

L'apparition de la Vie sur la Terre

La question de l'origine de la Vie touche une corde sensible : elle s'adresse directement à notre émotivité et à notre subjectivité. Tenter de comprendre la structure atomique d'un minéral ou de définir les paramètres de la fusion partielle du manteau terrestre ne relève pas des préoccupations métaphysiques de l'Homme. Mais s'attaquer à un problème comme l'origine de la Vie, c'est trop souvent tenter de concilier science, religion, mythes et croyances de toutes sortes – un exercice pour le moins périlleux.

Différentes théories visant à comprendre l'apparition de la Vie se sont succédées depuis l'Antiquité jusqu'au milieu de XIX^e siècle. Toutefois, pendant des siècles, une théorie a prédominé et ce, malgré des réfutations expérimentales probantes : la théorie de la génération spontanée, une théorie dont s'accommodaient assez bien les religions.

1. Les premières théories

Nous ne ferons qu'une brève mention des premières théories, qui peuvent nous paraître aujourd'hui farfelues ; il faut cependant tenir compte du fait que les connaissances étaient très limitées à cette époque. Ainsi, selon Anaximandre de Milet (610 à 546 av. J.-C.), la Vie apparaît suite à l'évaporation de l'eau due Soleil. Empédocle (490 à 435 av. J.-C.) pense quant à lui que les organes isolés se rassemblent pour former un seul être, et Démocrite (460 à 370 av. J.-C.) décrète que la Vie est issue de vers sortant de la boue pour former des êtres humains.

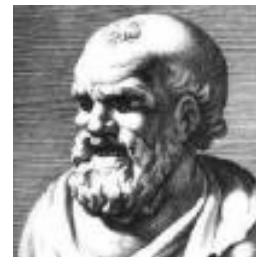


Figure 1. Démocrite (460 à 370 av. J.-C.).

2. La génération spontanée ou abiogenèse

On trouve les traces d'une croyance en une apparition spontanée de la Vie dans les écrits les plus anciens de la Chine, de l'Inde ou de l'Égypte ancienne : ainsi, des bambous donnent naissance aux pucerons pour autant que leurs jeunes pousses soient repiquées par temps chaud et humide ; les mouches et les parasites naissent spontanément à partir d'ordures et de sueurs ; les boues laissées par les inondations du Nil engendrent spontanément des grenouilles, des crapauds, des serpents, des souris et même des crocodiles.

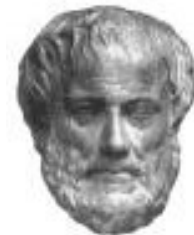


Figure 2. Aristote (384 à 322 av. J.-C.).

C'est Aristote (384 à 322 av. J.-C.) qui a réussi la synthèse des idées accumulées jusqu'à son époque et qui a formulé la thèse de la génération spontanée : « les plantes, les insectes, les animaux peuvent naître de systèmes vivants qui leur ressemblent, mais aussi de la matière en décomposition activée par la chaleur du Soleil ».

Jusqu'à la Renaissance – et même bien après –, les écrits abondent en récits d'observations de générations spontanées, mêlés de légendes diverses. Même de grands penseurs comme Roger Bacon, René Descartes ou Isaac Newton soutiennent l'idée de la génération spontanée. On passe même à l'expérimentation pour conforter la théorie. Jean-Baptiste Van Helmont (1577-1644) affirme ainsi qu'une chemise sale, du blé... et vingt et un jours d'attente feront apparaître une souris ! En plein milieu du XVIII^e siècle, le grand naturaliste Buffon (1707-1788) est un ardent défenseur de la génération spontanée. Mais le doute commence à s'installer...

Un savant italien, l'abbé Lazzaro Spallanzani (1729-1799), réalise de nombreuses expériences qui semblent montrer que lorsqu'on stérilise bien le système, il n'y a pas de génération spontanée. La polémique s'installe ; la controverse va durer un siècle. Il faudra attendre Louis Pasteur en 1860 pour clore le débat. Pasteur démontre, en mettant au point un protocole de stérilisation fiable, que la Vie ne peut naître spontanément de la matière inanimée – du moins à l'échelle d'une vie humaine : c'en était fait de la théorie de la génération spontanée.



Figure 5. Louis Pasteur (1822 - 1895).

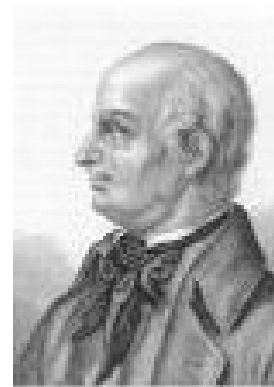


Figure 6. Lazzaro Spallanzani (1729 - 1799).

3. Le créationnisme

Le créationnisme suppose que c'est un être supérieur, le plus souvent un dieu, qui est à l'origine de la création de l'Univers et de la Vie. Par exemple, pour la religion chrétienne – du moins si l'on s'en tient *stricto sensu* à la Bible, c'est en rassemblant les eaux que Dieu fait apparaître la terre ferme ; il fait ensuite surgir les animaux dans la mer, dans l'air et sur la terre.

4. La panspermie

Pour clore ce rapide historique des idées sur l'origine de la Vie avant notre siècle, il faut signaler une autre théorie, qui est née à la fin du siècle de Pasteur : la Vie serait venue du cosmos. Cette théorie a été développée par l'Allemand H. E. Richter en 1865 ; selon lui, les corps célestes libèrent des particules qui contiennent des germes de microorganismes, appelés *cosmozoaires*, et qui ont été amenés sur Terre par les météorites.



