

METHODES D'EXTRACTION ALTERNATIVES D'URANIUM : COMPARAISON ENTRE LES APPROCHES *BORE HOLE MINING* ET *IN SITU RECOVERY*

ENCADREMENT PROJET

- **Coordinateurs** : Nicolas Seigneur, Damien Goetz
- **Encadrants** : Faouzi Hadj-Hassen, Emmanuel Ledoux, Louis Raimbault
- **Centre de recherche concerné** : Centre de Géosciences
- **Lieux** : Fontainebleau & Paris

RESUME

Durant ce MIG, les élèves mèneront une réflexion comparative de différentes techniques minières. Cette comparaison se basera sur la faisabilité technique et la rentabilité économique et intégrera également les impacts environnementaux, sociaux et climatiques de ses exploitations. Pour rendre cette étude concrète, cette réflexion sera menée en partenariat avec Orano sur un gisement identifié d'uranium du bassin de l'Athabasca. Deux techniques minières seront étudiées par des outils de modélisation afin de simuler la récupération d'uranium : le *Bore Hole Mining* (BHM) et l'*In Situ Recovery* (ISR).

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Comme reconnu par le GIEC, la production nucléaire d'électricité constitue un levier important pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, la production d'uranium, majoritairement assurée par la Russie et ses pays affiliés, est menacée par la crise en Ukraine. Afin d'assurer l'approvisionnement en uranium, de nouvelles techniques minières sont à l'étude pour exploiter de nouveaux gisements.

L'exploitation mondiale d'uranium se base en majorité sur la technique d'*In Situ Recovery* (ISR), tandis que certaines mines traditionnelles (mines à ciel ouvert et/ou travaux miniers souterrains) occupent une part minoritaire dans la production d'uranium. D'autres techniques d'exploitation alternatives sont aujourd'hui à l'étude, comme le *Bore Hole Mining* (BHM), qui offre de nouvelles opportunités d'exploitation de gisements jusqu'ici peu viables économiquement. Le BHM est une technique qui se base sur l'abattage de la roche par un jet d'eau à haute pression. La roche fragmentée est ensuite pompée vers la surface via *airlift*.

La technique ISR se base sur la circulation de solutions lessivantes au sein du gisement. Ces solutions sont injectées au sein du gisement et mobilisent l'uranium avant d'être repompées en surface, où l'uranium est récupéré. Orano opère plusieurs gisements d'uranium via la technique ISR. En particulier, les opérateurs miniers du Kazakhstan utilisent un logiciel de transport réactif développé par le Centre de Géosciences (Hytec) en tant qu'aide à la décision pour l'exploitation du gisement. Hytec est également utilisé pour prédire l'impact environnemental associé à leurs activités, ce qui permet d'apporter une vision globale économique d'une exploitation ISR.

Aujourd'hui, Orano souhaite exploiter un gisement d'uranium du bassin de l'Athabasca (Canada). Sur base de l'expertise en BHM et ISR, Orano se pose la question de quelle est la technique la plus adaptée à ce gisement. Le but de ce MIG est de fournir une approche multi-critères (technique, économique, géologique, environnementale et climatique) pour aider à la décision de la technique minière la plus adaptée pour ce gisement.

OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION

Ce MIG a deux objectifs principaux. Le premier consiste à mettre au point une approche de modélisation multi-physique pour prédire la récupération d'uranium par les deux techniques minières. Le deuxième objectif principal sera de réaliser une analyse multi-critère (économique, technique, environnementale et climatique) pour déterminer, en fonction du type de gisement, la méthode d'extraction la plus adaptée. Pour atteindre ces objectifs, les élèves seront séparés en 3 groupes de travail pour étudier le gisement, et modéliser les deux techniques durant la seconde semaine. Ensuite, les groupes seront remaniés afin de réaliser la comparaison des techniques sur base de leur productivité, impacts environnementaux et leur intensité CO₂. Les résultats de cette comparaison serviront de recommandation qui sera fournie à Orano afin de l'aider dans sa décision quant à la méthode d'extraction la plus adaptée.

MINI-PROJETS (MP)

MP1 – Géologie du Bassin de l'Athabasca et focus sur le gisement d'intérêt. (4 étudiants)

Le but de ce mini-projet est de fournir une description du gisement qui sera exploitée lors de la seconde semaine. Le mini-projet devra travailler en parallèle avec les MP2 & 3 pour déterminer les paramètres hydrologiques (porosité, perméabilité), géochimiques (chimie des eaux), minéralogiques (teneurs) et géotechniques (résistance mécanique) afin de contraindre ces modèles pour leur application au gisement considéré.

MP2 – Description d'un modèle ISR (6 étudiants)

Le but de ce mini-projet est de construire un modèle de transport réactif qui sera appliqué au gisement d'intérêt (en utilisant le logiciel de transport réactif développé par le centre de Géosciences : Hytec). Pour ce faire, les étudiants devront réaliser un modèle hydrogéochimique représentatif des réactions en jeu lors d'une exploitation ISR. Ce modèle devra être capable, une fois appliqué au gisement, de prédire les quantités de lixiviants à injecter ainsi que les quantités d'uranium produites, de manière à estimer l'efficacité d'une exploitation ISR.

MP3 – Elaboration et utilisation d'un modèle Bore Hole Mining (6 étudiants)

Le but de ce mini-projet est de modéliser le processus d'abattage au jet d'eau à haute pression et la formation de la cavité. Ce modèle tentera de reproduire les formes des cavités engendrées par le jetting ainsi que la productivité de la méthode. Il s'appuiera sur les données de jetting (débit, pression, position de la buse, vitesse de rotation) et sera comparé à des images (sonar) de la cavité et son évolution. Une fois le modèle calibré, il sera appliqué de manière prédictive à d'autres cavités.

Fin de la première semaine : présentation des résultats à Orano.

MP4 – Comparaison des impacts environnementaux (6 étudiants)

Sur base des simulations BHM et ISR sur le gisement, ce mini-projet a pour but d'évaluer les impacts environnementaux (qualité des eaux, stabilité) associés aux deux techniques. La planification de la remédiation du site devra être prise en compte (monitoring qualité des eaux – remblais – résidus miniers).

MP5 – Comparaison des impacts CO₂ (5 étudiants)

Sur base des simulations réalisées au préalable, comparer d'un point de vue énergétique les deux procédés afin de déterminer leur empreinte climatique.

MP6 – Synthèse globale technico-économique-environnementale des deux techniques (5 étudiants)

Sur base des simulations réalisées au préalable, déterminer les espérances de gain économiques des deux techniques en les comparant à des techniques minières plus traditionnelles. Egalement, via l'interaction avec les MP4 & 5, tenter de déterminer un rendement financier global en prenant en compte la post-exploitation. Pour ouvrir à d'autres projets, les conditions géologiques du gisement (profondeur, hydrogéologie, teneur, minéralogie, ...) pourront être utilisées pour une étude de sensibilité.

LES VISITES

Durant la première semaine, 3 visites sont prévues. Une visite d'une mine de gypse à ciel ouvert et souterraine. Ensuite, une visite de traitement de sol par *jet-grouting* sera réalisée sur les chantiers du Grand Paris comme analogue de la technique *Bore Hole Mining*.

PROGRAMME PREVISIONNEL

Semaine 1 : Lundi : conférences introductives à Orano. Mardi-Jeudi : visites. Vendredi : cours à Fontainebleau

Semaine 2 : MP1-2-3 + présentation des résultats

Semaine 3 : MP4-5-6 et rédaction du rapport

DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Contact : Nicolas Seigneur : nicolas.seigneur@mines-paristech.fr