

VI – 1 - Le nucléaire des temps géologiques : le réacteur naturel d'Oklo

Jean-Claude NIMAL

Le réacteur fossile d'Oklo a passionné Georges VENDRYES qui a su transmettre cette passion aux équipes qu'il a directement dirigées sur ce sujet. Le site d'Oklo est situé au Gabon, à une soixantaine de kilomètres au nord-ouest de Franceville (actuellement : Masuku).



La Mine d'Oklo (Mai 1972)

La couche géologique concernée est désignée par le terme de Francilien. La mine d'Oklo est exploitée par la Compagnie des Minerais d'Uranium de Franceville (C.O.M.U.F.).

La photo 1 ci-dessus représente la mine en exploitation. Une singularité et un intérêt essentiel du minerai extrait est la riche teneur en métal dans certaines poches. Une autre singularité a été découverte suite aux résultats d'analyses isotopiques effectuées en juin 1972 ; ces contrôles isotopiques sont réalisés en routine avant l'enrichissement en U235 indispensable pour l'élaboration d'éléments combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires. Ces contrôles, réalisés au laboratoire d'analyses de Pierrelatte, ont montré des teneurs isotopiques anormales en U235, dans un tout premier temps de l'ordre de 0,4%. La teneur normale habituelle est égale à 0,720%. Ces valeurs anormales, si elles se confirmaient dans le minerai extrait par la COMUF, auraient entraîné une sérieuse difficulté pour l'étape suivante : l'enrichissement. On comprend bien alors l'importance économique de cette anomalie qui pouvait faire perdre de l'intérêt à la mine concernée. On peut aussi comprendre les graves conséquences d'une telle anomalie : serait-il possible de modifier une teneur isotopique en utilisant une méthode simple dont seule la nature en a le secret ? Diverses explications ont été envisagées : séparation isotopique par un procédé physico-chimique ou existence de réactions de fission autoentretenues dont l'existence aurait pu modifier les concentrations isotopiques. L'enjeu est donc énorme sur le plan stratégique de l'utilisation de l'uranium enrichi tant du point de vue économique que du point de vue militaire.

Ces deux pistes restaient ouvertes à la fin de ce mois d'août 1972, juste avant le retour de congés de l'Administrateur Général du CEA (André GIRAUD) qui n'aurait pas manqué de s'enquérir sur l'avancement de cette question. La première piste, de nature chimique, était évoquée par *la Direction de la chimie* (DC dirigée par Claude Fréjacques), la seconde piste était du ressort de la *Division d'Études et de Développement des Réacteurs* (DEDR) puisqu'elle supposait l'existence d'une réaction en chaîne entretenue, elle était proposée par Georges VENDRYES. C'est ce point de vue qui est exposé dans l'article écrit par Georges VENDRYES et intégralement inséré ci-après [55] : il s'agit d'une démonstration de l'existence (de la réalité) de réactions en chaîne entretenues.

Un second article de Georges VENDRYES est également inséré ci-après : il s'agit d'un exposé présenté le 30 novembre 2010 devant la Société Géologique de France (article 2). Cet exposé porte bien évidemment sur une analyse du phénomène d'Oklo d'un point de vue géologique et minéralogique, mais je considère le caractère prémonitoire et passionnant d'une idée à caractère spéculatif lancée par Georges VENDRYES au cours de cet exposé : la naissance d'une forme « élaborée » de la Vie sur terre résultant d'une corrélation étroite entre la présence de matière organique et la présence de poches uranifères riches en métal.

