

Au-delà de la physique

Stuart A. Kauffman

Au-delà de la physique

Un nouveau regard sur l'origine de la vie

Traduit de l'anglais par Julien Bambaggi

DUNOD

A *World Beyond Physics* was originally published in English in 2019. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Dunod Éditeur is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

© Oxford University Press 2019

L'édition originale de l'ouvrage *Au-delà de la physique* a été publiée en anglais en 2019. Cette traduction est publiée avec l'accord d'Oxford University Press. Dunod Éditeur est le seul responsable de cette traduction réalisée à partir du texte original, et Oxford University Press décline toute responsabilité en cas d'erreurs, d'omissions, d'inexactitudes ou d'ambiguïtés dans cette traduction, ou pour toute perte causée par l'utilisation des informations qui y figurent.

© Oxford University Press 2019

Direction artistique : Élisabeth Hébert

Retrouvez l'ensemble de notre catalogue
sur notre site dunod.com

© Dunod, 2021 pour la traduction française
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-081205-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Prologue

Legs de Newton, la physique classique représente notre monde, mais écrit au mode passif : les rivières s'écoulent, les pierres tombent, les planètes se déplacent sur leurs orbites, les étoiles décrivent des arcs dans l'espace-temps que leur masse déforme. Rien n'agit, tout arrive : des myriades de choses se produisent, cela tient du miracle, mais c'est simple.

Tandis que je me suis assis pour écrire après être passé par la cuisine pour prendre une nectarine, je vais sur mes 78 ans. Hier, je suis monté à bord du *Poised Realm*, mon bateau de 22 pieds pour faire la traversée en skiff jusqu'au Crane Dock sur Orcas Island et me rendre à Eastsound, dans l'État de Washington, afin d'acheter cette nectarine qui a fait mon goûter. Mon cœur bat un petit peu fort, mon cœur d'homme. La plupart de mes lecteurs ont aussi le cœur d'un être humain.

Mais comment sont apparus mon cœur, la nectarine, ma cuisine, le bateau, Eastsound depuis ce simple événement qui s'est produit il y a 13,7 milliards d'années, le Big Bang ?

Depuis Newton, nous nous en remettons à la physique pour appréhender la réalité : ce qui constitue le RÉEL. Mais

la physique ne nous dira pas d'où nous venons, comment nous y sommes parvenus, pourquoi le cœur humain existe ; ni pourquoi je peux acheter des nectarines à Eastsound, sans parler de ce que signifie « acheter ».

C'est de tout cela dont nous allons parler, parce qu'il y en a davantage à savoir que ce que nous connaissons, davantage à dire que ce dont nous sommes capables.

Nous vivons dans un monde qui se situe au-delà de la physique.

Un monde de créatures vivantes qui se construisent elles-mêmes. Mais les concepts nous manquent pour le dire. Un arbre se construit à partir d'une graine, s'élance vers le soleil. Nous en sommes spectateurs et ne savons quoi en dire. Une forêt se construit elle-même, enracinée, ramifiée, paisible, comme en attente. La biosphère se développe elle aussi dans la diversité, pour donner ce qui est possible, et ce depuis quelque 3,7 milliards d'années. Une girafe? Qui aurait pu en avoir l'idée il y a 3 milliards d'années? Personne. Et les nectarines? Qui, à l'époque, aurait pu parler des nectarines?

Nous pensons que 50 à 90 % des 10 000 milliards de milliards (10^{22}) d'étoiles de l'univers connu sont pourvues de planètes en orbite autour d'elles. J'y reviendrai, mais si, comme je le crois, la vie abonde, l'univers est rempli de phénomènes en devenir, qui relèvent certes de la physique, mais au-delà de toute physique connue de nous.

L'idée qu'il y a peut-être 10^{22} biosphères me laisse pantois. Bien sûr, nous sommes transportés par l'image des milliards de galaxies que nous livre le télescope Hubble – quelque 10^{11} parmi elles. Mais y a-t-il 10^{22} biosphères aussi exubérantes que

la nôtre? Non pas un seul « monde au-delà de la physique », mais des mondes, aussi vastes que l'est notre physique, presque au-delà de la connaissance.

L'idée d'un système en autoconstruction est absente de notre science. J'introduirai le concept requis, dû à Maël Montévil et Mateo Mossio (2015) et appelé « clôture entre contraintes ». Ces jeunes chercheurs ont découvert un – peut-être « le » – concept qui nous manquait dans l'organisation biologique. Nous nous efforcerons de bien le comprendre pour nous en inspirer. Ces idées sont un tout petit peu complexes, mais pas tant que cela. Nous y parviendrons. Pour l'instant, nous pouvons nous contenter de voir la clôture entre contraintes de la manière suivante: il s'agit d'un ensemble de contraintes portant à la fois sur la libération d'énergie dans les processus hors équilibre et sur ces processus eux-mêmes, en sorte que le système construise ses propres contraintes. C'est une idée extraordinaire! Les cellules le font, pas les voitures.

