

Définir Lyfe dans l'univers : de trois fonctions privilégiées à quatre piliers

par Stuart Bartlett 1,2, * et Michael L. Wong 3,4

(attention, les traductions en français ont été effectuées à l'aide de robots automatiques et webeux, à vous d'interpréter le résultat avec prudence en comparant avec l'original, la machine n'est pas parfaite...)

¹ Division des sciences géologiques et planétaires, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, États-Unis

² Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japon

³ Département d'astronomie et programme d'astrobiologie, Université de Washington, Seattle, WA 98195, États-Unis

⁴ NASA Nexus for Exoplanet System Science's Virtual Planetary Laboratory, University of Washington, Seattle, WA 98195, États-Unis

* Auteur à qui la correspondance doit être adressée.

Vie **2020**, 10 (4), 42 ; <https://doi.org/10.3390/life10040042>

Reçu : 23 mars 2020/ Révisé : 12 avril 2020/ Accepté : 13 avril 2020/ Publié : 16 avril 2020

(Cet article fait partie du numéro spécial *Frontiers of Astrobiology*)

Abstrait

Motivés par la nécessité de broser un tableau plus général de ce qu'est – et pourrait être – la vie par rapport au reste des phénomènes de l'univers, nous proposons un nouveau vocabulaire pour la recherche astrobiologique. Lyfe est défini comme tout système qui accomplit les quatre processus de l'état vivant, à savoir : la dissipation, l'autocatalyse, l'homéostasie et l'apprentissage. La vie est définie comme l'instance de lyfe que nous connaissons sur Terre, celle qui utilise une boîte à outils moléculaire organométallique spécifique pour enregistrer des informations sur son environnement et atteindre un ordre dynamique en dissipant certains déséquilibres planétaires. Ce nouveau système de classification permet à la communauté astrobiologique de définir plus clairement les questions qui propulsent sa recherche – par exemple, si elle développe un récit historique pour expliquer l'origine de la vie (sur Terre), ou un récit universel pour l'émergence de lyfe, ou s'ils recherchent des signes de vie spécifiquement, ou s'ils sont en général lyfe à travers l'univers. Si le concept de « la vie telle que nous ne la connaissons pas » n'est pas nouveau, les quatre piliers du lyfe offrent une nouvelle perspective sur l'état de vie qui est indifférente aux composants particuliers qui pourraient le produire.

Mots-clés : définition de la vie ; origine de la vie ; astrobiologie ; mécanotrophe

1. Introduction : le besoin d'une nouvelle définition de la vie

Nous soutenons que la plupart des définitions standard de la vie sont restrictives et peuvent aveugler les futures recherches astrobiologiques de la vie qui se cache à la vue de tous. La définition actuelle de la vie de la NASA est « un système chimique auto-entretenu capable d'évolution darwinienne ». Bien que ce soit une description juste de la vie qui est présente en ce moment sur la planète Terre, rechercher dans l'univers des phénomènes qui correspondent à cette définition est similaire à jouer aux fléchettes en se concentrant uniquement sur la cible. Pour le joueur de fléchettes non initié, il y a trois problèmes à viser uniquement pour la cible dans un jeu de fléchettes : (1) Il est difficile de frapper car il occupe une toute petite zone du jeu de fléchettes ; (2) Ce n'est pas la région de score la plus élevée sur le plateau (triple 60 pour 180 est) ; (3) Il existe d'autres régions qui obtiennent des scores élevés qui devraient également être considérées comme des cibles. Par conséquent, dans la recherche de la vie extraterrestre, nous devons considérer que : (1) La vie exactement telle que nous la connaissons peut être rare dans l'univers, mais une classe plus générale de phénomènes avec des caractéristiques semblables à la vie peut être beaucoup plus courante ; (2) Il peut y avoir des systèmes, encore à découvrir ou même à imaginer, qui satisfont avec plus de succès aux critères de vie que même la vie terrestre ; (3) En relâchant nos contraintes sur la définition de la vie, nous nous ouvrons à l'exploration de tout l'espace des paramètres des interactions physiques et chimiques qui peuvent créer la vie qui satisfont mieux aux critères de vie que même la vie terrestre ; (3) En relâchant nos contraintes sur la définition de la vie, nous nous ouvrons à l'exploration de tout l'espace des paramètres des interactions physiques et chimiques qui peuvent créer la vie.

Nous sommes également motivés par la nature souvent passionnée du champ des origines de la vie, qui s'est ramifié en divers camps, chacun cherchant à décrire son propre scénario « un vrai » pour l'origine de la vie. Nous postulons que la plupart des comportements litigieux dans le domaine découlent de différences d'hypothèses sur ce qui constitue la vie et donc sur le début de la vie. Comme [1] l'a écrit : « Sans définition de la vie, le problème de la façon dont la vie a commencé n'est pas bien posé ». En redéfinissant le vocabulaire de l'état de vie, nous espérons engendrer une meilleure compréhension mutuelle et une meilleure communication entre les différentes communautés engagées dans la recherche sur les origines de la vie.

Le reste de la section 1 passe en revue quelques-uns des principaux problèmes menant à la discorde dans le domaine des origines de la vie qui nous ont obligés à chercher une définition plus générale de la vie. Dans la section 2, nous présentons notre nouvelle définition expansive de la vie – que nous appelons lyfe (prononcé « loif ») – et discutons de la manière dont une telle définition pourrait engendrer de nouvelles perspectives sur la recherche sur les origines de la vie. Enfin, dans la section 3, nous faisons les premiers pas vers l'imagination de phénomènes qui pourraient être qualifiés de lyfe.

1.1. Des fonctions privilégiées à l'origine de la vie

De nombreuses théories des origines de la vie se concentrent sur l'explication de l'émergence d'une « fonction privilégiée » – un aspect spécifique de la biologie terrestre moderne qui est supposée avoir été présente à son émergence. Souvent, ces fonctions privilégiées sont aussi implicitement supposées être plus fondamentales à la vie en ce qu'une fois la fonction privilégiée établie, le reste des fonctions de la vie devrait émerger naturellement [2]. Une autre façon de visualiser les fonctions privilégiées est l'idée de quantités conservées, essentielles en physique et en ingénierie. Les chercheurs d'Origins essaient souvent de cerner les aspects fonctionnels ou matériels de la vie qui, selon eux, doivent être présents et conservés dès le départ. Ces caractéristiques sont si importantes que sans elles, la vie ne mérite plus d'être appelée vie (selon une telle approche). Un exemple est le soi-disant « principe de conservation de la chimie » comme invoqué par [3]. Leur argument se résume ainsi : « Les traits chimiques des organismes sont plus conservateurs que l'environnement changeant et conservent donc des informations sur les conditions environnementales anciennes » [4]. Selon ce principe, une recherche du contexte des origines de la vie est essentiellement une recherche d'environnements prébiotiques qui correspondent le plus possible aux conditions cellulaires.

Des exemples de fonctions privilégiées comprennent la réplication d'ARN pilotée par modèle, des ensembles de réactions formant des métabolismes précoces et la compartimentation par les membranes lipidiques (voir figure 1). Cela conduit aux différentes théories « X-first » pour l'émergence de la vie. Par exemple, dans la théorie dite de « l'ARN fort d'abord », « l'évolution darwinienne serait nécessaire pour que la matière non intelligente s'auto-organise pour produire des comportements que nous attribuons à la biologie » [5], et l'apparition du darwinisme serait se produisent avec la formation abiotique de polymères d'ARN à longue chaîne. Inversement, dans de nombreuses théories du « métabolisme d'abord », la vie est considérée « comme d'autres systèmes auto-organiseurs de l'Univers, comme le résultat inévitable de déséquilibres particuliers » [6]. Dans cette optique, la vie sert d'abord et avant tout à dissiper ces déséquilibres spécifiques, en utilisant des moteurs de conversion de déséquilibres pour maintenir son propre état de faible entropie [7, 8]. De plus, dans les théories du « compartiment d'abord », « la compartimentation des réactions biochimiques primitives au sein des micro-gouttelettes d'eau liées à la membrane est considérée comme une étape essentielle dans l'origine de la vie » [9]. Cette organisation spatiale et cet encombrement moléculaire sont souvent médiés par des vésicules lipidiques auto-assemblées, conférant une fonctionnalité accrue à d'autres biomolécules [10, 11]. La focalisation sur les fonctions privilégiées conduit ces théories vers différents environnements favorisant l'émergence de la vie, source de grandes tensions au sein de la communauté. Des expériences en laboratoire indiquent que les environnements de surface – alimentés par le rayonnement UV, exposés à des conditions atmosphériques réductrices (peut-être transitoires) et / ou fournis avec les molécules pertinentes provenant de sources exogènes – sont idéaux pour la synthèse d'ARN, par exemple [12]. D'autre part, les événements hydrothermaux alcalins de haute mer semblent être les centres de focalisation pour les déséquilibres redox et pH qui pourraient conduire à l'apparition de voies proto-métaboliques, par exemple, [6]. Cependant, les piscines géothermiques sont favorisées pour l'assemblage membranaire spontané des vésicules lipidiques en raison, en partie, de leurs faibles concentrations de cations bivalents [13].

Toute théorie cherchant à expliquer une fonction privilégiée de la biologie terrestre contient l'hypothèse implicite que la fonction privilégiée était présente à l'émergence de la vie et qu'une telle fonction est fondamentale à la vie. Cependant, étant donné le manque inhérent de registres fossiles ou géologiques, il y a peu ou pas de preuves que l'une de ces fonctions était réellement présente au début de la vie. Sur la base d'études phylogénétiques, nos

connaissances sur les formes de vie les plus anciennes de la Terre s'arrêtent au dernier ancêtre commun universel (LUCA). De telles études ont mis en lumière la nature de LUCA – probablement un être cellulaire avec un métabolisme chimiosmotique dont la génétique était écrite en ADN/ARN. Cependant, LUCA n'était presque certainement pas la forme de vie originale sur Terre (voir, par exemple, [14]). En outre, les reconstructions phylogénétiques de LUCA sont intrinsèquement problématiques et potentiellement peu fiables en raison des limites des techniques bioinformatiques.

1.2. L'horizon des événements dans la recherche sur les origines de la vie

Il existe un « horizon des événements », pour s'approprier un terme d'astrophysique, dans les études sur les origines de la vie (figure 2). Les approches « descendantes », telles que la phylogénétique moléculaire, utilisent des indices dans la vie existante pour retracer l'histoire de la vie jusqu'à son origine. Celles-ci ne peuvent nous ramener que jusqu'à LUCA. Les approches « bottom-up », qui visent à simuler la synthèse de molécules prébiotiques et / ou l'apparition de structures et de fonctions proto-vivantes, pourraient un jour aboutir à une abiogénèse. Cependant, cette « origine éprouvette » ne sera pas LUCA.

