Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 112 (1989)

Artikel: L'hypothèse Gaïa : une lecture systémique
Autor: Schwarz, Eric
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89303

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'HYPOTHÈSE GAÏA, UNE LECTURE SYSTÉMIQUE

par

ERIC SCHWARZ

AVEC 1 TABLEAU

1. INTRODUCTION

Proposée il y a quelques années par James Lovelock, l'hypothèse selon laquelle la planète Terre serait un organisme vivant suscite des controverses, voire des passions, qui dépassent les querelles de spécialistes, car elles touchent probablement aux fondements sur lesquels nous organisons la «réalité». Afin d'éclairer quelque peu le débat, nous examinerons de plus près les deux termes de l'égalité Gaïa = Vie. Pour cela nous considérerons tout d'abord quelques-uns des processus les plus caractéristiques de la terre, tels que Lovelock les rapporte. Puis, dans une perspective systémique, nous tenterons de donner quelques éléments de réponse à la question: qu'est-ce que la vie? Enfin, nous verrons si Gaïa peut être considérée comme un système vivant.

2. L'HYPOTHÈSE GAÏA

Vers la fin des années soixante, James Lovelock, biochimiste britannique indépendant, était confronté à un problème que lui avait posé la NASA: y a-t-il de la vie sur Mars?

Différents tests sont imaginables: détection de traces de matière vivante (acides aminés, protéines, etc.), traces de nourriture, traces de déchets, par exemple. Encore s'agit-il d'éviter d'être trop terrestre: la vie martienne aurait-elle développé les mêmes composés organiques, que ceux présents sur notre planète? C'est ainsi que Lovelock en vint à se poser la question: qu'est-ce que la vie, fondamentalement? Comment distinguer le contingent de l'essentiel? Il réalisa que cette question avait jusque-là soulevé peu d'intérêt dans la littérature spécialisée. Ceci peut se comprendre. En effet, dans la conduite des affaires terrestres, les êtres vivants sont équipés de différents niveaux de mémoire leur permettant de reconnaître facilement si un autre être non seulement est vivant, mais encore s'il est amical, agressif, comestible ou dangereux. Finalement c'est dans les écrits de certains physiciens tels que Schrödinger et Wigner, que Lovelock

trouva une définition ayant un degré de généralité suffisant: un système vivant est un membre de la classe des systèmes ouverts, capables de réduire localement l'entropie (c'est-à-dire de créer de l'ordre) en rejetant des déchets (c'est-à-dire du désordre).

Comment tester empiriquement ce type de processus? On pourrait tenter de déceler des déchets à l'interface entre le système vivant et son environnement. Comment alors reconnaître les déchets? Pour rechercher une issue, Lovelock retourna la question: que donnerait un test de ce type sur terre? Un martien analysant la composition de l'atmosphère terrestre y trouverait-il des traces de vie?

Jusque dans les années 1965, on estimait que la composition de l'atmosphère terrestre était le résultat de processus abiologiques, et que la vie ne faisait qu'emprunter et rendre les gaz existants. En d'autres termes, cela revient à dire que la terre est un système à l'équilibre thermodynamique et chimique (correspondant à la température de sa surface). Si cela est vrai, en connaissant les quantités d'éléments présents dans l'atmosphère, dans les eaux et dans les roches de surface, on peut estimer leur répartition à l'état d'équilibre, c'est-à-dire à l'état correspondant à l'entropie maximale pour une température de 15° C. En comparant ensuite la composition de l'atmosphère ainsi calculée à celle qu'on observe expérimentalement, on vérifiera que le système terre est bien à l'équilibre.

Ce calcul a été fait par le chimiste suédois Sillen et répété par d'autres chercheurs. Il a donné les résultats notés dans le tableau ci-dessous (Terre à l'équilibre). On y voit que la composition de l'atmosphère terrestre à l'équilibre est très différente de la composition observée, ce qui signifie que la surface de la terre est en fait loin de l'équilibre thermodynamique et chimique. On notera sur le même tableau que les atmosphères observées sur Mars et Vénus sont relativement voisines de l'état d'équilibre.

