

# 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



<https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/journees-uranium-orsay/>

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.

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 ».

Les journées uranium de 2024 amèneront des conférences invitées et des débats sur la conjoncture actuelle et future de l'uranium.

## 23 & 24 janvier 2024

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

## 32 présentations 2 conférences invitées

Sur des sujets portants du  
Canada à la Chine  
en passant par la France,  
du terrain à la modélisation

### Organisateurs :

Antonio BENEDICTO (Université Paris Saclay)  
Patrick LEDRU (Université de Lorraine)  
Anthony LE BEUX (Orano)

### Contacts :

[antonio.benedicto@universite-paris-saclay.fr](mailto:antonio.benedicto@universite-paris-saclay.fr)  
[patrick.ledru@univ-lorraine.fr](mailto:patrick.ledru@univ-lorraine.fr)  
avec pour objet : JUO 2024

[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](mailto:accueil@geosoc.fr)



## Présentations

<b>Mardi 23/01.....</b>	<b>5</b>
9:00-9:30 Ouverture : L'uranium redevient-il sous pression ? .....	6
Christian Polak.....	6
09:30-09:50 Modèles géologiques et concepts d'exploration des gisements d'uranium de type discordance du bassin de l'Athabasca : l'approche de la chaire GeomIn3D.....	7
Julien Mercadier <sup>1</sup> , Patrick Ledru <sup>1</sup> , Guy Marquis <sup>2</sup> , Olivier Gerbeaud <sup>3</sup> , Elodie Williard <sup>3</sup> , Pierre Martz <sup>3</sup> , Magdalena Anderson <sup>4</sup> , Anthony Le Beux <sup>3</sup> .....	7
09:50-10:10 Architecture structurale d'un réservoir fossile à l'interface bassin/socle et rôle sur la mise en place de minéralisations d'uranium de haute teneur : exemple du prospect Waterfound, Bassin d'Athabasca (Canada).....	8
Manon Bulliard <sup>1, 2</sup> , Roger Soliva <sup>2</sup> , Gaétan Milesi <sup>1</sup> , Olivier Gerbeaud <sup>3</sup> , Magdalena Anderson <sup>3</sup> , Daniel Gerger <sup>3</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	8
10:10-10:30 Contexte tectonique associé aux minéralisations d'uranium de type discordance : apports des données d'imagerie de paroi dans les unités sédimentaires basales de l'Est du bassin d'Athabasca (Canada).....	9
Gaétan Milesi <sup>1</sup> , Thomas Obin <sup>1</sup> , Mehdi Serdoun <sup>1</sup> , Olivier Gerbeaud <sup>2</sup> , Magdalena Anderson <sup>2</sup> , Shawn Harvey <sup>3</sup> , Gerard Zaluski <sup>3</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	9
10:30-10:50 Evolution pétro-structurale des zones de faille minéralisées de l'est Athabasca : autopsie des « conducteurs graphiteux » .....	10
Thomas Obin <sup>1</sup> , Gaétan Milesi <sup>1</sup> , Patrick Ledru <sup>2</sup> , Raymond Michels <sup>1</sup> , Olivier Gerbeaud <sup>3</sup> , Marc Brouand <sup>3</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	10
11:10-11:30 Chronologie de formation d'un gisement d'uranium de type discordance du Bassin d'Athabasca : l'exemple de Waterfound et McClean South.....	11
Quentin Boulogne <sup>1</sup> , Thomas Obin <sup>1</sup> , Gaétan Milesi <sup>1</sup> , Marc Brouand <sup>2</sup> , Pierre Martz <sup>2</sup> , Daniel Gerger <sup>2</sup> , Marie Gérardin <sup>1</sup> , Chantal Peiffert <sup>1</sup> , Patrick Carr <sup>1</sup> , Magdalena Anderson <sup>2</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	11
11:30-11:50 Dater les épisodes hydrothermaux dans les gisements de métaux grâce aux argiles des failles : test d'applicabilité de la méthode K-Ar aux illites du bassin d'Athabasca, Canada .....	12
Marie Gérardin <sup>1</sup> , Danièle Bartier <sup>1</sup> , Gaétan Milesi <sup>1</sup> , Michel Cathelineau <sup>1</sup> , Pierre Martz <sup>2</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	12
11:50-12:10 Analyse des anomalies spectroscopiques liées aux minéralisations en uranium du bassin de l'Athabasca et de son socle (Saskatchewan, Canada) .....	13
Mehdi Serdoun <sup>1</sup> , Frédéric Sur <sup>2</sup> , Elodie Williard <sup>3</sup> , Gaétan Milesi <sup>1</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	13
12:10-12:30 Influences of different fault characteristics in fluid diversion at intersection zones and formation of structurally-controlled mineral deposits.....	14
Khalifa Eldursi <sup>1</sup> , Patrick Ledru <sup>2</sup> , Fabrice Golfier <sup>2</sup> , Luc Scholtès <sup>3</sup> , Marianne Conin <sup>2</sup> , Julien Mercadier <sup>2</sup> , Yannick Branquet <sup>4</sup> , Guoxiang Chi <sup>5</sup> .....	14
14:00-14:20 Modélisation conjointe des halos d'altération des gisements d'uranium et de leurs structures géologiques de contrôle à l'aide de squelettes à composantes multiples .....	15
Paul Marchal <sup>1</sup> , Guillaume Caumon <sup>1</sup> , Pauline Collon <sup>1</sup> , Patrick Ledru <sup>1</sup> , Kelsey McKee <sup>2</sup> , Julien Mercadier <sup>1</sup> .....	15
14:20-14:40 Inversion jointe de données électromagnétiques et électriques .....	16
A. Mohand-Saïd, G. Marquis, J.F. Girard .....	16



14:40-15:00 Calage d'historique de production assisté en transport réactif. Application à la récupération in situ de l'uranium .....	17
Antoine Collet <sup>1,2</sup> , Irina Sin <sup>1</sup> , Hervé Chauris <sup>1</sup> , Olivier Regnault <sup>1,3</sup> , Valérie Langlais <sup>2</sup> .....	17
15:00-15:20 Simulation numérique de l'impact d'un pilote d'exploitation d'uranium par <i>in situ</i> recovery (ISR) : apports pour la recherche de solutions alternatives de réhabilitation.....	18
Marine Bonnet <sup>1,2</sup> , Nicolas Seigneur <sup>2</sup> , Sophie Guillon <sup>2</sup> , Valentin Robin <sup>1</sup> , Flora Parrotin <sup>1,3,5</sup> , Niya Grozeva <sup>2</sup> , Munkh-Erdene Batbaatar <sup>4</sup> , Michael Descostes <sup>2,5</sup> .....	18
15:20-15:40 Développement d'un modèle de transport réactif pour prédire l'empreinte environnementale des exploitations d'uranium par in-situ recovery (ISR).....	19
Sofia Escario <sup>1</sup> , Nicolas Seigneur <sup>2</sup> , Antoine Collet <sup>2</sup> , Olivier Regnault <sup>1</sup> , Vincent Lagneau <sup>2</sup> , Michaël Descostes <sup>1,2</sup> .....	19
16:00-16:20 Etude pétrophysique et de RMN en laboratoire des faciès gréseux composant le Tchirezrine 2 du gisement d'Imouraren au Niger .....	20
Grégory Dufrechou, Pierre Grizard, Romain Mieszkalski.....	20
16:20-16:40 Utilisation de barytine pour atténuer le <sup>226</sup> Ra dans les résidus provenant de minerais à haute teneur en U - Saskatchewan, Canada.....	21
Clémence Besançon <sup>1</sup> , Paul Sardini <sup>2</sup> , Sébastien Savoye <sup>3</sup> , Kebbi Hughes <sup>4</sup> , Hamid Mokhtari <sup>4</sup> , Martine Gérard <sup>5</sup> , Michael Descostes <sup>1</sup> .....	21
16:40-17:00 Développements méthodologiques en autoradiographie alpha et applications en contexte minier.....	22
Hugo Lefeuvre <sup>1,2</sup> , Paul Sardini <sup>1</sup> , Sophie Billon <sup>1</sup> , Clémence Besançon <sup>3</sup> , Jérôme Donnard <sup>4</sup> , Benoit Merckx <sup>2</sup> , Michael Descostes <sup>3</sup> .....	22
17:00-17:20 Analyses de Spéciation de l'Uranium en Contexte Minier par Spectrofluorimétrie Laser à Résolution Temporelle : Comparaisons aux Calculs de Spéciation .....	23
Pascal E. Reiller <sup>1</sup> , Pierre L'Hermite <sup>2</sup> , Chengming Shang <sup>1</sup> , Valérie Plagnes <sup>2</sup> , Anne Jost <sup>2</sup> , Michaël Descostes <sup>3</sup> .....	23
17:20-17:40 Comportement de l'uranium, du plomb et du cuivre au sein d'une zone humide influencée par des apports particuliers d'origine minière.....	24
Louise Darricau <sup>1,2</sup> , Josselin Gorny <sup>1</sup> , Arnaud Mangeret <sup>1</sup> , Alkiviadis Gourgiotis <sup>1</sup> , Mathilde Zebracki <sup>1</sup> , Alexandra Courtin <sup>2</sup> .....	24
17:40-18:00 Simulation actuelle et future des écoulements dans un terril de résidus sur l'ancien site minier du Cellier en France.....	25
Pierre L'Hermite <sup>1</sup> , Anne Jost <sup>1</sup> , Valérie Plagnes <sup>1</sup> , Benoît Reile <sup>2</sup> , Isabelle Blanc-Potard <sup>3</sup> , Damien Regnier <sup>4</sup> , Michaël Descostes <sup>5,6</sup> .....	25
18:00-18:30 Discussion/conclusions journée .....	26
<b>Mercredi 24/01 .....</b>	<b>27</b>
08:45-09:00 Introduction au Programme NEEDS du CNRS.....	28
Antonio Benedicto .....	28
09:00-09:30 Détachements crustaux, granites syncinématiques et mobilités uranifères : 1) exhumation de la croûte, contexte structural, temporalité .....	29
Yannick Branquet, Philippe Boulvais, Nathan Cogné .....	29
09:30-09:50 Détachements crustaux, granites syncinématiques et mobilités uranifères : 2) exploration numérique Thermo-Hydro-Chimique (THC).....	30
Khaled Bock <sup>1</sup> , Yannick Branquet <sup>1</sup> , Olivier Pourret <sup>3</sup> , Thibault Duret <sup>1,2</sup> , Philippe Boulvais <sup>1</sup> .....	30

09:50-10:10 Le projet UraLod .....	31
Antonio Benedicto <sup>1</sup> , Grégory Ballas <sup>2</sup> , Michel Lopez <sup>2</sup> , Thomas Blaise <sup>1</sup> , Frederique Moreau <sup>3</sup> , Christian Le Carlier De Veslud <sup>3</sup> , Yannick Branquet <sup>3</sup> , Philippe Boulvais <sup>3</sup> , Delphine Bosch <sup>2</sup> , Olivier Bruguier <sup>2</sup> , Tristan Cornu <sup>2,4</sup> .....	31
10:10-10:30 Effets de la matière organique et de l'hématite sur les transferts d'Uranium (VI) : une approche moléculaire.....	32
Selena Ferreres <sup>1,4</sup> , Virginie Chapon <sup>2,4</sup> , Laureline Février <sup>3,4</sup> , Frédéric Coppin <sup>3,4</sup> , Mirella Del Nero <sup>1,4</sup> .....	32
10:50-11:10 Les signatures isotopiques indépendantes de la masse : un moyen sans précédent pour discriminer l'origine minière de l'uranium dans l'amont du cycle du combustible .....	33
Caroline Fitoussi <sup>1</sup> , Eric Pili <sup>2</sup> , Cécile Gardin <sup>1</sup> , Elsa Yobregat <sup>1</sup> , Mathieu Touboul <sup>1</sup> .....	33
11:10-11:30 Spatial geochemical distribution within the U-roll front of the Maastrichtian reservoir of the Djengeldi deposit (Uzbekistan).....	34
Pierre Martz <sup>1</sup> , Emmanuelle Chanvry <sup>1</sup> , Marc Brouand <sup>1</sup> , Grégory Dufréhou <sup>1</sup> , Hugo Marek <sup>2</sup> , Yoram Teitler <sup>2</sup> , Julien Mercadier <sup>2</sup> .....	34
11:30-11:50 Organic and inorganic reduction of uranium in low temperature sedimentary systems. Evidence from the Zoovch-Ovoo uranium deposit .....	35
Dimitrios Rallakis, Raymond Michels, Michel Cathelineau .....	35
11:50-12:10 Géochronologie U-Pb de la calcite : avancées et perspectives .....	36
Thomas Blaise, Frédéric Haurine .....	36
13:10-13:30 Sources des teneurs (800-1000ppm) en uranium dans le bassin de Pongola (Afrique du Sud).....	37
13:30-13:50 Avancées récentes sur la métallogénie de l'uranium en Chine .....	38
Michel Cuney .....	38
13:50-14:10 Les gisements d'uranium sont-ils générés par des phénomènes transitoires ?.....	40
Patrick Ledru, Julien Mercadier .....	40
14:15-15:00 Conférence invitée - IAEA activities supporting capacity building in uranium resources and production.....	41
Adrienne Hanly .....	41
15:00-15:45 Discussion, réflexion, actions coordonnées et clôture.....	42
Liste de participants .....	43



Mardi 23/01

---

## 9:00-9:30 Ouverture : L'uranium redevient-il sous pression ?

### Christian Polak

*Senior Advisor, Strategy & Partnerships, ORANO Mining*

Plusieurs événements récents (COVID 21, consommation accrue de charbon, invasion de l'Ukraine et la dépendance du gaz russe, le poids géopolitique de la Chine et son contrôle des terres rares donc des énergies renouvelables, désordres climatiques liés au CO2..) ont concouru à accentuer la pression sur le marché de l'uranium et la relance du nucléaire. Les conditions semblent encore plus renforcées et justifiées que la vague 2005-2011 qui portait sur la renaissance du nucléaire.

Pour y faire face, la réponse minière exige des prix plus élevés après plus d'une décennie où la production s'est orientée vers des exploitations à bas coûts de production.

Doubler la production d'uranium d'ici 2040, tel est aujourd'hui le challenge de notre industrie.

Les ressources existent, l'exploration a continué dans un contexte difficile des prix, à identifier de nouveaux gisements et développer de nouvelles technologies d'extraction

- 50% de la production mondiale d'uranium provient désormais de la technologie In-Situ Recovery jusqu'à quand ?
- Les gisements de discordances en marge de l'Athabasca
- Les découvertes de nouveaux gisements IOCG-U en Australie
- Blackshales et alaskites, basses teneurs, minerais complexes, coût élevés



## 09:30-09:50 Modèles géologiques et concepts d'exploration des gisements d'uranium de type discordance du bassin de l'Athabasca : l'approche de la chaire GeomIn3D

**Julien Mercadier<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>1</sup>, Guy Marquis<sup>2</sup>, Olivier Gerbeaud<sup>3</sup>, Elodie Williard<sup>3</sup>, Pierre Martz<sup>3</sup>, Magdalena Anderson<sup>4</sup>, Anthony Le Beux<sup>3</sup>**

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

*2 ORANO, 125 Avenue de Paris F-92320 Châtillon, France*

*3 ITES, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex, France*

*4 ORANO Canada Inc. 817 45th Street West, S7K 3X5 Saskatoon, Canada*

Les gisements d'uranium de type discordance du bassin de l'Athabasca (Saskatchewan, Canada) constituent l'une des sources d'uranium les plus importantes au monde pour l'industrie nucléaire, le Canada étant le pays ayant produit le plus d'uranium avec 542 000 tonnes d'U jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 2021 (AIEA, Red Book, 2022). Ces gisements sont géologiquement exceptionnels par leurs tonnages mais surtout par leurs teneurs en uranium allant jusqu'à 20% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> pour les mines de McArthur River et Cigar Lake. En raison de ces spécificités et de leur potentiel économique, ces gisements sont ciblés depuis plusieurs décennies par les compagnies minières à travers des campagnes intensives d'exploration géophysique et géologique. Actuellement explorés en profondeur à des centaines de mètres sous la surface, ils sont spatialement associés à de grands systèmes de failles enrichies en graphite, profondément enracinés dans le socle et présentant des signes d'activités tectoniques et hydrothermales polyphasées. L'exploration nécessite d'importants investissements financiers qui se sont élevés à 232 million CAD en 2022 (<https://natural-resources.canada.ca/>) et l'identification de gisements économiquement exploitables reste exceptionnelle.

Les études scientifiques menées sur ces objets depuis plusieurs décennies dans des laboratoires académiques en collaboration avec des sociétés minières ont permis de discriminer les marqueurs chimiques, minéralogiques, structuraux et physiques spécifiques de ces gisements. Les sources d'uranium, les conditions de transport, les mécanismes de piégeage et la datation des phases du dépôt et les relations avec les événements géodynamiques ont été largement documentés en tant que système minéral majeur. Cependant, les modèles de gisements sont jusqu'à présent incapables de discriminer les principaux indicateurs de concentrations minérales économiques et d'occurrences minéralisées locales car les empreintes sont la plupart du temps identiques et conduisent à des anomalies faussement positives (ou négatives). Ainsi, les processus actifs dans le bassin de l'Athabasca il y a plus d'environ 1,5 milliard d'années à l'origine de ces gisements géologiques exceptionnels sont encore mal compris et contraints, limitant la définition d'outils vectoriels et donc leur découverte.

Conscient de cette limite, un programme industrialo-académique innovant, GeomIn3D, a été lancé et constitue l'un des principaux projets du LabCom CREGU, laboratoire commun de recherche associant le CNRS et Orano avec les universités de Lorraine et l'Institut Terre et Environnement de Strasbourg. L'objectif de ce LabCom CREGU est de promouvoir les avancées scientifiques et technologiques pour améliorer l'exploration et l'exploitation des ressources en uranium en Athabasca. L'objectif est de comprendre les mécanismes spécifiques de formation de ces dépôts, de définir leurs empreintes chimiques, physiques ou minéralogiques et de les transformer en critères quantitatifs de ciblage à distance via un géomodèle 3D destiné à faciliter l'exploration, dans lequel les données géologiques et géophysiques seront réconciliées pour mieux cibler les zones uranifères potentielles et réduire l'incertitude quant à l'emplacement des forages.

