PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Caractérisation de la contamination chimique du sol d'un ancien site minier partiellement revégétalisé par combinaison de données hyperspectrales à haute résolution spatiale et de données LiDAR 3D

Référence : **PHY-DOTA-2024-05**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2024	**Date limite de candidature :** 15/05/2024

Mots clés :

Hyperspectral, éléments traces métalliques, après-mine, végétation, sol nu

Profil et compétences recherchées :

Formations : Master 2 ou école d'ingénieur (ENSEEIHT, ISAE, Centrale Supélec, ENSAT, INSA…).

Spécialités souhaitées : Traitement du signal, télédétection optique, physique de la mesure, environnement, mathématiques appliquées, IA

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Les sites miniers peuvent présenter des concentrations en ETM (Eléments Traces Métalliques incluant les métaux et les métalloïdes) dans les sols et les sédiments nécessitant des mesures de gestion. Pour cela il est nécessaire de pouvoir caractériser les sites et suivre le transfert de ces contaminants. Le suivi environnemental repose essentiellement sur des mesures ponctuelles à l'aide par exemples d'appareils XRF portables et d'analyses en laboratoire d'échantillons prélevés. Or, les contaminations liées aux activités minières et les concentrations naturelles en ETM peuvent présenter de fortes variations géographiques. Il est donc essentiel de pouvoir effectuer des mesures en continue. La mesure hyperspectrale dans le domaine réflectif [400-2500 nm] à haute résolution spatiale présente un intérêt majeur pour cartographier les concentrations en ETM sur les sites miniers réhabilités composés de surfaces de sols nus et végétalisées. De nombreux travaux ont montré l'intérêt de la télédétection optique passive pour caractériser les sols et la végétation dans diverses applications en lien avec des activités anthropiques (Ong et al. 2019).

L'objectif de la thèse est la cartographie des concentrations en ETM pour des surfaces de sols nus et végétalisés à partir de données hyperspectrales (HS) à haute résolution spatiale couvrant le domaine réflectif et de données LiDAR HD. Le site d'étude est un ancien site de traitement de minerais réhabilité en 2016 par un procédé de phytostabilisation aidée (implantation de végétation et introduction d'un amendement pour éviter la mobilité des métaux) (Fabre et al. 2020). La problématique, valable pour de nombreux sites pollués, est liée au contexte de co-contamination (mélanges de métaux et métalloïdes avec des niveaux faibles à élevés), à la diversité de l'occupation du sol à une échelle réduite (sol nu, végétation herbacée continue et discontinue, végétation haute), à la diversité des types de sols (naturels ou remaniés), à la diversité des espèces végétales (naturelles ou implantées).

Même si les concentrations en ETM observées sur les zones contaminées sont parfois élevées, il est difficile de détecter directement les ETM du sol à partir de la signature spectrale mesurée dans le domaine réflectif. La solution retenue est basée sur une approche indirecte (Lamine et al. 2019) (Lassalle et al. 2021). Pour cela, les marqueurs ou propriétés bio-physio-chimiques du sol (pH, texture, matière organique, minéraux ferrugineux…) et ceux de la végétation (pigments, contenu en eau, matière sèche, LAI-*Leaf Area Index, densité du couvert, hauteur*…) impactés par la contamination et qui peuvent être estimés à partir de la signature spectrale ou du nuage de points LiDAR 3D doivent être identifiés (Béraud et al. 2022). Ces marqueurs peuvent dépendre du type de sol ou de l'espèce végétale.

Pour atteindre cette première étape et comprendre les phénomènes physiques / physiologiques, une base de données sera construite à partir des mesures en laboratoire et terrain. Une fois les marqueurs identifiés, ils doivent être quantifiés et reliés à la concentration en métaux pour ensuite estimer les concentrations en ETM du sol à partir de la mesure de signature spectrale. Les méthodes à développer seront basées sur des approches de régressions, des réseaux de neurones ou l'utilisation de modèle physique. Les étapes suivantes vont se concentrer sur l'exploitation de l'imagerie à haute résolution spatiale. Les cartographies des types de sol et des espèces seront réalisées par des approches de classification supervisées (*machine learning : Support Vector Machine, Random Forest, Regularized Logistic Regression…*). Les techniques de détection et de caractérisation mises en place à partir de la base de données seront appliquées à l'image hyperspectrale et validées à partir de mesures terrain.

Ainsi, une cartographie des contaminations de 100% des surfaces du site sera obtenue en faisant pour les

sols le lien entre minéralogie et la contamination afin de renseigner sur la biodisponibilité des métaux (c'est-à-dire la partie accessible au végétal) qui sera mise en relation avec les concentrations en métaux dans les feuilles. Ces travaux renseigneront sur l'intérêt des plantes comme échantillonneur d'une contamination métallique et permettront l'identification des espèces tolérantes (séquestrant les ETM dans les racines en réduisant leur transfert vers les parties aériennes) et accumulatrices (concentrations en ETM dans les feuilles élevées). Enfin, des préconisations seront apportées au gestionnaire du site pour poursuivre sa revégétalisation.

Dans le cadre de ces travaux, il est prévu d'exploiter une image hyperspectrale aéroportée à une résolution spatiale de 0.75 m déjà disponible. Des acquisitions hyperspectrales avec un moyen drone sont envisagées pour améliorer la résolution spatiale des images traitées.

Béraud, L.; Elger, A.; Rivière, T.; Berseille, O.; Déliot, Ph.; Silvestre, J.; Larue, C.; Poutier, L.; Fabre, S. Impact of potentially toxic elements on pines in a former ore processing mine: Exploitation of hyperspectral response from needle and canopy scales, Environmental Research, 2023, 227, doi.org/10.1016/j.envres.2023.115747.

S. Fabre, R. Gimenez, A. Elger, T. Rivière, Unsupervised vegetation monitoring after the closure of an ore processing site with multi-temporal optical remote sensing, Sensors, 2020, 20(17), 4800; https://doi.org/10.3390/s20174800.

Lamine, S., Petropoulos, G. P., Brewer, P. A., Bachari, N. E. I., Srivastava, P. K., Manevski, K., Macklin, M. G. (2019), Heavy metal soil contamination detection using combined geochemistry and field spectroradiometry in the United Kingdom, Sensors, 19(4), 762.

G. Lassalle, S. Fabre, A. Credoz, R. Hédacq, D. Dubucq, A. Elger, Mapping leaf metal content over industrial brownfields using airborne hyperspectral imaging and optimized vegetation indices , Nature Scientific Reports, 2021, 11, 2, https://doi.org/10.1038/s41598-020-79439-z.

Ong, C., Carrère, V. , Chabrillat, S., Clark, R., Hoefen, T., Kokaly, R., Marion, R., Souza Filho, C.R., Swayze, G., Thompson, D.R., Imaging Spectroscopy for the Detection, Assessment and Monitoring of Natural and Anthropogenic Hazards, Surveys in Geophysics (2019) 40:431–470 https://doi.org/10.1007/s10712-019-09523-1.

Collaborations envisagées :

BRGM (co-direction)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et techniques associées

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : S. Fabre

Tél. : 05 62 25 28 59 Email : sophie.fabre@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : S. Fabre

Laboratoire : ONERA DOTA

Tél. : 05 62 25 28 59

Email : sophie.fabre@onera.fr

Pour plus d'informations : https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche