

7 Oxygénation de l'atmosphère et des océans

7.1.L'archivage du degré d'oxygénation d'un environnement

7.1.1.Diagramme pE-pH de stabilité du Fer (Figure 12)

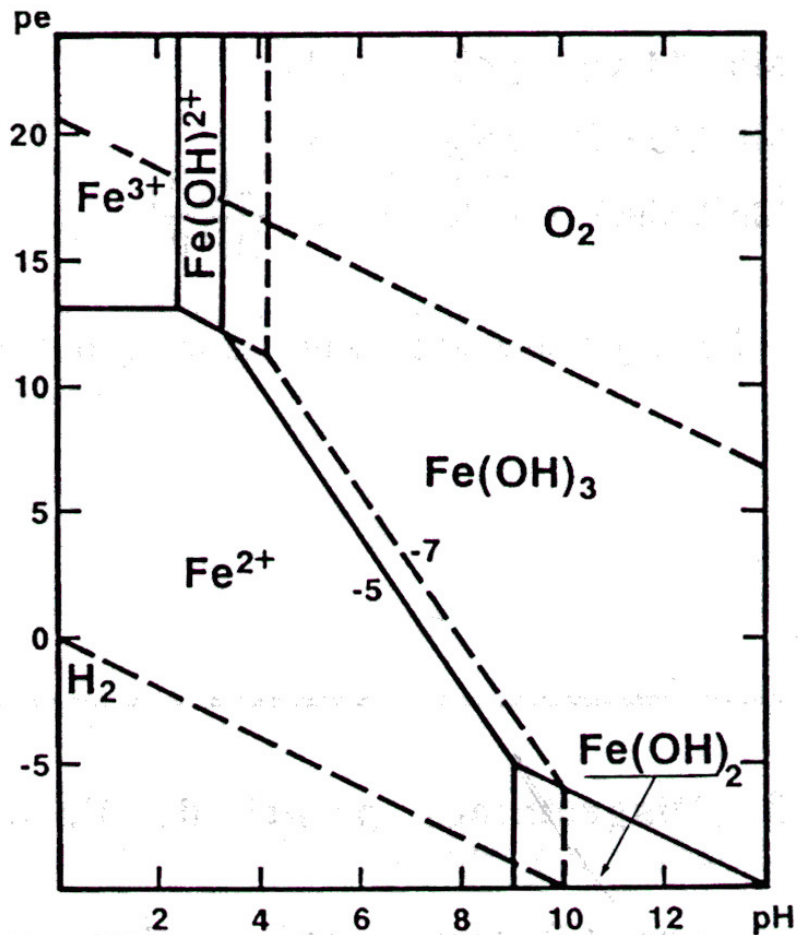


Diagramme pE-pH du fer pour une concentration totale de fer en solution égale à 10⁻⁵ mol/kg (traits pleins) et 10⁻⁷ mol/kg (pointillés).

Figure 12 - Diagramme pE-pH de stabilité du fer

On voit sur ce diagramme que dans les conditions oxydantes le fer est sous forme d'oxyde dont l'hématite (Fe₂O₃).

Dans des conditions réductrices, sous forme de l'ion soluble (Fe^{2+}) de pyrite ou de sidérite.

Quand il y a beaucoup de H_2S , le Fe^{2+} précipite sous forme de pyrite (FeS_2).

Quand il y a beaucoup de CO_2 , le Fe^{2+} donne de la sidérite (FeCO_3).

