
Structures crustales et potentiel des intrusions mafiques pour les minéralisations magmatiques de Cu-Ni-EGP dans le Grenville

PROJET 2008-05

PAR : STÉPHANE FAURE, PH.D.

AOÛT 2009



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 :

Faure, S., 2009. Structures crustales et potentiel des intrusions mafiques pour les minéralisations magmatiques de Cu-Ni-ÉGP dans le Grenville. Rapport du projet CONSOREM 2008-55, 33 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

RÉSUMÉ

Une stratégie d'exploration régionale pour les minéralisations de Cu-Ni-(Co-ÉGP) d'origine magmatique est proposée pour la Province de Grenville au Québec. Cette stratégie repose sur les principales caractéristiques géologiques régionales du gisement de Cu-Ni de Voisey's Bay au Labrador et sur les modèles de mise en place des massifs anorthositiques et intrusions mafiques-ultramafiques.

Un modèle tomographique d'ondes sismiques de la partie supérieure du manteau lithosphérique grenvillien permet d'identifier des blocs mantelliques de composition et/ou température différentes. Deux blocs en particulier où les vitesses sismiques sont plus rapides apparaissent plus favorables pour la localisation des massifs anorthositiques. Le premier bloc correspond à un appendice de la racine archéenne de la Province de Supérieur sous le Grenville et le second pourrait correspondre à la racine protérozoïque d'un micro-continent ou de Labradoria. Les limites de ces deux blocs mantelliques correspondent en surface à des failles crustales majeures spatialement associées avec des minéralisations en Cu-Ni.

Les intrusions mafiques – ultramafiques isolées ou associées à des suites d'anorthosites-mangérites-charnockites-granites (AMCG) sont les plus favorables pour les minéralisations Cu-Ni. Ces intrusions sont caractérisées en surface par de fortes anomalies de gravité résiduelle. Ces anomalies sont disposées en chapelets soit parallèlement au Front des Granulites dans l'allochtone du Grenville, soit en bordure du bloc mantellique sous Labradoria sur la Côte-Nord, ou soit au cœur de la Ceinture métavolcanique de Portneuf. Sur la Côte-Nord (anorthosite de Fournier) et le long de la frontière entre le parautochtone et l'allochtone, la résolution plus élevée des levés régionaux de gravité permet d'interpréter de fortes anomalies correspondant à des intrusions mafiques-ultramafiques qui représentent de nouvelles cibles d'exploration.

Des guides d'exploration géologique à l'échelle du Grenville sont proposés. Ceux-ci sont basés sur des tests statistiques de sensibilité des intrusions et des failles en fonction de la distance aux gîtes de Cu-Ni. Les fronts métamorphiques (granulites, migmatites) et les limites de bassins métasédimentaires et de roches supracrustales montrent une association positive avec les minéralisations Cu-Ni. Des corrélations positives sont également observées entre les minéralisations Cu-Ni et les anorthosites et les gabbronorites/troctolites. Le test de sensibilité montre qu'il existe une corrélation positive entre les minéralisations et les anorthosites jusqu'à une distance de 25 km. Cependant, les meilleures corrélations se situent entre 2,5 et 10 km. Le test de proximité pour les gabbronorites-troctolites indique que ce sont les bordures immédiates (<1 km) qui sont les plus favorables pour les minéralisations. Un modèle de favorabilité basé sur les corrélations positives entre les objets géophysiques et géologiques permet de proposer de nouvelles cibles d'exploration régionale pour les minéralisations Cu-Ni dans le Grenville.

Les faits saillants de cette étude sont : 1) la construction d'une base de données commune pour les intrusions mafiques et ultramafiques et les failles ductiles pour le Grenville au Canada et dans l'État de New York; 2) la production de cartes des discontinuités mantelliques et de failles crustales favorables; 3) la délimitation de régions d'intérêt pour la localisation de nouvelles intrusions mafiques; et 4) une carte de favorabilité pour les minéralisations Cu-Ni dans le Grenville du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	v
1 Introduction.....	1
2 Problématique dans le Grenville et objectifs de l'étude.....	1
3 Caractéristiques du gisement de Voisey's Bay.....	2
4 Caractéristiques des suites AMCG.....	3
5 Stratégie d'exploration dans le Grenville et méthodologie.....	4
6 Données utilisées.....	5
6.1 Géologie.....	5
6.2 Géophysique.....	6
7 Guides d'exploration géophysique à l'échelle du Grenville.....	6
7.1 Tomographie sismique et discontinuités mantelliques favorables.....	6
7.2 Épaisseur de la croûte et structures crustales favorables.....	12
7.3 Anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer et intrusions mafiques favorables.....	14
8 Guides d'exploration géologique à l'échelle du Grenville.....	18
8.1 Fronts métamorphiques.....	18
8.2 Limites de bassins métasédimentaires.....	21
8.3 Relations spatiales entre les gîtes Cu-Ni et anorthosites, troctolites, gabbro et gabbronorites.....	22
9 Modèle de favorabilité et cibles d'exploration régionale pour le Cu-Ni.....	25
10 Conclusion.....	28
Remerciements.....	29
Références.....	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1. A) Géologie du Labrador et localisation du gisement de Cu-Ni-Co de Voisey's Bay. Géologie d'après Geoscience Resource Atlas, 2009 (Nord géographique tel qu'indiqué en B). B) Carte de la composante résiduelle du champ magnétique total correspondant à la région A. Données de l'Entrepôt de données géoscientifiques (2009a) et la localisation des indices Cu-Ni (ronds verts) d'après Geoscience Resource Atlas, 2009.....	2
Figure 2. Les anorthosites du Grenville et la structure du manteau lithosphérique d'après les données de variation des vitesses sismiques de Godey et al. (2003) à 125 km de profondeur. Les lignes blanches indiquent les limites arbitraires de domaines mantelliques.....	7
Figure 3. Détail de la structure sismique du manteau lithosphérique sous la région de la Mauricie – Saguenay – Lac Saint-Jean exprimé sur le gradient vertical des vitesses sismiques à 125 km de profondeur (données sismiques de Godey et al., 2003). A: anorthosite, M: mangérite, G: gabbronorite.....	8

Figure 4.	Détail de la structure sismique du manteau lithosphérique sous la Côte-Nord exprimé sur le gradient vertical des vitesses sismiques à 175 km de profondeur (données sismiques de Godey et al., 2003) et les limites inférées du bloc mantellique sous la croûte de Labradoria à 125 et 175 km de profondeur. A: anorthosite, M: mangérite, G: gabbronorite.....	9
Figure 5.	Gradient vertical des vitesses sismiques à 125 km (données sismiques de Godey et al., 2003) avec la position et les noms des Terrains protérozoïques tels que définis par les âges CNd (en Ga) de la croûte selon Dickin (2000) avec la position de la section illustrée sur la Figure 6.....	10
Figure 6.	Section tomographique positionnée sur la figure 5 montrant la structure sismique du manteau lithosphérique grenvillien (données sismiques de Godey et al., 2003), les racines probables de Quebecia (Martin et Dickin, 2005) et de Labradoria (Dickin, 2000) et les sources inférées des magmas mafiques. Section géologique de la croûte d'après Gobeil et al. (2003). Exagération verticale 3x.	11
Figure 7.	Zones favorables proposées pour les minéralisations Cu-Ni (hachuré) sur la base de la variation du gradient vertical des vitesses sismiques à 125 km de profondeur.	11
Figure 8.	Variation de l'épaisseur de la croûte continentale d'après les données de Perry et al., (2002) et compilation CONSOREM avec la localisation des gîtes de Cu-Ni (SIGEOM 2008).....	12
Figure 9.	Épaisseur de la croûte sous le Haut Plateau de Manicouagan (données de Hynes et al., 2000) et les minéralisations Cu-Ni (ronds rouges). La ligne en tirets noirs indique la profondeur du Moho à 43 km, une limite correspondant sensiblement à celle entre le Parautochtone et l'Allochtone.....	13
Figure 10.	A) Histogramme de l'épaisseur de la croûte sous les indices Cu-Ni du Grenville. B) Zones favorables proposées (en treillis) pour le Cu-Ni correspondant aux valeurs comprises entre 38,5 et 39,5 km et 41,5 et 44,5 km de profondeur de l'histogramme (A). Même légende qu'à la figure 9.	13
Figure 11.	Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions mafiques et les anorthosites à la limite du Parautochtone et de l'Allochtone.....	14
Figure 12.	Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions mafiques et les anorthosites de la Côte-Nord.	15
Figure 13.	Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) de la région de Portneuf-Mauricie montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions mafiques (dates de Nadeau et van Breemen, 2001 et Sappin et al., 2009).....	15
Figure 14.	Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) de la région du Lac Volant sur la Côte-Nord montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions. A: anorthosite, M: mangérite, G: gabbronorite.	16
Figure 15.	Régions montrant les signatures gravimétriques favorables pour les intrusions mafiques -ultramafiques. Surfaces en vert : supérieur à -10 mGal; surfaces en mauve : supérieur à 10 mGal.....	17
Figure 16.	Carte métamorphique de la région de la Côte-Nord selon Gobeil et al., (2003) et selon http://gsc.nrcan.gc.ca/map/tecmet/index_e.php avec les anorthosites et les intrusions mafiques (SIGEOM 2008).....	18

Figure 17. Carte métamorphique de la région du Haut Plateau de Manicouagan selon la carte http://gsc.nrcan.gc.ca/map/tecmet/index_e.php avec les minéralisations et les anorthosites et intrusions mafiques (SIGEOM 2008).	19
Figure 18. Carte des failles connues (SIGEOM 2008) et interprétées (cette étude) limitant des domaines de haut grade métamorphique avec les minéralisations Cu-Ni. Granulites en mauve et migmatites en trame ondulée (SIGEOM 2008).	20
Figure 19. Tests statistiques de sensibilité des failles limitant A) les domaines de haut grade métamorphique et (B) les bassins métasédimentaires en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni. Les valeurs de contraste positives indiquent une corrélation spatiale positive et l'inverse pour les valeurs négatives.	21
Figure 20. Carte de failles connues (SIGEOM 2008) et interprétées (cette étude) limitant des bassins métasédimentaires et autres roches supracrustales (en bleu) avec les minéralisations Cu-Ni.	22
Figure 21. Tests statistiques de sensibilité des : A) anorthosites, B) gabbros et C) des gabbronorites en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni. Les valeurs de contraste positives indiquent une corrélation spatiale positive et l'inverse pour les valeurs négatives.	23
Figure 22. Zones de 10 km (ligne en rouge) de largeur autour des anorthosites (en bleu) qui représentent 26,6 % de la surface totale du Grenville du Québec. Distance de 10 km établie selon le test statistique de proximité avec les minéralisations Cu-Ni (Figure 21A).	23
Figure 23. Zones de 12,5 km (surface ombragée) de largeur autour des gabbros indifférenciés (en vert) qui représentent 35,2 % de la surface total du Grenville du Québec. Distance de 12,5 km établie selon le test statistique de proximité avec les minéralisations Cu-Ni (Figure 21B).	24
Figure 24. A) Les minéralisations Cu-Ni dans le Grenville sont localisées dans et à la bordure immédiate des gabbronorites et des troctolites (trame grise), anorthosite en bleu. B) Complexe métamorphique du Haut-Plateau de Manicouagan, C) Complexe du Lac de la Blache, et D) Complexe de Matamec.	25
Figure 25. Carte de favorabilité pour les minéralisations de Cu-Ni-(ÉGP-Co) dans le Grenville selon l'addition des 9 couches d'informations favorables présentées sur le Tableau I.	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques des couches utilisées pour le modèle de favorabilité	26
---	----

1 INTRODUCTION

La Province de Grenville contient la plus grande quantité (75 %) et les plus volumineuses intrusions anorthositiques du monde (Ashwal et Wooden, 1983). Dans cette province, il existe également de nombreuses intrusions mafiques et ultramafiques associées ou non aux suites Anorthosites-Mangérites-Charnockites-Granites (AMCG). Les intrusions mafiques et ultramafiques sont particulièrement fertiles pour les minéralisations magmatiques du type Cu-Ni-ÉGP (Clark, 2000). Les centaines de petites intrusions satellites situées en bordure des massifs anorthositiques grenvilliens ne sont pas sans rappeler le contexte géologique du gisement de Voisey's Bay au Labrador (Ryan et al., 1995).

Ce rapport vise à mieux comprendre, d'une part, les relations spatiales (et non nécessairement temporelles ou génétiques) entre les structures translithosphériques et les AMCG, les intrusions mafiques et ultramafiques et les minéralisations magmatiques Cu-Ni, et, d'autre part, les grands accidents géologiques de la croûte grenvillienne. Un modèle de favorabilité est présenté dans le but de dégager des secteurs d'intérêts pour l'exploration régionale des minéralisations Cu-Ni-ÉGP.

2 PROBLÉMATIQUE DANS LE GRENVILLE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Plusieurs éléments supportent l'idée que des minéralisations Cu-Ni de type Voisey's Bay au Labrador puissent se retrouver dans la Province de Grenville au Québec. D'abord, plusieurs suites AMCG au Québec ont un âge comparable à la suite de Nain (1,34-1,29 Ma), notamment, les anorthosites de Rivière Pentecôte, du Lac Berté, et les complexes du Lac Tétépisca et du Lac de la Blache (Francis et al., 2000; Myers et al., 2008). Ensuite, la composition de certaines intrusions et la présence de roches métasédimentaires ayant un contenu en soufre permet de supporter les modèles de minéralisation magmatique en Cu-Ni (Nabil, 2000; Vaillancourt, 2001; Sappin et al., 2009). Toutefois, la région de Voisey's Bay (**Figure 1a**) n'a pas été affectée par l'orogénie Grenvillienne (1100-980 Ma) et la difficulté au Québec est donc de reconnaître des structures fertiles comparables à celles de Voisey's Bay et, ceci malgré la déformation ductile et polyphasée. En effet, plusieurs orogénies ont affecté la Province de Grenville. Les structures reliées à ces événements de convergence sont probablement à pendages variables et certaines sont à pendage faible dans la croûte intermédiaire et inférieure. Ainsi, la correspondance entre les structures superficielles et les structures profondes peut être difficile à établir sauf dans une moindre mesure pour les structures de pendage vertical. Ceci a comme conséquence que les unités géologiques et les minéralisations à la surface actuelle ne sont donc pas nécessairement au-dessus de la partie du manteau lithosphérique à laquelle le phénomène est lié génétiquement.

D'autre part, les magmas associés aux suites AMCG ont pu se mettre en place dans la croûte par l'entremise de grandes failles régionales. Bien que ce lien n'ait jamais été démontré formellement, plusieurs éléments issus des cartographies par les géologues du MNRF permettent d'envisager cette hypothèse. Entre autres, les anorthosites du Lac-Saint-Jean et de Havre-Saint-Pierre montrent des structurations magmatiques et d'état solide concordant avec de grandes failles régionales de direction NE (Hébert et Lacoste, 1998a et 1998b; Gobeil et al., 2003). Ces discontinuités structurales peuvent représenter des structures translithosphériques ayant pu contrôler également la mise en place de magma mafique-ultramafique associé à des minéralisations en Cu-Ni. Leur reconnaissance devient donc un élément important afin de procurer des guides d'exploration à l'échelle régionale. L'état des connaissances de la Province de Grenville est inégal, ce territoire ayant subi des relevés cartographiques d'échelles variables. La présence des intrusions mafiques est bien connue dans les territoires cartographiés récemment et peut être suspectée dans les régions moins connues. Un outil permettant d'identifier de nouvelles intrusions mafiques serait également un atout dans une stratégie d'exploration.

Les objectifs du projet sont : 1) de valider l'hypothèse d'un lien spatial entre les structures crustales et mantelliques et les minéralisations Cu-Ni-(ÉGP) associées aux intrusions mafiques et ultramafiques dans le Grenville du Québec et, 2) d'établir un modèle prédictif pour l'exploration régionale de ce type de minéralisation dans cette vaste province géologique.

