

VI. Histoire de la Terre primitive – L'Hadéen.

VI.1. Formation de la Terre

La Terre a commencé à se former il y a 4,57 milliards d'années par le collage et l'agrégation de minuscules grains solides au sein de la nébuleuse solaire. L'agglomération de ces grains aboutit à la formation de planétésimaux de quelques kilomètres de diamètre. Des protoplanètes de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre se forment par le collage de ces planétésimaux. La Terre résulterait du choc et du collage d'une dizaine de protoplanètes de la taille de Mars ou de la Lune et a atteint sa taille actuelle il y a environ 4,45 milliards d'années, soit 100 millions d'années après le début de la phase d'accrétion. La chaleur dégagée lors de chocs violents que connaît la Terre lors de la phase finale d'accrétion et celle due à la désintégration d'éléments radioactifs fait fondre les roches terrestres et un océan de magma apparaît. Dans ces matériaux en fusion, les éléments les plus denses (fer et nickel) migrent vers le centre de la Terre et forment un noyau métallique. Le reste de la Terre se différencie en un manteau silicaté et une croûte superficielle de nature basaltique. C'est le processus de différenciation. Lors de la phase terminale d'accrétion, des chocs violents se produisent entre protoplanètes et planètes en formation. Quand la Terre avait atteint 80 % de sa taille actuelle, une protoplanète de la taille de Mars l'a percutée et les débris qui se sont mis en orbite autour de la Terre se sont agrégés pour former la Lune. Cet impact aurait eu lieu autour de 50 millions d'années après la formation de la Terre.

L'histoire de la Terre primitive, entre 4,5 et 3,8 milliards d'années est très mal connue, car les roches qui se sont formées durant cette période sont très rares à la surface de la Terre. Cette période s'appelle **l'Hadéen**, Le terme « Hadéen » dérive d'Hadès, nom du dieu grec des enfers, ce qui doit rappeler les conditions générales de la Terre à cette époque. Ce terme a été inventé en 1972 par le géologue américain Preston Cloud.

VI.2. Les plus anciennes roches connues

- Les plus vieilles roches terrestres ont été découvertes en 2008 dans le Nord du Québec, le long de la côte Est de la baie d'Hudson au Canada. Il s'agit de roches appartenant à la formation nommée ceinture de Nuvvuagittuq. Certaines roches de cette formation appelées faux-amphibolites, ont été daté à **4,28 milliards d'années**. Mais cet âge reste encore controversé.
- Avant cette découverte, le record de la plus ancienne roche terrestre connue était détenu **par les gneiss d'Acasta**, situés dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada, âgés de **4,03 milliards d'années**.
- Les roches sédimentaires les plus anciennes ont été découvertes au Sud-Ouest du Groënland (**3,8 milliards d'années** pour le site d'Isua et **3,85** pour le site d'Akilia). Elles contiennent peut-être des traces d'une vie primitive.

- Des grains minéraux de zircons trouvés en Australie sont encore plus anciens. Ils proviennent de la formation de Jack Hills et ont été daté à **4,404 milliards d'années**. Il s'agit du plus ancien matériel daté sur Terre. Mais il s'agit là de minéraux et non pas de roches : les roches mères qui contenaient ces zircons ont été probablement détruites.

Le peu de matériels existants rend l'étude de cette période très difficile. Les rares roches disponibles sont toutes métamorphisées (tableau 1) et on ne connaît pas de fossiles de cette période. Il faut donc se contenter des quelques échantillons existants et de l'étude des autres corps du système solaire qui ont très peu évolués depuis la naissance du Système solaire il y a 4,56 milliards d'années (météorites, la Lune...).

