

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES NATURELS D'OKLO

RÉSUMÉ

En 1972, le physicien français Francis Perrin fit une découverte étonnante dans une mine d'uranium sur le site d'Oklo, au Gabon et qui révélera par la suite une très légère anomalie isotopique de l'uranium dans des échantillons d'oxyde d'uranium (UO_2) sur le minerai extrait de cette mine. En effet, il a été trouvé une teneur de 0,7171 % pour l'isotope ^{235}U alors que sa teneur normale aujourd'hui est de 0,7202 %. La différence est faible mais significative.

Une seule explication possible : d'une façon ou d'une autre, une réaction de fission nucléaire auto-entretenu pendant plusieurs années avait consommé une partie de cet isotope dans le minerai. En d'autres termes, Francis Perrin et son équipe avaient devant eux un réacteur nucléaire naturel éteint. Encore fallait-il parvenir à démontrer cette hypothèse.

Conditions requises à Oklo pour obtenir une réaction nucléaire

Pour que des réacteurs à fission contrôlée aient pu se déclencher, il fallait réunir les conditions suivantes :

- un combustible suffisamment riche en ^{235}U
- une masse critique suffisante dans une configuration adaptée
- un modérateur efficace
- un système de régulation extrêmement complexe
- un nombre suffisant de fissions spontanées permettant de produire un grand nombre de neutrons et que ces derniers réagissent avec d'autres noyaux fissiles

À Oklo, toutes ces conditions ont pu être réalisées :



- la première condition était assurée grâce au taux de ^{235}U qui était naturellement, à cette époque, de 3,44 % (un taux quasi identique à celui des centrales électronucléaires du type REP). Sur le site d'Oklo, l'oxyde d'uranium était originellement dispersé dans une couche située entre 3500 et 5000 mètres de profondeur, la teneur en uranium pouvant dans certaines zones dépasser 10 %.
- la seconde, par la présence d'une masse d'uranium suffisante dans certaines zones du gisement avec les teneurs appropriées.
- la troisième par la présence d'un modérateur, composée soit d'eau, soit de matières organiques. Les deux ont été présentes, principalement l'eau qui a pu être abondante quand les mouvements de remontée du bassin ont ouvert les failles existantes et en ont créé de nouvelles.
- enfin pour qu'il y ait réaction entretenue, il faut qu'il y ait des mécanismes de stabilisation et de compensation à long terme qui permettent aux réactions de se poursuivre malgré les modifications irréversibles du milieu. Or, à Oklo, le minerai contenait des poisons neutroniques tels le gadolinium et surtout le bore ce qui permettait de stabiliser le flux de neutrons neutronique.

Enseignements pour un stockage de déchets nucléaires

Les réacteurs naturels d'Oklo sont tous à l'arrêt depuis plusieurs centaines de millions d'années, mais ils intéressent les géologues car, durant leur activité, ils ont émis des radio-isotopes similaires aux produits de fission engendrés dans les centrales nucléaires actuelles, c'est-à-dire des « déchets nucléaires ». Aussi voit-on dans le site d'Oklo un modèle d'étude pour la gestion des déchets radioactifs par enfouissement.

Oklo constitue à cet égard une source d'information précieuse sur le comportement des éléments issus des réactions nucléaires en milieu naturel sur de très longues durées.

LIMINAIRE

« Il y a un milliard sept cents millions d'années, une partie de ce qui est maintenant la carrière d'uranium d'Oklo en République Gabonaise était spontanément le siège des mêmes réactions nucléaires en chaîne, auto-entretenues qui, de nos jours, sont produites dans les piles atomiques construites de main d'homme.

Cette conclusion s'est imposée après plusieurs semaines d'études aux ingénieurs du Commissariat à l'Énergie Atomique qui recherchaient l'origine d'anomalies de teneurs en isotope ^{235}U (l'isotope fissile de l'uranium) observées dans quelques lots de minerais d'uranium provenant du Gabon »¹.

Il est à noter que la possibilité théorique d'un tel phénomène avait été indiquée en 1956 par un chercheur américain mais aucune des recherches faites sur la composition isotopique de l'uranium naturel n'avait abouti à déceler de variations importantes.

1. LA DÉCOUVERTE

En 1972, le physicien français Francis Perrin fait une découverte étonnante dans une mine d'uranium sur le site d'Oklo, au Gabon. Une analyse de routine, réalisée au laboratoire de l'usine d'enrichissement de Pierrelatte, révéla en effet une très légère anomalie isotopique de l'uranium dans des échantillons d'oxyde d'uranium (UO_2) sur le minerai extrait de cette mine.