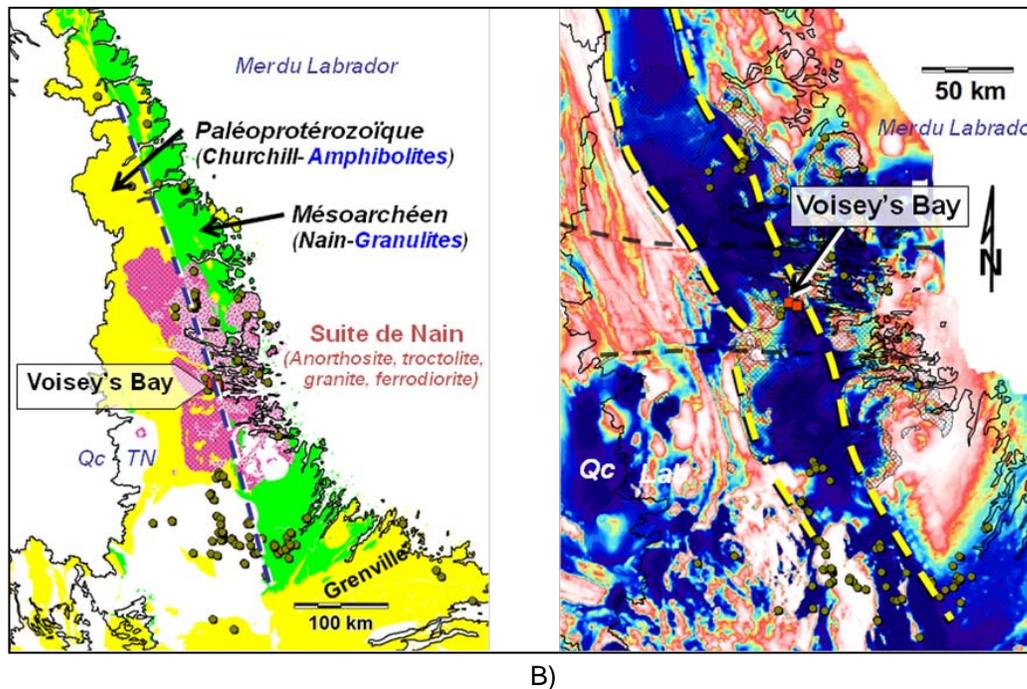


Figure 1. A) Géologie du Labrador et localisation du gisement de Cu-Ni-Co de Voisey's Bay. Géologie d'après Geoscience Resource Atlas, 2009 (Nord géographique tel qu'indiqué en B). **B)** Carte de la composante résiduelle du champ magnétique total correspondant à la région A. Données de l'Entrepôt de données géoscientifiques (2009a) et la localisation des indices Cu-Ni (ronds verts) d'après Geoscience Resource Atlas, 2009.

3 CARACTÉRISTIQUES DU GISEMENT DE VOISEY'S BAY

Le supergisement de Voisey's Bay (136,7 Mt @ 1,6 % Ni et 0,9 % Cu) est le 4^{ième} producteur mondial en importance pour son contenu métal (Barnes et Lightfoot, 2005). Ce dépôt est localisé à la rencontre d'une zone de suture nord-sud de premier ordre formée lors de l'Orogène des Torngats (~1860 Ma) et un couloir de failles cassantes de deuxième ordre orienté est-ouest (**Figure 1b**; Myers et al., 2008). La suture translithosphérique correspond à la limite entre la Province de Churchill-Sud-Est d'âge archéen et protérozoïque et principalement métamorphisée au faciès des amphibolites, et les roches archéennes du Craton de Nain métamorphisées au faciès des granulitiques (**Figure 1a**). Le corridor de failles cassantes, nommé Gardar – Voisey's Bay, se manifeste par des linéaments topographiques et géophysiques et est matérialisé sur le terrain par de la fracturation et des failles cassantes senestres (Myers et al., 2008). Ce corridor rectiligne a une envergure régionale; sa largeur fait plus de 50 km N-S et sa longueur près de 500 km en additionnant la portion au Labrador et celle qui traverse tout le sud du Groenland. Sur le plan géophysique, la zone de suture est caractérisée par un creux magnétique prononcé et le corridor de fracturation par des ruptures très nettes le long de certains repères très magnétiques de la zone tectonique d'Abloviak (**Figure 1b**). Il est important de noter que la région de Voisey's Bay est située à 300 km au nord du Front Grenville et qu'elle n'a pas été affectée par la déformation grenvillienne.

Le gisement de Voisey's Bay est situé dans la Suite intrusive de Nain composée d'anorthosites, de troctolites, de granites, et de ferrodiorites. La minéralisation est associée temporellement à cette suite qui s'est mise en place dans un intervalle de 66 Ma entre 1,34-1,29 Ga (Myers et al., 2008). Le gisement est localisé dans de petites intrusions de troctolites datées à 1333 Ma en marge de la suite de Nain et qui ne représentent qu'une infime partie du complexe intrusif (**Figure 1a**). Les minéralisations sont contrôlées par le système de failles E-O et reliées à un système globalement cassant mais localement ductile à cause de la température du magma (Leshner et al., 2008). Le gisement est localisé verticalement au-dessus d'un dénivelé de 6 km au niveau du Moho (Hall et al., 2002).

4 CARACTÉRISTIQUES DES SUITES AMCG

Les suites plutoniques AMCG sont constituées d'anorthosites (A), de mangérites (M), de charnockites (C) et de granites (G) et un cortège de roches mafiques (gabbronorite, gabbro, troctolite) et ultramafiques (pyroxénite, wehrlite) localisé généralement autour des massifs anorthositiques. Les phases mafiques sont les plus fertiles pour les minéralisations en Cu-Ni-EGP dans le Grenville (Clark, 2000).

Les suites AMCG sont générées par la formation de magma mantellique et la fusion partielle du manteau et de la partie inférieure de la croûte. Trois modèles de formation et de mise en place sont proposés :

1. Modèle d'Ashwal (1993).

Ce modèle propose un sous plaquage crustal de magma basaltique provenant d'un panache mantellique. Les magmas basaltiques ou picritiques issus du sous plaquage du manteau s'accumulent à la base de la croûte et produisent une anomalie thermique de longue durée à l'interface croûte-manteau. La base de la croûte subit une fusion partielle (anatexie) et produit les premiers magmas de composition granitique. La chambre magmatique assimile une partie de la croûte granulitique riche en Al. Les minéraux mafiques cristallisent, précipitent et s'accumulent par gravité à la base d'une chambre magmatique. Une certaine proportion de minéraux mafiques peut retourner dans le manteau. Les magmas résiduels deviennent enrichis en Al et Fe/Mg et forment des cumulats de plagioclase. Ceux-ci flottent au sommet de la chambre magmatique et par contraste de densité s'introduisent par diapirisme et sous forme de plutons dans la croûte (Martignole et Schrijver, 1970). La coalescence des plutons se produit au niveau de la croûte intermédiaire et supérieure pour former des massifs anorthositiques. Le contexte géodynamique dans lequel se mettent en place les massifs n'est pas précisé par l'auteur. Emslie (1975) propose dans ce modèle que le magma mafique à la base de la croûte aurait assimilé des granulites crustales pour former directement un magma parent enrichi en Al, lequel serait à l'origine des anorthosites.

2. Modèle de Corrigan et Hamner (1997).

Ce modèle préconise la délamination lithosphérique qui est associée à un effondrement orogénique. Les massifs anorthositiques se mettent en place après des épisodes majeurs d'épaississement de la croûte dans des zones en extension localisées à l'intérieur d'un système orogénique globalement en convergence. Il est suggéré dans ce modèle que l'amincissement de la lithosphère par convection joue un rôle important dans la mise en place des massifs.

3. Modèle de Duchesne et al. (1999).

Le modèle de Duchesne et al. propose la fusion d'une langue de croûte inférieure mafique à la fin d'une orogénie. Ces auteurs suggèrent que les anorthosites sont associées à des zones de faiblesse dans la croûte qui favorisent leur mise en place. Les magmas parents ne dérivent pas du fractionnement du manteau péridotitique comme le suggère Ashwal (1993), mais de la fusion de sources gabbronoritiques à la base de la croûte. Dans un contexte de collision, des délaminations de la croûte inférieure par sous chevauchements au niveau du Moho produisent l'enfoncement d'une langue de croûte dans l'asthénosphère. Par la suite, la fusion partielle de cette langue se produit pour former une chambre magmatique le long du plan de sous chevauchement. Il y a séparation minérale dans la chambre magmatique; les plagioclases flottent et montent par diapirisme dans les niveaux intermédiaires de la croûte via des failles faiblement inclinées, alors que les cumulats mafiques précipitent à la base de la chambre. La mise en place des massifs se fait durant la déformation et la compression. Il s'agit d'un modèle préconisé par plusieurs pour la formation des anorthosites dans le Grenville (Gauthier et al., 2004; Gauthier et Chartrand, 2005; Corriveau et al., 2007).

Les magmas mafiques et ultramafiques se forment à de grandes profondeurs dans le manteau. La fenêtre d'intérêt dans le manteau pour l'initiation de tels magmas se situe entre 100 et 150 km, là où les conditions PT permettent au magma de se séparer de sa source et de monter vers la croûte (Arndt et al., 2005). Les magmas mafiques peuvent être synchrones de la mise en place des anorthosites ou se mettent en place antérieurement ou ultérieurement en empruntant des zones de faiblesses dans le manteau et/ou la croûte.

5 STRATÉGIE D'EXPLORATION DANS LE GRENVILLE ET MÉTHODOLOGIE

En tenant compte des caractéristiques géologiques du gisement de Voisey's Bay et des modèles de mise en place des massifs anorthositiques en général, voici les principaux critères de recherche proposés, à différentes échelles, pour l'exploration des minéralisations de type Cu-Ni-EGP magmatiques dans le Grenville :

1- Préparation de terrain à une échelle régionale (plusieurs centaines de km)

a) Massifs anorthositiques (AMCG).

Les massifs indiquent une paléo-source de chaleur dans le manteau (plume, délamination à la base de la croûte) et des zones de faiblesses le long desquelles peut se mettre en place un cortège de roches mafiques et ultramafiques. Ces massifs sont généralement connus à l'échelle de la province géologique et certains sont plus fertiles que d'autres (Clark, 2000; Francis et al., 2000).

b) Zones de suture

Une zone de suture entre deux terrains d'âge et/ou de métamorphisme contrasté se traduit généralement par des structures translithosphériques qui sont susceptibles d'être connectées avec le manteau asthénosphérique.

2- A l'échelle du massif anorthositique

Discontinuités structurales

Il est possible de reconnaître les structures recoupant les suites AMCG à partir des failles déjà connues ou à partir de l'interprétation de linéaments géophysiques et topographiques. A l'indice du Lac Volant par exemple, le dyke minéralisé est non déformé, cassant, tardif, et recoupe la foliation (Perreault et al., 1996). C'est également le cas de certaines minéralisations dans le Haut Plateau Manicouagan (Clark, 2000).

Seule la reconnaissance des facteurs de fertilité à l'échelle régionale est traitée dans le cadre de ce rapport. La méthodologie proposée consiste d'une part à identifier les caractéristiques géophysiques (manteau lithosphérique et croûte) et géologiques des lieux d'emplacement des massifs anorthositiques et des minéralisations Cu-Ni, et d'autre part, d'établir des relations spatiales empiriques ou quantitatives de proximité entre les minéralisations connues de Cu-Ni et les différents paramètres géophysiques et géologiques. Une carte de favorabilité est ensuite construite en additionnant les différentes couches de facteurs positifs à la minéralisation.

6 DONNÉES UTILISÉES

6.1 Géologie

Plusieurs cartes numériques ont servi à construire une base de données cartographique pour les AMCG et intrusions mafiques-ultramafiques du Grenville au Canada et dans le NE des États-Unis (Adirondacks). La principale difficulté a été de jumeler des cartes à différentes échelles et divers niveaux d'information à l'intérieur même du Québec et ensuite entre l'Ontario et l'état de New York. Les cartes numériques du Grenville suivantes ont été utilisées :

- Labrador (Wardle et al., 1997),
- Ontario (OGS¹, 2006),
- États-Unis (Schruben et al., 1994), et
- Québec (SIGEOM 2008).

De plus, les cartes géologiques du Grenville de Davidson (1998) et celle de la Province de Québec ont été utilisées pour combler les vides de cartographie au 50k ou au 250k pour la portion québécoise du Grenville. Le champ magnétique total (CGC²) a été également utilisé afin de compléter la forme des intrusions à la limite de certaines cartes. L'âge des intrusions a été également ajouté à la base de données des intrusions. Cette information provient de la base géochronologique du Canada, de rapports ou légendes de cartes géologiques du MRNF, ou d'articles scientifiques.

Pour les failles, deux nouvelles cartes ont été construites. La première concerne les failles ductiles et l'autre, les failles cassantes, c'est-à-dire les structures rectilignes à fort angle par rapport au grain structural et/ou magnétique. La base de données du SIGEOM (2008) a servi de base de départ, mais les cartes de Wardle et al., (1997), Davidson (1998), et de nombreuses autres non géoréférencées (disponibles sur Examine et le site de la CGC) de même que des articles et rapports ont servi à compléter, en particulier, la carte des failles ductiles. Le champ magnétique total (CGC) a également servi à interpréter des prolongements de failles connues ou interprétées sur les cartes géologiques.

¹ OGS – Ontario Geological Survey.

² CGC – Commission Géologique du Canada.

La localisation et les substances principales et secondaires des indices, dépôts et mines de Cu-Ni-(ÉGP) proviennent du SIGEOM (2008), de l'OGS et du gouvernement de Terre-Neuve Labrador (Geoscience Resource Atlas 2009). Pour le Québec, les valeurs $\geq 0,1$ % Cu et/ou Ni ont été considérées comme des indices.

La carte métamorphique provient d'une carte préliminaire de la CGC (2009) modifiée avec l'information du SIGEOM et quelques rapports géologiques du MRNF³.

6.2 Géophysique

Les données géophysiques utilisées sont;

- 1- La composante résiduelle du champ magnétique total et la 1^{ère} dérivée verticale de la CGC (EDG, 2009a);
- 2- Les anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer de la CGC (EDG⁴, 2009b);
- 3- La profondeur du Moho (Perry et al., 2002) avec l'ajout de stations provenant d'articles scientifiques de projets LITHOPROBE;
- 4- La tomographie sismique d'ondes de surface (S), modèle 3D couvrant de 30 à 250 km profondeur (Godey et al., 2003).

7 GUIDES D'EXPLORATION GÉOPHYSIQUE À L'ÉCHELLE DU GRENVILLE

7.1 Tomographie sismique et discontinuités mantelliques favorables

Les variations de vitesse d'ondes sismiques permettent de distinguer des changements compositionnels et de température dans le manteau actuel (Forte et Perry, 2000). Le modèle tomographique utilisé est celui de Godey et al., (2003). Celui-ci est construit à partir des données sismiques d'ondes de surface (ondes S). Il couvre l'ensemble de l'Amérique du Nord, de 30 à 250 km de profondeur avec une résolution qui permet de distinguer des anomalies mantelliques supérieures à 400 km de longueur latéralement et 50 km verticalement. Les écarts de vitesse par rapport à la moyenne des vitesses du modèle sont exprimés en termes de variations de perturbation. Le gradient vertical de ces variations permet de rehausser les anomalies de petites longueurs d'onde et de mieux définir les anomalies sismiques. Il est exprimé en carte par une échelle de couleurs étalonnées sur la région d'étude selon la méthode de l'histogramme égaliseur (**Figure 2**). Les couleurs froides indiquent les domaines où les ondes sismiques voyagent rapidement, alors que les couleurs chaudes correspondent à des vitesses d'ondes plus lentes.

Les variations des vitesses sismiques d'ondes de surface dans le manteau à 125 km de profondeur (c.-à-d. profondeur inférée de la formation des magmas mafiques) montrent que les massifs anorthositiques se concentrent dans et/ou en bordure de domaines sismiques où les ondes sismiques voyagent plus rapidement que la moyenne du manteau lithosphérique sous la Province de Grenville (**Figure 2**). Les anomalies dans le manteau lithosphérique se corrélaient verticalement avec plusieurs objets géologiques de la croûte grenvillienne et permettent de proposer des éléments d'interprétations. Le modèle tomographique à cette profondeur montre que les vitesses rapides qui caractérisent la racine mantellique

³ MRNF – Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

⁴ EDG – Entrepôt de données géoscientifiques – Ressources naturelles Canada.

du craton archéen de la Province de Supérieur se poursuivent sous la partie centrale du Grenville (**Figure 2**). C'est à cet endroit que la concentration d'anorthosites est la plus forte. Un détail sur la région du Lac Saint-Jean, Mauricie et Portneuf montre que les anomalies dans le manteau suivent des failles crustales majeures comme celle de la zone de déformation de Saint-Fulgence par exemple, et englobe remarquablement l'anorthosite du Lac Saint-Jean (**Figure 3**). La majorité des indices de Cu-Ni suivent la bordure de cette anomalie.