Tableau 1 : Récapitulatifs des âges crustaux les plus anciens mesurés sur Terre

Age en Ga	Formation	Pays	Roche mère
3,82	Gneiss d'Amistôq	Groenland	Roche plutonique
3,865	Gneiss d'Isua	Groenland	Riche sédimentaire
4,03	Gneiss d'Acasta	Canada	Enclave
4,28	Faux amphibolites de Nuvvuagittuq	Canada	Enclave
4,3	Narryer	Australie	Zircon
4,404	Jack Hills	Australie	Zircon

VI.3. Histoire de la Terre durant l'Hadéen

L'Hadéen est une période clé de l'histoire de la Terre car plusieurs traits majeurs de notre planète ont été formés durant cette période :

- la formation de l'atmosphère s'est faite tout le long de cette période ;
- la formation des océans : on a des preuves de l'existence d'eau liquide à 4,4 Ga et la stabilisation des océans s'est faite aux alentours de 3,8 Ga ;
- la formation de la croûte et des continents (entre 4,4 et 4 Ga) ;
- le démarrage de la tectonique des plaques (autour de 4 Ga) ;
- l'apparition du champ magnétique de la Terre (4,5 Ga) ;
- et peut-être l'apparition de la vie durant cette période ?? (on n'a pas encore de preuves).

La surface de la Terre durant l'Hadéen était probablement dominée par deux processus : le bombardement météoritique et un volcanisme intense.

VI.3.1. La phase du bombardement météoritique

La Terre et les autres planètes et satellites du Système solaire auraient connues une intense période de bombardement météoritique durant les 500 millions d'années qui ont suivi la naissance du Système solaire. Par la suite, ce bombardement a diminué d'intensité assez rapidement. Les traces de cette période (cratères météoritiques) ont complètement été effacé de la surface de la Terre par les processus géologiques (tectonique des plaques, océanisation, érosion, volcanisme ...). Par contre la Lune et Mercure, deux objets qui ont très peu évolué du point de vue géologique depuis 3,8 Ga, gardent encore intacts les traces de cette période et présentent des surfaces criblées de cratères d'impact.

Ce bombardement météoritique a dû provoquer un réchauffement intense et une fusion de la surface de la Terre durant cette période. Un océan de magma aurait donc recouvert la surface de la Terre durant l'Hadéen. Cependant, la découverte récente de preuves en faveur de l'existence d'une croûte continentale et de l'eau liquide à la surface de la Terre 150 à 200 millions d'années après la formation de notre planète remet en question l'existence de cette période continue de bombardement météoritique.

Récemment, il a été proposé que le bombardement a pu être particulièrement violent durant les premières dizaines de millions d'années d'existence de la Terre, pour ensuite diminuer avant de connaître un regain de force entre 4 et 3,85 milliards d'années durant une phase appelée « **Bombardement intense tardif** ».

- L'origine de ce bombardement tardif serait une modification des orbites de Jupiter et de Saturne ayant entraîné l'éjection de la partie interne de la ceinture d'astéroïdes vers la partie centrale du Système solaire. Il en résulte qu'avant ce bombardement météoritique (avant 4,0 Ga) la surface terrestre n'était pas hostile et pouvait permettre la formation d'une croûte continentale stable ainsi que d'océans. Cette période est aussi nommée « Cool Early Earth = Terre Primitive Froide ». La question qui reste posée consiste à savoir si ce bombardement a pu avoir ou non un effet stérilisateur (vaporisation des océans, fusion de la croûte continentale, destruction d'une hypothétique vie).
- Les preuves de l'existence de cette période d'« intense bombardement météoritique tardif » proviennent de l'étude des roches lunaires apportées par les missions Apollo et des météorites lunaires tombées sur Terre. En effet, l'âge de toutes les roches prélevées des grands bassins (mers lunaires) et des météorites lunaires est situé entre 4 et 3,8 Ga, ce qui indique que ces bassins ont été formés durant cette période. De grands bassins de formations tardives existent également à la surface de Mercure et de Mars et indiquent que les planètes du Système solaire interne (dont la Terre) ont subi une phase tardive d'intense bombardement météoritique.

