

La **PLANÈTE TERRE** et ses **EXTRAORDINAIRES** **PROPRIÉTÉS**

Émergence, adaptation, autorégulation



Philippe **Bertrand**



L'état le plus structuré de la matière

1 Hasard et nécessité?

LA TERRE actuelle est un aboutissement improbable – mais possible – puisqu'il existe! – des propriétés combinatoires de la matière. On peut alors se demander, comme l'ont fait Jacques Monod et Christian de Duve à propos de la vie, quelles sont les parts de hasard et de nécessité dans cette structuration improbable de la matière.

Jacques Monod (1910-1976), prix Nobel de Physiologie-Médecine en 1965, est venu à penser que la part de hasard est si énorme dans l'origine de la vie qu'il s'agit peut-être d'un phénomène unique. Il écrivit alors: *L'univers n'est pas gros de vie, ni la biosphère de l'homme. Notre numéro est sorti au jeu de Monte Carlo. Quoi d'étonnant à ce que, tel celui qui vient d'y gagner un milliard, nous éprouvions l'étrangeté de notre condition? L'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé par hasard.*

Christian de Duve (1917-2013), prix Nobel de Physiologie-Médecine en 1974, fut en revanche convaincu que la part de hasard dans l'origine de la vie est faible en raison des propriétés combinatoires de la matière. Celles-ci, au fur et à mesure du temps, créent un ensemble de nouvelles conditions, c'est-à-dire une contingence, rendant l'émergence de la vie très probable. Il écrivit alors: *La vie appartient à la trame même de l'Univers. Si elle n'était pas une manifestation obligatoire des propriétés combinatoires de la matière, il eut été absolument impossible qu'elle prenne naissance naturellement.* Cette vision, dite du *hasard contraint*, peut toutefois être modulée selon le caractère inéluctable, ou non, que l'on prête

à cette évolution. Le mot *obligatoire* qu'emploie Christian de Duve indique que, selon lui, les propriétés combinatoires de la matière doivent inéluctablement aboutir à la vie en certains lieux et à certains moments de l'Univers. La tentation est grande, pour certains courants de pensée à caractère métaphysique, ou même religieux, de reformuler cette idée à propos de l'origine de l'homme. Cela va dans le sens du principe anthropique qui affirme que les constantes universelles de l'Univers et les propriétés combinatoires de la matière, qui ne sont pourtant que des produits scientifiques de l'esprit humain, ont rendu inéluctable l'apparition de la vie, avec l'être humain en aboutissement ultime. Un dessein intelligent, celui d'une transcendance divine se trouverait derrière cela. Bien évidemment, il n'y a pas d'aboutissement ultime dans l'évolution biologique et nul ne sait ce que seront les étapes et les protagonistes futurs. C'est pour cela que les obédiences religieuses s'opposent si vivement à la théorie de l'évolution alors qu'elles s'accommodent plus facilement des autres grandes théories scientifiques comme la relativité, la physique quantique ou le Big Bang. La théorie de l'évolution, bien que confortée elle-aussi par les faits et les expériences, subit des assauts de plus en plus violents visant à la discréditer, voire à la censurer dans l'éducation.

Dans les textes qui suivent, les commentaires relatifs aux parts respectives du hasard et de la nécessité, sont bien sûr limités aux arguments strictement scientifiques. Mais ils montreront que, même en évitant tout dogmatisme religieux, la partition n'est pas si simple, qu'elle aboutit à une indécidabilité philosophique, et que l'émergence de la vie elle-même a introduit une part d'imprévisibilité dans la structuration de la matière.

2 La structuration de la matière, à la fois microscopique et macroscopique

La matière que nous avons sous nos yeux est macroscopique. Nous en voyons le poids, les formes et les couleurs mais pas les détails microscopiques comme les molécules et les atomes, ni les détails encore plus fins comme les noyaux d'atomes ou leurs composants fondamentaux, les neutrons et les protons, ni les composants fondamentaux des neutrons et des protons que l'on appelle des quarks. En fait, le verbe «voir» sous-entend ici deux états

bien différenciés de la structuration de la matière, dont l'un peut être perçu directement par nos sens et l'autre non. Lorsque suffisamment d'interactions s'établissent entre des particules microscopiques, alors la matière prend l'aspect d'un corps macroscopique. À l'inverse, lorsque la matière se disperse en molécules ou en atomes, elle prend l'aspect et les propriétés respectives d'un gaz ou d'un plasma. La science nous a donné les moyens technologiques de «voir», au-delà de nos sens, ces particules microscopiques. Mais en poursuivant notre raisonnement, on peut aussi imaginer la dispersion des protons et des neutrons, et même celle des quarks. On aboutit alors à une situation où des particules quantiques fondamentales, dispersées et insécables, comme les quarks, évoluent sans interactions entre elles. Elles sont alors totalement invisibles puisque toute tentative de les «voir» revient à établir des interactions avec elles et à rompre leur isolement. En fait, dans une telle situation, ce sont les étranges propriétés quantiques qui dominent. Par exemple, le principe d'incertitude de Werner Heisenberg nous dit qu'avant d'avoir interagi avec une particule quantique isolée, c'est-à-dire avant de l'avoir observée, on ne peut savoir en même temps quelle est son énergie et sa localisation. Pire! Cette particule peut *a priori* se trouver à n'importe quel endroit de l'Univers, elle n'a en fait pas de localisation. Dans notre vie courante, nous préférons bien sûr avoir affaire à des objets macroscopiques, pesants, colorés, formatés et bien localisés. Ces propriétés macroscopiques dérivent des innombrables interactions qui se sont établies entre particules quantiques depuis le Big Bang, origine théorique de l'univers dans le modèle cosmologique actuel, datée d'environ 13,8 milliards d'années.