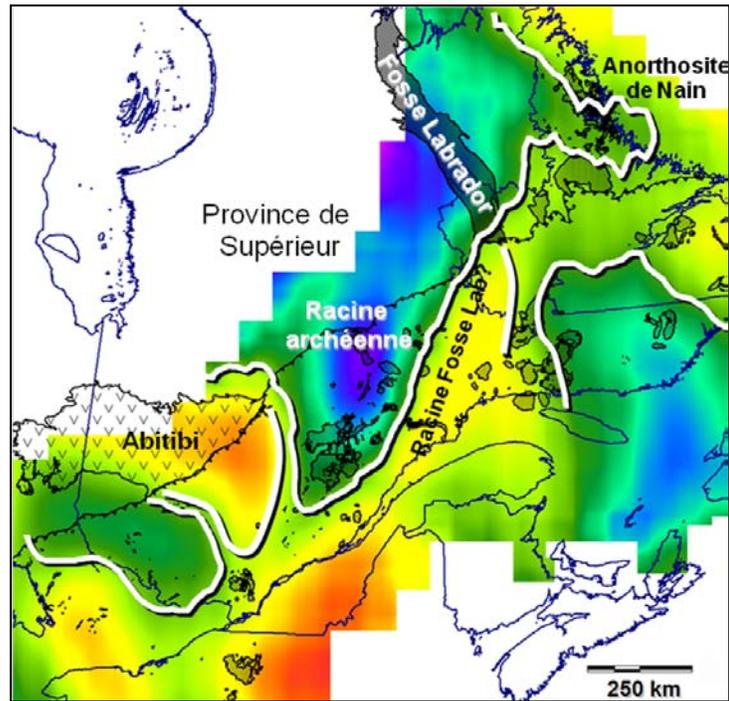


Figure 2. Les anorthosites du Grenville et la structure du manteau lithosphérique d'après les données de variation des vitesses sismiques de Godey et al. (2003) à 125 km de profondeur. Les lignes blanches indiquent les limites arbitraires de domaines mantelliques.

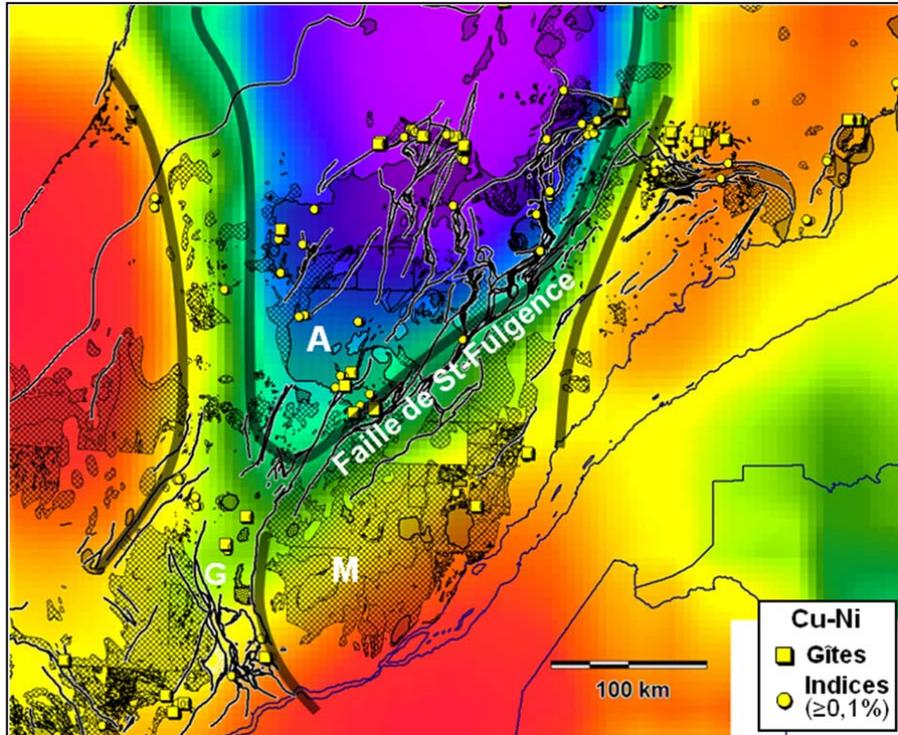


Figure 3. Détail de la structure séismique du manteau lithosphérique sous la région de la Mauricie – Saguenay – Lac Saint-Jean exprimé sur le gradient vertical des vitesses séismiques à 125 km de profondeur (données séismiques de Godey et al., 2003). A: anorthosite, M: mangérite, G: gabbronorite.

Un bloc mantellique faisant 300 km de large (E-O) par plus de 400 km de long (N-S) est interprété sur la Côte-Nord. Ce bloc a une signature séismique comparable à celle sous l'anorthosite du Lac Saint-Jean. Les limites de ce bloc sont définies arbitrairement suivant le gradient vertical des variations de vitesse séismique à 125 et 175 km de profondeur (**Figure 4**). Cette entité mantellique est située sous la croûte juvénile de l'arc de Labrador (1,7 Ga) telle que définie par Dickin (2000). Ce bloc pourrait ainsi être interprété comme la racine de Labrador ou d'un micro-continent. Les anorthosites de la Côte-Nord sont disposées de part et d'autre de ce bloc. La bordure ouest aurait un pendage vers l'ouest, alors que la limite est serait plus abrupte. La limite ouest a été l'hôte de multiples épisodes magmatiques (1380, 1130, 1060 et 540 Ma) ainsi que de minéralisations Cu-Ni de type magmatique comme le gîte du Lac Volant (**Figure 4**; Nabil, 2000). Le bassin métasédimentaire de Wakeham (~1,5 Ga; Larbi, 2003) occupe la portion centrale de cette anomalie mantellique. Ce bassin est moins métamorphisé (faciès supérieur des schistes verts à amphibolite inférieur) que les roches du socle adjacent ce qui indique qu'il a été moins enfoui par rapport à ses limites. Cette hypothèse supporte l'idée que le manteau sous la croûte de Labrador est moins dense que le manteau environnant comme le suggèrent les vitesses séismiques plus rapides (**Figure 2**). Le rift néoproterozoïque de Melville au Labrador (Gower et al., 1986) longe la limite nord de cette racine mantellique (**Figure 4**). Il pourrait s'agir d'une expression superficielle d'une discontinuité transcrustale.

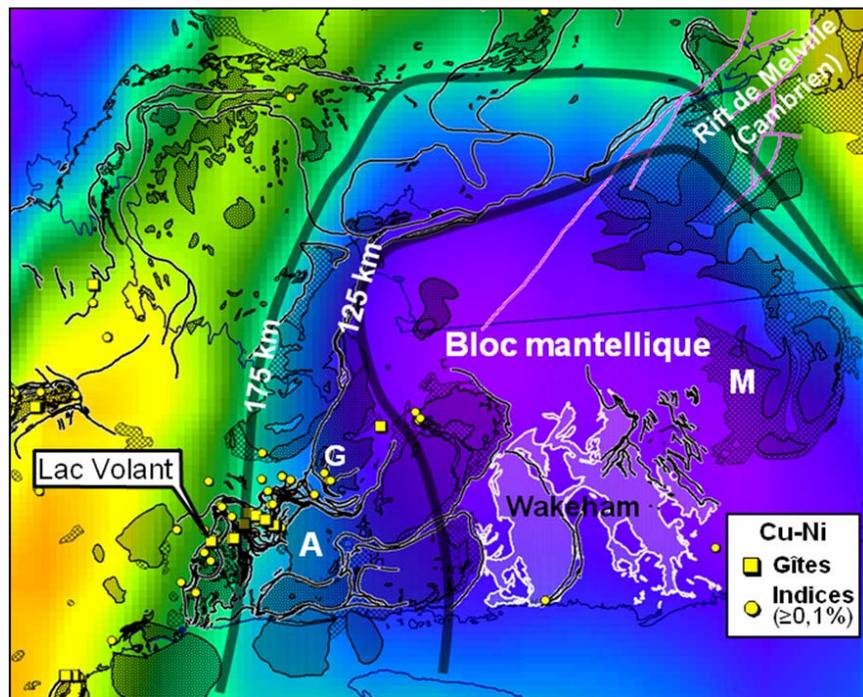


Figure 4. Détail de la structure séismique du manteau lithosphérique sous la Côte-Nord exprimé sur le gradient vertical des vitesses séismiques à 175 km de profondeur (données séismiques de Godey et al., 2003) et les limites inférées du bloc mantellique sous la croûte de Labradoria à 125 et 175 km de profondeur. A: anorthosite, M: mangérite, G: gabbronorite.

Le modèle tomographique à la profondeur de 125 km montre que la racine de la Sous-province archéenne de l'Abitibi se poursuit à 300 km vers le SE sous le Grenville (**Figure 2**), comme le montrent également les données gravimétriques et magnétiques (Faure, 2007). Il est probable également que la racine de la Fosse du Labrador se matérialise dans le manteau comme en témoignent les vitesses moyennes qui longent la racine cratonique de la Province de Supérieur (**Figure 2**). Il est à remarquer que seulement quelques petites intrusions d'anorthosite sont présentes au-dessus de ces deux anomalies de faibles vitesses.

Une section tomographique orientée SO-NE au centre de la Province de Grenville montre la dimension et la profondeur des blocs mantelliques ainsi que leur position par rapport aux massifs anorthositiques et aux minéralisations Cu-Ni (**Figures 5 et 6**). Les minéralisations du Lac Volant sont localisées directement au-dessus de la marge Ouest de Labradoria à 175 km de profondeur (**Figure 6**). La Ceinture de Portneuf occupe la marge Ouest d'une anomalie mantellique qui pourrait correspondre au Terrain de Québécia (1,5 Ga; Martin et Dickin, 2005).

En résumé, il y a une relation dans le Grenville entre les domaines de vitesse séismique rapide et la position de certaines minéralisations Cu-Ni associées aux AMCG et roches mafiques et ultramafiques. Les zones hachurées sur la **Figure 7** correspondent, à 125 km de profondeur, aux zones tampons de 100 km autour des blocs mantelliques et dans les blocs (sauf sur la Côte-Nord) où les vitesses séismiques sont les plus rapides. Ces zones représentent 50,7 % de la surface totale du Grenville (Québec et Labrador). Cette surface regroupe 58,5 % de toutes les minéralisations Cu-Ni et 64,6 % des gîtes. Ces chiffres indiquent qu'il y a une relation positive entre ces domaines mantelliques et la présence de minéralisation en Cu et Ni. Il s'agit de secteurs stratégiques pour l'exploration à l'échelle régionale. Le gîte du Lac Volant, de même que les indices environnants, ne sont pas localisés dans les zones favorables précédemment décrites. Cette non-concordance spatiale, pour la profondeur visée de 125 km,

pourrait s'expliquer par le fait que ces minéralisations sont contrôlées par des processus à une plus grande profondeur dans le manteau (à 175 km par exemple; **Figures 4 et 6**) ou que les minéralisations sont déracinées de leur lieu de formation et transportées par l'entremise des chevauchements. Le gîte du lac Volant se situe dans une grosse masse de gabbro-norite, qui fait partie d'une nappe de charriage transportée de l'ESE vers le NNO pendant l'orogénie grenvillienne. Sa localisation actuelle ne correspondrait donc pas avec son point d'origine. Cependant, la distance de transport demeure indéterminée.

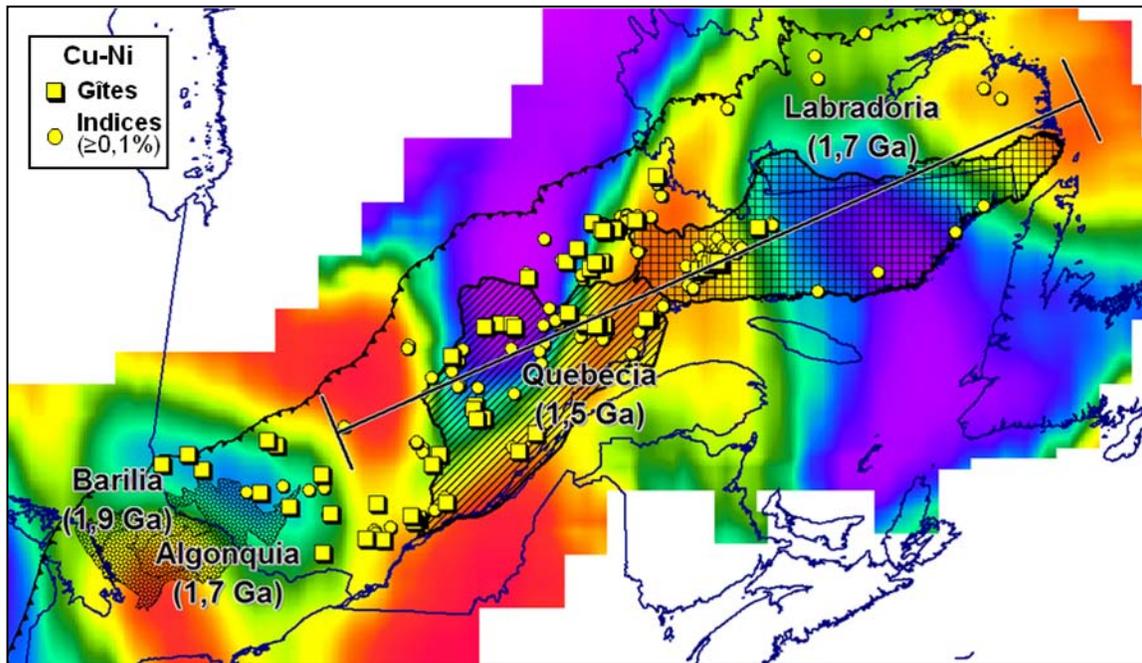


Figure 5. Gradient vertical des vélocités sismiques à 125 km (données sismiques de Godey et al., 2003) avec la position et les noms des Terrains protérozoïques tels que définit par les âges ϵNd (en Ga) de la croûte selon Dickin (2000) avec la position de la section illustrée sur la **Figure 6**.

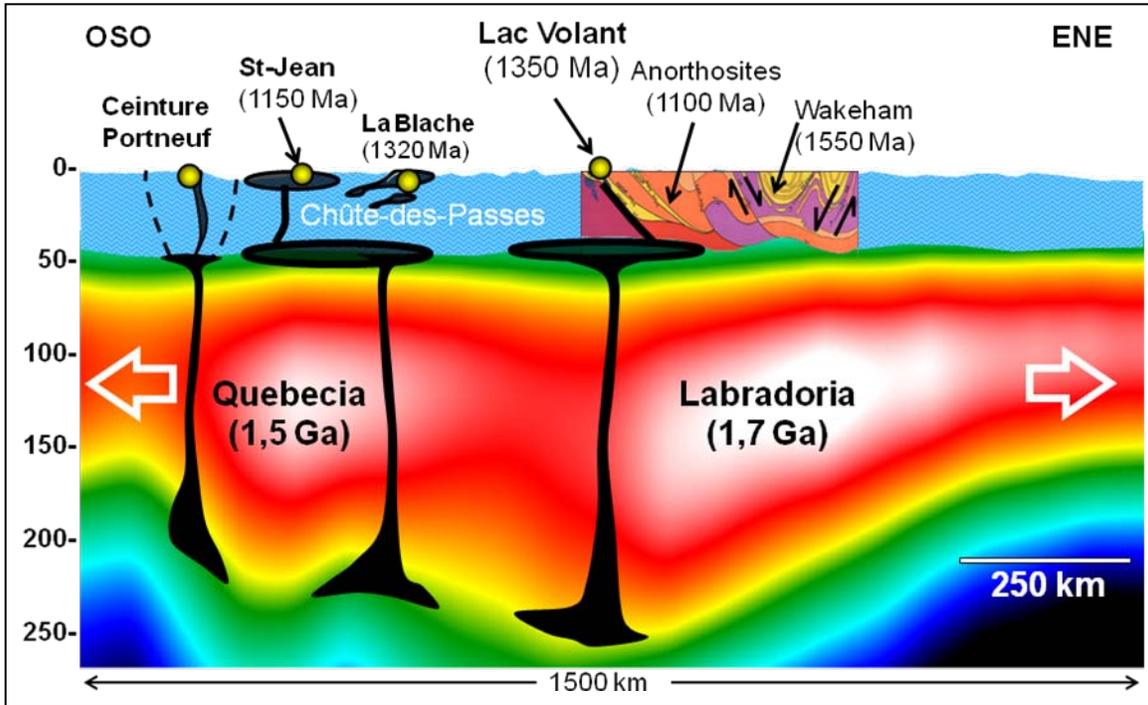


Figure 6. Section tomographique positionnée sur la figure 5 montrant la structure séismique du manteau lithosphérique grenvillien (données séismiques de Godey et al., 2003), les racines probables de Quebecia (Martin et Dickin, 2005) et de Labradoria (Dickin, 2000) et les sources inférées des magmas mafiques. Section géologique de la croûte d'après Gobeil et al. (2003). Exagération verticale 3x.

