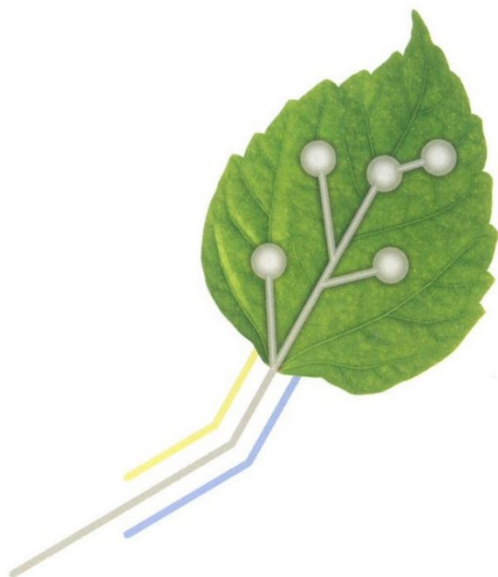


Fonds de recherche
du Québec –
Nature et technologies



Programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier

Fiches de résultats – Volet 1

- 1^{er} concours 2013-2014
- Perception sociale de l'industrie minière et acceptabilité sociale des projets miniers 2015-2016

Introduction

Le programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier a été lancé conjointement par le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) et le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) en juin 2013. Il s'agit d'une initiative qui s'inscrit dans le cadre du programme *Projet de recherche orientée en partenariat* du FRQNT.

Cinq créneaux de recherche ont été déterminés par le MERN pour ce programme, soit :

- Créneau 1 : L'exploration et l'exploitation minière en profondeur
- Créneau 2 : Le développement du secteur minier en milieu nordique
- Créneau 3 : Économie d'énergie et gaz à effet de serre
- Créneau 4 : L'impact du développement minier sur l'environnement et sur les communautés
- Créneau 5 : Développement et optimisation des outils géomatiques

Au total cinq concours ont été lancés, ce qui a permis le financement de 63 projets de recherche. Ceux-ci sont tous des projets réalisés en équipe et pour lesquels un minimum de 10 % de contribution provenant d'un partenaire de projet est obligatoire.

Vous trouverez dans le présent document les fiches de résultats pour l'ensemble des projets de recherche financés dans le cadre du 1^{er} concours lancé en juin 2013 ainsi que dans le cadre du concours portant sur la perception sociale de l'industrie minière et l'acceptabilité sociale des projets miniers lancé en juin 2015.

Les fiches de résultats présentent dans l'ordre : les objectifs poursuivis par chacun des projets, les résultats obtenus, les publications relatives à ces projets ainsi que le nom des partenaires. La liste de publications comprend les ouvrages acceptés seulement. Il est ainsi possible pour les utilisateurs et les utilisatrices des résultats d'obtenir davantage d'informations sur les résultats obtenus. Les personnes souhaitant obtenir des informations encore plus détaillées doivent s'adresser directement aux chercheurs responsables et aux chercheuses responsables.

Ce document constitue le premier volet d'une série de publications à venir. Au cours des prochaines années, les fiches de résultats des autres projets financés dans le cadre du programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier seront aussi publiées.

Pour toute question :

Louis Bienvenu
Ingénieur minier
Ministère de l'Énergie et des
Ressources naturelles
Louis.bienvenu@mern.gouv.qc.ca

Hélène Munger
Responsable de programmes
Fonds de recherche du Québec -
Nature et technologies
Helene.Munger@frq.gouv.qc.ca

Novembre 2018

TABLE DES MATIÈRES

1.	Présentation du programme de recherche	5
2.	Fonctionnement du programme	6
2.1	<i>Évaluation de la pertinence des projets</i>	6
2.2	<i>Évaluation scientifique des projets</i>	7
2.3	<i>Classification finale.....</i>	7
2.4	<i>Résultats</i>	7
3.	Fiches de résultats - projets financés lors du 1^{er} concours	9
3.1	<i>Conception optimale des haldes et utilisation novatrice des stériles sur les sites miniers - Michel Aubertin, École Polytechnique de Montréal.....</i>	11
3.2	<i>Optimisation économique des opérations d'extraction et de séparation des éléments de terres rares - Claude Bazin, Université Laval</i>	13
3.3	<i>Nouvelles méthodologies utilisant les minéraux indicateurs en exploration - Georges Beaudoin, Université Laval</i>	15
3.4	<i>Séquestration du carbone couplée à la récupération de l'énergie géothermique - Georges Beaudoin, Université Laval.....</i>	17
3.5	<i>Développement des outils d'interprétation pour deux nouveaux systèmes géophysiques dédiés à la détection d'amas minéralisés enfouis profondément - Li Zhen Cheng, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue</i>	19
3.6	<i>Développement d'une stratégie globale d'optimisation de sites miniers avec incertitude: Amélioration de la viabilité économique et de la gestion environnementale des résidus miniers d'une mine de fer dans le nord - Roussos Dimitrakopoulos, Université McGill</i>	21
3.7	<i>De l'échelle du mésocosme à celle du Nunavik : Développement d'un bioindicateur pour le suivi de la contamination métallique en région minière - Claude Fortin, Institut National de la Recherche Scientifique</i>	23
3.8	<i>Assimilation stochastique de données géophysiques pour la modélisation géologique et de teneur en trois dimensions - Erwan Gloaguen, Institut National de la Recherche Scientifique</i>	25
3.9	<i>Caractérisation et conception géomécaniques intégrées pour l'exploitation minière en profondeur ou sous hautes contraintes et en milieu nordique - Martin Grenon, Université Laval.....</i>	27
3.10	<i>Géochronologie des corridors magmatiques hydrothermaux fini-Archéens du Québec - Michel Jébrak, Université du Québec à Montréal</i>	29
3.11	<i>Développement d'un analyseur portable pour l'or - Marcel Laflamme, Université Laval....</i>	31
3.12	<i>Mines profondes : défis d'exploitation et impacts sur la récupération minéralurgique - Marcel Laflamme, Université Laval</i>	33
3.13	<i>Remblai minier en pâte cimenté dans le pergélisol : étude du transport et des conditions thermiques de cure - Mamert Mbonimpa, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue</i>	35

3.14	<i>Séquestration du CO₂ à la cheminée dans l'industrie du fer par carbonatation minérale de résidus miniers : valorisation de deux déchets - Guy Mercier, Institut National de la Recherche Scientifique</i>	37
3.15	<i>Des mines et des communautés : mieux comprendre les impacts du développement minier sur les communautés autochtones et non-autochtones du Nord - Thierry Rodon, Université Laval</i>	39
3.16	<i>Valorisation des carottes de forage d'exploration minière grâce au perfectionnement du Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) - Pierre-Simon Ross, Institut National de la Recherche Scientifique</i>	41
3.17	<i>Potentiel des systèmes énergétiques hybrides éolien-diesel-air comprimé pour les sites miniers - Daniel Rousse, École de Technologie Supérieure</i>	43
3.18	<i>La revégétalisation comme outil d'intervention et de rétablissement des services écosystémiques sur les sites miniers non-acidogènes - Sébastien Roy, Université de Sherbrooke</i>	45
3.19	<i>Prédictions critiques en revégétalisation de résidus acidogènes: effet des symbioses plantes-microorganismes sur la translocation des métaux et mécanismes assurant le maintien de l'homéostasie chez l'aulne dans ces environnements - Sébastien Roy, Université de Sherbrooke</i>	47
4.	Fiches de résultats – projets financés lors du concours portant sur la perception sociale de l'industrie minière et l'acceptabilité sociale des projets miniers	49
4.1	<i>Perception sociale de l'industrie minière et acceptabilité sociale des projets miniers - Jie He, Université de Sherbrooke</i>	51
4.2	<i>Partager les informations avec les communautés par l'indice du risque social - Michel Jébrak, Université du Québec à Montréal</i>	53
4.3	<i>Analyse de la perception des québécois sur le développement des ressources minérales et comparaison de l'acceptabilité sociale avec le développement d'autres ressources naturelles - Michel Malo, Institut National de la Recherche Scientifique</i>	55

1. Présentation du programme de recherche

Lancé en juin 2013, le programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier est offert conjointement par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) et le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT).

Ce programme de recherche en partenariat vise à inciter les chercheuses et chercheurs québécois œuvrant dans des champs disciplinaires variés à répondre aux besoins du MERN et à proposer des recherches innovatrices, offrant des avenues intéressantes en matière de recherche sur le développement durable du secteur minier. Il s'agit d'un programme qui encourage la collaboration scientifique entre les chercheuses et chercheurs universitaires, de collège et les entreprises minières.

Les objectifs spécifiques rattachés à ce programme sont de :

- favoriser l'acquisition de nouvelles connaissances, le développement de nouvelles technologies et stimuler l'innovation dans tous les processus du développement minier : l'exploration minière, l'exploitation minière, le traitement de minerais et la restauration des sites miniers;
- favoriser une approche globale et intégrée de la recherche entre tous les processus de développement minier soit entre l'exploration minière, l'exploitation minière, le traitement de minerais et la restauration des sites miniers;
- encourager le développement d'équipes multidisciplinaires de chercheurs et la consolidation d'équipes existantes pour aborder des problématiques de recherche complexes concernant l'industrie minière;
- augmenter le potentiel de recherche dans le domaine minier en assurant la relève scientifique et la formation de spécialistes et d'experts dont le Québec a besoin;
- appuyer les liens de coopération aux niveaux national et international avec des partenaires dont l'expertise est reconnue;
- favoriser le renforcement d'une industrie axée sur le savoir, l'innovation et les nouvelles technologies;
- stimuler la diffusion et le transfert des connaissances auprès des utilisateurs potentiels des résultats de la recherche;
- réduire l'impact écologique des activités minières sur le territoire québécois afin d'en améliorer l'acceptabilité sociale dans les communautés;
- générer, grâce à un effet de levier, une augmentation des investissements en innovation de l'industrie minière.

Initialement, le programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier était doté d'une enveloppe budgétaire globale de 16 000 000 \$ et faisait l'objet de quatre concours, entre les années financières 2013-2014 et 2016-2017. En décembre 2015, un avenant à l'entente est venu ajouter une enveloppe de 1 575 000 \$ au programme afin de promouvoir un concours supplémentaire en 2016-2017 portant sur la valorisation des résidus miniers. À cette enveloppe globale de 17 575 000 \$ s'ajoute une contribution obligatoire d'entreprises minières participant aux projets d'un montant équivalent à au moins 10 % du budget total de chacun des projets. Les partenaires se sont engagés à partager les coûts de la façon suivante :

Partenaires	Total
MERN	16 500 000 \$
FRQNT	1 075 000 \$
Total	17 575 000 \$
Frais de gestion	825 000 \$
Sommes disponibles pour les projets	16 750 000 \$
Contributions des entreprises	Minimum 10 %

2. Fonctionnement du programme

2.1 Évaluation de la pertinence des projets

Pour obtenir du financement de ce programme, les chercheurs et chercheuses doivent d'abord présenter une lettre d'intention répondant aux conditions d'admissibilité définies pour le programme dans le Guide d'appel de propositions.

Ces lettres d'intentions sont évaluées par un comité de pertinence formé par des représentants du MERN, en fonction de la pondération et des critères décrits ci-après :

- Adéquation, portée et caractère novateur (45 points)
(40 points pour le concours portant sur la perception sociale de l'industrie minière et l'acceptabilité sociale des projets miniers)
- Nature et importance des retombées pour l'industrie minière et le MERN (30 points)
- Écoconditionnalité et intégration des principes de développement durable (10 points)
(15 points pour le concours portant sur la perception sociale de l'industrie minière et l'acceptabilité sociale des projets miniers)
- Importance du partenariat établi pour la réalisation du projet (15 points)

Cette évaluation, assortie d'un seuil de passage, constitue une étape éliminatoire. Au terme de cette étape, les responsables des lettres d'intention retenues ont été invités à présenter une description détaillée de leurs propositions dans une demande d'aide financière.

2.2 Évaluation scientifique des projets

Les demandes d'aide financière sont analysées par un comité scientifique formé de pairs dont la composition relève du FRQNT.

Les membres du comité scientifique procèdent à l'évaluation des demandes en fonction de la pondération et des critères décrits ci-après :

- Qualité scientifique du projet (40 points)
- Qualité scientifique de l'équipe (20 points)
- Formation d'étudiants et d'experts dans le domaine (20 points)
- Qualité du plan de diffusion scientifique et de transfert des résultats (15 points)
- Réalisme de l'échéancier de réalisation et bien-fondé du budget demandé (5 points)

Cette évaluation, assortie d'un seuil de passage, constitue une étape éliminatoire.

2.3 Classification finale

La classification finale s'effectue en additionnant les résultats de l'évaluation de la pertinence à ceux de l'évaluation scientifique pour un total de 200 points.

2.4 Résultats

Le premier concours a été lancé en juin 2013 et 42 lettres d'intention admissibles ont été reçues. Au terme du processus d'évaluation et en tenant compte de l'enveloppe budgétaire disponible, 19 projets ont reçu une subvention.

Le deuxième concours a été lancé en juillet 2014 et 43 lettres d'intention admissibles ont été reçues. Au terme du processus d'évaluation et en tenant compte de l'enveloppe budgétaire disponible, 19 projets ont reçu une subvention.

Le concours portant sur la perception sociale de l'industrie minière et l'acceptabilité sociale des projets miniers a été lancé en juin 2015 et 10 lettres d'intention admissibles ont été reçues. Au terme du processus d'évaluation et en tenant compte de l'enveloppe budgétaire disponible, 3 projets ont reçu une subvention.

Le troisième concours a été lancé en août 2015 et 42 lettres d'intention admissibles ont été reçues. Au terme du processus d'évaluation et en tenant compte de l'enveloppe budgétaire disponible, 16 projets ont reçu une subvention.

Le concours portant sur la valorisation des résidus miniers a été lancé en décembre 2015 et 19 lettres d'intention admissibles ont été reçues. Au terme du processus d'évaluation et en tenant compte de l'enveloppe budgétaire disponible, 6 projets ont reçu une subvention.

3. Fiches de résultats - projets financés lors du 1^{er} concours

3.1 Conception optimale des haldes et utilisation novatrice des stériles sur les sites miniers - Michel Aubertin, École Polytechnique de Montréal

Objectif(s)

L'objectif du projet de recherche est d'élaborer de nouvelles approches pour mieux concevoir et construire les haldes de roches stériles, afin de prévenir les problèmes de stabilité géotechnique et géochimique. Le projet comportait aussi trois autres volets touchant l'utilisation des roches stériles sur les sites miniers, pour le remblayage des chantiers souterrains, pour une conception améliorée des parcs à résidus miniers (avec inclusions), et pour le contrôle de la production de drainage minier acide (DMA) ou un drainage neutre contaminé (DNC). Une telle contamination des eaux peut avoir des effets néfastes sur l'environnement à proximité des sites miniers.

