



Il était une fois la vie : la chimie dans l'océan terrestre il y a 4 milliards d'années

Auteur :

VALLÉE Yannick, Professeur de Chimie, Département de Chimie Moléculaire, Université Grenoble Alpes

17-04-2021

Il y a quelque 4 milliards d'années, la Terre était largement recouverte par un immense océan. Cet océan contenait un grand nombre de petites molécules organiques, que l'on dit « prébiotiques » parce qu'elles étaient là avant que la vie n'apparaisse. Quelles étaient-elles ? Furent-elles synthétisées sur place ou sont-elles venues de l'espace ? Comment se sont elles liées pour former de longs polymères, certains porteurs de l'information génétique, d'autres s'activant à reproduire toutes les molécules de base et à les agréger à leur tour en polymères ? Rien n'était gagné d'avance ! Les polymères n'étaient pas stables, les liens étaient difficiles à créer. Pourtant, nous sommes là. C'est donc bien qu'une chimie d'une finesse extrême trouva l'énergie et le temps nécessaire pour se mettre en place. Cet article donne quelques pistes pour tenter de comprendre ce qui a bien pu se passer.

1. Il y a bien longtemps, dans une galaxie pas bien lointaine

Il y a environ 4,6 milliards d'années, en un lieu excentré de la galaxie spirale que nous appelons la Voie lactée, un vaste disque de matière s'est formé. L'essentiel des gaz, des grains, des blocs qui constituaient ce disque s'est concentré, a fusionné, pour former une étoile, le Soleil. Le peu de matière résiduelle qui restait a formé des planètes et des objets plus petits, des planètes naines et astéroïdes. Notre Terre, en fait une proto-Terre, s'est donc formée à ce moment-là. Cinquante millions d'années plus tard (un rien à l'échelle des temps astronomiques) cette proto-Terre a été percutée par un objet très massif, Théia, un planétoïde de la taille de

Mars. De ce choc gigantesque naquit la Lune et notre Terre actuelle [1].

Avant ce choc, il est probable que l'atmosphère terrestre contenait beaucoup d'hydrogène, le constituant majeur du disque proto-solaire. Mais le choc fut gigantesque. Les éléments légers furent expulsés. Une nouvelle atmosphère en résulta, riche en dioxyde de carbone (CO₂), en azote (N₂) et en vapeur d'eau (H₂O). La Terre était encore très chaude. Elle se refroidit pourtant assez vite. La vapeur d'eau se condensa et tomba en une incessante pluie diluvienne pour former **un premier, unique et immense océan**.

Sous cet océan, la partie supérieure du manteau terrestre se solidifiait, formant une première croûte terrestre. Une première tectonique des plaques se mit peu à peu en place. Peut-être jaillissant de l'océan apercevait-on alors déjà quelques proto-continent, des îles éparses, sûrement **des volcans bien plus actifs que nos volcans actuels**. Notre planète était encore pleine d'énergie ! Cela compensait la faiblesse du jeune Soleil, plus petit et moins puissant qu'aujourd'hui. Sans l'énergie dégagée par la planète, sans l'important effet de serre conséquence de la proportion élevée de CO₂ dans l'atmosphère, il est bien possible que toute l'eau soit devenue glace. Quelle sorte de vie aurait pu naître dans cette glace ? Sans doute, aucune...

De même que la proto-Terre croisa la route de Théia, après la naissance de la Lune, la Terre fut percutée par de nombreux astéroïdes qui lui apportèrent probablement une bonne quantité d'eau supplémentaire, peut-être aussi des molécules organiques. Après un intense rebond de ces bombardements cataclysmiques, ils prirent fin il y a **3,8 milliards d'années** (enfin, presque fin : nous ne sommes toujours pas à l'abri d'un choc catastrophique. Ce ne sont pas les dinosaures qui diront le contraire !).

Il n'est pas impossible que la vie soit apparue avant la fin de ce « grand bombardement tardif », mais les preuves en ce sens restent ténues. Et même si elle avait démarré, aurait-elle survécu à ces catastrophes à répétition ? (Lire [L'origine de la vie vue par un géologue qui aime l'astronomie](#)).

