

## Programme

### 26 novembre 2018

**8:45 Accueil des participants – Café**

**9:10 - 9:30 Introduction aux Journées Uranium 2018.** Maurice Pagel

**9:30 – 9:50 Uranium et exploration future - Orano.** Nicolas Flotté

**9:50 -10:10 Publications géologiques récentes de l'agence internationale de l'énergie atomique.** P. Bruneton et Michel Cuney

**10:10 – 10:30 (Needs) Mobilisation et dépôt d'uranium dans les structures extensives varisques en Bretagne Sud : « set-up » de la modélisation numérique Mon-U.** Philippe Boulvais, Yannick Branquet, Thibault Duretz, Marc Poujol, Christophe Ballouard, Romain Tartèse, Nathan Cogné, Gilles Ruffet, Camille Dusséaux, Aude Gébelin

---

**10:30 – 10:50 Pause**

---

**10:50 – 11:10 (Needs) Apports des spectrométries Raman et infrarouge sur la caractérisation des brannérite et coffinite naturelles.** Fabien Baron, Nadia Guignard, Marion Turiani, Yann Batonneau, Daniel Beaufort, Adel Mesbah, Stéphanie Szenknect, Nicolas Clavier, Hantao Lin et Nicolas Dacheux

**11:10 – 11:30 Datation U/Pb des ciments calcitiques : implications pour la connaissance des processus diagénétiques et minéralisateurs dans les bassins sédimentaires.** Benjamin Brigaud, Simon Andrieu, Magali Bonifacie, Frédéric Haurine, Jocelyn Barbarand, Maurice Pagel

**11:30 – 11:50 In-situ carbonate U-Pb analysis by LA-ICP-MS: from absolute dating to understanding of U incorporation in sedimentary systems.** Damaris Montano, Marta Gasparri, Axel Gerdes, Giovanna Della Porta, Richard Albert Roper

**11:50 – 12:10 (Needs) Utilisation de l'autoradiographie digitale pour évaluer la mobilité des radioéléments de la chaîne de l'<sup>238</sup>U dans le cadre de l'exploitation par ISR.** Axel Angileri, Paul Sardini, Michael Descostes, Daniel Beaufort

**12:10 – 12:30 Premiers tests d'un prototype de détecteur muographique pour des applications en forage.** Amélie Cohu, Jacques Marteau

---

**12:30 – 13:45 Repas – Buffet sur place**

---

**13:45 -14:05 Gestion de l'environnement tout au long du cycle minier : une approche proactive et intégrée.** Emilie Lacroix, Véronique Rayot

**14:05 – 14:25 PRODATA : construction et application d'une base de données thermodynamiques dédiée à la modélisation des activités mines et post-mines d'Orano.** Pascal E. Reiller, Marine Ballini, Thomas Vercouter, Michael Descostes

**14:25 – 14:45 Géochimie des grès, des argilites des siltites et des granitoïdes : caractérisation physicochimiques des facies et comportement des isotopes radioactifs naturels.** Saïd Fakhi, Ait Malek Omar, H. El hadi, Faiz Zineb, Bouih Abderahim, Moncef Benmansour, A. Laïssaoui

**14:45 – 15:05 (Needs) Structural effect of phase modifiers on the aggregation and extraction mechanisms of ternary amines systems.** Sandrine Dourdain, Zijun LU

---

**15:05 – 15:25 Pause**

---

**15:25 – 15:45 (Needs) Etude multiparamétrique de la dissolution de la brannerite synthétique.** Adel MESBAH, Stéphanie Szenknect, Nicolas Dacheux

**15:45 – 16:05 (Needs) Caractérisation des brannerites naturelles (UTI2O6) : une étude texturale, géochimique et cristallographique. Implications pour la connaissance des gisements d'U.** Marion Turuani, Choulet Flavien, Eglinger Aurélien, Goncalves Phillipe, Mercadier Julien, Batonneau Yann, Seydoux-Guillaume Anne Magali, Pagel Maurice

**16:05 – 16:25 The paragenetic sequence of uranium precipitation in Zuvch Ovoo, Mongolia.** Dimitrios Rallakis, Michel Cathelineau, Raymond Michels, Marc Brouand et Olivier Parize

**16:25 – 16:45 Comparaison entre les gisements d'uranium de l'Alligator River Uranium Field et ceux de Westmoreland (Northern Territory et Queensland, Australie).** Joséphine Gigon, Julien Mercadier, Antonin Richard Irvine. Annesley, Andrew Wygralak, Roger Skirrow, Mark Kendric, Terry Mernagh

**16:45 – 17:05 Les minéralisations redox à forte teneur liées au graben tertiaire, dans le sédimentaire jurassique et triasique de Dasa (Niger).** Christophe DIN, George Flach, Henri Sanguinetti, Peter Wollemborg

## **27 novembre 2018**

**8:45 Accueil des participants – Café**

**9:00 - 9:10 Introduction à la séance « Gisements liés spatialement aux discordances proterozoïques du Canada – gisements haute teneur de la Saskatchewan ».** Patrick Ledru

**9:10 - 9:30 Hydrodynamic studies of Athabasca unconformity-related uranium mineralization: current understanding and remaining problems.** Guoxiang Chi, Zenghua Li, Khalifa Eldursi, Kathryn Bethune, Dave Quirt, Patrick Ledru, Sean Bosman, Colin Card, Eric Potter

**9:30 – 9:50 Caractéristiques et rôles des circulations fluides dans la formation des gisements de type discordance : exemple du gisement de Cigar Lake.** Julien Mercadier, Pierre Martz, Michel Cathelineau, Marie-Christine Boiron, David Quirt, Amber Doney, Olivier Gerbeaud, Patrick Ledru

**9:50 -10:10 Structural controls on uranium deposits in the Athabasca and Thelon basins (Canada): similar or different?** Antonio Benedicto

**10:10 – 10:30 The challenges to explore and discover an unconformity deposit at depth.** John. Robbins, Patrick Ledru

---

**10:30 – 10:50 Pause**

---

**10:50 – 11:10 Potential for high grade uranium mineralization in the West Athabasca.**

Olivier Gerbeaud, Patrick Ledru, John Robbins, Mario Blain, Craig Cutts

**11:10 – 11:30 Laurentia extension ca 2000-1500 Ma as reflected in the development of the Athabasca and related basins: implications for uranium geology.** Paul Ramaekers

**11:30 – 11:50 A numerical modelling perspective of the Precambrian Rae-Hearne craton and its implications to uranium mineralization.** Jonathan Poh, Philippe Yamato, Thibault Duretz, Patrick Ledru, Denis Gapais, Guoxiang Chi, Khalifa Eldursi

**11:50 – 12:10 Influences of fault configuration and attributes on the localisation of uranium deposits in the Athabasca Basin, Canada: a case study of the Cigar Lake deposit.** Khalifa Eldursi, Guoxiang Chi, Kathryn Bethune, Zenghua Li, Patrick Ledru, David Quirt

**12:10 – 12:30 Implicit model creation for the application of geophysical inversion and forward modelling.** Daniel Gerger, Gabriel Courrioux, Charles Gumiaux, Dwayne Kinar, Grant Harrison, Patrick Ledru

---

**12:30 – 13:45 Repas – Buffet sur place**

---

**13:45 -14:05 Les phosphates et sulfates d'aluminium (APS) des gisements d'uranium spatialement liés aux discordances protérozoïques au Canada et en Australie.** Daniel Beaufort, Stéphane Gaboreau and Thomas Riegler

**14:05 – 14:25 Hydrogeological modelling and groundwater geochemistry for uranium exploration in the Athabasca Basin (Canada).** Valerie Plagnes, Dave Quirt, Antonio Benedicto, John Mahoney, Patrick Ledru

**14:25 – 14:45 Origin of fault-related physical seals and their control on unconformity-related uranium mineralization: a case study in the Kiggavik area (Nunavut, Canada).** Alexis Grare, Olivier Lacombe, Julien Mercadier, Antonio Benedicto, Marie Guilcher, Anna Trave, Patrick Ledru and John Robbins

**14:45 – 15:05 Deformation processes in the Spitfire prospect, Patterson Lake corridor, West Canada.** Maher Abdelrazek, Antonio Benedicto, Cameron MacKay, Darren Slugoski, Scott Frostad, Patrick Ledru

**15:05 – 15:25 Are unconformity-related uranium deposits of Athabasca paleo-enhanced geothermal systems?** Patrick Ledru, Jean Marc Lardeaux, Yves Géraud, Charles Khairallah, Vivien Navelot

---

**15:25 – 16:00 Pause**

---

**16:00 – 17:30 Discussion générale avec possibilité de projection de diapositives pour animer le débat.**

**17:30 Clôture des Journées Uranium**

# PUBLICATIONS GEOLOGIQUES RECENTES DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE

Patrice Bruneton \* et Michel Cuney \*\*

\* 4 place de la Wantzenau 87500 Le Chalard, p.bruneton@orange.fr

\*\* CNRS – GeoRessources – Université de Lorraine, michel.cuney@univ-lorraine.fr

2018 aura été une année faste pour l'AIEA au niveau des publications. En effet, 3 documents techniques ont été publiés, ainsi qu'une carte de répartition mondiale des gisements d'uranium et 2 autres documents seront publiés d'ici la fin de l'année 2018. Ces documents sont téléchargeables gratuitement sur le site de l'agence (<https://www.iaea.org/publications>) ou achetables en version papier.

- IAEA-TECDOC-1842: « *Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples* ». Ce rapport présente la classification des gisements d'uranium adoptée en 2013 par l'AIEA et décrit une cinquantaine de gisements. Elle comprend 15 types, 36 sous-types et 14 classes. Cette classification est également utilisée dans le Livre Rouge depuis 2014.
- IAEA-TECDOC-1843: « *World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) – 2016 Edition* ». UDEPO est une base de données des gisements et ressources en uranium. Dans ce rapport, qui décrit les 50 paramètres utilisés dans la base, 1807 gisements-ressources sont listés (données 2015). En octobre 2018, UDEPO renferme 3114 gisements-ressources en uranium, mais seulement 2029 d'entre eux sont présents sur le site de l'AIEA-INFCIS (<https://nucleus.iaea.org/Pages/udepo.aspx>).
- IAEA-TECDOC 1849: « *Uranium Resources as Co- and By-products of Polymetallic, Base, Rare Earth and Precious Metal Ore Deposits* ». Ce rapport décrit les gisements qui ont produit, produisent ou pourraient produire de l'uranium en sous et/ou co-produit dans des contextes géologiques très variés.
- IAEA-TECDOC (à paraître): « *Quantitative and Spatial Evaluations of Undiscovered Uranium Resources* ». En utilisant plusieurs exemples, le but de cet ouvrage est de présenter les diverses techniques qui permettent de postuler la répartition des ressources potentielles mondiales en uranium.
- IAEA-TECDOC (à paraître): « *Unconformity-related Uranium Deposits* ». Ce rapport fait le point des connaissances sur ces gisements exceptionnels incluant géologie, minéralogie, métallurgie, méthodes minières, techniques d'exploration, et autres paramètres utiles pour leur évaluation.
- « *World Distribution of Uranium Deposits* ». Il s'agit d'une carte interactive de répartition mondiale des gisements d'uranium que l'on peut se procurer sur le site de l'agence. Cette seconde édition comprend 2831 gisements-ressources localisés sur un fond géologique. Types et sous-types de gisements sont individualisés.

# (Needs) MOBILISATION ET DEPOT D'URANIUM DANS LES STRUCTURES EXTENSIVES VARISQUES EN BRETAGNE SUD : “SET-UP” DE LA MODELISATION NUMERIQUE MON-U

Philippe Boulvais<sup>1</sup>, Yannick Branquet<sup>1,2</sup>, Thibault Duretz<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>1</sup>,  
Christophe Ballouard<sup>3</sup>, Romain Tartèse<sup>4</sup>, Nathan Cogné<sup>1</sup>, Gilles Ruffet<sup>1</sup>,  
Camille Dusséaux<sup>5</sup>, Aude Gébelin<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université de Rennes 1, Géosciences Rennes – philippe.boulvais@univ-rennes1.fr, yannick.branquet@univ-rennes1.fr, thibault.duretz@univ-rennes1.fr, marc.poujol@univ-rennes1.fr, nathan.cogne@univ-rennes1.fr, gilles.ruffet@univ-rennes1.fr

<sup>2</sup> Université d'Orléans, ISTO – yannick.branquet@univ-orleans.fr

<sup>3</sup> Université de Johannesburg (RSA) – christopheballouard@outlook.com

<sup>4</sup> Université de Manchester (UK) – romain.tartese@manchester.ac.uk

<sup>5</sup> Université de Plymouth (UK) - camille.dusseaux@plymouth.ac.uk, aude.gebelin@plymouth.ac.uk

Les détachements sont des zones de cisaillement extensives d'échelle crustale, syn- à post-orogéniques, permettant l'exhumation de croûte inférieure ductile et l'extension de la croûte supérieure fragile. De nombreuses circulations de fluides, aussi bien d'origines profondes que superficielles, y sont documentées. Zones de mélange, donc, entre des fluides variés, ces détachements contrôlent également la mise en place de granites syn-tectoniques et la géométrie de bassins sédimentaires. La Province du *Basin and Range* de l'ouest américain en est l'exemple typique. De nombreuses minéralisations métalliques sont documentées dans les détachements connus à travers le monde, parmi lesquelles l'uranium. L'uranium, enrichi dans les leucogranites syn-tectoniques peralumineux mis en place au mur des détachements, mobilisé ensuite par les fluides oxydants d'origine superficielle dont la circulation est localisée dans les détachements mêmes, est finalement précipité sous forme d'oxydes là où ces fluides rencontrent une lithologie réductrice.

Le sud du Massif Armoricaire, à titre d'exemple, a été structuré au Carbonifère supérieur, en fin d'histoire varisque, par le jeu conjugué de détachements crustaux et le fonctionnement décrochant du Cisaillement Sud Armoricaire. Les études que notre groupe y mène depuis plusieurs années nous ont permis d'obtenir une image géométrique et temporelle précise des interactions entre circulations de fluides, déformation et magmatisme. Cette image fournit un cadre, un *paysage métallogénique*, au sein duquel se sont développées, entre autres, des minéralisations en uranium. Le projet *Mon-U* (Modélisation numérique des minéralisations en uranium dans les détachements – soutenu par Needs) tient là les conditions initiales de son application. Dans ce projet, il s'agira (i) d'améliorer et d'établir des lois de perméabilité dynamique adéquates qui reproduisent l'hydrodynamique escomptée entre les différents réservoirs ; (ii) de contrôler le modèle thermique; (iii) d'évaluer les forces motrices dominantes qui s'exercent sur les fluides au cours du temps et d'estimer leur durée de vie ainsi que leur caractère pulsatile potentiel ; (iv) et finalement, de préciser le potentiel minéralisateur en uranium par le couplage d'une équation de transport de solutés. Pour le domaine sud-armoricaire, les expériences de modélisation seront ainsi calibrées dans l'espace (à l'échelle des détachements) et dans le temps (à la durée de la mobilité effective d'uranium).

