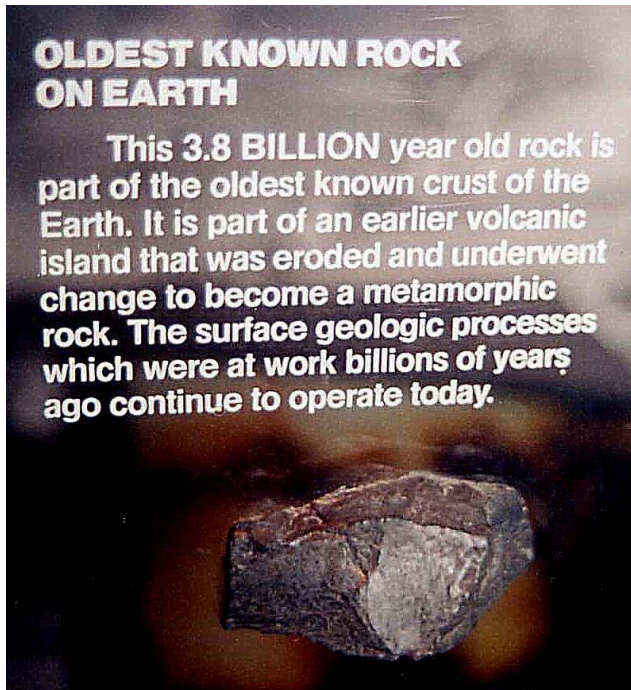


La naissance de la vie sur Terre...et ailleurs ?

Dès que les conditions ont été favorables la vie est apparue sur Terre. Mais elle a mis très longtemps à évoluer ensuite vers des formes avancées (sans même parler de la forme intelligente qui s'est auto désignée l'Homme). Il est intéressant de rappeler ce que l'on sait de cette évolution initiale de la vie sur Terre pour se faire une idée de ce qui a pu se passer sur Mars aux origines.

L'Hadéen, l'Archéen, les premiers ages de la Terre

Sur Terre il y a peu de vestiges des premiers ages en raison de l'intense activité géologique et tectonique à la surface. Les plus vieux terrains sont datés de l'Archéen, une période qui, conventionnellement, couvre de -4 milliards à -2,5 milliards d'années. On dénombre encore 22 zones archéennes principales sur Terre, deux au Canada, une au Groenland, une aux USA, deux en Amérique du sud, cinq en Afrique, deux seulement en Europe (Finlande et Ukraine), six en Asie (dont une grande partie de l'Inde), deux en Australie et une en Antarctique. Mais pendant tout l'Archéen il se serait formé 60 à 80 fois la



Roche d'époque archéenne remontant à 3,8 milliards d'années. L'échantillon mesure une dizaine de centimètres. Cette roche volcanique a replongé ultérieurement à une profondeur où, sous l'effet de la température et de la pression, elle a été métamorphisée (Desert Museum de Tucson ; doc. A. Souchier).

surface de continents archéens connue aujourd'hui. Les terrains archéens ont, en

moyenne, une épaisseur de 35 km. Leur formation est attribuée à l'empilement de croûtes océaniques se formant sous la mer, dans les zones d'expansion, à une époque où la température des laves était plus élevée qu'aujourd'hui en raison d'une radioactivité interne deux fois plus forte. La température élevée produisait des roches riches en magnésium (komatiites) qui, après hydratation par l'eau de mer, présentaient des densités faibles ($2,5 \text{ g/cm}^3$), et donc ne pouvaient plus replonger dans le manteau. Les premiers continents étaient nés.

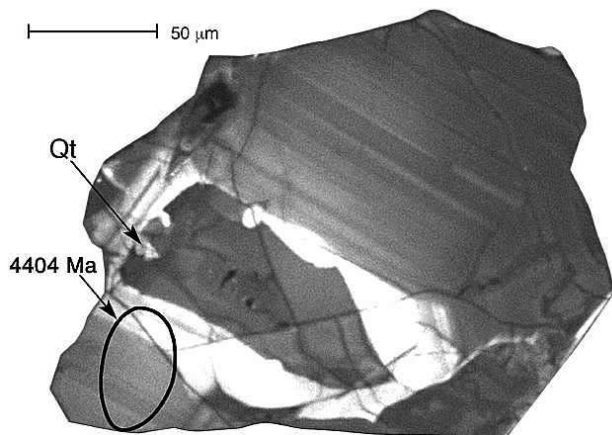
Les plus anciennes roches archéennes sont celles trouvées dans le région du lac de l'Esclave au Canada ; elles affichent 4,016 milliards d'années.



