

40^e QMÉ

Québec Mines+Énergie



RÉSUMÉS DES CONFÉRENCES ET DES PHOTOPRÉSENTATIONS DV 2019-01

Coordonnatrice

Marie-Eve Lagacée

Traduction et révision linguistique

Venetia Bodycomb

Michèle Mainville

Marie Racine, ing.

Révision des textes

Claude Dion, ing.

Conception graphique

André Tremblay

Couverture, mise en page

André Tremblay

AVERTISSEMENT

Les données utilisées pour rédiger ce rapport proviennent de sources diverses. L'exactitude et la fiabilité de ces données dépendent entièrement de ces sources.

TABLE DES MATIÈRES

Résumés des conférences.....	5
Résumés des photoprésentations.....	41
Acronymes	77

RÉSUMÉS DES CONFÉRENCES

SÉANCE 1

Panel : L'acceptabilité sociale, risque numéro 1 dans le secteur des mines et des métaux – comment et quand l'intégrer dans notre projet? 10

Panélistes : Patrick Bertrand-Daoust (Ernst & Young),
Carole-Anne Tanguay (MU Conseils)
et Jean L'Heureux (Mason Graphite)

Les bonnes pratiques et les obligations légales en matière de comité de suivi : un guide pour tous 10

Claude Leblanc (MERN)

SÉANCE 3

Communication LTE au complexe minier LaRonde : révolutionner l'exploitation minière souterraine..... 11

Christian Goulet (Mines Agnico Eagle)

Est-ce que l'intelligence artificielle peut diminuer votre dilution? Les résultats de la première étape du projet de Promine 11

Yvan Dionne (Promine)

Défis et innovations en évaluation du déplacement du minerai à Canadian Malartic..... 12

Christian Tessier (Canadian Malartic)

Le SAMS^{MC} de troisième génération 12

Marc Beauvais (Minrail)

Redémarrage de l'usine Sigma, un défi de taille 13

Christian Juteau et Mehdi Bouanani (Eldorado Gold, Lamaque)

SÉANCE 6

Perspective 2019-2020 sur les prix des métaux et de l'énergie..... 13

Rory Johnson (Banque Scotia)

Les facteurs qui influencent le développement économique des substances minérales stratégiques au Québec 14

Steve Boulet (MERN)

Bureau de coordination des droits du MERN, une solution attendue par l'industrie..... 14

Martin Breault (MERN) et Amyot Choquette
(Investissement Québec)

SÉANCE 7

Relations tectonique-minéralisations dans les lithosphères chaudes; applications aux cratons précambriens 15

Denis Gapais (Université de Rennes 1)

Les ophiolites, des témoins de l'évolution géodynamique de la lithosphère océanique - implications tectoniques et métallogéniques 15

Alain Tremblay (UQAM)

Or de type orogénique : quoi s'attendre dans les terrains au métamorphisme de forte intensité? 16

Damien Gaboury (UQAC)

Application d'un modèle de carapace stagnante instable pour expliquer la géologie et la métallogénie de l'Archéen 16

Jean Bédard (CGC-Q)

Les structures cachées énigmatiques de la croûte profonde et du manteau supérieur associées à la minéralisation en Au et en Ni-Cr-Cu-EGP dans la Province du Supérieur – Nouvelles données, interprétations tectoniques et cibles d'exploration 17

Lyal B. Harris (INRS-ETE)

SÉANCE 8

Mine Casa Berardi – Optimisation de l'usine de traitement de minerai 18

Steve Parent (Hecla Québec – Mine Casa Berardi)

Automatisation et télémétrie – La technologie au profit de la sécurité et de la productivité 18

Ronald Durham et Ronald Bordeleau
(Hecla Québec – Mine Casa Berardi)

L'innovation dans l'industrie du lithium : du développement de technologies vertes aux stratégies de financement 19

Simon Thibeault (Nemaska Lithium)

Lignes directrices de l'utilisation de l'hydrogène dans les mines 19

Gilles LeBlanc et Marc Bétournay (CANMET)

L'acier au manganèse réinventé – Renouvellement d'une technologie inchangée depuis 1800	20
--	-----------

Tomaso Veneroso (AMCAST)

Une solution plus verte pour la fragmentation de la roche.....	20
---	-----------

Hani Mitri (McGill)

SÉANCE 9

Distiller les mégadonnées : pistes et pièges	21
---	-----------

Guy Desharnais (Redevances aurifères Osisko)

Isolation des textures géologiques dans les données géophysiques aéroportées par apprentissage automatique.....	21
--	-----------

Matthieu Cédou, Erwan Gloaguen (INRS-ETE),
Martin Blouin (Geolearn) et Antoine Caré (SRK Consulting)

Segmentation d'image par apprentissage profond pour faciliter la planification des campagnes d'exploration minérale sur le terrain	22
---	-----------

Charles L. Bérubé, Véronique Bouzaglou
et Lindsay Hall (GoldSpot Discoveries)

Utilisation des données radiométriques pour la production automatisée de cartes d'altération résiduelle	22
--	-----------

Jean-Philippe Paiement (Mira Geoscience)

La contribution des techniques d'apprentissage machine dans la conception des systèmes de commande des réseaux autonomes fortement décarbonés	23
--	-----------

François Bouffard, Yuchong Huo (McGill, GERAD)
et Géza Joós (McGill)

SÉANCE 11

Les Premières Nations comme solution à la pénurie de main-d'œuvre.....	23
---	-----------

Ghislain Picard (Assemblée des Premières Nations
du Québec-Labrador)

Facteurs de succès liés au recrutement, à l'intégration et à la rétention des employés autochtones au sein de l'industrie minière	24
--	-----------

Joanie Caron (UQAT)

Guide de référence pour l'intégration et le maintien en emploi des Premières Nations	24
--	-----------

Wanda Lafontaine (CDRHPNQ)

Une réelle façon de faire ENSEMBLE.....	25
--	-----------

François Lafrenière (Minerai de fer Québec)

Initiatives de ressources humaines avec la Nation crie de Nemaska.....	25
---	-----------

Chantal Francoeur (Nemaska Lithium)

SÉANCE 12

Un survol des grandes provinces ignées et de leur métallogénie : ce que nous savons et ce que nous devons savoir à propos des liens entre les événements à l'origine des LIP et la formation des gîtes minéraux	26
--	-----------

Simon M. Jowitt (Université du Nevada, Las Vegas)
et Richard E. Ernst (Université Carleton et Université
d'État de Tomsk, Russie)

La genèse du gîte d'ETR Ashram au Québec : ce que la géochimie des roches entières, les réactions de remplacement apatite-monazite- bastnaésite et la composition chimique des minéraux peuvent nous apprendre	26
---	-----------

Caitlin M.J. Béland et Anthony E. Williams-Jones (McGill)

Le potentiel minéral de la Fosse du Labrador pour les gîtes d'oxydes de fer-cuivre-or (IOCG) et autres gîtes affiliés	27
--	-----------

James Conliffe (GSNL), Louise Corriveau (CGC-Q),
Jean-François Montreuil (MacDonald Mines Exploration)
et Olivier Blein (BRGM)

Pétrologie et architecture du système de plomberie magmatique des gîtes de Ni-Cu-EGP Expo-Delta-Raglan dans la grande province ignée du Circum-Supérieur, Nunavik, Québec ...	27
--	-----------

Dylan McKevitt, C. Michael Lesher
(Université Laurentienne) et Michel G. Houlé (CGC-Q)

<i>Corrugated Hills</i> : les restes d'une grande province ignée d'environ 2,17 Ga dans la Fosse du Labrador	28
---	-----------

David Corrigan (CGC-Q), Anne-Aurélien Sappin,
Michel G. Houlé (CGC-Q), Nicole Rayner (CGC-Q)
et Diane Van Rooyen (Université du Cap-Breton)

Localisation des minéralisations magmatiques en Cr et en sulfures de Fe-Ni-Cu-EGP dans les grandes provinces ignées	28
--	-----------

C. Michael Lesher (Université Laurentienne)

SÉANCE 13

Produire le magnésium le plus vert sur la planète 29

Joël Fournier (Alliance Magnésium)

Une approche de traitement novatrice pour le gîte de terres rares et de fluorite Ashram 29

Darren L. Smith (Commerce Resources), Christel Bemelmans, Nick Hazen et Dave Baughman (Hazen Research)

Traitement hydrométallurgique de lixéur-mère par sulfatation thermique sélective des roches granitiques contenant des terres rares : options de traitement et avantages et inconvénients associés 30

Dirk Naumann (Torngat Metals)

Développement d'un procédé écoresponsable de purification chimique du graphite 30

Geneviève Pichet et Jean L'Heureux (Mason Graphite)

SÉANCE 16

L'Essentiel des mines : un programme de formation sur l'employabilité destiné aux autochtones 31

Dana Imbeault et Pascale Larouche (RHiM)

Automation in mining, its impact on employment and the participation of the Indigenous Workforce – The Case of Rio Tinto in the Western Australia Pilbara..... 31

Étienne Lamy (Rio Tinto)

SÉANCE 17

Effondrement orogénique et minéralisations : une introduction 32

Michel Jébrak (UQAM) et Réal Daigneault (UQAC)

La chaîne des Cyclades (Grèce), un modèle récent pour les minéralisations post-orogéniques de type porphyre (Cu-Au ± Mo) à épithermal (Pb-Zn-Ag)..... 32

Christophe Scheffer (UL, Université de Lorraine), Olivier Vanderhaeghe (Université de Lorraine, Université de Toulouse), Panagiotis Voudouris (Université d'Athènes), Alexandre Tarantola (Université de Lorraine) et Adonis Photiades (IGME)

L'importance de l'extension le long des failles pour les minéralisations aurifères archéennes de type orogénique : exemples de la Sous-province de l'Abitibi, Québec 33

Pierre Bedeaux, Réal Daigneault, Damien Gaboury, Antoine Brochu et Lucie Mathieu (UQAC)

SÉANCE 19

Étude sur la qualité de l'onde électrique d'un complexe minier et avantages économiques d'une gestion optimale du risque 33

Maxime Beauregard (Armada Surge Protection)

SÉANCE 21

État des connaissances sur les populations de caribou forestier du Québec.....34

Joëlle Taillon (MFFP)

Développement d'une approche équilibrée pour assurer le maintien du caribou forestier au Québec 34

Frédéric Bujold, Jérôme Rioux (MFFP) et Marie-Pierre Ouellon (MERN)

SÉANCE 22

Les avancées en instrumentation LIBS : nouvelles applications en exploration minérale 35

Mohamad Sabsabi, Paul Bouchard, Aïssa Harhira, Josette El Haddad, Francis Vanier, Elton Soares Filho De Lima, Daniel Gagnon et Alain Blouin (CNRC)

Progrès réalisés dans l'application de méthodes d'analyse multivariée des données géochimiques pour l'exploration minière 35

Eric C. Grunsky (Université de Waterloo)

La géochimie des eaux souterraines : un outil novateur pour l'exploration profonde . 36

Silvain Rafini (CONSOREM)

L'utilisation des drones en exploration minière 36

Marc Boivin (MB Geosolutions)

Mise en valeur des spectres XRF : mesure de densité volumique rapide et efficace 37

Camille Hébert (UL)

L'approche probabiliste en géochimie 37

Réjean Girard (IOS)

SÉANCE 23

Production de contaminants dans les lixiviats de résidus oxydés après restauration; étude de deux sites miniers abandonnées..... 38

Marie-Pier Ethier (IRME UQAT-Polytechnique, Terre-Net)

Approche de gestion des risques et méthodologies de sécurisation des chantiers ouverts et des piliers de surface jugés instables dans le cadre du projet de restauration de l'ancienne mine Principale à Chibougamau, Québec..... 38

Éliane Cabot (Wood)

Développement d'approches durables en restauration minière au Québec : l'exploitation d'arbustes symbiotiques pour la végétalisation des résidus fins et des stériles 39

Sébastien Roy (UdeS)

Opportunités de mise en végétation des sites miniers à l'aide de matières résiduelles fertilisantes : survol des conditions gagnantes 39

Simon Naylor (Viridis Environnement)

Gestion des stériles miniers réactifs à l'aide de biosolides municipaux dans les CEBC 40

Christopher Hey (Englobe)

Évolution géochimique des résidus miniers riches en sulfures sur les sites miniers abandonnés et implications pour la réhabilitation 40

Carol Ptcacek et David Blowes (Université de Waterloo)

SÉANCE 1

Panel : L'acceptabilité sociale, risque numéro 1 dans le secteur des mines et des métaux – comment et quand l'intégrer dans notre projet?

Panélistes : Patrick Bertrand-Daoust (Ernst & Young), Carole-Anne Tanguay (MU Conseils) et Jean L'Heureux (Mason Graphite)

Selon la 12^e édition annuelle du rapport d'EY sur les dix principaux risques du secteur des mines et des métaux pour 2020, et pour une deuxième année d'affilée, près de la moitié des dirigeants de ce secteur classent l'acceptabilité sociale en tête des principaux risques pour leur entreprise. La pression accrue exercée par les parties prenantes et l'augmentation des placements à caractère éthique continuent de faire de l'acceptabilité sociale une priorité autant au Canada qu'à l'étranger.

Le contexte dans lequel évoluent les parties prenantes change et les minières doivent s'y adapter. Les attentes sociétales grandissantes, l'incidence des nouvelles technologies et la volonté de collaborer davantage poussent les minières à repenser leur approche en matière d'acceptabilité sociale des activités.

Plutôt que de s'en tenir aux questions sociales et environnementales, il importe désormais d'aborder la question de l'acceptabilité sociale des activités de manière plus globale, en prenant un engagement résolu envers la communauté, les gouvernements, les membres du personnel et les besoins environnementaux au-delà de la mine. Les entreprises doivent montrer comment elles cherchent à atteindre une croissance durable et inclusive afin de redéfinir l'image du secteur en tant que source responsable de minerais à l'échelle mondiale.

SÉANCE 1

Les bonnes pratiques et les obligations légales en matière de comité de suivi : un guide pour tous

Claude Leblanc (MERN)

Il est maintenant reconnu que l'acceptabilité sociale s'avère un ingrédient essentiel à l'intégration harmonieuse des projets de mise en valeur des ressources naturelles dans le milieu. L'un des facteurs qui influence ce jugement collectif à l'égard d'un projet est la participation des communautés aux prises de décision, et ce, le plus en amont possible dans l'élaboration du projet.

Le comité de suivi offre aux acteurs du milieu un moyen efficace de participation à la prise de décision. Cet espace de dialogue neutre et respectueux permet de faire connaître au promoteur leurs attentes et leurs préoccupations à l'égard de son projet. Cet échange entre le promoteur et les acteurs de la communauté constitue un terrain favorable à la prise en compte, par le promoteur, des enjeux soulevés par la communauté. Il permet également au promoteur de mieux faire connaître son projet, les objectifs qu'il poursuit et les contraintes auxquelles l'entreprise est assujettie. Ce dialogue ouvert permet, à terme, d'en arriver à des prises de position consensuelles à la satisfaction des deux parties, ce qui favorise cette intégration harmonieuse du projet dans le milieu.

Au cours de cette conférence, nous explorerons les bonnes pratiques relatives à la mise en place et au fonctionnement d'un comité de suivi, telles que présentées dans le Guide des bonnes pratiques sur les comités de suivi et obligations légales des promoteurs pour des projets miniers et d'hydrocarbures. Nous survolerons également les obligations légales des promoteurs de projets miniers et d'hydrocarbures en ce qui a trait à ces comités.

SÉANCE 3

Communication LTE au complexe minier LaRonde : révolutionner l'exploitation minière souterraine

Christian Goulet (Mines Agnico Eagle)

La présentation fera un survol du déploiement du réseau LTE sous terre au complexe minier LaRonde et des différentes applications que nous avons réussi à développer grâce à cette nouvelle technologie.

SÉANCE 3

Est-ce que l'intelligence artificielle peut diminuer votre dilution? Les résultats de la première étape du projet de Promine

Yvan Dionne (Promine)

Vous êtes tous victimes de la dilution! Il suffit de voir les réticences des principaux acteurs à en parler ou à en partager les résultats pour comprendre que le sujet est épineux.

La nature erratique des massifs rocheux exploités n'aide pas à un contrôle de la dilution efficace et fiable. La plupart du temps, les raisons qui expliquent une dilution élevée (ou même basse) ne sont pas claires. Il est difficile non seulement de cibler les bonnes actions à mettre en œuvre pour la diminuer, mais de faire le bon choix parmi les nombreux paramètres.

L'intelligence artificielle permet de faciliter ce travail. En effet, un programme d'intelligence artificielle trouvera des relations entre des choses qui semblent n'en avoir aucune a priori. Il permet de passer à travers de grandes quantités de données et de faire des déductions qui seraient complexes pour un humain.

Nous avons compilé des données provenant de deux exploitations minières québécoises pour prouver le concept, et les déductions obtenues présentent une bonne corrélation avec la réalité. Les prochaines étapes du projet seront orientées vers la prédiction de la dilution selon les propriétés d'un chantier (dimension, forage, support, explosifs, etc.), pour ensuite suggérer un design de chantiers optimisés. Un meilleur contrôle de la dilution a une incidence positive sur les revenus d'exploitation.

SÉANCE 3

Défis et innovations en évaluation du déplacement du minerai à Canadian Malartic

Christian Tessier (Canadian Malartic)

Depuis 2012, Canadian Malartic emploie la technologie développée par *Blast Movement Technologies* (BMT) pour quantifier le déplacement du minerai lors des sautages. Étant donné que le minerai et le stérile de la fosse Canadian Malartic sont indifférenciables à l'œil, l'utilisation de cet outil quantitatif est devenue une étape indispensable au contrôle des teneurs de la mine.

Le produit développé initialement par BMT ne s'intégrait pas parfaitement dans la séquence de dynamitage de la fosse Canadian Malartic. Pour résoudre ce problème, nous avons élaboré, en collaboration avec les concepteurs de BMT, un appareil permettant l'activation à distance des émetteurs BMM (*Blast Movement Monitor*).

Les améliorations apportées au produit ont permis d'éliminer certains risques en santé et sécurité, de faciliter la logistique d'implantation des émetteurs et d'éviter de possibles retards dans les opérations par leur installation hâtive avant les sautages.

SÉANCE 3

Le SAMS^{MC} de troisième génération

Marc Beauvais (Minrail)

Minrail est un manufacturier d'équipement minier bien établi à Val-d'Or. La société est axée sur le déploiement de son procédé et de ses équipements spécialement conçus pour l'extraction minérale de gisements souterrains à faible pendage. Le procédé SAMSMC (*Shallow Angle Mining System*) de même que ses équipements sont protégés par des brevets américains, canadiens et européens. Ce procédé vient résoudre les perpétuelles complications associées à l'extraction de minerai dans des horizons dont les angles varient de 10 à 45°, en mécanisant entièrement l'abattage du roc le long de l'axe de la plus grande pente du gisement. Le SAMSMC est un dispositif d'extraction entièrement intégré, du développement jusqu'à la phase de remblayage, en passant par la production. En plus de nombreuses possibilités d'innovation pour les opérations minières souterraines, ce système sur rail entièrement mécanisé améliore la sécurité des travailleurs ainsi que le niveau de productivité de la mine, tout en réduisant son empreinte environnementale.

Minrail se prépare pour les essais à l'échelle industrielle du système SAMS^{MC} à la mine Lamaque. D'ailleurs, le design des chantiers et les équipements ont subi bon nombre de mises à niveau à la suite des échanges entre les responsables du projet minier et l'équipe de design de Minrail. La société procède également à différentes évaluations comparatives sur des propriétés minières présentement en phase d'évaluation économique.

Aujourd'hui, la troisième génération d'équipements de Minrail intègre l'exécution de tâches par contrôle à distance, l'emploi de mâts et de foreuses hydrauliques interchangeables, le repérage en temps réel et l'enregistrement de données opérationnelles, ce qui rend le système SAMS^{MC} plus performant et plus sécuritaire. Les méthodes d'évaluation et de préparation des plans d'exploitation de projet minier intégrant la méthode SAMS^{MC} ont aussi grandement évoluées, en raison de l'expérience acquise au cours des années sur des projets situés au Canada, aux États-Unis et au Mexique.

SÉANCE 3

Redémarrage de l'usine Sigma, un défi de taille

Christian Juteau et Mehdi Bouanani (Eldorado Gold, Lamaque)

Située à Val-d'Or en Abitibi-Témiscamingue, la mine Lamaque, division de la vancouveroise Eldorado Gold, a atteint la production commerciale le 31 mars 2019. À la base de cette exploitation, le nouveau gisement d'or Triangle est situé à seulement 2,5 km au sud des mines historiques Lamaque et Sigma, sur la même propriété. Les anciennes installations ont été modernisées à plusieurs reprises, la dernière fois au début des années 2000. L'usine Sigma, construite en 1937, a été remise en état en 2018-2019 et traite aujourd'hui le minerai extrait du gisement Triangle.

Au cours de cette conférence, vous serez à même de constater l'ampleur du défi, les étapes de réalisation ainsi que les embûches rencontrées. Le travail d'équipe, la rigueur, le respect des normes en santé et sécurité ainsi que la synergie avec les fournisseurs et partenaires régionaux sont les facteurs clés du redémarrage de cette usine de traitement de minerai, et ce, en tenant compte des échéances.

SÉANCE 6

Perspective 2019-2020 sur les prix des métaux et de l'énergie

Rory Johnson (Banque Scotia)

Un survol des perspectives économiques mondiales selon Études économiques Scotia et ce que ces perspectives annoncent en termes de trajectoires pour les prix de l'énergie et des métaux. (conférence en anglais)

SÉANCE 6

Les facteurs qui influencent le développement économique des substances minérales stratégiques au Québec

Steve Boulet (MERN)

La lutte contre les changements climatiques, et plus particulièrement la transition énergétique, amène de nouvelles utilisations pour plusieurs minéraux. À travers le monde, il est de plus en plus souvent question de substances critiques ou de minéraux stratégiques. Plusieurs États ont élaboré leurs propres stratégies concernant ces minéraux. Quels sont les facteurs qui influencent les marchés et le développement économique autour de ces substances? Comment le Québec, en tant que producteur minier, peut-il aborder cette situation?

SÉANCE 6

Bureau de coordination des droits du MERN, une solution attendue par l'industrie

Martin Breault (MERN) et Amyot Choquette (Investissement Québec)

Le Gouvernement du Québec s'est engagé à accélérer la réalisation des projets de développement économique et les investissements, à créer des emplois de qualité et, ainsi, à générer de la richesse au bénéfice de l'ensemble de la population. Un des moyens retenus pour accélérer la réalisation des projets consiste à mettre en place :

- un Bureau de coordination des droits pour la délivrance des différents permis et autorisations, appuyé par une modernisation de la Loi sur les mines et un outil moderne de diffusion et de gestion des droits;
- des tables interministérielles en région (TIR) centrées sur l'émission des droits, proposant un accompagnement coordonné et personnalisé des promoteurs et permettant d'assurer une meilleure coordination ministérielle et interministérielle de l'émission des droits.

En créant un environnement d'affaires plus attractif, le gouvernement veut aussi être mieux positionné sur la scène internationale pour attirer des investisseurs étrangers.

Venez en apprendre davantage sur le chantier du Bureau de coordination des droits du MERN et les travaux d'Investissement Québec.

SÉANCE 7

Relations tectonique-minéralisations dans les lithosphères chaudes; applications aux cratons précambriens

Denis Gapais (Université de Rennes 1)

De nombreux cratons archéens et paléoproterozoïques soumis à une tectonique compressive montrent des champs de déformation qui diffèrent de ceux des zones orogéniques modernes. Les déformations se marquent par de l'épaississement crustal distribué, avec un raccourcissement subhorizontal et un étirement subvertical pénétratifs, qui se combine à un fluage horizontal dans la croûte ductile localement en fusion partielle. Parallèlement, les indicateurs métamorphiques régionaux sont généralement liés à des conditions de haute température distribuées dans la croûte moyenne, attestant de croûtes continentales chaudes.

Une synthèse des données de plusieurs exemples de terrain et les résultats de modélisations analogiques révèlent qu'une tectonique verticale marquée par l'enfouissement de dépôts de croûte supérieure dans une croûte sous-jacente chaude et molle (*pop-down tectonics*) est la plus pertinente pour rendre compte des structures. L'enfouissement des portions de croûte supérieure est restreint aux zones de déformation subverticales, où ces portions de croûte enfouies peuvent atteindre des conditions de fusion partielle.

Ces zones d'intense déformation subverticales sont géométriquement corrélées aux domaines de concentration des minéralisations qui caractérisent les cratons anciens de par leur importance. Les relations entre structures et minéralisations dans plusieurs ceintures archéennes et paléoproterozoïques montrent que le modèle de *pop-down tectonics* fournit un cadre structural prometteur pour l'exploration minière dans les cratons anciens.

SÉANCE 7

Les ophiolites, des témoins de l'évolution géodynamique de la lithosphère océanique - implications tectoniques et métallogéniques

Alain Tremblay (UQAM)

Les ophiolites sont des fragments de lithosphère océanique charriés sur une marge continentale lors d'une collision orogénique. Elles marquent généralement la trace de sutures de subduction et sont présentes dans les archives géologiques du Paléoproterozoïque, abondamment documentées dans celles du Phanérozoïque, mais plutôt rares, sinon absentes, dans l'Archéen. Les ophiolites sont les témoins d'océans aujourd'hui disparus et permettent d'étudier « à pieds secs » les variations séculaires des structures primaires et la nature de la croûte océanique profonde et du manteau supérieur. Les études récentes suggèrent que la composition et la structure de la lithosphère océanique moderne sont principalement contrôlées par les taux d'expansion à la ride qui varient de faibles (2-3 cm/année) à élevés (15-20 cm/année). Ces variations ont été extrapolées à différentes ophiolites de par le monde, parmi lesquelles on a reconnu des séries à expansion lente et rapide.

Cette conférence présente une comparaison lithologique et structurale de deux séries ophiolitiques phanérozoïques attribuées à une expansion lente, les ophiolites jurassiques de Mirdita (~165 Ma) dans les Dinarides de l'Albanie et les ophiolites ordoviciennes (~500 à 480 Ma) dans les Appalaches du sud du Québec. L'ophiolite de Mirdita forme une nappe allochtone de 4000 km² qui a subi très peu de déformation post-obduction, et pour laquelle on a établi la présence d'un « *core complex* » océanique (OCC), une structure précoce ayant causé l'exhumation de la croûte profonde et du manteau et favorisé la circulation de fluides hydrothermaux. Des structures préobduction, possiblement associées à un OCC, sont aussi reconnues dans les ophiolites du Québec, malgré le fait qu'elles aient subi deux phases de déformation post-obduction. Les âges U-Pb et 40Ar/39Ar de l'ophiolite de Thetford-Mines indiquent que l'obduction (*s.s.*) s'est étalée sur ~15 Ma. Malgré un écart d'âge de ≥300 Ma, les ophiolites des Dinarides et des Appalaches présentent plusieurs similitudes lithologiques et structurales, y compris i) une couverture sédimentaire discordante de bassin « *piggyback* » synobduction et ii) des structures d'extension précoce ayant permis le drainage d'intrusions magmatiques et/ou de fluides hydrothermaux à différents niveaux de la croûte. Les deux séries sont porteuses de minéralisations en Cr, en EGP, en Ni et en sulfures synvolcaniques de type Chypre, ces dernières étant à l'origine de la mine Munella en Albanie.

L'existence d'ophiolites archéennes est un des éléments-clés du débat sur la nature de la tectonique archéenne. L'absence de roches mantelliques et d'évidences supportant un déplacement important des séries océaniques archéennes militent en défaveur du principe d'uniformitarisme pour la Terre à l'Archéen.

SÉANCE 7

Or de type orogénique : quoi s'attendre dans les terrains au métamorphisme de forte intensité?

Damien Gaboury (UQAC)

L'or provenant de gisements de type « orogénique » représente ~75 % de la production mondiale. Ces gisements sont distribués dans des ceintures volcano-sédimentaires métamorphisées principalement aux faciès des schistes verts (assemblage à chlorite), d'âge archéen à phanérozoïque. Ils prennent la forme de veines de quartz-carbonates contenant peu de sulfures (pyrite ± arsénopyrite) dans des zones de cisaillement caractérisées par un alignement des phyllosilicates (schistosité), avec des altérations en séricite, en chlorite et en carbonates de fer. L'abondance des veines de quartz résulte du comportement cassant dans la zone sismogénique, induit par la forte pression des fluides. Les mouvements sismiques génèrent des ouvertures où la dépressurisation des fluides provoque la précipitation du quartz (formation de veines). Le pendage des zones de cisaillement minéralisées est vertical à modéré (>45°) et l'extension en profondeur de la minéralisation est kilométrique (>2 km).

Dans les terrains au faciès supérieur des schistes verts, où la biotite et l'actinote sont présentes dans les plans de schistosité des zones de déformation, le minerai renferme beaucoup moins de veines de quartz. Ces veines sont de faible puissance, boudinées et démembrées. Les carbonates sont communément absents. La pyrite coexiste avec la pyrrhotite; les deux sulfures possèdent la même signature en métaux traces, démontrant qu'ils sont cogénétiques. Ces caractéristiques s'expliquent par une température plus élevée du métamorphisme. Un comportement plus ductile que cassant au sein des zones de cisaillement, avec moins d'ouvertures, limite la précipitation du quartz sous forme de veines et celle des carbonates. Les altérations en séricite (K) et en chlorite (Fe) sont remplacées par un seul minéral : la biotite (K-Fe), stable à plus haute température. La géométrie des cisaillements minéralisés varie de verticale à subhorizontale. L'extension en profondeur de la minéralisation est dépendante de la proximité du faciès des amphibolites.

Dans le faciès des amphibolites, où par définition la hornblende est présente, la déformation est ductile et s'exprime par un alignement des silicates (foliation). La possibilité de concentrer des fluides hydrothermaux dans des zones de déformation aismiques est très limitée. Par conséquent, les gisements correspondent soit à des minéralisations anciennes métamorphisées et remobilisées, soit à des événements rétrogrades avec des altérations hydrothermales exprimées par des phyllosilicates.

Le faciès métamorphique, défini par la température, contrôle les caractéristiques minéralogiques, géométriques et les possibilités d'extension en profondeur des minéralisations aurifères. Les gisements Lapa (Néoarchéen, Canada), Boungou (Paléoproterozoïque, Burkina Faso), WG-03 (Néoproterozoïque, Soudan) et Macreas (Phanérozoïque, Nouvelle-Zélande) seront utilisés comme exemples.

SÉANCE 7

Application d'un modèle de carapace stagnante instable pour expliquer la géologie et la métallogénie de l'Archéen

Jean Bédard (CGC-Q)

Une révision critique montre que les faciès volcaniques, plutoniques, métamorphiques et sédimentaires des terrains archéens ne ressemblent pas aux roches typiques des terrains d'arc et de ride modernes. Ceci réfute la présomption que la tectonique des plaques était omniprésente à l'Archéen. Nous évaluons un modèle impliquant la déstabilisation périodique d'une **carapace stagnante** (comme sur Vénus). Les phases stables correspondraient à des périodes de convection stratifiée dans le manteau. Le manteau supérieur serait géochimiquement appauvri, ayant généré des magmas basaltiques lors des basculements mantelliques précédents. Le gradient thermique avec la surface produirait des courants de convection, qui refroidiraient et densifieraient progressivement le manteau supérieur. Au contraire, le manteau inférieur non appauvri deviendrait progressivement moins dense avec le temps, parce qu'il se réchaufferait, ayant gardé ses éléments radioactifs (U-Th-K). Éventuellement, après environ 100 à 300 Ma, il y aurait une inversion de densité, produisant d'immenses remontées du manteau inférieur pendant des périodes de 50 à 150 Ma. La décompression du manteau chaud et fertile produirait les effusions de basaltes tholéiitiques qui dominent dans les ceintures de roches vertes. En plus des effusions ensialiques typiques, ces basaltes auraient aussi constitué une épaisse croûte océanique mafique rarement préservée. Les basaltes archéens montrent peu ou pas de changement de composition dans le temps et semblent provenir d'un réservoir mantellique uniforme, peu appauvri et très différent de celui générant les basaltes de ride modernes. La longue durée des remontées et leurs répétitions périodiques permettraient la refusion et la cannibalisation progressive de croûtes préexistantes pour produire des TTG, des suites calco-alcalines et, éventuellement, la croûte continentale. Ce recyclage et cette distillation crustale auraient lieu à l'aplomb des remontées mantelliques à chaque basculement du manteau. L'écoulement radial mantellique à ces remontées a aussi le potentiel de désagréger les blocs et agrégats continentaux antécédents, produisant des bassins de rift propices aux dépôts de Ni-Cr komatiitiques. Une désagrégation plus complète créerait des bassins océaniques éphémères (Abitibi?). Les courants latéraux induits par ces basculements mantelliques mettraient aussi en mouvement des continents distaux, en poussant sur les profondes quilles lithosphériques qui sous-tendent les cratons, créant ainsi des orogènes accréionnaires chauds comme les secteurs sud et ouest de la Province du Supérieur. Dans ces orogènes, des gîtes d'or se développeraient le long des failles guidant le passage de fluides métamorphiques. Une comparaison avec Ishtar Terra sur Vénus montre que de tels orogènes accréionnaires peuvent se former en l'absence de rides et d'arcs.

SÉANCE 7

Les structures cachées énigmatiques de la croûte profonde et du manteau supérieur associées à la minéralisation en Au et en Ni-Cr-Cu-EGP dans la Province du Supérieur – Nouvelles données, interprétations tectoniques et cibles d'exploration

Lyal B. Harris (INRS-ETE)

Les structures de longue durée dans la croûte profonde et le manteau supérieur (manteau lithosphérique subcontinental ou MLSC) exercent un contrôle primaire sur l'architecture cratonique et la localisation des gîtes minéraux dans divers contextes tectoniques. Les structures dans le MLSC métasomatisé et dans la croûte profonde peuvent concentrer la circulation de fluides mantelliques riches en éléments volatiles et de magmas liés à une variété de types de gîtes minéraux; leur réactivation crée des structures encaissantes pour la minéralisation dans la croûte moyenne à supérieure.

Les données aéromagnétiques pour la Province du Supérieur, rehaussées pour mettre en valeur les éléments de la croûte profonde et du MLSC, dressent le portrait : (i) de failles rectilinéaires d'envergure régionale et de bordures de blocs distincts et compétents de granulites mafiques et felsiques, orientées à un angle prononcé par rapport aux structures cartographiées à l'échelle régionale et aux limites des sous-provinces, et qui ne présentent souvent qu'une faible, voire aucune expression directe en surface, et particulièrement dans la partie ouest du Supérieur, (ii) des structures elliptiques concentriques atteignant environ 185 km de diamètre, qui sont spatialement associées à la minéralisation orogénique (Au), porphyrique, et magmatique (Ni-Cu-EGP-Cr). Les données magnétotelluriques dans l'ouest du Supérieur, en Ontario, indiquent que des failles crustales profondes $\pm$ N-S et des structures elliptiques ont aussi une expression dans le MLSC. Les structures elliptiques ressemblent aux coroneae observées sur Vénus, dont les interprétations radar et gravimétriques suggèrent qu'elles se sont formées au-dessus de plumes mantelliques. L'emplacement des corps mafiques-ultramafiques qui encaissent de la minéralisation en Ni-Cr-EGP au sein de ces structures concentriques, là où elles croisent des failles $\pm$ N-S (structures phi), ainsi que leur localisation à la marge sud du craton du Supérieur Nord, sont cohérents avec des remontrées du manteau, qui ont été reproduites en modèles numériques montrant une plume mantellique sous un craton avec une quille lithosphérique profonde. Les failles N-S précoces préservées dans la croûte inférieure sous les grandes zones E-O de cisaillement ductile dextre du Néoarchéen, en régime de décrochement ou de transpression, et d'autres failles distinctes plus jeunes, ont agi comme des conduits pour le transport de magmas dans la croûte sus-jacente et ont concentré la circulation de fluides hydrothermaux.

Les observations suggèrent un découplage dans la croûte moyenne, à savoir un profil de compétence lithosphérique en « millefeuille », avec des couches compétentes dans le MLSC ainsi que dans la croûte profonde et supérieure; les

interprétations géophysiques ne peuvent être expliquées par des modèles conventionnels faisant intervenir l'accrétion d'arcs, mais tendent plutôt vers des modèles parautochtones de rifts liés à des plumes pour expliquer la formation des terrains de roches vertes archéennes. Les rehaussements géophysiques, les structures profondes nouvellement identifiées liées à la minéralisation en Au et en Ni-Cu-EGP-Cr, et le modèle alternatif à la tectonique des plaques confirmé par cette étude, ouvrent la voie pour la génération de nouvelles cibles d'exploration, y compris dans des secteurs peu ou pas affleurants.