Figure 7. Arrhénius.

L'idée a été reprise au début du siècle dernier, en 1906, par le savant suédois Svante Arrhénius – père de la théorie des électrolytes et Prix Nobel de Chimie en 1903 –, mais sous une forme plus élaborée : la panspermie. Cette théorie considère la Vie comme une caractéristique fondamentale de l'Univers, au même titre que la matière et l'énergie, et la Terre aurait été « ensemencée » par une Vie d'origine extra-terrestre. En 1969, on a d'ailleurs trouvé dans une météorite tombée en Australie de nombreuses substances organiques, notamment des acides aminés. D'autres molécules complexes ont aussi été identifiées dans l'espace par les astronomes. Les premières molécules organiques seraient-elles venues de l'espace ?

5. L'évolution chimique

L'étude de l'origine de la Vie va faire un bond en avant dans les années vingt avec les travaux de deux biochimistes, le Soviétique Alexander Ivanovitch Oparine (1894 - 1980) et le

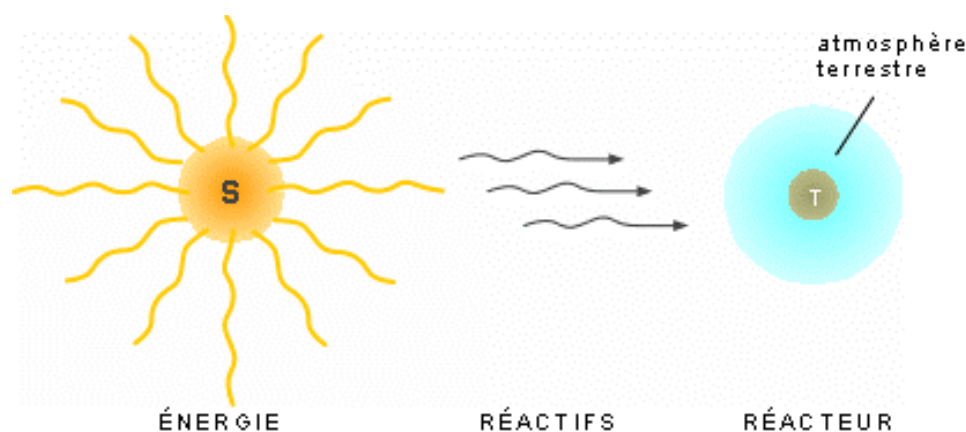


Figure 8. Les trois composantes nécessaires dans une réaction chimique.

Britannique John Haldane (1892 - 1964), qui ont proposé à peu de choses près, simultanément et de façon indépendante, une même théorie de l'apparition de la Vie. Pour ces savants, il faut sortir du cercle vicieux qui dit que seule la Vie peut produire la Vie. Leur théorie fait intervenir une espèce de génération spontanée, mais cette dernière se déroule cette fois sur une période de temps très longue ; elle ne constitue donc aucunement une réfutation des travaux de Pasteur. Pour Oparine et Haldane, il faut, pour comprendre l'origine de la Vie, remonter à la formation de la Terre. Au moment de la formation de notre planète, il y a 4,5 milliards d'années, une relation se serait établie entre la Terre et le Soleil, qu'Oparine et Haldane comparent à une réaction chimique. Dans une réaction chimique, il y a en effet trois composants essentiels : les réactifs (les composés chimiques), le réacteur (une fiole) et une source d'énergie (par exemple de la chaleur).

Peu de temps après la formation de la Terre, ces trois composants étaient bien en place : le réacteur était l'atmosphère terrestre ; la source d'énergie, le Soleil ; et les réactifs, tous les gaz et composés chimiques présents sur la Terre.

La clé de la proposition des deux chercheurs est la composition de l'atmosphère primitive de la Terre. Ils imaginent un scénario qui peut nous paraître aujourd'hui un peu farfelu, mais il faut se rappeler qu'à l'époque personne ne savait comment le Soleil fonctionnait. Selon eux, le cœur du Soleil est riche en hydrogène, oxygène, azote et carbone et son atmosphère est constituée d'hydrogène. Les éléments du cœur se combinent vite avec l'hydrogène de l'atmosphère solaire pour former des gaz comme le méthane, l'ammoniaque et la vapeur d'eau. Tous ces gaz étant transmis par la suite à l'atmosphère terrestre. D'autre part, le dégazage de la Terre, entre autres par les volcans, libère des gaz comme la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'hydrogène sulfuré (H₂S), une atmosphère bien différente de celle que nous connaissons aujourd'hui.

