



Évolution Terre et Vie : des histoires imbriquées

Jean-Claude Gall

Université Louis-Pasteur, École et observatoire des sciences de la Terre, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France

Reçu le 16 juin 2008 ; accepté après révision le 8 juillet 2008

Disponible sur Internet le 19 septembre 2008

Rédigé à l'invitation du Comité Éditorial

Résumé

L'histoire du globe terrestre est rythmée par le retour périodique d'événements et de situations analogues : la recomposition des continents, les cycles orogéniques, les ères glaciaires, les transgressions et les régressions des mers. . . L'histoire de la vie, en revanche, comporte une succession de paliers : le stade procaryote, la cellule eucaryote, les organismes pluricellulaires, la terrestrialisation, le développement des sociétés animales, l'homínisation. À chaque fois, la biosphère se hisse à un degré supérieur d'organisation et de complexité. Celui-ci est sous-tendu par la propension des êtres vivants à étendre leur emprise sur l'intégralité du globe terrestre, tout en s'émancipant de la servitude du milieu aquatique et des climats. Au cours des quatre derniers milliards d'années, des interactions étroites et complexes se sont tissées entre les deux histoires. La vie a étendu son contrôle sur les processus dynamiques du globe terrestre, tandis que l'environnement planétaire a orienté l'évolution des espèces vivantes. Cependant, à plusieurs reprises, le fragile équilibre qui s'est instauré entre la dynamique de la Terre et la dynamique du vivant s'est rompu, déclenchant des crises biologiques. Il en est ainsi de l'impact croissant des activités humaines sur l'intégrité de la planète, un défi majeur à relever par l'humanité du XXI^e siècle. **Pour citer cet article : J.-C. Gall, C. R. Palevol 8 (2009).**

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Earth and Life: Imbricated histories. The Earth's history consists in recurrent flashbacks of similar events and scenarios: redistribution of continents, orogenic cycles, glaciations, marine transgressions and regressions, etc. In contrast, Life's history evolves according to a succession of stages: prokaryotic stage, eukaryotic cell stage, pluricellular organism stage, terrestrialization, development of animal societies, homínization. With each successive stage the biosphere rises to a higher level of organization and complexity. This evolution results from the natural trend of living organisms to extend their control over the entire planet while they progressively escape the constraints of the aquatic environments and climates. During the last four billion years close and complex interactions prevailed between the history of both the Earth and Life. Living organisms have a profound effect on their environment and on the processes of the Earth dynamics, while the planetary environment controls the evolution of living species. Nevertheless, from time to time, the fragile equilibrium established between Earth's and Life's dynamics breaks down and triggers mass extinctions. It is presently the case of the increasing impact of human activities on the integrity of our planet, a major challenge for humankind during the 21st century. **To cite this article: J.-C. Gall, C. R. Palevol 8 (2009).**

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Biosphère ; Changements globaux ; Crises biologiques ; Changements climatiques ; Impact anthropique

Keywords: Biosphere; Global change; Mass extinctions; Climatic changes; Humankind impact on Earth environment

Adresse e-mail : jcgall@illite.u-strasbg.fr.

Abridged English version

Darwin emphasized in 1859 the capital role of environmental changes during Life history in an explicative theory of the transformations of living species called “transformation theory”. During the subsequent decades, many studies were undertaken in order to better specify the causability bonds between the events governing Life and Earth histories.

Life history: stages of the biosphere

The four billion years long history of Life is made up of different major stages which each time raised living beings to higher levels of organization and complexity.

- During about three billion years, the Earth was exclusively colonized by a microbial world which modified and structured its surface. Photosynthesis of some microorganisms, e.g., cyanobacteria, generated an oxidizing atmosphere. The huge activity of bacterial metabolism was responsible for precipitation of minerals such as carbonates, phosphates and sulfides [15]. The microbial world contributed to decreasing the greenhouse effects by subtracting carbon dioxide from the atmosphere in order to form its constitutive organic matter. Moreover, by recycling organic matter, microbes appear as the “great grave-digger” on the Earth and the principal agents of geochemical cycles. In addition, they were the most ancient builders of relief when stromatoliths shaped the Earth’s morphology surface. In present-day Nature, the work of microorganisms is still very active. From the start, Life history has been a microbial “adventure”.
- Another complexity step of the living world was taken when eukaryotic cells appeared around 2 Ga ago. Today one accepts that the transition from prokaryotes to eukaryotes resulted from an endosymbiosis, i.e., permanent association of different bacteria with initially distinct metabolisms [20].
- In the Late Precambrian period, the blooming of Ediacara fauna corresponded to the rapid progress of a macroscopic animal world. It took place after a particularly severe glacial period. Among the first fauna are those animals burrowing in sedimentary substrates. This bioturbation phenomenon is a real agronomic revolution. By ploughing sediments, living organisms stimulate the exchange of gases and solutions between the superficial pellicle of the Earth’s crust, hydrosphere and atmosphere.
- The Cambrian period radiation is another cardinal event, which initiated the present-day diversity of the

biosphere. It was characterized by the more or less simultaneous appearance of great body plans of the living world, i.e., the phyla. At the same time, animals gained the ability of producing mineralized tissues such as shells, carapaces, and skeletons at the origin of bioclasts. Chemical elements such as Ca, Si or P, were fixed in biomineralization, which contributed to buffering the oceans. Carbonate skeletons trapped carbon dioxide, and therefore regulated greenhouse effects.

- The final stage of Life’s history corresponds to the colonization of lands which emerged by animals previously depending on water. This phenomenon, called terrestrialization, took place during the first half of the Paleozoic era and completed the hold of the biosphere over the whole Earth. Vegetation preceded the animal world and contributed to the development of soil, which represents an interface where exchanges between the lithosphere, hydrosphere, atmosphere and biosphere were taking place. Among the first animals occupying continents are insects. Due to their small size and because they acquired an extraordinary liberation tool, i.e., the wings, insects represent one of the biggest successes in Life history. If the first terrestrial vertebrates, i.e., the amphibians, still depended on water, by contrast reptiles, which appeared during the Carboniferous period, broke off from this constraint.
- During the Triassic period, mammalians freed themselves from climate by acquiring an endothermic metabolism or “endothermy”. A new integration step starts with insects and primates, which are animal societies with maximal complexity. The society is equivalent to a superorganism in which individuals are at the community’s service.

In summary, the successive stages of Life history are underlain, on the one hand, by the trend for living beings tending to free themselves from the environmental constraints, and more particularly, climate constraints, and on the other hand, by their increasing hold over the Earth dynamics.

Climate changes and Earth dynamics

In reworking continuously the paleogeographies, plate tectonics contributes to the climate distribution and, consequently, has an effect upon fauna and flora. Through the rhythm of marine transgressions and regressions the latter controls the renewal of animal populations. The great climatic drifts in the Earth’s history are characterized by recurrent periods of greenhouse and icehouse modes, which affected the biological radiations punctuating the biosphere evolution. Temperature

fluctuations at the Earth's surface can largely be ascribed to the variations of atmospheric carbon dioxide content. The latter are modulated by the Earth's dynamics, i.e., volcanic activity [6], metamorphism and alteration of silicates. In its turn, the biosphere influences climate by exchanging gas with the atmosphere through vegetation due to photosynthesis and soil development, and the animal world through building carbonate skeletons and corals.

The biosphere answers

Faced with the environmental and climatic events affecting the Earth, living organisms could choose from the three following options: adaptation, migration, extinction.