Le premier article est rédigé par Georges VENDRYES sur le réacteur fossile d'Oklo, il présente un double intérêt scientifique et historique par la narration du déroulement des événements. D'un point de vue scientifique, cet article campe la situation géologique du gisement minier d'Oklo, décrit les phénomènes nucléaires en jeu dans le phénomène d'Oklo depuis l'évolution des concentrations en Uranium 235 (U235) et Uranium 238 (U238) au cours des âges jusqu'à l'exploitation des mesures isotopiques réalisées par la DC (Michèle Neuilly). C'est cette dernière exploitation qui a permis de démontrer l'existence d'une réaction en chaîne. Sur le plan historique, cet article rassemble de façon chronologique la succession des faits depuis la découverte de l'anomalie d'enrichissement en U235 constatée sur certains échantillons de minerai jusqu'à la date de parution des publications essentielles. Dans ces dernières, il est démontré de façon très convaincante l'existence d'une réaction en chaîne qui a eu lieu il y a environ 2 milliards d'années. Pour le réacteur d'Oklo, l'expression de « réacteur fossilisé » a tout son sens puisqu'on constate l'absence de migration des « pièces à conviction » dans l'espace et au cours de presque 2 milliards d'années. Cette conservation de ces indices dans le temps est confortée grâce à la cohérence observée entre les observations de diverses natures (comme les isotopies de plusieurs produits de fission, la teneur totale en métal, l'enrichissement en U235). Il faut également noter la description pleine d'humour concernant la visite indispensable de Georges VENDRYES et de Claude Fréjacques au Gabon auprès du président Albert Bongo : cette visite à caractère diplomatique n'était pas connue à la date des faits. L'article proposé, rédigé par Georges VENDRYES, me paraît donc être l'un des plus précis et des plus complets tout en restant très concis.

Le premier contact que j'ai eu avec Georges VENDRYES s'est tenu dans son bureau, à SACLAY, le vendredi 25 août 1972 au matin. Je pense que ce fut à cette occasion qu'il me communiqua les faits observés et quelques caractéristiques connues à l'époque sur les mesures isotopiques effectuées.

Les contacts suivants se déroulèrent au moment des « pauses-déjeuner », par téléphone entre SACLAY et Fontenay-aux-Roses, pour faire le point des avancements. Ces contacts m'ont particulièrement marqué par la précision scientifique des échanges téléphoniques et aussi par la qualité relationnelle humaine et la simplicité de ces entretiens.

L'objectif poursuivi par Georges VENDRYES était donc la démonstration de l'existence d'une réaction de fission pour expliquer les anomalies isotopiques observées. Rappelons qu'une série d'hypothèses envisagées dès le 19 juillet 1972 étaient basées sur des séparations isotopiques par des voies physico-chimiques jusqu'alors inconnues et par conséquent, dans ce cas, des réflexions poussées auraient été dignes d'intérêt pour des raisons évidentes tant économiques que militaires. En un mot, la démarche explicative de la DEDR consistait à considérer que les échantillons ayant fait l'objet de mesures isotopiques contenaient un mélange d'une certaine proportion de néodyme (Nd) naturel (présent dans la roche) et de néodyme supposé être issu de fissions. Ce néodyme, objet des mesures isotopiques, aurait donc eu deux voies de formation. Pour conforter cette hypothèse, sans faire dans ce tout premier temps des calculs numériques complexes, il fallait montrer qu'en dépolluant les résultats des mesures isotopiques de la présence de l'élément naturel alors le vecteur isotopique ainsi

corrige correspondait bien à celui obtenu par fission. Cette correction devenait simple si un isotope de l'élément néodyme naturel était absent de la liste des isotopes obtenus par fission. Cet isotope existait, c'était le Nd142, et par chance la teneur isotopique en Nd142 dans l'élément naturel est élevée (27,11%) ce qui rendait la correction d'autant plus précise. Georges VENDRYES était bien conscient de la « valeur approximative » de cette toute première approche qui était réalisable dès ce vendredi 25 août par utilisation d'une simple calculette.

L'approximation faite dans cette première évaluation était due à l'existence d'un flux de neutrons qui aurait été engendré par cette éventuelle réaction en chaîne et qui aurait alors pu modifier les teneurs isotopiques des néodymes et ceci à la fois sur l'élément naturel et à la fois sur l'élément produit par les éventuelles fissions. Néanmoins, il y avait déjà deux observations cohérentes indépendantes du point de vue quantités mesurées : d'une part l'appauvrissement constaté de la teneur de l'isotope U235 dans le minerai extrait et d'autre part l'existence (après dépollution) d'un vecteur isotopique du néodyme très proche du vecteur des produits de fission. L'existence d'une réaction en chaîne dans la mine d'Oklo devenait indubitable.