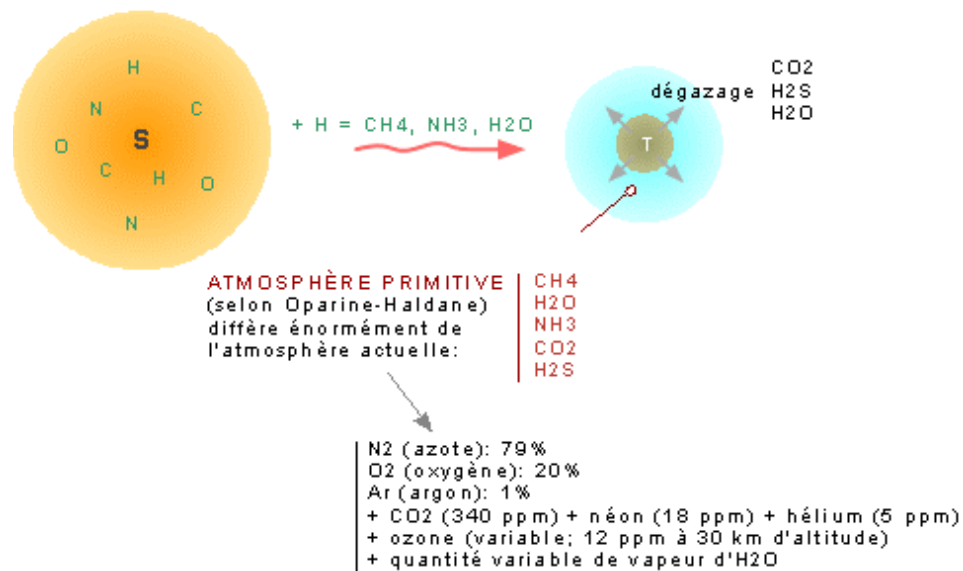


Figure 9. Composition de l'atmosphère primitive selon Oparine et Haldane.

Les radiations
 ultraviolettes provenant du Soleil, la source d'énergie principale, brisent les molécules simples de l'atmosphère primitive et libèrent des radicaux très réactifs, qui se combinent rapidement pour former des molécules plus complexes et plus lourdes. On peut aussi invoquer comme sources d'énergie additionnelles les décharges électriques que sont les éclairs et les volcans. Les pluies qui suivent la condensation de la vapeur d'eau dans la haute atmosphère précipitent les nouvelles molécules à la surface de la planète, dans les océans en formation.

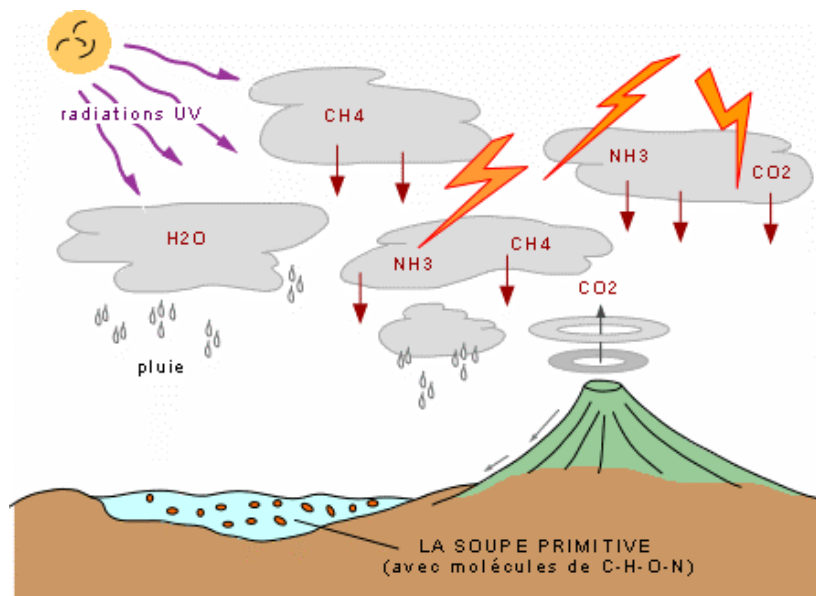


Figure 10. La formation de la « soupe primitive ».

Ces molécules sont composées de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote : on parle de *molécules organiques*.

C'est dans cette « soupe primitive » que les molécules organiques auraient progressivement évolué vers des molécules d'intérêt biologique (acides aminés, sucres et bases azotées).

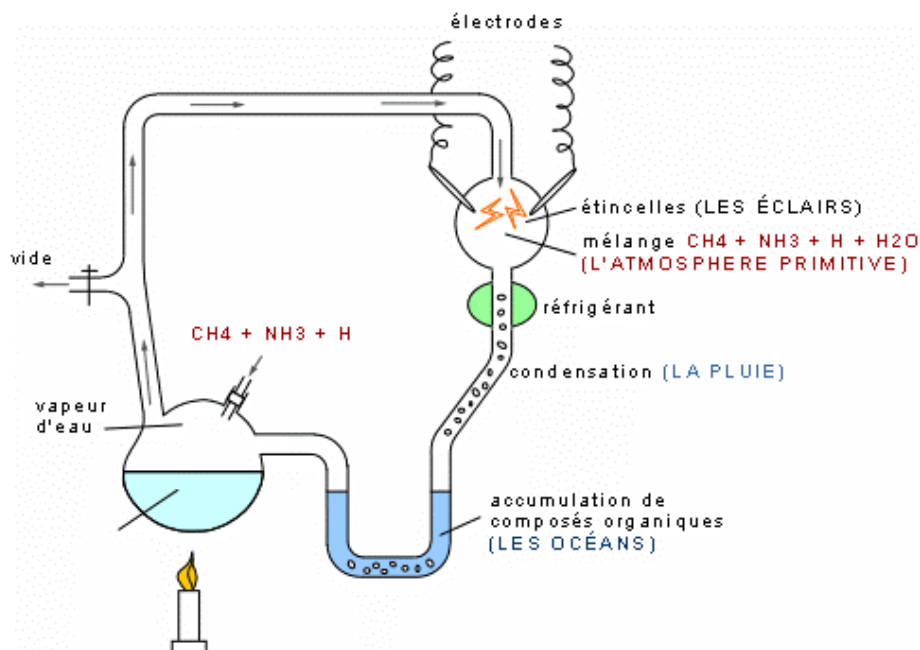
6. L'expérience de Stanley Miller et la chimie prébiotique

