

Les grandes étapes de l'évolution de la Terre et de la vie

THIERRY LOMBRY

Révisé le 12 août 2018

Publié originellement sur le site Internet LUXORION*

Résumé

L'histoire de l'évolution de la Terre et de la vie est longue et complexe. La Terre s'est formée il y a environ 4.5 milliards d'années et les archives fossiles suggèrent que la vie émergé il y plus de 3.8 milliards d'années. Bien qu'il existe des traces métaboliques suggérant que la vie serait apparue dès 4.1 à 4.28 milliards d'années, ces indices restent controversés du fait que des mécanismes non biologiques pourraient être à l'origine de ces signatures particulières. Les similitudes entre tous les organismes actuels indiquent l'existence d'un ancêtre commun à partir duquel toutes les espèces connues ont divergé à travers le processus de l'évolution.

Aux origines

Bien que l'évolution ait profondément modifié notre planète, tant physiquement que chimiquement, il est relativement aisé de remonter le temps. Seul bémol, la période la plus ancienne, l'éon Hadéen (par référence à Hadès, le dieu des Enfers, et qui précède la période Archéenne) qui s'étend de ~4.56 à 4 milliards d'années avant le présent reste incertaine.



La Terre et la Lune primordiales subirent l'assaut des météorites durant quelque 150 millions d'années, accompagnés d'une intense activité volcanique. Illustration de Mark Garlick.

* Cet article ainsi que toutes les illustrations, hyperliens et les références scientifiques sont disponibles sur le site LUXORION : <http://www.astrosurf.com/luxorion/terre-evolution-etapes-vie.htm>

Si avant 1960 les scientifiques estimaient que la prime jeunesse de la Terre serait à jamais inconnue en raison des effets de l'érosion, du métamorphisme des roches (l'altération des roches dans leur structure à l'état solide, de fusion ou dans un état mixte) et de la tectonique des plaques, à force de chercher et d'étudier divers échantillons, effectuant des recoupements et posant quelques hypothèses supportées par des modèles informatiques, géologues et géochimistes ont pu confronter leurs théories aux données recueillies par les missions scientifiques aux quatre coins du monde, aux découvertes lunaires et aux missions spatiales vers les autres planètes et les astéroïdes, et sont parvenus à relever le défi de décrire cette période Hadéenne avec une certaine précision. Ce sont les résultats de leurs travaux que nous allons décrire.

Issue de la nébuleuse protosolaire qui se serait condensée voici 4.65 milliards d'années, selon les dernières estimations la Terre serait âgée de 4.5685 ± 0.5 milliards d'années¹.

Pendant l'éon Hadéen qui s'étend de 4.65 à 3.80 milliards d'années, entre 10 et 70 millions d'années après la formation de la Terre, soit entre ~ 4.56 et 4.50 milliards d'années, le noyau métallique et le manteau silicaté se différencient. Le manteau est en grande partie fluide ainsi que la surface de la Terre où régnait une température supérieure à 2000°C et une pression comprise entre 310 et 480 atmosphères. Nous verrons plus bas que cette atmosphère primordiale fut rapidement dispersée au profit de gaz plus lourds.

Durant les 30 millions d'années qui suivirent, soit entre ~ 4.50 et 4.47 milliards d'années, la surface de la Terre n'était qu'un océan de magma qui libéra une chaleur intense (flux thermique >150 W/m²). La température de l'air était supérieure à 1200°C et la pression voisine de 270 bars, principalement entretenue par la vapeur d'eau et le gaz carbonique.

Les plus anciennes traces de fusion du manteau (la zone en fusion située sous la croûte terrestre solidifiée) ont été découvertes à Ishua, à l'ouest du Groenland et sont datées de 3.872 milliards d'années sur base d'un excès en néodyme (¹⁴²Nd) par rapport à d'autres échantillons. Il s'agit de coussins basaltiques de lave issus de la fusion partielle du manteau qui ont conservé des traces d'une différenciation chimique primordiale au sein d'un océan magmatique.

Il fallut ensuite patienter encore 70 à 100 millions d'années soit entre ~ 4.47 et 4.40 milliards d'années pour que le flux thermique chute en dessous de 150 W/m² et que la température en surface tombe sous 300°C, permettant la solidification superficielle du magma et la formation d'une croûte solide. L'effet de serre resta important durant toute cette période avec une pression de gaz carbonique dans l'air de 40 bars (contre 3.5×10^{-4} bar aujourd'hui).

Concernant la Lune, au début de l'Hadéen notre satellite encore chaud et envahi de lacs de lave se trouvait à peine à 25000 km de distance de la Terre. Il faudra attendre l'Archéen soit environ 800 millions d'années pour qu'elle se déplace lentement jusqu'à 100000 km de distance et influence sensiblement la période de rotation de la Terre et pratiquement attendre 4 milliards d'années pour qu'elle atteigne sa distance actuelle à environ 385000 km de la Terre..

1. Formation de l'atmosphère

Le plus important dans l'évolution de la Terre fut la formation de l'atmosphère car c'est le mélange approprié des gaz qui favorisa l'émergence de la vie à partir des océans et sa survie.

¹ L'âge de la Terre fut déterminé à partir d'horloges isotopiques. Cet âge est également confirmé dans les fragments météoritiques. Lire à ce sujet "Le Soleil, la Terre... la vie : La quête des origines," Robert Pascal et al., Belin/Pour la Science, 2009. Lire également les travaux de Bruce R.Doe et Robert E.Zartman de l'U.S.Geological Survey, de George W.Wetherill de la Carnegie Institution de Washington.

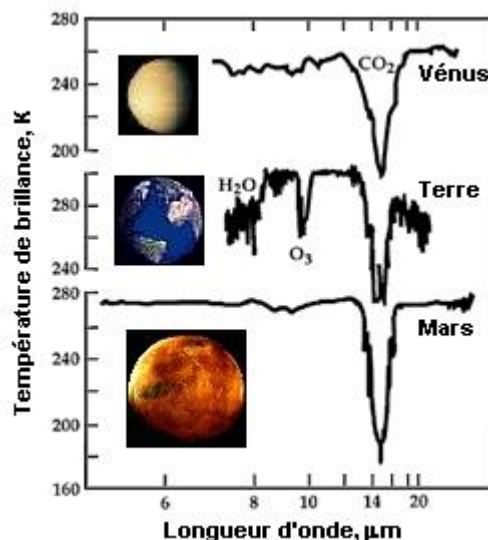
De nos jours, la Terre dispose d'une atmosphère composée de 78% en volume (75.5% en masse) d'azote et de 21% d'oxygène plus d'infimes quantités d'argon, de gaz carbonique et d'autres éléments, y compris solides. Ce n'est plus du tout la composition de l'atmosphère primitive capturée du disque protosolaire par gravitation qui se rapprochait de celle de Jupiter, à savoir constituée d'environ 81% d'hydrogène et de 18% d'hélium, elle même proche de celle du Soleil (92% d'hydrogène et 7.8% d'hélium).

Qu'est devenue cette atmosphère primitive ? Plusieurs hypothèses ont été proposées mais aucune n'est totalement satisfaisante ou autosuffisante.

Tout d'abord nous savons que les planétésimaux et autres grosses météorites dont Théia (l'impacteur qui donna naissance à la Lune) contenaient non seulement des roches mais également du gaz. Au moment de leur impact avec la jeune Terre en formation, une partie de l'énergie de choc fut transmises aux éléments légers qui ont acquis suffisamment d'énergie pour se libérer de l'attraction terrestre. Mais en même temps, d'autres impacteurs ont apporté des éléments volatils sur Terre, si bien que nous ignorons quel fut le bilan final de ces collisions.

Ensuite, avant la mise en place du champ géomagnétique (avant 4.4 milliards d'années) sur lequel nous reviendrons, le flux de particules du vent solaire avait la force nécessaire pour souffler les éléments les plus légers qui se sont également dispersés dans le milieu interplanétaire.

Enfin, à une époque où la couche d'ozone n'était pas encore constituée faute d'oxygène, sous l'effet du rayonnement UV, la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère a été photodissociée en atomes d'hydrogène qui se sont échappés dans l'espace.



La signature des planètes. Document NASA.

Bien que disparue depuis au moins 4.4 milliards d'années, les géochimistes ont découvert que des reliques de cette atmosphère primitive existent encore dans l'atmosphère et le manteau terrestre. En effet, des traces isotopiques d'hélium-3 (7×10^{-6} ppm) dont l'existence est liée sans équivoque à la nucléosynthèse solaire et donc contemporains de la formation de la nébuleuse protosolaire sont présents dans l'air ainsi que sur les dorsales océaniques où le déplacement des plaques tectoniques dépose des roches siliceuses riches en molécules de gaz archaïques. Les roches magmatiques que l'on y trouve peuvent concentrer les gaz dans un rapport $10^5:1$. Ainsi,

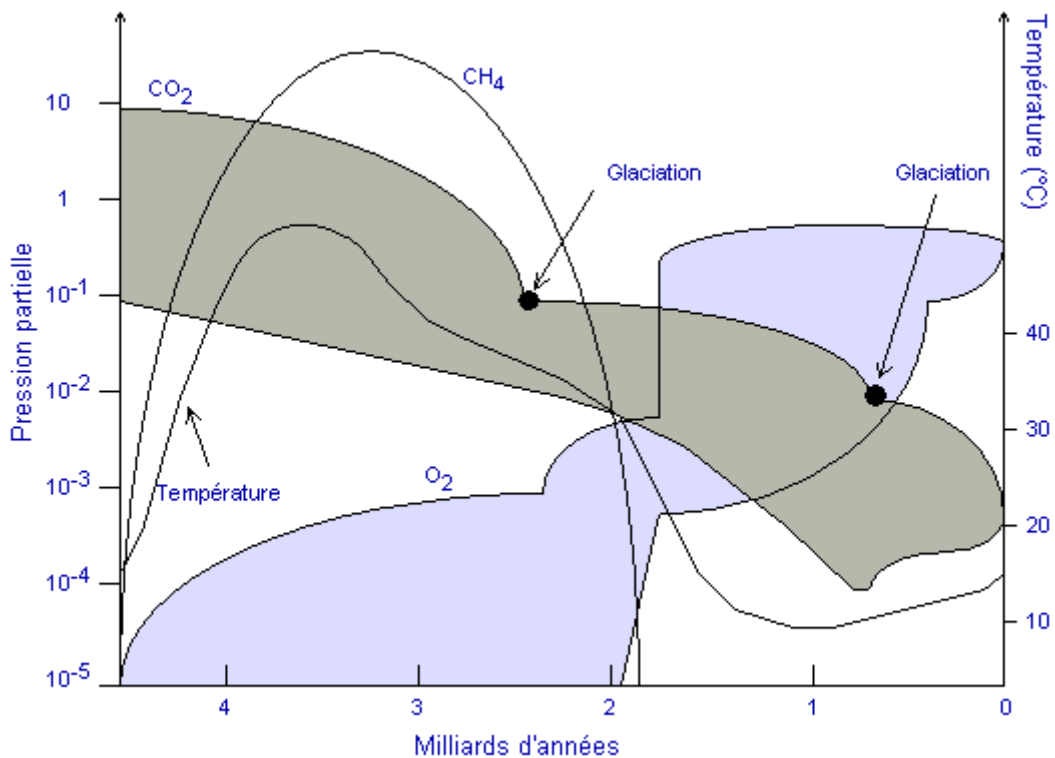
en Islande on a découvert que la concentration en hélium-3 est jusqu'à 37 fois plus élevée que celle de l'hélium-4. Même conclusion pour l'excès en isotope du néon-20 qui est plus proche de la composition du Soleil que de celle de l'atmosphère terrestre.

Quant aux composés de l'atmosphère actuelle, nous savons depuis les années 1950 que les gaz contenus dans l'atmosphère proviennent de l'intérieur de la Terre. En effet, à l'époque où les planétésimaux se sont agglomérés, ils ont capturé le gaz du disque avant que celui-ci se dissipe. Ils ont donc emprisonnés des gaz qui se sont ensuite échappés du sol et du magma, formant par la même occasion probablement 60% de l'eau des océans et l'atmosphère.

En draguant les fonds abyssaux à la recherche de roches primitives, les chercheurs découvrirent que 80 à 85% de l'atmosphère s'échappa durant le premier million d'années de formation de la Terre. Le restant fut libéré lentement mais de façon continue pendant les 4.4 milliards d'années restants.

Entre 4.56 et 4.40 milliards d'années, le dégazage intensif des éléments volatils a permis de remplacer l'atmosphère primitive héritée du Soleil par des éléments volatils extraterrestres ou résultant de transformations chimiques locales. La température à la surface de la Terre passa progressivement de plus de 2000°C et moins de 300°C, tout le gaz se trouvant encore à l'état de vapeur.

En surface, la pression (partielle) de la vapeur d'eau était de 270 bars (contre 17 millibars à 15°C aujourd'hui), celle du gaz carbonique était comprise entre 40 et 210 bars selon qu'on prend en compte uniquement le gaz carbonique de l'air ou également celui séquestré dans le manteau (contre 0.35 mbar ou 395 ppm aujourd'hui) avec un très fort effet de serre.



Evolution de la concentration atmosphérique des gaz sur Terre. Document adapté des estimations de J.Kasting. "Earth's Early Atmosphere", Science 259: 920-926 (1993).

La structure de l'atmosphère primitive était donc à prédominance de gaz carbonique et d'azote (cf. J.Kasting, 1984, 1993). Elle contenait également du méthane, de l'ammoniac, du dioxyde de soufre et de l'acide chlorhydrique, bref un environnement invivable, d'autant qu'il n'y avait alors encore aucune trace d'oxygène. Sa composition était alors identique à celle de Vénus aujourd'hui et trop chaude pour supporter une forme de vie.

Ensuite, entre 4.4 et 4 milliards d'années, malgré la condensation du gaz carbonique dans les océans, il resta le composant majoritaire de l'atmosphère où sa pression partielle était d'au moins 40 bars et la température d'au moins 200°C en surface au début de la période.

On ignore ce qui s'est produit dans l'atmosphère entre 4.4 et 2.5 milliards d'années. Deux hypothèses ont été proposées sur base des modèles informatiques et des rares indices découverts à ce jour : soit la Terre s'est refroidie jusqu'à provoquer une glaciation majeure soit l'effet de serre a diminué mais est resté important.

Dans tous les cas, à partir de 4.4 milliards d'années, la Terre subit un lessivage des roches silicatées tant au fond des océans (basaltes) que sur les surfaces émergées (granitoïdes) qui libéra de grandes quantités de silice et de bicarbonate, ce dernier précipitant ensuite sous forme de carbonate de calcium, donnant naissance à la craie.

Résultat de ces réactions, en l'espace de 10 millions à plus de 100 millions d'années selon les modèles, on estime que le gaz carbonique se trouva piégé dans les carbonates mais on ignore en quelles quantités. Au fond des océans, il fut recyclé dans les zones de subduction puis séquestré dans le magma tandis que dans l'atmosphère cette réaction aurait pu faire chuter la pression de gaz carbonique jusqu'à 0.2 ou 1 bar.

Dans le second modèle, sur bases des mesures isotopiques de l'oxygène et du silicium présents dans les roches Hadéennes, la température en surface et dans l'eau resta élevée si bien qu'on estime que la pression du gaz carbonique devait être de l'ordre de 3 bars.

Notons que certains auteurs avancent l'hypothèse que vers 3.8 milliards d'années l'atmosphère était riche en méthane et que des organismes méthanogènes auraient pu enrichir l'atmosphère en ce gaz à puissant effet de serre. Mais aucune preuve ne supporte cette théorie qui reste controversée.

Comme nous l'avons expliqué, c'est entre 4.4 et 4.1 milliards d'années que l'oxygène commença à "empoisonner" l'atmosphère. Progressivement, en l'espace de 300 à 600 millions d'années, ce gaz mortel à forte concentration fut mis à profit par les premiers organismes qui apprirent à l'utiliser dans leur métabolisme.

Compte tenu de la productivité de l'azote, du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, on estime que la production de molécules organiques s'est bien déroulée dans l'atmosphère durant tout l'Hadéen et peut-être même jusqu'à la fin de l'Archéen (il y a 2.5 milliards d'années) mais pas encore dans l'océan compte tenu de la durée de vie limitée de ces molécules dans un milieu où la température et la pression restaient très élevées.

Quant à l'effet de serre évoqué plus haut, il faut tenir de la quantité importante de méthane (CH₄) dégazé par le manteau terrestre il y a plus de 3.5 milliards d'années dont la production fut ensuite largement épaulée par les micro-organismes méthanogènes. Si aujourd'hui le méthane est

dégradé par l'oxygène en quelques années (demi-vie de 7 ans), durant l'Archéen le méthane a pu facilement s'accumuler dans l'atmosphère, augmentant sensiblement l'effet de serre.

Mais ce méthane n'a jamais présenté de concentration très élevée car au-delà de 10% de la concentration de gaz carbonique, il se polymérise en formant des macromolécules comme l'éthane (C₂H₆). Il forme alors une brume de matière organique qui filtre la lumière solaire et refroidit donc la surface. Notons qu'aujourd'hui l'éthane représente une importante source d'énergie au même titre que le butane, le propane et les autres gaz naturels carbonés.

Finalement, vers 2 milliards d'années, la pression partielle d'oxygène dépassa celle du gaz carbonique pour atteindre le niveau actuel, tandis que la concentration de gaz carbonique continua à chuter. Malheureusement, l'apparition de l'homme a changé toute l'écosystème. L'industrialisation a fait remonter le taux de gaz carbonique qui correspond aujourd'hui (plus de 400 ppm depuis 2016) au taux existant il y a plus de 2.5 millions d'années accompagné d'une hausse moyenne de la température supérieure 1°C par rapport à la période pré-industrielle.