De plus, les approches descendantes sont limitées dans leur compréhension de l'origine de la vie car l'arbre de vie que nous voyons aujourd'hui peut être satisfait par de nombreuses histoires théoriques (Figure 3). Ces histoires peuvent impliquer de multiples génèses qui ne convergent jamais, aboutissant à des lignées complètement différentes qui disparaissent ou sont toujours présentes en tant que « biosphère de l'ombre » [15]. Les récits plausibles sur les origines de la vie peuvent également impliquer un transfert horizontal de gènes entre différentes lignées, peut-être rampant dans un ribofilm protobiologique [16], de sorte que LUCA est en fait une pluralité de formes de vie : Last Universal Common Ancestral Set (LUCAS) [17]. Si tel est le cas, alors l'« arbre » de la vie peut être une métaphore plus appropriée qu'on ne l'imaginait initialement : s'il se ramifie vers le haut dans la diversité des êtres qui ont habité notre planète après LUCA (S), il rayonne également vers le bas dans un enchevêtrement réseau racine des premières expériences vivantes dont nous ne serons jamais au courant.

1.3. Récits d'origine historique, synthétique ou universel

Il y a un problème sous-jacent plus profond : les chercheurs sur les origines de la vie différentes peuvent ne pas chercher des explications analogues. Réf. [18] ont défini trois catégories distinctes de récits d'origine : historique, synthétique et universel (figure 4).

Les récits d'origine historique traitent de l'origine de la vie sur Terre, contraints par notre connaissance des premiers environnements de la Terre et informés par ce que nous observons dans les produits de ce processus : LUCA et l'arbre de vie moderne. Toutes les théories des fonctions privilégiées (section 1.1) sont des récits historiques.

Les récits d'origine synthétique décrivent des expériences où les chercheurs dirigent la création d'une nouvelle vie en laboratoire. De tels récits peuvent traiter de la transition entre la non-vie et la vie, ou ils peuvent créer de nouvelles formes de vie à partir de formes de vie préexistantes, via une évolution dirigée [20] ou un ensemble de bases artificiellement élargies pour encoder l'information [21]. Comme discuté précédemment, les expériences d'abiogénèse artificielle peuvent être adaptées à des récits historiques approximatifs, mais la prudence est de mise en confondant les deux, en raison de la nature « laboratoire propre » des expériences artificielles et de la grande incertitude sur les environnements prébiotiques.

Les récits universels décrivent les étapes nécessaires à l'abiogénèse n'importe où. Ils sont

relativement libres des détails de la Terre primitive, de la trajectoire particulière de la biosphère sur notre planète ou de la nature chimique de la vie telle que nous la connaissons – tous ne sont qu'une seule expression des phénomènes qui résultent d'un récit universel. Il n'est pas encore certain que des récits universels existent, mais quelques tentatives ont été faites pour expliquer les fonctions de la vie dans une perspective abstraite et fondamentale de la physique, par exemple [22, 23, 24, 25].

Par conséquent, les différents récits qui ont été développés dans la recherche sur les origines de la vie n'abordent pas une seule question scientifique mais plusieurs. Une question communément abordée est l'origine de la vie sur Terre, qui s'étend naturellement à la genèse de la vie terrestre sur d'autres mondes. Cependant, il existe une question complètement distincte de l'origine des systèmes vivants, qu'ils soient terrestres ou non, dans des environnements extraterrestres. Une autre question encore est de savoir comment créer, de manière complètement synthétique, de nouvelles structures que l'on jugerait vivantes. Toutes les questions sur les origines de la vie – que ce soit pour expliquer l'origine du couplage chimiosmotique dans la vie terrestre, le contournement de la « catastrophe d'erreur » dans tout système de réplication basé sur un modèle, ou la création d'un ordre dynamique en général – sont valables, mais ils ne demandent pas nécessairement la même chose.

Ces buts et objectifs disparates peuvent faire en sorte que la communauté des origines de la vie souffre de confusion (là où il devrait y avoir une compréhension mutuelle), de friction (où il devrait y avoir un échange d'idées à l'amiable) ou d'apathie (où il devrait y avoir un réel intérêt pour progrès de chacun). Cet article introduit un nouveau vocabulaire et une nouvelle définition de la vie en réponse à ces préoccupations.

2. La définition de Lyfe

Nous cherchons à recadrer la définition de la vie d'une manière plus expansive tout en reconnaissant la nécessité de signifier le type spécifique de vie que représentent les formes terrestres. Ainsi, nous avons mis au point un nouveau terme : lyfe. Désormais, nous parlerons de la vie (telle que nous la connaissons) et de la lyfe (telle qu'elle pourrait être, au sens le plus général). Les deux désignations se distinguent comme suit :

- La vie représente la vie telle que nous la connaissons ; il utilise les déséquilibres spécifiques et les classes de composants de la vie terrestre. ***La vie est un réseau autocatalytique de produits chimiques organométalliques en solution aqueuse qui enregistre et traite les informations sur son environnement sous forme moléculaire et atteint un ordre dynamique en dissipant tout sous-ensemble des déséquilibres suivants : gradients redox, gradients chimiosmotiques, photons visibles/thermiques, etc.***
- Lyfe représente tout phénomène hypothétique dans l'univers qui accomplit les processus fondamentaux de l'état vivant, quels que soient les déséquilibres ou les composants qu'il exploite ou utilise. ***Lyfe est tout phénomène hypothétique qui maintient un état de faible entropie via des conversions de dissipation et de déséquilibre, utilise des réseaux autocatalytiques pour obtenir une croissance et une prolifération non linéaires, utilise des mécanismes de régulation homéostatiques pour maintenir la stabilité et atténuer les perturbations externes, et acquiert et traite des informations fonctionnelles sur son environnement.***

Le concept de « la vie telle que nous ne la connaissons pas » n'est pas nouveau. Cependant,

les définitions traditionnelles de la vie ont du mal à délimiter clairement les frontières entre « la vie telle que nous la connaissons » et « la vie telle que nous ne la connaissons pas ». En outre, de nombreuses définitions traditionnelles sont tout aussi floues en ce qui concerne le moment où « la vie telle que nous ne la connaissons pas » s'éloigne suffisamment de la « vie telle que nous la connaissons » pour ne plus être considérée comme la vie. Par exemple, selon la définition de la vie de la NASA (section 1), un système chimique auto-entretenu qui évolue d'une manière non darwinienne devrait-il être considéré comme « la vie telle que nous ne la connaissons pas » ou pas du tout vivant ?

Pour y remédier, nous avons développé nos critères de lyfe basés sur quatre processus fondamentaux. Nous sommes d'accord avec le sentiment général de [26] que « la vie est un verbe, pas un nom », une remarque basée sur l'idée que la vie opère en dissipant les gradients redox planétaires, en faisant la navette des électrons et en transformant ce déséquilibre en d'autres configurations dynamiques [27]. Alors que la dissipation de l'énergie libre est certainement le premier aspect nécessaire de la vie, nous soutenons qu'elle doit être accompagnée de trois autres processus – autocatalyse, homéostasie et apprentissage – pour former une description suffisante de l'état de vie.

En d'autres termes, nous définissons lyfe comme tout système physique qui présente les quatre processus décrits ci-dessous. (De plus, la vie remplit chacun de ces éléments via les mécanismes spécifiques décrits en italique.)

- **Dissipation** – La lyfe ne peut pas exister à l'équilibre. La deuxième loi de la thermodynamique, en présence de mécanismes de transduction d'énergie libre, permet le couplage des processus exergoniques aux configurations endergoniques et organisées de lyfe.

En utilisant un ensemble de machines moléculaires à l'échelle nanométrique, la vie dissipe les déséquilibres chimiques externes et / ou convertit les photons à faible entropie en chaleur résiduelle à haute entropie, traduisant ces déséquilibres en d'autres déséquilibres (p. Ex. [$A TP$]/[$A D P$]). Pour effectuer un travail utile, la vie se convertit $Un TP \rightarrow A D P + P_{je}$, qui dissipe le [$A TP$]/[$A D P$] déséquilibre [28, 29].
- **Autocatalyse** – Capacité d'un système à présenter une croissance exponentielle de mesures représentatives de la taille ou de la population dans des conditions idéales. La propriété de l'autocatalyse peut apparaître sous différentes formes – y compris l'auto-catalyse, la catalyse croisée et l'autocatalyse en réseau – tant que l'effet conduit à une croissance exponentielle d'une métrique appropriée dans des conditions idéales. Un système cultivé de micro-organismes présente une croissance de la population autocatalytique due à la réplication cellulaire dans des conditions abondantes en ressources.
- **Homéostasie** – La capacité d'un système à maintenir des variables internes clés dans des plages de points de consigne idéaux. Dans un monde dynamique de perturbations, couplé à la croissance exponentielle décrite ci-dessus, un système lyving doit avoir les moyens de limiter la variation de ses systèmes internes lorsque les conditions externes changent.

La vie effectue l'homéostasie avec des réseaux de capteurs, de récepteurs et d'effecteurs. La substance sous régulation homéostatique (par exemple, les ions calcium) se lie généralement aux récepteurs et favorise la libération d'autres substances (par exemple, les hormones). Ces composés indicateurs stimulent ensuite

un mécanisme de réponse approprié pour ramener le niveau de substance dans la fenêtre souhaitée.

- **Apprentissage** – La capacité d'un système à enregistrer des informations sur son environnement externe et interne, à traiter ces informations et à effectuer des actions qui ont un effet positif sur sa probabilité de survie/prolifération. L'évolution darwinienne est un processus d'apprentissage biologique couramment cité (par exemple, [30, 31, 32]) parmi un ensemble beaucoup plus large de processus d'apprentissage que les systèmes vivants exécutent. Par exemple, il existe des exemples largement étudiés d'apprentissage biologique dans le domaine des neurosciences, permis par une gamme d'interactions neuronales et synaptiques (par exemple, [33, 34, 35]). En outre, il existe une liste croissante de systèmes d'apprentissage non neuronaux, y compris des réseaux de régulation génique [36, 37, 38], des réseaux d'interaction protéique [39, 40] et d'autres mécanismes épigénétiques (par exemple, [41, 42]). De nombreux exemples relèvent du cadre général de l'apprentissage associatif, qui a été présenté par des organismes non neuronaux tels que les moisissures visqueuses [43, 44]. Le darwinisme se mêle à ces autres processus d'apprentissage (et peut-être à d'autres formes encore inconnues) pour créer l'incroyable diversité et complexité de la biosphère. Par conséquent, « apprentissage » est un terme générique désignant cet ensemble de processus vaste et incomplètement compris.

Alors que ces quatre piliers de la lyfe sont dérivés des observations de la vie telle que nous la connaissons (après tout, la vie doit être un sous-ensemble de la lyfe), cette nouvelle définition est beaucoup plus vaste. Les quatre piliers constituent des exigences nécessaires et suffisantes de l'état de lyving tout en restant séparés des composants spécifiques qui composent le système. Ceci est illustré par le fait qu'il existe de nombreux systèmes qui exécutent les mêmes piliers mais qui ont une forme assez distincte (comme on le verra dans la section 2.1). Par conséquent, l'universalité du terme « lyfe » est dérivée de l'attente raisonnable qu'il puisse être appliqué à des systèmes encore non découverts (ou non inventés) qui existent à une myriade d'échelles à travers l'univers. Il peut même y avoir une classe de systèmes, encore inconnus et non décrits, qui remplissent les quatre piliers de la lyfe et un cinquième pilier également. De tels systèmes pourraient être considérés comme super-lyfe. Alors que la découverte de super-lyfe serait certainement un changement de paradigme, nous restons agnostiques quant à son existence pour le moment.

