

LIBS-SCReeN

Dépistage des matières premières critiques, de l'exploration à la (post-) valorisation, en utilisant les techniques LIBS

Contrat - B2/191/ P1/LIBS-SCReeN

Contexte

Les matières premières critiques (CRM) sont économiquement et stratégiquement importantes pour les secteurs industriels clés et les applications futures, mais leur approvisionnement comporte des risques élevés. Répondre à la demande croissante de CRM est l'un des plus grands défis mondiaux des prochaines décennies, et la (ré)exploitation des ressources domestiques, y compris le recyclage, deviendra de plus en plus significative. En Belgique, les gisements de zinc-plomb sont connus depuis la Préhistoire et ont été principalement exploités au XIXe siècle, mais le potentiel économique de ce qui reste est largement indéterminé. Il est connu que ces gisements contiennent des CRM tels que le germanium (Ge) et le gallium (Ga). Il est également crucial de considérer la présence d'éléments pouvant devenir des contaminants environnementaux, par exemple l'arsenic (As) et le cadmium (Cd), dans le cadre de nouvelles activités minières et de valorisation.

Des techniques flexibles, rapides et fiables sont nécessaires pour améliorer notre capacité d'exploration, d'exploitation, de recyclage des CRM et de surveillance de l'impact environnemental. Les techniques de caractérisation géochimique traditionnelles sont généralement chronophages, coûteuses et nécessitent une préparation des échantillons, ce qui limite la taille et la représentativité des ensembles de données. Dans ce contexte, la spectroscopie d'ablation laser (LIBS) apparaît comme une alternative avantageuse pour la caractérisation des matériaux géologiques. Cette technique repose sur la spectroscopie d'émission utilisant des impulsions laser à haute énergie comme source d'excitation. En plus de permettre une acquisition rapide des données avec peu ou pas de préparation des échantillons, un avantage significatif de la LIBS est la possibilité d'analyses simultanées des constituants majeurs, mineurs et traces, y compris les éléments plus légers (par exemple, C, B, Be, et Li), qui sont particulièrement difficiles à détecter avec de nombreuses autres techniques.

L'un des défis pour étendre l'application des techniques LIBS à de grands efforts de dépistage est la génération de grandes quantités de données spectrales complexes. Cela nécessite des technologies adaptées de traitement et d'analyse des données et peut grandement bénéficier de l'évolution des outils d'apprentissage automatique (ML) et d'intelligence artificielle (IA). En particulier dans les futures analyses LIBS automatisées potentielles, des pipelines d'extraction et de traitement des données également automatisés sont fortement nécessaires. Les protocoles de dépistage, d'identification des éléments et de classification des minéraux utilisant la LIBS représentent des étapes importantes vers la standardisation, ce qui peut apporter une contribution précieuse à la communauté internationale de la LIBS.

Objectifs

Le projet LIBS-SCReeN visait à améliorer la technologie LIBS déjà existante dans les laboratoires belges et à développer et mettre en œuvre davantage de capacités analytiques LIBS pour tester l'application de la technique à l'ensemble du cycle de vie des CRM, depuis l'exploration des ressources jusqu'aux scénarios post-bénéficiaire de recyclage et/ou de problèmes environnementaux. Les objectifs spécifiques du projet étaient de 1) développer et mettre en œuvre des flux de travail scientifiquement solides pour exploiter la LIBS pour le dépistage élémentaire à plusieurs échelles, 2) optimiser les flux de travail d'identification des éléments de l'acquisition au traitement des données pour garantir l'applicabilité de la LIBS à différents gisements et besoins environnementaux, et 3) diffuser et regrouper les activités locales avec la communauté scientifique mondiale de la LIBS et les projets de l'UE pour établir un centre d'expertise belge en LIBS.

