
EXPLORATION DES GÎTES MAGMATIQUES CUPRIFÈRES DANS LA PROVINCE DE GRENVILLE

Projet 2012-03

Par : Lucie Mathieu, Ph.D.
2013



CONSOREM

Consortium de recherche
en exploration minérale

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) 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 :

Mathieu, L., 2013. Exploration des gîtes magmatiques cuprifère dans la Province de Grenville. Rapport, Projet CONSOREM 2012-03, 49 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

Les sulfures massifs magmatiques (SMM) à Ni-Cu ou à Ni-Cu-Co-ÉGP se forment par des processus magmatiques au sein d'intrusions mafiques à ultramafiques. Ces gisements particuliers sont relativement peu nombreux mais peuvent avoir de grandes valeurs. Des exemples emblématiques sont le camp de Sudbury (Ontario), le Complexe du Bushveld (Afrique du Sud) ou, pour prendre un exemple québécois, le camp de Raglan. Ces gisements sont exploités principalement pour le Ni et/ou les ÉGP.

Certains gisements, comme celui de Duluth (Minnesota), sont particulièrement riches en Cu. Ce projet s'intéresse à ce type de gisement dans le but d'identifier les facteurs favorables à un enrichissement en Cu des sulfures massifs d'origine magmatique. La compilation des données de la littérature nous apprend que plusieurs facteurs pourraient, en théorie, favoriser la formation de SMM cuprifères : source mantellique enrichie, degré de fusion partielle idéal, contamination du magma par des roches enrichies en métaux, cristallisation fractionnée du liquide sulfuré dans des conditions de fugacité d'oxygène élevées et remobilisation post-magmatique des sulfures massifs.

Ce projet s'intéresse plus particulièrement aux magmas de type AMCG (Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite) pour diverses raisons : 1) ce sont des magmas à dominance mafique qui pourraient avoir été produits par des degrés de fusion partielle favorables à la concentration du Cu; 2) la suite AMCG du Nain (Labrador) contient un gisement exploité de Ni-Cu-Co (Voisey's Bay); 3) le Grenville québécois contient de gros volumes de magmas AMCG.

Cette étude a permis de faire l'état des connaissances sur les AMCG de la Province de Grenville, de répertorier les facteurs favorables à la formation de SMM, et de juger de la pertinence de chacun de ces facteurs par l'intermédiaire de calculs de contraste. Les données provenant de la littérature et des calculs statistiques ont permis d'établir une carte de « favorabilité » qui permet de cerner les zones pouvant avoir un potentiel pour les gisements recherchés. L'une des principales conclusions de ce travail est que le Cu pourrait avoir été concentré le long des bordures de certaines anorthosites par la cristallisation fractionnée du magma.

Ce projet a également permis de développer une méthode visant à identifier les roches plutoniques qui sont anormalement riches ou pauvres en Ni-Cu à partir d'analyses géochimiques de type « roche totale ». L'application de cette méthode en contexte d'exploration suppose qu'un sulfure massif, en se formant, ait appauvri le magma environnant en métaux de base. La méthode est basée sur la comparaison entre les échantillons étudiés et des roches étalons qui correspondent à des données de compilation (cf. base de données du GEOROC) ou à des modèles (cf. équation de cristallisation fractionnée à l'équilibre). Les échantillons sont comparés sur la base de leurs concentrations en éléments majeurs ou d'après leurs compositions normatives. Les calculs de contraste nous indiquent que la plupart des indices Ni-Cu du Grenville se situent à proximité de roches contenant à la fois des anomalies hautes **et** basses en Ni-Cu, validant ainsi l'applicabilité de la méthode de rehaussement à l'exploration.

TABLE DES MATIERES

Avertissement.....	i
Sommaire exécutif.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
1 Introduction.....	1
2 OBJECTIFS.....	2
3 CARACTÉRISTIQUES DES SMM.....	2
3.1 Processus de formation d'un SMM.....	2
3.2 Disposition des sulfures dans les roches magmatiques.....	4
3.3 Principaux contextes géodynamiques.....	4
4 CARACTÉRISTIQUES DES AMCG DU GRENVILLE.....	6
5 PARTIE I : DOCUMENTATION DES SUITES AMCG DU GRENVILLE.....	6
5.1 But.....	6
5.2 Opération sur les données.....	6
5.3 Outils : calcul du contraste.....	8
5.4 Relation spatiale entre indices et unités lithologiques.....	9
5.5 Relation spatiale entre indices et oxydes de Fe-Ti.....	12
5.6 Relation spatiale entre indices et roches métasédimentaires.....	13
5.7 Position des indices Ni-Cu au sein des intrusions.....	14
5.8 Documentation des suites AMCG.....	15
5.9 Conclusions de la partie I.....	17
6 PARTIE II : REHAUSSEMENT DES ANOMALIES NI-CU (MÉTHODE I).....	21
6.1 But et théorie.....	21
6.2 Présentation des données.....	22
6.3 Variations en Cu-Ni et cristallisation fractionnée.....	22
6.4 Méthode de rehaussement des anomalies Ni-Cu.....	23
6.5 Exploitation des résultats.....	28
6.6 Conclusion de la partie II.....	31
7 CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	35
RÉFÉRENCES.....	36
ANNEXE A – CALCUL DU CONTRASTE D'APRÈS BONHAM-CARTER (1994).....	38
ANNEXE B – CALCUL DU CONTRASTE, DEUXIÈME MÉTHODE.....	39
ANNEXE C - REHAUSSEMENT DES ANOMALIES NI-CU (MÉTHODE 2) ET ÉTUDE DE CAS.....	40
C.1 But et théorie.....	40
C.2 Compilation des Kd.....	41
C.3 Performance de la norme CIPW pour les suites AMCG.....	41
C.4 Méthode.....	43

C.5	Test sur trois AMCG	44
C.5.1	Anorthosite de Lac-Saint-Jean (ALSJ)	44
C.5.2	AMCG de La Blache et de Vallant.....	46
C.5.3.	Résultats des tests	46
C.6	Conclusions sur les tests.....	47
ANNEXE D – CONTAMINATION DES MAGMAS		49

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Représentation des ressources en Ni et Cu de plusieurs SMM.	1
Figure 2.	Localisation des suites AMCG et des indices Ni-Cu de Grenville, produite à partir des données du SIGÉOM. La carte est présentée dans le système de projection géographique (latitude, longitude) qui utilise le NAD83 calculé pour le Canada, et cette projection sera utilisée pour toutes les figures présentées dans ce rapport.....	2
Figure 3.	Concentration en Ni et en Cu de quelques intrusions et illustrant l'enrichissement en Ni des komatiites et la richesse en Cu des basaltes de plateau (modifiée d'après Clark et Gobeil, 1997, p. 24).	5
Figure 4.	Valeurs de contrastes calculées pour chaque type de lithologie. Les chiffres associés aux cercles rouges correspondent aux pourcentages d'indices Ni-Cu observés dans chacune des lithologies.	9
Figure 5.	Proportion de chaque unité lithologique qui constitue les intrusions contenant et ne contenant pas d'indices Ni-Cu.	10
Figure 6.	Graphique représentant les valeurs du contraste calculées par intervalles de rang centile de MgO (wt%), pour des échantillons situés à différentes distances des indices Ni-Cu.....	12
Figure 7.	Résultats des calculs de contraste effectués pour des indices Fe-Ti et Ni-Cu situés à différentes distances les uns des autres.	13
Figure 8.	Calculs de contraste effectués par intervalles de distance entre les indices Ni-Cu et leurs encaissants métasédimentaires, graphiteux et felsiques.	14
Figure 9.	Calculs de contraste effectués par intervalles de distance des indices Ni-Cu aux bordures des intrusions mafiques.....	15
Figure 10.	Surface des intrusions et quantité d'indices contenus dans les AMCG des groupes A à G.....	17
Figure 11.	Carte présentant le faciès mafique de bordure des anorthosites du Grenville.....	18
Figure 12.	Carte préliminaire de « prospectivité » pour les minéralisations de type SMM dans les AMCG de Grenville.....	20
Figure 13.	Diagramme de Barnes représentant deux analyses de roche théoriques, provenant de magmas appauvris et non-appauvris en ÉGP (cf. courbe « fertile »). Le fait de trouver ces deux types de roches dans, par exemple, une même unité magmatique peut indiquer qu'un liquide sulfuré a ségrégué.	21
Figure 14.	Graphique montrant les coefficients de corrélation entre le Ni, le Cu et les autres éléments des bases de données du GEOROC et du SIGÉOM.	23
Figure 15.	Graphiques montrant une corrélation entre le degré de différenciation des roches et leurs contenus en Ni-Cu. Les courbes rouges mettent en évidence les échantillons anomaux.	24
Figure 16.	Graphique représentant un échantillon du SIGÉOM et l'ensemble de la base de données du GEOROC. Dans cet espace à 2 dimensions, il est aisé de repérer les échantillons du GEOROC ayant des concentrations similaires en CaO et MgO à	

	celles de l'analyse du SIGÉOM. L'algorithme KNN permet de réaliser la même opération dans un espace à N dimensions.....	26
Figure 17.	Histogrammes présentant les valeurs centiles de "Comp" des lithologies principales, pour le <i>test Majeurs</i> et le <i>test CIPW</i> . Les valeurs extrêmes de "Comp" ont été mises en valeur. L'axe horizontal représente plusieurs intervalles de rang centiles du paramètre "Comp", et les proportions relatives des unités lithologiques décrites par le paramètre "Comp" pour chacun de ces intervalles sont représentées sur l'axe vertical.	27
Figure 18.	Graphique présentant les valeurs de $(Ni_{(SIGÉOM)} - Ni_{(GÉOROC)})$ et de $(Cu_{(SIGÉOM)} - Cu_{(GÉOROC)})$ en fonction du rang centile de "Comp", pour le <i>test CIPW</i> . Le même graphique, fait avec les données du <i>test Majeurs</i> , donne des résultats similaires.....	28
Figure 19.	Schémas résumant les différentes méthodes utilisées lors des tests 1 et 2; a) Test 1-a, méthode basée sur le nombre d'échantillons et leur position par rapport aux indices Ni-Cu; b) Test 1-b, méthode utilisant les polygones Thiessen (voisins naturels); c) Test 1-c, méthode utilisant un buffer de 2 km autour des anomalies. Le cercle en pointillé délimite la surface pour laquelle la quantité d'échantillons anomaux est évaluée pour le calcul du contraste. Le test 2 compare la quantité d'indices Ni-Cu situés dans et en dehors des surfaces anomaux, qui sont délimitées par les polygones Thiessen pour le test 2-a (d) et par des buffers pour le test 2-b (e).....	29
Figure 20.	Graphiques établis à partir du <i>test CIPW</i> , et représentant les valeurs de contrastes calculées par intervalles de distances aux indices Ni-Cu, pour les tests 1-a, 1-b et 1-c. Les intervalles de distances pour lesquels ces calculs ont été effectués sont: 0-0,5 km, 0,5-1 km, 1-2 km, 2-5 km, 5-10 km et > 10 km. Les mêmes graphiques, faits avec les données du <i>test Majeurs</i> , donnent des résultats très similaires.	30
Figure 21.	Résultats des tests 2-a (a) et 2-b (b). Notez que les valeurs de contrastes les plus hautes sont associées aux valeurs de centiles de "Comp" les plus élevées (cf. anomalies hautes) et, dans une moindre mesure, aux centiles les plus bas (cf. anomalies basses).	31
Figure 22.	Exemple pris au NE de l'ALSJ, et qui représente chaque échantillon par une surface correspondant à un buffer de 2 km. Cette carte montre que les indices Ni-Cu sont, pour la plupart, situés à proximité d'une anomalie haute, ou à l'intersection entre des anomalies basses et hautes. Les anomalies utilisées dans cet exemple sont celles du <i>test CIPW</i>	33
Figure 23.	Carte de potentiel minéral pour les minéralisations de type SMM dans les AMCG de Grenville. Les endroits où des anomalies hautes et basses montrent une intersection (utilisation de buffers de 2 km), dans les <i>tests CIPW</i> et <i>Majeurs</i> , ont été encerclés en noir.....	34
Figure C-1.	Comparaison des quantités de Fe_2O_3 mesurées dans des roches provenant: a) du SIGÉOM 2012 (n= 142); b) de Fredette (2006) (n= 15) et de Huss (2002) (n= 11). Les quantités de Fe_2O_3 ont été prédites par la méthode de Le Maître (1976) et par la méthode proposée dans ce rapport. Cette dernière prédiction a été faite à partir de la quantité de $Fe_2O_3_{total}$ mesurée dans les roches considérées, et en utilisant un rapport FeO/MgO de 0,5 (a) et de 0,43 (b). Notez que, pour des roches contenant > 10 wt% de Fe_2O_3 , cette quantité de fer oxydé est systématiquement sous-estimée par la méthode de Le Maître (1976), et est surestimée ou sous-estimée par la méthode proposée ci-dessus car le rapport FeO/MgO n'a pas été correctement ajusté dans cet exemple.	43
Figure C-2.	Corrélations entre les valeurs de Ni-Cu et de "MxKd". Les courbes de régression permettent de calculer les valeurs seuils qui ont été utilisées pour identifier les échantillons anormalement riches ou pauvres en Ni-Cu.	45

Figure C-3. Représentation des échantillons anomaux et non-anomaux détectés par les tests MxKd, pour les AMCG de Lac-Saint-Jean, La Blache et Vallant.....	46
Figure C-4. Figure extraite de Li et Naldrett, (1999) et présentant les concentrations en Ni de plusieurs olivines situées à proximité du gisement de Voisey's Bay. Ce graphique montre que les olivines ayant cristallisé à proximité du liquide sulfuré et après la ségrégation des sulfures sont plus pauvres en Ni et en Cu que les autres olivines de l'intrusion.....	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des colonnes ajoutées à la carte du SIGÉOM 2012 pour faciliter les requêtes sur la lithologie des intrusions.....	8
Tableau 2. Groupes A à G d'AMCG et résumé de l'environnement tectonique dans lequel elles se sont mises en place.	8
Tableau 3. Résultats des calculs du contraste qui documentent la proximité entre les indices Ni-Cu et les minéraux identifiés en affleurements	10
Tableau 4. Calcul de contraste permettant de définir la relation spatiale entre les indices Ni-Cu et les roches identifiées comme I1, I2, I3 et I4 sur la base de leurs concentrations en magnésium, silice et fer.....	12
Tableau 5. Résumé des paramètres et des facteurs utilisés pour établir la carte préliminaire de « prospectivité ».....	18
Tableau 6. Valeurs des moyennes et des écarts types utilisées dans chaque test.	25
Tableau 7. Excès de Cu par rapport au Ni d'après les valeurs absolues de Ni-Cu et d'après les valeurs de "Comp2".....	27
Tableau 8. Résultats des calculs de contraste.	32
Tableau 9. Résumé des paramètres et d'une partie des facteurs utilisés pour établir la carte de « prospectivité » de la Figure 23. Les autres facteurs utilisés pour créer la Figure 23 sont disponibles au tableau 5.	33
Tableau C-1. Valeurs des Kd utilisés pendant cette étude.	41
Tableau C-2. Comparaison des résultats des tests de rehaussements.	45

1 INTRODUCTION

Les sulfures massifs magmatiques à Ni-Cu ou à Ni-Cu-Co-ÉGP, désignés gisements de type SMM dans ce rapport, se forment au sein de systèmes magmatiques actifs. Ainsi, ces gisements se situent généralement dans des intrusions magmatiques, bien qu'ils soient parfois observés dans tous types de roches, à proximité d'intrusions, lorsque les sulfures ont été remobilisés après le refroidissement du magma. Ces gisements particuliers sont relativement peu nombreux, mais peuvent avoir de grandes valeurs. Des exemples emblématiques sont le camp de Sudbury (Ontario), le complexe du Bushveld (Afrique du Sud) ou, pour prendre un exemple québécois, le camp de Raglan (cf. **Figure 1**).

Les gisements cités ci-dessus sont exploités principalement pour le Ni et/ou les ÉGP. D'autres gisements plus rares, comme celui de Duluth (Minnesota), sont particulièrement riches en Cu. D'un point de vue théorique, plusieurs facteurs pourraient permettre de former des SMM cuprifères. Par exemple, une source enrichie en Cu ou un degré de fusion partielle idéal sont des facteurs favorables à la formation de tels SMM. La concentration du Cu se fait par l'intermédiaire d'un liquide sulfuré qui, comme pour les SMM à Ni, s'extrait du magma sous la forme de gouttelettes de liquide S-Fe suite à la cristallisation fractionnée et/ou à la contamination du magma. L'enrichissement en métaux de ces gouttelettes de liquide sulfuré, puis leurs collectes, sont également des étapes indispensables à la formation d'un SMM. Une fois le sulfure massif formé, sa cristallisation fractionnée dans des conditions de fugacité d'oxygène élevées (cf. fO_2) peut permettre son enrichissement en Cu. Des processus de remobilisation post-magmatique du SMM peuvent également concentrer le Cu. Ce projet vise à documenter l'importance de chacun de ces facteurs ainsi que leurs impacts sur les modèles d'exploration du Cu en milieu magmatique.

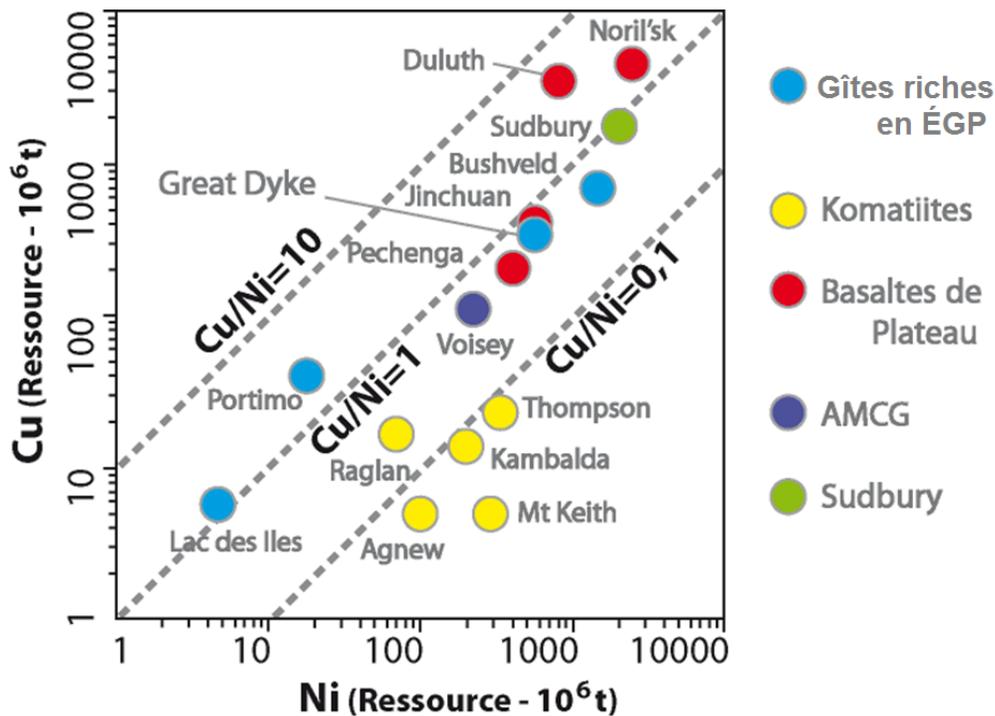


Figure 1. Représentation des ressources en Ni et Cu de plusieurs SMM.

2 OBJECTIFS

L'objectif initial du projet était d'identifier les caractéristiques géochimiques des intrusions magmatiques contenant des SMM cuprifères, c'est-à-dire des gisements ayant un rapport Cu/Ni égal ou supérieur à 1 (**Figure 1**). Le projet visait également à développer un outil géochimique pouvant être utilisé à un stade d'exploration pour évaluer le potentiel d'intrusions magmatiques pour des minéralisations de types SMM cuprifères. Cet outil devait initialement être applicable à l'ensemble du territoire québécois.

Pour des questions de temps et de données disponibles, le projet a été resserré sur la Province de Grenville, et en particulier pour les suites intrusives à Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite (AMCG) qui représentent 20,5% de la surface de cette province et qui semblent avoir un meilleur potentiel pour les gisements cuprifères que d'autres types d'intrusions, comme nous le verrons ci-après.

La base de données SIGÉOM utilisée pour ce projet (version 2012) contient plus de 156 indices Ni-Cu situés au sein des AMCG, ce qui représente 32,2 % des indices Ni-Cu de cette province orogénique (**Figure 2**). Aussi, plus de 2 327 échantillons de type « roche totale » du SIGÉOM ont été utilisés afin de documenter les massifs AMCG.

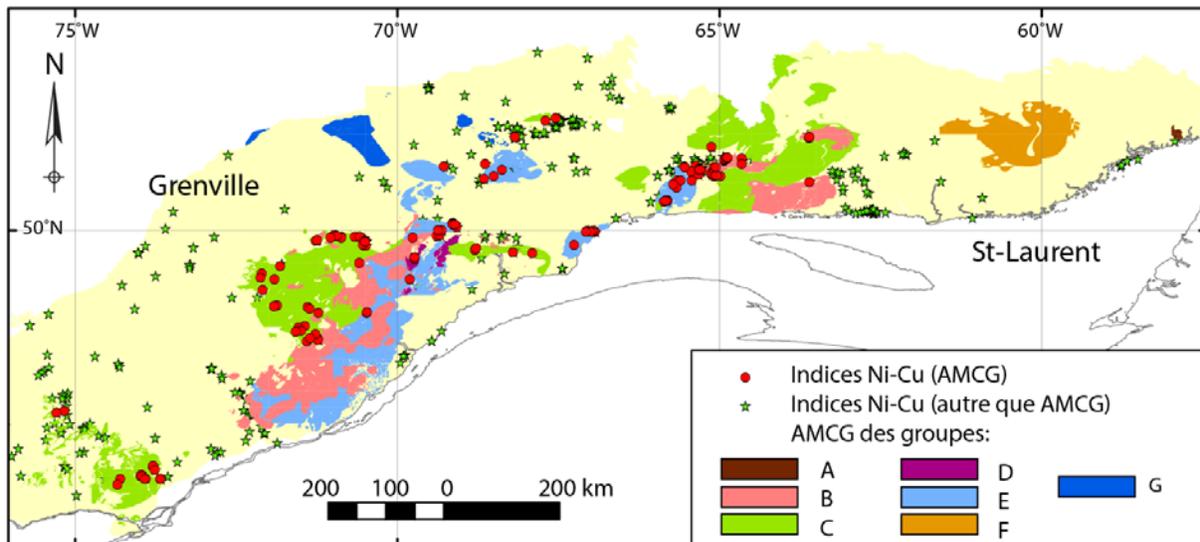


Figure 2. Localisation des suites AMCG et des indices Ni-Cu de Grenville, produite à partir des données du SIGÉOM. La carte est présentée dans le système de projection géographique (latitude, longitude) qui utilise le NAD83 calculé pour le Canada, et cette projection sera utilisée pour toutes les figures présentées dans ce rapport.

3 CARACTÉRISTIQUES DES SMM

3.1 Processus de formation d'un SMM

Plusieurs processus peuvent influencer la formation d'un SMM. La synthèse qui suit est principalement adaptée des travaux de Barnes et Lightfoot (2005) et de Eckstrand et Hulbert (2007).

a) Source de magma : Idéalement, le magma provient de la fusion partielle d'une source qui contient un maximum de métaux. Une source idéale est ainsi, le manteau inférieur enrichi. Quant au manteau sous continental, qui a pu être métasomatisé et avoir subi plusieurs épisodes de fusion partielle, sa composition

en métaux est difficile à évaluer. En effet, le métasomatisme pourrait aussi bien lessiver le Cu du manteau que l'y concentrer (cf. le Cu est assez mobile en solution). Aussi, la fusion partielle peut retirer le Cu du manteau ou bien, au contraire, de faibles degrés de fusion partielle peuvent produire des magmas saturés en soufre, qui migreront en laissant derrière eux, dans le manteau résiduel, le soufre et le Cu.

