



Guy MAURIN

Le climat de notre planète :

L'apparition de la vie au Précambrien

1. Introduction

Notre planète et son atmosphère n'ont cessé d'évoluer depuis leur création. Cet article est focalisé sur le climat, la formation de l'atmosphère et des océans, l'atmosphère prébiotique, l'apparition de la vie et de l'oxygène au Précambrien.

Le Précambrien commence avec la naissance de la Terre (-4,5Ga) et se termine avec la faune de l'Ediacarien (-0,55Ga). Cette période, qui précède l'ère Primaire, est restée longtemps mal connue bien qu'elle représente 90% de l'existence de notre planète. C'est durant le Précambrien que les fluctuations des concentrations en CO₂ et en O₂ ont été les plus importantes (Réf. 8.1).

La référence aux compositions du Soleil, des météorites et des autres planètes ainsi que l'étude géologique des couches successives sur Terre fournissent des données essentielles. Mais les roches très anciennes sont rares sur notre planète qui subit une forte érosion due à l'eau et un renouvellement dû à la tectonique des plaques et aux volcans.

Comme les données sont rares, il existe des points de vue convergents et des controverses. J'ai rassemblé des théories qui me semblent crédibles et cohérentes ; à l'avenir, de nouvelles découvertes pourront enrichir notre compréhension de ces temps très anciens.

2. L'atmosphère primaire issue de la nébuleuse initiale

Les planètes se sont formées par accrétion gravitaire d'une nébuleuse de roches et de gaz qui ont constitué une atmosphère primaire.

La masse très élevée du Soleil lui permet de conserver ses éléments légers. La composition du Soleil donne donc une référence pour la composition de l'atmosphère primaire de la Terre.

Les compositions des météorites constituent aussi des références auxquelles la Terre est comparée. Certaines météorites, les chondrites (Fig. 1 et Réf. 8.2), n'ont pas été différenciées à haute température depuis la création du système solaire lors de laquelle les chondrites se sont rassemblées en planétésimaux (~100 m) qui se sont eux même rassemblés en astéroïdes puis en planètes. Les chondrites sont composées de chondres (Si et Fe) pris dans une matrice de silicates. La composition moyenne des chondrites est voisine de celle de la Terre. Les chondrites sont actuellement les plus fréquentes des météorites (85%). Ce sont des fragments de petits astéroïdes, éjectés de la ceinture principale par un choc entre deux astéroïdes.