VI.3.2. La formation de l'atmosphère

L'atmosphère primitive de la Terre était très différente de celle qui existe actuellement. L'oxygène était pratiquement absent durant les 2 premiers milliards d'années de l'histoire de la Terre. Ce gaz a été progressivement rejeté dans l'air par les premiers organismes vivants apparus sur Terre.

La Terre a connu durant son histoire trois types d'atmosphères :

- Une atmosphère **primaire** issue de la nébuleuse solaire et capturée par la Terre au moment de sa formation. Elle était essentiellement composée d'hydrogène et d'hélium et a été rapidement perdue à cause :
 - de la faible gravité de notre planète (qui n'est pas suffisante pour retenir une atmosphère composée de gaz aussi légers que l'hydrogène et l'hélium)
 - de l'intense vent émis par le Soleil lors de la phase T Tauri qui a balayé les parties internes du Système solaire des gaz présents, essentiellement l'hydrogène et l'hélium.

- de l'énergie intense libérée par le bombardement des planétésimaux et la collision gigantesque qui a donné naissance à la Lune.
- Une atmosphère **secondaire**, formée par le dégazage de l'intérieur de la Terre au cours du volcanisme et par les gaz libérés lors de la chute de météorites et de comètes. Cette atmosphère était essentiellement composée d'azote (N_2), d'oxyde de carbone (CO_2), de vapeur d'eau (H_2O) avec un peu de méthane (CH_4) et d'ammoniaque (NH_4). La vapeur d'eau s'est condensée à la surface formant les premiers océans qui ont pompé le CO_2 sous forme de carbonates (calcaires) réduisant ainsi la teneur en CO_2 de l'atmosphère et l'effet de serre. La température est alors descendue à moins de $100^\circ C$ et l'azote est devenu le gaz majoritaire. Ces événements se sont produits il y a 4,4 milliards d'années et sont à l'origine de l'eau liquide à la surface de la Terre.
- Une atmosphère **tertiaire** (celle qui existe aujourd'hui), modifiée par l'apparition de la vie sur Terre, ce qui a enrichie l'atmosphère en oxygène jusqu'à atteindre le taux actuel (20 %). L'oxygène a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère vers 2,4 milliards d'années.

La figure 1 montre l'évolution de la composition de l'atmosphère depuis la formation de la Terre.

