

Les gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca (Canada) : nouveaux challenges pour l'étude de ces systèmes hydrothermaux exceptionnels

Gaétan Milesi¹, Thomas Obin¹, Mehdi Serdoun¹, Paul Marchal¹, Ali Mohand Said², Alessandro Vinciguerra², Quentin Boulogne¹, Manon Bulliard¹⁻³, Roger Soliva³, Guy Marquis², Pierre Martz⁴, Elodie Williard⁴, Olivier Gerbaud⁴, Magdalena Anderson⁵, Anthony Le Beux⁴ et Julien Mercadier¹.

Introduction

Situé principalement dans la partie nord de la province de la Saskatchewan (Canada), le bassin paléo- à mésoprotérozoïque de l'Athabasca (1.76-1.5 Ga) (Fig. 1) est la seule province géologique productrice d'uranium au Canada, faisant en 2022 de ce pays le second producteur mondial de cette ressource (15% du total mondial), seulement dépassé par le Kazakhstan (OECD-NEA/IAEA, *Uranium 2022*). L'essentiel des ressources en uranium de l'Athabasca se présente sous la forme de gisements dits « de type discordance » (en anglais *unconformity-related uranium deposits*) caractérisés par leurs très hautes teneurs, excédant 15% U₃O₈ en moyenne, comme c'est le cas à McArthur River ou Cigar Lake.

Ces teneurs importantes font du bassin de l'Athabasca la référence mondiale pour les gisements d'uranium dits « haute teneur/fort tonnage ». Du fait de leur teneur extrême (localement supérieure à 80% U₃O₈), la taille de ces gisements est remarquablement restreinte. La longueur du gisement de Cigar Lake est ainsi équivalente à celle de l'avenue des Champs-Élysées, mais avec une épaisseur et une largeur de seulement quelques dizaines de mètres (Pagel *et al.*, 1993). On réalise de fait la difficulté à cibler ces zones minéralisées si l'on considère l'échelle du district minier de l'Athabasca, qui présente une superficie équivalente à un pays comme la Suisse (~100 000 km²). L'approche est d'autant plus complexe que ces gisements se localisent sous une couverture sédimentaire et que l'exploration minière se concentre sur des zones d'épaisseur de plus en plus importante nécessitant le développement de nouvelles méthodes d'exploration (Kerr and Wallis, 2014).

De telles concentrations d'uranium sont le reflet de processus hydrothermaux locaux de très forte efficacité sur lesquels les compagnies minières et les laboratoires académiques travaillent

depuis plus de 60 ans. L'exploration dans cette zone a permis d'obtenir plus de 70 000 forages majoritairement carottés qui s'accompagnent d'un jeu de données extrêmement détaillées incluant géochimie, minéralogie, géologie structurale, géophysique ou pétrophysique par exemple (Ledru *et al.*, 2018). Le lancement, en novembre 2021, de la Chaire Industrielle ANR Géomodèle Intégré 3D (Geomin3D), d'aide à l'exploration des géoressources a pour but de développer de nouvelles approches scientifiques et industrielles appliquées à la compréhension, à la caractérisation et à l'exploration des gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca. Elle fédère des chercheurs académiques nancéiens, strasbourgeois et montpelliérains avec des géologues et scientifiques d'Orano. Ces travaux se concentrent sur deux axes qui seront développés dans cet article : (i) Le développement de nouvelles approches géophysiques et (ii) la révision du modèle métallogénique des gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca, fondée sur les données acquises par les compagnies d'exploration et sur de nouvelles données de laboratoire.

