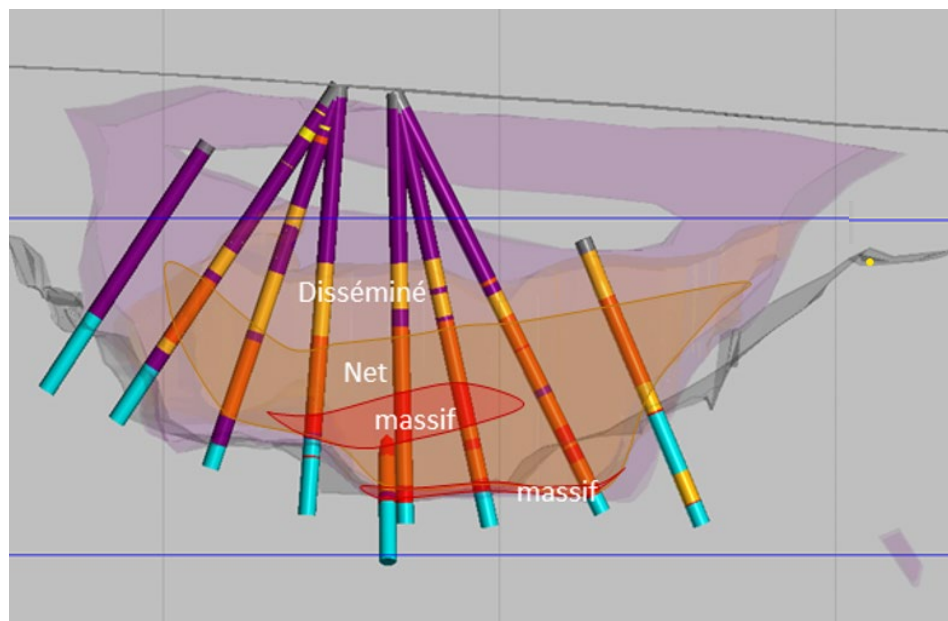


Vectorisation géochimique au sein des intrusions mafiques-ultramafiques pour l'exploration des gîtes magmatiques à Ni-Cu-EGP

Stéphanie Lavaure, géo., Ph. D

Sylvain Trépanier, géo., M. Sc.



Projet 2022-07

Avertissement

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics au bénéfice de l'ensemble de la communauté géoscientifique, 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 :

Lavaure, S. et Trépanier, S. 2023. Vectorisation géochimique au sein des intrusions mafiques-ultramafiques pour l'exploration des gîtes magmatique à Ni-Cu-EGP. Rapport, projet CONSOREM 2022-07, 38 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.



Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1
Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@ugac.ca

Site Web: www.consorem.ca



Résumé

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la convention 2021-2024 entre le ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec (MRNF) et le CONSOREM pour le développement d'outils géotechnologiques pour l'exploration des métaux précieux, usuels et des minéraux critiques et stratégiques au Québec.

Les gisements magmatiques sont une source importante de Ni, Cu et platinoïdes. Ces gisements proviennent de la ségrégation de liquide sulfuré à partir de magmas de composition mafique à ultramafique enrichis en soufre. Plusieurs outils d'exploration sont disponibles dans la littérature et diverses méthodes ont également été développées au CONSOREM au cours des deux dernières décennies pour cibler ces minéralisations. Ces outils sont principalement utilisés à l'échelle régionale afin d'identifier les systèmes magmatiques fertiles. La difficulté de l'exploration de ce type de gisement est d'orienter par la suite les travaux vers les zones favorables à l'accumulation du liquide sulfuré qui formeront des gisements économiques de sulfures riches en métaux. Ces gisements sont souvent de petite taille (quelques centaines de mètres), associés à des systèmes plurikilométriques très dynamiques. Les roches adjacentes aux minéralisations ne sont donc pas nécessairement les magmas desquels les sulfures ont été extraits, rendant l'empreinte géochimique de ces gisements particulièrement difficile à établir.

L'objectif du projet était donc de **déterminer s'il est possible de reconnaître la présence de halos géochimiques suffisamment étendus dans les roches magmatiques hôtes** dans le but d'établir une méthode de vectorisation par géochimie.

Une revue de la littérature et des anciens projets réalisés au CONSOREM sur la thématique Ni-Cu a été effectuée pour i) documenter l'état des connaissances sur la dynamique de la mise en place des minéralisations et des magmas associés ainsi que les outils géochimiques développés pour identifier le processus de ségrégations; et ii) évaluer l'utilité de ces outils pour la vectorisation. Parmi ces outils, le diagramme RA-EGP+ (projets CONSOREM 2003-09; Pearson, 2007 et 2008-11; Longuépée et Mathieu, 2014), le diagramme Ni vs. MgO (Lightfoot *et al.*, 2001; 2012) et le ratio Cu/Zr ont été examinés afin d'évaluer leur potentiel pour la vectorisation. En se basant sur ces outils, de nouveaux diagrammes et indices ont été développés et intégrés dans LithoModeleur dont une nouvelle version du diagramme RA-EGP, développé au cours des projets 2003-09 et 2008-11, soit le RA-EGPIII. Dans ce nouveau diagramme, les variables faisant intervenir l'iridium ont été éliminées afin de rendre le diagramme plus en adéquation avec les analyses des compagnies d'exploration. De plus, toutes les variables sont normalisées au manteau primitif rendant la normalisation plus uniforme.

Le diagramme Ni vs. MgO (Lightfoot *et al.*, 2001; 2012) ainsi que l'indice Ni/Ni*, calculé à partir de l'équation de la courbe de corrélation entre le Ni et MgO (Darling *et al.*, 2010), permettent d'évaluer l'appauvrissement et l'enrichissement en Ni des échantillons par rapport à une intrusion qui n'aurait pas subi de ségrégation magmatique. Au cours du projet deux indices ont été intégrés aux indices unaires, soit l'indice Ni/Ni*_{komatiites} et l'indice Ni/Ni*_{mafiques}. L'indice Ni/Ni*_{komatiites} utilisé pour les magmas ultramafiques archéens et paléoprotérozoïques, a été développés à partir d'une sélection de komatiites provenant de la base de données GEOROC (2022; <https://georoc.eu/>) et testé sur les roches encaissantes du gisement Expo et du gisement Grasset. L'indice Ni/Ni*_{mafiques} a été calculé à partir de la courbe de corrélation entre le Ni et le MgO, présentée par Lightfoot *et al.* (2012) et basée sur les basaltes des trappes du Deccan. L'indice Ni/Ni*_{mafiques} est utilisé pour évaluer l'enrichissement ou l'appauvrissement des roches issues de magmas de composition mafique et a été testé sur la suite intrusive de Soisson, une série d'intrusions mafiques mésoprotérozoïques non altérées dont certaines contiennent des minéralisations Cu-Ni (Sappin *et al.*, 2022).



L'utilisation du nouvel indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ sur Expo a permis de voir que l'appauvrissement en nickel du dyke est identifiable jusqu'à 2 300 m du gisement en aval de l'écoulement magmatique. Autant au niveau du gisement Expo que du gisement de Grasset, les péridotites encaissantes s'enrichissent en nickel à l'approche du gisement; cependant, cet enrichissement est visible uniquement à quelques dizaines de mètres du gisement dans les deux cas. Cet enrichissement en nickel correspond à un enrichissement en sulfures disséminés. Cependant, l'utilisation de l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ permet de quantifier les observations pétrographiques.

Les données de Grasset ont également servi à évaluer l'effet de l'altération hydrothermale sur le calcul de l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$. Pour ce faire, l'indice unaire $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ (calculé à partir du magnésium) a été comparé à un nouveau ratio Ni/Ni^* calculé à partir du chrome (Ni/Ni^*_{Cr}). Ce nouveau ratio Ni/Ni^*_{Cr} , spécifique au gisement de Grasset, est calculé à partir de l'équation de la courbe de corrélation entre le Ni et le Cr_2O_3 pour les péridotites non minéralisées ($S < 1\,000$ ppm) de Grasset. Les résultats montrent que la serpentinisation affecte peu le calcul de l'indice unaire $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ tout comme l'altération en carbonates ou en chlorite. L'altération en séricite, quant à elle, n'affecte pas l'indice unaire $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ lorsqu'elle est d'intensité faible, cependant, lors d'une altération en séricite d'intensité modérée, il convient de faire attention en utilisant l'indice unaire $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$. Idéalement, lorsque les échantillons sont fortement altérés, les indices unaires $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ ou $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ (calculés à partir de la teneur en magnésium) et le ratio Ni/Ni^*_{Cr} (calculé à partir de la teneur en chrome) devraient être comparés. En effet, le chrome est beaucoup moins mobile lors de l'altération hydrothermale que le magnésium et a un comportement similaire lors de la cristallisation fractionnée. Ainsi, dans les roches fortement altérées, il est recommandé d'analyser le chrome. Si celui-ci n'est pas disponible, il est recommandé de ne pas utiliser les indices unaires $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ et $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$, dans le cas de moyenne à forte altération en séricite.

Idéalement, les indices $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ et $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ devraient être couplé avec le ratio Cu/Zr pour être visualisé dans les deux nouveaux diagrammes développés dans ce projet afin d'identifier graphiquement si une intrusion a subi de la ségrégation de sulfures soit les diagrammes $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ vs. Cu/Zr (pour les magmas ultramafiques archéens et paléoprotérozoïques) et $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ vs. Cu/Zr (pour les magmas mafiques). Dans le cas où l'analyse en Zr ne serait pas disponible, il est important de n'utiliser les indices $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ et $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ que sur des roches enrichies en olivine dans le but de s'assurer que le magnésium est principalement contrôlé par l'olivine, principal silicate pouvant contenir du nickel, et non pas des minéraux ferromagnésiens moins riches en nickel tels que les pyroxènes.

Ce projet a confirmé que la géochimie est un outil robuste pour évaluer la fertilité d'une intrusion, néanmoins, à des fins de vectorisation, la géochimie est complémentaire aux observations pétrographiques et à une étude structurale locale qui devraient être réalisées en premier lieu afin d'identifier les zones susceptibles d'avoir accumulé le liquide sulfuré.

Summary

This project is part of the 2021-2024 agreement between the Quebec Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) and CONSOREM for the development of geotechnological tools for the exploration of precious metals, base metals, and critical and strategic minerals in Quebec.

Magmatic deposits are an important source of Ni, Cu and platinum-group elements. These deposits originate from the segregation of sulphide liquids from sulphur-enriched mafic to ultramafic magmas. Several exploration tools are available in the literature, and various methods have also been developed at CONSOREM over the past two decades to target this mineralisation. These tools are mainly used on a regional scale to identify fertile magmatic systems. The difficulty in exploring for this type of deposits lies in subsequently directing work towards areas favourable to



the accumulation of sulphide liquids, which will form economic deposits of metal-rich sulphides. These deposits are often small (a few hundred metres) and associated with highly dynamic multi-kilometre systems. The rocks adjacent to the mineralisation are therefore not necessarily representative of the magmas from which the sulphides were extracted, making the geochemical footprint of these deposits particularly difficult to establish.

The aim of the project was therefore to **determine whether it is possible to recognise the presence of sufficiently extensive geochemical halos in the host magmatic rocks** in order to establish a geochemical vectoring method.

A review of literature and previous projects carried out at CONSOREM on the Ni-Cu theme was conducted to i) document the state of knowledge on the dynamics of mineralisation and associated magma emplacement, as well as the geochemical tools developed to identify the segregation process; and ii) evaluate the usefulness of these tools for vectoring. Among these tools, the RA-EGP+ diagram (CONSOREM projects 2003-09; Pearson, 2007 and 2008-11; Longuépée and Mathieu, 2014), the Ni vs. MgO diagram (Lightfoot *et al.*, 2001; 2012) and the Cu/Zr ratio were examined to assess their potential for vectoring. Based on these tools, new diagrams and indices were developed and integrated into LithoModeleur, including a new version of the RA-EGP diagram developed during the 2003-09 and 2008-11 projects, namely RA-EGPIII. In this new diagram, variables involving iridium were eliminated to bring the diagram more in line with analyses exploration companies typically use. In addition, all variables are normalised to the primitive mantle, making normalisation more uniform.

The Ni vs. MgO diagram (Lightfoot *et al.*, 2001; 2012) and the Ni/Ni* index, calculated from the equation of the correlation curve between Ni and MgO (Darling *et al.*, 2010), can be used to evaluate the Ni depletion and enrichment of samples relative to an intrusion that has not undergone magmatic segregation. During the project, two indices were integrated into the unary indices, namely the Ni/Ni*_{komatiites} index and the Ni/Ni*_{mafic} index. The Ni/Ni*_{komatiites} index, used for Archaean and Paleoproterozoic ultramafic magmas, was developed from a selection of komatiites from the GEOROC database (2022; <https://georoc.eu/>) and tested on the host rocks of the Expo and Grasset deposits. The Ni/Ni*_{mafic} index was calculated from the correlation curve between Ni and MgO presented by Lightfoot *et al.* (2012) and based on the basalts of the Deccan Traps. The Ni/Ni*_{mafic} index is used to assess the enrichment or depletion of rocks derived from mafic magmas and has been tested on the Soisson intrusive suite, a series of unaltered Mesoproterozoic mafic intrusions, some of which contain Cu-Ni mineralisation (Sappin *et al.*, 2022).

The use of the new Ni/Ni*_{komatiites} index on Expo showed that the dyke's nickel depletion is identifiable up to 2,300 metres from the deposit downstream of the magmatic flow. At both the Expo and Grasset deposits, the host peridotites become enriched in nickel as they approach the deposit; however, this enrichment is only visible a few dozen metres from the deposit in both cases. This nickel enrichment corresponds to an enrichment in disseminated sulphides. However, the use of the Ni/Ni*_{komatiites} index allows the petrographic observations to be quantified.

Grasset's data were also used to evaluate the effect of hydrothermal alteration on the calculation of the Ni/Ni*_{komatiites} index. To do this, the Ni/Ni*_{komatiites} unary index (calculated from magnesium) was compared to a new Ni/Ni* ratio calculated from chromium (Ni/Ni*_{Cr}). This new Ni/Ni*_{Cr} ratio, specific to the Grasset deposit, is calculated from the equation of the correlation curve between Ni and Cr₂O₃ for unmineralized peridotites (S<1,000 ppm) from Grasset. The results show that serpentinization has little effect on the calculation of the Ni/Ni*_{komatiites} unary index, as does alteration to carbonates or chlorite. Sericite alteration, on the other hand, may not affect the Ni/Ni*_{komatiites} when it is of low intensity, however, when it is of moderate intensity, caution should be exercised when using this unary index. Ideally, when samples are heavily altered, the Ni/Ni*_{komatiites} or Ni/Ni*_{mafic} indices (calculated from the magnesium content) and the Ni/Ni*_{Cr} ratio (calculated from the chromium content) should be compared. This is because chromium is much less mobile during



hydrothermal alteration than magnesium and behaves similarly during fractional crystallisation. Therefore, in heavily altered rocks, it is recommended to analyse chromium. If Cr analysis are not available, it is recommended not to use the $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ and $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafics}}$ unary indices in cases of moderate to heavy sericite alteration.

Ideally, the $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ and $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafics}}$ indices should be coupled with the Cu/Zr ratio to be visualised in the two new diagrams developed in this project in order to graphically identify whether an intrusion has undergone sulphide segregation, i.e., the $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ vs. Cu/Zr (for Archaean and Paleoproterozoic ultramafic magmas) and $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafic}}$ vs. Cu/Zr (for mafic magmas). In cases where Zr analysis is not available, it is important to use the $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ and $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafics}}$ indices only on olivine-enriched rocks to ensure that magnesium is mainly controlled by olivine, the main silicate that can contain nickel, and not by ferromagnesian minerals such as pyroxenes that are far less enriched in nickel.

This project confirmed that geochemistry is a robust tool for assessing the fertility of an intrusion. However, for vectoring purposes, geochemistry is complementary to petrographic observations and a local structural study, both of which should be carried out first in order to identify areas likely to have accumulated sulphide liquids.



Table des matières

1-INTRODUCTION	8
1.1 MISE EN CONTEXTE	8
1.2 PROBLÉMATIQUE	11
1.3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	12
2 DIAGRAMME RA-EGP	12
2.1 MODIFICATION DU DIAGRAMME	13
2.2 SIGNATURE DU NOUVEAU DIAGRAMME	14
2.3 MISE EN APPLICATION	18
3 INDICE NI/NI*	20
3.1 DIAGRAMME MGO VS. NI	20
3.2 INDICES NI/NI* _{MAFIQUES} ET NI/NI* _{KOMATIITES}	21
3.3 VECTORISATION AVEC L'INDICE NI/NI* _{KOMATIITES} : EXEMPLE EXPO	24
3.4 INFLUENCE DE L'ALTÉRATION SUR LE CALCUL DE L'INDICE NI/NI* _{KOMATIITES} : EXEMPLE DE GRASSET	28
4 DIAGRAMMES NI/NI* VS. CU/ZR	30
4.1 PRINCIPE DU DIAGRAMME	30
4.2 ÉTUDE DE CAS : LA SUITE DE SOISSON	32
5 CONCLUSION	35
6 RÉFÉRENCES	36



1-Introduction

1.1 Mise en contexte

Les gisements magmatiques produisent 99 % des platinoïdes (éléments du groupe du platine ou EGP), 70 % du nickel et 2 % du cuivre mondial (Jébrak et Marcoux, 2008). Ces gisements se mettent typiquement en place en contexte de rift au niveau des marges actives (p. ex. Thompson, Raglan) ou des rifts continentaux (p. ex. Noril'sk, Duluth).

