

Les origines de la vie, du minéral aux biomolécules

D'après la conférence de Thomas Georgelin

Thomas Georgelin est Maître de Conférences à Sorbonne-Université et au Centre de Biophysique moléculaire d'Orléans¹.

Afin d'identifier les éléments et les conditions pour l'apparition de la vie, il est nécessaire de contextualiser l'émergence de la vie dans un environnement géochimique particulier, relatif à la Terre primitive par exemple.

Connaître les mécanismes chimiques ayant permis l'émergence de la vie sur Terre (**Figure 1**) permettra d'adapter les expériences prospectives pour la recherche de vie ailleurs.

1 Les conditions pour l'émergence de la vie

1.1. Qu'est-ce que la vie pour un chimiste ?

Pour les chimistes et les exobiologistes (voir le **Chapitre**

Michel Viso dans cet ouvrage *Chimie, aéronautique et espace*, EDP Sciences, 2018), la vie peut être définie en première approximation comme étant un système autonome capable de « faire plus de lui-même par lui-même ». Afin d'être chimiquement plus précis, il est nécessaire de placer ce système hors équilibre, donc de le compartimentaliser, afin de dissiper un maximum d'énergie, s'accumulant lors de l'auto-organisation des molécules. Il faut en outre que le système soit capable de coder et de transférer une partie de l'information.

Cette définition correspond parfaitement à la description d'un système cellulaire, tel qu'on le connaît aujourd'hui, comme par exemple une

¹. cbm.cnrs-orleans.fr/



Figure 1

La Terre primitive, contexte géochimique d'apparition de la vie.

bactérie (**Figure 2**), constituée d'un ensemble de molécules, structurées, parfois auto-organisées, à l'intérieur d'une membrane.

Dans un contexte de monde d'ARN, les systèmes cellulaires primitifs présentaient fort probablement une molécule d'ARN, capable d'autocatalyser sa formation.

1.2. L'apparition du premier organisme vivant sur Terre

L'acronyme LUCA (ou Luca, « *Last Universal Common Ancestor* ») est souvent utilisé pour désigner l'ancêtre commun à toutes les formes de vie connues actuellement. Il aurait vécu il y a environ 3,5 à 3,8 milliards d'années.

Le système le plus primitif est un système basé sur de petites unités ribosomales d'ARN, qui sont vraisemblablement des bactéries primitives. La branche la plus ancienne des bactéries

connues est celle des hyperthermophiles² (**Figure 3**). On peut se demander si notre plus vieil ancêtre commun était une bactérie hyperthermophile ou si les tous premiers organismes étaient eux aussi hyperthermophiles ou mésophiles, puis qu'ils auraient ensuite migré vers des sources chaudes. On ne connaît aucune trace fossile de cette vie bactérienne primitive, ni de LUCA, ni des pré-décédésseurs.

Avant même la formation d'une cellule primitive, intéressons-nous à la chimie prébiotique pour comprendre comment, à partir des briques moléculaires produites dans le milieu interstellaire ou sur la Terre primitive, les molécules d'intérêt biologique ont pu se former.

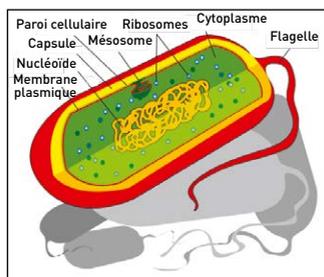


Figure 2

Une bactérie, le plus simple modèle de système vivant connu actuellement.

2. Hyperthermophile : famille de bactéries les plus anciennes connues et pouvant survivre à des températures élevées (au-delà de 80 °C).

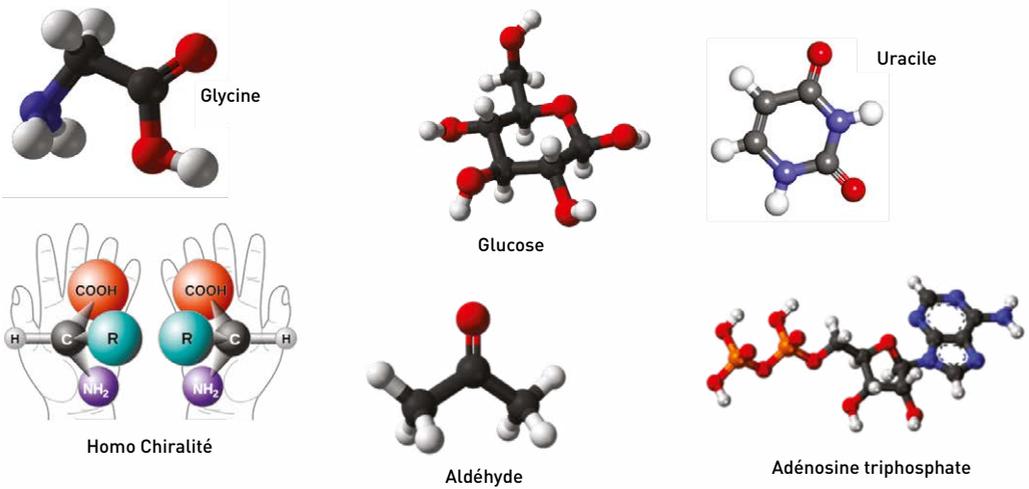


Figure 4

Quelques molécules d'intérêt biologique. Les molécules du vivant n'existent que sous une seule forme de symétrie.

oxygène, phosphore, soufre, mais aussi sur la présence de métaux de transition : le manganèse, le fer, le cuivre, le cobalt, le zinc.

La **Figure 5** indique l'abondance des éléments chimiques, dont ceux servant pour la biologie actuelle. Nous constatons que l'hydrogène, l'hélium, l'oxygène et le carbone font partie des éléments les plus abondants.

1.3. La chimie du carbone est favorable à l'émergence de la vie

La chimie et la biochimie sont donc basés sur la chimie du

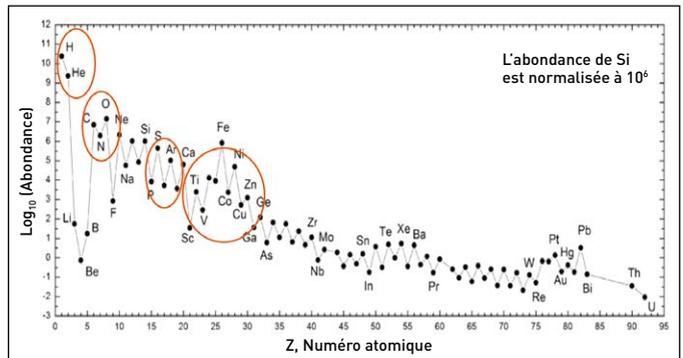
carbone principalement. La nature des molécules carbonées est particulièrement variée, allant de 1 carbone (CH₄) à des molécules très complexes comme le fullerène avec soixante atomes de carbone (**Figure 6**, en bas à droite).