Dès les 25-26 août, une première amélioration simple de l'interprétation des mesures isotopiques a été apportée en corrigeant manuellement les valeurs des concentrations isotopiques du néodyme de l'effet des captures neutroniques. Pour tous les isotopes de cet élément, les sections efficaces de capture ont des valeurs relativement faibles y compris dans les domaines des résonances épithermiques. La prise en compte sommaire des perturbations apportées par l'existence de captures neutroniques permettait de faire porter l'interprétation isotopique sur tous les isotopes du Nd et non plus sur les 3 couples dont les concentrations réunies deux à deux (un isotope pair et l'isotope impair suivant) sont indépendantes de toute considération de capture neutronique. Les résultats relatifs à tous les isotopes du néodyme pris séparément sont présentés dans l'encarté suivant.

	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Nd	Naturel (%)	Mesure (%)	Corrigé du naturel (%)	Corrigé de la capture (%)	Nd de fission	(5)/(6)
142	27,11	1,4	0,0	0,	0,0	O.K
143	12,17	22,1	22,6	28,6	28,84	0,99
144	23,85	32,0	32,4	26,4	26,50	1,00
145	8,30	17,5	18,0	19,0	18,87	1,00
146	17,22	15,6	15,6	14,6	14,42	1,01
148	5,73	8,0	8,1	8,1	8,26	0,98
150	5,62	3,4	3,3	3,3	3,12	1,06

Oklo Echantillon « M » Enrichissement mesuré en U235 : 0,44%

Afin d'améliorer la qualité physique de ces interprétations, nous avons utilisé alors des moyens de calculs plus sophistiqués ayant permis de prendre en compte non seulement les effets des captures de neutrons lents (le premier ordre de l'effet perturbateur) mais aussi les effets du second ordre dus

aux captures des neutrons plus énergétiques. Il devenait alors possible de calculer les concentrations isotopiques d'un grand nombre de produits de fission en s'imposant diverses conditions de la réaction en chaîne ; ceci permettait des études de sensibilité des résultats à ces hypothèses de « fonctionnement de ce premier réacteur ». Tous ces calculs furent réalisés grâce au code PEPIN, logiciel résolvant les équations différentielles d'évolution des produits de fission sous irradiation ; ce logiciel avait été développé au CEA à partir des années 1964 et une version améliorée perdue. À cet égard, une anecdote doit être rapportée : il n'est pas bon de travailler sur un « listing » de résultats de calculs « secrets » lorsqu'une personne entre spontanément dans votre bureau. Plusieurs mois plus tard, ce collègue m'a rapporté avoir eu alors des doutes sur ma santé mentale : il avait remarqué visuellement des temps de refroidissement et de fonctionnement d'un réacteur de l'ordre du milliard d'années pour le premier et de quelques centaines de millions d'années pour le second !

En utilisant les résultats de calculs d'évolution réalisés avec ce logiciel PEPIN pour différentes valeurs de conditions de la réaction en chaîne (durée de cette réaction, fluence neutronique, paramètres du spectre neutronique), l'analyse de plusieurs vecteurs isotopiques mesurés (Nd, Sm, Eu, puis avec quelques compléments ultérieurs) a alors permis de cerner les valeurs de ces conditions. Des calculs de criticité effectués intégrant au mieux les caractéristiques de la couche géologique concernée ont montré que les conditions étaient réunies pour qu'une réaction en chaîne entretenue puisse avoir eu lieu. Les conditions essentielles étaient réunies à cette époque : enrichissement en U235 de l'ordre de 3% (la décroissance naturelle avec le temps de l'isotope U235 est plus rapide que celle de U238), présence très probable d'eau donc d'un modérateur dans ce milieu reconnu comme étant lacustre, forte teneur en métal pouvant dépasser 10%, existence de « poisons consommables » due à la présence de traces de terres rares dans les sédiments.