2. Formation des océans

Les océans se sont formés dès l'Hadéen (entre 4.5-3.8 milliards d'années) suite au dégazage intensif du manteau terrestre. En effet, l'analyse isotopique de l'eau et notamment de l'hydrogène (1 proton) et du deutérium (1 proton + 1 neutron) montre que l'eau de mer contient la même proportion de deutérium que les micrométéorites qu'on retrouve notamment en Antarctique. Ces roches se sont formées directement suite à la condensation de la nébuleuse protosolaire.

Que l'eau existe sous forme moléculaire (H₂O) ou cristallisée (OH) dans les minéraux, elle s'est libérée et continue à se libérer sous l'effet de la chaleur régnant dans le manteau. Favorisant localement sa fusion, le magma moins dense remonte en surface via les cheminées volcaniques. Ensuite, les gaz sont libérés au cours des éruptions volcaniques et sont transportés dans l'atmosphère. L'eau se condense et retombe sous forme de pluie sur la surface de la terre. C'est ce cycle qui a formé un ou plusieurs océans, faisant tomber sur terre des déluges de pluie accompagnés de tempêtes et d'ouragans pendant des millions d'années !

La découverte de fossile de pluie, c'est-à-dire de l'empreinte de gouttes de pluie dans des matériaux meubles et les résultats de leur analyse (leur forme, leur taille, leur vitesse, etc.) ont permis d'évaluer la pression atmosphérique à l'époque de leur chute. Ces données, complétée par des modèles climatiques ont permis de déduire que l'intensité des pluies s'est fortement réduite à l'Archéen (voir plus bas), devenant pas plus de deux fois plus intense qu'aujourd'hui.

Des traces archaïques de zircon contenant de minuscules diamants ont été découvertes à l'ouest de l'Australie remontant entre 4.1 et 4.4 milliards d'années². Ces diamants contiennent des traces d'oxygène terrestre, apportant la preuve que de l'oxygène et de l'eau chaude existaient déjà sur Terre il y a 4.4 milliards d'années.

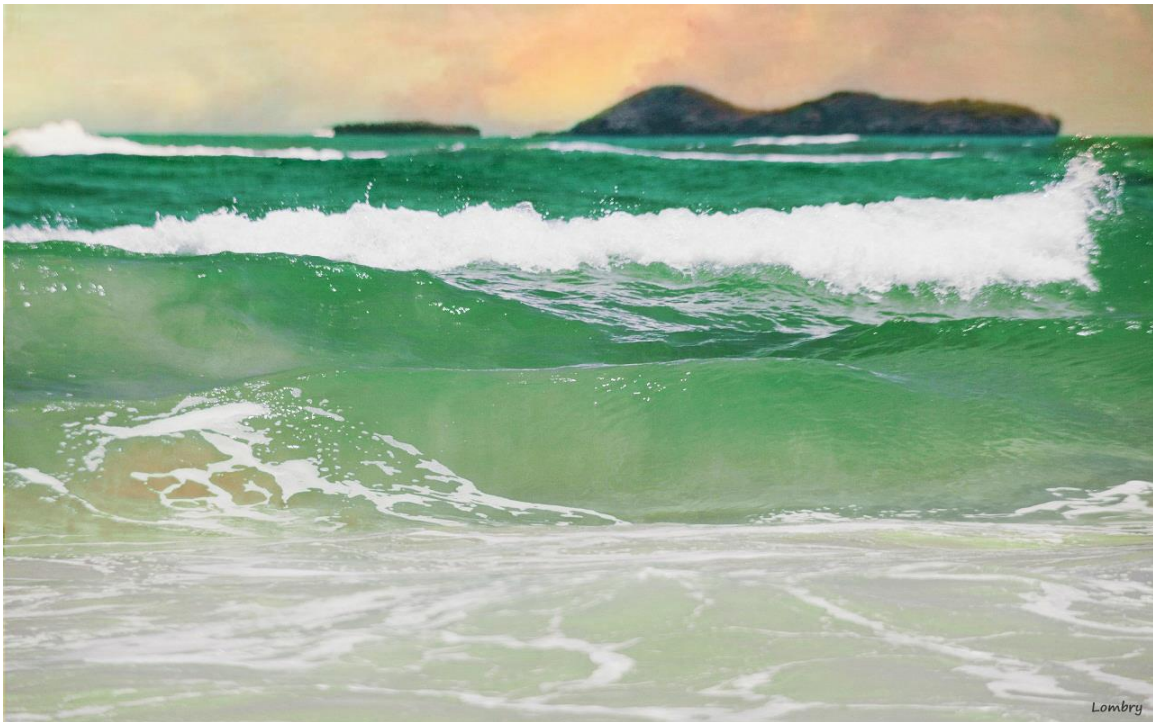
Nous assistons ensuite à une première vague de bombardements cométaires, peut-être suivie d'une seconde. Etant donné que plusieurs comètes visitées par les sondes spatiales ne présentent pas la même abondance isotopes que celle des océans, si elles ont probablement participé au

² Lire J. W. Valley et al., "Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography", *Nature Geoscience*, 2014. Lire les revues "*Nature*" et "*Geochimical and Cosmochimical Acta*", en particulier les travaux de David McGregor de l'Université de Maryland, Manfred Schidlowski de l'Institut Max Planck de Chimie, Stephen Moorbath de l'Université d'Oxford, Samuel Bowring du MIT et William Compston de l'Université Nationale de Canberra.

remplissage des fosses océaniques, la contribution des comètes ne peut pas dépasser 30 à 40% de la masse d'eau selon les dernières estimations (les valeurs inférieures à 10% de la masse des océans étant contredite par les données récentes).

La couleur des océans primitifs

Si nous savons à présent que les océans primordiaux étaient chauds et acides, quelle était leur couleur ? Dans une atmosphère majoritairement composée de gaz carbonique et donc réductrice, les pluies étaient acides et ont facilement désagrégé les minéraux silicatés. Le fer n'a pas été oxydé comme aujourd'hui en donnant sa couleur rouge aux continents mais s'est libéré dans les océans sous forme soluble, leur donnant une couleur verte. Aujourd'hui, on trouve encore cette couleur dans les lacs acides d'origine volcanique comme ceux du parc de Yellowstone aux Etats-Unis ou à Kawa Ljen en Indonésie. Certains affichent un pH quasiment négatif !



Chauds, acides et très salés, sous une atmosphère plombée encore plus chaude, orange et suffocante de gaz carbonique, les océans verts et encore stériles de l'Hadéen n'avaient rien d'attirant. Document T.lombry.

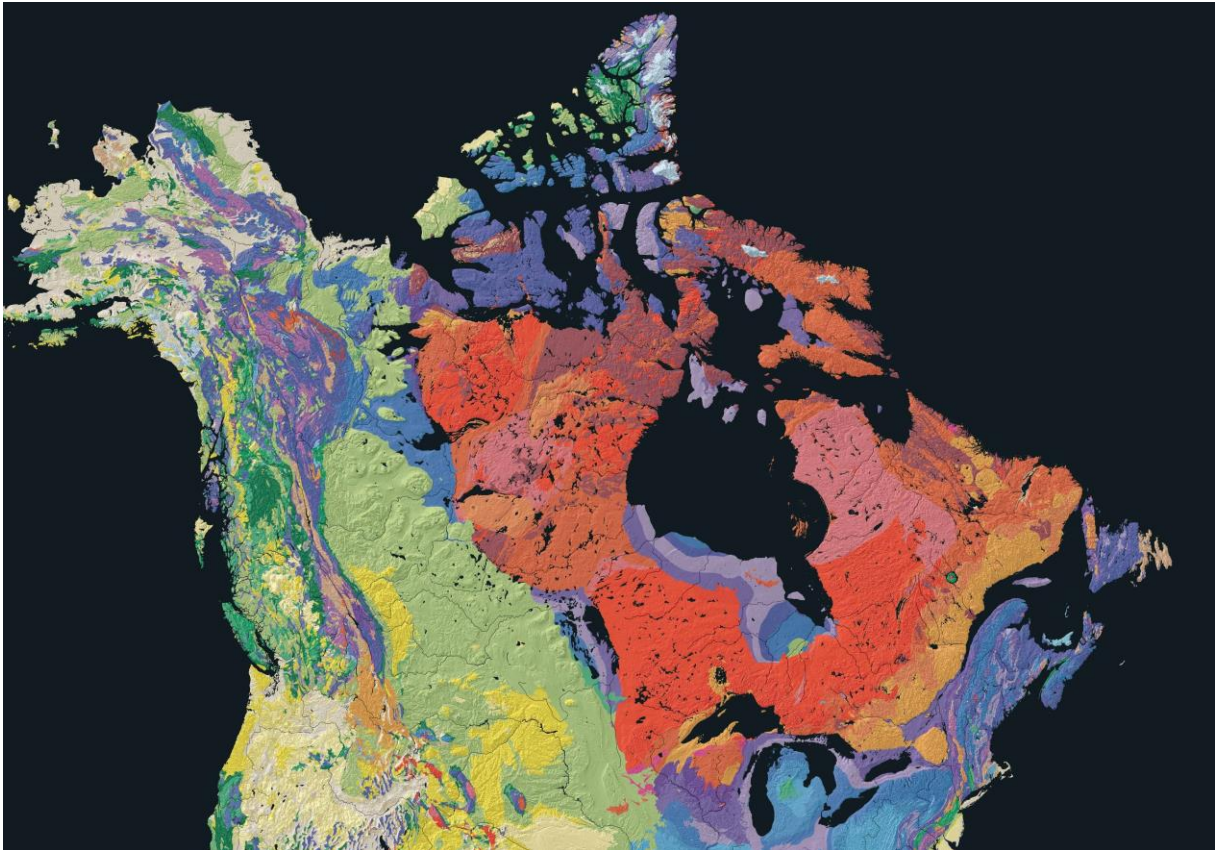
Formation du sel marin

Quelle était la salinité des océans primitifs ? L'origine actuelle du sel marin composé de chlore et sur lequel nous reviendrons dans l'article consacré à la Terre peu de chose à voir avec celle des océans primitifs. Si aujourd'hui les océans contiennent en moyenne 35 g de sel par litre, durant l'Archéen la quantité de sel devait être voisine de 60 g par litre. A cette époque, il existait encore peu de continents émergés et donc peu de possibilités d'évaporation de l'eau salée. Le sel s'est donc formé différemment qu'aujourd'hui et a plusieurs origines.

D'abord, comme dans le cas de l'eau, ce sont les remontées de gaz volcaniques issus du manteau terrestre qui ont donné naissance au chlore parmi d'autres gaz (CO_2 , F, He, etc.) suite à la décomposition des matières volatiles. Un second vecteur est représenté par les météorites, en particulier les chondrites contenant des chondres ou sphérules de silicates fondus. Tout ces matériaux ont forgé la Terre primitive et les plus légers se sont finalement retrouvés en surface où il furent érodés et transportés par l'eau et le vent jusqu'à la mer.

3. Emergence des continents : une histoire Archéenne

L'émergence des continents est beaucoup plus tardive. Pour les géologues et les micropaléontologues, les plus vieux sédiments que l'on retrouve à Ishua au Groenland, en Inde et au Gabon remontent entre 3.7 et 3.8 milliards d'années, c'est-à-dire à l'Archéen. D'autres plaques tectoniques, telle la région d'Acastagneiss située sur la partie ouest du bouclier canadien sont âgées de 3.96 milliards d'années.



Gros-plan sur le bouclier canadien (la surface orange, rose et ocre). Il recouvre presque la moitié de la superficie du Canada. Yellowknife se trouve sur la bordure ouest du bouclier canadien. Document [USGS](#)

Il n'existe que trois endroits dans le monde contenant des roches de plus de 4 milliards d'années : dans l'ouest de l'Australie, dans le bouclier canadien (plateau laurentien) ainsi qu'au nord des Territoires du Nord-Ouest du Canada où il existe des roches métamorphiques comme des granites et des zircons très anciens.

Ainsi, en 2017 les géochimistes Jonathan O'Neil de l'Université d'Ottawa et Richard Carlson de la Carnegie Institution de Washington DC ont publié dans la revue *Science* une étude décrivant la découverte de roches appartenant à la croûte terrestre originelle. Ces roches furent découvertes dans les collines basses (elles furent érodées durant le dernier âge glaciaire) situées aux abords de la baie d'Hudson, au nord-est du Canada.

La pierre ressemble presque à n'importe quelle roche brute : grise, dure, informe. C'est un granite d'apparence ordinaire mais qui cache un trésor. En effet, grâce à une nouvelle technique de datation, les deux chercheurs ont découvert dans ces échantillons des traces de samarium-146, un élément des terres rares, radioactif et donc instable dont la demi-vie est de 103 millions d'années. On ne trouve cet élément que dans la toute première croûte terrestre. Au cours de sa décroissance, il forme différents isotopes-fils dont le néodyme-142. C'est en mesurant au

spectromètre de masse la proportion des différents isotopes qu'on peut déterminer ceux qui proviennent d'une ancienne roche formée avant la disparition du samarium-146. En appliquant cette méthode, O'Neil et Carlson ont pu déterminer que le granite s'est formé par métamorphisme il y a 2.7 milliards d'années et que le basalte originel s'est formé il y a au moins 4.2 milliards d'années, un record absolu. Autrement dit, cet élément aurait été incorporé dans une roche basaltique pendant 1.3 milliard d'année avant de se transformer en granite.

Cela signifie surtout que les basaltes qui se sont transformés en granite de 2.7 milliards d'années ont survécu pendant 1.5 milliard d'années avant de subir les processus destructeurs de la subduction et du métamorphisme. Aujourd'hui, une telle survie serait impossible en raison des déplacements des plaques tectoniques qui renouvelle les basaltes en une centaine de millions d'années.



Un échantillon de roche découvert à 300 km au nord de Yellowknife, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. La datation des inclusions de zircon indique qu'elle remonte à 4.02 milliards d'années.
Document J. R. Reimink et al.

Comme un fossile conserve les détails des structures originelles, bien que la roche se soit transformée au fil des éons, elle ressemble encore fortement à la roche initiale. "*C'est un basalte correspondant parfaitement à la composition de la roche précurseur que nous pensons être à l'origine de tout*", a expliqué O'Neil.

En résumé, deux hypothèses peuvent expliquer la survie de ces basaltes. Selon la première théorie, les basaltes qui ont formé les granites du Canada proviendraient d'un gigantesque bloc rocheux qui résista à la subduction pendant 1.5 milliard d'années. Selon une seconde théorie, les mouvements tectoniques à l'époque de la Terre primitive étaient très lents voire inexistants, ce qui aurait permis aux basaltes de "flotter" à la surface de la Terre beaucoup plus longtemps que sous le régime actuel. Cette seconde hypothèse est supportée par d'autres résultats publiés en 2017 par Tim Johnson et ses collègues indiquant qu'il n'existait peut-être pas de plaques tectoniques à l'époque de la Terre primitive et donc que les premiers continents ne se sont pas formés par subduction. Cette hypothèse contredit évidemment l'idée que les plaques tectoniques expliqueraient le mieux l'évolution géodynamique de la Terre durant le premier milliard

d'années. Mais une deuxième découverte que nous allons décrire tout de suite va dans le même sens que la proposition de Tim Johnson.

Un autre échantillon de roche très ancien fut découvert à 300 km au nord de Yellowknife, dans la partie ouest du bouclier canadien, à 2200 km environ à l'ouest du site de la baie d'Hudson. Selon une étude publiée en 2016 dans la revue *Nature Geoscience* par le géophysicien Jesse R. Reimink de l'Université d'Alberta et son équipe, les zircons incrustés dans cette roche indiquent sans ambiguïté qu'elle remonte à environ 4.02 milliards d'années, approchant de peu du record précité.

Les signatures chimiques de cette roche furent analysées afin de comprendre comment le magma s'infiltra et interagit avec la roche et notamment avec les zircons. L'une de ces signatures enregistra l'assimilation du magma provenant de l'écorce terrestre. En effet, pendant son refroidissement, le magma réchauffe et fait fondre les roches autour de lui dont on peut encore trouver quelques traces aujourd'hui. La roche découverte près de Yellowknife en fait partie car elle provient d'une couche de roche fondue qui a interagit avec du magma plus ancien. Les traces de cette interaction sont visibles dans les cristaux de zircon.

L'échantillon ne présente aucune signature de l'écorce continentale. Si cela soulève plus de questions qu'elle n'en résout pour les géologues, elle révèle un fait en faveur de la théorie de Tim Johnson évoquée précédemment à propos de l'absence de plaque tectonique à cette époque ancestrale. En effet, cette roche suggère que la Terre d'il y a 4 milliards d'années était recouverte d'une surface solide similaire à la croûte océanique (celle qui forme le fond des océans) et non pas d'une croûte continentale comme on s'y attendait. Cette roche est donc précieuse car sa signature chimique unique révèle comment les premiers continents se sont formés et renseigne les scientifiques sur la nature des premières écorces terrestres.

En résumé, la découverte des deux roches de plus de 4 milliards d'années dans le nord du Canada suggère que pendant l'Hadéen il n'existait pas encore de continents. Mais cela ne veut pas dire qu'il n'y avait pas de "points chauds". La Terre de l'Hadéen devait être couverte d'îles volcaniques plus ou moins étendues dispersées dans un océan aux effluves acide et aux reflets verts ou rouges sous la lueur des laves. On en déduit que les plaques tectoniques sur lesquelles reposent les continents et beaucoup d'îles se sont formés il y a moins de 4 milliards d'années, durant l'Archéen.

Naissance des continents

Les théories de la tectonique des plaques et de la dérive des continents de Wegener nous apprennent que la Terre est constituée de 12 plaques tectoniques principales, auxquelles s'ajoutent de nouveaux morceaux apparus suite à des ruptures ou des collisions entre plaques. Leurs limites sont formées par les ruptures dans le plancher de l'écorce terrestre, les zones de subduction et les fractures secondaires.

