

## Le Voyage de l'Uranium dans la Nature

Présent à 0.021ppm (21mg par tonne) dans le manteau terrestre (90% du volume de la planète Terre) ce métal subit un cycle commun à bien d'autres du fait des propriétés physico-chimiques résultant du grand diamètre et de la forte charge de valence chimique de son atome qui le fait préférentiellement s'entourer de deux à trois atomes d'oxygène: C'est un encombrant et très solide assemblage qui a beaucoup de peine à entrer dans les réseaux cristallins de la plupart des minéraux.

Le voyage commence à quelques 100km de profondeur au droit des zones où naît la nouvelle croûte océanique (rift): La décompression des zones mantelliques à ce niveau génère une lave de basalte par fusion partielle (1 à 10%) extrayant préférentiellement la silice (quartz) délaissant les minéraux magnésio-ferreux. Au passage les gros atomes (Plomb, Uranium, Cérium, Rubidium) à l'état de traces sont également emmenés. Ces laves constituant la nouvelle croûte océanique dérivant lentement vers son destin lointain. Nouvellement formée elle est extrêmement chaude et l'eau de mer y pénètre en circulation thermique par convection ("fumeurs noirs") jusqu'à des profondeurs de 2 à 4 km dans le basalte, lessivant ce dernier. Fait très important, bien que beaucoup d'éléments soient lessivés du basalte, certains éléments de l'eau de mer sont à l'inverse piégés par ce dernier notamment l'Uranium marin.

Des dizaines de millions d'années plus tard, après subduction de la croûte océanique à quelques 100km de profondeur sous un continent, le réchauffement du basalte associé à son imprégnation intense d'eau de mer provoque une importante nouvelle fusion partielle et là aussi l'Uranium part en priorité ainsi que la silice dans les nouvelles laves créées. Par différenciation chimique successive, selon leur temps de montée vers la surface du continent (de 10 à 50 millions d'années) les laves de tête sont très riches en silice et Uranium et très appauvries en fer, d'où leur couleur claire. Emergeant rarement (volcans, trachytes d'Indonésie et des Andes) mais le plus souvent solidifiées en batholites d'andésite (immenses poches solidifiées de 10 à 20km de diamètre se créant à 10-20km sous le sol) ces laves de tête agrandissent les continents. Ce sont des granites pour le commun des mortels. Ces masses de roches constituant par accumulation successive l'essentiel de la croûte continentale épaisse de 35km en moyenne, sont très enrichies en Uranium, d'environ 1000 fois par rapport au manteau qui leur a donné naissance : sous forme de petits grains sub-millimétriques noirs jusqu'à 30grammes par tonne, ce qui est très peu pour un "minerai" ordinaire mais constitue d'immenses réserves de métal.

La lente solidification des batholites commence par leur périphérie et prend 20-30 millions d'années: Là aussi l'Uranium a de la peine à s'engager dans les réseaux cristallins des silicates dominants et reste confiné dans les liquides résiduels en leur centre. Ces derniers, à la fin, s'en échappent par les fentes de retrait du massif solidifié et se déposent en filons parfois de très grande longueur et extrêmement riches en minéraux rares (étain, tungstène, topazes, béryls, etc): ce sont les pegmatites chères aux minéralogistes. L'Uranium s'y dépose très vite dans la partie chaude (700°C) en oxyde noir uraninite, minéral primaire de tous les autres gisements. Lourd comme le plomb, noir et très dur, il reste sur place inaltéré tant que l'érosion n'a pas déblayé les terrains et qu'il n'y a pas d'oxygène dans l'atmosphère (ce fut le cas jusqu'il y a 2 milliards d'années). En présence d'oxygène libre des eaux superficielles l'uraninite s'oxyde rapidement en libérant l'ion  $UO_2^{2-}$  jaune, très soluble en présence de carbonates et/ou de phosphates dissous. Le voyage folâtre se poursuit toujours près de la surface jusqu'à rencontrer des zones réductrices (essentiellement humus ou végétation inférieures - lichens mais parfois des roches

métamorphiques riches en carbone sous forme de graphite [gisement de Cigar Lake au Canada]). Ce voyage explique très bien la distribution et la forme des gisements d'Uranium. Bien sûr seule une infime partie de l'Uranium en circulation va se piéger en gisement exploitables (il faut >0.5%) de nos jours ou demain, mais le reste issu de la corrosion de l'uraninite primaire reste dispersé dans les sols là où réside de la matière organique protégée de l'air (sols agricoles profonds, boues et vases fluviales, estuaires marins) jusqu'à 500kg d'Uranium à l'hectare. Soit dit en passant, l'utilisation d'engrais phosphatés remobilise massivement vers les rivières cet Uranium stocké là depuis des millions d'années.