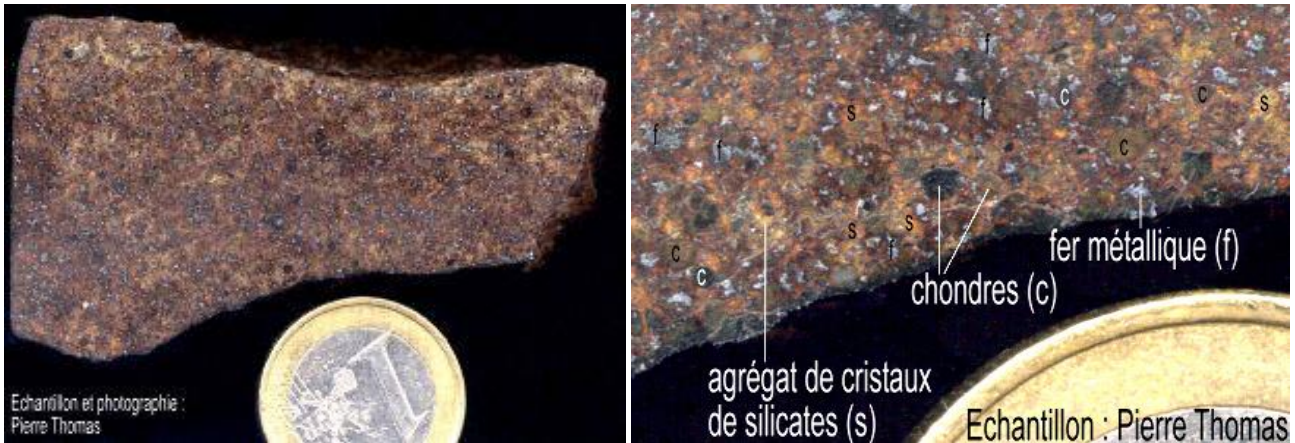


Figure 1 : Section polie d'une chondrite ordinaire et détails

Par rapport à ces références, la Terre a beaucoup perdu ses gaz légers, en particulier H et He qui constituent 99% du Soleil. Une planète retient son atmosphère par gravité. Mais un atome peut s'échapper lorsque sa vitesse est supérieure à sa vitesse de libération (11 km/s pour la Terre, Réf. 8.3) ; une molécule de gaz peut recevoir du Soleil l'énergie nécessaire à sa fuite de multiples manières : thermique, entrainement hydrodynamique, U.V., vent solaire constitué de particules chargées... Une planète perd d'autant plus vite son atmosphère qu'elle est proche du Soleil, petite et mal protégée par son champ magnétique. La Terre continue à perdre chaque année 93 000 t d'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, ce qui est fâcheux. Nous le savons car des images U.V. révèlent un halo rouge autour de la Terre dû aux atomes d'hydrogène (Fig. 2).

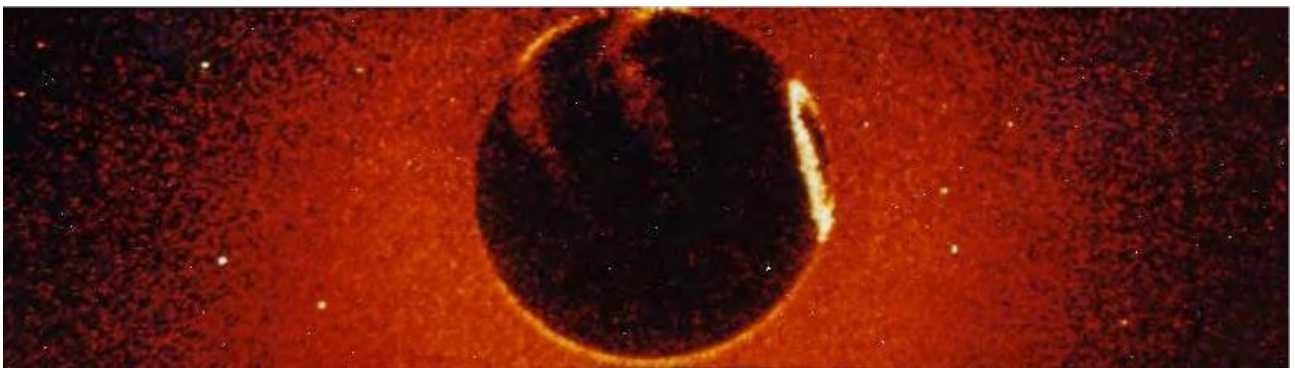


Figure 2 : Image Ultra-Violet de l'hémisphère sombre de la Terre avec le Soleil derrière elle. Le halo rouge autour de la planète provient des atomes d'hydrogène de l'exosphère. Prise à 19700km d'altitude par le vaisseau Dynamic Explorer de la NASA.

La Terre a aussi perdu ses gaz rares (Réf. 8.4). Dans le Soleil, les abondances du néon et de l'azote sont similaires alors qu'il y a 40 000 fois plus d'azote que de néon dans l'atmosphère terrestre. En fait, la Terre a perdu la plus grande part de son atmosphère primaire qui s'est échappée vers l'espace, le CO₂ s'étant dissous dans les océans ou ayant précipité sous forme de calcaire.

Elle a été remplacée par une atmosphère secondaire issue des roches qui ont dégazé longuement sous l'effet de la température interne élevée de la Terre. Ces gaz constituant l'atmosphère secondaire sont ceux qui sont réactifs comme C, H, O, N et qui peuvent être inclus dans les chondrites alliés à d'autres éléments moins volatils. Les chondrites ont aussi perdu leur atmosphère primaire et leurs gaz rares mais elles ne se sont pas échauffées et ont conservé leurs gaz occlus. En chauffant les chondrites et en analysant les gaz qui s'en échappent on peut estimer la composition de l'atmosphère secondaire. Le champ de température interne aux météorites, astéroïdes et planètes a donc une influence importante sur leurs atmosphères.