Ces travaux de recherche ont été financés dans le cadre du programme IGC de RNCAN. N. Cleven et C. Guilmette ont contribué aux interprétations dans la région de la baie James. Le logiciel Oasis Montaj[®] de Geosoft a été utilisé pour le traitement géophysique.

SÉANCE 8

Mine Casa Berardi – Optimisation de l'usine de traitement de minerai

Steve Parent (Hecla Québec – Mine Casa Berardi)

À sa création en 1988, l'usine de la mine Casa Berardi était conçue pour traiter 1200 tonnes de minerai par jour. Bien qu'en constante modernisation depuis 2005, le début des opérations minières à ciel ouvert en 2016 a nécessité de nombreux efforts pour augmenter le débit de traitement. Aujourd'hui, c'est près 4000 tonnes par jour qui y sont traitées. Retour sur les différents défis auxquels Hecla Québec – Mine Casa Berardi a dû faire face pour optimiser son usine de traitement.

SÉANCE 8

Automatisation et télémétrie – La technologie au profit de la sécurité et de la productivité

**Ronald Durham et Ronald Bordeleau
(Hecla Québec – Mine Casa Berardi)**

L'intégration de technologies telles que le camion automatisé et la télémétrie améliore les performances et augmente la sécurité des travailleurs à la mine Casa Berardi. Les défis de l'implantation font maintenant place aux bons résultats. La clé, un suivi rigoureux.

SÉANCE 8

L'innovation dans l'industrie du lithium : du développement de technologies vertes aux stratégies de financement

Simon Thibeault (Nemaska Lithium)

Le lithium est un élément crucial au développement technologique de notre économie. Mais espérons aussi que le développement de l'industrie du lithium sera réalisé de manière responsable, autant environnementalement que socialement. Il faut s'assurer de réduire l'empreinte écologique de la chaîne d'approvisionnement des batteries Li-ion lors de la transition. Conséquemment, cette transition repose sur le développement et l'intégration de nouvelles technologies et sur l'adoption de pratiques novatrices dans toutes les sphères d'un projet. La présentation portera sur l'histoire de Nemaska Lithium et l'intégration d'innovations technologiques, environnementales et sociales au modèle d'affaires de l'entreprise dès le début du projet.

SÉANCE 8

Lignes directrices de l'utilisation de l'hydrogène dans les mines

Gilles LeBlanc et Marc Bétournay (CANMET)

La sécurité au travail, la santé des travailleurs, les conditions climatiques, la hausse des prix du diesel et la tarification du carbone sont tous des aspects importants qui poussent l'industrie minière à adopter des pratiques énergétiques propres.

Il existe actuellement peu de solutions en matière d'énergie propre pour remplacer les moteurs diesel à combustion interne, tout en maintenant la même liberté de circulation et de production des véhicules.

La présentation détaillera les lignes directrices de l'utilisation de l'hydrogène : données de base, équipements, infrastructures et réglementation minière. Les exploitants miniers seront ainsi mieux outillés pour amorcer une transition vers l'économie hydrogène.

SÉANCE 8

L'acier au manganèse réinventé – Renouvellement d'une technologie inchangée depuis 1800

Tomaso Veneroso (AMCAST)

L'acier au manganèse est le matériau de choix pour le concassage depuis plus de 200 ans, mais de nouvelles technologies novatrices ont permis de combiner la dureté typique de l'alliage MnCr18.2, qui permet l'homogénéisation et la très fine dispersion de phases résistantes, avec des mesures de dureté (HV) qui sont généralement doublées par rapport à la valeur des carbures de chrome typiques. Le MNX renforcé est créé en incrustant la couche résistante à même la fonte au manganèse, ce qui protège la surface de l'abrasion due au glissement tout au long de la campagne de concassage. Après plusieurs essais en laboratoire et sur le terrain à la fonderie FAR en Italie, notre département technologique est arrivé à la conclusion que la performance globale du MNX est nettement supérieure lorsqu'on la compare à celle de l'acier au manganèse classique utilisé pour fabriquer des cônes, des mâchoires et des barres de choc.

SÉANCE 8

Une solution plus verte pour la fragmentation de la roche

Hani Mitri (McGill)

L'objectif principal de ce projet, parrainé par le Programme de croissance propre de Ressources naturelles Canada, est de créer, de tester et de valider une méthode révolutionnaire de fragmentation de la roche grâce à de nouveaux agents de démolition chimique sans bruit (SCDA) et à des patrons de forage innovants. Les SCDA sont traditionnellement utilisés en génie civil pour la démolition de fondations et l'enlèvement de roches en surface. Ils n'ont jamais été testés dans des mines souterraines pour trois raisons :

1) les roches dures sont considérablement plus solides que le béton; 2) la présence de fortes contraintes de confinement dans les roches empêcherait la fracturation; 3) le temps nécessaire au durcissement des SCDA est trop long, ce qui causerait des retards de production. Cette présentation traitera des défis face aux problèmes susmentionnés et mettra en lumière les effets potentiels de ce projet pour l'industrie minière.

SÉANCE 9

Distiller les mégadonnées : pistes et pièges

Guy Desharnais (Redevances aurifères Osisko)

L'apprentissage automatique renforce notre capacité d'exploiter les bases de données toujours croissantes et d'y extraire des connaissances utiles. Les algorithmes développés récemment sont axés sur la reconnaissance de formes, mais avec une telle efficacité qu'on les confond avec une intelligence rationnelle. Ces outils ont révolutionné plusieurs secteurs industriels. Pour le secteur des mines, l'apprentissage automatique peut s'appliquer dans plusieurs domaines, particulièrement en géométallurgie et en exploration.

Lors de la planification de la collecte de données, il est important de bien définir les étiquettes et de s'assurer que les mesures seront facilement liées à celles-ci. Les connaissances d'experts en minéralurgie, en géologie et en ingénierie minière sont indispensables pour que les résultats d'apprentissage soient fondés dans une réalité vérifiable. Une attention particulière devra être accordée aux données d'entrée et aux résultats de requêtes par ces experts, afin que le modèle ne se contente pas de prédire ce qui est déjà connu ou de produire de fausses pistes. La communication de la méthode et des livrables pour les parties prenantes ainsi que l'implémentation physique dans nos flux de travail sont des défis capitaux pour l'application de l'apprentissage automatique dans les mines.

SÉANCE 9

Isolation des textures géologiques dans les données géophysiques aéroportées par apprentissage automatique

Matthieu Cédou, Erwan Gloaguen (INRS-ETE), Martin Blouin (Geolearn) et Antoine Caré (SRK Consulting)

Les données géophysiques aéroportées sont couramment utilisées pour interpoler la géologie. Pour ce faire, les géologues recourent à des filtres numériques, une technique de traitement d'image permettant de mettre en valeur certaines propriétés des mesures géophysiques. Ces filtres requièrent des compétences en traitement de données géophysiques et sont appliqués de manière subjective.

Les algorithmes d'apprentissage automatique profond ont changé le paradigme du traitement d'image, notamment en imagerie biomédicale (détection de cellules cancéreuses ou d'anomalies cérébrales). Leur application à la géophysique permettrait d'explorer les données d'une manière novatrice, en générant plusieurs nouvelles couches d'information pertinentes, reproductibles et transférables.

Notre projet a étudié un algorithme « d'auto-encodeur » qui isole les différentes « textures » contenues dans les données, en optimisant des filtres spatiaux, sans apport direct de l'utilisateur. Il est ensuite possible de visualiser la localisation de ces « textures » dans les données d'origine et de les associer avec des objets géologiques connus ou anticipés. Cette technique de décomposition des données géophysiques aéroportées fournit automatiquement de nombreuses représentations objectives et optimisées de ces intrants. Ces représentations fournissent une information synthétisée et standardisée qui isole et met en évidence les objets géologiques présentant différentes signatures géophysiques et leur localisation, tout en supprimant le bruit. Elles permettent de mieux comprendre la géologie de la zone d'étude et facilitent la prospection indirecte.

Le potentiel de notre algorithme à détecter les failles, des structures importantes en exploration minière, a été testé dans la ceinture de roches vertes hôte de la mine Langlois-Grevet. Les données aéromagnétiques et MEGATEM ont été utilisées pour produire une carte de probabilité de présence de failles et une sélection des représentations générées les plus pertinentes pour leur prédiction.

Les résultats montrent la capacité de l'algorithme à explorer les données géophysiques aéroportées, à générer de nouvelles couches d'information et à automatiser les processus de traitement d'image.

SÉANCE 9

Segmentation d'image par apprentissage profond pour faciliter la planification des campagnes d'exploration minérale sur le terrain

Charles L. Bérubé, Véronique Bouzaglou et Lindsay Hall (GoldSpot Discoveries)

La délimitation des zones propices à la présence d'affleurements, des étendues d'eau et des chemins d'accès est une composante essentielle de la planification des levés géophysiques et des campagnes de cartographie géologique sur le terrain. Bien que certaines de ces informations soient disponibles librement, la détection d'affleurement se fait généralement à l'aide d'une analyse visuelle des orthophotographies et des modèles numériques de terrain, une méthode qui peut être fastidieuse. De plus, la morphologie des étendues d'eau peut évoluer rapidement et les données publiques ne sont pas toujours exactes. Nous présentons un protocole de traitement automatisé des orthophotographies basé sur les réseaux de neurones à convolution et l'architecture U-Net permettant d'extraire plusieurs composantes utiles à la planification des campagnes de terrain. Plus précisément, ce protocole permet de faire une segmentation sémantique des photographies aériennes afin de tracer des polygones délimitant les zones d'affleurements, les lacs, les cours d'eau, les routes et les sentiers. En utilisant des données du camp minier de Red Lake, en Ontario, nous avons démontré que l'algorithme de segmentation permet de produire une carte délimitant l'emplacement d'affleurements dans la forêt boréale, en plus d'améliorer la délimitation des étendues d'eau lorsque celles-ci ont évolué par rapport aux données publiques disponibles. L'impact de la résolution des orthophotographies sur les prédictions et l'importance des processus d'étiquetage et d'augmentation des données seront aussi discutés. Dans le futur, de nouvelles classes de segmentation – par exemple les lignes à haute tension, les marais ou encore les zones défrichées – pourront être ajoutées au modèle proposé.

SÉANCE 9

Utilisation des données radiométriques pour la production automatisée de cartes d'altération résiduelle

Jean-Philippe Paiement (Mira Geoscience)

Toutes les roches et tous les sols contiennent des isotopes radioactifs et presque tous les rayons gamma détectés près de la surface de la Terre résultent de la désintégration radioactive naturelle du potassium, de l'uranium et du thorium. Ces rayons sont assez pénétrants et peuvent parcourir environ 35 cm dans la roche et plusieurs centaines de mètres dans les airs. La méthode de spectrométrie radiométrique est un outil géophysique utilisé pour estimer les concentrations en potassium, en uranium et en thorium en mesurant les rayons gamma émis par les isotopes radioactifs de ces éléments lors de la désintégration radioactive. Elle a de nombreuses applications, notamment en cartographie géologique et en exploration minérale. Les modifications de lithologie ou de type de sol s'accompagnent couramment d'une variation des concentrations en radioéléments. La méthode spectrométrique à rayons gamma est capable de détecter les gisements minéraux, directement ou indirectement, comme l'altération potassique associée aux gisements hydrothermaux.

Dans les environnements affleurants ou peu recouverts de mort-terrain, il est possible de cartographier les différentes lithologies et d'estimer les variations de concentration en potassium et en uranium dues aux processus d'altération. Nous proposons ici, à travers quelques études de cas, une utilisation d'algorithmes de groupement automatisés (*clustering*) afin d'établir les différents groupes lithologiques selon les signatures radiométriques et magnétiques, le tout associé à une calibration géologique. Une fois le dictionnaire lithologique créé pour la zone étudiée, il est possible d'estimer des changements de masses pour le potassium et l'uranium, caractérisant ainsi les différents processus d'altérations. En effet, la nature immobile du thorium nous permet d'estimer une régression thorium/potassium et thorium/uranium et de calculer les valeurs résiduelles des éléments plus mobiles (potassium et uranium), qui auraient pu être affectés par la circulation de fluides hydrothermaux. Cette méthode de cartographie permet de mettre en évidence les zones de lessivage et de déposition de ces éléments radiométriques.

Cette approche permet de générer rapidement des cartes d'altération beaucoup plus précises que les cartes ternaires traditionnellement utilisées pour l'exploration de gîtes d'oxydes de fer-cuivre-or (IOCG), d'uranium, porphyriques ou tout autre système minéralisé possédant une grande empreinte, avec des variations de concentration en potassium et en uranium.

SÉANCE 9

La contribution des techniques d'apprentissage machine dans la conception des systèmes de commande des réseaux autonomes fortement décarbonés

François Bouffard, Yuchong Huo (McGill, GERAD)
et Géza Joós (McGill)

La décarbonation des réseaux électriques autonomes est un enjeu central pour l'industrie minière et les communautés du Nord québécois. L'intégration de sources d'énergie renouvelables, tels l'éolien et le solaire, fait partie du lot de solutions visant la réduction de l'empreinte carbone et des besoins en carburants fossiles de ces réseaux.

En revanche, la variabilité des sources d'énergie renouvelables est un enjeu technique non négligeable dans l'exploitation des réseaux électriques. En particulier dans les réseaux autonomes où, par exemple, les actifs de production au diesel ne sont généralement pas conçus pour répondre aux besoins d'équilibrage engendrés par les ressources renouvelables. L'utilisation de moyens de stockage d'énergie – batteries, volants d'inertie, etc. – est proposée afin de capter la production renouvelable et la répartir dans le temps en fonction de la demande. Le dimensionnement, la sélection et l'exploitation des actifs de stockage demeurent tout de même tributaires d'une caractérisation de la variabilité à gérer, tant du côté de la production que de la demande. De plus, étant donné que les actifs de stockage possèdent des capacités énergétiques limitées, les méthodes traditionnelles de répartition de la production (*dispatching*) doivent être adaptées.

C'est ici qu'interviennent les méthodes d'apprentissage machine. Elles permettent la caractérisation de la variabilité de la production renouvelable et de la charge ainsi que le calcul de la répartition de la production en présence d'actifs de stockage d'énergie. Pour la caractérisation de la variabilité, il est possible de calculer systématiquement des ensembles de bornes sur la variabilité à partir de données temporelles de production renouvelable et de demande. Avec de telles caractérisations en main, on peut optimiser conjointement la répartition de la production fossile et des actifs de stockage avec des algorithmes de commande prédictive qui peuvent maximiser la valeur des capacités de stockage.

Même si les algorithmes de commande prédictive permettent une réduction accrue de la production à partir de combustibles fossiles, ils sont associés à des efforts de calcul substantiels qui n'ont pas nécessairement leur place dans un contexte industriel en milieu isolé. Par contre, en réalisant un grand nombre de simulations de scénarios d'exploitation – basés sur la caractérisation de la variabilité – et en générant leurs ensembles de commandes correspondantes, il est possible d'utiliser des algorithmes d'apprentissage machine pour obtenir des modèles de prise de décision infiniment plus simples. De tels modèles, qui peuvent être implantés dans des plateformes informatiques minimalistes (automates programmables ou microcontrôleurs), sont en mesure de reproduire fidèlement le comportement des algorithmes de commande prédictive à moindre coût.

Ces travaux de recherche ont reçu le support financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG), d'Hydro-Québec, d'OPAL-RT Technologies et d'InnovÉÉ.

SÉANCE 11

Les Premières Nations comme solution à la pénurie de main-d'œuvre

Ghislain Picard (Assemblée des Premières Nations du Québec-Labrador)

Depuis quelques années, les effets d'une pénurie de main-d'œuvre se font ressentir dans plusieurs secteurs d'activités. Cette situation touche particulièrement les industries nécessitant une main-d'œuvre qualifiée, y compris l'industrie minière. À l'inverse, dans les communautés des Premières Nations, qui sont bien souvent situées à proximité des chantiers et sites miniers, les taux de chômage sont élevés, bien que les populations soient jeunes et prêtes à l'emploi. L'embauche de main-d'œuvre autochtone est l'une des solutions au manque de ressources humaines.

SÉANCE 11

Facteurs de succès liés au recrutement, à l'intégration et à la rétention des employés autochtones au sein de l'industrie minière

Joanie Caron (UQAT)

La rareté de main-d'œuvre est criante dans plusieurs secteurs d'activités au Canada et l'industrie minière québécoise n'est pas épargnée. Les communautés autochtones sont une population jeune, en croissance, et plusieurs désirent participer au développement minier. Pourtant, elles ont toujours eu un taux d'emploi inférieur à celui des populations non autochtones et les obstacles à l'emploi persistent. Afin de contrer la rareté de main-d'œuvre et de rehausser les conditions socioéconomiques au sein des communautés, il est nécessaire d'identifier des stratégies de recrutement, d'intégration et de rétention culturellement pertinentes et efficaces.

SÉANCE 11

Guide de référence pour l'intégration et le maintien en emploi des Premières Nations

Wanda Lafontaine (CDRHPNQ)

La Commission de développement des ressources humaines des Premières Nations du Québec (CDRHPNQ) souhaite vous présenter son nouveau guide de référence, qui se veut un recueil des meilleures pratiques pour contribuer à la réussite de l'intégration et du maintien en emploi d'une main-d'œuvre autochtone au sein de votre entreprise.

Les réalités d'affaires propres à chaque entreprise, combinées à la diversité culturelle des Autochtones et à un réseau de soutien dynamique et évolutif, font en sorte qu'une stratégie d'intégration universelle est difficile à proposer. Il existe cependant des « conseils et de meilleures pratiques » qui ont fait leurs preuves dans plusieurs entreprises et qui se retrouvent dans le présent guide. Nous espérons que ce guide pourra susciter votre intérêt à faire partie des entreprises qui embauchent des Autochtones de façon durable.

SÉANCE 11

Une réelle façon de faire ENSEMBLE

François Lafrenière (Minerai de fer Québec)

Les relations entre le monde industriel et les communautés autochtones ont évoluées grandement depuis quelques décennies. Cette évolution se traduit maintenant par une prise de conscience de la nécessité de vivre une réelle collaboration entre les deux solitudes d'antan. Il est essentiel pour les entreprises d'aujourd'hui de jeter des ponts entre les rives afin de travailler en synergie à la réalisation de projets communs, et ce, pour le bien de tous. C'est dans ce contexte que Minerai de fer Québec a fait du mot « ENSEMBLE » une réelle façon de faire avec les communautés. Nous sommes fiers de vous exposer notre approche pour y arriver.

SÉANCE 11

Initiatives de ressources humaines avec la Nation crie de Nemaska

Chantal Francoeur (Nemaska Lithium)

La proximité de la Nation crie de Nemaska a été considérée dès le début du projet de Nemaska Lithium comme un atout important pour son développement. En vertu de l'entente Chinuchi, signée en 2014, plusieurs initiatives ont été mises sur pied en collaboration avec la communauté, notamment en matière de formation de la main-d'œuvre et de recrutement.

SÉANCE 12

Un survol des grandes provinces ignées et de leur métallogénie : ce que nous savons et ce que nous devons savoir à propos des liens entre les événements à l'origine des LIP et la formation des gîtes minéraux

Simon M. Jowitt (Université du Nevada, Las Vegas)
et Richard E. Ernst (Université Carleton et Université d'État de Tomsk, Russie)

Les événements à l'origine des grandes provinces ignées (*Large Igneous Province* ou LIP) transportent des quantités considérables d'énergie et de métaux du manteau à la croûte terrestre et sont directement impliqués dans, ou alimentent, ou d'une façon ou d'une autre influencent causativement une variété de différents systèmes métallogéniques. Ces associations peuvent être distillées en cinq types de relations distinctes :

- (1) Les magmas des LIP qui génèrent directement de la minéralisation, comme des sulfures de Ni-Cu-EGP orthomagmatiques, ou des gîtes de Nb-Ta-ETR ou des diamants respectivement associés aux carbonatites et aux kimberlites liées à des LIP;
- (2) Les magmas des LIP qui fournissent de l'énergie, des fluides et/ou des métaux pour les types de minéralisation comme les sulfures massifs volcanogènes (SMV) hydrothermaux et les gîtes d'oxydes de fer-cuivre-or (*Iron Oxide-Copper-Gold* ou IOCG);
- (3) Les roches des LIP (particulièrement les filons-couches et les dykes) qui agissent comme barrières à la circulation de fluides et/ou comme zones de réaction, qui ont pour effet de contrôler les événements minéralisateurs comme les pièges structuraux dans les systèmes d'hydrocarbures, ou qui forment des barrières imperméables qui ont pour effet de contrôler la circulation de l'eau et donc la formation d'aquifères;
- (4) Les effets en surface, incluant la météorisation des roches de LIP pour former des latérites de Ni-Co et des bauxites d'Al dans les régions tropicales, ainsi que des latérites résiduelles riches en Nb, Ta et en ETR à partir de carbonatites associées à des LIP; et
- (5) Les liens indirects entre les LIP et la minéralisation, où les séparations continentales associées à des LIP génèrent de la compression et de la transpression distales au sein du circuit de tectonique des plaques, ce qui peut mener à la formation de gîtes liés à l'orogénèse (par ex. : les gîtes d'or orogéniques).

L'étude des événements à l'origine des LIP permet aussi de reconstruire les supercontinents du Précambrien et de suivre des secteurs d'enrichissement métallogénique et d'hydrocarbures entre des blocs crustaux aujourd'hui séparés mais qui étaient autrefois contigus. Toutefois, bien que la connaissance de ces liens soit utile pour le ciblage en exploration régionale et permette d'informer et de guider l'exploration plus localisée, nous devons aussi combiner nos connaissances de ces relations et de leur chronologie relative avec ce que nous savons sur la localisation de ces gîtes minéraux au sein des systèmes LIP. En faisant le lien entre ces connaissances spatiales et génétiques, les secteurs d'intérêt pour l'exploration minière au sein de systèmes LIP donnés pourront être identifiés. Cette présentation abordera les liens et les relations importantes entre les événements à l'origine des LIP, la formation de ressources minérales reliées à des LIP, et l'identification des principaux sites métallogéniques au sein des systèmes LIP, tous des éléments qui peuvent être utilisés pour améliorer les stratégies d'exploration minière pour une gamme de ressources minérales encaissées ou reliées aux LIP, ainsi que pour mettre en lumière les secteurs importants à cibler pour la recherche future.

SÉANCE 12

La genèse du gîte d'ETR Ashram au Québec : ce que la géochimie des roches entières, les réactions de remplacement apatite-monazite-bastnaésite et la composition chimique des minéraux peuvent nous apprendre

Caitlin M.J. Béland et Anthony E. Williams-Jones (McGill)

La demande croissante pour les éléments des terres rares (ETR), et en particulier les ETR lourdes dont la valeur est plus élevée, a attisé l'intérêt, tant pour l'exploration minière que pour la recherche scientifique portant sur les gîtes encaissés dans des carbonatites, à plus forte raison ceux particulièrement enrichis en ETR lourdes. Le gîte d'ETR Ashram, encaissé dans le complexe carbonatitique d'Eldor, dans la Fosse du Labrador au Québec (Canada), est un exemple de ce type d'enrichissement inhabituel en ETR lourdes. Les processus magmatiques ont joué un rôle important dans la genèse du gîte d'ETR Ashram, mais la remobilisation hydrothermale a été cruciale pour la concentration des ETR à des niveaux potentiellement économiques et pour le fractionnement des ETR lourdes. Le gîte s'est formé autour d'une brèche de faille centrale sous-jacente à la zone d'enrichissement en ETR lourdes. Les données géochimiques des roches entières et la composition en isotopes stables C-O des minéraux carbonatés indiquent qu'il y a eu deux phases de mise en place de carbonatites cogénétiques. La carbonatite précoce, surnommée ici la carbonatite de bordure, est caractérisée par de hautes teneurs en phosphate et en Sr et de basses teneurs en ETR, tandis que la carbonatite tardive (Ashram) est faible en phosphate mais présente des teneurs relativement élevées en ETR, en Fe et en F. Une autre différence entre les deux porte sur le fait que le magma qui a cristallisé pour former la carbonatite Ashram a subi l'exsolution d'un fluide d' $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ qui a agi sur les assemblages minéralogiques ignés primaires pour remobiliser les ETR.

Les minéraux d'ETR du gîte Ashram sont secondaires et ont été précipités à partir de fluides hydrothermaux. Ils se composent de monazite-(Ce) et de bastnaésite-(Ce), avec de moindres quantités de monazite-(Nd) et des traces de xénotime-(Y) et d'aeschynite-(Y). La minéralisation en ETR se présente sous forme disséminée dans la matrice des brèches, sous forme de veines et en remplissage de cavités. La monazite-(Ce) a été la première phase à se former, suivie par le xénotime-(Y) et la bastnaésite-(Ce). La composition de la monazite-(Ce) et de la bastnaésite-(Ce) varie en fonction de l'emplacement au sein du gîte. En effet, ces minéraux sont préférentiellement enrichis en ETR légères en s'éloignant des brèches de faille. Cet enrichissement est attribué à une combinaison de facteurs, soit le refroidissement et la diminution de l'effet tampon du pH du fluide dans la brèche, qui est interprétée comme ayant servi de conduit principal pour la circulation des fluides. La composition du xénotime-(Y) ne varie pas en fonction de l'emplacement, ce qui suggère qu'il n'y a pas eu fractionnement des ETR lourdes dans le fluide. Le fluide aurait plutôt lessivé les ETR lourdes des minéraux précoces, notamment la fluorite et les carbonates, pour les déposer *in situ* sous forme de xénotime-(Y) au contact avec une source de phosphate. La bastnaésite-(Ce) s'est développée en remplacement de la monazite-(Ce) par échange de ligands (F^- , CO_3^{2-} pour PO_4^{3-}), tout en préservant la composition d'origine en termes d'ETR. L'interaction d'un fluide en évolution compositionnelle avec des roches encaissantes de composition globale et de capacité tampon variables s'est soldée par le fractionnement et la zonalité des ETR à l'échelle du gîte.

SÉANCE 12

Le potentiel minéral de la Fosse du Labrador pour les gîtes d'oxydes de fer-cuivre-or (IOCG) et autres gîtes affiliés

James Conliffe (GSNL), Louise Corriveau (CGC-Q), Jean-François Montreuil (MacDonald Mines Exploration) et Olivier Blein (BRGM)

Les gîtes d'oxydes de fer-cuivre-or (*Iron Oxide-Copper-Gold* ou IOCG) et les différents types de gîtes affiliés représentent une source majeure de Cu et d'Au dans le monde et contiennent des quantités appréciables d'autres métaux (par ex. : Ag, Co, Bi, Fe, Mo, Ni, EGP, Pb, ETR, U, V, Zn). Ces types de gîtes sont caractérisés par des empreintes lithogéochimiques et des faciès d'altération distinctifs qui, lorsque ces derniers sont intégrés à des modèles métallogéniques et des classifications typologiques, peuvent fournir des vecteurs efficaces vers la minéralisation.

Dans la région de la Fosse du Labrador, dans le nord-est du Québec et l'ouest du Labrador, plusieurs contextes favorables pour la minéralisation de type IOCG ont été reconnus, notamment dans le horst de Romanet dans la partie centrale de la Fosse, et dans le secteur du lac Montgomery plus au sud. Dans le horst de Romanet, la présence d'altération hydrothermale et de bréchification est associée à des indices minéralisés polymétalliques enrichis en Cu, Au, Mo, ETR, U, Co et Ag. Les plus importantes zones de minéralisation identifiées dans le horst de Romanet se trouvent dans un corridor d'albitites localisé au sein de la faille qui marque la bordure nord du horst; à cet endroit, on retrouve d'importantes minéralisations en Cu-Ag-(Au) et en Au-Co-Cu là où des faciès d'altération de haute température (Ca-Fe-K) et de basse température (K-Fe) ont bréchifié l'albitite. D'autres indices et prospectus minéralisés dans le horst de Romanet se composent de minéralisation en Cu, U, Au-U, Au-Co-Cu et Mo encaissée dans des albitites, et de zones rappelant la minéralisation de type IOCG dominée par la magnétite. En plus de l'altération régionale en $\text{Na}\pm\text{Ca}$ (albitite) et des phases plus tardives, et des veines minéralisées contenant des carbonates, les systèmes minéralisés comprennent aussi des faciès d'altération de haute température en Ca-Fe (où l'amphibole est prédominante) et en K-Fe (où la magnétite et la biotite sont prédominantes), ainsi que des faciès de basse température en K-Fe (où l'hématite et la séricite sont prédominantes); les faciès d'altération en K-Fe sont distinctifs des gîtes de type IOCG et encaissent localement de la minéralisation en sulfures cuprifères. Dans le secteur du lac Montgomery, de vastes zones d'altération en $\text{Na}\pm\text{Ca}$ (albitite) et de bréchification ont été identifiées le long d'un corridor d'environ 2 km de long, et une minéralisation significative en Cu-Au est aussi rapportée le long de ce corridor. Des travaux de recherche sont en cours afin d'identifier si d'autres faciès d'altération et d'autres styles de minéralisation typiques des gîtes de type IOCG peuvent être identifiés dans ce secteur.

Cette présentation sera l'occasion de décrire le contexte géologique de ces secteurs favorables, en mettant l'accent sur l'évolution des faciès d'altération et des systèmes minéralisateurs associés aux indices minéralisés. Elle mettra en lumière l'importance de procéder à la cartographie des faciès d'altération, au traitement des grandes bases de données en termes de faciès d'altération et d'associations métalliques, et à l'intégration des modèles géologiques et géophysiques dans les secteurs peu affleurants comme la Fosse du Labrador. Par ailleurs, les liens potentiels entre la minéralisation de type IOCG et la mise en place de grandes provinces ignées (*Large Igneous Province* ou LIP) dans la Fosse du Labrador seront abordés.

SÉANCE 12

Pétrologie et architecture du système de plomberie magmatique des gîtes de Ni-Cu-EGP Expo-Delta-Raglan dans la grande province ignée du Circum-Supérieur, Nunavik, Québec

Dylan McKevitt, C. Michael Lesher (Université Laurentienne) et Michel G. Houlié (CGC-Q)

La moitié est du Domaine Sud de la ceinture de Cape Smith au Nunavik (Québec) présente l'une des sections les mieux exposées et les moins métamorphisées de la grande province ignée du Circum-Supérieur. La séquence volcanosédimentaire est constituée du Groupe de Povungnituk, plus ancien (volcanisme 2,04-1,96 Ga), surmonté du Groupe de Chukotat (volcanisme ca. 1,88 Ga) qui comprennent (de la base au sommet et du sud au nord) des unités silicoclastiques avec quelques unités de carbonates et des formations de fer (Formation de Nituk – Groupe de Povungnituk) où des filons-couches différenciés de pyroxénite à olivine/méso-leucogabbro se sont mis en place; des basaltes tholéitiques, des filons-couches synvolcaniques et de petites quantités de sédiments (Formation de Beuparlant – Groupe de Povungnituk) où des dykes peu différenciés en forme de lame, de composition variant d'une pyroxénite à olivine à une périclase à pyroxène, avec des bordures mélagabbroïques, se sont mis en place (unités « Expo »); des unités silicoclastiques avec de moindres quantités de volcanoclastites (Formation de Nuville – Groupe de Povungnituk) où des filons-couches différenciés de pyroxénite à olivine/méso-leucogabbro se sont mis en place (unités « Delta »); et des laves chenalisées et des chenaux invasifs de périclase peu différenciée de la formation Raglan, qui représentent les unités basales de l'assemblage de basaltes komatiitiques-tholéitiques du Groupe de Chukotat. La pétrologie et la minéralisation dans chaque partie du système reflète le degré de chenalisation dans cette partie du système, et la quantité et le type de minéralisation en sulfures varie en fonction du flux de magma et de la proximité d'horizons sédimentaires riches en S. Les filons-couches épais et bien différenciés ont un pourcentage poids global en MgO similaire au magma parental et représentent des poussées de magma individuelles; ils encaissent souvent de la minéralisation stratiforme interne en EGP-(Cu)-(Ni) de teneur subéconomique. Les portions inférieures contenant des orthomésocumulats d'olivine présentent des tendances prévisibles où la taille et l'abondance des oïcristaux sont inversement proportionnelles. Les sections gabbroïques supérieures présentent souvent un litage modal et sont localement surmontées d'un leucogabbro pegmatitique. Les filons-couches ultramafiques plus minces et peu différenciés se sont mis en place au-dessus des filons-couches différenciés dans les mêmes formations sédimentaires et peuvent contenir de minces couches au sommet ou dans les bordures latérales de gabbro-pyroxénite à texture variable, un litage dans la pyroxénite à olivine défini en fonction de la taille des oïcristaux, et des lambeaux de roches encaissantes. Ces conduits plus dynamiques, correspondant probablement à plusieurs poussées de magma, encaissent un peu de sulfures disséminés. La minéralisation en sulfures plus significative localisée dans les bordures inférieures et les quilles des dykes en forme de lame de type Expo et dans les dépressions à la base des coulées de laves de la formation Raglan reflètent des flux de magma encore plus importants et l'assimilation d'horizons sédimentaires riches en S. Les données préliminaires du projet de recherche en cours indiquent que différentes composantes du système de plomberie magmatique sont temporellement et pétrogénétiquement reliées, mais que les dykes en forme de lame dans la partie Expo du système sont issus de magmas moins magnésiens et ne représentent pas des dykes nourriciers des chenaux de laves et des coulées en feuillets chenalisées de la partie Raglan de ce district nickélifère de calibre mondial directement relié à la grande province ignée du Circum-Supérieur de 1,88 Ga.

SÉANCE 12

Corrugated Hills : les restes d'une grande province ignée d'environ 2,17 Ga dans la Fosse du Labrador

David Corrigan (CGC-O), Anne-Aurélié Sappin, Michel G. Houlié (CGC-Q), Nicole Rayner (CGC-O) et Diane Van Rooyen (Université du Cap-Breton)

Le secteur connu sous le nom des *Corrugated Hills*, un faciès topographique qui coïncide avec une partie de la zone Howse dans le Supergroupe de Kaniapiscaw, se compose de basaltes bien préservés qui se sont mis en place sous la forme de coulées de laves et possiblement de filons-couches subvolcaniques de haut niveau le long de la marge en extension du craton du Supérieur durant le Paléoprotérozoïque. La datation à l'U-Pb de zircons par la méthode SHRIMP a livré un âge de 2166 ± 4 Ma pour le gabbro Cramolet à la base de la section (auparavant daté indirectement à 2169 ± 2 Ma) tandis qu'un âge de 2171 ± 2 Ma a été obtenu pour un gabbro plus haut dans la section, suggérant une mise en place relativement rapide et une corrélation potentielle avec les essaims de dykes de Biscotasing (ca. 2169 Ma) et de la rivière Payne (ca. 2160-2170 Ma) dans le craton du Supérieur, tel que suggéré antérieurement. La plupart des coulées présentent des joints columnaires et sont caractérisées par des textures poecilitiques dans des gabbros moyennement à grossièrement grenus, suggérant la séquence de cristallisation suivante : olivine $\rightarrow$ plagioclase $\rightarrow$ (opx/cpx). De rares coulées de hyaloclastite avec des fragments de verre non dévitrifié sont aussi présentes. En termes de composition, les basaltes présentent une affinité tholéitique et des valeurs en MgO entre 6 et 11 % poids. Ils présentent des ratios Zr/Y, Ti/Zr et Ti/V similaires à ceux du manteau primitif, ainsi que des profils d'éléments incompatibles plats à légèrement appauvris en ETR légères et des profils d'ETR lourdes pratiquement plats, similaires à ceux des basaltes de dorsales médio-océaniques (MORB) modernes. Sur les diagrammes discriminants, ils sont positionnés sur la palette mantellique, entre les N-MORB et les E-MORB, à proximité du champ des basaltes de plateaux continentaux du Phanérozoïque comme ceux de la marge nord-atlantique. Sur des diagrammes multiélémentaires normalisés au manteau primitif, ils présentent des similitudes avec les dykes de la rivière Payne et de Biscotasing, bien que ces derniers semblent avoir assimilé des quantités progressivement croissantes de croûte continentale. Les sédiments interlités sont principalement silicoclastiques et leur provenance est surtout du craton du Supérieur, mais ceux à la base contiennent des grains de zircons aussi jeunes que ca. 2,2 Ga. Ils contiennent localement des fragments de basalte angulaires de taille millimétrique, indiquant une source proximale contemporaine au magmatisme. Tous ces traits combinés indiquent que les basaltes de plateaux des Corrugated Hills, auparavant inclus avec les filons-couches du Montagnais (ca. 1,88 Ga), représentent les restes d'une plume mantellique d'environ 2,17 Ga empiétant sur la marge est du craton du Supérieur, ce qui soulève des questions quant à leur potentiel pour des gîtes de Ni-Cu-EPG de type Noril'sk, et la possibilité qu'ils aient servi de source de chaleur localisée pour la génération de gîtes d'ETR, d'or et autres.