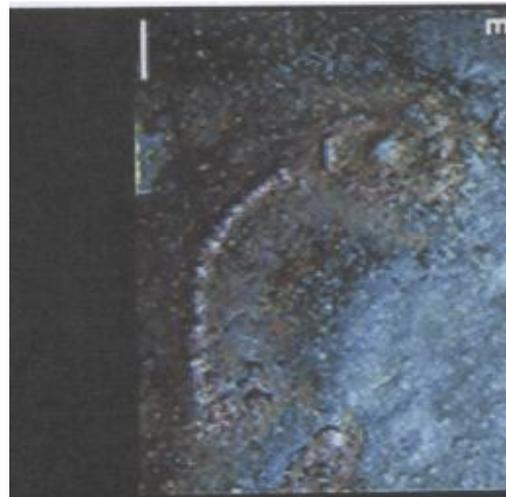
Tous ces résultats ont été officialisés dans diverses publications de Georges VENDRYES et dans le livre de R. NAUDET (1991). Les rapports isotopiques anormaux sur le couple U235/U238, à l'origine de cette "odyssée" scientifique, étaient souvent inférieurs à la valeur naturelle ; parfois ces rapports étaient légèrement supérieurs à cette valeur naturelle par suite de la transmutation par décroissance radioactive alpha du Pu239 formé (par capture sur U238) en U235. C'était le, ou peut être l'un, des tout premiers réacteurs au monde mettant déjà en œuvre le concept de la conversion du support fertile (U238) en matière fissile (le Pu239), concept qui a toujours été défendu par Georges VENDRYES pour pallier au manque d'uranium.

Chronologiquement, les deux premières publications externes sur le phénomène d'Oklo furent les communications à l'Académie des Sciences présentées le 25 Septembre par Monsieur Francis Perrin. L'une des premières communications auprès de la communauté scientifique internationale a eu lieu le 10 Octobre 1972 au cours de la quatrième édition de l' *International Conference on Radiation Shielding* (ICRS) [56b] qui, cette année-là, s'était tenue à Paris. La présentation par Jean Bussac a eu lieu au cours d'une session spéciale rajoutée en fin de journée au programme initial. Les logiciels de bureautique, comme par exemple Power Point, n'existaient pas encore en 1972 et la nécessité de préparer quelques transparents de qualité pour l'exposé de Jean Bussac nous a conduit à faire des efforts sur le plan graphisme. Pour les relecteurs : je souhaite ajouter en 2 lignes l'accueil réservé par cette assemblée internationale ; Sylvie a consulté avec moi les proceedings, mais il n'existe aucune transcription des questions et des réponses pour l'exposé de JB (c'est le seul exposé dans ce cas). Ma dernière tentative en cours : établir un contact avec l'un des directeurs de l'AEN ; cet organisme était coorganisateur de cette conférence.

Il convient de mentionner deux coupures de journaux de ce début de l'automne 1972 les joindre ? : l'une, que je trouvais à l'époque très lyrique par méconnaissance, décrivait l'ambiance il y a environ 2

milliards d'années « de lourds nuages noirs d'oxyde de carbone se déplaçaient dans le ciel » ; l'autre de nature plutôt spéculative, posant la question « la vie ne serait-elle pas née à ce moment-là par effet des rayonnements ionisants ? ». La première rappelle implicitement l'absence d'oxygène dans l'atmosphère il y a 2 milliards d'années ; la seconde est reliée à la première par le biais de l'apparition de bactéries qui, en pratiquant la photosynthèse, auraient ainsi libéré de l'oxygène dans l'atmosphère. Ce sont ces idées qui ont été développées par Georges VENDRYES dans sa communication donnée à Orsay le 30 Novembre 2010 à la *Société Géologique de France*. Toutes ces remarques sont liées à la présence de matière organique et à la formation de gisements uranifères riches en métal qui sont sources de rayonnements ionisants. Dans cette conférence Georges VENDRYES fait mention de l'influence réciproque (mutuelle) et concomitante de la matière organique et de la formation d'un minerai à haute teneur métallique. Il n'y a alors qu'un pas à franchir pour associer à cette remarque le passage de l'état monocellulaire à l'état multicellulaire par le truchement des rayonnements ionisants. Avec beaucoup de prudence, Georges VENDRYES lance cette idée tout en faisant remarquer que l'aspect chronologique des divers évènements permet d'apporter des précisions.

Depuis ces réflexions prémonitoires, les connaissances ont beaucoup évolué avec les premiers résultats des fouilles réalisées au Gabon à proximité de Franceville en 2008 (voir photographies 2 et suivante dont l'une présente un fossile datant de 2 milliards d'années). Ces résultats ont été confortés en 2010 par l'analyse de plusieurs centaines de fossiles présentant de nombreux morphotypes et dont certains peuvent atteindre une quinzaine de centimètres. Diverses publications ont été rédigées dès 2008, en particulier par le professeur A. El Albani (CNRS/Université de Poitiers) qui a dirigé les recherches. Citons également le communiqué de presse du CNRS publié le 25 juillet 2014.