De plus, un degré de fusion partielle élevé permettra de mobiliser un important volume de magma mafique tout en extrayant un maximum de métaux de la source mantellique. Ceci est vrai pour le Ni, qui est stocké dans l'olivine, car plus le degré de fusion partielle est élevé, plus le volume d'olivines qui entrent en fusion est important, et plus le magma s'enrichit en Ni. Le Cu, cependant, pourrait être présent dans le manteau sous forme d'alliages et/ou de sulfures. Ainsi, lorsque le manteau commence à fondre, les alliages et sulfures fondent tôt, vont dans le magma et y entraînent le Cu. Lorsque le degré de fusion partielle augmente, une plus grande quantité de soufre, et de Cu, se retrouve dans le magma. Cependant, le manteau contient peu de soufre, et une fois que ce dernier est entièrement consommé, le magma cesse de s'enrichir en Cu. Si le degré de fusion partielle continue à augmenter, le Cu va être dilué dans le magma, qui s'appauvrira en Cu et continuera à s'enrichir en Ni. Un degré de fusion partielle d'environ 10-20% (cf. expériences compilées par Barnes et Lightfoot, 2005) produira un magma ayant une concentration maximale en Cu.

b) Migration du magma : Idéalement, le magma doit être transporté rapidement depuis sa source mantellique vers sa position finale dans la croûte. Un transport moins rapide, cependant, permettra la formation d'olivines et de gouttelettes de sulfures qui s'extraient du magma pendant sa remontée en l'appauvrissant, principalement, en Ni et en ÉGP, et un peu en Cu. Une remontée relativement lente du magma pourrait ainsi permettre l'augmentation du rapport Cu/Ni.

c) Ségrégation du liquide sulfuré : Le liquide sulfuré s'extrait du magma sous la forme de gouttelettes de Fe-S. Ce liquide peut s'extraire lentement, et en petite quantité, lors de la cristallisation fractionnée du magma. Cependant, pour former un SMM, il est généralement admis que le magma doit recevoir un apport massif et rapide de soufre qui peut provenir, par exemple, d'évaporites ou de roches sédimentaires pélicitiques à pyrites. Les magmas ayant la plus grande probabilité d'être contaminés par des roches supracrustales sont ceux qui se mettent en place à de faibles profondeurs. Il est également possible qu'un ajout rapide de silice, suite à la contamination du magma par la croûte felsique (cf. granites, granulites felsiques), puisse provoquer sa saturation en soufre.

d) Formation du sulfure massif : Une fois les gouttelettes de liquide riche en Fe-S extraites de magma, elles vont s'enrichir en Ni, Cu et ÉGP. En effet, les coefficients de partage de ces éléments indiquent qu'ils préfèrent le liquide sulfuré au liquide silicaté. Les coefficients de partage diminuent depuis les ÉGP, vers le Ni et le Cu, ce qui indique que les ÉGP ont plus d'affinités que le Cu avec le liquide sulfuré.

Pour collecter un maximum de métaux, les gouttelettes de Fe-S doivent être mises en contact avec un important volume de magma, et leur taux d'enrichissement en métaux est quantifié par le facteur R. Le facteur R est particulièrement élevé pour les SMM situés dans des conduits magmatiques, à travers lesquels d'importants volumes de magma circulent et sont mis en contact avec le liquide Fe-S.

Une fois les gouttelettes de Fe-S enrichies en métaux, elles doivent être collectées pour former un sulfure massif. Ces gouttelettes peuvent se concentrer à la base d'une intrusion magmatique, puisque leurs grandes densités aura tendance à les entraîner vers le bas, ou dans un conduit magmatique (cf. dyke, sill, coulée de lave confinée dans un chenal) où le mouvement du magma et des variations de pressions peuvent permettre la collette des gouttelettes.

e) Cristallisation fractionnée du liquide sulfuré : Les accumulations de liquide sulfuré qui ne refroidissent pas trop rapidement subissent une cristallisation fractionnée. Ils cristallisent un MSS (Monosulphide Solide Solution) riche en Fe, alors que le liquide résiduel, ou ISS (Intermediate Solide Solution), est riche en Cu. Cette cristallisation peut permettre de concentrer le Cu dans la moitié supérieure de l'amas sulfuré. Aussi, dans le cas où cette cristallisation s'effectue dans des conditions de

fO₂ élevées, le liquide peut perdre du Fe et du Ni au profit d'oxydes, et peut ainsi s'enrichir en Cu (Wohlge-muth-Uberwasser et al., 2012).

f) Remobilisation : Les amas sulfurés se solidifient à plus faible température que les magmas silicatés, et peuvent donc se déplacer en dehors de l'intrusion magmatique alors que celle-ci vient tout juste de se solidifier. Les remobilisations peuvent également être plus tardives, et être dues à une phase de déformation et/ou de métasomatisme de l'intrusion magmatique. Le passage d'un fluide, en particulier, mobilisera plus facilement le Cu et pourra provoquer la formation de veines de sulfures cuprifères. D'une façon similaire, des processus d'altération superficielle peuvent remobiliser et concentrer le Cu, comme cela semble avoir été le cas pour le gisement d'O'Okiep (Clifford et al., 2004).

3.2 Disposition des sulfures dans les roches magmatiques

Les sulfures présentent des textures variées qui dépendent des processus ayant conduits à leurs formations. Les principales textures sont (d'après Barnes et Lightfoot, 2005; Eckstrand et Hulbert, 2007) :

a) Sulfures disséminés : Ces sulfures correspondent à des gouttelettes de liquide sulfuré refroidies. Leur rapport Cu/Ni est généralement représentatif de celui du magma dans lequel elles sont contenues. Leurs concentrations en Ni et en Cu peuvent indiquer si elles se sont, ou non, enrichies en métaux (cf. facteur R). Les sulfures sont disséminés mais peuvent être observés à proximité d'amas sulfurés plus massifs, ou être dispersés dans une intrusion stérile.

b) Globules de sulfures : Les globules sont soit des amas de sulfures disséminés, soit des lambeaux de sulfures massifs déchiquetés par une nouvelle injection de magma. Ces globules peuvent témoigner du dynamisme du système magmatique, ce qui est un point positif pour la formation d'un SMM.

c) Sulfures massifs : Les sulfures massifs correspondent au regroupement de sulfures disséminés, et se situent souvent, par exemple, à la base des intrusions ou des coulées de lave, ou dans un segment de dyke plus épais que la normale. Si le système n'a pas refroidi trop vite, les sulfures massifs auront subi la cristallisation fractionnée et la distribution des métaux y sera stratifiée. Aussi, les sulfures massifs présentent des teneurs plus faibles en métaux que les sulfures disséminés, puisque l'interface entre liquides sulfurés et silicatés est de taille très réduite dans le cas des sulfures massifs.

d) Veines : Les veines de sulfures sont symptomatiques d'une remobilisation hydrothermale ou superficielle. Les veines sont généralement enrichies en Cu.

3.3 Principaux contextes géodynamiques

Plusieurs contextes géodynamiques sont possibles pour la formation des SMM, dont les principaux sont :

a) « Points chauds » : Ce type d'environnement est le plus favorable à la formation de SMM. En effet, un environnement favorable à la formation de SMM permettra la fusion partielle, à un degré élevé, du manteau fertile pour créer un important volume de magma ultramafique à mafique. Ce type de magma peut, en partie, se mettre en place dans la croûte supérieure sous forme de conduits magmatiques qui pourront être en contact avec des roches sédimentaires riches en soufre. Ce contexte favorable correspond au magmatisme de type « point chaud », qui est souvent associé à de l'extension crustale responsable de la formation de bassins sédimentaires dans lesquels le magma peut se mettre en place au contact de roches sédimentaires.

Pour des degrés de fusion partielle extrêmes, du magma komatiitique peut être produit. Il est à noter que de nombreux SMM riches en Ni, comme ceux du camp de Raglan par exemple, se situent dans des komatiites (**Figure 3**). Pour des degrés de fusion partielle plus modestes, des basaltes de plateau peuvent se former. Notons que plusieurs SMM contenant autant de Ni que de Cu sont situés dans des roches mafiques, comme ceux de Noril'sk par exemple (**Figure 1**) ou de Duluth (**Figure 3**). Cependant, la richesse en Cu du gisement de Duluth est exceptionnelle, et pourrait être en lien avec la contamination du magma par son encaissant sédimentaire. D'autres gisements qui sont exploités pour les ÉGP, comme celui du Bushveld, proviennent également d'un magmatisme de type « point chaud ».

b) Impact météoritique : Sudbury est l'unique exemple dans cette catégorie, et est trop particulier pour être utile à ce projet.

c) Subduction : Les zones de subduction semblent être un contexte plutôt défavorable aux gisements de type SMM, bien que le gisement d'ÉGP de Lac des Iles (Ontario; Sutcliffe et al., 1989; Brüggmann et al., 1997) indique que ce type d'environnement n'est pas tout à fait stérile. Aussi, certaines intrusions de type « point chaud », comme celles de l'orogénie trans-hudsonienne (complexe de La Bostonnais, ceinture de Cape Smith incluant le camp de Raglan, etc.) pourraient en fait avoir été produites par un magmatisme de type arrière-arc (Corrigan et al., 2007; Sappin et al., 2009).

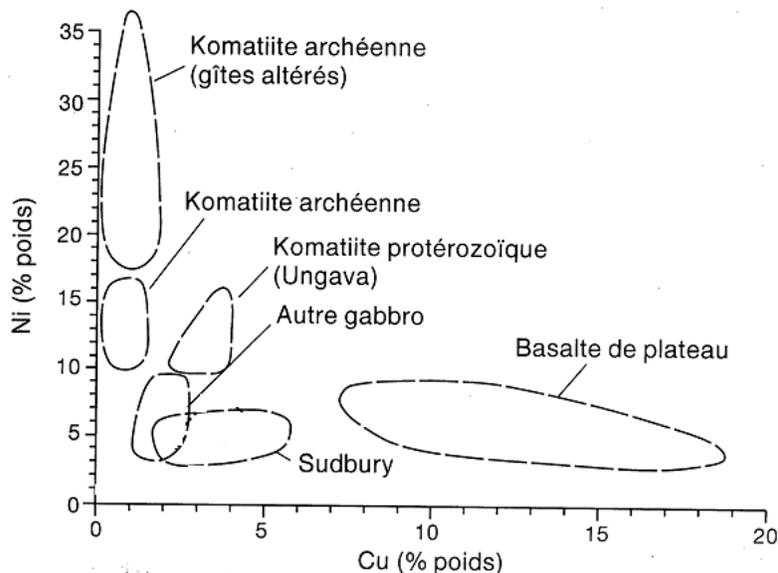


Figure 3. Concentration en Ni et en Cu de quelques intrusions et illustrant l'enrichissement en Ni des komatiites et la richesse en Cu des basaltes de plateau (modifiée d'après Clark et Gobeil, 1997, p. 24).

d) AMCG : Il est généralement admis que les SMM sont observés dans des roches riches en olivines, c'est-à-dire dans des suites magmatiques qui contiennent un volume important de magma mafique à ultramafique. De ce point de vue, les suites AMCG, qui sont constituées de magmas felsiques et de roches mafiques riches en plagioclases et pyroxènes, semblent être un environnement défavorable aux SMM.

La découverte du gisement de Voisey's Bay dans la suite AMCG du Nain a bouleversé cette vision. Ce gisement se situe dans une troctolite (roche à olivines) contaminée par des roches métasédimentaires et les amas sulfurés se sont formés dans un conduit magmatique (dyke). Ce complexe magmatique fait partie de la suite du Nain, qui pourrait provenir d'un magmatisme d'arrière-arc (1,4-1,3 Ga; Corrigan et Hanmer, 1997). Le gisement d'O'Okiep serait également associé à une suite AMCG. Cependant, dans le cas d'O'Okiep, le Cu a été lessivé puis concentré par la circulation des eaux de surface, et le gisement final n'a donc pas entièrement été produit par des processus magmatiques (Clifford et al., 2004).

4 CARACTÉRISTIQUES DES AMCG DU GRENVILLE

Les AMCG du Grenville sont des suites syn-orogéniques (Rivers, 1997) à post-orogéniques ou anorogéniques, c'est-à-dire que le magmatisme pourrait provenir de la délamination de la lithosphère sous-continentale (Corrigan et Hanmer, 1997).

Les suites AMCG sont constituées d'intrusions felsiques, aussi appelées couronnes MCG, et de roches mafiques, dont les anorthosites représentent le volume de roches le plus important. Ces magmas felsiques et mafiques sont contemporains mais pas co-magmatiques, puisque le magma mafique provient, en majeure partie, de la fusion du manteau, alors que la couronne MCG pourrait provenir de la fusion de la croûte. Ce projet se concentre principalement sur la partie mafique des AMCG.

Les anorthosites sont des roches magmatiques atypiques, provenant d'un magma peut-être enrichi en Al et qui a cristallisé un énorme volume de plagioclases. En théorie, la cristallisation de plagioclases devrait enrichir le magma résiduel en éléments incompatibles avec ce minéral, comme le Fe, le Ti et le P par exemple. C'est peut-être cette séquence atypique de cristallisation fractionnée qui est l'origine de la formation de dépôts d'oxydes de Fe-Ti-P, qui sont les seuls types de dépôts exploités à ce jour dans les AMCG de Grenville.

Aussi, dans le Grenville, deux principaux types d'anorthosites sont observés:

a) Anorthosites à labradorite : La labradorite est un plagioclase calcique, qui est particulièrement abondant dans les anorthosites les plus anciennes de Grenville. Ces AMCG contiennent également de la Ti-magnétite, de l'ilménite et de la magnétite, ce qui indique des conditions de fO_2 modestes à élevées (Hébert et al., 2005). Ces anorthosites pourraient être issues d'un magma parental de composition basaltique (Duchesne, 1985; Owens et al., 1993).

b) Anorthosites à andésine : En comparaison avec la labradorite, l'andésine est un plagioclase qui cristallise dans des conditions de fO_2 plus élevées, à des profondeurs plus faibles et/ou à partir de magmas plus différenciés. Les anorthosites à plagioclase sodique peuvent aussi contenir de l'apatite et de l'hémo-ilménite, ce qui indique des conditions de fO_2 très élevées (Hébert et al., 2005). Ces intrusions pourraient être issues d'un magma dioritique (Balk, 1931; Philpotts, 1966; Green, 1969; Duchesne et al., 1974; DeMaiffe et Hertogen, 1981; Owens et al., 1993).

5 PARTIE I : DOCUMENTATION DES SUITES AMCG DU GRENVILLE

5.1 But

Dans cette première partie du projet, les données cartographiques du SIGÉOM 2012 ont été exploitées. Le but de cette approche est de documenter les AMCG en utilisant des données cartographiques et bibliographiques, et d'identifier les intrusions ou parties d'intrusions qui ont le meilleur potentiel pour les gisements de type SMM.

5.2 Opération sur les données

Les opérations suivantes ont été effectuées sur la carte du SIGÉOM 2012:

a) Simplification des données lithologiques: Afin de faciliter les requêtes sur les colonnes « LITH », « DESC_LITH », et « DESC_STRAT », plusieurs colonnes ont été ajoutées à la carte (cf. **Tableau 1**). La colonne I1, par exemple, a été peuplée de la façon suivante:

- I1 = "vide" lorsque le polygone ne représente pas une unité mafique;
- I1 = 1 pour les polygones qui représentent uniquement des roches felsiques;
- I1 = 0,25 pour un polygone qui représente un mélange entre un faciès felsique et, par exemple, trois faciès mafiques.

Les données minéralogiques du fichier « affleurements_de_compilation.shp » ont également été simplifiées. Ainsi, plusieurs colonnes ont été ajoutées au fichier pour permettre l'identification rapide des échantillons contenant de l'olivine, du pyroxène, des sulfures, etc.

b) Roches métasédimentaires: La colonne "M4 sedimen" a été ajoutée à la carte pour identifier toutes les roches métamorphiques de Grenville qui pourraient avoir un protholite sédimentaire. Parmi ces roches, celles étant les plus pélitiques (cf. mudstones, argilites) et pouvant contenir des indices de graphite ou des formations de fer, ont été identifiées dans la colonne "M4 graphit".

c) Regroupement des polygones de la carte en suites AMCG: Le regroupement d'intrusions en suite AMCG peut se faire sur la base de leurs caractéristiques pétrologiques, de leur proximité spatiale et de la similarité de leurs âges absolus. Les anorthosites sont aisément reconnaissables, puisqu'elles sont constituées, par définition, de plus de 90% ou 95% de plagioclases, et sont généralement associées à des roches à hypersthène (orthopyroxène de haute pression). En pratique, les intrusions et la suite AMCG à laquelle elles appartiennent ont été identifiées sur la base des informations récoltées dans les rapports du ministère et dans le reste de la littérature scientifique. Certaines intrusions ont également pu être regroupées sur la base de leurs âges et de leurs pétrologies, et plusieurs polygones sans nom ont également été inclus aux suites AMCG sur la base de leur proximité spatiale et pétrologique avec des intrusions mieux documentées. Un total de 95 intrusions, regroupées en 18 suites AMCG (cf. **Figure 2**), ont été identifiées dans le Grenville québécois. Les 18 AMCG ont également été regroupées en 7 groupes, nommés les groupes A à G, en fonction de leurs positions dans l'histoire tectonique de Grenville (**Tableau 2**).

d) Indices Ni-Cu: Les indices Ni-Cu concernés par cette étude sont les 156 indices situés dans les AMCG et pour lesquels la colonne "CODE_SYMBOL" du fichier « gisement_métallique.shp » contient l'un des codes suivant: "GMCU", "GMNI" ou "GMNICU". D'après les critères du ministère, ces indices correspondent à des échantillons contenant plus de 0,1 wt% de Cu et/ou plus de 0,25 wt% de Ni (cf. Madore et al., 1998). Parmi ces indices, environ 1/3 sont riches en Cu, 1/3 sont riches en Ni et 1/3 ont un rapport Cu/Ni proche de 1. Ces statistiques sont identiques si l'on s'intéresse aux indices Ni-Cu de Grenville situés en dehors des AMCG. En fait, le rapport Cu/Ni des indices ne peut pas fournir d'informations sur la composition en Cu d'un éventuel SMM situé à proximité, puisque de nombreux paramètres peuvent faire varier le rapport Cu/Ni au sein d'un même gisement.

e) Indices Fe-Ti-(P): Ces indices ont été extraits des fichiers « gisement_métallique.shp » et « gisement_non_métallique.shp » du SIGÉOM 2012, et correspondent aux indices pour lesquels la colonne "CODE_SYMBOL" contient l'un des codes suivant: "GMFE", "GMFETI", "IM Ilménite", "FE Fer" et "AP Apatite".

Tableau 1. Description des colonnes ajoutées à la carte du SIGÉOM 2012 pour faciliter les requêtes sur la lithologie des intrusions.

Colonnes	Description	Surface
I1	Intrusions felsiques	20,4 %
I2	Intrusions de composition intermédiaire	26,6 %
I3	Intrusions mafiques (à l'exception des anorthosites)	12,6 %
I3-anorthosite	Anorthosites et autres intrusions mafiques très riches en plagioclases	36,3 %
I4-UM	Intrusion ultramafiques (à l'exception des roches riches en oxydes)	1,3 %
I4Z-oxydes	Roches ultramafiques riches en oxydes Fe-Ti-P	0,4 %

Tableau 2. Groupes A à G d'AMCG et résumé de l'environnement tectonique dans lequel elles se sont mises en place.

Groupe	Âge (Ma)	Événement tectonique	AMCG	Surface
A	975	Post-orogène Rigolet (phase tardive de l'orogène Grenville)	1	0,2 %
B	1080-1000	Tardi-orogène Ottawa (phase précoce de l'orogène Grenville)	4	23,0 %
C	1170-1120	Tardi-orogène Shawinigan et post-orogène Elzévirienne	5	41,4 %
D	1247	Période de stabilité tectonique	1	1,0 %
E	1390-1310	Période d'extension et de dénudation post-orogène Pinwarienne	5	21,6 %
F	1500	Post-orogène Wakahamienne, syn-orogène Pinwarienne	1	8,8 %
G	1700-1600	Syn-orogène Labradorienne (?)	1	4,0 %

5.3 Outils : calcul du contraste

Dans les sections qui vont suivre, nous nous intéresserons aux relations spatiales entre des indices Ni-Cu et différentes entités géologiques. Ces relations spatiales ont été quantifiées à l'aide de calculs de contraste, dont le principe général est décrit ci-après. Notez que deux méthodes, décrites à l'annexe A et B, ont été utilisées pour calculer les contrastes.

Le contraste est une mesure de l'association spatiale entre deux objets localisés dans l'espace, qui peuvent être soit des points, soit des surfaces. Prenons l'exemple d'une carte contenant des indices minéralisés (points A) et plusieurs unités lithologiques (surfaces B, C, D, etc.). Un calcul de contraste permet de quantifier l'association spatiale entre les points A et la surface B par exemple. Le contraste sera un chiffre fortement positif si, par exemple, la majeure partie des points A se situent dans la surface B, et un chiffre fortement négatif dans le cas contraire. Un contraste proche de 0 (entre -1 et 1 environ) signifie qu'il n'y a pas de relation spatiale particulière entre les points A et la surface B.

Le contraste est une méthode statistique et comme toutes méthodes de ce type, elle peut identifier des corrélations entre des objets n'ayant aucune relation génétique et dont la proximité spatiale est fortuite. Aussi, le contraste est dépendant du niveau de connaissance : si, par exemple, seules les unités ultramafiques d'une région ont été prospectées pour le Ni-Cu, ces unités pourraient contenir une surabondance d'indices Ni-Cu par rapport aux autres unités d'une carte, ce qui se traduira par des valeurs de contraste fortement positives.

En dépit des limitations citées ci-dessus, le calcul du contraste reste une technique rapide pour quantifier des associations spatiales qui sont difficiles à appréhender à l'œil nu. Le contraste permet avant tout de tester des hypothèses de travail et d'aider à la réflexion.

5.4 Relation spatiale entre indices et unités lithologiques

Les roches de type AMCG situées dans un rayon de 1 km autour des indices Ni-Cu sont constituées de 32,9%, 42,6% et 9,6% de roches I3, I3-anorthosites et I4, respectivement. Ces pourcentages sont supérieurs à la proportion de chacune de ces roches dans les AMCG, indiquant une forte relation spatiale entre les roches mafiques et ultramafiques et les indices Ni-Cu. Pour mieux mettre en évidence cette dépendance spatiale, la probabilité d'avoir un indice Ni-Cu, suivant que l'on se situe dans tel ou tel type de lithologie, a été calculée en utilisant le calcul du contraste détaillé dans l'annexe A.

Le calcul du contraste indique que, malgré la faible surface qu'elles occupent, ce sont les roches ultramafiques qui montrent la plus forte association spatiale avec les indices Ni-Cu (**Figure 4**). Le contraste est également élevé pour les roches mafiques, mais moins élevé pour les roches I3-anorthosites, qui sont donc de moins bonnes cibles que les autres types de roches mafiques, probablement à cause de leur trop grand volume. Les contrastes négatifs calculés pour les roches I1-I2 indiquent que l'on a plus de chance de trouver un indice Ni-Cu si l'on choisit un endroit au hasard que si l'on prospecte dans ce type de roches (**Figure 4**).

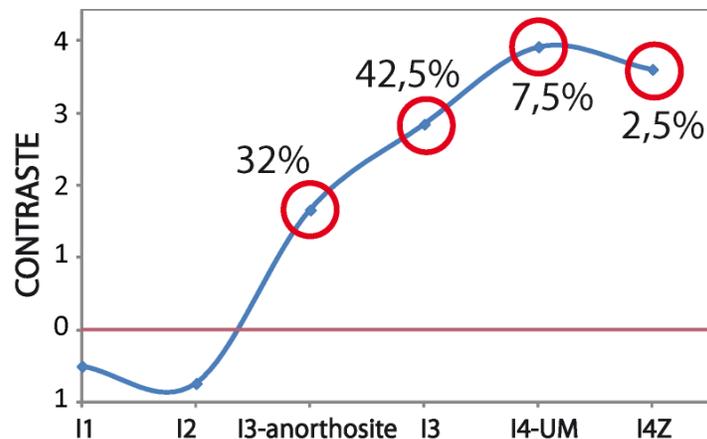


Figure 4. Valeurs de contrastes calculées pour chaque type de lithologie. Les chiffres associés aux cercles rouges correspondent aux pourcentages d'indices Ni-Cu observés dans chacune des lithologies.

Aussi, la probabilité de trouver un indice Ni-Cu est peut-être fonction du volume de roches mafiques que renferme une intrusion. Pour tester cette hypothèse, les intrusions des suites AMCG contenant ou ne contenant pas d'indices Ni-Cu ont été divisées en 2 groupes. Pour chacun de ces groupes, la proportion de chaque unité lithologique qui constitue les intrusions a été calculée et reportée graphiquement (**Figure 5**), et les résultats indiquent que les intrusions contenant des indices Ni-Cu sont généralement celles qui contiennent le plus de roches mafiques à ultramafiques. La même opération, effectuée sur les suites AMCG, a produit des résultats similaires (**Figure 5**). Cependant, toutes les intrusions contenant peu de roches felsiques ne contiennent pas forcément des indices Ni-Cu. Ainsi, il n'est pas nécessaire qu'une intrusion contienne un énorme volume de roches mafiques pour contenir des indices Ni-Cu; il faut simplement qu'elle contienne des roches mafiques.

