
PORPHYRES CU-AU SUBALCALINS : CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES ET CIBLES D'EXPLORATION DANS LES TERRAINS DE HAUT GRADE METAMORPHIQUE ARCHEENS ET PALEOPROTEROZOÏQUES AU QUEBEC

Projet 2011-07

Par : Stéphane Faure, Ph.D
2012



CONSOREM

Consortium de recherche
en exploration minérale

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minière) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non-commerciales en citant la référence suivante :

Faure, S., 2012. Porphyres Cu-Au subalcalins: caractéristiques géochimiques et cibles d'exploration dans les terrains de haut grade métamorphique archéens et paléoprotérozoïques au Québec. Rapport, Projet CONSOREM 2011-07, 25 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Ce projet est consacré aux caractéristiques géochimiques d'intrusions porphyriques subalcalines minéralisées en Cu-Au dont les âges varient entre 2734 et 1 Ma. L'accent est mis sur l'aspect méthodologie, d'abord afin de reconnaître la nature réelle des protolithes en soustrayant l'effet de l'altération hydrothermale et de comparer la géochimie d'intrusions récentes avec celles d'intrusions archéennes ou protérozoïques, et ensuite, dans le but d'identifier les éléments géochimiques discriminants qui permettent la distinction entre les intrusions minéralisées et non-minéralisées. L'approche proposée a conduit à l'élaboration de plusieurs cibles d'exploration régionale dans les provinces de Supérieur (excluant la Sous-province de l'Abitibi) et de Grenville.

Une base de données lithogéochimiques sur les porphyres à Cu-Au a été créée à partir de la littérature. Celle-ci compte 639 échantillons provenant de 60 gisements, dont les principaux gros gisements dans le monde et en particulier les quelques gisements connus du Paléoprotérozoïque en Scandinavie. Le tiers des échantillons de la banque sont géochimiquement altérés et la majorité des échantillons (560) sont classés subalcalins et calco-alcalins. L'effet de l'altération a été neutralisé en calculant les oxydes prédits dans le logiciel Lithomodeleur (version 3.0) par la méthode des bilans de masse sur précurseurs modélisés. Ceci a permis pour la première fois de constater que cette catégorie de porphyres est remarquablement regroupée selon une courbe de différenciation, avec une série allant des diorites gabbroïques jusqu'aux granites, et surtout qu'il n'existe aucune différence au niveau des éléments majeurs et dans la classification entre les Porphyres Cu-Au archéens, protérozoïques et plus récents.

Par la suite, le défi a été de reconnaître dans le Supérieur et le Grenville et parmi les 6 393 échantillons lithogéochimiques d'intrusions du SIGÉOM la « recette géochimique » s'approchant le plus des porphyres minéralisés en Cu-Au. Pour ce faire, les deux banques lithogéochimiques ont été comparées entre elles afin d'évaluer par des filtres la performance des éléments et des ratios d'éléments les plus discriminants qui caractérise ce type de minéralisation. L'objectif de cette comparaison est de conserver le maximum de données lithogéochimiques dans la banque de Porphyres Cu-Au et d'en soustraire le plus possible de la banque SIGÉOM qui contiendrait, à priori, peu de porphyres minéralisés. L'efficacité des différents critères utilisés a été évaluée dans un diagramme. Les critères discriminants les plus efficaces à réduire le nombre d'échantillons dans la banque SIGÉOM sont ceux qui utilisent les éléments des Terres Rares et les indices composites qui tiennent compte d'une série de filtres sur les éléments mineurs et traces. Ces nouveaux critères discriminants permettent dorénavant de reconnaître dans une banque de données lithogéochimiques d'éventuels porphyres subalcalins favorables aux minéralisations en Cu-Au. Afin de faciliter le transfert de l'approche vers l'utilisateur, un nouvel outil informatique a été créé dans Lithomodeleur. Cet outil de fertilité est basé sur un modèle de réseaux de neurones qui a été entraîné sur les deux banques de données (SIGÉOM et Porphyres Cu-Au). Deux modèles, qui diffèrent par le nombre d'éléments traces nécessaires pour les calculer, ont été réalisés.

Au total, 38 échantillons d'intrusions du SIGÉOM sur 611 (6,2 %) sont jugés favorables selon l'approche des filtres discriminants, et 57 échantillons sur 1 396 (4,1 %) selon une des deux méthodes de réseaux de neurones dans Lithomodeleur, avec un taux de recoupement des échantillons entre les deux approches de 40 %. Deux secteurs ont été ciblés dans le Grenville : le Front de Grenville dans le prolongement de l'Abitibi ainsi que dans l'Arc de La Bostonais, région de Portneuf. Dans le sud du Supérieur, l'intrusion du Lac Ell près du gisement Roberto ainsi que plusieurs autres intrusions magnétiques au contact entre les roches métasédimentaires de Laguiche et la Ceinture volcanique d'Eastmain ont été reconnues comme étant potentiellement fertiles. L'intrusion porphyrique minéralisée en Au du Lac Pau ainsi que d'autres intrusions adakitiques d'arc dans la Sous-province d'Ashuanipi sont également considérées comme des cibles d'exploration régionale.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----|
| Avertissement..... | i |
| Sommaire exécutif..... | ii |
| Table des matières..... | iii |
| Liste des figures..... | iv |
| Liste des tableaux..... | v |
| 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Éléments de problématique..... | 1 |
| 1.2 Objectifs et méthodologie..... | 1 |
| 2 PROTOLITHES DE PORPHYRES CU-AU AVANT ALTÉRATION..... | 2 |
| 2.1 Base de données sur les Porphyres Cu-Au et Au..... | 2 |
| 2.2 Traitement de l'altération, calcul des éléments majeurs prédits et classification des intrusions .. | 3 |
| 3 ÉLÉMENTS GEOCHIMIQUES DISCRIMINANTS DES PORPHYRES CU-AU..... | 6 |
| 3.1 Banque d'intrusions des Provinces de Supérieur, de Churchill et de Grenville..... | 6 |
| 3.2 Reconnaissance des meilleurs critères géochimiques discriminants..... | 7 |
| 3.3 Nouvel outil dans Lithomodeleur..... | 13 |
| 4 RÉSULTATS DE CIBLAGE - TERRAINS DE HAUT GRADE MÉTAMORPHIQUE..... | 13 |
| 4.1 Résultats de ciblage à partir des deux méthodes..... | 14 |
| 4.1.1 Grenville..... | 14 |
| 4.1.2 Région du Grand Nord..... | 15 |
| 4.1.3 Région de la Baie-James..... | 15 |
| 4.1.4 Sous-Province d'Ashuanipi..... | 16 |
| 5 CONCLUSION..... | 20 |
| Références..... | 21 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 1. | Distribution des gisements considérés dans la banque de compilation lithogéochimique de Porphyres Cu-Au et Au dans le monde..... | 2 |
| Figure 2. | Diagrammes de discriminations des roches fraîches et altérées pour les porphyres subcalins minéralisés de la banque lithogéochimique. A) Diagramme de Hughes (1973) modifié par Trépanier (2009); AS : Altération sodique; F : Roches fraîches; AK : Altération potassique. B) Altération Box Plot de Large et al. (2001) modifié par Trépanier (2009); les symboles précédés par la lettre F sont les champs pour les roches fraîches..... | 3 |
| Figure 3. | Diagrammes Harker montrant les relations entre les valeurs analysées (en X) en fonction des valeurs prédites (en Y) par le bilan de masse sur précurseurs modélisés (Trépanier, 2011) pour la banque des Porphyres Cu-Au subcalins. Nombre d'échantillons = 550. | 4 |
| Figure 4. | Diagrammes de Middlemost (1985) montrant la classification des roches ignées et la limite des champs alcalins et subcalins pour les valeurs analysées (A) et prédites par bilans de masse (B). | 5 |
| Figure 5. | Distribution au Québec des 6 393 échantillons lithogéochimiques d'intrusions mafiques à felsiques pour les provinces de Supérieur, de Churchill et de Grenville. Source : SIGÉOM, 2010. | 7 |
| Figure 6. | Diagrammes de Middlemost (1985) montrant la classification des roches ignées pour la banque de Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris) selon les valeurs d'oxydes d'échantillons frais ou prédits par BM sur précurseurs modélisés. A) Échantillons classés comme subcalins au départ (section 2.2). B) Échantillons après avoir appliqué le Critère 1 (intervalles de valeurs du Tableau 1). | 8 |
| Figure 7. | Diagramme V versus V/Y en ppm comparant la banque de Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris). Critère 2 du tableau 2. | 10 |
| Figure 8. | Diagramme U versus Th en ppm comparant la banque de Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris) avec la limite supérieure fixée pour la discrimination (trait bleu) et les ratios pour la croûte de Rudnick et Gao (2003). Critère 11 du Tableau 2..... | 11 |
| Figure 9. | Le diagramme Yb vs La/Yb de Richards et Kerrich (2007) permettant de discriminer les roches ignées d'arcs volcaniques adakitiques de celles d'arcs volcaniques normaux. Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris). Critère 15 du Tableau 2. | 11 |
| Figure 10. | Diagramme d'évaluation des critères discriminants présentés sur le Tableau 2 pour les intrusions subcalines de la banque Porphyres Cu-Au et du SIGÉOM. La courbe en tirets bleus montre à la brisure de pente que les meilleurs critères sont les indices composites. | 12 |
| Figure 11. | Distribution des échantillons lithogéochimiques du SIGÉOM (croix en gris) dans les terrains de haut grade métamorphique au Québec et ceux ciblés et considérés fertiles pour les minéralisations Porphyres Cu-Au (autres symboles). A) Après avoir appliqué le Critère 22, il ne reste que 38 échantillons (étoiles jaunes) sur 611 échantillons (Tableau 2). B) Après avoir appliqué le Modèle I de réseaux de neurones dans Lithomodeleur, seuls 57 échantillons (ronds blancs avec losange bleu) sur 1 434 sont considérés comme cibles d'exploration. | 17 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 12. | Localisation des régions ciblées par les deux méthodes (Figure 11) dans les provinces géologiques de haut grade métamorphique au Québec et la localisation des figures suivantes. | 17 |
| Figure 13. | Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subalcalines dans le centre du Grenville. Échantillon non fertile : croix, fertile selon le Critère 2 : étoile jaune, ou la Méthode I : rond blanc avec losange bleu. | 18 |
| Figure 14. | Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subalcalines dans le domaine parautochtone archéen du Grenville à l'est de l'Abitibi. Même légende pour les échantillons qu'à la Figure 13. | 18 |
| Figure 15. | Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subalcalines dans le Grand-Nord, Province du Supérieur. Même légende pour les échantillons qu'à la Figure 13. Subdivisions de domaines lithotectoniques d'après Simard (2008). | 18 |
| Figure 16. | Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subalcalines dans la région de la Baie-James. Même légende pour les échantillons qu'à la Figure 13. | 18 |
| Figure 17. | Localisation des échantillons autour de la Mine Éléonore, Baie-James avec le champ magnétique total. Échantillon non fertile : petite étoile blanche, fertile selon le Critère 2 : étoile jaune, ou la Méthode I : rond blanc avec losange bleu. Contour des intrusions fertiles en bleu. | 19 |
| Figure 18. | Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subalcalines dans la Sous-province d'Ashuanipi. Même légende que la Figure 17. L'encadré montre la localisation de la Figure 19. | 19 |
| Figure 19. | Localisation des échantillons dans le secteur du Gîte du Lac Pau. Échantillon non fertile : petite étoile noire, fertile selon le Critère 2 : étoile jaune, ou la Méthode I : rond blanc avec losange bleu. Contour des intrusions fertiles en bleu. | 19 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-------------|--|----|
| Tableau 1 : | Intervalles de valeurs pour les oxydes majeurs caractérisant les Porphyres Cu-Au | 6 |
| Tableau 2 : | synthèse des limites de valeurs et de l'efficacité des critères discriminants pour les intrusions subalcalines du SIGÉOM et des Porphyres Cu-Au..... | 10 |
| Tableau 3 : | Gisements de la banque Porphyres Cu-Au retenus suite à l'application du Critère 22* | 12 |

1 INTRODUCTION

Ce rapport est consacré aux caractéristiques géochimiques d'intrusions porphyriques subcalines minéralisées en Cu-Au et en Au dont les âges varient entre 2734 à 1 Ma. L'accent est mis sur l'aspect méthodologie, d'abord afin de reconnaître la nature réelle des protolithes en soustrayant l'effet de l'altération hydrothermale et de comparer la géochimie d'intrusions récentes avec celles d'intrusions archéennes ou protérozoïques, et ensuite dans le but d'identifier les éléments géochimiques discriminants qui permettent de distinguer entre des intrusions minéralisées et non-minéralisées. La dernière partie du rapport présente des cibles d'exploration régionale dans les provinces de Supérieur (excluant la Sous-province de l'Abitibi) et de Grenville qui sont basées sur la position des échantillons jugés fertiles selon l'approche proposée.

1.1 Éléments de problématique

Selon les descriptions et le niveau de détails dans le Système d'informations géominières du gouvernement du Québec (SIGÉOM), on ne dénombre pas moins de 807 intrusions porphyriques dans la Province de Supérieur (excluant la Sous-province de l'Abitibi) pour une superficie totale de 45 650 km², soit environ 7 % de la superficie de cette province. Dans la Province de Grenville, il existerait 1 065 intrusions porphyriques pour une superficie totale 16 970 km², soit environ 3,5 % du territoire grenvillien.

