
Fertilité des intrusions mafiques et ultramafiques pour les minéralisations Cu-Ni

PROJET 2008-11

PAR : HUGUES LONGUEPEE ET LUCIE MATHIEU

2014



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 :

Longuépée, H. et Mathieu, L. 2014. Fertilité des intrusions mafiques et ultramafiques pour les minéralisations Cu-Ni. Rapport du projet CONSOREM 2008-11, 40 pages.

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

Ce projet vise à distinguer les intrusions magmatiques mafiques à ultramafiques dites « fertiles » parce qu'elles renferment des gisements magmatiques de sulfures massifs à Ni-Cu, de celles qui sont dites « stériles ». Pour ce faire, deux outils graphiques permettant de faciliter l'interprétation des données géochimiques acquises en contexte d'exploration ont été développés. Le premier outil intègre des échantillons de roche totale ayant le Ni, le Cu, le S et les éléments du groupe du platine (EGP) analysés. Le second outil requière seulement le dosage du S et du Ni.

Le premier outil correspond à une modification du diagramme RA-EGP développé par le CONSOREM dans le cadre du projet 2003-09 (Pearson, 2007). Le diagramme RA-EGP est une intégration graphique de plusieurs rapports élémentaires permettant de mettre en valeur les processus, principalement magmatiques, qui peuvent conduire à la formation de gisements d'EGP. Le rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ a été ajouté au diagramme, qui est donc maintenant désigné comme RA-EGP+, pour les besoins de ce projet. Le nouveau diagramme permet, dans sa partie droite, d'évaluer le potentiel pour les minéralisations à EGP et, dans sa partie gauche, de juger de la fertilité d'une intrusion pour le Ni-Cu. Ainsi, des rapports Pd/S et Ni/Pd faibles et un rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ élevé sont caractéristiques d'intrusions ayant un potentiel pour le Ni-Cu.

Le second outil est le diagramme Ni/S vs Ni, qui permet de visualiser une série d'échantillons et de déterminer s'ils ont été différenciés par cristallisation fractionnée et/ou par la ségrégation d'un liquide sulfuré. Cet outil exploite le comportement chimique du Ni, qui a des affinités avec le liquide sulfuré et, dans une moindre mesure, avec les silicates comme l'olivine. En plus de distinguer les échantillons différenciés par la ségrégation du soufre, le diagramme permet de porter un jugement sur le taux d'enrichissement en Ni d'un liquide sulfuré (cf. facteur R). Aussi, plusieurs champs de fertilités ont été délimités afin de faciliter l'utilisation de cet outil dans un contexte d'exploration.

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION	1
2.	PROBLÉMATIQUE	1
3.	GENÈSE DES GISEMENTS MAGMATIQUES	2
4.	LE RA-EGP	3
4.1	Principes du diagramme RA-EGP	3
4.2	Ratio $\Sigma EGP / (Ni+Cu)$	5
4.2.1	Fondement théorique.....	5
4.2.2	Normalisation des rapports du diagramme RA-EGP.....	5
4.2.3	Rapports élémentaires du diagramme RA-EGP	6
4.2.4	Nouveau rapport pour le diagramme RA-EGP+.....	6
4.2.5	Exemples d'application	11
4.2.6	Synthèse des profils RA-EGP+	20
5.	RAPPORT NI/S.....	22
5.1	Introduction et théorie	22
5.2	Diagramme Ni/S vs Ni.....	23
5.3	Exemples d'utilisation du diagramme Ni/S vs Ni.....	25
5.4	Champs de fertilité du diagramme Ni/S vs Ni	30
5.5	Exemples d'utilisation des champs de fertilité	33
6.	CONCLUSION.....	35
7.	REMERCIEMENTS	35
	RÉFÉRENCES	36
	ANNEXE A.....	38

Liste des figures

Figure 1.	Exemple de diagramme ratio-arachnide (d'après Pearson, 2007).	4
Figure 2.	Organigramme résumant les différentes signatures de RA-EGP en relation avec des contextes pétrogénétiques (tiré de Pearson, 2007).....	4
Figure 3.	Valeurs du rapport $\Sigma EGP/(Ni+Cu)$ pour une série d'intrusions fertiles, stériles et sub-économiques; a) pour l'ensemble des échantillons compilés (incluant les roches contenant majoritairement des sulfures ou des silicates); b) pour les échantillons contenant <1 wt% S.	8
Figure 4.	Histogramme montrant les valeurs du rapport $\Sigma EGP/(Ni +Cu)^*$ pour diverses intrusions (classification selon l'évaluation de leur fertilité). On remarque que le rapport est environ 100 fois plus élevé pour les intrusions stériles par rapport aux intrusions fertiles. Les histogrammes ont été faits; a) avec l'ensemble des échantillons compilés (incluant les roches contenant majoritairement des sulfures ou des silicates); et b) avec seulement les échantillons contenant <1 wt% S.	9
Figure 5.	Diagramme RA-EGP+ permettant d'évaluer la fertilité en EGP d'une intrusion, de la même façon que le diagramme RA-EGP, ainsi que son potentiel pour les minéralisations de type sulfure massif à Ni-Cu.	11

Figure 6.	Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'intrusion de Voisey's Bay (gîte Ni-Cu) provenant de Naldrett <i>et al.</i> (2000). Notez la pente positive très accentuée entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd. L'encadré souligne la partie du diagramme qui permet de porter un jugement sur les minéralisations de type Ni-Cu, et les lignes rouges synthétisent le profil de ces échantillons.....	12
Figure 7.	Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'intrusion de Jinchuan (gîte Ni-Cu) reportés par Chai et Naldrett (1992). Notez la forme en crochet (ligne rouge) de la partie gauche du diagramme. L'encadré souligne la partie du diagramme qui permet de porter un jugement sur les minéralisations de type Ni-Cu, et les lignes rouges synthétisent le profil de ces échantillons.....	13
Figure 8.	Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'intrusion de Dumont (gîte à faible teneur en Ni) reportés par Brüggmann <i>et al.</i> (1990). Notez que deux échantillons de gabbro provenant de la partie supérieure du filon-couche ne présentent pas la pente positive observée entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd pour les autres échantillons.....	14
Figure 9.	Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'indice du Lac Bleu provenant de Clark (1989). Notez que la pente entre les rapports $\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd est faiblement positive à négative.....	15
Figure 10.	Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons du complexe mafique d'East Bull Lake, provenant de Peck <i>et al.</i> (2001). Les profils A et B indiquent que les échantillons sont, respectivement, faiblement et fortement enrichis en Pd.	16
Figure 11.	Diagramme RA-EGP+ montrant 15 échantillons du gisement de Lac des Îles, provenant de Brüggmann, <i>et al.</i> (1989). Pour la majorité des échantillons, les courbes sont, dans leurs parties gauche, rectilignes et ont des pentes négatives.	17
Figure 12.	Diagramme RA-EGP+ montrant les échantillons des komatiites de Kambalda provenant de Keays et Davison (1976).....	18
Figure 13.	Diagramme RA-EGP+ montrant les échantillons de la coulée komatiitique de Pyke Hill, provenant de l'assemblage igné de Kidd-Munro (Ontario). Données tirées de Crocket et McRae (1986).	19
Figure 14.	Diagramme RA-EGP+ montrant les échantillons de la coulée « Theo's Flow », qui fait partie des komatiites de Munro (Ontario). Données tirées de Crocket et McRae (1986).	19
Figure 15.	Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'ophiolite de Thetford provenant d'Oshin (1981). Notez la pente faiblement négative entre les paramètres Pd+Pt et Pd/S, qui indique un faible enrichissement en S des roches.	20
Figure 16.	Profils schématiques de courbes reportées dans la partie gauche du diagramme RA-EGP+. Les zones ombragées soulignent les pentes négatives et positives des courbes décrites dans le texte; A) Profil en crochet caractéristique de sulfures massifs enrichis en métaux de base; B) Profil en pente descendante de roches pouvant avoir un potentiel pour les minéralisations à EGP; C) Profil en « racine carrée inversée » de roches sous-saturées en soufre, qui sont soient enrichies en Ni (cf. présence d'olivine), ou qui ont perdu plus d'EGP que de Ni-Cu au profit d'un liquide sulfuré. Selon l'interprétation que l'on fera au cas par cas, de tels échantillons peuvent provenir d'intrusions ayant ou non un potentiel pour les minéralisations de sulfures massifs à Ni-Cu.....	21

Figure 17.	Teneurs en Ni et S pour des échantillons d'ophiolite et d'autres intrusions mafiques à ultramafiques (cf. intrusions M/UM). Notez que les ophiolites sont pauvres à enrichies en Ni, mais sont systématiquement appauvries en S, alors que pour les intrusions minéralisées étudiées, les concentrations en Ni et en S sont positivement corrélées. Les données géochimiques proviennent de Keays et Davison (1976), Oshin (1981), Crocket et McRae (1986), Clark (1989), Brüggmann <i>et al.</i> (1989, 1990), Chai et Naldrett (1992), Naldrett <i>et al.</i> (2000), Peck <i>et al.</i> (2001), Sproule <i>et al.</i> (2005).	23
Figure 18.	Interprétations possibles de séries d'échantillons s'alignant dans le graphique Ni vs Ni/S.....	24
Figure 19.	Distribution schématique d'échantillons appartenant à différentes intrusions dans le diagramme Ni vs Ni/S. Les intrusions stériles, différenciées uniquement par cristallisation fractionnée par exemple, montrent une distribution parallèle aux lignes de concentrations constantes et faibles en sulfures. Les intrusions fertiles, quant à elles, se distribuent le long de droites obliques aux droites de concentrations constantes en sulfures. L'intersection de ces droites avec la ligne 100% de sulfures permet d'évaluer approximativement la teneur en nickel maximale d'un sulfure massif qui se formerait dans une intrusion donnée. Les ophiolites, qui ont des valeurs moyennes à élevées en Ni et faibles en S, ont également été représentées dans ce diagramme.....	25
Figure 20.	Graphiques Ni vs Ni/S représentant a) le gisement de Stormi du Complexe de Vammala (Finlande) et b) le gisement de Bruvann (Nordland, Norvège) (données de Lamberg, 2005).	27
Figure 21.	Diagrammes Ni vs Ni/S représentant a) l'intrusion de Alter do Chao (données de Lamberg, 2005) et b) l'intrusion renfermant le gisement du Lac des Îles (Ontario) (données de Brugmann <i>et al.</i> , 1989).	28
Figure 22.	Graphiques Ni vs Ni/S représentant a) des échantillons provenant de l'indice du Lac Bleu (données de Clark 1989) et b) l'intrusion du Lac Kénogami (données de Vaillancourt, 2001).	29
Figure 23.	Distribution des échantillons ayant un Mg# < 0,4 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=79) et stériles (n=138) proviennent de 17 localités différentes.....	31
Figure 24.	Distribution des échantillons ayant un Mg# compris entre 0,4 et 0,6 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=127) et stériles (n=93) proviennent de 10 localités différentes.....	31
Figure 25.	Distribution des échantillons ayant un Mg# compris entre 0,6 et 0,7 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=159) et stériles (n=90) proviennent de 9 localités différentes.....	32
Figure 26.	Distribution des échantillons ayant un Mg# > 0,7 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=117) et stériles (n=39) proviennent de 20 localités différentes.....	32
Figure 27.	Diagramme représentant les quatre champs définis pour différents Mg# et servant à caractériser la fertilité d'une intrusion. Ces champs permettent de définir si une intrusion est fertile ou stérile à partir d'une faible quantité d'échantillons, qu'ils proviennent de roches ultramafiques ou de magmas plus felsiques.....	33
Figure 28.	a) Représentation graphique des échantillons les plus felsiques de l'intrusion de Laukunkangas (Finlande) à partir des données de Lamberg (2005); b) Représentation graphique des échantillons de	

gabbros et norites du Lac-à-Paul, qui font partis de la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean, à partir des données de Huss (2002).....34

Figure A-1. Organigramme qui établit un cheminement de description géochimique des échantillons afin de donner une valeur de discrimination (OD) pour classier les cibles.....39

Figure A-2. Organigramme qui permet de classier les cibles en fonction de la valeur OD déterminée précédemment.40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des neuf paramètres utilisés pour le développement du diagramme de ratio-arachnide, Tiré de Pearson 2007.3

Tableau 2. Calcul de l'efficacité de reconnaissance de la fertilité des intrusions par l'utilisation des champs de fertilité définis par l'intermédiaire du Mg#.30

1. INTRODUCTION

Ce rapport s'articule autour de deux parties. La première section propose une adaptation du diagramme arachnide RA-EGP, qui a été développé par le CONSOREM dans le cadre du projet 2003-09 pour l'exploration de gisements d'éléments du groupe du platine (EGP). Ce diagramme RA-EGP est une intégration graphique de différents rapports élémentaires qui mettent en valeur les mécanismes menant à la concentration des métaux par des processus principalement magmatiques. Ce diagramme permettait déjà de porter certains jugements sur le potentiel pour les minéralisations de sulfures massifs à Ni-Cu, mais le projet 2008-11 vise à pousser plus avant l'utilité de ce diagramme pour ce type de minéralisation.

Dans la deuxième partie de ce rapport, un nouveau diagramme permettant de juger de la fertilité d'une intrusion à partir de son contenu en Ni et en S sera présenté. Ce diagramme permet de visualiser une série d'échantillons provenant d'une même suite magmatique et de déterminer si le magma a été différencié par cristallisation fractionnée et/ou par la ségrégation des sulfures. Le nouveau graphique permet également d'estimer le facteur R et de porter un jugement sur la teneur potentielle maximale en Ni que les sulfures massifs pourraient atteindre, à partir d'une série d'échantillons prélevés en contexte d'exploration.

Des exemples d'applications des deux outils sont donnés à partir de contextes connus représentant des environnements jugés fertiles ou stériles pour les minéralisations en Ni.

2. PROBLEMATIQUE

Les intrusions mafiques et ultramafiques sont les principales cibles d'exploration pour les gisements magmatiques de cuivre, nickel et d'éléments du groupe du platine (EGP). Les magmas riches en magnésium sont relativement abondants au Québec, comme ailleurs dans le monde, mais les intrusions contenant des gisements de Ni-Cu-EGP magmatiques sont rares et difficiles à identifier. Les intrusions magmatiques, qui sont par définition plus grandes que les gisements qu'elles renferment, sont cependant les seuls guides d'exploration disponibles pour les gisements recherchés, puisque ceux-ci ne peuvent pas être prospectés à partir de halos d'altération (Arndt et al., 2005; Barnes et Lightfoot, 2005). Au-delà de leur pétrologie, qui permet d'identifier les magmas mafiques à ultramafiques, ces roches intrusives ne sont utiles que si leur composition chimique est mesurée.

La teneur en éléments traces des magmas, notamment, est depuis longtemps utilisée pour identifier des processus comme la fusion partielle, la cristallisation fractionnée et la contamination. Le processus qui nous intéresse ici est celui de la ségrégation d'un liquide sulfuré qui modifie les concentrations en Ni, Cu et EGP du magma silicaté duquel il s'extrait. Ce projet propose donc d'utiliser ces éléments traces afin d'aider à la prospection des gisements de sulfures massifs d'origine magmatique.

Le CONSOREM a déjà eu l'occasion d'utiliser le Cu, le Ni, et les EGP afin de faciliter la recherche de minéralisations à EGP, ce qui lui a permis de proposer le diagramme arachnide RA-EGP (Pearson, 2007). Ce projet se propose d'étendre l'utilité de ce graphique aux minéralisations Ni-Cu, par l'intermédiaire du diagramme RA-EGP+. Ce projet a également permis de développer le diagramme binaire Ni versus Ni/S, qui permet de porter un jugement sur l'efficacité avec laquelle un liquide sulfuré concentre les métaux dans une intrusion donnée.

3. GENESE DES GISEMENTS MAGMATIQUES

Cette section permettra de décrire les mécanismes favorisant la formation de gisements à EGP et à Ni-Cu-(EGP).

Les études géochimiques nous apprennent que les EGP ont une grande affinité avec le liquide sulfuré (cf. ils ont des coefficients de partage élevés); c'est-à-dire que la moindre gouttelette de liquide sulfuré qui se forme va collecter la quasi-totalité des EGP contenus dans le magma silicaté avec lequel elle est en contact. Le Ni et le Cu ont, dans une moindre mesure, un comportement similaire.

Ainsi, pour avoir un potentiel pour les gisements à EGP, le magma doit être transporté depuis sa roche source (cf. le manteau), jusqu'à sa position finale (cf. croûte continentale généralement), sans que la saturation en soufre ne se soit produite. Une fois l'intrusion finale formée plusieurs mécanismes, qui sont encore largement débattus aujourd'hui, pourraient concentrer les EGP (cf. Barnes et Maier, 2002; et références incluses):

- 1) Saturation en soufre, bien que la plupart des gisements d'EGP soient pauvres en sulfures, à quelques exceptions près (cf. gisements de Duluth et de Sudbury, par exemple).
- 2) Cristallisation fractionnée, surtout lorsqu'elle permet la formation de grandes quantités de minéraux de type oxyde.
- 3) Mélange de magmas : un magma chaud et primitif arrivant dans une chambre magmatique peut réagir avec, un magma plus différencié et le déstabiliser. Ce mécanisme a été invoqué pour expliquer la formation des reefs du Bushveld.
- 4) La contamination peut favoriser la saturation en soufre et contribuer à déstabiliser le système, ou peut faire augmenter la fugacité d'oxygène, ce qui facilite la formation d'oxydes.
- 5) Mouvement des cumulats : concentration mécanique de roches préalablement enrichies en EGP. Ce phénomène est évoqué pour expliquer la formation des « reefs » du Bushveld.
- 6) Hydrothermalisme : phénomène non-magmatique souvent invoqué pour expliquer la formation de grandes quantités d'oxydes. Il est généralement considéré comme un phénomène qui "bonifie" un système déjà enrichi, et qui a le potentiel de transformer un gisement sub-économique en un gisement économique.

Le magma peut également subir de faibles degrés de cristallisation fractionnée et de saturation en soufre pendant sa remontée, et peut ainsi perdre une part significative de ses EGP. Cependant, un magma ayant perdu ses EGP ne perd pas forcément une grande quantité de Ni-Cu et peut conserver un potentiel pour les gisements de sulfures massifs. Pour former de tels gisements, une grande quantité de soufre doit s'extraire du magma silicaté sous forme de gouttelettes de liquide sulfuré, suite à la contamination par des roches magmatiques ou méta-sédimentaires felsiques et/ou riches en soufre. Les gouttelettes de liquide sulfuré collectent ensuite le Ni-Cu et les EGP qui restent dans le magma, et elles collectent d'autant plus de métaux qu'elles sont en contact avec de grandes quantités de magma silicaté (cf. facteur R; Barnes et Lightfoot 2005). Enfin, ces gouttelettes doivent être collectées pour former un gisement de sulfures massifs, et cette collecte se fait par gravité (accumulation à la base de la chambre), par le mouvement du magma dans des conduits d'épaisseurs variables (dykes, etc.), etc.

En conclusion, on observe que de nombreuses conditions doivent être réunies pour former les gisements recherchés. Ainsi, la concentration en métaux du magma parental n'est qu'un paramètre parmi beaucoup d'autres, et il est possible que tous les magmas riches en métaux ne soient pas nécessairement « fertiles ». Ce paramètre, ainsi que ceux répertoriés ci-dessus, seront explorés plus avant au cours de ce projet.

4. LE RA-EGP

4.1 Principes du diagramme RA-EGP

Le diagramme arachnide EGP (RA-EGP) développé par le CONSOREM (**Figure 1**; Pearson, 2007 Projet 2003-09); https://consorem.ugac.ca/rapports_publics.html) est une intégration graphique de plusieurs rapports d'éléments qui permettent de porter un jugement sur les processus menant à la concentration magmatique des EGP. Cet outil intègre des rapports d'éléments étudiés notamment par Barnes (Barnes et al. 1988; Barnes et Lightfoot 2005), en les intégrant dans 6 diagrammes binaires ce qui facilite leur utilisation (CONSOREM 2003-09, Pearson 2007).

Les rapports d'éléments traces (cf. Ni, Cu, EGP) sont normalisés au manteau primitif (MP), ce qui permet de visualiser leurs variations par rapport à leurs valeurs mantelliques. Ainsi, la normalisation souligne les transformations subies par les roches depuis leur source mantellique, et qui sont la conséquence d'événements de fusion partielle, de cristallisation fractionnée et autres.

Le diagramme RA-EGP comprend neuf paramètres (**Tableau 1**), le premier ($1000 \cdot \Sigma(\text{Pd}+\text{Pt})$) étant la somme de la concentration en platine et palladium (en ppb), multipliée par 1000. Ce paramètre permet d'évaluer la concentration absolue en EGP du magma étudié. Les huit autres paramètres sont des rapports normalisés par rapport au manteau primitif et sont multipliés par différentes constantes qui permettent de faciliter leurs visualisations sur un même graphique. Les divers profils, ou "signatures", représentent différents processus tels que la fusion partielle, la cristallisation fractionnée et l'hydrothermalisme, qui fractionnent les rapports utilisés (**Figure 2**). Le diagramme RA-EGP permet également de comparer la composition d'un échantillon analysé dans une campagne d'exploration avec les compositions de magmas de référence provenant de contextes minéralisés documentés à travers le monde (Pearson 2007).