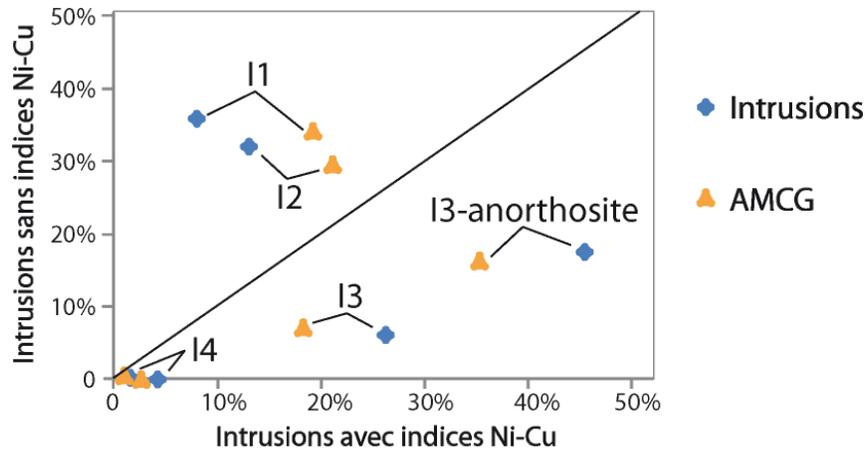


Figure 5. Proportion de chaque unité lithologique qui constitue les intrusions contenant et ne contenant pas d'indices Ni-Cu.

Les données pétrologiques du fichier « affleurement_de_compilation.shp » ont ensuite été exploitées, dans le but de réduire la taille des cibles qui, pour le moment, ont la même surface que celle des roches I3-I4 des suites AMCG. Tout d'abord, il est observé que parmi les polygones des roches I3-I4 de la carte du SIGÉOM 2012 pour lesquels au moins un affleurement est documenté, 14,4% des polygones contiennent de l'olivine, 88,6% contiennent du pyroxène et/ou de l'amphibole, dont 69,0% contiennent de l'orthopyroxène. Ceci indique que les roches mafiques des AMCG contiennent peu d'olivines et que le caractère mafique d'une roche est avant tout défini par la proportion de plagioclases, de pyroxènes et d'oxydes de Fe-Ti.

Afin d'étudier la proximité spatiale entre les indices Ni-Cu et les différents minéraux observés en affleurement, des valeurs de contraste ont été calculées selon la méthode décrite à l'annexe B. Ce calcul ne concerne que les 60,2% d'indices Ni-Cu situés à moins de 2 km d'un affleurement documenté. Les contrastes ainsi obtenus sont bas, et diminuent généralement suivant que les affleurements considérés se situent à moins de 2 km ou de 5 km des indices Ni-Cu (**Tableau 3**). Ce calcul met en évidence une faible dépendance spatiale entre la présence d'olivine, de sulfures et/ou d'apatite et la présence d'un indice (**Tableau 3**). La présence de pyroxène est un critère inutile, puisque toutes les roches des suites AMCG en contiennent. D'une façon générale, les données minéralogiques utilisées sont un critère peu discriminant, et pourraient peut-être produire de meilleurs résultats si les proportions des phases observées en affleurement pouvaient être utilisées.

Tableau 3. Résultats des calculs du contraste qui documentent la proximité entre les indices Ni-Cu et les minéraux identifiés en affleurements

Minéraux identifiés en affleurement	Contraste (2 km)	Contraste (5 km)
Olivine	0,85	0,64
Orthopyroxène	0,66	0,83
Pyroxène et amphibole	0,27	0,68
Plagioclase	0,59	0,68
Feldspath potassique	-1,43	-0,6
Oxyde de fer	-0,45	-0,39
Sulfure et sulfosel	1,98	1,32
Apatite	0,88	0,55

Puisque les données pétrologiques ne permettent pas d'identifier les roches I3-I4 les plus favorables aux minéralisations Cu-Ni, les données géochimiques permettant de définir le caractère mafique des roches ont été utilisées. Il est à noter que ce test ne concerne que les 55,1 % d'indices Ni-Cu situés à moins de 2 km d'un échantillon de roche analysé et compilé dans le SIGÉOM 2012.

Dans un premier temps, il est nécessaire de définir un critère géochimique pour quantifier le caractère mafique d'une roche. Les critères suivant pourraient être utiles:

a) SiO₂ (wt%): La proportion de SiO₂ (wt%) est généralement utilisée pour caractériser les roches mafiques à felsiques. Le problème avec les AMCG est leur richesse en plagioclase, qui est un minéral qui contient relativement peu de silice. Ainsi, les anorthosites semblent être des roches ultramafiques alors qu'elles sont pauvres en MgO et en d'autres éléments, comme le Ni, Cr, Co, ÉGP, qui caractérisent généralement les magmas les plus mafiques.

b) Mg#: Le nombre Mg (ou Mg#), est égal à $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ (avec Mg et Fe en mole%). Le Mg# est plus élevé pour les roches les plus mafiques, car elles sont généralement plus riches en magnésium qu'en fer. Le problème est que certaines roches ultramafiques (cf. roche de couleur sombre), comme les magnétites et autres roches à oxydes par exemple, sont très riches en fer. Ainsi les suites AMCG, qui sont des roches mafiques riches en oxydes de fer, ont des #Mg proches de ceux de roches felsiques.

c) MgO (wt%): Habituellement, les roches les plus mafiques sont celles qui contiennent le plus de MgO (wt%). Ce critère est généralement utilisé pour classer les roches I3 à I4. Le problème avec ce critère est que les anorthosites, qui sont des I3, contiennent aussi peu de magnésium que des roches felsiques. Ainsi, et comme pour le Mg#, la richesse en Fe₂O₃ de certaines roches les font paraître plus felsiques qu'elles le sont en réalité.

Ainsi, tous les critères présentent des inconvénients. En fait, ces inconvénients reflètent le fait que les classifications habituellement appliquées aux roches magmatiques sont inadaptées aux anorthosites, qui proviennent d'un magma atypique.

Dans un premier temps, les critères énumérés ci-dessus ont quand même été utilisés pour classer les échantillons comme étant des roches I1, I2, I3 ou I4, en utilisant les valeurs de MgO, SiO₂ et Mg# qui définissent généralement chacun de ces groupes (cf. **Tableau 4**). Ensuite, la proximité entre les indices Ni-Cu et les roches identifiées comme ayant tel ou tel type de lithologie, et situées à moins de 2 km et 5 km des indices, a été mesurée en utilisant des calculs de contraste effectués selon la méthode décrite à l'annexe B. Les résultats indiquent que le Mg# et le SiO₂ (wt%) ne sont pas des critères discriminants, puisqu'ils montrent que les roches identifiées comme étant des I1-I2 sont proches des indices et que les I4 en sont éloignées (**Tableau 4**). Le MgO (wt%) semble être un meilleur critère pour identifier les roches les plus mafiques, bien que les valeurs de contrastes calculées avec ce critère soient faibles (**Tableau 4**).

Lorsque la méthode décrite à l'annexe A est utilisée, les contrastes calculés avec le critère MgO (wt%) indiquent que les échantillons contenant un maximum de magnésium (cf. MgO > 85^{ième} centile, c'est-à-dire MgO > 8,5 wt%), et situés à moins de 2 km d'un indice Ni-Cu, présentent une forte dépendance spatiale avec les indices (**Figure 6**). Ainsi, le MgO semble être un critère intéressant pour identifier les roches mafiques associées aux indices Ni-Cu dans les suites AMCG.

Tableau 4. Calcul de contraste permettant de définir la relation spatiale entre les indices Ni-Cu et les roches identifiées comme I1, I2, I3 et I4 sur la base de leurs concentrations en magnésium, silice et fer.

Roches	I1		I2			I3			I4		
Critères*	MgO	SiO ₂	MgO	SiO ₂	Mg#	MgO	SiO ₂	Mg#	MgO	SiO ₂	Mg#
Valeurs du critère**	<2	>63	2-6	52-63	>0,4	6-13	45-52	0,4-0,3	>13	<45	< 0,3
Contraste (2 km)	-1,27	-1,14	-0,86	-0,43	2,11	0,77	1,32	0,90	2,02	-0,75	-2,29
Contraste (5 km)	-0,85	-0,97	-0,51	-0,21	1,51	0,63	0,95	0,96	1,60	-0,41	-1,65

*MgO et SiO₂ sont en wt%

**Pour SiO₂, les valeurs reportées sont celles de la littérature. Pour MgO et Mg#, les valeurs reportées sont celles déterminées avec les échantillons du GEOROC, qui ont préalablement été classées comme roches felsiques à mafiques sur la base de leur concentration en silice.

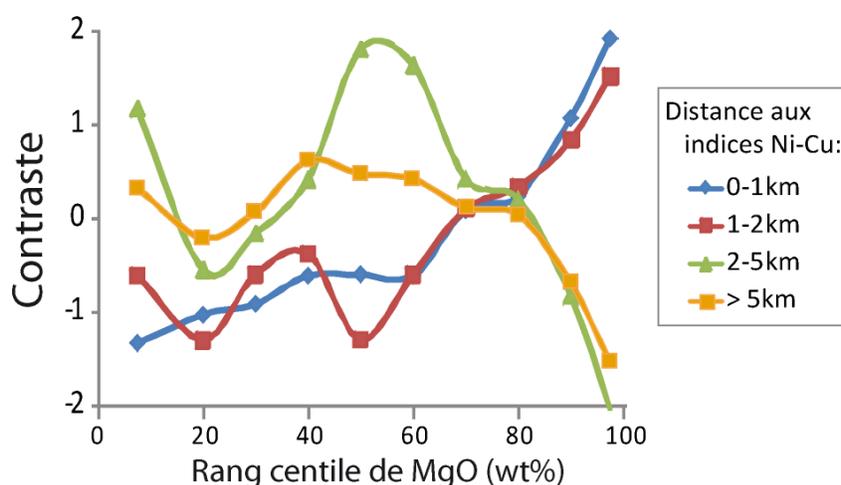


Figure 6. Graphique représentant les valeurs du contraste calculées par intervalles de rang centile de MgO (wt%), pour des échantillons situés à différentes distances des indices Ni-Cu.

5.5 Relation spatiale entre indices et oxydes de Fe-Ti

Les gisements d'oxydes de Fe-Ti font partie intégrante des systèmes magmatiques étudiés et, pour cette raison, leur relation spatiale avec les indices Ni-Cu sera étudiée dans cette section (**Figure 7**). Aussi, des gisements d'oxydes de fer sont observés à proximité des SMM cuprifères de Duluth (Nabil, 2003), et des accumulations d'oxydes sont observées dans des intrusions contenant également des ÉGP, comme celle du Bushveld par exemple. Les gisements d'oxydes de fer se forment dans des conditions de fO₂ élevées, qui sont soit la conséquence d'un haut degré de différenciation du magma ou de l'assimilation de roches encaissantes felsiques ou de roches sédimentaires de type formation de fer ou autre. Il est à noter que ces paramètres de différenciation et de contamination pourraient également jouer un rôle important dans la formation des gîtes cuprifères.

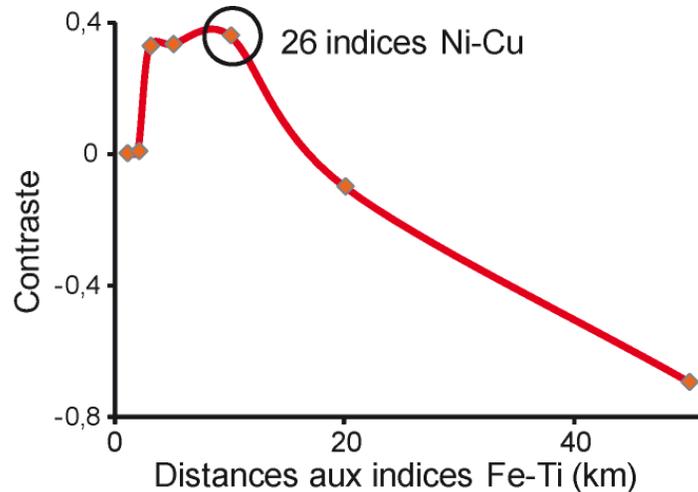


Figure 7. Résultats des calculs de contraste effectués pour des indices Fe-Ti et Ni-Cu situés à différentes distances les uns des autres.

Parmi les 37 intrusions qui contiennent au moins un type d'indice, 24% contiennent seulement des indices de Ni-Cu (cf. intrusion de Tortue par exemple), 30% ont des indices de Fe-Ti (cf. intrusion de Labrieville) et les 46% d'intrusions restantes contiennent les 2 types d'indices (cf. AMCG de Morin). Pour mieux étudier la relation entre les deux types d'indices, des calculs de contraste ont été effectués suivant la méthode décrite dans l'annexe A (**Figure 7**). Ces calculs indiquent qu'aucun indice Ni-Cu n'est situé à moins de 2 km d'un indice Fe-Ti, et que 26 indices Ni-Cu sont situés entre 2 et 10 km d'indices Fe-Ti. Les valeurs de contraste sont très faibles, ce qui indique que la présence ou l'absence d'indices Fe-Ti ne conditionne pas la présence d'indices Ni-Cu.

5.6 Relation spatiale entre indices et roches métasédimentaires

Il est généralement admis qu'un apport extérieur de soufre est nécessaire pour former des SMM. Le soufre provient généralement d'un contaminant sédimentaire et c'est pourquoi la relation spatiale entre les indices Ni-Cu et les roches métasédimentaires de Grenville est ici étudiée (**Figure 8**). La relation entre les indices et les roches à graphite sera également étudiée, puisque la présence de graphite peut indiquer la présence d'un horizon pélitique qui a potentiellement sédimenté à grande profondeur en milieu réducteur, où il a pu s'enrichir en soufre. Aussi, la distance entre les indices Ni-Cu et leur encaissant felsique (cf. roches I1) sera étudiée, puisqu'il est possible que l'assimilation de ce type de roches soit suffisante pour provoquer la saturation en soufre du magma (Ardnt et al., 2005; Barnes et Lightfoot, 2005).

D'un point de vue statistique, tous les indices Ni-Cu se situent entre 1 et 60 km d'un encaissant métasédimentaire, et la moitié des indices se situent à 1-17 km de ce type de roches. Si l'on répartit les intrusions en deux groupes, suivant qu'elles contiennent ou non des indices de Ni-Cu, on observe qu'environ 60% des intrusions de chaque groupe se situent à moins de 10 km de roches métasédimentaires. Ainsi, la nature de l'encaissant ne permet pas de discriminer les intrusions minéralisées de celles qui ne le sont pas.

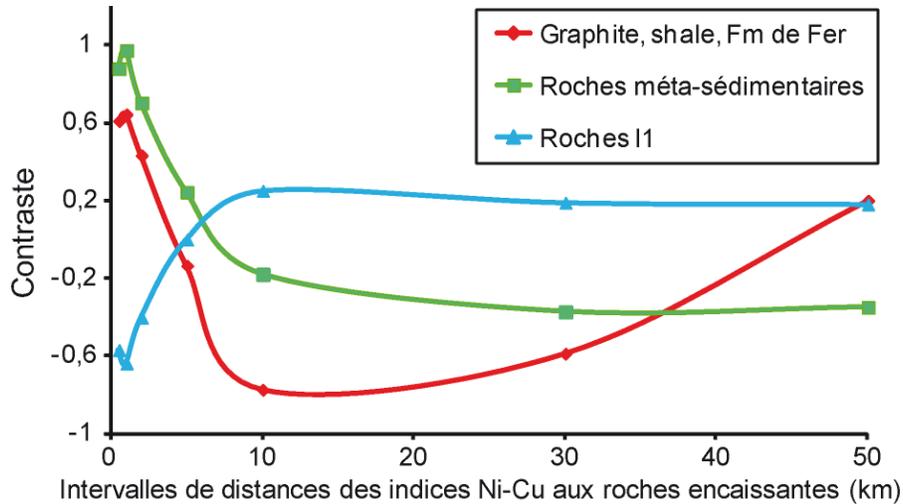


Figure 8. Calculs de contraste effectués par intervalles de distance entre les indices Ni-Cu et leurs encaissants métasédimentaires, graphiteux et felsiques.

Afin de mieux contraindre cette relation spatiale, des calculs de contraste ont été effectués suivant la méthode décrite à l'annexe B. Les valeurs de contraste sont faibles, et indiquent une faible relation spatiale entre les indices Ni-Cu et les roches métasédimentaires, contenant ou non du graphite, et situées à moins de 2 km de ces indices (**Figure 8**).

En fait, les magmas contaminés par un encaissant métasédimentaire migrent loin de leur contaminant avant de développer un SMM. Duluth fait pourtant exception à la règle, puisqu'il semble encore être en contact avec son contaminant (Nabil, 2003). Cependant, il est possible que les AMCG aient migré loin de leur contaminant potentiel et qu'ainsi la nature de leur encaissant soit un paramètre inutile et potentiellement trompeur pour l'établissement d'un modèle de prospection.

5.7 Position des indices Ni-Cu au sein des intrusions

Les indices Ni-Cu sont généralement observés le long des bordures des intrusions mafiques des suites AMCG, car ils se situent dans les niveaux de roches mafiques à ultramafiques qui sont, en grande partie, des faciès de bordure (cf. Clark, 1998).

Dans cette analyse, les bordures des intrusions mafiques des suites AMCG ont été tracées sous ArcGIS. Ces bordures correspondent aux contacts entre les intrusions anorthositiques et leur couronne felsique de roches MCG ou leur encaissant, ainsi qu'aux contacts entre plusieurs intrusions mafiques observées au sein d'un même massif anorthositique. Les bordures ainsi sélectionnées ne sont pas forcément pertinentes car plusieurs faciès de bordures ont pu être oblitérés par des mouvements de faille (cf. AMCG de Rivière-Pentecôte par exemple), mais elles permettent un premier calcul de contraste.

Ces calculs de contraste ont été effectués pour la surface des intrusions mafiques uniquement et suivant la méthode décrite dans l'annexe A (**Figure 9**). Les valeurs de contraste les plus élevées indiquent que de nombreux indices Ni-Cu se situent à moins de 2 km des zones de bordure, qui constituent ainsi une cible d'exploration intéressante.

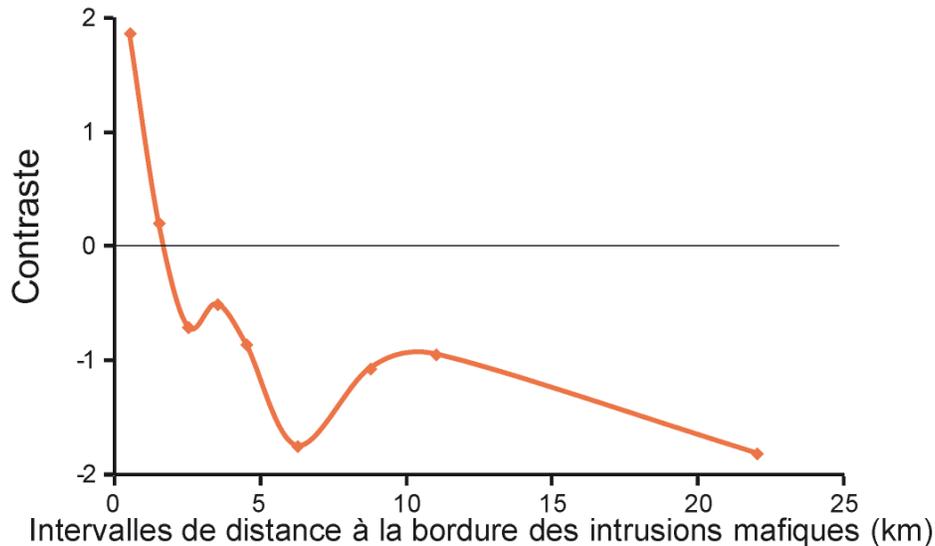


Figure 9. Calculs de contraste effectués par intervalles de distance des indices Ni-Cu aux bordures des intrusions mafiques.

5.8 Documentation des suites AMCG

Un total de 18 fiches a été rédigé dans le but d'établir l'état des connaissances sur les 18 suites AMCG étudiées pendant ce projet. Les intrusions ont été regroupées dans chacune de ces fiches sur la base d'interprétations proposées dans la littérature et, dans certains cas, sur la base d'interprétations personnelles basées, en grande partie, sur les données géochronologiques.

Ces 18 fiches compilent d'abord les données du SIGÉOM 2012, c'est-à-dire des données lithologiques, pétrologiques, structurales, minéralogiques et géochronologiques. Ces fiches regroupent également un ensemble d'informations puisées dans la littérature. Parmi les informations compilées, on trouvera des descriptions du contexte géodynamique dans lequel le magma s'est mis en place: période de compression syn-orogénique, période d'extension post-collision, contexte d'arc volcanique, etc. Ces descriptions s'accompagnent d'un paragraphe décrivant la nature de l'encaissant, sédimentaire ou igné, qui permet d'évaluer les chances que le magma ait pu recevoir du soufre d'une source externe.

La composition du plagioclase et des oxydes de fer est également décrite, afin d'évaluer la fO_2 du magma. D'une façon générale, la présence d'andésine, de magnétite et d'hémo-ilménite indique des conditions de fO_2 plus élevées que la présence de labradorite, de Ti-magnétite et d'ilménite. Aussi, toutes les informations disponibles sur le mode et la profondeur de mise en place des intrusions, et sur la source du magma et les caractéristiques de sa séquence de cristallisation ont été compilées, afin d'évaluer la morphologie possible de l'intrusion, ce qui peut conditionner la position des SMM. Ces informations sont utiles pour distinguer les roches qui ont cristallisé tard de celles qui les ont précédées, et pourraient ainsi permettre de localiser les unités lithologiques qui ont les plus de chances d'avoir accumulé des métaux de base.

Cette compilation a permis de dégager les règles générales suivantes:

a) Relation entre le volume des AMCG et les indices Ni-Cu: La corrélation entre la surface occupée par une suite AMCG et le nombre d'indices Ni-Cu qu'elle contient est assez faible, étant de l'ordre de 20% (cf. coefficient de corrélation = 0,45). Le résultat est le même si l'on regarde chaque intrusion individuellement (corrélation de 30% environ, pour un coefficient de corrélation égal à 0,63). En fait, l'AMCG de Lac-Saint-Jean (ALSJ) est la seule suite qui soit de très gros volume et contienne, en

conséquence, un grand nombre d'indices; probablement parce que cette AMCG est particulièrement bien documentée (**Figure 10**). Ainsi, ce ne sont pas forcément les suites AMCG les plus volumineuses qui ont le meilleur potentiel.

b) Âge des AMCG: Ce sont les AMCG des groupes B, C et E qui contiennent la majorité des indices Ni-Cu, probablement parce que ces trois groupes représentent, à eux seuls, 80% de la surface totale des AMCG (**Figure 10**). Ces groupes comprennent des intrusions qui se sont mises en place à 1000-1160 Ma et à 1310-1390 Ma, qui semblent être les intervalles d'âges les plus favorables aux minéralisations SMM dans les anorthosites de Grenville.

Aussi, les anorthosites les plus anciennes (groupes C à G), sont les plus riches en labradorites, ce qui pourrait indiquer qu'elles sont constituées d'un magma plus primitif que les AMCG plus récentes. Puisque les magmas les plus primitifs, c'est-à-dire les plus mafiques, sont généralement plus riches en Ni et en Cu, il est possible que les AMCG anciennes aient un meilleur potentiel pour les minéralisations recherchées.

Cependant, les AMCG les plus anciennes, c'est-à-dire celles des groupes F et G, ont subi de multiples épisodes de déformation, d'exhumation et de métamorphisme qui pourraient avoir modifié, détruit ou bonifié, d'éventuelles minéralisations. Comme ces AMCG sont également celles qui sont cartographiées avec le moins de détails, il est difficile d'évaluer leur potentiel. Ainsi, du point de vue de l'âge, ce sont les AMCG des groupes C et E (le groupe D, qui ne comprend que la mangérite de Joncas, étant mis à part), qui semblent avoir le meilleur potentiel.

c) Faciès de bordure: Une AMCG idéale se constitue d'un cœur anorthositique présentant un fin faciès de bordure de roches mafiques à ultramafiques, ou jotunitiques, localement riche en oxydes de fer et en apatite, et qui est associé avec la majorité des indices Ni-Cu connus. Ce faciès de bordure est en contact avec la couronne de roches felsiques de type MCG et/ou avec les roches de l'encaissant.