Adaptation to an essentially changing environment leads to a continuous adjustment of morphologies and physiologies to new life conditions. It is the key to biological evolution.

Migration to geographic areas with life conditions very similar to those prevailing in their original domain represented a second option for numerous organisms endowed with mobility. The latter generally involves a drifting, spread over time, which is favorable to speciations.

Mass extinction takes place whenever global changes were too severe [16], i.e., fauna and flora disappeared in large numbers and the biosphere goes through crisis. Biological crises were succeeded by recovery periods and biosphere renewal. The most dramatic crisis at the end of Permian period was followed by the spectacularly rapid growth of reptiles and cephalopods during the Mesozoic era. The crisis of the Late Cretaceous epoch played a major role in the expansion of mammals during the Cenozoic era. The sixth great extinction spasm started at the beginning of the last glacial period in which we are presently living. Since a few centuries, the crisis is amplified by the increasing impact of human activity on the Earth's integrity [4]. From now on, mankind is responsible for the management of the Earth.

Conclusions

In summary, if the Earth's history consists in recurrent flashbacks of similar scenarios, such as Wilson cycles, glaciation periods or alternations of marine transgressions and regressions, in contrast Life's history is guided by the linear arrow of time, which prevents any return to the starting point. Moreover, the great stages of the biosphere indicate a continuous search by living organisms to break away from environmental constraints as

life gets an increasing hold on the Earth's dynamic processes. If Life evolution is bent by disruptions affecting the Earth, in its turn Life contributes to the shaping of the Earth's surface. The imbrication between both dynamics, that of the Earth, and that of Life, does encourage developing transdisciplinary research in the Life domain and in Geosciences [12].

1. Introduction

En 1859, Charles Darwin propose une interprétation cohérente de l'évolution biologique. Elle met l'accent sur le rôle capital exercé par l'environnement dans l'émergence des espèces nouvelles. Cent ans plus tard, la théorie de la tectonique des plaques reconnaît les processus dynamiques qui recomposent en permanence la face de la Terre et président au renouvellement des paléogéographies. Au cours des 50 années suivantes, les tentatives se multiplient pour établir des liens de causalité entre des événements contemporains de l'histoire de la Vie et de l'histoire de la Terre. Leur ambition est de mieux comprendre le fonctionnement du globe terrestre, celui d'une planète vivante animée par une dynamique propre, mais également celui d'une planète habitée par une diversité d'organismes vivants. Désormais, un vaste champ d'investigation s'offre à la science. Son exploration n'en est qu'à ses débuts. On peut néanmoins tenter de dresser un bilan provisoire de l'état des connaissances.

2. Les paliers de la biosphère

Une histoire est faite d'événements qui infléchissent durablement son cours. L'histoire de la Vie se déroule sur près de quatre milliards d'années, des durées de peu inférieures à celles de l'histoire de la Terre. Elle comporte une succession d'étapes qui, à chaque fois, conduisent les êtres vivants à se hisser à un niveau supérieur d'organisation et de complexité.

2.1. Le monde microbien

Les plus anciens organismes vivants de la planète proviennent des roches de cratons précambriens, datées de 3,5, voire de 3,8 milliards d'années. Ils sont rapportés à des bactéries. Durant près de trois milliards d'années c'est-à-dire durant plus des trois quarts de son histoire, la Terre fut uniquement colonisée par un monde microbien. Dans la nature actuelle, le rôle de celui-ci demeure toujours essentiel. L'histoire de la Vie est d'abord une aventure microbienne.

2.1.1. *Le développement d'une atmosphère oxydante*

On s'accorde pour admettre que l'atmosphère primitive de la planète était dépourvue d'oxygène. Le dégazage massif du manteau y entretenait des concentrations en dioxyde de carbone plus de mille fois supérieures aux valeurs actuelles. Au cours du Précambrien, l'atmosphère s'enrichit peu à peu en oxygène. En témoignent les dépôts de fer oxydé, les gisements de fer rubané, qui se développent à partir de la fin de l'Archéen. Simultanément, la couche d'ozone se met en place. On estime que vers environ –2 Ga, les teneurs en oxygène de l'atmosphère dépassaient 10 %. L'enrichissement de l'atmosphère en oxygène est attribué à l'activité photosynthétique de certains micro-organismes, vraisemblablement des cyanobactéries, un groupe bactérien jadis rapporté aux algues bleues, toujours représenté dans la nature actuelle.

2.1.2. *Une diversité de métabolismes : des genèses minérales*

Au fur et à mesure de l'écoulement du temps, les micro-organismes du Précambrien déploient une diversité morphologique croissante. À côté de corpuscules sphériques (les coques), se rencontrent des formes allongées (les bacilles) et des filaments. Leur surface est diversement ornementée. À l'instar du monde microbien actuel, cette diversité traduit une multiplicité de métabolismes faisant appel à une source d'énergie externe, le rayonnement solaire ou l'énergie chimique, et à des transferts de matière tels le carbone et l'azote. Cette diversité de métabolismes a permis aux micro-organismes de coloniser tous les environnements de la planète, y compris les milieux où règnent des conditions extrêmes, tels les marais salants, les sources thermales ou les régions désertiques. En outre, de nombreuses souches bactériennes s'avèrent capables de précipiter des espèces minérales comme les carbonates, les phosphates, les sulfures... [15]. Elles se trouvent à l'origine des calcaires et des gisements de fer rubané du Précambrien. Or, la précipitation des calcaires s'accompagne d'une séquestration du carbone prélevé à partir du CO₂ atmosphérique, un gaz à effet de serre. L'activité microbienne participe activement au refroidissement de la planète.

2.1.3. *Un rôle de fossoyeur : l'initiation des cycles biogéochimiques*

Durant le Précambrien, la prolifération des micro-organismes drapait la surface de la planète d'un tapis de mattes microbiennes. Elle se trouve à l'origine d'une intense production de matière organique. Celle-ci est élaborée, par exemple, à partir du carbone et

de l'azote de l'atmosphère et du phosphore et du soufre livrés par l'altération des minéraux. Une foule de micro-organismes hétérotrophes s'attaquent ensuite à la matière organique assurant sa minéralisation et son recyclage. Le monde microbien s'avère un acteur incontournable des cycles biogéochimiques.

2.1.4. *Les premières bioconstructions : les stromatolites*

Les plus anciennes constructions microbiennes, les stromatolites, se rencontrent dans des formations archéennes d'Australie, datées de –3,5 Ga. Durant toute la durée du Précambrien, elles restent omniprésentes dans les mers et les océans dont elles structurent les fonds. Leurs reliefs pouvaient atteindre plusieurs dizaines de mètres de hauteur et s'étendre sur des centaines de kilomètres, contribuant à infléchir la circulation des courants marins. Cependant, leur importance diminue considérablement vers la fin du Précambrien, une régression imputable soit à un refroidissement climatique, soit à la prolifération des animaux brouteurs.

En définitive, l'impact du monde microbien sur l'économie du globe terrestre s'avère multiple et considérable. Il se traduit par des échanges gazeux avec l'atmosphère, la genèse d'espèces minérales, le recyclage des éléments chimiques... Dans la nature actuelle, leur rôle demeure toujours déterminant.

2.2. *Les premières faunes*

En modifiant la composition de l'atmosphère et en remodelant la surface du globe terrestre, le monde microbien du Précambrien a préparé la voie pour l'émergence d'organismes plus évolués.

2.2.1. *La théorie de l'endosymbiose*

La cellule eucaryote qui est l'apanage des champignons, des végétaux et des animaux, apparaît aux alentours de –2 Ga. Il est aujourd'hui admis qu'elle résulte d'une endosymbiose c'est-à-dire d'une association permanente de bactéries aux métabolismes initialement distincts [20]. Chez les eucaryotes, des organites intracellulaires comme les mitochondries, sièges de la respiration cellulaire, correspondraient à l'appropriation de protéobactéries, proches des bactéries pourpres. Les chloroplastes où s'opère la photosynthèse des cellules végétales, seraient issus de l'incorporation de cyanobactéries. Dans l'histoire de la vie, l'endosymbiose constitue un palier d'intégration, un nouveau niveau de complexité, où des éléments antérieurement isolés interagissent et se rassemblent pour collaborer en une sorte de superorganisme doué de capacités nouvelles. L'organisation d'un

animal est, en effet, bâtie sur une dissociation des fonctions et une division du travail. Les cellules eucaryotes s'y associent en assemblages stables, tissus et organes, auxquels sont dévolues des tâches spécifiques, telles que la respiration, la nutrition, la sensorialité ou la contraction. La coordination de l'activité des tissus et des organes contribue au fonctionnement d'une entité commune, autonome, à savoir un organisme macroscopique. Elle a conduit à l'essor du règne végétal et du règne animal.

2.2.2. Les « jardins » d'Ediacara

Les plus anciens restes corporels de vie animale ont d'abord été décrits en Australie, puis signalés sur les autres continents. Il s'agit de la « faune d'Ediacara » datée du Vendien. Elle se déploie au lendemain d'une dramatique période glaciaire au cours de laquelle une grande partie du globe terrestre était gelée. À l'exception des *Cloudina*, des microfossiles calcaires, les organismes d'Ediacara sont des êtres au corps mou, dépourvus de squelette minéralisé. Certains sont rapportés à des vers qui pouvaient atteindre 1 m de longueur. L'organisation d'autres organismes rappelle celle de coelentérés coloniaux comme les pennatules actuelles. Enfin, des traces circulaires sont interprétées comme des empreintes d'ombrelles de méduses.

Récemment, la nature animale de certains fossiles d'Ediacara a été mise en doute [21]. Il a été suggéré que leur organisation singulière les apparentait plutôt à des colonies microbiennes géantes. D'après cette interprétation, la « faune » d'Ediacara représenterait en réalité un monde vivant original, les vendobiontes, une expérience biologique sans lendemain, sans lien d'ascendance avec les faunes plus récentes de l'ère primaire. Quoiqu'il en soit, à côté des vendobiontes existaient, en proportions bien moindres, d'authentiques espèces animales, des éponges, des vers, des coelentérés et des mollusques au corps mou, un monde animal comportant uniquement des consommateurs de matière organique. Le monde des prédateurs demeure encore absent.

2.2.3. La bioturbation : une révolution agronomique

Doués de mobilité, les animaux se déplacent certes à la surface du sol, mais bon nombre d'entre eux creusent également des terriers et des galeries. Les plus anciens terriers proviennent du Précambrien du continent indien. Le travail des animaux fouisseurs occasionne un véritable labourage d'une certaine tranche de sédiment. Terriers et galeries fonctionnent comme autant de drains empruntés par les fluides, des solutions et des gaz, stimulant les circulations et les échanges de matière entre la pellicule superficielle de l'écorce terrestre et la nappe d'eau surincombante. Une certaine épaisseur

de sédiment, déstructurée et transformée par l'activité biologique, devient le siège de réactions chimiques complexes pouvant aboutir à des concentrations de substances minérales tels les sulfates ou les phosphates. En s'appropriant la fraction superficielle de la croûte terrestre, le monde animal bouleverse durablement le façonnement de la surface du globe terrestre.

2.2.4. L'explosion biologique du Cambrien

L'ère primaire s'ouvre par l'« explosion biologique » du Cambrien. Elle se traduit par l'avènement simultané des grands plans d'organisation du monde animal, qui caractérisent les embranchements, toujours présents dans la nature actuelle. Il en est ainsi des mollusques, des brachiopodes, des arthropodes, des échinodermes. . . Aux consommateurs de matière organique des jardins d'Ediacara, vont désormais s'ajouter des prédateurs.

À l'échelle des temps géologiques, l'événement cambrien revêt un caractère quasi instantané, estimé à une dizaine de millions d'années [5]. Son interprétation est encore sujette à bien des controverses.

Pour l'histoire de la Vie, l'explosion biologique du Cambrien constitue un événement capital. Désormais, le cours de l'évolution biologique se limitera à une succession d'innovations greffées sur les plans d'organisation mis en place il y a 540 millions d'années c'est-à-dire à des variations sur des thèmes.

2.2.5. Les biominéralisations

La radiation du monde animal au Cambrien s'accompagne de l'aptitude d'élaborer des squelettes minéralisés à partir d'éléments chimiques prélevés dans le milieu extérieur. Elle se traduit dans la production de sédiments et de roches biogènes. Des éléments comme le calcium, le silicium ou le phosphore, issus de l'altération de minéraux, sont immobilisés, durant des intervalles de temps plus ou moins longs, dans les coquilles, les carapaces et les squelettes. En particulier, le calcium et le silicium qui s'accumulent et se concentrent normalement dans les mers et dans les océans, s'y maintiennent désormais à des teneurs qui demeurent compatibles avec l'existence d'êtres vivants. Dans une certaine mesure, la vie a pris le contrôle de la composition chimique du domaine aquatique.

Parmi la faune cambrienne figurent des formes coloniales, les archéocyathes, qui édifient des constructions calcaires. Il s'agit des premières ébauches de récifs, des écosystèmes dont la biodiversité ira en croissant au cours de l'ère primaire. En raison de leur nature calcaire, les récifs constituent des puits à carbone et participent à la régularisation des climats.

2.3. La terrestrialisation

La vie s'est épanouie et diversifiée au sein du domaine aquatique. Son accès à l'extraordinaire diversité des paysages et des climats des terres émergées et à leurs ressources alimentaires, impliquait un bouleversement radical des anatomies, des physiologies et des comportements du monde animal et du monde végétal. Il concernait, en particulier, l'approvisionnement en eau, la protection contre la déshydratation et l'adaptation aux échanges gazeux avec l'atmosphère. Chez les animaux, s'y ajoutaient, en outre, des restructurations des modes de locomotion, des organes des sens et des modalités de la reproduction.

2.3.1. Le déploiement du couvert végétal

Les végétaux furent apparemment les premiers organismes vivants à réussir le tour de force de s'installer sur les continents. Les données paléontologiques datent l'apparition des plus anciennes plantes aériennes de l'Ordovicien. La protection contre la déshydratation était assurée par une cuticule imperméable, percée de stomates. Il en était de même des spores protégées par une enveloppe de sporopollénine. Mais l'innovation la plus originale qui a permis aux plantes de se déployer sur les terres émergées, réside dans les vaisseaux, des conduits aux parois rigides qui acheminent l'eau et la sève depuis le sol jusqu'à l'extrémité des tiges. Elle a contribué au succès des plantes aériennes qui drapent aujourd'hui la plupart des continents d'un dense tapis végétal. Notre planète bleue est aussi une planète verte.

Les premières plantes terrestres affectent une organisation extrêmement simple. Mais dès la fin de la période dévonienne, l'ordonnement de la végétation annonce celle des forêts actuelles avec leur succession de strates herbacées, d'arbustes et d'arbres.