Nous profitons de ce moment pour souligner que notre définition de lyfe s'applique au niveau du système. Les piliers qui peuvent être attribués à un certain système dépendent spécifiquement des limites avec lesquelles nous utilisons pour désigner ce système. Par exemple, quels sont les piliers des virus ? Un seul virus isolé ne peut exécuter aucun des piliers. Les virus dans un système constitué de virus, de bactéries et de nutriments peuvent effectuer une autocatalyse et, par la coercition de leurs hôtes bactériens, se dissiper. Les virus dans une biosphère qui co-évolue avec son environnement provoqueront non seulement une autocatalyse et une dissipation, mais aussi un apprentissage (par l'évolution). Dans certains écosystèmes, les virus peuvent même conférer des attributs homéostatiques au système en introduisant des gènes métaboliques auxiliaires chez leurs hôtes et en recyclant la matière organique par lyse [45]. Ainsi, l'argument de savoir si un virus (ou un mulot, pour citer un autre paradoxe classique) est vivant devient hors de propos sous l'hypothèse que la « lyfeness » n'émerge pas au niveau moléculaire, cellulaire ou organismal. Comme d'autres l'ont suggéré [46, 47], nous soutenons que l'état de vie peut être mieux évalué à l'échelle

d'un écosystème ou d'une planète.

Comme exemple d'un pilier qui se manifeste au niveau du système, considérez l'apprentissage. On pourrait suggérer que le taux d'apprentissage s'applique naturellement aux espèces individuelles, mais à notre avis, il est interprété plus efficacement au niveau du système. En effet, chaque espèce évolue de concert avec d'autres espèces et son environnement abiotique. Par conséquent, lorsqu'une espèce apprend, d'autres espèces du système qui ne s'éteignent pas doivent également apprendre. Même si les humains font beaucoup d'apprentissage, d'autres espèces avec lesquelles nous partageons la planète apprennent à faire face aux conséquences et aux changements dus à notre apprentissage (par exemple, les espèces fongiques apprenant à dégrader les plastiques [48, 49, 50] ou les humains apprenant à contrer les agents pathogènes avec des antibiotiques, qui apprennent ensuite des stratégies de résistance [51]).

Nous notons également que l'importance et la pertinence des piliers sont distinctes de la facilité avec laquelle nous pouvons mesurer leur présence. Par exemple, la mesure de la propriété autocatalytique est susceptible d'être non triviale, à moins que les organismes/ systèmes en question ne puissent être cultivés. En particulier, les biosignatures d'exoplanètes distantes ne seront probablement pas suffisantes pour révéler la propriété autocatalytique, à moins que ces signatures ne soient collectées sur de très longues périodes. Par conséquent, pour ce pilier, il existe une différence entre la signification (cette propriété est fondamentale pour la définition de lyfe) et la facilité de mesure (elle peut ne pas être facile à évaluer). Cependant, parfois, la propriété autocatalytique se révèle de façon dramatique. Au moment où nous écrivons, le monde tel que nous le connaissons est bouleversé par une entité qui est à la fois considérée comme non vivante et ne comprend qu'un petit génome d'ARN et un petit ensemble de protéines. Chaque graphique qui a suivi le COVID-19 a montré une croissance exponentielle (autocatalyse) dans la première phase, démontrant comment de minuscules entités biologiques peuvent montrer des changements dynamiques non linéaires extrêmes en peu de temps.

2.1. Sublyfe

Au-delà de l'octroi d'une simple « check-list » de critères pour déterminer si oui ou non un système dynamique est un système dynamique, les quatre piliers nous aident également à replacer la lyfe dans le contexte d'autres phénomènes de l'univers. Nous définissons lyfe comme tout système qui exécute les quatre piliers et sublyfe comme tout système qui exécute certaines de ces fonctions, mais pas toutes (voir la figure 5).

Ci-dessous, nous listons des exemples de phénomènes qui correspondent aux régions numérotées de la figure 5.

1. **Dissipation uniquement** : diffusion thermique ou tout processus thermodynamiquement irréversible.
2. **Homéostasie uniquement** : un gaz idéal à l'équilibre. Un système isolé comme celui-ci se détend toujours à l'équilibre après une fluctuation interne ou externe.
3. **Dissipation et autocatalyse** : Le feu est un exemple fréquemment discuté de dissipation et d'autocatalyse. Il présente l'homéostasie de certaines variables (par exemple, la température de brûlure reste naturellement dans certaines limites), mais son incapacité à réguler complètement son comportement ou à apprendre de l'expérience le maintient relégué dans le monde non vivant. Un autre exemple

pertinent serait la croissance exponentielle des produits dans des réactions chimiques non linéaires (par exemple, la réaction de formose).

4. **Dissipation et homéostasie** : un oscillateur harmonique amorti convertit l'énergie cinétique en énergie thermique et revient toujours à sa position d'équilibre.
5. **Dissipation et apprentissage** : Un réseau neuronal artificiel est un exemple de système qui apprend et est dissipatif, mais qui ne présente pas nécessairement une croissance autocatalytique ou une homéostasie (par exemple, il ne maintient pas par lui-même la température de son propre matériel). On pourrait soutenir que leur utilité nous oblige à les produire à un rythme exponentiel, mais c'est une autre discussion.
6. **Dissipation, autocatalyse et apprentissage** : un système vivant qui s'efface par la tragédie des communs. Des exemples pourraient inclure des espèces envahissantes introduites sur une île qui détruisent leurs sources de nourriture si rapidement que les sources de nourriture sont endommagées au-delà de la récupération. On pourrait également suggérer le changement climatique anthropique comme autre exemple. Notez que ces cas dépendent essentiellement de l'endroit où l'on trace la limite du système (par exemple, pour inclure les humains ou non). En effet, cette forme de sublyfe ou de sous-vie est moins susceptible de se produire car si le système est capable d'apprendre, il pourrait en principe apprendre à se réguler de manière homéostatique (à moins qu'il ne puisse apprendre assez vite).
7. **Dissipation, homéostasie et apprentissage** : Un thermostat domestique « intelligent » qui surveille le comportement des occupants au fil du temps. Ce système ne peut pas se répliquer mais consomme de l'énergie gratuite, est capable d'apprentissage primitif et peut réguler sa température locale.
8. **Dissipation, autocatalyse et homéostasie** : points de réaction-diffusion thermique de Gray-Scott. Il a été démontré que certains modèles chimiques hors équilibre se développent de manière exponentielle et régulent également leur température locale [52, 53, 54, 55].
9. **Tous les quatre** : Lyfe (qui comprend la vie).

En ce qui concerne l'homéostasie dans les systèmes d'équilibre (région 2 sur la figure 5), il y a quelques subtilités délicates. Notre affirmation selon laquelle l'homéostasie se produit dans de tels systèmes isolés est simplement le fait qu'ils sont l'archétype de la stabilité (par définition). Cependant, le point est discuté des deux côtés. On pourrait soutenir qu'au moment où une fluctuation se produit, il y a une création momentanée d'énergie libre. Cependant, maîtriser une telle fluctuation exigerait des mesures et un traitement de l'information et, comme [56] a montré que pour accomplir cela dans un système de mémoire finie, il faut un effacement, ce qui ne peut pas être fait gratuitement et donc il n'y a en fait aucune énergie libre créée par les fluctuations d'un système d'équilibre. En général, toute perturbation d'un tel système disparaîtra en un temps fini lorsque le système se relâchera, nous autorisons donc l'homéostasie dans les systèmes d'équilibre (en revanche, les processus homéostatiques biologiques se produisent généralement par la consommation d'énergie libre).

Il existe plusieurs complexes macromoléculaires notables qui sont à la fois dissipatifs et

autocatalytiques mais pas nécessairement homéostatiques (régions 3 et 6 de la figure 5). Nous avons déjà discuté des virus ci-dessus, qui sont des complexes protéine-gène. Les amyloïdes (prions) sont essentiellement des virus conformationnels peptidiques, car ils se propagent via une dissémination pathologique de leur propre conformation sur des peptides existants (de conformation différente) [57, 58, 59]. Il existe également des gènes autocatalytiques, appelés transposons : « éléments transposables ou mobiles capables de prolifération parasitaire dans le génome de l'hôte » [60, 61, 62, 63]. Si nous considérons également les exemples biochimiques de micelles et de gouttelettes auto-répliquantes [64, 65], nous voyons que le sous-ensemble d'entités dissipatives et autocatalytiques mérite potentiellement une catégorie qui leur est propre. Nous notons qu'une telle catégorie comprendrait également des phénomènes à des niveaux supérieurs de la hiérarchie de la vie. Par exemple, les mèmes Internet sont clairement autocatalytiques et dissipatifs (étant donné les coûts énergétiques de calcul impliqués dans leur prolifération et leur communication). En outre, le système d'adhésion aux médias sociaux et de mèmes apprend collectivement, le plaçant dans la région 6 de la figure 5. De plus, par analogie avec les virus biologiques, les histoires de désinformation qui ne sont que faiblement corrélées à la réalité peuvent être amplifiées par divers effets au point de provoquer des impacts socio-politiques perturbateurs.

Dans cette sous-section, nous avons présenté une liste de phénomènes de plus en plus semblables à la lyfe, qui peuvent donner l'illusion que les origines de la lyfe procèdent toujours d'une manière simple et par étapes – c'est-à-dire qu'une structure dissipative prébiotique doit d'abord présenter une croissance exponentielle (peut-être), acquérir des capacités de régulation homéostatiques, puis enfin apprendre. À notre avis, il est également plausible que des systèmes relativement simples capables de traiter des informations rudimentaires puissent surgir de novo et que la capacité de ces systèmes à optimiser au fil du temps leurs traits dissipatifs, autocatalytiques et homéostatiques déterminera leur destin ultime (voir aussi [66]). Par exemple, la première vie sur Terre n'a presque certainement pas utilisé l'ADN pour stocker des informations ou des enzymes reconnaissables dans son réseau métabolique. Après d'innombrables tiraillements entre le hasard et la nécessité, l'évolution a produit les macromolécules familières que nous observons aujourd'hui. Dans la section 2.2, nous examinons comment le concept de lyfe peut changer nos approches des enquêtes sur les origines de la vie.

2.2. Lyfe et études sur les origines de la vie

En ce qui concerne les récits sur les origines de la vie discutés dans la section 1.1, lyfe englobe tout système qui remplit les quatre piliers décrits ci-dessus mais peut remplir les trois fonctions privilégiées classiques – réplication, métabolisme et compartimentation – en utilisant des composants non utilisés par la vie terrestre. L'idée que ces trois fonctions privilégiées définissent les conditions nécessaires et suffisantes à la vie a été explorée en grand détail théorique dans le champ de la vie artificielle et les concepts d'autopoïèse [67] et de « chimioton » [68].

La figure 6 montre un « cube » dont les sommets représentent des systèmes vivants avec différentes combinaisons de composants remplissant les trois fonctions privilégiées. À un sommet, la vie remplit ces fonctions privilégiées en utilisant les mécanismes de l'ARN/ADN, de la chimiosmose et des membranes lipidiques. Directement liés à la vie sont des exemples de lyfe qui partagent deux des trois mécanismes avec la vie. Deux étapes retirées de la vie sont des exemples de lyfe qui ne partagent qu'un seul des trois mécanismes avec la vie. De plus, au sommet opposé se trouve une forme de lyfe complètement différente de la vie terrestre.

