

PAR HÉLÈNE GUILLEMOT

# UNE CENTRALE NUCLÉAIRE DE DEUX MILLIARDS D'ANNÉES AU SECOURS DE NOS DÉCHETS RADIOACTIFS ?



Au cours du Précambrien, des réacteurs nucléaires se sont spontanément allumés sous la terre. Bien conservés jusqu'à notre époque, certains d'entre eux ont résolu le problème du stockage des résidus de la fission nucléaire. Nous enseigneront-ils comment nous débarrasser de nos propres déchets radioactifs ?

**I**l y a deux milliards d'années, quelque part à 3 000 mètres sous terre, fonctionnaient... plusieurs dizaines de réacteurs nucléaires. Des réacteurs naturels qui ressemblaient comme deux gouttes d'eau aux centrales aujourd'hui les plus répandues, utilisant

de l'uranium enrichi et de l'eau sous pression. En fait, l'existence de réacteurs nucléaires précambriens n'est pas tout à fait une surprise : un physicien américain avait envisagé une telle éventualité dès 1956. Ce qui, en revanche, relève





presque du miracle, c'est que ces réacteurs fossiles aient été retrouvés après deux milliards d'années de soulèvements de montagnes, de dérives et submersions de continents, de séismes, de fractures, de ravinements, d'érosions et d'innombrables autres remaniements géologiques. Ils nous sont pourtant parvenus presque intacts dans la mine d'uranium d'Oklo, près de Franceville, au Gabon.

Dès 1972, date de la découverte du premier réacteur nucléaire naturel, physiciens et géologues se sont emparés de cette curiosité unique au monde. Ils ont ainsi pu reconstituer toute l'histoire géologique locale. Après avoir regardé ces réacteurs fossiles comme de purs objets d'étude pour la recherche fondamentale, on compte maintenant sur eux, en tant qu'"analogues naturels" de nos centrales nucléaires, pour nous aider à résoudre l'épineux problème du stockage de nos déchets radioactifs.

La fission nucléaire – on le sait – produit des déchets qui resteront radioactifs pendant parfois plu-

### Seize réacteurs nucléaires fossiles

Dans la carrière de la mine d'uranium d'Oklo, au Gabon, on a mis au jour 16 réacteurs nucléaires fossiles, qui ont fonctionné il y a 2 milliards d'années. Après avoir été étudiés, certains de ces foyers ont été détruits lors de l'exploitation de la mine, mais les chercheurs ont tenu à conserver "en souvenir" une petite portion d'une zone de réaction, que l'on voit au premier plan (flèche) accrochée au flanc droit de la carrière.

sieurs milliers, voire plusieurs dizaines de milliers d'années, engageant notre avenir sur des échelles de temps qui paraissent inaccessibles. Comment stocker en toute sécurité des matières si dangereuses pendant tous ces siècles ? Ni les modélisations mathématiques, ni les expériences ne sont capables de voir si loin.

C'est là que les réacteurs fossiles, grâce à leur très longue histoire, nous font accéder aux conséquences futures de la fission nucléaire. Les roches d'Oklo apportent en effet le témoignage concret du



cheminement souterrain des déchets radioactifs au cours des ères géologiques. Avant d'en arriver là, revenons à l'histoire de cette découverte, qui vaut son pesant d'uranium !

Pierrelatte, juin 1972. Au cours d'une analyse de routine, un technicien du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) constate une très légère anomalie dans la composition isotopique d'un échantillon d'uranium. Il existe, en effet, deux types (ou isotopes, (voir encadré ci-dessous) d'uranium, le 235 et le 238, différant seulement par le nombre de neutrons que contiennent leurs noyaux : la teneur normale en isotope 235 dans l'uranium naturel est la même partout sur Terre, très précisément 0,720 %. Or, notre technicien, très scrupuleux, trouve 0,7171 % d'uranium 235 (1)... L'écart est mince, mais sans nul doute anormal. On s'aperçoit bientôt que de nombreux autres échantillons d'uranium présentent des taux exceptionnellement bas...

Après une enquête minutieuse, remontant la chaîne de traitement de l'uranium à travers plusieurs usines, un responsable du CEA finit par trouver la source unique de tout l'uranium déficient : la Compagnie des mines d'uranium de Franceville, au Gabon. Il s'agissait donc bien

droits 0,44 % d'uranium 235 ! Manifestement, le phénomène était de grande ampleur.

Dès août 1972, après deux mois d'investigations rondement menées, il était clair que des réactions nucléaires en chaîne s'étaient produites spontanément, il y a très longtemps, à Oklo. Car, si la quantité d'uranium 235 était plus faible que la normale, c'était qu'une partie avait fissionné. Hypothèse très vite brillamment confirmée : on retrouva dans le minerai des sous-produits de fission. En effet, quand un noyau d'uranium se casse, il reste des "morceaux" dont les compositions isotopiques sont très différentes de celles des éléments naturels : or les produits de fission d'Oklo présentaient exactement la composition isotopique prévue par la théorie, parfois à quelques millièmes près.