7.1.2. Diagramme de stabilité de l'Uranium

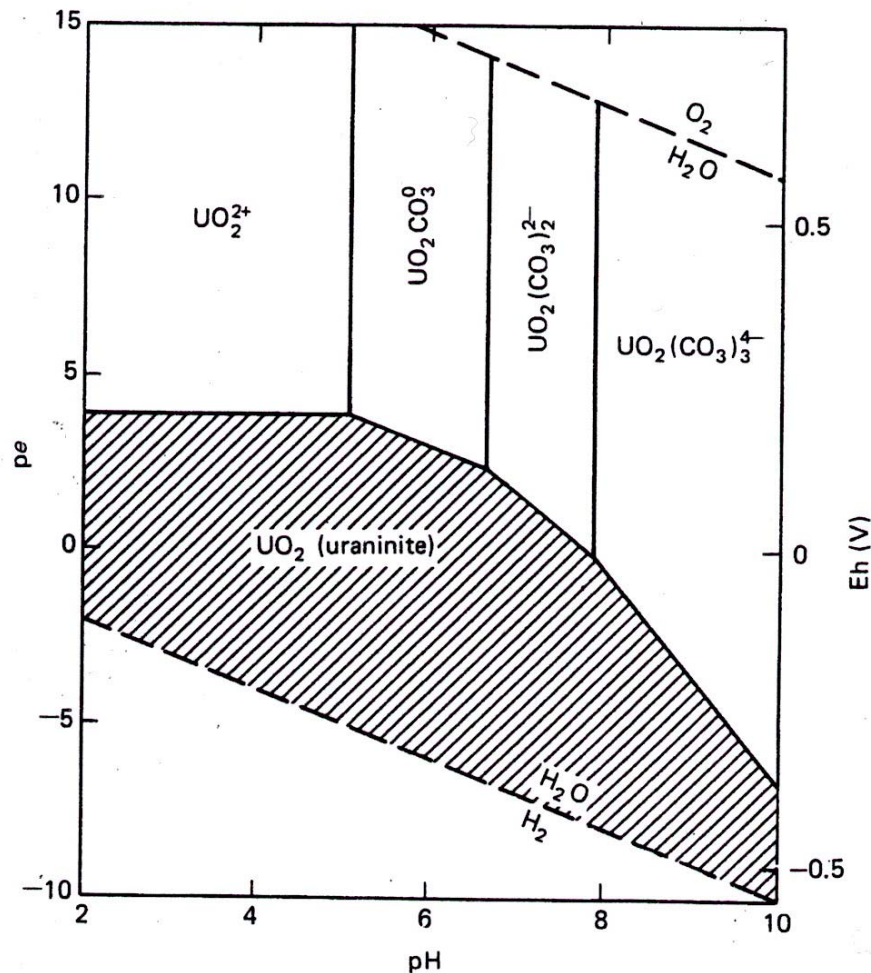


FIGURE 9-9 Simplified pe-pH diagram for the system U-O-H₂O-CO₂ at 25°C and $P_{\text{CO}_2} = 10^{-2}$ atm, showing the stability fields of ideal solid uraninite and dissolved species. Solubility boundaries are drawn at 10^{-6} m dissolved uranium species (modified from Langmuir, 1978).

Figure 13 – Diagramme pe-pH de stabilité de l'uranium.

L'Uranium sous forme réduite (+4) est solide : l'uraninite (UO_2).

L'Uranium sous forme oxydée (+6) est soluble.

7.2. Degré d'oxydation de l'atmosphère initiale (Hadéen de 4,5 à 3,8 Ga).

Pour l'Hadéen, on ne dispose pas de roches susceptibles d'avoir enregistré les conditions d'oxydation. On ne peut donc s'appuyer que sur des modèles d'évolution terrestre.

Origine de l'atmosphère/hydrosphère terrestre : dégazage et/ou apport extraterrestre (météorites / comètes).

Composition des gaz volcaniques : H₂O (80-90%), CO₂ (6-12%), H₂S et SO₂ (3%), H₂ (0,6-1,5%), CO (<0,4%)...

Ce qui donne un environnement modérément réducteur.

7.3. Les enregistrements de l'oxygénation entre 3,8 et 0,6 Ga.

En regardant les archives géologiques on arrive à avoir une vague idée de l'évolution de l'oxygénation de l'atmosphère et des océans.

Passons en revue certaines de ces archives :

7.3.1. Les BIF

Les Gisements de fer rubané (ou Banded Iron Formation, BIF) sont des roches sédimentaires constituées d'alternance centimétriques de silice (quartz) et de minéraux de fer (sidérite, pyrite, magnétite, hématite). Ces sédiments sont interprétés comme ayant précipité de façon chimique ou biochimique en domaine de plateforme.

On en trouve de 3.8 à 1.8 Ga. On en retrouve un peu vers 0,7 Ga.

La présence de ces gisements implique que l'océan était à cette période très riche en Fe²⁺ dissous, qui lorsque les eaux se chargent en H₂S précipitait sous forme de pyrite, ou lorsque les eaux se chargent localement en O₂ précipite sous forme de magnétite ou d'hématite.

Pour que l'Océan soit si riche en Fe²⁺, il était donc principalement réducteur.

7.3.2. Les paléosols

Entre 3.4 et 2.2 Ga, les paléosols montrent des appauvrissements en fer.

Dans une atmosphère réductrice, le fer est solubilisé et transporté à l'océan où il se concentre et peut par endroits précipiter sous forme de BIF. Les études de paléosols permettent de proposer des pressions partielles d'oxygène dans l'atmosphère inférieure à 1% de la pression partielle actuelle (Present Atmospheric Level, PAL).