2. Que d'eau ! Que d'eau !

Plaçons-nous donc, il y a un peu moins de 4 milliards d'années, à une époque géologique qu'on appelle l'Hadéen. A cette époque, la Terre comporte un gigantesque océan, des volcans hyperactifs, des embryons de continents. La Lune s'en écarte, mais elle est loin d'avoir atteint son orbite actuelle : elle est encore trois fois plus proche. En conséquence, la force des marées est gigantesque, plus de vingt fois supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui. Les vents sont impressionnants. Même si il est en cours de refroidissement, **la température de l'océan est sans doute plus chaude que de nos jours**.

Il est difficile de connaître son pH : il est actuellement légèrement basique (vers 8,1) mais il s'acidifie à cause des émissions de CO₂ d'origine humaine. Dans l'eau, le CO₂ forme en effet un acide : l'acide carbonique. Il y a aujourd'hui beaucoup moins de CO₂ dans l'atmosphère qu'à l'époque où naissait la vie. Peut-être l'océan était-il donc alors plutôt acide, ce qui n'est pas sans conséquence sur la chimie qui pouvait s'y produire. Il contenait bien sûr des ions. Comme aujourd'hui le sodium (Na⁺) et les chlorures (Cl⁻) dominaient. **L'océan était déjà salé !** Il y avait aussi du calcium, du magnésium, des bromures, et même bien plus d'iodures qu'aujourd'hui.

On a d'abord pensé que l'atmosphère primitive était très réductrice, qu'elle contenait beaucoup d'hydrogène, de méthane, d'ammoniac. Mais nous l'avons vu, si hydrogène il y avait eu, le choc avec Théia entraîna l'expulsion vers l'espace de ce gaz léger. Pour autant l'atmosphère n'était pas oxydante. Elle ne contenait pas, ou presque pas, d'oxygène moléculaire (O₂). On parvient à dater l'apparition d'une quantité significative d'O₂ sur Terre en déterminant l'âge des plus anciens gisements contenant du fer ferrique. En effet, lorsque l'on expose du fer à de l'eau contenant de l'oxygène, il rouille. C'est-à-dire qu'il est oxydé en fer ferrique (Fe³⁺). Le fer ferrique n'est pas soluble dans l'eau. Sans oxygène par contre, le fer forme des ions ferreux (Fe²⁺) qui eux sont solubles.

Il y a donc une différence majeure entre notre océan actuel et **l'océan Hadéen : celui-ci contenait du fer ferreux dissout**, pas le nôtre.

3. Une foultitude de petites molécules

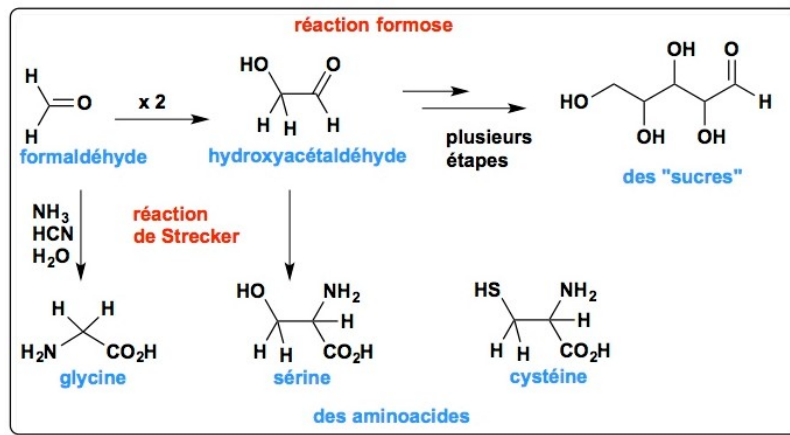


Figure 1. Exemples de synthèses prébiotiques. Le « sucre » représenté, un pentose, avec 5 atomes de carbone, n'est qu'un exemple parmi beaucoup d'autres. De même, il est possible d'envisager la synthèse d'autres aminoacides que la glycine, la sérine et la cystéine.

