

# SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

Société savante fondée le 17 mars 1830  
Reconnue d'utilité publique le 3 avril 1832

Réunion GEOPS-NEEDS/CNRS  
avec le concours d'Orano et du CEA



## Les Journées Uranium d'Orsay



orano



université  
PARIS-SACLAY

Les journées uranium réunissent des participants couvrant un domaine allant des approches académiques aux applications industrielles. Ces journées sont totalement ouvertes et sont l'occasion de faire le point dans les différents domaines de l'amont du cycle de l'uranium.

**Les journées uranium de 2022 amèneront des conférences invitées et des débats sur la conjoncture actuelle et future de l'uranium**

Une demi-journée est consacrée aux projets qui sont financés par le programme du CNRS NEEDS (Nucléaire: Energie, Environnement, Déchets, Société) dans le cadre de la thématique «Ressources».

## 20 & 21 janvier 2022

Université de Paris-Saclay  
Faculté des Sciences – UMR GEOPS  
Campus d'Orsay – Bât 510  
Amphi Blandin

**Date limite de proposition des résumés :  
25 octobre 2021**

*Un numéro spécial du Bulletin de la Société Géologique de France permettra une diffusion plus large des travaux pour ceux qui souhaitent y participer.*

**Inscription gratuite  
mais obligatoire  
avant le 15 octobre 2021**

par courrier électronique à  
Antonio Benedicto

antonio.benedicto@universite-paris-saclay.fr  
et

Maurice Pagel

maurice.pagel@universite-paris-saclay.fr

avec pour objet : JUO - 2022

### Organisateurs :

Antonio Benedicto et Maurice Pagel (GEOPS Université Paris-Saclay),  
Hervé Toubon (Orano), Andrea Salvatores (CEA)

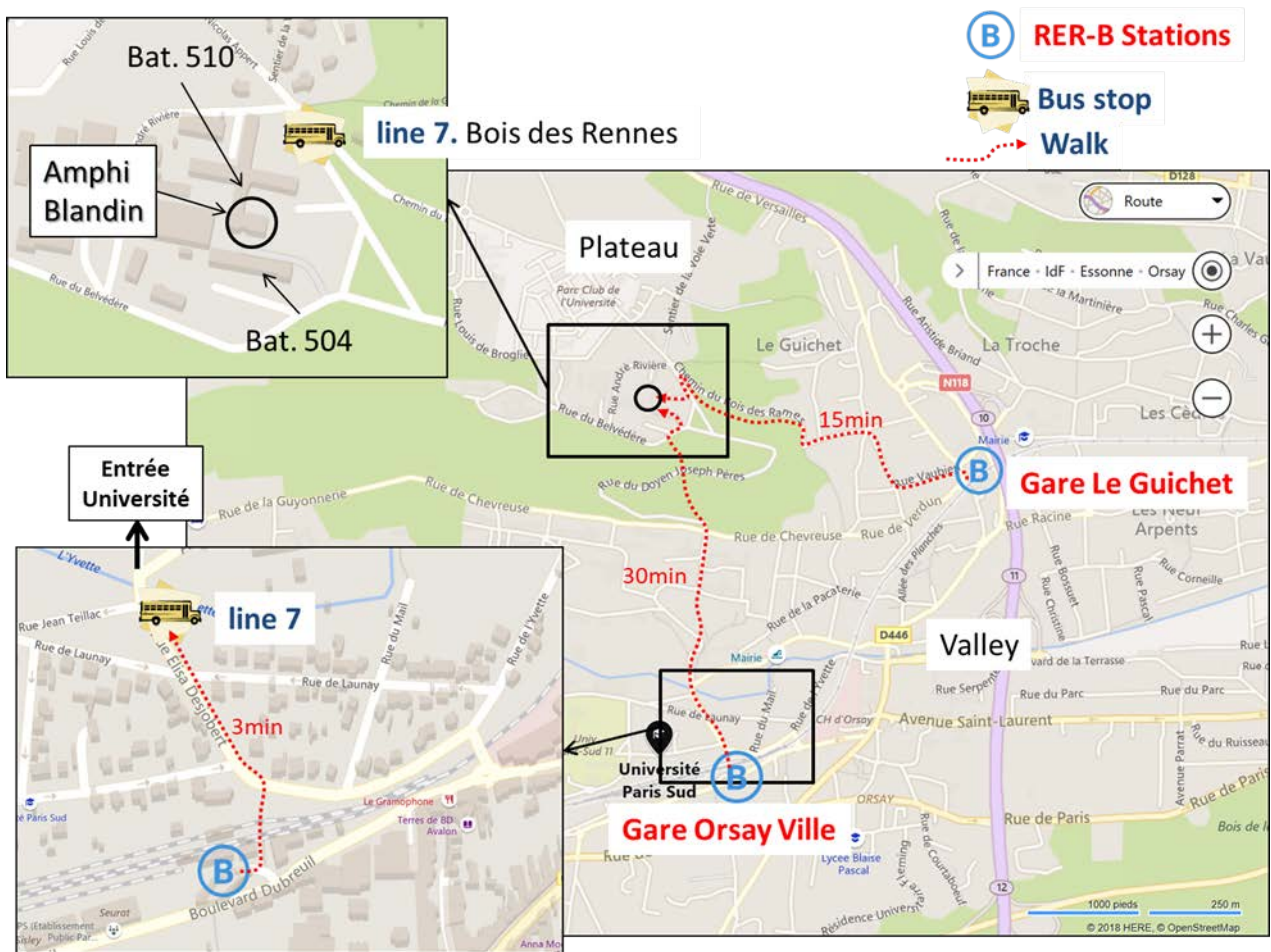
[www.geosoc.fr](http://www.geosoc.fr)



Société  
Géologique  
de France

77 rue Claude Bernard, 75005 Paris  
(33) (0) 1 43 31 77 35 @ accueil@geosoc.fr

## Plan d'accès à l'Université Paris Saclay et à l'Amphi Blandin



## Table des matières

<b>Jeudi 20/01 session ouverte</b> .....	5
9:00-9:30 Ouverture : Conjoncture actuelle de l'exploration de l'Uranium (provisoire) .....	6
FLOTTE, Nicolas VP Géosciences Orano Mining.....	6
09:30-09:50 La chaire Industrielle Orano à l'Université de Lorraine: retour d'expérience .....	7
LEDRU Patrick Université de Lorraine.....	7
09:50-10:10 Étude des conducteurs géophysiques associés aux gisements d'uranium de type discordance de l'Athabasca ....	8
OBIN Thomas et al. Université de Lorraine.....	8
10:10-10:30 Macro et micro caractéristiques des zones de failles, systèmes de fracture et porosité dans les gisements d'uranium de socle de l'Athabasca (Saskatchewan, Canada) .....	9
ABDELRAZEK Maher et al. Université Paris Saclay .....	9
10:30-10:50 Structural network control on the U-mineralization: Example of the Cigar North fault, Saskatchewan, Canada.	3
QUESSENDIER Martin et al. Université de Lorraine .....	3
11:10-11:30 Numerical investigation of fault activation mode and formation of oriented-orebodies: application to the uranium deposits of the Athabasca Basin, northern Canada.....	4
ELDURSI Khalifa et al. Université Lorraine.....	4
11:30-11:50 Data integration and machine learning on the unconformity-related uranium mineral system of Athabasca basin .....	5
PARQUER Marion et al. Université de Lorraine.....	5
11:50-12:10 Automated recognition of resistivity and alteration domains through statistical methods.....	6
SERDOUN Mehdi Université Lorraine.....	6
14:00-14:30 Nouveaux développements dans le domaine de l'instrumentation nucléaire pour améliorer l'extraction et la récupération de l'Uranium.....	7
TOUBON Hervé VP R&D Orano Mining.....	7
14:30-14:50 Sondes diagaphiques neutroniques pour la mesure de la teneur en uranium ou de la porosité hydrogène .....	8
FONDEMENT Valentin et al. CEA.....	8
14:50-15:10 Extension du domaine de l'In Situ Recovery (ISR) : application aux réservoirs peu perméables et fracturés.....	9
HOCQUET Sébastien et al. Orano Mining.....	9
15:10-15:30 Simulation de la récupération in situ de l'uranium par transport réactif. Application à grande échelle dans le bassin de Shu Saryssu, gisement de Tortkuduk (Kazakhstan).....	10
COLLET Antoine et al. Orano/Mines ParisTech.....	10
15:30-15:50 Quels paramètres sédimentologiques, stratigraphiques ou physiographiques peuvent orienter la répartition des gîtes uranifères dans les bassins sédimentaires ? .....	11
PARIZE Olivier et al. Ex-Orano .....	11
16:10-16:30 Quelles connaissances nous révèlent les analyses isotopiques et élémentaires sur des échantillons de minerai uranifère extraits des réacteurs naturels d'Oklo ?.....	12
NIMAL Jean Claude Ex-CEA.....	12
16:30-16:50 Influence du mode de fonctionnalisation d'une silice mésoporeuse sur son efficacité d'extraction de l'uranium .....	13
RESSLER Aline et al. CEA.....	13
16:50-17:10 Spéciation de l'uranium (VI) étudiée par Dynamique Moléculaire : séparation liquide/liquide et solide/liquide .....	14

MORENO MARTINEZ Diego et al. CEA .....	14
17:10-17:30 Utilisation du traçage isotopique pour l'évaluation d'impact des anciennes mines d'uranium sur l'environnement.....	15
GOURGIOTIS Alkiviadis et al. IRSN .....	15
17:30-17:50 The diversity of Erzgebirge granites geochemical types and their potential to be related to uranium deposits..	16
CUNNEY Michel et al. Ex-Université de Lorraine .....	16
<b>Vendredi 21/01 – session NEEDS.....</b>	<b>17</b>
08:40-09:05 Interactions, SPéciation et Effets des radionuCléides d'une zone humide anThropisée : Le projet structurant INSPECT .....	18
DEL NERO Mireille et al. IPHC CNRS .....	18
09:05-09:30 Détachements crustaux, granites syn-tectoniques et mobilités uranifères : (1) structures, pétrologie et traçage géochimique .....	19
BOULVAIS Philippe et al. Université de Rennes .....	19
09:30-09:55 Détachements crustaux, granites syn-tectoniques et mobilités uranifères : (2) exploration numérique.....	20
BOCK Khaled et al. Université de Rennes.....	20
09:55-10:20 Évolution pétrologique et géochimique des séries magmatiques/métamorphiques de la province de Rae le long du corridor du Patterson Lake (Saskatchewan, Canada) : source d'uranium ? .....	21
PALLARES Carlos Université Paris Saclay .....	21
10:40-11:05 Evaluation et étude de Mélanges d'ammoniums quaternaires pour l'extrAction sélective de l'uranium en milieu Sulfurique .....	22
GUERINONI E. et al. CEA .....	22
11:05-11:30 Etude expérimentale du fractionnement des éléments accompagnateurs entre fluide et oxyde d'uranium par précipitation contrôlée en condition hydrothermale .....	23
MERCADIER Julien et al. CNRS.....	23
11:30-11:55 Simulation des écoulements souterrains dans un tas de résidus miniers sur l'ancienne mine d'uranium du Cellier (Lozère, France).....	24
OUEDRAOGO Ahmeda et al. Sorbonne Université.....	24
11:55-12:20 Caractérisation géophysique de résidus miniers en milieu non saturé.....	25
GUERIN Roger et al. Sorbonne Université.....	25
13:30-13:55 Les isotopes de l'uranium comme traceurs des échanges nappe-rivière. Cas de la vallée de l'Essonne .....	26
ZEBRACKI Mathilde et al. IRSN .....	26
13:55-14:15 La datation U-Pb sur calcite : un outil de découverte en géodynamique .....	27
MISSENARD Yves Université Paris Saclay.....	27
14:15-15:15 Conférence invitée - Considérations sur l'électronucléaire actuel et futur ou comment mieux utiliser l'uranium naturel .....	28
Guillaumont Robert Académie des Sciences.....	28
15:35-16:45 Discussion et réflexion actions coordonnées.....	29
16:45-17:00 Conclusion et clôture .....	29
Liste de participants .....	30

**J**eudi 20/01 session ouverte

---

---

**9:00-9:30 Ouverture : Conjoncture actuelle de l'exploration de l'Uranium  
(provisoire)**

**FLOTTE, Nicolas VP Géosciences Orano Mining**

## 09:30-09:50 La chaire Industrielle Orano à l'Université de Lorraine: retour d'expérience

### LEDRU Patrick Université de Lorraine

*Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359, BP 70239, F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France*

Orano Mining et l'Université de Lorraine ont fondé une chaire industrielle en 2020 « Géoressources, Exploration et Traitement » dont l'objectif est l'émergence de nouveaux concepts sur l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles. Cette création se positionne dans le partenariat durable construit autour de l'uranium et dans le sillon du CREGU. Une première tâche accomplie par un groupe d'experts a été de réaliser un inventaire des questions propres à la définition de nouvelles cibles d'exploration sur les gisements de discordance du Bassin de l'Athabasca pour les opérationnels d'Orano et des problématiques scientifiques et techniques non résolues et considérées comme critiques par le laboratoire Géoressources. A l'issue de cet inventaire, les priorités ont été définies suivant quatre axes relatifs à l'identification technique des empreintes et à leur représentation spatiale : les transferts de matière dans leur cadre structural, le système Uranium, l'aide numérique à la prédictivité, l'imagerie géophysique des zones minéralisées.

La connaissance du système Uranium est au cœur du savoir-faire et de l'expertise Géoressources. Compte tenu de la pression actuelle pour une transition énergétique vers une énergie décarbonée, de l'augmentation prévisible des besoins en matière première et de la production d'énergie électrique, la connaissance des processus fondamentaux à l'origine des gisements géants reste un thème majeur de la problématique scientifique fondamentale des chercheurs de Géoressources. De plus le savoir-faire développé au sein du laboratoire sur d'autres métaux ouvre sur des problématiques de changement d'échelle et de compréhension des systèmes métallogéniques dans un contexte géodynamique global. L'expression des besoins des équipes opérationnelles en charge de l'exploration a montré l'importance du cadre structural afin de mieux appréhender le caractère fertile de certaines structures, de l'échelle régionale pour les exercices de génération de projets à l'échelle des prospects pour la caractérisation des ressources.