Les gisements porphyriques se mettent en place typiquement entre 1 et 5 km de profondeur, mais plus particulièrement pour ceux minéralisés en Cu-Au autour de 1 km (Singer et al., 2008; Murakami et al., 2010). La préservation au cours du temps des gisements porphyriques a fait l'objet de débats par certains auteurs (Groves et Goldfarb, 2007). S'il est vrai qu'on observe une décroissance du nombre de gisements porphyriques préservés depuis environ 10 Ma jusque vers 120-140 Ma (Kesler et Wilkinson, 2006 et 2008) à cause principalement du taux d'érosion rapide dans les arcs volcaniques océaniques évalués à environ 0,1 mm/an (Sillitoe, 1994), il n'en demeure pas moins que de plus en plus de gisements sont interprétés comme des porphyres protérozoïques ou archéens au Canada et ailleurs dans le monde (Lydon 2007; Sinclair 2007; Singer et al., 2008). Dans le Supérieur, et notamment en Abitibi, plusieurs porphyres archéens ont été reconnus (Pilote et al., 1998; Lydon, 2007; Beaulieu, 2010; Mercier-Langevin, 2000). Même si aucun porphyre minéralisé n'est connu dans la Province de Grenville, des gîtes de types SEDEX et exhalatifs de sulfures massifs volcanogènes (SMV) reconnus pour se mettre en place près de, ou à la surface, sont préservés malgré le métamorphisme élevé au moins au faciès des amphibolites (Bernier et al., 1987; Gauthier et Chartrand, 2005; Bonnet et al., 2005; Corriveau et al., 2007).

Il est donc difficile d'optimiser les efforts d'exploration sur de si grandes régions comme celles des provinces de Supérieur et de Grenville. De plus, le métamorphisme élevé et l'âge des roches dans ces deux provinces rendent difficile la reconnaissance d'environnements favorables à la formation de ce type de gisements. Afin de contourner ces problèmes et de s'affranchir des modèles métallogéniques et gîtologiques, la méthodologie proposée vise la caractérisation géochimique des intrusions porphyriques minéralisées en Cu-Au et Au. Le premier obstacle rencontré a été de trouver des données géochimiques car il n'existe pas de banque géochimique exhaustive et publique spécifiquement pour les porphyres minéralisés en général. Une des questions posées est de savoir si les Porphyres Cu-Au archéens et protérozoïques ont une chimie similaire aux porphyres plus récents et de mieux connaître les éléments mineurs, en traces et en Terres Rares (ÉTR) qui discriminent les intrusions fertiles de celles non-fertiles.

1.2 Objectifs et méthodologie

L'approche méthodologique proposée vise à : 1) mieux identifier et caractériser la nature géochimique des protolithes de Porphyres Cu-Au en soustrayant l'effet de l'altération hydrothermale; 2) comparer la géochimie de Porphyres Cu-Au subcalins cénozoïques avec celle de porphyres minéralisés archéens et protérozoïques connus; et 3) reconnaître dans le Supérieur et le Grenville les intrusions favorables pour ce type de minéralisation. Dans le cadre du projet, il a fallu développer une méthodologie simple

d'application et transférable aux utilisateurs. Cette approche s'est concentrée sur les limites et ratios d'éléments majeurs et traces afin d'évaluer leur performance pour ne retenir que les éléments les plus discriminants (en d'autres termes trouver une recette). Afin de faciliter le traitement lithogéochimique pour l'utilisateur, la base de la méthode a été implantée dans le logiciel Lithomodeleur du Consorem (Trépanier, 2012).

2 PROTOLITHES DE PORPHYRES CU-AU AVANT ALTÉRATION

2.1 Base de données sur les Porphyres Cu-Au et Au

Une nouvelle banque de compilation de données lithogéochimiques sur des porphyres à Cu-Au et Au a été construite à partir de 41 articles scientifiques, rapports gouvernementaux ou thèses. Au total, 639 échantillons lithogéochimiques de 60 gisements différents dans le monde ont été compilés, parmi lesquels on retrouve la majorité des plus gros gisements (**Figure 1**). Les éléments majeurs pour tous les échantillons de la banque sont présentés, mais pour les éléments mineurs et traces il y a une certaine hétérogénéité dans les données ce qui est inhérent pour ce genre de compilation. La banque de référence donne également des descriptions sur le nom, l'altération et la texture de la roche analysée, ainsi que des indications sur les tonnages et les teneurs en Cu et Au, l'âge, et l'environnement géotectonique.

Un peu moins de la moitié des échantillons (304) de la banque proviennent de gisements de moins de 40 Ma, dont Bajo de la Alumbrera (Argentine), Batu Hijau (Indonésie), Bingham (USA), Escondida (Chili), Reko Diq (Afghanistan), et plusieurs gisements notables de la Papua Nouvelle-Guinée (**Figure 1**). La banque compte également 219 échantillons de gisements porphyriques protérozoïques en Scandinavie (Aitik, Tallberg et Granberg en Suède et Juhineva en Finlande) et archéens au Canada (Malartic, Troilus, Mc Gold, Zone 32 ou La Grande Sud, et Messegay). Le reste de la banque contient des gisements du Silurien en Australie (Endeavour, Cadia et autres gisements de l'Eastern Lachan), du Dévonien en Mongolie (Hugo Dummett et Oyu Tolgoi), du Mésozoïque au Canada (Prosperity, Lorraine et Lexington en Colombie-Britannique), en Chine (Shaxi), au Mexique (El Arco) et au Tibet (Duobuza).



Figure 1. Distribution des gisements considérés dans la banque de compilation lithogéochimique de Porphyres Cu-Au et Au dans le monde.

2.2 Traitement de l'altération, calcul des éléments majeurs prédits et classification des intrusions

Un des défis de la lithogéochimie est de connaître le protolithe de la roche hôte avant qu'elle ne subisse l'altération hydrothermale (métasomatisme). La reconnaissance de la composition initiale en éléments majeurs est fondamentale afin de nommer et classer correctement les intrusions porphyriques, surtout celles qui sont altérées et de comparer les échantillons de différents gisements entre eux ou de reconnaître d'autres intrusions de nature similaire. Les diagrammes de classification des roches ignées utilisant que des éléments traces comme celui de Winchester et Floyd (1977) sont en principe insensibles à l'altération mais ne sont pas aussi discriminants que les diagrammes utilisant les majeurs comme cela est proposé dans le modèle de classification de l'IUGS pour les roches ignées (Le Maître et al., 1989).

Dans la majorité des articles scientifiques consultés pour la compilation de la base de données lithogéochimiques sur les Porphyres Cu-Au et Au, l'altération géochimique est généralement sous-estimée ou esquivée, et les valeurs d'oxydes majeurs sont utilisées directement dans des diagrammes de classification de roches (diagramme TAS-Total Alkali Silica par exemple) ce qui ne permet pas de nommer correctement certains échantillons altérés. Tout au plus, des diagrammes Harker exprimant les variations des éléments majeurs en fonction du SiO₂ sont présentés et discutés. La nature des protolithes des roches altérées et minéralisées est plus souvent qu'autrement interprétée soit sur la base de comparaisons pétrographiques entre échantillons frais et altérés ou sur les profils de Terres Rares de différentes suites intrusives. La **Figure 2** montre qu'environ le tiers des données lithogéochimiques des porphyres subalcalins minéralisés de la banque sont altérés (30 % et 36 % selon le graphique utilisé).

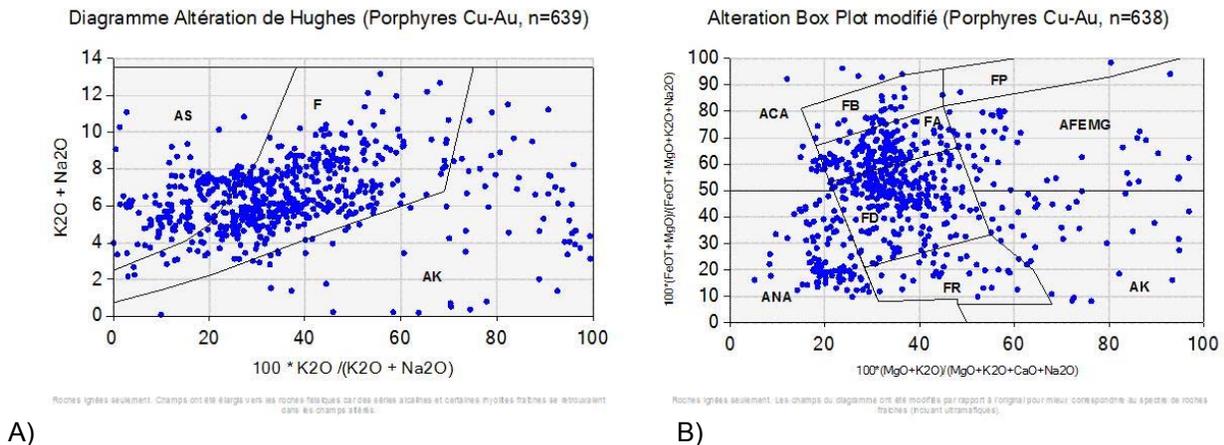


Figure 2. Diagrammes de discriminations des roches fraîches et altérées pour les porphyres subalcalins minéralisés de la banque lithogéochimique. A) Diagramme de Hughes (1973) modifié par Trépanier (2009); AS : Altération sodique; F : Roches fraîches; AK : Altération potassique. B) Altération Box Plot de Large et al. (2001) modifié par Trépanier (2009); les symboles précédés par la lettre F sont les champs pour les roches fraîches.

Le calcul des bilans de masse est la méthode de traitement optimal du métasomatisme. Il s'agit de calculer les gains et les pertes en éléments (généralement les majeurs) d'un échantillon altéré par rapport à un protolithe frais. La difficulté est d'avoir et de pouvoir reconnaître les échantillons les moins altérés d'une banque de données et idéalement se trouvant proches des roches métasomatisées (Leitch et Lentz, 1994). Afin de contrer cette difficulté, Trépanier (2011) a proposé une nouvelle méthode de bilans de masse sur des précurseurs modélisés à partir d'une banque de milliers de roches ignées fraîches et de composition variée. Cette méthode est basée sur les réseaux neuronaux et calcule selon une équation complexe et non-linéaire la composition idéale en éléments majeurs (oxydes prédits) d'une roche métasomatisée à partir de ses ratios d'éléments immobiles (Al₂O₃, Zr, TiO₂ avec Cr et Y optionnels). Cependant, cette méthode ne s'applique qu'aux roches ignées subalcalines puisque le réseau neuronal a

été entraîné que pour cette catégorie de roche.

La première étape du traitement a donc été de différencier dans la banque de porphyres minéralisés Cu-Au les roches subcalines des roches alcalines. Les diagrammes de discrimination de l'alcalinité de Winchester et Floyd (1977) et Pearce (1996) utilisant les rapports Nb/Y versus Zr/Ti ou Zr/TiO₂ ont été utilisés. Le seuil analytique du Nb a été considéré en particulier; pour les analyses avec un seuil de détection de 1 ppm, seuls les échantillons plus grands que 10 ppm ont été considérés. Pour certains échantillons qui n'ont pas été analysés pour le Zr, le diagramme TAS de Le Bas et al. (1986) pour l'alcalinité a été utilisé seulement pour les roches fraîches déterminées à l'aide des diagrammes de Hughes (1973; modifié par Trépanier 2009) et « Alteration Box Plot » de Large et al. (2001; modifié par Trépanier, 2009). Si le Nb et/ou Y n'étaient pas analysés, le diagramme de Winchester et Floyd (1977) avec SiO₂ versus Zr/Ti a été utilisé. Mais comme SiO₂ est sensible à l'altération, le SiO₂ mesuré a été comparé au SiO₂ prédit par la méthode des bilans de masse sur précurseurs modélisés. Si le SiO₂ mesuré était similaire en valeur à celui prédit, alors le SiO₂ pouvait être utilisé.

Au total, 560 analyses lithogéochimiques dans la banque de Porphyres Cu-Au ont été classées selon cette approche comme étant des intrusions subcalines. La grande majorité (82,1 %) de ces porphyres sont calco-alcalins selon les critères de Barrett et MacClean (1994), alors que 13 % des échantillons sont d'une affinité transitionnelle. Le reste des porphyres (4,9 %) sont tholéitiques et se regroupent dans les arcs volcaniques immatures des Philippines (Luzon) et de la Papua Nouvelle Guinée (Iles Salomon). Les oxydes prédits par la méthode des bilans de masse sur précurseurs modélisés ont été par la suite calculés pour 550 d'entre eux. Il apparaît une bonne corrélation pour la majorité des échantillons entre les valeurs des éléments analysées et celles prédites pour le SiO₂ et le Fe₂O₃ (**Figure 3**). Par contre, les corrélations sont mauvaises entre autre pour le CaO et le K₂O, ce qui témoigne que beaucoup d'échantillons sont altérés avec l'ajout ou le lessivage en ces éléments.

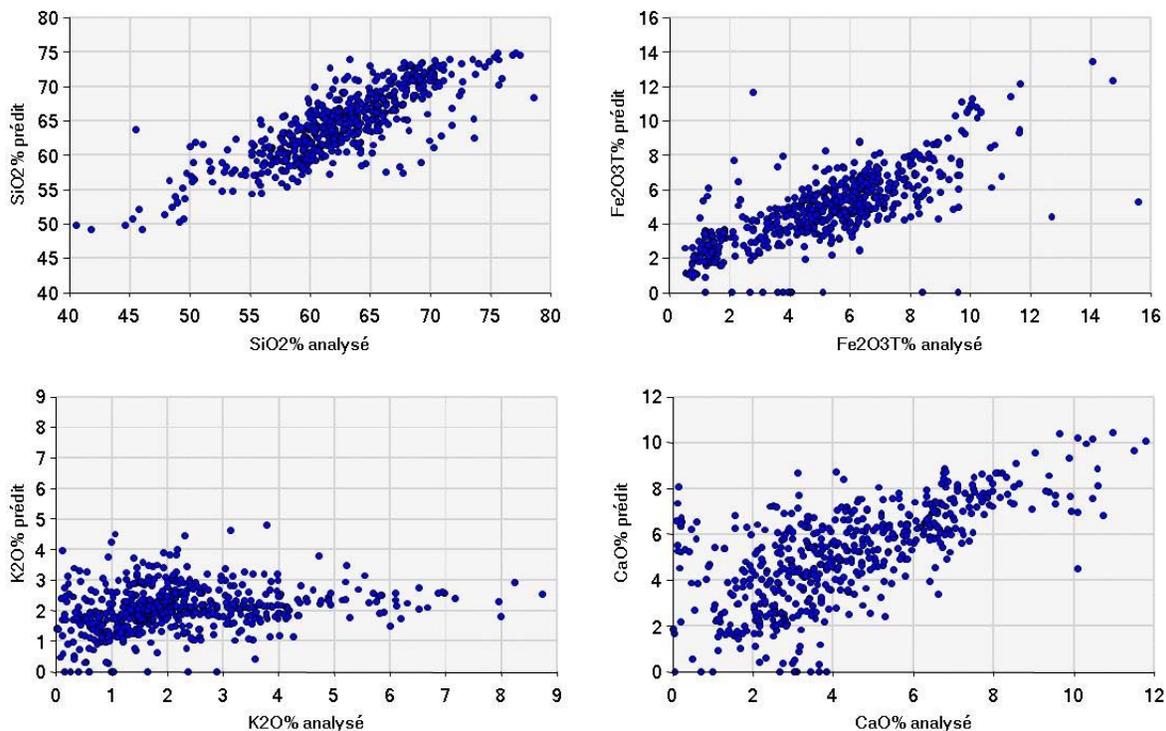


Figure 3. Diagrammes Harker montrant les relations entre les valeurs analysées (en X) en fonction des valeurs prédites (en Y) par le bilan de masse sur précurseurs modélisés (Trépanier, 2011) pour la banque des Porphyres Cu-Au subcalins. Nombre d'échantillons = 550.

