

Modèle métallogénique des principaux indices de Ni-Cu±EGP du Domaine de Portneuf-Mauricie

Anne-Aurélien Sappin¹, Marc Constantin¹, Thomas Clark²

RP 2006-07

Mots-clés : Ni-Cu±EGP, gabbro, roche ultramafique, arc magmatique, Portneuf-Mauricie, Grenville, Protérozoïque

Résumé

Le Domaine de Portneuf-Mauricie est situé dans les feuillets SNRC 31I et 31P, à environ 100 km à l'ouest de Québec. Il est composé des métasédiments et des métatufs du Groupe de Montauban (1,45 Ga), recoupés par les plutons du Complexe de La Bostonnais (1,40 à 1,37 Ga). Cet assemblage s'est formé dans un environnement d'arc magmatique. Les roches intrusives du Complexe de La Bostonnais et des roches métasédimentaires qui y sont associées ont été injectées d'intrusions mafiques et ultramafiques différenciées contenant plusieurs indices de Ni-Cu±EGP. Le potentiel en Ni-Cu de la région est attesté par la présence de la mine du lac Édouard, exploitée dans les années 1970 (69 000 t à 1,5 % Ni et 0,5 % Cu), et par l'existence de minéralisations dont les sulfures sont riches en Ni et en Cu comparativement à la majorité des indices de sulfures magmatiques de la Province de Grenville.

Les gîtes de Ni-Cu±EGP de classe mondiale partagent plusieurs caractéristiques communes permettant d'expliquer leur mise en place et leur enrichissement en métaux. Dans le Domaine de Portneuf-Mauricie, la caractérisation des indices Lac Matte, Lac Kennedy, Rousseau et Lac Nadeau ainsi que de la mine du lac Édouard a permis de développer un modèle génétique préliminaire où la minéralisation de Ni-Cu±EGP se serait formée dans un environnement inhabituel d'arc magmatique. Ces minéralisations proviennent de magmas associés à une zone de subduction. Les magmas sont primitifs ou légèrement différenciés et d'affinité tholéitique. Le Domaine de Portneuf-Mauricie est caractérisé par la présence de roches crustales contenant localement des traces de sulfures. L'interaction des magmas relativement chauds avec les roches encaissantes a occasionné la felsification des magmas (assimilation de matériel felsique). Dans le nord du domaine, cette interaction a permis au magma d'assimiler du soufre d'origine crustale. Ces mécanismes ont causé la saturation des magmas en sulfures, entraînant leur ségrégation du liquide silicaté. En ce qui concerne les indices Lac Matte, Lac Kennedy et Rousseau, ainsi que la mine du lac Édouard, il semble que des sulfures aient été préalablement soustraits des liquides silicatés au cours de leur ascension. La perte de sulfures aurait entraîné un appauvrissement des magmas en éléments chalcophiles et précieux, affectant ainsi la composition des sulfures formés ultérieurement. Les magmas silicatés associés à l'indice Lac Nadeau pourraient, au contraire, être restés sous-saturés en sulfures jusqu'à la mise en place des minéralisations ou avoir subi une perte précoce de sulfures compensée par un « facteur *R* » élevé. La formation des sulfures dans les indices du Domaine de Portneuf-Mauricie a été suivie par des interactions entre les magmas et les sulfures. Ces interactions sont responsables de l'enrichissement en Ni et en Cu des sulfures. Dans le secteur sud de ce domaine, les interactions ont été plus intenses, entraînant la formation de sulfures riches en métaux précieux. Lorsque les magmas ont atteint le point de saturation en sulfures, ces derniers se sont déposés. Le piégeage des sulfures à l'intérieur ou à proximité d'un conduit magmatique n'a pu être établi.

Certains gîtes de Ni-Cu±EGP découverts récemment, dont le gisement d'Aguablanca en Espagne, ont été interprétés comme étant associés à des environnements d'arc magmatique. L'étude des indices de Ni-Cu±EGP du Domaine de Portneuf-Mauricie va permettre de mieux comprendre ce nouveau type de minéralisation, ce qui représente une nécessité dans le domaine de l'exploration pour le Ni, le Cu et les EGP.

1- Université Laval

2- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

INTRODUCTION

Le Domaine de Portneuf-Mauricie est situé dans les feuillettes SNRC 311 et 31P, à environ 100 km à l'ouest de Québec. Il est composé des métasédiments et des métatufs du Groupe de Montauban (1,45 Ga; Nadeau et van Breemen, 1994), formés dans un environnement d'arc insulaire (Gautier, 1993). Cet assemblage a été recoupé par les plutons du Complexe de La Bostonnais (1,40 à 1,37 Ga; Nadeau et van Breemen, 1994), mis en place dans un contexte d'arc insulaire (Gautier, 1993) ou d'arc continental (Corrigan et van Breemen, 1997). Les roches intrusives du Complexe de La Bostonnais et des roches métasédimentaires qui y sont associées ont été injectées d'intrusions mafiques à ultramafiques différenciées contenant plusieurs indices de Ni-Cu±EGP (Corrigan et van Breemen, 1997; Corrigan et Hanmer, 1997; Clark, 2000). L'intrusion contenant l'indice Lac Nadeau a été datée par la méthode U/Pb sur zircon à 1396 ± 5 Ma (Sappin *et al.*, 2004). Ainsi, son âge est compris dans la gamme d'âge du Complexe de La Bostonnais.

Les minéralisations en Ni-Cu±EGP du Domaine de Portneuf-Mauricie présentent un potentiel économique certain. Cependant l'origine de la minéralisation reste mal comprise. Les gîtes de Ni-Cu±EGP de classe mondiale partagent plusieurs caractéristiques communes permettant d'expliquer leur mise en place. Dans le Domaine de Portneuf-Mauricie, l'identification et l'évaluation de ces caractéristiques clés a été faite pour les indices Lac Matte, Lac Kennedy, Rousseau et Lac Nadeau et pour la mine du lac Édouard. Ce travail a permis de développer un modèle génétique préliminaire expliquant la formation de la minéralisation de Ni-Cu±EGP dans un environnement d'arc magmatique qui n'est pas habituel pour ce type de gîte.