Résultats obtenus

Le projet de recherche a été mené par une équipe composée de plusieurs professeurs, chercheurs et étudiants de deux universités, et faisant partie de l'Institut de recherche sur les mines et l'environnement (IRME UQAT-Polytechnique).

Les travaux menés sur les quatre volets ont mené à des résultats concrets et des progrès significatifs qui ouvrent la porte à de nouvelles approches de gestion pour les roches stériles sur les sites miniers. Par exemple, le projet a permis de mieux cibler le développement d'une nouvelle méthode de construction des haldes, qui implique une disposition sélective des roches stériles réactives et non réactives, avec une configuration géométrique de rehaussement par bancs; cette méthode originale incorpore aussi des couches densifiées inclinées visant à contrôler les écoulements de l'eau en les déviant vers les flancs de la halde.

Le volet sur les couvertures multicouches a montré comment l'utilisation des roches stériles permet d'améliorer l'efficacité du bris capillaire, de réduire le flux d'oxygène, et d'optimiser la performance globale du recouvrement pour empêcher la formation d'eaux acides; cette technique est à l'étude pour une utilisation à très grande échelle sur quelques sites miniers incluant le site Manitou-Goldex en Abitibi.

Des progrès significatifs ont aussi été obtenus au niveau de la conception des barricades formées de roches stériles pour retenir le remblai dans les chantiers miniers souterrains et pour mieux évaluer l'état des pressions induites autour des ouvertures. Le volet sur l'utilisation des inclusions de roches stériles a démontré l'efficacité de cette technique pour accélérer le drainage et la consolidation des rejets de concentrateur dans les parcs à résidus miniers, ainsi que pour améliorer la stabilité des digues par un effet de renforcement global. Les travaux sur les quatre volets visés par ce projet vont se poursuivre sur des sites miniers au cours des prochaines années, en collaboration avec les partenaires industriels.

Pour en savoir plus

1. Broda, S., Aubertin, M., Blessent, D., Hirthe, E. & Graf, T. (2017). Improving control of contamination from waste rock piles. *Environmental Geotechnics*, 4(4), 274-283. <https://doi.org/10.1680/envgeo.14.00023>
2. Ferdosi, B., James, M., Aubertin, M. (2015) Effect of waste rock inclusions on the seismic stability of an upstream raised tailings impoundment: a numerical investigation. *Canadian Geotechnical Journal* 52(12): 1930-1944.
3. Ferdosi, B., James, M. & Aubertin, M. (2015). Investigation of the Effect of Waste Rock Inclusions Configuration on the Seismic Performance of a Tailings Impoundment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6): 1519-1537.

4. Jahanbakhshzadeh, A., Aubertin, M., Li, L. (2018) Analysis of the stress distribution in inclined backfilled stopes using closed-form solutions and numerical simulations. *Geotechnical and Geological Engineering* 36(2): 1011-1036.
5. Jahanbakhshzadeh, A., Aubertin, M., Li, L. (2018) Three-dimensional stress state in inclined backfilled stopes obtained from numerical simulations and new closed-form solution. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(6): 810-828. (doi: 10.1139/cgj-2016-0385).
6. Kalonji Kabambi, A., Bussière, B., Demers, I. (2017) Hydrogeological Behaviour of Covers with Capillary Barrier Effects Made of Mining Materials. *Geotech Geol Eng.* 35(3): 1199-1220 (doi:10.1007/s10706-017-0174-3).
7. Martin, V., Plante, B., Bussière, B., Aubertin, M., Pabst, T., Chen, D., Bréard Lanoix, M.L., Dubuc, J., Dimech, A. (2017). Controlling water infiltration in waste rock piles: Design, construction, and monitoring of a large-scale in-situ pilot test pile. *GeoOttawa 2017 - 70th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, ON, Canada.
8. Yang, P.Y., Li, L., Aubertin, M., Brochu-Baekelmans, M., Ouellet, S. (2017) Stability analyses of waste rock barricades designed to retain paste backfill. *ASCE—International Journal of Geomechanics* 17(3): 04016079-1 – 04016079-13
9. Aubertin, M. (2016). Diverses approches pour améliorer la stabilité des sites d'entreposage des rejets miniers pendant l'exploitation et à la fermeture. Présentation invitée. *Le leadership du Québec en restauration minière*, Québec Mines 2016.
10. Aubertin, M. James, M. D'Anjou, N. Pednault, C. Bussière, B. Pabst, T. Pepin, N. Limoges, M. (2017). Waste Rock Inclusions to Improve the Performance of Tailings Impoundments: The Canadian Malartic Case Study. Invited Presentation, 24th British Columbia MEND Metal Leaching/Acid Rock Drainage Workshop. Vancouver. 2017.
11. Bussière, B. Aubertin, M. (2016). Development and application of mine site reclamation methods to control acid generation in Canada. Keynote Presentation, West Virginia Mine Drainage Task Force Symposium, March 2016.
12. Chen, D., Plante, B. Martin, V. (2016). Contrôle des écoulements d'eau dans les haldes à stériles : étude de terrain menée à la mine Tio. *Recherche et développements récents à l'Institut de recherche en mines et en environnement*, Québec Mines 2016.
13. Pednault, C., James, M., Aubertin, M. (2016). Utilisation des inclusions de roches stériles pour favoriser la stabilité géotechnique des parcs à résidus : travaux menés à la mine Canadian Malartic. *Recherche et développements récents à l'Institut de recherche en mines et en environnement*. Québec Mines 2016.

Partenaires du projet

- Rio Tinto Fer et Titane
- Corporation Minière Osisko
- Mines Agnico Eagle Itée

3.2 Optimisation économique des opérations d'extraction et de séparation des éléments de terres rares - Claude Bazin, Université Laval

Objectif(s)

- Développer un simulateur pour un circuit de séparation des éléments de terres rares (Lanthane à Lutécium, incluant Yttrium et Scandium);
- Utiliser le simulateur pour étudier les aspects économiques de différentes stratégies de séparation de ces éléments;
- Développer des procédures expérimentales pour calibrer le simulateur.

Résultats obtenus

Le projet a permis de clarifier et de comprendre les étapes de valorisation des terres rares (TR). Ainsi le projet a d'abord permis de mettre au point des méthodes fiables pour mesurer les concentrations des TR dans des échantillons solides ou liquides, ce qui est une étape de base dans tout processus visant à mettre en valeur ces éléments d'un minerai. Le projet a aussi permis d'identifier les difficultés associées aux étapes du traitement des minerais, du craquage des minéraux de TR, et de la récupération des TR dans des produits commerciaux. Cette acquisition de connaissances a été mise à l'épreuve en procédant à l'échelle du laboratoire à la mise en valeur des TR des minerais de trois sites miniers québécois différents. Ces travaux qui débutaient avec de la roche et se terminaient avec un produit d'oxydes de terres rares partiellement séparés sont une première au Québec. Le projet a aussi permis d'identifier les problématiques environnementales associées à la mise en valeur des TR.

Une fois le concentré de minéraux de TR produit, la plupart des exploitants de TR traitent ce concentré par une cuisson à l'acide sulfurique, un procédé polluant et complexe à opérer. Dans le cadre du projet, les chercheurs ont appliqué avec succès un traitement caustique au concentré de TR. Ce traitement est moins polluant que la cuisson acide et facilite l'élimination des impuretés comme le thorium et le fer. Il serait stratégique de poursuivre l'évaluation de ce procédé de craquage caustique pour vérifier son applicabilité à une échelle industrielle. Le projet visait aussi à évaluer la pertinence de procéder à la séparation de TR et afin d'en évaluer l'économique. À cet effet un programme informatique permettant la simulation de cette opération a été mis au point et validé avec des résultats de laboratoire, en attente d'une validation avec des données industrielles ou provenant d'une usine pilote. Cet outil de simulation est présentement un des plus avancés au monde et son développement se poursuit.

Pour en savoir plus

1. Boulanger J.-F., Bazin C., Turgeon K., Verret F.-O., Downey D., 2018. Production of partially separated rare Earth elements from a Quebec deposit, *Extraction 2018*, Ottawa, August, pp. 2777-2795.
2. Turgeon K., Bazin C., Boulanger J.F., Whitty-Léveillé L., Larivière D., 2016. Material balancing and estimation of equilibrium constants : Application to solvent extraction tests of rare earth elements, XXVIII Intern. Mineral Process. Congress (IMPC), Quebec, Canada, Sept 13-15.
3. Whitty-Léveillé, L., Turgeon, K., Bazin, C., & Larivière, D. (2017). A comparative study of sample dissolution techniques and plasma-based instruments for the precise and accurate quantification of REEs in mineral matrices. *Analytica Chimica Acta*, 961, 33-41.
4. Whitty-Léveillé L., Drouin E., Constantin M., Bazin C., Larivière D., 2016. Scandium Analysis in Silicon-Containing Minerals by Inductively Coupled Plasma Tandem Mass Spectrometry, *Spectrochimica Acta Part B: March*, pp.112-118.

Partenaires du projet : Soutex, Corem, Roche, SGS-Québec

Objectif(s)

Développer de nouvelles méthodologies pour identifier et quantifier la composition minérale d'un échantillon de grains extraits d'un sédiment non consolidé. En particulier, nous allons développer l'application aux concentrés de minéraux lourds extraits de sédiments glaciaires, mais les méthodologies pourront être appliquées à d'autres environnements (fluvial, côtier, éolien).

Résultats obtenus

Les minéraux indicateurs sont utilisés pour trouver la trace d'un gîte minéral masqué par des sédiments non consolidés. Les minéraux indicateurs denses sont séparés physiquement du sédiment, puis ils sont identifiés sous le microscope par un spécialiste. La méthodologie est fastidieuse, et il est difficile d'implémenter des protocoles de contrôle qualité. Le projet utilise des propriétés physiques et compositionnelles des minéraux pour les identifier. Nous avons étudié deux types de mesures: 1) les spectres d'absorption de la lumière dans le proche visible et l'infrarouge moyen à l'aide de caméras hyperspectrales; 2) la composition chimique mesurée par fluorescence des rayons X, à l'aide d'un appareil de microanalyse.

Les données recueillies ont par la suite fait l'objet d'un traitement statistique sophistiqué pour comparer les spectres d'absorption à ceux de bibliothèques de références et de mesure sur des échantillons types. Le traitement statistique permet de reconnaître les bandes d'absorption caractéristiques de minéraux indicateurs utiles pour l'exploration minérale. Des méthodes apparentées à l'intelligence artificielle permettent la classification automatisée des grains de minéraux indicateurs. Le transfert de la technologie vers l'industrie va permettre d'accroître l'efficacité des entreprises québécoises dans le domaine.

Pour en savoir plus

1. Yousefi B, Sojasi S, Ibarra Castanedo C, Maldague XPV, Beaudoin G, Chamberland M. Continuum removal for ground-based LWIR hyperspectral infrared imagery applying non-negative matrix factorization. *Applied Optics*. 2018. 57 (21): 6219-6228. <https://doi.org/10.1364/AO.57.006219>
2. Yousefi B, Ibarra Castanedo C, Beaudoin G, Maldague XPV, Huot F, Chamberland M, 2017. Mineral identification in LWIR hyperspectral imagery applying sparse spectral clustering. 2nd Asian Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Daejeon, Korea, July 2017.
3. Sojasi S, Yousefi B, Liaigre K, Ibarra Castanedo C, Beaudoin G, Maldague X, Huot F, Chamberland, 2016. Role of Continuous Wavelet Transform in Mineral Identification Using Hyperspectral Imaging in the Long-Wave Infrared (7.7 to 11.8 μm) by using SVM Classifier. *Proc. SPIE 10214, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX*, 986118 (May, 2017).
4. Yousefi B, Sojasi S, Liaigre K, Ibarra Castanedo C, Beaudoin G, Maldague X, Huot F, Chamberland M, 2017. Modified algorithm for mineral identification in LWIR hyperspectral imagery. *Proc. SPIE 10214, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX*, 986118 (May, 2017).
5. Yousefi B, Sojasi S, Ibarra Castanedo C, Beaudoin G, Huot F, Maldague X, Chamberland M, Lalonde E, 2016. Emissivity retrieval from indoor hyperspectral imaging of mineral grains ", *Proc. SPIE 9861, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII*, 98611C (May 11, 2016); doi:10.1117/12.2224379

Partenaires du projet : Photonic Knowledge, Telops inc.

Objectif(s)

Le premier objectif du projet de recherche est de mieux comprendre les processus de carbonatation minérale qui se produisent à l'intérieur d'un parc à résidus miniers riche en magnésium. Le second objectif est d'évaluer le potentiel géothermique, engendré par réactions exothermiques de carbonatation minérale, des parcs à résidus. La caractérisation des processus en trois dimensions sera effectuée grâce à la réalisation d'un forage dans le parc à résidus miniers de la mine Black Lake à Thetford Mines.

Résultats obtenus

Le projet a permis de faire le suivi du processus de minéralisation du carbone dans un parc à résidus miniers, à l'échelle industrielle. Il s'agit de la seule expérience du genre à avoir été entreprise dans le monde. Le projet a permis de faire un forage dans une pile de résidus miniers à la mine Black Lake de Thetford Mines. Le forage de 92 m de profondeur a été instrumenté avec des sondes pour mesurer la température et des tubes d'échantillonnage des gaz à différentes profondeurs dans le forage. Le forage a été carotté, et la minéralogie, la teneur en carbone et les propriétés pétrophysiques des échantillons de résidus miniers partiellement cimentés par le processus de minéralisation du carbone ont été caractérisés. Depuis l'installation du puits d'observation en 2016, nous enregistrons en continu la température, la pression différentielle et la concentration en CO₂ dans l'air interstitiel de la pile de résidus. Nous avons aussi mesuré périodiquement la composition isotopique du carbone du CO₂ dans l'air interstitiel. Une station météo enregistre en continu les conditions environnementales sur le site du puits d'observation. De plus, nous avons effectué un levé géophysique (diagraphie en résistivité électrique et susceptibilité magnétique) dans le puits d'observation, et des levés géoradar et gravimétrique en surface de la pile de résidus.