L'érosion des montagnes et des sols remet en solution cet Uranium qui rejoint les océans par les fleuves : d'où la teneur de ces derniers allant de 1 à 7 mg par mètre cube. L'Océan, continuellement appauvri en Uranium (voir plus haut) n'en est pas riche, en gros 3.3 mg/m<sup>3</sup>. Concernant les doses en rivière, les concentrations moyennes sont de 0.02 mg/m<sup>3</sup> pour l'Amazonie à la sortie (un lessivage amoindri dû au relief quasi-plat de l'Amazonie serait compensé par la précipitation redox dans les boues du fleuve). Le record semble être le Gange avec 6.6 mg/m<sup>3</sup>. Pour un même lieu de mesure, les concentrations varient du simple au triple suivant les saisons. Il y a une corrélation positive entre le contenu en Uranium et la concentration en ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Les auteurs suggèrent une dose moyenne de 0.3 à 0.6 mg/m<sup>3</sup> pour une rivière ordinaire. Il faut aussi penser à la méthode de mesure qui doit non seulement rechercher les ions UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> mais aussi les boues transportées, notamment les oxyhydroxydes de fer, de titane puis certaines argiles comme la montmorillonite qui sont de très bons absorbeurs d'Uranium au point d'avoir été envisagés (titane) pour l'extraction depuis l'eau de mer.

Les eaux souterraines en contiendraient dans une très grande plage depuis 0.001g/m<sup>3</sup> jusqu'à 1 kg/m<sup>3</sup> au maximum (lessivage stagnant de gisements d'Uranium); l'eau de Badoit atteignait 80 mg/m<sup>3</sup>. La permanence de ce cycle depuis des milliards d'années montre la montée irréversible de l'Uranium des profondeurs du Globe vers la surface et les géologues en constatent une dose moyenne de 3.7g/tonne dans la croûte terrestre jusqu'à 15km de profondeur et 10 à 15 fois moins au delà. Ses descendants radioactifs génèrent le dangereux Radon gazeux dont une très faible partie parvient à s'échapper dans l'atmosphère au cours de sa brève vie de gaz (3.8jours) mais qui constitue la part principale de l'irradiation humaine naturelle.

### **Les types de gisements exploitables:**

Les filons hautes températures, générés à grande profondeur (8-15km) contiennent l'uraninite UO<sub>2</sub> noire. Ils ne sont accessibles à l'Homme qu'au moins 100 millions d'années plus tard lorsque l'érosion régionale a éliminé cette épaisseur. S'ils ont été à leur tour démantelés il y a plus de 2 milliards d'années, l'uraninite fractionnée, transportée inaltérée se retrouve dans les brèches et sables (Elliot Lake, Canada). Un démantèlement plus récent les dissout en UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> jaune dans les eaux superficielles.

Dans certaines couches de grès contenant un peu de reste de matière organique, ces eaux superficielles pénètrent en déposant leur Uranium dès que les conditions de réduction chimique sont satisfaites: minerais jaunes, autunite, torbernite (vert), carnotite et tyuyanimite associent systématiquement UO<sub>2</sub> respectivement aux ions phosphates (+ calcium, cuivre) ou vanadates (+ potassium, calcium). Typiques du Colorado et Wyoming, etc.

La même chose peut se produire dans les shales (schistes) noirs à Randstad, Suède (500ppm) et les phosphates de chaux naturels (Maroc, Floride, 150ppm) très utilisés en agriculture. Certains sites très particuliers conduisent à des gisements énormes et concentrés: Les discordances géologiques entre un socle cristallin ancien émettant par une importante faille des fluides

profonds chauds riches en eau et CO<sup>2</sup> émergeant à la base d'une couche épaisse de marnes (600m), donnent naissance à une véritable usine chimique naturelle souterraine précipitant de l'uraninite et dérivés en poches de 250 000 tonnes d'U, très concentrées (20%) : Cigar Lake au Canada, Pine Creek en Australie, où plusieurs nouvelles poches ont été identifiées récemment. Les bien plus modestes gisements épuisés du Limousin (45 000 t cumulées) sont dans des granites intérieurement corrodés par les eaux circulant dans des failles très abruptes; Une partie de l'Uranium emporté s'est déposé un peu plus bas dans la zone syénitique.

