

Appel de candidatures pour des projets de recherche sur
La métallogénie des gisements aurifères orogéniques

L'équipe Alliance Agnico Eagle – Eldorado - MRNF

Le partenariat Alliance Agnico Eagle – Eldorado - MRNF est une initiative de recherche majeure financée sur 5 ans par le CRSNG et ses partenaires Agnico Eagle, Eldorado Gold et le ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF) pour étudier la métallogénie des gisements d'or orogéniques. L'équipe est composée de chercheurs de l'Université Laval (Profs G. Beaudoin, C. Guilmette, C. LaFlamme et B. Rottier) et de l'INRS-ETE (Prof. R. Soucy La Roche). Le partenariat Alliance offre un environnement de formation dynamique et collaboratif comprenant plus d'une trentaine d'étudiants diplômés et professionnels de recherche. L'Université Laval figure parmi les universités les mieux classées au Canada. Reconnue pour son leadership et ses grandes réalisations en éducation et en recherche, elle offre un environnement accueillant et diversifié au cœur de la ville de Québec, ville du patrimoine mondial de l'UNESCO (<http://www.quebecregion.com/fr/>). La communauté universitaire compte plus de 50 000 étudiants et offre un environnement de travail s'engageant dans un cadre de qualité de vie exceptionnelle.

Nous lançons un appel de candidatures pour entreprendre **sept** projets de doctorat et **un projet post-doctoral** (2,5 ans). Les projets comprennent **1)** des études à l'échelle régionale des districts aurifères orogéniques, **2)** des études visant à dater et à déterminer l'origine des fluides aurifères dans d'importants gisements d'or orogéniques, **3)** le développement de nouvelles méthodologies utilisant les minéraux indicateurs pour définir la source, vectoriser vers les zones aurifères et pour estimer la dotation en Au des gisements d'or orogéniques, **4)** analyse de la modélisation géomécanique de l'écoulement des fluides et de la déformation en relation avec la mise en place de l'or, et **5)** le développement de méthodologies d'exploration des gisements d'or orogéniques à l'aide d'instruments portatifs. Les titres des projets sont énumérés ci-dessous et leurs descriptions détaillées sont jointes en annexe.

1. Études à l'échelle régionale – La compréhension du cadre géologique régional des gisements aurifères est un élément essentiel pour cibler des régions ayant un fort potentiel pour la découverte de gisements d'or orogéniques.

a. **Corridor Bonfond (PhD1)** – Le corridor Bonfond est un secteur du champ filonien aurifère orogénique de Val-d'Or, dans la sous-province néoarchéenne de l'Abitibi (Québec), au sud et au sud-ouest du batholite de Bourlamaque.

b. **Hope Bay (PhD2)** - Hope Bay est une ceinture de roches vertes fortement déformée, longue de 100 km, dans la province néoarchéenne de l'Esclave (Nunavut), qui contient plusieurs gisements aurifères.

2. Datation des événements de minéralisation aurifère et de la source des fluides - études à l'échelle du gisement pour dater les événements d'écoulement des fluides et pour comprendre la source et l'écoulement des fluides hydrothermaux formant les gisements aurifères.



Énergie et Ressources
naturelles



a. **Meliadine (PhD3)** : Meliadine (Nunavut) héberge une série de gisements aurifères orogéniques situés le long de la faille Pyke, avec une histoire complexe.

3. Minéraux indicateurs – Les projets continueront à développer des outils d'exploration pour définir la source, vectorisation vers la minéralisation et pour estimer la dotation en Au.

a. **Arsénopyrite (PhD4)** : l'arsénopyrite est un minéral commun associé à l'or pour lequel les données sur les éléments traces sont rares.

b. **Ormaque (PhD5)** : une étude de cas à Ormaque (Val-d'Or) sur des veines de quartz-tourmaline-carbonate pour concevoir des outils innovateurs pour la vectorisation et la fertilité des minéraux indicateurs afin de cibler des systèmes de veines aurifères.

c. **Nunavik (PhD6)** : cette étude de cas intégrera les méthodologies pour définir la source des minéraux indicateurs et identifier les types de gîte dans un grand relevé régional au Nunavik (nord du Québec) réalisé par le MRNF.