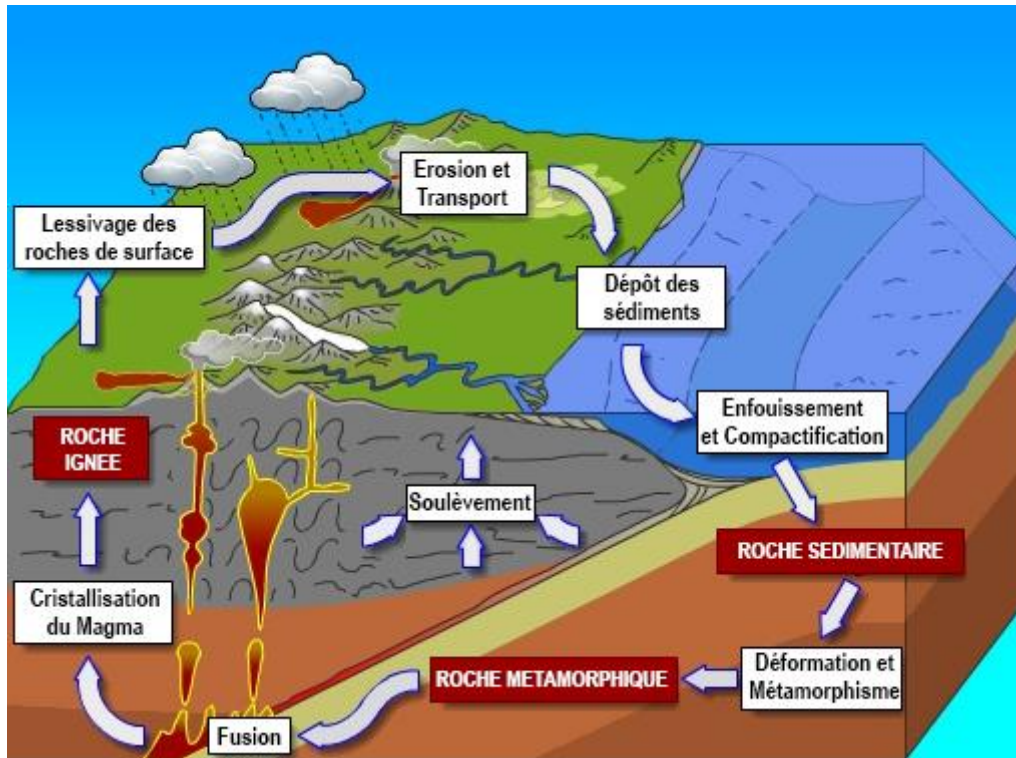
Les continents sont les seules structures de l'écorce terrestre n'ayant pas été recyclées, et par conséquent détruites par l'incessant cycle géothermique de convection qui se déroule dans le manteau. Leur subsistance vient du fait que les continents sont constitués de matériaux légers qui restent en surface pendant les phases de subduction des plaques tectoniques. Il n'est donc pas étonnant de retrouver des roches continentales remontant à 2 ou 3 milliards d'années alors que les fonds sédimentaires ou magmatiques des océans ne dépassent pas quelque 200 millions d'années.



Sur le plan paléontologique, on peut donc trouver dans les roches continentales les traces fossiles des premières formes de vie, y compris en haute altitude en raison du soulèvement des plaques tectoniques. Ces traces fossilisées ne sont toutefois pas très nombreuses car l'activité géologique, l'érosion et le métamorphisme ont détruit la plupart des roches primitives. Peu de fragments ont survécu à cette machine géologique infernale.

Notons que pour un paléontologue comme pour un archéologue, outre l'activité géologique qui peut effacer toute trace de vie en quelques minutes, l'érosion des sols et la décomposition des organismes jouent un rôle très pénalisant. C'est encore plus vrai dans les régions humides où les restes des organismes morts pourrissent et disparaissent avant leur momification ou leur fossilisation. C'est l'une des raisons qui rend le travail de ces chercheurs difficile quand il faut retracer la distribution d'une population ou l'origine géographique d'une espèce sachant que le manque de fossiles dans une région ne signifie pas que l'espèce n'y a pas vécu.

Concernant la durée du jour, durant l'Hadéen la période de rotation de la Terre était inférieure à 6 heures puis elle s'est fortement ralentie en l'espace d'un milliard d'années. On estime que durant l'Archéen cette durée a progressivement augmenté de 14 à 18 heures entre 3.8 et 2.5 milliards d'années. Il y a 550 millions d'années encore, au tout début du Cambrien, les premiers animaux marins devaient se contenter de 20 heures, la coquille du nautilite par exemple en apportant la preuve (chaque jour la plupart des invertébrés marins ajoutent une strie à leur coquille. L'étude de leurs fossiles permet donc de calculer la durée du jour depuis le Cambrien). Ce phénomène est intéressant à noter car il eut un effet sur le climat, sur la vitesse des vents et l'érosion des sols ainsi que sur le métabolisme des organismes.



Durant l'Hadéen, les vents devaient être très violents avec une houle très impressionnante, d'autant que les continents n'existaient pas encore et que la Lune était alors beaucoup plus proche de la Terre (<25000 km). Il faudra attendre le début de l'Archéen pour que la Lune s'éloigne jusqu'à 100000 km de distance. Par endroits, l'amplitude des marées atteignit une centaine de mètres de hauteur ! Les rivages étaient donc soumis à une érosion intense, générant des débris et des dépôts importants de sédiments dans les dépressions.

Comme nous l'avons expliqué, sous l'effet des pluies acides le fer présent dans les roches s'est dissolu dans les océans, donnant aux continents une couleur grise bordés par des eaux acides et vertes, un milieu qui est resté franchement invivable jusqu'à la fin de l'Hadéen. Parfois, on peut encore retrouver des roches Archéennes sous forme de sables ou de galets érodés d'uraninite (du minéral d'uranium) et de pyrite (sulfure de fer), les rares témoins de cette époque primordiale.

Le Précambrien : Hadéen (4650 à 3800 Ma)

Selon les modèles, il y a 4 milliards d'années la luminosité du Soleil était 27% plus faible qu'aujourd'hui et était encore 20% plus faible qu'aujourd'hui il y a 2.8 milliards d'années. Avec beaucoup moins de chaleur solaire disponible et le piégeage du gaz carbonique dans les carbonates en raison du lessivage des roches, la Terre aurait pu connaître une glaciation durant l'Hadéen.

Or, comme nous l'avons expliqué, les analyses des zircons et des radioisotopes de l'oxygène et du silicium datant de 3.8 milliards d'années montrent que la pression du gaz carbonique était encore de 3 bars à cette époque, entraînant un puissant effet de serre, portant la température de l'air à plus de 250°C en surface tandis que la température des océans était probablement voisine de 70°C.

Quelles conditions faut-il réunir pour que la vie émerge ? Pour que la vie se développe, trois éléments doivent être réunis : l'eau, l'énergie et les nutriments (les minéraux). Ces éléments étaient réunis à la fin de l'Hadéen.

On ignore encore précisément si l'atmosphère était toujours plus ou moins réductrice à la fin de l'Hadéen. Dans le pire scénario, même si l'hydrogène s'est rapidement dispersé dans l'espace conduisant à une atmosphère non réductrice rendant difficile voire impossible la formation de molécules organiques dans un milieu neutre, en d'autres endroits de la planète la vie était possible.

Ainsi, comme c'est toujours le cas aujourd'hui, la croûte terrestre présente un caractère réducteur qui permet la synthèse de composés organiques. Si la vie ne pouvait peut-être pas encore se développer dans l'air, les conditions étaient réunies dans les lacs et les océans, en particulier autour des sources hydrothermales et des fumeurs se formant à l'interface entre l'eau et les roches magmatiques réductrices riches en fer (Fe^{2+}).

Sachant que les ions métalliques sont des catalyseurs des réactions chimiques, à partir du gaz carbonique dissout dans l'eau, grâce à la réaction de synthèse de Fischer-Tropsch dans un milieu aqueux et chaud, on peut produire des hydrocarbures (par exemple de l'essence et du gaz de synthèse à partir du charbon ou du gaz) et des acides gras, une première étape vers la vie.

Etant donné les conditions pour le moins hostiles qui régnèrent sur Terre durant l'Hadéen, jusqu'à preuve du contraire, nous n'avons découvert aucune forme de vie remontant à cette époque. Mais comme nous venons de l'expliquer, cela ne veut dire que la vie n'a pas existé au fond des mers à la fin de l'Hadéen. Mais compte tenu du cycle de vie des fonds océaniques et des déplacements des plaques tectoniques, trouver d'éventuelles traces de vie identifiables de cette époque est un défi qui relèvera d'un coup de chance extraordinaire.

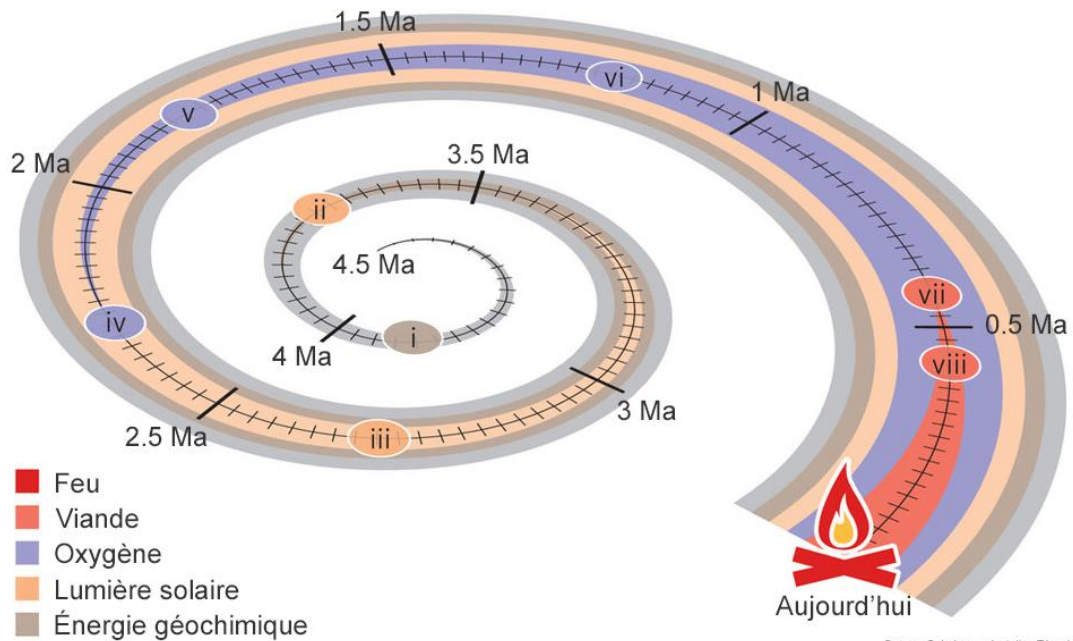
Les sources d'énergie

Pour que la vie puisse se développer, la condition sine qua non est l'existence d'une source d'énergie qui bien sûr ne soit pas létale. Comme le rappela la biologiste Olivia Judson de l'Université Libre de Berlin dans un article publié en 2017, les scientifiques ont divisé l'histoire de la vie sur Terre en cinq époques "énergétiques", chacune présentant une période durant laquelle les formes de vie ont été capables d'exploiter une nouvelle source d'énergie. Ces sources sont : l'énergie géochimique (la plus ancienne, apparue lorsque l'eau réagit avec les basaltes et les autres roches), la lumière du Soleil (photosynthèse), l'oxygène (produit pour moitié par le plancton et qui fit exploser la vie au Cambrien notamment), la viande (pour son apport en protéines chez les carnivores et les omnivores) et le feu (naturel comme celui déclenché par les éclairs qui affecte la qualité des sols et peut développer la biodiversité, la distribution des plantes et des animaux qui s'en nourrissent). En résumé, cinq sources d'énergie participent au développement de toute la chaîne alimentaire.

Les deux premières sources d'énergie existent depuis la formation de la Terre tandis que l'oxygène, la viande et le feu sont les résultats d'évènements évolutifs. Étant donné qu'aucune catégorie de source d'énergie n'a disparu, au cours de l'histoire de la Terre, leur disponibilité eut un impact majeur sur l'environnement planétaire dont les effets se sont étendus et diversifiés au fil du temps. Cette diversification des sources d'énergie a également transformé les environnements qui, par rétroaction, ont contraint les changements évolutifs, y compris la diversité des organismes dans certaines directions plus ou moins temporaires ou durables en fonction des circonstances.

Le fait que la Terre dispose d'énergie libre dite gratuite est une exigence universelle pour la vie. Comme nous l'apprend l'écologie, elle entraîne des mouvements mécaniques et des réactions chimiques qui, en biologie, peuvent transformer une cellule, un organisme ou toute une

population; c'est la théorie de l'évolution de Darwin avec ses effets à travers la faculté d'adaptation des organismes.



Le développement de la vie sur Terre repose sur cinq sources d'énergie. Voir le texte pour les explications. Document Olivia P.Judson.

Notons que l'étude de l'évolution des sources d'énergie et leurs rétroactions sur le développement de la vie sur Terre peut nous apporter des informations sur l'évolution potentielle de la vie sur d'autres planètes.

Les premiers organismes : 3.5 milliards voire 4.28 milliards d'années

Pour les paléontologues des années 1960, la vie semblait avoir débuté au Cambrien, il y a 540 millions d'années avec les trilobites et les méduses, car il n'y avait a priori aucune traces de squelettes antérieures à cette date, donc il n'y avait pas de vie tout simplement. Remercions le travail effectué par les micro-paléontologues et les biochimistes qui reculèrent la date du début de la vie toujours en arrière. En effet, en 1981 les géologues Donald R. Lowe et Gary R. Byerly de l'Université de Louisiane découvrirent des stromatolites microfossiles au Zimbabwe qui remontaient à 3.5 milliards d'années, à l'époque du continent Gondwana. Aujourd'hui leurs descendants survivent toujours, en particulier dans les eaux chaudes et peu profondes de Shark Bay en Australie Occidentale, à Exuma Cays aux Bahamas (découverts en 1983) ainsi que dans les lacs turquoises des "Rosas esmeralda" de Cuatro cienegas au nord-est du Mexique et dans la lagune de Bacalar au Yucatan.

Depuis, nous verrons plus bas que les chercheurs ont découvert de nombreuses traces possibles de vie remontant à 3.8 ou même à plus de 4 milliards d'années, mais rarement des fossiles attestant que la vie existait à ces époques reculées. De telles découvertes sont donc précieuses.



Des stromatolites (toujours vivants) dans les eaux peu profondes de Shark Bay en Australie

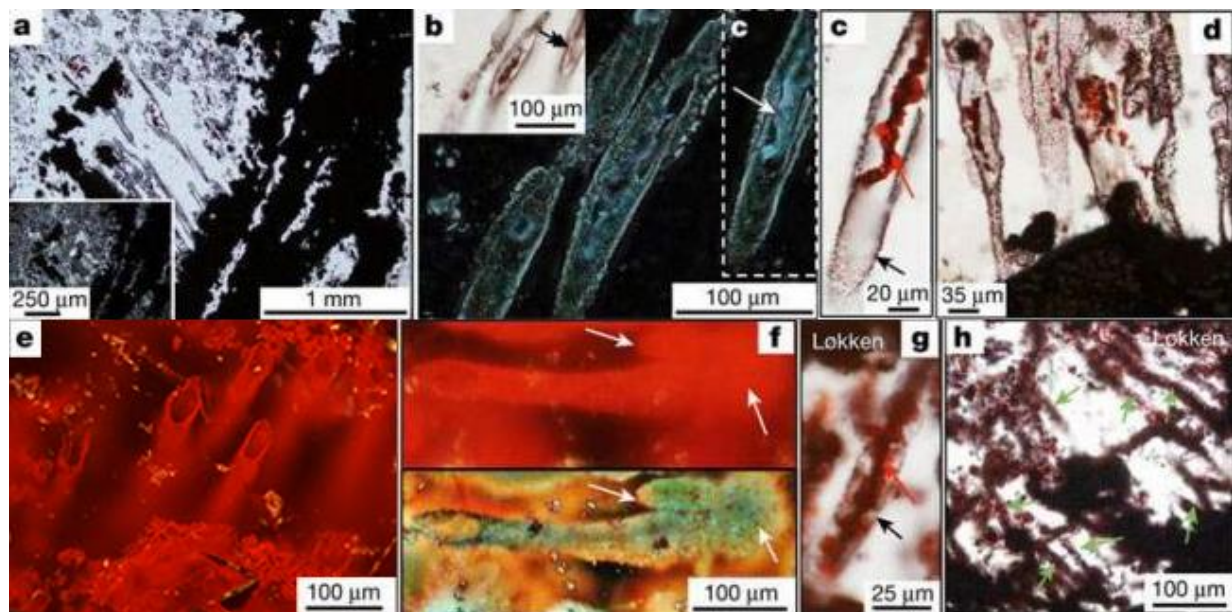
Parmi celles-ci, en 2017 le paléobiologiste J. William Schopf de l'UCLA et ses collègues découvrirent dans les collines d'Apex Chert dans l'ouest de l'Australie des microfossiles âgés d'environ 3.5 milliards d'années préservés dans des couches sédimentaires fossilisées. En fait, les fossiles furent découverts en 1993 mais ce n'est qu'en 2017 qu'une analyse chimique sophistiquée fut réalisée grâce à un nouveau modèle de spectromètre de masse à ionisation secondaire (SIMS modèle IMS 1280) capable de séparer les différents isotopes de carbone et mesurer le rapport isotopique $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Il fallut 10 ans à Valley et ses collègues pour mettre au point la méthode d'analyse.

Ces microfossiles primitifs appartiennent à différents groupes de microbes dont des bactéries photosynthétiques, des archées produisant du méthane et des gammaprotéobactéries consommant du méthane. Ces microbes mesurent environ 10 microns de longueur.

Comme souvent en sciences, sans même étudiés les spécimens, certains chercheurs ont contesté les résultats, estimant qu'il s'agissait simplement de structures minérales ressemblant à des structures biologiques. Toutefois selon John Valley, expert en géoscience à l'Université du Wisconsin à Madison et coauteur de cette étude, il s'agit bien d'organismes biologiques.