2.3.2. Le développement des sols

L'expansion de la flore aérienne a entraîné l'accumulation d'une masse considérable de restes végétaux. Une partie de cette matière organique est enfouie et se trouve à l'origine de gisements de charbon. Une autre fraction demeure en surface où elle est dégradée et recyclée par un monde de bactéries, de vers et d'arthropodes. Incorporés aux produits de l'altération des roches, la matière végétale et ses dérivés se trouvent à l'origine des sols. Ceux-ci constituent une interface privilégiée pour les échanges entre lithosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère.

Les sols revêtent la surface des continents d'un manteau de matériaux meubles, à l'instar d'un épais tapis qui absorbe et retient les eaux de ruissellement. Dès lors, ils

limitent l'impact des agents de l'érosion et infléchissent le trajet des cours d'eau.

2.3.3. L'exode du monde animal vers les continents

L'essor de la végétation aérienne fut suivi de peu par la faune. En effet, des pistes de locomotion attribuées à des arthropodes terrestres, découvertes dans l'Ordovicien de l'Ontario [19], laissent à penser que le monde animal s'est adapté précocement à la vie sur les terres émergées. À la fin du Silurien, le fait semble avéré. Cependant, à l'opposé de l'extrême diversité déployée par le monde animal aquatique, seul un nombre limité de groupes zoologiques réussit à coloniser durablement la terre ferme. Il s'agit des arthropodes, des mollusques gastéropodes, des vers et des vertébrés tétrapodes.

Les myriapodes, les araignées et les insectes furent les premiers animaux terrestres. Plus tard, avec les premiers insectes ailés qui apparaissent au Carbonifère, les arthropodes se dotent d'un fabuleux outil de libération, l'aile, qui permet de s'affranchir des obstacles naturels et facilite la recherche de nourriture et la dispersion des espèces. C'est à leur petite taille et à l'invention de l'aile, qu'est redevable le succès spectaculaire du monde des insectes qui représentent aujourd'hui 75 % des espèces animales du globe.

La conquête des terres émergées par les vertébrés s'effectua au cours de la seconde moitié du Dévonien. Engagée par les batraciens, elle a nécessité des reconversions radicales de l'anatomie et de la physiologie d'animaux initialement aquatiques. Des pattes remplacèrent progressivement les nageoires, des poumons se substituèrent aux branchies... Mais la reproduction s'effectue encore obligatoirement dans un milieu aqueux. Les reptiles qui apparaissent au Carbonifère, parachèvent l'affranchissement des vertébrés de l'environnement aquatique. Un revêtement d'écailles protège leur corps de la déshydratation. L'embryon poursuit son développement à l'abri d'une coquille où il baigne dans un environnement liquide et s'acquitte de ses fonctions vitales grâce à des annexes embryonnaires, l'amnios et l'allantoïde. Néanmoins, les reptiles restent dépendants des fluctuations climatiques car la température de leur corps varie en fonction de celle du milieu extérieur.

Les mammifères apparaissent vers la fin du Trias. Dotés de régulation thermique, ils jouissent d'une liberté thermodynamique qui leur a permis de conquérir l'intégralité de la planète, depuis les océans jusqu'aux sommets des montagnes, de l'équateur aux régions polaires. Récemment, il y a quelques millions d'années à peine, se détachera la lignée des hominidés.

2.3.4. *Le parachèvement de la biosphère*

La sortie des eaux, par les végétaux d'abord, par les animaux ensuite, marque une étape décisive de l'histoire de la Vie et de l'histoire de la Terre. Désormais, l'intégralité de la surface du globe, les étendues d'eau tout comme les terres émergées, se pare d'une enveloppe continue d'organismes vivants, la biosphère, un authentique épiderme vivant. Bien davantage qu'une enveloppe issue de la juxtaposition d'espèces animales et végétales, la biosphère s'avère une entité d'une complexité extraordinaire. Des interactions multiples se tissent entre organismes du règne végétal, du règne animal et du monde microbien. Elles se déclinent en termes de coopération, de dépendance ou d'exploitation.

2.4. *Les sociétés animales*

En développant des sociétés, les individus se mettent au service de la communauté. Les sociétés apparaissent comme des sortes de superorganismes. Avec elles, la Vie franchit un nouveau palier d'intégration. L'organisation sociale atteint un maximum de complexité chez les insectes et chez les primates. Les insectes sociaux, termites, fourmis et abeilles, apparaissent au cours de l'ère secondaire. Leurs sociétés sont fondées sur une distribution des différentes tâches, l'alimentation, la reproduction ou la défense. Celles-ci sont assumées par des individus anatomiquement distincts et aux comportements figés. En revanche, chez les primates du Cénozoïque, plus particulièrement chez les hominidés, la répartition des fonctions au sein de la société est de nature culturelle, capable d'adaptation et d'évolution.

En définitive, l'histoire de la Vie comporte une succession de paliers d'intégration qui, à chaque fois, conduit la biosphère à un niveau supérieur de complexité. Au stade procaryote des bactéries, succèdent la cellule eucaryote, puis les organismes pluricellulaires végétaux et animaux et, plus récemment, les sociétés animales. Cette progression est sous-tendue par une double logique. D'une part, la propension des organismes vivants à investir tous les milieux disponibles de la planète, les étendues d'eau, les terres émergées et les airs. D'autre part, la quête d'une libération progressive des contraintes environnementales, en particulier de la servitude du milieu aquatique et des climats.

3. **La dynamique du globe terrestre et les changements climatiques**

La géographie et les climats s'avèrent des facteurs majeurs qui déterminent la répartition des faunes et des flores à la surface de la Terre. À l'échelle des temps

géologiques, ils se révèlent éminemment changeants. La dynamique du globe terrestre recompose en permanence l'aspect de la planète. Si les caractères des climats sont certes contrôlés par les périodicités de l'orbite terrestre et par les variations de l'activité solaire, ils sont également dépendants des événements géologiques et biologiques qui affectent la physionomie de la planète.

3.1. *La reconstitution des paléogéographies*

La tectonique des plaques redessine en permanence la configuration de la planète et ses paléogéographies. Or, les climats globaux sont fonction de la localisation latitudinale des continents et des modifications des courants océaniques qu'elle entraîne. Au Carbonifère par exemple, les masses continentales se trouvaient disposées de part et d'autre de l'équateur. Les climats chauds et humides profitent à une végétation luxuriante qui alimente les grands gisements de charbon du globe. En revanche, simultanément, loin des régions tropicales, un régime de glaciations sévit durant près de 50 millions d'années, en Amérique du Sud, en Afrique, dans l'Antarctique et en Australie. Au Permien, la formation de la Pangée favorise la généralisation de climats chauds et secs dans les domaines continentaux situés aux alentours des tropiques. En témoigne la fréquence des formations éoliennes et des dépôts d'évaporites.

Au cours du Mésozoïque, le climat demeure globalement chaud. La température moyenne du globe dépasse 20 °C. Le climat se dégrade progressivement au Cénozoïque par suite de la dérive des plaques continentales. Le continent antarctique rejoint alors le pôle sud et s'habille d'une calotte de glace. En outre, l'ouverture de l'Atlantique modifie les trajets des courants océaniques. Aux courants équatoriaux qui prévalaient auparavant, se substituent des circulations méridiennes d'eaux froides. Avec l'ère quaternaire, le Groenland se dote à son tour d'une calotte de glace. La planète s'engage dans une ère glaciaire. Les changements climatiques qui résultent de la restructuration des paléogéographies se répercutent inévitablement sur la distribution des faunes et des flores.