Dans la figure 6, la vie est positionnée au sommet, car c'est l'objectif final de la plupart des hypothèses sur les origines de la vie. Dans les récits des origines de la vie qui impliquent une émergence par étapes, un système abiotique peut suivre une trajectoire qui se déplace d'un sommet à un autre, pour finalement arriver à la vie. Un exemple de ceci est illustré par la ligne violette en pointillé sur la figure 6, qui dénote un récit dans lequel la synthèse abiotique de l'ARN était la première étape du début de la vie, suivie d'une compartimentation à l'intérieur des membranes lipidiques, suivie de l'émergence d'un métabolisme chimiosmotique (par exemple, une hypothèse du monde de l'ARN). La façon dont ce diagramme est dessiné, les récits des origines de la vie seraient décrits par des trajectoires qui se déplacent « vers le haut » vers une convergence sur la composition biochimique générale de la vie telle que nous la connaissons.

Cependant, la forme « cube » de la figure 6 permet de faire pivoter facilement la figure dans l'œil de l'esprit de sorte que toute combinaison de mécanismes d'accomplissement aux trois fonctions privilégiées soit au sommet – peut-être comme le verrait une lyfeform. L'exécution de cette gymnastique mentale déclenche deux réalisations : (1) Les premières étapes de l'évolution de la vie peuvent avoir traversé des phases qui répondent pleinement aux critères de vie mais que nous identifierions comme lyfe ; (2) La recherche sur les origines de la vie devrait être ouverte à l'imagination et à la recherche de solutions de type lyfe aux trois fonctions privilégiées, car elles pourraient représenter des attracteurs que notre histoire biologique particulière n'a pas trouvée ou installée mais que la lyfe extraterrestre l'a fait. Les raisons plus détaillées pour lesquelles un système pourrait ou non traverser ces voies alternatives sont un vaste sujet de débat philosophique, au-delà de la portée du présent travail. Comme discuté dans la section 1.2, il est difficile de discerner les composants que la première forme de vie a utilisés sur la base de la machinerie hautement évoluée et complexe que la vie actuelle utilise. Dans l'esprit de la métaphore, nous aimerions souligner deux analogies qui sont utiles pour examiner ces questions. Le premier concerne les différences frappantes de composition et de structure entre les échafaudages et les produits finis. Le second est une analogie entre l'évolution biologique et l'histoire des locomotives (Figure 7).

Considérons un Shinkansen japonais de pointe (avec un « métabolisme » géré par des aimants supraconducteurs refroidis à l'hélium liquide, une « compartimentation » en matériaux composites tels que la fibre de carbone, des polymères et des alliages, et un « traitement de l'information » par un ordinateur système de guidage). En examinant le Shinkansen et en ne sachant rien d'autre, on pourrait déduire l'origine de la locomotive (un « métabolisme » exécuté en brûlant des combustibles fossiles pour faire bouillir de l'eau en vapeur, une « compartimentation » en fonte et en bois, et un « traitement de l'information » dans la forme d'un conducteur humain) ?

Étant donné que les composants du train peuvent être échangés en gros les uns contre les autres par des mains humaines, cette analogie peut sembler inappropriée en ce qui concerne la vision communément admise de l'évolution biologique en tant que processus graduel qui est entraîné par la sélection naturelle de minuscules modifications apportées aux éléments préexistants. Par exemple, dans les prétendues « hypothèses de l'oignon » concernant l'évolution de la vie [69, 70, 71], on suppose que la vie a commencé avec un noyau métabolique de réactions, autour duquel toutes les couches de complexité supplémentaires ont été posées.

Cependant, comme [72] l'a fait valoir, l'évolution de la vie a progressé à travers plusieurs « transitions majeures », dont beaucoup ont remodelé les capacités de traitement de l'information de la biologie. Il est tout à fait possible qu'au tout début de la vie, de telles transitions aient été endémiques, alors que les systèmes vivants primitifs se battaient pour la suprématie dans un paysage de fitness relativement plat, échangeant facilement des

composants via des transferts horizontaux d'informations et de matériel. Grâce à l'invention d'un mécanisme qui confère un plus grand avantage sélectif que le reste, cette machinerie – que ce soit le ribosome ou l'ATP synthase – deviendrait un attracteur stable dans la trajectoire évolutive de la biologie terrestre.

Dans son livre *Seven Clues to the Origin of Life*, réf. [73] compare la lignée de la vie à une longue corde faite de fibres superposées, dans laquelle aucune fibre ne s'étire du début à la fin. Il écrit : « Il existe alors une manière simple de mettre à jour la machinerie centrale de contrôle des organismes : par une prise de contrôle progressive. Une corde de fibres de chanvre à une extrémité pourrait progressivement se transformer en une corde contenant uniquement des fibres de sisal, en raison de la décoloration des fibres de chanvre et de la décoloration des fibres de sisal.

À notre avis, la vérité est probablement la plus proche d'un hybride de ces concepts de corde et d'oignon. L'émergence et les premiers stades de la vie sont probablement bien représentés par le concept de corde, avec différentes fibres se joignant, contribuant et quittant la corde. À partir de l'analogie de la « longue corde », nous suggérons que les « prises de contrôle » de Cairn-Smith auraient pu être soudaines plutôt que graduelles.

Cependant, une fois que l'évolution est tombée sur une fibre avec une efficacité ou une stabilité supérieure, cette caractéristique s'intégrerait rapidement et deviendrait un fil central de la corde de la vie, à jamais ancrée dans le noyau moléculaire de la biosphère. Les couches fonctionnelles qui s'accumulent autour du noyau du câble empêcheraient la perte des composants du noyau du câble. Il en résulte une histoire « semblable à l'oignon » qui peut être pelée grâce à des techniques modernes comme la phylogénie moléculaire et la métabolomique.

Notez que le « verrouillage » de la fonctionnalité se produit dans de nombreux systèmes complexes, y compris les systèmes économiques, technologiques et politiques. Les systèmes centraux qui s'interfaçent avec de nombreux sous-systèmes supérieurs deviennent si fonctionnellement liés aux divers modules que toute modification des systèmes centraux serait préjudiciable ou catastrophique pour l'ensemble cohérent. Cela peut être vrai même s'il existe des systèmes candidats supérieurs pour le noyau. Par exemple, de nombreuses villes européennes ont connu une croissance organique sur de longues périodes et ont maintenant une organisation quelque peu fractale. Comparez cela aux structures de grille beaucoup plus planifiées des villes américaines. Changer la structure fondamentale des villes européennes est désormais trop coûteux, de sorte qu'elles sont coincées avec leurs plans non conçus.

Il est également tout à fait plausible que les composants modernes des systèmes biochimiques de base remplissent à l'origine différentes fonctions. La biosphère regorge d'exemples d'une telle exaptation : le changement de fonction ou la cooptation d'un composant pour un autre usage. Les plumes accordaient à l'origine des capacités de chaleur et de signalisation avant de devenir des outils de vol ; les ailes étaient probablement utilisées pour augmenter la vitesse de course avant d'être utilisées pour le vol [74] ; le complexe oxydant de l'eau qui a inauguré l'ère de la photosynthèse oxygénée peut avoir été à l'origine utilisé pour l'oxydation du manganèse [75]. Pour d'autres exemples d'exaptation, voir l'ouvrage fondateur de [76] et ses citations.

Ainsi, nous devons veiller à ne pas assimiler sans équivoque l'universalité d'un certain composant dans la biosphère moderne à sa nécessité à l'émergence de la vie. Les longs brins de nucléotides n'étaient peut-être pas le premier système de traitement de l'information ; peut-être que les chaînes polyphosphates n'étaient pas la première « monnaie énergétique » de la vie ; peut-être que les premières membranes n'étaient pas composées d'hydrocarbures organiques. Les récits sur les origines de la vie qui recherchent des voies abiotiques pour synthétiser les « blocs de construction » spécifiques de la vie fonctionnent sous l'hypothèse

que ces molécules : (1) étaient impliquées dans les origines de la vie ; (2) ont rempli les mêmes fonctions à l'origine de la vie qu'aujourd'hui ; (3) présentait une fonctionnalité qui suit la forme, c'est-à-dire une fois que tous les matériaux de la vie ont été synthétisés et colocalisés, les capacités complexes de traitement de l'information de la vie émergeraient simplement (certains ont même décrit cette troisième hypothèse comme une forme de « vitalisme » moderne [77]). Cette approche étroite est nécessairement aveugle aux scénarios où la ressemblance avec la vie pourrait commencer à utiliser des composants alternatifs, comme cela aurait pu se produire non seulement sur Terre mais ailleurs dans l'univers. Alors, lorsque nous étudions l'émergence de la vie, que recherchons-nous sinon des biomolécules spécifiques ? La définition de lyfe offre une réponse : nous recherchons un système qui présente dissipation, autocatalyse, homéostasie et apprentissage. En basant les critères de lyfe sur des processus génériques – plutôt que sur des composants spécifiques qui effectuent des tâches spécifiques – nous ouvrons notre esprit à l'exploration de tous les systèmes qui affichent ces propriétés émergentes, en nous libérant des restrictions de recettes chimiques précises dont les prescriptions contiennent des hypothèses qui peuvent limiter nos explorations sur l'émergence de comportements réalistes dans l'univers.

3. Imaginer Lyfe

3.1. Exemples de composants alternatifs dans les hypothèses sur les origines de la vie

La communauté des origines de la vie a suggéré de nombreuses hypothèses qui impliquent une émergence par étapes à travers des phases de type lyfe. En utilisant notre classification, ces systèmes émergents pourraient être classés comme lyfe ou sublyfe car ils utilisent des composants radicalement différents de ceux de la vie actuelle pour atteindre un ou plusieurs des quatre piliers de la lyfe. Cette section décrit quelques exemples saillants d'hypothèses d'origine qui utilisent des composants alternatifs à l'origine de la vie.

Certains auteurs ont émis l'hypothèse que les premiers systèmes métaboliques pourraient avoir été pilotés par le thioester [70] (notez également les préoccupations soulevées par [78]), plutôt que par le phosphate, en raison de l'inaccessibilité du phosphate inorganique sur la Terre primitive [79] (notez également les opinions contradictoires [80]). Le phosphore est un élément clé de la biologie moderne ; il se trouve dans l'ATP, la monnaie énergétique universelle de la vie, des cofacteurs métaboliques comme le NADH et des molécules de stockage d'informations comme l'ADN et l'ARN. Cependant, réf. [81] ont identifié un métabolisme plausible sans phosphate en utilisant une approche de biologie systémique. Au sein de la biosphère, il existe un métabolisme indépendant du phosphate qui dépend fortement des enzymes fer-soufre et métaux de transition – qui eux-mêmes ont été liés à des scénarios géochimiques pour l'émergence de la biochimie [82, 83, 84]. Les algorithmes basés sur des réseaux suggèrent que divers paramètres environnementaux pourraient aboutir à un réseau proto-métabolique à base de thioester similaire au cycle de l'acide tricarboxylique réducteur [85]. Il en résulterait un « monde de thioester » qui, une fois que le phosphate est devenu biodisponible, est passé au « monde du phosphate » moderne qui contient de l'ATP et des nucléotides [70]. Ainsi, le monde plus thioester, s'il avait jamais existé, aurait été une biosphère primitive mais florissante de lyfeforms.

