MB 2026-07

Les minéralisations de Ni-Cu de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, secteur de Lac à Paul, Province de Grenville centrale, Québec

Documents complémentaires

Additional Files



Licence

License

Cette première page a été ajoutée au document et ne fait pas partie du rapport tel que soumis par les auteurs.

Ressources naturelles et Forêts
Québec



Les minéralisations de Ni-Cu de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, secteur de Lac à Paul, Province de Grenville centrale, Québec

Othman Bounour, Sarah Dare, Renée-Luce Simard et Abdelali Moukhsil

MB 2026-07

Québec

Avertissement

Ce document est une copie fidèle du manuscrit soumis par l'auteur, sauf pour une vérification sommaire destinée à assurer une qualité convenable de diffusion.

Les minéralisations de Ni-Cu de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, secteur de Lac à Paul, Province de Grenville centrale, Québec

Par

Othman Bounour[1]

Sarah Dare[1], Renée-Luce Simard[1], et Abdelali Moukhsil[2]

[1] : Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

[2] : Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Québec (MRNF)

Date de soumission : 23 mars 2026

Résumé

Ce travail porte sur la caractérisation pétrographique, géochimique et métallogénique des minéralisations de Ni-Cu du secteur du Lac à Paul, situé dans la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ). Il a été réalisé à partir de l'étude de forages provenant de plusieurs indices (Discovery Zone, MHY Nord, MHY Ap [Gravi Zone], Nourricier, Manouane, Léo-Charl, Paul) du secteur. Les minéralisations sulfurées sont encaissées essentiellement dans des lithologies à pyroxène (leuconorite, norite, gabbronorite, leucogabbronorite, webstérite et orthopyroxénite). Des occurrences de sulfures semi-massifs sont également observées dans une dunite, une troctolite et une péridotite à l'indice Manouane. Toutes ces lithologies peuvent également contenir des proportions variables d'oxydes et d'apatite. Le plagioclase est principalement de composition andésine (An_{35-51}), alors que les phases mafiques ont des Mg# faibles (entre 43 et 64 pour l'orthopyroxène), indiquant un magma fortement différencié ayant évolué par cristallisation fractionnée dans des conditions de pression faible à moyenne (4 kbar, soit environ 12 km). Le plagioclase présente une composition globalement homogène. Toutefois, certains grains montrent des teneurs en Sr plus élevées, suggérant des injections locales de nouveau magma. Le Gabbro de Steve (gabbronorite à grain fin) se distingue par une composition plus primitive : le plagioclase de composition labrador (An_{54-68}) montre des teneurs en Sr faibles (0,042 à 0,056 % Sr), alors que l'orthopyroxène se caractérise par des concentrations plus élevées en Ni et Cr pour des Mg# similaires à ceux des autres lithologies du secteur. Cette intrusion montre ainsi une tendance de différenciation légèrement différente.

Les assemblages sulfurés, dominés par la pyrrhotite associée à des proportions mineures de pentlandite et chalcopyrite, présentent des textures massives à disséminées caractéristiques des sulfures magmatiques. La composition du plagioclase dans les roches encaissantes et en association avec les sulfures est globalement similaire (andésine avec faibles teneurs en Sr : 0,06 à 0,10 % Sr), bien que ceux compris dans les sulfures montrent parfois une calcicité légèrement plus faible et des variations plus marquées du pourcentage de strontium. La composition chimique des porphyroclastes de clinopyroxène et

d’orthopyroxène compris dans les sulfures massifs est comparable à celle de ces minéraux dans les roches encaissantes.

Les indices du secteur de Lac à Paul se caractérisent par de faibles teneurs en Ni (0,6 à 3,2 % Ni, teneurs normalisées à 100 % sulfures), Cu (0,1 à 1,6 % Cu, excluant une valeur anomale de 10,0 % Cu) et Co (0,09 à 1,19 % Co), légèrement plus élevées que celles des indices de McNickel, Yenevac et Mistass de la marge ouest de la SALSJ (0,4 à 2,0 % Ni; 0,08 à 0,6 % Cu; 0,07 à 0,2 % Co) et inférieures à celles des indices associés aux conduits mafiques-ultramafiques primitifs, comme ceux du Lac Kénogami (2,0 à 12,9 % Ni) de la marge sud de la SALSJ. Ces caractéristiques des indices du secteur de Lac à Paul reflètent un magma évolué avec des liquides sulfurés appauvris en Ni. Les rapports S/Se élevés indiquent une assimilation de soufre crustal provenant probablement des gneiss riches en soufre de Complexe de Rouvray, ce qui a favorisé la saturation en sulfures du magma. Les très faibles teneurs en éléments du groupe du platine (EGP < 103 ppb) des indices du Lac à Paul et de la marge ouest de la SALSJ, notamment en Os, Ir, Ru, et Rh, témoignent d’une ségrégation précoce d’un liquide sulfuré qui a appauvri le magma parental avant la mise en place finale des minéralisations. Ces faibles teneurs en EGP indiquent également que ces indices se sont formés dans des conditions de faibles facteurs R, expliquant les faibles teneurs en Ni et en EGP, contrairement aux indices du Lac Kénogami caractérisés par des facteurs R plus élevés.

La pyrrhotite et la pentlandite des indices du Lac à Paul, de la marge ouest et du Lac Kénogami ont été analysées par LA-ICP-MS pour les éléments en traces. Une bonne corrélation est observée entre la proportion modale de pentlandite (PD) et la teneur en Co. Ainsi, la pentlandite présente des teneurs en Co élevées (2,8 à 7,4 %) lorsque les sulfures sont pauvres en ce minéral (< 10 % PD modale à 100 % sulfures). Le faible contenu en pentlandite reflète aussi un liquide sulfuré appauvri en Ni. L’utilisation du sélénium dans la pentlandite comme marqueur du facteur R, en raison de la forte tendance chalcophile de cet élément, confirme que les indices du Lac à Paul et de la marge ouest se sont formés dans des conditions de faible facteur R (Se faible), tandis que ceux du Lac Kénogami se sont développés dans des conditions de facteur R plus élevé (Se plus élevé). Ainsi, le

contenu en Se et Co de la pentlandite permet de distinguer les sulfures plus pauvres en Ni (Se faible, Co élevé) des sulfures plus riches en Ni (Se élevé, Co faible).

Malgré le caractère évolué du système minéralisateur de Lac à Paul et la ségrégation précoce des sulfures, la présence de dykes d'orthopyroxénite porteurs de sulfures massifs démontre le potentiel du secteur. Du travail reste à faire pour localiser ces intrusions et, peut-être, de plus grands volumes de minéralisation.

Mots clés : minéralisations de Ni-Cu - SALSJ - Lac à Paul - Province de Grenville - XRFp.

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement mes directrices de recherche, Sarah Dare et Renée-Luce Simard, pour leur grande disponibilité, la pertinence de leurs commentaires, la richesse de nos échanges ainsi que leurs précieux conseils, tant lors des travaux de terrain qu'au cours des réunions, qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail. Je remercie également João Victor Rodrigues Costa pour sa disponibilité et son aide lors des travaux de terrain, ainsi qu'Abdelali Moukhsil pour ses commentaires avisés ainsi que pour sa disponibilité en tout temps et sa grande ouverture pour toute sorte de discussion.

Un grand merci à Elaine Baša (CBM) et Frank Baša (CBM) pour l'accessibilité aux carottes de forage et à la scie à roche. Mes remerciements vont aussi à Matthew Halliday et Claude Duplessis pour leur aide.

Je souhaite également remercier Dany Savard et Audrey Lavoie au LabMaTer (UQAC) pour les analyses LA-ICP-MS, Olivier Lamarche (MRNF) pour la coordination des analyses de roche totale, David Noël (UQAC) pour avoir rendu disponible le matériel nécessaire pour le terrain, Pape Doudou Tague (UQAC) pour son aide lors de la description microscopique des lames minces, ainsi qu'Hélène Legros (MRNF) pour avoir amené à l'UQAC les carottes de forage de Mines d'or Virginia depuis la ville de Québec.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Table de matières

Résumé 2
Remerciements 5
Table de matières 6
Liste des figures 8
Liste des appendices 11
1- Introduction 12
2- Méthodologie 15
3- Contexte géologique régional 16
4- Contexte géologique local 17
4.1- La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) 17
4.2- Le secteur de Lac à Paul 17
5- Géologie des indices Ni-Cu dans le secteur de Lac à Paul 20
5.1- Indice Discovery Zone 21
5.1.1- (Leuco)norite et (leuco)gabbronorite 21
5.1.2- Leucotroctolite 23
5.1.3- Orthopyroxénite à oxydes 24
5.1.4- Sulfures massifs 26
5.1.5- Sulfures semi-massifs 27
5.2- L'indice MHY Ap (Gravi Zone) 29
5.2.1- Leucotroctolite, troctolite nelsonitique et nelsonite à olivine 29
5.2.2- Leuconorite et leucogabbronorite 31
5.2.3- Webstérite à sulfures disséminés 32
5.2.4- Pyroxénite biotitisée 34
5.2.5- Sulfures massifs 34
5.3- L'indice MHY Nord 36
5.3.1- Leucotroctolite à oxydes-apatite et nelsonite à olivine 36
5.3.2- Leuconorite - leucogabbronorite et norite 38
5.3.3- Mélagabbronorite à oxydes 39
5.3.4- Sulfures massifs 40
5.3.5- Sulfures semi-massifs 42

5.3.6- Sulfures disséminés 44
5.4- L'indice Nourricier B 45
5.4.1- Sulfures semi-massifs 46
5.4.2- Sulfures massifs 47
5.5- Autres lithologies tardives 48
5.5.1- Diorite 49
5.5.2- Syénite 49
5.6- L'indice Paul 50
5.7- L'indice Manouane Est 52
6- Géochimie 53
6.1- Lithogéochimie 53
6.1.1- Méthodes analytiques 53
6.1.2- Les oxydes majeurs 54
6.1.3- Les éléments traces 60
6.1.3.1- Le spectre des éléments de terres rares (ETR) et multi-éléments 60
6.1.3.2- Les éléments chalcophiles 64
6.2- Chimie minérale 72
6.2.1- Méthodologie 72
6.2.1.1- Analyse des plagioclases par fluorescence X portative (XRFp) 72
6.2.1.2- Analyse des minéraux silicatés et sulfurés par LA-ICP-MS 74
6.2.2- Résultats 76
6.2.2.1- Plagioclase 76
6.2.2.2- Olivine 81
6.2.2.3- Orthopyroxène 83
6.2.2.4- Clinopyroxène 87
6.2.2.5- Pyrrhotite 90
6.2.2.6- Pentlandite 92
7- Discussion et conclusions 96
Références 99
Appendice : logs avec l'emplacement des échantillons 105

Liste des figures

Figure 1 : Carte géologique de la Province de Grenville montrant les occurrences des suites anorthositiques, dont celle de Lac-Saint-Jean (LSJ).. 12
Figure 2 : Carte géologique de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean avec les indices de minéralisation de sulfures (Ni-Cu±Co) et d'oxydes (Fe-Ti±V±P), ainsi que le contour de la zone d'étude 13
Figure 3 : Carte géologique du secteur d'étude avec l'emplacement des forages étudiés (étiquettes blanches) et des indices Ni-Cu±Co et Fe-Ti-V-P 19
Figure 4 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la (leuco)norite et de la leucogabbronorite de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31) 23
Figure 5 : Photographie (A) et microphotographie (B) de la leucotroctolite de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). 24
Figure 6 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) d'orthopyroxénite à oxydes de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). 25
Figure 7 : Photographies (A, B) et microphotographies (C-E) des sulfures massifs de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). 27
Figure 8 : Photographies (A-C) et microphotographies (D, E) des sulfures semi-massifs de l'indice Discovery (forage GRL-22-31). 29
Figure 9 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la leucotroctolite, de la troctolite nelsonitique et de la nelsonite à olivine de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). 30
Figure 10 : Photographie (A) et microphotographie (B) de la leuco(gabbro)norite de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). 32
Figure 11 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la webstérite à sulfures disséminés de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). 33
Figure 12 : Intervalle de pyroxénite à grains fins fortement biotitisée au sein de la leuconorite mégacrisitque. 34
Figure 13 : Photographies (A-C) et microphotographies (D, E) des sulfures massifs de l'indice MHY Ap (Gravi ; forage GRL-22-45). 35
Figure 14 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la leucotroctolite et de la nelsonite à olivine de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-60). 37
Figure 15 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la (leuco)norite et de la leucogabbronorite de l'indice MHY Nord.. 39
Figure 16 : Photographie (A) et microphotographie (B) de la mélagabbronorite à oxydes de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-41). 40
Figure 17 : Photographies (A-C) et microphotographie (D) des sulfures massifs de l'indice MHY Nord (forages GRL-22-41 et GRL-22-60). 42
Figure 18 : Photographie (A) et microphotographies (B-D) des sulfures semi-massifs de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-41). 43