POTENTIEL ÉCONOMIQUE

Le potentiel en Ni-Cu de la région est attesté par la présence de la mine du lac Édouard, exploitée dans les années 1970 (69 000 t à 1,5 % Ni et 0,5 % Cu; Poirier, 1988). L'étude des teneurs en Ni, Cu, EGP et Au recalculées à 100 % de sulfures a confirmé que les sulfures des indices de Ni-Cu du Domaine de Portneuf-Mauricie se distinguent par des teneurs relativement élevées en Ni et en Cu (Sappin *et al.*, 2005; figure 1a), atteignant 16 % Ni₁₀₀ (Ni à 100 % de sulfures) et jusqu'à 9 % Cu₁₀₀. Les indices Rousseau et Lac Nadeau sont les seuls à présenter des sulfures qui sont riches en métaux précieux (Sappin *et al.*, 2005), contenant de 3 à 65 g/t (Pd+Pt)₁₀₀ et de 1 à 30 g/t Au₁₀₀. Ces résultats témoignent de l'importance de ces indices si nous les comparons à la majorité des indices de sulfures magmatiques du Grenville qui contiennent des sulfures dont les teneurs sont plus faibles. L'âge de l'intrusion du lac Nadeau, la signature géochimique d'éléments traces typique des environnements d'arc magmatique dans les roches mafiques et ultramafiques qui encaissent les indices étudiés (Sappin *et al.*, 2006),

ainsi que la superficie relativement grande qu'occupe le Complexe de La Bostonnais suggèrent que le potentiel économique de tout le Domaine de Portneuf-Mauricie devrait être évalué pour le Ni, le Cu, les EGP et l'Au.

CARACTÉRISTIQUES DES GÎTES DE NI-CU±EGP

D'après Naldrett (1997, 1999), les gîtes de Ni-Cu±EGP de classe mondiale tels que Noril'sk, Voisey's Bay, Kambalda, Jinchuan et Sudbury, partagent plusieurs caractéristiques communes. Ces caractéristiques sont : 1) une association avec des magmas relativement riches en MgO favorisant la cristallisation d'olivine, 2) la proximité d'une discontinuité crustale majeure, 3) des roches encaissantes contenant des sulfures, 4) l'appauvrissement en éléments chalcophiles et précieux dans les magmas silicatés associés, 5) l'interaction entre les magmas silicatés associés aux sulfures et les roches encaissantes et 6) la présence ou la proximité d'un conduit magmatique.

Ces caractéristiques ont une grande influence sur trois processus clés dans la formation des gîtes de Ni-Cu±EGP à fort potentiel économique. Il s'agit de l'immiscibilité des sulfures, du mélange adéquat entre les sulfures et les magmas silicatés associés et du piégeage des sulfures (Naldrett, 1999).

Magmas riches en MgO

Les indices de Ni-Cu±EGP étudiés dans le Domaine de Portneuf-Mauricie sont associés à des roches riches en olivine. L'indice Lac Matte est situé dans la partie nord-est d'une intrusion mafique-ultramafique constituée de pyroxénite (± olivine, ± plagioclase), de gabbronorite (± quartz), de norite, et d'un peu de wehrilite. L'indice Lac Kennedy est localisé dans une intrusion mafique-ultramafique différenciée, composée d'une unité de péridotite et d'une unité de gabbro-pyroxénite. À la mine du lac Édouard, l'intrusion hôte de la minéralisation est litée (Poirier, 1988). Les niveaux basaux sont constitués de péridotite, tandis que les niveaux sommitaux sont composés de pyroxénite (± olivine, ± plagioclase) et de roches gabbroïques. Le faciès dominant est la pyroxénite à olivine (Poirier, 1988). L'indice Rousseau est localisé dans le secteur ouest de l'intrusion mafique-ultramafique du lac à la Vase. Il est inclus dans des pyroxénites à olivine. Le secteur du lac Nadeau présente trois zones minéralisées : la zone minéralisée Ouest qui constitue l'indice Lac Nadeau, la zone minéralisée Est et la zone minéralisée Kéno. La composition de l'unité hôte de l'indice Lac Nadeau varie entre celle d'une pyroxénite à plagioclase et celle d'un gabbronorite mélanocrate à olivine. Dans la zone Est, les roches porteuses de la minéralisation sont des péridotites (± plagioclase) et des roches gabbroïques (± olivine, ± quartz). Enfin, la zone Kéno présente une minéralisation associée à des gabbronorites (± olivine) et des norites à olivine.

Pour roches mafiques-ultramafiques associées aux minéralisations étudiées, nous avons déterminé le contenu en forstérite dans les olivines. Le contenu en forstérite est compris entre 82 et 88 % à l'indice Rousseau, entre 75 et 86 % pour l'indice Lac Kennedy, entre 81 et 85 % dans le cas de l'indice Lac Matte, entre 70 et 83 % pour l'indice Lac Nadeau et enfin entre 77 et 80 % à la mine du lac Édouard. Dans le cas des indices Lac Matte, Lac Kennedy et Rousseau, ainsi que dans le cas de la mine du lac Édouard, le contenu élevé en forstérite confirme que les roches mafiques et ultramafiques ont cristallisé à partir de magmas relativement primitifs et riches en MgO. De tels magmas sont issus de la fusion partielle d'une source mantellique. Les roches mafiques et ultramafiques de l'indice Lac Nadeau sont caractérisées par la présence d'olivine plus évoluée. Les magmas qui ont généré cet indice étaient donc plus différenciés que ceux associés aux autres indices étudiés. La source initiale de ces magmas semble cependant être mantellique.