Tableau 1. Liste des neuf paramètres utilisés pour le développement du diagramme de ratio-arachnide, Tiré de Pearson 2007.

Paramètre	Ratios mantelliques	Méthode de normalisation
$1000 \cdot \Sigma(\text{Pd}+\text{Pt})$	$\text{Pd}+\text{Pt} = 11 \text{ ppb}$	$1000 \times (\text{Pd}+\text{Pt})$ $1\text{g/t} = 1 \times 10^4 \text{ ppb}$
Pd/S	$\text{Pd/S} = 0.000016$	$[(\text{Pd/S})_{\text{échant.}} / (\text{Pd/S})_{\text{MP}}]^2$
Ni/Pd	$\text{Ni/Pd} = 500 \ 000$	$[0,1 * (\text{Ni/Pd})_{\text{échant.}} / (\text{Ni/Pd})_{\text{MP}}]^2$
Ni/Cu	$\text{Ni/Cu} = 71$	$[10 * (\text{Ni/Cu})_{\text{échant.}} / (\text{Ni/Cu})_{\text{MP}}]^2$
Cu/Pd	$\text{Cu/Pd} = 7000$	$[(\text{Cu/Pd})_{\text{échant.}} / (\text{Cu/Pd})_{\text{MP}}]^2$
Cu/Pt	$\text{Cu/Pt} = 4000$	$[(\text{Cu/Pt})_{\text{échant.}} / (\text{Cu/Pt})_{\text{MP}}]^2$
Pd/Pt	$\text{Pd/Pt} = 0.57$	$[(\text{Pd/Pt})_{\text{échant.}} / (\text{Pd/Pt})_{\text{MP}}]^2$
Pd/Ir	$\text{Pd/Ir} = 1.18$	$[(\text{Pd/Ir})_{\text{échant.}} / (\text{Pd/Ir})_{\text{MP}}]^2$
Cu/Ir	$\text{Cu/Ir} = 8235$	$[(\text{Cu/Ir})_{\text{échant.}} / (\text{Cu/Ir})_{\text{MP}}]^2$

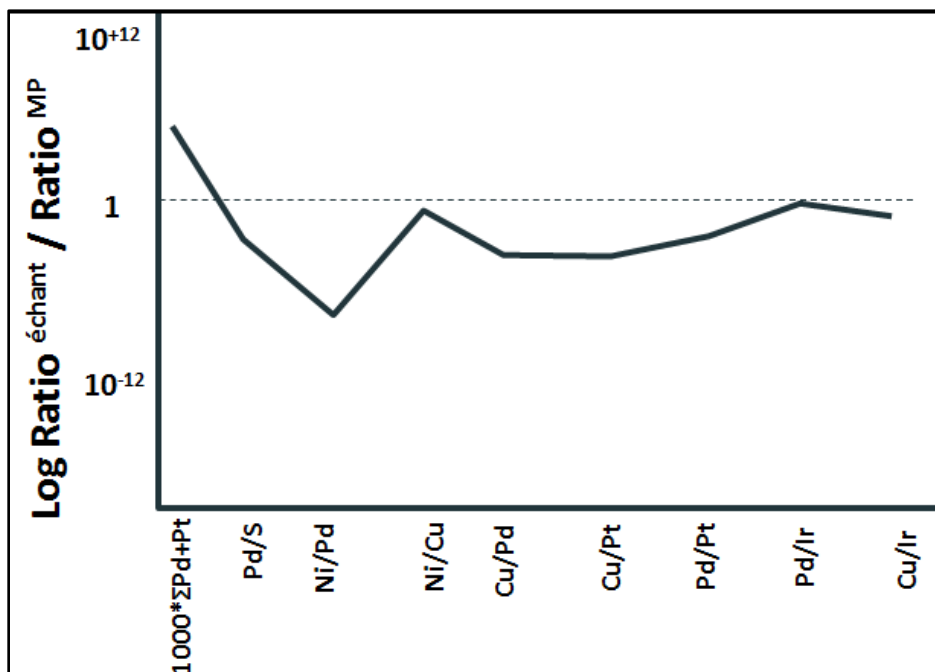


Figure 1. Exemple de diagramme ratio-arachnide (d'après Pearson, 2007).

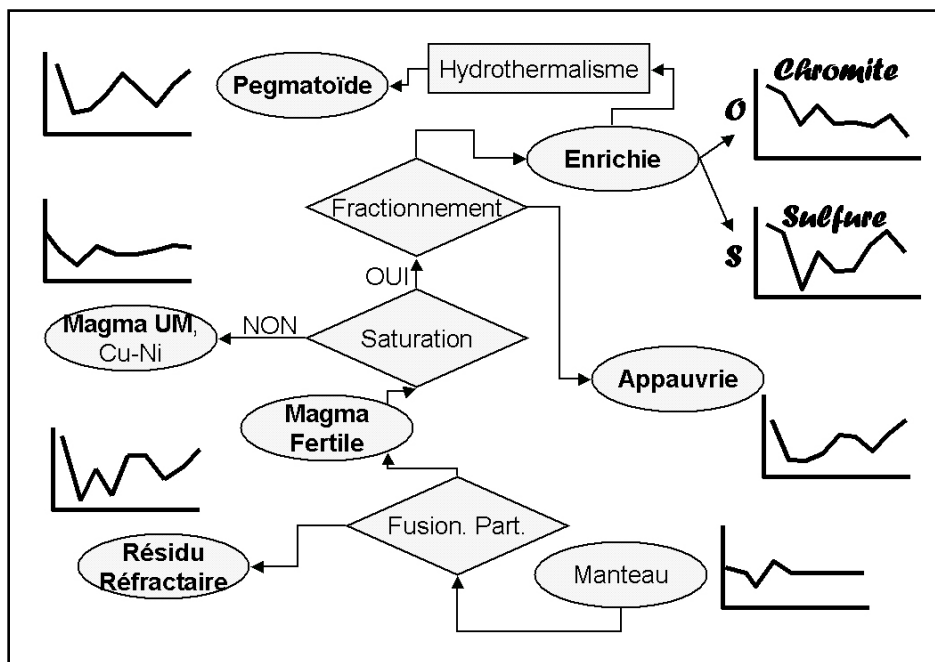


Figure 2. Organigramme résumant les différentes signatures de RA-EGP en relation avec des contextes pétrogénétiques (tiré de Pearson, 2007).

4.2 Ratio Σ EGP / (Ni+Cu)

4.2.1 *Fondement théorique*

En théorie, un magma primitif extrait du manteau a des rapports en éléments traces similaires à ceux du manteau. En effet, la fusion partielle modifie les concentrations en éléments traces mais pas les valeurs de leurs rapports, en particulier si les traces considérées ont des comportements chimiques proches. Pour cette raison, de nombreux rapports d'éléments traces sont surnommés "traceurs de source", bien qu'ils soient sensibles à certains processus. En effet, la cristallisation fractionnée, en formant de l'olivine, appauvrira le magma principalement en Ni, ce qui modifiera la valeur de tous les rapports faisant intervenir le Ni. Un degré élevé de cristallisation fractionnée fera également varier les rapports faisant intervenir le Cu, qui est capable d'intégrer la structure cristalline, ou les lacunes, de certains minéraux silicatés. La formation de certains oxydes, en concentrant les EGP, peut également faire varier les rapports faisant intervenir ces éléments.

La formation de gouttelettes de liquide sulfuré, en revanche, fera varier les rapports étudiés de façon plus dramatique. Ainsi, les rapports faisant intervenir des métaux chalcophiles ("qui ont des affinités avec le soufre") pourraient être qualifiés de "traceurs de processus", puisqu'ils peuvent mettre en valeur le processus de ségrégation du soufre. La formation de très peu de ces gouttelettes de liquide sulfuré suffit à retirer une grande quantité d'EGP du magma.

En revanche, la ségrégation de quelques gouttelettes de liquide sulfuré modifie la concentration en Ni-Cu du magma de façon négligeable, et ceci pour deux raisons : 1) les magmas silicatés contiennent quelques ppm de Ni-Cu et seulement quelques ppb d'EGP et donc, la moindre perturbation aura plus d'impact sur la concentration en EGP que sur celle en Ni-Cu; 2) les coefficients de partage (cf. répartition de l'élément entre le magma silicaté et le liquide sulfuré) des EGP sont ~1000 fois plus élevés que ceux du Ni, qui sont eux-mêmes similaires ou plus élevés que ceux du Cu (Barnes et Lightfoot 2005).

Aussi, on peut postuler que l'extraction d'une petite quantité de liquide sulfuré modifiera énormément les rapports utilisant les EGP de façon locale, c'est-à-dire que seul le magma silicaté situé à proximité du liquide sulfuré sera affecté. Dans ce cas de figure, les rapports (Ni-Cu)/EGP du liquide sulfuré seront beaucoup plus faibles que ceux du magma silicaté, et la probabilité de former un gisement économique sera faible.

Au contraire, la formation d'une grande quantité de gouttelettes de liquide sulfuré et leur mise en contact avec une grande quantité de magma feront diminuer la concentration en Ni-Cu-EGP d'un volume important de magma silicaté de façon significative. Dans les cas extrêmes, les rapports (Ni-Cu)/EGP des deux fluides étudiés pourraient s'égaliser. Les systèmes perturbés à une telle échelle peuvent contenir des gisements économiques.

Les rapports EGP versus Ni-Cu ont donc le potentiel de livrer des informations intéressantes sur la formation des gisements recherchés. Cependant, les rapports élémentaires peuvent être interprétés de nombreuses façons, et c'est pourquoi ce projet vise à faciliter leur utilisation.

4.2.2 *Normalisation des rapports du diagramme RA-EGP*

Un rapport élémentaire reflète tous les processus subis par les éléments considérés, à commencer par leur genèse. L'effet bien connu d'Oddo-Harkins, par exemple, peut oblitérer les processus que l'on cherche à mettre en valeur à partir d'une analyse chimique, et ce problème est souvent adressé à l'aide d'une normalisation par la chondrite. Dans le cas qui nous intéresse, on cherche à mettre en valeur des processus ayant lieu dans la chambre magmatique. Pour cette raison, Barnes recommande de normaliser les roches par rapport au manteau primitif, ce qui permet de s'affranchir des effets de la différenciation noyau-manteau-croûte (Barnes et Lightfoot 2005).

Cette normalisation par le manteau fait l'hypothèse que les rapports utilisant les EGP et le Ni-Cu sont plus sensibles à la formation de gouttelettes de liquide sulfuré qu'à tous autres types de processus. Aussi, la composition du manteau est très variable et la normalisation par un chiffre unique est une simplification. Localement, l'étude des xénolites permet de modéliser une source plus réaliste, mais ce paramètre sera négligé dans la présente étude.

En fait, une normalisation par le manteau primitif pourrait mettre en valeur tous les processus subis par la roche depuis son extraction de sa roche source : fusion partielle, cristallisation fractionnée, etc.; alors que le seul processus qu'on cherche à mettre en valeur est celui de la ségrégation du liquide sulfuré. Pour cette raison, il pourrait être envisagé de normaliser par un échantillon pauvre en soufre provenant de l'intrusion magmatique qu'on souhaite étudier. Ainsi, si les échantillons étudiés ont une source commune, s'ils ont subi des degrés de fusion partielle, de cristallisation fractionnée et de contamination similaires, le seul processus qui sera mis en valeur par la normalisation sera la ségrégation du liquide sulfuré. Cette piste ne sera pas suivie plus avant pendant ce projet, car elle nécessiterait une connaissance approfondie d'une intrusion donnée pour être mise en application, ce qui n'est pas l'objectif ici. Cette solution est cependant recommandée aux utilisateurs qui souhaitent affiner l'étude d'un système magmatique particulier.

4.2.3 *Rapports élémentaires du diagramme RA-EGP*

D'une façon théorique, les rapports du diagramme RA-EGP (**Tableau 1**) devraient se comporter de la façon suivante :

- Pd/S : Le soufre dosé dans les roches indique la présence de minéraux de type sulfure. Le rapport Pd/S permet de quantifier le taux d'enrichissement en Pd de ces sulfures (Pearson, 2007).
- Ni/Pd, Cu/Pd, Cu/Pt, Cu/Ir : Les rapports entre les métaux de base et les EGP sont avant tout sensibles à la ségrégation des liquides sulfurés, car le Cu et le Ni ont moins d'affinité avec le liquide sulfuré que, dans l'ordre d'affinité croissante, le Pd, Pt et l'Ir (Barnes, 1990). Ainsi, la ségrégation du liquide sulfuré fera augmenter la valeur de ces rapports dans le magma silicaté « résiduel », avec la valeur du rapport Cu/Ir augmentant le plus rapidement.
- Ni/Cu, Pd/Pt, Pd/Ir : Ces rapports font intervenir des éléments ayant des coefficients de partage similaires entre les liquides silicatés et sulfurés, et sont donc peu fractionnés par la ségrégation du soufre (Barnes, 1990). Ces rapports seront en revanche modifiés par la cristallisation fractionnée. En effet, la formation d'olivine fera diminuer le rapport Ni/Cu du magma résiduel. La chromite concentre le Ni et accumule plus l'Ir que le Pd, et sa cristallisation fera diminuer le rapport Ni/Cu et augmenter le rapport Pd/Ir du magma silicaté. Le rapport Pd/Pt, en revanche, est moins affecté par la cristallisation de l'olivine et de la chromite, et est donc un moins bon indicateur du degré de différenciation du magma (Barnes, 1990).

4.2.4 *Nouveau rapport pour le diagramme RA-EGP+*

Afin d'étendre l'utilité du diagramme RA-EGP aux gisements magmatiques de Cu-Ni, l'introduction du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})$ est proposée. Tout comme les rapports faisant intervenir des métaux de base et des EGP (cf. rapports Ni/Pd, Cu/Pd, Cu/Pt, Cu/Ir), ce nouveau rapport sera particulièrement sensible à la ségrégation du liquide sulfuré. Ainsi, la formation de sulfures fera diminuer le rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})$ dans le magma résiduel pauvre en soufre, et le fera augmenter dans les échantillons contenant des minéraux de type sulfure.

Pour les magmas n'ayant pas ségrégué les sulfures, le comportement de ce nouveau rapport est difficile à prédire, car les coefficients de partage des éléments utilisés pour l'olivine et les oxydes sont peu contraints (cf. Barnes et Lightfoot 2005 et référence incluses). Il est possible que la cristallisation d'olivine

ne modifie pas le rapport ou le fasse augmenter dans le magma résiduel (et diminuer dans les cumulats à olivine). Les oxydes comme la chromite pourraient, au contraire, faire diminuer le nouveau rapport dans le magma résiduel.

Il est donc difficile de prédire le comportement de ce nouveau rapport de façon théorique, et il sera donc étudié de manière empirique. Pour ce faire, une compilation de données de la littérature correspondant à des analyses de roches silicatées contenant des proportions variables de sulfures sera utilisée. Ces échantillons sont qualifiés de « stériles », « sub-économiques » ou « fertiles », selon que les intrusions analysées renferment, respectivement, des gisements économiques, sub-économiques ou qu'elles n'ont pas de minéralisation reconnue. Ce classement est bien sûr fonction d'un état de connaissances.

En calculant le nouveau rapport à partir des échantillons compilés, il est observé tout d'abord que le rapport $\Sigma EGP / (Ni + Cu)$ ne permet pas de discriminer les intrusions fertiles de celles qualifiées de stériles (**Figure 3**). Pour pallier à ce problème, une constante (cf. 150) a été ajoutée au rapport pour souligner les variations des concentrations en Ni-Cu par rapport à celles en EGP. Aussi, seule la valeur au carré de ce nouveau rapport sera utilisée, ce qui facilitera son intégration au diagramme RA-EGP (**équation 1**).

Calcul des valeurs du rapport $\Sigma EGP / (Ni + Cu)^{*1}$ où les valeurs des EGP sont en ppb et celles du Ni et du Cu sont en ppm.

$$\frac{\Sigma EGP}{(Ni + Cu)} * = \left(\frac{Pd + Pt + Ir}{150 (Ni + Cu)} \right)^2$$

¹ * Indiquera dorénavant dans le texte le ratio modifié selon l'équation 1

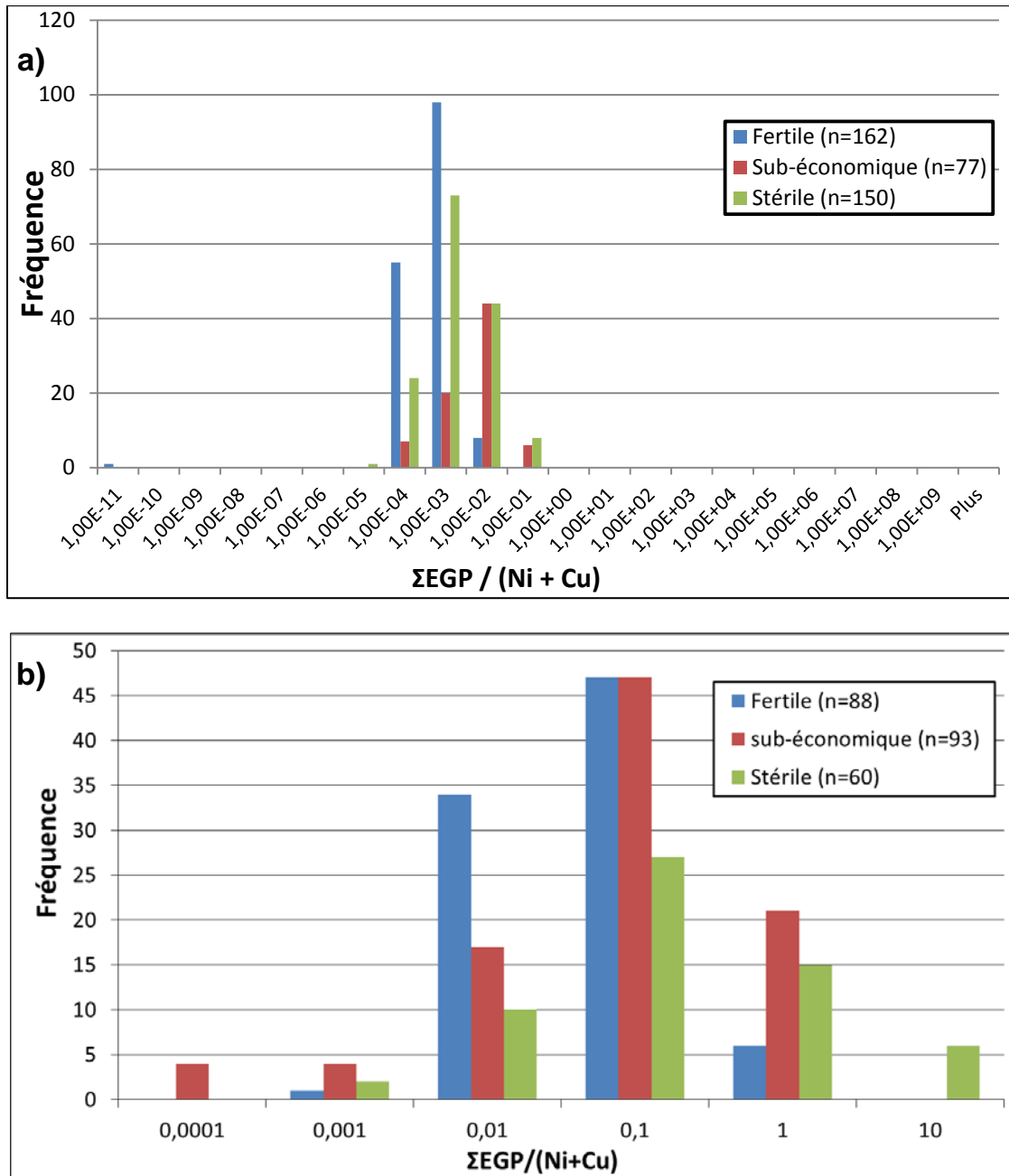


Figure 3. Valeurs du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})$ pour une série d'intrusions fertiles, stériles et sub-économiques; **a)** pour l'ensemble des échantillons compilés (incluant les roches contenant majoritairement des sulfures ou des silicates); **b)** pour les échantillons contenant <1 wt% S.

Les valeurs du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ ont ensuite été calculées à partir de données compilées pendant ce projet (**Figure 4**). Lorsqu'on utilise l'ensemble des échantillons disponibles, on observe que le nouveau rapport est plus faible pour les intrusions fertiles que pour les intrusions sub-économiques et stériles (**Figure 4a**). Il est cependant difficile de comprendre le comportement du nouveau rapport à partir d'un diagramme où sont mélangés les échantillons minéralisés, qui concentrent généralement plus les EGP que le Cu-Ni, et des échantillons de roches silicatées, dont les concentrations en EGP-Cu-Ni sont plus complexes à prédire. Pour pallier à ce problème, un histogramme ne regroupant que les échantillons contenant < 1 wt% S sera utilisé (**Figure 4b**). À partir de ce diagramme, nous observons que les

intrusions stériles possèdent les valeurs les plus élevées du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$, alors que les intrusions fertiles à sub-économiques possèdent des valeurs plus basses de ce rapport, peut-être parce qu'elles ont perdu une partie de leurs EGP au profit d'un liquide sulfuré. Ainsi, le rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ permet de distinguer les intrusions ayant, ou non, subi l'extraction d'un liquide sulfuré. Cependant, ce rapport ne permet pas de distinguer les intrusions sub-économiques des intrusions économiques (**Figure 4b**), c'est-à-dire qu'il ne permet pas de prédire à quelle échelle la ségrégation des sulfures s'est produite, ni qu'elle est la quantité absolue de métaux qui ont été retirés du magma. Pour répondre à ces dernières questions, seule une cartographie détaillée d'une intrusion pour laquelle les roches ayant et n'ayant pas perdus d'EGP ont été identifiées, peut s'avérer utile.

