



## Offre de thèse

### **Diagnostic 4D d'un Anthroposol minier : Impact de la pédogenèse sur la réactivité et le transfert des contaminants métalliques et métalloïdes**

#### *Contexte et problématique scientifique*

Ce projet de thèse s'inscrit dans la thématique de la gestion des résidus miniers et dans une démarche d'anticipation de possibles effets néfastes de ce système parfois contaminé sur l'environnement. Pour mettre ses sites en sécurité, il est particulièrement important de comprendre et d'évaluer les flux de contaminants issus de ces sites. Ceci nécessite de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des sites ainsi que leur évolution temporelle. Ces connaissances pourront être utilisées pour réaliser un diagnostic 4D (3 dimensions spatiales + la dimension temporelle) qui permettra d'optimiser les choix de gestion des sites. Parmi ces méthodes de gestion, les techniques de phytostabilisation consistant à végétaliser les Anthroposols se formant sur les résidus miniers sont largement employées en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leur coût économique modéré. Les techniques de phytostabilisation utilisent des amendements et/ou minéraux pour favoriser la formation d'un sol structuré (pédogenèse) permettant un développement optimal des espèces végétales. Toutefois, les conséquences de ces pratiques sur la libération ou la fixation des contaminants métalliques et métalloïdes (CMM) restent encore très mal comprises. En effet, les mécanismes mis en jeu sont complexes et parfois antagonistes. Ainsi, la re-végétalisation peut augmenter la mobilité des CMM notamment en modifiant le pH alors que la modification concomitante du potentiel d'oxydoréduction peut favoriser la formation de phases solides sur lesquelles les CMM peuvent venir se sorber. Comprendre les mécanismes régulant la mobilité des CMM dans ces sols et être en mesure d'identifier les leviers de forçages permettant de les optimiser pour limiter la libération de CMM dans un contexte donné constituent des verrous majeurs à lever pour permettre une gestion raisonnée des anciens sites miniers.

#### *Objectifs et démarche*

L'originalité du sujet de thèse proposé réside dans la détermination et la hiérarchisation des mécanismes régulant la réactivité et le transfert des CMM au sein d'un Anthroposol minier dans un contexte de re-végétalisation. Les mécanismes régulant le devenir des CMM étant multifactoriel, leur étude impliquera l'emploi d'une démarche innovante combinant **expérimentation multi-échelle et modèle numérique mécaniste**. En raison de leur rôle clé dans la régulation du devenir des CMM, une attention particulière sera apportée pour améliorer la compréhension des mécanismes interfaciaux (adsorption, co-précipitation, complexation, ...) contrôlant l'interaction entre les CMM et les solides minéraux ou organiques présents dans le

sol. La dynamique de ces mécanismes interfaciaux en réponse à l'évolution des conditions microbiologiques et physico-chimiques sera également suivi.

### *Programme de travail*

Au cours de la thèse, 4 actions de recherches consécutives et complémentaires seront réalisées.

#### Action 1: Caractérisation du site d'étude

L'étude sur site d'une chronoséquence d'Anthroposols miniers : des profils de sols seront observés et échantillonnés pour comprendre leur état biologique et physico-chimique actuel. Cet état sera comparé à celui des matériaux parentaux de ces sols que constituent les déchets miniers afin d'identifier les mécanismes majeurs influençant leur évolution (pédogénèse).

#### Action 2: Identification des amendements utilisables pour la modification de l'Anthroposol

Des expériences en microcosmes permettront d'étudier l'influence de l'apport d'amendements, organiques et inorganiques, seul et en combinaison, dans les résidus miniers afin d'étudier l'impact de cette pratique sur la mobilité des CMM dans l'Anthroposol. La modification des propriétés de surface des solides initialement présents dans le sol suite à l'apport des amendements sera analysée. Les apports permettant de maximiser la rétention des CMM seront identifiés.

#### Action 3: Mobilité des CMM au sein du profil de sol

Des expériences basées sur l'utilisation de cellules humides seront mis en place pour étudier le transfert vertical des CMM le long d'une colonne d'Anthroposol, permettant d'évaluer la lixiviation des CMM et donc d'évaluer les flux susceptibles de rejoindre les eaux souterraines. Durant ces expériences, le degré de saturation en eau de l'échantillon sera modifié selon des pas de temps définis pour pouvoir étudier l'impact de la modification de l'état d'oxydoréduction sur la mobilité des CMM. En complément, des expérimentations à échelle du mésocosme métrique seront menées sur la plateforme PRIME. Lors de ces expérimentations, un monitoring biogéochimique complet des différents compartiments (eau, gaz, solide) sera réalisé afin de quantifier les transferts verticaux des éléments majeurs et du carbone organique ainsi que des CMM en fonction du type de couvert végétal, de la nature des amendements et des conditions de saturation en eau.

#### Action 4: Modélisation et prédiction du comportement des CMM au sein du profil d'un Anthroposol

L'ensemble des résultats acquis aux différentes échelles dans des conditions contrôlées et choisies fournira un important jeu de données, notamment au niveau de la géochimie des eaux et de la minéralogie des solides dans un Anthroposol re-végétalisé. Ces données seront utilisées pour construire un modèle géochimique de la dynamique des CMM dans le système étudié. Ce modèle permettra de quantifier finement comment les processus interfaciaux régulent la mobilité des CMM. Le modèle permettra également d'étudier comment ces processus peuvent évoluer en réponse à une modification des propriétés physico-chimiques et/ou microbiologiques du sol. L'évolution des propriétés du sol sera simulée de manière explicite, ce qui nécessitera l'inclusion des différents processus bio-géochimiques régulant ces propriétés du sol au sein du modèle. Le modèle géochimique sera ensuite couplé à un modèle de transport pour construire un modèle de transport-réactif pour simuler la mobilité des CMM au sein d'un Anthroposol re-végétalisé ainsi que son évolution au cours de la pédogénèse de ce sol.

### *Laboratoire d'accueil*

La thèse sera réalisée dans les laboratoires de l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, <https://www.isto-orleans.fr/>) et du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et

Minières, <http://www.brgm.fr/>), associés au sein de l'UMR ISTO 7327 (sous triple tutelle : Université d'Orléans, CNRS, BRGM).

*Encadrement :*

La thèse sera dirigée par Lydie LE FORESTIER (ISTO, [lydie.leforestier@univ-orleans.fr](mailto:lydie.leforestier@univ-orleans.fr)) et co-encadrée par Nicolas DEVAU (BRGM, [n.devau@brgm.fr](mailto:n.devau@brgm.fr)) et Philippe BATAILLARD (BRGM, [p.bataillard@brgm.fr](mailto:p.bataillard@brgm.fr))

*Financement*

Bourse de thèse BRGM - Région Centre Val de Loire. Contrat de 3 ans à partir d'octobre 2018

*Profil du candidat*

Master 2 en Géosciences avec une formation en géochimie environnementale. Des compétences en expérimentations et/ou en modélisation numérique seraient un plus.