TABLEAU I

Comparaison de l'atmosphère de quelques planètes

	CO_2	N	O_2
Vénus	98 %	1.9 %	traces
Mars	95 %	2.7 %	0.13 %
Terre à l'équilibre (sans vie)	98 %	1.9 %	traces
Terre réelle	0.03 %	79 %	21 %

Il se pourrait donc que le grand déséquilibre dans lequel se trouve la terre soit l'indice de la présence de la vie qui, par son histoire et les puissants flux qu'elle provoque, maintienne l'atmosphère hors équilibre.

Cette constatation et d'autres encore poussèrent Lovelock à proposer en 1972, ce que par la suite on a appelé l'hypothèse Gaïa (LOVELOCK 1986), du nom de l'ancienne divinité grecque de la Terre Mère: «... hypothèse selon laquelle l'ensemble des êtres vivant sur Terre — des baleines aux virus, des chênes aux algues — peut être considéré comme formant

une entité vivante unique, capable de manipuler l'atmosphère de la Terre de manière à satisfaire ses besoins généraux et dotée de facultés et de pouvoirs supérieurs à ceux de ses parties constituantes.»

Les connotations anthropocentriques, voire animistes, de cette formulation ont certainement contribué au succès populaire de l'hypothèse Gaïa autant qu'à l'irritation de certains spécialistes, les retenant d'en approfondir les aspects positifs.

Nous la compléterons ici par une autre expression dont la neutralité le dispute à l'hermétisme: la planète terre est un système non isolé, dissipatif, loin de l'équilibre, à dynamique non linéaire, autorégulé, auto-organisant et autopoïétique.

Nous reviendrons dans la suite de cet article sur les différents qualificatifs utilisés dans cette définition systémique de Gaïa. Avant cela nous mentionnerons encore quelques caractéristiques de la dynamique de Gaïa.

3. LA DYNAMIQUE DE GAÏA

Si l'on récapitule les propriétés thermodynamiques de la planète Terre que nous avons déjà évoquées, la première et la plus évidente est celle d'être un système non isolé: la terre reçoit de l'énergie du soleil. La plus grande partie de cette énergie est réémise dans le cosmos sous forme de rayonnement infrarouge (correspondant à sa température de surface); une infime partie de l'énergie incidente est retenue sur terre sous forme d'organisations structurées: matière vivante et infrastructures construites par les êtres vivants.

Une autre propriété que nous avons mentionnée dans le chapitre précédent est peut-être intuitivement moins évidente: la surface de la terre, et plus particulièrement l'atmosphère, est loin de l'équilibre thermodynamique et chimique. La notion d'équilibre a ici un sens précis: c'est l'état correspondant à l'entropie maximale des substances présentes, à la température donnée. On dit aussi que c'est l'état le plus probable. La distance à l'équilibre peut se déterminer en principe par la différence entre l'entropie de l'état considéré et celle qu'il aurait à l'équilibre. Nous avons donc vu que la composition de l'atmosphère était loin de l'équilibre, donc thermodynamiquement improbable. Cette notion peut frapper le sens commun: on pense souvent que l'atmosphère terrestre naturelle est à l'équilibre et que l'homme, par les polluants qu'il y déverse, la déséquilibre. En fait, la situation est beaucoup plus fragile. Même sans l'homme l'atmosphère est déséquilibrée; sa composition est le résultat d'un grand nombre d'échanges dans un état momentanément stationnaire, une sorte d'équilibre dynamique. Il est évident dans ce contexte qu'une petite modification d'un flux ou d'un autre peut altérer de façon irréversible le fonctionnement de l'ensemble du réseau d'échanges, qui peut éventuellement se stabiliser à un autre point de fonctionnement stationnaire. Il est tout aussi évident que ce nouveau mode de fonctionnement, même s'il ne met pas en péril le fonctionnement global de l'atmosphère, peut être fort dommageable à une niche écologique ou une autre.