En termes de liaison chimique, le carbone permet aussi la formation de molécules oxygénées (C-O, C=O, etc.) ou phosphorylées (liaison C-O-P comme dans les nucléotides). En raison de l'énergie libre de ces molécules, ces liaisons sont une bonne opportunité pour l'émergence de la vie.

La très grande variabilité de structures entraîne une

Figure 5

Abondance des éléments du tableau périodique dans l'Univers. Les éléments utiles à la vie (entourés en rouge) tels que l'oxygène, le carbone et l'hydrogène sont très abondants.



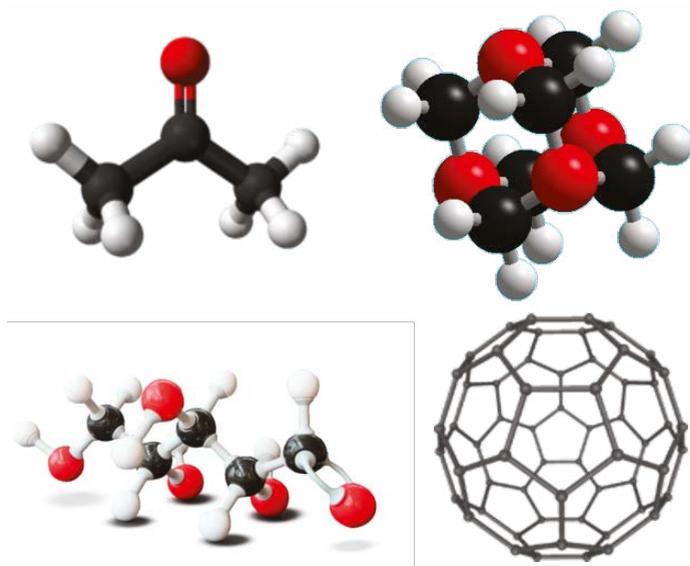


Figure 6

Quelques molécules organiques d'intérêt biologique.

énorme variabilité en termes de fonctionnalités chimiques et biochimiques. En effet, la structuration des molécules biologiques induit une fonction particulière pour l'organisme, pour la cellule, pour le métabolisme. Comprendre la structuration des molécules organiques est donc un enjeu majeur pour comprendre nos origines biologiques. Il faut aussi pouvoir former des molécules chirales et orienter cette chiralité ; le carbone le permet, et c'est aussi une opportunité pour avoir des gains énergétiques.

1.4. L'eau est un solvant idéal pour l'apparition de la vie

La vie est donc basée sur la chimie du carbone, une chimie réalisée dans l'eau. L'eau, abondamment présente sur la Terre primitive (**Figure 7**), est un bon vecteur et un bon solvant. Elle forme en effet des liaisons hydrogène, et peut solvater toutes les molécules polaires.

En raison de la nécessité de dissiper de l'énergie sous forme thermique, l'eau est là encore un bon vecteur. Elle présente une bonne capacité calorifique et permet à une structure dissipative d'extraire de l'énergie⁵.

L'eau est aussi un bon solvant dissociant. Cela est important car un océan primitif contient des sels qui seront dissociés dans l'eau comme par exemple le chlorure de sodium (NaCl), qui sera dissocié en cation Na^+ et en anion Cl^- . Ces ions serviront à structurer les biomolécules, les molécules organiques ou macromolécules⁶, ainsi que les biopolymères. Cette structuration permettra à une partie des molécules d'acquérir une fonctionnalité.

5. Capacité calorifique : capacité d'un produit à absorber et restituer de l'énergie.

6. Macromolécule : molécule de très grande taille (protéine, ARN, ADN, etc.).

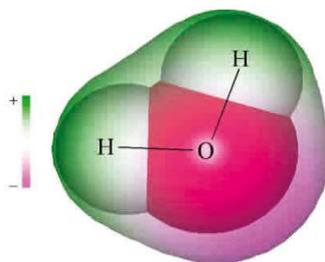


Figure 7

L'eau, composé essentiel en biologie grâce à ses différentes propriétés physico-chimiques.

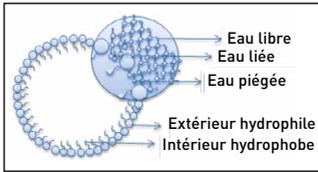


Figure 8

Une cellule primitive potentielle, issue de micelles.

Figure 9

Deux origines possible de la vie, une origine endogène où la vie est apparue sur Terre (images du haut), et une autre où la vie est venue d'un autre corps céleste (images du bas).

Les propriétés physico-chimiques de l'eau permettent aussi d'expliquer la formation de micelles ou de vésicules, c'est-à-dire des structures permettant de compartimenter les molécules organiques. La **Figure 8** montre un exemple d'une cellule primitive qui pourrait être basée sur la formation de micelles.

Si pour toutes ces raisons l'eau est un très bon vecteur, on peut aussi en imaginer d'autres, comme par exemple le formamide. Le formamide a des propriétés similaires à celles de l'eau, et l'on pourrait imaginer une chimie basée sur ce solvant, mais au vu des

faibles quantités de formamide disponible sur la Terre primitive, l'eau est probablement le solvant ayant permis l'émergence du vivant.

2 Sur les traces de l'origine de la vie sur Terre

2.1. L'hypothèse endogène de l'origine de la vie

Les molécules organiques et les macromolécules primitives ont pu être formées sur la Terre (origine endogène) ou sur des corps célestes (origine exogène) (**Figure 9**).



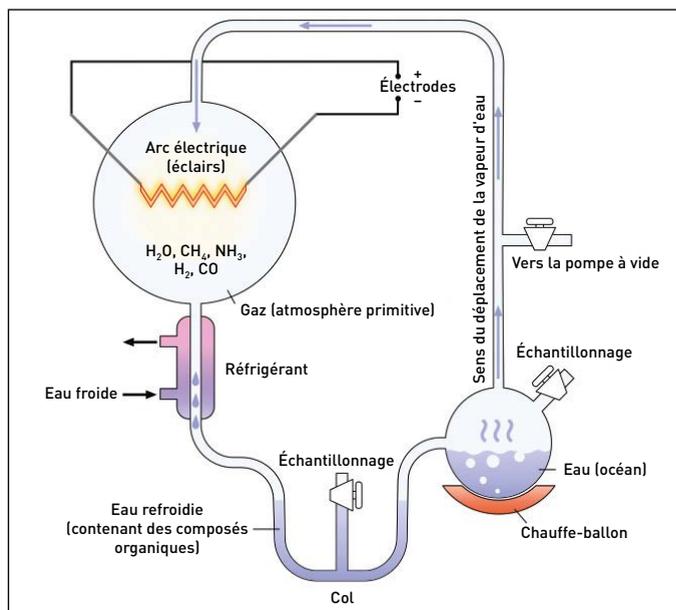


Figure 10

L'expérience de Miller (1953), cherchant à reproduire l'atmosphère d'une Terre primitive. Source : wikipédia, licence GFDL, cc-by-sa-3.0.