Le projet nous permet de démontrer pour la première fois que le processus de minéralisation du carbone se produit à l'intérieur d'un parc à résidus miniers à l'échelle industrielle. Nous avons documenté une augmentation de la teneur en carbone dans les résidus miniers, et identifié les minéraux carbonatés qui ont incorporé de manière permanente le carbone dans leur structure cristalline. Nous avons aussi démontré que la minéralisation du carbone modifie les propriétés pétrophysiques des résidus miniers, en réduisant leur susceptibilité magnétique tout en augmentant leur résistivité électrique, ce qui permet d'envisager une détection à distance, et un suivi, par des méthodes géophysiques. Le puits d'observation instrumenté nous a permis de démontrer que la pile de résidus fonctionne selon deux régimes dynamiques dictés par la température ambiante. En saison chaude, la pression interne de la pile de résidus est inférieure à celle de l'air ambiant, ce qui provoque l'entrée d'air, contenant environ 400 ppmv de CO₂: la pile inhale l'air ambiant. En saison froide, la pression interne de la pile augmente et la pile expulse alors de l'air interne: elle exhale. L'air dans la pile de résidus miniers est toujours appauvri en CO₂ par rapport à la composition de l'atmosphère, en raison du processus de minéralisation du carbone qui consomme le CO₂ gazeux plus rapidement que l'apport naturel à partir de l'atmosphère. De plus la réaction de minéralisation du carbone est exothermique, elle libère de l'énergie sous forme de chaleur, causant une anomalie thermique.

Pour en savoir plus

1. Nowamooz A, Dupuis C, Beaudoin G, Molson J, Lemieux J-M, Horswill M, Fortier R, Larachi F, Maldague X, Constantin M, Duchesne J, Therrien R, submitted. Atmospheric carbon mineralization in an industrial-scale chrysotile mining waste pile. *Environmental Science and Technology*. 52 (14): 8050-8057.

2. Beaudoin G, Assima GP, Lechat K, Gras A, Nowamooz A, Entezari Zarandi A, Horswill M, Turcotte S, Larachi F, Dupuis C, Molson J, Lemieux J-M, Maldague X, Plante B, Bussière B, Constantin M, Duchesne J, Therrien R, Fortier R, 2017. Passive mineral carbonation of Mg-rich mine wastes by atmospheric CO₂. Energy Procedia, 114: 6083-6086. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1745>
3. Horswill M, Dupuis JC, Nowamooz I, Lemieux J-M, Fortier R, Molson J, Beaudoin G, Constantin M, 2016. Petrophysical signature of carbonates generated from the carbonation of magnesium-rich mining waste at Thetford Mines, QC. Canadian Geophysical Union Joint Annual Meeting (Fredericton).
4. Nowamooz I, Dupuis JC, Lemieux J-M, Fortier R, Beaudoin G, Molson J, Constantin M, 2016. A permanent installation for monitoring CO₂ sequestration in magnesium-rich mining waste at Thetford Mines, QC. Canadian Geophysical Union Joint Annual Meeting (Fredericton).
5. Beaudoin G, Assima GP, Lechat K, Gras A, Nowamooz A, Entezari Zarandi A, Horswill M, Turcotte S, Larachi F, Dupuis C, Molson J, Lemieux J-M, Maldague X, Plante B, Bussière B, Constantin M, Duchesne J, Therrien R, Fortier R, 2016. Passive mineral carbonation of Mg-rich mine wastes by atmospheric CO₂. 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18, November 2016, Lausanne, Switzerland.
6. Nowamooz A, Dupuis JC, Beaudoin G, Molson J, Lemieux J-M, Horswill M, Fortier, Larachi F, Maldague X, Constantin M, Duchesne J, Therrien R, 2018. Dynamic CO₂ sequestration in an industrial-scale chrysotile mining waste pile, ACEME, Newcastle (Australia), 14-17 March 2018.

Partenaire du projet

- Telops inc.

3.5 Développement des outils d'interprétation pour deux nouveaux systèmes géophysiques dédiés à la détection d'amas minéralisés enfouis profondément - Li Zhen Cheng, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Objectif(s)

Les recherches visent à améliorer deux nouveaux systèmes géophysiques dédiés à la détection des corps minéralisés profonds. Ces deux systèmes sont :

- 1) GRAVILOG pour mesurer la variation de gravité dans les forages; et
- 2) ARMIT pour mesurer les champs électromagnétiques dans les trous de forage; ces systèmes sont pour l'exploration minière à grande profondeur et sont particulièrement efficaces dans la détection d'amas de sulfures massifs à semi-massifs.

Résultats obtenus

L'avantage des mesures gravimétriques en forage est qu'elles intègrent directement les effets gravitationnels générés par la matière au pourtour de la sonde, que ce soit à proximité ou à distance, au-delà du mur des trous de forage. Deux nouveaux algorithmes sont développés pour la modélisation directe, ce qui permet de faire des estimations sur l'effet gravitationnel des unités géologiques individuellement ou leur effet d'ensemble. En éliminant ces bruits géologiques on peut mettre en évidence des anomalies utiles de GRAVILOG. Un autre algorithme d'inversion quantifie (position, géométrie et densité) les structures ou corps minéralisés à l'origine des anomalies GRAVILOG. Les modélisations directes et inverses sont basées sur un modèle volumétrique 3D à base de tétraèdre.

L'avantage de discrétiser le modèle en tétraèdres est qu'il donne une meilleure approximation de la géométrie géologique réelle, y incluant l'effet de topographie. Un des résultats intéressants est que l'inversion des données GRAVILOG met en évidence la présence de tous les lentilles de sulfures massifs connus, et un excès de masse non modélisé par les données mesurées à la surface.

Le système ARMIT mesure simultanément la dérivée temporelle du champ magnétique secondaire (dB/dt) et l'intensité du champ magnétique induit (B). Cette dernière possibilité est novatrice et recherchée à travers le monde. Il y a un très grand nombre de sources qui génèrent un bruit électromagnétique (EM) : par exemple, des câbles de transmission électrique et de communication, le vent solaire ou l'éclair, des bruits électroniques. Un nouvel outil de traitement de signal a été développé pour ARMIT basé sur la transformation d'ondelette, mais il est aussi applicable aux données EM d'autres systèmes de mesure. En comparaison avec les méthodes conventionnelles, le nouvel algorithme élimine les bruits des données ARMIT de façon efficace.

En ce qui concerne la modélisation 3D, un nouvel algorithme de calcul parallèle est développé dans le cadre de ce projet pour faire calculer plusieurs processeurs simultanément. De cette façon on a accéléré la modélisation 3D des données EM forage-surface en la rendant 5 fois plus rapide que la méthode conventionnelle. Un autre nouvel algorithme de l'inversion 3D des données EM est présentement en développement.

Pour en savoir plus

Plusieurs articles sont en voie d'être publiés.

Partenaire du projet : Abitibi Géophysique

3.6 Développement d'une stratégie globale d'optimisation de sites miniers avec incertitude: Amélioration de la viabilité économique et de la gestion environnementale des résidus miniers d'une mine de fer dans le nord - Roussos Dimitrakopoulos, Université McGill

Objectif(s)

- (1) Concevoir et développer des modèles de programmation stochastique pour le secteur minier et la planification de la production;
- (2) Améliorer l'analyse mathématique et statistique en adaptant les modèles afin d'intégrer des sources multiples d'approvisionnement (des mines, des fosses);
- (3) Élaborer des stratégies de résolution basée sur des métaheuristiques y compris des hybrides;
- (4) Développer des formulations de programmation stochastique basées sur les données futures simulées qui peuvent synchroniser de façon optimale les plans de production à court et à long terme;
- (5) Évaluer la performance du modèle développé et l'ajuster aux sites miniers.

Résultats obtenus

Ce programme de recherche a permis de résoudre quatre problématiques en lien avec le projet minier New Millenium.

1. Le premier projet a porté sur l'amélioration du modèle géologique. La description du gisement d'une mine se fait par des méthodes géostatistiques à partir des trous de forage d'exploration. À la fin du processus, les géologues discrétisent le gisement en un ensemble de blocs pour lesquels diverses caractéristiques sont estimées, ce qui est communément appelé le modèle de blocs. Plutôt que d'utiliser une seule description du gisement, il est préférable de faire plusieurs représentations équiprobables de celui-ci afin de mieux tenir compte de l'incertitude liée à cette estimation. Un premier projet de recherche portait sur l'amélioration de ces méthodes d'estimation.
2. La planification à long terme dans les mines à ciel ouvert est souvent faite en n'utilisant qu'une seule représentation du modèle de blocs. Ces modèles de programmation mathématique prennent pour acquis que l'information contenue dans ces modèles géologiques est connue à 100 % et ignorent l'incertitude, ce qui mène parfois à des résultats catastrophiques pour les compagnies minières. Nous avons proposé ici un modèle de planification stochastique (c.-à-d. qui tient compte de l'incertitude) qui permet d'effectuer la planification à long terme en se basant sur une dizaine de représentations équiprobables du gisement. Ce modèle permet de mieux tenir compte de l'incertitude et de déterminer la séquence de minage plus robuste.
3. Le site minier de New Millenium est situé dans une région où l'espace d'entreposage des résidus miniers était limité en raison de la présence de lacs et de rivières. Il fallait donc réfléchir à un moyen d'entreposer les stériles dans les parties de la fosse qui étaient exploitées. Nous avons développé un modèle mathématique de planification à long terme des activités de minage qui permet de décider du moment opportun pour entreposer les stériles dans la mine et des endroits où ceux-ci peuvent être disposés sans nuire aux opérations de la mine. Un tel modèle n'avait jamais été présenté dans la littérature.
4. Le gisement que New Millenium compte exploiter est étroit, mais s'étend sur des kilomètres de longueur. Si un seul concasseur fixe est utilisé, les camions devront, à long terme, parcourir une très grande distance pour transporter le minerai et le stérile. L'entreprise souhaitait étudier la rentabilité économique d'utiliser un ou des concasseurs mobiles jumelés à un transport par convoyeurs. Nous avons présenté un premier modèle mathématique de planification minière à long terme qui inclut la position à diverses périodes de temps d'un concasseur et des convoyeurs. D'un point de vue théorique, ceci a posé un défi de taille, car les coûts de transports changent en fonction de la position du concasseur.

Pour en savoir plus

1. Yao L, Dimitrakopoulos R, Gamache M (2018) A new computational model of high-order stochastic simulation based on spatial Legendre moments. *Mathematical Geosciences*, <https://doi.org/10.1007/s11004-018-9744-z>.
2. Rimélé A, Dimitrakopoulos R, Gamache M (2018) A stochastic optimization method with in-pit waste and tailings disposal for open pit life-of-mine production planning. *Resources Policy*, DOI 10.1016/j.resourpol.2018.02.006
3. Vallejo Garcia M N, Dimitrakopoulos R (2018) Stochastic Orebody Modelling and Stochastic Long-Term Production Scheduling at the KéMag iron ore deposit, Quebec. *Int. Journal of Mining, Reclamation and Environment*, DOI 10.1080/17480930.2018.1435969
4. Spleit M, Dimitrakopoulos R (2017) Risk management and long-term production schedule optimization at the LabMag iron ore deposit in Labrador, Canada. *Mining Engineering*, 69(10): 47-53.
5. Brika Z., Gamache M., Dimitrakopoulos R, (2018) Multi-Product Mine Scheduling Optimization under Multi-Element Geological Uncertainty. *Group for Research in Decision Analysis*, G-2018-72.

Partenaire du projet

- New Millenium Iron Corp.

3.7 De l'échelle du mésocosme à celle du Nunavik : Développement d'un bioindicateur pour le suivi de la contamination métallique en région minière - Claude Fortin, Institut National de la Recherche Scientifique

Objectif(s)

L'objectif du projet est d'examiner les liens entre la biodisponibilité des contaminants et les réponses du périphyton afin d'établir les bases d'un nouvel outil écotoxicologique d'évaluation du risque écologique que posent les métaux. Ce projet permettra :

- 1) de construire un modèle prédictif de la contamination métallique du périphyton en fonction des variables physico-chimiques (pH, dureté, spéciation chimique, etc.),
- 2) d'intégrer les données obtenues dans le Nord au modèle prédictif ;
- 3) d'explorer les liens entre la contamination métallique et les déformations observées dans les frustules de diatomées ; et
- 4) de quantifier les impacts de variables propres aux sites nordiques (température faible; heures d'ensoleillement) sur l'accumulation et les effets des métaux sur le périphyton.

Résultats obtenus

Pour répondre à l'objectif de ce projet, il est important de sélectionner un modèle biologique possédant les bonnes qualités : il doit être présent dans tous les milieux, incluant ceux qui sont contaminés, et doit donc être tolérant aux contaminants. Contrairement aux poissons et insectes aquatiques, les micro-organismes sont toujours présents dans les cours d'eau et on les retrouve en grande concentration sous la forme de biofilms. Il s'agit d'un mélange complexe d'algues unicellulaires, de champignons et de bactéries se développant à la surface, entre autres, des cailloux. De plus, ces micro-organismes se trouvent à la base de la chaîne alimentaire. Ainsi, si un contaminant a un effet négatif sur le biofilm, les effets négatifs peuvent ainsi se répercuter sur le reste de l'écosystème par un effet domino le long de cette chaîne alimentaire.

Le projet avait pour objectif d'examiner la possibilité de développement d'un outil utilisant le biofilm afin d'améliorer la capacité à évaluer l'impact des activités minières sur les écosystèmes aquatiques.

Les chercheurs ont donc mené plusieurs campagnes d'échantillonnage dans deux régions minières du Canada : au nord du Québec (Nunavik) et dans la région de Sudbury (Ontario). Ces travaux ont permis d'établir des liens entre la concentration d'un métal dans l'eau, la composition de l'eau et la concentration de métal dans le biofilm. Étant donné que les concentrations de métaux accumulés par le biofilm étaient similaires entre les deux régions pour des conditions comparables, cela suggère que le biofilm peut être utilisé à grande échelle.

Les résultats obtenus ont permis d'affirmer l'utilité ainsi que la robustesse du biofilm comme bioindicateur. Si certaines questions restent encore à investiguer, ces recherches ont permis de cibler des paramètres clés qui permettent aujourd'hui d'affiner les corrélations. À noter également que les connaissances acquises lors de ce projet permettront, à terme, de développer un indice multimétrique pour le suivi de contaminations métalliques. De plus, les travaux contribueront à améliorer l'évaluation du risque écotoxicologique des métaux.