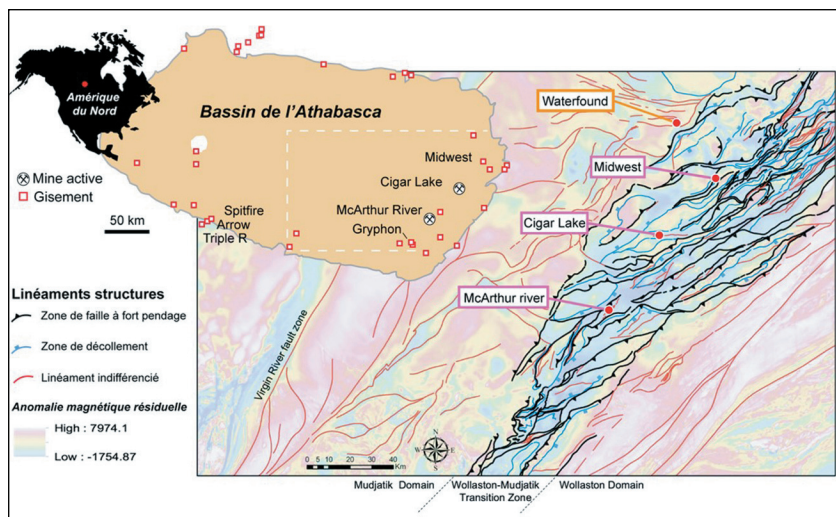


Figure 1. Vue du bassin de l'Athabasca où les principales mines d'uranium et gisements découverts sont indiqués. Carte d'anomalie magnétique de la partie est du bassin d'Athabasca, avec les principales structures replacées (d'après Ledru *et al.*, 2022). On peut noter que les mines sont essentiellement dans les zones vertes/bleues de faible susceptibilité magnétique qui correspondent à un socle pélitique (méta-sédimentaire) ou altéré.

1. GeoRessources – CNRS, LabCom CREGU, Université de Lorraine – Vandœuvre-lès-Nancy, France.
2. ITES Strasbourg – CNRS, EOST, Université de Strasbourg – Strasbourg, France.
3. Geosciences Montpellier – CNRS, Université de Montpellier – Montpellier, France.
4. Orano Mining – Chatillon, France.
5. Orano Canada inc. – Saskatoon, Canada.

Modèle métallogénique des gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca

Le modèle métallogénique couramment admis et synthétisé par Jefferson *et al.* (2007) considère que ces gisements, dits hydrothermaux, résultent de circulations massives de fluides originaires du bassin (saumures) dans des pièges structuraux et physico-chimiques situés à l'intersection entre des structures graphiteuses sub-verticales s'enracinant dans le socle et des discontinuités sub-horizontales correspondant principalement à la surface de discordance du bassin de l'Athabasca (Fig. 2). Les gisements sont ainsi tous spatialement associés à la discordance entre le bassin et le socle ce qui leur vaut leur dénomination de gisement de « type discordance », et les minéralisations peuvent être localisées dans le bassin, à la discordance ou dans le socle, en fonction du cadre structural, des chemins de circulations des fluides et des mécanismes de précipitation de l'uranium. Tous les gisements connus sont spécifiquement associés spatialement aux structures graphiteuses redressées appelées conducteurs graphiteux.

Le moteur des circulations hydrothermales est la réactivation des structures du socle, et en particulier des conducteurs graphiteux. Grâce à ce mécanisme, les saumures en provenance du bassin circulent à l'interface bassin/socle et interagissent avec les roches encaissantes. Cette interaction modifie les propriétés physiques et les compositions chimiques de la saumure et des roches, favorisant la formation de fluides minéralisateurs et d'altérations hydrothermales de type argileuse et d'extension métrique à kilométrique selon l'intensité des pro-

cessus. L'uranium précipite ensuite massivement à partir de ces saumures modifiées par interaction avec les agents réducteurs de type solides (roches), liquides et/ou gaz présents le long des conducteurs graphiteux (Martz *et al.*, 2019). Ces minéralisations d'une extrême richesse mais de très petit volume résultent donc de circulations des différents fluides à l'interface bassin-socle en lien avec la réactivation tectonique de structures héritées du socle. La présence de réservoirs de fluides et la réactivation de structures préexistantes ont été des éléments clés il y a plus d'un milliard d'années pour les échanges liquide/gaz/roche à l'origine de la mobilisation, du transport et du dépôt des métaux dans ces gisements. La découverte au début des années 2000 de gisements d'uranium à forte teneur dans des failles de socle localisées jusqu'à plus d'un kilomètre sous la discordance : Eagle Point, Gryphon à l'est ou Arrow, Spitfire, Triple R à l'ouest..., a permis de réévaluer les modèles conceptuels de mise en place des gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca et ancre le rôle majeur de la réactivation des failles pour la circulation de saumures (Kerr and Wallis, 2014).