Roche d'époque archéenne remontant à 3,8 milliards d'années extraite sur le continent nord américain. L'échantillon mesure une dizaine de centimètres. (Desert Museum de Tucson ; doc. A. Souchier).

Mais l'Archéen n'est pas le premier âge de la Terre. On considère en effet que celle ci a été créée par accréation de différent petits corps, en même temps que les autres planètes, il y a 4,56 milliards d'années. Cette période d'accréation aurait duré quelques dizaines de millions d'années « seulement ». Vers -4,5 milliards d'années, notre planète a subi un impact géant : le crash d'une planète de la taille de Mars (la moitié du diamètre de la Terre) a éjecté dans l'espace une importante quantité de l'enveloppe silicatée de notre globe qui s'est réagglomérée en un astre de 3476 km de diamètre, la Lune. Cette datation a été rendue possible par le retour de roches collectées lors des missions Apollo. Toute la période de -4,56 à -4 milliards d'années est appelée l'Hadéen. Il n'en subsiste plus de roches (sur Terre) mais certains cristaux pris dans des roches un peu plus récentes remontent à cette période. Il s'agit de cristaux de zircon, silicate de zirconium, que l'on a pu dater jusqu'à

-4,4 milliards d'années ! L'uranium se désintégrant progressivement en plomb, l'analyse du rapport uranium sur plomb permet cette datation extraordinaire.



4,4 milliards d'années, un cristal de zircon témoin des origines de la Terre trouvé dans l'ouest de l'Australie, dans les Jack Hills. (Doc. W.H. Peck).

Une atmosphère étrange

Peu de temps après sa formation le soleil était 4 à 5 fois plus lumineux qu'aujourd'hui ; puis il a soufflé une partie de sa couronne et s'est stabilisé à une luminosité 30% inférieure à celle que nous connaissons. La Terre aurait dû devenir une planète gelée (en surface) s'il n'y avait eu l'effet de serre du gaz carbonique présent dans l'atmosphère. A la fin de l'Hadéen l'atmosphère devait comporter 65% d'azote, 31% de gaz carbonique, 3% d'hydrogène sulfuré (H_2S), 0,93% d'argon. Totalement irrespirable donc. De plus en absence d'oxygène (O_2), il ne pouvait y avoir création d'ozone (O_3) en altitude. En l'absence d'ozone le rayonnement ultra violet du soleil arrive jusqu'au sol et ses effets stérilisateurs empêchent toute vie. La vie ne pouvait donc naître que sous l'eau.

Très tôt : un océan acide

On sait que, dès le début de l'Archéen, un océan existe déjà, donc qu'il est apparu pendant l'Hadéen. Dans le conglomérat d'Isua au Groenland on a trouvé des galets datant de 3,85 milliards d'années. On y a aussi trouvé des laves en coussins qui ne se forment que dans l'eau. D'ailleurs ces laves contenaient des cristaux de quartz qui avaient piégé des gouttes microscopiques de l'océan archéen. Cet océan est étrange ; il est acide ; son PH est compris

entre 4 et 4,5 alors qu'aujourd'hui il est légèrement basique à 8, la neutralité étant à 7. Cette acidité est démontrée par l'absence de précipitations de silicates et carbonates de fer à cette époque, qui ne peuvent se produire qu'avec un PH supérieur à 5. L'océan comporte en solution du chlorure de sodium (NaCl , le « sel »), mais aussi beaucoup de chlorures de calcium, potassium et fer. D'où vient l'eau qui a formé cet océan ? On a pensé à l'apport des comètes. Mais celles ci ont un rapport deutérium sur hydrogène de 0,03, alors que l'eau de mer affiche 0,00015 et que la nébuleuse primitive qui a donné naissance au système solaire n'est qu'à 0,00003. D'après Michel Maurette du CNRS, ce sont les micrométéorites qui ont apporté la majorité de l'eau. Il y a 4 milliards d'années la Terre recevait probablement 10 millions de tonnes de météorites par an, mille fois plus qu'aujourd'hui.

Pour ajouter à l'étrangeté de ce monde que l'on appelle aujourd'hui Terre, au début de l'Archéen la période de rotation de la planète était probablement seulement de quelques heures, la lune n'était qu'à 200.000 km produisant des marées 3,5 fois plus fortes que celles que nous connaissons aujourd'hui et à un rythme 4 fois plus rapide.