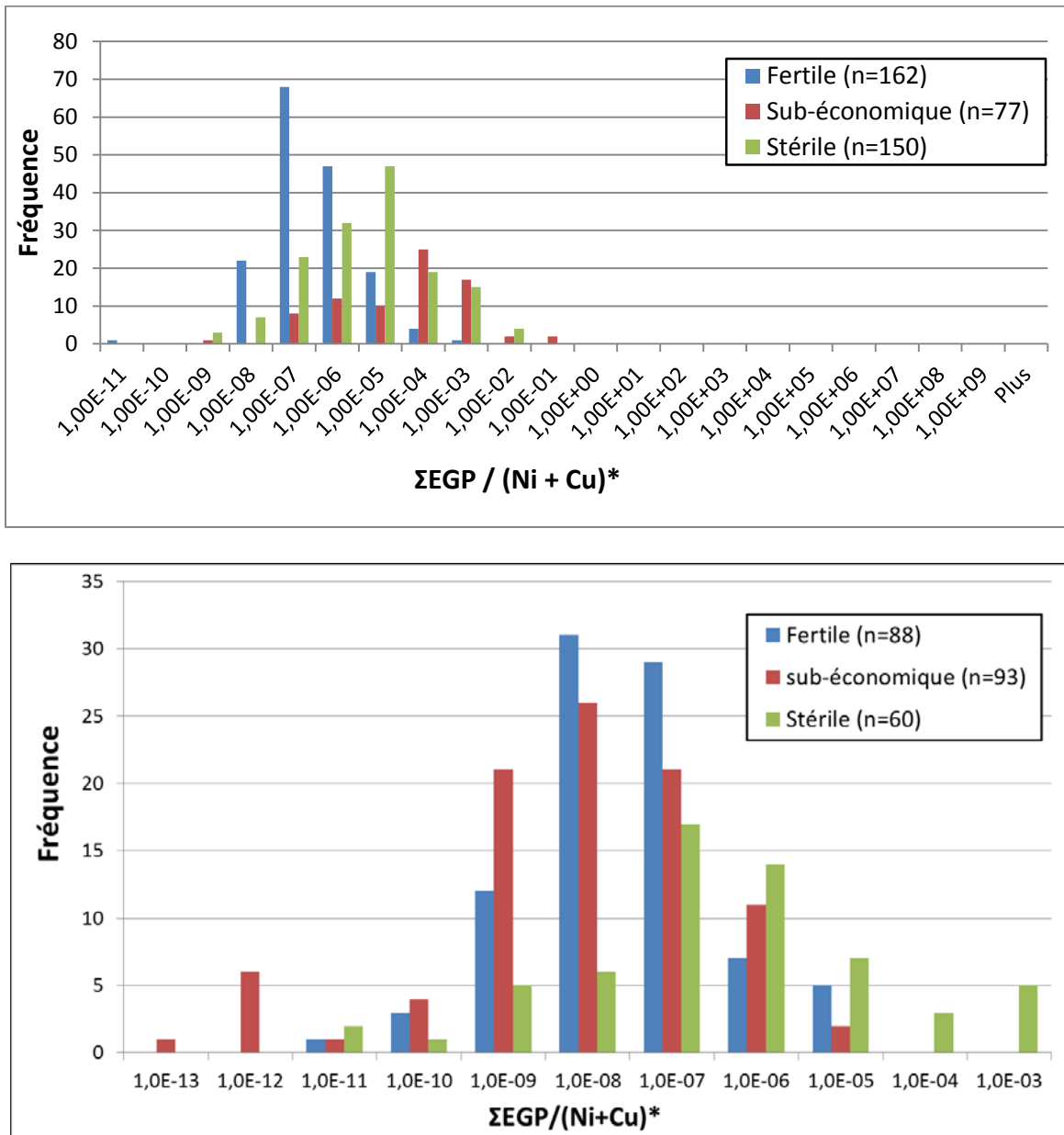


Figure 4. Histogramme montrant les valeurs du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni} + \text{Cu})^*$ pour diverses intrusions (classification selon l'évaluation de leur fertilité). On remarque que le rapport est environ 100 fois plus élevé pour les intrusions stériles par rapport aux intrusions fertiles. Les histogrammes ont été faits; **a)** avec l'ensemble des échantillons compilés (incluant les roches contenant majoritairement des sulfures ou des silicates); et **b)** avec seulement les échantillons contenant <1 wt% S.

Le nouveau rapport a été intégré au diagramme RA-EGP, qui devient ainsi le graphique RA-EGP+ (**Figure 5**). Le rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ a été placé entre les rapports Pd/S et Ni/Pd afin de conserver les propriétés du diagramme décrites par Pearson (2007). En effet, cette position permet de préserver 1) la signature des magmas ultramafiques ayant un potentiel pour le Ni-Cu et, 2) la signature en « M » du diagramme qui est caractéristique des intrusions fertiles en EGP (**Figure 2**).

Ainsi le nouveau rapport, intégré au diagramme RA-EGP+, indique s'il y a eu ségrégation des sulfures, ou si le magma s'est enrichi en EGP suite à la cristallisation d'oxydes (**Figure 5**). Aussi, le rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ se comporte d'une façon inverse à celle du rapport Ni/Pd situé à sa droite. Ainsi, si une intrusion a un potentiel pour le Ni-Cu, c'est-à-dire si une grande quantité de liquide sulfuré s'est formée et a retiré plus d'EGP que de Cu-Ni du magma « résiduel », la droite entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd aura une pente fortement positive. Au contraire, si l'intrusion a plutôt un potentiel pour les gîtes d'EGP, c'est-à-dire que le système est enrichi en EGP et que ces derniers ont été concentrés par des oxydes, la pente entre les deux rapports mentionnés ci-dessus sera négative (**Figure 5**).

Le graphique RA-EGP+ permet d'évaluer, dans sa partie droite, le potentiel d'une intrusion pour les minéralisations de type EGP et, dans sa partie gauche, il procure des indications sur le potentiel pour les minéralisations Ni-Cu magmatiques (**Figure 5**).

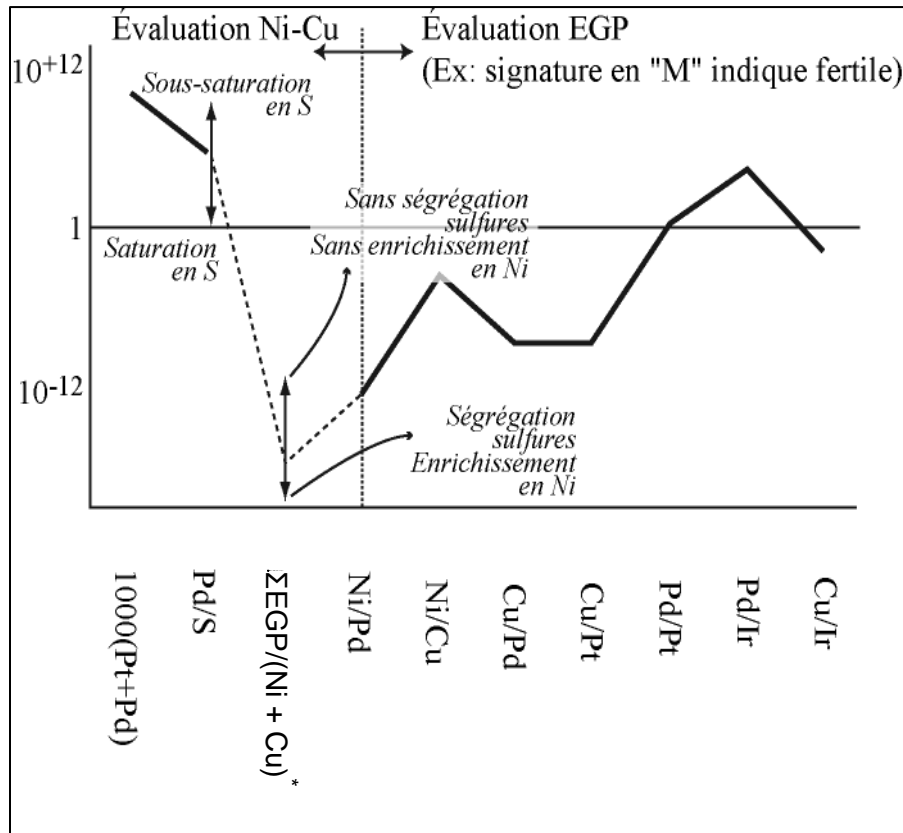


Figure 5. Diagramme RA-EGP+ permettant d'évaluer la fertilité en EGP d'une intrusion, de la même façon que le diagramme RA-EGP, ainsi que son potentiel pour les minéralisations de type sulfure massif à Ni-Cu.

4.2.5 Exemples d'application

Afin d'illustrer l'utilité du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni} + \text{Cu})^*$, cette section présente plusieurs profils obtenus dans le diagramme RA-EGP+ pour des échantillons provenant d'intrusions hôtes de minéralisations Ni-Cu et/ou EGP, qui sont considérées économiques ou sub-économiques. À titre comparatif, nous présenterons également une ophiolite et deux coulées ultramafiques considérées stériles.

Voisey's Bay

Le gisement de Voisey's Bay (Labrador) contient des réserves et ressources de 124 Mt à 1,66 % Ni, 0,88 % Cu et 0,05 % Co, pour lesquelles aucune teneur significative en EGP n'a été reportée (Li *et al.*, 2001). Le gisement se situe dans un dyke à gabbro et troctolite et dans les chambres magmatiques qui lui sont connectées. Ces intrusions font parties de la suite magmatique du Nain, qui est de type AMCG (Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite).

Les échantillons utilisés correspondent à des troctolites minéralisées et à des sulfures massifs, pour lesquels le soufre n'a pas été dosé (Naldrett *et al.*, 2000). Sur le profil RA-EGP+, on observe que la pente entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni} + \text{Cu})^*$ et Ni/Pd est fortement positive (**Figure 6**). Ce profil est probablement caractéristique de sulfures ayant accumulés plus de Ni-Cu que d'EGP, probablement parce que le liquide sulfuré était en contact avec un magma qui contenait du Ni-Cu et qui était appauvri en EGP. La partie droite du diagramme est typique des intrusions mafiques à ultramafiques « non-saturées » et ayant un potentiel pour les minéralisations de type Ni-Cu (cf. Pearson 2007; **Figure 2**).

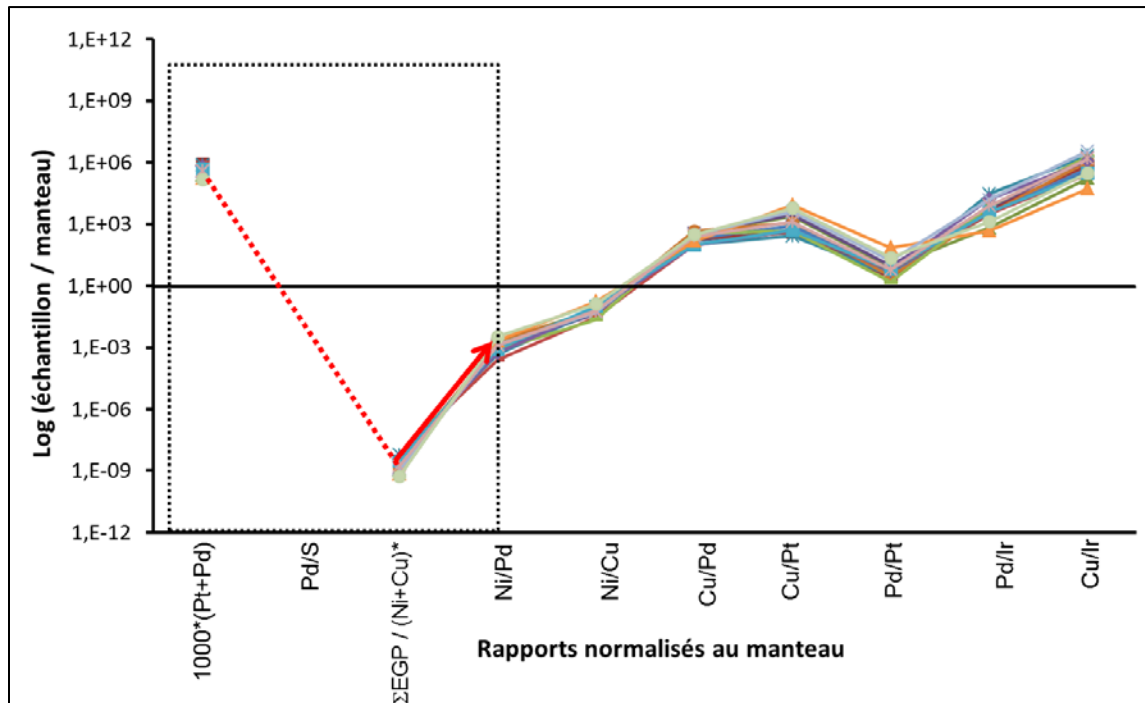


Figure 6. Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'intrusion de Voisey's Bay (gîte Ni-Cu) provenant de Naldrett *et al.* (2000). Notez la pente positive très accentuée entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd. L'encadré souligne la partie du diagramme qui permet de porter un jugement sur les minéralisations de type Ni-Cu, et les lignes rouges synthétisent le profil de ces échantillons.

Jinchuan

Le gisement de Jinchuan a un tonnage de 515 Mt avec une teneur moyenne de 1,06 % Ni (Eckstrand, 1996). L'intrusion minéralisée, qui est un dyke à dunite, pyroxénite et lherzolite, contient également jusqu'à 1 ppm d'EGP (Chai et Naldrett, 1992).

Les données de Chai et Naldrett (1992) sont des analyses de roches minéralisées. Sur le diagramme RA-EGP+ établi à partir de ces roches, la pente entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd est positive. Remarquez également que seuls les rapports faisant intervenir des métaux de base et des EGP (cf. $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$, Ni/Pd, Cu/Pd, Cu/Pt et Cu/Ir) ne sont pas égaux à 1, ce qui indique que ces échantillons ont principalement été différenciés par la ségrégation d'un liquide sulfuré.

Aussi, les trois premiers éléments du graphiques sont alignés, ce qui donne un profil en crochet à la partie droite du diagramme RA-EGP+ (**Figure 7**). Ce profil semble caractériser les échantillons contenant des sulfures qui ont accumulé plus de Ni-Cu que d'EGP, peut-être parce que l'intrusion initiale ne contenait pas suffisamment d'EGP et avait donc un potentiel uniquement pour les minéralisations de type Ni-Cu. Alternativement, les EGP ont pu être dilués par une trop grande quantité de soufre (cf. rapport Pd/S).

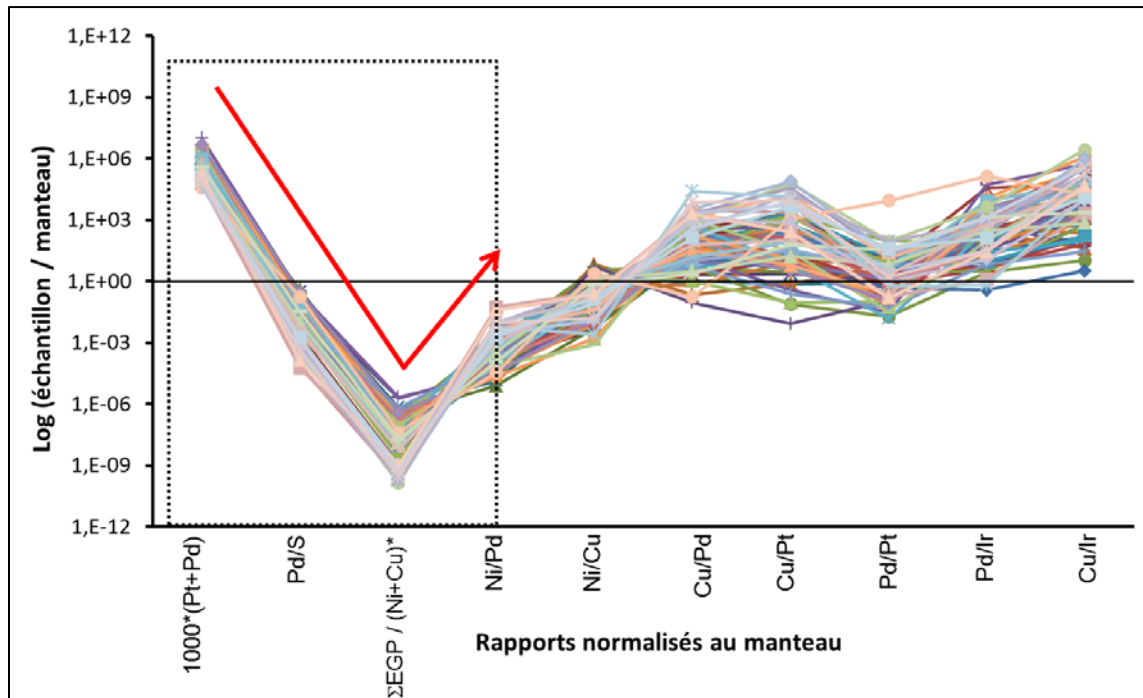


Figure 7. Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'intrusion de Jinchuan (gîte Ni-Cu) reportés par Chai et Naldrett (1992). Notez la forme en crochet (ligne rouge) de la partie gauche du diagramme. L'encadré souligne la partie du diagramme qui permet de porter un jugement sur les minéralisations de type Ni-Cu, et les lignes rouges synthétisent le profil de ces échantillons.

Dumont

Le gîte de Dumont (région d'Amos, Abitibi) est associé à un filon-couche mafique à ultramafique d'affinité komatiitique (Brügmann *et al.*, 1990). Ce gîte à faible teneur a des réserves de 365 Mt à 0,32 % Ni (www.royalnickel.com). Le filon-couche composé de dunite, péridotite et gabbro, contient également une zone enrichie en palladium dans sa partie basale.

Les échantillons utilisés contiennent des concentrations variables de sulfures disséminés (Brügmann *et al.* 1990). La partie gauche du diagramme RA-EGP+ a une forme en crochet, probablement parce que les sulfures ont accumulé principalement du Ni à partir d'un magma appauvri en EGP, et/ou parce que les silicates et les oxydes échantillonnés ont perdu des EGP au profit d'un liquide sulfuré non-échantillonné dans le présent exemple (**Figure 8**).

Aussi, la ligne qui relie le paramètre (Pd+Pt) au rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ est brisée, car les échantillons contiennent relativement peu de soufre au regard de leur concentration en Pd. Ceci est dû à une sous-saturation en S ou à un enrichissement en Pd du filon-couche qui présente ces deux caractéristiques (Brügmann *et al.*, 1990). Notons aussi que l'intrusion de Dumont a perdu du S au cours d'un épisode de métamorphisme, ce qui peut expliquer la faible valeur du rapport Pd/S (**Figure 8**).

Les échantillons de gabbro situés au toit de l'intrusion montrent des profils différents, probablement parce qu'ils ne contiennent pas de sulfures disséminés ou parce qu'ils n'ont pas perdu leurs métaux au profit d'un liquide sulfuré.

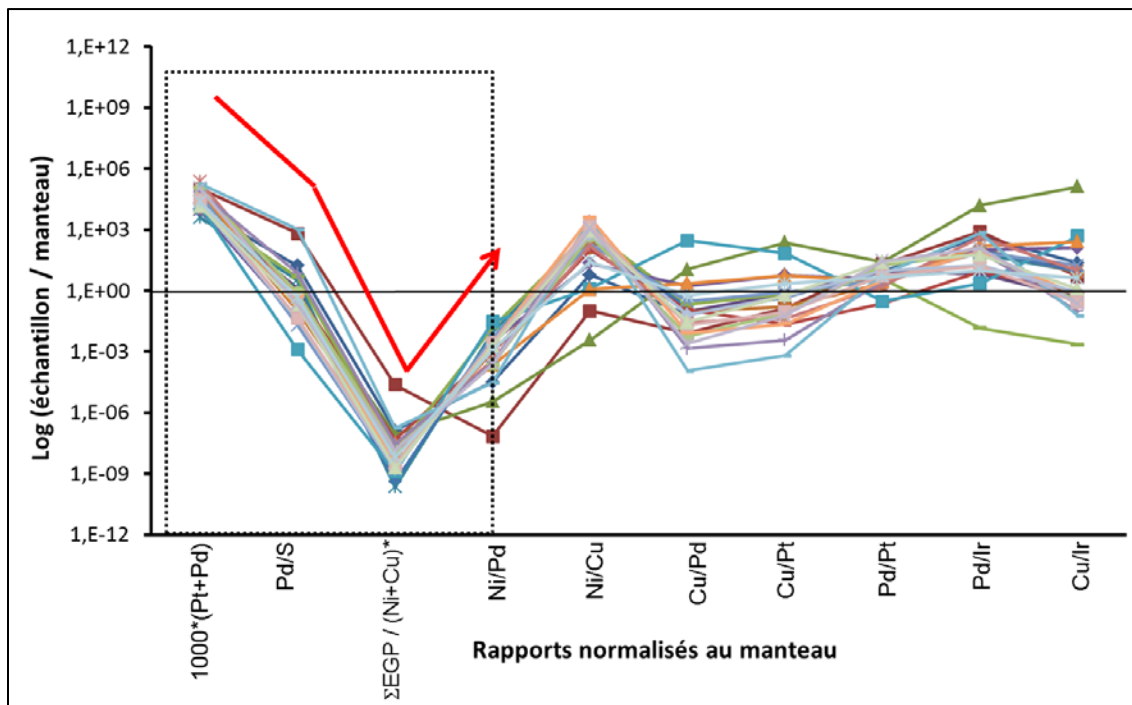


Figure 8. Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'intrusion de Dumont (gîte à faible teneur en Ni) reportés par Brüggmann *et al.* (1990). Notez que deux échantillons de gabbro provenant de la partie supérieure du filon-couche ne présentent pas la pente positive observée entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd pour les autres échantillons.