## **09:50-10:10 Architecture structurale d'un réservoir fossile à l'interface bassin/socle et rôle sur la mise en place de minéralisations d'uranium de haute teneur : exemple du prospect Waterfound, Bassin d'Athabasca (Canada)**

**Manon Bulliard<sup>1,2</sup>, Roger Soliva<sup>2</sup>, Gaétan Milesi<sup>1</sup>, Olivier Gerbeaud<sup>3</sup>, Magdalena Anderson<sup>3</sup>, Daniel Gerger<sup>3</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GeoRessources – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique, LabCom CREGU – France

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier – Université de Montpellier, Centre National de la Recherche Scientifique - France

<sup>3</sup>ORANO – Orano Group – France/Canada

Les bassins sédimentaires paléo- à mésoprotérozoïques tels que Mc Arthur (Australie) ou Athabasca (Canada), abritent parmi les plus importants gisements connus d'uranium, plomb, zinc et cuivre. Ces minéralisations sont liées à des circulations hydrothermales de haute intensité qui se sont concentrées à la discordance entre la base des séries de bassins et leur socle métamorphique. C'est à cette interface que s'est développé un réseau structural complexe qui a conduit de manière préférentielle les fluides minéralisateurs. L'étude et la compréhension de ces systèmes minéralisés fossiles, présentent un fort intérêt industriel (recherche de nouveaux guides d'exploration) et scientifique (analogie avec des systèmes actifs/géothermie). Pour mieux comprendre la genèse de ces réservoirs, nous étudions les caractéristiques structurales des minéralisations d'uranium situé dans le bassin d'Athabasca. Ces gisements formés entre 1,6 et 1,3 Ga renferment des teneurs très élevées en oxyde d'uranium (2 – 20% d' $U_3O_8$  en moyenne), associées à une altération massive de l'encaissant, le tout étant le marqueur d'une activité hydrothermale majeure contrôlée structuralement. Notre approche se base sur l'observation de carottes des forages du projet Waterfound (projet d'exploration dans la partie Nord-Est du bassin), dans lequel les processus d'altération et de minéralisation sont restés à un stade peu mature, ce qui a permis la préservation des structures distributrices à la base du bassin, ce qui rend possible leur analyse détaillée.

Cette étude s'appuie sur un travail de levé structural en carottes sur site, incluant la typologie des structures (plans striés, fractures et leur caractérisation de remplissage minéral, stylolites, bandes de déformation...), la mesure des orientations, et leur remise en contexte structural à l'échelle du projet. L'étude comporte également un volet sur la caractérisation minéralogique et chimique des remplissages et altérations à l'échelle microscopique qui vient compléter ce travail. L'ensemble de ces données permet de définir un cadre structural et cinématique qui permet de remettre en contexte la chronologie des phases d'altération et de minéralisation.

Nous visons ainsi à préciser le polyphasage tectonique enregistré par les séries sédimentaires du bassin d'Athabasca depuis sa formation vers 1,7 milliard d'années, et à caractériser les circulations de fluides associées aux différents épisodes de déformation/minéralisation dans le bassin. Il constitue une base nécessaire pour appréhender la distribution actuelle de l'uranium et des halos d'altération, ainsi que leur contexte géodynamique de mise en place. L'ensemble des données structurales est utilisé pour reconstituer l'évolution du régime de contraintes à l'aide d'inversions cinématiques. Sur cette base, un scénario d'évolution tectonique est proposé pour la formation et/ou la réactivation des structures associées aux circulations de fluides minéralisateurs. La finalité de ce travail sera d'apporter un calage chronologique des épisodes tectoniques clés à l'origine de la formation des minéralisations uranifères en Athabasca.

## **10:10-10:30 Contexte tectonique associé aux minéralisations d'uranium de type discordance : apports des données d'imagerie de paroi dans les unités sédimentaires basales de l'Est du bassin d'Athabasca (Canada)**

**Gaétan Milesi<sup>1</sup>, Thomas Obin<sup>1</sup>, Mehdi Serdoun<sup>1</sup>, Olivier Gerbeaud<sup>2</sup>, Magdalena Anderson<sup>2</sup>, Shawn Harvey<sup>3</sup>, Gerard Zaluski<sup>3</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>GeoRessources - CNRS, Université de Lorraine - LabCom CREGU, France*

*<sup>2</sup>Orano - Orano groupe, France/Canada*

*<sup>3</sup>Cameco, Canada*

Le bassin d'Athabasca (Saskatchewan, Canada) est considéré comme la référence mondiale pour les gisements d'uranium de type discordance avec des teneurs moyennes d'uranium pouvant atteindre près de 20%. La formation de tels gisements nécessite des circulations massives de fluides, à l'interface bassin/sole (discordance). Le modèle métallogénique montre que les fluides minéralisateurs sont drainés à l'échelle des gisements par un réseau structural complexe, spécifiquement développé proche de la discordance, et dont l'initiation est liée à la réactivation tectonique des zones de cisaillement riches en graphite dans le socle (conducteurs géophysiques). Cette réactivation se manifeste par la formation de structures cassantes qui se propagent dans le bassin, et qui contrôlent la localisation des altérations ainsi que des minéralisations d'uranium. La caractérisation structurale des zones hydrothermalisées et minéralisées situées à la base du bassin par l'étude directe des carottes de forage peut s'avérer difficile dans les gisements dits « géants » (e.g. Cigar Lake, Mc Arthur) du au fort degré d'argilisation et à la perte de cohésion du matériel.

Dans ce travail, nous avons utilisé les données d'imagerie de paroi (imagerie acoustique) acquises dans les unités sédimentaires basales des forages d'exploration sur deux projets opérés par Orano Canada, à savoir les prospects de Waterfound (indice alligator), de McClean (gisement de McClean South) et sur le gisement de Cigar Lake, exploité par Cameco, pour caractériser : i) l'évolution de l'intensité de la fracturation dans les zones minéralisées et ii) l'orientation et la taille des différentes structures (failles, fractures...) dans le bassin, en fonction des teneurs en uranium des zones étudiées. Les résultats marquent une augmentation nette de l'intensité de la fracturation vers les zones à teneur en uranium les plus élevées, avec l'apparition de nouvelles familles d'orientation de fractures spécifiquement localisées dans les zones minéralisées. L'analyse structurale de ces trois objets minéralisés montre notamment le développement d'une fracturation subhorizontale dans le bassin, parallèle aux surfaces de stratification, dont l'intensité augmente de façon proportionnelle par rapport à la dimension des objets minéralisés. Le développement de ce réseau de fracture particulier est un potentiel marqueur de la présence de surpressions fluides au sein du bassin. Dans la mesure où l'occurrence de ces fractures subhorizontales est corrélée à la présence d'uranium, une meilleure caractérisation et quantification pourrait permettre de mieux appréhender les conditions de formation de ces fractures et l'intensité des circulations de fluides dans les zones minéralisées et donc d'affiner nos modèles métallogéniques et d'exploration dans le bassin.

## 10:30-10:50 Evolution pétro-structurale des zones de faille minéralisées de l'est Athabasca : autopsie des « conducteurs graphiteux »

**Thomas Obin<sup>1</sup>, Gaétan Milesi<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>2</sup>, Raymond Michels<sup>1</sup>, Olivier Gerbeaud<sup>3</sup>, Marc Brouand<sup>3</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GeoRessources, CNRS, Université de Lorraine, LabCom CREGU, Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup>Support Expert LabCom CREGU, Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>3</sup>ORANO, Châtillon, France

Le Bassin de l'Athabasca (Saskatchewan, Canada) est depuis les années 1960 une région majeure à l'échelle mondiale pour l'exploration de l'uranium avec des gisements de classe mondiale pouvant atteindre des teneurs de 20% en uranium (par exemple, Cigar Lake et McArthur River). Une spécificité de ces gisements protérozoïques est l'association spatiale entre le carbone et l'uranium. Le carbone est présent sous différentes formes dont le graphite constitue la phase majeure. Il est principalement concentré dans des zones de cisaillement paléoprotérozoïques du socle, formant ainsi des "conducteurs graphiteux" identifiables depuis la surface grâce à des levés électromagnétiques. Ces objets ont ainsi été largement ciblés pour l'exploration de l'uranium en Athabasca depuis des décennies. La majorité des "conducteurs graphiteux" forés se révèle néanmoins être dépourvue de minéralisations uranifères de tonnages importants, et il est à priori encore impossible de distinguer par des marqueurs géochimiques ou géophysiques les conducteurs graphiteux fortement minéralisés de ceux moins dotés. Dans ce contexte, cette étude vise à définir l'appellation "conducteur graphiteux" en décrivant comment les zones de cisaillement se développent et évoluent au cours du temps, en expliquant comment le graphite s'enrichit dans ces zones, en définissant les variabilités spatiales des propriétés clés au sein de ces cisaillements et leurs liens potentiels avec la localisation de l'uranium.

L'étude pétrographique et structurale réalisée dans le socle des minéralisations de Waterfound et McClean South, et dans le socle des gisements de Cigar Lake et McArthur River montre que l'enrichissement en graphite dans la zone de transition Wollaston Mudjatik (WMTZ, est du bassin) est causé par un événement régional de précipitation de graphite métasomatique à partir de fluides chauds (i.e., 500-600°C), en conditions rétro-métamorphiques. Il se traduit par une abondance de graphite le long des chemins de circulation des fluides et par la présence d'une altération caractéristique associée. Ces zones enrichies en graphite sont relativement restreintes en épaisseur. L'introduction de graphite dans les lithologies distales (gneiss et roches anatectiques) y est plus diffuse, voire nulle.

L'enrichissement en graphite débute avec l'activation de la zone de cisaillement en régime de déformation ductile, caractérisée par la formation de mylonites. Cette concentration de graphite se poursuit ensuite à mesure que la zone de cisaillement évolue vers un régime ductile-fragile au cours duquel les fluides métasomatiques circulent fortement. Pendant cette phase de déformation, la création d'un réseau de failles anastomosées et des plans de cisaillement associés favorise la remobilisation et la reconcentration du graphite, dont les teneurs peuvent atteindre 30% de la roche totale dans les cataclasites. Enfin, les réactivations de faille en déformation fragile (gouge argileuse par exemple) sont tardives et supposées post-Athabasca. Elles ne sont pas impliquées dans la précipitation de graphite, dont la mobilité est donc principalement antérieure au dépôt du Bassin de l'Athabasca.

## **11:10-11:30 Chronologie de formation d'un gisement d'uranium de type discordance du Bassin d'Athabasca : l'exemple de Waterfound et McClean South**

**Quentin Boulogne<sup>1</sup>, Thomas Obin<sup>1</sup>, Gaétan Milési<sup>1</sup>, Marc Brouand<sup>2</sup>, Pierre Martz<sup>2</sup>, Daniel Gerger<sup>2</sup>, Marie Gérardin<sup>1</sup>, Chantal Peiffert<sup>1</sup>, Patrick Carr<sup>1</sup>, Magdalena Anderson<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GeoRessources – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique, LabCom CREGU – France

<sup>2</sup>ORANO – Orano Group – France/Canada

Le bassin de l'Athabasca au Canada est considéré comme la référence mondiale pour les gisements d'uranium à haute teneur de type discordance avec des exemples comme Cigar Lake ou McArthur River présentant des teneurs en U supérieures à 20% en moyenne. La formation de ces gisements requiert la conjonction spatio-temporelle de processus complexes. Le modèle métallogénique couramment admis met en jeu des circulations massives de fluides à l'interface entre le socle et le bassin et via des structures de socle spécifiques riches en carbone et en soufre. Ces structures, conductrices, sont identifiables par levés électromagnétiques et constituent aujourd'hui le principal guide d'exploration de ce type de gisement. La minéralisation en U se fait en effet systématiquement en lien avec ces structures à la faveur de pièges structuraux et physico-chimiques. Malgré les nombreuses recherches entreprises sur ces objets depuis 50 ans et des décennies d'exploration, plusieurs inconnues limitent la compréhension scientifique de ces gisements et donc leur découverte, en particulier les notions de temps et de durée des processus géologiques ayant permis la formation de ces gisements entre le Paléo et Mésoprotérozoïque. Les données géochronologiques publiées sur oxydes d'uranium, minéral porteur du métal d'intérêt, ou sur les minéraux d'altération de type argile n'ont jusqu'à présent pas permis d'atteindre un consensus sur le cadre temporel de formation de ces objets. Cela est vrai à l'échelle d'un gisement jusqu'à celle de la province métallogénique. Les très nombreux âges publiés tendent en effet à indiquer que plusieurs épisodes minéralisateurs non-synchrones à l'échelle du bassin pourraient s'étendre sur une période de plusieurs centaines de millions d'années. Ces épisodes sont mis en lien avec plusieurs grands événements tectoniques qui auraient affecté le bouclier canadien ou ses marges au cours des derniers 1,6 milliards d'années. Afin de pouvoir proposer un cadre chronologique consensuel, il est ainsi nécessaire de discuter l'exactitude des âges proposés à l'aune de nos connaissances actuelles. En particulier, une attention critique doit être portée sur les spécificités minéralogiques et cristallographiques des différents minéraux jusqu'ici datés, les méthodes et approches analytiques ou de préparation appliquées, ainsi que le choix de sélection et de traitement des données isotopiques. Considérant ces problématiques et limitations, une nouvelle stratégie est développée pour la datation des gisements de type discordance du bassin d'Athabasca, en utilisant deux sites d'études récemment découverts par Orano Canada dans l'Est du bassin : Mc Clean South et Waterfound. Ces deux exemples sont particulièrement adaptés car ils ont fait l'objet d'une caractérisation géologique et structurale multi-échelle préalable systématique et détaillée. Cette caractérisation a permis de décrire avec précision la succession des processus géologiques, avant, syn- et post- minéralisation ayant affectés ces deux zones depuis l'Orogénèse Trans-hudsonienne il y a environ 1,8 milliard d'années. Les associations entre chaque type de structure et des marqueurs hydrothermaux et minéralisateurs propre sont ainsi connues. Sur ces objets bien décrits, il est proposé d'ajouter des contraintes chronologiques en se focalisant spécifiquement sur trois systèmes isotopiques (U/Pb sur UO<sub>2</sub>, K-Ar sur illites et Rb-Sr sur micas).



## **11:30-11:50 Dater les épisodes hydrothermaux dans les gisements de métaux grâce aux argiles des failles : test d'applicabilité de la méthode K-Ar aux illites du bassin d'Athabasca, Canada**

**Marie Gerardin<sup>1</sup>, Danièle Bartier<sup>1</sup>, Gaétan Milesi<sup>1</sup>, Michel Cathelineau<sup>1</sup>, Pierre Martz<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GeoRessources - CNRS, Université de Lorraine - LabCom CREGU, France

<sup>2</sup>Orano - Orano groupe, France/Canada

Les gisements d'uranium du bassin d'Athabasca (Canada) se sont formés à la transition Paléo-Mésoprotérozoïque grâce à la circulation massive de fluides hydrothermaux à l'interface entre le bassin sédimentaire et le socle sous-jacent. Ces circulations ont été spécifiquement contrôlées par des réseaux structuraux dont l'expression la plus visible aujourd'hui est la présence de failles exprimées dans le bassin et le socle, associées à des altérations distinctes, en particulier argileuses. L'observation de la distribution spatiale de ces réseaux, l'existence de critères de recoupement entre structures et les données géochronologiques connues sur les minéralisations et leurs halos d'altération indiquent que plusieurs épisodes hydrothermaux ont été actifs dans cet environnement depuis 1,7 milliard d'années. L'absence de contraintes temporelles directes sur les différentes failles et familles de structures limite néanmoins notre compréhension du rôle des différents épisodes de déformation et d'altération hydrothermale sur les caractéristiques actuelles de ces gisements, en particulier leur impact sur leur enrichissement exceptionnel en uranium.

Pour mieux comprendre la temporalité et la dynamique de développement de ces structures, nous avons développé une approche couplant la caractérisation chimique et cristallographique des argiles avec leur datation par la méthode K-Ar. Cette approche permet d'obtenir de façon optimale des informations temporelles et de conditions physico-chimiques de formation de ces failles, ainsi que de leur possible(s) réactivation(s). Le laboratoire GeoRessources à Nancy a récemment développé la double capacité de séparation/caractérisation des minéraux argileux et de datation par la méthode K-Ar. La séparation granulométrique des argiles est effectuée par décantation et par centrifugation en flux continu. Ce couplage permet d'obtenir des coupures granulométriques jusqu'à  $< 0.1 \mu\text{m}$  en seulement quelques jours de manipulation. Chaque fraction granulométrique obtenue est caractérisée par MEB-EDS, DRX, spectroscopie infrarouge, diffraction laser et enfin par analyse chimique en roche totale pour déterminer leur morphologie, minéralogie, cristallographie, granulométrie et leur chimie. Ces caractérisations fines des différentes fractions nous permettent de déconvoluer l'évolution potentielle du message argileux avec la granulométrie, en amont des informations géochronologiques. La fiabilité des datations obtenues par la méthode K-Ar sur la nouvelle plateforme de GeoRessources a été démontrée à partir de matériaux de référence d'âges compris entre 24 et 420 Ma. Les âges obtenus varient de seulement 1% au maximum par rapport aux âges publiés et avec une précision de l'ordre de 0,5 à 1,5%. La certification des âges K-Ar est en cours de finalisation grâce à un projet d'inter-comparaison des méthodes de datation K-Ar et Ar-Ar des argiles porté par GeoRessources et Geosciences Montpellier. La première application de ces nouvelles capacités de préparation, de caractérisation et de datation des minéraux argileux a été faite sur le projet d'exploration de Waterfound, situé au nord-est du bassin d'Athabasca. Trois échantillons ont été sélectionnés dans des failles de socle et de bassin, spatialement associées ou non à des zones minéralisées. La minéralogie des fractions argileuses révèle un mélange de deux polytypes d'illite dont les proportions varient avec la granulométrie. Ce mélange marque des variations des conditions physico-chimiques au sein de ces failles dont l'origine est en cours de définition. La datation des différentes fractions séparées pour chaque échantillon et la variation des polytypes entre fraction permettent de dater ces deux polytypes via des droites de mélanges, dont les premiers résultats seront présentés à Orsay.