Présence d'une discontinuité crustale

Dans le secteur du Domaine de Portneuf-Mauricie, l'évolution lithotectonique consiste, au début du Mésoproterozoïque (1,45 Ga), en la formation d'un arc insulaire représenté par les roches du Groupe de Montauban. Par la suite, cet arc insulaire s'est accrété à la marge laurentienne vers 1,40 Ga (Corrigan et van Breemen, 1997). Cette collision entre le continent laurentien et l'arc insulaire aurait produit de la déformation dans l'arc (Corrigan et van Breemen, 1997) et aurait coïncidé avec une zone de subduction à pendage vers le NW, sous la Province du Supérieur (Hanmer *et al.*, 2000; Corrigan *et al.*, 2000). Corrigan et van Breemen (1997) présumant que la zone de suture séparant la marge du continent Laurentia et l'arc insulaire est oblitérée par le plutonisme d'arc continental ayant affecté ultérieurement les roches appartenant au Domaine de Portneuf-Mauricie et aux terranes adjacents à l'ouest. De grandes structures pénétrant la croûte et atteignant le manteau ont vraisemblablement joué un rôle essentiel dans la remontée des magmas riches en Ni, en Cu et en métaux précieux qui se sont mis en place dans le Domaine de Portneuf-Mauricie.

Roches encaissantes et contenu en sulfure

En ce qui concerne l'indice Lac Matte, des traces de pyrite ont été identifiées au sud de la minéralisation principale, dans la roche encaissante composée d'orthogneiss. À l'est de la mine du lac Édouard, une unité de diorite encaissante présente jusqu'à 1 % de pyrite et de chalcopyrite. Une monzonite à quartz et un gneiss granitique appartenant à l'encaissant de l'indice Rousseau présentent 1% de pyrite. Finalement, dans le secteur du lac Nadeau, des paragneiss encaissants situés à proximité de la zone Est contiennent près de 2 % de pyrite et de chalcopyrite.

Appauvrissement en éléments chalcophiles et précieux

Rapports Cu/Pd

Les variations des rapports Cu/Pd dans les roches mafiques-ultramafiques associées aux indices étudiés permettent d'évaluer le niveau d'appauvrissement en éléments chalcophiles et précieux des magmas (figure 1b). En effet, le coefficient de partage du Pd entre un liquide sulfuré et un magma silicaté est beaucoup plus grand que celui du Cu. De plus, les rapports Cu/Pd ne sont pas affectés par la présence des silicates et des oxydes, car ces derniers contiennent de très faibles quantités de Cu et de Pd par rapport aux sulfures (Barnes *et al.*, 1993). Le diagramme Cu/Pd versus Pd (figure 1b) se divise en trois champs définis par un rapport Cu/Pd inférieur, égal ou supérieur à celui du manteau (Barnes *et al.*, 1993). Sur la figure 1b, on observe que les sulfures des indices Lac Matte, Lac Kennedy et Rousseau, ainsi que de la mine du lac Édouard présentent des rapports Cu/Pd supérieurs aux valeurs mantelliennes. Cet appauvrissement en Pd par rapport au Cu comparé au manteau peut s'expliquer par l'extraction de sulfures à partir des magmas au cours de leur ascension. La perte précoce de sulfures aurait entraîné une diminution des éléments chalcophiles et précieux disponibles dans les magmas pour former les prochains sulfures. Les rapports Cu/Pd essentiellement mantelliennes des roches mafiques-ultramafiques minéralisées de l'indice Lac Nadeau (figure 1b) nous permettent de suggérer que ces métaux ont été conservés dans les magmas jusqu'à la formation des intrusions minéralisées. Il est aussi possible qu'une soustraction précoce de sulfures a été compensée par l'interaction d'une grande quantité de magma silicaté avec des sulfures formés ultérieurement (Clark, 2000).

Composition de l'olivine

Nous avons déjà démontré que la teneur en MnO de l'olivine dans les corps intrusifs étudiés varie en fonction du contenu en forstérite de l'olivine (Sappin *et al.*, 2005). Cette variation témoigne de l'évolution normale de la cristallisation des magmas. Toutefois, à la mine du lac Édouard, les olivines contenues dans l'intrusion minéralisée contiennent des teneurs en NiO plus faibles qu'ailleurs, de sorte que la teneur en NiO au lac Édouard ne suit pas la tendance générale (Sappin *et al.*, 2005). Ceci suggère qu'à la mine du lac Édouard, des sulfures ont cristallisé avant ou pendant la cristallisation de l'olivine (Sappin *et al.*, 2005). Cette cristallisation précoce de sulfures aurait entraîné l'appauvrissement des magmas en métaux. À la mine du lac Édouard, les teneurs en NiO observées dans les olivines pourraient aussi être en partie expliquées par le rééquilibrage tardif du Fe et du Ni entre les grains de sulfures et d'olivine.

Interaction entre les magmas et les roches encaissantes

Données géologiques

Sur les affleurements de roches visités aux indices Lac Matte, Lac Kennedy et Rousseau ainsi qu'à la mine du lac Édouard, les observations de terrain ne nous permettent pas d'identifier des évidences convaincantes d'interaction entre les magmas mafiques-ultramafiques et les roches encaissantes. En revanche, près de l'indice Lac Nadeau, le corps mafique-ultramafique de la zone minéralisée Est contient des enclaves de paragneiss partiellement assimilées, témoins de la contamination du magma par les roches encaissantes (Sappin *et al.*, 2004).