Les systèmes vivants réalisent cette clôture entre contraintes et ce qu'on appelle des « cycles thermodynamiques de travail » grâce auxquels ils peuvent se reproduire. Les systèmes vivants connaissent aussi la variation transmissible de Darwin et peuvent donc être soumis à la sélection naturelle: c'est ainsi qu'ils évoluent. J'ai déjà écrit à ce sujet dans certains de mes précédents ouvrages. Mais j'étais ennuyé par le sentiment que quelque chose manquait. Avec la clôture entre contraintes, c'est une pièce essentielle du puzzle qui s'est mise en place.

Un phénomène évolutif ne peut être décrit par avance : il émerge de façon *impréconcevable*¹ (*unprestatably* en anglais, le mot adéquat manque) et contribue à la complexité croissante de notre biosphère. Nous en sommes les enfants : tout comme les girafes, les nectarines et les concombres de mer.

Il y a quelques années, à l'occasion de la fête donnée pour son soixante-dixième anniversaire, un ami physicien a souri de la vision que les biologistes ont du monde. Si des biologistes s'étaient trouvés aux côtés de Galilée en haut de la Tour de Pise, ils auraient laissé tomber des pierres rouges, orangées, roses, bleues, vertes, etc.

Mes collègues physiciens s'esclaffent en connaissance de cause. Les physiciens cherchent à simplifier pour découvrir des lois tandis que, pour les biologistes, il s'agit d'étudier la façon dont la vie s'est complexifiée. Bien entendu, les pierres rouges sont les girafes, les orangées les nectarines, les bleues des concombres de mer et les vertes, eh bien, nous ! La question n'est pas de savoir qui, du concombre de mer, de la girafe, de nous ou de la nectarine tombe le plus vite, mais de savoir d'où ils viennent, au tout début.

La physique ne nous le dira pas. Personne ne le sait.

Il y a un monde au-delà de la physique.

Darwin nous a enseigné que des espèces nouvelles dressent des barrières sur le sol encombré de la nature pour dégager

1. « *Unprestatably* », ailleurs « *unprestatable* » : néologisme formé à partir de « state », affirmer, stipuler. Cela signifie donc quelque chose dont on ne saurait même pas parler à l'avance. « Impréformulable », en quelque sorte. Nous avons choisi de traduire là aussi par un néologisme : *impréconcevable*. (N.d.T.)

l'espace nécessaire à leur existence : c'est vrai et faux. Le seul fait que des créatures existent crée les conditions mêmes pour que d'autres créatures émergent. Les espèces constituent les fissures du sol de la nature, formant les niches qui vont permettre à d'autres espèces d'apparaître et de créer elles-mêmes encore plus de fissures pour faire émerger toujours davantage d'espèces.

La biosphère s'épanouit et recrée ses propres possibilités de diversification et prolifération.

Il en va de même, presque sans qu'on le remarque, de la croissance explosive de l'économie mondiale. Des biens nouveaux créent des niches pour de nouveaux biens à venir : l'invention du World Wide Web a créé des espaces pour la vente en ligne, d'où eBay et Amazon. Qui, à leur tour, créent du contenu en ligne, et donc des possibilités pour des moteurs de recherche comme Google ; et, pour les entreprises qui se lancent sur Internet, la recherche d'algorithmes permettant de vendre toujours davantage de choses. Songez aussi aux applications pour iPhone, et aux applications pour les applications, comme les bloqueurs de pub qui suppriment les baratins publicitaires que Safari affiche.

Nous titubons dans le monde que nous rendons possible en allant de l'avant, avec peu ou pas d'intuition ou de prescience. Je peux aller à Eastsound acheter des nectarines.

Nous pensons que c'est dans la physique – la relativité restreinte et générale, la mécanique quantique, la théorie quantique des champs et son modèle standard – que nous trouverons les fondements nous permettant de déduire le

monde, le devenir ultime. Mais ce n'est pas possible. Peut-être le devenir ultime repose-t-il sur les fondements, mais il n'est pas déductible à partir d'eux. Il s'agit d'un déploiement qui échappe à la connaissance, se libère de ses amarres originelles et flotte librement. Selon Héraclite, le monde vivant est un devenir bouillonnant.

1

Le monde n'est pas une machine

Depuis la naissance de la physique classique et les triomphes de Descartes, Newton et Laplace, nous en sommes venus à voir dans la physique la réponse aux questions que nous nous posons sur ce qu'« est » le réel. Dans cette quête, nous avons fini par penser le monde comme une grande machine. Ce cadre newtonien de base s'est merveilleusement étendu à la relativité, restreinte comme générale. La mécanique quantique et la théorie quantique des champs ont affecté certains des fondements déterministes de la physique classique mais pas la vision de la réalité comme une énorme « machine ».