4. Modélisation géomécanique de la déformation/de l'écoulement des fluides (PDF) – une caractéristique commune des gisements d'or orogéniques est la répartition des déformations au sein et/ou entre les roches intrusives compétentes et les roches volcaniques encaissantes moins compétentes. L'étude examinera les variations spatiales des contraintes de cisaillement et de dilatation entre les corps intrusifs et leurs roches hôtes, qui constituent un contrôle majeur de la distribution de la minéralisation aurifère.

5. Méthodologies basées sur le terrain - développer l'application d'instruments portatifs servant à obtenir des résultats sur le terrain pour prendre des décisions rapides lors des travaux en exploration.

a. **pSWIR Corridor Bonfond (PhD7)** : cette étude testera sur le terrain l'application d'un appareil portatif d'absorption spectrale du spectre de l'infrarouge (pSWIR) pour la détection d'altération fertile en or dans les roches granodioritiques du batholite de Bourlamaque et dans les roches volcaniques mafiques à felsiques du corridor Bonfond, qui héberge également les gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) et les zones d'altération associées.

Les **projets de doctorat** sont dotés par une bourse de 27 500\$ par an pour 3 ans. Les candidats au doctorat peuvent recevoir jusqu'à 8 500 \$ de l'Université pour l'atteinte d'objectifs de leur programme de formation en plus de leur bourse. Les doctorants étrangers bénéficient d'une exonération des frais de scolarité internationaux équivalente à celle des étudiants résidant au Québec. Cette bourse peut être cumulée avec une autre bourse d'excellence. Le **PDF** recevra un salaire correspondant à ses qualifications. Les candidatures sélectionnées auront l'opportunité de faire des recherches originales et de les présenter à des congrès scientifiques nationales et internationales. Les projets débiteront en janvier ou mai 2023. Les postes sont ouverts jusqu'à ce qu'ils soient pourvus. La maîtrise de l'anglais parlé et écrit est obligatoire, tandis que la maîtrise du français est un avantage, mais n'est pas obligatoire. L'équipe supervisera les étudiants dans la langue de leur choix (anglais ou français).



Énergie et Ressources
naturelles



Valorisant l'équité, la diversité et l'excellence, l'Université Laval s'engage fermement à offrir un milieu de travail et de vie inclusif à tous ses membres. **Nous souscrivons à l'égalité d'accès et encourageons les personnes qualifiées** de toutes origines, sexes, orientations sexuelles, identités ou expressions de genre, ainsi que les personnes handicapées, à postuler.

Les candidats doivent envoyer leur curriculum vitae, une lettre de motivation indiquant quel(s) projet(s) les intéressent et les noms de 3 références à :

Professeur Georges Beaudoin
Chaire de recherche industrielle CRSNG-Agnico Eagle en exploration minérale
Université Laval
explomin@ggl.ulaval.ca

Appel de candidatures pour des projets de recherche sur
La métallogénie des gisements aurifères orogéniques

Le partenariat Alliance Agnico Eagle – Eldorado - MRNF

Annexe – Description détaillée des projets

1. Études à l'échelle régionale - Comprendre le cadre géologique régional des gisements aurifères est un élément essentiel pour cibler les régions ayant un potentiel plus élevé d'héberger des gisements aurifères orogéniques.

a. Corridor Bonnefond (PhD1) – Le corridor Bonnefond est un secteur du champ filonien aurifère orogénique de Val-d'Or, dans la sous-province néoarchéenne de l'Abitibi (Québec), au sud et au sud-ouest du batholite de Bourlamaque. Les roches volcaniques de la région sont recoupées par plusieurs corps intrusifs, à la fois syn- et post-volcaniques, dont le complexe tonalitique à dioritique de Bonnefond Sud et le filon-couche de tonalite du Nouveau Louvre. Les intrusions et leurs roches hôtes immédiates sont recoupées par des zones de cisaillement de deuxième et troisième ordre à faible pendage (15 et 45°) qui hébergent des veines aurifères de quartz-carbonate-tourmaline. Une exploration efficace nécessite une meilleure compréhension des relations entre l'âge, la pétrologie et la géochimie de l'intrusion et celle des roches volcaniques hôtes et des VMS qui se chevauchent (par exemple, Louvicourt) et des systèmes