La traduction de cette connaissance sur la genèse des gisements en termes de guides d'exploration et d'implémentation de nouvelles méthodes d'analyse dans la pratique actuelle de l'exploration a été identifiée comme un vecteur méritant des efforts de R&D. Ainsi, en liaison avec les objectifs de Mine Digitale d'Orano, l'accès à des bases de données de qualité contrôlée et le déploiement de techniques d'apprentissage machine se sont notamment concrétisés par le lancement d'une action pilote d'intégration en 3D des données géologiques et géophysiques d'un projet emblématique dans un serveur Cloud et par le lancement de plusieurs actions de recherche sur la combinaison des paramètres physiques et chimiques. L'adhésion d'Orano au consortium RING a aussi été l'occasion d'élargir à de nouveaux terrains de jeux les problématiques abordées par le laboratoire Géoressources en soutien à Orano.

La préparation d'un projet de Chaire Industrielle ANR a été l'opportunité d'aborder la problématique de l'imagerie géophysique des zones minéralisées en uranium qui était jusqu'à présent absente de la thématique du laboratoire Géoressources en élargissant aux chercheurs de l'Université de Strasbourg. Ce partenariat qui a reçu le soutien de l'ANR vise la réconciliation entre l'observation géologique et la modélisation géophysique au sein de Géomodèles Intégrés 3D.

## 09:50-10:10 Étude des conducteurs géophysiques associés aux gisements d'uranium de type discordance de l'Athabasca

**OBIN Thomas et al. Université de Lorraine**

*Thomas Obin(a), Julien Mercadier(a), Raymond Michels(a), Marc Brouand(b), Patrick Ledru(a)*  
*<sup>a</sup>Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359, BP 70239, F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France*  
*<sup>b</sup>ORANO, 125 Avenue de Paris F-92320 Châtillon, France*

Les gisements d'uranium de type discordance de l'Athabasca (Saskatchewan, Canada) présentent des teneurs exceptionnelles en uranium. Les minéralisations sont contrôlées par deux types de structures majeures : la discordance séparant la couverture sédimentaire d'âge paléo à mésoprotérozoïque du socle cristallin, et des accidents affectant le socle et la base du bassin. Ces accidents, qualifiés de « conducteurs graphiteux », sont des zones de cisaillement formées dans le socle au cours des orogènes talstonienne (ca. 2-1,9 Ga) et hudsonienne (ca. 1,8-1,7 Ga) pour l'ouest et l'est du bassin respectivement. Ces zones recoupent les gneiss supracrustaux constitués de métapélites graphitiques à l'est et les gneiss granitoïdes à l'ouest. Elles montrent des évidences de réactivation à plusieurs reprises, dont certaines après le dépôt du bassin sédimentaire, qui ont contrôlé la mise en place des minéralisations uranifères. Les graphites et sulfures contenus dans ces structures en font d'excellents conducteurs électromagnétiques, utilisés pour la prospection géophysique de l'uranium. Une limitation majeure de l'exploration des gisements de type discordance dans ce bassin est l'incapacité actuelle de distinguer les conducteurs graphiteux minéralisés de ceux stériles, bien que leurs signaux électromagnétiques soient similaires. Comparer les différentes typologies de conducteurs, minéralisés ou non, en fonction de leur répartition spatiale sous le bassin pourrait ainsi permettre de révéler quels ont été les paramètres clés impliqués dans la formation des dépôts d'uranium.

À cette fin, les paragenèses minérales de ces zones de cisaillement dans plusieurs conducteurs en Athabasca ont été établies, en tenant compte de leur situation par rapport aux structures de déformation (foliation, gouge, brèche, cataclasite, mylonite) et de leur localisation à l'est ou l'ouest du bassin. Cette étude a pour objectif (i) de catégoriser ces conducteurs en décrivant précisément les roches de faille qui les composent, (ii) de mieux comprendre les mécanismes de formation de ces lithologies particulières, (iii) d'identifier et de dater les différentes phases de réactivation et circulation de fluides au sein des zones de dommages et de les comparer.

Dans l'état actuel des travaux, un graphite hérité du pic de métamorphisme ayant affecté le protolithe sédimentaire est identifié dans les conducteurs de l'est, parfois accompagné d'un graphite hydrothermal ayant précipité pendant le métamorphisme rétrograde. Le graphite de l'ouest, présent dans nombre de cisaillements, semble être uniquement hydrothermal. Au vu des échantillons étudiés, certains conducteurs dits « graphiteux » ne contiendraient en fait que peu de graphite. Plusieurs générations de pyrites sont présentes dans l'ensemble de ces conducteurs et semblent parfois être étroitement liées à la présence de graphite hydrothermal. Aussi, les fluides ne semblent pas circuler dans les zones finement broyées au cœur des failles (ultra-cataclasite) mais plutôt aux épontes de ces structures. Du clinocllore (chlorite ferromagnésienne), identifié comme minéral du métamorphisme rétrograde, se trouve également dans tous les conducteurs tandis que la sudoïte (chlorite magnésienne), identifiée comme produit de l'altération hydrothermale, n'est présente que dans certains d'entre eux.

**Mots-clés :** uranium, gisements de type discordance, Athabasca, faille, cisaillement, cataclasite, graphite, pyrite, conducteur électromagnétique



## 10:10-10:30 Macro et micro caractéristiques des zones de failles, systèmes de fracture et porosité dans les gisements d'uranium de socle de l'Athabasca (Saskatchewan, Canada)

ABDELRAZEK Maher et al. Université Paris Saclay

M. Abdelrazek<sup>1</sup>, A. Benedicto<sup>2</sup> & O. Gerbeaud<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GEOPS, Université Paris Saclay, 91504 Orsay

<sup>2</sup> Orano Mining, Châtillon, France

Les travaux développés en géologie structurale sur Hook Lake, dans l'Ouest de l'Athabasca et à Martin Lake, dans l'Est, ont permis de montrer que les processus de déformation associés à la mise en place de minéralisation d'uranium de socle peuvent être communs aux deux zones d'étude. Cela revient à dire que des épisodes de déformation et d'altération dans le socle sont comparables entre le corridor du Patterson Lake (PLC) dans l'ouest-Athabasca et la partie sud de la zone de transition Wollaston-Mudjatik (WMTZ).

Ces processus sont :

- Des transformations minéralogiques au sein des zones mylonitiques, associées à l'altération rétro-morphique et hydrothermale lors de l'exhumation du socle, avec développement de phyllosilicates qui, modifiant profondément la minéralogie du protolithe, amplifie les contrastes rhéologiques ;
- La réactivation cassante discrète de certains segments de ces zones de cisaillement ductile héritées ;
- La réutilisation ou réouverture de la foliation au sein de ces zones réactivées ;
- Le développement d'un réseau de micro-fractures au sein des contacts à fort contraste rhéologique, générant le réseau de porosité principal pour la circulation de fluides minéralisateurs ;
- La succession d'épisodes d'altération dont des phénomènes de dissolution syn- à post-bassin qui amplifient le réseau de porosité au-delà du réseau de micro-fractures ;
- La formation de phyllosilicates dans le réseau de porosité et servant de support à la minéralisation d'uranium.

L'approche multi-échelle détaillée au cours de ces travaux a permis de mettre en avant une méthode permettant de passer efficacement d'une échelle très large jusqu'à des observations très focalisées (Fig. 1). Le changement d'échelle entre le travail à échelle cartographique, la définition des intervalles structuraux à l'échelle de la coupe, la caractérisation des structures sur carottes et les analyses pétrographiques et microstructurales ont permis de mieux comprendre comment les différents épisodes de déformations ductile puis cassant ainsi que les altérations ont préparé le socle à contenir l'uranium.

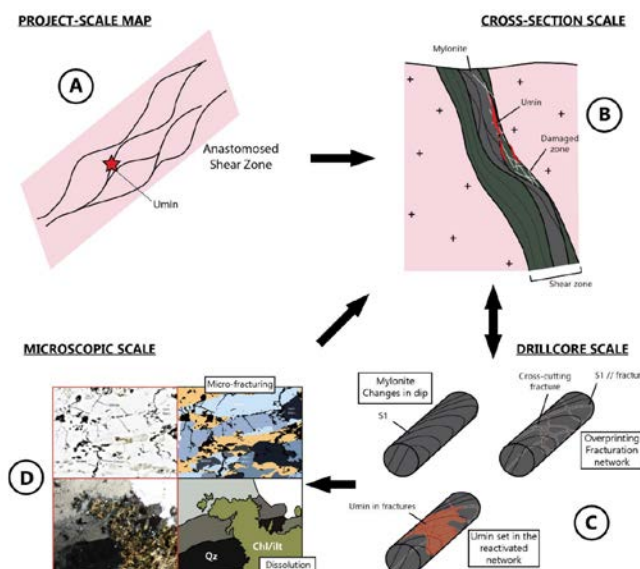


Figure 1 : Schéma des différentes étapes de l'analyse structural du socle avec pour chacune d'elle quelques éléments clés indiquant un potentiel structural pour la mise en place de minéralisation uranifère. Chaque étape représente un saut d'échelle de plus en plus resserré, apportant des résultats pouvant être intégrés aux échelles supérieures.

## 10:30-10:50 Structural network control on the U-mineralization: Example of the Cigar North fault, Saskatchewan, Canada

QUESSENDIER Martin et al. Université de Lorraine

*Quessandier Martin (1); Yves Géraud (1); Patrick Ledru (1); Julien Mercadier (2); Olivier Gerbeaud (3)*

*(1) Université de Lorraine, GeoRessources, UMR 7359, BP 70239, F-54506, Vandœuvre-lès-Nancy, France*

*(2) Université de Lorraine, GeoRessources, CNRS, UMR 7359, BP 70239, F-54506, Vandœuvre-lès-Nancy, France*

*(3) Orano, 125 Avenue de Paris, F-92320, Châtillon, France*

Unconformity-related uranium deposits host the highest uranium ore grades known on the earth, and are for the most part localized at the eastern edge of the Athabasca basin. These deposits, formed by the circulation of U-rich hydrothermal fluids are highly controlled by reactivated basement structures intensely percolated by fluids. Among these structures, numerous graphitic shear zones (conductors), representing thousands of linear kilometres buried under the sedimentary basin, along which are localized small-sized high-grades uranium pods at and/or below the unconformity surface. This affinity between uranium and conductive structures is used as the main proxy by mining companies for exploring new lands over the basin. However, most part of these structures is barren despite identical geological signature with mineralized zones.

A structural analysis, including the study of fault rocks, fracture systems, structural orientations and detailed spatial analysis of the fractures distribution used in unconventional oil reservoirs or hydrothermal studies, allow the identification of a mezzo-scale structural framework responsible for fluid circulations and their transfers between the sedimentary basin and the basement. Orano field exploration dataset coupled with the data acquired during this PhD work led to propose a revised structural model and push further the structural interpretation, with a special focus given to the relations between the fracture system and the alterations observed in the basement and in the basin. A major stake of this ongoing work is to determine which alterations/fracture systems may be in relation with the onset of uranium high-grade mineralization. A weakly mineralized structure was chosen as a first case study to establish a more complete description, as in highly mineralized areas some structures have been “erased” by intense alteration.

A chronological sequence of main structural events was established based on cross-cutting relationships between structural elements, as lithological contacts, ductile and brittle structures. This sequence of events reflects a polyphased tectonic history, including pre-basinal, and syn- to to post-Athabasca deformation stages, in which an inherited hudsonian metamorphic contact evolved to a complex brittle fault zones. The structural analysis of the Cigar North conductor reveals that along a regional reactivated structures, specific zones occur, characterized by intensely fractured rocks. High density vein network with a strong illite-carbonates alteration zone is associated with some U-mineralization. The relations between main structures (faulted contacts) and fractured/alteration zones is detailed in this study, which carries new structural elements for better understanding of fluids exchanges between the basement rocks and the sedimentary basin.

Key words: Unconformity-related uranium deposit, uranium, Athabasca, fault, fault core, damage zone, structural sequence

## 11:10-11:30 Numerical investigation of fault activation mode and formation of oriented-orebodies: application to the uranium deposits of the Athabasca Basin, northern Canada

ELDURSI Khalifa et al. Université Lorraine

Khalifa Eldursi<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>1</sup>, Luc Scholtès<sup>2</sup>, Marianne Conin<sup>1</sup>, Fabrice Golfier<sup>1</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>, Pauline Collon<sup>1</sup>, Remy Chemillac<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, 54000 Nancy, France

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup> Orano Canada, 100-833 45th Street West, Saskatoon, Saskatchewan S7L 5X2, Canada

In the Athabasca basin, episodically-reactivated crustal-scale faults are considered as an essential factor in the formation and remobilization of high-grade uranium deposits at regional and local scales alike. The regional spatial distribution of clay alteration assemblages and uranium deposits are aligned with deep fault sets that belong to regional NE structural corridors (e.g., Wollaston-Mudjatik Transitional Zone WMTZ, Snowbird Tectonic Zone STZ, and Patterson Lake corridor). At deposit scale, elongated orebodies (oriented E-W to NNW direction) are located at intersection zones of two or more superficial and distinct local faults (e.g., Cigar Lake area). However, the relation between these two major fault classes and their activation mechanisms has been gingerly introduced. Furthermore, an explanation of orebody-orientation at fault intersection zones at a local scale has not been yet provided.

Using 3-D Distinct Element Code (3DEC), a simplified 3-D hydromechanical modeling of two intersected faults was carried out to understand the hydraulic activation mechanism and its influence on fault activation under different faulting regimes. To validate our modeling results and approach the real mineralization sites, more complex 3-D hydromechanical models were run to mimic "Phase2" of the Cigar Lake area. The models were designed to determine the activation mode through which the E-W fault set is activated. Therefore, two activation mechanisms were tested: 1) brittle deformation, where different convergent directions are applied (N-S, N25W, N45W, and N65W); 2) hydraulic activation due to the injection of overpressured fluid along the NE-SW fault set.

The simplified 3-D models show that the fluid diverts from the main fault (where the fluid is injected) toward the secondary fault at the intersection zone for certain intersecting angles. The critical approaching angle (the intersection angle) at which the fluid diverts relies on the applied faulting regime. It varies between ca. 27° for the normal faulting regime, to ca. 55° for both reverse and strike-slip faulting regimes. The obtained results are consistent with field observations.

The 3-D Cigar Lake models show that the E-W fault system is activated only under N45W to N65W of convergent deformation. However, other fault sets are also activated simultaneously (e.g., NW-SE, N-S, and NE-SW faults). No preferential fluid path is detected through the activated fault system. In contrast, under the reverse faulting regime, the hydraulic activation provides a possibility to exclusively activate the E-W fault set, which becomes a preferential pathway for fluid to flow, in agreement with the obtained results of the simplified models, and field observations. However, the study emphasizes a possible combination of the two mechanisms in fault activation at regional and local scales. Brittle convergent deformation occurs at an early stage and is responsible for a discharge of deep-basement overpressured fluid into the upper crustal portion. Consequently, superficial and local faults are activated hydraulically, leading to the formation of differently-oriented orebodies at intersection zones.

