

Expliquer les origines de la vie : structures et schèmes explicatifs

Christophe Malaterre



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/noesis/1656>

DOI : [10.4000/noesis.1656](https://doi.org/10.4000/noesis.1656)

ISSN : 1773-0228

Éditeur

Centre de recherche d'histoire des idées

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2008

Pagination : 89-112

ISBN : 2-914561-48-2

ISSN : 1275-7691

Référence électronique

Christophe Malaterre, « Expliquer les origines de la vie : structures et schèmes explicatifs », *Noesis* [En ligne], 14 | 2008, mis en ligne le 28 juin 2010, consulté le 19 septembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/noesis/1656> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/noesis.1656>

Ce document a été généré automatiquement le 19 septembre 2022.

Tous droits réservés

Expliquer les origines de la vie : structures et schèmes explicatifs

Christophe Malaterre

- ¹ Les origines de la vie ont été et sont toujours l'objet de nombreuses controverses (Peretó 2005). Ces dernières cinquante années ont vu une grande quantité d'avancées scientifiques s'agréger en un certain nombre de théories scientifiques plus ou moins spéculatives. Dans cette contribution, je cherche à caractériser les types d'explications auxquels font appel ces « théories » sur les origines de la vie¹. Partant de travaux scientifiques contemporains, je propose qu'ils se répartissent en trois grandes classes d'explications, chacune de ces classes relevant d'un schème explicatif spécifique : (1) le schème explicatif des processus chimiques prébiotiques, (2) le schème explicatif du principe d'évolution chimique prébiotique, et (3) le schème explicatif des principes d'auto-organisation prébiotique. Je propose également que ces trois schèmes explicatifs sont organisés logiquement et temporellement les uns par rapport aux autres, et qu'ils sont contraints par un quatrième ensemble d'explications scientifiques de nature historique. Pour conclure, j'illustre la fécondité de l'approche en analysant comme la question de l'émergence appliquée à l'origine de la vie peut être reformulée et précisée.

1. Les travaux sur les origines de la vie

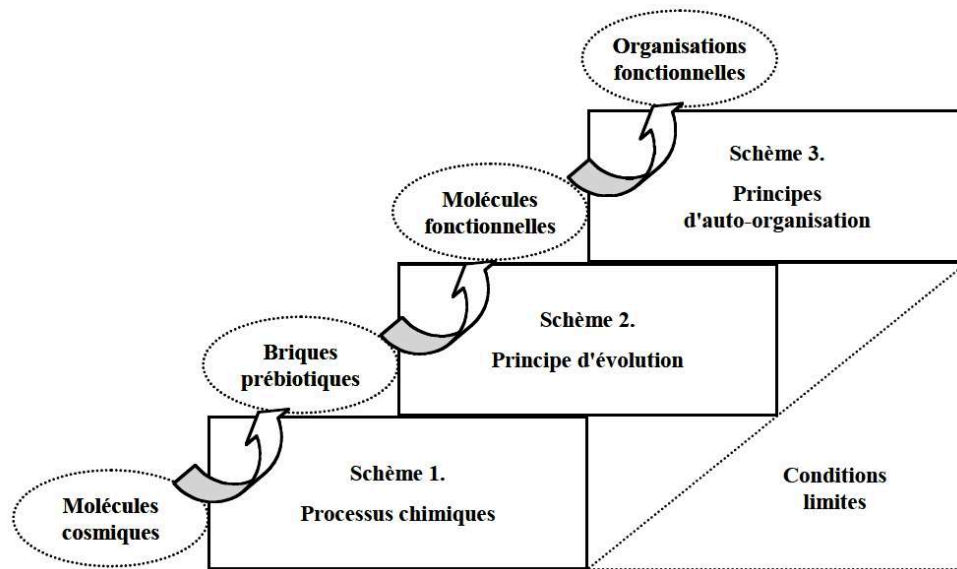
- ² La recherche scientifique sur les origines de la vie cherche à expliquer, d'une manière générale, la transition de la matière inanimée à la vie, et plus particulièrement cette même transition qui est sensée avoir eu lieu sur notre planète Terre à son plus jeune âge, il y a quelques quatre milliards d'années de cela. Alors que les premiers fossiles d'organismes multicellulaires remontent à 1,2 milliards d'années et ceux des premiers eukaryotes à 2,7 milliards d'années, il semblerait que les tout premiers fossiles de bactéries soient vieux de près de 3,8 milliards d'années². Les premiers organismes vivants seraient donc apparus sur Terre à peine quelques centaines de millions d'années après la formation de la planète. Les travaux scientifiques contemporains sur les origines de la vie adoptent des approches très diverses, qu'elles soient ancrées dans

la biologie, la biochimie ou la chimie³. L'approche expérimentale des origines de la vie a véritablement commencé dans les années 1950, grâce notamment aux travaux de Miller qui met en évidence la possibilité d'une synthèse d'acides aminés et d'autres molécules organiques dans des conditions prébiotiques ; depuis, le champ de la chimie dite « prébiotique » s'est largement étendu à une population de plus en plus diverse de molécules organiques. D'autres programmes de recherche s'intéressent aujourd'hui à la conception artificielle de cellules minimales, qu'il s'agisse d'une synthèse nouvelle à partir de molécules organiques ou de la simplification à l'extrême d'une cellule existante. Et bien entendu, de nombreuses contributions viennent régulièrement d'équipes de recherche traditionnellement ancrées en géologie, paleo-biologie ou planétologie pour ne citer qu'elles.

- 3 Une question se pose alors, celle de former une image cohérente, ordonnée, de la grande quantité des travaux scientifiques qui touchent de près ou de loin aux origines de la vie sur Terre. À terme bien entendu, cette image pourrait prendre la forme d'une « théorie » qui rendrait alors compte de tous les aspects de cette transition de l'inerte au vivant ; une telle théorie ne serait sans doute pas sans rappeler par son ambition intellectuelle les conjectures de Oparin (1924, 1936) ou Haldane (1926). Aujourd'hui cependant, les objectifs scientifiques affichés sont moins ambitieux : il s'agit moins de formuler une « théorie » des origines de la vie que d'identifier des maillons susceptibles d'intervenir dans une telle théorie. Il faut trouver ce qui marche, expérimentalement, et montrer comment cela peut être pertinent dans le cadre de scénarios sur les origines de la vie. Mais les maillons sont nombreux et la question se pose de les ordonner en l'absence, à ce jour, de toute « théorie » englobante sur les origines de la vie.
- 4 Une réponse classique à cette question consisterait à ordonner les travaux scientifiques en fonction des entités chimiques, des types de molécules sur lesquels ils portent, typiquement en ordre croissant de taille et de complexité structurelle, depuis les molécules les plus simples présentes dans l'espace interstellaire jusqu'aux systèmes moléculaires les plus complexes, doués de capacités de réplication et bien proches alors de supposées protocellules. Dans un tel classement, je propose de distinguer quatre grandes classes de molécules : (1) les *molécules cosmiques*, qui sont des molécules relativement simples, comprenant moins d'une dizaine d'atomes et présentes en relative abondance dans l'espace interstellaire comme le méthane, l'ammoniac ou l'eau, (2) les *briques prébiotiques du vivant*, qui sont les premières molécules organiques à pouvoir être synthétisées dans des conditions prébiotiques et qui comprennent par exemple des acides aminés, des peptides, des sucres, des bases, des nucléotides ou encore des lipides, (3) les *molécules fonctionnelles*, qui sont des polymères de molécules du type précédent et qui peuvent à ce titre prendre des tailles considérables de l'ordre de 10^3 à 10^{11} atomes, comprenant alors des molécules comme des brins d'ARN, d'ADN, des protéines ou d'autres polymères doués de propriétés remarquables comme la catalyse, (4) les *organisations fonctionnelles*, qui sont des populations de molécules des types précédents interagissant entre-elles, comme par exemple au sein de réseaux auto-catalytiques ou de vésicules lipidiques, et qui vont jusqu'à englober les supposées protocellules primitives, premiers systèmes vivants apparus sur Terre. Ce classement se retrouve en filigrane dans la structure même de certains ouvrages universitaires qui abordent le problème scientifique des origines de la vie⁴.