Il avait été trouvé une teneur de 0,7171 % pour l'isotope ^{235}U alors que sa teneur normale aujourd'hui est de 0,7202 %. La différence est faible mais significative. Des contrôles indiquèrent qu'il n'y avait pas eu d'erreur de mesure. En remontant la piste de ce minerai anormal on arriva à la mine d'Oklo et plus précisément à l'extrémité nord de celle-ci. On trouvera même un prélèvement sur une carotte provenant d'un forage où la teneur était aussi faible que 0,440 %.

Or appauvrir en ^{235}U un minerai d'uranium naturel, par des procédés physiques, n'est pas plus facile que de l'enrichir, et il faut de grandes usines pour produire de l'uranium enrichi en quantité significative.

Une seule explication possible : d'une façon ou d'une autre, une réaction de fission nucléaire auto-entretenu pendant plusieurs années avait consommé une partie de cet isotope dans le minerai. En d'autres termes, Francis Perrin et son équipe avaient devant eux un réacteur nucléaire naturel éteint.

Encore faut-il parvenir à démontrer cette hypothèse. Les faits étant tellement anciens, tous les produits de fission ont disparu, ils se sont transformés en produits stables ; ce n'est que par l'analyse isotopique de ces derniers que l'on peut remonter à l'origine des différents isotopes d'un même corps, n'ayant pas les mêmes parents.

L'origine des anomalies a pu être déterminée sans aucun doute, car on obtenait pour un certain nombre d'éléments des rapports isotopiques caractéristiques de la fission.

Seules des réactions nucléaires en chaînes au sein du gisement pouvaient les expliquer. Plus tard, on devait trouver dans une partie du gisement non exploitée des zones à haute teneur en uranium, qui avaient été le siège de fissions, en très bon état de conservation².

De nombreux éléments issus des réactions étaient restés en place et dans des distributions représentatives, ce qui pouvait permettre une étude minutieuse des phénomènes. Pour cela des coupes très fines, comme sur un chantier archéologique, ont été pratiquées, et des milliers d'analyses isotopiques ont été effectuées sur des prélèvements.

Il a pu être déterminé, sans aucun doute possible, qu'il y a 2 milliards d'années de nombreux réacteurs nucléaires spontanés ont fonctionné durant plus de 400 000 ans sur le site d'OKLO.

Depuis, 16 autres réacteurs, situés entre 12 et 250 mètres de profondeur, ont été identifiés sur le site d'Oklo, dont certains remontent à près de 2 milliards d'années. Ces réacteurs sont tous à l'arrêt depuis plusieurs centaines de millions d'années, mais ils intéressent les géologues car, durant leur activité, ils ont émis des radio-isotopes similaires aux produits de fission engendrés dans les centrales nucléaires actuelles, c'est-à-dire des « déchets nucléaires ». Aussi voit-on dans le site d'Oklo un modèle d'étude pour la gestion des déchets radioactifs par enfouissement.

En 2000, des chercheurs de l'université Washington, à Saint-Louis, ont ainsi montré que certains minéraux (des phosphates) dans le réacteur 13 d'Oklo avaient piégé des isotopes radioactifs du xénon dans des proportions plus importantes que n'importe quel autre minéral sur Terre. À présent, Evan Groopman, du laboratoire de

¹ D'après un document CEA octobre 1972

² Colloque de Libreville IAEA SM 204 Juin 1975

recherche navale américaine, à Washington, et ses collègues ont découvert qu'un métal présent dans le même réacteur, le ruthénium, a piégé des radio-isotopes de césium et de baryum particulièrement difficiles à traiter, notamment du césium 135 et 137.



Gisement d'uranium d'OKLO au Gabon

2. CONDITIONS REQUISES POUR LE DÉCLENCHEMENT D'UNE RÉACTION NUCLÉAIRE

Pour que des réacteurs à fission contrôlée (réaction du type de celle utilisée dans le parc électronucléaire français) puissent se déclencher, il faut réunir les conditions suivantes :

- un combustible suffisamment riche en ^{235}U
- une masse critique suffisante dans une configuration adaptée
- un modérateur efficace
- un système de régulation extrêmement complexe

Le déroulement des réactions en chaîne nécessite d'une part qu'il y ait suffisamment de fissions spontanées produisant un grand nombre de neutrons et d'autre part que ces derniers puissent réagir avec d'autres noyaux fissiles. À Oklo :

- la première condition était assurée grâce au taux de ^{235}U qui était naturellement, à cette époque, de 3,44%. Ce taux est très proche de celui qui est utilisé dans nos centrales électronucléaires
- la seconde est réalisée par la présence d'une masse d'uranium suffisante dans certaines zones du gisement où des teneurs supérieures à 10% sont fréquentes
- enfin il fallait un modérateur, soit de l'eau, soit des matières organiques. Les deux ont été présentes, principalement l'eau qui a pu être abondante quand les mouvements de remontée du bassin ont ouvert les failles existantes et en ont créé de nouvelles

Pour comprendre la genèse et le déroulement de ces réacteurs, il faut retourner aux conditions géologiques de leur formation.