Nous arrivons ainsi à une troisième propriété de la dynamique gaïenne: la présence de nombreuses boucles de rétroaction et même de régulations globales, planétaires. On le sait grâce aux fossiles, le climat de la terre a été favorable à la vie depuis plus de trois milliards d'années, malgré quelques oscillations, dont les dernières pulsations glaciaires sont les plus connues. Or pendant le même laps de temps, le rayonnement solaire a augmenté d'environ 30 %. Sans régulations la surface de la terre aurait été gelée pendant le premier milliard et demi d'années de la vie, selon Lovelock. Malgré quelques explications abiologiques, Lovelock voit là un exemple de plus de l'intime jeu d'échanges entre atmosphère, lithosphère, hydrosphère et matière vivante, qui a fait émerger des propriétés globales dépassant celles de chacun des partenaires.

Cette notion d'émergence est même un des concepts fondamentaux de la théorie générale des systèmes telle que la développait Ludwig von Bertalanffy dès les années quarante. On lira avec intérêt à ce sujet la traduction parue en 1973 de son ouvrage de base, la *Théorie Générale des Systèmes* (VON BERTALANFFY 1973). Avec l'avènement de la cybernétique de Norbert Wiener dans les années cinquante (WIENER 1952) et surtout de la thermodynamique irréversible loin de l'équilibre de Ilya Prigogine dans les années soixante (PRIGOGINE 1979), la théorie générale des systèmes prit un tour plus quantitatif. Elle nous permettra par la suite de placer l'hypothèse Gaïa dans un contexte plus général.

Pour l'instant, nous reprendrons la métaphore de la planète aux pâquerettes imaginée par Lovelock pour faire comprendre intuitivement le processus cybernétique fondamental de la rétroaction négative. Supposons une planète gravitant autour d'un soleil dont le rayonnement augmente lentement: sur cette planète ne poussent que deux types de plantes: des pâquerettes blanches et des noires. Au début, lorsque la température est basse, les noires sont les premières à pousser car leur couleur foncée élève leur température. Par la même occasion, l'air s'en trouve réchauffé par conduction. Lorsque la température croît lentement à cause du rayonnement croissant du soleil, les pâquerettes blanches se mettent à prospérer et ralentissent le réchauffement de l'atmosphère en réfléchissant la lumière (albedo). Finalement lorsque la température devient incompatible avec toute vie de pâquerettes, vu le rayonnement solaire trop intense, l'atmosphère prendra la température de l'équilibre thermodynamique. Ceci montre comment la présence de deux espèces vivantes, par un jeu de rétroaction, arrive à stabiliser la température de l'atmosphère pour autant que le rayonnement solaire reste dans les limites de tolérance de ces organismes. Il va de soi que sur une planète réelle comme la Terre, la situation est rendue beaucoup plus complexe, donc moins intelligible, par l'existence des milliers de boucles de rétroactions ayant pu se développer depuis trois milliards et demi d'années. Toutefois, les chercheurs motivés par l'hypothèse Gaïa découvrent chaque année de nouveaux cycles (KERR 1988).

Nous limiterons ici nos remarques sur la dynamique de Gaïa. On trouvera d'autres exemples dans le livre de Lovelock cité plus haut.