# (Needs) APPORTS DES SPECTROSCOPIES RAMAN ET INFRAROUGE SUR LA CARACTÉRISATION DES BRANNÉRITE ET COFFINITE NATURELLES

Fabien Baron\*, Nadia Guignard\*\*, Marion Turiani\*\*\*, Yann Batonneau\*\*, Daniel Beaufort\*\*, Adel Mesbah\*\*\*\*, Stéphanie Szenknect\*\*\*\*, Nicolas Clavier\*\*\*\*, Hantao Lin\*\*\*\* et Nicolas Dacheux\*\*\*\*

\*LPG, UMR6112, CNRS – Université de Nantes, Bât 4, 2 rue de la Houssinière, 44300 Nantes, fabien.baron@univ-nantes.fr

\*\*IC2MP, UMR7285, CNRS - Université de Poitiers, B35, 6 Rue Michel Brunet, TSA 51106, 86073 Poitiers Cedex 9, yann.batonneau@univ-poitiers.fr, nadia.guignard@univ-poitiers.fr, daniel.beaufort@univ-poitiers.fr

\*\*\*Université de Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, UCA, IRD, LMV UMR 6524, Saint-Etienne, France, marionturuani@gmail.com

\*\*\*\* ICSM, CEA, CNRS, ENSCM, Univ Montpellier, Site de Marcoule - Bât. 426, BP 17171, 30207 Bagnols-sur-Cèze, France

La brannérite ( $UTi_2O_6$ ) et la coffinite ( $USiO_4$ ) représentent les minéraux porteurs d'uranium (U) tétravalent les plus abondants sur Terre après l'uraninite ( $UO_2$ ). Néanmoins, ces deux minéraux sont difficilement identifiables par des techniques de minéralogie conventionnelle du fait de leur faible concentration, leur très faible degré d'organisation cristallographique et leur forte hétérogénéité chimique. La brannérite naturelle est généralement amorphe du fait des dommages induits par l'auto-irradiation (métamictisation). La coffinite est le plus souvent disséminée sous la forme de nanocristaux intimement associés à d'autres produits d'altération. Le développement récent des techniques de synthèse de brannérite et de coffinite a permis d'obtenir les spectres Raman et infrarouges de référence pour ces minéraux. L'un des grands avantages des spectroscopies Raman et infrarouges est qu'elles permettent une analyse multi-échelles depuis l'affleurement avec les spectromètres portables jusqu'à la lame mince.

L'étude spectroscopique d'échantillons naturels de coffinite métamictite a montré l'oblitération partielle du signal Raman et infrarouge. Cependant, une signature spectrale persiste permettant ainsi d'avoir un outil performant d'identification. La signature obtenue dans le proche infrarouge a permis de concevoir un outil de quantification de la coffinite (Hebert et al.). Concernant la brannérite, la microspectroscopie Raman montre une signature spécifique pouvant être attribuée à de la brannérite très désorganisée (métamictite). Les analyses micro-spectroscopie Raman et infrarouge d'un échantillon naturel contenant des cristaux métamictes de brannérites ont révélé la formation d'anatase nanostructurée et de proto-coffinite.

L'utilisation des méthodes de micro-spectrométrie Raman et infrarouge apportent des informations sur la nature et la localisation des produits générés par l'auto-irradiation de la brannérite (anatase, proto-coffinite) qui peuvent aider à l'interprétation de la pétrographie ainsi qu'à une meilleure interprétation des analyses chimiques (majeurs et traces) et des données isotopiques (isotopes stables ou radiogéniques) réalisées à l'échelle locale dans ce type de minéral.

Hebert *et al.* (en révision) Quantification of coffinite ( $USiO_4$ ) in roll-front uranium deposits using visible to near infrared (Vis-NIR) portable field spectroscopy.

# DATATION U/PB DES CIMENTS CALCITIQUES : IMPLICATION POUR LA CONNAISSANCE DES PROCESSUS DIAGENETIQUES ET MINERALISATEURS DANS LES BASSINS SEDIMENTAIRES

Benjamin Brigaud\*, Simon Andrieu\*\*, Magali Bonifacie\*\*\*, Frédéric  
Haurine\*, Jocelyn Barbarand\*, Maurice Pagel\*

\* GEOPS, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France. \*\*BRGM, Orléans, France. \*\*\*Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris-Diderot, UMR 7154 CNRS, F-75005 Paris, France

Si la diagenèse progressive est maintenant bien comprise, même s'il existe des incertitudes sur certains processus, la diagenèse ponctuelle est très loin d'être caractérisée et démontrée. En effet, des verrous technologiques majeurs sont à lever. C'est dans un premier temps (1) la datation du dépôt ou de la cristallisation des minéraux en milieu poreux intergranulaire ou fracturé et dans un deuxième temps, (2) la caractérisation de la source des fluides et certains paramètres des conditions de dépôt comme température, Eh, pH, etc... à la fois des solides et des fluides. La difficulté à dater les principaux minéraux responsables de la cimentation des roches sédimentaires (calcite, dolomite ou quartz) empêche d'avoir une chronologie des événements à l'origine des changements de propriétés pétrophysiques des roches. Que ce soit pour les analyses  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  ou des éléments des terres rares ou encore de la datation U-Pb, le microforage, permettant de prélever plusieurs mg de carbonate, est le moyen le plus communément utilisé afin de caractériser le sédiment et sa diagenèse. Quand il s'agit de comprendre les processus physico-chimiques mis en jeu lors de la diagenèse, cette technique s'avère être un facteur très limitant, voire même bloquant, empêchant de réaliser un saut d'échelle sur l'acquisition des connaissances. La taille d'investigation est ainsi un verrou à de nombreuses études diagénétiques, notamment celles de diagenèse précoce qui sont caractérisées par des objets très petits (<50  $\mu\text{m}$ ). Le spectromètre de masse à plasma à couplage inductif, ou ICPMS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), couplé à un système d'ablation laser (Laser Ablation : LA) permet d'analyser géochimiquement des ciments très petits (spot d'analyse de 50 à 110  $\mu\text{m}$ ) directement sur lame mince, et ouvre, dans certains cas favorables, la possibilité de dater la diagenèse.

L'objectif de cette présentation est de montrer le fort potentiel de l'utilisation de cet outil sur des calcites obturant l'espace intergranulaire des calcaires jurassiques du Bassin de Paris. Les premières zones colmatant l'espace inter-granulaire ne sont pas toujours synchrones du dépôt et de grandes incertitudes résident sur la chronologie du début de la diagenèse (cimentation). Quand débute la cimentation, 1 Ma, 10 Ma ou 100 Ma après le dépôt ? Des analyses préliminaires sur les premiers ciments colmatant l'espace intergranulaire montrent que la cimentation débute de 3 Ma à 100 Ma après les dépôts. Couplés à l'analyse des températures  $\Delta_{47}$ , les âges U/Pb obtenus sur les ciments liés à l'enfouissement suggèrent que des fluides anormalement chauds ont pu circuler au Crétacé inférieur, période marquée par d'importants événements géodynamiques à l'origine du soulèvement des bordures du bassin de Paris. Un dernier stade de circulation de fluide est clairement à mettre en relation avec la phase extensive Eocène-Oligocène. Ces premières datations suggèrent une diagenèse épisodique dans le bassin de Paris. La datation des cristaux de calcite par U-Pb et la détermination de leur température de dépôt par  $\Delta_{47}$  ouvrent de nouvelles possibilités pour l'étude des minéralisations uranifères polyphasées dans le cas de minéralisations accompagnées de calcite comme au Niger ou à Lodève.

# IN-SITU CARBONATE U-PB ANALYSIS BY LA-ICP-MS: FROM ABSOLUTE DATING TO UNDERSTANDING OF U INCORPORATION IN SEDIMENTARY SYSTEMS

Damaris Montano\*, Marta Gasparrini\*, Axel Gerdes \*\*, Giovanna Della Porta  
\*\*\*, Richard Albert Roper\*\*

\*IFP Energies nouvelles, Rueil-Malmaison (France); damaris.montano@ifpen.fr, Marta.gasparrini@ifpen.fr \*\* Goethe Universität, Frankfurt (Germany); gerdes@em.uni-frankfurt.de, AlbertRoper@em.uni-frankfurt.de \*\*\* Earth Sciences Department, Milan University(Italy); Giovanna.dellaporta@unimi.it

Carbonate are low U-bearing minerals ( $U < 100$ ppm) and precipitate in a variety of sedimentary and diagenetic settings, going from soils to deep sedimentary basins. They record the geochemical conditions of the parent fluid at the time of the crystallization and may be the witnesses of geodynamic, thermal and fluid migration events. The use of the  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  ratio as proxy to track the seawater paleo-redox conditions, the risk of U-leakage in nuclear waste disposal sites and the recent application of U-Pb geochronology to carbonates, increased the interest in understanding the mechanisms of U incorporation and fractionation in carbonates. Here we present the analysis of U and Pb incorporation into carbonate sediments from 2 paleo-lakes with well characterized chronostratigraphy and chemiostratigraphy: the Nördlinger Ries Crater basin (Miocene, southern Germany) and the Yacoraite formation (Maastrichtian-Danian, Argentina). The Ries Crater formed by the impact of a meteorite at 14.9Ma, and the sedimentation ended after 2Ma. The Yacoraite fm. consists of a 4Ma sequence of carbonates interfingering by datable tuff-layers. Biotic and abiotic syngenic carbonates have been investigated for U and Pb isotopes by in-situ Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) and dated according to their  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ratios. Petrography combined with O and C stable isotope analyses suggests that the investigated carbonate phases are syn-sedimentary and possibly preserve the original crystallization ages and the parent-fluid geochemistry. Furthermore, the geochronometric dataset obtained for micrite, microbialite, ooids and early cements is consistent with the sedimentary ages. Pb concentration of all carbonates analyzed is homogeneous, whereas U concentration is heterogeneous. Micrite and biotic carbonates have the highest U concentrations. In contrast, all cements are characterized by lower U concentrations. The presence of organic matter in the environment where biotic carbonates precipitate can be considered as the main driving factor for U incorporation. The low U concentration in blocky calcite cements seems to be linked with crystal size and absence of inclusions. In the future it will be performed a more detailed study of the possible links between the carbonate origin (biotic vs abiotic; calcite vs dolomite) and the U-Pb isotope concentration in paleo-lakes with a well constrained chrono- and chemiostratigraphy. This will possibly give further information about the U-Pb incorporation in carbonates in modern/ancient carbonate systems.



# UTILISATION DE L'AUTORADIOGRAPHIE DIGITALE POUR EVALUER LA MOBILITE DES RADIOELEMENTS DE LA CHAINE DE L'<sup>238</sup>U DANS LE CADRE DE L'EXPLOITATION PAR ISR

Axel Angileri\*, Paul Sardini\*, Michael Descostes\*\*, Daniel Beaufort\*

\*IC2MP Université de Poitiers, rue Michel Brunet F 86073 Poitiers CEDEX,  
axel.angileri@univ-poitiers.fr, paul.sardini@univ-poitiers.fr, daniel.beaufort@univ-poitiers.fr

\*\* ORANO Mining, R&D Dpt, F 92084 Paris La Défense CEDEX, France.  
michael.descostes@areva.com

This work is based on a comparative analysis of two polished thin-sections of representative sand samples from the In Situ Recovery experimental site of the Dulaan Uul uranium prospect (Mongolia). The first sample comes from the fresh uranium ore body and the second is from a part of the ore body which was leached during 6 months by a sulphuric acid solution. U-concentration in the range of 400 ppm and U/Ra ratio near 1 (secular equilibrium) were measured in the fresh ore sample while U-concentration of 6 ppm and U/Ra ratio of 29 were measured in the sample of leached ore.

Different techniques were employed at the thin section scale and with a micrometric resolution : i) the alpha digital autoradiography BeaQuant device was used as a mapping tool to locate alpha emitting regions, ii) QuemScan chemical mapping was used to obtain a large chemical/mineralogical map of the samples, iii) A scanning electron microscope coupled with focused ion beam (SEM-FIB) was used to produce transversal nanometric cross sections directly from the petrographic thin sections and iv) alpha spectrometry was also employed for determining the contribution of the different alpha emitters in the bulk material.

Alpha autoradiographs of both samples present heterogeneous spatial distribution of alpha activity: hot spots of activity, area with low/diffuse activity and inactive zones. Petrographic observations of both samples reveal that most of the radioactive spots are related to aggregates of various types of Fe-Ti minerals (ilmenite, Ti-magnetite, anatase, rutile, titanite) presenting an important internal microporosity.

STEM-HAADF imaging and EDX analysis of FIB sections of the fresh sample evidenced that most of the U-mineralization consists in the decoration of the dissolution surface of Fe-Ti minerals by polycrystalline nanograins of uraninite (50 to 100 nm in diameter) and a partial infilling of the pore space of the altered grains by smectitic clay phases.

Uraninite nanograins totally disappeared and uranium is almost totally leached from the ore body sample after the ISR test. However digital autoradiography and alpha spectrometry evidence radioactive spots which are due to elements of the uranium decay chain in the alteration sites of Fe-Ti minerals, so suggesting the persistence of all daughters of <sup>230</sup>Th (including <sup>226</sup>Ra) after 6-month ISR leaching, these daughters having the same activity.

Digital autoradiography coupled to mineral mapping could be a powerful method to understand the spatial mobility of the alpha radio-isotopes. The environmental impact of such a coupled approach is potentially strong, because it indicates trapping of the U-decay products in the alteration sites after ISR leaching of uranium from the ore body. These findings have to be confirmed by more systematic study of ISR leached samples at the mining site scale.