Notons que les équipes de Valley et Wilde avaient déjà découverts en 2001 des grains de zircons confirmant que des océans d'eau liquide (donc à moins de 100°C) existaient dans la région il y a 4.3 milliards d'années, soit 800000 ans avant l'apparition de ces bactéries.

Ces fossiles de bactéries sont à ce jour les plus anciennes traces attestant que la vie existait il y a 3.5 milliards d'années.



Aspect des tubes constitués d'oxyde de fer (sur les encarts b, c et h, la flèche indique le filament ou cil en hématite). Documents Dominic Papineau, Matthew Dodd et al., 2017.

Un peu plus tôt en 2017, le géologue Dominic Papineau du Collège Universitaire de Londres et son équipe ont annoncé dans la revue "*Nature*" avoir probablement découvert des micro-organismes fossilisés datant de 3.77 milliards d'années et peut-être même de 4.28 milliards d'années dans des couches de jaspe, une variété de quartz microcristallin, composées de roches sédimentaires ferrugineuses. Le site se situe dans la partie est de la baie d'Hudson, dans la ceinture de Nuvvuagittuq, au Québec, au Canada.

Ces organismes seraient des bactéries extrémophiles ayant vécu près de cheminées hydrothermales sous-marines comme le font encore aujourd'hui de nombreuses créatures car elles trouvent près de ces oasis sous-marines des eaux chargées en de nombreux nutriments. Ces micro-organismes fossiles mesurent moins de 0.5 mm et sont constitués de tubes et de filaments (cils) en oxyde de fer, précisément du chert d'hématite (65-95% de SiO_2 + 3-35% de Fe_2O_3) dont les morphologies et les assemblages minéraux ressemblent à ceux des bactéries filamenteuses modernes vivant près des cheminées hydrothermales et capables d'oxyder les composés ferreux ou soufrés (certaines peuvent même vivre dans des environnements acides à fortes concentrations en métaux lourds). Leur structure contient également du graphite, de l'apatite (groupe des phosphates) et évidemment du carbone. Les microfossiles comprennent également des rosettes, les résidus du métabolisme de ces créatures.

Rappelons qu'aujourd'hui encore, l'hématite (Fe_2O_3) abonde dans les systèmes hydrothermaux où l'eau très chaude percole à travers les roches volcaniques, permettant aux minéraux riches en fer dont l'hématite de précipiter par refroidissement. Un processus similaire aurait déjà existé voici 3.77 à 4.28 milliards d'années, permettant le développement des premières bactéries extrémophiles capables d'oxyder le fer.

Toutefois certains auteurs mettent en doute la nature biologique des structures fossilisées ainsi que la datation de 4.28 milliards d'années du fait que la roche s'est cristallisée. Matthew Dodd, coauteur de cette étude, reconnaît lui-même qu'il faut "rester prudent", raison pour laquelle ils ont donné "un âge minimum de 3.77 milliards d'années" mais elles sont peut-être 510 millions d'années plus anciennes.

Traces primitives de métabolisme biologique : 3.95 à 4.37 milliards d'années

Comme nous l'avons évoqué, si la plupart des chercheurs en paléobiologie n'ont pas trouvé de fossiles datant du Précambrien (Hadéen), en revanche ils ont découverts de nombreuses roches sédimentaires très anciennes présentant des traces évoquant un métabolisme biologique.

La géologie nous apprend par exemple que la zone d'Isua près de Godhab au Groenland remontait aux environs de 3.8 milliards d'années et comptait ainsi parmi les plus vieilles roches sédimentaires. De retour d'une expédition dans cette région, le géologue Vic MacGregor ramena des échantillons qui datèrent de 3.7 milliards d'années. Un échantillon de l'Est Indien datait même de 3.8 milliards d'années mais il se décomposa. En 1988, Mandred Schidlowski de l'Institut Max Planck de Chimie apporta enfin la preuve aux moyens d'enregistrements isotopiques que la vie avait bien existé à cette lointaine époque. L'exobiologiste Cyril Ponnamperuma du centre Ames de la NASA confirma dans le rapport concluant ses analyses chimiques que l'on avait reculé l'âge des premiers signes de la vie bien au-delà de la limite des 2 milliards d'années qui tenait depuis 20 ans.

Puis il fallut de nouveau attendre plusieurs décennies pour qu'on découvre des traces suggérant qu'il existerait des formes de vie plus anciennes. En effet, en 2015 le géochimiste Mark Harrison et ses collègues de l'UCLA ont annoncé dans les "*PNAS*" avoir découvert des traces de vie âgées de 4.1 milliards d'années.

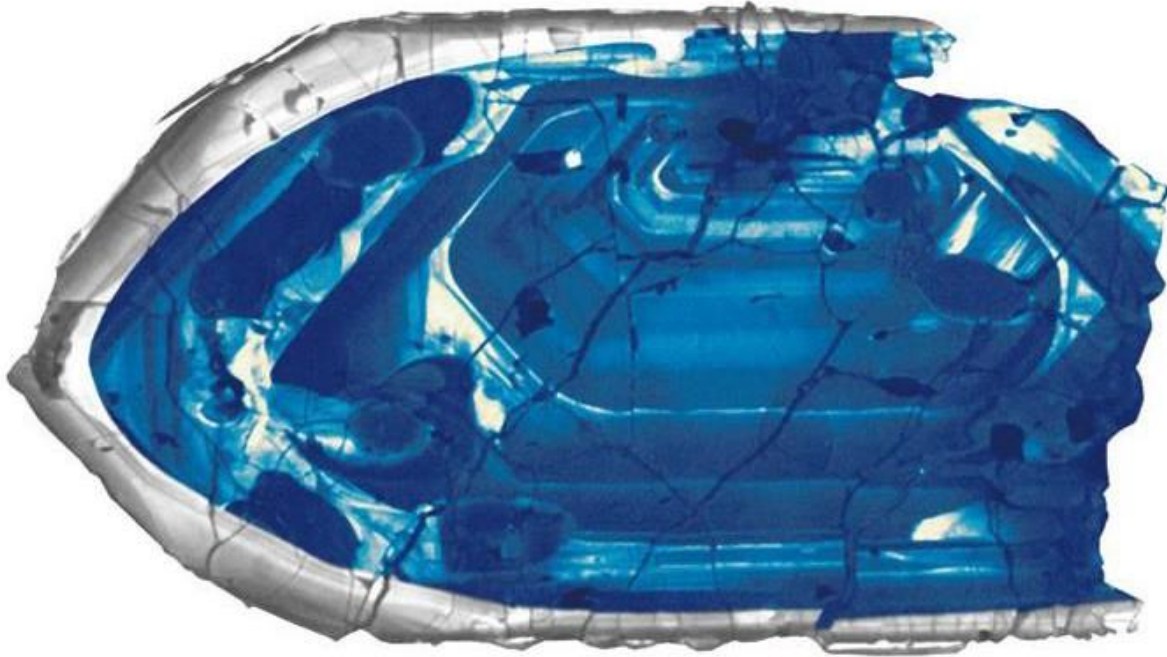
Sa collègue Elizabeth A. Bell et son équipe avaient analysé plus de 10000 grains de zircons extraits d'une roche récoltée à Jack Hills, dans l'ouest de l'Australie. Les chercheurs ont ensuite sélectionné 656 spécimens âgés de plus de 3.8 milliards d'années présentant des inclusions sombres puis analysé 79 spécimens par spectroscopie Raman, une technique qui permet de connaître la structure moléculaire et chimique de microfossiles en trois dimensions grâce à un balayage vertical à travers l'échantillon.

Du graphite, du carbone pur, a été découvert dans une inclusion de zircon. Or, le graphite est la forme stable des molécules carbonées que Steve Mojzsis avait déjà découvert en 1996 à Isua.

Dans ces nouvelles inclusions, les chercheurs ont trouvé un mélange d'isotopes de carbone $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ rappelant "*les restes visqueux d'une vie biotique*", a déclaré Harrison. Ces résidus carbonés contiennent un taux plus important de ^{12}C que de ^{13}C , typique des échantillons d'organismes vivants ou fossiles. Selon Harrison le carbone proviendrait d'une colonie de micro-organismes inconnus.

Jusqu'à présent, les plus anciennes traces de vie remontaient à 3.8 milliards d'années (Ishua 1996 et Akilia 2007). A présent, cette découverte reculerait l'apparition de la vie de 300 millions d'années. C'est donc vers 4.1 milliards d'années que nous devrions assister à l'étape de transition entre la matière inanimée et les organismes primitifs.

Toutefois les indices récoltés ne constituent pas une preuve irréfutable que la vie est apparue à cette époque. En effet, plusieurs études (Mark Van Zuilen 2002, Dominic Papineau 2011) ont déjà montré que du graphite pouvait se former sous l'action de fluides infiltrés postérieurement dans ces roches.



Échantillon microscopique de zircon daté de 4.4 milliards d'années. Il comprend également de l'oxygène et de la silice (les grandes zones bleues foncées elliptiques correspondent à des inclusions de quartz).
Document J.Valley et al.

Enfin, toujours en 2017, Takayuki Tashiro de l'Université de Tokyo et son équipe ont annoncé dans la revue "*Nature*" la découverte de roches sédimentaires au Labrador dans le nord-est du Canada, contenant des traces biologiques remontant à 3.95 milliards d'années, c'est-à-dire de l'époque Eoarchéenne où l'écorce terrestre était encore toute récente et l'atmosphère très chargée et ne contenant pratiquement pas d'oxygène.

Mais une nouvelle fois, il ne s'agit pas d'organismes primitifs mais de traces de graphite et de carbonate qui analysés au radiocarbone contiennent des éléments biogéniques pouvant être soit des restes fossilisés de cellules soit le résultat de processus géochimiques.

Les chercheurs ont comparé les températures de cristallisation du graphite et celles qui ont chauffé la roche sédimentaire et exclut une contamination ultérieure. Étant donné que les traces ne sont pas beaucoup plus que des fragments chimiques de graphite et de carbonate, ils ne nous apprennent pas grand chose sur la nature des organismes qui les ont laissés derrière eux. Toutefois, cette découverte apporte un élément de plus au puzzle du vivant en apportant une donnée sur la manière dont la vie évolua à cet endroit, suggérant qu'elle s'adapta à des conditions hostiles.

Ces quelques découvertes renforcent l'idée que la biosphère a pu abriter une forme de vie bien plus tôt qu'on le pensait, en fait dès que la surface terrestre s'est solidifiée et les premières étendues liquides sont apparues, c'est-à-dire 440-510 millions d'années seulement après la formation de la Terre.

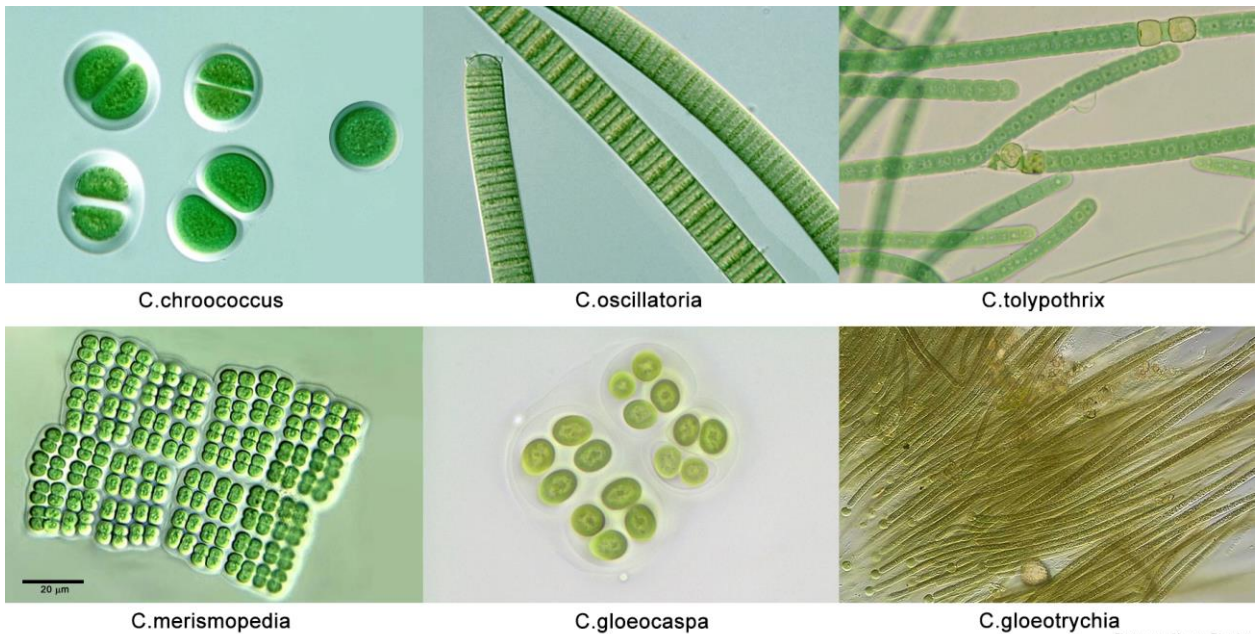
Complétée par la découverte de zircons remontant à 4.374 milliards d'années par John Valley précité (cf. "*GeoScience*", 2014), ces traces montrent qu'à cette époque la Terre présentait déjà des surfaces solides et abritait vraisemblablement la vie. Bien que la vie complexe se développe sur des échelles de temps très longues, elle semble facilement émerger dès que les conditions physico-chimiques sont réunies. Cela donne encore plus d'espoir de trouver des traces de vie,

vivantes ou fossiles ailleurs que sur Terre et notamment sur Mars sans même imaginer sur les exoplanètes telluriques.

Le Précambrien : Archéen et Protérozoïque (3800 à 542 Ma)

On estime que durant l'Archéen, les océans occupaient 25% de plus que leur volume actuel. Comme nous l'avons expliqué, cette eau provient du dégazage du manteau terrestre qui débuta durant l'Hadéen. En analysant l'évolution biologique des sites volcaniques (Hawaii, Dallol, les Açores, etc.) ou très isolés comme les Tépuy au Venezuela (Mt Roraima), on sait que la lave est riche en potassium et phosphore notamment, constituant un excellent engrais. La lave se fracture et s'effrite également facilement sous l'effet du vent et des intempéries. De petits débris peuvent alors s'insérer et s'accumuler dans les fractures des roches magmatiques. Ces roches conservent également la chaleur et étant très poreuses, elles conservent l'humidité. L'environnement minéral des volcans en sommeil et des premières îles a donc constitué le premier milieu terrestre stable propice au développement de la vie.

Dans ces lieux inhospitaliers, on découvre généralement que les premiers organismes vivants se développant dans les flaques d'eau par exemple y compris dans les sources hydrothermales (jusqu'à 75°C) sont des microbes transportés par les vents, les intempéries et les marées, parmi lesquels les cyanobactéries. Anciennement appelées à tort les "algues bleues" (on verra plus loin que l'apparition des algues est beaucoup plus tardive), il s'agit en réalité de bactéries procaryotes (sans noyau). On a identifié quelque 7500 espèces de cyanobactéries réparties en plus de 150 genres. Apparues, il y a environ 3.8 milliards d'années, il s'agit d'organismes unicellulaires capables de vivre dans l'eau et sur la terre ferme en formant de grandes colonies. Grâce à leur métabolisme basé sur la photosynthèse, les cyanobactéries sont capables de produire de l'oxygène. Elles transforment également l'azote de l'air en ammonium et en nitrates, constituants des engrais pour les futures plantes. Lorsqu'elles vivent dans l'océan, elles séquestrent le carbone, produisent le calcaire des stromatolites et participent à la désacidification des océans.



Différents types de cyanobactéries, des bactéries procaryotes vivant en colonies dans l'eau ou sur la terre ferme (à ne pas confondre avec les algues vertes). On dénombre au moins 7500 espèces de cyanobactéries. Compilation de T.Lombry.

Ensemble, les fragments de laves et les cyanobactéries vont créer les premières ébauches de sol, c'est-à-dire de terre dans les infractuosités humides des roches. C'est dans ces endroits privilégiés que progressivement des organismes plus complexes vont s'enraciner et notamment les mousses et les champignons, en particulier les mycètes. S'ils n'existaient pas, la vie n'aurait probablement pas émergé sur la terre ferme car ce sont les mycètes qui ont brisé les roches et sont à l'origine de la terre que nous foulons et des premiers peuplements terrestres. Ce n'est que beaucoup plus tard que les pollens ont participé au développement de la vie.

On a également retrouvé des traces de vie aquatique remontant à plus de 3.5 milliards d'années. Il s'agit d'organismes unicellulaires. Ensuite, pendant plus de 1.5 milliard, la vie évolua peu car les conditions n'étaient pas réunies pour qu'elle survive dans de bonnes conditions. En effet, la Terre était couverte de volcans actifs, de nuages toxiques et d'immenses étendues de lacs de lave tandis que le Soleil bombardait le sol de rayons ultraviolets mortels. Même si les organismes vivaient dans l'eau, à l'abri des aléas du climat, la flore était encore éparse.

A une époque où les tempêtes et les éruptions volcaniques faisaient rage, il est à se demander comment la vie put émerger de ce chaos.