D'un point de vue génétique, le faciès de bordure pourrait représenter la bordure figée de l'anorthosite, c'est-à-dire un magma primitif ayant probablement refroidi trop rapidement pour présenter le moindre intérêt pour les minéralisations Ni-Cu. En fait, les données géochimiques indiquent que ces faciès de bordure correspondent à des magmas très différenciés, produits par des degrés élevés de cristallisation fractionnée (Huss, 2002; Fredette, 2006). Ces faciès représentent des magmas résiduels, produits par l'extraction d'un important volume de plagioclases du magma parental, et qui se sont donc enrichis en éléments incompatibles avec le plagioclase comme le Fe, Ti, P, Mg et potentiellement, le Cu et le soufre. C'est pour cette raison que les faciès mafiques situés en bordures des massifs anorthositiques présentent un intérêt pour les minéralisations d'apatite et d'oxydes de Fe-Ti (cf. secteur du Lac à Paul au NE de l'ALSJ) et ont le potentiel de présenter un intérêt pour les SMM.

Le second avantage que présente ces faciès de bordure est qu'ils sont composés de roches mafiques en contact avec les roches encaissantes. Ils sont donc les plus susceptibles de subir une contamination crustale qui est une étape généralement cruciale dans la genèse d'un SMM. En résumé, les faciès de bordure des anorthosites, c'est-à-dire ceux qui sont documentés par des données cartographiques, sont la meilleure cible d'exploration identifiée jusqu'à présent.

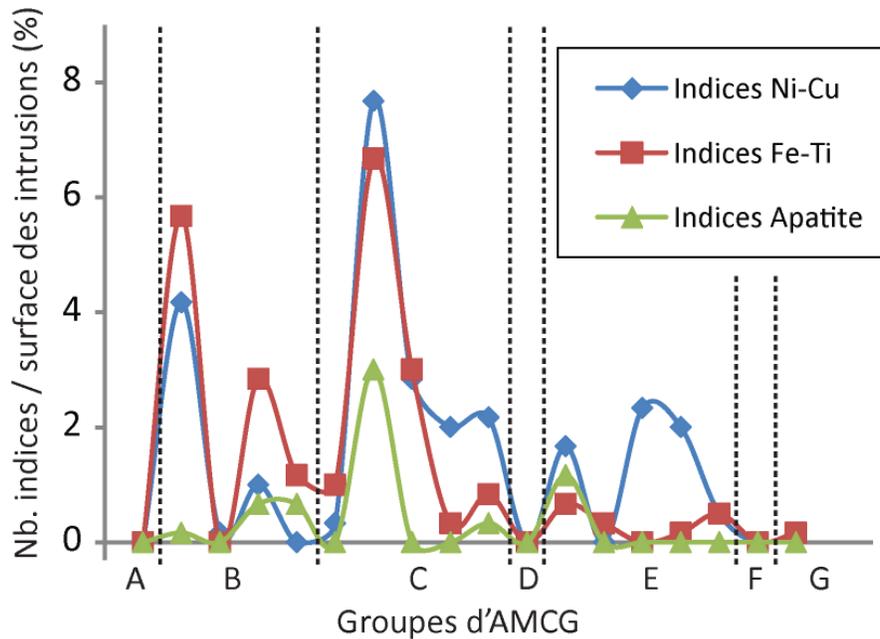


Figure 10. Surface des intrusions et quantité d'indices contenus dans les AMCG des groupes A à G.

5.9 Conclusions de la partie I

Cette première partie du projet a permis d'isoler un certain nombre de paramètres qui permettent de définir un premier modèle d'exploration pour les SMM cuprifères dans les AMCG de Grenville.

Les critères jugés les plus importants sont pétrologiques. Le premier de ces critères indique que seules les roches mafiques ont un potentiel, ce qui permet de réduire la surface des AMCG de 100% à 53,1% tout en conservant 93,6% des indices Ni-Cu. Le second critère indique que la bordure mafique, ultramafique ou jotunitique des anorthosites a un fort potentiel, et cette bordure représente 1,33% de la surface des AMCG et contient 28% des indices Ni-Cu. Ces chiffres permettent de calculer des valeurs de contraste de 3,37 et de 2,79 pour les faciès de bordure, selon que la zone étudiée correspond, respectivement, à la surface des AMCG ou seulement à la surface des roches mafiques des suites AMCG.

La **Figure 11** présente une carte de ces faciès de bordure, établie à partir des données du SIGÉOM 2012 et des données compilées dans les 18 fiches qui accompagnent ce rapport. Ces faciès constituent une première cible d'exploration. Cependant, le critère "faciès de bordure" est probablement trop restrictif, puisqu'il est très dépendant du niveau de détail atteint par la cartographie des différents feuillets qui couvrent les AMCG.

Les autres paramètres identifiés pendant cette étude présentent plusieurs inconvénients et sont parfois peu discriminants. Néanmoins, une carte de « prospectivité » a été réalisée en attribuant des facteurs aux paramètres étudiés. Ces facteurs correspondent à la valeur, parfois arrondie, des contrastes calculés précédemment et sont présentés dans le **Tableau 5**. En pratique, cinq cartes contenant 2 à 5 classes ont été créées, pour lesquelles les valeurs des classes correspondent à celles des facteurs du **Tableau 5**.

Une fois les cinq cartes produites, elles ont été combinées sous ArcGIS, ce qui a permis d'obtenir une unique carte dont les polygones contiennent les valeurs des facteurs des cartes qui ont permis de les définir. Ensuite, la somme des facteurs a été calculée et transformée en **pourcentages** qui prennent en compte les valeurs maximales et minimales que cette somme de facteurs peut atteindre. Cette dernière

étape a été nécessaire puisque les couches d'informations utilisées n'ont pas toutes la même surface, puisque, par exemple, le paramètre « lithologie » couvre l'intégralité des suites AMCG alors que le paramètre « MgO » ne couvre que la surface des AMCG située à moins de 2 km d'un échantillon de roche. La carte ainsi obtenue est une carte de « prospectivité » préliminaire (**Figure 12**), à laquelle sera ajoutée des contraintes géochimiques dans la seconde partie de ce rapport.

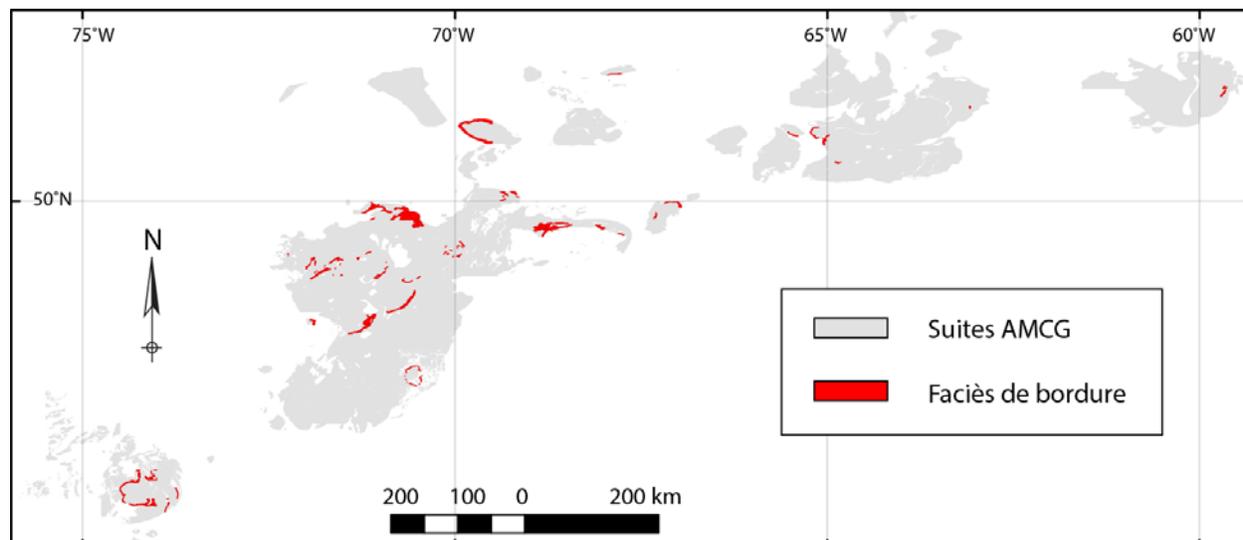


Figure 11. Carte présentant le faciès mafique de bordure des anorthosites du Grenville.

Tableau 5. Résumé des paramètres et des facteurs utilisés pour établir la carte préliminaire de « prospectivité ».

Nom	Surfaces concernées	Facteur	Description
Lithologie	AMCG	-1	I1 et I2
		1,5	I3-anorthosite
		3	I3-autres
		4	I4-UM (roches silicatées)
		3,5	I4Z (oxydes de fer)
Pétrologie	Buffer de 2 km autour des affleurements de compilation qui documentent les AMCG	2	Sulfures et sulfosels
		1	Olivine et/ou apatite
		0	Autres minéraux
MgO	Buffer de 2 km autour des échantillons pour lesquels MgO (wt%) est analysé	1	MgO > 8,5 wt%
		0	MgO < 8,5 wt%
Proximité aux sédiments	AMCG	1	AMCG situées à moins de 2 km des roches métasédimentaires
		0	Autres
Fe-Ti indices	Critère non utilisé, car peu discriminatoire	0	-
Faciès de bordure	Intrusions mafiques	3	Faciès de bordure cartographiés
		2	Autres roches I3 situées à < 1 km des bordures des intrusions
		0	Autres roches I3

Cette carte préliminaire indique que les régions suivantes ont un potentiel pour les minéralisations de type SMM:

AMCG de LSJ: La bordure de l'anorthosite, et en particulier sa bordure NE (cf. secteur Lac à Paul), semble avoir un potentiel pour ce type de minéralisation (**Figure 12**). Cependant, deux observations problématiques ont été faites dans ce secteur: 1) absence de contaminant métasédimentaire; ce qui n'est pas forcément un point négatif puisque la plupart des SMM se situent dans des magmas qui ne sont plus en contact avec leurs contaminants; 2) nombreux indices Ni-Cu dispersés; il est possible qu'aucun mécanisme n'ait permis de rassembler les gouttelettes de sulfures disséminées dans le magma, ne permettant ainsi pas la formation d'un sulfure massif.

AHSP: La partie NO de cette AMCG ressort sur la **Figure 12**, peut-être parce que ce secteur correspond à la partie la mieux documentée de cette suite magmatique. Les faciès de bordure mafiques à ultramafiques des Lobes NO et Sheldrake semblent particulièrement intéressants.

AMCG de Rivière-Pentecôte: La bordure NE de l'anorthosite, qui est en contact avec des roches métasédimentaires, semble particulièrement intéressante.

AMCG de Matamec: Cette AMCG ressort sur la carte de « prospectivité » à cause de la grande quantité de roches mafiques qu'elle renferme. Matamec est cependant un terrane, dont la structure interne complexe rend difficile l'identification du faciès de bordure ou de toutes autres structures qui auraient pu favoriser la concentration de sulfures massifs. Toute prospection dans le terrane de Matamec nécessite, au préalable, une bonne compréhension de sa structure et de la position des différentes unités lithologiques.

AMCG de Morin: Les intrusions mafiques de la suite de Chevreuil semblent être des sills, ce qui pourrait être une morphologie favorable aux minéralisations de type SMM. En ce qui concerne l'anorthosite de Morin, sa bordure jotunique est trop felsique pour avoir un potentiel minéralisateur. Le faciès mafique situé entre les deux lobes d'anorthosite semble plus intéressant pour les minéralisations recherchées.

AMCG de Vallant, La Blache, Tétépisca, anorthosite de Vallant (AMCG de Pipmuacan) et anorthosite de Tortue (AMCG de Raudot-Fournier): Ces intrusions semblent avoir un potentiel à cause de la grande quantité de roches mafiques qu'elles renferment. Les caractéristiques de leurs faciès de bordure et de leurs indices Ni-Cu mériteraient d'être décrites plus avant.

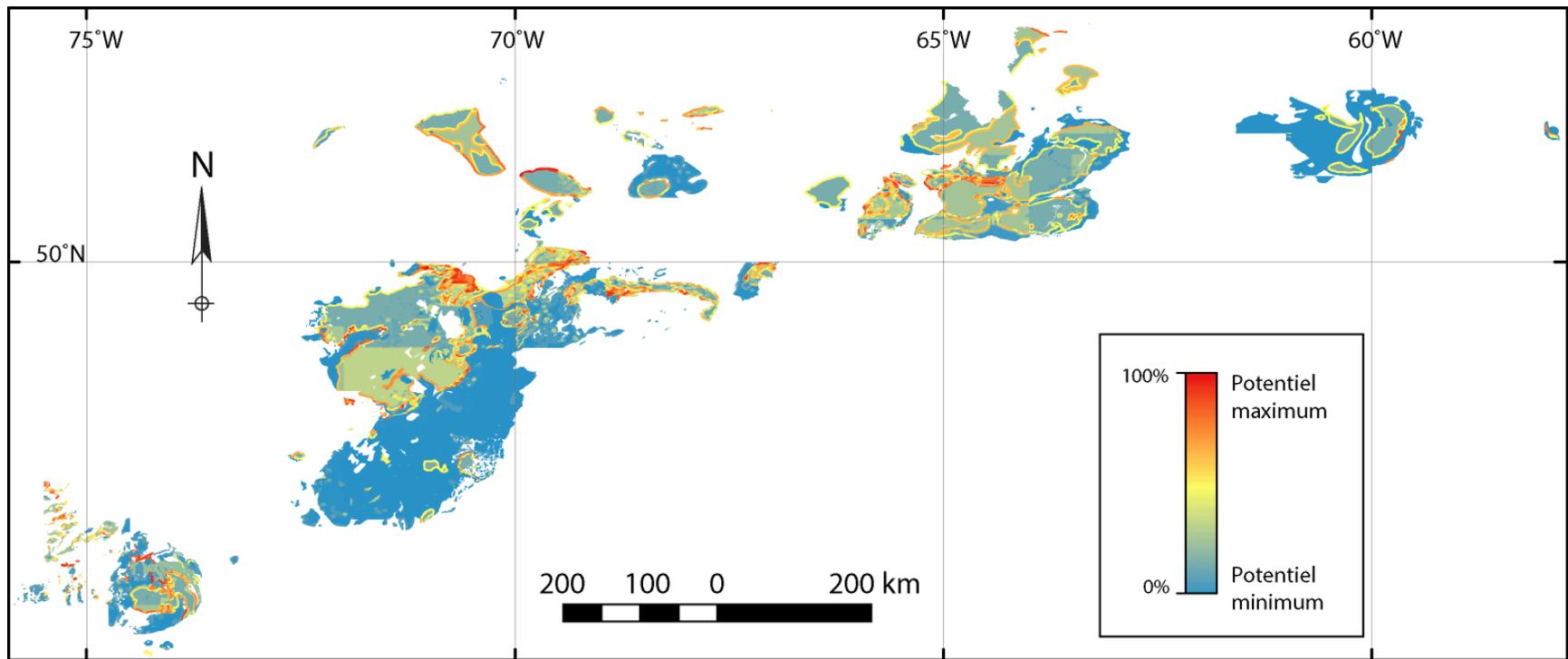


Figure 12. Carte préliminaire de « prospectivité » pour les minéralisations de type SMM dans les AMCG de Grenville.

6 PARTIE II : REHAUSSEMENT DES ANOMALIES NI-CU (MÉTHODE I)

6.1 But et théorie

L'objectif de la seconde partie de ce rapport est de proposer une méthode permettant de déterminer si un échantillon de roche magmatique donné contient des concentrations faibles, normales ou hautes en Ni-Cu. Pour atteindre cet objectif, nous ne définirons pas des valeurs seuils uniques pour le Cu et le Ni, puisque la concentration de ces éléments varie en fonction du type de roche considéré, comme nous le verrons ci-après.

L'intérêt de détecter les anomalies hautes en métaux est double et vise à : 1) détecter des systèmes magmatiques qui sont, par exemple, anormalement riches en Cu, comme l'est l'intrusion de Duluth; 2) détecter, au sein d'une intrusion contenant des concentrations normales en métaux, les unités anormales présentant un intérêt prospectif.

La détection des anomalies basses peut, en théorie, également avoir un intérêt prospectif. En effet, lorsqu'un sulfure massif se forme, il concentre les ÉGP et le Ni-Cu dont les concentrations devraient ainsi baisser dans le magma silicaté « résiduel » ou « appauvri ». Puisque les ÉGP ont le coefficient de partage le plus élevé et, qu'en conséquence, la moindre gouttelette de liquide sulfuré qui se forme capte la quasi-totalité des ÉGP du magma environnant, des anomalies basses et ponctuelles en ÉGP devraient entourer les gisements de SMM (cf. **Figure 13**). Le problème des ÉGP est que leurs concentrations dans le magma est de l'ordre du ppb et que, pour cette raison, leur analyse systématique est coûteuse et rarement effectuée, ou rarement fiable lorsqu'elle est disponible.

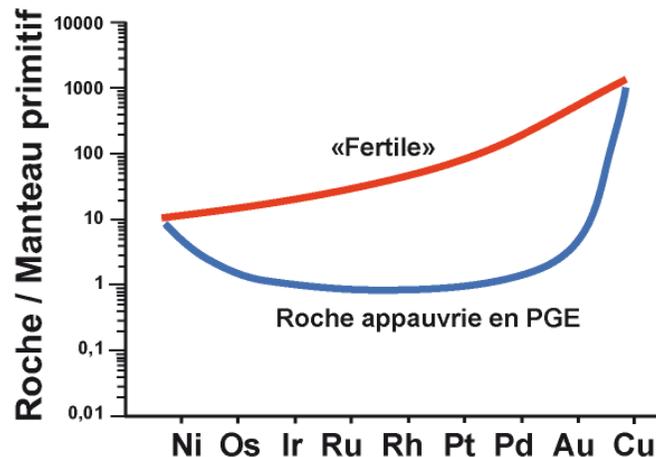


Figure 13. Diagramme de Barnes représentant deux analyses de roche théoriques, provenant de magmas appauvris et non-appauvris en ÉGP (cf. courbe « fertile »). Le fait de trouver ces deux types de roches dans, par exemple, une même unité magmatique peut indiquer qu'un liquide sulfuré a ségrégué.

Un liquide sulfuré concentre également le fer et le soufre. Le problème relié à l'utilisation du Fe est qu'il est trop abondant dans les magmas, en particulier dans les anorthosites, et qu'il sera donc impossible de détecter une perte en Fe liée à la formation d'un liquide sulfuré. Quant au soufre, il est difficilement utilisable puisque c'est un volatil qui n'est pas toujours analysé et dont la concentration pourrait varier fortement en fonction du métamorphisme et de l'altération. Ainsi, les quelques analyses de soufre disponibles dans le SIGÉOM pourraient ne pas représenter la concentration en soufre du magma au moment de son refroidissement.

Ainsi, le Cu et le Ni qui sont moins mobiles que le S et qui sont présents en plus grande quantité que les ÉGP et beaucoup moins abondants que le Fe, semblent être les seuls éléments utiles à la détection des magmas dont la composition a été modifiée par la formation d'un SMM. Le but de cette section est, ainsi, de détecter les anomalies basses et ponctuelles en Ni-Cu qui pourraient avoir été causées par la formation d'un SMM. Cette étude portera avant tout sur les roches mafiques à ultramafiques, qui sont des cibles d'exploration privilégiées.

6.2 Présentation des données

La première base de données utilisée contient 3 297 échantillons de roches totales provenant du **SIGÉOM** 2012 qui documentent les AMCG de Grenville.

Parmi ces échantillons, les gneiss, les roches métasédimentaires et les autres roches du socle, qui sont probablement des enclaves, ont été éliminés. Aussi, les roches ayant été conservées sont celles pour lesquelles SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO, Fe_2O_3 -total, MnO, CaO, Na_2O , K_2O et P_2O_5 , ainsi que Ni et/ou Cu ont été analysés. Le calcul du total des oxydes a également permis d'éliminer les analyses dont le total était inférieur à 90 % ou supérieur à 110 %. Les échantillons altérés, dont la PAF (Perte Au Feu) était supérieure à 5 %, ont également été éliminés. Au final, 1 365 échantillons ont été conservés.

Les opérations suivantes, comme les recalculs anhydres des oxydes et du Cu-Ni, ont été effectuées sous LithoModeleur (logiciel du CONSOREM développé par Sylvain Trépanier), ce qui a également permis de facilement calculer la norme CIPW de chaque analyse. Le problème avec le calcul normatif est que les roches du Grenville ont été métamorphosées, ce qui a modifié leur minéralogie et, peut-être, leur concentration en éléments volatils. Par contre, il est possible que les roches étudiées n'aient pas subi de métasomatisme, et que leur composition chimique soit encore représentative de roches magmatiques fraîches, ce qui rend pertinent le calcul de la norme CIPW.

La seconde base de données utilisée est celle du **GEOROC**, qui est un jeu de données gratuit, accessible sur internet, et qui regroupe une quantité importante de données géochimiques publiées dans la littérature scientifique. Ces données documentent avant tout la chimie de roches volcaniques et, dans une moindre mesure, de roches plutoniques (cf. site web GEOROC). Pour les besoins de cette étude, les analyses de roches totales d'échantillons de roches plutoniques ayant au moins SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO, Fe_2O_3 -total, MnO, CaO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Cu et Ni analysés, ont été téléchargées. Les opérations effectuées sur ces données sont les mêmes que celles effectuées sur les données du SIGÉOM, ce qui a permis de retenir environ 4 000 analyses pour cette étude.

6.3 Variations en Cu-Ni et cristallisation fractionnée

Mises à part la composition de la source, les conditions de la fusion partielle et, parfois, la contamination (cf. introduction), la cristallisation fractionnée du magma est le principal processus qui peut modifier la concentration en Cu et Ni d'un magma.

Afin de mettre en évidence l'effet de la cristallisation fractionnée sur les concentrations en Ni-Cu, les coefficients de corrélation entre ces métaux et les autres éléments analysés dans les bases de données du SIGÉOM et du GEOROC ont été calculés (cf. **Figure 14**). Il est à noter que des coefficients de corrélation compris entre 0,2 et -0,2 indiquent des corrélations non-significatives.

Ces calculs indiquent que, d'après les données du GEOROC, le Ni se corrèle positivement au MgO, Cr, Co, et négativement au Al_2O_3 , Na_2O , SiO_2 , K_2O ; alors que le Cu se corrèle positivement seulement au Fe_2O_3 -total, MnO, CaO, TiO_2 , P_2O_5 et V. D'après les données du SIGÉOM, le Ni et le Cu se corrèlent positivement au MgO, SO_2 , Co, Re, Cr, Fe_2O_3 -total, MnO et s'anti-corrèlent au Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 (**Figure 14**).

Les données du GEOROC montrent de fortes corrélations entre le Ni et les éléments qui se concentrent dans les roches mafiques (Cr, Co, Mg), et des anti-corrélations marquées entre le Ni et les éléments caractéristiques des roches felsiques (K, Si, Na, Al). Les plus faibles corrélations entre le Cu et ces éléments laissent à penser que la concentration de cet élément varie peu en fonction du degré de cristallisation fractionnée. Le Cu, cependant, se corrèle au Fe-Mn, V, Ti, P qui sont des éléments qui se concentrent dans les oxydes de fer, c'est-à-dire dans des roches relativement différenciées. Les données du SIGÉOM montrent de meilleures corrélations entre le Cu et les éléments qui se concentrent dans les roches mafiques (Mg, Co, (Cr)), signalant une différence marquée entre les magmas anorthositiques (SIGÉOM) et les magmas documentés par le GEOROC.

Aussi, les coefficients de corrélation confirment que le Cu et le Ni se concentrent dans les roches mafiques et que leurs concentrations, et en particulier celle du Ni, diminuent lorsque le degré de cristallisation fractionnée augmente.