Bien que basé sur l'étude de nombreuses zones minéralisées, le modèle métallogénique des gisements d'uranium du bassin d'Athabasca demeure incomplet. Il est entre autres particulièrement difficile de hiérarchiser les paramètres géologiques à l'origine de ces minéralisations d'uranium ou de décorrélérer les événements tectoniques et hydrothermaux pré-, syn- et post- minéralisation. La vision structurale de ces gisements reste limitée et résulte essentiellement de l'interprétation des carottes de forages. Ce qui s'ajoute à une mauvaise connaissance du contexte géodynamique au moment de la mise en place

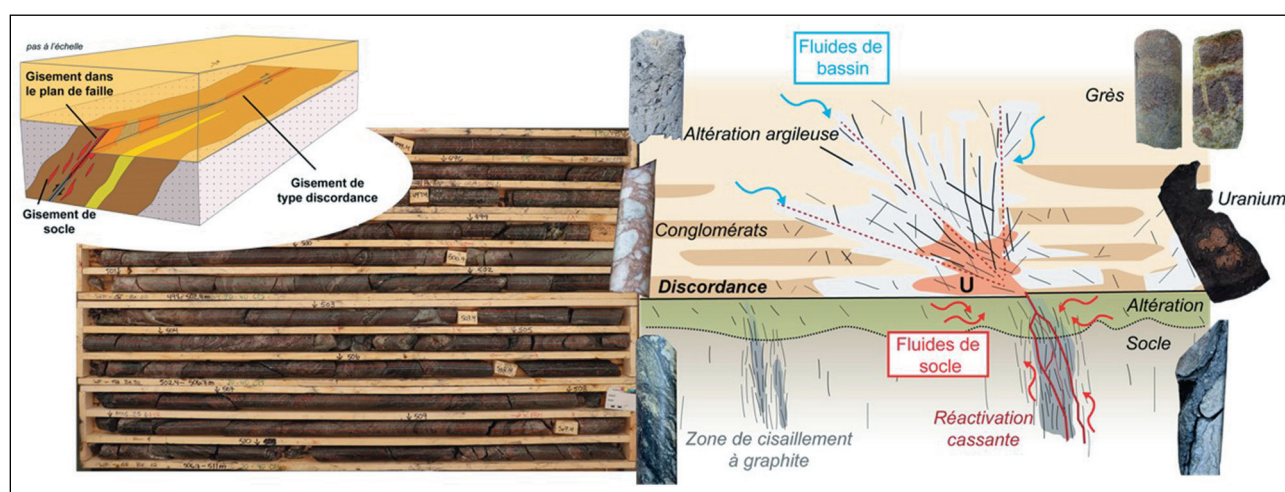


Figure 2. Modèle géologique conceptuel des différents types de gisement présents dans le bassin de l'Athabasca (modifié d'après Thomas, 2016). Exemple d'une boîte de carotte d'exploration de socle provenant du projet de Waterfound River au nord-est du bassin et modèle conceptuel d'un gisement de type discordance basé sur les observations sur carottes (modifié d'après Milesi *et al.*, 2023).

de ces minéralisations (~1.4 Ga). La comparaison avec des systèmes équivalents du même âge est elle aussi difficile car elle se limite au bassin du Thelon, également au Canada ou au bassin de McArthur en Australie.

Les guides d'exploration pour l'uranium

Considérant le modèle de formation des minéralisations uranifères évoqué précédemment, les stratégies d'exploration déployées par la grande majorité des compagnies minières opérant en Athabasca s'appuient sur deux étapes successives, à savoir (i) l'approche géophysique pour définir la localisation des conducteurs graphiteux et les empreintes hydrothermales potentiellement associées, puis (ii) l'étude des échantillons issus des carottes de forage : levé de logs, analyse minéralogique, pétrophysique et mesures diagaphiques afin d'évaluer la fertilité et le potentiel minéralisateur associé à un conducteur. Des analyses complémentaires sont réalisées à l'issue de la campagne de forage pour affiner les données acquises comme l'étude pétrographique sur lame mince ou la géochimie roche totale.

L'approche géophysique

Dans les systèmes hydrothermaux fossiles, il ne reste souvent qu'une fraction limitée des fluides mobilisés lors de leurs périodes actives. La conductivité électrique des roches est donc aujourd'hui dominée par des phases solides conductrices telles que le graphite ou la pyrite, et par des zones argileuses riches en eau. La mobilité forte de la silice dans ces systèmes, marquée par des phénomènes de dissolution/précipitation du quartz, peut générer des zones de conductivité plus faible. De plus, l'altération provoquée par les paléo-circulations hydrothermales a pu fortement diminuer la susceptibilité magnétique des roches du socle.