Le minerai d'uranium se trouve dans une épaisse série sédimentaire formée de grès et de pélites (argiles grossières). L'oxyde d'uranium était originellement dispersé dans une couche de grès grossiers entre 3500 et 5000 mètres de profondeur, la teneur en uranium pouvant dans certaines zones dépasser 10 %. Des mouvements tectoniques vont remonter l'ensemble du bassin sédimentaire, et y créer de nombreuses failles.

La proportion en isotopes 235 et 238 de l'uranium est une donnée physique, si l'âge estimé du gisement est le bon, car les deux sont liés.

Les réactions ont démarré dans des amas qui, aujourd'hui, ont la forme de galettes très irrégulières dont l'épaisseur n'est que de quelques décimètres mais qui, dans les autres dimensions, peuvent dépasser les vingt mètres.

Les géologues se sont longuement interrogés sur l'origine des lentilles argileuses très chargées en uranium dans lesquelles les réactions s'étaient développées. Ils ont fini par comprendre que ce n'était pas du tout l'état primitif du minerai ; au départ celui-ci était constitué par des grès avec des teneurs exceptionnelles. Les mouvements de convection créés par les courants de chaleur ont dissous tous les quartz, ne laissant subsister que le ciment argileux, d'où la formation de ces lentilles très riches.

Bien que de faible ampleur à l'échelle du gisement, ce fut un phénomène important qui dégagait autant d'énergie qu'une centrale de 1000 MWe pendant 10 ans mais, ici, beaucoup plus lentement, de l'ordre du demi million d'années. Cette énergie chauffa l'eau qui, devenue agressive, a dissous les quartz des grès encaissant, permettant dans un premier temps la venue d'un plus grand volume d'eau pour une meilleure modération, suivie d'un effondrement des éponges qui, en chassant l'eau, arrêtaient les réactions.

Les études ont montré qu'il y avait eu pendant les réactions de très grandes quantités d'eau, ce qui a nécessité une porosité de 30 à 40 %. Or, même en faisant appel à des réactions tectoniques, de tels chiffres paraissent difficiles à admettre. Ils s'expliquent en revanche s'il s'agit de matériaux venant de perdre une partie de leur substance.

Pour qu'il y ait réaction entretenue, il faut qu'il y ait des mécanismes de stabilisation et des mécanismes de compensation à long terme qui permettent aux réactions de se poursuivre malgré les modifications irréversibles du milieu ; cela peut paraître invraisemblable, c'est toutefois assez simple.

Le minerai contenait des poisons neutroniques tels le gadolinium et surtout le bore. Au départ, la criticité a été atteinte malgré ces captures importantes mais, les poisons se détruisant plus vite que l'uranium, les réactions se seraient emballées si un autre mécanisme n'était intervenu : c'est le grand dégagement de chaleur qui abaisse la densité de l'eau. Le flux de neutrons se trouvait stabilisé à un niveau qui, compte tenu des conditions d'évacuation de la chaleur, conduisait à des températures assurant la criticité. Ce schéma général doit être adapté aux conditions locales de fonctionnement de chaque zone de réaction.

Un point important concernant Oklo comme analogue d'un site de stockage est la température régnant dans le site à l'époque du fonctionnement des réacteurs.

En cristallisant, les minéraux peuvent piéger un peu du liquide qui les baigne. Dans les conditions normales, beaucoup de ces inclusions sont diphases. La température d'homogénéisation révèle la température minimale à la fermeture de l'inclusion. Sur les bordures gréseuses des réacteurs, on a trouvé des filons de quartz qui avaient piégé des fluides à plus de 370°C. Dans le cœur du réacteur, il devait sûrement régner une température bien supérieure.

3. ENSEIGNEMENTS POUR UN STOCKAGE

Un milieu ouvert, en perpétuelle modification, ne peut constituer un modèle de site de stockage des déchets radioactifs. De ce point de vue, Oklo n'est pas une référence. En revanche, c'est une source d'information extraordinaire sur le comportement des éléments issus des réactions nucléaires en milieu naturel sur de très longues durées.