La **Figure 4** permet de voir l'impact de la correction apportée aux oxydes lorsqu'on soustrait l'effet de l'altération sur les échantillons lithogéochimiques, c'est-à-dire une fois le calcul de bilan de masse réalisé. Dans le diagramme de Middlemost (1985), les valeurs analysées des oxydes montrent un étalement des valeurs selon le SiO₂ et une dispersion des alcalis pour certains échantillons dans les champs des monzonites et vers le champ alcalin (**Figure 4a**). Par contre, les valeurs prédites des oxydes par bilans de masse sont recentrées remarquablement selon une courbe de différenciation, avec une série allant des diorites gabbroïques jusqu'aux granites (**Figure 4b**). La **Figure 4b** montre également qu'il n'existe aucune différence aux niveaux des éléments majeurs et dans la classification des Porphyres Cu-Au archéens, protérozoïques et plus récents.

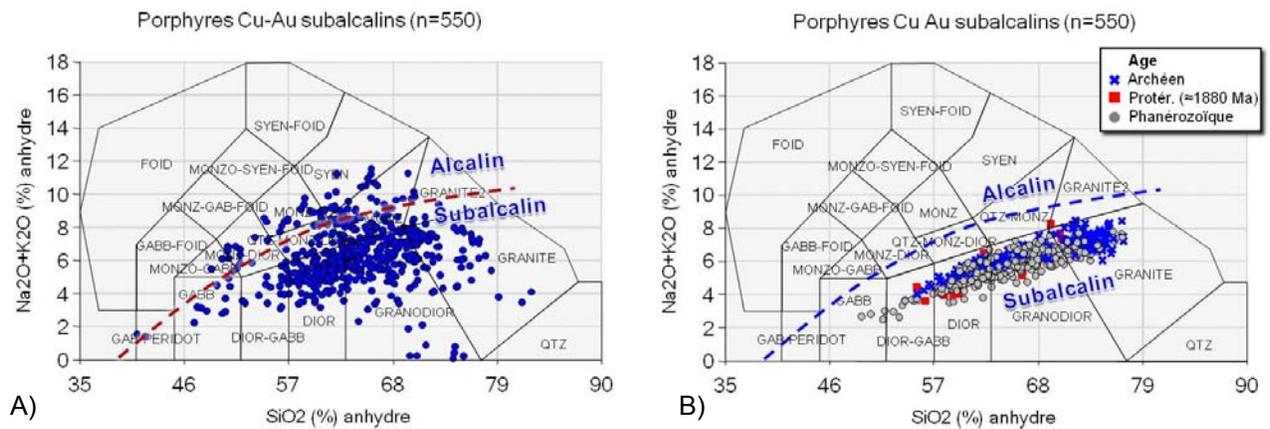


Figure 4. Diagrammes de Middlemost (1985) montrant la classification des roches ignées et la limite des champs alcalins et subalcalins pour les valeurs analysées (A) et prédites par bilans de masse (B).

Il existe donc une différence notable dans la classification des intrusions une fois l'effet de l'altération soustraite. À partir de la banque traitée des Porphyres Cu-Au subalcalins, il est maintenant possible de fixer des bornes minimales et maximales pour les valeurs des oxydes prédits ou analysés d'échantillons frais. Le **Tableau 1** résume les limites des valeurs qui devraient être appliquées pour discriminer dans un premier temps les échantillons de toutes autres banques d'échantillons traitées avec la méthode des bilans de masse. Il s'agit ici du premier critère discriminant nommé **Critère 1**. En appliquant ces limites discriminantes, 61 des 550 échantillons de la banque de Porphyres Cu-Au n'ont pu se classer, cela veut dire que 11,1 % des échantillons sont hors norme d'après les limites fixées du **Tableau 1**. Les analyses rejetées correspondent principalement à des diorites, à des échantillons dont les bilans de masse ont été calculés sans le Cr (donc moins précis), ou des intrusions à la limite du champ alcalin selon différents diagrammes.

Tableau 1 : Intervalles de valeurs pour les oxydes majeurs caractérisant les Porphyres Cu-Au (Critère discriminant 1)

| Oxyde analysé (éch. frais) ou prédit par BM (éch. altéré) | Minimum (%) | Maximum (%) |
|---|-------------|-------------|
| SiO ₂ | 54 | 74 |
| K ₂ O | 0,9 | 4 |
| CaO | 0,3 | 9 |
| Na ₂ O | 2,5 | 5,5 |
| MgO | 0,5 | 6,5 |
| Fe ₂ O ₃ T | 1,0 | 9,0 |
| TiO ₂ | 0 | 1,0 |
| Al ₂ O ₃ (analysé) | 10 | 21 |
| MnO (analysé) | 0 | 0,5 |
| P ₂ O ₅ (analysé) | 0 | 0,5 |

BM : Bilans de masse sur précurseurs modélisés

3 ÉLÉMENTS GEOCHIMIQUES DISCRIMINANTS DES PORPHYRES CU-AU

Cette section traite des éléments les plus discriminants qui permettent de reconnaître dans une banque de données la signature géochimique d'intrusions comparables aux Porphyres Cu-Au ou en Au compilés dans ce rapport, autrement dit des meilleures combinaisons d'éléments pour fabriquer une recette géochimique. Afin d'évaluer la performance des éléments et des ratios d'éléments les plus discriminants, une comparaison lithogéochimique a été faite entre la banque de Porphyres Cu-Au et une autre banque d'intrusions de fertilité inconnue qui à priori ne contiendrait que très peu des porphyres minéralisés et dont on ne saurait les reconnaître au départ. Le but est de conserver le maximum de données lithogéochimiques dans la banque de porphyres (signature géochimique recherchée) et d'en rejeter le plus possible dans l'autre banque, ce qui indiquerait que les critères utilisés sont discriminants. Par conséquent, les échantillons restants dans cette banque quelconque seraient comparables géochimiquement aux porphyres minéralisés et pourraient être considérés comme des cibles d'exploration.

3.1 Banque d'intrusions des Provinces de Supérieur, de Churchill et de Grenville

La banque qui a été comparée à celle des Porphyres Cu-Au est une banque de données d'intrusions mafiques à felsiques (selon la description lithologique de l'échantillon géochimique) constituée des données publiques du SIGÉOM pour la province archéenne de Supérieur (excluant l'Abitibi) et celles protérozoïques de Churchill et de Grenville, ces trois provinces étant généralement métamorphosées au moins au faciès des amphibolites (**Figure 5**). Cette banque compte 6 393 échantillons géochimiques analysés pour les majeurs, mais les éléments mineurs et traces analysés sont variables en nombre et en qualité d'un échantillon à l'autre. Il s'agit donc d'une banque non-uniforme concernant ces éléments et cela aura une incidence sur le nombre d'échantillons retenus lors du choix des éléments discriminants.

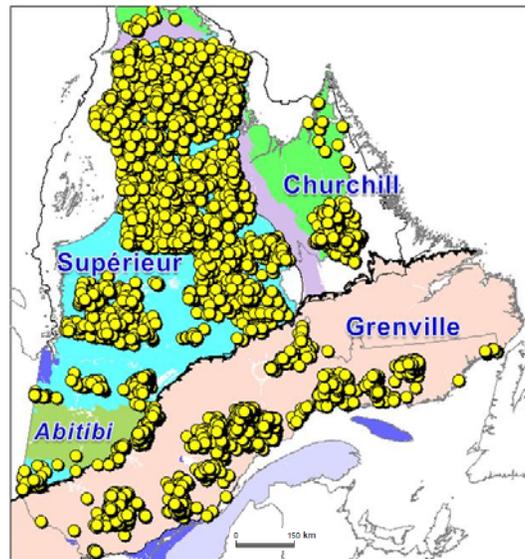


Figure 5. Distribution au Québec des 6 393 échantillons lithogéochimiques d'intrusions mafiques à felsiques pour les provinces de Supérieur, de Churchill et de Grenville. Source : SIGÉOM, 2010.

3.2 Reconnaissance des meilleurs critères géochimiques discriminants

Afin de comparer la banque de porphyres minéralisés à celle des intrusions du SIGÉOM, cette dernière a dû être traitée de la même manière que ce qui a été montré dans la section 2.2, c'est-à-dire déterminer l'alcalinité et ensuite calculer les bilans de masse par la méthode des précurseurs modélisés sur les roches subalcalines. Au total, 6 204 des 6 393 échantillons du SIGÉOM ont été classés subalcalins selon cette démarche. La **Figure 6a** montre la distribution de ces échantillons dans l'espace SiO_2 prédit versus $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ prédits. Une quarantaine d'échantillons (moins de 0,68 %) se classent dans ce diagramme dans le champ alcalin. Ceci ne pose pas un problème puisque lorsqu'on applique le Critère 1, c'est-à-dire la série de filtres sur les valeurs minimales et maximales des oxydes, ces échantillons sont éliminés (**Figure 6b** et **Tableau 1**). En tout, 2 544 intrusions du SIGÉOM sont conservées après avoir appliqué le Critère 1, ce qui veut dire que 3 660 échantillons (59 %) ont été retirés lors de cette étape discriminante. En contre partie, 61 des 550 échantillons (11,1 %) de la banque de Porphyres Cu-Au ne se sont pas classés tel que montré précédemment dans la section 2.2. Il en résulte une très bonne superposition des données entre les deux banques, à part une série de monzonites à quartz subalcalines dans la base du SIGÉOM (**Figure 6b**).

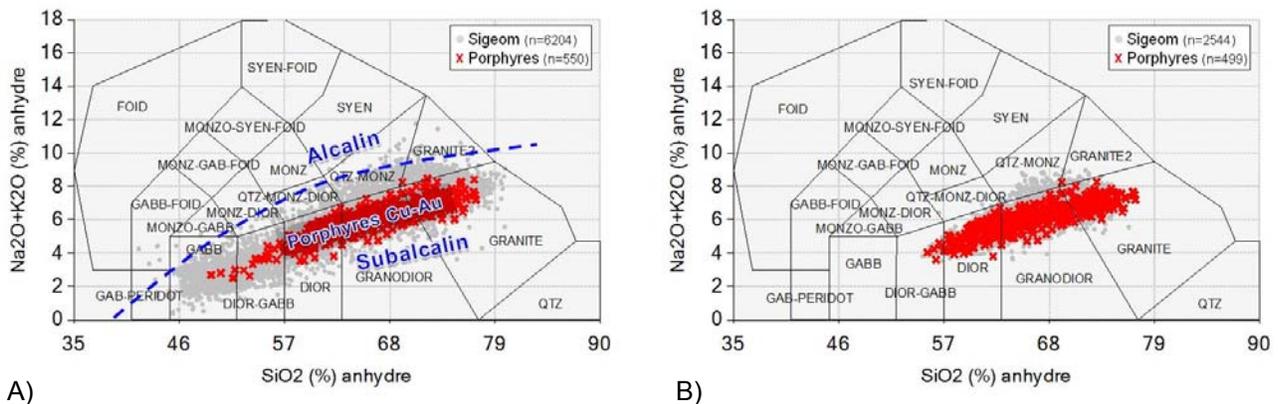


Figure 6. Diagrammes de Middlemost (1985) montrant la classification des roches ignées pour la banque de Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subalcalines du SIGÉOM (ronds gris) selon les valeurs d'oxydes d'échantillons frais ou prédits par BM sur précurseurs modélisés. A) Échantillons classés comme subalcalins au départ (section 2.2). B) Échantillons après avoir appliqué le Critère 1 (intervalles de valeurs du Tableau 1).

À partir de la présente étape, les 2 544 échantillons restants du SIGÉOM et les 499 de la banque Porphyres Cu-Au servent de base de comparaison lithogéochimique commune. Tous ces échantillons sont classés de la même manière et ont des compositions très similaires selon le diagramme de classification de TAS de Middlemost (1985) présenté sur la **Figure 6b**. Il s'agit maintenant de filtrer d'une manière plus ciblée la banque du SIGÉOM pour des intrusions fertiles en utilisant les éléments traces et ÉTR les plus discriminants. Le choix de critères discriminants les plus performants repose sur certains principes (Kerrick et Wyman, 1996). Il faut d'abord exclure les LILE (Large-ion lithophile elements) et les LFS (Low field strength elements) car ils sont sensibles aux processus métasomatiques. Même si Van Dongen et al. (2010) ont montré que certains ÉTR, et le Ti considéré immobile, peuvent être mobiles dans des systèmes porphyriques minéralisés à cause de changements minéralogiques dans les zircons, apatites, et titanites, les ÉTR et les HFSE (High field strength elements) de manière générale peuvent être considérés immobiles lors de l'altération. La discrimination par ratios d'éléments immobiles peut se faire en opposant des éléments qui ont des affinités ou des comportements différents. On peut opposer des éléments lithophiles (croûte sialique) comme U, Th, Yb, Y, et Zr avec des éléments d'affinité mantellique comme le Nb, Ta, Ti, Cr, et Ni par exemple, ce qui pourrait témoigner de la contamination de sources différentes. Des ratios entre ÉTRL (ÉTR légères comme le La), ÉTRM (ÉTR moyennes comme le Sm) et ÉTRH (ÉTR lourdes comme le Yb) peuvent également témoigner de processus de fractionnement différents (Richards et al., 2012).