Méthodologie

Le projet a utilisé deux installations LIBS principales : l'une à l'UMONS et l'autre à la RBINS-GSB, avec une troisième installation en cours de développement à l'ULiège. Les approches méthodologiques comprenaient :

- **Analyse d'Échantillons de Référence** : Comparaison des analyses élémentaires LIBS avec SEM-EDS, μ XRF et LA-ICP-MS sur 13 échantillons de roche de référence.
- **Inventaire d'Échantillons et de Carottes** : Catalogage des échantillons historiques de minerai de Zn-Pb provenant des collections géologiques des institutions partenaires du projet et collaboration avec l'UGent pour des échantillons de carottes de forage.
- **Approches de Dépistage** : Mise en œuvre de méthodologies de dépistage ciblées et aléatoires sur des échantillons à main et des carottes de forage pour évaluer les biais de l'utilisateur et la pertinence de l'automatisation.
- **Dépistage de la Contamination des Sols** : Réalisation d'analyses semi-portables LIBS sur des échantillons de sol de sites belges et français pour évaluer la contamination par les métaux lourds.

Réalisations Clés

1. **Développement de Flux de Travail LIBS** : Le projet a développé et testé avec succès des protocoles de dépistage allant de l'acquisition des données au traitement des spectres LIBS. Des centaines d'échantillons de roche et de sol ont été analysés, démontrant les capacités de la LIBS à détecter les CRM et les contaminants environnementaux potentiels. Deux approches méthodologiques ont été comparées : des analyses ciblées avec moins de mesures plus contrôlées, et des analyses aléatoires et automatisées avec moins de biais de l'utilisateur.
2. **Optimisation de l'Identification des Éléments** : Les techniques LIBS ont été optimisées pour différentes échelles, des échantillons de la taille d'une main à des échantillons de carottes entières. Le projet a amélioré les installations à l'UMONS, à la RBINS-GSB et à l'ULiège. Des modèles avancés d'apprentissage automatique ont été développés pour gérer de grands volumes de données spectrales, permettant de différencier les phases minérales et de détecter rapidement des éléments critiques tels que le germanium (Ge) et le gallium (Ga), ainsi que des polluants comme le cadmium (Cd) et l'arsenic (As).
3. **Pilotes de Dépistage** : Un total de 408 échantillons ont été dépistés, englobant une grande variété de compositions minéralogiques associées aux occurrences de Zn-Pb en Belgique. Les pilotes de dépistage ont mis en évidence la capacité de la LIBS à fournir des cartes de distribution détaillées des éléments chimiques à plusieurs échelles, montrant son potentiel

tant pour l'exploration des CRM que pour la surveillance environnementale. Les analyses de sols de sites contaminés, comme le site de friche de Sclaigneaux, ont validé l'efficacité de la LIBS dans les applications environnementales.

4. **Diffusion et Valorisation** : Le projet a mené de nombreuses activités de communication et de diffusion, notamment des ateliers, des présentations de conférences et des collaborations avec des institutions de recherche internationales. La création du Cluster de Recherche LIBS Belge (belibs.naturalsciences.be) a été un résultat significatif, visant à poursuivre la recherche LIBS et à offrir une expertise et des services grâce à l'infrastructure développée au cours du projet.
5. **Présence Numérique et Publications** : Le projet a maintenu une présence numérique robuste avec une page LinkedIn dédiée et un profil Twitter, attirant des abonnés et générant un engagement significatif. Une série de vidéos éducatives sur YouTube a expliqué les principales tâches et innovations du projet LIBS-SCReeN. De plus, plusieurs publications évaluées par des pairs et résumés de conférences ont été produits, diffusant davantage les résultats du projet.

Conclusions

Le projet LIBS-SCReeN a démontré que la LIBS est un outil puissant pour l'exploration des CRM et la surveillance environnementale. Le développement de flux de travail optimisés et de techniques avancées de traitement des données, combiné à l'établissement de BELIBS, positionne la Belgique comme un leader dans la recherche et l'application de la LIBS. Les recherches futures pourraient se concentrer sur le perfectionnement de ces techniques et l'exploration de nouvelles applications dans divers contextes industriels et environnementaux. Les résultats du projet améliorent la capacité d'utiliser la LIBS pour une exploration et une exploitation des CRM sans pollution dans des environnements divers, y compris l'industrie du recyclage.