Dans le domaine des mers épicontinentales, les transgressions et les régressions rythment le renouvellement et la distribution des écosystèmes. Une relation fut établie entre les phases transgressives et la diversification des communautés marines [8]. L'extension des plateaux continentaux stimule la prolifération des faunes marines et les processus des radiations biologiques. La haute productivité biologique se traduit par le dépôt de séries pétrolières particulièrement riches [22]. En revanche, durant les phases régressives, la biodiversité se réduit. La réalité apparaît cependant plus complexe. En

effet, les extinctions massives qui affectent les populations aquatiques semblent se produire lors d'événements transgressifs particulièrement rapides qui submergent les plateaux continentaux par des eaux peu oxygénées [14].

3.2. *L'activité volcanique et le métamorphisme*

L'activité volcanique et le métamorphisme libèrent dans l'atmosphère des gaz à effet de serre, en particulier du dioxyde de carbone. S'il est admis que la part prise par le volcanisme dans le réchauffement climatique actuel demeure négligeable, il en fut autrement dans le passé géologique. Une corrélation a été établie entre les crises biologiques du Phanérozoïque et les grandes manifestations du magmatisme basaltique [6]. En particulier, les deux grandes crises de la fin du Permien et de la fin du Crétacé, sont contemporaines de sévères dérèglements climatiques, mais également d'activités volcaniques particulièrement spectaculaires. Celles-ci se manifestent par l'accumulation des milliers de mètres de basaltes qui se trouvent respectivement à l'origine des trapps de Sibérie et des trapps du Deccan.

3.3. *L'érosion des reliefs et l'altération des roches*

Durant les paroxysmes orogéniques, la vigueur des reliefs en cours d'édification s'accompagne d'une intense érosion mécanique. En entretenant la dénudation des roches, elle stimule leur altération chimique. Or l'altération des minéraux silicatés est grande consommatrice de CO₂, un gaz prélevé dans l'atmosphère. Elle induit une diminution de l'effet de serre c'est-à-dire un rafraîchissement rapide de la surface du globe. [7,11]. Les deux dernières périodes glaciaires, celle du Carbonifère et celle du Cénozoïque, sont respectivement contemporaines des phases orogéniques varisques et alpines. En revanche, le ralentissement des altérations chimiques maintient dans l'atmosphère des taux élevés de CO₂ et favorise des températures clémentes. Tel fut le cas durant une grande partie du Mésozoïque. En agissant sur les teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère, les altérations s'avèrent ainsi un mécanisme régulateur des climats.

À partir de ce constat, deux scénarios ont été envisagés. Le premier s'appuie sur le fait qu'une augmentation globale de la température de la planète accélère les altérations chimiques et accentue le prélèvement du CO₂ atmosphérique [10]. Il en résulte une baisse des températures. Il y a rétroaction négative, un processus qui n'est pas sans rappeler l'homéostasie qui se rencontre dans le monde animal. Un autre scénario mise sur l'accélération de l'érosion mécanique et des altérations chimiques des

surfaces minérales dénudées par le travail des glaciers : lors des périodes de refroidissement. Le soutirage du CO₂ atmosphérique s'amplifie, accentuant d'autant le refroidissement de la planète. Il y a rétroaction positive.

Cet exemple illustre le couplage probable entre des processus sédimentaires et les caractères des climats. Il met l'accent sur le rôle central du CO₂. Cependant, il s'avère nécessaire que la modélisation des variations climatiques globales prenne également en compte les autres gaz à effet de serre comme le méthane et la vapeur d'eau.

3.4. *Le rôle régulateur du monde vivant*

Dès son apparition, le monde microbien, en rejetant de l'oxygène et en fixant du CO₂, modifie la composition de l'atmosphère et les caractères des climats. Avec l'extension d'un couvert végétal sur les continents, cet impact s'amplifie considérablement. En effet, les racines des végétaux terrestres pénètrent profondément le substrat rocheux et activent l'altération des minéraux, un processus consommateur de CO₂. La photosynthèse soustrait le dioxyde de carbone de l'atmosphère et conduit à la séquestration partielle de la matière organique dans les sols et dans les sédiments. La végétation se comporte comme un puits de carbone. À l'opposé, une fraction de la matière végétale est dégradée et recyclée par une foule de micro-organismes. Elle contribue à renouveler les taux de gaz carbonique et de méthane de l'atmosphère. Les répercussions climatiques de ces interactions sont évidentes. Les différents modèles de climats proposés pour le Phanérozoïque [1,9], mettent effectivement en évidence une chute considérable des concentrations de l'atmosphère en gaz carbonique à partir d'un intervalle de temps compris entre –380 et –350 Ma, c'est-à-dire au cours du Dévonien. Cette baisse coïncide avec l'essor des plantes vasculaires sur les terres émergées et le développement des sols.

Dans les mers et dans les océans, l'accumulation et la précipitation de sédiments calcaires sont entretenues par une foule d'organismes vivants. Les calcaires constituent une énorme réserve de carbone. Ils sont le garant d'une certaine stabilité des températures.

Si l'impact du monde vivant sur les processus de la dynamique externe du globe relève de l'évidence, le rôle qui revient aux calcaires entraînés dans le manteau terrestre au niveau des zones de subduction n'est pas encore élucidé.

En définitive, la biosphère se comporte comme une pompe à carbone qui contribue au maintien de températures compatibles avec la vie. On estime que la libération de tout le carbone piégé dans la matière organique des sols et des sédiments et impliqué dans les

calcaires, conduirait à des teneurs en dioxyde de carbone de l'atmosphère terrestre proches de celles que connaît la planète Vénus. La Terre se transformerait alors en fournaise.

3.5. Les rythmes climatiques

En dépit des régulations à l'œuvre, l'histoire de la Terre est rythmée par des dérives et des événements climatiques. Des phases de refroidissement global durant lesquelles des calottes de glace s'installent aux pôles, alternent avec de longues périodes de réchauffement. Elles sont respectivement qualifiées de mode « *icehouse* » (glacière) et de mode « *greenhouse* » (effet de serre). Au cours du dernier milliard d'années, quatre grandes périodes de glaciations ont été reconnues : la fin du Précambrien, la fin de l'Ordovicien, le Carbonifère et le Cénozoïque. Cette récurrence de conditions glaciaires relève d'un ensemble de circonstances singulières. Certaines sont extérieures à la planète, tels les paramètres astronomiques ou l'activité solaire. D'autres relèvent de la dynamique du globe terrestre. La baisse des températures est généralement rapportée aux variations des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone, le méthane, la vapeur d'eau.

D'autres changements climatiques présentent un caractère récurrent. Il en est ainsi au cours du Mésozoïque où, à plusieurs reprises, un dégazage massif de gaz à effet de serre, vraisemblablement dû à des activités volcaniques majeures, déclencha de brefs intervalles de réchauffement. Il s'ensuivit un accroissement spectaculaire de la productivité primaire des océans et la généralisation d'événements anoxiques à l'origine des *black shales*.

4. Les réponses de la biosphère

Face aux changements qui affectent le caractère et la nature des environnements et des climats, les faunes et les flores sont confrontées à plusieurs issues : s'adapter, migrer ou s'éteindre.