SÉANCE 12

Localisation des minéralisations magmatiques en Cr et en sulfures de Fe-Ni-Cu-EGP dans les grandes provinces ignées

C. Michael Lesher (Université Laurentienne)

La localisation privilégiée de la chromite et des sulfures de Fe-Ni-Cu-(EGP) au sein des segments horizontaux et dynamiques (réalimentés, dominés par les cumulats) des complexes de dykes – filons-couches – coulées de laves dans les grandes provinces ignées (Large Igneous Provinces ou LIP) indique qu'il s'agit de pièges fluidodynamiques pour ces phases. Plusieurs auteurs les ont interprétés comme ayant accumulé la chromite ou les gouttelettes de sulfures transportées vers le haut, souvent en provenance de chambres transitoires plus profondes. Bien que des suspensions très fines (grains de chromites de 0,1-0,5 mm, gouttelettes de sulfures de <1-2 cm) et diluées (<8 % chromite, <15 % sulfures) de chromite ou de sulfures en fusion denses aient pu être transportées par des magmas ascendants, plusieurs problèmes restent associés aux modèles de transport ascendant pour la plupart des gîtes associés aux LIP : 1) les données isotopiques du S sont compatibles avec des sources crustales proximales, 2) les xénolites semblent être issus de l'encaissant proximal plutôt que de sources crustales plus profondes, 3) les faciès latéraux des coulées en feuillets ou des filons-couches des grands gisements ne contiennent que peu ou pas de chromite ou de sulfures, 4) mis à part les endroits où il y a des évidences d'une source locale d'oxydes ou de S, la chromite et les sulfures (ou les enrichissements en éléments chalcophiles indiquant leur présence antérieure) sont rarement, voire pas du tout, présents dans la partie volcanique du système, même s'il y a présence de minéralisation dans la partie subvolcanique du système, et 6) certaines laves sont légèrement à fortement appauvries en EGP >>> Cu > Ni > Co, indiquant que des sulfures n'ayant pas fait éruption ont séquestré les EGP en profondeur. Deux solutions potentielles à ce paradoxe sont que : 1) les systèmes naturels contenaient des tensioactifs qui ont abaissé les tensions interfaciales entre sulfures et silicates, permettant aux sulfures en fusion de se rassembler et de se déposer plus facilement que ce que les études théoriques/expérimentales de systèmes artificiels/analogues le prédisent, et/ou 2) la chromite et les sulfures n'existaient pas sous forme de grains et de gouttelettes dispersés uniformément, comme on l'a toujours supposé, mais plutôt sous forme de masses liquides ou de pseudocouches fluidodynamiquement cohérentes, qui étaient suffisamment larges pour qu'elles ne puissent pas être transportées vers le haut. Peu importe l'explication finale, il semble probable que la plupart des gîtes de Cr et de sulfures de Ni-Cu-(EPG) à haute teneur dans les LIP se soient formés au niveau stratigraphique où on les retrouve ou au-dessus, suggérant que l'exploration devrait se concentrer sur les segments horizontaux, dominés par les cumulats, des complexes de dykes – filons-couches – coulées de laves se trouvant au niveau ou en dessous de sources crustales d'oxydes ou de S.

SÉANCE 13

Produire le magnésium le plus vert sur la planète

Joël Fournier (Alliance Magnésium)

Le magnésium est un métal stratégique destiné aux marchés des transports et de l'aluminium.

Plus de 80 % du magnésium produit sur la planète provient de Chine qui utilise des procédés thermiques polluants, grands générateurs de CO₂.

Fort des héritages technologiques d'une époque récente de production québécoise de magnésium, Alliance Magnésium a développé un procédé de fabrication qui fait appel aux concepts les plus innovateurs en matière d'hydrométallurgie et de valorisation de résidus miniers.

Créée en octobre 2012, Alliance Magnésium a implanté un modèle de développement en trois phases : une unité pilote, une usine de préproduction commerciale et une usine de production commerciale. Les essais en unité pilote sont terminés depuis 2017. Les résultats obtenus ont permis le début des travaux préparatoires de l'usine de préproduction d'une capacité de 12 000 tonnes de magnésium métallique, dont la construction est prévue à l'hiver 2019-2020. Le lancement des travaux de l'usine de production d'une capacité de 50 000 tonnes est planifié vers 2024. Au total, c'est plus de 750 000 000 \$ qui auront été investis dans la région de Danville-Asbestos et plus de 350 emplois directs créés.

Propriétaire d'un site industriel d'exception, Alliance Magnésium dispose également de 100 millions de tonnes de serpentine (environ 25 % de magnésium), la matière première.

Au final, Alliance Magnésium fabriquera le magnésium le plus vert sur la planète, à partir d'un résidu minier prêt à être valorisé, en employant un procédé hydroélectrolytique alimenté à l'électricité. Le magnésium produit pourra par après être transformé en pièces ou en alliages destinés au marché du transport, réduisant ainsi le poids des véhicules et leur empreinte environnementale.

Une véritable écotechnologie!

SÉANCE 13

Une approche de traitement novatrice pour le gîte de terres rares et de fluorite Ashram

Darren L. Smith (Commerce Resources), Christel Bemelmans, Nick Hazen et Dave Baughman (Hazen Research)

Le gîte Ashram, détenu par Commerce Resources, est l'un des plus gros gîtes d'éléments des terres rares (ETR) et de fluorite au monde. Situé dans le nord du Québec, le gîte englobe des ressources mesurées de 1,6 million de tonnes (Mt) à 1,77 % oxydes de terres rares (OTR) et 7,7 % CaF₂, des ressources indiquées de 27,7 Mt à 1,90 % OTR et 5,9 % CaF₂, et des ressources présumées de 219,8 Mt à 1,88 % OTR et 4,5 % CaF₂, selon un seuil de coupure de 1,25 % OTR (Gagnon & Canus, 2012). Les ETR dans ce gîte associé à une carbonatite se présentent principalement sous forme de particules de monazite d'environ 10-15 µm, emprisonnées dans des minéraux carbonatés (dolomite, ankérite, sidérite) avec une petite quantité de bastnaésite et plus rarement, du xénotime. L'apatite est aussi présente comme composante mineure de la gangue.

Le schéma de traitement pour le minerai du gîte Ashram fait appel à une combinaison novatrice de procédés de traitement minéral conventionnels et hydrométallurgiques, afin de permettre la séparation et la concentration des minéraux de terres rares. Cette approche implique la lixiviation, à l'acide chlorhydrique, des minéraux de la gangue à partir du concentré de flottation, suivie d'une étape de séparation magnétique pour retirer la fluorite du résidu de lixiviation, produisant ainsi un concentré de minéraux de terres rares à plus de 40 % OTR, pour un taux de récupération élevé, qui se prête bien aux étapes subséquentes de traitement hydrométallurgique en aval. Durant l'étape de lixiviation à l'acide chlorhydrique, une petite fraction des ETR est dissoute. Après séparation des liquides et des solides, la fraction dissoute des ETR est précipitée et filtrée pour être éventuellement récupérée avec le concentré de minéraux. Une dissolution à l'acide sulfurique porte les ETR en solution. Après avoir retiré le thorium par extraction au solvant, une solution est obtenue, à partir de laquelle il est possible de produire une variété de produits de terres rares commercialisables.

Travaux cités

Gagnon, G., & Canus, Y. (2012). *Technical Report Mineral Resource Estimation Update, Eldor Property - Ashram Deposit, Nunavik, Quebec*. SGS Canada Inc. pour Commerce Resources Corp.

SÉANCE 13

Traitement hydrométallurgique de liqueur-mère par sulfatation thermique sélective des roches granitiques contenant des terres rares : options de traitement et avantages et inconvénients associés

Dirk Naumann (Torngat Metals)

Le projet Strange Lake de Torngat Metals produira un concentré sur le site minier, dans le Nord-du-Québec, qui sera traité à Bécancour. Durant le traitement par attaque acide du concentré, tous les minéraux de terres rares et les métaux de base réactifs seront convertis en sulfates. Après la décomposition thermique sélective des sulfates de métaux de base, les sulfates de terres rares ainsi isolés pourront être lixiviés quantitativement dans l'eau pour former une liqueur-mère. Cette liqueur-mère sera purifiée lors d'une série d'étapes hydrométallurgiques. Après précipitation de tous les composés de terres rares, ces derniers devront être à nouveau dissous pour poursuivre le traitement et la séparation par extraction par solvant, de façon à produire des composés de métaux individuels.

Deux options pour l'étape d'extraction par solvant seront présentées, avec des profils très différents et très distinctifs en termes de développement durable, d'investissements requis, de coûts d'exploitation, et de consommation de produits chimiques auxiliaires : le chlorure et le nitrate.

SÉANCE 13

Développement d'un procédé écoresponsable de purification chimique du graphite

Geneviève Pichet et Jean L'Heureux (Mason Graphite)

Le développement d'un procédé de purification du graphite par voie chimique de manière écoresponsable implique nécessairement l'optimisation des réactifs. Cette optimisation se concrétise par un choix judicieux des produits chimiques utilisés, par une minimisation de la consommation en réduisant les concentrations des solutions, par leur réutilisation et/ou par leur régénération. Grâce au soutien financier du MERN, trois phases d'optimisation ont été réalisées : la première à l'échelle du laboratoire, la deuxième à l'échelle mini-pilote et la dernière à l'échelle pilote. Les travaux associés, les méthodes employées et certains résultats de ces trois étapes seront présentés.

SÉANCE 16

L'Essentiel des mines : un programme de formation sur l'employabilité destiné aux autochtones

Dana Imbeault et Pascale Larouche (RHIM)

Mis sur pied en 2010 dans le cadre d'un partenariat entre le Conseil des ressources humaines de l'industrie minière (RHIM) et l'Assemblée des Premières Nations (APN), l'Essentiel des mines est le seul programme de formation minière national validé par l'industrie menant à un emploi pour les autochtones intéressés à explorer les possibilités de carrière dans le secteur minier. Il a été créé en collaboration avec l'APN, l'Inuit Tapiriit Kanatami, le Ralliement national des Métis, des employeurs, des éducateurs et des communautés.

Le programme, d'une durée de 360 heures, enseigne à la fois des compétences essentielles et d'employabilité qui ont été validées par l'industrie minière comme étant jugées nécessaires pour obtenir un emploi dans l'industrie. Par l'entremise de partenariats avec l'industrie, l'Essentiel des mines fournit aux participants l'occasion de vivre des expériences d'apprentissage sur le terrain, dans une mine ou sur un site d'exploration, de façon à enrichir leur expérience d'apprentissage.

L'Essentiel des mines se distingue d'autres programmes d'employabilité en ce sens que les compétences sont enseignées à l'aide d'exemples tirés des milieux de travail, en combinaison avec des méthodes et des styles d'enseignement traditionnel autochtone. Cette approche permet aux apprenants de faire des liens plus facilement avec la matière, grâce à l'utilisation d'un contexte culturel et de méthodes pertinentes.

Créé dans le but d'aider les entreprises et les communautés à atteindre les cibles d'embauche et d'emploi, le programme a pour but d'offrir aux autochtones la possibilité d'acquérir les compétences non techniques et la confiance requises pour accéder à un emploi gratifiant, tout en favorisant le développement économique, pour des communautés saines et prospères. L'Essentiel des mines continue d'améliorer les chances de réussite et d'avancement dans différents cheminements de carrière, tout en misant sur l'attraction et la rétention des autochtones dans l'industrie minière canadienne, contribuant du même coup à optimiser l'offre de main-d'œuvre actuelle.

Les partenariats entre employeurs miniers, éducateurs et communautés sont fortement encouragés dès le départ, afin de jeter les bases qui assureront que cette formation mène à l'emploi. Les partenaires de l'industrie doivent déclarer, par écrit, leur intention d'embaucher les participants qui auront réussi le programme. L'Essentiel des mines peut facilement être adapté pour s'adresser à tous les partenaires impliqués et aux besoins uniques de chaque région.

SÉANCE 16

Automation in mining, its impact on employment and the participation of the Indigenous Workforce – The Case of Rio Tinto in the Western Australia Pilbara

Étienne Lamy (Rio Tinto)

La révolution 4.0 est une mégatendance qui touche tous les secteurs de l'industrie, y compris les mines et la production de métal primaire. Au Québec, il existe déjà de nombreux exemples d'automatisation des opérations minières et il est prévu que le processus ira en s'accéléralant dans les prochaines années. L'une des principales préoccupations liées à l'automatisation, à la robotique et à l'IA est l'impact potentiel sur la main-d'œuvre, en particulier pour les emplois les moins qualifiés, et sur les communautés locales et autochtones. Notre présentation portera sur le lien entre le processus d'automatisation et les emplois en s'appuyant sur l'expérience de Rio Tinto (minerais de fer) dans la région du Pilbara, en Australie occidentale. Nous discuterons notamment du contexte régional, des moteurs qui sous-tendent l'automatisation, de l'impact sur les emplois locaux et autochtones, des partenariats de formation avec le gouvernement pour développer la main-d'œuvre du futur et des programmes de requalification des travailleurs touchés.

SÉANCE 17

Effondrement orogénique et minéralisations : une introduction

Michel Jébrak (UQAM) et Réal Daigneault (UQAC)

La formation des chaînes de montagnes fait alterner des périodes de contraction et d'extension à toutes les échelles. Si les premières sont bien étudiées, les secondes restent mal connues, en particulier dans les orogènes anciens. Des effondrements ont été décrits dans la quasi-totalité des orogènes depuis l'Archéen, après les grandes phases de raccourcissement. Ils indiquent le détachement et la plongée d'une plaque en subduction ou le détachement de la racine lithosphérique des orogènes et reflètent le retour de la croûte à une épaisseur normale et la conservation des terrains supracrustaux à l'affleurement. Lors de l'effondrement de la chaîne apparaissent des reliefs en horst et graben avec une sédimentation détritique et des jeux multiples des accidents profonds, communément obliques pour accommoder les déformations. Plus en profondeur, l'augmentation du flux de chaleur produit la fusion de la croûte et la formation de granites hyperalumineux. En outre, la fusion partielle du manteau peut produire des roches alcalines tels les lamprophyres et les granites alcalins.

Cette période est également celle de la formation d'une grande variété de gisements épigénétiques : gisements de métaux usuels, de métaux précieux et de métaux rares associés aux plutons alcalins et hyperalumineux, zones de cisaillement à or, à arsenic et à antimoine de type orogénique, pegmatites à métaux rares à différents niveaux de la croûte, etc.

Cette séance vous présente des configurations tectoniques d'effondrement orogénique de l'Archéen à aujourd'hui et les minéralisations associées. Elle devrait permettre de dégager de nouveaux guides de prospection basés sur une meilleure compréhension des paysages géologiques et hydrothermaux à la fin de la formation des chaînes de montagnes.

SÉANCE 17

La chaîne des Cyclades (Grèce), un modèle récent pour les minéralisations post-orogéniques de type porphyre (Cu-Au ± Mo) à épithermal (Pb-Zn-Ag).

Christophe Scheffer (UL, Université de Lorraine),
Olivier Vanderhaeghe (Université de Lorraine, Université de Toulouse),
Panagiotis Voudouris (Université d'Athènes),
Alexandre Tarantola (Université de Lorraine)
et Adonis Photiades (IGME)

La chaîne des Hellénides fait partie de la chaîne orogénique Alpine-Himalayenne qui s'est formée entre la fin du Crétacé et le début du Cénozoïque. Le domaine Égéen est constitué d'une succession de nappes où les roches métasédimentaires (marbres et schistes) alternent avec des mélanges ophiolitiques, résultat de l'accrétion tectonique d'unités continentales et océaniques. Le métamorphisme de *HP-BT* (schistes bleus) entre la fin du Crétacé et l'Éocène témoigne de l'enfouissement et de l'exhumation de ces roches « découplées » de la plaque plongeante. L'accélération du retrait de cette dernière à l'Oligocène-Miocène est associée à la formation de failles de détachement de faible pendage accompagnant l'effondrement de la chaîne orogénique et la formation de complexe à noyau métamorphique.

Le retrait de la plaque plongeante est également associé à la mise en place de roches plutoniques et de roches volcaniques d'affinités calco-alcalines à shoshonitiques et alcalines depuis le massif du Rhodope au nord de la Grèce (34-25 Ma) jusqu'au temps présent au sud de la Grèce (volcans de Milos et de Santorin).

Trois grandes époques métallogéniques ont été définies au cours du Crétacé supérieur, de l'Oligocène et du Miocène. Les minéralisations sont spatialement associées à la génération des magmas et comprennent : des porphyres (Cu-Mo), des minéralisations liées à des intrusions (Au-Ag), des skarns (Fe-Cu-W-Au), des minéralisations par remplacement de roches carbonatées (Pb-Zn-Ag-Au) ou encore des minéralisations de type épithermal (Pb-Zn-As-Sb-Ag).

Nos travaux sur la bordure ouest des Cyclades (Laurion, Eubée) ont permis de réévaluer ce modèle géodynamique et métallogénique. L'évolution structurale et thermobarométrique du domaine Égéen est complexe et polyphasée, avec des plissements et des recoupements successifs des chevauchements par les failles de détachement syn- puis postorogéniques. Cette dernière phase intervenant après la phase de décompression isotherme (exhumation synorogénique) est caractérisée par une augmentation de température postérieure à l'accrétion tectonique, le métamorphisme des roches au niveau structural le plus profond atteignant le faciès des amphibolites et des granulites (conditions d'anatexie). Les minéralisations de types remplacement des carbonates et épithermal se mettent en place au niveau de la transition ductile-fragile, le long des failles de détachement post-orogéniques associées à la formation du complexe à noyau métamorphique. L'absence de lien génétique avec les intrusions magmatiques du Miocène ainsi que la découverte de stock métallifère anté-subduction remettent en question la source des fluides et des métaux dans la formation de ces gisements.

SÉANCE 17

L'importance de l'extension le long des failles pour les minéralisations aurifères archéennes de type orogénique : exemples de la Sous-province de l'Abitibi, Québec

Pierre Bedeaux, Réal Daigneault, Damien Gaboury, Antoine Brochu et Lucie Mathieu (UQAC)

À l'Archéen, bien que la présence d'orogènes soit discutée, la période tectonique qui suit le volcanisme est responsable de la création de reliefs alimentant une sédimentation abondante. L'effondrement post-tectonique de ces reliefs est indiqué par des contrastes de niveaux métamorphiques le long des failles majeures. Les gisements de type orogénique sont associés à ces failles et se sont mis en place à la transition entre le faciès des schistes verts et celui des amphibolites. Afin de vérifier le rôle de l'extension pour les minéralisations aurifères de type orogénique, nous avons étudié et comparé trois failles au sein de la Sous-province de l'Abitibi : la Faille de Cadillac, la Faille de Barlow et la Zone tectonique de Waconichi.

La Faille de Cadillac est un bon exemple de structure possédant les caractéristiques nécessaires pour le développement de gisements orogéniques. Cette faille d'ampleur crustale sépare les roches volcaniques de la Sous-province d'Abitibi des roches sédimentaires de la Sous-province de Pontiac. La Faille de Cadillac est d'orientation est-ouest, sa géométrie est segmentée et elle possède une histoire structurale complexe où se sont succédé des phases de raccourcissement, de décrochement et, finalement, d'extension. La minéralisation est associée aux premières phases de déformation dans un niveau crustal correspondant au faciès des schistes verts. Dans ce contexte, l'extension le long de la Faille de Cadillac a permis de protéger le bloc Nord de l'érosion. La Faille de Barlow, située à l'extrémité nord-est de la Sous-province d'Abitibi, est une structure à laquelle peu d'indices aurifères sont associés. D'après les travaux de cartographie effectués en 2018, cette faille possède des caractéristiques très similaires à la Faille de Cadillac. En effet, la Faille de Barlow est orientée est-ouest, présente une segmentation et semble avoir une ampleur crustale significative puisqu'elle est associée à un bassin de type Timiskaming (bien que d'âge plus ancien). Les observations de terrain indiquent que la faille a d'abord joué en chevauchement avant d'être réactivée en extension. Les roches de chaque côté de la faille sont au faciès des amphibolites. Le mouvement d'extension, qui suit l'apogée métamorphique durant l'effondrement post-orogénique, est négligeable le long de cette faille. Le niveau crustal favorable pour la mise en place de gisements de type orogénique n'a pas été préservé, d'où leur rareté. Quant à la Zone tectonique de Waconichi, située à 10 km au sud de la Faille de Barlow, elle comprend un ensemble de structures anastomosées, qui constituent la limite entre le faciès des schistes verts et celui des amphibolites, et contient plusieurs indices aurifères. Le mouvement d'extension dans cette zone a permis la préservation des gisements mis en place dans des conditions de métamorphisme moins intense.

SÉANCE 19

Étude sur la qualité de l'onde électrique d'un complexe minier et avantages économiques d'une gestion optimale du risque

Maxime Beauregard (Armada Surge Protection)

Armada participe à un projet de gestion agile de l'énergie avec Mines Agnico Eagle, division LaRonde. L'objectif principal est d'établir un rapport complet des apports des protecteurs contre les surtensions, notamment en matière de réduction du nombre de surtensions et de leur puissance affectant les équipements du réseau. Dans cette conférence, nous expliquerons les innovations technologiques brevetées et développées par Armada, le travail de terrain effectué sur les différents sites de LaRonde et les résultats escomptés relativement aux gains monétaires et à la diminution du risque.

SÉANCE 21

État des connaissances sur les populations de caribou forestier du Québec

Joëlle Taillon (MFFP)

Le caribou forestier est une espèce emblématique considérée comme un indicateur de l'état général de la forêt boréale au Canada, tout en revêtant une importance culturelle pour plusieurs nations autochtones. Il se distingue par son association étroite aux peuplements résineux matures qui renferment les lichens terrestres, éléments clés de son régime alimentaire hivernal. Le caribou forestier est aussi connu pour sa grande sensibilité aux perturbations et aux modifications de son habitat. Cette présentation met en évidence les caractéristiques écologiques propres à ce cervidé ainsi que les préoccupations, les facteurs limitants et les menaces à sa persistance au Québec.

SÉANCE 21

Développement d'une approche équilibrée pour assurer le maintien du caribou forestier au Québec

**Frédéric Bujold, Jérôme Rioux (MFFP)
et Marie-Pierre Ouellon (MERN)**

Pour mettre en œuvre l'approche du Gouvernement du Québec, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs mène, en collaboration avec d'autres ministères, des travaux pour établir de nouvelles modalités adaptées à la protection du caribou forestier et à l'aménagement de son habitat. La démarche s'appuie sur les connaissances les plus à jour en matière d'aménagement de l'habitat du caribou forestier, un suivi rigoureux des populations de caribous, des analyses socioéconomiques détaillées et la participation des partenaires et des groupes intéressés, y compris les Premières Nations. Les travaux permettront de jeter les bases d'une stratégie à long terme pour l'aménagement de l'habitat du caribou forestier.

En parallèle, des travaux ont été entrepris dernièrement en vue de convenir des modalités sur les activités énergétique et minière afin que cette stratégie soit prise en compte de manière adéquate et standardisée.

SÉANCE 22

Les avancées en instrumentation LIBS : nouvelles applications en exploration minière

Mohamad Sabsabi, Paul Bouchard, Aïssa Harhira, Josette El Haddad, Francis Vanier, Elton Soares Filho De Lima, Daniel Gagnon et Alain Blouin (CNRC)

La spectroscopie laser-plasma (LIBS) a évolué au cours des 50 dernières années pour devenir une technologie concurrentielle dans de nombreuses applications d'analyse chimique. Les percées dans la compréhension du processus d'ablation et le développement de composants améliorés pour le laser et le détecteur ont contribué à une meilleure performance des appareils et, par conséquent, à l'obtention de mesures analytiques fiables. En exploration minière, lorsque la valeur des métaux précieux augmente, leur teneur limite diminue, d'où la nécessité de développer de nouvelles techniques pour augmenter la productivité et l'efficacité sur le terrain. Le CNRC a mis au point une technologie révolutionnaire basée sur la LIBS, y compris la fabrication d'un prototype portable, en collaboration avec de grandes sociétés minières aurifères canadiennes et l'Université Laval. Sur le terrain, le prototype du CNRC a permis de détecter pour la première fois de l'or à un niveau inférieur au ppm dans un échantillon de minerai, en donnant également des informations sur la minéralogie du minerai. Le prototype permet une analyse rapide de l'or en temps réel, ce qui a des répercussions dans toute la chaîne de production, de l'exploration à la production. En effet, les géologues et les ingénieurs pourront prendre des décisions sur-le-champ, valoriser le minerai en évitant l'envoi de gangue à l'usine, gérer efficacement les projets miniers et même découvrir de nouvelles zones aurifères. Cette technologie permettra aussi de minimiser les coûts d'exploitation.

Notre présentation porte sur le développement de la LIBS au CNRC et ses applications récentes dans le domaine minier. Nous discuterons de l'instrumentation LIBS en termes de robustesse et de performance analytique par rapport aux techniques conventionnelles. Nous soulignerons l'avenir de la LIBS dans le domaine minier et les défis relatifs à son implantation.

SÉANCE 22

Progrès réalisés dans l'application de méthodes d'analyse multivariée des données géochimiques pour l'exploration minière

Eric C. Grunsky (Université de Waterloo)

Les levés géochimiques multiélémentaires de roches, de sols, de sédiments de ruisseaux/de lacs/de plaines inondables et de régolites sont généralement réalisés par les gouvernements et les sociétés d'exploration minière à des échelles continentale (1/1 000 000), régionale (1/250 000) et locale (1/10 000). La composition chimique de ces matériaux est définie par leur assemblage minéralogique et leur modification subséquente par comminution et météorisation. Une base de données géochimiques, avec 50 éléments ou plus, représente un espace géochimique à plusieurs dimensions qui peut être étudié au moyen de méthodes d'analyse statistique multivariée permettant de décrire des patrons géospaialement cohérents reflétant les processus géochimiques/géologiques (découverte des processus). Des modèles prédictifs probabilistes sont ensuite créés à partir de ces patrons (validation des processus).

Pour arriver à une interprétation efficace et pertinente des données multidimensionnelles, il est nécessaire d'adopter une approche systématique pour le traitement des données issues de levés géochimiques comptant plusieurs milliers d'échantillons. Il est important de comprendre la nature du milieu d'échantillonnage, les méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons, les procédures de dissolution en laboratoire et les méthodes d'instrumentation analytique. Les problèmes typiquement associés à l'interprétation des données géochimiques multiélémentaires comprennent les problèmes de fermeture, les valeurs manquantes, la censure, la fusion et le nivellement de différents ensembles de données, et la conception spatiale adéquate des échantillons. L'utilisation de méthodes logratio permet de surmonter les problèmes de fermeture.

Les plus récents développements en analyse multivariée avancée et l'analyse géospaiale permettent d'analyser et d'interpréter de façon efficace les renseignements inhérents aux ensembles de données géochimiques. Les processus géochimiques et géologiques peuvent être reconnus en utilisant des procédures de découverte de données comme l'application de l'analyse des composantes principales, l'analyse des composantes indépendantes, etc. Des méthodes comme les forêts aléatoires, les réseaux neuronaux et l'analyse discriminante peuvent être utilisées pour valider et prédire les processus.

Des exemples de découverte/prédiction des processus seront présentés, notamment dans le cadre d'une évaluation des ressources des principaux types de gîtes minéraux en Colombie-Britannique; une cartographie des grands assemblages crustaux en Australie; et l'identification et la prédiction des phases diamantifères dans les kimberlites du champ de kimberlites Star en Saskatchewan (Canada).

SÉANCE 22

La géochimie des eaux souterraines : un outil novateur pour l'exploration profonde

Silvain Rafini (CONSOREM)

Plusieurs projets de recherche récents du CONSOREM ont porté sur l'utilisation de la géochimie des eaux souterraines en exploration minière. Les corps métallifères sont des anomalies géochimiques du socle qui imprègnent l'eau environnante jusqu'à des profondeurs importantes. La détection de ces halos hydrogéochimiques offre un très grand potentiel d'exploration des gîtes profonds. À la différence des autres méthodes de géochimie secondaire, celle-ci n'est pas affectée par la présence de dépôts glaciaires et son efficacité augmente en profondeur (eaux continentales saumâtres).

Cette conférence présentera les travaux réalisés en 2016-2017 sur deux gîtes de sulfures massifs zincifères profonds dans le camp de Matagami (Abitibi). Ces études de cas montrent que l'eau souterraine du roc fracturé acquiert une composition géochimique anormale au contact du gîte. L'empreinte proximale multiéléments se fractionne avec la profondeur et la dispersion latérale. Le panache est détectable sur plusieurs centaines de mètres, à toutes les profondeurs étudiées (> 1 km), et en présence d'un couvert glaciaire atteignant la centaine de mètres d'épaisseur. Nous avons analysé l'eau de plusieurs forages dont les résultats d'analyse de roches étaient négatifs. Les résultats obtenus se sont avérés positifs, signe que les forages avaient recoupé le panache. À l'évidence, l'analyse de l'eau dans ces forages d'exploration aurait révélé la présence du gîte, là où aucun signal n'était détecté dans la roche. Un échantillonnage systématique des forages existants sur une propriété devrait permettre de mettre au jour des minéralisations entre les forages, autrement dit dans les « trous » de la maille.

Les tests menés dans ces études ont permis d'établir des protocoles opérationnels appropriés et validés en terrains nordiques québécois. Cette méthode pourrait devenir une procédure standard lors des campagnes d'exploration, des stades précoces aux plus avancés, puisqu'elle augmente la portée des informations accessibles sur l'environnement du forage, en complément d'autres méthodes indirectes (p. ex., diagraphies, Pulse EM, etc.).

SÉANCE 22

L'utilisation des drones en exploration minière

Marc Boivin (MB Geosolutions)

Les drones (aéronefs sans pilote) sont utilisés dans notre société moderne depuis plusieurs années. Cette conférence fera un rapide survol (dans tous les sens du mot) de leur utilisation en exploration minière au Québec et ailleurs dans le monde.

Les ailes volantes et les aéronefs multirotors à usage non militaire sont aujourd'hui accessibles autant pour la géophysique que pour la cartographie géologique directe (photographie aérienne) ou indirecte (mesures hyperspectrales).

Des systèmes permettant des levés magnétiques par drone ont fait leur apparition sur le marché, dont certains sont conçus au Québec. Des recherches sont en cours quant aux systèmes légers pour les levés EM (ex. : VLF). D'autres méthodes viendront s'ajouter dans un futur proche.

De nombreux géologues utilisent déjà la photographie par drone pour la cartographie de décapages et de rainurages.

Des caméras hyperspectrales fixées sur des drones sont déjà utilisées en environnement minier. Leur utilisation en exploration minière est à nos portes.

Par contre, les nouvelles règles de Transport Canada, en vigueur depuis cette année, encadrent avec plus de sévérité l'utilisation des drones au Canada. Cette réglementation doit être connue des futurs clients afin de mieux comprendre les limites de ces systèmes en exploration minière.

SÉANCE 22

Mise en valeur des spectres XRF : mesure de densité volumique rapide et efficace

Camille Hébert (UL)

La densité volumique des matériaux qui composent un massif rocheux est une information essentielle à chaque étape d'un projet minier. De la modélisation gravimétrique d'un gisement au dimensionnement des équipements d'exploitation et de manutention du minerai et des résidus, une simple erreur de mesure de densité peut avoir de fâcheuses conséquences sur la faisabilité d'un projet. Les instruments de mesure disponibles sur le marché présentent certaines limites. Les mesures de densité volumique faites sur des carottes de forage peuvent être chronophages et donner une vision biaisée de la réalité en surreprésentant les portions du massif rocheux qui sont les plus compétentes. Les portions où la roche est moins compétente (carottes endommagées ou perdues durant le forage) sont ainsi sous représentées dans les modèles. Les sondes de densité en forage, communément appelées gamma-gamma, offrent une meilleure couverture spatiale en permettant de caractériser toutes les zones recoupées. Par contre, la présence d'une source de radiation isotopique restreint leur déploiement dans les forages qui ont le plus faible risque d'effondrement. De plus, plusieurs pays limitent l'usage de ces sondes. Il est difficile d'obtenir un portrait global de la densité volumétrique avec les méthodes actuelles. Comme les données collectées sont rarement localisées au même endroit que les autres paramètres, leur intégration à une analyse multivariée est aussi complexe.

Pour remédier à ces problématiques, une nouvelle méthodologie faisant usage d'un instrument à fluorescence X portable (FRXp) a été mise au point. Cet instrument permet d'obtenir des valeurs de densité relative ainsi que des données géochimiques semi-quantitatives, et ce, en quelques secondes. Les mesures de densité relative sont obtenues en évaluant la relation entre la diffraction élastique et inélastique des photons des rayons X. Ce rapport permet de quantifier la contribution des éléments lourds et des éléments légers sur les diffractions observées. Il est alors possible de comprendre les interférences internes de la structure atomique de l'échantillon et d'évaluer la densité d'électron des atomes qui le composent. Cette nouvelle méthodologie est une solution intéressante pour mesurer la densité le long de forage de façon rapide, tout en évitant les désavantages des sources isotopiques des sondes gamma-gamma. Elle devrait améliorer la cohérence des ensembles de données, en permettant une caractérisation simple et efficace de tous les forages réalisés. Les résultats de notre étude illustrent bien la fiabilité du FRXp en exploration.

SÉANCE 22

L'approche probabiliste en géochimie

Réjean Girard (IOS)

Lors de notre tout premier cours de chimie au secondaire, on nous a enseigné que la chimie, et donc la géochimie, est une science exacte! Alors, pourquoi utilise-t-on des statistiques pour l'interpréter? Les teneurs en métaux mesurées dans les différents sédiments de l'environnement secondaire (sol, ruisseau, lac, till, etc.) sont le produit d'une interaction complexe, contrôlée par de nombreux paramètres qui ne sont pas communément estimés. Qui évalue la capacité d'échange cationique des sols? Il devient alors difficile de construire des modèles déterministes en géochimie, qui permettraient de prédire la teneur en métal anticipée dans un échantillon. Sachant que les différentes variables comprennent une variance intrinsèque ou une imprécision, il est possible d'élaborer un modèle prédictif qui, assumant une population homogène, calcule les probabilités d'obtenir une certaine teneur en métal dans l'échantillon. Cette teneur est conforme à une fonction de densité de probabilité dictée par le type de matériel analysé et peut être paramétrée. Ainsi, les dosages des métaux d'origine hydromorphe doivent respecter une distribution log-normale, les dosages de métaux d'origine détritique respectent une distribution Gamma, les comptes de grains d'or ou de minéraux indicateurs respectent une distribution d'Erland, etc. En comparant la distribution prévue par de telles lois avec la distribution réelle, il est possible de différencier les échantillons ne respectant pas ladite distribution. Ces signaux déviants découlent habituellement de la présence d'une autre population qui se superpose à la population régionale. Cette autre population de source distincte peut être paramétrée. La méthode est particulièrement efficace pour détecter les populations mixtes et pour éliminer les faux signaux résultant de la fluctuation du signal régional.

SÉANCE 23

Production de contaminants dans les lixiviats de résidus oxydés après restauration; étude de deux sites miniers abandonnés

Marie-Pier Ethier (IRME UQAT-Polytechnique, Terre-Net)

En climat humide, des barrières à l'oxygène sont mises en place dans les parcs à résidus miniers pour contrôler le drainage minier acide (DMA) et ses contaminants associés. Les types de barrières les plus usuelles sont : les recouvrements monocouches combinés à une nappe phréatique surélevée et les recouvrements avec géomembranes. À ce jour, les études sur la restauration des sites miniers considéraient des résidus relativement frais. Peu d'entre elles ont évalué des résidus ayant été oxydés.