## **11:30-11:50 Data integration and machine learning on the unconformity-related uranium mineral system of Athabasca basin**

**PARQUER Marion et al. Université de Lorraine**

*Marion Parquer<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>1</sup>, Anthony Le Beux<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Georessources, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France*

*<sup>2</sup>Orano Mining, Châtillon, France*

Decades of uranium exploration and production in the Athabasca basin allow Orano Canada to gather a very rich geological, petrophysical and geophysical dataset. Indeed, data from around 700 drillholes covering themes such as lithology, structures, alteration, geochemistry, gamma probing or spectral clay analyses are available along with regional interpretative geological maps and geophysical surveys (e.g. magnetic, electromagnetic, gravity, radiometrics, resistivity studies). In addition, Orano Canada constructed several 3D structural geological models of their exploration assets within the Athabasca basin.

In order to increase the performance of its uranium exploration, Orano Mining, in collaboration with Université de Nancy have launched a project to test new concepts and tools covering data science and artificial intelligence. The area of interest for this project has been restricted to the Orano exploration asset named Waterbury Cigar.

The first stage of the project consisted in analyzing and controlling data in order to remove unnecessary information and to ensure data compatibility between the various data sources.

Integration of drillholes data (i.e. lithology, structures, geochemistry, gamma probing, spectral clay) with geological maps was performed with the package Geosciences INTEGRATOR & Geoscience ANALYST developed by MIRA Geosciences. It allows for spatial visualization and analysis and therefore facilitates controls to ensure data consistency. It also permits to integrate and combine a very large range of data types. Through this integration data test, we aim the integration of geological data and geophysical models in a 3D geometrical model as well as the reproducibility of such workflow.

In a second stage, integrated data will permit to apply more advanced spatial analyses and artificial intelligence techniques on the area of interest

## **11:50-12:10 Automated recognition of resistivity and alteration domains through statistical methods**

**SERDOUN Mehdi Université Lorraine**

*Géoressources, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France*

The downhole geophysical tool of choice for uranium deposit exploration, including unconformity-related uranium deposits, is natural gamma probe. However, such deposits being rather limited in size, studying their alteration haloes is significantly more insightful for the targeting of zones of interest. These alteration zones consist in association of mostly clay minerals such as illite, and chlorites. Exploration companies collect a wealth of observational data over these zones, e.g., cores description and qualitative scales of alteration types (chloritization, argilization, hematitization). Geophysical and petrophysical data (e.g., resistivity, density) are also acquired during the core logging process. In particular, IR-spectroscopy is relevant and used for the characterization of these alterations. IR data are routinely produced along the drill hole and evolution of the clay content is particularly looked after. However, all the processing is man-made and requires significant resources. On the other hand, Machine-Learning algorithms have become widely available and can be implemented to explore these datasets faster and improve the descriptions made by geologists through supervised and unsupervised techniques. A phase of pre-processing is necessary prior to the application of these algorithms, due to the heterogeneous nature of these datasets. In this presentation, we tested the feasibility of obtaining, from raw data, classes and intensity of alteration, resistivity logs, lithological logs... The expected final product of this work is an operational workflow that could be used routinely on similar datasets in order to produce first order targets for exploration.

## 14:00-14:30 Nouveaux développements dans le domaine de l'instrumentation nucléaire pour améliorer l'extraction et la récupération de l'Uranium

### TOUBON Hervé VP R&D Orano Mining

H. TOUBON<sup>(1)</sup>, P. AMADIEU<sup>(1)</sup>, S. HOCQUET<sup>(1)</sup>, Y. BENSEDIK<sup>(1)</sup>, A. BERLAND<sup>(2)</sup>, R. GOUPILLOU<sup>(2)</sup>, S. MESSAMAH<sup>(3)</sup>, J. BEAUJOIN<sup>(4)</sup>, N. HOUFFLAIN<sup>(4)</sup>, B. PEROT<sup>(5)</sup>, T. MARCHAIS<sup>(5)</sup>

<sup>1</sup>Orano Mining Chatillon France

<sup>2</sup>Orano Mining Bessines France

<sup>3</sup>GEOVISTA Wales UK

<sup>4</sup>Mirion Technologies France

<sup>5</sup>CEA Cadarache France

Face à des problématiques d'extraction minière plus complexes, Orano Mining a mis en place un plan de développement de nouvelles techniques d'instrumentation. Ces nouvelles techniques sont principalement en appui au Niger et pour répondre au problème de déséquilibre radioactif dans les roll-fronts de nos mines ISR (In Situ Recovery) de KATCO au Kazakhstan, en appui à nos projets en Mongolie et en Ouzbékistan, ainsi que pour améliorer le contrôle géologique de notre mine à SOMAIR.

Pour KATCO et nos projets miniers ISR, nous pouvons citer les projets en cours suivants :

- Le développement d'une sonde de forage LaBr pour la mesure par spectrométrie gamma utilisant un algorithme breveté par Orano avec le CEA pour séparer plus rapidement l'Uranium de ses produits de décroissance radioactive
- Le même type de détecteur est également utilisé pour caractériser des carottes ou des échantillons de minerai

Pour notre mine de SOMAIR, nous avons les projets en cours suivants :

- un bâton connecté couplant un GPS différentiel très précis (incertitude de 10cm en altitude) et une mesure gamma, permettant d'assurer la sélectivité et la traçabilité du minerai, tout en évitant de passer par un portique de caractérisation du chargement des camions
- une mesure gamma sur convoyeur à bande après concassage du minerai, permet d'avoir un bilan minier précis et d'effectuer une bonne sélectivité de teneur entre le minerai lixivié en tas et celui de plus haute teneur entrant dans notre usine de traitement
- une mesure de fluorescence X pour caractériser l'uranium, ainsi que les pénalisants (carbonate et argile) afin d'optimiser la quantité de réactif nécessaire pour lixivier le minerai en entrée de l'usine de traitement du minerai

Tous ces développements permettent à Orano Mining de mieux caractériser son minerai avec des objectifs de performance industrielles visant à :

- une réduction des incertitudes locales sur les réserves d'Uranium de nos gisements ISR, pour un meilleur positionnement de nos cellules de production
- une amélioration de la sélectivité minière
- une augmentation des rendements de lixiviation.

## 14:30-14:50 Sondes diagraphiques neutroniques pour la mesure de la teneur en uranium ou de la porosité hydrogène

### FONDEMENT Valentin et al. CEA

*V. Fondement<sup>1\*</sup>, T. Marchais<sup>1</sup>, B. Pérot<sup>1</sup>, H. Toubon<sup>2</sup>, Y. Bensedik<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>CEA, DES, IRESNE, DTN/SMTA/LMN, Nuclear Measurement Laboratory, 13108 St Paul-lez-Durance, France*

*<sup>2</sup>ORANO Mining, 92320 Chatillon, France*

*\*valentin.fondement@cea.fr*

Depuis 2019, plus de la moitié de l'uranium produit chaque année est extrait à l'aide de méthodes de lixiviation in situ (ISL ou ISR, in-situ leaching/in-situ recovering). Ce type d'exploitation permet de produire à faible coût de l'uranium issu de gisements à faible teneur ou considérés comme épuisés. Il est important de quantifier la teneur en uranium et les propriétés géophysiques de ces mines afin de les exploiter pleinement. Cette caractérisation est essentielle lors de phases de prospection, afin d'identifier les meilleurs candidats à l'exploitation.

Les sondes diagraphiques présentent l'avantage de pouvoir fournir une mesure rapide et continue de certaines grandeurs physiques tout le long du puits. Les déséquilibres dans les chaînes de filiation ainsi que les faibles teneurs en uranium peuvent rendre les mesures par spectrométrie gamma difficiles, ainsi il peut être complémentaire d'utiliser une mesure comme celle de teneur en uranium par détection de neutrons prompts de fission (PFN, prompt fission neutrons).

Cette technique d'interrogation neutronique repose sur l'utilisation d'un générateur de neutrons pulsés et est insensible aux déséquilibres dans les chaînes de filiation. Les mesures sont impactées par la présence de thermalisants et d'absorbants neutroniques (H, Cl, B, ...) et doivent être compensées ou corrigées. L'un des paramètres géophysiques ayant le plus grand impact est la porosité hydrogène, or il est également possible de la mesurer à l'aide de mesures basées sur la rétrodiffusion neutronique (NBS, neutron backscattering).

L'étude des deux techniques PFN et NB et la possibilité de concevoir un outil diagraphique de dernière génération permettant d'accéder au moins à ces deux grandeurs fait l'objet d'une thèse de doctorat cofinancée par le CEA et ORANO Mines. Cette présentation porte sur l'état de l'art des sondes de ce type existant sur le marché.

## 14:50-15:10 Extension du domaine de l'In Situ Recovery (ISR) : application aux réservoirs peu perméables et fracturés.

**HOCQUET Sébastien et al. Orano Mining**

*Sébastien Hocquet<sup>1</sup>, Thierry Lefebvre<sup>1</sup>, Pierre Grizard<sup>1</sup>, Youcef Bensedik<sup>1</sup>, Romain Mieszkalski<sup>1</sup>, Emmanuelle Chanvry<sup>1</sup>, Olivier Gerbeaud<sup>1</sup>, Anthony Le Beux<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ORANO, 125, avenue de Paris, 92320 Châtillon, France*

L'ISR (« In Situ Recovery »), méthode minière par injection de solutions lixiviantes, est devenue la méthode la plus utilisée pour l'extraction de l'uranium, en raison de la mise en exploitation de nombreux gisements dans les années 2000, en grande majorité au Kazakhstan, et de la baisse des cours de l'uranium qui a limité le développement de projets miniers et même parfois contraint des mines « classiques » (mines à ciel ouvert et mines souterraines) à la fermeture temporaire ou définitive.

Cependant, pour appliquer l'ISR tout en maîtrisant les coûts et l'impact environnemental, il faut réunir des conditions bien spécifiques : i) une minéralisation encaissée dans des formations perméables et saturées en eau, ii) un gisement confiné aux épontes par des aquitards, iii) des phases porteuses du métal accessibles et non réfractaires aux solutions lixiviantes. Ces conditions sont réunies dans la plupart des gisements d'uranium de type roll-front, mais ce n'est pas le cas pour la plupart des autres gisements.

L'application de l'ISR à des réservoirs complexes a connu des développements dans les années 1970-1990 au succès mitigé sur le plan environnemental (pollution des aquifères à Straz Pod Ralskem, ex-Tchécoslovaquie ; réhabilitation complexe de l'exploitation de Königstein, ex-RDA). Cependant, la reprise dans les années 2000 des études en Arizona sur des gisements cuivre de type porphyres et skarns aboutit au développement de projets ISR n'ayant pas été exploités préalablement par d'autres méthodes. La technique aurait ainsi un potentiel économique plus large que son application actuelle. Plus récemment encore, l'ISR commence à être étudié pour l'exploitation de gisements uranium à forte teneur dans le bassin de l'Athabasca (gisement de Phoenix, notamment), ce qui témoigne également de cette tendance à évaluer la technique ISR pour des gisements sub-économiques actuellement.

De son côté, Orano Mining a démarré des études techniques afin de déterminer l'économie de l'application de l'ISR pour le gisement d'Imouraren au Niger, comme technique minière alternative à une exploitation par mine à ciel ouvert, pour tout ou partie du gisement.

Le gisement d'Imouraren est un gisement d'uranium gros volume faible teneur, encaissé dans des formations gréseuses du Permien fortement lithifiées, et d'une perméabilité de l'ordre d'un ordre de grandeur inférieur à la perméabilité des gisements exploités par ISR au Kazakhstan. Une connaissance hydrogéologique poussée du gisement est nécessaire, car ce sera un des facteurs clés dans l'étude économique. Cette caractérisation nécessite la mise en place de méthodes qui ne sont pas appliquées en routine sur les gisements exploités en ISR, à savoir : tests hydrogéologiques avec packers multiples, diagraphies optiques pour caractérisation des zones ouvertes (fractures, zones friables...), diagraphies RMN et échantillonnages pour mesures pétrophysiques (porosité, perméabilité).

Ces données, avec la mise en place de méthodes de modélisation géologique et hydrogéologique avancées, seront prises en compte pour la modélisation par transport réactif d'un projet ISR, permettant de tester différents scénarios et de définir les paramètres de premier ordre qui devront être étudiés lors de la réalisation d'un test ISR pilote.



## 15:10-15:30 Simulation de la récupération in situ de l'uranium par transport réactif. Application à grande échelle dans le bassin de Shu Saryssu, gisement de Tortkuduk (Kazakhstan)

**COLLET Antoine et al. Orano/Mines ParisTech**

*Antoine Collet<sup>1,2</sup>, Olivier Regnault<sup>1,2</sup>, Alexandr Ozhogin<sup>3</sup>, Assemgul Imantayeva<sup>3</sup>, Loïc Garnier<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> ORANO, 125 avenue de Paris, 92320 Châtillon, France*

*<sup>2</sup> PSL University / Mines ParisTech, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France*

*<sup>3</sup> KATCO JV LLP, Esil district, 48 Sauran Street, Congress Office BC, Nur-Sultan, Kazakhstan*

La récupération in situ de l'uranium (ISR) est aujourd'hui la technique d'extraction d'uranium la plus utilisée dans le monde. Cette technique consiste à dissoudre le minerai par une solution lixivante, directement au sein du gisement. L'absence d'extraction mécanique donne à l'ISR l'avantage d'être rapide à déployer, mais aussi d'être moins couteuse et de plus faible impact environnemental de surface que les techniques dites traditionnelles (mines à ciel ouvert, mines souterraines). En revanche, comme dans le domaine pétrolier, elle offre une vision indirecte du gisement et présente une incertitude forte sur l'estimation des productions futures. En prédisant les écoulements et les réactions géochimiques au sein du réservoir, le transport réactif (RT) est un outil puissant et adapté pour comprendre et piloter une exploitation par ISR. C'est pourquoi ORANO Mining et le centre de Géosciences de MINES ParisTech développent depuis une dizaine d'années une approche déterministe de modélisation de RT dédiée à la simulation de l'exploitation ISR. La modélisation est faite avec le code de transport réactif HYTEC développé à MINES ParisTech et repose sur i) un modèle géologique (champs de porosité/perméabilité et distribution des phases minérales réactives), ii) un modèle géochimique décrivant les interactions entre la solution injectée et les phases minérales, iii) une configuration géométrique des puits et un scénario d'exploitation.

