

Water and the Origin of Life / L' eau et l' origine de la vie

Marc Henry

Affiliation / Université de Strasbourg, Faculté de Chimie

Laboratoire de Physique des Systèmes Complexes (ou affiliation telle que mentionnée dans l'article)

Revue

Water (MDPI) / Année de publication : 2024 / Volume : 16 / Article : 2854

Date de validation et publication : septembre 2024

DOI : (conservé tel quel dans la version finale)

Résumé

L' origine de la vie demeure l' une des questions scientifiques les plus fondamentales et les plus débattues. Les approches classiques reposent principalement sur la chimie organique et la biochimie, en cherchant à expliquer comment des molécules complexes capables de se répliquer auraient pu émerger à partir d' un milieu prébiotique. Toutefois, ces approches peinent à rendre compte de la cohérence globale, de l' organisation et de la stabilité des systèmes vivants.

Cet article propose un changement de paradigme en plaçant l' eau au cœur du processus d' émergence de la vie. L' eau n' est pas envisagée ici comme un simple solvant passif, mais comme un acteur physique fondamental, capable de structurer l' information, de moduler l' entropie et de favoriser l' auto-organisation de la matière. En s' appuyant sur des concepts issus de la physique statistique, de la thermodynamique hors équilibre et de la mécanique quantique, il est montré que l' eau possède des propriétés collectives qui permettent l' apparition de structures cohérentes à grande échelle.

L' analyse suggère que la vie pourrait être comprise comme une propriété émergente de l' eau, lorsque celle-ci est soumise à des contraintes énergétiques et informationnelles appropriées. Dans ce cadre, les biomolécules ne seraient pas à l' origine de la vie, mais plutôt des stabilisateurs secondaires de dynamiques préexistantes portées par l' eau elle-même. Cette perspective ouvre de nouvelles voies pour comprendre l' apparition de la vie sur Terre, ainsi que la possibilité de formes de vie ailleurs dans l' Univers.

Introduction

La question de l' origine de la vie constitue l' un des problèmes les plus complexes et les plus transdisciplinaires de la science contemporaine. Elle se situe à l' interface de la chimie, de la physique, de la biologie et, plus largement, de la philosophie des sciences. Malgré des décennies de recherches expérimentales et théoriques, aucun consensus n' a

émergé quant aux mécanismes fondamentaux ayant permis le passage de la matière inerte à des systèmes vivants capables de métabolisme, de reproduction et d'évolution.

Les approches dominantes reposent traditionnellement sur une vision moléculariste de l'origine de la vie. Selon ce paradigme, la vie serait apparue à la suite de l'assemblage progressif de molécules organiques de plus en plus complexes, jusqu'à l'émergence de systèmes auto-réplicatifs, tels que l'ARN ou des précurseurs de celui-ci. Bien que ces modèles aient permis de mieux comprendre certaines étapes chimiques possibles dans un environnement prébiotique, ils laissent ouverte une question centrale : comment l'organisation, la cohérence et la stabilité des systèmes vivants ont-elles pu émerger spontanément dans un univers gouverné par l'augmentation de l'entropie ?

Un point commun à l'ensemble des scénarios proposés est la présence quasi systématique de l'eau. Celle-ci est généralement considérée comme un simple milieu réactionnel, un solvant permettant la diffusion et les réactions entre les molécules organiques. Pourtant, cette vision réductrice ne rend pas justice aux propriétés physiques exceptionnelles de l'eau, ni à son rôle omniprésent dans tous les processus biologiques connus.

L'eau possède des caractéristiques thermodynamiques, structurales et dynamiques uniques. Elle est capable de former des réseaux étendus de liaisons hydrogène, de présenter des comportements collectifs et de répondre de manière non linéaire à des perturbations énergétiques. Ces propriétés suggèrent que l'eau pourrait jouer un rôle actif dans l'organisation de la matière, bien au-delà de celui d'un simple support passif.

Dans cet article, nous proposons de reconsidérer la question de l'origine de la vie en adoptant un point de vue fondamentalement différent : et si la vie n'était pas apparue dans l'eau, mais à partir de l'eau elle-même ? Cette hypothèse conduit à envisager la vie comme une propriété émergente de systèmes aqueux soumis à des flux d'énergie et d'information, plutôt que comme le résultat fortuit de réactions chimiques isolées.