Le lessivage général de régions granitiques ou gneissiques libère de grandes quantités de métal (10 à 30 grammes par mètre cube de roches) dans les eaux. L'Uranium peut se retrouver au pied des collines en question, au niveau des schistes qui constituent les zones de dépressions sources de bons terrains agricoles (Bretagne centre). Le dépôt final d'Uranium se fait souvent dans les larges estuaires où les boues en zone calme entretiennent une vie favorable à la précipitation du métal (20 000 tonnes à Coutras, Gironde, 45 000 tonnes à Oklo, Gabon). Il arrive aussi parfois que les eaux en régions semi-désertiques aboutissent à des lacs temporaires sans déversoir. L'évaporation fait tout déposer dans un certain ordre et on trouve à Yeelirie, Australie un gisement de 70 000 tonnes à teneur de 1% quelques décimètres sous un lac asséché, c'est un calcrète, de durée de vie géologique très courte.

### **Exploitation minière:**

Selon les circonstances, soit en surface avec de gros engins, soit en galeries souterraines (nécessitant une forte ventilation pour éviter une exposition du personnel au radon) et parfois sans personnel, avec des machines téléguidées tant la quantité de radon libérée est importante, comme à Cigar Lake. Les minerais ordinaires à 0.5-2% sont broyés et lessivés par de l'eau faiblement acidulée mettant en solution l'UO<sub>2</sub>. On précipite le métal chimiquement dans un autre bac par de la soude ou ammoniac, donnant directement l'uranate commercial "yellow cake" à 70% d'Uranium. La descendance naturelle de l'Uranium extrait, en gros quatre fois plus radioactive que le métal pur emporté, reste sur place dans les haldes de l'exploitation. Son Thorium reste immobilisé mais le Radium (géologiquement mobile car de la famille du calcium) et ses propres descendants (inclus ci-dessus dans la descendance de l'Uranium) sont le siège d'environ 70% de la radioactivité naturelle du gisement avant exploitation. Un soin particulier doit être pris pour les haldes car dans certains cas leur Radium peut être déplacé par les eaux superficielles et concentré là où on ne l'attendait pas. Bien que la radioactivité naturelle totale du gisement après exploitation ait baissé de 30%, le Radium peut éventuellement en concentrer une partie très localement, provoquant une nuisance radon par exemple. Un simple recouvrement des haldes par 20cm de terre glaise (imperméable) recouverte de tout venant de provenance hors site suffit pourvu qu'un contrôle radiologique des eaux de drainage soit instauré jusqu'à stabilisation du site.

**Nota:** Le cousin de l'Uranium, le Thorium, 3.8 fois plus abondant dans le manteau terrestre accompagne fidèlement l'Uranium dans les basaltes, batholites et pegmatites pour exactement les mêmes raisons que l'Uranium, souvent en thorianite ThO<sub>2</sub> noire et dure, au point de former parfois un minéral commun genre uraninite contenant beaucoup de Thorium en substitution de l'Uranium, et de mêmes propriétés physiques: l'uranothorianite. Là, leurs routes se séparent car le Thorium n'est pas soluble dans les eaux quelles qu'elles soient, rendant même l'uranothorianite indestructible chimiquement. Ces minéraux au Thorium s'accumulent lentement dans les débris de démantèlement des granites disparus, associé à d'autres irréductibles tels le

zircon, diamant, or et métaux de la famille du platine. Sur les très vieux continents émergés on le trouve sous la couche de terre arable (Amérique du Sud, Guyane, sables noirs de l'Inde, etc). Il ne retourne jamais dans l'Océan. Le Thorium remplacera l'Uranium quand le besoin s'en fera sentir (dans des dizaines de siècles) si la Fusion thermonucléaire n'était jamais maîtrisée industriellement.

**Références:**

Uranium: M.Cuney, J.Leroy et M.Pagel

Géologie de la croûte océanique: T.Juteau, R.Maury, *Sciences de la Terre*

Manual of Mineralogy: *J.D.Dana 20th edition* , C.Klein, C.Hurlbut,

Emission: Août 2008

Corrections numériques: 20 Oct 2008 (remerciant les lecteurs les ayant signalées).