Figure 19 : Photographie (A) et microphotographies (B-D) des sulfures disséminés de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-41).. 45
Figure 20 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures semi-massifs de l'indice Nourricier B (forage NB-97-02). 47
Figure 21: Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures massifs de l'indice Nourricier B (forage NB-97-03). 48
Figure 22 : Photographie de la diorite montrant une structure foliée (forage GRL-22-60). 49
Figure 23 : Photographie de la syénite (forage GRL-22-31) 50
Figure 24 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures semi-massifs de l'indice Paul (forage PAU-97-01). 51
Figure 25 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures massifs de l'indice Manouane Est (forage MAN-97-04). 53
Figure 26 : Diagrammes binaires de Harker. 58
Figure 27 : Compositions en ÉTR de différentes lithologies, normalisées à la chondrite de McDonough et Sun (1995), avec P_2O_5 (en % poids). 63
Figure 28 : Diagrammes multi-éléments des compositions globales de différentes lithologies normalisées au manteau primitif de Sun et McDonough (1989). 63
Figure 29 : Diagramme Ni vs Cu montrant la répartition des teneurs en Ni et Cu (ppm) dans les différents indices de Ni-Cu du secteur de Lac à Paul et illustrant la représentativité des échantillons étudiés..... 65
Figure 30 : Diagrammes binaires d'éléments chalcophiles en fonction du soufre pour les lithologies anorthositiques et sulfures..... 67
Figure 31 : Diagramme binaire de Pt + Pd (ppm) vs S (pd. %) pour les sulfures 68
Figure 32 : Diagramme des teneurs en Ni, Cu, Au et ÉGP, normalisées à 100 % sulfure et normalisées aux valeurs du manteau primitif 70
Figure 33 : Diagramme de Pt+Pd (ppm) normalisé à 100 % sulfures (S) en fonction du rapport S/Se pour les indices Ni-Cu du secteur de Lac à Paul (SALSJ Nord), comparés à d'autres indices Ni-Cu-Co 72
Figure 34 : Variation des teneurs en % An et % Sr dans les roches anorthositiques et les sulfures des différents forages étudiés 78
Figure 35 : Diagramme binaire illustrant les variations de % An et de % Sr du plagioclase dans les sulfures massifs, semi-massifs et disséminés, ainsi que dans leurs roches hôtes immédiates 79
Figure 36 : Diagramme binaire illustrant les variations de % An et de % Sr du plagioclase dans les sulfures massifs, semi-massifs et disséminés, ainsi que dans leurs roches anorthositiques associées dans les forages..... 80
Figure 37 : Diagrammes binaires des éléments en traces par rapport à Mg# dans l'olivine des lithologies de secteur de Lac à Paul..... 81

Figure 38 : Diagramme binaire Mg# (olivine) en fonction de % An (plagioclase), des lithologies à olivine de secteur de Lac à Paul 83
Figure 39 : Diagrammes binaires des éléments en traces par rapport à Mg# d'orthopyroxène des lithologies du secteur de Lac à Paul. 84
Figure 40 : Relations entre la teneur en Al_2O_3 et le Mg# de l'orthopyroxène dans les lithologies de secteur de Lac à Paul 86
Figure 41 : Diagramme binaire Mg# (orthopyroxène) en fonction de % An (plagioclase), des lithologies à pyroxène de secteur de Lac à Paul en comparaison avec ceux de l'intrusion litée de Sept-Îles (Namur et al., 2010), et de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001)..... 87
Figure 42 : Diagrammes binaires des éléments en traces par rapport à Mg# dans le clinopyroxène des lithologies de secteur de Lac à Paul..... 88
Figure 43 : Diagramme binaire montrant la relation entre le Mg# du clinopyroxène et celui de l'orthopyroxène dans les lithologies du secteur de Lac à Paul. 89
Figure 44 : Diagramme binaire Mg# (clinopyroxène) en fonction de % An (plagioclase), des lithologies à pyroxène de secteur de Lac à Paul en comparaison avec ceux de l'intrusion litée de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001), de Sept-Îles (Namur et al., 2010), et de la Suite d'Étoile (Maier et al. 2025). 90
Figure 45 : Concentrations en Ni (pd. %) et en Co (pd. %) dans la pyrrhotite des indices du secteur de Lac à Paul (Nourricier B, Discovery Zone, MHY Ap, MHY Nord, Manouane Est, Paul et Léo-Charl), de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi que des indices du Lac Kénogami (Dumont et Gagnon) dans l'intrusion de Baie-à-Cadie, située sur la marge sud de la SALSJ. 91
Figure 46 : Concentrations en Ni (pd. %) et en Co (pd. %) dans la pentlandite des indices du secteur de Lac à Paul (Nourricier B, Discovery Zone, MHY Ap, MHY Nord, Manouane Est, Paul et Léo-Char), de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi que des indices du Lac Kénogami (Dumont et Gagnon)..... 93
Figure 47 : Diagramme binaire de la proportion modale de pentlandite (à 100 % sulfures) en fonction du Co (ppm) dans la pentlandite des sulfures des indices de secteur de Lac à Paul, de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi que des indices du Lac Kénogami..... 94
Figure 48 : Diagramme Se (ppm) dans la pentlandite en fonction du Ni (100 % sulfures) de la roche totale des sulfures des indices de secteur de Lac à Paul, de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi du Lac Kénogami (LK).. 95

Liste des appendices

Appendice 1 : levé stratigraphique du forage GRL-22-31 (Discovery Zone). 105
Appendice 2 : levé stratigraphique du forage GRL-22-45 (MHY Ap (Gravi Zone)). 105
Appendice 3 : levé stratigraphique du forage GRL-22-41 (MHY Nord) 106
Appendice 4 : levé stratigraphique du forage GRL-22-60 (MHY Nord). 106
Appendice 5 : levé stratigraphique du forage NB-97-02 (Nourricier B) 107
Appendice 6 : levé stratigraphique du forage NB-97-03 (Nourricier B) 107
Appendice 7 : levé stratigraphique du forage PAU-97-01 (Paul) 108
Appendice 8 : levé stratigraphique du forage MAN-97-04 (Manouane Est)..... 108

1- Introduction

Les massifs anorthositiques protérozoïques de la Province de Grenville, au Canada, tels que la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ ; figure 1), renferment plusieurs indices de métaux critiques et stratégiques, notamment en Ni-Cu±ÉGP et Fe-Ti-V-P (figure 2 ; Hébert et al., 2009). Toutefois, la Province de Grenville se distingue par un contexte géologique atypique pour la formation de minéralisations magmatiques en Ni-Cu±ÉGP.

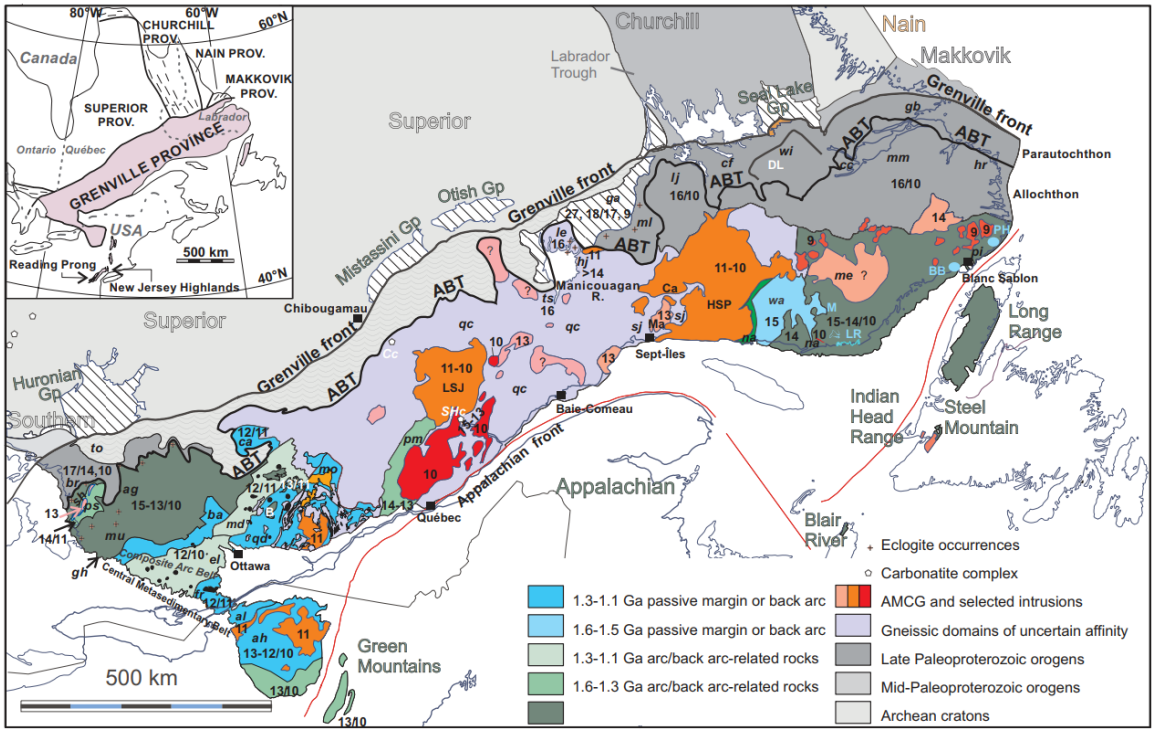


Figure 1 : Carte géologique de la Province de Grenville montrant les occurrences des suites anorthositiques, dont celle de Lac-Saint-Jean (LSJ). (Abréviations : HSP : Havre-Saint-Pierre et qc : Quebecia ; tirée de Corriveau et al., 2007).

