références et notes

Image de couverture. Montage Pierre Thomas

[1] Miller SL & Urey HC (1959) *Organic Compound Synthesis on the Primitive Earth*, Science, 130, pp. 245-251.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** THOMAS Pierre (2021), L'origine de la vie vue par un géologue qui aime l'astronomie, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=501

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