Données géochimiques

Origine du soufre

Les rapports isotopiques du soufre ($\delta^{34}\text{S}$) versus les rapports sélénium-soufre ($\text{Se/S} \times 10^6$) ont été déterminés pour des échantillons provenant d'intrusions de roches mafiques et ultramafiques associées aux minéralisations, ainsi que pour des échantillons de roches qui encaissent des corps intrusifs (figure 1c). La source du soufre présent dans les minéralisations est différente selon le secteur où l'échantillon a été prélevé. Les indices de Ni-Cu±EGP situés dans le secteur sud du Domaine de Portneuf-Mauricie présentent des valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ comprises entre +0,5 et +2,8 ‰ et des rapports Se/S supérieurs ou égaux à ce qui est observé dans les roches mantelliques. Les indices situés dans le secteur nord montrent des valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ comprises entre +1,2 et +3,8 ‰ et des rapports Se/S généralement inférieurs ou égaux à ce que l'on trouve dans des roches mantelliques. Dans les secteurs nord et sud du Domaine de Portneuf-Mauricie, les compositions isotopiques du soufre contenu dans les minéralisations et leurs encaissants sont comprises dans le champ du manteau ou voisines de celui-ci (figure 1c). Ces résultats ne permettent donc pas de déterminer si le soufre impliqué dans la formation des sulfures provient du manteau ou d'une source crustale (Sappin *et al.*, 2005). Dans le secteur sud, les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ obtenues pour les roches encaissantes sont similaires aux valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ obtenues pour les roches mafiques et ultramafiques minéralisées (figure 1c). En revanche, dans le secteur nord, les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ obtenues pour certaines roches encaissantes sont nettement supérieures à celles obtenues pour les roches minéralisées (figure 1c). La valeur moyenne de $\delta^{34}\text{S}$ pour les roches minéralisées du secteur nord est aussi supérieure à celle des roches équivalentes du secteur sud. Ceci suggère que les indices du secteur nord sont caractérisés par un apport de soufre provenant des encaissants, apport qui aurait fait augmenter le $\delta^{34}\text{S}$ dans les sulfures. Ces résultats sont appuyés par les rapports ($\text{Se/S}) \times 10^6$. En effet, les indices du secteur nord présentent des rapports Se/S similaires à ceux des roches encaissantes. Nous pouvons donc conclure

que dans le secteur nord, une partie des sulfures semble être d'origine crustale alors que dans le secteur sud, les évidences sont moins concluantes et ne nous permettent pas de retracer l'origine du soufre.

Éléments lithophiles et profils multiéléments

Les roches mafiques et ultramafiques associées aux indices Lac Matte, Lac Kennedy, Lac Nadeau et Rousseau, ainsi qu'à la mine du lac Édouard sont riches en éléments lithophiles fortement incompatibles (HILE), tels que Th, Ta, La, Ce, et Nd, comparativement aux éléments lithophiles modérément incompatibles (MILE), comme Zr, Sm et Ti. En effet, ces roches montrent des rapports $[\text{Ce/Sm}]_{\text{MN}}$ et $[\text{Th/Ta}]_{\text{MN}} > 1$ (rapports Ce/Sm et Th/Ta normalisés au manteau; Palme et O'Neill, 2004).

Pour les roches gabbroïques et les pyroxénites étudiées, les profils multiéléments normalisés au manteau primitif montrent un faible enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. Le secteur de l'indice Rousseau fait toutefois exception avec son profil multiélément plat (figures 2a et 2b).

Ces observations nous permettent de suggérer que, pour les indices Lac Matte, Lac Kennedy et Lac Nadeau ainsi que pour la mine du lac Édouard, les magmas à l'origine des intrusions minéralisées ont été contaminés par la croûte continentale lors de leur ascension. En ce qui concerne l'indice Rousseau, les magmas ayant engendré l'intrusion minéralisée du lac à la Vase montrent un faible degré de contamination crustale.

Conduit magmatique

Une caractéristique commune à de nombreux gîtes de Ni-Cu±EGP est le piégeage de sulfures dans une zone restreinte (Naldrett, 1997). Ces pièges sont causés par la forme du conduit magmatique ou encore par la présence d'une dépression sur le plancher d'une coulée ou d'une intrusion horizontale. Le point d'entrée d'un conduit magmatique dans une chambre magmatique ou dans une intrusion est un endroit très favorable au piégeage d'une grande quantité de sulfures car le taux d'écoulement magmatique y diminue (Naldrett, 1997). L'état actuel de nos connaissances ne nous a pas permis d'identifier de conduit magmatique pour les intrusions mafiques-ultramafiques minéralisées du Domaine de Portneuf-Mauricie. À la mine du lac Édouard, les sulfures se sont déposés par des processus d'accumulation gravitationnelle pour former une lentille de sulfures massifs près de la base de l'intrusion (Poirier, 1988). Ceci confirme que le magma était saturé en sulfures au début de sa mise en place. Il est possible qu'un conduit magmatique ait été présent à proximité de la lentille.

VERS UN MODÈLE MÉTALLOGÉNIQUE

Immiscibilité des sulfures

La formation d'un gîte magmatique de Ni-Cu±EGP repose sur la saturation en sulfures du magma. Ceci entraîne la séparation des sulfures du liquide silicaté et leur éventuelle accumulation. Dans le secteur nord du Domaine de Portneuf-Mauricie, l'immiscibilité des sulfures observée aux indices Lac Matte et Lac Kennedy ainsi qu'à la mine du lac Édouard a probablement été causée par deux mécanismes : la « felsification » des magmas (assimilation de matériel felsique) et l'addition de soufre d'origine crustale dans les magmas mafiques à ultramafiques. Ces processus résulteraient de l'interaction des magmas avec la croûte continentale lors de leur ascension. Dans le sud du Domaine de Portneuf-Mauricie, aux indices Rousseau et Lac Nadeau, l'immiscibilité des sulfures semble résulter uniquement de la felsification des magmas.

Dans le Domaine de Portneuf-Mauricie, les magmas silicatés associés aux indices présentent des teneurs assez élevées en MgO et étaient donc relativement chauds. Les températures élevées des magmas vont faciliter l'assimilation de roches encaissantes et, du fait même, la contamination du magma. La température élevée des magmas peut aussi causer un métamorphisme de contact dont les effets seraient atténués par le métamorphisme régional. La déshydratation de la roche encaissante résultant du métamorphisme permet alors l'introduction de soufre d'origine crustale dans les magmas sous forme de phases volatiles comme H₂S et SO₂ (Ripley *et al.*, 2002).

Interactions magmas-sulfures

Pour obtenir des teneurs économiques en Ni, en Cu et en métaux précieux, il est nécessaire que les sulfures aient la capacité d'interagir avec suffisamment de magma après leur formation afin de s'enrichir en métaux. Le « facteur *R* » (le rapport de masse entre le liquide silicaté et le liquide sulfuré; Campbell et Naldrett, 1979) permet d'évaluer la quantité de magma ayant interagi avec les sulfures. Il est défini par l'équation suivante :

$$Y_i = \frac{X_i^0 \cdot D_i(R+1)}{(R+D_i)}$$

où X_i^0 est la concentration initiale de l'élément *i* dans le magma silicaté, Y_i est la concentration finale de *i* dans le liquide sulfuré, et D_i est le coefficient de partage de *i* entre le liquide sulfuré et le magma silicaté.

