



*Réunion de la Société Géologique de France*  
*Uranium : géologie, géophysique, chimie*

*Lundi 29 novembre 2010*

**9h10 - 9h30 - Accueil des participants par Eric Simoni, Vice-Doyen de la Faculté des Sciences d'Orsay, Maurice Pagel et Jean-Pierre Milesi, organisateurs**

**9h30 - 9h50 - Etude prospective de la transition technologique électronucléaire**

Abdou-Aziz Zakari (LPSC, CNRS UMR 5821 IN2P3 Grenoble 1), Sylvana Mima (LEPII, UMR 5252 CNRS-UPMF Saint Martin-d'Hères), Adrien Bidaud (LPSC, CNRS UMR 5821 IN2P3 Grenoble 1), Patrick Criqui, Philippe Menanteau (LEPII, UMR 5252 CNRS-UPMF Saint Martin-d'Hères), Sylvain David (IPN, UMR CNRS-UPS 8608 Orsay), Maurice Pagel (UMR IDES CNRS-UPS 8148, Université de Paris Sud 11) p.5

**9h50 - 10h10 - L'amont du cycle nucléaire : de la molécule au procédé**

Alexandre Chagnes, Gérard Cote (Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, LECA, UMR 7575 CNRS-Paris 6), Bruno Courtaud et Jacques Thiry (AREVA NC, SEPA, Bessines sur Gartempe) p.6

**10h10 - 10h30 - Géophysique : évolutions récentes**

Jean-Marc Miehé (AREVA, BG Mines, Paris la Défense) p.7

**10h30 - 10h50 - Utilisation des diagraphies en exploration Uranium**

Fabien Gilbert (AREVA, BU Mines, Paris la Défense) p.8

10h50 – 11h10 - Pause

**11h10 - 11h30 - Une classification génétique des gisements de thorium**

Michel Cuney (G2R UMR 7566, Nancy Université, Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex) p.9

**11h30 - 11h50 - Une nomenclature génétique des sources d'uranium**

Maurice Pagel (UMR IDES CNRS-UPS 8148, Université de Paris Sud 11) p.10

**11h50 - 12h10 - Les gisements d'uranium associés à une discordance protérozoïque. Rétrospective**

Patrice Bruneton p.11

**12h10 - 12h30 - The use of spectral analysis techniques in uranium exploration : real-time mapping of clay alteration features**

D. Ewington (Areva NC) p.12

12h30 – 13h45 - Buffet

**13h45 - 14h05 - Développement d'électrodes de carbone sérigraphiées fonctionnalisées pour l'analyse de l'uranium à l'état de traces**

Christine Vautrin-UI, Caroline Cannizzo, Betelu Stéphanie, Chaussé Annie (LAMBE, UMR 8587 CNRS-CEA, Université Evry Val d'Essonne), Jacques Ly et Annie Chaussé (SECR, CEA, Gif-sur-Yvette) p.13

**14h05 - 14h25 - Etude de la sphère de solvatation des actinides en milieu organique**

Damien Bourgeois, Jérôme Maynadié et Daniel Meyer (LCPA, ICSM, UMR 5257, Bagnols sur Cèze) p.14

**14h25 - 14h45 - Thermodynamique des phases uranifères d'intérêt pour le cycle électronucléaire**

N. Clavier, D.T. Costin, F. Crétaz, S. Szenknect, J. Ravaux, (ICSM – UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM Bagnols sur Cèze) C. Poinssot (CEA/DEN/DRCP Bagnols sur Cèze) et N. Dacheux (ICSM – UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM Bagnols sur Cèze) p.15

**14h45 - 15h05 - Lixiviation en tas de minerais marginaux à Somair : des études laboratoire à la production de 700 T d'uranium par an**

Nicolas Durupt et J.J Blanvillain (AREVA NC, SEPA, Bessines sur Gartempe) p.16

**15h05 - 15h25 - Phénoménologie de l'agglomération et rôle du Fer dans la lixiviation en tas de l'uranium**

François Geffroy (Areva, BG Mines, Paris la Défense) et Nicolas Durupt (Areva NC – SEPA, Bessines sur Gartempe) p.17

**15h25 - 15h45 - Les complexes d'uranyle chlorure jusqu'à 300 °C le long de la courbe de vapeur saturante : étude par spectroscopie Raman et conséquences métallogéniques**

Béatriz Aparicio, Jean Dubessy, Chinh Nguyen-Trung et Pascal Robert (G2R UMR 7566, UHP-Nancy Université, Vandoeuvre-lès-Nancy Cédex) p.18

15h45 – 16h00 - Pause

**16h00 - 16h20 - Systèmes d'altération dans le gisement de Shea Creek (Athabasca, Canada) : 1/Variabilité verticale des altérations argileuses**

Freddy Uri, Daniel Beaufort (UMR 6269 HydrASA, Université de Poitiers) et Jean Luc Lescuyer (AREVA, BU Mines, Paris la Défense) p.19

**16h20 - 16h40 - Systèmes d'altération dans le gisement de Shea Creek (Athabasca, Canada) : 2/Apports des défauts d'irradiation dans les argiles au traçage des migrations passées de l'uranium**

Elisa Morichon, Daniel Beaufort (UMR 6269 HydrASA, Université de Poitiers), Thierry Allard (IMPIC UMR 7590, Paris) et Jean-Pierre Milesi (Areva BU Mines, Paris La Défense) p.20

**16h40 - 17h00 - Les concentrations en uranium dans les fluides minéralisateurs du bassin de l'Athabasca : approche analytique et expérimentale**

Antonin Richard, Christophe Rozsypal, Julien Mercadier (G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), David A.Banks (School of Earth and Environment, Leeds UK), Michel Cuney, Marie-Christine Boiron, Michel Cathelineau (G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy) p.21

**17h00 - 17h20 - Paléosurfaces et enracinements métalliques : l'uranium autochtone des paléoaltérites pré-Athabasca, Canada**

Jacques Dardel p.22

**17h20 - 17h40 - Distribution des paragenèses argileuses dans le gisement d'Imouraren (Niger)**

Sophie Billon, Patricia Patrier, Daniel Beaufort (Hydrasa Université de Poitiers, UMR 6269 CRNS, Poitiers) et Aurélia Wattinne (AREVA, Paris la Défense) p.23

**17h40 - 18h00 - Flux de chaleur et concentration en éléments radioactifs (U, Th, K) des cratons Précambriens : Implications en termes de mécanismes de croissance crustale, paléogéotherme et la formation de provinces métallogéniques**

Olivier Vanderhaeghe et Cécile Fabre (UMR G2R, Nancy Université, Vandoeuvre-lès-Nancy)

p.24

*Mardi 30 novembre 2010*

**9h00 - 9h20 - Transition magmatique – hydrothermale dans la pegmatite de Rössing : implications pour la minéralisation en uranium**

Mathieu Castillo, Stefano Salvi, Didier Béziat (LMTG Université de Toulouse, CNRS, IRD, OMP) et Anthony E. Williams-Jones (McGill University, Montréal, Canada)

p.25

**9h20 - 9h40 - Déformation et fusion partielle d'une croûte d'âge archéen-paléoproterozoïque : implication sur la mobilisation et le dépôt de minéralisations uranifères, Orogène des Torngats, Baie d'Ungava**

Pierre Trap (Université Franche-Comté, UMR CNRS 6249, Besançon), Cyril Durand (Université de Lille, FRE 3298 Géosystèmes, Villeneuve d'Ascq), Philippe Goncalves, Didier Marquer (Université Franche-Comté, UMR CNRS 6249, Besançon), Jean-Louis Feybesse et Yoann Richard (AREVA, BU Mines, Paris la Défense)

p.26

**9h40 - 10h00 - Les galets de cherts noirs des conglomérats du bassin de Pongola (~2,9 Ga ; Afrique du Sud) : une source potentielle de l'uranium ?**

Beate Orberger (Université de Paris Sud 11, UMR IDES CNRS-UPS 8148) et Axel Hofmann (School of Geological Sciences, Johannesburg University, South Africa)

p.27

**10h00 - 10h20 - L'origine et l'évolution des pyrites détritiques dans les conglomérats mésoarchéens (3.08-2.64 Ga) d'Afrique du Sud : source ou piège de l'uranium ?**

Megneng M., Orberger B., (Université de Paris Sud 11, UMR IDES CNRS-UPS 8148), Hofmann A., (School of Geological Sciences, Johannesburg University, South Africa), Bouttemy M., Vigneron J. et Etcheberry A. (Institut Lavoisier de Versailles, UVSQ, Versailles)

p.28

**10h20 - 10h40 - Etude expérimentale des carbonates d'U(VI) en fonction de trois paramètres : pH, concentration en carbonate, température, à l'aide de spectroscopie vibrationnelle (Raman, FTIR ATR) et optique (UV-visible)**

C. Nguyen-Trung (CREGU, Vandoeuvre-les-Nancy), M. Perdicakis (LCPME, Villers-les-Nancy) et N. Prignon (UMR 7566 G2R, UHP Nancy 1, Vandoeuvre-les-Nancy)

p.29

10h40 – 11h00 - Pause

**11h00 - 11h20 - Nature et signification du contact entre le complexe gneissique Abbabis et les séquences métasedimentaires dans la ceinture orogénique du Damara**

Wilfried Toé, Olivier Vanderhaeghe, Anne-Sylvie André-Mayer (Nancy Université, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), Jean-Louis Feybesse et Jean Pierre Milesi (AREVA BU Mines, Paris La Défense)

p.30

**11h20 - 11h40 - Potentiel métallogénique des ceintures orogéniques Protérozoïques accrétées aux cratons archéens : l'orogène du Damara/Lufilien (Namibie et Zambie)**

Aurélien Eglinger, Wilfried Toé, Anne-Sylvie André-Mayer, Olivier Vanderhaeghe (Nancy Université, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy), Jean-Louis Feybesse et Jean-Pierre Milesi (AREVA, BU Mines, Paris La Défense) et Thinus Jordaan (AREVA, South Africa)

p.31

**11h40 - 12h00 - Contribution of the Geological Exploration to the development of the KATCO ISR mine (Chu-Sarysu basin, Kazakhstan)**

Sébastien Hocquet, Patrick Ledru et Viktoriya Selezneva (KATCO, Almaty, Kazakhstan)

p.32

12h00 - 12h20 - **Quelques réflexions sur les événements remarquables qui sont survenus lors de la formation du Francevillien**

Georges Vendryes

p.33

12h20 – 13h45 - Buffet

13h45 - 14h05 - **Signature géochimique de différentes phases minérales obtenue par ablation laser ICP-MS (éléments en traces et Terres Rares) : Application aux gisements d'Uranium**

Philippe Lach, Jean Dubessy, Michel Cuney, Jean Mercadier, Marie-Christine Boiron (G2R, Nancy Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy) et Marc Brouand (AREVA, BU Mines, Paris la Défense)

p.34

14h05 - 14h25 - **Le rôle des fluides et de l'irradiation dans des assemblages complexes d'euxénites-zircons de pegmatite de Norvège et les conséquences en géochronologie U-Pb**

C. Duran, A. M. Seydoux-Guillaume (LMTG, CNRS-UPS-IRD Toulouse ), B. Bingen (NGU, Trondheim, Norvège), Ph de Parseval, D. Guillaume (LMTG, CNRS-UPS-IRD Toulouse ), V. Bosse, JL Paquette (LMV Université Blaise Pascal Clermont Ferrand) et J. Ingrin (LMTG, CNRS-UPS-IRD Toulouse )

p.35

14h25 - 14h45 - **Modélisation mécanique de la rupture autour des minéraux métamictes**

Jean-Marc Montel (ENSG G2R, Nancy Université, CNRS, Vandoeuvre les Nancy), Richard Giot (ENSG-LAEGO, Nancy Université) Fanny Maucotel et Stéphanie Hubert (ENSG, Vandoeuvre-les-Nancy)

p.36

14h45 - 15h05 - **La diffusion de l'hélium dans l'apatite : Effet des dommages causés par recul alpha**

Cécile Gautheron (Université de Paris Sud 11, UMR IDES CNRS-UPS 8148), Laurent Tassan-Got (IN2P3 Université Paris Sud 11), Maurice Pagel et Jocelyn Barbarand (Université de Paris Sud 11, UMR IDES CNRS-UPS 8148)

p.37

15h05 - 15h25 - **Les spectres de terres rares dans les oxydes d'uranium : un marqueur des types de gisements d'uranium**

Julien Mercadier, Michel Cuney, Marie-Christine Boiron, Philippe Lach, Jessica Bonhoure, Mathieu Leisen, Philippe Kister, (G2R, Nancy Université, CNRS, CREGU, Vandoeuvre-lès-Nancy)

p.38

15h25 - 15h45 - **Les terres rares : traceurs du comportement de l'uranium lors de l'altération hydrothermale sulfatée acide (exemple de la Guadeloupe)**

Anne Salaun, Benoît Villemant, Martine Gérard, Jean-Christophe Komorowski et Agnès Michel ((UPMC, Paris 6 IsTep., IPGP, UMR 7154, IRD, UMR 161 CEREGE, IMPMC Paris)

p.39

15h45 – 16h05 - Pause

16h05 - 16h25 - **Quel modèle métallogénique pour le trend Kiggavik-Andrew Lake ? Nunavut, Canada**

Thomas Riegler (Université de Poitiers, UMR 6269, Poitiers)

p.40

16h25 - 16h45 - **Mobilité de l'uranium dans le système sud-Américain**

Romain Tartèse, Philippe Boulvais, Marc Poujols (Université de Rennes 1, Géosciences, UMR CNRS 6118, Rennes) et Eric Gloaguen (BRGM Orléans)

p.41

16h45 - 17h05 - **Uranium Clusters : Models for Environmentally Relevant Species**

Marinella Mazzanti, Victor Mougél, Gregory Nocton, Biblab Biswas, Jacques Pécaut (LRICC, LCIB, UMR-E3 CEA-UJF, INAC/CEA Grenoble)

p.42

17h05 - 17h25 - **Spéciation de l'uranium dans des opales de Nopal I (Sierra Peña Blanca, Mexique)**

Guillaume Othmane, Thierry Allard, Nicolas Menguy (IMPMC, CNRS UMR 7590 UPMC, Paris), Thomas Vercouter (LSRM/CEA Gif sur Yvette ), Guillaume Morin, Laurence Galois, Georges Calas (IMPMC, CNRS UMR 7590 Paris) et Mostafa Fayek (Department of Geological Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, Canada)

p.43

17h25 à .... : **Bilan des deux journées et discussion générale**

## **Etude Prospective de la Transition Technologique Electronucléaire**

Abdou-Aziz Zakari\*, Sylvana Mima\*\*,  
Adrien Bidaud\*, Patrick Criqui\*\*, Philippe Menanteau\*\*,  
Sylvain David\*\*\*, et Maurice Pagel\*\*\*\*

\* Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC)

CNRS : UMR5821 – IN2P3 – Université Joseph Fourier - Grenoble I – Institut Polytechnique de Grenoble. bidaud@lpsc.in2p3.fr

\*\* Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale (LEPII) UMR 5252 CNRS-UPMF, Université Pierre Mendès France, 1221 rue des Résidences, Domaine Universitaire, 38400 Saint-Martin-d'Hères

\*\*\* Institut de Physique Nucléaire, UMR CNRS-UPS 8608, Faculté des Sciences d'Orsay, Bât 102 – 91 406 Orsay Cedex

\*\*\*\* Université de Paris-Sud 11, UMR CNRS-UPS 8148, Faculté des Sciences d'Orsay, Bât 504 – 91 405 Orsay Cedex

Les échelles de temps caractéristiques du nucléaire sont nettement plus importantes que celles d'autres technologies de production d'électricité de base. Ces échelles sont imposées par celles de la gestion des déchets nucléaires et par la grande durée de vie attendue des installations, nécessaire à leur amortissement. Ainsi, alors qu'elle ne représente qu'une petite fraction du coût de l'électricité nucléaire, la fourniture en uranium naturel sur le long terme est une question stratégique pour tous les acteurs de la filière. Les réacteurs de nouvelle génération pourraient ne plus consommer de fissiles une fois démarrés. Leur déploiement serait donc favorisé par la perspective d'un coût de l'uranium important. Paradoxalement, leur déploiement à l'échelle industrielle pourrait réduire la consommation d'uranium du parc nucléaire et donc se freiner lui-même. L'étude de la dynamique de déploiement des différentes filières de réacteurs et de la consommation des réserves d'uranium nécessite donc de bien comprendre les relations entre différents paramètres issus de champs disciplinaires variés : disponibilité de ressources faciles d'accès, flux de matières nucléaires entre les réacteurs de différentes générations, évolution de la demande d'électricité et des coûts des technologies...

Nous présentons les premiers résultats obtenus en utilisant et en développant l'outil de simulation de prospective du marché de l'énergie POLES (Prospective Long Terme Energy Simulation). Ce projet rassemble des spécialistes des disciplines concernées : géologues, physiciens des réacteurs et économistes de l'énergie. Deux évolutions importantes de POLES ont été apportées. La première permet de prendre en compte une anticipation d'un risque de rupture d'approvisionnement à moyen terme. Elle réduit la volonté des électriciens d'installer de nouvelles centrales nucléaires à eau si la visibilité sur les ressources est insuffisante. La seconde permet de simuler le recyclage des combustibles usés des réacteurs actuels lors du démarrage des réacteurs de nouvelles technologies. Nous mettrons en évidence des effets inattendus de la complémentarité des générations de réacteurs, ainsi que l'importance primordiale pour toute l'industrie nucléaire d'avoir une visibilité étendue des ressources prouvées et donc l'importance d'une recherche amont en géologie de l'uranium forte.

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre du projet PEPITTE (Projet d'Etude Prospective Interdisciplinaire de la Transition Technologique Electronucléaire) soutenu par le programme énergie du CNRS.