3 La beauté dans la structuration de la matière

Au travers des interactions entre ses structures microscopiques, la matière acquiert sa structuration macroscopique, c'est-à-dire une morphologie et éventuellement une distribution de couleurs ou de textures. C'est celle-ci qui nous inspire un sentiment subjectif de beauté ou d'esthétique.

Alan Turing est un mathématicien britannique qui a jeté les fondements de l'informatique en créant la machine de Turing, et qui a travaillé sur le décodage du code *Enigma*, utilisé par l'armée allemande pendant la Seconde

Guerre mondiale. À la fin de sa vie, il s'est également penché sur la question de la genèse des formes et a montré qu'elles pouvaient être générées par des algorithmes informatiques en créant des états stationnaires numériques. Des structures similaires ont été observées en chimie des milieux liquides où un ensemble de réactions chimiques se produisent en aboutissant à un état stationnaire macroscopique, c'est-à-dire une stabilité de ce que l'on peut voir. En informatique comme en chimie, la visualisation macroscopique est stable, mais le système microscopique sous-jacent est dynamique.

Des structures de type «Turing» peuvent aussi être observées dans le domaine du vivant, par exemple des alternances régulières de bandes de couleur sur les écailles, le pelage ou le plumage d'un animal, ou sur la cuticule d'une plante. Ici, l'interrogation porte sur les phénomènes du développement embryonnaire. À partir de cellules souches disposant des mêmes gènes, un organisme se développe avec des changements progressifs contrôlés par l'environnement de chaque cellule. Les gènes y sont sensibles au travers de mécanismes dits épigénétiques qui modifient leur état d'activation (expression) ou d'inhibition avec éventuellement une sélection naturelle (darwinienne) des cellules. Ces phénomènes sont une grande voie de la recherche biologique d'aujourd'hui, que l'on appelle «évo-dévo» pour signifier la convergence des questions fondamentales de l'évolution darwinienne et de celles du développement embryonnaire et corporel. Bien que ceci soit très spéculatif, on peut imaginer que les structures biologiques de Turing ne sont qu'un simple détail de l'état stationnaire général de l'individu adulte.

Des structures ressemblant à des formes biologiques ont également été étudiées dans le domaine des fractales. Celles-ci sont caractérisées par des structures simples qui se reproduisent à toutes les échelles d'espace. Par exemple, la fougère de Barnsley (**Figure 1.1**) est construite par algorithme avec une prescription structurante simple qui s'applique à toutes les échelles depuis l'état microscopique initial (simple, peu structuré) jusqu'à l'état macroscopique (très structuré, fractal). Des structurations fractales similaires, comme le triangle de Sierpinski, peuvent aussi être construites par algorithme descendant depuis l'état macroscopique. Sur un plan esthétique, donc subjectif, on peut mentionner ici la grande beauté des structures de Mandelbrot, le pionnier de la science des fractales, même si celles-ci n'ont pas, à ma connaissance, d'équivalents dans le vivant.

Finalement, la genèse d'une structure macroscopique compliquée, éventuellement belle pour nos sens, n'a pas besoin d'une grande quantité d'information initiale. Une partie de l'information décrit l'état initial, et l'autre, génétique, décrit un jeu de règles de progression, très limité, qui s'applique étape par étape (algorithme), avec modification de la contingence à chaque étape (incrémentation de l'information décrivant la contingence). Bien entendu, ce que des algorithmes humains peuvent faire, la nature peut le faire. Une structuration initiale porteuse de l'information génétique est le guide qui s'applique à chaque étape du développement. Les flux de matière et d'énergie sont les conditions nécessaires à ce développement. Enfin l'entité développée constitue à chaque étape une contingence qui contraint les possibilités du développement à l'étape suivante.