Cette étude illustre une application à grande échelle de la modélisation RT, sur le champ de puits de Tortkuduk (Kazakhstan), l'une des plus grandes mines ISR du monde, exploité par KATCO (filiale d'ORANO Mining). Cette étude met en évidence la robustesse du schéma de modélisation et sa valeur ajoutée pour l'exploitant. Premièrement, la robustesse est démontrée sur 2394 puits couvrant 39 zones de production différentes (blocs). Le modèle reproduit fidèlement les concentrations d'uranium et les pH des solutions pompées sur des échelles de temps allant jusqu'à 12 ans. Seuls trois paramètres sont ajustés manuellement pour calibrer le modèle : teneurs initiales en argile (beidellite), calcite et hydroxyde de fer (goethite). L'écart entre la production d'uranium simulée et observée et la consommation d'acide diminuent à mesure que l'échelle d'observation augmente, ce qui montre que les erreurs locales se compensent. Il est montré que ces écarts s'expliquent principalement par les incertitudes des modèles géologiques 3D. Deuxièmement, une étude de cas sur quatre des blocs simulés illustre comment cette modélisation aide à la prise de décision et devient un atout clé pour l'opérateur. En 2019, après 10 ans de production, la zone d'étude a été réaménagée afin de cibler l'uranium restant. Plusieurs scénarios ont été testés et séquentiellement améliorés grâce aux simulations. Rien que sur les deux premières années, la conception finale adoptée prévoyait une augmentation de 28 % de la production d'uranium et de 35 % des gains économiques par rapport à l'approche empirique habituelle. La comparaison entre les prévisions de 2019 et les observations sur 16 mois ont montré un écart de moins de 10 % pour la production totale d'uranium. Cet écart tombe à 2 % en utilisant les conditions opérationnelles réellement observées, ce qui valide la prédictibilité de l'approche et confirme les gains attendus.

## 15:30-15:50 Quels paramètres sédimentologiques, stratigraphiques ou physiographiques peuvent orienter la répartition des gîtes uranifères dans les bassins sédimentaires ?

PARIZE Olivier et al. Ex-Orano

O. Parize<sup>1</sup>, J.-L. Rubino<sup>2</sup>, C. Valsardieu<sup>3</sup>

1, Ex-Orano, olivier.parize@yahoo.com ; 2, Sorbonne Université Paris, ex-expert international TotalEnergies ; 3, Ex-Minatome, Total Compagnie Minière

L'inventaire des indices, gîtes, gisements... d'uranium en terrains sédimentaires est régulièrement mené à l'échelle mondiale à des fins prospectives et prédictives en abordant leurs accessibilité, disponibilité, ressources, réserves... Notre propos est d'essayer de replacer ces occurrences dans un cadre stratigraphique et paléoenvironnemental à des fins de prédictabilité. En plus de leurs caractéristiques radiométriques, chimiques..., nos investigations et leurs analyses portent tout autant sur l'environnement sédimentaire et le cadre stratigraphique de leur couche hôte. Ces deux éléments sont également constitutifs de la géologie de l'uranium en terrain sédimentaire.

Un des tous premiers paramètres que nous avons caractérisé est la relation entre la couche hôte et sa formation stratigraphique et son bassin sédimentaire, à savoir sa nature, sa géométrie, son âge... Outre l'influence manifeste du climat, certains gîtes ou gisements sont clairement encaissés dans des systèmes sédimentaires confinés comme dans le cas des calcrètes de Langer Heinrich en Namibie ou de Yeelirrie en Australie de l'Ouest. Dans cette dernière région, l'extension des minéralisations uranifères de Bennett well, de Manyingee (Valsardieu *et al.*, 1981) ou d'Oobagooma (Botten, 1984) est associée à celle de paléovallées.

En ce qui concerne l'âge nous savons tous que les minéralisations sont rarement synchrones du dépôt de leur encaissant (Brouand *et al.* 2016), sauf à développer des gîtes lithologiques ou bien sous forme de placers mis en place avant la Grande Oxydation. Il est indispensable de connaître précisément l'âge des phases de minéralisation ; à cette condition il est alors possible de replacer l'indice, le gîte, le gisement... dans l'histoire du bassin, de la dynamique des fluides et sa géodynamique.

Un autre paramètre est le faciès de la couche hôte. Rappelons que le faciès d'une roche sédimentaire détritique terrigène regroupe les éléments lithologiques, minéralogiques et texturaux, la stratification et le litage et enfin les fossiles ou leurs traces. Mme Y. Gubler en fait la base de son enseignement des sédiments. En 1969, l'observation de ce faciès avait permis à l'un d'entre nous (JPL) de suspecter la présence de gouttelettes d'hydrocarbures dans l'encaissant des réacteurs naturels de fission d'Oklo, ce qui fut confirmée par l'analyse géochimique effectuée à Pau.

L'analyse du faciès du réservoir uranifère permet de reconnaître l'hydrodynamisme dominant à l'origine du dépôt et de restituer le paléo-environnement de ce dernier. C'est de la sorte que l'un d'entre nous (JLR, avec †G. Allen et F. Mercier) avait diagnostiqué, sur photos, un environnement tidal pour cette même formation hôte d'Oklo, que qui fut ensuite confirmé par des études de terrain. Cette identification peut être précoce comme celle faite à Oobagooma en Australie de l'Ouest. Parfois cette analyse est disjointe de l'exploration ou l'exploitation minière comme dans le cas des gisements encaissés dans les réservoirs gréseux d'âge Crétacé moyen/supérieur de Tchèque.

Les premiers éléments de comparaison issus de notre inventaire entre les données géologiques de l'uranium en terrains sédimentaires et les analyses sédimentologiques et stratigraphiques menées sur leur encaissant suggèrent que des associations seraient plus fréquentes que d'autres, notamment avec les milieux paraliques (estuariens ou deltas tidaux) et continentaux (remplissages fluvio-lacustres). A ce jour, aucune accumulation (économique) ne semble avoir été identifiée en milieu profond (systèmes turbiditiques). Ce que nous proposons d'illustrer.

Botten, P. 1984. - Proceedings Perth Symposium. Geological Society of Australia / Petroleum Exploration Society of Australia, pp. 485-501. Brouand, M., Berthet, L., Gaspard, R., Parize, O., Cardon, O., Deloule, E., Flotté, N., Schmitt, P., 2016. - Uranium SGF Meeting, LAL Orsay - Tuesday, 29th of November 2016. Valsardieu, C.A., Harrop, D.W., Morabito, J. 1981. - Proceedings of the Australasian Institute of Mining & Metallurgy, Volume 279, pp. 5-17.

## 16:10-16:30 Quelles connaissances nous révèlent les analyses isotopiques et élémentaires sur des échantillons de minerai uranifère extraits des réacteurs naturels d'Oklo ?

**NIMAL Jean Claude Ex-CEA**

*Ingénieur Ecole Centrale de Paris ; Docteur d'Etat des Sciences Mathématiques (Paris VI)  
Ancien Directeur de Recherches au CEA*

Au printemps/été 1972, des équipes du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) ont mis en évidence l'existence de plusieurs foyers de « réacteurs nucléaires naturels » ayant divergé il y a environ 2 milliards d'années en un lieu qui correspond à l'emplacement actuel du Gabon. Ces réacteurs étaient situés dans la couche géologique dénommée le Francevillien (Mazuku est la ville la plus proche) [1]. Le minerai uranifère extrait possède une très forte teneur en Uranium et les filons sont épais ; ces caractéristiques font l'intérêt économique du site. Une fois effectué le traitement chimique, le processus d'enrichissement en Uranium 235 (U235) est réalisé pour passer de la teneur isotopique naturelle, 0,72% actuellement, une teneur compatible avec le fonctionnement des réacteurs électrogènes de l'ordre de 3%. Avant cet enrichissement, un contrôle de routine effectué au laboratoire de Pierrelatte a montré de fortes anomalies dans le rapport isotopique U235/U238 entraînant de sérieuses difficultés au cours de l'étape d'enrichissement. Une question s'est posée concernant l'intérêt de la mine : de quel(s) phénomène(s) s'agit-il ?

La mise en évidence de phénomènes nucléaires a été réalisée à la Division d'Études et de Développement des Réacteurs du CEA. Cette démonstration a permis d'exclure d'autres hypothèses telles une malveillance ou un phénomène chimique naturel simple et inconnu ... À la suite de mesures isotopiques réalisées à Pierrelatte et après corrections de ces mesures de la pollution par les éléments naturels, il a été montré que les proportions isotopiques des éléments objets de mesures correspondaient à celles des produits de fission de « l'uranium ». Ceci est illustré dans le tableau ci-dessous pour le cas du Néodyme mesuré dans l'échantillon dit « M » dont la teneur en U235 était l'une des plus anormales en 1972 : 0,44%.

	Nd142	Nd143	Nd144	Nd145	Nd146	Nd148	Nd150
Naturel	27,11	12,17	23,85	8,30	17,22	5,73	5,62
Minerai	0,	28,6	26,4	19,0	14,6	8,1	3,3
fission	0,	28,84	26,50	18,87	14,42	8,26	3,12

Deux remarques doivent être formulées :

L'existence de réacteurs nucléaires naturels à fission est un phénomène unique à notre connaissance ; il est dû à la conjonction à Oklo de trois caractéristiques : (i) une forte teneur en métal, (ii) un enrichissement de 3,5% (il y a 1,95 milliards d'années à cause des périodes radioactives), (iii) la présence d'eau dans ces milieux argileux.

Une très forte concentration en Uranium est très rare sur Terre [2] (on en trouve dans les gisements Canadiens CIGAR LAKE et Mc ARTHUR RIVER dans le Saskatchewan et dans le gisement OLYMPIC DAM situé en Australie.). Lors de sa conférence [3] devant la Société Géologique de France (Orsay en 2010), G. VENDRYES avait décrit les processus d'oxydo-réduction conduisant à ces fortes concentrations en Uranium par changements de valence.

Dès 1972, la communauté scientifique disposait de mesures isotopiques sur plusieurs éléments dont les terres rares (en particulier Néodyme, Samarium, Europium, Gadolinium...) en association avec les concentrations isotopiques de l'Uranium [4]. Les concentrations des isotopes formés par réactions nucléaires dépendent [5] de divers paramètres tels que les rendements (pourcentages d'isotopes formés par fission), la nature de l'isotope fissionnant, les variations des constantes nucléaires en fonction de l'énergie des neutrons, la demi-vie de chaque isotope. Avec l'utilisation de logiciels de Physique des réacteurs et grâce à la performance atteinte récemment par les mesures isotopiques, il est possible de déduire des informations sur le fonctionnement des réacteurs d'Oklo : puissance, durée, hypothèses de pollution. Des résultats d'études utilisant diverses disciplines sont rassemblés dans la référence [1].

[1] R. NAUDET, Oklo : des réacteurs nucléaires fossiles, Paris, Eyrolles, 1991. [2] A. GOURGIOTIS, IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LELI. Nombreux échanges et communications privées. [3] G. VENDRYES, Exposé à la réunion du 30/11/2010 de la Société Géologique de France à la Faculté d'Orsay. [4] J.-F. DOZOL, M. NEUILLY, Analyse isotopique des terres rares contenues dans le minerai d'Oklo, Rapport IAEA-SM-204/29 Libreville (1975). [5] A. TSILANIZARA, T.D. UYNH. CEA/DEN/DANS/DM2S/SERMA/LLPR. Communications privées.

## 16:30-16:50 Influence du mode de fonctionnalisation d'une silice mésoporeuse sur son efficacité d'extraction de l'uranium

**RESSLER Aline et al. CEA**

*Aline DRESSLER, Antoine LEYDIER, Agnès GRANDJEAN  
CEA, DES, ISEC, DMRC, Marcoule, France*

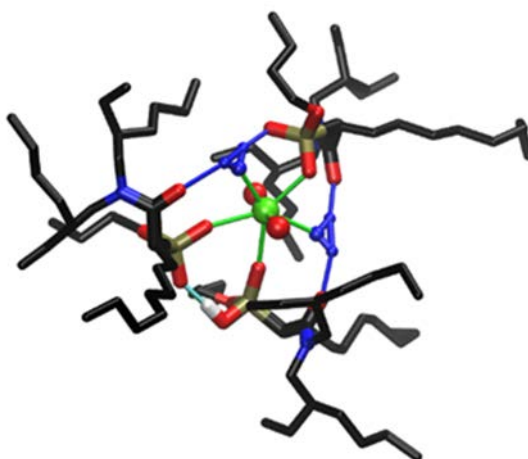
Trois matériaux hybrides à base de silice ont été étudiés comme extractants d'uranium à partir de solutions acides sulfuriques. Ces matériaux sont composés de supports de silice mésoporeuses fonctionnalisés avec des ligands amidophosphonates soit par greffage covalent, soit par imprégnation non covalente. Avant imprégnation, la surface des supports de silice a été modifiée soit avec des chaînes alkyles, soit avec des chaînes de liquide ionique. L'impact des méthodes de fonctionnalisation sur l'efficacité d'extraction de l'uranium a été évalué dans des solutions à faible teneur en sulfate ( $[\text{SO}_4]/[\text{U}] = 50 \text{ mol/mol}$ ,  $\text{pH} = 2$ ) et à haute teneur en sulfate ( $[\text{SO}_4]/[\text{U}] = 900 \text{ mol/mol}$ ,  $\text{pH} = 1$ ). La sélectivité des supports de silice fonctionnalisées pour l'uranium a été déterminée en présence de fer et de molybdène comme ions compétitifs. Nos résultats montrent que les deux méthodes de fonctionnalisation donnent des matériaux avec une bonne efficacité d'extraction et une bonne sélectivité dans les solutions à faible teneur en sulfate. Dans les solutions riches en sulfates, les matériaux imprégnés extraient l'uranium de manière plus efficace et plus sélective en présence de Fe et Mo que le matériau greffé. L'imprégnation non covalente des ligands augmente probablement leur mobilité permettant ainsi une coordination plus aisée autour de l'uranium.

## 16:50-17:10 Spéciation de l'uranium (VI) étudiée par Dynamique Moléculaire : séparation liquide/liquide et solide/liquide

**MORENO MARTINEZ Diego et al. CEA**

*Diego MORENO MARTINEZ, Philippe GUILBAUD, Dominique GUILLAUMONT, Agnès GRANDJEAN  
CEA, DES, ISEC, DMRC, Univ, Montpellier, Bagnols sur Ceze 30207, France*

Les extractants amido-phosphonate sont développés depuis peu pour la séparation de l'uranium (VI) par la voie liquide/liquide et solide/liquide [1,2]. La structure bifonctionnelle de ces molécules a été conçue en joignant deux fonctions organiques, une fonction acide et une fonction solvatante. Malgré des études précédentes, une caractérisation détaillée au niveau moléculaire et supramoléculaire est manquante pour ces systèmes. Dans ce travail, la Dynamique Moléculaire classique est couplée à des données expérimentales afin de décrire le comportement de l'extractant amido-phosphonate et la spéciation de l'uranium (VI) en séparation liquide/liquide et solide/liquide. Une description fine des espèces et des interactions intervenant au sein des agrégats est donnée en phase organique [3]. Sur support solide, une description de l'interface solide/liquide est faite. Le mécanisme d'extraction est ainsi éclairci dans les deux cas, avec un réseau d'interactions qui stabilise le complexe et facilite l'extraction sans le déshydrater complètement. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les interactions faibles dans les processus de séparation et montrent comment le couplage des méthodes de modélisation et des données expérimentales permet d'explorer les interactions moléculaires et l'organisation supramoléculaire de ces systèmes.