## L'Amont du Cycle Nucléaire : de la Molécule au Procédé

Alexandre Chagnes\*, Gérard Cote\*, Bruno Courtaud\*\* et Jacques Thiry\*\*

\* Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris – ENSCP, Université Pierre et Marie Curie – Paris6 - Laboratoire d'Electrochimie et de Chimie Analytique - UMR7575 CNRS ENSCP-Paris6, 11 Rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05, France.

[Alexandre-chnes@ens.chimie-paristech.fr](mailto:Alexandre-chnes@ens.chimie-paristech.fr), [gerard-cote@chimie-paristech.fr](mailto:gerard-cote@chimie-paristech.fr)

\*\* AREVA NC, Service d'Etudes de Procédés et Analyses (SEPA), B.P. 71 87250

Bessines sur Gartempe, France. [Bruno.courtaud@reva.com](mailto:Bruno.courtaud@reva.com), [jacques.thiry@areva.com](mailto:jacques.thiry@areva.com)

L'extraction par solvant est une technologie qui a fait ses preuves dans divers domaines comme l'hydrométallurgie des métaux stratégiques (Cu, Ni, Co, Ga, U, etc.), le retraitement des déchets nucléaires (U et Pu), la pétrochimie, les industries pharmaceutiques et alimentaires.

En principe, l'extraction par solvant est une technologie simple qui repose sur la mise en contact de deux phases non miscibles permettant le transfert sélectif d'un soluté d'une phase à l'autre. A l'échelle de l'usine, la chimie doit tenir compte des contraintes technologiques, économiques et environnementales. Par exemple, les solutions d'alimentation qui contiennent les métaux à valoriser sont obtenues après plusieurs étapes de broyage, de lixiviation, d'oxydation qui sont contrôlées par de nombreux paramètres comme la maille de libération, la nature de la phase aqueuse (sulfate, chlorure, nitrate, phosphate, etc.), le potentiel d'oxydation, le niveau d'acidité et la force ionique. Les performances de l'usine d'extraction reposent également sur la nature de la phase organique qui doit être formulée avec des extractants/co-extractants, diluants et modificateurs de phases appropriés.

Au cours de leur fonctionnement, les procédés d'extraction par solvant sont altérés pour des raisons variées comme le vieillissement du solvant ou la modification de la composition et de la charge des minerais exploités. Cela a pour conséquence une diminution de la sélectivité et de la performance du solvant d'extraction, la formation de crasses, des problèmes de dés-extraction et de recyclage du solvant. L'ensemble de ces phénomènes peuvent avoir lieu simultanément et être responsables d'une chute importante de la production de l'usine.

Dans cette présentation, les différentes étapes du procédé conduisant à la production d'uranium dans l'usine de Cominak au Niger (Areva-NC) seront présentées puis nous nous focaliserons ensuite sur la physicochimie du procédé d'extraction de l'uranium dans cette usine et sur le vieillissement des solvants d'extraction. Pour faire face à ce vieillissement, le développement de nouvelles molécules résistantes à la dégradation semble crucial. Cela nécessite la coopération synergique entre physicochimistes, théoriciens et organiciens. En effet, le criblage des molécules par modélisation moléculaire, leurs synthèses, la validation des performances de ces molécules en laboratoire puis à l'échelle du pilote sont les trois étapes indispensables à la découverte de nouvelles molécules performantes et robustes pour les procédés d'extraction par solvant. Quelques exemples seront développés au cours de cette présentation.

## Géophysique : évolutions récentes

Jean-Marc MIEHE \*

\* AREVA, BG Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex.  
[jean-marc.miehe@areva.com](mailto:jean-marc.miehe@areva.com)

La géophysique est un outil essentiel pour la prospection minière et donc en particulier pour l'exploration de l'uranium. Les méthodes géophysiques sont utilisées pendant toutes les étapes de l'exploration, de l'échelle régionale à l'étude de détails, en phase de développement puis d'accompagnement durant l'exploitation d'un gisement et pour terminer dans la gestion des problèmes de l'après-mine.

L'augmentation du nombre de projets d'exploration pour l'uranium a suscité un regain d'intérêt pour les méthodes géophysiques.

Toutes les méthodes géophysiques sont susceptibles d'être utilisées pour l'exploration, aussi bien pour les gisements d'uranium peu profonds (0 à 20 m) que pour les gisements profonds de plusieurs centaines de mètres (+ de 500 m).

La géophysique a bénéficié des progrès récents de l'électronique et de l'informatique, repoussant les limites de sensibilité et de détectabilité des différentes méthodes, au bénéfice de l'exploration dans des environnements géologiques diversifiés et complexes.

Cette présentation, sans prétendre à l'exhaustivité, se propose d'exposer quelques unes des évolutions les plus récentes ou les plus significatives de la géophysique appliquée à l'exploration. Ces évolutions concernent aussi bien les méthodes géophysiques aéroportées que sol, aussi bien les équipements de mesures que les logiciels d'interprétation et de nouvelles méthodes.

## **Utilisation des diagraphies en exploration Uranium**

Fabien Gilbert

AREVA, BU Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex.  
[fabien.gilbert@areva.com](mailto:fabien.gilbert@areva.com)

On désigne par diagraphie tout enregistrement continu en fonction de la profondeur, des variations d'une caractéristique donnée des formations traversées par un sondage.

Les outils classiques qui mesurent le diamètre du trou, la déviation du sondage et la résistivité des formations traversées seront rapidement évoqués. L'imagerie de parois et la mesure de la vitesse du son dans la roche seront aussi illustrées.

L'exposé se focalisera plus particulièrement sur les mesures qui permettent d'approcher la teneur en Uranium d'une formation (gamma total, gamma spectral et PFN) en précisant le principe de fonctionnement de chaque outil, leurs limitations et les corrections à apporter aux mesures. Des exemples de prospection Uranium illustreront les propos.

## Une classification génétique des gisements de thorium

Michel CUNEY

G2R UMR7566, Nancy Université, Faculté des Sciences, BP239, 54506 Vandoeuvre les NANCY Cedex. [michel.cuney@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:michel.cuney@g2r.uhp-nancy.fr)

Il est généralement proposé que les ressources en Th soient 3 à 4 fois plus grandes que celles en U du fait que le Clarke du Th est 3 à 4 fois supérieur à celui de l'U. Cependant bien que Th ait le même comportement de type incompatible que l'U dans les processus magmatiques, la plupart des gisements de Th diffèrent de ceux d'U car Th a des propriétés chimiques très différentes de celles de U en solution. U a deux états de valence ( $U^{4+}$  and  $U^{6+}$ ) et est très soluble sur la forme oxydée  $UO_2^{2+}$ , tandis que Th n'existe que sous l'état de valence  $Th^{4+}$  très faiblement soluble à des températures basses à intermédiaires. Cette propriété a plusieurs conséquences majeures: (i) les minéraux de Th sont remarquablement résistants à l'altération et peuvent être concentrés physiquement sous forme de placers et dans les zones altérées des gisements, (ii) la plupart des autres types de gisements de Th sont formés en environnements magmatique et/ou hydrothermal de haute température, (iii) l'extraction métallurgique du Th requiert des processus plus coûteux que pour l'U. Cependant, sa solubilité s'accroît fortement aux faibles pH. Ainsi à pH 3, elle atteint 100 ppm sous forme de complexe sulfaté. Par exemple, Th est déposé au griffon de sources chaudes et acides dans des basaltes peralcalins quaternaires riches en Th d'Italie. A haute température, la solubilité de Th s'accroît en présence de complexes fluorés. Les anions  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$ , et  $CO_3^{2-}$  peuvent aussi accroître significativement sa solubilité. Un certain nombre de complexes hydroxydes, silicates et phosphates existent également. A basse température Th est fortement adsorbé sur les limonites et les argiles. Th se trouve concentré dans une grande variété de types de gisements:

- (i) Gisements liés à la cristallisation fractionnée des séries peralcalines
  - ➔ Roches plutoniques ou volcaniques acides (Ilmausaq, Groënland)
  - ➔ Carbonatites (Fen au sud de la Norvège)
- (ii) Gisements liés à la fusion partielle (pegmatoides anatectiques, Mt Laurier, Canada)
- (iii) Gisements associés aux systèmes métasomatiques (Tranomaro, Madagascar)
- (iv) Gisements hydrothermaux de haute température
  - ➔ Uranothorite veins (Lehmi Pass, USA)
  - ➔ Monazite veins (Steenskampskraal, Afrique du Sud)
- (v) Gisements syn-sédimentaires
  - ➔ Placers côtiers (Indes: Kerala and south-western Tamil Nadu ...)
  - ➔ Dunes (Indes: Manavalakurchi, embouchure du fleuve Vailiyar, ...)
  - ➔ Placers off shore (Indes: Neendakarai-Kayankulam coast)
  - ➔ Placers alluviaux (Western Australia: Cooljarloo region)
  - ➔ Placers fossils (Australia, New South Wales: Murray Basin)
  - ➔ Placers métamorphisés (Espagne: Despenaperros Ordovician-Sil. quartzites)
  - ➔ Charbon et lignite

La plupart des estimations de ressources en Th correspondent à des ressources potentielles, car aucune exploration spécifique et estimation globale des ressources n'a jamais été entreprise. Une ressource globale de l'ordre de 6,2 Mt Th est estimée à partir de différentes sources.

### Références

CUNEY, M., 2010. Uranium and thorium: The extreme diversity of the resources of the world's energy minerals. In "Non-renewable resources. Geoscientific and Societal Challenges", Springer, in press.

## Une nomenclature génétique des sources d'uranium

Maurice Pagel

Université de Paris-Sud 11, UMR CNRS-UPS 8148, Faculté des Sciences d'Orsay, Bât 504 –  
91 405 Orsay Cedex. [maurice.pagel@u-psud.fr](mailto:maurice.pagel@u-psud.fr)

L'élaboration d'un modèle génétique de formation d'un gisement d'uranium implique la connaissance de la source, du transport et du dépôt de l'uranium et des éléments associés. La source potentielle est souvent peu étudiée car de nombreuses études se focalisent sur le gisement alors que la source est souvent régionale. Le concept de fertilité a été proposé par Marcel Moreau en 1966 pour des roches granitiques ayant des teneurs élevées en uranium, cet uranium étant lessivable. En fait, la nature des sources est très variée et l'objectif de cette présentation est en premier de proposer une nomenclature génétique des sources d'uranium et en second, d'illustrer les processus qui aboutissent à la formation de ces différentes sources sur des exemples représentatifs.

- Les **sources actives** (active sources) sont celles dont le processus de leur formation conduit à des concentrations économiques d'uranium, c'est le cas de la fusion partielle qui conduit à des concentrations importantes mais également de la cristallisation fractionnée.
- Les **sources actives préconcentrées** (preconcentrated active source) sont celles qui correspondent à des concentrations remobilisées pour former la concentration économique. C'est le cas par exemple des gisements de type placer.
- Les **sources passives immédiates** (immediate passive sources) sont celles dont la formation aboutit directement à des teneurs en uranium significatives facilement lessivables.
- Les **sources passives différées** (time-deleted passive sources) sont formées au départ par des concentrations en uranium supérieures à la moyenne mais l'uranium se localise dans des minéraux difficilement lessivables. Au cours du temps, la déstabilisation du réseau des minéraux augmente significativement sa solubilité.
- Les **sources passives transitoires** (transient passive sources) sont des sources riches en uranium au départ mais dont le stock en uranium a été redistribué lors d'un épisode de circulation fluide et dans ce cas, le processus de sorption joue un rôle majeur.

Ce classement ne doit pas cacher qu'il peut y avoir une succession de préconcentrations et que le gisement résulte de deux processus par exemple une source active qui sera remobilisée par des altérations superficielles (exemple de Rössing en Afrique du Sud). L'uranium pouvant également provenir de deux sources en fonction du trajet des solutions comme c'est le cas en Athabasca avec une source régolithique et une source liée à la fracturation du socle.

## **Les gisements d'uranium associés à une discordance protérozoïque. Rétrospective**

**Patrice BRUNETON**  
**([p.bruneton@orange.fr](mailto:p.bruneton@orange.fr))**

Les gisements liés à des discordances d'âge protérozoïque, exceptionnels par leurs tailles et leurs teneurs, ont fourni en 2009, 14 618 tU, soit à peu près 30% de la production mondiale. Ils représentaient en 2008 **avec 725.000 tU, 13.5% des ressources mondiales en uranium à un cout inférieur à 130 US\$/kgU (AIEA, 2010). A ce jour, 83 de ces gisements, de tailles très variables, sont répertoriés dans la base de données UDEPO de l'AIEA.**

La majorité d'entre eux se localise dans deux secteurs géographiques bien distincts, le géosynclinal de Pine Creek (18 gisements) dans le Territoire du Nord, en Australie, et le bassin de l'Athabasca (50 gisements), province Saskatchewan, au Canada. D'autres régions renferment des gisements isolés comme le bassin du Thelon (6), dans les Territoires du Nord canadiens, la province Paterson (3) en Australie de l'Ouest et le district de Karkou (1) en Carélie, Russie.

Les premiers gisements ont été découverts en 1968 au Canada (Rabbit Lake), puis en 1970 en Australie (Ranger). Les travaux de recherche pour la découverte de nouveaux corps minéralisés se poursuivent toujours de façon très active dans ces deux pays. Plusieurs nouveaux gisements et zones minéralisées prometteuses ont ainsi été mis en évidence au Canada, dans le bassin de l'Athabasca ces dernières années, suite à la relance des travaux d'exploration à partir de 2003. On peut citer Kianna, Centennial, Roughrider, Midwest A, Phoenix, J-Zone, Maverick Zone, .....

Ces gisements sont spatialement liés à une discordance, entre un socle métamorphique et granitique d'âge archéen à protérozoïque inférieur (> 1800 Ma) et une couverture sédimentaire d'âge protérozoïque moyen (1750-1500 Ma) déposée dans des bassins intracratoniques. Ils peuvent être entièrement localisés dans le socle comme en Australie et dans le bassin du Thelon au Canada, ou être situés dans le socle, à la discordance ou dans la couverture sédimentaire comme dans le bassin de l'Athabasca. Dans le socle, les minéralisations peuvent se poursuivre jusqu'à des profondeurs importantes (plus de 1000 m à Jabiluka en Australie), alors que dans la couverture sédimentaire, les minéralisations dépassent rarement quelques dizaines de mètres au-dessus de la discordance. Exceptionnellement, peuvent exister comme au Canada, des "minéralisations perchées".

La taille de ces gisements est très variable, depuis de petites lentilles de quelques dizaines à quelques centaines de tonnes, jusqu'à des "monstres", comme McArthur River (Canada), dont les réserves sont supérieures à 200.000 tU. Les teneurs sont également très variables: 0,20 à 0,70% U pour les gisements australiens situés dans le socle, jusqu'à 15-22% de teneur moyenne pour les gisements de Cigar Lake et de McArthur River au Canada. Ces très fortes teneurs, qui peuvent dépasser 50% U sur plusieurs mètres d'épaisseur, posent d'ailleurs d'importants problèmes aux mineurs qui ont dû inventer de nouvelles techniques d'extraction robotisées.

Les premières découvertes des années 1960-1970 ont été effectuées par des prospections classiques au sol ou par des campagnes de prospection géophysique aérienne. Les minéralisations affleuraient à la surface et étaient donc faciles à mettre en évidence. Tous les gisements australiens du Pine Creek connus à ce jour (Ranger I, Ranger 3, Jabiluka, Koongarra, Nabarlek et Caramal), et de nombreuses anomalies, qui n'ont jamais été testées à ce jour, ont ainsi été découverts en quelques mois par des campagnes de géophysique aérienne à large maille. Par la suite, le développement et l'amélioration de méthodes géophysiques électriques aériennes et au sol ont permis d'investiguer des zones situées de plus en plus profondément à l'intérieur des bassins sédimentaires et d'aboutir à la découverte dans le bassin de l'Athabasca de plusieurs gisements totalement aveugles, tels Dawn Lake (100 m), Midwest Lake (200 m), Cigar Lake (400 m), McArthur River (550 m), Millenium (600 m) et Shea Creek (750 m). Les recherches se poursuivent actuellement à des profondeurs avoisinant 1000 m.

**Il existe une très abondante littérature sur ces gisements qui font toujours l'objet d'études très exhaustives : contexte géologique particulier, contrôles lithologiques et tectoniques, paragenèses minérales et métalliques, altérations, âge de formation des minéralisations, caractérisation des fluides impliqués dans leur mise en place, compréhension de leurs mécanismes de formation, .... Ces études multidisciplinaires ont pour but et permettent la mise en évidence de guides d'exploration à toutes les échelles.**

## **The use of spectral analysis techniques in uranium exploration: real-time mapping of clay alteration features**

D. Ewington

Senior Geologist, AREVA NC

Since the advent of field-portable infrared spectrometers in the mid-90s, exploration geologists have been using this technology to provide rapid and semi-quantitative analysis of surface samples and drillcore. This technique measures the reflectance spectroscopy of samples, and in particular focuses upon the visible to near-infrared (VNIR) and short-wave infrared (SWIR) portions of the electromagnetic spectrum. In these bandwidths the presence of diagnostic absorption features provides a semi-quantitative interpretation of certain minerals, especially phyllosilicates and carbonates in the SWIR, and iron-oxides in the VNIR. The technique requires no sample preparation and analysis is completed in seconds.

Uranium explorers have been at the forefront of these techniques. Since the first prototypes were tested on some Australian unconformity-related uranium deposits, the technology spread more generally throughout other uranium exploration projects within Australia, Canada, and elsewhere. Although principally utilised in unconformity-related uranium exploration, the technology is equally applicable to other styles of uranium deposits. But it has been in unconformity-related uranium deposits where the greatest advancements have been made. The presence of certain syn-mineralisation alteration clays can be rapidly determined and mapped using this technology. For these styles of deposits, which are typically buried beneath hundreds of metres of barren cover, the ability to map alteration provides an important vector to mineralisation.