## **11:50-12:10 Analyse des anomalies spectroscopiques liées aux minéralisations en uranium du bassin de l'Athabasca et de son socle (Saskatchewan, Canada)**

**Mehdi Serdoun<sup>1</sup>, Frédéric Sur<sup>2</sup>, Elodie Williard<sup>3</sup>, Gaétan Milesi<sup>1</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> GeoRessources, CNRS, Université de Lorraine, Labcom CREGU Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup> LORIA, Université de Lorraine, Inria, CNRS, Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>3</sup> ORANO, Châtillon, France

La spectroscopie infrarouge portative est une méthode rapide, peu coûteuse, non invasive et non destructive permettant d'obtenir une caractérisation minéralogique en temps réel des carottes de forages. A ce titre, elle est utilisée depuis plusieurs décennies par les différentes compagnies d'exploration pour la détection des halos d'altération liés aux gisements d'uranium de discordance du bassin de l'Athabasca (Saskatchewan, Canada) dans le domaine infrarouge à ondes courtes (350-2500nm). Ces halos sont considérés comme le résultat des interactions entre les fluides minéralisateurs et les roches du bassin et du socle initialement présentes dans cet environnement, avec une localisation préférentielle proximité de l'intersection entre la discordance bassin-socle et des zones de faille riches en graphite, nommés conducteurs graphiteux. La collecte systématique de spectres infrarouges à l'aplomb et dans ces conducteurs graphiteux a généré des jeux de données conséquents (plusieurs dizaines à centaines de milliers de spectres selon les compagnies) représentatifs de degrés d'altération et de minéralisation variables. Ces jeux de données de spectres infrarouges représentent donc une information généralisée à l'échelle du bassin de qualification des conducteurs graphiteux et de leur potentiel à abriter des minéralisations uranifères économiques. Ils n'ont néanmoins que rarement été considérés dans leur ensemble, à l'échelle régionale, pour cet objectif.

A partir d'une compilation base de données issue des campagnes d'exploration récentes (années 2000 et 2010) d'Orano Canada dans l'Est et l'Ouest du bassin de l'Athabasca et comprenant plus de 90 000 spectres infrarouge (68 000 échantillons de bassin ; 25 000 échantillons de socle) collectés sur une vingtaine de conducteurs graphiteux dont plusieurs présentent des minéralisations économiques (Cigar Lake, Midwest, Shea Creek), une analyse quantitative de la donnée infrarouge est proposée en deux parties i) étude des tendances générales par secteurs et variations spectrales et minéralogiques locales liées aux conducteurs minéralisés ou non par analyse en composantes principales (ACP) ; ii) analyse spatiale des classes d'intervalles de spectres regroupés par distance aux minéralisations au moyen de cartes topologiques (self-organizing maps, SOM). Ces approches nous permettent de donner des « cartes d'identité » minéralogiques des différents conducteurs et des différentes zones des enveloppes d'altération à la fois en termes de type de minéral dominant et d'intensité de l'altération.

Ces deux approches complémentaires permettent d'apporter de nouveaux enseignements sur les caractéristiques des enveloppes d'altération, leur seuil de détection à distance des minéralisations et les différents types de signatures des conducteurs. L'objectif est le développement d'un outil transférable aux compagnies d'exploration et utilisable en campagne de terrain pour une aide prédictive à l'implantation de nouveaux forages.

## 12:10-12:30 Influences of different fault characteristics in fluid diversion at intersection zones and formation of structurally-controlled mineral deposits

**Khalifa Eldursi<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>2</sup>, Fabrice Golfier<sup>2</sup>, Luc Scholtès<sup>3</sup>, Marianne Conin<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>2</sup>, Yannick Branquet<sup>4</sup>, Guoxiang Chi<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Department of Earth Sciences, University of Benghazi, Benghazi, Libya, POBOX 9480-1308

<sup>2</sup> Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, 54000 Nancy, France

<sup>3</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand, France

<sup>4</sup> Géosciences Rennes, Bât.15 campus Beaulieu, Université de Rennes 1, RENNES 35042, France

<sup>5</sup> Department of Geology, University of Regina, 3737 Wascana Parkway, Regina, Saskatchewan S4S 0A2, Canada

The majority of basement-basin interface mineral deposits are defined as epigenetic and structurally-controlled ore deposits. However, the role of faults on fluid circulation (e.g., conduits, barriers, or structural traps) and consequently, the formation of oriented mineral deposits is still unclear. A previous structural study has provided new insights into fault reactivation in response to hydromechanical processes [1]. The study shows that the intersection angle between faults plays a critical role in whether fluid continues to flow along one fault or diverts toward another fault at the intersection zone depending on the stress regime. The obtained results were based on 3D numerical modeling of two intersected vertical faults, hosted in a homogenous layer that represents basement rocks.

The present study goes beyond this preliminary approach to consider fault parameters that have not been evaluated yet (e.g., variation of Horizontal differential stress (HDS), fault dip-angle, fault extension, and heterogeneity of basement lithologies). The current study uses the previous published work as a reference model; thus, the same code and numerical protocol have been used to assess the abovementioned parameters separately. The numerical tests were run under different faulting regimes.

The numerical results show that all the aforementioned parameters affect the critical angle at which the fluid diverts at a fault intersection zone. The HDS and fault dip-angle increase this critical angle value by facilitating fault dilation due to their effects on the on-fault shear stress. Besides, the vertical extension of basement-faults plays a role of barrier at intersection zone, leading fluids to flow toward the basin. In addition, the basement rock heterogeneity also induces a slight effect on the critical intersection angle.

[1] Khalifa Eldursi, Luc Scholtes, Marianne Conin, Fabrice Golfier, Patrick Ledru, Julien Mercadier, Pauline Collon, Remy Chemillac (2023) 3-D hydromechanical simulation of intersecting faults: Influences on fluid circulation and formation of oriented-orebodies, *Journal of Structural Geology*, V. 171, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.104864>.

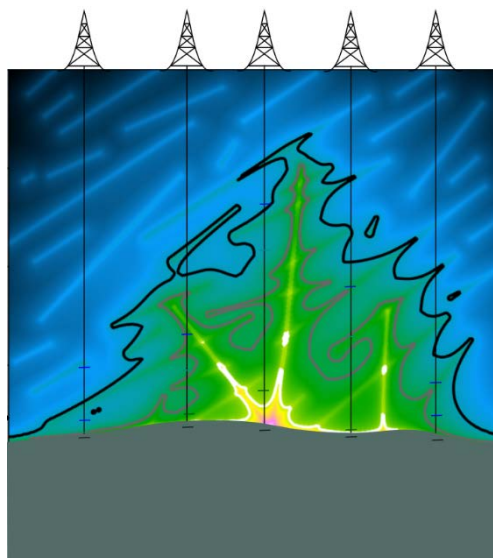
## 14:00-14:20 Modélisation conjointe des halos d'altération des gisements d'uranium et de leurs structures géologiques de contrôle à l'aide de squelettes à composantes multiples

Paul Marchal<sup>1</sup>, Guillaume Caumon<sup>1</sup>, Pauline Collon<sup>1</sup>, Patrick Ledru<sup>1</sup>, Kelsey McKee<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, CNRS, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup>Orano Paris, 92320 Chatillon, France

Les gisements de métaux liés à des processus hydrothermaux présentent une zonation minérale et chimique sous forme de halos, qui constituent des marqueurs fossiles directs de ces processus. Ces halos sont utilisés en exploration comme aides pour trouver les zones de minéralisation économiquement rentables qui leur sont génétiquement associées, car ils possèdent une plus grande extension spatiale. Le développement de méthodes de modélisation adaptées à la représentation en 3D de ces objets est une clef d'amélioration pour l'exploration et l'exploitation des métaux. Cette démarche permet une meilleure caractérisation des volumes et des géométries, tout en améliorant la connaissance de ces objets complexes. Pour une approche géologiquement cohérente, une solution consiste à modéliser conjointement les halos d'altération et de métaux avec les objets géologiques qui ont contrôlé leurs développements, à savoir les structures drainantes des fluides. Par exemple, les gisements d'uranium liés à des discordances (URU deposits) dépendent de la présence de structures géologiques majeures (failles, discordances) et des propriétés pétrophysiques du milieu (perméabilité) qui sont considérées comme contrôles de premier ordre pour la géométrie des halos d'altération et de minéralisation. Afin d'optimiser la modélisation 3D de ces objets géologiques complexes, nous proposons de définir un squelette structural multi-composantes pour construire les limites de front des halos d'altération, sur la base de données connues sur ces objets géologiques. Nous calculons un champ de pseudo-distance  $D(p)$  par rapport à ce squelette structural. Ce champ de distance est utilisé pour construire des isosurfaces correspondant aux limites des fronts d'altération. Pour obtenir un squelette adapté aux données d'entrée, nous introduisons une phase de modification du squelette. Au cours de cette phase, les caractéristiques du squelette, telles que le nombre de composants, leur position et leur orientation, sont modifiées. Les connaissances géologiques intégrées dans cette logique de modélisation implicite, via l'utilisation du squelette, permettent de générer des géométries de halo plus conformes aux modèles conceptuels. La modification itérative du squelette, sous le contrôle d'une valeur d'ajustement  $\sigma$ , basée sur l'écart-type, permet d'obtenir des interprétations de halos cohérentes avec les données d'entrée.



## 14:20-14:40 Inversion jointe de données électromagnétiques et électriques

A. Mohand-Saïd, G. Marquis, J.F. Girard

ITES, Strasbourg, France

La minéralisation des gisements d'uranium de type discordance d'Athabasca (Canada) est associée à des failles crustales minéralisées en graphites. Ces failles crustales ont joué le rôle de vecteur de fluides hydrothermaux ayant entraîné l'altération des sédiments de bassin surplombant la discordance, et la précipitation des minéraux uranifères. La minéralisation en graphite des failles et les zones d'altération ont des propriétés pétrophysiques qui contrastent avec leur environnement. C'est particulièrement le cas pour la résistivité électrique. Du fait de leurs sensibilités à cette propriété, les méthodes géophysiques électrique (DC) et électromagnétique (EM) sont donc incontournables pour l'exploration des gisements d'uranium d'Athabasca. Toutefois, elles ne permettent pas d'observer les mêmes objets. La méthode DC est sensible aux zones d'altérations et aux contrastes de résistivités. La méthode EM est une méthode inductive et permet de localiser des objets conducteurs.

L'inversion des données géophysique permet de retrouver un modèle de propriétés pétrophysiques reproduisant les données observées sur le terrain. C'est un processus qui requiert d'importantes ressources de calculs. Un nombre de calculs de modélisation directe proportionnels au nombre de paramètres du modèle d'inversion sont réalisées pour calculer les matrices de sensibilité. Les matrices de sensibilité vont permettre de déterminer la direction que doit suivre le modèle pour satisfaire les données.

Nous avons développé un algorithme se basant sur la méthode de Broyden, une méthode Quasi-Newton, permettant d'approximer une nouvelle matrice de sensibilité à chaque itération. Cette approximation se base sur la matrice de sensibilité de l'itération précédente, modifiée en fonction de la perturbation du modèle et son effet sur la réponse de la modélisation directe. Le gain de temps avec cette méthode est significatif dans la mesure où seule une matrice de sensibilité initiale est calculée.

Les inversions de données DC et EM sont quasi-systématiquement réalisées indépendamment les unes des autres. Un intérêt certain existe à inverser ces données conjointement étant données leurs sensibilités communes à la résistivité électrique et leurs capacités à identifier des structures différentes. L'inversion de données EM permet de modéliser les fortes anomalies de conductivité des conducteurs graphiteux. Tandis que l'inversion de données DC permet de modéliser les couches relativement résistives de surface, mais peinent à contraindre l'extension des zones de conductivité élevées. L'inversion jointe de données DC et EM permet d'obtenir un modèle de résistivité électrique recouvrant des structures identifiables par ces deux méthodes.

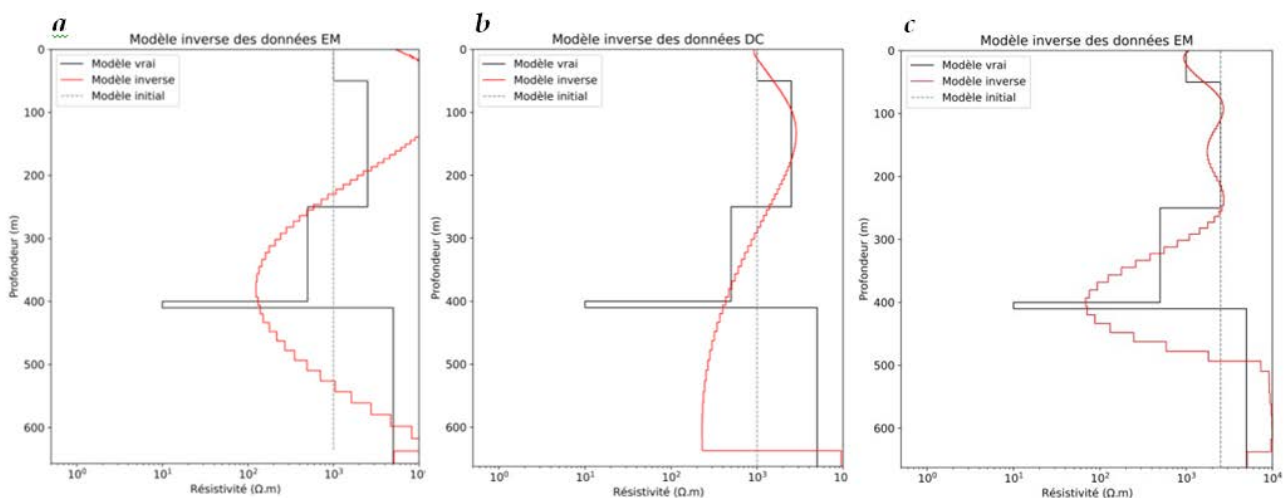


Figure 1 Résultats d'inversion obtenu avec la méthode de Broyden. (a) Inversion EM, (b) Inversion DC, (c) Inversion jointe.



## **14:40-15:00 Calage d'historique de production assisté en transport réactif. Application à la récupération in situ de l'uranium**

**Antoine Collet<sup>1,2</sup>, Irina Sin<sup>1</sup>, Hervé Chauris<sup>1</sup>, Olivier Regnault<sup>1,3</sup>, Valérie Langlais<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Mines Paris, PSL University, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France*

*<sup>2</sup>Orano, 135 avenue de Paris, 92320 Châtillon, France*

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

La production par récupération in situ (ISR) est pour l'uranium la première des méthodes d'exploitation avec 63% de la production mondiale. Cette technique consiste à récupérer le métal par dissolution directe du minerai en place. Comme dans le domaine pétrolier, l'ISR offre une vision indirecte du gisement et il existe une incertitude forte sur l'estimation initiale des réserves et l'évaluation de leur évolution au cours du temps. Ce travail présente une approche efficace de mise à jour du modèle géologique 3D, et notamment des teneurs initiales en uranium, en intégrant les données de production obtenue pendant l'exploitation. Le processus de calage d'historique est réalisé par une méthode de quasi-Newton couplée à un calcul du gradient par la méthode de l'état adjoint. La comparaison à plusieurs autres approches de pointe sans dérivée telles que PCGA, ESMDA ou SIES montre que la méthode développée donne de meilleurs résultats pour un coût de calcul inférieur d'au moins un ordre de grandeur.

## 15:00-15:20 Simulation numérique de l'impact d'un pilote d'exploitation d'uranium par *in situ* recovery (ISR) : apports pour la recherche de solutions alternatives de réhabilitation

**Marine Bonnet<sup>1,2</sup>, Nicolas Seigneur<sup>2</sup>, Sophie Guillon<sup>2</sup>, Valentin Robin<sup>1</sup>, Flora Parrotin<sup>1,3,5</sup>, Niya Grozeva<sup>2</sup>, Munkh-Erdene Batbaatar<sup>4</sup>, Michael Descostes<sup>2,5</sup>**

<sup>1</sup>E2Lim, Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, CEDEX, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup>Mines Paris, PSL, Centre de Géosciences, 35 rue St Honoré, 77330 Fontainebleau, France

<sup>3</sup>IC2MP, HydrASA, UMR 7285 CNRS/Université de Poitiers, 86073 Poitiers, France

<sup>4</sup>Badrakh Energy LLC, 9 avenue Jamyan Gun, district Sukhbaatar 1er khoroo, UB-14240, Mongolie

<sup>5</sup>ORANO Mines, Département R&D Environnement, 125 avenue de Paris, 92330 Châtillon, France

L'*in situ* Recovery (ISR) est une technique minière couramment employée pour l'uranium depuis les années 1960 et représente ~ 60% de la production mondiale d'uranium aujourd'hui. Elle consiste à dissoudre les phases porteuses d'uranium en place par la circulation de solutions lixiviantes, par exemple des solutions d'acide sulfurique à pH ~ 1. Les solutions enrichies en uranium sont ensuite récupérées en surface pour séparer l'uranium. Présentant certains avantages (économique, pas de génération de stériles ou résidus miniers), son principal inconvénient est son impact sur les eaux souterraines. La capacité de prédiction de l'impact et de son évolution temporelle, via des modélisations de transport-réactif, représente un atout pour l'exploitant qui pourra minimiser son impact. En outre, ce genre d'outils peut être utilisé pour guider l'exploitant dans sa stratégie de réhabilitation.