Cet océan contenait aussi des molécules organiques. A partir de CO₂ ou de méthane (CH₄), des molécules comportant deux atomes de carbone se forment aisément. Le CO₂ peut être réduit en **formaldéhyde** (H₂CO, Figure 1) qui par une réaction qu'on appelle « réaction de formose » donne d'abord l'hydroxyacétaldéhyde (une molécule à deux carbones) puis des molécules plus longues qui sont des sucres. Un cuisinier dirait qu'avec ces sucres en plus du chlorure de sodium, l'océan hadéen était sucré-salé !

En plus des sucres, il faut au moins deux types de molécules pour construire une cellule vivante : des protéines et des acides nucléiques. Ces molécules contiennent toutes de l'azote. Quelles pouvaient être les sources de cet azote dans l'océan prébiotique ? Sans doute l'ammoniac (NH₃), et l'acide cyanhydrique (HCN). Lorsque ces deux composés réagissent avec le formaldéhyde ils donnent le plus simple des aminoacides, **la glycine**. Cette molécule est synthétisée grâce à une réaction essentielle qu'on appelle synthèse de Strecker, du nom d'Adolph Strecker, chimiste germanique, qui l'a découverte au milieu du XIX^e siècle. Cette synthèse, à partir d'autres aldéhydes, peut donner divers aminoacides, par exemple **la sérine** à partir de l'hydroxyacétaldéhyde (Figure 1).

Ces aminoacides sont les constituants de base des polymères que sont les protéines. Comme nous venons de le voir, ils ont pu être synthétisés assez facilement : ils étaient donc très probablement présents dans l'océan primitif.

Quid des précurseurs des acides nucléiques, ADN et ARN, qui portent l'information génétique ? Leur synthèse est un peu plus complexe. Il est moins évident que tous aient été présents. Mais il est possible d'écrire des synthèses prébiotiques pour chacun d'entre eux. Le ribose peut ainsi être obtenu par la réaction formose déjà citée, les bases nucléiques à partir de l'acide cyanhydrique, et des voies d'accès directes aux ensembles ribose-base ont récemment été publiées par les chercheurs.

La synthèse des chaînes d'ADN et ARN pose néanmoins la question de **la source de phosphore**. Il est en effet abondamment présent dans ces polymères porteurs de l'information génétique. Dans notre monde oxydant, on trouve généralement cet élément sous la forme de phosphate, en particulier du phosphate de calcium, insoluble dans l'eau. Y avait-il des phosphates (solubles) dans l'océan hadéen, pour le moins non-oxydant ? Sinon, quelle était la source de phosphore soluble ? C'est une question non tranchée [2].

Autre élément important : **le soufre** présent aujourd'hui dans deux aminoacides indispensables à la vie, la méthionine et la cystéine. Il s'en dégage des quantités importantes des volcans actifs, des fumeroles, de nombreuses sources hydrothermales, souvent sous forme d'hydrogène sulfuré (H₂S). Il est donc raisonnable de penser que l'océan primitif contenait de l'hydrogène sulfuré, et par voie de conséquence, de petites molécules sulfurées, par exemple un aminoacide, la cystéine.

Si nous sommes certains (d'aucun diront : à peu près certains) que jamais aucun petit homme vert venu de l'espace intergalactique, n'a posé le pied sur notre planète, il n'est pas impossible que certaines des molécules citées ici aient atterri, ou plutôt amerri, sur Terre, apportées par les millions d'astéroïdes qui l'ont frappée, en particulier pendant le grand bombardement tardif. Ainsi, la magnifique visite qu'a rendue la sonde Rosetta à l'astéroïde 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, dit « Tchouri », a montré que celui-ci contenait de l'eau, de l'ammoniac, du formaldéhyde, de l'acide cyanhydrique, de l'hydrogène sulfuré... mais aussi des molécules organiques plus complexes parmi lesquelles la glycine, ce petit aminoacide dont nous avons décrit plus haut une synthèse possible sur Terre (Lire [Comment étudier les molécules organiques des comètes ?](#)).

