

Réunion de la Société Géologique de France avec le concours d'AREVA, CNRS -
INSU, PACEN, GUTEC, IDES, Université de Paris-Sud

Géologie et Chimie de l'Uranium

29 – 30 novembre 2011 à Orsay
Université de Paris-Sud
Faculté des Sciences - Campus d'Orsay

Programme et volume des résumés

Organisateurs

Maurice Pagel (UMR IDES, Université de Paris-Sud, Orsay), Jean-Pierre Milesi (AREVA)
et Sylvie Delpech (IPNO, Université Paris-Sud, Orsay)

E-mail : maurice.pagel@u-psud.fr, jean-pierre.milesi@areva.com, sylvie.delpech@u-psud.fr

Comité scientifique

Jocelyn Barbarand, IDES Orsay
Daniel Beaufort, Hydras Poitiers
Antonio Benedicto, AREVA
Claude Caillat, AREVA
Georges Calas, IMPMC Paris
Michel Cathelineau, G2R et CREGU Nancy
Alain Cheilletz, CNRS/INSU - CRPG Nancy
Gérard Côté, ENSCP Paris
Michel Cuney, G2R et CREGU Nancy
Nicolas Dacheux, ICSM Bagnols sur Cèze
Denis Gapais, Géosciences Rennes
Cécile Gautheron, IDES Orsay
Bernd Grambow, PACEN – Subatech Nantes
Jean-Marc Miehé, AREVA
Jean Reyx, AREVA
Amel Rejeb, R&D AREVA
Jacques Thiry, AREVA, SEPA





Réunion de la Société Géologique de France
Géologie et Chimie de l'Uranium

Mardi 29 novembre 2011

9h10 – 9h30 – Accueil des participants par Maurice Pagel, Jean-Pierre Milesi et Sylvie Delpech, organisateurs.

9h30 – 9h50 - Les gisements d'uranium de type « intrusifs ».

Patrice Bruneton

p.7

9h50 – 10h10 - Les gisements d'U sous discordance : analogies avec les gisements F-Ba-Pb-Zn (Ag) de type « Basin Hosted » ?

Michel Cathelineau, Antonin Richard, Julien Mercadier, Marie-Christine Boiron, Michel Cuney (G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy)

p.8

10h10 – 10h40 - Argiles et minéraux associés guides de prospection des gisements d'uranium : le point sur les avancées récentes.

D. Beaufort et P. Patrier (HydrASA, UMR 6269, Université de Poitiers-CNRS)

p.9

10h40 – 11h00 – Pause

11h00 – 11h20 - Fusion partielle et transfert de l'uranium : exemple du domaine Mudjattik-Wollaston (Saskatchewan, Canada) et approche expérimentale.

Philippe Goncalves, Pierre Trap (Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté, Besançon), Marieke Van Lichtervelde (UMR, Geosciences Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse), Pauline Jeanneret, Didier Marquer (UMR Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté, Besançon), Jean-Louis Feybesse (AREVA, BU Mines, Paris La Défense), Jean-Louis Paquette (UMR Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)

p.10

11h20 – 11h40 Les minéralisations d'uranium hudsoniennes dans la partie Ouest de l'orogène Trans-Hudsonienne (Saskatchewan, Canada): une source pour la formation des gisements de type discordance ?

Julien Mercadier (G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), Irvine R. Annesley (JNR Resources Inc., Saskatoon, Canada & Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada), Christine L. Austmann (Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada) et Steve Creighton (Saskatchewan Research Council, Saskatoon, Canada) p.11

11h40 – 12h00 - Mobilisation des éléments U-Th au cours du métamorphisme Panafricain : implication sur la formation des gisements Cu-Co-(U), Dôme de Solwezi, NW de la Zambie.

Aurélien Eglinger, Olivier Vanderhaeghe, Anne-Sylvie André-Mayer, Michel Cuney (Nancy-Université, UMR G2R 7566 CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), Philippe Goncalves (Université de Franche-Comté, UMR 6249 CNRS, Besançon), Cyril Durand (Université de Lille 1, FRE 3298 Géosystèmes, Villeneuve d'Ascq) et Jean-Louis Feybesse (AREVA, BU Mines, Paris La Défense) p.12

12h00 – 12h20 - Caractérisation de réseaux de fractures par anisotropie sismique et électrique.

Hermann Zeyen, Jan Bereš, Marc Pessel (UMR 8148 IDES, CNRS-Université Paris-Sud XI, Orsay), Stéphane Gaffet (UMR GEOAZUR 6526, UNS/CNRS/OCA, Valbonne), Dominique Rousset et Guy Sénéchal (UMR 5212, Univ. Pau et des Pays de l'Adour, Pau) p.13

12h20 – 14h00 - Buffet

14h00 – 14h20 - Etude de la spéciation de l'uranyle par spectroscopie Raman dans des solutions chlorurées (LiCl = 0,5 à 15 M) jusqu'à 350°C. Conséquences métallogéniques et perspectives.

Maxime Dargent, Jean Dubessy, Marie-Camille Caumon et Chinh-Nguyen Trung (UMR CNRS G2R 7566, Université Henri Poincaré, Vandoeuvre-lès-Nancy) p.14

14h20 – 14h40 - Altération expérimentale de monazite naturelle dans les conditions de formation des gisements d'uranium d'Oklo et de type discordance.

Antonin Richard, Jean-Marc Montel, Chantal Peiffert, Romain Leborgne, Michel Cathelineau et Michel Cuney (G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy) p.15

14h40 – 15h00 - Perturbation des chronomètres U-Th-Pb lors de l'altération à BT de la monazite : synergie entre dégâts d'irradiation et dissolution-précipitation.

Anne-Magali Seydoux-Guillaume (GET, UMR 5563 CNRS, Université Paul Sabatier, IRD, Toulouse), J.-M. Montel (G2R, CNRS, ENSG, Nancy-Université, Vandoeuvre-lès-Nancy), B. Bingen (Geological Survey of Norway, Trondheim Norway), V. Bosse (Clermont Université, CNRS UMR 6524, Université Blaise Pascal and IRD, Clermont-Ferrand), Ph. De Parseval (GET, UMR 5563 CNRS, Université Paul Sabatier, IRD, Toulouse), J.-L. Paquette (Clermont Université, CNRS UMR 6524, Université Blaise Pascal and IRD, Clermont-Ferrand), Emilie Janots (ISTerre Grenoble), et Richard Wirth (Helmholtz-Zentrum Postdam, Deutsches GeoForschungsZentrum, Telegrafenberg, Germany) p.16

15h00 -15h20 - Interaction Uranium (VI) avec les Substances Humiques : Spéciation et Application à des Données Indépendante.

Pascal E. Reiller (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, CE Saclay, DEN/DANS/DPC/SEARS, Laboratoire de développement Analytique, Nucléaire, Isotopique, Elémentaire et organique, Gif-sur-Yvette), Laura Marang (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, CE Saclay, DEN/DANS/DPC/SEARS, Laboratoire de développement Analytique, Nucléaire, Isotopique, Elémentaire et organique, Gif-sur-Yvette & Laboratoire de Géochimie des Eaux, Université Paris Diderot, IPGP UMR CNRS 7154, Paris), Delphine Jouvin et Marc F. Benedetti (Laboratoire de Géochimie des Eaux, Université Paris Diderot, IPGP UMR CNRS 7154, Paris) p.17

15h20 – 15h40 -Préparation et caractérisation de solutions solides $\text{Th}_{1-x}\text{U}_x\text{SiO}_4$: vers une compréhension de la formation de la coffinite ?

N. Clavier, D.T. Costin, A. Mesbah, N. Dacheux, (ICSM –UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM Bagnols sur Cèze) et C.Poinsot (CEA/DEN/DRCP/DIR Bagnols sur Cèze) p.18

15h40 – 16h00 – Pause

16h00 – 16h20 - Un nouvel outil géochimique pour l'étude des gisements d'uranium : les anions dans l'uraninite.

Louis Raimbault (Centre de Géosciences, Mines-ParisTech, Fontainebleau), Julien Mercadier (ETH Zurich, Department of Chemistry and Applied Biosciences, Laboratory of Inorganic Chemistry, Zurich), Michel Cuney (CREGU & UMR G2R 7566, Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques, Université Henri Poincaré, Nancy 1), Nathalie Moncoffre, Benoît Marchand et Angela Perrat-Mabillon (Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Villeurbanne) p.19

16h20 – 16h40 – Tectonique dans le bassin d'Unegt (Est-Gobi, Mongolie) : bandes de déformation, migration d'hydrocarbures et minéralisations d'uranium.

A. Giné (AREVA NC, BG Mines, Paris La Défense, IDES & Université Paris Sud XI, CNRS/INSU, Orsay), B. Saint-Bézar (IDES, Université Paris Sud, CNRS/INSU, Orsay), A. Benedicto, A. Wattinne (AREVA NC, BG Mines, Paris la Défense) et G. André (COGEGOBI, BG MINES-DGS) p.20

16h40 – 17h00 - Etude des sources de l'uranium dans le bassin d'Erlian (Chine).

Christophe Bonnetti, Michel Cuney, Sylvain Bourlange, Fabrice Malatre (Université de Nancy, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), Antonio Benedicto (AREVA NC – BG Mines, direction des géosciences, Paris La Défense) et Xiaodong Liu (East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi (China)) p.21

17h00 – 17h20 - Acquisition des données thermodynamiques associées aux phosphates et vanadates d'uranyle : des analogues synthétiques aux échantillons naturels.

F. Cretaz, S. Szenknect, N. Clavier (ICSM (LIME) UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM, Bagnols sur Cèze), C. Poinsot (CEA/DEN/DRCP/DIR, Bagnols sur Cèze), M. Descostes (AREVA, Business Group Mines, DI/DR&D-projet Envi@mines, Paris La Défense) et N. Dacheux (ICSM (LIME) UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM, Bagnols sur Cèze) p.22

17h20-17h40 - Spéciation de l'uranium dans les opales de Nopal I : implications géochimiques pour la fin de la genèse du gisement.

Guillaume Othmane, Thierry Allard, Nicolas Menguy (Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés, CNRS UMR 7590, Université Pierre et Marie Curie, Paris) Thomas Vercouter (CEA Saclay, DEN, DPC, SEARS, LANIE, Gif-sur-Yvette) Guillaume Morin, Imène Esteve, Georges Calas (IMPMC, CNRS UMR 7590, Université Pierre et Marie Curie, Paris) et Mostafa Fayek (Department of Geological Sciences, University of Manitoba, Winnipeg) p.23

17h40-18h00 - Distribution et valence de l'uranium dans les phosphorites.

Jocelyn Barbarand (UMR UPS-CNRS IDES 8148, Université Paris Sud, Orsay), Romuald Drot (Institut de physique nucléaire, groupe de radiochimie, Université Paris Sud, Orsay), Alexis Grare (IDES et AREVA), Jean Reyx (BG Mines, AREVA, Paris la défense), Maurice Pagel (IDES, Université Paris Sud, Orsay) et Marc Brouand (BG Mines, AREVA, Paris la défense) p.24

Mercredi 30 novembre 2011

8h40 – 9h00 - Le nucléaire face à un « Pic Uranium » ?

Aziz Zakari et Adrien Bidaud (LPSC Grenoble)

p.25

9h00 – 9h20 - Contexte géologique des gisements d'U primaires de la ceinture orogénique de Damara, Namibie : De la source migmatitique au gisement plutonique.

Wilfried Toé, Olivier Vanderhaeghe, Anne-Sylvie André-Mayer (Nancy Université UMR G2R 7566 CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), Jean-Louis Feybesse, Jean-Pierre Milési (AREVA – BU Mines, Paris) et Jean-Louis Paquette (Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand)

p.26

9h20 – 9h40 - Distribution de l'uranium dans un granite Archéen : du batholithe à la lame mince.

Simon Carrouée, Jean-François Moyen (Université Jean Monnet, Saint Etienne) et Michel Cuney (G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy)

p.27

9h40 – 10h00 - Zonalité minéralogique, géochimique et hydrochimique d'un roll-front au Kazakhstan : données récentes et état des interprétations.

Jean-Michel Schmitt, Marc Brouand (AREVA/BG Mines, Direction des Géosciences, Paris La Défense), Majda. Bouzid (Mines ParisTech, Fontainebleau), Valérie Langlais (AREVA/BG Mines, SER, Paris La Défense) et Sébastien Hocquet (AREVA/BG Mines, KATCO, Almaty, Kazakhstan)

p.28

10h00 – 10h20 - Les facies carbonatés dans les séries silico-clastiques des gisements d'uranium de type roll du Kazakhstan : données minéralogiques, géochimiques et isotopiques.

A. Munara (UMR CNRS-UHP-INPL 7566 et CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), P. Boulvais (Géosciences UMR 6118, Université de Rennes) C. Carpentier, M. Cathelineau (UMR CNRS-UHP-INPL 7566 et CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy) et M. Brouand (AREVA, Paris la défense)

p.29

10h20 – 10h40 - Modélisation 3D du gisement uranifère de Muyunkum, Kazakhstan.

Leïla Ajjabou (Katco, Almaty, Kazakhstan – ENSG-LIAD Nancy), Patrick Ledru, Nicolas Fiet, Sébastien Hocquet (AREVA/BG Mines, KATCO, Almaty, Kazakhstan) et Jean-Jacques Royer (ENSG-LIAD Nancy)

p.30

10h40 – 11h00 - Du modèle stratigraphique à la modélisation géologique 3D de systèmes de roll front au Kazakhstan.

N. Fiet (Géosciences, Katco, Almaty, Kazakhstan), T. Oppeneau (Géosciences AREVA, La Défense), N. Berestnev, T. Merembayev et P. Ledru (Géosciences, Katco, Almaty, Kazakhstan)

p.31

11h00 – 11h20 – Pause

11h20 – 11h40 - Les gisements d'uranium au sein de l'évolution tectono-sédimentaire du bassin francevillien (Gabon).

Jean-Louis Feybesse et Olivier Parize (AREVA NG, BG Mines, Paris La Défense)

p.32

11h40 – 12h00 - Du Talak au Teleflak (Madaouéla, Arlit Niger) : décryptage des événements clefs à la compréhension de l'évolution de la région au Viséen, et des minéralisations associées dans le Guezouman.

I. Aouami, A. Nedjari, T. Mahaman, H. Sanguinetti (GOVIEX, Niger)

p.33

12h00 – 12h20 - Apport des argiles à la compréhension du contexte sédimentaire à la base du bassin d'Athabasca dans le secteur du gisement de Shea Creek (Ouest Athabasca, Saskatchewan, Canada).

Freddy Uri, Daniel Beaufort (HydrASA, Université de Poitiers, CNRS UMR 6269, Poitiers), Jean-Louis Feybesse, Olivier Parize (AREVA, BU Mines, Paris La Défense) p.34

12h20 – 12h40 - Altérations argileuses et minéralisations uranifères associées le long du faisceau structural Kiggavik-Andrew Lake (Nunavut, Canada).

Thomas Riegler (HydrASA/ERM, Université de Poitiers, CNRS UMR 6269, Poitiers), Jean-Luc Lescuyer, Peter Wollenberg (AREVA, Paris La Défense et AREVA Ressources Canada) et Daniel Beaufort (HydrASA, Université de Poitiers, CNRS UMR 6269) p.35

12h40 – 13h00 - Sur des gisements d'uranium d'ascendance rhyolitique : Xiangshan /Jiangxi en Chine, Sierra Pena Blanca/ Chihuahua au Mexique et Lodève/Hérault en France.

Jacques Dardel p.36

13h00 – 14h00 – Buffet

14h00 – 14h20 - Extraction L/L de l'Uranium et du Thorium : vers la compréhension du rôle de l'eau dans leur sphère de solvation en milieu organique.

Damien Bourgeois, Jérôme Maynadié et Daniel Meyer (Laboratoire de Chimie et Physico-chimie des Actinides, LCPA, Institut de Chimie Séparative de Marcoule, ICSM, UMR 5257, Bagnols sur Cèze) p.37

14h20 – 14h40 - Nouveau procédé de précipitation des concentrés d'uranium pour augmenter la densité en vrac du concentré.

B. Courtaud, F. Auger, J. Thiry (AREVA NC, SEPA, Bessines sur Gartempe) p.38

14h40 – 15h00 - Etude granulométrique des phosphates naturels marocains « Bassin Oulad Abdoun » : Distribution des radionucléides naturels, quantification et implication génétique.

S. Fakhri, E. Fait, R. Outayad (Unité de Radiochimie, Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Maroc) M. Mouflih, (Laboratoire des Géorressources Sédimentaires et Environnements, Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Maroc), I. Voque Romero, Guillermo Manjon (Departament de Física Aplicada II, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Universidad de Sevilla), M. Ben Mansour, A. Bouih (CNESTN-Maroc), A. Nourredine (IPHC, Strasbourg) et H. El Hadi (Laboratoire de Géochimie, Géologie Appliquée et Environnement, Université Hassan II, Mohammedia-Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Maroc) p.39

15h00 – 15h20 - Valorisation de l'uranium contenu dans l'acide phosphorique.

Hamid Mokhtari, Bruno Courtaud et Jacques Thiry (AREVA Mines, SEPA, Bessines sur Gartempe) p.40

15h20 – 15h40 – Pause

15h40 – 16h00 - Développement d'un système de couplage direct d'une colonne instrumentée avec une ICP-MS : Application à la migration de l'uranium dans une colonne de sable en présence d'acides humiques.

Alkiviadis Gourgiotis, Sylvain Bassot, Caroline Simonucci, Olivier Diez, Aurélie Mifsud (IRSN/DEI/SARG, Fontenay-aux-Roses), Arnaud Martin-Garin et Frédéric Coppin (IRSN/DEI/SECRE, Cadarache) p.41

16h00 – 16h20 - Spéciation et facteurs de stabilité de l'uranium dans les résidus miniers de Cominak (Niger).

Adrien Dejeant, Laurence Galois, Georges Calas (IMPMC Paris), Vannapha Phrommavanh et Michael Descostes (AREVA, BG Mines, R&D, Paris La Défense) p.42

16h20 – 16h40 - IMOURAREN – Tests de lixiviation et spécificité des analcimes.

Aurélia Wattine-Morice (AREVA, Paris La Défense) et Michel Bélières (AREVA – SEPA, Bessines sur Gartempe) p.43

16h40 – 17h00 - Modélisation de tests de lessivage acide de minerai d'uranium. Application à la récupération minière in situ (ISR).

Rose Ben Simon (Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Fontainebleau), Valérie Langlais, Jean-Michel Schmitt (AREVA NC, BU Mines, Paris La Défense), Michel Bélières (SEPA, AREVA NC BU Mines, Bessines/ Gartempe) et Médard Thiry (Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Fontainebleau) p.44

17h00 à.....Bilan des deux journées et discussion générale

Résumés sans présentation orale

- Le rôle des pyrites détritiques dans la concentration de l'uranium dans les conglomérats du bassin mésoarchéen de Pongola (2.9 Ga) Afrique du Sud.

Melissa Megneng (Université Paris Sud 11- UMR 8148 – IDES, Orsay), Beate Orberger (ERAMET RESEARCH Trappes), Axel Hofmann (Department of Geology, University of Johannesburg, Afrique du Sud), Richard Wirth (GFZ, Potsdam, Allemagne) Paule Dumas et Christophe Sandt (Synchrotron Soleil, Saint Aubin) p.45

- The role of black chert pebbles in uranium mineralisation in conglomerates of the basal Mozaan Group (Pongola basin, South Africa).

Beate Orberger (Université Paris Sud 11- UMR 8148 – IDES, Orsay), Axel Hofmann (Department of Geology, University of Johannesburg, Afrique du Sud), Melissa Megneng (Université Paris Sud 11 - UMR 8148 – IDES, Orsay), Nigel Hicks (Council for Geoscience, Pietermaritzburg, South Africa), Richard Wirth (GFZ Potsdam, Allemagne) et Alina Tudryn (Université Paris Sud 11 - UMR 8148 – IDES, Orsay) p.46

- Altération hydrothermale et lessivage de l'uranium dans le granite de Questembert (Massif Armoricaïn, France).