Les minéraux argileux auto-réplicatifs ont été suggérés comme les premières structures informationnelles de la vie [86, 87]. Dans cette hypothèse, les informations sont contenues dans les défauts, les irrégularités et les caractéristiques aperiodiques des structures chimiques et spatiales des cristaux. Étant donné que les cristaux se développent grâce à l'ajout de couches complémentaires planes, ces informations peuvent être « répliquées » lorsque les

cristaux en croissance se brisent. Ces génotypes cristallins peuvent se manifester sous forme de phénotypes qui affectent l'environnement dans lequel le cristal se développe ainsi que le pouvoir catalytique du cristal [73]. Le potentiel autocatalytique des systèmes argilo-organiques est particulièrement intéressant. Par exemple, il a été suggéré que l'origine de la vie pourrait avoir impliqué des argiles riches en fer qui pourraient effectuer un transfert de charge induit par la lumière pour réduire le CO₂ aux molécules organiques fonctionnelles [69]. Les minéraux argileux sont également connus pour favoriser la synthèse des polynucléotides [88, 89]. Dans cette hypothèse d'émergence de la vie, une « prise de contrôle organique » finirait par s'ensuivre, dans laquelle l'autocatalyse organique-organique a remplacé les systèmes argilo-organiques. Ainsi, ce récit scientifique a des minéraux argileux fournissant l'échafaudage pour la biochimie organique : une forme argile-organique de lyfe.

Récemment, la rouille verte (anciennement connue sous le nom de fougérite), un Fe²⁺/Fe³⁺ + oxyhydroxyde, a été suggéré comme la graine fondamentale de la vie [90]. On suppose que ce minéral métastable était un constituant des événements hydrothermaux alcalins sous-marins Hadéens. En raison de ses capacités de réduction-oxydation, la rouille verte est considérée comme un moteur important de l'organosynthèse dans ces contextes [90]. Dans ses couches intermédiaires flexibles et anhydres, le nitrate peut être converti en ammonium [91, 92], et on émet l'hypothèse que le carbone inorganique peut être converti en pyruvate, qui peut ensuite être aminé en alanine. Dans le même temps, la théorie suggère que la rouille verte pourrait agir comme une pyrophosphatase inorganique primitive, ce qui en fait l'un des premiers nano-moteurs de la vie [93]. Certains ont même émis l'hypothèse que la variable Fe²⁺/Fe³⁺ + les cations auraient pu servir de système primitif de stockage d'informations [86, 93, 94]. Si la rouille verte (ou un minéral similaire) jouait le rôle d'une machine moléculaire à l'émergence de la vie, alors ce système protométabolique pourrait être classé comme lyfe.

Dans les hypothèses d'émergence qui se produisent dans les systèmes hydrothermaux, la compartimentation n'est pas réalisée par l'assemblage spontané de membranes lipidiques mais par un labyrinthe d'espaces de pores minéraux inorganiques. Ce n'est qu'après l'invention de la biosynthèse des lipides et l'invention subséquente de la biochimie de la paroi cellulaire que des cellules semblables à la vie ont émergé et ont échappé à leurs limites hydrothermales [95]. Cependant, avant qu'ils ne deviennent des procaryotes libres, les réseaux chimiques complexes logés à l'intérieur de leurs enceintes minérales pouvaient encore être considérés comme alyves (ou subalyves avant d'atteindre les quatre piliers de la lyfe).

D'autres chercheurs ont envisagé les amyloïdes, des polypeptides avec une β – sheet fold – comme première entité biologique auto-répliquante. C'est un problème de longue date que la synthèse et la polymérisation d'ARN est un défi dans la plupart des environnements abiotiques (par exemple, [96, 97]), bien que plusieurs progrès aient été réalisés dans ce domaine récemment (par exemple, [98]). Les réplicateurs à base d'amyloïde offrent une alternative à l'ARN : leurs monomères sont plus facilement synthétisés dans des scénarios prébiotiques ; ils sont stables dans les premières conditions de la Terre ; ils sont auto-assemblés, répliquatifs, catalytiques et peuvent être capables de s'adapter aux changements de leur environnement [57, 58]. Bien que l'amylose soit surtout connue pour être associée à des maladies humaines [99], la vie moderne utilise des protéines amyloïdes fonctionnelles à son avantage, de la formation de biofilm à la résistance à la déshydratation à la mémoire à long terme [58]. Si les premières entités vivantes avaient constitué un « monde amyloïde » plutôt qu'un « monde ARN », cela représenterait un type unique de lyfe.

3.2. Lyfe sur Titan

La biochimie de la vie – de sa nature aqueuse à sa forte dépendance au CHNOPS – est le reflet des conditions physiques et chimiques de la Terre. D'autres mondes qui présentent des habitats potentiellement similaires – par exemple, les systèmes hydrothermaux sur Europe ou Encelade – peuvent être habités par des créatures vivantes qui sont biochimiquement similaires à la vie. Cependant, sur des mondes qui occupent des espaces physiques et chimiques radicalement différents de ceux de la Terre, toute exobiologie qui existe serait sûrement la lyfe, pas la vie. Une possibilité intrigante est Titan, le seul autre monde du système solaire connu pour posséder des corps stables de liquide à sa surface. Malgré les similitudes générales de Titan avec la Terre (pression atmosphérique, géomorphologie, cycle méthalogique actif proche du cycle hydrologique de la Terre, etc.), si l'exobiologie existe sur Titan, il aurait émergé et évolué dans un environnement incroyablement différent de la Terre. Les principales différences environnementales comprennent : des températures de surface extrêmement basses de ~ 94 K (résultant en une chimie organique exotique de Van der Waals [100, 101]) ; un manque d'oxygène disponible pour la biochimie (aboutissant à des hypothèses de biochimies N-substituées [102]) ; et un CH non polaire 4 – C_2H_6 solvant (résultant en des spéculations pour des structures de membrane alternatives). Abordant la différence finale plus en détail, réf. [103] a émis l'hypothèse que l'acrylonitrile (C_2H_3CN) pourraient former des structures stables en forme de membrane appelées azotosomes dans les lacs et les mers de Titan. Bien que l'acrylonitrile ait été récemment détecté dans l'atmosphère de Titan [104], des calculs de mécanique quantique récents ont montré que les membranes azotosomiques ne s'auto-assemblent pas dans des conditions de type Titan [105]. Cependant, cela n'exclut peut-être pas la possibilité que des entités de type lyfe puissent les construire. Alternativement, les membranes peuvent ne pas être nécessaires pour lyfe sur Titan parce que les températures extrêmement basses empêchent déjà la dissolution des macromolécules, et les structures de type membrane inhiberaient la diffusion des métabolites dans et hors d'un système de lyving froid et stationnaire [105]. Si une telle entité exobiologique sans membrane existait, ce serait certainement un exemple provocateur de lyfe.

3.3. Mécanotrophes

Dans l'esprit d'imaginer la lyfe telle que nous ne la connaissons pas encore, nous présentons maintenant une forme de vie hypothétique qui utilise un système dissipatif/métabolique alternatif : la transduction du travail mécanique en déséquilibres chimiques. La vie terrestre utilise diverses sources d'énergie libres externes, des couples redox au rayonnement solaire en passant par les gradients de densité de protons et même de densité électronique (par exemple, électrotrophes [106]). Les organismes macroscopiques sont connus pour exploiter les sources abiotiques du travail mécanique et les utiliser à leur avantage ; des exemples de ceci incluent des promenades en attelage de saumon sur des tourbillons turbulents pour nager en amont [107, 108], les oiseaux capturant des thermiques à des altitudes plus élevées, et les humains construisant des éoliennes et des centrales hydroélectriques. Cependant, il n'y a pas d'exemple catalogué d'un organisme qui transforme le travail mécanique directement en son métabolisme.

Nous trouvons cela assez surprenant, car le processus inverse est une composante fondamentale de toute vie, c'est-à-dire la conversion de gradients chimiosmotiques en mouvement de rotation en utilisant la famille ATP synthase de moteurs moléculaires [109]. Ce mouvement de rotation est surtout connu pour synthétiser l'ATP à partir d'ADP et de P_je,

mais il est également utilisé pour produire un mouvement cellulaire dans des environnements fluides. Cela se produit par l'intermédiaire des protéines motrices flagellaires, proches parents des ATP synthases [110, 111]. Les moteurs flagellaires dissipent l'énergie libre de l'hydrolyse de l'ATP chez les eucaryotes, ou les forces motrices ioniques chez les procaryotes, pour la production d'un mouvement de rotation. La rotation du rotor central fait tourner le filament flagellaire, et la structure du filament permet au mouvement de rotation de produire un mouvement de translation de l'organisme dans l'eau (ce mouvement a été comparé au mécanisme par lequel les bouchons sont poussés d'une bouteille par le rotation d'un tire-bouchon [112]).

Pourquoi ce processus ne pourrait-il pas être inversé pour alimenter un organisme mécanotrophe ? Imaginez un organisme unicellulaire dans de l'eau courante qui est ancré à un rocher via un filament d'attache en forme de pilus (comme une personne parachute ascensionnel derrière un bateau). Supposons qu'un tel organisme soit équipé du type de protéines motrices flagellaires qui ont été étudiées chez les bactéries nageuses ou les eucaryotes unicellulaires. L'écoulement de l'eau provoque un mouvement de rotation des filaments flagellaires, et ce mouvement de rotation est utilisé pour la synthèse de l'ATP (ou peut-être une autre étape chimique endergonique dans une lyfe plus exotique), comme le montre la figure 8. Cela dépend des conditions thermodynamiques et dynamiques des fluides. Notez qu'un tel organisme mécanotrophe pourrait avoir une conception différente de l'archétype de la bactérie nageuse. Par exemple, il peut utiliser une attache rigide en torsion attachée à une molécule génératrice moléculaire (le flagelle étant entraîné), et la cellule entière peut tourner autour du complexe générateur d'attache. Dans ce cas, le flagelle serait fixé par rapport au corps de la cellule (à l'extrémité opposée au complexe de long-générateur) et tournerait avec la cellule. Les détails hydrodynamiques, l'efficacité et l'énergétique d'un tel organisme seront explorés en détail dans un futur travail. Ici, nous souhaitons simplement souligner la possibilité d'un tel organisme. Ce serait un excellent exemple de lyfeform, bien qu'il soit également possible qu'un tel organisme existe sur Terre mais soit simplement passé inaperçu à ce jour.