# PREMIERS TESTS D'UN PROTOTYPE DE DETECTEUR MUOGRAPHIQUE POUR DES APPLICATIONS EN FORAGE

Amélie Cohu\*, Jacques Marteau\*

\*Institut de Physique Nucléaire de Lyon – Bât. P. Dirac, 4 rue Enrico Fermi, 69622 Villeurbanne  
amelie.cohu@etu.univ-lyon1.fr, marteau@ipnl.in2p3.fr

La tomographie-3D, temps réel avec des muons d'origine cosmique est un concept novateur dans le domaine des géosciences, complémentaire des méthodes d'imagerie standard [1]. Le principe est identique à celui de la radiographie clinique qui réalise une image par densitométrie de contraste grâce à l'absorption différentielle d'un flux de particules pénétrantes, dans ce cas des muons cosmiques d'origine atmosphérique [2]. Depuis une dizaine d'années, la collaboration DIAPHANE entre IPNL, IPGP et Géosciences Rennes, développe et obtient des résultats novateurs sur l'étude des dômes de volcans actifs par l'intermédiaire de cette méthode innovante. L'intérêt principal est de permettre une prise de données non invasive, permanente et autonome et donc un suivi temporel de l'activité de systèmes complexes comme les systèmes hydrothermaux des volcans actifs [3]. De nombreux développements méthodologiques ont permis d'améliorer la qualité de l'analyse depuis les débuts du projet.

Les outils de détection employés par DIAPHANE sont des trajectographes à muons. Les muons sont les particules les plus abondantes du rayonnement cosmique secondaire au niveau du sol. Ils ont un pouvoir de pénétration de la matière et les plus énergétiques d'entre eux peuvent parcourir quelques centaines à plusieurs milliers de mètres de roche standard avant d'être absorbés. Lorsqu'ils traversent la matière, les muons perdent de l'énergie : par ionisation ou radiation. Les « télescopes » à muons peuvent avoir des formes différentes selon leurs fonctions : ils ont notamment des applications en génie civil, en archéologie ainsi que dans l'industrie lourde. Deux types de trajectographes ont été construits par DIAPHANE : des détecteurs à plusieurs plans et un détecteur destiné aux forages. Le travail présenté ici porte sur l'étude de faisabilité en prospection minière d'un prototype de détecteur muographique en forage et spécifiquement dans le cas de gisements d'uranium.

Le premier objectif est de réussir à le caractériser théoriquement en calculant, notamment, son acceptance. La seconde partie est consacrée à la reconstitution de trajectoires. La reconstitution 3D d'une trajectoire d'un muon, et particulièrement son inclinaison, nécessite l'application d'une technique de temps de vol. Il faut analyser une grande quantité de données et modéliser des flux par une méthode de Monte Carlo. Les muons sont générés avec une direction et une énergie (pondérée par le flux) choisies au hasard. Le flux de muons est ainsi connu à une profondeur donnée en tenant compte de la perte d'énergie dans le sol et de la distribution de flux par rapport à l'angle zénithal. Cette dernière est un paramètre déjà codé dans un logiciel de simulation de gerbes cosmiques appelé CORSIKA. La perte d'énergie par quantité de matière traversée est quant à elle disponible avec le logiciel GEANT4. L'étape suivante consiste à réaliser une comparaison des résultats obtenus avec ces outils de simulations.

Les méthodes développées, notamment pour la reconstruction de trajectoires et d'observation de variation de densité, sont recyclables dans tous les projets de détection de muons. L'idée serait d'utiliser le détecteur de forage pour faire un contrôle de la présence ou de l'absence d'anomalies de densité et conclure sur les analyses en forage. Il est aussi possible de l'employer pour mesurer des variations de densité à l'intérieur du détecteur.

[1] Rosas Carbajal, Marina, et al. "Three dimensional density structure of La Soufrière de Guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data." *Geophysical Research Letters* 44.13 (2017): 6743-6751.

[2] Jourde, Kevin, et al. "Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the La Soufrière of Guadeloupe volcano." *Scientific reports* 6 (2016): 33406.

[3] Jourde, Kevin, et al. "Monitoring temporal opacity fluctuations of large structures with muon radiography: a calibration experiment using a water tower." *Scientific reports* 6 (2016): 23054.

# GESTION DE L'ENVIRONNEMENT TOUT AU LONG DU CYCLE MINIER : UNE APPROCHE PROACTIVE ET INTEGREE

Emilie Lacroix\*, Véronique Rayot\*\*

\*1 Place Jean Millier, 92400 Courbevoie + emilie.lacroix@orano.group

\*\*1 Place Jean Millier, 92400 Courbevoie + veronique.rayot@orano.group

Les activités industrielles telles que l'exploitation minière ont des impacts sur l'environnement. L'objectif d'ORANO Mining est d'éviter et/ou de réduire ces impacts dans la mesure du possible. Cela permet ainsi à tout site minier de s'intégrer correctement dans son environnement.

Les activités minières du groupe ORANO sont réparties dans plusieurs pays sur 4 continents (Canada, Namibie, France, Niger, Mongolie, Gabon, Kazakhstan) et s'appuient sur différentes méthodes d'exploitation, telles que les mines à ciel ouvert, la lixiviation in-situ ou récupération in-situ, ou les mines souterraines. Au-delà de la stricte conformité aux réglementations en vigueur dans chaque pays dans lequel ORANO Mining est implanté, cette diversité a donc conduit ORANO à définir une approche commune pour mieux anticiper les risques et limiter l'empreinte écologique de ses activités. En outre, les connaissances requises par cette politique reposent sur les leçons apprises et font suite à plus de 40 années d'expérience dans le domaine des mines. Cette expertise nous permet d'assumer nos responsabilités et d'exploiter ce retour d'expérience pour nourrir de nouveaux projets miniers.

Tout au long du cycle minier, de l'exploration au réaménagement du site en passant par les phases projet et exploitation de la mine, les impacts et les risques pour l'environnement doivent être évalués. Une surveillance correcte ainsi que des mesures de prévention associées doivent également être mises en œuvre. Par exemple, le réaménagement du site est anticipé dès que possible au cours du projet et des phases opérationnelles pour minimiser l'empreinte résiduelle. Parallèlement à cela, ORANO Mining investit dans des études de recherche et développement pour améliorer sa connaissance des impacts potentiels et trouver des solutions innovantes pour en réduire les conséquences.

Grâce à divers exemples tout au long du cycle minier, nous présenterons la valeur de cette approche, les défis qui y sont associés et notre façon de la mettre en œuvre.

1. Lacroix and al (2015) Environmental management throughout the mining cycle: a proactive and integrated approach, GLOBAL 2015, Paris, France
2. [www.csr-mines.orano.group](http://www.csr-mines.orano.group)

# PRODATA : CONSTRUCTION ET APPLICATION D'UNE BASE DE DONNÉES THERMODYNAMIQUES DÉDIÉE À LA MODÉLISATION DES ACTIVITÉS MINES et POST-MINES D'ORANO

Pascal E. Reiller\*, Marine Ballini\*\*, Thomas Vercouter\*, Michael Descostes\*\*

\* Den – Service d'Études Analytiques et de Réactivité des Surfaces (SEARS), CEA, Université Paris-Saclay, F 91191 Gif-sur-Yvette, France. pascal.reiller@cea.fr

\*\* ORANO Mining, R&D Dpt, F 92084 Paris La Défense CEDEX, France. michael.descostes@areva.com

Même si de nombreuses bases de données thermodynamiques sont disponibles, soit de manière indépendante<sup>1-3</sup>, soit adossées à des logiciels de calcul<sup>4,5</sup>, la gestion des activités mines et post-mines d'ORANO nécessite les constantes thermodynamiques pour les éléments majeurs ou trace d'intérêt, en une base de donnée cohérente et traçable. Pour répondre à ces besoins, ORANO et le CEA ont construit la base PRODATA qui compile les fonctions ( $\Delta_f G^\circ$ ,  $\Delta_f H^\circ$ ,  $S_f^\circ$  et  $C_p^\circ$ ) et constantes ( $\log_{10} K^\circ$ ) thermodynamiques pour U et Ra, mais aussi pour les éléments majeurs (F, Cl, S, N, P, C, Si, Na, K...) et traces (Se, Pb, Al, Cu, Ni, Fe, Mn, V, Ti...), en s'appuyant en priorité sur les recommandations de CODATA<sup>6,7</sup> et de l'AEN<sup>3</sup>, et complétées de données tracées de la littérature.

La base PRODATA est construite afin d'être exportable vers les principaux logiciels de calcul de chimie en solution utilisées par ORANO : PhreeqC, CHESS, et Geochemist's Workbench. Des exemples d'applications à des modélisations d'eaux représentatives d'activités minières (exploration, exploitation, réaménagement, surveillance environnementale) seront présentés pour l'uranium et le radium. L'application plus large en dehors des activités d'ORANO sera aussi abordée pour la gestion des déchets radioactifs ou l'impact environnemental des munitions en uranium appauvri.

- 1 R. A. Robie, B. S. Hemingway, *Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 bar (10<sup>5</sup> Pascal) Pressure and at Higher Temperatures*. US Geological Survey, Report US Geological Survey Bulletin 2131. Denver, CO, USA, **1995**. pp 461.
- 2 M. W. Chase, *NIST-JANAF Thermochemical Tables - Fourth Edition*. American Chemical Society, **1998**.
- 3 R. Guillaumont, T. Fanghänel, J. Fuger, I. Grenthe, V. Neck, D. A. Palmer, M. Rand, *Chemical Thermodynamics 5. Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium*, North Holland Elsevier Science Publishers B. V., **2003**, pp. 918.
- 4 D. L. Parkhurst, C. A. J. Appelo, *User's guide to PHREEQC (version 2) - a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations, Report 99-4259. Lakewood, Colorado, USA, **1999**.
- 5 J. W. Ball, D. K. Nordstrom, *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and text cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters*. Report 91-183, **1991**.
- 6 D. D. Wagman, W. H. Evans, V. B. Parker, R. H. Schumm, I. Halow, S. M. Bailey, K. L. Churney, R. L. Nuttall, *J. Chem. Ref. Data* **1982**, *11*, 392.
- 7 J. D. Cox, D. D. Wagman, V. A. Medvedev, *CODATA key values for thermodynamics*, Hemisphere Publishing Corp., **1989**.

# **GEOCHIMIE DES GRES, DES ARGILITES DES SILTITES ET DES GRANITOÏDES : CARACTERISATIONS PHYSICOCHEMIQUES DES FACIES ET COMPORTEMENT DES ISOTOPES RADIOACTIFS NATURELS**

Said Fakhi<sup>1</sup>, Ait Malek Omar<sup>1,2</sup>, H. El hadi<sup>2</sup>, Faiz Zineb<sup>1,4</sup>, Bouih Abderahim<sup>3</sup>,  
Moncef Benmansour<sup>3</sup>, A. Laissaoui<sup>3</sup>

1 Université Hassan II de Casablanca, Laboratoire d'Ingénierie et de Matériaux (LIMAT).  
Thermostructural Materials, Polymers and Radiochemistry Team (TMPR), Faculté des Sciences  
Ben M'Sik Casablanca, Maroc. fakhisaid@gmail.com / ayachayoub0@gmail.com

2 Université Hassan II de Casablanca, Laboratoire de Géodynamique des chaînes anciennes,  
Faculté des Sciences Ben M'Sik Casablanca, Maroc. o.aitmalek@gmail.com

3 Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN), Centre  
des Etudes Nucléaires Maamoura (CENM), Salé, Maroc. elaouidi.samira@hotmail.fr/  
bouih@cnesten.org.ma/benmansour64@yahoo.fr/laissaoui@cnesten.org.ma

4 Laboratoire MATIC, Université Hassan I, Khouribga, Maroc. faiz.zineb@gmail.com

Le présent travail est focalisé sur la compréhension de l'accumulation des radionucléides, en particulier, ceux des chaînes U-Th et des éléments traces métalliques dans différentes roches du Maroc. L'étude s'inscrit dans la continuité des problématiques programmées et réalisées dans le cadre de l'UMR entre l'Université Hassan II de Casablanca et le CNESTEN\* concernant l'utilisation de ce types de roches comme ajouts pour améliorer le confinement par cimentation des déchets radioactifs.

La caractérisation de ces roches et l'étude du comportement des radionucléides naturels en fonction de la minéralogie et la chimie des horizons ont été aussi abordées afin de contribuer au programme d'investigation des sites potentiels pour un futur stockage des déchets de faibles et moyenne activités.

Les échantillons étudiés au cours de ces travaux sont constitués de grès, d'argilite et de siltite et des granitoïdes marocains. La caractérisation pétrographique montre, la présence d'une paragenèse minérale à quartz, feldspath potassique, plagioclase, amphibole et biotite avec des minéraux accessoire tel que les opaques, la pyrite hématitisée, l'apatite, l'augite aegyrinique et l'épidote pour les granitoïdes. Pour les faciès de grès, d'argilite et de siltite, on note la présence d'un assemblage minéralogique presque similaire de quartz, feldspath alcalin, micas, argiles et oxydes de Fer. L'analyse radiochimique a montré que pour les grès et siltite, U et Th sont essentiellement liés à la fraction résiduelle constituée par les minéraux silicatés (argile et quartz).

\* Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires

# (NEEDS) STRUCTURAL EFFECT OF PHASE MODIFIERS ON THE AGGREGATION AND EXTRACTION MECHANISMS OF TERNARY AMINES SYSTEMS

Sandrine DOURDAIN\*, Zijun LU\*

\*ICSM/LTSM, CEA/CNRS/UM2/ENSCM UMR5257, Site de Marcoule, Bat. 426, 30207 Bagnols sur Cèze, France sandrine.dourdain@cea.fr, zijun.lu@cea.fr

Uranium recycling is an essential challenge for the reliability of the nuclear energy application. In this case, solvent extraction processes are widely applied to extract selectively uranium from sulfuric media with tertiary amines ligands.

Most of the systems used industrially require the use of a phase modifier such as n-Octanol, which as believed, can avoid the formation of a third phase by possibly modifying the structural state of the aggregates. The study of Abécassis *et al.* showed that n-Octanol plays a role either as a co-surfactant or as a co-solvent on the structure of malonamide extractant solutions<sup>[1]</sup>. However, the effects of such phase modifiers on aggregation and extraction properties may differ when different extraction systems are applied.

To our knowledge, few studies have been performed for systems using tertiary amines ligands, and none of them focused on the effect of the phase modifier either on chelation or aggregation mechanism. It is therefore essential to understand the role of these modifiers on the aggregation and extraction properties of such ligands to optimize their extraction efficiencies.