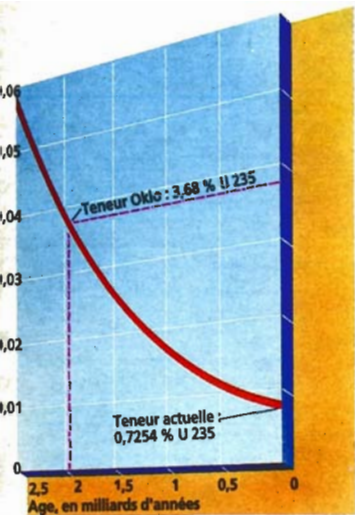
Comment des réactions de fission en chaîne ont-elles pu se déclencher naturellement ? La première condition nécessaire est un taux d'U 235 (le seul isotope "fissile") suffisant. De nos jours, le taux naturel de 0,72 % est trop faible, ce qui oblige à enrichir l'uranium en isotope 235 avant de l'utiliser dans nos centrales nucléaires. En revanche, dans un très lointain passé, cette condition était remplie : la teneur en U 235 était alors plus élevée que maintenant. En effet, les deux isotopes de l'uranium sont radioactifs, c'est-à-dire se désintègrent spontanément, très lentement, mais comme l'uranium 235 se désintègre un peu plus vite que le 238, il y avait donc, proportionnellement, plus d'U 235 autrefois qu'aujourd'hui. Il y a deux milliards d'années, cette teneur s'élevait en effet à 3,7 %, sensiblement comme dans nos centrales nucléaires actuelles.

Toutefois, pour que la réaction en chaîne se maintienne (voir encadré p. 50), il faut aussi une concentration et une quantité d'uranium totales suffisantes pour qu'un neutron éjecté par l'éclatement d'un noyau d'U 235 ait de bonnes chances de rencontrer un noyau semblable. Ensuite, pour que les noyaux en question se brisent, il leur faut absorber les neutrons ; ceux-ci doivent donc avoir une faible énergie et être ralentis, par de l'eau par exemple. Enfin, il ne doit pas y avoir trop d'éléments "poisons", gros capteurs de neutrons, comme le bore. Toutes ces conditions – très riche teneur en uranium, présence d'eau, faible quantité de "poisons" – avaient été réunies jadis à Oklo.

Enfin, il ne doit pas y avoir trop d'éléments "poisons", gros capteurs de neutrons, comme le bore. Toutes ces conditions – très riche teneur en uranium, présence d'eau, faible quantité de "poisons" – avaient été réunies jadis à Oklo.

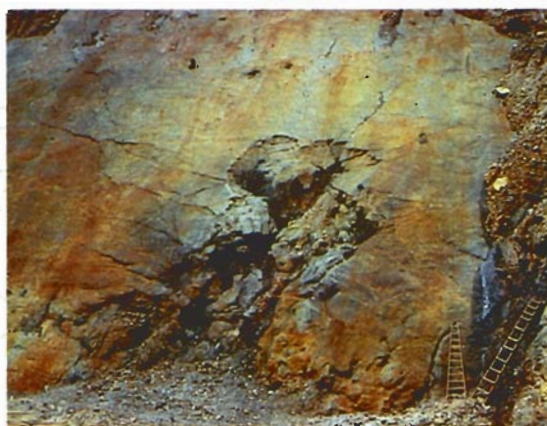
### De l'uranium naturellement "riche"

L'uranium naturel existe sous la forme de deux isotopes, l'uranium 235, le seul "fissile", et l'uranium 238. Tous deux sont radioactifs : U 238 se désintègre en 4,5 milliards d'années, tandis que U 235 disparaît plus vite, en 700 millions d'années. La proportion d'U 235 dans l'uranium naturel décroît donc au fil du temps (courbe ci-contre). Aujourd'hui, le taux d'U 235 n'est que de 0,72 %, mais il s'élevait à 3,68 % il y a 1,95 milliard d'années : cette teneur, très proche de celle de l'uranium enrichi de nos centrales nucléaires, a permis à cette époque le déclenchement de réactions de fission nucléaire en chaîne.



de minerai naturel, provenant très exactement de l'extrémité nord du gisement d'Oklo. Il s'avéra que tout l'uranium issu de cette mine, depuis son ouverture un an et demi plus tôt, avait une teneur isotopique inférieure à la normale, atteignant par en-

(1) On peut se demander pourquoi on mesurait des teneurs isotopiques aussi bien connues : ces mesures n'avaient évidemment pas pour objet la vérification de ces teneurs, mais le calibrage d'étalons avant enrichissement de l'uranium.