Ces gisements se classifient selon deux catégories en fonction de leur minéralisation (Leshner, 2019) soit :

- Les gisements de Ni-Cu±Co±EGP : Ce sont des gisements riches en sulfures qui contiennent comme commodités principales le nickel et le cuivre avec parfois des éléments du groupe du platine (EGP) ou du cobalt. C'est le cas des gisements associés aux magmas ultramafiques archéens et paléoproterozoïques comme ceux de la ceinture de Raglan et de Thompson, dans la province de Churchill, et des gisements associés aux basaltes de plateaux comme Noril'sk (Russie).
- Les gisements EGP±Ni±Cu. Ces gisements sont pauvres en sulfures et contiennent comme commodités principales les EGP. Ceux-ci sont présents dans des minéraux du groupe du platine (MGP) comme des arséniures ou des tellurures. Les sulfures de Ni et Cu y sont très disséminés. C'est le cas notamment des gisements associés aux intrusions litées comme le Bushveld (Afrique du Sud) ou le Stillwater (É.-U.).

Les gisements de la première catégorie proviennent de la ségrégation de liquide sulfuré à partir de magmas de compositions chimiques variées (mafique à ultramafique) enrichis en soufre (Leshner, 2019). Plusieurs conditions sont nécessaires pour former ces gisements (Barnes et Lightfoot, 2005; Lamberg, 2005; Eckstrand et Hubert, 2007; Barnes, *et al.*, 2016) soit 1) un fort degré de fusion partielle du manteau, 2) une ascension rapide du magma dans la croûte; 3) la saturation en soufre du magma qui permet de ségréguer des gouttelettes de liquide sulfuré; 4) l'interaction entre un large volume de magma silicaté et les gouttelettes de liquide sulfuré (facteur R) et 5) la concentration du liquide sulfuré par gravité et dans les pièges structuraux afin de cristalliser et accumuler les sulfures (**Figure 1**).

Ces gisements peuvent se mettre en place dans des systèmes extrusifs tels que les coulées de lave komatiitiques, sous forme de gisement de sulfures disséminés ou massifs (**Figure 2A et 2B**) ou dans les systèmes intrusifs sous forme de conduits magmatiques de diverses morphologies (**Figure 2C**).



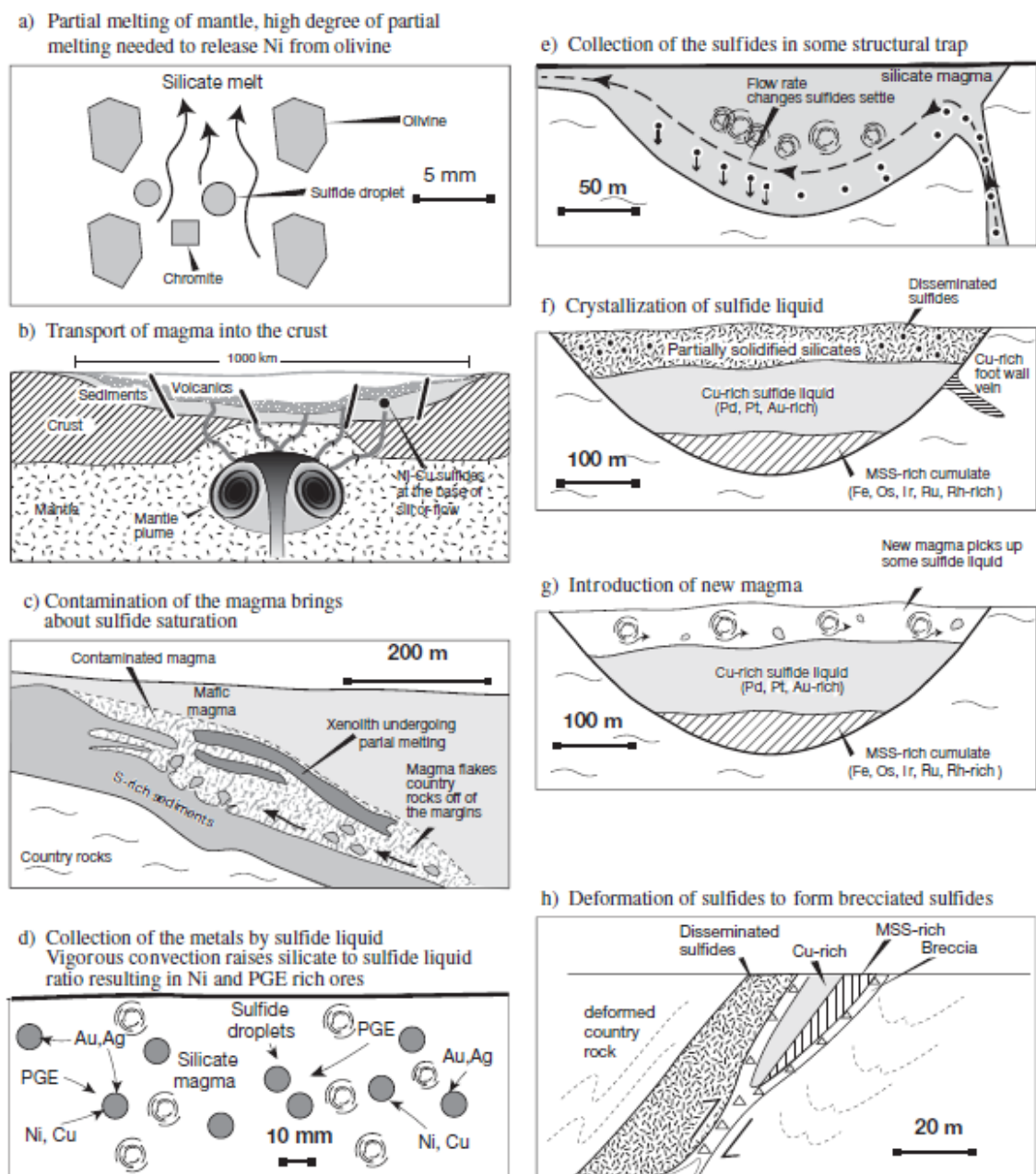


Figure 1. Schéma des processus nécessaires à la formation de gisements de Ni-Cu. Source : Barnes et Lightfoot (2005).

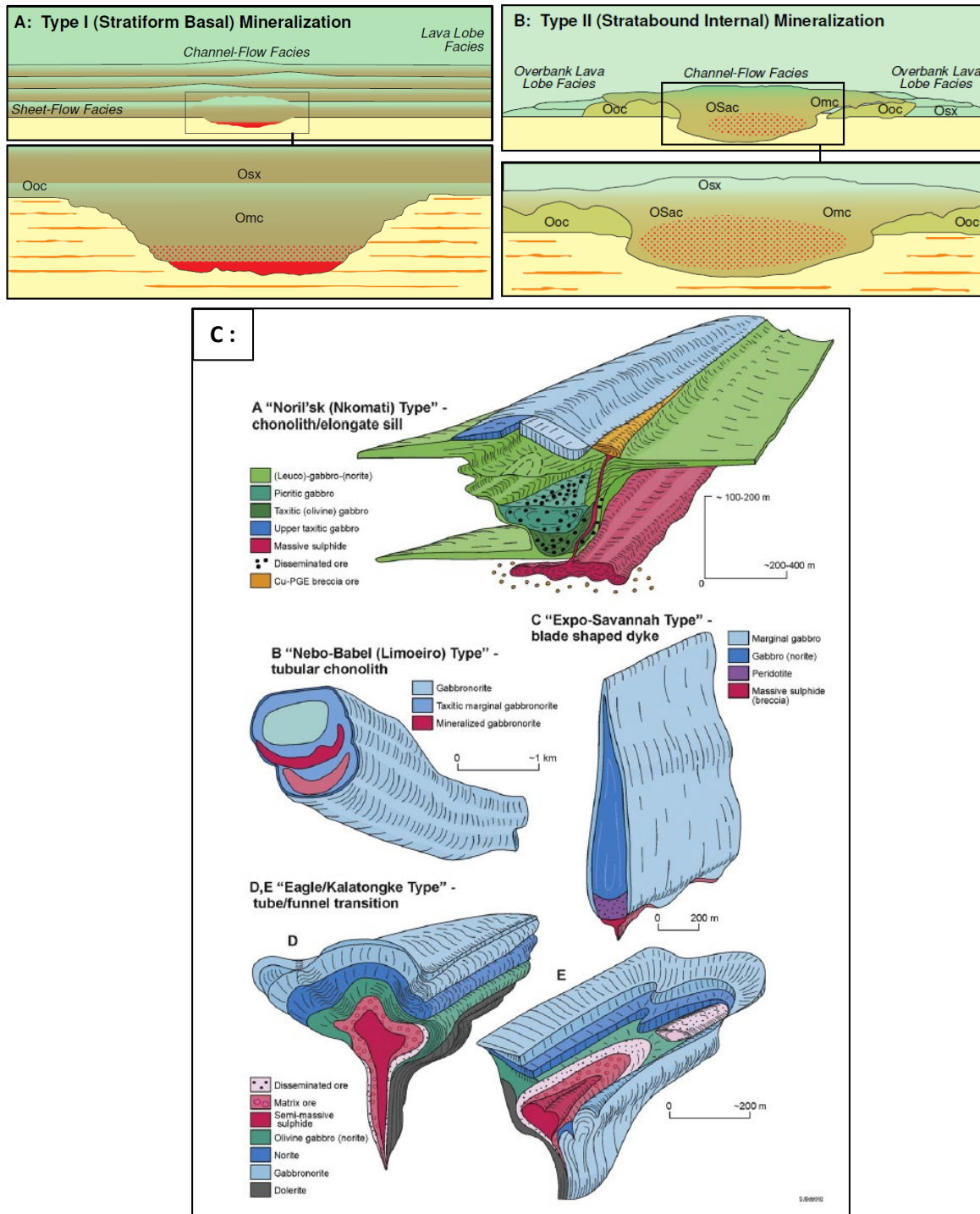


Figure 1. Illustration des différents types de gisement de Ni-Cu. A) gisement de type Kambalda : séquence de sulfures massifs et disséminés dans une coulée de komatiïtes (Leshner et Keays, 2002); B) gisement de type Mont Keith : gisement de sulfures disséminés dans une coulée de komatiïtes (Leshner et Keays, 2002); C) gisements dans des intrusions mafiques et ultramafiques de diverses morphologies (Barnes *et al.*, 2016).

1.2 Problématique

Plusieurs outils d'exploration sont disponibles dans la littérature afin de localiser les systèmes magmatiques susceptibles de contenir des gisements de Ni-Cu (**Figure 3**; Le Vaillant *et al.*, 2016; Leshner, 2019; Barnes *et al.*, 2016). Divers outils géochimiques ont également été développés au CONSOREM au cours des deux dernières décennies (Pearson, 2007; Mathieu, 2013; Longuépée et Mathieu, 2014). Ces outils permettent d'identifier :

- la présence de chenaux de laves et/ou de conduits magmatiques,
- des évidences de contamination du magma en soufre, et
- des évidences de la ségrégation d'un liquide sulfuré à partir du magma, soit la fertilité du système magmatique.

Regional scale	Camp to prospect scale	Deposit scale
<p>Favourable tectonic settings:</p> <p>Craton boundaries <i>Beresford et al. (2007); Begg et al. (2010); McCuaig et al. (2010); Mole et al. (2013, 2014)</i></p> <p>Inverted continental rift zones <i>Beresford et al. (2007); McCuaig et al. (2010); Fiorentini et al. (2012b)</i></p> <p>Exploration tools: Magnetotellurics, Aeromagnetics, Seismics, Gravity, Sm-Nd model-age maps, Lu-Hf isotopes on zircons; the last two are the only techniques which image this architecture through time and identify palaeo-sutures (<i>Deen et al. (2006); Champion and Cassidy, (2007, 2008); Begg et al. (2009); McCuaig et al. (2010); Mole et al. (2012, 2014); Perring et al. (2015a, b)</i>)</p> <p>Areas of enhanced magmatic flux:</p> <p>High proportions of high MgO komatiite magmas, and abundance of strongly adcumulate olivine-rich cumulates <i>Barnes and Fiorentini, (2012)</i></p> <p>Exploration tools: Regional airborne aeromagnetic surveys (<i>Barnes et al. (2004a); Grigg and Riley, (2006); Fiorentini et al. (2007)</i>)</p> <p><i>Example: The Nebo Babel deposit in the West Musgrave, Western Australia, was discovered using lithospheric architectural targeting combining areas presenting evidences of major focused mantle-derived magmatism with anomalous lithospheric architecture (boundary of the Yilgarn craton, and convergence of multiple faults including the Mundrabilla fault) (Pers. Comm. John Hronsky)</i></p>	<p>Channelised volcanic environments:</p> <p>Prediction of prospective volcanic environments <i>Barnes and Brand, 1999; Barnes et al. (2004a); Leshner et al. (2001); Fiorentini et al. (2012b); Le Vaillant et al. (2014)</i></p> <p>Exploration tool: Ni/Ti vs Ni/Cr diagrams, potentially using pXRF data (<i>Le Vaillant et al. (2014)</i>)</p> <p>Evidences of crustal contamination:</p> <p>Sulphur isotope analyses to test crustal assimilation models <i>Fiorentini et al. (2012a)</i></p> <p>Anomalous enrichment in incompatible elements such as Zr, Th, LREE <i>Leshner et al., 2001; Barnes and Hill, (2004b); Fiorentini et al. (2012b)</i></p> <p>Possible pervasive contamination signals in certain cases (e.g. Black Swan, Perseverance) <i>Barnes et al. (1988c, 2004a, 2007); Barnes and Fiorentini, (2012);</i></p> <p>Exploration tools: Laboratory geochemical analyses, portable XRF (pXRF) analyses potentially directly on the field (<i>Le Vaillant et al. (2014)</i>)</p> <p><i>Example: Presence of a pervasive contamination signal in komatiite units of the Black Swan komatiite complex, as well as the Perseverance ultramafic complex, Western Australia (Barnes et al. (1988b, 2004a))</i></p> <p>Evidences of sulphide accumulation and/or extraction:</p> <p>Positive and negative anomalies in chalcophile elements (Ni, Cu, Co and PGE) whole rock and Ni in olivine <i>Barnes et al. (1988a); Barnes and prichard, (1993); Leshner et al. (2001)</i></p> <p>Exploration tool: whole rock analyses, Laser ablation ICP-MS analyses of olivines to evaluate their nickel content</p> <p><i>Examples: Low Ni content of olivines in the Kambalda Dome komatiite flows and in the Perseverance camp, Western Australia (Leshner et al. (1981); Barnes et al. (1988a); Anomalous positive and negative PGE concentrations in the komatiite basalt of the Raglan camp, Northern Quebec (Barnes and Picard, (1993); Leshner et al. (2001))</i></p>	<p>Evidences of sulphide accumulation and/or extraction:</p> <p>Positive and negative anomalies in chalcophile elements (Ni, Cu, Co and PGE) whole rock and Ni in olivine <i>Barnes et al. (1988a); Barnes and prichard, (1993); Leshner et al. (2001)</i></p> <p>Ruthenium depletion in chromite grains – possible applications in lateritic terranes <i>Fiorentini et al. (2008); Locmelis et al. (2011, 2013);</i></p> <p>Exploration tool: whole rock analyses, Laser ablation ICP-MS analyses of olivines and chromite to evaluate their Ni or Ru content</p> <p><i>Example: Subtle PGE enrichments and depletion signals in host komatiite units at the Long Victor and Maggie Hays deposits, Western Australia, up to 400 m away from massive sulphides (Barnes et al. (2013); Heggie et al. (2012))</i></p> <p>Empirical detection tools:</p> <p>Use of Ni/Cr to delineate ore-related channels <i>Barnes and Brand, (1999); Barnes et al. (2013)</i></p> <p><i>Example: delineation of ore shoots around the Kambalda Dome, Western Australia (Barnes and Brand, (1999))</i></p> <p>Airborne and down hole Electromagnetic surveys</p> <p><i>Example: The Nova discovery (Western Australia) was made when testing a large and strong EM anomaly (ASX Announcement – 26.07.2012)</i></p> <p>Hydrothermal Ni-As-PGE haloes:</p> <p>Presence of nickel arsenides (gersdorffite mainly) in veins or within a plan of foliation creating a geochemical signal (enrichment in Ni, As, Pd and Pt) extending up to 1,780 m away from massive nickel-sulphides. <i>Le Vaillant, (2014); Le Vaillant et al. (2015a,b)</i></p> <p><i>Example: Hydrothermal geochemical halo observed surrounding the Mittel and the Sarah's Find deposits, Western Australia (Le Vaillant et al. (2015a,b))</i></p>

Figure 3. Exemple d'outils pour l'exploration des gisements de Ni-Cu associés aux komatiites. Source : Le Vaillant *et al.* (2016).

L'ensemble de ces outils servent à **identifier les systèmes magmatiques fertiles et sont principalement utilisés à l'échelle régionale**, cependant, la difficulté de l'exploration pour ce type de gisement est d'orienter par la suite les travaux vers les zones favorables à l'accumulation du liquide sulfuré permettant la formation de gisements économiques. En effet, ces gisements sont souvent de petite taille (quelques centaines de mètres) dans des systèmes plurikilométriques. Cette difficulté est accentuée dans les systèmes intrusifs dans lesquels plusieurs conduits magmatiques peuvent s'être mis en place à divers niveaux stratigraphiques, ces conduits n'étant pas nécessairement tous minéralisés (Leshner, 2019). De plus, étant donné que ces gisements sont associés à des systèmes très dynamiques, les roches adjacentes aux minéralisations ne sont donc pas nécessairement les magmas desquels les sulfures ont été extraits. L'empreinte géochimique de ces gisements est donc particulièrement difficile à établir (Barnes *et al.*, 2016; Le Vaillant *et al.*, 2016).

Plusieurs outils géophysiques peuvent être utilisés pour la vectorisation (Malo-Lalande *et al.*, 2020), toutefois ceux-ci permettent généralement de ne localiser que les gisements proches de la



surface. De plus, la présence de grandes structures magnétiques et de conducteurs régionaux peut masquer le signal, empêchant ainsi la vectorisation par cette méthode.

1.3 Objectifs et méthodologie

L'objectif général du projet 2022-07 était de **déterminer s'il est possible de reconnaître la présence de halos géochimiques suffisamment étendus dans les roches hôtes** afin de compléter les outils géophysiques existants avec une méthode de vectorisation par géochimie.