- 5 Il me paraît intéressant de noter que ce classement des travaux scientifiques par types de molécules se trouve doublé par la présence de schèmes explicatifs spécifiques, paradigmatiques des transitions d'une classe de molécules à une autre classe de molécules. C'est ce que je propose de montrer dans les sections suivantes, à partir d'exemples empruntés à la chimie prébiotique, à la recherche sur les ribozymes et aux travaux sur les ensembles moléculaires doués d'auto-organisation. J'identifie trois schèmes explicatifs bien particuliers, chacun étant spécifique à une transition d'une classe de molécule à une autre, et je propose que toute théorie sur les origines de la vie s'appuie sur chacun de ces trois schèmes pour expliquer la transition de l'inerte au vivant.
- 6 Les quatre classes de molécules que je viens de mettre en avant délimitent trois étapes de transitions : une première transition des molécules cosmiques vers les briques prébiotiques du vivant, une seconde de ces briques prébiotiques vers les molécules fonctionnelles, et une troisième des molécules fonctionnelles vers les organisations fonctionnelles. Chacune de ces transitions requiert explication. J'avance que les explications de chacune de ces transitions font chacune appel à des schèmes explicatifs spécifiques, si bien que toute théorie sur les origines de la vie repose sur trois modes d'explication : (1) des ensembles de *processus chimiques* pour rendre compte de l'apparition de molécules organiques dans des conditions prébiotiques, (2) un *principe d'évolution* pour justifier l'apparition de molécules organiques bien plus complexes que les précédentes et dotées de propriétés fonctionnelles intéressantes, et (3) des *principes d'auto-organisation* pour expliquer l'apparition de premiers signes d'organisation comme des structures, des réseaux auto-catalytiques et autres propriétés des premières protocellules.
- 7 Ces trois schèmes explicatifs sont par ailleurs soumis à un certain nombre de restrictions dictées par les conditions environnementales de la Terre primitive et par leur évolution au cours des premières centaines de millions d'années de son existence : composition chimique, conditions de température et de pression, rayonnement, présence d'atmosphère, d'eau et de terres émergées etc. Les trois schèmes explicatifs et les quatre classes d'entités moléculaires que j'ai mis en avant précédemment doivent être compatibles non seulement avec l'ensemble de ces conditions environnementales mais également avec leur enchaînement historique. Toutes ces *conditions aux limites* restreignent l'éventail des possibles, qu'il s'agisse des entités chimiques ou des processus explicatifs sur lesquels repose toute théorie sur les origines de la vie. S'enchaînant dans un ordre logique mais également temporel, les trois schèmes explicatifs que je mets en avant sont également contraints par un ensemble de conditions aux limites (voir illustration 1). Pour argumenter cette position, j'emprunte trois exemples aux travaux scientifiques sur les origines de la vie.

illustration 1.



Les trois schèmes explicatifs des théories sur les origines de la vie

2. Le schème explicatif des processus chimiques prébiotiques

- 8 Dans le sillage de Miller (1953) et de ses premières expériences de chimie prébiotique, nombreux de scientifiques explorent le vaste champ de la chimie à la recherche de réactions chimiques susceptibles de rendre compte de l'apparition sur Terre des premières molécules organiques à partir des espèces moléculaires en abondance sur la planète et dans les conditions environnementales susceptibles d'y régner à cette époque lointaine. Les explications qui visent à rendre compte de l'apparition de ces premières briques du vivant sont formulées en tant qu'ensembles de réactions chimiques compatibles avec les conditions de la Terre primitive. D'une complexité parfois déconcertante, ces ensembles peuvent regrouper de nombreuses réactions successives, avec des embranchements parallèles, des chemins réactionnels qui entrent en concurrence les uns avec les autres, se croisent, se recouvrent et se séparent ultérieurement. Autrement dit, les explications sont formulées sur la base de ce que j'appellerai des *processus chimiques prébiotiques*. La recherche contemporaine sur les voies prébiotiques possibles de synthèse des bases nucléiques va me servir ici d'illustration.
- 9 La pertinence de cette recherche tient, bien entendu, à l'ubiquité de l'ADN et de l'ARN dans les organismes vivants connus aujourd'hui. Elle tient aussi à l'intérêt que suscite la théorie du « monde ARN » selon laquelle les premières formes de vie à apparaître sur Terre seraient des molécules d'ARN capables à la fois d'auto-réplication et de variation (Gilbert 1986). La composition chimique de ces acides nucléiques est bien connue : il s'agit de polymères de nucléotides, chaque nucléotide étant lui-même un assemblage d'un phosphate, d'un sucre et d'une base nucléique. Quatre bases nucléiques se retrouvent le plus fréquemment dans l'ARN : il s'agit de deux bases puriques, l'adénine d'une part et la guanine de l'autre, et de deux bases pyrimidiques, la cytosine et

l'uracile. De nombreux travaux de chimie prébiotique se sont intéressés aux possibilités de synthétiser des fragments d'ARN dans les conditions de la Terre primitive. Les problèmes à résoudre sont complexes car non seulement faut-il expliquer comment des nucléotides seraient à même de polymériser ensemble, mais il s'agit également d'expliquer comment des nucléotides auraient pu être eux-mêmes synthétisés auparavant, et, avant eux, les sucres et les bases nucléiques, qu'il s'agisse des bases puriques comme des bases pyrimidiques.