Il faut attendre le milieu des années 1950 pour qu'un jeune doctorant, Stanley Miller, qui effectuait ses recherches à l'Université de Chicago dans le laboratoire de Harold Urey – Prix Nobel de Chimie en 1934 –, se lance dans une aventure des plus périlleuses : tenter de reconstituer en laboratoire les conditions postulées par Oparine et Haldane pour la synthèse des premières molécules de la Vie. Il conçoit un montage où le réacteur est un système fermé, parfaitement stérile, dans lequel on peut faire le vide.



Figure 11. Stanley Miller.

Dans un ballon rempli d'eau, il introduit les gaz, méthane (CH_4), ammoniac (NH_3) et hydrogène (H). Sous l'effet de la chaleur d'une flamme, l'eau se vaporise. Il apparaît donc un



mélange gazeux constitué de vapeur d'eau, de méthane, d'ammoniaque et d'hydrogène : c'est une simulation de l'atmosphère primitive d'Oparine et de Haldane. Plus loin dans le réacteur, des étincelles sont produites entre deux électrodes pour simuler les éclairs : c'est la source d'énergie ; selon la théorie d'Oparine et de Haldane, c'est à cet endroit devraient se former les molécules organiques. Un réfrigérant provoque ensuite la condensation de la vapeur d'eau, qui entraîne avec elle les molécules nouvellement formées : c'est la pluie ; le tout s'accumule à la base du montage : ce sont les océans primitifs.

Après plusieurs jours, Miller constate qu'un matériau sombre et peu engageant s'est déposé à la base de son montage. L'analyse du dépôt montre que celui-ci contient de nombreux composés organiques, en particulier du formaldéhyde et de l'acide cyanhydrique, deux molécules qui jouent des rôles-clés dans la synthèse de molécules organiques plus complexes, ainsi qu'une petite quantité d'acides aminés, essentiellement de la glycine, le plus simple des acides aminés. Les bases d'une discipline scientifique nouvelle viennent d'être jetées : la *chimie prébiotique*, c'est-à-dire la chimie des molécules qui précède l'apparition de la Vie.

L'expérience de Miller montre qu'il est possible d'obtenir du formaldéhyde et de l'acide cyanhydrique par combinaison de la vapeur d'eau avec des molécules de méthane. Par combinaison de cinq de ces molécules de formaldéhyde, on peut obtenir une molécule complexe appelée *ribose* – qui est un sucre à cinq atomes de carbone, une des briques du vivant. C'est la combinaison du méthane et de l'ammoniaque qui a donné de l'acide cyanhydrique, et la combinaison de cinq molécules de cet acide peut produire de l'adénine, une des bases essentielles à la formation de l'ADN. La combinaison du formaldéhyde, de l'eau et de l'acide cyanhydrique permet d'obtenir des molécules très importantes pour la Vie, les acides aminés, essentiels à la synthèse des protéines et à la formation du glucose. Cependant, il faut bien constater que si prometteuses que soient ces étapes, on n'a pas « synthétisé la Vie » : on a seulement réussi à synthétiser les molécules essentielles à la construction de la Vie – ce que l'on pourrait appeler certaines briques de la Vie : mais un tas de briques ne fait pas encore un édifice !

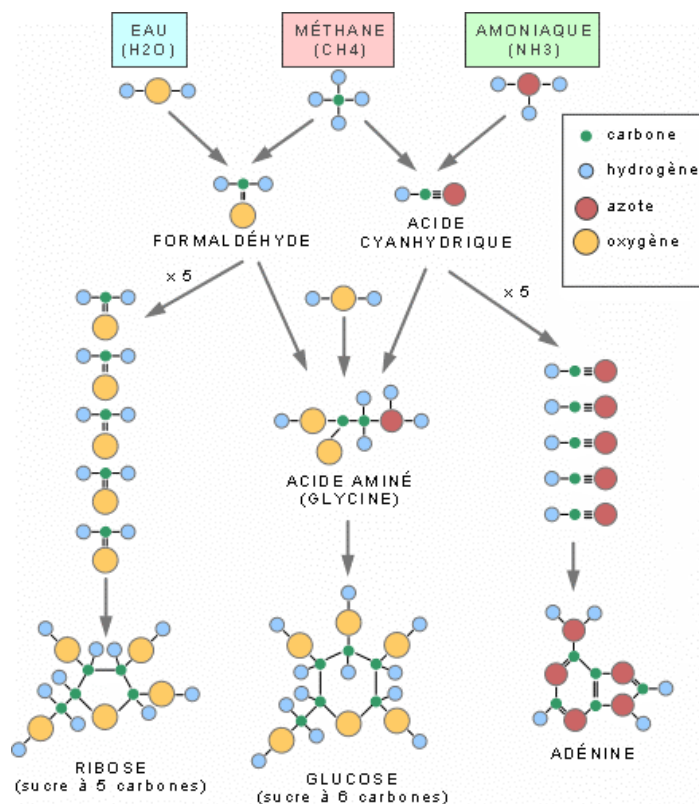


Figure 13. Chimie prébiotique.