### L'empreinte du cœur d'un réacteur naturel

Le réacteur nucléaire fossile proprement dit (la zone où se sont déroulées les réactions) s'étend sur une faible épaisseur (**en rouge sur la coupe géologique ci-dessus**) parallèlement à l'inclinaison du terrain. La concentration en uranium y fut très élevée, pouvant atteindre 60 % de la masse rocheuse. L'argile fine qui entoure cette zone de réaction, dont l'origine est longtemps demeurée mystérieuse, a été fabriquée par le réacteur lui-même ! A l'origine, il y avait du grès, mais les premières réactions nucléaires, créant des points chauds, ont provoqué un mouvement de convection de l'eau qui circulait là. L'eau chaude a dissout et emporté la silice du grès, n'y laissant que l'argile. Du même coup, l'uranium de la roche se trouvait encore plus concentré, et la réaction nucléaire s'étendait plus loin... Ce départ de la silice a fini par provoquer des effondrements au cœur de la roche (**photo ci-contre**) : le dessin du creux sur la paroi moule parfaitement la forme d'un réacteur naturel qui se trouvait juste au-dessus.

L'exploitant minier ayant accepté de prêter momentanément au CEA une partie du gisement d'Oklo, les fouilles scientifiques débutèrent en mars 1973. Et, ô merveille, on découvrit bientôt des foyers de réaction pratiquement intacts. D'abord deux zones, puis quatre autres, et encore trois autres en 1978. D'autres foyers ont été trouvés plus récemment et l'on en compte seize au total à ce jour.

A quoi ressemble un réacteur nucléaire fossile ? Vu de l'extérieur... à pas grand-chose, d'autant que la plupart sont souterrains (certains ont été mis au jour par l'exploitation). Une coupe de terrain donne un meilleur panorama de la situation (**voir dessin ci-dessus**). La couche uranifère, inclinée à 45° dans un terrain sédimentaire de grès, est épaisse de 5 à 8 mètres. Au sein de cette couche, les zones qui ont été le siège de réactions de fission mesurent typi-



## COMMENT S'ENTRETIENT UNE RÉACTION EN CHAÎNE

L'énergie nucléaire provient de la fission d'un élément naturel, l'uranium. Tous les noyaux des atomes d'uranium possèdent 92 protons, mais certains ont 143 neutrons, alors que d'autres en ont 146. L'existence de ces deux types d'uranium, ou "isotopes", conditionne l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Presque tous les éléments naturels existent sous la forme de plusieurs isotopes. Dans le cas de l'uranium, il y en a deux principaux : l'uranium 238 (U 238) et l'uranium 235 (U 235), ces nombres étant la somme du nombre de protons (92) et du nombre de neutrons (respectivement 146 et 143). Il existe un troisième isotope, U 234, radioactif lui aussi, mais sa présence est négligeable puisqu'il n'existe qu'à l'état de traces infinitésimales (0,006 %).

L'uranium 235 est fissile, c'est-à-dire que son noyau peut se casser en deux morceaux en dégageant une énergie énorme, alors que l'U 238 ne fissionne pas. Toutefois, l'U 235 ne se brise pas spontanément : il a besoin d'un coup de pouce, en l'espèce l'arrivée d'un neutron (1) qui rompt le fragile équilibre du noyau (2). Celui-ci se scinde alors violemment en deux morceaux (3 et 4), éjectant en outre deux ou trois neutrons libres (5, 6 et 7). Si l'un de ces neutrons émis lors de la fission rencontre un autre noyau d'U 235 sur son chemin (8), il sera absorbé, provoquant à son tour la fission du noyau, et l'éjection de nouveaux neutrons, qui feront fissionner de nouveaux noyaux d'uranium 235, et ainsi de suite...

C'est la fameuse réaction en chaîne, entretenue dans les

centrales nucléaires. Elle libère une énergie considérable : la fission complète d'un kilo d'uranium 235 produit autant d'énergie que la combustion de 2 500 tonnes de pétrole ! Mais la fission produit aussi des "morceaux" issus de la désintégration de l'atome d'uranium : les tristement célèbres déchets, très instables et donc fortement radioactifs.

Pour entretenir la réaction en chaîne, encore faut-il qu'à chaque fission, au moins un des neutrons éjectés soit absorbé par un autre noyau d'uranium 235. Or l'isotope 235 est très rare : il constitue seulement 0,72 % de l'uranium naturel, tout le reste étant formé d'uranium 238, non fissile. Un neutron a donc cent quarante fois plus de chances de rencontrer un noyau d'U 238 qu'un noyau d'U 235 ! C'est pourquoi il est

indispensable d'enrichir l'uranium en isotope 235.