En mobilisant des concepts issus de la thermodynamique hors équilibre, de la physique statistique et de la mécanique quantique, nous montrons que l'eau peut supporter des états cohérents capables de stocker, de traiter et de transmettre de l'information. Ces états pourraient avoir fourni le cadre physique nécessaire à l'émergence progressive des biomolécules et des premières formes de métabolisme.

Ainsi, plutôt que de chercher l'origine de la vie exclusivement dans la chimie organique, il devient possible d'envisager une approche plus globale, dans laquelle l'eau constitue le substrat informationnel et dynamique primordial, à partir duquel les structures biologiques se sont progressivement stabilisées.

L' eau : un acteur physique fondamental

Dans la majorité des modèles classiques de l' origine de la vie, l' eau est considérée comme un simple environnement chimique, un solvant nécessaire aux réactions moléculaires. Cette conception, héritée d' une approche réductionniste de la chimie, occulte toutefois le fait que l' eau possède des propriétés physiques remarquables qui la distinguent profondément des autres liquides.

L' eau est un système fortement corrélé, structuré par un réseau dynamique de liaisons hydrogène. Ces liaisons ne sont ni fixes ni aléatoires : elles se forment et se rompent continuellement, donnant lieu à une organisation collective capable de s' adapter aux contraintes énergétiques et environnementales. Cette dynamique confère à l' eau une capacité singulière à absorber, stocker et redistribuer l' énergie.

Du point de vue thermodynamique, l' eau présente un ensemble d' anomalies bien connues, telles que sa densité maximale à 4 ° C, sa chaleur spécifique élevée ou encore son comportement atypique en phase liquide. Ces propriétés jouent un rôle essentiel dans la stabilité des environnements propices à la vie, mais elles témoignent surtout d' un ordre interne qui ne peut être compris à partir d' une description purement locale ou moléculaire.

Lorsqu' elle est soumise à des flux d' énergie — qu' ils soient thermiques, électromagnétiques ou chimiques — l' eau peut développer des structures à grande échelle, caractérisées par une cohérence spatiale et temporelle. Ces structures émergentes ne relèvent pas d' un simple hasard statistique, mais résultent de processus d' auto-organisation propres aux systèmes hors équilibre.

Dans ce cadre, l' eau apparaît comme un milieu capable de soutenir des états cohérents, dans lesquels les degrés de liberté individuels des molécules sont partiellement synchronisés. Une telle synchronisation permet la réduction locale de l' entropie, compensée par une dissipation accrue vers l' environnement, conformément aux principes de la thermodynamique hors équilibre.

Cette capacité de l' eau à maintenir des états ordonnés loin de l' équilibre ouvre une perspective nouvelle sur l' origine de la vie. Elle suggère que l' organisation biologique pourrait émerger naturellement de la dynamique collective de l' eau, sans nécessiter, dans un premier temps, la présence de macromolécules complexes. Les biomolécules pourraient ainsi être vues comme des produits tardifs, sélectionnés et stabilisés par un milieu aqueux déjà structuré.

En replaçant l' eau au centre du processus, il devient possible de comprendre l' origine de la vie non comme un événement ponctuel et improbable, mais comme une transition physique progressive, rendue possible par les propriétés intrinsèques de l' eau et par les flux d' énergie qui traversent les systèmes naturels.

Eau, entropie et information

L' un des obstacles conceptuels majeurs à la compréhension de l' origine de la vie réside dans la relation apparente entre organisation biologique et entropie. La vie se caractérise par un haut degré d' ordre, de structuration et de cohérence, alors que la seconde loi de la thermodynamique stipule que l' entropie totale d' un système isolé ne peut qu' augmenter. Cette tension apparente a longtemps conduit à considérer la vie comme une exception improbable aux lois physiques fondamentales.

Toutefois, cette contradiction disparaît lorsque l' on considère les systèmes ouverts, soumis à des flux continus d' énergie et de matière. Dans un tel contexte, une diminution locale de l' entropie est non seulement possible, mais attendue, à condition qu' elle soit compensée par une augmentation de l' entropie de l' environnement. Les systèmes vivants ne violent donc pas la seconde loi ; ils en sont au contraire une expression particulière dans le cadre de la thermodynamique hors équilibre.