L'une des expériences piliers de l'origine endogène de la vie est l'expérience de Miller (1953) (Figure 10), qui a tenté de reproduire ce qui pouvait se passer dans la haute atmosphère d'une Terre primitive (Figure 11). L'expérience fait intervenir entre autres de l'eau (H₂O), du méthane (CH₄), de l'ammoniac (NH₃) et du dihydrogène (H₂). Les substances sont enfermées dans un groupe de tubes de verre stériles connectés ensemble en boucle, avec un flacon à moitié plein d'eau liquide et un autre contenant des électrodes. L'eau liquide est ensuite chauffée pour provoquer l'évaporation, puis des étincelles sont déclenchées entre les électrodes pour simuler des éclairs à travers l'atmosphère de la Terre et la vapeur d'eau. Enfin, l'atmosphère est rafraîchie pour que l'eau se condense et retourne dans le premier flacon. Et le cycle redémarre.

À la fin de la première semaine de fonctionnement continu, Miller et Urey observèrent qu'entre 10 et 15 % du carbone à l'intérieur du système était alors sous la forme de composés organiques. 2 % du carbone avait formé des acides aminés, dont treize des vingt-deux qui sont utilisés pour fabriquer des protéines dans les cellules des organismes, avec une abondance de glycine. Des sucres, des lipides et quelques composants des acides nucléiques se formèrent également, mais pas d'acides nucléiques entiers (ADN ou ARN). Comme il a été observé dans les expériences qui ont suivi, des énantiomères gauches dextrogyre et lévogyre se sont formés dans un mélange racémique. Malgré leur toxicité, ces composés, dont le méthane et le cyanure, sont des composants nécessaires pour les composés biochimiques

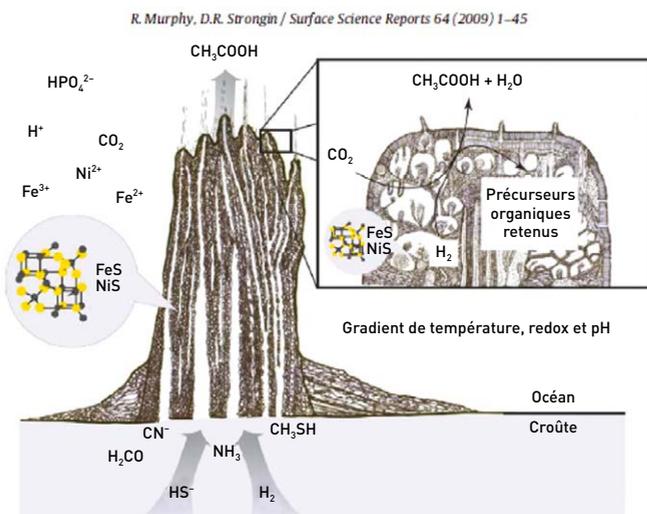


Figure 11

Atmosphère d'une Terre primitive, contexte d'apparition de la vie sur Terre.

Figure 12

Les sources hydrothermales au niveau des dorsales océaniques, riches en composés variés, sont un environnement possible pour une origine endogène de la vie.



importants, ils vont être à la base d'une chimie plus complexe amenant à la formation des nucléotides, des peptides, voire des protéines. Même si à l'heure actuelle, à travers cette expérience, aucun biopolymère⁷ n'a été mis en évidence, c'est une bonne base de travail puisque des monomères, eux, ont été mis en évidence.

Une autre hypothèse pour l'origine endogène des biomolécules est celle de leur formation dans les sources hydrothermales⁸. La **Figure 12** présente un exemple de source hydrothermale sous-marine que l'on retrouve au niveau des dorsales océaniques. Ces environnements sont intéressants puisqu'ils sont riches en H_2 , CO_2 et en composés variés. La chimie y est basée sur celle du gaz carbonique CO_2 ; c'est plutôt

7. Biopolymère : chaîne carbonée macromoléculaire composant un organisme vivant.

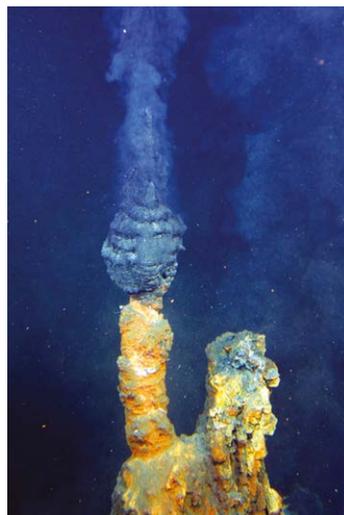
8. Voir aussi *La chimie et la mer*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009.

une chimie d'oxydo-réduction qui conduit à une formation relativement abondante de sucre, et à la présence de composés de type CN^- ou HCN . Il peut aussi se former des bases azotées et potentiellement des peptides. Grâce à la présence d'ions métalliques, principalement le fer, le zinc et le nickel, sous forme de sulfures, c'est la formation de sucres à travers les réductions successives du CO_2 qui a été surtout mise en évidence.

Néanmoins, ni sur place, ni à travers des études réalisées en laboratoire mimant ces systèmes, des biopolymères n'ont été mis en évidence (**Figure 13**).

2.2. L'hypothèse exogène de l'origine de la vie sur corps céleste entrant en collision avec la Terre

Sur des corps célestes tels que les météorites (**Figure 14**) et dans le milieu interstellaire, les techniques



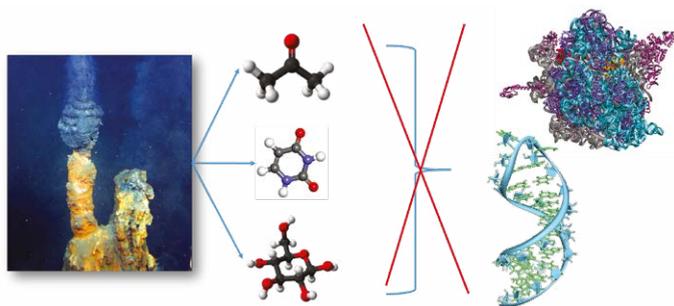


Figure 13

Il n'y a pas encore de mise en évidence de biopolymères dans les sources hydrothermales sous-marines.



Figure 14

Les météorites Murchinson et Tchouri, comportant des molécules organiques plus anciennes que les premières connues sur Terre.

A) Wikipédia, licence cc-by-2.0, James St. John ; B) ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0.

spectroscopiques⁹ ont montré la présence d'un nombre très important de molécules organiques (voir les **Chapitres de M. Viso** et de **M. Guélin** dans *Chimie, aéronautique et espace*). Quelques-unes de ces molécules d'intérêt biologique pour former les peptides et les acides nucléiques sont rappelées sur la **Figure 15** : il s'agit d'acides aminés, de sucres, de nucléobases, d'urée, des molécules essentielles au vivant.

Dans l'expérience des comètes artificielles, présentée dans le

9. Spectroscopie : méthode d'analyse d'un spectre émis par une espèce [spectre lumineux, résonance magnétique, etc.], permettant de déterminer la structure de molécule.