Mais l'enrichissement coûte cher, on ne peut le pousser trop loin : la teneur en U 235 ne dépasse pas 3 à 3,5 % dans la plupart des réacteurs. On a donc recours à un autre stratagème pour poursuivre la fission : on ralentit les neutrons. En effet, des neutrons de faible énergie (on dit "thermiques") se laissent beaucoup plus facilement absorber par les noyaux d'uranium 235 que par ceux d'uranium 238.

Cette préférence compense l'infériorité numérique de l'isotope fissile et permet à la réaction en chaîne de se propager. L'eau est un des meilleurs ralentisseurs de neutrons : c'est elle qu'on utilise, en France notamment, dans les centrales de type PWR.

La réaction en chaîne est

quement 10 m de côté sur quelques centimètres d'épaisseur. L'uranium, sous forme de dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>) ou uraninite, atteint souvent une concentration de 40 %, voire de 60 %.

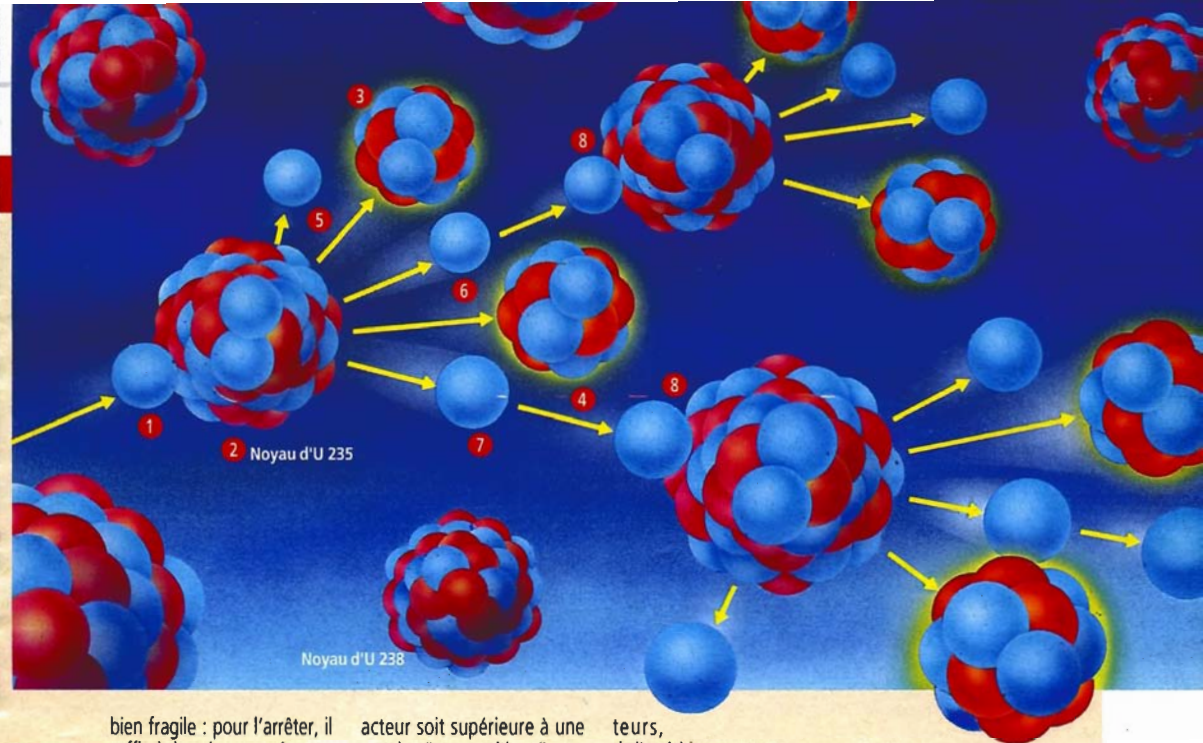
L'état de conservation exceptionnel de certaines zones de réaction a permis de recueillir des informations très complètes et de reconstituer l'histoire des réacteurs. Avec le temps, les débris de fission, hautement radioactifs, se sont transmutés en d'autres éléments, eux-mêmes radioactifs, qui se sont transformés à leur tour, et ainsi de suite jusqu'à aboutir à un élément stable.

Seuls subsistent aujourd'hui ces éléments stables de fin de chaîne. Et leur composition isotopique, dépendant des conditions de la fission au départ, nous renseigne, notamment, sur les neutrons de cette lointaine époque : leur nombre, leur vitesse, la proportion de ceux qui étaient ralentis, la distance moyenne qu'ils parcouraient, etc. On peut en déduire, par exemple, la quantité d'eau présente pour ralentir ces neutrons et dont il ne reste évidemment rien. Cette partie de la physique (la neutronique), développée pour les réacteurs industriels et qui étudie en détail tous les paramètres

de la fission, a permis de retracer l'histoire des réacteurs fossiles d'Oklo (2).