Plusieurs ratios ont été calculés et analysés dans des diagrammes binaires dans le but de discriminer les intrusions « fertiles » des « intrusions non-fertiles ». Ces ratios d'éléments, ainsi que certaines valeurs limites, sont synthétisés pour chacune des banques sur le **Tableau 2**. Au total, 22 critères différents ont été testés sur la base de limites et de ratios d'éléments en traces, de Terres Rares et d'indices composites, incluant le Critère 1 en tête de liste. C'est en fait à partir des échantillons qui ont passé le filtre du Critère 1 que tous les autres critères ont été évalués individuellement en termes d'efficacité. Pour chaque critère et pour chacune des banques de données, le nombre et le pourcentage de données retirées sont exprimés en fonction des intervalles de valeurs choisis. Les intervalles de valeurs ont été déterminés visuellement en fixant des limites qui correspondent au champ des Porphyres Cu-Au sur des diagrammes binaires construits par le logiciel Lithomodeleur 3.0 (Trépanier, 2012). Il est à noter que selon les éléments analysés, la quantité d'échantillons varie beaucoup d'un critère à l'autre (**Tableau 2**).

Trois exemples de diagrammes discriminants sont présentés (**Figures 7, 8 et 9**). Le diagramme V versus V/Y de la **Figure 7** montre qu'en fixant le ratio $V/Y \geq 4,5$ (et $Y \leq 26$ ppm non montré sur cette figure), le

pourcentage de données retirées est de 4,5 % pour la banque des Porphyres Cu-Au et de 44,7 % pour les intrusions du SIGÉOM. La valeur généralement élevée de ce ratio pour les Porphyres Cu-Au de la banque est probablement une indication que ces intrusions contiennent de la magnétite. En effet, le V^{3+} peut se substituer au Fe^{3+} principalement dans la structure de la magnétite (Taner et al., 2000; Toplis et Corgne, 2002). Les valeurs de ce ratio indiqueraient ainsi que les magmas étaient oxydés. Cet état d'oxydation du liquide sulfuré permet de fixer l'oxygène au fer pour former la magnétite, le soufre et le cuivre de se concentrer ultimement dans les fluides minéralisés.

Une bonne discrimination entre les Porphyres Cu-Au et la banque du SIGÉOM est observée également sur la **Figure 8** avec une nette séparation selon le rapport $Th/U \leq 5,55$, et les limites $U \leq 4$ et $Th \leq 12$. Seulement 27 échantillons de Porphyres Cu-Au sur 237 (11,4 %) ne sont pas compris dans ces limites, contre 674 sur 1 354 (49,8 %) pour les intrusions subalcalines du SIGÉOM (**Tableau 2**). Le Th et U sont incompatibles et ont des comportements similaires de sorte qu'ils ne fractionnent pas l'un par rapport à l'autre durant le magmatisme et se concentrent dans les résidus de fusion (Sun et al., 2012). Les Porphyres Cu-Au ont des ratios Th/U soient semblables aux ratios moyens de la croûte continentale, situés entre 3,8 pour la croûte supérieure et 6,0 pour la partie inférieure (Rudnick et Gao, 2003), ou en dessous (**Figure 8**). La majorité des données ont des valeurs inférieures à la croûte, cela pourrait s'expliquer par la contamination de produits de fusion du manteau dont la valeur moyenne de ce dernier est estimée à 2,6 (O'Nions et McKenzie, 1993) ou par la plus grande mobilité de l'uranium durant le métasomatisme, notamment lors de la déshydratation et le relâchement de fluides dans la plaque subductée (Sun et al., 2012).

Le diagramme de discrimination Yb vs La/Yb de Richards et Kerrich (2007) permet de discriminer les roches ignées d'arcs volcaniques du type adakitique de celles de composition andésitique à rhyolitique d'arcs volcaniques normaux. Plusieurs auteurs ont attribué la fertilité de porphyres sur la base de ce graphique (Thiéblemont et al., 1997; Sajona et Maury, 1998; Oyarzun et al., 2001). La compilation de Porphyres Cu-Au subalcalins présentée dans ce rapport montre qu'une grande majorité de gisements ne sont pas des roches adakitiques mais sont plutôt des intrusions d'arcs normaux (**Figure 9**). En fait seulement 47 échantillons se sont classés dans le champ adakitique, alors que 185 sont dans le champ des arcs normaux (le reste étaient hors champ). Parmi les porphyres minéralisés du type adakitique, on retrouve ceux des gisements Aitik en Suède (1340 Mt @ 0,4 % Cu, 0,2 g Au/t), El Galeno au Pérou (486 Mt @ 0,57 % Cu, 0,14 g/t Au), le tiers des données d'Escondida au Chili (4 860 Mt @ 0,97 % Cu, 0,25 g/t Au), et Saindak en Afghanistan (440 Mt @ 0,41 % Cu, 0,5 g/t Au). Ces résultats indiquent donc que la majorité des intrusions porphyriques Cu-Au ne sont pas de composition adakitique. Par contre ce graphique est parmi les plus discriminants de ceux testés si on utilise les limites suivantes : $La/Yb \leq 35$ ppm, $Yb \geq 0,4$, $Y \leq 2,5$ et $La \leq 27$ ppm. Ces valeurs limites permettent d'éliminer 69 % des données de la banque du SIGÉOM contre seulement 10,9 % pour les Porphyres Cu-Au (**Figure 9; Tableau 2**).

Tableau 2 : synthèse des limites de valeurs et de l'efficacité des critères discriminants pour les intrusions subcalines du SIGÉOM et des Porphyres Cu-Au.

| No | Critère discriminant | Banque Porphyres Cu-Au | | Banque Sigeom 2010 | |
|--|--|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | | Données retirées/Total | % données retirées | Données retirées/Total | % données retirées |
| Intrusions subcalines au départ | | | | | |
| Critère sur la base des Oxydes (prédits ou frais) | | | | | |
| 1 | SiO ₂ ≥54 ≤74; Al ₂ O ₃ ≥10 ≤21; K ₂ O ≥0,9 ≤4; CaO ≥0,3 ≤9 etc... | 61/550 | 11,1% | 3660/6204 | 59,0% |
| Éléments traces | | | | | |
| 2 | V/Y ≥4,5 et Y ≤26 | 14/313 | 4,5% | 477/1067 | 44,7% |
| 3 | Th ≥0,5 ≤10 et Hf ≥1,5 ≤4,5 | 16/207 | 7,7% | 637/1202 | 53,0% |
| 4 | Th/Ta ≥2 ≤21 et Th ≤12 et Ta ≤1,8 | 14/165 | 8,5% | 636/1193 | 53,3% |
| 5 | Y/Sr ≤0,11 et Y ≥2,5 ≤22 | 32/495 | 6,5% | 642/2145 | 29,9% |
| 6 | Th/Co ≤1,3 et Co ≤30 Th ≤12 | 14/211 | 6,6% | 387/1275 | 30,4% |
| 7 | Zr ≤180 et Y ≥2,5 ≤22 | 39/495 | 7,9% | 847/2193 | 38,6% |
| 8 | Sc/Th ≤8 et Th ≤12 | 17/192 | 8,9% | 589/1701 | 34,6% |
| 9 | Nb/Sr ≤0,025 | 43/480 | 9,0% | 659/2113 | 31,2% |
| 10 | Nb/Zr ≤0,09 et Zr ≤200 | 43/480 | 9,0% | 649/2113 | 30,7% |
| 11 | Th/U ≤5,55 et U ≤4 Th ≤12 | 27/237 | 11,4% | 674/1354 | 49,8% |
| MOYENNE | | | 7,7% | | 37,9% |
| Éléments Terres Rares | | | | | |
| 12 | Sm/Yb ≥1 ≤5 et Sm ≤6 Yb ≤2,5 | 20/247 | 8,1% | 661/1177 | 56,2% |
| 13 | Ce/Yb ≤60 et Yb ≥0,4 ≤2,5 Ce ≤60 | 23/247 | 9,3% | 795/1173 | 67,8% |
| 14 | Nd/Th ≤11 et Th ≤9 Nd ≤25 | 22/216 | 10,2% | 905/1415 | 64,0% |
| 15 | La/Yb ≤35 et Yb ≥0,4 ≤2,5 La ≤27 | 27/247 | 10,9% | 811/1176 | 69,0% |
| 16 | La/Sm ≥2 ≤8 et Sm ≤6 La ≤27 | 28/248 | 11,3% | 1056/1541 | 68,5% |
| 17 | La/Hf ≤9 et La ≤27 Hf ≥1,5 ≤5 | 25/207 | 12,1% | 763/1207 | 63,2% |
| 18 | Eu _v /Eu* ≥0,8 ≤1,2 | 25/218 | 11,5% | 384/750 | 51,2% |
| MOYENNE | | | 10,5% | | 62,8% |
| Indices composites | | | | | |
| 19 | Critères 1+2+3+4 (Éléments Traces) | 20/142 | 14,1% | 452/618 | 73,1% |
| 20 | Critères 1+12+16 (Terres Rares I) | 41/247 | 16,6% | 878/1176 | 74,7% |
| 21 | Critères 1+12+13+14+15+16 (Terres Rares II) | 44/209 | 21,1% | 989/1149 | 86,1% |
| 22 | Critères 1+2+3+4+12+13+14+15+16 (Traces et ÉTR) | 34/142 | 23,9% | 573/611 | 93,8% |

Note : les critères en lettres rouges sont les critères les plus efficaces c'est-à-dire retirant le moins de données dans la base Porphyres Cu-Au et le plus de données dans la base du SIGÉOM.

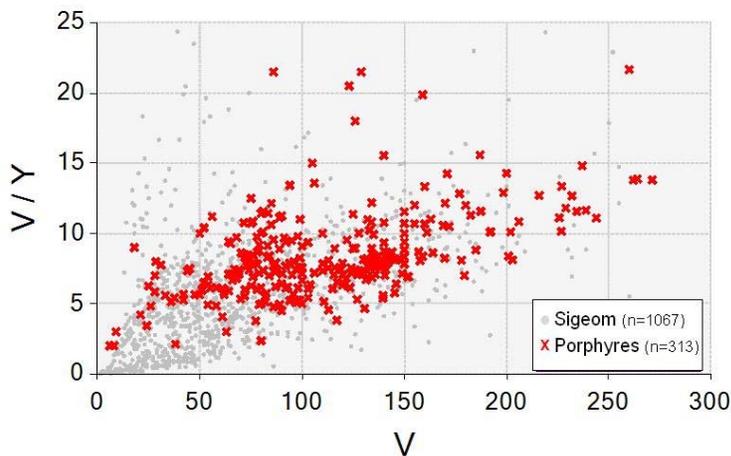


Figure 7. Diagramme V versus V/Y en ppm comparant la banque de Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris). Critère 2 du tableau 2.

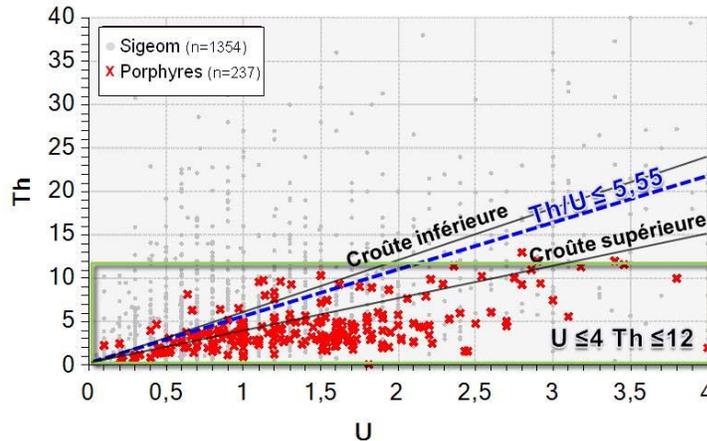


Figure 8. Diagramme U versus Th en ppm comparant la banque de Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris) avec la limite supérieure fixée pour la discrimination (trait bleu) et les ratios pour la croûte de Rudnick et Gao (2003). Critère 11 du Tableau 2.

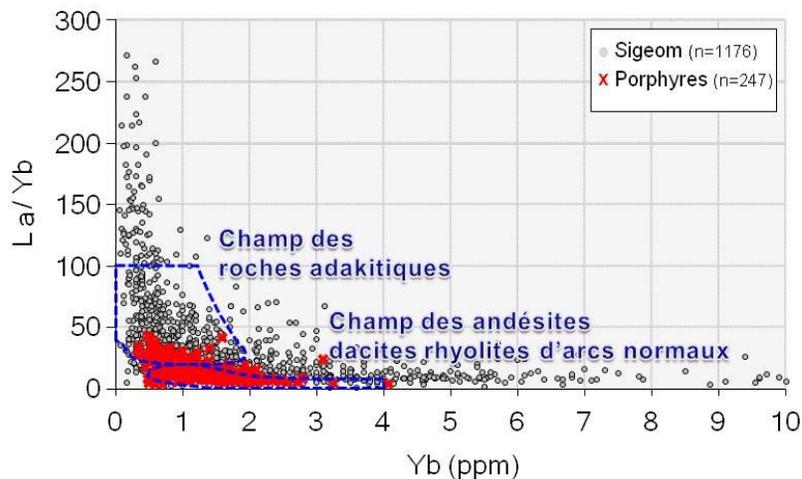


Figure 9. Le diagramme Yb vs La/Yb de Richards et Kerrich (2007) permettant de discriminer les roches ignées d'arcs volcaniques adakitiques de celles d'arcs volcaniques normaux. Porphyres minéralisés en Cu-Au (croix rouges) et la banque d'intrusions subcalines du SIGÉOM (ronds gris). Critère 15 du Tableau 2.