Cependant, il faut bien constater que si prometteuses que soient ces étapes, on n'a pas « synthétisé la Vie » : on a seulement réussi à synthétiser les molécules essentielles à la construction de la Vie – ce que l'on pourrait appeler certaines briques de la Vie : mais un tas de briques ne fait pas encore un édifice !

L'importance de l'expérience de Miller et des expériences analogues qui ont suivi est d'avoir démontré que les molécules de base de la Vie peuvent être fabriquées de façon simple dans les milieux naturels. Mais il est important de réaliser qu'on n'a pas nécessairement démontré que ces synthèses se sont vraiment déroulées dans l'atmosphère primitive selon le scénario d'Oparine et Haldane .

En fait, cette chimie prébiotique fondée sur la fabrication de molécules organiques à partir de ce qu'on croyait être l'atmosphère primitive se heurte à trois problèmes majeurs, qui se rapportent à la composition de l'atmosphère primitive, à la concentration des molécules dans l'océan primitif et aux interactions chimiques dans la soupe primitive. Passons rapidement en revue ces trois paramètres.

a. La composition de l'atmosphère primitive.

Oparine et Haldane avaient postulé pour la composition de l'atmosphère primitive un mélange de méthane, d'eau, d'ammoniaque et d'hydrogène sulfuré, produits à partir de composés venant du Soleil et du dégazage de la Terre. Aujourd'hui, on considère que l'atmosphère s'est constituée par le seul dégazage du manteau de la Terre, durant les premières étapes de sa formation. Les volcans actifs auraient été beaucoup plus nombreux qu'aujourd'hui. On a de bonnes raisons de croire que l'atmosphère primordiale était composée principalement de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et d'azote, avec des quantités minimales de méthane, d'ammoniaque et de dioxyde de soufre, mais sans hydrogène ni oxygène. Les spécialistes de la chimie prébiotique s'accordent aujourd'hui à dire que l'atmosphère primitive devait être riche en méthane, azote et eau, ce qui ne correspond pas à l'idée que s'en faisaient Oparine, Haldane et Miller. Les chimistes s'accordent aussi sur le fait qu'une atmosphère riche en dioxyde de carbone serait défavorable à l'émergence de la Vie – ce qui pose un important problème : la présence de gaz carbonique est essentielle pour créer et maintenir un effet de serre suffisant sans lequel la température serait beaucoup plus basse, et il n'y aurait donc pas eu d'eau sous forme liquide sur la Terre. Pas de CO₂, pas d'eau liquide ; mais l'eau liquide est essentielle à la chimie des molécules prébiotiques ! C'est un cercle vicieux...le débat reste ouvert.

b. Les interactions chimiques dans la soupe primitive.



Figure 14. Un cristal de pyrite.

Dans la soupe primitive, il devait y avoir énormément d'espèces moléculaires différentes. Certaines peuvent soit catalyser, soit inhiber les réactions chimiques. On est encore loin actuellement de comprendre toutes ces interactions. En laboratoire, on réalise des expériences sur des systèmes simples – simplifiés même –, et même dans ces conditions, les manipulations s'avèrent très complexes. Il faudra de toute évidence faire appel à la modélisation théorique pour mieux cerner la réalité.

c. La concentration des molécules prébiotiques dans la soupe primitive.

Le modèle initial de la chimie prébiotique s'accommode mal de l'extrême dilution des réactifs en milieu liquide. Cependant, G. Wachterhauser et A. G. Cairns-Smith ont récemment montré que l'adsorption et la polymérisation de différentes molécules organiques pouvaient se produire de façon efficaces sur des surfaces minérales ayant des propriétés catalytiques. Ils ont poussé plus loin encore leur théorie en proposant que les organismes vivants primitifs auraient été des molécules organiques autocatalytiques utilisant directement le gaz carbonique CO₂, qui auraient tiré leur énergie de la pyrite (du sulfure naturel de fer FeS₂) à laquelle elles

se seraient attachées : ces molécules auraient formé un film organique à la surface de la pyrite ; elles proviendraient de la réduction du gaz carbonique par l'hydrogène sulfuré et le fer – qui dans la pyrite est dans un état réducteur. Bref, il y aurait donc eu une relation étroite entre l'apparition des molécules organiques primitives et la pyrite. Il est important de noter pour la suite que la pyrite est abondante dans les sources hydrothermales.

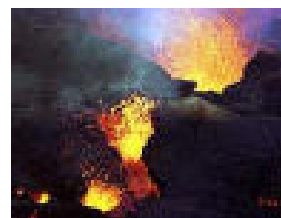


Figure 15. Les volcans à l'origine de la Vie?