## Développement d'électrodes de carbone sérigraphiées fonctionnalisées pour l'analyse de l'uranium à l'état de traces

Vautrin-UI Christine\*, Caroline Cannizzo\*, Betelu Stéphanie\*, Ly Jacques\*\*, Chaussé Annie\*,

\*Laboratoire d'Analyse et de Modélisation pour la Biologie et l'Environnement (LAMBE)

UMR 8587 CNRS-CEA-Université d'Evry Val d'Essonne,

1 rue du Père Jarland - 91025 Evry Cedex. [christine.vautrin-ul@univ-evry.fr](mailto:christine.vautrin-ul@univ-evry.fr)

\*\*Service d'Etude du Comportement des Radionucléides (SECR), CEA, Centre d'Etudes de Saclay - 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.

La maîtrise des activités industrielles mettant en œuvre des actinides nécessite de surveiller la dissémination potentielle, vers l'environnement, des éléments toxiques générés. Cela suppose la mise en œuvre de méthodes d'analyses chimiques sensibles et robustes pour un déploiement à des fins de contrôle sur le terrain.

Nous rapportons ici l'intérêt que présentent des électrodes sérigraphiées fonctionnalisées de façon covalente par une couche de 4-carboxyphenyle pour l'analyse sur site de l'uranium [1].

Le groupement 4-carboxyphenyle, qui présente des propriétés complexantes vis-à-vis de U(VI) [2], a été greffé par réduction électrochimique du sel de diazonium correspondant. L'analyse a ensuite été effectuée en deux étapes : (i) préconcentration à l'électrode par adsorption directe de U(VI) sur la couche greffée (ii) réduction électrochimique de U(VI) adsorbé par balayage à vague carrée.

L'étude de l'influence du temps de préconcentration a permis de démontrer que l'équilibre thermodynamique de sorption pour une concentration de  $3.5 \times 10^{-8}$  mol L<sup>-1</sup> était atteint à partir de 12 minutes; 15 minutes a été retenu comme temps optimal, meilleur compromis entre le temps d'analyse et la reproductibilité des résultats. Des limites de détection et de quantification de  $7 \times 10^{-10}$  mol L<sup>-1</sup> et  $2 \times 10^{-9}$  mol L<sup>-1</sup> ont été ainsi obtenues. Une étude en présence d'éléments-traces tels que Cu(II), Cd(II), Pb(II) et Zn(II) a montré que la sensibilité des électrodes n'était pas perturbée. Enfin l'application de la méthode à l'analyse d'échantillons naturels a été réalisée.

Les électrodes sérigraphiées greffées par une couche de 4-carboxyphenyle se révèlent aussi performantes pour l'analyse de l'uranyle que les électrodes à base de plomb, de bismuth ou de mercure proposées dans la littérature; mais présentent de plus l'avantage d'être non polluantes.

Simple de mise œuvre, performantes, reproductibles et fiables, ces électrodes sérigraphiées fonctionnalisées apparaissent actuellement comme un outil prometteur pour l'analyse de l'uranium sur le terrain.

### Références

[1] S. Betelu, C. Vautrin-UI, J. Ly, A. Chaussé, Talanta, 80 (1), p 372-376, 2009

[2] M.R Smith, A.E. Martell, Critical stability constants supplement N<sup>o</sup>.1, Plenum Press, London (1976).

## Etude de la sphère de solvation des actinides 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](mailto:damien.bourgeois@univ-montp2.fr)

La séparation des éléments f (lanthanides et actinides) est appliquée à l'échelle industrielle dans plusieurs procédés, comme l'extraction et la purification des différentes terres rares, de l'uranium et du thorium, ou bien le retraitement des combustibles nucléaires usés. Dans tous les cas, ces procédés reposent sur une séparation par extraction liquide/liquide, et utilisent au mieux les différences de comportement des différents cations en phase aqueuse, principalement grâce à des ajustements de degré d'oxydation et aux différences d'affinité pour certains ligands qui en résultent. Ainsi, on peut aisément préparer les degrés d'oxydation +III, +IV, +V et +VI des principaux actinides, et séparer l'uranium (+VI) du plutonium (+IV), et des actinides mineurs et lanthanides au degré +III.

Néanmoins, il reste des points durs au niveau de la séparation des lanthanides et des actinides, et dans ce dernier cas aussi bien dans le cadre de l'aval du cycle du combustible (élimination complète des transplutoniens à forte activité radiologique, responsables de la majeure partie de l'activité des déchets non valorisables) que de l'amont (milieux plus complexes, notamment par la présence d'autres cations métalliques comme le vanadium, le molybdène, ou le fer...).

La compréhension à l'échelle moléculaire des phénomènes intervenant lors du passage en milieu organique, puis responsables de la stabilisation des espèces dans ce même milieu, nous apparaît donc d'importance primordiale, et 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 notre étude est de parvenir à des modèles décrivant de façon pertinente les différents niveaux d'interactions qui régissent ces agrégats (cf Fig. 1), en préparant des milieux d'extraction modèles dans des conditions strictement anhydres, auxquels on pourra ajouter une quantité d'eau contrôlée afin d'évaluer directement son rôle sur la structuration du milieu.

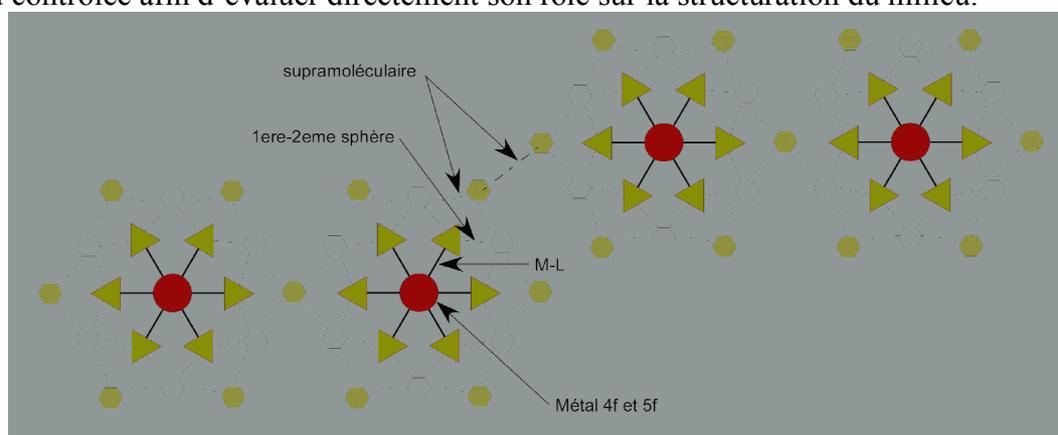


FIGURE 1 – Différents niveaux d'interaction autour d'un ion métallique

## Thermodynamique des phases uranifères d'intérêt pour le cycle électronucléaire

N. Clavier<sup>1</sup>, D.T. Costin<sup>1</sup>, F. Crétaz<sup>1</sup>, S. Szenknect<sup>1</sup>, J. Ravaux<sup>1</sup>, C. Poinssot<sup>2</sup>,  
N. Dacheux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICSM – UMR 5257 CEA/CNRS/UM2/ENSCM, Site de Marcoule, BP 17171, 30207 Bagnols / Cèze cedex, nicolas.clavier@icsm.fr

<sup>2</sup> CEA/DEN/DRCP, Site de Marcoule, BP 17171, 30207 Bagnols / Cèze cedex

Les phases uranifères et thorifères présentes dans les milieux naturels constituent un enjeu majeur dans les problématiques du cycle électronucléaire. En premier lieu, les industriels vont devoir exploiter de nouvelles ressources tout en adaptant les procédés d'exploitation pour en réduire l'empreinte environnementale. Dans ce contexte, il apparaît essentiel de disposer d'une meilleure connaissance des données thermodynamiques permettant de décrire les domaines de stabilité des différentes phases minérales, ainsi que des données cinétiques indispensables pour optimiser les procédés de traitement des minerais. Par ailleurs, dans l'hypothèse d'un stockage de colis de déchets radioactifs en formation géologique profonde, une situation accidentelle peut conduire à des phénomènes d'altération susceptibles de provoquer l'établissement d'équilibres thermodynamiques contrôlant la concentration des actinides en solution, notamment *via* la précipitation de silicates d'actinides, dont la coffinite (USiO<sub>4</sub>), et des solutions solides dérivées par substitution.

Les premiers travaux menés sur ces familles de composés ont porté sur la synthèse de silicates d'uranium et/ou de thorium par des méthodes originales incluant l'utilisation de conditions hydrothermales. Plusieurs paramètres, tels que l'ordre dans l'ajout des réactifs, le pH du milieu réactionnel, la température et la durée du traitement thermique ont été étudiés et ont permis d'établir les conditions optimales de synthèse de USiO<sub>4</sub>, jusqu'alors jamais clairement reportées dans la littérature, puis d'en déterminer précisément les paramètres de maille. Ces conditions expérimentales ont également conduit à la préparation de solutions solides de formule générale Th<sub>1-x</sub>U<sub>x</sub>SiO<sub>4</sub> (0 ≤ x ≤ 0,75). Néanmoins, pour les composés les plus riches en uranium, la formation de la phase de type coffinite s'accompagne systématiquement de la présence résiduelle d'une faible quantité d'UO<sub>2</sub> et/ou de ThO<sub>2</sub>. Les études en cours visent donc maintenant à préparer des échantillons strictement monophasés de manière à entreprendre les mesures de constantes de solubilité et des données thermodynamiques correspondantes.

Des premières valeurs de telles données ont par ailleurs été obtenues dans le cas de phases phosphatées d'intérêt pour l'amont du cycle électronucléaire : l'autunite et la torbernite. Dans ce cadre, une approche comparative impliquant l'étude parallèle d'échantillons naturels et synthétiques a été développée. Par la suite, l'étude de la solubilité de la torbernite a été entreprise à la fois en conditions de sur- et sous-saturation. Dans le premier cas, la valeur de la constante de solubilité a pu être évaluée pour différentes températures, celle-ci variant de 10<sup>-66</sup> à 3.10<sup>-65</sup> entre 20 et 90°C. Ces données ont alors conduit à fournir une première valeur de la variation d'enthalpie standard de réaction voisine de 400 kJ.mol<sup>-1</sup>. Les études en sous-saturation sont actuellement en cours afin de confirmer ces valeurs et déterminer les cinétiques de dissolution.

# **LIXIVIATION EN TAS DE MINERAIS MARGINAUX A SOMAIR : DES ETUDES LABORATOIRE A LA PRODUCTION DE 700 T D'URANIUM PAR AN**

N. Durupt<sup>1</sup> et J.J. Blanvillain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AREVA NC – Service d'Etudes de Procédés et d'Analyses (SEPA), B.P. no. 71  
87250 Bessines sur Gartempe, France  
(Email : nicolas.durupt@areva.com)

## **RESUME**

En 2006, SOMAIR a décidé d'augmenter sa production de 50% grâce au traitement de minerais marginaux par lixiviation en tas. Ces minerais, qui proviennent de différents gisements de compositions très variables, ont été étudiés en 4 étapes :

- Des essais laboratoire : destinés à comparer le comportement des minerais (caractérisation, consommation d'acide, rendements de récupération de l'uranium...).
- Des essais en colonnes sur un échantillon moyen de tous les gisements : destinés à déterminer les paramètres significatifs pour l'étude de faisabilité du projet.
- Des essais en colonnes sur un échantillon spécifique de chaque gisement : destinés à optimiser chaque rendement de récupération de l'uranium et identifier les éventuels problèmes de percolation liés aux argiles.
- Des essais pilotes en stalles : destinés à valider les paramètres du procédé.

L'unité de production de Somair a démarré en juillet 2009 et constitue la plus importantes dans le monde pour l'uranium avec ce type de procédé de traitement.

## **Phénoménologie de l'agglomération et rôle du Fer dans la lixiviation en tas de l'uranium**

François Geffroy\*, Nicolas Durupt\*\*

\* AREVA, BG Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex.  
[francois.geffroy@areva.com](mailto:francois.geffroy@areva.com)

\*\* AREVA NC – SEPA - 1 Avenue du Brugeaud – B.P. N°71 87250 Bessines/Gartempe.  
[nicolas.durupt@areva.com](mailto:nicolas.durupt@areva.com)

La maîtrise du procédé de lixiviation en tas est aujourd'hui indispensable pour le BG Mines d'AREVA, avec l'accès à des minerais à faible teneur et le recours croissant à cette méthode. Afin d'optimiser ce procédé, une compréhension fine de la chimie impliquée est nécessaire. L'étude de différentes données de colonnes de lixiviation réalisées en laboratoire a montré que l'agglomération du minerai, outre son rôle dans l'amélioration des écoulements, jouait un rôle de premier plan dans la dissolution de l'uranium.

Des essais d'agglomération à différentes quantités d'acide sulfurique, d'oxydant, avec différentes durées de mûrissement ont été réalisés pour déterminer l'avancement des réactions de dissolution avant le début de l'irrigation.

Les rendements de dissolution d'uranium observés vont de 45% à 80% en 24h de mûrissement selon les quantités d'acide ajouté (de 0 à 50 kg par tonne de minerai). La fraction oxydée U(VI) du minéral est très facilement soluble alors que la partie réduite U(IV) requiert la présence d'oxydant. La concentration en fer ferrique (Fe(III)) a été fortement corrélée à la mise en solution de l'U(IV).

Afin d'obtenir une concentration suffisante en Fe(III), il est nécessaire de dissoudre les minéraux ferriques de la gangue par des fortes concentrations d'acide, ou d'oxyder les minéraux ferreux de la gangue avec une plus faible quantité d'acide, mais en présence d'oxydants.

Ces essais ont montré qu'en appliquant des paramètres adaptés, il est ainsi possible d'obtenir un rendement de dissolution d'uranium de 75% en 24h de mûrissement.

## Les complexes d'uranyle chlorure jusqu'à 300 °C le long de la courbe de vapeur saturante: étude par spectroscopie Raman et conséquences métallogéniques

Béatrix Aparicio, Jean Dubessy, Chinh Nguyen-Trung et Pascal Robert

UMR G2R(7566), UHP-Nancy Université, BP-70239-54506-Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex (France), [jean.dubessy@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:jean.dubessy@g2r.uhp-nancy.fr)

Les gisements d'uranium sous discordance sont des « monstres » géochimiques suggérant des conditions physico-chimiques très favorables au transport de cet élément par les fluides. Les paléofluides associés sont des saumures chlorurées (> 6 molal) circulant entre 150 et 250 °C (e.g. Pagel (1975) ; Mercadier et al. (2010)) dont la concentration en uranium, déterminée par LA-ICP-MS, peut atteindre quelques centaines de ppm (Richard et al., 2010). Des expériences en solutions chlorurées acides à 150°C ont montré une solubilité très importante de UO<sub>2</sub>, indiquant une capacité de transport importante des ions uranyles par ces solutions chlorurées et suggérant la complexation de l'uranyle Cl<sup>-</sup> (Richard et al., 2010, ce symposium). Si les complexes d'uranyle chlorure (UO<sub>2</sub>Cl<sub>n</sub><sup>2-n</sup>) sont assez bien connus à température ambiante (e.g. Nguyen et al., 1992), notamment par spectroscopie Raman, leur importance jusqu'à 300 °C est mal connue. La conception de modèles génétiques de ces minéralisations sur des bases thermodynamiques solides exige donc des études de spéciation dans le système UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>-Cl<sup>-</sup>-H<sup>+</sup> d'autant plus que le chlorure est l'anion majeur de la plupart des fluides crustaux.

Les études spectroscopiques de l'uranyle en solution aqueuse sont très difficiles en raison des problèmes de corrosion du conteneur par la solution aqueuse et des réactions redox provoquant la précipitation de UO<sub>2</sub>. Ces difficultés expérimentales ont été surmontées grâce à l'utilisation de capillaire de silice pure et d'une platine chauffante microthermométrique. Les concentrations en chlorure (LiCl) varient de 1 à 15 molaires, le pH est de l'ordre de 1 à température ambiante et la concentration en uranyle est de 0,01 molaire.

Les spectres Raman (excitatrice à 514,535 nm) de la bande d'élongation U-O permettent d'identifier à température ambiante les 6 complexes chlorurés d'uranyle en fonction du rapport Cl/U. Les complexes à 5 et 6 chlorures apparaissent pour des rapports Cl/U ≥ 225. L'augmentation de température se traduit par un déplacement de la bande Raman vers les basses fréquences, indiquant une stabilité croissante des complexes à nombre de chlorure croissant : ainsi à 300°C, les seuls complexes présents dans une solution à 2,5 M Cl<sup>-</sup> sont UO<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub><sup>2-</sup>, UO<sub>2</sub>Cl<sub>5</sub><sup>3-</sup> et UO<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub><sup>4-</sup>. L'ajustement du signal Raman sur un modèle à 7 composantes permet d'estimer l'abondance relative des différentes espèces.

Ces premiers résultats démontrent le rôle des complexes chlorurés d'uranyle dans les processus minéralisateurs. Une étude dans des solutions à pH initial plus élevé (2 voir 3) reste à réaliser pour étudier la compétition avec les complexes hydroxylés.

### Références

- 
- Mercadier et al. (2010). *Lithos*, 115, 121-136.  
Nguyen-Trung C., Begun G., Palmer D. (1992). *Inorganic Chemistry* 31, 5280-5287.  
Pagel M. (1975). *C.R.A.S.*, 280 (D), 2301-2304.  
Richard et al. (2010) *Terra Nova*, 22, 303-308. Richard et al., (2010), *ce symposium*.

## **Systèmes d'altération dans le gisement de Shea Creek (Athabasca, Canada):**

### **1/ Variabilité verticale des altérations argileuses**

Freddy URI\*, Daniel Beaufort\* et Jean Luc Lescuyer\*\*

\*UFR SFA, UMR 6269 HydrASA Université de Poitiers Bâtiment des Sciences Naturelles 40 Avenue du Recteur Pineau 86022 POITIERS [daniel.beaufort@univ-poitiers.fr](mailto:daniel.beaufort@univ-poitiers.fr)

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

[jeanluc.lescuyer@areva.com](mailto:jeanluc.lescuyer@areva.com)

Shea Creek est le projet d'exploration d'uranium le plus avancé actuellement dans l'ouest Athabasca (Saskatchewan, Canada). Dans ce gisement associé à une discordance, les découvertes majeures faites entre 700 et 900 m de profondeur ont montré en un même lieu tous les styles de minéralisation répertoriés séparément dans les autres gisements de ce type : (1) minéralisation perchée dans les grès, (2) minéralisation associée à la discordance et (3) minéralisation localisée dans le socle. C'est donc une référence pour la prospection des gisements d'uranium profonds en Athabasca.