L'apparition de la vie

Deux scénarios sont avancés pour l'apparition de la vie : l'ensemencement par les météorites ou la chimie active se déroulant autour des sources chaudes hydrothermales sous marines.

En ce qui concerne l'hypothèse ensemencement extérieur, on sait que dans le milieu interstellaire se déroulent des réactions qui produisent des molécules de chimie organique. L'analyse de la météorite carbonée d'Orgueil a montré la présence d'acides aminés et bases azotées. L'analyse de la météorite de Murchinson a mis en évidence 73 acides aminés dont 8 font partie des 20 qui constituent la base de la vie. On est arrivé, en laboratoire, en simulant les conditions des espaces interstellaires, à recréer 16 de ces 20 acides aminés de base.

L'autre scénario propose une apparition de la vie dans les profondeurs autour des sources hydrothermales découvertes il y a quelques dizaines d'années dans les dorsales sous marines. Ces sources sont désignées « fumeurs noirs » en raison de la couleur de l'eau surchauffée à 300°C (mais liquide en raison de la

pression), très chargée en sulfures de fer de zinc et de cuivre, qui s'en échappe. Des bactéries thermophiles, vivant à 110 °C, ont été identifiées à proximité de ces sources comme appartenant à la souche la plus primitive des archéobactéries. Sont-elles les derniers témoins des origines de la vie ? On n'a pas reproduit la création de molécules organiques prébiotiques en laboratoire dans les conditions des fumeurs noirs. On a juste démontré que l'argile pouvait faciliter l'assemblage d'acides aminés en protéines, surtout en exécutant des cycles de températures du type 25 à 95 °C, alors que cette réaction n'est pas facile en présence d'eau.

Le scénario d'une création des briques du vivant dans l'atmosphère, reproduit en laboratoire dans les années cinquante par S. Miller, a été abandonné. L'expérience avait consisté à envoyer des décharges électriques dans un mélange de méthane, ammoniac et vapeur d'eau. La production d'acides aminés avait été constatée. Mais le mélange expérimenté n'a rien à voir avec l'atmosphère terrestre originelle dans laquelle la forte teneur en gaz carbonique n'est pas du tout favorable à la création des briques du vivant.

En tout cas la vie est apparue très tôt. Des roches du gisement d'Isua et de l'île d'Akilia au Groenland ont révélé des inclusions de carbone d'origine biologique datées de 3,86 milliards d'années (mais ce résultat est encore contesté). A Barberton en Afrique du Sud, on a trouvé, intercalés entre des couches de basalte et de Komatiite, des structures en tubes et filaments dont la morphologie et l'abondance évoquent les bactéries bleues actuelles. Ces fossiles ont 3,5 milliards d'années. Des filaments analogues ont été trouvés dans des roches archéennes à Warrawoona en Australie et datées à -3,45 milliards d'années. La vie est donc apparue très tôt au début de l'Archéen. Certains scientifiques pensent qu'elle aurait pu même apparaître pendant l'Hadéen et survivre aux impacts importants d'astéroïdes qui marquaient cette époque et pouvaient vaporiser l'océan entier. Des bactéries auraient pu alors subsister en mode dormant dans des petites gouttes d'eau prisonnières de gisement de sel et se réveiller à la reconstitution de l'océan quelques centaines d'années après l'impact.

La croissance du taux d'oxygène

La présence de domaines continentaux stables

pendant l'Archéen a permis, vers -2,6 milliards d'années l'expansion de colonies de cyanobactéries, encore appelées improprement algues bleues, qui construisent des récifs calcaires par précipitation des carbonates qu'ils dégagent. Ces constructions calcaires à l'allure feuilletée, sont appelées « Stromatolithes ».



Fossiles de Stromatolithes datant de 2,3 milliards d'années. Les Stromatolithes ont enrichi progressivement l'atmosphère en oxygène. (Desert Museum de Tucson ; doc. A. Souchier).

Ces cyanobactéries dégagent aussi de l'oxygène. Elles sont apparues dès -3,5 milliards d'années car on en trouve déjà des fossiles dans les roches de Warrawoona en Australie. Tout d'abord l'oxygène qu'elles produisent va précipiter le fer contenu dans les océans, produisant ainsi entre -2,6 et -2 milliards d'années les grands gisements de fer que l'on exploite aujourd'hui.