4. Conclusions

Nous avons présenté une nouvelle définition conceptuelle de la vie qui englobe quatre piliers : la dissipation, l'autocatalyse, l'homéostasie et l'apprentissage. Tout système physique présentant toutes ces caractéristiques nécessaires et suffisantes pourrait être classé comme lyfe, notre désignation pour l'ensemble de tous les systèmes remplissant les critères, y compris le cas plus spécifique de la vie sur Terre. Cela contraste avec l'idée de fonctions privilégiées, dont la poursuite a guidé une grande partie des recherches dans le domaine des origines de la vie. Les systèmes qui présentent différents niveaux de similitude avec la vie (par exemple, un système métabolique ou un appareil de traitement de l'information différent), pourraient être considérés comme lyfe ou sublyfe. Cela inclurait les phases d'émergence de la vie avant qu'elle n'arrive sur les cycles et voies métaboliques familiers, le stockage et le traitement de l'information ADN/ARN, et les membranes lipidiques. Dans le contexte de l'astrobiologie, notre cadre conceptuel peut aider à clarifier les objectifs et les discussions entourant la recherche sur les origines et la biosignature. Lorsqu'on cherche à expliquer l'émergence de la biologie sur Terre ou des signatures d'exobiologie directement analogues à la vie sur Terre, il conviendrait de se référer à la vie. D'un autre côté, lorsque l'on aborde des questions liées à des systèmes plus généraux qui partagent les propriétés de la vie mais diffèrent par des spécificités chimiques ou structurelles, il serait approprié de se référer à la lyfe. Par exemple, trouver des chimiotrophes unicellulaires ressemblant à des

archées sur Europe constituerait une découverte de la vie. D'un autre côté, trouver une biologie à base de méthane sur Titan constituerait une découverte de lyfe.

La question de savoir si l'exobiologie peut émerger d'une multitude d'états abiotiques ou d'un seul est une question scientifique profonde. En effet, notre ignorance en la matière est ce qui motive une définition conceptuelle de la vie qui est agnostique à des composants spécifiques et met en évidence les processus à la place. Ce n'est qu'en recherchant d'autres instances de lyfe que nous pouvons savoir si la vie est un sous-ensemble approprié de lyfe ou si la vie et la lyfe sont des ensembles identiques. En encadrant la vie comme un sous-ensemble d'une classe plus large de phénomènes hypothétiques appelés lyfe, nous encourageons la recherche de la lyfe telle que nous ne la connaissons pas. Cette recherche peut nous conduire à une compréhension scientifique plus profonde de ce que, comment et pourquoi nous sommes : si nous constatons que la lyfe n'existe que sous forme de vie, cela suggérerait que les composants moléculaires spécifiques de la vie dictent la fonctionnalité de l'état de lyving. (en accord avec un point de vue réductionniste). cependant, si nous découvrons que la lyfe existe sous une myriade de formes, cela suggérerait que la « lyfe » est émergente.

Enfin, nous suggérons également un lyfeform hypothétique qui transforme l'énergie mécanique d'un fluide en circulation en son métabolisme, un soi-disant mécanotrophe. Un tel organisme n'a pas été catalogué et reste donc du domaine de la lyfe. Cependant, comme personne ne le cherche, il se peut qu'il se cache à la vue de tous sur Terre, ce qui en ferait un membre de la vie.

En conclusion, nous soumettons facétieusement que cette revue devrait désormais être rebaptisée Lyfe en raison de sa vaste portée et de son ouverture d'esprit à publier des idées comme la nôtre.

Contributions d'auteur

Les discussions entre les auteurs sur une longue période ont abouti au travail présenté. SB a conçu le concept des quatre piliers, MLW a produit toutes les figures et a écrit diverses sections du manuscrit. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Le financement

Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Remerciements

Nous adressons nos plus sincères remerciements aux membres du groupe de lecture d'astrobiologie de Caltech, avec qui plusieurs des idées de cet article ont été passionnément discutées.

Les conflits d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées dans ce manuscrit :

LUCA Dernier ancêtre commun universel

Les références

1. Walker, SI ; Davies, PCW Les origines algorithmiques de la vie. *JR Soc. Interface* 2013, 10, 20 120 869. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Lanier, KA ; Williams, LD L'origine de la vie : modèles et données. *J. Mol. Evol.* 2017 , 84 , 85–92. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
3. Mulkidjanian, AY ; Bychkov, AY ; Dibrova, DV ; Galperin, MY; Koonin, EV Origine des premières cellules des champs géothermiques terrestres anoxiques. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2012, 109, E821 – E830. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
4. Mulkidjanian, AY ; Galperin, MY Contraintes physico-chimiques et évolutives pour la formation et la sélection des premiers biopolymères : vers le paradigme consensus de l'origine abiogénique de la vie. *Chem. Biodivers.* 2007, 4, 2003–2015. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. Benner, SA ; Bell, EA ; Biondi, E .; Brasser, R. ; Carell, T .; Kim, HJ ; Mojzsis, SJ ; Omran, A. ; Pasek, MA ; Trail, D. Quand la vie a-t-elle probablement émergé sur Terre dans un processus ARN-First ? *ChemSystemsChem* 2019. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Russell, MJ ; Barge, LM ; Bhartia, R .; Bocanegra, D .; Bracher, PJ ; Branscomb, E. ; Kidd, R .; McGlynn, S. ; Meier, DH ; Nitschke, W. ; et coll. La route vers la vie sur des mondes humides et glacés. *Astrobiology* 2014, 14, 308–343. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Branscomb, E. ; Russell, MJ Tourniquets et bifurcateurs : Les moteurs de conversion de déséquilibre qui mettent le métabolisme sur la route. *Biochim. Biophys. Acta Bioenergy* 2013, 1827, 62–78. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Branscomb, E. ; Biancalani, T .; Goldenfeld, N. ; Russell, M. Mécanismes d'échappement et conversion des déséquilibres ; les moteurs de la création. *Phys. Rep.* 2017, 677, 1-60. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Dzielciol, AJ ; Mann, S. Designs for life: modèles de protocellules en laboratoire. *Chem. Soc. Rev.* 2012, 41, 79–85. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Saha, R .; Pohorille, A .; Chen, IA surpeuplement moléculaire et évolution précoce. *Orig. Life Evol. Biosph.* 2015 , 44 , 319–324. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Saha, R. ; Verbanic, S. ; Chen, IA Les vésicules lipidiques chaperonnent un aptamère d'ARN encapsulé. *Nat. Commun.* 2018, 9. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
12. Sutherland, JD Opinion : Etudes sur l'origine de la vie –La fin du commencement. *Nat. Rev. Chem.* 2017, 1, 0012. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Damer, B. ; Deamer, D. Phases couplées et sélection combinatoire dans les piscines hydrothermales fluctuantes : un scénario pour guider les approches expérimentales à l'origine de la vie cellulaire. *Life* 2015 , 5 , 872–887. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
14. Cornish-Bowden, A .; Cárdenas, ML La vie avant LUCA. *J. Theor. Biol.* 2017, 434, 68–74. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

15. Davies, CP ; Benner, SA ; Cleland, CE ; Lineweaver, CH ; McKay, CP ; Wolfe-Simon, F. Signatures d'une biosphère de l'ombre. *Astrobiology* 2009, 9, 241–249. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
16. Baross, JA; Martin, WF Le Ribofilm comme concept pour les origines de la vie. *Cell* 2015, 162, 13–15. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Fournier, GP ; Andam, CP ; Gogarten, JP Ancien transfert de gène horizontal et derniers ancêtres communs. *BMC Evol. Biol.* 2015, 15, 70. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Mariscal, C. ; Barahona, A. ; Aubert-Kato, N. ; Aydinoglu, AU ; Bartlett, S. ; Cárdenas, ML ; Chandru, K. ; Cleland, C. ; Cocanougher, BT ; Comfort, N.; et coll. Concepts cachés dans l'histoire et la philosophie des études sur les origines de la vie : un rapport d'atelier. *Orig. Life Evol. Biosph.* 2019, 49, 111-145. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Scharf, C. ; Virgo, N. ; Cleaves, HJ; Aono, M. ; Aubert-Kato, N. ; Aydinoglu, A. ; Barahona, A. ; Barge, LM ; Benner, SA ; Biehl, M. ; et coll. Une stratégie pour les origines de la recherche sur la vie. *Astrobiology* 2015, 15, 1031–1042. [Google Scholar] [CrossRef]
20. Arnold, FH a dirigé l'évolution : donner vie à une nouvelle chimie. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2018, 57, 4143–4148. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Hoshika, S.; Leal, NA ; Kim, MJ ; Kim, MS ; Karalkar, Nouveau-Brunswick ; Kim, HJ ; Bates, AM ; Watkins, NE ; SantaLucia, HA ; Meyer, AJ ; et coll. ADN et ARN Hachimoji : Un système génétique avec huit éléments constitutifs. *Science* 2019, 363, 884–887. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
22. Angleterre, JL Physique statistique de l'auto-réplication. *J. Chem. Phys.* 2013, 139, 121 923. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
23. Angleterre, JL Adaptation dissipative dans l'auto-assemblage piloté. *Nat. Nanotechnol.* 2015, 10, 919–923. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
24. Walker, SI Les origines de la vie : un problème pour la physique, un examen des questions clés. *Rep. Prog. Phys.* 2017, 80, 092601. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Kim, H. ; Smith, HB ; Mathis, C. ; Raymond, J. ; Walker, SI Mise à l'échelle universelle à travers les réseaux biochimiques sur Terre. *Sci. Adv.* 2019, 5. [Google Scholar] [CrossRef]
26. Russell, MJ Life est un verbe, pas un nom. *Geology* 2017 , 45 , 1143–1144. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Schrödinger, E. Qu'est-ce que la vie ? : L'aspect physique de la cellule vivante ; Université de Cambridge : Cambridge, Royaume-Uni, 1944. [Google Scholar]
28. Branscomb, E. ; Russell, MJ Frankenstein ou un événement alcalin sous-marin : qui est responsable de l'abiogenèse ? *BioEssays* 2018 , 40 , 1700179. [Google Scholar] [CrossRef]
29. Branscomb, E. ; Russell, MJ Frankenstein ou un événement alcalin sous-marin : qui est responsable de l'abiogenèse ? *BioEssays* 2018 , 40 , 1700182. [Google Scholar] [CrossRef]
30. Valiant, L. Probablement à peu près correct : les algorithmes de la nature pour l'apprentissage et la prospérité dans un monde complexe ; Basic Books : New York, NY, États-Unis, 2013. [Google Scholar]
31. Watson, RA ; Mills, R. ; Buckley, C.; Kouvaris, K.; Jackson, A. ; Pouvoirs, ST ; Cox, C. ; Tudge, S. ; Davies, A. ; Kounios, L. ; et coll. Connectionisme évolutif : principes algorithmiques sous-tendant l'évolution de l'organisation biologique dans les transitions evo-devo, evo-eco et évolutionniste. *Evol. Biol.* 2016, 43, 553–581.