Des travaux sont en cours à Shea Creek pour améliorer les connaissances sur les relations spatiales et temporelles qui unissent minéralisation et altération des roches hôtes. L'étude de la zone d'altération recoupée par un forage de référence dans le prospect de Kianna révèle un certain nombre d'hétérogénéités pétrographiques et minéralogiques aussi bien dans les grès du bassin que dans les roches du socle.

Dans les grès, il existe une forte hétérogénéité verticale des taux de compaction et de pression dissolution liés à la diagenèse, avec notamment le développement d'une zone sous compactée à la base du bassin. L'altération hydrothermale des grès s'exprime jusqu'à la surface d'érosion actuelle (illitisation). Dans les roches du socle, l'altération est guidée par une intense fracturation (bréchification) des roches exprimée par le développement de gouges argileuses dans les failles jusqu'à la base du forage (934 m).

Dans les grès, la kaolinite (et non pas la dickite) est le minéral diagénétique marqueur de la zone sous compactée alors que l'illite est le marqueur de l'altération hydrothermale postérieure.

Dans le socle, l'illite, la sudoïte et la chlorite trioctaédrique sont les principaux marqueurs argileux de l'altération, l'illite et la sudoïte cristallisant avant la chlorite.

Smectite et sulfate-phosphate d'aluminium (APS) sont présents de part et d'autre de la discordance.

La concentration moyenne en terres rares légères des APS augmente fortement à proximité des corps minéralisés. Dans les grès, cette signature chimique est perceptible à partir d'environ 200 m au dessus de la minéralisation perchée.

Ce modèle de distribution des minéraux argileux et des phases associées va servir de référence pour l'étude en cours qui porte sur une cinquantaine de forage du gisement de Shea Creek.

## **Systemes d'altération dans le gisement de Shea Creek (Athabasca, Canada) :**

### **2/ Apports des défauts d'irradiation dans les argiles au traçage des migrations passées de l'uranium**

Elisa Morichon<sup>\*,□</sup>, Daniel Beaufort<sup>\*</sup>, Thierry Allard<sup>□</sup> et Jean-Pierre Milesi<sup>§</sup>

\* Université de Poitiers, Laboratoire HydrASA, CNRS-UMR 6269, 40 avenue du recteur Pineau, Poitiers F-86022, France [elisa.morichon@univ-poitiers.fr](mailto:elisa.morichon@univ-poitiers.fr)

□ IMPMC, UMR 7590, 140 rue de Lourmel, 75015 Paris, France

§ AREVA BU Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier - 92084 Paris La Défense Cedex

Le bassin de l'Athabasca tel que nous le connaissons aujourd'hui contient de nombreux gisements d'uranium associés à la discordance entre une des formations sédimentaires gréseuses d'âge Mesoproterozoïque et un socle sous-jacent d'âge Paléoproterozoïque. Ces gisements sont entourés par des halos d'altération riches en minéraux argileux qui se sont constitués pendant une longue période géologique (100 à 200 Ma) durant laquelle ont fonctionné les processus tectoniques et hydrothermaux à l'origine de la dissolution, du transport, puis du dépôt de l'uranium.

Les interactions avec les radiations ionisantes émises naturellement par l'uranium et ses éléments fils sont à l'origine de défauts structuraux stables au sein des minéraux argileux. Ces défauts témoignent de la résidence (passée ou récente) de radioéléments dans le champ proche des cristaux bien après qu'ils aient disparu. Autour des gisements d'uranium, les défauts d'irradiation détectables par spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, ont été identifiés dans des quartz et dans diverses argiles telles que la montmorillonite ou les kaolins (kaolinite, dickite) issus de systèmes relativement récents (<50Ma).

Les travaux menés depuis quelques années sur les défauts d'irradiation des minéraux argileux dans le bassin d'Athabasca (kaolinite, dickite, illite et sudoite) ont pour but le traçage multi-échelle des paléo-circulations de fluides riches en uranium. A l'échelle globale du bassin, les défauts d'irradiation sont très proches de par leur nature mais leur concentration peut varier des valeurs de fond régional (déterminé à partir des concentrations obtenues sur les forages stériles) jusqu'à des valeurs supérieures de trois ordres de grandeur le long des structures en relation avec les corps minéralisés. Les fluctuations maximales de concentration en défauts sont observées au niveau de la discordance, ainsi qu'au niveau des failles recoupant cette discordance. A l'échelle locale, l'exemple du forage She114 (gisement de Shea Creek, Ouest Athabasca), qui recoupe plusieurs corps minéralisés situés dans les grès, au niveau de la discordance et dans le socle sous-jacent, conforte l'importance de la discordance et du réseau fracturé associé pour la circulation des paléo-fluides. Dans les grès, la signature d'une irradiation anormalement élevée a pu être décelée jusqu'à plus de cent mètres au-dessus du premier corps minéralisé actuel. L'augmentation de la concentration en défauts à mesure que l'on se rapproche de la discordance est à mettre en parallèle avec l'augmentation des teneurs en terres rares légères dans les phosphates-sulfates d'aluminium (APS), contemporains des minéraux argileux. D'autre part, l'absence de corrélation entre concentration en défauts et débit de dose démontre qu'il s'agit bien des migrations anciennes de radioéléments qui ont eu lieu après la formation des argiles.

## Les concentrations en uranium dans les fluides minéralisateurs du bassin de l'Athabasca: approche analytique et expérimentale

Antonin Richard\*, Christophe Rozsypal\*, Julien Mercadier\*, David A. Banks\*\*, Michel Cuney\*, Marie-Christine Boiron\*, Michel Cathelineau\*

\*G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes B.P. 239, F-54506, Vandoeuvre-lès-Nancy, France. [antonin.richard@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:antonin.richard@g2r.uhp-nancy.fr)

\*\*School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK. [d.banks@see.leeds.ac.uk](mailto:d.banks@see.leeds.ac.uk)

Dans le bassin protérozoïque de l'Athabasca (Canada), des saumures d'origine évaporitique et de salinité égale à environ 25-35% équivalent NaCl, ont envahi les formations gréseuses basales au cours de la diagenèse à des températures de 120-200°C (Boiron et al., 2010 ; Richard et al., soumis). Ces saumures ont percolé à travers le socle cristallin grâce à la réactivation d'anciennes structures et ont lessivé l'uranium du socle pour le précipiter à proximité de l'interface socle/couverture sédimentaire (Mercadier et al., 2010 ; Richard et al., 2010).

A ce jour, la concentration en uranium dans les saumures minéralisatrices de ces gisements reste mal connue mais serait une clé importante pour comprendre la genèse de ces minéralisations de très fortes teneurs et très forts tonnages. Nous présentons ici les résultats de mesures des concentrations en uranium dans les inclusions fluides de ces gisements par LA-ICP-MS, couplée à la détermination expérimentale de la solubilité de l'U(VI) dans des saumures de NaCl (0.3-6.0 M) en fonction du pH (3-8) à 155°C et  $P_{\text{sat}}$ .

Par cette approche couplée, nous montrons que les saumures ont transporté l'uranium dans une large gamme de concentrations ( $\sim 10^{-6}$  à  $\sim 2.8 \times 10^{-3}$  mol.l<sup>-1</sup>) et à des pH très bas (3-4). Ces concentrations en uranium sont parmi les plus élevées jamais enregistrées pour des fluides géologiques et n'ont d'équivalent que dans les fluides liés à l'activité magmatique-hydrothermale autour des intrusions granitiques.

Les saumures à l'origine des gisements géants du bassin de l'Athabasca remplissent les conditions (T, pH,  $fO_2$ , salinité) favorables pour un lessivage et un transport extrêmement efficaces de l'uranium.

### Références

---

- Boiron M.C., Cathelineau M. and 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., Boiron M.C., Cathelineau M. and Cuney M. (2010), Brine migration in the basement rocks of the Athabasca Basin through microfracture networks (P-Patch U deposit, Canada), *Lithos*, **115**, 121-136.
- Richard A., Pettke T., Cathelineau M., Boiron M.C., Mercadier J., Cuney M. and 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.
- Richard A., Banks D. A., Mercadier J., Boiron M.C., Cuney M. Cathelineau M., An evaporated seawater origin for the ore-forming brines in unconformity-related uranium deposits (Athabasca Basin, Canada): Cl/Br and  $\delta^{37}\text{Cl}$  analysis of fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, soumis.

## Paléosurfaces et enracinements métalliques : l'uranium autochtone des paléolatérites pré-Athabasca

Jacques Dardel

**Approche générale** - Le bassin Athabasca où des gisements d'uranium tendent à chevaucher la paléosurface pré-Athabasca suscita pléthore de travaux mais sa géologie semble patiner ! Ne faudrait-il pas révisiter la doctrine ?

La source du métal d'un gisement, toujours difficile à situer, pourrait être l'encaissant lui-même mais les gisements dans le bassin sont plus nombreux dans le socle granito-gneissique et plus riches dans les grès.

**Incidences métalliques autochtones** - La notion de discordance est un concept sédimentaire qui précise une discontinuité dans l'espace et/ou dans temps entre deux termes sédimentaires, finalement superposés. La paléosurface est une surface temps qui induit une émergence et/ou une altération du terme inférieur avant le dépôt du terme supérieur. Si les altérites sont des produits de dégradation/agradation d'une roche, les paléolatérites sont des altérites fossilisées sous une formation plus jeune dont elles sont séparées, le cas échéant, par une paléosurface. L'altération superficielle et la pédogenèse favorisent parfois des concentrations métalliques, pour des éléments peu mobiles comme l'aluminium (bauxites latéritiques), pour des éléments mobiles : le nickel mobile en milieu acide ou le manganèse sensible à l'oxydation : garniérite ou secondaires de manganèse se concentrent à la base de la saprolite grossière au-dessus de leur roche mère. La coïncidence entre minéraux d'uranium et discordance pré-Athabasca avait été notée dès 1956 par Blake. L'identification d'une paléosurface et/ou d'un régo-lite (paléolatérites) est basée sur deux critères : la superposition tranchée de deux lithofaciès : en Athabasca, grès hétérogènes sur socle granito-gneissique altéré ; une zonation continue, colorée, emboîtée et asymétrique des altérations du socle (paléoprofil d'altération). Cette paléosurface surmonte un profil de paléolatérites d'une puissance moyenne de 95 mètres à Carswell (50 m dans le granite Clearwater, 140 m dans les gneiss feldspatiques).

**Signé météorite Valérie** - Le contrôle d'un vol gammamétrique donne prestement à Cluff des galets d'uraninite glaciaires et des indices dans les grès et dans un socle granito-gneissique. Malgré la rareté des affleurements, suite au cratère d'explosion creusé par la météorite Valérie et à son rabotage par l'inlandsis et son épandage glaciaire, la structure circulaire de Carswell permet deux observations essentielles

- la minéralisation à uraninite-or-bitume est en amande dans un filon chloriteux dans le socle d'une écaille retournée,
- la paléosurface pré-Athabasca est richement échantillonnée par d'étonnantes écailles centripètes.

Des savoirs locaux (indices de l'île Stewart-Nisto-Stony Rapids-Fond-du-Lac) et savants (Blake 1956, Moreau et al.1966) corroborent notre hypothèse de la paléosurface pré-Athabasca comme lieu géométrique de la minéralisation uranifère. Dès août 1968, l'indice filonien dans le socle devient l'indice Cluff D, avec D comme discordance.

**Horizon Athabasca** - Les gisements en Athabasca sont dans le socle, dans les grès ou dans socle et grès, soit sous, sur ou de part et d'autre de la paléosurface pré-Athabasca, mais se présentent plutôt en cigare ou en corps massif souvent linéaire, c'est-à-dire à l'intersection de deux plans.

L'étude structurale du gisement Cluff D apporte trois informations fondamentales (Ey 1984) : ces gisements se situent à l'intersection d'une structure compressive du socle avec la paléosurface (les paléolatérites), hydrothermalisme et mylonitisation sont contemporains, la perméabilité de fracture canalise les circulations.

Si trois géométries sont décrites entre paléosurface et gisements, deux types principaux sont connus :

-une **minéralisation polymétallique à forte teneur en uranium dans les grès**, souvent «chloritisés» ; l'uraninite est accompagnée de minéraux métalliques réducteurs (sulfures, sulfo-arséniures, arséniures, tellurures) et souvent de kérabitude ; les fluides minéralisateurs seraient ascendants du socle dans les grès. Le rapport  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  élevé confirme que les phases fluides impliquées proviennent du socle : la minéralisation est de type «egress» ;

- **une minéralisation monométallique dans le socle, en amas ou en amandes**, avec un rapport  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  faible : les fluides descendent du bassin, courent sur la paléosurface et s'injectent dans la structure compressive ; de type «ingress».

La même structure peut porter un amas dans les grès à la paléosurface et irriguer un archipel d'amandes minéralisées dans le socle altéré de la faille sous la paléosurface. Un halo d'altération enveloppe souvent le gisement avec, en bref, des chlorites contre la minéralisation, une enveloppe à illites dominantes et une silicification extérieure. Cette coque imperméable leur est une protection durable. Un calage synthétique implique pour l'Athabasca un épisode initial de minéralisation uranifère vers 1,6 Ga masqué à Carswell par la météorite Valérie, estimée vers  $1\ 100 \pm 50$ . Les autres âges uranium seraient des retouches. La concomitance des âges initiaux de l'uranium minier en Athabasca canadien et en Kombogie australien vers 1,6 Ga comme aussi en Beaverlodge canadien (1 750 Ma) et à Ranger en Kombolie (1 737±20 Ma) ouvre un autre ciel.

**Approche d'un potentiel uranium pour le bassin Athabasca à partir du modèle de Cluff** - Ce modèle privilégie un piège structural à la paléosurface dont l'uranium serait partie de l'uranium latent libéré des granitoïdes du socle par une altération climatique longue autour de 1,75 Ga et redistribué par hydrothermalisme et mylonitisation autour de 1,6 Ga. Le fond géochimique varie de 5 et 9 ppm d'uranium dont 40 % est mobilisable, soit 2 ppm. L'altération climatique sur 10 mètres libèrerait 50 grammes d'uranium par mètre carré, soit 50 tonnes par km<sup>2</sup> ou encore 100 tU pour une altération sur 20 mètres. Le potentiel ultime théorique serait alors entre 2,4 et 5 millions de tonnes d'uranium, soit une à deux fois la production mondiale en 60 ans. Cette approche fruste avec des granitoïdes sous un demi bassin est conservatoire car son potentiel est calculé sur un demi bassin et sa productivité sur sa totalité. En tonne par km<sup>2</sup>, sa productivité théorique serait de 25 à 50, celle du bassin de 7, de 375 à Wollaston, d'environ 5 000 à Cluff.

## Distribution des paragenèses argileuses dans le gisement d'Imouraren (Niger)

Sophie Billon\*, Patricia Patrier\*, Daniel Beaufort\* et Aurélia Wattinne\*\*

\*HYDRASA, Université de Poitiers- UMR 6269 CNRS, 40 Av. du Recteur Pineau 86022 Poitiers Cedex. [sophie.billon@etu.univ-poitiers.fr](mailto:sophie.billon@etu.univ-poitiers.fr)

\*\*AREVA, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex. [aurelia.wattinne@areva.com](mailto:aurelia.wattinne@areva.com)

Localisé dans le bassin de Tim Mersoï, à l'Est de la faille d'Arlit, le gisement uranifère d'Imouraren (Niger) est encaissé dans des formations gréseuses du Tchirézrine 2 (Jurassique sup.). Du Nord au Sud du gisement, il existe des variations minéralogiques qui concernent aussi bien la nature des minéralisations uranifères que la distribution des paragenèses à analcime et paragenèses argileuses. La distribution des minéraux argileux dans ce gisement permet de mieux comprendre sa genèse et constitue une nécessité pour l'optimisation des processus de traitement du minerai.

**La chlorite Fe et l'illite** (en faible abondance) sont présentes sur l'ensemble du gisement. Les autres minéraux argileux ont une répartition plus locale: (1) **la montmorillonite** et les minéraux du sous groupe **kaolin** (kaolinite, dickite) sont situés vers le Centre et le Sud du gisement ; (2) **la tosudite** (interstratifié montmorillonite-sudoite ordonné régulier de type R1) apparaît principalement dans le secteur Nord en association avec des minéraux uranifères oxydés (métatyuyamunite et uranophane).

Ces associations de minéraux argileux résultent de la superposition de plusieurs épisodes d'interaction eau-roche : (1) **Un épisode diagénétique** voit la formation précoce de chlorite Fe (transition berthiérine-chlorite Fe) et de kaolinite qui tend à être remplacée partiellement par la dickite ou l'illite dans les secteurs les plus enfouis; (2) **Un épisode plus tardif** qui conduit à **l'altération** des minéraux détritiques et diagénétiques et à la cristallisation de tosudite ou de montmorillonite. La montmorillonite se forme au Centre et au Sud à partir des produits de dissolution des chlorites Fe et est associée à l'hématite. La tosudite cristallise au Nord à partir des produits de dissolution des kaolins, feldspaths et chlorites Fe et est synchrone de la formation de minéraux uranifères oxydés. Au moins une génération de chlorite plus magnésienne (clinocllore ou sudoite ?) est suspectée d'après les chimismes variés et la présence de 2 polytypes (Ib sur tout le gisement, IIb au Nord). L'origine du polytype IIb, qui est un polytype de haute température, reste à préciser.