Les objectifs spécifiques étaient :

- d'identifier les outils géochimiques qui pourraient permettre de vectoriser l'exploration et établir la distance jusqu'à laquelle ces outils sont utilisables.
- de documenter les effets de l'altération sur les outils développés.

Une revue de la littérature et des anciens projets réalisés au CONSOREM sur la thématique Ni-Cu a été effectuée pour documenter l'état des connaissances sur la dynamique de la mise en place des minéralisations et des magmas associés ainsi que les outils géochimiques développés pour identifier le processus de ségrégation, tout en évaluant l'utilité de ces outils pour la vectorisation.

Parmi ces outils, le diagramme RA-EGP (Pearson, 2007; Longuépée et Mathieu, 2014), le diagramme MgO vs. Ni (Lightfoot *et al.*, 2001; Darling *et al.*, 2010; Lightfoot *et al.*, 2012) et le ratio Cu/Zr (Li et Naldrett, 1999) ont été utilisés dans le but d'identifier leur potentiel pour la vectorisation. En se basant sur ces outils, de nouveaux diagrammes et indices ont été développés et intégrés dans LithoModeleur.

Ces outils ont été testés sur plusieurs études de cas, soit le gisement Expo, le gisement Grasset et la suite intrusive de Soisson.

2 Diagramme RA-EGP

Plusieurs anciens projets CONSOREM ont permis de développer des outils afin de reconnaître la fertilité des intrusions (2003-09, Pearson, 2007; 2008-11, Longuépée et Mathieu, 2014; 2012-03, Mathieu 2013). Le diagramme RA-EGP+ a été développé au cours du projet 2003-09 et optimisé au cours du projet 2008-11 pour mettre en évidence la signature de ségrégation des sulfures (**Figure 4**). Ce diagramme intègre différents ratios qui répondent à divers processus magmatiques, dont la cristallisation fractionnée et la ségrégation de sulfures. Ce diagramme a été développé en premier lieu dans les projets 2002-02 (pas de rapport publié) et 2003-09 (Pearson 2007) pour évaluer la fertilité pour les gisements d'EGP. Le diagramme a ensuite été optimisé en 2008 pour s'appliquer également aux gisements de Ni-Cu (Longuépée et Mathieu, 2014). Ce diagramme permet d'identifier, dans sa partie gauche, une signature spécifique de la présence de sulfures riches en Ni-Cu et, dans sa partie droite, une signature typique de la fertilité pour les EGP.

Durant le projet 2008-11, plusieurs signatures spécifiques avaient été déterminées (**Figure 5**) en fonction du contexte soit :

- la signature en crochet pour les sulfures massifs riches en Ni-Cu,
- la pente descendante jusqu'au ratio Ni/Pd, qui montre qu'il y a un potentiel pour les EGP, mais pas de concentration de Ni-Cu,
- la signature en racine carrée inversée pour des roches sous saturées en soufre pour lesquels une interprétation doit être faite au cas par cas.



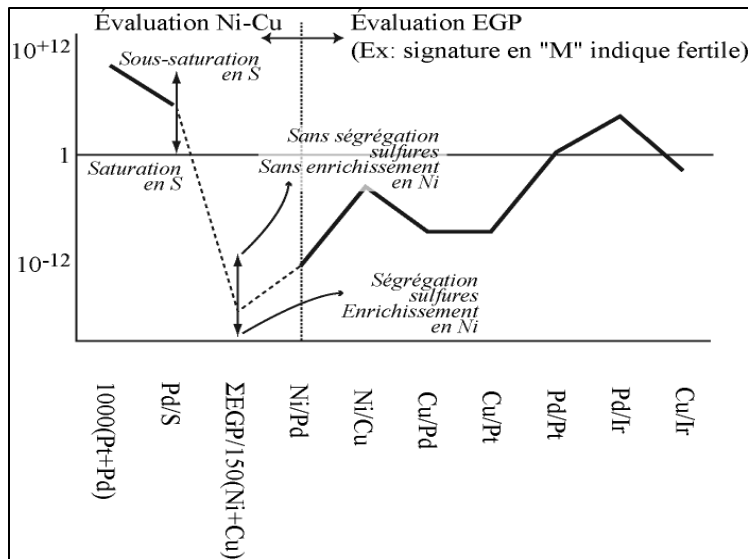


Figure 2. Diagramme RA-EGP+ permettant d'évaluer la fertilité en EGP d'une intrusion ainsi que son potentiel pour les minéralisations de type sulfure massif à Ni-Cu. Tiré du projet CONSOREM 2008-11 (Longuépée et Mathieu, 2014).

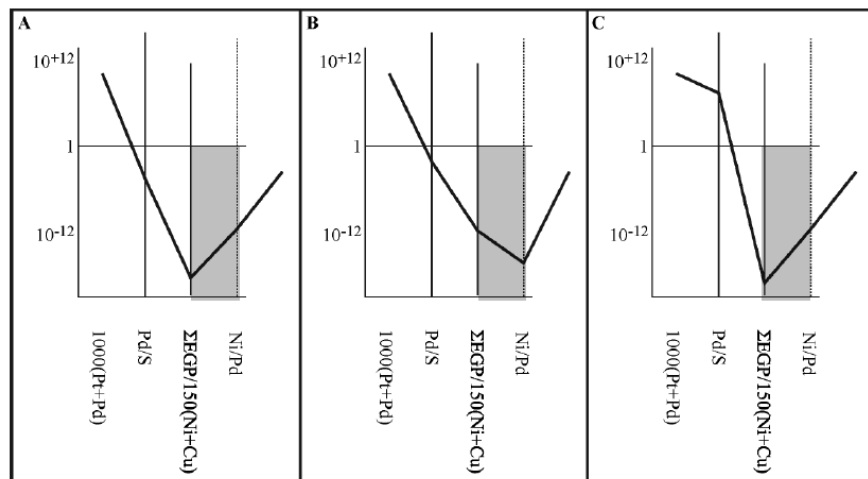


Figure 3. Profils schématisés de courbes reportées dans la partie gauche du diagramme RA-EGP+. Tiré du projet CONSOREM 2008-11 (Longuépée et Mathieu, 2014).

Ce diagramme est présentement peu utilisé par les membres du CONSOREM en raison notamment de la présence de variables faisant intervenir l'iridium, un élément rarement analysé par les compagnies d'exploration en raison des coûts élevés de son analyse.

La première phase de travaux s'est donc attardée à modifier le diagramme RA-EGP afin de : 1) rendre le diagramme plus en adéquation avec les analyses des compagnies d'exploration, 2) simplifier l'utilisation du diagramme en uniformisant les unités de mesure utilisées dans les variables, et 3) normaliser l'ensemble des variables au manteau primitif. Ce nouveau diagramme (**RA-EGPIII**) a été intégré dans LithoModeleur. Par la suite, ce diagramme a été utilisé dans le but de voir s'il pouvait exister une variation dans le profil du diagramme RA-EGPIII par rapport à la distance des minéralisations.

2.1 Modification du diagramme

Étant donné que l'iridium est rarement analysé en exploration, les ratios incluant l'iridium ont été enlevés du diagramme. Les équations de calcul des variables ont également été modifiées afin d'homogénéiser la normalisation au manteau primitif ainsi que les unités utilisées dans les divers



ratios, tout en gardant l'esprit du diagramme (garder des signatures spécifiques en fonction du contexte similaire à l'ancien diagramme). Le **Tableau 1** présente les nouvelles équations de calcul utilisées dans le diagramme ainsi que le processus identifié par la variable.

Tableau 1. Équations de calcul pour chacune des variables du diagramme RA-EGPIII. MP : manteau primitif (Palme et O'Neill, 2003).

Nom de la variable dans le diagramme	Processus	Équations de calcul
$1000 \cdot (Pd + Pt)$	Enrichissement en EGP	$1000 \times (Pd^{ech}/Pd^{MP} + Pt^{ech}/Pt^{MP})$
Pd/S	Quantifier l'enrichissement en Pd des sulfures	$[(Pd^{ech}/Pd^{MP}) / (S^{ech}/S^{MP})]^2$
$\Sigma EGP / (Ni + Cu)$	ségrégation des sulfures	$[(Pd^{ech}/Pd^{MP} + Pt^{ech}/Pt^{MP}) / 150 \cdot (Ni^{ech}/Ni^{MP} + Cu^{ech}/Cu^{MP})]^2$
Ni/Pd	ségrégation des sulfures	$[0,1 \cdot (Ni^{ech}/Ni^{MP}) / (Pd^{ech}/Pd^{MP})]^2$
Ni/Cu	Cristallisation fractionnée de l'olivine	$[10 \cdot (Ni^{ech}/Ni^{MP}) / (Cu^{ech}/Cu^{MP})]^2$
Cu/Pd	ségrégation des sulfures	$[(Cu^{ech}/Cu^{MP}) / (Pd^{ech}/Pd^{MP})]^2$
Cu/Pt	ségrégation des sulfures	$[(Cu^{ech}/Cu^{MP}) / (Pt^{ech}/Pt^{MP})]^2$
Pd/Pt	Hydrothermalisme	$[(Pd^{ech}/Pd^{MP}) / (Pt^{ech}/Pt^{MP})]^2$

2.2 Signature du nouveau diagramme

Les bases de données compilées durant les projets CONSOREM 2002-02, 2003-09 et 2008-11 ont été utilisées, auxquelles ont été ajoutées les données de Voisey's Bay de Lightfoot *et al.* (2012), afin :

- d'identifier la variation des variables (du profil) lors du processus de cristallisation fractionnée, et
- de comparer les signatures des intrusions fertiles établies lors du projet 2008-11 avec celles du nouveau diagramme RA-EGPIII et établir les profils associés aux minéralisations en fonction du contexte géologique dans le nouveau diagramme.

Variation des variables lors de la cristallisation fractionnée

Les signatures à la base (cumulats d'olivine) et au sommet (zone à spinifex) d'une coulée de lave stérile ont été établies à travers l'exemple de la coulée komatiitique de Vetreny (données compilées par Pearson, 2007). La cristallisation fractionnée de l'olivine entraîne une baisse des ratios Ni/Pd et Ni/Cu dans le liquide résiduel et une augmentation de ces ratios dans le cumulat d'olivine (**Figure 6**).

Comparaison des signatures dans le diagramme RA-EGP+ et le diagramme RA-EGPIII

Gisement de Ni-Cu sans minéralisation d'EGP : exemple de Voisey's Bay (Figure 7)

La signature en crochet typique de la présence de sulfures massifs de Ni-Cu, identifiée par Longuépée et Mathieu (2014), est toujours présente. La signature en W identifiée par Pearson (2007) comme étant typique des intrusions stériles pour les EGP ne forme plus un W étant donné que les ratios Pd/Ir et Cu/Ir ont été enlevés du nouveau diagramme. Cependant la pente ascendante entre Ni/Pd et Cu/Pt est toujours présente et se combine à une inversion de la pente entre Cu/Pt et Pd/Pt.



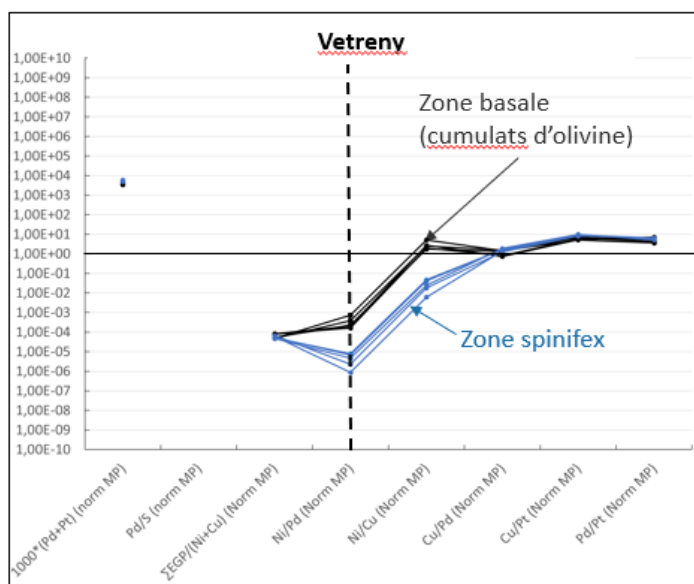


Figure 4. Diagramme RA-EGP+ pour les cumulats d'olivine et la zone à spinifex de la coulée de lave komatiitique de Vetreny. Données de Pushtel et Hamayun, 2001. L'ensemble des variables est normalisé au Manteau primitif (Palme et O'Neill 2003).

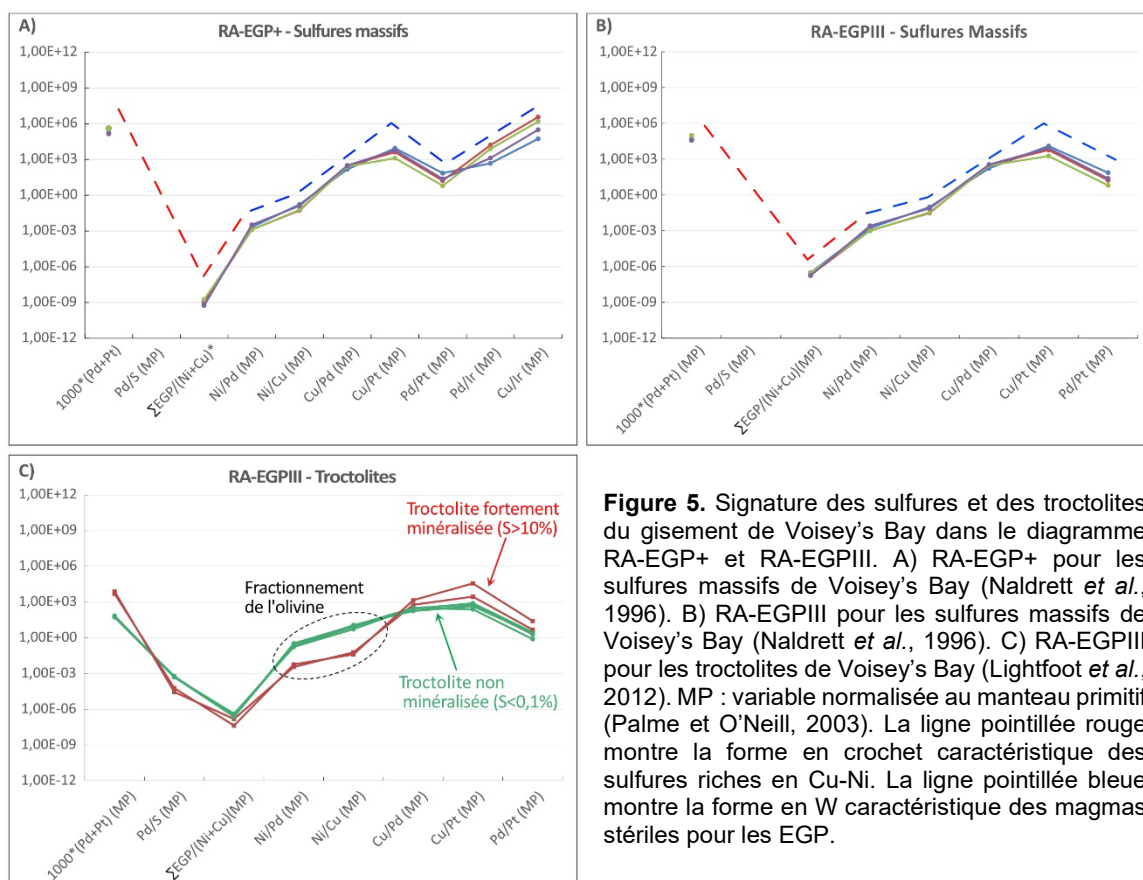


Figure 5. Signature des sulfures et des troctolites du gisement de Voisey's Bay dans le diagramme RA-EGP+ et RA-EGPIII. A) RA-EGP+ pour les sulfures massifs de Voisey's Bay (Naldrett *et al.*, 1996). B) RA-EGPIII pour les sulfures massifs de Voisey's Bay (Naldrett *et al.*, 1996). C) RA-EGPIII pour les troctolites de Voisey's Bay (Lightfoot *et al.*, 2012). MP : variable normalisée au manteau primitif (Palme et O'Neill, 2003). La ligne pointillée rouge montre la forme en crochets caractéristique des sulfures riches en Cu-Ni. La ligne pointillée bleue montre la forme en W caractéristique des magmas stériles pour les EGP.



Gisement d'EGP avec faible teneur en Ni-Cu : exemple du Lac des Îles (**Figure 8**)

La signature en pente descendante sur les quatre premiers ratios du diagramme typique d'un potentiel pour les EGP sans ségrégation de sulfures (Longuépée et Mathieu, 2014) est toujours présente, mais plus accentuée avec un pic au niveau du ratio Pd/S montrant l'enrichissement en EGP avec peu de sulfures (gisement de catégorie EGP±Ni±Cu). La signature en M dans la partie droite, identifiée par Pearson (2007) comme étant typique des intrusions fertiles pour les EGP ne forme plus un M. Cependant, le pic positif au niveau du ratio Ni/Cu caractérisé par une rupture de pente entre Ni/Pd, Ni/Cu et Cu/Pd est présent.