3. La température initiale de la Terre

La formation par accréation sous l'effet de la gravité a émis beaucoup de chaleur ce qui a porté la température interne de la Terre à plusieurs milliers de degrés. De plus, la radioactivité naturelle interne produisait nettement plus de chaleur qu'aujourd'hui. Toutefois, cette puissance radioactive est négligeable devant le refroidissement radiatif de la surface de la Terre qui impose un sol beaucoup plus froid que le magma interne. Donc la Terre a commencé dès sa création à évoluer vers une sphère dont la température décroît fortement du centre (~6000°C) vers la surface. Mais l'inertie thermique de notre planète est élevée et son refroidissement a toujours été lent ce qui explique qu'il subsiste encore une partie de la chaleur initiale de création.

La température du sol était imposée par le rayonnement du Soleil, plus faible, l'albédo probablement plus faible car il n'y avait pas de végétation et l'atmosphère dont l'effet de serre était amplifié par une pression atmosphérique plus forte et des gaz à effet de serre plus divers. On imagine que le sol était un peu plus chaud qu'aujourd'hui. Notre planète a conservé son eau, ce qui est essentiel. Il existe des preuves géologiques de l'existence de l'eau sur Terre, il y a 4,4 Gan. Cette preuve est apportée par l'analyse isotopique de l'oxygène des zircons de Jack Hills, en Australie, datés de - 4,4 Gan qui sont les plus anciens échantillons de la croûte continentale connus.

Vénus, plus chaude car plus proche du Soleil, a perdu toute son eau, ce qui la rend inhabitable et impropre à la vie. Mars, plus froide, a conservé de l'eau glacée et peut être des traces de vie. Mais il ne lui reste que 600 Pa d'atmosphère, à 96% du CO₂ ; cela fait 15 fois plus de CO₂ que sur Terre pour une température moyenne de - 63°C.

Sur Terre, le magma très chaud s'est différencié, le noyau ferreux central plus dense se séparant par gravité des silicates. On estime que le noyau ferreux central s'est séparé en 100 Man. Ce noyau ferreux a créé le champ magnétique terrestre qui protège notre planète des rayonnements les plus durs du Soleil.

4. L'atmosphère secondaire issue du dégazage des roches

Les chondrites contiennent du fer et du carbone réducteurs qui favorisèrent une atmosphère secondaire réductrice composée de H₂O, CO, CO₂, HCl, CH₄, NH₃, H₂S, N₂ sans oxygène.

Des expériences de synthèse de molécules prébiotiques par des éclairs électriques et des rayonnements dans des mélanges de gaz variés ont été menées par Miller et Urey dans les années 1950. Elles ont montré qu'une telle atmosphère réductrice est favorable à la création d'acides aminés et de molécules prébiotiques, premières étapes pouvant mener à l'ARN puis à la vie. La vie est définie par la capacité de reproduction, les copies étant semblables à l'original grâce à une mémoire moléculaire. La synthèse de la vie n'a cependant pas été obtenue en laboratoire. On n'a pas encore trouvé de vie extra-terrestre ni de vie sans carbone.

Le caractère réducteur de l'atmosphère secondaire est cependant controversé (Réf. 8.5). Les molécules CH₄ et NH₃ sont progressivement détruites par les rayonnements solaires. D'autre part, lorsque le fer s'est rassemblé dans le noyau, le magma est devenu plus oxydant et les gaz émis plutôt CO₂, H₂O, SO₂, N₂ avec des traces de CO et H₂. Ce sont ces gaz qu'émettent les volcans aujourd'hui et depuis 3,8 Gan. Ces atmosphères oxydantes ne sont pas favorables à la synthèse de molécules prébiotiques.

Il y a toutefois un consensus sur le fait que l'atmosphère secondaire ne comportait pas d'oxygène mais beaucoup plus de CO₂ qu'aujourd'hui. Suivant JF. Kasting (Réf. 8.6), la pression de CO₂ était de l'ordre de 20 bar, mais pour d'autres auteurs, elle valait 200 bar. Il y a 90 bar de CO₂ sur Venus.

Le CO₂ a été progressivement absorbé par les océans. L'altération des silicates par le CO₂ suivant $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ consomme aussi du CO₂. La formation des calcaires a consommé des masses importantes de CO₂.