L'hypothèse avancée pour expliquer les variations minéralogiques décrites ci-dessus fait intervenir la circulation post-diagénétique d'un fluide oxydant, riche entre autre en Mg qui a réagi avec les roches du bassin. Cette circulation de fluide a pu être guidée par l'orientation N-S de corps sableux. La température du fluide, plus importante dans le secteur Nord (> 150°C) aurait permis la formation de tosudite au détriment des kaolins, feldspaths et chlorites Fe. Le polytype IIb des chlorites rencontré dans le secteur Nord vient appuyer cette hypothèse de gradient thermique décroissant vers le Sud. La préservation d'une partie des minéraux de la kaolinite dans les roches des secteurs Centre et Sud suggère une interaction fluide-roche moins forte (rééquilibrage du fluide avec la roche ?) et la formation de montmorillonite dans ces zones témoigne d'une interaction fluide-roche à plus basse température (≈100°C).

## **Flux de chaleur et concentration en éléments radioactifs (U, Th, K) des cratons Précambriens : Implications en termes de mécanismes de croissance crustale, paléogéotherme et la formation de provinces métallogéniques**

Olivier Vanderhaeghe et Cécile Fabre

UMR G2R, Nancy Université, BP 239 54506 Vandoeuvre, [olivier.vanderhaeghe@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:olivier.vanderhaeghe@g2r.uhp-nancy.fr)

Le flux de chaleur à la surface des continents est le reflet des contributions combinées du flux de chaleur mantellique (flux réduit) et du flux de chaleur produit par la désintégration des éléments radioactifs (U, Th, K) contenus dans la croûte continentale. L'objectif de cette contribution est de d'évaluer la concentration en éléments radioactifs à partir des flux de chaleur mesurés à la surface et de l'épaisseur de la croûte continentale pour les cratons Archéens et les ceintures orogéniques Protérozoïques.

La relation entre le flux de chaleur à la surface et la concentration en éléments radioactifs est obtenue à partir de l'équation de la chaleur en 1D (Carlslaw and Jaeger, 1959). Plusieurs conditions aux limites peuvent être envisagées. Ce travail s'appuie sur les synthèses à l'échelle terrestre du flux de chaleur à la surface, de l'épaisseur de la croûte continentale et de la lithosphère (Artemieva, 2006).

Les valeurs obtenues pour les concentrations en éléments radioactifs des cratons Archéens et les ceintures Protérozoïques permettent de représenter la concentration des éléments radioactifs en fonction de l'âge de la croûte continentale. Ces modèles permettent d'une part de discuter les mécanismes de croissance crustale en distinguant les contributions relatives de l'accrétion de croûte juvénile, la remobilisation et le recyclage des cratons (Albarede, 1998; Armstrong, 1981; Hoffmann, 1988; Rudnick, 1995; Taylor and Mc Lennan, 1995; von Huene and Scholl, 1991; Wedepohl, 1991). D'autre part, l'estimation de la concentration actuelle en éléments radioactifs des cratons Archéens et des ceintures Protérozoïques permet de calculer le géotherme initial au moment de l'accrétion continentale et l'épaisseur de la lithosphère thermique.

**Albarede, F.** 1998. The growth of continental crust. *Tectonophysics*, **296**: 1-14.

**Armstrong, R.L.** 1981. Radiogenic isotopes: the case for crustal recycling on a near steady-state no continental growth Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **301**: 443-472.

**Artemieva, I.M.** 2006. Global  $1^\circ \times 1^\circ$  thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution. *Tectonophysics*, **416**: 245-277.

**Carlslaw, H.S. and Jaeger, J.C.** 1959. *Conduction of heat in solids*, **2nd edition**. Oxford Univ. Press, Oxford, 510 pp. **Hoffmann, A.W.** 1988. Chemical differentiation of the Earth. The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, **90**: 297-314.

**Rudnick, R.L.** 1995. Making continental crust. *Nature*, **378**: 571-578.

**Taylor, S.R. and Mc Lennan, S.M.** 1995. The geological evolution of the continental crust. *Rev. Geophysics*, **33**: 641-265. **von Huene, R. and Scholl, D.W.** 1991. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Rev. Geophys.*,

**29**: 279-316.

## Transition magmatique – hydrothermale dans la pegmatite de Rössing : implications pour la minéralisation en uranium

Mathieu Castillo<sup>a</sup>, Stefano Salvi<sup>a</sup>, Didier Béziat<sup>a</sup> et Anthony E. Williams-Jones<sup>b</sup>

<sup>a</sup> LMTG, Université de Toulouse, CNRS, IRD, OMP, 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

<sup>b</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, 3450 University Street, Montreal, Quebec, H3A 2A7, Canada

Le gisement d'uranium de Rössing, situé dans la ceinture néoproterozoïque de Damara, en Namibie est considéré comme le type représentatif des gisements uranifères magmatiques associés à des leucogranites. Ce type de gisement représenterait les conditions de température et pression les plus élevées pour les minéralisations uranifères (Cuney et Kyser, 2009). La minéralisation en uranium est disséminée dans des roches granitiques (alaskite) se présentant en dykes recoupant les roches métamorphiques encaissantes de la séquence de Damara. La minéralisation est également présente dans des zones riches en phlogopite et quartz situées au contact entre les alaskites et les roches encaissantes.

Nous avons étudié en détail un sondage dans lequel on retrouve plusieurs intrusions d'alaskite de puissance variée et présentant des teneurs variables en uranium. Ce sondage recoupe également deux types de roches encaissantes, le marbre inférieur de la formation de Rössing et le schiste à amphibole et biotite de la formation de Khan. L'alaskite est normalement constituée de feldspaths (principalement alcalins), de quartz et de moins de 5% de biotite. La proportion de biotite augmente de façon brutale dans les zones de bordure (d'une dizaine de mètres de puissance au maximum) pour atteindre une proportion moyenne de 20 % volume. Enfin, dans la partie la plus externe de la zone de bordure, on observe trois nouvelles zones décimétriques marquées par un changement de texture et de composition minéralogique, avec en allant vers l'extérieur une première zone à texture aplitique contenant 60% vol. de biotite, puis une deuxième zone à texture litée contenant jusqu'à 90% vol. de biotite et enfin une zone à quartz-phlogopite. Suivant la nature de la roche encaissante, on retrouve dans les zones à quartz-phlogopite soit de la pyrrhotite si l'encaissant est le marbre, soit des oxydes de fer et titane et de l'anhydrite si l'encaissant est le schiste. Ces minéraux se retrouvent également dans les roches encaissantes métasomatisées immédiatement au contact de la zone à quartz-phlogopite. La paragenèse dans les zones de marbre métasomatisées a permis de contraindre la température de cette métasomatose entre 400°C et 500°C. L'individualisation de ces diverses zones de bordures pourrait être reliée à la démixtion tardive d'un fluide orthomagmatique conformément à un processus de skarnification. On aurait ainsi une partie endoskarn correspondant aux zones de bordure de l'alaskite, et une partie exoskarn correspondant aux zones transformées des marbres et des schistes. Le fluide initialement riche en Si, F et S s'enrichirait au contact des roches encaissantes en Mg, Fe et Ca modifiant les rapports d'activité  $a_{\text{Fe}^{2+}}/a_{\text{H}^+}$  conduisant à la précipitation massive de micas. On constate également que les formations encaissantes exercent un contrôle sur la composition de l'uraninite, avec de plus faibles quantités en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Y}^{3+}$  et  $\text{REE}^{3+}$  qui traduisent un plus fort rapport  $\text{U}^{4+}/\text{U}^{6+}$  pour les uraninites des alaskites en intrusion dans les marbres relativement à celles en intrusion dans les schistes. Ces résultats corroborent ceux de Cuney et Kyser (2009) qui montraient que les marbres étaient plus réducteurs que les schistes.

A la suite de cet épisode métasomatique, on aurait un deuxième épisode contemporain ou plus tardif associé à un fluide réducteur qui affecterait l'ensemble de l'alaskite et se marquerait notamment par la transformation partielle de l'uraninite en coffinite entourée partiellement de pyrite, ainsi que par la présence de nombreux filonnets de calcite, anhydrite, pyrite et quartz.

Cuney, M. et Kyser, K. (2009) *Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration*, Mineralogical Association of Canada, short course series, Vol. 39.

## **Déformation et fusion partielle d'une croûte d'âge archéen-paléoproterozoïque: implication sur la mobilisation et le dépôt de minéralisations uranifères, Orogène des Torngats, Baie d'Ungava**

Pierre Trap\*, Cyril Durand\*\*, Philippe Goncalves\*, Didier Marquer\*, Jean-Louis Feybesse\*\* et Yoann Richard\*\*

\* Université de Franche-comté, UMR CNRS 6249, La Bouloie - UFR Sciences et Techniques 16 route de Gray 25030 Besançon cedex. [pierre.trap@univ-fcomte.fr](mailto:pierre.trap@univ-fcomte.fr); [philippe.goncalves@univ-fcomte.fr](mailto:philippe.goncalves@univ-fcomte.fr); [didier.marquer@univ-fcomte.fr](mailto:didier.marquer@univ-fcomte.fr)

\*\* Université de Lille 1, FRE 3298 Géosystèmes, UFR des Sciences de la Terre – Bâtiment SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex. [cyril.durand@univ-lille1.fr](mailto:cyril.durand@univ-lille1.fr)

\*\*\* AREVA, BU Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex. [jean-louis.feybesse@areva.com](mailto:jean-louis.feybesse@areva.com); [yoann.richard@areva.com](mailto:yoann.richard@areva.com)

Au sein de l'orogène des Torngats (Nord Québec), le district uranifère de CAGE récemment découvert (Caillat, 2005) s'inscrit dans la catégorie des gisements sédimentaires de marges passives impliquées dans des processus orogéniques d'épaississement crustal et d'anatexie. Une étude récente ciblée sur les minéralisations du district de CAGE distingue deux types d'anomalies en U-Th : 1) un type de minéralisation « stratoïde » enrichie en U et localisée dans des marbres et 2) un type de minéralisation dans des pegmatites et skarns associés et enrichie en Th (Néto, 2010). Ces anomalies sont localisées préférentiellement dans des couloirs de déformation. L'objectif est ici de préciser le contexte tectono-métamorphique de formation de ces anomalies et notamment de discuter le rôle des cisaillements dans le transfert de fluides et liquides silicatés lié aux minéralisations.

Une étude structurale multi-échelle a été réalisée sur l'ensemble des claims du district. La déformation finie est caractérisée par une foliation verticale ou fortement pentée, une linéation d'étirement et minérale à faible plongement et des critères cinématiques dextres témoignant d'un régime transpressif dextre. En outre, on observe une structuration en S-C-C' ainsi que du boudinage asymétrique à l'échelle plurikilométrique. En combinant les données de terrain et les données de géophysique aéroportée, il apparaît que les minéralisations uranifères sont étroitement associées aux grands couloirs de déformation. L'étude pétrologique des sédiments migmatitiques montre que la déformation transpressive est contemporaine de la fusion partielle pour des conditions d'environ 8-9 kbar et 750°C.

Nos résultats mettent en évidence le rôle majeur des cisaillements d'échelle crustale dont la géométrie et la distribution permettent un transport facilité des liquides silicatés et fluides hydro-magmatiques profonds remobilisant et transportant l'U et le Th pendant la fusion partielle. L'U et le Th sont déposés soit au sein même des grands cisaillements ductiles soit dans des structures connexes.

### Références

---

Caillat, C. (2005). Compte-rendu de mission au Québec : découverte de l'indice Cage, Août 2005. Rapport interne AREVA NC.

Néto, J. (2010). Genèse des minéralisations uranifères hudsoniennes (1.7-1.8 Ga) dans les socles de la Laurentia et de la Baltica. Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy 1.

## **Les galets de cherts noirs des conglomérats du bassin de Pongola (~2,9 Ga ; Afrique du Sud): une source potentielle de l'uranium ?**

Beate Orberger\* and Axel Hofmann\*\*

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

\*\* School of Geological Sciences, Johannesburg University, South Africa.

Dans les conglomérats fluviaux mésoarchéens, les cherts représentent ~12 vol%, car il s'agit des roches sédimentaires les plus abondantes à cette époque. Certains de ces cherts sont noirs dû à leurs teneurs élevées en matière organique (0,1-0,5 wt.%; Orberger et al. 2006), sulfures et/ou oxydes de Fe ou Ti et, comme p.ex. dans le bassin de Pongola, peuvent contenir entre 30 et 500 ppm d'U. Nos premières recherches montrent que ces cherts, bien qu'ils contiennent 97-99 wt.% SiO<sub>2</sub>, essentiellement sous forme de micro quartz, ont hérité une texture sédimentaire de la roche préexistante pendant la première silicification en milieu marin avant l'arrivée dans le bassin fluvial. Il s'agit d'une texture micro conglomératique avec des galets "fantôme" riches en matière organique, ou bien d'une texture bréchique avec des clastes noirs, centimétriques riches matière organique ou transparents. Les microquartz contiennent de multiples microinclusions (~1 µm) automorphes de feldspath potassique et de biotite. Dans la matrice de chert on observe rarement des micrograins de phosphates de terre rares légères (TRL) et moyennes (TRM), des oxydes de Ti et des carbonates de Ca, Fe et Mg. De nombreuses pyrites automorphes (5 to 200 µm) sont dissimulées dans la matrice sous forme de grains massifs sans ou avec des figures de dissolution, ou sous forme d'agrégats des petits grains. Les pyrites contiennent des teneurs variable de Co (< 1,7 wt.%), Ni (< 3,8 wt.%) et As (< 5,6 wt.%). Les sulfures de Ni-Co-As sont également présents. L'U forme de sulfures et arsénides sur les surfaces automorphes de pyrite. Les silicates d'U, sans ou avec des inclusions de galène, sont dissimulés dans la matrice, parfois associés aux oxydes de Ti. Ils montrent également des figures de dissolutions. Les cherts sont recoupés par de nombreuses veines de quartz, d'oxydes de Fe et Ti associés aux feldspaths potassiques (20 µm) riches en Ba, et aux biotites à traces de Ba, Ti et Cr. La dernière génération de veines est caractérisée par des pyrites riches en As. L'U a été également analysé dans les oxydes de fer des veines (moyenne: 0,1 wt.%). Apart de la minéralisation en U, les autres signatures sont typique pour les cherts archéens qui ont été affectés par plusieurs phases hydrothermales océaniques, accompagnées d'un métasomatisme potassique (Rouchon and Orberger, 2008; Hofmann et al. submitted). Cependant, les spectres des TR+Y des galets riches en U normalisés au PAAS, montrent un non-fractionnement des TRL pour les 5 échantillons analysés, mais des variables enrichissements en TRM et TR lourdes (TRLD) dans deux échantillons, ou un spectre quasi-plat pour trois échantillons, avec une faible anomalie négative d'Y. Ces spectres se distinguent des spectres de TRY d'autres cherts noirs archéens minéralisés ou non-minéralisés de Pilbara et de Zimbabwe qui sont caractérisés par un non-fractionnement des TRL, une anomalie positive d'Eu et, soit d'un léger enrichissement des TRLD ou d'un non-fractionnement des TRM et TRLD (Orberger et al. 2006, Hofmann et al. submitted). Dans les galets de cherts riches en U, aucune corrélation a été observée entre TRY et U. Cependant, la corrélation positive entre U est K<sub>2</sub>O indique que les cherts ont été minéralisés en U contemporaine au métasomatisme potassique, donc avant l'arrivée dans le bassin fluvial. L'infiltration des eaux de surface pendant ou après le dépôt dans le bassin de Pongola a conduit à la remobilisation de l'U et sa séquestration dans les silicates (et/ou arsénides, sulfures et oxydes).

## **L'origine et l'évolution des pyrites détritiques dans les conglomérats mésoarchéen (3.08-2.64 Ga) d'Afrique du Sud: source ou piège de l'uranium ?**

Megneng, M.\*, Orberger, B.\*, Hofmann, A.\*\*, Bouttemy, M.\*\*\*, Vigneron, J.\*\*\*, Etcheberry, A\*\*\*

\* 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

\*\* School of Geological Sciences, Johannesburg University, South Africa.

\*\*\* Institut Lavoisier de Versailles, Université de Versailles St-Quentin Bâtiment Lavoisier 45 Avenue des Etats-Unis 78035 Versailles cedex.

Les conglomérats fluviatiles du bassin de Witwatersrand (WWR) du mésoarchéen contiennent des grandes ressources économiques d'U (~270g/t) et de l'or (3-25 g/t) sur 0,1-2 m d'épaisseur. L'U est lié essentiellement à l'uraninite d'origine magmatique. Cependant les galets de pyrite peuvent contenir aussi jusqu'à 800 ppm d'U (p.ex. Kimberley Reef (~2.85 Ga), Black Reef (~2.64 Ga)). Les données isotopiques du S et du Fe de ces galets de pyrites indiquent une origine détritique, volcano-sédimentaire (Hofmann et al., 2009). Toutefois, ces conglomérats ont été modifiés par cinq événements hydrothermaux (2.7 à 2 Ga; *in*: Kirk et al., 2001). Cinq échantillons du WWR et du bassin de Pongola ont été étudiés afin de localiser l'U dans les pyrites et de comprendre le rôle de la pyrite dans la rétention de l'U. Quatre types de galets (mm) de pyrite ont été identifiés: 1. intercroisés avec du quartz et de l'argile; 2. agrégats des grains de pyrite; 3. massifs, cataclasés avec des remplissages de veines; 4. massifs avec des surcroissances de la pyrite "poreuse". On observe également des grains arrondis (quelques centaines de  $\mu\text{m}$ ), et de la pyrite automorphe entre les galets. Ce dernier a été formé lors d'un événement hydrothermal. Nos résultats préliminaires indiquent que l'U n'a pas été détecté dans les pyrites par la microsonde électronique. Cependant, les silicates et oxydes d'uranium subautomorphes sont localisés dans les surcroissances poreuses de galets de pyrite massifs associés aussi aux oxydes de titane, et dans les microveines des galets massifs cataclasés. On les observe aussi en microalignements proche des galets de pyrite et des phyllosilicates. Les arsénides d'U ont été trouvés dans la pyrite hydrothermale. Les minéraux à traces d'U (apatites et zircons détritiques ou hydrothermaux) forment des inclusions dans les galets massifs cataclasés et dans le quartz et la pyrite du ciment hydrothermal. Les apatites et zircons de la matrice sont partiellement corrodés et cataclasés. Ces derniers contiennent des micrograins de galènes. Les micrograins de galène sont également abondants dans les phyllosilicates inclus dans les surcroissances de pyrite "poreuses". A cette étape d'étude, aucun galet d'uraninite a été observé. Les seules sources de l'U primaire sont les zircons et apatites inclus dans les galets de pyrites massifs cataclasés. Les silicates de l'U et les arsénides d'U dans les veines et des fractures des galets, dans les surcroissances de pyrite et à proximité des phyllosilicates ont été formés probablement par remobilisation de l'U (As, Si) des phases primaires durant une des phases hydrothermales. Les premières analyses XPS ont été effectuées sur des surfaces de pyrites des galets cataclasés de deux échantillons, Black Reef (BR) sans minéraux d'U et du Kimberley Reef (KR) à minéraux d'U. Seuls les galets de pyrite dans les échantillons pauvres en minéraux d'U (BR), montrent la présence d'iode et de mercure. L'iode pourrait représenter le produit de fission de l' $^{238}\text{U}$  ( $^{129}\text{I}$ : période: 157 Ma), et/ou, mais moins probable, de la dégradation de la matière organique.