- [Google Scholar] [CrossRef]
32. Watson, RA ; Szathmáry, E. Comment l'évolution peut-elle apprendre ? *Trends Ecol. Evol.* 2016, 31, 147–157. [Google Scholar] [CrossRef]
 33. Hopfield, JJ *Neurones, Dynamics et Computation. Phys. Aujourd'hui* 1994, 40–46. [Google Scholar] [CrossRef]
 34. Purves, D. ; Cabeza, R. ; Huettel, S. ; LaBar, K. ; Platt, M. ; Woldorff, M. *Principes de la neuroscience cognitive* ; Sinauer: Sunderland, MA, États-Unis, 2013. [Google Scholar]
 35. Tononi, G. ; Boly, M. ; Massimini, M. ; Koch, C. Théorie de l'information intégrée : de la conscience à son substrat physique. *Nat. Rev. Neurosci.* 2016, 17, 450–461. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 36. Fernando, CT ; Liekens, AM ; Bingle, LE ; Beck, C. ; Lenser, T. ; Stekel, DJ ; Rowe, JE *Circuits moléculaires pour l'apprentissage associatif dans les organismes unicellulaires. JR Soc. Interface* 2009, 6, 463–469. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 37. Gandhi, N. ; Ashkenasy, G. ; Tannenbaum, E. Apprentissage associatif dans les réseaux biochimiques. *J. Theor. Biol.* 2007, 249, 58–66. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 38. Tagkopoulos, I. ; Liu, YC ; Tavazoie, S. Comportement prédictif au sein des réseaux génétiques microbiens. *Science* 2008, 320, 1313–1317. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 39. Bray, D. Molécules de protéines comme éléments de calcul dans les cellules vivantes. *Nature* 1995, 376, 307–312. [Google Scholar] [CrossRef]
 40. Bray, D. *Wetware : Un ordinateur dans chaque cellule vivante* ; Yale University Press: New Haven, CT, États-Unis, 2009. [Google Scholar]
 41. Arkin, A. ; Ross, J. Fonctions de calcul dans les réseaux de réactions biochimiques. *Biophys. J.* 1994, 67, 560–578. [Google Scholar] [CrossRef]
 42. Turner, C. ; Robling, A. ; Duncan, R. ; Burr, D. Les cellules osseuses se comportent-elles comme un réseau neuronal ? *Calcif. Tissue Int.* 2002, 70, 435. [Google Scholar] [CrossRef]
 43. Adamatzky, A. *Progrès dans les machines Physarum : détection et calcul avec la moisissure visqueuse* ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2016 ; Volume 21. [Google Scholar] [CrossRef]
 44. Boisseau, RP ; Vogel, D. ; Dussutour, A. Habituation dans les organismes non neuronaux : preuves de moisissures visqueuses. *Proc. R. Soc. Biol. Sci.* 2016, 283, 20160446. [Google Scholar] [CrossRef]
 45. Breitbart, M. ; Bonnain, C. ; Malki, K. ; Sawaya, NA *Maîtres des marionnettes phages du royaume microbien marin. Nat. Microbiol.* 2018, 3. [Google Scholar] [CrossRef]
 46. Smith, E. ; Morowitz, HJ *L'origine et la nature de la vie sur Terre : l'émergence de la quatrième géosphère* ; Cambridge University Press: Cambridge, Royaume-Uni, 2016. [Google Scholar]
 47. Owen, T. La vie en tant que phénomène planétaire. *Orig. Life Evol. Biosph.* 1985 , 15 , 221–234. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 48. Kalita, NK ; Kalamdhad, A. ; Katiyar, V. Tendances récentes et progrès de la biodégradation des plastiques conventionnels. Dans *Les progrès réalisés dans les polymères durables* ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2020 ; 389–404. [Google Scholar] [CrossRef]
 49. Yuan, J. ; Ma, J. ; Sun, Y. ; Zhou, T. ; Zhao, Y. ; Yu, F. Dégradation microbienne et

- autres aspects environnementaux des microplastiques/plastiques. *Sci. Total Environ.* 2020, 715, 136 968. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
50. Zhang, J. ; Gao, D. ; Li, Q. ; Zhao, Y. ; P'tit.; Lin, H. ; Bi, Q. ; Zhao, Y. Biodégradation de particules microplastiques de polyéthylène par le champignon *Aspergillus flavus* à partir des entrailles de la pyrale *Galleria mellonella*. *Sci. Total Environ.* 2020, 704, 135 931. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
51. Levy, SB ; Marshall, B. Résistance antibactérienne dans le monde : causes, défis et réponses REVUE. *Nat. Med.* 2004, 10, 122-129. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
52. Bartlett, S. Pourquoi la vie ? Une évaluation des propriétés thermodynamiques des systèmes dissipatifs formant des modèles. doctorat Thèse, Université de Southampton, Southampton, Royaume-Uni, 2014. [Google Scholar]
53. Bartlett, S. ; Bullock, S. Emergence de la concurrence entre différentes structures dissipatives pour une même source d'énergie libre. In *Proceedings of the Artificial Life Conference*, York, Royaume-Uni, 20-24 juillet 2015; pp. 415–422. [Google Scholar] [CrossRef]
54. Bartlett, S. ; Bullock, S. Une existence précaire : Homéostasie thermique de structures dissipatives simples. Dans les actes de la Conférence sur la vie artificielle 2016, Cancún, Mexique, 4 juillet – 8 août 2016 ; pp. 608–615. [Google Scholar] [CrossRef]
55. Bartlett, S. Approfondir la dynamique homéostatique des systèmes de diffusion de réaction avec un modèle général de dynamique des fluides et de chimie artificielle. Dans les actes de la Conférence sur la vie artificielle, Lyon, France, 4-8 septembre 2017 ; 52-59. [Google Scholar] [CrossRef]
56. Landauer, R. Irréversibilité et génération de chaleur dans le processus de calcul. *IBM J. Res. Dev.* 1961, 5, 183–191. [Google Scholar] [CrossRef]
57. Greenwald, J. ; Riek, R. Sur l'origine amyloïde possible des replis protéiques. *J. Mol. Biol.* 2012, 421, 417–426. [Google Scholar] [CrossRef]
58. Maury, CPJ Structures polypeptidiques en feuillet β auto-propagées en tant qu'entités moléculaires d'information prébiotiques : Le monde amyloïde. *Orig. Life Evol. Biosph.* 2009, 39, 141-150. [Google Scholar] [CrossRef]
59. Rout, SK ; Friedmann, député ; Riek, R. ; Greenwald, J. Une synthèse peptidique dirigée par une matrice prébiotique basée sur des amyloïdes. *Nat. Commun.* 2018, 9, 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]
60. Feschotte, C.; Pritham, transposons d'ADN EJ et évolution des génomes eucaryotes. *Annu. Rev. Genet.* 2007, 41, 331–368. [Google Scholar] [CrossRef]
61. Fischer, MG; Suttle, CA Virophage à l'origine de grands transposons d'ADN. *Science* 2011, 332, 231–234. [Google Scholar] [CrossRef]
62. Iranzo, J. ; Puigbò, P. ; Lobkovsky, AE; Wolf, YI ; Koonin, EV Inévitabilité des parasites génétiques. *Genome Biol. Evol.* 2016 , 8 , 2856-2869. [Google Scholar] [CrossRef]
63. Kapitonov, VV ; Jurka, J. Transposons d'ADN auto-synthétisés chez les eucaryotes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2006, 103, 4540–4545. [Google Scholar] [CrossRef]
64. Bachmann, PA ; Luisi, PL ; Lang, J. Micelles autocatalytiques auto-répliquantes comme modèles pour les structures prébiotiques. *Nature* 1992, 357, 57–59. [Google Scholar] [CrossRef]
65. Hanczyc, MM ; Szostak, JW Réplication de vésicules comme modèles de croissance et division de cellules primitives. *Curr. Opin. Chem. Biol.* 2004, 8, 660–664. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

66. Bartlett, SJ ; Beckett, P. Sonder la complexité : Approches de la thermodynamique et de la mécanique computationnelle pour les études sur les origines. *Interface Focus* 2019, 9, 20 190 058. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
67. Maturana, HR ; Varela, FJ *Autopoiesis et Cognition : La réalisation du vivant ; Springer Science & Business Media : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 1991 ; Volume 42.* [Google Scholar]
68. Gánti, T. Organisation des réactions chimiques en unités de division et de métabolisation : les chimiotons. *BioSystems* 1975 , 7 , 15–21. [Google Scholar] [CrossRef]
69. Hartman, H. Spéculations sur l'origine et l'évolution du métabolisme. *J. Mol. Evol.* 1975 , 4 , 359–370. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
70. Hartman, H. ; Smith, TF L'origine du code génétique se trouve à la transition entre un monde thioester de peptides et le monde phosphoester des polynucléotides. *Life* 2019 , 9 , 69. [Google Scholar] [CrossRef]
71. Hsiao, C .; Mohan, S. ; Kalahar, BK ; Williams, LD Éplucher l'oignon : les ribosomes sont d'anciens fossiles moléculaires. *Mol. Biol. Evol.* 2009, 26, 2415–2425. [Google Scholar] [CrossRef]
72. Smith, J. ; Szathmary, E. *Les transitions majeures de l'évolution ; OUP : Oxford, Royaume-Uni, 1997.* [Google Scholar]
73. Cairns-Smith, AG *Sept indices sur l'origine de la vie : une histoire de détective scientifique ; Cambridge University Press: Cambridge, Royaume-Uni, 1990.* [Google Scholar]
74. Talori, YS ; Zhao, JS ; Liu, YF ; Lu, WX ; Li, ZH ; O'Connor, JK Identification du mouvement de battement aviaire de dinosaures ailés non volants basé sur une analyse de masse effective modale. *PLoS Comput. Biol.* 2019, 15. [Google Scholar] [CrossRef]
75. Lingappa, UF ; Monteverde, DR ; Magyar, JS ; Valentine, JS ; Fischer, WW Comment le manganèse a renforcé la vie avec le dioxygène (et vice versa). *Gratuit. Radic. Biol. Med.* 2019. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
76. Gould, SJ ; Vrba, ES Exaptation – Un terme manquant dans la science de la forme. *Paleobiology* 1982 , 8 , 4–15. [Google Scholar] [CrossRef]
77. Duval, S. ; Baymann, F. ; Schoepp-Cothenet, B .; Trolard, F. ; Bourrié, G. ; Grauby, O. ; Branscomb, E. ; Russell, MJ ; Nitschke, W. Fougérite : Le progéniteur pas si simple des premières cellules. *Interface Focus* 2019, 9, 20 190 063. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
78. Chandru, K. ; Gilbert, A. ; Butch, C. ; Aono, M. ; Cleaves, HJ La chimie abiotique des dérivés d'acétate thiolés et l'origine de la vie. *Sci. Rep.* 2016, 6, 29 883. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
79. Keefe, AD ; Miller, SL Les polyphosphates ou les esters de phosphate sont-ils des réactifs prébiotiques ? *J. Mol. Evol.* 1995, 41, 693–702. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
80. Schwartz, AW Phosphorus en chimie prébiotique. *Philos. Trans. R. Soc. Biol. Sci.* 2006 , 361 , 1743–1749. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
81. Goldford, JE ; Hartman, H. ; Smith, TF ; Segrè, D. Vestiges d'un métabolisme ancien sans phosphate. *Cell* 2017, 168, 1126-1134. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
82. Hazen, RM ; Sverjensky, DA Surfaces minérales, complexités géochimiques et origines de la vie. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 2010, 2. [Google Scholar] [CrossRef]