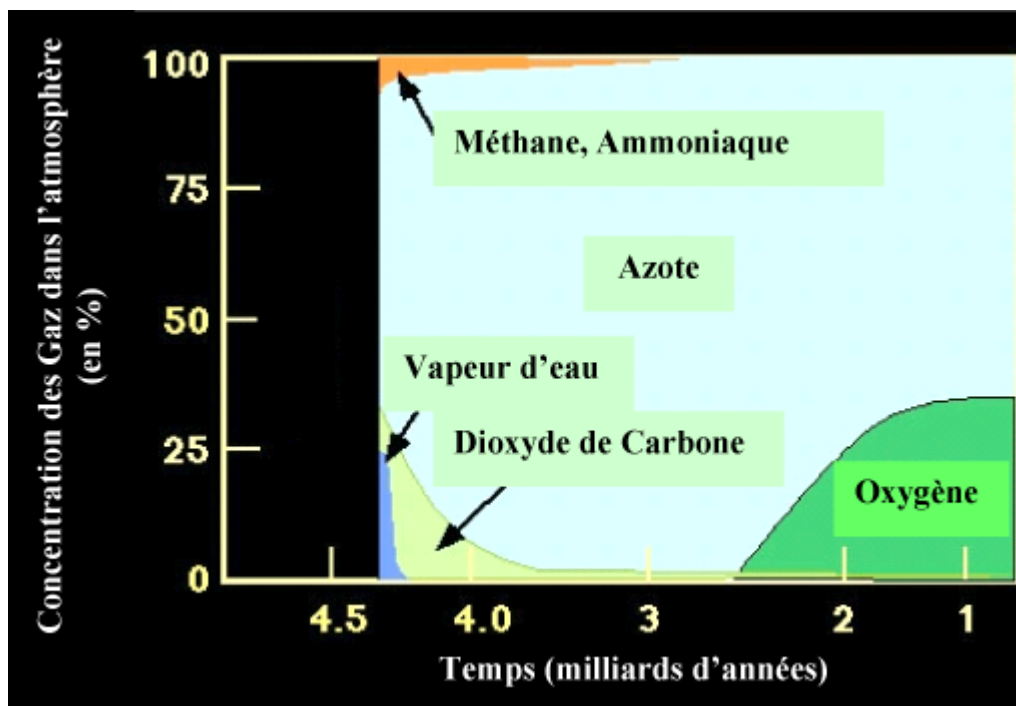


Figure 1 : évolution de la composition des gaz de l'atmosphère depuis la formation de la Terre

VI.3.3. Formation des Océans. Origine de l'eau.

a. Les preuves de l'existence d'eau liquide à la surface de la Terre il y a 4,4 Ga

L'eau liquide était probablement présente à la surface de la Terre 150 à 200 millions d'années après le début de la formation du Système solaire. En effet, des inclusions d'eau ont été retrouvées dans les zircons de la formation de Jack Hills datés à 4,4 Ga. Par ailleurs, ce minéral se forme dans les magmas granitiques dont la genèse requiert de l'eau. D'autre part, la constitution isotopique de l'oxygène des zircons de Jack Hills a permis de démontrer que la source de leur magma hôte avait réagi avec de grands volumes d'eau liquide

Cependant, à cause des conditions qui régnaient à l'époque, cette eau liquide a probablement été éphémère, et a du plusieurs fois être vaporisées par le bombardement météoritique. La stabilisation des océans à la surface de la Terre a eu lieu à la fin de l'Hadéen, il y a 3,8 Ga, comme l'attestent les plus vieilles roches sédimentaires marines et les calcaires d'Akilia et Isua au Groenland.

b. L'origine de l'eau

La Terre a été formée dans une région du Système solaire pauvre en eau. Au moment de sa naissance, la Terre était sèche. L'eau de la Terre fut probablement apportée par des objets célestes (météorites ou comètes) au cours des 100 millions d'années qui ont suivi la création de la Terre lors de l'intense bombardement météoritique primitif. Cette eau a probablement été apportée par les météorites de type chondrites carbonées qui sont riches en eau (10-20 % d'eau). Les comètes qui proviennent de la ceinture de Kuiper et du nuage de Oort contiennent en masse jusqu'à 80 % de glace d'eau et aurait pu être une importante source de l'eau sur Terre. Cependant, l'étude du rapport isotopique de l'hydrogène D/H (Deutérium/hydrogène) des océans terrestres (~ 0,000153), a montré qu'il est proche de celui des météorites de type chondrites carbonées (0,000145-0,000153) et inférieur à celui des comètes (0,000280-0,000340). Une origine météoritique des océans est donc plus vraisemblable qu'une origine cométaire.

- L'eau contenue dans ces millions d'astéroïdes de types chondrites carbonées qui se sont abattus sur Terre s'est infiltrées dans ce qui allait devenir le manteau de la Terre. Cette eau a ensuite échappée de l'intérieur de la planète via d'intenses éruptions volcaniques, formant une épaisse couche de nuages porteurs de pluies.