Roche avec bandes contenant des oxydes de fer. Ceux-ci se sont formés sous la mer, à proximité de cyanobactéries (algues bleues) dégageant de l'oxygène qui a réagi avec le fer en solution dans l'eau. Ces roches se sont créées vers -2,5 milliards d'années. A cette époque l'atmosphère était encore très pauvre en oxygène (de l'ordre du dix millième de bar). (Desert Museum de Tucson ; doc. A. Souchier).

Une fois le fer précipité, l'oxygène émis par les cyanobactéries des stromatolithes va passer

plus facilement dans l'atmosphère. Vers -2,4 milliards d'année, le taux d'oxygène dans l'atmosphère atteint ainsi un millième de bar puis un centième de bar vers -1,5 milliards d'années.



Fossiles de Stromatolithes datant d'environ 130 millions d'années et trouvés à proximité de la base martienne simulée Mars Desert Research Station de la Mars Society dans l'Utah. (Doc. A Souchier).

L'augmentation de l'oxygène est favorisée par l'apparition du phytoplancton vers -1,7 milliards d'années. Il faudra attendre -500 millions d'années pour que l'atmosphère devienne respirable pour un humain ! Les stromatolithes perdurent encore de nos jours.

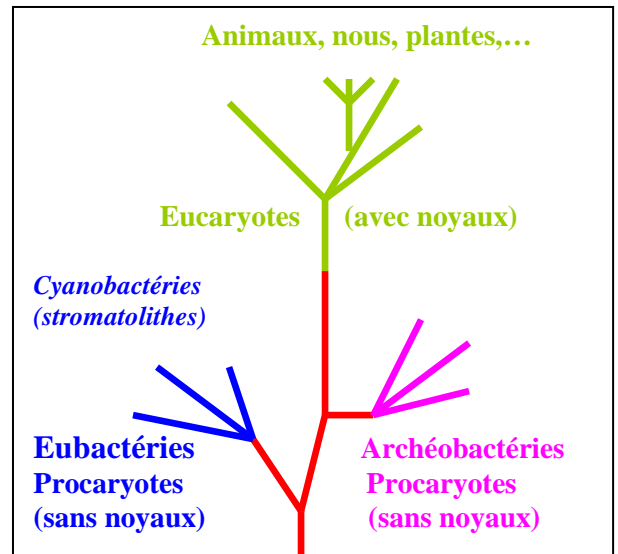


Cyanobactéries à stromatolithes vivant de nos jours à Shark Bay en Australie. L'oiseau est apparu 3,5 milliards d'années après son perchoir. (Doc. A. Beaurain).

L'explosion de la vie : les cellules à noyaux

Jusque là les organismes vivants étaient des

cellules sans noyau (Procaryotes). A partir de -1,7 milliards d'années apparaissent les premières cellules à noyau (Eucaryotes); on considère que le phénomène s'est produit par absorption par les cellules eucaryotes, de cellules procaryotes suivi d'un fonctionnement symbiotique du nouvel ensemble. Des découvertes plus récentes indiqueraient même -2,65 milliards d'années pour l'apparition de ces cellules à noyaux. La période de séparation entre les procaryotes et les eucaryotes reste en fait mystérieuse. Ce sont même trois branches



L'évolution des formes de vie telle que nous croyons la comprendre aujourd'hui. Les lignées rouges restent mal connues.



1,3 milliards d'années ; cette roche contient les fossiles des premières cellules à noyaux. (Desert Museum de Tucson ; doc. A. Souchier).

qui se sont séparées au début de l'Archéen, voire avant : celle des eubactéries à laquelle appartiennent les cyanobactéries des stromatolithes, celle des eucaryotes et celle des archéobactéries. On sait par des points communs dans l'ADN que les archéobactéries

proviennent de la même branche que les eucaryotes.

La période succédant à l'Archéen est désignée Protérozoïque. Elle s'étend jusqu'à -540 millions d'années. Sa fin est marquée par l'apparition des organismes pluricellulaires. La vie sort des eaux peu après, vers -500 millions d'années .



Maquette d'un récif archéen de stromatolithes. A partir du Cambrien (-540 millions d'années) et l'apparition des cellules à noyau, puis des organismes multicellulaires, la vie explose (à droite) mais il a fallu 3 milliards d'années d'évolution pour en arriver là. Mars n'a probablement pas offert à la vie une si longue période favorable d'évolution. (Exposition Biosphère 2 ; doc. A. Souchier).

Et sur Mars ?

Lors des premiers âges de Mars, un océan aurait subsisté pendant environ 500 millions d'années et de l'eau liquide encore pendant peut être 500 millions d'années. L'océan martien ressemblait peut être à l'océan terrestre acide du début de l'Archéen car on n'a pas trouvé de carbonates jusqu'à présent sur Mars et l'acidité empêche le dépôt de carbonates.