Nous avons étudié les résidus oxydés de deux sites miniers abandonnés : la mine Principale (Chibougamau, Québec) et la mine d'or Long Lake (Sudbury, Ontario). Les essais en colonnes ont été réalisés en laboratoire. Des colonnes témoins et restaurées qui contenaient des résidus oxydés et non oxydés ont été montées pour chaque site à l'étude. Une couverture monocouche avec un EWT a été testée sur les résidus de la mine Principale. Une couverture de sable a été installée sur les résidus de la mine Long Lake pendant les six premiers mois de l'essai, après quoi une géomembrane étanche à l'air a été ajoutée.

Les colonnes témoins ont produit du DMA avec des concentrations élevées en Fe (1000 à 3500 mg/l) et des dizaines de mg/l de Co, de Ni et de Zn. Les lixiviats de la colonne témoin de Long Lake contenaient également des centaines de mg/l d'As. Les concentrations de métaux dans les lixiviats témoins étaient souvent supérieures de plus d'un ordre de grandeur à celles des lixiviats des colonnes restaurées. Le pH de la colonne restaurée de la mine Principale a augmenté graduellement, pour atteindre des valeurs presque neutres après neuf mois. La couverture de sable n'était pas efficace pour contrôler la production de DMA des résidus de Long Lake. La qualité de l'eau interstitielle a varié en fonction de la profondeur et du temps après l'installation de la géomembrane sur les résidus de Long Lake et ne s'est pas encore stabilisée.

Le comportement hydrogéochimique de ces colonnes sera reproduit par une modélisation du transport réactif afin de mieux identifier les processus générant des contaminants dans les résidus oxydés après restauration, plus spécifiquement leur nature et leurs impacts.

SÉANCE 23

Approche de gestion des risques et méthodologies de sécurisation des chantiers ouverts et des piliers de surface jugés instables dans le cadre du projet de restauration de l'ancienne mine Principale à Chibougamau, Québec

Éliane Cabot (Wood)

« Mine Principale » est le nom donné aux mines Campbell, Kayrand et Merrill qui, de 1953 à 2005, ont exploité des filons riches en cuivre et en or encaissés dans une roche ignée intrusive (anorthosite). Le site est situé au sud-est de la ville de Chibougamau (Québec). Un plan de fermeture, conforme à la réglementation en vigueur, a été établi après une revue exhaustive des données historiques du site, la construction d'un modèle numérique en 3D des ouvertures souterraines et la réalisation de travaux sur le terrain visant à confirmer l'emplacement de ces ouvertures et les propriétés du massif rocheux pour analyse de stabilité. La remise en état des lieux a commencé en 2018 et comprenait le dynamitage de minces piliers de surface, le remblayage des chantiers souterrains à partir de la surface ou via de larges trous de forage (12 po de diamètre), l'utilisation d'ancrages galvanisés pour stabiliser les piliers de surface plus importants et le recouvrement des monteries à condamner.

Cette présentation passe en revue toutes les étapes ayant mené aux travaux de sécurisation et au programme de surveillance en cours. Il sera discuté des conditions du site et de la construction du modèle en 3D, des résultats des travaux de terrain et des essais de résistance mécanique en laboratoire, de même que de l'approche de gestion des risques et des méthodologies de sécurisation utilisées; ces dernières visant à optimiser les travaux de sécurisation selon les résultats de l'analyse de stabilité.

SÉANCE 23

Développement d'approches durables en restauration minière au Québec : l'exploitation d'arbustes symbiotiques pour la végétalisation des résidus fins et des stériles

Sébastien Roy (UdeS)

L'activité minière est essentielle à l'économie québécoise, mais elle engendre des sites perturbés qui doivent être réhabilités. De manière à restaurer un maximum de sites miniers, il est impératif de diminuer le coût opérationnel de la végétalisation. Les résultats de nos recherches menées au Québec au cours des dernières années démontrent le potentiel d'une approche de restauration par plantation directe de semis sur les haldes à stériles et les parcs à résidus. Cette approche s'inscrit dans le développement durable. Notamment, elle minimise ou élimine l'utilisation d'intrants organiques pour réduire les coûts et l'empreinte environnementale des opérations de restauration. L'exploitation des plantes symbiotiques sera discutée sur le plan technique, en lien avec leur performance qui a été évaluée sur le terrain dans les grandes régions minières du Québec. Les obstacles à l'établissement de vie végétale dans ces environnements extrêmes seront traités, de même que des résultats de recherche concernant la phytostabilisation de métaux lourds sur les sites avec résidus acidogènes. Bien que la restauration écologique de sites miniers présente plusieurs défis technico-économiques, avec l'aide d'une équipe de recherche formée de collaborateurs industriels, du gouvernement et du secteur académique, nous sommes à développer de nouvelles solutions de végétalisation efficaces, peu coûteuses, durables et intéressantes sur le plan social.

SÉANCE 23

Opportunités de mise en végétation des sites miniers à l'aide de matières résiduelles fertilisantes : survol des conditions gagnantes

Simon Naylor (Viridis Environnement)

Les sites miniers en exploitation doivent maintenant et obligatoirement fournir un plan de restauration, incluant la mise en végétation. De plus, parmi les sites orphelins sous la responsabilité du MERN, une centaine de sites d'exploitation sont en cours de restauration ou à restaurer. Dans les deux cas, l'établissement d'un couvert végétal durable est un enjeu technique considérable, mais aussi une dépense importante pour les exploitants, ou encore pour l'État. D'un point de vue environnemental, l'utilisation de matières résiduelles fertilisantes (MRF) en remplacement de la terre végétale est avantageuse, autant agronomiquement qu'économiquement. Les MRF peuvent être utilisées pour enrichir les sols, pour corriger un pH acide ou pour amender en matière organique les sols minéraux. Ces MRF générées par les villes et les industries sont souvent les matériaux les plus intéressants économiquement pour la mise en végétation. Leur emploi pour la restauration du couvert végétal est une approche écologique d'économie circulaire.

L'utilisation de MRF comporte des défis, tant du point de vue technique, agronomique, réglementaire que logistique. Les chantiers doivent être conçus et planifiés en fonction de l'utilisation de MRF, notamment lors de la demande du certificat d'autorisation auprès du MELCC. L'objectif de la conférence est de présenter un portrait des enjeux entourant l'utilisation de MRF pour créer les meilleurs couverts végétaux aux meilleurs coûts possible, en tenant compte de la diversité des sites miniers à restaurer. Au menu, survol des types de MRF et des bénéfices économiques liés à leur utilisation, présentation de réalisations de Viridis et spécificités des MRF disponibles en Abitibi.

SÉANCE 23

Gestion des stériles miniers réactifs à l'aide de biosolides municipaux dans les CEBC

Christopher Hey (Englobe)

Le coût financier et la quantité de matériaux requis pour la restauration minière sont des éléments très importants lorsque vient le temps d'évaluer la viabilité financière et environnementale de projets miniers. Les biosolides municipaux présentent une alternative potentielle à faible coût aux matériaux traditionnels utilisés pour construire des recouvrements multi-couches pour la réhabilitation de stériles miniers et de terrains perturbés. Un mélange de biosolides, connu sous le nom de *Custom Reclamation Mix* ou CRM (mélange volumétrique 1 : 1 de biosolides digérés en milieu anaérobie et de résidus de jardin et de feuilles mortes), a été évalué comme couche barrière candidate dans une couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC) en procédant à la caractérisation du produit, à des essais de laboratoire en colonne de CEBC avec biosolides, et à une modélisation numérique de l'écoulement en milieu non saturé. Le mélange CRM présente un fort potentiel pour utilisation comme couche barrière à l'oxygène servant à réduire la production de drainage minier acide, démontrant une faible conductivité hydraulique en milieu saturé ($k = 4,21 \times 10^{-7}$ cm/s à $e = 4,01$) et une valeur d'entrée d'air d'environ 400 kPa. Tout au long des essais de laboratoire en colonne, les couches de biosolides à l'intérieur des CEBC sont restées fortement saturées, agissant comme barrière à la diffusion d'oxygène et à l'écoulement de l'eau. La modélisation numérique montre que la diffusion d'oxygène est réduite de jusqu'à trois ordres de magnitude lorsqu'une CEBC avec biosolides est utilisée par rapport à des résidus miniers non recouverts. Les biosolides présentent une alternative prometteuse à faible coût aux matériaux traditionnels à faible perméabilité pour les recouvrements multi-couches employés comme mesure d'atténuation du drainage minier acide.

SÉANCE 23

Évolution géochimique des résidus miniers riches en sulfures sur les sites miniers abandonnés et implications pour la réhabilitation

Carol Ptcacek et David Blowes (Université de Waterloo)

L'oxydation des minéraux sulfurés dans les empilements de résidus miniers abandonnés libère de l'acidité, des sulfates et des métaux qui migrent dans la sous-surface et qui se déversent éventuellement dans les plans d'eau en surface. Le taux de libération de contaminants et l'étendue du phénomène dépendent d'une grande variété de facteurs, dont la minéralogie initiale et la distribution granulométrique des résidus miniers, ainsi que les conditions climatiques et hydrologiques. Par conséquent, l'avancement des réactions d'oxydation des sulfures et la libération ultérieure de contaminants est très variable; il est donc nécessaire de réaliser des études de caractérisation de chaque site afin d'optimiser l'élaboration de stratégies de gestion efficaces. Les stratégies de gestion impliquent souvent la mise en place de recouvrements conçus sur mesure à la surface des résidus miniers afin de limiter l'entrée d'eau ou d'oxygène, des couvertures végétales pour le contrôle des poussières et la gestion de l'eau, des méthodes d'interception pour prévenir le déversement de contaminants dans les plans d'eau adjacents, ou une combinaison de ces différents éléments. En l'absence d'une stratégie de réhabilitation efficace, les réactions d'oxydation progressent jusqu'à la profondeur où la quantité d'eau présente dans les résidus miniers est suffisante pour limiter l'entrée d'oxygène, remettant en question la pertinence d'appliquer un recouvrement pour faire barrière à l'oxygène. La mise en place d'une barrière d'infiltration à la surface des résidus miniers pourrait faire en sorte d'abaisser la nappe phréatique, augmentant potentiellement l'épaisseur de résidus miniers susceptibles aux réactions d'oxydation. Les approches de réhabilitation qui favorisent la dissolution de solides secondaires accumulés dans les résidus miniers peuvent mener à une libération accrue de contaminants. Des études de cas portant sur la caractérisation de l'étendue des réactions d'oxydation, l'appauvrissement des phases qui neutralisent l'acidité et l'accumulation de solides secondaires solubles seront présentées pour plusieurs sites miniers abandonnés, ainsi que la façon dont ces renseignements peuvent être utilisés pour guider les processus décisionnels, dans le but ultime de concevoir des systèmes qui sont optimisés pour chaque site individuel.

RÉSUMÉS DES PHOTOPRÉSENTATIONS

Extraction d'éléments intégrés en imagerie géophysique de haute dimensionalité	46	Inventaire des ressources en granulats de la région du Lac-Saint-Jean.....	50
Bahman Abassi et Li Zhen Cheng (UQAT)		André Brazeau (MERN) et Charles-William Couture (UL)	
Analyse statistique de structures profondes dans la région du camp minier de Red Lake et liens avec la minéralisation aurifère orogénique	46	Peut-on quantifier la déformation et les contraintes dans les veines de quartz aurifères de l'Abitibi?	51
Parham Adiban et Lyal Harris (INRS-ETE)		Crystal Brochard, Michel Jébrak et Daniele L. Pinti (UQAM)	
Extraction de caractéristiques intégrées pour l'imagerie géophysique en haute dimension	47	Facteurs de contrôle sur les minéralisations aurifères associées à des zones de cisaillement et à des filons-couches mafiques et ultramafiques : exemple du gisement Philibert, Chibougamau-Chapais	51
Bahman Abassi et Li Zhen Cheng (UQAT)		Antoine Brochu (UQAC et MRB), Damien Gaboury et Pierre Bedeaux (UQAC)	
Fugacité de l'oxygène et contenu en éléments volatils des magmas syntectoniques de la Sous-province de l'Abitibi	47	Carte préliminaire des dépôts de surface de l'ensemble du Québec	52
Baptiste Madon et Lucie Mathieu (UQAC)		Étienne Brouard, Martin Roy (UQAM) et Hugo Dubé-Loubert (MERN)	
Le Groupe de Ouarzazate, une large province ignée felsique (SLIP) métacratonique panafricaine d'âge édiacarien : nouveaux âges U-Pb sur zircons de la vallée de Tifnoute, promontoire d'Ouzellagh-Siroua, Anti-Atlas central, Maroc ..	48	Utilisation de la phytométrie pour évaluer la fertilité des résidus miniers : une méthode offrant une réponse plus globale et représentative que les analyses agronomiques conventionnelles	52
Said Belkacim (Université Ibn Zohr, Maroc et UQAT), Morgann Perrot, Joshua Davies (GEOTOP UQAM), Moha Ikenne (Université Ibn Zohr, Maroc) et Jean-Paul Liégeois (Musée royal de l'Afrique centrale, Belgique)		Arturo Canton Ruz (ECOSUR), Martine Migneault, Sébastien Roy et Bill Shipley (SÈVE, UdeS)	
Présentation des données géophysiques acquises en 2019	48	Décomposition des données géophysiques aéroportées par apprentissage automatique profond	53
Siham Benahmed et Intissar Rachid (MERN)		Matthieu Cedou, Erwan Gloagen (INRS-ETE) et Martin Blouin (Geolearn)	
Cadre stratigraphique du projet aurifère LaRonde Zone 5 et des zones minéralisées de la propriété Ellison, camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde, Abitibi, Québec	49	Potentiel de colmatage des puits à colonne permanente – Impact sur leur utilisation	53
Émile Boily-Auclair (INRS-ETE), Patrick Mercier-Langevin (CGC-Q), Pierre-Simon Ross (INRS-ETE) et David Pitre (Agnico Eagle)		Léo Cerclet, Benoît Courcelles et Philippe Pasquier (Polytechnique Montréal)	
Stratigraphie et chimie de la Formation d'Obatogamau : implications pour les minéralisations de type SMV	49	L'utilisation des traits fonctionnels dans la sélection de végétaux indigènes pour la restauration progressive du site Whabouchi de Nemaska Lithium.....	54
Adrien Boucher, Lucie Mathieu et Réal Daigneault (UQAC)		Chiara Chelo, Martine Migneault, Sébastien Roy et Bill Shipley (SÈVE, UdeS)	
Conductivité électrique dans les matériaux pour le stockage de l'énergie.....	50	Impact du gel-dégel et de la salinité sur le comportement de résidus miniers de terres rares en milieu nordique	54
Nesrine Boussadoune, Olivier Nadeau et Gabriel Antonius (UQTR)		Sophie Costis, Jean-François Blais (INRS-ETE), Lucie Coudert, Carmen Mihaela Neculita (IRME-UQAT) et Kristin Mueller (INRS-ETE)	

Conception, fabrication et caractérisation de cellules photovoltaïques multijonctions à contacts en vias traversants 55

Mathieu de Lafontaine, Maïté Volatier, Abdelatif Jaouad, Simon Fafard, Vincent Aimez et Maxime Darnon (UdeS)

Caractérisation métallogénique de la minéralisation aurifère du gisement Gladiator, Ceinture d'Urban-Barry, Abitibi, Canada 55

Gauthier D'Harlingue (UQAC, Ressources Bonterra), Damien Gaboury (UQAC), Dominique Genna (CONSOREM, UQAC) et Boris Artinian (Ressources Bonterra)

Surveillance microsismique des mines en temps réel avec EnKF 56

Ana Cecilia Dip, Bernard Giroux et Erwan Gloaguen (INRS-ETE)

Impact de la Faille de Gwillim dans la détermination de cibles d'exploration par la caractérisation métallogénique, structurale et en 3D des minéralisations polymétalliques du camp minier de Chapais, Québec..... 56

Maxime Dour, Damien Gaboury, Pierre Bedeaux (UQAC), Laury Schmitt (SOQUEM) et Patrick Houle (MERN)

Géologie des dépôts de surface de la région de la rivière Arnaud, péninsule d'Ungava 57

Hugo Dubé-Loubert, Simon Hébert (MERN), Claudie Lefebvre-Fortier, Marc-Antoine Lévesque et Martin Roy (UQAM)

Nouvelles analyses géochimiques de till dans la région sud-est de la rivière Mistassini, Québec 57

Mohamed El Amrani (MERN)

Géologie des minéralisations aurifères de la mine Éléonore, Eeyou Istchee Baie-James, Province du Supérieur, Québec, Canada 58

Arnaud Fontaine (INRS-ETE), Benoît Dubé (CGC-Q), Michel Malo (INRS-ETE), Vicki McNicoll, Simon Jackson (CGC-O), Nathalie Prudhomme, Francis Larivière (Newmont-Goldcorp Corporation, Mine Éléonore) et Jordi Turcotte (Sirios)

Géologie de la région du lac Parent, Fosse de l'Ungava, Nunavik, Québec, Canada 58

Guillaume Mathieu, Mélanie Beaudette et Carl Bilodeau (MERN)

***Metal Earth* : vers une compréhension intégrée des systèmes de circulation des fluides aurifères..... 59**

Guillaume Raymond, Isaac Siles Malta, Michael Herzog, Farnaz Ghoraishi, Camille Hébert, Georges Beaudoin, Christian Dupuis, Crystal LaFlamme, Carl Guilmette, Benoit Quesnel, Bertrand Rottier et Christophe Scheffer (UL)

Des arbustes robustes et leurs locataires racinaires : une conjugaison synergique pour la revégétalisation minière 59

Louis Garneau, Sophie Lalonde, Pascale B. Beauregard et Sébastien Roy (SÈVE, UdeS)

La nature et l'évolution du contact entre le Domaine Nord et l'Antiforme de Kovik 60

Thierry Karl Gélinas, Carl Guilmette (UL), Kyle Larson (UBC-O) et Marc-Antoine Vanier (MERN)

Rehaussement d'images obtenues par sonde optique en forage : leçons tirées en extraction d'éléments pour l'exploration minière 60

Farnaz Ghoraishi, J. Christian Dupuis (UL) et Erwan Gloaguen (INRS-ETE)

Vers un nouveau modèle d'exploration sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James : les granitoïdes aurifères 61

Morgane Gigoux (CONSOREM)

Le secteur du Pluton de Chevrillon et celui de Kirkland Lake : deux zones analogues? 61

Julien Huguet, Lucie Mathieu et Paul Bédard (UQAC)

Géologie de la région du lac Sirmiq, Fosse de l'Ungava, Nunavik, Québec, Canada 62

Marc-Antoine Vanier et Isabelle Lafrance (MERN)

Valorisation d'un sous-produit issu de l'extraction du lithium pour la synthèse de zéolites 62

Fatima Ibsaïn, Justine Dionne, Geneviève Rioux, Kristin Mueller, Lan Huong Tran (INRS-ETE), Lucie Coudert (UQAM) et Jean-François Blais (INRS-ETE)

Caractérisation géochimique de pyrites nodulaires de niveaux d'argilites graphiteuses dans la région de Timmins, nord-est de l'Ontario 63

Jean-Luc Pilote (CGC-Q), Simon Jackson (CGC-O), Patrick Mercier-Langevin, Benoît Dubé (CGC-Q), Christopher Lawley, Duane Petts (CGC-O), Ed van Hees (OGS) et Dave Rhys (Panterra Geoservices)

Élaboration d'une stratégie de gestion de l'énergie tenant compte de la dégradation et de la gestion thermique d'un système de piles à combustible	63	Performance des matériaux alcalins pour prévenir la génération d'acidité et la mobilisation des métaux retenus par un nouveau biofiltre semi-passif sulfato-réducteur utilisé pour le traitement du drainage minier acide	67
Mohsen Kandidayeni, Loïc Boulon et Sousso Kelouwani (UQTR)		Khalifa Lounate, Thomas Genty, Lucie Coudert, Robin Potvin, Tran Lang Huong, Guy Mercier et Jean-François Blais (INRS-CTRI-Englobe)	
Synthèse d'observations le long du transect Manicouagan-Fermont : évolution tectono-métamorphique du centre de la Province de Grenville.....	64	Simulations géostatistiques de ressources minérales en éléments de terres rares	68
Charles Kavanagh-Lepage, Félix Gervais (Polytechnique Montréal) et Abdelali Moukhsil (MERN)		Michael Raymond (UL), Marcel Laflamme (InnovExplo, UL) et Marc Constantin (UL)	
<i>Metal Earth</i> à Chibougamau – le Complexe d'Eau Jaune : lien entre déformation, métamorphisme et minéralisations	64	Dispersion glaciaire distale des minéraux indicateurs en aval d'un gisement d'or : le cas d'Amaruq (Nunavut).....	68
Marie Kieffer, Lucie Mathieu et Damien Gaboury (UQAC)		Alexandre Mendizabal, Georges Beaudoin (UL), Isabelle McMartin (CGC-O), Olivier Côté-Mantha et Marjorie Simard (Agnico Eagle)	
Détecter les fluides d'origine magmatique à partir de la chimie de la pyrite : exemple de la région de Chibougamau, Sous-province de l'Abitibi, Québec	65	Estimation du flux thermique en surface et du gradient géothermique dans la communauté de Kuujuaq (Québec, Canada)	69
Lucie Mathieu, Pierre Bedeaux, Adrien Boucher, Youssouf Ahmadou Youssoufou, Marie Keiffer, Julien Huguet, Baptiste Madon, Patrik Berthoty, Alexandre Crépon, Réal Daigneault, Damien Gaboury et Paul Bédard (UQAC)		Mafalda M. Miranda, Jasmin Raymond (INRS-ETE, UL), Alcides J.S.C. Pereira (CITEUC) et Chrystel Dezayes (BRGM)	
Caractérisation hydrogéologique d'un parc à résidus miniers en Abitibi-Témiscamingue, Québec.....	65	Géologie de la région de Normandin, Province de Grenville, région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada	69
Marika Labbé (UL)		Abdelali Moukhsil et Mhamed El Bourki (MERN)	
Améliorer le pouvoir biofertilisant de la symbiose actinorhizienne par l'étude de la composition du microbiome nodulaire.....	66	Optimisation d'un procédé de séquestration de CO₂ par différents types de scories d'aciéries....	70
Sophie Lalonde et Sébastien Roy (SÈVE, UdeS)		Nader Nmiri, Lan-Huong Tran, Louis-César Pasquier, Guy Mercier (INRS-ETE), Pedro Ramirez et Pascal Lemoine (CTTÉI)	
Géologie des dépôts de surface de la région de la rivière Eastmain supérieure (SNRC 23D05, 23D06, 23D11, 23D12, 33A08 à 33A10)	66	Caractérisation structurale de la Sous-Province de Nemiscau, Province du Supérieur, Canada : implications de la tectonique dans le développement des bassins sédimentaires archéens.....	70
Olivier Lamarche et Simon Hébert (MERN)		Rocío Pedreira Pérez, Alain Tremblay (UQAM), Yannick Daoudene et Daniel Bandyayera (MERN)	
Élaboration et ingénierie d'un procédé circulaire et évaluation technico-économique d'un centre régional de traitement avancé de biomasse	67	Analyse de l'écoulement des fluides associés à une minéralisation d'uranium dans le bassin d'Athabasca à l'aide de zircons détritiques.....	71
Pierre-Olivier Lemire, Simon Barnabé et François Labelle (UQTR)		Morgann G. Perrot, Joshua H.F.L. Davies (GEOTOP, UQAM), Jesse R. Reimink (Pennsylvania State University) et Patrick Ledru (Orano Canada)	

Géologie de la région d'Amos, Sous-province de l'Abitibi, région de l'Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada 71

Pierre Pilote, Jonathan Marleau et Jean David (MERN)

***Metal Earth* – Cartographie des variations isotopiques des fluides aurifères dans la Province du Supérieur 72**

Benoit Quesnel, Christophe Scheffer, Georges Beaudoin, Crystal LaFlamme, Carl Guilmette, Christian Dupuis et Bertrand Rottier (UL)

Hydrogéochimie des eaux souterraines – Avènement d'un nouvel outil pour l'exploration profonde 72

Silvain Rafini (CONSOREM)

Élaboration et développement de catalyseurs moléculaires à base de diaminotriazine pour la production d'hydrogène à partir de lumière 73

Sanil Rajak, Olivier Schott, Prabhjyot Kaur, Thierry Maris, Garry S. Hanan et Adam Duong(UQTR et UdeM)

Géologie et géophysique appliquées à la recherche de la source de l'or du placer de Saint-Simon-les-Mines (Beauce, Québec) 73

Marc Richer-LaFlèche (INRS-ETE) et Patrick Levasseur (Champs d'Or en Beauce)

Élaboration d'un concept de générateur thermoélectrique (GTE) pour recycler la chaleur inutilisée en électricité 74

Justin Riggio, Ferri Hassani et Frank Mucciardi (McGill)

Formation et évolution d'une lithosphère océanique : retour sur les groupes de Watts et de Spartan 74

Sacha Lafrance, Carl Guilmette (UL), Jean Bédard (CGC-Q), Crystal LaFlamme (UL), Guillaume Mathieu, Mélanie Beaudette, Carl Bilodeau (MERN) et Thierry Karl Gélinas (UL)

Pétrographie, chimie minérale et composition géochimique d'intrusions mafiques de la Suite intrusive de Soisson, sud-est de la Province de Churchill (Québec, Canada).....75

Anne-Aurélien Sappin, Michel G. Houlié (CGC-Q), David Corrigan (CGC-O), Marie-Pierre Bédard (NMEF), Natasha Wodicka (CGC-O), Cynthia Brind'Amour-Côté (NMEF) et Nicole Rayner (CGC-O)

Les klippes externes de l'Himalaya, la clé pour comprendre le début de l'évolution de l'Orogène du Grenville? 75

Renaud Soucy La Roche (INRS-ETE), Laurent Godin (Queen's), John M. Cottle (UCSB) et Dawn A. Kellett (CGC-A)

Procédé de carbonatation minérale des résidus miniers de serpentine 76

Ilies Tebbiche, Louis-César Pasquier, Guy Mercier, Jean-François Blais (INRS-ETE) et Sandra Kentish (Université de Melbourne, Australie)

Les minéraux industriels exploités au Québec ..76

N'golo Togola et Ricardo Escobar (MERN)

Extraction d'éléments intégrés en imagerie géophysique de haute dimensionalité

Bahman Abassi et Li Zhen Cheng (UQAT)

L'un des problèmes fondamentaux dans l'interprétation de données géophysiques intégrées est d'arriver à une représentation géologique adéquate de multiples images géophysiques; cela nécessite des techniques de haute dimensionalité pour réussir à extraire des éléments géologiques latents à partir d'images géophysiques de haute dimensionalité. Puisque chaque image géophysique n'est sensible qu'à certains éléments géologiques, différentes parties du modèle géologique pourront être reconstruites à partir des différentes contributions de multiples images géophysiques. La grande question reste à savoir comment mettre ensemble ces éléments cachés, emprisonnés dans des espaces à haute dimensionalité, pour reconstruire un modèle géologique pertinent. Nous avons élaboré un outil mathématique autonome, basé sur l'analyse en composantes principales (PCA) et l'analyse en composantes indépendantes (ICA), qui de façon itérative, sépare et extrait les éléments géologiques superposés et montrant une forte corrélation à partir de multiples images géophysiques et satellitaires. Nous démontrons que, comparativement à d'autres méthodes comme l'analyse en composantes principales et la maximisation du kurtosis, la méthode fast-ICA par maximisation de la néguentropie est un outil robuste de reconnaissance automatisée de patrons géologiques, qui ne requiert aucune information géologique ou pétrophysique préalable pour extraire des éléments de façon efficace.

Analyse statistique de structures profondes dans la région du camp minier de Red Lake et liens avec la minéralisation aurifère orogénique

Parham Adiban et Lyal Harris (INRS-ETE)

Les gisements d'or orogéniques sont reliés à des structures géologiques qui ont servi de conduits pour les fluides minéralisateurs, résultant en un lien spatial entre les gisements d'or et les structures géologiques. Les zones de cisaillement régionales dans le manteau lithosphérique sub-continental (MLSC) peuvent servir de conduits pour les fluides minéralisateurs en provenance du manteau supérieur et un craton archéen comme la Province du Supérieur, qui noyaute le Bouclier canadien, est un contexte idéal pour étudier ce phénomène en raison de sa lithosphère continentale stable. La partie ouest du Supérieur renferme des gisements de calibre mondial comme ceux du camp de Red Lake, et une vaste gamme de données géologiques et géophysique est disponible pour cette région. Par ailleurs, des études antérieures ont démontré une relation spatiale entre les zones de cisaillement et la minéralisation à l'échelle du gisement. Dans la présente étude, des structures profondes d'envergure régionale sont identifiées à partir des données géophysiques (magnétiques et gravimétriques) et géologiques (lithologies, zones de cisaillement, dykes) disponibles. Les données géophysiques sont interprétées au moyen de techniques de rehaussement d'images (calculs de pseudogravité, angle d'inclinaison, angle θ) et des techniques d'estimation de la profondeur (analyse des spectres de puissance, *worming* gravimétrique/pseudogravimétrique, déconvolution d'Euler). Des algorithmes d'apprentissage automatique (notamment l'algorithme de forêt aléatoire) sont entraînés en utilisant une compilation des ensembles de données disponibles et d'ensembles de données générés à partir de techniques d'analyse spatiale classiques (zones tampons, méthode Fry, analyse fractale), pour produire un modèle statistique qui définit la relation spatiale entre les structures de cisaillement régionales et la minéralisation aurifère orogénique. L'objectif futur du projet est de produire un modèle qui permettra d'estimer la probabilité de minéralisation dans des secteurs inexplorés avec un modèle géologique similaire.

Extraction de caractéristiques intégrées pour l'imagerie géophysique en haute dimension

Bahman Abassi et Li Zhen Cheng (UQAT)

Un des problèmes fondamentaux de l'interprétation des données géophysiques intégrées est la représentation géologique adéquate des images géophysiques. Des techniques de haute dimension sont nécessaires pour extraire les caractéristiques géologiques latentes des images géophysiques de haute dimension. Étant donné que chaque image géophysique reflète un nombre limité de caractéristiques géologiques, un modèle géologique en 3D peut être construit à partir d'une combinaison d'images géophysiques interprétées. La question est de savoir comment assembler ces caractéristiques à l'intérieur de l'espace de haute dimension pour reconstruire un modèle géologique plausible. Nous avons développé un outil mathématique autonome basé sur l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse en composantes indépendantes (ACI), qui sépare et extrait des caractéristiques géologiques fortement corrélées et superposées dans des images brutes. Nous avons démontré que par rapport à d'autres méthodes comme l'ACP et la maximisation de kurtosis, l'ACI par maximisation de la néguentropie est un outil solide pour la reconnaissance automatisée de formes géologiques. Ce dernier ne nécessite aucune information géologique ou pétrophysique préalable pour une extraction efficace des caractéristiques géologiques.

Fugacité de l'oxygène et contenu en éléments volatils des magmas syntectoniques de la Sous-province de l'Abitibi

Baptiste Madon et Lucie Mathieu (UQAC)

La Sous-province archéenne de l'Abitibi est une ceinture de roches vertes qui contient de nombreuses minéralisations aurifères, dont certaines sont liées à des processus magmatiques. En fonction de son âge, le magmatisme est réparti entre la période synvolcanique (phase de construction de la ceinture de roches vertes) et la période syntectonique (phase de déformation et de magmatisme de faible volume). De nombreuses études ont démontré qu'il existe une relation spatiale, structurale et/ou génétique entre les magmas syntectoniques et les gisements associés à des intrusions.

Afin de préciser le modèle métallogénique de ces minéralisations, il est nécessaire de comprendre le rôle des magmas dans le transport, la concentration et le dépôt de l'or. Les métaux sont transportés par les magmas et les fluides sous certaines conditions redox et si certains éléments volatils (S, Cl) y sont dissous. Par exemple, la quantité d'or qui peut être dissoute dans un magma dépend de son contenu en S, lequel est lié directement à la fugacité de l'oxygène (fO_2). Plus la fO_2 est élevée, plus grande est la quantité de S dissout dans le magma.

Ce projet s'intéresse à la capacité de transporter l'or des magmas de la période syntectonique. Pour ce faire, la fO_2 et le contenu en volatils de cinq intrusions situées dans la région de Chibougamau, en Abitibi, ont été évalués, en utilisant le zircon, l'apatite et l'amphibole. Les intrusions sélectionnées sont alcalines et calco-alcalines et proviennent des périodes syntectoniques ($n=4$) et synvolcaniques ($n=1$). Une des intrusions est associée à des minéralisations à Cu-Au. Le zircon, l'apatite et l'amphibole ont été analysés par LA-ICP-MS et à la microsonde.

Les résultats préliminaires montrent que la fO_2 est plus élevée pour les magmas de la période syntectonique que pour celui de l'intrusion synvolcanique. La même tendance est observée dans les apatites, qui sont des apatites fluorées. Ces résultats préliminaires apportent une nouvelle perspective pour la pétrologie ignée archéenne et indiquent que certains magmas présentent déjà une fO_2 élevée aux alentours de 2,6 Ga.

Le Groupe de Ouarzazate, une large province ignée felsique (SLIP) métacratonique panafricaine d'âge édiacarien : nouveaux âges U-Pb sur zircons de la vallée de Tifnoute, promontoire d'Ouzellagh-Siroua, Anti-Atlas central, Maroc

Said Belkacim (Université Ibn Zohr, Maroc et UQAT), Morgann Perrot, Joshua Davies (GEOTOP UQAM), Moha Ikenne (Université Ibn Zohr, Maroc) et Jean-Paul Liégeois (Musée royal de l'Afrique centrale, Belgique)

Le Groupe volcano-sédimentaire de Ouarzazate (GVSO) s'est déposé à l'Édiacarien (580-545 Ma) dans l'Anti-Atlas marocain et s'étend sur une superficie de 700 x 150 km, avec une épaisseur très variable (jusqu'à 2,5 km) due à la sédimentation syntectonique. Il est précédé par le Groupe de Bou Salda (610-580 Ma), formant d'étroits bassins. Ces deux groupes volcano-sédimentaires, de nature felsique et calco-alcaline hautement potassique, forment le Super-groupe de Ouarzazate (SGO). Leurs succèdent les séquences sédimentaires du Cambrien liées à une synextension qui mènera à l'ouverture de l'océan Rhéique à l'aube de l'Ordovicien. Limité au nord par la grande faille sud-atlasique et au sud par le bassin de Tindouf, le Groupe de Ouarzazate s'est mis en place durant un régime transtensif sur la bordure nord du craton ouest-africain (COA) dont les lithologies paléoprotérozoïques sont bien préservées. Il constitue une large province ignée felsique de la fin du Néoprotérozoïque.

De nouvelles datations U-Pb sur zircon ont été réalisées par LA-ICP-MS sur des roches de la vallée de Tifnoute (VT) dans le promontoire d'Ouzellagh-Siroua, où le GVSO est à dominance felsique et intermédiaire. La coulée rhyolitique, à la base de la séquence volcanique, a donné un âge d'environ 575 Ma, indiquant qu'elle appartient à la base du Groupe d'Ouarzazate et non pas au Groupe du Saghro (>610 Ma) comme considéré jusqu'à présent. Deux échantillons, provenant d'un tuf andésitique et d'une ignimbrite rhyodacitique situés stratigraphiquement au-dessus de la coulée rhyolitique, ont été datés respectivement aux environs de 574 Ma et de 577 Ma. Ils contiennent plusieurs zircons hérités édiacariens et quelques-uns du Cryogénien. Au-dessus, un échantillon d'un autre tuf andésitique est daté à environ 562 Ma et contient des zircons hérités exclusivement du SGO (<610 Ma). Cet âge similaire à celui connu des plutons granitiques de la VT (561 ± 2 Ma et 558 ± 3 Ma) indique la contemporanéité des événements intrusifs et extrusifs. Enfin, l'âge d'un échantillon de dyke granitique, chenal d'arrivée volcanique tardive, est d'environ 550 Ma avec des zircons hérités exclusivement du Groupe d'Ouarzazate (<580 Ma).

Dans la VT, le volcanisme est restreint au Groupe de Ouarzazate (<580 Ma), avec des pulsations aux alentours de 575 Ma, de 560 Ma et de 550 Ma, caractéristiques des LIP. Nous intégrons la genèse de cette SLIP dans le cadre de mouvements transtensifs le long de la bordure métacratonique nord du COA à la fin de l'orogénèse panafricaine.