Cet impact environnemental se traduit notamment par une lente remontée du pH au sein de l'aquifère même plusieurs années après l'arrêt de la production, phénomène suivi par exemple sur une cellule exploitée en 2011 à Umnut en Mongolie (pH ≈ 4-5 après 10 ans d'arrêt contre pH ≈ 7 initialement). Des modélisations de transport-réactif 3D, à Umnut et sur le site de Zoovch Ovoo à proximité, ont réussi à reproduire les évolutions géochimiques de ces aquifères et montrent également une lente remontée en pH. Une explication avancée afin d'expliquer ce phénomène est celle du relargage progressif des H<sup>+</sup> qui ont été adsorbés à la surface des minéraux argileux gonflants présents dans l'aquifère pendant l'injection acide. Cela suggère que les processus d'échange d'ions sont capitaux dans le contrôle de la chimie des eaux. Dès lors, mieux comprendre ces mécanismes permettrait de définir des actions capables de revenir à des conditions pH naturelles de l'aquifère plus rapidement.

Afin de mieux comprendre l'impact sur le pH et l'échange du H<sup>+</sup> sur les minéraux argileux (smectites), des expériences en colonne à l'échelle du laboratoire ont été réalisées avec un échantillon provenant du site de Zoovch Ovoo. Ces expériences reproduisent la phase de production avec l'injection d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ainsi que la phase de réhabilitation avec la circulation de différentes solutions salines. Les résultats ont montré une bonne reproduction de ce qui a été observé sur le terrain pendant la phase de production, ainsi qu'une remontée du pH aux conditions initiales pendant la phase de réhabilitation. Ces résultats expérimentaux ont été couplés à des modélisations de transport-réactif 1D ne prenant en compte que de l'échange d'ions. Les modélisations reproduisent de manière satisfaisante les résultats expérimentaux et valident l'hypothèse que la sorption est le phénomène principal contrôlant la dynamique du H<sup>+</sup> et des autres cations. Des études à l'échelle du terrain permettront d'améliorer nos connaissances sur la manière dont les mécanismes d'échange d'ions influencent la mobilité du H<sup>+</sup> dans ce contexte d'ISR acide. Pour cela, des modélisations de transport-réactif 3D du site seront menées pour aider les opérateurs à optimiser leurs stratégies de production et/ou réhabilitation pour une gestion de l'impact environnemental de l'activité minière à long terme.

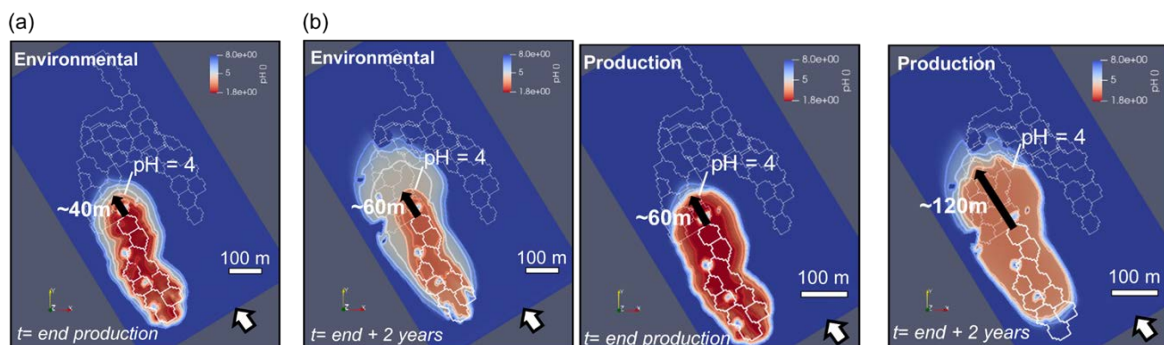
## 15:20-15:40 Développement d'un modèle de transport réactif pour prédire l'empreinte environnementale des exploitations d'uranium par in-situ recovery (ISR)

Sofia Escario<sup>1</sup>, Nicolas Seigneur<sup>2</sup>, Antoine Collet<sup>2</sup>, Olivier Regnault<sup>1</sup>, Vincent Lagneau<sup>2</sup>, Michaël Descostes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ORANO Mining, Environmental R&D Dpt., France

<sup>2</sup>MINES Paris, Centre de Géosciences, Fontainebleau, France

Dans le monde, la majeure partie de la production d'uranium repose sur la technique d'extraction par récupération in situ (ISR). Cette dernière consiste à dissoudre le minerai à l'aide d'une solution de lixiviation (acide ou alcaline) directement au sein du gisement à travers une série de puits d'injection et d'extraction. En raison de la nature des solutions ISR injectées, la qualité de l'eau de l'aquifère peut être affectée. La modélisation de type transport réactif est un outil puissant pour prédire l'écoulement des fluides et les réactions géochimiques dans les réservoirs ISR. Dans cette étude nous présentons un modèle géochimique environnemental (EGM) 3D (basé sur le logiciel de transport réactif HYTEC), capable de prédire les conditions physico-chimiques au sein de l'aquifère minéralisé durant l'exploitation et donc son empreinte environnementale durant et après production<sup>2</sup>. Le modèle a été validé au niveau de la mine KATCO (Kazakhstan) sur deux blocs de production différents et indépendants, plus de 10 ans après leur fermeture, et en attente de réhabilitation. Le modèle montre que l'intégration de deux processus géochimiques principaux, (1) les propriétés d'échange cationique des minéraux argileux (smectite-beidellite) et (2) la précipitation du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), reproduit avec succès les données de chimie des eaux mesurées dans les puits de contrôle (pH, acidité et  $\text{SO}_4$ ). Les sites de sorption des minéraux argileux restent majoritairement saturés en protons pendant la phase de production. Les simulations montrent que le stock de protons sorbés maintient les conditions acides pendant une période plus longue. Le modèle d'impact environnemental a également été comparé à un modèle préexistant spécifiquement développé pour simuler la phase de production<sup>1,3</sup> : des différences sont observées pour les distances d'impact (Figure 1), en raison des différences dans la paragenèse minéralogique réactive considérée. Ainsi, le choix du modèle géochimique doit être fait en tenant compte les objectifs recherchés. Ces travaux aideront à l'exploitant minier pour maîtriser et limiter l'empreinte environnementale et d'adopter la meilleure stratégie de remédiation.



**Figure 1.** Migration de la plume saline en utilisant le modèle géochimique environnemental et production. (a-c) Détail à la fin de la production d'Uranium. (b-d) Détail à deux ans après la fin d'exploitation.

### Références

- [1] Collet *et al.*, *Hydrometallurgy*. **138109957** (2022)
- [2] Escario *et al.*, *Journal of Contaminant Hydrogeology*. **104106** (2023)
- [3] Lagneau *et al.*, *Mineral. Geochem.* **85**. (2019)

## 16:00-16:20 Etude pétrophysique et de RMN en laboratoire des faciès gréseux composant le Tchirezrine 2 du gisement d'Imouraren au Niger

**Grégory Dufréhou, Pierre Grizard, Romain Mieszkalski**

*Orano Mining, Direction des Géosciences, 125 avenue de Paris, 92320 Châtillon. France*

L'exploitation minière de type Récupération In Situ (ISR) est l'une des méthodes les plus employées pour la production d'uranium. Ainsi, la perméabilité et de la porosité du réservoir minéralisé ont un impact immédiat pour la viabilité de l'exploitation. L'estimation de ces paramètres pétrophysiques est donc une problématique majeure pour l'exploitant. Cela est encore plus critique pour un gisement composé de roches indurées tel que celui d'Imouraren, situé dans la région d'Agadez au Niger.

Dans le cadre des travaux préliminaires à la faisabilité d'une production de type ISR du gisement d'Imouraren, une sonde diagrapie de résonance magnétique nucléaire (RMN) a été déployée sur site. Cet outil donne un accès direct à la porosité totale du réservoir et permet une quantification à la fois de la porosité cinématique et de la perméabilité.

Afin de valider les mesures RMN in situ, de calibrer la méthode et de mieux prédire les propriétés pétrophysiques des faciès géologiques composant le réservoir, des mesures sur échantillons ont été réalisées en laboratoire, comprenant des mesures de porosité, perméabilité et RMN.

L'analyse des données de perméabilité des échantillons montre que la perméabilité moyenne est de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s et que celle-ci augmente avec la granulométrie des grès. Les faciès argileux analcimolites sont les faciès les plus imperméables avec des valeurs de l'ordre de  $10^{-9}$  m/s (entre  $10^{-8}$  et  $10^{-11}$  m/s). Les faciès les plus perméables sont les grès très grossiers et les micro-conglomérats qui ont des perméabilités de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s voire exceptionnellement de  $10^{-4}$  m/s.

La porosité Archimède estimée en laboratoire a été comparée aux porosités RMN (effective et totale). La porosité RMN totale se rapproche le plus de la porosité Archimède. La porosité RMN effective est légèrement inférieure à la porosité Archimède et RMN totale. La porosité RMN effective n'augmente pas avec la granulométrie comme constatée pour la perméabilité : la porosité RMN effective augmente des faciès fins (analcimolites et grès fins) jusqu'au grès grossiers, puis diminue fortement lorsque les faciès deviennent très grossiers jusqu'à micro-conglomératiques.

Les analyses par faciès de la perméabilité et de la porosité ont montré des comportements différents. Seul les faciès les plus fins qui sont aussi les plus imperméables : analcimolites et grès fins présentent une possible relation entre la porosité et la perméabilité. Pour les autres faciès plus grossiers, de grès moyen à micro-conglomératiques, il apparaît difficile de trouver une relation apparente entre ces deux variables, même en séparant par faciès. Des groupes sont néanmoins visibles en particulier entre les faciès moyen-grossier (perméabilité correcte et forte porosité) et les faciès grossiers à micro-conglomératiques (forte perméabilité mais porosité moyenne).

Une comparaison des mesures de porosité archimède, RMN laboratoire et RMN en diagrapie montre une bonne corrélation entre les différentes porosités obtenues en laboratoire et in situ. Des estimations de perméabilité ont été réalisées à partir des mesures effectuées avec la sonde RMN. Ces estimations ont été faites à partir des modèles et paramètres de calage issus de la littérature qui devront être affinés. Dans l'ensemble, la dynamique entre la perméabilité évaluée in situ et la perméabilité sur échantillon est comparable, mais avec des écarts de perméabilité notables de l'ordre d'une décade. Ces estimations de perméabilité ont également été comparées aux mesures de micromoulinet réalisées dans des puits en pompage. A l'échelle du forage, le niveau d'arrivée d'eau dans le puits se corrèle bien avec les valeurs de perméabilité élevée. A l'échelle des faciès géologiques pour un même forage, la corrélation est moins évidente.

## 16:20-16:40 Utilisation de barytine pour atténuer le $^{226}\text{Ra}$ dans les résidus provenant de minerais à haute teneur en U - Saskatchewan, Canada

Clémence Besançon<sup>1</sup>, Paul Sardini<sup>2</sup>, Sébastien Savoye<sup>3</sup>, Kebbi Hughes<sup>4</sup>, Hamid Mokhtari<sup>4</sup>, Martine Gérard<sup>5</sup>, Michael Descostes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orano Mining ; <sup>2</sup>Université de Poitiers, IC2MP ; <sup>3</sup>Université Paris-Saclay CEA, Service de Physico-Chimie ; <sup>4</sup>Orano Canada Inc ; <sup>5</sup>Sorbonne Université, CNRS UMR7590, MNHN, IRD, IMPMC

Le radium-226 présente un intérêt particulier pour les mines d'U canadiennes contenant du minerai à haute teneur. Le minerai traité à l'usine de McClean Lake – Saskatchewan, Canada – a des valeurs d'activité moyennes de 2 200 Bq/g de  $^{238}\text{U}$  (équivalent à  $1,8 \times 10^5$  ppm) et de  $^{226}\text{Ra}$  (60 ppb), et le taux de récupération de l'U est de 99 %. Les résidus des mines d'U sont des déchets radioactifs de faible activité, riches en sulfates. [1] Le volume de résidus produits par l'usine de McClean Lake dépasse 2 Mt. Le  $^{226}\text{Ra}$  est l'un des principaux contaminants d'intérêt pour la gestion des résidus. A l'usine de McClean Lake, du  $\text{BaCl}_2$  est ajouté pour précipiter en partie le  $^{226}\text{Ra}$  dans la barytine. Suite à ce traitement les résidus sont stockés sous une couverture d'eau faisant office de barrière radiologique. [2] Pour évaluer la stabilité du  $^{226}\text{Ra}$  dans les résidus, une étude approfondie du potentiel de rétention du  $^{226}\text{Ra}$  dans les résidus a été réalisée. En tant qu'ultra-trace, le  $^{226}\text{Ra}$  n'est pas mesuré par les techniques habituelles. L'alpha-autoradiographie est couplée à la sonde EDS afin d'étudier les occurrences minérales et les émetteurs alpha. [3] L'approche analytique de cette étude est résumé dans la figure 1.

Les résultats confirment que la barytine est la phase de rétention principale du  $^{226}\text{Ra}$  dans les résidus, en accord avec la concentration en  $^{226}\text{Ra}$  mesurée dans l'eau interstitielle (6 Bq/L). La contribution des mécanismes de sorption est minime. Une solution solide de  $(\text{Ba,Ra})\text{SO}_4$  contrôle la concentration en  $^{226}\text{Ra}$  à long terme, sujette à une modification vers un équilibre de recristallisation. Cette modification entraîne une élévation ultérieure de la concentration à long terme de  $^{226}\text{Ra}$  dans les eaux de résidus jusqu'à 10 Bq/L. La connaissance du mécanisme de rétention du  $^{226}\text{Ra}$  dans les résidus est essentielle et alimentera le développement de modèles prédictifs. Ces résultats permettent de mieux évaluer la stratégie de gestion des résidus en s'assurant que les résidus n'ont pas d'effets significatifs sur le milieu aval qui reste protégé à long terme. [4]–[6]

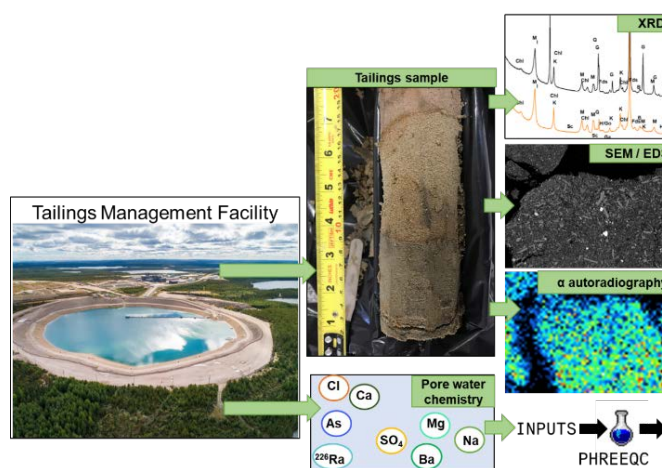


Figure 1. Schéma analytique pour la recherche de phases minérales de rétention  $^{226}\text{Ra}$  dans cette étude

### References

- [1] IAEA, "Management of NORM Residues," IAEA-TECDOC-1712, ISBN 978-92-0-142710-6, IAEA-TECDOC-1712, 2013.
- [2] J. Robertson, M. J. Hendry, T. Kotzer, and K. A.

Hughes, "Geochemistry of uranium mill tailings in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada: A review," *Crit Rev Env. Sci Technol*, vol. 29, no. 14, pp. 1237–1293, 2019.

[3] C. Besançon, P. Sardini, S. Savoye, M. Descostes, and M. Gérard, "Quantifying  $^{226}\text{Ra}$  activity in a complex assemblage of  $^{226}\text{Ra}$ -bearing minerals using alpha autoradiography and SEM/EDS," *J. Environ. Radioact.*, vol. 251–252, p. 106951, 2022.

[4] A. Situm *et al.*, "An X-ray spectromicroscopy study of the calcium mineralization in the JEB tailings management facility at McClean Lake, Saskatchewan," *Appl. Geochem.*, vol. 112, p. 104459, Jan. 2020.

[5] P. E. R. Blanchard *et al.*, "Investigating arsenic speciation in the JEB Tailings Management Facility at McClean Lake, Saskatchewan using X-ray absorption spectroscopy," *Chem. Geol.*, vol. 466, pp. 617–626, Sep. 2017.

[6] J. Mahoney, M. Slaughter, D. Langmuir, and J. Rowson, "Control of As and Ni releases from a uranium mill tailings neutralization circuit: Solution chemistry, mineralogy and geochemical modeling of laboratory study results," *Biogeochem. Gradients Microbes Meas. Model.*, vol. 22, no. 12, pp. 2758–2776, Dec. 2007.



## 16:40-17:00 Développements méthodologiques en autoradiographie alpha et applications en contexte minier

**Hugo Lefeuvre<sup>1,2</sup>, Paul Sardini<sup>1</sup>, Sophie Billon<sup>1</sup>, Clémence Besançon<sup>3</sup>, Jérôme Donnard<sup>4</sup>, Benoit Merckx<sup>2</sup>, Michael Descostes<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>IC2MP Université de Poitiers, <sup>2</sup>ERM Sarl, Poitiers, <sup>3</sup>Orano Group, <sup>4</sup>Ai4R SAS, Nantes

L'autoradiographie digitale Beaquant™, basée sur l'utilisation d'un détecteur MPGD (Micro Pattern Gaseous Detector), est un outil qui a été développé à l'origine pour des applications du secteur biologie/santé (Donnard et al, 2009). Depuis 2014, cet outil a été testé et appliqué aux géo-matériaux issus du domaine minier pour détecter et quantifier l'U et ses descendants par le biais de l'autoradiographie alpha (A $\alpha$ ). L'A $\alpha$  consiste à imager en 2D les émissions alpha issues d'une section polie (Sardini et al., 2016). Les principales avancées qui ont été réalisées depuis la première A $\alpha$  sur géomatériaux sont focalisées sur la détection des isotopes de la chaîne de l'<sup>238</sup>U, et plus particulièrement sur les déséquilibres U/Ra.

Les premiers développements réalisés durant la thèse d'A. Angileri (2015-2018) ont permis de cartographier, à l'échelle d'une lame mince, les déséquilibres U/Ra en couplant l'A $\alpha$  et la cartographie élémentaire de l'Uranium (Angileri et al., 2018). Ils ont également permis d'étudier la mobilité du <sup>226</sup>Ra en contexte d'ISR, en comparant l'activité des points chauds sur A $\alpha$ , avant et après lixiviation (Angileri et al., 2020).

