



Proposition de thèse : Caractérisations structurales et des conditions de circulations fluides dans l'environnement des gisements de type discordance : exemple du gisement de Cigar Lake (Saskatchewan, Canada)

Thèse à réaliser au sein du laboratoire GeoRessources à Vandoeuvre-lès-Nancy

Direction : Y.Géraud (Université de Lorraine), J. Mercadier (CNRS), P. Ledru (Orano Canada)

Financement: Orano via le CREGU (Centre de Recherche sur la Géologie des Matières Premières Minérales et Energétiques), localisé à Vandoeuvre-lès-Nancy

Période de réalisation: juin 2019-mai 2022

L'objectif de cette thèse est d'apporter des nouvelles contraintes sur le contexte structural associé à la circulation des fluides dans l'environnement des gisements d'uranium de type discordance du bassin d'Athabasca (Saskatchewan, Canada). Le but est de comprendre comment les différents types de fluide ont pu circuler à l'interface entre un bassin sédimentaire (le bassin d'Athabasca) et un socle archéen à paléoprotérozoïque, pour former les gisements d'uranium les plus riches au monde.

Contexte : les gisements d'uranium de type discordance du bassin d'Athabasca font l'objet de campagne d'exploration depuis plusieurs décennies du fait de leur très haute teneur en uranium (jusqu'à 20% pour les gisements de Cigar Lake et McArthur River par exemple). Plusieurs modèles de formation ont été avancés au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances scientifiques sur ces objets. Certaines contraintes de premier ordre sont aujourd'hui acceptées (comme la nature des fluides minéralisateurs par exemple) mais plusieurs aspects sont encore débattus, limitant la détermination de guides d'exploration efficaces. Parmi ces points de discussion, les contextes géodynamiques et structuraux à l'origine de la circulation des fluides à l'interface bassin – socle et du dépôt de minéralisations uranifères massives sont mal contraints. Les chemins de circulations des différents fluides aux différentes échelles (kms à μm) et les modifications physico-chimiques associées pour les fluides et les roches restent à définir. Cette thèse a pour but d'apporter des réponses à ces questions via 3 objectifs définis ci-dessous et appliqués au gisement de Cigar Lake et à son environnement.

Objectif 1 : Implémentation et validation d'un modèle géologique 3D et caractérisation des structures « vecteurs » des circulations des fluides minéralisateurs.

Il s'agit en premier lieu d'identifier et reconnaître le rôle et la dynamique des différents vecteurs fluide mis en jeu dans les gisements de type discordance (chronologie, géométrie, cinématique, mécanisme

de déformation, conditions pression température de déformation et réactivation), en particulier de déterminer ceux permettant l'infiltration et l'exhaure des fluides minéralisateurs et donc le lessivage de larges domaines de socle et de bassin et les dépôts hydrothermaux et minéralisateurs. Les conditions de fonctionnement et de circulation des fluides dans les différentes failles et shear zones de la zone de Cigar Lake seront spécifiquement étudiées. **L'un des objectifs et de tester l'analogie avec les systèmes géothermaux naturels et améliorés subactuels, objets géologiques actuellement beaucoup mieux contraints au niveau de leur conditions de fonctionnement que les gisements de type discordance formés il y a plus de 1.5 Ga.**

Dans cette perspective, il sera nécessaire d'implémenter et de prioriser dans un modèle géologique 3D les données structurales, microstructurales et pétrophysiques pertinentes sur les différentes structures et zones minéralisées de l'environnement de Cigar Lake en champ proche et en champ lointain du gisement (comme initié pendant la thèse de P. Martz réalisée à GeoRessources). Ces données seront extraites de la base de données Orano et complétées des données acquises sur échantillons. Une étude structurale spécifique et un échantillonnage complémentaire seront conduits par l'étudiant et ses encadrants sur zone afin d'identifier et caractériser les éléments considérés de premier ordre mentionnés ci-dessous. Une attention particulière sera portée sur la chronologie des épisodes de déformation et de déplacement (cinématique, chronologie relative et datation absolue), la géométrie et l'architecture des failles réactivées et néoformées en référence à la discordance, le développement de la perméabilité de fracture (mécanismes de déformation, phénomène de dissolution et de recristallisation, croissance et propagation des failles et de la déformation associée), le remplissage des zones en extension afin de déterminer la nature de la ou les phase(s) fluide(s), son (leurs) origine(s) et sa (leurs) période(s) de circulation. Des compléments quant à la nature des fluides, leur chimie (teneurs en métaux) et leurs propriétés P-T de circulation seront acquis. Cette étude suivra la démarche faite par P. Martz sur le gisement de Cigar Lake.