Le facteur *R* a été calculé pour différentes roches mafiques et ultramafiques du Domaine de Portneuf-Mauricie contenant de la minéralisation. La composition moyenne de basaltes primitifs d'arcs continentaux (Kelemen *et al.*, 2004) a été

choisie pour représenter la composition du magma parent. Le coefficient de partage du Ni entre le liquide sulfuré et le magma silicaté est de 1000 (Arndt *et al.*, 2005), de même que celui du Cu (Naldrett *et al.*, 1999). Dans le secteur nord du Domaine de Portneuf-Mauricie, les valeurs du facteur *R* sont comprises entre 2 et 2608 pour l'indice Lac Kennedy, entre 1 et 1403 pour l'indice Lac Matte, ainsi qu'entre 23 et 769 pour la mine du lac Édouard. Dans le secteur sud, les valeurs du facteur *R* sont plus élevées avec des valeurs comprises entre 1020 et 9795 pour l'indice Rousseau et entre 1016 et 8376 pour l'indice Lac Nadeau.

Un enrichissement élevé en métaux dans les sulfures se produit lorsque le volume de magma silicaté par rapport au volume de liquide sulfuré est très grand. Lorsque le facteur *R* est faible, soit entre 100 et 2000, le contenu en Ni et en Cu dans les sulfures sera typique de la plupart des gîtes de Ni-Cu, alors que la concentration en EGP sera relativement faible comme c'est le cas dans les gisements de Sudbury (Naldrett, 2004). En augmentant le facteur *R* à des valeurs très élevées, entre 10 000 et 100 000, le contenu en Ni et en Cu des sulfures augmentera, mais beaucoup moins que les concentrations en EGP qui pourront atteindre les teneurs observées, par exemple, dans le Merensky Reef (Naldrett, 2004). Les indices situés dans le secteur nord de la zone d'étude présentent des valeurs du facteur *R* basses. Il semble donc que les interactions entre les magmas et les sulfures ont été peu intenses, en particulier à la mine du lac Édouard. Dans le cas des indices du secteur sud, les interactions entre les magmas et les sulfures sont plus importantes, ce qui favorise l'enrichissement des sulfures en éléments chalcophiles et surtout en éléments précieux.

Modèle métallogénique préliminaire

Au Mésoproterozoïque, la présence d'une zone de subduction à proximité de l'arc insulaire représenté par les roches du Groupe de Montauban aurait facilité la production et l'ascension de magmas relativement riches en MgO, responsables de la formation des indices de Ni-Cu±EGP du Domaine de Portneuf-Mauricie.

Les roches crustales du Domaine de Portneuf-Mauricie contiennent localement des sulfures, comme c'est le cas aux indices Lac Matte, Rousseau et Lac Nadeau, ainsi qu'à la mine du lac Édouard. Les interactions entre ces roches et les magmas relativement chauds ont entraîné une felsification des magmas. Dans le secteur nord du domaine, les magmas ont également assimilé du soufre d'origine crustale lors de leur ascension. Ces mécanismes de contamination et d'assimilation vont provoquer la saturation des magmas en sulfures et ainsi entraîner l'immiscibilité de ces derniers.

Les magmas qui sont à l'origine des indices Lac Matte, Lac Kennedy et Rousseau, ainsi que de la mine du lac Édouard semblent avoir subi une soustraction précoce de sulfures au cours de leur remontée. Cette extraction aurait entraîné une diminution de la quantité d'éléments chalcophiles et précieux disponibles dans les magmas lors de la formation d'une deuxième génération de sulfures. Les

magmas silicatés associés à l'indice Lac Nadeau pourraient, au contraire, avoir conservé leurs métaux jusqu'à leur site de cristallisation. Une autre possibilité est que les magmas associés à l'indice Lac Nadeau aient également perdu prématurément des sulfures. L'appauvrissement en métaux qui s'ensuit a pu être compensé par une augmentation importante des teneurs des éléments chalcophiles et précieux dans les sulfures formés lors d'un deuxième épisode de saturation du magma en sulfures. Cet apport résulterait d'une interaction intense entre les magmas et les sulfures.

Les sulfures des indices du Domaine de Portneuf-Mauricie formés après l'extraction initiale, lorsqu'elle a lieu, vont interagir avec le magma transporteur pour s'enrichir en Ni, en Cu et en métaux précieux. Les sulfures de la mine du lac Édouard sont ceux qui ont connu le moins d'interaction avec le magma transporteur, puisqu'ils ont été ségrégués du magma au début de la mise en place de l'intrusion. Ils ont ainsi formé une lentille de sulfures massifs à la base de l'intrusion. En revanche, dans le secteur sud du Domaine de Portneuf-Mauricie, les interactions entre les magmas et les sulfures sont beaucoup plus importantes. Ceci explique l'enrichissement en EGP et en Au des sulfures dans ce secteur.

Classification

Les gîtes magmatiques de Ni-Cu±EGP sont subdivisés par Naldrett (2004) selon le type de magma à l'origine des corps minéralisés et selon le type d'environnements tectoniques dans lequel les gîtes se sont formés (tableau 1).