- 10 Si les travaux de Miller (1953) ont surtout permis de mettre en évidence la possibilité d'une synthèse prébiotique d'acides aminés dans un milieu réducteur et à partir de molécules simples supposées en grande abondance à l'époque de la Terre primitive comme du méthane, de l'ammoniac, de l'hydrogène et de l'eau, d'autres chimistes s'intéressent rapidement par la suite à la synthèse prébiotique des acides nucléiques et de leurs composants. Certains cherchent notamment à synthétiser les bases puriques, adénine et guanine, à partir de différents mélanges réactionnels et sous diverses conditions chimiques.
- 11 Une première base purique, l'adénine⁵, est synthétisée au début des années 1960 à partir d'acide cyanhydrique HCN et d'ammoniac NH₃, ou plus généralement à partir de cyanure d'ammoniac NH₄CN (Oró 1961 ; Oró, Kimball 1961). Sous certaines conditions en effet, l'acide cyanhydrique polymérise en formant des molécules relativement complexes, notamment à base de cycles alternant des atomes de carbone et d'azote, et parmi lesquelles figure en particulier l'adénine. Ces travaux ont ouvert la voie à toute une chimie de la polymérisation de l'acide cyanhydrique. Mais la faisabilité prébiotique des chemins réactionnels soulève plusieurs problèmes.
- 12 Un premier problème se pose en effet, celui de la concentration de HCN : la plupart des réactions intéressantes se déroulent dans des concentrations de HCN qu'il apparaît impossible d'atteindre dans un océan primitif ; le HCN étant par ailleurs très volatile, un processus de concentration par évaporation de lagunes n'est pas envisageable non plus. Certains chercheurs se sont alors intéressés à des solutions de HCN portées à des températures relativement basses, de l'ordre de -24°C. Dans ces conditions, on observe simultanément plusieurs phénomènes : l'eau change de phase et cristallise en glace ; cela a pour conséquence que l'acide cyanhydrique précédemment fortement dilué se retrouve concentré dans les interstices des cristaux de glace ; se forme alors un précipité très hétéroclite de polymères de molécules d'acide cyanhydrique ; et, même si cela n'est qu'en faibles proportions, ce précipité renferme de l'adénine (Schwartz, Joosteenn, Voet, 1982). Dans cette même direction de recherche, différentes bases puriques, dont l'adénine mais également la guanine, ont pu être observées dans des solutions de HCN conservées à -78°C pendant 27 ans (Miyakawa, Cleaves, Miller 2002a, 2002b). La concentration par le gel apparaît donc comme une des voies plausibles de synthèse prébiotique des bases puriques à partir de HCN, mais les quantités ainsi synthétisées sont faibles. C'est là un second problème.
- 13 Ce second problème pourrait peut-être se voir résolu d'une manière originale. L'étude détaillée des chemins réactionnels possibles menant à la formation de bases puriques par polymérisation d'acide cyanhydrique révèle en effet un passage quasi-obligé par deux intermédiaires chimiques successifs : un tétramère d'acide cyanhydrique et un précurseur direct de l'adénine, l'AICN (Ferris, Orgel 1966 ; Sanchez, Ferris, Orgel 1968). Si la formation du tétramère semble relativement aisée, le passage de ce tétramère à l'AICN paraît plus problématique. Une première possibilité pourrait impliquer de la

formamidine $\text{HN}=\text{C}-\text{NH}_2$; cette hypothèse ne semble cependant pas faisable dans des conditions prébiotiques car elle nécessiterait de bien trop fortes concentrations d'ammoniac NH_3 (Orgel 2004). Une seconde hypothèse serait alors de faire appel à un processus photochimique d'isomérisation; cette hypothèse aurait l'avantage d'être relativement indépendante des concentrations d'ammoniac (Ferris, Orgel 1966). Au total donc, la formation des bases puriques dans des conditions prébiotiques impliquerait à la fois un processus de concentration par le froid et un processus d'isomérisation par rayonnement solaire (Orgel 2004).

- 14 Les recherches sur la synthèse prébiotique des bases puriques ne s'arrête pas là. D'autres voies sont explorées aujourd'hui qui, bien que moins développées que celles issues de la chimie de polymérisation de l'acide cyanhydrique, pourraient néanmoins se révéler tout aussi pertinentes. Ainsi par exemple, de l'adénine a pu être obtenue en chauffant du formamide HCONH_2 , composé chimique dont la présence dans des conditions prébiotiques ne semble pas problématique (Saladino, Crestini, Costanzo, Negri, Di Mauro, 2001). Par un tout autre processus chimique, de la guanine a été synthétisée au sein d'un mélange gazeux d'azote, de monoxyde de carbone et d'eau porté brutalement à haute température puis refroidit tout aussi rapidement, ce processus de « choc thermique » visant à simuler les conditions d'impact de météorites avec l'atmosphère de la Terre primitive et le réchauffement brutal très local de cette atmosphère le long des trajectoires de ces météorites (Miyakawa, Murasawa, Kobayashi, Sawaoka, 2000).
- 15 Sans prétendre à l'exhaustivité, cette brève synthèse sur la chimie prébiotique des bases puriques illustre parfaitement ce que j'entends par « processus chimiques prébiotiques ». L'explication, telle que nous pouvons la formuler à ce jour, de l'apparition des bases puriques sur la Terre primitive fait ainsi appel à plusieurs chemins réactionnels possibles et parallèles : chimie de l'acide cyanhydrique, chimie du formamide ou choc thermique atmosphérique⁶. Qui plus est, le cas de la chimie de l'acide cyanhydrique se décompose lui-même en plusieurs chemins réactionnels éventuellement parallèles ou successifs, plus ou moins probables : réactions chimiques dans des solutions de HCN en forte concentration, réactions dans des solutions de HCN plus diluée mais soumises à des changements de phase par refroidissement et gel, amélioration des rendements par présence de formamidine et ammoniac, ou alors plus vraisemblablement par processus photochimique.
- 16 Au total donc, la seule question de la synthèse prébiotique des bases puriques appelle une explication en forme d'ensemble de *processus chimiques prébiotiques*, chaque processus se composant d'une liste de réactants et de produits, et se déroulant dans des conditions chimiques spécifiques (conditions de température, de pH, de pression, de concentration etc.). À son tour, la question de la synthèse prébiotique des bases pyrimidiques appelle une explication toute semblable par sa structure argumentative. De même la question de la synthèse prébiotique des sucres et notamment du ribose. De même la phosphorylation du ribose et l'accrochage d'une base à l'ensemble, à moins qu'il ne s'agisse d'abord de faire réagir sucre et base puis d'y adjoindre un phosphate pour synthétiser un nucléotide. De même la polymérisation de plusieurs nucléotides pour finalement obtenir enfin un premier brin d'ARN⁷. Au total donc, l'explication de la synthèse prébiotique de l'ARN fait appel à un réseau de plusieurs dizaines de réactions chimiques. C'est cet ensemble de *processus chimiques prébiotiques* qui explique pas à pas la transformation des molécules en grande abondance sur la Terre primitive, les

molécules que j'ai appelées « molécules cosmiques », en différents intermédiaires chimiques résultant eux-mêmes en l'apparition des premières « briques prébiotiques du vivant ». L'assemblage et la transformation de ces briques du vivant en de grosses molécules douées de propriétés intéressantes comme la capacité à catalyser une réaction donnée voire même la capacité à se reproduire, font l'objet d'explications d'une tout autre nature. C'est ce que je propose d'illustrer maintenant.

3. Le schème explicatif du principe d'évolution chimique prébiotique

- 17 Si l'explication de l'apparition des premières briques prébiotiques du vivant fait appel à un ensemble de processus chimiques prébiotiques, celle de l'apparition des premières molécules fonctionnelles fait appel à un schème explicatif tout autre : ce schème explicatif spécifique est un *principe d'évolution chimique prébiotique*. Alors que dans le cas des briques prébiotiques il s'agissait d'identifier les chemins réactionnels chimiques possibles, c'est-à-dire, pour schématiser, quels produits peuvent être synthétisés à partir de quels substrats et dans quelles conditions, le problème qui se pose pour les premières molécules fonctionnelles est d'une tout autre nature. En effet, une fois que l'on sait par exemple comment des nucléotides peuvent polymériser pour donner un brin d'ARN, c'est-à-dire suivant quel chemin réactionnel, la question qui se pose est d'expliquer comment tel ARN plutôt que tel autre en est venu à être prépondérant sur Terre alors que la probabilité initiale de leur synthèse par polymérisation au hasard était la même. Une simple estimation numérique suffit à se rendre compte de la pertinence de cette question : il existe 4^{200} brins d'ARN possibles contenant chacun 200 nucléotides choisis parmi les 4 nucléotides les plus répandus dans les organismes vivants contemporains ; cela représente pas moins de 10^{120} polymères différents, soit infiniment plus que les quelques 10^{80} particules censées être contenues dans notre univers⁸. Autrement dit, l'univers entier ne serait pas suffisamment vaste pour contenir à lui seul la totalité des brins possibles d'ARN de longueur 200. Les ARN présents sur Terre dans les organismes vivants ne sont donc qu'une infime partie de l'ensemble possible des ARN, et ce d'autant plus que leur longueur s'étend considérablement au-delà de 200 nucléotides. Comment expliquer alors la prépondérance de certains ARN plutôt que d'autres ? L'étude des processus chimiques prébiotiques ne peut apporter de réponse à cette question, et ce qu'il s'agisse de polymères d'acides nucléiques comme l'ARN ou l'ADN, ou de polymères d'acides aminés comme les protéines. Un autre schème explicatif devient nécessaire. Pour en comprendre la nature, je propose d'analyser les travaux de recherche sur les ribozymes, ces brins d'ARN très particuliers, doués de propriétés catalytiques.
- 18 Les ribozymes furent découverts dans les années 1980. On pensait alors qu'au sein des organismes vivants, les seules molécules douées de propriétés catalytiques étaient ces protéines que l'on appelle enzymes. La découverte de brins d'ARN capables de catalyser une réaction de ligation d'ARN ribosomal chez le protozoaire *Tetrahymena Thermophila* (Cech, Zaug, Grabowski 1981) prouva qu'il n'en était rien⁹, d'autant plus que d'autres ribozymes naturels furent aussi découverts, comme par exemple chez la bactérie très commune qu'est *Escherichia Coli* (Guerrier-Takada, Gardiner, Marsh, Altman, 1983). Et si des ribozymes naturels pouvaient être découverts, serait-il également possible d'en synthétiser de nouveaux, artificiellement ? Les premières tentatives ont porté sur des