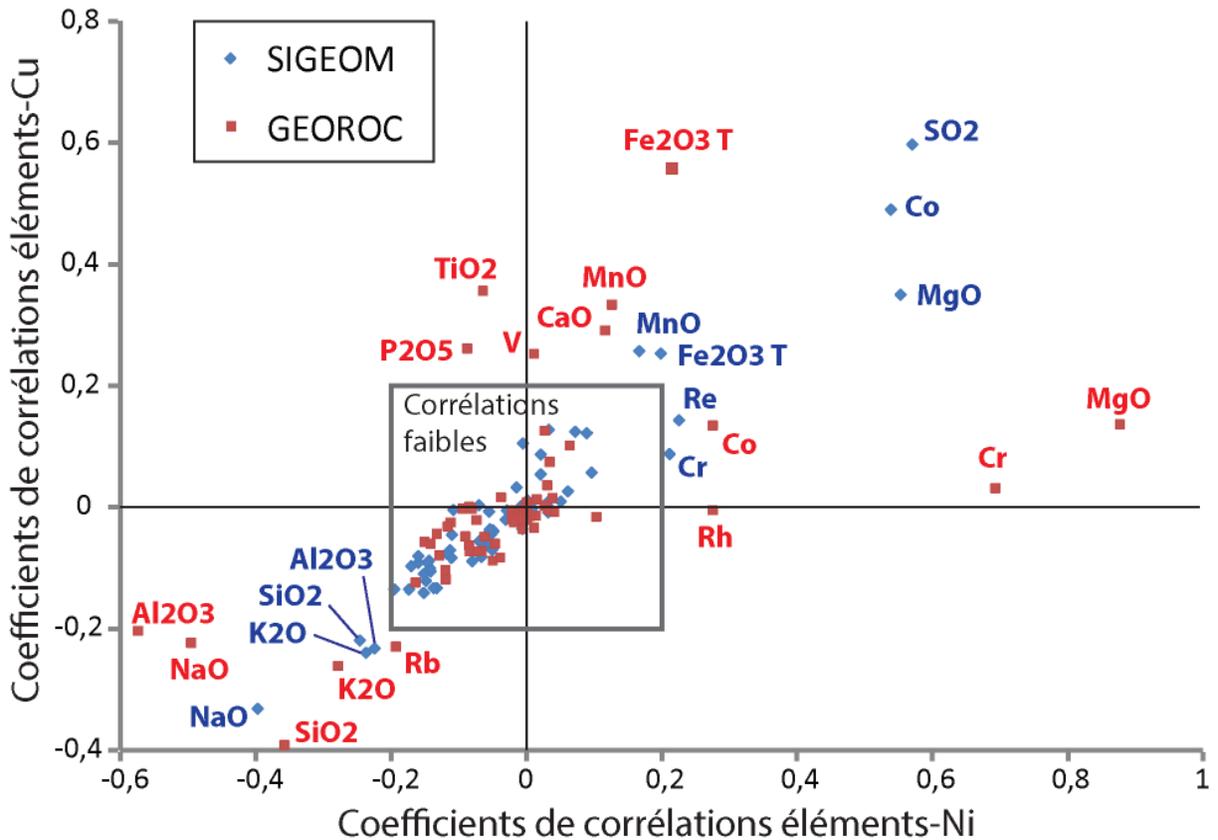


Figure 14. Graphique montrant les coefficients de corrélation entre le Ni, le Cu et les autres éléments des bases de données du GEOROC et du SIGÉOM.

6.4 Méthode de rehaussement des anomalies Ni-Cu

Pour détecter les valeurs normales et anormales des concentrations en Ni-Cu dans la base de données du SIGÉOM, les analyses ont été comparées à celles du GEOROC, qui sont considérées comme des standards ayant des concentrations non-anomales en Ni et en Cu. Les échantillons ont été comparés en fonction de leurs concentrations en oxydes (cf. *test Majeurs*) et de leurs proportions de minéraux normatifs (cf. *test CIPW*). La procédure du rehaussement est résumée ci-dessous:

a) Standard GEOROC: Pour transformer le GEOROC en une base de données standard, les données ont été lissées afin d'éliminer les échantillons anormaux. En théorie, le Cu et le Ni se corrèlent au magnésium ou à la silice, et les échantillons contenant trop ou pas assez de métaux peuvent être facilement identifiés dans de tels espaces bidimensionnels (cf. **Figure 15**). Cependant, plutôt que d'utiliser une résolution graphique, chaque échantillon du GEOROC a été comparé à la totalité des analyses de cette base de données, suivant la procédure qui est décrite ci-après. Cette procédure a permis d'éliminer les échantillons ayant des compositions anormales en métaux (cf. paramètre Comp > 95^{ième} centile ou < 5^{ième} centile), et de constituer une base de données standard de 3 972 échantillons.

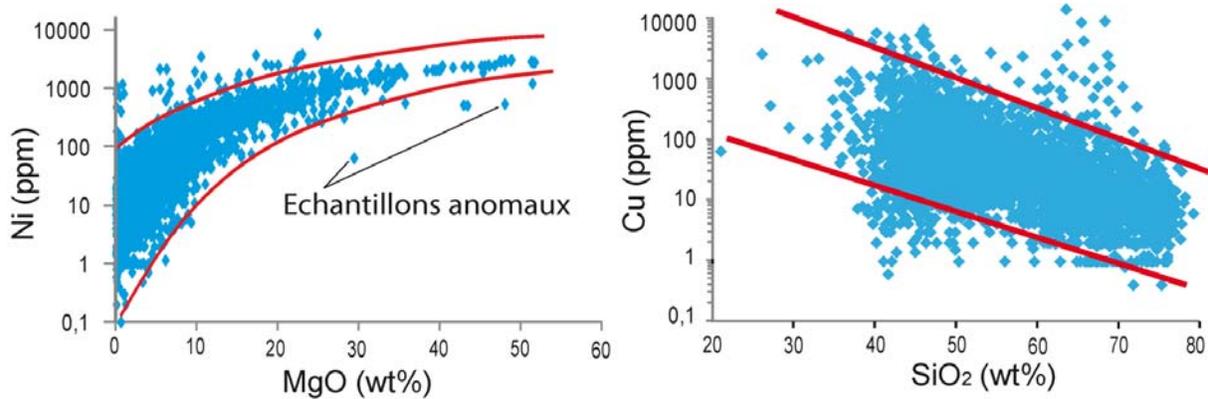


Figure 15. Graphiques montrant une corrélation entre le degré de différenciation des roches et leurs contenus en Ni-Cu. Les courbes rouges mettent en évidence les échantillons anormaux.

b) Comparer les variables: Les compositions en éléments majeurs varient selon des ordres de grandeurs différents, selon que l'on considère la silice ou le titane par exemple. Pour rendre ces valeurs comparables, la variance de chaque paramètre a été contrainte à 1, en utilisant la formule suivante pour l'exemple de la silice:

$$SiO_2(i)normalisé = \frac{SiO_2 - moyenne(SiO_2)}{écart\ type(SiO_2)};$$

avec $SiO_2(i)$ la concentration en silice d'un échantillon et
 SiO_2 , la concentration en silice de l'ensemble de la population considérée.

La même opération a été effectuée sur les proportions en minéraux normatifs de chaque analyse. Aussi, les mêmes valeurs des moyennes et des écarts types ont été utilisées pour les bases de données du GEOROC et du SIGÉOM. Ces valeurs correspondent à la médiane des moyennes et écarts types calculés de façon indépendante pour chaque base de données (**Tableau 6**).

Tableau 6. Valeurs des moyennes et des écarts types utilisées dans chaque test.

	Moyenne	Écart type		Moyenne	Écart type
SiO ₂	54,208298	10,907092	Forstérite	8,2466956	9,1119035
TiO ₂	1,5280309	2,2792685	OrthosilicateCa	3,5312006	3,0448599
Al ₂ O ₃	15,752708	5,0465173	Enstatite	7,7132559	8,091928
Fe ₂ O ₃ T	10,000404	7,7077296	Fayalite	4,7047274	5,3788831
MnO	0,1448177	0,1085296	Diopside	7,8248078	7,1794494
MgO	5,6613383	5,6760816	Ferrosilite	4,3521193	4,2107603
CaO	7,3560351	3,9036367	Hedenbergite	3,2463326	3,238119
Na ₂ O	3,0630443	1,3529323	Apatite	0,9240628	1,7556433
K ₂ O	1,8230456	1,8852836	Leucite	1,0572433	1,4526153
P ₂ O ₅	0,4138249	0,7682627	Néphéline	2,2750565	2,1069528
Calcite	0,9509446	1,2838165	Wollastonite	1,6466811	3,3063181
Corindon	1,4314389	2,2224476	Hématite	3,1776565	3,1771261
Albite	25,894102	11,258716	Magnétite	3,9789893	2,7596287
Chromite	6,77E-06	1,63E-05	Orthoclase	10,957298	11,158898
Anorthite	23,304625	14,185797	Quartz	13,224605	12,10286
Ilménite	2,9068381	4,4137507			

c) Algorithme KNN: L'algorithme KNN (K-Nearest Neighbours) a été utilisé pour calculer la distance euclidienne entre les analyses et ainsi identifier les échantillons ayant des compositions similaires en oxydes ou en minéraux normatifs (**Figure 16**). La différence entre les concentrations en oxydes d'un échantillon du SIGÉOM et d'un échantillon du GEOROC a été calculée selon la formule suivante:

$$Distance = \sqrt{\sum (X(i)_{GEOROC} - X(i)_{SIGÉOM})^2} ;$$

avec X(i) correspondant à la concentration en oxydes (*test Majeurs*) ou à la proportion de minéraux normatifs (*test CIPW*) des échantillons comparés.

En résumé, plus le paramètre "Distance" est petit, plus les analyses comparées sont similaires. Dans le cas présent, chaque échantillon du SIGÉOM a été comparé à l'ensemble des échantillons du GEOROC, et les 20 analyses du GEOROC pour lesquelles la "Distance" était la plus faible ont été isolées. Ensuite, les concentrations en Ni et en Cu de ces 20 analyses ont été pondérées, en accordant plus de poids aux valeurs associées aux "Distance" les plus faibles; selon la formule suivante pour l'exemple du Cu:

$$Moyenne\ pondérée\ (Cu) = \frac{\sum (Cu(i)_{GEOROC} / Distance(i))}{\sum (1 / Distance(i))}$$

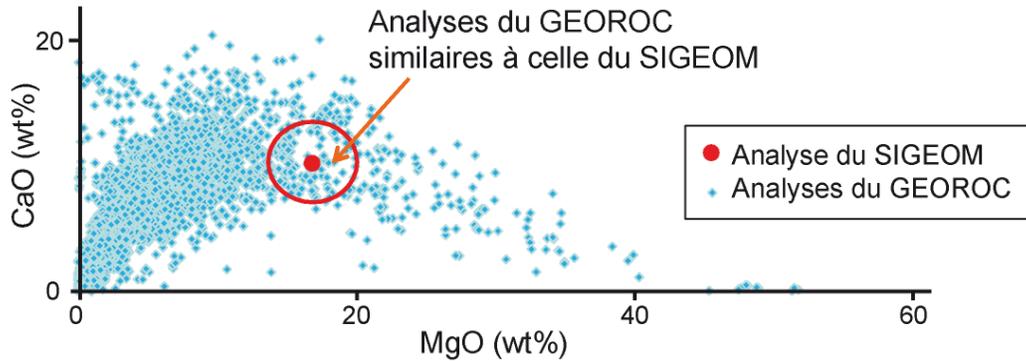


Figure 16. Graphique représentant un échantillon du SIGÉOM et l'ensemble de la base de données du GEOROC. Dans cet espace à 2 dimensions, il est aisé de repérer les échantillons du GEOROC ayant des concentrations similaires en CaO et MgO à celles de l'analyse du SIGÉOM. L'algorithme KNN permet de réaliser la même opération dans un espace à N dimensions.

d) Identifier les valeurs anormales: Les valeurs de "MoyennePondérée" obtenues à partir du GEOROC ont ensuite été soustraites aux concentrations en Cu-Ni des analyses du SIGÉOM. À cette étape, les concentrations en Cu et Ni n'ont plus été considérées de façon indépendantes, puisqu'un échantillon est considéré comme ayant une concentration anormale en métaux seulement si sa concentration en Ni et en Cu est anormale. Le paramètre "Comp", et ses valeurs centiles, a été calculé pour chaque échantillon du SIGÉOM, et les échantillons anormaux correspondent à ceux ayant des valeurs extrêmes du paramètre "Comp".

$$Comp = \frac{[(Ni_{SIGÉOM} - Ni_{GEOROC}) - moyenne(Ni)]}{écart\ type(Ni)} + \frac{[(Cu_{SIGÉOM} - Cu_{GEOROC}) - moyenne(Cu)]}{écart\ type(Cu)},$$

avec $Ni_{(GEOROC)}$ et $Cu_{(GEOROC)}$ correspondant aux valeurs de "MoyennePondérée" et $Ni_{(SIGÉOM)}$ et $Cu_{(SIGÉOM)}$ correspondant aux concentrations en Ni-Cu des analyses du SIGÉOM.

Aussi, les rapports Cu/Ni ont été comparés grâce au paramètre "Comp2". Une valeur positive de "Comp2" indique que l'analyse du SIGÉOM considérée contient un excès de Cu par rapport au standard GEOROC, et inversement pour les valeurs négatives de ce paramètre "Comp2"; qui a été calculé comme suit:

$$Cu / Ni_{(SIGÉOM)} = Cu_{(SIGÉOM)} / Ni_{(SIGÉOM)}$$

$$Cu / Ni_{(GEOROC)} = Cu_{(GEOROC)} / Ni_{(GEOROC)}$$

$$Comp2 = \frac{[Cu / Ni_{(SIGÉOM)} - Cu / Ni_{(GEOROC)}]}{Cu / Ni_{(GEOROC)}} * 100$$

e) Contrôle de qualité: Dans un premier temps, les valeurs de "Comp" du *test Majeurs* et du *test CIPW* ont été comparées. Le coefficient de corrélation pour la valeur absolue de "Comp" est de 0,957 et il est égal à 0,796 pour les valeurs centiles de "Comp", ce qui indique que les tests sont cohérents entre eux. Ainsi, les deux tests produisent des résultats très similaires d'après la valeur absolue de "Comp", mais ils ne classent pas les échantillons exactement dans le même ordre, ce qui explique la plus faible valeur de corrélation obtenue pour les centiles.

Ensuite, le rapport Cu/Ni a été utilisé pour contrôler la cohérence des résultats des tests. Les anorthosites contiennent environ autant de roches ayant un excès de Cu que de roches ayant un excès de Ni (**Tableau 7**), parce que le rapport Cu/Ni de ces roches est généralement égal à 1. Aussi, le paramètre "Comp2"

indique qu'environ 70% des roches du SIGÉOM présentent un excès de Cu par rapport aux roches du GEOROC, ce qui pourrait indiquer que les anorthosites ont des rapports Cu/Ni plus élevés que ceux des standards auxquels elles sont comparées. Ceci pourrait indiquer que le GEOROC n'est peut-être pas la meilleure référence pour comparer la composition des roches anorthositiques. Par contre, les résultats sont très similaires pour le *test Majeurs* et le *test CIPW*, ce qui indique que la méthode de rehaussement produit des résultats cohérents entre eux.

Tableau 7. Excès de Cu par rapport au Ni d'après les valeurs absolues de Ni-Cu et d'après les valeurs de "Comp2"

	SIGÉOM		Test Majeurs (Comp2)	Test CIPW (Comp2)
Cu > Ni	59,85 %	Excès de Cu	67,74 %	62,46 %
Cu < Ni	40,14 %	Excès de Ni	32,25 %	37,54 %

Enfin, la valeur du paramètre "Comp" des lithologies principales a été étudiée (**Figure 17**). Les lithologies utilisées sont celles qui ont été reportées dans le SIGÉOM lors de l'échantillonnage. Cette étude montre que les roches I1-I2 sont associées à des valeurs intermédiaires de "Comp", que les roches I3 peuvent avoir toutes sortes de valeurs de "Comp" et que les roches I4-UM sont plutôt associées à des valeurs extrêmes de "Comp". Les roches à oxydes de fer (I4Z) en revanche, présentent plutôt des anomalies basses en Ni-Cu.

Ces résultats indiquent que les tests sont cohérents avec ce qui a été indiqué dans la première partie de ce rapport. En effet, les roches I3 et I4-UM sont les plus favorables aux minéralisations de type SMM, et ces roches devraient donc présenter des anomalies hautes et basses en Ni-Cu (cf. valeurs extrêmes de "Comp"), alors que les roches I2-I1 ne devraient pas présenter d'anomalies, ce qui coïncide avec le résultat des tests (**Figure 17**).

En ce qui concerne les roches à oxydes, des données géochimiques sur des jotunites montrent que ces roches sont très pauvres en Ni-Cu (cf. Owens et al., 1993). Ainsi, les anomalies basses en métaux calculées pour ces roches sont peut-être de fausses anomalies, ce qui indique que le GEOROC n'est pas un bon standard pour les roches riches en oxydes de fer.

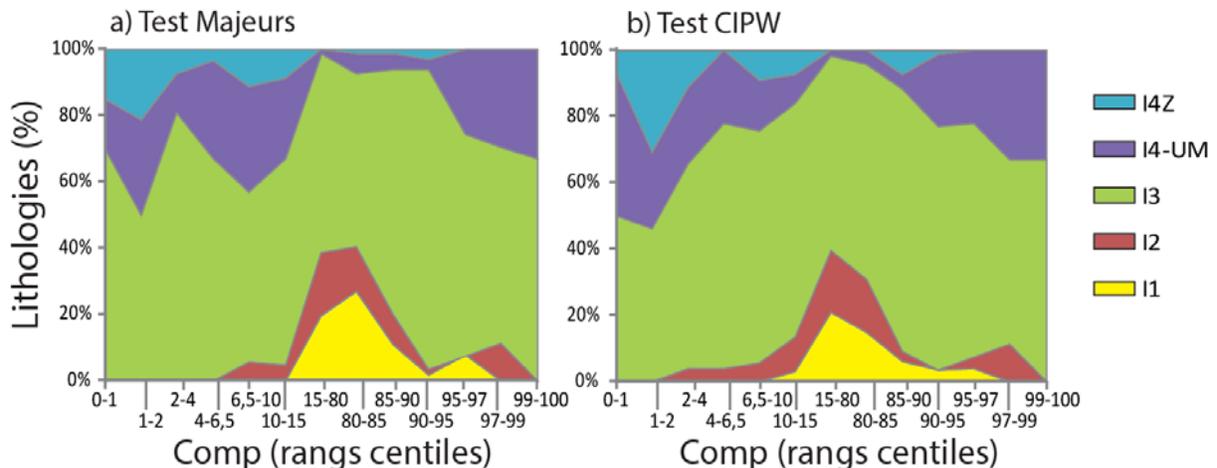


Figure 17. Histogrammes présentant les valeurs centiles de "Comp" des lithologies principales, pour le *test Majeurs* et le *test CIPW*. Les valeurs extrêmes de "Comp" ont été mises en valeur. L'axe horizontal représente plusieurs intervalles de rang centiles du paramètre "Comp", et les proportions relatives des unités lithologiques décrites par le paramètre "Comp" pour chacun de ces intervalles sont représentées sur l'axe vertical.

f) Valeurs anormales: Les valeurs résiduelles de Ni et Cu ont été comparées au rang centile de "Comp" (cf. **Figure 18**). Ceci indique que, en ce qui concerne la base de données étudiée, les anomalies basses et hautes en Ni-Cu correspondent, respectivement, à des valeurs de "Comp" inférieures au 15^{ième} et supérieures au 85^{ième} centiles.

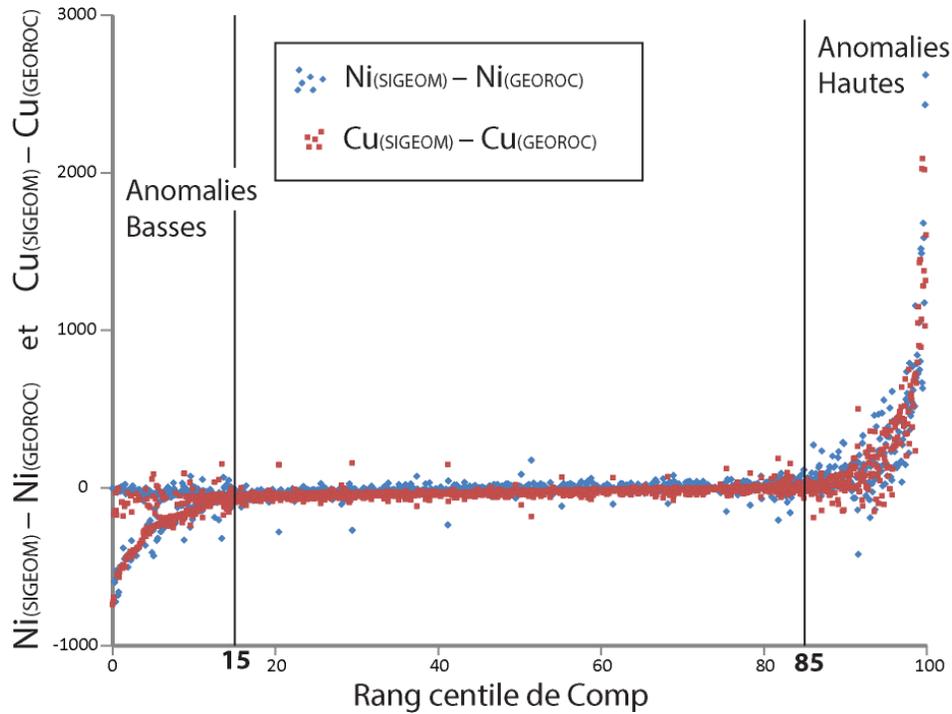


Figure 18. Graphique présentant les valeurs de $(Ni_{(SIGEOM)} - Ni_{(GEOROC)})$ et de $(Cu_{(SIGEOM)} - Cu_{(GEOROC)})$ en fonction du rang centile de "Comp", pour le *test CIPW*. Le même graphique, fait avec les données du *test Majeurs*, donne des résultats similaires.

6.5 Exploitation des résultats

Afin de tester la relation spatiale entre les indices Ni-Cu et les échantillons présentant des concentrations anormales en Ni-Cu, plusieurs calculs de contraste ont été effectués dans le Grenville. Bien sûr ce calcul de contraste se fait en fonction d'un état de connaissances sur les gîtes connus et aussi d'une quantité limitée d'échantillons. Mais cela permet de porter un certain jugement sur l'utilisation de la méthode.

Dans un premier temps, le contraste a été calculé suivant la méthode décrite dans l'annexe B (cf. test 1) et trois variantes de ce calcul sont proposées (cf. test 1-a, 1-b, 1-c). Dans le test 1-a, le nombre d'échantillons anormaux situés près et loin des indices Ni-Cu ont été comptés pour permettre le calcul du contraste (cf. **Figure 19-a**; et annexe B). Cette méthode est adaptée à des échantillons régulièrement répartis dans l'espace, mais peut produire de mauvais résultats dans le cas contraire. Comme les échantillons de roches disponibles sont souvent distribués en grappes, deux alternatives au test 1-a sont proposées.

Pour les tests 1-b et 1-c, les échantillons anormaux ont été représentés par une surface, et les calculs ont été effectués en utilisant les surfaces anomaliées situées près et loin des indices Ni-Cu. Dans le test 1-b, cette surface correspond aux polygones Thiessen-Voronoi (voisins naturels) tracés jusqu'à un maximum de 5 km autour de chaque échantillon (**Figure 19-b**). Dans le test 1-c, cette surface est une zone située de 0 à 2 km autour de tous les échantillons anormaux (cf. buffer de 2 km) (**Figure 19-c**). Le détail du calcul du contraste est disponible à l'annexe B.

Notons que pour le test 1, comme pour le test 2 décrit ci-après, les calculs utilisent uniquement les indices Ni-Cu situés à moins de 2 km ou 5 km d'un échantillon de roche du SIGÉOM. Ainsi, selon les tests, entre 84 et 111 indices Ni-Cu sont concernés par les calculs.

Tout d'abord, on peut constater que les calculs produisent des résultats similaires, qu'ils soient effectués avec les résultats du *test Majeurs* ou avec ceux du *test CIPW*. Aussi et d'après le test 1-a, les anomalies hautes (> 85^{ième} centile) sont plus nombreuses de 0 à 500 m autour des indices Ni-Cu que dans le reste de la zone étudiée et une faible relation spatiale entre les anomalies basses et les indices Ni-Cu est dénotée (**Figure 20**). D'après les tests 1-b et 1-c, une plus grande quantité d'anomalies basses sont situées à proximité, plutôt qu'à distance, des indices Ni-Cu; bien que les valeurs du contraste soient généralement faibles. Ces deux tests montrent également une forte dépendance spatiale entre les anomalies hautes et les indices Ni-Cu (**Figure 20**).

