

L'ARCHEEN

LA SAGA DE LA TERRE COMMENCE

Désiré Corneloup

L'Archéen (du grec Archaïos, primitif) est l'Ere géologique qui s'étend de 4 milliards d'années (4 Ga) jusqu'à 2,5 Ga, soit durant un tiers de l'histoire de la Terre.

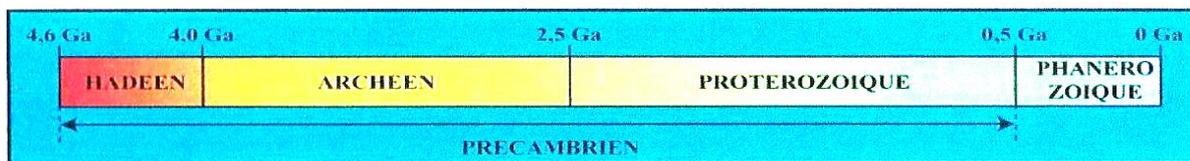
*La Terre aurait atteint sa taille et sa forme actuelles il y a 4,5 Ga au cours de l'**Hadéen** (Hadès, Dieu des Enfers) après accréation de milliards de poussières, chondrites et planétésimaux avec accroissement d'une température de surface qui aurait pu s'élever à plus de 2000 °C.*

Mis à part des zircons détritiques trouvés à Jack Hills en Australie datés de 4,1 et 4,4 Ga, il ne reste pratiquement aucun témoin de cette époque mouvementée.

Par contre, au cours de l'Archéen, la Terre se refroidissant, des blocs continentaux ont pu se former (on verra comment) et être préservés, entraînant des conséquences sur le fonctionnement de la machine Terre, à l'origine de son atmosphère et de la vie.

Aujourd'hui, les terrains archéens affleurent en de nombreux endroits ; ils forment ce que les géologues appellent les cratons ou les boucliers dont l'étude fournira de précieuses informations.

On se propose ici de résumer quelques évènements majeurs de cette ère exceptionnellement dynamique, à savoir : la naissance d'une croûte continentale, une tectonique des plaques et l'évacuation de la chaleur, le volcanisme, les BIF, la grande catastrophe, les premières traces de vie et la formation de l'atmosphère telle que nous la respirons.



1- LA NAISSANCE D'UNE CROUTE A LA SURFACE DE LA TERRE

La croûte qui s'est formée à l'Archéen est très différente de la croûte qui va se former durant le Phanérozoïque (de 2,5 Ga à nos jours, fig. 1).

Au début de l'Archéen on suppose que, mis à part de rares îlots solides, la Terre n'était qu'un océan magmatique avec une énergie disponible considérable, même si une grande partie de cette énergie a pu se dissiper par irradiation dans l'espace. De plus le géotherme archéen était très différent du géotherme actuel : par exemple, la température était voisine de 1800°C à 30 km de profondeur (fig.2). Ce magma était constitué essentiellement d'olivine, de pyroxènes, de plagioclases et de grenats en phase liquide, sans oublier les terres rares, ou lanthanides (très utiles pour la datation des roches car il n'est bien entendu pas question de compter sur des fossiles pour dater les roches de l'Archéen !). Les géologues ne se sont d'ailleurs intéressés à l'Archéen que depuis les années 1960/70 lorsqu'ils ont su dater les roches par la géochronologie nucléaire.

Ce magma était basique et ultrabasique (komatiitique), c'est-à-dire pauvre en SiO₂ (< 50%) et riche en Mg (MgO > 25%), Fe et Ca, alors que le magma actuel est plutôt basique (basaltique, MgO ≤ 10% et SiO₂ ≤ 50%).

On suppose enfin que la Terre était bombardée depuis l'Hadéen par des comètes qui pouvaient lui apporter de l'eau : eau qui pouvait rester liquide sur des îlots où la température était inférieure à 100°C, être incorporée au magma ou être vaporisée sous forme de nuages.

Lorsqu'une première croûte a pu se former au cours du refroidissement, ce sont successivement l'olivine, les pyroxènes et les grenats qui ont cristallisé. En raison de leur densité, de l'ordre de 3,3 à 3,9, ces cristaux ont coulé progressivement dans l'océan magmatique dont la densité était voisine de 2,9 pour former des cumulats qui se sont déposés en strates dans le manteau. Le liquide magmatique superficiel qui a pu se refroidir au contact de l'hydrosphère (eau sous forme de liquide ou de vapeur), s'est solidifié, un peu à la manière de ce que l'on observe aujourd'hui à petite échelle dans les lacs de lave. Cette eau a pu réagir immédiatement avec une partie de l'olivine et des pyroxènes avant qu'ils ne coulent pour former une croûte stable de serpentine dont la densité est de 2,8. Cette première croûte superficielle, qui ne peut pas plonger dans le manteau de densité 2,9, va donc flotter à la surface de la Terre et créer une couche isolante s'épaississant progressivement, jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

A titre d'exemple : la forstérite (composant magnésien de l'olivine), en présence d'eau et de silice donne de la serpentine ; la fayalite (composant ferreux de l'olivine), en présence d'eau apporte de la silice, de la magnétite et du dihydrogène.