Alors la première glycine : « terrestre » ou « extra-terrestre » ? Et les autres aminoacides ? Et les bases de l'ADN ? Personne n'en sait rien. Mais ce qui est certain c'est que lorsque les bombardements massifs se sont arrêtés, lorsque cette éventuelle source extra-terrestre s'est tarie, que toutes ces molécules extra-terrestres ont été utilisées, il a bien fallu que des synthèses terrestres

prennent le relais. Comme nous l'avons vu, elles sont tout-à-fait possibles. L'hypothèse extra-terrestre, si elle ne peut être réfutée, n'est pas indispensable pour décrire la naissance de la vie sur Terre.

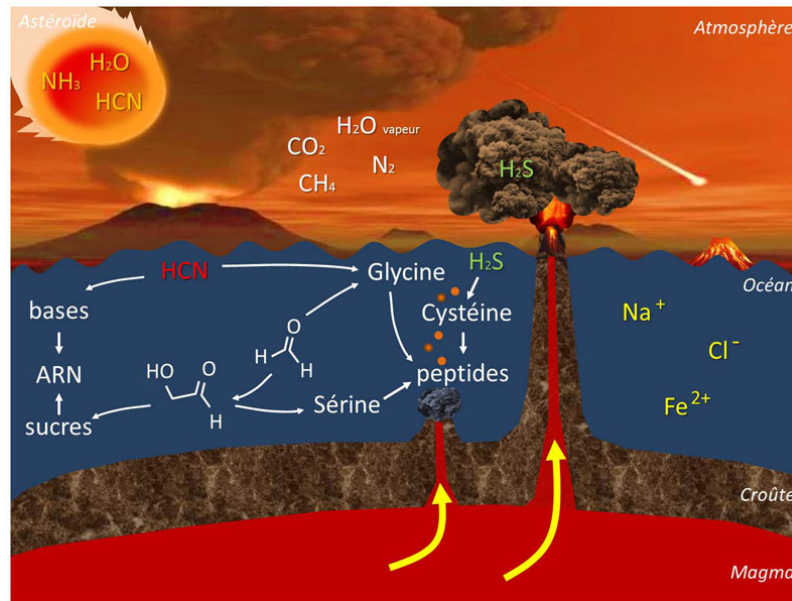


Figure 2. Il y a 4 milliards d'années, une première croûte terrestre se formait, largement recouverte par un vaste océan salé contenant du fer ferreux, soluble. Des astéroïdes apportaient de l'eau et de petites molécules organiques. D'autres molécules se formaient dans l'océan. La présence d'acide cyanhydrique HCN permettait alors d'une part la synthèse des bases de l'ARN, d'autre part celle des aminoacides qui en se polymérisant donnèrent de premiers peptides.

La Figure 2 résume toute cette chimie.

Reste le problème de la concentration de ces molécules. C'est une question très importante : plus les composés de départ d'une réaction donnée sont dilués plus la réaction est lente. Certes la vie avait le temps devant elle. Sauf que beaucoup de produits résultants de la condensation des petites molécules sont peu stables dans l'eau. Il faut pouvoir en faire assez, assez vite, pour qu'elles continuent à grandir, à former des molécules de plus en plus longues, de plus en plus complexes, avant de se séparer à nouveau en petits constituants de départ. Cela pose deux questions : Quelle était la quantité d'eau présente sur Terre ? Et cette eau, quelle masse de molécules organiques contenait-elle ?

Combien d'eau ? L'hypothèse la plus réaliste est de considérer qu'il n'y en avait, grosso modo, ni plus ni moins qu'aujourd'hui, c'est à dire environ **1,36 milliard de km³**, soit en arrondissant mille milliards de milliards de litres, ce qui n'est pas rien !

Savoir combien il y avait de molécules organiques, en chemin vers la vie, est bien plus compliqué. La biosphère terrestre actuelle comporte 2 000 gigatonnes (2 000 milliards de tonnes = 2 milliards de milliards de grammes) de carbone organique. Il est très improbable qu'il y en ait eu plus, sous forme de petites molécules, à un moment où la vie justement « organique » n'était pas encore apparue.