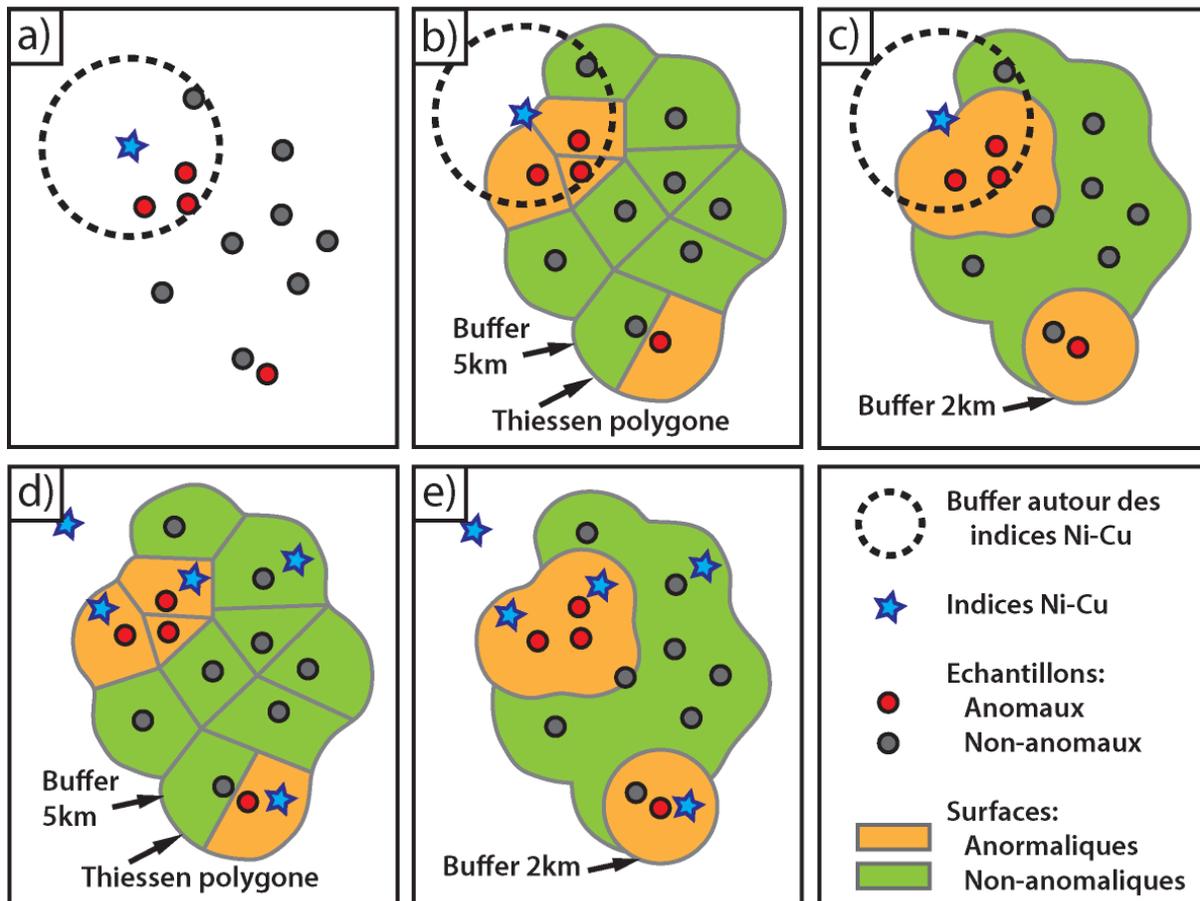


Figure 19. Schémas résumant les différentes méthodes utilisées lors des tests 1 et 2; a) Test 1-a, méthode basée sur le nombre d'échantillons et leur position par rapport aux indices Ni-Cu; b) Test 1-b, méthode utilisant les polygones Thiessen (voisins naturels); c) Test 1-c, méthode utilisant un buffer de 2 km autour des anomalies. Le cercle en pointillé délimite la surface pour laquelle la quantité d'échantillons anomaux est évaluée pour le calcul du contraste. Le test 2 compare la quantité d'indices Ni-Cu situés dans et en dehors des surfaces anormales, qui sont délimitées par les polygones Thiessen pour le test 2-a (d) et par des buffers pour le test 2-b (e).

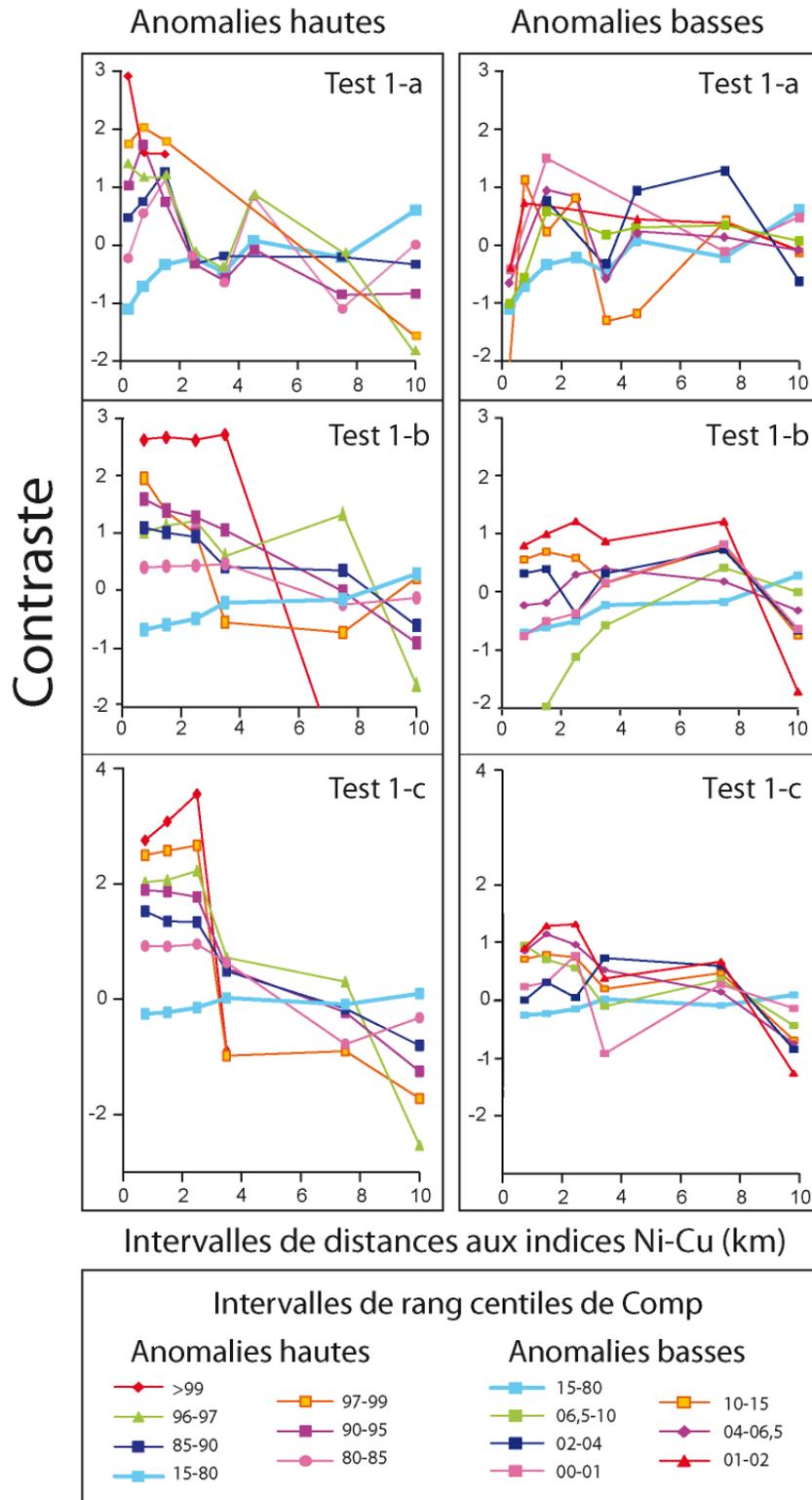


Figure 20. Graphiques établis à partir du *test CIPW*, et représentant les valeurs de contrastes calculées par intervalles de distances aux indices Ni-Cu, pour les tests 1-a, 1-b et 1-c. Les intervalles de distances pour lesquels ces calculs ont été effectués sont: 0-0,5 km, 0,5-1 km, 1-2 km, 2-5 km, 5-10 km et > 10 km. Les mêmes graphiques, faits avec les données du *test Majeurs*, donnent des résultats très similaires.

Dans un second temps, le contraste a été calculé selon la technique décrite à l'annexe A (test 2), et qui est basée sur le nombre d'indices Ni-Cu observés dans et en-dehors des surfaces anomales. Deux variantes du test 2 sont proposées, pour lesquelles les surfaces anomales sont représentées par des polygones Thiessen qui s'étendent jusqu'à un maximum de 5 km autour des échantillons de roches (test 2-a) et par des polygones correspondant à des buffers de 2 km et de 5 km entourant les échantillons utilisés (test 2-b) (**Figure 20-d, 20-e**).

Là encore, les données du *test Majeurs* et du *test CIPW* produisent des résultats très similaires. Les résultats des tests 2 sont présentés par la **Figure 21**. Les contrastes sont les plus élevés pour les anomalies les plus hautes ce qui indique, comme pour le test 1, que les anomalies hautes en Ni-Cu se situent à proximité des indices Ni-Cu. Aussi, bien que les valeurs du contraste soient faibles, les tests 2-a et 2-b pointent une relation spatiale entre les indices Ni-Cu et les anomalies basses.

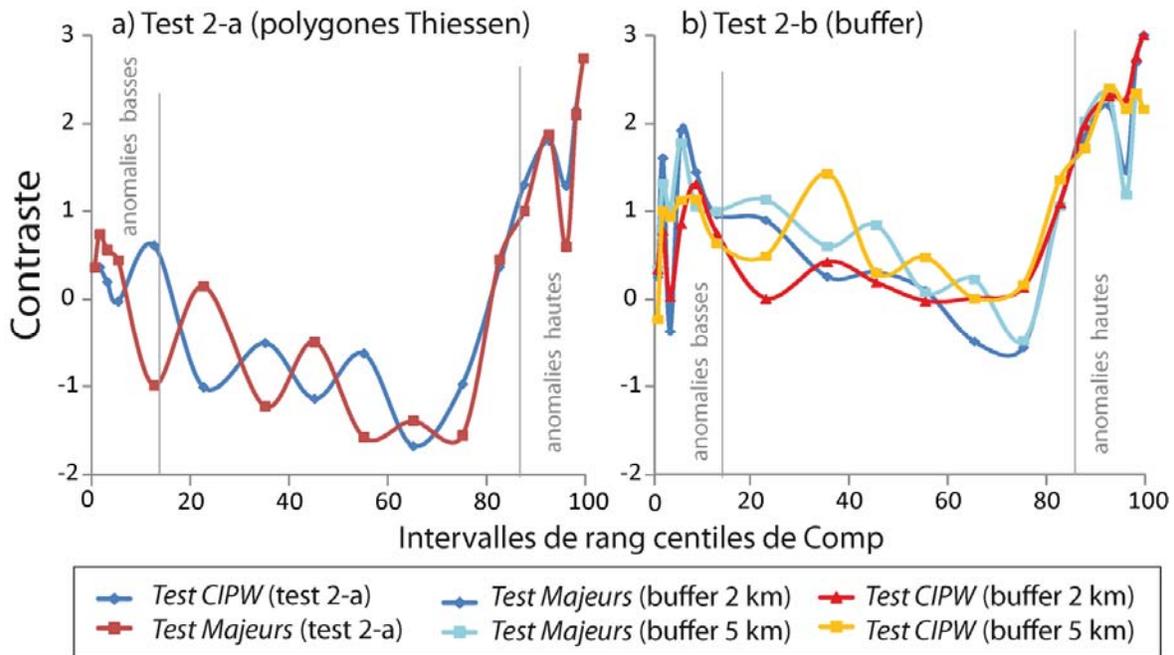


Figure 21. Résultats des tests 2-a (a) et 2-b (b). Notez que les valeurs de contrastes les plus hautes sont associées aux valeurs de centiles de "Comp" les plus élevées (cf. anomalies hautes) et, dans une moindre mesure, aux centiles les plus bas (cf. anomalies basses).

6.6 Conclusion de la partie II

Les tests 1 et 2 mettent en évidence une forte dépendance spatiale entre les indices Ni-Cu et les échantillons de roche anormalement riches en Ni-Cu. Parfois, l'échantillon du SIGÉOM correspond à celui qui a permis de définir un indice, et il est donc naturellement anomal. Dans d'autres cas, l'échantillon a été prélevé à proximité d'une occurrence de minéraux sulfurés, et est donc toujours anomal, même si il contient des concentrations en Ni-Cu trop faibles pour correspondre à un indice (cf. ministère des Ressources naturelles du Québec pour le SIGÉOM). La proximité entre ces roches riches en métaux et les indices Ni-Cu permet également de valider la qualité et l'intérêt de la méthode de rehaussement utilisée.

Ensuite, on pourrait s'attendre à ce que les concentrations en Ni-Cu diminuent progressivement lorsque l'on s'éloigne des indices Ni-Cu. En d'autres termes, on pourrait s'attendre à ce que les anomalies hautes soient entourées d'échantillons non anomaux et que les anomalies basses soient observées à distance des indices Ni-Cu. Les anomalies basses pourraient, par exemple, être de fausses anomalies et se

concentrer dans les roches riches en oxydes de fer ou en plagioclases, qui ne concentrent pas le Cu-Ni et pour lesquelles le standard GEOROC pourrait ne pas être adapté. Cependant, les observations sont en désaccord avec ce à quoi on devrait, intuitivement, s'attendre.

En effet, une partie importante des anomalies basses se situe à proximité des indices Ni-Cu et des anomalies hautes (**Figure 22**). Ceci indique que la présence d'une anomalie basse à proximité d'une anomalie haute pourrait permettre de trouver de nombreux indices Ni-Cu. Pour tester cette hypothèse, un buffer de deux kilomètres a été réalisé autour des échantillons anomaux permettant d'obtenir des surfaces qui représentent les anomalies hautes et basses. Ces surfaces ont été intersectées pour garder uniquement les zones de la carte dans lesquelles une anomalie haute **et** une anomalie basse sont présentes dans un rayon de 2 km. Les contrastes ont ensuite été calculés pour l'ensemble des anomalies hautes, basses et pour leurs intersections (**Tableau 8**). Ces calculs indiquent que les valeurs de contraste sont similaires et maximales pour les anomalies hautes et pour les intersections, et que la surface occupée par les intersections est environ 4 fois plus petite que celle occupée par les anomalies hautes. Les endroits où à la fois des anomalies hautes et basses sont observées semblent donc être de meilleurs indicateurs de la présence d'indices.

Tableau 8. Résultats des calculs de contraste.

		Contraste	Surface (%)*
Test Majeurs	Anomalies hautes	2,58	15,74
	Anomalies basses	1,30	22,61
	Intersection	2,62	4,65
Test CIPW	Anomalies hautes	2,86	14,60
	Anomalies basses	0,56	16,91
	Intersection	2,21	3,11

*Les chiffres correspondent aux pourcentages des surfaces représentées par les anomalies (surface de 2 km autour des échantillons), par rapport au total de la surface des AMCG située à plus de 2 km des échantillons.

Du point de vue théorique, les anomalies hautes sont des concentrations de sulfures et les anomalies basses situées à proximité des indices Ni-Cu correspondent aux magmas silicatés qui ont perdu leurs métaux de base au profit du liquide sulfuré. Ainsi, une perte de métaux probablement causée par l'exsolution de liquide sulfuré a pu être mise en évidence avec la méthode de rehaussement décrite ci-dessus. La proximité entre anomalies hautes et basses pourrait pointer vers de nouveaux indices Ni-Cu dans le Grenville (**Figure 23**).

La présence de plusieurs anomalies basses, proches les unes des autres, et observées de façon locale dans une intrusion donnée lors d'une campagne d'exploration, pourrait servir de guide pour la recherche d'une accumulation de sulfures massifs. Un appauvrissement local de métaux de base pourrait également, si le volume de cet appauvrissement est bien contraint, permettre d'estimer la teneur en métaux d'un SMM qui serait, par exemple, moins proche de la surface que les roches silicatées échantillonnées. Ces dernières considérations restent toutefois théoriques, puisque l'auteure n'est pas en mesure de présenter d'exemples de SMM pour lesquels une telle approche ait été utilisée.

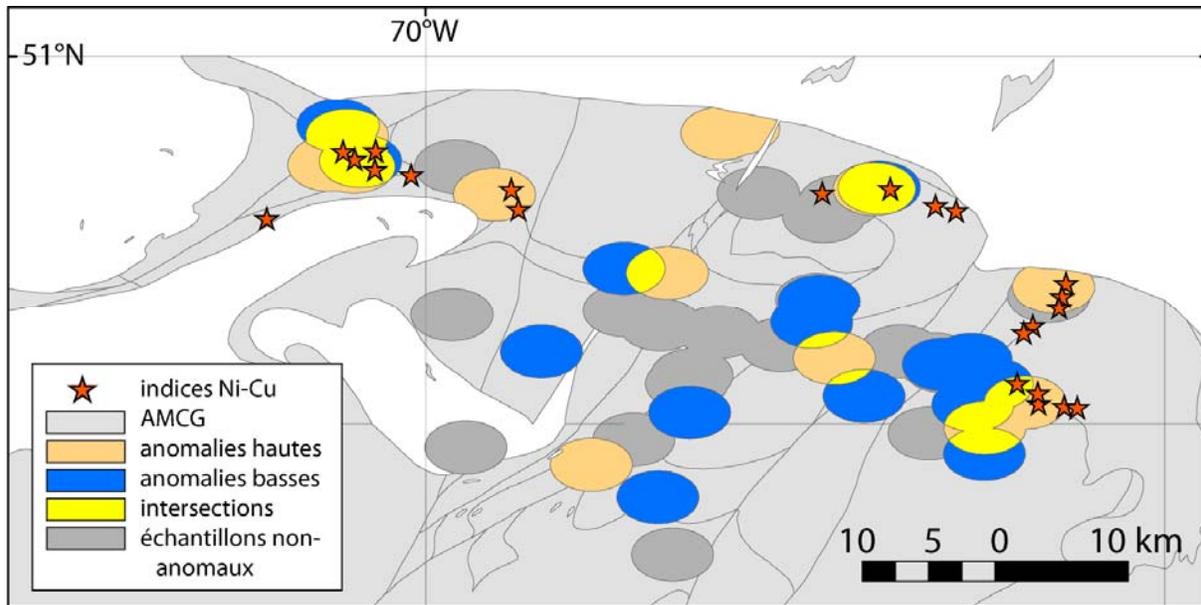


Figure 22. Exemple pris au NE de l'ALSJ, et qui représente chaque échantillon par une surface correspondant à un buffer de 2 km. Cette carte montre que les indices Ni-Cu sont, pour la plupart, situés à proximité d'une anomalie haute, ou à l'intersection entre des anomalies basses et hautes. Les anomalies utilisées dans cet exemple sont celles du *test CIPW*.

Enfin, les calculs de contraste effectués sur les résultats des *tests CIPW* et *Majeurs* ont permis de produire une carte avec les critères répertoriés par le **Tableau 9** (ajout au **Tableau 5**). Cette carte a ensuite été ajoutée aux 5 cartes qui ont permis d'établir la carte préliminaire du potentiel minéral présentée à la **Figure 12**, afin de produire la carte de la **Figure 23**. Les cartes des **Figures 12 et 23** mettent en valeurs les mêmes zones potentiellement fertiles. En plus de ces zones intéressantes, les endroits où des anomalies hautes **et** basses sont présentes dans un rayon de 2 km ont été mis en valeurs (cf. cercles noirs de la **Figure 23**). On peut ainsi observer que les intersections entre ces deux types d'anomalies se concentrent en bordure des anorthosites de Lac-Saint-Jean, La Blache et Rivière-Pentecôte entre autres, qui sont toutes des zones pour lesquelles des indices Ni-Cu ont été abondamment documentés.

Tableau 9. Résumé des paramètres et d'une partie des facteurs utilisés pour établir la carte de « prospectivité » de la **Figure 23**. Les autres facteurs utilisés pour créer la **Figure 23** sont disponibles au **tableau 5**.

Nom	Surfaces concernées	Facteur	Description
Anomalie Cu-Ni (<i>tests Majeurs et CIPW</i>)	Tampon de 2 km autour des échantillons pour lesquels Ni et Cu ont été analysés.	3*	intersection anomalies hautes et basses
		2,5	anomalies hautes
		1	anomalies basses
		-1	autres

*Les résultats des *tests CIPW* et *Majeurs* ont été combinés pour établir ces facteurs.

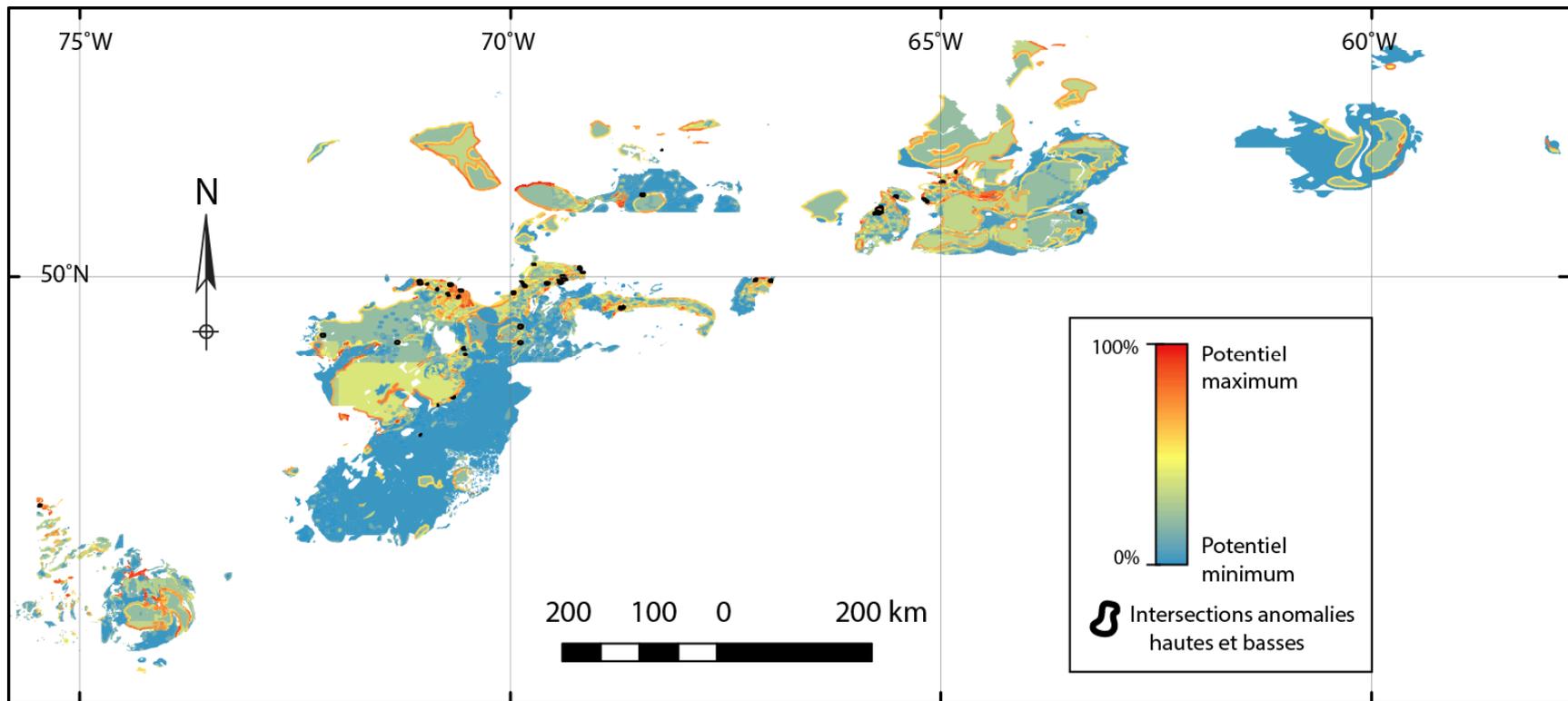


Figure 23. Carte de potentiel minéral pour les minéralisations de type SMM dans les AMCG de Grenville. Les endroits où des anomalies hautes et basses montrent une intersection (utilisation de buffers de 2 km), dans les *tests CIPW* et *Majeurs*, ont été encerclés en noir.