Les réactions de serpentinisation libèrent du dihydrogène (H_2) qui, lui-même se recombine avec le diazote et le dioxyde de carbone préexistant depuis l'Hadéen pour former du méthane et de l'ammoniac (NH_3). Puis, H_2 , CH_4 et NH_3 vont s'échapper et rejoindre le CO_2 et H_2O sous forme de vapeur pour former l'atmosphère de l'Archéen. On est encore loin de l'atmosphère que nous respirons qui ne commencera à apparaître qu'au début du Protérozoïque à 2,3 Ga !

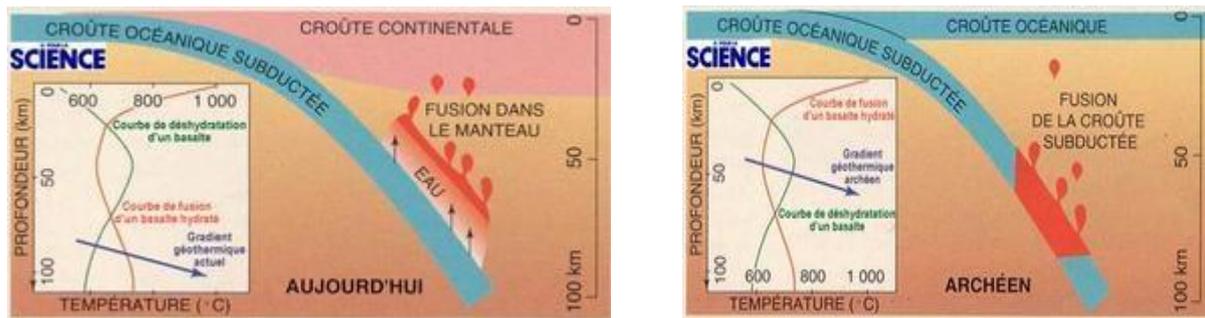


Fig. 1 : Comparaison des modes de création d'une croûte aujourd'hui et à l'Archéen

Entre 3,8 Ga et 2,5 Ga un nombre important de petites plaques continentales vont se mettre en place, mais dans un environnement où les mécanismes seront différents de ceux que nous connaissons actuellement, les conditions de températures surtout n'étant pas les mêmes. Des mécanismes de fusion partielle des sources mafiques (magmas ferro-magnésiens) hydratées et des changements de phases dans les strates supérieures vont favoriser des mouvements de sous-placages épaississant ainsi ces plaques : les roches les plus denses vont plonger sous les roches moins denses, une tectonique des plaques va ainsi s'amorcer. A l'Archéen, on suppose que l'intense activité magmatique a été à l'origine des trois-quart du volume de la croûte continentale actuelle.

Les roches qui se sont formées à l'Archéen affleurent aujourd'hui, entre autres à (fig.4):

- Acasta (4 Ga) et Uivak (3,8 Ga) au Canada,
- Amîsoq (3,9 Ga) au Groenland,
- Kaapvaal et Barberton (3,6 et 3,1 Ga) en Afrique du Sud et au Swaziland,
- Pilbara (3,1 Ga) en Australie,

sous forme de trois associations lithologiques :

- des roches gneissiques déformées et métamorphisées,
- des roches vertes, volcano-sédimentaires sur lesquelles nous reviendrons au sujet de la mise en place du volcanisme sur les cratons,

- des granites intrusifs provenant de la fusion des péridotites du manteau et qui sont arrivés à s'insinuer dans le socle gneissique.

L'étude des roches gneissiques a montré que Na (sodium) sous la forme de Na₂O et Ca (calcium) sous la forme de CaO étaient relativement abondants, tandis que K (potassium) sous la forme de K₂O était en faible quantité ou absent, avec les proportions suivantes :

SiO₂ 57%, FeO+MgO 15 %, CaO 8 %, Na₂O 4 % et K₂O 0,7 %.

De telles roches sont connues sous le nom de TTG* (tonalite, trondhémite, granodiorite), granitoïde essentiellement enrichi en feldspaths sodi-calciques ou plagioclases (45 à 60%, l'andésine pouvant y atteindre 40%), les autres minéraux étant la biotite (mica noir) et la hornblende (amphibole). La structure grenue de ces roches atteste d'une lente cristallisation en profondeur, ce qui suppose un enfouissement soit par subduction, soit par sous-placage d'une épaisse croûte océanique. Les TTG, sont donc des roches essentiellement métamorphiques et qui se sont formés jusqu'à 2,5 Ga. Aujourd'hui, une roche similaire aux TTG apparaît dans le cadre de la subduction à haute pression de croûtes océaniques jeunes, par exemple entre la plaque de Nazca et la plaque Antarctique non loin de la Patagonie : ce sont les adakites. On peut donc en conclure que les TTG, roches propres à l'Archéen, se seraient formées elles aussi dans les mêmes conditions, sachant toutefois que le gradient géothermique le long du plan de subduction était plus élevé qu'aujourd'hui (fig. 2).

* le terme anglo-saxon est TTD (tonalite, trondhémite, dacite) ; la dacite est une diorite quartzique.