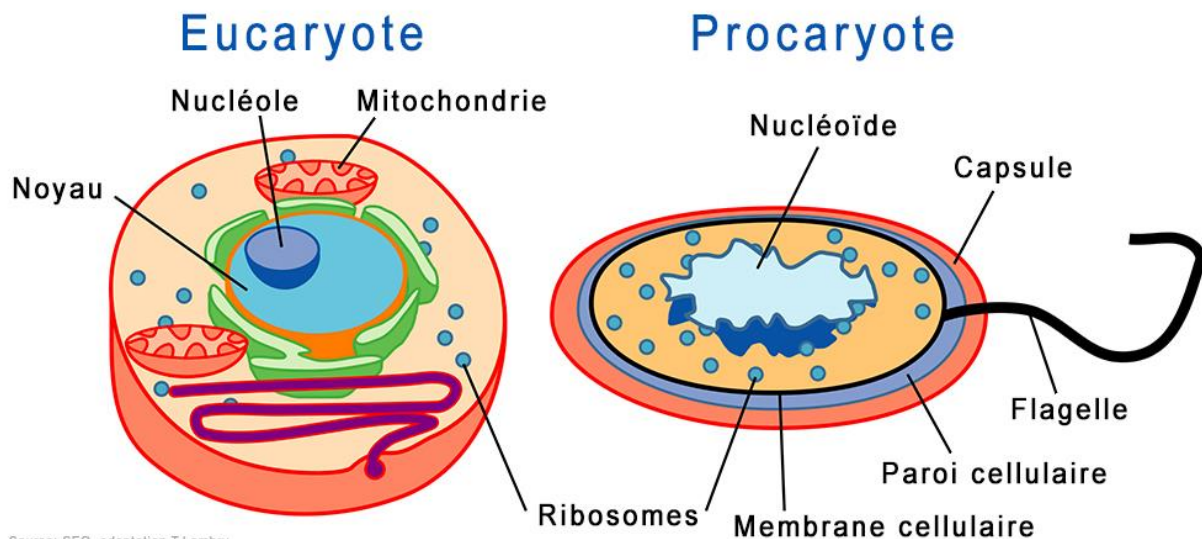
Bien que les cyanobactéries photosynthétiques vivaient déjà depuis longtemps dans les océans et probablement sur les premières terres émergées, la photosynthèse n'eut un impact majeur sur la biosphère qu'un milliard d'années après leur apparition, c'est-à-dire au Protérozoïque, il y a plus de 2.5 milliards d'années, période qu'on surnomma la "Grande Oxydation". Mais il faudra encore patienter des millions d'années pour que l'atmosphère devienne respirable et que les océans soient le siège d'une vie complexe.

Lokiarchaeum, un organisme transitionnel

A quelle époque apparurent les organismes complexes ou en tout cas des cellules présentant des facultés génétiques voire un noyau cellulaire ? Les biologistes n'ont pas encore de réponse ferme et définitive car cela remonte à une époque tellement reculée que l'identification d'un tel fossile est extrêmement hasardeuse et difficile. Malgré cela, en 2015 une équipe de biologistes de l'Université d'Uppsala en Suède, annonça dans la revue "*Nature*" avoir découvert un organisme transitionnel entre les cellules procaryotes (sans noyau, comme les bactéries) et les cellules eucaryotes (à noyau et que'on retrouve dans tout le règne animal). Il s'agit d'une nouvelle espèce d'archéobactérie baptisée *Lokiarchaeum*. Elle appartient au nouveau phylum ou embranchement archéen des Lokiarchaeota. C'est une première mondiale.

Cet organisme fut découvert grâce à un robot explorant l'océan Arctique, entre le Groenland et la Norvège, dans une couche de sédiments située à plus de 3000 mètres de profondeur, au pied d'une cheminée hydrothermale appelée le "Château de Loki" par 73°N.

Pour rappel, les cellules eucaryotes sont les organismes les plus complexes du vivant, en particulier en raison de la présence non seulement du noyau cellulaire qui protège et renferme l'ADN mais également des mitochondries, véritables usines énergétiques de la cellule. A l'origine, ces mitochondries étaient des bactéries, des parasites que les premières cellules ont incorporées (phagocytées) dans leur enceinte cellulaire et dont elles ont tiré profit. Or les cellules procaryotes ne possèdent pas ces entités.



Source: SEO, adaptation T.Lombry

Les bactéries et les archées sont probablement les organismes les plus anciens. On retrouve des signatures chimiques des lipides archéens remontant à 3.8 milliards d'années alors que les cellules eucaryotes les plus anciennes remontent à 2.1 milliards d'années. On y reviendra. Jusqu'à présent il n'existait pas de forme intermédiaire (qu'on appelle à tort le "chaînon manquant"). Aussi, la découverte de *Lokiarchaeum* qui ne présente pas encore toutes les caractéristiques des eucaryotes témoigne de l'existence d'une transition entre les archées et les eucaryotes. Selon Anja Spang, chercheuse au département de biologie cellulaire et moléculaire à l'Université d'Uppsala, *Lokiarchaeum* n'a ni noyau ni mitochondrie. Son génome la fait apparaître dans l'arbre phylogénétique comme un groupe sœur des cellules procaryotes. En effet, elle présente une troublante similarité génétique avec les cellules eucaryotes : "*elle dispose de gènes qui codent pour des protéines qu'on ne retrouve normalement que chez les cellules eucaryotes. On n'en connaît pas encore la fonction chez Lokiarchaeum*", précise Anja Spang.

Cet organisme dispose également de facultés génétiques lui permettant de fabriquer des protéines complexes. "*Naturellement cela ne veut pas dire que Lokiarchaeum est la copie conforme de cet ancêtre commun*" entre procaryotes et eucaryotes, relativise Anja Spang car "*Lokiarchaeum a également évolué pendant des siècles.*"

Cette découverte représente une étape majeure dans notre compréhension de l'évolution cellulaire. *Lokiarchaeum* apporte un nouvel éclairage sur la manière dont les cellules complexes qui composent aujourd'hui tout le règne du vivant, des champignons à la faune en passant par la flore, ont évolué à partir de cellules sans noyau.

A présent que les zones humides foisonnent de formes de vie élémentaires et que certaines commencent à intégrer des bactéries, des virus et des gènes étrangers qui travaillent à leur profit, certains organismes ont profité de cette opportunité pour se complexifier. Mais pour cela, ils ont dû s'adapter à la présence de l'oxygène dont les radicaux sont toxiques car oxydants et indirectement germicides, rappelez-vous le rôle désinfectant de l'eau oxygénée (H_2O_2) et de l'eau de Javel ($NaClO$).

Les premiers métazoaires (2.1 Ma)

En 2008 l'équipe d'Abderrazak El Albani de l'Université de Poitiers découvrit dans le bassin sédimentaire de Franceville au Gabon des traces fossilisées des premiers métazoaires : ils sont apparus il y a 2.1 milliards d'années. Cette découverte est très importante.

Pour démontrer qu'il s'agit bien de formes de vie fossilisées, les chercheurs ont mesuré le rapport isotopique du soufre et mesuré la distribution relative de la matière organique transformée en pyrite (disulfure de fer) au cours de la fossilisation. Les chercheurs ont ainsi pu différencier la matière fossile du sédiment gabonais constitué d'argiles.



L'holotype du plus ancien métazoaire découvert au Gabon en 2008 par les chercheurs de l'Université de Poitiers. Il date de 2.1 milliards d'années.

Plus de 400 spécimens ont été étudiés. Ces organismes mesurent entre 1 et 17 cm auxquels s'ajoutent des microfossiles carbonés mesurant entre 50 et 80 microns. Ces organismes vivaient en colonies : localement plus de 40 spécimens au demi-mètre carré ont été recueillis. Ils constituent à ce jour les eucaryotes pluricellulaires les plus anciens jamais décrits.

Le gisement repose sur un socle granitique Archéen remontant entre 2.7 et 3.1 milliards d'années. Les couches sédimentaires sont horizontales et n'ont pas été altérées par l'activité tectonique (déformation et compaction avec élévation de la température et de la pression), ce qui a préservé les échantillons, les maintenant dans un état de conservation exceptionnel.

En étudiant les structures sédimentaires du gisement, les scientifiques ont pu déterminer que ces organismes pluricellulaires vivaient dans un environnement marin d'eau peu profonde (20 à 30 m), souvent calmes mais périodiquement soumises à l'influence conjuguée des marées, des vagues et des tempêtes.

Jusqu'à présent, on supposait que les formes de vie existant avant 600 millions d'années étaient majoritairement représentées par des organismes unicellulaires (microbes). Or cette nouvelle découverte prouve que des formes de vie complexes et beaucoup plus grandes existaient déjà 1.5 milliard d'années plus tôt, bien avant celles découvertes en Australie.



Fossiles découverts au Gabon au cours des campagnes de fouilles réalisées entre 2005 et 2010 par l'équipe d'Abderrazak El Albani de l'Université de Poitiers. Cet organisme vivait il y a environ 2.1 milliards d'années. L'échelle représente 1 cm. Document A.El Albani et al. (2010).

Précisons que les couches sédimentaires de Franceville contiennent également des fossiles beaucoup plus anciens, notamment des stromatolithes de probablement 3.5 milliards d'années ainsi que des microsphères qui seraient les traces fossilisées d'algues unicellulaires à chlorophylle dont les plus anciens spécimens datent de 3.3 milliards d'années. De manière générale, les sédiments francevilliens présentent une teneur élevée en carbone organique (jusqu'à 20% dans certaines couches) qui témoigne de la prolifération de la vie en ces lieux il y a 2 milliards d'années.

C'est au cours de cette époque lointaine que la vie se diversifia : aux cellules procaryotes (sans noyau) se sont ajoutés les eucaryotes (cellules à noyau), les organismes uni et pluricellulaires dont l'organisation et le métabolisme sont plus complexes. De plus grande taille, ces organismes contiennent un génome de nature ADN, porteur d'information héréditaire.

La Grande Oxydation : 2.45 à 2 milliards d'années

Pour se développer, on suppose que les premiers métazoaires ont bénéficié d'une augmentation significative mais temporaire de la concentration en oxygène dans l'atmosphère. Ce phénomène s'est produit entre 2.45 et 2 milliards d'années; c'est l'époque de la "Grande Oxydation". Les organismes aérobies ont dû s'adapter à la présence d'oxygène ou périr. Ils ont donc appris à utiliser l'oxygène pour respirer tout en neutralisant les radicaux libres susceptibles d'oxyder les molécules et d'endommager leur organisme. Ce fut réalisé grâce notamment à trois nouveaux acides aminés, la méthionine (M ou MET), le tryptophane (W ou TRP) et la sélénocystéine (U ou SEC) qui furent incorporés dans leur machinerie génomique. Depuis cette époque, tous les organismes aérobies ne craignent plus l'oxygène, du moins tant qu'il reste à des concentrations normales, sinon comme nous l'avons évoqué, c'est toujours un poison. Puis, il y a 1.9 milliard d'années, le taux d'oxygène dans l'atmosphère chuta brusquement.

Ensuite, pendant des centaines de millions d'années la vie n'a pas beaucoup évoluée, le taux d'oxygène devenant parfois très faible.

Tout débuta réellement il y a 1.2 milliard d'années, au Protérozoïque moyen, où on observe le développement d'un grand nombre de créatures marines complexes alors que la concentration en oxygène dans l'atmosphère était cent fois plus faible qu'au Cambrien (première ère du Paléozoïque, il y a 542-488 millions d'années).

Première biominéralisation il y a 810 millions d'années

Un élément critique pour beaucoup d'organismes pluricellulaires est la solidité des structures biologiques, tels que les os des animaux, les coquilles des mollusques et les coraux fabriqués à partir d'éléments minéraux, notamment de sels de calcium.

Phoebe R. Cohen du Williams College du Massachusetts et ses collègues spécialistes en géosciences ont déclaré en 2017 dans la revue "*Science Advances*" avoir découvert au Canada une cellule eucaryote présentant des signes de biominéralisation âgée d'environ 810.7 millions d'années. Cette découverte lève un coin d'ombre sur la manière dont les organismes ont évolué au cours du temps.

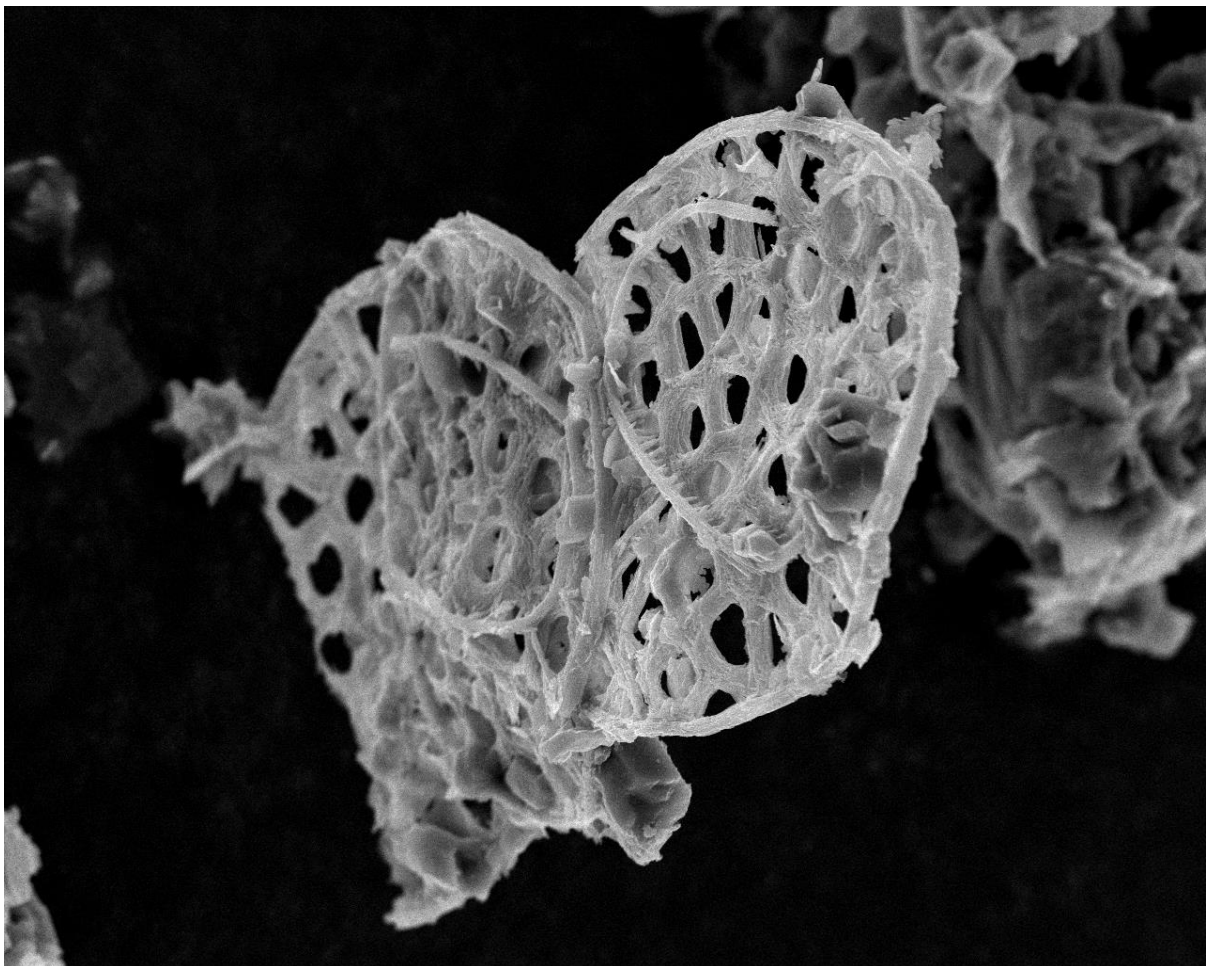


Image obtenue au microscope électronique des plus anciennes plaques fossilisées biominéralisées; elles remontent à 810 millions d'années. Documents P.A.Cohen.

Jusqu'à présent on ignorait à quelle époque étaient apparus les premiers signes de biominéralisation eucaryote et il était donc impossible de connaître l'âge et les circonstances

environnementales dans lesquelles ces structures sont apparues. Rappelons que les premières ammonites et leur fameuse coquille en spirale remontent au début du Dévonien (~419 Ma) tandis que les plus anciens échantillons de biominéralisation que nous possédons remontent à environ 600 millions d'années.

Les chercheurs dont les travaux furent financés par l'Institut d'Astrobiologie de la NASA ont récolté des échantillons dans une couche de limon et de schiste noir et gris épaisse d'environ 60 mètres située sur un affleurement enneigé près du mont Slipper dans le territoire du Yukon au Canada, près de la frontière avec l'Alaska. Ils se sont concentrés sur les microfossiles datant du Néoprotérozoïque, c'est-à-dire l'ère remontant entre 541 millions et 1 milliard d'années. Les fossiles furent découverts en dissolvant les roches carbonatées (c'est-à-dire composées d'ions carbonatés CO_3^{2-}) dans un acide faible.

Les fossiles qu'ils ont découvert ne semblent pas être des organismes individuels mais feraient partie d'une seule cellule de forme arrondie entourée de petites plaques de protections. Selon les chercheurs, ces microfossiles ont une structure complexe comprenant un réseau entrelacé de cristaux fibreux d'un minéral connu sous le nom d'apatite. La complexité de ce réseau confirme qu'il a été créé par un procédé biologique et non par un processus géologique. C'est l'analyse des isotopes du rhénium et de l'osmium prisonniers des roches qui a permis de dater ces fossiles de 810 millions d'années.

Cette découverte confirme que les cellules eucaryotes étaient capables de fabriquer des structures biominéralisées complexes beaucoup plus tôt qu'on le pensait. Il y a 810 millions d'années, pratiquement tous les organismes vivaient dans l'eau tandis que les plantes et les animaux n'existaient pas encore. En revanche, il existait une grande diversité de cellules eucaryotes. Il y avait par exemple des algues similaires à nos algues rouges et vertes actuelles et d'autres espèces qui n'ont pas d'équivalents modernes comme les fossiles qu'a découvert l'équipe de Cohen.

Alors que les eaux primitives s'alcalinisaient (devenaient moins acides), l'analyse des roches entourant les fossiles suggère que les altérations chimiques se sont produites dans les océans lorsque ces cellules eucaryotes étaient vivantes et ont renforcé la quantité de composés phosphatés ayant été dissous dans les eaux où ces organismes ont vécu. Selon Cohen, ceci expliquerait pourquoi ces organismes présentent une structure faite d'apatite, qui est un minéral phosphaté de formule chimique générique $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{Cl},\text{F}))$. On suppose que la biominéralisation s'est développée dans les organismes en même temps que leur environnement évolua. Etant donné que le milieu était riche en phosphore, il paraît naturel que les organismes aient utilisé cet élément pour leur processus de biominéralisation, en l'occurrence pour fabriquer leur coquille.