Chapitre de M. Viso, l'irradiation de glace cométaire conduit à la formation d'acides aminés, et une publication plus récente¹⁰ reporte la formation de sucres d'intérêt biologique, notamment le sucre à cinq carbones, le ribose, qui est le seul sucre présent dans les acides nucléiques actuels.

2.3. Les défis de la chimie prébiotique

Actuellement on ne sait toujours pas expliquer le passage du non-vivant au vivant, et même expliquer le passage des monomères aux biopolymères, et encore moins celui

10. Meierenrich U.J. (2015). PNAS, 112 : 965-970.

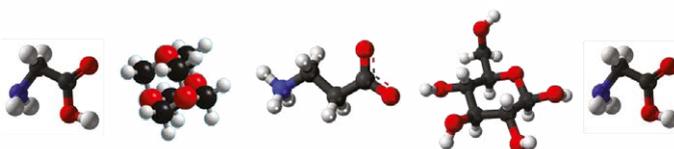
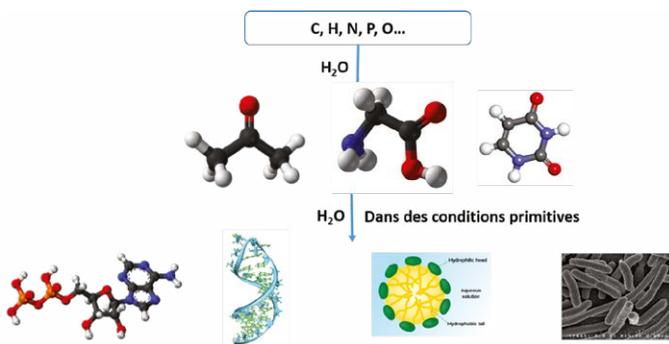


Figure 15

Quelques molécules organiques d'intérêt biologique d'origine exogène dont le composant principal est le carbone.

Figure 16

À partir des éléments les plus abondants et d'eau dans des conditions primitives, on peut aboutir à des molécules biochimiques.



aux biopolymères actifs. Cette chimie prébiotique complexe s'inscrit clairement dans l'exobiologie.

Partons des éléments primordiaux qu'on retrouve dans l'Univers, dans un contexte de géochimie particulier. Prenons le cas simple d'un océan primitif où il n'y a que l'eau et pas encore des sels (Figure 16), et essayons de comprendre comment peuvent se former des molécules organiques dans ces conditions primitives, puis ensuite des polymères, des biopolymères, des cellules, et enfin des bactéries.

Dans toutes ces étapes, l'eau est un facteur essentiel, et son contrôle passe par une bonne connaissance de la géochimie des environnements primitifs. Dans cette chimie prébiotique, et plus spécifiquement dans un contexte de monde d'ARN, les premiers polymères intéressants sont les acides nucléiques comme les molécules d'ARN et d'ADN, pour

lesquelles il faut passer par des étapes de condensation.

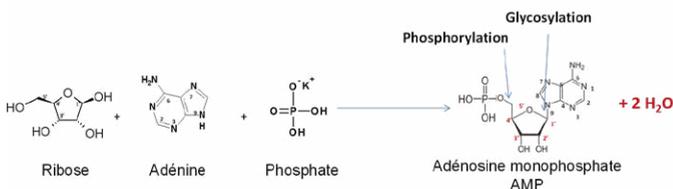
La Figure 17 montre comment peut se former l'adénosine monophosphate (AMP – l'une des briques des ARN) à partir de la condensation du ribose, le sucre à cinq carbones, avec une base azotée (ici l'adénine) et du phosphate ; deux molécules d'eau sont éliminées au cours de la réaction, ce qui est thermodynamiquement défavorable. Pour lever ce problème, il existe deux voies possibles.

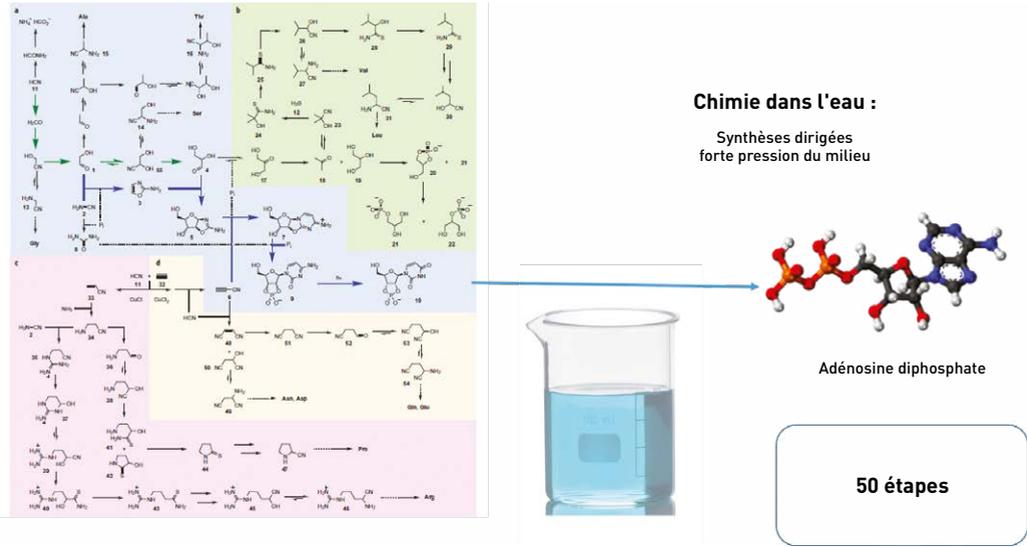
L'utilisation d'un activateur chimique est une solution cohérente dans certains cas, comme l'ont montré des études spatiales menées sur la présence par exemple d'acide cyanhydrique HCN ou d'imidazole. Mais on peut aussi utiliser les surfaces minérales pour gérer la quantité d'eau à la proximité des molécules organiques.

La Figure 18 résume un très bel exemple de chimie

Figure 17

Formation de l'adénosine monophosphate, à partir de ribose, sucre à cinq carbones, et d'adénine.





biotique dans l'eau, une synthèse dirigée qui conduit à la formation de nucléotides. C'est une chimie dite orientée, chacune des étapes prise indépendamment pouvant être caractérisée comme une étape primitive prise dans des conditions primitives avec des intermédiaires réactionnels plus ou moins stables. C'est le cas du cyanoacétylène, qui est fortement instable. Tous les réactifs utilisés ici sont des produits que l'on retrouve potentiellement dans un environnement primitif.

Ce schéma est totalement cohérent mais il nécessite d'être dans un environnement concentré et d'avoir des agents stabilisants ; cette chimie dans l'eau est très

belle, mais elle souffre encore de quelques problèmes qu'il faut travailler.

Un autre exemple est celui d'une chimie initiée par Orgel et Ferris, qui a été reprise par le groupe de Sutherland et Szostak depuis quelques années. Elle est centrée sur la formation d'oligonucléotides à travers l'utilisation d'activateurs tels que le 2-aminooxazole et le 5-aminoimidazole. Ces activateurs chimiques permettent la formation d'esters activés, facilitant la condensation des sucres avec les bases azotées (Figure 19). Cette proposition est aussi une voie très intéressante car elle peut servir à expliquer la répllication non-enzymatique de l'ARN.