Les retombées scientifiques sont d'autant plus importantes que le projet a fait l'objet de plusieurs collaborations avec des acteurs publics comme privés. Les outils développés seront intéressants pour de nombreux gestionnaires de l'environnement puisqu'ils permettront d'évaluer l'intégrité biologique des écosystèmes aquatiques avant, ou après, l'implantation de nouveaux sites miniers. Cela facilitera ainsi l'évaluation du succès des travaux de suivi ou de restauration. À noter également que ces outils pourront, dans le futur, intégrer ces éléments métalliques dits émergents à l'exemple des éléments du groupe platine ou des lanthanides pour ne citer que deux exemples.

Pour en savoir plus

1. Leguay, S., Lavoie, I., Levy, J. et Fortin, C. (2016) Using biofilms for monitoring metal contamination in lotic ecosystems: the protective effects of hardness and pH on metal bioaccumulation. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 35(6): 1489-1501. DOI :10.1002/etc.3292
2. Lavoie, I., Hamilton, P., Morin, S., Kim Tiam, S., Gonçalves, S., Falasco, E., Fortin, C., Gontero, B., Heudre, D., Kahlert, M., Kojadinovic-Sirinelli, M., Manoylov, K., Pandey, L. et Taylor, J. (2017) Diatom teratologies as biomarkers of contamination: are all deformities ecologically meaningful? *Ecological Indicators*. 82:539-550. DOI :10.1016/j.ecolind.2017.06.04
3. Lavoie, I., Morin, S., Laderriere, V. et Fortin, C. (2018) Freshwater diatoms as indicators of combined long-term mining and urban stresses in Junction Creek (Ontario, Canada). *Environnements*, 5(2), 30; DOI :10.3390/environnements5020030

Partenaire du projet

- Canadian Royalties inc.

3.8 Assimilation stochastique de données géophysiques pour la modélisation géologique et de teneur en trois dimensions - Erwan Gloaguen, Institut National de la Recherche Scientifique

Objectif(s)

La mise en marché d'une mine ainsi que la planification de l'exploitation de ses ressources requièrent une modélisation numérique en trois dimensions de la géologie et des teneurs en minéraux économiques des zones minéralisées. Les méthodes conventionnelles de modélisation géologiques et des teneurs en minéraux économiques des gisements ne sont basées que sur les mesures acquises sur les carottes de forages et le modèle conceptuel des géologues de la mine. Or, il existe de nombreuses mesures indirectes acquises à la surface et en forages qui permettraient d'avoir un meilleur contrôle sur le modèle numérique en dehors des forages. Ces mesures consistent pour la plupart en des mesures géophysiques de surface et en forages (diagraphies).

Il est reconnu que les mesures en surface n'ont pas la résolution intrinsèque nécessaire afin d'y inférer des paramètres physiques corrélables avec les mesures géologiques en forages. En effet, le processus algorithmique permettant d'inférer les propriétés physiques à partir des mesures géophysiques de surface (inversion) sur estime la moyenne et sous-estime les valeurs extrêmes. Or, ce sont les valeurs extrêmes qui sont recherchées. Il fallait donc développer une nouvelle méthode de travail afin d'assimiler l'ensemble des données et des connaissances afin de générer des modèles possibles de la distribution spatiale de la géologie et des teneurs en minéraux économiques.

Résultats obtenus

Les travaux effectués dans le cadre de ce programme de recherche ont permis de développer une méthodologie d'intégration et d'assimilation de données géophysiques, géochimiques et géologiques donnant accès à des modèles numériques tri-dimensionnels de la géologie et des teneurs en minéraux économiques des gisements plus précis ainsi qu'à l'incertitude de ces paramètres. Les résultats ont plusieurs impacts:

- 1) Les modèles numériques générés grâce aux approches développées permettent une meilleure planification minière et permettent de réinterpréter les contextes géologiques et miniers. Cette méthode donnera un avantage économique aux compagnies qui l'utiliseront. En effet, une meilleure compréhension de la distribution spatiale de la zone minéralisée permet de mieux planifier l'exploitation de la mine, de réduire la dilution, c'est à dire mieux différencier les zones minéralisées des zones de gangue et de réduire l'impact sur l'environnement en réduisant la halde à stérile.
- 2) Les méthodologies développées ont permis à six étudiants de l'INRS de créer deux « startups » (goldspot et geolearn) en assimilation de données pour le domaine minier.

Pour en savoir plus

1. Bouchedda, Abderrezak; Giroux, Bernard et Gloaguen, Erwan (2017). Constrained electrical resistivity tomography Bayesian inversion using inverse Matérn covariance matrix. *Geophysics*, 82 (3) : E129-E141. DOI : 10.1190/geo2015-0673.1
2. Caté, Antoine; Perozzi, Lorenzo; Gloaguen, Erwan et Blouin, Martin (2017). Machine learning as a tool for geologists. *The Leading Edge*, 36 (3) : 215-219. DOI : 10.1190/tle36030215.1
3. Fresia, Bastien; Ross, Pierre-Simon; Gloaguen, Erwan et Bourke, Alexandre (2017). Lithological discrimination based on statistical analysis of multi-sensor drill core logging data in the Matagami VMS district, Quebec, Canada. *Ore Geol. Rev.*, 80 (Janvier): 552-563. DOI :10.1016/j.oregeorev.2016.07.019

4. Tirdad, S., Gloaguen, E., Bouchedda, A., Dupuis, C.J., 2018. 3D stochastic assimilation of gravity data in Lalor volcanogenic massive sulphide, Manitoba, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences.
5. Gloaguen, E., Perozzi, L., Caté, A., Tirdad, S., Schnitzler, N. (2017). Machine Learning for Near-Mine and In-Mine Prediction: A Powerful New Tool for Geoscientists. Exploration 2017, Toronto, Canada.

Partenaire du projet

- Mira Geoscience Ltd

3.9 Caractérisation et conception géomécaniques intégrées pour l'exploitation minière en profondeur ou sous hautes contraintes et en milieu nordique - Martin Grenon, Université Laval

Objectif(s)

- 1) Développer un modèle géotechnique constitué de quatre sous modèle : géologique, structural, du massif rocheux et hydrogéologique qui seront intégrés à un logiciel de planification minière utilisé dans l'industrie.
- 2) Réaliser des analyses géomécaniques de la stabilité des ouvrages miniers qui maximisent l'utilisation du modèle géotechnique. Dans le cadre de ce projet, l'analyse de la stabilité sera réalisée à deux échelles : celle de la galerie et celle du pilier de surface.

Résultats obtenus

Les gisements miniers en surface ou de faibles profondeurs sont de plus en plus rares dans les régions septentrionales du Québec. L'exploitation minière au Québec est conséquemment réalisée dans des conditions géomécaniques plus difficiles: milieu nordique, gisements à faible teneur ou encore à de grandes profondeurs, dans des conditions à la limite des pratiques actuelles de la conception géomécanique.

La conception géomécanique des ouvrages miniers (puits, galeries, chantiers, piliers de surface, etc.) doit être adaptée à ces nouvelles réalités afin d'assurer la sécurité des travailleurs, la rentabilité économique des projets miniers, la compétitivité de l'industrie québécoise à l'échelle internationale, la minimisation des impacts environnementaux et le développement responsable de ces ouvrages. Dans ce contexte, la conception minière doit impérativement s'appuyer sur une approche globale et intégratrice de caractérisation géomécanique des massifs rocheux fracturés et sur des méthodes et outils de conception reposant sur cette caractérisation.

Le site du projet minier aurifère Éléonore en Jamésie offrait une occasion unique de développer des approches novatrices pour une conception géomécanique intégrée qui tient compte du contexte minier québécois. En effet, le site est situé en milieu nordique, le projet offre un potentiel minier en profondeur sous hautes contraintes et la mine est située sous le réservoir Opinaca (présence importante d'eau).

Les travaux de recherche ont permis d'améliorer la caractérisation de la fracturation des massifs rocheux et de mieux comprendre la probabilité d'occurrence de blocs rocheux aux toits des galeries minières. Ils ont également permis de mieux comprendre l'efficacité des approches d'injection de ciment dans les structures géologiques afin de réduire les venues dans les ouvertures minières souterraines. Une méthodologie novatrice fut développée afin de quantifier le niveau de connaissance des propriétés du roc intact (qui varie en fonction de l'avancement d'un projet minier) à l'aide de tests statiques. Cette approche permet d'optimiser le nombre et le type d'essais et d'identifier les futures cibles de caractérisation. Des outils de design ont été développés pour la conception de chantiers. Les approches statistiques développées ont permis d'améliorer considérablement la prédiction des instabilités des chantiers par rapport aux approches existantes. Finalement, une meilleure approche permettant de quantifier les interactions entre différents paramètres opérationnels et géomécaniques avec la sismicité fut proposée aux opérateurs miniers pour optimiser la planification des travaux afin de protéger les travailleurs et d'éviter des délais de production.

Pour en savoir plus

1. Grenon M*, Landry A, Hadjigeorgiou J, Lajoie PL. 2016 Discrete Fracture Network based drift stability at the Éléonore mine. Transaction of the AusIMM, section A, Mining technology. DOI 10.1080/14749009.2016.1199296

2. Guido S, Grenon M. 2018. Contributions to Geomechanical Stope Optimization at the Goldcorp Eleonore Mine Using Multiple Linear, Binary Logistic and Principal Component Logistic Regression. In Proceedings 10th Asian Rock mechanics symposium. The ISRM symposium for 2018. Singapore.
3. Tuleau J, Grenon M, Duchesne C, Woodward K, Lajoie PL. 2018. Multivariate statistical analysis to investigate the seismic response to production blasting at Goldcorp Eleonore. In Proceedings 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Seattle, USA.

Partenaire du projet

- Goldcorp – Projet Éléonore

Objectif(s)

L'objectif du projet est de dater la mise en place de l'or en datant directement, pour la première fois, les minéraux sulfurés (pyrite, arsénopyrite, molybdénite) directement porteurs de l'or.

Les chercheurs développeront au Québec une nouvelle méthode basée sur la géochimie isotopique Rhénium Osmium en se servant des installations de pointe installées récemment au Geotop. Cette technique permet non seulement de dater les minéralisations, mais aussi de connaître leur source, crustale ou mantellique. Elle permettra ainsi de beaucoup mieux contraindre le processus de genèse des minéralisations en or, et de cartographier distinctement chacun des événements hydrothermaux. Cette approche sera appliquée sur quatre corridors porteurs de minéralisations : les failles Cadillac (E-W) et Lamarck (NE-SW) en Abitibi, le corridor de Belleterre et le corridor Rex en Ungava. Le projet permettra d'analyser chacun de ces corridors, de les comparer entre eux, et d'en comparer le fonctionnement avec des failles plus récentes. Il définira des secteurs favorables pour les minéralisations en or.

Résultats obtenus

Le Québec est un des grands producteurs d'or du Canada, et en particulier grâce à l'Abitibi où des mines sont exploitées depuis près de 100 ans. Cependant, la manière dont des minéralisations se sont formées reste encore mystérieuse. L'un des points clefs pour comprendre cette genèse est de déterminer l'âge exact de ces minéralisations. Le projet visait d'abord à mettre au point une méthode nouvelle pour dater les gisements d'or, en utilisant la géochimie isotopique d'éléments radioactifs du groupe du platine, le rhénium et l'osmium, puis à l'appliquer sur des gisements de l'Abitibi.

La méthode repose sur un mode nouveau de séparation des minéraux, une méthode brevetée. Nous avons aussi développé la géochimie des éléments en trace par spectrométrie LIBS, une méthode rapide et bon marché qui commence à avoir des applications dans tous les domaines.

Les résultats scientifiques ont de nombreuses implications scientifiques et économiques. Sur le plan scientifique, on observe que de nombreux gisements se sont formés en plusieurs étapes sur une longue période de temps, plusieurs centaines de millions d'années: c'est un processus de maturation, de remobilisations successives de l'or. Ce résultat contredit le modèle géologique classique des gisements d'or orogénique; celui-ci soutenait que les gisements se sont formés en un seul épisode, l'or surgissant brutalement de la croûte profonde ou du manteau. Notre modèle montre par exemple que le grand volcanisme mantellique du Proterozoïque aurait pu jouer un rôle dans la reconcentration tardive de l'or. Il reste à préciser les mécanismes de détail des concentrations, obtenir des âges plus précis, déterminer la distribution géographique de ces différentes reprises, etc. On doit aussi mieux comprendre la trajectoire de l'or et des éléments du groupe du platine depuis leur source à leur zone de dépôt.

Sur le plan de l'exploration minière, les résultats sont de deux ordres: d'une part, les études de détail de plusieurs districts près de Rouyn-Noranda, de Val d'or et de Lebel-sur-Quévillon ont fourni des guides d'exploration pour les entreprises minières: par exemple, la mise en évidence de zonalité verticale permet de prévoir l'évolution en profondeur de certains gîtes. D'autre part, l'idée que plusieurs gisements d'or se sont construits progressivement au cours du temps induit des guides d'exploration plus régionaux, et permet de mieux comprendre où pourraient être situés les gisements les plus riches. Cette notion est applicable dans le monde entier.

Pour en savoir plus

1. Fayol, N.*, Jébrak, M. 2017. Archean sanukitoid gold porphyry deposits: A new understanding and genetic model from the Lac Bachelor gold deposit, Abitibi, Canada. *Economic Geology*, 112: 1913-1936.
2. Mériaud, N.*, Jébrak, M. 2017. From Intrusion-Related to Orogenic Mineralization: The Wasamac Deposit, Abitibi Greenstone Belt, Canada. *Ore Geology Review* 84: 289-308.
3. Jébrak, M., Lebrun, C.*, André-Mayer, A-S, Simard, M. 2017. Native antimony emplaced by hydrothermal methane in orogenic fault-zone. *Terra Nova*, 2017; 00:1–8. <https://doi.org/10.1111/ter.12300>
4. Trichard, F.; Moncavo, S.; Devismes, D.; Pelasrini, F.; Maurelli, J.; Feugier, A.; Sasseville, C., and Motto-Ros, V. Evaluation of a compact VUV spectrometer for elemental imaging by laser-induced breakdown spectroscopy: application to mine core characterization. *Journal of Analytical Spectrometry*. 2017; 8:1527-1534.
5. Fayol, N.*, Jébrak, M., Harris, L.B. 2016. The magnetic signature of Neoproterozoic alkaline intrusion-related gold deposits: significance and exploration implications. *Precambrian Research*, 283: 13-23.

Partenaires du projet

- Ressources Métanor inc.
- Mines Richmond
- Alexandria
- Hecla Québec
- Exploration Azimut inc.
- Ressources Yorbeau inc.
- Les Mines J.A.G. Ltée

Objectif(s)

L'objectif du projet est qu'à la fin du projet, toutes les connaissances requises pour l'intégration en un système SLP portable analyseur d'or soient rendues disponibles à l'industrie minière. De plus, une licence sera octroyée à un manufacturier pour commercialisation de la technologie SLP pour l'analyse en continu des teneurs en or dans les mines.

Résultats obtenus

Au Québec, environ 17 mines d'or sont en opération et des centaines d'échantillons de roches y sont prélevés quotidiennement pour être envoyés aux laboratoires pour en déterminer la teneur en or. Habituellement, un délai de 24 à 48 heures est nécessaire à l'obtention des résultats, obligeant les opérateurs miniers à prendre des décisions opérationnelles avant de connaître les résultats. Ce projet innovateur et unique dans le monde est possible grâce à la technologie émergente de spectroscopie d'émission de plasma induit par laser (Laser Induced Breakdown Spectroscopy - LIBS). En effet, cette dernière satisfait au besoin de l'industrie minière pour la détermination de l'or in situ, en temps réel. Le montage expérimental actuel permet des limites de détection de 0,8 et 1,5 ppm respectivement pour les échantillons riches en silice ou en fer-soufre, répondant ainsi aux besoins de l'industrie minière en termes de limite de détection (~ 1 ppm).

Il est reconnu dans la littérature que l'or a une distribution spatiale hétérogène. Il est donc très difficile d'obtenir les mêmes teneurs en or en faisant des répliques d'analyses géochimiques sur un même échantillon. Néanmoins, les mines ont déjà connaissance de ce fait et prennent leur décision malgré cela. Ce projet a montré que la technique LIBS est très prometteuse, car la majorité des résultats LIBS présentent un écart-type relatif bien souvent inférieur à celui retrouvé entre laboratoires utilisant le même protocole expérimental.

L'utilisation d'outils statistiques a permis d'établir des protocoles expérimentaux préliminaires en tenant compte de la forme du matériel analysé ainsi que de la minéralisation. Pour les échantillons de type carotte (1 à 1,50 m de long), le nombre de tirs optimal à réaliser, pour pouvoir être représentatif des échantillons, serait compris entre 1 000 et 1 500 tirs. Quant aux roches (dizaine de cm), le nombre de tirs optimal est de 150. En fonction du type de minéralisation, les échantillons de types veines de quartz nécessitent 1 000-1 500 tirs. Les échantillons de type sulfures doivent avoir un nombre de tirs supérieur à 1 000 pour être représentatifs. L'usage d'un pas supérieur ou égal à 8 permet de minimiser le nombre de tirs des échantillons et ainsi diminuer le temps d'acquisition de la mesure. L'appareil portable permettant de réaliser 20 tirs/sec, le temps d'analyse sur les différents chantiers pourra donc être, en moyenne, d'une dizaine de minutes selon la surface à analyser, rencontrant ainsi les exigences opérationnelles des mines.

Les stages réalisés dans les mines partenaires ont également permis de réaliser que le LIBS peut être aussi bien utilisé au niveau des chantiers transversaux/longitudinaux, des roches dans les godets, des carottes et des copeaux de forage, que ce soit dans les mines à ciel ouvert ou souterraines. La prise de décision pour le minage d'un chantier ne nécessitera plus l'attente des résultats 24h à 48h après échantillonnage, mais peut être faite par le géologue ou le technicien une dizaine de minutes après son arrivée sur le site.

Pour la suite du projet, il serait intéressant d'analyser plus d'échantillons afin de valider les tendances observées à ce jour et de comparer les résultats obtenus avec le LIBS avec une autre technique surfacique permettant une autre validation de cette technique déjà prometteuse. La microfluorescence X est un appareil présent à l'Université Laval et pourrait permettre de faire cette comparaison surfacique, même si cette technique est très lente par rapport au LIBS. En ce qui concerne l'analyse statistique, il serait intéressant de tester la sensibilité de l'appareil dans la détermination des faibles teneurs en or, le seuil du continuum dans le choix de la courbe de calibration, afin de pouvoir valider les teneurs en or obtenues à partir du LIBS. La mise en place de

l'appareil portatif permettrait de mettre en application et de tester le protocole d'échantillonnage sur une face de chantier en production.

Pour en savoir plus

1. Rifai K, Laflamme M, Constantin M, Vidal F, Sabsabi M, Blouin A, Bouchard P, Fytas K, Castello M, Nguengang Kamwa B (2017). Analysis of gold in rock samples using laser-induced breakdown spectroscopy: matrix and heterogeneity effects. *Spectrochimica Acta Part B*, 134 : 33-41.
2. Nguengang Kamwa B, Laflamme M, Constantin M, Sabsabi M, Blouin A, Bouchard P, Vidal F, Rifai K, Castello M, Fytas K (2017). Sampling strategy by statistical analyses of LIBS data in the context of a portable gold analyser. Tenth International Mining Geology Conference 2017- Paper Number : 081.
3. Nguengang-Kamwa B, Laflamme M, Constantin M, Rifai K, Castello M, Fytas K, Vidal F, Blouin A, Bouchard P, Sabsabi M. (2017). Definition of a sampling strategy by statistical analyses of LIBS data in the context of portable gold analyzer. In: SGA Québec. Québec; 2017. p. 173-NaN-63.
4. Castello M, Constantin M, Laflamme M, Rifai K, Nguengang-Kamwa B. Measurements of gold in ores by laser-induced breakdown spectroscopy. In: SGA Québec 2017. Québec; 2017. 173-NaN-63.

Partenaires du projet

- Agnico Eagle
- Hecla Québec
- lamgold
- Osisko

Objectif(s)

L'objectif du projet est de développer une banque d'informations sur les méthodes et séquences de développement et minage dans les mines profondes et d'élaborer un guide pratique en conception et ingénierie minière pour les mines profondes ainsi qu'un protocole d'essais et de simulation

Résultats obtenus

Concernant le volet d'exploitation minière, en premier lieu, il a été possible de dépeindre la réalité, les conditions, les problématiques et les défis de l'industrie minière québécoise exploitant ou visant l'exploitation en profondeur. En parallèle, la réalisation du projet a permis d'identifier clairement les lacunes existantes dans la littérature relativement à l'utilisation de la dilution et les pertes opérationnelles de minerai comme étant les principaux paramètres pour évaluer la performance technique des chantiers d'abattage et les risques de mauvaise interprétation qui en découlent.

De ce fait, le projet a permis, d'une part, de reconnaître que les facteurs d'influence de la performance des chantiers les plus intimement liés à la profondeur de minage sont l'état des contraintes in situ et leurs ratios. L'étude de l'effet significatif du ratio sur la stabilité des épontes des chantiers et sa quantification a mené à l'élaboration d'un modèle d'évaluation. Ce dernier prend en compte l'effet de la variation dudit ratio en fonction de la profondeur par le biais d'un facteur de correction appliqué.

D'autre part, le projet démontre qu'une évaluation de la performance technique des chantiers basée uniquement sur les concepts de dilution et pertes ne parvient pas à refléter correctement ladite performance, au risque de l'évaluer incorrectement, affectant toute la chaîne des décisions qui sont prises en conséquence. Dans le but de pallier à cette situation, une méthodologie mieux adaptée aux besoins actuels de l'opération a été développée et validée par la pratique minière. Ladite méthodologie permet également de quantifier l'impact de la performance technique des chantiers sur quelques aspects d'importance économique.

Par ailleurs, le projet en question a analysé en détail les différentes alternatives de transport qui s'offrent dans les conditions des mines profondes, en faisant ressortir les avantages et les inconvénients de chaque option. Un arbre de décision a été élaboré à partir des analyses, dans le but de proposer un outil pratique pour l'industrie tenant compte des conditions et mettant l'accent sur les problématiques observées communément sur le terrain. Qui plus est, l'étude porte une attention spéciale à la variabilité du coût par rapport à la distance parcourue, en proposant plusieurs voies d'optimisation sachant que le coût de transport dans une mine souterraine est l'une des variables les plus significatives quand on considère l'ensemble des coûts totaux d'opération.

En outre, on sait que le choix d'utiliser une rampe ou un puits interne pour l'exploitation éventuelle des zones minéralisées se trouvant sous les infrastructures existantes d'une mine en opération amène des avantages et des inconvénients. Étant donné qu'il s'agit là d'un des défis d'exploitation des mines profondes, ce projet se penche sur l'évaluation de ceux-ci en adoptant une vue d'ensemble et qui aboutit dans l'élaboration d'un outil informatique complet permettant de prendre une décision plus éclairée en comparant les différentes options pour des scénarios donnés.

Enfin, les travaux portant sur le traitement du minerai ont permis de documenter l'effet de la dilution opérationnelle non planifiée sur le taux de production d'un circuit de broyage conventionnel et la dualité entre celui-ci et le rendement en or obtenu lors de l'extraction par cyanuration.

Le tout, sachant que le Québec, bien qu'étant une province favorable à l'activité minière, elle doit tout de même innover afin de résoudre de nombreux défis, et que cette innovation passe, d'abord, par une compréhension de la réalité de ces mines afin de proposer un éventail de voies

d'optimisation de façon à diminuer les écarts entre les études de faisabilité et les résultats de l'opération minière qui s'en suit.

Pour en savoir plus

1. Ibarra-Gutiérrez, S., Enriquez-Lopez, E., Thiombiano, Y., Planeta, S. & Laflamme, M., Mining dilution and ore loss impact on operating cost and the effect of ROM grade on present values, Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Mine Operations, Editor Juan Carlos Barros, Santiago, Chile, 2016.
2. Robert-Martel, J., Laflamme, M., Planeta, S., Integration of an empirical approach for evaluating the dilution in the design of open stopes in deep mines, 24th World Mining Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

Partenaires du projet

- Agnico Eagle
- Goldcorp – Éléonore
- Iamgold

3.13 Remblai minier en pâte cimenté dans le pergélisol : étude du transport et des conditions thermiques de cure - Mamert Mbonimpa, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Objectif(s)

L'objectif de cette étude était de développer de nouveaux outils pour prédire les conditions thermiques de cure du remblai en pâte cimenté (RPC) à l'échelle d'un chantier souterrain dans le pergélisol.

Résultats obtenus

Ce projet a donné lieu au développement de la technologie de remblayage minier dans le pergélisol où le remblai en pâte cimenté (RPC) n'est pas encore utilisé. Deux outils numériques ont été développés dans le code COMSOL Multiphysics pour le design d'un système de remblayage minier dans le pergélisol.

Le 1^{er} outil permet de prédire les conditions thermiques de cure du RPC, ce qui nécessite la connaissance de la température du RPC au moment de sa déposition dans le chantier minier. Le 2^e outil permet de prédire cette température ainsi que la pression de pompage requise en tenant compte du changement de température du RPC le long du système de distribution (ce qui est nouveau!). L'optimisation des recettes de RPC au laboratoire pourra être réalisée de manière plus sécuritaire.

Le premier objectif spécifique visé était de contribuer à une meilleure compréhension de l'impact des basses températures des conditions nordiques sur le transport du RPC à travers un réseau de distribution constitué de pipelines et de trous de forage. Pour cela, l'effet de la température ambiante sur les propriétés rhéologiques et thermiques du RPC frais a d'abord été étudié. Ces deux propriétés influent sur les pressions d'écoulement et les échanges de chaleur internes (dans le RPC) et externes (avec l'extérieur). Les résultats obtenus indiquent que les propriétés rhéologiques des RPCs sont thermodépendantes contrairement aux propriétés thermiques des RPCs frais (non gelés) qui ne sont pas thermodépendants. Des tests d'écoulement en boucle ont ensuite été réalisés à l'échelle du laboratoire pour déterminer l'évolution de la température et des pertes de charge le long du réseau d'écoulement. Les données obtenues ont alors été utilisées pour calibrer afin de déterminer et simuler un modèle numérique d'écoulement du RPC avec le module « Non Isothermal Pipe Flow » du code COMSOL Multiphysics® 5.2. Il a été observé que les données expérimentales concordaient très bien avec les données prédites avec le modèle. Le modèle numérique a finalement été utilisé pour simuler le transport du RPC dans un réseau de distribution typique à grande échelle (fourni par le partenaire industriel) afin d'optimiser le design du système de distribution en déterminant les pressions de pompages et surtout la température de mise en place du remblai dans les chantiers souterrains du pergélisol. L'influence de divers paramètres (vitesse de transport du RPC, diamètre de pipelines, isolation thermique des pipelines et température de l'air extérieur, de l'air sous terre et du RPC à l'usine) a été étudiée.

Le deuxième objectif spécifique visait à contribuer à une meilleure compréhension des conditions thermiques de cure du RPC dans des chantiers souterrains délimités par des parois de pergélisol. L'effet du gel sur les propriétés thermiques du RPC a d'abord été étudié. Par la suite, un modèle numérique construit à l'aide du module « Heat Transfert » du code COMSOL Multiphysics® 5.2 a été validé avec des résultats expérimentaux obtenus au laboratoire à partir de modèles physiques simulant le transfert de chaleur 1D et 3D dans le remblai. Le transfert de chaleur 1D a été simulé avec des essais en colonnes soumises à différentes conditions thermiques aux frontières. Le transfert de chaleur 3D a été simulé à l'aide d'un baril rempli de RPC et placé dans une chambre froide à une température contrôlée (autour de -11°C). Les colonnes et le baril étaient instrumentés pour mesurer la distribution et l'évolution de la température dans les matériaux utilisés. Une très bonne concordance a été observée entre les résultats expérimentaux et numériques. Le modèle numérique calé et validé a été ensuite utilisé pour étudier le transfert de chaleur 3D dans le RPC

curant sous les conditions aux frontières des chantiers miniers souterrains dans le pergélisol. Les caractéristiques d'un chantier typique fournies par le partenaire industriel ont été considérées. Les résultats des simulations numériques ont permis de montrer comment la température diminuait progressivement dans le RPC en fonction du temps jusqu'à ce qu'il soit complètement gelé et atteigne la température du pergélisol. Plusieurs facteurs d'influence (dimensions des chantiers, distance d'application de la condition aux frontières, type de roche du pergélisol, température de déposition du RPC, température initiale du pergélisol, etc.) ont été étudiés.

Ce projet de recherche a permis de développer les premiers outils d'aide à la conception appropriée du RPC en conditions nordiques. Ces outils qui s'intègrent à l'ensemble des connaissances déjà acquises sur le RPC en zones tempérées seront mis au profit des exploitations minières en milieu nordique futur des Mines Agnico Eagle Ltée et d'autres entreprises minières canadiennes, voire même étrangères. Ce projet a aussi contribué au développement des capacités de recherche au Québec, entre autres par la formation de deux étudiants à la maîtrise et de trois étudiants de premier cycle. Il y a aussi des retombées au niveau économique, social et environnemental. En effet, la technologie de remblayage minier souterrain permet de stocker sous terre jusqu'à 50 % du volume des résidus qui auraient dû être stockés en surface (réduction de la contamination de l'environnement, surtout lorsque ces résidus sont générateurs de drainage minier acide ou neutre contaminé). Le RPC en conditions nordiques contribuera ainsi à réduire l'empreinte écologique des activités minières sur le territoire québécois, et particulièrement en milieu nordique où l'environnement est fragile.

Pour en savoir plus

1. Beya, Kazambua Fabrice, Mbonimpa, Mamert, Belem, Tikou, Benzaazoua, Mostafa, Marceau, Ugo, Kalonji, Kayumba, Li, Li, Ouellet, Serge, 69^e Conférence Canadienne de Géotechnique : GéoVancouver 2016, « Modélisations physique et numérique du transfert de chaleur 1D et 3D dans le remblai en pâte cimenté sous diverses conditions thermiques de cure », Vancouver, Canada, octobre 2016.
2. Kalonji, Kayumba et al., Mbonimpa, Mamert, Belem, Tikou, Benzaazoua, Mostafa, Beya, Kazambua Fabrice, Ouellet, Serge 69^e Conférence Canadienne de Géotechnique : GéoVancouver 2016, « Calage d'un modèle numérique de prédiction de l'évolution de la température pendant le transport du remblai en pâte cimenté », Vancouver, Canada, octobre 2016.
3. Kalonji, Kayumba, Mbonimpa, Mamert, Belem, Tikou, Benzaazoua, Mostafa, Beya, Kazambua Fabrice, Ouellet, Serge 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference: GeoQuebec 2015 September 20-23, Quebec, QC., Canada., « Preliminary investigation of the effect of temperature and salinity on the rheological properties of fresh cemented paste backfills », Quebec, Canada, septembre 2015.
4. Beya, Kazambua Fabrice, Mbonimpa, Mamert, Belem, Tikou, Benzaazoua, Mostafa, Kalonji, Kayumba, Ouellet, Serge 68^e conférence canadienne de géotechnique et 7^e conférence canadienne sur le pergélisol, « Preliminary study of the influence of temperature and salinity on the thermal properties of hardening cemented paste backfill », Québec, Canada, septembre 2015.

Partenaire du projet

- Mines Agnico Eagle Ltée

3.14 Séquestration du CO₂ à la cheminée dans l'industrie du fer par carbonatation minérale de résidus miniers : valorisation de deux déchets - Guy Mercier, Institut National de la Recherche Scientifique

Objectif(s)

La compagnie Cliffs Natural Resources (CNR) souhaitait trouver un procédé pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'usine de bouletage de même qu'une méthode pour améliorer la gestion des résidus entreposés sur son site minier. La problématique était donc de développer un procédé de séquestration du CO₂, peu coûteux et efficace, qui permettrait également l'utilisation des résidus miniers et ainsi la diminution de la taille du parc à résidus.

La carbonatation minérale, réaction faisant partie du processus d'altération des silicates, est un phénomène naturel connu et étudié pour ses possibilités d'application à la séquestration du CO₂. Les matériaux qui contiennent des cations réagissant avec le CO₂ pour donner des carbonates (calcium, magnésium, fer) peuvent être utilisés en carbonatation minérale. Parmi ces matériaux on trouve la serpentinite (Pasquier et al., 2013), certains types de roches calciques (Ben Ghachem et al., 2013), les résidus d'extraction de minerais de fer (comme pour la compagnie Cliffs Natural Resources), du titane ou des déchets industriels, tels que les bétons usés et les scories métallurgiques (Bobicki et al., 2012).

L'objectif principal de ce projet, réalisé en partenariat avec la compagnie minière Cliffs Natural Resources (CNR), a été de vérifier le potentiel des résidus miniers à être intégré dans un procédé de carbonatation minérale. L'utilisation de ces résidus permettrait non seulement de réduire les émissions, mais également de diminuer la quantité de résidus localisés dans les parcs, tout en apportant une valeur ajoutée à ces déchets.

Résultats obtenus

Afin de déterminer le potentiel des résidus miniers, une caractérisation complète a été effectuée. Le métal le plus abondant dans les résidus et pouvant former des carbonates avec le CO₂ est le fer (21 % Fe₂O₃). Le calcium et le magnésium sont également présents, mais en quantité limitée. Les principaux minéraux sont de l'hématite et le quartz. Des essais préliminaires de carbonatation minérale en conditions adaptées au domaine industriel, ont été réalisés. Les résultats n'ayant pas été satisfaisants les travaux se sont poursuivis selon un processus visant l'extraction des éléments réactifs, dit indirect. Deux voies ont été envisagées : l'usage d'acide sulfurique et l'usage du SO₂ selon des teneurs ajustées à ce qu'une usine de bouletage de minerai de fer peut émettre.

Les essais avec l'acide sulfurique n'ont permis de solubiliser que 4 % du fer total. Le passage à un pH favorable à la carbonatation a éliminé le fer du système et les métaux restants présents (Mg, Ca) ont formé une très faible quantité de dolomite lors de la mise en contact avec le CO₂. Les essais avec l'ajout de SO₂, dans un ratio SO₂-CO₂ déterminé par la revue de littérature, ont démontré qu'il était très difficile de produire un carbonate de fer avec les résidus miniers du Lac Bloom dans les conditions d'expérimentations.

En parallèle à ces divers essais, une estimation du potentiel minéral des roches provenant des carrières de Sept-Îles a été effectuée. La majorité des roches échantillonnées comportaient de l'olivine, avec une composition proche du pôle ferreux communément appelé fayalite. La méthodologie des essais de carbonatation minérale sur ce minéral est similaire aux précédents, mais les quantités de SO₂ ne sont pas les mêmes. Les résultats semblent plus prometteurs qu'avec les résidus miniers d'après l'observation d'une diminution de CO₂ et de la précipitation de carbonate de calcium. Cependant les rendements de la réaction demeurent trop faibles et nécessitent de plus amples recherches.

En conclusion, les résultats de carbonatation minérale avec les résidus miniers générés lors de l'extraction du fer (présents dans les oxydes de fer) avec le SO₂ ou de l'acide sulfurique, sont peu concluants pour le développement d'un procédé de carbonatation minérale à l'échelle industrielle.

Par contre, ils ouvrent des possibilités intéressantes pour d'autres matériaux riches en fer, présents aux alentours de Sept-Îles ou dans des mines qui seront bientôt en exploitation (phosphate, etc.). Le projet a permis d'obtenir une caractérisation complète des résidus de la mine du Lac Bloom, ces informations, plus les données de réactivité, pourront être utiles lors de l'élaboration de nouvelles solutions pour la gestion de ces résidus. Ce projet a également permis de réaliser une cartographie des sites ayant un potentiel minéralogique pour la carbonatation minérale dans la région de Sept-Îles.

Pour en savoir plus

1. Beaulieu, Cindy, Cecchi, Emmanuelle, Journée des sciences de la Terre, INRS-ETE, « Optimisation de la réaction de carbonatation minérale à l'aide de résidus miniers provenant de l'industrie du fer », Québec, Canada, mars 2016.

Partenaire du projet

- Cliffs Québec Mine de fer Limitée

3.15 Des mines et des communautés : mieux comprendre les impacts du développement minier sur les communautés autochtones et non-autochtones du Nord - Thierry Rodon, Université Laval

Objectif(s)

- 1) Comprendre comment le développement minier peut affecter la cohésion sociale des communautés minières autochtones et non-autochtones du Nord québécois;
- 2) Analyser l'évolution de l'emploi local dans les mines du Nord québécois;
- 3) Comprendre les impacts du développement minier sur l'écologie du caribou migrateur et celle des petits fruits et sur l'économie de subsistance de communautés autochtones québécoises.

Résultats obtenus

Des analyses qualitatives et quantitatives de données ont permis d'obtenir une meilleure compréhension de l'impact du développement minier sur la cohésion sociale et le bien-être de communautés minières du Nord québécois, sur l'évolution de l'emploi dans les mines, sur l'écologie du caribou migrateur et sur l'économie de subsistance de communautés autochtones québécoises.

En réponse au premier objectif, les chercheurs ont constaté, à la suite d'entrevues individuelles et avec des groupes de discussion dans une communauté crie et un village inuit, que les projets miniers avaient divisé la communauté entre ceux qui soulignaient les retombées positives possibles en termes d'emploi et ceux qui mentionnaient les impacts sociaux et le manque de compensations adéquates. Les principales préoccupations soulevées dans la communauté concernaient la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes. Au-delà de ces discussions, les chercheurs ont constaté le rôle des impacts sociocumulatifs (sédentarisation, abatage des chiens, pensionnats, développements hydro-électriques) dans l'acceptabilité sociale et la capacité des communautés à offrir un consentement libre, préalable et éclairé. Ces facteurs peuvent également nuire aux délibérations au sein des communautés (capacité d'exprimer ses préoccupations, cohésion sociale) et finalement mener à une perte de confiance envers les institutions et nuire au dialogue.

Pour ce qui est du deuxième objectif concernant l'évolution de l'emploi local dans les mines du Nord québécois et du Labrador, l'étude montre qu'au Nunavik et au Nunatsiavut, les communautés situées près des sites miniers ne bénéficient pas davantage des emplois à la mine et qu'on assiste à une forte augmentation de la proportion des employés inuits vivant dans les grands centres, un impact direct du système de navettage (fly-in/fly-out) mis en place depuis quelques années et qui facilite la délocalisation des travailleurs. Aussi, l'équipe a trouvé que l'intégration des employés et le sentiment d'appartenir à une communauté sont des facteurs qui contribuent à augmenter la rétention de la main d'œuvre. Ces facteurs seraient particulièrement importants pour les travailleurs inuits dont l'intégration serait plus difficile, car ces derniers sont notamment plus soumis aux stéréotypes négatifs que la plupart des autres travailleurs.

Finalement, pour le troisième objectif, notre recherche met à jour certains des impacts du développement minier sur l'écologie du caribou migrateur et sur l'économie de subsistance de communautés autochtones québécoises. Par exemple, les chercheurs ont constaté que les infrastructures minières ont un impact sur les caribous migrateurs. Ainsi, les chercheurs ont mesuré les zones d'influence des perturbations pour certaines infrastructures, c'est-à-dire les zones où moins de caribous qu'attendu ont été observés en se basant sur la qualité de l'habitat. Ces zones d'influence vont de deux à quatre kilomètres pour une communauté, mais peuvent s'étendre jusqu'à 21 km pour un site d'exploration minière et jusqu'à 23 km pour une mine en opération. De même, ces infrastructures contribuent à une perte cumulée d'habitat allant jusqu'à 14%. Lorsqu'on considère la présence de chasseurs sportifs sur le territoire, qui accentue l'évitement des perturbations par les caribous, la perte cumulée d'habitat peut atteindre 35%. En ce qui a trait à l'économie de subsistance, les chercheurs ont pu constater que les activités minières pouvaient affecter la disponibilité des ressources fauniques, tout en offrant un soutien financier pour ces

activités. De même, les horaires de navettage peuvent faciliter la pratique d'activités traditionnelles, mais peuvent affecter les réseaux sociaux qui sous-tendent la pratique de ces activités.

Les résultats du projet sont notamment disponibles sous forme [d'une carte narrative \(http://ulaval.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=e9855aa6ead44d3daaf26a51258bd727&folderid=71cb86a62cf04a6d9e5e27d4f9e615d7\)](http://ulaval.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=e9855aa6ead44d3daaf26a51258bd727&folderid=71cb86a62cf04a6d9e5e27d4f9e615d7) qui présente les interactions entre le développement minier, les troupeaux de caribous migrateurs et l'utilisation du territoire par les communautés autochtones du Québec nordique.

Pour en savoir plus

1. Bourgeois, S. et Rodon, T. Soumis. Comprendre la décision d'imposer un « moratoire administratif » sur l'exploration et l'exploitation de l'uranium: l'influence des coalitions autochtones et allochtones auprès du gouvernement du Québec. *Revue canadienne de science politique*.
2. Bourgeois, S. et J. Fo11in (dirs). Accepté. Les défis de la mise en oeuvre de la Déclaration des Nations Unies sur le droit des peuples autochtones, *Les Cahiers du CIERA*, numéro spécial, Printemps 2018.
3. Rodon, T. 2017. Development in Nunavik: How Regional and Local Initiatives Redefine Sustainable Development in Nunavik. *American Review of Canadian Studies*, 47(2), 176-188.
4. Rodon, T. 2014. From Nouveau-Québec to Nunavik and Eeyou Istchee: The Political Economy of Northern Québec. *Northern Review*. 38 (2014), 93-112.
5. Rodon, T. et I. Lemus-Lauzon. Resource Royalties Distribution and Community Development. *Northern Review*.
6. Rodon, T. et F. Lévesque. 2015. Understanding the Social and Economie Impacts of Mining Development in Inuit Communities: Evidence from Past and Present Mines in Inuit Nunangat. *Northern Review*, 41(2015), 13-39.
7. Plante S., Dussault C., Richard J. H. et S. D. Côté. Human disturbance effects and cumulative habitat loss in endangered migratory caribou. *Biological Conservation*. 224 (2018), 129-143.
8. Plante, S., Dussault, C. et S. D. Côté. 2017. Landscape attributes explain migratory caribou vulnerability to sport hunting. *The Journal of Wildlife Management*, 81(2), 238-247.

Partenaire du projet

- ArcelorMittal Mines

3.16 Valorisation des carottes de forage d'exploration minière grâce au perfectionnement du Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) - Pierre-Simon Ross, Institut National de la Recherche Scientifique

Objectif(s)

L'objectif général du projet de recherche est la valorisation des carottes de forage d'exploration minière grâce au perfectionnement du LAMROC.