Faisons le calcul : 2 milliards de milliards de grammes divisé par mille milliards de milliards litres, cela fait 2 milligrammes de carbone organique par litre d'eau. C'est une concentration faible, sans être totalement ridicule. Mais elle ne donne qu'une idée sans doute surestimée de la concentration en molécules organiques dans l'océan hadéen. La concentration réelle était sans doute encore plus faible. Alors ? Comment envisager des réactions assez rapides dans cet océan brassé continuellement par des marées gigantesques, et donc grossièrement homogène ?

Darwin lui-même avait déjà exprimé le problème lorsqu'il écrivait à son ami Joseph Hooker, en 1871 : « *Mais si (et oh, quel énorme si), nous pouvions concevoir dans une petite mare chaude contenant toutes sortes de sels d'ammoniac et de sels phosphoriques, avec de la lumière, de la chaleur, de l'électricité, etc., qu'un composé protéique fut formé chimiquement, prêt à subir des changements encore plus complexes ...* »

C'est l'origine de **cette petite mare chaude**, « **warm little pond** », qui a proprement fait fantasmer tant de chercheurs à la recherche des origines de la vie. Darwin sous-entend que sa petite mare est assez concentrée pour que la chimie y avance jusqu'à la synthèse d'une chaîne assez longue d'acides aminés, le « composé protéique ».

Il y avait peut-être de petites étendues d'eau sur les continents naissants de l'Hadéen, mais les molécules organiques y étaient-elles plus concentrées que dans l'océan global ? Peut-être des molécules se concentrèrent-elles sur les premières plages, ou dans quelques fissures ? Y avait-il plus de composés organiques autour des volcans ? Ou au fond de l'océan, près des cheminées hydrothermales dont s'échappent des volutes de gaz chauds ? Ne faut-il pas plutôt imaginer des réactions particulièrement efficaces permettant de construire des polymères (des protéines, par exemple) même dans des conditions très diluées ?

4. Les clés de la réussite : énergie et catalyse

Pour qu'une réaction chimique ait lieu, il faut :

qu'elle soit possible, c'est une question de thermodynamique,

qu'elle soit assez rapide, c'est une question de cinétique.

Or, a priori, il y a 4 milliards d'années, rien n'allait de soit !

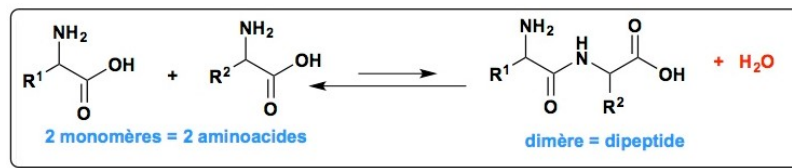


Figure 3. Synthèse d'un dipeptide à partir de deux acides aminés. La différence de longueur des flèches signifie que l'équilibre est déplacé vers les deux acides aminés. La formation d'eau, en particulier, défavorise la synthèse du dipeptide.

D'un point de vue thermodynamique ce qui importe c'est la stabilité relative des molécules présentes et des molécules formées. Construire un polymère se fait pas à pas. D'abord deux monomères donnent un dimère, qui sera allongé en trimère et ainsi de suite jusqu'à des chaînes très longues. Au début donc, deux monomères forment un dimère en éliminant de l'eau. Que ce soit dans le cas des peptides (Figure 3) ou dans celui des acides nucléiques, les dimères sont bien moins stables que les monomères. Autrement dit, c'est la réaction de coupure des dimères (une hydrolyse) qui est favorisée. L'équilibre est donc déplacé vers les monomères. Et ce d'autant plus que cette hydrolyse consomme une molécule d'eau, ce qui dans l'eau est favorable, alors que la condensation forme à côté du dimère une molécule d'eau, ce qui est défavorable. C'est ce problème de formation défavorable d'une molécule d'eau qui conduit certains auteurs à chercher les milieux les moins aqueux possibles pour y placer leur scénario d'origine de la vie, les côtes des premiers continents en particulier, où on pouvait sans doute trouver des endroits relativement secs.