Dès qu'on prend le temps d'observer ce qui nous entoure, la beauté des structures terrestres nous émerveille. Certaines sont issues du développement des corps des êtres vivants et de l'évolution des espèces, comme les coraux, les fleurs, les pelages, les plumages, les écailles, les coquilles. D'autres sont des effets de phénomènes physiques sur l'atmosphère, comme les levers et les couchers de soleil, les aurores polaires, les nuages ondulatoires, lenticulaires, stratifiés (**Figure 1.1**). Mais le système Terre est aussi, dans son ensemble, d'une étonnante beauté car nous pouvons désormais le contempler depuis l'espace et saisir les mouvements à grande échelle des cyclones, des grands panaches volcaniques, des efflorescences printanières du phytoplancton, des plissements tectoniques, de l'écoulement des calottes glaciaires vers l'océan.

Mais la connaissance que ce livre a l'ambition de révéler porte en elle-même une beauté moins visuelle, celle d'une structure planétaire globale qui s'est construite en plusieurs milliards d'années, et qui a acquise l'extraordinaire propriété d'autopoïèse.

Figure 1.1. La beauté de la structuration de la matière

La structuration terrestre de la matière peut prendre des formes multiples, permanentes ou éphémères. Certaines ne sont pas biologiques, comme des nuages stratifiés (en haut), et ne répondent qu'aux lois combinatoires de la matière. D'autres sont biologiques comme une feuille de fougère, le pelage d'un zèbre, ou la coquille d'un mollusque. Celles-ci sont imprévisibles car elles répondent à la fois aux lois combinatoires de la matière et à la sélection naturelle. Certaines sont néanmoins modélisables par un simple algorithme mathématique appliqué sur un contexte initial prescrit, comme la fougère fractale de Barnsley (en bas). Ces structures locales peuvent nous inspirer le sentiment subjectif de la beauté. Mais la Terre est dans son ensemble, un objet encore beaucoup plus structuré et qui a acquis l'extraordinaire propriété d'autopoïèse, c'est-à-dire de se construire et se maintenir par elle-même pour peu qu'elle puisse échanger de l'énergie avec l'Univers environnant. Cette beauté-là ne peut être perçue au travers de nos seuls sens. L'ambition de ce livre est de partager les connaissances dont nous disposons aujourd'hui afin que chaque lecteur puisse percevoir à quel point la Terre est belle.

Photo de nuages © P. Bertrand



4 Quelle est l'origine de la matière ?

La structuration de la matière a connu bien des étapes depuis le Big Bang, au fur et à mesure que des conditions nouvelles apparaissaient dans l'Univers. Dans les premiers instants, des quarks se sont rapidement associés, probablement au hasard des rencontres, sous l'effet d'une interaction, dite nucléaire forte, pour former des protons et des neutrons. Les premiers protons constituaient de fait les premiers noyaux de l'élément hydrogène, très majoritaire au moment du Big Bang, et encore majoritaire aujourd'hui dans l'Univers. Puis des protons et des neutrons se sont associés, au hasard des rencontres, sous l'effet d'une interaction, dite nucléaire faible, pour commencer à former d'autres noyaux composites, quoiqu'encore très simples, ceux de l'hélium et du lithium. À ce stade l'Univers était d'une grande simplicité chimique, avec seulement 3 éléments présents !

Pour synthétiser de nouveaux noyaux, composés de plus de protons et de neutrons, il fallait de nouvelles conditions, celles qui apparurent au cœur des premières étoiles, environ 75 millions d'années après le Big Bang. Or, ces premières étoiles, comme les suivantes, les actuelles et les futures, se forment sous l'effet d'une des grandes forces de l'Univers, celle de l'attraction gravitaire.

Nous avons tous l'expérience de l'attraction gravitaire des corps, celle qui nous lie à la Terre par notre poids ou celle qui fait tomber les gouttes de pluie. Parmi les grandes théories de la physique, certaines d'entre elles se sont attachées à décrire cette attraction, aussi appelée interaction gravitaire. Copernic, Kepler et Galilée en ont été des pionniers, mais la première formalisation théorique véritable fut celle de Newton à l'aube du XVIII^e siècle. Pour Newton les corps s'attirent en fonction de la distance qui les sépare et de leurs masses respectives. Il en résulte les mouvements gravitaires que sont la chute des objets sur la Terre, les trajectoires orbitales des planètes et des astéroïdes autour d'une étoile, et la contraction à grande échelle de la matière dans l'espace avec pour corollaire la formation d'étoiles, de galaxies et de trous noirs. Cette première théorie de la gravité s'applique dans un espace euclidien homogène à 3 dimensions, c'est-à-dire dans un espace où règnent les lois de la géométrie euclidienne, celles qui nous sont familières. Elle garde toute son actualité et reste largement applicable dans notre monde terrestre, ainsi

qu'à l'échelle des mouvements orbitaux du système solaire. Toutefois, aux très grandes échelles de temps et d'espace, certains effets observés ne sont pas prévus par la théorie newtonienne. Une autre théorie de la gravité, plus étendue, lui a donc succédé, celle de la relativité générale d'Einstein (1915). Einstein a pour cela rompu avec la vision d'un espace homogène à 3 dimensions, et lui a substitué la vision d'un espace déformable à 4 dimensions où le temps est l'une de ces dimensions. Dans la vision d'Einstein, le mouvement gravitaire newtonien est remplacé par la déformation de l'espace-temps due à la concentration des masses de matière.