## ***Etude expérimentale des carbonates d'U(VI) en fonction de trois paramètres : pH, concentration en carbonate, température, à l'aide de spectroscopie vibrationnelle (Raman, FTIR ATR) et optique (UV-visible)***

C. Nguyen-Trung <sup>(1)</sup>, M. Perdicakis <sup>(2)</sup> et N. Prignon <sup>(3)</sup>

(1) CREGU, BP 23, 54501 Vandoeuvre lès Nancy Cédex. [Chinh.Nguyentrung@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:Chinh.Nguyentrung@g2r.uhp-nancy.fr),

(2) LCPME, 405 rue de Vandoeuvre, 54600 Villers-lès-NANCY. [perdi@lcpme.cnrs-nancy.fr](mailto:perdi@lcpme.cnrs-nancy.fr)

(3) UHP Nancy1, UMR7566G2R, BP 239, 54506-Vandoeuvre-lès-Nancy Cédex.

Il est bien connu que l'ion uranyle (VI) forme des complexes aqueux les plus stables avec les deux ligands  $\text{OH}^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  (Guillaumont et al, 2003 ; Maya et Begun, 1981 ; Musikas, 1972 ; Nguyen-Trung et al, 1992) à température ambiante. La connaissance de leur comportement en milieu aqueux et en fonction de trois paramètres : pH, concentration en carbonate et température, est fondamentale aussi bien en métallogénie (solubilisation et transport de l'uranium (VI) par des fluides carbonatés) que dans la gestion des déchets radioactifs. A ce jour, il n'existe pratiquement aucune donnée valable sur les espèces hydrolysées et carbonatées d'uranyle (VI) en milieu basique et à température élevée.

Cette étude expérimentale a pour but de déterminer l'étendue des domaines de stabilité des complexes de carbonates d'uranyle (VI) par rapport aux espèces hydrolysées d'uranyle (VI) en fonction du pH, de la concentration du carbonate et de la température à l'aide de la spectrométrie vibrationnelle (Raman et FTIR ATR) et optique (UV-visible). Les mesures en spectrométrie Raman à haute température ont été effectuées à l'aide d'un porte échantillon chauffant développé à cet effet. Les expériences ont été réalisées sur 5 solutions d'hydroxyde d'uranyle (VI) en milieu de base organique, tétraméthyl ammonium hydroxyde (TMAOH) et 55 solutions de carbonate d'uranyle (VI) ( $10^{-3}$  M –  $10^{-2}$  M) contenant des teneurs en carbonate dissous variables ( $10^{-4}$  M –  $10^{-1}$  M) avec un rapport molaire  $(\text{CO}_3)_{\text{total}}/(\text{U(VI)})_{\text{total}}$  compris entre 0.01 et 100, en milieu basique (pH = 8,1 – 14,1)

Les mesures en spectrométrie optique (Raman, ATR FTIR, UV-visible) des solutions de carbonate d'uranyle (VI) (0,0075M – 0,01M) avec un rapport molaire  $(\text{CO}_3)_{\text{total}}/(\text{U(VI)})_{\text{total}}$  compris entre 10 et 80, en milieu basique (pH = 8,1 – 14,1) ont permis d'obtenir quatre principaux résultats :

1- Quatre espèces de carbonate d'uranyle (VI) caractérisées par quatre bandes Raman à 740, 792, 819 et 852  $\text{cm}^{-1}$  ont été détectées dans un domaine de pH compris entre 8,1 et 11,4. La bande la plus intense est localisée à 819  $\text{cm}^{-1}$  et correspond à l'élongation symétrique ( $\nu_1$ ) de l'espèce majeure  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ .

2- Les mesures en FTIR ATR complètent les mesures en Raman sur les mêmes échantillons et ont permis de détecter une seule bande majeure et distincte à 890  $\text{cm}^{-1}$  et correspondant à l'élongation antisymétrique ( $\nu_3$ ) de l'espèce majeure  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ .

3- Les carbonates d'uranyle (VI) dont l'espèce prédominante  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  absorbent plutôt dans le visible avec trois bandes distinctes à 435, 448 et 461 nm. L'écart entre les deux bandes

4- Les carbonates d'uranyle (VI) y compris l'espèce majeure  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  sont stables dans un domaine de pH compris entre 8.1 et 12.6.

5- L'espèce majeure  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  est stable jusqu'à 100°C. La valeur de son élongation symétrique caractéristique ( $\nu_1$ ) reste constante (819  $\text{cm}^{-1}$ ) entre 25 et 100°C.

Tous ces résultats constituent une base de données de référence qui peut être utilisée comme un guide utile dans la détermination formules chimiques des carbonates d'uranyle (VI) ainsi que leur constante de formation (log K) à l'aide des titrations potentiométriques.

### **Références**

Guillaumont R., Fanghänel T., Fuger J., Grenthe I., Neck V., Palmer D. A., Rand M. H. **2003** *Update on the Chemical Thermodynamics of U, Np, Pu, Am and Tc* (Elsevier), 919 p.

Maya L., Begun G. M. **1981** *J. Inorg. Nucl. Chem.* 43, 2827-2832

Muskas C. **1972** *Radiochem. Radioanal. Lett.* 11 (5), 307-316

Nguyen-Trung C., Begun G.M., Palmer D. **1992** *Inorg. Chem.* 31, 5280-5287.

## **Nature et signification du contact entre le complexe gneissique Abbabis et les séquences métasédimentaires dans la ceinture orogénique du Damara.**

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

\*Nancy Université, UMR G2R 7566 CNRS-CREGU, BP 70239–54 506 Vandoeuvre Cedex, France.

Wilfried.toe@g2r.uhp-nancy.fr

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

La ceinture orogénique Protérozoïque du Damara sépare les cratons Archéens du Congo et du Kalahari et s'est formée au cours de l'épisode Panafricain ( $\sim 0,5 \pm 0,1$  Ga) de l'assemblage du supercontinent Gondwana [1]. Le Damara comprend des séquences métasédimentaires, des complexes gneissiques et des granitiques intrusifs [2]. La séquence métasédimentaire, néoprotérozoïque, est composée de bas en haut [3] par le Groupe Nosib (formations Etusis et Khan) avec des âges stratigraphiques compris entre 850 et 800 Ma et le Groupe Swakop (formations de Rössing, Chuos, Karibib et Kuiseb) avec des âges relatifs de 800 à 650 Ma [4]. Ces métasédiments représenteraient des dépôts de plate-forme et rift [2]. Les complexes gneissiques présentent des âges paléoprotérozoïques (2,0 à 1,65 Ga [4]) à mésoprotérozoïque (1.1 Ga ; U/Pb sur zircons [5]) et sont interprétés comme étant la marge remobilisée du craton du Congo. Par conséquent, le contact entre les complexes de gneiss et de la séquence métasédimentaire est interprété comme un contact socle/couverture en discordance [2].

Nous avons effectué une coupe transversale le long de la rivière Swakop, dans la Southern Central Zone du Damara, afin de contraindre davantage la nature du contact entre les séquences métasédimentaires et l'un des complexes gneissiques, à savoir le Complexe Gneissique de l'Abbabis (CGA). Ces roches ont été affectées par la fusion partielle dans le faciès des amphibolites attestée par des leucosomes à cordiérite et grenat. Le CGA consiste en des migmatites granitiques, appelés Diatexites avec de grandes portions de paragneiss, amphibolites et orthogneiss. Le contact entre la séquence métasédimentaire et le CGA correspond à la transition entre métatexite et diatexites. Ces observations appellent une réévaluation de l'interprétation du complexe Abbabis dans le cadre du socle du craton du Congo impliqué dans la ceinture orogénique du Damara. En effet, ce complexe pourrait simplement représenter l'équivalent de la couverture métasédimentaire, mais ayant été plus transformée à la suite de la fusion partielle.

Afin de tester cette hypothèse, nous effectuons une étude U / Pb en utilisant la sonde ionique au CRPG (Nancy-Université) sur les populations de zircon à partir de trois échantillons:

(1) Un paragneiss de la Rietfontain Gamsberg Suite (ferme Gauchab) dans la Zone de Marge Cratonique du Kalahari (Southern Marginal Zone)

(2) Un granite à cordiérite intrusif dans la formation Chuos du Damara (Goanikontès).

(3) Un orthogneiss dans le CGA (rivière Swakop).

Au-delà de leurs implications en termes de géologie régionale, ces résultats contribuent au débat sur les mécanismes de la croissance de la croûte / remobilisation associés aux orogénèses du Protérozoïque. L'interprétation du complexe Abbabis dans le cadre du socle du craton du Congo implique que la ceinture de Damara s'est surtout développée au détriment des marges des cratons et qu'il correspond à un orogène intracratonique avec remobilisation des cratons voisins. Par ailleurs, si le complexe Abbabis est équivalent au reste de la séquence métasédimentaire de la ceinture de Damara, il ouvre la possibilité pour l'élaboration d'un modèle géodynamique de la formation de la ceinture du Damara en termes actualistes, à savoir qu'il s'est formé en tant que conséquence de la fermeture d'un bassin océanique.

### **Références**

- [1] Meert, J.G., and Van der Voo, R., 1997, The assembly of Gondwana 800–550 Ma: Journal of Geodynamics, v. 23, p. 223–235.
- [2] 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.
- [3] Jacob, R.E., Corner, B., Brynard, H.J., 1986, The regional geological and structural setting of the uraniferous granitic provinces of southern Africa.: In: Annhauser, C.R., Maske, S. (Eds.), Mineral Deposits of Southern Africa. Geological Society of South Africa II, p. 1807-1818.
- [4] Geological Map of Namibia. 1/250 000. Sheet 2214 – Walvis Bay.1995. Geological surveys of Namibia en Finland.
- [5] Kroner, A., Retief, E.A., Compston, W., Jacob, R.E., and Burger, A.J., 1991, Single-grain and conventional zircon dating of remobilized basement gneisses in the central Damara belt of Namibia: South African Journal of Geology, v. 94, p. 379-387.

## Potentiel métallogénique des ceintures orogéniques Proterozoïques accrétées aux cratons archéens: l'orogène du Damara/Lufilien (Namibie et Zambie).

Aurélien Eglinger\* ; Wilfried Toé\* ; Anne-Sylvie André-Mayer\* ; Olivier Vanderhaeghe\* ; Jean-Louis Feybesse\*\* ; Jean-Pierre Milési\*\* ; Thinus Jordaan\*\*\*

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

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

\*\*\* AREVA – South Africa.

Les ceintures orogéniques protérozoïques du Damara/Lufilien, respectivement en Namibie et en Zambie, seraient le résultat de l'assemblage du supercontinent Gondwana [1] d'âge Pan-Africain ( $\sim 0,5 \pm 0,1$  Ga) et portent une grande variété de gisements d'uranium. La fusion partielle de métasédiments silicoclastiques (plate-forme épicontinentale) déposés entre 850 et 700 Ma est censée être la principale source de la dotation en uranium [2]. Ce processus est localement accompagné d'une activité hydrothermale conduisant à une plus grande concentration d'uranium [3].

L'objectif de ce projet est de replacer les processus associés à la mobilisation, au transport et au dépôt des métaux en général et l'Uranium et le Thorium en particulier dans leur cadre géodynamique à la transition Archéen-Protérozoïque en relation avec la croissance, la remobilisation et le recyclage de la croûte continentale. Deux modèles sont envisagés :

**(1) Une extraction précoce** de la croûte continentale des éléments incompatibles tels que l'Uranium et le Thorium lors de la différenciation initiale de la Terre primitive [4], [5], [6]. Ce stock initial est ensuite remobilisé en relation avec les processus de surface et les processus métamorphiques, métasomatiques et magmatiques lors d'orogénèses successives ou recyclé dans le manteau dans les zones de convergence de plaques;

**(2) Une extraction progressive** de la croûte continentale de l'Uranium et du Thorium dans les zones de convergence de plaques par fusion partielle de la plaque plongeante (basaltes +/- sédiments) et du manteau supra-subduction [7]. Dans ce cas également, la croûte continentale juvénile est susceptible d'être affectée par remobilisation ou recyclage.

Caractériser les sources possibles des granites porteurs d'uranium nous a conduits aux questionnements de second ordre suivants dans le cas du Damara: (A) **Source mantellique** : l'uranium serait rapporté par des magmas juvéniles provenant du manteau? Apparemment non, car aucun des granitoïdes minéralisés n'a une signature peralcaline et leurs spectres de terres rares sont plus concordants avec une formation avec la croûte continentale supérieure [7]. (B) **Source crustale** : l'uranium pourrait être fourni par la remobilisation de sédiments cratoniques dans un paléo-bassin? Étant donné que la plupart des granites ont des signatures de type Collision (COLG, [8]) et que le Damara a subi un cycle géodynamique complet [9] il pourrait s'agir d'une origine possible de la concentration d'uranium. Les données isotopiques de Sr, Nd, Pb pourraient aider à clarifier la question. (C) **Sources mixtes** : l'uranium pourrait être fourni par un recyclage des marges cratoniques et/ou le recyclage des sédiments issus de cratons par subduction dans le manteau?

Les observations de terrain (transect à grande échelle dans les ceintures du Damara et du Lufilien), les études pétrologiques (microscopie, MEB et microsonde électronique), géochimiques (roches totales, éléments majeurs et traces, et des isotopes radiogéniques) et géochronologiques (U-SHRIMP sur zircons) et leur compilation SIG seront présentées. Ces nouvelles données seront examinées à la lumière des études antérieures sur cet orogène.

[1] Meert, J.G., and Van der Voo, R., 1997, The assembly of Gondwana 800–550 Ma: *Journal of Geodynamics*, v. 23, p. 223–235.

[2] Coney, M. Evolution of Uranium Fractionation Processes through Time: Driving the Secular Variation of Uranium Deposit Types. *Economic Geology*, v. 105, pp. 553–569

[3] Basson, I.J., and Greenway, G., 2004, The Rössing uranium deposit: A product of late-kinematic localization of uraniferous granites in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia: *Journal of African Earth Sciences*, v. 38, p. 413–435.

[4] Armstrong, R.L. 1968. A Model for the Evolution of Strontium and Lead Isotopes in a Dynamic Earth. *Rev. Geophys.*, 6: 175

[5] Fyfe, W.S. 1978. The evolution of Earth's crust: modern plate tectonics to ancient hot spot tectonics? *Chem. Geol.*, 23: 89–114.

[6] Reymer, A. and Schubert, G. 1986. Rapid growth of some major segments of continental crust. *Geology*, 14: 299–302.

[7] Taylor S. R., McLennan S.M., 1985, *The continental crust: its composition and evolution.*, Blackwell, Oxford.

[8] Pearce J.A., H.N.B.W., Tindle A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks.: *Journal of Petrology*, v. 25, p. 956–983.

[9] Kasch, K.W., 1983d, Continental collision, suture progradation and thermal relaxation: A plate tectonic model for the Damara orogen in central Namibia.: *Spec. Publ. geol. Soc. S. Afr.*, v. 11, p. 423–429.

## **Contribution of the Geological Exploration to the development of the KATCO ISR mine (Chu-Sarysu basin, Kazakhstan)**

Sébastien Hocquet, Patrick Ledru, Viktoriya Selezneva

KATCO, 282 Dostyk Av., 050000 Almaty, KAZAKHSTAN

[Sebastien.hocquet@areva.com](mailto:Sebastien.hocquet@areva.com), [viktoriya.selezneva@areva.com](mailto:viktoriya.selezneva@areva.com), [patrick.ledru@areva.com](mailto:patrick.ledru@areva.com)

The Moynkum uranium deposit, South Kazakhstan, is being mined since 2005 by KATCO, joint-venture between Kazatomprom and Areva. This typical roll-front type deposit is exploited by In-Situ Recovery process, favoured by highly permeable host rocks. KATCO is in process of increasing its production up to 4000t of Uranium per year from 2012. To reach this objective, well fields and plant capacities have been developed. However, in order to maintain this production level on a medium and long term perspectives, the contribution of the Geological Exploration is crucial. The roll-front-type deposit of Moynkum, hosted within 3 main Paleogene permeable-sand horizons (from bottom to top the Kanjugan, Uyuk and Ikansk horizons), has been discovered in 1972. The redox fronts extend over 70 kilometres from few to hundred of meters large and several meters thickness, located at depth between 250 to more than 500m within mainly permeable sands confined between thick impermeable clay screens.

During the successive stages of exploration, resources have been calculated and progressively better characterized. Updated resources reach more than 100 000t of Uranium all categories merged that represents a world-class deposit. However, since the degree of confidence varies drastically from one to another category, this evaluation includes a high degree uncertainty and doesn't represent in any case geological reserves.