Romain Tartèse, Philippe Boulvais et Marc Poujol (Université Rennes1, Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Rennes) p.47

LES GISEMENTS D'URANIUM DE TYPE « INTRUSIFS »

Patrice Bruneton

p.bruneton@orange.fr

Les gisements de type « intrusifs » (classification AIEA 2009) sont associés à des roches intrusives ou anatectiques de compositions chimiques très variées. Le contexte géodynamique de ces gisements correspond à des intrusions syn à post-orogéniques dans des ceintures mobiles intra-cratoniques. Elles ont des contacts généralement très tranchés avec leurs roches encaissantes.

76 gisements « intrusifs » étaient répertoriés en 2011 dans la base de données UDEPO de l'AIEA. Ils se répartissent selon 5 sous-types qui appartiennent à deux catégories génétiquement très différentes, les gisements associés à des roches provenant de phénomènes de *fusion partielle* (1. *alaskites*, 2. *pegmatites*) et les gisements provenant de phénomènes de *crystallisation fractionnée* (3. *granites-monzonites*, 4. *complexes alcalins* et 5. *carbonatites*).

Dans les gisements provenant de phénomènes de fusion partielle, l'uranium est présent principalement sous forme d'uraninite.

- 1) Dans les **alaskites**, (granites pegmatoïdiques leucocrates), l'uraninite (\pm bétafite) est disséminée dans des corps irréguliers sécants, de tailles très variables. Les teneurs sont faibles (100-500 ppm), les tonnages importants. Tous les gisements connus sont localisés en Namibie avec notamment le gisement en production de Rossing (246.000 t U, 300 ppm) et les gisements de Rossing South (190.000 t, 410 ppm), Anomaly A (48.700 t, 175 ppm) et de Valencia (32.400 t, 110 ppm).
- 2) Dans les **pegmatites**, l'uraninite dominante et les autres phases minérales à U-Th sont localisées dans des dykes pegmatitiques. Les teneurs sont faibles (100-800 ppm), les tonnages de quelques centaines à quelques milliers de tonnes. Les principaux districts sont localisés au Canada: districts du Lac Charlebois (17.500 t, 600 ppm), de North Shore (25.000 t, 125 ppm) et de Bancroft (15.000 t, 800 ppm), seul district ayant produit de l'uranium de 1955 à 1996.

Dans les gisements provenant de phénomènes de cristallisation fractionnée, l'uranium, à faible teneur (20-200 ppm), souvent associé au thorium, ne représente qu'un sous-produit.

- 3) **Granites-monzonites**: minéralisations disséminées localisées dans des complexes granitiques ou quartz-monzonitiques hautement différenciés (porphyres cuprifères de Bingham Canyon, Twin Buttes et Yerington, USA; porphyres cuprifères du Chili). De par leurs teneurs généralement très faibles en uranium (20-100 ppm), ce dernier ne peut être récupéré qu'en sous-produit des minéralisations à Cu-Au-Mo-Ag.
- 4) **Complexes peralcalins**: disséminations d'uranium à faibles teneurs (50-250 ppm) dans des dômes et stocks de granites ou de syénites les plus fractionnés des complexes peralcalins. Les phases uranifères (streenstrupine, eudialite, rinkite, vitusite, monazite,) sont complexes et généralement réfractaires. Les principaux gisements sont ceux de Kvanefjeld (Groenland) à Terres Rares-Zn-F-Nb-Ta-U (135.000 t, 220 ppm) et de Ghurayah (Arabie Saoudite) à Ta-Nb-Y-Zr-U (38.500 t, 140 ppm).
- 5) **Carbonatites**: uranothorianite, bastnasite, disséminées, localisées dans des complexes de carbonatites cuprifères à P-Fe-Zr-Th-Ti (Phalabora, Afrique du Sud) ou des carbonatites à P-Nb-Terres Rares-Ta-F-Th, comme Araxa (13.000 t U, 80 ppm) et Catalao (72.200 t U, 130 ppm) au Brésil et Sokli en Finlande (2.500 t U, 100 ppm).

La pression existant actuellement sur le marché des terres rares et à plus longue échéance les besoins en Ta-Nb-Th dans le monde pourraient conduire à la covalorisation de l'uranium avec ces métaux dans les gisements des sous types 4 et 5.

LES GISEMENTS D'U SOUS DISCORDANCE : ANALOGIES AVEC LES GISEMENTS F-Ba-Pb-Zn(Ag) DE TYPE « BASIN HOSTED »?

Michel Cathelineau, Antonin Richard, Julien Mercadier,
Marie-Christine Boiron, Michel Cuney

G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes B.P. 239, F-54506,
Vandœuvre-lès-Nancy, France. *michel.cathelineau@g2r.uhp-nancy.fr

La circulation des fluides à l'interface socle-couverture est de première importance pour le transfert des métaux, et particulièrement la formation des gisements de F-Ba-Pb-Zn(Ag) de type « basin hosted » (Boiron et al, 2010). L'examen des gisements d'uranium protérozoïques dits « sous discordance » (Canada, Australie) montrent beaucoup de ressemblances avec des systèmes à Pb-Zn-F-Ba(Ag) plus récents, parmi lesquelles :

Origine des fluides : les circulations à la base des bassins se sont produites en présence de saumures chlorurées oxydantes, riches en Na-K-Ca-Mg (Richard et al., 2010). L'origine des saumures a été précisée par l'analyse du $\delta^{37}\text{Cl}$ (-1 à 0 ‰) et des rapports Cl/Br (~ 200) (Richard et al., 2011), mais aussi par celle du $\delta^{11}\text{B}$ obtenu sur les tourmalines diagénétiques (20 à 30 ‰) (Mercadier et al., sous presse), qui montrent sans ambiguïté que l'évaporation de l'eau de mer constitue le seul mécanisme susceptible d'expliquer ces valeurs.

Pénétration dans les socles et extraction des métaux: la pénétration dans les socles cristallins est assurée par le biais réseaux de microfractures, en partie hérités de déformations antérieures tardi-orogéniques (Mercadier et al., 2010). La forte interaction avec les socles est responsable d'échanges Na-Ca, de l'augmentation des concentrations en métaux dans les saumures, et de la formation d'argiles magnésiennes (chlorite di-trioctaédrique de type sudoite) et des dravites (tourmalines magnésiennes).

Transport et dépôt de l'uranium: le caractère oxydant, la teneur en chlore extrêmement élevée font de ces fluides des transporteurs potentiels de métaux, surtout si le pH est bas de l'ordre de 3 à 4 à 150°C (Richard et al., sous presse).

Références :

- Boiron M.C, Cathelineau M., Richard A. (2010). Fluid flows and metal deposition near basement / cover unconformity: Lessons and analogies from Pb-Zn-F-Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits. *Geofluids*, 10, 270-292.
- Mercadier J., Richard A., Cathelineau M. Boron and magnesium-rich marine brines at the origin of giant unconformity-related uranium deposits: $\delta^{11}\text{B}$ evidence from Mg-tourmalines, *Geology*, sous presse.
- Mercadier J., Richard A., Boiron M.C., Cathelineau M., Cuney M. (2010). Migration of brines in the basement rocks of the Athabasca Basin through microfracture networks (P-Patch U deposit, Canada). *Lithos*, 115, 121-136.
- Richard A., Rozsypal C., Mercadier J., Banks D.A., Cuney M., Boiron M.C., Cathelineau M. Giant uranium deposits formed from exceptionally uranium-rich acidic brines. *Nature Geoscience*, sous presse.
- Richard A., Banks D.A., Mercadier J., Boiron M.C., Cuney M., Cathelineau M. (2011). An evaporated seawater origin for the ore-forming brines in unconformity-related uranium deposits (Athabasca Basin, Canada): Cl/Br and $\delta^{37}\text{Cl}$ study of fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 2792-2810.
- Richard A., Pettke T., Cathelineau M., Boiron M.C., Mercadier J., Cuney M., Derome D. (2010). Brine-rock interaction in the Athabasca basement (McArthur River U deposit, Canada): Consequences for fluid chemistry and uranium uptake. *Terra Nova*, 22, 303-308.

Argiles et minéraux associés guides de prospection des gisements d'uranium: le point sur les avancées récentes

D. Beaufort et P. Patrier

HydrASA, UMR 6269 Université de Poitiers-CNRS, Bâtiment B08, Rue Albert Turpin, 86022 Poitiers cédex.

Les minéraux argileux associés aux gisements d'uranium enregistrent des informations sur les conditions d'interaction entre les solutions, vecteur du transport de l'uranium, et les roches hôtes au moment des processus de minéralisation. D'autre part l'archivage de ces informations est exploitable bien longtemps après que les circulations aient cessé. Classiquement, les minéraux argileux sont considérés comme source d'information dans les domaines suivants : (1) l'extension des zones d'altération et la chronologie relative des événements (pétrographie des altérations), (2) les paléotempératures et la chimie des solutions (cristallochimie des argiles) et (3) l'origine des solutions et l'âge des cristallisations (isotopes stables et radiogéniques).

Les travaux de recherche menés ces dix dernières ont permis d'optimiser l'outil « argile » pour la prospection de l'uranium en le focalisant sur les variations des propriétés du cristal à une échelle spatiale conforme à celle des forages d'exploration. Ainsi, pour les espèces argileuses les plus courantes, il est maintenant possible de définir un ensemble de caractéristiques texturales, cristallographiques ou cristallochimiques dont les variations les plus marquantes apparaissent quelques dizaines à quelques centaines de mètres autour des corps minéralisés ou des discontinuités structurales ayant canalisé les solutions minéralisatrices.

Les avancées les plus marquantes concernent les trois points suivants :

(1) Les chemins de circulation des paléo-fluides : Les minéraux argileux authigènes possèdent une signature texturale et cristallographique des conditions dans lesquelles ils se sont formés et ont grandi. Ainsi, pour une espèce considérée, les variations couplées des paramètres cristallographiques (taille des domaines cohérents, polytype) et texturaux (taille, forme des cristaux) sont de bons marqueurs des zones de fort déséquilibre (chimique ou thermique) entre solides et solutions.

(2) Les paléo-conditions redox : La signature cristallochimique des paléo-conditions rédox dans les milieux de formation des gisements peut être recherchée dans la concentration en fer ferrique des chlorites (mesurable par μ XANES) et dans la variation des concentrations en terres rares légères et strontium des phosphates sulfates d'aluminium qui sont des minéraux communs dans les gisements hydrothermaux et sédimentaires.

(3) Le traçage des paléo-migrations des radioéléments (U notamment). Les minéraux argileux présentent un intérêt dosimétrique car ils possèdent des défauts électroniques stables qui sont liés à l'irradiation naturelle (au rayonnement α notamment). Une telle utilisation basée sur des méthodes de résonance paramagnétique électronique (RPE) a démontré qu'il était possible de mesurer des concentrations en défauts jusqu'à plus de mille fois supérieures au fond régional dans les minéraux argileux (kaolinite, illite, sudoite) entourant des gisements d'uranium.

Une utilisation intégrée de ces nouvelles approches ouvre de nouvelles perspectives pour le raffinement des modèles génétiques des gisements d'uranium résultant des interactions eau-roche en condition sédimentaire et/ou hydrothermale.

FUSION PARTIELLE ET TRANSFERT DE L'URANIUM : EXEMPLE DU DOMAINE MUDJATTIK-WOLLASTON (SASKATCHEWAN, CANADA) ET APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Philippe Goncalves*, Pierre Trap*, Marieke Van Lichtervelde**, Pauline Jeanneret*,
Didier Marquer*, Jean-Louis Feybesse***, Jean-Louis Paquette****

* UMR Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté, Besançon,
philippe.goncalves@univ-fcomte.fr

** UMR Geosciences Environnement Toulouse, Université Paul Sabatier, Toulouse

*** AREVA, BU Mines, Tour AREVA, Paris La Défense

**** UMR Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

La formation de gisements d'uranium de classe internationale, tels que les gisements de discordance de type « Athabasca », est le résultat de processus supergènes efficaces d'extraction et de transport de l'uranium depuis la source vers le piège (e.g. Richard et al. 2010). Néanmoins, la formation de ces gisements peut aussi être favorisée si la source a été pré-concentrée lors de processus endogènes. Dans le cas du bassin d'Athabasca, la répartition des gisements d'U à l'aplomb de métasédiments partiellement fondus et de pegmatites (zone de transition entre les domaines du Mudjatik et Wollaston), suggère un rôle majeur de la fusion partielle (Annesley et al. 1997). Le mécanisme de pré-concentration invoqué est la mise en solution de monazite lors de la fusion partielle des métasédiments et la reprécipitation de l'U sous forme de monazite néoformée et/ou d'uraninite dans des leucosomes et pegmatites.

Afin de quantifier ces phénomènes de pré-concentration métamorphique, nous réalisons une étude pluridisciplinaire du socle de la zone de transition Mudjatik – Wollaston. Un point fondamental est de caractériser les relations entre pré-concentrations uranifères et évolution tectono-métamorphique, ce qui implique une étude fine du comportement des phases uranifères durant le métamorphisme, la fusion partielle et l'évolution P-T-t-D-M.

Ces données seront confrontées à de nouvelles données expérimentales et thermodynamiques des conditions physico-chimiques de la solubilité de la monazite et de l'uraninite dans les liquides silicatés. Il existe un nombre très limité de données expérimentales sur la solubilité des phases porteuses de U-Th dans les magmas granitiques (monazite : Rapp et al., 1986, 1987; Montel, 1986, 1993 ; uraninite : Peiffert et al., 1996). L'objectif est d'augmenter le jeu de données de solubilité de monazite et d'affiner les équations de saturation de monazite dans les magmas granitiques. Il faudra aussi établir à partir des données de la littérature (e.g. Peiffert et al., 1996) et de nouvelles données expérimentales, les équations de saturation des pôles purs uranifères et thorifères tels que la coffinite, l'huttonite, la brabantite et l'uraninite dans des liquides silicatés de compositions variables. Ces données expérimentales seront alors intégrées à des modèles thermodynamiques, de type pseudosection, qui permettent de déterminer pour toutes P et T, la composition des liquides silicatés et donc le degré de saturation en monazite.

Ce projet a débuté en septembre 2011. Ainsi notre objectif sera de présenter à la communauté notre projet, les méthodes et les résultats attendus en insistant sur l'état de l'art des connaissances du socle métamorphique du bassin de l'Athabasca et de la solubilité des monazites dans les liquides silicatés.

Les minéralisations d'uranium hudsoniennes dans la partie Ouest de l'orogène Trans-Hudsonienne (Saskatchewan, Canada): une source pour la formation des gisements de type discordance?

Julien Mercadier*, Irvine R. Annesley****, Christine L. Austmann*** et Steve Creighton****

*G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes, B.P. 239, F-54506, Vandoeuvre lès Nancy, France, julien.mercadier@g2r.uhp-nancy.fr

**JNR Resources Inc., 204-315 22nd Street East, Saskatoon, SK, S7K 0G6, Canada

***Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, 114 Science Place, Saskatoon, SK, S7N 5E2, Canada

**** Saskatchewan Research Council, 125 Innovation Boulevard, Saskatoon, SK, S7N 2X8, Canada

Le modèle génétique des gisements géants d'uranium de type discordance du bassin d'Athabasca (Canada) est un sujet toujours débattu (Jefferson et al., 2007 ; Kyser et Cuney, 2008), l'une des questions principales étant l'origine des métaux (uranium ou terres rares par exemple) concentrés par des événements diagénétiques-hydrothermaux durant l'ère Mesoproterozoïque (1.5-1 Ga) à l'interface entre le bassin sédimentaire d'Athabasca et le socle Archéen à Paleoproterozoïque sous-jacent. Actuellement, les minéraux accessoires comme la monazite, le zircon ou l'apatite du bassin ou du socle sont proposés comme le stock métal initial pour la formation des gisements de type-discordance (Fayek et Kyser, 1997 ; Hecht et Cuney, 2000).

Une étude systématique et détaillée de deux zones du socle (les propriétés de Way Lake et Moore Lake), localisées en bordure est du bassin de l'Athabasca, a permis de démontrer la présence significative et récurrente de minéralisations d'oxydes d'uranium d'âge Hudsonien (1.85-1.7 Ga) formées avant le dépôt du bassin sédimentaire. Deux types de minéralisations ont été observés : des oxydes d'uranium magmatiques liés à des pegmatoïdes et des oxydes d'uranium de haute température en veine. Les oxydes d'uranium magmatiques ont été formés par fusion partielle des roches métasédimentaires du Groupe Wollaston alors que l'origine des minéralisations en veine reste énigmatique, mais leur haute teneur en Th suggère un processus de haute température possiblement associé à du métasomatisme Na et/ou Ca. Les oxydes d'uranium sont associés à d'autres minéraux accessoires porteurs de U, Th et terres rares, renforçant le contenu en métaux de ces roches, qui atteint plusieurs centaines de ppm d'U. Les échantillons étudiés, même macroscopiquement frais, présentent des évidences claires d'altération indiquant la percolation de saumures associées à la formation des gisements de type discordance. Il est donc proposé que le socle de la partie est du bassin d'Athabasca ait pu fournir une source d'uranium hudsonienne d'uranium, beaucoup plus importante que jusqu'ici proposée, pour les gisements hydrothermaux de type discordance.

Fayek et Kyser, 1997, *Canadian Mineralogist*, 35, 627-658

Hecht et Cuney, 2000, *Mineralium Deposita*, 35, 791-795

Jefferson et al., 2007, *EXTECH IV, Geological Survey of Canada*, 23-67

Kyser et Cuney, 2008, *GAC-MAC Short Course series*, 39, 161-219

Mobilisation des éléments U-Th-REE au cours du métamorphisme Panafricain : implication sur la formation des gisements Cu-Co-(U), Dôme de *Solwezi*, NW de la Zambie.

Aurélien Eglinger* ; Olivier Vanderhaeghe* ; Anne-Sylvie André-Mayer* ; Michel Cuney* ; Philippe Goncalves** ; Cyril Durand*** ; Jean-Louis Feybesse****

* Nancy Université, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, Vandœuvre-lès-Nancy ; aurelien.eglinger@g2r.uhp-nancy.fr

** Université de Franche-Comté, UMR 6249 CNRS, Besançon

*** Université de Lille 1, FRE 3298 Géosystèmes, Villeneuve d'Ascq

**** AREVA, BU Mines, Tour Areva, Paris La Défense

La ceinture néoproterozoïque du Lufilian est le résultat de l'assemblage du supercontinent Gondwana [1] au cours de l'**orogène Panafricain** (~ 0,5 ± 0,1 Ga). Cette ceinture implique (i) des séries métasédimentaires carbonatées/silicoclastiques attribuées à la couverture Néoproterozoïque du *Katanga* [2], et (ii) des complexes gneissiques dont les âges U/Pb sur zircon sont étalés de l'Archéen au Néoproterozoïque [3]. Ces âges témoignent (i) de l'implication et du recyclage d'un socle équivalent à celui des marges des cratons voisins, (ii) d'une évolution sédimentaire, métamorphique, tectonique et magmatique polycyclique, relative aux « orogènes s.l. » Archéen, Paléoproterozoïque et Panafricain. Outre des minéralisations à Cu-Co d'intérêt économique avéré, des minéralisations à **uraninite**, datées à 530,1 ± 5,9 Ma [4], et **brannérite**, plus tardive, sont décrites autour de ces dômes gneissiques [5].

L'objectif de ce projet est de replacer les processus associés à la mobilisation, au transport et au dépôt des éléments U et Th dans leur cadre géodynamique en relation avec des modèles de croissance, remobilisation et recyclage de la croûte continentale.