La thèse que je défends dans ce livre est que, s'agissant d'une biosphère en évolution, la nôtre ou n'importe laquelle dans l'univers, l'image de la « machine » est fautive. La vie évolue, ce n'est pas une machine. Il faudra encore

faire preuve de patience pour comprendre et expliquer cette évolution. On ne peut prévoir quelles seront les conséquences de ce changement dans la façon de voir le monde. J'espère en tout cas que cela signifiera, entre autres, la prise de conscience que nous faisons partie d'un monde vivant qui crée son devenir avec une indicible inventivité. J'espère aussi que cela sera une source de joie, que cela provoquera une conscience plus aiguë et une compréhension plus fine de ce qu'est le monde vivant. Et qu'il en résultera un sens plus profond des responsabilités à son égard. Le temps nous le dira.

C. P. Snow, dans son célèbre essai *Les deux cultures*², a décrit la coupure entre le monde des sciences et celui des arts. Une partie de ce clivage vient de la distinction entre matière « muette » et imagination humaine. Mais, entre les deux, se trouve le monde vivant, en évolution, que sa conscience s'exprime largement ou pas du tout. J'espère montrer que, contrairement à la physique où les lois jouent un grand rôle, l'évolution de la biosphère n'est conditionnée par aucune loi. Personne ne sait ni ne peut savoir ce qui se produira à mesure que la biosphère évolue et façonne son propre avenir en suivant des voies qui nous sont imprévisibles. Elles sont *impréconcevables*. Cette émergence dépourvue de loi, contingente mais non aléatoire, réserve une place qui se situe entre la matière muette et Shakespeare. La vie elle-même est un pont entre physique et art.

2. La traduction française de la conférence de Charles Percy Snow donnée en 1959, *The Two Cultures*, est parue chez Jean-Jacques Pauvert en 1968. (N.d.T.)

1. Le monde n'est pas une machine

Ensemble, nous allons explorer ces questions que je viens à peine d'ébaucher. Il y a beaucoup à faire, davantage que ce qu'on peut espérer de ce livre. Mais je vais m'efforcer de nous donner un bon départ!

L'univers est non ergodique au-dessus du niveau des atomes

L'univers a-t-il produit tous les types possibles d'atomes stables? La réponse est oui. Les bosons et les fermions – les deux grandes sortes de particules de la physique – se sont acoquinés de toutes les façons imaginables pour donner les quelque cent éléments qui constituent la matière. Mais l'univers créera-t-il toutes les réalisations complexes possibles? Certainement pas. La plupart d'entre elles n'existeront jamais.

Il est facile d'en comprendre la raison. Les protéines sont des séquences linéaires de vingt types d'acides aminés – l'alanine, la phénylalanine, la lysine, le tryptophane, etc. La séquence spécifique – le long de la « chaîne principale » d'une protéine donnée – de ces vingt acides aminés, reliés par des liaisons peptidiques, définit la séquence primaire de cette protéine. La protéine se replie ensuite de manière complexe pour remplir sa fonction dans la cellule.

Une protéine humaine typique est une séquence linéaire de quelque trois cents acides aminés. Plusieurs milliers pour certaines protéines.

Combien y a-t-il de protéines possibles avec seulement deux cents acides aminés dans chacune? Pour chaque place, il y a vingt choix possibles : le nombre de protéines possibles

d'une longueur de deux cents acides aminés est 20^{200} , soit un nombre de l'ordre de 10^{260} . C'est un nombre hyper-astronomique!

Maintenant, il faut comprendre que l'univers ne peut pas avoir fabriqué plus qu'une toute petite fraction de ces protéines possibles depuis le Big Bang.

Nos meilleures estimations donnent un âge de l'univers de 13,7 milliards d'années, ce qui représente de l'ordre de 10^{17} secondes. On estime le nombre de particules de l'univers connu à 10^{80} . La mécanique quantique nous explique que la durée la plus courte pendant laquelle quelque chose peut se produire dans l'univers est la durée de Planck, soit 10^{-43} secondes.

Par conséquent, si les 10^{80} particules de l'univers n'avaient rien fait d'autre depuis le Big Bang que fabriquer des protéines à chaque tic-tac de l'horloge de Planck, il aurait fallu 10^{39} fois les 13,7 milliards d'années d'histoire de l'univers pour fabriquer toutes les protéines possibles avec une séquence de deux cents acides aminés. (En revanche, il n'a sans doute fallu que quelques milliards d'années pour fabriquer les vingt acides aminés.)

Quoi qu'il en soit, l'univers n'a pu fabriquer qu'une minuscule fraction (1 sur 10^{39}) des protéines possibles d'une longueur en acides aminés de deux cents.

L'histoire entre en scène lorsque le domaine du possible est beaucoup plus vaste que celui de la réalité. L'évolution de la vie, par exemple, est elle-même un processus profondément historique. Il en va de même pour la chimie de l'espace et la formation de molécules complexes. Ainsi, le