

## Il y a deux milliards d'années, des réacteurs nucléaires naturels

**Michel Crousilles (michel.crousilles@gmail.com)**

A notre époque où l'on parle beaucoup de l'énergie, de son « mix » le plus approprié dans lequel l'énergie nucléaire devrait avoir toute sa place, il est, je crois, intéressant de rappeler, à qui veut bien l'entendre, l'histoire fascinante des réacteurs nucléaires naturels d'Oklo (Gabon).

J'ai eu la chance, et le privilège dirais-je, de pouvoir les observer lors de ma toute première affectation comme géologue, juste après mes études. Mais avant d'aborder ce sujet sous l'angle géologique quelques rappels sur la radioactivité et un peu de physique nucléaire sont nécessaires.

### Radioactivité, décroissance nucléaire et fission

La chaleur interne de la terre est due à la radioactivité des éléments la constituant. C'est la décroissance radioactive spontanée des éléments tels que le potassium (responsable de la moitié de la radioactivité du corps humain), le thorium et l'uranium, pour ne citer que les plus abondants. En effet, pour certains éléments constitutifs de notre planète ils n'existent que sous forme d'isotopes (les isotopes d'un élément sont caractérisés par une différence du nombre de neutrons de leur noyau) instables dans le temps et qui par décroissance radioactive tendent vers une forme stable. C'est ce que l'on appelle communément la radioactivité.

La fission, quant à elle, n'est pas spontanée (du moins le croyait-on) et a été mise en évidence dans les années 30 par différentes équipes (américaine, allemande et française) après la découverte du neutron en 1932 par James Chadwick. C'est l'équipe française, dirigée par Frédéric Joliot, qui montra que la fission de l'uranium (après bombardement par des neutrons « lents »), suite aux premières observations de Enrico Fermi, était accompagnée de l'émission de trois nouveaux neutrons alors que le noyau se scindait en plusieurs fractions. Cette équipe en déduisit alors les concepts de bombe atomique et de réacteur nucléaire (brevets secrets déposés au début de 1939).

Le premier réacteur nucléaire réalisé par l'homme verra le jour en 1942, près de Chicago, avec l'équipe dirigée par Enrico Fermi. Ce fut la « pile CP1 » que l'on a cru longtemps être le premier réacteur nucléaire de fission.

### L'uranium naturel

L'uranium naturel, qui est l'élément naturel le plus lourd, est composé, aujourd'hui, de trois isotopes dans des proportions précises, et ce sur toute la terre : 99,2744% d'uranium 238 ( $^{238}\text{U}$ ), 0,7202% d'uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ) et 0,0054% d'uranium 234 ( $^{234}\text{U}$ ). C'est-à-dire qu'un minerai d'uranium, aujourd'hui, quelle que soit sa teneur, contient ces proportions d'isotopes.

Pour mémoire, seul l'uranium 235 est facilement fissile sous l'action des neutrons lents.

Ces isotopes sont tous radioactifs et se désintègrent avec le temps (décroissance nucléaire) jusqu'à arriver à une forme stable (l'uranium 238, par exemple, se transforme au final en plomb 206). Mais cette décroissance s'opère à une vitesse différente selon les isotopes. La période radioactive (temps nécessaire à la désintégration de la moitié de la quantité d'atomes) de l'uranium 238 est de 4,51 milliards d'années, soit en gros l'âge de la terre. Elle est de 705 millions d'années pour l'uranium 235. Il en résulte que la proportion d'uranium 235 dans l'uranium naturel augmente au fur et à mesure que l'on remonte dans le temps. Elle était proche de 17% à la création du système solaire et de l'ordre de 3,5%

il y a deux milliards d'années. C'est-à-dire qu'un minerai d'uranium, quelle que soit sa teneur, il y a deux milliards d'années contenait (environ) : 96,20% d'uranium 238, 3,50% d'uranium 235 et 0,03% d'uranium 234.