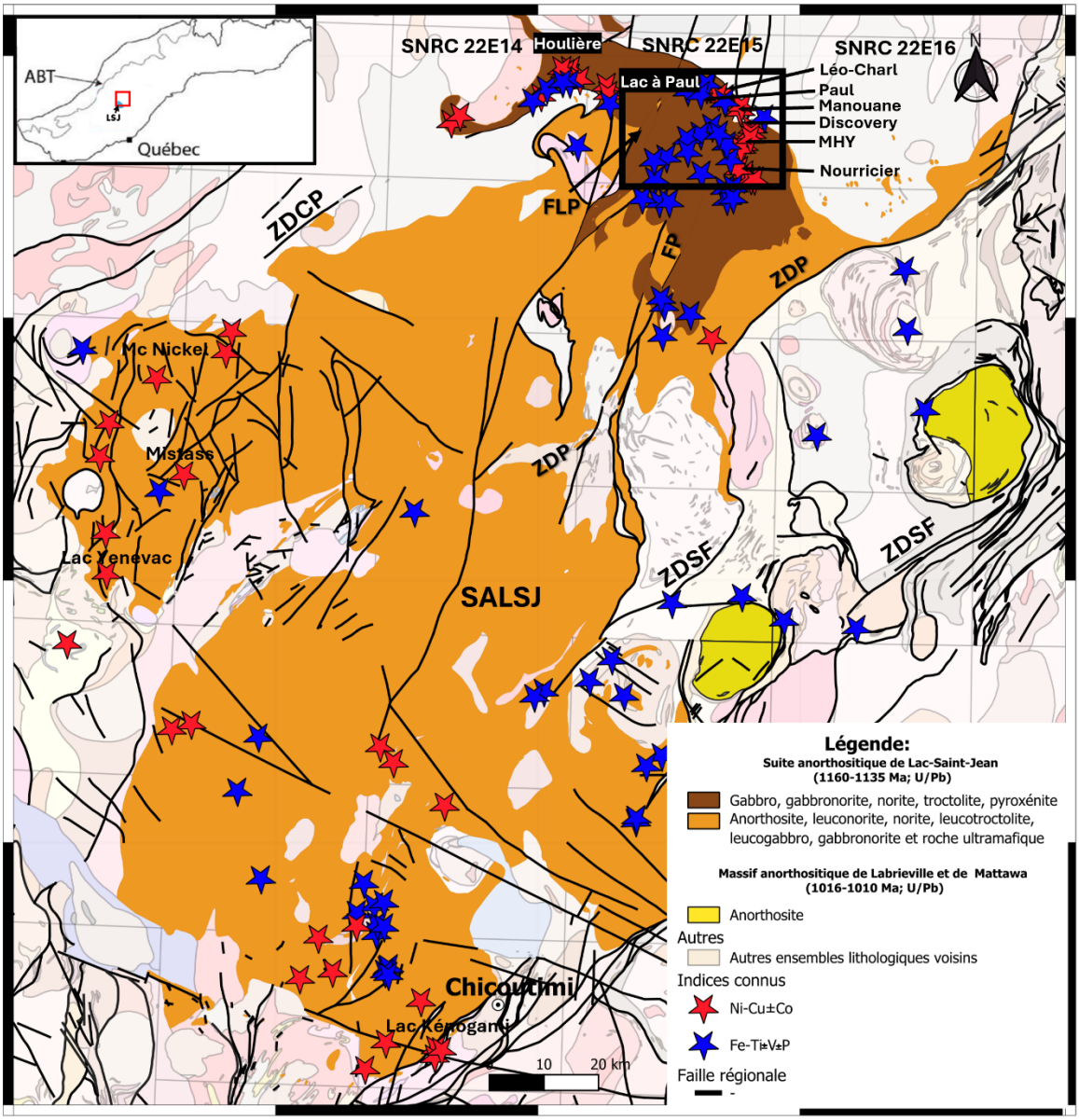


Figure 2 : Carte géologique de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean avec les indices de minéralisation de sulfures (Ni-Cu±Co) et d'oxydes (Fe-Ti±V±P), ainsi que le contour de la zone d'étude (rectangle noir ; modifiée d'après Hébert et al., 2009 et SIGÉOM, 2024). L'âge de la SALSJ provient de Higgins et van Breemen (1992 ; 1996), Hervet et al. (1994) et Hébert et van Breemen (2004), tandis que les âges de Mattawa et de Labrieville proviennent de Hébert et al. (2005) et de Owens et al. (1994), respectivement. (Abréviations : FLP : Faille de Lac à Paul ; FP : Faille de Pamouscachiou ; ZDCP : Zone de déformation de Chute-des-Passes ; ZDP : Zone de déformation de Pipmuacan ; ZDSF : Zone de déformation de Saint-Fulgence).

La formation de gisements de Ni-Cu-Co est généralement associée à des contextes géodynamiques en extension, impliquant une fusion partielle importante du manteau (panache), un transport rapide du magma, une saturation en soufre et un piégeage efficace

des sulfures. Des exemples bien documentés, comme le gisement de Voisey's Bay, associé aux massifs anorthositiques de la Suite plutonique de Nain au Labrador (1350-1290 Ma ; Emslie et al., 1994), où l'ascension rapide du magma primitif est facilitée par la présence d'une structure majeure traversant la croûte épaisse (Naldrett, 2004), ou encore le gisement Ni-Cu de Nova-Bollinger en Australie (1330-1280 Ma ; Spaggiari et al., 2014; Taranovic et al., 2022), formé dans un bassin arrière-arc lié à une zone de subduction, montrent qu'il est possible de trouver des gisements de Ni-Cu-Co associés à des suites anorthositiques protérozoïques dans d'autres contextes que l'extension.

Dans le cas des anorthosites massives en contexte orogénique post-collisionnel (croûte continentale épaisse) dépourvu de panache mantellique, comme la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, la croûte épaisse agit comme une barrière mécanique à la remontée des magmas. Ces derniers se caractérisent alors par une dynamique magmatique faible (facteur R faible), tandis que l'absence de panache mantellique (Corrigan et Hanmer, 1997) limite les taux de fusion partielle nécessaires à la production de magmas riches en Ni-Cu-Co. Les mécanismes de minéralisation dans ce type d'environnement demeurent donc mal compris. Mieux comprendre les processus de formation de ces minéralisations, ainsi que leurs relations avec les roches hôtes, est essentiel pour améliorer les modèles d'exploration des gisements orthomagmatiques qui leur sont associés.

Ce projet de maîtrise en géologie et génie géologique (programme 1666) à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), dirigé par les professeures Sarah Dare et Renée-Luce Simard, en collaboration avec le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) représenté par Monsieur Abdelali Moukhsil, vise à mieux comprendre les mécanismes de formation et les relations entre les minéralisations en Ni-Cu et les roches anorthositiques hôtes de la marge nord de la SALSJ (secteur de Lac à Paul). Cette zone renferme à la fois des minéralisations Fe-Ti-V-P et Ni-Cu±Co, ces dernières incluant les indices Nourricier, MHY, Discovery, Manouane, Paul et Léo-Charl (figure 2).

Ce rapport présente les nouveaux résultats des travaux de terrain et analyses réalisés à l'été et automne 2025. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité de ceux de l'été 2024 (Bounour et al., 2025), qui avaient porté sur la cartographie de surface dans le secteur de Lac à Paul. Comme les minéralisations en Ni-Cu historiques du secteur de Lac à Paul

n'étaient généralement pas exposés en affleurement en 2024, l'étude a été poursuivie à l'été 2025 à partir des carottes de forage réalisées pour Cobalt Works Inc. (CCW) et Coniagas Battery Metals Inc. (CBM) dans le cadre du projet Graal, entre 2021 et 2022. Ces carottes de forage ont été examinées à Cobalt, en Ontario, lors d'une campagne tenue du 19 au 22 juillet 2025. De plus, des morceaux de carottes (zones minéralisées) issus de forages réalisés par Mines d'Or Virginia en 1997, fournis par CBM, ont également été étudiés.

2- Méthodologie

La méthodologie adoptée pour ce projet de maîtrise combine la description des carottes de forage, l'échantillonnage, la pétrographie et les analyses géochimiques. Le processus a commencé par la sélection des forages les plus représentatifs et les plus complets de la stratigraphie de la zone d'étude, incluant ceux ayant recoupé les différents indices minéralisés. Une deuxième sélection a ensuite été effectuée en fonction de la disponibilité et de l'accessibilité des carottes de forage entreposées à Cobalt, en Ontario.

Au total, quatre forages réalisés dans le cadre du projet Graal ont été retenus. Chacun a fait l'objet d'une diagraphie (« *logging* ») et d'une description détaillée (voir appendice 1) des intervalles d'intérêt. Les intervalles de forage non observés ont été comblés à partir des diagraphies de Francoeur (1998) et de Meneux et al. (2023). Quatre intervalles de sulfures massifs et semi-massifs, issus de forages réalisés par Mines d'Or Virginia, ont également été décrits.

Une série de 54 échantillons a été prélevée et décrite à l'aide des géofiches du MRNF et d'un cahier de terrain, en vue des analyses XRFp (52 échantillons), de lames minces polies (37 lames minces) et des analyses de roche totale (29 analyses). De plus, des analyses LA-ICP-MS ont été effectuées sur une sélection de ces échantillons afin de déterminer la composition élémentaire des phases minérales (notamment les orthopyroxènes, les clinopyroxènes, les olivines, la pyrrhotite et la pentlandite), ce qui servira pour évaluer le degré de différenciation du magma et bien caractériser la minéralisation associée.

3- Contexte géologique régional

La zone d'étude, secteur de Lac à Paul de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, se situe au cœur de la Province de Grenville centrale (figure 1). La Province de Grenville constitue une ceinture orogénique mésoprotérozoïque d'environ 1600 km de long sur 350 km de large, s'étend du Labrador, en passant par le centre du Québec (figure 1), et se prolonge sous la surface jusqu'au Texas, aux États-Unis formant la marge sud-est du paléocontinent laurentien et une partie importante du Bouclier canadien oriental (Corriveau et al., 2007; Rivers, 2012). La province est structurée en deux grands domaines tectonométamorphiques majeurs : la ceinture allochtone, composée de terranes accrétés au craton laurentien durant le Mésoprotérozoïque, et la ceinture parautochtone, comprenant les roches de la marge est de la Province du Supérieur, ainsi que des terranes antérieurement accrétés remobilisés durant l'orogenèse grenvillienne (Rivers, 2012; Rivers et al., 1989). Ces deux ceintures sont séparées par la faille de chevauchement allochtone (*Allochthon Boundary Thrust*; ABT) à pendage sud-est (figure 1).

La Province de Grenville résulte d'une succession d'événements orogéniques au Protérozoïque, incluant l'Orogénie labradorienne (1680-1600 Ma), l'Orogénie pinwarienne (1520-1460 Ma), l'accrétion de Québécia (1400-1370 Ma), l'Orogénie elzévirienne (1245-1225 Ma), et l'Orogénie de Shawinigan (1190-1140 Ma), culminant avec l'Orogénie grenvillienne terminale (1090-980 Ma ; Gower et al., 2008 ; Rivers, 2012). Cette dernière, divisée en phases d'Ottawa (1090-1020 Ma) et de Rigolet (1005-980 Ma), a provoqué un métamorphisme de haute température, principalement au faciès amphibolite et granulite, qui caractérise la Province de Grenville (Indares, 2020; Rivers, 2012), et sont séparées par des périodes d'extension crustale et de magmatisme intraplaque (Corriveau et al., 2007; Miloski et al., 2023). Ce processus a conduit à la formation de nombreux complexes Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite (AMCG) sur une période de 150 Ma entre 1160 et 1010 Ma, incluant l'emplacement de la Suite anorthositique de Lac Saint-Jean à plagioclase de type labradorite et andésine (1160-1135 Ma ; Hébert et van Breemen, 2004; Hébert et al., 2009; Higgins et van Breemen, 1996), formant la plus vaste suite anorthositique connue (20 000 km²; Ashwal, 1993).

4- Contexte géologique local

4.1- La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ)

La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) est localisée dans la partie centrale de la Province de Grenville, au cœur de la ceinture allochtone (figure 1 ; Rivers et al., 1989). Elle se compose de plusieurs lobes formés à la suite de multiples remontées diapiriques anorthositiques et injections de magma mafique-ultramafiques associées (Hébert et Beaumier, 2000a; Hébert et Cadieux, 2003; Hébert et al., 2005; Hébert et van Breemen, 2001; Woussen et al., 1981). La SALSJ s'est mise en place dans des gneiss migmatitiques principalement composés d'orthogneiss, de migmatites à compositions diverses, ainsi que d'une quantité mineure de roches supracrustales (Higgins et van Breemen, 1992).

La SALSJ est composée d'anorthosite et de la leuconorite (95 %) ainsi qu'une quantité mineure de leucotroctolite, norite, gabbro à olivine, gabbro, pyroxénite, péridotite, dunite, nelsonite, magnétitite et de rares unités de charnockite-mangérite (Hébert et al., 2009). Le plagioclase de type labradorite domine, mais des roches contenant de l'andésine sont également présentes dans les parties nord et est du massif anorthositique (Hébert et al., 2005). Les faciès felsiques et intermédiaires de cette suite AMCG sont représentés par : (i) la Charnockite de Kénogami, datée entre 1155 et 1135 Ma (Hébert et van Breemen, 2004); (ii) la Charnockite verte (farsundite) de Lac Kénogami, d'un âge d'environ 1160 Ma (Hervet et al., 1994); et (iii) le Granite de Labrecque, qui présente un âge de 1146 ±3 Ma (Higgins et van Breemen, 1996).

4.2- Le secteur de Lac à Paul

Le secteur de Lac à Paul se situe dans la partie nord de la SALSJ (figures 2 et 3). Les études menées dans cette région (cette étude), combinées aux travaux de synthèse de Hébert et al. (2009), ont permis de caractériser une variété de lithologies anorthositiques appartenant à la SALSJ dans ce secteur. Les roches affleurantes sont principalement

constituées de gabbronorite, avec ou sans oxydes de Fe-Ti-P (mPlsj1 ; Hébert et al., 2009); figure 3), ainsi que d'anorthosite, de leuconorite, de gabbro, de norite et de niveaux de roches ultramafiques et de gabbronorite à oxydes de Fe-Ti (mPlsj2). On y retrouve également des leuconorites, anorthosites, norites, troctolites, leucotroctolites, pyroxénites, péridotites, nelsonites, dunites et magnétitites à ilménite et apatite (mPlsj3). Un faciès distinct de gabbro microcoronitique, connu sous le nom de « Gabbro de Steve », est également présent à l'est dans le secteur (mPlsj6; figure 3). Tous ces faciès montrent un enrichissement variable en Fe-Ti-P (Fredette, 2006). Localement, des minéralisations en Ni-Cu sont présentes, associée à la bordure de l'unité mPlsj3, près la zone de contact avec le Gabbro de Steve (mPlsj6 ; figure 3 ; Huss, 2002).

Dans la partie sud-ouest du secteur affleure le pluton du Granite de La Carpe (mPcar1 ; Hébert et al., 2009 ; figure 3). Cette intrusion est constituée de charnockite et de monzonite, avec ou sans hypersthène, et contient localement des enclaves d'anorthosite appartenant à la SALSJ (Hébert, 1999; Hébert et Beaumier, 2000a; Hébert et al., 2009). L'âge obtenu pour cette intrusion est de 1028 ±2 Ma (van Breemen, 2009).