7. Les nids du vivant

Quels sont les sites – « les nids » – propices à l'apparition du Vivant ? Cette question fait l'objet de nombreuses controverses. Évoquons, en vrac, quelques possibilités :

- Le moule originel du vivant comprend de l'eau plus « autre chose ». On a vu que les hypothèses d'Oparine, d'Haldane et de Miller ne tiennent pas la route : l'eau des océans n'est pas un milieu convenable pour le développement des premières réactions chimiques. Certains scientifiques soupçonnent l'intervention d'activateurs physiques comme la chaleur, la foudre, les ultraviolets, la dessiccation, l'évaporation,... et d'activateurs chimiques, notamment des catalyseurs comme les métaux, qui facilitent sûrement certaines réactions. Mais alors, où est le nid ? Il semble que les lagunes tièdes des protocontinents constituent un milieu propice aux interactions organiques primordiales. Charles Darwin en a eu l'intuition en 1871 : il parle alors d'un petit étang chaud (« warm little pond ») – de l'eau peu profonde à 30°C ou 40°C, contenant des minéraux « actifs » comme des argiles, des laves basaltiques, des sables et des métaux.
- L'hypothèse de la panspermie conserve aujourd'hui toute sa force. Le biologiste américain David Deamer a observé au cœur de certaines météorites l'existence de matériaux organiques disposés de façon quasiment identique à ceux des membranes cellulaires. D'autre part, Kevin Zahnle bâtit l'hypothèse qu'un énorme astéroïde, composé essentiellement de fer, aurait induit, grâce aux remarquables propriétés catalytiques de ce métal, les manifestations initiales de la Vie terrestre.
- Comme nous l'avons signalé plus haut, la pyrite attire les molécules organiques. Elle y déclenche des réactions de capture d'énergie et de transfert d'électrons analogues à celles que l'on observe dans la photosynthèse (voir l'article de C. Laumonier et J. Segers, *L'influence de la lumière sur les organismes vivants*, *Galaxie* 32, page 34)
- Selon le microbiologiste allemand Karl Stetter, la Vie n'apparaît pas dans le petit étang chaud cher à Darwin, mais dans une bouillante cocotte-minute, auprès des volcans et dans les geysers. Et le géochimiste américain Everett Shock a calculé qu'à haute température, les cellules et les organismes extraient aisément et rapidement les

nutriments qui leur conviennent. Avec, toutefois, une limite : on n'a jamais vu quelque organisme vivant résister à une température supérieure à 112°C.

- Il existe dans les fonds océaniques, à proximité des dorsales volcaniques, des sources chaudes sous pression qu'on appelle *sources hydrothermales*. On y rencontre des bactéries tributaires de la chimie du soufre qui appartiennent au groupe des *archéobactéries*, les plus anciennes bactéries connues. Le microbiologiste américain Norman Pace a émis l'idée que, durant l'enfance de notre planète, ces sources chaudes étaient bien plus nombreuses qu'à l'heure actuelle, et qu'elles ont joué, en offrant leur énergie chimique, un rôle décisif dans l'apparition du Vivant.
- Voici une hypothèse plus romantique. Pour Louis Lerman, le nid de la Vie doit être recherché dans l'écume et les embruns. Les bulles nées de l'agitation des vagues représentent environ 5 % de la surface des océans. Elles reçoivent beaucoup d'énergie lumineuse et collectent spontanément des molécules organiques, certains métaux catalyseurs et des sels comme les phosphates.
- Les argiles (silicates d'aluminium) ont, par rapport à l'eau et aux molécules organiques, des vertus étonnantes. Ainsi, elle forment des couches feuilletées où s'opèrent des catalyses et où les réactions s'accélèrent. Elles se laissent pénétrer en surface et offrent donc, des propriétés d'adsorption remarquables ; les cavités qu'elles recèlent sont des pièges à grosses molécules. Elles forment donc un échafaudage où les briques de la Vie sont empilées, enchaînées, repliées, tordues dans les trois dimensions et transformées en polymères biochimiques...
- Et si, tout compte fait, la Vie avait emprunté des voies multiples pour apparaître voici quatre milliards d'années à la surface de notre planète ?



Figure 16. L'écume de la mer.

8. Le passage des molécules à la cellule : un pas de géant !

Pendant des millions d'années, des molécules organiques ont donc dû s'accumuler dans les mers, formant la soupe primitive. Le pas suivant dans l'évolution de la Vie – un véritable pas de géant – a été l'organisation de ces molécules en cellules capables de se répliquer et de transmettre une information génétique à leur descendance. Comment les choses se sont passées reste un profond mystère. Nous ne savons même pas comment elles ont commencé : par la cellule, par les enzymes ou par les gènes ?

- **D'abord les cellules ?**

Oparine a émis l'hypothèse que la cellule était apparue la première, suivie

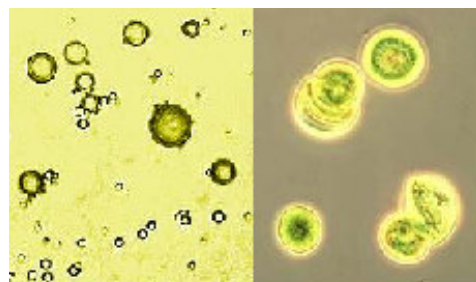


Figure 17. Coacervats (gauche) et cyanobactéries (droite).

des enzymes, et enfin des gènes. Il se fondait sur une analogie avec les *coacervats*, ces gouttelettes formées par certaines grosses molécules qui se regroupent spontanément dans l'eau sous certaines conditions. Pour Oparine, la Vie aurait commencé quand des populations complexes de molécules se seraient accumulées dans ces gouttelettes. Les enzymes seraient apparues ensuite, et auraient établi des cycles métaboliques à l'aide de ces molécules ; les gènes seraient apparus les derniers.