Lac Bleu

L'indice du Lac Bleu (Fosse du Labrador), est situé dans un filon-couche constitué de webstérite et lherzolite. Cette intrusion renferme un sulfure massif de 337 000 t ayant une teneur de 0,7 % Ni et 1,06 % Cu, et contenant peu d'EGP (Clark, 1989).

Les échantillons utilisés sont des roches ultramafiques riches en sulfures et des sulfures massifs. Sur le diagramme RA-EGP+, ces échantillons présentent un profil en crochet, comme nous l'avons déjà observé pour les cas précédents (**Figure 9**). Cependant, dans ce cas-ci, la pente entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd est faible, ce qui indique que les sulfures massifs se sont plus enrichis en EGP que ceux examinés dans les cas précédents. Cependant, le premier paramètre du graphique (cf. Pd+Pt) indique que les roches minéralisées contiennent peu d'EGP, ce qui signifie que ces roches contiennent également peu de Ni-Cu (cf. valeurs des rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd). Le profil observé sur la **Figure 9** est donc caractéristique de minéralisations de sulfures massifs s'étant faiblement enrichies en métaux (cf. facteur R faible).

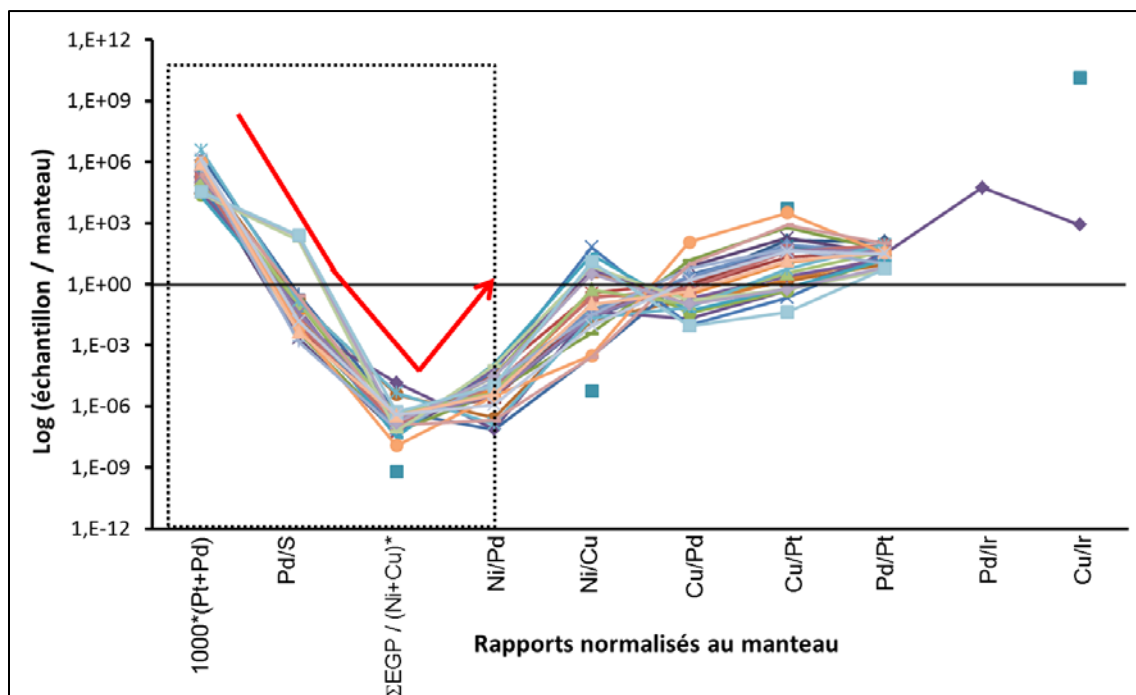


Figure 9. Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'indice du Lac Bleu provenant de Clark (1989). Notez que la pente entre les rapports EGP/(Ni+Cu)* et Ni/Pd est faiblement positive à négative.

East Bull Lake

Le suite intrusive mafique d'East Bull Lake est située à 80 km à l'ouest de Sudbury et contient plusieurs indices d'EGP (www.mustangminerals.com). Les échantillons utilisés proviennent de roches mafiques à ultramafiques minéralisées et contenant des quantités variables de sulfures et d'oxydes.

Ces échantillons présentent deux profils distincts sur le diagramme RA-EGP+ (**Figure 10**). Ces deux profils ont des formes en crochet dont la partie gauche est brisée car le rapport Pd/S a une valeur élevée. Ceci indique que les échantillons sont pauvres en sulfures et qu'ils contiennent probablement des oxydes qui ont concentré le Pd. Pour le profil A (**Figure 10**), la pente entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd est faible, car ces échantillons sont probablement faiblement enrichis en EGP et en Ni-Cu (cf. présence probable d'oxydes et de sulfures). En ce qui concerne le profil B, la pente est fortement négative, car les échantillons sont enrichis en EGP.

Les roches échantillonnées ont donc concentré les EGP plus efficacement que le Ni-Cu, probablement parce que la ségrégation des sulfures a été limitée et que les conditions étaient favorables à la cristallisation d'oxydes. Aussi, la partie droite du diagramme indique que l'intrusion a un potentiel modéré pour les minéralisations à Ni et faible pour celles à EGP car il n'a pas une forme en « M » (cf. Pearson, 2007).

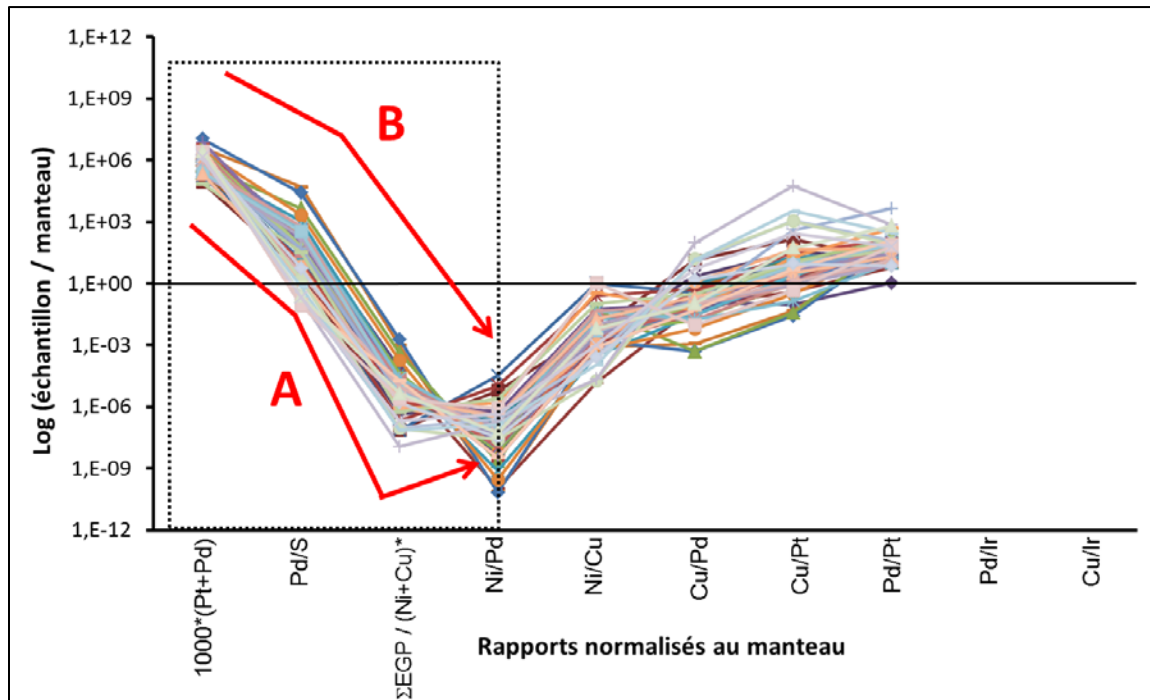


Figure 10. Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons du complexe mafique d'East Bull Lake, provenant de Peck *et al.* (2001). Les profils A et B indiquent que les échantillons sont, respectivement, faiblement et fortement enrichis en Pd.

Lac des Îles

Le complexe de Lac des Îles contient des minéralisations économiques en palladium, associées à de faibles teneurs en Ni et Cu. Les minéralisations sont situées dans une intrusion litée à webstérite, pyroxénite, grabbronorite et gabbro (Sutcliffe *et al.*, 1989).

Les échantillons étudiés contiennent des roches mafiques à ultramafiques contenant des sulfures disséminés (Brügmann, *et al.* 1989). La partie droite du diagramme RA-EGP+ a un profil caractéristique des gisements ayant été formés et/ou remobilisés par des processus hydrothermaux (cf. Pearson, 2007; **Figure 11**). Dans la partie gauche du graphique, la plupart des échantillons ont une pente négative depuis le paramètre Pd+Pt jusqu'au rapport Ni/Pd, ce qui est caractéristique d'échantillons enrichis en EGP et n'ayant pas concentrés le Ni-Cu (**Figure 11**). La valeur du rapport Pd/S et le bris de pente qu'il engendre confirme que les échantillons sont pauvres en sulfures et n'ont pas été différenciés par la ségrégation de liquides sulfurés.

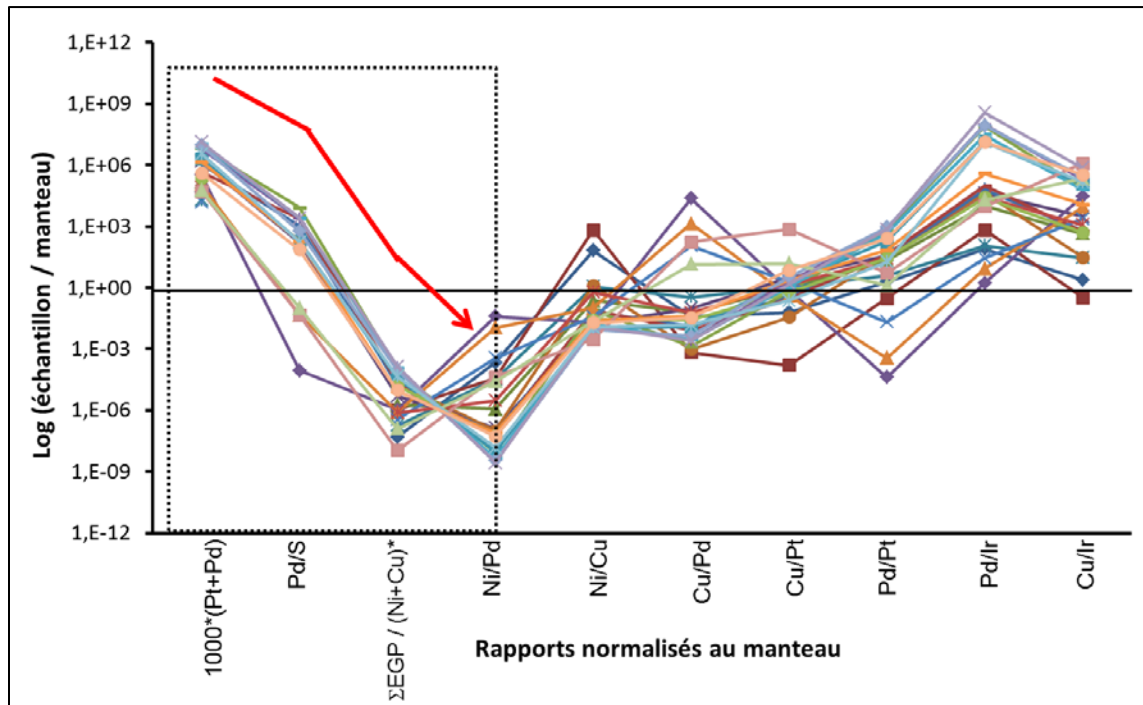


Figure 11. Diagramme RA-EGP+ montrant 15 échantillons du gisement de Lac des Îles, provenant de Brüggmann, *et al.* (1989). Pour la majorité des échantillons, les courbes sont, dans leurs parties gauche, rectilignes et ont des pentes négatives.

Kambalda

Les coulées komatiitiques de Kambalda (Australie) contiennent plusieurs gisements de sulfures massifs à Ni-Cu-EGP. Cet exemple est un cas typique de minéralisation à dominante nickélique associée à des komatiites. Les échantillons utilisés correspondent à des roches ultramafiques contenant des sulfures disséminés à massifs (Keays et Davison, 1976). Sur le diagramme RA-EGP+, les parties gauches des profils ont une forme en crochet, ce qui est caractéristique de roches riches en sulfures ayant efficacement concentré le Ni (**Figure 12**). Les EGP ont été moins efficacement concentrés, soit parce que le magma parental en contenait peu, soit parce qu'ils ont été dilués dans la trop grande quantité de sulfures présente dans la coulée.

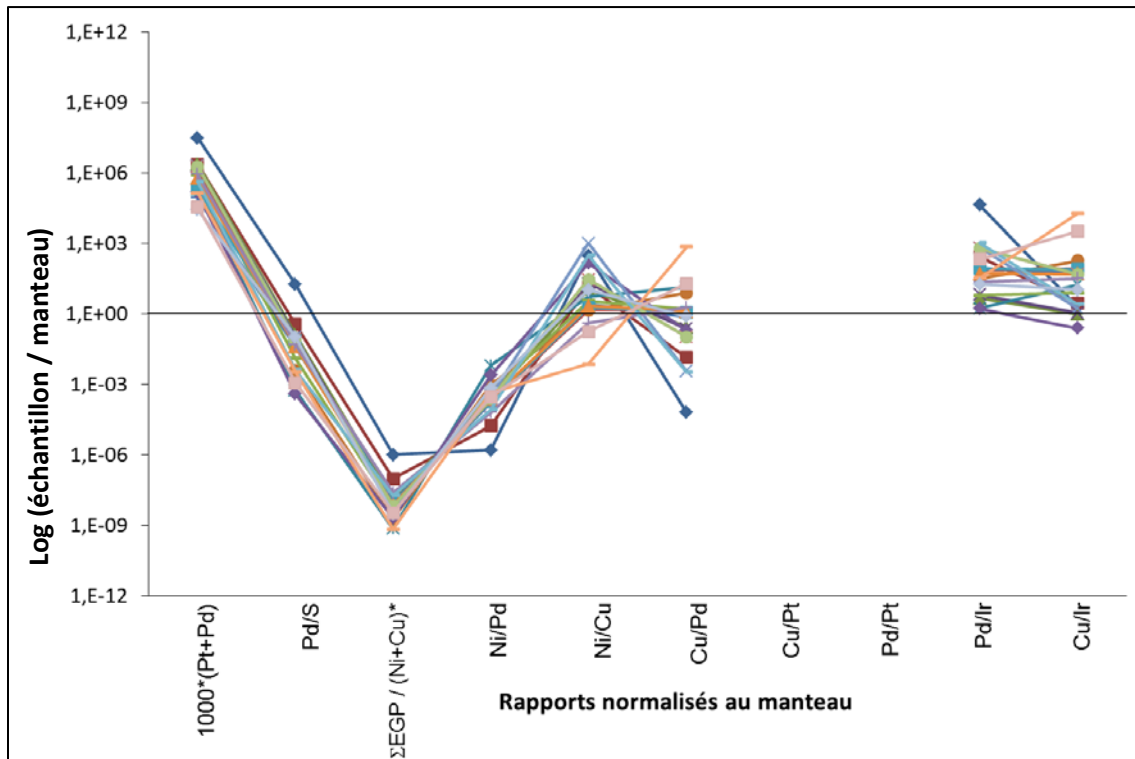


Figure 12. Diagramme RA-EGP+ montrant les échantillons des komatiites de Kambalda provenant de Keays et Davison (1976).

Les coulées ultramafiques de Kidd-Munro

L'assemblage de Kidd-Munro, situé dans la Sous-province de l'Abitibi, renferme les komatiites de Munro, qui sont associées à plusieurs minéralisations nickélicifères comme celles d'Alexo, de Dundonald et de Marbridge. Les minéralisations associées à la coulée de Pyke Hill (M. Houlé, communication personnelle, 2010), ont un profil favorable en crochet (cf. partie gauche du diagramme RA-EGP+) qui est caractéristique des minéralisations de sulfures massifs enrichis en Ni (**Figure 13**).

Les échantillons de la coulées de Théo présentent également un profil en crochet dans la partie gauche du diagramme RA-EGP+, avec une pente faible entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd (**Figure 14**). Ce profil suggère que la coulée de Théo a un faible potentiel pour les minéralisations à Ni-Cu, comme le suggère également sa nature tholéiitique (Sproule *et al.*, 2005).

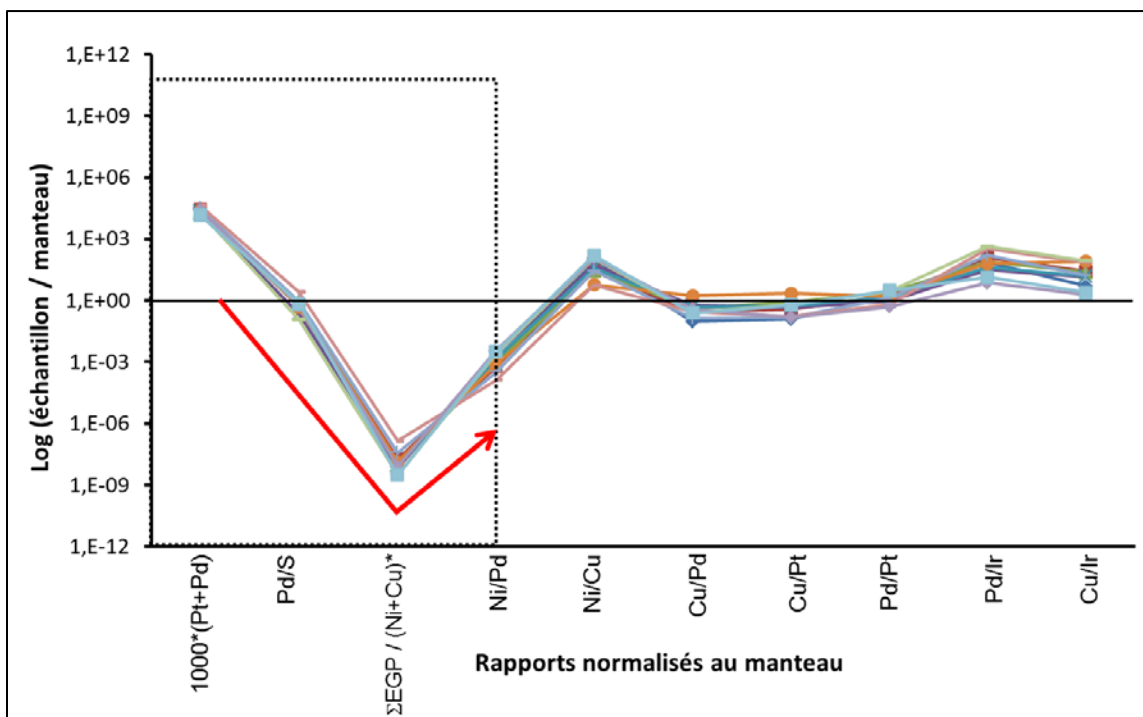


Figure 13. Diagramme RA-EGP+ montrant les échantillons de la coulée komatiitique de Pyke Hill, provenant de l'assemblage igné de Kidd-Munro (Ontario). Données tirées de Crocket et McRae (1986).