[1]. Pecheur, O. ; Guillaumont, D. ; Dourdain, S. ; Berthon L. ; Turgis R. ; Fillaux, C. ; Arrachart, G. ; Testard, F ; Solvent Extr. Ion Exc., 2016, vol. 34, no 3, p. 260-273.

[2] Le Nedelec, T. ; Charlot, A. ; CALARD, F. ; Cuer, F. ; Leydier, A. ; & Grandjean, A. New J. Chem., 2018, vol. 42, no 17, p. 14300-14307.

[3] Moreno Martinez, D. ; Acher, E. ; Vatin, M. ; Dourdain, S. ; Guillaumont, D. ; Guilbaud, P. J. Phys. Chem. B. 2021, vol. 125, no 38, 10759-10771.

## 17:10-17:30 Utilisation du traçage isotopique pour l'évaluation d'impact des anciennes mines d'uranium sur l'environnement

GOURGIOTIS Alkiviadis et al. IRSN

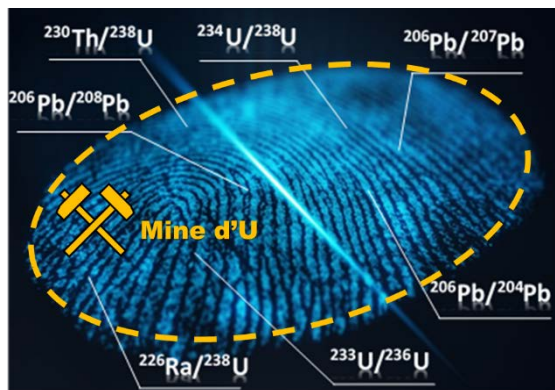
Alkiviadis Gourgiotis<sup>1\*</sup>, Arnaud Mangeret<sup>1</sup>, Hugo Jaegler<sup>1</sup>, Aurélien Beaumais<sup>1</sup>, Pascale Blanchart<sup>2</sup>, Lucie Stetten<sup>1,3,4</sup>, Guillaume Morin<sup>3</sup>, Pierre Le Pape<sup>3</sup>, Pierre Lefebvre<sup>3</sup>, Mathieu Le Coz<sup>1</sup>, Peter Steier<sup>5</sup>, Robin Golser<sup>5</sup> Charlotte Cazala<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire - PSE/ENV - SEDRE/LELI, Fontenay-aux-Roses, 92262, France.

<sup>2</sup>Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire - PSE/ENV - SEDRE/USDR, Fontenay-aux-Roses, 92262, France.

<sup>3</sup>Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC), UMR 7590 CNRS-Sorbonne Université IRD-MNHN, case 115, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 5, France. <sup>4</sup>Centre for Microbiology and Environmental Systems Science, University of Vienna, Althanstraße 14, UZA II, 1090 Vienna, Austria <sup>5</sup>University of Vienna, Faculty of Physics, Isotope Research and Nuclear Physics, Vienna Environmental Research Accelerator, Währinger Str. 17, 1090 Vienna, Austria. \*auteur correspondant: alkiviadis.gourgiotis@irsn.fr

En France, l'extraction d'uranium a concerné environ 250 sites, entre 1948 et 2001 [1], dont près de 75 % sont localisés dans le bassin Loire-Bretagne. L'uranium et ses produits de désintégration peuvent se disséminer en aval des anciens sites miniers, même plusieurs dizaines d'années après leur réaménagement. Ainsi, les fortes teneurs de certains radionucléides dans les sols et sédiments de zones humides sont souvent attribuées uniquement à l'activité minière (extraction et traitement de l'U). Cependant, cette présence peut être également due à la contribution du substratum rocheux naturel. Ainsi, des niveaux de radioactivité importants d'origine naturelle ont été mis en évidence dans des sols alpins dont le substratum rocheux présente des teneurs en U bien inférieures aux gisements uranifères [2-4]. En effet, des mécanismes de transport de certains radioéléments depuis la roche mère jusqu'à leur piégeage dans les sols et sédiments peuvent conduire à des teneurs dépassant largement la valeur moyenne du fond géochimique local. Elles peuvent être du même ordre de grandeur que les activités qui peuvent être rencontrées en aval d'anciens sites miniers. Il est donc important de disposer de moyens permettant de caractériser les différentes sources pour un site d'étude donné et ainsi d'être en mesure de déconvoluer le signal du fond géochimique de celui de la mine. Les concepts de traçage de sources et de filtrage des signaux font appel à différents raisonnements et outils, parmi lesquels les traceurs isotopiques et des outils géostatistiques tiennent une place croissante. Le Laboratoire sur le



devenir des pollutions des sites radioactifs (LELI) de l'IRSN développe via la plateforme de spectrométrie de masse PATERSON et du laboratoire LUTECE un large panel de traceurs isotopiques et fait appel à des outils géostatistiques pour identifier et caractériser les sources et les mécanismes de transport des contaminants radioactifs. Dans ce contexte, seront présentés quelques exemples d'utilisation des isotopes stables du Pb combinés aux outils géostatistiques [5] et aux déséquilibres de la chaîne de l'U238 [6, 7] sur des sites caractérisés par un marquage radiologique. La pertinence ainsi que les limitations de ces outils seront discutées. En perspective, l'utilisation d'un nouvel outil, celui des isotopes mineurs de l'U (<sup>233,236</sup>U), sera abordée. Les informations ainsi acquises pourront contribuer à

améliorer notre expertise sur les modalités actuelles de gestion des anciens sites miniers, ainsi que sur les stratégies de remédiation des sédiments et sols contaminés.

Références : 1. IRSN, IRSN MIMAUSA database, Memory and Impact of uranium mines: synthesis and records, march 2017, <https://mimausabdd.irsn.fr/>. 2017. 2. Regenspurg, S.; Margot-Roquier, C.; Harfouche, M.; Froidevaux, P.; Steinmann, P.; Junier, P.; Bernier-Latmani, R., Speciation of naturally-accumulated uranium in an organic-rich soil of an alpine region (Switzerland). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2010, 74, (7), 2082-2098. 3. Lefebvre, P.; Gourgiotis, A.; Mangeret, A.; Sabatier, P.; Le Pape, P.; Diez, O.; Louvat, P.; Menguy, N.; Merrot, P.; Baya, C.; Zembracki, M.; Blanchart, P.; Malet, E.; Jézéquel, D.; Reyss, J.-L.; Bargar, J. R.; Gaillardet, J.; Cazala, C.; Morin, G., Diagenetic formation of uranium-silica polymers in lake sediments over 3,300 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2021, 118, (4), e2021844118. 4. Lefebvre, P.; Sabatier, P.; Mangeret, A.; Gourgiotis, A.; Le Pape, P.; Develle, A.-L.; Louvat, P.; Diez, O.; Reyss, J.-L.; Gaillardet, J.; Cazala, C.; Morin, G., Climate-driven fluxes of organic-bound uranium to an alpine lake over the Holocene. *Science of The Total Environment* 2021, 783, 146878. 5. Le Coz, M.; Gourgiotis, A.; Blanchart, P.; Mangeret, A., Factorial kriging for estimating and mapping the geochemical background from in situ gamma dose rate measurements downstream of a former uranium mine. *Journal of Environmental Radioactivity* 2021, 237, 106681. 6. Gourgiotis, A.; Mangeret, A.; Manhès, G.; Blanchart, P.; Stetten, L.; Morin, G.; Le Pape, P.; Lefebvre, P.; Le Coz, M.; Cazala, C., New Insights into Pb Isotope Fingerprinting of U-Mine Material Dissemination in the Environment: Pb Isotopes as a Memory Dissemination Tracer. *Environmental Science & Technology* 2020, 54, (2), 797-806. 7. Mangeret, A.; Blanchart, P.; Alcalde, G.; Amet, X.; Cazala, C.; Gallerand, M. O., An evidence of chemically and physically mediated migration of <sup>238</sup>U and its daughter isotopes in the vicinity of a former uranium mine. *Journal of Environmental Radioactivity* 2018, 195, 67-71.

## 17:30-17:50 The diversity of Erzgebirge granites geochemical types and their potential to be related to uranium deposits

CUNEY Michel et al. Ex-Université de Lorraine

Michel CUNEY<sup>1</sup>, Hans-Jürgen FÖRSTER<sup>2</sup>, Reimar SELTMANN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, GéoRessources, CREGU, CNRS, 54600 Vandoeuvre les NANCY, F  
michel.cuney@univ-lorraine.fr

<sup>2</sup>GFZ, Telegrafenberg. Section 4.8 Geoenergy, 14473 Potsdam, Germany,

<sup>3</sup>Natural History Museum, ES Mineral & Planetary Sciences Division, London SW7 5BD, GB

The Erzgebirge represents the largest U district for hydrothermal granite-related deposits in the World. Despite the small size of this district, extending about 70 km in NE-SW extension and 50 km in NW-SE extension, its U resources are much larger than the U granite-related resources estimated in the French segment of the Variscan Belt covering an area of more than 700 km. The age of the granites and primary U deposition are similar in the Erzgebirge and in France. In the Erzgebirge, the granites are emplaced at shallow structural levels and the deposits are almost entirely hosted in low-grade metasediments, whereas in France, the granites are emplaced at deeper structural level and most of the deposits are hosted within the granites. The mineral assemblages of the Erzgebirge U veins is much more diversified than that of the intragranitic deposits in France, probably because of the higher concentration of redox-sensitive elements in the enclosing metasedimentary rocks, especially the carbonaceous schists, in the Erzgebirge.

From a detailed mineralogical-geochemical analysis of the five geochemical groups of Erzgebirge granites [1], the fractionation trends of the different types are defined and compared with the granites of the French segment of the Variscan Belt. Erzgebirge granites can be re-grouped in two major types: variably fractionated high-K calc-alkaline granites (A2 type) with an evolution trend rooted in the metaluminous domain, and fractionated, strongly peraluminous leucogranites with fractionation trends presenting a more or less steep increase of their peraluminosity with the decrease of femic mineral content. It appears that all the Erzgebirge granites are more fractionated, richer in U and lower in Th/U ratios, resulting in a larger proportion of U hosted in uraninite. In addition, some specific types of Erzgebirge granites are not known in the French segment of the Variscan Belt. The five types of Erzgebirge granites represent a remarkable evolution in the quartz-feldspars mineralogical diagram (Q-P) with increasing fluorine content, without being genetically related. The low-F biotite granites (e.g., Niederbobritzsch, Kirchberg) show a correlative increase of quartz and K-feldspar, up to highly fractionated intrusions (e.g., Eichigt-Schönbrunn). Then, a progressive rotation of the fractionation trend occurs, first with a continuation of quartz enrichment, but with a correlative albite enrichment for the low-F two-mica granites (e.g., Bergen ≡ L-type in France [2]), and then with a more and more important decrease of quartz content with increasing albite content in the F-rich, P-poor Li-mica granites (e.g., Annaberg, Eibenstock), a trend which culminates with the Beauvoir peraluminous high-P rare metal granite (PHP-RMG) (French Central Massif), represented in the Erzgebirge only by the sub-economic Podlesi granite (Czech Erzgebirge). The majority of RMG of the Erzgebirge (e.g. Seiffen, Zinnwald), are peraluminous low-P granites (PLP-RMG), which are less enriched in Al and F than the PHP-RPG. Among the five types of granites of the Erzgebirge, three of them are associated with U deposits (low-F biotite granites, low-F two-mica granites, high-F medium-P Li-mica granites). In France, only one type is related to U deposits, i.e., peraluminous two mica leucogranites (L-Type).

Another major difference between the two districts, which may explain the contrasting U resources, is the exceptional size of the Gera-Jachymov lineament zone compared to the Bonnac-Bellezane lineament in the St Sylvestre granite [3]. The Gera-Jachymov zone is about 40 km wide and extends over 80 km from Neumark (Nejdek) to Joachimsthal (Jachymov) and Gera, whereas the Bonnac-Bellezane lineament is only 5 km wide and 25 km long. Independently of the geology, exploration in France has rarely exceeded depths of about 400 m, whereas in the Erzgebirge, exploration and mining operations have reached depths of more than 2,000 m.

[1] Förster, H.J., Tischendorf, G., Trumbull, R.B., Gottesmann, B., 1999. *Journal of Petrology*, 40, 1613-1645.

[2] Cuney, M. 2014. *Bulletin de la Société Géologique De France*, 185, 75-92.

[2] Cuney, M., Friedrich, M., Blumenfeld, P. et al. 1989. *Tectonophysics*, 177, 39-57.

# Vendredi 21/01 – session NEEDS

---



## 08:40-09:05 Interactions, SPéciation et Effets des radionuCléides d'une zone humide anThropisée : Le projet structurant INSPECT

DEL NERO Mireille et al. IPHC CNRS

Del Nero M., S. Georg, R. Barillon, O. Courson

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, UMR 7178 CNRS IN2P3 – Université de Strasbourg, 1 rue du Loess, 67037 Strasbourg. LTSER « Zone Atelier Territoires Uranifères », Clermont-Ferrand.

Le projet NEEDS-INSPECT structure des recherches mécanistes et pluridisciplinaires, menées à l'interface chimie-microbiologie, dans le but d'aboutir *in fine* à une compréhension fine des interactions, des transferts et des effets de radionucléides naturels (RN), dont l'uranium (U), au sein des continuum sol-eau-plantes des biotopes des territoires uraniumifères. Le projet INSPECT structure des recherches menées dans le cadre de l'axe TERROIR de la Zone Atelier Territoires Uranifères (ZATU, <https://zatu.org/>). Ces recherches sont envisagées via l'étude multi-échelle d'un milieu complexe, à savoir une zone humide (ZH) caractérisée par un horizon de sub-surface à teneurs en RN supérieures à celle du fond géochimique. Cette ZH est située à l'aval d'une ancienne exploitation minière d'uranium (Rophin, Puy-de-Dôme).