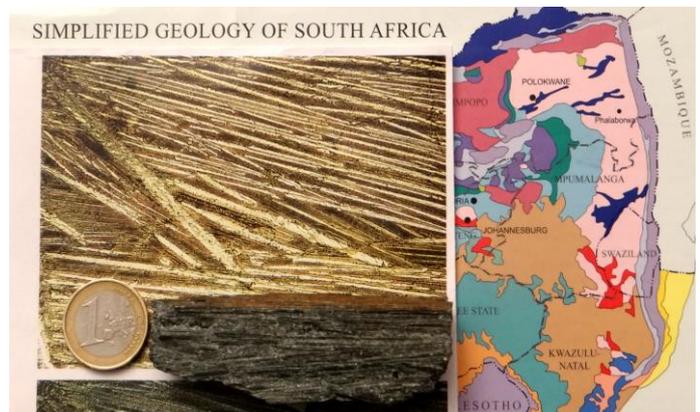
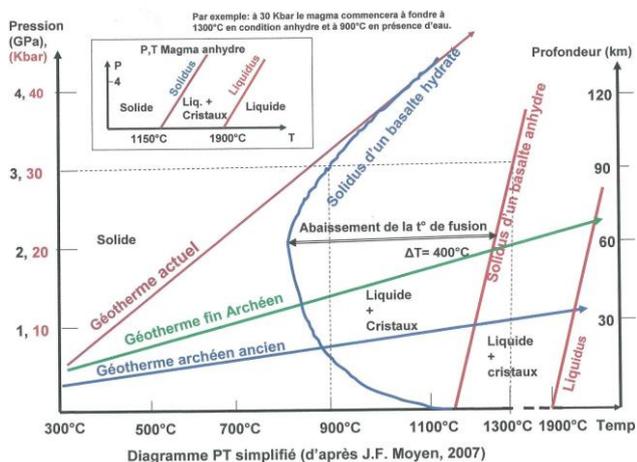


Fig. 2 : Diagramme PT simplifié
(On voit en particulier que le gradient géothermique Archéen était plus élevé que l'actuel)

Fig.3 :Komatiïtes formées à l'Archéen. Ph. D.C.
(Les baguettes d'olivine peuvent atteindre une dizaine de cm, en Afrique du Sud, les komatiïtes affleurent en Mpumalanga)

L'étude de la formation des minéraux composant les roches archéennes, a conduit les géologues à déterminer leurs géobaromètres et leurs géothermomètres permettant de connaître la profondeur et la température auxquelles ces minéraux se sont formés. Ils en ont conclu que la croûte continentale avait une épaisseur peu différente de la croûte actuelle et que les conditions de température et de pression pour la formation d'un liquide à composition TTG étaient de l'ordre de 1100 °C et 30 Kbars.

Les plaques continentales étaient, comme on l'a vu, animées de mouvements horizontaux et verticaux et elles entraient en subduction ou en collision : à l'Archéen il existait donc des massifs montagneux, des bassins et des mers recouverts de masses nuageuses. L'érosion allait entraîner une sédimentation des roches. Les témoins de cette sédimentation affleurent, dans les lieux cités plus haut, sous forme de :

- conglomérats en séries épaisses de plus de 2000 mètres, signifiant une destruction rapide des reliefs,

- dépôts fluviatiles ou deltaïques avec des figures de stratification, signifiant une importante hydrographie,
- rides de plage et fentes de dessiccation attestant de périodes d'émersion et de sécheresse.

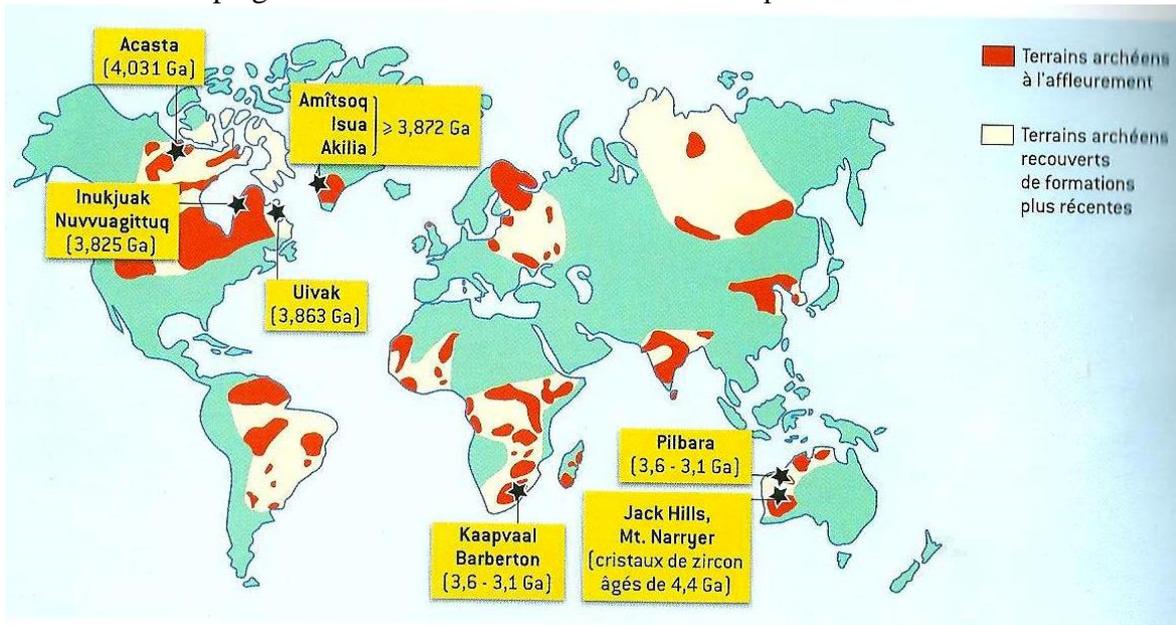


Fig. 4 : Localisation des principaux terrains archéens. H. Martin

En observant la cyclicité des dépôts de plage (fig.5) résultant de l'effet des marées, les géologues ont pu déterminer un cycle lunaire de 20 jours il y a 3,5 Ga, alors qu'actuellement il est de 29,5 jours.