L'accent a ensuite été mis sur le <sup>226</sup>Ra, avec la confection de matériaux dopés au <sup>226</sup>Ra et analysés par A $\alpha$ . En premier lieu, ce sont des célestines (SrSO<sub>4</sub>) qui ont été dopées au <sup>226</sup>Ra : l'A $\alpha$  et l'imagerie MEB ont permis de remonter aux teneurs de <sup>226</sup>Ra incorporées, démontrant le potentiel de quantification de l'A $\alpha$  (Billon et al. 2020). C'est ensuite un mélange de trois minéraux fins dopés au <sup>226</sup>Ra (barytine/ferrihydrate/montmorillonite) qui a été caractérisé lors de la thèse de C. Besançon (2019-2022). L'activité en <sup>226</sup>Ra de chacune des phases minérales a été retrouvée en combinant l'A $\alpha$  et les cartographies élémentaires obtenues par SEM/EDS (Besançon et al., 2022).

Après validation de la quantification du <sup>226</sup>Ra sur matériel artificiellement dopé, les travaux ont repris sur les matériaux complexes que sont les résidus de traitement. Par couplage de l'A $\alpha$  et d'observations/analyses minéralogiques (MEB-EDS), les minéraux porteurs d'U et de <sup>226</sup>Ra ont pu être identifiés au sein des résidus, en s'appuyant notamment sur les connaissances des mécanismes de piégeage de ces différents minéraux (Besançon et al., 2022 ; thèse de M. Reymond 2020-2023). Cette approche a aussi pu être couplée à des lixiviations séquentielles, méthode conventionnelle pour l'identification des minéraux porteurs de U et <sup>226</sup>Ra et/ou à des simulations géochimiques (Billon et al., accepté ; Reymond et al., 2023).

Cependant, ces différents développements concernant la cartographie du <sup>226</sup>Ra par A $\alpha$  sont (1) soit limités à des échantillons contenant uniquement <sup>226</sup>Ra et descendants, ou (2) nécessitent la mise en place de techniques complémentaires comme l'emploi de la cartographie chimique de l'U. Le développement de l'autoradiographie spectroscopique lors de la thèse d'Hugo Lefeuvre (2020-2023) apporte une réponse plus complète à la cartographie quantitative du <sup>226</sup>Ra à l'échelle de la lame mince pour des résidus de traitement, qui sont des géo-matériaux à la minéralogie très complexe. Ces travaux sont basés sur l'obtention conjointe de la position et de l'énergie des particules alpha émergeant de la section étudiée (Lefeuvre et al., 2022).

Angileri et al. (2018). Mapping 238U decay chain equilibrium state in thin sections of geo-materials by digital autoradiography and microprobe analysis. *Applied Radiation and Isotopes*, 140, 228-237.

Angileri et al. (2020). Mobility of daughter elements of 238U decay chain during leaching by In Situ Recovery (ISR): New insights from digital autoradiography. *Journal of Environmental Radioactivity*, 220, 106274.

Besançon et al. (2022). Quantifying 226Ra activity in a complex assemblage of 226Ra-bearing minerals using alpha autoradiography and SEM/EDS. *Journal of Environmental Radioactivity*, 251, 106951.

Billon et al. (accepté). Sequential extractions versus alpha autoradiography: Mutually complementary for the identification of U- and Ra-bearing minerals in mine tailings. *Journal of Geochemical Exploration*.

Billon et al. (2020). Quantitative imaging of 226Ra ultratrace distribution using digital autoradiography: Case of doped celestines. *Journal of environmental radioactivity*, 217, 106211.

Donnard et al. (2009). The micro-pattern gas detector PIM: A multi-modality solution for novel investigations in functional imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 610(1), 158-160.

Lefeuvre et al. (2022). Spectroscopic autoradiography of alpha particles using a parallel ionization multiplier gaseous detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1035, 166807.

Reymond et al. (2023). Assessment of 226Ra and U colloidal transport in a mining environment. *Chemosphere*, 338, 13949.

Sardini et al. (2016). Quantitative autoradiography of alpha particle emission in geo-materials using the Beaver™ system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 833, 15-22.

## 17:00-17:20 Analyses de Spéciation de l'Uranium en Contexte Minier par Spectrofluorimétrie Laser à Résolution Temporelle : Comparaisons aux Calculs de Spéciation

Pascal E. Reiller<sup>1</sup>, Pierre L'Hermite<sup>2</sup>, Chengming Shang<sup>1</sup>, Valérie Plagnes<sup>2</sup>,  
Anne Jost<sup>2</sup>, Michaël Descostes<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service de Physico-Chimie (SPC), F-91191 Gif-sur-Yvette CEDEX, France

<sup>2</sup> Sorbonne Université, CNRS, EPHE, METIS, F-75005 Paris, France

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

La connaissance de la spéciation aqueuse de l'uranium en contexte minier est une donnée importante pour les calculs d'impact basés sur des modélisations de type transport réactif. L'utilisation de base de données thermodynamiques permet d'avoir accès à cette spéciation de manière théorique lorsque les compositions d'eaux sont connues. Néanmoins, il est possible d'avoir accès à cette spéciation de manière expérimentale par spectrofluorimétrie laser à résolution temporelle,<sup>1</sup> pour peu que l'uranium soit au degré d'oxydation +VI. Dans ce travail, nous avons mesuré les spectres de fluorescence de l'uranium dans des prélèvements issus de différents environnements : des sites historiques français du Bosc (Lodève) et du Cellier en fonction du traitement des eaux ; et un site issu d'un site sub-saharien (Teloua, Niger). Les différences de spéciation attendues à partir des compositions d'eaux sont bien retrouvées dans les échantillons où la concentration en uranium est suffisante pour obtenir un signal de fluorescence. Les échantillons du site du Bosc et de Teloua présentent les caractéristiques des spectres de fluorescence des complexes  $\text{Ca}_n\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{(4-2n)-}$ .<sup>1,2</sup> Pour le site du Cellier, les échantillons prélevés avant et après traitement des eaux montrent l'évolution de l'uranium sous forme  $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_n^{2-2n}$  vers les complexes  $\text{Ca}_n\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{(4-2n)-}$ . Les calculs thermodynamiques en utilisant PHREEQC<sup>3</sup> et la base de données PRODATA<sup>4,5</sup> sont en bon accord avec les attributions spectroscopiques pour le site du Bosc, Teloua et les échantillons attribués du Cellier ; un échantillon atypique du Cellier semble être composé majoritairement des complexes  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)$  et  $(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$ .

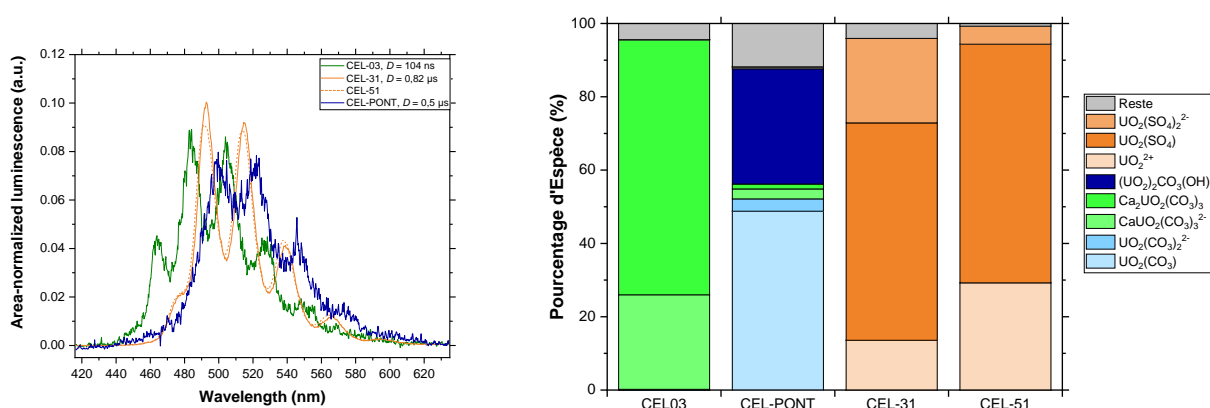


Figure 2. Exemples de spectres de fluorescence normalisés à la même aire, caractéristiques des échantillons du site du Cellier, représentant les espèces  $\text{Ca}_n\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{(4-2n)-}$  (vert),  $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_n^{2-2n}$  (orange) et atypiques (bleu) ; et spéciations calculées avec la base Prodata 1.5.3.1<sup>4,5</sup> correspondantes.

### Références

- [1] Shang et al., Sci. Total Environ. 858 (2023)
- [2] De Windt et al., 18th International Conference on the Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2023, September 24-29, 2023), Nantes, France, 2023.
- [3] Parkhurst & Appelo, Report 99-4259, U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado, USA, 1999.
- [4] Reiller, Report CEA-R 6573 (ISSN 0429-3460) Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, Gif-sur-Yvette, France, 2022.
- [5] Reiller & Descostes, Chemosphere 251 (2020)

## 17:20-17:40 Comportement de l'uranium, du plomb et du cuivre au sein d'une zone humide influencée par des apports particuliers d'origine minière

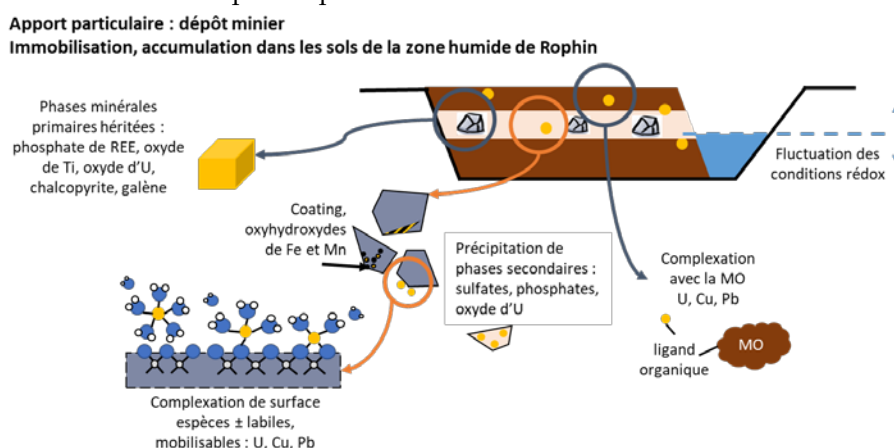
Louise Darricau<sup>1,2</sup>, Josselin Gorny<sup>1</sup>, Arnaud Mangeret<sup>1</sup>, Alkiviadis Gourgiotis<sup>1</sup>, Mathilde Zebracki<sup>1</sup>, Alexandra Courtin<sup>2</sup>

1) Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN), PSE-ENV/SPDR/LT2S, 31 Avenue de la division Leclerc, 92262 Fontenay-aux-Roses, France ; 2) Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405 Orsay, France

Les gisements d'uranium (U) français ont été exploités de 1948 à 2001 dans le but d'assurer l'autosuffisance pour le développement des activités nucléaires civiles et militaires. Ces gisements peuvent présenter des minéraux uranifères primaires et secondaires qui contiennent également d'autres Eléments chimiques en Traces (ET), comme le plomb (Pb). Bien que l'exploitation et le traitement des minerais d'U aient cessé en France, les environnements à proximité des sites miniers ont pu être affectés, pouvant entraîner un enrichissement en radioéléments et/ou ET dépassant les niveaux naturels des fonds géochimiques locaux. En particulier, le comportement géochimique de ces ET a encore été peu étudié dans les systèmes influencés par ces anciennes activités minières d'U. Pour répondre à cet objectif, ce travail s'est donc intéressé à l'étude de la spéciation solide des ET et de U dans les sols d'une zone humide située en aval des anciens sites d'extraction et de traitement de minerais d'U de Rophin (Auvergne-Rhône-Alpes) grâce à diverses techniques de caractérisation physico-chimique (DRX, MEB, EPMA, SIMS, XAS, isotopies, extractions chimiques).

Les résultats indiquent des apports anthropiques en U, en Pb et en cuivre (Cu) dans les sols de la zone humide. Les niveaux d'enrichissement les plus élevés de ces éléments sont liés à un dépôt hérité des anciennes activités minières d'U. L'analyse de ces dépôts miniers a permis d'identifier deux origines différentes d'U : i) la première marquée par du Pb radiogénique, provenant du traitement des minerais de pechblende ( $UO_{2+x}$ ) des Bois-Noirs-Limouzat, et ii) une autre source exempte de Pb radiogénique, avec un rapport U/Pb proche de 0,5 provenant du traitement des minerais de paronsite ( $Pb_2(UO_2)PO_4 \cdot 2H_2O$ ) de Rophin.

Pour ce dernier dépôt, l'absence de phosphates d'U et de Pb hérités de Rophin ainsi que les extractions importantes de ces deux éléments pour les fractions acido-soluble et réductible du protocole BCR, suggèrent leur possible redistribution dans la zone humide. Dans une moindre mesure, une grande diversité de phases minérales héritées du granite et des minéralisations ont également été identifiées (notamment des plumbogummites  $PbAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$ , des zircons et des monazites riches en U). Dans les couches riches en Matière Organique Particulaire (MOP), la spéciation de Cu et de Pb semble être essentiellement dominée par les processus de sorption avec cette MOP. Seule une très faible partie de ces éléments est mobilisable d'après des tests de lixiviations normalisés, tout comme U, attestant de la stabilité de ces phases porteuses organiques. Dans un contexte plus oxydant, il a également été observé au sein d'un échantillon de dépôt minier affleurant au niveau du ruisseau traversant la zone humide, la présence importante de phases héritées du traitement des minerais de Rophin (paronsite, pyromorphite ( $Pb_5(PO_4)_3Cl$ )), ainsi que de phases issues de leur altération (notamment des phosphates) qui semblent dominer la spéciation solide d'U et de Pb. *In fine*, l'ensemble de ces résultats souligne la diversité des sources d'U et des ET, des comportements et des processus d'altération différents des phases porteuses au sein de cette zone humide.



## 17:40-18:00 Simulation actuelle et future des écoulements dans un terril de résidus sur l'ancien site minier du Cellier en France

**Pierre L'Hermitte<sup>1</sup>, Anne Jost<sup>1</sup>, Valérie Plagnes<sup>1</sup>, Benoît Reile<sup>2</sup>, Isabelle Blanc-Potard<sup>3</sup>, Damien Regnier<sup>4</sup>, Michaël Descostes<sup>5,6</sup>**

*<sup>1</sup>Sorbonne Université, CNRS, EPHE, METIS – France*

*<sup>2</sup>Cabinet Reilé – France*

*<sup>3</sup>ORANO Mining, AMF Department – France*

*<sup>4</sup>SDR Ingénierie Environnement – France*

*<sup>5</sup>ORANO Mining, Environmental R&D Department – France*

*<sup>6</sup>MINES Paris, PSL - Research University, Centre de Géosciences - France*

La compréhension des écoulements est un enjeu essentiel pour la gestion environnementale à long terme des anciens sites miniers. Les écoulements dans des sites de stockages de résidus peuvent générer des réactions chimiques et des effluents acides. Dans le cas de la lixiviation statique sur des terrils de résidus en surface, cette acidification peut durer plusieurs décennies selon l'acide restant dans les résidus. Les effluents miniers générés par la circulation des eaux météoriques à travers ces résidus sont collectés et traités dans une station de traitement avant d'être rejetés dans l'environnement en conformité avec les normes environnementales. La compréhension du fonctionnement hydrogéologique des sites de stockage de résidus est donc primordiale pour adapter les stratégies de gestion de l'eau aujourd'hui mais aussi dans le futur (jusqu'en 2100) dans un contexte de changement climatique.

Le terril étudié est composé de résidus miniers recouverts d'une couche de stériles, ces matériaux sont considérés comme de granulométrie grossière. Ces résidus ont subi un traitement statique à l'acide sulfurique injecté dans le terril. Les eaux météoriques s'infiltrent dans ce terril et les effluents qui en résultent sont drainés et leur débit mesuré mensuellement depuis 1990 et journalièrement depuis avril 2021. L'analyse de ces données montre que le débit à l'exutoire du terril réagit rapidement aux précipitations. Un modèle journalier à double porosité a été développé avec le logiciel HYDRUS 2D qui permet de représenter le fonctionnement des écoulements en milieu non saturé à travers le terril. Le modèle intègre une représentation simplifiée en 4 couches de l'hétérogénéité du terril basée sur une analyse granulométrique réalisée sur toute sa hauteur. La transpiration des végétaux a aussi été implémentée dans le modèle pour inclure l'effet de la présence de buissons et de conifères sur le terril. Une fois calé, le modèle reproduit de manière satisfaisante les débits mensuels et journaliers observés et la réaction rapide des débits à la pluie.

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrogéologique du terril, les données de précipitations et de températures provenant des données DRIAS 2020 issues du projet d'inter-comparaison des modèles couplés (CMIP5) et de trois scénarios climatiques (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) ont été utilisées comme données d'entrée du modèle calé. À la fin du siècle, les événements pluvieux devraient être plus intenses et plus fréquents qu'au début du siècle. Les débits à la sortie du terril ont pu être simulés jusqu'en 2100 avec ces forçages climatiques et permettent d'étudier la réponse du terril aux événements pluvieux sous l'effet du changement climatique. Ces simulations sont essentielles pour vérifier le dimensionnement des installations de traitement pour le futur (en particulier pour les événements extrêmes) et assurer une gestion responsable des sites de stockage de résidus miniers.

Mots clés : Terril de résidus, Acide résiduel, Modélisation des écoulements non saturés, Changement climatique, Évènements extrêmes, Gestion de l'eau.

---

**18:00-18:30 Discussion/conclusions journée**



Mercredi 24/01

---

**08:45-09:00 Introduction au Programme NEEDS du CNRS****Antonio Benedicto**

*Géosciences Paris Saclay (GEOPS) – Université Paris Saclay*

NEEDS est un programme de recherche multi-partenaires porté par le CNRS avec Andra, BRGM, CEA, EDF, Framatome, IRSN et Orano. NEEDS vise à mobiliser une recherche académique sur les grandes questions scientifiques liées au nucléaire. Il assure une animation scientifique multi-partenaires, et aide à construire des projets de recherches structurants qui abordent des questions de science fondamentale d'intérêt pour l'énergie nucléaire.