La géophysique aéroportée avec des systèmes de prospection électromagnétique (EM) et magnétique est donc d'abord utilisée sur des permis d'exploration de plusieurs dizaines de km² pour détecter des zones d'anomalies magnétiques et de conductivité électrique. Dans un premier temps les zones ayant des anomalies magnétiques négatives et de fortes conductivités sont privilégiées. En effet, les méthodes EM aéroportées sont basées sur le principe de l'induction EM qui sera d'autant plus forte que la conductivité du sous-sol sera élevée. Les conducteurs graphiteux marqués par cette signature sont considérés comme plus favorables à la présence de minéralisations. Il en résulte une carte de répartition et de catégorisation du potentiel des conducteurs graphiteux de la zone explorée.

Quand l'épaisseur du bassin sédimentaire est faible (~100 m), les techniques d'EM aéroportées permettent de positionner les forages précisément en fonction des cibles dans le socle. Néanmoins, au fur et à mesure de l'épaississement de la couverture sédimentaire, des méthodes au sol sont déployées pour améliorer la détection des corps graphiteux. Des techniques de tomographie par méthode électrique sont également mises en œuvre au sol car l'EM n'est pas la méthode la plus adaptée pour définir les zones d'altération argileuse. Ces campagnes de prospection au sol sont réalisées en hiver ou en été, lorsque les sites sont facilement accessibles. Deux approches sont privilégiées :

- L'électromagnétisme (EM) temporel au sol. La méthode utilise une « boucle » de transmission qui génère un champ magnétique primaire qui peut induire un courant électrique (dit de Foucault) dans les corps conducteurs, notamment les corps graphiteux. Lorsque le champ EM primaire est arrêté, le champ induit décroît et génère lui-même un champ EM secondaire qui à son tour est mesuré à la surface à l'aide d'une autre boucle, une bobine d'induction ou un capteur SQUID. Le géophysicien va déplacer ces équipements de transmission et de réception le long d'un profil pour détecter la position du corps conducteur. Grâce à des outils de modélisation, ce champ EM secondaire est reproduit en simplifiant géométriquement les corps graphiteux en utilisant des objets de type plaques conductrices. Cette modélisation permet de donner une estimation de la position, de la profondeur, de l'orientation et du pendage de l'objet détecté.
- La tomographie de résistivité électrique par courant continu. C'est une méthode géophysique de surface qui consiste en l'injection d'un courant électrique dans le sol à travers deux électrodes et la mesure de différence de potentiels sur d'autres électrodes de mesure. À l'aide d'outils d'inversion, la distribution de la résistivité électrique du sous-sol est reconstruite. Cette méthode permet, en plus de détecter les corps graphiteux, d'être sensible à des variations plus faibles de la résistivité notamment liées à la présence d'altération argileuse ou de silification/désilicification.

Les résultats des modèles sont ensuite comparés et les zones présentant des plaques conductrices associées à des altérations seront privilégiées comme cibles pour l'implantation de forages. Une séquence de travail géophysique pour le gisement de Shea Creek (ouest du bassin de l'Athabasca) est présentée dans la Figure 3.

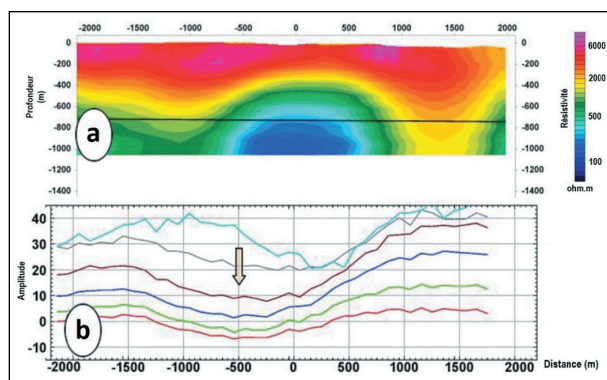


Figure 3. Résultats géophysiques sur le gisement d'uranium de Shea Creek (Athabasca). (a) coupe de résistivité obtenue par inversion d'un levé de tomographie électrique. Le trait horizontal noir indique la profondeur de la discordance. (b) mesures d'EM Moving Loop pour 6 temps de mesure. La flèche indique la position du toit de la plaque conductrice représentant un corps graphiteux. Elle correspond au minimum de la réponse EM, sa position coïncide avec une zone de faible résistivité qui s'étend au-dessus de la discordance (modifiée d'après Nimeck et Koch, 2008).