Fig. 5 : Rides de plage archéennes. Ph. D.C

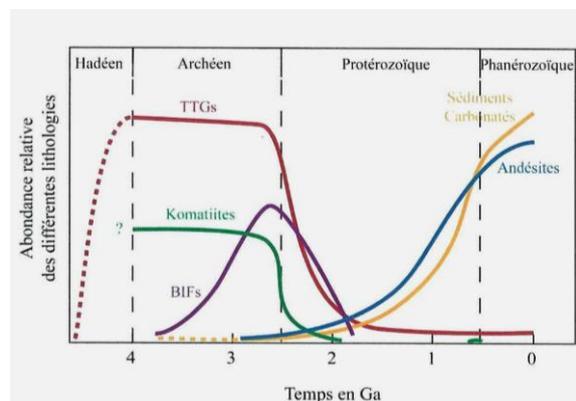


Fig. 6 : Evolution des lithologies. H. Martin

Cela signifie que la distance Terre-Lune était plus faible qu'aujourd'hui : après l'impact géant entre un corps et la Terre qui a conduit à la formation de la Lune, il y a plus de 4,5 Ga, celle-ci s'éloigne progressivement de la Terre.

2- TECTONIQUE DES PLAQUES ET EVACUATION DE LA CHALEUR

Les TTG n'ont pu se former que dans le cadre d'une tectonique des plaques : par la suite, cette tectonique allait conditionner la géologie (et la vie) de la Terre. Un élément important de cette tectonique est la subduction. A l'Archéen, le magma étant plus chaud que celui d'aujourd'hui et les plaques moins rigides, la subduction se faisait à angle faible, c'était une subduction plate. La Terre évacue sa chaleur interne par un mode principalement convectif : convection thermique et déplacements conjoints de matière chaude vers le haut et de matière froide vers le bas. Les

déplacements de matière froide dans le manteau sont principalement le fait de la subduction, une plaque froide s'enfonçant dans le manteau ; les déplacements de matière chaude sont le fait des remontées de magma au niveau des dorsales, du moins dans la partie supérieure du manteau, et des points chauds. A l'Archéen il y avait deux à quatre fois plus de chaleur à évacuer qu'actuellement.

Aujourd'hui, la chaleur est essentiellement évacuée au niveau des rides médio-océaniques ou dorsales. Comme il devait en être de même à l'Archéen, et comme la Terre a toujours gardé une surface constante, il est logique de penser qu'il y avait beaucoup de rides médio-océaniques, donc un grand nombre de petites plaques (fig.7) se déplaçant plus rapidement que ne se déplacent les plaques aujourd'hui et subductant tout aussi rapidement.

Le phénomène, simple d'apparence, doit tenir compte des remarques suivantes :

- la plaque plongeante étant encore relativement chaude, le gradient thermique le long du plan de Bénéioff (plan de plongement) devait être élevé, et comme la densité diminue lorsque la température augmente, la plaque plongeante pénétrait dans le manteau avec un angle faible, on parle de subduction plate ;
- au début de l'Archéen, la moins grande rigidité des roches limitait l'empilement des lames crustales et favorisait les déformations des blocs de surface et les mouvements aboutissant à une subduction forcée.

Un autre argument en faveur d'une subduction archéenne, c'est la découverte d'un ensemble ophiolitique vieux de 3,8 Ga mis à jour en 2007 au Groenland à Isua. On sait en effet qu'un complexe ophiolitique constitue une preuve de l'ouverture océanique caractéristique de la tectonique des plaques.

Les petites plaques archéennes se mouvant rapidement, la croûte océanique devait entrer en subduction plus rapidement qu'aujourd'hui : des calculs ont donné un âge moyen de la croûte océanique (avant qu'elle ne subisse la subduction) de 10 Ma, alors qu'aujourd'hui cet âge est de 80 Ma.

Un test grandeur nature en faveur d'une tectonique du type archéen permettant d'évacuer un flux de chaleur important nous est donné par le bassin fidjien actuel situé entre la Nouvelle-Calédonie et les îles Fidji (fig.8).

Là, le flux de chaleur évacué est de 240 mW/m^2 , soit quatre fois plus que le flux moyen actuel, conditions qui nous rapprochent des conditions de l'Archéen. Or, que constate-t-on dans ce bassin ? On note la multiplication des segments de rides actives qui limitent de petites plaques. Il y a donc un lien entre le flux de chaleur à évacuer, le nombre et la longueur des rides et le nombre de petites plaques.