Nous rappellerons que la proportion de 3,5% d'uranium 235 est celle utilisée dans le combustible des centrales nucléaires actuelles à eau pressurisée (d'où un nécessaire enrichissement en uranium 235).

### La découverte des réacteurs nucléaires naturels

Elle remonte à juin 1972 dans l'usine d'enrichissement de Pierrelatte engagée alors dans des activités non civiles d'enrichissement d'uranium. Une mesure de contrôle de routine, par spectrométrie de masse, a révélé une anomalie puisque la proportion d' $^{235}\text{U}$  dans l'échantillon (en tête d'usine) n'était que de 0,7171%. La différence par rapport au résultat attendu - 0,7202% - était certes minime mais une recherche plus approfondie fut immédiatement engagée.

D'autres résultats sur plusieurs autres échantillons et sur tous les produits intermédiaires entre l' $\text{UF}_6$  (produit prêt à être enrichi) et le minerai, avec parfois des valeurs d' $^{235}\text{U}$  très faibles (jusqu'à 0,440%) furent mis en évidence et les recherches ont été orientées alors sur la provenance du minerai. Il apparut que tous les produits incriminés provenaient des deux mines d'uranium de Mounana et d'Oklo, près de Franceville au Gabon et plus spécifiquement de la zone nord du très riche gisement d'Oklo. L'hypothèse de très anciennes réactions de fission prit rapidement corps et des analyses sur place vinrent immédiatement la confirmer (recherche des descendants des produits de fission). La découverte fut alors rendue publique en octobre 1972 dans les Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences. La société d'exploitation (COMUF : Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville) accepta de cesser l'exploitation de la zone concernée et de laisser la place à une foule de chercheurs. Un projet Oklo fut mis en place par le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) ouvert ensuite aux chercheurs internationaux via l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et un nombre considérable de sondages percutants et carottés, mesures, analyses, études ... fut réalisé (Figure 1). Au final 16 réacteurs ont été mis en évidence dans la zone d'Oklo et un autre à Bagombé, à 30 km au sud-est.



Figure 1 : visite sur la carrière d'exploitation du gisement d'Oklo

## La géologie du gisement d'Oklo

Le gisement d'uranium d'Oklo s'inscrit dans le bassin de Franceville, situé au SE du Gabon (Figure 2), d'âge paléoprotérozoïque (2,1 milliards d'années), bassin peu déformé et non métamorphique. Il représente donc une archive exceptionnelle de cette période de la Terre où la vie commence à se développer.



Figure 2 : Situation géographique

La sédimentation de ce bassin est en discordance sur un socle archéen (2,7 milliards d'années) et son épaisseur est de 4000 m au maximum. Cinq unités ont été distinguées dans cette série sédimentaire déposée dans un bassin d'avant fosse.

Les cinq unités, FA à la base et FE au sommet, sont caractérisées par (Figure 3) :

- la formation FE correspond à la réinstallation d'une sédimentation détritique et montre une alternance de grès, pélites et ampélites silteuses,
- la formation FD est caractérisée par des dépôts volcano-sédimentaires avec ampélites (milieu marin) et schistes noirs siliceux contenant des niveaux de faciès volcanique,
- la formation FC montre une sédimentation chimique marine et volcanique peu profonde avec jaspe, dolomie et ampélites,

- la formation FB est une série transgressive marine constituée de schistes noirs avec une base essentiellement pélitique et ampélitique riche en matière organique alors que son sommet comprend surtout des grès fins massifs silicifiés,
- la formation FA est principalement constituée de dépôts continentaux grès-conglomératiques d'origine fluvio-deltaïque avec des grès grossiers conglomératiques caractéristiques d'un environnement fluvial, des grès moyens à fins, parfois pélitiques, caractérisant un environnement deltaïque et des grès fins pélitiques caractéristiques d'une zone de battements des marées.