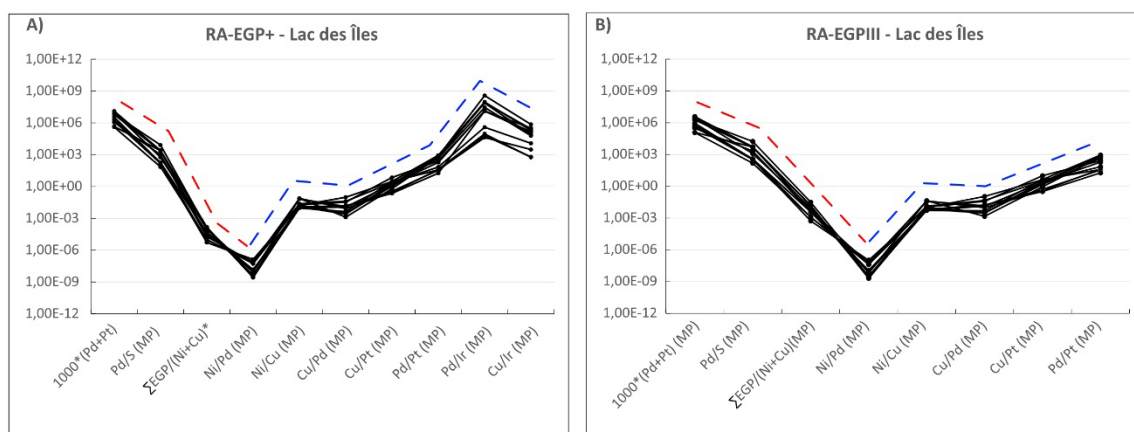


Figure 6. Signature des échantillons du gisement du Lac des Îles dans le diagramme RA-EGP+ et RA-EGPIII. Données de Brüggmann *et al.* (1989). MP : variable normalisée au manteau primitif (Palme et O'Neill, 2003). La ligne pointillée rouge montre la forme en crochets caractéristique des sulfures riches en Cu-Ni. La ligne pointillée bleue montre la forme en M caractéristique des échantillons ayant un potentiel pour les EGP.

Gisement de Ni-Cu avec des minéralisations d'EGP : exemple de Raglan (**Figure 9**)

La signature de ce type de gisement dans la partie gauche du diagramme RA-EGP+ est difficile à interpréter. En effet, les échantillons de Raglan Nord montrent une signature en crochets typique des gisements à sulfures riches en Ni-Cu. Par contre, l'échantillon de Méquillon montre une pente négative entre les quatre premières variables typiques des roches ayant un potentiel pour les EGP mais ayant subi peu de ségrégation de sulfures. Dans le nouveau diagramme cependant, la signature pour Raglan Nord et Méquillon est une pente négative « brisée » dans la partie gauche du diagramme (entre les quatre premières variables). La brisure provient d'une teneur en EGP élevée, mais d'un ratio Pd/S faible due à la présence de sulfures riches en Ni-Cu. Cette forme de signature est celle des gisements riches en métaux mais ayant aussi un potentiel pour les EGP. Dans la partie droite du diagramme, le pic au niveau du Ni/Cu est toujours présent, indiquant le potentiel pour les EGP. Il est important de noter que la rupture de pente entre les ratios Ni/Pd, Ni/Cu et Cu/Pd est beaucoup plus accentuée dans les échantillons de Raglan Nord que dans ceux de Méquillon. Ceci est dû à la teneur en nickel qui est beaucoup plus élevée dans les sulfures de Raglan Nord qu'à Méquillon, le premier étant issu d'un magma probablement plus primitif (McKevitt *et al.*, 2020).



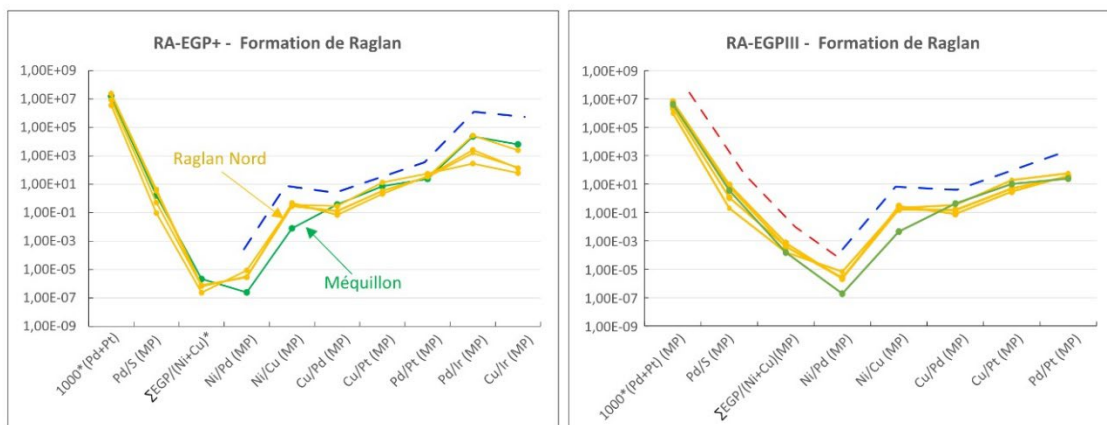


Figure 7. Signature des échantillons de sulfures disséminés de Raglan Nord et Méquillon dans le diagramme RA-EGP+ et RA-EGPIII. Données de Barnes et Giovenazzo (1990). MP : variable normalisée au manteau primitif (Palme et O'Neill, 2003). La ligne pointillée rouge montre la forme en crochet caractéristique des sulfures riches en Cu-Ni. La ligne pointillée bleue montre la forme en M caractéristique des échantillons ayant un potentiel pour les EGP.

Les médianes des signatures dans les différents contextes ont été combinées sur un seul diagramme et comparées (**Figure 10**). La valeur des deux premières variables est nettement plus faible dans les troctolites minéralisées et non minéralisées de Voisey's Bay que dans les échantillons du Lac des Îles et de Raglan, montrant le potentiel de ces deux derniers pour les EGP. La **Figure 11** montre les signatures typiques ainsi que le principe de la nouvelle version du diagramme.

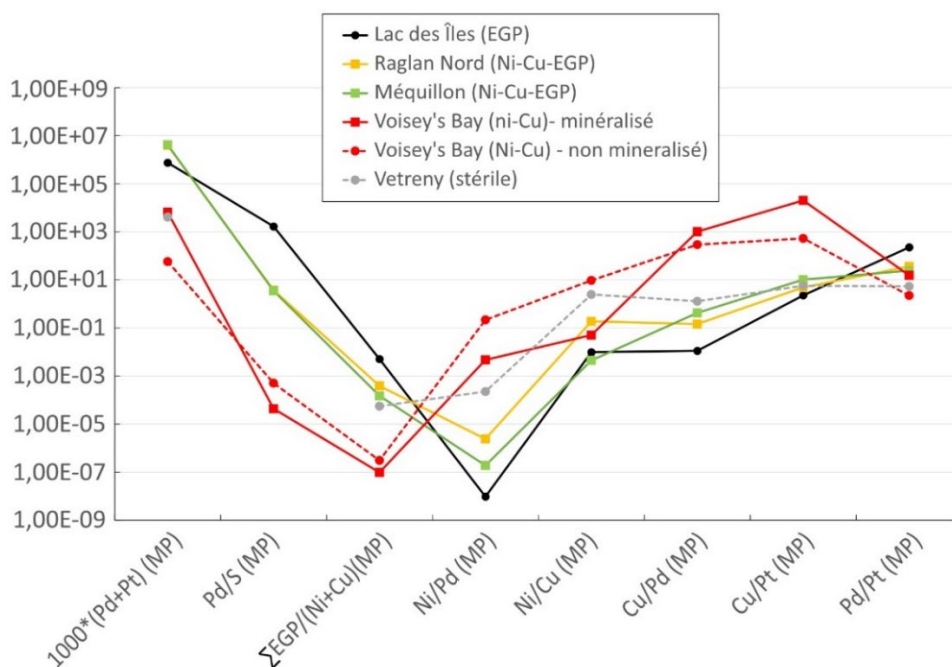


Figure 8. Signatures des intrusions ayant un potentiel pour les gisements de Ni-Cu pauvres en EGP, les gisements de Ni-Cu riches en EGP, les gisements EGP pauvres en Ni-Cu et des komatiites stériles dans le nouveau diagramme RA-EGPIII. La signature correspond à la médiane des données de Lightfoot et al. (2012) sur Voisey's Bay (troctolites minéralisées et non minéralisées), de Brügmann et al. (1989) sur Lac des Îles (minéralisation disséminée), de Barnes et Giovenazzo (1990) sur la formation de Raglan (minéralisation disséminée) et de Pushtel et Hamayun (2001) sur Vetreny, zone basale.



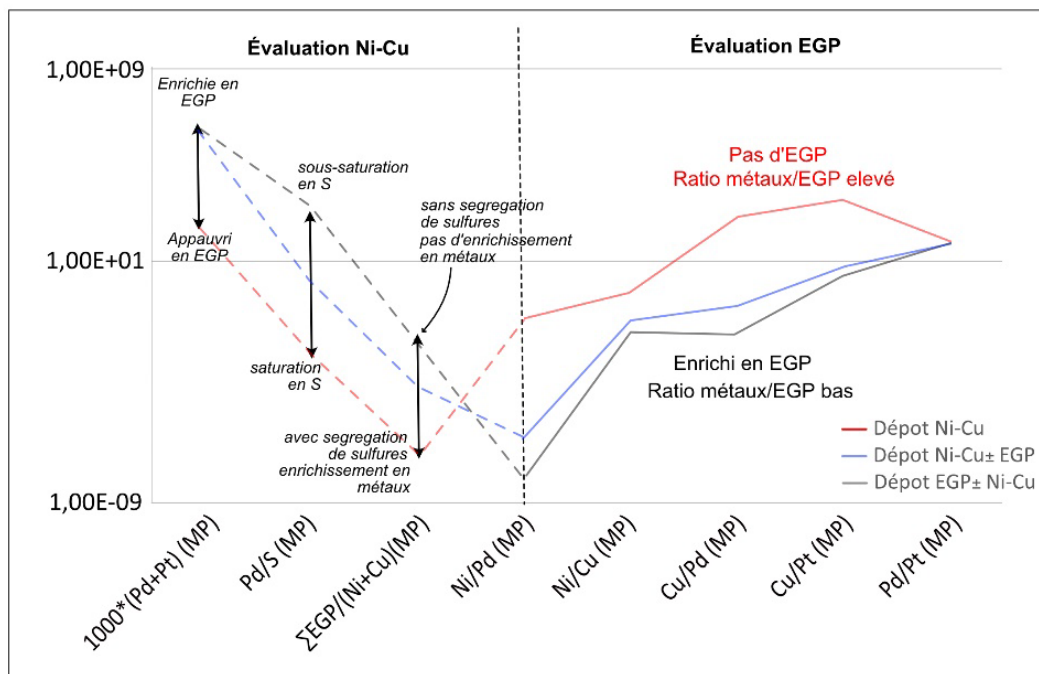


Figure 9. Nouvelle version du diagramme RA-EGPIII permettant d'évaluer la fertilité d'une intrusion en EGP et son potentiel pour les minéralisations de Ni-Cu.

2.3 Mise en application

Dans un deuxième temps, la variation de la signature géochimique à l'approche d'un gisement de Ni-Cu a été regardée à travers l'exemple du gisement Expo de Canadian Royalties.

Le gisement Expo est situé dans le domaine sud de la ceinture de Cape Smith (**Figure 12**), au sein de la suite intrusive d'Expo, dans la province de Churchill. La suite intrusive d'Expo est une série de dykes de composition ultramafique recoupant un ensemble volcanosédimentaire paléoprotérozoïque (le Groupe de Povungnituk; Bleeker et Kamo, 2020). Le magma source est interprété comme étant d'affinité komatiitique basaltique (McKevitt *et al.*, 2020). Certains de ces dykes contiennent des minéralisations économiques. Le gisement Expo, situé dans la partie centrale de la suite, est exploité depuis 2012. Le gisement se situe à la base d'un conduit magmatique en forme de *lame de couteau* (Barnes *et al.*, 2016) et forme une séquence de sulfures disséminés, matriciels et massifs du haut vers le bas stratigraphique du gisement (**Figure 13**).

Un forage ayant des analyses en continu dans la péridotite encaissante du gisement Expo a été sélectionné afin d'évaluer la variation de la signature géochimique à l'approche du gisement (**Figure 14**). La signature a été regardée à travers le nouveau diagramme RA-EGPIII modifié dans la première partie du projet. Peu de variations de signature ont été observées au sein de la roche encaissante à l'approche du gisement. L'échelle du diagramme (logarithmique) et la proximité par rapport à la minéralisation sont probablement responsables du peu de variations observées.

Les diagrammes RA-EGP sont des outils intéressants pour identifier la fertilité des intrusions, cependant, pour la vectorisation, les diagrammes binaires sont plus pertinents. Ainsi, pour la deuxième partie du projet, seuls des diagrammes binaires ont été utilisés.

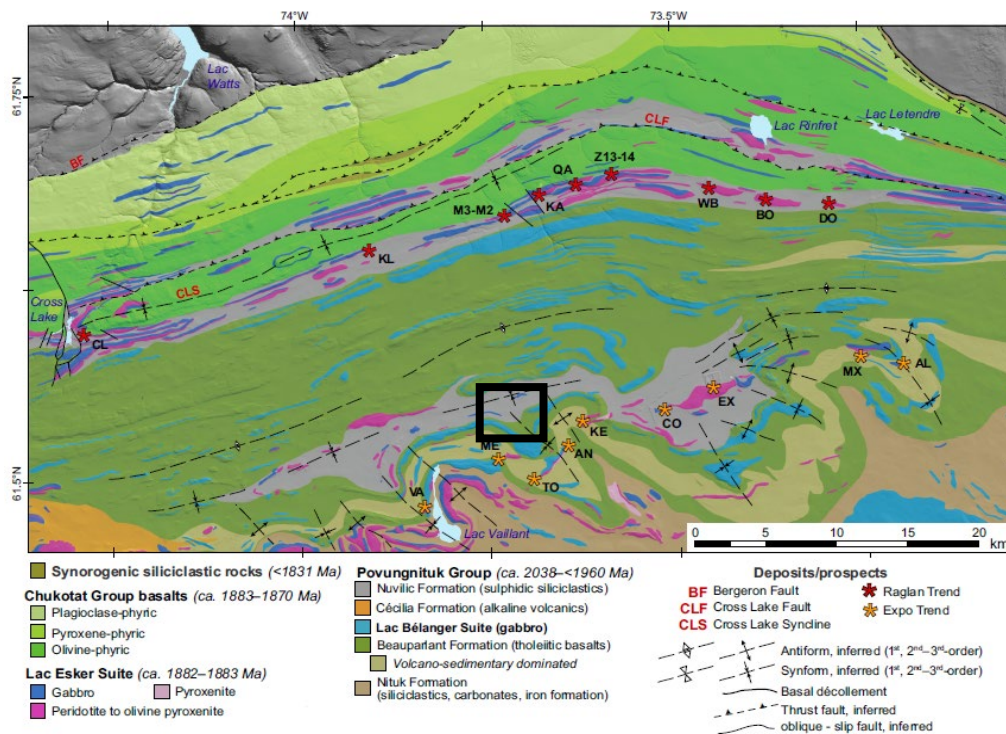


Figure 10. Localisation du gisement Expo dans la ceinture de Cape Smith. Source : McKeivitt et al. (2020).

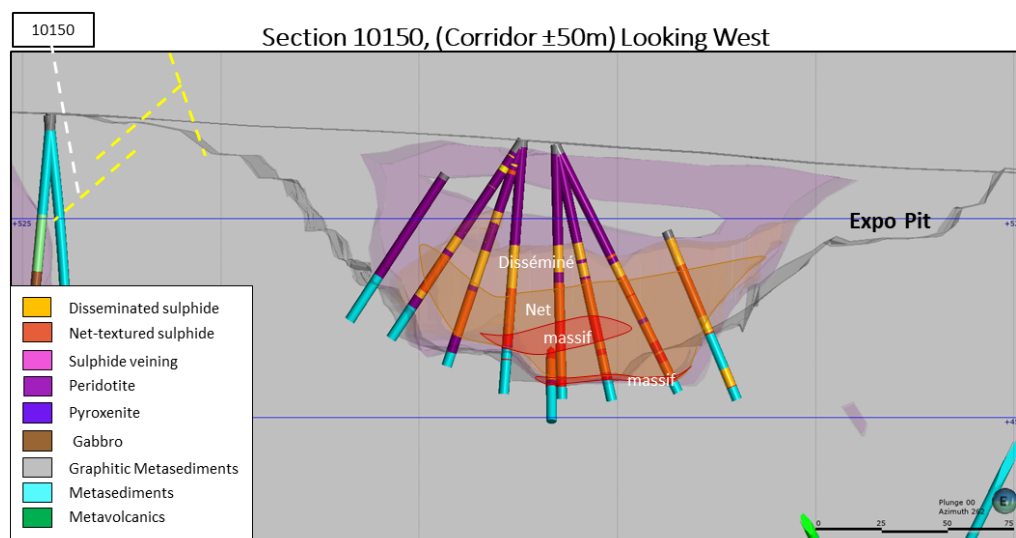


Figure 11. Section transversale du gisement Expo. Source : communication personnelle, Canadian Royalties, 23 août 2022.



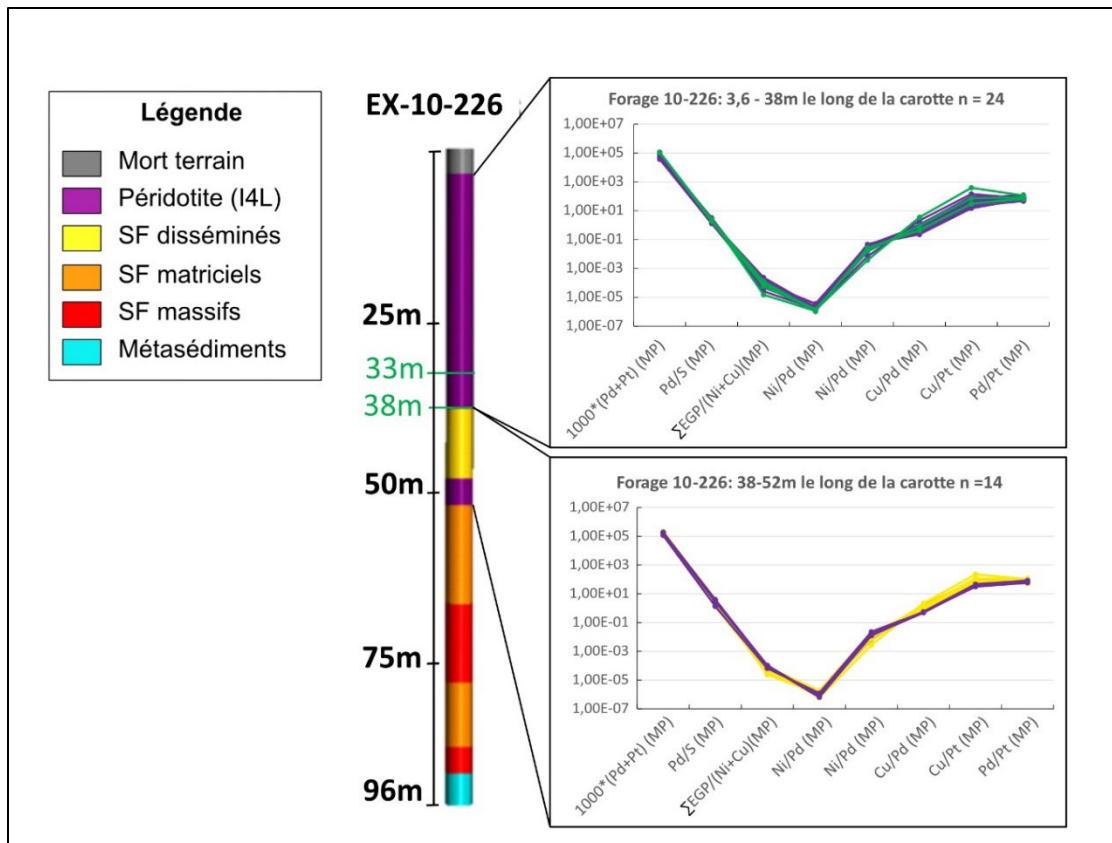


Figure 12. Diagramme RA-EGPIII des péridotites le long du forage EX-10-226.