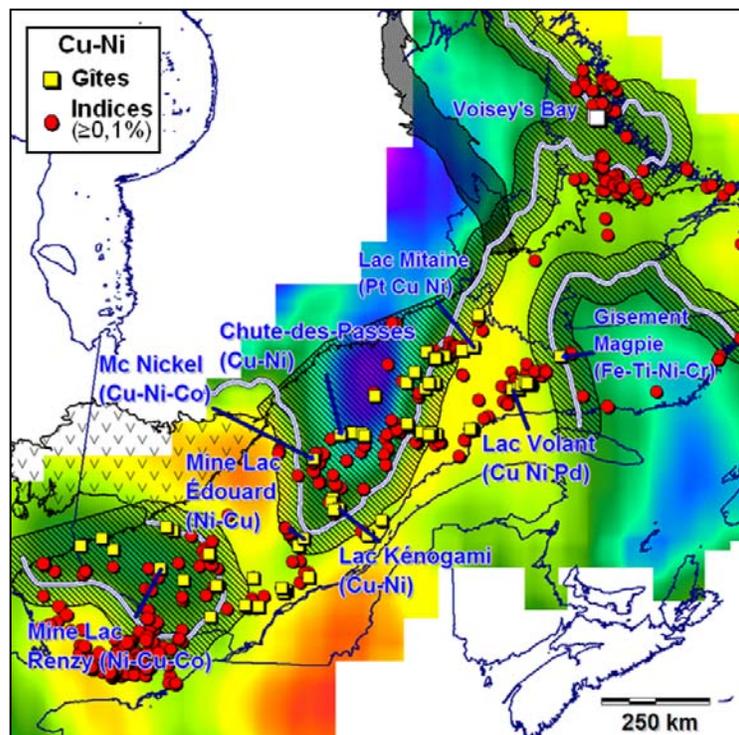


Figure 7. Zones favorables proposées pour les minéralisations Cu-Ni (hachuré) sur la base de la variation du gradient vertical des vitesses séismiques à 125 km de profondeur.

7.2 Épaisseur de la croûte et structures crustales favorables

La localisation du gisement de Voisey's Bay au-dessus d'un dénivelé de 6 km au niveau du Moho montre l'importance pour l'exploration régionale de reconnaître les forts gradients dans l'épaisseur de la croûte. La **Figure 8** est une représentation de l'épaisseur de la croûte continentale construite à partir des données de projets LITHOPROBE (Perry et al., 2002 et compilation CONSOREM). Les données sont parfois très fragmentaires comme par exemple dans le centre du Grenville. Par contre, le modèle de la topographie du Moho de Hynes et al., (2000) sous la région du Haut-Plateau de Manicouagan est bien contraint (**Figure 9**). Il montre que le Complexe de gabbro-norites granulitiques du Haut-Plateau de Manicouagan (âge minimum de 1500 Ma; Indares et Dunning, 2004) et hôte des minéralisations Cu-Ni dans ce secteur, est situé au-dessus d'un fort dénivelé à la base de la croûte (Eaton et al., 1995). Les indices dans des gabbros post métamorphisme de haut grade (1,50 – 1,23Ga; Indares et Dunning, 2004) ainsi que les gîtes du secteur Châte-des-Passes et de Mc Nickel au SO suivent remarquablement la topographie du Moho (**Figure 8**). La Mine du Lac Renzy ainsi que plusieurs autres indices de Cu-Ni dans le SO de la Province de Grenville au Québec sont localisés autour de variations significatives dans l'épaisseur de la croûte (**Figure 8**).

Les minéralisations Cu-Ni de la Province de Grenville sont en majorité localisées verticalement au-dessus d'une croûte dont l'épaisseur varie entre 39 et 45 km, plus spécifiquement à $39 \pm 0,5$ km et entre 41,5 et 44,5 km de profondeur (Histogramme de la **Figure 10**). La région formée par l'intervalle de 39 à 45 km de profondeur représente 45,5 % de la surface totale du Grenville au Québec (**Figure 10**). À l'intérieur de cette surface, 76,5 % des minéralisations en Cu-Ni et 72 % des gîtes s'y retrouvent, ce qui en fait une région statistiquement propice à l'exploration.

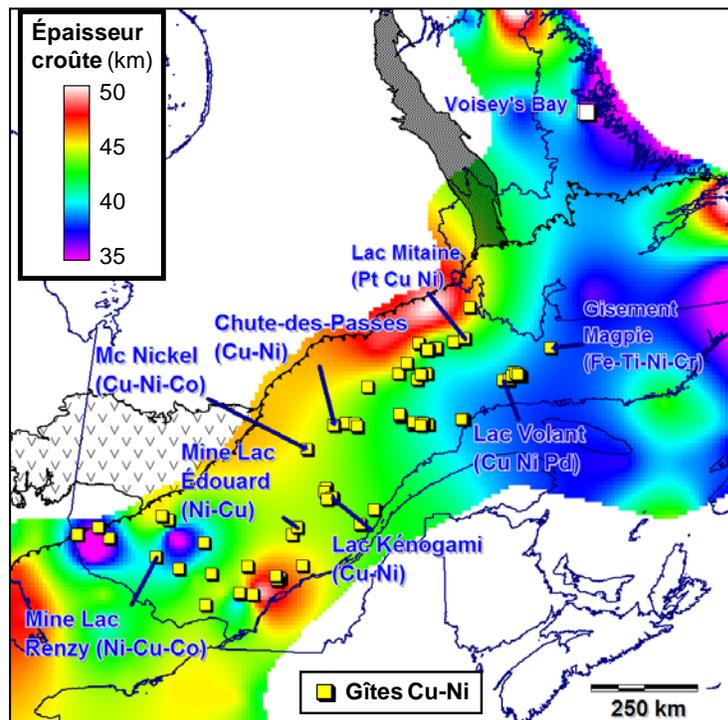


Figure 8. Variation de l'épaisseur de la croûte continentale d'après les données de Perry et al., (2002) et compilation CONSOREM avec la localisation des gîtes de Cu-Ni (SIGEOM 2008).

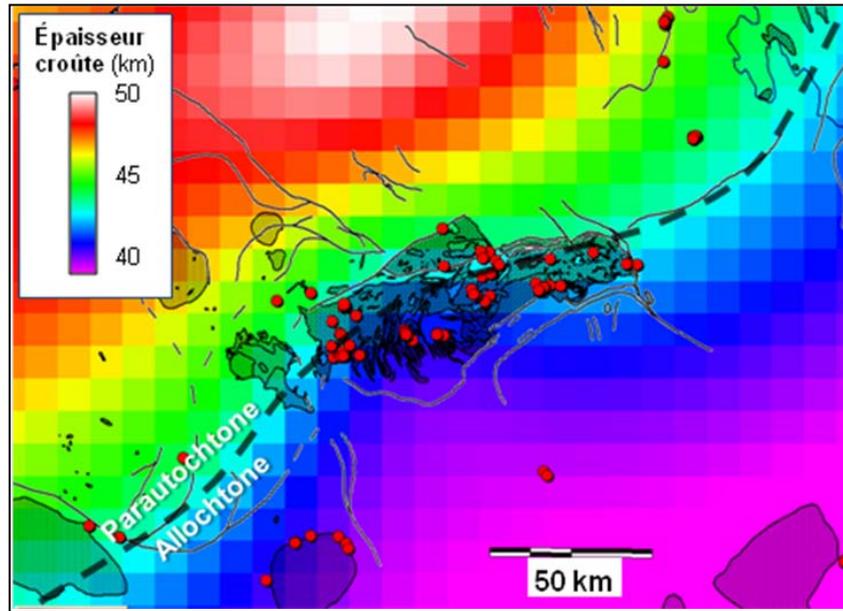


Figure 9. Épaisseur de la croûte sous le Haut Plateau de Manicouagan (données de Hynes et al., 2000) et les minéralisations Cu-Ni (ronds rouges). La ligne en tirets noirs indique la profondeur du Moho à 43 km, une limite correspondant sensiblement à celle entre le Parautochthone et l'Allochthone.

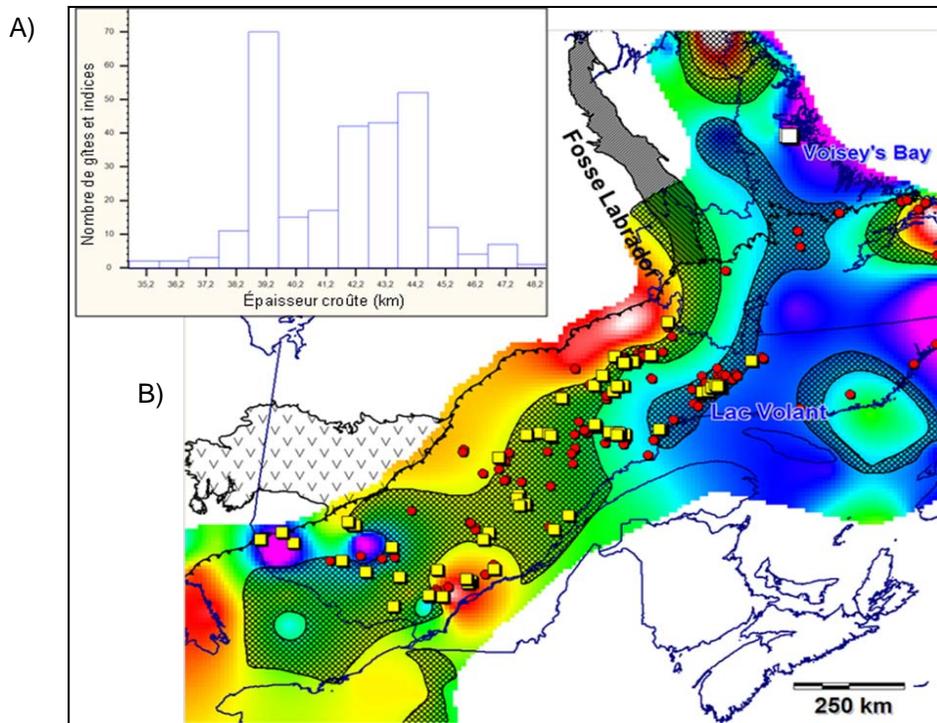


Figure 10. A) Histogramme de l'épaisseur de la croûte sous les indices Cu-Ni du Grenville. B) Zones favorables proposées (en treillis) pour le Cu-Ni correspondant aux valeurs comprises entre 38,5 et 39,5 km et 41,5 et 44,5 km de profondeur de l'histogramme (A). Même légende qu'à la figure 9.

7.3 Anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer et intrusions mafiques favorables

Les grandes concentrations de magma mafique ont depuis longtemps été considérées comme un facteur favorable pour les indices de Cu-Ni. La gravité aide donc à évaluer la taille et le potentiel de ces masses, qui peuvent être partiellement enfouies sous la surface actuelle. Dans le Grenville, les complexes mafiques et ultramafiques isolés ou associés à des suites AMCG sont caractérisés par de fortes anomalies isostatiques résiduelles du champ de gravité. Ces anomalies de courte longueur d'onde et qui témoignent de contrastes de densité près de la surface sont obtenues en soustrayant la composante gravitaire régionale causée par les charges topographiques. Dans le Grenville, ces anomalies sont disposées en chapelets soit parallèlement au Front des Granulites dans l'Allochtone (**Figure 11**), soit en bordure du bloc mantellique sous Labradoria sur la Côte-Nord (**Figure 12**), ou soit au cœur de la Ceinture métavolcanique de Portfneuf (**Figure 13**).

Dans la région du Haut-Plateau de Manicouagan, les minéralisations Cu-Ni sont confinées essentiellement à une anomalie de gravité résiduelle positive correspondant au complexe de gabbronorite (**Figure 11**). Les anomalies gravimétriques correspondant à l'anorthosite du Lac Tétépisca (1,33 Ga) et à la suite intrusive d'Ossok Mountain (1,45 Ga) sont très similaires en intensités et en dimension à celle du Haut-Plateau. Le secteur du Lac Tétépisca en particulier représente un potentiel considérant que plusieurs indices Cu-Ni sont connus à la périphérie de cette anorthosite de même nom (**Figure 11**).

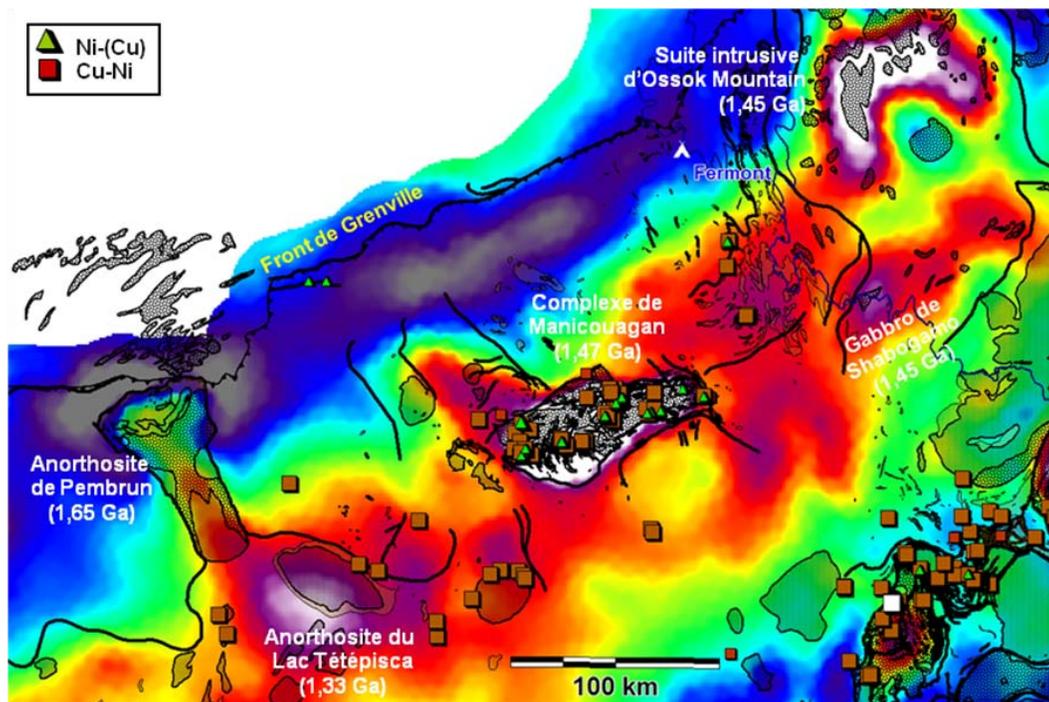


Figure 11. Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions mafiques et les anorthosites à la limite du Parautochtone et de l'Allochtone.

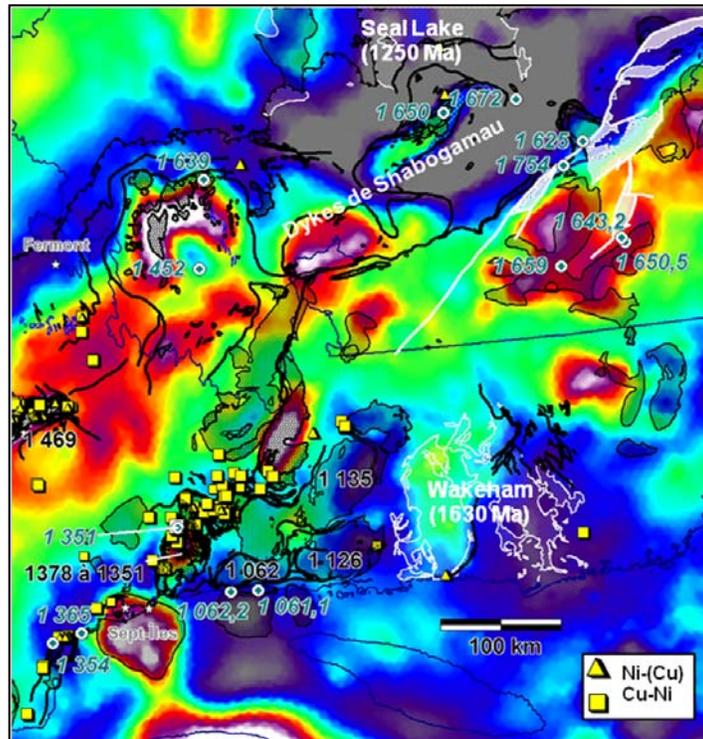


Figure 12. Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions mafiques et les anorthosites de la Côte-Nord.