Figure 18

Un exemple de chimie biotique : synthèse dirigée dans l'eau, en cinquante étapes, de l'adénosine diphosphate.

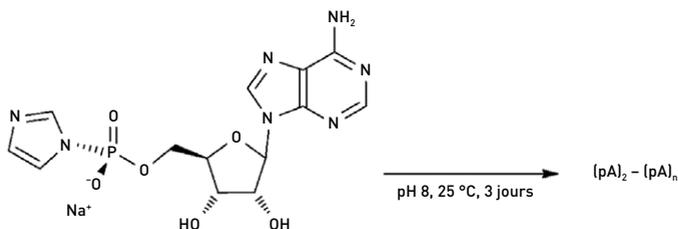


Figure 19

Réaction de Sutherland et Szostak consistant en une formation de nucléotides, expliquant la répllication non-enzymatique de l'ARN.

Il existe aussi d'autres voies qui, sans activateurs chimiques (**Figure 20A**), à partir des éléments essentiels à la vie (le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le soufre, le phosphore), acceptent la présence de l'eau pour former les monomères de l'étape 1 : de la glycine, du sucre, des acides aminés, des bases azotées.

L'étape 2, qui ne peut se faire en présence d'eau, se fait en présence de surface minérale, ici de la silice poreuse (**Figure 20B**), dont la taille des pores est d'environ $2 \mu\text{m}$; mais des surfaces minérales non poreuses peuvent aussi être utilisées.

Les surfaces minérales, poreuses ou non, par interaction avec les molécules organiques, stabilisent les molécules ; par exemple un sucre instable en milieu acide ou basique, mis sur une surface minérale dans les mêmes conditions, sera stabilisé en raison des interactions par liaisons hydrogène avec la surface minérale. En plus de la stabilisation par la surface,

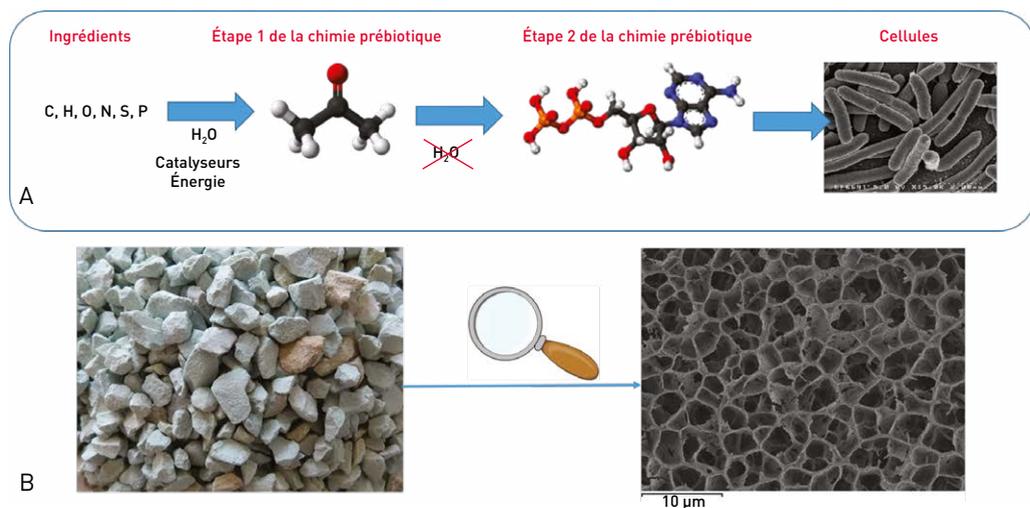
la présence de pores permet de confiner la matière organique, ce qui conduit à des interactions chimiques, à des effets catalytiques qui vont accélérer les vitesses des réactions chimiques.

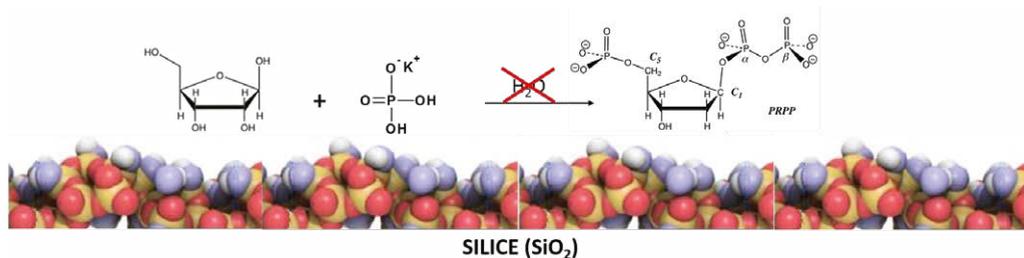
Les surfaces minérales ou les pores de ces matériaux peuvent en outre structurer les molécules et les organiser. Ces matériaux conduisent la chaleur et, selon la température, ils peuvent aussi apporter de l'énergie ou mettre en place des gradients de température, mais aussi des gradients de matière. Cela place le système réactionnel hors équilibre et permet de dissiper une grande partie de l'énergie perdue sous forme entropique.

Dans les pores ou à la surface de minéraux, il y a nettement moins d'eau que dans un océan, dans un lac ou dans une mare quelconque. La limitation de la quantité d'eau lève l'écueil énergétique limitant la condensation des monomères pour former les polymères.

Figure 20

A) À partir des éléments les plus abondants dans l'univers, d'eau et de silice, on peut former des biomolécules ; B) les surfaces minérales jouent le rôle de catalyseur. Dans le cas de la silice poreuse, les pores jouent le rôle de microréacteurs qui accélèrent les réactions.





Un autre exemple du rôle des minéraux est l'étude conduite dans notre laboratoire avec de la silice non poreuse pour la réaction d'un sucre et d'un phosphate dans l'objectif de former une molécule phosphorylée, c'est-à-dire avec un peu plus d'énergie que les monomères (**Figure 21**). La réaction a été réalisée dans très peu d'eau, sur un milieu réactionnel à peine séché, à 70 °C.

Une molécule trois fois phosphorylée appelée phosphoribosyle diphosphate (PRPP) a été obtenue. Il s'avère que cette molécule est extrêmement importante dans le métabolisme actuel puisqu'elle est à la base de la voie des pentophosphates. C'est la première fois qu'a été mise en évidence par une voie totalement abiotique la formation d'une molécule métabolique en gérant la proportion d'eau, grâce à l'utilisation d'une surface minérale.

Notre objectif étant de synthétiser un adénosine mono, di ou triphosphate, la deuxième étape part de la molécule précédente de PRPP, que l'on fait réagir avec une base azotée, l'adénine, mais cette fois en présence d'eau (**Figure 22**). On obtient de l'adénosine monophosphate (AMP). La molécule de PRPP présente tellement d'énergie qu'elle va vouloir la libérer, et cette réaction peut se faire dans l'eau d'autant mieux qu'il y a une bonne diffusion et une bonne dissipation énergétique.