3 Indice Ni/Ni*

3.1 Diagramme MgO vs. Ni

Le diagramme MgO vs. Ni, développé par Lightfoot *et al.* (2001; 2012) permet d'évaluer, de manière graphique, l'enrichissement ou l'appauvrissement en nickel d'un échantillon par rapport à la valeur en nickel attendue (Ni*) s'il n'y avait eu aucune ségrégation de sulfures. Le diagramme repose sur le principe que lors de l'absence de ségrégation de sulfure, le nickel est contrôlé par l'olivine. Il existe donc une corrélation entre la teneur en MgO et en nickel (Ni*).

Lors de la ségrégation des sulfures, le nickel est extrait du magma; le liquide silicaté résiduel sera donc appauvri en nickel, entraînant la formation d'olivine pauvre en nickel (**Figure 15**, point A). Les échantillons issus de la cristallisation du liquide silicaté résiduel se situeront sous la courbe de fractionnement des basaltes intra-plaques, alors que ceux du liquide sulfuré se situeront au-dessus de la courbe. Cette évaluation peut se faire de manière mathématique en calculant le ratio entre le nickel analysé et le nickel attendu (Ni/Ni*; Darling *et al.*, 2010). Ainsi, loin du gisement, Ni/Ni* sera faible (**Figure 15**, point A) et augmentera lorsque l'on se rapproche d'un gisement de Ni-Cu avec la présence de sulfures disséminés.

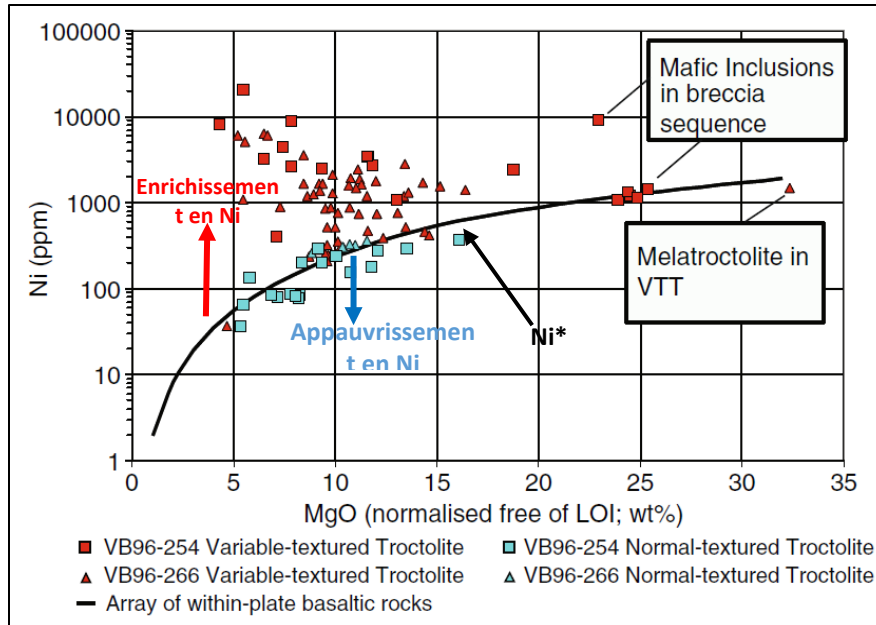


Figure 14. Diagramme MgO vs. Ni des troctolites de Voisey's Bay. La courbe de régression de puissance a été calculée à partir des valeurs en MgO et Ni des basaltes intra-plaques des trapps du Deccan. Modifié de Lightfoot *et al.* (2012).

3.2.2. $Ni^*/Ni^*_{komatiite}$

En partant du même principe, une équation de régression de puissance a été développée afin d'évaluer les enrichissements et appauvrissements en Ni pour les roches ultramafiques archéennes.

Une courbe de régression de puissance a été définie à partir de la base de données des komatiites du GEOROC (2022; <https://georoc.eu/>). À partir de l'ensemble de la base de données, les échantillons avec une analyse en soufre inférieure à 0,1 % et non associés à une mine ou un gisement de Ni-Cu connus ont été sélectionnés. Les échantillons de pyroxénite ont également été enlevés afin de s'assurer que le MgO soit principalement contrôlé par l'olivine. Suite à la sélection, 122 analyses ont permis de définir l'équation de calcul du Ni^* pour les komatiites (**Figure 17**) :

$$Ni^*_{komatiites} = 5,0515 \times (MgO_{ann\ ydre})^{1,6536}$$

Les indices $Ni/Ni^*_{mafiques}$, à utiliser sur les magmas mafiques, et $Ni/Ni^*_{komatiites}$, à utiliser sur les magmas ultramafiques archéens et paléoproterozoïques, sont intégrés dans le module de calcul des indices unaires de LithoModeleur. Pour y intégrer la régression de puissance pour les komatiites, le diagramme MgO vs. Ni modifié de Lightfoot *et al.* (2012) a aussi été ajouté à LithoModeleur.

Le diagramme MgO vs. Ni ainsi que le calcul d'indice $Ni/Ni^*_{komatiites}$ ont été testés sur les komatiites stériles de Vetreny et la base de données de komatiites stériles compilées à partir de la base de données GEOROC (2022; <https://georoc.eu/>), afin de caractériser la variabilité du ratio $Ni/Ni^*_{komatiites}$ (**Figure 18** et **Tableau 2**). À partir de cette caractérisation, un échantillon avec $Ni/Ni^*_{komatiites} < 0,7$ est considéré comme anormalement appauvri alors qu'il sera considéré anormalement enrichi si $Ni/Ni^*_{komatiites} > 1,5$.



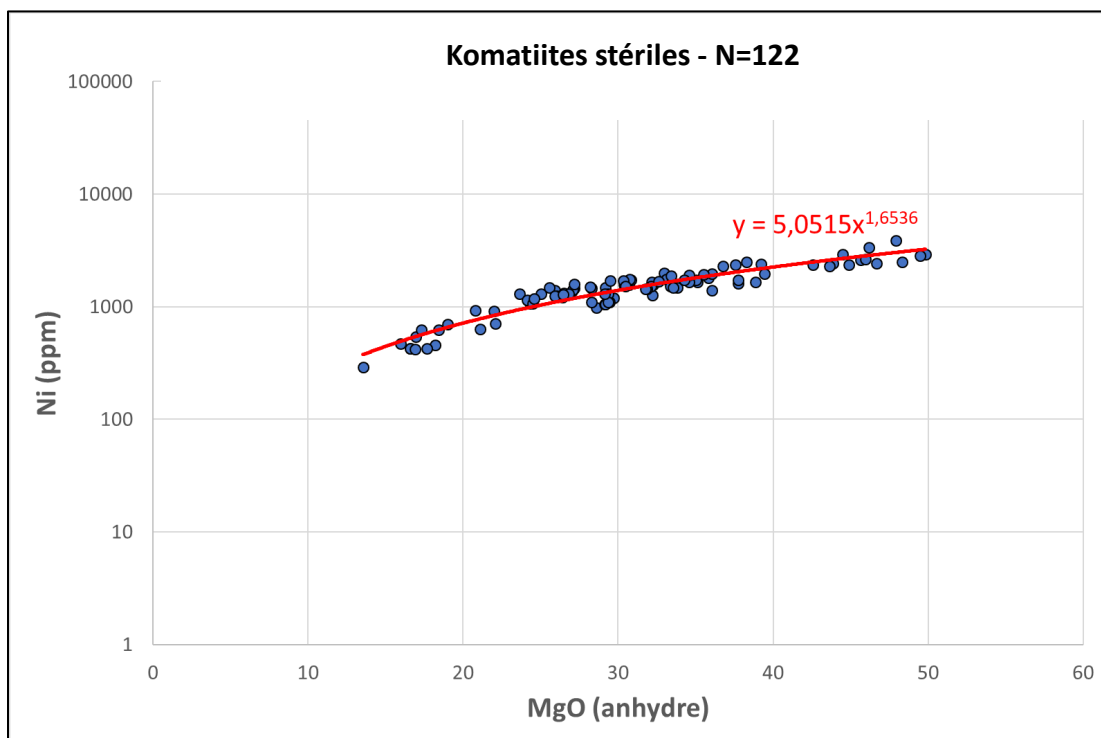


Figure 15. Diagramme MgO vs. Ni pour les komatiites stériles. Données provenant de la base de données GEOROC (2022; <https://georoc.eu/>).

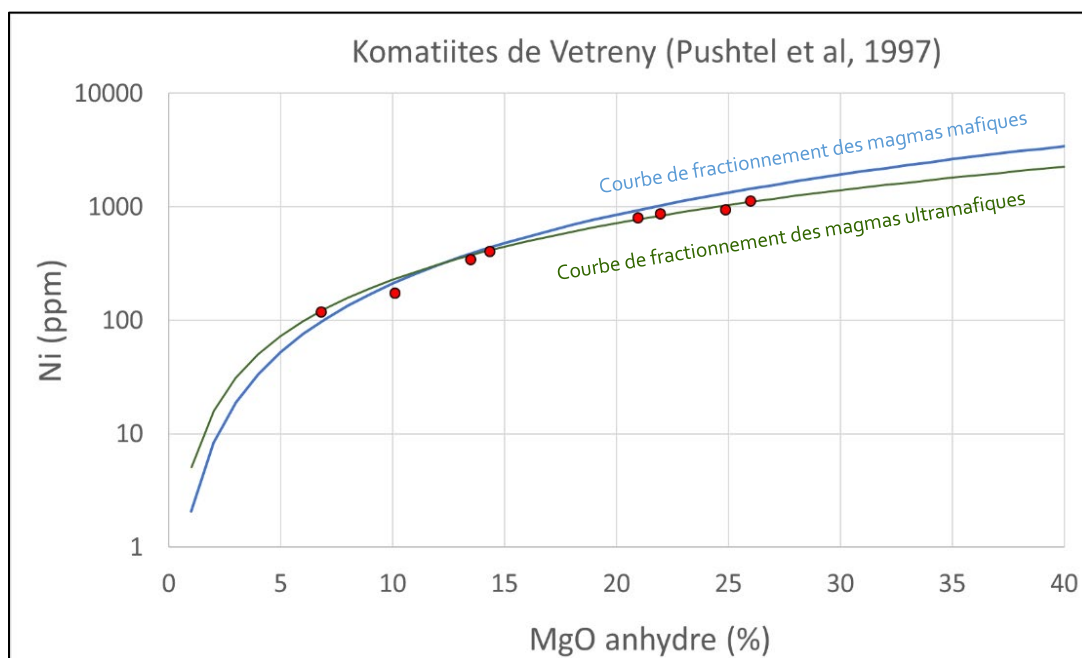


Figure 16. Diagramme MgO vs. Ni pour les échantillons de komatiites de Vetreny. Données de Pushtel et Hamayun (2001).



Tableau 2. Variabilité de l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ pour les komatiites stériles.

	$Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$	
	Minimum	Maximum
Komatiites de Vetreny	0,75	1,05
Komatiites stériles du GEOROC	0,73	1,4

3.3 Vectorisation avec l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$: exemple Expo

La base de données de forage de la suite intrusive d'Expo fournie par Canadian Royalties comprenait 9 851 forages pour 187 000 échantillons analysés. La méthode analytique utilisée est une digestion par quatre acides suivie d'une analyse ICP-AES (communication personnelle, Canadian Royalties, 24 septembre 2022). La base de données ainsi que le modèle géologique en trois dimensions (3D) du gisement Expo ont été fournis sous format Leapfrog. Une sélection de 868 forages a été faite autour du gisement dans un secteur de 5,5 km d'orientation E-O. À l'aide du logiciel Leapfrog, les codes lithologiques et les analyses géochimiques ont été compilés dans un même fichier et les coordonnées spatiales XYZ (UTM NAD83, zone 18) de chacun des échantillons ont été calculées. À l'aide d'un programme Visual Basic, la distance de chaque échantillon par rapport à la lentille minéralisée a été calculée. Afin de discriminer la lentille minéralisée de la roche hôte par la géochimie, une teneur de 0,26 % Ni a été utilisée. En effet, le premier quartile de la teneur en nickel des sulfures disséminés correspond à 0,26 % Ni alors que le dernier quartile des roches ultramafiques encaissantes correspond à une teneur de 0,23 % (Tableau 3).

Tableau 3. Variabilité du nickel dans les différentes unités lithologiques du Gisement Expo.

	Min	Q1	Médiane	Q3	Max
Sulfures massifs	-0,01	0,629	2,107	2,92	7,645
Sulfures matriciels	-0,01	0,46	0,61	0,46	4,141
Sulfures disséminés	-0,01	0,26	0,327	0,411	3,25
Ultramafique (I4)	-0,01	0,132	0,178	0,233	6,941

L'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ a été calculé pour les échantillons de la lithologie I4L (péridotite) à partir de l'indice unaire intégré dans LithoModeleur. Les valeurs des indices $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ calculées ont été reportées dans un diagramme boîte à moustache en fonction de la distance à la lentille minéralisée calculée précédemment. Ce diagramme montre que la médiane des valeurs diminue progressivement en s'éloignant de la lentille minéralisée jusqu'à une distance d'environ 300 m (Figure 19).

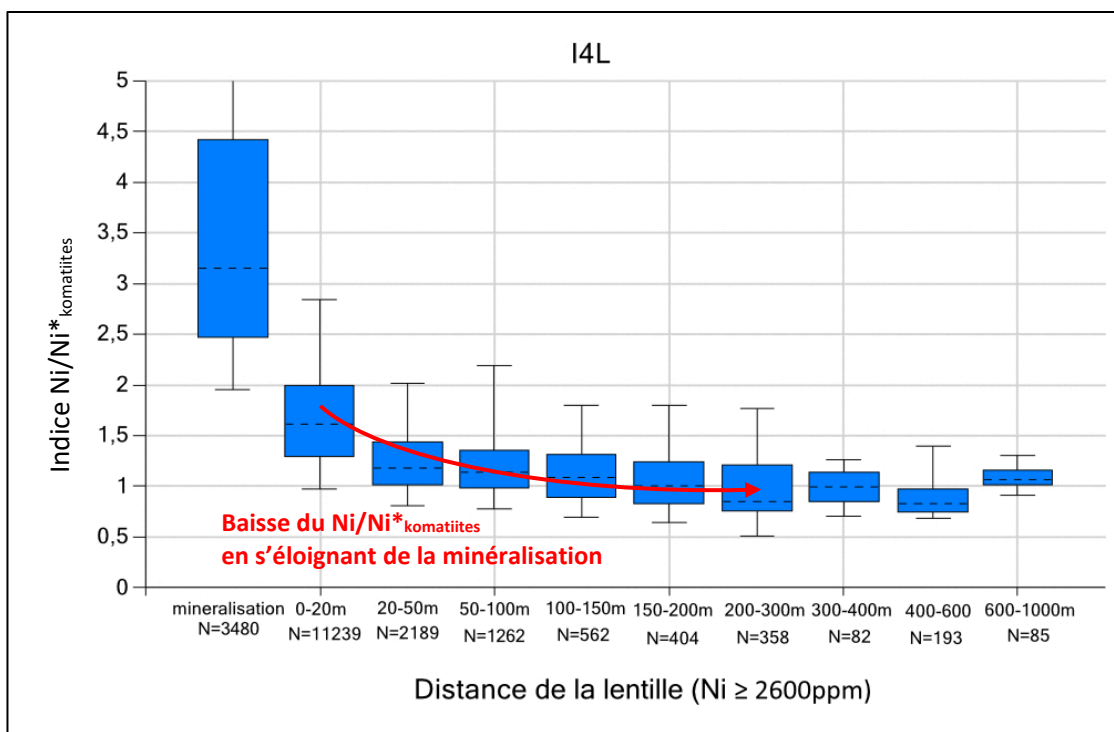


Figure 17. Diagramme boîte à moustache de l'indice $Ni/Ni^*_{komatiites}$ dans les péridotites encaissantes d'Expo en fonction de la distance à la lentille minéralisée.

Les valeurs des indices $Ni/Ni^*_{komatiites}$ calculées avec LithoModeleur ont ensuite été visualisées en 3D dans le logiciel Leapfrog (**Figure 20**). Les observations des textures d'écoulement magmatique en forage montrent une transition d'un écoulement vertical à horizontal à l'est du gisement Expo (communication personnelle, Canadian Royalties, 29 mars 2023) indiquant l'emplacement du dyke nourricier. À partir de ce dyke nourricier, l'écoulement magmatique se serait fait horizontalement vers l'est et l'ouest. Le gisement se serait donc mis en place à la sortie du dyke nourricier.