5. L'apparition de la vie

3,9 Ga avant notre ère, s'est produit le Grand Bombardement Tardif, pluie de météorites provoquée par la migration d'Uranus et Neptune (Réf. 8.9) qui peut avoir partiellement détruit l'atmosphère existante et apporté de l'eau et une atmosphère plus réductrice issue des météorites (Réf. 8.6) favorable à l'apparition de la vie qui apparut ensuite. Il existe plusieurs hypothèses sur l'origine de la vie : dans l'atmosphère, dans les océans ou apportée par une météorite.

Dans des roches sédimentaires d'Isua au Groenland âgées de 3,8 Ga, il a été trouvé un rapport 12C/13C riche en 12C, signature de la vie, témoin de l'existence de la vie à cette époque.

Les fossiles connus les plus anciens sont des micro-organismes marins. Il s'agit essentiellement de stromatolithes constitués de cyanobactéries, ou « algues bleu-vertes », qui forment des empilements de lamines carbonatées que l'on retrouve dans les sédiments (Fig. 3). Les plus anciens ont été découverts à Pibara en Australie et datent de - 3,5 Ga. Il s'agissait de cyanobactéries marines monocellulaires procaryotes (sans noyau, l'ADN étant dans le cytoplasme de la cellule) capables de se nourrir de CO₂ en produisant de l'oxygène et des carbonates. Ces algues font aussi passer le carbone vers le carbonate de calcium qui constitue un stock de carbone. Ces algues bleu-vertes existent toujours et, comme elles sont toxiques, elles provoquent le décès de chiens ; cela se produit en France et ailleurs dans le monde.



Figure 3 : Stromatolithes fossiles

6. La création d'une atmosphère oxygénée

L'existence de chlorophylle vers - 2,7 Ga est attestée par de petits prismes nommés pristanes dans des échantillons rocheux (Réf. 8.4). Par photosynthèse, la chlorophylle participe à l'augmentation de la concentration en oxygène de l'atmosphère dans la mesure où le carbone est stocké dans le sol.

Durant cette période de l'Archéen, des bactéries produisaient du méthane CH₄ dont l'effet de serre contribuait à réchauffer l'atmosphère. La décroissance du CO₂ et la disparition du méthane dû à l'oxygène ont contribué à la glaciation survenue il y a 2,3 Ga. Le passage du Soleil dans une zone poussiéreuse de la Voie Lactée a aussi réduit le rayonnement solaire réchauffant la Terre (Réf. 8.7). La glace ayant un albédo élevé, sa présence a refroidi la Terre qui devint une boule de glace. La

glaciation qui dura 10 Ma fut suivie d'un réchauffement climatique dont on ne connaît pas la cause : Soleil plus chaud ou poussières produites par les volcans qui noircissent la glace et réduisent son albédo.

La Terre s'étant réchauffée, l'oxygène poursuivit son augmentation. Une augmentation rapide de l'oxygène, la « Grande Oxydation » a eu lieu il y a 2 Ga. Comment le sait-on ?

On trouve dans des sédiments âgés de ~ 3 Ga pyrite et uraninite détritiques qui prouvent que la concentration d'oxygène était faible à cette époque car ils ne résistent pas aux concentrations d'oxygène actuelles (voir Fig. 4 ci-dessous issue de la Réf. 8.1).

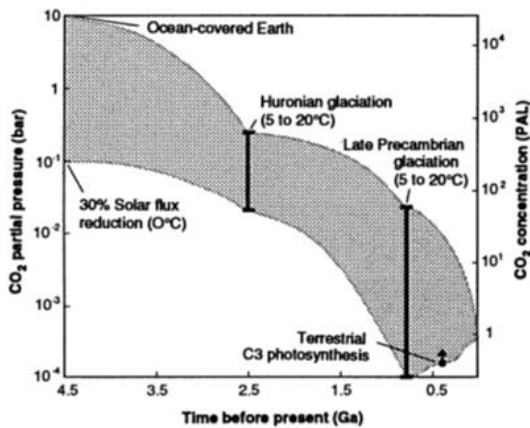
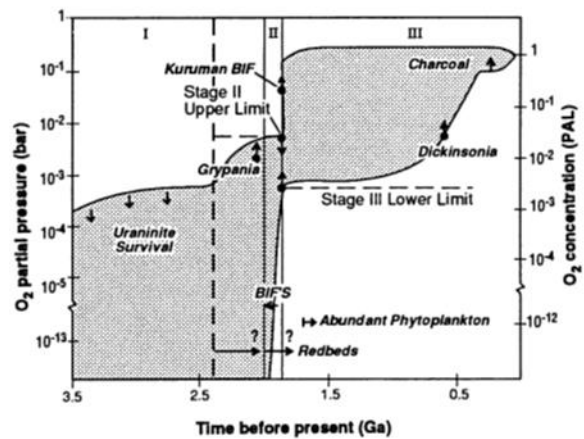