Enfin, l'étude cartographique, stratigraphique et géochronologique des terrains archéens de la Province du Supérieur au Canada montre un assemblage de blocs différents, de largeur de quelques dizaines de kilomètres, mis en contact entre 2,8 et 2,6 Ga et séparés les uns des autres par des ceintures de roches vertes.

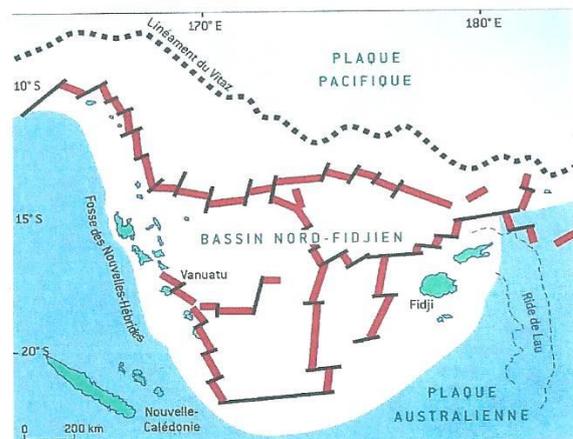
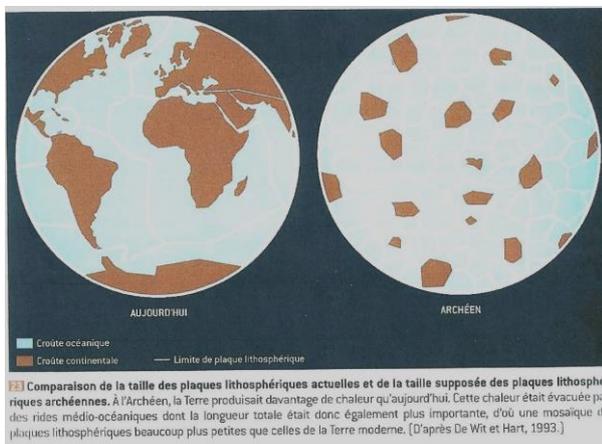


Fig. 7 : Comparaison des plaques lithosphériques Fig. 8 : Le Bassin Nord-Fidjien actuel. H.M

3- LE VOLCANISME ARCHEEN

Avant 2,5 Ga, les laves ultrabasiques archéennes (les komatiites) étaient très abondantes au sein du magma. A une exception près, île de Gorgona en Colombie, elles sont absentes depuis cette époque. Les komatiites (fig.6), qui tirent leur nom de la rivière Komati en Afrique du Sud, où elles ont été observées et définies pour la première fois, sont des laves très fluides à forte teneur en MgO, où le minéral dominant est l'olivine, montrant un taux de fusion important de 30% à 60%, peu riches en eau et fondant à des températures de 1600°C à 1800°C, ce qui correspond à 2000°C à 80 km de profondeur (pour mémoire les basaltes actuels arrivent en surface aux alentours de 1250°C).

Le volcanisme komatiitique archéen a été émis en larges coulées, peu épaisses, de l'ordre du mètre, pouvant former des volcans du type bouclier, les coulées une fois refroidies s'empilant les une sur les autres, et des pillow-lavas, ce qui suggère une mise en place en milieu aquatique.

Ces laves se sont insinuées parmi les TTG puis déposées, et elles ont subi le métamorphisme en même temps que ces roches.

Une coulée de komatiites (fig. 3) présente une succession de textures :

- une fine croûte figée vitreuse, un peu à l'image de celle des pillow-lavas actuels,
- une sous-couche à texture « spinifex » (le spinifex est une graminée australienne à aiguilles très fines). En pétrologie, on utilise ce terme pour désigner une texture à grands cristaux d'olivine aciculaire. Les dendrites spinifex, parfois décimétriques, sont le propre d'un refroidissement rapide et, conjointement, d'une croissance rapide des minéraux ; les dendrites d'olivine grandissent dans des directions indiquant le plus grand gradient thermique, en général perpendiculaire à la surface de la coulée,
- des textures cumulatives de cristaux d'olivines trapus à la base, là où le refroidissement à été moins rapide qu'en surface.

Les komatiites se sont formées dans le contexte chaud du manteau archéen, ce qui correspond vraisemblablement à des points chauds. Les points chauds devaient être nombreux à l'Archéen, compte tenu du fait que les roches vertes, formées en partie de komatiites, sont très abondantes dans les cratons. Néanmoins, de récentes études ont montré que, si le magma komatiitique était très chaud, la température du magma dans son ensemble n'était que d'une centaine de degrés plus élevée que celle du magma actuel.

L'émission d'abondantes laves komatiitiques a participé de façon spectaculaire au refroidissement de la Terre.

Les komatiites ont été à l'origine d'un phénomène complètement disparu aujourd'hui : la sagduction. Les laves komatiitiques très fluides et de forte densité ($d = 3,3$) se sont déposées par endroits sur une croûte de TTG de plus faible densité ($d = 2,7$) et relativement ductile. Sous l'effet de leur poids, les komatiites se sont enfoncées dans les TTG créant une dépression, une sorte de cratère, où ont pu se déposer des sédiments. Ces cratères apparaissent, entre autres, à Pilbara, à l'Ouest de l'Australie. On peut dire que la sagduction est une sorte de point chaud à l'envers au milieu des plaques !