In this context, the objective of this presentation consists of studying the effect of alkyl substituents of tertiary amines on supramolecular aggregation and relating this effect to their extraction properties by comparing them with Trioctylamine (TOA, classically used in Amine EXtraction procedure of uranium extraction in sulfuric medium). Besides, we will evaluate the effect of different phase modifiers on tertiary amines extraction systems, with the similar approach as developed in previous studies<sup>[2]</sup>, by characterizing the aggregates by SAXS, SANS, Surface tension and relating thermodynamics motors as curvature energy to the extraction properties.

1. Abecassis, B., et al., Effect of n-octanol on the structure at the supramolecular scale of concentrated dimethyldioctylhexylethoxymalonamide extractant solutions. *Langmuir*, 2003. 19(17): p. 6638-6644.
2. Rey, J., et al., Synergy in Extraction System Chemistry: Combining Configurational Entropy, Film Bending, and Perturbation of Complexation. *Langmuir*, 2015. 31(25): p. 7006-15.

# (NEEDS) NEOPROTEROZOIC MAGMATIC ACCRÉTION AND PAN-AFRICAN REWORKING IN THE SOUTH OUADDAÏ (CHAD): IMPLICATIONS FOR U AND TH MINERAL SYSTEMS

Olivier Vanderhaeghe\*, Félix Djerosssem\*, Moussa Isseini\*\*, Julien Berger\*, Jérôme Ganne, Armin Zeh\*\*\*

\*GET – Université Paul Sabatier, Toulouse 3, CNRS, IRD, CNES.

olivier.vanderhaeghe@get.omp.eu

\*\*Université de N'Djamena, Tchad.

\*\*\*KIT – Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

U and Th are incompatible elements that are used as tracers of the implication of geological processes in crustal growth, recycling and differentiation, which, in turn provides guidelines for the understanding of U and Th mineral systems. This study, financially supported by the NEEDS program, is devoted to apply this strategy to the southern Ouaddaï, one of the least documented zone of the Central African Orogenic Belt. The Ouaddaï Massif (eastern Chad), located in the Central Africa Orogenic Belt (CAOB) and marking the southern margin of the Saharan craton, north of the Congo Craton, provides constraints to discuss these processes during the Neoproterozoic.

The southern part of the Ouaddaï Massif is dominated by metasediments (metapelite, metagreywacke, quartzite and marble) alternating with orthoderived amphibolite and quartz-diorite and intruded by intermediate to felsic plutons (granodiorite, monzogranite, biotite-granite and leucogranite). Zircon detrital grains with Hf signatures pointing to an Archaean to Paleoproterozoic inheritance indicates that metasedimentary rocks are derived from erosion of the surrounding cratons and were deposited in the early Neoproterozoic. Amphibolites correspond to pre-tectonic tholeiitic basalts derived from the partial melting of a depleted mantle. The felsic rocks, represented by S-type leucogranites yielding U-Pb zircon ages of  $635 \pm 3$  Ma and  $612 \pm 8$  Ma and characterized by non-radiogenic Hf signatures, are interpreted to represent the first melt derived from the partial melting of metasediments, without destabilization of zircon grains of the source rocks. High-K calc-alkaline I-type granitoids, including a shoshonitic pyroxene-monzonite, are characterized by radiogenic isotopic signatures and are attributed to partial melting of an enriched mantle followed by differentiation through fractional crystallization and/or interaction with crustal melts.

Metasedimentary rocks display a NE-SW trending S0/S1-2 foliation associated with centimeter to hectometer scales F1 and F2 isoclinal folds delineating hook type interferences pattern and bearing a L1-2 lineation weakly dipping towards the NW. The S0/S1-2 foliation is also affected by upright open F3 folds marked by the development of a faint axial planar S3 schistosity variably dipping to the NNW or NW. Mineral parageneses delineating these structures indicate a metamorphic gradient from greenschist facies in the western part of the studied area to amphibolite facies reaching partial melting as attested by the presence of migmatites in the eastern part. Thermodynamic modelling (pseudosection and phengite-biotite multi-equilibrium) yield PT conditions of around 4 kbars for less than 400°C for the greenschist facies metamorphism dated at  $627 \pm 7$  Ma by Th-U-Pb on monazite and at  $602 \pm 3$  Ma by U-Pb on metamorphic zircon but with dates spreading along the Concordia from 615 Ma to 595 Ma interpreted to record Pan-African metamorphism.

These data show that the South Ouaddaï massif, marking the southern margin of the Sahara craton, has recorded accretion of juvenile magmas derived from partial melting of a depleted mantle associated with deposition of detrital sediments issued from erosion of the nearby cratons during break-up of the Rodinia supercontinent followed by tectonic reworking during the Pan-African orogeny associated with partial melting of the crustal root and of an enriched mantle that might either correspond to the subcontinental mantle or to the suprasubduction mantle. Th and U content of these rocks indicate that concentration of incompatible elements could result from differentiation of magmas generated by partial melting of metasediments or of an enriched mantle.

# (NEEDS) ORGANISATION SPATIALE ET RUGOSITE DES CONCENTRATIONS K, TH, U DANS LA GRANITE DE SARAYA, SENEGAL ORIENTAL

D. Baratoux<sup>1</sup>, F. Makhoudia<sup>2,3</sup>, P.M. Niaye<sup>3</sup>, M.W. Jessell<sup>4</sup>

1 Geosciences Environnement Toulouse, CNRS, IRD & Université de Toulouse, 14, Avenue

Edouard Belin, 31 400 Toulouse, France, david.baratoux@ird.fr

2 Institut Fondamental d'Afrique Noire Cheikh Anta Diop,

3 Université Cheikh Anta Diop, Département de Géologie, Dakar, Sénégal

4 Center for Exploration Targetting, Université d'Australie Occidentale

Le granite de Saraya forme un massif allongé orienté N-NE d'environ 100 km de long et en moyenne de 20 km de large. Ce granite présente des concentrations élevées en U, et nous l'avons choisi pour principal site d'étude dans le cadre du projet NEEDS « Organisation Spatiale Multi-Echelle Uranium- Thorium: Etudes Géostatistiques du Minéral à la Croûte ». Ce massif granitique à biotite et muscovite intrude les formations métasédimentaires du groupe Diale-Dalema (micaschistes, graywacke et roches carbonatées). Il comprend des enclaves sédimentaires ayant subi un métamorphisme important [1,2]. Il présente deux faciès: un faciès à biotite riche en muscovite situé au centre et au nord et un faciès à biotite pauvre en muscovite dans sa partie sud [1,2]. Les minéraux accessoires sont l'apatite, la tourmaline et le zircon. Le granite de Saraya a un âge (U-Pb) de  $2079 \pm 2$  Myr [3]. Nos précédents travaux à partir des données radiométriques sur ce granite ont révélé : a) une dichotomie entre la partie nord riche en K, et la partie sud pauvre en K, b) un anisotropie des concentrations en K et Th sur la partie nord, établie à partir de variogrammes bidimensionnels, tandis que cette anisotropie s'évanouit pour la partie sud (Fig. 1) [3,4]. Les travaux de terrain, et l'analyse des données topographiques ont permis d'établir que ces signatures étaient d'origine magmatique au nord, et le résultat de processus superficiels au sud (altération et transport).

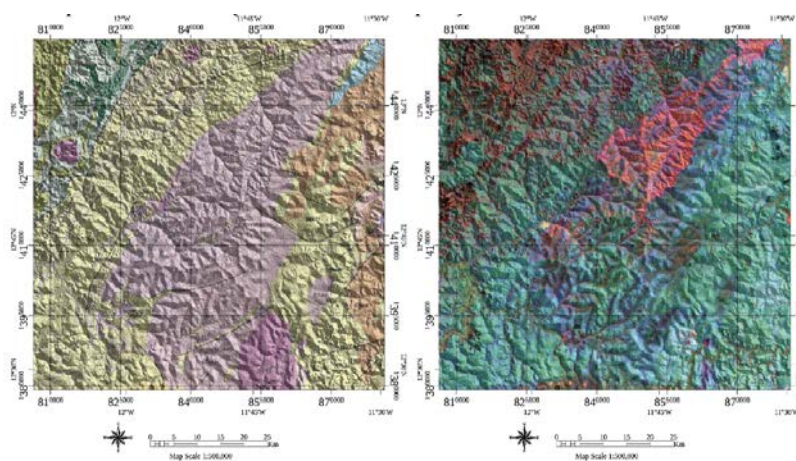


Fig. 1 – Gauche : carte géologique du granite de Saraya et de ses environs, b) Concentrations en K, Th, et U à partir des données radiométriques aéroportées sur la même zone.

Nous avons poursuivi cette année l'analyse de l'organisation spatiale de K, Th, et U à partir d'une analyse de la « rugosité » (ou dispersion) des concentrations à différentes échelles. Le principe de calcul est identique à celui du calcul de rugosité en géomorphologie. Une rugosité élevée correspond donc ici à une dispersion importante des concentrations à l'intérieur d'une fenêtre définissant l'échelle de calcul, et après avoir soustrait une éventuelle tendance linéaire



régionale (identique à la soustraction du plan moyen dans le cas de la topographie). La carte de rugosité à 700 m (Fig. 2) révèle que l'organisation du K à petite échelle est probablement le fait de dykes orientés N45 ou de filons pegmatitiques montrant des orientations similaires. L'organisation du K est modifiée aux échelles supérieures avec des structures perpendiculaires. Ces objets sont responsables d'une rugosité en K à toute les échelle dans la partie nord, tandis que ce signal disparaît dans la partie sud. La rugosité élevée du K est associée à une faible rugosité du Th dans la partie nord à grande échelle. La rugosité élevée du Th dans la partie sud montre que l'enrichissement en Th lors de l'altération du granite est hétérogène à cette échelle. La rugosité de l'U à petite échelle permet de délimiter les contours du granite (ce qui n'est pas le cas pour la concentration elle-même) (Fig. 3). On notera l'absence de différence de rugosité entre la partie nord et la partie sud. Considérant que les distributions en U entre le nord et le sud sont également très proches [4], cela suggère que les processus superficiels responsables des modifications des concentrations et de l'organisation spatiale de K et Th affectent peu l'U à cette échelle.

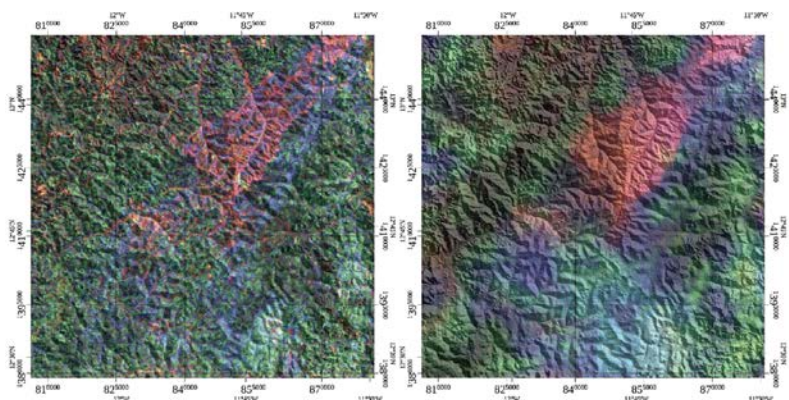


Fig. 2 – Gauche : Carte de rugosité à 700, Rouge = Potassium, Vert = Thorium, Bleu = Uranium, droite : Carte de rugosité à 17 km, même code couleur.

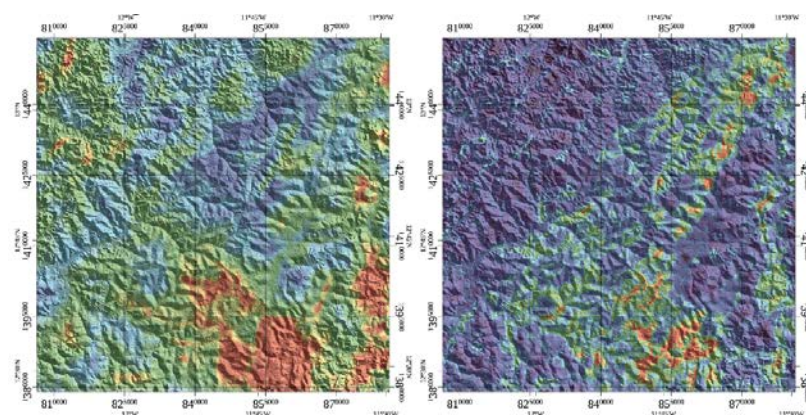


Fig. 3 – Gauche : Carte de rugosité du Th (0.2 à 2 ppm) à 17 km, et de l'U (0.2 à 1.2 ppm) à 700 m.

L'analyse de la « rugosité » des concentrations en K, Th, U calculées à partir des données radiométriques (aéroportées ou au sol) permet de mettre en évidence des échelles caractéristiques de processus magmatiques ou secondaires, échelles qui diffèrent selon qu'il s'agit du K, Th, ou U.

- [1] Bassot, J.P., et Caen-Vachette, M., 1984. In: Géologie Africaine, Tervuren, pp. 191-209 (Edité par Klerkx. J et Michot. J).
- [2] Ndiaye, P.M. et al.. J. Afr. Earth Sci. 2, 193-208
- [3] Hirdes and Davis, D.W., 2002. Precambrian Res. 118, 83- 99.
- [4] Fall et al. J. Afr. Earth Sci. 148, 30-51.
- [5] M. Fall, Thèse de doctorat, Univ. Cheikh Anta Diop.

# HYDRODYNAMIC STUDIES OF ATHABASCA UNCONFORMITY-RELATED URANIUM MINERALIZATION: CURRENT UNDERSTANDING AND REMAINING PROBLEMS

Guoxiang Chi\*, Zenghua Li\*, Khalifa Eldursi\*, Kathryn Bethune\*, Dave Quirt\*\*, Patrick Ledru\*\*, Sean Bosman\*\*\*, Colin Card\*\*\*, Eric Potter\*\*\*\*

\*University of Regina, Regina, Canada; guoxiang.chi@uregina.ca; \*\* Orano Canada Inc., Saskatoon, Canada; \*\*\* Saskatchewan Geological Survey, Regina, Canada; \*\*\*\* Geological Survey of Canada, Ottawa, Canada

The formation of unconformity-related U deposits, known for their high grades and large tonnages, requires the circulation of large amounts of fluids, which must be driven by some geologic forces. Research has been conducted on fluid flow mechanisms related to the unconformity-related U mineralization, applied mainly to the Athabasca Basin. While the actual fluid flow driving force(s) responsible for mineralization remain uncertain, potential forces include deviation of fluid pressure from hydrostatic pressure (overpressure) due to sediment compaction, topographic relief, geothermal gradient, salinity-related fluid density gradient, and extensional and compressional deformation.