Afin de former maintenant des polymères à partir de cette première molécule activée qu'est l'adénosine monophosphate, toujours en présence d'une surface de silice légèrement séchée, nous ajoutons un autre nucléotide, l'UMP (**Figure 23**). On obtient dans une première étape des dimères¹¹, et si on répète la

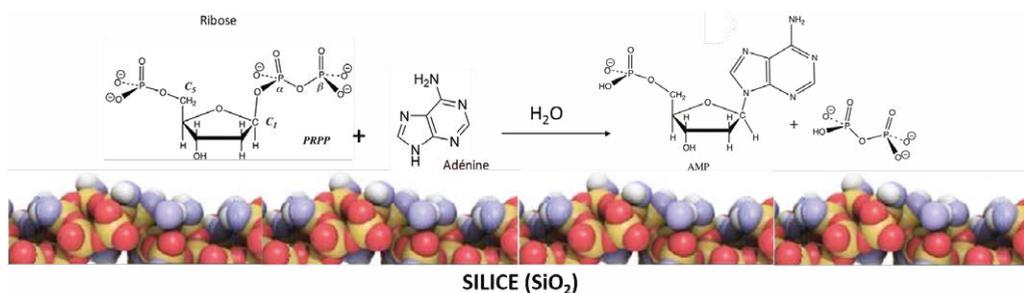
11. Dimère : polymère ne comportant que deux unités monomères.

Figure 21

Première étape de la synthèse d'une molécule métabolique grâce à l'utilisation d'une surface minérale : en dehors de l'eau, le sucre réagit avec le phosphore en présence de silice poreuse pour donner le phosphoribosyle diphosphate.

Figure 22

Le phosphoribosyle diphosphate réagit avec l'adénine en présence d'eau, de silice et d'adénine pour former de l'adénosine monophosphate.



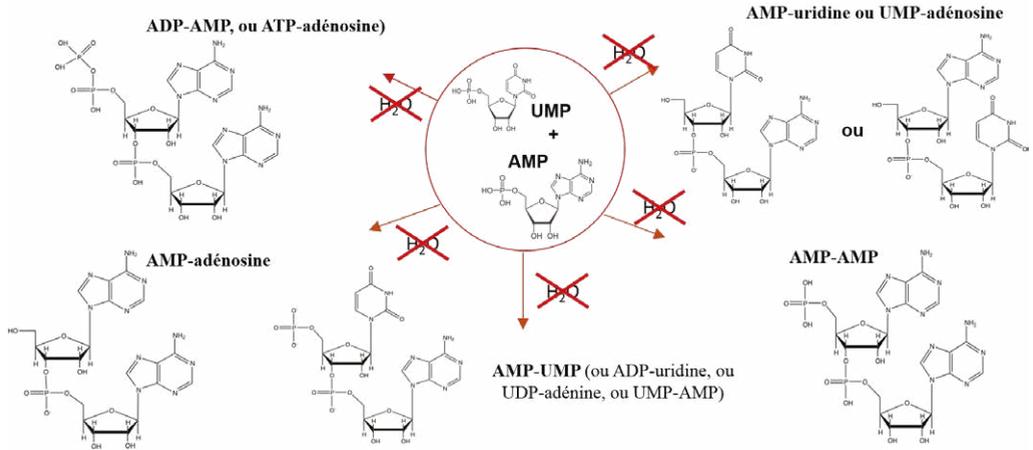
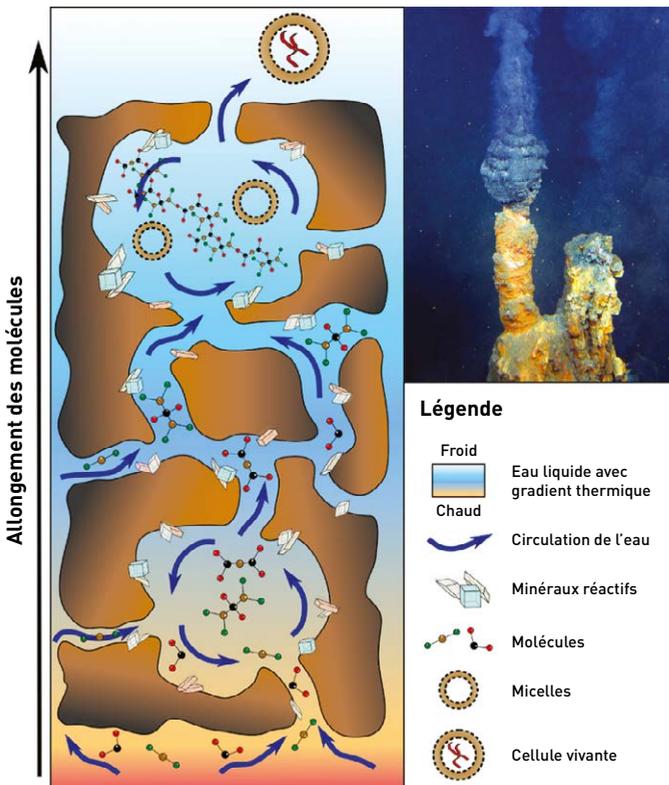


Figure 23

Troisième étape de la synthèse de polymères par activation minérale : la molécule obtenue précédemment réagit avec l'UMP en contact avec la silice pour former des polymères.

Figure 24

Une source hydrothermale sous-marine, lieu propice à l'apparition de biochimie.



séquence plusieurs fois, on se retrouve avec des polymères sans utiliser d'activateur chimique mais en utilisant une source minérale qu'on retrouve dans un environnement primitif.

Ces expériences montrent bien que l'activation minérale est une autre voie intéressante de la chimie prébiotique.

2.4. L'émergence possible de la vie dans les sources hydrothermales

Lorsque l'on recherche des systèmes minéraux pouvant avoir un potentiel ou un intérêt pour former des molécules biologiques, on pense tout de suite aux sources hydrothermales sous-marines. Notre équipe a proposé un schéma expliquant comment une source hydrothermale sous-marine peut être un lieu propice à l'émergence de la vie (Figure 24). On y trouve des pores dans lesquels peuvent se faire les réactions précédentes avec une matière

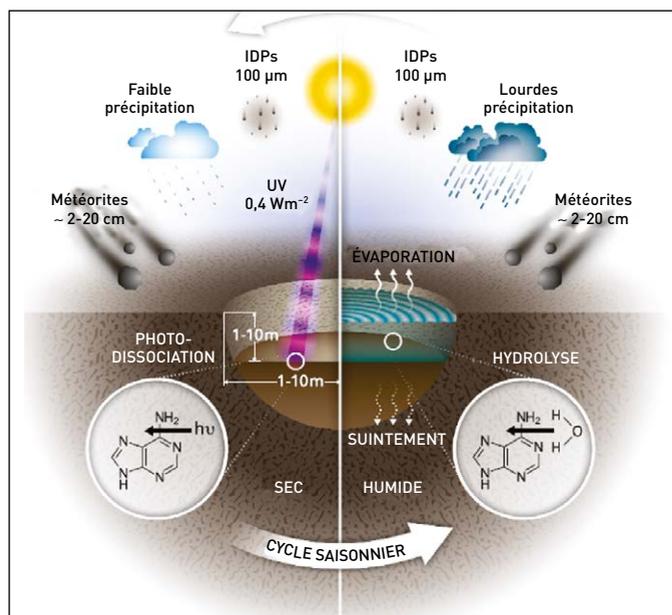


Figure 25

Les sources hydrothermales de surface, combinant les avantages des sources hydrothermales sous-marines et de l'apport de matériaux exogènes de surface.