Que trouve-t-on à Oklo à ce sujet ?

Dans l'uraninite restante il a été découvert des agrégats métalliques contenant du ruthénium, du rhodium, du palladium, du plomb ainsi que des inclusions à tellure, bismuth, arsenic et soufre. Ces deux types d'agrégats ressemblent à ceux observés dans les combustibles irradiés. Leur ségrégation date des réactions nucléaires et, malgré des conditions peu favorables, ils sont toujours présents.

On retrouve à Oklo des traces de radiolyse de l'eau : on a observé de l'oxygène et de l'hydrogène libres dans des inclusions fluides de cristaux de quartz en bordure du cœur du réacteur N°10. Toutefois le cœur des réacteurs est resté pauvre en oxygène comme en témoigne l'abondance du plomb métallique, de la galène et de la coffinite (un silicate d'uranium).

Cet environnement réducteur a subsisté parce que de la matière organique était abondante dans le gisement. Ce rôle de prévention pourrait favoriser le choix d'un milieu argileux, où se rencontre généralement une petite proportion de matériaux organiques.

Les argiles qui entourent les réacteurs d'Oklo sont parsemées de grains de quartz corrodés puisque résultant de la désilicification des grès d'origine. On y a observé, en bordure du réacteur N°10, un enrichissement en uranium-235. Une partie des éléments radioactifs a été lessivée par les solutions chaudes du foyer et entraînée vers les argiles. Là, les minéraux en cours de cristallisation ont incorporé à leur réseau le plutonium-239 précurseur de l'uranium-235.

L'analyse des réacteurs Gabonais montre que la libération des éléments radioactifs du combustible utilisé résulterait plus d'une dissolution de surface que d'une transformation en masse, ce qui est favorable pour la sûreté.

A Oklo, l'uraninite s'est peu modifiée depuis l'arrêt des réacteurs, l'uranium s'est lentement désintégré en donnant du plomb alors que les descendants des éléments transuraniens demeuraient dans le réseau. Les minéraux argileux entourant les foyers ont adsorbé l'uranium migrant, malgré de faibles qualités d'adsorption, bien inférieures à celles des argiles prévues pour les sites de stockages.

En outre F. Gauthier-Lafaye a signalé la présence d'apatites (minéraux phosphatés) contemporaines des réactions nucléaires. On y retrouve des inclusions solides d'uraninite enrichie en produits de fission; leur composition isotopique montre qu'elles avaient incorporé du plutonium. Cette incorporation est contemporaine des réactions et la rétention a été durable.

Oklo nous dit que si nous savons utiliser les informations qu'il nous donne, l'enfouissement des déchets apparaît comme l'une des solutions les plus sûres... (voir [fiche argumentaire GAENA "Les déchets radioactifs"](#)).

C'est normal : c'est la plus naturelle, puisque déjà employée il y a 2 milliards d'années, et elle remplit encore ses fonctions aujourd'hui.

4. CONCLUSION

Le 25 septembre 1972, l'Administrateur du CEA, André Giraud, rompt le secret qui entourait les premières analyses, et annonce qu'un réacteur nucléaire vieux de 2 milliards d'années a été découvert au GABON, sur le site de la mine d'uranium d'OKLO.

Les travaux effectués par le CEA ont été poursuivis, dans le cadre de la Communauté Européenne, dans une deuxième phase d'études, avec la coopération de six partenaires : les agences de gestion des déchets de Suède, d'Espagne et l'ANDRA ainsi que le CNRS et deux universités espagnoles.

Ayant débuté en 1991, elles se sont poursuivies jusqu'au début des années 2000, alors qu'en fin 1997 la société minière a fermé le site qui a été de nouveau envahi par les eaux.

Au-delà des enseignements précieux sur le comportement à long terme d'un site de stockage géologique de déchets, OKLO a fait la démonstration, s'il en était encore besoin, que le recours à la fission nucléaire était un moyen parfaitement naturel pour produire de l'énergie !

5. SOURCES

[Réf. 1] Wikipédia. Réacteur naturel d'Oklo.

[Réf. 2] Réacteur nucléaire d'Oklo – Définitions et explications. 2022. <http://Techno-Science.net>

[Réf. 3] Oklo, le seul réacteur nucléaire naturel connu au monde vieux de deux milliards d'années. 10 août 2018, Laura Gil. <https://www.iaea.org/>

[Réf. 4] [Les réacteurs nucléaires naturels d'Oklo \(Gabon\)](#) : 2 milliards d'années avant Fermi ! Bertrand Barré
' Président European Nuclear Society), Sciences, 2005-3, pp. 31-36