4.1. Les adaptations

Le mécanisme le plus communément invoqué pour rendre compte de l'évolution des espèces vivantes fait appel à l'adaptation. Par le jeu combiné de la variabilité génétique présente au sein des populations et de la sélection naturelle, une adéquation permanente doit être assurée entre les communautés vivantes et un environnement éminemment changeant. Les radiations adaptatives

des céphalopodes et des reptiles de l'ère secondaire illustrent l'étonnante diversité des réponses que le monde animal a apportée à l'offre d'habitats nouveaux et à de nouveaux modes de vie.

La surface du globe terrestre est recomposée en permanence par une dynamique interne qui s'exprime dans la tectonique des plaques et une dynamique externe contrôlée par les climats. Les cycles de Wilson correspondent à l'histoire maintes fois répétée de la dérive continentale. Ils comptabilisent l'intervalle de temps qui sépare la dispersion des plaques tectoniques et leur rassemblement en un continent unique. Les deux derniers cycles ont abouti à l'édification de la Rodinia vers la fin du Précambrien et de la Pangée au Paléozoïque supérieur. La séparation des continents accroît l'extension du domaine littoral et des mers peu profondes, des environnements où se rencontrent la plus grande densité et diversité des peuplements aquatiques. Elle offre aux organismes vivants une multitude d'environnements nouveaux à coloniser. La fragmentation de la Rodinia fut suivie par l'explosion biologique du Cambrien ; celle de la Pangée fut contemporaine des radiations biologiques du Mésozoïque.

Cependant, à aucun moment, la répétition de situations paléogéographiques analogues n'a conduit les communautés biologiques à revenir à leur case de départ. Les itérations morphologiques mises en évidence chez les ammonites, désignent des processus évolutifs où des formes et des ornements similaires de la coquille se retrouvent chez des espèces d'origine et d'âge distincts, lorsqu'elles sont confrontées à des situations écologiques semblables. Mais, même dans ces exemples, des différences entre espèces demeurent perceptibles. L'histoire de la Vie ne se répète jamais.

4.2. Les migrations

La recherche d'un ailleurs plus viable est facilitée par la mobilité ou par l'existence d'organes de dissémination. Les faunes de mammifères d'Europe occidentale ont entrepris, tout au cours du Quaternaire, des migrations contrôlées par les rythmes climatiques. Les périodes de glaciation privilégièrent l'installation d'une faune issue des hautes latitudes, adaptée aux climats froids, comportant les mammoths, les rhinocéros laineux, les rennes ou les bisons. En revanche, les périodes de réchauffement climatique virent l'arrivée, à partir des régions plus méridionales, de l'éléphant ou de l'hippopotame.

Les déplacements de faunes s'accompagnent de spéciation et de compétition entre espèces occupant des niches écologiques proches. Le grand « chassé-croisé »

américain en fournit un exemple particulièrement spectaculaire [2].

Au début de l'ère tertiaire, la dérive continentale ennoie l'isthme de Panama et isole l'Amérique du Sud du continent nord-américain. Chacun des deux continents devient alors, durant près de 50 millions d'années, le creuset d'une diversification de faunes mammaliennes endémiques qui comportaient à la fois des placentaires et des marsupiaux. La fin de l'ère tertiaire met un terme à ce splendide isolement. L'isthme de Panama émerge au Pliocène, rétablissant la communication terrestre entre les deux continents. Les mammifères entreprennent alors des migrations qui s'effectuent essentiellement du nord vers le sud. Les placentaires carnassiers d'Amérique du Nord entrent en compétition avec leurs homologues marsupiaux du continent sud-américain et provoquent leur extinction. Simultanément, les herbivores endémiques sud-américains sont éliminés par les immigrants venus du nord. Le panorama faunistique de l'Amérique du Sud en sera durablement renouvelé.

L'exception de l'insularité australienne est révélatrice des interactions entre isolement géographique et spéciation. L'Australie est demeurée un continent isolé depuis le début de l'ère tertiaire. Elle était peuplée initialement par des mammifères marsupiaux. Au cours de dizaines de millions d'années, elle fut le siège d'une remarquable radiation adaptative. Les marsupiaux s'y diversifièrent en formes carnivores, herbivores, insectivores... reproduisant étonnamment les mêmes adaptations anatomiques et comportementales que celle des placentaires des autres continents. La biodiversité originale du continent australien fut bouleversée à l'époque historique par l'homme qui introduisit des concurrents placentaires, tels les lapins ou les moutons. Un équilibre naturel a été rompu, créant une situation dramatique pour la faune marsupiale australienne.

4.3. Les extinctions : crises et reconquêtes

L'évolution de la Vie est sous-tendue par le relais des espèces. Le taux de renouvellement des faunes et des flores varie en fonction de l'importance des modifications de l'environnement planétaire. Le changement intervient-il trop brutalement, ses répercussions s'avèrent-elles trop sévères ou concernent-elles l'intégralité de la planète, les faunes et les flores ne parviennent pas à retrouver assez rapidement un nouvel état d'équilibre. Elles sont alors massivement décimées. La biosphère entre en crise.

L'histoire de la Vie est jalonnée par de nombreuses crises biologiques durant lesquelles un nombre considérable d'espèces s'éteignent simultanément à la suite de

modifications drastiques de l'environnement planétaire [16].

4.3.1. La Terre sinistrée du Permien

Au cours du Permien, l'édification de la Pangée s'accompagne d'une altération des conditions climatiques. Le centre de cette vaste étendue continentale est assujéti à des climats arides. Les paysages évoluent en déserts [13]. Vers la fin du Permien, durant un intervalle de temps qui n'excède guère une dizaine de millions d'années, la situation se dégrade considérablement. Une intense activité volcanique se manifeste d'abord en Chine, puis en Sibérie. Les teneurs de l'atmosphère en dioxyde de carbone atteignent des valeurs trois fois supérieures à celles de nos jours. Il s'ensuit une élévation globale de la température à la surface de la Terre qui provoque le dégel des régions polaires englacées. Au niveau des hautes latitudes, des quantités considérables de méthane, un gaz à effet de serre jusque-là séquestré dans les sols gelés, sont libérées. On estime que les rejets cumulés de dioxyde de carbone et de méthane contribuèrent à accroître de 6 à 8 °C la température moyenne du globe. Les conséquences furent dramatiques pour la Vie à la fois sur les terres émergées et dans les océans.

Au cœur de la Pangée, les écarts journaliers de température dépassent 45 °C. Ils se trouvent à l'origine de feux de brousse et de feux de forêts qui dévastent régulièrement le couvert végétal et affectent les faunes herbivores et carnivores.

Dans le domaine océanique, la stratification des eaux induit, au contact des fonds, d'importantes concentrations en méthane, en dioxyde de carbone et en hydrogène sulfuré, des gaz toxiques pour la faune aquatique. En outre, une régression généralisée des mers dont le niveau chute de 200 m par rapport à l'état initial, génère une multitude de bassins océaniques communiquant difficilement les uns avec les autres, situation qui limite d'autant les circulations et le brassage des eaux. Lorsque les émissions de gaz toxiques gagnent l'intégralité de la tranche d'eau, elles provoquent des extinctions en masse de la faune aquatique.

Le bilan de la crise du Permien se révèle particulièrement dramatique. À la fin du Permien, près de 90 % des espèces marines ont disparu. Il s'agit de la phase d'extinction la plus dévastatrice de l'histoire de la Vie.

