



## **Optimisation multi-critère d'une exploitation d'uranium par ISR**

Adresse courriel du contact scientifique : [nicolas.seigneur@mines-paristech.fr](mailto:nicolas.seigneur@mines-paristech.fr)

### **Description du projet de thèse :**

A l'échelle mondiale, la production d'uranium est actuellement majoritairement basée sur les techniques d'*In Situ Recovery* (ISR). A ce jour, ORANO Mining opère la plus grande mine ISR du monde au Kazakhstan et étudie plusieurs projets miniers susceptibles d'être exploités également par ISR dans le monde (Mongolie, Ouzbékistan) en se basant notamment sur le logiciel de transport réactif HYTEC, développé au Centre de Géosciences de MINES ParisTech (Lagneau *et al.*, 2019). Ce logiciel a été déployé aux industriels responsables de la gestion de la mine et leur sert d'outil opérationnel afin d'optimiser la production (production U et consommation acide). Récemment, le VIE d'Antoine Collet, actuellement en thèse au sein de l'équipe HYTEC, a démontré l'applicabilité d'HYTEC pour prédire la production d'uranium sur toutes les zones du gisement afin d'alimenter la planification minière. Également, la thèse de Jean Langanay a ouvert des pistes de la gestion de l'exploitation sur base d'une analyse géostatistique sur l'incertitude géologique, dans l'optique de maximiser la production d'uranium.

L'intérêt économique d'une telle démarche est évident. Parallèlement, l'impact environnemental est également appréhendé au travers d'un monitoring dédié associé à des modèles de transport réactif (Lagneau *et al.*, 2019 ; de Boissezon *et al.*, 2020). Plusieurs échelles spatiales et scalaires sont dans ce cas à considérer allant ainsi du bloc technologique jusqu'au gisement et ce pour des durées allant de l'année à plusieurs dizaines d'années. Outre ces différences d'échelles d'étude entre les modèles dédiés à l'optimisation de la production et ceux construits pour la compréhension de l'empreinte environnementale, les paramètres étudiés diffèrent. Alors que les modèles de production essaient d'optimiser la production d'U en fonction des quantités d'acide sulfurique employées, les modélisations de l'impact environnemental concernent l'hydrogéochimie complète des eaux. Ainsi, les mécanismes réactionnels pris en compte diffèrent (Angileri *et al.*, 2020 ; Robin *et al.*, 2020).

Les conditions opératoires optimisées au niveau des champs de puits ne sont pas à ce jour considérées pour appréhender directement les conséquences environnementales au sein d'un même workflow de modélisation. En effet, au-delà des objectifs différents de chaque modèle, les mécanismes réactionnels et paramètres d'intérêt qui sont testés et optimisés par Hytec diffèrent entre les modèles d'optimisation de la production et d'observation de l'empreinte environnementale (Lagneau *et al.*, 2019). Par exemple, les processus de minéralisation secondaire ou de sorption sur les argiles sont deux exemples de puits de contaminants et d'acidité qui peuvent perdurer plusieurs dizaines voire centaines d'années. Ces processus jouent un rôle secondaire pour la production d'Uranium et sont totalement négligés dans les modèles de production. Une telle approche permettrait au sein d'une même chaîne de modélisation permettrait de mieux appréhender les coûts associés à la restauration des aquifères souterrains exploités par ISR.

Des modélisations 3D de l'empreinte environnementale au niveau d'un bloc technologique, toujours réalisées sous HYTEC, dans le cadre du stage postdoctoral de Sofia Escario (co-encadrement MINES ParisTech / Nicolas Seigneur et Orano Mining / Michael Descostes) ont permis de montrer la faisabilité d'une telle approche à partir d'un jeu de données de production et de surveillance environnementale. Dès lors, ces résultats ouvrent la possibilité de pouvoir étendre cette approche sur plusieurs blocs technologiques, et à terme d'évaluer l'efficacité des solutions de réhabilitation des aquifères exploités par ISR (atténuation naturelle ou bioremédiation ; Descostes *et al.*, 2014). Cette approche ne peut être complète que si le schéma de modélisation environnementale considère les hypothèses de production, et ce jusqu'à l'échelle du gisement dans le cadre d'une planification minière afin de pouvoir inclure une dimension économique.

Le projet de thèse suggéré est de réaliser une étude couplée production - impact environnemental afin d'établir une stratégie d'exploitation optimale entre le rendement économique de la mine et l'impact environnemental. L'étude se déroulera en 3 temps :

1. Calibration plus fine des modèles hydrogéochimiques avec accès à des données via ORANO Mining de données de surveillance environnementale de blocs technologiques arrêtés depuis plus de 30 ans.
2. Analyse de sensibilité par rapport à la stratégie de production (variation des débits d'injection/production, variation des compositions des fluides injectés, balance hydrique).
3. Définition de critères économiques et scientifiques pour quantifier l'impact et établissement d'un modèle optimal pour des recommandations à ORANO.

## ***Multi-criteria optimization of uranium exploitation by In Situ Recovery***

### **Abstract:**

*Worldwide, uranium production is mostly based on In Situ Recover (ISR) techniques. Today, ORANO Mining is operating one of the largest ISR mine in Kazakhstan and studies several other projects around the world. ORANO Mining partly relies on HYTEC, a reactive transport code developed by MINES ParisTech to plan and optimize their exploitation strategy (Lagneau et al. 2019). The recent work of Antoine Collet, who started a PhD in the Hytec team in early 2021, has further demonstrated the predictive capacities of HYTEC for these techniques. Also, the PhD thesis of Jean Langanay paved the way to optimize production strategies based on a geostatistical analysis of the geological uncertainty. The economic advantages of using a predictive tool for mining operations are obvious.*

*In parallel, monitoring of the water quality and reactive transport studies are being performed to study the environmental impact of this exploitation (Lagneau et al. 2019; de Boissezon et al. 2020). Several spatial and temporal scales are being investigated, to understand and mitigate the long-term impacts. To achieve this, a more detailed description of the physicochemical processes is required to predict the water quality (Angileri et al., 2020 ; Robin et al., 2020), incorporating secondary mineral precipitation and sorption processes. A coupled model (production + environmental impact) would allow to better comprehend the costs associated to the aquifer remediation. 3D models of the environmental impact of a production block are being performed using Hytec, in the context of the postdoctoral work of Sofia Escario Perez, under the supervision of Nicolas Seigneur and Michael Descostes (ORANO Mining). Based on her work, it is then possible to study several exploitation strategies to find an optimum between uranium production and environmental impact. Also, several aquifer remediation strategies will be studied (natural attenuation or bioremediation; Descostes et al. 2014).*

*This PhD proposal will consist of three main steps:*

1. *Calibration of the hydrogeochemical model based on long-term water quality monitoring data*
2. *Sensitivity analysis based on the production strategy (injection and pumping rates, solution composition)*
3. *Definition of economic (U production and remediation costs) and scientific criteria to quantify the environmental impact and provide guidelines to mine operators.*

### **Compétences et connaissances requises/ *Prerequisite skills and knowledge* :**

Bases en géochimie et/ou hydrogéologie ; Intérêt et connaissances de base en simulations numériques et programmation.

*The PhD applicant needs to have an interest and a basic knowledge in numerical simulations and programming. Interest and strong knowledge in hydrogeochemistry.*