Les minéralisations uranifères sont toutes circonscrites à la partie supérieure de la formation FA et ont été exploitées des années 1961 à 1999 ; 26000 tonnes d'uranium ayant été extraites à partir d'un minerai dont la teneur en uranium variait de 0,1 à 50%.

L'origine de l'uranium est rattachée au lessivage des roches fertiles (socle ou roches volcaniques) et à la percolation de ces solutions dans des pièges tectono-sédimentaires. La circulation de l'uranium dans le bassin s'est effectuée à la faveur de l'augmentation en oxygène de l'atmosphère à cette époque permettant sa solubilisation dans les eaux diagénétiques et sa circulation dans un réseau de fracturation et de porosité connexe propre à la formation grès-conglomératique de la base du bassin de Franceville. C'est la matière organique, par sa capacité de réduction chimique, qui a piégé l'uranium dans une couche lithologique avec une teneur moyenne de 0,4% d'U. Des amas lenticulaires,

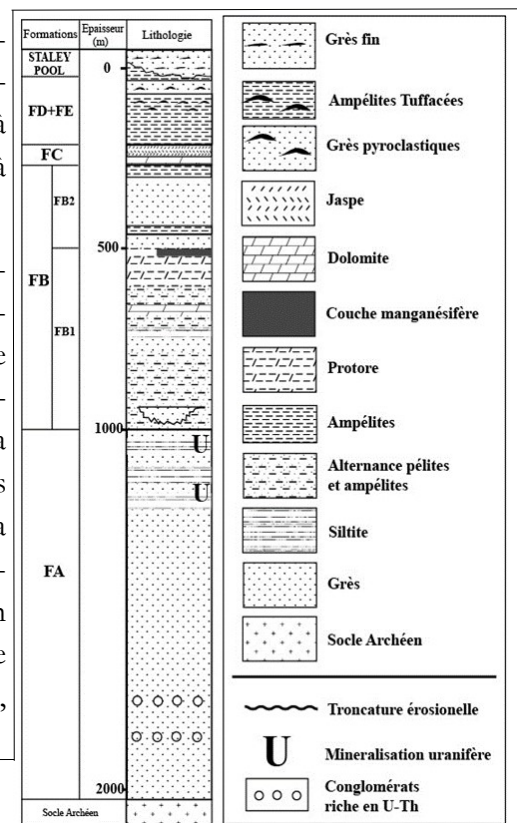


Figure 3 : Log stratigraphique synthétique de la série du Francevillien

de dimension variable, présente des teneurs fortes à très fortes de 2 à 50% d'uranium.

Le minerai est principalement constitué de quartz, d'argiles, de matière organique et de pechblende ( $UO_2$  amorphe) alors que dans les zones très riches c'est l'uraninite ( $UO_2$  cristallisé) qui est présente. La concentration en uranium dépend pour l'essentiel de la teneur en matière organique et de la porosité des grès.

Ce sont ces lentilles très riches en uranium qui ont donné naissance aux seize réacteurs naturels répertoriés sur cette zone et les seuls connus à ce jour dans le monde. La figure 4, ci-dessous, de la carrière principale d'Oklo montre, à mi-pente, la construction de conservation d'un des réacteurs naturels.