7 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce projet a permis de faire l'état des connaissances sur les AMCG de la Province de Grenville au Québec, ce qui est une étape préliminaire essentielle à tous projets d'exploration. Les informations suivantes ont ainsi pu être mises en valeur:

- Les AMCG sont des suites magmatiques de gros volume, dont seul le cœur mafique, c'est-à-dire l'anorthosite, a un intérêt pour l'exploration pour le Ni-Cu.
- Le long de la bordure des anorthosites, un faciès mafique est communément observé. Pour certains auteurs, ce faciès est recoupé ou constitué de filons-couches mafiques tardifs injectés en bordure de l'anorthosite (Chevé et al., 1999), ou encore il correspond au cumulat mafique de l'intrusion. Cependant, ce faciès de bordure semble plutôt correspondre à un magma très évolué (Huss, 2002; Fredette, 2006), formé par la cristallisation de la majeure partie de l'anorthosite. Ce faciès de bordure s'est potentiellement enrichi en métaux de base, et en particulier en Cu. Le Ni, quant à lui, pourrait avoir été emprisonné dans des olivines qui se seraient formées en profondeur, avant la migration du magma anorthositique, ce qui expliquerait que les magmas mafiques étudiés pendant ce projet soient appauvris en Ni.
- La cristallisation fractionnée a donc pu concentrer le Cu en bordure des massifs anorthositiques. Le second avantage des faciès de bordure est qu'ils sont en contact avec leur encaissant, et présentent donc la probabilité maximale d'avoir été contaminés par des roches métasédimentaires et/ou des roches magmatiques felsiques. De telles contaminations semblent, dans certains cas, avoir permis la ségrégation des sulfures et la formation de sulfures disséminés.
- Il apparaît ainsi que les anorthosites sont capables de concentrer les métaux de base et de ségréger des liquides sulfurés. Cependant, il n'a pas été possible de déterminer si ces intrusions sont capables de ségréger un volume important de liquide sulfuré. De plus, aucun mécanisme ne semble permettre d'enrichir puis de rassembler les gouttelettes de liquide sulfuré au sein d'une anorthosite. Si de tels mécanismes étaient véritablement absents lors de la solidification des anorthosites, alors les chances qu'elles contiennent des gisements de type SMM sont minces.

Ce projet a également permis de développer une méthode permettant de rehausser les anomalies Ni-Cu de roches plutoniques. Cette méthode est décrite dans la partie II de ce rapport. Une seconde méthode de rehaussement, plus théorique, est décrite dans l'annexe C de ce rapport. Cette seconde méthode est prometteuse mais demande d'être testée plus avant. L'annexe C, ainsi que l'annexe D, décrivent des outils et des problèmes qui constituent des perspectives de recherche pour le futur.

La technique décrite dans la partie II de ce rapport permet d'identifier les échantillons qui sont anormalement riches ou pauvres en Ni-Cu d'après leurs concentrations en éléments majeurs. L'application de cette méthode en contexte d'exploration suppose qu'un sulfure massif, en se formant, ait appauvri le magma environnant en métaux de base, ce qui semble être le cas à Voisey's Bay (cf. Li et Naldrett, 1999). Cependant, les théories exposées dans ce rapport ont besoin d'être testées sur un plus grand nombre de sites minéralisés.

RÉFÉRENCES

- Arndt, N., Leshner, C.M., Czamanske, G.K., 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary volume, 5-24.
- Balk, R., 1931. Structural geology of the Adirondack anorthosite. *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 41: 308-434.
- Barnes, S.-J., Lightfoot, P.C., 2005. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (eds.) *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 179-213.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic information systems for geoscientists, modelling with GIS; Ed. Pergamon, Serie editors: DF Merriam (Computer methods in the Geosciences), Vol 13, 397 p.
- Brügmann, G.E., Reischmann, T., Naldrett, A.J., Sutcliffe, R.H., 1997. Roots of an Archean volcanic arc complex: the Lac des Iles area in Ontario, Canada. *Precambrian Research*, 81(3-4): 223-239.
- Chevé, S., Gobeil, A., Clark, T., Corriveau, L., Perreault, S., Dion, D.J., Daigneault, R., 1999. Géologie de la région du lac Manitou (22I/14). MNRQ Québec, **RG-99-02**, 71 p.
- Clark, T., 1998. Un aperçu du potentiel du Grenville québécois pour des gîtes de Ni-Cu±Co±ÉGP. MNRQ Québec, **PRO-98-01**, 10 p.
- Clark, T., Gobeil, A., 1997. Ni-Cu-Co-PGE-Au, Petit Lac Manicouagan et rivière Sainte-Marguerite. MNRQ Québec, rapport MB-96-41, 63 p.
- Clifford, T.N., Barton, E.S., Stern, R.A., Duchesne, J.-C., 2004. U–Pb Zircon Calendar for Namaquan (Grenville) Crustal Events in the Granulite-facies Terrane of the O'Okiep Copper District of South Africa. *Journal of Petrology*, 45(4): 669-691.
- Corrigan, D., Hanmer, S., 1997. Anorthosites and related granitoids in the Grenville orogen: A product of convective thinning of the lithosphere? *Geology* 25: 61-64.
- Corrigan, D., Galley, A.G., Pehrsson, S., 2007. Tectonic evolution and metallogeny of the southwestern Trans-Hudson Orogen. In: Goodfellow WD (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 5, 881-902.
- DeMaiffe, D., Hertogen, J., 1981. Rare earth element geochemistry and strontium isotopic composition of a massif-type anorthositic-charnockitic body: the Hydra Massif (Rogaland, SW Norway). *Geochimica Cosmochimica Acta* 45: 1545-1561.
- Duchesne, J.-C., 1985. The Rogaland anorthosites: facts and speculations. In: Tobi AC, Touret JLR (eds.), *The Deep Proterozoic Crust in the North Atlantic Provinces*. Reidel, Boston, 449-476.
- Duchesne, J.-C., Roelandts, I., Demaiffe, D., Hertogen, J., Gijbels, R., DeWinter, J., 1974. Rare-earth data on monzonitic rocks related to anorthosites and their bearing on the nature of the parental magma of the anorthosite series. *Earth and Planetary Science Letter* 24: 325-335.
- Eckstrand, O.R., et Hulbert, L.J., 2007. Magmatic nickel-copper-platinum group element deposits. 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 5, 205-222.
- Francis, D., Scowen, P., Panneton, G., Doig, R., 2000. Contrasting Si-saturation in troctolite-anorthosite intrusions along the Manicouagan corridor of the Abitibi-Grenville transect. *Revue canadienne des sciences de la Terre* 37(2-3): 271-289.

- Fredette, J., 2006. Pétrographie, géochimie et potentiel économique en Fe-Ti-P du secteur du Lac à Paul, partie nord de la suite anorthositique de lac-Saint-Jean, province de Grenville, Québec. MSc, UQAC, 326 p.
- GEM (site internet): <http://earthref.org/>
- GEOROC (site internet): <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>
- Giroux, F., 2001. Étude pétrographique des unités mafiques à ultramafiques associées à l'anorthosite de De La Blache, Province géologique de Grenville. Rapport de projet de fin d'études (GLG-13202). Université Laval, Québec. 38 p. plus annexes.
- Green, T.H., 1969. Experimental fractional crystallization of quartz diorite and its application to the problem of anorthosite origin. In: Isachsen YW (ed.), Origin of Anorthosite and Related Rocks. New York State Museum Science Service Mere., 18: 23-29.
- Hébert, C., Cadieux, A.-M., van Breemen, O., 2005. Temporal evolution and nature of Ti-Fe-P mineralization in the anorthosite – mangerite – charnockite – granite (AMCG) suites of the south-central Grenville Province, Saguenay – Lac St. Jean area, Quebec, Canada. Canadian Journal of Earth Science 42: 1865-1885.
- Huss, L., 2002. Caractérisation de la minéralisation en Ni-CUEGP des indices de la région du lac à Paul, Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. M.Sc., UQAC, 220 p.
- Le Maître, R.W., 1976. The Chemical Variability of some Common Igneous Rocks. Journal of petrology 17(4) : 589-598.
- Li, C., Naldrett, A.J., 1999. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids. Lithosphere, 47(1-2): 1-31.
- Madore, L., Verpaest, P., Brisebois, D., Hocq, M., Dion, D.-J., 1998. Géologie de la région du Lac Allard (SNRC 12L/11). MNRQ Québec, RG-98-01, 39 p.
- Middelmost, E.A.K., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. Chemical Geology 77(1): 19-26.
- Nabil, H., 2003. Genèse des dépôts de Fe-Ti-P associés aux intrusions litées (exemples : l'intrusion mafique de Sept-îles, au Québec; complexe de Duluth aux États-Unis). Thèse de Maîtrise, UQAC, 537 p.
- Owens, B.E., Rockow, M.W., Dymek, R.F., 1993. Jotunites from the Grenville Province, Quebec: petrological characteristics and implications for massif anorthosite petrogenesis. Lithosphere 30: 57-80.
- Philpotts, A.R., 1966. Origin of anorthosite-mangerite rocks of southern Quebec. Journal of Petrology 7: 1-64.
- Rivers, T., 1997. Lithotectonic elements of the Grenville Province: review and tectonic implications. Precambrian Research, 86(3-4): 117-154.
- Sutcliffe, R.H., Sweeny, J.M., Edgar, A.D., 1989. The Lac des Iles Complex, Ontario: petrology and platinum-group-elements mineralization in an Archean mafic intrusion. Canadian Journal of Earth Science, 26: 1408-1427.
- Sappin, A.-A., Constantin, M., Clark, T., van Breemen, O., 2009. Geochemistry, geochronology, and geodynamic setting of Ni-Cu ± PGE mineral prospects hosted by mafic and ultramafic intrusions in the Portneuf-Mauricie Domain, Grenville Province, Quebec. Canadian Journal of Earth Sciences 46(5): 331-353.
- Trépanier, S., 2011. Optimisation des données de till pour l'exploration. Projet CONSOREM 2011-05.
- Wohlgemuth-Ueberwasser, C.C., Fonseca, R.O.C., Ballhaus, C., Berndt, J. 2012. Sulfide oxidation as a process for the formation of copper-rich magmatic sulfides. Mineralium Deposita, 48(1): 115-127.

ANNEXE A – CALCUL DU CONTRASTE D'APRÈS BONHAM-CARTER (1994)

Les calculs du contraste ont été effectués à de nombreuses reprises pendant différents projets CONSOREM, et les méthodes utilisées lors de la présente étude sont succinctement décrites dans cette annexe ainsi que dans l'annexe B.

Le contraste est une mesure de l'association entre deux cartes binaires qui représentent, par exemple, des unités ultramafiques (carte A) et des indices minéralisés, représentés par des pixels ou des polygones, et non des points (carte B).

Les valeurs du contraste s'interprètent de la façon suivante:

- Un contraste positif indique une corrélation entre A et B, c'est-à-dire que l'on a plus de chance de trouver un indice (B) si le paramètre A est présent.
- Un contraste négatif indique une absence de corrélation entre A et B, c'est-à-dire que l'on a plus de chance de trouver un indice (B) si le paramètre A est absent.
- Un contraste proche de 0 signifie que l'on a autant de chance de trouver un indice (B) en utilisant le critère A que d'en trouver un en choisissant un endroit au hasard.

Le calcul du contraste utilise les paramètres suivants:

- B: critère B lorsque A est présent. Par exemple, B peut correspondre à la surface occupée par les indices Ni-Cu situés dans des roches ultramafiques (critère A).
- B_total: Par exemple, surface totale occupée par les indices Ni-Cu.
- A: Par exemple, surface totale des roches ultramafiques.
- T: Surface totale de la zone d'étude. Dans ce rapport, T correspond parfois à la surface totale des AMCG de Grenville.

Le contraste est calculé de la façon suivante:

a) Probabilité conditionnelle de B étant donné A ("Sufficiency ratio")

$$LS = (B / B_total) * [(T - B_total) / (A - B)]$$

b) Probabilité conditionnelle de B étant donné non-A ("Necessity ratio")

$$LN = ((B_total - B) / B_total) * ((T - A - B_total + B) / (T - B_total))$$

c) Contraste:

$$\text{Contraste} = \ln(LS) - \ln(LN)$$

ANNEXE B – CALCUL DU CONTRASTE, DEUXIÈME MÉTHODE

Le contraste peut également être calculé à partir du logarithme népérien de la côte. Cette méthode est inspirée du rapport CONSOREM 2011-05 (p. 6).

Le contraste est égal à : **Contraste = \ln (Proximal / Distal)**; avec les paramètres "Proximal" et "Distal" égaux à, selon les cas:

a) Cas de la proximité (2 km) entre des échantillons riches en MgO et des indices Ni-Cu:

Proximal = (nombre d'échantillons riches en MgO situés à <2km des indices Ni-Cu /
nombre total d'échantillons situés à <2km des indices Ni-Cu)

Distal = (nombre d'échantillons riches en MgO situés à >2km des indices Ni-Cu /
nombre total d'échantillons situés à >2km des indices Ni-Cu)

b) Cas de la proximité des roches métasédimentaires aux indices Ni-Cu:

Proximal = (surface des roches métasédimentaires situées à <2km des indices Ni-Cu /
surface totale des roches de l'encaissant situées à <2km des indices Ni-Cu)

Distal = (surface des roches métasédimentaires situées à >2km des indices Ni-Cu /
surface totale des roches de l'encaissant situées à >2km des indices Ni-Cu)

c) Cas du Test 1-a (cf. **Figure 19):**

Proximal = (nombre d'échantillons anomaux situés à <2km des indices Ni-Cu /
nombre total d'échantillons situés à <2km des indices Ni-Cu)

Distal = (nombre d'échantillons anomaux situés à >2km des indices Ni-Cu /
nombre total d'échantillons situés à >2km des indices Ni-Cu)

d) Cas des Tests 1-b et 1-c (cf. **Figure 19):**

Proximal = (surface anormale située à <2km des indices Ni-Cu /
surface totale, couverte par des échantillons et située à <2km des indices Ni-Cu)

Distal = (surface anormale située à >2km des indices Ni-Cu /
surface totale, couverte par des échantillons et située à >2km des indices Ni-Cu)

ANNEXE C - REHAUSSEMENT DES ANOMALIES NI-CU (MÉTHODE 2) ET ÉTUDE DE CAS

C.1 But et théorie

Cette annexe présente une seconde méthode de rehaussement des anomalies Ni-Cu pour des analyses de roche totale. La méthode décrite dans la partie II du rapport utilisait la base de données du GEOROC comme un standard et faisait l'hypothèse que les échantillons du SIGÉOM avaient les mêmes caractéristiques que ceux du GEOROC. Cependant, les AMCG sont des suites magmatiques très particulières et relativement rares, qui sont très peu échantillonnées dans le GEOROC. Ainsi, une approche plus théorique a été testée, qui utilise la composition normative des échantillons et les coefficients de partage du Cu et du Ni pour prédire les concentrations métalliques attendues des analyses étudiées.

Cette seconde méthode de rehaussement est basée sur les études portant sur la cristallisation fractionnée des magmas silicatés. Lorsqu'un minéral cristallise au sein d'un magma, il utilise des éléments constitutifs. Il peut aussi incorporer des éléments traces qui intègrent le cristal en se substituant aux éléments constitutifs, en se coinçant dans les lacunes, etc. L'olivine, par exemple, a besoin de Si, Fe et Mg pour cristalliser, et peut incorporer, si ils sont présents dans le magma, des éléments traces comme le Ni et le Cr. Le Ni, par exemple, incorpore aisément l'olivine; on dit qu'il a des affinités avec ce minéral. Cette affinité est quantifiée par le coefficient de partage partiel (Kd), qui est supérieur à 1 lorsqu'un élément est compatible avec un minéral donné et inférieur à 1 lorsque l'élément est incompatible avec le minéral. Par exemple, le Ni est compatible avec l'olivine ($Kd_{Ni} \geq 7$), incompatible avec le plagioclase ($Kd_{Ni} = 0,2$) et très compatible avec le liquide sulfuré ($Kd_{Ni} > 300-1000$).

Une analyse de roche totale couplée à une analyse pétrographique détaillée en lame mince de même qu'à la détermination des paramètres physico-chimiques dans lesquels la cristallisation fractionnée s'est effectuée (cf. température, pression, fO₂, etc.) et l'utilisation de Kd adaptés, permet de calculer la concentration en l'élément étudié qu'avait le magma à partir duquel les minéraux identifiés en lame mince ont cristallisé. Ce calcul est effectué avec l'équation suivante, qui est valable pour des conditions de cristallisation à l'équilibre:

$$C_0 = \frac{C_{mesuré}}{\sum Kd \times minéraux}$$

avec : Minéraux: proportion des minéraux observés en lame mince

$C_{mesuré}$: concentration en Cu, par exemple, mesurée dans l'échantillon de roche totale

C_0 : concentration en Cu, par exemple, du magma initial

Kd: coefficient de partage du Cu pour les différents minéraux identifiés en lame mince

Cette prédiction des concentrations initiales en Ni-Cu du magma pourrait servir au calcul du rehaussement, en indiquant si le magma avait, ou non, perdu des métaux au profit d'un liquide sulfuré avant sa cristallisation. Le paramètre " C_0 " pourrait en effet être calculé puisque le paramètre " $C_{mesuré}$ " correspond aux concentrations en Ni-Cu des échantillons du SIGÉOM, les Kd peuvent être compilés à partir de la littérature scientifique et les minéraux peuvent être modélisés avec la norme CIPW.

Avant de présenter la méthode utilisée pour rehausser les anomalies en Ni-Cu, les valeurs de Kd sont compilées puis la validité de la norme CIPW est discutée.

C.2 Compilation des Kd

Les Kd sont soit mesurés en laboratoire, soit calculés à partir d'échantillons de suites magmatiques différenciées par cristallisation fractionnée. Les Kd varient en fonction de la température, de la pression, de la fugacité d'oxygène et de soufre, de la composition du magma initial, etc. Leur détermination fait l'objet d'un grand nombre de publications scientifiques, qui ont été compilées en ligne (cf. site internet GEM, <http://earthref.org/>).

Une étude rigoureuse nécessiterait la compilation des Kd et des conditions physico-chimiques dans lesquelles ils ont été mesurés. En raison d'un manque de temps, et parce que les conditions dans lesquelles les anorthosites ont cristallisé sont mal comprises, les Kd du Cu et du Ni ont été téléchargés à partir du site internet GEM et ont été moyennés, en accordant un poids plus important aux valeurs de Kd mesurées dans des roches mafiques (**Tableau C-1**). Les moyennes obtenues pour les Kd du Ni dans l'olivine, les pyroxènes et la magnétite sont particulièrement élevées, peut-être parce que les Kd ont été mesurés dans des roches qui contenaient beaucoup de ces minéraux, et ces valeurs ont donc été réduites pour le besoin de cette étude (**Tableau C-1**).

Aussi, la compilation des Kd met l'emphase sur les phases minérales majeures observées dans les anorthosites. Le quartz n'est pas inclus car son Kd est peu documenté et est probablement très faible. De plus, aucune donnée de Kd pour l'apatite n'a pu être documentée.

Plusieurs observations utiles au projet peuvent être faites à partir des valeurs de Kd. En effet, on constate que les Kd du Ni sont généralement plus élevés que les Kd du Cu, et donc que les minéraux fréquemment observés dans les anorthosites ont tendance à concentrer plus facilement le Ni que le Cu. Ceci indique que, pour que le rapport Cu/Ni mesuré dans les roches échantillonnées soit environ égal à 1 (cf. Partie I), les magmas initiaux devaient être plus riches en Ni qu'en Cu (si on fait l'hypothèse d'un système magmatique ouvert, ce qui est généralement le cas). Cette constatation implique également que la cristallisation fractionnée de minéraux mélanocrates devrait produire un magma résiduel enrichi en Cu puisque tous les Kd du Cu sont proches ou inférieurs à 1, et appauvri en Ni puisque plusieurs Kd du Ni sont supérieurs à 1. Par contre, la cristallisation d'un important volume de plagioclases devrait enrichir le magma résiduel, aussi appelé magma différencié ou évolué, en Ni et en Cu.

Tableau C-1. Valeurs des Kd utilisés pendant cette étude.

	Olivine	CPX	OPX	Plagioclase	Feldspath K	Magnétite	Ilménite	Feldspathoïde
Kd_{Cu}*	0,237	0,441	0,560	0,157	1,060	0,723	1,125	0,050
Kd_{Ni}	16,147	5,292	7,757	0,232	1,134	20,000	3,800	0,140
Kd_{Ni}*	7	3	4	0,232	1,134	8	3,800	0,140

*Valeurs utilisées dans les tests présentés ci-après.

C.3 Performance de la norme CIPW pour les suites AMCG

La norme CIPW est un modèle qui propose une paragenèse que des roches magmatiques auraient pu avoir, mais qui n'est pas forcément celle qu'elles ont effectivement eue.

L'un des facteurs qui peut modifier les proportions des minéraux normatifs est l'état d'oxydation du Fe. Idéalement, les quantités de Fe₂O₃ et de FeO sont analysées, ce qui n'est pas le cas pour les échantillons utilisés lors de cette étude. Ces quantités peuvent cependant être estimées à l'aide de deux méthodes:

a) Méthode de Middelmost (1989): L'estimation du rapport Fe₂O₃/FeO est basée sur une compilation d'échantillons de roches volcaniques et plutoniques pour lesquels l'état d'oxydation du fer a été mesuré.

Le rapport Fe_2O_3/FeO varie de 0,15 (roches ultramafiques) à 0,5 (roches felsiques) d'après cette compilation.

b) Méthode de Le Maître (1976): Cette méthode est également une approche empirique, et utilise la silice et les alcalins selon l'équation suivante:

$$\frac{FeO}{(FeO + Fe_2O_3)} = 0,88 - 0,0016 \times SiO_2 - 0,027(Na_2O + K_2O)$$

Lorsque l'on introduit des valeurs extrêmes dans cette équation, on peut estimer que le rapport Fe_2O_3/FeO devrait varier de 0,21 (roches ultramafiques) à 2,1 (roches felsiques).

D'après ces deux méthodes, le rapport Fe_2O_3/FeO devrait avoir une valeur d'environ 0,2-0,4 pour des roches mafiques, ce qui est probablement une valeur inexacte pour des roches mafiques anorthositiques. En effet, les anorthosites contiennent parfois de grandes quantités d'oxydes de fer, ce qui pourrait refléter des fO_2 élevées. Aussi, les anorthosites peuvent contenir de l'apatite et du quartz, qui sont généralement observés dans des roches plus riches en silice, et pourraient donc avoir une fO_2 élevée, similaire à celle de roches plus felsiques. En condition de fO_2 élevée, il est probable que le rapport Fe_2O_3/FeO soit supérieur à 0,2-0,4.

Pour pallier à ce problème, la norme CIPW a été calculée selon la procédure suivante:

a) Recalcul de l'analyse à 100% anhydre.

b) Estimation du rapport FeO/MgO : Les minéraux silicatés, comme l'olivine et les pyroxènes, incorporent uniquement du fer réduit (FeO), qui forme une solution solide avec le magnésium. Ainsi, et préalablement au calcul de la norme, le rapport FeO/MgO de l'olivine et des pyroxènes a été estimé en se basant sur des analyses in-situ de ces minéraux effectuées dans les intrusions étudiées ci-après.

c) Soustraire le Fe excédentaire: En utilisant le rapport FeO/MgO et la concentration en MgO , la quantité de FeO qui servira à calculer les proportions d'olivine et de pyroxène normatifs a pu être estimée. Le fer excédentaire, qui correspond au fer qui servira à calculer les proportions d'oxydes de fer normatifs, a été retiré de l'analyse.

$$Fe_{excédentaire} = Fe_{total} - \left[Mg \times \frac{FeO}{MgO} \right]$$

avec Mg et Fe correspondant aux proportions molaires de ces éléments.

Cette équation a été adaptée pour recevoir des données d'oxydes:

$$Fe_2O_{3_excédentaire} = \left[\frac{Fe_2O_{3_total}}{159,7} - \frac{MgO}{40,31} \times \frac{FeO}{MgO} \right] \times 159,7$$

avec Fe_2O_3 , MgO et FeO correspondant aux proportions d'oxydes (wt%).