Il est possible d'évaluer la performance de chacun des critères discriminants du **Tableau 2** dans un graphique qui met en relation le pourcentage d'échantillons de Porphyres Cu-Au retirés pour chaque critère en fonction du pourcentage d'échantillons retirés de la banque SIGÉOM (**Figure 10**). Dans ce type de graphique, des points près de la pente 1 :1 (diagonale traversant le centre du graphique) indiqueraient que les critères utilisés ne sont pas discriminants. Par contre, les meilleurs critères recherchés sont ceux qui ont un pourcentage faible de données retirées en abscisse et un fort pourcentage de données retirées en ordonnée, c'est-à-dire bien au-dessus de cette pente. C'est le cas pour l'ensemble des résultats présentés du **Tableau 2** et rapportés sur la **Figure 10**. De plus, les points du graphique s'alignent le long d'une courbe. Une brisure de pente le long de cette courbe indique un changement de tendance. Ce changement est observé au niveau des critères 15, 16 et 17 avec les ÉTR qui sont plus

efficaces que les autres ratios d'ÉTR et que ceux avec les éléments traces (**Tableau 2** et **Figure 10**). Les indices composites sont considérés les meilleurs critères, non pas qu'ils sont les plus efficaces à conserver le plus de données de la banque des Porphyres Cu-Au, mais bien qu'ils sont très discriminants à rejeter le maximum de données de la Banque du SIGÉOM (**Figure 10**). Le Critère 22 est considéré le plus discriminant des critères, mais étant donné que beaucoup d'éléments traces et d'ÉTR ne sont pas présents dans les deux bases de données, seulement 25,8 % des données de la banque des Porphyres Cu-Au et 9,8 % de celle du SIGÉOM sont utilisées (pourcentage par rapport au nombre de données obtenues après avoir appliqué le Critère 1). Les gisements qui ont été retenus après avoir utilisé le Critère 22 sont présentés au **Tableau 3**. On peut retenir les trois gisements paléoprotérozoïques en Suède et deux gros gisements de plus d'un milliard de tonnes (El Arco au Mexique et Oyu Tolgoi en Mongolie). Un des avantages de l'approche discriminante présentée, est qu'un utilisateur qui désire filtrer des données géochimiques peut se moduler et arrêter son choix sur certains critères discriminants en fonction des éléments disponibles dans sa banque et des résultats présentés au **Tableau 2**.

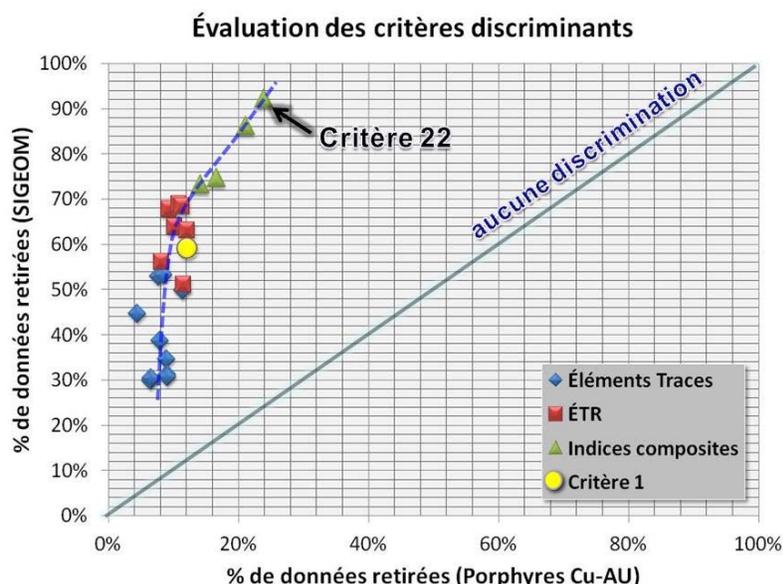


Figure 10. Diagramme d'évaluation des critères discriminants présentés sur le Tableau 2 pour les intrusions subcalines de la banque Porphyres Cu-Au et du SIGÉOM. La courbe en tirets bleus montre à la brisure de pente que les meilleurs critères sont les indices composites.

Tableau 3 : Gisements de la banque Porphyres Cu-Au retenus suite à l'application du Critère 22*

| Gisement (pays) | Tonnage et teneurs |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Aitik Cu-Au (Suède) | 1 340 Mt 0,4 % Cu, 0,2 g Au/t |
| Tallberg Cu-Au-Mo (Suède) | 44 Mt @ 0,27 % Cu, 0,2 g/t Au |
| Granberg Cu-Au (Suède) | Inconnu |
| Colosa Au (Colombie) | 468,8 Mt 0,86 g/t Au |
| El Arco Cu-(Au) (Mexique) | 1 016 Mt @ 0,518 % Cu, 0,12 g/t Au |
| Michiquillay Cu-Au-Mo (Pérou) | 631 Mt @ 0,69 % Cu, 0,15 g/t Au |
| Endeavour Cu-Au (Australie) | 131,7 Mt @ 1,12 % Cu, 0,51 g/t Au |
| Oyu Tolgoi Cu-Au (Mongolie) | 1 150 Mt 1,27 % Cu, 0,48 g/t Au |
| Hugo Dummert Cu-Au (Mongolie) | 820 Mt at 1,82 % Cu, 0,42 g/t Au |
| Duobuza Cu-(Au) (Tibet) | 62,9 Mt @ 0,94 %Cu, 0,21 g/t Au |
| Shaxi Cu-Au (Chine) | 258 500 t Cu, Au inconnu |
| Baguio Cu-Au (Philippines) | Total région: 35 Moz Au, 3 Mt Cu |

*Description du critère au Tableau 2

3.3 Nouvel outil dans Lithomodeleur

La reconnaissance de la fertilité d'intrusions pour des minéralisations porphyriques Cu-Au a été automatisée dans la version 3.0 de Lithomodeleur (Trépanier, 2012). Cet outil de transfert est basé sur un modèle de réseaux de neurones qui a été entraîné sur les deux banques de données (SIGÉOM et Porphyres Cu-Au). Deux modèles ont été réalisés, qui diffèrent entre autre par le nombre d'éléments traces nécessaire pour les calculer.

- 1) **Modèle I** : modèle étendu et sélectif qui reprend l'essentiel des critères les plus discriminants présentés dans la section 3.2 et sur le **Tableau 2** (sauf Critère 1) avec Zr, Nb, Y, La, Ce, V, Hf, Sm, Nd, Yb, et Ta ainsi que Al_2O_3 et TiO_2 qui ont été ajoutés pour mieux contraindre la différenciation magmatique. Le réseau de neurones calculant le potentiel a été entraîné sur la banque Porphyres Cu-Au (n=144) et celle du SIGÉOM (n=1 550). Pour déterminer le potentiel, le modèle de neurones utilise ces 13 éléments ainsi que les 12 ratios suivants: Zr/TiO_2 , Zr/Al_2O_3 , TiO_2/Al_2O_3 , V/Y, Th/Ta, Th/Ta, Sm/Yb, Ce/Yb, Nd/Th, La/Yb, La/Sm, et La/Hf. Si un de ces éléments n'est pas analysé dans un échantillon, aucune réponse n'est donnée par l'outil pour cet échantillon. Pour qu'une réponse cohérente soit donnée par le modèle pour un échantillon, il faut que les valeurs des éléments et des ratios de cet échantillon soient inclus dans les intervalles suivants, définis sur la banque d'entraînement du système neuronal (élément;Min/Max): TiO_2 ; 0,03/4,70 : Al_2O_3 ; 6/26,3 : Hf; 0,25/800 : Ta; 0,09/20 : Th; 0,08/112 : V; 2/504 : Zr; 14,6/1840 : Y; 1,2/220 : La; 1/500 : Ce; 3/900 : Nd; 2,4/400 : Sm; 0,45/65 : Yb; 0,1/17 : Zr/TiO_2 ; 6/3 500 : Zr/Al_2O_3 ; 0,85/130 : TiO_2/Al_2O_3 ; 0,0015/0,42 : V/Y; 0,024/70 : Th/Ta; 0,032/490 : Sm/Yb; 0,5/50 : Ce/Yb; 1,5/1 000 : Nd/Th; 0,236/450 : La/Yb; 0,9/600 : La/Sm; 0,76/31 : La/Hf; 0,085/100.
- 2) **Modèle II** : modèle simplifié, moins restrictif et moins performant par rapport au précédent avec seulement Zr, Nb, Y, La, Ce, V, Al_2O_3 , et TiO_2 . La base de données d'entraînement est constituée des échantillons de la banque Porphyres Cu-Au (n=335) et de celle du SIGÉOM à laquelle dernière ont été ajoutés des échantillons de la banque mondiale GEOROC 2011 (pour un total combiné de 4 130 échantillons). Pour déterminer le potentiel de fertilité, le modèle de neurones utilise ces 8 éléments et les 6 ratios suivants: Zr/TiO_2 , Zr/Al_2O_3 , TiO_2/Al_2O_3 , V/Y, La/Y Nb/Zr. Si un de ces éléments n'est pas analysé dans un échantillon, aucune réponse n'est donnée par l'outil pour cet échantillon. Pour qu'une réponse cohérente soit donnée par le Modèle II pour un échantillon, il faut que les valeurs des éléments et des ratios de cet échantillon soient inclus dans les intervalles suivants, définis sur la banque d'entraînement du système de neurones (élément;Min/Max): TiO_2 ; 0,005/5,35 : Al_2O_3 ; 3,19/29,35 : V; 2/1 030 : Zr; 1,6/1 905 : Y; 0,6/214 : La; 0,5/600 : Ce; 1,1/1100 : Nb; 0,2/180 : Zr/TiO_2 ; 5/10 000 : Zr/Al_2O_3 ; 0,06/118 : TiO_2/Al_2O_3 ; 0,0003/0,45 : V/Y; 0,017/196 : La/Y; 0,03/38 : Nb/Zr; 0,003/1,16.

Dans Lithomodeleur, les deux modèles donnent la probabilité qu'un échantillon d'une roche intrusive soit similaire aux échantillons de porphyres minéralisés Cu-Au (1) ou non (0), avec toute la gamme de probabilité entre 0 et 1. Pour le Modèle I, un seuil de 0,4 est utilisé comme limite pour ce qui est favorable de ce qui ne l'est pas, et de 0,6 pour le Modèle II. Ces probabilités sont indiquées dans le tableur suite au traitement. Ainsi, le choix du seuil peut-être fait par l'utilisateur pour restreindre ou élargir la quantité de données retenues comme fertiles.

4 RÉSULTATS DE CIBLAGE - TERRAINS DE HAUT GRADE MÉTAMORPHIQUE

Les méthodes présentées dans les sections 3.2 et 3.3 ont conduit à reconnaître dans la banque du SIGÉOM des intrusions potentiellement fertiles pour des minéralisations de type Porphyres Cu-Au. Cette section résume les cibles d'exploration régionales générées à partir des échantillons lithogéochimiques jugés fertiles selon ces méthodes et par rapport à la carte géologique, la géochimie de l'environnement

secondaire et la réponse magnétique de certaines intrusions au Québec. Les territoires couverts sont les domaines de plus haut grade métamorphique des provinces protérozoïques de Grenville et de Churchill et archéenne de Supérieur (excluant ainsi l'Abitibi). Mais les régions ciblées dans ces provinces géologiques sont d'abord et avant tout celles déterminées par la présence d'échantillons lithogéochimiques ayant les éléments requis pour chacune des méthodes appliquées.

La méthodologie pour le ciblage consiste à identifier les échantillons d'intrusions du SIGÉOM dont la géochimie est comparable aux Porphyres Cu-Au. Ces échantillons fertiles sont ensuite mis en relation spatiale avec les cartes géologiques au 1 :250 000 du SIGÉOM. Dans presque tous les cas, l'échantillon lithogéochimique correspondait à un polygone d'une intrusion sur la carte et aux phases intrusives du descriptif. La description de l'affleurement correspondant à la position de l'échantillon et les autres affleurements à l'intérieur du polygone de la carte ont permis de mieux caractériser les textures et les phases minérales de l'intrusion visée. De plus, les cartes magnétiques ont permis d'évaluer l'intensité du magnétisme et indirectement la possible présence ou l'absence de magnétique comme critère de fertilité supplémentaire. Parfois, les polygones ont été redessinés soit en fonction des similarités lithologiques et/ou texturales décrites en affleurements, et/ou des récents levés aéromagnétiques hautes résolutions qui ont été réalisés dans le Moyen-Nord (Baie-James). En effet, ces levés sont plus récents et de bien meilleures résolutions que la majorité des campagnes de cartographie.

Il est bon de rappeler que les intrusions clés recherchées devraient avoir des textures porphyriques, être hydratées et riches en volatiles (>3-4 % H₂O), ce qui se traduit par la présence de hornblende, biotite, et apatite, et être oxydées comme peut en témoigner la magnétite. Le principal problème pour les échantillons lithogéochimiques dans le SIGÉOM est que la texture de l'intrusion n'est généralement pas spécifiée.

4.1 Résultats de ciblage à partir des deux méthodes

Les cibles d'exploration sont présentées ponctuellement sur la **Figure 11** à l'échelle du Québec pour le critère le plus performant (Critère 22) et pour la méthode I de réseaux de neurones. Après avoir appliqué la série de filtres du Critère 22, 38 échantillons du SIGÉOM parmi 611 (6,2 %) sont considérés comme des cibles dans le Supérieur et le Grenville (**Figure 11a** et **Tableau 2**). Les résultats issus des deux modèles de réseaux de neurones montrent que le modèle I est de loin le plus efficace à éliminer un grand nombre d'échantillons de la banque du SIGÉOM. Au total, seulement 57 sur 1 434 échantillons du SIGÉOM (4,0 %) sont considérés comme potentiels en appliquant un seuil de probabilité de 0,4 (**Figure 11b** et section 3.3). Le modèle II est moins restrictif et donne évidemment plus de données en sortie du fait qu'il y a moins d'éléments considérés, c'est pourquoi les résultats pour ce modèle ne sont pas présentés et discutés. Il est à noter qu'aucun échantillon lithogéochimique dans le Churchill s'est avéré être une cible que se soit en utilisant le Critère 22 ou la méthode I (**Figure 11**).