Une coupe géologique à travers le dôme de *Solwezi*, dans la zone interne de la ceinture, a été réalisée afin de contraindre la nature du contact entre les séquences métasédimentaires du *Katanga* et le complexe gneissique de *Solwezi*. L'analyse pétro-géochimique des échantillons permet de caractériser une série de schistes et quartzites à disthène correspondant à la base de la série du *Katanga*. Le cœur du dôme est constitué de paragneiss migmatitiques (métagrauwackes) et de granites peralumineux intrusifs. Le métamorphisme synschisteux est croissant depuis le faciès des schistes verts en bordure du dôme jusqu'au faciès des amphibolites vers le cœur du dôme.

De nouvelles données microscopiques permettent de mettre en évidence la présence de niveaux de migmatites enrichis en monazites interprétées comme magmatique. L'**altération** de ces **monazites** en **allanite** et **apatite** permettrait la libération et la mise en solution de l'uranium sous sa forme UO_2^{2+} , ce qui peut expliquer les minéralisations à uraninite. Les cristaux d'**allanite** présentent également une **métamictisation** plus tardive due à l'auto-irradiation qui permet également de libérer de l'U en solution alors que le Th, élément plus immobile précipite sous forme de thorite. Des carbonates de REE soulignent la fracturation radiale des allanites et précipitent en bordure des grains. Ce phénomène de métamictisation peut expliquer les minéralisations plus tardives à brannérite (U^{4+} , Ca, Th, REE)(Ti, Fe³⁺, Nb)₂(O, OH)₆.

[1] Unrug, R. 1996. The assembly of Gondwanaland. *Episodes*, 19: 11-20.

[2] Porada, H. and Berhorst, V. 2000. Towards a new understanding of the Neoproterozoic-Early Paleozoic Lufilian and northern Zambezi belts in Zambia and the RCD. *J. of African Earth Sciences*, 300: 727-771.

[3] Rainaud, C., Master, S., Armstrong, R.A., Robb, L.J. 2005. Geochronology and nature of the Paleoproterozoic basement in the Central African Copperbelt (Zambia and DRC), with regional implications. *J. of African Earth Sciences*, 42: 1-31.

[4] Decrée, S., Delouie, E., De Putter, T., Dewaele, Stijn., Mees, F., Yans, J., Marignac, C. 2011. SIMS U-Pb dating of uranium mineralization in the Katanga Copperbelt : Constraints for the geodynamic context. *Ore Geology Reviews*, 40: 81-89.

[5] Così, M., De Bonis, A., Gosso, G., Hunziker, J., Martinotti, G.; Moratto, S., Robber, J.P. and Ruhlman, F. 1992. Late Proterozoic thrust tectonics, high pressure metamorphism and uranium mineralization in the Domes area, Lufilian Arc, Northwestern Zambia. *Precambrian Research*, 58: 215-240.

Caractérisation de réseaux de fractures par anisotropie sismique et électrique

Hermann Zeyen*, Jan Bereš, Marc Pessel
*UMR 8148 IDES, CNRS-Université Paris-Sud XI, Bât. 504
F-91405 Orsay cedex, FRANCE*

Tél: +33-(0)1-69-15-49-09, Fax: +33-(0)1-69-15-49-05, E-mail: hermann.zeyen@u-psud.fr

Stéphane Gaffet
*UMR GEOAZUR 6526, UNS/CNRS/OCA, 250, rue Albert Einstein - Bât. 4
Sophia-Antipolis -- F-06560 Valbonne*

Dominique Rousset, Guy Sénéchal
*UMR 5212, Univ. Pau et des Pays de l'Adour, BP 1155
F-64013 Pau Cedex - France*

Les gisements d'uranium sont souvent liés à des roches sédimentaires fracturées où l'uranium est concentré à proximité des fractures, d'où l'intérêt de la caractérisation d'un milieu géologique en termes de densité et de direction de fractures. En général, autant le litage sédimentaire que la fracturation ont des dimensions inférieures à la résolution des méthodes géophysiques. Cependant, une structure finement litée ou affectée par un réseau de fractures parallèles provoque une anisotropie de certaines propriétés physiques: selon la direction d'observation, les propriétés comme la vitesse de propagation des ondes sismiques ou la conductivité électrique vont être différentes. Un tel milieu peut être décrit par une séquence de couches rapides (ou conductrices) et lentes (ou résistantes). En direction perpendiculaire au litage ou aux plans de fractures, les ondes sismiques doivent traverser les couches lentes et les couches rapides et la vitesse mesurée correspond à une moyenne pondérée des deux. Par contre, en direction parallèle aux couches ou aux fractures, la propagation des ondes est régie par les couches rapides. De façon similaire, le courant électrique se propage mieux en direction des fractures repliés d'eau et donc relativement conductrices, qu'en direction perpendiculaire où il doit aussi traverser la matrice rocheuse typiquement très peu conductrice. Cet effet d'anisotropie sera donc autant plus important que les propriétés physiques sont contrastées. Pour la sismique, un réseau de fractures rempli de gaz aura une anisotropie plus importante que si les fractures sont saturées en eau (propagation des ondes plus rapide que dans le gaz). Par contre, en électrique, l'eau dans les fractures augmente la conductivité par rapport aux fractures sèches, ce qui augmente l'anisotropie en présence d'eau.

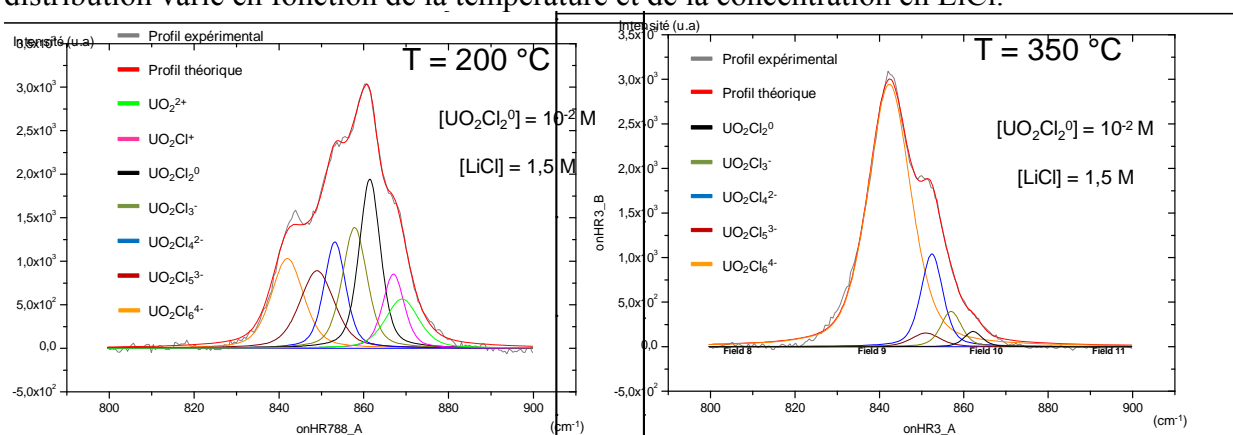
Le projet FASE se propose d'exploiter cette différence pour quantifier la densité de fracturation des milieux peu profondes en mesurant les variations de l'anisotropie sismique et électrique selon la saturation en eau d'un massif rocheux. Deux sites avec des caractéristiques différentes ont été choisis pour ces mesures: Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB à Rustrel) localisé dans un massif calcaire karstique caractérisé par un réseau de failles subverticales et le site de Lodève d'AREVA caractérisé par un litage fin subhorizontal et de la fracturation subverticale. Des résultats préliminaires sont présentés pour les deux sites. Une forte anisotropie sismique parallèle aux failles et variable dans le temps a été détectée au LSBB. Sur le site de Lodève, des mesures récentes montrent une anisotropie de la conductivité électrique dans le sens d'anomalies magnétiques interprétées comme provoquées par des minéralisations autour des fractures.

ETUDE DE LA SPECIATION DE L'URANYLE PAR SPECTROSCOPIE RAMAN DANS DES SOLUTIONS CHLORUREES (LiCl = 0,5 A 15 M) JUSQU'A 350°C. CONSEQUENCES METALLOGENIQUES ET PERSPECTIVES

Maxime DARGENT, Jean DUBESSY, Marie-Camille CAUMON, Chinh-Nguyen TRUNG

UMR CNRS G2R(7566)- Université Henri Poincaré,
BP-70239-54506-Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex
Maxime.Dargent@g2r.uhp-nancy.fr

Dans le gisement d'U de type discordance (MacArthur River, Saskatchewan, Canada), les inclusions fluides riches en chlorures (6 à 9 mole Cl/kg H₂O) contiennent de l'uranium à des teneurs de quelques dizaines de ppm jusqu'à 500 ppm : ceci suggère le rôle de complexes chlorurés dans le transport de l'uranium [1]. Ce travail a pour objectif l'étude de la spéciation de l'uranyle dans des solutions chlorurées par spectroscopie Raman de la bande d'élongation U-O de 25 °C jusqu'à 350 °C à pression de vapeur saturante (UO₂Cl₂ = 10⁻² M, LiCl = 1,5 M ; 4 M ; 8 M, pH = 1 à température ambiante). Les profils des spectres Raman montrent la présence de plusieurs complexes dont la distribution varie en fonction de la température et de la concentration en LiCl.



La décomposition des profils des spectres expérimentaux, réalisée à partir de l'attribution des fréquences de vibration U-O des différents complexes chlorurés [2], a permis d'estimer l'abondance des différents complexes ainsi que leur constante de formation. Il en ressort que les espèces UO₂Cl₅³⁻ et UO₂Cl₆⁴⁻ sont dominantes dans les conditions de formation des gisements d'uranium de type discordance. Cette étude établit, sur une base spectroscopique, le fort potentiel minéralisateur en uranium des solutions chlorurées acides à l'origine du caractère exceptionnel des gisements d'uranium de type discordance par leur tonnage et leur volume.

Références

- [1] Richard A., Pettke T., Cathelineau M., Boiron M. C., Mercadier J., Cuney M., and Derome D., 2010. Terra Nova, 303-308.
[2] Nguyen-Trung C., Begun G. M., Palmer D.A., 1992. Inorganic Chemistry, 31, 5280-5287

ALTERATION EXPERIMENTALE DE MONAZITE NATURELLE DANS LES CONDITIONS DE FORMATION DES GISEMENTS D'URANIUM D'OKLO ET DE TYPE DISCORDANCE

Antonin Richard*, Jean-Marc Montel, Chantal Peiffert, Romain Leborgne
Michel Cathelineau, Michel Cuney

G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes B.P. 239, F-54506,
Vandoeuvre-lès-Nancy, France. *antonin.richard@g2r.uhp-nancy.fr

Des altérations spectaculaires de monazite en présence de saumures diagénétiques sont bien documentées dans les bassins de Franceville (Gabon), Kombolgie (Australie) et Athabasca (Canada). Ainsi, la monazite a été proposée comme une source potentielle d'uranium pour les gisements d'Oklo et de type discordance (e.g. Mathieu et al., 2000 ; Hecht and Cuney, 2000). Cependant, ces altérations restent énigmatiques au regard de la faible solubilité de la monazite dans des conditions hydrothermales de basse température (Pourtier et al., 2010).

Afin de simuler les conditions d'altération de la monazite dans ces environnements, des expériences en batch (autoclaves type « Parr » en acier, chemisage Teflon) ont été réalisées. Des monazites naturelles riches en U et très homogènes (Managotry, Madagascar) ont été équilibrées avec des solutions de H₂O-NaCl-CaCl₂ (6 molal Cl) à 150°C et pression de vapeur saturante, pendant un mois. L'influence des proportions relatives de Na et Ca ($Na/(Na+Ca) = 0, 0.5, 1$) et du pH ($pH = 1, 3, 7$) a été testée sur neuf expériences.

L'analyse au MEB de grains de monazites après réaction, montre que des figures de corrosion discrètes apparaissent pour les expériences à $pH = 1$ et $Na/(Na+Ca) = 0.5$ et 1 , et pour l'expérience à $pH = 3$ et $Na/(Na+Ca) = 0.5$. Aucune précipitation de phase secondaire n'est observée. L'analyse des solutions en fin d'expérience par ICP-MS ne montre pas de libération significative de la teneur en U et Terres Rares.

On montre ainsi que la monazite n'est pas parfaitement stable pour une partie des conditions étudiées. En revanche, les altérations spectaculaires observées dans la nature ne sont pas reproduites. Il est envisagé de reproduire ces expériences, sur une durée plus longue (6 mois) et avec des solutions plus proches des conditions naturelles (présence de Si, Mg, K etc...).

Références :

- Hecht L., Cuney, M., 2000. Hydrothermal alteration of monazite in the Precambrian crystalline basement of the Athabasca Basin (Saskatchewan, Canada): Implications for the formation of unconformity-related uranium deposits. *Mineralium Deposita* **35**, 791-795.
- Mathieu R., Zetterström L., Cuney M., Gauthier-Lafaye F., Hidaka H., 2001. Alteration of monazite and zircon and lead migration as geochemical tracers of fluid paleocirculations around Oklo-Okélobondo and Bangombé natural nuclear reaction zones (Gabon). *Chemical Geology* **171**, 147-171.
- Pourtier E., Devidal J.L., Gibert F. 2010. Solubility measurements of synthetic neodymium monazite as a function of temperature at 2 kbars, and aqueous neodymium speciation in equilibrium with monazite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**, 1872-1891.

Perturbation des chronomètres U-Th-Pb lors de l'altération à BT de la monazite : synergie entre dégâts d'irradiation et dissolution-précipitation

Anne-Magali Seydoux-Guillaume^{1*}, J.-M. Montel², B. Bingen³, V. Bosse⁴, Ph. de Parseval¹, J.-L. Paquette⁴, Emilie Janots⁵ and Richard Wirth⁶

¹ GET, UMR 5563 CNRS - Université Paul Sabatier - IRD, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France; ² G2R, CNRS, ENSG, Nancy-Université, BP 70239, 54056 Vandoeuvre-les-Nancy, France; ³ Geological Survey of Norway, 7491 Trondheim, Norway; ⁴ Clermont Université, CNRS UMR 6524, Université Blaise Pascal and IRD, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand France; ⁵ ISTERre BP 53, 38041 Grenoble CEDEX 9, France; ⁶ Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Germany
*Corresponding author, Email: anne-magali.seydoux@get.obs-mip.fr

Cette étude s'intéresse à l'altération à basse température de trois cristaux de monazites centimétriques de Norvège (Arendal), de Madagascar (Ambato), et du Srilanka. Les trois monazites étudiées ont des compositions chimiques différentes, notamment vis-à-vis de U, Th, Y et Pb, et des âges variés allant de 491 à 900 Ma (monazite primaire-Mnz1), mais montrent toutes la même texture caractéristique. Différentes analyses en microscopie (optique et électronique-balayage et transmission) révèlent une fracturation intense, avec des fissures remplies de phases riches en Th, U et Fe, autour desquelles les grains de monazites ont des compositions différentes. Ces textures sont interprétées comme des réactions d'altération par dissolution-précipitation couplée en présence de fluides conduisant au remplacement partiel de la monazite primaire magmatique (Mnz1) par une monazite secondaire (Mnz2) associée à une phase riche en Th ($\text{ThSiO}_4 \pm \text{ThO}_2$) \pm xénotime, selon la composition initiale de Mnz1. L'utilisation du thermomètre monazite-xénotime montre que Mnz1 a interagit avec un fluide (oxydé) à basse température et a été partiellement remplacée par Mnz2 appauvrie en U, Th-(Y)- à Th/U plus élevé. Les âges chimiques U-Th-Pb_{total} obtenus à la microsonde électronique dans les différentes zones des monazites ne permettent pas de dater l'altération, sauf pour la monazite Ambato, où les domaines altérés donnent des âges apparents plus vieux (750 Ma). Les datations isotopiques U/Pb et Th/Pb par LA-ICP-MS donnent des résultats semblables dans les Mnz1. Par contre, les systèmes isotopiques sont perturbés dans la monazite secondaire. Dans le cas des monazites de Sri Lanka et Arendal, seuls les âges $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$ donnent une estimation raisonnable de l'âge d'altération, respectivement à 450 et 874 Ma. Les systèmes U/Pb sont perturbés du fait de l'incorporation de Pb commun (jusqu'à 40%) et du fractionnement Th-U lors de l'altération, induisant une perte préférentielle en U dans les monazites secondaires (Th/U élevé). En revanche, dans le cas de la monazite d'Ambato les 2 systèmes (U/Pb et Th/Pb) sont affectés et donnent des âges aberrants plus anciens dans les zones altérées. Ceci est attribué d'une part à une très forte incorporation en Pb commun (jusqu'à 80%) dans Mnz2, affectant tous les isotopes du Pb et expliquant également les âges apparents plus vieux obtenus à la microsonde électronique. D'autre part, la forte densité de nano-fractures et nano-phases remplies de silicates de Th et U dans les zones altérées, uniquement visibles en MET, entraîne également une perturbation des mesures dans ces zones. Finalement, ces résultats démontrent le rôle important des effets dégâts d'irradiation, en particulier de la fracturation induite par le gonflement des phases radioactives amorphisées, et le rôle essentiel de la porosité et des fissures, permettant au fluide (chargé d'éléments) de migrer à travers l'échantillon.

Interaction Uranium (VI) avec les Substances Humiques : Spéciation et Application à des Données Indépendantes

Pascal E. Reiller,^a Laura Marang,^{a,b} Delphine Jouvin,^b Marc F. Benedetti^b

^a Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, CE Saclay, DEN/DANS/DPC/SEARS, Laboratoire de développement Analytique, Nucléaire, Isotopique, Élémentaire et organique, Bâtiment 391-PC 33, BP 11, F-91191 Gif-sur-Yvette CEDEX, France.

^b Laboratoire de Géochimie des Eaux, Université Paris Diderot, IPGP UMR CNRS 7154, F-75025 Paris, CEDEX 13, France.

Dans un système naturel contenant de grande quantité de matière organique naturelle (MON), principalement sous forme de substances humiques (SH), les interactions entre la MON et l'uranium peuvent être importantes. La connaissance et la modélisation de la complexation de l'uranium (VI) par les SH by HS est nécessaire pour comprendre sont devenir dans l'environnement. Néanmoins, la grande hétérogénéité de la MON, et le grand nombre de modèle décrivant ses propriétés de complexation font qu'il est difficile d'avoir une vue générale de ces phénomènes. Nous avons complété la base de données existante sur la complexation de l'uranium (VI) par les SH proposée dans le cadre du modèle NICA-Donnan,¹ avec de nouvelles données sur deux extraits humiques différents : un acide humique issu du site de Gorleben (Allemagne) en utilisant la Flux Donnan Membrane Technique,² et un acide humique insolubilisé permettant la séparation entre U(VI) lié et U(VI) libre par simple centrifugation.³ Les isothermes obtenues à différent pH sont en bon accord avec les données de la littérature, ce qui permet de renforcer les paramètres génériques de l'uranium (VI),¹ et de proposer les paramètres particuliers à nos extraits. Ces données, ainsi que celles de la base de données, sont confrontées à des données indépendantes de laboratoire et de terrain : Moorland Rivers (UK),⁴ Savannah River test site (SC, USA),⁵ un podzol acide français,⁶ des eaux souterraines canadiennes,⁷ une argile à opaline suisse,⁸ des eaux de puits finlandaises,⁹ et une tourbe calcique.¹⁰ Pour chaque cas, la présence ou l'absence d'interaction avec l'uranium est représentée de manière satisfaisante par le modèle NICA-Donnan en utilisant les données génériques pour U(VI) et les autres cations. L'importance de la compétition avec les carbonate est montrée comme attendue, mais l'influence de la concentration totale en uranium semble aussi un paramètre à prendre en compte.

1. Milne CJ, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **2003**, *37*, 958.

2. Marang L, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **2006**, *40*, 5496.

3. Weber T, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **2006**, *40*, 7488.

4. Unsworth ER, *et al.*, *J. Environ. Monitor.* **2005**, *7*, 559.

5. Jackson BP, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **2005**, *39*, 2478.

6. Crançon P, van der Lee J, *Radiochim. Acta* **2003**, *91*, 673.

7. Ranville JF, *et al.*, *J. Contam. Hydrol.* **2007**, *91*, 233.

8. Joseph C, *et al.*, *Chem. Geol.* **2011**, *284*, 240.

9. Prat O, *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **2009**, *43*, 3941.

10. Phrommavanh V. Etude de la migration de l'uranium en milieu naturel. Approche expérimentale et modélisation géochimique. Thèse, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 2008.