Source : Pearce et coll. (2017). PNAS, 14 : 11327-11332.

organique confinée, une quantité d'eau limitée et de la catalyse. D'autres systèmes ont récemment été proposés, à savoir des sources hydrothermales de surface, comme il peut y en avoir en Islande par exemple. L'intérêt de ce modèle, avec le même type de chimie, est d'avoir toujours les mêmes molécules, toujours la même énergie, la possibilité de sécher, avec toujours la présence des minéraux poreux.

La chimie prébiotique dans une source hydrothermale de surface est aussi intéressante parce qu'il peut y avoir un apport exogène de la matière organique : le bombardement météoritique de micrométéorites peut alimenter la source hydrothermale en matière organique primitive, que ce soit avec des acides aminés, de l'urée ou de l'acide cyanhydrique (Figure 25). Ce milieu est très intéressant du point

de vue de la chimie prébiotique, à la fois pour l'influence des minéraux et pour la présence d'activateurs chimiques importés par les météorites.

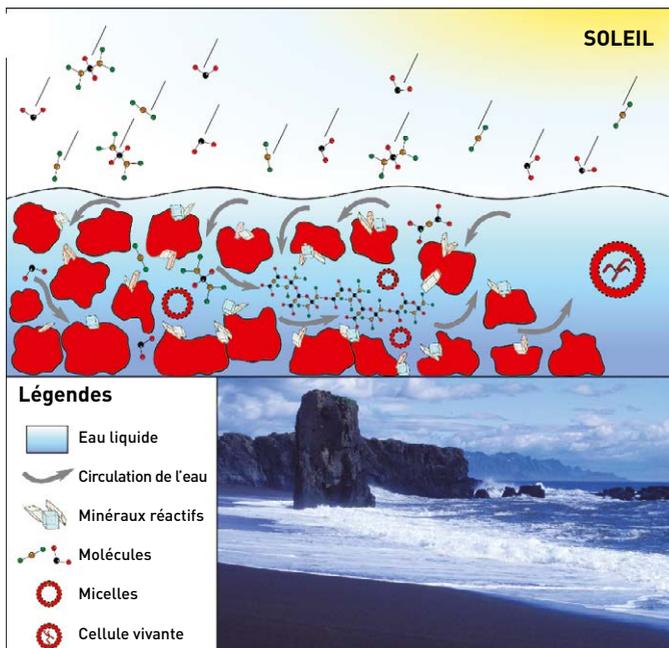
Le seul problème de ce système est que sur la Terre primitive, il devait être soumis à une forte dose d'irradiation pouvant dégrader plus rapidement les molécules formées que dans un environnement hydrothermal sous-marin, où les températures et le pH en haut de la colonne hydrothermale sont raisonnables.

2.5. Les plages volcaniques, un autre lieu possible pour l'émergence de la vie

Les plages volcaniques sont une autre possibilité intéressante (Figure 26). La Terre primitive était une planète océan où il y avait très peu de terres émergées, mais avec une forte activité volcanique, et on y trouvait des flancs de

Figure 26

L'importance de la Lune sur l'apparition de la vie : les marées permettent des cycles de séchage.



volcans contenant une très forte quantité de phosphates rejetée par les volcans, mais aussi de polyphosphates, des molécules polyphosphorylées, le pyrophosphate, le borophosphate et d'autres molécules.

La chimie prébiotique dans cet environnement riche en phosphate a aussi été influencée par les minéraux. Dans ces systèmes de surfaces, les systèmes chimiques ont subi l'influence des marées, de la Lune, qui induisent des cycles de séchage, humectation-séchage-humectation, qui font varier la quantité d'eau à la surface des minéraux.

2.6. Et les geysers ?

Les geysers (Figure 27) sont des systèmes peut-être un peu trop rudes en termes de conditions physico-chimiques, et le temps de vie

des molécules serait à l'heure actuelle assez limité pour envisager une chimie prébiotique dans ces systèmes. Des études sont menées sur place depuis plusieurs années au niveau des geysers, mais très peu de molécules organiques complexes d'intérêt biologique y ont été observées.

3 L'habitabilité sur Terre et sur les autres corps célestes

3.1. L'habitabilité en termes chimiques de la Terre primitive

Ces notions de chimie prébiotique nous conduisent à la notion d'habitabilité. En termes de chimie, il faut :

- de l'eau liquide, mais dont la quantité doit être modulée ;
- les éléments chimiques : carbone, phosphore, azote,



Figure 27

Les geysers, une hypothèse peu probable de l'origine de la vie.

soufre, oxygène, hydrogène, métaux de transition ;

– de l'énergie, des catalyseurs, des stabilisateurs, que l'on peut trouver avec la présence des minéraux (**Figure 28**). Le monde minéral est donc important pour réaliser cette chimie et pour appréhender la biochimie qui sera formée par la suite. Les minéraux, par l'existence d'interfaces, peuvent aussi gérer la quantité d'eau.

Il faut noter que la notion d'habitabilité est une notion locale. Un petit environnement (un petit lac, une source hydrothermale) peut suffire pour engendrer une quantité importante de molécules organiques. Il n'est pas nécessaire de recouvrir toute une planète pour faire émerger du vivant ou des molécules d'intérêt biologique.

La Terre primitive, avant 4,3 milliards d'années, était une Terre non habitable, avec un océan magmatique. Il y a 3,4 milliards d'années, la Terre a évolué et pouvait être comparée à une Terre-océan, avec très peu de terres émergées. Les éléments essentiels au vivant y étaient présents, avec du carbone, du phosphore, de l'hydrogène, de l'azote, des nutriments, de l'énergie, des roches, toutes les conditions propices à l'émergence de la vie, donc habitable.

La Terre primitive était donc une Terre-océan, avec très peu de terre émergée et une forte activité volcanique, mais rappelons qu'il n'est pas essentiel de faire émerger la vie partout sur la Terre, et l'émergence de la vie était probablement locale. L'environnement était chaud,

il n'y avait pas de dioxygène, et la terre recevait un flux de matière extraterrestre important qui était la source de carbone. La vie a pu apparaître soit dans les sources hydrothermales sous-marines, soit à flancs de volcans, sur le peu de terres émergées existantes.

3.2. L'habitabilité de Mars

La planète Mars (**Figure 29**) était un système planétaire semblable à celui de la Terre.