- ***D'abord les enzymes ?***

Récemment, Freeman Dyson, de l'Université de Princeton, a soutenu la théorie des « enzymes d'abord » : il est plus facile de synthétiser des acides aminés (les éléments de base des protéines et donc des enzymes) que des nucléotides (les éléments de base de l'ADN et de l'ARN) ; il est donc plausible que les protéines soient apparues les premières. Mais pour obtenir une enzyme, c'est à dire une protéine, il est nécessaire de disposer du gène possédant l'information qui gouverne sa synthèse.

- ***D'abord les gènes ?***

Dans les années 1970, une nouvelle théorie selon laquelle les gènes se seraient formés les premiers, a fait son apparition. Cette théorie est séduisante, car le caractère fondamental de la Vie est l'hérédité. Il semble néanmoins que les premières molécules porteuses d'informations aient été des molécules d'ARN, et non pas des molécules d'ADN.

9. L'apparition de l'ARN

Parmi les molécules qui se sont formées dans la soupe primitive, il y a l'AMP – une association entre une base azotée, l'*adénine*, un sucre, le *ribose* un pyrophosphate inorganique (PI). Ce dernier a d'ailleurs dû jouer un rôle dans la formation et l'accrochage du ribose à l'adénine.

L'ATP s'est ensuite formé par l'addition de deux autres pyrophosphates sur l'AMP. L'ATP a l'importante propriété de former avec l'AMP de longues chaînes par polymérisation. Cette chaîne ATP-AMP-AMP-AMP-AMP... est plus connue sous le nom de *PolyA*. Peu à peu, d'autres bases azotées ont dû apparaître dans la soupe primitive au hasard des réactions : la *cytosine*, l'*uracile*, la *guanine*, et bien d'autres... Possédant des propriétés analogues à celles de l'adénine, ces bases ont formé par polymérisation du CMP, de l'UMP, du GMP,... qui se sont insérés naturellement dans les *PolyA*, formant ainsi un ARN primitif.

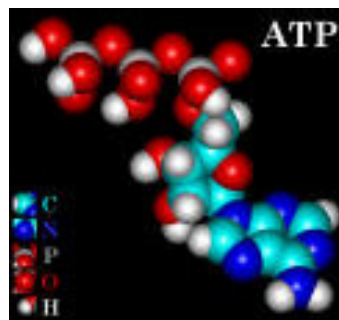


Figure 18. Molécule d' ATP.

À ce stade, l'ARN ne possède encore aucune information : ce n'est qu'une succession aléatoire de nucléotides. Parmi les bases azotées formées, seules la guanine (G), la cytosine (C), l'uracile (U) et l'adénine (A) ont été conservées, car ces molécules peuvent se lier entre elles : la guanine se lie à la cytosine, et l'uracile à l'adénine, en se protégeant mutuellement des dégradations. Cette propriété, qui a pour effet de stabiliser la molécule d'ARN, a permis à celle-ci de se replier sur elle-même : certaines séquences sont complémentaires d'autres et se lient entre elles, par exemple :

```

.....A-G-C-A-U-U-A-G-C.....
      | | | | | | | |
.....C-A-G-U-A-A-U-C-U.....
  
```

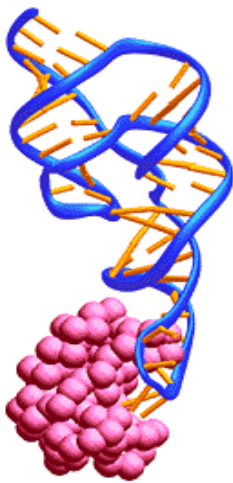


Figure 19. Ribozyme.

Ces repliements en boucle permettent l'apparition de nouvelles propriétés : une meilleure résistance à la dégradation par exemple mais surtout la possibilité d'une réplication de la molécule avec la formation d'un second brin complémentaire du premier. En effet, imaginons une molécule d'ARN dont une extrémité se replie. De nouvelles bases vont pouvoir s'accrocher à cette extrémité mais, en raison de leur affinité, leur mise en place ne sera cette fois plus aléatoire : elle sera conditionnée par la séquence des bases situées sur l'autre brin. Parmi les différents ARN formés, certains possèdent une activité catalytique – on les appelle des *ribozymes*. Cette activité leur confère entre autres une capacité d'autoréplication.

Un ARN capable de se répliquer peut donc proliférer au détriment des autres ARN, qui pourtant utilisent les mêmes bases azotées : c'est le début d'une sélection de type darwinien. Les nombreuses erreurs de réplication permettent de créer de nombreuses variantes de cet ARN, dont certaines s'avèreront plus efficaces en étant par exemple plus stables ou en se répliquant plus rapidement. Par ce mécanisme, où seules les bases azotées A, C, G, U peuvent intervenir, la disparition des ARN composés d'autres bases que ces quatre bases azotées est inéluctable...