Numerical modeling of sediment compaction suggests that the basin was at near-hydrostatic pressure throughout the sedimentation history. This fluid pressure regime indicates that sediment compaction was not a major driving force of fluid flow related to U mineralization, as such flow does not disturb the thermal profile and is too slow to explain the elevated fluid temperatures observed in the basin and near the mineralization. A hydrostatic pressure regime is favorable for the development of fluid convection, as well as for fluid flow driven by topographic relief. Fluid convection, which is facilitated by elevated thermal gradients, fluid density contrasts due to development of basinal brines, and high porosity and permeability in the sediments, may be an important mechanism for driving mineralizing fluid flow. Convection has been long postulated as a flow mechanism and its role in mineralization is further supported by recent studies suggesting a relatively shallow mineralization depth (thus elevated thermal gradient) and similar timing of brine development and mineralization.

On the other hand, the close spatial relationship between unconformity-related U deposits and reactivated basement faults suggests that deformation-induced faulting likely played an important role in driving mineralizing fluid flow. Numerical modeling indicates that while extensional strain may induce ingress flow, compressional strain may lead to either egress (at low degree of deformation) or ingress (at high degree of deformation) flow. Numerical modeling also indicates that both fluid convection and deformation-driven fluid flow can explain the ingress and egress flow patterns, depending on local geological factors such as fault geometry (attitude, width, spacing, and interconnection), mechanical properties, deformation rates, and contrasts in rheology of the basement geology. Faulting may have played a dual role in fluid flow by providing a driving force (deformation-driven flow) and by enhancing permeability (for fluid convection). These two modes of fluid flow may have alternated as dominant mode during precipitation of U. Ongoing studies aim to further evaluate the relationship between the two fluid flow mechanisms and their relative importance for U mineralization. Furthermore, the hydrodynamic relationships between the relatively shallow mineralization-bearing faults and larger, regional structures linked with deep-seated geologic processes remain to be investigated.

# CARACTERISTIQUES ET ROLES DES CIRCULATIONS FLUIDES DANS LA FORMATION DES GISEMENTS DE TYPE DISCORDANCE : EXEMPLE DU GISEMENT DE CIGAR LAKE

Julien Mercadier\*, Pierre Martz\*, Michel Cathelineau\*, Marie-Christine Boiron\*, David Quirt\*\*, Amber Doney\*\*, Olivier Gerbeaud\*\*, Patrick Ledru\*\*

\* Laboratoire GeoResources, Rue Jacques Callot BP 70239, 54506 Vandoeuvre-les-Nancy, France, julien.mercadier@univ-lorraine.fr; \*\* Orano Canada, 817 45 St W, Saskatoon, SK S7L 5X2, Canada

Les gisements de type discordance sont les gisements d'uranium les plus riches au monde avec des teneurs moyennes pouvant atteindre 20%. Ces gisements sont appelés de type discordance car ils sont spécifiquement localisés à la discordance entre un bassin sédimentaire Paléo- à Mésoprotérozoïque (comme le bassin d'Athabasca) et un socle cristallin sous-jacent. Ces gisements exceptionnels se sont formés initialement dans le bassin d'Athabasca entre 1,6 et 1,3 milliard d'années grâce aux circulations à grande échelle de deux saumures évaporitiques (Pagel, 1975 ; Derome et al., 2005). Ces saumures ont la même origine, à savoir l'évaporation d'une eau de mer à la surface du bassin (Richard et al., 2011 ; Mercadier et al., 2012) mais n'ont pas la même composition chimique, que ce soit pour les éléments majeurs (Na, Ca, Mg) et pour les métaux (U, Pb, Cu ou Zn par exemple ; Richard et al., 2016). Malgré ces avancées récentes, certains processus clés sont encore débattus, dont en particulier : i) les mécanismes et conditions de circulations des saumures dans les deux environnements (bassin et socle) et leur interface, ii) la taille et volume des boucles de circulation de ces saumures dans le socle et iii) les changements physico-chimiques affectant les saumures lors de leurs circulations et qui sont à l'origine *in fine* de la formation de ces gisements exceptionnels.

Afin de répondre à ces questions, nous avons étudié le gisement de Cigar Lake selon une nouvelle approche fondée sur le changement d'échelle, de l'échelle pluri-kilométrique (celle des structures abritant ces gisements) à l'échelle micrométrique (celle des inclusions fluides qui contiennent les saumures). Ce travail a permis de démontrer que les structures graphiteuses du socle, héritées de l'orogénèse Trans-Hudsonienne (~ 1,8 Ga), sont les zones de circulation préférentielle des saumures de bassin dans le socle. Les saumures sodiques initiales circulent dans le cœur des structures graphiteuses réactivées mais aussi dans leurs zones de dommage grâce à un dense réseau de microfractures. Ces circulations favorisent une intense interaction saumures sodiques-socle formant le halo d'altération typique à illite-sudoite et la formation des saumures calciques plus salées et enrichies en métaux, dont U. Là où les interactions sont les plus marquées, les degrés d'altération sont les plus forts et la chimie des saumures sodiques la plus modifiée. C'est aussi dans ces zones que les minéralisations se sont formées. Ces résultats confirment donc que l'interaction entre les saumures initiales de bassin et les roches du socle au sein des structures graphiteuses réactivées a été un processus déterminant pour la formation des gisements de type discordance.

Références : Pagel M. (1975), CRAS, 280, 2301-2304 ; Derome D. et al. (2005), Econ. Geol., 100, 1529-1545 ; Richard A. et al. (2011), Geochim Cosmochim. Acta, 75, 2792-2810 ; Mercadier J. et al. (2012), Geology, 40, 231-234 ; Richard A. et al. (2016), Miner. Depos. 51, 249-270

# STRUCTURAL CONTROLS ON URANIUM DEPOSITS IN THE ATHABASCA AND THELON BASINS (CANADA): SIMILAR OR DIFFERENT?

Antonio Benedicto\*

\* UMR GEOPS, Université de Paris Sud, Orsay, France (antonio.benedicto@u-psud.fr)

Major uranium provinces in Canada are linked to the Athabasca and Thelon Paleoproterozoic basins. There still exists an open debate about if these two basins were only one at the time of formation and if their unconformity-related uranium deposits formed in the same basin, tectonic, P/T context and timing. The answers to these open questions are critical to establish ore genetic models and to guide future exploration. Most of the published works conclude about significant similarities of sedimentation, diagenesis, geochemistry and geochronology of fluids and uranium precipitation. All this existing literature attributes a major role to ductile shear zones (Poh et al., this vol.), brittle faults (Chi et al., Eldursi et al., and Mercadier et al., this vol.), and breccias (Grare et al., this vol.) in channeling metal-bearing fluids responsible for mineralization. Nevertheless, the “plumbing”, the 2D and 3D arrangement of the structural channels and traps, and the mechanisms driving fluid flow through fracture networks is still poorly constrained due, among others, to the strong alteration associated to the ore bodies that obliterates the tectonic features making difficult the structural approach. Today’s progress in drilling techniques, drill-core recovery and acquisition of confident and accurate oriented data (i.e. by using downhole Televiewer), bring good quality data that helps to figure out the structural footprint of uranium deposits.

In this presentation I will compare the structural controls and footprint that are so far known in basement-hosted deposits from studied cases from both basins with the objective to define similarities and/or differences between both uranium provinces.

Recent work about the Kiggavik area (Thelon basin) has demonstrated that mineralization is exclusively related to polyphased brittle tectonics resulting in the reactivation of long live, non-graphitic faults since ca. 1.750 Ma through ca. 1.250 Ma. Large, well-defined silica breccias of magmatic-related origin and cataclastic faults from various tectonic phases have channelled four different episodes of metal-bearing fluids responsible for uranium mineralization (see also Grare et al., this vol.). Observed deformation mechanisms attest for the role of active faulting and recurrent reuse of pre-existing fracture networks.

Macro and micro-structural work in progress (see Abdelrazek et al., this vol.) of studied cases from West Athabasca (Hook Lake prospect) and East Athabasca (Martin Lake prospect and Midwest deposit) suggest dominant pervasive hydraulic micro-brecciation and isotropic micro-fracturing tailed by strong corrosion of host rocks through vertical pipes reusing preexisting ductile shear zones. Pervasive corrosion (fluid/rock interaction) propagates from fractures into the host rock and develops dendritic corrosion wear textures that erase the original structural features. Uranium mineralization fills up and seals micro veins and corrosion cavities replacing host rock minerals. These observations minimise the role of active tectonics and faulting vs the passive reutilisation of pre-existing ductile shear zones and features (S1). Dissolution/corrosion is a deformation mechanism that reminds corrosion in geothermal systems (see also Ledru et al., this vol.) in which permeability opens through fractures by fluid overpressure and corrosion has a major role enhancing fracture permeability and efficiency.

These recent works emphasize that the structural controls of the uranium deposits are different in the Athabasca and Thelon basins.

# (NEEDS) ETUDE MULTIPARAMETRIQUE DE LA DISSOLUTION DE LA BRANNERITE SYNTHETIQUE

Adel Mesbah\*, Stéphanie Szenknect\*, Nicolas Dacheux\*

\*ICSM, UMR 5257, CEA, CNRS, ENSCM, Univ. Montpellier, Site de Marcoule – Bât. 426, BP 17171, 30207 Bagnols-sur-Cèze, France (adel.mesbah@cea.fr, Stéphanie.szenknect@cea.fr, nicolas.dacheux@cea.fr)

La brannerite (de formule idéale  $UTi_2O_6$ ) est considérée comme la troisième source d'uranium (IV) après l'uraninite et la coffinite<sup>1</sup>. Cependant, la brannerite est une phase minérale réfractaire à la dissolution et l'extraction de l'uranium contenu au sein de cette phase nécessite des conditions plus agressives que celles utilisées pour la lixiviation de minerais uranifères conventionnels. Les procédés utilisés sont également dépendants du type d'échantillon utilisé (composition chimique, granulométrie, gangue, minéraux associés, degré de metamictisation, degré d'altération ou d'oxydation, etc...) et il reste difficile de déduire des mécanismes ou des lois phénoménologiques en utilisant des échantillons naturels. Pour cette raison, des études multiparamétriques de dissolution d'échantillons synthétiques ont été entreprises plus récemment. Cependant les phases synthétisées ne sont pas toujours pures et les voies de synthèse répertoriées sont souvent très laborieuses. Très peu de données cinétiques reportées dans littérature paraissent donc extrapolables à d'autres types de conditions.

Dans ce contexte, une nouvelle méthode de synthèse a été développée à l'ICSM afin d'obtenir des échantillons purs de brannerite ( $UTi_2O_6$ ). Dans cette méthode alternative, l'alkoxyde de titane est introduit dans une solution d'uranium (IV) en milieu chlorhydrique (6 M HCl). Un mélange précurseur est obtenu près ajout d'un excès de  $NH_4OH$ . La solution est alors maintenue sous agitation pendant 30 minutes, puis le précipité est lavé à deux reprises avec de l'eau distillée et une fois avec de l'éthanol. La poudre obtenue est ensuite séchée sous vide afin d'éviter son agglomération et de préserver une forte réactivité. Cette poudre est pastillée puis traitée thermiquement sous argon durant 72 heures à  $1300^\circ C$ .

Dans un deuxième temps une étude multiparamétrique de dissolution a été effectuée, plusieurs expériences ont d'ores et déjà permis d'évaluer les vitesses de dissolution normalisées dans divers milieux et d'accéder à l'ordre partiel par rapport à l'activité en proton et à l'énergie d'activation de la réaction de dissolution. Plusieurs expériences ont été réalisées en milieu acide ( $H_2SO_4$ ) et basique (NaOH) à différentes températures. L'impact de la présence d'un agent oxydant a aussi été évalué en ajoutant des ions de  $Fe^{3+}$ . Des expériences de dissolution ont également été conduites en milieu silicaté à différentes acidités pour souligner le rôle éventuel des ions silicate dans le mécanisme de dissolution de la brannerite. Cet ensemble d'expériences a permis d'accéder aux différents paramètres cinétiques de dissolution de la brannerite synthétique.

1. IAEA. Uranium extraction technology. *Technical reports series* **1993**, 359,
2. Charalambous, F. A.; Ram, R.; Pownceby, M. I.; Tardio, J.; Bhargava, S. K. Chemical and microstructural characterisation studies on natural and heat treated brannerite samples. *Minerals Engineering* **2012**, 39, 276-288.
3. Gilligan, R.; Nikoloski, A. N. The extraction of uranium from brannerite – A literature review. *Minerals Engineering* **2015**, 71, 34-48.

# (NEEDS) CARACTERISATION DES BRANNERITES NATURELLES (UTi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) : UNE ETUDE TEXTURALE, GEOCHIMIQUE ET CRISTALLOGRAPHIQUE. IMPLICATIONS POUR LA CONNAISSANCE DES GISEMENTS D'U ET DES PROCESSUS DE REDISTRIBUTION D'U

Marion Turuani<sup>1</sup>, Choulet Flavien<sup>2</sup>, Eglinger Aurélien<sup>3</sup>, Goncalves Phillippe<sup>2</sup>, Mercadier Julien<sup>3</sup>, Batonneau Yann<sup>4</sup>, Seydoux-Guillaume Anne Magali<sup>1</sup>, Pagel Maurice<sup>5</sup>

1 LMV, Université Jean Monnet, Saint Etienne. 2 Chrono-Environnement, UBFC, Besançon  
3 GeoRessources, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy. 4 IC2MP, Université de Poitiers. 5 Geops, Université Paris Sud

Actuellement, l'uranium est essentiellement exploité à partir de minerais d'uraninite (UO<sub>2</sub>). L'épuisement programmé de cette ressource requière l'exploration de nouvelles phases minérales non conventionnelles. La brannerite, de formule idéale UTi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, souvent reportée (U, Ca, Th, REE, Y)(Ti, Al, Fe, Si)<sub>2</sub>O<sub>6-8</sub>(OH)<sub>x</sub> représente un potentiel minerais d'U, alternatif à l'uraninite. Les conditions de formation ainsi que les caractéristiques naturelles (e.g. composition chimique) de cette phase étant mal connues, une étude comparative de 14 échantillons naturels provenant de différents contextes géologiques (hydrothermal, métamorphique et magmatique) a été réalisée. Les observations microscopiques ont révélé une importante variété de texture (zonation concentrique, inclusions, stockwerk, couronnes d'altération). Les analyses des éléments majeurs, mineurs, traces et des compositions isotopiques ont permis de mettre en évidence 1) des substitutions sur les deux sites cristallographiques, qui en fonction de leur nature, marquent différents contexte géologique et qui peuvent être indicatrices des conditions de formation à l'échelle du gisement, 2) des spectres de Terres Rares marquant des signatures spécifiques pour chaque contexte de formation et 3) une homogénéité isotopique permettant l'utilisation de la brannerite comme géochronomètre. Certaines substitutions nécessitent une compensation de charge (e.g. Ca<sup>2+</sup>). Certains auteurs (*Lumpkin et al., 2012*) proposent que cette compensation s'effectue par une oxydation de l'uranium ce qui implique différentes spéciations de l'uranium au sein de ce minéral. Peu d'échantillons montrent une stœchiométrie proche du pôle théorique UTi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Les occurrences hydrothermales et métamorphiques présentent des zones très altérées, avec la cristallisation de phases secondaires (e.g. coffinite USiO<sub>4</sub>) témoignant d'interactions fluide-minéral. Le caractère radioactif de l'uranium pose la question de l'effet de la métamictisation et du temps sur la mobilité des éléments et la conservation de la composition chimique primaire. Une caractérisation à l'échelle nanométrique et moléculaire à travers des observations au MET et des analyses  $\mu$ Raman ont permis de mettre en évidence 1) l'absence de réseau cristallin même dans les brannerites les plus jeunes (4.8 Ma), 2) une nano-structuration (présence d'uraninite et de galène) dans les brannerites les plus vieilles (530 Ma), 3) la présence, dans le minéral amorphe, de liaisons chimiques impliquant le Ti et 4) des signatures  $\mu$ Raman indiquant la présence d'ions uranyle. En se basant sur les données de la littérature (*Lumpkin et al., 2012 ; Macmillan et al., 2017*) et les observations micro et nanoscopiques un modèle conceptuel de l'altération de ce minéral dans le milieu naturel a pu être proposé.