Un aspect inattendu de cette découverte est d'apporter un indice sur les endroits où chercher d'éventuels fossiles sur d'autres planètes et notamment sur Mars. Ainsi, si on recherche des fossiles élaborés en grande partie à partir de phosphates, les chercheurs peuvent dorénavant se concentrer sur les zones ayant autrefois été riches en phosphates dissous.

Il reste encore beaucoup de questions en suspens comme par exemple de savoir pourquoi on ne retrouve pas d'autres traces de biominéralisation pendant 200 millions d'années. Cohen se demande si ces animaux se sont éteints et pourquoi d'autres espèces n'ont pas développé cette capacité ? On peut imaginer que les conditions chimiques de l'océan empêchaient leur fabrication. Pour l'heure, ce sont autant de questions ouvertes qui méritent d'être étudiées.

La glaciation Varanger ou la Terre "boule de neige" il y a 720 millions d'années

Il y a 800 millions d'années, à la fin du Protérozoïque, trois phénomènes majeurs ont contribué au refroidissement sévère de la Terre. Tout d'abord, le supercontinent Rodinia qui s'étendait le long de l'équateur sur 60° de latitude commença à se fracturer et se fragmenter sous l'effet de l'activité des points chauds. Le supercontinent s'ouvrit en formant des bras de mer qui provoquèrent une augmentation de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère et par conséquent de la quantité de pluie. Le carbone piégé dans l'eau de pluie sous forme de gaz carbonique fut séquestré dans les sédiments au fond des océans sous forme de carbonates (sels carbonatés). Ces carbonates sont connus pour influencer à long terme le climat et notamment l'effet de serre via le cycle de carbone.

En même temps, suite à la fracture du supercontinent Rodinia, de gigantesques flots de laves ont envahi la surface des terres. Sous l'effet des pluies, ces surfaces basaltiques nouvellement exposées à l'air et riches en silicates (sels combinant de la silice SiO_2 et des oxydes métalliques) ont rapidement absorbé le carbone (le basalte absorbe 8 fois plus de carbone que les granits) présent dans l'air.

Enfin, à cette époque, le jeune Soleil émettait 6% de chaleur en moins qu'aujourd'hui.



La Terre "boule de neige" il y a 715 millions d'années et qui dura 120 millions d'années.
Document Walter B. Myers.

Ces trois facteurs se sont combinés pour provoquer voici 720 millions d'années une baisse soudaine et brutale de la température de l'air et de la couche supérieure des océans. La Terre se couvrit de glace des pôles jusqu'à la latitude de 25° sur plus de 100 mètres d'épaisseur. C'est l'époque de la Terre "boule de neige" comme l'a surnommée improprement Paul F. Hoffman, géologue émérite de l'Université d'Harvard.

Ce "coup de froid" appelé la glaciation Varanger s'acheva il y a environ 595 millions d'années. Pendant cette période glaciaire qui dura 120 millions d'années, la température moyenne au sol était de -20°C avec localement des extrêmes de -50°C . Certains gaz se sont alors retrouvés

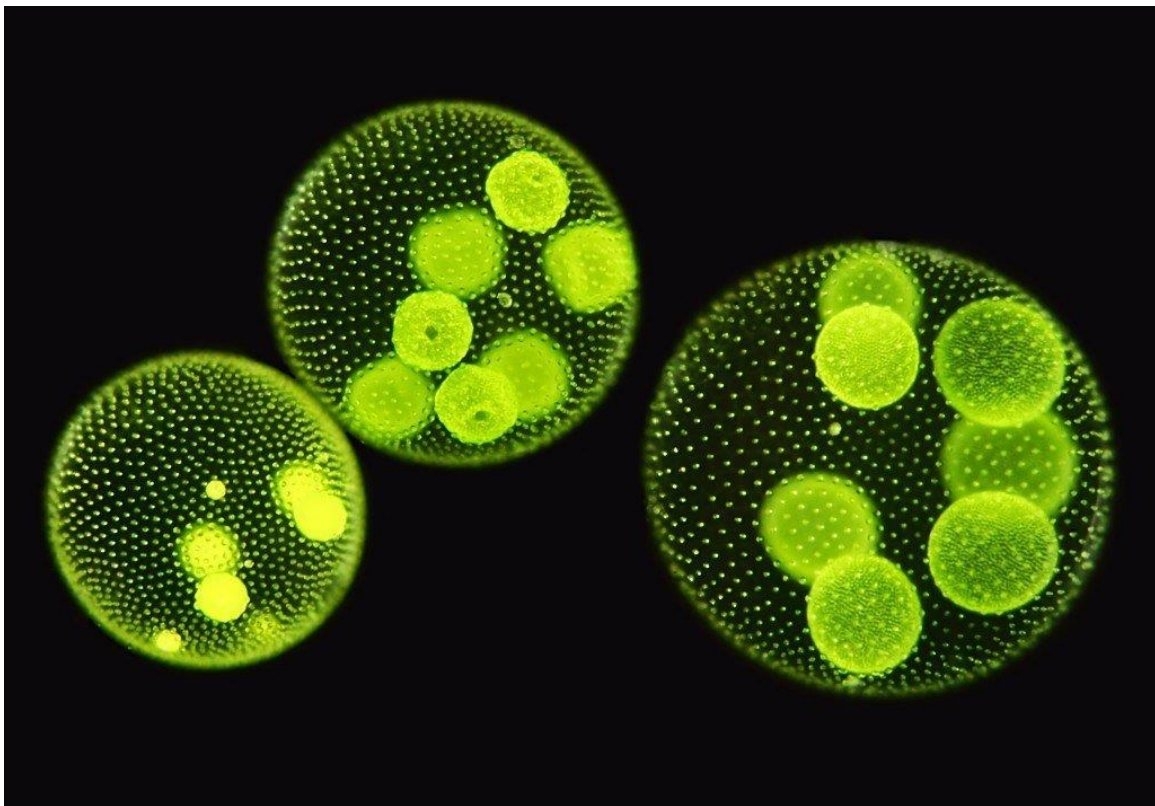
piégés dans la roche ou dans la glace. Néanmoins, dans les océans, à quelques mètres sous la surface l'eau resta liquide, permettant aux organismes complexes de survivre, certains profitant de la chaleur libérée par les sources hydrothermales créées par l'activité volcanique sous-marine.

Cette glaciation majeure est prouvée par des traces géologiques (vallées glaciaires, moraines, etc, en Amérique du Nord, en Chine et dans le sud de l'Australie), chimiques (des isotopes dans les fossiles et les carottes de glace) et paléontologiques (changements dans la distribution des fossiles du fait que les animaux ont migré vers les latitudes tropicales).

De nos jours la Terre est une planète relativement calme sur le plan climatique mais si on tient compte des variations orbitales, la température moyenne chuta occasionnellement de 8°C lors des glaciations les plus sévères, le froid tuant la plupart des espèces inadaptées ou cantonnant les autres à des habitats spécifiques abrités des grands froids.

L'avènement des algues il y a 650 millions d'années

Entre 660 et 635 millions d'années d'ici, au Néo-Protérozoïque II (que certains appellent le pré-Cambrien), une bonne partie de la Terre était recouverte par le supercontinent Gondwana (totalement formé il y a ~500 millions d'années) fracturé d'immenses bras de mers, prémices des futurs continents. L'activité volcanique se calma et le gaz carbonique contenu dans l'atmosphère ainsi que d'autres gaz à effet de serre provoquèrent son réchauffement, entraînant la fonte des glaces, ce qui augmenta le niveau des océans de plusieurs dizaines de mètres. Ce phénomène favorisa la libération du peroxyde d'oxygène piégé dans la glace, augmentant la proportion d'oxygène dans l'air.



Des algues Volvox aureus ou chlorophytes et des cellules filles (à l'intérieur des sphères). Il s'agit d'algues vertes multicellulaires composées d'organismes unicellulaires enveloppés dans une coquille gélatineuse formée de cellules biflagellées connectées entre elles. Les Volvox vivent en colonies contenant entre 500 et 3900 cellules somatiques dans des eaux non stagnantes riches en oxygène.

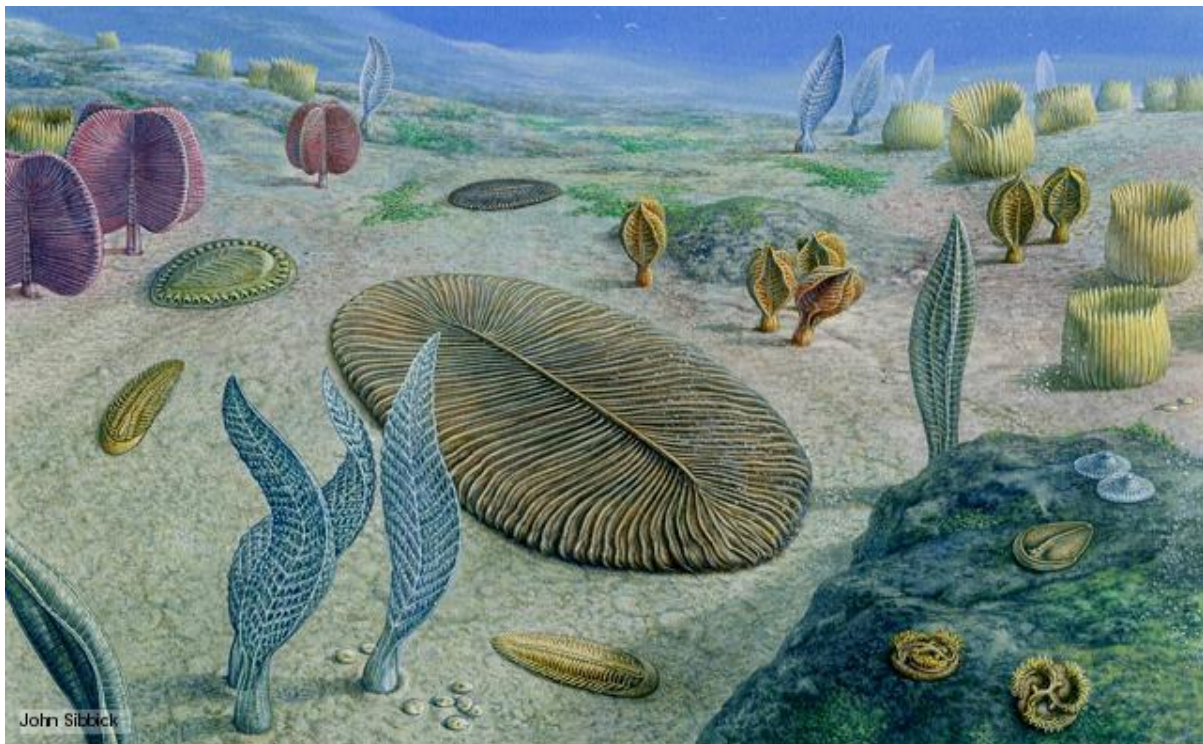
Document Jack Challoner.

La transition des bactéries (procaryotes) aux organismes eucaryotes marins fut l'une des révolutions écologiques les plus profondes de l'histoire de la Terre. En effet, elle réorganisa la distribution du carbone et des nutriments à travers tous les océans et toute la masse d'eau et augmenta le flux d'énergie vers les niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire.

Selon une étude publiée en 2017 dans la revue "*Nature*" par une équipe de géochimistes dirigée par Jochen J. Brocks de l'Université Nationale d'Australie, il y a 650 millions les algues ont dominé dans les océans et transformèrent radicalement la vie sur Terre.

Selon Brocks et ses collègues, jusqu'à présent les raisons et le timing géologique de cette transition ainsi que ses liens éventuels avec la hausse du taux d'oxygène atmosphérique et l'évolution des animaux étaient obscures. Mais depuis la découverte de biomolécules fossiles de stéroïdes eucaryotes (des lipides hydrophobes) en 2009, les scientifiques comprennent un peu mieux ce qui s'est passé juste avant l'explosion du Cambrien.

Un biomarqueur est un élément naturel inerte ou vivant qui permet de tracer un phénomène biologique. L'un des plus connus est une variété de lipide appelée stérol (une version simplifiée du cholestérol) que le géochimiste Roger Summons découvrit dans des roches du sultanat d'Oman en 1994 qui permit aux chercheurs de confirmer que des organismes multicellulaires, en l'occurrence des éponges existaient il y a 640 millions d'années.



Aspect des océans entre 2.5 milliards et ~542 millions d'ici, au Protérozoïque. On y trouvait des animaux à corps moux (sans dents, ni os ou partie dure) comme les Edicariens (nom provenant de Ediacara Hills, un site d'Australie riche en fossiles de cette période) et d'autres créatures qui ne sont toujours pas identifiées. Vers 810 millions d'années, ces eaux abritaient les premières cellules eucaryotes protégées par une coquille biominérale, ancêtres des mollusques à coquille. Document John Sibbick/BBC.

Les biomarqueurs stéroïdiques découverts en Australie en 2017 démontrent que les bactéries étaient les seuls producteurs primaires importants dans les océans avant la glaciation Varanger. L'augmentation de la diversité et de l'abondance des stéroïdes marque l'élévation rapide de la quantité d'algues planctoniques marines (*Archaeplastida*) dans l'intervalle de temps compris

entre les glaciations Sturtienne (720-650 Ma) et Marinoéenne (650-635 Ma), c'est-à-dire durant la période dite de la Terre "boule de neige", exactement entre 659 et 645 millions d'années.

Les spécialistes estiment que la population des cyanobactéries fut interrompue en raison de l'augmentation des nutriments fournis lors de la déglaciation Sturtienne. "L'avènement des algues" créa de nouveaux réseaux alimentaires accompagnés de transferts d'éléments nutritifs et énergétiques plus efficaces, conduisant les écosystèmes vers des organismes de plus en plus complexes. Cet effet s'est clairement manifesté par l'apparition simultanée de biomarqueurs chez les premières éponges précitées et les rhizariae prédateurs (des unicellulaires eucaryotes comme les foraminifères) suivi par la prolifération des métazoaires supérieurs (eumétazoaires) durant la période de l'Édiacarien (635-541 Ma), c'est-à-dire à la fin du Précambrien.

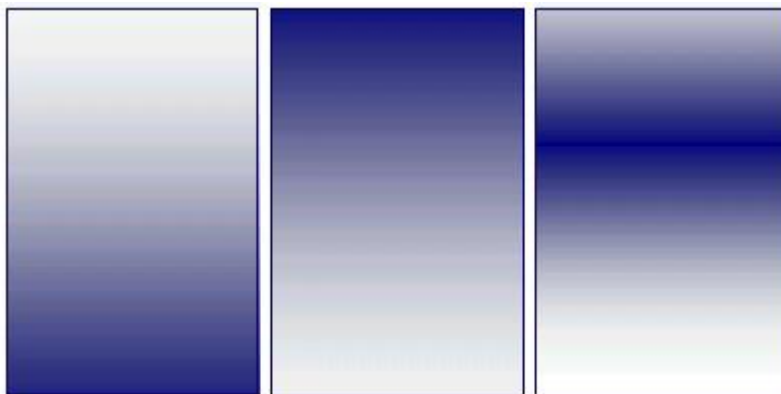
Formation de la couche d'ozone il y a 600 millions d'années

Il y a 1 milliard d'années, les premières cyanobactéries (algues bleu-vert) ont commencé à utiliser l'énergie transmise par la lumière du Soleil pour décomposer l'eau (H₂O) et le dioxyde de carbone (CO₂) et les recombinaient en composés organiques et en dioxygène ou oxygène moléculaire (O₂); c'est le début de la photosynthèse. L'oxygène libéré par les organismes photosynthétiques combiné au carbone organique à reformer des molécules de CO₂. L'oxygène restant s'est accumulé dans l'atmosphère, redevenant un véritable poison et provoquant une catastrophe écologique massive dans toutes les populations d'organismes anaérobies (ceux assurant leur métabolisme sans apport d'oxygène) déjà existantes.

À mesure que la concentration d'oxygène augmenta dans l'atmosphère, la concentration de gaz carbonique diminua. Dans la haute atmosphère, certaines molécules d'oxygène absorbèrent l'énergie ultraviolette émise par le Soleil, provoquant leur division en deux atomes d'oxygène (O). Ces atomes se sont combinés avec le dioxygène restant (O₂) pour former des molécules d'ozone (O₃). Les réactions chimiques sont les suivantes :



La forte production de peroxyde d'oxygène (H₂O₂) combinée avec l'effet de la baisse de la densité de l'air avec l'altitude et l'augmentation de la quantité d'UVE avec l'altitude favorisa la constitution de la couche d'ozone vers 25 km d'altitude.



La formation de la couche d'ozone. La densité de l'air diminue avec l'altitude (gauche) tandis que la production de peroxyde d'oxygène et la quantité d'UV extrême solaire augmentent avec l'altitude (centre). Résultat (droite), sous l'effet des UV solaires, la combinaison de l'oxygène avec le dioxygène présente une densité maximale vers 25 km d'altitude; c'est la couche d'ozone. Document T.Lombry

Cette couche d'ozone offre la particularité d'absorber très efficacement les rayons UV (UVE entre 10-124 nm, UVC entre 100-280 nm et une partie des UVB jusque 315 nm), ce qui est un bienfait pour tous les êtres vivants car ces rayonnements sont nocifs pour la santé car ils peuvent pénétrer en profondeur dans les tissus vivants et les endommager ou modifier l'activité des cellules (risque de cancer, etc., cf l'article de l'OMS sur les effets des UV sur la santé). La couche d'ozone entourant la Terre agit comme un bouclier filtrant les UV, protégeant la planète et les organismes contre le risque d'ionisation.