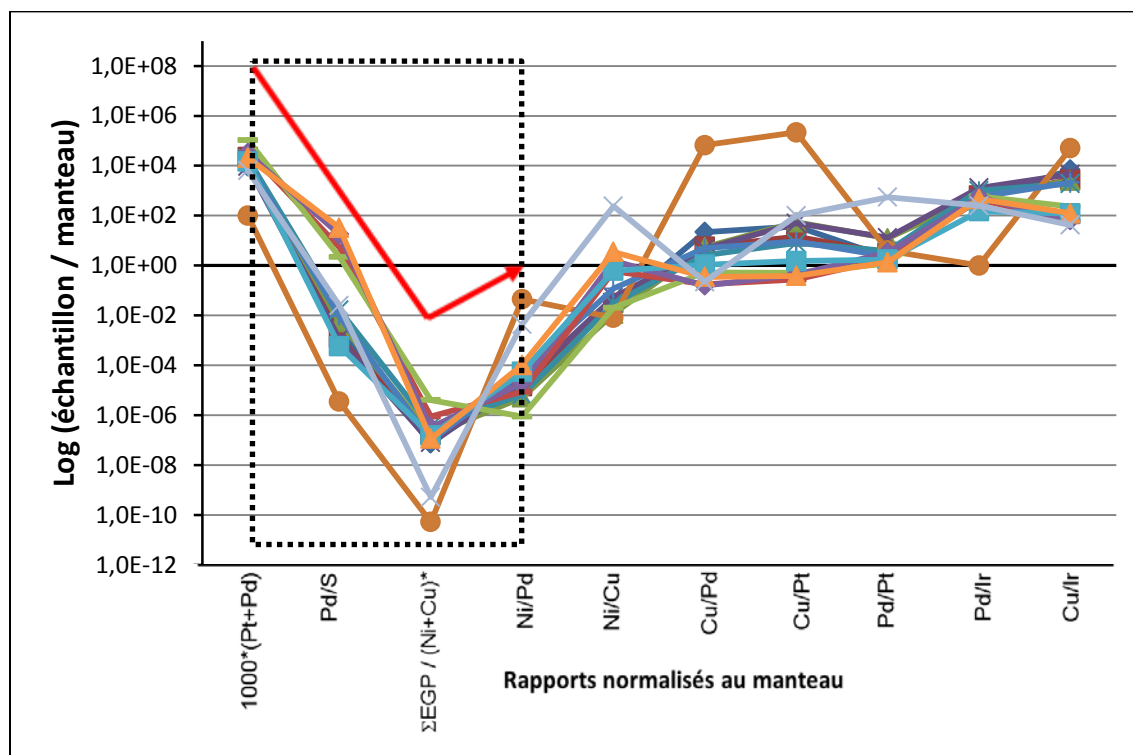


Figure 14. Diagramme RA-EGP+ montrant les échantillons de la coulée « Theo's Flow », qui fait partie des komatiites de Munro (Ontario). Données tirées de Crocket et McRae (1986).

L'ophiolite de Thetford Mines

La séquence ophiolitique de Thetford Mines est l'hôte de minéralisations de chromite. Comme la plupart des ophiolites, ces roches sont pauvres en EGP et contiennent trop peu de soufre pour avoir concentré le Ni-Cu de façon efficace. À Thetford Mines, les gisements de Ni ont une origine latéritique (cf. extraction du Ni contenu dans l'olivine par des processus d'altération superficielle).

Dans leurs parties gauches, les courbes reportées sur le diagramme RA-EGP+ ont un profil en crochet, car le magma a concentré plus efficacement le Ni que les EGP (**Figure 15**). Aussi, la droite qui relie les paramètres Pd+Pt et Pd/S a une pente faible car les roches sont sous-saturées en S. Ceci indique que le Ni n'a pas été concentré par les sulfures, mais se situe plus probablement dans l'olivine. Le profil de la **Figure 15** est donc caractéristique de roches ultramafiques contenant de grandes quantités d'olivines riches en Ni.

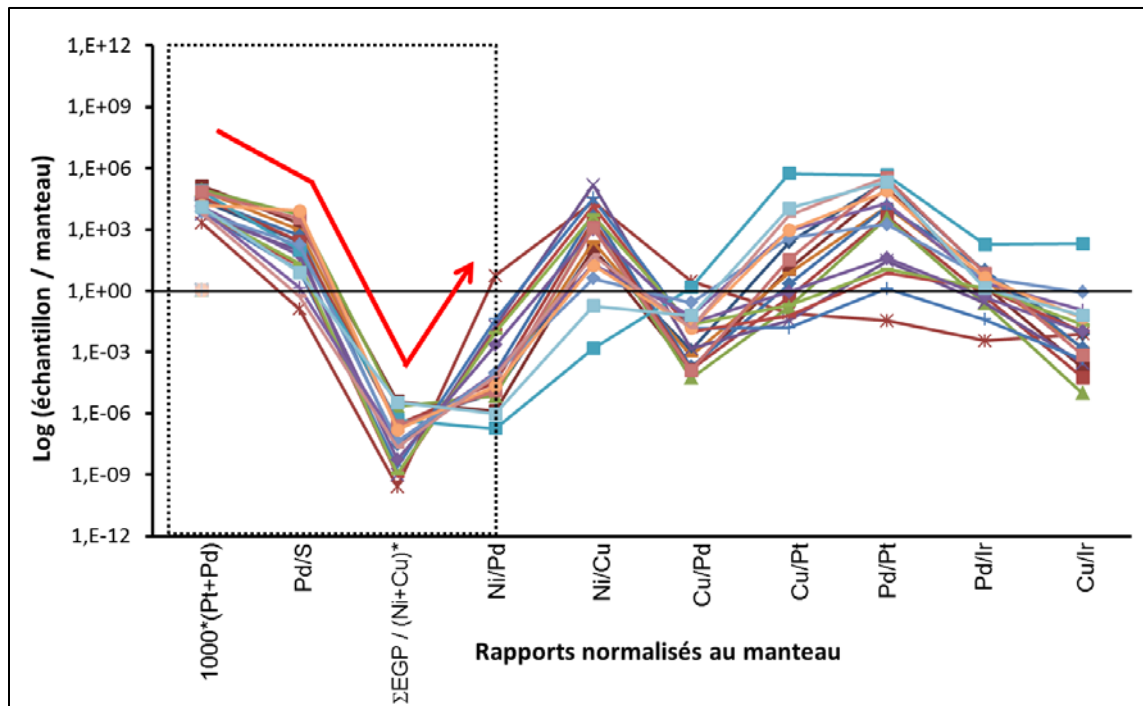


Figure 15. Diagramme RA-EGP+ montrant des échantillons de l'ophiolite de Thetford provenant d'Oshin (1981). Notez la pente faiblement négative entre les paramètres Pd+Pt et Pd/S, qui indique un faible enrichissement en S des roches.

4.2.6 Synthèse des profils RA-EGP+

L'ajout du rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ au diagramme arachnide a permis de créer le diagramme RA-EGP+, dont la partie gauche permet d'évaluer le potentiel pour les minéralisations de sulfures massifs à Ni-Cu (EGP) à partir d'échantillons de roches magmatiques mafiques à ultramafiques (**Figure 5**). La partie droite du diagramme, quant à elle, est identique à celle du diagramme RA-EGP qui permet d'évaluer le potentiel pour des minéralisations à EGP (Pearson, 2007).

Dans la partie gauche du diagramme RA-EGP+, le rapport Pd/S permet d'évaluer l'enrichissement en Pd des sulfures. Ce rapport sera élevé si la roche contient très peu de soufre, ce qui est le cas pour la majorité des magmas extraits du manteau, ou si elle renferme quelques sulfures très enrichis en Pd (cf. potentiel pour les gisements d'EGP). Ce rapport sera bas si la roche est enrichie en soufre, c'est-à-dire si

l'échantillon analysé est un sulfure massif à semi-massif dans lequel la concentration en Pd est faible au regard de la concentration en S.

Les rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$, quant à lui, a une tendance inverse à celle du rapport Ni/Pd. La pente de la droite qui relie ces deux rapports sera fortement positive si la roche considérée est plus enrichie en métaux de bases qu'en EGP. Dans ce cas de figure, et si le rapport Pd/S est bas et indique ainsi que la roche est saturée en soufre, alors les métaux de base ont pu être concentrés efficacement par un liquide sulfuré. L'intrusion échantillonnée aura donc un potentiel pour les gisements de sulfures massifs à Ni-Cu et son profil sur le diagramme RA-EGP+ aura une forme en crochet (**Figure 16a**).

Sinon, lorsque la pente entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd est positive mais que le rapport Pd/S est élevé, la roche est sous-saturée en soufre ce qui indique que l'intrusion étudiée n'a pas de potentiel pour les minéralisation Ni-Cu. Ce type de magma a soit perdu des EGP pendant sa remontée vers la surface, ce qui est le cas de nombreuses roches mafiques, ou bien la roche a concentré les métaux de base comme le Ni dans des phases silicatées comme l'olivine, ce qui est le cas des roches mantelliques et des roches intrusives à cumulats d'olivine (cf. ophiolite de Thetford Mines). Notons également que ce type de roche pourrait avoir perdu plus d'EGP que de Ni-Cu au profit d'un liquide sulfuré, et pourrait ainsi provenir d'intrusions ayant un potentiel pour les minéralisations de sulfures massifs à Ni-Cu. Ainsi, un échantillonnage abondant couplé à la cartographie et à des études pétrologiques sont recommandés pour évaluer pleinement le potentiel d'une intrusion magmatique. Pour ce type de roche, la courbe aura un profil en « racine carrée inversée » (**Figure 16c**).

Enfin, la pente entre les rapports $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ et Ni/Pd peut être faible à fortement négative, avec un rapport Pd/S faible. Dans ce cas de figure, la roche contient des sulfures faiblement enrichis en Pd, et est enrichie en EGP au regard de sa concentration en Ni-Cu. Ce type d'intrusion n'a pas de potentiel pour les minéralisations de sulfure massif à Ni-Cu, mais peut avoir un potentiel pour les minéralisations à EGP, à conditions que les EGP aient été concentrés par des oxydes et non par des sulfures (cf. rapport Pd/S faible). Ce potentiel pour les EGP peut être évalué à l'aide de la partie droite du diagramme RA-EGP+ (Pearson, 2007). Pour ce type de roche, la courbe de la partie gauche du diagramme aura un profil en droite descendante (**Figure 16b**).

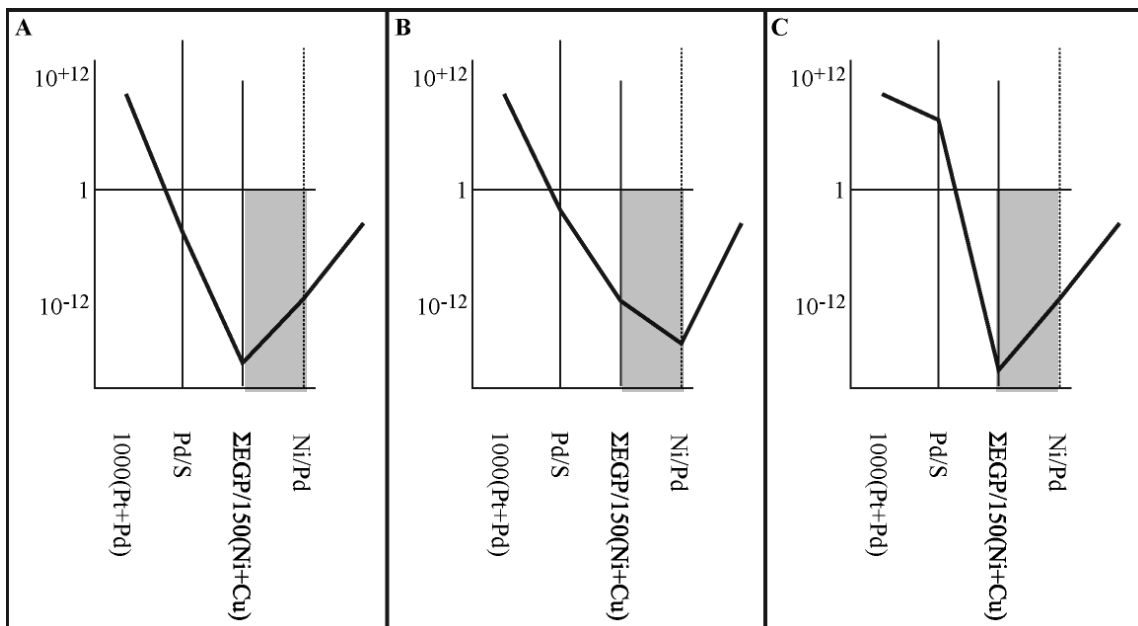


Figure 16. Profils schématiques de courbes reportées dans la partie gauche du diagramme RA-EGP+. Les zones ombragées soulignent les pentes négatives et positives des courbes décrites dans le texte; A) Profil en crochet caractéristique de sulfures massifs enrichis en métaux de base; B) Profil en pente

descendante de roches pouvant avoir un potentiel pour les minéralisations à EGP; C) Profil en « racine carrée inversée » de roches sous-saturées en soufre, qui sont soit enrichies en Ni (cf. présence d'olivine), ou qui ont perdu plus d'EGP que de Ni-Cu au profit d'un liquide sulfuré. Selon l'interprétation que l'on fera au cas par cas, de tels échantillons peuvent provenir d'intrusions ayant ou non un potentiel pour les minéralisations de sulfures massifs à Ni-Cu.

5. RAPPORT Ni/S

5.1 Introduction et théorie

Dans le manteau et dans les magmas mafiques pauvres en soufre, le Ni se répartit entre plusieurs silicates, comme l'olivine principalement, et le pyroxène, et peut également intégrer la structure d'oxydes comme la chromite (Lamberg, 2005). Puisque ces minéraux sont abondants dans les magmas mafiques, ils ont la possibilité d'extraire le Ni du magma au début de sa cristallisation. Ainsi, le magma perd son Ni pendant la différenciation, c'est-à-dire que l'on observe généralement une anti-corrélation entre les concentrations en Si et en Ni et c'est pour cette raison que seuls les magmas ultramafiques à mafiques ont un potentiel pour les gisements à Ni-Cu. Notons que le comportement du Cu peut être similaire ou plus complexe et, pour cette raison, cette section se concentrera uniquement sur le Ni.

En présence de liquide sulfuré, le Ni se concentrera dans les gouttelettes de Fe-S et sa concentration dans le magma silicaté diminuera. La répartition de ce métal est quantifiée par les coefficients de partage partiels du Ni, qui sont d'environ 1-14 pour l'olivine et sont ~1000 pour le liquide sulfuré (Barnes et Lightfoot, 2005). Ces chiffres indiquent qu'en présence d'olivine et de liquide sulfuré, le Ni contenu dans le magma silicaté intégrera majoritairement le liquide sulfuré.

Ainsi, les intrusions ayant un potentiel pour les minéralisations recherchées ne doivent pas uniquement être enrichies en métaux, elles doivent également contenir du soufre. Puisque le manteau contient peu de soufre et que les magmas qui en sont extraits le concentrent faiblement, le soufre est généralement apporté par contamination, lorsqu'un magma assimile des roches méta-sédimentaires riches en soufre par exemple. Un exemple emblématique du rôle du soufre est offert par les ophiolites. Ces roches sont mafiques et enrichies en Ni et pourraient être qualifiées de « fertiles ». Cependant, les ophiolites proviennent de magmas qui ont refroidi dans la croûte océanique, où aucun contaminant capable de provoquer la saturation en soufre n'était présent. Pour cette raison, les ophiolites ne contiennent généralement pas de gisements de sulfures massifs, ou renferment des gîtes de Ni magmatique de teneurs et de volumes non-économiques (**Figure 17**).

Dans cette section, nous nous intéresserons à la concentration absolue en Ni des intrusions magmatiques minéralisées, ainsi qu'à leurs rapports Ni/S. Dans un système pauvre en S, et donc ayant un faible potentiel, le rapport Ni/S devrait être élevé, et la concentration en Ni relativement faible. Les systèmes les plus intéressants du point de vue de la prospection seront riches en Ni et auront des rapports Ni/S relativement faibles. Notons également que le rapport Ni/S diminuera depuis des roches à sulfures disséminés vers les roches à sulfures massifs. Afin de visualiser ces différents critères, un diagramme binaire mettant en relation le rapport Ni/S et la concentration en Ni sera utilisé.

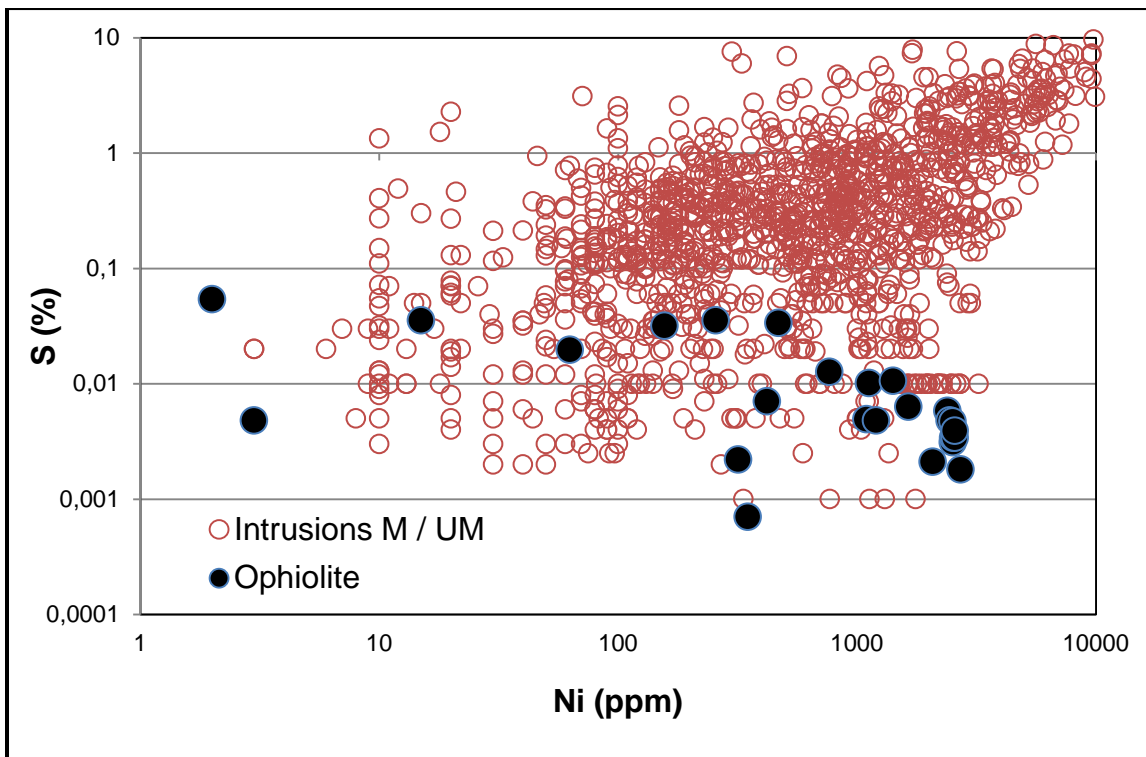


Figure 17. Teneurs en Ni et S pour des échantillons d'ophiolite et d'autres intrusions mafiques à ultramafiques (cf. intrusions M/UM). Notez que les ophiolites sont pauvres à enrichies en Ni, mais sont systématiquement appauvries en S, alors que pour les intrusions minéralisées étudiées, les concentrations en Ni et en S sont positivement corrélées. Les données géochimiques proviennent de Keays et Davison (1976), Oshin (1981), Crocket et McRae (1986), Clark (1989), Brüggmann *et al.* (1989, 1990), Chai et Naldrett (1992), Naldrett *et al.* (2000), Peck *et al.* (2001), Sproule *et al.* (2005).

5.2 Diagramme Ni/S vs Ni

Sur un diagramme Ni/S versus Ni, il est possible de tracer plusieurs courbes rectilignes de concentrations en S constantes (**Figure 18**). Ces courbes ont été tracées en utilisant les concentrations moyennes en Ni-S des minéraux sulfurés les plus communs. Ainsi, la ligne 100% de sulfures a été construite à partir des concentrations en Ni-S qui pourraient être mesurées dans une roche contenant uniquement de la millérite (NiS) et/ou de la pentlandite ($[(Fe,Ni)_9S_8]$) ayant différents rapports Fe/Ni (**Figure 18**). Les autres droites sont similaires à cette première courbe, mais représentent des concentrations en sulfures plus faibles d'un ordre de grandeur à chaque intervalle.

Ces courbes sont utiles pour visualiser rapidement la concentration en soufre d'une série d'échantillons. En effet, les échantillons pauvres en soufre se situent sur ou à gauche de la courbe 0,1 wt% de sulfures. Les sulfures semi-massifs à massifs, au contraire, se situent à droite du graphique, le long des droites 10 à 100 wt% de sulfures.

Ce diagramme permet d'expliquer les variations des concentrations en Ni observées dans une série de roches provenant d'une même intrusion magmatique. En effet, lorsque plusieurs échantillons sont alignés parallèlement aux courbes de concentrations constantes en sulfures, cela signifie que les variations de leurs concentrations en Ni ne sont pas dues à la ségrégation des sulfures. Dans ce cas, les concentrations en Ni varient probablement en fonction de la cristallisation fractionnée, ou sont le résultat d'un apport extérieur de roches plus riches ou plus pauvres en Ni que le magma étudié (cf. mélange de magma ou assimilation de roches encaissantes) (**Figure 18**).

En revanche, lorsqu'une série d'échantillons sont alignés obliquement aux courbes de concentrations constantes en sulfures, cela signifie que les variations de leurs concentrations en Ni sont dues à la ségrégation des sulfures (**Figure 18**). De tels échantillons contiennent des sulfures et des concentrations élevées en S, ce qui peut aussi être observés sans recourir au graphique Ni/S vs S. Cependant, en plus de permettre une visualisation rapide de l'attitude d'une série d'échantillons, l'intérêt de ce diagramme est aussi de permettre une estimation de la teneur maximale en Ni qu'un sulfure massif pourrait atteindre dans une intrusion donnée, et d'apprécier l'efficacité des processus permettant la concentration des métaux (**Figure 19**).