Énergie et Ressources
naturelles



minéralisés aurifères orogéniques. **Objectifs** : i) caractériser l'évolution pétrologique et géochimique des roches volcaniques et intrusives ; ii) contraindre la chronologie des phases intrusives ; iii) établir la séquence paragénétique de la minéralisation et de l'altération ; iv) définir le cadre structural des zones de cisaillement et des veines ; v) comparer avec d'autres gisements aurifères logés dans des intrusions tonalitiques et dioritiques. **Activités** : cartographie détaillée sur le terrain et description des carottes de forage, suivie de la pétrographie, de l'analyse microstructurale, de la lithogéochimie, de la chimie minérale et de la géochronologie des intrusions. **Résultats attendus** : i) un cadre expliquant l'évolution pétrochronologique des intrusions, leur affinité géochimique et les conditions lors de mise en place ; ii) l'évolution structurale des zones de cisaillement hôtes de veines ; iii) l'évolution paragénétique de la minéralisation et de l'altération ; iv) les contraintes sur la chronologie et le rôle des intrusions dans la minéralisation aurifère ; v) une carte bonifiée du corridor Bonnefond proposant des nouveaux guides d'exploration.

b. Hope Bay (PhD2) - Hope Bay est une ceinture de roches vertes fortement déformée, longue de 100 km, dans la Province néoarchéenne de l'Esclave (Nunavut), qui contient plusieurs gisements aurifères formés pendant le principal événement de déformation D₂ (Sherlock et al. 2012). Elle est métamorphisée au faciès des schistes verts inférieurs, avec un grade métamorphique plus élevé (amphibolite inférieure) au contact avec le granite/gneiss environnant. Plusieurs zones plus petites de grade métamorphique plus élevé sont reconnues à proximité de la minéralisation aurifère suggérant un régime thermique local plus élevé ou un flux de fluide carbonique comme à Timmins/Kirkland Lake (Thompson 2005). Cette relation doit être documentée en détail pour évaluer son contrôle sur la mise en place de la minéralisation aurifère et pour développer des guides d'exploration innovateurs. **Objectifs** : i) cartographier les modèles structuraux et la distribution des faciès métamorphiques en mettant l'accent sur les « points chauds » métamorphiques ; ii) estimer les conditions thermobarométriques roche/fluide ; iii) établir le contexte géodynamique du volcanisme, du métamorphisme/déformation et de la minéralisation aurifère ; iv) contraindre la chronologie de la déformation, du métamorphisme et de la minéralisation aurifère. **Activités** : cartographie détaillée sur le terrain des faciès métamorphiques, de la pétrographie, de l'analyse microstructurale et lithogéochimique, des diagrammes de phases thermobarométriques pour l'équilibre des phases rocheuses et fluides, de la datation des épisodes tectono-métamorphique. **Résultats attendus** : i) carte tectono-métamorphique bonifiée de la ceinture de roches vertes de Hope Bay ; ii) historique du métamorphisme et de la déformation de la ceinture ; iii) relation entre l'évolution tectono-métamorphique et la minéralisation ; iv) nouveaux guides d'exploration.



Énergie et Ressources
naturelles



2. Datation des événements aurifères et de la source des fluides - études à l'échelle des gisements pour dater les apports de fluides et comprendre la source et l'écoulement des fluides hydrothermaux formant les gisements aurifères.

a. Meliadine (PhD3) : Meliadine comprend une série de gisements aurifères orogéniques associés à des formations de fer rubannées (BIF) situés le long de la faille Pyke, au Nunavut. La datation de l'arsénopyrite par Re/Os donne un intervalle d'âges allant de 2,3 à 1,8 Ga (Lawley et al. 2015). Le xénotime tardif dans les veines de quartz et les roches altérées hôtes, datés par SHRIMP, a donné un âge de 1858 ± 10 Ma (Lawley et al. 2015) semblables à ceux de la monazite 1854 ± 6 Ma (Carpenter et al. 2005), mais la relation des grains de phosphate datés avec la minéralisation aurifère est équivoque. Ainsi, l'âge de la minéralisation aurifère est incertain et la source des fluides n'a pas été étudiée, de sorte que l'origine de la minéralisation aurifère logée dans les roches archéennes remobilisées au Paléoprotérozoïque, reste mystérieuse. Ceci limite l'exploration dans des terranes similaires. **Objectifs** : i) dater les événements d'écoulement de fluides hydrothermaux aurifères en utilisant la géochronologie U/Pb des phosphates sur les grains liés à la minéralisation aurifère ; ii) établir la source des fluides, des ligands d'or et des métaux ; iii) présenter un cadre reliant les apports de fluides aurifères à l'évolution tectono-métamorphique des roches encaissantes. **Activités** : séquence paragénétique détaillée de la minéralisation aurifère et la déformation, de la géochronologie des minéraux phosphatés, de la géochimie des isotopes stables des sulfures et des minéraux filoniens (en vrac et in situ). **Résultats attendus** : i) âge de la minéralisation aurifère et d'autres événements hydrothermaux ; ii) source et évolution des fluides hydrothermaux, des ligands d'or et des métaux iii) avoir une meilleure compréhension des gisements aurifères orogéniques potentiellement polyphasés ; iv) implications et nouveaux guides pour l'exploration aurifère.