Les unités de la SALSJ, dans cette région, sont chevauchées vers le nord-est sur le Complexe gneissique de Rouvray (mProu ; Hébert et Cadieux, 2003) au nord (Hébert et Beaumier, 2000a; Turcotte, 2001). Ce complexe a livré un âge de 1484 ±30 Ma (U-Pb) sur un échantillon d'orthogneiss mangéritique (van Breemen, 2009). Cet encaissant gneissique est subdivisé en trois unités : mProu1, mProu2 et mProu2a (Hébert et al., 2009), dont seules mProu1 et mProu2 affleurent dans le secteur de Lac à Paul (figure 3). L'unité mProu1 est constituée d'orthogneiss granulitique (charnockite, mangérite) avec une composante dioritique et gabbronoritique, de gneiss granitique, de gneiss quartzofeldspathique, ainsi que de lambeaux de quartzite, paragneiss et amphibolite. L'unité mProu2, quant à elle, est constituée de gneiss grisâtres, plus ou moins rubanés, de composition granodioritique à tonalitique, d'amphibolite et de gneiss granitique (Hébert et al., 2009).

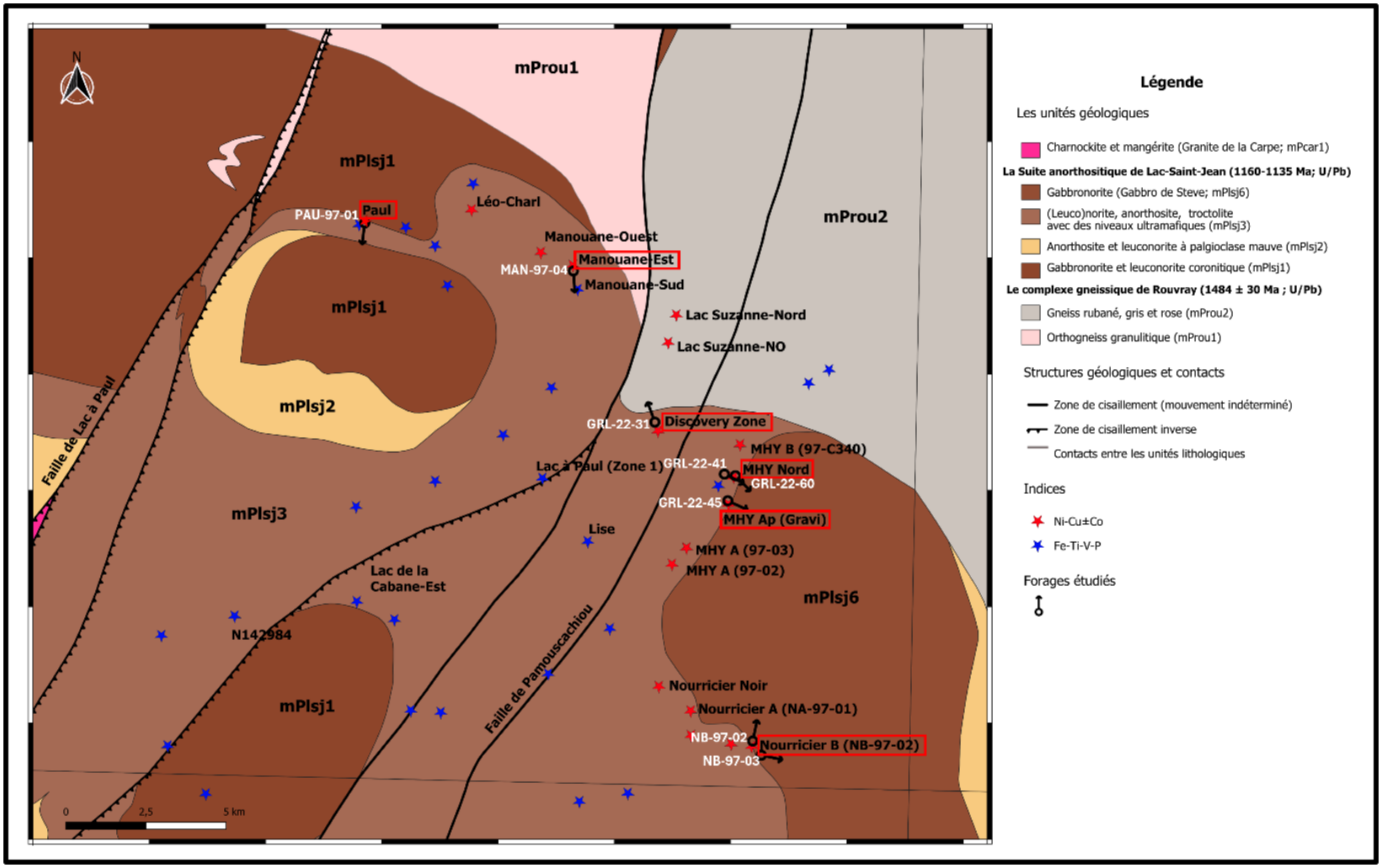


Figure 3 : Carte géologique du secteur d'étude avec l'emplacement des forages étudiés (étiquettes blanches) et des indices Ni-Cu±Co et Fe-Ti-V-P (modifiée d'après Hébert et al., 2009). L'âge de la SALSJ provient de Higgins et Van Breemen (1996), Hervet et al. (1994) et Hébert et Van Breemen (2004), tandis que l'âge du Complexe gneissique de Rouvray provient de Van Breemen (2009).

5- Géologie des indices Ni-Cu dans le secteur de Lac à Paul

Le secteur de Lac à Paul renferme plusieurs indices de Ni-Cu±Co, incluant les indices Nourricier, MHY (A, B, et Nord), MHY Ap (Gravi Zone), Discovery Zone, Manouane, Paul et Léo-Charl (figures 2 et 3).

En 1997, la compagnie Mines d'Or Virginia a réalisé 18 forages dans le secteur de Lac à Paul, incluant 4 forages sur l'indice Nourricier A, 3 forages sur l'indice Nourricier B, 3 forages sur l'indice MHY, 6 forages sur l'indice Manouane et 2 forages sur l'indice Paul (Francoeur, 1998). Certains intervalles de sulfures massifs et semi-massifs issus de ces forages fournis par CCW ont été étudiés et échantillonnés dans le cadre de cette étude. Ils proviennent des forages NB-97-02 et NB-97-03 réalisés sur l'indice Nourricier B, du forage MAN-97-04 réalisé sur l'indice Manouane Est, ainsi que du forage PAU-97-01 réalisé sur l'indice Paul (figure 3).

Entre 2021 et 2022, un total de 64 sondages a été effectué dans le secteur par Laurentia Exploration pour le compte de CCW et CBM dans le cadre du projet Graal, notamment sur les indices Discovery Zone, MHY Ap (Gravi) et MHY Nord (Meneux et al., 2023). Quatre forages ont été étudiés en détail dans le cadre de la présente étude : le forage GRL-22-31 réalisé sur l'indice Discovery Zone, le forage GRL-22-45 réalisé sur l'indice MHY Ap (Gravi), ainsi que les forages GRL-22-41 et GRL-22-60 réalisés sur l'indice MHY Nord (figure 3).

Les descriptions ci-bas ont été effectuées à partir des observations des carottes de forage mentionnées ci-haut. Le suffixe « à oxydes-apatite » est utilisé dans la nomenclature des lithologies lorsque le pourcentage en apatite est compris entre 5 et 15 %. Aussi, sur le terrain/dans les carottes, il n'a pas été possible de distinguer les orthopyroxènes des clinopyroxènes; seuls les orthopyroxènes ont pu être identifiés. C'est pour cette raison que, dans ce rapport, les (leuco)norites et les (leuco)gabbronorites sont regroupées, puisqu'elles présentent les mêmes caractéristiques macroscopiques. La seule différence entre ces deux lithologies réside dans les proportions respectives de clinopyroxène et d'orthopyroxène,

observables uniquement en lame mince. Les proportions modales des minéraux observées en lame mince pour chaque lithologie sont présentées dans l'annexe 1.

5.1- Indice Discovery Zone

L'indice Discovery Zone est situé dans la partie NNE de secteur d'étude, tout près du contact nord entre les unité anorthositiques mPlsj3 et l'unité mProu2 (Complexe gneissique de Rouvray; figure 3). Le forage étudié dans cette zone, GRL-22-31 (140 m de profond), révèle principalement une alternance décamétrique de leuconorite, (leuco)gabbronorite et de rare niveaux peu épais (2 à 5 m) de leucotroctolite (appendice 1). On y observe également quelques niveaux de norite et de mélanorite, ainsi qu'un mince niveau (20 cm) d'orthopyroxénite à oxydes. La minéralisation est principalement constituée de sulfures massifs, d'une épaisseur de 95 cm à une profondeur de 88 m. À la base, des sulfures semi-massifs d'une épaisseur de 20 cm se développent sur une distance d'environ 50 cm par rapport aux sulfures massifs. Les sulfures disséminés ont une épaisseur de 10 cm, situés à 44 m au-dessus des sulfures massifs dans le forage. Ces sulfures sont tous associés à la leuco(gabbro)norite. L'ensemble est localement recoupé par des injections de syénite (50 à 165 cm) et de diorite (115 cm).

5.1.1- (Leuco)norite et (leuco)gabbronorite

Les (leuco)norites et les (leuco)gabbronorites présentent, en surface fraîche, une couleur grise mauvâtre. Elles sont hétérogranulaires, avec une granulométrie variant de moyennement grenue à très grossièrement grenue, localement mégacristique (figures 4A et B). La texture est principalement porphyroclastique et coronitique. La structure est généralement faiblement foliée, mais peut localement être massive ou très foliée.

La composition minéralogique comprend 55 à 85 % de plagioclase, généralement beige mauve dans les parties non déformées, et blanchâtre dans les zones de déformation intense. Les grains sont allongés, subidiomorphes à xénomorphes, et mesurent de 2 mm à

5 cm. En lames minces, ils présentent généralement une extinction roulante. Dans certaines lames, le plagioclase est fortement recristallisé en multiples sous-grains, surtout dans ses bordures, en raison de la déformation, ce qui se reflète dans les carottes de forage par des plagioclases blanchâtres. L'orthopyroxène est présent entre 2 et 35 % dans les (leuco)norites, et entre 1 et 10 % dans les (leuco)gabbronorites. Sur le terrain, il est brunâtre à noirâtre, idiomorphe dans les roches moins déformées à subidiomorphe dans les plus déformées. Il mesure entre 1 mm et 5 cm, et présente parfois des macles courbées ainsi que des exsolutions de clinopyroxène. Le clinopyroxène est présent en proportion de 1 à 5 % dans les (leuco)norites, et entre 4 et 20 % dans les (leuco)gabbronorites (figures 4C et D). La magnétite (1 à 5 %) et l'ilménite (1 à 2 %), xénomorphes et grisâtres, présentent des tailles comprises entre 1 mm et 4 cm. L'apatite, blanchâtre et allongée, représente 1 à 4 %, avec des proportions locales pouvant atteindre 6 %, et mesure de 1 mm à 4 cm. La hornblende verte est présente de 1 à 20 %, formant des couronnes de 1 à 5 mm autour des pyroxènes et de l'olivine lorsque celle-ci est présente. La biotite est présente à raison de 1 à 5 %, formant des couronnes de 1 à 5 mm autour de l'orthopyroxène. Dans certains échantillons, la hornblende remplace totalement les pyroxènes. On observe également des sulfures, soit de la pyrrhotite (1 à 2 %), disséminée, xénomorphe, de 1 mm à 1 cm, et de la chalcopyrite (≤1 %), disséminée ou en petits amas dans la pyrrhotite, mesurant de 1 à 2 mm.

Dans la zone de transition avec la leucotroctolite, ces lithologies peuvent contenir localement jusqu'à 10 % d'olivine vert olive, subarrondie, de 1 mm à 1 cm. Elle est souvent fracturée et faiblement altérée au niveau des fractures en iddingsite et/ou en serpentine. On observe également des couronnes d'orthopyroxène en bordure d'olivine, au contact du plagioclase.

