

## Sujet de thèse - Cycles du soufre, du fer et du carbone et rôle sur la formation des minéralisations U de type discordance

**Objectif** : comprendre le rôle du soufre, du fer et du carbone et de leur cycle géochimique dans la formation des gisements d'uranium de type discordance

**Etat des lieux et problématique** : Le soufre, le fer et le carbone sont des éléments ubiquistes des gisements d'uranium, dans lesquels ils sont présents possiblement sous différentes formes (sulfures, sulfates, carbonate, graphite, matière organique, oxydes, oxyhydroxydes, ...) et dans différentes phases (minéraux, fluides, gaz,...). Ces éléments sont depuis longtemps considérés comme clé pour la formation des gisements d'uranium en tant que qu'échangeurs d'électrons potentiels pour la réduction de l' $U^{6+}$  en  $U^{4+}$  et donc la précipitation des minéralisations. Les liens U-Fe-S-C ont été précédemment étudiés avec de nombreux travaux portant par exemple sur la réactivité des sulfures (dissous ou minéralisés) vis à vis de l'uranyle pour des applications principalement dédiées au stockage des déchets radioactifs. L'implication des bactéries sur les réactions S-U a aussi été étudié, en particulier pour les gisements d'uranium de basse température (25°C) et à faible salinité. Peu de données sont par contre connues concernant le rôle du carbone, du fer et du soufre dans la formation des gisements de type discordance bien que ces éléments soient particulièrement présents et mobiles dans ces gisements hydrothermaux (125-200°C) impliquant des fluides très salés (saumures). Un acquis des travaux scientifiques et géologiques est la démonstration que ces gisements d'uranium de classe mondiale se forment à la discordance entre un bassin sédimentaire et un socle, en corrélation spatiale avec une lithologie spécifique du socle riche en sulfures et graphite (shear zone graphiteuse). Différentes théories sont aujourd'hui proposées quant à l'action de Fe-S-C sans contraintes claires validant leur pertinence, ce qui pose un problème majeur quant à la définition des processus associés à la formation de ces gisements aux teneurs exceptionnelles (jusqu'à 20% de teneur U) et donc à leur découverte.

Le but de cette thèse est donc de définir de façon spécifique le rôle du soufre, du fer et du carbone dans la formation des gisements de type discordance. La cible géologique choisie est le bassin d'Athabasca, au Canada, qui abrite les plus grand nombre de gisements de ce type au niveau mondial. Ces travaux seront réalisés en collaboration avec l'entreprise Orano, leader mondial du cycle de l'uranium.

**Plan de recherche** : cette thèse couplera deux axes de recherche : un axe pétrographique et géochimique et un axe expérimental. Le premier axe visera la qualification des cycles Fe-C-S dans ces gisements via une succession de travaux pétrographiques et géochimiques, dont un volet important portera sur la caractérisation isotopique des différents porteurs (minéral, fluide, gaz). Un travail spécifique d'évaluation des variations C-Fe-S dans les shear zones graphiteuses à l'échelle du socle de l'Athabasca sera réalisé dans le but de proposer une classification de potentiel réducteur pour cette lithologie. L'axe expérimental se basera sur des tests en autoclave afin de définir la réactivité des différentes phases et espèces Fe-C-S vis-à-vis de l'uranium aux conditions géologiques connues pour la formation des gisements d'uranium. Ce travail permettra de proposer des mécanismes réactionnels ainsi que des bilans de masse qui seront confrontés aux observations et bilans géochimiques faits au cours de l'axe 1. Les données obtenues seront ensuite utilisées pour nourrir des modélisations physico-géochimiques via différents logiciels dédiés.

**Réalisation du travail** : des missions de terrain sur différents sites d'exploration d'Orano sur le bassin d'Athabasca seront effectuées afin d'étudier les échantillons de forage sur place et de prélever des échantillons pour la réalisation des travaux de laboratoires (dépendant de l'évolution des conditions sanitaires). Le travail de laboratoire sera principalement réalisé au laboratoire GeoRessources de Nancy, ainsi qu'en collaboration avec le CRPG (Nancy) pour les mesures isotopiques et IsTerre pour le volet expérimental. Le projet repose sur un volet analytique important (microscopies, microsondes électronique et ioniques, Raman, XRF, LIBS, LA-ICP-MS), que ce soit en laboratoire ou sur le terrain, pour lequel l'ensemble des équipements est disponible à Nancy.

GeoRessources est un des laboratoires académiques de référence pour l'étude des gisements de métaux, avec près de 200 personnes ([georessources.univ-lorraine.fr](https://georessources.univ-lorraine.fr)), avec des collaborations de long terme avec des entreprises minières et pétrolières de premier rang. GeoRessources est considéré comme un des centres de recherche de référence mondiale pour l'étude des gisements d'uranium, avec plus de 40 ans d'expertise sur ce sujet. GeoRessources fait partie de l'Université de Lorraine (<https://www.univ-lorraine.fr>), qui est une des universités de référence en Europe avec plus de 55000 étudiants et 600 laboratoires de recherche. Le département des Sciences de la Terre est un des plus importants de France, avec 4 laboratoires abritant plus de 300 chercheurs et 1000 étudiants. L'Université de Lorraine est classée 11<sup>ème</sup> au classement 2020 de Shangai pour la thématique « Mining and mineral engineering », première université européenne dans ce domaine de recherche.

Encadrement Universitaire : J. Mercadier, P. Ledru, R. Michels, M. Cathelineau (laboratoire GeoRessources, Nancy)

Encadrement Orano : R. Chemillac (Orano Canada) et M. Brouand (Orano France)

Collaborations : C. Card (Service Géologique du Saskatchewan, Canada), L. Truche (IsTerre, Grenoble)

Période : fin 2020-fin 2023

Contacts : Julien Mercadier ([julien.mercadier@univ-lorraine.fr](mailto:julien.mercadier@univ-lorraine.fr), 0372745559); Patrick Ledru ([patrick.ledru@univ-lorraine.fr](mailto:patrick.ledru@univ-lorraine.fr), 0372745523)