83. Martin, W. ; Russell, MJ Sur l'origine de la biochimie à un événement hydrothermal alcalin. *Philos. Trans. R. Soc. Biol. Sci.* 2007 , 362 , 1887–1926. [Google Scholar] [CrossRef]
84. Wächtershäuser, G. Evolution des premiers cycles métaboliques. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1990, 87, 200–204. [Google Scholar] [CrossRef]
85. Goldford, JE ; Hartman, H. ; Marsland, R. ; Segrè, D. Les conditions aux limites environnementales pour l'origine de la vie convergent vers un métabolisme organo-soufré. *Nat. Ecol. Evol.* 2019, 3, 1715-1724. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
86. Greenwell, HC ; Coveney, PV Layered double hydroxyde minéraux en tant que composés de stockage et de transfert d'informations prébiotiques possibles. *Orig. Life Evol. Biosph.* 2006, 36, 13–37. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
87. Hartman, H. ; Cairns-Smith, AG Minéraux d'argile et l'origine de la vie ; Archive CUP : Cambridge, Royaume-Uni, 1986. [Google Scholar] [CrossRef]
88. Swadling, JB; Coveney, PV; Greenwell, HC Clay Minerals Mediate Folding and Regioselective Interactions of RNA: A Large-Scale Atomistic Simulation Study. *Confiture. Chem. Soc.* 2010, 132, 13750-13764. [Google Scholar] [CrossRef]
89. Biondi, E. ; Branciamore, S. ; Fusi, L. ; Gago, S. ; Gallori, E. Activité catalytique des ribozymes en tête de marteau dans un environnement minéral argileux : implications pour le monde de l'ARN. *Gene* 2007, 389, 10–18. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
90. Russell, M. Green Rust : la semence organisatrice simple de toute vie ? *Life* 2018 , 8 , 35. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
91. Hansen, HCB ; Guldborg, S. ; Erbs, M. ; Koch, CB Cinétique de la réduction des nitrates par les rouilles vertes – effets de l'anion intercouche et du rapport Fe (II) : Fe (III). *Appl. Clay Sci.* 2001 , 18 , 81–91. [Google Scholar] [CrossRef]
92. Trolard, F. ; Bourrié, G. Fougerite un hydroxyde double stratifié naturel dans le sol gleyifié : Habitus, structure et quelques propriétés. Dans les minéraux argileux dans la nature – leur caractérisation, modification et application ; IntechOpen : Rijeka, Croatie, 2012 ; 171-188. [Google Scholar] [CrossRef]
93. Russell, MJ Comprendre comment la vie a décollé pour la première fois, c'est (un peu comme) la science des fusées ! *Planète. Space Sci.* 2019 , 175 , 13–20. [Google Scholar] [CrossRef]
94. Arrhenius, GO Crystals and Life. *Helv. Chim. Acta* 2003, 86, 1569-1586. [Google Scholar] [CrossRef]
95. Martin, W. ; Russell, MJ Sur les origines des cellules : Une hypothèse pour les transitions évolutives de la géochimie abiotique aux procaryotes chimioautotrophes, et des procaryotes aux cellules nucléées. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Biol. Sci.* 2003, 358, 59–85. [Google Scholar] [CrossRef]
96. Kurland, CG Le temps de rêve de l'ARN : Les cellules modernes comportent des protéines qui auraient pu soutenir un monde polypeptidique prébiotique, mais rien n'indique que le monde de l'ARN l'a jamais été. *Bioessays* 2010 , 32 , 866–871. [Google Scholar] [CrossRef]
97. Shapiro, R. Une origine plus simple pour la vie. *Sci. Un m.* 2007, 296, 46–53. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
98. Becker, S. ; Feldmann, J. ; Wiedemann, S. ; Okamura, H. ; Schneider, C. ; Iwan, K. ; Crisp, A. ; Rossa, M. ; Amatov, T. ; Carell, T. Synthèse prébiotiquement plausible unifiée des ribonucléotides d'ARN de pyrimidine et de purine. *Science* 2019, 366, 76–82. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

99. Chiti, F. ; Dobson, CM Mauvais repliement des protéines, formation d'amyloïdes et maladies humaines : un résumé des progrès au cours de la dernière décennie. *Annu. Rev. Biochem.* 2017, 86, 27–68. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
100. Maynard-Casely, HE; Hodyss, R. ; Câble, ML ; Vu, TH ; Rahm, M. Un co-cristal entre le benzène et l'éthane : un matériau d'évaporite potentiel pour la lune de Saturne Titan. *IUCrJ* 2016, 3, 192–199. [Google Scholar] [CrossRef]
101. Maynard-Casely, HE; Câble, ML ; Malaska, MJ ; Vu, TH ; Choukroun, M. ; Hodyss, R. Perspectives de minéralogie sur Titan. *Un m. Minéral. J. Earth Planet. Mater.* 2018, 103, 343–349. [Google Scholar] [CrossRef]
102. Lv, KP ; Norman, L. ; Li, YL Biochimie sans oxygène : la Fondation CHN putative pour la vie exotique dans un monde d'hydrocarbures ? *Astrobiology* 2017, 17, 1173–1181. [Google Scholar] [CrossRef]
103. Stevenson, J. ; Lunine, J. ; Clancy, P. Alternatives membranaires dans les mondes sans oxygène : création d'un azotosome. *Sci. Adv.* 2015, 1, e1400067. [Google Scholar] [CrossRef]
104. Palmer, MY; Cordiner, MA ; Nixon, Californie ; Charnley, SB ; Teanby, NA ; Kisiel, Z. ; Irwin, PGJ ; Mumma, détection MJ ALMA et potentiel astrobiologique du cyanure de vinyle sur Titan. *Sci. Adv.* 2017, 3. [Google Scholar] [CrossRef]
105. Sandström, H. ; Rahm, M. Les membranes à polarité inversée peuvent-elles s'auto-assembler sur Titan ? *Sci. Adv.* 2020, 6. [Google Scholar] [CrossRef]
106. Nealson, KH ; Rowe, AR Electromicrobiology : Réalités, grands défis, objectifs et prédictions. *Microb. Biotechnol.* 2016 , 9 , 595–600. [Google Scholar] [CrossRef]
107. Liao, JC ; Beal, DN ; Lauder, GV ; Triantafyllou, MS Les poissons exploitant les tourbillons diminuent l'activité musculaire. *Science* 2003, 302, 1566-1569. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
108. Wu, TY ; Chwang, AT Extraction d'énergie d'écoulement par les poissons et les oiseaux dans un ruisseau ondulé. Dans *la natation et voler dans la nature* ; Springer : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 1975 ; 687–702. [Google Scholar] [CrossRef]
109. Yoshida, M. ; Muneyuki, E. ; Hisabori, T. ATP synthase – Un merveilleux moteur rotatif de la cellule. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 2001, 2, 669–677. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
110. DeRosier, DJ Le tour de la vis : le moteur flagellaire bactérien. *Cell* 1998, 93, 17–20. [Google Scholar] [CrossRef]
111. Sowa, Y. ; Berry, RM Moteur flagellaire bactérien. *Q. Rev. Biophys.* 2008, 41, 103–132. [Google Scholar] [CrossRef]
112. Lauga, E. Hydrodynamique bactérienne. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2016, 48, 105-130. [Google Scholar] [CrossRef]

Figure 1. Trois exemples courants de fonctions privilégiées dans les théories des origines de la vie. Après [2].

Figure 2. L'horizon des événements dans les études sur les origines de la vie, dénoté par un nuage de questions entre les approches ascendantes, qui cherchent à identifier les voies vers l'origine de la vie, et les approches descendantes, qui cherchent à interpréter les caractéristiques des Dernier ancêtre commun universel (LUCA).

Figure 3. Les approches descendantes ne peuvent pas faire la distinction entre le récit général d'une seule origine de la vie sur Terre et les récits alternatifs qui impliquent plusieurs génèses entraînant des lignées éteintes et / ou une biosphère de l'ombre ou des récits qui impliquent

plusieurs LUCA qui ont échangé des gènes via un gène horizontal transfert (HGT). A = archées ; E = Eukarya ; B = bactéries. Basé sur [18].

Graphique 4. Les trois catégories générales de récits sur les origines de la vie : historique, synthétique et universel. En violet, des trajectoires décrivent des récits historiques : comment une Terre abiotique est devenue la vie telle que nous la connaissons. Les nombreuses trajectoires avec les mêmes points de départ et d'arrivée représentent les différentes hypothèses proposées pour l'origine de la vie sur Terre. Les explications synthétiques sont en pointillé orange. Ceux-ci peuvent chercher : (1) à recréer la vie naturelle sur Terre, bien que probablement par une trajectoire différente de l'origine naturelle ; (2) modifier la vie naturelle pour créer de nouvelles formes de vie. En bleu et en vert sont des origines extraterrestres hypothétiques de la vie (lyfe) ; ceux-ci et les trajectoires qui ont abouti à la vie sur Terre convergent à un point de l'espace des paramètres que les récits universels cherchent à décrire. En rouge est un système qui n'a pas passé par ces exigences universelles, évoluant ainsi vers un produit final qui remplit certains des piliers de la vie, mais pas tous. Basé sur [18, 19].

Figure 5. Un diagramme de Venn des quatre piliers de lyfe. Sublyfe (régions 1 à 8) est un système qui exécute certains mais pas tous les piliers, tandis que lyfe (région 9) est un système qui exécute les quatre. L'autocatalyse et l'apprentissage nécessitent un approvisionnement continu en énergie gratuite et dépendent donc de la dissipation ; cependant, l'homéostasie peut se produire même dans les systèmes d'équilibre et ne nécessite donc pas toujours une dissipation. Voir le texte pour des exemples de chaque région.

Figure 6. Un « arbre factoriel » des trois fonctions privilégiées : réplication (bleu), métabolisme (rouge), compartimentation (or) (section 1.1). Dans le paradigme des fonctions privilégiées aux origines de la vie, la vie représente une solution à ces fonctions dans l'espace des composants, et la lyfe englobe tout système vivant qui utilise d'autres composants pour accomplir les mêmes tâches. La vie, étant le produit final recherché des hypothèses sur les origines de la vie (comme le montre la trajectoire violette en pointillé), est positionnée au sommet. Le niveau directement sous la vie contient deux éléments communs à la vie. Le niveau ci-dessous qui contient un composant commun. Le dernier niveau ne contient aucun composant commun. La connexion des sommets via des composants communs crée un « cube ». La rotation de cette forme permet à n'importe quelle combinaison de prendre le sommet, ce qui suggère notre position selon laquelle la lyfe peut être une cible tout aussi valable de la recherche sur les origines de la vie que la vie.

Figure 7. Analogie entre l'histoire des trains et l'évolution biologique, présentée sous une forme ressemblant à la figure 2. En raison des nombreuses transitions majeures dans le développement des trains, il serait difficile d'examiner un Shinkansen des temps modernes et de déduire de manière « descendante » les composants du premier train. Bien que les matériaux à partir desquels les trains sont construits aient changé au fil du temps, leur objectif et leurs fonctions sont restés constants. Par analogie, les composants biologiques que la vie utilise aujourd'hui peuvent être différents des composants biologiques à l'émergence de la vie, mais les processus – les quatre piliers de la lyfe – ont été conservés. Image Shinkansen : Daylight9899 (Wikimedia Commons).

Figure 8. Une lyfeform mécanotrophe hypothétique. Cette entité unicellulaire se fixe à une roche via des pili d'adhésine et transforme le mouvement mécanique du flux de fluide environnant en énergie libre intracellulaire via la rotation d'une protéine motrice (entraînée

par le mouvement d'une « turbine flagellaire »).

© 2020 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué sous les termes et conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).