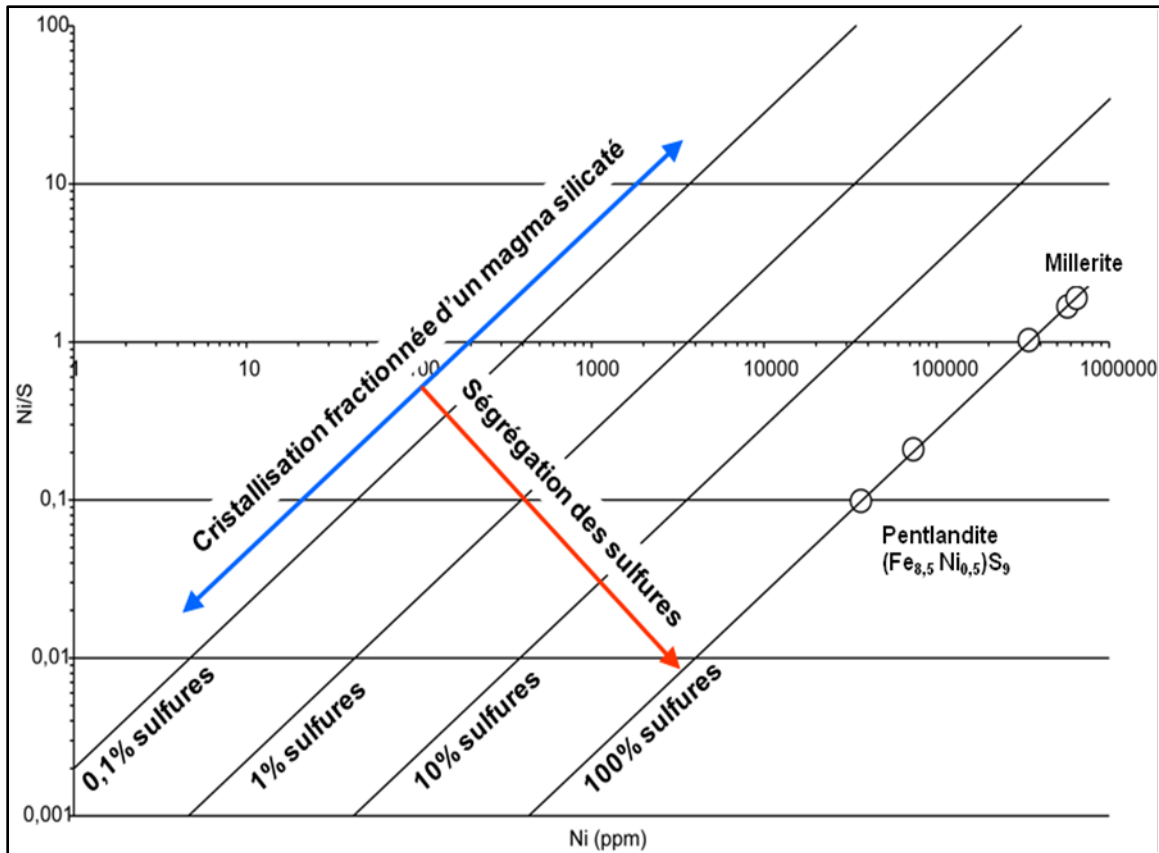


Figure 18. Interprétations possibles de séries d'échantillons s'alignant dans le graphique Ni vs Ni/S.

En effet, la teneur maximale en Ni d'un gîte peut être estimée graphiquement, à l'aide de la courbe 100% de sulfures, comme montré à la **Figure 19**. Cependant, il est important de garder à l'esprit que de telles concentrations en Ni seront rarement atteintes dans les systèmes naturels, puisque les sulfures massifs sont majoritairement constitués de phases qui ne concentrent pas le Ni, comme la pyrite par exemple. La valeur estimée graphiquement doit donc être utilisée simplement à titre indicatif.

Aussi, une courbe de régression peut être tracée à partir d'une série d'échantillons (cf. flèche rouge, **Figure 18-19**). La pente de cette courbe de régression permet de porter un jugement sur l'efficacité des processus ayant permis de concentrer les métaux. En effet, pour des concentrations identiques en soufre, les magmas peuvent présenter toute une gamme de concentrations en Ni, suivant que les gouttelettes de liquide sulfuré ont été capables d'extraire une quantité plus ou moins importante de métaux du magma. Ce paramètre est généralement quantifié à l'aide du facteur R (cf. Barnes et Lightfoot, 2005; et références incluses), qui doit être élevé pour permettre la formation d'un gisement économique. Sur le graphique Ni/S vs Ni, une pente fortement négative devrait correspondre à un facteur R faible, alors qu'une pente négative devrait correspondre à un facteur R plus élevé, possiblement favorable à la formation d'un gîte.

Une pente positive correspondra à des conditions très favorables et possiblement irréalistes dans les systèmes naturels (**Figure 19**).

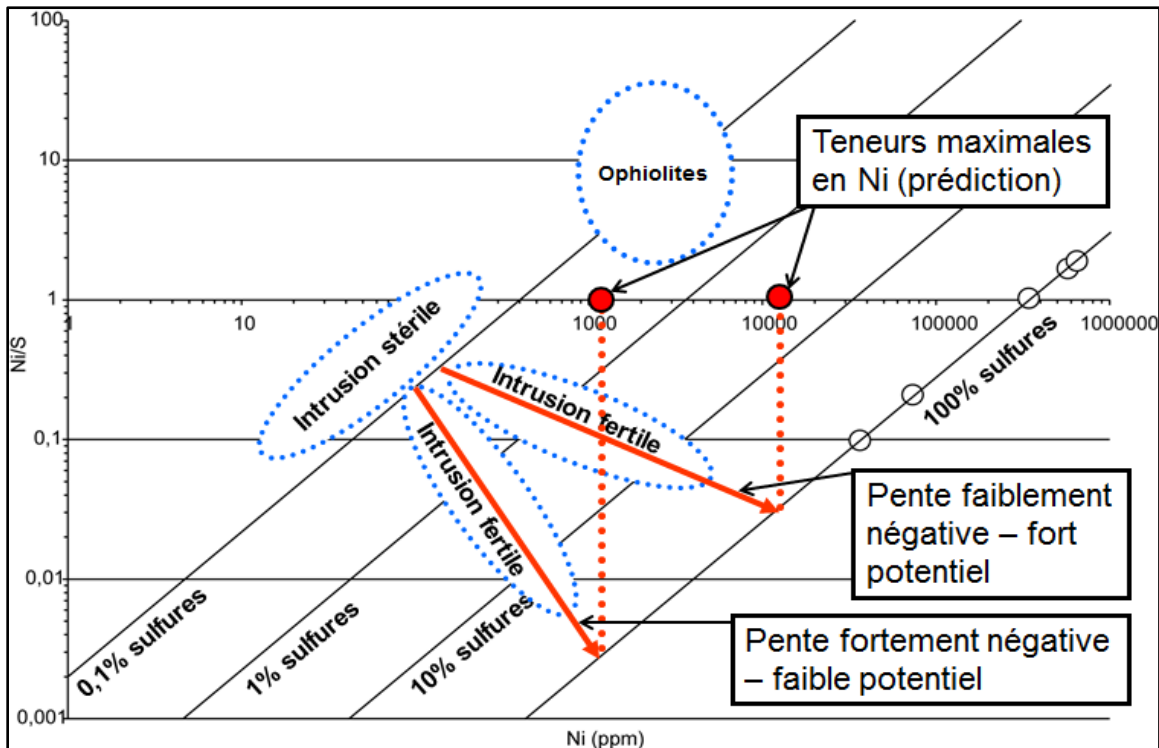


Figure 19. Distribution schématique d'échantillons appartenant à différentes intrusions dans le diagramme Ni vs Ni/S. Les intrusions stériles, différenciées uniquement par cristallisation fractionnée par exemple, montrent une distribution parallèle aux lignes de concentrations constantes et faibles en sulfures. Les intrusions fertiles, quant à elles, se distribuent le long de droites obliques aux droites de concentrations constantes en sulfures. L'intersection de ces droites avec la ligne 100% de sulfures permet d'évaluer approximativement la teneur en nickel maximale d'un sulfure massif qui se formerait dans une intrusion donnée. Les ophiolites, qui ont des valeurs moyennes à élevées en Ni et faibles en S, ont également été représentées dans ce diagramme.

5.3 Exemples d'utilisation du diagramme Ni/S vs Ni

Dans cette section, la concentration en Ni-S de plusieurs intrusions magmatiques sera étudiée à l'aide du diagramme Ni/S vs Ni.

Prenons tout d'abord l'exemple des gisements de Stormi (complexe de Vammala, Finlande) et de Bruvann (intrusion litée de Rana, Nordland, Norvège). Les variations des concentrations en Ni de ces deux intrusions sont dues, possiblement, à la cristallisation fractionnée pour une partie des échantillons, et à la ségrégation des sulfures pour les autres roches. Notons que les sulfures se sont ségrégués dans les roches les plus riches en Ni, c'est-à-dire dans les unités les plus mafiques de ces deux intrusions. Aussi, on observe quelques échantillons stériles riches en Ni et pauvres en S dans l'intrusion de Stormi, qui correspondent probablement à des roches riches en olivines (cf. xénolite du manteau ou cumulat ultramafique) (**figure 20**).

L'intrusion de Alter do Chao (Portugal) n'est pas minéralisée et le graphique Ni/S vs Ni indique que les variations des concentrations en Ni pourraient être entièrement dues à la cristallisation fractionnée du magma (**figure 21a**). Les échantillons du gisement du Lac des Îles (Ontario) n'ont pas non plus été

différenciés par la ségrégation d'un liquide sulfuré (**figure 21b**). Le gisement de Lac des Îles est, en effet, un gisement d'EGP, dont la formation n'a pas nécessité la ségrégation d'un liquide sulfuré.

Les échantillons provenant de l'indice du Lac Bleu (Fosse du Labrador), quant à eux, se sont différenciés suite à la ségrégation d'un liquide sulfuré. Cet indice correspond à une lentille de sulfure massif située à la base d'une intrusion mafique. Ce sulfure massif est relativement pauvre en nickel, ce qui pourrait être dû à un facteur R faible, comme le montre la pente fortement négative de la droite de régression tracée à partir des échantillons disponibles (**figure 22a**).

Les échantillons du Lac Kénogami (Saguenay) proviennent d'un dyke de gabbronorite associé à la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean. L'alignement des échantillons est peu marqué, peut-être parce qu'ils proviennent de trois indices différents (**figure 22b**). Cependant, ces échantillons indiquent que la ségrégation des sulfures a eu lieu et que le facteur R semble intéressant. Cependant, des études détaillées de ce dyke ont montré que le système magmatique est probablement trop petit pour avoir permis la formation d'un gisement économique (Vaillancourt 2001).

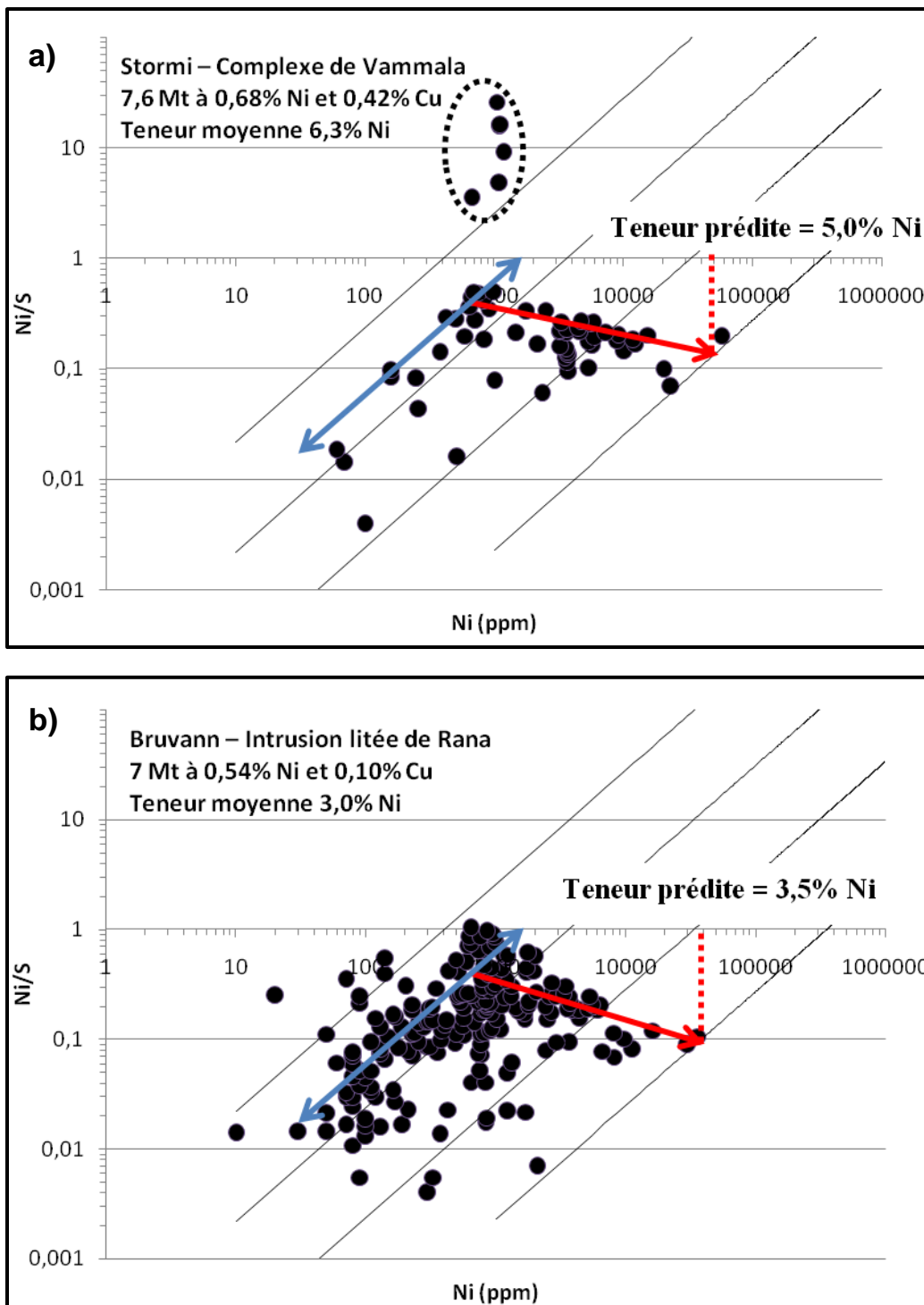


Figure 20. Graphiques Ni vs Ni/S représentant **a)** le gisement de Stormi du Complexe de Vammala (Finlande) et **b)** le gisement de Bruvann (Nordland, Norvège) (données de Lamberg, 2005).

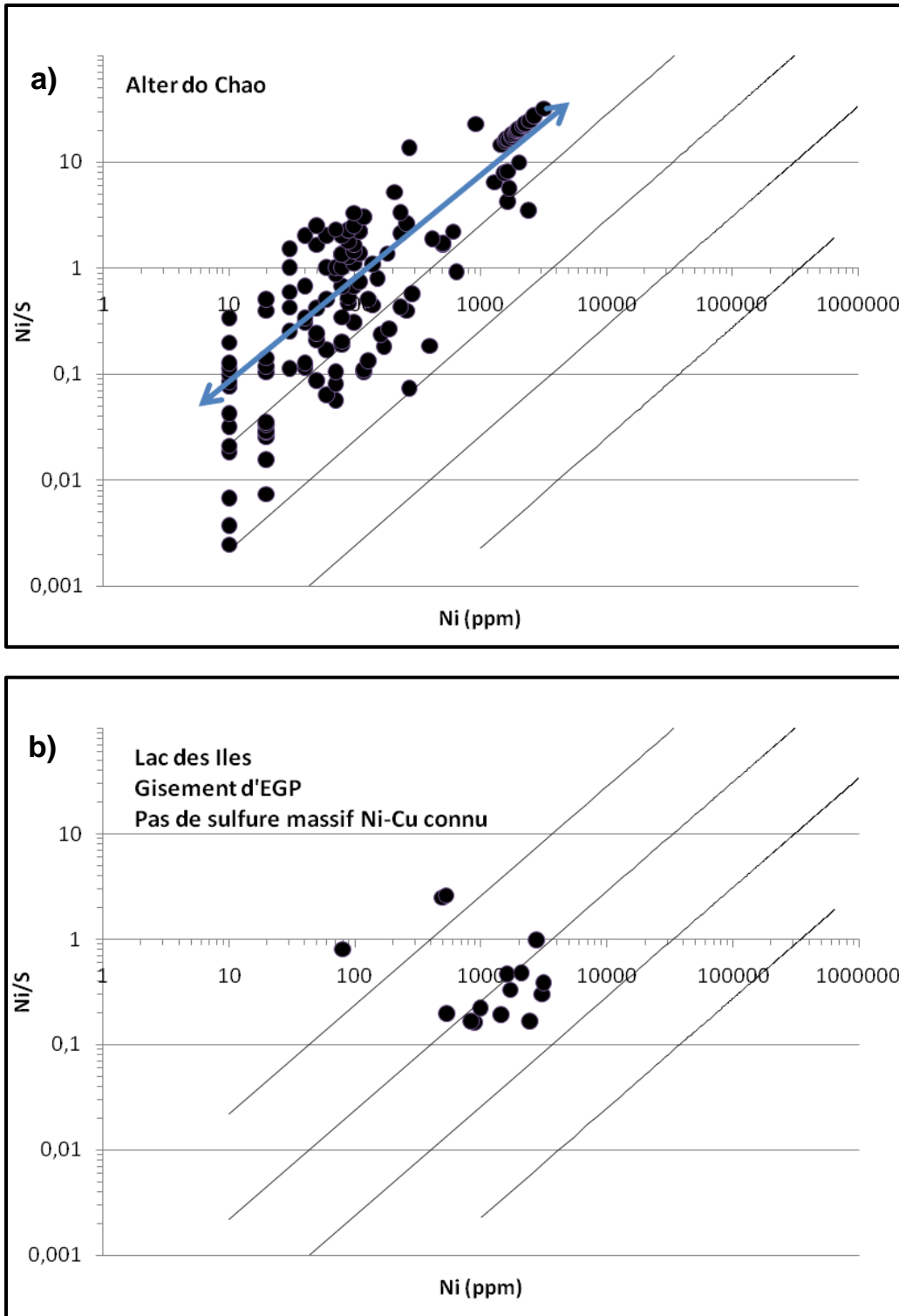


Figure 21. Diagrammes Ni vs Ni/S représentant **a)** l'intrusion de Alter do Chao (données de Lamberg, 2005) et **b)** l'intrusion renfermant le gisement du Lac des Îles (Ontario) (données de Brugmann *et al.*, 1989).

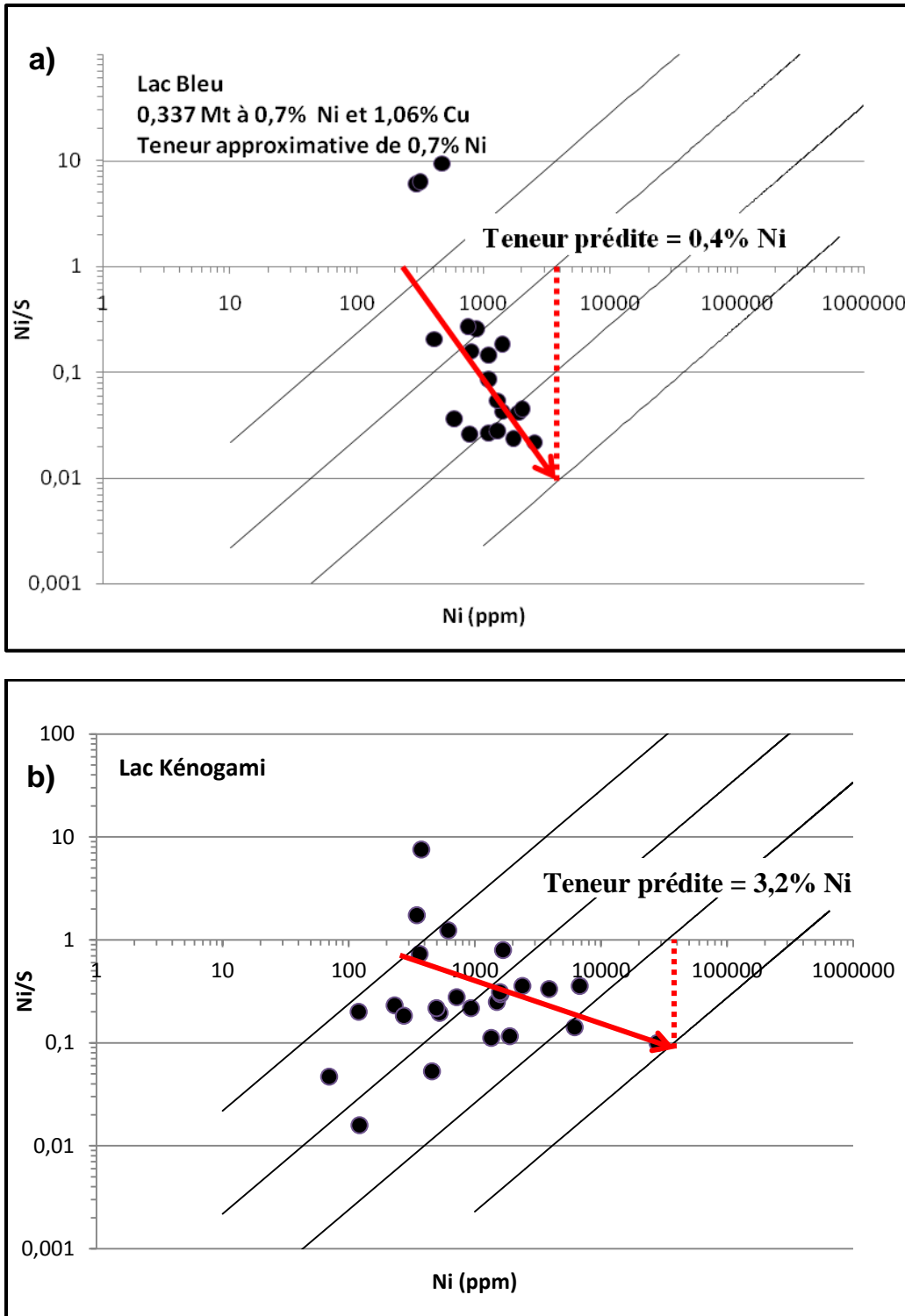


Figure 22. Graphiques Ni vs Ni/S représentant a) des échantillons provenant de l'indice du Lac Bleu (données de Clark 1989) et b) l'intrusion du Lac Kénogami (données de Vaillancourt, 2001).