Dans ce cadre, les transferts de l'U ont été étudiés via des analyses de la mobilité de l'U et de sa spéciation métallo-organique dans les eaux du ruisseau du bassin versant de Rophin (S. Georg, 2021). Des échantillons d'eau ont été prélevés en amont de la ZH, et à l'entrée et en sortie de la ZH (échantillons E4-E5, Fig. 1), au printemps et en hiver 2018-2019. Des analyses élémentaires, microscopiques (MET-EDS), et spectrométriques des fractions dissoutes et colloïdales des eaux ont été réalisées, incluant des analyses des matières organiques (MO) par spectrométrie de fluorescence synchrone et par spectrométrie de masse à haute résolution et à source d'ionisation par électro-nébulisation (ESI-FTMS).

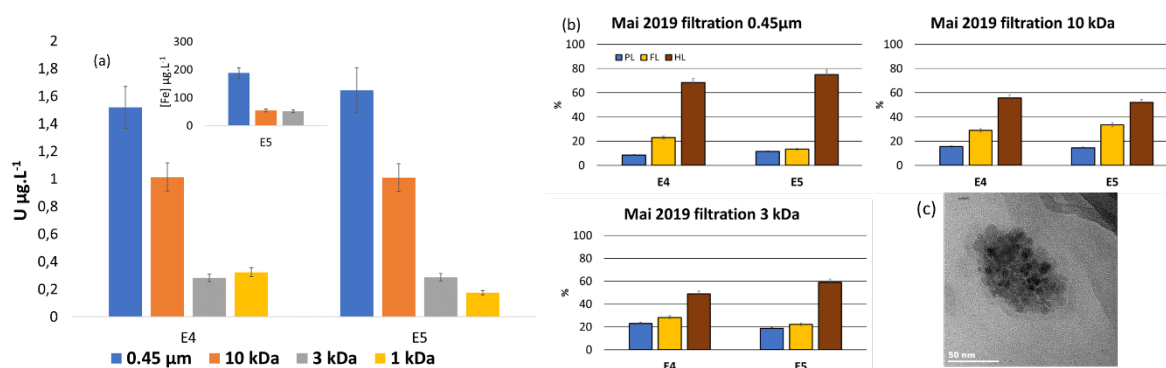


Fig. 1 : Résultats des filtrations des eaux E4-E5 au droit de la ZH de Rophin (mai 2019): effet du seuil de filtration (a) sur la concentration en U et Fe (insert), (b) sur les composantes des MO analysées par fluorescence synchrone (composante PL:protein-like, FL: fulvic-like, HL: Humic-like), et (c) image au MET d'agrégats de colloïdes d'oxydes de fer entourés d'une gangue organique. (Georg, 2021).

L'uranium(VI) montre une dynamique saisonnière et spatiale dans les eaux de Rophin. Il a été notamment montré que la ZH est une source secondaire de U pour les eaux du ruisseau la traversant. Une avancée scientifique importante a été réalisée sur les mécanismes de transport de l'U(VI) dans les eaux au droit de la ZH : l'U(VI) y migre sous forme de pseudo-colloïdes en suspension. Il y est associé à une fraction colloïdale de taille 0,45µm-10 kDa (Fig. 1a) constituée d'oxydes de fer de 10-20 nm couverts d'une gangue organique (Fig. 1c, analyses MET-EDS) à forte composante humique (Fig. 1b), et à une fraction colloïdale de taille 3-10 kDa qui est organique (Fig. 1a). L'U(VI) est donc co-adsorbé avec des acides humiques sur des oxydes de fer colloïdaux, et complexé par des colloïdes organiques (à composantes humique et fulvique). Ces colloïdes sont les vecteurs de son transport dans le ruisseau.

Georg, Sylvia (2021). Etude de la spéciation et de la mobilité de l'uranium(VI) dans des eaux naturelles : effet des matières organiques. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, 16 septembre 2021, IPHC.

Remerciement à LTSER « Zone Atelier Territoires Uranifères », Clermont-Ferrand.

## 09:05-09:30 Détachements crustaux, granites syn-tectoniques et mobilités uranifères : (1) structures, pétrologie et traçage géochimique

**BOULVAIS Philippe et al. Université de Rennes**

*Ph. Boulvais<sup>1</sup>, N. Cogné<sup>1</sup>, Clémentine Lassalle<sup>1</sup>, Mathilde Lefranc<sup>1</sup>, Hicham Bousrih, Cindy Luisier<sup>1</sup>, Yannick Branquet<sup>1,2</sup>*  
<sup>1</sup> Géosciences Rennes, <sup>2</sup> ISTO Orléans

Le domaine varisque sud-armoricain est caractérisé par la mise en place syntectonique de granites fertiles en uranium (Ballouard et al., 2015). Un modèle conceptuel de mobilité et de minéralisation en uranium a été établi (Ballouard et al., 2017), impliquant des circulations hydrothermales sollicitant des sources variées, profondes et superficielles, dans les détachements, grandes failles normales ductiles permettant l'exhumation de la croûte profonde (Dusséaux et al., 2019). Sur la presqu'île de Quiberon, même si aucune minéralisation en uranium n'est décrite, de magnifiques affleurements de granites syntectoniques s'offrent à l'expertise. La stratégie scientifique que nous suivons pour contraindre au mieux le set-up de la modélisation numérique (Bock et al., ce volume) consiste en : 1/ une cartographie des structures de déformation du granite, 2/ l'établissement du cadre temporel de l'activité magmatique syntectonique, 3/ la définition des réservoirs magmatiques fertiles en uranium et le traçage des mobilités en uranium.

1/ Les structures cartographiées sur l'affleurement symptomatique du Vivier (sud-ouest de la presqu'île), foliations et cisaillements ductiles (de faible pendage ouest) aussi bien que les discontinuités fragiles, se sont développées dans le même champ de contraintes, caractéristique du fonctionnement du détachement crustal à forte composante cisailante top-ouest. Un stade à composante coaxiale est présent lors de la mise en place de filons d'aplitopegmatites.

2/ Au regard de la composition minéralogique du granite et des filons, nous avons mis en place une datation par la méthode U-Pb sur apatite (analyse in-situ par Laser-ICPMS, et en contexte structural, en lame mince ; fig. 1). Nous avons ainsi établi que le corps granitique principal (le granite de Quiberon) s'est mis en place à  $316 \pm 3$  Ma, la première génération d'aplitopegmatites vers  $301.5 \pm 2$  Ma, la dernière génération (pegmatite large d'un mètre) vers  $292 \pm 2$  Ma. De 20 à 25 millions d'années de magmatisme et d'activité hydrothermale sont enregistrées.

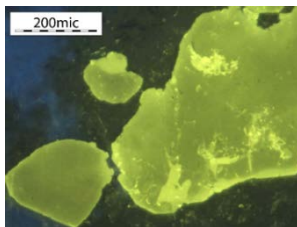


Fig. 1- Image en cathodoluminescence de grains d'apatite (échantillon Vi 20-7) montrant une zonalité cœur-bordure (grain à gauche de l'image) sur laquelle se superpose la trace d'une altération hydrothermale (réseau vert clair guidé par des fractures sur le grain central).

3/ Le granite du Vivier présente un degré de différenciation magmatique plus important que le granite hors-Vivier (teneurs en Th, La et Zr plus faibles, signe d'un fractionnement de monazite et de zircon), ce qui est compatible avec sa position structurale plus élevée, proche du détachement localisé au sommet du pluton. Or, au Vivier, la teneur moyenne en U est de 3,1 ppm, légèrement inférieure à celle du granite de Quiberon hors Vivier (3.5 ppm). Albitisation et muscovitisation partielles et pervasives observées en lames minces, augmentation du rapport Na/K et rapport Nb/Ta abaissé sous la valeur seuil de 5 (Ballouard et al., 2016) sont autant d'évidences d'interactions entre le granite du Vivier et des fluides hydrothermaux, évidences non visibles dans le granite de Quiberon hors affleurement du Vivier. Ajoutée à cela la présence systématique de bordures de grains d'apatite appauvries en U par rapport au cœur des grains, et nous concluons que les teneurs en uranium anormalement basses des échantillons du Vivier sont la trace vraisemblable d'un lessivage d'uranium au cours de l'interaction avec des fluides hydrothermaux.

Le granite de Quiberon, par son affleurement exemplaire du Vivier, enregistre ainsi 20 à 25 millions d'années d'une histoire magmatique-hydrothermale, en plusieurs stades, tous syn-tectoniques d'un détachement tardi-varisque ; il fournit donc le cadre idéal d'application d'une modélisation numérique de la mobilisation de l'uranium dans ces systèmes géologiques.

Références citées : Ballouard et al. (2015) *Lithos* 220-223, 1-22 ; Ballouard et al. (2016) *Geology*, 44 (3), 231-234; Ballouard et al. (2017) *Ore Geology Reviews*, 80, 309-331; Dusséaux et al. (2019) *Terra Nova*, 31 (4), 366-372

## 09:30-09:55 Détachements crustaux, granites syn-tectoniques et mobilités uranifères : (2) exploration numérique

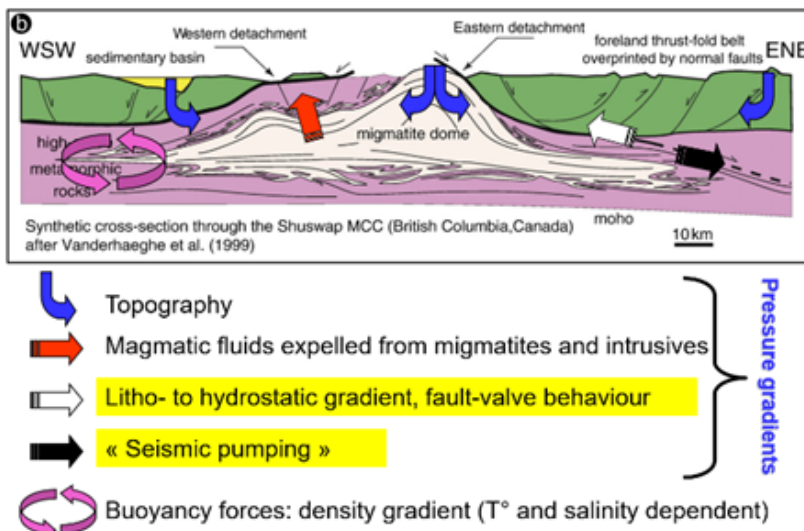
**BOCK Khaled et al. Université de Rennes**

*BOCK Khaled et al. Université de Rennes*

*K. Bock<sup>1</sup>, Y. Branquet<sup>1,2</sup>, P. Boulvais<sup>1</sup>, T. Duretz<sup>1,3</sup>*

*<sup>1</sup>Géosciences Rennes, <sup>2</sup>ISTO Orléans, <sup>3</sup>Goethe University, Frankfurt*

L'hydrodynamique et le transfert de solutés au sein des failles crustales normales à faible pendage (i.e. détachements) restent encore méconnus dans la croûte continentale où elles exhument la croûte inférieure ductile (métamorphique à migmatitique) en contexte de désépaississement crustal tardi-orogénique. Il n'y a aucun modèle hydrodynamique unifié soit (i) car les nombreuses forces motrices qui régissent les transferts de fluides ne sont jamais identiques dans le temps et l'espace pour chaque cas naturel (Fig. 1) ; (ii) soit par ce que les auteurs comparent les propriétés de ces fluides à différents moments de l'évolution du système. Certains détachements présentent ainsi des circulations de fluides chauds profonds per ascensum (Famin et Nakashima, 2005) et d'autres des indicateurs de fluides d'origine météoriques qui percolent per-descensum (Morrison et Anderson, 1998).



En Bretagne Sud, des gisements et des mobilités uranifères sont associées au fonctionnement de détachements crustaux et de granite syn-cinématiques. Il s'avère que l'histoire magmato-hydrothermale est complexe et polyphasée : (i) pour le système minéralisé granite/détachement de Guérande, l'âge de mise en place du leucogranite est ca. 310 Ma, suivi d'un épisode magmatique tardif à ca. 302 Ma et la minéralisation principale à ca. 300 Ma (Ballouard et al., 2017) ; (ii) pour le système non minéralisé granite/détachement de Quiberon, l'âge de mise en place du leucogranite est ca. 316 Ma, suivi d'un premier épisode magmatique tardif à ca. 302 Ma puis d'un dernier à ca. 292 Ma (Boulvais et al., ce volume). Ainsi avant de modéliser les mobilités uranifères en termes de transport de masse, il convient d'investiguer l'hydrodynamique du système au cours de cette évolution thermique complexe.

Des modèles numériques 2D contraints par ces données géométriques et géochronologiques ont été construits. Ils intègrent un couplage chaleur et circulation de fluides avec des perméabilités dépendantes de la profondeur, sans variation de topographie et la flottabilité pour unique force motrice dans un premier temps.

Les modèles montrent que le régime hydrodynamique du détachement change au cours d'une histoire thermique monophasée (1 cycle de chauffage suivi d'un cycle de refroidissement). Des fluides montants et descendants peuvent circuler de façon simultanée dans le détachement (Fig. 2a). La succession de deux cycles chauffage/refroidissement perturbe le motif de circulation des fluides. Dans les conditions de formation du gisement de Guérande (Pen Ar Ran), l'ajout d'une faille de second ordre focalise les zones favorables pour une minéralisation (Fig. 2b).

## 09:55-10:20 Évolution pétrologique et géochimique des séries magmatiques/métamorphiques de la province de Rae le long du corridor du Patterson Lake (Saskatchewan, Canada) : source d'uranium ?

**PALLARES Carlos Université Paris Saclay**

*Carlos Pallares<sup>a\*</sup>, Patrick Ledru<sup>b</sup>, Jocelyn Barbarand<sup>a</sup>, Antonio Benedicto<sup>a</sup>, Rémy Chemillac<sup>c</sup>*

*<sup>a</sup> Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France*

*<sup>b</sup> Université Lorraine, 54506 Vandoeuvre les Nancy, France*

*<sup>c</sup> Orano Canada*

Located along the Patterson Lake corridor (PLC), the Rae province recorded some crustal accretion magmatic events associated to subduction processes before the Talston continental collision at about 1.9 Ga. The discovery of new uranium ore deposits along the PLC leads us to search the possible sources and to evaluate the fertility of the distinct lithologies. The deep crustal structures characterization was recently suggested like a major litho-structural guide. The major and trace elements data from the southwestern part basement of the Rae province reveal petrological and geochemical characteristics, which could be associated to subduction-continental accretion geodynamic events. These characteristics from the magmatic/metamorphic series also suggest the interaction of deep crustal rocks and lithospheric mantle involvements. The latter events could have favored the uranium concentration in the most differentiated rocks by fractional crystallization. Within magmatic/metamorphic series at least three rock types can be identified: i) the boninites which can be associated to melting of refertilized depleted cratonic roots, or refertilized depleted lithosphere; ii) the calc-alkaline rocks (CA-BADR) like current volcanic arcs; and iii) Paleoproterozoic rocks with adakitic/TTG affinity, which result from melting and recycling of Archean crust, or from continental crust and slab melts interactions. Although uranium minerals concentrate mainly this element, other minerals such as potassic feldspath and plagioclase also concentrate it as trace element. The most uranium enriched rocks are those with adakitic/TTG affinity in which recycling was important, while the boninitic and CA-BADR rocks were depleted by silicic metasomatic fluids which affected the basement.