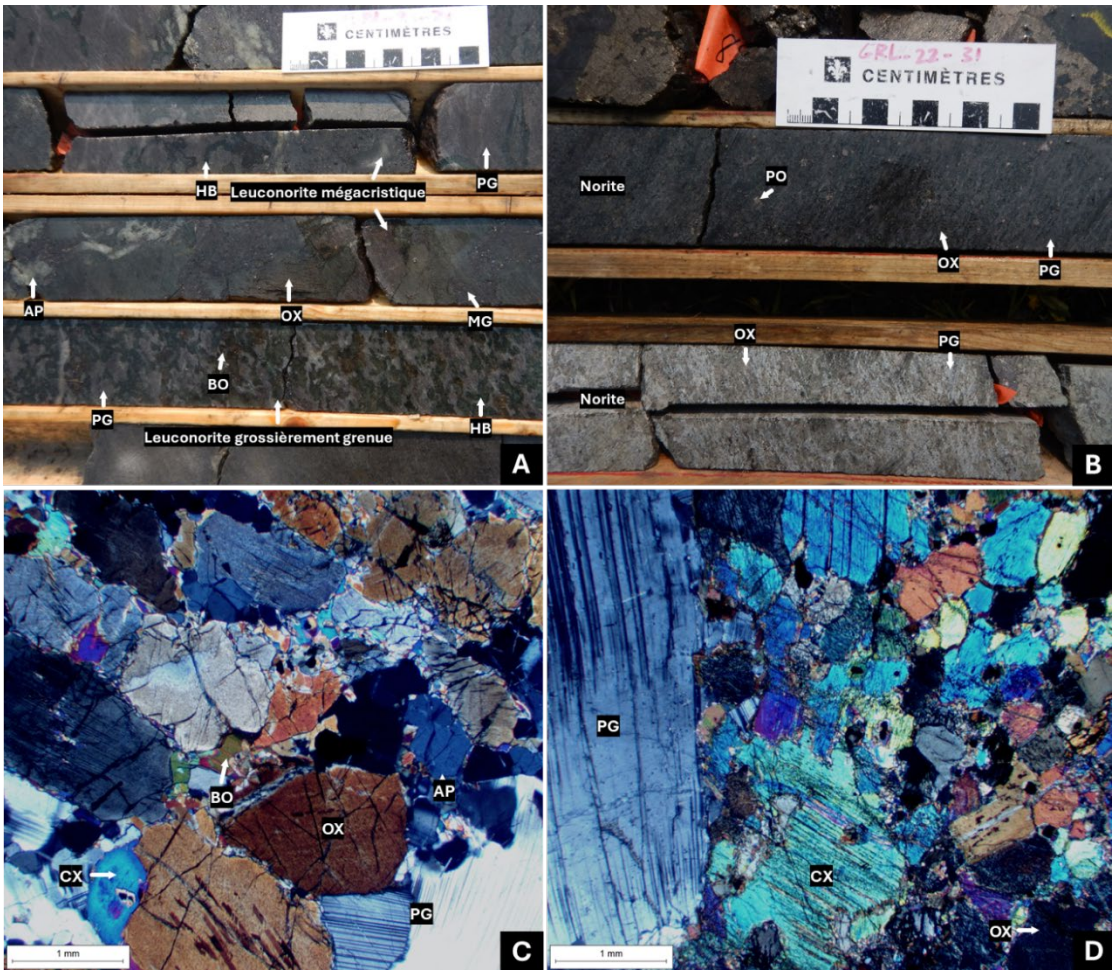


Figure 4 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la (leuco)norite et de la leucogabbronorite de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). (A) Leuconorite présentant deux faciès distincts : une zone mégacristique dans la partie supérieure de l'image et une zone à grain grossier dans la partie inférieure. (B) Norite foliée avec sulfures disséminés. (C) Norite montrant des pyroxènes plus ou moins altérés et des plagioclases faiblement recristallisés (25-OB-8014 A1 ; LP). (D) Leucogabbronorite caractérisée par des pyroxènes bordés de couronnes de hornblende verte et des plagioclases à macles légèrement courbées (25-OB-8007 A1 ; LP). (Abréviations : AP = apatite ; BO = biotite ; CX = clinopyroxène ; HB = hornblende ; LP : lumière polarisée double ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase.)

5.1.2- Leucotroctolite

La leucotroctolite présente une couleur mauve beige en surface fraîche. Sa granulométrie varie de moyenne à très grossière, localement mégacristique (figure 5A). Elle présente une texture coronitique et porphyroclastique, et une structure faiblement foliée. La minéralogie est dominée par le plagioclase, à environ 60 à 65 %, de couleur mauve grisâtre, avec des cristaux variant de 5 mm à 3 cm, parfois recristallisés. Il présente

également des macles courbées et une extinction roulante. L'olivine représente entre 1 % (sous forme de reliques) et 35 %, sous forme de grains olive verdâtres, mesurant de 0,5 à 3 cm. Elle est souvent fracturée et est faiblement serpentinisée ou iddingsitisée, et entourée d'une double couronne d'orthopyroxène (3 %) de 1 à 2 mm dans la zone interne et de hornblende verte dans la zone externe (2 à 25 %) de 1 à 4 mm (figure 5B). Au contact avec la leuconorite, on peut trouver quelques grains d'orthopyroxène (2 %) et de clinopyroxène (3 %), subidiomorphes, mesurant entre 1 et 2 cm. La biotite est présente à environ 1 à 3 %, en feuillets noirâtres de 1 à 5 mm, souvent autour des oxydes de fer. L'apatite (0 à 3 %) se présente en grains blanchâtres allongés et fracturés, de 2 mm à 4 cm. L'ilménite et la magnétite représentent jusqu'à 2 %, mesurant de 1 mm à 1 cm. La pyrrhotite constitue 1 à 2 %, en grains disséminés de 1 mm à 1 cm, avec quelques petits amas de chalcopyrite (<1 %) de 1 à 2 mm associés à la pyrrhotite.

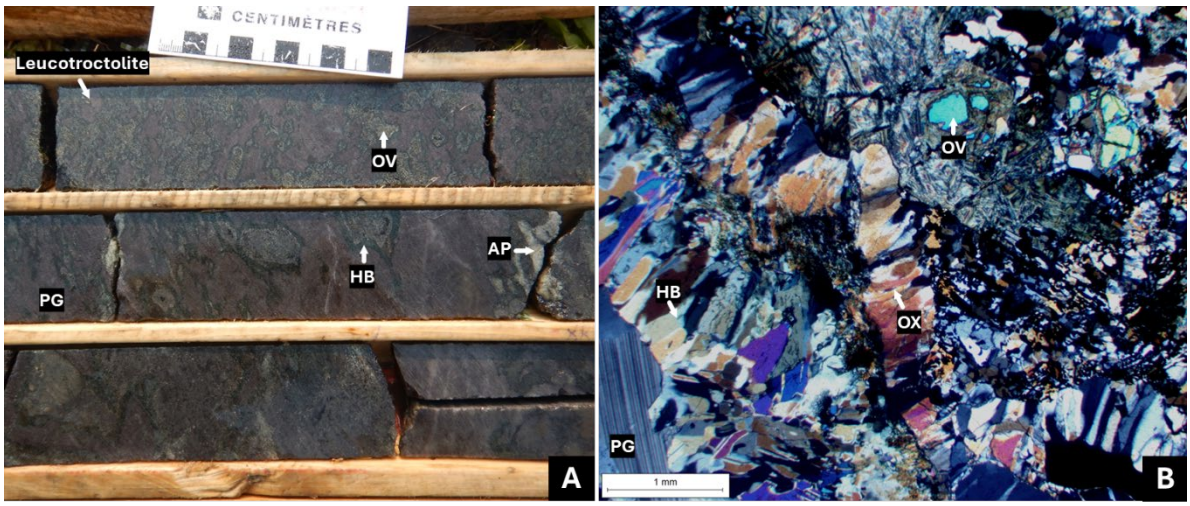


Figure 5 : Photographie (A) et microphotographie (B) de la leucotroctolite de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). (A) Leucotroctolite grossière à très grossière, faiblement foliée, présentant des couronnes de hornblende autour des olivines. (B) Reliques d'olivine dans la leucotroctolite, entourées d'une double couronne d'orthopyroxène et de hornblende (25-OB-8004 A1 ; LP). (Abréviations : AP = apatite ; HB= hornblende verte ; MG = magnétite ; LP : lumière polarisée double ; OX= orthopyroxène ; OV = olivine ; PG = plagioclase).

5.1.3- Orthopyroxénite à oxydes

L'orthopyroxénite à oxydes est observée au sein d'un intervalle de leuconorite entre 63,27 et 63,40 m (figure 6A). Elle est caractérisée par une couleur noirâtre en surface

fraîche. Sa granulométrie est grossière à mégacristique, et elle présente une texture cumulat ainsi qu'une structure massive (figure 6B). Elle est principalement composée d'orthopyroxène (75 à 80 %), brun, idiomorphe à subidiomorphe, non altéré, mesurant entre 5 mm et 3 cm (figure 6C). Il est entouré par de fines couronnes (1 mm) de hornblende verte (2 %). La magnétite représente 15 % de la roche et mesure entre 1 mm et 2 cm. L'ilménite représente environ 5 % et se présente sous forme d'exsolutions de 1 mm à 1,5 cm dans la magnétite (figure 6D). On observe également jusqu'à 2 % de pyrrhotite, soit disséminée, soit aux bordures de la magnétite, mesurant entre 1 et 2 mm. La chalcopyrite (<1 %) forme de petits amas de 1 à 1,5 mm au sein de la pyrrhotite. Des exsolutions en flammes de pentlandite (<1 %) ont également été observées dans la pyrrhotite.

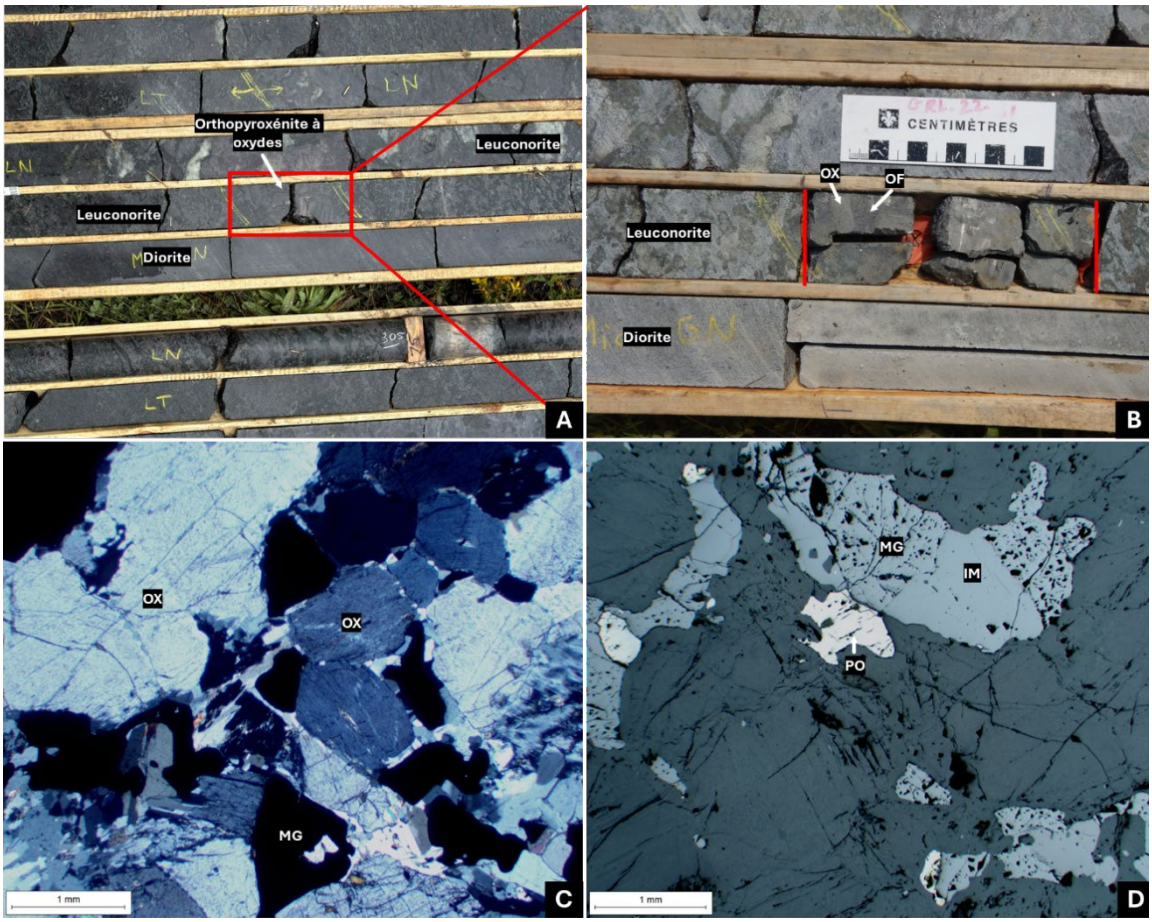


Figure 6 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) d'orthopyroxénite à oxydes de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). (A) Mince intervalle d'orthopyroxénite à oxydes au sein de la leuconorite. (B) Vue rapprochée de l'orthopyroxénite à oxydes. (C) Orthopyroxènes plus ou moins frais dans l'orthopyroxénite à oxydes (25-OB-8009 A1 ; LP). (D) Grains de magnétite et d'ilménite associés à quelques grains de pyrrhotite dans l'orthopyroxénite à oxydes (25-OB-8009 A1 ; LR). (Abréviations : IM = ilménite ; ; LR = lumière réfléchie ; LP : lumière polarisée double ; OX = orthopyroxène ; OF = oxydes de fer ; MG = magnétite).