Il y a 1,970 milliard d'années, de l'uranium s'est trouvé concentré en grandes quantités à Oklo. Dans ces zones, la fission s'est immédiatement "allumée", et la réaction en chaîne a commencé à se propager. La date de cet événement, calculée par des méthodes radioactives (c'est la moindre des choses !), est confirmée par l'histoire géologique des sédiments. N'allez cependant pas imaginer de gigantesques foyers libérant une énergie phénoménale. Les réacteurs précambriens ont fonctionné très longtemps, mais au ralenti : selon les zones, les réactions en chaîne ont duré entre cent mille et huit cent mille ans. Pendant tout ce temps, elles ont produit à peine l'énergie fournie par un de nos réacteurs industriels pendant un an (soit de l'ordre de 15 000 mégawatts-an, pour les zones les plus réactives). La puissance atteinte dans ces foyers

(2) Un livre entièrement consacré à ce sujet a été écrit par Roger Naudet, physicien du CEA, premier chef de projet du programme de recherche sur Oklo - Oklo : des réacteurs nucléaires fossiles, collection du Commissariat à l'énergie atomique, chez Eyrolles, Paris. 695 pages.



bien fragile : pour l'arrêter, il suffit de la présence, même en très petites quantités, de "poisons" absorbant fortement les neutrons, tels que le bore. Enfin, il faut que la quantité d'uranium présent dans le ré-

acteur soit supérieure à une certaine "masse critique" : en-deçà de cette masse, trop de neutrons s'échappent du réacteur par rapport au nombre absorbé. Cette masse critique dépend de la forme des réac-

teurs, de l'enrichissement, etc.

En résumé, enrichissement en isotope 235, ralentissement des neutrons, très faibles quantités de poisons capturant ces neutrons, et

masse critique suffisante, telles sont les quatre conditions indispensables à la poursuite de la chaîne des réactions de fission.

était en effet infime : quelques dizaines de watts, l'équivalent d'une ampoule électrique !

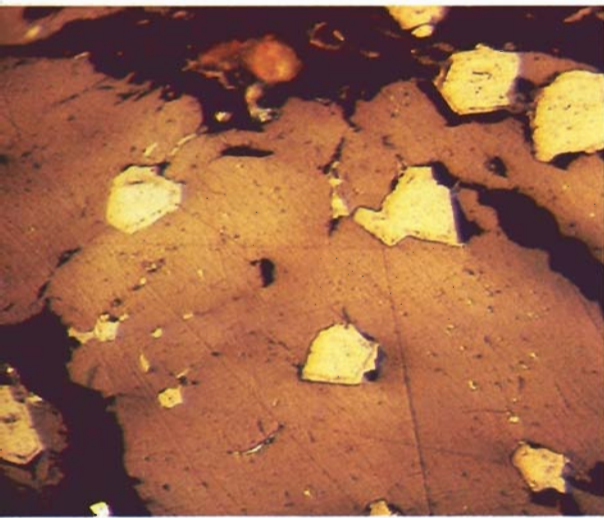
Enterré à quelque 3 000 mètres de profondeur, le cœur de ces réacteurs était soumis à des pressions élevées permettant à la température de monter jusque à plusieurs centaines de degrés. Or, pour que la réaction en chaîne se poursuive, l'eau doit avoir une densité minimale pour ralentir les neutrons. La température montant, la densité de l'eau diminue : il existe donc une température maximale au-delà de laquelle la densité de l'eau est trop faible, et les réactions de fission s'arrêtent. Toutefois, plus la pression est forte, plus cette température critique est élevée : à Oklo, elle devait atteindre 400 °C pour les réacteurs les plus puissants.

A l'intérieur des roches, la chaleur s'évacuait mal, ce qui explique la faible puissance produite. Car, lorsque l'intensité des réactions augmentait, la température s'élevait aussitôt. La densité de l'eau diminuait alors, et la réaction en chaîne tendait à s'éteindre. La température baissait à son tour, la densité de l'eau augmentait et les réactions pouvaient se poursuivre, et ainsi de suite. C'est ainsi que l'évacuation de la chaleur par l'eau a régulé le

fonctionnement des réacteurs. L'entretien des réactions en chaîne, contrôlé par l'eau, dépendait donc de la porosité et de la perméabilité des roches. Bien que complexes et différant beaucoup d'une zone à l'autre, les conditions de cette régulation sont, dans l'ensemble, assez bien comprises.