Le programme a été lancé en 2019 et les premiers projets ont été financés en 2020. La crise sanitaire ayant retardé le déroulement des projets, NEEDS n'a pas procédé à un nouvel appel à projet exploratoire à l'automne 2020, mais a poursuivi le financement des projets engagés après évaluation bilan scientifique et de l'état d'avancement.

Un nouvel appel à projets exploratoires a eu lieu en Septembre 2021 et l'arbitrage des projets a été fait début 2022.

Les grandes thématiques du programme sont :

- Réacteurs nucléaires et transition énergétique : modélisation neutronique, modélisation du cycle du combustible, matériaux sous irradiation, couplages multi-physiques, radiochimie, modélisation économique, place du nucléaire dans le mix électrique, scénarios d'évolution nucléaire.
- Déchets nucléaires : caractérisation, matériaux pour les déchets, comportement des radionucléides dans un site de stockage, géologie associée, milieux poreux, couplages multi-échelles, ...
- Environnement : comportement des radionucléides dans l'environnement, interaction avec le biotope, territoires nucléaires en évolution, ...
- Ressources : formation et caractérisation des gisements d'uranium, comportement des actinides dans les roches, procédés d'extraction, impact environnemental...

Le programme NEEDS favorisera en priorité des projets de recherche de science fondamentale dédiés à une meilleure compréhension ou modélisation des mécanismes mis en jeu dans les objets d'intérêt du nucléaire, ou l'acquisition de données de base d'intérêt pour les thématiques du programme.

Link : [Needs – NEEDS vise à mobiliser une recherche académique sur les grandes questions scientifiques liées au nucléaire \(in2p3.fr\)](#)

## 09:00-09:30 Détachements crustaux, granites syncinématiques et mobilités uranifères : 1) exhumation de la croûte, contexte structural, temporalité

**Yannick Branquet, Philippe Boulvais, Nathan Cogné**

*Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France*

Dans le domaine sud-armoricain, en contexte de détachement tardi-orogénique, Ballouard et al. (2017) ont mis en évidence sur le leucogranite de Guérande que la coupole sommitale enrichie en uraninite et étain en fin de cristallisation (ca. 310 Ma) a subi un lessivage par des eaux météoriques oxydantes percolant le long des failles associées au détachement. Ces fluides chargés en U sont remontés et ont formé des concentrations uranifères économiques à la faveur de leur rencontre avec des méta black shales réducteurs (entre 300 et 275 Ma). Ce modèle métallogénique a servi de modèle conceptuel pour explorer les mobilités uranifères sur d'autres détachements et en particulier sur le système de Détachement de Quiberon-dôme Migmatique du Golfe du Morbihan (DQ-MGM) au mur. Cette cible est d'autant plus prometteuse que Dusséaux et al. (2022) mettent en évidence l'infiltration de fluides météoriques en profondeur de ca.320 à 303 Ma le long du détachement de Quiberon.

Nos travaux d'analyse pétro-structurale, de datations U/Pb sur les apatites et de géochimie montrent que si l'agenda global tectono-hydrothermal du système DQ-MGM est correct, l'histoire magmatique est plus complexe qu'un unique épisode de migmatisation responsable d'un seul emplacement de magma leucogranitique. En effet, nous mettons en évidence trois épisodes magmatiques séparés sur 25 Ma : i) le leucogranite de Quiberon à 315 Ma synchrone de l'épisode majeur de fusion partielle dans les migmatites du Golfe du Morbihan ; ii) une première famille d'aplo-pegmatites à 301 Ma qui intrudent le granite de Quiberon et qui sont synchrones des dykes moins différenciés de microgranites qui intrudent les migmatites ; iii) une seconde famille d'aplo-pegmatites à 292 Ma intrudant le granite de Quiberon. Ainsi, il y a plusieurs fusions partielles au sein du système DQ-MGM ce qui explique la durée anormale du système hydrothermal lié à l'infiltration d'eaux météoriques (Dusséaux et al., 2022). Les derniers épisodes magmatiques de 301 à 292 Ma sont vraisemblablement la source de chaleur qui a permis d'activer, le long du détachement, les circulations de fluides responsables d'altérations et de mobilités élémentaires, et ce bien après le refroidissement du corps principal granitique. Au sein du système DQ-MGM, albitisation, muscovitisation secondaire et déplétion localisés en U sur les grains d'apatites suggèrent des mobilités similaires à celles observées au sein du système minéralisé en U du granite de Guérande.

Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., Mercadier, J., Tartese, R., Venneman, T., Cuney, M. (2017). Magmatic and hydrothermal behavior of uranium in syntectonic leucogranites: The uranium mineralization associated with the Hercynian Guérande granite (Armorican Massif, France). *Ore Geology Reviews*, 80, 309-331.

Dusséaux, C., Gébelin, A., Boulvais, P., Ruffet, G., Poujol, M., Cogné, N., Mulch, A. (2022). Timing and duration of meteoric water infiltration in the Quiberon detachment zone (Armorican Massif, Variscan belt, France). *Journal of Structural Geology*, 156, 104546.

**09:30-09:50 Détachements crustaux, granites syncinématiques et mobilités uranifères : 2) exploration numérique Thermo-Hydro-Chimique (THC)****Khaled Bock<sup>1</sup>, Yannick Branquet<sup>1</sup>, Olivier Pourret<sup>3</sup>, Thibault Duretz<sup>1,2</sup>, Philippe Boulvais<sup>1</sup>***<sup>1</sup>Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France**<sup>2</sup>Goethe Universität Frankfurt FB 11, Institut für Geowissenschaften Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt**<sup>3</sup>UniLaSalle, AGHYLE, 19 rue Pierre Waguet, 60000 Beauvais, France*

Les zones de détachement sont des régions privilégiées pour l'interaction entre les fluides issus de la surface et les roches, pouvant potentiellement conduire à la formation de dépôts minéraux. Toutefois, l'hydrodynamique de ces zones, et en particulier la manière dont les fluides de surface atteignent les profondeurs crustales, demeure énigmatique. Cette question devient encore plus complexe lorsque le chauffage dû à la mise en place d'un granite syn-cinématique peut augmenter la flottabilité des fluides, entravant ainsi leur descente. Dans ce contexte, nous avons réalisé des modèles numériques hydrothermaux en 2D. La géométrie intègre un détachement ainsi que des failles normales secondaires dans le toit du détachement. Des tests de sensibilité ont été menés pour évaluer l'impact des gradients topographiques, de l'activité magmatique syn-tectonique, et du contraste de perméabilité dépendant de la profondeur entre le détachement et la croûte. Plusieurs indicateurs d'écoulement, intégrés dans le temps et associés à un suivi de particules, nous ont permis de mettre en évidence les principaux facteurs de contrôle. Notre étude montre que l'infiltration de fluides issus de la surface dans les zones de détachement est favorisée par la présence d'une source de chaleur en profondeur, telle qu'un pluton syn-cinématique. Les failles secondaires constituent le principal chemin de percolation pour les fluides de surface infiltrant le détachement. Des anomalies thermiques en forme de panache ont été repérées entre ces failles. Les perméabilités dynamiques des intrusions magmatiques, qui dépendent des températures sub-solidus, reproduisent spatialement et temporellement le modèle conceptuel de la minéralisation en uranium dans le Domaine Sud Armoricaire Varisque, pris comme exemple d'application.

En se basant sur les trajectoires PT des fluides issus de la surface suivies dans le modèle de perméabilité dynamique du pluton, nous avons couplé le modèle physique de transport à l'évolution des équilibres chimiques au cours du trajet des fluides. Ainsi, une modélisation itérative en batch a été réalisée à plusieurs points PT du parcours des fluides. A chaque point, l'interaction des fluides avec les roches du massif Sud Armoricaire a été étudiée. Ces fluides météoriques s'infiltrent d'abord à travers les failles secondaires. Ensuite, ils cheminent le long de la coupole du pluton leucogranitique enrichie en U et finalement, ils remontent vers la surface jusqu'au toit du détachement en traversant les schistes noirs réducteurs. Cette approche nous a permis de mieux appréhender les mécanismes de mobilisation, de transport et de dépôt de l'uranium dans le système de détachement situé dans le Massif Sud Armoricaire.

**09:50-10:10 Le projet UraLod**

**Antonio Benedicto<sup>1</sup>, Grégory Ballas<sup>2</sup>, Michel Lopez<sup>2</sup>, Thomas Blaise<sup>1</sup>,  
Frederique Moreau<sup>3</sup>, Christian Le Carlier De Veslud<sup>3</sup>, Yannick Branquet<sup>3</sup>,  
Philippe Boulvais<sup>3</sup>, Delphine Bosch<sup>2</sup>, Olivier Bruguier<sup>2</sup>, Tristan Cornu<sup>2, 4</sup>**

*<sup>1</sup>Géosciences Paris Saclay – Université Paris Saclay, France*

*<sup>2</sup>Géosciences Montpellier – Université de Montpellier, France*

*<sup>3</sup>Géosciences Rennes – Université de Rennes*

*<sup>4</sup>TotalEnergies, CSTJF Pau, France*

Par la synergie de trois équipes fortes (Géosciences Paris-Saclay, Montpellier et Rennes), UraLod ambitionne de revisiter le système uranifère du bassin permien de Lodève en couplant concepts et méthodes modernes pour aboutir à un modèle métallogénique intégré. Par ailleurs, ce projet bénéficiera des développements méthodologiques du projet structurant UraMod (Needs).

Les travaux les plus récents sur les minéralisations Ba/sulfures du bassin montrent que la mobilisation principale des fluides et métaux est associée à la phase de rifting permien et est cachetée par le Trias moyen. Les âges jurassiques ou crétacés obtenus par U-Pb dans les années 90 ne semblent donc pas correspondre à des périodes principales de mise en place des minéralisations uranifères.

Ce projet propose de définir l'origine, les conditions de mobilisation, de transport, de piégeage et de remobilisation de l'uranium du bassin de Lodève : autrement dit, d'établir un modèle métallogénique cohérent, inexistant à ce jour.

Mots clés : Uranium, Lodève, ressources, métallogénie, datation, circulation de fluides, modélisation numérique, Needs.



## 10:10-10:30 Effets de la matière organique et de l'hématite sur les transferts d'Uranium (VI) : une approche moléculaire

Selena Ferreres<sup>1,4</sup>, Virginie Chapon<sup>2,4</sup>, Laureline Février<sup>3,4</sup>, Frédéric Coppin<sup>3,4</sup>,  
Mirella Del Nero<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Université de Strasbourg, IPHC, 23 rue du Loess 67037 Strasbourg, CNRS, UMR7178, 67037 Strasbourg, France

<sup>2</sup>BIAM, Cité des Énergies, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France

<sup>3</sup>LR2T, IRSN, Centre d'Études Nucléaires de Cadarache, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex, France

<sup>4</sup>LTSER « Zone Atelier Territoires Uranifères », Clermont-Ferrand, France

Comprendre le devenir de l'Uranium (VI) dans les environnements à radioactivité naturelle renforcée nécessite de décrire sa spéciation et ses transferts dans les continuums eau-sol-plantes. Pour cela, il est essentiel de déterminer les liens entre la spéciation de l'U(VI), sa labilité et sa biodisponibilité. Dans les environnements riches en matière organique naturelle (MO), notamment les milieux forestiers, la spéciation organique de l'U(VI) est prédominante (Cumberland et al, 2016). Aujourd'hui, deux verrous subsistent : 1/ la spéciation U(VI)-MO à l'échelle moléculaire, en considérant son fractionnement de sorption aux surfaces minérales, et 2/ les effets sur la spéciation de l'U(VI) des micro-organismes, qu'ils soient directs (biosorption, bioréduction, bioaccumulation...) ou indirects (dégradation de la matière organique).

Afin de lever ces verrous, nous avons réalisé une étude préalable d'un sol d'une zone humide impactée par d'anciennes activités minières d'Uranium (Rophin, Puy-de-Dôme, France), notamment un horizon argileux de sub-surface enrichi en éléments trace métalliques, plus particulièrement en uranium et plomb. Les résultats de cette étude montrent que l'uranium est mobile dans la fraction colloïdale, qui contient également des nano-minéraux d'oxyde de fer et de la matière organique. Cela nous a permis de définir les conditions expérimentales de systèmes modèles, aux conditions contrôlées en laboratoire, dont l'étude est toujours en cours. Ces modèles contiennent de la matière organique naturelle, extraite de l'horizon argileux, et un oxyde de fer (hématite), en présence ou en absence d'une population bactérienne spécifique (*Microbacterium spp.*). Des systèmes binaires (MO-U et MO-minéral) et ternaires (MO-U-minéral) ont été réalisés, puis analysés de manière quantitative par Carbone Organique Total (MO) et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) (U), et qualitativement (émission de fluorescence). Les résultats préliminaires montrent qu'en présence d'hématite, l'uranium favorise l'adsorption de molécules de type "humique", dont une fraction composée d'aromatiques condensées, et forme des complexes ternaires (métallo-organiques) à la surface de l'hématite. L'affinité de l'U(VI) pour les sites de surface du minéral et pour la MO contrôle son comportement en solution.

Ce travail est soutenu par la ZATU (Zone Atelier Territoires Uranifères). Il fait partie du projet INSPECT (INteractions, SPéciation et Effets des radionuCléides (U, Th, Ra, Po) d'une zone humide anThropisée), du projet national NEEDS (Nucléaire : Energie, Environnement, Société).

## **10:50-11:10 Les signatures isotopiques indépendantes de la masse : un moyen sans précédent pour discriminer l'origine minière de l'uranium dans l'amont du cycle du combustible**

**Caroline Fitoussi<sup>1</sup>, Eric Pili<sup>2</sup>, Cécile Gardin<sup>1</sup>, Elsa Yobregat<sup>1</sup>, Mathieu Touboul<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratoire de Géologie de Lyon (LGL-TPE), ENS Lyon, CNRS et Université Claude Bernard de Lyon, 46 allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 7, France*

*<sup>2</sup>CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France*

De nombreuses impuretés naturellement présentes dans les minerais d'uranium, comme le molybdène (Mo), peuvent se retrouver à différentes étapes des procédés de fabrication du combustible nucléaire. Ces procédés affectent l'abondance relative des isotopes stables de ces éléments et ces fractionnements isotopiques constituent des outils applicables dans le cadre des activités de lutte contre la prolifération nucléaire et de criminalistique nucléaire.

L'étude des fractionnements isotopiques dépendants de la masse, qui représente l'approche classique des isotopes stables, a tout d'abord permis le développement d'une méthode capable de caractériser les transformations de l'uranium lors de différentes étapes du cycle. Toutefois, la majorité des réactions chimiques qui affectent la matière étudiée produit ces fractionnements dépendants de la masse. Il est donc primordial de pouvoir enrichir cette information par d'autres outils dotés d'un plus fort pouvoir de discrimination, notamment en ce qui concerne l'origine géologique de l'uranium dans le cycle du combustible.

Une approche résolument novatrice a mis en évidence des signatures isotopiques indépendantes de la masse grâce à des mesures à très haute précision des isotopes du Mo. Des signatures multi-isotopiques de différents types ont ainsi été pour la première fois mises en évidence dans la matière uranifère. Ces signatures permettent de distinguer les différents sites miniers sur lesquels elles ont été mesurées et persistent à travers les procédés physico-chimiques employés par les usines produisant les concentrés miniers jusqu'aux produits issus de la calcination. Elles constituent un moyen sans précédent pour discriminer l'origine minière de l'uranium dans l'amont du cycle du combustible.

## 11:10-11:30 Spatial geochemical distribution within the U-roll front of the Maastrichtian reservoir of the Djengeldi deposit (Uzbekistan)

**Pierre Martz<sup>1</sup>, Emmanuelle Chanvry<sup>1</sup>, Marc Brouand<sup>1</sup>, Grégory Dufréhou<sup>1</sup>, Hugo Marek<sup>2</sup>, Yoram Teitler<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>2</sup>.**

*<sup>1</sup>ORANO Mining – Orano Group – 125 Av. de Paris, 92320, Chatillon – France*

*<sup>2</sup>GeoRessources – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique, LabCom CREGU – France*

Sandstone roll-front uranium deposits from the Central Kyzylkum basin (Uzbekistan) are explored and mined through conventional techniques since the 1950s and through In-situ-Leaching Recovery (ISR) since the 1970s. Although smaller compared to its twin kazakh sisters: The Syr-Darya and Chu-Sarysu basins that concentrate about 41% of U world production in 2020, the Kyzylkum basin shares nonetheless a global tectonic evolution and similar features with them, making him a good candidate for further U discoveries.

Despite the long history of deposit discoveries in this area (ex: Uchkuduk, Bukinai, Sabyrsai, Sugralya, etc.), Uzbekistan U roll front deposits have been relatively much less studied and described in the literature so the metallogenic model(s) and their tectonic-sedimentary context remain poorly understood today. Nevertheless, significant progress has been made over the past two decades in understanding this type of deposit, which may have common characteristics from one U roll front province to another. Features specific to the Central Kyzylkum basin and common with typical model(s) are however unknown, yet understanding them is of key interest for exploration and production in this province.

Since 2020, Orano Mining conducts exploration activities with its Uzbekistan partner on the Djengeldi deposit of the Kyzylkum province. In order to gain better knowledge on the nature of the reservoir hosting the deposit, the type of mineralization and its spatial distribution as well as that of detritic, diagenetic and alteration minerals, we conducted a multidisciplinary and systematic characterization of cores from a profile crosscutting the U-mineralized roll front of the Maastrichtian reservoir.

Indeed, through 08 drill holes crosscutting the front from the oxidized red altered reservoir to the grey-green unaltered area, we have carried out systematic sedimentary and geological characterization together with VIS-SWIR infrared (IR) spectroscopic and XRF measurements. In addition, geochemical and mineralogical characterization have been performed on a set of samples, including whole rock geochemistry, optical and MEB observations both in Orano Mining facilities and Georessources laboratory.