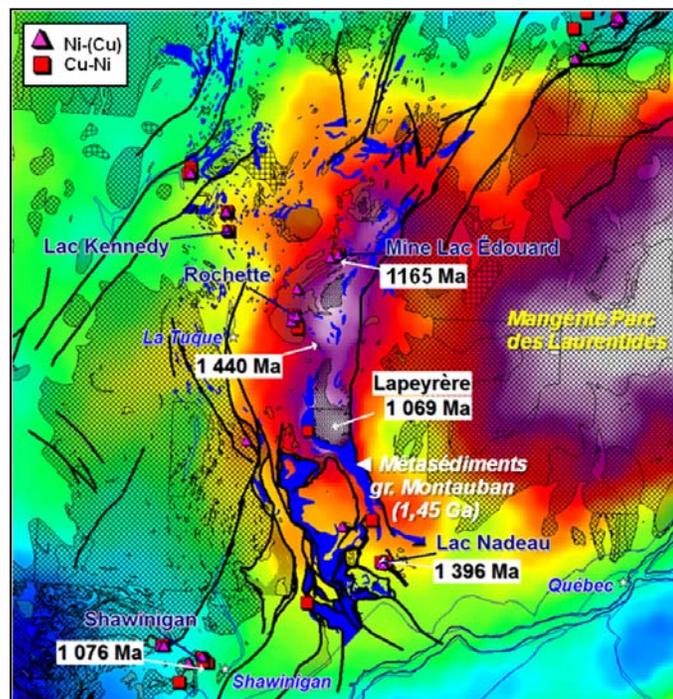


Figure 13. Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) de la région de Portneuf-Mauricie montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions mafiques (dates de Nadeau et van Breemen, 2001 et Sappin et al., 2009).

Sur la Côte-Nord, les anomalies gravimétriques sont disposées à une centaine de kilomètres et symétriquement par rapport au bassin de Wakeham, épousant la géométrie en profondeur du bloc mantellique sous la croûte de Labradoria (**Figures 4, 12 et 14**). Les minéralisations dans le secteur du Lac Volant sont situées en périphérie d'une anomalie de gravité résiduelle positive expliquée par la présence de gabbronorite et de troctolite (**Figure 14**). Une anomalie encore plus importante se situe au cœur de l'Anorthosite de Fournier. La position de cette anorthosite par rapport à une faille régionale de chevauchement est très similaire à celle du Lac Volant (**Figure 14**). Même si pratiquement aucune minéralisation Cu-Ni n'est connue dans ou à la bordure ouest de cette anorthosite, le potentiel pour ce type de minéralisation est considéré significatif compte tenu de la dimension et de l'intensité de l'anomalie gravimétrique. Il est à noter que la résolution des levés gravimétriques dans ce secteur semble donner un niveau de détails plus élevé que sur la plus récente carte géologique (Sharma et Franconi, 1975).

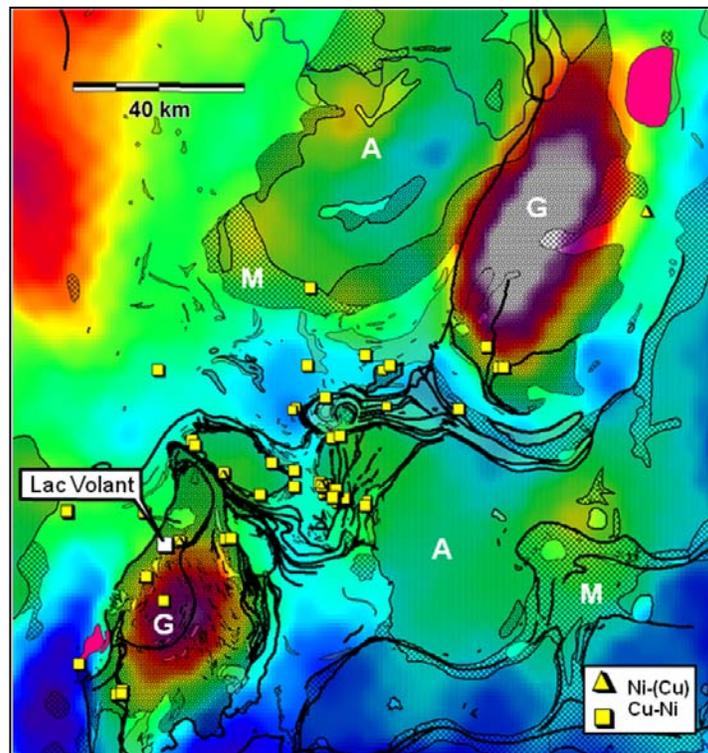


Figure 14. Carte des anomalies isostatiques résiduelles de l'anomalie de Bouguer (données de l'Entrepôt de données géoscientifiques du Canada, 2009b) de la région du Lac Volant sur la Côte-Nord montrant la relation avec les minéralisations Cu-Ni et les intrusions. A: anorthosite, M: mangérite, G: gabbronorite.

Dans le secteur de Portneuf et de la Mauricie, il existe trois épisodes de magmatisme mafique (Nadeau et van Breemen, 2001; Sappin et al., 2009); celui associé au Complexe de La Bostonnais entre 1,41 et 1,38 Ga, celui associé aux plutons de la Mine du Lac Édouard à 1165 Ma, et celui associé à des gabbronorites de la suite de Lapeyrère à 1,07 Ga (**Figure 13**). Le Complexe de La Bostonnais s'est développé dans un contexte de subduction et vraisemblablement pendant la formation d'un arc magmatique (Sappin et al., 2009). Il recoupe la principale phase de déformation qui a affecté le Groupe de Montauban (1,45 Ga; Nadeau et van Breemen, 2001). Les minéralisations en Cu-Ni du Lac Nadeau et Rochette, sont associées à la première phase de magmatisme mafique (Sappin et al., 2004 et 2009). Selon Sappin et al., (2009), l'âge minimal de cristallisation des plutons mafiques et ultramafiques contenant l'ancienne Mine du Lac Édouard est de 1165 Ma. Les fortes anomalies gravimétriques résiduelles au centre de la ceinture sont spatialement associées aux gabbronorites de la suite de Lapeyrère (**Figure 13**). Les intrusions minéralisées de la Mine du Lac Édouard et de l'indice Rochette sont plus anciennes que cette suite mais sont localisées à la marge ouest de cette anomalie gravimétrique

régionale. Ainsi, l'anomalie gravimétrique serait spatialement associée à ces minéralisations Cu-Ni mais ne serait pas contemporaine. Elle pourrait souligner l'expression d'une zone de suture crustale réutilisée par les magmas mafiques lors de l'orogénie grenvillienne.

En résumé, la gravité résiduelle permet d'isoler des anomalies positives correspondant à des intrusions mafiques-ultramafiques de la partie supérieure de la croûte. Ces anomalies sont considérées comme des guides géophysiques régionaux pour l'exploration des minéralisations Cu-Ni. En effet, les régions qui circonscrivent des valeurs gravimétriques anormalement élevées par rapport au bruit de fond régional représentent 28,8 % de la surface du Grenville et contiennent 44,9 % des minéralisations Cu-Ni dont 45,1 % sont des gîtes (**Figure 15**). Les zones où la gravité résiduelle est très élevée sur la **Figure 15** représentent 4,1 % de la surface totale du Grenville au Québec et contiennent 18,0 % des minéralisations Cu-Ni dont 14,6 % des gîtes.

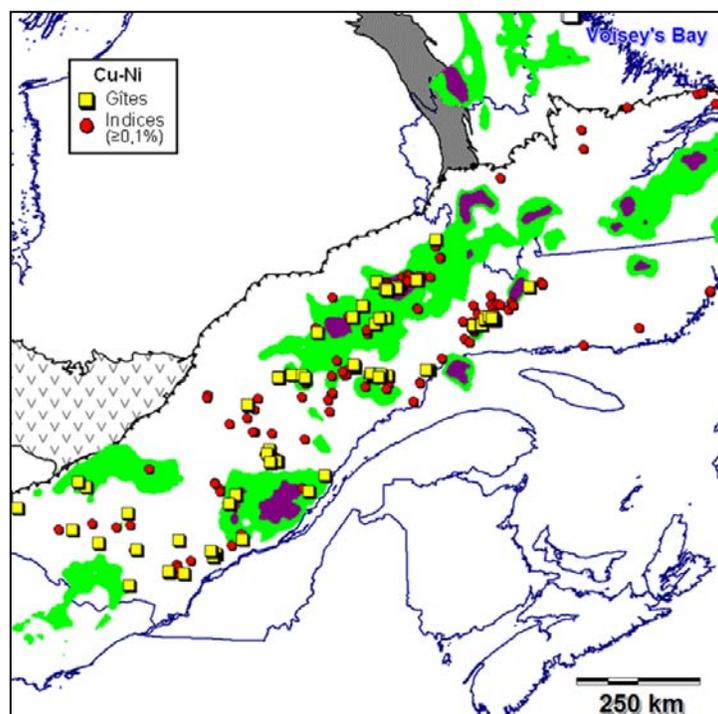


Figure 15. Régions montrant les signatures gravimétriques favorables pour les intrusions mafiques - ultramafiques. Surfaces en vert : supérieur à -10 mGal; surfaces en mauve : supérieur à 10 mGal.

8 GUIDES D'EXPLORATION GÉOLOGIQUE À L'ÉCHELLE DU GRENVILLE

Les fronts métamorphiques sont l'expression de failles majeures qui délimitent des terrains d'âges différents, de métamorphisme discordant, et/ou de styles structuraux contrastés. Les bassins sédimentaires sont généralement bordés par des failles majeures, synchrones ou postérieures à leur formation, comme par exemple des zones de subduction, des failles de décrochement, ou des failles listriques associées à la formation de complexes centraux. Cette étude montre qu'il existe des relations spatiales positives entre les minéralisations Cu-Ni et les fronts métamorphiques ainsi que les limites de bassins métasédimentaires protérozoïques de la Province de Grenville.

8.1 Fronts métamorphiques

Les indices Cu-Ni du Lac Volant et du Haut-Plateau de Manicouagan sont deux exemples de minéralisations localisées sur des fronts métamorphiques (**Figures 16 et 17**) dans l'allochtone du Grenville.

L'indice du Lac Volant est localisé dans un dyke de gabbronorite de 20 m de large daté à 1,35 Ga (Gobeil et al., 1998). Les contacts avec les épontes sont francs et indiquent que la minéralisation s'est mise en place sous un régime tectonique cassant (Perreault et al., 1996). Le dyke est injecté dans des gabbronorites granulitiques du Complexe de Matamec daté à 1,37 Ga (Gobeil et al., 1997). La minéralisation du Lac Volant est située à moins de 5 km à l'est d'une faille à vergence ouest qui chevauche le Complexe de Manitou, un domaine métamorphisé au faciès supérieur des amphibolites (**Figure 16**; Gobeil et al., 2003). Ce front granulitique est présent au sud de l'Anorthosite de Fournier le long du chevauchement NNE. Ce contexte représente une cible intéressante pour des minéralisations s'apparentant à celles du Lac Volant.

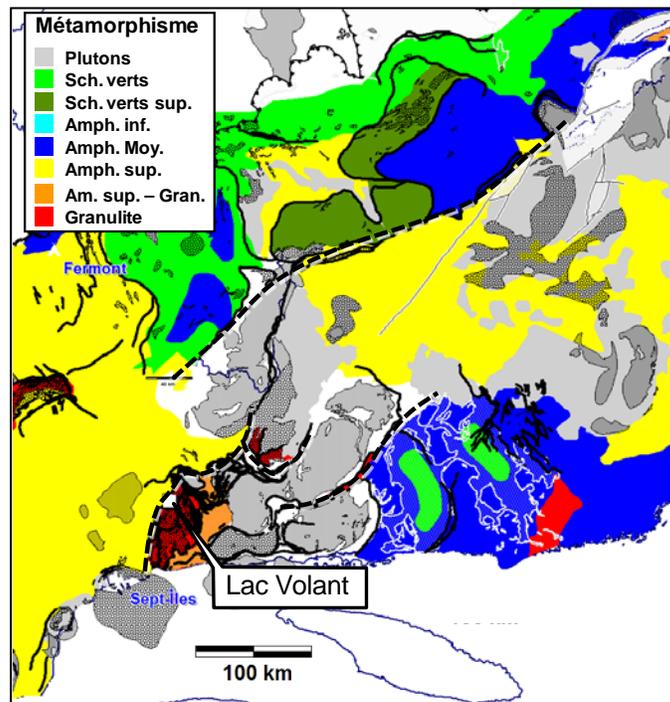


Figure 16. Carte métamorphique de la région de la Côte-Nord selon Gobeil et al., (2003) et selon http://gsc.nrcan.gc.ca/map/tecmet/index_e.php avec les anorthosites et les intrusions mafiques (SIGEOM 2008).

La région du Haut Plateau de Manicouagan est caractérisée par de multiples phases intrusives (1650; 1510; 1460; 1220; 1160 Ma), un métamorphisme et une tectonique polyphasés, et par des jeux complexes de failles ductiles et cassantes (Gobeil et al., 1996; Indares et al., 1998; Indares et Dunning, 2004). Le Complexe métamorphique de Manicouagan est un bloc lithotectonique isolé situé à une jonction triple (**Figure 17**). Il a été métamorphisé aux faciès des granulites durant le Labradorien (1,6 Ga). Il est coïncé entre le Terrain parautochtone de Gagnon, métamorphisé au faciès supérieur des amphibolites, celui de Berthé, également au même faciès, et les terranes éclogitiques de Lelukuau et Tshenukutish (Indares et Dunning, 2004). Une faille de chevauchement limite la partie nord du Complexe de Manicouagan, alors qu'une faille normale listrique borde la limite sud (Eaton et al., 1995). Selon Indares et Dunning (2004), ce complexe se comportait comme un bloc rigide et froid lors de la mise en place des dykes de gabbro à olivine minéralisés vers 1228 Ma et l'emplacement des troctolites du Lac Raudot et de Brien vers 1166 Ma. Les minéralisations sont de trois types. Il y a des minéralisations précoces et synchrones de la mise en place des gabbrogranorites granulitiques, des minéralisations synchrones de la mise en place de certaines intrusions de la Suite de Toulnostouc (minéralisations plus jeunes), et finalement, des minéralisations épigénétiques représentant des remobilisations locales associées à ces deux âges de minéralisations syngénétiques. La minéralisation tardive est contrôlée par des cisaillements, veines, fractures dans les gabbros et les troctolites pas ou peu déformés (Clark, 2000).

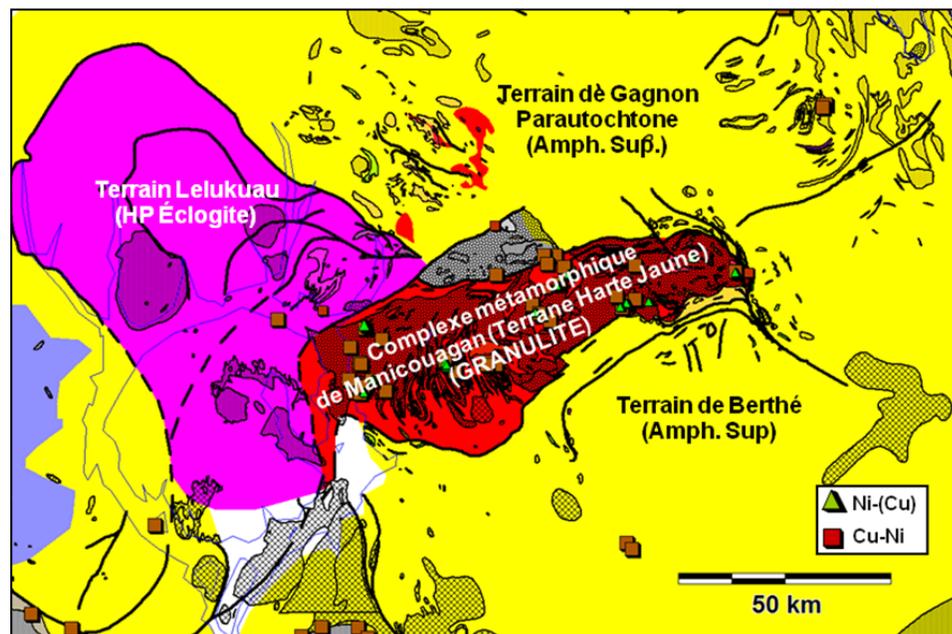


Figure 17. Carte métamorphique de la région du Haut Plateau de Manicouagan selon la carte http://gsc.nrcan.gc.ca/map/tecmet/index_e.php avec les minéralisations et les anorthosites et intrusions mafiques (SIGEOM 2008).