Présentation des données géophysiques acquises en 2019

Siham Benahmed et Intissar Rachid (MERN)

Poursuivant sa mission d'acquisition et de traitement des données géoscientifiques, le Bureau de la connaissance géoscientifique du Québec a réalisé durant l'hiver 2019 un nouveau levé aéromagnétique de haute résolution (espacement entre traverses de 200 m). Ce levé de 35 000 kilomètres linéaires (superficie d'environ 6360 km²) est situé dans le secteur du lac Manouane, Province géologique de Grenville. Il a pour but de fournir un outil de soutien à la cartographie géologique autant pour les projets de Géologie Québec que pour ceux des compagnies minières. Ces données permettent également de stimuler l'investissement privé en générant de nouvelles zones favorables à l'exploration minérale.

Le rapport technique et les données numériques sont publiés dans Examine (DP 2019-01). Les cartes du champ magnétique total résiduel et du gradient vertical sont également disponibles via la carte interactive.

À l'été 2019, certaines propriétés physiques, notamment la densité et la susceptibilité magnétique, ont été mesurées sur les échantillons de roches prélevés lors de la cartographie géologique du projet du lac Parent dans la Fosse d'Ungava et du projet de Normandin dans le Grenville. Les mesures ont été prises sur des surfaces planes nettoyées à la scie à roches, conformément au protocole développé par le laboratoire de géophysique de l'Université Laval. Les résultats de ces mesures sont disponibles dans la base de données du SIGÉOM.

Cadre stratigraphique du projet aurifère LaRonde Zone 5 et des zones minéralisées de la propriété Ellison, camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde, Abitibi, Québec

Émile Boily-Auclair (INRS-ETE), Patrick Mercier-Langevin (CGC-Q), Pierre-Simon Ross (INRS-ETE) et David Pitre (Agnico Eagle)

Le projet LaRonde Zone 5 (LZ5; 6,8 Mt Au à 2,34 g/t pour des ressources totales de 14,5 t Au ou de 0,51 Moz) est un gisement d'or archéen qui est situé dans le camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde (DBL) au sein du Groupe de Blake River, dans la partie sud de la Sous-province de l'Abitibi. La LZ5 faisait autrefois partie de la mine Bousquet 1 qui a produit 42 t Au, ou 1,36 Moz, de 1978 à 1996. La LZ5 est présentement exploitée sous terre par Mines Agnico Eagle sur le complexe minier LaRonde.

Les zones minéralisées de l'ancienne mine Bouquet 1 sont situées dans la partie centrale du camp DBL et marquent la transition entre les systèmes liés au Pluton synvolcanique de Mooshla à l'ouest (Westwood Zone 2 Extension, Doyon et Mouska) et les systèmes de type sulfures massifs volcano-gènes riches en or à l'est (Bousquet 2-Dumagami et LaRonde Penna), ce qui en fait une zone clé pour comprendre l'évolution métallogénique du secteur.

Les zones minéralisées du projet LZ5 (zones 4, 4.1 et 5), qui sont stratigraphiquement parmi les plus basses dans le camp DBL, et les zones A et B de la propriété voisine Ellison sont synvolcaniques. Elles étaient considérées précédemment comme étant encaissées dans l'unité hétérogène de Bousquet, au sommet du membre inférieur de la Formation de Bousquet. L'étude en cours a démontré que les zones minéralisées se trouvent plus haut dans la séquence stratigraphique, c'est-à-dire dans des unités volcaniques et volcanoclastiques (tuf et tuf à lapillis mafique à felsique) très déformées et fortement altérées au sommet du membre inférieur et à la base du membre supérieur de la Formation de Bousquet. Ceci indique que les minéralisations parmi les plus anciennes du camp DBL sont également associées au magmatisme intermédiaire à felsique d'affinité transitionnelle à calco-alcaline du membre supérieur de la Formation de Bousquet, un métallotecte de premier ordre dans le secteur.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de maîtrise portant sur la nature des zones minéralisées en or du projet LZ5 du complexe minier LaRonde et sur l'importance relative des principaux éléments qui contrôlent la distribution de l'or à différentes échelles.

Stratigraphie et chimie de la Formation d'Obatogamau : implications pour les minéralisations de type SMV

Adrien Boucher, Lucie Mathieu et Réal Daigneault (UQAC)

La Formation d'Obatogamau est une unité volcanique d'une grande étendue spatiale (>100 km en direction E-W, près de 4 km d'épaisseur) dans la région de Chibougamau. Elle est considérée comme un empilement monotone de coulées de lave mafiques pouvant contenir jusqu'à 20 % de gloméro-cristaux de plagioclase. Malgré son apparente homogénéité, la Formation d'Obatogamau contient des niveaux marqueurs indiquant des interruptions dans le volcanisme. Il existe peu ou pas d'information sur les variations géochimiques, la pétrologie ou l'âge et la durée de mise en place de cette unité.

Ce projet a pour but d'évaluer le potentiel en SMV de la Formation d'Obatogamau, ce qui requiert une meilleure compréhension de son environnement volcanique. Des travaux de cartographie ont été réalisés dans le secteur du lac de la Presqu'île et ont été suivis d'une étude chimique et pétrologique détaillée. Sur le terrain, les marqueurs d'interruptions dans le volcanisme mafique correspondent à de minces niveaux (15 cm à quelques mètres d'épaisseur) de tufs graphiteux, de chert ou de mudstone et de siltstone interstratifiés. Ces niveaux sont faiblement minéralisés; les sulfures comprennent de la pyrrhotite, de la pyrite ainsi qu'un peu de chalcopryrite, de galène et de sphalérite. À l'est de la zone d'étude, une coulée de lave felsique a été observée, signe d'une activité volcanique felsique contemporaine du volcanisme mafique de la Formation d'Obatogamau.

Les laves étudiées sont des basaltes et des basaltes andésitiques d'affinité tholéiitique. Ces laves ont une chimie homogène qui indique une différenciation limitée entre chaque éruption. Seules les coulées situées au sommet de la séquence stratigraphique présentent une composition plus évoluée d'affinité transitionnelle, coïncidant avec une transition vers la Formation de Waconichi sus-jacente. La chimie de la coulée felsique observée (composition de rhyodacite calco-alcaline avec un patron multiéléments appauvri en terres rares lourdes) indique une source mantellique différente des laves mafiques. Les résultats préliminaires de la datation de cette unité donnent un âge très proche de celui de la Formation de Waconichi. D'après nos observations, les taux d'effusion importants et les courtes pauses dans le volcanisme de la Formation d'Obatogamau sont liés à un temps de résidence limité dans les chambres magmatiques. Ces caractéristiques sont peu favorables au développement de gisements de type SMV. [Contribution Metal Earth numéro MERC-ME-2019-202]

Conductivité électrique dans les matériaux pour le stockage de l'énergie

Nesrine Boussadoune, Olivier Nadeau
et Gabriel Antonius (UQTR)

Les matériaux 2D représentent une part importante dans la recherche en science des matériaux, et ce, en raison de leurs propriétés hors du commun. La découverte du graphène et de ses propriétés exceptionnelles a mis en avant l'intérêt de ces matériaux dans les problématiques de recherche actuelle. Les matériaux 2D conducteurs sont particulièrement bien adaptés aux électrodes de supercondensateurs (une sorte de batterie à décharge rapide) en raison de leur grande surface spécifique qui permet l'intercalation des ions entre les nanofeuilles. Nous nous sommes intéressés à la classe des MXenes, de formule chimique $M_{n+1}X_nT_x$. Les propriétés rapportées dans la littérature montrent l'importance de ces matériaux dans le domaine du stockage de l'énergie, du fait de leur bonne conductivité électrique.

Notre objectif est d'étudier comment la morphologie, la composition chimique et la terminaison de surface des MXenes affectent leurs performances en tant que matériaux d'électrode pour les dispositifs de supercondensateurs. Nous cherchons en particulier à calculer la conductivité électrique des différentes structures. Pour ce faire, nous avons effectué des calculs *ab initio* à l'aide de la théorie de la fonctionnelle de densité (DFT) dans le logiciel Abinit. Cette méthode nous a permis de calculer les paramètres structuraux, l'énergie de formation ainsi que la structure électronique. La connaissance de ces derniers est la première étape vers le calcul de la mobilité électronique. Les calculs *ab initio* dans le cadre de la théorie de la perturbation de la fonctionnelle de la densité (DFPT) se sont avérés les plus fiables pour obtenir les fréquences de vibration de phonon ainsi que le potentiel de couplage phonon et les éléments de matrice de couplage électron-phonon pour calculer la mobilité électronique. Cette dernière sera estimée en résolvant l'équation de transport de Boltzmann linéarisée.

Ce projet nous permettra de comprendre l'origine microscopique de la résistivité électrique dans les MXenes et d'identifier les modes de vibration qui causent le plus de diffusion dans le courant électrique. Nous pourrions aussi comprendre comment les principaux indicateurs de la conductivité électrique (densité de porteurs de charges, vitesse des électrons, temps de vie) peuvent être contrôlés à travers différents paramètres structuraux des matériaux. Ultimement, nous prévoyons intégrer de grandes bases de données et faire du criblage à haut débit afin d'identifier les matériaux les plus prometteurs pour les supercondensateurs.

Inventaire des ressources en granulats de la région du Lac-Saint-Jean

André Brazeau (MERN) et Charles-William Couture (UL)

Durant l'été 2019, des travaux d'inventaire des ressources en granulats ont été effectués dans la partie est de la région du Lac-Saint-Jean.

Les travaux ont couvert, en partie ou en totalité, les feuillets SNRC 22D05, 22D06, 22D07, 22D11 et 22D12 à l'échelle du 1/50 000. Les résultats vont permettre de localiser et de caractériser les sources en granulats de cette partie du Lac-Saint-Jean et d'en évaluer l'importance.

Les activités de terrain ont consisté en de nombreux sondages à la pelle et en visites de sablières, de gravières, de coupes naturelles et de déblais de routes. Plus de 270 sites ont été explorés et 39 échantillons de sable ou de gravier ont été prélevés et expédiés en laboratoire pour déterminer leurs propriétés physico-mécaniques.

Le socle rocheux appartient aux provinces géologiques du Grenville et des Basses-Terres du Saint-Laurent. On y retrouve surtout des roches de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (roches ultramafiques; anorthosite, gabbro, norite), des roches granitiques et des roches sédimentaires du Groupe de Trenton (calcaires, dolomies, shales et grès).

Les dépôts susceptibles de fournir des granulats sont principalement d'origine marine (deltaïque) ou fluvioglaciaire. Plusieurs d'entre eux ont été exploités intensivement et sont aujourd'hui pratiquement épuisés.

Les principales sources de granulats sont composées de sédiments grossiers glaciomarins et de sédiments deltaïques ainsi que de sédiments fluvioglaciaires. Ces sédiments se sont déposés lors de la dernière déglaciation qui s'est amorcée il y a environ 10 500 ans, en grande partie lorsque les eaux marines de la Mer postglaciaire de Laflamme ont ennoyé les terrains encore enfoncés par le passage du glacier. La mer a complètement submergé les terres jusqu'à une altitude d'environ 195 m.

Les granulats de la région sont généralement de bonne qualité. Ces matériaux, qui ont été arrachés du socle par l'action des glaciers, reflètent bien la nature des roches sous-jacentes.

Peut-on quantifier la déformation et les contraintes dans les veines de quartz aurifères de l'Abitibi?

Crystal Brochard, Michel Jébrak et Daniele L. Pinti (UQAM)

La Faille de Cadillac est une zone de déformation majeure située en Abitibi, hôte de nombreuses minéralisations aurifères sur 250 km de long. Elle est composée de plusieurs segments, plus ou moins liés les uns aux autres, qui ont permis la circulation de fluides hydrothermaux. L'hydrothermalisme intense est à l'origine des grandes zones minéralisées en or associées pour la plupart au type orogénique. Ces minéralisations contiennent communément des veines de quartz.

Dans le cadre du projet de recherche, la déformation le long de la zone de faille sera étudiée en utilisant la recristallisation dynamique du quartz. De nombreux minéraux, comme le quartz, recristallisent sous l'effet des contraintes liées à la déformation. Ce processus laisse des traces visibles au microscope optique, les textures de recristallisation : lamelles de déformation, extinction ondulante, allongement et forme des bordures de grains. L'étude de ces textures permettra de comprendre dans quelles conditions les veines ont (re-)cristallisé et de déterminer si ces conditions ont changé en fonction du segment étudié. Selon les résultats, cette méthode pourrait servir de guide pour l'exploration.

Le projet de recherche testera également sur des veines de quartz des méthodes habituellement pratiquées sur des roches métamorphiques (quartzites ou mylonites). Les méthodes choisies sont : 1) l'analyse par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) pour déterminer l'orientation cristallographique des grains de quartz et les taux de contrainte, grâce à des piézomètres empiriques préétablis sur des quartzites; 2) l'analyse des gaz rares dans le quartz par spectrométrie de masse, afin de déterminer la source des fluides et leur éventuelle température d'ébullition; 3) l'utilisation de géothermomètres (chlorite/biotite, titane dans le quartz) pour associer la température au taux de contrainte et obtenir une pression.

Facteurs de contrôle sur les minéralisations aurifères associées à des zones de cisaillement et à des filons-couches mafiques et ultramafiques : exemple du gisement Philibert, Chibougamau-Chapais

Antoine Brochu (UQAC et MRB), Damien Gaboury et Pierre Bedeaux (UQAC)

L'étude a pour but d'établir les principaux facteurs qui contrôlent la minéralisation aurifère du gisement Philibert. La propriété, située à 50 km au sud-ouest de Chibougamau, renferme une minéralisation disséminée au sein du corridor de déformation régional de Guercheville, au contact entre des filons-couches mafiques et des roches volcaniques basaltiques associés à la Formation d'Obatogamau. Les objectifs sont : 1) d'identifier les facteurs qui contrôlent la distribution de la minéralisation, 2) de définir la nature et l'empreinte des altérations hydrothermales à l'échelle régionale et à celle des zones minéralisées, 3) de déterminer le modèle métallogénique.

À l'été 2019, plus de 2000 m de forages ont été décrits et échantillonnés. Plusieurs corridors altérés et déformés sur plus de 100 m de large recoupés en forage renferment une quinzaine de zones minéralisées parallèles et orientées 300° avec un pendage entre 35 et 45° vers le NE. Les zones minéralisées fortement foliées contiennent de la pyrite disséminée et, en moindre proportion, de la pyrrhotite, en association avec une silicification et une carbonatation (carbonates de fer). Ces zones minéralisées sont bordées sur plusieurs mètres par des enveloppes riches en magnétite idiomorphe disséminée. La transition entre la pyrite et la magnétite est graduelle et pourrait traduire un gradient redox. Le filon-couche hôte est différencié avec une polarité renversée vers le sud. Du nord-est au sud-ouest, les quatre faciès au sein du filon couche sont : 1) le gabbro à grains moyens, 2) le gabbro à porphyroblastes d'amphibole, 3) le gabbro quartzifère et 4) la diorite quartzifère. La minéralisation semble concentrée dans la zone de déformation au sud du filon-couche, dans les unités plus différenciées de gabbro et de diorite quartzifères. Le filon-couche du gisement Philibert présente plusieurs similitudes avec le Filon-Couche de Bourbeau de la Suite intrusive de Cummings qui est associé à de nombreux gisements aurifères.

La pétrographie en lame mince et l'analyse par LA-ICP-MS des pyrites (89 analyses dans 10 lames minces) indiquent que l'or est libre ou associé à la pyrite disséminée. Deux familles de pyrite ont été identifiées : 1) une pyrite fine et idiomorphe contenant peu d'inclusions, avec un alignement préférentiel dans les plans de schistosité et 2) une pyrite grossière, xénomorphe, très poreuse et tardive par rapport à la première famille. La pyrite (1) est aurifère et montre une signature granophile (Bi-Te-W-Sb ± Sn-Pb-Cu-Ag) avec une corrélation positive entre Au et As-Sb-Pb-Cu. La pyrite (2) est stérile.

Carte préliminaire des dépôts de surface de l'ensemble du Québec

Étienne Brouard, Martin Roy (UQAM)
et Hugo Dubé-Loubert (MERN)

Une grande quantité de données et de connaissance sur les dépôts de surface du Québec a été générée au cours des dernières décennies, notamment grâce aux programmes d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), aux inventaires écoforestiers (SIF) et à divers travaux de recherche scientifique. La plupart de ces données ont été produites à des échelles différentes et à partir de légendes distinctes, ce qui complexifie la visualisation d'une synthèse cartographique du Québec. Dans le cadre de l'élaboration du nouveau canevas du bulletin Quaternaire au BCGQ, il a été convenu de produire une carte globale de l'architecture des dépôts de surface pour l'ensemble du Québec qui respecte l'état actuel des connaissances géologiques.

Les diverses sources de données (PACES, SIF, cartes de dépôts de surface existantes) ont été traduites dans une légende commune afin de pouvoir comparer les données et effectuer des ajustements. Les données traduites ont ensuite été combinées et rééchantillonnées dans ArcGIS 10.6 pour produire des cartes à différentes échelles (travaux en cours). Diverses méthodes de rééchantillonnage ont aussi été testées pour s'assurer un respect des données originales et limiter la perte d'information géographique. La traduction des légendes utilisées par les divers auteurs est parfois hasardeuse et reste une source importante d'incertitude sur la nature des dépôts. Nous suggérons l'utilisation d'une légende simple pour les nouveaux projets qui assurera une uniformité dans l'interprétation des dépôts. Nous présentons ici les résultats préliminaires du rééchantillonnage ainsi qu'une version préliminaire de la carte globale.

Utilisation de la phytométrie pour évaluer la fertilité des résidus miniers : une méthode offrant une réponse plus globale et représentative que les analyses agronomiques conventionnelles

Arturo Canton Ruz (ECOSUR), Martine Migneault,
Sébastien Roy et Bill Shipley (SÈVE, UdeS)

Le succès de la restauration écologique des sites miniers est en grande partie déterminé par le degré de fertilité du sol de chaque site. La faible teneur en macronutriments et en micronutriments, la carence en matière organique et, conséquemment, l'absence de processus microbiens dans ces nouveaux sols constituent des conditions défavorables à l'établissement naturel de plantes. Autant les sites miniers sont situés dans des environnements différents, autant les propriétés des résidus à végétaliser varient d'un site à l'autre. Ces propriétés sont communément déterminées par le biais d'analyses agronomiques conventionnelles établissant les concentrations de certains nutriments. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles ne traitent pas de l'interaction globale entre les éléments nutritifs, les propriétés physiques du sol et les besoins spécifiques des différentes espèces végétales. La méthode des phytomètres, mise au point à l'Université de Sherbrooke, est une approche qui tient compte de ces interactions et qui offre une représentation plus complète de la fertilité des résidus miniers. La phytométrie consiste à utiliser des modèles d'**équations structurelles**, y compris les taux de croissance relative d'espèces herbacées indicatrices. Dans cette étude, les espèces indicatrices utilisées pour mesurer la fertilité des résidus neutres d'une mine du Nord-du-Québec et d'une mine de la région de l'Abitibi sont le blé (**Triticum aestivum**) et le trèfle (**Trifolium pratense**). Les résultats ont permis de comparer la fertilité des résidus provenant de différents sites ou de différents traitements et l'**état** des résidus d'un même site **à l'aide** de la production de biomasse des phytomètres. Il est important de quantifier la capacité de support de la vie végétale des **résidus miniers** avant d'appliquer des stratégies de revégétalisation et de mettre en place des méthodes de restauration efficaces, durables et adaptées à chaque site minier. La méthode phytométrique que nous proposons pourrait également évaluer s'il y a une amélioration des propriétés des nouveaux sols après la revégétalisation, dans le but de mieux comprendre et de prédire la trajectoire de développement des écosystèmes reconstruits.

Décomposition des données géophysiques aéroportées par apprentissage automatique profond

**Matthieu Cedou, Erwan Gloagen (INRS-ETE)
et Martin Blouin (Geolearn)**

Les méthodes géophysiques aéroportées ne présentent pas de biais de répartition ni d'interprétation. Elles sont un atout pour la géologie d'exploration et leurs données sont idéales pour les approches par apprentissage automatique, contrairement aux méthodes basées sur l'échantillonnage.

Les techniques de traitement d'image sont à la base de l'interprétation de ces données. Elles permettent de mettre en évidence certains objets, selon leur signature géophysique (nature, forme, profondeur).

Au cours des dernières années, les algorithmes d'apprentissage automatique profond ont changé le paradigme du traitement d'image. Leurs applications sont nombreuses, de la classification d'image à la transformation des données. Reste à savoir s'ils permettent d'explorer les données géophysiques et de générer des couches d'information pertinentes.

L'algorithme « auto-encodeur » utilisé dans le cadre de notre projet permet, par entraînement et sans nécessiter d'étiquettes, de décomposer les données visuelles de manières optimales. Pour cela, il isole les différentes textures contenues dans les données. Il est ensuite possible de visualiser la localisation de ces « textures » dans les données d'origine. De nouvelles représentations peuvent ainsi être obtenues, mettant en évidence les objets géologiques présentant différentes signatures géophysiques et leur localisation.

Ces représentations fournissent au géologue de nombreuses couches d'informations, isolant ou supprimant certaines anomalies géophysiques. Elles permettent de mieux comprendre la géologie de la zone d'étude et facilitent la prospection indirecte. De plus, ces nombreuses représentations générées ouvrent la porte aux approches basées sur les données.

Afin de tester les performances de l'algorithme, la ceinture de roches vertes dans la région de la mine Gonzague-Langlois-Grevet a été étudiée. Les données de magnétisme aéroporté et de MEGATEM ont été utilisées et traitées par l'algorithme développé. Les résultats montrent la capacité de l'algorithme à explorer les données géophysiques, à générer de nouvelles couches d'information et à automatiser les processus de traitement d'image. Il facilite et améliore l'utilisation des données géophysiques aéroportées.

Potentiel de colmatage des puits à colonne permanente – Impact sur leur utilisation

**Léo Cerclet, Benoît Courcelles
et Philippe Pasquier (Polytechnique Montréal)**

Les systèmes géothermiques de basse température présentent un grand potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les besoins calorifiques des bâtiments, qu'il s'agisse de climatisation ou de chauffage. Plusieurs technologies d'échangeurs souterrains sont disponibles, mais les deux technologies usuelles, les puits en boucle fermée et les puits en boucle ouverte, sont respectivement dispendieuses ou sensibles à la productivité hydraulique des aquifères. Les puits à colonne permanente (PCP) offrent des avantages par rapport aux systèmes traditionnels. En plus de résoudre ces deux problèmes, il s'intègre facilement dans un contexte urbain dense. Leur déploiement massif comporte des défis, notamment en ce qui concerne la gestion du colmatage causé par la précipitation des carbonates, des silicates et des métaux. Si les PCP ont fait leurs preuves dans certaines régions du globe, le Québec possède de nombreux aquifères carbonatés qui pourraient avoir un effet sur la rentabilité des PCP à long terme.

Nous avons étudié le potentiel de colmatage d'un PCP dans un aquifère de la région métropolitaine de Montréal pendant un an. Le PCP était relié à l'Unité mobile de géothermie (UMG) de Polytechnique Montréal, qui est composée de quatre thermopompes pour une puissance de 16 tonnes, d'un chauffe-eau de 24 kW pour des essais de réponse thermique et d'une unité de conditionnement de la qualité de l'eau. Cette unité a permis l'acquisition en continu des paramètres de fonctionnement du PCP (température, débit...) et un suivi des paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine. Les résultats ont établi un lien entre le fonctionnement du PCP et l'évolution chimique de l'eau souterraine. Plusieurs critères d'utilisation ont été identifiés comme sensibles pour la stabilité des minéraux carbonatés, notamment les arrêts successifs du système qui contribuent à l'accroissement de la dissolution de la roche. Par ailleurs, des essais par lots réalisés en laboratoire ont permis de déterminer la cinétique de dissolution afin de simuler l'impact du fonctionnement sur l'eau souterraine. De plus, le suivi de l'évolution chimique de l'eau (indices de Ryznar, de Langelier et de saturation) a permis d'identifier la période de climatisation comme critique pour la stabilité des carbonates, ceci en adéquation avec les modèles chimiques développés dans la littérature. L'analyse des échantillons de dépôt dans les tuyaux du système par microscopie à balayage électronique à la fin de la période de suivi a confirmé leur nature carbonatée.

L'utilisation des traits fonctionnels dans la sélection de végétaux indigènes pour la restauration progressive du site Whabouchi de Nemaska Lithium

Chiara Chelo, Martine Migneault, Sébastien Roy et Bill Shipley (SÈVE, UdeS)

Le site Whabouchi de Nemaska Lithium dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James verra l'établissement d'une halde de codisposition des extrants miniers (stériles et résidus fins), laquelle fera l'objet d'une restauration progressive tout au cours de la vie de la mine. À l'heure actuelle, les pratiques en restauration écologique des sites miniers sont peu développées et proviennent souvent d'essais empiriques, d'où une compréhension limitée du fonctionnement des plantes et autres organismes dans l'environnement anthropisé d'accueil. Notre équipe de recherche travaille au développement d'une approche durable de restauration écologique sur mesure pour cette halde.

Les résidus et stériles miniers sont des environnements hostiles à l'établissement de végétaux étant donné leur nature minérale, pauvre en nutriments et sans matière organique, ainsi que leur perméabilité, et la sécheresse qui en découle. Dans la nature, un bon nombre de végétaux rustiques s'établissent dans les substrats minéraux comme les sables et les affleurements rocheux. Notre équipe s'attarde à l'étude de la végétation naturelle déjà adaptée à la croissance sur de tels substrats dans la région de Nemaska.

Nous présenterons comment les traits fonctionnels de la flore locale (essences forestières, arbustives et herbacées) peuvent nous guider dans la sélection de végétaux qui serviront dans les opérations de restauration minière. Spécifiquement, nous avons étudié l'effet du stress hydrique sur différentes espèces en effectuant des expériences *in situ* (plantations) et en mesurant les paramètres suivants : survie, croissance, photosynthèse, efficacité d'utilisation de l'eau, surface foliaire, conductance stomatique et conductance hydraulique des feuilles. Les espèces étudiées comprennent notamment l'aulne rugueux, l'épinette noire, le bouleau blanc, le myrique baumier, le peuplier faux-tremble, le pin gris, le thé du Labrador et diverses espèces de kalmia. Les essais ont été réalisés à l'aide de semis disponibles commercialement (pépinières) et de transplants provenant de la région de Nemaska.

Ces recherches contribueront à améliorer nos connaissances sur la biologie des espèces indigènes et permettront d'évaluer leur réel potentiel pour la restauration minière. Nous visons la bonification des méthodes de gestion environnementale, avec égard pour les coûts monétaires et écologiques des opérations de restauration. Ultiment, le développement de nouvelles approches de restauration basées sur la flore régionale témoigne du respect envers le milieu naturel et les communautés qui accueillent les projets miniers, ce qui peut contribuer à l'acceptabilité sociale des activités minières.

Impact du gel-dégel et de la salinité sur le comportement de résidus miniers de terres rares en milieu nordique

Sophie Costis, Jean-François Blais (INRS-ETE), Lucie Coudert, Carmen Mihaela Neculita (IRME-UQAT) et Kristin Mueller (INRS-ETE)

Les éléments de terres rares (ETR) sont présents dans de nombreuses applications et suscitent de plus en plus d'intérêt. Bien que la Chine ait un quasi-monopole sur la production d'ETR, d'autres producteurs potentiels émergent. Le gisement Ashram est considéré comme l'un des projets de terres rares ayant un fort potentiel de développement. Ce gisement est situé dans le nord du Québec, en climat subarctique (température extrême et longues périodes de gel-dégel). La roche d'intérêt est une carbonatite qui contient environ 1,9 % d'oxydes de terres rares totales.

La contamination que peut engendrer la production d'ETR est connue et doit être contrôlée. Les principaux contaminants dans ce type d'exploitation sont les actinides, les métaux, les composés organiques, les matières en suspension ainsi que les poussières avec les polluants associés lors de l'entreposage (Weber et Reisman, 2012). La toxicité des ETR est encore, quant à elle, peu étudiée.

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer le potentiel de lixiviation de contaminants présents dans des résidus issus de l'extraction des minéraux de terres rares en milieu nordique, pour établir la contamination possible. Pour ce faire, une caractérisation physico-chimique et minéralogique détaillée a été réalisée, alors que des essais cinétiques en colonnes sont en cours. Puisque le climat dans la région est subarctique, la faible température, les cycles de gel-dégel et la salinité peuvent avoir un impact nuisible sur le comportement géochimique des résidus et ont été pris en compte lors des essais cinétiques. Des études antérieures ont montré que la faible température est un facteur d'influence majeure sur la lixiviation des éléments présents au sein des minéraux (Boulanger-Martel *et al.*, 2016; Elberling *et al.*, 2000; Elberling, 2005; Éthier, 2011). Par ailleurs, les critères de qualité des eaux de surface pour une toxicité aiguë sont plus stricts en climat nordique, où la dureté du milieu récepteur est plus faible. Une concentration jugée non toxique en milieu tempéré pourrait être considérée comme toxique en milieu subarctique (MDDEFP, 2013). Le mode de gestion final des résidus miniers pour le projet Ashram n'est pas complètement défini. Puisque l'utilisation d'agents de dégivrage pourrait être envisagée pour faciliter le transport et la mise en place des résidus, l'impact de la salinité sur le potentiel de lixiviation sera aussi étudié.

Conception, fabrication et caractérisation de cellules photovoltaïques multijonctions à contacts en vias traversants

Mathieu de Lafontaine, Maïté Volatier, Abdelatif Jaouad, Simon Fafard, Vincent Aimez et Maxime Darnon (UdeS)

Le domaine du photovoltaïque concentré (CPV) vise à produire de l'énergie électrique en concentrant la lumière grâce à des lentilles ou des miroirs sur une petite cellule photovoltaïque présentant une grande efficacité. Ces cellules multijonctions possèdent typiquement un contact électrique en face arrière et un contact en forme de grille en face avant. Cette grille est conçue de manière à trouver un compromis entre les pertes d'efficacité dues aux pertes résistives et celles dues à l'ombrage.

Afin d'augmenter l'efficacité des cellules et d'éliminer ce compromis, le projet de doctorat vise à fabriquer des contacts en vias traversants. Le transfert du contact en face avant vers la face arrière est possible grâce à des milliers de microtrous isolés électriquement et métallisés traversant la cellule photovoltaïque. En éliminant le contact en face avant, il y aurait une réduction significative des pertes dues à l'ombrage. Cette solution permettrait aussi de réduire les pertes résistives. Plusieurs procédés de microfabrication ont été développés afin de fabriquer cette nouvelle architecture de contacts électriques. Un procédé de gravure par plasma permet de former des milliers de microtrous simultanément dans la cellule photovoltaïque, tout en préservant ses performances. Une couche isolante est ensuite déposée dans ces trous par un procédé de dépôt par couche atomique. Cette technique permet d'isoler électriquement les trous afin d'éviter un éventuel court-circuit. Les trous sont ensuite métallisés par électroplacage d'or. Cette étape permet de déplacer le contact face avant vers la face arrière.

Selon des résultats de simulation, cette nouvelle architecture de contact permettrait un gain absolu de 3 % en efficacité de conversion photovoltaïque. Par ailleurs, ce processus est compatible avec tous les types de cellules photovoltaïques multijonctions. Il serait envisageable d'intégrer cette architecture sur des cellules ayant déjà une efficacité record de 46 % et possiblement de s'approcher du seuil de 50 % d'efficacité de conversion photovoltaïque. Cette avancée technologique permettrait de positionner avantageusement le Québec dans le domaine du photovoltaïque concentré. En effet, ces nouvelles cellules seront utilisables dans les systèmes CPV développés et fabriqués au Québec par STACE. En plus, il serait possible de réduire le coût de production de cette énergie propre et renouvelable.

Caractérisation métallogénique de la minéralisation aurifère du gisement Gladiator, Ceinture d'Urban-Barry, Abitibi, Canada

Gauthier D'Harlingue (UQAC, Ressources Bonterra), Damien Gaboury (UQAC), Dominique Genna (CONSOREM, UQAC) et Boris Artinian (Ressources Bonterra)

Le projet Gladiator de Ressources Bonterra est situé en bordure de la zone de déformation régionale de Barry (ENE-WSW), dans la ceinture de roches vertes d'Urban-Barry, à l'est de Lebel-sur-Quévillon, en Abitibi. La ceinture d'Urban-Barry est un secteur encore sous-exploré de l'Abitibi malgré un fort potentiel aurifère, comme en témoignent les projets Windfall (ressources de 2,8 Moz à 6,9 g/t Au), Barry (ressources de 0,8 Moz à 5,46 g/t Au) et Gladiator (ressources de 1,1 Moz à 8,98 g/t Au).

Le gisement Gladiator est situé dans une zone de dilatation, où les roches volcaniques mafiques et volcanoclastiques fortement déformées sont recoupées par des gabbros et de multiples intrusions felsiques. La chronologie relative des intrusions au sein de l'empilement volcanique commence par les gabbros, suivi des dykes felsiques aphanitiques puis porphyriques et, plus tardivement, des intrusions intermédiaires rougeâtres oxydées (nommées « Red Dog »). La déformation principale s'exprime par une schistosité subverticale orientée NE-SW avec une linéation dominante plongeant à 45° vers l'ENE. Les dykes porphyriques et les intrusions Red Dog semblent être tardifs par rapport à cette déformation. Une seconde déformation en coulissage dextre, avec localement une linéation à 20° vers l'ENE, se superpose à la première fabrique et se moule au contact du dyke et des veines.

La minéralisation est associée à des veines de quartz. Trois types de veines ont été identifiés :

1. veines de quartz-carbonate-chlorite-séricite-tourmaline-pyrite-sphalérite-or ($\pm$ chalcopryrite-galène) à texture laminée, subverticales et associées aux zones de cisaillement, parallèles aux dykes felsiques;
2. veines à paragenèse identique, en extension et oblique au premier type;
3. veines pegmatitiques à quartz-carbonate-feldspath-chlorite-pyrite sans orientation particulière, qui recoupent la déformation.

Par rapport à la déformation, les veines de type 1 sont probablement associées à la première phase et celles de type 2 à la seconde. Les veines de type 3 correspondent à un épisode de remobilisation tardif.

Le gisement Gladiator a les caractéristiques d'un gisement de type orogénique, mais sa paragenèse à sphalérite-chalcopryrite-galène et la présence d'or natif grossier sont des caractéristiques inhabituelles. Ces caractéristiques spécifiques pourraient témoigner de l'héritage de métaux issus d'un système précoce à sulfures massifs volcanogènes. Par ailleurs, la relation entre la minéralisation et les intrusions felsiques, en particulier les intrusions oxydées, de même que la présence de veines pegmatitiques aurifères suggèrent un apport de fluides magmatiques. Une étude pétrographique et géochimique des roches et des veines permettra de vérifier ces hypothèses. Les analyses par LA-ICP-MS des pyrites seront utilisées pour définir la signature métallique des fluides minéralisateurs, incluant la contribution possible des différents systèmes hydrothermaux.

Surveillance microsismique des mines en temps réel avec EnKF

Ana Cecilia Dip, Bernard Giroux et Erwan Gloaguen (INRS-ETE)

En raison de l'épuisement des gisements près de la surface, l'exploitation minière à grande profondeur est devenue de plus en plus importante au cours des dernières années. Les contraintes élevées autour des cavités peuvent causer des ruptures dans le massif rocheux, surtout à grande profondeur. Des cas extrêmes de dégagement d'énergie peuvent provoquer de violentes explosions de roches qui entraîneront des dommages à la structure de la mine ou au personnel (blessures et décès).

La microsismique permet de prédire les éboulements et de détecter les secteurs problématiques et les niveaux de danger. Les systèmes de surveillance microsismique sont utilisés en mécanique des roches en milieu minier, car ils sont capables de détecter les ruptures de roches provoquées par la libération soudaine d'énergie résultant de la redistribution des contraintes autour des excavations souterraines.

Pour bien surveiller l'activité microsismique d'une mine, il faut deux éléments clés : un bon modèle de vitesse sismique pour prévoir la localisation des événements et une bonne façon d'intégrer chaque nouvel événement causé par l'activité minière.

Notre recherche vise à développer une méthode innovante et efficace de mise à jour du modèle de vitesse qui permettrait de surveiller la mine en temps réel et qui, connaissant les propriétés mécaniques des roches, faciliterait la prise de décisions liées à la production ainsi qu'à la sécurité des travailleurs et des installations.