La campagne de forage

Les campagnes géophysiques permettent l'identification des zones conductrices cibles qui sont ensuite testées par forage. Les géologues d'exploration effectuent une étude de détail sur les carottes au cours des campagnes de forage afin de référencer différents types de marqueurs considérés comme empreintes des gisements, tels que la présence de structures, d'altérations hydrothermales et de minéralisations (Fig. 4). Des mesures minéralogiques (spectroscopie VNIR-SWIR) et pétrophysiques *in situ* sont également réalisées à intervalles réguliers sur les carottes de forage, avec pour but de détecter la présence d'altérations ou de modifications du milieu géologique indicatives de la proximité d'une minéralisation d'uranium. Des mesures de diagraphies de puits sont également réalisées, principalement la diagraphie gamma ray pour détecter la présence de minéralisations d'uranium, et la diagraphie de résistivité pour évaluer l'intensité des phénomènes de silicification/désilicification, argilisation, et graphitisation le long du puits. Pour les forages présentant un réseau structural complexe ou une altération importante, des données d'imagerie de paroi acoustiques sont parfois acquises permettant de mieux détailler les différents types de structures en présence et leurs orientations.

Ces informations sont collectées et utilisées pour définir le site d'un nouveau forage d'exploration. Une dizaine de forages sont réalisés

selon ce protocole par projet au cours d'une campagne d'exploration. Des échantillons sont systématiquement prélevés le long des forages pour être analysés en laboratoire (prestataire) au retour de la campagne d'exploration. Des lames minces peuvent être réalisées puis étudiées au centre d'Orano Canada Inc à Saskatoon pour affiner l'identification minérale. Un rapport de synthèse est ensuite établi pour présenter les résultats de la campagne et préparer les futures actions. Les décennies d'exploration dans le bassin de l'Athabasca ont permis ainsi d'acquérir un grand nombre de données de nature diverse sur l'ensemble du bassin.

Nouveaux challenges pour l'exploration et la compréhension des systèmes uranifères de type discordance

Du fait de leurs caractéristiques de formation, les gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca sont des objets à très forte teneur, très localisés et avec des empreintes spatialement restreintes. La compréhension et l'exploration de ce type d'objets font face à des challenges importants qui sont au cœur des activités de recherche développées dans la chaire industrielle ANR Gemin3D.

Le premier challenge est l'exploitation optimisée de l'ensemble des données acquises au cours des campagnes d'exploration. L'exploitation de ces données a pour but de mieux comprendre et contraindre les empreintes géophysiques, minéralogiques, géochimiques ou structurales des différentes zones minéralisées à l'échelle du bassin, pour améliorer les procédures de qualification des futures campagnes d'exploration. Une question légitime est ainsi l'unicité potentielle des empreintes des différents gisements du bassin. Les résultats attendus de ce travail de comparaison, appuyé par des outils d'apprentissage machine et d'intelligence artificielle, vont constituer un pilier majeur pour la compréhension des différentes signatures

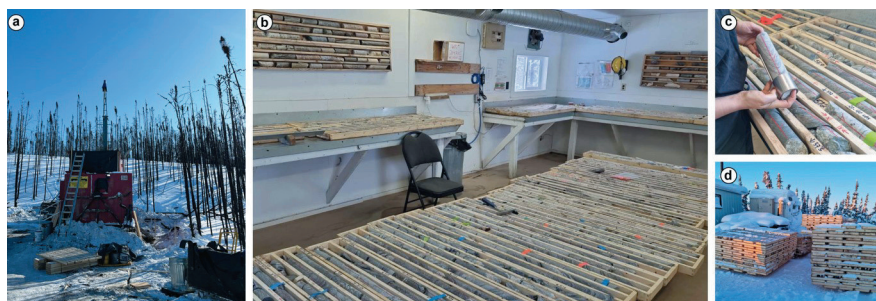


Figure 4. Campagne d'hiver 2023 dans le nord-est du bassin de l'Athabasca : (a) plateforme de forage sur le projet Waterfound, (b) intérieur d'un « CoreShack » dans lequel les géologues d'exploration étudient des carottes de forage, (c) différents levés géologiques sont réalisés comme les mesures de l'orientation des structures, (d) exemple de carottes réalisées durant la campagne d'exploration.

LES MODÈLES CONCEPTUELS DE CIRCULATIONS HYDROTHERMALES ET LES APPROCHES D'EXPLORATION

associées à la mise en place de l'uranium dans le bassin de l'Athabasca, et la variabilité de celles-ci selon la taille et la localisation des gisements.