Ce n'est pas mieux côté cinétique. Pour que deux molécules réagissent ensemble, il faut les activer, c'est à dire leur fournir une certaine quantité d'énergie. Plus l'énergie à fournir est élevée, plus la probabilité que deux monomères se rencontrent (on parle de « chocs ») sans réagir, est grande. Autrement dit, plus la réaction est lente. Or l'énergie à fournir pour former un dimère embryon de protéine ou d'acide nucléique est grande.

Peine perdue ? Non, puisque malgré tout ça, il est tout à fait certain que la vie est apparue. Pour y arriver, il faut au moins :

une molécule riche en énergie. En se coupant en deux fragments cette molécule va libérer une bonne partie de l'énergie qu'elle contient. Si cela se passe en même temps que la formation d'un dimère (par exemple un dipeptide), alors les deux énergies vont se compenser et le processus global sera favorisé par la thermodynamique ;

un catalyseur, c'est à dire une espèce chimique : une molécule, mais aussi parfois la surface d'un solide, (lire [Origine des premières cellules : le point de vue de l'ingénieur](#)) capable d'aider la formation d'un dimère à partir de deux monomères. Le nombre de chocs efficaces (ceux formant vraiment le dimère) sera alors bien plus élevé, et la réaction atteindra une vitesse raisonnable dans l'océan prébiotique.

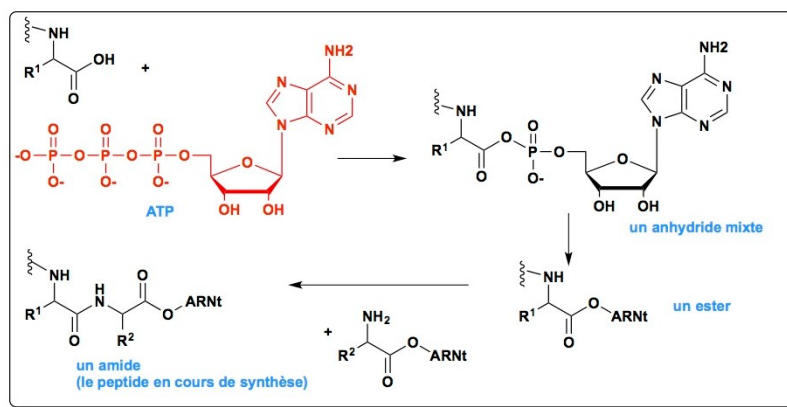


Figure 4. Rôle de l'ATP (adénosine triphosphate) dans la synthèse biologique des peptides. Les deux premières réactions sont catalysées par une protéine, une aminoacyl ARNt synthétase. La troisième a lieu sur l'extrémité de deux molécules d'ARNt au sein du ribosome, qui est lui-même massivement constitué de chaînes d'ARN. Que cette dernière étape soit catalysée par de l'ARN est un argument fort des chercheurs qui proposent l'existence d'un monde primitif où prédominait l'ARN (le monde d'ARN).

La molécule riche en énergie utilisée aujourd'hui dans les organismes vivants est l'ATP (Figure 4), **un triphosphate**. La coupure d'une liaison phosphate libère suffisamment d'énergie pour équilibrer l'instabilité des dimères à synthétiser. Dans la synthèse peptidique cela va même permettre d'aboutir au dimère via des intermédiaires encore moins stables que le dimère lui-même. On forme dans un premier temps un anhydride mixte carboxylique phosphorique, puis un ester, enfin un amide (le peptide). Au total, cela implique trois étapes, chacune étant intrinsèquement lente. Des catalyseurs entrent donc en jeu. Il en a fallu aussi pour que les tout premiers peptides se forment dans l'océan Hadéen.

Expliquer l'apparition de la vie nécessite donc d'identifier d'une part au moins une source moléculaire d'énergie (sachant qu'il est fort peu probable que l'ATP existât dans l'océan primitif, il est trop riche en énergie), et d'autre part des catalyseurs initiaux (étant entendu que ceux utilisés aujourd'hui dans les cellules vivantes, aminoacyl ARNt synthétases et autres, sont infiniment trop complexes pour être prébiotiques).