Et l'on a découvert un très curieux phénomène : les réacteurs généraient leur propre minerai, et ont eux-mêmes forgé les conditions de la poursuite de la réaction en chaîne. Les géologues, en effet, étaient intrigués par l'argile fine, abondante au cœur de certaines zones de fission, mélangée à l'uraninite : on n'en trouvait pas ailleurs dans la région. Ce n'est qu'en 1978 que l'on comprit : l'argile avait été "fabriquée" par les réactions nucléaires ! L'uraninite, au départ, baignait dans du grès. Puis les premières réactions de fission se sont déclenchées, créant localement des points chauds. Lorsqu'il y avait de l'eau, un phénomène de convection se produisait à cause de la différence de température entre l'eau chaude en ce point et l'eau froide ailleurs. Comme dans une casserole que l'on chauffe, l'eau se mit à circuler selon des courants convectifs, extrayant progressivement





### La nature savait stocker les déchets

Ces cristaux d'uraninite (oxyde d'uranium) de couleur claire, provenant d'un des réacteurs fossiles d'Oklo, sont pris dans la matière organique, de couleur brune (photo en fausses couleurs, au microscope à balayage ; l'inclusion la plus grosse mesure environ trente micromètres). Dans cette gangue, l'uraninite est bien protégée de l'oxydation ou d'autres agressions extérieures, et les produits issus de la fission sont conservés. Une idée à creuser pour le stockage des déchets nucléaires modernes.

du grès toute la silice, très soluble dans l'eau chaude (c'est ce que les géologues appellent la "désilicification") et qui constituait jusqu'à 90 % du grès d'origine. Grès moins silice, restait de l'argile et, bien sûr, l'oxyde d'uranium qu'elle contenait. Du même coup, au voisinage des foyers réactifs l'uranium se trouva beaucoup plus concentré. D'une teneur de 15 % dans le grès, il atteignait jusqu'à 60 % dans l'argile.

Là où la concentration en uranium s'accroissait, les réactions nucléaires s'"allumaient" et, de proche en proche, la zone de fission gagnait du terrain. En outre, les failles et les creux laissés par le départ de la silice provoquaient des effondrements, des tassements, dans lesquels subsistaient des passages où l'eau pouvait se glisser, entretenant la fission. C'est ainsi que, en une sorte de "réaction en chaîne" géologique, le minerai s'est enrichi en se libérant de la silice et a créé les conditions propres à la poursuite de la fission.

Une question essentielle demeure cependant posée : comment de l'uranium s'est-il trouvé là en aussi grande concentration, alors que cet élément est très disséminé dans la croûte terrestre et que les minerais ont généralement d'assez faible teneur ? La réponse est donnée par la paléoclimatologie. Il y a 2 milliards d'années, en effet, l'oxygène faisait son apparition dans l'atmosphère. Composée jusqu'alors essentiellement de gaz carbonique,

d'azote et de vapeur d'eau, l'atmosphère commença à devenir respirable, grâce à l'oxygène que dégageait la photosynthèse de végétaux aussi primitifs que les algues bleues qui peuplaient les océans. Au contact de l'oxygène, l'uranium de la surface terrestre s'oxyde et devient soluble. Les eaux se chargent fortement en oxyde d'uranium, et lorsqu'elles rencontrent un sol réducteur (capteur d'oxygène), comme le grès, l'uranium précipite sous forme d'uraninite solide. Les concentrations d'uranium d'Oklo se sont formées ainsi, grâce à l'action de l'oxygène libéré dans l'atmosphère.

Reste peut-être le plus étonnant : par quel miracle les réacteurs fossiles ont-ils traversé les cataclysmes et remaniements géologiques sans en être altérés, jusqu'à leur récente découverte ? Ils ont simplement eu de la chance, pourrait-on dire : ils sont apparus au bon endroit, dans des sédiments reposant sur un vieux socle très stable qui, jusqu'à une époque tardive, n'a pas bougé. A 3 000 mètres de profondeur, protégés de l'oxydation – et donc de la dispersion par dissolution – par un milieu réducteur (grès, matières organiques), ils n'ont pas été attaqués et sont restés au repos des centaines de millions d'années. Puis, récemment – il y a quelques millions d'années –, au début du Tertiaire, le socle est remonté à l'occasion de bouleversements géologiques (formation de chaînes de montagnes...), et l'érosion a repris. Les foyers de fission fossiles se sont rapprochés de la surface ; ils sont arrivés à portée de la main juste à l'époque où les hommes avaient réinventé la fission nucléaire... et avaient besoin d'uranium. Il a donc fallu d'abord une histoire mouvementée aboutissant à la concentration de l'uranium, puis un très long repos, et enfin une reprise d'activité récente, pour que nous découvrons les réacteurs fossiles d'Oklo.