Lumpkin, G.R., Leung, S.H.F. and Ferenczy, J., 2012. Chemistry, microstructure, and alpha decay damage of Macmillan E., Cook N. J., Ehrig K., Pring A. 2017. Chemical and textural interpretation of late-stage coffinite and brannerite from the Olympic Dam IOCG-Ag-U deposit. *Mineralogical Magazine*. 81(6) :1323-1366

## THE PARAGENETIC SEQUENCE OF URANIUM PRECIPITATION IN ZUUVCH OVOO, MONGOLIA

Dimitrios Rallakis<sup>1</sup>, Michel Cathelineau<sup>1</sup>, Raymond Michels<sup>1</sup>, Marc Brouand<sup>2</sup>  
et Olivier Parize<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNRS, CREGU, Université de Lorraine, GeoRessources, 54501 Vandoeuvre-Nancy, France

<sup>2</sup>Orano, Tour Areva, 1, place Jean Millier, 92400 Courbevoie, France

The Zuuvch Oovo uranium deposit is located in East Gobi Basin, Mongolia. It is hosted in the Sainshand Formation, a Late Cretaceous siliciclastic reservoir, upper part of the post-rift infilling of the Mesozoic East Gobi Basin. The Sainshand Formation corresponds to unconsolidated medium-grained sandy intervals and clay layers deposited in fluvial-lacustrine settings. The uranium deposit is confined within a 60-80 m thick siliciclastic sequence inside aquifer driven systems assimilated to roll-fronts. As assessed by vitrinite reflectance (%VR<sub>o</sub>=0.4) and molecular geochemistry, the formation has never experienced significant thermal maturation.

The uranium ore is expressed as uraninite (UO<sub>2</sub>) and less commonly as phospho-coffinite (U,P)SiO<sub>4</sub>. The habitus of uranium is: (i) U-rich organic matter (type III kerogen as detrital elements) with or without any distinguishable U-phase, (ii) UO<sub>2</sub> inclusions inside euhedral pyrite and sphalerite, (iii) U-phases as epigenesis of associated pyrite and sphalerite cement, (iv) U-cement in clay matrix, (v) U-cement within euhedral dolomite, (vi) U-oxides associated to quartz cement, (vii) UO<sub>2</sub> replacing Fe-Ti oxides and (viii) U-phases within porous detrital silicates.

Organic matter and sulphides are the most important agents for uranium trapping while clays and Fe-Ti oxides play minor roles. According to petrographic observations coupled with geochemical data, there are at least four major uranium mineralization episodes linked to the roll-front activity. The first episode takes place right after the formation of the first euhedral pyrite on which pitchblende is found as coating. The fixation of U within the detrital organic matter may be contemporaneous to this first stage. The second pitchblende generation precipitates at the same time with the second generation of the euhedral pyrite and of sphalerite, in which it occurs as micro-sized spherules. The third uranium generation is characterized by massive formation of pitchblende acting as cement to the sand grains. Finally, the fourth uranium generation is differentiated by its chemistry which is close to the phospho-coffinite stoichiometry. It was also observed that pitchblende experiences limited coffinitization at a late diagenetic stage.

All data taken into account, a full paragenetic succession was constructed highlighting changes in fluid-rock interaction conditions. This sets the petrographic and geochemical background to document the diagenetic evolution of the roll-front system in relationship to U ore formation stages within a geological evolution framework.

# COMPARAISON ENTRE LES GISEMENTS D'URANIUM DE L'ALLIGATOR RIVER URANIUM FIELD ET CEUX DE WESTMORELAND (NORTHERN TERRITORY ET QUEENSLAND, AUSTRALIE)

Joséphine Gigon\*, Julien Mercadier\*\*, Antonin Richard\*\*\* Irvine  
Annesley\*\*\*\*, Andrew Wygralak<sup>+</sup>, Roger Skirrow<sup>++</sup>, Mark Kendrick<sup>+++</sup>, Terry  
Mernagh<sup>++++</sup>

\* Laboratoire GeoResources, Rue Jacques Callot BP 70239, 54506 Vandoeuvre-les-Nancy, France; josephine.gigon@univ-lorraine.

\*\* Laboratoire GeoResources; julien.mercadier@univ-lorraine.fr

\*\*\* Laboratoire GeoResources; antonin.richard@univ-lorraine.fr

\*\*\*\* Laboratoire GeoResources; irvine.annesley@univ-lorraine.fr

<sup>+</sup> Northern Territory Geological Survey, PO Box 2901, Darwin, NT 0801, Australie; andrew.wygralak@nt.gov.au

<sup>++</sup> Geoscience Australia, GPO Box 378, Canberra, ACT 2601, Australie; Roger.Skirrow@ga.gov.au

<sup>+++</sup> Australian National University, 142 Mills Rd., Acton, ACT 2601, Australie; mark.kendrick@anu.edu.au

<sup>++++</sup> Australian National University, 142 Mills Rd., Acton, ACT 2601, Australie; Terry.Mernagh@anu.edu.au

La province de Northern Territory (Australie) contient environ 30% des sources d'uranium «à bas coût» en Australie, avec 361 indices [1]. Les gisements peuvent être divisés en cinq types principaux [2], dont deux sur lesquels porte cette étude : les types « discordance » et « Westmoreland–Murphy ». Au nord du bassin paléo- à mésoprotérozoïque de McArthur, les gisements de type discordance de l'Alligator River Uranium Field (ARUF) comme Ranger, Nabarlek, Jabiluka et Koongarra sont situés dans le socle mais formés à partir de saumures issues du bassin de McArthur. A Westmoreland, au niveau de la bordure sud du bassin, d'anciennes mines d'uranium et de nouveaux prospectes comme Eva, Redtree et Junnagunna font partie du type Westmoreland–Murphy et sont localisés dans les formations basales du bassin. Contrairement à la zone d'ARUF, celle de Westmoreland a été très peu étudiée. Etant donné les contextes de mise en place similaires, il est donc d'intérêt d'établir une comparaison détaillée de ces deux types de minéralisations afin de déterminer si ces deux districts associés au même bassin sédimentaire peuvent être liés au même épisode minéralisateur ou aux mêmes processus. Pour répondre à ces questions, cette étude apporte de nouvelles données sur la minéralogie, la géochimie, la thermométrie, la géochronologie et les inclusions fluides dans le secteur de Westmoreland. L'ensemble de ces données est ensuite comparé à celles déjà publiées sur la zone d'ARUF.

[1] Ahmad, M., Munson, T.J., (compilers), (2013) - Geology and Mineral Resources of the Northern Territory, NTGS.

[2] Lally, J.H., Bajwah, Z., (2006) - Uranium Deposits of the Northern Territory, Rep. 20, NTGS.



# LES MINÉRALISATIONS REDOX A FORTE TENEUR LIÉES AU GRABEN TERTIAIRE, DANS LE SEDIMENTAIRE JURASSIQUE ET TRIASIQUE DE DASA (NIGER)

Christophe DIN\*, George Flach\*, Henri Sanguinetti\*, Peter Wolleberg \*

\* acdin@globalatomicfuels.com

\* gaflach@gmail.com

\* sanguinetti.henri@orange.fr

\* peterwollenberg@gmail.com

Le programme de développement 2018 en sondages carottés sur le gisement de DASA a confirmé la présence de zones à très forte teneur, localisées dans le TCHIREZRINE 2 sur le flanc sud du gisement. La préparation des échantillons pour analyses est en cours, et les résultats devraient être disponibles début janvier 2019. Les interprétations actuelles sont basées sur les mesures radiométriques en sondages effectuées avec des sondes équipées de tubes Geiger Muller VACUTECH 70019, et contrôlées dans deux puits tests à forte activité avec les sondes Orano DHT27 et NGRS de référence.

Les observations de carottes qui sont rassemblées dans cette présentation et replacées dans le modèle actuel, montrent l'existence de minéralisations liées à des contrôles sédimentaires et de minéralisations associées à des fracturations. Ces minéralisations se situent au sein d'un ensemble redox complexe, marqué par des colorations propres aux facies du Tchirezrine.

L'interprétation structurale du graben de DASA montre que sa forme actuelle résulte de mouvements récents, post déposition des sédiments du Tegama (Crétacé). Les événements antérieurs sont certainement masqués mais il y a des signes de l'activité de cette structure à plusieurs époques depuis le Carbonifère, avec des phases de minéralisations qui pourraient être distinctes.

La localisation des minéralisations présentées confirment l'importance des flux chargés en uranium qui ont dû circuler à la faveur des accidents N70E à l'époque Tertiaire, pouvant développer à DASA des enrichissements inconnus jusqu'alors au Niger, mais alimenter aussi d'autres zones du bassin localisées à l'aplomb de foyers d'activité hydrogéologiques similaires.

# THE CHALLENGES TO EXPLORE AND DISCOVER AN UNCONFORMITY DEPOSIT AT DEPTH

John Robbins, Patrick Ledru

\*Orano Canada Inc., Saskatoon, Canada, john.robbins@orano.group

Proterozoic unconformity uranium deposits are considered the highest grade deposits in the world. The most recognized deposits occur in the Athabasca basin in Canada. As indicated in the 2016 “Red Book”, Proterozoic unconformity deposits account for about one-third of the world’s uranium resources based upon reasonably assured resources. In 2017, the only two producing uranium mines in Canada allowed for over 20% of the world supply utilizing underground mining methods. One matrix using current research of active mining operations with publicly disclosed data involving ore reserves, calculated according to an international standard, has outlined Cameco’s Cigar Lake and McArthur River operations as having the most valuable ore. Current statistics obtained from the Saskatchewan Mining Association indicate that exploration expenditures in the Athabasca Basin were \$CAD 45.8 million in 2017. Major uranium companies such as Orano Canada (previously AREVA Resources Canada Inc.) and Cameco Corporation have committed the majority of their annual exploration dollars to the Athabasca Basin. Other known uranium companies with publicly announced discoveries such as NexGen Energy Ltd (NexGen), Denison Mines (Denison) and Fission Uranium Corp. (Fission) continue to release promising results in defining new discoveries and provide optimism to investors with their exploration expenditures.

An internal review of the current land disposition in the Athabasca Basin (includes the provinces of Alberta and Saskatchewan) involving uranium exploration was conducted in February, 2018. Upon review, it is estimated that 40% of the claims deemed for uranium exploration are located on the edge or outside of the sandstone cover of the Athabasca Basin. In terms of actual surface area within the confines of the basin itself, 53% of the land mass has been staked between the depths of 0 to 500 metres with the majority of the southern, central and eastern edges of the basin being claimed. The rationale for the land disposition has to do with current and past mining operations in the eastern Athabasca; the Wollaston-Mudjatik transition zone hosts the Cigar Lake and McArthur River operations and the majority of economical and non-economical deposits. The staking along the southern and central edges of the basin has been driven in part by the discoveries by NexGen and Fission. As the unconformity becomes deeper there is less staked land and at a known unconformity depth between 500 and 1000 metres only 25% of the land mass has been claimed. The acquired land is there associated with the lateral extension of known fertile trends related to conductive corridors or regional fault systems. Within the deepest portions of the basin, greater than 1000 metres depth to the unconformity, less than 4% of the land mass is acquired.

In a long term vision, the critical depth of exploration within the Athabasca Basin will likely evolve and it is probable that the deepest portions of the basin, from 500 to more than 1000m, will be considered for greenfield exploration. However, several economical and technical challenges will have to be faced. What type of mineral deposit and which size will have to be targeted to become economic? Can we expect some technical and scientific breakthrough that would improve significantly the resolution of the geophysical methods, the drilling technologies and our ability to vector our geological exploration? This new frontier and challenges are discussed in relation to the present state of art and in reference to the Cigar Lake giant deposit.

# POTENTIAL FOR HIGH GRADE URANIUM MINERALIZATION IN THE WEST ATHABASCA

Olivier Gerbeaud\*, Patrick Ledru\*\*, John Robbins\*\*, Mario Blain\*\*, Craig Cutts\*\*

\*Orano, 1 Pl. Jean Miller, 92400 Courbevoie. olivier.gerbeaud@orano.group

\*\* Orano Canada, 817 45th St. W, Saskatoon, SK S7L 5X2, Canada.

The Athabasca Paleoproterozoic detrital basin located in northern Saskatchewan (Canada) is known to host the largest reserves of high-grade uranium unconformity-type deposits in the world. Two of the largest underground deposits (McArthur and Cigar Lake) are located in the eastern side of the basin.