Figure 4 : Évolution du CO₂



Évolution de l'oxygène O₂

Ensuite, les BIF « Banded Iron Formation » ou « formations de fer rubanées », que l'on peut voir sur la Figure 5, sédiments composés de strates alternées de quartz et d'oxyde de fer Fe₂O₃ prouvent la présence d'oxygène dans les eaux de surface des océans mais aussi son absence dans les profondeurs océaniques. À partir de ~ 2 Ga, le fer put être transporté dans les profondeurs sous forme ferreuse soluble avant de se déposer en formant ces BIF qui disparaissent à partir de 1,85 Ga. Ces faits conduisent P.E. Cloud en 1972 à proposer l'hypothèse que la concentration d'oxygène se soit élevée à un niveau significatif il y a 2 Ga, ce que des analyses ultérieures ont confirmé.

La Grande Oxydation pourrait avoir l'origine suivante : l'augmentation progressive de l'oxygène a conduit à une meilleure protection des U.V. par l'ozone ce qui a permis au phytoplancton de se développer et d'amplifier l'oxygénation de l'atmosphère. Les organismes vivants ont dû s'adapter à cette oxygénation qui fut assez brutale.

Dès ~ 1,5 Ga sont apparus des organismes monocellulaires eucaryotes (possédant un noyau qui contient l'ADN et est entouré d'une membrane), d'une taille supérieure à 60 µm qui sont toujours aérobies, ce qui confirme la présence d'oxygène dans l'air. C'est aussi à cette époque qu'apparut la reproduction sexuée qui apporta des innovations génétiques puissantes (Réf. 8.8).

À partir de ~ 1,2 Ga on détecte des traces de vie multi-cellulaire, comme des algues rouges ou des éponges.

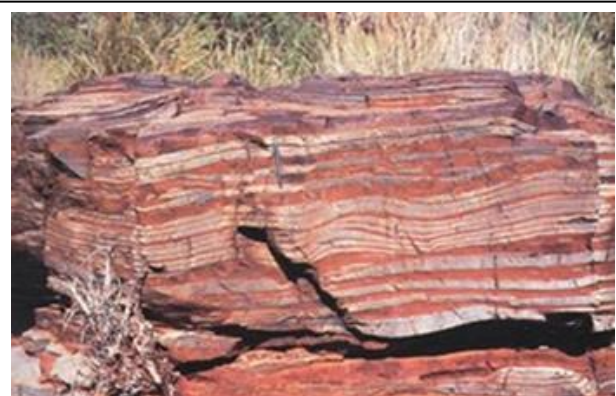


Figure 5 : Banded Iron Formation

- 8.4 Processus naturels / Terre ronde École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne ENSM-SE emse.fr Bouchardon
- 8.5 Earth's Earliest Atmospheres 2010 K. Zahnle, L. Schaefer, B. Fegley.Jr Washington University St Louis MO63130
- 8.6 Climatic consequences of very high carbon dioxide levels in the earth's early atmosphere Kasting JF Ackerman TP NASA
- 8.7 Greenhouse warming by CH₄ in the atmosphere of early earth Pavlov AA Kasting JF Brown LL Rages KA Freedman R Pennsylvania University
- 8.8 Les grandes étapes de l'histoire du vivant Museum national d'Histoire Naturelle ENS Lyon Institut Français de l'Éducation
- 8.9 Le climat de notre planète : les premiers jours. G. Maurin Les Plumes de l'ARA N°68 Déc. 2019