Préparation et caractérisation de solutions solides $\text{Th}_{1-x}\text{U}_x\text{SiO}_4$: vers une compréhension de la formation de la coffinite ?

N. Clavier *, D.T. Costin *, A. Mesbah *, N. Dacheux *, C. Poinssot **

* ICSM – UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM – Site de Marcoule, BP 17171, 30207 Bagnols / Cèze cedex, nicolas.clavier@icsm.fr

** CEA/DEN/DRCP/DIR, Site de Marcoule, BP17171, Bagnols / Cèze cedex

Le stockage direct dans des sites souterrains est l'une des options alternatives au retraitement envisagée par plusieurs pays afin de gérer la radiotoxicité à long terme des combustibles nucléaires usagés. Dans ce cadre, il est important de pouvoir évaluer le comportement à long terme de l'uranium au sein de la biosphère, en particulier lors de la dégradation des barrières de confinement et la lixiviation subséquente du colis de déchets. Les sites de stockage envisagés présentant généralement des conditions réductrices associées à de fortes teneurs en silicates, la concentration en uranium au sein du milieu devrait être contrôlée par la précipitation de la coffinite USiO_4 .

Néanmoins, très peu de données thermodynamiques fiables relatives à la coffinite sont disponibles dans la littérature, probablement en raison des difficultés persistantes à en préparer des analogues synthétiques¹. Dans ces conditions, ce travail a consisté à développer une méthode de synthèse fiable et reproductible des solutions solides d'uranothorite $\text{Th}_{1-x}\text{U}_x\text{SiO}_4$, ces dernières permettant d'accéder aux données thermodynamiques de la coffinite par le biais d'une approche basée sur l'existence d'une solution solide continue. Ainsi, la préparation des échantillons a été réalisée à partir d'un mélange d'actinides en solution chlorhydrique et de métasilicate de sodium traité en conditions hydrothermales ($T = 250^\circ\text{C}$, $t = 24$ heures)².

Les échantillons obtenus ont alors été caractérisés par DRX, MEB, MET et spectroscopie Raman. Dans un premier temps, l'affinement Rietveld des données DRX a révélé la coexistence de deux phases : la solution solide d'uranothorite attendue et une solution solide d'uranothorianite. Par ailleurs, la proportion d'oxyde au sein du mélange croît avec le taux d'incorporation en uranium(IV), x . Une étude cinétique a alors été entreprise afin d'évaluer l'influence de la durée de traitement thermique sur la composition du mélange³. Ainsi, la teneur en oxyde au sein du mélange décroît avec la durée du traitement hydrothermal, soulignant la probable formation des solutions solides d'uranothorite *via* un mécanisme proche de la coffinitisation. En revanche, les durées nécessaires à l'obtention de phases silicatées pures pour les valeurs de x élevées s'avèrent extrêmement longues (> 1000 heures). Dans ces conditions, la formation de la coffinite pourrait être thermodynamiquement possible mais associée à une cinétique trop lente pour être préparée en tant que phase pure à l'échelle de temps du laboratoire.

Références

1. V. Pointeau, A.P. Deditius, F. Miserque, D. Renock, U. Becker, J. Zhang, N. Clavier, N. Dacheux, C. Poinssot, R.C. Ewing, *J. Nucl. Mater.* **2009**, 393, 449-458.
2. D.T. Costin, A. Mesbah, N. Clavier, S. Szenknect, N. Dacheux, C. Poinssot, J. Ravaux, H.P. Brau, *Prog. Nucl. Energ.*, doi:10.1016/j.pnucene.2011.10.004, **2011**.
3. D.T. Costin, A. Mesbah, N. Clavier, N. Dacheux, C. Poinssot, S. Szenknect, J. Ravaux, *Inorg. Chem.*, **2011**, 50, 11117-11126.

Un nouvel outil géochimique pour l'étude des gisements d'uranium: les anions dans l'uraninite

Louis Raimbault*, Julien Mercadier**, Michel Cuney***, Nathalie Moncoffre****, Benoît Marchand****, Angela Perrat-Mabillon****

* Centre de Géosciences, Mines-Paristech, 35 rue Saint Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex; louis.raimbault@mines-paristech.fr

** ETH Zurich, Department of Chemistry and Applied Biosciences, Laboratory of Inorganic Chemistry, HCI G 141, Wolfgang-Pauli-Str. 10, 8093 Zurich; mercadier@inorg.chem.ethz.ch

*** CREGU & UMR G2R 7566, Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques, Université Henri Poincaré - NANCY I, BP 70 239 - F54 506 VANDOEUVRE les NANCY Cedex; michel.cuney@g2r.uhp-nancy.fr

**** Institut de Physique Nucléaire de Lyon, 43 Bd du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex

L'uraninite UO_2 a une structure de type fluorine CaF_2 , ce qui suggère que l'incorporation des anions dans sa structure peut se faire aisément; de fait, un calcul *ab initio* a montré que l'incorporation de Cl en remplacement de O est la solution énergétiquement la plus favorable. Une étude systématique du chlore dans l'uraninite a été entreprise par SIMS.

Calibration d'un standard

La teneur en chlore d'un échantillon d'uraninite provenant de la zone 13 d'Oklo, bien caractérisé pour les éléments majeurs, a été calibrée au moyen d'échantillons d' UO_2 synthétique implantés en ^{35}Cl , donnant une valeur de 273 ± 20 ppmw. La dispersion des valeurs en chlore a été évaluée à 8 %. Par ailleurs, des évaluations préliminaires des teneurs en H, F, Si et I de cet échantillon ont permis d'ajouter ces éléments à la procédure analytique pour une première évaluation.

Distribution du chlore

L'ensemble des valeurs en chlore de 219 analyses ponctuelles d'uraninites se répartit sur 4 ordres de grandeur, entre 0.4 et 4000 ppmw, la précision analytique restant comparable sur toute la gamme de variations. Toutefois, des teneurs très différentes ont été trouvées dans les différents types de gisements: très faibles à faibles dans les gisements de veines intragranitiques (médiane: 9 ppmw, gamme [0.4-117]) et d'épisyénites (15 ppmw, [0.7-50]); intermédiaires dans les gisements dans des grès (273 ppmw, [76-320]) et synmétamorphes (275 ppmw, [182-329]); fortes à très fortes dans les gisements de discordance (Australie: 469 ppmw, [318-781]; Canada: 1449 ppmw, [94-3185]); et très fortes dans les gisements magmatiques (pegmatitiques: 3081 ppmw, [2770-3951]). De fait, les domaines de variations sont quasiment disjoints entre ces différents types.

Variations dans l'espace fluor-chlore

Bien qu'il s'agisse de résultats préliminaires pour les valeurs absolues, les teneurs relatives en fluor sont fiables et, couplées aux teneurs en chlore, définissent trois domaines:

- $F/Cl < 1$: gisements de discordance, synmétamorphes, pegmatitiques;
- $F/Cl \sim 1$: gisements dans des grès;
- $F/Cl > 1$: gisements dans les formations intragranitiques.

Références

Pipon, Y. (2006): Diffusion thermique et assistée par irradiation du chlore dans le dioxyde d'uranium. Thèse, Université Lyon 1, 219 p.

TECTONIQUE DANS LE BASSIN D'UNEGT (EST-GOBI, MONGOLIE) : BANDES DE DEFORMATION, MIGRATION D'HYDROCARBURES ET MINÉRALISATIONS D'URANIUM

A. Giné***; B. Saint-Bézar**; A. Benedicto*; A. Wattinne*; G. André***

* AREVA NC, BG Mines, Tour AREVA, 1, Place Jean Milier-92084 Paris La Défense
Cedex ;

anna.gine-sanchez@u-psud.fr, abenedicto@areva.com, aurelia.wattinne@areva.com

** IDES, Université Paris-Sud 11; CNRS/INSU, Orsay, France ;

bertrand.saint-bezar@u-psud.fr

*** COGEOBI, BG MINES-DGS;

gregoire.andre@areva.com

Le bassin d'Uneget est un bassin silico-clastique continental fracturé et polyphasé qui contient des hydrocarbures et des minéralisations d'uranium d'intérêt économique. Pour certains gisements (Chine, Texas, Australie...), il a été suggéré une étroite relation entre la migration d'hydrocarbures par la fracturation et la précipitation d'uranium (Spirakis, 1996...). Ce travail porte sur la caractérisation de la fracturation et des paléofluides drainés par celle-ci, et en particulier sur l'étude des relations entre cette fracturation, la migration d'hydrocarbures (ou fluides réducteurs attachés au système pétrolier) et les minéralisations d'uranium présentes dans le bassin.

Les données tectoniques de surface du bassin, ainsi que issues de la corrélation de sondages, montrent un réseau de déformation formé par des bandes de déformation, failles normales, décrochantes et inverses organisées en différentes familles cinématiques qui reflètent l'évolution tectonique polyphasée du bassin. Des bandes de déformation et des failles normales ont été observées dans les sables fluviatiles du Crétacé supérieur avec la présence de fronts d'oxydoréduction et des dépôts d'Uranium de type *roll front*. L'étude pétro-structurale de ces failles et de ces bandes de déformation permet de discuter de la circulation des fluides à travers les sables poreux. Les bandes de déformation, qui évoluent en failles normales, se caractérisent par des mécanismes de déformation en dilatance conjugués à du cisaillement. La déformation par dilatance est une notion clé pour la compréhension des migrations localisées de fluides dans des encaissants déjà poreux. L'étude pétrographique et géochimique des ciments dans les fractures ont permis d'identifier au moins trois types de circulation de paléo-fluides: eaux météoriques, hydrocarbures liquides et fluides réducteurs riches en Fe et Mn.

On discutera sur le rôle que ces fluides réducteurs drainés le long de fractures ont pu avoir sur la localisation des minéralisations d'Uranium d'intérêt économique dans ce bassin.

Références

Spirakis CS.1996. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks. *Ore Geology Reviews* 11:53-69

Etude des sources de l'uranium dans le bassin d'Erlian (Chine)

Christophe Bonnetti* ; Michel Cuney* ; Sylvain Bourlange* ; Fabrice Malartre* ; Antonio Benedicto** ; Xiaodong Liu***

*Université de Nancy, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, BP 70239-54 506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex ; christophe.bonnetti@g2r.uhp-nancy.fr; michel.cuney@g2r.uhp-nancy.fr

** AREVA NC - BG Mines, direction des géosciences ; antonio.benedicto@areva.com

*** East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi (China); xdliu@ecit.edu.cn

Le bassin d'Erlian est un bassin intracontinental d'âge Mésozoïque localisé au NE de la Chine [1]. Développé lors d'un épisode de rifting (Jurassique sup. - Crétacé) témoignant d'une phase d'extension majeure en Asie de l'Est [2], il se compose de nombreux grabens asymétriques orientés NE-SO [3] et se caractérise par le dépôt d'unités sédimentaires fluvio-lacustres [4]. Ce bassin repose sur un socle plissé et métamorphisé lors de l'orogénèse hercynienne mongole Xing'an [1, 3] qui se compose principalement de métasédiments paléozoïques ainsi que de granites de type A (anorogénique) et de type I (source ignée basique à intermédiaire) d'âge Hercynien et Yanshanien. Les granites dits « Yanshanien » sont issus d'un plutonisme intense développé au Jurassique – Crétacé et qui s'est particulièrement bien exprimé dans la chaîne du Yanshan [5], localisée au NE de la Chine et au Sud du bassin d'Erlian. Ainsi, les auteurs ont montré l'existence de deux phases d'intrusion majeures au cours de ce plutonisme : (i) au Jurassique (~190-150 Ma) et (ii) au Crétacé inférieur (~135-100 Ma) avec un pic entre 120-130 Ma [5, 6, 7]. La mise en place de ces granites est également associée à un épisode important de volcanisme mafique à felsique en Chine du Nord, qui s'initie vers 163 Ma et se poursuit jusqu'à la fin du Crétacé inférieur.

Depuis le début des années 80, plusieurs gîtes ou gisements uranifères ont été découverts dans le bassin d'Erlian. Deux types de minéralisation peuvent être distingués : (i) les gîtes de Subeng et Naomugen ainsi que le gisement de Nuheing (36 000t U @ 0.03-0.1% U) sont de morphologie tabulaire et principalement encaissés dans des argiles et des silts, riches en matière organique et pyrite (origine syn-sédimentaire ?), (ii) les gîtes de Bayawula, Saihangaobi, Huhe et Mangheite seraient de type roll-front et principalement encaissés dans des grès ou sables non consolidés [1].

Dans le cadre de l'étude de la genèse de ces minéralisations uranifères, les sources de l'uranium sont à ce jour assez mal connues. Il apparaît donc nécessaire de caractériser les différentes roches susceptibles de constituer une source pour les minéralisations encaissées dans le bassin : (i) les granites du socle (minéraux porteurs d'U ?, quelle génération est la plus fertile ?), (ii) les roches volcaniques situées à la base du bassin (contribution syn-sédimentaire ?) et (iii) d'éventuelles pré-concentrations d'uranium syn-sédimentaires sur la matière organique. Ces roches ont été échantillonnées sur affleurements et sur carottes de sondage (ZK2011-1) en vue de réaliser une étude complémentaire couplant analyses géochimiques, pétrographiques et géochronologiques. Seules les analyses géochimiques et pétrographiques ont été traitées à ce jour. Des granites calco-alcalins fortement potassiques ont été identifiés et certains des échantillons analysés présentent des teneurs enrichies en uranium, de l'ordre de 10-20 ppm. Les minéraux accessoires susceptibles de contenir de l'uranium sont l'uranothorite, l'allanite et le zircon. Quand aux roches volcaniques, elles correspondent à des rhyolites et à des trachytes et présentent des teneurs en uranium de l'ordre de 3-6 ppm. Les minéraux accessoires susceptibles de contenir de l'uranium sont des phosphates (xénotime, monazite) et du zircon. Les rapports Th/U des granites échantillonnés en surface et dans la partie supérieure du sondage étudié montrent des valeurs élevées (entre 5 et 20) indiquant une remobilisation partielle de l'uranium. Ainsi, les granites encadrant la zone du bassin étudiée peuvent donc être considérés comme une source primaire d'uranium. Les autres types de roches proposées comme source potentielle sont actuellement à l'étude et viendront compléter ces résultats préliminaires, de même que les analyses microsonde et géochronologiques.

Références :

[1] Dahlkamp, F.J., 2009. Uranium Deposits of the world: Asia, p. 29-35; 65-71. [2] Charles, N., 2010. Mécanismes de l'extension continentale au Mésozoïque en Asie de l'Est. Doctorat de l'université d'Orléans. [3] Dou, L., Chang, L., 2003. Fault linkage patterns and their control on the formation of the petroleum systems of the Erlian Basin, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology* 20, p.1213-1224. [4] Changsong, L., Eriksson, K., Sitian, L., Yongxian, W., Jianye, R., and Yanmei, Z., 2001. Sequence architecture, depositional systems, and controls on development of lacustrine basin fills in part of the Erlian basin, northeast China. *AAPG Bulletin*, v.85, NO. 11, p. 2017-2043 [5] Deng, J., Su, S., Niu, Y., Liu, C., Zhao, G., Zhao, X., Zhou, S., Wu, Z., 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos* 96 (2007) 22–35. [6] Wu, F.Y., Lin, J.Q., Wilde, S.A., Sun, D.Y., Yang, J.H., 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planetary Science Letters* 233, 103-119. [7] Wu G., SUN F., ZHAO, C., LI, Z., ZHAO, A., PANG, Q., LI, G., 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 50, No. 23, 2733_2743.

Acquisition des données thermodynamiques associées aux phosphates et vanadates d'uranyle : des analogues synthétiques aux échantillons naturels

F. Cretaz¹, S. Szenknect¹, N. Clavier¹, C. Poinssot², M. Descostes³, N. Dacheux¹

¹ICSM (LIME) UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM, 30207 Bagnols sur Cèze – stephanie.szenknect@cea.fr / fanny.cretaz@cea.fr

²CEA/DEN/DRCP/DIR, 30207 Bagnols sur Cèze – christophe.poinssot@cea.fr

³AREVA, Business Group Mines, DI/DR&D-projet Envir@mines, 92084 Paris La Défense – michael.descostes@areva.com

De manière à répondre à l'accroissement des besoins en uranium, l'exploitation de nouvelles ressources de composition minéralogique variée devient une nécessité. De plus, dans une perspective de développement durable, les procédés d'exploitation, de traitement et de purification du minerai requièrent une optimisation afin de réduire leur empreinte environnementale. Il est ainsi nécessaire d'acquérir des données thermodynamiques fiables relatives aux systèmes d'intérêt, dont en particulier les phosphates et les vanadates d'uranium. Dans ce cadre, des composés synthétiques ont été préparés et comparés à des échantillons naturels de référence. Par la suite, la solubilité de ces solides a été déterminée lors d'études menées en conditions de sous- et de sursaturation dans différents milieux, notamment sulfatés.

La torbernite $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8-12\text{H}_2\text{O}$ a été la première phase synthétisée par précipitation directe (voie humide).

L'influence de la stœchiométrie et de la température a été étudiée. Quelles que soient les conditions de synthèse retenues, les diffractogrammes DRX montrent que de la torbernite pure est obtenue. Les solides synthétisés ont par la suite été comparés avec des échantillons naturels provenant de la mine d'Entraygues (Aveyron). Les analyses montrent que les échantillons synthétisés et naturels sont très proches que ce soit du point de vue structural, chimique ou morphologique.

La solubilité de la torbernite a par la suite été étudiée selon deux approches : en conditions de sursaturation (c'est-à-dire l'étude de la précipitation, en milieu H_3PO_4 $2 \cdot 10^{-2}\text{M}$) et de sous-saturation (dissolution, dans différents solvants H_2SO_4 1M, HCl 1M et HNO_3 1M). Pour les expériences de dissolution, les valeurs des constantes de solubilité mesurées sont comprises entre 10^{-45} et 10^{-41} à 25°C tandis que pour les expériences en conditions de sursaturation, les valeurs sont proches de 10^{-49} , en bon accord avec celles publiées par Kobets et Umreiko¹. De plus, une première valeur de l'enthalpie de réaction a été évaluée à $\Delta_{\text{RH}}^\circ = 96 \pm 14 \text{ kJ/mol}$.

La comparaison avec un échantillon naturel de méta-torbernite est en cours. Une méthodologie identique est également en cours de développement pour les autres phases d'intérêt retenues pour cette étude : autunite $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2-6\text{H}_2\text{O}$, méta-tyuyamunite $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, méta-ankoleite $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, et carnotite $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

¹ L.V. Kobets, D.S. Umreiko, Russian Chemicals Reviews **52**, 509-523 (1983)

Spéciation de l'uranium dans les opales de Nopal I : implications géochimiques pour la fin de la genèse du gisement

Guillaume Othmane*, Thierry Allard*, Nicolas Menguy*, Thomas Vercoouter**, Guillaume Morin*, Imène Esteve*, Georges Calas* et Mostafa Fayek***

* Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés, CNRS UMR 7590, Université Pierre et Marie Curie, 140, rue de Lourmel, 75015 Paris
guillaume.othmane@impmc.upmc.fr

** CEA Saclay, DEN, DPC, SEARS, LANIE, Gif-sur-Yvette, France,
thomas.vercoouter@cea.fr

*** Department of Geological Sciences, University of Manitoba, 240 Wallace Bldg., 125 Dysart Rd., Winnipeg, MB R3T 2N2, fayek@cc.umanitoba.ca

La genèse des gisements d'uranium peut avoir lieu dans des contextes géologiques et conditions géochimiques très variés, entraînant une grande diversité des gisements de ce radionucléide à travers le monde (Cuney, 2009). On peut ainsi distinguer les gisements de type volcanique, parmi lesquels figure le gisement d'uranium de Nopal I (Sierra Peña Blanca, Mexique), caractérisé par des conditions de formation de basse température inhabituelles pour ce type de gisement (Calas et al., 2008). Le gisement d'uranium de Nopal I (Sierra Peña Blanca, Mexique) est situé dans du tuf volcanique. La minéralisation primaire d'uranium a eu lieu dans une zone de brèches volcaniques sous forme d'uraninite, altérée par la suite en minéraux secondaires d'uranyle. Le dernier épisode correspond à la formation d'opales (SiO₂ amorphe) contenant de l'uranium et recouvrant des silicates d'uranyle (uranophane Ca[(UO₂)(SiO₃OH)]₂(H₂O)₅ et weeksite (K,Na)₂[(UO₂)₂(Si₅O₁₃)](H₂O)₃) (Calas et al., 2008, Schindler et al., 2010).