This study allowed to define main mineralogical and petrological characteristics of the reservoir and the mineralization (U-bearing phases, detritic and diagenetic minerals, alteration haloes). Key sedimentary characteristics of the reservoir and the main stratigraphic intervals above and below have been defined. Associated depositional environments have been interpreted. The systematic use of XRF and IR data coupled with punctual whole rock lab geochemistry allowed to estimate the spatial distribution of the key mineral phases through the redox front as well as the geochemical variations through it. We present here such variations through the profile. The observed spatial distribution of the elemental contents, relating to the mineral proportions and the textures of these minerals show striking common features with U roll front deposits from Wyoming (USA), Kazakhstan or North China with specific evolutions of pyrite textures and U, S, As, Mo, Se-rich halos. These common features together with specificities, as we know them today, are presented and discussed.

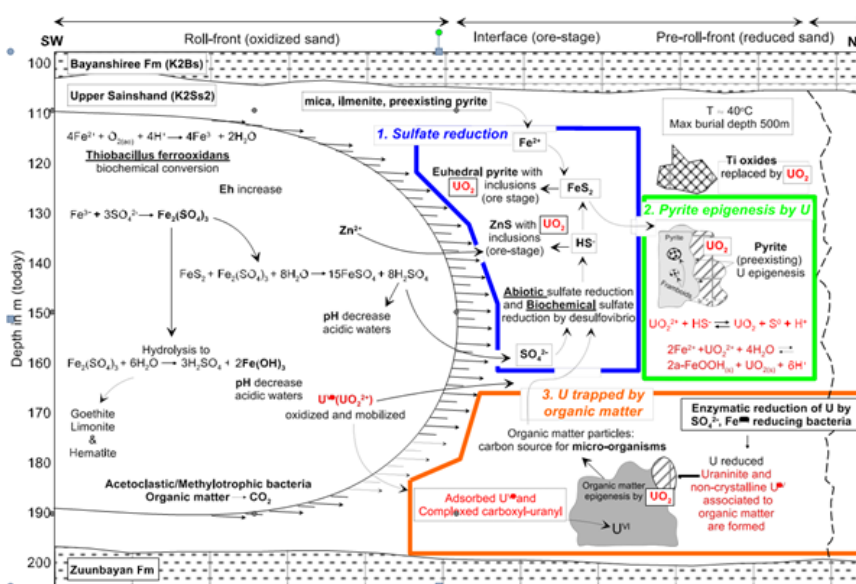
## 11:30-11:50 Organic and inorganic reduction of uranium in low temperature sedimentary systems. Evidence from the Zoovch-Ovoo uranium deposit

**Dimitrios Rallakis, Raymond Michels, Michel Cathelineau**

*CNRS, CREGU, Université de Lorraine, GeoRessources, 54501 Vandoeuvre-Nancy, France*

The objective of the study is to analyze the organic and inorganic processes governing the uranium reduction in the aquifers of the roll-front type Zoovch Ovoo uranium-deposit (Mongolia). The Cenomanian Sainshand Formation hosting the ore deposit contains reservoirs made of silicoclastic sediments deposited in fluvio-lacustrine settings mostly characterized by unconsolidated silty clays and sands ranging from arenite to subarkose lithologies. These reservoirs are very rich in detrital organic matter deposited most often at the base of sand bodies or associated to clay. It is always poorly preserved and according to organic petrography analysis it is of higher plant origin and very immature (lignite stage; vitrinite reflectance  $\leq 0.4\%$ ). It was observed that at the scale of sedimentary particles, organic matter systematically complexes U(VI). However, it cannot be considered as directly involved in the reduction mechanism of uranium because of the low burial temperatures (max 50°C) and hence very limited diagenesis. Previous studies proved that for direct uranium reduction by organic matter, temperature must rise to 120°C (Nakashima et al, 1984), a case that is a priori excluded for our study area. Nevertheless, the investigation reveals that organic matter is an important element in the U trapping process. Indeed, it acts as a substrate sustaining and focusing bacterial activity into specific sedimentary layers. In turn, the microbial communities, SRB and FeRB, catalyse the reduction of sulfur and iron, respectively but also uranium, leading to two major consequences, first the precipitation of  $UO_2$  onto organic matter particles and secondly the formation of sulfides which act as additional reducers for U(VI). The organic matter through biofilm formation can also complex U(VI) (organic-uranyl complexes) and reach concentrations up to 20wt%. Specifically, both bacteria and inorganic processes govern the reduction cycle of sulfur as updip pyrite dissolution in the suboxic part of the roll-front provides Fe(II) and reduced sulfur species (Hough, 2019), when in the reduced part of the roll-front, SRB would be present and reduce sulfate into intermediate valence species of sulfur, such as  $S_2^-$ ,  $HS^-$ ,  $H_2S$  and  $S_0$  (Rackley, 1972). Reduced iron and other metals would then react with the reduced sulfur leading to the formation of pyrite and other sulfides that directly reduce U. Hence, except for the traditional inorganic reduction of U, it could be deduced that in general, 1) iron-reducing (FeRB), 2) sulfate-reducing (SRB) and 3) bacteria that form (non-crystalline  $UO_2$ ) are involved in uranium reduction. This assumption is reinforced by later studies i.e. Jroundi et al. (2020, 2023) who further highlighted the role of these strains in uranium trapping and reduction.

**Key words:** uranium, deposit, bacteria, roll-front, Zoovch Ovoo, Mongolia



**Figure:** Concept art of the metallogenic system and redox trap of the Zoovch Ovoo roll-front from Rallakis et al. (2021) and references therein. The reduction mechanisms are highlighted: 1) sulfate (bio)reduction leading to pyrite formation, 2. Pyrite epigenesis by uraninite 3. Organic matter reactivity through complexation and sustainment of biological activity, responsible for uranium precipitation.

**11:50-12:10 Géochronologie U-Pb de la calcite : avancées et perspectives****Thomas Blaise, Frédéric Haurine***Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, Orsay 91405, France*

Depuis les premiers résultats de géochronologie U-Pb sur calcite par couplage ablation laser-ICP-MS publiés en 2014, la géochronologie U-Pb de la calcite a connu un développement scientifique et technique rapide.

Nous passerons en revue les applications de cette méthode de datation radiométrique sur les carbonates, incluant les informations obtenues concernant le développement des structures ductiles et cassantes, la diagenèse, la stratigraphie.

Nous verrons ensuite quelles sont les stratégies actuelles de standardisation et d'estimation des incertitudes, et les perspectives d'amélioration de la justesse, la précision et la reproductibilité.

Nous proposerons enfin des pistes pour améliorer la cartographie de l'U dans les échantillons et discuterons des mécanismes d'incorporation de l'U dans la calcite selon les conditions physico-chimiques et les environnements de précipitation.



## 13:10-13:30 Sources des teneurs (800-1000ppm) en uranium dans le bassin de Pongola (Afrique du Sud)

Megneng Melissa<sup>1</sup>, Pagel Maurice<sup>2</sup>, Orberger Beate<sup>2</sup>, Hoffman Axel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ecole Normale Supérieure de Libreville, Laboratoire des Sciences de la Vie et de la Terre (LASCIVIT), BP, 17009, Libreville, Gabon

<sup>2</sup>GEOPS-Université Paris Sud Bât 504 91405 Orsay CEDEX

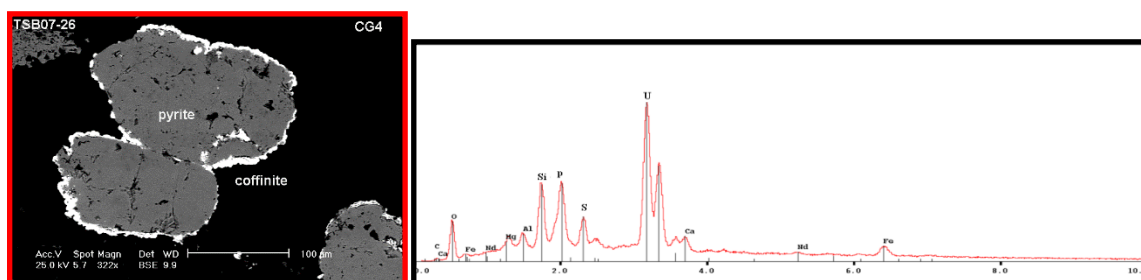
<sup>3</sup>Department of Geology, university of Johannesburg Auckland Park Kingsway

En Afrique du Sud plusieurs bassins sur le craton du Kaapvaal sont minéralisés. En effet, le bassin du Witwatersrand est le plus connu non seulement pour ses accumulations d'or parmi les plus grandes du monde, mais ils représentent aussi des ressources en uranium importantes. Le supergroupe Pongola s'est déposé sur le craton du Kaapvaal à environ 3 milliards d'années. Il a été démontré par Sagger et al., (1986) que les minéralisations du bassin de Pongola ont une ressemblance remarquable à celles du bassin de Witwatersrand.

Ce travail concerne deux carottes des formations conglomératiques et gréseuses basales du Mozaan Groupe dans le Denny Dalton dans lesquelles des teneurs en uranium (800-1000 ppm) ont été reconnues. Le but de ce travail était donc de retrouver les potentielles sources de ces teneurs en uranium afin de reconstituer les paragenèses minérales du bassin de Pongola.

La pétrographie, la chimiques et la minéralogie de cette étude mettent en évidence les différentes minéralisations qui caractérisent les processus diagenétiques et hydrothermaux qui ont affectés le Mozaan groupe. La morphologie des minéraux suggère un transport court de la source vers le bassin de Pongola. Les observations des minéraux d'uranium mettent en évidence de phospho-coffinite, de Phosphates Alumineux Hydratés de Terres Rares et des altérations très développées qui affectent les grains de monazite. Ces assemblages minéralogiques révèlent une diagenèse avec la circulation de fluides acides comme l'atteste la présence de la pyrite et des APS dans la porosité secondaire des roches. les teneurs en uranium proviendraient de l'altération des grains détritiques de monazite lors d'un événement daté à 2,45 Ga car l'uraninite est absente dans ces minéralisations.

Mots clés : Conglomérat, Minéralogie, Paragenèse, Pongola , Uranium -- Minerais Uranium



Observation au MEB : cristallisation de la coffinite autour des grains détritiques altéré de pyrite

## 13:30-13:50 Avancées récentes sur la métallogénie de l'uranium en Chine

Michel Cuney

*GéoRessources – Université de Lorraine - CNRS*

La Chine consacre des budgets extrêmement importants pour la recherche scientifique et l'exploration des gisements d'uranium. Plusieurs centaines de géologues (milliers ?) sont impliqués dans ces travaux avec 3 principaux centres de recherche: (i) l'East China Institute of Technology (ECUT) focalisée sur les sciences nucléaires et la géologie qui forme la majeure partie des géologues de l'uranium en Chine ; (ii) le Service Géologique de Tianjing qui a une équipe très importante focalisée sur l'étude des gisements d'uranium associés aux grès. Le directeur du service est responsable d'un projet ICP (2019-2025) sur l'uranium dans les grès ; (iii) le Beijing Research Institute on Uranium Geology (BRIUG) qui coordonne les recherches sur la géologie de l'uranium depuis les aspects métallogéniques, jusqu'au stockage des déchets nucléaires et les aspects environnementaux, avec environ 600 personnes et des laboratoires équipés au plus haut niveau (microsonde ionique CAMECA 1280, La ICP-MS et spectromètres de masse de tous les types, ...). De nombreuses autres universités sont également impliquées dans ce type de recherche, mais de manière plus sporadique. Il en résulte une production scientifique prolifique, publiée en majeure partie dans des revues chinoises, mais aussi de manière croissante dans les revues internationales. Les recherches portent sur tous les types de gisements mais majoritairement sur les gisements d'U dans les grès (Fig. 1) qui constituent les ressources les plus importantes nouvellement découvertes en Chine. J'ai sélectionné quelques résultats scientifiques récents qui m'ont parus les plus originaux:

- Découverte du gisement magmatique-hydrothermal U-Nb-Pb de Huayangchuan (centre Chine) associé à des carbonatites avec une excellente corrélation entre Nb et U (pyrochlore uranifère ± uraninite) (150 000 tU, IAEA UDEPO ?) et de faibles teneurs en Th et ETR, contrairement à Bayan Obo (Huang et al., 2020);
- Découverte de 2 gisements d'U associés à la métasomatose sodique dans la ceinture de Longshoushan, NW de la Chine avec une minéralisation primaire magmatique à uraninite-Th (Yu et al., 2020).
- Mise en évidence de l'association du gisement de Baiyanghe (NW Chine) à U-Be-Mo à du volcanisme peralcalin avec un épisode précoce à Be (2,2 Mt de minerai @ 0,2 - 1,4 %Be), suivi d'un épisode à pechblende (>2000t U @ 0.05-0.2 %U) fortement remobilisé ensuite par des fluides météoriques (Bonnetti et al., 2021).
- Mise en évidence de 2 types de minéralisation dans la caldera de Xiangshan (SE Chine), une à 120-105 Ma à brannérite riche en Th-REE-Y-Nb-Zr, une à 100-80 Ma à pechblende riche en Ti-Th-Zr (Bonnetti et al., 2020) à partir de datation sur des zircons hydrothermaux et des oxydes d'uranium. Cependant, des âges plus précoces de la 1ère phase de minéralisation, proche de la mise en place des volcanites à partir de datations sur apatites (126,7 et 131 Ma) ont été obtenus par Wang et al. (2023).
- Découverte de minéralisations de haute température (300-450°C) précoces (175-145Ma) dans les granites du district de Xiazhuang (SE Chine) associées à des altérations potassique et propylitique d'origine magmatique-hydrothermale, non connue dans les granites hercyniens, avec des fluides dérivés de granites calco-alcalins potassiques très fractionnés (A2), (Bonnetti et al., 2022).
- Découverte des minéralisations uranifères de Penyang dans des grès éoliens au SW du bassin d'Ordos, avec un réducteur extrinsèque correspondant à des fluides migrés depuis des réservoirs pétroliers (Zhao et al., 2022 ; Chen et al., 2022) à partir d'une étude systématique des diagraphies fournies par la SINOPEC (Fig. 2);
- Présentation très exhaustive et discussion des relations entre minéralisations en uranium dans les grès et les niveaux de charbon dans le bassin de Yili (Bai et al., 2022). Les minéralisations sont associées à des infiltrations d'eaux météoriques en conditions de climat aride à semi-aride, principalement au Cénozoïque.
- Analyse détaillée des relations entre minéralisation d'U et le dépôt des sédiments dans un système de chenaux méandriformes avec niveaux charbonneux pendant le Crétacé supérieur dans le bassin de Songliao (NE Chine) (Jia et al., 2023). Le dépôt des grès se produit en climat chaud et semi-humide lors d'une inversion tectonique (74.9-72.2 Ma). Les fluides riches en uranium s'infiltrèrent lors d'un soulèvement rapide au Cénozoïque (38.0-10.0 Ma) associé à une altération continentale intense, et dépôt de l'U dans des chenaux semi-abandonnés.

- Le gisement de Daying (bassin d'Ordos) est un exemple d'une succession redox d'un roll front classique ayant subi une réduction 2<sup>aire</sup> de la zone d'oxydation (Li et al., 2023). La minéralisation U est associée à une matière organique de type humique.

- Utilisation de l'altération de l'apatite pour tracer la nature des fluides minéralisateurs pour les gisements d'U intragranitiques du district uranifère de Lujing dans le granite à 2 micas de Ledong (SE Chine) (Yu et al., 2023).

Bai, H., Wang, W., Lu, Q., Wang, W., et al. 2022. ACS Omega, 7(6) 5453-5470 ; Bonnetti, C., Liu, X., Cuney, M., Mercadier, J., et al. (2020). Ore Geology Reviews, 103514; Bonnetti, C., Liu, X., Mercadier, J., Cuney, M., Wu, B., et al. 2021. Ore Geology Reviews, 103921.; Bonnetti, C., Riegler, T., Liu, X., Cuney, M. 2022. Mineralium Deposita in press.; Chen, Y, Miao, P., Li, J., Jin, R. et al. 2022. Journal of Earth Science, 33(2), 289-307; Huang, H., Wang, K.X., Cuney, et al. 2022. Ore Geology Reviews. 146, 104958.\*; Li, Q., Wu, B., Luo, J., Yang, S. et al. 2023, Minerals. 13(8), 1002. ; Jia, J., Mao, C., Xi, W., et al. 2023. Ore Geology Reviews. 161, 105673; Wang, Y., Fan, H., Qin, K., Evans, N.J. et al. Ore Geology Reviews, 160, 105586; Yu, C.D., Wang, K.X., Liu, X.D., Cuney, M., et al. 2020. Minerals, 10, 335; Yu, Z., Liu, L., Ling, H., Chen, P. et al. 2023. Economic Geology. 118(5) 1177-1199; Zhao, H.L., Ao, C., Li, J.G., et al. 2022. Ore Geology Reviews, 141, 104641.