La **Figure 18** montre dans la partie centrale du Grenville les failles connues (SIGEOM 2008) ou interprétées selon la géologie et la géophysique (cette étude) limitant les terrains granulitiques et migmatitiques des domaines moins métamorphisés. On remarque que certains segments de roches granulitiques et migmatitiques forment des bandes quasi continues orientées N-S à angle avec l'orientation globale de la Province de Grenville et NNE-SSO parallèle à la chaîne.

Visuellement, les minéralisations sont principalement situées le long des failles bordières de ces bandes de haut grade métamorphique. Afin de déterminer l'incidence de ces failles sur la présence de

minéralisation, un test statistique de sensibilité des failles en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni a été effectué. L'approche statistique utilisée est celle des probabilités conditionnelles appliquées aux données spatiales (Bonham-Carter, 1994). Cette technique permet de quantifier l'association spatiale entre deux séries de données binaires (A et B). Dans le cas présent, la carte B est une carte binaire des minéralisations de Cu-Ni connues. La carte des failles a ensuite été séparée en différentes classes de valeurs de distance. Chaque classe de valeurs devient alors une carte binaire (multiples cartes A). Chacune de ces cartes binaires (A) peut alors être comparée à celle des minéralisations (B). Le contraste est une mesure de l'association entre les deux cartes binaires (A et B). Il est défini comme étant la différence entre le logarithme naturel de la probabilité conditionnelle de B étant donné A moins le logarithme naturel de la probabilité conditionnelle de B étant donné non-A. Ici, des valeurs de contraste sont donc calculées pour l'association entre la couche des minéralisations (carte B) et chaque classe de la distance aux failles (carte A). Les valeurs du contraste supérieures à 0 indiquent une corrélation spatiale positive entre deux cartes binaires, et cette corrélation est d'autant plus importante si elle s'éloigne de 0. À l'inverse, des contrastes inférieurs à 0 indiquent une corrélation négative.

Le test statistique de sensibilité des failles limitant les domaines granulitiques en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni indique des valeurs de contrastes qui varient entre 0,5 et 1 dans les premiers 10 km (**Figures 18 et 19a**). Ce résultat permet de conclure qu'il y a une relation spatiale positive (pas nécessairement génétique ou temporelle) entre les minéralisations et les failles jusqu'à une distance de 10 km (**Figure 19a**).

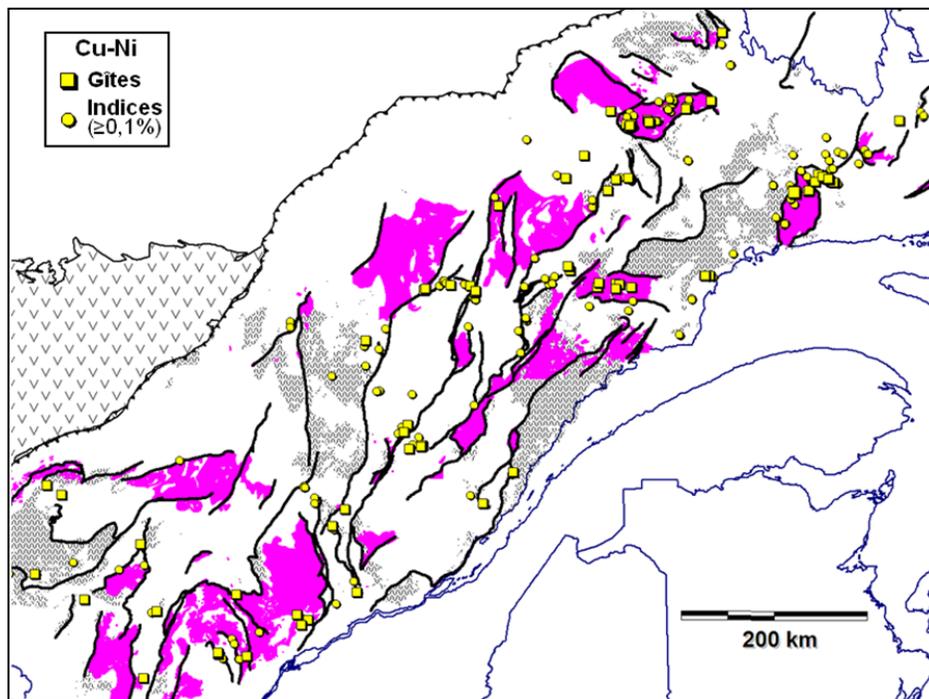


Figure 18. Carte des failles connues (SIGEOM 2008) et interprétées (cette étude) limitant des domaines de haut grade métamorphique avec les minéralisations Cu-Ni. Granulites en mauve et migmatites en trame ondulée (SIGEOM 2008).

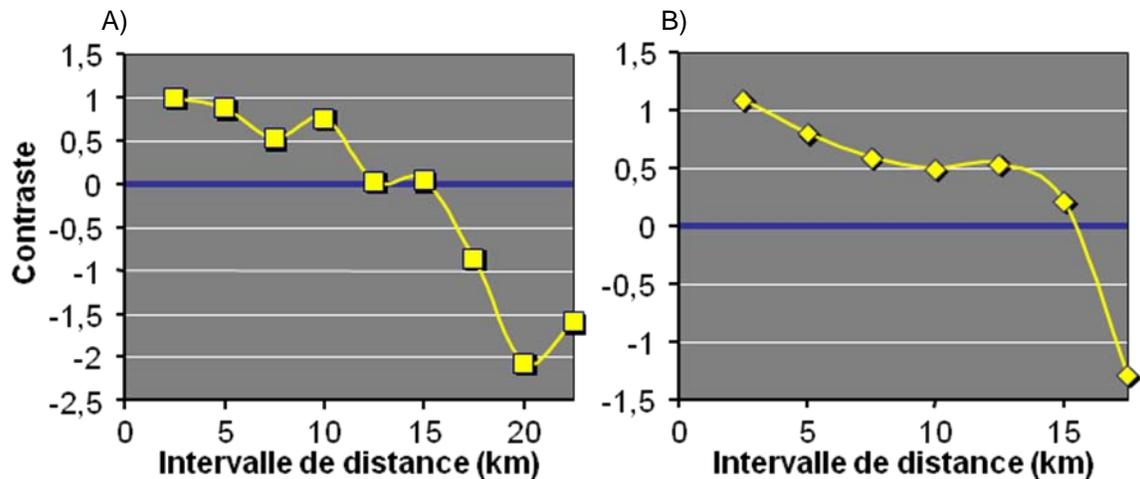


Figure 19. Tests statistiques de sensibilité des failles limitant A) les domaines de haut grade métamorphique et (B) les bassins métasédimentaires en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni. Les valeurs de contraste positives indiquent une corrélation spatiale positive et l'inverse pour les valeurs négatives.

8.2 Limites de bassins métasédimentaires

Les séquences de roches supracrustales (Wakeham, Seal Lake, Montauban, Mont-Laurier) et autres bandes de roches métasédimentaires et volcaniques (quartzites et paragneiss) dans l'Allochtone du Grenville se regroupent également en entités cohérentes pour former des bandes ou des groupes de bandes bordées par des failles (**Figure 20**).

Dans la partie est du Grenville, le Groupe de Seal Lake au Labrador (1,25 Ga; Romer et al., 1995) et le Supergroupe de Wakeham (1,55 Ga; Larbi, 2003) au Québec ont une orientation globalement NNO-SSE. Cette orientation est similaire au corridor minéralisé en Cu-Ni au Labrador à l'intérieur duquel la Mine de Voisey's Bay est localisée (**Figure 20**). Mis à part les minéralisations Cu-Ni autour de l'Anorthosite du Lac St-Jean, les indices et gîtes de Cu-Ni sont spatialement associés à des bandes métasédimentaires. C'est le cas dans le sud du Grenville au Québec où les minéralisations sont localisées dans la Ceinture volcano-sédimentaire de Portneuf ou en bordure du Bassin de Mont-Laurier et dans son extension possible vers l'est, à l'est de l'Anorthosite de Morin.

Le test statistique de sensibilité des failles bordant les bassins sédimentaires en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni montre clairement qu'il y a une corrélation positive jusqu'à une distance de 15 km des failles (**Figure 19b**). En effet, les valeurs de contraste varient dans cet intervalle de distance entre 1,1 et 0,5.

En résumé, les relations spatiales positives entre les minéralisations Cu-Ni et les failles limitant des domaines métamorphiques de haut grade ou des bassins métasédimentaires semblent démontrer que les magmas mafiques-ultramafiques et les minéralisations Cu-Ni associées se mettent en place dans des zones de failles crustales. Plusieurs minéralisations syngénétiques anciennes (pré-grenviliennes) sont localisées le long de failles pour la plupart grenviliennes. Le lien spatial qui est établi ici suggère que les failles majeures sont des structures crustales réactivées et réutilisées sur de longues périodes de temps par les magmas mafiques.

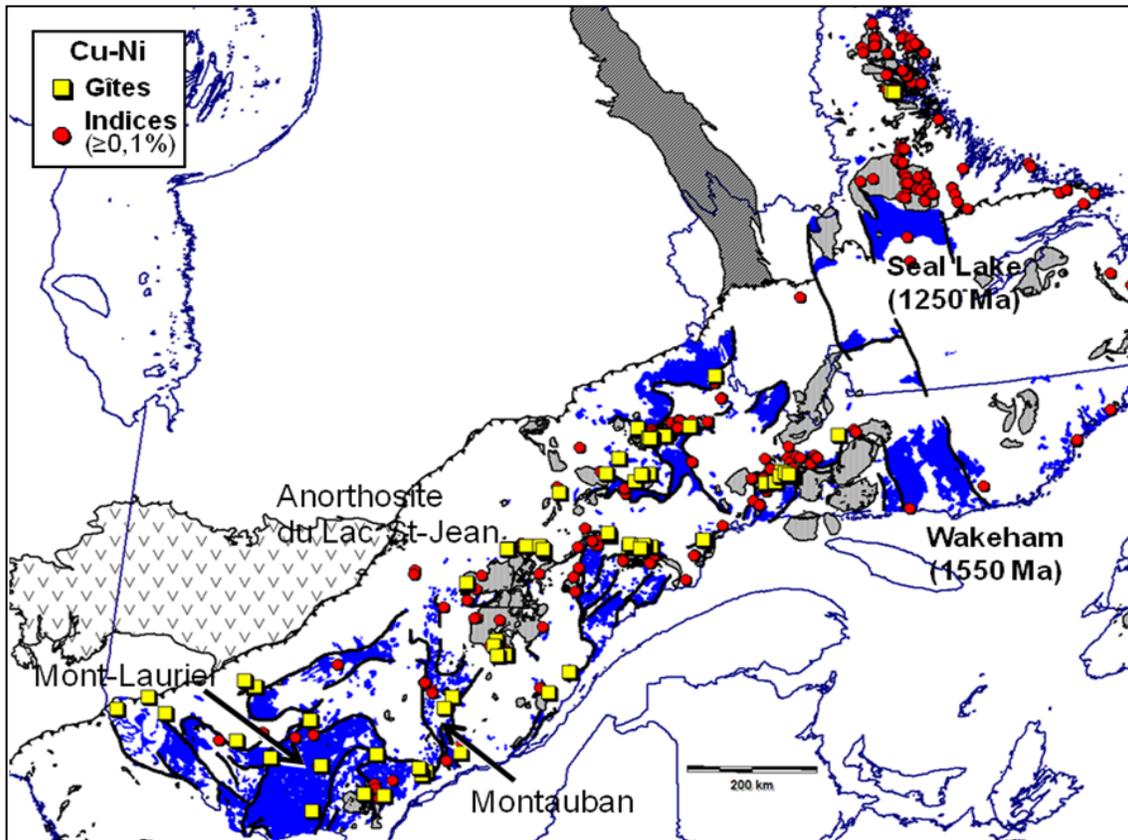


Figure 20. Carte de failles connues (SIGEOM 2008) et interprétées (cette étude) limitant des bassins métasédimentaires et autres roches supracrustales (en bleu) avec les minéralisations Cu-Ni.

8.3 Relations spatiales entre les gîtes Cu-Ni et anorthosites, troctolites, gabbro et gabbronorites

Les minéralisations Cu-Ni du Grenville sont contemporaines et localisées dans des intrusions mafiques et ultramafiques (Clark, 1998). Ces intrusions sont associées spatialement de près ou de loin aux AMCG. Par exemple, les indices et gîtes de Cu-Ni-Co au nord du Lac Saint-Jean (McNickel et Châte-des-Passes entre autres) sont disposés essentiellement en bordure du massif anorthositique du même nom. D'autres minéralisations génétiquement liées aux anorthosites sont plus distales par rapport aux massifs. Il s'agit par exemple de celles associées aux troctolites du Complexe de la Blache, aux gabbronorites granulitiques du Complexe du Haut Plateau de Manicouagan, ou aux gabbronorites métamorphisées du Complexe de Matamec (Lac Volant). D'autres minéralisations sont localisées dans des massifs de gabbro isolés dans la Suite intrusive de Shabogamo (Clark, 1998).

Afin d'établir s'il y a un lien spatial entre les minéralisations et les trois principaux groupes d'intrusions (anorthosites, gabbronorites-troctolites, et gabbros), des tests statistiques de sensibilité en fonction de la distance des intrusions aux gîtes et indices de Cu-Ni sont réalisés (**Figure 21**). Le test fait par rapport aux anorthosites montre qu'il existe une corrélation positive entre les minéralisations et les intrusions jusqu'à une distance de 25 km (**Figure 21a**). Cependant, les meilleures corrélations se situent entre 2,5 et 10 km avec des valeurs de contraste entre 0,7 et 1,5. La superficie totale de toutes les anorthosites et de leur

zone tampon de 10 km de largeur représente 26,6 % du territoire du Grenville au Québec (**Figure 22**). Dans cette superficie, 64,3 % des indices et gîtes Cu-Ni sont dénombrés, ce qui indique un fort potentiel pour ces régions.

Le test statistique de sensibilité des gabbros en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni montre des valeurs de contrastes qui oscillent autour de 1 jusqu'à 12,5 km des intrusions, après quoi la corrélation demeure positive mais moins forte jusqu'à 25 km (**Figure 21b**). La surface totale formée par les intrusions gabbroïques et leur zone tampon de 12,5 km représente 32,5 % du Grenville au Québec (**Figure 23**). Au total, 82,9 % des minéralisations Cu-Ni se retrouvent à l'intérieur de cette région, indiquant également que les gabbros et leur pourtour sont favorables pour l'exploration.