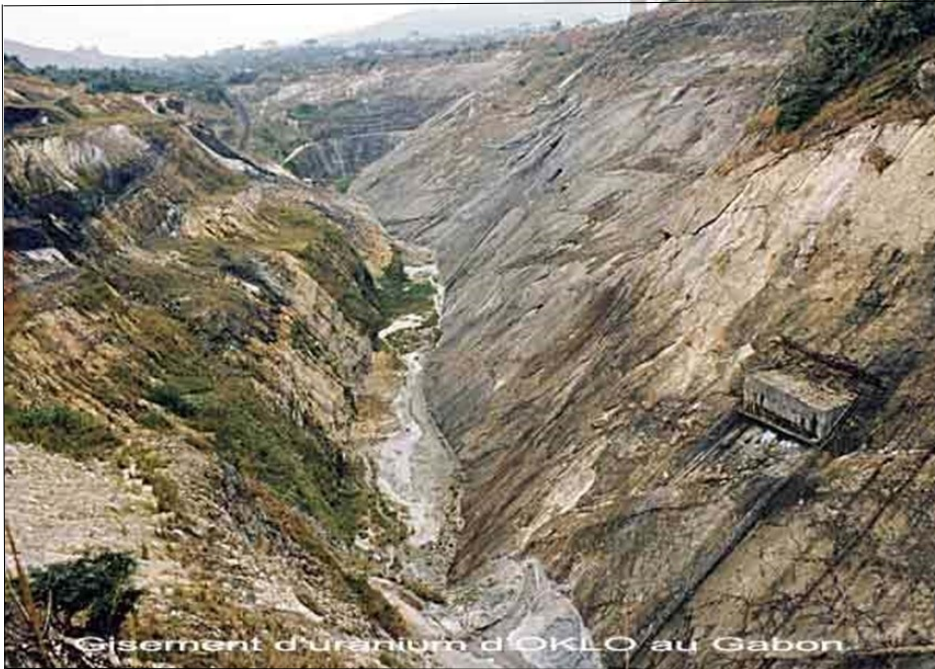


Figure 4 : Vue générale de la carrière d'exploitation d'Oklo avec sur la partie droite la construction de conservation de la zone de réaction 2.

Les réacteurs ont durant leur fonctionnement engendré de profondes modifications de la roche encaissante mais dans un rayon, somme toute, assez faible. Ces modifications sont essentiellement une forte désilicification des grès et la mise en place d'une importante matrice argileuse (Figure 5).