Les indices de Ni-Cu±EGP du Domaine de Portneuf-Mauricie sont contenus dans des roches intrusives d'affinité tholéitique (données non publiées). Selon la classification de Naldrett (2004), ces indices appartiennent à la classe des picrites et des tholéites diverses, soit la classe NC-5 du tableau 1. D'après la signature géochimique des éléments traces, ces indices se seraient mis en place dans un environnement d'arc magmatique (Sappin *et al.*, 2006). Cet environnement tectonique comprend une zone en compression, l'arc magmatique proprement dit, et une zone en extension correspondant au bassin arrière-arc. En ce qui concerne l'indice Lac Nadeau, l'âge de l'intrusion minéralisée est inclus dans la gamme d'âge du Complexe de La Bostonnais. Ceci nous suggère que cette intrusion s'est formée durant le développement de l'arc magmatique. Les indices du Domaine de Portneuf-Mauricie ne sont pas les seuls indices connus que l'on associe à un environnement inhabituel d'arc magmatique. Par exemple, Tornos *et al.* (2001) considèrent que le gisement d'Aguablanca situé en Espagne s'est formé dans un arc magmatique en transpression. Les ressources de ce gisement sont estimées à 17 Mt à 0,65 % Ni, 0,47 % Cu et 0,46 g/t EGP (Martinez *et al.*, 2005). Les indices du Domaine de Portneuf-Mauricie, tout comme le gisement d'Aguablanca, ne correspondent à aucune des classes de gîtes proposées par Naldrett (2004) et présentées au tableau 1. Afin de classer correctement les indices du Domaine de Portneuf-Mauricie et le gisement

d'Aguablanca, il serait donc nécessaire d'ajouter à la classe des « picrites et tholéites diverses » l'environnement géodynamique d'arc magmatique.

CONCLUSION

Le potentiel en Ni-Cu du Domaine de Portneuf-Mauricie est attesté par la présence de la mine du lac Édouard, exploitée dans les années 1970, et par l'existence de minéralisations riches en Ni et en Cu comparativement à la majorité des indices de sulfures magmatiques de la Province de Grenville. Dans le Domaine de Portneuf-Mauricie, les indices ont été formés à partir de magmas relativement primitifs à légèrement différenciés, associés à une zone de subduction. L'interaction entre les magmas et les roches encaissantes, ces dernières contenant des traces de sulfures par endroits, a permis la felsification des magmas et, localement, l'assimilation de soufre d'origine crustale par les magmas. Ces mécanismes ont entraîné l'immiscibilité des sulfures. Les magmas associés aux indices étudiés ont pu subir une soustraction précoce de sulfures, entraînant un appauvrissement des magmas en éléments chalcophiles et précieux. La formation des sulfures a été suivie par des interactions plus ou moins intenses entre les magmas et les sulfures. Ces interactions sont responsables de l'enrichissement des sulfures en Ni, en Cu et, dans le secteur sud du domaine, en métaux précieux.

Certains gîtes de Ni-Cu±EGP découverts récemment ailleurs dans le monde, dont le gisement d'Aguablanca en Espagne, ont été interprétés comme étant associés à des environnements d'arc magmatique. L'étude des indices de Ni-Cu±EGP du Domaine de Portneuf-Mauricie va permettre de mieux comprendre ce nouveau type de minéralisation, ce qui représente une nécessité dans le domaine de l'exploration pour le Ni, le Cu et les EGP.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. Jean-François Montreuil (Université Laval) pour son assistance lors de la campagne de terrain et des travaux de laboratoire au cours des années 2005 et 2006. Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du réseau DIVEX (Valorisation Recherche Québec), du CRSNG (Subvention à la découverte) et du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, octroyé à Marc Constantin (professeur, Université Laval).