**Keywords:** Boninites, calc-alkaline rocks, adakitic/TTG affinity, uranium, Patterson Lake Corridor, Athabasca.

## 10:40-11:05 Evaluation et étude de Mélanges d'ammoniums quaternaires pour l'extraction sélective de l'uranium en milieu Sulfurique

GUERINONI E. et al. CEA

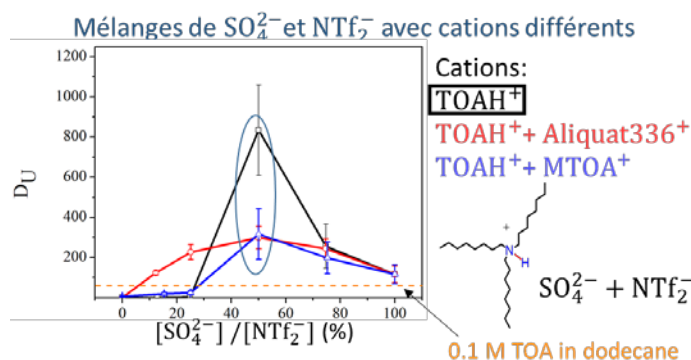
E. Guérinoni, S. Dourdain\*, T. Dumas, Z. Lu, F. Giusti, G. Arrachart, S. Pellet-Rostaing  
\*sandrine.dourdain@cea.fr

Le procédé d'extraction AMEX utilise des amines tertiaires pour l'extraction sélective de l'uranium issu de jus de lixiviation en milieu sulfurique. Malgré son application à l'échelle industrielle, ce procédé reste confronté à plusieurs problèmes : 1/ La sélectivité de l'uranium vis-à-vis du zirconium et du molybdène n'est pas idéale 2/ Il faut un modificateur de phase pour empêcher la formation de troisième phase 3/ Les amines tertiaires se dégradent en présence de Vanadium et du modificateur de phase.

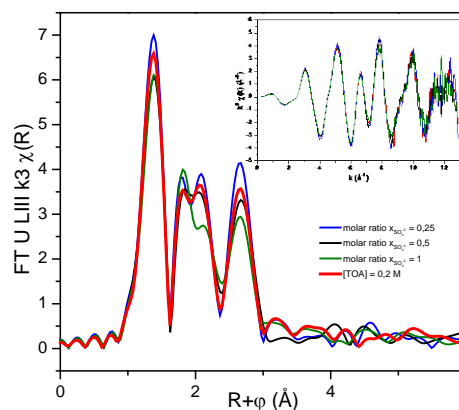
En cherchant à limiter l'utilisation d'un modificateur de phase, le projet EMINANS visait à tester les propriétés d'extraction de plusieurs ammoniums quaternaires différenciés par la nature de leurs cations et de leurs anions, ainsi que celles de leurs mélanges. L'affinité pour l'uranium et la sélectivité vis-à-vis des impuretés Fe, Zr, V, Mo ont été estimées par une étude multiparamétrique et analyse ICP OES, titration, et Karl Fisher. Il a été montré qu'un des mélanges d'ammoniums quaternaires constitué de cations identiques et d'anions différents permet d'obtenir une efficacité d'extraction 100 fois supérieure au système de référence (TOA) utilisée dans le procédé AMEX (Figure a). Utilisés purs et sans modificateur de phase, ces ammoniums quaternaires sont analogues à des liquides ioniques qui présentent de ce fait l'avantage d'offrir des volatilités infimes comparés aux solvants d'extraction classiques.

Des mesures par diffusion des rayons X (SAXS), et d'absorption X (EXAFS) réalisées sur la ligne MARS du synchrotron SOLEIL (Figure b), couplées à des méthodes spectroscopiques RMN, IR et UV Vis ont été réalisées pour étudier les mécanismes d'extraction en se penchant tout particulièrement sur l'origine de ces propriétés synergiques jusqu'alors jamais décrites.

a)



b)



Il est apparu qu'aucun aspect structural ni de coordination ne permet d'expliquer cette synergie. Seules les propriétés de viscosité du système, associées à son extraction d'eau ont permis d'observer un caractère synergique permettant de proposer une hypothèse de mécanisme à l'origine de l'extraction synergique d'uranium. Ces résultats ont donné lieu au dépôt d'un brevet et la rédaction d'une publication est en cours.

## 11:05-11:30 Etude expérimentale du fractionnement des éléments accompagnateurs entre fluide et oxyde d'uranium par précipitation contrôlée en condition hydrothermale

MERCADIER Julien et al. CNRS

Julien Mercadier(a), Chantal Peiffert(a), Aurélien Randi(a), Jérôme Marin(a), Anne-Magali Seydoux-Guillaume(b,c), Laurent Truche(d)

(a) Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources, UMR 7359, BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

(b) Université de Lyon, CNRS, UCBL, ENSL ; LGL-TPE, 69622 Villeurbanne, France

(c) Université de Lyon, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, 42020 Saint-Etienne, France

(d) Université Grenoble Alpes, CNRS, ISTERre, 38058 Grenoble, France

Les oxydes d'uranium naturels contiennent des quantités très variables d'éléments chimiques accompagnateurs qui sont de plus en plus utilisés pour classer les gisements d'uranium ou déterminer le type de gisements auxquels appartiennent des minéralisations nouvellement découvertes. Ces teneurs en éléments accompagnateurs sont aussi utilisées de façon généralisée pour lutter contre la prolifération nucléaire. Les paramètres contrôlant l'intégration de ces éléments dans les oxydes d'uranium sont néanmoins mal contraints, ne permettant pas à l'heure actuelle de comprendre les processus à l'origine de la géochimie des oxydes. Le projet SYNTHEXU financé par NEEDS a pour objectif de définir les conditions d'intégration des éléments accompagnateurs dans les oxydes d'uranium naturels via une approche couplant de façon originale expérimentation et analyse. Cette approche vise à définir pour la première fois les coefficients de partage entre fluide et oxyde d'uranium pour une gamme variée de conditions (température, salinité du fluide, pH,...) et d'éléments. La réalisation des objectifs proposés dans ce projet, à savoir la synthèse d'oxydes d'uranium en conditions expérimentales contrôlées, passe par la validation deux étapes structurantes : i) l'établissement du protocole de synthèse expérimentale des oxydes d'uranium et ii) la définition des protocoles et méthodes d'analyse des solutions expérimentales et de dissolution des oxydes d'uranium synthétisés par expérimentation.

1) *protocole de synthèse hydrothermale des oxydes d'uranium en autoclave* : l'établissement de ce protocole s'est appuyé sur les travaux de M. Dargent à GeoRessources qui a testé l'efficacité de différents réducteurs pour la précipitation d'oxydes d'uranium à partir de solutions uranifères. Le choix initial s'est porté sur l'utilisation d'un réducteur gazeux (hydrogène) permettant théoriquement une cinétique rapide de précipitation (<48h) et l'absence de contamination des solutions. Différentes configurations ont été testées (variation de la pression d'H<sub>2</sub>, présence d'un nucléus solide de graphite pour faciliter et focaliser spatialement la précipitation, utilisation d'un bol en téflon). L'utilisation de sulfures d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) a été testée lors des dernières expériences, avec pour objectif une augmentation du rendement de précipitation des oxydes d'uranium et de la vitesse de synthèse.

2) *méthodes et protocole d'analyse des solutions* : deux types d'instrumentation ont été testés : analyse par ICP-OES par voie liquide et analyse par LA-ICP-MS, et différentes gammes de solutions (variations des rapports [éléments accompagnateurs]/[uranium] et variation de la salinité totale de la solution) ont été mesurées. Des tests d'effet de matrice et d'interférence ont été réalisés à partir de gammes de concentrations variables pour les éléments majeurs des solutions (Na, Cl et U), se focalisant sur leurs effets potentiels sur la mesure des éléments de terres rares. Trois séries de solutions ont été produites en laboratoire, chacune avec une teneur fixe en terres rares (0,01, 0,1 et 1 ppm) et des teneurs en uranium variant de 0,01 à 3000 ppm, donnant des rapports [U]/[REE] compris entre 0,01 et 300010. Les tests pour les deux instrumentations indiquent que les précisions sont meilleures que 10% et que les déviations à la valeur de référence sont majoritairement inférieures à 10%. Les déviations les plus importantes sont mesurées pour les deux instrumentations pour concentrations en uranium les plus élevées et pour la gamme de concentration la plus faible en terres rares (0,01 ppm).

Les résultats de ces travaux sont actuellement utilisés pour le lancement de la synthèse « en routine » d'oxydes d'uranium selon les conditions géologiques connues dans les gisements, avec comme première cible les gisements dits de type discordance.

*Mots clés* : uranium, synthèse hydrothermale, coefficient de partage, éléments accompagnateurs

## 11:30-11:55 Simulation des écoulements souterrains dans un tas de résidus miniers sur l'ancienne mine d'uranium du Cellier (Lozère, France)

**OUEDRAOGO Ahmeda et al. Sorbonne Université**

*Ahmeda Assann OUEDRAOGO<sup>1</sup>, Anne JOST<sup>1</sup>, Valérie PLAGNES<sup>1</sup>, Isabelle BLANC-POTARD<sup>2</sup>, Camille CHAUTARD<sup>3</sup>, Michael DESCOSTES<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Sorbonne Université, CNRS, EPHE, METIS, F-75005 Paris, France*

*<sup>2</sup>AMF, ORANO Mining, France*

*<sup>3</sup>Environmental R&D, ORANO Mining, France*

L'écoulement des eaux au sein des résidus miniers est un aspect essentiel de la gestion à long terme de ceux-ci. En effet, ces écoulements à travers des résidus déposés en surface influencent les réactions chimiques et la migration de certains polluants dans l'environnement. Cette étude porte sur l'un des terrils résultant d'une lixiviation en tas de l'ancien site minier du Cellier (Lozère-France). Ces résidus sont caractérisés par une dominance de particules grossières et sont principalement constitués d'argile, de sables et de blocs de leucogranite. Ce site est maintenant réhabilité et toutes les eaux sont collectées et traitées avant d'être rejetées dans l'environnement, avec un suivi quotidien et mensuel depuis 1991. La surveillance environnementale comprend la mesure des débits et de la chimie de l'eau issue des drains situés sous le tas de résidus.

L'analyse des données hydrologiques disponibles a permis d'évaluer l'évapotranspiration réelle et d'effectuer le calcul du bilan hydrique. On constate que l'évapotranspiration, qui correspond à 45% des précipitations, affecte fortement le comportement hydrologique de la pile en été et en automne. Les mois de juin, juillet et août sont néanmoins marqués par un faible débit des drains malgré un bilan négatif ( $P-ETR < 0$ ), qui persiste au début de l'automne. Le temps de réponse hydrologique de la pile aux précipitations est d'un mois. Les auto-corrélations suggèrent que les débits des drains ont une faible inertie avec un effet mémoire de 2 à 3 mois. Les corrélations croisées entre les précipitations et les débits des drains observés indiquent qu'il existe un cycle trimestriel à semestriel dans lequel les écoulements réagissent aux précipitations et influencent les paramètres chimiques tels que le pH et les concentrations en sulfates.

Un modèle hydrodynamique développé sous le code Hydrus nous permet de décrire correctement le comportement hydrologique moyen observé du tas de résidus (données mensuelles 2010-2018). La structure du tas n'étant pas connue, nous avons utilisé une distribution homogène et stochastique de la conductivité hydraulique. Les résultats des simulations montrent que la distribution de l'eau dans la pile varie de façon saisonnière et que la teneur en eau reste faible (2,9 - 3,8%) tout au long de la période de simulation, ce qui est susceptible de favoriser le drainage acide dans l'environnement avant sa neutralisation par la station d'épuration.

**Keywords** Après-mine, résidus miniers, bilan hydrologique, modélisation hydrodynamique, milieu insaturé, ancienne mine d'uranium

## 11:55-12:20 Caractérisation géophysique de résidus miniers en milieu non saturé

GUERIN Roger et al. Sorbonne Université

Roger GUÉRIN<sup>1</sup>, Romain BIENNAIS<sup>1</sup>, Pierre L'HERMITE<sup>1</sup>, Ludovic BODET<sup>1</sup>, Alexis MAINEULT<sup>1</sup>, Anne JOST<sup>1</sup>, Valérie PLAGNES<sup>1</sup>, Michael DESCOSTES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75005 Paris

<sup>2</sup>ORANO - Mining BU, Environmental R&D Dept, 125 avenue de Paris, 92330 Châtillon

Une ancienne mine d'uranium comprenant des tas de résidus de traitement statique fait l'objet d'études hydrogéologique et géophysique. Un modèle d'écoulement sur un des tas poreux et perméables caractérisés par une dominance de particules grossières et constitué majoritairement de sable et de blocs de leucogranite, a été établi. L'une des principales conclusions issues de cette modélisation indique que la teneur en eau du tas de résidus de traitement évolue de façon cyclique en fonction des saisons mais demeure dans l'ensemble très faible, ce qui est susceptible de resolubiliser l'acidité piégée dans le milieu. Pour améliorer la modélisation, il faut préciser autant que possible la structure interne du tas de résidus, car le modèle est très fortement dépendant des paramètres hydrodynamiques et de sa géométrie. Les outils géophysiques sont adaptés aussi bien pour définir l'épaisseur et la porosité des couches que pour préciser la teneur en eau en surface mais aussi à l'échelle du tas. La tomographie de résistivité électrique (ERT), qui est intégratrice et qui permet d'identifier dans le massif résistant électriquement les zones/couches ayant des teneurs différentes en fluide et présentant une porosité différente, a été employée. Les résultats obtenus en combinant deux acquisitions (avec des écartements inter-électrode de 1 et 3 m) montrent une structure plus complexe que celle donnée par le forage réalisé au sommet du tas (Figure 1). Le milieu étant relativement hétérogène (compacités différentes, tailles différentes des blocs), l'utilisation d'une méthode alternative comme la tomographie sismique devrait permettre d'obtenir des informations complémentaires et de se prémunir des bruits inhérents à chaque méthode. La tomographie sismique (en ondes P et en ondes de surface) renseigne en effet sur la présence d'interfaces entre deux zones de compacité différente. De plus, la combinaison de ces méthodes d'imagerie électrique et sismique, permettra de localiser précisément les interfaces. Leur répétition dans le temps à des périodes où l'humidité dans le sol sera différente permettra de localiser les zones avec des variations de teneur en fluide à partir des variations des propriétés électriques et mécaniques.