5.1.4- Sulfures massifs

Les sulfures massifs sont encaissés dans un intervalle de leuconorite grossièrement grenue entre 88,35 et 89,3 m (figure 7A). Ces sulfures présentent un contact diffus avec la leuconorite hôte sur une distance de 2 à 5 cm dans la partie sommitale et un contact net dans la partie basale. Ils se caractérisent par une couleur brun rosée en surface fraîche, une granulométrie fine à grossière et une texture massive (figure 7B). Ils sont composés d'environ 90 % de pyrrhotite, xénomorphe, fracturée, mesurant entre 2 et 5 mm, formant la matrice pour les autres minéraux sulfurés ainsi que pour les phases silicatées. On observe 2 % de chalcopyrite, mesurant entre 1 et 5 mm, en petits amas xénomorphes au sein de la pyrrhotite. La pentlandite (1 à 2 %) est présente essentiellement sous forme d'exsolutions en flammes dans la pyrrhotite, mais elle est présente également en petits grains (<0,5 mm) dans la pyrrhotite et aux bordures de la chalcopyrite (figures 7D et E). La magnétite (<1 %) est généralement observée en petits grains (jusqu'à 1 mm) en bordure de la pyrrhotite. On trouve également des porphyroclastes de plagioclase gris à environ 2 %, mesurant entre 1 mm et 3 cm (figure 7C), ainsi que des porphyroclastes d'orthopyroxène (1 %) et de clinopyroxène (1 %), xénomorphes, mesurent entre 2 et 3 mm, presque totalement transformés en hornblende verte (<1 %) et biotite (<1 %; figure 7C). Des grains d'apatite blanchâtre, xénomorphes, représentent moins de 1 % et mesurent entre 1 et 5 mm.

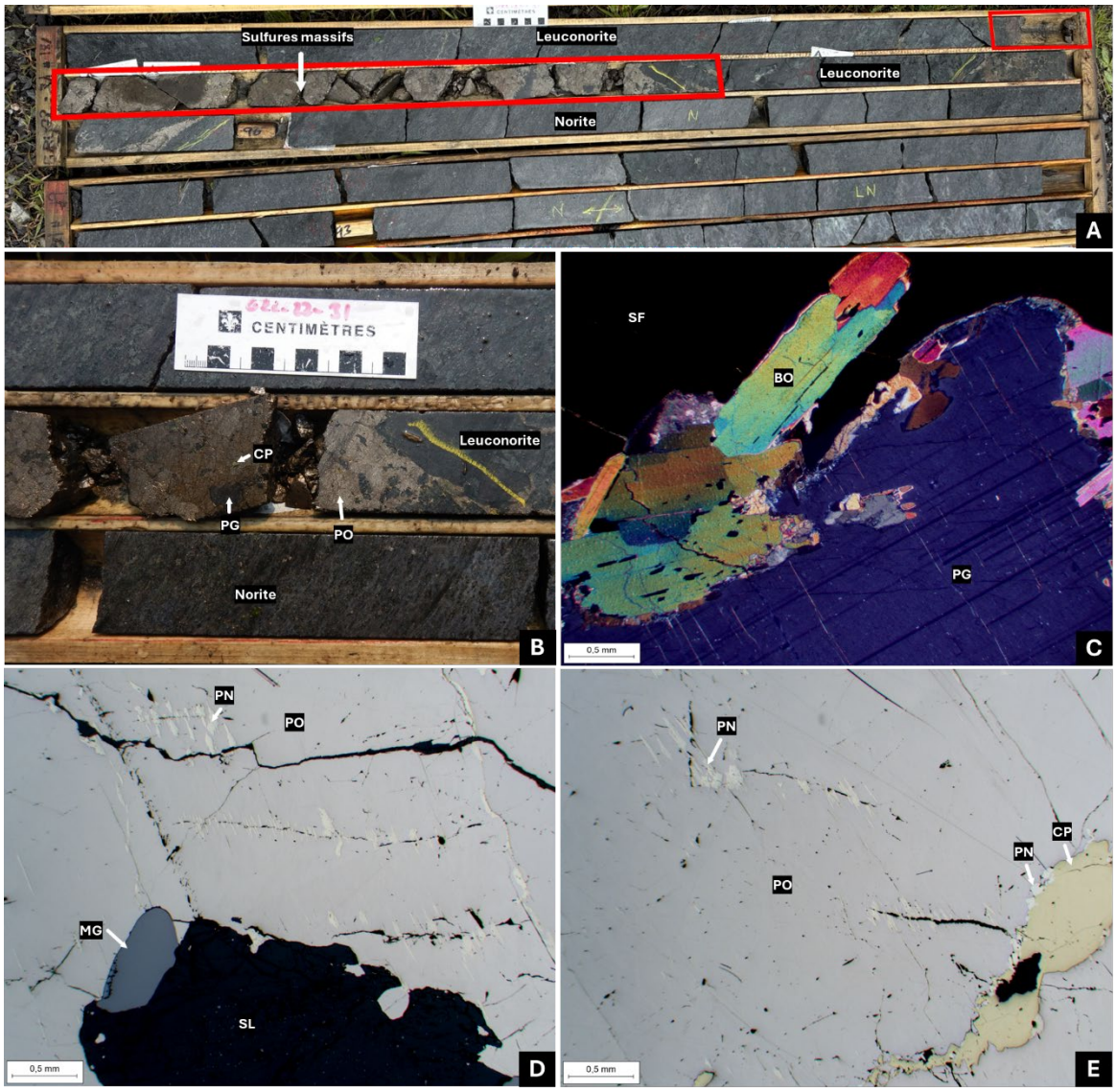


Figure 7 : Photographies (A, B) et microphotographies (C-E) des sulfures massifs de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). (A) Intervalle de sulfures massifs encaissé dans la leuconorite. (B) Aspect des sulfures massifs montrant des porphyroclastes de plagioclase et un contact net entre la leuconorite et les sulfures massifs. (C) Porphyroclaste de plagioclase dans les sulfures massifs, avec de la biotite ayant complètement remplacé le pyroxène (25-OB-8012 A1 ; LP). (D) Pyrrhotite contenant des exsolutions en flammes et des grains de pentlandite (25-OB-8012 A1 ; LR). (E) Pyrrhotite avec un amas de chalcopyrite et des grains de pentlandite aux bordures de la chalcopyrite ou en exsolutions en flammes dans la pyrrhotite (25-OB-8012 A1 ; LR). (Abréviations : BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; LR = lumière réfléchie ; LP : lumière polarisée double ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SF= sulfures ; SL = silicates).

5.1.5- Sulfures semi-massifs

Les sulfures semi-massifs sont encaissés dans un intervalle de leuconorite grossièrement grenue entre 89,80 et 90 m, soit un intervalle de 20 cm en dessous des

sulfures massifs (figure 8A). La texture est en filets. La minéralisation est principalement composée d'environ 30 % de pyrrhotite, apparaissant sous forme de masses xénomorphes et interconnectées, mesurant entre 1 mm et 3 cm (figure 8B). On observe environ 2 % de chalcopyrite, en grains ou en petits amas de 1 à 3 mm, généralement au sein de la pyrrhotite. La pentlandite (environ 2 %) est présente sous forme d'exsolutions en flammes dans la pyrrhotite, ou en grains (<0,25 mm) dans la pyrrhotite ou aux bordures de la chalcopyrite (figure 8E). La magnétite représente environ 1 % et mesure entre 1 et 7 mm en bordure de la pyrrhotite. On trouve également environ 50 % de plagioclase mauve-gris, xénomorphe, mesurant entre 1 mm et 1 cm. La matrice silicatée est composée d'orthopyroxène (8 %) brun verdâtre et de clinopyroxène (2 %), subidiomorphes à xénomorphes, mesurant entre 1 mm et 1,5 cm, essentiellement entourés par de la hornblende verte (5 %) sous forme de couronnes de 1 à 2 mm ou remplacés totalement (figure 8D). La biotite (2 %) est également présente en couronnes autour des pyroxènes et mesure entre 1 et 2 mm. Des porphyroblastes de grenat rouge (<1 %) sont également observés, mesurant jusqu'à 2 cm.

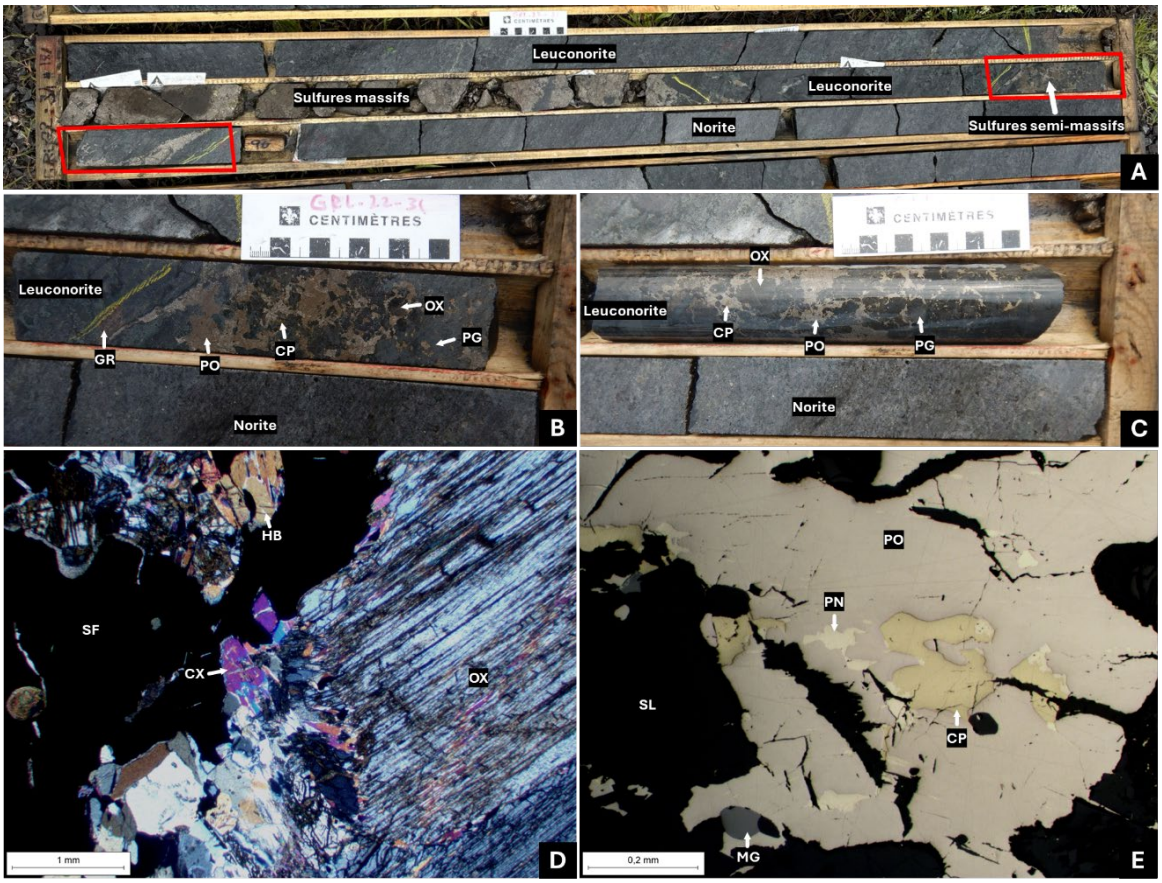


Figure 8 : Photographies (A-C) et microphotographies (D, E) des sulfures semi-massifs de l'indice Discovery Zone (forage GRL-22-31). (A) Zone de sulfures semi-massifs encaissée dans la leuconorite. (B) Vue rapprochée des sulfures semi-massifs montrant une granulométrie moyenne à grossière. (C) Vue rapprochée des sulfures semi-massifs montrant la texture en filet. (D) Porphyroclastes d'orthopyroxène et de clinopyroxène partiellement remplacés par de la hornblende verte dans les sulfures (25-OB-8013 A1 ; LP). (E) Pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite, et de pentlandite sous forme d'exsolutions en flammes ou en grains dans la pyrrhotite et aux bordures de la chalcopyrite ; la magnétite est également présente en grains aux bordures de la pyrrhotite (25-OB-8013 A1 ; LR). (Abréviations : CP = chalcopyrite ; CX = clinopyroxène ; GR = grenat ; HB= hornblende verte ; LR = lumière réfléchie ; LP = lumière polarisée ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SF = sulfures ; SL = silicates).