Photographies 2a et 2b Deux fossiles datant de presque 2Milliards d'années :

Un petit fossile en haut (~2cm) et une grosse bête en bas (~15cm). Ces formes de vie sont apparues de façon très précoce, peut-être temporairement, soit 1,4 Milliard d'années avant les formes de vie décelées à ce jour (600000 millions d'années).

Compte tenu des avancées réalisées dans les deux domaines constitués par la géologie et la biologie depuis l'exposé de Georges VENDRYES depuis novembre 2010, il me semble très intéressant scientifiquement et passionnant de donner une suite à ces réflexions.

Les acteurs dans cette étude sur le "phénomène d'Oklo" y ont apporté leur contribution avec passion et dynamisme suscités par deux grandes qualités que possédait Georges VENDRYES, la cordialité dont

il faisait preuve lors de ses entretiens et une connaissance scientifique approfondie dans chacune des disciplines impliquées.

Sur le plan scientifique, l'étude du phénomène d'Oklo constitue un exemple emblématique de la démarche d'analyse d'un phénomène "inconnu". Après une étude simplifiée de démonstration de l'existence du phénomène inconnu, l'agrégation d'informations diverses permet d'en conforter l'existence et d'en déduire des valeurs approchées des paramètres explicatifs. Cette démarche a été adoptée lors des toutes premières approches visant à comprendre l'accident nucléaire de Tchernobyl d'avril 1986.



Figure 1 : Situation d'Oklo



De gauche à droite : le représentant de l'ambassadeur du Gabon à Paris, MM. VENDRYES, Lucius, Yvon, Fréjacques (debout), Taranger et Morin

Exposé de Georges VENDRYES à la réunion du 30 novembre 2010 de la Société Géologique de France, à la Faculté des Sciences d'Orsay [147]

**Quelques réflexions sur les événements remarquables qui sont survenus
lors de la formation du Francevillien**

Monsieur le Président, chers amis géologues,

Tout d'abord un grand merci à Maurice Pagel et à Jean-Pierre Milesi pour m'avoir admis à présenter une communication à cette réunion alors que je suis un complet ignorant en géologie. C'est pour moi un domaine inconnu mais passionnant où je m'aventure non sans témérité. Le principal objectif de ma démarche ce matin est de recueillir vos remarques et vos objections éventuelles.

A l'origine de mes réflexions se trouve la découverte de Mr El Albani, du laboratoire Hydrasa de l'Université de Poitiers, qui a fait la une de la revue Nature du 1^{er} juillet et qu'il a présentée à Orsay il y a quelques jours. Comme vous le savez certainement, il a trouvé des fossiles attribués à des

organismes multicellulaires dans une carrière du Gabon, dans une couche du Francevillien datée de 2,1 milliard d'années. Cette découverte est remarquable car elle remet en question les connaissances que nous avons de l'évolution des êtres vivants. Les plus anciens témoignages d'organismes multicellulaires à avoir été identifiés auparavant sont beaucoup plus tardifs. Ils datent notamment de l'explosion cambrienne qui a connu une prolifération vertigineuse d'espèces il y a 600 millions d'années.

Du moment où j'ai eu connaissance de cette découverte en lisant mon journal, je n'ai pu m'empêcher de faire un rapprochement avec un autre phénomène exceptionnel, à savoir les réacteurs naturels d'Oklo, dont la mise en évidence demeure le souvenir le plus exaltant de ma vie professionnelle. Jean Bussac ici présent peut témoigner de l'émotion intense qui nous a saisis tous deux ce matin de la fin août 1972 dès qu'on m'eut apporté toutes chaudes les mesures brutes de la distribution isotopique du néodyme dans un échantillon de minerai prélevé dans la mine d'Oklo. Il nous suffit de quelques minutes de manipulation de nos règles à calcul, mettant en œuvre les quatre opérations élémentaires de l'arithmétique, pour voir apparaître sous nos regards émerveillés la distribution exacte des isotopes du néodyme produits de fission de l'uranium.