Une évaluation des conditions les plus favorables à la stimulation et à l'accroissement des perméabilités des structures héritées du socle (orientation par rapport aux contraintes, contrastes rhéologiques, intersection de structures superposées, conditions pression-température, texture, minéralogie...) sera conduite. L'examen et l'analyse de ces différentes données avec les géologues et géophysiciens d'Orano Canada permettra d'en extraire les connaissances géologiques fondamentales pour l'étude de ce type de minéralisations et d'identifier les informations de premier ordre pour construire un modèle géologique 3D structurellement pertinent.

Objectif 2 : Paramètres physiques et chimiques des structures « vecteur » des circulations des fluides minéralisateurs à l'échelle du gisement de Cigar Lake

Une fois identifiées grâce à l'objectif 1, les structures « vecteurs » de circulation des fluides minéralisateurs serviront de référentiel dans un cadre géologique 3D pour une estimation des valeurs des différents paramètres de transferts de fluides, de matière et de chaleur à l'époque de la formation des gisements. En s'appuyant sur le concept de système géothermique, plusieurs paramètres seront définis pour ces structures. Quatre zones doivent être définies : la zone d'infiltration, la zone de recharge, la zone de drainage ascendant et la zone d'accumulation. Pour chacune des zones, l'analyse structurale détaillée dans l'objectif 1 sera complétée par la détermination des éléments constitutifs du réseau poreux et des propriétés pétrophysiques. L'analyse conduite sera multiéchelle (du μm à $>\text{m}$) et les éléments constitutifs seront séparés en objets de grande taille (failles et fractures) et en objet structurant la matrice (pores et fissures). Pour les failles et fractures, il s'agit de reconnaître leur organisation, distribution de longueur, orientation et d'ouverture ou paléo-ouverture, et d'en déduire leur paléoconnectivité au moment des minéralisations. L'estimation des propriétés de stockage (porosité) et de transfert (perméabilité) sera obtenue par calcul. Cette analyse permettra de

hiérarchiser les structures et d'estimer les volumes poreux et les propriétés de transfert pour chacune des zones définies. Ces propriétés peuvent être mesurées directement sur échantillons analogues après une analyse des structures des roches prélevées par forage dans les zones d'intérêt. L'analyse des images acquises sur les lames minces permettra de remonter à la paléo-porosité et aux propriétés associées, dont les paléo-vitesse d'écoulement et les rapports eau-roche. La mesure des propriétés comme la résistivité électrique, la susceptibilité magnétique ou la densité, seront utilisées pour caractériser de façon indirecte la porosité mais pourront également servir à l'interprétation des données de géophysique de subsurface et de puits.

La caractérisation multi-propriétés de ces différents volumes permettra de construire un modèle 3D de la « plomberie » utilisée pour permettre les transferts de fluides, de chaleur et de matière entre les différents compartiments et à l'origine du gisement de Cigar Lake. Ces données serviront de base pour une modélisation THMC (Thermo-Hydro-Mécanique-Chimique) réalisée en parallèle à cette thèse avec l'implication d'un post-doctorat sur la période 2020-2021.

Objectif 3. Extension du domaine modélisé et des structures « vecteurs » de premier ordre : un modèle à l'échelle du projet Waterbury Cigar et vers l'application à d'autres cas d'étude