4. QU'EST-CE QUE LA VIE?

Avant de tenter de répondre à la question: la planète Terre est-elle un organisme vivant? il faut préciser ce qu'est un organisme vivant, ce qu'est la vie. Nous avons vu plus haut une définition thermodynamique des systèmes vivants. Pour préciser quelles sont les caractéristiques essentielles des systèmes non isolés capables de diminuer localement l'entropie, nous suivrons une démarche didactique partant de l'expérience quotidienne.

a) *Le mouvement?*

Par contraste avec un objet inanimé, le mouvement pourrait apparaître comme une caractéristique du vivant. Il n'en est évidemment rien, une rivière en pente douce, une cascade sont là pour nous le rappeler. Toutefois, profitons de remarquer que tout mouvement signale un déséquilibre: soit une force (balle qui tombe), soit une pression (eau dans une conduite), un gradient (flux de chaleur dans une paroi), une différence de potentiel (réaction chimique, courant électrique).

b) *Présence de régulations?*

Un des traits les plus fréquents des processus vivants à toutes les échelles est leur aspect d'organisation circulaire, de rétroaction négative (homéostasie, régulations thermiques, taux de sucre dans le sang, etc.).

Remarquons toutefois que la régulation par rétroaction négative, si elle est omniprésente dans les organismes vivants, n'est pas spécifique du vivant: le régulateur de Watt, le contrôle de débit de chasse d'eau par flotteur, les fours à thermostat, les réactions chimiques inorganiques catalytiques, les amplificateurs à gain automatique en sont des exemples hors du vivant.

c) *Evolution?*

L'évolution des individus de la naissance à l'âge adulte puis à la mort, l'évolution des espèces avec son apparente orthogénèse pourraient faire penser que le fait d'évoluer est une spécificité du vivant. L'apparente pérennité des mouvements périodiques non évolutifs décrits par la mécanique céleste et balistique pourrait nous confirmer dans cette idée.

Il existe toutefois de nombreux systèmes non vivants qui présentent des caractères d'évolution, en particulier d'évolution irréversible. Nous n'en citerons ici que trois.

Lorsqu'on met en présence de l'eau chaude et de l'eau froide dans un même récipient, on observe une tendance nette et irréversible vers un état d'équilibre caractérisé par une température uniformément tiède. Si l'on verse une goutte d'encre dans un verre d'eau, la configuration de départ va se transformer graduellement en un liquide uniformément coloré. De même toutes les réactions chimiques inorganiques ordinaires sont caractérisées par des processus amenant les réactifs à leur état d'équilibre, caractérisé par une entropie maximale.

Ces trois exemples nous montrent que l'évolution n'est pas une propriété spécifique du vivant. Toutefois, il faut admettre que les évolutions mentionnées ici sont toutes caractérisées par un passage d'un état structuré, différencié, déséquilibré, improbable, à un état d'équilibre, uniforme, ayant une grande probabilité. En d'autres termes, ce sont des applications du deuxième principe de la thermodynamique qui dit que l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître, c'est-à-dire que l'ordre ne peut pas croître. Or, aussi bien dans l'évolution d'un organisme que des espèces vivantes, celle-ci se fait dans le sens d'une organisation, d'une différenciation, bref d'une diminution de l'entropie.

d) *Auto-organisation?*

Aurions-nous trouvé avec la tendance à l'organisation un trait propre au vivant? Hélas, on trouve dans le monde inorganique de nombreux systèmes auto-organisants. Nous en citerons un en hydrodynamique, l'autre en chimie inorganique.

Lorsqu'on chauffe un liquide par-dessous de façon modérée, le flux de chaleur de bas en haut se fait par conduction de proche en proche sans déplacement de matière. Si le chauffage est plus énergique, on assiste à la formation de cellules de convection régulières formant sur tout le plan du liquide un réseau de courants ascendants et descendants. Le fluide s'est structuré, s'est auto-organisé à partir du moment où la distance à l'équilibre a dépassé un seuil critique, en l'occurrence dès que le gradient vertical de température a dépassé une certaine valeur.

Il y a une vingtaine d'années Belousov et Jabotinsky ont mélangé de l'acide malonique et de la ferroïne; ils ont alors observé l'apparition d'ondes colorées se déplaçant dans le milieu de façon quasi périodique pendant plusieurs dizaines de minutes.