RÉFÉRENCES

- ARNDT, N.T. – LESHER, C.M. – CZAMANSKE, G.K., 2005 – Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits. *Economic Geology*; 100th Anniversary Volume, page 5-23.
- BARNES, S.-J. – COUTURE, J.-F. – SAWYER, E.W. – BOUCHAIB, C., 1993 – Nickel-copper occurrences in the Belleterre-Angliers belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions. *Economic Geology*; volume 88, pages 1402-1418.
- CAMPBELL, I.H. – NALDRETT, A.J., 1979 – The influence of silicate: sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides. *Economic Geology*; volume 74, pages 1503-1506.
- CLARK, T., 2000 – Le potentiel en Cu-Ni±Co±EGP du Grenville québécois : exemple de minéralisations magmatiques et remobilisées. *Chronique de la Recherche Minière*; volume 539, pages 85-100.
- CONSTANTIN, M., 2006 – Determination of Au, Ir and thirty-two other elements in twelve geochemical reference materials by instrumental neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*; volume 267, pages 407-414.
- CORRIGAN, D. – HANMER, S., 1997 – Anorthosites and related granitoids in the Grenville orogen: A product of convective thinning of the lithosphere? *Geology*; volume 25, number 1, pages 61-64.
- CORRIGAN, D. – VAN BREEMEN, O., 1997 – U-Pb age constraints for the lithotectonic evolution of the Grenville Province along the Mauricie transect, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*; volume 34, pages 299-316.
- CORRIGAN, D. – RIVERS, T. – DUNNING, G., 2000 – U-Pb constraints for the plutonic and tectonometamorphic evolution of Lake Melville Terrane, Labrador, and implications for basement reworking in the northeastern Grenville Province. *Precambrian Research*; volume 99, pages 65-90.
- ECKSTRAND, O.R. – GRINENKO, L.N. – KROUSE, H.R. – PAKTUNC, A.D. – SCHWANN, P.L. – SCOATES, R.F.J., 1989 – Preliminary data on sulphur isotopes and Se/S ratios, and the source of sulphur in magmatic sulphides from the Fox River Sill, Molson Dykes and Thompson nickel deposits, northern Manitoba. *Geological Survey of Canada; Current Research, Part C*, paper 89-1C, pages 235-242.
- GAUTIER, E., 1993 – Géochimie et pétrologie du Complexe de La Bostonnais et du gabbro du Lac Lapeyrère. Université Laval; Thèse de maîtrise, 129 pages.
- HANMER, S. – CORRIGAN, D. – PEHRSSON, S. – NADEAU, L., 2000 – SW Grenville Province, Canada: the case against post-1.4 Ga accretionary tectonics. *Tectonophysics*; volume 319, pages 33-51.
- KELEMEN, P.B. – HANGHØJ, K. – GREENE, A.R., 2004 – One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *In: Treatise on Geochemistry* (Holland, H.D. and Turekian, K.K., editors). The crust; volume 3, pages 593-659.
- KERR, A., 2001 – The calculation and use of sulphide metal contents in the study of magmatic ore deposits: A methodological analysis. *Exploration and Mining Geology*; volume 10, pages 289-301.
- KERR, A., 2003 – Guidelines for the calculation and use of sulphide metal contents in research and mineral exploration. Newfoundland Department of Mines and Energy; Geological Survey, Current Research, Report 03-1, pages 223-229.
- MARTINEZ, C. – TORNOS, F. – CASQUET, C. – GALINDO, C., 2005 – The Aguablanca Ni-(Cu-PGE) deposit, SW Spain. *Ore Geology Reviews*; volume 27, number 1-4, page 164-165.
- NADEAU, L. – VAN BREEMEN, O., 1994 – Do the 1,45-1,39 Ga Montauban Group and La Bostonnais complex constitute a Grenvillian accreted terrane? *Geological Association of Canada - Mineralogical Association of Canada; Program with abstracts*, volume 19, page A81.
- NALDRETT, A.J., 1997 – Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay, and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: implications for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*; volume 44, pages 283-315.
- NALDRETT, A.J., 1999 – World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*; volume 34, pages 227-240.
- NALDRETT, A.J., 2004 – Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin; 728 pages.
- NALDRETT, A.J. – ASIF, M. – SCANDL, E. – SEARCY, T. – MORRISON, G.G. – BINNEY, W.P. – MOORE, C., 1999 – Platinum-group elements in the Sudbury ores; significance with respect to the origin of different ore zones and to the exploration for footwall orebodies. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*; volume 94, number 2, pages 185-210.
- NALDRETT, A.J. – ASIF, M. – KRSTIC, S. – LI, C., 2000 – The composition of mineralization at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to platinum-group elements. *Economic Geology*; volume 95, pages 845-865.
- PALME, H. – O'NEILL, H. ST. C., 2004 – Cosmochemical estimates of mantle composition. *In: Treatise on Geochemistry* (Holland, H.D. and Turekian, K.K., editors), The Mantle and Core; volume 2, pages 1-38.
- POIRIER, G., 1988 – Étude métallogénique de gîtes de nickel, cuivre et platinoïdes de l'ouest de la Province de Grenville, Québec. Université du Québec à Montréal; Thèse de maîtrise, 299 pages.
- RIPLEY, E.M. – LI, C. – SHIN, D., 2002 – Paragneiss assimilation in the genesis of magmatic Ni-Cu-Co sulfide mineralization at Voisey's Bay, Labrador: $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, and Se/S evidence. *Economic Geology*; volume 97, pages 1307-1318.
- SAPPIN, A.-A. – CONSTANTIN, M. – CLARK, T. – VAN BREEMEN, O., 2004 – Géologie des indices de Ni-Cu-EGP des lacs Nadeau et Long, Région de Portneuf. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec; RP 2004-03, 11 pages.
- SAPPIN, A.-A. – CONSTANTIN, M. – CLARK, T., 2005 – Pétrologie et géochimie d'indices de Ni-Cu-EGP dans le Domaine de Portneuf-Mauricie. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; RP 2005-05, 12 pages.
- SAPPIN, A.-A. – CONSTANTIN, M. – CLARK, T., 2006 – Ni-Cu-PGE deposits in a Proterozoic magmatic arc setting, Portneuf-Mauricie Domain, Grenville Province, Québec: new petrological and geochemical data. *Geological Association of Canada - Mineralogical Association of Canada; Program with abstracts*, volume 31, page 133.
- TORNOS, F. – CASQUET, C. – GALINDO, C. – VELASCO, F. – CANALES, A., 2001 – A new style of Ni-Cu mineralization related to magmatic breccia pipes in a transpressional magmatic arc, Aguablanca, Spain. *Mineralium Deposita*; volume 36, pages 700-706.