Taking into account the estimated potential of more than 100 000t Uranium for the Moynkum deposit, the target of increasing KATCO production up to 4000t Uranium for a long period looks realistic. But actually, simulation based on present-day classified resources in B (100x50m grid), C1 (200x50m grid) and C2 (400 or 800x50m grid) shows that a 4000tU production per year is possible only until 2017, thus enhancing the need for huge effort in exploration programs.

Since 2001, KATCO performed 825 000m of exploration drilling. A first detailed exploration report presented in 2004 has given significant increase of the known resources and reserves that have been approved by the competent authorities. The detailed exploration of the northern part of the deposit, Tortkuduk field, is almost completed, while the central part of the deposit, Moynkum Centre North field, is still only defined in prognostic resources. Additional 800 000m have to be drilled in the next 3 years in order to estimate the Uranium potential of the Central field and transform it into mineable reserves.

Testing the delineated orebody by In Situ Recovery test cells will finally enable to fix the different technico-economical parameters that will feed the pre-feasibility and feasibility studies and the definition of Reserves (C1 + B + A) of Moynkum Centre North field.

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

Georges Vendryes

[vendryes.georges@wanadoo.fr](mailto:vendryes.georges@wanadoo.fr)

Il est frappant que deux événements uniques dans l'histoire de notre planète se soient produits au même endroit de la croûte terrestre et à des époques très voisines à l'échelle géologique, voilà 2 milliards d'années.

Il s'agit d'une part des réacteurs nucléaires naturels qui ont été mis en évidence en 1972 à Oklo au Gabon, dans un gisement d'uranium occupant le sommet de la formation de grès FA à la base du groupe paléoproterozoïque qualifié de Francevillien. D'autre part de la découverte récente par le laboratoire Hydrasa de l'université de Poitiers de fossiles d'organismes multicellulaires dans une carrière située à 30 km d'Oklo, dans la formation d'argiles FB surmontant FA.

L'étude des réacteurs naturels d'Oklo avait déjà montré que les matières organiques résultant de la décomposition des organismes vivants de l'époque étaient omniprésentes dans le gisement d'uranium. Mais cela va bien au-delà d'une simple cohabitation. La genèse même du gisement résulte de l'imbrication d'une série de phénomènes d'ordre physique, chimique et biologique dans un cadre géologique évolutif, où la tectonique a joué un rôle majeur.

Dans un tel contexte d'interactions réciproques la présence, pour la première fois dans l'histoire de la terre, de sources radioactives intenses et concentrées aurait-elle pu provoquer sur les organismes unicellulaires existant à l'époque des effets susceptibles de conduire à la formation d'organismes multicellulaires ?

Il semble établi que les réacteurs eux-mêmes n'ont pu jouer aucun rôle à cet égard, ne serait-ce que pour des raisons de chronologie. En revanche, avant que soient réunies les conditions géochimiques qui ont permis le dépôt de l'uranium dissous dans les eaux, les organismes unicellulaires marins qui se trouvaient à son contact ont été soumis directement aux effets de sa radioactivité. Cette situation a pu durer longtemps et il est plausible qu'elle ait eu lieu à l'époque même où se sont formés les organismes multicellulaires récemment découverts. La question se pose d'un éventuel lien de cause à effet entre les deux faits.

A ce stade il ne s'agit que d'une hypothèse qu'il convient de prendre avec une grande prudence. Pour la soumettre à une épreuve scientifique on peut imaginer une série d'enquêtes et d'expériences. Il me semble qu'il y a là un domaine de recherches intéressant, et que la France est bien placée pour l'explorer.

## **Signature géochimique de différentes phases minérales obtenue par ablation laser ICP-MS (éléments en traces et Terres Rares) : Application aux gisements d'Uranium**

Philippe Lach\*, Jean Dubessy\*, Michel Cuney\*, Julien Mercadier\*, Marie-Christine Boiron\*, Marc Brouand\*\*

\*G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes B.P. 239, F-54506, Vandoeuvre-lès-Nancy, France. [Philippe.lach@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:Philippe.lach@g2r.uhp-nancy.fr)

\*\* AREVA, BU Mines, Tour Areva, 1, Place Jean Millier – 92084 Paris La Défense Cedex. [marc.brouand@areva.com](mailto:marc.brouand@areva.com)

Il a été montré au cours des dernières années que chaque type de minéralisation uranifère était caractérisé par un spectre de Terres rares particulier (Fryer et al. 1987, Pagel et al. 1987, Bonhoure et al. 2007). Parmi les différents systèmes d'analyses ponctuelles disponibles, l'ablation laser couplée à un spectromètre de masse (LA-ICP-MS) est un très bon candidat pour une analyse rapide et précise des terres rares. Les concentrations d'une large gamme d'éléments (de la masse atomique 7 Li à la masse atomique 238 U) peuvent être obtenues en quelques minutes à partir d'une simple section de roche polie avec des limites de détection de l'ordre du ppm pour les éléments des terres rares.

Le système LA-ICP-MS installé dans les locaux du G2R permet de réaliser des analyses ponctuelles de diamètre ajustable de 5 à 160µm. Le calibrage se fait par l'intermédiaire d'un standard externe (Nist 610) de composition parfaitement connue. La quantification nécessite également de connaître la concentration en un élément majeur de l'échantillon, obtenu par sonde électronique, utilisé alors comme standard interne.

Afin de valider cette méthode, une série d'analyse a été réalisée sur des oxydes d'uranium de composition en terres rares connue, obtenue à la fois par méthode ponctuelle (SIMS, CRPG) et globale (ICP-MS, IGEM). Les spectres réalisés par LA-ICP-MS sur une uraninite standard de Mistamisk sont comparables (erreur de l'ordre de 15%) aux spectres obtenus par les autres techniques. La même étude a été effectuée sur des oxydes d'uranium en provenance des gisements de type discordance (Saskatchewan, Canada) et montre des résultats tout à fait similaire aux études précédentes (Bonhoure et al. 2007). L'aspect ponctuel permet de choisir avec précision les zones bien caractérisées d'un point de vue pétrographique lors de l'étude de minéraux qui peuvent avoir une histoire complexe (plusieurs stades de croissances, altérations localisées par exemple)

Suite à cette validation, plusieurs oxydes d'uranium en provenance du monde entier (Kazakhstan ou Niger par exemple) ont été analysés pour mettre en évidence la discrimination des gisements par le comportement des terres rares (Mercadier et al. 2010, ce volume).

La technique est en cours d'application pour l'analyse d'autres minéraux communs au gisement d'uranium, telles que les carnotites, ou les tourmalines. De plus, la ponctualité du système LA-ICP-MS permet d'atteindre le contenu d'inclusions fluides piégées dans les minéraux (Richard et al. 2010, ce volume), et permettrait à terme, d'établir un lien entre la source de l'uranium, le fluide de transport et les conditions de dépôt des minéralisations.

### Références

- 
- Bonhoure et al, 2007. *Geostandard and Geoanalysis Research*. 31, 3, 209-225  
Fryer B.J. and Taylor R.P. (1987). *Chemical Geology*. 63, 101-108.  
Pagel et al. 1987. *Mineral Deposit*, 27, 81-85.

## **Le rôle des fluides et de l'irradiation dans des assemblages complexes d'euxénites-zircons de pegmatite de Norvège et les conséquences en géochronologie U-Pb**

C. Duran\*, A.M. Seydoux-Guillaume\*, B. Bingen\*\*, Ph. de Parseval\*, D. Guillaume\*, V. Bosse\*\*\*, J.L. Paquette\*\*\* et J. Ingrin\*.

\* LMTG, CNRS-UPS-IRD, Université de Toulouse, 14 av E. Belin, 31400 Toulouse, France.

\*\* NGU, Leiv Eirikssons vei 39, 7491 Trondheim, Norway.

\*\*\* LMV, Université Blaise Pascal, 5 rue Kessler, 63000 Clermont-Ferrand

Dans la plupart des roches, l'uranium et le thorium sont concentrés dans quelques minéraux qui offrent des sites cristallographiques favorables comme le zircon, la monazite, le sphène, et plus rarement l'urano-thorianite, la thorite/huttonite, la coffinite, l'euxénite, etc... Ces minéraux sont soumis à une intense auto-irradiation qui peut les rendre métamictes. Ils modifient également leur environnement en irradiant les minéraux hôtes.

Dans l'étude présentée ici (Duran et al., 2010), nous nous sommes focalisés sur des minéraux accessoires (zircons, monazites, euxénites, xénotimes), de pegmatites du sud de la Norvège (Iveland-Evje); certains de ces minéraux sont très riches en U (euxénites-jusqu'à 15wt.%). Une paragenèse complexe à zircon + euxénite + monazite + xénotime a été étudiée en détail par des méthodes multiples de microscopie (optique et électronique) et de géochronologie U-Pb (SIMS et LA-ICP-MS); le but étant de mettre en relation les observations texturales et le signal géochronologique de ces minéraux.

L'ensemble de nos observations montre que des relations complexes existent entre les différents minéraux (notamment zircons-euxénites) et les différents processus (altération par les fluides et effets d'irradiation) qui ont des répercussions sur la réponse géochronologique U-Pb. L'irradiation (auto et ext), détruit les réseaux cristallins (amorphisation) favorisant l'altération des phases plus ou moins amorphes (par des mécanismes de diffusion-réaction ou de dissolution-précipitation, selon les minéraux). L'amorphisation induit également une augmentation de volume, responsable de la formation de fractures, connectées entre elles en réseau de fractures dans l'ensemble de la roche. Cette fracturation, en permettant la circulation de fluides, favorise les recristallisations et les remobilisations d'éléments (ex: enrichissements en Ca, incorporation de OH dans les zones altérées des euxénites et zircons, pertes de Pb, incorporations de Pb précipitant sous forme de galène...). L'ensemble de ces processus a des répercussions importantes sur le signal géochronologique obtenu. Les analyses réalisées dans les zones altérées de ces différents minéraux donnent des âges discordants avec des pertes de Pb et/ou des incorporations de Pb commun et perturbent donc fortement l'information géochronologique.

Références: Duran, C., Seydoux-Guillaume, AM., Bingen, B., De Parseval, P., and Ingrin, J. (2010). Fluid-mediated re-equilibration and self-irradiation of euxenite-zircon assemblage in pegmatites, South Norway. IMA 2010.

---

## **Modélisation mécanique de la rupture autour des minéraux métamictes**

Jean-Marc Montel\*, Richard Giot\*\*, Fanny Maucotel\*\*\*, Stéphanie Hubert\*\*\*

\* ENSG-G2R, Nancy Université, CNRS. jean-marc.montel@ensg.inpl-nancy.fr

\*\* ENSG-LAEGO, Nancy Université. richard.giot@ensg.inpl-nancy.fr

\*\*\* ENSG, Rue du Doyen Marcel Roubault, 54501 Vandœuvre Cedex

Le gonflement des minéraux uranifère et thorifères du à l'auto-irradiation peut entraîner le développement de fracture, en général radiales dans les minéraux-hôtes. Nous avons examiné l'importance des paramètres mécaniques des minéraux à partir d'un un modèle simple de gonflement d'un minéral confiné dans un autre. Le modèle est constitué de deux minéraux sphériques emboîtés, parfaitement élastiques et isotropes. Les paramètres sont : les rayons de sphères, les modules d'incompressibilité et de cisaillement des minéraux, la pression de confinement, le gonflement relatif du minéral interne.

Le gonflement du minéral interne est absorbé conjointement par l'élasticité des deux minéraux. Le champ de contrainte engendré par le gonflement comporte une composante normale et une composante tangentielle. Le déplacement est maximal à l'interface des deux minéraux. Le long de cette interface se développe une contrainte radiale compressive maximale et une contrainte tangentielle en tension également maximale. Ces deux contraintes peuvent entraîner la formation de fractures radiales.

Des applications numériques, à partir des données de la littérature, permettent d'évaluer l'importance des différents paramètres. Pour des conditions réalistes (zircon métamictes de 200  $\mu\text{m}$  gonflé de 1% dans un quartz de 1 mm), il se développe, le long de l'interface, une contrainte différentielle qui atteint 600 MPa, très nettement supérieure à la limite de rupture. Le paramètre le plus important est le taux de gonflement, est pratiquement proportionnel à la contrainte maximale. La pression de confinement n'a aucune influence, la taille des grains est un paramètre mineur. Parmi les paramètres élastiques des minéraux, le module d'incompressibilité du minéral interne et le module de cisaillement du minéral hôte sont les plus importants. Ce modèle très simple peut être amélioré en tenant compte de l'anisotropie des minéraux, que ce soit l'anisotropie de gonflement du minéral métamictes ou celle du minéral-hôte. La principale difficulté est l'absence, pour la plupart des minéraux radioactifs, des paramètres élastiques à des degrés divers de gonflement et de métamictisation.

### Référence :

J.K.W. Lee, J.Tromp (1995) Self-induced fracture generation in zircon J. Geophys. Res. Vol. 100 17753-17770(1995)

## La diffusion de l'hélium dans l'apatite: Effet des dommages causés par recul alpha

Cécile Gautheron<sup>1</sup>, Laurent Tassan-Got<sup>2</sup>, Maurice Pagel<sup>1</sup> et Jocelyn Barbarand<sup>1</sup>

1 UMR IDES – CNRS 8148 Université Paris sud

2 IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub> Université Paris sud

Dans les échantillons géologiques, l'hélium produit par la décroissance radioactive de l'U, Th et de ses descendants s'accumule. La mesure des concentrations en U-Th et He permet de déterminer une date. Cependant, l'hélium diffuse des cristaux dans lesquels il est produit, et cette diffusion est fonction de la température et du domaine de diffusion (grain). Une date (U-Th)/He reflétera alors l'accumulation et la diffusion de l'He lors du chemin temps-température du grain. De plus, des études récentes (Shuster et al., 2006 ; Flowers et al., 2009 et Gautheron et al., 2009) ont montré des corrélations entre la date et la concentration en U-Th et ont proposé que la diffusion de l'hélium était influencée par les dommages causés par le recul alpha dans les séries de l'U et du Th. Les âges obtenus sur des échantillons ayant des concentrations en eU (U+0.24Th) variables sont aussi très variables comme illustré dans la figure 1.

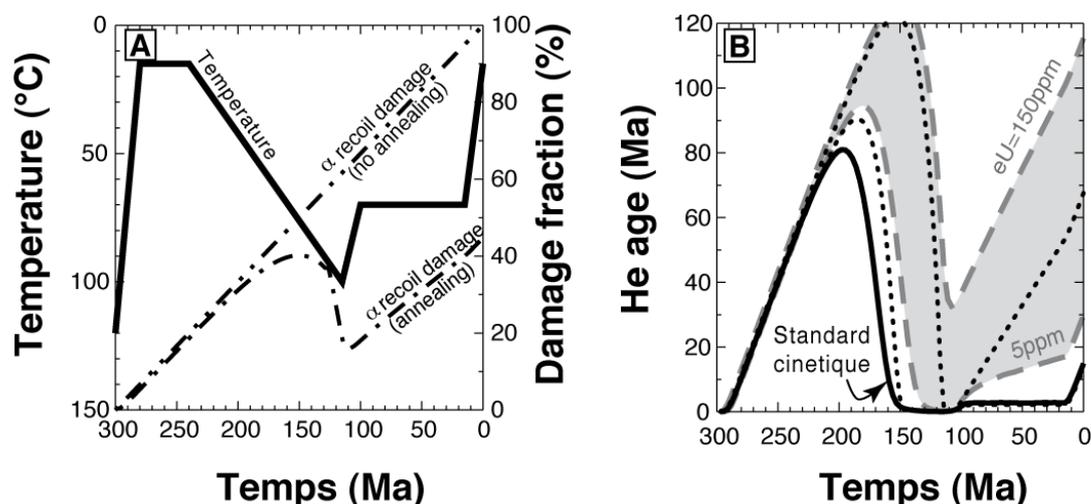


Figure 1 : A- Formation des défauts et leurs cicatrises pour l'histoire thermique donnée, B- Age (U-Th)/He pour cette même histoire et effet de la concentration en eU (U+0.24Th). La cinétique standard ne prend pas en compte les défauts (Farley, 2000).

Cependant, le rôle de ces défauts, leur cicatrisation, et leur influence sur la diffusion de l'He ne sont pas complètement compris. Des modèles de production des défauts prédisent (Flowers et al., 2009 et Gautheron et al., 2009) une production linéaire ou cubique et sans relation avec un phénomène physique de création des défauts pour cette dernière. De plus, le rôle des dommages dus à la fission de l'U doit être exploré. La compréhension des effets de ces différents paramètres sur la diffusion est indispensable à l'interprétation des dates obtenues.

Farley, K.A., 2000. Helium diffusion from apatite: general behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *J. Geophys. Res.*, 105: 2903-2914.

Flowers, R., Ketcham, R.A., Shuster, D. and Farley, K.A., 2009. Apatite (U-Th)/He thermochronology using a radiation damage accumulation and annealing model. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73: 2347-2365.

Gautheron, C.E., Tassan-got, L., Barbarand, J. and Pagel, M., 2009. Effect of alpha-damage annealing on apatite (U-Th)/He thermochronology. *Chemical Geology*, 266: 166-179.

Shuster, D., Flowers, R. and Farley, K.A., 2006. The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 249: 148-161.

## Les spectres de terres rares dans les oxydes d'uranium: un marqueur des types de gisements d'uranium

Julien Mercadier\*, Michel Cuney\*, Marie-Christine Boiron\*, Philippe Lach\*,  
Jessica Bonhoure\*, Mathieu Leisen\*, Philippe Kister\*

\*G2R, Nancy-Université, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes B.P. 239, F-54506,  
Vandoeuvre-lès-Nancy, France. [julien.mercadier@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:julien.mercadier@g2r.uhp-nancy.fr)

La métallogénie de l'uranium est spécifiquement caractérisée par une extrême diversité de gisements fonction des différentes conditions de formation pour lesquelles ce métal peut être déposé dans les environnements géologiques (Cuney, 2009). Les oxydes d'uranium, minéraux d'uranium les plus communs dans les occurrences uranifères, incorporent des quantités variables d'éléments traces (dont les éléments de terres rares) durant leur cristallisation, possiblement dépendantes de la diversité des conditions physico-chimiques au moment de leur formation. De ce fait les éléments de terres rares peuvent être un marqueur efficace des types de gisement. Des études pionnières de mesure des teneurs en terres rares dans les oxydes d'uranium (Fryer et Taylor, 1987 et Pagel et al. 1987 notamment), bien que prometteuses, ont été limitées par le petit nombre de gisements considérés, les limitations des techniques d'analyse et l'absence de contraintes génétiques pour les gisements étudiés.