Dans les théories de Newton et d'Einstein les grandeurs sont continues et les équations déterministes. La discontinuité et le hasard n'y ont pas de place. Tout y est connu du passé comme de l'avenir. Seule notre incapacité à donner un état initial infiniment précis nous empêche d'explorer l'avenir ou le passé lointain à la lumière de ces théories. En revanche les théories de la physique quantique font intervenir la notion de discontinuité et d'aléa, c'est-à-dire de hasard et de probabilité, dans l'évolution de l'énergie, de la masse, du temps et même de l'espace. Nous sommes encore loin d'une «théorie du tout» qui relierait ces deux grands pans de la physique, mais la question de l'origine de la masse, c'est-à-dire de la matière, établit un premier point de connexion. En physique on considère que la masse d'un objet lui confère une certaine inertie, ce qui signifie qu'il faut lui apporter de l'énergie pour l'accélérer. On parle d'ailleurs de masse inerte pour la différencier de la masse grave, c'est-à-dire de celle dont dépend l'attraction gravitaire des masses entre elles. Jusqu'à présent la science n'a jamais constaté de différence mesurable entre la masse inerte et la masse grave. La théorie quantique nous dit que la masse existe par le fait que certaines particules sont freinées par un champ appelé le champ de Higgs, apparu peu de temps après le Big Bang, lorsque l'univers fut suffisamment refroidi. La découverte récente, en 2012, du boson de Higgs, particule issue de l'interaction entre le champ de Higgs et les particules freinées par celui-ci, est venue confirmer la prévision théorique de plusieurs physiciens faite en 1964. Dès lors, l'existence de la masse, c'est-à-dire de la matière, ou son absence, disposait d'une explication théorique issue de la physique quantique.

5 D'où vient la diversité chimique de la matière?

Les étoiles se forment par la concentration gravitaire de matière au sein de grands nuages cosmiques de gaz et de poussières, résultant eux-aussi d'une concentration gravitaire préalable. À partir d'une certaine masse accumulée, les conditions physiques de pression et de confinement au cœur d'une étoile permettent la fusion des noyaux des éléments chimiques présents pour synthétiser des noyaux plus lourds. C'est ainsi que l'étoile s'allume en amorçant la fusion nucléaire en son cœur, d'où elle tire l'énergie de son rayonnement.

La formation d'étoiles est un phénomène général qui répond à des conditions cosmiques, celles de la présence de matière et du champ de gravité qui l'accompagne. Le rôle du hasard y est donc faible (**Figure 1.2**). Il est limité à certaines questions. Où, quand, et avec quoi se forme une étoile? On ne peut prévoir la naissance d'une étoile en particulier car les fluctuations de la répartition de la matière dans l'espace relèvent d'une infinité de causes, dont la naissance et la mort d'étoiles antérieures, qui s'enchaînent dans le temps. De la même façon que les prévisions météorologiques deviennent chaotiques, c'est-à-dire impossibles, au-delà de 8 à 10 jours, celles de la prévision de la naissance des étoiles l'est aussi à l'échelle de temps qui les concerne.