Ces analyses à l'échelle des structures et des échantillons et la définition des paramètres physiques et chimiques fourniront une représentation du réseau de perméabilité dans l'environnement de Cigar Lake qui sera utilisé pour les modélisations 3D et THMC (voir objectif 2). L'extension de ce domaine modélisé dans le cadre régional du champ hydrothermal nécessitera l'intégration des données géophysiques et géologiques régionales afin de définir le cadre lithologique et structural approprié et si possible la création de modèles de propriétés à plus large échelle. Cette modélisation à l'échelle du projet s'appuiera essentiellement sur la base de données résultant du projet d'exploration Waterbury-Cigar et contenant l'ensemble des données 1D issue des forages, des coupes géologiques et des modélisations géophysiques en 2D, des propriétés physiques mesurées sur échantillons, des modèles géologiques en 3D. L'extension de la représentation du réseau de perméabilité déterminé localement à un modèle de perméabilité à l'échelle du projet, et donc possiblement la caractérisation et la localisation des boucles de circulation des saumures du bassin et de leur interaction avec les fluides et les roches du socle, sera l'objectif final vers lequel tendra ce projet. Si les résultats sont prometteurs sur la zone Waterbury-Cigar, une application à plus large échelle sera réalisée en fin de thèse (détermination de l'objet et échelle suite à validation par Orano)

Résultats et plus-values attendus

- Génération d'un modèle géologique 3D à l'échelle du gisement de Cigar Lake structuralement pertinent
- Détermination du rôle des différentes structures connues dans le fonctionnement de la « plomberie » du gisement de Cigar Lake
- Détermination quantitative des paramètres physiques et chimiques de la « plomberie » d'un gisement d'U de type discordance
- Etude du système Cigar Lake avec une approche « système géothermique », avec comparaison avec des systèmes géothermiques actifs
- Génération de données de premier ordre pour les modélisations 3D et THMC (projets en parallèle)

- Hiérarchisation des structures pour la définition des cibles de forage compte tenu de leurs caractères géométriques et de leurs propriétés physiques.

Conditions de réalisation de la thèse

Cette thèse sera réalisée en étroite collaboration entre les chercheurs du laboratoire GeoRessources et les géologues et géophysiciens d'Orano. Cette thèse se basera premièrement sur des travaux de terrain qui seront réalisés au cours de plusieurs missions sur le site de Cigar Lake. Ces travaux de terrain permettront d'étudier des forages sélectionnés, de réaliser des mesures sur ces forages et de prélever des échantillons pour les analyses en laboratoire. Ces travaux de terrain seront encadrés par les personnels d'Orano réalisant les campagnes d'exploration sur le site de Cigar Lake, ainsi que par les encadrants de la thèse. Ces séjours au Canada permettront aussi d'interagir avec les géologues et géophysiciens d'Orano à Saskatoon (Saskatchewan, Canada) pour appréhender et étudier au mieux les contextes géologiques et géophysiques de la zone d'étude. Les échantillons prélevés seront ensuite étudiés au laboratoire GeoRessources, qui dispose de tous les instruments nécessaires à l'étude proposée, ainsi qu'une équipe dédiée à la modélisation 3D. Des collaborations pourront être établies avec d'autres laboratoires si nécessaire

Le laboratoire GeoRessources est le laboratoire universitaire français de référence sur l'étude des ressources minérales et énergétiques (georessources.univ-lorraine.fr), avec près de 200 personnels dédiés. Le laboratoire s'appuie en particulier sur le CREGU, entreprise privée à l'interface entre les entreprises privées du domaine des ressources minérales et énergétiques et le monde académique. Le CREGU (<https://www.cregu.fr/>) est un acteur scientifique historique de premier plan à l'échelle mondiale sur l'étude des gisements d'uranium, avec plus de 40 ans d'activité dans le domaine. La valorisation des travaux de recherche sera principalement axée sur la publication d'articles scientifiques dans des revues à comité de lecture reconnues internationalement, ainsi que lors de conférences internationales (Goldschmidt et assimilées). Le doctorant sera affilié à l'école doctorale SIREna de l'Université de Lorraine.

Prérequis : le candidat devra aimer travailler en équipe et au sein d'environnements différents. Le candidat devra avoir un bagage scientifique solide. Un master 2 orienté structural/géothermie serait un plus, ainsi que des connaissances en minéralogie. Le candidat devra avoir un niveau d'anglais lui permettant de communiquer de façon autonome avec des anglophones, ainsi que d'écrire des articles scientifiques dans des revues anglophones.

Contacts : CV et lettre de motivation à envoyer à Yves Géraud (yves.geraud@univ-lorraine.fr), Julien Mercadier (julien.mercadier@univ-lorraine.fr) et Patrick Ledru (patrick.ledru@orano.group)

Dates limites

La thèse est à pourvoir et les candidatures sont donc à envoyer dès que possible pour détermination de possibles auditions orales