Il y a une assez bonne correspondance entre les résultats des deux approches avec un taux de recoupement des échantillons de 40 % (**Figure 12**). Même s'il n'y a pas toujours de correspondance, la grande majorité des échantillons sont regroupés dans les mêmes secteurs, sauf à un endroit dans le Grenville et quelques échantillons isolés dans le Grand-Nord où seule la méthode I de réseaux de neurones donne des indications sur la fertilité (**Figure 12**). Ces résultats montrent dans l'ensemble que les deux approches sont comparables et complémentaires.

4.1.1 Grenville

Deux régions dans la Province de Grenville sont ciblées. Une au centre de cette province et l'autre près du front de Grenville, dans l'extension de la Sous-province de l'Abitibi (**Figure 12**). Au centre du Grenville, 9 échantillons sont disposés le long des failles du Lac Long au nord de Trois-Rivières et de Saint-Fulgence près de Chicoutimi et dans son extension vers le NE. Tous ces échantillons sont situés à l'intérieur ou à la limite de l'arc juvénile de Québécois dont l'âge de la croûte est évalué par les isotopes du Nd à 1,5 Ga (Dickin, 2000). Les 4 échantillons au nord de Trois-Rivières sont des diorites particulièrement

intéressantes puisqu'ils sont localisés au cœur du Complexe de La Bostonnais daté entre 1,41 et 1,37 Ga (Nadeau et van Breemen, 2001). Ce Complexe s'est développé dans un contexte de subduction et pendant la formation d'un arc magmatique continental (Sappin et al., 2009). Les échantillons sont localisés dans une bande de métadiorites à hornblende-biotite massives à foliées autour d'un pluton beaucoup plus jeune de la Suite granitique de Rivière-à-Pierre (1058±1 Ma; Nadeau et al., 1992). L'échantillon géochimique près de Chicoutimi semble représentatif d'une petite intrusion de 25 km² du Complexe mafique du Cap de la Mer et qui est coincée dans la zone de déformation de Saint-Fulgence en bordure de l'Anorthosite du Lac Saint-Jean. L'intrusion est composée de gabbro, d'amphibolites et de gneiss à hornblende et biotite (Hébert et Lacoste, 1998). Ce complexe mafique est intimement associé aux roches supracrustales du Complexe gneissique du Saguenay. Les quatre autres échantillons au NE de l'Anorthosite du Lac Saint-Jean qui se sont avérés fertiles selon la méthode I (**Figure 13**) sont des diorites gabbroïques associées à la Suite plutonique mafique de De La Blache (1327±16 Ma; Gobeil et al., 2002) ou à de petites intrusions de gabbros de la Suite de Louis (1060 Ma) à l'intérieur du Complexe de Baie-Comeau (1101 Ma; Moukhsil et al., 2009).

Les échantillons près de, ou au Front de Grenville sont situés dans le domaine parautochtone archéen du Grenville (**Figure 14**). Un groupe de 11 échantillons est localisé à l'intérieur du Complexe de Barry au sud de la Ceinture de roches vertes de Barry. Il s'agit de tonalites à biotite, hornblende, hématite, et magnétite, massives à foliées, d'enclaves de diorites à quartz (localement à biotite), et de granodiorites (Bandyayera et al., 2004). Le spectre des Terres Rares des tonalites de Barry (Bandyayera et al., 2004) est typique de certains porphyres à Cu-Au avec un profil plat reliant les Terres Rares moyennes et les lourdes, ce qui est une indication du fractionnement de la hornblende et de la titanite (Richards et al., 2012). Un autre groupe d'échantillon est situé à environ 40 km au SSE du Pluton de La Dauversière et à 25 km à l'est du front. Il s'agit d'échantillons de tonalites foliées à hornblende et biotite et de diorites à quartz non-magnétiques qui ont répondu surtout aux critères de fertilité de la méthode I (**Figure 14**). Le dernier groupe dans le parautochtone grenvillien est constitué de 2 échantillons retenus selon le Critère 22. Il se situe à environ 15 km à l'est du Front de Grenville, dans le prolongement des roches volcaniques de la Formation Gilman de la ceinture de l'Abitibi entre le pluton de La Dauversière et le Complexe du lac Doré (**Figure 14**; Bandyayera et al., 2005). Un des échantillons est une tonalite gneissique à biotite et l'autre une tonalite à biotite avec de la hornblende et de la magnétite selon la description de l'unité intrusive sur la carte géologique de Bandyayera et al. (2005).

4.1.2 Région du Grand Nord

Dans le Grand-Nord (Province de Supérieur), plusieurs échantillons considérés fertiles sont situés près ou à la frontière de domaines lithotectoniques. Les domaines de roches plutoniques néoarchéennes de Tikkerutuk et de Bienville au pourtour du domaine de roches métasédimentaires du Lac Minto semblent particulièrement intéressants (**Figure 15**). De plus, la majorité des échantillons s'alignent le long de failles majeures de plus de 100 km de longueur et parallèles aux frontières lithotectoniques. Les échantillons favorables pour les Porphyres Cu-Au dans le sud-ouest du Grand-Nord (**Figure 15**), sont concentrés principalement dans les Suites intrusives de Desbergères (2720-2710 Ma) et de Loups Marins (2715 - 2705 Ma), deux suites intrusives relativement tardives dans l'évolution du Grand-Nord (Simard, 2008). Il s'agit de tonalites à biotite et granodiorites, parfois porphyriques et/ou magnétiques, et de diorites à biotite hornblende. Trois échantillons jugés fertiles selon la Méthode I sont associés à de petites intrusions mafiques et kilométriques. Des anomalies en Cu dans les sédiments de fond de lac (Lamothe, 2010) sont présentes autour de certaines des intrusions de la carte géologique du SIGÉOM jugées fertiles.

4.1.3 Région de la Baie-James

Dans la région de la Baie-James, la limite entre les ceintures de roches vertes et le bassin métasédimentaire du Complexe de Laguiche de la Sous-province d'Opinaca semble particulièrement favorable (**Figure 16**). Au NO de ce bassin, dans la ceinture de La Grande, se trouve la Zone 32, un gisement porphyrique dont les ressources sont évaluées à 4,2 Mt @ 2,1 g Au/t et 0,2 % Cu (Mercier-

Langevin, 2000). Les échantillons lithogéochimiques de ce pluton minéralisé font partis de la banque Porphyres Cu-Au. Ceux-ci ont passé les filtres discriminants utilisant les éléments traces (**Tableau 2**), mais les autres critères, dont le Critère 22, n'ont pu être évalués puisque les Terres Rares n'ont pas été analysées (**Figure 16**; Mercier-Langevin, 2000). À environ 80 km au SO de la Zone 32 et à moins de 10 km du contact avec le Groupe de Laguiche, un échantillon lithogéochimique dans une intrusion de 80 km² constituée d'une granodiorite porphyrique à hornblende et à biotite s'est avéré fertile.

C'est dans le secteur autour du gisement de classe mondial de Roberto (Mine Opinaca sur la propriété Éléonore; 12,48 Mt @ 7,56 g/t Au, Goldcorp, 2011) que se concentre le plus d'échantillons fertiles pour les minéralisations porphyriques à Cu-Au (**Figures 16 et 17**). Cette région avait déjà été ciblée pour les minéralisations porphyriques de Cu-Au±Mo par un modèle de potentiel minéral fait par Lamothe (2009). Trois échantillons sur un total de 15 dans le Pluton du Réservoir Opinaca apparaissent comme fertiles selon la Méthode I de réseaux de neurones. Cette importante intrusion polyphasée est entourée par des volcanites de la ceinture de roches vertes d'Eastmain. Les trois échantillons fertiles sont tous situés dans la bordure de la partie ouest de l'intrusion constituée de tonalites magnétiques à hornblende et biotite porphyriques. Il s'agit de la phase intrusive la plus ancienne du pluton (2708,9 ±0,9 Ma; Bandyayera et al., 2007). La partie est, où prévalent des diorites à quartz et des monzodiorites très magnétiques, est datée à 2703,5 ±2,8 Ma (Bandyayera et al., 2007) et est considérée non favorable selon les critères géochimiques fixés (**Figure 17**). Une des deux intrusions de granodiorites à hornblende et biotites au NE du gisement Roberto et qui ont une signature magnétique comparable à celle du Pluton du Réservoir Opinaca contient deux échantillons fertiles sur trois.

Le seul et unique échantillon d'intrusion subalcaline près du gisement Roberto est fertile selon les deux approches (**Figure 17**). Il s'agit d'un dyke de tonalite en marge de l'intrusion de diorite et diorite quartzifère du Lac Ell datée à 2705±6 Ma et qui est l'hôte de minéralisations de type porphyrique à Au-Ag-Cu (Bandyayera et Fliszár, 2007; Bécu et al., 2007; Ravenelle et al., 2010). Bien que la minéralisation du gisement Roberto soit plus jeune que 2675±6 Ma, Ravenelle et al. (2010) n'excluent pas le rôle possible de fluides magmatiques dans la genèse de ce gisement, notamment en raison de la présence d'autres intrusions porphyriques potentiellement plus jeunes dans la région. La zone Roberto et le gîte du Lac Ell partagent certaines caractéristiques communes, notamment l'altération potassique typique de systèmes porphyriques (Bécu et al., 2007; Ravenelle et al., 2010).

4.1.4 Sous-Province d'Ashuanipi

Au Labrador, dans la partie est de la Sous-province d'Ashuanipi, les travaux de Percival et al. (2003) ont mis en évidence des intrusions prétectoniques de composition adakitique (**Figure 19**). Ces intrusions dioritiques à tonalitiques appartiennent à la Suite de Desliens et sont datées à 2723 ±6 Ma (Percival et al., 2003). Elles se seraient mises en place dans un arc magmatique suite à la subduction d'une croûte océanique juvénile (Percival et al., 2003). Du côté québécois, la Suite de Desliens a été reconnue au SO de la Sous-province d'Ashuanipi par Leclair et al. (1998) et Lamothe et al. (2000). Vers le NO de cette sous-province, les suites de Beausac et de Lachaîne pourraient être des équivalents de celle de Desliens selon les cartes du SIGÉOM (**Figure 19**). Certaines intrusions de ces suites seraient fertiles pour des Porphyres Cu-Au comme en témoignent l'intrusion hôte de la minéralisation au Lac Pau en Bordure du Réservoir Caniapiscou (**Figure 19**). L'échantillon lithogéochimique a répondu favorablement au Critère 22 et à la méthode I. Il serait représentatif d'une tonalite et granodiorite foliées à biotite + hornblende (SIGÉOM). La bordure qui est en partie porphyritique ou mylonitisée est l'hôte d'une minéralisation aurifère et d'une altération potassique. Deux petites intrusions au SE du gîte du Lac Pau sont visées comme cibles d'exploration (**Figure 19**). À 90 km au NE du gîte Lac Pau, 2 échantillons sur 4 dans une même intrusion ont été reconnus comme étant fertiles. Cette intrusion est composée d'une diorite quartzifère à biotite et orthopyroxène et d'une tonalite à hornblende et biotite. Elle est comparable en dimension et à la signature géophysique des plutons du Lac Pau et du Réservoir Opinaca (**Figures 17, 18 et 19**).

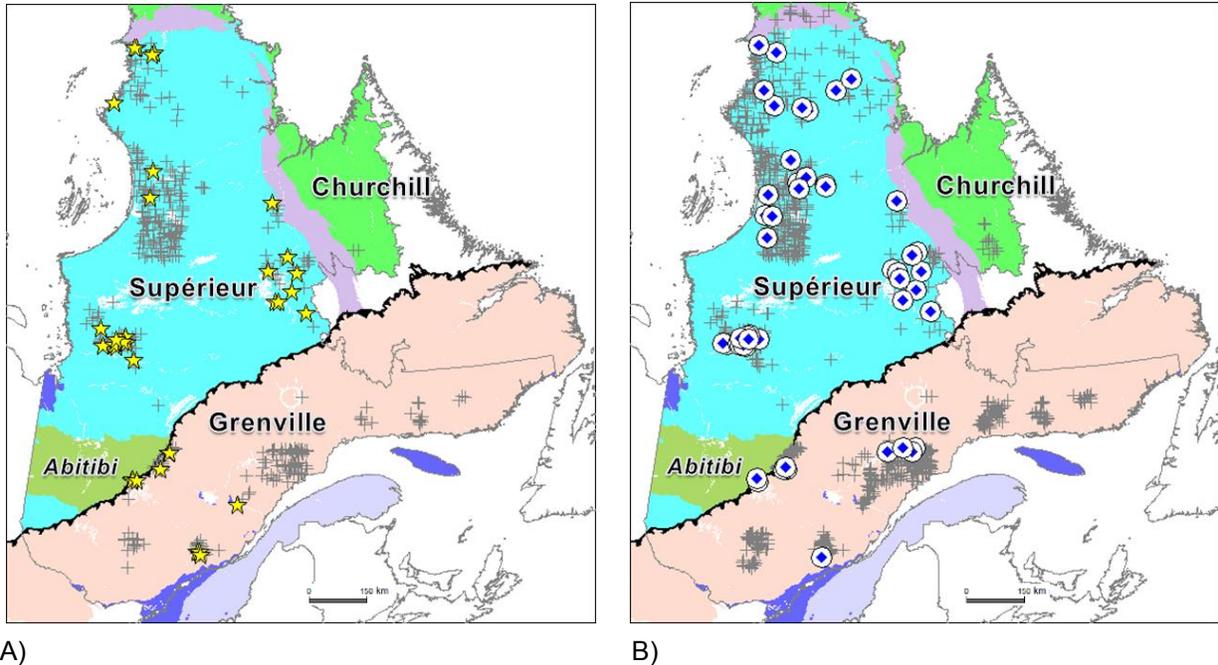


Figure 11. Distribution des échantillons lithogéochimiques du SIGÉOM (croix en gris) dans les terrains de haut grade métamorphique au Québec et ceux ciblés et considérés fertiles pour les minéralisations Porphyres Cu-Au (autres symboles). A) Après avoir appliqué le Critère 22, il ne reste que 38 échantillons (étoiles jaunes) sur 611 échantillons (Tableau 2). B) Après avoir appliqué le Modèle I de réseaux de neurones dans Lithomodeleur, seuls 57 échantillons (ronds blancs avec losange bleu) sur 1 434 sont considérés comme cibles d'exploration.