10. Le passage de l'ARN aux protéines et à l'ADN

La molécule d'ARN a donc dû tendre rapidement vers un modèle stable dont l'évolution ultérieure devient difficile. Cependant, un nouveau type de sélection a dû voir le jour : certains ARN sont en effet capables de se lier à un acide aminé. Une telle association les protège encore mieux de la dégradation car elle les rend plus compacts. Ils doivent donc devenir de plus en plus nombreux et il leur est alors possible de se lier entre eux et de former de petits peptides par association de leurs acides aminés. C'est à ce stade qu'interviennent des ribozymes capables de catalyser ce type de liaison et une troisième molécule d'ARN qui par

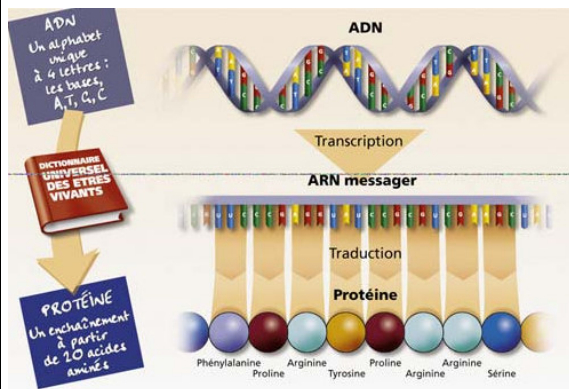
sa séquence de nucléotides dirige l'ordre de formation du peptide (elle fait alors office de gène) : la fonction de traduction est née.

Ici encore, certains des peptides formés possèdent une activité catalytique, ils préfigurent les futures enzymes. Certains ont pu par exemple faciliter la réplication des ARN. C'est à ce stade que l'apparition de la cellule a dû changer considérablement le devenir de l'ARN producteur de l'enzyme. En effet, si de telles enzymes étaient libres dans le milieu, elles catalyseraient la réplication de tous les ARN concurrents, ce qui ne donnerait aucun avantage évolutif à l'ARN qui les codait et aurait probablement entraîné, tôt ou tard, sa disparition.

Sous l'action d'enzymes, certains ARN se combinent entre eux et forment ainsi un ARN plus long et donc des peptides plus longs. Cette « combinaison » ou *épissage* a pu être réalisée grâce à l'action de certains ribozymes. Parmi ces nouveaux peptides, certains apportent des propriétés nouvelles. Ainsi, une enzyme permettant de fabriquer l'ADN a pu voir le jour. Cette *transcriptase inverse*, comme on l'appelle actuellement, permet à partir d'un seul brin d'ARN de créer une molécule d'ADN à double brin. Les différences entre ARN et ADN (*thymine* (T) à la place de l'uracile, *désoxyribose* à la place du ribose) peuvent provenir de l'affinité de la transcriptase inverse pour de telles molécules. Une telle enzyme a dû en fait permettre à la fois la formation d'ADN à partir d'ARN, la réaction inverse et la réplication. Puis, avec le temps de nouvelles formes plus spécialisées ont dû la remplacer. L'avènement de l'ADN a permis de stocker les gènes primitifs (ex -ARN) en un seul exemplaire, au lieu d'en nécessiter un grand nombre et elle a également favorisé leur stabilité.

L'hypothèse d'un monde de l'ARN à l'origine de toutes les autres molécules du Vivant (protéines, ADN) est séduisante. Mais il convient de rappeler que l'ARN est très sensible à la chaleur ; on peut donc supposer que l'ARN s'est formé au niveau de sources hydrothermales mais sa survie ne peut se comprendre que s'il y a eu ensuite migration vers des eaux moins chaudes.

L'ADN est constitué d'un enchaînement des nucléotides A, T, G et C. C'est cet enchaînement, appelé séquence, qui fournit l'information nécessaire à la synthèse des protéines. L'ADN est dans une première étape transformé en une molécule intermédiaire, l'ARN messager, constitué des ribonucléotides A, U, G et C, au cours d'un processus appelé transcription. Cet ARN est alors pris en charge par des entités supramoléculaires, constituées de protéines et d'ARN dits ribosomiaux : les ribosomes. Les ribosomes sont l'usine moléculaire qui synthétise les protéines à partir de l'ARN messager, au cours d'un processus appelé traduction. L'ordre d'enchaînement des acides aminés qui forment la protéine est dicté par l'ordre d'enchaînement des nucléotides. Cette correspondance est assurée par les ARN de transfert. La correspondance ADN → ARN → protéine est unidirectionnelle : c'est le dogme central de la biologie moléculaire. Ce mécanisme est universel, ce qui constitue la meilleure preuve de l'origine commune de tous les organismes vivants.



11. Conclusions

Dans cet article, nous avons tenté de présenter les théories qui se sont succédées pour comprendre les mécanismes de l'apparition de la Vie sur notre planète. On ne sait toujours pas exactement ni *comment* ni *où* la Vie est apparue, mais il est clair qu'une chimie prébiotique, alliant molécules formées sur Terre – et peut-être molécules venant de l'espace – a donné naissance aux premières molécules porteuses d'informations génétiques. L'étude en laboratoire, mais aussi l'étude *in situ* d'astres comme Mars et Titan, qui doivent prochainement être visités par des sondes spatiales, nous apporteront probablement beaucoup d'indices.

Et si là, de nos jours, la Vie continuait à se créer, en secret... ?

Catherine Laumonier (UMH) et Jérôme Segers (UMH)

Pour en savoir plus...

Yves Paccalet, *La Terre et la Vie, Chronique de l'Univers des origines au XXI^e siècle*, Larousse, 1994.

Yves Paccalet, *La Mer et la Vie, Chronique de l'Univers des origines au XXI^e siècle*, Larousse, 1994.

Linda Gamlin et Gail Vines, *Evolution of life*, Equinox, Oxford, 1986.