Un autre hasard, plus prosaïque, a permis cette découverte : à la fin 1971, l'exploitant minier était en retard dans sa production et, pour faire face à ses échéances, il a creusé une tranchée directement dans les parties du gisement les plus riches en uranium – les plus appauvries en isotope 235 puisque la fission s'y était produite. Il fournit donc à ses clients un uranium appauvri qui, même après de multiples dilutions, a pu être repéré par le technicien de Pierrelatte.

Après l'énumération de cette incroyable série de circonstances favorables, on ne s'étonnera pas que les réacteurs d'Oklo soient uniques au monde. Ce phénomène, on l'a vu, n'a pu survenir qu'à une période précise de l'histoire géologique : vers deux milliards d'années. Pas après, car la proportion d'uranium 235, qui diminue avec le temps, devient

trop faible pour que se propagent des réactions en chaîne. Pas beaucoup avant non plus, car il faut de l'oxygène pour que se forment d'importantes concentrations d'uraninite. Sans compter qu'il a fallu une très grande stabilité géologique pour que ces réacteurs fossiles parviennent jusqu'à nous. Des recherches menées dans des gisements d'uranium du même âge que ceux du Gabon, au Canada et en Australie, n'ont d'ailleurs rien donné.

Les réacteurs nucléaires fossiles d'Oklo, superbes curiosités géologiques, ont donné des idées aux chercheurs de nombreux pays. Rassemblés sous l'égide de la CEE dans le "Groupe Oklo", ils considèrent les réacteurs fossiles comme des "ana-

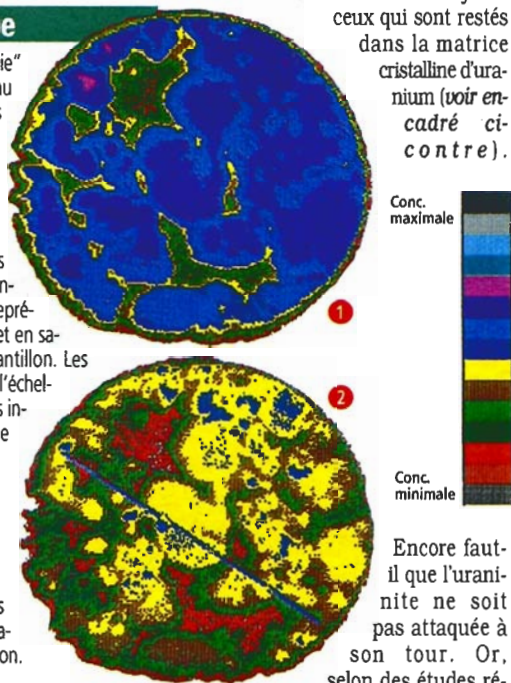
bitume. Il y a deux milliards d'années, à l'époque du fonctionnement de ces réacteurs, et même après, ces matières organiques, issues de la décomposition d'algues (il n'y avait pas encore de végétaux terrestres), étaient liquides. Réductrices, elles ont contribué à la précipitation de l'uranium soluble en uraninite solide, donc à la concentration de l'uranium. Puis, au cours de leur maturation, les matières organiques se sont solidifiées, protégeant l'uraninite de toute décomposition et empêchant du même coup la fuite des produits de fission emprisonnés dans les cristaux d'uraninite.

Car le meilleur piège pour les produits de fission, c'est l'uraninite elle-même : les éléments les mieux

conservés sont toujours ceux qui sont restés dans la matrice cristalline d'uranium (voir encadré ci-contre).

### Le cœur d'un réacteur vu à la loupe

Grâce à une sonde ionique, on obtient une "photographie" des échantillons de sol montrant la concentration *in situ*, au micromètre près, des différents éléments présents dans une roche. Le procédé consiste à bombarder la surface polie d'un échantillon de cette roche avec un faisceau d'ions d'argon ou d'oxygène : cela pulvérise les premières couches d'atomes de l'échantillon, qui sont ensuite collectés et identifiés. Dans le cas des réacteurs nucléaires fossiles d'Oklo, on a pu déterminer ainsi quels éléments sont restés sur place depuis deux milliards d'années, et lesquels ont migré. Les deux disques ci-contre représentent respectivement la concentration en uranium (1) et en samarium, un produit de fission (2), dans un même échantillon. Les couleurs indiquent des concentrations croissantes suivant l'échelle ci-contre. Le samarium apparaît, certes, en quantité très inférieure à l'uranium, mais on voit immédiatement que le dessin est à peu près le même dans les deux cas : les régions à plus haute teneur en uranium, donc celles où s'est produit le plus de réactions de fission, sont aussi celles où le samarium est le plus concentré. Conclusion : le samarium est resté sur le lieu de sa naissance, et n'a pas migré. C'est-à-dire que la gangue rocheuse enveloppant, dans le réacteur naturel, le minerai d'uranium a préservé des agressions extérieures ce minerai et, du même coup, le samarium produit en son sein au cours des réactions de fission.