Ces deux exemples ont comme trait commun d'être des systèmes loin de l'équilibre (SCHWARZ 1988). Une grande distance à l'équilibre a comme conséquence des relations non-linéaires entre les forces, les gradients d'une part et les flux de l'autre. Ces non-linéarités à leur tour ont des conséquences dramatiques sur la dynamique des systèmes, en particulier en faisant apparaître des effets synergiques, collectifs qui peuvent briser l'uniformité initiale d'un milieu, donnant naissance à des structures spatiales comme les cellules de convection, soit à des structures temporelles comme les oscillations de Belousov-Jabotinsky, soit à des ondes progressives ou même stationnaires. Ce sont les fameuses structures dissipatives de Prigogine. Certains chercheurs de l'Ecole de Bruxelles estiment que ces régimes stationnaires, se produisant dans des systèmes non linéaires, pourraient être à l'origine des premières formes d'organisation prébiotiques apparues il y a 3,5 milliards d'années.

En résumé, nous dirons que l'auto-organisation, même si elle est une propriété importante de la matière vivante, peut se trouver présente également dans d'autres systèmes non isolés, loin de l'équilibre, ayant une dynamique non linéaire.

e) *Autopoïèse?*

On pense souvent que la reproduction est la caractéristique essentielle des êtres vivants. Dans ce contexte, on présente le code génétique comme un programme de construction des individus. Ainsi au niveau anatomique, la structure en cellules et la présence d'ADN semblent être une signature incontournable du vivant, du moins à notre échelle. Par contre, considéré à l'échelle planétaire, quel est le rôle de la reproduction? N'apparaît-elle pas comme un simple moyen logistique permettant de recycler la matière pour assurer la survie de la vie, en tant que processus autonome? Vues globalement, la faculté de reproduction et la présence d'ADN ne seraient que des propriétés contingentes, liées aux péripéties de l'histoire de la vie sur cette planète. La propriété essentielle de la vie ne serait donc pas la reproduction des individus mais plutôt la faculté globale de la vie de s'autoproduire, c'est-à-dire l'autopoïèse. Cette notion, fort abstraite et d'un grand caractère de généralité, a été introduite par Maturana et Varela précisément dans le contexte de la recherche de la nature de la vie. Elle est liée à une propriété de nature logique, la clôture opérationnelle. Est autopoïétique, c'est-à-dire se produit lui-même, un système qui n'a pas de liens logiques avec l'extérieur, c'est-à-dire qui est logiquement fermé sur lui-même. Nous recommandons aux lecteurs désirant se familiariser avec ces notions de se reporter au livre de Varela qui vient d'être traduit en français (VARELA 1989).

Nous avons passé en revue un certain nombre de propriétés des systèmes vivants. Nous avons vu qu'ils partagent ces propriétés avec d'autres systèmes, non vivants, à l'exception de la dernière, l'autopoïèse, l'autoproduction qui semble liée à l'ancienneté, donc à la complexité des systèmes vivants, par comparaison avec d'autres systèmes loin de l'équilibre, tels que des cellules de convection. On trouvera dans le tableau ci-dessous les quatre propriétés que nous avons passé en revue.

Propriétés des systèmes vivants	*Conséquences sur leur dynamique*
1. Systèmes non isolés	mouvements, flux, échanges
2. Systèmes ayant de nombreuses boucles de rétroaction négatives	homéostasie, régulations
3. Systèmes loin de l'équilibre thermodynamique et chimique ayant une dynamique non linéaire	auto-organisation
4. En plus, systèmes anciens donc complexes	autopoïèse (autoproduction)

5. GAÏA EST-ELLE UN ORGANISME VIVANT?

Comme c'est souvent le cas pour les questions fondamentales, il est nécessaire de préciser ici le sens que nous donnons aux mots. Si nous utilisons le mot vivant comme on le fait dans le langage courant et même

dans le contexte de la biologie classique, c'est-à-dire en y associant les notions de reproduction, d'acides aminés, de protéines, de code génétique, alors certainement Gaïa n'est pas un organisme vivant.