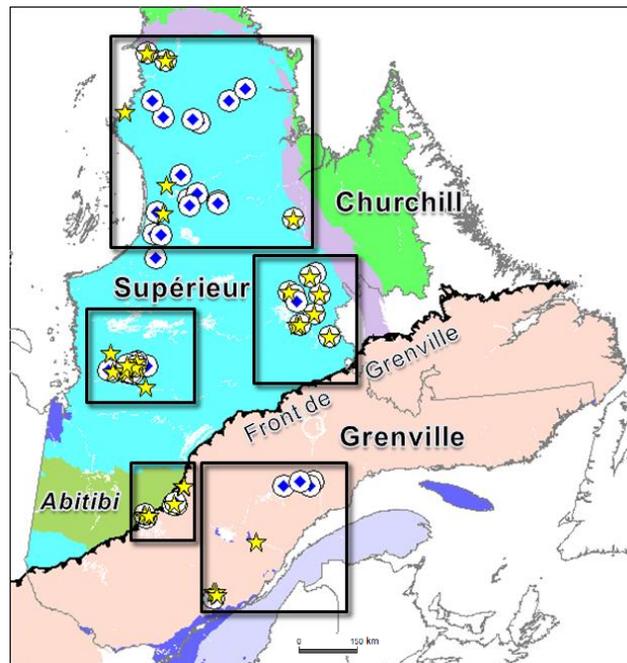


Figure 12. Localisation des régions ciblées par les deux méthodes (Figure 11) dans les provinces géologiques de haut grade métamorphique au Québec et la localisation des figures suivantes.

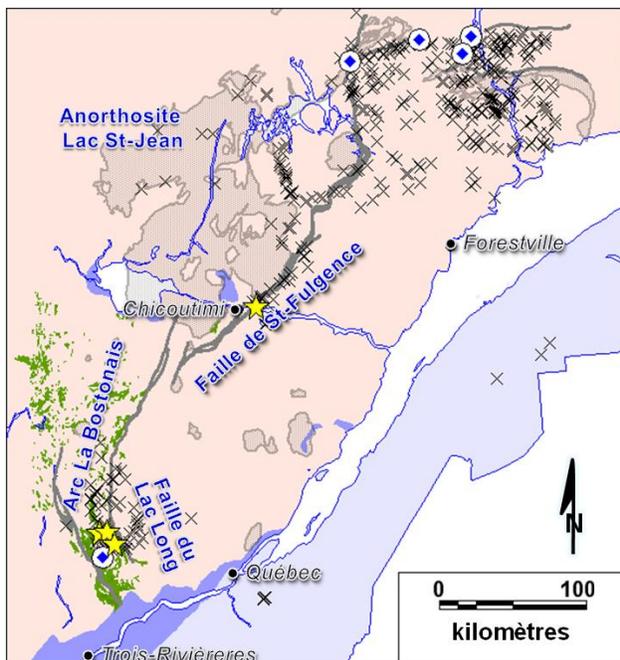


Figure 13. Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subcalines dans le centre du Grenville. Échantillon non fertile : croix, fertile selon le Critère 2 : étoile jaune, ou la Méthode 1 : rond blanc avec losange bleu.

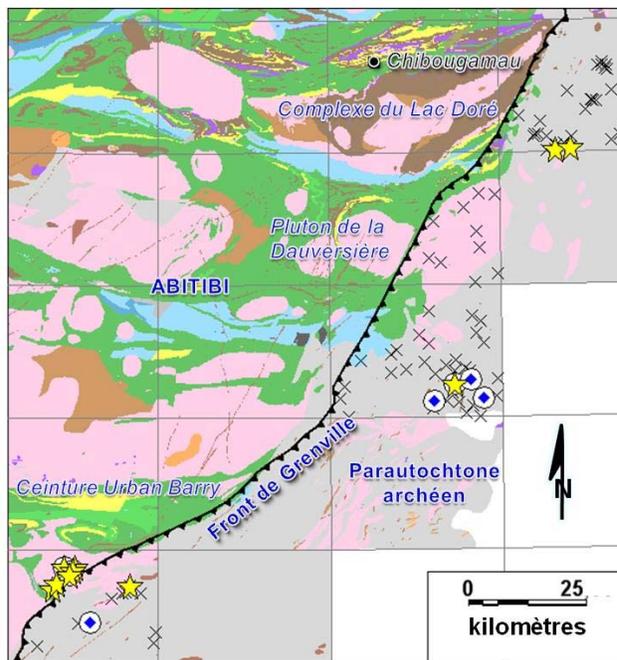


Figure 14. Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subcalines dans le domaine parautochtone archéen du Grenville à l'est de l'Abitibi. Même légende pour les échantillons qu'à la Figure 13.

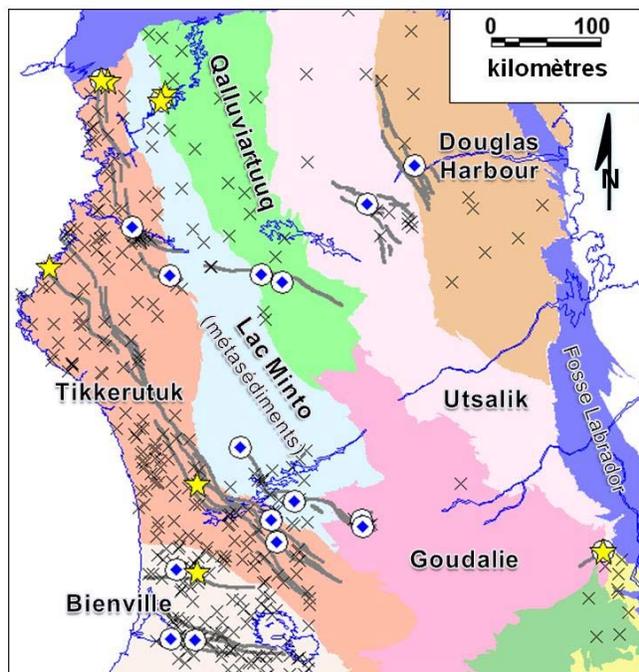


Figure 15. Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subcalines dans le Grand-Nord, Province du Supérieur. Même légende pour les échantillons qu'à la Figure 13. Subdivisions de domaines lithotectoniques d'après Simard (2008).

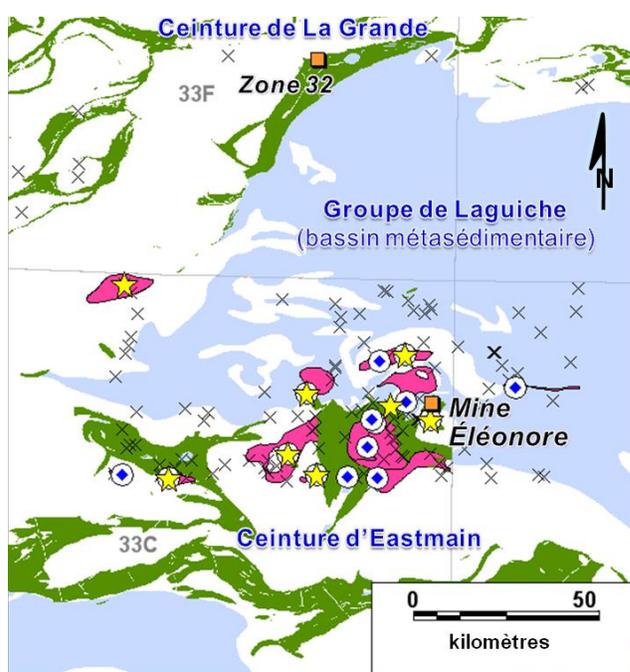


Figure 16. Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subcalines dans la région de la Baie-James. Même légende pour les échantillons qu'à la Figure 13.

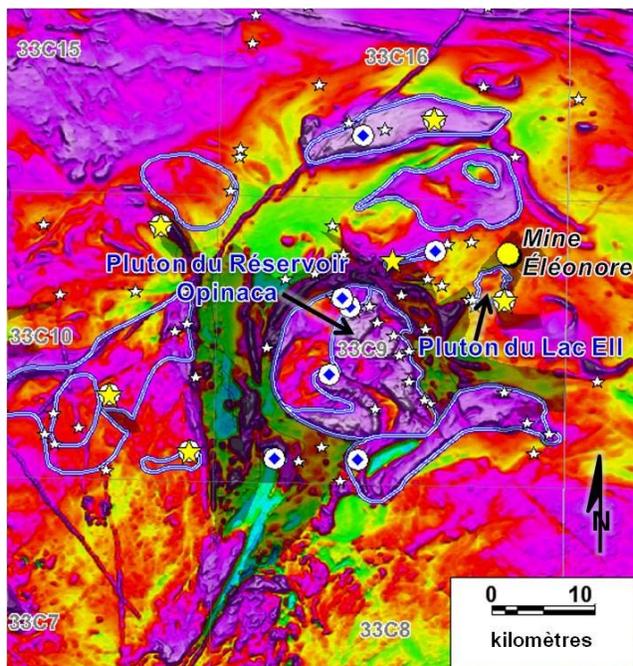


Figure 17. Localisation des échantillons autour de la Mine Éléonore, Baie-James avec le champ magnétique total. Échantillon non fertile : petite étoile blanche, fertile selon le Critère 2 : étoile jaune, ou la Méthode 1 : rond blanc avec losange bleu. Contour des intrusions fertiles en bleu.

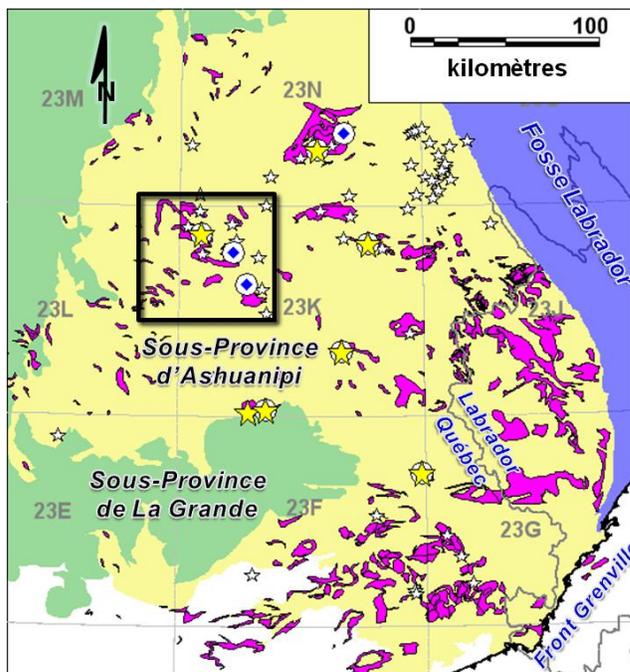


Figure 18. Localisation des échantillons lithogéochimiques d'intrusions subalcalines dans la Sous-province d'Ashuanipi. Même légende que la Figure 17. L'encadré montre la localisation de la Figure 19.

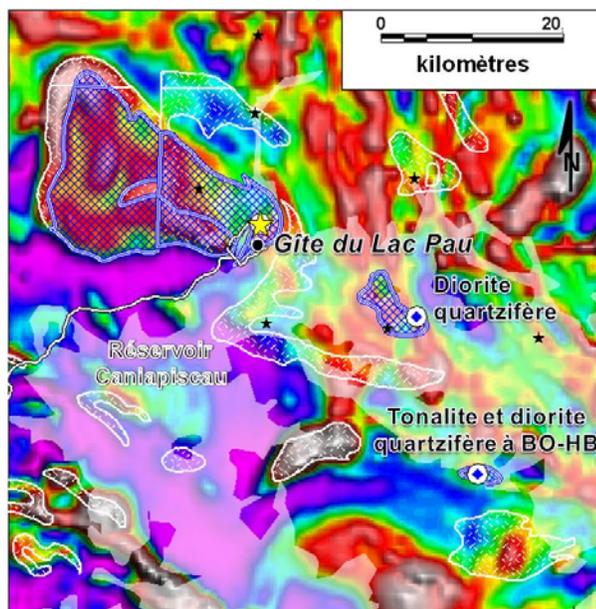


Figure 19. Localisation des échantillons dans le secteur du Gîte du Lac Pau. Échantillon non fertile : petite étoile noire, fertile selon le Critère 2 : étoile jaune, ou la Méthode 1 : rond blanc avec losange bleu. Contour des intrusions fertiles en bleu.

5 CONCLUSION

Une banque de données lithogéochimiques de porphyres minéralisés en Cu-Au a été construite à partir de la littérature et il s'agirait d'une première synthèse publique. Les compositions des intrusions subalcalines de cette banque ont été reconstituées en éliminant les effets de l'altération selon la méthode des bilans de masse sur précurseurs modélisés. Cela a permis de reconnaître que ces intrusions ont des compositions remarquablement alignées selon une courbe de différenciation allant des diorite-gabbroïques jusqu'aux granites. Une conclusion intéressante mais non surprenante, montre que la composition des intrusions porphyriques à Cu-Au archéennes et protérozoïques n'est pas différente de celle des porphyres phanérozoïques.