Si on compare la physico-chimie et la géochimie d'une Terre primitive et de Mars primitive, elles sont comparables. Il semblerait que la température moyenne des océans était globalement similaire, aux alentours de 50 °C. Il y avait beaucoup de gaz carbonique, l'océan était légèrement acide voire neutre. L'irradiation,

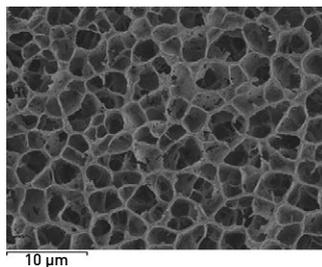


Figure 28

La silice agit en tant que catalyseur et est essentielle à la formation de la vie.

Figure 29

La Planète Mars, système proche de la Terre pouvant aussi voir l'apparition de vie.



l'hydrothermalisme, le volcanisme, étaient extrêmement actifs, et les impacts étaient fréquents, il y avait donc beaucoup de sources de carbone.

Sur Terre et sur Mars, la présence d'eau liquide, de carbone, de nutriments, d'énergie, la présence similaire de minéraux, étaient dans les deux cas propices à l'apparition de la vie (**Tableau**).

À priori on peut estimer que Mars était habitable, ce qui ne veut pas dire qu'elle a été habitée. À noter que si la Terre primitive était une Terre-océan, Mars primitif avait très peu d'environnements aqueux (**Figure 30**), mais là-encore la vie a pu émerger de manière très locale au niveau de ses sources, ce point n'est donc pas réhibitoire.

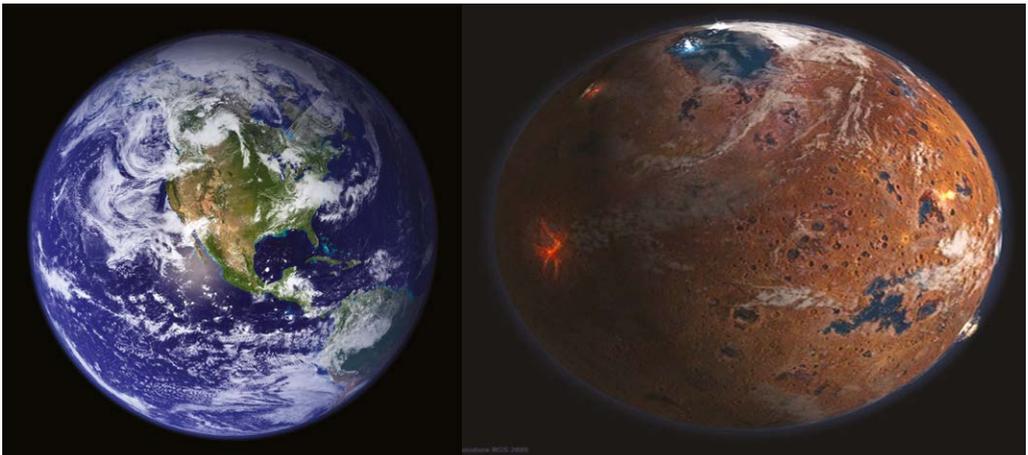
Tableau

Les conditions sur la Terre primitive et sur Mars primitive.

	Terre Primitive	Mars Primitive
Température Océans	~ 50 °C	~ 0° > 50 °C
Atmosphère	CO ₂ < 0,2 % O ₂	CO ₂ < 0,2 % O ₂
pH	Légèrement acide	Légèrement acide - Neutre
Radiation	~ 50 W/m ²	~ 50 W/m ²
Hydrothermalisme	Extrêmement actif	Extrêmement actif
Volcanisme	Extrêmement actif	Extrêmement actif
Impacts	Fréquent	Fréquent

Figure 30

La Terre et Mars, deux systèmes similaires et habitables.



3.3. L'habitabilité d'autres corps célestes, Europe et Encelade

Europe (**Figure 31**), le satellite de Jupiter, est constitué d'un cœur solide, un manteau rocheux, d'un océan et d'une croûte de glace. Dans ce système, on y retrouve donc toujours les minéraux, la possibilité d'avoir de la catalyse et de la stabilisation moléculaire. Par une voie exogène, voire de manière endogène, de la matière organique est potentiellement présente. Ce corps pourrait donc être potentiellement habitable, d'autant plus que du cryovolcanisme a pu y être détecté.

Cela est une source d'énergie potentielle pour les étapes de chimie prébiotique.

Encelade (**Figure 32**), le satellite de Saturne, est un système presque identique qui possède un océan liquide, une couche de glace, et où une chimie va être aussi possible grâce à la présence de minéraux et du cryovolcanisme. Dans les deux cas, une chimie peut potentiellement être détectée à travers l'analyse des geysers, qui vont éjecter certaines molécules caractéristiques.

Europe et Encelade sont à priori habitables, au sens chimique du terme !

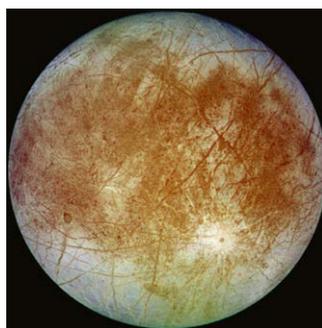


Figure 31

Europe, satellite naturel de Jupiter constitué d'un manteau rocheux, d'un océan et d'une croûte de glace, est considérée comme habitable.

Le futur de la chimie prébiotique

L'émergence de la vie, telle qu'on la connaît sur Terre, est basée sur une chimie du carbone, ainsi que sur une chimie du phosphore (dont le cycle est important et qu'il ne faut pas négliger), sur l'azote, le soufre et l'hydrogène.

Le contexte géochimique joue un rôle très important. Les différents facteurs à prendre en compte sont la présence des minéraux, des températures élevées, les conditions hydrothermales et les conditions anaérobiques. Une bonne connaissance de ces conditions géochimiques est indispensable pour que les chimistes, puissent mieux conduire les expériences en laboratoire. Le but étant d'être de plus en plus réalistes et de modéliser le mieux possible une Terre primitive ou un autre environnement primitif.

À l'heure actuelle, la synthèse en laboratoire de biopolymères a été réalisée, mais pas encore



Figure 32

Encelade, satellite naturel de Saturne, possède des caractéristiques semblables à Mars, et Europe est considérée comme habitable.

celle de biopolymères actifs, c'est-à-dire structurés. Aucun biopolymère réalisé en laboratoire n'a encore eu d'activité catalytique ou biocatalytique, pas plus qu'une capacité de s'auto-reproduire. La synthèse d'ARN auto-catalytique n'a encore jamais été réalisée et semble être un enjeu important.

Les recherches se poursuivent et les résultats viendront peut-être d'une meilleure connaissance de la géochimie sur d'autres systèmes, tels que Mars, Europe, Encelade, ou sur d'autres exoplanètes. La comparaison avec des processus que l'on peut observer sur Terre permettra d'affiner les modèles terrestres en vue de réaliser des expériences en laboratoire, et permettra aussi d'affiner les expériences qu'on pourra mener dans le cadre des futures missions spatiales.