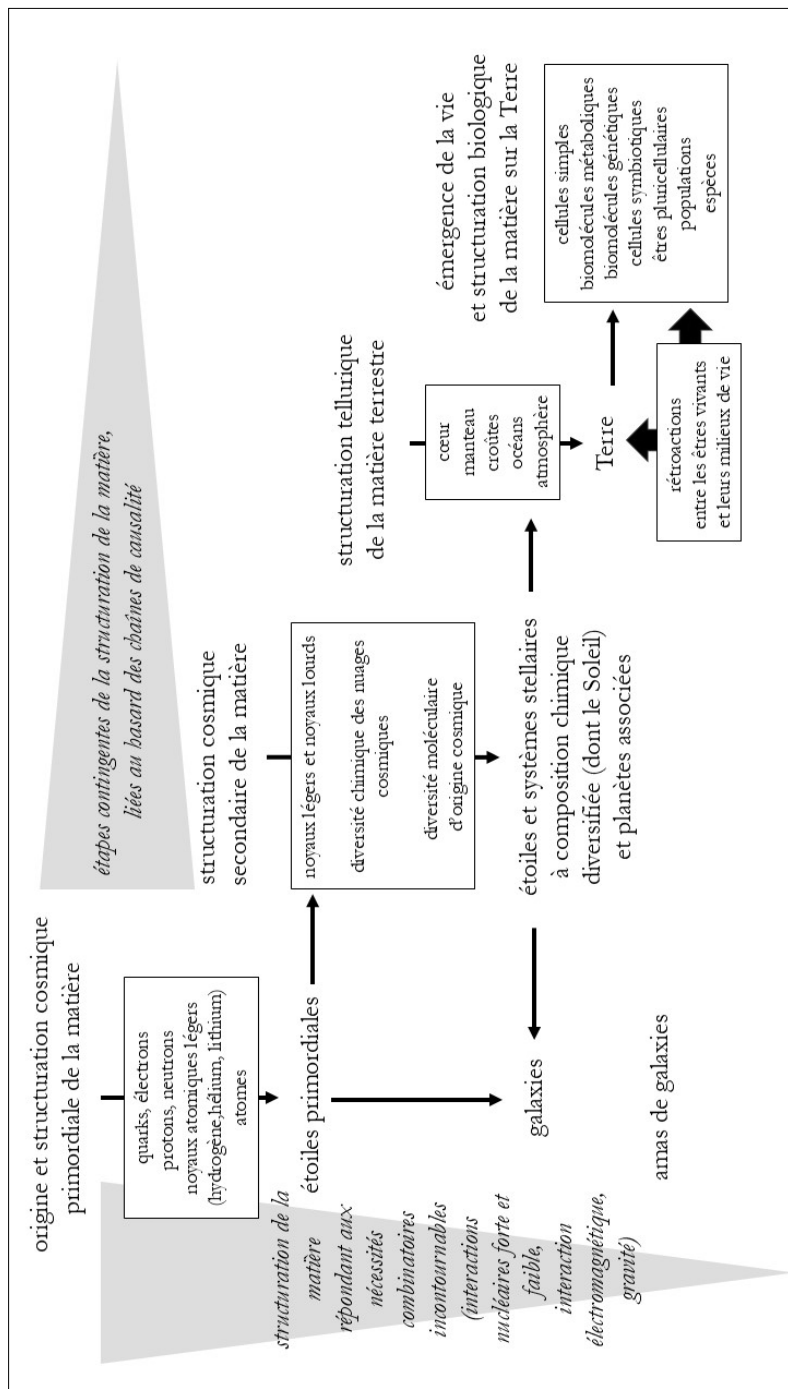
Dans les premières étoiles, formées essentiellement à partir de l'hydrogène primordial issu des premiers instants du Big Bang, des noyaux plus complexes ont pu se constituer, comme ceux de l'hélium, du lithium, du bore, du carbone, de l'azote et de l'oxygène. Une telle synthèse, par fusion nucléaire, se produit aussi dans les étoiles actuelles comme notre soleil dont le combustible principal reste l'hydrogène pour encore longtemps. Mais en vieillissant, les étoiles épuisent leur hydrogène et fusionnent de plus en plus d'autres noyaux, tout en fabricant de nouveaux éléments, de plus en plus lourds. C'est ainsi qu'apparaissent des éléments qui participent aussi à la diversité chimique que nous observons sur la Terre, comme le sodium, le magnésium, l'aluminium, le silicium, le phosphore, le soufre et le chlore. Lorsque les étoiles ne peuvent plus émettre suffisamment d'énergie par la fusion nucléaire, elles s'écroulent sur elles-mêmes puis explosent, redispersant dans l'univers les nouveaux éléments fabriqués. Les étoiles des générations

suivantes héritent d'un univers où la diversité chimique est plus grande et sont aptes à produire des noyaux d'éléments encore plus lourds, jusqu'au noyau du fer composé de 26 protons et de 30 neutrons.

Pour des noyaux encore plus lourds, la fusion nucléaire demande plus d'énergie qu'elle n'en émet et la contrainte du confinement gravitaire ne suffit plus. Il faut donc mobiliser une énergie externe, qui n'est disponible que lors d'évènements cosmiques très puissants, comme les explosions d'étoiles massives en fin de vie, les *supernovae* et les éventuelles formations d'étoiles à neutrons qui en résultent. Ces évènements poursuivent donc le travail de fusion nucléaire des étoiles et accroissent encore la diversité chimique de la matière en produisant par exemple du cobalt, du nickel, du cuivre, mais aussi des éléments beaucoup plus lourds comme l'uranium, composé de 92 protons et de 143 ou 146 neutrons. Les noyaux plus lourds que le plomb (82 protons, 124 à 126 neutrons) sont en général instables et se désintègrent naturellement en libérant une énergie sous forme de rayonnements. C'est la radioactivité naturelle. Fort heureusement pour nous, la plupart des éléments très lourds se désintègrent rapidement. Mais, il se trouve que certains ne se désintègrent que très lentement, comme la variété (ou isotope) 238 de l'Uranium (92 protons et 146 neutrons). Après 4,5 milliards d'années, la moitié des noyaux d'uranium 238 (^{238}U) formés lors d'un évènement cosmique subsistent encore. Bien après leur formation, la radioactivité naturelle de ces noyaux lourds peut donc encore s'exprimer au sein d'étoiles ou de planètes auxquelles ils auraient été incorporés. Plus qu'un phénomène néfaste, la radioactivité naturelle a constitué une heureuse opportunité pour le destin de la Terre, ce que je montre dans la suite de cet ouvrage.