Les intrusions porphyriques minéralisées en Cu-Au ont des signatures distinctes d'éléments majeurs et traces. Il a donc été possible d'utiliser certains de ces éléments clés et des ratios discriminants comme méthode de ciblage et de reconnaissance de fertilité d'intrusions. Pour ce faire, la banque de données de porphyres minéralisés en Cu-Au a été comparée à celle d'intrusions subalcalines du SIGÉOM qui contient à priori peu d'intrusions fertiles. Deux méthodes géochimiques discriminantes ont été proposées. La première méthode est basée sur une série de critères discriminants. Ces critères consistent à déterminer les seuils en certains éléments majeurs et traces ainsi que sur des ratios d'éléments clés qui permettent de discriminer les porphyres minéralisés des intrusions à priori non fertiles de la banque du SIGÉOM. La performance de ces critères a par la suite été évaluée dans un diagramme de type ROC. L'autre méthode est basée sur les réseaux neuronaux et a été intégrée dans le logiciel Lithomodeleur.

Les résultats de ciblage par ces deux méthodes sont comparables, voire complémentaires. Plusieurs secteurs dans les terrains de haut grade métamorphique des provinces de Grenville et de Supérieur ont été ciblés. Les cibles dans le Moyen-Nord en particulier, expliquent certaines minéralisations reconnues comme étant porphyriques, notamment celle du Lac Eil, près du gisement de classe mondiale de Roberto, et celle probablement du Lac Pau. Ces résultats démontrent le potentiel d'application des deux méthodes.

La grande majorité des échantillons considérés fertiles selon l'une ou l'autre ou les deux méthodes (Critère 22 et modèle I de réseaux neuronaux) proviennent d'intrusions intermédiaires à phénocristaux de hornblende et biotite. Ces deux minéraux témoignent que les magmas étaient hydratés. De plus, plusieurs des intrusions mentionnées comme cibles d'exploration ont de la magnétite comme minéral accessoire ou sont magnétiques selon les levés aéroportés du ministère. La présence de magnétite indique que le magma de ces intrusions était oxydé. Ces conditions d'hydratation et d'oxydation dans les magmas sont parmi les principaux paramètres de fertilité des porphyres (Richards, 2011).

Les intrusions adakitiques ne sont pas plus fertiles que les magmas d'arcs normaux selon le diagramme La/Yb de Richards et Kerrich (2007) et présenté à la **Figure 9**. Ce diagramme ne serait donc pas un outil géochimique discriminant ni pour la fertilité ni pour la grosseur des gisements porphyriques à Cu-Au comme le suggèrent certains auteurs.

La méthodologie établie dans ce rapport est transférable pour d'autres types de porphyres minéralisés, notamment alcalins et/ou à Cu-Mo, ou toutes autres minéralisations dont la chimie de l'intrusion est importante dans la genèse de gisements.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier Sylvain Trépanier (Consorem) pour avoir intégré les deux méthodes de réseaux neuronaux dans le logiciel Lithomodeleur v. 3.0 et fait une revue critique du manuscrit. La relecture critique par Réal Daigneault et Geneviève Boudrias a grandement été appréciée.

RÉFÉRENCES

- Bandyayera, D., Cadéron, S., Houle, P., et Sharma, K.N.M., 2005. Géologie de la région du Lac Mitshisso (32H/13). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, RP 2005-04, 12 p.
- Bandyayera, D., Rhéaume, P., Cadéron, S., Giguère, E., et Sharma, K.N.M., 2004. Géologie de la région du Lac Lagacé (32B/14). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, RG 2004-02, 30 p.
- Bandyayera et al., 2007. Géologie de la région de la Baie Kasipasikatch (33C09) et du lac Janin (33C16). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, RP 2007-05, 15 p.
- Bandyayera, D., et Fliszár, A. 2007. Géologie de la région de la Baie Kasipasikatch (32C09) et du lac Janin (22C16). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, RP 2007-05, 15 p.
- Barrett, T.J. et MacLean, W.H., 1994. Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VHMS deposits in greenstones and younger volcanic rocks. Dans: Lentz, D.R. ed. Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems. Geological Association of Canada, short course notes, 11: 433-467.
- Beaulieu, C., 2010. Le gisement aurifère péri-granitique de Canadian Malartic (Québec) : apport de la modélisation 3D à l'interprétation métallogénique. Mémoire M. Sc. Université du Québec à Montréal, 92 p.
- Bécu, V., Ravenelle, J.F., Malo, M., Dubé, B., Gauthier, M., et Simoneau, J., 2007. Résultats préliminaires de l'étude de la minéralisation Cu-Au-Ag de l'indice du Lac Ell et de ses implications sur la genèse du gisement d'or Roberto, propriété Éléonore, Baie James. Rapport annuel Divex 2007, Sous projet SC21, 33 p.
- Bernier, L., Pouliot, G., et MacLean, W.H., 1987. Geology and metamorphism of the Montauban North Gold Zone: A metamorphosed polymetallic exhalative deposit, Grenville Province, Quebec: Economic Geology, v. 82, p. 2076-2090.
- Bonnet, A.L., Corriveau, L. et La Flèche, M.R., 2005. Chemical imprint of highly metamorphosed volcanic-hosted hydrothermal alterations in the La Romaine Supracrustal Belt, eastern Grenville Province, Quebec. Can. J. Earth Sci. 42: 1783–1814.
- Corriveau, L., Perreault, S., et Davidson, A., 2007. Prospective metallogenic settings of the Grenville Province. Dans Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 819-847.
- Dickin A.P., 2000. Crustal formation in the Grenville Province: Nd-isotope evidence. Can. J. Earth Sci. 37: 165–181.
- Gauthier, M. et Chartrand, F. 2005. Metallogeny of the Grenville Province revisited. Can. J. Earth Sci. 42: 1719-1734.
- GEOROC, 2011. Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents Database. <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>
- Gobeil, A., Hébert, C., Clark, T., Beaumier, M. et Perreault, S., 2002. Géologie de la région du lac De La Blache (22K/03 et 22K/04). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, RG 2002-01, 49 p.

- Groves, D.I. et Goldfarb, R.J., 2007. The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits: a discussion. *Economic Geology*, 102: 155 - 158.
- Hébert, C., et Lacoste, P., 1998. Géologie de la région de lac Jalobert (SNRC 22D/10). Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, RG 97-05, 15 p.
- Hughes, C.J., 1973. Spillites, keratophyres, and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, 109: 513-527.
- Kerrich, R. et Wyman, D.A., 1996. The trace element systematic of igneous rocks in mineral exploration; an overview. *Dans* Wyman, D. A., ed., Trace element geochemistry of volcanic rocks; applications for massive sulphide exploration, Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, p. 1 - 50.
- Kesler, S.E. et Wilkinson, B.H., 2006. The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits. *Economic Geology*, 101: 919-922.
- Kesler, S.E. et Wilkinson, B.H., 2008. Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits. *Geology*, 36: 255-258.
- Lamothe, D., Thériault, R., et Leclair, A., 2000. Géologie de la région du lac Nitchequon. Ministère des Ressources naturelles, Québec, RG 99-14, 43 p.
- Lamothe, D., 2009. Évaluation du potentiel minéral pour les gîtes porphyriques de Cu-Au ± Mo de la Baie-James. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, EP 2009-01, 53 p.
- Lamothe, D., 2010. Modélisation de cibles de l'environnement secondaire par des techniques de seuils naturels et de régression spatiale multiple. Ministère des Ressources naturelles et Faune, EP 2010-01, 27 p.
- Large, R.R., Gemmel, J.B., Paulick, H., et Huston, D.L., 2001. The alteration box plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho-geochemistry association with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology* 96: 957-972.
- Leclair, A., 2008. Évolution géologique du nord-est de la Province du Supérieur. *Dans* : Synthèse du nord-est de la Province du Supérieur, MRNF, MM 2008-02, p. 131-136.
- Leclair, A.D., Lamothe, D., Choinière, J., Parent, M., 1998. Géologie de la région du lac Bermen (23F et 23G). Ministère des Ressources naturelles, Québec, RG 97-11.
- Leitch, C.H.B., et Lentz, D.R., 1994. The Gresens approach to mass balance constraints of alteration systems: methods, pitfalls, examples. *Dans* Lentz, D.R., ed., Alteration and Alteration Processes association with Ore-forming Systems. Geological Association of Canada, Short Course Notes v11, p. 161-192.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. & Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750.
- Le Maître, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. et Zanettin, B., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford, U.K.
- Lydon, J.W., 2007. An overview of the economic and geological contexts of Canada's major mineral deposit types, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration

Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 3-48.

- Mercier-Langevin, P., 2000. Les minéralisations aurifères au sein de la tonalite de La Grande-Sud, Baie-James, Québec. Mémoire M.Sc. Université du Québec à Chicoutimi, 258 p.
- Middlemost, E.A.K., 1985. Magmas and Magmatic Rocks. Longman, London, 266 pp.
- Moukhsil, A., Lacoste, P., Gobeil, A., et David, J., 2009. Synthèse géologique de la région de Baie-Comeau (SNRC 22F). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, RG 2009-03, 28 p.
- Murakami, H., Seo, J.H., et Heinrich, C.A., 2010. The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu–Au ± Mo deposits. *Mineral Deposita*, 45:11 -21.
- Nadeau, L., van Breemen, O., et Hébert, C., 1992. Géologie, âge et extension géographique du groupe de Montauban et du complexe de La Bostonnais; résumé de conférences, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DV 92-03, p. 35-39.
- Nadeau, L. et van Breemen, O., 2001. U-Pb zircon and regional setting of the Lapeyère gabbro-norite, Portneuf-Mauricie region, south-central Grenville Province, Quebec. Geological Survey of Canada, Current Research 2001-F6, 20 p.
- O'Nions R. K. et McKenzie D., 1993. Estimates of Mantle Thorium/Uranium Ratios from Th, U and Pb Isotope Abundances in Basaltic Melts. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 342: 65-77.
- Oyarzun, R., Márquez, A., Lillo, J., López, I., et Rivera, S., 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36: 794 - 798.
- Percival, J.A., Stern, R.A., Rayner, N., 2003. Archean adakites from the Ashuanipi complex, eastern Superior Province, Canada: geochemistry, geochronology and tectonic significance. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 145: 265–280.
- Pearce, J. A., 1996. A user guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D. A. (eds) *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79-113.
- Pilote, P., Robert, F., Kirkham, R.V., Daigneault, R., Sinclair, W.D., 1998. «Minéralisations de type porphyrique et filonienne dans le complexe du lac Doré -Les secteur du lac Clark et de l'île Merrill». In *Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau*, Éditeur: Pierre Pilote, DV-98-03, pp. 71 à 96.
- Ravenelle, J.F., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V., Nadeau, L., et Simoneau, J., 2010. Insights on the geology of the world-class Roberto gold deposit, Éléonore property, James Bay area, Quebec. *Commission géologique du Canada, Current Research 2010-1*, 26 p.
- Richards, J.P., et Kerrich, R. 2007. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology*, 102: 537-576.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A., et Fletcher, T., 2012. High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu ± Mo ± Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan. *Economic Geology*, 107: 295-332.

- Richards, J.P., 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu \pm Mo \pm Au deposits: just add water. *Economic Geology*, Vol. 106, pp. 1075 -1081.
- Rudnick, R.L. et Gao, S., 2003. The Composition of the Continental Crust. *Dans The Crust* (ed. R.L. Rudnick) Vol. 3, *Treatise on Geochemistry* (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, Oxford. pp. 1-64.
- Sajona, F.G., et Maury, R.C., 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 326 : 27 - 34.
- Sappin A.A., Constantin, M., Clark, T. et van Breemen O., 2009. Geochemistry, geochronology, and geodynamic setting of Ni-Cu \pm PGE mineral prospects hosted by mafic and ultramafic intrusions in the Portneuf-Mauricie Domain, Grenville Province, Québec. *Can. J. Earth Sci.* 46: 331-353.
- Sillitoe, R. H., 1994. Erosion and collapse of volcanoes: Causes of telescoping in intrusion-centered ore deposits. *Geology* 22, 945-948.
- Simard, M., 2008. Stratigraphie et géochronologie du nord-est de la province du Supérieur. *Dans Synthèse du nord-est de la Province du Supérieur*, MRNF, MM 2008-02, p. 23-86.
- Sinclair, W.D., 2007, Porphyry deposits. *Dans Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5*, p. 223-243, avec base de données de l'appendice 2.
- Singer, D.A., Berger, V.I., et Moring, B.C., 2008. Porphyry Copper Deposits of the World: Database and Grade and Tonnage Models. US Geological Survey, Open-File Report 2008-1155, 45 p. avec base de données PorCuEx2008.
- Sun, W.D., Ling, M.X., Chung, S.L., Ding, X., Yang, X.Y. Liang, H.Y., Fan, W.M., Goldfarb, R., et Yin, Q.Z., 2012. Geochemical Constraints on Adakites of Different Origins and Copper Mineralization. *The Journal of Geology*, 120: 105-120.
- Taner, M.F., Gault, R.A., et Ercit, T.S., 2000. Vanadium mineralization and its industry in Canada. *Geological Association of Canada, The Gangue issue* 65.
- Thiéblemont, D., Stein, G., et Lescuyer, J.-L., 1997. Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 325 : 103 - 109.
- Toplis, M.J., et Corgne, A., 2002. An experimental study of element partitioning between magnetite, clinopyroxene and iron-bearing silicate liquids with particular emphasis on vanadium. *Contrib. Mineral. Petrol.* 144: 22-37.
- Trépanier, S., 2009. Outils d'assistance pour le traitement lithogéochimique de l'altération et du métasomatisme. *Projet 2008-07*. 87 p.
- Trépanier, S., 2011. Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme. *Projet CONSOREM 2008-07*, 209 p. (disponible sur www.consorem.ca)
- Trépanier, S., 2012. Norme Lithomodeleur. *Projet CONSOREM 2011-04*.
- Van Dongen, M., Weinberg, R.F., et Tomkins, A.G., 2010. REE-Y, Ti, and P remobilization in magmatic rocks by hydrothermal alteration during Cu-Au deposit formation. *Economic Geology*, 105: 763-776.

Winchester J.A., et Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343.