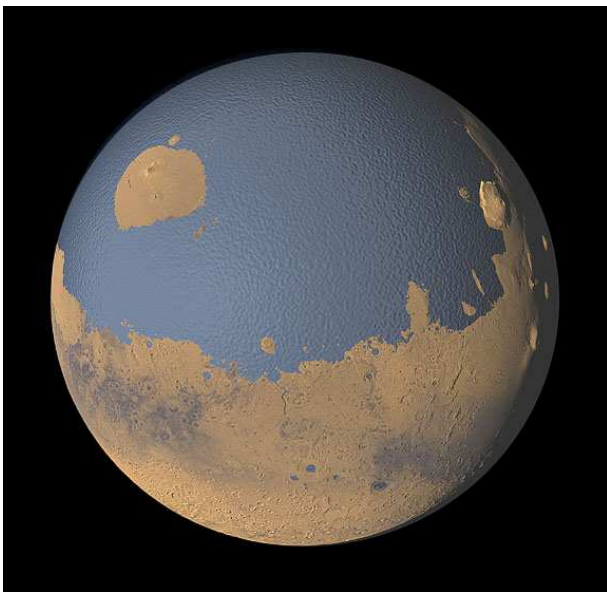
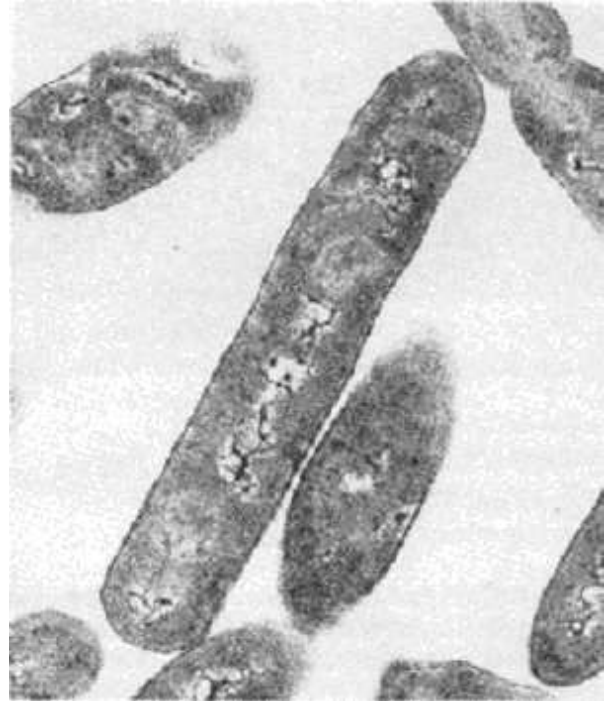


Image de synthèse montrant ce que pouvait être l'océan martien originel dans l'hémisphère nord. (Doc. NASA, Greg Shirah).

En faisant l'hypothèse - imprudente- que l'évolution se serait déroulée de la même manière sur Terre et sur Mars, la vie sur la planète rouge n'aurait pas atteint le stade des cellules à noyau, en particulier celui des organismes multicellulaires, et on ne pourrait y trouver que des fossiles microscopiques ou des traces macroscopiques semblables aux stromatolithes. Mais l'évolution de l'éventuelle vie martienne s'est peut être aussi arrêtée dans la zone de séparation mal connue entre les eubactéries, les eucaryotes et les archéobactéries et la découverte de ces chaînons qui manquent sur Terre serait passionnante.



Bacillus Infernus trouvé à 2700 mètres de profondeur sous terre en Virginie et isolé par Y. Liu et D.R. Boone de l'Oregon Institute of Science and Technology. Cette bactérie n'est pas une archéobactérie au contraire de bien des extrémophiles qui vivent dans des conditions très sévères. Elle «consomme » de l'oxyde de fer et de manganèse.

On peut aussi imaginer que la vie s'est réfugiée en sous sol mais les conditions y sont probablement peu favorables à une évolution de la vie vers des formes complexes. Y aurait il encore sur Mars des bactéries vivantes du type de celles que l'on a trouvé depuis peu à de grandes profondeurs sur Terre ? Le méthane détecté sur Mars proviendrait-il d'organismes semblables aux archéobactéries terrestres qui chez nous sont celles qui produisent le méthane ? Seule l'exploration sur place pourra le dire.