Le but de cette étude est de déterminer la spéciation de l'uranium dans ces opales, afin de caractériser les conditions de transport et de piégeage de ce radioélément à la fin de la genèse du gisement. Trois échantillons d'opales jaune ou verte ont ainsi été analysés par microscopie électronique à balayage, microscopie électronique en transmission ainsi que par spectroscopie de fluorescence laser résolue en temps.

La spéciation de l'uranium dans les opales de Nopal I s'est révélée variée et complexe. Les résultats mettent tout d'abord en évidence la présence d'uranophane beta Ca[(UO₂)(SiO₃OH)]₂(H₂O)₅, et d'apatite Ca₅(PO₄)₃(OH,Cl,F) contenant des traces d'uranium. Néanmoins, la majorité de l'uranium est présent sous forme de complexes de type Ca_m(UO₂)_m(OH)_n d'uranium piégés par l'opale et associés éventuellement à un ou plusieurs groupes phosphates. Ces complexes suivent la forme botryoïdale de l'opale et sont concentrés en couches de concentrations différentes, suggérant des variations de la chimie du milieu de formation, avec toutefois un rapport Ca/U constant et un pH neutre ou basique. Ces résultats soulèvent donc des questions sur la chronologie des altérations de basse température ayant conduit à la mobilisation de l'uranium lors de la genèse du gisement.

Références

- Calas G., Agrinier P., Allard T., Ildefonse P. (2008) Alteration geochemistry of the Nopal I uranium deposit (Sierra Peña Blanca, Mexico), a natural analogue for a radioactive waste repository in volcanic tuffs. *Terra Nova* **20**, 206-212
- Cuney, M. (2009) The extreme diversity of uranium deposits. *Miner. Deposita* **44**, 3-9
- Schindler M., Fayek M., Hawthorne F. C. (2010) Uranium-rich opal from the Nopal I uranium deposit, Peña Blanca, Mexico : Evidence for the uptake and retardation of radionuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**, 187-202

Distribution et valence de l'uranium dans les phosphorites

Jocelyn Barbarand ⁽¹⁾, Romuald Drot R. ⁽²⁾, Alexis Grare ^(1,3), Jean Reyx ⁽³⁾, Maurice Pagel ⁽¹⁾, Marc Brouand ⁽³⁾

(1) UMR UPS-CNRS IDES 8148, Université Paris Sud, F-91405 Orsay cedex

(2) Institut de physique nucléaire, groupe de radiochimie, Université Paris Sud, F-91406 Orsay

(3) BG Mines, AREVA, Tour AREVA, 1 place Jean Miller, F-92084 Paris la défense

Les phosphorites peuvent contenir de l'uranium à des teneurs importantes (>500 ppm) et constituer par conséquent des gisements potentiels. La caractérisation du gisement passe par une bonne identification de la phase porteuse de l'uranium. Cette étude a utilisé notamment la luminescence des cristaux d'apatite pour définir la distribution et la valence de l'uranium. Le gisement de Bakouma (République Centrafricaine) qui constitue une accumulation en domaine karstique a été étudié en particulier ainsi que les formations carbonato-phosphatées de Siwaqa (Jordanie) qui constituent une accumulation en domaine marin.

La minéralisation de Bakouma (Patricia et Fosse) est constituée par des (carbo)fluorapatites de petite taille (10-30 μm), des oxydes de fer, du quartz, des carbonates et des argiles. Des minéraux secondaires d'uranium (VI) (torbernite et autunite) sont également présents mais en faible quantité. Les caractéristiques de ces cristaux d'apatite évoluent en fonction de la profondeur. L'observation en fluorescence UV permet une meilleure définition de la forme des cristaux et présente quatre couleurs différentes : vert et jaune-vert, observable dans la partie supérieure des gisements, bleu foncé et jaune orangée, observable dans la partie profonde des gisements. Les cristaux d'apatite sont souvent zonés avec une bordure luminescence et un cœur sombre. Les apatites montrent des traces de dissolution, des bandes internes ou le cœur pouvant être complètement dissous. Les analyses au microscope électronique à balayage montrent que l'uranium est détectable dans les bordures des cristaux et qu'il n'est pas associé à des inclusions dans les cristaux. Les analyses à la microsonde électronique ont confirmé que la distribution de l'uranium est hétérogène à l'échelle des cristaux d'apatite mais peut atteindre 1%, la moyenne des échantillons se situant vers 3000 ppm et que cette teneur est la plus forte dans la partie inférieure des forages. L'observation par spectrométrie de fluorescence laser a permis d'identifier la présence d'U(VI), en particulier dans les parties supérieures des forages.

Des échantillons de Jordanie ont également été analysés par spectrométrie de fluorescence laser ; la présence d'U(VI) est également détectée dans des échantillons dans lesquels des minéraux secondaires d'uranium (VI) n'existent pas ce qui laisse envisager que cet uranium est présent dans les apatites. La détermination du temps de vie qui permet de définir l'environnement chimique identifie deux environnements significativement différents ; la réalisation d'échantillons standards permettra leur identification.

LE NUCLÉAIRE FACE À UN « PIC URANIUM » ?

Aziz Zakari et Adrien Bidaud

LPSC Grenoble, 53, rue des Martyrs, 38026 Grenoble Cedex

A cause de temps caractéristique très longs, que ce soit en durée de vie ou en amortissement des investissements, l'industrie nucléaire exige beaucoup de visibilité et d'anticipation. Une centrale nucléaire nécessite un engagement sur le long terme, en particulier en ce qui concerne les ressources disponibles et accessibles en minerai d'uranium. Pourtant, depuis plus d'une décennie, il existe un déficit entre la demande de cette ressource et sa production. Si le nucléaire doit jouer un rôle majeur dans les politiques énergétique bas carbone et s'intégrer dans une stratégie de développement durable, il devient légitime de s'assurer des conditions de la pérennité de l'approvisionnement en uranium.

En attendant l'arrivée des réacteurs innovants, l'industrie nucléaire restera très gourmande en ressources combustibles. Le recensement des ressources identifiées et raisonnablement assurées affichées depuis 7 ans est de 6 Mt. Une bonne partie de ces matières est déjà engagée, c'est-à-dire qu'elle est nécessaire au fonctionnement des réacteurs actuels ou en construction pendant leur durée de vie prévue. Malgré la baisse de consommation de certains pays comme le Japon ou l'Allemagne, avec la pression des nouvelles puissances nucléaires comme la Chine et l'Inde, la probabilité d'un décrochage entre les ressources accessibles et les besoins vers le milieu du siècle paraît vraisemblable.

Nous avons, à l'aide de l'outil POLES (Prospective Outlook on Long Term Energy Systems), réalisé un certain nombre de scénarios qui nous permettent d'évaluer le comportement des différentes régions du monde face à l'anticipation de chocs liés aux difficultés techniques de l'extraction minière. Ces études ont été réalisées suivant que ces États aient de la visibilité sur les ressources et anticipent un risque de rupture à terme ou suivant que le marché pilote le prix du minerai simplement en réponse à la loi de l'offre et de la demande.

Si quelques résultats étaient prévisibles, l'analyse globale est plus contrastée qu'attendue. Tous les scénarios de raréfaction de ressources ne se soldent pas par un pic dans le déploiement des réacteurs nucléaires des différentes générations. Et quand c'est le cas, les différents acteurs ne se comportent pas tous de la même manière vis-à-vis d'un tel pic. A l'instar de la Chine et l'Inde qui tous scénarios confondus continueraient vraisemblablement à investir dans l'industrie nucléaire dans son ensemble, en particulier dans les mines d'uranium même si les réacteurs de prochaines générations se sont développés massivement.

Contexte géologique des gisements d'U primaires de la ceinture orogénique de Damara, Namibie : De la source migmatitique au gisement plutonique

Wilfried Toé.*; Olivier Vanderhaeghe*; Anne-Sylvie André-Mayer*; Jean-Louis Feybesse**; Jean-Pierre Milési** ; Jean-Louis Paquette***

*Nancy Université, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, BP 70239–54 506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France. Wilfried.toe@g2r.uhp-nancy.fr

**AREVA – BU Mines Exploration Department, Paris, France.

*** Laboratoire Magmas et volcans, Clermont-Ferrand, France

La Swakop River dans la partie Sud de la zone centrale (SCZ) de la ceinture orogénique Panafricaine de Damara expose des gneiss migmatitiques (Abbabis complex) interprétés comme un socle Mésoprotérozoïque en contact avec une série métasédimentaire composée de quartzite, paragneiss, calcschistes et marbres attribués au Néoprotérozoïque. Notre analyse de terrain indique que cette transition socle/couverture correspond à la transition entre métatexites (migmatites avec une foliation gneissique continue) et diatexites (migmatites dominées par la fraction granitique). Cette observation appelle une réévaluation du modèle socle/couverture (Miller, 1983) et une discussion des implications en termes de mobilisation-transport-dépôt de l'Uranium.

Suivant l'analyse de Vanderhaeghe (2009) trois niveaux structuraux sont distingués sur la base de la proportion et de la distribution de la fraction granitique à l'échelle de l'affleurement et de sa relation avec l'encaissant gneissique avec de bas en haut :

- des diatexites (Abbabis) correspondant à des granites hétérogènes et comprenant des plutons en forme de dôme de granite leucocrate.
- des métatexites de paragneiss caractérisées par des leucosomes isolés et des réseaux de veines granitiques concordants ou sécants à la schistosité.
- des plutons syntectoniques intrusifs (ex. Ida dôme) dans une série métasédimentaire structurellement liés aux métatexites par un réseau de dikes et sills leucogranitiques.

La fraction granitique de ces migmatites est principalement méta- et peralumineuse et a une signature de croûte continentale supérieure.

Dans la SCZ de la ceinture de Damara, les minéralisations en U sont limitées à un sillon plurikilométrique d'orientation NNE ("alaskite Valley"). Les minéralisations primaires d'U sont associées à des poches pegmatitiques à quartz fumés dans des leucogranites intrusifs et également à des zones de métamorphisme de contact dans l'encaissant de gneiss à silicates calciques comme c'est le cas pour les mines de Rössing, Husab et le dôme granitique de Ida.

La formation de gisements d'U dans la ceinture de Damara semble ainsi être liée (1) à la ségrégation de magmas granitiques issus de la fusion partielle d'une série métasédimentaire et métavolcanique Néoprotérozoïque lors de l'orogénèse panafricaine (2) à laquelle se superpose une concentration lors de la cristallisation fractionnée des magmas granitiques et/ou (3) un transfert d'U dans l'encaissant des granites avec les fluides liés à la mise en place des granites. Il reste à déterminer l'influence de la préconcentration de l'U dans certains protolithes de la série métasédimentaire et métavolcanique comme certaines roches volcaniques acides datées à 750 Ma dans la région de Khorixas (rhyolites d'Austerlitz et de Summas) ainsi que le comportement des phases minérales porteuses d'U lors de la fusion partielle.

Références

MILLER, R.M., 1983, The Pan-African Damara orogen of South West Africa/Namibia, Spec. Publ. geol. Soc. S. Afr., Volume 11, p. 431-515.

VANDERHAEGHE, O. 2009. Migmatites, granites and orogeny: Flow modes of partially-molten rocks and magmas associated with melt/solid segregation in orogenic belts."Tectonophysics 477 (3-4): 119-134.

Distribution de l'uranium dans un granite Archéen : du batholithe à la lame mince

Simon Carrouée*, Jean-François Moyen**, Michel Cuney***

*Université Jean Monnet, Laboratoire de Transferts Lithosphériques, 23 rue du Dr Paul Michelon, 42023 Saint-Etienne, France; simon.carrouee@univ-st-etienne.fr

** Université Jean Monnet, France; jean.francois.moyen@univ-st-etienne.fr

*** Université de Nancy, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, BP 70239-54 506 Vandoeuvre Cedex, France ; michel.cuney@g2r.uhp-nancy.fr

Les gisements d'uranium les plus anciens à la surface de la Terre sont les conglomérats à galets de quartz, contenant de l'uraninite d'origine détritique, de bassins sédimentaires mésoarchéens sur le craton du Kaapvaal en Afrique du Sud. L'origine de cette uraninite est à chercher dans les magmas felsiques de la série enrichie en potassium et éléments incompatibles de 3.1 Ga, les magmas felsiques antérieurs, de la série des trondhjemite-tonalite-granodiorite (TTG), présentant des concentrations en uranium insuffisantes pour permettre la cristallisation d'uraninite. Le batholithe de Heerenveen, dans la région de Barberton, appartient à cette série de 3.1 Ga. Il est composé de 8 faciès différents appartenant à 4 phases principales de mise en place ; sa mise en place a été guidée, au moins en partie, par des zones de cisaillement synmagmatiques sur les bordures de chaque côté du batholithe.

La concentration en uranium augmente avec la chronologie des phases d'injection, si bien que les dernières phases sont celles qui présentent les concentrations moyennes les plus élevées (jusqu'à plus de 5 ppm). Le thorium possède la même répartition que l'uranium, ainsi le rapport Th/U (proche de 4) ne permet pas la cristallisation d'uraninite ($\text{Th/U} < 1$). Mais si le thorium est réparti de façon assez homogène au sein des différents faciès, l'uranium peut présenter des pics pouvant dépasser les 20 ppm, permettant des rapports Th/U compatibles avec la cristallisation d'uraninite. Ces quelques pics de concentration se trouvent tous au sein de la zone de cisaillement sur la bordure Est du batholithe. La taille de ces pics d'uranium peut être de l'ordre de la centaine de mètres, plusieurs échantillons d'un même affleurement pouvant présenter la même anomalie, alors que des échantillons d'un autre affleurement espacé de quelques centaines de mètres, dans les mêmes lithologies, ne présentera pas d'anomalie.

Les analyses en roche totale montrent que pour certains échantillons, l'uranium atteint la saturation des minéraux accessoires auxquels il est généralement associé (zircon, monazite, xénotime, thorite...) et qu'il doit ainsi former ses propres phases. L'étude microscopique de ces échantillons montre que l'uranium forme effectivement ses propres minéraux, probablement des oxydes, sous forme de petits cristaux automorphes de 2-3 μm . L'uranium est présent également au sein de la thorite (5-13% d' U_2O_3) et de façon beaucoup plus marginale dans les autres minéraux accessoires. Les oxydes d'uranium ainsi découverts présentent de très faibles teneurs en thorium, contrairement à ce que l'on sait de l'uraninite d'origine magmatique.

Deux processus semblent être à l'origine de la concentration de l'uranium : (i) un processus magmatique conduisant à la concentration des éléments incompatibles dans les dernières phases d'injection de magma et (ii) un processus secondaire favorisant l'uranium au détriment du thorium, probablement non magmatique et lié aux zones de cisaillement.

Zonalité minéralogique, géochimique et hydrochimique d'un roll-front au Kazakhstan : données récentes et état des interprétations

Jean-Michel Schmitt^{1*} ; Marc Brouand¹ ; Majda Bouzid² ;
Valérie Langlais³ ; Sébastien Hocquet⁴

¹AREVA/BG Mines, Direction des Géosciences, 1 place Jean Millier, 92084 Paris La Défense Cedex

²Centre de Géosciences, MINES ParisTech, 77305 Fontainebleau Cedex, France

³AREVA/BG Mines, SER, 1 place Jean Millier, 92084 Paris La Défense Cedex

⁴AREVA/BG Mines, KATCO, 282, Dostyk Avenue, 050020 Almaty, Kazakhstan

jean-michel.schmitt@areva.com, marc.brouand@areva.com, majda.bouzid@mines-paristech.fr,
valerie.langlais@areva.com, sebastien.hocquet@areva.com

L'exploitation des gisements d'uranium de type Roll Front s'est beaucoup développée ces dernières années, en particulier au Kazakhstan où Areva exploite actuellement, via sa filiale KATCO, les gisements de Muyunkum et Tortkuduk par la méthode de la récupération in situ (ISR). Un important programme de recherche et développement a été lancé afin d'optimiser l'exploitation de ce type de gisements par cette méthode, et un de ses quatre axes principaux vise à mieux connaître 'l'objet géologique' roll front, son architecture, son fonctionnement et sa genèse.

Une étude multi-disciplinaire des gisements du secteur a été entreprise dans ce but à partir de profils de sondages de reconnaissance et de développement minier. Les premiers travaux de synthèse réalisés s'accordent bien avec les grands traits du modèle classiquement décrit, tant en ce qui concerne la géométrie d'ensemble (formes en rouleaux simples ou emboîtées, à convexité dirigée vers l'aval hydraulique, limitées souvent au mur et au toit par des niveaux plus argileux), que pour ce qui concerne la répartition des principaux minéraux néoformés (oxyhydroxydes de fer, minéraux uranifères, sulfures, carbonates, ...).

Le cortège classique des éléments accompagnateurs (molybdène, sélénium, vanadium, etc.) est également présent avec certaines particularités propres au contexte géochimique régional.

Des études spécifiques ont été lancées en interne (pétrographie-minéralogie et géochimie des faciès minéralisés), ou confiées à des laboratoires extérieurs (étude des carbonates, du comportement de la matière organique, des phénomènes d'oxydo-réduction, ...), de façon à préciser la nature et les relations entre les différentes phases minérales.

Une étude croisée de l'hydrochimie régionale a également été entreprise, de même qu'une étude détaillée dans certaines zones du roll front. Une attention particulière a été portée à l'acquisition de paramètres physico-chimiques fiables et d'échantillons aussi représentatifs que possible de l'aquifère aux différents points de prélèvements.

Le rapprochement des différents résultats obtenus à ce jour montre que dans ce secteur, le système géochimique du roll front est toujours fonctionnel. Nos efforts actuels visent donc à valoriser l'ensemble de ces données pour construire un modèle thermodynamique cohérent des différentes zones de l'aquifère (phases minérales et eau interstitielle), et à tester ce modèle dans le cadre d'une simulation génétique de mise en place des minéralisations.

On espère, sur la base de nouveaux profils dédiés à l'étude, conforter ces premiers résultats et atteindre ainsi un degré de compréhension de ces minéralisations qui nous sera précieux aussi bien pour l'exploration que pour la planification de l'exploitation de ce type de gisements.