Parallèlement aux komatiites, quelques volumes de laves basaltiques à affinité tholéitiques, et de rares laves acides (dacites ou rhyolites) pouvaient être émis. Ces laves, mêlées à des roches sédimentaires ont ceinturé le socle essentiellement TTG, pour former les roches vertes dans une proportion qui ne dépasse pas 8% du volume des terrains archéens.

Enfin, des granites intrusifs à affinité calco-alcaline, provenant de la fusion des péridotites du manteau, sont apparus parmi les roches vertes et les TTG.

Les granites ayant subi un fort métamorphisme peuvent s'insinuer en fins filons blanchâtres dans les TTG en général gris clairs (fig. 10).

4- LES FORMATIONS FERRIFERES RUBANÉES, LES BIF ET LES OcéANS

Le terme BIF (*Banded Iron Formation*) recouvre une variété de roches sédimentaires où alternent de fines couches centimétriques de quartz et de magnétite formées durant la fin de l'Archéen.



Fig. 9 : Les BIF du Namaqualand. Ph. D.C.

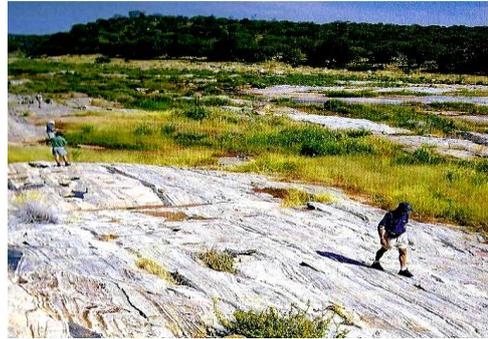


Fig. 10 : Les gneiss du Kaapvaal. Ph. D.C.

Le fer de la magnétite provient essentiellement de l'altération et du lessivage des roches de surface. La mobilité du fer dépend de son état d'oxydation : sous sa forme ferreuse Fe^{+2} il est soluble dans l'eau, alors qu'il ne l'est pas sous sa forme ferrique Fe^{+3} . Aujourd'hui, l'atmosphère étant riche en oxygène, le fer reste sur les continents sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes, par exemple dans les cuirasses latéritiques d'Afrique. A l'Archéen où l'atmosphère était dépourvue d'oxygène, donc réductrice, le fer était en solution dans les océans ; il en était de même du quartz.

Aujourd'hui, les précipités chimiques du fer et de la silice, après oxydation et métamorphisme, affleurent sous forme de niveaux rubanés du plus bel effet, en de larges plis alternant fines couches rouges d'oxydes de fer et couches noires ou grises de matériaux siliceux : ce sont les BIF.

La composition des océans archéens a été, entre autres, déterminée par l'étude de petits volumes de fluides, de l'ordre de quelques dizaines de μm^3 , piégés dans les défauts cristallins de certains minéraux des TTG. On a retenu, entre autres, que l'océan archéen contenait du fer, beaucoup de sel et enfin, de l'analyse des isotopes stables de l'oxygène, du silicium et du strontium, il ressort que la température de l'eau était supérieure à $50^\circ C$: les flux de chaleur internes étaient plus importants qu'aujourd'hui et, on le verra plus loin, régnait un important effet de serre.

5- LA GRANDE CATASTROPHE

Entre 3,9 Ga et 3,8 Ga, au début de l'Archéen, certaines planètes du système solaire ont subi un intense bombardement météoritique. La Terre a dû considérablement souffrir de ce bombardement en particulier sur ses cratons stables. Aujourd'hui, il n'en reste plus de traces visibles car elles ont été effacées par l'érosion et la tectonique des plaques. Ces traces sont par contre bien visibles sur la Lune qui compte plus de 1700 cratères de 20 km de diamètre chacun, datés en moyenne de 3,9 Ga et sur Mercure où ils sont innombrables. On ne voit donc pas pourquoi la Terre aurait été épargnée !

Cette époque de bombardement, dont le pic se situe à 3,9 Ga, porte le nom de LHB (*Large Heavy Bombardment*).

Selon le scénario lunaire et, compte tenu de la surface de la Terre, quelque 22 000 météorites auraient pu laisser des cratères d'une vingtaine de kilomètres de diamètre chacun ; certains auraient même pu atteindre des diamètres d'un millier de kilomètres.

On pourrait retrouver les indices du LHB dans l'enregistrement sédimentaire de certaines roches archéennes : teneur élevée en platinoïdes, minéraux choqués et anomalies isotopiques.

Les platinoïdes, éléments chimiques rares sur Terre (Pt, Pd, Ru, Ir...) sont par contre abondants au sein des météorites. Les minéraux choqués ont été déformés par une violente onde de choc et une rapide et forte augmentation de température. A ce jour, ces deux premiers indices n'ont pas encore été découverts dans les plus anciens terrains archéens.

Il reste cependant les marqueurs isotopiques : des sédiments archéens d'Isua au Groenland et de Nulliak au Labrador ont laissé des indices, si on compare les rapports isotopiques du tungstène de ces sédiments et ceux d'une valeur de référence moyenne de la Terre. Donc la Terre a bien été bombardée !