5.2- L'indice MHY Ap (Gravi Zone)

L'indice MHY Ap se situe dans la partie est du secteur d'étude, tout près du contact entre l'unité mPlsj3 et mPlsj6 (Gabbro de Steve ; figure 3). Le forage étudié dans cette zone, GRL-22-45, révèle un épais niveau de leucotroctolite (entre 2,5 et 90,4 m) en surface, comprenant localement un niveau de troctolite nelsonitique (2,5 m d'épaisseur) et de nelsonite à olivine (1,6 m d'épaisseur). À partir de 90,4 m, la séquence est dominée par la leuco(gabbro)norite, avec deux niveaux de webstérite (15 à 20 cm) et des niveaux de sulfures massifs de 17 à 98 cm d'épaisseur (appendice 2). On note également la présence d'injections centimétriques à métriques (5 cm à 1,5 m) de syénite dans la leuco(gabbro)norite à la base de carotte.

5.2.1- Leucotroctolite, troctolite nelsonitique et nelsonite à olivine

La leucotroctolite présente une couleur gris beige en surface fraîche. Sa granulométrie varie de moyenne à grossière. Elle est massive à faiblement foliée et présente une texture coronitique, porphyroclastique (figure 9A). Sa minéralogie est dominée par le plagioclase, à environ 60 à 70 %, de couleur grisâtre, avec des cristaux variant de 0,5 à 2 cm, localement recristallisés au niveau des bordures et présentant une extinction roulante. L'olivine représente entre 15 et 25 %, sous forme de grains olive verdâtres, fracturés, mesurant de 0,5 à 1,5 cm (figure 9C). Elle est souvent entourée d'une couronne mince (1 à 2 mm) de hornblende verte (2 à 5 %). La biotite est présente à environ 1 à 2 %, en feuillets noirâtres de 1 à 2 mm en amas autour de la magnétite. L'apatite est présente entre 1 et 5 %,

en grains blanchâtres, subarrondis, fracturés, de 0,5 à 1 mm. La magnétite, xénomorphe, représente jusqu'à 4 %, mesurant de 1 à 2 mm (figure 9D). L'ilménite (<1 %) et le spinelle vert (<1 %) sont associés à la magnétite, mesurant entre 0,5 et 1 mm. On trouve également de la pyrrhotite disséminée (1 %), souvent associée aux bordures de la magnétite, mesurant jusqu'à 1 mm. La chalcopyrite (<1 %) est observée en petits amas (<0,5 mm) dans la pyrrhotite.

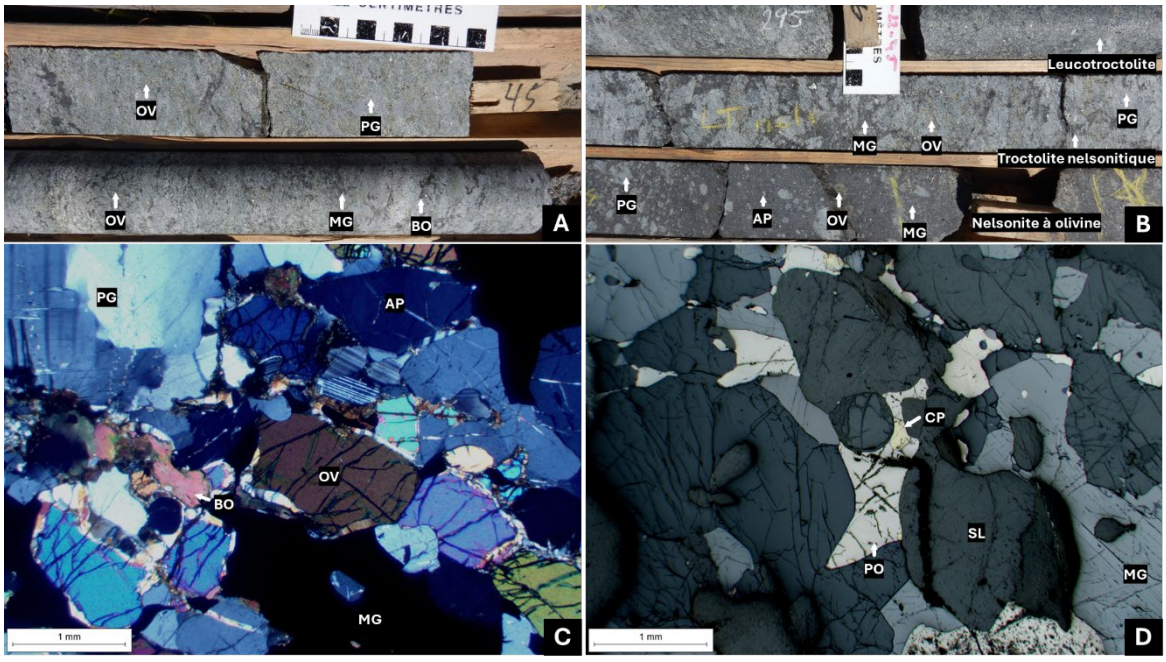


Figure 9 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la leucotroctolite, de la troctolite nelsonitique et de la nelsonite à olivine de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). (A) Aspect général de la leucotroctolite. (B) Intervalles de troctolite nelsonitique et de nelsonite à olivine dans la leucotroctolite. (C) Leucotroctolite à oxydes et apatite présentant des plagioclases localement recristallisés, une mince couronne de hornblende autour des olivines, ainsi que des grains d'apatite et des amas de magnétite (25-OB-8033 A1 ; LP). (D) Magnétite dans la leucotroctolite à oxydes et apatite, avec des grains de pyrrhotite en bordure de la magnétite et de petits amas de chalcopyrite dans la pyrrhotite (25-OB-8033 A1 ; LR). (Abréviations : BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; LR = lumière réfléchie ; LP = lumière polarisée ; MG = magnétite ; OV = olivine ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

Au sein de la leucotroctolite, on trouve un intervalle de troctolite nelsonitique entre 35,5 et 38 m. Elle présente une couleur beige noirâtre en surface fraîche (figure 9B). Sa granulométrie varie de moyenne à grossière. Elle est massive à faiblement foliée et présente une texture coronitique et porphyroclastique. Sa minéralogie est dominée par l'olivine, à environ 50 %, de couleur verdâtre olive, mesurant de 0,5 à 2 cm. Le plagioclase représente entre 20 et 40 %, sous forme de grains grisâtres, variant de 0,2 à 2 cm. La magnétite

représente jusqu'à 25 % et l'ilménite jusqu'à 10 %, mesurant de 1 mm à 1 cm. L'apatite représente jusqu'à 10 %, en grains beige blanchâtres de 0,5 à 5 mm. La hornblende verte (2 %) forme souvent une couronne de 1 à 2 mm autour de l'olivine.

Au sein de la leucotroctolite, on trouve également un intervalle de nelsonite à olivine entre 38 et 39,6 m. Elle présente une couleur gris noirâtre en surface fraîche (figure 9C). Sa granulométrie varie de moyenne à grossière. Elle est massive et présente une texture coronitique. Sa minéralogie est dominée par la magnétite, à environ 55 %, de couleur grisâtre, mesurant de 1 mm à 1,5 cm. L'ilménite représente environ 10 %, mesurant de 1 mm à 1 cm. L'apatite représente environ 15 %, en grains beige blanchâtres, variant de 0,5 à 1 cm. L'olivine représente environ 20 %, de couleur verdâtre olive, mesurant de 0,5 à 1,5 cm. Le plagioclase représente environ 10 %, sous forme de grains grisâtres, variant de 0,2 à 2 cm.

5.2.2- Leuconorite et leucogabbronorite

La leuconorite et la leucogabbronorite présentent, en surface fraîche, une couleur grise mauvâtre. Elles sont hétérogranulaires, avec une granulométrie allant de moyennement à très grossièrement grenue, localement mégacristique (figure 10). La texture est coronitique et porphyroclastique. Leur structure est généralement faiblement foliée, mais peut localement apparaître massive ou fortement foliée (figure 10A).

Leur composition minéralogique est dominée par le plagioclase, représentant 60 à 75 %, gris mauve et blanchâtre dans les zones recristallisées. Il est allongé et subidiomorphe, mesurant entre 1 mm et 3 cm. L'orthopyroxène, brunâtre à verdâtre, idiomorphe à subidiomorphe, est présent de 10 à 20 % dans la leuconorite et entre 2 à 5 % dans la leucogabbronorite. Il mesure entre 1 mm et 4 cm et présente des macles courbées. Le clinopyroxène est présent entre 2 et 5 % dans la leuconorite et jusqu'à 15 % dans la leucogabbronorite (figure 10B). Au contact avec la leucotroctolite, certaines leuco(gabbro)norites contiennent jusqu'à 10 % d'olivine vert olive, subarrondie, de 1 mm à 1 cm. La hornblende verte est comprise entre 2 et 15 %, formant souvent des couronnes

de 2 à 3 mm autour du pyroxène ou le remplaçant. La biotite représente entre 1 et 5 % et se trouve essentiellement en grains de 1 à 2 mm ou en amas autour de la magnétite. La magnétite (1 à 3 %) est présente en grains xénomorphes mesurant de 1 mm à 3 cm, ou en symplectite. L'apatite, blanchâtre et allongée, représente 1 à 2 % et mesure de 1 mm à 1 cm. La pyrrhotite, xénomorphe, est présente en grains disséminés ou en bordure de la magnétite, et constitue jusqu'à 2 %, mesurant de 1 mm à 1 cm, souvent accompagnée de chalcopyrite (≤1 %), disséminée ou en petits amas dans la pyrrhotite, de 1 à 5 mm. Du spinelle vert (<1 %) est également observé dans quelques lames minces, associé à la magnétite.

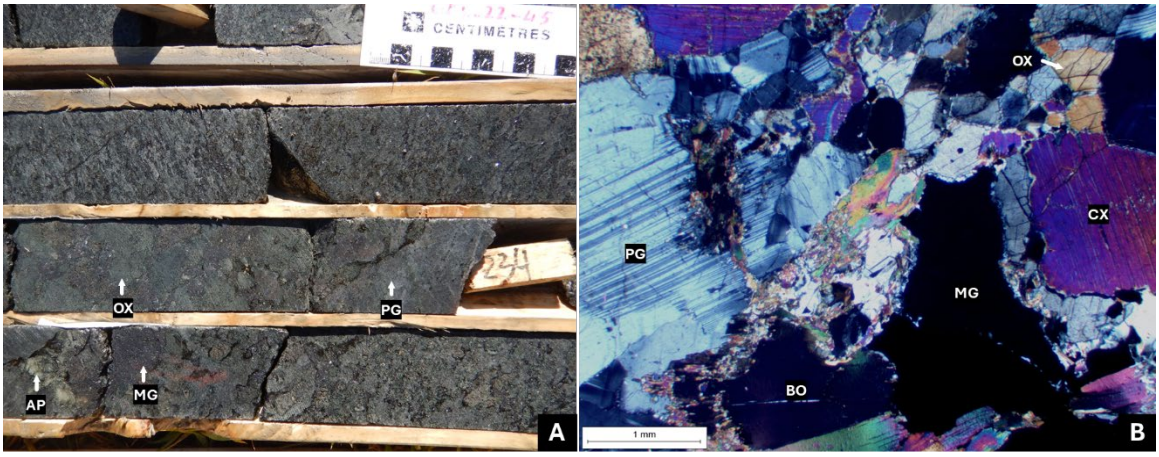


Figure 10 : Photographie (A) et microphotographie (B) de la leuco(gabbro)norite de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). (A) Leuconorite moyennement à très grossièrement grenue, avec des orthopyroxènes majoritairement remplacés par de la hornblende verte. (B) Leucogabbronorite présentant des grains xénomorphes de clinopyroxène et d'orthopyroxène, ainsi que des amas de biotite autour de la magnétite ; les plagioclases sont légèrement recristallisés (25-OB-8035 A1 ; LP). (Abréviations : AP = apatite ; BO = biotite ; CX = clinopyroxène ; LP= lumière polarisée ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase).