Plaçons-nous par contre dans un contexte systémique, et plus particulièrement à son niveau le plus simple et le plus fondamental, celui de la thermodynamique. Tous les systèmes de la nature font partie d'une des trois catégories suivantes (PRIGOGINE 1979).

1. Systèmes isolés n'ayant aucun échange avec l'extérieur. S'ils n'y sont pas déjà, ces systèmes retournent à l'équilibre en suivant le deuxième principe de la thermodynamique (entropie maximale).
2. Systèmes non isolés près de l'équilibre. Peuvent échanger matière et/ou énergie avec leur environnement. Leur dynamique est régie par la loi de production minimale d'entropie (exemple: flux laminaire).
3. Systèmes non isolés loin de l'équilibre. Leur dynamique, non linéaire, n'est régie par aucun principe général. Chaque système doit être étudié pour lui-même; les non-linéarités des équations différentielles conduisent souvent à l'émergence de structures dissipatives pouvant conduire à un processus d'auto-organisation.

Des systèmes ayant une longue histoire d'auto-organisation peuvent présenter un degré de complexité tel qu'émerge une nouvelle propriété, l'autopoïèse. La matière vivante habituelle, à notre échelle, «microscopique», fait partie de cette catégorie de systèmes.

Gaïa — la planète Terre dans sa totalité — est également un système ancien, non isolé et loin de l'équilibre, qui se révèle de plus en plus complexe aux chercheurs. C'est pourquoi, pour certains, il semble conséquent de supposer qu'elle présente également des caractères autopoïétiques. Dans ce sens, nous devons considérer, tout en sachant que nous choquerons de nombreux lecteurs, que Gaïa est un être vivant.

6. CONCLUSIONS

Nous avons présenté succinctement l'hypothèse Gaïa de James Lovelock, suivant laquelle la planète Terre dans sa totalité (plantes, animaux, atmosphère, hydrosphère, lithosphère) pourrait être considérée comme une entité vivante ayant des propriétés globales que ne possèdent aucun de ses composants mais qui émergent de leurs interactions. Parmi ces propriétés, celle d'autorégulation à une certaine échelle de temps, et celle d'auto-organisation à une autre échelle de temps, sont caractéristiques d'une catégorie de systèmes appelés autopoïétiques, c'est-à-dire autoproducteurs ou qui se produisent eux-mêmes.

La question de savoir si la terre est un organisme «vivant» est plus une question de linguistique, de sémantique que de sciences naturelles. La terre n'est certainement pas un organisme vivant au sens habituel du terme tel qu'on l'utilise pour décrire des plantes, des animaux et des êtres humains. Par contre si on élargit le sens du mot vivant pour en faire un synonyme du mot autopoïétique, alors on peut admettre que la terre est une entité vivante.

De nombreuses recherches sont encore nécessaires pour préciser les notions qui gravitent autour du concept d'autopoïèse et arriver à un consensus général.

BIBLIOGRAPHIE

VON BERTALANFFY, L. – (1973). *Théorie Générale des Systèmes*. 298 pp., *Paris* (Dunod).

KERR, R. A. – (1988). No Longer Willfull, Gaïa Becomes Respectable. *Science* 240: 393-395.

LOVELOCK, J. – (1986). *La Terre est un Etre vivant. L'hypothèse Gaïa*. 184 pp., *Paris* (Rocher).

PRIGOGINE, I. et STENGERS, I. – (1986). *La Nouvelle alliance: Métamorphose de la Science*. 439 pp., *Paris* (Gallimard, coll. Folio Essais).

SCHWARZ, E. – (1988). *La Révolution des Systèmes: Une introduction à l'approche systémique*. 290 pp., *Fribourg* (Delval).

VARELA, F. – (1989). *Autonomie et Connaissance: Essai sur le vivant*. 248 pp., *Paris* (Seuil).

WIENER, N. – (1952). *Cybernétique et Société*. 294 pp., *Paris* (Deux-Rives).