modifications de ribozymes naturels ; ainsi, le ribozyme du *Tetrahymena* a pu être modifié afin qu'il puisse catalyser la polymérisation non pas d'ARN mais d'ADN (Beaudry, Joyce 1992). Mais les expériences qui m'intéressent plus particulièrement ici sont celles qui ont révélé la possibilité de synthétiser des ribozymes à partir de séquences d'ARN totalement aléatoires. Les premiers de ces ribozymes totalement artificiels étaient capables de catalyser sensiblement la ligation de deux brins d'ARN préalablement alignés sur une matrice (Bartel, Szostak 1993) ; leur efficacité a été considérablement améliorée par la suite au point d'être comparable avec celle des enzymes protéiniques appelées « ligases » (Ekland, Szostak, Bartel 1995). Plus spectaculaire encore fut la synthèse d'un ribozyme capable de s'accrocher à une séquence aléatoire d'ARN et de catalyser la polymérisation de plus d'une douzaine de nucléotides complémentaires avec une fidélité tout à fait respectable (Johnston, Unrau, Lawrence, Glasner, Bartel, 2001) ; ce ribozyme long de 189 nucléotides rend alors crédible la possibilité de synthétiser l'équivalent ARN de « répliques », ces enzymes protéiniques capables de catalyser la réplication de brins d'acide nucléique ; autrement dit, il apporte un regain de crédibilité à l'hypothèse du « monde ARN » selon laquelle les premières structures dotées de la capacité à se reproduire auraient été des molécules d'ARN. Ces ribozymes sont ainsi un excellent exemple de ce que j'ai nommé « molécules fonctionnelles ».

- 19 Outre le résultat de ces expériences, à savoir donc les séquences spécifiques d'ARN synthétisées, c'est le processus expérimental même qui est intéressant : non seulement permet-il de comprendre comment sont synthétisées artificiellement de telles molécules aux propriétés si particulières, mais il révèle aussi la présence d'un schème explicatif tout à fait spécifique. Ce schème explicatif porte non pas sur l'identification d'une réaction chimique prébiotique précise mais sur la justification de l'apparition d'une séquence particulière parmi des quantités astronomiques possibles ; il fait appel à une alternance d'étapes de multiplication et de sélection au niveau moléculaire. Le processus expérimental en question est appelé « évolution *in vitro* ». Partant d'une solution contenant un très grand nombre de brins d'ARN aux séquences aléatoires¹⁰, l'évolution *in vitro* consiste en la répétition alternée de deux étapes : (1) la sélection de certains brins de la solution pour une activité catalytique spécifique, et (2) la multiplication des brins sélectionnés par un processus dit d'amplification, avec introduction de variation. La première étape élimine la très vaste quantité des brins d'ARN qui n'ont pas l'activité catalytique ciblée (ou ne l'ont pas de manière suffisamment développée), et la deuxième fait croître la concentration des molécules recherchées tout en introduisant des mutations grâce à un processus de réplication non fidèle à 100 %, ce qui permet de donner naissance à des brins dotés d'une activité catalytique éventuellement meilleure. La répétition alternée de ces deux étapes une douzaine de fois suffit à donner naissance à des ribozymes d'une performance rivalisant avec celle des enzymes. Le succès de ce processus expérimental lui a valu d'être sitôt transposé en principe explicatif de l'apparition sur Terre de certaines séquences d'ARN plutôt que d'autres, autrement dit, de ce que j'ai appelé certaines « molécules fonctionnelles » du vivant. Ce principe consiste en l'alternance d'étapes de sélection et de multiplication moléculaires, semblables à celles du laboratoire mais censées s'être déroulées spontanément dans les conditions de la Terre primitive. Il n'est autre qu'un *principe d'évolution chimique prébiotique*¹¹ : sélection de certaines molécules pour une activité leur conférant un quelconque avantage, comme par exemple une activité de fixation à un substrat ou de participation à une catalyse croisée, puis

multiplication de ces molécules par un processus d'accumulation progressive ou bien par catalyse croisée ou éventuellement auto-catalyse, le tout selon des réactions chimiques non fidèles à 100 % afin d'assurer un certain degré de variation d'une génération de molécules à la suivante. C'est à ce principe explicatif qu'il est, bien entendu, fait appel pour expliquer l'apparition sur Terre des tout premiers ribozymes, y compris des hypothétiques ribozymes « répliques » prébiotiques. Couplé à des *processus chimiques prébiotiques* permettant d'expliquer la polymérisation spontanée de nucléotides dans des conditions prébiotiques¹², ce principe d'évolution chimique prébiotique explique pourquoi certains ARN plutôt que d'autres en sont venus à être prédominants. De manière plus générale, c'est ce principe explicatif qui est à la base des explications de l'apparition de certains polymères prébiotiques aux propriétés fonctionnelles bien spécifiques, de ces polymères-là et non d'autres en dépit d'une probabilité infime, qu'il s'agisse de polymères d'acides nucléiques ou d'acides aminés, ou d'autres sortes encore. Reste alors à expliquer comment des populations de molécules fonctionnelles en viennent à interagir entre elles pour s'accroître en taille, autrement dit se reproduire, tout en autorisant un certain degré de variation. C'est là qu'intervient un troisième schème explicatif.