Le problème étant posé, tout le reste n'est qu'hypothèse. La plus communément admise aujourd'hui est celle du « **monde d'ARN** » [3] (lire [Origine des premières cellules : le point de vue de l'ingénieur](#)). Elle suppose que les premiers polymères significatifs furent des ARN, à la fois dépositaires de premières informations génétiques et catalyseurs. De fait, certains ARN des cellules vivantes actuelles ont des propriétés catalytiques (même si la très grande majorité des catalyseurs biologiques sont des protéines). En ce qui concerne la source d'énergie : il est impossible de former des ARN sans utiliser l'énergie contenue dans les triphosphates. Or il est peu probable que des triphosphates aient pu exister dans l'océan primitif. C'est une des difficultés de l'hypothèse. Mais elle a l'avantage de concilier information génétique et catalyse.

D'un autre côté, les protéines ne portent pas d'information génétique, mais elles sont de bien meilleurs catalyseurs que les ARN. Cette absence d'information génétique est-elle rédhibitoire pour faire des protéines les premiers polymères vraiment importants dans l'histoire de la vie ? Peut-être pas... Aujourd'hui en effet, certains peptides sont fabriqués directement sur des protéines, sans l'aide d'acides nucléiques. Ces peptides sont dit « non-ribosomaux », parce qu'ils ne sont pas fabriqués dans les ribosomes, des complexes d'ARN. Pourtant, ils ne sont pas fabriqués « au hasard » et des auteurs ont proposé l'existence d'un code différent du code génétique classique (qui traduit l'ADN en protéines via les ARN). Ce code « non-ribosomal » traduit des protéines en peptides (on pourrait dire des peptides en peptides). C'est un code complexe, basé sur des ensembles de dix aminoacides (dans la protéine codante) : il permet de choisir précisément l'acide aminé à introduire dans le peptide à synthétiser. Rien n'interdit donc d'imaginer qu'une information « pré-génétique », même sommaire, ait pu être portée à l'origine par des chaînes d'acides aminés.

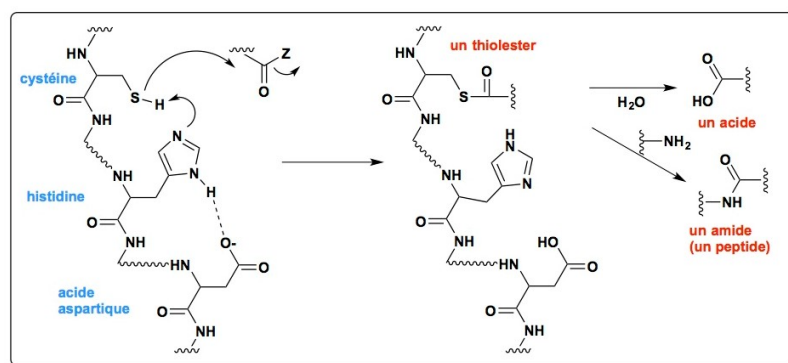


Figure 5. Principe d'action d'une triade catalytique, ici une triade cystéine – histidine – acide aspartique. Les liens en zigzag représentent des chaînes peptidiques. Un thiolester est formé. C'est une molécule à haute énergie qui sera utilisée pour des réactions ultérieures comme l'hydrolyse. La formation d'un amide est une autre suite envisageable.

Bien que les protéines catalytiques soient des molécules complexes, leur activité repose généralement sur des principes assez simples. C'est le cas des **triades catalytiques** que l'on retrouve dans des hydrolases et des transférases. Trois aminoacides sont nécessaires : un alcool ou un thiol, une base et un acide. Dans la Figure 5, c'est un thiol, la cystéine, qui agit. Grâce à l'histidine (la base) située plus loin dans la chaîne protéique, cette cystéine perd son proton. Elle porte alors une charge négative, ce qui lui permet de réagir avec le carbone positif de la double liaison C=O. L'acide aspartique est là pour activer l'histidine. Le produit de la réaction est, dans ce cas, **un thiolester**, un autre exemple, après les triphosphates, de molécule à haute énergie. Ce thiolester pourra ensuite subir d'autres réactions, par exemple avec l'eau pour faire un acide (la protéine qui contient la triade est alors une hydrolase), ou avec une autre molécule organique (la triade est le site actif d'une transférase).