La géophysique constitue le second pilier de nos actions. L'approche traditionnelle de l'exploitation des mesures géophysiques dans l'Athabasca telle que discutée ci-dessus a fait ses preuves. Néanmoins, il n'est pas toujours évident de valider la présence d'altération, critère primordial de favorabilité, dans les résultats de la tomographie électrique lorsque des corps graphiteux sont présents. En effet, la géométrie des corps graphiteux est très fine comparée à la profondeur d'investigation. De plus, le contraste de conductivité de ces corps avec leur encaissant est tel que les techniques d'imagerie par inversion peinent à produire des objets clairement identifiables entre le graphite et l'altération. Des anomalies souvent coalescentes sont visibles et semblent diffuser dans les sédiments de couverture sans qu'il soit possible d'attester efficacement de leur présence sans forage (sauf en cas d'altération massive et de grande emprise). Pour aborder les problématiques précédemment décrites, deux pistes de réflexion sont actuellement travaillées :

- La première reste dans l'univers géophysique : plutôt que de modéliser séparément les données EM aéroportées, terrestres et les données de tomographie électrique, qui sont sensibles toutes les trois à la résistivité électrique, pourquoi ne pas les intégrer dans un cadre commun ? Les méthodologies dites *d'inversion jointe* peuvent éventuellement combiner les points forts et la sensibilité de ces différentes mesures pour obtenir un seul modèle de résistivité qui contient à la fois les conducteurs graphiteux révélés par l'EM et par la tomographie électrique, et ceux liés à l'altération qui ne sont détectés que par la tomographie. Cette approche pourrait permettre de mieux déconvoluer ces deux objets et de diminuer l'incertitude quant à la présence ou non d'altération.
- La seconde vise à utiliser la géophysique comme étalon de mesure des scénarios géologiques de présence d'un éventuel gisement. Mettant à profit la base de connaissances sur les propriétés physiques des roches construite à partir des diagraphies et des mesures sur carottes, les réponses géophysiques des différents scénarios peuvent être calculées puis confrontées aux données acquises. Cette approche a l'avantage de mettre la réalité géologique au centre du système et offre une grande flexibilité dans le choix des paramètres d'étalonnage : on pense bien sûr aux données EM et électriques mais on peut y ajouter la gravimétrie, le magnétisme, la sismique, ... Cette approche peut également tirer parti des développements en intelligence artificielle, par exemple pour identifier les caractéristiques communes des scénarios qui satisfont le mieux aux données.

Le troisième pilier s'appuie sur le développement et l'application de nouvelles approches analytiques et conceptuelles afin d'affiner les modèles de formation de ces gisements. L'amélioration des connaissances sur les notions de chronologie, temporalité et de durée des processus à l'origine de la formation de ces gisements ou de leurs perturbations fait partie des différentes pistes testées. L'avènement des méthodes de datation *in situ* (U-Pb, Rb-Sr...), la disponibilité de matériaux de référence permettant de dater de nouveaux minéraux, et l'amélioration des protocoles de caractérisation et datation des argiles, sont ainsi considérés comme prometteurs. En effet, nos premiers résultats démontrent que ces gisements tels qu'ils sont observés aujourd'hui résultent d'une superposition de circulations hydrothermales successives associées à des contextes tectoniques différents. Dans un contexte évolutif depuis plus d'un milliard et demi d'années, la meilleure définition des caractéristiques structurales et cinématiques de mise en place des minéralisations uranifères, avec une caractérisation fine de l'âge de leur dépôt, permettra d'isoler les circulations hydrothermales clés associées aux minéralisations d'uranium et leur contexte géodynamique de mise en place.

Une autre approche innovante choisie pour améliorer nos connaissances de ces objets fossiles et non affleurants est l'analogie avec d'autres systèmes géologiques, fossiles ou actifs, pour lesquels des paramètres et mécanismes sont mieux connus que pour les gisements d'uranium de type discordance. Ainsi, la comparaison avec des systèmes hydrothermaux plus récents et mieux connus par exemple dans leur cadre géodynamique ou tectonique peut permettre d'apporter des clés de compréhension pour les gisements fossiles d'uranium. Ce dossier de *"Géologues"* constitue en cela un parfait exemple des analogies entre systèmes minéralisés fossiles et circulation hydrothermales actives et apporte des éléments de réflexion pour leur compréhension.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de Recherche et Orano qui permettent la réalisation de ces travaux au travers du projet Geomin3D (ANR-21-CHIN-0006). Les chercheurs de l'ITES remercient le Centre HPC de l'Université de Strasbourg, financé par Equipex Equip@Meso et le CPER Alsacalcul/Big Data.

Bibliographie

- La bibliographie de cet article se trouve sur le site de la SGF : www.geosoc.fr