4. Le schème explicatif des principes d'auto-organisation prébiotique

- 20 Ce troisième schème explicatif est mis à contribution pour rendre compte de l'apparition des premiers signes d'organisation censés caractériser les toutes premières protocellules apparues sur la Terre primitive. Ces protocellules seraient composées d'un grand nombre de molécules diverses et notamment de « molécules fonctionnelles », dont certaines seraient assemblées en une membrane délimitant alors un milieu intérieur d'un milieu extérieur, et dont d'autres permettraient la croissance de l'ensemble en catalysant la production continue de nouvelles molécules fonctionnelles. Mon objectif ici n'est pas de rentrer dans le détail des différents modèles de protocellules qui ont pu être proposés jusqu'à aujourd'hui comme le chemoton de Gánti (1971) ou le système auto-poïétique de Maturana et Varela (1973). Il s'agit plutôt de caractériser le type d'explication mis en avant pour rendre compte de l'apparition de telles protocellules à partir d'une soupe primitive contenant les trois types de molécules rencontrés jusqu'ici, à savoir des « molécules cosmiques », des « briques prébiotiques du vivant » et des « molécules fonctionnelles ». Il s'agit à nouveau de rendre compte d'une transition.
- 21 Ce qui caractérise ce troisième cas, c'est que les explications mises en avant font toutes appel à un troisième schème explicatif complémentaire des deux premiers, à savoir un schème explicatif reposant sur des *principes d'auto-organisation prébiotique*. Ces principes d'auto-organisation transparaissent quand des scientifiques cherchent à expliquer par exemple la formation de vésicules prébiotiques, ancêtres des membranes des cellules vivantes que nous connaissons aujourd'hui, ou encore l'apparition de réseaux catalytiques auto-entretenus, ancêtres des réseaux métaboliques auto-entretenus¹³.
- 22 Dans le premier cas, il s'agit d'expliquer comment des molécules peuvent passer, en solution aqueuse, d'un état désordonné à un état organisé en s'assemblant toutes seules en des objets de forme sphérique, qu'il s'agisse de coacervats résultant de la condensation de protéines (par exemple Oparin 1936 ; Fox, Harada et Kendrick 1959) ou

de vésicules d'acides gras amphiphiles ou de phospholipides (par exemple Hargreaves et Deamer 1978 ; Szostak, Bartel, Luisi 2001). Les travaux de ces vingt dernières années sur les lipides ont par exemple permis de mettre en évidence la formation spontanée de vésicules sphériques double-couches et semi-perméables aux propriétés fascinantes : ces vésicules peuvent croître, fusionner, se scinder, bourgeonner, engendrer de nouvelles vésicules en leur sein ou encore encourager certaines réactions chimiques sur leur surface. L'explication de l'apparition de vésicules au sein d'une solution aqueuse contenant des lipides, et sous certaines conditions de pH et de concentration ionique, fait appel à un principe d'auto-organisation, principe lui-même détaillé en un certain nombre de phénomènes physico-chimiques (Hanczyc et Szostak 2004). Ainsi par exemple, les molécules d'acides gras sont connues pour être composées d'une tête compacte hydrophile et d'une longue queue hydrophobe ; leur mise en solution aqueuse provoque la déprotonation de leur tête ; en fonction de leur concentration, du pH de la solution et de son contenu en ions, les molécules d'acides gras déprotonisées ont tendance à adhérer les unes aux autres, tête contre tête et queue contre queue, grâce d'une part à des liaisons hydrogènes entre leurs têtes et à des interactions de van der Waal entre leurs queues hydrocarbonées ; elles s'organisent alors en une bi-couche, les têtes hydrophiles tournées vers l'extérieur en contact avec la solution aqueuse et les queues hydrophobes tournées vers l'intérieur et protégées des molécules d'eau ; cette bi-couche adopte à son tour une forme sphérique pour des raisons de stabilité thermodynamique¹⁴ (Ourisson, Dannenmuller, Désaubry, Nakatami, 2000 ; Monnard et Deamer 2002).

- 23 Dans le second cas, encore théorique pour l'essentiel à ce jour, l'explication porte sur le passage d'une solution moléculaire inerte à une solution au sein de laquelle les molécules catalysent mutuellement leur multiplication à partir d'un flux de molécules primaires plus simples¹⁵. L'auto-organisation porte ici sur l'apparition spontanée de réseaux auto-catalytiques. Le modèle de l'origine de la vie de Dyson (1982) illustre ce type d'explication. Il s'agit d'un modèle mathématique inspiré des approches statistiques en biologie des populations. Ce modèle fait intervenir un très grand nombre de molécules, des « monomères », qui ont la capacité de polymériser entre elles pour former des molécules plus longues, des « polymères » ; les molécules sont initialement réparties en « îlots », chaque îlot représentant ainsi l'équivalent d'une cellule et contenant un nombre donné N de monomères, séparés ou partiellement polymérisés ; il est également fait l'hypothèse que certains polymères catalysent la polymérisation d'autres polymères, auquel cas ces polymères aux propriétés catalytiques sont appelés des polymères « actifs ». Au sein de chaque îlot donc, un processus de polymérisation peut avoir lieu, catalysé par des polymères actifs si de tels polymères s'y trouvent présents ; une réaction concurrente d'hydrolyse est également censée être possible, détruisant progressivement certains des polymères en présence. Le modèle de Dyson s'intéresse à l'évolution de ces îlots et plus spécifiquement de leur contenu : les molécules en présence restent-elles à l'état de monomères ou de polymères courts (état dit « désordonné ») ou bien donnent-elles naissance à des polymères plus longs qui parviennent à contrer le phénomène d'hydrolyse grâce à une catalyse croisée (état dit « ordonné ») ? Le traitement statistico-mathématique du modèle permet d'identifier trois points d'équilibre : deux points d'équilibre stables, le premier avec des îlots « désordonnés » et le second des îlots « ordonnés », et un troisième point d'équilibre, instable, contenant en même temps des îlots des deux types. Il est aussi possible de calculer le ratio d'îlots ordonnés par rapport aux îlots

désordonnés ou encore le taux de transition d'îlots désordonnés vers des états d'îlots ordonnés. Outre la quantité N de monomères par îlot, deux paramètres se trouvent alors jouer un rôle déterminant : la diversité a des monomères, à savoir le nombre de types de monomères présents, et l'activité catalytique b des polymères actifs. Ainsi par exemple, Dyson trouve que si $a = 10$, $b = 100$ et $N > 2000$, alors de nombreux îlots ordonnés apparaissent spontanément, la vie est possible : un grand nombre de molécules simples pouvant s'assembler entre elles et catalyser leurs assemblages respectifs peut donner lieu à une population de grosses molécules qui parvient à maintenir son existence en s'auto-entretenant¹⁶. Avec un tel modèle, l'explication de l'apparition de la vie est formulée en des termes statistico-mathématiques qui décrivent un phénomène de transition du désordre vers l'ordre, phénomène si caractéristique de l'*auto-organisation*.

- 24 Qu'il s'agisse donc de phénomènes relativement simples et expérimentalement bien connus comme la formation de vésicules lipidiques ou de phénomènes populationnels modélisés comme l'apparition de réseaux catalytiques auto-entretenus, leur explication fait appel à des *principes d'auto-organisation*, pour certains ancrés dans le physico-chimique, pour d'autres dans la modélisation mathématique. Les théories sur les origines de la vie ont besoin d'expliquer la transition de ce que j'ai appelé des « molécules fonctionnelles » vers des « organisations fonctionnelles ». Les principes d'auto-organisation comme ceux que je viens de décrire à titre d'illustration s'y emploient. Ils sont paradigmatiques du troisième type de schème explicatif des théories sur les origines de la vie.