Ainsi avons-nous la démonstration aveuglante que des réactions de fission s'y étaient produites en abondance. Incidemment ce résultat montrait que les propriétés de la fission nucléaire étaient exactement les mêmes il y a 2 milliards d'années que maintenant, c'est-à-dire que les constantes fondamentales de la physique (c , h , e ...) avaient alors la même valeur numérique qu'aujourd'hui, ce qui n'était nullement évident a priori.

La distance entre les réacteurs naturels d'Oklo et la carrière aux fossiles n'est que de 30 km. Le gisement d'uranium occupe la couche supérieure (C1), de 5 m d'épaisseur, de la formation de grès FA qui est à la base du Francevillien, alors que les fossiles se trouvent dans la formation d'argiles FB située juste au-dessus. Il est pour le moins troublant que deux phénomènes uniques dans l'histoire de notre planète aient eu lieu au même endroit de la croûte terrestre et à peu près à la même époque. Ne pourrait-il y avoir lien entre eux ? Il était tout naturel que cette question me vint à l'esprit. La meilleure preuve en est que je reçus le soir même un coup de téléphone de Jean Bussac qui, en lisant son journal de son côté, avait eu la même idée que moi tout à fait indépendamment.

Je me suis replongé aussitôt dans les résultats des études des réacteurs d'Oklo. Ils ont fait l'objet de trente ans de recherches approfondies, dans le cadre d'un projet international sous l'égide de l'AIEA. La France y a joué un rôle majeur, grâce à la collaboration étroite et exemplaire qui s'établit entre les physiciens nucléaires et les chimistes du CEA et des géologues de diverses universités. Parmi ces derniers je citerai seulement les noms de Mr Weber et de Mr Gauthier-Lafaye, de l'Université de Strasbourg. Une synthèse excellente de toutes ces études se trouve dans le livre de Roger NAUDET, publié en 1991 et malheureusement épuisé. Il m'a servi de guide constant dans mes réflexions depuis l'été dernier.

Un fait qui avait beaucoup frappé ceux qui effectuaient ces études était l'omniprésence des matières organiques dans le gisement d'uranium, jusque dans le cœur de certains des réacteurs, où l'uranium appauvri accompagné de produits de fission était véritablement enchassé dans de la matière organique, qui s'y trouvait présente avant le début des réactions de fission. Cela allait bien au delà d'une simple cohabitation entre uranium et matière organique. C'est aux organismes vivants de l'époque (cyanobactéries, algues unicellulaires), tous exclusivement marins, et aux matières organiques résultant de leur décomposition, qu'on doit la formation du gisement d'uranium.

Vous savez mieux que moi que c'est seulement à partir de 2,4 Milliard d'années environ que les bactéries ont commencé à pratiquer la photosynthèse à partir du rayonnement solaire. Ce faisant elles ont émis de l'oxygène qui auparavant n'existait pas à l'état libre. La teneur en oxygène a progressivement augmenté dans l'atmosphère ainsi que dans les eaux superficielles qui sont devenues oxydantes. C'est cet événement majeur nouveau qui a donné naissance aux premiers gisements sédimentaires à haute concentration de fer, de manganèse, d'uranium.

Celui d'Oklo est l'un des plus anciens qui soient. Selon les informations que j'ai tirées du livre de Roger NAUDET, un scénario possible de sa formation a été le suivant.

La provenance probable de l'uranium est le socle archéen, où il a pu être déposé à la suite d'anciens épisodes d'intense activité volcanique continentale. Les cendres contenant les grains d'uranium ont été ensuite lessivées par ruissellement des eaux de pluie et entraînées jusqu'à un delta où les eaux oxydantes ont provoqué le passage de l'uranium en valence 6 et sa mise en solution dans une mer de faible profondeur. Il y est resté un temps indéterminé, jusqu'à ce que ces eaux viennent en contact avec un environnement chimique réducteur au voisinage de l'interface FA/FB. Il en est résulté un retour de l'uranium en valence 4 entraînant sa précipitation sous forme d'uraninite UO_2 dans la couche supérieure du FA où son dépôt se trouva facilité par l'existence de fracturations abondantes dues à des actions tectoniques locales.