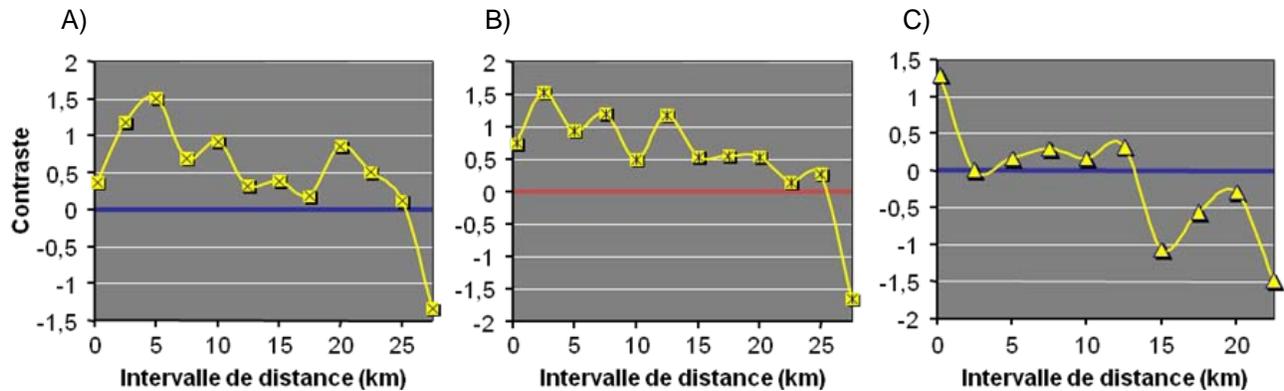


Figure 21. Tests statistiques de sensibilité des : A) anorthosites, B) gabbros et C) des gabbro-norites en fonction de la distance aux gîtes Cu-Ni. Les valeurs de contraste positives indiquent une corrélation spatiale positive et l'inverse pour les valeurs négatives.

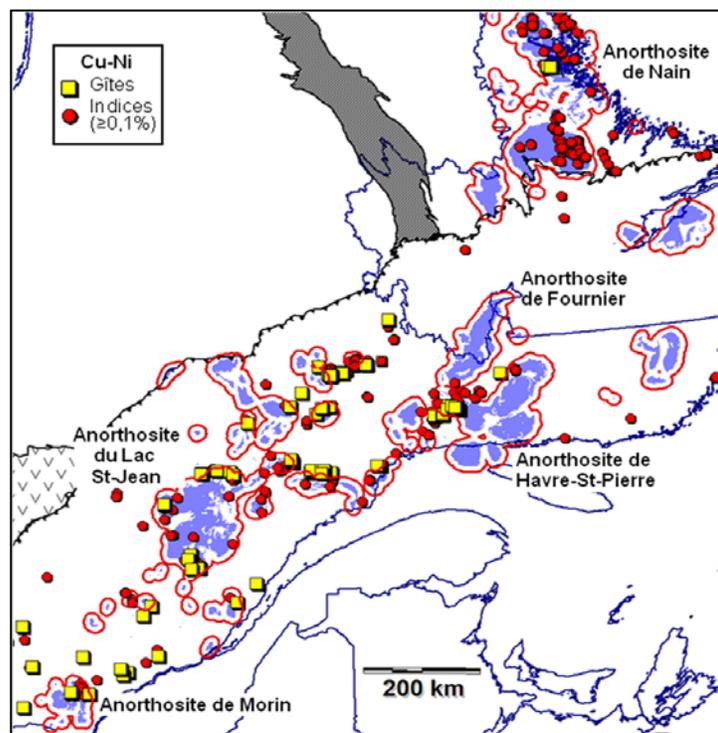


Figure 22. Zones de 10 km (ligne en rouge) de largeur autour des anorthosites (en bleu) qui représentent 26,6 % de la surface totale du Grenville du Québec. Distance de 10 km établie selon le test statistique de proximité avec les minéralisations Cu-Ni (Figure 21A).

Finalement, le test de proximité pour les gabbronorites-troctolites indique que ce sont les bordures immédiates (<1 km) qui sont les plus favorables pour les minéralisations Cu-Ni, avec une valeur de contraste de 1,3 (**Figure 21c**). Après 1 km, il n'existe aucune relation significative (valeurs autour de 0). Il y a une corrélation négative entre les intrusions et les minéralisations au-delà de 15 km. La surface des gabbronorites et troctolites ainsi que leur bordure de 0,5 km représente 6,6 % de la surface du Grenville et contient 45,6 % des minéralisations Cu-Ni dont 52,4 % des gîtes (**Figure 24**). Cette faible superficie devient par conséquent des régions à un fort potentiel.

En résumé, les tests de proximité démontrent statistiquement que les gabbros et les gabbronorites-troctolites dans le Grenville sont plus favorables pour les minéralisations Cu-Ni par rapport aux anorthosites.

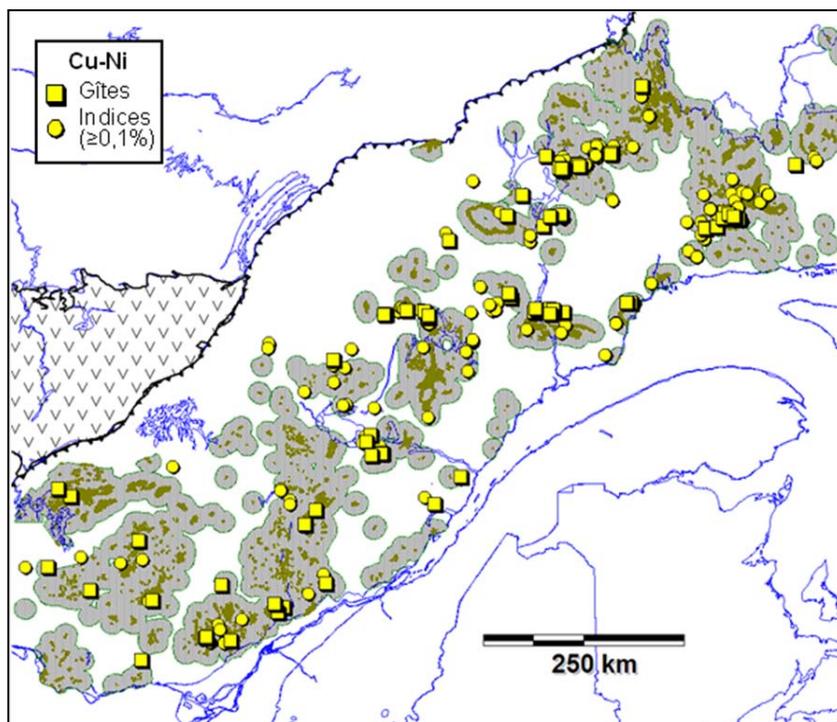


Figure 23. Zones de 12,5 km (surface ombragée) de largeur autour des gabbros différenciés (en vert) qui représentent 35,2 % de la surface total du Grenville du Québec. Distance de 12,5 km établie selon le test statistique de proximité avec les minéralisations Cu-Ni (Figure 21B).

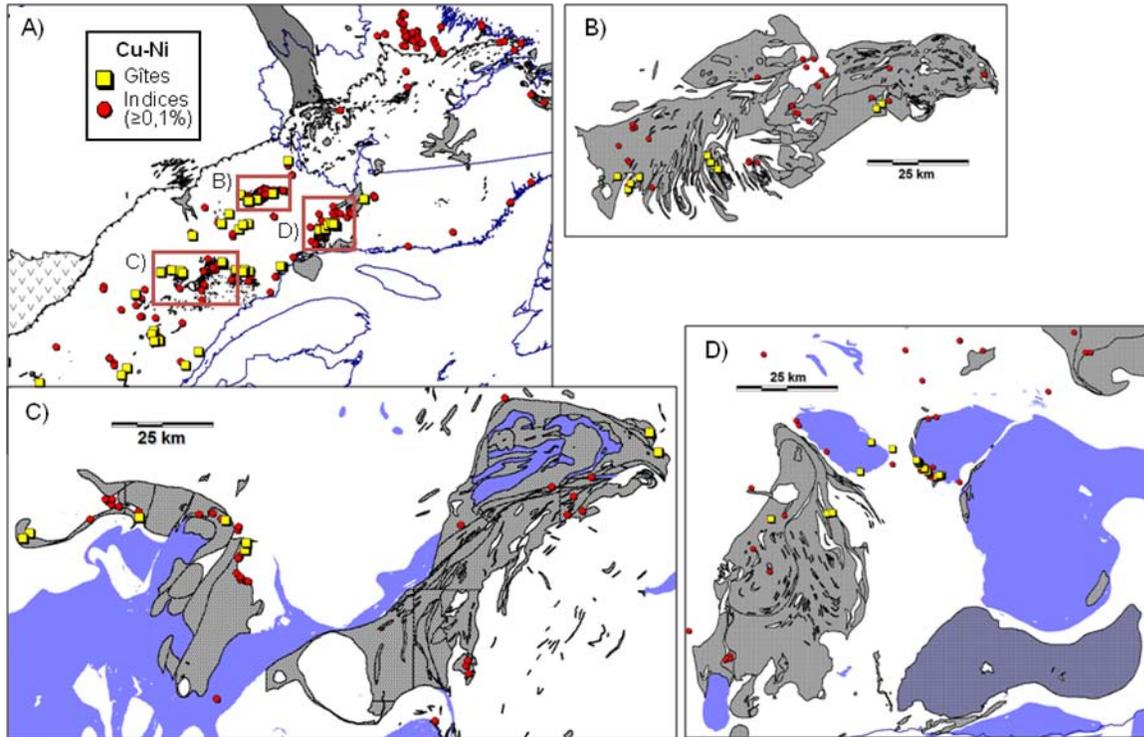


Figure 24. A) Les minéralisations Cu-Ni dans le Grenville sont localisées dans et à la bordure immédiate des gabbronorites et des troctolites (trame grise), anorthosite en bleu. B) Complexe métamorphique du Haut-Plateau de Manicouagan, C) Complexe du Lac de la Blache, et D) Complexe de Matamec.

9 MODÈLE DE FAVORABILITÉ ET CIBLES D'EXPLORATION RÉGIONALE POUR LE CU-NI

Les objets géologiques et géophysiques du Grenville présentés précédemment montrent chacun à leur manière des relations spatiales positives avec les minéralisations de type Cu-Ni magmatique. L'intégration verticale par addition de couches reconnues comme étant favorables permet de créer un modèle de favorabilité simple pour ce type de minéralisation. Le **tableau I** résume les couches utilisées et leurs justifications.

Tableau I : Caractéristiques des couches utilisées pour le modèle de favorabilité

Couches	Zone tampon (km)	Raisons
Géophysique		
Tomographie sismique, gradient vertical à 125 km, zones de vitesses sismiques	100	Structures mantelliques à la profondeur inférée de formation des magmas mafiques
Épaisseur de la croûte, intervalle de 39 à 44 km	n.a.	Rupture, faille translithosphérique au niveau du Moho
Gravité résiduelle régionale élevée, valeurs supérieures à -10 mGal	n.a.	Domaines de roches mafiques-ultramafiques
Gravité résiduelle locale très élevée, valeurs comprises à 10 mGal	n.a.	Masses importantes de gabbro-norites-troctolites
Géologique		
Fronts granulitiques	10	Failles crustales majeures
Limites de bassins métasédimentaires	10	Failles crustales majeures
<i>Lithologies favorables</i>		
Anorthosites	10	
Gabbros indifférenciés	12,5	
Gabbro-norites-troctolites	0,5	

Le modèle de favorabilité est constitué au total de 9 couches d'information (**Tableau I**). Une approche booléenne par cumul d'indices est utilisée, c'est-à-dire que pour chaque couche, une valeur unitaire de 1 a été attribuée aux régions favorables, selon les critères résumés dans le **Tableau I**, et une valeur de 0 pour les zones situées à l'extérieur de ces régions. La valeur maximale de 9 sur la carte de favorabilité représente les endroits où toutes les conditions positives sont réunies (voir échelle de couleurs sur la légende de la **Figure 25**).

La carte de favorabilité permet d'établir des priorités d'exploration. Les cibles de première priorité, au nombre de 10, correspondent aux régions où une valeur de 9 est calculée (en mauve foncé sur la **Figure 25**). Les cibles de deuxième priorité, représentent les endroits où 8 critères favorables sur 9 sont présents sur la même cellule (régions en mauve). Enfin, les cibles de troisième priorité, sont des secteurs où il y a 7 critères favorables sur 9 (régions en rouge). Au total, 122 régions sont donc proposées pour l'ensemble de la Province de Grenville au Québec (**Figure 25**).

Les secteurs les plus favorables pour l'exploration (priorité 1 et 2) sont localisés au centre de la Province de Grenville selon une orientation NNE-SSO. Ces secteurs sont disposés à des intervalles réguliers d'environ 200 km. Le Complexe de Manicouagan montre un excellent potentiel, mais celui-ci se limite au complexe lui-même (pas d'extension). La périphérie de l'Anorthosite du Lac Tétépisca offre également un bon potentiel, particulièrement à sa bordure sud.

Une autre région d'intérêt se situe sur la Côte-Nord. Il s'agit d'une bande favorable orientée NE-SO qui passe par la région du Lac Volant et qui longe l'Anorthosite de Fournier (**Figure 25**). Des cibles de priorité 1 et 2 sont également présentes près de la frontière Québec-Labrador.

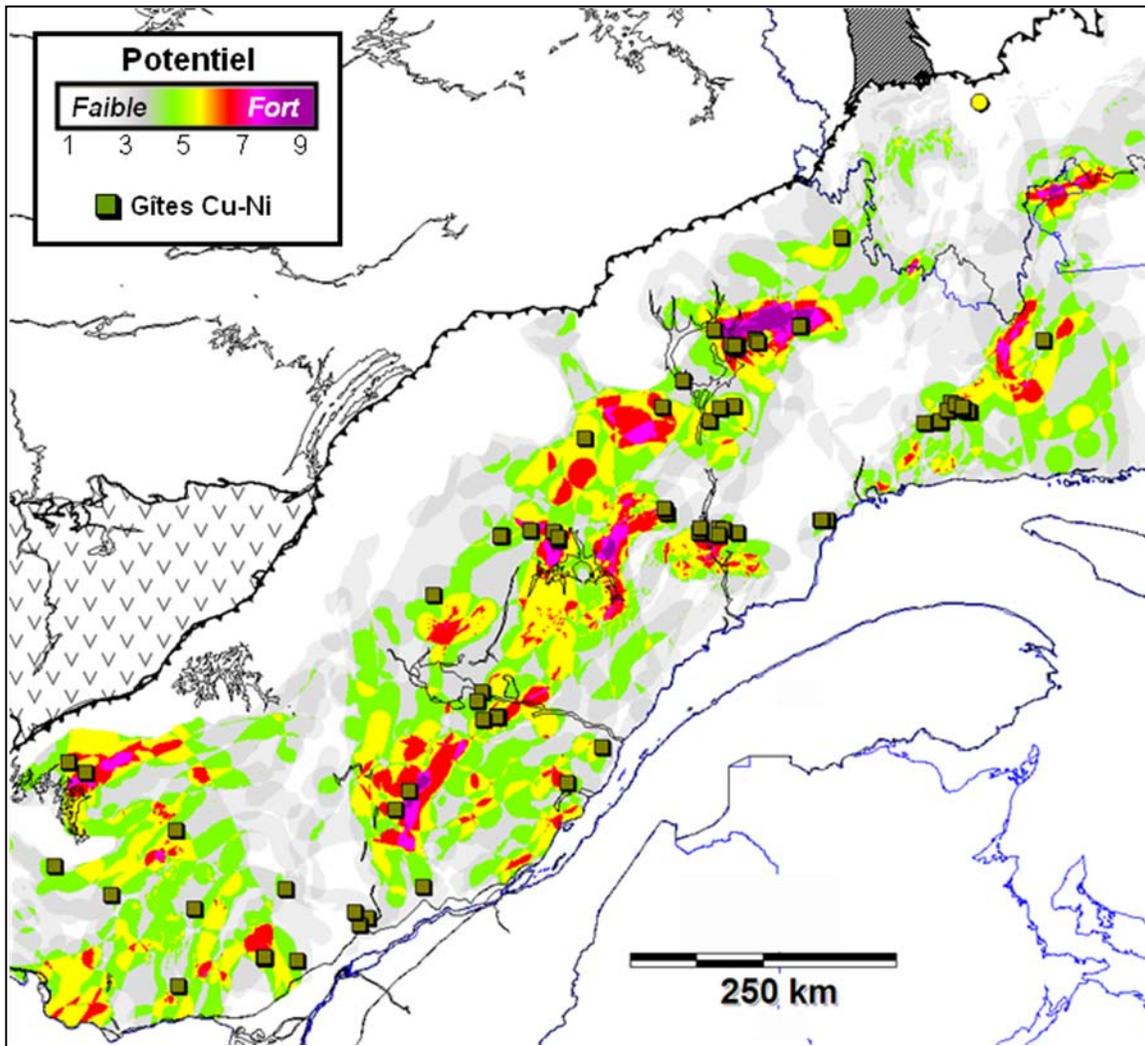


Figure 25. Carte de favorabilité pour les minéralisations de Cu-Ni-(ÉGP-Co) dans le Grenville selon l'addition des 9 couches d'informations favorables présentées sur le Tableau I.