La visualisation 3D montre un appauvrissement en nickel (indice $Ni/Ni^*_{komatiites} < 0,7$) dans le dyke d'Expo jusqu'à 2,3 km en aval du gisement. L'enrichissement en nickel (indice $Ni/Ni^*_{komatiites} > 1,5$) est observable dans les roches encaissantes uniquement à l'aplomb du gisement.

La **Figure 21** montre deux sections perpendiculaires à l'allongement de la lentille. L'enrichissement en nickel de la lithologie I4L à l'approche du gisement est visible à travers l'augmentation de l'indice $Ni/Ni^*_{komatiites}$ dans les vingt derniers mètres avant les sulfures matriciels. Cet enrichissement est dû à une augmentation progressive de la quantité de sulfures disséminés dans la péridotite et serait visible de manière qualitative par simple observation minéralogique.

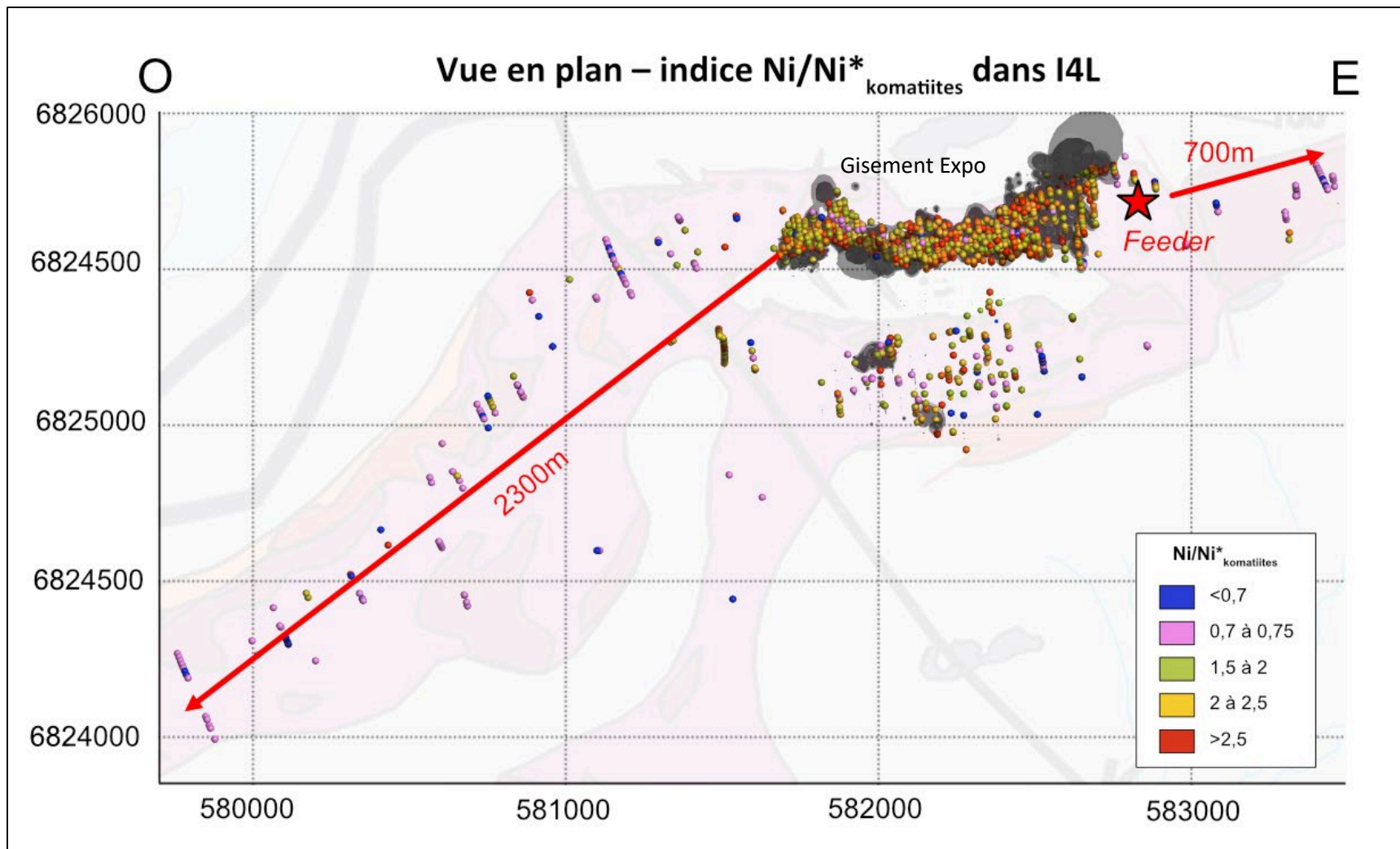


Figure 18. Visualisation 3D de la variabilité de l'indice $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ des péridotites du dyke d'Expo. La lentille minéralisée du gisement est représentée en gris foncé sur l'image. Les flèches rouges indiquent le sens d'écoulement magmatique tel qu'interprété à partir des observations en forages (communication personnelle, Canadian Royalties, 29 mars 2023).

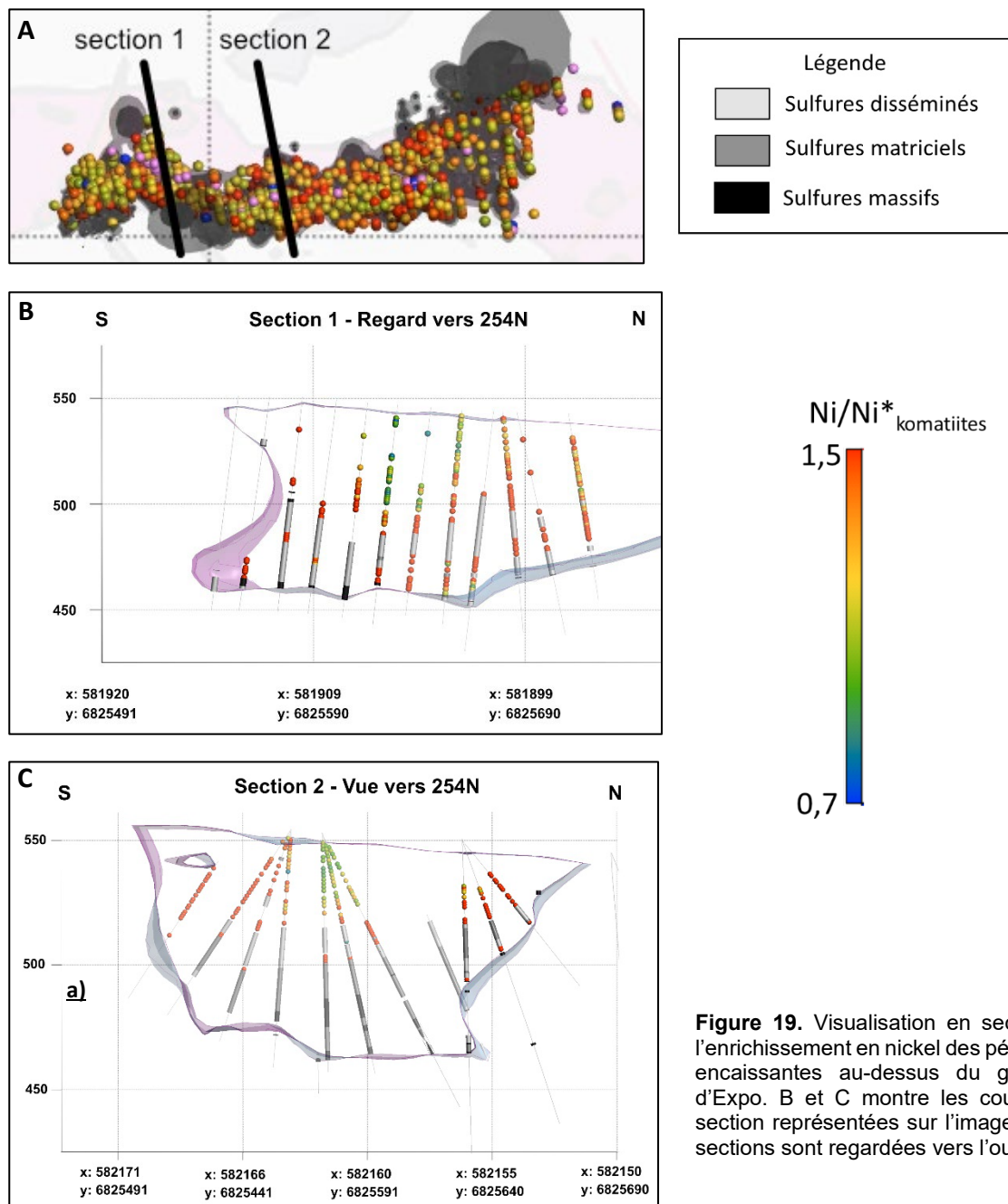


Figure 19. Visualisation en section de l'enrichissement en nickel des péridotites encaissantes au-dessus du gisement d'Expo. B et C montre les coupes en section représentées sur l'image A. Les sections sont regardées vers l'ouest.

3.4 Influence de l'altération sur le calcul de l'indice $Ni/Ni^*_{komatiites}$: exemple de Grasset

L'histoire géologique post-magmatique entraîne souvent la déformation et l'altération des intrusions hôtes des gisements. Le magnésium, qui est utilisé pour le calcul de l'indice unaire $Ni/Ni^*_{komatiites}$, est un élément souvent mobile lors des altérations hydrothermales. Il est donc pertinent de documenter les effets de l'altération sur cet indice. Le chrome est beaucoup moins mobile lors de l'altération hydrothermale que le magnésium et a un comportement similaire lors de la cristallisation fractionnée. Un indice d'enrichissement en Ni a donc été calculé à partir du Cr_2O_3 pour les péridotites encaissant le gisement de Grasset soit le ratio Ni/Ni^*_{Cr} . Ce ratio a été comparé à la variabilité de l'indice $Ni/Ni^*_{komatiites}$ en fonction des minéraux d'altération présents et de l'intensité de l'altération.

Le complexe ultramafique de Grasset (GUC), situé dans la partie nord-ouest de la Sous-province de l'Abitibi, est une série de sills ultramafiques archéens en intrusion dans une séquence de roches volcaniques bimodales avec quelques niveaux d'argilite graphitique et de formation de fer (**Figure 22**). Le sud du complexe est cisaillé par la zone de déformation de Sunday Lake, métallotecte important pour les minéralisations aurifères. Le gisement de Grasset se situe dans la partie sud-est du complexe et est constitué de sulfures disséminés à l'intérieur d'un sill ultramafique (14; Wallbridge Mining Company, 2021). Le complexe est métamorphisé au faciès des schistes verts supérieur (Wallbridge Mining Company, 2021). Sa proximité avec la zone de déformation de Sunday Lake ainsi que le grade métamorphique en font un excellent candidat pour évaluer les effets de l'altération sur les outils développés durant ce projet.

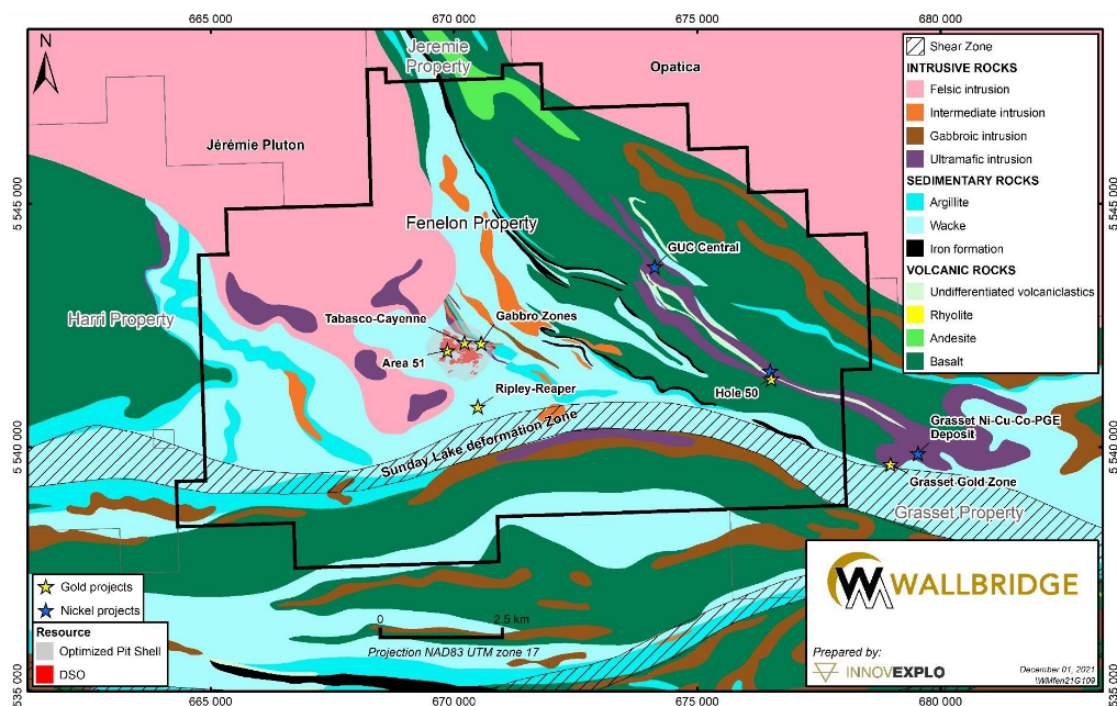


Figure 20. Localisation du gisement Grasset dans le complexe ultramafique de Grasset. Source : Wallbridge Mining Company (2021).

La **Figure 23** montre que le nickel est corrélé au Cr dans les péridotites de Grasset. Les échantillons ayant un $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ bas s'alignent le long d'une courbe de régression de puissance de la même manière que dans le diagramme MgO vs. Ni . L'altération semble donc affecter très peu le calcul de l'indice $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$.

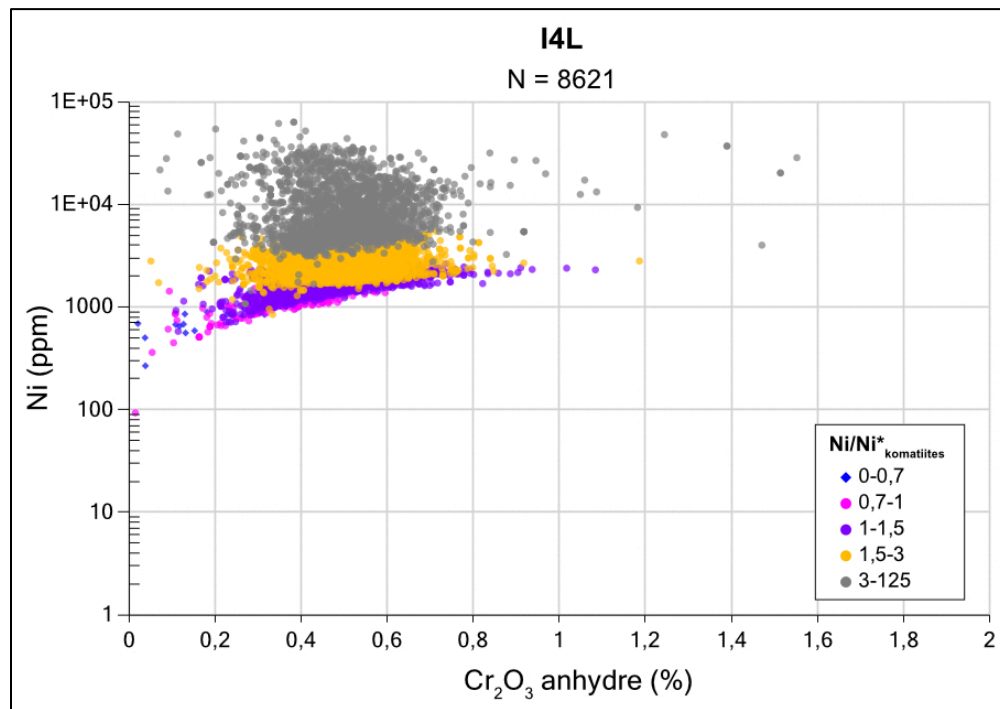


Figure 21. Diagramme Cr_2O_3 vs. Ni en fonction de l'indice $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ pour les péridotites archéennes encaissant le gisement de Grasset.

Afin d'aller plus loin dans la caractérisation des effets de l'altération, un ratio $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{Cr}}$ a été calculé à partir de la régression de puissance entre le Ni et le Cr_2O_3 pour les péridotites du Grasset ayant une teneur en soufre inférieure à 1 000 ppm. Le ratio $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{Cr}}$ a ensuite été comparé avec le résultat de l'indice unaire $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ (calculé à partir du MgO) dans LithoModeleur (**Figure 24**).

La bonne corrélation entre l'indice $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ et $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{Cr}}$ montre que la serpentinisation affecte peu le calcul de l'indice $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ tout comme l'altération en carbonates ou en chlorite (**Figure 24A, B, C**). La **Figure 24D** montre que l'altération en séricite, lorsqu'elle est d'intensité faible, n'affecte pas l'indice; cependant, lors d'une altération en séricite d'intensité modérée, un découplage apparaît entre les ratios $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ et $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{Cr}}$. Il est donc important de faire attention en utilisant l'indice unaire $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ sur des roches modérément à fortement altérées en séricite. Idéalement, lorsque les échantillons sont fortement altérés, les indices unaires $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ ou $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafiqes}}$ (calculés à partir de la teneur en magnésium) et le ratio $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{Cr}}$ (calculé à partir de la teneur en chrome) devraient être comparés.