Figure 1.2. Le hasard et la nécessité dans la structuration de la matière

La matière se structure sous le contrôle des propriétés combinatoires de la matière (sens vertical, du haut vers le bas). Mais le hasard des chaînes de causalités (non prévisibles) modifie la répartition de l'énergie et de la matière déjà structurée dans l'univers, ce qui peut créer, aléatoirement, de nouveaux contextes (ou contingences) locaux qui offrent des possibilités d'une plus grande structuration de la matière, et ainsi de suite (sens horizontal de la gauche vers la droite). La vie peut ainsi émerger là où se créent les conditions planétaires d'une habitabilité primordiale, se développer, modifier les milieux de vie (donc d'habitabilité), et s'adapter à des conditions d'habitabilité qui se modifient.



6 La structuration stellaire et planétaire de la matière

Dans beaucoup de régions de l'Univers, quelques milliards d'années après le Big Bang, la matière disposait donc d'une grande diversité chimique en raison de la vie et de la mort de générations d'étoiles antérieures. Ceci était une évolution inéluctable guidée par les lois physiques, elle ne devait rien au hasard. En revanche, la naissance de notre Soleil dans l'une de ces régions il y a environ 4,6 milliards d'années était imprévisible car les fluctuations de densité de la matière cosmiques sont chaotiques. En modifiant le champ de gravité, ces fluctuations provoquent des mouvements de la matière environnante autour de certains points. C'est ainsi que les étoiles commencent à se former, par milliards lorsque la densité des nuages cosmiques est suffisante. Individuellement, notre Soleil est donc né d'une grande part de hasard, mais il appartient à un phénomène cosmique plus général, inéluctable, guidé par les lois physiques.

Les étoiles naissantes attirent à elles la matière environnante sous forme d'un disque aplati comme le prévoient les théories de la gravité et du mouvement. Mais une part de la matière du disque subit aussi des fluctuations gravitationnelles internes qui donnent naissance à des grumeaux de matière condensée qui, en grossissant, forment des planètes, ou de simples astéroïdes. Tandis que le disque se trouve peu à peu nettoyé de sa matière dispersée, les gaz et les poussières, les mouvements des corps et l'évolution de leurs masses, peuvent aboutir à des orbites stabilisées. La structuration de la matière se poursuit ainsi au sein des systèmes stellaires et des systèmes planétaires en formation.

Lorsque le Soleil eut une masse suffisante, les réactions de fusion nucléaire en son cœur se déclenchèrent. L'étoile s'alluma ! Ce faisant, elle produisit un vent de particules solaires et des rayonnements très puissants qui repoussèrent les éléments et composés légers, les moins soumis à l'attraction gravitaire du soleil, vers l'extérieur du disque. Dans les régions internes du disque, les plus proches du Soleil, ne subsistèrent alors que des poussières et corps solides. Ceux-ci donnèrent lieu aléatoirement à la formation de 4 planètes rocheuses, ou telluriques, Mercure, Vénus, la Terre et Mars, où les composés volatiles sont présents mais minoritaires. Des planètes majoritairement

gazeuses se formèrent au contraire dans des régions plus lointaines, où la matière volatile avait été repoussée par l'allumage du Soleil. L'histoire est sans doute un peu plus compliquée car la plus grosse des planètes, Jupiter, a peut-être commencé à se former sur une orbite beaucoup plus éloignée du Soleil que l'orbite actuelle, et s'en serait rapprochée sous l'effet du déplacement de masses, donc du champ de gravité, lors de l'évolution précoce du disque solaire. C'est l'hypothèse d'un « Jupiter chaud », qui postule que Jupiter aurait ainsi connu une phase de croissance dans la zone interne du système solaire, celle occupée aujourd'hui par les planètes telluriques. Cette première migration aurait eu diverses conséquences, dont celle de réinjecter des objets contenant de l'eau dans la zone interne du système solaire, cette eau qui aurait ensuite participé à la croissance des planètes telluriques actuelles. Mais l'orbite de Jupiter aurait ensuite migré vers des zones plus éloignées, jusqu'à sa position actuelle, toujours à la faveur du déplacement des masses dans le disque au fur et à mesure que se structurait le système solaire. Ce faisant, l'influence gravitaire de Jupiter aurait contribué à nettoyer la zone interne du disque en n'y laissant que des corps orbitaux solides déjà bien constitués, favorisant par-là la formation ultérieure des planètes telluriques.

Tous ces grands phénomènes nucléaires et gravitaires qui s'exercent lors de la formation d'un système stellaire sont inéluctables. Même la formation de planètes, telluriques et gazeuses, est, sinon inéluctable, au moins très fréquente comme le montre l'exploration des planètes extrasolaires, ou exoplanètes, depuis une trentaine d'années. Ce qui relève davantage du hasard sont les conditions cosmiques d'habitabilité, celles qui permettent notamment à l'eau liquide de pouvoir, potentiellement, exister à la surface d'une planète. Il s'agit notamment de la distance à l'étoile et des conditions de rotation de la planète sur elle-même. Un chapitre ultérieur de ce livre est dédié aux conditions d'habitabilité et je reviendrai sur la part cosmique de ces conditions, héritées de la formation du système solaire. Mais ne nous y trompons pas, la vie ne choisit pas une planète au hasard. Elle ne peut s'installer que sur celles que les conditions cosmiques ont, au hasard, rendues potentiellement habitables. Les conditions d'habitabilité font donc partie des contraintes naturelles qui s'exercent pour minimiser le rôle du hasard dans la poursuite de la structuration de la matière par la vie.