Cette recherche comprend deux étapes :

1. Intégration via simulation gaussienne séquentielle (SGS) de modèles de vitesse avec différentes résolutions (journaux de forages, mesures microséismiques, mesures sur échantillons), pour générer un ensemble de modèles stochastiques à partir de ceux-ci;
2. Mise à jour de ces modèles en ajoutant les nouveaux événements microséismiques en temps réel à travers le filtre Ensemble Kalman (EnKF). La rapidité du filtre EnKF permet de faire une mise à jour en temps réel et de surveiller les changements de vitesse dans le roc.

En plus de localiser les hypocentres, cette méthode permet de voir où la vitesse change, ce qui met évidence les zones où le massif rocheux subit des contraintes et, par conséquent, les zones susceptibles de rompre.

Impact de la Faille de Gwillim dans la détermination de cibles d'exploration par la caractérisation métallogénique, structurale et en 3D des minéralisations polymétalliques du camp minier de Chapais, Québec

Maxime Dour, Damien Gaboury, Pierre Bedeaux (UQAC), Laury Schmitt (SOQUEM) et Patrick Houle (MERN)

Le camp de Chapais a produit 24,2 MG à 2,24 % Cu et 1,128 g/t Au de 1954 à 1991, principalement à partir des mines Springer (12,7 MG à 2,56 % Cu et 1,23 g/t Au), Perry (9 MG à 2,16 % Cu et 0,14 g/t Au) et Cooke (2,1 MG à 0,66 % Cu et 5,17 g/t Au). Ces mines sont situées au sein des filons-couches de Ventures et de Bourbeau de la Suite intrusive de Cummings, lesquels sont recoupés et décalés par la Faille de Gwillim (250°/70°, déplacement senestre apparent de 3,0 km et jeu vertical interprété de 1,5 km). La minéralisation de type « Opémiska » à la mine Springer correspond à des filons cuprifères de CP-PY-MG-QZ associés à des fractures radiales recoupant une charnière de pli dans le Ventures. À la mine Cooke, à l'est de la Faille de Gwillim, la minéralisation est composée de veines de QZ-CF-PY-CP-Au dans des zones de cisaillement orientées à 260°-285°/70°-80° au sein du Bourbeau.

Malgré l'importance du camp minier de Chapais, la géométrie, les paragenèses et les altérations hydrothermales des minéralisations ont été peu décrites. Le rôle de la Faille de Gwillim, la source des métaux, l'origine et la signature des fluides minéralisateurs restent encore inconnus, ne permettant pas d'établir un modèle métallogénique précis. Les travaux de cartographie et les observations en forage ont permis de définir plusieurs générations de veines aux paragenèses et aux géométries distinctes à la mine Springer. Le système minéralisé est dominé par des structures de cisaillement dextre E-W associées à un système conjugué de veines de tension à 290° et à 250°. Six différents assemblages minéralogiques ont été reconnus : 1) des veines de magnétite massive; 2) des veines de CP-PY-MT-PO-(QZ); 3) des veinules de PY-CP d'aspect rubané; 4) des veines de QZ-PY-CP (AS, Au) dans les structures orientées à 290°; 5) une minéralisation polymétallique à Au-Cu-Ag-Pb-Zn-W-Co-Mo située dans une zone de cisaillement orientée à 260°/85°; 6) un assemblage de AS-PY-Au-Ag dans une zone de cisaillement dextre orientée à 310°-330°/80° recoupant les veines de cuivre. Situé à l'est de la Faille de Gwillim, au sein du gabbro du Ventures, l'indice Chibougamau Copper présente des minéralisations en cuivre identiques, recoupées par une veine aurifère de QZ-CF-PY-CP-SP-GL-SW.

L'altération hydrothermale se manifeste par : 1) une auréole de chloritisation intense de dimension métrique, où la chlorite remplace les minéraux ferromagnésiens; 2) des filonnets de stilpnomélane; 3) une silicification au contact des veines. L'altération se superpose au métamorphisme régional (faciès des schistes verts). Une ankéritisation, présente localement, est associée aux veines de QZ-CF tardives qui recoupent l'ensemble des minéralisations.

Géologie des dépôts de surface de la région de la rivière Arnaud, péninsule d'Ungava

**Hugo Dubé-Loubert, Simon Hébert (MERN),
Claudie Lefebvre-Fortier, Marc-Antoine Lévesque
et Martin Roy (UQAM)**

Le Bureau de la connaissance géoscientifique du Québec (BCGQ) a réalisé au cours des étés 2017 et 2018 une étude des dépôts de surface dans le secteur de la rivière Arnaud comprenant un levé cartographique du Quaternaire et l'échantillonnage des sédiments glaciaires (till) et fluvioglaciers (esker). Le projet a couvert, en totalité ou en partie, les feuillets SNRC 24M, 25D, 34P et 35A.

Le secteur à l'étude se trouve à proximité de la Ligne de partage glaciaire de Payne et de la zone d'influence du courant de glace de la rivière Arnaud. L'évolution, la migration et l'activité de ces entités au cours du dernier cycle glaciaire ont grandement influencé la distribution des dépôts et des formes de surface qui leur sont associées. De plus, la vallée de la rivière Arnaud a connu l'invasion marine postglaciaire de la Mer d'Iberville marquée par la construction de plusieurs terrasses et de deltas ainsi que par le remaniement des sédiments préexistants. Ces événements ont favorisé la mise en place d'une épaisseur considérable de sédiments qui masquent par endroits le roc sous-jacent et qui constituent un frein à l'exploration minière. La cartographie des dépôts de surface, l'étude des marques d'érosion glaciaire et les résultats des analyses géochimiques et minéralogiques permettent de pallier le manque d'exposition du socle rocheux et de mieux évaluer le potentiel minéral régional.

La zone d'étude se trouve à la limite entre les provinces géologiques de Churchill et du Supérieur. L'hétérogénéité du socle et son influence sur la dynamique glaciaire sont perceptibles, autant dans les unités et le type de morphologie cartographiés que dans les compositions minéralogiques et granulométriques des sédiments glaciaires et fluvioglaciers. Au total, 294 échantillons de till et 139 échantillons d'esker ont été prélevés au cours des deux étés. La matrice fine des échantillons de till sera analysée pour les éléments majeurs, en traces et d'intérêt économique alors que tous les échantillons de till et d'esker seront éventuellement traités pour en extraire les minéraux indicateurs. Les résultats de la prospection glaciocérosédimentaire feront l'objet d'une publication subséquente.

Nouvelles analyses géochimiques de till dans la région sud-est de la rivière Mistassini, Québec

Mohamed El Amrani (MERN)

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) a réalisé au cours de l'été 2018 un levé géologique du Quaternaire dans la région sud-est de la rivière Mistassini (feuillets SNRC 32H01, 32H02, 32H07 et 32H08). Ce levé a permis de cartographier les dépôts de surface, de décrire la dynamique glaciaire et de prélever 142 échantillons de till de fond. Les analyses géochimiques de la fraction fine du till ont permis d'identifier deux secteurs d'intérêt pour le Nb, le Ni, le Fe-Ti et les ETR.

Géologie des minéralisations aurifères de la mine Éléonore, Eeyou Istchee Baie-James, Province du Supérieur, Québec, Canada

Arnaud Fontaine (INRS-ETE), Benoît Dubé (CGC-Q), Michel Malo (INRS-ETE), Vicki McNicoll, Simon Jackson (CGC-O), Nathalie Prudhomme, Francis Larivière (Newmont-Goldcorp Corporation, Mine Éléonore) et Jordi Turcotte (Sirios)

La minéralisation aurifère de la mine Éléonore (4,3 Moz d'or) est encaissée dans la Formation de Low (<2714-2675 Ma) appartenant à la Sous-province de La Grande (domaine de la rivière Eastmain). Dans ce secteur, situé à proximité de la limite sud de la Sous-province d'Opinaca, les roches sédimentaires de Low sont recoupées par plusieurs types d'intrusions et sont affectées par un métamorphisme de forte intensité (faciès supérieur des amphibolites, 5-6 kbars et 650 °C) et une déformation polyphasée, incluant une phase de déformation principale D_2 . Les zones minéralisées de la mine Éléonore se présentent sous diverses formes telles que, par ordre d'importance : 1) un stockwerk de veines et de veinules de quartz et de dravite et des zones de remplacement à microcline, à dravite et à phlogopite (zones 5010 et 5050); 2) des veines laminées de quartz-diopside-actinote-uvite (zones 6000, 7000 et *Hanging Wall*), 3) des brèches hydrothermales et des zones de remplacement (zone du Nord), des veines de quartz-(feldspath-K, actinote, dravite) et des pegmatites granitiques dans les niveaux profonds (zone 494). Toutes ces minéralisations comprennent des disséminations de pyrrhotite, d'arséno-pyrite, de löllingite et, plus rarement, de pyrite. Formées précocement durant la déformation D_2 , les zones minéralisées ont une signature métallique commune en As-Sb-Ni-Co $\pm$ (Bi, W, Te, Se, Pb) et une altération hydrothermale avec une zonalité latérale et des concentrations élevées en S, en B, en Ca, en Si, en Fe et en Mg. Tout indique que ces minéralisations aurifères ont subi une évolution complexe liée à un épisode tectono-métamorphique de longue durée, contemporain à la mise en place de pegmatites granitiques localement aurifères (environ 2620-2600 Ma). Cette évolution complexe et prolongée est responsable de la recristallisation et de la déformation du minerai, provoquant par endroits une redistribution de l'or et des métaux associés (Ni, Co, Au, Te et Sb, Pb, Bi, Se et Ag). La propriété Cheechoo est également l'hôte de minéralisations aurifères encaissées dans une intrusion syntectonique à tarditectonique, la granodiorite de Cheechoo (2612 Ma). La partie sommitale de l'intrusion comprend plusieurs générations de veines et de veinules de quartz et de quartz $\pm$ (feldspath-K, phlogopite, arsénopyrite, pyrrhotite, pyrite). La nature de ces veines est relativement similaire à celle de la zone 494 dans les niveaux profonds de la mine Éléonore. Par analogie avec les gisements orogéniques hypozonaux et les systèmes aurifères associés à des intrusions réduites, les minéralisations aurifères de la mine Éléonore et de la propriété Cheechoo sont des exemples de systèmes hydrothermaux archéens actifs dans un contexte régional tectono-métamorphique complexe et de longue durée.

Géologie de la région du lac Parent, Fosse de l'Ungava, Nunavik, Québec, Canada

Guillaume Mathieu, Mélanie Beaudette et Carl Bilodeau (MERN)

Le levé géologique réalisé au cours de l'été 2019 dans la région du lac Parent constitue la deuxième année d'un programme de cartographie à l'échelle 1/50 000 du Domaine Nord de la Fosse de l'Ungava, dans la Province de Churchill, au Nunavik. La carte comprend la totalité du feuillet SNRC 35G11 et une partie du quadrant SW du 35G14. Le Domaine Nord est délimité au nord par l'Arc de Narsajuaq et le Complexe de Kovik, au sud par le Domaine Sud de la Fosse de l'Ungava.

La région a été divisée en deux blocs structuraux, le bloc sud et le bloc nord.

Le bloc sud comprend, du sud vers le nord, trois unités lithostratigraphiques; le Groupe de Chukotat, la Formation d'Hubert et la Formation de Parent. Le Groupe de Chukotat est formé de basaltes tholéiitiques. La Formation d'Hubert est composée d'une séquence de conglomérat polygénique et d'arénite qui repose en discordance angulaire sur les basaltes du Chukotat. Ces deux unités sont séparées du Groupe de Parent par une faille de chevauchement d'étendue régionale, la Faille de Bergeron.

Le Groupe de Parent est composé majoritairement de roches volcaniques mafiques, dominées par des formations pyroclastiques qui surmontent des coulées coussinées dans sa partie sud. La composition des unités volcaniques évolue du sud vers le nord de basaltique à dacitique. Au moins trois niveaux exhalatifs et sédimentaires témoignent d'autant de pauses dans le volcanisme. Plusieurs zones de cisaillement longitudinales, d'étendue kilométrique, englobent des intrusions syntectoniques.

Le bloc nord renferme principalement des intrusions hétérogènes et recristallisées de composition intermédiaire à mafique appartenant à la Suite de Cape Smith. La partie nord-ouest de ces unités a historiquement été attribuée au Groupe de Watts. Dans cette zone affleurent également des intrusions peu déformées à orthopyroxène. Ce bloc est séparé de la partie sud par une zone de déformation complexe SW-NE renfermant possiblement une écaille tectonique de roches plus intensément métamorphisées. Certaines intrusions sont associées à une séquence de roches métasédimentaires, comparable à celle du Groupe de Spartan située à l'est du secteur cartographié, et à des lambeaux de métavolcanites mafiques.

Les plus intéressantes nouvelles cibles métallifères correspondent à des minéralisations épigénétiques : 1) des filons cuprifères au niveau de la discordance Hubert-Chukotat et 2) des zones ankéritisées et arsénifères à potentiel aurifère associées à des zones de cisaillement dans des roches volcaniques ou intrusives.

Metal Earth : vers une compréhension intégrée des systèmes de circulation des fluides aurifères

Guillaume Raymond, Isaac Siles Malta, Michael Herzog, Farnaz Ghoraishi, Camille Hébert, Georges Beaudoin, Christian Dupuis, Crystal LaFlamme, Carl Guilmette, Benoît Quesnel, Bertrand Rottier et Christophe Scheffer (UL)

Metal Earth est un programme de recherche ambitieux visant à améliorer notre compréhension de l'enrichissement en métaux de la croûte terrestre à l'Archéen. Notre équipe est impliquée dans différentes études pluridisciplinaires focalisées le long de treize transects distribués au travers de la Province du Supérieur. Les projets présentés dans ce résumé ont pour but une meilleure compréhension des caractéristiques thermiques et chimiques des fluides minéralisateurs, de l'extension de l'altération hydrothermale et de ses effets sur la minéralisation aurifère ainsi que des processus géodynamiques associés au fonctionnement de ces systèmes de circulation de fluides.

Deux projets portent sur la caractérisation de la composition en isotopes stables de veines et de roches métasomatisées, témoins de circulation de fluides le long de discontinuités structurales. La combinaison de différents systèmes isotopiques ($d^{18}O$, δD , $d^{13}C$, $d^{34}S$, $D^{33}S$, Δ_{47}) vise à déterminer l'origine des fluides, leur température ainsi que l'intensité de leurs interactions avec les roches hôtes et de leur flux.

Un troisième projet vise à déterminer si les fluides dérivés du métamorphisme prograde des roches métasédimentaires du Groupe de Pontiac pourraient être impliqués dans la genèse des gisements d'or de type orogénique de l'Abitibi. La combinaison de la modélisation P-T-X, de la géochronologie (U-Pb, Lu-Hf) et des isotopes stables ($d^{18}O$, δD , $d^{34}S$) vise à estimer la composition des fluides métamorphiques locaux ainsi que le moment de leur formation en relation avec l'âge de la minéralisation aurifère.

Enfin un dernier projet porte sur la caractérisation de l'altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en comparant la signature géophysique des roches altérées de zones très ou peu minéralisées. La finalité de ce travail consiste à identifier un lien potentiel entre la variation spatiale des propriétés géophysiques et la distribution erratique de l'or.

Des arbustes robustes et leurs locataires racinaires : une conjugaison synergique pour la revégétalisation minière

Louis Garneau, Sophie Lalonde, Pascale B. Beauregard et Sébastien Roy (SÈVE, UdeS)

La revégétalisation d'écosystèmes profondément perturbés comme les sites miniers pose des défis substantiels d'un point de vue biologique. Les résidus miniers sont des substrats pauvres en nutriments et leur granulométrie peut entraîner des problèmes de drainage et de rétention d'eau ou encore de perméabilité à l'oxygène. Ils sont sujets à une érosion importante, peuvent présenter des pH extrêmes et peuvent contenir des contaminants toxiques aux plantes tels que des métaux lourds et des sels. Les aulnes sont des arbustes indigènes rustiques capables de coloniser rapidement ces environnements, amorçant ainsi la succession végétale qui mène graduellement à l'établissement d'un écosystème fonctionnel. Leur capacité à former des symbioses racinaires avec des partenaires bactériens et fongiques augmente leur survie et leur croissance en conditions difficiles. Ces associations plante-microorganismes sont d'un intérêt primordial pour améliorer les techniques de revégétalisation. Les bactéries du genre *Frankia* forment des nodules sur les racines des aulnes et y fixent l'azote atmosphérique, permettant aux arbustes de coloniser des substrats très pauvres. Dans le cadre de notre étude, des bactéries autres que les *Frankia* ont été isolées de nodules, caractérisées et testées sur des aulnes en conditions gnotobiotiques afin de déterminer leur potentiel biotechnologique. Nos tests *in vitro* ont révélé chez ces isolats la présence de traits intéressants associés à la stimulation de la croissance végétale, notamment la solubilisation de phosphate inorganique ainsi que la sécrétion d'hormones végétales et de métallophores, qui permettent de rendre disponibles des microéléments essentiels aux plantes. Plusieurs de ces nouveaux isolats sont capables de favoriser la croissance des aulnes et interagissent positivement avec la symbiose aulne-*Frankia* en modifiant le nombre de nodules ou encore l'allocation de la biomasse chez la plante. De tels isolats ont un potentiel comme co-inoculant pour accélérer le développement de la symbiose aulne-*Frankia*, un paramètre critique pour la survie d'aulnes transplantés sur les sites miniers. De plus, lors d'essais de co-culture avec les *Frankia*, certains isolats ont vu leurs fonctions métaboliques modifiées, notamment au niveau de la sécrétion d'hormones végétales auxiniques impliquées dans la symbiose et la stimulation de la croissance. Une meilleure compréhension des interactions entre l'aulne et ses partenaires microbiens permettra d'employer à bon escient ces arbustes indigènes au Québec et de restaurer les sites miniers à moindre coût, en réduisant l'utilisation d'intrants organiques pour préparer ces sites à la revégétalisation.

La nature et l'évolution du contact entre le Domaine Nord et l'Antiforme de Kovik

Thierry Karl Gélinas, Carl Guilmette (UL),
Kyle Larson (UBC-O) et Marc-Antoine Vanier (MERN)

L'Orogène de l'Ungava constitue l'un des exemples les mieux préservés de collision arc-continent d'âge paléoproterozoïque. Il correspond à la branche nord-est de l'Orogène Trans-Hudsonien et résulte de la collision entre la marge du Supérieur et le Churchill. Cet orogène est composé d'un domaine de marge de rift, la ceinture de Cape Smith, d'un domaine océanique, le Groupe de Watts, et d'un domaine de marge continentale active, l'Arc de Narsajuaq. Un bombement tardif aurait exposé le Supérieur dans la fenêtre tectonique de l'Antiforme de Kovik.

La zone de cisaillement au contact du Groupe de Watts et de l'Antiforme de Kovik est interprétée comme le résultat du chevauchement de l'ophiolite (Groupe de Watts) sur la marge passive du Supérieur lors de l'accrétion de l'Arc de Narsajuaq. La découverte de matériau subduit à plus de 80 km de profondeur dans la partie occidentale de l'Antiforme de Kovik remet toutefois en question la nature de ce contact.

Ce projet de maîtrise a pour objectif de caractériser la nature et l'évolution du contact entre le Groupe de Watts et l'Antiforme de Kovik et, par conséquent, d'avoir une meilleure compréhension de l'évolution de l'Orogène de l'Ungava. Le secteur étudié est une zone d'affleurements interprétée comme une klippe du Groupe de Watts dans l'Antiforme de Kovik, où sont exposées une section impressionnante de la zone de cisaillement et l'unité mafique sus-jacente. La zone de cisaillement a été cartographiée et des échantillons orientés ont été récoltés le long de deux transects afin de déterminer la cinématique, la température et l'âge de la déformation ainsi que le métamorphisme de l'unité mafique.

Les observations de terrain ainsi que l'examen pétrographique des lames minces orientées serviront à déduire la cinématique de la zone de cisaillement. Pour déterminer la température de déformation, les angles d'ouverture des axes *c* du quartz seront mesurés et liés aux données du thermomètre TitaniQ. Les cartes élémentaires des échantillons réalisées à la micro-XRF et les examens pétrographiques permettront d'identifier les phases titanifères et la monazite, puis de dater le métamorphisme dans la zone de cisaillement. Quant à l'unité mafique, le métamorphisme sera caractérisé par le biais de pseudo-sections associées à des datations Lu-Hf sur grenat pour déterminer les conditions P-T-t-D.

Des travaux préliminaires à la microsonde ont permis d'obtenir la chimie minérale des minéraux dans quatre lames minces du fragment mafique et de calculer une pression de $13,8 \pm 2,9$ kbar et une température de 846 ± 85 °C.

Rehaussement d'images obtenues par sonde optique en forage : leçons tirées en extraction d'éléments pour l'exploration minière

Farnaz Ghoraishi, J. Christian Dupuis (UL)
et Erwan Gloaguen (INRS-ETE)

Les futures réserves minérales seront probablement découvertes à des profondeurs qui pourraient dépasser les 1000 m, où l'exploration minière par forage au diamant conventionnel sera très coûteuse. Cela signifie que le nombre de sondages sera probablement réduit et qu'il sera nécessaire d'extraire autant de valeur que possible de ces actifs d'exploration coûteux. De récentes avancées technologiques ont facilité le développement de nouveaux outils d'imagerie en forage, qui pourraient faire partie de la solution pour l'exploration en profondeur. La qualité des images continues et orientées obtenues au moyen de sondes optiques (*Optical Televiewer* ou OTV) de nouvelle génération fait en sorte qu'il est non seulement possible de décrire les structures tout au long du trou de forage, mais également de reconnaître les minéraux et de générer un journal de sondage géologique automatisé. Dans le cadre de cette étude, nous expliquons les étapes qui ont mené à l'élaboration d'un algorithme permettant de traiter les images de sonde optique pour produire des pseudo-journaux de sondage minéralogiques. Bien que les nouvelles sondes optiques puissent capter des détails plus subtils, il reste plusieurs obstacles à surmonter pour extraire des éléments pertinents et reproductibles à partir des images obtenues. Dans les trous de forage historiques, où la plupart de nos données ont été acquises, des contaminants externes peuvent couvrir la lentille de la caméra et réduire la clarté des images. Nous avons trouvé une solution intéressante pour contrer ce problème. L'étape suivante consistait à déterminer la meilleure méthode de segmentation pour diviser l'image en régions étiquetées. Puisque la sonde optique permet d'acquérir des images en couleurs réelles, la couleur joue un rôle important dans notre processus de segmentation, mais donne aussi du fil à retordre. La perception des couleurs est subjective et affecte le nombre de classes de couleur que chaque personne peut distinguer. Les méthodes appliquées et les paramètres sélectionnés ont un impact notable sur les étiquettes qui en résultent. L'établissement de seuils de couleur et le masquage se sont avérés insuffisants pour distinguer toutes les phases minérales en raison du classement préférentiel de différents espaces-couleurs vers des couleurs spécifiques. Au niveau de la classification et du regroupement, il reste toujours des pixels mal classés, peu importe la méthode de sélection, automatique ou manuelle, des centres de groupes. L'erreur commune entre les méthodes susmentionnées est le fait qu'une étiquette fixe est apposée à chaque pixel, et ce, malgré la superposition de groupes de couleurs. Nous avons utilisé un modèle d'espérance-maximisation – mélange de gaussiennes (*Expectation Maximization-Gaussian Mixture Model* ou EM-GMM), une méthode de regroupement souple, pour résoudre le problème des étiquetages erronés. L'algorithme EM capture la variance des données et donne le meilleur nombre de groupes de couleur ainsi que la valeur moyenne de chaque groupe. Basé sur les résultats du modèle EM, le modèle GMM peut ensuite adapter un mélange de modèles gaussiens aux données et accorder une note d'appartenance à chaque donnée dans chaque groupe de couleur. Les images finales segmentées et les cartes minéralogiques correspondantes montrent un meilleur étiquetage des pixels.

Vers un nouveau modèle d'exploration sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James : les granitoïdes aurifères

Morgane Gigoux (CONSOREM)

Ce projet est né de l'intérêt croissant des industriels à comprendre la récente découverte de minéralisations aurifères dans le pluton de Cheechoo. Située à proximité du contact entre la Sous-province d'Opinaca et la Sous-province de La Grande, à moins de 15 km au sud de la mine Éléonore, cette intrusion datée à 2612 Ma présente un fort potentiel aurifère d'après les récents sondages de la compagnie minière Ressources Sirios. Le projet vise à définir les caractéristiques des granitoïdes aurifères et les contextes favorables à leur présence sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James. Au vu du contexte particulier de la tonalite aurifère de Cheechoo, l'unique intrusion tonalitique d'origine très tardive actuellement connue dans la région, nous avons déterminé sa signature géochimique avant de la comparer avec d'autres granitoïdes (diorite, tonalite, granodiorite et granite) d'âge similaire issus de la base de données lithogéochimiques du SIGÉOM.

Sur la base des analyses de roches totales en éléments majeurs, les pressions de cristallisation de différents types de granitoïdes ont pu être déterminées à partir des équations de Yang. La méthode a été vérifiée sur certains plutons de différentes natures en Abitibi. Les pressions ont été calculées à partir des concentrations en éléments majeurs modélisées d'après la méthode des précurseurs modélisés sous Lithomodeleur. Du point de vue de l'exploration minière, l'intérêt d'identifier les basses pressions de cristallisation est qu'elles peuvent indiquer la mise en place de système porphyrique à faible profondeur (< 8 km).

À l'aide des bilans de masses calculés et des minéraux normatifs caractéristiques à Cheechoo, des granitoïdes (SIGÉOM) ont pu être ciblés et considérés comme ayant une signature géochimique comparable. Ce guide d'exploration des granitoïdes permet de faire ressortir quatre secteurs d'intérêt sur le territoire d'Eeyou Istchee Baie-James. À la suite de ces résultats, Ressources Sirios a fait l'acquisition de deux blocs de claims qui sont devenus les propriétés Amikap (169 claims, 87 km²) et Keoz (66 claims, 34 km²). La propriété Keoz, située dans le Complexe de Laguiche, est considérée de priorité 1 selon nos résultats.

Le secteur du Pluton de Chevrillon et celui de Kirkland Lake : deux zones analogues?

Julien Huguet, Lucie Mathieu et Paul Bédard (UQAC)

Le Pluton de Chevrillon (PdC) et ses trois intrusions satellites d'âge Néoarchéen se sont mis en place dans les roches sédimentaires de la Formation de Chebistuan, dans la partie nord-est de la Sous-province de l'Abitibi (région de Chibougamau). Ces roches sédimentaires, principalement des conglomérats polygéniques jointifs et des grès, affleurent exclusivement dans le Synclinal de Waconichi. La relation entre la déformation et le PdC et ses satellites n'est pas déterminée. Cette association spatiale et temporelle entre magmatisme tardif, conglomérats et failles est observée ailleurs dans la Sous-province de l'Abitibi, dans le secteur de Kirkland Lake, la différence étant que les intrusions de Kirkland Lake sont porteuses de minéralisations aurifères, alors qu'aucune minéralisation n'est connue à ce jour dans le secteur PdC.

Les objectifs de notre étude sont 1) d'établir une relation entre la déformation et le PdC et ses satellites et 2) de définir les caractéristiques géochimiques des intrusions, en vue de le comparer au secteur de Kirkland Lake. Les travaux de terrain et l'étude de la texture du quartz en lames minces ont été utilisés pour étudier la déformation. La caractérisation de l'altération a permis de déterminer si l'utilisation de diagrammes de classification des éléments mobiles est appropriée. Les résultats d'analyses géochimiques (éléments majeurs, éléments traces et terres rares) a pour but de comparer le PdC, le satellite nord (SN) et le satellite ouest (SO) avec les grandes familles de roches intrusives archéennes : la suite des tonalites-trondhjémite-granodiorites (TTG), les sanukitoïdes et les granitoïdes calco-alcalins riches en potassium (HKCA).

Les travaux de terrain et les observations microscopiques montrent que le PdC et ses satellites se sont mis en place pendant la période de déformation, même si les roches sont faiblement altérées. Ils sont constitués de granodiorites à phénocristaux de microcline. Le pourcentage de microcline est variable, passant de 2 % dans le SO à 20 % dans le PdC et le SN, indiquant que ces deux dernières intrusions appartiennent à la même lignée. Les trois intrusifs pourraient s'apparenter à des sanukitoïdes ou à des HKCA. Lorsque comparé au secteur de Kirkland Lake, même si la relation avec la déformation et la chimie des intrusifs sont similaires, aucune faille majeure subverticale n'est observée dans le secteur du PdC, ce qui s'expliquerait l'absence de minéralisation. [Contribution *Metal Earth* numéro MERC-ME-2019-199]

Géologie de la région du lac Sirmiq, Fosse de l'Ungava, Nunavik, Québec, Canada

Marc-Antoine Vanier et Isabelle Lafrance (MERN)

En 2017, le MERN a cartographié le secteur ouest de l'Arc de Narsajuaq. Cet ensemble géologique était alors reconnu comme un arc magmatique paléoprotérozoïque (1863 à 1800 Ma). Toutefois, les datations U-Pb sur zircons de cinq unités lithologiques (diorite à hypersthène, enderbite, gneiss tonalitique, monzogranite et opdalite) soulignent une dominance des roches archéennes, avec des âges de mise en place variant entre 2800 et 2550 Ma. L'Arc de Narsajuaq serait en fait composé de roches archéennes ayant subi un métamorphisme au faciès des granulites entre 1880 et 1806 Ma (Paléoprotérozoïque).

À l'été 2019, les travaux de cartographie à l'échelle de 1/100 000 se sont poursuivis dans la région du lac Sirmiq. En plus des unités de l'Arc de Narsajuaq, la région comprend aussi du gabbro, des roches métasédimentaires migmatisées, des gneiss granulitiques, de la tonalite, de la monzonite quartzifère et de la syénite.

Le potentiel de minéralisation dans le secteur d'étude est très varié. Les lambeaux allongés de roches ultramafiques au sein de diverses unités lithologiques renferment un potentiel en Ni-Cu-EGP. Ces lambeaux contiennent jusqu'à 12 % de sulfures disséminés et en amas, notamment de la pyrrhotite et de la chalcopryrite. Des zones d'altérations hydrothermales continues le long de corridors E-W ont aussi été observés, les principaux faciès étant : 1) magnétite (30 à 65 %) + clinopyroxène ± grenat ± graphite ± sulfures; 2) feldspath potassique + biotite + quartz + magnétite; 3) grenatite à quartz + plagioclase + biotite ± chalcopryrite ± malachite ± azurite. Ces faciès sont interprétés comme étant le produit de l'évolution d'un système à magnétite-apatite (IOA) ou à oxydes de fer cuivre-or (IOCG), où les faciès correspondent respectivement à une phase précoce d'albitisation sur laquelle s'est superposé un enrichissement de haute température en Fe-Ca et en K-Fe, puis une altération de basse température en Ca-Mg. Ces altérations sont aussi associées spatialement à des anomalies géochimiques régionales en or et en cuivre (sédiments de fond de lac). La formation des gîtes IOA ou IOCG est liée aux arcs magmatiques de rift intracratonique ou aux arcs continentaux en régime compressif, deux environnements géodynamiques possibles dans le Narsajuaq.

Valorisation d'un sous-produit issu de l'extraction du lithium pour la synthèse de zéolites

Fatima Ibsaïn, Justine Dionne, Geneviève Rioux, Kristin Mueller, Lan Huong Tran (INRS-ETE), Lucie Coudert (UQAM) et Jean-François Blais (INRS-ETE)

L'extraction du lithium à partir du concentré de spodumène par Nemaska Lithium (NMX) génère un sous-produit riche en silicium et en aluminium (aluminosilicates). Une caractérisation minéralogique et physicochimique exhaustive des aluminosilicates produits par NMX a permis de déterminer des axes potentiels de recherche pour la valorisation de ces sous-produits, y compris la synthèse de zéolites. Leurs structures microporeuses ainsi que la présence de canaux, de cavités de dimensions moléculaires et de cages confèrent aux zéolites des propriétés intéressantes, permettant d'envisager de nombreuses applications dans l'industrie (catalyse, adsorption, échange ionique).

Les principaux objectifs de ce projet de recherche sont de synthétiser des zéolites de types A, X et Y à partir des aluminosilicates produits par NMX, d'optimiser leurs conditions de synthèse et d'évaluer leur potentiel pour le traitement d'effluents liquides et gazeux. D'après les résultats de caractérisation des aluminosilicates, le rapport molaire Si/Al est de l'ordre de 2,5; il se rapproche du rapport des trois types de zéolites (entre 1,0 et 1,5 pour les zéolites de type A et X et entre 1,5 et 3,8 pour les zéolites de type Y). Les zéolites de type A et X, les plus commercialisées, sont d'une grande importance dans l'industrie, car elles ont une capacité d'échange ionique très élevée, tandis que les zéolites de type Y, moins répandues, sont majoritairement utilisées dans les processus de catalyse. L'optimisation des conditions de synthèse de ces différents types de zéolites a considéré plusieurs facteurs : le rapport Si/Al, le pH, la nature des réactifs et leur concentration, la température et le temps de cristallisation, etc. Les zéolites produites seront testées afin d'évaluer leurs capacités à diminuer la dureté de l'eau par adsorption des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ainsi qu'à traiter des eaux usées (par exemple, enlèvement des ions NH_4^+) ou des effluents miniers contaminés (par exemple, enlèvement des métaux et des métalloïdes dans le drainage minier ou de NH_4^+ dans les eaux d'exhaure). L'élimination de H_2S dans des effluents gazeux et la séparation des gaz seront également étudiées comme voie de valorisation des zéolites produites.

Caractérisation géochimique de pyrites nodulaires de niveaux d'argilites graphiteuses dans la région de Timmins, nord-est de l'Ontario

Jean-Luc Pilote (CGC-Q), Simon Jackson (CGC-O), Patrick Mercier-Langevin, Benoît Dubé (CGC-Q), Christopher Lawley, Duane Petts (CGC-O), Ed van Hees (OGS) et Dave Rhys (Panterra Geoservices)

La dévolatilisation métamorphique des roches crustales et/ou supracrustales comme source potentielle de fluides hydrothermaux aurifères fait largement consensus dans le cas des gîtes d'or de type orogénique. Cette interprétation implique une contribution aurifère potentielle d'une variété de lithologies, telles que les argilites graphiteuses, y compris celles contenant des sulfures de fer diagénétiques (pyrite), avec des teneurs en or anormales (100 ppb ou plus). Au cours des dernières années, des teneurs en or significatives (allant jusqu'à 10 ppm Au) ont été obtenues dans des nodules de pyrite formés dans des roches métasédimentaires archéennes du corridor aurifère de Timmins-Matheson, ce qui soulève des questions quant au moment et aux processus responsables de cet enrichissement. Les nodules de pyrite se forment dans des assemblages lithologiques volcaniques (Deloro, Stoughton-Roquemaure, Kidd-Munro, Tisdale et Blake River) et sédimentaires (Porcupine). Des lits conglomératiques contenant des nodules de pyrite détritiques sont présents par endroits (Timiskaming). Les nodules sont généralement arrondis à ellipsoïdaux, concentriques, d'une taille allant de quelques millimètres à quelques centimètres et composés de deux parties : un noyau caractérisé par des grains allotriomorphes et équidimensionnels et une couronne formée de grains de pyrite tabulaires ou aciculaires. Non seulement ces deux parties se distinguent par leur texture, mais ont des signatures chimiques et des teneurs en or distinctes. Le noyau est enrichi en or par rapport à sa couronne (moyenne de 0,889 ppm Au et de 0,163 ppm Au respectivement, $n=365$). Cette diminution des teneurs en or vers l'extérieur pourrait être liée à une baisse du niveau de sursaturation des principaux agents formateurs de la pyrite (une réduction de la disponibilité en S et en Fe, par exemple). En ce qui concerne la variabilité des teneurs entre les assemblages, les résultats préliminaires indiquent que l'un des facteurs de contrôle dans la région de Timmins-Matheson est la disponibilité en or dans les sédiments, qui serait à son tour contrôlée par les différentes sources. Les travaux en cours visent à faire la lumière sur les processus métallogéniques impliqués dans un tel enrichissement et les impacts pour l'exploration.