Le Fe²⁺ des océans proviendrait donc de l'altération des sols dans une atmosphère réductrice.

A partir de 1,8 Ga, les paléosols montrent au contraire des enrichissements en fer. Dans une atmosphère oxydante, le fer est immobilisé dans les sols sous forme d'oxydes de fer. A partir de ces paléosols, on peut proposer des pressions partielles d'oxygène dans l'atmosphère supérieures à 15% de la pression partielle actuelle (Present Atmospheric Level, PAL).

Entre 2,2 et 1,8 Ga, pour le moment il n'y a pas de paléosol disponible.

7.3.3. Uraninite et pyrite détritique

On trouve de l'uraninite et de la pyrite détritique jusqu'à 2.2 Ga. Ces deux minéraux sont très instables en conditions oxydantes. Le fait qu'ils soient transportés sous forme de grain et redéposés dans des roches sédimentaires indique que l'atmosphère au moment de leur transport était réductrice.

7.3.4. Les couches rouges

Les couches rouges sont des grès (roche sédimentaire détritique composée principalement de grains de quartz) dont les grains de quartz sont encroûtés d'hématite.

Cela signifie qu'ils ont été transportés et déposés dans un milieu (eau au contact avec l'atmosphère) oxydant, donc que l'atmosphère était oxydante.

On les trouve à partir de 2.2 Ga.

⇒ 2.2 Ga est donc une étape importante d'oxygénation de l'atmosphère.

Remarque : Les océans seraient restés anoxiques un peu plus longtemps que l'atmosphère.

7.4. Après 0,6 Ga.

Vers 0,7 et 0,6 Ga, un second palier d'oxygénation se produit et les océans après avoir été brièvement anoxiques pendant un épisode glaciaire (BIF) deviennent oxiques.

7.4.1. Enregistrement fossile

A la fin du Néoprotérozoïque, apparition des métazoaires qui nécessitent pour leur métabolisme une teneur en oxygène dissous dans l'océan similaire à l'actuelle.

7.4.2. Révolution du substrat :

Films bactériens avec des stratégies d'alimentation basées sur la consommation des films bactériens. Peu de traces et traces simples.

A la base du Cambrien en milieu peu profond, les traces augmentent et les biofilms disparaissent, on voit apparaître la bioturbation verticale.

D'abord dans les plates-formes,

Ensuite dans les fonds océaniques.

Oxygénation des océans ?

Perte de la capacité à fossiliser les corps mous

7.5. Coïncidences avec des perturbations du cycle du carbone:

Constance du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ depuis 3.5 voire 3.8 Ga, implique fixation de C par la Rubisco en milieu oxique ou anoxique.

⇒ création de pouvoir oxydant, et enfouissement de pouvoir réducteur.

Excursions du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ à 2.7 Ga : -50.

Indicateur de dégradation de la MO par méthanogenèse = méthanotrophie

⇒ la concentration d'oxydants soit SO_4^{2-} soit O_2 atteint un seuil suffisant pour oxyder le méthane.

⇒ La fin du pic peut s'interpréter comme une accumulation d'oxydant encore plus forte permettant de limiter la fermentation méthanique.

A 2.3 Ga excursion positive du $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates = augmentation conséquente de la fossilisation de matière organique (donc libération d' O_2): coïncide avec l'augmentation de la teneur en O_2 de l'atmosphère.

A 730-580 Ma, oscillations du $\delta^{13}\text{C}$ suivie par l'apparition des métazoaires.

Palier d'oxygénation (15% PAL) et fin des Océans anoxiques, début des Océans riches en sulfates.

A 300 Ma : Excursion positive du $\delta^{13}\text{C}$ carb et org qui coïncide avec la radiation des végétaux supérieurs sur les continents et impacte le cycle du CO_2 et de l' O_2 :

A partir du Silurien pour les mousses,
puis du Dévonien pour les végétaux ligneux
Avec une biomasse maximale au Carbonifère.

Production de MO réfractaire à la dégradation (lignine) donc enfouissement de plus de MO.

Conséquences :

Accumulation d' O_2 dans l'atmosphère : Insectes géants (libellules de 70cm d'envergure) et morceaux de bois carbonisés : feu de forêts donc % O_2 élevé (au moins 15%).

Développement des systèmes racinaires :

Accélération de l'altération continentale et du pompage du CO_2 atmosphérique.

⇒ initiation de la glaciation permo-carbonifère.

⇒ Augmentation de la fossilisation de matière organique souvent associée à une diminution de la teneur en CO_2 , à une oxygénation de la surface terrestre et à des glaciations (moins de CO_2 / moins d'effet de serre).