La couche d'ozone aurait déjà existé il y a 600 millions d'années. À cette époque, le niveau d'oxygène était d'environ 10% de sa concentration actuelle. Avant cette période, la vie était limitée à l'océan. Dorénavant, grâce à la présence de la couche d'ozone, les organismes vont pouvoir se développer et vivre sur la terre ferme.

Ensuite, la couche d'ozone s'épaissit durant 130 millions d'années, se stabilisant vers 25 km d'altitude avec une épaisseur d'environ 10 km mais qui n'est pas régulière, notamment au-dessus des pôles.

Notons qu'un processus similaire mais de nature différente explique la formation de l'ionosphère entre 50-500 km d'altitude.

Le Paléozoïque: du Cambrien au Permien (542 à 252 Ma)

Nous entrons à présent dans l'ère du Paléozoïque il y a 542 millions d'années et qui va durer environ 300 millions d'années. Pendant cette ère, les océans étaient suffisamment oxygénés pour voir la prolifération d'animaux marins. Ils ont vécu au fond des océans, aidés par une abondante flore aquatique. En revanche, sur la terre c'est encore un désert minéral tandis que l'atmosphère est presque respirable; l'air était chargé de 4500 ppm de dioxyde de carbone (contre ~410 ppm de nos jours) et contenait seulement 12.5% d'oxygène au début du Cambrien. La température moyenne de l'air était 7° plus chaude qu'aujourd'hui, voisine de 21°C.

C'est à cette époque que pour la première fois les organismes ont vu le monde à la lumière du jour. En effet, c'est au début du Cambrien qu'apparaissent les yeux, c'est-à-dire l'organe sensoriel sensible au rayonnement visible et même un peu plus chez certaines espèces. Si chez certaines créatures, les yeux étaient encore des ocelles rudimentaires, les prédateurs notamment percevaient déjà clairement le monde dans ses détails.

Ceci dit, jusqu'alors beaucoup de créatures percevaient le monde mais de manière moins précise et plutôt localement (quoi que ce soit relatif) au moyen d'autres récepteurs sensoriels notamment sensibles aux éléments chimique présents dans l'environnement ou aux vibrations qu'ils captaient.

Entre 542 et 530 millions d'années, nous assistons à "l'explosion du Cambrien" durant laquelle apparurent des créatures emblématiques comme les trilobites - les ancêtres des insectes, des homards et des scorpions notamment - l'anomalocaris et le fameux Pikaia gracilens, l'ancêtre de tous les vertébrés. C'est également voici 500 millions d'années qu'apparut l'étonnant tardigrade.

Selon une étude publiée en 2018 par Sebastiaan van de Velde de l'ULB et ses collègues dans la revue "*Nature Communications*", à partir de 520 millions d'années, on observe une anoxie océanique (diminution de l'oxygène dissous), le milieu marin devenant euxinique à la fin du Cambrien il y a ~485 millions d'années, en même temps que le taux d'oxygène diminuait : si la vie

vie marine continue de se développer en surface, en profondeur l'absence d'oxygène rend toute vie impossible, hormis pour quelques bactéries.

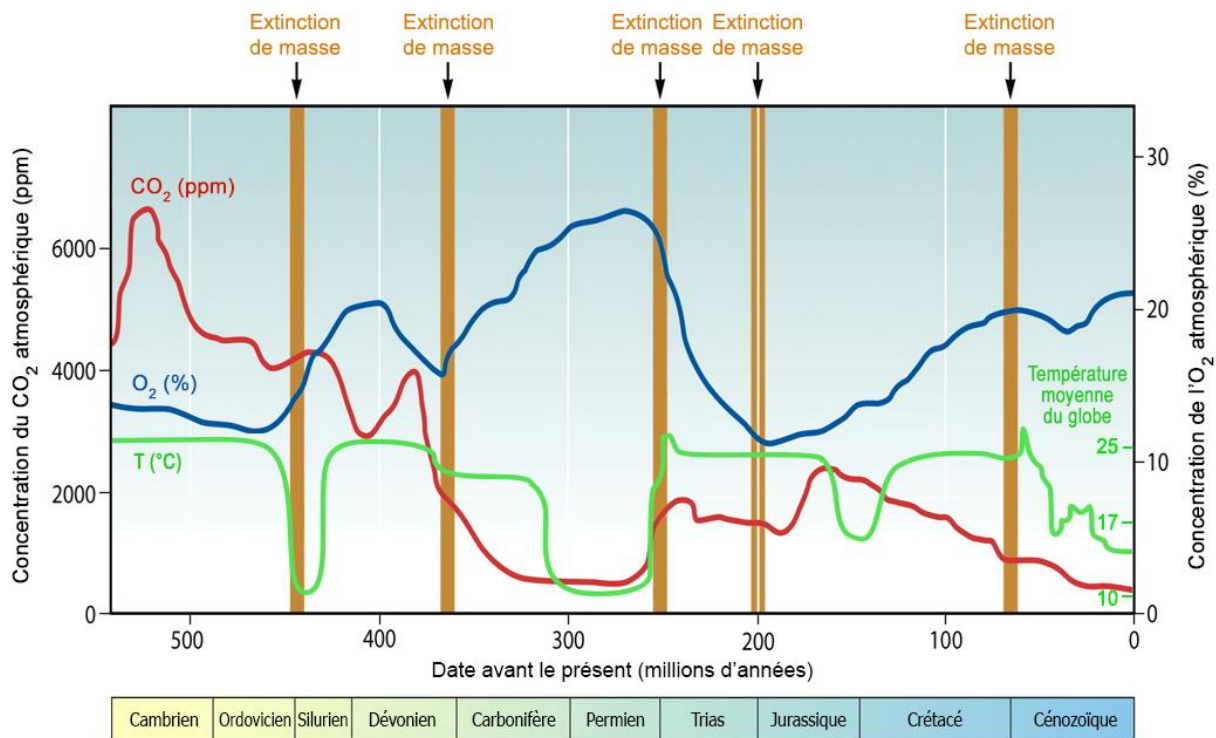


Les mers du Cambrien connurent de nouvelles espèces comme ce prédateur Anomalocaris (centre).
Document John Sibbick

Les premiers animaux ont conquis la terre ferme il y a 460 millions d'années durant l'Ordovicien. Si la vie foisonnait déjà dans les océans, la terre ferme était encore pratiquement sans vie; c'est un sol rocailleux et sinon stérile juste couvert localement de quelques mousses et de champignons. A cette époque, la température au sol était d'environ 30°C et la couche d'ozone étant encore en train de s'épaissir, les rayons ultraviolets solaires n'étaient pas encore totalement filtrés. Mieux valait donc vivre sous l'eau, sous terre ou dans les grottes.

La Grande Biodiversification de l'Ordovicien

On a longtemps cru que la concentration d'oxygène durant l'Ordovicien était similaire à sa valeur actuelle. En fait, selon une étude publiée en 2017 dans la revue "*Nature Geoscience*" par Cole T. Edwards de l'Université Appalachiennne de Caroline de Nord (ASU) et ses collègues, entre 485 et 445 millions d'années, la concentration d'oxygène fut progressivement multipliée par trois en même temps que la biodiversité et atteignit pratiquement son niveau actuel il y a 455 millions d'années.



Sources: R.Dorrell et A.Smith (O₂, CO₂), C.R. Scotese (température), adaptation T.Lombry

Évolution de la concentration de gaz carbonique, de l'oxygène et de la température moyenne du globe depuis le début du Cambrien. Documents [R.Dorrell et A.Smith](#) (2011), [C.R. Scotese](#) (températures).

Estimer le niveau d'oxygène d'une époque révolue est difficile du fait qu'il n'existe aucun moyen de mesurer directement la composition des atmosphères et des océans du passé. On peut toutefois estimer cette valeur grâce à des approximations géochimiques (des proxies) et des signatures chimiques préservées dans les roches carbonatées formant le fond des océans (et plus tard grâce aux dents ou aux défenses). Ainsi, les chercheurs ont constaté que le niveau d'oxygène augmenta de près de 80% en environ 15 millions d'années, passant de 14% d'oxygène dans l'atmosphère à l'époque Darriwilienne (durant l'Ordovicien Moyen, entre 465-460 millions d'années) à 24% de l'atmosphère au milieu du Katien (à la fin de l'Ordovicien, entre 455-450 millions d'années). Cette époque coïncide avec les premiers charbons de bois fossilisés. Cette étude suggère également que le niveau d'oxygène atmosphérique n'a pas atteint le niveau actuel pendant plusieurs millions d'années après l'explosion du Cambrien.

Cependant les chercheurs ne peuvent pas affirmer que l'augmentation de la concentration d'oxygène eut un effet direct sur la vie animale ou qu'elle eut un effet même passif en étendant par exemple les écosystèmes. En effet, il est difficile de savoir quel facteur fut dominant, si c'est la température, l'oxygène ou un autre facteur qui accéléra la biodiversification. Mais il est certain que l'oxygénation provoqua un changement majeur.

Ceci dit, ce n'est probablement pas la seule raison expliquant pourquoi la biodiversité explosa à cette époque. Selon Edwards, il est probable que d'autres changements comme le refroidissement des océans, l'augmentation de la quantité de nutriments disponible dans les océans et la pression exercée par les prédateurs ont participé ensemble à diversifier la vie pendant plusieurs millions d'années, ce qu'on appelle la Grande Biodiversification de l'Ordovicien.

L'étude précitée de l'équipe de van de Velde montre également qu'à la fin du Cambrien on assista à une diminution de la concentration de gaz carbonique dans l'air qui passa de 15-17% durant

l'explosion du Cambrien (avec un maximum de ~6300 ppm) et au début de l'Ordovicien (~4500 ppm) à seulement 9-10% à la fin de l'Ordovicien et au début du Silurien il y a 440 millions d'années, mais avec une concentration toujours très élevée de ~3000 ppm. A cette époque, l'anoxie océanique diminue fortement, devenant 2.5 fois plus faible qu'au Cambrien. En contrepartie la concentration d'oxygène réaugmente pour atteindre une concentration similaire à aujourd'hui à la fin du Silurien.

La Terre verdit entre 440 et 420 millions d'années, au Silurien, se couvrant d'un épais tapis de mousses primitives. Les licopodes notamment également appelés mousse terrestre ou pied de loup, sont les descendants de ces premières plantes vertes. Il faudra ensuite patienter entre 100 et 200 millions d'années selon les espèces pour qu'apparaissent les fougères, les prêles et les Selaginellales.

C'est au Dévonien inférieur, il y a 410 millions d'années, qu'apparut le premier poisson muni d'un poumon et donc capable de respirer à l'air libre : le dipneuse. Parfaitement adapté, il a survécu depuis cette époque. C'est le seul poisson qui s'enterre dans la terre ferme et capable de survivre dans une forme de stase pendant 10 ans !

C'est également à cette époque que le déplacement des plaques tectoniques vida totalement la mer au nord-ouest de l'Australie. Les gorges de Geikie par exemple situées dans le Territoire du Nord, au sud de Darwin, se caractérisent par des vallées étroites aux parois verticales s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres. Certaines sont en partie inondées, d'autres sont à sec; il s'agit en fait d'une ancienne barrière de corail fossilisée remontant à 400 millions d'années.



Les gorges de Geikie près de Darwin en Australie. Il s'agit d'une barrière de corail fossilisée. Doc Aussie Specialist

La couche d'ozone évoquée précédemment est à présent assez dense pour filtrer les rayonnements ultraviolets nocifs (UVE et UVC en dessous de 280 nm) et permettre le développement de la vie sur la terre ferme et n'est dorénavant plus confinée à la mer.

Grâce à l'abondance de l'oxygène et des pluies, vers 375 millions d'années apparurent les premières mousses terrestres. C'est à cette époque qu'apparut le premier amphibien, le Tiktaalik roseae, un poisson osseux dont les fossiles furent découverts dans la carrière de Bird Quarry, au Canada Arctique en 2004. Mesurant 3 mètres, c'est le premier poisson disposant d'un cou articulé et capable de marcher sur ses nageoires. C'est l'ancêtre des trépatodes : muni de quatre membres et d'une colonne vertébrale, c'est le premier animal marin qui colonisa la terre ferme. L'ère des reptiles et des mammifères débuta.

C'est au Dévonien supérieur qu'apparurent des végétaux et des créatures géantes. Vers 365 millions d'années par exemple, à la limite entre le Dévonien et le Carbonifère apparaissent les fougères arborescentes dont on retrouve les fossiles en Amérique du Sud, en Afrique du Sud, en Inde et en Antarctique, c'est-à-dire sur l'ancien continent Gondwana. Ces plantes pouvaient atteindre 10 à 15 mètres de hauteur. Certaines espèces ont survécu. Le genre *Dicksonia* par exemple comporte une trentaine d'espèces distribuées dans les montagnes de Malaisie, en Australie, en Nouvelle-Calédonie et en Nouvelle-Zélande. Citons également les genres *Cibotium* et *Cyathea*.



Paysage aquatique typique des eaux peu profondes du Mississipi entre 359 et 318 millions d'années. Les crinoïdes (échinodermes de la famille des étoiles de mer et des oursins) dominaient ce milieu dans lequel on trouvait quelques poissons osseux dont le Tiktaalik. Un peu plus en profondeur évoluaient des colonies de bryozoaires pourvus de tentacules ciliées rétractiles, tandis que les brachiopodes (mollusques) monopolisaient les fonds vaseux. Des requins croisaient au-dessus de cette faune.

Document Smithsonian Institution.

Fait remarquable, au Carbonifère vers 358 millions d'années, l'atmosphère contenait environ 35% d'oxygène (contre 21% aujourd'hui), ce qui accéléra le développement de la vie et boosta le métabolisme des créatures terrestres. On a longtemps pensé sans pouvoir le démontrer que l'atmosphère hyperoxique (contenant un taux élevé d'oxygène) avait contribué au gigantisme des espèces. Finalement, une expérience réalisée aux Etats-Unis en 2010 par Jon F. Harrison et ses collègues au moyen d'un synchrotron a permis de prouver cette hypothèse en mesurer la quantité d'oxygène consommée par différents insectes (criquets, scarabés, etc). Les chercheurs ont découvert qu'il existait une limite à la taille du système respiratoire (et forcément des muscles et

des organes) au-delà de laquelle le corps de l'animal devient trop petit pour le contenir. Mais tant que cette limite n'est pas atteinte, l'espèce peut grandir. C'est ce qui s'est effectivement passé à la fin du Paléozoïque, entre le Dévonien, le Carbonifère et le début du Permien.

Le monde était également peuplé d'insectes géants comme les libellules qui avaient la taille d'un épervier (70 cm d'envergure pour le *Meganeura monyi*), des mille-pattes aussi grands que des serpents ou d'autres comme l'*Arthropleura* mesurant plus de 2.5 m et aussi large qu'un homme ! Toutefois, à côté d'eux vivaient également de petits insectes de quelques millimètres dont beaucoup se sont fait piéger dans la résine des conifères qui se fossilisa pour former l'ambre, y compris les ancêtres des abeilles, la super-famille des Apoidea apparue il y a 350 millions d'années.



Reconstruction du Tiktaalik, l'ancêtre des tétrapodes qui vécut il y a quelque 375 millions d'années.

Il y a environ 300 millions d'années au début du Permien, dans un monde qui était déjà couvert de forêts et dans lequel évoluaient quantité d'insectes, apparurent les premières plantes à graines ou spermatophytes; à la différence des spores, les gamètes femelles doivent être fécondés par les grains de pollen.

Rappelons que le charbon que l'on extrait aujourd'hui en grande quantité s'est formé à cette époque, à partir de la décomposition de ces végétaux géants.

A l'inverse de la plupart des animaux contraints de vivre dans l'eau, certaines créatures terrestres avaient la faculté de pondre des oeufs, une avancée décisive dans l'évolution. Désormais l'animal peut transporter ses oeufs sur la terre ferme tout en étant protégés dans leur coquille contenant le liquide amniotique nourricier.

A ce jour, la plante à fleurs (clade des Angiospermes) fossilisée la plus ancienne remonte entre 125 et 130 millions d'années, il s'agit d'une *Montsechia vidalii* dont la découverte par l'équipe de Bernard Gomez fut annoncée en 2015 dans les "PNAS". Il s'agit d'une plante à fleurs aquatique qui vivait dans les lacs d'eau douce dans ce qui est devenu l'actuelle Espagne.



Une fougère arborescente d'Océanie. Document Lui Weber.

C'est l'apparition des plantes à fleurs qui aurait condamné à mort les insectes géants au stade larvaire ou juvénile aquatique. En effet, les larves de libellules par exemple naissent et vivent dans l'eau. Or quand les plantes aquatiques meurent et se décomposent, elles polluent les eaux qui deviennent trop turpides pour la fragile santé des larves.

Au cours du Permien, le Gondwana se recouvrit d'une épaisse couche de neige; nous entrons dans une nouvelle période glaciaire qui dura 80 millions d'années entrecoupée d'une période interglaciaire de 15 millions d'années. La glace conquies les latitudes polaires et tempérées. Ailleurs, l'Australie par exemple connut des périodes glaciaires saisonnières à l'image du climat actuel du nord de l'Alaska. Le froid ou la glace ne signifie pas que toute vie est interrompue. Si l'espèce est adaptée à ce climat, elle peut parfaitement survivre, que ce soit un dinosaure, un mammouth, un Néandertalien, un manchot empereur ou une bactérie.

Entre 299 et 252 millions d'années, une intense activité volcanique combinée à un changement climatique majeur transformèrent radicalement la Terre. Les archives géologiques montrent qu'un peu partout sur la planète mais principalement dans la Sibérie actuelle, les éruptions volcaniques libèrent dans l'atmosphère une quantité colossale de gaz toxiques et parfois létaux dont du gaz carbonique. Les sols se sont asséchés ce qui entraîna une forte mortalité de la faune et de la flore terrestre. Dans les océans, la température de l'eau augmenta, provoquant la mort de la plupart des espèces marines et la prolifération des algues roses qui furent si nombreuses que la couleur de la mer devint rose. Sous l'effet des éruptions et de l'augmentation de la température, le méthane qui était emprisonné dans le sol ou sous les sédiments marins s'est échappé dans l'atmosphère. Selon une étude publiée en 2012 dans la revue "*Science*" par Yadong Su et son équipe, le méthane étant un puissant gaz à effet de serre, ce phénomène provoqua une

accélération du réchauffement global, portant la température au sol qui était de 34°C avant les éruptions entre 50 et 60 °C dans l'air et à près de 40°C dans les eaux de surface équatoriales.