Les conséquences du LHB ont été une remise à zéro des velléités d'évolution de la Terre au début de l'Archéen. Néanmoins, en dépit de l'intensité du LHB, quelques rares îlots de croûte continentale ont été conservés et certains de leurs composants tels que les zircons ont pu traverser les âges pour venir jusqu'à nous : à Jack Hills, des zircons ont été datés à 4,4 Ga et à 4 Ga des gneiss près d'Acasta.

6- LES PREMIERES TRACES DE VIE

Le passage du minéral au vivant demeure, encore aujourd'hui pour les scientifiques, l'une des grandes énigmes. Pour le biologiste, la vie est la faculté d'autoréplication de certaines associations de molécules qui évoluent et se développent pour atteindre un état d'équilibre éloigné de l'état d'équilibre qui leur a donné naissance.

Du physicien au chimiste, en passant par le géologue et le philosophe, chacun pourrait donner une définition de ce qu'il entend par « la vie ».

Certains postulent que la vie serait apparue même avant le LHB : événement sans doute improbable compte tenu des conditions physico-chimiques ! Les premières traces de vie dateraient de 3,5 Ga, mais les traces de vie avérées ont été enregistrées à 2,7 Ga.

Pour certains chercheurs la vie serait apparue lorsque des systèmes construits à partir d'ARN auraient été capables de se répliquer, il y aurait 3,8 Ga. Cette hypothétique et première structure, dont on ne connaît aucune trace, a même reçu un nom : LUCA (*Last Universal Cell Ancestral*). Nous serions donc tous les enfants de Luca !

Quant à savoir où est née la vie, les candidats sont nombreux : l'océan et ses rivages arriveraient en tête, les argiles et la glace suivraient ; la panspermie (un germe de vie serait venu d'une planète lointaine), quant à elle, n'étant qu'une hypothèse spéculative.

Actuellement les seuls macrofossiles datés indubitablement de l'Archéen sont les stromatolites (fig. 11 & 12) : ce sont des structures sédimentaires carbonatées laminées qui s'empilent sous forme de plaques ou de colonnes. Elles sont engendrées par des communautés microbiennes complexes où dominent les cyanobactéries (organismes procaryotes, c'est-à-dire sans noyau) enfermées dans un mucilage qui piège les particules carbonatées. Ces organismes se développent dans l'eau, non loin de la surface et sur des plateformes carbonatées. Les organismes les plus profonds sont peu à peu asphyxiés, ils meurent et de nouveaux organismes se construisent sur leurs « cadavres ».

Des stromatolites se développent encore aujourd'hui, entre autres dans l'Ouest de l'Australie à Shark Bay, où elles croissent dans des conditions spéciales qui, on le suppose, se rapprochent des conditions archéennes :

- milieu calme et sans prédateur,
- salinité voisine de 60 g/l,
- pluviométrie faible, apport d'eau douce très limité,
- intense évaporation,
- faible marée,
- faible profondeur de la baie (< 4 mètres),
- fonds couverts de sables carbonatés.

L'hypersalinité de la baie évite le développement des algues macrophytes et empêche la vie des gastéropodes prédateurs. La vitesse de croissance des stromatolites a été estimée à 0,5 mm/an et

la durée de vie d'une colonie à 1000 ans. A Shark Bay les édifices morts sont oxydés, de couleur rouge ; les vivants respirent (petites bulles), sont à fleur d'eau et de couleur gris brun.

A l'Archéen, les stromatolites devaient régner en maîtres sur l'ensemble des plateformes carbonatées devenues nombreuses et être sans doute les seuls êtres vivants macrostructurés de la planète. Mais, comme on le verra, leur « mode de vie » allait signer leur quasi-disparition !



Fig. 11 : *Stromatolites vivantes*. Ph. D.C.



Fig. 12 : *Stromatolites fossiles*. Ph. D.C.

7- LA FORMATION DE L'ATMOSPHERE ACTUELLE.

Le métabolisme des stromatolites fonctionne par fixation du dioxyde de carbone et rejet d'oxygène. Ce métabolisme a eu pour conséquence une modification fondamentale de l'atmosphère terrestre qui, alors réductrice, est devenue oxydante avec création de puits de CO₂ et bouleversement complet des lignées du vivant.

L'apparition de l'oxygène atmosphérique a créé une véritable révolution : le GOE (*Great Oxidation Event*). Elle a débuté à la fin de l'Archéen pour avoir son pic au Paléoprotérozoïque, de 2,5 Ga à 1,8 Ga.

Les conséquences cruciales de l'oxygénation atmosphérique ont été, entre autres, les suivantes :

- disparition des BIF, le fer Fe²⁺ n'étant plus soluble dans l'eau, il s'oxyde en Fe³⁺ et se dépose sous forme de latérite, entre autres,
- oxydation de l'océan et précipitation massive du fer qu'il contient,
- multiplication des organismes eucaryotes (organismes à noyau) et des êtres multicellulaires qui allaient occuper la planète et réduire les stromatolites à des espaces de vie de plus en plus restreints,
- raréfaction des formations méthanogènes,
- extinction de tous les organismes pour qui l'oxygène est un poison ; ne subsisteront que les organismes pouvant vivre dans des milieux anoxiques, dans certaines sources thermales profondes ou à l'intérieur d'autres organismes.