Les objectifs spécifiques étaient de (1a) acquérir des données avec le LAMROC sur le plus de forages possible, dans le secteur de la mine de sulfures massifs volcanogènes Bracemac-McLeod, afin d'avoir une base de données dense dans un secteur d'intérêt; (1b) valider l'utilisation de paramètres spectraux infrarouges pour semi-quantifier la composition des micas blancs et des chlorites; (1c) estimer le sodium à partir des autres éléments géochimiques mesurés par le LAMROC; (2a) valider les résultats de la spectrométrie infrarouge en termes de proportions de micas blancs et de chlorites; (2b) développer une librairie spectrale spécifique à Matagami; (3) tester les mesures des analyseurs à FRX portatifs sur des roches en poudre et les comparer avec des mesures in situ sur les carottes de forage; et (4) perfectionner les outils d'analyse statistique multivariée applicables à l'exploration minière.

Résultats obtenus

Deux étés de travaux de terrain ont eu lieu à Matagami (2014 et 2015), avec une équipe de trois personnes : Nathalie Schnitzler (étudiante de maîtrise), Alexandre Bourke (professionnel de recherche), et une stagiaire de premier cycle chaque été, le tout sous la supervision de Pierre-Simon Ross (professeur). Neuf forages ont fait l'objet d'analyses complètes au LAMROC et de descriptions géologiques détaillées.

Les forages vont de la lentille de sulfures McLeod jusqu'à 1,5 km vers l'Est-Sud-Est, ce qui permet de voir comment les propriétés varient en fonction de la distance du gisement. Nous avons notamment montré que la composition des micas blancs varie en fonction de la distance au gisement (objectif 1a). Bourke et Ross ont confirmé la validité de l'utilisation de caractéristiques spectrales des chlorites et des micas blancs pour l'exploration grâce à des mesures de composition de micas blancs et de chlorites à la microsonde électronique sur une vingtaine d'échantillons couvrant la gamme des compositions possibles dans le secteur Bracemac-McLeod (objectif 1b). Le sodium a été estimé par Schnitzler et Erwan Gloaguen (professeur) à partir des autres éléments mesurés par le LAMROC avec la méthode des Random Forest, une technique d'apprentissage automatique (machine learning) (objectif 1c). Bourke et Ross ont comparé les proportions de micas blancs et de chlorites dans un groupe de 21 échantillons de Matagami selon deux méthodes : la spectrométrie infrarouge avec le logiciel TSG Core (résultats du LAMROC), et la diffraction des rayons X (raffinement de Rietveld) en laboratoire. La corrélation est bonne, ce qui valide nos résultats minéralogiques (objectif 2a). Pour la librairie spectrale spécifique à Matagami, les données sont acquises et l'interprétation reste à faire (objectif 2b).

Par rapport à l'objectif 3, Bourke et Ross ont réalisé une étude géochimique de 27 échantillons. Les mesures de FRX portatif ont été faites in situ et aussi sur les échantillons broyés et pulvérisés, le tout étant comparé aux résultats de la géochimie traditionnelle. Ceci a permis d'établir que la préparation des échantillons n'améliore pas la précision analytique ni l'exactitude des résultats de FRX portatif, mais que la variabilité des mesures due à l'hétérogénéité minéralogique est grandement minimisée avec les poudres. Toutefois, nous avons montré que pour les profils géochimiques multiéléments à haute résolution spatiale le long des forages, les données in situ lissées sont appropriées.

Pour atteindre l'objectif 4, soit la diversification des outils d'analyse statistique multivariée, Schnitzler et Gloaguen ont utilisé des algorithmes de « bagging » qui offrent une grande flexibilité dans le nombre de variables et leur nature. L'ensemble d'entraînement consistait en quelques forages ayant la géochimie, ainsi que les mesures du LAMROC. L'algorithme a ensuite été

appliqué à un sous-ensemble test, mais aussi aux autres forages ne contenant que les données du LAMROC. Les résultats de la calibration et du test ont montré des bonnes corrélations.

Ce projet a permis de perfectionner le LAMROC, qui était au début du projet le seul laboratoire du genre dans le monde. Un laboratoire similaire est désormais (mi-2016) en cours de développement en Australie, mais pour l'instant le Québec reste un leader international des mesures multiparamétriques sur les carottes de forage d'exploration minière, et de l'interprétation de ces mesures. Le projet a aussi permis aussi de former du personnel qualifié. Le projet se continue pour une dernière année pour compléter les travaux, notamment le projet de maîtrise.

Pour en savoir plus

1. Fresia, Bastien, « Lithological discrimination based on statistical analysis of multi-sensor drill core logging data in the Matagami VMS district, Quebec, Canada », REVUE: Ore Geology Reviews AUTEURS: Fresia B, Ross P-S, Gloaguen E, Bourke A, Elsevier, 2016, vol 80, p. 552-563.
2. Ross, Pierre-Simon, « High-resolution gamma ray attenuation density measurements on mining exploration drill cores, including cut cores », REVUE: Journal of Applied Geophysics AUTEURS: Ross P-S, Bourke A, Elsevier, 2016, vol 136, p. 262-268.
3. Bourke, Alexandre, « Portable X-ray fluorescence measurements on exploration drill cores: comparing performance on unprepared cores and powders for “whole-rock” analysis », REVUE: Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis AUTEURS: Bourke A, Ross P-S, The Geological Society of London, 2016, vol 16, no 2, p. 147-157.
4. Ross, Pierre-Simon, « High-resolution physical properties, geochemistry and alteration mineralogy for the host rocks of the Archean Lemoine auriferous VMS deposit, Canada », REVUE: Economic Geology AUTEURS: Ross P-S, Bourke A, Mercier-Langevin P, Lépine S, Leclerc F, Boulerice A, Society of Economic Geologists, 2016, vol 111, no 7, p. 1561–1574.

Partenaire du projet

- Glencore/Xstrata

3.17 Potentiel des systèmes énergétiques hybrides éolien-diesel-air comprimé pour les sites miniers - Daniel Rousse, École de Technologie Supérieure

Objectif(s)

Le présent projet SHEDAC vise à valider l'implantation d'une centrale de production énergétique hybride éolien-diesel-air comprimé (SHEDAC ou WDCAS, en anglais) afin d'augmenter de 50 % la capacité de production électrique du camp Esker de l'entreprise Transport Ferroviaire Tshuétin Inc. en limitant l'impact environnemental.

Résultats obtenus

- 1) Le développement d'une expertise forte dans l'ingénierie des systèmes énergétiques hybrides en milieu nordique qui a donné lieu à la formation de 6 personnes au niveau maîtrise, 2 au niveau du doctorat dont l'une a poursuivi au post-doc sur la commande des systèmes SHEDAC;
- 2) une connaissance nouvelle des applications SHEDAC;
- 3) le développement d'une technologie de contrôle prédictif de consommation/production comme en témoignent les publications scientifiques qui découlent de ce projet;
- 4) une collaboration nationale et internationale nouvelle entre équipes complémentaires puisque nous avons pu compter sur les conseils d'un collègue allemand pour la partie contrôle;
- 5) une approche intégrée de la gestion énergétique dans des stations/camps/villages isolés grâce à l'algorithme de contrôle en temps réel développé par le chercheur Miloud Rezkallah.

Retombées

- 1) Une réduction de l'impact écologique par un facteur de presque 2 de l'emploi de diesel pour l'alimentation électrique du camp Esker;
- 2) la formation de personnel hautement qualifié, 8 au niveau gradué universitaire en plus des 4 stagiaires des collègues impliqués;
- 3) du contenu pour la création de formations spécifiques sur les sujets relatifs au projet;
- 4) des devis techniques pour implanter les applications SHEDAC puisque nous pourrions implanter l'une des solutions développées à Esker, une entreprise qui a à sa disposition une technologie qu'elle peut implanter ailleurs en sites isolés en fonction de la charge et des conditions climatiques.

Pour en savoir plus

1. Rezkallah, Miloud, «Design and Real-time Implementation of Novel APC with Improved P&O for Hybrid Wind-PV-Battery Standalone Power Generation System», IEEE Transaction on Industrial Electronics, IEEE, 2016. DOI: 10.1109/TIE.2017.2777404
2. Rezkallah, Miloud, «Lyapunov Function and Sliding Mode Control Approach for Solar-PV Grid Interface System», IEEE Transactions on Industrial Electronics DOI: 10.1109/TIE.2016.2607162, IEEE, 2016.

Partenaire du projet

- Tshuétin

3.18 La revégétalisation comme outil d'intervention et de rétablissement des services écosystémiques sur les sites miniers non-acidogènes - Sébastien Roy, Université de Sherbrooke

Objectif(s)

Répondre à quatre questions prioritaires pour développer des techniques de plantations efficaces et peu coûteuses sur les sites miniers à réhabiliter:

- 1) Comment planter des arbres et arbustes directement sur du roc et du sable ?
- 2) Est-ce que des mycorhizes pourraient aider les plantes sur de tels sites ?
- 3) Est-ce que des bactéries pourraient aider les plantes à survivre et croître ?
- 4) Une fois les plantes établies sur le site, est-ce que les plantes ont stimulé le développement d'une activité microbienne importante dans le sol sous ces plantes ?
- 5) Est-ce que cette microflore suggère qu'il y a rétablissement d'un écosystème fonctionnel ?

Résultats obtenus

L'activité minière est essentielle à l'économie québécoise, mais elle engendre malheureusement des perturbations et les sites doivent être réhabilités. De manière à restaurer un maximum de sites perturbés, il est impératif de diminuer le coût opérationnel de la revégétalisation. En nous inspirant de la nature boréale, notre équipe a amorcé le développement de stratégies et techniques de plantation sur des sites miniers qui visent à exploiter les plantes et les microorganismes indigènes à la forêt boréale pour revégétaliser les résidus fins et les stériles miniers non-acidogènes. Nous avons employé le pin gris, l'épinette blanche, l'aulne rugueux, l'aulne crispé et les avons plantés dans des conditions très hostiles où dominant le vent, la sécheresse et la carence nutritionnelle. Les communautés microbiennes (bactéries et champignons) côtoient naturellement les racines des plantes et elles jouent un rôle important dans la survie et la croissance de celles-ci, surtout dans des environnements extrêmes.

Nous avons donc employé des plantes inoculées avec des microorganismes et d'autres non inoculées, puis les avons transplantées sur une halde de roches stériles et un parc de résidus fins sur le complexe minier Sigma-Lamaque, à Val-d'Or. Les communautés microbiennes ont été suivies plusieurs années. Nous avons aussi isolé de l'environnement et caractérisé ces microorganismes. Notre étude des populations microbiennes nous permet de progresser dans la compréhension des associations pouvant aider à la survie et à la croissance des plantes sur le site. Cette information sera utilisée pour développer un inoculum de microorganismes bénéfique à la survie et à la colonisation des plantes préalablement inoculées avant de les réintroduire en milieu hostile.

Nous avons aussi voulu éliminer la nécessité de préparer le site minier avec de la matière organique fertilisante (boues d'épuration, autres) pour diminuer les coûts économiques et les émissions de gaz à effet de serre (GES). Notre projet a démontré que nous pouvons effectuer de telles plantations sans préparer le site minier et tout en établissant une grande diversité d'arbres et d'arbustes boréaux directement sur les stériles ou dans les résidus.

Nous avons maintenant une meilleure connaissance des populations microbiennes qui se développent dans la rhizosphère des espèces boréales que nous avons étudiées. Les connaissances et le savoir-faire développés pourront servir à court terme à la restauration écologique des sites miniers actifs, mais également des sites miniers orphelins au Québec. Ce projet multidisciplinaire en microbiologie et biotechnologie a été mené en laboratoire, mais aussi sur le terrain, nous permettant de démontrer l'efficacité réelle de ces phytotechnologies. Nous avons formé des étudiants de premier, deuxième, et troisième cycle, ainsi que de deux stagiaires postdoctoraux avec les connaissances et le savoir-faire pour devenir des acteurs de changement dans ce secteur d'activité.

Pour en savoir plus

1. Callender KL, Roy S, Khasa DP, Whyte L, Greer CW. 2016. Actinorhizal alder phytostabilization alters microbial community dynamics in gold mine waste rock from Northern Quebec: A greenhouse study. PlosOne, 11(2):e0150181.
2. Khasa DP, Nadeau MB, Roy S, Greer CW. 2014. Phytobial remediation of Sigma-Lamaque gold mine waste lands in Val D'Or, Québec. Canadian Reclamation, 14 (1), 36-39.
3. Nadeau BM, Khasa DP. 2016. Edaphic selection pressures as drivers of contrasting white spruce ectomycorrhizal fungal community structure and diversity in the Canadian boreal forest of Abitibi-Témiscamingue region. PLOS ONE | DOI:10.1371/journal.pone.0166420

Partenaires du projet

- Conseil national de recherches Canada
- ArborInnov Inc.
- CTRI
- Roche
- AEF Global Inc.
- Centre jardin Lac Pelletier
- Century Mining Corp.

3.19 Prédications critiques en revégétalisation de résidus acidogènes: effet des symbioses plantes-microorganismes sur la translocation des métaux et mécanismes assurant le maintien de l'homéostasie chez l'aulne dans ces environnements - Sébastien Roy, Université de Sherbrooke

Objectif(s)

Plusieurs sites miniers au Québec ont des résidus générateurs de drainage minier acide (DMA) contenant des métaux lourds (ex: plomb, arsenic, zinc, etc). Pour endiguer ce problème, l'industrie limite l'exposition de ces minéraux à l'oxygène par le biais, entre autres, de l'installation de couvertures avec effet de barrière capillaire (CEBC) par-dessus l'aire de stockage des résidus. Malheureusement, ces installations CEBC, avec le temps, sont colonisées par des arbres et des arbustes dont les racines peuvent percer les membranes sous-jacentes essentielles pour limiter la diffusion d'oxygène et la production de DMA. Parallèlement à cette situation, des végétaux colonisent naturellement les sites miniers abandonnés; encore là un contexte de contact entre plantes et minéraux générateurs acides.

Nous avons donc voulu déterminer le niveau de tolérance aux métaux lourds des aulnes: ces plantes pionnières souvent employées en réhabilitation.

Notre projet avait donc deux finalités pratiques:

1. évaluer si la colonisation naturelle d'aulnes sur des sites miniers acidogènes abandonnés entraîne un risque de dispersion de métaux dans l'environnement et;
2. évaluer si les aulnes ultimement pourraient être employés pour des travaux de revégétalisation sur ou à proximité de sites miniers dont les résidus génèrent du DMA.

Résultats obtenus

Nos résultats démontrent que les aulnes peuvent tolérer une exposition intermédiaire à des métaux lourds, que ce soit sous forme de DMA, ou encore de résidus fins acidogènes. Cette tolérance, témoignée par la survie des aulnes, est associée à une accumulation en métaux lourds au niveau des feuilles qui s'avère acceptable.