5. Une structure en « marchepied »

- 25 Les exemples scientifiques développés précédemment ont visé à étayer ma thèse selon laquelle les théories sur les origines de la vie font appel à trois grandes classes d'explications, trois schèmes explicatifs : (1) *des processus chimiques prébiotiques*, (2) *un principe d'évolution prébiotique* et (3) *des principes d'auto-organisation*. Ce sont ces trois schèmes que les scientifiques mettent à contribution pour essayer de rendre compte de la transition graduelle de la matière inanimée sous sa forme la plus répandue dans l'univers à la matière animée sous sa forme supposée la plus primitive. Bien entendu, l'explication de cette transition graduelle n'est pas achevée à ce jour. Il se pourrait même qu'elle n'en soit qu'à ses balbutiements. Quoi qu'il en soit, les trois schèmes apparaissent aujourd'hui nécessaires pour expliquer la transition de l'inerte au vivant dans la mesure où ils sont largement mis à contribution par la communauté scientifique. Ils peuvent même être qualifiés de « suffisants » puisque aucun autre schème explicatif supplémentaire n'est postulé par cette même communauté scientifique. Bien entendu, ce constat est valable pour aujourd'hui et ne préjuge en rien de la forme que pourra revêtir à terme une théorie probante des origines de la vie sur Terre : il se pourrait en effet que de nouveaux schèmes explicatifs soient effectivement nécessaires pour expliquer les origines de la vie, mais de cela nous n'en savons rien aujourd'hui.
- 26 Je soutiendrai par ailleurs que les trois schèmes explicatifs identifiés sont soumis à un ordre à la fois logique et temporel. En effet, les entités moléculaires qui résultent de l'application d'un schème servent de matière première à un second schème : les « briques prébiotiques » qui résultent des *processus chimiques prébiotiques* sont les

entités sur lesquelles porte le *principe d'évolution prébiotique* et ainsi de suite. Ainsi la présence possible sur Terre d'un ensemble suffisamment vaste de brins d'ARN au sein duquel un ribozyme puisse apparaître par évolution est justifiée par un ensemble de processus chimiques conduisant à la synthèse de nucléotides et de brins aléatoires d'ARN. Les trois schèmes explicatifs sont donc imbriqués logiquement les uns dans les autres, les produits des uns pouvant donner lieu à des entités manipulées par les autres.

- 27 Les schèmes sont également soumis à un enchaînement temporel. Ainsi par exemple, les molécules fonctionnelles ne peuvent être apparues sur Terre avant que n'aient été formées les briques prébiotiques correspondant à leurs composants. Il en résulte que le schème explicatif du principe d'évolution prébiotique ne peut être mobilisé pour rendre compte de phénomènes qui seraient antérieurs aux phénomènes expliqués par le schème explicatif des processus chimiques prébiotiques. Cela n'implique cependant pas que le schème explicatif des processus chimiques prébiotiques perde toute sa pertinence au moment où le schème explicatif du principe d'évolution prébiotique fait son apparition ; autrement dit, il est tout à fait possible et même très certainement probable que les phénomènes décrits par les processus chimiques prébiotiques perdurent alors que les phénomènes d'évolution prébiotiques font leur apparition.
- 28 Cette double organisation des schèmes les uns par rapport aux autres, à savoir donc leur imbrication logique et leur apparition successive dans le temps, confère à l'ensemble une organisation en « marches » : la première permet de prendre appui sur la seconde, et la seconde sur la troisième. Ces marches sont par ailleurs contraintes par les *conditions aux limites* mentionnées précédemment¹⁷. Ainsi par exemple les processus chimiques prébiotiques doivent être compatibles avec les conditions environnementales de la Terre primitive, ou encore les durées requises pour l'évolution des molécules fonctionnelles doit être compatible avec les échelles de temps géologiques. Les conditions limites contraignent ainsi chacun des trois schèmes explicatifs.
- 29 Elles sont en quelque sorte le socle sur lesquelles reposent les trois marches, faisant métaphoriquement de l'ensemble le marchepied de l'illustration 1.

6. Conclusion

- 30 Dans cette contribution, j'ai proposé et argumenté la thèse selon laquelle les explications que formulent les scientifiques qui travaillent sur les origines de la vie sur Terre se répartissent en trois grandes classes, chacune de ces classes relevant d'un schème explicatif spécifique : (1) le schème explicatif des processus chimiques prébiotiques, (2) le schème explicatif du principe d'évolution chimique prébiotique, et (3) le schème explicatif des principes d'auto-organisation prébiotique. J'ai également montré que ces trois schèmes explicatifs sont organisés logiquement et temporellement les uns par rapport aux autres, qu'ils sont contraints par un quatrième ensemble d'explications scientifiques de nature historique et qu'ils apparaissent aujourd'hui à la fois comme nécessaires et suffisants pour espérer un jour servir de base à la formulation d'une explication réussie des origines de la vie sur Terre.
- 31 Cette clarification des schèmes explicatifs à l'œuvre dans les « théories » sur les origines de la vie est d'autant plus féconde qu'elle permet aussi de préciser certaines questions philosophiques sur l'origine de la vie. Il en va ainsi par exemple de la question de l'émergence¹⁸ : interroger les origines de la vie à la lumière de la notion

philosophique d'émergence revient à mettre en rapport cette notion avec les différents types d'explications mobilisés dans les travaux sur les origines de la vie, autrement dit avec chacun des trois schèmes explicatifs identifiés mais aussi avec le quatrième ensemble d'explications de nature historique.

- 32 Ce quatrième ensemble d'explications que j'ai intitulé « conditions limites » est de nature historique ; à ce titre, la notion d'émergence sous une acception « diachronique », au sens de nouveauté qui apparaît au fil du temps dans l'univers, peut se trouver ici toute sa pertinence : la vie pourrait être qualifiée de diachroniquement émergente pour la simple et bonne raison que des explications de nature historique, non prédictibles, sous-tendent toute théorie des origines de la vie. *A contrario*, si une notion d'émergence est susceptible de s'appliquer aux trois principaux schèmes explicatifs que j'ai identifiés, ce n'est pas sous une acception « diachronique » mais plutôt « synchronique », comme par exemple au sens d'irréductibilité, les trois principaux schèmes étant anhistoriques : dire que la vie émerge reviendrait alors à affirmer la présence d'irréductibilité dans au moins un des trois schèmes explicatifs identifiés.
- 33 Bien entendu, mon objectif ici n'est pas de trancher la question de l'émergence appliquée au problème de l'apparition de la vie sur Terre, mais d'illustrer comment l'identification des schèmes explicatifs à l'œuvre dans les théories sur les origines de la vie pourrait permettre de reformuler plus précisément la question et d'en dévoiler à la manière d'un prisme les multiples facettes.

BIBLIOGRAPHIE

- BARTEL D., SZOSTAK J.W. (1993), « Isolation of new ribozymes from a large pool of random sequences », *Science*, 261, p. 1411-1418.
- BEAUDRY A., JOYCE G. (1992), « Directed evolution of an RNA enzyme », *Science*, 257, p. 635-641.
- CECH T., ZAUG A., GRABOWSKY P. (1981), « In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor of Tetrahymena : involvement of a guanosine nucleotide in the excision of the intervening sequence », *Cell*, 27, p. 487-496.
- DYSON F. (1982), « A model for the origin of life », *Journal of Molecular Evolution*, 18, p. 344-350.
- EKLAND E., SZOSTAK J., BARTEL D. (1995), « Structurally complex and highly active RNA ligases derived from random RNA sequences », *Science*, 269, p. 364-370.
- FAGOT-LARGEAULT A. (2002), « L'émergence », dans Andler D., Fagot-Largeault A. & Saint-Sernin B., *Philosophie des sciences II*, Paris, Gallimard.
- FERRIS J. P., ORGEL L. E. (1966), « Studies in prebiotic synthesis. I. Aminomalononitrile and 4-amino-5-cyanoimidazole », *Journal of the American Chemical Society*, 88, p. 3829-3831.
- FERRIS J. P., HILL A. R., LIU R., ORGEL L. E. (1996), « Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces », *Nature*, 319, p. 618.