Encore faut-il que l'uraninite ne soit pas attaquée à son tour. Or, selon des études récentes, les matières orga-

niques offrent à l'uraninite, et par suite aux produits de fission, une rétention bien meilleure que celle de l'argile. Celle-ci, séparée de la silice, tassée, parcourue par des courants de convection, attaquée par les rayonnements nucléaires, n'assure pas une très bonne protection à l'uraninite. Les fluides y circulent dans des microfissures du terrain, dissolvent les cristaux d'oxyde d'uranium et dispersent les produits de fission qu'ils retenaient. Il y a, évidemment, des exceptions : à Oklo, le réacteur le mieux conservé de tous est enserré dans une épaisse gangue argileuse... Mais à part ce cas parti-

logues naturels" des réacteurs industriels, et à ce titre censés nous en apprendre beaucoup sur la meilleure façon de stocker nos déchets radioactifs. Les conditions de conservation des réacteurs d'Oklo sont en effet assez différentes suivant les zones. Dans les six premières zones explorées, qui ont été étudiées le plus en détail par les physiciens, le minerai d'uranium est mélangé à une gangue argileuse, apparue à la suite du phénomène de "désilicification" décrit plus haut. En revanche, dans les zones 7 à 9, l'uraninite se trouve souvent immobilisée dans des matières organiques solides, du type

bitume. Il y a deux milliards d'années, à l'époque du fonctionnement de ces réacteurs, et même après, ces matières organiques, issues de la décomposition d'algues (il n'y avait pas encore de végétaux terrestres), étaient liquides. Réductrices, elles ont contribué à la précipitation de l'uranium soluble en uraninite solide, donc à la concentration de l'uranium. Puis, au cours de leur maturation, les matières organiques se sont solidifiées, protégeant l'uraninite de toute décomposition et empêchant du même coup la fuite des produits de fission emprisonnés dans les cristaux d'uraninite. Car le meilleur piège pour les produits de fission, c'est l'uraninite elle-même : les éléments les mieux conservés sont toujours ceux qui sont restés dans la matrice cristalline d'uranium (voir encadré ci-contre).

(suite du texte page 165)



## UNE CENTRALE NUCLEAIRE DE DEUX MILLIARDS D'ANNEES

(suite de la page 53)

culier, encore mal expliqué, les matières organiques ont généralement beaucoup mieux protégé l'uraninite que l'argile. Imperméables à l'eau, insolubles, réductrices, elles l'ont préservée de toute oxydation et de toute dissolution, assurant par là même la rétention des produits de fission.

Mais au fait, quels sont-ils, ces produits de fission ? La liste en serait très longue, mais plusieurs des déchets produits à Oklo ont disparu : la majeure partie des gaz rares (krypton et xénon), les éléments volatils (iode), les alcalins (césium), entre autres. En revanche, d'autres éléments, plus lourds ou moins mobiles, sont restés très stables, pour autant que l'uraninite dans laquelle ils étaient pris le soit demeurée aussi : ce sont les terres rares (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, gadolinium...) ainsi que les transuraniens, ces éléments radioactifs plus lourds que l'uranium, comme le plutonium et le thorium, issus non de la fission mais de l'absorption de neutrons : leur volume étant très proche de celui de l'atome d'uranium, ils s'inséraient facilement dans la matrice d'uraninite et y demeuraient.

Les terres rares et le plutonium ne se sont pas échappés de la matrice organique – or ce sont là des éléments à moyenne ou haute radioactivité. Cette remarquable rétention de l'uraninite dans les matières de type bitume est à prendre en compte dans le débat sur le stockage des déchets nucléaires. Même si les conditions d'Oklo ne sont pas tout à fait les mêmes que celles prévalant dans les réacteurs industriels, c'est presque une recommandation, aux Américains notamment. Les Etats-Unis en effet, contrairement à la France, ne retraitent pas leurs déchets nucléaires. Au lieu de séparer les différents types de produits radioactifs, comme le font les Français à l'usine de La Hague, les Américains stockent les barreaux d'uranium usagés tels qu'ils sortent des réacteurs. Or ces barreaux ressemblent beaucoup aux foyers d'Oklo à l'époque de leur activité... Les recherches d'Oklo pourraient donc apporter un argument de poids dans le débat qui a lieu outre-Atlantique sur la meilleure façon de se débarrasser des déchets. Les recherches se poursuivent au Gabon, dans l'espoir que le devenir de nos déchets soit inscrit dans les roches d'Oklo.

La Nature, qui a inventé les réacteurs nucléaires deux milliards d'années avant les hommes, nous inspirera peut-être le moyen d'en maîtriser les conséquences.

**Hélène Guillemot**