Élaboration d'une stratégie de gestion de l'énergie tenant compte de la dégradation et de la gestion thermique d'un système de piles à combustible

Mohsen Kandidayeni, Loïc Boulon et Sousso Kelouwani (UQTR)

L'efficacité énergétique d'un assemblage de piles à combustible (PC) est affectée par de nombreux facteurs comme la dégradation et les conditions d'opération variables, et ces effets sont encore plus évidents dans des pays au climat froid comme le Canada. Toutefois, la plupart des stratégies de gestion de l'énergie (SGE) existantes pour les véhicules électriques hybrides munis de piles à combustibles (VEHPC) sont basées sur des modèles constants quasi-statiques, qui ne sont valides qu'à l'intérieur d'un régime opérationnel restreint. De plus, les stratégies disponibles ne déterminent que la puissance électrique/le courant de référence produit par l'assemblage de PC, mais la PC est un système dont l'efficacité et le rendement énergétique sont affectés par plusieurs paramètres comme le courant, la température, la pression, etc. À cet effet, notre étude se penche sur l'impact de deux aspects importants - le phénomène de dégradation des PC et la gestion thermique - sur le rendement d'une SGE dans un VEHPC. Pour ce faire, un modèle de véhicule est d'abord élaboré dans un environnement simulé pour un VEHPC à basse vitesse, composé d'un assemblage de PC et d'un accumulateur. Par la suite, la programmation dynamique (PD) déterministe est utilisée pour formuler une SGE optimale afin de minimiser la consommation d'hydrogène tout en respectant les contraintes opérationnelles des sources d'énergie. La performance est évaluée dans deux scénarios distincts. Le premier scénario clarifie l'effet de la dégradation de l'assemblage de PC sur la performance du véhicule. À cet effet, la PD détermine le courant que doit produire l'assemblage de PC pour deux PC montrant différents degrés de dégradation, alors que le système est à l'état de charge (EC) de la batterie. Le deuxième scénario évalue comment la gestion thermique peut contribuer à améliorer la performance. À cet effet, une PD avec deux variables de contrôle (le courant de la PC et le cycle de service du ventilateur de refroidissement) et deux états (EC de la batterie et température de l'assemblage de PC) est développée et comparée avec chacun des deux cas considérés dans le premier scénario. Les résultats de cette étude indiquent qu'un assemblage de PC dégradées peut détériorer la performance d'une SGE de jusqu'à 13 %. De plus, l'intégration d'un contrôle de température dans la SGE permet de réduire la consommation d'hydrogène de 2,4 %.

Synthèse d'observations le long du transect Manicouagan-Fermont : évolution tectono-métamorphique du centre de la Province de Grenville.

Charles Kavanagh-Lepage, Félix Gervais (Polytechnique Montréal) et Abdelali Moukhsil (MERN)

L'étude des orogènes larges et chauds (LHO) a mené à l'élaboration de plusieurs modèles tectoniques expliquant leur évolution. Les processus orogéniques d'exhumation sont au cœur des études tectoniques et opposent des modèles de fluage, de prismes orogéniques et d'effondrement gravitaire. La Province de Grenville serait le résultat d'un LHO et est une candidate idéale pour l'étude des processus tectoniques anciens. L'étude de ces processus s'avère importante pour comprendre la déformation multiphasée d'un gisement de fer ou encore élaborer des vecteurs d'exploration de métaux stratégiques ou de terres rares.

La région de Manicouagan dans le centre de la Province de Grenville a été choisie pour étudier ces processus d'exhumation. Plusieurs modèles tectoniques ont été proposés dans ce secteur : fluage chenalisé d'âge du Rigolet, extrusion ductile de la Zone imbriquée de Manicouagan (ZIM) et du Domaine de Shabogamo (DS) à un stade tardif de l'Ottawan, modèle de prisme orogénique et effondrement gravitaire associé à une déformation en transtension. Un transect partant du réservoir Manicouagan jusqu'à Fermont, a recoupé tous les niveaux structuraux des ceintures allochtone et parautochtone impliquées dans ces modèles.

Nous présentons trois secteurs en détail, reflétant les résultats de la campagne de terrain de l'été 2019. D'abord le Domaine de Shabogamo, défini antérieurement par une étude géophysique, correspond à une nappe d'orthogneiss fortement métamorphisé probablement d'origine allochtone et semble se rattacher au Terrane de Molson Lake à l'est du Petit lac Manicouagan. La Zone de charriage de l'Allochtone (ABT) sépare le Terrane de Gagnon et la ZIM près de l'ancienne ville de Gagnon. Le mouvement à cet endroit est normal, abaissant la ZIM vers le nord-ouest. De nombreuses textures de décompression indiquent que le mouvement de l'ABT serait lié à l'exhumation du Terrane de Gagnon. Au troisième site, à la jonction de la rivière Hart-Jaune et de la route 389, l'ABT est recoupée par la Zone de cisaillement de Hart-Jaune. Les unités intensément métamorphisées de la ZIM montrent un mouvement subhorizontal vers le nord-ouest alors qu'en s'approchant de la rivière, les mêmes unités présentent un mouvement oblique-normal vers le sud-est, associé à une forte linéation d'étirement. Cette zone de cisaillement semble définir la base du Granite de Hart-Jaune.

Ces données de terrains seront combinées à une étude pétrochronologique de pointe et intégrées aux données pression-température-temps-déformation existantes afin d'élaborer un modèle tectonique complet de l'Orogénie grenvillienne.

Metal Earth à Chibougamau – le Complexe d'Eau Jaune : lien entre déformation, métamorphisme et minéralisations

Marie Kieffer, Lucie Mathieu et Damien Gaboury (UQAC)

Le Complexe d'Eau Jaune (CEJ) est l'une des plus importantes intrusions polyphasées du transect *Metal Earth* dans la région de Chibougamau. Cette étude a pour objectif de déterminer la pétrogenèse, la géométrie, la formation et la profondeur de mise en place du CEJ.

Les observations de terrain, les observations pétrographiques en lames minces et les analyses lithogéochimiques montrent que le CEJ s'est mis en place dans la Formation d'Obatogamau, dont des enclaves sont trouvées dans chacune de ses phases. Le CEJ est constitué de six phases intrusives majeures appartenant à la série des tonalites-trondhjémites-granodiorites (TTG). De la plus jeune à la plus tardive, ces phases sont : 1) la diorite 1 caractérisée par un patron d'éléments de terres rares (ETR) peu fractionné; 2) la diorite 2, qui est un produit de la différenciation de la diorite 1; 3) les tonalites 1 et 2; 4) les phases centrales 1 et 2. La tonalite 1 possède un patron d'ETR fractionné avec une anomalie positive en Eu et un enrichissement en Lu. Elle est moins enrichie en ETR et plus riche en SiO₂ que la tonalite 2. Celle-ci présente une anomalie négative en Eu et un appauvrissement en Lu. La phase centrale 1 est issue d'une source mafique (amphibolite à grenat), tandis que la phase centrale 2 provient d'une source mantellique. Les calculs de géo-thermobarométrie sur les amphiboles montrent que ces phases se sont mises en place à un niveau crustal profond, au faciès des amphibolites (3,5 à 6 kbar et environ 800 °C). Des conditions de 2,5 kbar et 750 °C sont obtenues pour la diorite 2, d'où l'hypothèse que les phases centrales 1 et 2 seraient remontées dans les phases tonalitiques et dioritiques le long de failles. L'étude structurale détaillée montre que le complexe est très peu déformé et a subi au moins deux phases de déformation (foliations N-S, puis E-W). La partie est du CEJ est traversée par un couloir de déformation ductile orienté 110° à 130°. Une circulation de fluides hydrothermaux tardifs rétrogrades (compatibles avec des conditions de type schistes verts) est observée dans ce corridor. Les minéralisations en molybdène de l'indice Moly-Desgagné sont associées à cet épisode tardif par rapport au métamorphisme et à la déformation. La nature du CEJ, sa profondeur de mise en place et les minéralisations rétrogrades sont atypiques dans le secteur de Chibougamau. [Contribution *Metal Earth* numéro ME-2019-198]

Détecter les fluides d'origine magmatique à partir de la chimie de la pyrite : exemple de la région de Chibougamau, Sous-province de l'Abitibi, Québec

Lucie Mathieu, Pierre Bedeaux, Adrien Boucher, Youssouf Ahmadou Youssoufou, Marie Keiffer, Julien Huguét, Baptiste Madon, Patrik Berthoty, Alexandre Crépon, Réal Daigneault, Damien Gaboury et Paul Bédard (UQAC)

Le projet *Metal Earth*, piloté par l'Université Laurentienne, est financé à hauteur de 104 millions de dollars principalement par les Fonds Apogée du Canada. Il s'agit d'un programme impliquant de nombreux chercheurs, qui améliorera notre compréhension des gisements aurifères et facilitera leur exploration. Le volet « Chibougamau » du projet *Metal Earth* est piloté par l'UQAC depuis juillet 2017 et comprend des recherches sur les processus magmatiques hydrothermaux, sur la pétrogenèse des magmas, sur la stratigraphie et la structure de la région et sur la minéralogie (pyrite, zircon, amphibole, apatite) de différents systèmes.

Cette étude vise à détecter la présence de fluides d'origine magmatique dans les systèmes minéralisés à partir de la chimie de la pyrite. La présence de fluides magmatiques dans les systèmes aurifères archéens est intensément débattue. Nous avons comparé la chimie de pyrites associées à des systèmes à Cu-Au de type porphyrique de la région de Chibougamau à la chimie de pyrites du « *background* » (pyrites provenant de secteurs faiblement minéralisés de la même région). À partir d'une étude pétrographique détaillée et d'analyses par LA-ICP-MS (ablation laser) au LabMaTer de l'UQAC, cette étude met en lumière le mode de distribution des éléments en traces dans les pyrites et montre que seuls le Te et le Bi indiquent de la présence de fluides d'origine magmatique dans la région de Chibougamau. Le Te est soit structuralement lié à la pyrite, soit présent sous la forme de micro-inclusions, alors que la distribution du Bi est contrôlée par des inclusions de galène et de chalcopyrite. La chimie de la pyrite peut être interprétée à partir de son contenu en Te (ppm) et des rapports Bi/Pb et Bi/Cu. En plus d'améliorer notre compréhension des systèmes magmatiques hydrothermaux à Cu-Au de la région de Chibougamau, cette étude a démontré que la pyrite peut être utilisée comme un indicateur de la présence de fluides d'origine magmatique dans d'autres systèmes minéralisés. [Contribution Metal Earth numéro MERC-ME-2019-200]

Caractérisation hydrogéologique d'un parc à résidus miniers en Abitibi-Témiscamingue, Québec

Marika Labbé (UL)

La protection de l'eau souterraine est un sujet de plus en plus important dans les études environnementales des projets miniers. Par souci de minimiser leur empreinte sur le territoire, les compagnies minières cherchent à affiner leurs connaissances sur l'écoulement de l'eau souterraine des sites d'exploitation. Le projet de recherche qui fera l'objet d'une maîtrise réalisé en partenariat avec Mines Agnico Eagle et étudiera le comportement de l'eau souterraine d'un site minier qui dispose d'un parc à résidus. L'objectif est de développer un modèle conceptuel et un modèle numérique de l'écoulement de l'eau souterraine qui permettront de bien gérer des résidus miniers et de minimiser les risques environnementaux dans le futur.

Une grande quantité d'informations (géométrie du site, composition physique et minéralogique des résidus miniers, géologie, réseau hydrique et hydrogéologie de la région) ainsi que les données météorologiques des dernières années sont disponibles et seront compilées dans une base de données. Les travaux de terrains comprennent l'installation de treize pointes filtrantes dans les résidus et dépôts meubles et le creusage d'un puits d'observation dans le roc. Chaque site d'échantillonnage sera muni de sondes afin de mesurer la variation du niveau d'eau en permanence pour la durée du projet. Il sera également possible d'y effectuer divers essais de pompage et d'essais *in situ* en vue de caractériser les dépôts. Ces informations sont nécessaires au développement du modèle conceptuel du site. Le traitement des données obtenues des pointes filtrantes dans les logiciels SEEP/W et FLONET générera plusieurs coupes en 2D du régime d'écoulement à l'intérieur du parc à résidus. Par la suite, un modèle numérique en 3D sera élaboré avec FEFLOW pour appuyer le modèle conceptuel. Les résultats des modèles numériques pourront être utilisés à titre d'outils de gestion, en plus d'identifier les principaux éléments à suivre dans le temps afin de préserver l'intégrité des ressources en eau souterraine.

Améliorer le pouvoir biofertilisant de la symbiose actinorhizienne par l'étude de la composition du microbiome nodulaire

Sophie Lalonde et Sébastien Roy (SÈVE, UdeS)

Notre laboratoire de recherche se penche sur la symbiose entre l'actinobactérie fixatrice d'azote *Frankia* et les plantes actinorhiziennes. Cette association plante-microorganisme est reconnue pour favoriser l'établissement de végétaux sur des sols pauvres et dégradés par le biais de l'action de structures spécialisées appelées nodules. Ces plantes symbiotiques peuvent être d'un grand intérêt pour la remise en état et la revégétalisation des sites miniers. Pour améliorer la croissance végétale, nous nous sommes intéressés aux bactéries qui vivent dans les nodules racinaires de ces plantes et qui ont des effets bénéfiques sur leur croissance. Nous avons ciblé les bactéries appartenant au genre *Micromonospora*, lesquelles sont reconnues pour leur rôle dans la croissance végétale.

Sur un site minier aurifère dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, nous avons procédé à l'échantillonnage de nodules et de rhizosphères (portion de sol près des racines) des espèces végétales suivantes : l'aulne crispé, l'aulne rugueux, l'argousier, le chalef à feuilles étroites ainsi que la shepherdie du Canada. Nos travaux permettront d'identifier par une approche de métagénomique ciblée les communautés bactériennes retrouvées au niveau des nodules actinorhiziens et des rhizosphères qui leur sont associées. Nous présentons ici les résultats d'isolement de bactéries intranodulaires, principalement les *Micromonospora*, et décrivons la phylogénie des souches de même que leur prévalence par espèce végétale étudiée. Ces connaissances pourraient servir à développer des inoculants biosourcés pour améliorer la survie et le rendement des semis boréaux employés en restauration minière.

Géologie des dépôts de surface de la région de la rivière Eastmain supérieure (SNRC 23D05, 23D06, 23D11, 23D12, 33A08 à 33A10)

Olivier Lamarche et Simon Hébert (MERN)

À l'été 2018, le Bureau de la connaissance géoscientifique du Québec a entrepris des travaux d'échantillonnage de sédiments d'origine glaciaire (till) et fluvioglaciaire (esker) et de cartographie des formations de surface à l'échelle de 1/50 000 dans la région de la rivière Eastmain supérieure (feuilles SNRC 23D05, 23D06, 23D11, 23D12, 33A08 à 33A10). La région présente un fort potentiel kimberlitique ainsi qu'un fort potentiel pour l'or et les métaux usuels (Au, Cu, Pb, Ni, Zn) dans la ceinture de roches vertes de la Haute-Eastmain (CRVHE).

Au cours de la campagne de terrain 2018, 164 échantillons de till de 10 kg et 31 échantillons fluvioglaciaires de 15 kg ont été prélevés. Les échantillons fluvioglaciaires ont été tamisés sur le terrain pour récupérer et analyser la fraction inférieure à 8 mm. Les résultats des analyses géochimiques et des analyses sur les concentrés de minéraux lourds des sédiments glaciaires et fluvioglaciaires seront traités ultérieurement.

Les dépôts de surface sont principalement des tills qui forment des traînées morainiques fuselées et des moraines de Rogen. Lors de la déglaciation, ces dépôts ont été recouverts par des sédiments sableux d'origine fluvioglaciaire associés à des environnements de contact de glace et d'épandage proglaciaire. Des segments de moraines frontales permettent l'interprétation de la position de la marge glaciaire dans le secteur. La mise en place de sédiments d'épandage en milieu principalement subaérien a entraîné le comblement des vallées. Les eaux de fonte ont formé des réseaux de chenaux, lesquels abondent dans la zone cartographiée, formant par endroits des secteurs de till fortement délavé. Depuis l'Holocène, des alluvions se sont développées, principalement dans la vallée de la rivière Eastmain, formant de grandes plaines alluviales. Finalement, des sédiments organiques se sont accumulés dans les secteurs mal drainés et sont à l'origine des tourbières réticulées.

La recherche de la source d'une anomalie minérale par prospection glacio-sédimentaire nécessite une bonne connaissance de l'histoire glaciaire de la région. Pour caractériser l'impact de l'évolution des dômes de dispersion de l'Inlandsis laurentidien sur la région, un levé systématique des marques d'érosion glaciaire a été effectué. La séquence des écoulements glaciaires résultante montre une succession de différents mouvements qui permet de préciser le cadre chronologique glaciaire de la région au nord des monts Otish.

Élaboration et ingénierie d'un procédé circulaire et évaluation technico-économique d'un centre régional de traitement avancé de biomasse

Pierre-Olivier Lemire, Simon Barnabé
et François Labelle (UQTR)

L'objectif de recherche consiste à proposer un concept et réaliser l'ingénierie d'un procédé circulaire local pour un centre de traitement avancé de biomasse, incluant une évaluation technico-économique appliquée à une étude de cas dans le sud du Québec. Les objectifs spécifiques sont : (1) élaborer un schéma conceptuel de procédé circulaire local pour un centre de traitement de multiples flux de biomasse opérant en symbiose avec une porcherie et un digesteur anaérobie; (2) en adoptant une approche d'écologie industrielle, déterminer les spécifications techniques avec les hypothèses opérationnelles du centre de biomasse et sa chaîne d'approvisionnement décentralisée, afin d'évaluer la performance technique et environnementale; (3) déterminer l'investissement en capital requis, les coûts d'exploitation et les revenus du modèle agro-commercial afin d'évaluer le rendement économique et la sensibilité, et discuter et analyser l'efficacité, les retombées et les opportunités liées au nouveau modèle agro-commercial. Le rôle du centre de biomasse et de sa chaîne d'approvisionnement est de recueillir, transporter, entreposer, prétraiter et convertir la biomasse en produits primaires, intermédiaires et en produits finis. Le centre convertit les résidus organiques, soit les tiges de maïs et les résidus organiques urbains, en sucre de 2^e génération, en biométhane et en coproduits. Le centre traite les résidus agricoles pour produire du glucose, qui peut ensuite être converti en molécules à valeur ajoutée dans une bioraffinerie, qui est le client d'affaires du centre de biomasse. L'ingénierie du centre modélisé fonctionne en symbiose avec une porcherie et un digesteur anaérobie. Ainsi, les coproduits de la déconstruction des tiges de maïs peuvent être utilisés directement sur place comme nourriture pour les animaux et comme bioénergie ne nécessitant aucun transport. Le digesteur anaérobie traite le lisier de porc sur place comme substrat de fermentation, agrémenté de résidus organiques urbains de source locale comme cosubstrat. Le biogaz est valorisé, comprimé et distribué sous la forme de bioGNC (gaz naturel comprimé) pour alimenter les opérations de transport du centre et autres usages de transport local. Ainsi, les activités de transport du centre sont basées sur un approvisionnement efficient, autonome et peu coûteux de biocarburant. Le modèle tient compte des aspects techniques et économiques, du rendement du procédé, et des émissions de GES. La contribution de cette recherche est de mettre en lumière les retombées durables liées à une approche d'écologie industrielle, principalement par la gestion efficiente de coproduits. Le sucre de haute pureté est vendu comme produit principal, mais pour rendre le procédé plus rentable, les coproduits peuvent être valorisés sur place sous forme d'aliments pour animaux et de bioénergie. L'évaluation technico-économique estime le rendement économique du centre en se basant d'abord sur le prix de vente minimum du sucre, de façon à comparer le rendement du centre avec le marché actuel du sucre. Une analyse de sensibilité a aussi été réalisée, ainsi qu'une estimation des émissions de GES.

Performance des matériaux alcalins pour prévenir la génération d'acidité et la mobilisation des métaux retenus par un nouveau biofiltre semi-passif sulfato-réducteur utilisé pour le traitement du drainage minier acide

Khalifa Lounate, Thomas Genty, Lucie Coudert,
Robin Potvin, Tran Lang Huong, Guy Mercier
et Jean-François Blais (INRS-CTRI-Englobe)

L'industrie minière utilise des méthodes de traitement « actives » pour le traitement du drainage minier acide (DMA). Ces méthodes présentent certains inconvénients et sont proscrites pour les sites miniers fermés et/ou abandonnés. Durant ces dernières années, plusieurs méthodes de traitement « passives » plus respectueuses de l'environnement et tout autant efficaces ont été développées. Parmi ces méthodes, les biofiltres passifs sulfato-réducteurs. Ces derniers utilisent des matériaux naturels disponibles localement et non valorisés pour le traitement des DMA. Des travaux récents ont remis en question la performance de ces biofiltres en présence de DMA fortement enrichi en fer (risque de colmatage). Comme solution, un biofiltre semi-passif (BSPBR), constitué de 60 % de copeaux grossiers, de 20 % de fumier et de 20 % de calcite, a été testé (avec ajout de lactate) pour traiter un DMA fortement contaminé en métaux. Le suivi physicochimique et microbiologique des effluents à la sortie du BSPBR a montré une meilleure capacité de traitement à moyen terme et aucun problème de relargage et/ou de colmatage n'a été mis en évidence pour traiter un DMA fortement contaminé.

Un autre problème relativement récent concerne la gestion de ces BSPBR après utilisation et leur stabilité à long terme. De nombreux travaux exposent la complexité associée à la gestion des mélanges réactifs chargés en métaux après leur démantèlement. Dans le cadre de notre recherche, nous avons examiné des approches de stabilisation des BSPSR (après utilisation) à partir de la valorisation de résidus alcalins. Des essais cinétiques en colonnes ont été réalisés en laboratoire sur le BSPSR après utilisation. Ces essais ont été réalisés sans et avec résidus alcalins (cendres de cogénération, boues rouges, poussières de four à chaux et hydroxyapatite) pour étudier leur stabilité des BSPSR après utilisation à long terme. Différentes configurations de stockage ont aussi été testées lors des essais en colonnes. Les résultats ont montré que les BSPSR après utilisation sont classifiés comme étant à risque élevé ou dangereux et qu'ils sont générateurs d'acidité. Seuls l'ajout de boues rouges et/ou leur stockage en conditions saturées semblent permettre d'améliorer leur stabilité à long terme.

Simulations géostatistiques de ressources minérales en éléments de terres rares

Michael Raymond (UL), Marcel Laflamme (InnovExplo, UL), et Marc Constantin (UL)

Les ressources minérales de nombreux projets miniers sont estimées à l'aide de méthodes géostatistiques classiques tel le krigeage. Ces méthodes ne permettent pas de quantifier et d'évaluer l'incertitude des ressources estimées. Ce projet de recherche vise à quantifier et à évaluer l'incertitude liée à l'estimation de ressources minérales à l'aide de simulations géostatistiques. Le cas étudié est un gisement comprenant trois zones minéralisées en éléments de terres rares (ETR), soit 14 lanthanides (lanthane à lutécium, excluant le prométhium) et l'yttrium.

Chacune des trois zones minéralisées en ETR, définies par leur lithologie distincte, a fait l'objet de 100 simulations gaussiennes séquentielles. La méthode utilisée comprend les étapes suivantes :

1. Normalisation des données;
2. Décorrélation des données à l'aide de la méthode MAF (*Minimum/Maximum autocorrelation factor*);
3. Simulations conditionnelles des facteurs MAF par simulations gaussiennes séquentielles;
4. Transformation inverse des facteurs MAF et dénormalisation;
5. Validations des simulations;
6. Évaluation des ressources minérales.

À ce jour, seuls les résultats des étapes 1 à 5 sont disponibles. Afin d'être considérées comme valides, les simulations doivent respecter trois critères. Elles doivent reproduire 1) les données d'origine à leur localisation, 2) la distribution des données d'origine et 3) leur relation de corrélation. Le premier critère a été évalué par la transformation inverse des facteurs MAF à leur espace d'origine. L'ensemble des points simulés reproduit les données d'origine à leur localisation. Le second critère est jugé respecté par la reproduction de la fonction de densité. Un faible lissage de la distribution est observé. Le troisième critère est également validé par la reproduction du semi-variogramme des données normalisées (originales et simulations).

Les résultats obtenus démontrent la validité des simulations réalisées. La prochaine étape sera de calculer les ressources minérales découlant des simulations géostatistiques.

Dispersion glaciaire distale des minéraux indicateurs en aval d'un gisement d'or : le cas d'Amaruq (Nunavut)

Alexandre Mendizabal, Georges Beaudoin (UL), Isabelle McMartin (CGC-O), Olivier Côté-Mantha et Marjorie Simard (Agnico Eagle)

L'exploration de l'or dans les régions arctiques et subarctiques est difficile en raison de l'importante couverture de sédiments glaciaires masquant le substrat rocheux. L'utilisation des minéraux indicateurs dans le till est une méthode reconnue dans ces régions au Canada.

Plusieurs campagnes d'échantillonnage des zones minéralisées et des sédiments glaciaires issus de la dernière glaciation ont été effectuées à proximité du gisement Amaruq, une minéralisation aurifère de type orogénique.

Cette étude a pour but d'évaluer la signature en minéraux indicateurs du gisement Amaruq dans les dépôts glaciaires jusqu'à 8 km en aval du gisement. Le till a été échantillonné le long de deux transects suivant la direction principale du transport glaciaire (NNW), puis les grains de trois minéraux indicateurs caractéristiques du gisement ont été comptés et classifiés : l'or, la scheelite et la tourmaline.

Les premiers résultats montrent la présence d'or, de scheelite et de tourmaline à 8 km en aval glaciaire du gisement. De plus, la proportion de grains d'or de forme intacte encore visible à 8 km est importante. Cette signature distale concorde avec la géochimie du till, quoique celle-ci est plus complexe due aux différentes lithologies, aux derniers événements glaciaires et aux processus de modification postglaciaires (par exemple le remaniement, la cryoturbation, etc.).

L'analyse complète des minéraux indicateurs dans le till et dans le gisement à la microsonde électronique puis au spectromètre de masse plasma à couplage inductif par ablation laser (LA-ICP-MS) va permettre de vérifier le signal géochimique de ces minéraux dans le train de dispersion en aval de la minéralisation.

L'étude combinée de la géologie du substrat rocheux, de l'histoire glaciaire, du nombre et de la composition de ces minéraux indicateurs aidera à mieux caractériser la signature du gisement Amaruq et, par conséquent, servira à l'exploration glaciocédimentaire à l'échelle régionale.

Estimation du flux thermique en surface et du gradient géothermique dans la communauté de Kuujuaq (Québec, Canada)

Mafalda M. Miranda, Jasmin Raymond (INRS-ETE, UL), Alcides J.S.C. Pereira (CITEUC) et Chrystel Dezayes (BRGM)

Les communautés isolées et hors réseau du Nord du Canada sont très dépendantes des carburants fossiles pour la génération d'électricité, le chauffage des bâtiments et l'eau chaude domestique. En cette ère de conscientisation environnementale de plus en plus forte et en vue d'assurer la sécurité énergétique et de réduire l'utilisation des carburants fossiles, la recherche de sources locales d'énergie écologique est d'intérêt fondamental. Parmi les options d'énergies renouvelables, les ressources géothermiques ont l'avantage d'offrir une génération d'énergie continue pour le chauffage et les besoins de base, peu importe les conditions météorologiques. Elles sont suffisamment versatiles pour contribuer de différentes façons importantes à résoudre les défis énergétiques d'une société sans carbone, même dans les régions les plus reculées.

L'énergie géothermique semble prometteuse pour les communautés hors réseau en raison du climat froid et des coûts énergétiques élevés. Les systèmes géothermiques peu profonds sont viables comme solutions à court terme, tandis que l'exploitation des ressources géothermiques profondes est un objectif à plus long terme. Toutefois, la profondeur et la température des ressources profondes sont les principaux obstacles qui nuisent à leur exploration. Le forage pour se rendre à la profondeur des ressources potentielles est coûteux et risqué, ainsi il est essentiel, dès les premières étapes du processus d'exploration géothermique, d'améliorer les connaissances du champ thermique en profondeur. Les estimations de ce paramètre sont contrôlées par le flux thermique, la conductivité thermique et la production de chaleur radiogénique des matériaux géologiques sous-jacents, et par la température en surface. Des analyses thermophysiques effectuées sur des échantillons de roches provenant de sources comparables aux réservoirs profonds révèlent des valeurs de conductivité thermique élevées ($2,3$ à $3,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et des valeurs de génération de chaleur interne faibles ($0,3$ à $1,0 \mu\text{W m}^{-3}$). Souvent, les estimations de la température en profondeur dans la croûte supposent un géotherme à l'état d'équilibre, toutefois les variations des températures en surface, influencées par le climat, perturbent cet état d'équilibre et doivent donc être prises en compte dans l'approche de modélisation. Des modèles transitoires 1D et 2D ont été construits à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics afin de calculer le flux thermique optimisé en surface et simuler la température actuelle en profondeur. La meilleure correspondance entre les valeurs simulées et les données calculées a été obtenue avec un flux thermique en surface de $40,7 \text{ mW m}^{-2}$. Ceci suggère donc une température d'environ 86°C à 5 km de profondeur. Un régime thermique semblable limite les applications géothermiques potentielles. En effet, pour atteindre une température minimale d'au moins 50°C , adéquate pour le chauffage des bâtiments, la profondeur minimale des puits devrait être de plus de 3 km . En poursuivant la modélisation numérique, il sera possible de déterminer si les systèmes géothermiques profonds pourraient convenir pour remplacer les carburants fossiles et assurer une plus grande sécurité énergétique pour les communautés situées au nord du 49° parallèle.

Géologie de la région de Normandin, Province de Grenville, région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, Québec, Canada

Abdelali Moukhsil et Mhamed El Bourki (MERN)

Une nouvelle carte au $1/50\,000$ de la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean (Roberval–Saint-Félicien–Normandin) a été produite à la suite du levé géologique réalisé durant l'été 2019. Les unités stratigraphiques d'âge mésoprotérozoïque ($0,99$ à $1,45 \text{ Ga}$) sont constituées de gros volume de suites intrusives felsiques, intermédiaires et mafiques à ultramafiques, de complexes métasédimentaires (paragneiss, paragneiss migmatitique, migmatite, marbre, roches calcosilicatées) et de métavolcanites. Une séquence de roches sédimentaires ordoviciennes, qui repose en discordance sur les roches mésoprotérozoïques, affleure sur la rive ouest du lac Saint-Jean.

Les roches mésoprotérozoïques déformées et plissées sont traversées par plusieurs failles (normales ou inverses) et des zones de cisaillement (décrochement senestre ou dextre). Le grain structural est surtout orienté N-S à NE-SW. Le métamorphisme régional prograde varie du faciès des granulites au faciès des amphibolites supérieur. Localement, un métamorphisme rétrograde est aussi reconnu.

Un système d'altération hydrothermale constitué de roches volcano-sédimentaires anormales en zinc s'étend plusieurs kilomètres dans le nord-ouest de la région. Ce système est constitué de plusieurs lithologies : paragneiss rouillé à graphite et à sillimanite, quartzite contenant des traces de graphite, grenatite, roches calcosilicatées, marbre, roche quartzofeldspathique enrichie en grenat et roches mafiques à grain fin (métavolcanites).

Il existe plusieurs zones favorables pour l'exploration de substances minérales dans la région, notamment pour les quatre types de gîtes suivants :

1. $\text{Zn} \pm \text{Cu} \pm \text{Ag}$ dans les roches métasédimentaires à graphite, à grenat et à sillimanite;
2. éléments de terres rares $\pm \text{Th} \pm \text{Nb} \pm \text{Ta}$ dans les dykes granitiques et dans les intrusions syénitiques et granitiques à feldspath alcalin;
3. $\text{P} \pm \text{Fe} \pm \text{Ti} \pm \text{V}$ dans les gabbro-norites;
4. $\text{Ni} \pm \text{Cu}$ dans les roches intrusives ultramafiques.

Optimisation d'un procédé de séquestration de CO₂ par différents types de scories d'aciéries

Nader Nmiri, Lan-Huong Tran, Louis-César Pasquier, Guy Mercier (INRS-ETE), Pedro Ramirez et Pascal Lemoine (CTTÉI)

Dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques, le Québec s'est engagé à réduire d'ici 2030 ses émissions de gaz à effet de serre de 37,5 % par rapport au niveau de 1990. Comme le secteur industriel est responsable de 30 % de ces émissions dans la province, plusieurs techniques pour le captage et le stockage du CO₂ industriel ont été proposées.

La carbonatation minérale est une technique prometteuse qui consiste à faire réagir le CO₂ avec des résidus industriels riches en cations divalents pour former des carbonates stables et inertes.

Les aciéries québécoises Arcelor Mittal Produits Longs Canada et Rio Tinto Fer et Titane émettent près de 1 Mt CO₂/an et génèrent conjointement environ 500 kt/an de scories pour lesquelles il y a peu de débouchés. Les recherches récentes réalisées par l'INRS et le CTTÉI ont montré que ces scories, riches en oxyde de calcium, ont la capacité de réagir avec le CO₂ à travers une réaction de carbonatation directe en voie aqueuse.

L'objectif de cette étude est d'optimiser un procédé de séquestration de CO₂ en utilisant les scories produites par ces deux entreprises. Ceci permettra non seulement de traiter leurs gaz industriels, mais aussi de trouver une voie de valorisation pour leurs sous-produits.

Plusieurs types de scories provenant des deux aciéries ont été étudiés. La composition de chaque type de scories a été établie. Après les essais préliminaires, un plan d'expérience Box-Behnken à trois facteurs a été utilisé pour optimiser la température de la réaction, sa durée et la quantité de CO₂ injectée. Le procédé a été appliqué à deux types de scories sélectionnées à partir des tests précédents. Les essais ont été réalisés avec un gaz dont la recette reconstituait les fumées des cheminées (contenu moyen de 10 % CO₂) afin de s'approcher au maximum des conditions industrielles.

Les rendements obtenus sont variés, allant jusqu'à 150 kg CO₂/t_{scories}. Les modèles établis montrent que la température joue un rôle crucial. Plus la température est élevée, plus la réaction de carbonatation est favorisée. Toutefois, pour des raisons d'efficacité énergétique, des températures plus modérées ont été adoptées.

Le procédé de séquestration de CO₂ génère des scories carbonatées qui peuvent être valorisées dans plusieurs domaines, comme en agriculture (amendement des sols) ou dans la fabrication de ciment Portland. Une étude énergétique et économique est en cours pour valider la rentabilité du procédé.

Caractérisation structurale de la Sous-Province de Nemiscau, Province du Supérieur, Canada : implications de la tectonique dans le développement des bassins sédimentaires archéens

Rocío Pedreira Pérez, Alain Tremblay (UQAM), Yannick Daoudene et Daniel Bandyayera (MERN)

La Sous-Province de Nemiscau est située dans la partie centrale de la Province du Supérieur, au Québec. Le Nemiscau est composé de roches sédimentaires variablement déformées et migmatisées et, en moindre proportion, de ceintures volcano-sédimentaires. Il est séparé des sous-provinces volcano-plutoniques avoisinantes de La Grande, au nord, et d'Opatika, au sud, par de grandes zones de cisaillement superposées aux ceintures volcano-sédimentaires de Colomb-Chaboulié et du lac des Montagnes.

Les récents travaux de cartographie dans la région ont permis de reconnaître jusqu'à cinq phases de déformation à l'échelle régionale. La déformation D₁ est observée au sein des roches gneissiques des sous-provinces avoisinantes et correspond à un événement préalable à l'Orogenèse kénoréenne. La déformation D₂ transpose les structures D₁ et est observée régionalement. L'orientation des fabriques D₂ varie d'E-W à NE-SW. La déformation D₃ est observée uniquement dans le secteur nord-est, où les roches métasédimentaires sont peu ou pas migmatisées; elle est orientée vers le NE-SW et superposée sur D₂, générant des motifs d'interférence de plis. La déformation D₄ est observée dans le secteur ouest, où les roches du Nemiscau ont été fortement migmatisées, atteignant le faciès des granulites. Cette déformation E-W recoupe les fabriques planaires préexistantes observées dans le secteur nord-est. Le dernier événement observé, D₅, correspond à des zones de cisaillement d'orientation NW-SE.