4.3.2. La reconquête triasique

Avec le Trias, s'amorce la restauration biologique d'une planète écologiquement ruinée [3]. Son rythme s'avère anormalement lent et s'étire sur une dizaine de millions d'années, en raison, d'une part, du stress environnemental permien qui s'est prolongé durant le début

du Trias et, d'autre part, de l'ampleur de la décimation qui a affecté la biosphère à la fin de l'ère primaire. Dans les océans, appauvris en oxygène et aux salinités anormales, le développement des récifs coralliens demeure longtemps contrarié. À leur place, prolifèrent des constructions microbiennes, les stromatolites. La situation ne revient à la normale que plusieurs millions d'années plus tard, au Trias moyen, avec la réapparition des coraux. Simultanément les échinodermes amorcent des radiations adaptatives, tandis que les lamellibranches prolifèrent au détriment des brachiopodes.

Sur les terres émergées, la reconquête des paysages sinistrés débute par une végétation peu diversifiée, comportant des espèces pionnières, de petite taille. C'est seulement à partir du Trias moyen, que la flore retrouve une certaine biodiversité comprenant des fougères, des équisétales et des conifères. Parmi la faune des vertébrés tétrapodes, l'essor des reptiles mammaliens prépare l'avènement des mammifères.

Globalement, la biosphère ne récupère un niveau de diversité proche de celui qu'elle avait atteint avant la crise, qu'au bout d'un laps de temps considérable se déclinant en millions d'années. L'aspect du monde vivant en sera profondément et définitivement bouleversé. Les espèces étranges du Paléozoïque sont relayées par des végétaux et des animaux dont les silhouettes annoncent les faunes et les flores modernes.

Aussi, le Trias correspond-t-il à la plus importante période de renouvellement de la biosphère.

4.3.3. La crise du Crétacé

Au cours de l'ère secondaire, des climats chauds et humides prédominent sur une grande partie du globe. La température moyenne des milieux marins dépasse d'une dizaine de degrés celle des mers tempérées actuelles. Les régions polaires sont dépourvues de calottes glaciaires.

La crise biologique qui scelle l'ère secondaire entraîne la disparition définitive de la grande faune de l'ère secondaire, les dinosaures, les reptiles marins et les reptiles volants, mais également des ammonites et des bélemnites. Près de 75 % des espèces vivantes s'éteignent. Les extinctions massives de la fin du Crétacé sont imputées à un ensemble de changements de grande ampleur qui affectent l'environnement planétaire. Une baisse généralisée du niveau des mers de l'ordre de 200 m, découvre largement le domaine littoral. Le climat se rafraîchit et des calottes de glace s'étendent sur les régions polaires. Une intense activité volcanique se manifeste en Inde, alimentant l'impressionnante accumulation de laves basaltiques des trapps du Deccan. Elle s'accompagne d'émissions de cendres et de

gaz à effet de serre. À cette conjonction de conditions défavorables, s'ajoutent les effets d'une catastrophe cosmique, la collision avec une météorite de grande dimension.

Bien d'autres crises de la biosphère émaillent l'histoire de la Terre. Six d'entre elles sont qualifiées de majeures en raison de l'ampleur des extinctions enregistrées. Aux crises du Permien et du Crétacé, s'ajoutent celles de la fin de l'Ordovicien, du Dévonien supérieur et de la limite Trias–Jurassique. La sixième crise biologique correspond à l'âge des glaciations c'est-à-dire à l'ère quaternaire. Elle est contemporaine de l'essor de l'humanité.

En définitive, si les crises biologiques apparaissent comme des périodes d'appauvrissement considérable de la biosphère, elles constituent en même temps des moments propices à son renouvellement. Les changements dramatiques qui interviennent dans l'environnement planétaire éliminent certes de très nombreuses espèces, mais, simultanément, ils libèrent une multitude de milieux de vie. Lors du retour à la normale, cette vacuité est mise à profit par des espèces ayant survécu à la crise. Des communautés nouvelles, originales, s'installent et se diversifient dans les habitats désertés par leurs premiers occupants. Il en fut ainsi de la crise du Permien qui permit aux reptiles de l'ère secondaire de développer une étonnante variété de formes terrestres, aquatiques et volantes. La crise du Crétacé préluda à la radiation des mammifères de l'ère tertiaire.

5. L'impact anthropique

La singularité des interactions entre les activités humaines et l'environnement planétaire réside dans la démesure de leurs répercussions sur les paysages et sur les climats. L'impact anthropique est, en effet, attribuable à une unique espèce vivante, *Homo sapiens*. Il s'est accéléré au cours des deux derniers siècles, pour atteindre aujourd'hui une ampleur alarmante en raison, d'une part, du développement industriel et, d'autre part, d'une explosion démographique sans précédent. Il est rendu en partie responsable d'une crise biologique majeure, la sixième crise de la biosphère.

5.1. L'histoire de l'humanité : une emprise croissante sur l'environnement

En fabriquant et en utilisant des outils pour la chasse, *Homo habilis* inaugure une première atteinte à l'intégrité de la faune. Plus tard, en maîtrisant le feu, les hominidés

Tableau 1

Récapitulation des principaux événements de l'histoire de la vie et de l'histoire de la Terre

Summary of the principal events during Life and Earth histories

Âge géologique			Événements marquants	
			Biosphère	Géosphère
–1,8 ma	Ère quaternaire (<i>Cénozoïque</i>)	Holocène	Sédentarisation d' <i>Homo sapiens</i>	Glaciation
		Pléistocène	Crise biologique	
–65 ma	Ère tertiaire (<i>Cénozoïque</i>)	Néogène	Prairies à graminées	Molasses
		Paléogène	Essor des mammifères	Orogénèse alpine
–251 ma	Ère secondaire (<i>Mésozoïque</i>)	Crétacé	Crise biologique	Trapps du Deccan
			Jurassique	
		Trias	Premiers oiseux	Basaltes de l'Atlantique Central
			Essor des reptiles	
			Crise biologique	
–542 ma	Ère primaire (<i>Paléozoïque</i>)	Permien	Crise biologique	Trapps de Sibérie
		Carbonifère	Premiers reptiles	Pangée
			Glaciation	
		Dévonien	Crise biologique	Orogénèse varisque
		Silurien	Premiers vertébrés tétrapodes	Grès rouges
		Ordovicien	Terrestrialisation	Glaciation
Cambrien	Crise biologique	Orogénèse calédonienne		
–4560 ma	Précambrien	Protérozoïque	Biominéralisations	Glaciation
		Archéen	Explosion biologique	
			Premières faunes	Atmosphère oxydante
			Monde microbien	

se dotèrent d'une stratégie plus efficace pour rabattre le gibier. Mais les feux de brousse intentionnellement provoqués modifièrent du même coup l'organisation des paysages. La diaspora de l'humanité à partir de son berceau africain étendit ensuite progressivement l'impact des activités humaines à l'ensemble de la planète. L'impact anthropique demeura cependant limité en raison de la faible densité des populations humaines. Un tournant capital dans l'histoire de l'humanité intervint au Néolithique, il y a quelque 10 000 ans, avec la sédentarisation d'*Homo sapiens*. Le développement de l'agriculture implique le défrichement des forêts ainsi que la sélection et l'amélioration d'espèces végétales sauvages. Simultanément, l'homme entreprend l'élevage d'animaux domestiques. Les écosystèmes et la biodiversité s'en trouvèrent affectés. La perturbation de l'environnement naturel s'amplifia encore par suite de l'explosion démographique provoquée par la sédentarisation. On estime, en effet, qu'à la fin du Néolithique, la population mondiale est passée de cinq à 250 millions d'individus [18].