5.4 Champs de fertilité du diagramme Ni/S vs Ni

Comme nous l'avons vu précédemment, les concentrations en Ni des magmas varient en fonction de la cristallisation fractionnée, qui fait également varier les concentrations en éléments majeurs. Ainsi, il est possible que des magmas ayant subi des degrés de différenciation identiques aient des concentrations constantes et caractéristiques en Ni-S. Si c'est le cas, l'identification de ces valeurs typiques pourrait permettre de repérer facilement les roches contenant des concentrations anormalement élevées en Ni-S et provenant d'intrusions potentiellement fertiles. Dans cette section, ces valeurs typiques en Ni-S seront repérées par l'intermédiaire de champs de fertilité, qui viendront compléter le diagramme Ni/S vs Ni.

Afin de construire les champs de fertilité, les roches seront classées en fonction de leur degré de différenciation. L'effet de la cristallisation fractionnée est généralement quantifié à l'aide de la concentration en silice. Ce critère est cependant problématique pour les magmas les plus mafiques, pour lesquels le nombre Mg, qui est compris entre 0 et 1 ($Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+})$; avec Mg et Fe en wt%), ou la concentration absolue en Mg sont plus souvent utilisés. Notons que chacun de ces critères présentent des avantages et des inconvénients, puisqu'ils sont de bons marqueurs du degré de cristallisation fractionnée mais qu'ils sont également sensibles à la composition de la source, au degré de fusion partielle, à la contamination, aux types de phases présentes dans l'échantillon, etc.

Pour les besoins de cet exercice, nous utiliserons le Mg#, qui semble plus satisfaisant car il fait intervenir un plus grand nombre de paramètres. Les échantillons compilés ont été divisés en quatre groupes contenant des quantités similaires d'échantillons, et qui sont définis de la façon suivante : 1) groupe 1 avec $Mg\# < 0,4$; 2) groupe 2 avec $Mg\# = 0,4$ à $0,6$; 3) groupe 3 avec $Mg\# = 0,6$ à $0,7$; 4) groupe 4 avec $Mg\# > 0,7$. En plus de classer les échantillons disponibles en fonction de leur Mg#, ils seront classés selon qu'ils proviennent d'une intrusion « fertile » (cf. minéralisée) ou « stérile » (cf. dépourvue de minéralisation connue).

À partir de ces groupes, des champs de fertilité ont été créés (cf. **Figure 23 à 27**). Ces champs de fertilité permettent d'identifier rapidement les échantillons fertiles et non-fertiles, à condition qu'ils soient classés en fonction de leur Mg#. Le taux de reconnaissance des analyses disponibles est de 59% à 94%, et est généralement supérieur à 70% (cf. **Tableau 2**).

Tableau 2. Calcul de l'efficacité de reconnaissance de la fertilité des intrusions par l'utilisation des champs de fertilité définis par l'intermédiaire du Mg#.

Mg#	Stérile			Fertile		
	Connu	Reconnu	Succès	Connu	Reconnu	Succès
< 0,4	138	99	72%	79	70	89%
0,4 à 0,6	93	55	59%	127	89	70%
0,6 à 0,7	90	85	94%	159	119	75%
> 0,7	39	33	85%	117	91	78%

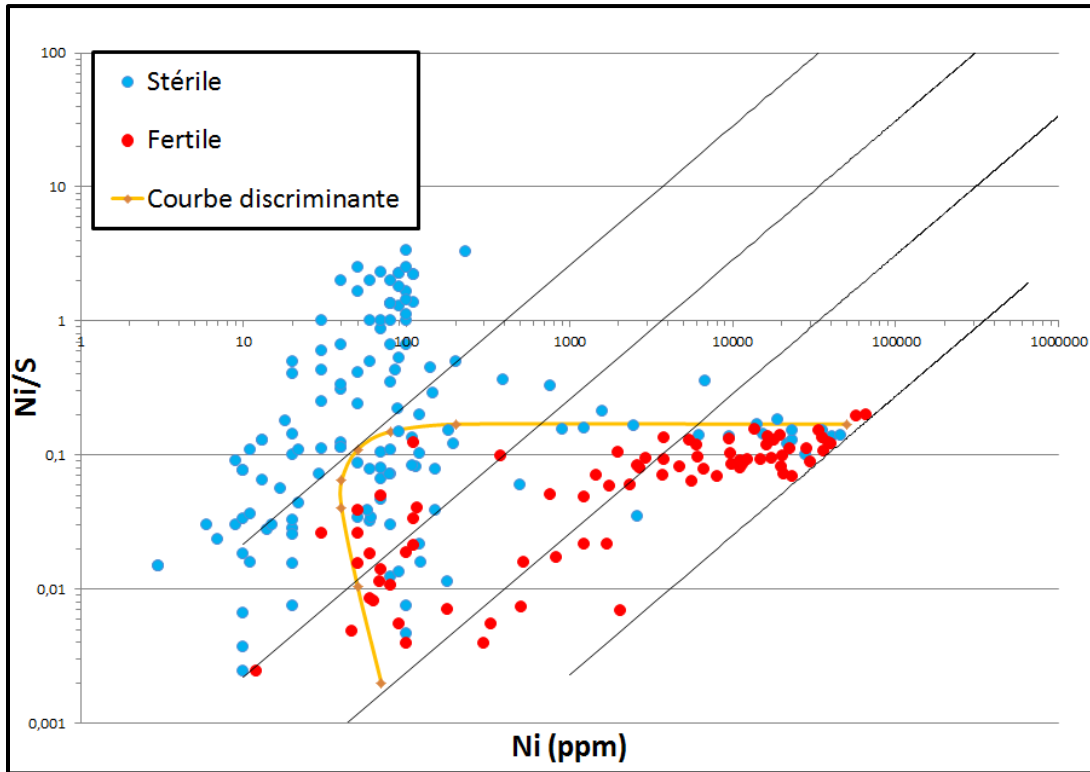


Figure 23. Distribution des échantillons ayant un Mg# < 0,4 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=79) et stériles (n=138) proviennent de 17 localités différentes.

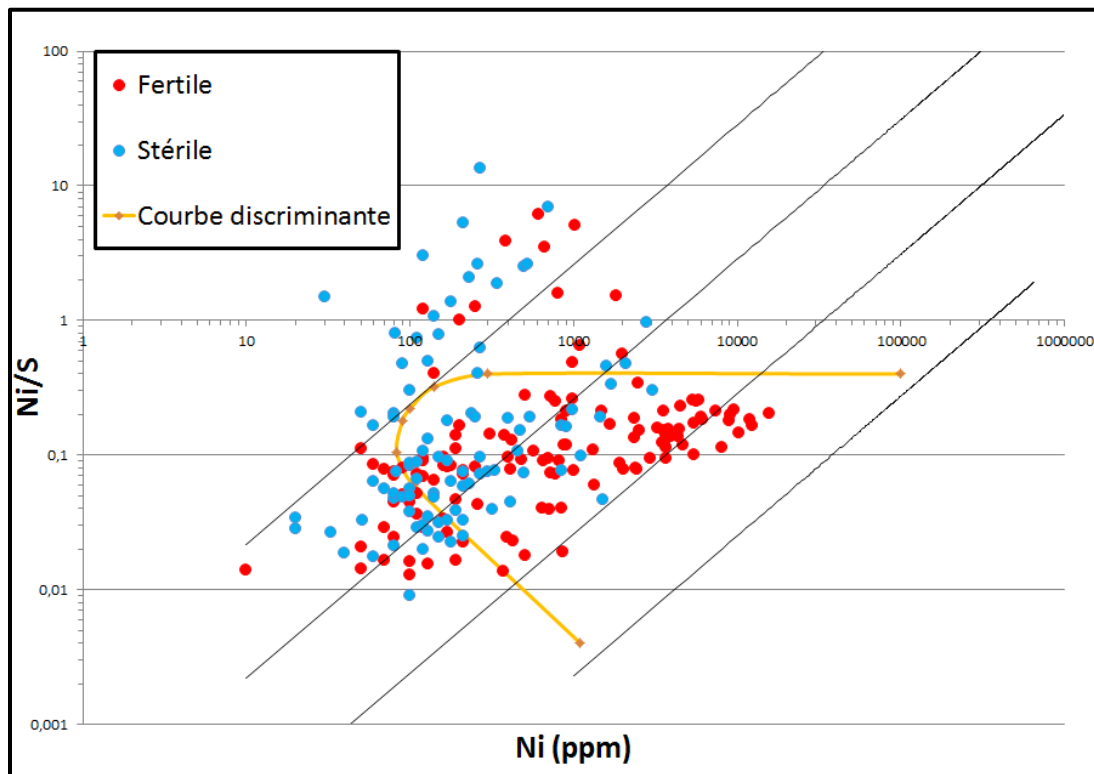


Figure 24. Distribution des échantillons ayant un Mg# compris entre 0,4 et 0,6 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=127) et stériles (n=93) proviennent de 10 localités différentes.

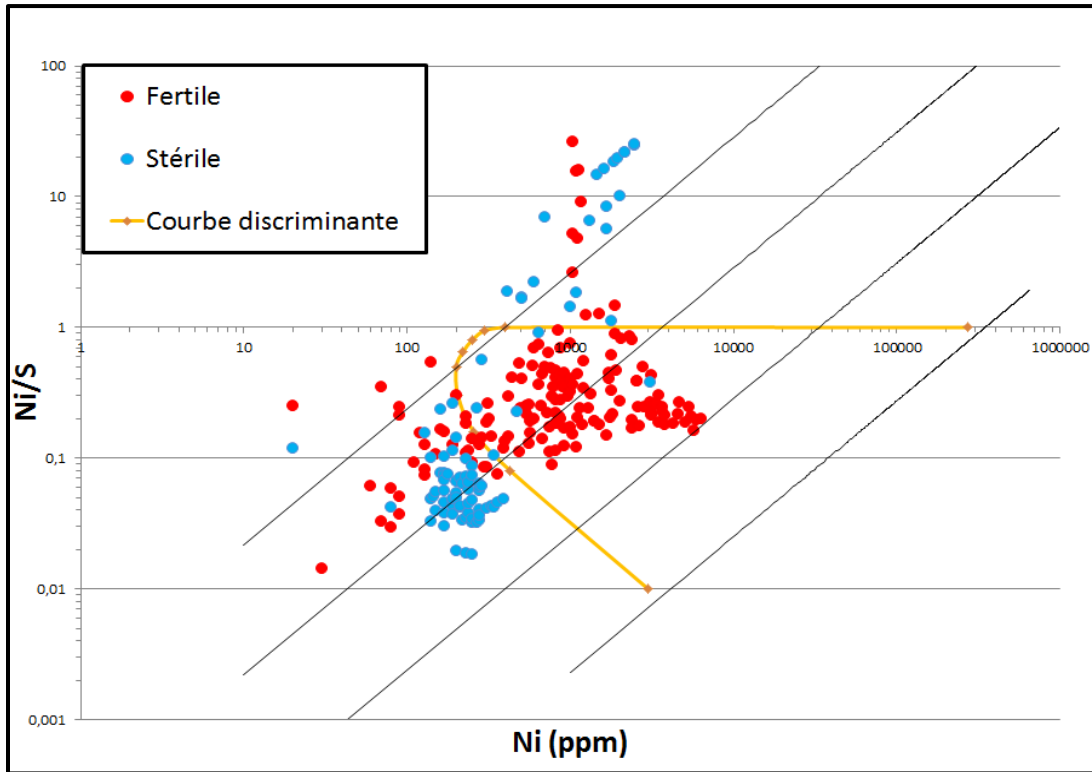


Figure 25. Distribution des échantillons ayant un Mg# compris entre 0,6 et 0,7 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=159) et stériles (n=90) proviennent de 9 localités différentes.

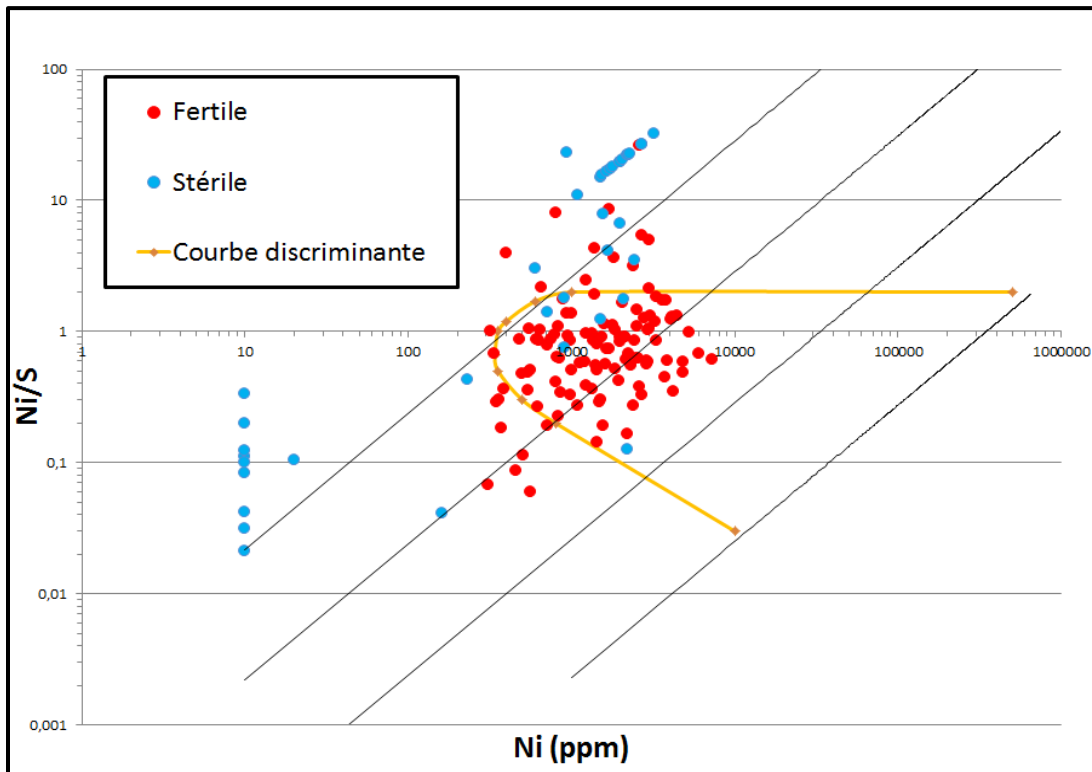


Figure 26. Distribution des échantillons ayant un Mg# > 0,7 et champ de fertilité correspondant. Les échantillons fertiles (n=117) et stériles (n=39) proviennent de 20 localités différentes.

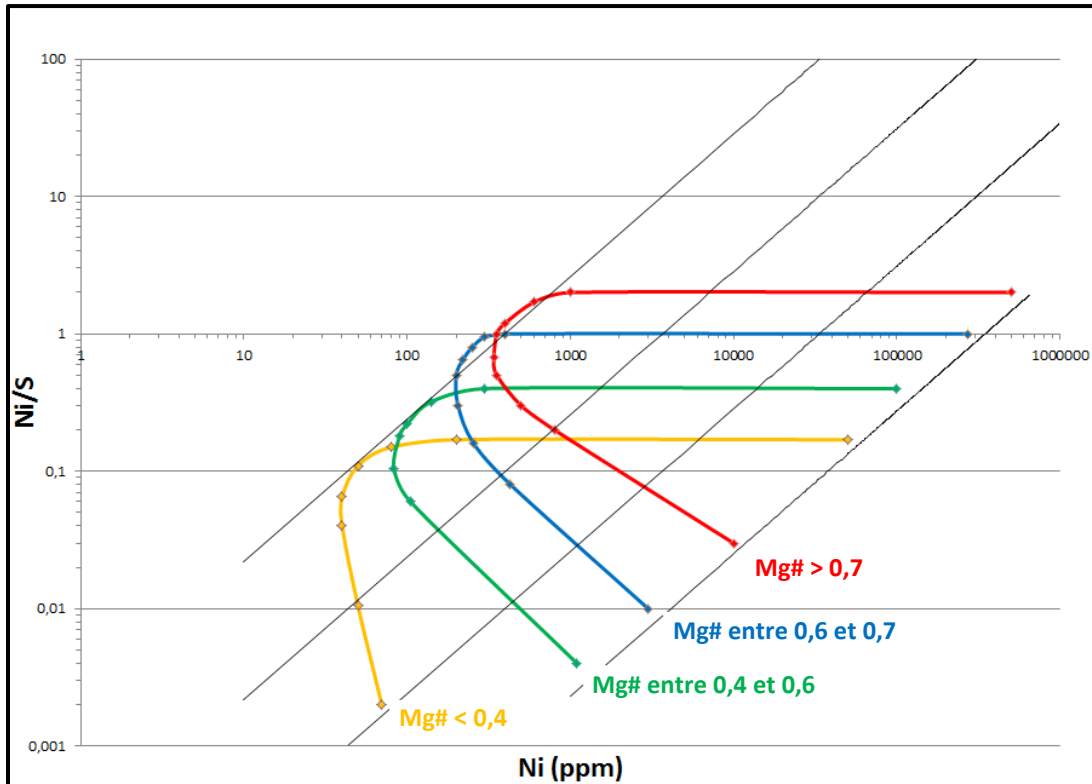


Figure 27. Diagramme représentant les quatre champs définis pour différents Mg# et servant à caractériser la fertilité d'une intrusion. Ces champs permettent de définir si une intrusion est fertile ou stérile à partir d'une faible quantité d'échantillons, qu'ils proviennent de roches ultramafiques ou de magmas plus felsiques.

5.5 Exemples d'utilisation des champs de fertilité

La pertinence des champs de fertilité a été testée à l'aide de deux exemples : l'intrusion de Laukunkangas (Finlande) et celle du Lac-à-Paul qui fait partie de la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean.

L'intrusion de Laukunkangas renferme un gisement de 6,7 Mt à 0,76 % Ni et 0,22 % Cu (Lamberg, 2005). Cette intrusion est différenciée et se compose majoritairement de gabbro, de norite, de diorite et d'une faible proportion de dunite. Les échantillons les plus différenciés de cette intrusion tombent dans le champ de fertilité des roches ayant un Mg# inférieur à 0,4. Ainsi, et bien que ces échantillons ne soient pas alignés, leur position sur le graphique Ni vs Ni/S suggère qu'ils appartiennent à une intrusion minéralisée (**Figure 28a**).

Dans la région du Lac-à-Paul, les roches mafiques appartenant à la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean renferment de nombreux petits indices de Ni-Cu qui sont des sulfures massifs à semi-massifs composés de pyrrhotite et de chalcopryrite (Huss, 2002). Les échantillons disponibles ont un Mg# < 0,4 et se situent à l'intérieur ou en marge du champ de fertilité défini pour les roches les plus felsiques. D'après leur distribution, ces échantillons semblent indiquer que, si l'intrusion étudiée contenait un sulfure massif, sa teneur maximale serait d'environ 1% Ni (**Figure 28b**).