Le Nemiscau a souvent été perçu comme les vestiges d'un prisme d'accrétion ou d'un bassin d'arrière-arc. Cette étude structurale suggère une histoire métamorphique et structurale complexe. Le secteur nord-est semble former un vaste synforme délimité au nord et au sud par le Groupe du Lac des Montagnes. D'importantes masses de roches plutoniques gneissiques affleurent sous la forme de dômes structuraux. Le secteur ouest pourrait également représenter un synforme, d'après une signature géochimique similaire entre les groupes de Colomb-Chaboulié au sud et de Lac des Montagnes au nord. La nature des roches au faciès des granulites dans ce secteur reste cependant à être précisée, mais les principales hypothèses avancées incluent l'exhumation selon un modèle en dômes et bassins ou une extrusion latérale des roches de la croûte inférieure.

Analyse de l'écoulement des fluides associés à une minéralisation d'uranium dans le bassin d'Athabasca à l'aide de zircons détritiques.

Morgann G. Perrot, Joshua H.F.L. Davies (GEOTOP, UQAM), Jesse R. Reimink (Pennsylvania State University) et Patrick Ledru (Orano Canada)

Les roches des bassins sédimentaires clastiques sont constituées de minéraux détritiques et diagénétiques ainsi que de fluides qui ont catalysé la formation des minéraux diagénétiques et ont interagi physiquement et chimiquement avec les grains détritiques. Ces fluides peuvent avoir une origine marine ou météorique et sont présents lors de la formation du bassin et/ou ont migré à travers le bassin pendant des événements magmatiques ou tectoniques. Ces processus de migration sont à l'origine de la formation de gisements de minéraux ou d'hydrocarbures. Nous présentons les premiers résultats d'une étude visant à comprendre les relations chronologiques et génétiques entre la migration des fluides et la minéralisation. Notre étude se concentre sur la composition chimique et l'âge U-Pb de zircons d'un échantillon de grès prélevé au cœur du halo d'altération hydrothermale du gisement d'uranium (U) de Cigar Lake, dans le bassin d'Athabasca. Les images en cathodoluminescence (CL) des zircons détritiques indiquent que les fluides se sont infiltrés dans les fissures des grains et ont entraîné des processus de dissolution et de reprécipitation. Ces zones ont été analysées afin de quantifier leur teneur en éléments traces et en isotopes d'U-Pb. Les premiers résultats révèlent que deux fluides distincts ont affecté le gisement de Cigar Lake. L'un, enrichi en Zn-Ni-K-Al, est associé aux grains de zircon les moins altérés (concentrations faibles en Ca et en U). L'autre fluide, avec une teneur élevée en Mn-Fe-V-Ti-P-ETR, est associé aux grains les plus altérés (Ca et U plus élevés). Les âges $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ des zircons définissent une distribution d'âge bimodale représentant leur cristallisation. Ces grains ont subi par la suite d'importantes pertes en plomb en raison de l'altération par les fluides et de l'addition d'U. Nos données d'U-Pb et nos images en CL indiquent que la recristallisation et/ou la métamictisation des zircons ont eu lieu localement, usuellement le long de fractures, et sont associées à une augmentation des concentrations en éléments traces. D'autres analyses seront effectuées à une résolution spatiale plus fine, dans des roches moins altérées (avec une concentration en U plus faible) afin de déterminer la chronologie de l'écoulement des différents fluides.

Géologie de la région d'Amos, Sous-province de l'Abitibi, région de l'Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada

Pierre Pilote, Jonathan Marleau et Jean David (MERN)

Notre campagne de terrain 2019 a consisté en des travaux de cartographie et de compilation à l'échelle 1/20 000 du feuillet SNRC 32C012-200-0102. Située à environ 15 km au nord-est de la ville de Barraute, cette région est constituée principalement de roches volcano-plutoniques néoarchéennes :

1. Formations de Landrienne (basalte coussiné) et de Deguisier (andésite, dacite fragmentaire et localement rhyolite);
2. Groupes de Figuery (unités andésitiques, dacitiques et localement rhyolitiques), d'Amos (basalte coussiné et nombreux volumineux filons-couches gabbroïques/pyroxénitiques), du Lac Arthur (andésite et dacite) et de La Morandière (coulées basaltiques);
3. Volcanites mafiques associées pour l'instant à aucune formation ou groupe particulier, dans l'extrémité NE du secteur d'étude;
4. Roches intrusives (diorite, tonalite et Pluton de Laflamme, une intrusion monzonitique tarditectonique);
5. Dykes de diabase d'âge protérozoïque.

Le prolongement et l'épaisseur des unités volcaniques sont très variables. L'orientation générale des surfaces stratigraphiques fluctue également, passant de E-W à NW-SE, de la partie centrale de la carte vers son extrémité est en direction de Senneterre.

La schistosité régionale S_1 , modérément à intensément développée, est communément subparallèle à la stratification S_0 . Un clivage S_2 orienté E-W recoupe la fabrique S_1 , particulièrement aux endroits où S_0/S_1 sont d'orientation WNW-ESE. Les linéations d'éirement contenues dans la fabrique S_1 plongent de façon abrupte vers le NE. Le Synclinal de Duvernay, un pli P_1 d'orientation E-W, traverse la région.

Cette région se démarque par des failles longitudinales et des cisaillements d'envergure kilométrique, orientés E-W à WNW, à pendage abrupt vers le nord, qui bordent et délimitent communément les contacts entre les différents groupes et formations. Il s'agit des failles d'Abcourt, de Lyndhurst, de Beauchamp, de Lapaix et de Champneuf. Ces failles sont généralement subparallèles à la surface S_0 sur de longs segments, bien qu'elles tronquent la stratification en plusieurs endroits. La Faille de Castagnier, d'orientation NNW, est la plus tardive et entraîne de façon dextre l'ensemble du grain stratigraphique ainsi que toutes les failles E-W précédemment nommées. Un segment secondaire du bassin sédimentaire de Chicobi (hors carte), d'orientation NNW, apparaît délimité par la Faille de Castagnier. La Zone de chevauchement de Manneville, d'envergure régionale (d'une largeur N-S de 6 à 8 km), interprétée comme une vaste séquence plissée matérialisée par une série de plis synclinaux et anticlinaux orientés ESE-WNW déversés vers le sud, voit sa bordure nord se situer probablement à la Formation de Deguisier.

La région d'Amos présente des contextes géologiques favorables à la découverte de gîtes de sulfures volcanogènes, particulièrement dans la Formation de Deguisier, hôte de l'ancienne mine Barvue. Cette région renferme également un potentiel pour les minéralisations filoniennes aurifères, comme en témoignent le gîte Swanson (minéralisation dans des intrusions felsiques albitisées et hématisées) et plusieurs autres petits indices.

Metal Earth – Cartographie des variations isotopiques des fluides aurifères dans la Province du Supérieur

Benoît Quesnel, Christophe Scheffer, Georges Beaudoin, Crystal LaFlamme, Carl Guilmette, Christian Dupuis et Bertrand Rottier (UL)

Metal Earth est un programme de recherche ambitieux visant à améliorer notre compréhension de l'enrichissement en métaux de la croûte terrestre à l'Archéen. Notre étude porte sur la variabilité isotopique des fluides impliqués dans la formation des gisements aurifères de type orogénique à l'échelle de la Province du Supérieur. Deux ensembles de données géoréférencées ont été utilisés. Le premier comprend les données isotopiques (H, C et O) de 230 analyses de quartz, 70 de carbonates et 35 de phyllosilicates provenant de 240 échantillons de veines de minéralogie variée (principalement quartz, carbonate et tourmaline) prélevés le long de six transects. Ces échantillons sont situés dans différentes unités géologiques, au sein ou en dehors des zones de déformation majeures et des zones minéralisées. Le second ensemble est une compilation de 855 données isotopiques issues de la littérature (H, C, N, O, S et Si) de minéraux provenant de veines de type orogénique de la Province du Supérieur. Le but de ce projet est d'établir une relation entre les variations de la composition isotopique des fluides et différents paramètres (source, température, intensité des interactions fluide-roche, lithologie des roches altérées) ayant pu jouer un rôle sur la distribution de la minéralisation aurifère au sein de la Province du Supérieur.

Hydrogéochimie des eaux souterraines – Avènement d'un nouvel outil pour l'exploration profonde

Silvain Rafini (CONSOREM)

Cette affiche présente l'avancement du programme de recherche du CONSOREM consacré à l'hydrogéochimie souterraine appliquée à l'exploration minérale sur le territoire québécois. Les travaux conduits en 2016 et en 2017 sur deux gîtes de sulfures massifs (SM) zincifères profonds dans le camp de Matagami (Abitibi) sont présentés. La première campagne analysait une trentaine d'échantillons d'eau souterraine dans l'environnement des sulfures massifs de Phelps Dodge 1 (PD1) et confirmait l'existence d'une empreinte d'envergure kilométrique très prononcée à toutes les profondeurs. Une seconde campagne a été réalisée sur le site du gîte Daniel 25 (D25), recouvert d'une couverture sédimentaire épaisse de 60 à 100 m, voisin de PD1. Au total, 83 échantillons ont été prélevés jusqu'à 780 m de profondeur dans 31 forages différents. Un halo extrêmement enrichi en Zn y est détecté dont l'amplitude **s'accroît** de manière importante en profondeur avec un facteur d'enrichissement (FE) de 500 à 700 de 30 à 150 m. Ce comportement s'oppose à celui du Cu dont le FE au contact des sulfures massifs diminue avec la profondeur, suggérant une mobilité plus faible dans les saumures continentales (la chimie des éléments majeurs indique une maturation de type salinisation continentale, c.-à-d. une météorisation). Les éléments mineurs et en traces constituant l'empreinte de l'eau souterraine à D25 et à PD1 sont le Co, le Ni, l'Al, le (Ce) ainsi qu'à faible profondeur le Zr, l'U, l'Y, le (Mo) et à grande profondeur le Sb, le V, l'As, le (Sn), traduisant un fractionnement géochimique relié au processus de salinisation. Le Fe et le SO_4 sont enrichis à PD1 et non à D25, du fait d'un niveau de base très élevé à D25 (pyrite massive). La géométrie des fractures ouvertes du socle pour D25 a été caractérisée par l'analyse tridimensionnelle des profils statiques de température de l'eau en forage. Cette approche révèle une forte anisotropie de la conductivité hydraulique du roc fracturé, qui se reflète sur la géométrie du halo : retour au niveau de base >2000 m vers l'ouest, <600 m vers le Nord.

L'intérêt pour l'exploration s'illustre dans plusieurs forages proximaux aux gîtes, où **aucune anomalie n'est détectée** à l'analyse de la carotte **tandis que l'analyse de l'eau détecte très clairement un panache zincifère** indiquant la proximité d'un corps minéralisé.

Cette nouvelle méthode d'exploration a prouvé son efficacité dans le Bouclier canadien 1) pour la reconnaissance de nouvelles zones à l'échelle d'une propriété, 2) pour augmenter la « portée » des forages à tous les stades d'exploration, 3) pour l'exploration profonde.

Élaboration et développement de catalyseurs moléculaires à base de diaminotriazine pour la production d'hydrogène à partir de lumière

Sanil Rajak, Olivier Schott, Prabhjyot Kaur, Thierry Maris, Garry S. Hanan et Adam Duong (UQTR et UdeM)

Avec l'épuisement des carburants fossiles et le phénomène du réchauffement global, il devient de plus en plus impératif de se tourner vers des sources d'énergies propres, durables et renouvelables. L'hydrogène est un vecteur énergétique propre, inoffensif pour l'environnement et durable puisque l'eau est l'unique produit de sa combustion. L'hydrogène en tant que carburant possède le plus grand rendement énergétique en fonction de sa masse. Toutefois, l'hydrogène moléculaire est très rare dans l'atmosphère terrestre, à environ 1 ppm par volume. Il doit donc être produit à partir de sources appropriées. La réaction d'évolution de l'hydrogène (REH) déclenchée par la lumière du soleil s'est avérée une solution intéressante pour harnacher l'énergie solaire, abondante et inépuisable, sous forme de liaisons chimiques. Récemment, d'importants efforts ont été consentis par des chercheurs scientifiques pour développer des catalyseurs efficaces à base de métaux de transition pour la REH. Plusieurs schémas impliquant des métaux nobles comme le Re (II), l'Ir (III) et le Pt (II) ont été utilisés en raison de leur activité élevée et de leur stabilité. Toutefois, pour assurer la faisabilité économique, le catalyseur doit être fabriqué à partir de matériaux terrestres abondants. De plus, la recherche dans ce secteur cherche d'abord et avant tout à élaborer et à développer des catalyseurs moléculaires efficaces et moins coûteux.

Les travaux présentés démontrent une technique simple et abordable visant à préparer des photocatalyseurs moléculaires en se basant sur la stratégie d'autoassemblage par coordination et liaisons d'hydrogène. Nous avons synthétisé plusieurs complexes moléculaires de métaux de transition à base de bipyridine, terpyridine et quaterpyridine de diaminotriazine (DAT) fonctionnalisés en utilisant un procédé de synthèse facile. Leur structure a été caractérisée par diffraction au rayon X sous forme cristalline et sous forme de poudre, et leur activité photocatalytique a été déterminée en fonction des nombres de conversion et de la fréquence de conversion. Nos complexes moléculaires produisent de l'hydrogène avec des nombres de conversion (*turnover number* ou TON) variant de 72 à 326 moles de H₂ par mole de photosensibilisant (PS), ce qui est nettement plus élevé que le catalyseur de référence le plus fréquemment cité, le cobaloxime. Des états d'oxydoréduction stables, des niveaux d'énergie HOMO et LUMO plus bas, et un *redshift* accru au niveau de l'absorbance sont certains des facteurs qui expliquent leur forte performance. À notre connaissance, ces complexes moléculaires sont les premiers exemples de catalyseurs moléculaires à base de DAT pour la REH.

Géologie et géophysique appliquées à la recherche de la source de l'or du placier de Saint-Simon-les-Mines (Beauce, Québec)

Marc Richer-LaFlèche (INRS-ETE) et Patrick Lévassieur (Champs d'Or en Beauce)

La provenance de l'or dans les environnements de placier est une question fondamentale pour l'exploration minière. Dans certains cas, la source de l'or peut être multiple (multi-sources) et dans d'autres, la source est locale (White Gold au Yukon; Cariboo, en Colombie-Britannique). Dans plusieurs régions de placier en Amérique du Nord (Klondike au Yukon), l'industrie minière explore intensément le territoire afin de localiser la ou les sources d'or dans le roc. Dans le cas de Saint-Simon-les-Mines (Beauce, Québec), la morphologie des grains d'or observés dans le placier de Saint-Simon-les-Mines, dans la rivière Gilbert et dans le ruisseau Giroux suggère une source relativement proximale qui n'a pas encore été localisée, et ce, même après un historique d'exploration et d'exploitation aurifère remontant au XIX^e siècle. Dans le cadre de ce projet de recherche, Champs d'Or en Beauce et l'INRS ont déployé une stratégie d'exploration multidisciplinaire comprenant une étude géologique et structurale, de la prospection de terrain et des études géophysiques (audio-magnétotellurisme, magnétisme, gravimétrie, tomographie géoélectrique et électromagnétisme TDEM) et pétrophysiques. Le levé gravimétrique de haute résolution du secteur de Saint-Simon-les-Mines a permis de localiser une discontinuité structurale linéaire longeant la vallée de la rivière Gilbert. Cette structure semble correspondre à une faille détectée par un récent levé audio-magnétotellurique (AMT). Le modèle d'inversion des données AMT souligne la présence d'une discontinuité géoélectrique d'extension verticale kilométrique et à pendage vers le sud. Cette dernière passe sur ou à proximité des nombreux puits d'exploration de Saint-Simon-les-Mines. Des travaux d'excavation réalisés en septembre et en octobre 2019 ont mis au jour une faille à pendage vers le sud associée à une importante zone d'injection de veines de quartz, de carbonates de fer et de sulfures, indiquant la présence d'une structure hydrothermale qui pourrait être aurifère. Afin de préciser la géologie et d'optimiser la prospection de l'or dans le roc dans le secteur entre le rang Chaussegros et le ruisseau Giroux (site de la découverte des pépites d'or Kilgour [51 onces], McDonald [45 onces] et Sainte-Onge [42 onces]), nous avons réalisé des sections tomographiques géoélectriques (résistivité électrique et polarisation provoquée). Les modèles d'inversion soulignent la présence de nombreuses anomalies de chargeabilité dans les roches volcanoclastiques situées au nord de la rivière Gilbert. Ces dernières feront l'objet de travaux d'exploration en 2020.

Élaboration d'un concept de générateur thermoélectrique (GTE) pour recycler la chaleur inutilisée en électricité

Justin Riggio, Ferri Hassani et Frank Mucciardi (McGill)

Les procédés industriels libèrent des quantités importantes de chaleur inutilisée sous forme de flux liquides et/ou gazeux. Avec la demande énergétique croissante, il y a un intérêt pour le développement de solutions où cette chaleur peut être utilisée pour accroître l'efficacité énergétique globale des procédés en question. Le générateur thermoélectrique (GTE) présenté dans cette étude est constitué de caloducs qui captent et concentrent la chaleur inutilisée, combinés à des modules thermoélectriques (MTE) afin de convertir une partie de la chaleur inutilisée directement en électricité. Les principaux avantages du GTE sont sa simplicité et sa fiabilité. Il ne compte aucune pièce mobile, ce qui contribue au peu d'entretien requis sur sa durée de vie utile. Les GTE qui alimentent les navettes spatiales Voyager 1 et 2 en énergie sont toujours fonctionnels après plus de 40 ans.

Ce que nous proposons de nouveau est un concept modulaire pour le GTE, qui offre une grande adaptabilité et une grande flexibilité à titre de complément pouvant s'ajuster à une vaste gamme de procédés industriels, tout dépendant des paramètres des flux de chaleur inutilisée. Un prototype a été conçu et construit afin de valider le concept. Dans le cadre des essais expérimentaux du prototype, la production d'énergie a été mesurée en fonction de la température et du débit d'air entrant, qui représente le flux de chaleur inutilisée. Le modèle semi-empirique se compare bien aux résultats obtenus, en tenant compte notamment des paramètres du MTE comme la géométrie et les propriétés des matériaux, et la température en régime normal des deux côtés du MTE. L'efficacité a ensuite été calculée en estimant la chaleur captée par le GTE en utilisant une relation empirique valable pour ce cas précis.

Pour faire suite à ces travaux, une stratégie potentielle est requise pour continuer à développer ce concept et en faire une technologie viable et durable. Une piste de solution possible impliquerait de remplacer les matériaux thermoélectriques couramment utilisés, faits de bismuth (Bi) et de tellure (Te), qui sont rares, coûteux et associés à de fortes émissions. Les matériaux thermoélectriques à base d'oxyde de zinc (ZnO) et d'oxyde de nickel (NiO) sont des candidats intéressants pour les applications de haute température. Ils sont fabriqués à partir d'éléments abondants, peu coûteux et associés à des émissions relativement faibles. Le modèle semi-empirique validé par ces travaux a donc été utilisé pour évaluer la performance d'un MTE à base de ZnO-NiO comparativement à un MTE à base de tellure de plomb (PbTe), qui est aussi approprié pour les hautes températures, d'après les propriétés citées dans la littérature. Les propriétés thermoélectriques pour le ZnO-NiO n'étaient pas facilement disponibles, de telle sorte que des échantillons de chacun ont été synthétisés et leurs propriétés ont été mesurées en fonction de la température à l'aide d'un ProboStat^{MC}.

Formation et évolution d'une lithosphère océanique : retour sur les groupes de Watts et de Spartan

Sacha Lafrance, Carl Guilmette (UL), Jean Bédard (CGC-Q), Crystal LaFlamme (UL), Guillaume Mathieu, Mélanie Beaudette, Carl Bilodeau (MERN) et Thierry Karl Gélinas (UL)

Le Paléoproterozoïque est caractérisé par de profonds changements dans le mode de convection de la planète et dans les processus tectoniques qui façonnent sa surface. Les archives d'une partie de cette période-clé de l'évolution de la Terre sont particulièrement bien exposées et préservées au Nunavik, au sein de l'Orogène de l'Ungava. Quatre terranes géologiques distincts se sont accrétés à la marge du craton du Supérieur il y a environ 1,9 -1,8 milliard d'années. On distingue du sud au nord : la séquence de marge riftée de Cape Smith, le fragment de lithosphère océanique du Groupe de Watts, le socle néoarchéen du Complexe de Kovik et l'arc magmatique de Narsajuaq.

Ce projet de recherche porte sur les groupes de Watts et de Spartan. Le Groupe de Watts se compose de roches ignées, métamorphisées jusqu'au faciès des amphibolites et imbriquées par des chevauchements hors séquence lors de l'Orogenèse de l'Ungava. Il est constitué d'une suite plutonique de cumulats mafique et ultramafique datée à 1998 Ma, d'un complexe de dykes en feuillets et d'une séquence de basalte massif et coussiné. Leurs caractéristiques géochimiques typiques de MORB et leur signature isotopique homogène ont été interprétées comme des arguments forts d'une origine cogénétique des diverses lithologies du Watts. Ces unités ont alors été interprétées comme un fragment de lithosphère océanique nommé « l'ophiolite de Purtuniq ». Pour sa part, le Groupe de Spartan est constitué d'une séquence de roches sédimentaires clastiques déformées et métamorphisées au faciès des schistes verts. Cette séquence a été interprétée comme un prisme d'avant-arc.

La présente étude a pour objectif d'identifier et de caractériser les unités du Groupe de Watts par une cartographie régionale et détaillée, la pétrographie et la géochimie. L'âge de formation et la source du Groupe de Watts ainsi que l'âge de déposition des roches sédimentaires du Groupe de Spartan seront étudiés par le biais de la géochronologie U-Pb et Sm-Nd. L'évolution tectono-métamorphique du Groupe de Watts et des unités associées sera étudiée au moyen de modélisation des équilibres de phases et de pétrochronologie, accompagnées d'une analyse structurale.

Ce projet de recherche améliorera la compréhension de la géologie et de l'évolution tectonique de la région et mènera à une meilleure estimation de son potentiel minéral. Il permettra de répondre aux questions fondamentales telles que : quelle est la nature de la lithosphère océanique au Paléoproterozoïque? Par quels processus cette dernière est-elle incorporée dans les orogènes continentaux? Ces processus sont-ils différents de ceux caractérisant la tectonique des plaques moderne?

Pétrographie, chimie minérale et composition géochimique d'intrusions mafiques de la Suite intrusive de Soisson, sud-est de la Province de Churchill (Québec, Canada)

Anne-Aurélien Sappin, Michel G. Houlé (CGC-Q), David Corrigan (CGC-O), Marie-Pierre Bédard (NMEF), Natasha Wodicka (CGC-O), Cynthia Brind'Amour-Côté (NMEF) et Nicole Rayner (CGC-O)

La Suite intrusive de Soisson, située dans la portion ouest de la Zone noyau (Churchill), comprend une série d'intrusions kilométriques d'âge mésoprotérozoïque qui sont composées de troctolite, de gabbro à olivine et de gabbronorite. Ces intrusions se distinguent des autres intrusions mafiques de la région (par exemple, la Suite de Ralleau) par l'absence de déformation et d'altération en lien avec le métamorphisme régional. Plusieurs des intrusions de la Suite de Soisson font actuellement l'objet d'une étude pétrographique, minéralogique et géochimique visant la caractérisation détaillée de cette suite. Elles sont situées principalement à l'ouest et au nord-ouest du lac Saffray (intrusions Soisson-Nord) et dans le secteur du lac Papavoine (intrusions Soisson-Sud). Dans ce dernier secteur, l'une des intrusions, l'intrusion Papavoine, **a été datée** récemment à 1311 Ma.

Les intrusions Soisson-Nord ne présentent pas de structure interne particulière et sont composées principalement de mésogabbro à leucogabbro à olivine et, localement, de gabbro et de gabbronorite mésocrates à leucocrates. Les gabbros à olivine ont des textures de cumulat avec des cristaux cumulus de plagioclase-olivine $\pm$ clinopyroxène $\pm$ orthopyroxène entourés par des oïkocristaux de clinopyroxène $\pm$ olivine. Les gabbros forment des cumulats 1) à cristaux cumulus de plagioclase-olivine et à oïkocristaux de clinopyroxène ou 2) à cristaux cumulus de plagioclase-clinopyroxène et à oïkocristaux de plagioclase. Les gabbronorites présentent des textures de cumulat avec cristaux cumulus de plagioclase-orthopyroxène-clinopyroxène et oïkocristaux de pyroxènes. Ces intrusions contiennent de l'olivine (no Mg_{71-45}), du clinopyroxène (no Mg_{79-58}) et du plagioclase (essentiellement An_{66-38}) présentant des compositions chimiques relativement évoluées. Les résultats préliminaires indiquent que ces intrusions mafiques sont riches en éléments lithophiles fortement incompatibles (HILE), comparativement aux éléments lithophiles modérément incompatibles (MILE), mais sont moins riches en Nb et, localement, en Ta par rapport aux autres HILE.

L'intrusion Papavoine ne présente pas de structure interne spécifique. Elle est composée de mésogabbro à olivine avec des textures de cumulat à plagioclase-olivine $\pm$ clinopyroxène $\pm$ orthopyroxène et des oïkocristaux de clinopyroxène $\pm$ orthopyroxène-olivine. Cette intrusion contient des grains d'olivine (no Mg_{71-67}), de clinopyroxène (no Mg_{82-77}) et de plagioclase (An_{72-42}) ayant une composition plus primitive.

L'intrusion Papavoine est l'hôte de sulfures de Fe-Ni-Cu-(EGP) disséminés, interstitiels et semi-massifs à massifs d'origine magmatique, avec des teneurs allant jusqu'à 1,2 % Ni, 0,5 % Cu, 617 ppm Co et 181 ppb Pt+Pd. Les intrusions Soisson-Nord contiennent également des sulfures disséminés (<2 %) et montrent des caractéristiques pétrographiques et minéralogiques similaires à l'intrusion Papavoine. À la lumière de ces premiers résultats, il semble que l'ensemble de la Suite de Soisson devrait être considérée pour son potentiel en minéralisation de type Ni-Cu-EGP.

Les klippes externes de l'Himalaya, la clé pour comprendre le début de l'évolution de l'Orogène du Grenville?

Renaud Soucy La Roche (INRS-ETE), Laurent Godin (Queen's), John M. Cottle (UCSB) et Dawn A. Kellett (CGC-A)

La transition entre les petits orogènes froids dominés par la déformation mécanique et les orogènes larges et chauds dominés par la déformation thermomécanique a d'importantes conséquences sur la formation de barrières orographiques, le climat, la migration du magma et des fluides et la remobilisation des métaux et des minéraux. Cette transition s'effectue peu de temps après la collision initiale entre deux continents et affecte tout particulièrement la croûte moyenne. Certaines roches de la croûte moyenne sont exhumées durant ou après la collision et offrent une opportunité d'étudier ses propriétés lors de la collision. Toutefois, les roches les mieux exposées dans l'arrière-pays ne préservent que rarement des informations à propos des premiers stades de la collision puisqu'elles sont souvent « réinitialisées » par des événements métamorphiques plus jeunes à la suite d'un séjour prolongé en profondeur. Afin de mieux comprendre le début de l'évolution des orogènes, il faut étudier des roches métamorphiques préservées dans des contextes tectoniques non conventionnels.

Nos travaux dans l'Himalaya démontrent que les roches métamorphiques des klippes de l'avant-pays ont été exhumées avant les unités équivalentes de l'arrière-pays et qu'elles ont préservé les débuts de l'évolution de la croûte moyenne himalayenne. Au moyen de cartographie de terrain, d'analyses microstructurales, de modélisation d'équilibre de phases, de pétrochronologie U-Th-Pb *in situ* sur monazite et xénotime et de géochronologie Ar-Ar sur mica blanc, nous avons reconstruit l'évolution pression-température-temps-déformation d'unités métamorphiques au faciès des amphibolites dans les klippes de Karnali et de Jajarkot dans l'ouest du Népal. Les résultats démontrent que les unités ont enregistré une évolution prograde pendant l'Éocène (environ 45–35 Ma), ont atteint leur pic métamorphique durant l'Oligocène (environ 35–25 Ma) et ont été exhumées au début du Miocène (environ 20–15 Ma). Ces roches n'ont pas subi la surimpression métamorphique de haute température lors du Miocène qui a affecté les roches exposées dans l'arrière-pays.

Ces connaissances dans des terrains récents peuvent être transposées à la Province de Grenville afin de mieux comprendre le début de cette orogénèse. Les résultats d'analyses sismiques du programme Lithoprobe démontrent que l'architecture structurale de la région à l'est du réservoir Cabonga dans l'ouest du Québec ressemble à celle de l'Himalaya, avec une klippe externe de métamorphisme intense préservée près de l'avant-pays. Cette zone est une cible privilégiée pour identifier des unités de croûte moyenne exhumées dans les premiers stades et, éventuellement, caractériser le début de l'évolution de l'Orogène du Grenville.

Procédé de carbonatation minérale des résidus miniers de serpentine

Ilies Tebbiche, Louis-César Pasquier, Guy Mercier, Jean-François Blais (INRS-ETE) et Sandra Kentish (Université de Melbourne, Australie)

La carbonatation minérale offre une opportunité intéressante pour valoriser les résidus miniers du Québec et répond à une problématique d'actualité qui est la réduction des gaz à effet de serre. Il s'agit d'exploiter la réactivité du magnésium contenu dans les résidus de serpentine ($\approx 30\%$ en masse) avec le CO_2 émis par diverses industries. Cela permettrait un stockage stable et permanent du gaz sous forme de carbonate de magnésium qui de surcroît présente un intérêt économique.

Les procédés actuels nécessitent une grande quantité d'énergie. Premièrement, en raison de la réactivité de la serpentine qui est naturellement lente et dont l'accélération requiert une étape d'activation thermique à haute température ($\approx 670^\circ\text{C}$), se traduisant par une forte demande en chaleur ($1,6\text{ GJ/tonne}$ de solide). Deuxièmement, compte tenu de la haute pression de CO_2 nécessaire pour la lixiviation du magnésium, qui engendre une consommation importante d'électricité.

À la suite d'expériences en colonne à bulle d'un litre dans des conditions ambiantes de pression et de température, il a été prouvé qu'environ 32% du magnésium initial présent dans la serpentine activée était récupérable en solution. Lors des essais, pour reproduire un effluent industriel typique, le gaz utilisé avait une teneur en CO_2 de 18% . Le magnésium et le CO_2 dissous peuvent par la suite être convertis en carbonate de magnésium dans un réacteur séparé, à des températures de 90°C .

Une intégration énergétique du procédé global a été réalisée avec la méthode du pincement (*pinch*) en utilisant le logiciel Aspen Energy Analyzer. Cela a permis d'optimiser l'utilisation des différentes sources de chaleur dans le procédé (gaz de combustion, serpentine chaude...) afin de diminuer les pertes énergétiques. Il a été démontré qu'à une température de préchauffage de la serpentine à 400°C , la demande en gaz naturel est réduite de 16% .

Notre procédé permet de produire du carbonate de magnésium en éliminant le recours à la compression et à l'agitation, ce qui a un effet direct sur la consommation énergétique, autant thermique qu'électrique. Par exemple, il permet de réduire de 80% la consommation d'électricité comparative à une réaction à une pression de 11 bars avec le même gaz. Une moins grande consommation énergétique permet non seulement de réduire les émissions propres du procédé, mais aussi les coûts opérationnels de ce dernier. Comme il nécessite moins d'équipement, les coûts d'investissements sont aussi réduits.

Les minéraux industriels exploités au Québec

N'golo Togola et Ricardo Escobar (MERN)

Les minéraux industriels désignent des minéraux, des roches ou des substances minérales dont les propriétés physiques ou chimiques sont mises à contribution dans divers usages, produits ou procédés industriels.

Les minéraux industriels exploités au Québec comprennent des minéraux non métalliques et métalliques ainsi que des roches (pierres industrielles).

Les minéraux non métalliques extraits sont le diamant, le feldspath potassique, le graphite, le mica (phlogopite) et le sel. Leurs usages sont variés : polissage, coupe, fabrication de céramique, de charge minérale ou d'agent de déglacage, etc.

Le diamant provient de la mine Renard située au nord de Chibougamau (Nord-du-Québec).

Le feldspath potassique est extrait de la mine Othmer située au nord-est de Buckingham (Outaouais).

Le graphite provient du gisement de Lac-des-îles au sud de Mont-Laurier (Laurentides).

Le mica (phlogopite) est extrait de la mine du Lac Letondal dans la région de Parent (Mauricie).

Le sel gemme est exploité des Mines Seleine sur les Îles-de-la-Madeleine (Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine).

Le minéral métallique exploité est l'ilménite. Ce minéral est utilisé surtout comme pigment blanc pour la peinture, le plastique et le papier. L'ilménite est extraite de la mine du Lac Tio au nord de Havre-Saint-Pierre (Côte-Nord).

Les roches (pierres industrielles) exploitées sont le calcaire, la dolomie, le calcaire dolomitique, le marbre calcitique, le quartzite, le grès, le sable naturel et le shale.

Le calcaire, la dolomie et le marbre servent à des fins industrielles pour la production de chaux vive, d'amendements, de charges minérales ou de ciment.

Le calcaire est extrait de carrières situées à Saint-Basile-Sud (Capitale-Nationale), à Joliette (Lanaudière), à Saint-Armand et à Bedford (Estrie).

La dolomie provient de carrières situées à Saint-Ferdinand et à Sainte-Hélène-de-Chester (Centre-du-Québec).

Le calcaire dolomitique est extrait de carrières situées à la Rédemption (Bas-Saint-Laurent) et à Stukely-Sud (Estrie).

Le marbre calcitique provient d'une carrière à Saint-Eugène (Saguenay-Lac-Saint-Jean).

Les principales sources de silice sont le quartzite, le grès quartzifère et le dépôt de sable naturel.

La silice de haute pureté provient d'une bande de quartzite au Petit lac Malbaie (Charlevoix) et sert à la fabrication de ferrosilicium et de silicium métal.

On extrait également de la silice d'un grès quartzifère dans le secteur de Saint-Canut (Laurentides) pour la fabrication de verre.

Du grès quartzifère est exploité dans les secteurs de Sainte-Clotilde et de Beauharnois (Montérégie) et utilisé, entre autres, comme sable de silice pour le ciment.

Un dépôt de sable de silice est exploité à Saint-Joseph-du-Lac (Laurentides). Le sable lavé et tamisé est utilisé dans les mélanges de ciment à joint, le traçage des aires de jeu et le sablage au jet.

Des schistes argileux extraits d'une carrière à la Prairie (Montérégie) sont destinés à la production de briques de parement.

ACRONYMES

L'italique est utilisé pour la version anglaise

AFNQL : Assembly of First Nations of Quebec and Labrador

APNQL : Assemblée des Premières Nations du Québec et du Labrador

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières, France

CERM-UQAC : Centre d'études sur les ressources minérales de l'Université du Québec à Chicoutimi

GERAD : Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions

CGC : Commission géologique du Canada

CGC-A : Commission géologique du Canada, Atlantique, Bedford Institute of Oceanography

CGC-O : Commission géologique du Canada, Ottawa

CGC-Q : Commission géologique du Canada, Québec

CNRC : Conseil national de Recherche Canada

COREM : Consortium de recherche en minéralogie

CONSOREM : Consortium de recherche en exploration minérale

E4M : Centre de recherche sur la géologie et l'ingénierie des ressources minérales, Université Laval

GSC: Geological Survey of Canada

GSC-A: Geological Survey of Canada – Atlantic, Bedford Institute of Oceanography

GSC-O: Geological Survey of Canada – Ottawa

GSC-Q: Geological Survey of Canada – Québec

HEC : HEC Montréal

IAMGOLD : IAMGOLD Corporation

INRS-ETE : Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement

IOS : IOS Services Géoscientifiques

IRME UQAT-Polytechnique : Institut de recherche en mines et environnement UQAT-Polytechnique

LIRIDE : Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Ingénierie Durable et en Écoconception

McGill : Université McGill

McGill: McGill University

MERN : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

NMX : Nemaska Lithium

NTS: National Topographic Series

Polytechnique : École Polytechnique de Montréal

SMV : sulfures massifs volcanogènes

UdeS : Université de Sherbrooke

UL : Université Laval

Memorial U. : Université Memorial de Terre-Neuve/Memorial University of Newfoundland

UQAC : Université du Québec à Chicoutimi

UQAM : Université du Québec à Montréal

UQAT : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

UQTR : Université du Québec à Trois-Rivières

USGS : United States Geological Survey