While most of the exploration focus has been centered in the eastern side of the basin, the central and the western portion remain relatively under-explored. Yet, uranium has been known from the 1970's and extracted in the western portion of the Athabasca Basin from the past producer Cluff Lake that shut down in 2002. In parallel, some significant occurrences were discovered, like the Dragon Lake area in Alberta (Maybelle) in 1988 and the Shea Creek mineralization in 1994, but both are considered to be under an economical threshold. More recent significant discoveries, such as Centennial in 2004, and even more recently Triple R (2012), Arrow (2014) and Spitfire (2014) along the Patterson Lake trend, have demonstrated the good potential of, and renewed the interest in, the Western Athabasca.

The Western Athabasca Paleoproterozoic basement rocks (Taltson Domain) differ much from the East (Wollaston-Mudjatik Transition Zone). In addition, some of the recent discoveries have challenged the classical Athabasca high-grade uranium deposit model (as described in Hoeve and Quirt, 1984; Jefferson et al., 2007), with some deviations from the model, and atypical geological controls (Card & Noll, 2016; Card, 2017). This has been observed at Centennial (no clear evidence of a graphitic shear zone in the basement, P. Alexandre et al., 2011), and along the Patterson Lake Corridor (uranium deeply rooted in the basement in Arrow, importance of mafic intrusive rocks in Spitfire). Thereby, in this context, some of the usual exploration guides are put into question, and the need for a renewal of ideas appears to be important for future exploration.

Most of historical exploration drilling over the basin focused on an unconformity-type model, by transposing a model defined in the Eastern part of the basin to the West, and with few drill holes designed to investigate the basement rocks. As a consequence, the regional knowledge of the basement geology remains quite immature, although it appears now to be a key-factor for uranium exploration. However, significant improvements regarding the geological knowledge of the Taltson (former Lloyd) Domain were made in the last few years, due to significant exploration programs and to some regional investigations performed by the Saskatchewan Geological Survey, and to a lesser extent by exploration companies' themselves. Some of the more recent geological considerations, as well as specific methods and approaches that could lead to improve the understanding of the basement architecture and refine exploration in the West Athabasca are presented and discussed.

P. Alexandre et al. (2011), *Economic Geology* 107-3; J. Hoeve and D. Quirt (1984), SRC Technical Report No.187; C.W. Jefferson et al. (2007), *Bull. Geological Survey, Canada*; C. Card and J. Noll (2016), *Summary of investigations 2016, vol. 2*; C. Card (2017), *Summary of investigations 2017, vol. 2*.

# LAURENTIA EXTENSION CA 2000 -1500 MA AS REFLECTED IN THE DEVELOPMENT OF THE ATHABASCA AND RELATED BASINS: IMPLICATIONS FOR URANIUM GEOLOGY

Paul Ramaekers\*

\*MF Resources Inc., 832 Parkwood Drive, SE., Calgary, AB, Canada T2J 3W7, mfres@telus.net

Northwest Laurentian Proterozoic basins hosting U deposits range in age from ca 2100 Ma to 1200 Ma and were formed in tectonic environments ranging from continental rifts to collisional orogens. U was emplaced and remobilized in diagenetic events. Athabasca region 'unconformity-type' ore is emplaced near the base of three stacked, overlapping Proterozoic basins (Jackfish, Cree and Mirror): the Athabasca Basin in older literature.

The oldest basin (Jackfish) is structurally aligned with the basins of the Hudsonian Martin Group, and its fill, but not its diagenetic history, also resembles that of the intermontane Martin Group rather than that of the overlying Cree and Mirror basins. Thus, it may be regarded as the latest of the peak orogenic Martin basins.

The Cree Basin (ca 1720-1700 Ma) forms a simple NW trending trough, in response to late movement within the Trans-Hudson Orogen (THO) as it continued to be modified by ongoing activity along its southern margin. Thus it might be regarded as late THO basin, or part of the early extension that lead to breakup along the west and northwest margin of Laurentia, with a network of basins extending cratonward, analogous to the aborted continental breakup basins in Africa and Europe heralding the formation of the Atlantic. The oldest U ages in the Athabasca basins (ca. 1600 Ma) correspond to that of the upper evaporitic unit of the Cree Basin, the Wolverine Point Fm.

Most reported U-Pb ages of uraninite coincide with formation of the Mirror Basin (1550-1500 Ma). The preserved fill consists of over 2300 m of clastics, minor evaporites and dolomites. The Mirror basin consists of deep NE trending troughs, consistent with renewed continental extension. Mirror Basin subsidence controls the shape of the underlying basement troughs. U orebodies are located at their ends, and in faults related to their formation. Thus, the formation of the Mirror basins was a controlling factor in guiding Wolverine Point, Douglas, Carswell U-extracting and emplacing brines to basement U traps, and that Mirror Basin related faulting marks the limit of Athabasca region unconformity ore.

Note that the chemically most leached sandstone in the area is the Otherside Fm of the Mirror Basin, and that the sabkhas in these basins were effective intermediate U traps that kept dissolved U from lateritic weathering in the basins until deep burial. Basin sequences from this time show comparable histories through much of NW Laurentia.

# A NUMERICAL MODELLING PERSPECTIVE OF THE PRECAMBRIAN RAE-HEARNE CRATON AND ITS IMPLICATIONS TO URANIUM MINERALISATION

Jonathan Poh<sup>1</sup>, Philippe Yamato<sup>1,2</sup>, Thibault Duretz<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>3</sup>, Denis Gapais<sup>1</sup>, Guoxiang Chi<sup>4</sup>, Khalifa Eldursi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France

(jonathan.poh@univ-rennes1.fr)

<sup>2</sup> Institut Universitaire de France, Paris, France

<sup>3</sup> Orano Canada Inc, Saskatoon, Canada

<sup>4</sup> Department of Geology, University of Regina, 3737 Wascana Parkway, Regina, Saskatchewan S4S 0A2, Canada

Exceptional high to ultra-high grade uranium deposits are located at the eastern margins of the Athabasca Basin (Saskatchewan, Canada), making it a world class metallogenic province. These uranium deposits are situated near the unconformity between the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic sedimentary rocks of the Athabasca Group and the Archean to Paleoproterozoic metamorphic rocks, and are termed unconformity-related uranium deposits. The orebodies are spatially associated with reactivated basement faults crosscutting and locally displacing the unconformity. These basement faults have been interpreted to have resulted from thermo-tectonic events prior to the Athabasca Basin, particularly during the 1.84 - 1.78 Ga Trans-Hudson Orogeny. An investigation was undertaken to evaluate tectonic processes leading to the basement structures' inception, which resides within the Rae-Hearne Craton and underlying the Athabasca Basin. Understanding the dynamics of the tectonic processes that influence the outcome of structural geometries, have major implications in predetermining eventual loci for fluid circulations and prospective origins of the unconformity-related uranium deposits.

A systematic numerical modelling approach was adopted. We simulated the compressive effects of far-field stresses on a lithospheric-scaled thermo-mechanical lithospheric-scaled geological model (200 km by 100 km) over a wide range of thermal profiles and shortening rates. The model consists of a granitic basement with a thin sedimentary cover, mimicking thermo-mechanical conditions determined from previously studied Precambrian field examples. Each modelling result was then compared against the geological and metamorphic data of the Rae-Hearne craton in order to determine possible reference models. One of the models, which is in agreement with the geological and metamorphic data, was used as input to simulate coupled fluid-thermal processes. The vertical orientation of the finite strain patterns from our thermo-mechanical results can be reinterpreted as enhanced permeability structures, providing new and complex fault geometries to focus fluid flow and improve fluid-basement rock interactions.

With the structural framework of the Pre-Athabasca period thus established, it is now possible to simulate fluid flow and heat transfer scenarios during uranium mineralisation. We applied an integrated workflow between two numerical codes (M-Doodz and FLAC3D) in two laboratories (Rennes and Regina). Preliminary results suggest that deep seated structures play a role of fluid conduits, and produce strong thermal anomalies within the overlying sedimentary cover. In addition, they govern the size and location of convection cells established within the sedimentary cover.

# INFLUENCES OF FAULT CONFIGURATION AND ATTRIBUTES ON THE LOCALISATION OF URANIUM DEPOSITS IN THE ATHABASCA BASIN, CANADA: A CASE STUDY OF THE CIGAR LAKE DEPOSIT

Khalifa Eldursi<sup>\*</sup>, Guoxiang Chi<sup>\*</sup>, Kathryn Bethune<sup>\*</sup>, Zenghua Li<sup>\*</sup>, Patrick Ledru<sup>\*\*</sup>,  
David Quirt<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Department of Geology, University of Regina, Regina, Canada,  
khalifa.eldursi@gmail.com; <sup>\*\*</sup> Orano Canada Inc, Saskatoon, Canada.

The uranium deposits in the Athabasca Basin, referred to as “unconformity-related”, are further subdivided into two types: unconformity-contact or sandstone-hosted, believed to be associated with egress fluid flow (e.g., Cigar Lake), and basement-hosted, in which the deposits are located within the basement and have been linked to ingress fluid flow (e.g., Eagle Point). The close spatial relationship between uranium deposits and reactivated basement faults in the Athabasca Basin has been recognized for a long time, with the role of faults being assumed to be as fluid conduits and/or structural traps. Although significant progress has been made to improve our metallogenetic understanding of the unconformity-related deposits since the early discoveries, questions related to the influence of the basement faults on fluid flow at the deposit scale, and thus on the formation and localization of the uranium deposits, still remain.

In this study, several 2D and 3D numerical models were carried out to evaluate the effects of fault geometry and other attributes (dip angle, direction, thickness, number and spacing, and vertical extent) on the fluid flow patterns under different driving forces (thermal convection, deformation, and both). The models comprise two categories: the first category includes general models designed to study fault configurations and attributes with simplified scenarios, and the second category includes deposit-scale case study scenarios based on the structural architecture of the Cigar Lake deposit.

The results of the general models show that the basement faults can be separated into two categories: basement faults that are limited by the unconformity surface, and extended basement faults that cut the unconformity surface and extend into the sandstone. The two types have different influences on fluid flow patterns under different driving forces due to their geometry and attributes. In the case of the Cigar Lake deposit, both basement faults and extended basement faults are present and were involved in the mineralization process. In deformation-driven models, both types of faults enhance the permeability of the E-W structural corridor, inferred to be related to both tip- and intersection-fault damage. In the thermal convection-driven models, the basement faults provide suitable conditions for the basinal fluids to flow down into the basement, and interact with basement fluid, and/or lithology, whereas the extended basement faults strengthen the upwelling fluid flow and focus the fluid within the structural corridor. The numerical results are also consistent with field observations at other uranium mineralization sites within the Athabasca region and provide new insights into geological factors responsible for the localization of these deposits.

# IMPLICIT MODEL CREATION FOR THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL INVERSION AND FORWARD MODELLING

Daniel Gerger<sup>\*</sup>, Gabriel Courrioux<sup>\*\*</sup>, Charles Gumiaux<sup>\*\*\*</sup>, Dwayne Kinar<sup>\*</sup>, Grant Harrison<sup>\*</sup>, Patrick Ledru<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Orano Canada Inc., P.O. Box 9204, 810 – 45th Street West, Saskatoon, SK S7K 3X5, Canada. daniel.gerger@orano.group

<sup>\*\*</sup> BRGM, 3 avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, France. g.courrioux@brgm.fr

<sup>\*\*\*</sup> ISTO, UMR 7327 CNRS-Université d'Orléans-BRGM, 1A rue de la Ferrollerie, F-45071 Orléans, France. charles.gumiaux@univ-orleans.fr

Exploration for undiscovered uranium deposits across the Wollaston-Mudjatik Transition zone of the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada is complicated by a thick sandstone and overburden cover, masking the geophysical response of the basement-sandstone unconformity surface that provides a favourable pathway and trap for mineralizing fluids. Alteration envelopes associated with uranium deposition can be used as important vectors in the exploration for these buried 'blind-target' deposits as they can significantly alter the physical properties, notably density and resistivity, of the surrounding host rock and resultantly the geophysical response. Innovative and adaptable operational workflows can be developed to better target low density anomalies associated with alteration haloes at or near the unconformity interface through the reconciliation of observational and interpretive data by utilizing geological constraints within a 3D model for geophysical forward and inversion modelling.

The aim of this project is to focus on the spatial distribution of density across the Getty Russell project, operated by Orano Canada Inc. along the Wollaston-Mudjatik Transition zone, and to reconcile this distribution determined from available field data with the observed gravimetric response. This is accomplished through the application of forward and inversion modelling on a 3D block model of the project within 3D Geomodeller software using a Heli-Falcon Airborne Gravity Gradiometer survey flown in 2016 as a constraint via the observed gravimetric response. Results from the inversion suggestive of areas of interest must be reconciled with known metallogenic guides for uranium mineralization, principally graphitic horizons as they intersect the unconformity surface in association with re-activated fault networks. When combined with an 'expert-driven' approach to data analysis regarding known and favourable factors within the geological context of the project area, identification of zones of physical property variation unaccounted for in the geological model can be used to vector towards zones of interest for improved drill targeting for deeply buried ore deposits.

# LES PHOSPHATES ET SULFATES D'ALUMINIUM (APS) DES GISEMENTS D'URANIUM SPATIALEMENT LIÉS AUX DISCORDANCES PROTÉROZOÏQUES AU CANADA ET EN AUSTRALIE

\*Daniel Beaufort, \*\*Stéphane Gaboreau and \*\*\*Thomas Riegler

\*IC2MP, Université de Poitiers, 6 Rue Michel Brunet, TSA 51106, F-86073 Poitiers cedex 9, France. daniel.beaufort@univ-poitiers.fr

\*\* BRGM, D3E/DVP, 3 Avenue Claude Guillemin, F-45060 Orléans Cedex 2, France.

s.gaboreau@brgm.fr

\*\*\* iCRAG/Trinity College Dublin Department of Geology, College Green, Dublin 2 Ireland. rieglert@tcd.ie

Les phosphates-sulfates d'aluminium (APS) du supergroupe de l'alunite sont ubiquistes dans beaucoup d'environnements géologiques de la croûte terrestre (latérites, roches sédimentaires, systèmes hydrothermaux, roches métamorphiques et volcaniques). Les APS cristallisent dans le système rhomboédrique avec une formule générale  $AB_3(XO_4)_2(OH)_6$ , où A, B et X correspondent à trois sites cristallographiques de coordinance 12, 6 et 4 respectivement, ce qui permet à ces minéraux d'incorporer une très grande variété d'éléments chimiques dans leur structure. Les APS des groupes de la crandallite et la woodhouseite sont particulièrement répandus dans les halos d'altération argileuse associés aux gisements d'uranium spatialement liés aux discordances protérozoïques du Canada et d'Australie. Les études minéralogiques et pétrographiques de ces halos d'altération publiées au cours des 15 dernières années ont démontré que la variabilité cristallochimique des APS analysée à toute échelle (du cristal au bassin) met en jeu des solutions solides entre les pôles phosphate et/ou sulfate de calcium (crandallite, woodhouseite), de strontium (goyazite, svanbergite) et de terres rares légères (florencite). Ces variations ont été interprétées en termes de conditions de formation, d'origine des fluides et de lien potentiel avec les processus géochimiques minéralisateurs de l'uranium. Les principaux enseignements de ces travaux peuvent être résumés comme suit :

Bien qu'ils présentent de fortes similitudes dans leur distribution spatiale et leur cristallochimie, les APS des différents bassins protérozoïques hôtes des gisements d'uranium (Athabasca, Thelon, Kombolgie) peuvent avoir plusieurs origines : (1) Une génération précoce d'APS, associée à la kaolinite et plus accessoirement au diaspore et la cérianite, appartient au cortège détritique des formations gréseuses ; (2) La génération la plus abondante d'APS est liée à la diagenèse d'enfouissement des sédiments gréseux et à l'interaction des fluides diagénétiques avec les roches du socle pendant la période de mise en place des minéralisations spatialement liées aux discordances basales ; (3) Une génération tardive d'APS, liée à la remobilisation de la minéralisation uranifère par des infiltrations de fluides météoriques, peut être observée dans les gisements peu enfouis.