LES FACIES CARBONATES DANS LES SERIES SILICO-CLASTIQUES DES GISEMENTS D'URANIUM DE TYPE ROLL DU KAZAKHSTAN: DONNEES MINERALOGIQUES, GEOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

A. Munara*, P. Boulvais**, C. Carpentier*, M. Cathelineau* et M. Brouand***

* UMR CNRS-UHP-INPL 7566 et CREGU, 54500, Vandoeuvre les Nancy

** Géosciences UMR 6118, Université de Rennes 1, 35042 Rennes Cedex

*** Areva, Tour AREVA, 1, place Jean Millier, 92084 Paris La Défense

Les sables crétacés à tertiaires du bassin de Chu-Sarysu ont été affectés par les processus suivants :

- des dépôts alternés de faciès sableux et d'argiles localement oxydés dans des plaines deltaïques ; ces faciès contiennent les produits d'érosion des reliefs (chaîne du Karatau), principalement de faciès felsiques (quartz et microcline), alternant ou en mélange avec des dépôts d'argiles (smectite dominante),
- Des processus bio-réducteurs, à l'origine de pyrites précoces de type framboïdale (issues de la réduction bactérienne de sulfates) et de réduction de l'U sur les matières organiques,
- Des processus de formation de sulfures dont l'origine est discutée (mélange de fluides, présence d'HC ou de gaz, processus suggérés par les auteurs russes) ;
- La formation de rolls uranifères, avec le déplacement d'une zone oxydée /réduite par pénétration d'eaux oxydantes vers une zone réduite, avec enrichissement en uranium ;
- Des processus de carbonatation locaux, en lentilles, qui sont postérieurs au moins à un stade de dépôt d'oxydes d'uranium sur grains de pyrite, et se traduisent par la formation de plusieurs ciments se terminant par des grands cristaux poecilitiques.

L'influence de ces différents processus sur la formation et la remobilisation éventuelle des minéralisations (associations sulfures-M.O.-uranium), et la formation des carbonates associés (sable à ciment de calcite) sont étudiés sur 3 secteurs explorés par KATCO. La formation des carbonates a été particulièrement étudiée en minéralogie, géochimie et isotopie (O, C). Les compositions homogènes ($\delta^{18}\text{O} = 18 \pm 1\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -8 \pm 1\text{‰}$). Le caractère homogène des compositions plaide en faveur d'une circulation massive qui garde son empreinte originelle au cours de l'infiltration, ce qui est le signe de rapports fluide-roche élevés. Dans ces conditions, on peut donc estimer la composition du fluide à partir duquel les carbonates ont précipité entre 20 et 50°C, températures a priori raisonnables pour la précipitation des carbonates. On calcule un $\delta^{18}\text{O}$ de H₂O en équilibre avec $\delta^{18}\text{O}_{\text{Carb}}$ à $18 \pm 1\text{‰}$ entre -5 et -12.3‰ (fractionnement isotopique Calcite-H₂O de Zheng). Cela correspond à une signature de fluides météoriques, indubitablement. Parallèlement, la signature en carbone vers -8‰ est compatible avec des carbonates néo-formés en milieu continental, tels que ceux invoqués à partir de l'oxygène, à partir d'un carbone ambiant mixte, organique et minéral.

En conclusion, les données isotopiques mesurées sur les calcites plaident en faveur d'une circulation de fluides météoriques, qui est suffisamment importante en volume pour préserver sa signature à l'ensemble de la région d'étude.

MODELISATION 3D DU GISEMENT URANIFERE DE MUYUNKUM, KAZAKHSTAN

Leila Ajjabou^{*,**}, Patrick Ledru^{*}, Nicolas Fiet^{*},
Sébastien Hocquet^{*} et J.J. Royer^{**}

* Katco, Almaty, Kazakhstan

** ENSG-LIAD, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, France

Email : royer@gocad.org, patrick.ledru@areva.com

Les gisements uranifères de type roll-front sont parmi les plus gros gisements au monde en terme de réserves, en particulier ceux du Kazakhstan qui est devenu le premier producteur d'uranium en 2009 avec environ 25% de la production mondiale. Toutefois, la géométrie de ces gisements uranifères reste mal connue du fait de la complexité du front d'oxydoréduction qui présente de nombreuses digitations en 2D et d'importantes variations latérales et verticales des paramètres physiques et chimiques. Une modélisation en 3D d'un front d'oxydoréduction a été entreprise dans une zone test du gisement de Muyunkum. Les méthodes de caractérisation spatiale 2D basée sur les fractals et la variographie ont ensuite été utilisées pour tenter d'identifier des structures spatiales permettant de mieux prévoir la forme des fronts d'oxydoréduction observés.

Le gisement de Muyunkum est situé dans le bassin de Chu-Sarysu, séparé du bassin du Syr Darya par la chaîne du Karatau dont le soulèvement est rapporté au Pliocène. Ces bassins sont remplis de sédiments clastiques d'âge Eocène (sables fins à grossiers non consolidés à intercalaires argileux) favorable à la circulation de fluides minéralisateurs. La localisation des zones de transitions Red/Ox, zones potentielles d'accumulation de l'uranium, dépend directement de la géométrie des niveaux perméables et de leur variabilité spatiale. Afin d'améliorer la connaissance de ces paramètres, la construction d'un modèle géométrique 3D des formations encaissantes a été entreprise sous Gocad en intégrant une trentaine de coupes géologiques verticales interprétatives ainsi que les données radiométriques de plus de 440 forages. Ce modèle a permis : (i) de mettre en cohérence les informations apportées par les coupes réalisées et de les corriger éventuellement; (ii) d'identifier la position de la zone d'oxydation en relation avec les critères morphologiques tels que la courbure du toit et du mur; (iii) de caractériser la géométrie de la zone d'oxydation, notamment ses dimensions de l'ordre de 2km dans la direction N135 et de 1km perpendiculairement, sa largeur et son épaisseur qui augmentent avec la profondeur. Toutes ces observations peuvent s'avérer très utiles pour optimiser l'implémentation de forages complémentaires d'exploration ou de reconnaissance sur une zone présentant des caractéristiques similaires.

L'analyse 3D a été complétée par une étude spatiale 2D des fronts d'oxydoréduction à l'échelle régionale. Vue de dessus à l'échelle du gisement, la zone minéralisée de Muyunkum est très similaire à celle des fronts de diffusion observés lors de la migration d'un fluide dans un milieu poreux. Les doigts et les golfs peuvent être assimilés à des digitations correspondant à l'avancée du front d'oxydoréduction dans des zones plus ou moins perméables. La frontière extérieure de ce front est très irrégulière et semblable aux figures fractales observées dans les problèmes de diffusion-convection dans les milieux poreux (sols, couches réservoir...). C'est pourquoi une analyse morphologie de ces fronts faite à l'aide de méthodes fractales de type comptage par boîtes, montre que le roll-front est de nature multi-fractale, avec des dimensions proches de celles reportées dans l'étude des phénomènes de diffusion-convection, dont la dimension fractale est en moyenne de 1.3 et varie entre 0.83 et 1.65. Cette analyse a été complétée par l'étude du variogramme des indicatrices de la zone minéralisée. La variographie montre l'existence de structures spatiales continues, isotropes à petite échelle (670m), et anisotropes à plus grande échelle (4-5km), se reproduisant sur toute la zone étudiée du gisement de Muyunkum, soit 80km. Ces caractéristiques peuvent être mises à profit pour simuler la géométrie des fronts entre deux observations de puits, et pour optimiser l'implantation des forages de reconnaissance à l'échelle régionale.

Du modèle stratigraphique à la modélisation géologique 3D de systèmes de roll front au Kazakhstan

Fiet N.¹, Oppeneau T.², Berestnev N.¹, Merembayev T.¹ et Ledru P.¹

¹Geosciences Katco, Almaty, Kazakhstan.

²Geosciences Areva, La Défense, France.

E-mail : nicolas.fiet@areva.com; thomas.oppeneau@areva.com

Dans la région du Sud Kazakhstan, les gisements d'Uranium, localisés dans des bassins sédimentaires à dépôts silico-clastiques, sont de type Roll front. L'uranium, transporté dans les aquifères par un fluide oxydant, précipite à l'interface oxydé/réduit (front redox) et se concentre sur divers supports (en association avec de la matière organique et/ou des sulfures, en adsorption des argiles) La géométrie des fronts est complexe et intimement dépendante des propriétés chimiques (fluides) et pétrophysiques (porosité, perméabilité) des formations géologiques encaissantes.

Katco, filiale d'Areva et de KazatomProm, explore et exploite le gisement de Muyunkum dans le bassin du Chu-Sarysu sur le permis de Tortkuduk. Les systèmes de roll fronts présentent une extension longitudinale de plusieurs dizaines de kilomètres. Par contre, les zones d'enrichissement d'intérêt économique sont très étroites (pluridécamétriques à hectométriques) et leur caractérisation nécessite des mailles de forage serrées (pas de 50 m sur profils espacés de 400 à 200m).

Afin d'optimiser les campagnes de sondages liées à l'activité minière (exploration et production) et développer de nouveaux outils de prospection et de compréhension des gisements, le groupe Géosciences de Katco développe une démarche de modélisation 3D de ces fronts.

La série sédimentaire cible, d'une puissance variant entre 40 et 70m, est d'âge Paléocène-Eocène. Elle est constituée d'alternances de niveaux de sables non consolidés en remplissages de chenaux et de niveaux d'argiles. Les environnements de dépôts sont caractéristiques de milieux fluvio-deltaïques.

La démarche actuellement développée sur ce type d'environnement consiste en 6 étapes.

1. construction d'une charte stratigraphique 1D caractérisant l'organisation temporelle des différentes unités lithologiques porteuses des gisements,
2. établissement d'un modèle stratigraphique définissant les relations géométriques entre unités lithologiques : extensions géographiques, morphologies, relations sables/argiles,
3. sélection des paramètres pétrophysiques et chimiques à modéliser (perméabilités, teneurs U, RedOx) et corrélations stratigraphiques 2D,
4. contrôle qualité en 3D des profils de corrélation 2D,
5. création de cartes de paramètres par unité lithologique pour la prospection.
6. création de blocs modèles par modélisation stochastique 3D,

La visualisation dans l'espace de la géométrie des sables perméables et des connections potentielles entre les différentes unités ouvre de nouvelles perspectives. La géométrie des fronts redox est révisée et la répartition des intervalles de minéralisation économiquement intéressants peuvent être étudiée de façon originale en fonction des paramètres de perméabilité, de composition minéralogique, d'oxydation et de déséquilibre. La modélisation de la dynamique des écoulements de fluides constituera l'étape suivante.

Les gisements d'uranium au sein de l'évolution tectono-sédimentaire du bassin francevillien (Gabon)

Jean-Louis FEYBESSE et Olivier PARIZE

AREVA NC, BG Mines, Direction des Géosciences, 1 place Jean Millier, 92084 Paris La Défense, France ; jean-louis.feybesse@areva.com – olivier.parize@areva.com

Localisé au sud-est du Gabon et centré sur la ville de Franceville, le bassin sédimentaire francevillien s'est mis en place au Paléoproterozoïque (environ 2 Ga). Des gisements de manganèse et d'uranium sont encaissés dans son remplissage sédimentaire. A l'issue de l'exploitation par la COMUF des gisements d'uranium de Boyindzi, Bangombé, Mikouloungou, Mounana, Okélobondo, Oklo, des campagnes de reconnaissances par COGEMA et des études académiques des réacteurs de fission naturelle de Bangombé, Okélobondo et Oklo. Le modèle francevillien classique développé par Weber (1969) puis Gauthier-Lafaye (1986) se résume en quelques points : la succession lithologique continue FA à FE correspondrait à une séquence granodécroissante de comblement ; les « grès de Poubara » (FB2a) seraient attribués à des dépôts marins margino-littoraux ; les « jaspes FC » correspondraient aux dépôts évaporitiques scellant le comblement du bassin et assimilés pour cette raison à un datum. Le modèle géotectonique uranifère francevillien a été établi dans ce cadre. Il repose sur 4 critères : (1) un réservoir silicoclastique (grossier) appartenant au sommet du FA supérieur ; (2) le contact avec les pélites et ampélites du FB, qu'il soit stratigraphique ou tectonique ; (3) un point haut d'origine tectonique, sensu « piège pétrolier » ; (4) le développement d'une fracturation hydraulique.

Une réévaluation de contexte géologique du bassin Francevillien et des minéralisations uranifères a été réalisée par AREVA courant 2009 et 2010, initiée par la reprise de l'exploration, après une vingtaine d'années d'arrêt de ses travaux de recherche minière en République gabonaise. Cette actualisation du contexte tectono-sédimentaire de la série du Paléoproterozoïque du bassin Francevillien, hôte de la minéralisation, devait être menée au travers de nouvelles observations de terrain (affleurements et sondages), en s'appuyant sur les progrès accomplis dans la géologie des bassins sédimentaires durant ces vingt dernières années, tout en intégrant les connaissances réunies lors des travaux de recherche, d'exploration et d'exploitation antérieurs.

L'attendu de cette expertise tectono-sédimentaire était d'apporter des éléments pour cadrer les minéralisations dans l'évolution géodynamique du bassin. Cet objectif devait être atteint en reconstituant la colonne lithostratigraphique, en replaçant les événements tectoniques dans cette succession et en proposant un schéma d'évolution paléogéographique.

L'évolution tectono-sédimentaire du bassin Francevillien telle qu'elle apparaît au terme de cette actualisation est proposée comme une alternative au modèle classique : l'analyse faciologique et la cartographie nous conduisent répartir les lithologies FA, FB, FD et FE au sein de trois cycles stratigraphiques enregistrant l'approfondissement du bassin. Ce cadre stratigraphique amène à réviser le modèle paléo-tectonique et suggère plusieurs bassins successifs en contexte tectonique transcurrent. Nous proposons d'intégrer les gisements d'Uranium et les indices déjà inventoriés dans la séquence des événements géologiques.

Du Talak au Teleflak (Madaouéla, Arlit Niger) : décryptage des événements clés à la compréhension de l'évolution de la région au Viséen, et des minéralisations associées dans le Guezouman

I Aouami, A Nedjari, T Mahaman, H Sanguinetti.
(GOVIEX, Niger)

Le bassin de Tim Mersoï est un bassin certes mobile mais paradoxalement très peu subsident. La couverture y est détritique et les carbonates extrêmement rares. La nomenclature en usage comporte des séries, des sous séries, des formations et des unités avec, en particulier à la base **La série de Terada** (Dévono-Carbonifère) où seule la dernière formation, Les Argilites de Talak est Viséen. Des grès clôturent cette formation, unité d'Akokan (UA).

Deux éléments nouveaux permettent de regarder différemment les coupes de Madaouéla:

- Le Téléflak est une silcrète produit d'une paléopédogénèse,
- Les grands ensembles de l'UA reposant en discordance sur les Argiles du Talak (front de delta à cordons sableux) sont des éléments résédimentés.

Le contexte au cours de ce Viséen s'y prête assez bien car assez mobile et instable. On connaît à cette même époque au Sahara et sur la bordure du Gondwana une phase majeure compressive à l'origine de la mise en place de nappes de charriages au Maroc.

Cette instabilité se retrouve ici et elle est lisible à toutes les échelles : slumps, paquets désorganisés. La fin de cette formation est dominée par une structuration assez précoce probablement à l'origine de la réactivation de la flexure de Madouéla, mais cela reste toutefois à confirmer et étayer. Cela a engendré le plissement de la formation. Dans un stade ultime la flexure se débarrasse d'une partie de sa couverture constituée par la formation des argiles du Talak dont fait partie les grès de l'UA. Ce sont de véritables paquets, des nappes de charriage qui se résédimentent sur les argiles du Talak vers l'Est

Il est fort probable que ce même phénomène soit à l'origine de la série dite « monoclinale » que l'on retrouve à Madaouéla Est en discordance sur les argiles du Talak.

Cette phase orogénique fini viséenne est également à l'origine de l'émersion de ce bassin. Il s'en suit une longue période de stabilité au cours de laquelle s'installe une végétation avec des paléosols de type hydromorphe (en liaison avec les battements de la nappe phréatique).

Cette pédogénèse s'exprimera différemment selon les faciès sur lesquels elle se développe. Sur les grès de l'UA elle remobilise essentiellement la silice et le fer en nodules donnant une silcrète. C'est ce qui est connu comme le conglomérat du Téléflak. Il fournira par la suite les éléments des conglomérats du Guézouman.

Sur les argiles du Talak imperméables la pédogénèse sera moins généreuse avec des ferricrètes discontinues, quelques nodules cm, des marmorisations, de la dessiccation.

La suite de l'histoire sera différente en fonction des situations : Dans un régime fluvial des sables, vont combler la paléo topographie dans une première décharge. La silcrète fournit les galets. Sur les zones hautes il n'est pas exclu que les paléosols continuent à se développer et à mobiliser les éléments. Les minéralisations du GUEZOUAN sont à replacer dans ce contexte.

Apport des argiles à la compréhension du contexte sédimentaire à la base du bassin d'Athabasca dans le secteur du gisement de Shea Creek (Ouest Athabasca, Saskatchewan, Canada)

Freddy Uri*, Daniel Beaufort* Jean-Louis Feybesse** et Olivier Parize**.

*UFR SFA, UMR 6269 HydrASA Université de Poitiers Bâtiment des Sciences Naturelles 40 Avenue du Recteur Pineau 86022 POITIERS freddy.uri@univ-poitiers.fr

** AREVA, BU Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex.

olivier.parize@areva.com

De par ses nombreux corps minéralisés à haute teneur situés entre 700 et 1000 m de profondeur, le gisement d'uranium associé à une discordance de Shea Creek constitue une référence pour la prospection de nouveaux gisements d'uranium enfouis profondément sous le bassin de l'Athabasca. En effet, ce gisement qui est enfoui sous une épaisse couverture gréseuse (700 à 800m) possède tous les styles de minéralisation connus dans les autres gisements associés à une discordance de par le monde. Les études réalisées sur le halo d'altération qui entoure les minéralisations de Shea Creek convergent vers une genèse conforme au modèle diagénétique-hydrothermale tel que défini par Hoeve and Quirt (1984). Cependant, s'il ne fait aucun doute qu'à Shea Creek la plupart des minéraux argileux rencontrés dans les formations gréseuses de la base du bassin ont une origine hydrothermale, il subsiste de nombreuses incertitudes quant à l'origine du matériel sédimentaire dans lesquelles se sont mise en place ces altérations. Parmi ces incertitudes il convient de citer (1) le calage stratigraphique de la formation sédimentaire qui recouvre la discordance et qui est répertoriée sous le nom de séquence de Shea Creek, de formation Smart ou de formation Manitou Fall C selon les auteurs et (2) le contrôle stratigraphique de zones riches en argile situées vers la base du bassin qui ont été mises en évidence à l'échelle régionale (Kister et al., 2006).

L'étude détaillée des formations gréseuses de 200 forages du gisement de Shea Creek et de ses environs confirme la nature spécifique de cette formation basale qui se distingue des autres par les caractères suivants:

- Une forte proportion globale de minéraux argileux associés à des roches sous compactées.
- les minéraux argileux de ces niveaux sous compactées sont composé essentiellement de kaolinite de forte cristallinité et d'origine diagénétique.
- Présence de fins niveaux d'argilites pas affectés par l'altération hydrothermale et composée de kaolinite, dickite, muscovite, quelques minéraux lourds, pas de feldspath marquant la composition originelle du dépôt.
- Fort enrichissement en terre rare (REE) de cette formation.
- Forte concentration des défauts d'irradiation dans les minéraux argileux (minéraux diagénétiques compris).
- Une proportion en terre rare (REE) nettement supérieure aux autres formations.

Ces résultats démontrent l'importance des processus sédimentaires précoces dans la concentration des éléments chimiques corrélés aux minéralisations actuelles. La prise en compte de ces processus sédimentaires permettrait compléter les modèles existants de genèse du gisement de Shea Creek.