Durant ces éruptions volcaniques, des flots de laves de dizaines de mètres d'épaisseur envahirent la plupart des régions de l'Eurasie, recouvrant une étendue équivalente à la superficie des Etats-Unis. En 2011, Stephen E. Grasby et son équipe ont expliqué dans la revue "*Nature*" que ces cataclysmes avaient été provoqués par un supervolcan de Sibérie qui serait entré en éruption à la fin du Permien et à l'origine des dépôts de cendres qu'on retrouve de l'Eurasie à l'Amérique du Nord. Vu l'ampleur des émissions de gaz sulfureux (et chloré et fluoré), il serait également à l'origine de l'acidification des mers suite aux abondantes pluies acides déversées sur les terres et dans les océans. Suite à ces catastrophes globales qui ont duré 500000 ans, la faune comme la flore succombèrent en masse, conduisant à l'extinction du Permien il y a environ 252 millions d'années. 75% des espèces terrestres et entre 90-95% des espèces marines, faune et flore confondues, ont disparu. Ce fut la première des 5 grandes extinctions massives que connaîtra la Terre depuis l'apparition de la vie.

A la fin du Permien, on observe une baisse importante du taux d'oxygène qui passa de 28 ou 35% selon les estimations à 23%, soit proche du taux actuel. Puis il continua de baisser pour atteindre seulement 11% d'oxygène dans l'air il y a 200 millions d'années.

Le Mézozoïque : Trias, Jurassique et Crétacé (252 à 65.5 Ma)

Suite à l'extinction du Permien, au début du Trias la Terre passa à deux doigts de la mort; tout était à refaire ou presque. Finalement, les éruptions volcaniques s'arrêtèrent et avec elles les émanations toxiques et les pluies acides, permettant à la végétation de réapparaître progressivement ainsi que la faune. De cette catastrophe, la Terre vit émerger de nouvelles espèces dont les dinosaures qui descendirent des reptiles ayant survécu au Permien.

Les premiers dinosaures sont apparus il y a environ 230 millions d'années au Trias supérieur (Carnien). A partir de la forme de certains os (l'os ischion du bassin, l'os prédentaire de la mâchoire, l'os lacrymal, du pouce, des os du cou, etc.), ils ont été divisés en deux clades, les dinosaures *ornithischia* ou dinosaures herbivores, bipèdes ou quadrupèdes et les dinosaures *saurischia*, bipèdes avec ou sans à plumes dont les oiseaux sont les seuls descendants. On y reviendra.



Il y a 200 millions d'années, au début du Jurassique, un continent unique s'étendit d'un pôle à l'autre, la Pangée, entourée d'un immense océan.

C'est au Crétacé, il y a 145 millions d'années qu'apparaissent les angiospermes, c'est-à-dire toutes les espèces végétales porteuses de fruits (par opposition aux gymnospermes ou plantes à graine nue) et les gnétophytes.



Fossile de *Montsechia vidalii*, le premier angiosperme ou première plante à fleurs apparue voici 125 à 130 millions d'années. Document David Dilcher/Indiana University

Il y a 110 millions d'années, suite à une intense activité du manteau terrestre, la Pangée se fragmenta et les premiers continents partirent à la dérive sur le grand océan au gré des déplacements des plaques tectoniques.

Des plaques se percutèrent localement en formant les chaînes de montagnes comme l'Himalaya (dont l'âge remonte entre 50 et 40 millions d'années selon les endroits) ou les Alpes (dont l'âge remonte entre 90 et 5 millions d'années selon les endroits), isolant ci et là des poches d'eau dans d'immenses mers intérieures dont certaines s'asséchèrent ensuite pour former les déserts actuels comme dans le centre de l'Australie.

Quelle était la température des océans il y a 100 millions d'années ? A partir de l'étude isotopique du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des tests de foraminifères (les foraminifères sont des protozoaires apparus au Cambrien inférieur, il y a 540 millions d'années), en 2017 le minéralogiste Sylvain Bernard de l'IMPIC du CNRS et ses collègues paléoclimatologues ont découvert qu'au début du Crétacé, il y a environ 110 millions d'années, la température de l'océan de surface sous les Tropiques était presque identique à sa température actuelle ($\sim 28^\circ\text{C}$) et non pas une quinzaine de degrés supérieurs comme on le pensait il y a encore quelques années sur base de modèles paléoclimatiques mais biaisés par des données mal calibrées. La température de l'océan de surface était également plus fraîche que prévue aux hautes latitudes, avec une température de 10 à 15°C (contre -2°C aujourd'hui aux pôles) et l'océan profond était à $15-20^\circ\text{C}$ (contre 3.5°C aujourd'hui).



Source: Lida Xing et al.

Fragments les mieux conservés d'un oisillon emprisonné dans de l'ambre datant de 100 millions d'années découvert au Myanmar. Cette espèce appartenant aux "oiseaux opposés" s'est éteinte il y a 66 millions d'années. Document Linda Xin et al.

Ensuite, il y a environ 66 millions d'années, à la limite C/Pg (anciennement limite C/T), la Terre subit une nouvelle extinction massive, dont celle des dinosaures suite à l'impact d'une météorite d'environ 10 km de diamètre à Chicxulub, dans la péninsule du Yucatan au Mexique.

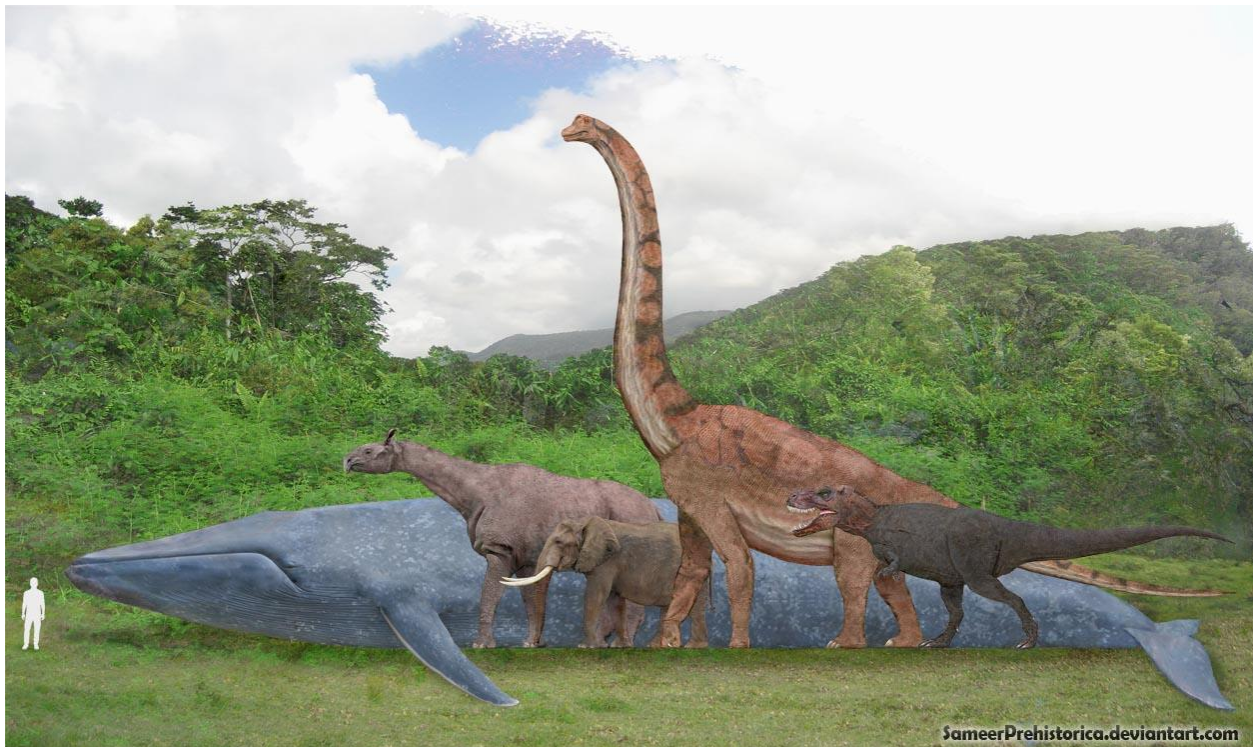
Cette catastrophe écologique majeure provoqua la disparition de près de la moitié des espèces dont 75% des espèces marines. Suite à cet impact, comme au Permien des milliards de tonnes de poussières toxiques et de fumées mélangées à des gaz sulfurés ont envahi l'atmosphère, bloquant le rayonnement solaire, faisant chuter la température au point de créer un hiver d'impact, ce qui interrompit brutalement la photosynthèse et altéra pendant des dizaines d'années sinon davantage le climat de la Terre.

On sait aujourd'hui qu'après cette catastrophe globale qui réduisit pratiquement tout en cendres, seulement 2 à 3 ans seulement après l'impact des formes de vie élémentaires comme le plancton et autres protozoaires sont réapparues au point d'impact à Chicxulub dans un environnement qui était encore très toxique pour des formes de vie plus évoluées. En revanche, ailleurs sur la planète et selon les endroits il faut ensuite patienter entre 30000 et 300000 ans pour construire une biocénose complète.

Le Cénozoïque : du Paléocène à l'Holocène (65.5 Ma à aujourd'hui)

Lorsque l'atmosphère s'éclaircit, la catastrophe globale du Crétacé/Tertiaire offrit aux mammifères et aux oiseaux l'opportunité de se développer et d'occuper les niches écologiques abandonnées par les grands sauriens. Nous entrons dans l'ère du Cénozoïque et des reptiles géants.

A l'époque des dinosaures, la Terre connut des créatures gigantesques comme le *Diplodocus hallorum* (anc. *Seismosaurus halli*) de 54 m de long découvert en 1991, l'Apatosaure (Brontosaurus) de 26 m de long et 8 m de haut pesant jusqu'à 35 tonnes et le Titanoboa de 13 m de longueur.



Tailles comparées de quelques animaux préhistoriques et contemporains. Document [Sameer Prehistorica](#).

Dans les océans de la fin du Cénozoïque (28-1.5 Ma) chassaient des prédateurs géants comme le Mégalodon mesurant jusqu'à 20 m de long et pesant jusqu'à 50 tonnes. La pression de sa mâchoire était de 20 t/cm², dix fois supérieure à celle du grand requin blanc portant redoutable.

Dans les milieux humides, le plus grand et le plus féroce des superprédateurs fut sans conteste le Spinosure (*Spinosaurus*) ou "lézard épineux" découvert en Egypte en 1912 puis au Maroc et en Asie (Laos). Ce dinosaure théropode vécut au Crétacé il y a 108 à 95 millions d'années mais de nouvelles études indiquent qu'il aurait été présent en Amérique du Nord dès le Jurassique supérieur (150-135 millions d'années). Ce colosse mesurait jusqu'à 18 m de long - 3 m de plus que T.rex- et 6 m de haut pour un poids de 9 tonnes et était pourvu d'une grande voilure dorsale. Sa mâchoire mesurait 1 m de long et était dotée de dents lisses et coniques (et non pas acérées et dentelées comme la plupart des autres prédateurs) s'imbriquant les unes dans les autres. Il rigolerait en voyant la gueule d'un Tyrannosaurus Rex ! Des études publiées en 2010 dans la revue "*Geology*" montrent que sa mâchoire est celle d'un animal semi-aquatique se nourrissant de poissons, à l'image des crocodiles.

Dans les eaux du Spitzberg actuel, il y a 147 millions d'année vivait le Pliosure (*Pliosaurus funkei*) surnommé "Predator X" mesurant 15 m de long et pesant 45 tonnes. Dans ce monde de géants vivaient également des hybrides marins ou aériens tel le scorpion de mer de 2.7 m de long.

Devant cette prolifération d'espèces, l'évolution choisit rapidement les caractères dominants, les erreurs d'inadaptation s'éliminant d'elles-mêmes mais parfois au terme de plusieurs millions d'années seulement; dame Nature n'est pas pressée.

On dit souvent que les oiseaux sont les descendants des dinosaures. C'est tout à fait exact ! Etant donné le peu d'intérêt qu'ils représentent au yeux des scénaristes de films qui leur préfèrent les

dinosaures³, cela vaut la peine de faire un arrêt sur image, d'autant que de nouvelles espèces furent découvertes depuis 2010.



L'emblématique Archaeopteryx (~150 Ma, 30 cm, 0.8-1 kg). Document Mauricio Anton/Thierry Lombry.

Les ancêtres de nos poulets et autres volatiles à plumes remontent indirectement au Tyrannosaurus rex (~65 Ma) bien que les deux classes taxinomiques soient différentes. En effet, le T.rex appartient à la classe des sauropodes (*Sauropsidae*) qu'on peut assimiler à celle des reptiles alors que les oiseaux appartiennent à la classe des *Aves*, c'est-à-dire des animaux ailés. Etant bipèdes, les *Aves* appartiennent aussi au groupe des théropodes. Les deux classes ont un ancêtre commun appartenant à la super-classe des *Tétrapodes* (les premiers animaux vertébrés aquatiques à respiration pulmonaire) apparu au Dévonien moyen il y a moins de 380 millions d'années. Comme nous l'avons expliqué, le clade des dinosaures *saurischia* comprend l'espèce T.rex mais celle-ci ainsi que toutes les espèces du super-ordre des dinosaures se sont éteintes il y a environ 65 millions d'années suite à l'impact météoritique à la limite C/Pg à l'exception de la classe des *Aves* qui survécut, donnant naissance aux ancêtres des oiseaux actuels.

Une seconde extinction mais cette fois d'origine climatique se produisit au PETM ou maximum thermique survenu à la limite Paléocène-Eocène il y a ~56 millions d'années. La température moyenne du globe augmenta entre 5 et 8° et la concentration de dioxyde de carbone augmenta, conduisant à l'anoxie de certaines eaux profondes et à l'extinction de nombreuses espèces.

³ Les oiseaux préhistoriques ayant l'image populaire d'oiseaux volants ne s'attardant pas au sol et étant a priori moins impressionnants que les dinosaures, ils sont relativement peu représentés et très fugaces dans les films. On a vu des Ptérodactyles dans "Voyage dans la préhistoire" en 1954, des Ptéranodons dans "Dinotopia" en 1992 et dans les téléfilms en 2002, diverses espèces clonées (Ptérodactyle, Ptéranodon, Cearadactyle, Dimorphodon) dans "Le Monde perdu: Jurassic Park" en 1997, des Ptérodactyles dans "Les aventuriers du monde perdu" (Le Monde interdit) en 2001 et diverses espèces (Anurognathus, Ptéranodon, Ptérosaure, Titanis, etc.) dans plusieurs saisons du téléfilm "Primeval" entre 2007 et 2011.



Le *Titanis walleri*, l'un des plus grands oiseaux préhistoriques (classe des Aves, groupe des théropodes). (5-2 Ma, 2.5 m, 150 kg). Document DK.



Un autre oiseau préhistorique imposant, le *Phorusrhacos* (27-0.4 Ma, 2.5 m, 130 kg).

Les oiseaux modernes remontent à une branche primitive d'oiseaux géants - plus grands et plus massifs que l'autruche - ayant vécu il y a moins de 30 millions d'années, le plus souvent sur le continent américain (nord ou sud ou les deux) comme le *Physornis* (28-23 Ma), le *Brontornis* (~27 Ma), le *Kelenken* (15 Ma), le *Titanis* (5-2 Ma) et autre *Lallawavis* (3.5 Ma) présentés ci-joint. Leurs ancêtres, les théropodes sont apparus il y a environ 175 millions d'années, au

Jurassique moyen (Dogger) soit environ 60 millions d'années après les premiers dinosaures. Parmi ces premiers oiseaux, il y avait le fameux Archaeopteryx découvert en Allemagne en 1861 et qui vécut il y a ~150 millions d'années. Les paléontologues ont découvert 8 sous-espèces mais leur taille ne dépasse pas celle du pigeon (moins de 30 cm de longueur). En revanche, tous les autres oiseaux préhistoriques sont de véritables géants et des superprédateurs très dangereux.

Les oiseaux préhistoriques dont certaines espèces étaient incapables de voler présentait des dents dont la poule par exemple a hérité ainsi que d'autres caractéristiques morphologiques comme le fait qu'ils sont tous bipèdes, ont des pattes à quatre doigts dont un ergot et une palmure plus ou moins développés, des plumes, un bec, des membres antérieurs transformés en ailes et une queue courte osseuse (à l'exception de l'Archéoptéryx dont la queue osseuse est longue, de même que celle du Deinonychus). Parmi les espèces géantes vivant en Europe (et en Amérique du Nord) il y avait le Gastornis (Diatryma) assez proche du Brontornis.

L'une des espèces d'oiseaux géants préhistoriques ayant survécu le plus longtemps fut le Phorusrhacos (de la même espèce que le Brontornis) qui vécut sur le continent américain entre -27 millions d'années et -400000 ans.

Ensuite, depuis 20 millions d'années, les continents ont l'aspect que nous leur connaissons aujourd'hui. Les principales chaînes de montagnes étaient également formées. Seules des îles comme l'archipel d'Hawaï se sont formées plus récemment (5 millions d'années) sachant que la durée de vie des îles volcaniques (par exemple la Polynésie) est d'environ 100 millions d'années.

Nous connaissons la suite de l'histoire à travers l'évolution de l'homme dont nos ancêtres hominés apparus à la fin de l'époque du Miocène, il y a plus de 10 millions d'années.

© LUXORION, 2018