- FOX S. W., HARADA K., KENDRICK J. (1959), « Production of Spherules from Synthetic Proteinoid and Hot Water », *Science*, 129, p. 1221.
- GÁNTI T. ([1971] 1987), *The principle of life*, Budapest, Omikk.
- GARGAUD M., CLAEYS P., LOPEZ-GARCIA P., MONTMERLE T., REISSE J. (eds.) (2007), *From Suns to Life : A Chronological Approach to the History of Life on Earth*, Berlin, Springer Verlag.
- GAYON J. (2005), « De la biologie comme science historique », *Les temps modernes*, 630, p. 55-67.
- GILBERT W. (1986), « The RNA world », *Nature*, 319, p. 618.
- GUERRIER-TAKADA C., GARDINER K., MARSH T., ALTMAN S. (1983), « The RNA moiety of ribonuclease P is the catalytic subunit of the enzyme », *Cell*, 35, p. 849-857.
- HALDANE J. B. S. ([1929] 1967), « The origin of life », *The Rationalist Annual*, 148, p. 3-10, republié dans Bernal J.D. (1967), *The Origin of Life*, London, Weidenfeld and Nicolson, p. 242-249.
- HANCZYC M., SZOSTAK J. W. (2004), « Replicating vesicles as models of primitive cell growth and division », *Current Opinion in Chemical Biology*, 8(6), p. 660-664.
- HARGREAVES W. R., DEAMER D. W. (1978), « Liposomes from Ionic, Single-Chain Amphiphilest », *Biochemistry*, 17, p. 3759-3768.
- JOHNSTON W., UNRAU P., LAWRENCE M., GLASNER M., BARTEL D. (2001), « RNA-catalyzed RNA polymerization », *Science*, 292, p. 1319-1325.
- KAUFFMAN S. A. (1986), « Autocatalytic sets of proteins », *Journal of Theoretical Biology*, 119, p. 1-24.
- KAUFFMAN S. A. (2000), *Investigations*, New York, Oxford University Press.
- KIM J. (1999), « Making Sense of Emergence », *Philosophical Studies*, 95, p. 3-36.
- KIRSCHNER M., GERHART J., MITCHISON T. (2000), « Molecular “vitalism” », *Cell*, 100, p. 79-88.
- KISSEL J., KRUEGER F. R. (1987), « The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1 », *Nature*, 326, p. 755-760.
- LARRALDE R., ROBERTSON M. P., MILLER S. L. (1995), « Rates of Decomposition of Ribose and Other Sugars : Implications for Chemical Evolution », *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 92, p. 8158-8160.
- LEE D., GRANJA J. R., MARTINEZ J. A., SEVERIN K., GHADIRI M. R. (1996), « A self-replicating peptide », *Nature*, 382, p. 525-528.
- LIFSON S. (1997), « On the crucial stages in the origin of animate matter », *Journal of Molecular Evolution*, 44, p. 1-8.
- MATURANA H., VARELA F. (1973), « Autopoiesis : The Organization of the Living », dans *Autopoiesis and cognition*, H. Maturana et F Varela (éds.), Boston, Reidel.
- MAUREL M.C. (2003), *La naissance de la vie*, Paris, Dunod.
- MCLAUGHLIN B. (1997), « Emergence and Supervenience », *Intellectica*, 2, p. 25-43.
- MILLER S. (1953), « A production of amino acids under possible primitive earth conditions », *Science*, 117, p. 528-529.
- MIYAKAWA S., CLEAVE H.J., MILLER S.L. (2002a), « The Cold Origin of Life : A. Implications Based On The Hydrolytic Stabilities Of Hydrogen Cyanide And Formamide », *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 32(3), p. 195-208.

- MIYAKAWA S., CLEAVE H.J., MILLER S.L. (2002b), « The Cold Origin of Life : B. Implications Based on Pyrimidines and Purines Produced From Frozen Ammonium Cyanide Solutions », *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 32(3), p. 209-218.
- MIYAKAWA S., MURASAWA K., KOBAYASHI K., SAWAOKA A.B. (2000), « Abiotic synthesis of guanine with high temperature plasma », *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 30, p. 557-566.
- MONNARD P. A., DEAMER D. W. (2002), « Membrane Self-Assembly Processes : Steps Toward the First Cellular Life », *The Anatomical Record* 268, p. 196-207.
- MORANGE M. (2003), *La vie expliquée ; 50 ans après la double hélice*, Paris, Odile Jacob.
- OPARIN A. I. ([1924] 1967), *The Origin of Life*, trad. A. Synge, republié dans Bernal J.D. (1967), *The Origin of Life*, Londres, Weidenfeld and Nicolson, p. 199-234.
- OPARIN A. I. ([1936] 1953), *The Origin of Life*, trad. S. Morgulis, New York, Dover.
- ORGEL L. E. (2004), « Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world », *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 39(2), p. 99-123.
- ORÓ J. (1961), « Mechanism of synthesis of adenine from hydrogen cyanide under possible primitive earth conditions », *Nature*, 191, p. 1193-1194.
- ORÓ J., KIMBALL A.P. (1961), « Synthesis of purines under possible primitive earth conditions : Adenine from hydrogen cyanide », *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 94, p. 217-227.
- OURISSON G., DANNENMULLER O., DÉSAUBRY L., NAKATAMI Y. (2000), « Ébauche de cellules », *La Recherche*, 336, p. 29-31.
- PERETÓ J. (2005), « Controversies on the origin of life », *International Microbiology*, 8, p. 23-31.
- RICARDO A., CARRIGAN M.A., OLCOTT A.N., BENNER S.A. (2004), « Borate Minerals Stabilize Ribose », *Science*, 303, p. 196.
- SALADINO R., CRESTINI C., COSTANZO G., NEGRI R., DI MAURO E. (2001), « A possible prebiotic synthesis of purine, adenine, cytosine, and 4(3H)-pyrimidone from formamide : implications for the origin of life », *Bioorganic and Medical Chemistry*, 9, p. 1249-1253.
- SANCHEZ R., FERRIS J. P., ORGEL L. E. (1968), « Studies in prebiotic synthesis. IV. Conversion of 4-aminoimidazole-5-carbonitrile derivatives to purines », *Journal of Molecular Biology*, 38, p. 121-128.
- SCHWARTZ A.W., JOOSTEEN H., VOET A.B. (1982), « Prebiotic adenine synthesis via HCN oligomerization in ice », *Biosystems*, 15, p. 191-193.
- SIEVERS D., VON KIEDROWSKI G. (1994), « Self-replication of complementary nucleotide oligomers », *Nature*, 369, p. 221-224.
- SZOSTAK J., BARTEL D., LUISI P.L. (2001), « Synthesizing Life », *Nature*, 409, p. 387-390.
- TIRARD S. (2002), « Les origines de la vie sur la Terre : un problème historique », *Cahiers Français Viète*, 4, p. 35-48, Nantes, Université de Nantes.
- WESTALL F. (2003), « Le contexte géologique de l'origine de la vie et les signatures minérales de la vie fossile », dans *Les traces du vivant*, Gargaud M., Despois D., Parisot J.-P., Reisse J.M. (éd.), Bordeaux, PUB, p. 319-342.