5.2. La gestion de la planète

Avec l'essor de la métallurgie, l'impact anthropique franchit une nouvelle étape. Désormais, les activités industrielles rejettent des polluants dans l'atmosphère, dans l'hydrosphère et dans les sols [4]. La pollution de l'air par le plomb remonte aux Romains de l'Antiquité. Elle fut récemment détectée dans les carottes de glace prélevées en Antarctique. Depuis l'entrée dans l'ère industrielle, il y a deux siècles, la pollution de l'air, de l'eau et des sols, a pris une ampleur sans précédent. Elle se traduit, en particulier, dans le réchauffement climatique en cours et dans l'érosion de la biodiversité. La perception de ces dérèglements se trouve aujourd'hui à l'origine d'une mobilisation internationale. La Terre est désormais perçue comme un bien commun à l'humanité, une planète fragilisée par les activités humaines, une planète aux ressources limitées. Le concept de développement durable souligne l'urgence d'instaurer une situation d'équilibre entre les performances économiques, l'équité sociale et la qualité de

l'environnement. L'homme est appelé à devenir le gestionnaire de sa planète.

6. Conclusion

À l'évidence, l'histoire de la Terre et l'histoire de la Vie s'avèrent étroitement imbriquées (Tableau 1).

L'histoire de la Terre est marquée par le retour périodique de situations analogues. La périodicité de ces rythmes s'échelonne entre 400 à 500 Ma pour les cycles de Wilson qui renouvellent les paléogéographies, 150 ou 300 Ma pour le retour des grandes glaciations et quelques millions d'années pour les variations des niveaux marins. La répétition des mêmes causes entraîne les mêmes effets.

En revanche, l'histoire de la Vie comporte une succession de paliers qui la hissent, à chaque fois, à des niveaux de plus grande complexité. Elle se traduit par une emprise croissante des êtres vivants sur la dynamique du globe terrestre et par leur émancipation des contraintes de l'environnement planétaire. Orientée par la flèche du temps, l'histoire de la Vie exclut tout retour au point de départ.

La dynamique du globe terrestre et la dynamique du vivant n'œuvrent pas indépendamment l'une de l'autre. Elles s'avèrent indissociables. Depuis près de quatre milliards d'années, des interactions d'une extraordinaire complexité se sont tissées entre biosphère et géosphère. Elles recomposent en permanence la face de la Terre. L'évolution biologique est contrôlée par les changements du contexte environnemental ; à son tour, la dynamique de la surface du globe est infléchie par les organismes vivants. Cependant, à maintes reprises, l'équilibre fragile qui s'est instauré au cours des temps entre les deux dynamiques, fut rompu. Les crises biologiques qui en résultèrent, favorisèrent à chaque fois le renouvellement de la biosphère. Il en découle que l'histoire du globe terrestre n'est pas faite de situations répétitives, mais d'une suite de périodes à chaque fois singulières.

Élucider les mécanismes à l'œuvre relève d'une démarche scientifique qui transcende les frontières entre disciplines. La géochimie évolue en biogéochimie. La paléontologie devient géobiologie [12]. Les multiples interactions entre Terre et Vie apparaissent comme autant de rouages d'une machinerie complexe. Mais le tout n'est pas la somme des parties. Dans l'état actuel des connaissances, l'accumulation des dynamiques qui animent chaque rouage est impuissante à rendre compte du fonctionnement global de la planète Terre. Celui-ci est, en effet, bien davantage que l'addition des différents mécanismes, si nombreux soient-ils. Dans cette optique, l'hypothèse Gaïa proposée par James Lovelock [17], en

dépît des controverses qu'elle suscite, ouvre des voies de recherche novatrices. À terme, celles-ci devraient déboucher sur une appréhension globale des problèmes environnementaux, une préoccupation partagée par une part croissante de l'humanité.

Références

- [1] R.A. Berner, A.C. Lasaga, Modeling the geochemical carbon cycle, *Sci. Am.* 260 (1989) 74–81.
- [2] L. de Bonis, *Évolution et extinction dans le règne animal*, Éditions Masson, 1991, 192 p.
- [3] D.J. Bottjer, J.C. Gall (Eds.), The Triassic recovery, the dawn of the modern biota, *C.R. Palevol* 4 (2005) 385–584.
- [4] H. Chamley, *Environnements géologiques et activités humaines*, Éditions Vuibert, 2002, 512 p.
- [5] S. Conway Morris, *The crucible of creation, the Burgess shale and the rise of animals*, Oxford University Press, 1998, 242 p.
- [6] V. Courtillot, P.R. Renne, On the ages of flood basalt events, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 113–140.
- [7] C. Dessert, B. Dupré, L.M. François, J. Schott, J. Gaillardet, G. Chakrapani, S. Bajpai, Erosion of Deccan Traps determined by river geochemistry: impact on the global climate and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater, *Earth Planet. Sci. Lett.* 188 (2001) 459–474.
- [8] A.G. Fischer, M.A. Arthur, Secular variations in the pelagic realm, in H.E. Cook, P. Enos (Eds.), *Deep-water carbonate environments*, *Soc. Econ. Paleont. Miner., Spec. Publ.* 28 (1977) 19–50.
- [9] L.M. François, J.C.G. Walker, Modeling the Phanerozoic carbon cycle and climate: constraints from the strontium isotopic ratio of seawater, *Am. J. Sci.* 292 (1992) 81–135.
- [10] J. Gaillardet, B. Dupré, *Érosion et climat*, *Revue du Palais de la Découverte* 286 (2001) 14–23.
- [11] J. Gaillardet, B. Dupré, P. Louvat, C. Allègre, Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers, *Chem. Geol.* 159 (1999) 3–30.
- [12] J.C. Gall, Plaidoyer pour la géobiologie, *Géochronique* 68 (1998) 27–28.
- [13] J.C. Gall, L. Grauvogel-Stamm, A. Nel, F. Papier, La crise biologique du Permien et la renaissance triasique, *C.R. Acad. Sci. Paris, Paris, Ser.IIa* 326 (1998) 1–12.
- [14] A. Hallam, P.B. Wignall, Mass extinctions and sea-level changes, *Earth-Sci. Rev.* 48 (1999) 217–250.
- [15] P. Lagny, J.C. Michel (Eds.), *Les bactéries*, *Géochronique* 86 (2003) 13–35.
- [16] F. Lethiers, *Évolution de la biosphère et événements géologiques*, Gordon & Breach Science Publications, 1998, 321 p.
- [17] J. Lovelock, *Les âges de Gaïa*, Éditions R. Laffont, 1990, 293 p.
- [18] H. de Lumley, B. Midant-Reynes (Eds.), *Climats, cultures, sociétés aux temps préhistoriques. De l'apparition des Hominidés jusqu'au Néolithique*, *C.R. Palevol* 5 (2006) 472 p.
- [19] R.B. MacNaughton, J.M. Cole, R.W. Dalrymple, S.J. Braddy, D.E.G. Briggs, T.D. Lukie, First steps on land: Arthropod trackways in Cambrian-Ordovician eolian sandstone, southeastern Ontario, Canada, *Geology* 30 (5) (2002) 391–394.
- [20] L. Margulis, D. Sagan, *L'univers bactériel*, Éditions A. Michel, 1989, 333 p.
- [21] A. Seilacher, Vendozoa: organismic construction in the Proterozoic biosphere, *Lethaia* 22 (1989) 229–239.
- [22] B. Tissot, Effect on prolific petroleum source rocks and major coal deposits caused by sea level changes, *Nature* 277 (1979) 462–465.