L' eau joue un rôle central dans ce processus. En tant que milieu capable de soutenir des interactions collectives à grande échelle, elle agit comme un support physique de l' information. Contrairement à une vision strictement abstraite de l' information, celle-ci est ici intrinsèquement liée à l' état physique du système aqueux. Les arrangements spatiaux et temporels des molécules d' eau constituent des porteurs d' information, susceptibles d' influencer les dynamiques chimiques et biologiques ultérieures.

Dans cette perspective, l' information n' est pas un concept extérieur à la matière, mais une propriété émergente de systèmes physiques organisés. L' eau, par sa capacité à former des réseaux cohérents, permet l' apparition de corrélations à longue portée, essentielles à la stabilisation de structures complexes. Ces corrélations réduisent le nombre de micro-états accessibles au système, ce qui correspond, d' un point de vue thermodynamique, à une réduction locale de l' entropie.

Il est important de souligner que cette réduction de l' entropie ne se fait pas au détriment de la loi fondamentale, mais grâce à une dissipation accrue de l' énergie vers l' extérieur. L' eau agit ainsi comme un convertisseur entropique, transformant des flux d' énergie désordonnés en structures ordonnées, tout en rejetant l' excès d' entropie dans l' environnement.

Cette capacité confère à l'eau un rôle de médiateur entre énergie, matière et information. Elle permet de comprendre comment des structures organisées peuvent émerger spontanément dans des conditions prébiotiques, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer des mécanismes hautement improbables ou des interventions extérieures. La vie apparaît alors comme le prolongement naturel de processus physiques universels, opérant dans des systèmes aqueux soumis à des flux d'énergie adéquats.

Dans ce cadre conceptuel, les biomolécules — acides nucléiques, protéines, lipides — ne sont plus considérées comme les initiateurs de l'organisation, mais comme des éléments sélectionnés et stabilisés par un environnement aqueux déjà porteur d'information et de cohérence. Leur rôle principal serait de figer, d'amplifier et de transmettre des dynamiques préexistantes, issues de la structuration collective de l'eau.

Cohérence, quantification et dynamique collective de l'eau

La compréhension du rôle fondamental de l'eau dans l'origine de la vie nécessite d'aller au-delà des descriptions classiques issues de la chimie et de la thermodynamique à l'équilibre. En particulier, il devient indispensable de prendre en compte les effets collectifs et les phénomènes de cohérence qui émergent lorsque l'eau est considérée comme un système quantique macroscopique.

Dans les systèmes constitués d'un grand nombre de particules en interaction, la mécanique quantique ne se limite pas à décrire le comportement individuel des constituants. Elle permet également l'apparition d'états collectifs, dans lesquels un grand nombre de degrés de liberté se comportent de manière corrélée. Ces états cohérents sont bien connus dans d'autres domaines de la physique, tels que la supraconductivité, la superfluidité ou encore les condensats de Bose-Einstein.

Appliquée à l'eau liquide, cette approche conduit à considérer que certaines populations de molécules peuvent entrer dans des domaines cohérents, caractérisés par une phase commune et une dynamique collective. Dans ces domaines, les fluctuations individuelles sont partiellement supprimées au profit d'un comportement global plus stable et plus ordonné. Il en résulte une diminution effective du bruit thermique et une capacité accrue à maintenir des structures organisées.

La quantification joue ici un rôle essentiel. Les interactions entre les molécules d'eau et le champ électromagnétique peuvent conduire à la formation d'états liés collectifs, dans lesquels l'énergie est distribuée de manière non continue, mais selon des niveaux

discrets. Cette quantification favorise la stabilité des états cohérents et limite leur dispersion sous l'effet des perturbations thermiques.

Ces domaines cohérents ne sont ni statiques ni permanents. Ils émergent, évoluent et se dissipent en fonction des conditions environnementales, notamment des flux d'énergie et des contraintes imposées au système. Toutefois, tant qu'ils existent, ils confèrent à l'eau des propriétés physiques radicalement différentes de celles attendues pour un liquide désordonné.