Mais bien avant la vie, la matière non vivante constitutive de la Terre, continua à se structurer, au-delà de la diversité chimique créée par les étoiles qui ont précédé le Soleil, et au-delà de la structuration gravitaire du système solaire lui-même. Cette phase de structuration de la matière terrestre, que j'appelle ici tellurique, allait d'ailleurs participer à l'élaboration d'autres conditions d'habitabilité, tout aussi nécessaires que les conditions cosmiques héritées.

7 La structuration de la matière non vivante sur la Terre

La Terre s'est formée, il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années, par l'accumulation gravitaire de gaz, de poussières et de corps solides de taille plus importante. Certains de ces corps solides étaient eux-mêmes des planètes en formation. Les multiples impacts qui accompagnèrent cette agrégation de matière dégagèrent une énergie thermique considérable. Tout au long de sa formation, la Terre était une sphère de matière extrêmement chaude, avec des parties internes où régnait une certaine fluidité, et une surface qui était un océan magmatique.

Mais, dans une telle sphère de matière, les effets gravitaires continuent de s'exercer inéluctablement. En d'autres termes, la matière la plus lourde coule progressivement vers le centre de la sphère et s'y concentre, aux dépens de la matière plus légère qui se trouve alors concentrée dans les parties externes de la sphère. D'un point de vue chimique cela signifie que les éléments les plus lourds, abondants comme le fer et le nickel, ou rares comme l'uranium, se concentrent au centre de la sphère, alors que les éléments les plus légers, comme l'hydrogène, l'hélium, le carbone, l'azote, l'oxygène, le soufre, se concentrent dans les couches périphériques de la sphère. La matière se structure donc de manière concentrique, ou en peau d'oignon, pour aboutir à un cœur riche en fer et en nickel, un manteau riche en aluminium, silicium, calcium, magnésium, et une atmosphère riche en composés d'hydrogène, de carbone, d'oxygène, de soufre et d'azote.

Il faut toutefois garder à l'esprit que ces effets gravitaires s'exercent non seulement sur des éléments chimiques individuels, mais aussi sur des entités moléculaires ou macroscopiques liant parfois des éléments lourds et des éléments légers. C'est pourquoi des éléments légers peuvent se retrouver, dans une certaine proportion, dans les couches profondes de la Terre et inversement, des éléments lourds dans les couches superficielles.

Avec la formation des planètes, le disque solaire se trouve progressivement nettoyé de la plus grande partie de sa matière dispersée. Les impacts en viennent donc à se raréfier et les planètes commencent à se refroidir alors que se poursuit leur différenciation gravitaire interne. C'est ainsi que la Terre, comme ses 3 sœurs telluriques, Mercure, Vénus et Mars, se dote d'une croûte externe, solide, plus légère que le manteau, formée de roches riches en oxydes de silicium et d'aluminium. Les composés volatiles d'éléments légers continuent de dégazer à travers la croûte et de former l'atmosphère primitive. Les plus légers, l'hydrogène et l'hélium, sont les plus rapides à s'y concentrer, mais ils sont rapidement expulsés de l'attraction terrestre par le vent solaire. Finalement l'atmosphère primitive se charge principalement d'azote, de gaz carbonique, d'oxydes de soufre, et d'eau. À cause du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, la pression au sol de l'atmosphère primitive est estimée à plusieurs dizaines de fois la pression de l'atmosphère actuelle.

Dans les parties internes de la Terre, les conditions physiques de pression, de température, et de composition de la matière ont abouti à des compartiments différenciés, dont certains sont aujourd'hui fluides et d'autres non. Le noyau interne actuel de la Terre est une boule solide. Le noyau externe, légèrement fluide, est animé par des mouvements de convection thermique. Comme il est riche en fer, ces mouvements sont la cause du champ magnétique terrestre, très important pour l'habitabilité. Le manteau inférieur est solide, ses mouvements ne sont perceptibles qu'à des échelles de temps de plusieurs siècles. Enfin, le manteau supérieur est un peu plus fluide que le manteau inférieur, mais sa viscosité est néanmoins très grande. Ce n'est qu'en cas de remontée et de dépressurisation rapide que les matériaux du manteau peuvent se transformer en magma très fluide tel que celui que nous voyons surgir lors des éruptions volcaniques.

Tous ces phénomènes de structuration tellurique de la matière sont inéluctables car guidés par les lois physiques, celles de la gravité, de l'électromagnétisme et de la chimie, et de la thermodynamique. Seules, leurs manifestations locales sont sujettes au hasard des chaînes de causalité.