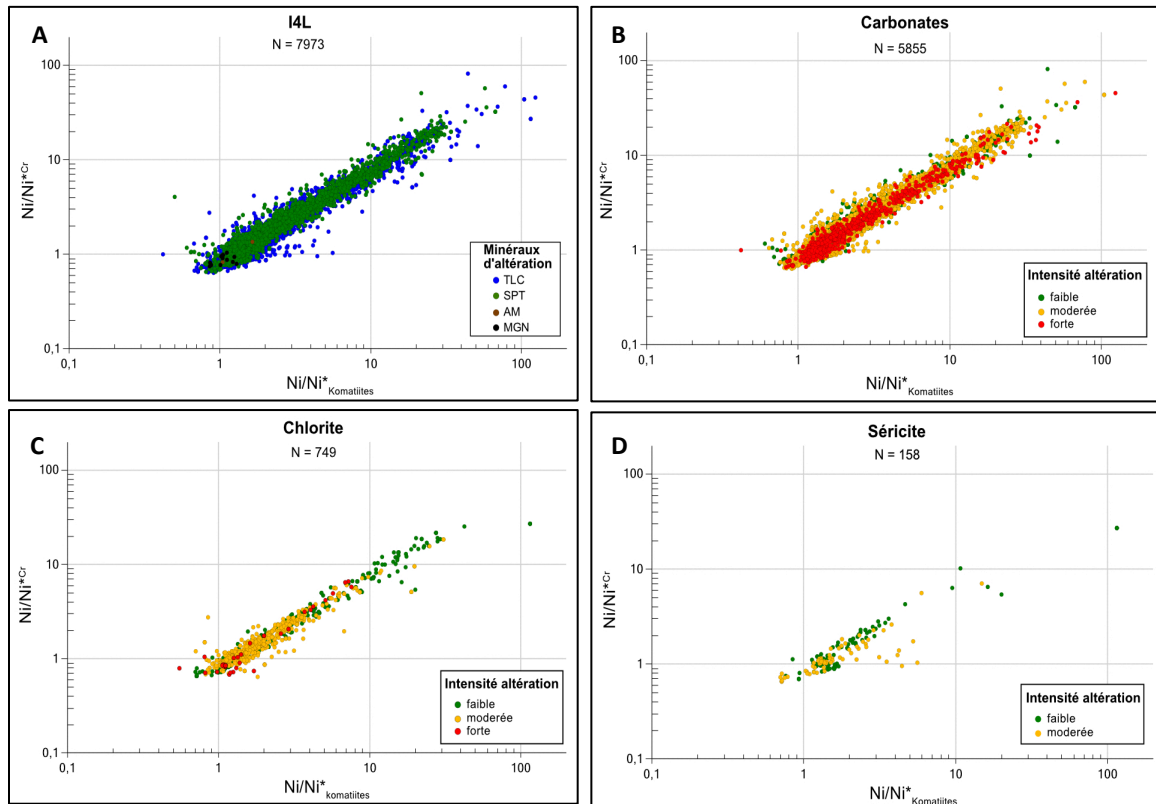


Figure 22. Comparaison du $Ni/Ni^*_{komatiites}$ et Ni/Ni^*_{Cr} pour les péridotites encaissant le gisement de Grasset. L'indice $Ni/Ni^*_{komatiites}$ a été calculé avec le nouvel indice unaire dans LithoModeleur, lequel a été construit à partir de l'équation de la courbe de corrélation entre le Ni et le MgO dans les péridotites non minéralisées de la base de données GEOROC (2022; <https://georoc.eu/>) et l'indice Ni/Ni^*_{Cr} a été calculé à partir de l'équation de la courbe de corrélation entre le nickel et le Cr_2O_3 dans les péridotites non minéralisées de Grasset.

4 Diagrammes Ni/Ni^* vs. Cu/Zr

4.1 Principe du diagramme

Un indicateur de la ségrégation des sulfures souvent utilisé dans la littérature scientifique est le ratio Cu/Zr développé par Li et Naldrett (1999). Ce ratio repose sur l'incompatibilité de ces éléments et leur affinité avec le soufre. Cu et Zr étant deux éléments très incompatibles lors de la cristallisation des magmas mafiques, leur ratio restera homogène dans le liquide résiduel lors de la cristallisation fractionnée. Par contre, comme Cu un élément très chalcophile alors que Zr n'est pas chalcophile, lors de la ségrégation des sulfures, le ratio Cu/Zr va baisser dans le liquide silicaté résiduel et augmenter dans le liquide sulfuré (**Figure 25**).



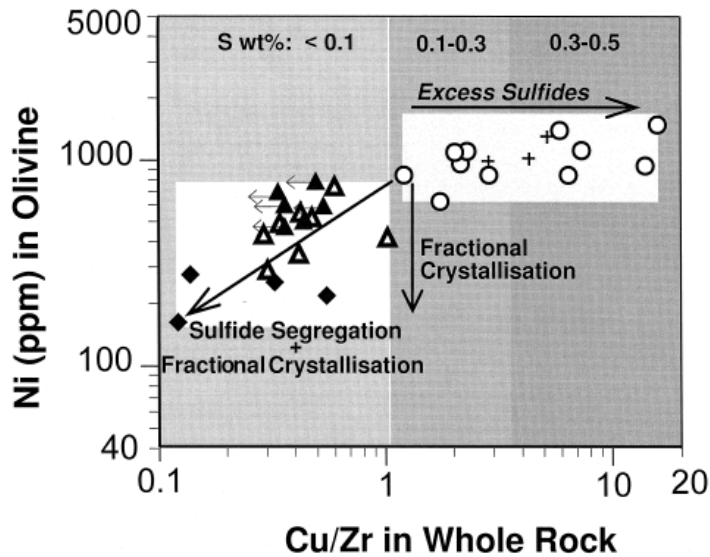


Figure 23. Variation du ratio Cu/Zr lors de la cristallisation fractionnée et de la ségrégation de sulfures. Source : Li et Naldrett (1999).

Partant de ce principe, deux nouveaux diagrammes ont été construits afin de définir la fertilité d'une intrusion. Ces diagrammes intègrent en abscisse l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ ou $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ et en ordonnée le ratio Cu/Zr (**Figure 26**). Étant donné que le ratio Cu/Zr et les indices Ni/Ni^* restent homogènes durant la cristallisation fractionnée, les échantillons d'une intrusion n'ayant subi aucune ségrégation de sulfure devraient être regroupés dans le diagramme. Par contre, lors de la ségrégation de sulfures, les échantillons devraient s'aligner le long de deux directions à partir du centre soit :

- vers le bas à gauche du diagramme, ce qui correspond au liquide silicaté ayant perdu les éléments chalcophiles (Ni et Cu), et
- vers le haut à droite du diagramme, ce qui correspond au liquide sulfuré.

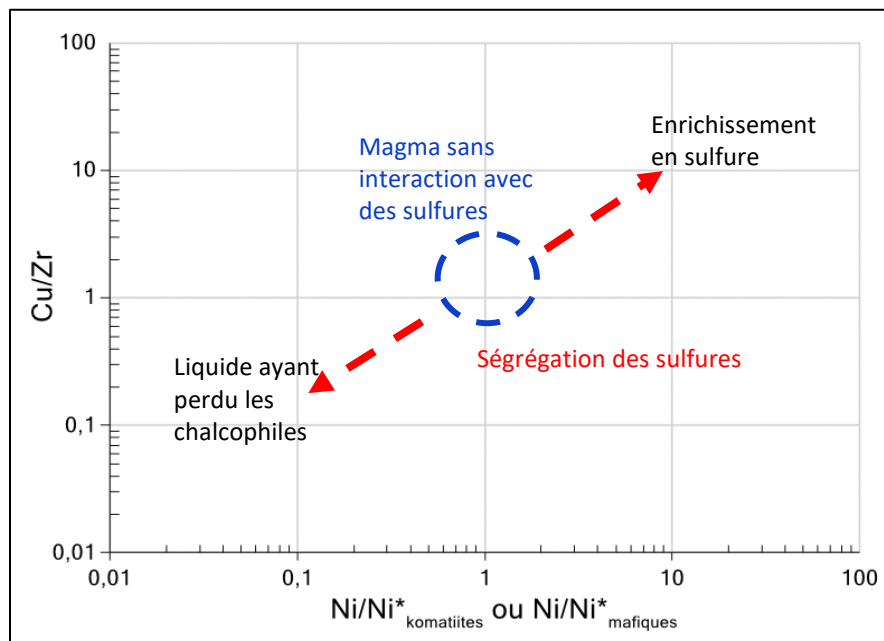


Figure 24. Principe des diagrammes $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ vs. Cu/Zr et $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ vs. Cu/Zr.



Deux versions de ce diagramme sont intégrées dans LithoModeleur, soit pour les roches mafiques et les roches ultramafiques archéennes/paléoprotérozoïques.

Il est important de noter que le ratio Cu/Zr de départ est dépendant du ratio Cu/Zr dans le magma d'origine; ainsi, il est important d'utiliser ce diagramme uniquement sur les échantillons d'une même suite magmatique.

Ce diagramme a d'abord été testé sur les komatiites de Vetreny. La **Figure 27** montre que l'ensemble des échantillons se regroupent dans le centre du diagramme, comme attendu étant donné la stérilité de la coulée de lave.

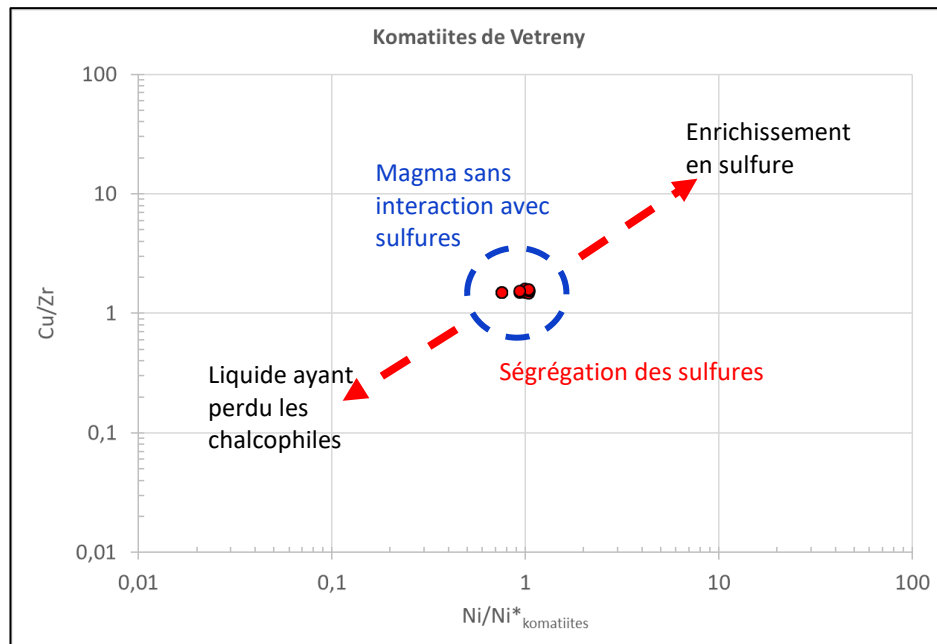


Figure 25. Diagramme $Ni/Ni^*_{\text{komatiites}}$ vs. Cu/Zr pour les komatiites de Vetreny. Données de Pushtel et Hamayun (2001).

4.2 Étude de cas : la suite de Soisson

Le diagramme $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ vs. Cu/Zr a ensuite été testé sur les intrusions de la suite de Soisson.

La suite intrusive de Soisson est située dans le sud-est de la province du Churchill, près de la limite entre le domaine de Kuujuaq et le bloc de la rivière Georges, dans la partie ouest de la Zone noyau (**Figure 28**). La suite consiste en une série d'intrusions mafiques mésoprotérozoïques dont certaines contiennent des minéralisations de Cu-Ni (Sappin *et al.*, 2022). Ces intrusions n'ont pas subi de métamorphisme ou d'altération post-magmatique. La base de données comprend 97 échantillons de surface provenant du MRNF, de la Commission géologique du Canada et de compagnies privées.

L'indice unaire $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ a été calculé pour chacun des échantillons et reporté dans le diagramme $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ vs. Cu/Zr (**Figure 29**). Les échantillons de l'intrusion SIS-01 montrent une corrélation entre $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ et Cu/Zr . La direction de la corrélation indique un enrichissement en sulfures. Quelques échantillons s'alignent selon une direction opposée correspondant au liquide silicaté appauvri en éléments chalcophiles. Cette intrusion a donc un bon potentiel pour des minéralisations de Ni-Cu.



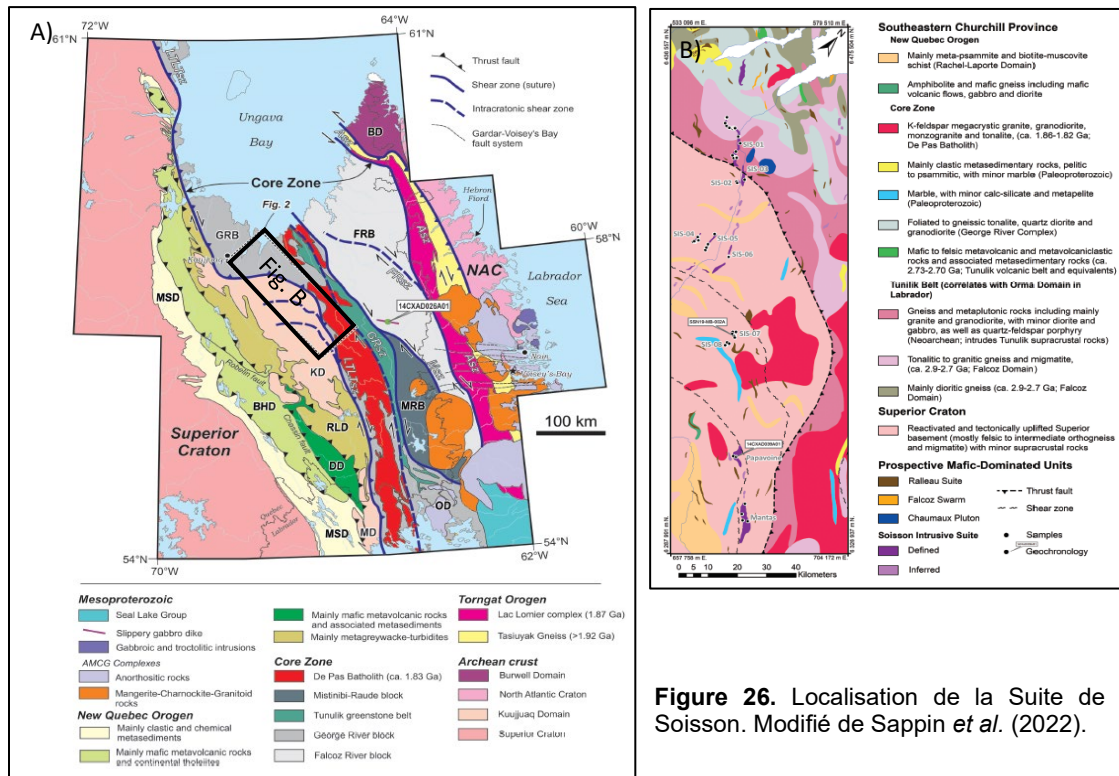


Figure 26. Localisation de la Suite de Soisson. Modifié de Sappin *et al.* (2022).

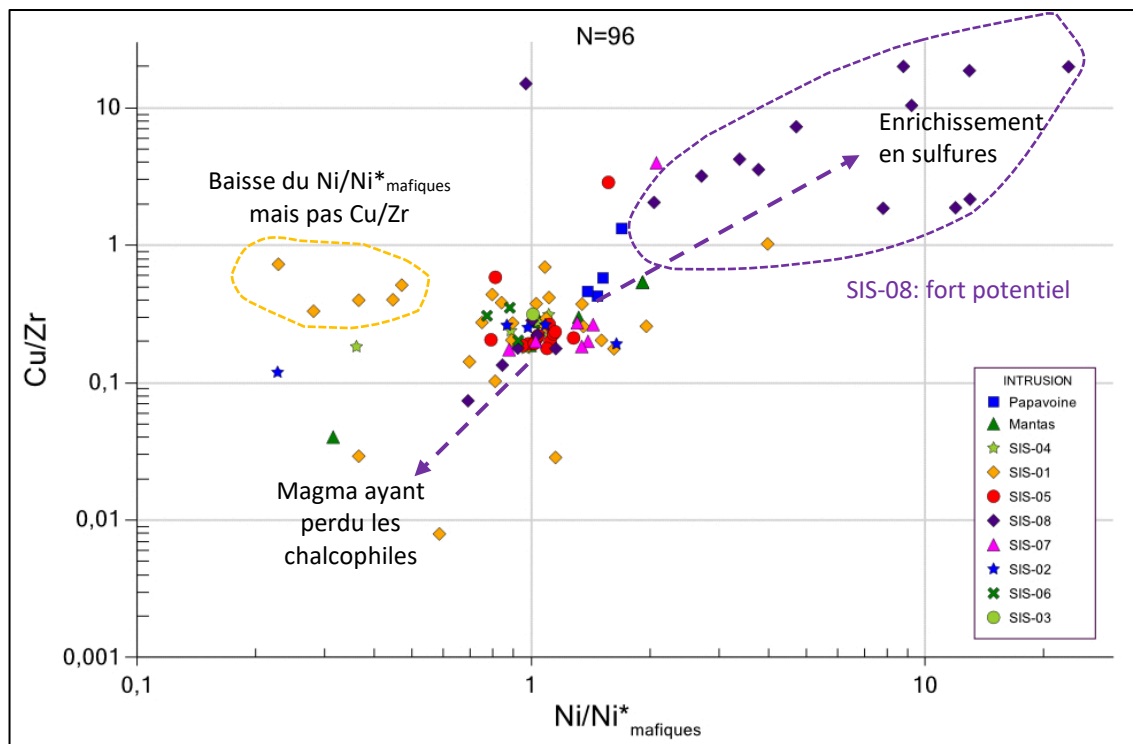


Figure 27. Diagramme Ni/Ni^* vs. Cu/Zr pour les échantillons de la suite de Soisson.



Les échantillons de l'intrusion SIS-08 montrent la ségrégation de sulfure ainsi qu'un liquide silicaté appauvri (**Figure 29**). Cependant quelques échantillons s'alignent selon une direction horizontale avec une baisse du Ni/Ni^*_{mafiq} et un ratio Cu/Zr demeurant homogène.