Bien sûr, dans nos protéines actuelles, ces triades sont positionnées très précisément par les chaînes d'acides aminés qui les lient. Grâce à cela, chaque protéine à triade est spécialisée et ne réalise qu'un type de réaction sur des molécules elles aussi bien définies. Mais, il y a 4 milliards d'années, dans l'océan terrestre, pouvait-il y avoir des triades ? Elles auraient sans aucun doute été beaucoup moins spécifiques, en quelque sorte « bonnes à tout faire ». Pourquoi pas ? La Figure 6 représente un tel exemple de triade très simplifiée. La stéréochimie de la molécule, ou « chiralité », y est précisée : c'est une question tout à fait essentielle, qu'un modèle complet d'origine de la vie se doit d'expliquer [4].

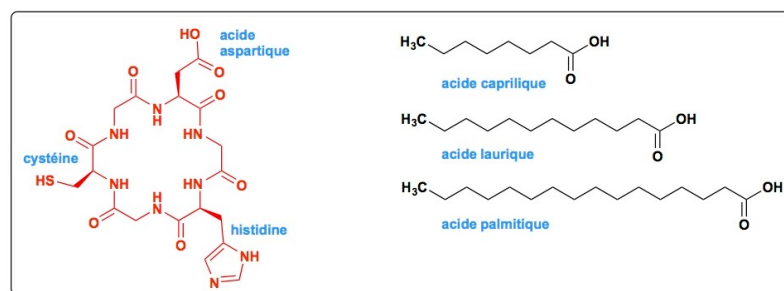


Figure 6. A gauche : simplification à l'extrême d'une triade. La molécule (hypothétique) est cyclique. Elle contient les 3 aminoacides (cystéine, histidine et acide aspartique). Rien ne dit que celle-là précisément aurait une activité catalytique. A droite : trois exemples d'acides gras. Ce sont de longues chaînes organiques, où se répète le motif CH₂, terminées par une fonction acide.

Enfin, nous n'imaginons pas la vie sans l'existence de structures cloisonnées, des cellules ou quelque chose qui y ressemble, donc des membranes ou des parois. Les premières membranes ont pu être formées de peptides enchevêtrés, ou plus ordonnés, collés les uns aux autres. Elles ont pu aussi contenir de longues chaînes organiques hydrophobes, celles des acides gras (Figure 6). On sait justement synthétiser ces acides gras aujourd'hui grâce à des protéines et à la chimie des thioesters.

Le monde où la vie est apparue qui se dessine alors serait **un monde de peptides** bien plus qu'un monde d'acides nucléiques. Le soufre, à travers la cystéine et les thioesters, y aurait joué un rôle tout à fait central, ce qui le relie à un possible monde encore plus primitif, plus « minéral », **le monde à fer-soufre** [5],[6]. Cela amène à réfléchir au rôle spécifique qu'aurait pu jouer le fer ferreux, soluble, donc disponible, possible fournisseur d'électrons, donc d'énergie, en lien avec tous ces peptides.

Références et notes

Image de couverture. Montage EEnv à partir d'une image CC0 License [source <https://www.pexels.com/photo/beach-dawn-dusk-ocean-189349/>] et des structures chimiques dessinées par l'auteur

[1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lune>. A propos de la naissance de la lune, on trouvera dans cet article des hypothèses alternatives à celle de l'impact géant.

[2] Goldford J.E., Hartman H., Smith T.F. & Segré D. (2017) *Remnants of an ancient metabolism without phosphates*. Cell 168, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.02.001>

[3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Hypothèse_du_monde_à_ARN

[4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Chiralité_\(chimie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chiralité_(chimie))

[5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Protéine_fer-soufre

[6] Vallée Y., Shalalay I. et al. (2017) *At the very beginning of life on Earth: The thiol-rich peptide (TRP) world hypothesis*. Int. J. Dev. Biol. 61: 471-478. <http://doi.org/10.1387/ijdb.170028yv>

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

Pour citer cet article: **Auteur** : VALLÉE Yannick (2021), Il était une fois la vie : la chimie dans l'océan terrestre il y a 4 milliards d'années, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=3889>

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.