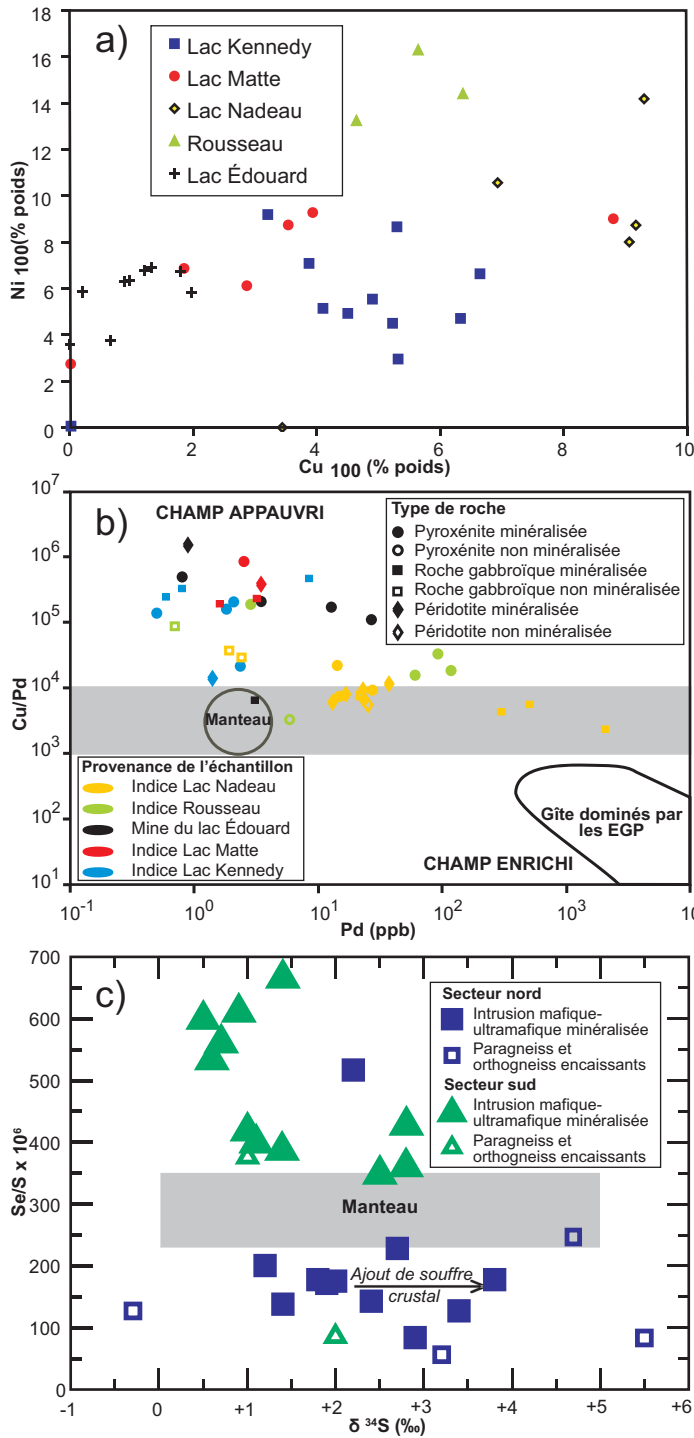


FIGURE 1 - a) Teneurs en Ni et Cu recalculées à 100% de sulfures pour des échantillons représentatifs. Pour les échantillons contenant de l'olivine, la méthode utilisée pour le calcul de la composition à 100 % de sulfures est celle de Naldrett *et al.* (2000). La méthode employée pour les échantillons dépourvus d'olivine est celle de Kerr (2001, 2003).

b) Variations des rapports Cu/Pd versus Pd pour des roches mafiques-ultramafiques porteuses ou non de minéralisation (d'après Barnes *et al.*, 1993).

c) Rapports isotopiques du soufre ($\delta^{34}\text{S}$) versus les rapports sélénium-soufre (Se/S x 106) obtenus pour des échantillons minéralisés et pour des roches encaissantes. Pour le manteau, les valeurs de (Se/S) x 106 varient entre 230 et 350 et celles de $\delta^{34}\text{S}$ entre 0 et +5 ‰ (Eckstrand *et al.*, 1989). Le secteur nord comprend les indices Lac Matte et Lac Kennedy, ainsi que la mine du lac Édouard. Le secteur sud inclut les indices Rousseau et Lac Nadeau. Les isotopes de soufre ont été analysés par ACME Analytical Laboratories.

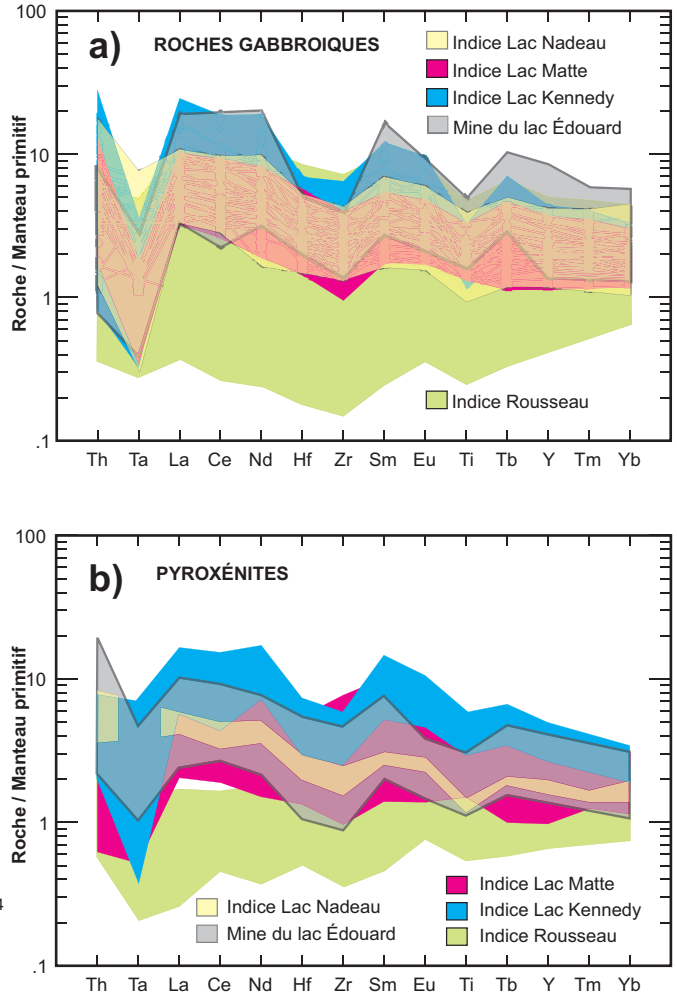


Figure 2 - Diagramme multiélément avec des teneurs normalisées au manteau primitif pour les analyses de roches mafiques-ultramafiques porteuses ou non de minéralisation du Domaine de Portneuf-Mauricie; **a)** roches gabbroïques, **b)** pyroxénites. Valeurs de normalisation d'après Palme et O'Neill (2004). Les méthodes analytiques sont les mêmes que celles décrites dans Sappin *et al.* (2005) et Constantin (2006).

TABLEAU 1: Classification des gîtes magmatiques de Ni-Cu±EGP selon le type de magma et l'environnement tectonique de mise en place (modifiée d'après Naldrett, 2004).

Classe	Magmatisme associé	Exemples de camps miniers et de gîtes	Environnement géodynamique associé au magmatisme
NC-1	Komatiite	Ceinture de roches vertes de Wiluna-Norseman (Kambalda, Mt Keith, Perseverance), Abitibi, Zimbabwe	Ceintures de roches vertes (rift ?)
		Thompson, Raglan	Marge continentale - rift
NC-2	Coulées basaltiques	Noril'sk, Duluth, Muskox	Rift (jonction triple)
		Insizwa	Marge continentale - rift
		Wrangelia	Arc insulaire - rift
NC-3	Ferropicrite	Pechenga	Marge continentale - rift
NC-4	Anorthosite-Granite-Troctolite	Voisey's Bay	Rift
NC-5	Picrite-Tholéïte diverses	Montcalm	Ceinture de roches vertes (rift ?)
		Jinchuan	Marge continentale - rift
		Niquelandia	Rift continental
		Moxie, Aberdeenshire Gabbros, Rona	Orogène (compression)
		Acoje	Ceinture ophiolitique (océan)
		Domaine de Portneuf-Mauricie, Aguablanca	Arc magmatique
NC-6	Mélange lié à un impact	Sudbury	Impact météoritique