Altérations argileuses et minéralisations uranifères associées le long du faisceau structural Kiggavik-Andrew Lake (Nunavut, Canada)

Thomas Riegler*, Jean-Luc Lescuyer***, Peter Wollenberg***
et Daniel Beaufort**

*HydrASA / ERM, Université de Poitiers, CNRS UMR 6269, Bâtiment B08, Rue Albert Turpin, 86022 Poitiers cédex, thomas.riegler@univ-poitiers.fr

** HydrASA, Université de Poitiers, CNRS UMR 6269, daniel.beaufort@univ-poitiers.fr

***AREVA & AREVA Ressources Canada, Tour AREVA, 1 place Jean Millier 92084 Paris la Défense Cedex

Le projet Kiggavik est localisé à 70km à l'Est du hameau de Baker Lake, Nunavut Canada. C'est un projet majeur d'exploration uranium dans l'arctique canadien. Il comprend 3 gisements (Kiggavik, End et Andrew) avec un contenu d'environ 58 000t U reconnues dans les années 70-80 le long de la bordure SE du bassin du Thelon, ainsi qu'un potentiel de découverte important à l'échelle régionale. Les grès protérozoïques du bassin du Thelon ainsi que la paléosurface de la discordance bassin-socle sont érodés. Les minéralisations uranifères sont majoritairement rencontrées dans les roches du socle d'âge néoarchéen à proximité de grandes failles d'orientation N80 associant une forte hématitisation, de puissantes brèches hydrauliques à remplissage de quartz et des zones d'altérations argileuses pluridécimétriques

Ces altérations argileuses, contrôlées par structures secondaires aux grands accidents Est-Ouest, sont spatialement liées aux minéralisations uranifères. La paragenèse communément observée à l'échelle faisceau structural de Kiggavik-Andrew lake est un assemblage à **illite ± sudoite ± hematite ± phosphate et sulfate d'aluminium (APS)**, identique à celui observé autour des minéralisations associées à des discordances paléoproterozoïques, dans l'Athabasca (Canada) ou l>Alligator river (Australie).

La pétrographie des altérations met en évidence deux phases de cristallisation de phyllosilicates de même nature (micas dioctaédriques ou illite et chlorite) mais de propriétés cristallographiques et chimiques distinctes. La première phase est attribuée au métamorphisme rétrograde qui a affecté les roches du socle à l'échelle régionale alors que la seconde caractérise l'altération hydrothermale associée à la mise en place des minéralisations. Les propriétés cristallographiques des phyllosilicates hydrothermaux ont permis de réaliser une cartographie des halos d'altération à partir de données de diffraction RX (cristallinité suivant l'axe c, polytypisme) tandis que la caractérisation cristallographique des phases argileuses impliquées dans les processus d'altération hydrothermales démontre un départ massif du fer de la structure des silicates qui doit être mis en parallèle avec l'occurrence d'hématite dans les zones altérées. Ce dernier point met en avant le contrôle potentiel du changement d'état d'oxydation du fer pour la précipitation des minéraux uranifères au cours de l'évènement hydrothermal.

SUR DES GISEMENTS D'URANIUM D'ASCENDANCE RHYOLITIQUE : XIANGSHAN/JIANGXI EN CHINE, SIERRA PENA BLANCA/CHIHUAHUA AU MEXIQUE ET LODEVE/HERAULT EN FRANCE

Jacques Dardel (jac.dardel@orange.f)

A Xiangshan, un massif rhyolitique de 300 km² recoupe des métamorphites protérozoïques et s'ennoie sous un conglomérat rouge Jurassique supérieur. Les laves de Xiangshan appartiennent à une série unique de type calco-alcalin (AFM) riche en potassium, caractéristique d'un système géodynamique de type compressif (subduction). Les gisements, à U seul ou à U-Th, sont encaissés dans les rhyolites, des rhyodacites ou dans les microgranites porphyriques tardifs, sur des structures liées à des failles. Avec ses dix-neuf gisements, Xiangshan aurait un potentiel de 45 000 tonnes d'uranium (tU) dont environ 15 000 tonnes sont déjà extraites. Le seul gisement de Zoujiashan a produit 10 000 tU à partir de minerais à 0,35 % en uranium métal (sur une hauteur de 600 mètres).

Implanté à l'ouest de la Sierra Madre Oriental, le chaînon NNO-SSE de 70 km de la Sierra Pena Blanca correspond à un bloc basculé. Les gîtes sont dans une série volcano-sédimentaire éocène discordante sur des calcaires crétacés. Cette série dépassant 500 mètres affleure sur 450 km² avec près de 20 indices. La minéralisation à uranophane dominant est toujours encaissée dans les tufs vitroclastiques soudés Nopal ou Escuadra datés à 44 Ma, et surtout sur des failles N90-100° ou sur des intersections N45° et N135°, voire sur des amas bréchiques (Nopal 1, Las Margaritas). La minéralisation est décrite depuis le toit des calcaires crétacés sous la formation Nopal (Domitila) jusqu'au mur de la formation Mesa (Cueva Amarilla), soit une dénivelée topographique de 150 m ou stratigraphique de 350 m. La pechblende fut signalée dans le haut de Nopal 1 (1976). En 1985, les trois gîtes explorés de Nopal 1, Puerto 3, et Las Margaritas représentaient un exploitable 1 400 tU plus 450 tU pour des gîtes moins étudiés (Domitila, Cueva Amarilla etc). Site abandonné en 1982.

Situé au sud du Massif central, le bassin permien de Lodève affleure sur 250 km². Les 700 mètres de sédiments autuniens, détritiques à granulométrie fine, se singularisent par l'abondance des carbonates (jusqu'à 40 %) et des feldspaths (jusqu'à 25-40 %), le quartz représentant 5 à 35 % de la roche. Le bassin garde aussi de nombreuses reliques d'un volcanisme explosif, synchrone avec son remplissage : 18 niveaux de cinérites dans l'Autunien, 15 niveaux de tuffites dans le Saxonien, avec des restes de pyroclastes abondants dans la totalité des 2 500 mètres de sédiments. A Mas d'Alary et Mas Lavayre, l'uranium minier (pechblende/coffinite) est essentiellement lié à des bitumes (en remplissage de fractures, ciment de brèche etc) au niveau de grandes failles N60°. Les âges les plus anciens obtenus sur la fraction feldspathique d'un tuf rhyolitique (intercouche 24-25) sont à 280 Ma et s'intègrent bien avec le temps permien (295-245 Ma). Un second groupe d'âge (248-246 Ma) correspondrait à l'enfouissement maximal. L'uranium minier se rattacherait à deux épisodes d'hydrothermalisme profond liés à des événements géodynamiques majeurs, régionaux et de style distensif, mais l'uranium et les matières organiques (faciès couche) sont intrinsèques aux sédiments autuniens. Lodève produisit 18 000 tU depuis un minerai moyen à 0,22 % en uranium métal.

Hors le détail de leurs scénarii, ces trois groupes de gisements affichent chacun deux mêmes métallotectes : un encaissant à uranium latent et un piègeage structural. Les compositions chimiques de ces volcanites (rhyolites de Xiangshan, tufs vitroclastiques soudés de Pena Blanca, retombées aériennes du Lodévois) les classent dans le domaine calco-alcalin dans le diagramme AFM et dans le domaine des rhyolites alcalines dans le diagramme de de La Roche.

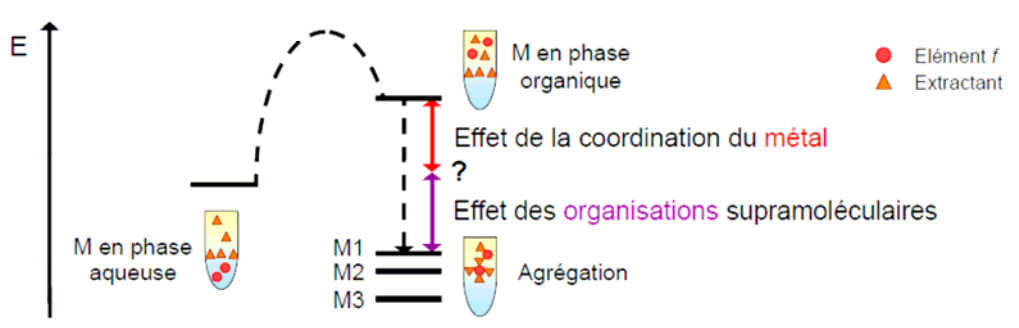
Ainsi, la composition même de ces rhyolites alcalines potassiques « induisait » probablement une concentration de 4 à 10 µgrammes d'uranium par gramme de rhyolite (mésostase et minéraux), un uranium « labile » dans le ciment vitreux (60-80% de la roche) et donc mobilisable par altérations. Ce regard oblique contraint à se méfier du dogme des classifications ou du fétichisme des modèles.

Extraction L/L de l'Uranium et du Thorium : vers la compréhension du rôle de l'eau dans leur sphère de solvation en milieu organique

Damien Bourgeois, Jérôme Maynadié et Daniel Meyer

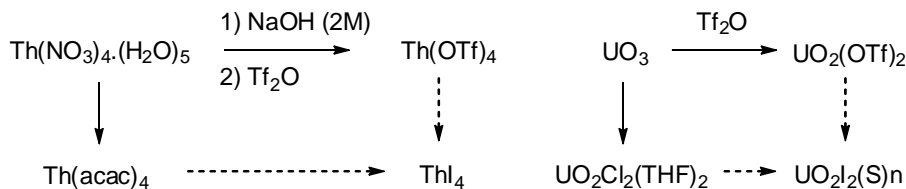
Laboratoire de Chimie et Physico-chimie des Actinides (LCPA),
 Institut de Chimie Séparative de Marcoule (ICSM, UMR 5257), Site de Marcoule, BP 17171,
 30207 Bagnols sur Cèze Cedex, damien.bourgeois@univ-montp2.fr

La compréhension à l'échelle moléculaire des phénomènes intervenant en extraction liquide/liquide lors du passage en milieu organique, puis responsables de la stabilisation des espèces dans ce même milieu, nous apparaît d'importance primordiale : l'influence respective des différents facteurs sur le bilan de l'extraction est encore mal connue.



Dans cette optique, nous avons entrepris une étude qui vise à la caractérisation de la sphère de solvation des éléments *f* en milieu organique. En effet, les agrégats qui se forment dans la phase organique lors de l'extraction ont une structure complexe et difficile à étudier directement à partir de milieux d'extraction. L'objectif de cette étude est de parvenir à des modèles décrivant de façon pertinente les différents niveaux d'interactions qui régissent ces agrégats, en préparant des milieux d'extraction modèles dans des conditions bien contrôlées. Afin d'évaluer le rôle de l'eau sur la structuration du milieu, nous avons préparé des systèmes strictement anhydres, auxquels on peut ajouter une quantité d'eau contrôlée.

Les sels (chlorures, triflates, iodures) d'uranium (IV et VI) sont décrits dans la littérature,^[1] mais les analogues du thorium (IV) ne sont pas tous décrits. Nous avons donc dans un premier temps préparé ces composés selon le schéma ci-dessous :



Nous avons ensuite entrepris une étude RMN de ces sels en présence de TBP (tri-butyl phosphate), afin de déterminer l'influence de l'eau sur les équilibres de complexation (RMN ³¹P) ainsi que sur le degré d'agrégation (mesures de coefficients d'autodiffusion par DOSY).

Références

[1] M.P. Wilkerson, C.J. Burns, R.T. Paine, B.L. Scott, *Inorg. Chem.* **1999**, *38*, 4156-4158; J.C. Berthet, M. Lance, M. Nierlich, M. Ephritikine, *Eur. J. Inorg. Chem.* **2000**, 1969-1973.

NOUVEAU PROCÉDÉ DE PRÉCIPITATION DES CONCENTRÉS D'URANIUM POUR AUGMENTER LA DENSITÉ EN VRAC DU CONCENTRÉ

*B. Courtaud, F. Auger, J. Thiry

Pour joindre l'auteur : bruno.courtaud@areva.com

*AREVA NC – Service d'Etudes de Procédés et d'Analyses (SEPA), B.P. N°71 – 87250
Bessines sur Gartempe (France).*

Le plus souvent, les usines de traitement de minerais d'uranium sont installées près des gisements en exploitation et donc loin des usines de raffinage et conversion. Cela conduit à des coûts de transport des concentrés élevés. Un des moyens de les réduire est de charger plus d'uranium dans chaque fût en augmentant la densité en vrac du concentré (yellow cake). La densité peut être augmentée soit par compaction mécanique de la poudre de concentré, soit en améliorant l'étape de précipitation. C'est cette seconde voie qu' AREVA a adoptée pour la plupart de ses usines.

Un nouveau procédé de précipitation, applicable à tous le types de concentrés (uranates de sodium ou de magnésium, peroxyde d'uranium,...) a été mis au point ; il permet, par exemple, d'obtenir une densité en vrac de 3 pour l'uranate de sodium au lieu de 1,5 à 2 pour celui produit par un procédé classique.

Actuellement ce procédé est exploité à l'échelle industrielle et va devenir la norme pour les procédés de précipitation dans les usines d'uranium d'AREVA.

Outre le fait de produire un concentré de haute densité, on obtient un concentré sans aucune fine, constitué de particules sphériques régulières qui donnent au produit une bonne coulabilité et une filtration facile après précipitation.

***ETUDE GRANULOMETRIQUE DES PHOSPHATES
NATURELS MAROCAINS « BASSIN OULAD ABDOUN » :
DISTRIBUTION DES RADIONUCLEIDES NATURELS,
QUANTIFICATION ET IMPLICATION GENETIQUE***

S. FAKHI¹, E. FAIT^{1,5}, R. OUTAYAD¹, M. MOUFLIH², I. VOQUE ROMERO³, Guillermo Manjon³ M. BEN MANSOUR⁴, A. BOUIH⁴, A. NOURREDDINE⁶ & H.EL HADI⁵

- (1) Unité de Radiochimie Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Maroc.
E-mail : fakhisaid@gmail.com;
- (2) Laboratoire des Géorressources Sédimentaires et Environnement, Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Maroc.
- (3) Département de Física Aplicada II, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla Universidad de Sevilla
Phone: +34 954 555979, Fax: +34 954 557892
- (4) Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN- Maroc), CEN de MAAMOURA
- (5) Laboratoire de Géochimie, Géologie Appliquée et Environnement, Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Faculté des Sciences ben M'Sik.
- (6) Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) 23 rue du Loess BP 2867037 Strasbourg cedex

La connaissance des processus physicochimiques mis en jeu et la détermination des paramètres d'échange des métaux et l'identification des phases de piégeage des radioéléments dans le phosphate, permet de concevoir des matériaux anthropiés de piégeage de ces éléments et de développer des procédés de séparation et de récupération des métaux d'intérêt énergétique, économique et environnemental tels l'uranium, terres rares...

Au cours de ce travail, nous sommes intéressés à la séparation des fractions granulométrique des phosphates en tant que horizon solide pour étudier en premier lieu la distribution des radionucléides naturels dans les différentes phases et avons calibré les grains qui constituent les phosphates. Les activités spécifiques ont été déterminées par spectrométrie alpha après traitement radiochimique approprié et directement par spectrométrie gamma sur des échantillons de bassin des Oulad Abdoun.

VALORISATION DE L'URANIUM CONTENU DANS L'ACIDE PHOSPHORIQUE

Hamid MOKHTARI¹, Bruno COURTAUD¹, Jacques THIRY¹

¹ AREVA MINES, Service d'Etudes de Procédés et Analyses (SEPA),
1 Avenue du Brugeaud, B.P. 71, 87250 Bessines sur Gartempe, France.
e-mail: hamid.mokhtari@areva.com

L'utilisation des ressources énergétiques et la recherche de technologies énergétiques performantes sont les nouveaux challenges du 21^{ème} siècle. La fin des réserves d'énergies fossiles est estimée à moins de 60 ans pour le pétrole et le gaz et environ 200 ans pour le charbon. Dans ce contexte et avec les risques associés au réchauffement climatique à cause des gaz à effet de serre, l'énergie nucléaire semble être intéressante pour la fourniture d'une énergie sans CO₂. Les prévisions montrent que l'énergie d'origine nucléaire devrait être à l'origine d'une part importante de l'énergie mondiale d'ici les cinquante prochaines années. En effet, les analystes estiment que l'énergie nucléaire devrait augmenter de 2 à 3,5% chaque année. En 2010, 435 réacteurs nucléaires étaient en fonctionnement et leur nombre devrait augmenter entre 523 et 748 d'ici 2035 selon les prévisions de l'AIEA et l'OCDE/AEN. Autant de réacteurs nécessiteront entre 87000 tonnes d'uranium et 138000 t d'uranium par an en 2035. Cependant, ce scénario pourrait être revu à la baisse notamment avec le récent événement qui a eu lieu à Fukushima.

Depuis 1990, la production d'uranium est plus faible que la demande et la différence est compensée par les ressources secondaires (uranium enrichi provenant du démantèlement des armes nucléaires, uranium provenant du combustible usé traité, etc.). Cependant, ces ressources secondaires commencent à diminuer et la production d'uranium actuelle ne sera pas capable de satisfaire la demande future en uranium même si les réserves en uranium sont suffisantes.

L'uranium non conventionnel comme les phosphates, les minerais non ferreux, les schistes noirs, l'eau de mer, etc., pourrait fournir une quantité significative d'uranium. Cette présentation s'intéresse exclusivement à la valorisation de l'uranium contenu dans les phosphates et l'acide phosphorique qui constituent le plus gros potentiel uranifère, notamment la présentation des procédés historiques permettant d'extraire l'uranium de ces matrices.

Développement d'un système de couplage direct d'une colonne instrumentée avec une ICP-MS : Application à la migration de l'uranium dans une colonne de sable en présence d'acides humiques

Alkiviadis GOURGIOTIS*, Sylvain BASSOT*, Caroline SIMONUCCI*, Olivier DIEZ*, Aurélie MIFSUD*, Arnaud MARTIN-GARIN**, Frédéric COPPIN**

*IRSN/DEI/SARG, Fontenay-aux-Roses (alkiviadis.gourgiotis-manpower@irsn.fr; sylvain.bassot@irsn.fr; caroline.simonucci@irsn.fr; olivier.diez@irsn.fr; aurelie.mifsud@irsn.fr)

** IRSN/DEI/SECRE, Cadarache (arnaud.martin-garin@irsn.fr; frederic.coppin@irsn.fr)

Suite à l'accident de Tchernobyl, une partie des matériaux les plus contaminés (végétaux, sol de surface, particules de combustibles,...) issus d'une zone sous le vent nommée 'la Forêt Rousse' ont été enfouis dans des tranchées à proximité de la centrale. L'IRSN, en partenariat avec des Instituts de recherche Ukrainiens (UIAR et IGS), a instrumenté un site pilote sur une de ces tranchées (T22) afin d'approfondir la compréhension des mécanismes entrant en jeu dans la migration des radionucléides (Sr, Cs, Pu, U..) vers la nappe souterraine et d'améliorer les modèles prédictifs opérationnels. Parmi ces mécanismes, le rôle des colloïdes est en particulier à l'étude car ces particules peuvent faciliter le transport des actinides à la nappe. L'étude réalisée en laboratoire dans le cadre du GNR TRASSE (Groupement National de Recherche sur le Transfert des Radionucléides dans le Sol, le Sous-sol et vers les Ecosystèmes) vise à mieux comprendre l'impact des colloïdes organiques, notamment des acides humiques (AH), dans le transfert des actinides (U/Pu) vers la nappe.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce développement analytique de couplage direct d'une colonne de sable instrumentée type FPLC (Fast Protein Liquid Chromatography) avec un ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) quadripolaire. Ce dispositif permet en temps réel de suivre, en sortie de colonne, les teneurs en uranium et en divers éléments traces par ICP-MS, la teneur en AH ainsi que le pH et la conductivité (cellules en ligne).

Afin d'améliorer la précision des résultats expérimentaux, différents paramètres ont été étudiés et optimisés : système de nébulisation, choix du traceur externe pour la correction de la dérive du signal instrumental, choix de l'isotope de l'uranium, choix du traceur des AH. De plus, les paramètres hydrodynamiques de la colonne ont été diagnostiqués à l'aide de traçages non réactifs, afin de s'assurer que le dispositif permet bien de mettre en évidence les interactions U-AH-sable dans différentes conditions chimiques et avec différents temps caractéristiques d'interaction.

Le couplage FPLC-ICP-MS permet la mesure en ligne de plusieurs éléments en simultané sans aucune préparation de l'échantillon tout en offrant de très bonnes limites de détection et une meilleure résolution temporelle (par rapport à des mesures hors ligne, en collecteur de fraction). Les résultats très prometteurs déjà obtenus permettent d'envisager l'utilisation de ce dispositif expérimental en testant différents paramètres et dans d'autres domaines d'intérêt pour l'IRSN (résidus miniers d'uranium, sols contaminés de Fukushima, interface béton-argile dans le cadre des stockages des déchets radioactifs à haute et moyenne activité, ...).