Du point de vue de l'origine de la vie, l'existence de tels domaines cohérents est cruciale. Elle fournit un mécanisme physique permettant la concentration de l'énergie, la synchronisation des dynamiques et la transmission de l'information à des échelles spatiales et temporelles compatibles avec l'émergence de processus biologiques primitifs. Ces domaines pourraient avoir servi de matrices dynamiques, au sein desquelles les premières réactions métaboliques ont été sélectionnées et stabilisées.

Ainsi, la vie peut être envisagée comme une conséquence directe de la capacité de l'eau à former et à maintenir des états cohérents quantifiés, dans des conditions hors équilibre. Cette perspective relie de manière naturelle la physique quantique, la thermodynamique et la biologie, en proposant un cadre unifié pour comprendre l'émergence de la complexité vivante.

De la cohérence de l'eau à l'émergence des biomolécules

Si l'eau est capable de former des domaines cohérents porteurs d'information et d'organisation, se pose alors la question du rôle des biomolécules dans ce cadre théorique. Les approches classiques considèrent les biomolécules comme les acteurs principaux de l'origine de la vie, l'eau n'étant qu'un support réactionnel. Dans la perspective développée ici, cette hiérarchie se trouve inversée.

Les biomolécules apparaissent comme des structures secondaires, sélectionnées et stabilisées par un milieu aqueux déjà organisé. Autrement dit, ce ne sont pas les biomolécules qui imposent leur ordre à l'eau, mais l'eau cohérente qui crée les conditions physiques favorables à leur émergence, à leur persistance et à leur fonctionnalité.

Les domaines cohérents de l'eau peuvent agir comme des pièges énergétiques et informationnels, concentrant certaines espèces chimiques et favorisant des interactions spécifiques. Dans ces environnements structurés, les réactions chimiques ne se produisent plus de manière aléatoire, mais selon des trajectoires préférentielles, guidées par la dynamique collective du milieu aqueux.

Cette sélectivité physique pourrait expliquer l'apparition progressive de molécules capables de stocker et de transmettre de l'information, telles que les acides nucléiques, ainsi que de molécules catalytiques, comme les protéines primitives. Ces entités ne seraient pas apparues par pur hasard, mais comme des réponses adaptatives à un environnement aqueux déjà porteur de contraintes et d'opportunités spécifiques.

En se liant à l'eau cohérente, les biomolécules contribuent en retour à stabiliser les domaines cohérents, créant ainsi une boucle de rétroaction positive entre le milieu aqueux et les structures moléculaires émergentes. Cette coévolution progressive permet le passage d'une organisation purement physique à une organisation biochimique de plus en plus sophistiquée.

Dans ce contexte, l'origine de la vie ne correspond plus à un événement unique et abrupt, mais à une transition graduelle, au cours de laquelle l'eau, l'énergie et l'information s'articulent pour produire des systèmes de plus en plus complexes. Les premières entités vivantes peuvent alors être vues comme des prolongements naturels de la dynamique de l'eau, plutôt que comme des anomalies statistiques dans un univers dominé par le désordre.

Cette vision permet également de mieux comprendre la robustesse et l'universalité de la vie. Si les principes physiques mis en jeu sont généraux, il devient plausible que des processus similaires puissent se produire ailleurs dans l'Univers, dès lors que des conditions permettant l'existence d'eau liquide et de flux d'énergie adéquats sont réunies.

Discussion générale et implications pour l'origine de la vie

Les développements présentés dans cet article conduisent à une relecture profonde des scénarios classiques de l'origine de la vie. En plaçant l'eau au centre du processus, non plus comme un simple solvant mais comme un acteur physique fondamental, il devient possible de dépasser certaines limites conceptuelles des approches purement chimico-biologiques.

L'un des apports majeurs de ce cadre théorique réside dans sa capacité à expliquer l'émergence de l'ordre biologique sans recourir à des événements hautement improbables. La structuration de l'eau en domaines cohérents, soutenue par des flux d'énergie et décrite par la thermodynamique hors équilibre, fournit un mécanisme naturel de réduction locale de l'entropie. Cette réduction n'est ni exceptionnelle ni fragile : elle est une conséquence attendue de la dynamique des systèmes ouverts.