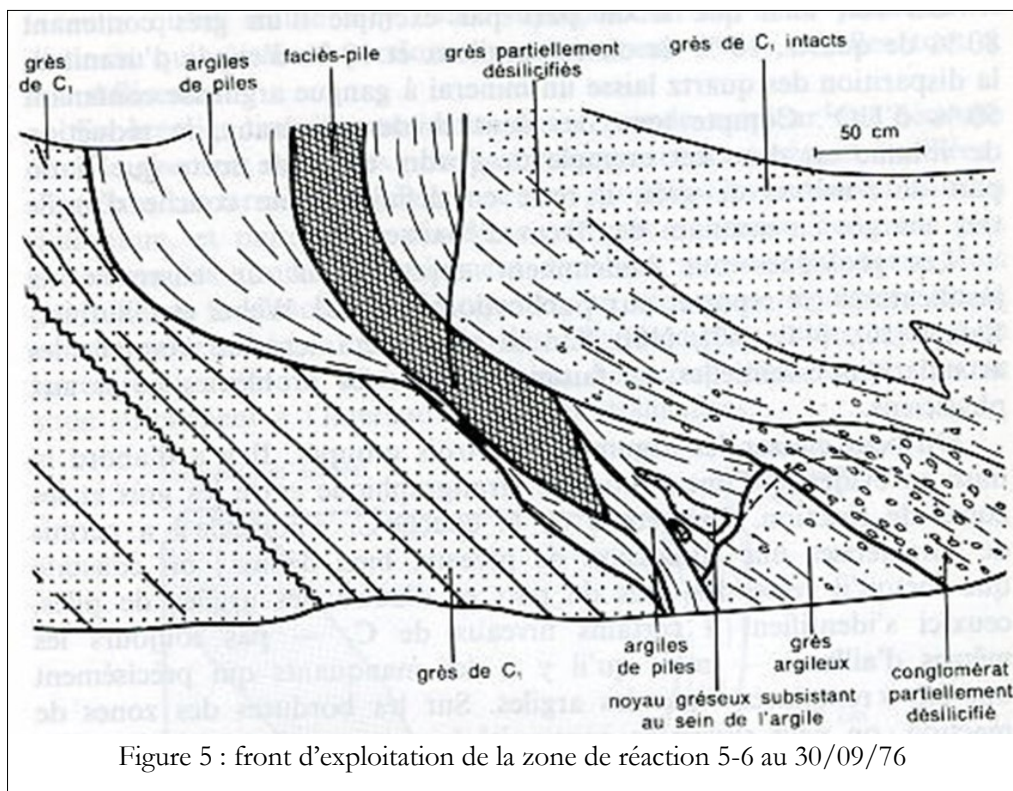


Figure 5 : front d'exploitation de la zone de réaction 5-6 au 30/09/76

## Fonctionnement des réacteurs naturels

Le remarquable état de conservation des réacteurs naturels fossilisés a permis des observations très fines et une bonne compréhension des processus à l'origine du démarrage spontané et du fonctionnement de ces différents réacteurs.

De très nombreuses études de géologie, géochimie et de neutronique permettent d'évaluer le démarrage des réactions de fission à  $-1950 \pm 30$  millions d'années. La durée de fonctionnement est estimée, selon les zones de réaction, de 150 000 à 850 000 ans.

Les réacteurs étaient « contrôlés » par plusieurs facteurs dont le principal était la température. En effet avec le dégagement d'énergie des réactions de fission la température s'élevait ce qui provoquait simultanément l'augmentation des captures de neutrons par  $^{238}\text{U}$  et la diminution de la densité de l'eau et donc de son pouvoir modérateur. Enfin la combinaison des très nombreuses études multidisciplinaires a conduit à estimer que les réacteurs de la zone nord d'Oklo ont fonctionné à plusieurs milliers de mètres de profondeur [les conditions de pression et de température étaient alors proches de celles d'un réacteur à eau pressurisée (REP)] alors que ceux plus au Sud ont fonctionné plutôt à une profondeur de 500 m [conditions proches d'un réacteur à eau bouillante (REB)].

## Conclusions

Au-delà de la fascination scientifique qu'a suscitée cette découverte projetons nous quelque peu dans le futur pour un sujet qui commence à animer notre actualité, je veux parler de l'entreposage des déchets ..... nucléaires ; sujet sur lequel la géologie est en première ligne.

Ainsi à Oklo, comme nous venons de le voir, les éléments lourds (U, Th, Pu) n'ont pas migré, pas plus que les terres rares (Zr, Ru, Pa, Rh, ...), et ce malgré les altérations significatives liées à des soulèvements tectoniques récents et à l'érosion qui ont porté ces réacteurs naturels près de la surface. Certes les éléments légers, et donc plus volatiles, n'ont pas été retrouvés (Kr, Xe, I, Ba, Sr, ...). La nature à Oklo a donc permis un confinement des éléments radioactifs pendant deux milliards d'années et ce sans emballage spécifique ni barrière ouvragée. Mais sachons raison (à tout le moins scientifique) garder, et nous ne dirons donc pas que Oklo constitue une vraie démonstration du bien fondé du stockage géologique profond des déchets nucléaires mais qu'il apporte une solide confiance en celui-ci.

Enfin pour plus de détails sur ce sujet passionnant, un article est à paraître dans le prochain numéro de nos Annales.

## Bibliographie

AIEA, 1975. Comptes-rendus colloque Libreville **STI/PUB/405** : 658p.

Barré B., 2005. Les réacteurs naturels d'Oklo (Gabon) : 2 milliards d'années avant Fermi. *Sciences* **2005-3** : 31-36.

Dubois M., 2017. Environnement de dépôts et processus de formation des carbonates de manganèse dans les black shales paléoprotérozoïques du bassin de Franceville (2.1 Ga, Gabon). *Thèse de doctorat de l'université de Montpellier* : 348p.

Onanga Mavotchy N., 2016. Etudes des paléomilieux protérozoïques (2,1-2,0 Ga) : la formation fb du bassin de Franceville au Gabon. *Thèse de doctorat de l'université de Poitiers* : 264p.