NOTES

1. J'utilise ici le mot « théorie » dans un sens très englobant. *Stricto sensu*, les « théories » sur les origines de la vie ne sont encore que des « hypothèses » ou des « scénarios possibles ». Cependant le mot « théorie » est largement utilisé dans la littérature scientifique afférente. Cet usage englobant du mot « théorie » peut paraître justifié en regard des nombreux travaux expérimentaux, observationnels ou théoriques de ce champ scientifique et qui ont donné lieu à de multiples travaux de formalisation théorique.
2. Voir par exemple Westall (2003), pour une revue des découvertes de ces traces fossiles.
3. Pour une typologie des travaux scientifiques à l'œuvre dans le domaine des origines de la vie et un panorama de la diversité des approches, voir par exemple Morange (2003).
4. Voir par exemple Maurel (2003), ou encore Gargaud, Claeys, Lopez-Garcia, Montmerle, Reisse (eds.) (2007).
5. Rappelons pour information que l'adénine a la composition chimique suivante : image (pour plus de détails, voir par exemple les articles scientifiques cités).
6. Certains scientifiques proposent également que les bases nucléiques puissent avoir été amenées sur Terre par des météorites ou des particules de poussière interstellaire. Ainsi par exemple, de l'adénine aurait été identifiée dans des particules de poussière de comète (Kissel, Krueger 1987), même si ces résultats sont parfois contestés. De telles explications n'altèrent en rien les principes de mon argumentation : en effet, avancer que de l'adénine ait été amenée sur Terre par des météorites n'explique pas la formation d'adénine. Pour cela, il faudrait encore identifier des chemins réactionnels spécifiques à la formation d'adénine dans les conditions de l'espace interstellaire (pression et température proches du zéro absolu, très fort rayonnement etc.). En suivant ce scénario, l'explication de l'apparition d'adénine sur Terre fera alors appel à un ensemble de processus chimiques compatibles avec les conditions de l'espace interstellaire primitif et au bombardement de la Terre par des objets célestes, ce deuxième point faisant déjà partie des modèles de formation de notre planète ou « conditions aux limites ».
7. À ce jour, la synthèse prébiotique de l'ARN est loin d'être problématique. Certains des processus chimiques qui apparaissent dans les détails de l'explication posent problème : il peut s'agir de réactions lentes, de réactions à faible rendement, ou encore de réactions dans des conditions chimiques jugées aujourd'hui peu compatibles avec les conditions de la Terre primitive. C'est ainsi par exemple le cas du problème de la stabilisation du ribose (voir par exemple Larralde, Robertson, Miller 1995 ; Ricardo, Carrigan, Olcott, Benner 2004).
8. Sur le nombre de particules contenues dans l'univers, voir par exemple Kauffman (2000), p. 137.
9. *Tetrahymena thermophila* appartient au groupe des protozoaires ciliés, une branche majeure des eukaryotes unicellulaires. La découverte de ribozymes naturels joua un grand rôle pour la théorie du « monde ARN ». En effet, cette découverte rend plus crédible le scénario selon lequel des brins d'ARN auraient pu apparaître spontanément sur la Terre primitive et surtout catalyser leur propre réplication sans l'aide de protéines. Ces brins d'ARN auraient alors été les premières structures moléculaires douées de réplication, éventuellement avec variation (en fonction des aléas de réplication).
10. Il est ainsi typique de commencer avec des solutions contenant quelques 10^{15} variantes moléculaires d'un brin d'ARN de longueur donnée (cf. Bartel, Szostak 1993). Notons à nouveau que ce nombre, bien qu'impressionnant, ne représente qu'une infime partie de tous les polymères possibles de cette longueur-là réalisés à partir d'une combinaison aléatoire de 4 nucléotides. Ainsi, dans le cas du ribozyme long de 189 nucléotides (Johnston, Unrau, Lawrence, Glasner, Bartel, 2001), il existe pas moins de 4^{189} variantes possibles d'un polymère ARN de cette longueur, soit environ 10^{113} .

11. Ce principe d'évolution est différent de celui de l'évolution dite Darwinienne dans la mesure où il n'y a pas nécessairement de réplique individuelle et encore moins de reproduction. Les molécules prébiotiques qui en sont l'objet n'ont pas besoin de se répliquer ou de se reproduire individuellement. Leur multiplication peut résulter de leur participation à un réseau de molécules mutuellement catalytiques, auquel cas chaque molécule catalyse une partie du processus de synthèse d'une autre molécule du réseau si bien qu'au total elles se multiplient l'une l'autre. Dans le pire des cas, il se pourrait tout simplement que leur augmentation numérique résulte tout simplement d'un très lent processus d'accumulation différentielle : les polymères ne possédant pas la propriété en question seraient plus rapidement hydrolysés, laissant alors comme seuls survivants les polymères aux propriétés fonctionnelles les plus développées. Bien entendu, un ensemble de polymères capable de catalyse croisée, ou mieux encore un polymère auto-catalytique prendrait très rapidement le dessus (voir par exemple Lifson 1997).

12. Schème explicatif précédent ; voir par exemple les processus chimiques prébiotiques proposés par Ferris, Hill, Liu, Orgel (1996).

13. Pour certains, la formation de vésicules lipidiques ou de coacervats protéiques n'est pas un cas d'auto-organisation *stricto sensu*, mais d'auto-assemblage (voir par exemple Kirschner, Gerhart et Mitchison 2000, p. 80). Sans entrer dans le débat sémantique sur les différentes définitions possibles de l'auto-organisation et sur la pertinence ou non de démarquer l'auto-assemblage, j'adopte ici une acception large de l'auto-organisation permettant d'y inclure les phénomènes de formation spontanée de vésicules ou de coacervats. Cette acception large est celle à mon sens qui rend le mieux compte de la forme des débats entre scientifiques sur les origines de la vie.

14. Il s'agit ici d'une minimisation de l'énergie libre au sein d'une structure dissipative ; notons que d'autres formes que des sphères sont aussi possibles même si comparativement moins stables ; on observe ainsi par exemple la formation de tores ou de cylindres fermés par des demi-sphères à leurs extrémités (Monnard et Deamer 2002).

15. Voir par exemple les travaux de modélisation de Kauffman (1986) ; notons que les développements expérimentaux sont encore maigres car tout au plus peut-on citer la mise en évidence de quelques paires de molécules catalysant réciproquement leur synthèse (catalyse croisée) comme par exemple Lee, Granja, Martinez, Severin, Ghadiri (1996) dans le cas de polypeptides, ou Sievers, Von Kiedrowski (1994) dans le cas de segments d'ARN.

16. Dyson note que si la diversité des monomères a est inférieure à 8, alors aucune transition d'un état stable vers un autre état stable n'est possible, autrement dit il ne peut y avoir d'apparition de la vie à partir de matière inanimée (ni d'ailleurs de mort de matière animée) ; pour Dyson, cela pourrait indiquer que l'apparition de la vie sur Terre serait donc bien plus probable à partir de protéines (des polymères de 10 à 20 types différents d'acides aminés) qu'à partir d'ARN (des polymères de seulement 4 types différents de nucléotides).

17. Sur la dimension historique des théories sur les origines de la vie, voir par exemple Tirard (2002), et plus généralement en biologie Gayon (2005).

18. La littérature sur la notion d'émergence est très abondante. On pourra se référer par exemple à Fagot-Largeault (2002) pour une synthèse historique des courants émergentistes, à Stephan (1999) pour une typologie de différentes notions d'émergence, ou à McLaughlin (1997) et Kim (1999) pour des travaux plus spécialisés.

AUTEUR

CHRISTOPHE MALATERRE

Christophe Malaterre est docteur en philosophie de l'université Paris 1 – Panthéon Sorbonne. Spécialiste en philosophie des sciences, il s'intéresse tout particulièrement aux questions qui touchent les origines de la vie et la transition du physico-chimique au biologique. Il est affilié à l'Institut d'Histoire et Philosophie des Sciences et Techniques, et a enseigné au MIT et à Suffolk University.