Ce point de vue permet également de clarifier le rôle de l'information dans les systèmes vivants. L'information n'apparaît plus comme un concept abstrait introduit a posteriori,

mais comme une propriété physique intrinsèque de systèmes aqueux organisés. Les corrélations à longue portée, rendues possibles par la cohérence de l'eau, constituent un support matériel pour le stockage et la transmission de l'information, bien avant l'apparition des macromolécules biologiques.

Dans cette perspective, les biomolécules ne sont pas les fondations de la vie, mais des structures fonctionnelles sélectionnées au sein d'un milieu déjà porteur d'organisation. Leur efficacité biologique découle de leur capacité à interagir avec l'eau cohérente, à stabiliser certains états et à amplifier des dynamiques préexistantes. Cette inversion du point de vue traditionnel permet de mieux comprendre pourquoi la vie est indissociable de l'eau et pourquoi aucune forme de vie connue ne peut s'en passer.

Les implications de ce modèle dépassent largement la question de l'origine de la vie sur Terre. Si les principes physiques invoqués sont universels, alors l'émergence de systèmes vivants pourrait être une conséquence relativement commune de la présence d'eau liquide soumise à des flux d'énergie appropriés. Cela ouvre des perspectives nouvelles pour l'astrobiologie et pour la recherche de formes de vie ailleurs dans l'Univers.

Enfin, ce cadre théorique invite à repenser certaines frontières disciplinaires. En articulant de manière cohérente la physique quantique, la thermodynamique et la biologie, il propose une vision intégrée de la complexité vivante. L'origine de la vie apparaît alors non comme une énigme isolée, mais comme un chapitre particulier de la physique des systèmes complexes.

Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une approche alternative de la question de l'origine de la vie, fondée sur une revalorisation du rôle physique de l'eau. Loin d'être un simple solvant passif, l'eau apparaît comme un système complexe capable de soutenir des dynamiques collectives, des états cohérents et des processus d'auto-organisation, essentiels à l'émergence de structures vivantes.

En mobilisant des concepts issus de la thermodynamique hors équilibre, de la physique statistique et de la mécanique quantique, nous avons montré que l'eau peut constituer un substrat physique pour l'information, permettant une réduction locale de l'entropie compatible avec les lois fondamentales de la physique. Dans ce cadre, la vie n'est plus perçue comme une anomalie ou un événement hautement improbable, mais comme une propriété émergente de systèmes aqueux soumis à des flux d'énergie et d'information appropriés.

Cette perspective conduit à une inversion du paradigme traditionnel de l'origine de la vie. Les biomolécules, souvent considérées comme les éléments fondateurs du vivant, apparaissent ici comme des structures secondaires, sélectionnées et stabilisées par un environnement aqueux déjà organisé. Leur rôle principal serait de fixer, de transmettre et d'amplifier des dynamiques préexistantes, portées par la cohérence de l'eau.

Au-delà de la question de l'origine de la vie sur Terre, ce cadre théorique offre des implications plus larges pour la compréhension de la complexité biologique et pour la recherche de formes de vie ailleurs dans l'Univers. Si les propriétés mises en avant sont universelles, alors la vie pourrait émerger chaque fois que des conditions permettant l'existence d'eau liquide et de flux d'énergie soutenus sont réunies.

Enfin, cette approche souligne la nécessité d'une vision véritablement interdisciplinaire pour aborder les grandes questions du vivant. En reliant de manière cohérente la physique, la chimie et la biologie, elle ouvre la voie à une compréhension plus unifiée de la matière vivante et de ses origines.

Références

Henry, M. (2024). Water and the Origin of Life. Water, 16, 2854.

- [L'eau et l'origine de la vie]. <https://doi.org/10.xxxx/water162854>
- Prigogine, I. (1980). From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences. Freeman, San Francisco.
- [De l'être au devenir : temps et complexité dans les sciences physiques].
- Schrödinger, E. (1944). What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge University Press.
- [Qu'est-ce que la vie ? L'aspect physique de la cellule vivante].
- Del Giudice, E.; Preparata, G. (1998). Coherent Dynamics in Water as a Possible Explanation of Biological Membrane Formation. Journal of Biological Physics.

[Dynamique cohérente de l'eau comme explication possible de la formation des membranes biologiques].