SPÉCIATION ET FACTEURS DE STABILITÉ DE L'URANIUM DANS LES RÉSIDUS MINIERES DE COMINAK (NIGER)

Adrien Déjeant*, Laurence Galois*, Georges Calas*, Vannapha Phrommavanh**,
Michael Descostes**

* Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC), 4 place Jussieu, 75005 Paris, adrien.dejeant@impmc.upmc.fr

** AREVA, BG Mines, R&D, Tour AREVA, 1 place Jean Millier, 92084 Paris la Défense

Après plus de 30 années d'exploitation, une verse de 14 millions de tonnes de résidus miniers a été accumulée aux abords de la mine souterraine de COMINAK¹. Les résidus correspondent à la fraction minérale issue du broyage et du lessivage du minerai d'uranium (U).

Le rendement du procédé d'extraction est d'au moins 95% et une certaine quantité d'uranium demeure dans les résidus. Des reconcentrations en U sont observées dans certaines zones de la verse, indiquant l'existence potentielle d'une migration liée à la diagénèse^{2,3}. La réactivité de cet environnement géochimique assez particulier est étudiée afin d'identifier (i) la spéciation de l'U et de ses éléments associés et (ii) les facteurs jouant sur la stabilité physique et chimique des phases porteuses d'U.

Des concentrations relativement élevées sont notamment mesurées en surface de la verse, dans une croûte indurée de type *gypscrite* (à matrice gypseuse). Les analyses montrent différentes phases porteuses d'U, de tailles micro à nanométriques et souvent associées à des argiles. Des oxydes d'U^{IV}-Ti de type brannerite, similaires à ceux observés dans le minerai⁴, pourraient en être hérité. La brannerite résiste relativement bien à la lixiviation acide en usine⁵, mais elle pourrait s'altérer avec le temps dans la verse. Ces phases correspondraient, après oxydation et solubilisation, à la source principale de l'U^{VI} mobilisable. En outre, des phases uranifères présumées néoformées de type vanadates, sulfates et phosphates d'uranyle (U^{VI}) sont également observées. Ces secondaires d'U sont presque toujours associés à des argiles jouant sûrement un rôle prépondérant par sorption.

À terme, cette étude s'inscrit dans une optique de revalorisation et/ou de réhabilitation des verses à résidus.

Références

¹ AREVA et le Niger, un partenariat durable (2010)

² Wattine, A. Etude pétrographique 9527 – Niger/Cominak, étude des échantillons de verse à stériles (2007) – document interne

³ Peiffert, C. and Cathelineau, M. Caractérisation des sédiments issus de la campagne d'échantillonnage de 2007 au Niger – CREGU – document interne

⁴ Cavallec S. Evolution diagénétique du bassin de Tim Mersoï et conséquences pour la genèse des minéralisations uranigères dans les formations carbonifères du Guezouman et du Tarat –Thèse 2006

⁵ Lottering, M.J. et al. Mineralogy and uranium leaching response of low grade South African ores. Mineral Engineering 21 (2008), 16-22

IMOURAREN – Tests de lixiviation et spécificité des analcimes

Aurélia Wattinne-Morice* & Michel Bélières**

*AREVA - Tour Areva, 1 place Jean Millier 92084 Paris la Défense- aurelia.wattinne@areva.com

** AREVA – Service d'Etudes de Procédé et Analyses (SEPA), B. P. 71-
87250 Bessines sur Gartempe
michel.belieres@areva.com

Situé au Niger à environ 160 km d'Agadez, Imouraren est un gisement d'uranium de type sédimentaire (150 000tU à 0.08%). L'uranium piégé dans les grès se présente majoritairement sous forme oxydée (uranotyle métatyuyamunte), mais une partie se trouve aussi sous forme réduite (pechblende uraninite). Les sédiments d'Imouraren ont une particularité : ils sont riches en analcimes, certains d'entre eux sont partiellement chloritisés. La présence de ces analcimes complique la récupération de l'uranium. Différents essais de lixiviation par voie acide ont été effectués afin de mettre en évidence le procédé le plus adéquat.

Les études minéralogiques (pétrographie et analyses DRX) ont été faites sur le minerai composite et sur les différents résidus de lixiviation. Ces études ont mis en évidence le comportement complexe de ces associations minéralogiques et surtout leur influence sur la récupération de l'uranium.

MODELISATION DE TESTS DE LESSIVAGE ACIDE DE MINERAI D'URANIUM. APPLICATION A LA RECUPERATION MINIERE IN SITU (ISR)

Rose Ben Simon¹, Valérie Langlais², Jean-Michel Schmitt², Michel Bélières³, Médard Thiry¹

(1) Centre de Géosciences, Mines ParisTech, 35 rue Saint-Honoré, Fontainebleau, 77305, France, rose.ben_simon@mines-paristech.fr, medard.thiry@mines-paristech.fr

(2) AREVA NC BU Mines, 1 place Jean Millier, Paris La Défense Cedex, 92084, France, valerie.langlais@areva.com, jean-michel.schmitt@areva.com

(3) SEPA, AREVA NC BU Mines, 1 avenue Brugeaud, B.P. N°71, Bessines/Gartempe, 87250, France, michel.belieres@areva.com

La récupération *in situ* (ISR), par attaque acide ou alcaline, est de plus en plus souvent appliquée à l'exploitation de l'uranium. Comme l'ISR a lieu au sein d'un aquifère, sa gestion est essentiellement indirecte, au vue des solutions d'attaque récupérées. La modélisation numérique des attaques permet d'optimiser la conduite de ce type d'exploitation.

Trois types de phénomènes doivent être pris en compte pour la modélisation de la lixiviation de l'uranium par ISR : (1) les réactions géochimiques qui se produisent durant le process ; (2) les cinétiques de ces réactions et (3) l'influence du transport hydrodynamique sur ces réactions.

Des tests de lessivage, en batchs et en colonnes ont été conduits sur des échantillons du site minier de Tortkuduk (Kazakhstan), où l'ISR de l'uranium est réalisée par voie acide (H_2SO_4).

Les hypothèses déduites des tests de lessivage ont été validées en modélisant ces tests avec des codes de calcul de géochimie et de transport. Un modèle 1D couplant géochimie et transport du procédé ISR à l'échelle du laboratoire, a permis de traduire la séquence de mise en solution des éléments en une séquence de réactions géochimiques.

En outre, des tests de sensibilité menés sur le modèle nous ont aidés à : (1) déterminer les facteurs contrôlant le lessivage acide ; et (2) à quantifier leur influence sur le rendement de la récupération (à l'échelle du laboratoire). Les tests de sensibilité ont également permis de déterminer des simplifications possibles du modèle numérique pour la construction d'un modèle de transport réactif 2D et 3D du procédé ISR à l'échelle de l'exploitation.

Référence : Ben Simon, R. (2011). Tests de lessivage acide de minerais d'uranium et modélisations géochimiques des réactions. Application à la récupération minière in situ (ISR). Thèse de doctorat Mines ParisTech, 176 p.

Le rôle des pyrites détritiques dans la concentration de l'uranium dans les conglomérats du bassin mésoarchéen de Pongola (2.9 Ga) Afrique du Sud

Megneng, M.* , Orberger, B.* , Hofmann, A.** , Wirth, R.*** , Dumas, P.**** , Sandt, C.****

* Université de Paris-Sud 11, UMR CNRS-UPS 8148, Faculté des Sciences d'Orsay, Bât 504-509 91 405 Orsay Cedex. melissa.megneng@u-psud.fr; * ERAMET RESEARCH, 1 rue Albert Einstein, Trappes ; ** Department of Geology, University of Johannesburg, Afrique du Sud; *** GFZ, Potsdam, Allemagne; **** Synchrotron Soleil, Saint Aubin, France

L'uranium associé à des dépôts importants d'or dans les conglomérats fluviaux des bassins sédimentaires de Pongola et Witwatersrand (2,98-2,71 Ga) de 0,1 à 2 m d'épaisseur est exploité comme sous-produit. Associée à ces ressources on trouve généralement la pyrite qui constitue 2 à 20 % de la matrice. Certains galets de pyrite (0.05-5 mm) des conglomérats de Witwatersrand ont des teneurs d'uranium pouvant aller jusqu'à 800 ppm (Hofmann et al. 2009). Le bassin de Pongola est composé de quatre horizons conglomératiques riches en U et Th (100-1000 ppm de U et 20-40 ppm de Th ; corrélés positivement; Saager et al. 1986); intercalés avec des grès, quartzites ou granulestones. Une vingtaine d'échantillons des conglomérats et grès du bassin de Pongola ont été étudiés. Quatre morphologies de pyrites (0.05-10 mm) ont été identifiées dans les conglomérats et grès: i. massives, avec des surcroissances de la pyrite; ii. poreuses remplacées (intercroisées avec le quartz) par la silice de l'intérieur vers l'extérieur, ou de manière homogène du grain; iii. cataclasées, avec des remplissages de veines par les minéraux remobilisés in situ; iiiii. automorphe. Dans les grès et conglomérats, certains galets de pyrite et autres sulfures, ainsi que les phases minérales contenant l'uranium (silicate, phosphate, Ti-oxyde) ont des traces de dissolution. L'uranium détritique provient des galets de pyrite massifs et cataclasés qui contiennent des inclusions d'apatite et de monazite. A ce stade d'observation aucun galet d'uraninite n'a été observé. Les minéraux à élément majeur Th (\pm U) et U (\pm Th) surcroissent les pyrites massives et cataclasées (automorphes et détritiques). Ces minéraux à Th (\pm U) et U (\pm Th) sont inclus aussi dans les monazites (200 μ m) et des oxydes de Ti (150 μ m). La spectroscopie RAMAN effectuée sur les oxydes de Ti indique qu'il s'agit des rutiles. La nature des minéraux associés aux pyrites sont indicatrice d'une diagenèse précoce et tardive (U-silicate avec monazite, U-silicate avec P, Ca, Ti, Zn), et de l'altération surpergène (monazite, oxyde de Ti, d'arsénures de Ni-Co, des zircons). Les analyses chimiques à la microsonde électronique de U et Th des pyrites détritiques indiquent la présence du Th en trace (0,01-0,1 wt.%) distribué hétérogénéiquement. Bien qu'à l'échelle de la roche totale une corrélation positive entre U et Th a été constatée (Saager et al. 1986). Au cours de la diagenèse mécanique et chimique l'U et Th des galets de pyrites et les minéraux uranifères (apatite, monazite, zircon, brannerite, leucoxène, oxyde de Ti) ont été remobilisés et séquestrés in situ. Ceci entraîne la formation des silicates d'U et de Th qui surcroissent autour des pyrites. Les analyses FIB-TEM sur les galets de pyrite révèlent la présence de la pyrrhotine nanométrique et des défauts cristallins. L'interprétation des spectres des phases minérales à Th (\pm U) et U (\pm Th) obtenue à la spectroscopie RAMAN est en cours.

The role of black chert pebbles in uranium mineralisation in conglomerates of the basal Mozaan Group (Pongola basin, South Africa)

Beate Orberger¹, Axel Hofmann², Melissa Megneng¹, Nigel Hicks³, Richard Wirth⁴, Alina Tudryn¹

1) Université de Paris-Sud 11, UMR IDES 8148, Faculté des Sciences d'Orsay, Bât 504-509 – 91 405 Orsay Cedex ; beate.orberger@u-psud.fr.

2) Department of Geology, University of Johannesburg, South Africa.

3) Council for Geoscience, Pietermaritzburg, South Africa

4) GFZ Potsdam, Allemagne

The sedimentary succession of the Mozaan Group, the upper part of the Pongola Supergroup (2.98-2.87 Ga), hosts at its base four uranium (and gold) bearing conglomerate horizons intercalated with granulstones and quartzites. At the Denny Dalton locality, U (up to 1000 ppm) and Th (160 ppm) are positively correlated (Saager et al. 1986). These conglomerates are composed of about 12 vol.% chert pebbles and cobbles. Pyrite pebbles are concentrated in a few centimetre thick layers along bedding planes of the conglomerates. In the conglomerates, U occurs as leucoxene, brannerite, and as U-silicates around pyrite pebbles. In a few black chert pebbles, the U-content reaches up to 450 ppm. Coffinites occur dispersed in the quartz matrix or close to K-Al-silicates of these pebbles, sometimes as replacements of protoclats, and crystallized on euhedral pyrite grains. U-arsenides with Ca, P, Ni, Fe are also observed on pyrite faces. Uranium silicates occur also as bacteriomorphous textures retracing the shapes of protoclats. Fe-oxide in veins contain up to 1000 ppm of U. Pyrites and U-silicates show sometimes dissolution features. The chert pebbles are characterized by primary, albeit brecciated, textures from their volcanoclastic and carbonaceous protoliths. They host hydrothermal sulfides (pyrite, Co-Ni-As, sphalerite), Ba-bearing K-feldspar and biotite, similar to those observed in black and green cherts from the Barberton greenstone belt (Hofmann et al., submitted). The Barberton cherts contain Ca-Mg-Fe-carbonates as hydrothermal overprint in the matrix and veins. However, the Mozaan chert pebbles are free of these carbonates, possibly indicating their dissolution by chemical alteration. Chemical comparison of the chert pebbles with the cherts from the Barberton greenstone belt show that the Co/Ni ratio is constant with minor mobilisation of Co. However, significant differences are observed in the U/Th ratios (chert pebbles : 12-361 ; Barberton cherts and quartzite and sandstones for the Mozaan Group at Denny Dalton: 0.13-3 ; Hicks and Hofmann, unpubl. data), U/K₂O-ratios (chert pebbles: 0.29-3, Barberton cherts and Mozaan sedimentary rocks: 0.0002-0.04). This clearly indicates a postdepositional enrichment of U. The source of U in the chert pebbles are probably detrital monazite, zircon, apatite in the conglomerate, and maybe primary U minerals (oxides, although not directly observed). The detrital minerals were dissolved and/or altered during diagenesis and a later oxidizing event. Uranium was most likely transported as uranyl-carbonate complexes. The black carbonaceous matter bearing chert pebbles, hosting K-Al phyllosilicates, and sulfides served as a barrier for U. Later fluids (palaeo-groundwaters ?) transformed part of the sulfides to troilite, or dissolved the sulfides and the coffinites. Uranium was again mobilized and fixed in bacteriomorphous U-silicates and Fe-oxides in-situ. Modern weathering mobilises U in a third step, as observed in outcrop, and has dissolved part of the pyrite pebbles.

Hofmann, A., Bolhar, R., Orberger, B., Foucher, F. (submitted to *Chemical Geology*): Petrology and trace-element geochemistry of silicified sedimentary and volcanoclastic rocks in the Onverwacht Group, Barberton greenstone belt, South Africa.

Saager, R., Stupp, H. D., Utter, T. & Matthey, H. O., 1986. Geological and mineralogical notes on placer occurrences in some conglomerates of the Pongola Sequence. In: *Mineral Deposits of Southern Africa* (eds Anhaeusser, C. R. & Maske, S.). Geological Society of South Africa. pp 473-487.

Altération hydrothermale et lessivage de l'uranium dans le granite de Questembert (Massif Armoricain, France)

Romain Tartèse, Philippe Boulvais et Marc Poujol

Université de Rennes 1, Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Bât. 15 Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

Dans le Massif Armoricain, le granite de Questembert s'est mis en place le long du Cisaillement Sud Armoricain (CSA) à 316 ± 3 Ma [1]. Certains échantillons de ce granite présentent des teneurs en uranium anormalement faibles en comparaison de celles de granites similaires (Fig. 1a). La composition isotopique de l'oxygène des roches et des minéraux montre que le granite de Questembert a été affecté par une altération hydrothermale pervasive (Fig. 1b, [2]) datée entre ca. 310 et 300 Ma [1]. La diminution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des feldspaths, causée par cette altération hydrothermale, requiert la participation de fluides météoriques à bas $\delta^{18}\text{O}$ infiltrés depuis la surface, fluides récemment reconnus le long du CSA [3-4]. La corrélation entre les teneurs en uranium et le déséquilibre isotopique entre quartz et feldspath, donné par le $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Qz-Fsp}}$ (Fig. 1c) suggère que c'est précisément cet afflux d'eau oxydante infiltrée qui a dû provoquer le lessivage de l'uranium du granite de Questembert en profondeur, probablement du fait de la déstabilisation d'uraninite.

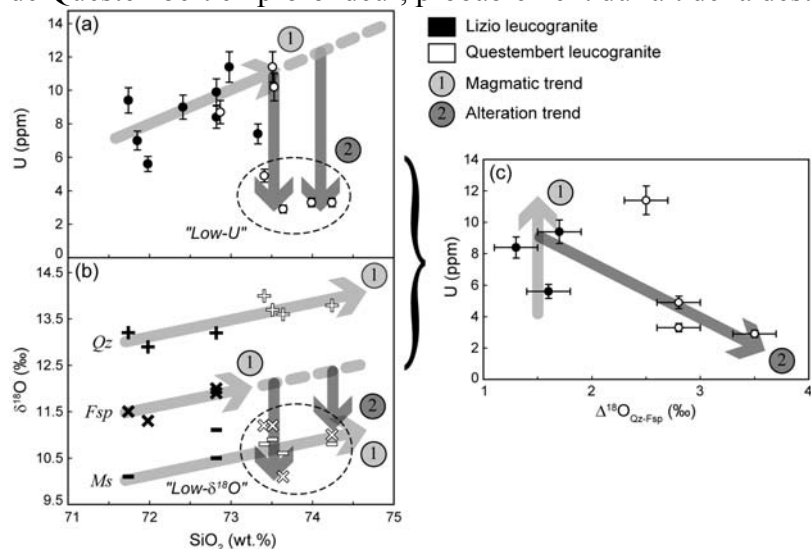


Fig. 1 : Teneurs en uranium (a) et valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des roches et des minéraux (b) en fonction de la teneur en SiO_2 dans les granites de Lizio et Questembert. La combinaison de ces deux graphiques est illustrée par la teneur en uranium en fonction du $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Qz-Fsp}}$ (c).

Un bilan de masse conservatif, réalisé à l'échelle du pluton, montre que plus de 1,3 millions de tonnes d'uranium ont pu être lessivées du granite de Questembert durant son altération hydrothermale, en faisant un mécanisme de premier ordre quant aux sources possibles d'uranium. Aucun gisement uranifère d'une telle importance n'a été découvert dans la région, suggérant que la majorité de cet uranium n'a pas été piégée efficacement. L'uranium libéré a plutôt dû être transféré et disséminé dans les bassins intra-montagneux formés dans la chaîne Varisque à la fin du Carbonifère.

Références

- [1] Tartèse R., Ruffet G., Poujol M., Boulvais P., Ireland T.R., 2011. [Simultaneous resetting of the muscovite K-Ar and monazite U-Pb geochronometers: a story of fluids](#). *Terra Nova*, doi: 10.1111/j.1365-3121.2011.01024.x. sous presse.
- [2] Tartèse R., Boulvais P., 2010. Differentiation of peraluminous leucogranites "en route" to the surface, *Lithos* 114, 353-368.
- [3] Lemarchand J., Boulvais P., Gaboriau M., Boiron M.C., Tartèse R., Cokkinos M., Bonnet S., Jégouzo P., 2011. Giant quartz vein formation and high elevation meteoric fluid infiltration into the South Armoricain Shear Zone: geological, fluid inclusion and stable isotope evidence. *Journal of the Geological Society*, doi: 10.1144/0016-76492010-186, sous presse.
- [4] Tartèse R., Boulvais P., Poujol M., Chevalier T., Paquette J.L., Ireland T.R., Deloule E., 2011. Mylonites of the South Armoricain Shear Zone: Insights for crustal-scale fluid flow and water-rock interaction processes. *Journal of Geodynamics*, doi: 10.1016/j.jog.2011.05.003, sous presse