Toujours selon ce livre, un consensus existait parmi les géologues (et je pense qu'il existe toujours) pour considérer que cet environnement réducteur était dû à un champ d'hydrocarbures résultant d'une dégradation avancée des matières organiques en provenance des étages supérieurs du Francevillien. La formation de ces hydrocarbures constitue également une première dans l'histoire de la Terre. Elle nécessitait que le milieu où ils ont été produits se soit trouvé à une température de l'ordre de 150°C , ce qui implique que le dépôt de l'uranium dans la couche C1 ait eu lieu à une grande profondeur, de l'ordre peut-être de 3 km. L'environnement réducteur autour du gisement a durablement persisté, du fait que l'uranium n'a pas été remis en solution. Un mécanisme précis pour la succession des réactions d'oxydo-réduction auquel ce dernier a été sujet tout au long du processus exposé ci-dessus a été proposé par l'Université d'Orléans.

Tout au long de cette série d'évènements ont eu lieu des interactions étroites entre phénomènes physiques, nucléaires, chimiques et biologiques dans un cadre géologique évolutif où la tectonique a joué un rôle majeur. Dans un tel contexte, il est légitime de se demander si la présence, pour la première fois dans l'histoire de la vie, d'une concentration très élevée d'uranium n'aurait pas pu provoquer par le truchement de sa radioactivité la formation d'organismes multicellulaires à partir des unicellulaires initiaux.

Les réacteurs eux-mêmes n'ont joué aucun rôle à cet égard, ne serait-ce que pour des raisons de chronologie, car leur fonctionnement est à coup sûr postérieur à la formation des organismes récemment découverts.

A ce propos, je me permets de faire une remarque, que certains jugeront peut-être impertinente, au sujet des problèmes de datation. En août 1972, dans les jours qui ont précédé la révélation éclatante de l'existence de ces foyers naturels de fissions, nous avons effectué des calculs neutroniques pour déterminer les conditions permettant la réalisation de réactions de fission autoentretenues dans un mélange d'uranium naturel et d'eau. Il nous fallait pour cela connaître la teneur de l'uranium en ^{235}U , c'est-à-dire dater l'époque où avaient eu lieu ces réactions. Les géologues que nous avons alors consultés nous ont déclaré que l'âge de la couche où se trouvait le gisement d'uranium était, selon l'opinion la plus répandue, compris entre 1,7 et 1,8 milliard d'années. Pour faire nos calculs nous avons adopté la valeur de 1,74 milliard d'années qui figure dans la note aux C.R. de l'Académie des Sciences de septembre 1972 et dont la précision peut faire sourire aujourd'hui. Toujours est-il que nos calculs nous permettaient de conclure qu'à cette date, des réactions en chaîne de fissions étaient possibles, mais tout juste, tant était étroite la plage autorisée pour les principaux paramètres du milieu multiplicateur.

C'est seulement vers 1980 qu'a été obtenue une évaluation précise de la date de fonctionnement du réacteur n° 2, exceptionnellement bien conservé. L'analyse détaillée de mesures neutroniques d'une parfaite cohérence a donné : 1950 ± 30 millions d'années, sans faire appel à aucune considération d'ordre géologique. Je ne crois pas altérer la vérité historique en disant que c'est ce résultat qui nous a obligés à repousser de plusieurs centaines de millions d'années la date de la formation de la couche uranifère. J'ai gardé de ces péripéties le sentiment que la datation d'un évènement géologique relève

d'un art difficile et subtil, si bien que j'ai maintenant tendance, peut-être à tort, à considérer toute donnée sur un âge géologique dans l'absolu comme une estimation approximative.

Quoiqu'il en soit, il apparaît clairement que c'est bien avant le fonctionnement des réacteurs qu'aurait pu avoir lieu l'action de la radioactivité que j'ai en tête. Actuellement, si j'ai bien enregistré les propos que m'ont tenus Jean-Pierre Milesi et Jean-Louis Feybesse, on estime à 2,1 Milliard d'années le dépôt des sédiments à l'interface FA/FB, à 2,05 milliard d'années le dépôt de l'uranium dans la couche C1 de FA, et à 1,95 milliard d'années le fonctionnement du réacteur n°2, le seul dont l'âge ait pu être évalué parmi la douzaine de ceux qui ont été découverts dans la région d'Oklo.