La norme CIPW a été calculée afin d'identifier la raison de cette baisse du Ni/Ni^*_{mafiq} , alors que le ratio Cu/Zr ne montre pas de ségrégation de sulfures. La raison de la baisse du ratio Ni/Ni^*_{mafiq} dans ces échantillons est leur teneur élevée en minéraux ferromagnésiens autres que l'olivine, notamment les pyroxènes, qui contiennent du magnésium (**Figure 30**). Au regard de la **Figure 31**, les clinopyroxènes semblent être la phase minérale qui entraîne une variabilité de l'indice Ni/Ni^*_{mafiq} quand ils sont présents en grande quantité.

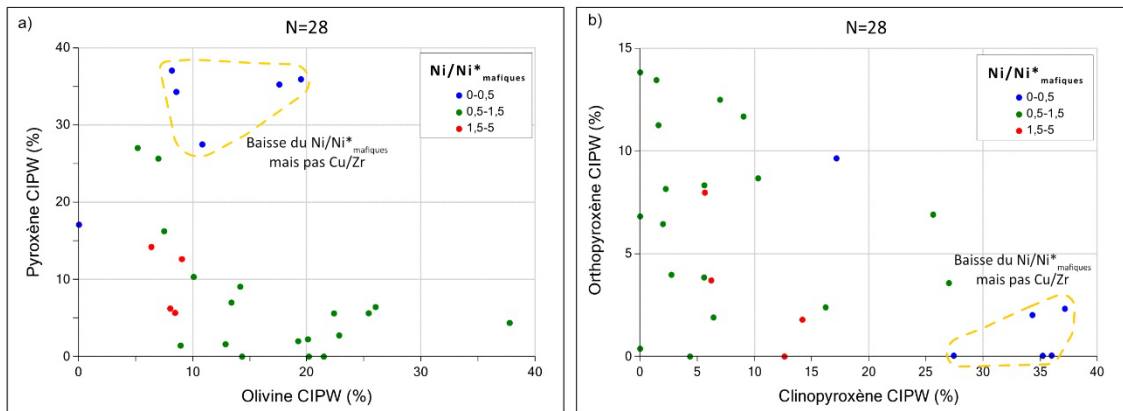


Figure 28. Composition minéralogique calculée par la norme CIPW pour les échantillons de SIS-01 en fonction de l'indice Ni/Ni^*_{mafiq} . Les valeurs en olivine, clinopyroxène et orthopyroxène proviennent du calcul de la norme CIPW avec LithoModeleur.

Les échantillons de la suite de Soisson ont aussi été visualisés dans le diagramme Ni vs. Ni/S développé dans le projet CONSOREM 2008-11 (Longuépée et Mathieu, 2014). Ce diagramme permet de déterminer la fertilité d'une intrusion dans le but d'évaluer si la variation en nickel d'une série d'échantillons provient de la cristallisation fractionnée ou de la ségrégation de sulfures (**Figure 31**). Il convient néanmoins de faire attention au ratio $(FeO_T + MgO)/SiO_2$ lors de l'utilisation du diagramme puisque les champs de fertilité sont dépendants de la teneur en olivine qui va faire varier la teneur en Ni de l'échantillon. Ainsi il est nécessaire d'analyser la silice afin d'utiliser le diagramme correctement. Celle-ci n'est généralement pas comprise dans les forfaits analytiques multi-élémentaires ICP des laboratoires, il sera donc nécessaire d'ajouter une analyse en éléments majeurs sur roche totale à l'analyse multi-élémentaire pour utiliser ce diagramme. L'alignement des échantillons SIS-08 dans le champ de fertilité du diagramme confirme le potentiel de cette intrusion. L'alignement de certains échantillons de SIS-01 le long d'une direction de cristallisation fractionnée confirme le fait que quelques échantillons se trouvent dans le champ de fertilité ainsi que les résultats obtenus avec le diagramme Ni/Ni^*_{mafiq} vs. Cu/Zr.

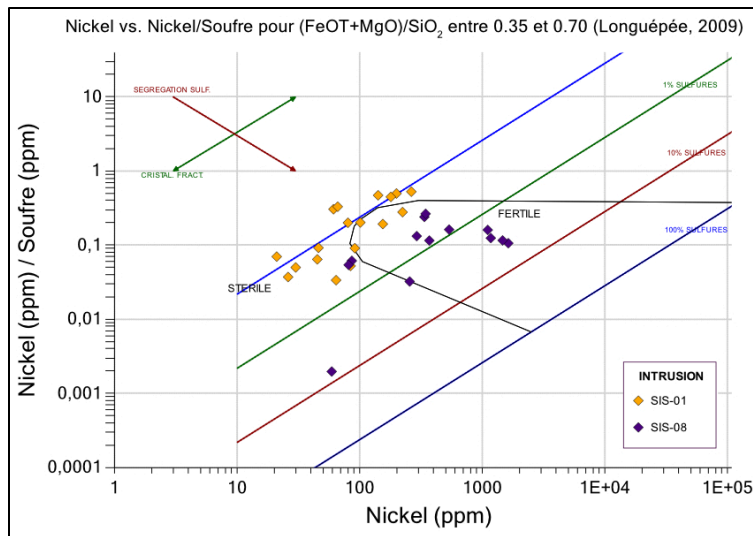


Figure 29. Diagramme Ni vs. Ni/S pour les intrusions SIS-01 et SIS-08 de la suite de Soisson. Seuls les échantillons ayant un ratio $(\text{FeO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ entre 0,35 et 0,7 sont reportés sur le diagramme.

5 Conclusion

Au cours de ce projet, plusieurs nouveaux diagrammes et indices ont été développés et ajoutés dans LithoModeleur. De plus, une nouvelle version du diagramme RA-EGP, développé au cours des projets CONSOREM 2003-09 (Pearson, 2007) et 2008-11 (Longuépée et Mathieu 2014), soit le RA-EGPIII a été intégrée dans LithoModeleur. Dans ce nouveau diagramme, les variables faisant intervenir l'iridium ont été éliminées afin de rendre le diagramme plus en adéquation avec les analyses des compagnies d'exploration. Aussi, toutes les variables sont normalisées au manteau primitif, rendant la normalisation plus uniforme.

Plusieurs outils LithoModeleur permettent de déterminer la fertilité des intrusions magmatiques. Le diagramme Ni vs. Ni/S développé dans le projet 2008-11 permet de visualiser si les échantillons d'une suite magmatique s'alignent dans le champ de fertilité. La pente de l'alignement et son prolongement donne une idée du potentiel de l'intrusion et la teneur du sulfure massif éventuellement associé. Cependant, ce diagramme nécessite l'analyse de la silice. Le diagramme Ni vs. MgO ainsi que les indices $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafiques}}$ et $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ permettent d'évaluer l'appauvrissement et l'enrichissement des échantillons en Ni par rapport à une intrusion qui n'aurait pas subi de ségrégation magmatique. Ces outils servent à modéliser le Ni dans l'olivine à travers la teneur en magnésium de l'échantillon. Il est néanmoins nécessaire de faire attention à ce que le magnésium soit principalement contrôlé par l'olivine. Idéalement, les indices $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafiques}}$ et $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ devraient être couplés avec le ratio Cu/Zr afin d'être visualisés dans les nouveaux diagrammes $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafiques}}$ vs. Cu/Zr et $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ vs. Cu/Zr respectivement. Si, dans le diagramme, les échantillons s'alignent selon une orientation diagonale, la variation de la teneur en Ni est due à la ségrégation d'un liquide sulfuré. Si les échantillons s'alignent le long d'une direction horizontale, la baisse de la teneur en Ni dans les échantillons est due à la présence en grande quantité de minéraux ferromagnésiens autres que l'olivine. Il est donc recommandé d'analyser Mg, Ni, Cu, Zr de manière routinière lors de l'exploration pour des gisements de Ni-Cu magmatique. De plus, lorsque les roches sont fortement altérées, il est recommandé d'analyser le chrome afin de comparer les indices unaires $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ ou $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafiques}}$ (calculés à partir de la teneur en magnésium) et le ratio $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{Cr}}$ (calculé à partir de la teneur en chrome). Si l'analyse en Cr n'est pas disponible, il est recommandé de ne pas utiliser les indices unaires $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{komatiites}}$ et $\text{Ni}/\text{Ni}^*_{\text{mafiques}}$, dans le cas de moyenne à forte altération en séricite.

La variation de la teneur en Ni liée à la ségrégation des sulfures est identifiable par la géochimie dans la péridotite grâce à l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ développé au cours de ce projet pour les intrusions ultramafiques archéennes. Au niveau de la vectorisation, les intrusions issues d'un magma ayant ségrégué des sulfures sont appauvries nickel loin des gisements. Cet appauvrissement est identifiable dans l'intrusion d'Expo jusqu'à 2,3 km du gisement, en aval de l'écoulement magmatique. Autant au niveau du gisement Expo que du gisement de Grasset, les péridotites encaissantes s'enrichissent en nickel à l'approche du gisement. Toutefois, cet enrichissement est visible uniquement à quelques dizaines de mètres du gisement dans les deux cas. De plus, l'enrichissement en nickel correspond à un enrichissement en sulfures disséminés identifiable visuellement en pétrographie macroscopique. L'utilisation de la géochimie peut permettre de quantifier l'observation qualitative.

Le diagramme $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ vs. Cu/Zr n'a pu être testé pour la vectorisation car les données provenant d'Expo et de Grasset ne le permettaient pas. Cependant, ce diagramme devrait pouvoir être utilisé pour la vectorisation. Les échantillons éloignés des gisements montreraient probablement une baisse de ratio Cu/Zr corrélée à la baisse de l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ et inversement, un ratio Cu/Zr de plus en plus élevé en s'approchant du gisement, de la même manière que l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ augmente.

Ce projet a confirmé que la géochimie est un outil puissant pour évaluer la fertilité d'une intrusion. Néanmoins, à des fins de vectorisation, des observations pétrographiques et une étude structurale locale doivent être réalisées en premier lieu afin d'identifier les zones susceptibles d'avoir accumulé le liquide sulfuré. Les travaux de Saumur et Cruden (2016), ont montré l'importance des structures préexistantes dans les roches encaissantes pour piéger le liquide sulfuré. De plus, les gisements de Ni-Cu associés aux intrusions mafiques et ultramafiques se mettent généralement en place dans des intrusions souvent stratigraphiquement au-dessus d'horizons sédimentaires permettant la saturation en soufre du magma. Les changements d'orientation de l'écoulement magmatique et/ou la sortie des conduits magmatiques verticaux peuvent agir comme pièges structuraux pour le liquide sulfuré. Ces secteurs sont généralement visibles texturalement par la présence de brèches, de variations de l'orientation des minéraux primaire, etc. La géochimie peut être un outil complémentaire à ces études.

Un aspect non testé durant ce projet est le comportement de l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ et du ratio Cu/Zr dans l'ensemble des lithologies de la séquence du conduit magmatique et notamment dans les pyroxénites qui peuvent parfois être la lithologie hôte de ces gisements. Il est possible que dans le diagramme $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ vs. Cu/Zr plusieurs alignements soient observables en fonction de la lithologie. Il serait également intéressant de caractériser la variabilité naturelle de l'indice $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ dans ces lithologies. Enfin, il serait nécessaire de compléter l'étude des impacts de l'altération sur les indices $Ni/Ni^*_{\text{mafiques}}$ et $Ni/Ni^*_{\text{komatiïtes}}$ en testant l'indice sur une intrusion hôte d'un gisement et métamorphisée au faciès des amphibolites supérieures, voir des granulites, comme les gisements de la ceinture de Thompson par exemple.

6 Références

- Barnes, S. J. (2022). Whole-rock geochemistry for intrusion-hosted magmatic Ni-Cu-Co exploration: identifying prospective host rocks. *Explore - Newsletter for the Association of Applied Geochemists*, vol. 195, pp. 1-13.
- Barnes, S. J., Cruden, A. R., Arndt, N., Saumur, B. M. (2016). The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, vol. 76, pp. 296-316.
- Barnes, S.-J., et Giovenazzo, D. (1990). Platinum-group elements in the Bravo intrusion, Cape Smith fold belt, Northern Quebec. *Can. Miner.*, vol. 28, pp. 431-449.



- Barnes, S. J. et Lightfoot, P. (2005). Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. *In: Economic geology, One Hundredth Anniversary Volume*, pp. 179-213.
- Bleeker, W. et Kamo, S. (2020). Structural-stratigraphic setting and U-Pb geochronology of Ni-Cu-Co-PGE ore environments in the central Cape Smith Belt, Circum-Superior Belt. In Targeted Geoscience Initiative 5: Advances in the understanding of Canadian Ni-Cu-PGE and Cr ore systems – Examples from the Midcontinent Rift, the Circum-Superior Belt, the Archean Superior Province, and Cordilleran Alaskan-type intrusions. Ed. W. Bleeker and M.G. Houlé. Geological Survey of Canada, Open File 8722, p. 65-98.
- Brüggmann, G. E., Naldrett, A. J. et Macdonald, A. J. (1989). Magma mixing and constitutionnal zone-refining in the Lac des Îles complex, Ontario: Genesis of Platinum-group element mineralization. *Economic Geology*, vol. 84, pp. 1557-1573.
- Darling, J. R., Hawkesworth, C. J., Lightfoot, P. C., Storey, C. D., and Tremblay, E. (2010). Isotopic heterogeneity in the Sudbury impact melt sheet. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 289, p. 347-356.
- Eckstrand, O. R., et Hubert, L. J. (2007). Magmatic nickel-copper-platinum group element deposit. *In: Goodfellow, W. D. (ed), Mineral Deposit of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological Provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5*, pp. 205-222.
- Jébrak, M., Marcoux, É. (2008). Géologie des ressources minérales. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, MM 2008-01, 668 pages.
- Keays, R. et Lightfoot, P. (2007). Siderophile and chalcophile metal variations in Tertiary picrites and basalts from West Greenland with implications for the sulphide saturation history of continental flood basalt magmas. *Mineralium Deposita*, vol. 42., pp. 319-336.
- Lamberg, P. (2005). From genetic concepts to practice: lithogeochemical identification of Ni-Cu mineralised intrusions and localisation of the ore (vol. 402). Geological survey of Finland. 266 p.
- Leshner C. M. (2019). Up, down, or sideways: emplacement of magmatic Fe–Ni–Cu–PGE sulfide melts in large igneous provinces. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 56, p. 756-773.
- Leshner, C. M. et Keays, R. R. (2002). Komatiite-associated Ni-Cu-PGE Deposits: Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Genesis. In book: *The Geology, Geochemistry Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum Group Elements*. Ed. L. Cabri. Canadian Institute Mineral Metallurgy Petroleum, vol. 54. pp 579-618
- Le Vaillant, M., Fiorentini, M. L. et Barnes, S. J. (2016). Review of lithogeochemical exploration tools for komatiite-hosted Ni-Cu-(PGE) deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 168, pp. 1-19.
- Li, C. et Naldrett, A. J. (1999). Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulphide and silicate liquids. *Lithos*, vol. 47. pp. 1–31.
- Lightfoot, P. C., Keays, R. R., et Doherty, W. (2001). Chemical evolution and origin of nickel sulfide mineralization in the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada; *Economic Geology*, vol. 96, p. 1855–1875.
- Lightfoot, P. C., Keays, R. R., Evans-Lamswood, D. et Wheeler, R. (2012). S saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: origin of the Voisey's Bay Ni–Cu–Co sulfide deposit, Labrador, Canada; *Mineralium Deposita*, vol. 47, p. 23-50.
- Longuépée, H. et Mathieu, L. (2014). Fertilité des intrusions mafiques et ultramafiques pour les minéralisations Cu-Ni. Rapport, projet CONSOREM 2008-11, 40 pages.
- Malo-Lalande, C., Boisvert, M., Adam, E. et Grondin, C. (2020). Exploring for Magmatic Ni-Cu-PGE Ore Bodies with Magnetism, Electromagnetics and Reflection Seismic in a Challenging Geological Setting in Nunavik, QC. *Recorder*, vol. 45 Issue 1.
- Mathieu, L. (2013). Exploration des gîtes magmatiques cuprifères dans la Province de Grenville. Rapport, projet CONSOREM 2012-03, 49 pages.



- McKevitt, D. J., Leshner, C. M. et Houlié, M. G. (2020). Regional lithogeochemical synthesis of mafic-ultramafic volcanic and intrusive rocks in the Cape Smith Belt, Nunavik, northern Quebec. In Targeted Geoscience Initiative 5: Advances in the understanding of Canadian Ni-Cu-PGE and Cr ore systems - Examples from the Midcontinent Rift, the Circum-Superior Belt, the Archean Superior Province, and Cordilleran Alaskan-type intrusions. Geological Survey of Canada, Open File 8722, 2020 p. 99-115.
- Naldrett, A. J., Keats, H., Sparkes, K., et Moore, R. (1996). Geology of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada: Exploration and Mining Geology, vol. 5, pp. 69–179.
- Palme, H. et O'Neill, H. S. C. (2003). Cosmochemical Estimates of Mantle Composition; Earth and Planetary Science Letters, v. 289, p. 347–356. *In*: Treatise on Geochemistry, vol. 2, pp. 1-38.
- Pearson, V. (2007). Développement d'un nouvel outil d'exploration pour les EGP : le diagramme ratio-arachnide, Rapport, projet CONSOREM 2003-09, 35 pages.
- Pushtel, I. S. et Humayun, M. (2001). Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 65, pp. 2979-2293.
- Sappin, A. A., Houlié, M., Corrigan, D., Bédard, M.-P., Rayner, N., Wodicka, N. et Brind'Amour-Côté, C. (2022). Petrography, chemical composition, and age constraints of mafic intrusions from the Mesoproterozoic Soisson Intrusive Suite in the southeastern Churchill Province (Canada). *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 59, pp.180-204.
- Saumur, B. M. et Cruden, A. R. (2016). On the emplacement of the Voisey's Bay intrusion (Labrador, Canada). *GSA Bulletin* (2016) 128 (1-2): 147–168.
- Walbridge Mining Company (2021). NI 43-101 Technical Report for the Detour-Fenelon Gold Trend Property, Quebec, Canada, 293p.