Uranium, géologie, Chine, métallogénie

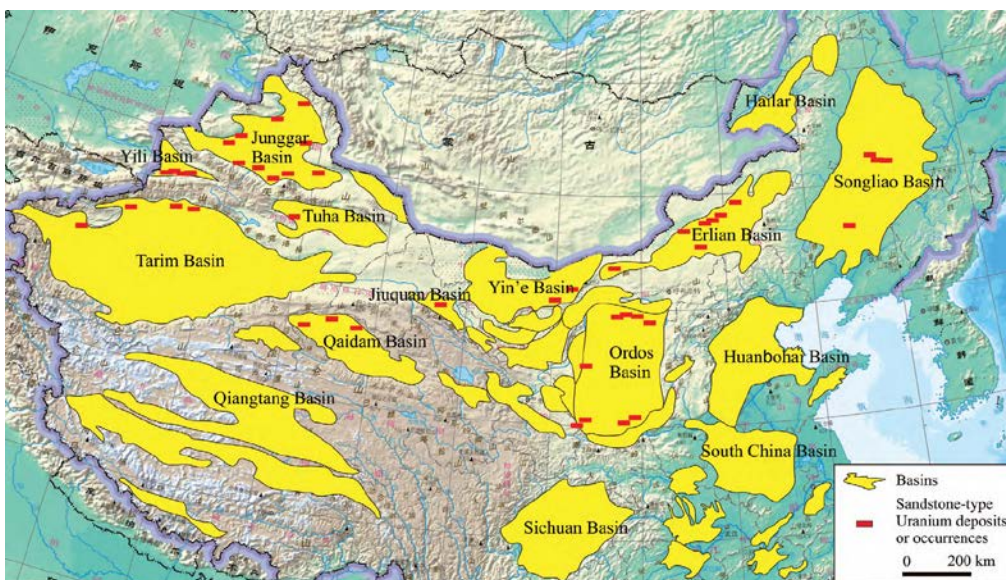


Fig. 1 : Distribution des gisements d'U associés aux grès dans les bassins sédimentaires de Chine (Chen et al., 2022)

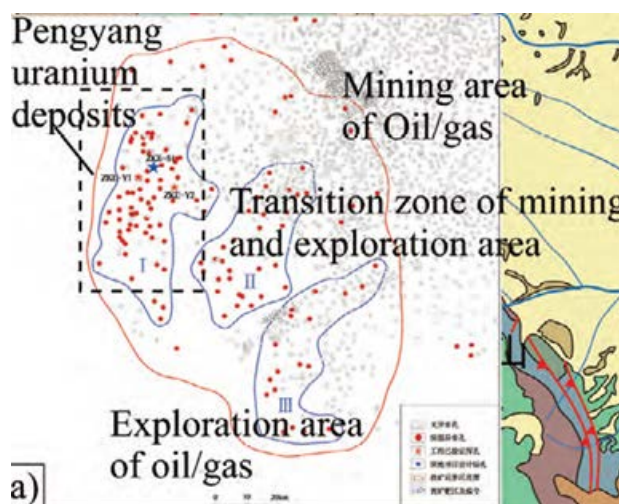


Fig. 2 : Utilisation des données diagraphiques des forages pétroliers de SINOPEC (points gris) dans le SW du bassin d'Ordos pour localiser des indices et gisements d'U (points rouges) associés au grès (Chen et al., 2022).



## 13:50-14:10 Les gisements d'uranium sont-ils générés par des phénomènes transitoires ?

**Patrick Ledru, Julien Mercadier**

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

Le concept de système métallogénique met en avant la notion de contexte géodynamique favorable et de systèmes hydrothermaux auto-organisés. La formation de tels systèmes nécessite une source d'énergie qui va contrôler les circulations fluides, permettre leur accumulation dans un réservoir scellé et conséquemment contribuer à l'accroissement d'un gradient hydraulique qui, à la faveur de phénomènes transitoires, va être à l'origine de la formation de gisements (McCuaig et Hronsky, 2014). Ces éléments sont considérés comme critiques pour la formation des gisements d'or et la compréhension du fonctionnement des systèmes de failles valves et le contrôle structural des circulations fluides (Micklethwaite et al., 2010). Leurs propriétés thermiques, hydrauliques et mécaniques sont comparables aux paramètres qui conditionnent la stimulation des réservoirs fracturés des systèmes géothermaux (Cox, 2016). L'application de ces concepts à la métallogénie de l'uranium (Skirrow et al. 2009 ; Ledru et al., 2023) conduit à rechercher et évaluer le rôle éventuel de phénomènes transitoires dans la formation des gisements.

La localisation des gisements d'uranium haute-teneur du bassin de l'Athabasca à proximité de systèmes de faille ayant été réactivés à de multiples reprises, s'étant propagés au sein du bassin et ayant guidé la circulation des fluides témoigne du contrôle structural de ces minéralisations. La coïncidence entre cette réactivation et la génération des gisements d'uranium est une première évidence d'événements transitoires, une chronologie relative pouvant être établie entre déformation, altération et minéralisation. D'autre part, les études minéralogiques montrent des conditions thermiques élevées et l'importance des phénomènes de dissolution et recristallisation qui sont responsables du lessivage de volumes considérables de roches dans le socle et le bassin. Dans ces conditions, l'existence de réservoirs au sein du socle ayant permis l'accumulation progressive de saumures issues du bassin et éventuellement de fluides profonds du socle est envisagée, des contraintes tectoniques aux limites et/ou la surpression fluide au sein du réservoir étant alors responsables de la réactivation des structures du socle et de l'expulsion des fluides de ce réservoir enrichi en éléments métalliques. L'alternance de période d'activité sismique et intersismique serait ainsi tout à fait comparable aux systèmes hydrothermaux auto-organisés décrits pour les gisements d'or (Sibson, 2020) ou les réservoirs géothermaux et pourrait correspondre à une succession de périodes de temps très limitées dans l'histoire du bassin. Cette réflexion a soutenu le montage du projet ANR Earth Beat qui a pour objectif le couplage Thermo-Hydro-Mécanique des phénomènes transitoires dans les systèmes hydrothermaux des gisements géothermaux et métalliques géants.

La recherche d'événements transitoires dans le cas des gisements de roll front est un sujet plus difficile à aborder. Si le contrôle de leur morphologie est de premier-ordre la perméabilité du réservoir, la coïncidence avec la réactivation de structures de socle et la circulation de fluides réducteurs peut toutefois être envisagée. D'autre part, l'extension des roll-fronts du Kazakhstan soulève la question d'une formation ayant nécessité plusieurs dizaines de millions d'années et encore en progression ou d'une période particulière ayant fossilisé l'avancement du front d'oxydo réduction. L'analyse des relations entre l'architecture de ces bassins et les structures profondes serait sans doute un élément important à prendre en compte pour caractériser de tels événements transitoires.

Ledru P., Benedicto A., Chi G., Khairallah C., Mercadier J., Poh J., Robbins J. (2023). The unconformity-related uranium mineral system of the Athabasca Basin (Canada). Wiley, ISTE, Natural Resources: Applied Basic Research, Chapter 3.

McCuaig T.C., Hronsky J.M.A. (2014). The Mineral System Concept: The Key to Exploration Targeting. Soc. Econ. Geol., 18, 153-175.

Micklethwaite S., Sheldon H.A., Baker T. (2010). Active fault and shear processes and their implications for mineral deposit formation and discovery. J. Struct. Geol., 32, 151-165.

Sibson R.H. (2020). Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. Earth Planets Space, 72, 31.

Skirrow R.G., Jaireth S., Huston D.L., Bastrakov E.N., Schofield A., van der Wielen S.E., Barnicoat A.C. (2009). Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework. Rapport, Geoscience Australia Record 2009/20.

**14:15-15:00 Conférence invitée - IAEA activities supporting capacity building in uranium resources and production**

**Adrienne Hanly**

*International Atomic Energy Agency*

The IAEA provides various forms of support for capacity building in countries engaged in uranium exploration, processing, and mining. This support includes technical meetings, training workshops, symposia, review and expert missions, publications, e-learning, fellowships, scientific visits, and procurements. An IAEA Nuclear Energy Series document (NES No. NF-G-1.1) titled 'Milestones in the Development of National Infrastructure for the Uranium Production Cycle' offers guidance to countries currently undertaking or considering programmes in uranium exploration, production, processing, decommissioning, and remediation of uranium mine and processing facilities.

To assist countries in understanding this guidance, the IAEA is developing a series of e-learning modules (see Figure 1). One e-learning module will provide an overview of the Milestones approach in developing national infrastructure for the uranium production cycle. Two additional e-learning modules, one focusing on stakeholder engagement and the other on conventional safety and radiation protection, will further expand on the Milestones approach. A fourth e-learning module will concentrate on uranium exploration, offering a solid foundation in the principles of conducting uranium exploration systematically, safely, and sustainably. This will complement an IAEA Technical Document currently in draft form titled 'Exploration Planning, Management and Practise.'

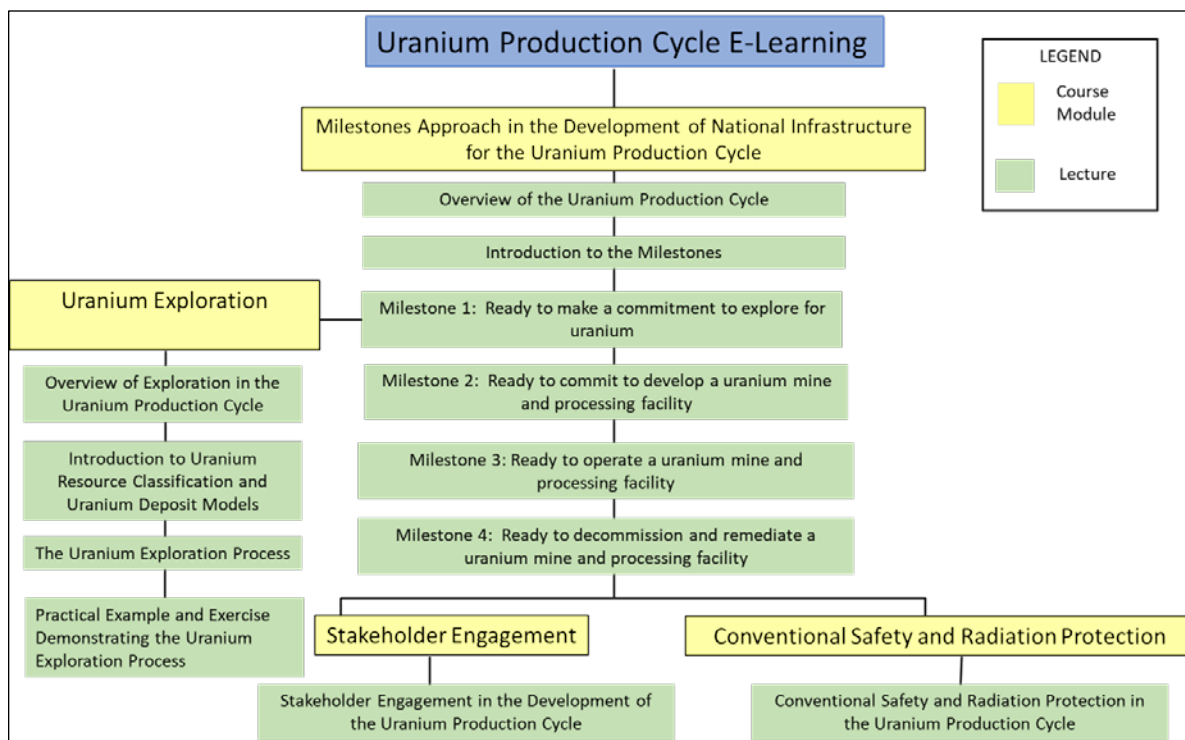


Figure 1: E-learning modules to support the uranium production cycle that are currently under development at the IAEA.



---

**15:00-15:45 Discussion, réflexion, actions coordonnées et clôture**

## Liste de participants

ABDELRAZEK	Maher	Global Ore Discovery	abdelrazek.maher@gmail.com
ACHIN	Nicolas	Orano Mining	nicolas.achin@orano.group
BENEDICTO	Antonio	Géosciences Paris Saclay	antonio.benedicto@universite-paris-saclay.fr
BESANCON	Clémence	Orano Mining	clemence.besancon@orano.group
BILLEBAUD	Annick	IN2P3 CNRS	billebaud@lpsc.in2p3.fr
BOCK	Khaled	Géosciences Rennes	khaled.bock@univ-rennes1.fr
BONNET	Marine	Mines ParisTech	marine.bonnet@minesparis.psl.eu
BOULOGNE	Quentin	Géoresources Lorraine	quentin.boulogne@univ-lorraine.fr
BOURGES	Mathieu	Géoresources Lorraine	mathieu.bourges@univ-lorraine.fr
BLAISE	Thomas	Géosciences Paris Saclay	thomas.blaise@universite-paris-saclay.fr
BRANQUET	Yannick	Géosciences Rennes	yannick.branquet@univ-orleans.fr
BROUAND	Marc	Orano Mining	marc.brouand@orano.group
BRUNETON	Patrice	Auditeur libre	patrice.bruneton@gmail.com
BULLIARD	Manon	Géosciences Montpellier	manon.bulliard@umontpellier.fr
CAUMARTIN	Patrick	Auditeur libre	patorisu87@gmail.com
CHAPON	Virginie	CEA	virginie.chapon@cea.fr
CHARLET	Laurent	Auditeur Libre	charlet38@gmail.com
COLLET	Antoine	Mines ParisTech	antoine.collet@orano.group
COPPIN	Frédéric	IRSN/PSE-ENV/SPDR/LT25	frederic.coppin@irsn.fr
COULIBALY	Kadogogon Mohamed	Eramet	km.coulibaly@eramet.com
COURTIN	Alexandra	Université Paris Saclay	alexandra.courtin@universite-paris-saclay.fr
CUNEY	Michel	Géoresources Lorraine	michel.cuney@univ-lorraine.fr
DAGNELIE	Romain	CEA	romain.dagnelie@cea.fr
DARRICAU	Louise	IRSN / Géoresources Paris Saclay	louise.darricau@irsn.fr
DESCOSTES	Michael	Orano Mining	michael.descostes@orano.group
DUFRECHOU	Gregory	Orano Mining	gregory.dufrechou@orano.group
ELDURSI	Khalifa	Université de Bengazi (Lybie)	khalifa.eldursi@gmail.com
ESCARIO PEREZ	Sofia	Orano Mining	sofia.escario-perez1@orano.group
FERRERES	Selena	IPHC CNRS	selena.ferrerres@iphc.cnrs.fr
FEVRIER	Laureline	IRSN - Cadarache	Laureline.ferrerres@irsn.fr
FITOUSSI	Caroline	ENS-Lyon	caroline.fitoussi@ens-lyon.fr
FORBES	Pierre	Orano Mining	pierre.forbes@orano.group
FRAISSE	Henri	Auditeur libre	hr.fraisse@gmail.com
GABRIEL	Sophie	CEA	sophie.gabriel@cea.fr
GERARDIN	Marie	Géoresources Lorraine	marie.gerardin@univ-lorraine.fr
GERBEAUD	Olivier	Orano Mining	olivier.gerbeaud@orano.group
GORNY	Josselin	IRSN	josselin.gorny@irsn.fr
GRANDPRAT	Michel	Auditeur libre	mgrandprat23@orange.fr
GRIZARD	Pierre	Orano Mining	pierre.grizard@orano.group
GUILLON	Sophie	Mines ParisTech	sophie.guillon@mines-paristech.fr
HANLY	Adrienne	IAEA	A.Hanly@iaea.org
HAURINE	Frédéric	Géosciences Paris Saclay	frederic.haurine@universite-paris-saclay.fr
LACROIX	Elodie	IJLab Paris Saclay	emilie.lacroix@orano.group
LE BEUX	Anthony	Orano Mining	anthony.lebeux@orano.group
LEDRU	Patrick	Géoresources Lorraine	patrick.ledru@univ-lorraine.fr
LEFEUVRE	Hugo	Université de Poitiers	hugo.lefeuvre@univ-poitiers.fr
L'HERMITE	Pierre	Sorbonne Université	pierre.l_hermite@upmc.fr
LOPEZ	Michel	Géosciences Montpellier	milolo34@gmail.com
MARCHAL	Paul	Géoresources Lorraine	paul.marchal@univ-lorraine.fr
MARTZ	Pierre	Orano Mining	pierre.martz@orano.group
MARQUIS	Guy	EOST Université de Strasbourg	gmarquis@unistra.fr
MEGNENG	Melissa	ENS Libreville (Gabon)	megnengmelissa@yahoo.fr
MERCADIER	Julien	Géoresources Lorraine	julien.mercadier@univ-lorraine.fr
MICHELS	Raymond	Géoresources Lorraine	raymond.michels@univ-lorraine.fr
MIESZKALSKI	Romain	Orano Mining	romain.mieszka@orano.group
MILESI	Gaétan	Géoresources Lorraine	gaetan.milesi@univ-lorraine.fr
MOHAND-SAID	Ali	Université de Strasbourg	amohandsaid@unistra.fr
MOREAU	Frederique	Géosciences Rennes	frederique.moreau@univ-rennes1.fr
OBIN	Thomas	Géoresources Lorraine	thomas.obin@univ-lorraine.fr
OUKHALAHCEN	Rajaa	GS Elbilila Khouribga (Maroc)	roukhalahcen@gmail.com
PALIAKOVSKA	Kateryna	Géoresources Lorraine	kateryna.poljakovska@gmail.com
PILI	Eric	CEA/DAM-Île de France	eric.pili@cea.fr
PLAGNES	Valérie	Sorbonne Université	valerie.plagnes@sorbonne-universite.fr
POLAK	Christian	Orano Mining	christian.polak@orano.group
POLIAKOVSKA	Kateryna	Géoresources Lorraine	kateryna.poljakovska@gmail.com
PRUDHOMME	Antoine	Eramet	antoine.pruddomme@eramet.com
RALLAKIS	Dimitrios	Géoresources Lorraine	dimitrios.rallakis@gmail.com
REILLER	Pascal	CEA	pascal.reiller@cea.fr
REYX	Jean	Auditeur libre	jean.reyx@gmail.com
ROUSELLE	Jacky	SGF	jackyrouselle@orange.fr
SAILHAC	Pascal	GEOPS	pascal.sailhac@u-psud.fr
SARDINI	Paul	Université de Poitiers	paul.sardini@univ-poitiers.fr
SERDOUN	Mehdi	Géoresources Lorraine	mehdi.serdown@univ-lorraine.fr
SOL	Roland	Auditeur libre	roland.sol@outlook.com
SOLIVA	Roger	Géosciences Montpellier	roger.soliva@umontpellier.fr
TISON	Jean-Louis	Groupe Régional Ile de France Ouest	jtison@orange.fr
TOUBON	Hervé	Orano Mining	herve.toubon@orano.group
VIRLOGEUX	Denis	Auditeur libre	denis.virlogeux@orange.fr
VINCIGUERRA	Alessandro	Université de Strasbourg	avinciguerra@unistra.fr
ZEBRACKI	Mathilde	IRSN Fontenay-aux-Roses	mathilde.zbrucki@irsn.fr