8 La première habitabilité de la Terre

Au tout début de l'histoire de la Terre, une croûte solide existe donc, ainsi qu'une certaine quantité d'eau gazeuse dans l'atmosphère. Ces deux conditions étaient, sinon suffisantes, du moins indispensables à la formation d'eau liquide à la surface de la planète. Des études géochimiques de cristaux datant de 4,4 milliards d'années, des zircons inclus dans de très vieilles roches sédimentaires en Australie, ont indiqué que de l'eau liquide existait déjà à cette époque. C'est-à-dire seulement 100 millions d'années après la fin de l'accrétion terrestre! Le refroidissement de l'atmosphère, et sa charge en vapeur d'eau, furent donc déjà suffisants pour que de l'eau liquide se forme. N'imaginons pas ici une fraîche pluie de printemps! En raison de la pression très importante de l'atmosphère primitive, la vapeur d'eau a certainement pu se condenser à des températures élevées, peut-être 200 °C ou plus. Or de telles températures étaient encore bien trop élevées pour la vie. Elles tenaient notamment à l'important effet de serre de l'atmosphère primitive, majoritairement composée de gaz carbonique.

Mais l'apparition de l'eau liquide changea brutalement la donne et enclencha un mécanisme chimique inéluctable par lequel la Terre se libéra de son effet de serre excessif. L'eau liquide, dans laquelle le gaz carbonique peut se dissoudre, constitue en effet un réacteur chimique qui assure le passage entre l'état gazeux et l'état solide du carbone et réciproquement. Nous examinerons ultérieurement les détails de cette transformation. Mais retenons ici que, pour la structuration de la matière, la formation d'eau liquide due au premier refroidissement de la Terre permit peu à peu de transformer le carbone gazeux de l'atmosphère terrestre initiale en carbone solide, sous forme de roches carbonatées! Ce faisant, l'effet de serre initial diminua peu à peu, et la température au sol baissa jusqu'à atteindre des valeurs compatibles avec la vie, inférieures à 100 °C. On ne sait pas combien de temps a demandé

cette évolution. J'ai tendance à penser qu'elle fut rapide, ne prenant que... quelques dizaines de millions d'années, mais l'hypothèse la plus généralement admise est que la première habitabilité terrestre fut acquise il y a environ 4 milliards d'années, soit 400 millions d'années après la première apparition attestée de l'eau liquide.

9 Quand la structuration de la matière devient adaptative

L'émergence de la vie, sur Terre ou ailleurs, n'est pas un phénomène comme les autres. Certes, la matière vivante se structure en répondant à de lois physiques comme celle de la thermodynamique, de l'électromagnétisme et de la chimie, mais ses propriétés vont bien au-delà de celles de la matière structurée non vivante issue des évolutions antérieures.

On dit qu'une particularité majeure de la vie est qu'elle est capable de se répliquer, ou de se reproduire. Mais au-delà de cette simple formulation, il convient d'examiner ici ce qu'elle signifie plus précisément en termes de structuration de la matière.

Les êtres vivants sont le siège de deux formes de structuration de la matière, l'une est macroscopique, c'est celle des corps, l'autre est microscopique, c'est celle des gènes. On perçoit ici que, lorsque la matière se structure, elle ne se contente pas d'agréger des masses, celles des protons et des neutrons, puis celles des atomes, puis celles des molécules, mais qu'elle donne lieu à des formes ou à des combinaisons qui portent en elles une information. Cette notion d'information, qui s'accroît avec la structuration de la matière, est intégrée dans les théories physiques. J'y reviendrai. Bien entendu, les êtres vivants sont dépositaires d'une quantité considérable d'information, que ce soit celle qui permet de décrire leur corps (ou phénotype), ou celle de leur patrimoine génétique (ou génotype).

Disons-le tout net! On ne connaît pas vraiment les processus chimiques qui ont conduit à la vie. Ce qui est certain c'est que la vie relève à la fois de nécessités, celles des lois physiques, chimiques et thermodynamiques, et du hasard. Cette part aléatoire tient au fait que, à un moment donné, lorsque la Terre fut devenue habitable, en un lieu donné, un système chimique

Figure 1.3. La structuration tellurique de la matière terrestre

Les différentes étapes de la structuration tellurique de la matière terrestre, au cours desquelles certaines conditions primordiales d'habitabilité, complémentaires des conditions cosmiques, ont été acquises. La formation très précoce des premiers océans a protégé la Terre contre la perte d'eau. Mais comme les océans sont aussi des médiateurs chimiques entre les formes gazeuses, liquides et solides du carbone, ils ont permis le transfert de la plus grande partie du carbone atmosphérique (CO_2) vers une forme solide (sédiments carbonatés), réduisant ainsi l'énorme effet de serre de l'atmosphère initiale jusqu'à un niveau potentiellement habitable.