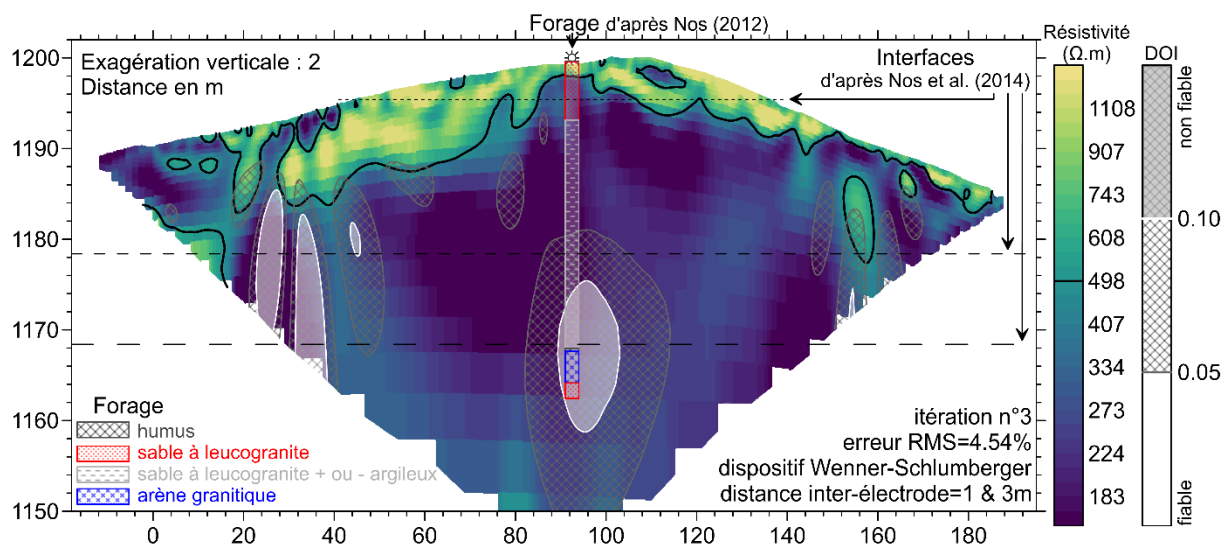


Figure 1 : ERT sur le tas avec comparaison avec les données de forage



## 13:30-13:55 Les isotopes de l'uranium comme traceurs des échanges nappe-rivière. Cas de la vallée de l'Essonne

**ZEBRACKI Mathilde et al. IRSN**

*M. Zebracki<sup>1</sup>, V. Durand<sup>2</sup>, C. Marlin<sup>2</sup>, O. Diez<sup>1</sup>, T. Gaillard<sup>3</sup>, J. Gorny<sup>1</sup>, C. Jardin<sup>1</sup>, C. Lafont<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LELI, Fontenay-aux-Roses*

*<sup>2</sup> UMR GEOPS, Université Paris-Saclay – CNRS, Orsay*

*<sup>3</sup> CPGF-HORIZON, Avon*

Dans l'environnement, les eaux de surface et souterraine en connexion hydraulique entre elles constituent une seule et même ressource (Winter et al. 1998). La préservation de la qualité de cette ressource et les modalités de gestion associée reposent sur une bonne compréhension des échanges entre nappes et rivières (Khan and Khan 2019). Cependant les interactions entre nappes et rivières sont difficiles à caractériser (Sophocleous 2002). L'exploitation en hydrologie des isotopes de l'uranium pour tracer la circulation des eaux souterraines, quantifier les mélanges entre masses d'eaux, ou encore estimer les temps de résidence des eaux souterraines, n'est plus à démontrer (Osmond and Cowart 1976; Osmond et al. 1968) ; en revanche, pour tracer les processus hydrologiques d'un continuum nappe-rivière (Durand et al. 2005), l'utilisation de ces traceurs n'est que peu documentée.

En amont du bassin versant sud de la Seine, la rivière Essonne, avec ses affluents et les aquifères qui leurs sont associés, sont des hydrosystèmes peu étudiés. En amont de ce bassin versant, l'Œuf est une rivière qui prend sa source en forêt d'Orléans, draine une surface de 235 km<sup>2</sup>, puis rejoint environ 32 km à l'aval un autre affluent, la Rimarde, et, de cette confluence naît la rivière Essonne. Du point de vue hydrogéologique, la rivière Œuf-Essonne sert d'exutoire naturel pour l'eau souterraine contenue dans des formations géologiques différenciées et connectées à la rivière (notamment les sables et argiles de Sologne d'âge Burdigalien et les calcaires de Pithiviers d'âge Aquitanien).

De manière fortuite, les investigations antérieures menées dans la rivière Œuf-Essonne (IRSN 2006, 2007) ont permis de détecter des concentrations en uranium (U) particulièrement élevées (22 µg L<sup>-1</sup>) et des rapports d'activité entre isotopes (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) singulièrement bas (< 0,5). L'écart remarquable entre les valeurs détectées dans la rivière Œuf-Essonne et celles généralement observées dans les rivières – concentration moyenne de l'U entre 0,2 et 0,5 µg L<sup>-1</sup> (Mangini et al. 1979; Palmer and Edmond 1993; Windom et al. 2000), rapport d'activité (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) en moyenne égal à 1,17 (Chabaux et al. 2003) – soulève la question de l'origine de l'U et du déséquilibre <sup>238</sup>U-<sup>234</sup>U (Zebracki et al. 2019).

Courant 2020, la rivière Œuf-Essonne a fait l'objet de prélèvements en une dizaine de points (depuis sa source en Forêt d'Orléans jusqu'à la confluence avec la Rimarde) et saisonnièrement (mars, juin, septembre et décembre). Les variations des concentrations d'U et du rapport d'activité (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) dans la rivière Œuf-Essonne en fonction de la distance depuis sa source ont permis d'identifier une origine naturelle de l'U et du déséquilibre <sup>238</sup>U-<sup>234</sup>U. Les résultats acquis montrent que la présence d'U déséquilibré dans la rivière est liée aux échanges d'eau avec la nappe des calcaires de Pithiviers (formation lacustre carbonatée composant la partie supérieure de l'aquifère de Beauce). Les caractéristiques de l'U (concentration et isotopie) ont été exploitées pour distinguer l'origine des masses d'eaux alimentant la rivière Œuf-Essonne (surface vs. profondeur). L'identification de signatures distinctes a ainsi permis de quantifier la contribution en U d'origine souterraine dans la rivière entre 50 et 85 % de l'U total (Zebracki et al., in prep.).

## **13:55-14:15 La datation U-Pb sur calcite : un outil de découverte en géodynamique**

**MISSENARD Yves Université Paris Saclay**

*Université Paris Saclay, UMR GEOPS*

Le développement de nouvelles techniques de datation telle que la méthode U-Pb sur calcite de faille au Spectromètre de Masse couplé à un Système d'Ablation Laser (LA-ICP-MS) permet de préciser ou compléter les calendriers géodynamiques au front des orogènes, jusqu'alors établis à l'aide de la thermochronologie et des dépôts syn-tectoniques. Nous présentons ici les résultats surprenants obtenus dans l'avant-pays oriental nord pyrénéen (région des Corbières) et qui permettent de discuter de l'évolution Néogène, supposée post-orogénique, de la chaîne. En plus de confirmer la phase pyrénéenne d'âge Eocène, la datation des calcites syn-tectoniques montre que cette histoire compressive s'est poursuivie au Miocène (c.a. 16Ma) avec la réactivation des grandes structures régionales telles que le Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen et le Front Nord Mouthoumet. Ces résultats permettent de jeter un regard nouveau sur des observations connues comme l'existence de surfaces perchées datées du Miocène et présentes dans l'entièreté de la chaîne.

## **14:15-15:15 Conférence invitée - Considérations sur l'électronucléaire actuel et futur ou comment mieux utiliser l'uranium naturel**

**Guillaumont Robert Académie des Sciences**

*Professeur honoraire Paris XI-Orsay, Membre de L'Académie des sciences*

L'Académie des sciences a récemment publié un rapport sur la production d'énergie électrique pour éclairer, au plan scientifique, les choix stratégiques possibles entre utilisation des ressources fossiles et de ressources renouvelables ([www.academie-sciences](http://www.academie-sciences)). L'approche a été simplifiée pour être appréhendée par un large public. L'accent est mis sur l'utilisation de l'énergie nucléaire de fission. En effet la place de l'électronucléaire dans un futur mix énergétique doit être définie au regard du temps : court terme et long terme, pour mettre en œuvre la R&D dans les deux cas, R&D qui est extrêmement longue. Le rapport aborde l'électronucléaire sous l'angle des performances du combustible nucléaire et donc de l'utilisation de l'uranium et de la matière fissile créée dans le combustible. La conférence traitera essentiellement de l'utilisation de l'uranium et du plutonium dans les réacteurs à neutrons thermiques (RNT) et rapides (RNR) : caractéristique du combustible, mise en œuvre, limitations imposées par la sûreté, performances, avenir. Le cas de la France sera mis en avant au regard de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie.

---

**15:35-16:45 Discussion et réflexion actions coordonnées**

**16:45-17:00 Conclusion et clôture**

## Liste de participants

NOM Prénom	Affiliation	e_mail
ABDELRAZEK Maher	Université Paris Saclay	maher.abdelrazek@universite-paris-saclay.fr
ANDRE-MEYER Anne-Sylvie	Université de Lorraine	anne-sylvie.andre@univ-lorraine.fr
BENEDICTO Antonio	Université Paris Saclay	antonio.benedicto@universite-paris-saclay.fr
BOCK Khaled	Université de Rennes	bock.khaled07@gmail.com
BOUKARI Claire	Université Paris Saclay	claire.boukari@universite-paris-saclay.fr
BOULVAIS Philippe	Université de Rennes	philippe.boulvais@univ-rennes1.fr
BRANQUET Yannick	Université de Rennes	yannick.branquet@univ-orleans.fr
BROUAND Marc	Orano Mining	marc.brouand@orano.group
COLLET Antoine	Orano/Mines ParisTech	antoine.collet@orano.group
CUNEY Michel	Ex-Université de Lorraine	michel.cuney@univ-lorraine.fr
DAGNELIE Romain	CEA	romain.dagnelie@cea.fr
DARRICAU Louise	Université Paris Saclay	louise.darricau@universite-paris-saclay.fr
DAVID Sylvain	CNRS	sdavid@ipno.in2p3.fr
DEL NERO Mireille	IPHC CNRS	mireille.delnero@iphc.cnrs.fr
DELEPINE Jacques	Libre	j.delepine76760@gmail.com
DELOGKOS Stratos	University College Dublin	delstratos@hotmail.com
DESCOSTES Michael	Orano Mining	michael.descostes@orano.group
DOUCMAK Razane	Mines-Paritech	razane.doucma@mines-paritech.fr
DOURDAN Sandrine	CEA	sandrine.dourdain@cea.fr
DRESSLER Aline	CEA	aline.dressler@cea.fr
ELDURSI Khalifa	Université de Lorraine	khalifa.eldursi@gmail.com
FLOTTE Nicolas	Orano Mining	nicolas.flotte@orano.group
FONDEMENT Valentin	CEA	valentin.fondement@cea.fr
FORBES Pierre	Orano Mining	pierre.forbes@orano.group
GERBEAUD Olivier	Orano Mining	olivier.gerbeaud@orano.group
GORNY Josselin	IRSN	josselin.gorny@irsn.fr
GOURGIOTIS Alkiviadis	IRSN	alkiviadis.gourgiotis@irsn.fr
GUERIN Roger	Sorbone Université	roger.guerin@sorbonne-universite.fr
GUILLAUMONT Robert	Académie des Sciences	robert.guillaumont0663@orange.fr
GUILLON Sophie	Mines-Paritech	sophie.guillon@mines-paritech.fr
HAURINE Frederic	Université Paris Saclay	frederic.haurine@universite-paris-saclay.fr
HOCQUET Sébastien	Orano Mining	sebastien.hocquet@orano.group
JACQUEMET Nicolas	Chercheur/consultant indépendant	nicolas@nicolas-jacquemet.com
LANGLAIS Valérie	Orano Mining	valerie.langlais@orano.group
LE BEUX Anthony	Orano Mining	anthony.lebeux@orano.group
LEDRU Patrick	Orano Mining	patrick.ledru@univ-lorraine.fr
L'HERMITE Pierre	Sorbonne Université	pierre.l_hermite@upmc.fr
MARCHAL Paul	Orano Mining	paul.marchal@univ-lorraine.fr
MERCADIER Julien	Université de Lorraine	julien.mercadier@univ-lorraine.fr
MICHELS Raymond	Université de Lorraine	raymond.michels@univ-lorraine.fr
MISSENARD Yves	Université Paris Saclay	yves.missenard@universite-paris-saclay.fr
NIMAL Jean Claude	Ex-CEA	jean-claude.nimal@orange.fr
OBIN Thomas	Université de Lorraine	thomas.obin@univ-lorraine.fr
OUEDRAOGO	Ahmeda	oahmedaassann@gmail.com
PAGEL Maurice	Université Paris Saclay	maurice.pagel@universite-paris-saclay.fr
PALLARES Carlos	Université Paris Saclay	carlos.pallares@universite-paris-saclay.fr
PARIZE Olivier	Ex-Orano Mining	candidaparize@aol.com
PLAGNES Valérie	Sorbone Université	valerie.plagnes@sorbonne-universite.fr
QUESSANDIER Martin	Université de Lorraine	martin.quesandier@univ-lorraine.fr
RAYOT Véronique	Orano Mining	veronique.rayot@orano.group
REILLER Pascal	CEA	pascal.reiller@cea.fr
ROUSSELLE Jacky	Libre	jackyrouselle@orange.fr
SAILHAC Pascal	Université Paris Saclay	pascal.sailhac@universite-paris-saclay.fr
SALVATORE Andrea	CEA	andrea.salvatores@cea.fr
SERDOUM Mehdi	Université de Lorraine	mehdi.serdoum@univ-lorraine.fr
TOUBON HervéMaher ABDE	Orano Mining	herve.toubon@orano.group
WILLIARD Elodie	Orano Mining	elodie.williard@orano.group
ZEBRACKI Mathilde	IRSN	mathilde.zebracki@irsn.fr
GUERINONI Else	CEA	Elise.GUERINONI@cea.fr