Des avancées décisives pour la mesure des éléments de terres rares dans les oxydes d'uranium ont été obtenues par le développement d'analyse par microsonde ionique (Bonhoure et al. 2007). Nous présentons ici de nouveaux résultats obtenus par sonde ionique et ablation laser couplée à un spectromètre de masse (voir résumé de P.Lach dans ce volume) sur dix-huit occurrences mondiales couvrant six types majeurs de gisements d'uranium. Pour chaque échantillon, une sélection drastique des zones analysées a permis d'obtenir la signature initiale en terres rares des oxydes d'uranium.

Chaque type de gisement est remarquablement caractérisé par un spectre de terres rares spécifique, quels que soient l'âge et la localisation géographique des gisements du type considéré. Des interprétations préliminaires peuvent être proposées quant à l'origine des abondances en terres rares observées impliquant quatre contrôles majeurs: la température, la source des terres rares, la salinité des fluides pour les minéralisations hydrothermales et les minéraux porteurs de terres rares co-génétiques des oxydes d'uranium. Ainsi les éléments de terres rares, du fait de leur incorporation différentielle en fonction des conditions physico-chimiques, apportent des informations clés pour la compréhension de la genèse des gisements d'uranium.

### Références

---

- Bonhoure, J., Kister, P., Cuney, M., and Deloule, E. (2007) Methodology for rare earth element determinations of uranium oxides by ion microprobe, *Geostandards and Geoanalytical Research*, **31**, 209-225.
- Cuney, M., (2009) The extreme diversity of uranium deposits, *Mineralium Deposita*, **44**, p. 3-9.
- Fryer, B. J., and Taylor, R. P. (1987) Rare earth elements distributions in uraninites: implications for ore genesis, *Chemical Geology*, **63**, 101-108.
- Pagel, M., Pinte, G., and Rotach-Toulhoat, N. (1987) The rare earth elements in natural uranium oxides, *Monograph Series on Mineral Deposits*, **27**, 81-85.

## **Les terres rares : traceurs du comportement de l'uranium lors de l'altération hydrothermale sulfatée acide (exemple de la Guadeloupe)**

Anne Salaün<sup>\* \*\*</sup>, Benoît Villemant<sup>\* \*\*</sup>, Martine Gérard<sup>\*\*</sup>, Jean-Christophe Komorowski<sup>\*\*</sup>, Agnès Michel<sup>\*\*</sup>

\*UPMC, Université Paris 06, IsTeP, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France. [salaun@ipgp.fr](mailto:salaun@ipgp.fr)

\*\* Equipe Géologie des Systèmes Volcaniques, IPGP, Sorbonne Paris Cité, CNRS (UMR 7154), 1 rue Jussieu, 75238 Paris Cedex 05, France.

\*\*\* IRD, UMR 161 CEREGE, IMPMC, 140 rue Lourmel, 75015 Paris, France.

L'activité hydrothermale joue un rôle majeur dans les systèmes volcaniques. Son développement et sa distribution au sein de l'édifice volcanique sont déterminants dans l'activité volcanique explosive (interaction eau-magma-encaissant) et dans le déclenchement d'instabilité des édifices volcaniques.

Les volcans andésitiques comme ceux des Petites Antilles sont fréquemment le siège d'une activité hydrothermale intense produisant des nouveaux assemblages minéralogiques associés à une redistribution des éléments chimiques. Nous avons étudié l'activité hydrothermale du volcan La Découverte-La Soufrière de Guadeloupe pendant les derniers 50 000 ans à partir des matériaux hydrothermalisés collectés dans les dépôts de cendres volcaniques et dans 4 avalanches de débris résultant de déstabilisations de flanc, (étude des compositions des éléments traces).

La minéralogie de ces matériaux est caractérisée par une association smectite ± pyrite/jarosite ± gypse, typique de l'altération de sub-surface, par des fluides sulfatés acides à faible température. Les associations minéralogiques de plus hautes températures sont exceptionnelles ce qui indique que seules les parties superficielles du système hydrothermal ont été échantillonnées lors des effondrements de flancs ou des explosions phréatiques.

L'étude des éléments traces et en particulier des terres rares et des autres éléments incompatibles (U, Th, Hf, Zr), majoritairement concentrés dans les verres des magmas andésitiques, au cours de l'altération permet de suivre la transformation du verre volcanique en smectite. Cette transformation s'accompagne (1) d'une perte importante des éléments alcalins - alcalino-terreux et des éléments de transition 3d, (2) d'un fort appauvrissement en MREE et HREE et (3) d'une quasi-immobilité des éléments fortement incompatibles (Th, Zr, Hf et LREE). La distribution des terres rares dans les smectites présentant un spectre normalisé de forme sigmoïde est ainsi caractéristique du processus d'altération. Cette transformation s'accompagne aussi d'une variation significative du rapport U/Th ce qui offre l'opportunité de dater la fin de l'activité hydrothermale et de reconstruire l'évolution dans l'espace et dans le temps de l'activité hydrothermale au sein de l'édifice étudié.

## **Quel modèle métallogénique pour le trend Kiggavik-Andrew Lake ? Nunavut, Canada**

Thomas RIEGLER

Université de Poitiers, UMR6269, UFR SFA, Bât Sciences Naturelles, 40 Av. du Recteur Pineau  
86022, Poitiers Cedex. E-mail : tom\_riegler@hotmail.com

Le projet Kiggavik anciennement baptisé Lone Gull 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 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 pluridécamétriques. La gîtologie de ces gisements reste controversée, des différences notables existant avec les minéralisations de type discordance connues dans le bassin d'Athabasca 800km au SE. La réponse à ce questionnement repose en partie sur caractérisation de la minéralogie des altérations argileuses qui leur sont associées (texture, cristallographie, composition isotopique...). La nature et le rôle de la matière carbonée présente dans certaines zones minéralisées sera également à élucider. Les résultats des analyses de roches et de leurs constituants minéraux (composition chimique de roche totale, pétrographie, diffraction RX, concentration en défauts d'irradiation des minéraux argileux, datations isotopiques) seront obtenues à l'échelle du terrain pour être confrontés aux données de lithogéochimie et géologie structurale. Il conviendra ensuite de procéder à la comparaison des données acquises sur ces minéralisations avec celles déjà connues dans le bouclier Canadien. On peut déjà noter que les textures et les teneurs du minerai d'une part et les altérations d'autre part sont souvent macroscopiquement dissemblables de celles qu'il est possible d'observer dans minéralisations de socle du bassin d'Athabasca (Shea Creek par exemple).

## Mobilité de l'Uranium dans le système sud-Armoricain

Romain Tartèse\*, Philippe Boulvais\*, Marc Poujol\* et Eric Gloaguen\*\*

\*Université de Rennes 1, Géosciences, UMR CNRS 6118, Bât. 15 Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex. [romain.tartese@univ-rennes1.fr](mailto:romain.tartese@univ-rennes1.fr); [philippe.boulvais@univ-rennes1.fr](mailto:philippe.boulvais@univ-rennes1.fr); [marc.poujol@univ-rennes1.fr](mailto:marc.poujol@univ-rennes1.fr)

\*\*BRGM, Service Ressources Minérales REM, 3 avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans Cedex 2. [E.Gloaguen@brgm.fr](mailto:E.Gloaguen@brgm.fr)

Le système Varisque sud-Armoricain est composé de terrains métamorphiques variés, de leur couverture paléozoïque, d'intrusions granitiques, et d'un accident majeur qui a localisé d'importantes circulations de fluides. Vingt pourcent de l'uranium produit en France provient de cette région, mais les processus responsables de sa mobilisation restent mal contraints. Dans la chaîne Varisque, les gîtes uranifères sont essentiellement liés aux leucogranites peralumineux (Cuney, 2009). Dans le massif Armoricaïn, une étude récente a montré que l'uranium s'est concentré dans les liquides évolués (Fig. 1a ; Tartèse et Boulvais, 2010) et a permis de démontrer l'interaction du granite de Questembert avec des fluides à bas  $\delta^{18}\text{O}$ , responsables de la chute des teneurs en uranium dans les échantillons les plus différenciés (Fig. 1a).

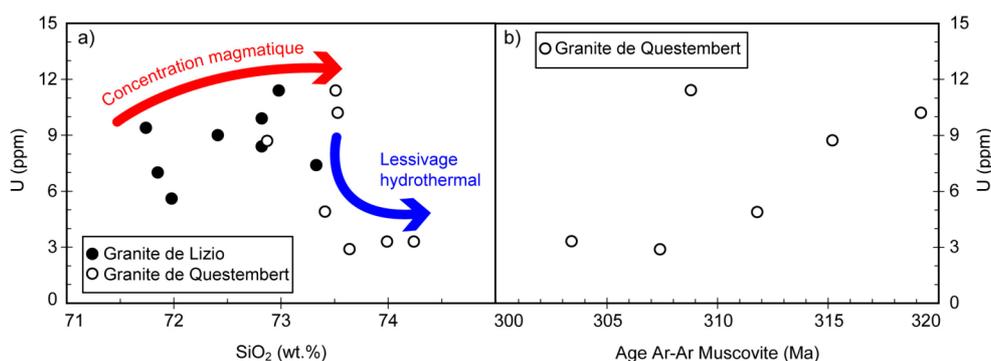


Figure 1 : a) U (ppm) vs. SiO<sub>2</sub> (wt.%) des granites de Lizio et Questembert. b) U (ppm) vs. âges <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar obtenus sur muscovite dans le granite de Questembert.

L'infiltration d'eau météorique oxydante est un moyen efficace de lessiver l'uranium des roches hôtes. Dans le domaine sud-Armoricain, une étude sur les veines de quartz a permis de mettre en évidence cette infiltration à l'échelle régionale (Lemarchand et al., soumis). De plus, les mylonites qui jalonnent le cisaillement sud-Armoricain enregistrent aussi ce phénomène. Elles ont fait l'objet de datations U-Pb sur zircon et monazite, permettant de dater l'infiltration météorique vers 300 Ma (Tartèse et al., 2010). Dans le granite de Questembert, les âges <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar des muscovites s'évalent entre 320 et 300 Ma et on remarque que la chute de la teneur en uranium est corrélée avec le rajeunissement des âges (Fig. 1b ; Tartèse et al., soumis). Dans le système sud-Armoricain, il semble donc que l'uranium, pré-concentré dans les granites évolués, a été mobilisé vers 300 Ma du fait de circulations hydrothermales. A cette période, l'effondrement de la chaîne et l'exhumation des unités profondes ont fourni la chaleur nécessaire à l'activation des circulations hydrothermales.

### Références

- Cuney, M., The extreme diversity of uranium deposits. *Miner. Deposita* **44**, 3-9 (2009).
- Lemarchand, J. et al., Giant quartz veins in the South Armorican Shear Zone, soumis au *J. Geol. Soc. London*.
- Tartèse, R. et Boulvais, P., Differentiation of peraluminous leucogranites "en route" to the surface, *Lithos* **114**, 353-368 (2010).
- Tartèse, R. et al., Synchronous resetting of the K-Ar and U-Pb geochronometers: a story of fluids, soumis à *Geology*.
- Tartèse, R. et al., Meteoric water infiltration in the Variscan crust during the orogenic collapse: O isotope characterization and U-Th-Pb dating along the South Armorican shear zone. RST Bordeaux, France (2010).

## Uranium Clusters: Models for Environmentally Relevant Species

Marinella Mazzanti, Victor Mougel, Gregory Nocton, Biblab Biswas, Jacques Pécaut

Laboratoire de Reconnaissance Ionique et Chimie de Coordination, Laboratoire de Chimie Inorganique et Biologique, (UMR-E 3 CEA-UJF), INAC/, CEA-Grenoble, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble, Cedex 09, France. E-mail: [marinella.mazzanti@cea.fr](mailto:marinella.mazzanti@cea.fr)

Polymetallic uranium clusters are of high current interest for their relevance as models of the species involved in actinide migration in the environment. The redox chemistry of actinides plays a crucial role in many aspects of nuclear technology including nuclear fuel reprocessing and safe disposal and in determining the mobility of actinides in the environment. Notably the disproportionation reaction and the hydrolysis are major aspects of actinide chemistry leading to complex systems in aqueous solutions. Accordingly we are studying the redox reactivity of low-valent uranium compounds with different substrates including water, oxygen and organic acids in non-aqueous conditions. The use of controlled conditions leads to the isolation of large polymetallic clusters and renders possible the study of their reactivity. Notably, the hydrolysis of trivalent uranium in non-aqueous conditions leads to mixed valence (U(IV)/U(V)) discrete clusters with the U<sub>6</sub>O<sub>8</sub> core and with the unprecedented U<sub>12</sub>O<sub>20</sub> core. The isolated compounds provide good molecular model for the U(IV)-oxide-clusters which have been shown to form in the bacterial reduction of U(VI). The synthesis and reactivity of these clusters will be presented.

The disproportionation of pentavalent uranyl is also highly relevant for the speciation of uranium in the environment, spent nuclear fuel disposal and the development of remediation strategies. The reduction of UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> by anaerobic microorganisms is thought to proceed via an unstable uranyl(V) species which then rapidly undergoes acid mediated disproportionation to yield UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> and U(IV) products but the nature of these species has not been identified and experimental validation of the proposed mechanism is lacking. Humic acids have been found to enhance the bioreduction of U(VI) yielding soluble forms of U(IV) such as colloidal nanoparticles and molecular-scale clusters but the potential role of an UO<sub>2</sub><sup>+</sup> intermediate was never considered. We will show how we have been able to shed light on the mechanism of disproportionation of pentavalent uranyl and to isolate probable intermediates presenting cation-cation interaction. Moreover the reaction of pentavalent uranyl with benzoic acid (modelling humic acids) leading to a highly stable uranium(IV) cluster will be presented. The observed cluster formation is likely to be the missing link between the pentavalent uranyl intermediate in uranium bioreduction and the formation of colloidal nanoparticles involved in the transport of actinides in ground water

### References

---

- [1] G. Nocton, F. Burdet, J. Pécaut, M. Mazzanti, *Angew. Chem., Int. Ed.* 2007, 46, 7574.
- [2] G. Nocton, P. Horeglad, J. Pécaut, M. Mazzanti, *J. Am. Chem. Soc.* 2008, 130, 16633.
- [3] V. Mougel, P. Horeglad, G. Nocton, J. Pécaut, M. Mazzanti, *Angew. Chem., Int. Ed.* 2009, 48, 8477.

## Spéciation de l'uranium dans des opales de Nopal I (Sierra Peña Blanca, Mexique)

Guillaume Othmane\*, Thierry Allard\*, Nicolas Menguy\*, Thomas Vercoouter\*\*,  
Guillaume Morin\*, Laurence Galois\*, 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 Lurmel, 75015 Paris [guillaume.othmane@impmc.upmc.fr](mailto:guillaume.othmane@impmc.upmc.fr)

\*\* Laboratoire de Spéciation des Radionucléides et des Molécules, Commissariat à l'Énergie Atomique, Centre de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, [thomas.vercoouter@cea.fr](mailto:thomas.vercoouter@cea.fr)

\*\*\* Department of Geological Sciences, University of Manitoba, 240 Wallace Bidg., 125 Dysart Rd., Winnipeg, MB R3T 2N2, [fayek@cc.umanitoba.ca](mailto:fayek@cc.umanitoba.ca)

La compréhension des processus de migration et de piégeage de l'uranium dans l'environnement est importante pour estimer la sûreté des sites de stockage de déchets nucléaires à haute activité. En particulier, la détermination des conditions de séquestration de l'uranium dans des analogues naturels de sites de stockage de déchets nucléaires peut se révéler utile pour intégrer ces processus à long terme.

Le gisement d'uranium de Nopal I (Sierra Peña Blanca, Mexique) est un analogue naturel 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 climat semi-aride qui règne à Nopal I a enfin conduit à la formation d'opales contenant de l'uranium et recouvrant des silicates d'uranyle (uranophane  $\text{Ca}[(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3\text{OH})]_2(\text{H}_2\text{O})_5$  et weeksite  $(\text{K},\text{Na})_2[(\text{UO}_2)_2(\text{Si}_5\text{O}_{13})](\text{H}_2\text{O})_3$ ).

Le but de cette étude est de déterminer la spéciation de l'uranium dans ces opales, afin de préciser les conditions de piégeage de ce radioélément. Compte tenu de la complexité des échantillons naturels (hétérogénéités de concentration, multiplicité des espèces chimiques...), cette étude aborde la spéciation à plusieurs échelles d'observation : depuis les échelles millimétrique et microscopique jusqu'à l'échelle atomique ou moléculaire délivrée par les spectroscopies.

Trois échantillons d'opales jaune ou verte ont ainsi été analysés par microscopie électronique à balayage (inclusions en résine), microscopie électronique en transmission (lames FIB) ainsi que par spectroscopie de fluorescence laser résolue en temps.

Les résultats de cette étude mettent en évidence un piégeage tardif et à basse température d'uranium par l'opale majoritairement sous forme de complexes de type  $\text{CaUO}_2(\text{OH})_n$ .

Ces complexes suivent la forme botryoïdale de l'opale et sont concentrés en différentes couches, suggérant des variations de la chimie du milieu de formation, avec toutefois un rapport Ca/U constant. Par conséquent, une approche thermodynamique de ce système devrait, en perspective, permettre de préciser les paramètres chimiques du milieu ayant présidé au piégeage de l'uranium par l'opale à l'échelle des temps géologiques.

### 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

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.