L'aptitude des APS pour l'archivage cristallochimique des paléoconditions combinée avec leur très faible solubilité et leur capacité à se développer par surcroissance font de ces minéraux des candidats très prometteurs pour l'enregistrement de l'histoire des phénomènes d'altération dans ces bassins.



# **HYDROGEOLOGICAL MODELLING AND GROUNDWATER GEOCHEMISTRY FOR URANIUM EXPLORATION IN THE ATHABASCA BASIN (CANADA)**

Valerie Plagnes<sup>1,2</sup>, Dave Quirt<sup>2</sup>, Antonio Benedicto<sup>3,2</sup>, John Mahoney<sup>4</sup>, Patrick Ledru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université, UMR METIS, France, valerie.plagnes@sorbonne-universite.fr ;

<sup>2</sup> Orano Canada Inc., Saskatoon, Canada;

<sup>3</sup> Université Paris Saclay, UMR GEOPS, France; <sup>4</sup> Mahoney Geochemical Consulting, Colorado, USA

A multidisciplinary approach combining a hydrogeochemical survey of groundwater and a 3D groundwater flow model has been tested on unconformity-type U mineralization in the Athabasca Basin, as a new additional guide for uranium exploration. This approach has been developed within the McClean Lake Operation site, in the Eastern part of the basin. This site presents several advantages to conduct this new approach. First, the area is relatively well known from a geological point of view thanks to the exploration activities. Second, groundwater levels and quality have been monitored for a long time in the entire area for environmental purposes and risk assessments.

McClean Lake Operations area comprises several uranium deposits, some of them have been mined and others are not yet mined. The goal of the exploration work on-going in this area is to find new deposits in the vicinity of the known deposits in order to facilitate an eventual future exploitation.

Even though a significant amount of hydrologic data is available in our study area, we carried on an additional specific field campaign between June and October 2016. Groundwater levels were measured in 60 wells and groundwater sampling was conducted at 31 of these wells, some of them are screened in basement rocks below the unconformity and others in sandstones above the unconformity. Among these wells, we included 4 wells located in the close vicinity of a known ore body (SABRE area) in order to better evaluate the potential of our approach to identify the presence of U mineralization.

Results show that in this study area, U concentrations and SI maps are not good pathfinders for U mineralization as U concentrations are very low for all samples due to strong reducing conditions. Saturation indexes (SI) indicate supersaturation with respect to uraninite and coffinite for most of the samples, but the U concentration is too low to precipitate. However, 5 of the wells exhibits a remarkable geochemical composition with the highest Total Dissolved Solids and particularly very high Cl concentration (200-600 mg/L) compared to all the other samples (Cl < 1mg/L). Strong relationships between Cl and Na, K, Mg, Ca, Fe as well as Sr and Ba concentrations suggest that these ions may be derived from a common source. Four of these 5 samples belong to SABRE area, but the fifth well is located upstream of SABRE area, far from a known ore body. The flow path terminating at this well screen was traced to its source by backward particle tracking from a groundwater flow model previously developed for this purpose. In the groundwater model structure, the graphite-rich fault zones are considered as the main geological structures controlling the groundwater flows. The up-gradient geochemical plume deciphered from backward streamlines allows identifying new exploration targets.

This approach appears to be an appropriate method for prioritizing the locations of future exploration drilling.

# ORIGIN OF FAULT-RELATED PHYSICAL SEALS AND THEIR CONTROL ON UNCONFORMITY-RELATED URANIUM MINERALIZATION: A CASE STUDY IN THE KIGGAVIK AREA (NUNAVUT, CANADA)

Alexis Grare<sup>1</sup>, Olivier Lacombe<sup>1</sup>, Julien Mercadier<sup>2</sup>, Antonio Benedicto<sup>3</sup>, Marie Guilcher<sup>2</sup>, Anna Trave<sup>4</sup>, Patrick Ledru<sup>5</sup> and John Robbins<sup>5</sup>

1- Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre de Paris, IStEP UMR 7193, F-75005 Paris, France; alexisgrare@gmail.com; olivier.lacombe@sorbonne-universite.fr

2- Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources lab, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France; julien.mercadier@univ-lorraine.fr (J.M.); marie.guilcher1@gmail.com (M.G.)

3- UMR Geops, Université Paris Sud, 91405 Orsay, France; antonio.benedicto@u-psud.fr

4- Departament de Mineralogia, Universitat de Barcelona (UB), Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, 08028 Barcelona, Spain; atrave@ub.edu

5- Orano Canada Inc., 817 45th Street, West Saskatoon, SK S7L 5X2, Canada; patrick.ledru@orano.group (P.L.); john.robbins@orano.group (J.R.)

Hydrothermal breccias can be of various types depending on several parameters, such as pressure, temperature, depth of emplacement, and elements in the fluids (Jébrak et al., 1997). Among them, quartz-cemented breccias can have an economic interest, being possibly associated with ore deposits such as epithermal (Au-Ag-Cu-Pb-Zn-Sb), orogenic gold (Au), and porphyric (Cu-Mo-Au-Ag). They display thickness from meter to several meters, thicker hydrothermal breccias being relatively rarely described. Quartz breccias in fault zones form progressively during several cycles of fluid pressure growth, seismogenic fault slip and quartz precipitation. In the Kiggavik area (Nunavut, Canada), major fault zones along, or close to, where uranium deposits are found are often associated with occurrence of thick quartz breccia (QB) bodies (Grare et al., 2018).

These bodies formed in an early stage (~1750 Ma) of the long-lasting tectonic history of the Archean basement, and of the Proterozoic Thelon basin. Faults formed earlier during syn- to post-orogenic rifting (1850–1750 Ma) were subsequently reactivated, and underwent cycles of cataclasis, pervasive silicification, hydraulic brecciation, and quartz recrystallization. These processes were synchronous with the circulation of meteoric fluids mixing with Si-rich magmatic-derived fluids at depth. The formation of the QB was coeval with the emplacement of the Kivalliq igneous suite at 1750 Ma.

These processes led to the emplacement of up to 30 m thick QB, which behaved as a mechanically strong, transverse hydraulic barrier that localized later fracturing, and compartmentalized/channelized vertical flow of uranium-bearing fluids after the deposition of the Thelon Basin (post 1750 Ma). The development and location of this fault seal control the location of uranium mineralization in the Kiggavik area.

Jébrak, M. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geol. Rev.* 1997, 12, 111–134, doi:10.1016/S0169-1368(97)00009-7.

Grare, A.; Benedicto, A.; Lacombe, O.; Trave, A.; Ledru, P.; Blain, M.; Robbins, J. The Contact uranium prospect, Kiggavik project, Nunavut (Canada): Tectonic history, structural constraints and timing of mineralization. *Ore Geol. Rev.* 2018, 93, 141–167, doi:10.1016/j.oregeorev.2017.12.015.

# DEFORMATION PROCESSES IN THE SPITFIRE PROSPECT, PATTERSON LAKE CORRIDOR, WEST CANADA

Maher Abdelrazek\*, Antonio Benedicto\*, Cameron MacKay\*\*, Darren Slugoski\*\*, Scott Frostad\*\*, Patrick Ledru\*\*\*

\*Géosciences Paris Sud (GEOPS), Bâtiment 504, Rue du Belvédère, 91405 Orsay Cedex, France. maher.abdelrazek@u-psud.fr

\*\*Purepoint Uranium Group, 111 2 Ave S, Saskatoon, SK S7K 1K6, Canada

\*\*\*Orano Canada, 810 45 St W, Saskatoon, SK S7L 5X1, Canada

In the Athabasca Basin (Canada), exploration targeting has focused for decades on the intersection between basement-hosted graphitic conductors and the basin unconformity. The exploration guide is the supposed structural control that have acted both as channels and barriers, creating fluid pathways and traps for fluid-rock interaction and uranium mineralization (i.e. Abdelrazek et al., 2016; Grare et al., 2017; Martz et al., 2017).

Recent discoveries in the western part of the basin, along the Patterson Lake trend, raise new questions about the conjugation of structural parameters needed to develop economic size unconformity type deposit. Along the Patterson Lake trend, the economic mineralization is basement hosted, reaching 900m depth, below no or little sandstones overlying the basement (i.e. Arrow and Triple R deposits). Orano Canada has interests in this area through a joint venture with Cameco and Purepoint Uranium Inc. about the Hook Lake property. The Hook Lake property hosts the Spitfire prospect (10.3% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> over 10.0 metres). The present PhD project tries to understand the structural controls and the structural footprint of basement hosted deposits.

Work in progress in the Hook Lake property shows no major brittle structure intersected in drillholes as it would be expected for economic size deposit. The microstructural analysis of texture/alteration/mineralization relationships of drill core from the Spitfire orebody highlights the development of micro-fracturation and strong dissolution processes along the pre-existing ductile-shear zone. Uranium mineralization is associated with different mineral phases and different alterations along depth from the top of the upper body to the bottom of the root.

Corrosion associated with automorphous ferruginous chlorite is the dominant process within the orebody root. In the upper part of the orebody, mineralizing fluids use microfractures and grain boundaries to spread, leading to hydraulic brecciation textures, sub-orthogonal to foliation. In the oxydized facies, mineralization is remobilized and precipitated as spherulitic nodules within foliation planes.

Abdelrazek M., Gerbeaud O., Kinar D., Ledru P. (2016). Structural analysis of the ductile-brittle fault network in the basement below the Athabasca Basin (Martin Lake, Saskatchewan). Journées de l'Uranium Orsay.

Benedicto, A., MacKay, C., Frostad, S., Slugoski, D., Ledru, P. (2017). Uranium mineralization and structural controls in the Spitfire prospect, Hook Lake Project, Patterson Lake Trend, Canada. SGA – Extended abstract. Submitted.

Grare, A., Benedicto, A., Lacombe, O., Trave, A., Robbins, J., Ledru, P., Blain, M. (2017). Structural controls on uranium mineralizations at the Kiggavik Project (NE Thelon area, Canada). SGA – Extended abstract. Submitted

## ARE UNCONFORMITY-RELATED URANIUM DEPOSITS OF ATHABASCA PALEO-ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS?

Patrick Ledru\*, Jean Marc Lardeaux\*\*, Yves Géraud\*\*\*, Charles Khairallah\*,  
Vivien Navelot\*\*\*

\*Orano Canada Inc., Saskatoon, Canada, patrick.ledru@orano.group; \*\* Université Nice Sophia-Antipolis, France; \*\*\* Université Nancy Lorraine, France

The concept of Enhanced Geothermal Systems (EGS) was defined following experiences of reservoir stimulation in Hot Dry Rocks. Within regions of high geothermal gradients, temperature may reach more than 200°C at depth less than 5 km that can be attained by borehole doublets. Experiments have shown that the natural permeability network was able to be stimulated by mechanical and chemical processes, mainly through the injection of fluids at the base of an injector well. Structural analysis done in these boreholes has demonstrated that the stimulation of the permeability was mainly related to the development of fracture systems tightly controlled by inherited reactivated structures within mainly altered lithologies. This EGS is then used for initiating and maintaining a loop enabling injected fluid to exchange heat with the reservoir and transfer it to the surface to produce electricity. This concept has also been applied to active geothermal field as it has been proven that reinjection of fluid in the reservoir was a condition for maintaining a sustainable exploitation of the vapor.

In the Soultz project, the borehole triplet has reached a fractured Variscan granite at 5000 m depth, situated below the unconformity at the base of the Mesozoic sequence of the Rhine Graben. Extensive researches have demonstrated that fluid exchanges between the basement and the basin had never been interrupted since the deposition of the first Mesozoic sequences, revealing that the crust had a bulk permeability up to now clearly underestimated.

The updated metallogenic model for the generation of unconformity-type deposits at the base of the Paleoproterozoic Athabasca Basin in Canada invokes the precipitation of uranium-enriched fluids in structural-chemical traps, along steep reactivated basement-rooted structures inherited from the Trans Hudsonian orogeny (1.8 Ga), and sub-horizontal discontinuities at the base of the basin. The footprint of the main deposits is characterized by variably extensive zones in which the hydrothermal environment has led to a complete alteration of the basement and overlying sedimentary sequences. The fact that many deposits are located within or at the apex of basement-hosted graphitic lithologies or shear zones is a solid argument to link these structural discontinuities and the related channeling of these reduced fluids with the chemical traps. Structural analysis shows that the fracture network permeability has been active since the cooling and retromorphism of the basement until the percolation of the brines originated from the basin and that reactivation of the steeply dipping structures, related to late Post Athabasca compressive events and marked by the offset of the unconformity, has played a major role in channelizing the mineralizing fluids. Fluid flow modelling also support the contribution of these structures to the interaction between basement and basin fluids, giving birth to egress and ingress style of Unconformity Related Uranium deposits.

An analogy between EGS and Unconformity Related Uranium deposits is proposed as in both cases a preexisting permeability network is stimulated, whether by forceful injection of fluids or by tectonic processes, enabling the creation and maintaining fluid convection at the scale of the crust. The temperature range to which this stimulation occurs is around 200°C for both environments and fluid rock interactions are observed, marked by the leaching of large volume of rocks and progressive enrichment in metals.