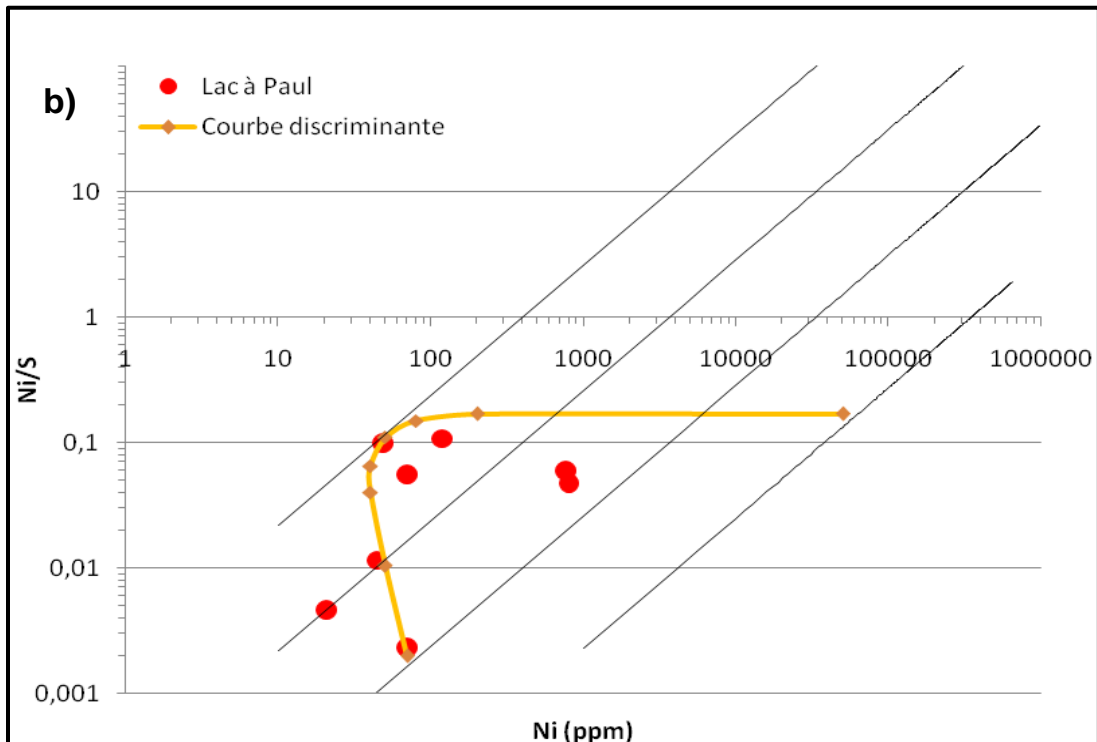
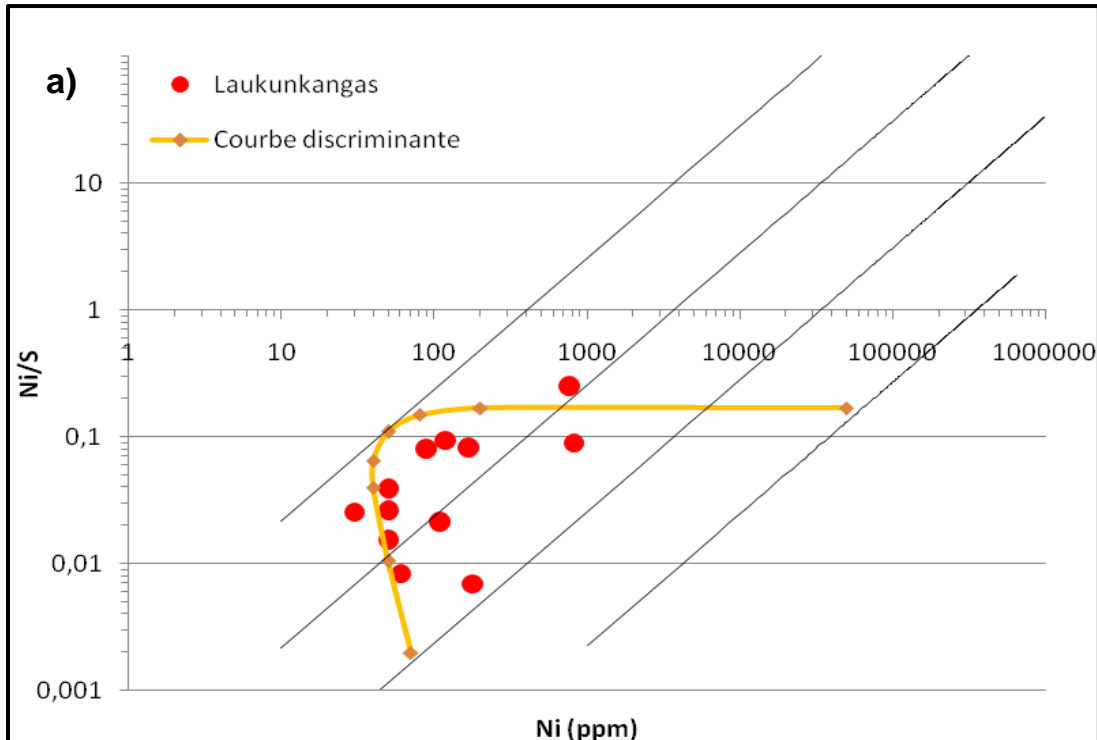


Figure 28. **a)** Représentation graphique des échantillons les plus felsiques de l'intrusion de Laukunkangas (Finlande) à partir des données de Lamberg (2005); **b)** Représentation graphique des échantillons de gabbros et norites du Lac-à-Paul, qui font partis de la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean, à partir des données de Huss (2002).

6. CONCLUSION

Les deux outils développés dans le cadre de ce projet permettent d'évaluer le potentiel des intrusions mafiques et ultramafiques pour les minéralisations à Ni-Cu. Le diagramme RA-EGP, qui a initialement été développé pour évaluer le potentiel pour les minéralisations à EGP, a été modifié pour créer le graphique RA-EGP+. Ce nouveau diagramme intègre le rapport $\Sigma\text{EGP}/(\text{Ni}+\text{Cu})^*$ qui, lorsqu'il est mis en relation avec les rapports Ni/Pd et Pd/S, permet de déterminer si l'intrusion échantillonnée a un potentiel pour les minéralisations à Ni-Cu et/ou à EGP. Cependant, cet outil nécessite l'analyse d'éléments qui sont rarement dosés, car leurs faibles abondances rendent les analyses laborieuses et chères (cf. Ir, et autres EGP).

Pour pallier à cet inconvénient, le diagramme Ni/S vs Ni a été développé. Ce diagramme permet, à partir d'éléments communément analysés (FeO, MgO, Ni et S), de juger du potentiel d'intrusions mafiques et ultramafiques pour les minéralisations nickélifères. Ce nouveau graphique permet d'évaluer si une série d'échantillons a été différenciée par cristallisation fractionnée et/ou par la ségrégation d'un liquide sulfuré, ainsi que d'évaluer le taux d'enrichissement en métaux de base des sulfures.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient exprimer leur gratitude envers Geneviève Boudrias, Julie Menier et Réal Daigneault pour la lecture critique et l'édition de ce rapport. Ce projet a été réalisé dans le cadre de la programmation régulière du CONSOREM et tous les membres de l'équipe de recherche et les représentants du comité de gestion scientifique du CONSOREM sont remerciés pour avoir participé aux nombreux échanges constructifs.

RÉFÉRENCES

- Arndt, N.T., Leshar, C.M. et Czamanske, G.K., 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 5-23.
- Barnes, S.-J. 1990 The use of metal ratios in prospecting for platinum-group element deposits in mafic and ultramafic intrusions. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 37(1), 91-99.
- Barnes, S.-J., et Maier, W. D. 2002. Platinum-group element distributions in the Rustenburg Layered Suite of the Bushveld Complex, South Africa. Pp. 431-458. In: L. J. Cabri eds. *The geology, geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements*. Sp. Vol. 54. Can. Inst. Min. Metal.
- Barnes, S.-J. and 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. and Richards, J.P. (eds.) *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 179-213.
- Brügmann, G. E., Naldrett, A. J. et Macdonald, A. J. 1989. Magma mixing and constitutional zone-refining in the Lac des Îles complex, Ontario: Genesis of Platinum-group element mineralization. *Economic Geology*, vol. 84, 1557-1573.
- Brügmann, G. E., Naldrett, A. J. et Duke, J. M. 1990. The platinum-group element distribution in the Dumont sill, Quebec. Implications for the formation of Ni-sulfide mineralization. *Mineralogy and Petrology*, vol. 42, 97-119.
- Chai, G. et Naldrett, A. J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralisation and genesis of the Jinchuan deposit, Northern China. *Economic Geology*, vol. 87, 1475-1495.
- Clark, T. 1989. Étude du Gîte de Cu-Ni-Pd-Pt du lac Bleu no. 1 - Fosse du Labrador. Résultats préliminaires. Ministère Énergie et Ressources du Québec. MB89-35. 65 pages.
- Crocket, J.H. et McRae, W.E., 1986. Platinum-group element distribution in komatiitic and tholeiitic volcanic rocks from Munro Township, Ontario. *Economic Geology* 1986 81: 1242-1251.
- Eckstrand, O.R., 1996. Nickel-copper sulphides. *Dans Geology of Canadian mineral deposit types*. O. R., Eckstrand, W.D. Sinclair et R.I. Thorpe, Eds. Commission géologique du Canada, 584-605.
- Huss, L., 2002. Caractérisation de la minéralisation en Ni-Cu-EGP des indices de la région du Lac à Paul, suite anorthositique de Lac St-Jean. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec, 220 pages.
- Keays, R. R. et Davison, R. M. 1976. Palladium, Iridium and gold on the ores and host rocks of nickel sulfide deposits in Western Australia. *Eco. Geol.*, vol. 71, 1214-1228.
- Lamberg, P., 2005. From genetic concepts to practice – lithochemical identification of Ni-Cu mineralised intrusions and localisation of the ore. *Geological Survey of Finland Bulletin* 402, 264 pages.
- Li, C., Naldrett, A.J. et Ripley, E.M., 2001. Critical factors for the formation of a nickel-copper deposit in an evolved magma system: lessons from a comparison of the Pants Lake and Voisey's Bay sulphide occurrences in Labrador, Canada. *Mineralium Deposita*, vol. 36, 85-92.
- Mustang Minerals Corp., 2011. <http://www.mustangminerals.com/>.

- Naldrett, A. J., Mohammed, A., Sasa Krstic et Chusi Li. 2000. The composition of mineralization at the Voisey's bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to Platinum-group elements. *Eco. Geol.*, vol. 95, 845-865.
- Oshin, I.O., 1981. The abundances and geochemistry of some noble metals in Thetford Mines ophiolites, PQ. Thèse de doctorat. Université McMaster, Hamilton, ON. 391 pages.
- Pearson, V., 2007. Développement d'un nouvel outil d'exploration pour les EGP: le diagramme ratio-arachnide, Rapport 2003-09, Projet Consorem, 35 pages (https://consorem.uqac.ca/production_scienc/2003_09/2003-09_ra_egp.pdf).
- Peck, D. C., Keays, R. R., James, R. S., Chubb, P. T. et Reeves, S. J. 2001. Controls on the formation of contact-type platinum-group element mineralization in the East Bull Lake intrusion. *Economic Geology*, vol. 96, 559-581.
- Sproule, R.A., Leshner, C.M., Houlié, M.G., Keays, R.R., Ayer, J.A. et Thurston, P.C., 2005. Chalcophile element geochemistry, petrogenesis, and metallogenesis of komatiitic rocks in the Abitibi Greenstone belt, Canada. *Economic Geology*, vol. 100, no. 6, p. 1169-1190.
- Sutcliffe, R. H., Sweeny, J. M. et Edgar, A. D. 1989. The Lac des Îles complex, Ontario: Petrology and platinum-group elements mineralization in an Archean mafic intrusion. *Can. Jour. Earth Sci.*, vol. 26, 1408-1427.
- 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. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec, 204 pages.

ANNEXE A

La reconnaissance de la fertilité des intrusions mafiques et ultramafiques est un sujet d'intérêt dans plusieurs régions du globe. C'est dans cette optique que Lamberg (2005) a mis au point un outil statistique permettant d'évaluer le potentiel des roches mafiques et ultramafiques pour les gisements Ni-Cu. Les détails de la méthode ne seront pas décrits dans la présente annexe, mais une énumération des conditions nécessaires à l'utilisation de l'outil est présentée.

La méthode de Lamberg (2005) fait appel, tout comme le graphique Ni vs Ni/S du CONSOREM, à la notion de coefficient de partage du nickel, mais aussi au coefficient de partage du cobalt. Pour être utilisables, les analyses doivent contenir les éléments majeurs, le nickel, le cuivre, le cobalt et le soufre. À partir de ces analyses, les modifications ou calculs suivants doivent être réalisés :

- Calcul de la composition des sulfures;
- Calcul des Ni# et Co#;
- La transformation des analyses en analyses anhydres et anhydres sans sulfures;
- La minéralogie normative (B-norm);
- La chimie des divers minéraux;
- Le nom du cumulat déterminé par la minéralogie normative.

Tous ces éléments sont déterminés pour les échantillons ayant des concentrations en nickel et en cuivre inférieures à 0,5 wt%. Il faut également éliminer les échantillons qui ne sont pas des cumulats mafiques (cf. ceux dont le MgO_n est inférieur à 10 %). Suite à la transformation des données et au tri des échantillons, diverses caractéristiques sont établies selon l'organigramme illustré à la **Figure A-1**. Ensuite, la valeur obtenue est utilisée pour l'organigramme de la **Figure A-2**. Cet organigramme permet de définir la fertilité de l'intrusion étudiée.

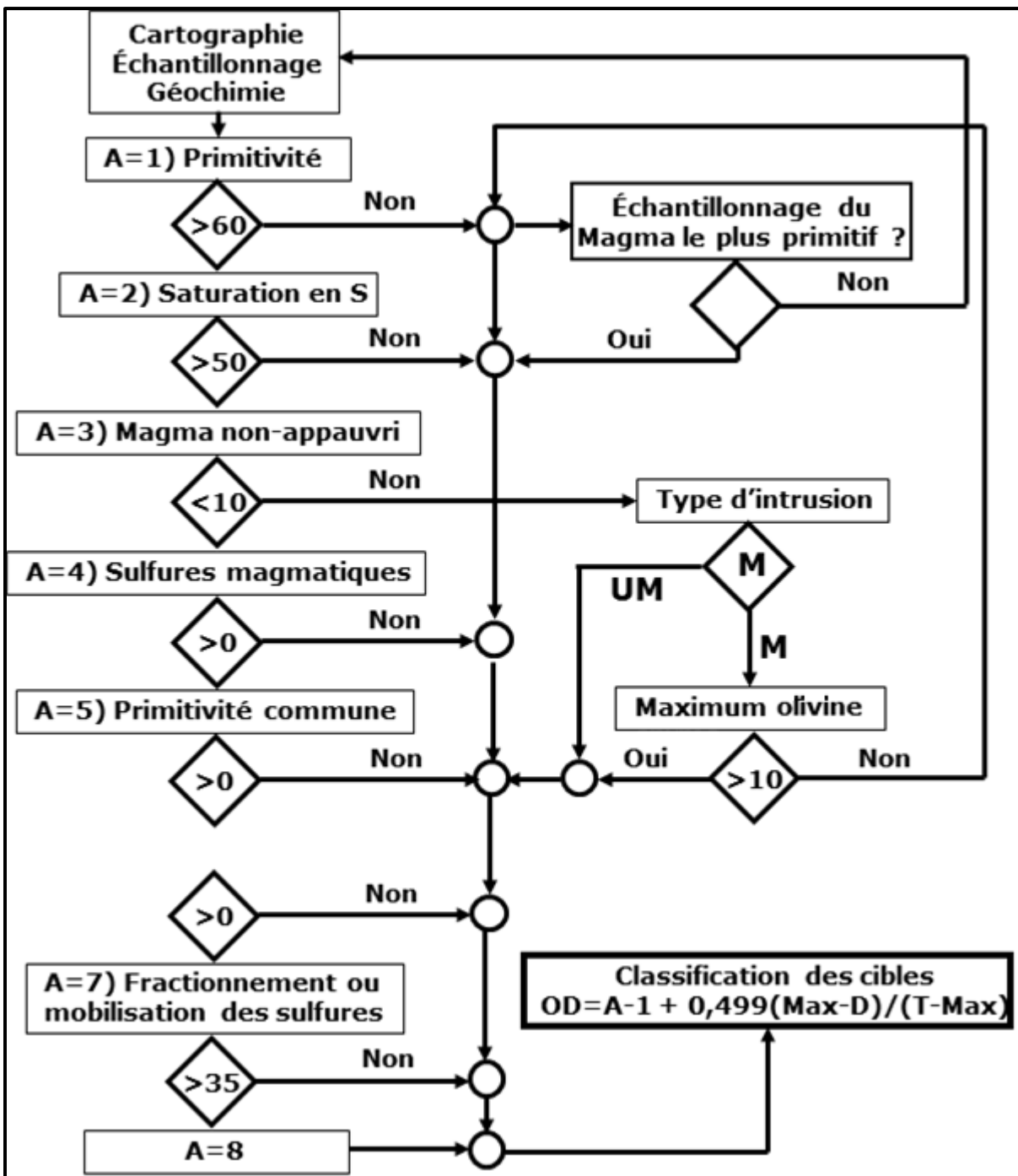


Figure A-1. Organigramme qui établit un cheminement de description géochimique des échantillons afin de donner une valeur de discrimination (OD) pour classer les cibles.

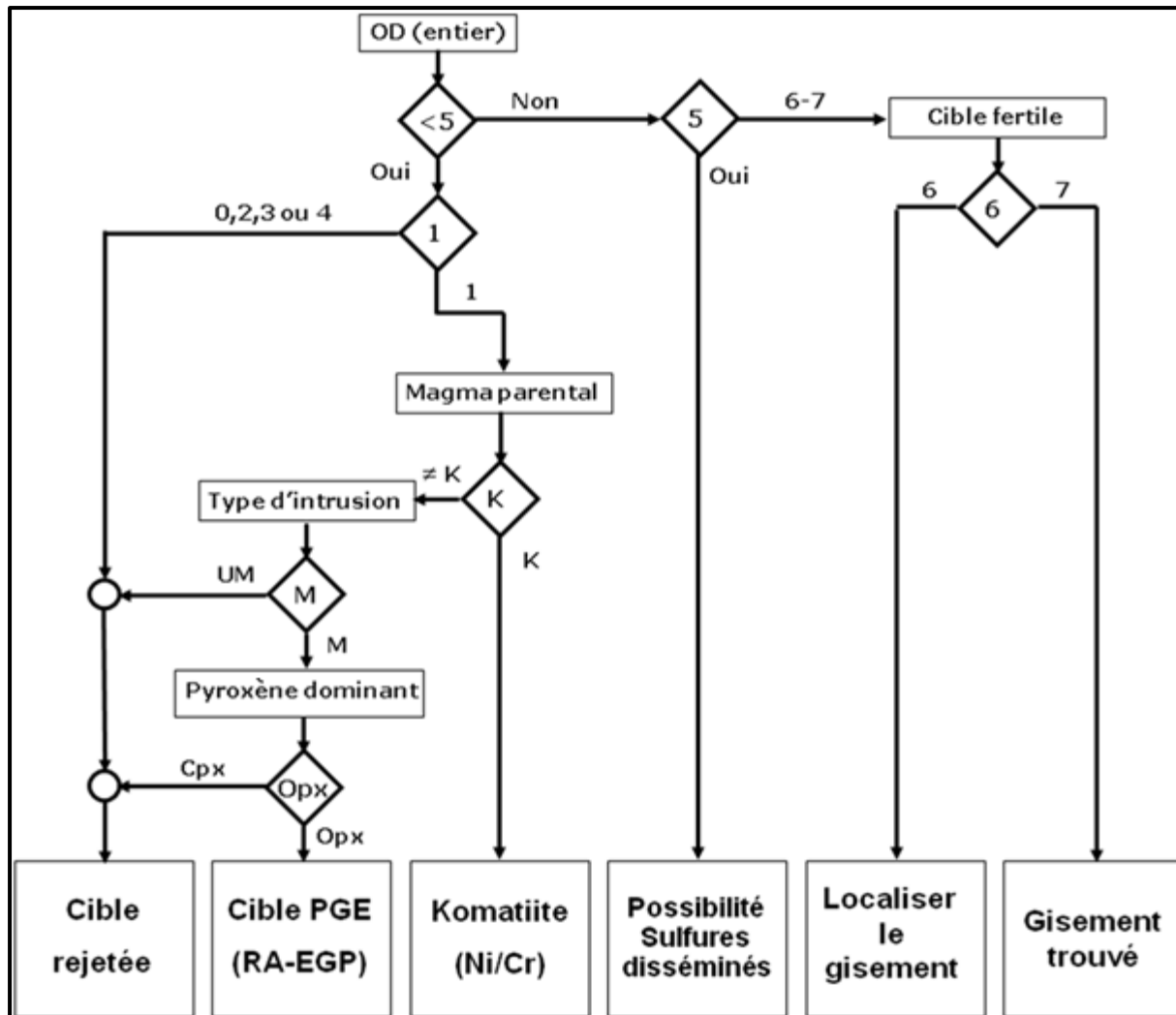


Figure A-2. Organigramme qui permet de classer les cibles en fonction de la valeur OD déterminée précédemment.

La méthode développée par Lamberg (2005) a pour avantage d'être relativement simple et d'être basée sur des statistiques effectuées à partir d'éléments couramment analysés. Cependant, afin d'obtenir des résultats significatifs, l'échantillonnage doit être représentatif ($n > 20$) et la minéralogie normative doit être fiable. Il faut aussi prendre en ligne de compte que les statistiques ont parfois des particularités qui peuvent être difficiles à reproduire par des formules simples dans un tableur MS Excel (ex : maximum sans les « outliers »).

Au cours de la réalisation du projet, un module non-commercialisé du logiciel HSC Chemistry permettait d'effectuer tous ces calculs. Ce module devrait être commercialisé dans les versions ultérieures du logiciel.