10 CONCLUSION

Cette étude supporte l'hypothèse d'un lien spatial, pas nécessairement temporelle ou génétique, entre des structures crustales et mantelliques et les minéralisations Cu-Ni-(ÉGP) associées aux intrusions mafiques et ultramafiques dans le Grenville du Québec.

Les complexes anorthositiques dans le Grenville sont localisés au-dessus et à la bordure de deux domaines mantelliques de vélocité sismique rapide. Le premier correspond vraisemblablement à la racine cratonique archéenne de la Province de Supérieur (Anorthosite du Lac Saint-Jean) et le second probablement à la racine mantellique d'un microcontinent (archéen ?) ou de la racine protérozoïque de Labradoria (Anorthosites de la Côte-Nord). Les deux régions où il n'y a pas d'anorthosite correspondent à des domaines de vélocité sismique plus lente. Un de ces domaines correspond à la racine archéenne de l'Abitibi qui se prolonge sous une partie du Grenville et l'autre possiblement au vestige de la racine de la ceinture trans-hudsonienne de la Fosse du Labrador. Les bordures de ces domaines tomographiques correspondent en surface à des failles régionales majeures. La présence d'anorthosites pourrait d'abord être liée à une composition particulière du manteau (appauvri?) sous-jacent. Les frontières de blocs mantelliques pourraient être des zones favorables le long desquelles les magmas auraient été générés et acheminés au niveau de la croûte moyenne ou supérieure. La composante résiduelle de la gravité est une donnée géophysique importante pour la reconnaissance des intrusions mafiques en surface.

Les discontinuités à la base de la croûte telles que reconnues sous le gisement de Voisey's Bay sont présentes sous le Haut-Plateau de Manicouagan. Cependant, les données de profondeur du Moho sous le Grenville sont actuellement trop fragmentaires pour reconnaître d'autres discontinuités similaires.

Les minéralisations Cu-Ni montrent des associations spatiales positives avec les failles qui délimitent des domaines métamorphiques (granulites-amphibolites) et dans une moindre mesure avec les failles bordant des bassins métasédimentaires. Même si les anorthosites et les gabbros montrent une relation spatiale positive avec les indices et les gîtes de Cu-Ni, principalement entre 5 et 10 km de leurs bordures, il est démontré statistiquement que ce sont les bordures immédiates aux gabbro-norites et aux troctolites qui sont les plus intéressantes pour l'exploration.

La correspondance verticale entre certaines régions du manteau et la majorité des massifs anorthositiques du Grenville indique que la tectonique horizontale et le découplage possible de la croûte par rapport au manteau lithosphérique pendant l'orogénie grenvillienne auraient été négligeables par rapport à la résolution des données tomographiques et de l'échelle considérée (dizaine ou vingtaine de kilomètres comme ordre de grandeur). Le meilleur exemple présenté ici est la correspondance verticale entre la Faille de Saint-Fulgence au Saguenay, une faille verticale de décrochement, et l'anomalie de forte vélocité sismique en profondeur dans le manteau (**Figure 3**). Dans le cas de chevauchements comme sur la Côte-Nord (réf. Lac Volant), des déplacements non négligeables ont pu se produire et expliquer le décalage entre l'architecture du manteau sous-jacent à la position actuelle des minéralisations.

Un modèle prédictif d'exploration régionale pour les minéralisations Cu-Ni dans le Grenville est présenté dans ce rapport. Malgré une province géologique complexe, le modèle de favorabilité est basé sur une approche conceptuelle simple qui tient compte des corrélations positives entre les minéralisations, la géologie et la géophysique. Plusieurs cibles de qualité pour l'exploration ont été générées à partir de ce modèle.

REMERCIEMENTS

Je remercie chaleureusement Thomas Clark, retraité du Ministère des Ressources naturelles et Faune (MRNF), pour la lecture critique de ce rapport et ses commentaires éclairants et constructifs. Merci également à Réal Daigneault (UQAC), Serge Perreault (Soquem) et Léopold Nadeau (CGC) pour leurs discussions fructueuses au cours du projet, à Sylvain Lacroix, Charles Roy et Daniel Lamothe (MRNF) pour l'accès aux plus récentes informations géologiques, ainsi qu'à Geneviève Boudrias pour la mise en page et les corrections du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Arndt, N. T. Leshner, C.M. et Czamanske, G.K., 2005. Mantle-Derived Magmas and Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, p. 5-24.
- Ashwal, L.D., 1993. *Anorthosites*. Springer-Verlag, Berlin, 422 p.
- Ashwal L.D. et Wooden, J.L., 1983. Isotopic evidence from the eastern Canadian shield for geochemical discontinuity in the Proterozoic mantle. *Nature* 306: 679-680.
- Barnes S.J. et Lightfoot, P.C. 2005. Formation of Magmatic Nickel Sulfide Ore Deposits and Processes Affecting Their Copper and Platinum Group Element Contents. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, p. 179-214.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic information systems for geoscientists*. Computer Methods in the Geosciences, Volume 3. Pergamon Press, Oxford, 398 p.
- CGC 2009 (en préparation). La carte tectono-métamorphique du Bouclier canadien. Carte préliminaire pour le Grenville au 1:2,000,000. Commission Géologique du Canada. (http://gsc.nrcan.gc.ca/map/tecmet/index_f.php).
- Clark, T., 1998. Un aperçu du potentiel du Grenville québécois pour des Gîtes de Ni-Cu±Co±ÉGP. MRN, Service géologique de Québec, PRO 98-01, 10 pages.
- Clark, T., 2000. Le potentiel en Cu-Ni±Co±ÉGP du Grenville québécois: exemples de minéralisations magmatiques et remobilisées: *Chronique de la Recherche minière*, 539, p. 85-100.
- Corrigan, D., et Hanmer, S., 1997. Anorthosites and related granitoids in the Grenville orogen: a product of convective thinning of the lithosphere? *Geology*, v. 25, no. 1, p. 61-64.
- Corriveau, L., Perreault, S., et Davidson, A., 2007. Prospective metallogenic settings of the Grenville Province, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 819-847.
- Davidson, A., 1998. Geological map of the Grenville Province, Canada and adjacent parts of the United States of America: Geological Survey of Canada, Map 1947A, scale 1:2,000,000.
- Dickin A.P., 2000. Crustal formation in the Grenville Province: Nd-isotope evidence. *Can. J. Earth Sci.* 37: 165-181.
- Duchesne, J.-C., Liegeois, J.P., Vander Auwera, J., et Longhi, J., 1999. The crustal tongue melting model and the origin of massive anorthosites: *Terra Nova*, v. 11, p. 100-105.
- Eaton, D.W., Hynes, A. Indares, A. et Rivers, T., 1995. Seismic images of eclogites, crustal-scale extension, and Moho relief in the eastern Grenville province, Quebec. *Geology*, 23: 855-858.
- EDG (Entrepôt de données géoscientifiques), 2009a. Base canadienne de données aéromagnétiques, Section de la géophysique régionale, CGC - Division du Centre du Canada, Commission géologique du Canada, Secteur des sciences de la Terre, Ressources naturelles Canada.

- EDG (Entrepôt de données géoscientifiques), 2009b. Système canadien d'information géodésique, Section gravimétrie et réseaux géodésiques, Division des levés géodésiques, Géomatique Canada, Secteur des sciences de la Terre, Ressources naturelles Canada.
- Emslie, R.F., 1975. Pyroxene megacrysts from anorthositic rocks; new clues to the sources and evolution of the parent magmas. *Mineralogical Association of Canada. The Canadian Mineralogist*, May 1975; v. 13; no. 2; p. 138-145
- Faure, S., 2007. Outils prévisionnels d'exploration dans les terrains de hauts grades métamorphiques; le parautochtone grenvillien, une zone à fort potentiel. Rapport technique disponible sur www.consorem.ca. 33 p.
- Forte, A.M., et Perry, H.K.C., 2000. Geodynamic evidence for a chemically depleted continental tectosphere: Science, 290: 1940-1944.
- Francis, D., Scowen, P., Panneton, G. et Doig, R., 2000. Contrasting Si-saturation in troctolite-anorthosite intrusions along the Manicouagan corridor of the Abitibi-Grenville transect. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37: 271-289.
- Gauthier, M., et Chartrand, F., 2005. Metallogeny of the Grenville Province revisited: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 42, p. 1719-1734.
- Gauthier, M., Gardoll, S., et Duchesne, J.-C., 2004. Quest for palladium: Application of the Groves hypothesis to Precambrian terranes of northeast North America: *Geology*, v. 32, p. 593-596.
- Geoscience Resource Atlas, 2009. Government of Newfoundland and Labrador, Natural Resources, Geological Survey. (<http://gis.geosurv.gov.nl.ca/resourceatlas/viewer.htm>).
- Gobeil, A., Clark, T., et David, J. 1996. Nouvelles données géochronologiques U-Pb dans l'intrusion métamorphique de Manicouagan. Dans LITHOPROBE Projet Abitibi-Grenville, Atelier 96, Résumé des présentations, p.14.
- Gobeil, A., Chevé, S., Clark, T., David, J., Machado, N., et Dion, D.J., 1997. Le projet Manitou :  tat des connaissances géologiques et m talog niques. Dans Séminaire d'information sur la recherche géologique, programme et résumés, 1997, Ministère des Ressources naturelles, Québec, DV 97-03, page 13.
- Gobeil, A. Chevé, S. Clark, T. David, J. et Machado, N., 1998. Le projet Manitou: de nouvelles données géologiques, géochronologiques et structurales dans le Grenville. Association Géologique du Canada – Association Minéralogique du Canada, 23 : A-66.
- Gobeil, A., Brisebois, D., Clark, T., Verpaelst, P., Madore, L., Wodicka, N., et Chevé, S., 2003. Géologie de la moyenne Côte-Nord. Dans Géologie et ressources minérales de la partie est de la Province de Grenville, Brisebois, D. et Clark, T. coordonnateurs. Ministère des Ressources naturelles, Québec. DV 2002-03, p. 9-58.
- Godey, S., Snieder, R., Villasenor, A., et Benz, H.M., 2003. Surface wave tomography of North America and the Caribbean using global and regional broad-band networks: phase velocity maps and limitations of ray theory: *Geophysical Journal International*, 152: 620-632.
- Gower, C.F., Erdmer, P. et Wardle, R. J. 1986. The Double Mer Formation and the Lake Melville rift system, eastern Labrador. *Can. J. Earth Sci.* 23: 359–368.
- Hall, J., Loudon, K. E., Funck, T., et Deemer, S., 2002. Geophysical characteristics of the continental crust along the Lithoprobe Eastern Canadian Shield Onshore–Offshore Transect (ECSOOT): a review. *Can. J. Earth Sci.* 39: 569–587.

- Hébert, C. et Lacoste, P. 1998a. Géologie de la région de Jonquière-Chicoutimi (SNRC 22D/06). Géologie Québec, Service géologique de Québec, 32 p.
- Hébert, C. et Lacoste, P. 1998b. Géologie de la région de Bagotville (SNRC 22D/07). Géologie Québec, Service géologique de Québec, 22 p.
- Hynes, A., Indares, A. Rivers, T., et Gobeil, A., 2000. Lithoprobe line 55: integration of out-of-plane seismic results with surface structure, metamorphism, and geochronology, and the tectonic evolution of the eastern Grenville Province. *Can. J. Earth Sci.* 37: 341–358.
- Indares, A., Dunning, G. Cox, R., et Gale, D., 1998. High-pressure, high-temperature rocks from the base of thick continental crusts: Geology and age constraints from the Manicouagan Imbricated Zone, eastern Grenville Province. *Tectonics*, 17 : 426-440.
- Indares, A., et Dunning, G., 2004. Crustal architecture above the high-pressure belt of the Grenville Province in the Manicouagan area: new structural, petrologic and U–Pb age constraints. *Precambrian Research* 130: 199–228.
- Larbi, Y., 2003. Caractérisation géochimique (éléments majeurs et éléments en traces), traçage isotopique (sm-nd, lu-hf) et géochronologie (Pb-Pb,U-Pb) du Groupe de Wakeham, NE Québec: bassin sédimentaire protérozoïque dans la province de Grenville. Thèse de Doctorat UQAM, 138 p.
- Leshner, C.M., Wilton, D.H.C., Lightfoot, P.C., et Evans-Lamswood, D. (éditeurs), 2008. Geology of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co Deposit, Guidebook to Field Trip B1, Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada – Joint Annual Meeting, Québec 2008, 98 pp.
- Martignole, J. et Schrijver, K., 1970. Tectonic significance and evolution of the Morin anorthosite, Grenville Province, Quebec. *Bull. Geol. Soc. Finland*, 42: 165-209.
- Martin C. et Dickin A.P., 2005. Styles of Proterozoic crustal growth on the southeast margin of Laurentia: evidence from the central Grenville Province northwest of Lac St.-Jean, Quebec. *Can. J. Earth Sci.* 42: 1643–1652.
- Myers, J.S., Voordouw, R.J., et Tettelaar, T.A., 2008. Proterozoic anorthosite-granite Nain batholith : structure and intrusion processes in an active lithosphere-scale fault zone, northern Labrador. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45: 909-934.
- Nabil, H., 2000. Caractérisation de la minéralisation en Ni-Cu-Co de l'indice de Lac-Volant, région de Sept-Îles, Québec. Mémoire de Maîtrise UQAC, 178 p.
- Nadeau, L. et van Breemen, O. 2001. U-Pb zircon and regional setting of the Lapeyère gabbro-norite, Portneuf-Mauricie region, south-central Grenville Province, Quebec. *Geological Survey of Canada, Current Research* 2001-F6, 20 p.
- OGS (Ontario Geological Survey), 2006. 1:250 000 scale bedrock geology of Ontario. Sudbury, Ontario. (http://www.geologyontario.mndm.gov.on.ca/mndmaccess/mndm_dir.asp?type=pub&id=MRD126)
- Perreault, S., Clark, T., Gobeil, A., Chevé, S., Dion, D.J., Corriveau, L., Nabil, H. et Lortie, P., 1996. Le potentiel en Cu-Ni-Co de la région de Sept-Îles : l'indice du lac Volant. Ministère des Ressources naturelles, Québec, PRO 96-06, 12 pages.
- Perry, H.K.C., Eaton D.W.S. et Forte A.M., 2002. LITH5.0: a revised crustal model for Canada based on Lithoprobe results. *Geophys. J. Int.* , 150 : 285–294.

- Romer, R.L. Schärer, U. Wardle, R.J. et Wilton, D.H.C., 1995. U–Pb age of the Seal Lake Group, Labrador : relationship to Mesoproterozoic extension-related magmatism of Laurasia. *Can. J. Earth Sci.* 32: 1401–1410.
- Ryan, B., Wardle, R., Gower, C. et Nunn, G., 1995. Nickel-copper-sulfide mineralization in Labrador : the Voisey Bay discovery and its exploration implications. Newfoundland Department of Natural Resources, Geological Survey, Current Research, Report 95-1, pages 177-204.
- Sappin, A.A., Constantin, M., Clark, T. et van Breemen, O. 2004. Géologie des indices de Ni-Cu-EGP des lacs Nadeau et Long, Région de Portneuf. Ministère des Ressources naturelles de la Faune et des Parcs, Québec. RP 2004-03, 11 p.
- Sappin A.A., Constantin, M., Clark, T. et 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, Québec. *Can. J. Earth Sci.* 46: 331-353.
- Schruben, P.G., Arndt, Raymond E., Bawiec, W.J., 1994. Geology of the Conterminous United States at 1 : 2,500,000 Scale - A Digital Representation of the 1974 P.B. King and H.M. Beikman Map: U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-11, scale 1:2500000.
- Sharma, K.N.M. et Franconi, A. 1975. Région des rivières Magpie, Saint-Jean, Romaine. Ministère des Richesses Naturelles, Rapport Géologique 163, 73 p.
- Vaillancourt, C. 2001. Étude géochimique et économique de la suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami, Saguenay-Lac St-Jean, Québec. Maîtrise Université du Québec à Chicoutimi, 204 p.
- Wardle, R.J., Gower, C.F., Ryan, B., Nunn, G.A.G., James, D.T., et Kerr, A., 1997. Geological Map of Labrador; 1:1 million scale. Government of Newfoundland and Labrador, Department of Mines and Energy, Geological Survey, Map 97-07.