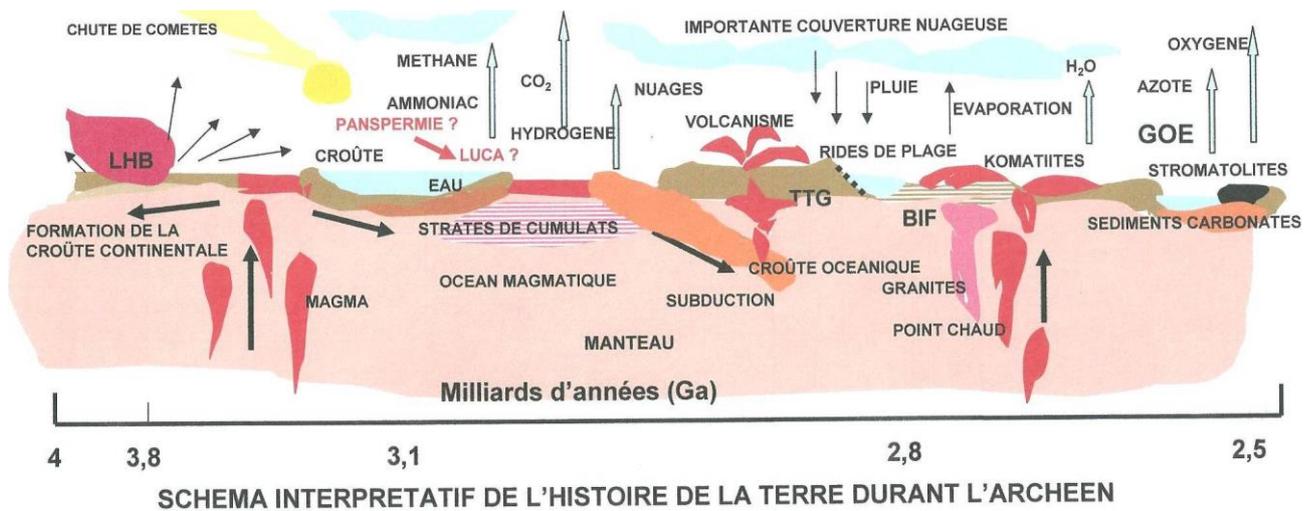
De toute façon, eucaryotes et procaryotes allaient continuer de vivre, de s'adapter et d'évoluer !

Quant à tenter d'expliquer l'origine des eucaryotes, les chercheurs sont partagés entre plusieurs hypothèses, entre autres :

- complexification des associations de procaryotes,
- symbiose entre plusieurs lignées de bactéries,
- association de virus dans un noyau de procaryotes pour créer des eucaryotes.

Comme on l'a vu plus haut, l'atmosphère archéenne se composait essentiellement de CO₂, de CH₄, de composés nitrés dont N₂ et d'eau. Il devait donc régner sur Terre un important effet de serre. Or, comme le soleil était moins lumineux qu'aujourd'hui (environ 25% fois plus faible), cet effet de serre devait éviter à la Terre de trop se refroidir. A partir de 2,5 Ga, l'oxygène devait s'accumuler, le CO₂ diminuer, le CH₄ disparaître pratiquement, N₂ et H₂O restant constants. L'oxygénation de l'atmosphère allait induire une diminution de l'effet de serre et donc de la

température ; mais comme la luminosité de soleil devait s'accroître, un nouvel équilibre allait se créer aux débuts du Protérozoïque.



Explications dans le texte

BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie liée à l'Archéen est importante. J'ai choisi quelques titres accessibles à l'amateur averti de géologie.

BALLEVRE, M. & JOLIVEL, J.Y., 2008. *Géologie en Australie*. META ODOS. Cesson-Sévigné. France.

CASSIDY, K.F., & al. 2001. *4th Archean Symposium, Sept. 2001*. AGSO. Geoscience. Perth Australie. Pp. 6-7, 54-55, 131, 134-135, 222-223, 314-317, 394-395.

GARGAUD, M., & al., 2009. *Le Soleil, la Terre...la vie. La quête des origines*. Belin. Pour la Science. Paris.

MARTIN, H., 2009. *L'Archéen*, Encyclopedia Universalis, pp. 715-720.

MASCLE, G., 2008. *Les Roches, mémoire du temps*. EDP Science. Les Ullis.

MOYEN, J.F. & JOLIVEL, J.Y., 2007. *Géologie en Afrique du Sud. La Terre précambrienne*. META ODOS. Cesson-Sévigné. France.

MOYEN, J.F., 2004. *TTG et Adakite. Cas particulier de magma de zones de subduction*. Planet-Terre. ENS Lyon. Stellenbosh University. 7602 Matieland. Afrique du Sud.

REISSE, J., 2006. *La longue histoire de la matière*. Presse Universitaire de France. Paris

Pour plus amples informations voir « Archéen » sur Google : on y trouvera des références relatives à des thèses sur des terrains précambriens.

La Recherche et *Pour la Science* ont consacré de nombreux articles au Précambrien.



Deux affleurements typiques de l'Archéen : des gneiss et des stromatolites (Afrique du Sud, Australie). Ph. D.C.