Selon le schéma que j'imagine l'action de la radioactivité aurait eu lieu avant même la formation du gisement d'uranium. Jean-Pierre Milesi a attiré mon attention sur le fait qu'encore aujourd'hui on ne dispose pas de connaissances certaines en ce qui concerne l'origine de cet uranium et le cheminement qu'il a suivi jusqu'à son dépôt. J'ai donc conscience que le scénario que je viens de vous exposer et qui m'a été inspiré par la lecture du livre de Roger NAUDET n'est pas prouvé. Il décrit un déroulement possible mais non certain des événements.

En admettant qu'il corresponde à ce qui s'est passé réellement, cela implique que les organismes unicellulaires présents dans les couches superficielles des mers de l'époque se seraient trouvés directement exposés pendant une durée indéterminée, mais qui a pu être de dizaines de millions d'années, à la radioactivité de l'uranium en solution dans les mêmes eaux, et il ne semble pas exclu que ces irradiations aient eu lieu à une époque contemporaine de la formation des organismes multicellulaires.

Je serais bien incapable de proposer un mécanisme précis selon lequel des organismes unicellulaires ont pu donner naissance à des multicellulaires, et à ma connaissance il n'en existe aucun qui ait recueilli l'accord des biologistes spécialistes de l'évolution. Je serais pour autant surpris que la suite des processus qui ont conduit des uns aux autres n'ait pas comporté des modifications profondes de la structure des cellules initiales, accompagnées de mutations à leur génome, de la rupture de leurs éléments constitutifs conduisant à la formation même très fugitive de composés chimiques inhabituels, etc, toutes choses que la radioactivité peut provoquer ou favoriser. J'insiste sur l'efficacité de la radioactivité α (sans parler de la fission spontanée de l'uranium), dont le pouvoir ionisant est considérable.

Je suis très conscient que la relation de cause à effet que j'évoque entre la radioactivité de l'uranium du gisement d'Oklo et la formation des organismes multicellulaires récemment observés n'est à ce stade qu'une pure hypothèse, mais il me semble intéressant de la soumettre à l'épreuve. Il est à mon avis justifié de lancer à cette fin des études spécifiques associant des spécialistes de différentes disciplines. Sans vouloir faire preuve d'un nationalisme déplacé, je crois que la France dispose de nombreux atouts pour les entreprendre et les mener à bien. On peut imaginer toute une panoplie d'enquêtes, d'essais et d'expériences.

Une première tâche de grande utilité dans le cas particulier du Francevillien consisterait à décrire avec précision la nature et la chronologie des événements qui ont précédé le dépôt de l'uranium, à suivre à la trace le chemin qu'il a suivi, et à situer la formation des organismes multicellulaires dans le cadre de cette histoire. Toute observation qui ferait apparaître un lien entre eux et la radioactivité serait de grand intérêt. Je crois savoir que Daniel Beaufort se propose de rechercher des traces de dégâts d'irradiation dans les minéraux voisins de la carrière aux fossiles, ce qui constituerait un résultat hautement significatif.

On a observé bien d'autres cas de formation d'organismes multicellulaires, à des époques très postérieures (notamment aux sites d'Ediacara en Australie, de la Burgess Shale au Canada,...). Cela vaudrait la peine de rechercher si dans ces cas on peut mettre en évidence une relation quelconque avec des phénomènes radioactifs. Inversement il serait intéressant de rechercher des vestiges d'organismes multicellulaires au voisinage d'autres riches gisements d'uranium ou de thorium.

Enfin on peut songer à une tentative de recréer ce qui a pu se passer au moyen d'essais d'irradiation, en soumettant dans un milieu aqueux des organismes unicellulaires à la radioactivité d'uranium dissous dans les eaux les contenant. Une grosse difficulté, entre autres, de telles expériences est que le paramètre temps n'est pas à notre disposition pour tenter de reconstituer des événements qui ont pu nécessiter de très longues durées pour se produire.

Je m'en tiendrai là, en vous rappelant que je suis particulièrement intéressé par les commentaires et les critiques de la communauté des géologues français.

Merci de votre attention.