VI.3.4. Formation de la première croûte continentale

Les datations des cristaux de zircons sédimentaires de la formation de Jack Hills en Australie ont donné des âges allant de 4,4 à 4,0 Ga. Les roches dans lesquelles ces minéraux ont cristallisé ont probablement disparu ; seuls les cristaux de zircon connu pour leur résistance ont été préservés. Les zircons se forment dans des magmas de type granitique. Les granites étant les roches constitutives de la croûte continentale, il est donc possible que cette dernière ait commencé à se former sur Terre dès 4,4 Ga et que sa genèse ait continué tout au cours de l'Hadéen. Par ailleurs l'étude de zircons de la même formation et dont les âges s'échelonnent entre -4 et -4,2 milliards d'années a montré que les processus de la tectonique des plaques (subduction) avaient peut être démarré à cette époque. Tout cela semble indiquer que l'environnement terrestre à l'époque de l'Hadéen n'était pas aussi hostile qu'on ne le pense et qu'il ressemblait peut-être à l'environnement actuel !!!

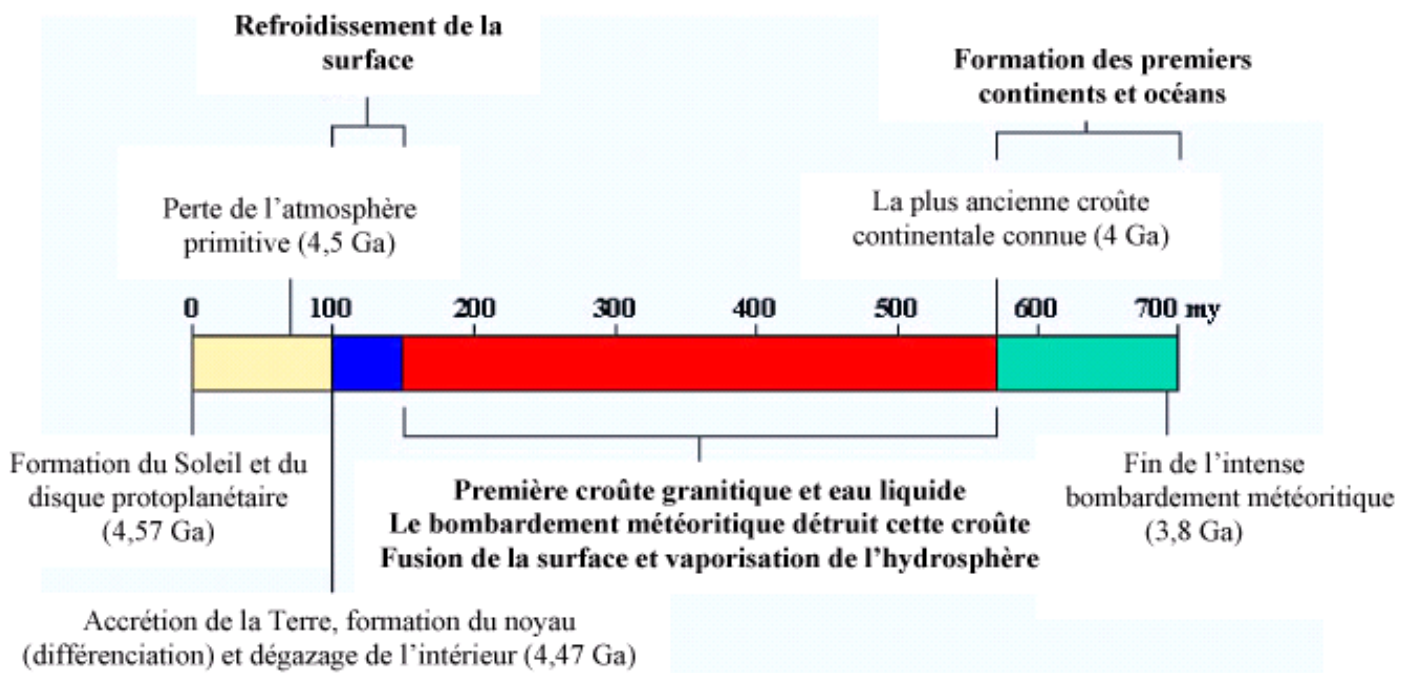


Figure 2 : Schéma récapitulatif de l'évolution de la Terre durant l'Hadéen