Dans les cas où " $Fe_2O_{3_excédentaire}$ " était inférieur à 0, la valeur de FeO/MgO a été révisée, ou bien la valeur de " $Fe_2O_{3_excédentaire}$ " a été fixée à 0 pour les échantillons concernés.

Les résultats de cette prédiction ont été comparés à ceux de la méthode de Le Maître (1976), sur des échantillons pour lesquels les quantités de FeO et Fe₂O₃ ont été analysées (**Figure C-1**). Cette comparaison montre que la méthode de Le Maître (1976) est plus performante pour des échantillons contenant moins de 5-10 wt% de Fe₂O₃. Pour des roches riches en oxydes de fer, cependant, la prédiction décrite ci-dessus, bien que simpliste, donne de meilleurs résultats (**Figure C-1**).

d) Soustraire le Ti: Le titane a également été retiré de l'analyse et servira dans un second temps, pour former des oxydes de fer normatifs. Ensuite, la somme des oxydes restant a été calculée et correspond environ à la proportion de minéraux silicatés que la norme CIPW sera amenée à calculer.

e) Calcul de la norme CIPW: L'analyse partielle a été importée dans LithoModeleur afin de calculer les proportions des minéraux normatifs. Pour ce calcul, le fer de l'analyse est considéré comme étant entièrement du FeO. Ensuite, les proportions de minéraux normatifs, dont le total est environ égal à 100%, ont été recalculées pour que la somme des minéraux normatifs soit égale à la somme des oxydes calculée à l'étape précédente.

f) Calcul des oxydes de fer normatifs: Le TiO₂ et "Fe₂O₃_excédentaire" ont été utilisés pour calculer la proportion d'ilménite normative, puis la proportion de rutile dans les cas où un excès de titane était observé. Enfin, la proportion de magnétite normative a été calculée avec le Fe₂O₃ restant.

g) Recalcul à 100%: Enfin, les minéraux normatifs ont été additionnés et recalculés pour s'assurer que la somme des minéraux boucle exactement à 100%.

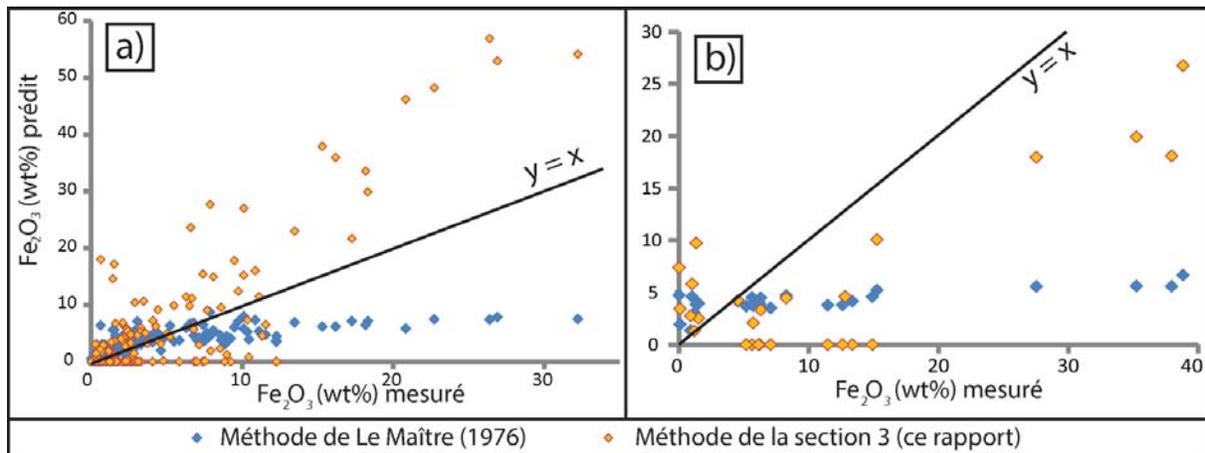


Figure C-1. Comparaison des quantités de Fe₂O₃ mesurées dans des roches provenant: a) du SIGÉOM 2012 (n= 142); b) de Fredette (2006) (n= 15) et de Huss (2002) (n= 11). Les quantités de Fe₂O₃ ont été prédites par la méthode de Le Maître (1976) et par la méthode proposée dans ce rapport. Cette dernière prédiction a été faite à partir de la quantité de Fe₂O₃_total mesurée dans les roches considérées, et en utilisant un rapport FeO/MgO de 0,5 (a) et de 0,43 (b). Notez que, pour des roches contenant > 10 wt% de Fe₂O₃, cette quantité de fer oxydé est systématiquement sous-estimée par la méthode de Le Maître (1976), et est surestimée ou sous-estimée par la méthode proposée ci-dessus car le rapport FeO/MgO n'a pas été correctement ajusté dans cet exemple.

C.4 Méthode

Les conditions dans lesquelles les anorthosites ont cristallisé sont peu contraintes, ce qui rend difficile l'estimation des valeurs de Kd comme nous l'avons déjà discuté. Aussi, la norme CIPW est un modèle,

qui ne peut pas être aussi satisfaisant qu'une étude pétrographique. Enfin, l'influence éventuelle que le métamorphisme a pu avoir sur la composition des roches étudiées n'est pas contraint. Toutes ces incertitudes rendent l'estimation de "C₀" difficile.

Plutôt que de chercher à estimer les concentrations en Ni et Cu du magma dont sont issus les cumulats étudiés, les anomalies en Ni-Cu ont été rehaussées à l'aide du paramètre "MxKd", qui correspond au coefficient de partage global des roches analysées et qui est calculé comme suit:

$$MxKd_{-Ni} = [\sum Kd_{-Ni} \times Minéraux]$$

$$MxKd_{-Cu} = [\sum Kd_{-Cu} \times Minéraux]$$

Plus la valeur de "MxKd" est élevée, plus la roche en question a concentré les métaux de base étudiés. Ainsi, si l'on fait l'hypothèse qu'un ensemble de roches a cristallisé à partir d'un même magma, les valeurs de "MxKd" devraient se corrélérer positivement aux concentrations en Ni-Cu. Par contre, les échantillons dont les concentrations en Ni-Cu ne se corrèlent pas aux valeurs de "MxKd" correspondront aux échantillons anomaux. Là encore, cette technique permettra d'identifier des anomalies hautes et basses au sein de la population d'échantillons étudiée. Cependant, cette méthode de rehaussement ne pourra s'appliquer qu'au cas par cas sur des ensembles de roches ayant cristallisées à partir d'un même magma. Aussi, pour les cas où les intrusions contiennent de grandes quantités d'oxydes de fer, le rapport FeO/MgO des silicates devra être estimé pour permettre un calcul fiable de la norme CIPW.

Cette méthode de rehaussement sera mise en pratique ci-après, à l'aide de trois études de cas.

C.5 Test sur trois AMCG

C.5.1 Anorthosite de Lac-Saint-Jean (ALSJ)

L'anorthosite de l'AMCG de Lac-Saint-Jean est une intrusion de gros volume, pour laquelle un total de 217 échantillons avec Ni et Cu analysés ont été identifiés dans la base de données du SIGÉOM. Parmi ces échantillons, plusieurs contiennent plus de 20 wt%, et parfois jusqu'à 70 wt%, de Fe₂O₃_{total}, ce qui indique que des roches parfois très riches en oxydes de fer ont été échantillonnées. Ainsi, le rapport FeO/MgO des silicates doit être estimé préalablement au calcul de la norme CIPW.

Dans la région du Lac à Paul, les pyroxènes et l'olivine contiennent environ 70% de magnésium pour 30% de fer (Fredette, 2006). Le rapport FeO/MgO de ces minéraux est ainsi égal à environ 0,43. En fait, la région du Lac à Paul se situe en bordure de l'anorthosite, là où pourrait se concentrer le magma le plus différencié du massif. Ainsi, le rapport FeO/MgO des minéraux mélanocrates diminue peut-être depuis le cœur vers la périphérie de l'anorthosite. Cependant, puisque peu de mesures directes de la composition de ces minéraux sont disponibles, le rapport FeO/MgO de ces minéraux sera considéré comme constant pour les besoins du calcul de rehaussement.

Afin de rehausser les anomalies en Ni-Cu, la norme CIPW et le paramètre "MxKd" ont été calculés suivant les procédures décrites précédemment. Les concentrations en Ni et en Cu ont ensuite été corrélées aux valeurs de "MxKd" (**Figure C-2**). Des courbes de régression linéaire, logarithmique ou autre ont ensuite été utilisées pour décrire la corrélation entre les valeurs de Ni-Cu et de "MxKd". Ces mêmes courbes ont été utilisées pour définir des valeurs seuils, au-delà desquelles les échantillons sont considérés comme anormalement riches ou pauvres en métaux de base (**Figure C-2**).

Parmi les échantillons étudiés, seuls ceux présentant à la fois une anomalie en Cu et en Ni ont été considérés comme étant anomaux. Au total, 21 roches (9,68% des analyses) présentent des anomalies hautes en Ni-Cu et 15 roches (6,91% des analyses) présentent des anomalies basses en Ni-Cu.

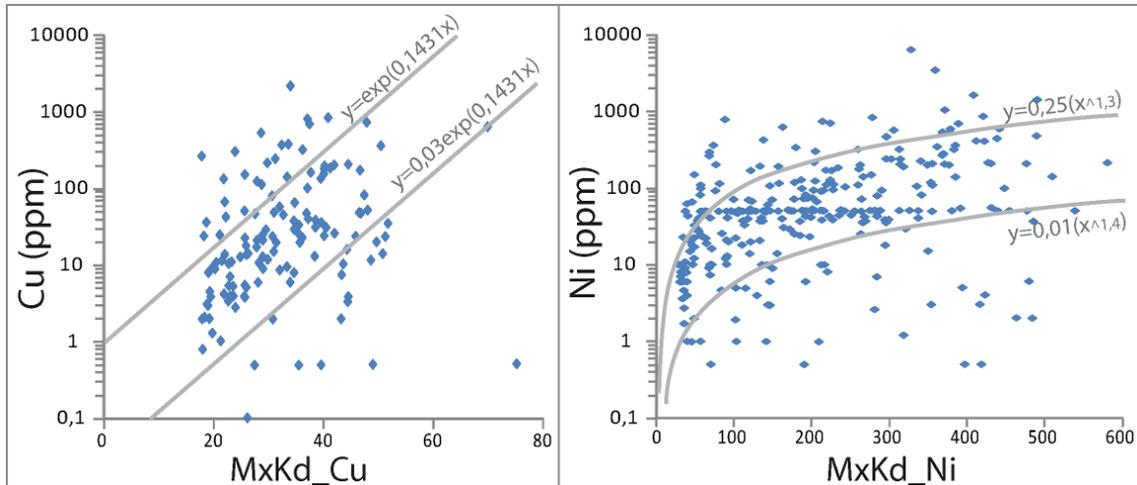


Figure C-2. Corrélations entre les valeurs de Ni-Cu et de "MxKd". Les courbes de régression permettent de calculer les valeurs seuils qui ont été utilisées pour identifier les échantillons anormalement riches ou pauvres en Ni-Cu.

Les résultats de ce test ont été comparés à ceux du test précédant (cf. Partie II). Le *test Majeurs* et le *test CIPW* n'ont pu être effectués que sur 197 échantillons de l'ALSJ, et non sur les 217 échantillons disponibles, car les roches les plus riches en oxydes de fer n'ont pas pu trouver d'équivalent parmi les analyses du GEOROC et n'ont ainsi pas été prises en compte par la première méthode de rehaussement. Les résultats des deux méthodes n'ont ainsi pas pu être comparés que sur la base de ces 197 échantillons (**Tableau C-2**).

Cette comparaison indique une très bonne concordance entre le test performé avec les valeurs de "MxKd" et les *tests Majeurs* et *CIPW*, en particulier en ce qui concerne les anomalies hautes et les échantillons non-anomaux. Pour les anomalies basses cependant, la concordance entre les tests n'est que de 50% (**Tableau C-2**).

Aussi, de 40% à 70% des anomalies basses et hautes détectées par le test présenté dans cette partie correspondent aux échantillons contenant les plus faibles, ou les plus hautes, concentrations en Ni-Cu (**Tableau C-2**). Le fait que toutes les analyses anormales ne correspondent pas forcément aux roches contenant des valeurs extrêmes de Ni et de Cu confirme l'importance des méthodes de rehaussement.

Tableau C-2. Comparaison des résultats des tests de rehaussements.

Test MxKd	Test CIPW	Test Majeurs	Ni (ppm)	Cu (ppm)
Anomalies Basses	0,47*	0,47	0,67	0,4
Anomalies Hautes	0,95	0,95	0,7	0,65
Autres roches	0,65	0,64	0,72	0,69

*Les chiffres sont égaux à: [nombre d'anomalies basses dans le *test CIPW* lorsqu'il y a aussi une anomalie basse dans le *test MxKd* / 197] / [nombre d'anomalies basses dans le *test MxKd* / 197]. Plus les chiffres sont élevés, plus les résultats des tests sont similaires.

C.5.2 AMCG de La Blache et de Vallant

Le test effectué sur l'ALSJ a été répété sur les AMCG de La Blache et de Vallant. Pour ces intrusions, un total de 97 (La Blache) et 119 (Vallant) échantillons du SIGÉOM ayant les principaux éléments majeurs, ainsi que Ni et Cu, analysés ont été utilisés. Aussi, ces deux AMCG contiennent des accumulations d'oxydes de fer et 25-30% des échantillons utilisés contiennent de 20 wt% à 65 wt% de $Fe_2O_3_{total}$. Puisqu'une partie importante de ces roches contient probablement une grande quantité d'oxydes de fer, le calcul de la norme CIPW a été effectué selon la méthode décrite précédemment.

Préalablement à ces calculs, le rapport FeO/MgO a dû être estimé. Les roches mafiques de l'AMCG de La Blache contiennent des olivines de composition Fo_{60} environ (Giroux, 2001). Les olivines de l'AMCG de Vallant, quant à elles, ont des compositions variées (Fo_{25-78} ; Francis et al., 2000). Ainsi, le rapport FeO/MgO a été fixé à 0,6667 pour les deux AMCG, ce qui est une approximation, en particulier pour les roches de Vallant. En fait, le calcul de la norme CIPW n'a dû être adapté que pour la moitié des roches. Pour l'autre moitié, les valeurs de " $Fe_2O_3_{excédentaire}$ " étaient négatives et un calcul classique de la norme CIPW a donc été effectué.

Les étapes suivantes du calcul sont les mêmes que celles décrites précédemment.

C.5.3. Résultats des tests

La position des anomalies hautes et basses détectées par les tests effectués sur l'ALSJ et sur les AMCG de La Blache et de Vallant est présentée par la **Figure C-3**. Aussi, des calculs de contraste ont été effectués selon la méthode décrite à l'annexe B pour explorer le résultat des tests.

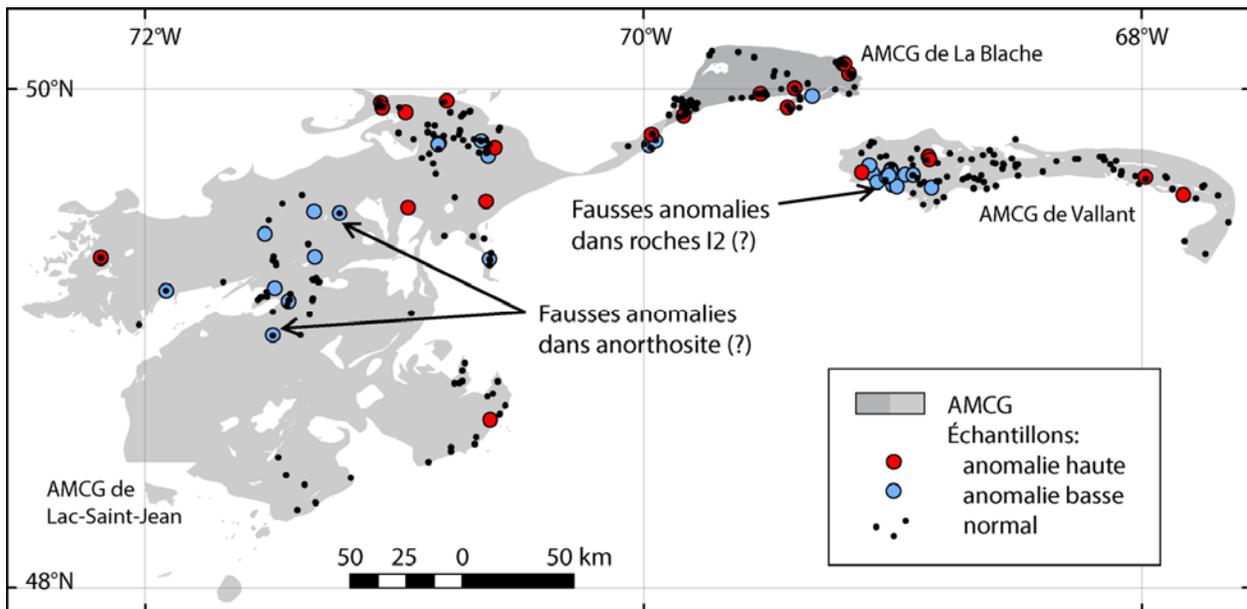


Figure C-3. Représentation des échantillons anomaux et non-anomaux détectés par les tests MxKd, pour les AMCG de Lac-Saint-Jean, La Blache et Vallant.

Pour les anomalies hautes situées à 2 km et 5 km des indices Ni-Cu, les valeurs du contraste sont, respectivement, 2,54 et 2,09. En ce qui concerne les anomalies basses, les valeurs du contraste sont négatives. Ceci indique que le *test MxKd* est aussi performant que les *tests CIPW* et *Majeurs* lorsqu'il s'agit de détecter des anomalies hautes en Ni-Cu. Le *test MxKd* ne permet pas, cependant, de reproduire les anomalies basses rehaussées précédemment.

En fait, le *test MxKd* détecte des anomalies basses qui se concentrent au cœur de l'ALSJ et dans la bordure de composition intermédiaire (I2) de l'AMCG de Vallant (**Figure C-3**). Ces anomalies basses sont donc observées dans des roches riches en plagioclase ou différenciées qui devraient, normalement, contenir peu de Ni-Cu et sont donc probablement de fausses anomalies (**Figure C-3**). Ce problème est peut-être imputable à des erreurs dans le choix des courbes de régression utilisées pour déterminer les seuils hauts et bas (cf. **Figure C-2**).

C.6 Conclusions sur les tests

En conclusion, le *test MxKd* permet de détecter des anomalies hautes et basses en Ni-Cu dans des échantillons de roches totales en utilisant uniquement les informations contenues dans les analyses étudiées. La détection de ces anomalies est réalisée sans utiliser une base de données de référence qui n'est pas forcément un bon standard pour des roches atypiques comme le sont celles des suites AMCG.

Le *test MxKd* semble cependant peu performant lorsqu'il s'agit de détecter des anomalies basses. En fait, ce test pourrait être prometteur, à conditions de régler plusieurs problèmes en ce qui concerne la détermination de la proportion exacte des minéraux analysés, la sélection de Kd adaptés à l'intrusion étudiée et de disposer d'un nombre suffisamment important d'échantillons pour pouvoir ajuster correctement les courbes de régression qui servent à définir les seuils hauts et bas.

Une façon plus rigoureuse de repérer les roches ayant cristallisé à partir d'un magma qui aurait perdu ses métaux de base au profit d'un liquide sulfuré serait de calculer les valeurs de " C_0 ". Plusieurs tests ont été effectués en ce sens, mais ils n'ont pas produit de résultats cohérents car le système contient trop de variables mal définies comme les Kd et les proportions des phases minérales. Pour pallier à ces difficultés, les minéraux devraient être comptés en lame mince et les valeurs de Kd devraient être mieux contraintes.

Cependant, même une bonne étude pétrographique n'est pas toujours représentative et la détermination des phases accessoires peut-être imprécise. Il pourrait être plus simple de calculer les valeurs de " C_0 " à partir d'un seul type de minéral dont la concentration en Ni-Cu est analysée in-situ. Cette méthode ne nécessite la détermination que de deux Kd, celui du Cu et celui du Ni pour le minéral en question. Cette méthode est généralement mise en œuvre avec l'olivine (**Figure C-4**), mais pourrait aussi fonctionner avec les pyroxènes. Des méthodes similaires sont actuellement mises au point au profit des minéraux indicateurs échantillonnés dans l'environnement secondaire, et de telles techniques pourraient être utiles à la prospection au sein de systèmes magmatiques.

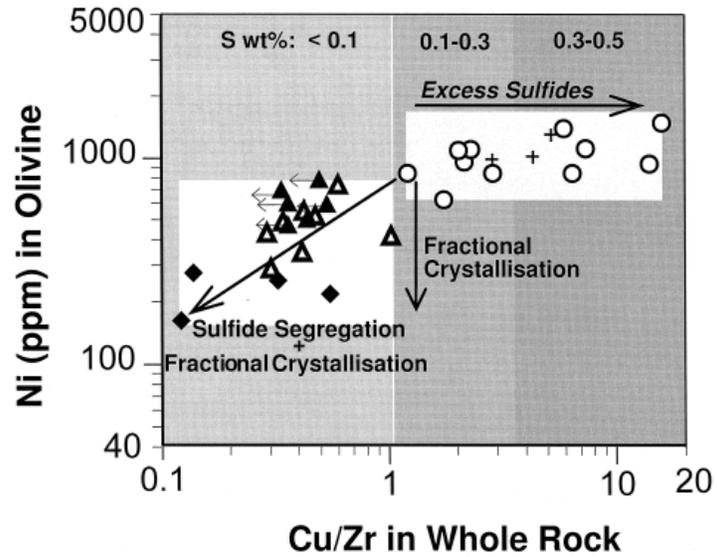


Figure C-4. Figure extraite de Li et Naldrett, (1999) et présentant les concentrations en Ni de plusieurs olivines situées à proximité du gisement de Voisey's Bay. Ce graphique montre que les olivines ayant cristallisé à proximité du liquide sulfuré et après la ségrégation des sulfures sont plus pauvres en Ni et en Cu que les autres olivines de l'intrusion.

ANNEXE D – CONTAMINATION DES MAGMAS

Le problème de la contamination des magmas n'a pas été abordé du point de vue de la géochimie dans le cadre de ce projet. La contamination est pourtant une étape essentielle à la formation d'un SMM (cf. Barnes et Lightfoot, 2005). Pour cette raison, les méthodes permettant de la détecter au sein d'intrusions magmatiques sont discutées brièvement dans cette annexe.

La contamination crustale peut être "globale", lorsque le magma a été contaminé à sa source, comme dans le cas d'une fusion anatexique. Dans ce cas, l'intégralité de l'intrusion magmatique présentera des caractéristiques héritées de cette contamination crustale, comme des concentrations élevées en Al et Zr par exemple. La contamination qui nous intéresse pour les SMM est "locale", en cela qu'elle n'affecte qu'une partie restreinte de l'intrusion magmatique. Cette contamination a généralement lieu en bordure d'une intrusion, là où le magma assimile les roches de son encaissant. Un magma n'est véritablement contaminé que lorsque les enclaves qu'il incorpore ont fondu et se sont mélangées avec le magma. C'est ce stade ultime de l'assimilation qui a le potentiel de provoquer la ségrégation du liquide sulfuré.

Ce type de contamination est facilement modélisable, par l'intermédiaire de courbes de mélange par exemple, lorsque des échantillons du contaminant, du magma contaminé et du magma non-contaminé sont disponibles. Ces trois types de roches sont facilement identifiables sur des graphiques utilisant des éléments qui se concentrent dans le magma (cf. éléments compatibles dans le cas d'un magma mafique) et des éléments qui se concentrent dans le contaminant (cf. éléments incompatibles dans le cas d'un contaminant granitique par exemple, ou Se dans le cas d'un contaminant sédimentaire). Le degré de contamination peut également être calculé, selon une méthode qui s'apparente à celle des bilans de masse.

Dans le cas où le magma a migré loin de son contaminant et que seuls des magmas contaminés et non-contaminés sont disponibles, une méthode similaire peut être appliquée, qui nécessite de corriger l'effet de la cristallisation fractionnée, en calculant les C_0 par exemple, avant d'évaluer l'effet qu'une éventuelle contamination a pu avoir sur les roches en question. Lorsque l'étude porte sur une même unité magmatique, l'auteure recommande de chercher à détecter les variations en éléments susceptibles de provenir du contaminant. Pour appliquer cette méthode aux AMCG de Grenville, un échantillonnage abondant et systématique ciblé sur les bordures mafiques des anorthosites serait nécessaire.