Nous concluons que lorsque les aulnes sont visiblement en santé, nous devrions retrouver une translocation de métaux lourds au niveau des feuilles qui ne sont pas très problématiques.

Nous constatons toutefois la très grande toxicité du DMA pur et des résidus fins acidogènes purs testés dans notre étude. Nous constatons également que malgré la tolérance constatée, il est impératif de pratiquer la vigilance et de mesurer les teneurs en métaux lourds (surtout au niveau foliaire) lorsque des végétaux sont en contact avec des minéraux acidogènes ou du DMA. Ce projet a permis la formation de deux étudiants à la maîtrise, un étudiant au doctorat et plusieurs stagiaires au baccalauréat, tous ayant été exposés à ce domaine multidisciplinaire où se côtoient des notions de biotechnologie environnementale, de biologie végétale, de microbiologie, de même que la réalité industrielle et réglementaire. Plusieurs seront outillés pour interagir avec l'industrie pour développer des approches de gestion environnementale sur-mesure, selon la réalité de l'entreprise et l'évolution des exigences environnementales.

Pour en savoir plus

1. Rizzi A, Haroune L, Roy S, Bellenger J-P, Beauregard PB. Biofilm and bacillibactin are essential to iron homeostasis in *Bacillus subtilis*. 19th International Conference on *Bacillus* and related Gram-positive bacteria. Berlin, Allemagne. 2017.
2. Rodrigue-Morin M*, Barrette K*, Roy S. Potentiel de translocation et de toxicité de résidus miniers acidogènes envers les espèces végétales et microbiennes indigènes. Québec Mines 2016. Québec. 2016.

3. Rodrigue-Morin M*, Roy S. Potentiel de translocation et de toxicité du drainage minier acide envers l'aulne, un arbuste de choix en restauration minière. Québec Mines 2017. Québec. 2017.

Partenaires du projet

- ArborInnov Inc.
- CTRI
- Roche
- AEF Global Inc.
- Iamgold

4. Fiches de résultats – projets financés lors du concours portant sur la perception sociale de l'industrie minière et l'acceptabilité sociale des projets miniers

4.1 Perception sociale de l'industrie minière et acceptabilité sociale des projets miniers - Jie He, Université de Sherbrooke

Objectif(s)

L'objectif général du projet est d'évaluer au Québec le décalage résultant entre les populations et les minières à l'égard de nouveaux projets miniers afin de mieux intégrer les préoccupations micro de la majorité silencieuse à travers les instruments macro couramment utilisées par les principales parties prenantes (PP). Les objectifs spécifiques sont de :

- (1) définir l'acceptabilité sociale dans l'évaluation des projets miniers via les approches micro et macro que nous appellerons acceptabilité sociale et acceptabilité sociétale respectivement;
- (2) recenser et améliorer les connaissances des déterminants majeurs des acceptabilités sociale et sociétale en évaluant à l'aide de l'étude Choix Multi-Attributs (CMA) l'ampleur des leviers/freins potentiels (e.g. climat de confiance, croyances, influence des médias et réseaux sociaux);
- (3) fournir aux Ministères concernés le cadre d'une méthodologie scientifique transposable aux différentes régions du Québec, projets industriels et acteurs mobilisés pour évaluer les critères d'acceptabilité sociale.

Résultats obtenus

Pour cet objectif, nous avons d'abord réalisé en 2016 une enquête qualitative sous forme d'entrevues semi-dirigées avec 63 individus qui représentaient les différentes parties prenantes des projets miniers partout au Québec et par la suite une enquête en ligne de la population générale du Québec en 2017 impliquant 3 000 répondants. Ces deux enquêtes nous ont permis dans un premier temps de recenser les déterminants majeurs des acceptabilités sociales pour la population et les principales parties prenantes.

Les analyses statistiques réalisées par la suite nous ont permis de mesurer les importances relatives de ces déterminants dans la formation de l'acceptabilité sociale pour la population générale et pour les différentes parties prenantes. Les informations obtenues de nos enquêtes ont également été utilisées pour comprendre comment ces différents facteurs déterminants de l'acceptabilité sociale varient selon les contextes (e.g. types minerais (Or vs. Uranium vs. Terre rare), valeurs, croyances, influence des médias et réseaux sociaux).

Nos travaux de recherche continuent dans les efforts de fournir au Ministère d'Énergie et des Ressources Naturelles un cadre d'une méthodologie scientifique transposable aux différentes régions du Québec, projets industriels et acteurs mobilisés. Plus précisément, nous visons à explorer la possibilité de la conception des indices composites d'acceptabilités sociale en se référant aux informations qualitatives et quantitatives obtenues de nos enquêtes et de nos résultats d'analyses statistiques. De plus, nous vérifierons également la possibilité de construire une grille de comparaison entre la population générale et les différentes parties prenantes des projets miniers qui nous aidera à identifier le décalage potentiel entre eux dans la perception de l'acceptabilité sociale.

Pour en savoir plus

Des articles et des rapports sont en voie d'être publiés.

Partenaire du projet

- ArcelorMittal

Objectif(s)

L'évaluation du risque social d'un projet minier doit se faire de manière précoce, dès que les grandes lignes industrielles sont esquissées, mais avant qu'elles ne soient figées. Nous développerons un outil de communication commun entre les explorateurs miniers, les investisseurs, les communautés et les gouvernements, afin d'identifier les points à bonifier dans un projet minier et de minimiser les risques pour toutes les parties prenantes. Nous avons développé jusqu'ici un indice partiel pour le Québec. Sur cette base, nous proposons :

- une extension de l'outil d'analyse du risque social, prenant en compte les aspects juridiques et politiques liés à différentes juridictions, et permettant des comparaisons avec des projets miniers canadiens et scandinaves; et
- l'utilisation d'internet pour démocratiser l'accès à l'information et mieux accéder à la perception des parties prenantes.

Résultats obtenus

Le cadre réglementaire et juridique qui s'applique au développement minier est propre à chacune des provinces et des territoires au Canada. Afin de comparer des projets miniers situés dans des juridictions canadiennes différentes, les juristes de l'équipe ont identifié, documenté et évalué les éléments du cadre juridique qui influencent l'acceptabilité sociale dans cinq provinces et territoires: le Québec, l'Ontario, la Saskatchewan, la Colombie-Britannique et le Nunavut. Une note globale a été déterminée pour ces provinces et territoires, allant de 67 % à 55 %, à la suite à l'évaluation du cadre juridique, ce qui donne des repères pour rendre ce cadre plus propice à l'acceptabilité sociale des projets miniers. Des comparaisons permettent d'identifier les meilleures pratiques.

Le projet a permis de revoir la liste des caractéristiques relatives aux projets miniers, aux entreprises qui les portent et aux communautés d'accueil, qui servent à évaluer le risque social pour un projet donné. De même, le questionnaire sur les communications a été revu. Ces révisions ont été faites à la suite des commentaires recueillis auprès d'utilisateurs potentiels de l'Indice de risque social, soit les investisseurs, les entrepreneurs miniers, les gouvernements et les membres des communautés où un projet pourrait se développer.

Pour mettre à l'épreuve l'indice, l'équipe s'est penchée sur plus de cent projets miniers ayant cours dans les cinq juridictions canadiennes précédemment citées. Les informations ont été compilées pour les caractéristiques relatives aux projets miniers, aux entreprises qui les portent et aux communautés d'accueil, de manière à calculer une cote de risque social pour chacun des projets miniers. On constate que plusieurs projets se développent dans des conditions qui ne sont pas optimales, avec un risque social bien présent. Si certaines conditions sont fixes, d'autres peuvent être modifiées afin de rendre le projet moins socialement risqué.

En parallèle, l'équipe a réalisé une analyse de presse pour ces mêmes projets, afin d'avoir un point de comparaison. Un constat émerge : il y a très peu d'articles négatifs dans les médias au sujet des projets miniers au stade de l'exploration minière. Cependant, certains projets font beaucoup parler d'eux tôt dans le processus de développement minier. C'est une indication de risque social qui concorde assez bien avec les projets miniers moins bien cotés par l'indice.

Afin de faciliter l'utilisation de l'indice du risque social, un outil web a été développé. Sa première version est prête pour des tests. Cet outil pourra recueillir de nouvelles données au sujet de projets miniers en développement lorsque les utilisateurs se l'approprient.

Pour en savoir plus

1. Stéphanie Yates, Kristina Maud Bergeron, Michel Jébrak, Philippe Angers, Valérie Lehmann, Charles Séguin, Suzanne Durand, Pierre-Yves Le Meur et Corinne Gendron (2016) « Indice du risque social : un outil pour mieux saisir les enjeux, risques et opportunités des projets miniers », Éthique publique [En ligne] vol. 18, no 1.
2. Kristina Maud Bergeron et Christophe Krolik (2017) L'Indice du risque social dans le secteur minier. Dans Le droit des ressources naturelles et de l'énergie, dir. C. Krolik, 127-134. (Montréal : LexisNexis).
3. Kristina Maud Bergeron et Michel Jébrak (2017) L'indice de risque social: un nouvel outil d'évaluation des projets miniers dans un contexte de développement durable. Dans L'industrie minière et le développement durable – Une perspective internationale en Francophonie, dir. A. Rouleau et D. Gasquet, 35-46. (Québec: Institut de la Francophonie pour le développement durable). <https://www.ifdd.francophonie.org/ressources/ressources-pub-desc.php?id=707>
4. Kristina Maud Bergeron, Michel Jébrak et Christophe Krolik (2017). Comparing social risk for mining projects located in different jurisdictions. Dans Proceeding of the 14th SGA Biennial Meeting: 1437-1440.

Partenaires du projet

- Association de l'exploration minière du Québec
- Goldcorp

4.3 Analyse de la perception des québécois sur le développement des ressources minérales et comparaison de l'acceptabilité sociale avec le développement d'autres ressources naturelles - Michel Malo, Institut National de la Recherche Scientifique

Objectif(s)

Les objectifs principaux sont d'évaluer le niveau de connaissances de la population par rapport au développement des ressources naturelles et de développer des guides pour favoriser l'acceptabilité sociale des projets de développement. Les objectifs secondaires sont :

- 1) Établir un portrait par région du Québec du niveau de connaissances sur les ressources naturelles (mines et hydrocarbures).
- 2) Déterminer quels sont les avantages et désavantages perçus par la population.
- 3) Déterminer quelles sont les attentes de la population par rapport au partage de la richesse et des bénéfices de l'exploitation des ressources.
- 4) Déterminer quels sont les principaux impacts appréhendés par la population.
- 5) Déterminer quel est le niveau de confiance des citoyens par rapport aux promoteurs du développement.
- 6) Comparer les deux filières de développement des ressources minérales et énergétiques.

Résultats obtenus

Dans le cadre du projet de recherche, le sondage a permis d'obtenir un portrait du niveau de connaissances et de la perception sociale des Québécois par région vis-à-vis le développement des ressources minérales. Le niveau de connaissances dans l'ensemble du Québec n'est pas très élevé, mais il l'est toutefois plus élevé dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue et de la Côte Nord. Les niveaux de confiance envers la gouvernance, c'est-à-dire la confiance dans la réglementation des activités minières et dans l'intervention du gouvernement pour la faire respecter, et envers l'industrie sont également plus élevés dans ces deux régions minières. Une majorité de Québécois ne croit pas qu'ils bénéficieraient personnellement du développement minier et que les bénéfices sont distribués de façon équitable. Une très grande majorité des Québécois reconnaît toutefois que le secteur minier apporte une contribution significative à l'économie de la province. Au point de vue de l'acceptabilité sociale, une grande majorité n'est pas contre ou pour le développement minier (83 %) en l'acceptant (36 %), l'approuvant (15 %) ou le tolérant (32 %), tandis, seulement 7 % des Québécois s'y opposent et 10 % l'encouragent. C'est dans les régions que l'encouragement est le plus élevé (29 %) et l'opposition la plus faible (1 %).

Les principales préoccupations concernent des sujets qui touchent à la protection de l'environnement. C'est la contamination des cours d'eau et de l'eau souterraine qui vient en premier. La majorité des Québécois pensent que les compagnies devraient en faire plus pour favoriser les principes du développement durable.

C'est le développement des ressources hydriques pour produire de l'électricité qui arrive au premier rang pour le support des Québécois (88 %) envers les ressources naturelles exploitées au Québec. Le support de l'exploitation des mines (67 %) est très semblable à celui de la forêt (64 %). C'est l'exploitation des hydrocarbures qui obtient le plus faible support (38 %).

Les entretiens de groupe n'ont pas apporté de nouvelles informations concernant la perception des Québécois sur le développement des ressources minérales. Ils ont plutôt confirmé les inquiétudes de la population par rapport à la protection de l'environnement et le manque de confiance dans la gouvernance et l'industrie comme telle.

Le projet contribue à développer de meilleures interventions entre les citoyens du Québec, l'industrie minière et le gouvernement. Il pourrait permettre de résoudre des problèmes sociaux en donnant des pistes pour changer l'attitude de l'industrie et des citoyens les uns envers les autres. Les retombées permettent également d'améliorer la gestion des ressources naturelles.

Pour en savoir plus

1. Malo, F., Bédard, K., Malo, M., Rivard, C., Lavoie, R. 2017. Perception regarding mineral resources development in the province of Québec, Canada. Proceedings 14th Biennial SGA Meeting, Québec, Canada, 20-23 août 2017, p. 1445-1448.
2. Malo, M., Malo, F., Bédard, K., Lavoie, R., Rivard, C. 2017. Analyse de la perception des Québécois sur le développement des ressources minérales. Dans : Le droit des ressources naturelles et de l'énergie, LexisNexis Canada p. 117-126. ISBN/ISSN :9780433496038.
3. Malo, F., Bédard, K., Malo, M., Lavoie, R., Rivard, C. 2017. Analyse régionale de la perception et de l'acceptabilité sociale du développement minier au Québec. Québec Mines. 20 au 23 novembre 2017, Québec, Canada.

Partenaires du projet

- Osisko
- Les Diamants Stornoway (Canada)

www.frqnt.gouv.qc.ca

140, Grande Allée Est, bureau 450
Québec (Québec) G1R 5M8 | 418 643-8560

500, rue Sherbrooke Ouest, bureau 800
Montréal (Québec) H3A 3C6 | 514 873-2114

*Fonds de recherche
Nature et
technologies*

Québec 