3. Minéraux indicateurs – La Chaire de recherche industrielle CRSNG-Agnico Eagle en exploration minérale s'est imposée comme le chef de file international en recherche sur les minéraux indicateurs. La recherche proposée continuera à développer notre leadership dans l'étude des minéraux indicateurs, sur les outils d'exploration en lien avec le traçage de minéraux et la fertilité des minéraux indicateurs.

a. Arsénopyrite (PhD4) : l'arsénopyrite est un minéral commun associé à l'or pour lequel les données sur les éléments traces sont rares. Cela limite l'application des minéraux indicateurs pour les gisements où l'arsénopyrite est abondante, comme pour les gisements aurifères orogéniques au Nunavut.

Objectifs : i) mesurer la composition en éléments majeurs et en éléments traces de l'arsénopyrite provenant de divers contextes géologiques ; ii) définir des critères chimiques pour identifier la source de l'arsénopyrite provenant de



Énergie et Ressources
naturelles



gisements d'or orogéniques ; iii) réaliser des études de cas pour tester l'application de l'arsénopyrite pour le traçage de dépôts aurifères. **Activités** : acquérir un ensemble d'échantillons représentatifs de gites d'or orogéniques et autres, mesurer la composition en éléments majeurs et en traces de l'arsénopyrite, analyser statistiquement la composition chimique en utilisant des méthodes multivariées et d'apprentissage automatique. **Résultats attendus** : i) une base de données sur la composition en éléments majeurs et traces de l'arsénopyrite ; ii) des critères chimiques pour discriminer la source de l'arsénopyrite ; iii) une méthodologie pour utiliser l'arsénopyrite dans l'exploration des gisements aurifères orogéniques.

b. Ormaque (PhD5) : ce gisement d'or orogénique (Val-d'Or) comprend un ensemble de veines sub-horizontales de quartz-tourmaline-carbonate principalement encaissés dans un porphyre intrudé dans des roches volcaniques, mais avec une géométrie différente du gisement Triangle en exploitation par Eldorado Gold Québec. **Objectifs** : i) définir la séquence paragénétique des événements successifs de minéralisation aurifère ; ii) mesurer la composition chimique et isotopique des minéraux associés aux dépôts aurifères ; iii) identifier les caractéristiques texturales, chimiques et isotopiques associées à l'or ; iv) définir des critères de vectorisation pour cibler les systèmes de veines aurifères. **Activités** : cartographie de terrain, cartographie souterraine et description des carottes de forages, composition chimique et isotopique des minéraux (minerais et gangue) (en vrac et in situ), pétrographie des minéralisations aurifères, analyse statistique des données. **Résultats attendus** : i) textures caractéristiques, composition chimique et isotopique des minéraux intimement associés à l'or ; ii) critères discriminants entre les minéraux de minerai et de la gangue associés ou non à l'or ; iii) des méthodologies de vectorisation des minéraux indicateurs pour cibler les systèmes de veines aurifères dans un gisement.

c. Nunavik (PhD6) : cette étude de cas intégrera des méthodologies pour définir la source des minéraux indicateurs, développées par les projets de recherche précédents dans le cadre d'une vaste étude régionale au Nunavik (nord du Québec) réalisée par le MERN. **Objectifs** : i) mesurer l'abondance des minéraux indicateurs (scheelite, tourmaline, or, chalcopryrite, arsénopyrite) dans le till ; ii) mesurer la composition en éléments majeurs et en éléments traces des minéraux indicateurs ; iii) évaluer la provenance des minéraux indicateurs à l'aide des critères de traçage développés dans des études précédentes ; iv) identifier les types de dépôts érodés et dispersés dans les sédiments glaciaires. **Activités** : Mesurer l'abondance des minéraux indicateurs dans les concentrés de minéraux lourds et mesurer la composition en éléments majeurs et en éléments traces, et l'association minérale des minéraux indicateurs, appliquer des critères de signature pour déterminer l'origine des minéraux indicateurs. **Résultats attendus** : i) abondance relative des minéraux indicateurs ; ii) base de données



Énergie et Ressources
naturelles



sur la composition chimique des minéraux indicateurs ; iii) classification des sources potentielles pour chaque minéral indicateur, sur la base de critères chimiques.

4. Modélisation géomécanique de la déformation/de l'écoulement des fluides (BPD) : une caractéristique commune des gisements d'or orogéniques est la répartition des déformations à l'intérieur et/ou entre les roches intrusives compétentes et les roches volcaniques encaissantes moins compétentes. Les variations spatiales des contraintes de cisaillement et de dilatation entre les corps intrusifs et leurs roches hôtes constituent un contrôle majeur sur la distribution de la minéralisation aurifère, comme pour le gisement Triangle et plusieurs autres gisements du champ filonien de Val-d'Or. Une meilleure compréhension des relations entre les intrusions déformées, les roches hôtes moins compétentes et l'écoulement des fluides est cruciale. **Objectifs :** i) mesurer les propriétés des roches pour diverses lithologies et leurs altérations ; ii) modéliser la déformation des roches et l'écoulement des fluides ; iii) établir les paramètres favorables à la déformation et à la dilatation locale ; iv) comparer les résultats de la modélisation à ceux du gisement Triangle et à d'autres intrusions aurifères du champ filonien de Val-d'Or. **Activités :** mesurer les propriétés de la roche, faire une modélisation numérique 2D (UDEC) et 3D (FLAC3D) de la déformation et de l'écoulement des fluides, comparer les résultats du cisaillement et à la veine 3D, et ainsi que la distribution des altérations au gisement Triangle et à d'autres gisements. **Résultats attendus :** i) relations entre la déformation, la rhéologie de la roche et la formation des cisaillements et des veines; ii) modèle prédictif de la localisation des minéralisations aurifères ; iii) caractéristiques géologiques clés qui doivent être documentées pendant la description des carottes de forage pour prédire le comportement mécanique; iv) nouveaux guides d'exploration.

5. Méthodologies utilisant les appareils portatifs: les projets sont conçus pour développer l'application d'instruments portatifs pour obtenir des résultats pour une prise de décision rapide sur le terrain lors des travaux en exploration.

a. pSWIR Corridor Bonnefond (PhD7) : cette étude testera sur le terrain l'application d'un appareil portable mesurant le spectre d'absorption dans l'infrarouge court (pSWIR) pour la détection de l'altération fertile en or dans les roches granodioritiques du batholite de Bourlamaque et dans les roches volcaniques mafiques à felsiques du corridor Bonnefond, qui hébergent également gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) et les zones d'altération associées, s'appuyant sur la base de données des spectres SWIR des faciès d'altération d'Eldorado Gold (Québec) Inc. L'instrument pSWIR a été largement adopté pour cartographier d'altération dans les systèmes épithermaux et porphyriques, mais moins dans l'exploration pour l'or orogénique malgré les résultats prometteurs obtenus par l'équipe CMIC-Footprint à Canadian Malartic



Énergie et Ressources
naturelles



(Lypaczewski et al. 2019). **Objectifs** : i) mesurer les spectres d'absorption SWIR dans les zones d'altération liées à la minéralisation aurifère, dans les zones dépourvues d'or et dans les zones d'altération VMS, sur le terrain et dans les carottes de forage ; ii) comparer la composition chimique des micas et autres minéraux d'altération à leurs spectres d'absorption pour identifier l'altération liée à l'or ; iii) relier les spectres SWIR au contexte géologique (métamorphique, versus SMV hydrothermal ou or orogénique); iv) réaliser des études de cas sur les affleurements et les carottes de forage. **Activités** : acquérir les valeurs des spectres SWIR sur des affleurements et sur des carottes de forage, mesurer in situ la composition chimique des minéraux d'altération, analyser la relation entre les caractéristiques spectrales, la composition chimique et la fertilité des minéralisations aurifères. **Résultats attendus** : i) bibliothèque des caractéristiques associée aux valeurs des spectres d'absorption SWIR des minéraux d'altération orogéniques liés à l'or ou non et celles associées aux SMV ; ii) des critères discriminants pour l'altération hydrothermale liée à l'or et non liée ; iii) méthodologie basée sur le terrain pour intégrer le pSWIR aux travaux des levés d'exploration.



Énergie et Ressources
naturelles