5.2.3- Webstérite à sulfures disséminés

La webstérite à sulfures disséminés se présente en deux intervalles minces (15 à 20 cm) au sein de la leuconorite (figure 11A). Elle présente une couleur brune verdâtre en surface fraîche et une granulométrie moyenne à grossière. Sa texture est coronitique, et sa structure est légèrement foliée (figure 11B).

La minéralogie comprend environ 40 % d'orthopyroxène et 35 % de clinopyroxène, sous forme de grains subidiomorphes à xénomorphes de 1 à 2 cm (figure 11C). Le plagioclase, gris mauve, représente environ 5 %, mesure entre 1 mm et 1 cm et est localement recristallisé. La pyrrhotite, disséminée, représente environ 15 % et se présente sous forme de grains xénomorphes de 1 mm à 1 cm (figure 11D). La chalcopyrite représente environ 1 %, sous forme de petits amas dans la pyrrhotite, et mesure jusqu'à 2 mm. La pentlandite (<1 %) est présente sous forme d'exsolutions en flammes dans la pyrrhotite. La magnétite constitue environ 2 % et se présente sous forme de grains en bordure de la pyrrhotite ou isolés. Elle mesure entre 2 et 5 mm. La hornblende verte (2 %) et la biotite (1 %) sont présentes sous forme de couronnes (<0,1 mm) autour du pyroxène.

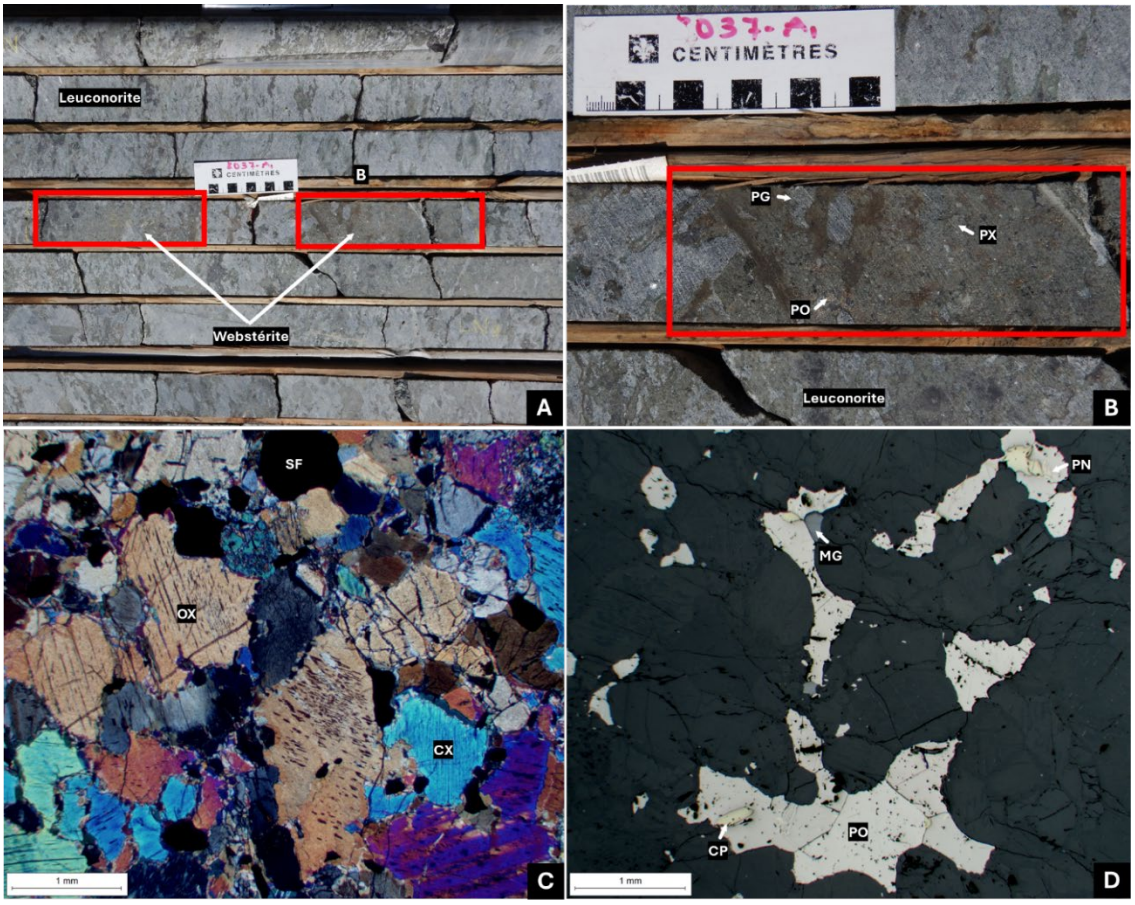


Figure 11 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la webstérite à sulfures disséminés de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). (A) Deux intervalles minces de webstérite au sein de la leuconorite. (B) Vue rapprochée de la webstérite montrant un contact diffus avec la leuconorite. (C) Webstérite présentant des grains xénomorphes d'orthopyroxène et de clinopyroxène. (D) Amas xénomorphes de pyrrhotite dans la webstérite, avec de la chalcopyrite incluse dans la pyrrhotite et de la magnétite en bordure de celle-ci. (Abréviations : CP = chalcopyrite ; CX = clinopyroxène ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase ; PN = pentlandite ; PO = pyrrhotite ; PX = pyroxène).

5.2.4- Pyroxénite biotitisée

La pyroxénite biotitisée (figure 12) est observée localement entre 165,25 et 167 m. Le contact avec la leuconorite est net. Elle présente une couleur verdâtre en surface fraîche, une granulométrie fine à moyenne et une texture massive. Elle est constituée d'environ 80 % de biotite brun verdâtre, en grains de 1 à 2 mm, et jusqu'à 20 % de hornblende verte, également en grains de 1 à 2 mm.

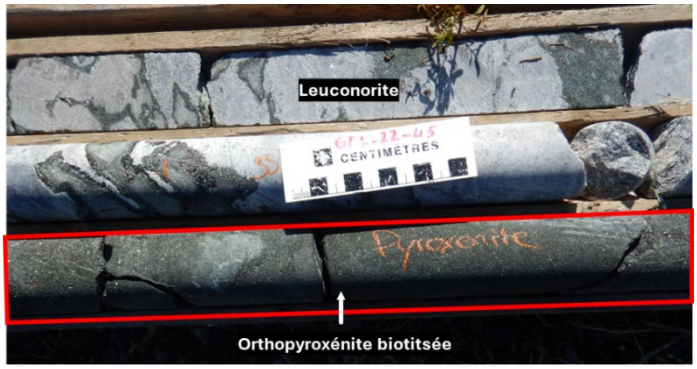


Figure 12 : Intervalle de pyroxénite à grains fins fortement biotitisée au sein de la leuconorite mégacrisitque.

5.2.5- Sulfures massifs

Des bandes discontinues de sulfures massifs sont encaissées dans un intervalle de leuconorite mégacristique compris entre 146,35 et 148,67 m (figure 13A). Ces sulfures présentent des contacts diffus avec la leuconorite hôte sur une distance de 2 à 5 cm (figure 13C), tandis que, parfois, ils sont en contact net avec cette dernière (figure 13A). Ils présentent une couleur bronze rosée en surface fraîche, une granulométrie moyenne à grossière et une texture massive (figure 13B). Ils sont constitués d'environ 85 à 90 % de pyrrhotite, xénomorphe, fracturée, de taille variante entre 2 mm et 2 cm, et d'environ 1 à 3 % de chalcopyrite, mesurant entre 0,1 et 2 mm, en amas au sein de la pyrrhotite. La pentlandite (1 à 2 %) est présente sous forme d'exsolutions en flammes dans la pyrrhotite ou en grains (<0,1 mm) dans cette dernière ou aux bordures de la chalcopyrite (figure 13C). La magnétite représente environ 1 % ; elle se présente en grains (1 à 3 mm) xénomorphes aux bordures de la pyrrhotite. On trouve également de l'ilménite (<1 % ; 1 à 2 mm),

localement associée à la magnétite (figure 13D). La matrice silicatée est représentée par le plagioclase gris et blanchâtre (2 à 5 %), mesurant entre 1 mm et 4 cm. Le clinopyroxène (1 %) et l'orthopyroxène (<1 %), mesurant entre 1 mm et 2 cm, sont essentiellement remplacés par la hornblende verte (2 à 3 %) et la biotite (1 à 2 %). L'apatite (<1 %), subarrondie, peut atteindre jusqu'à 1 mm.

Dans l'intervalle des sulfures massifs, on observe localement une enclave de gneiss à biotite de 20 cm sur 1,5 cm, de couleur gris blanchâtre en surface fraîche (figure 13A). Elle présente une granulométrie fine et une structure foliée. Sa composition est d'environ 60 % de quartz, 20 % de plagioclase et 20 % de biotite.

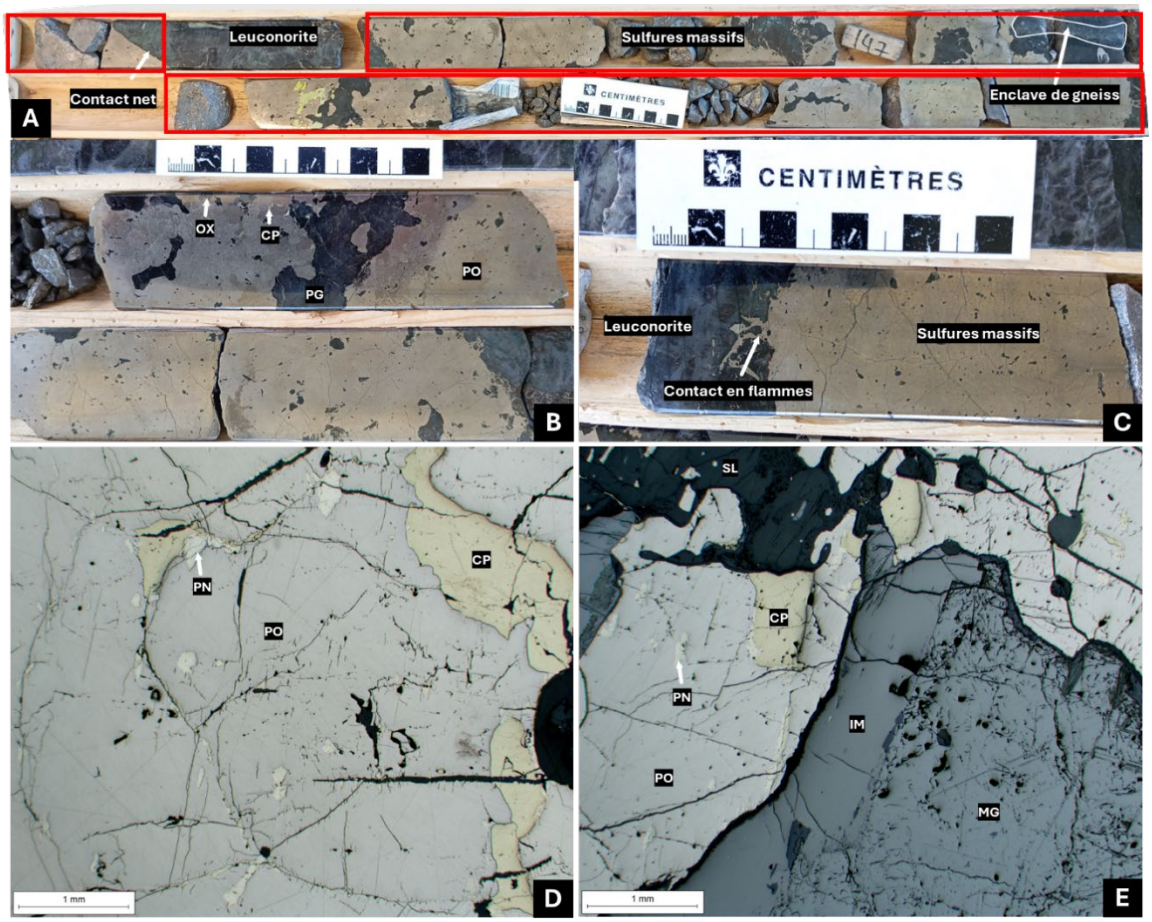


Figure 13 : Photographies (A-C) et microphotographies (D, E) des sulfures massifs de l'indice MHY Ap (Gravi Zone ; forage GRL-22-45). (A) Sulfures massifs encaissés dans la leuconorite mégacristique, incluant une enclave de gneiss. (B) Porphyroclastes de plagioclase et de pyroxène dans une matrice de pyrrhotite. (C) Contact en flammes entre les sulfures massifs et la leuconorite. (D) Pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite et des grains de pentlandite (25-OB-8039 A1 ; LR). (E) Pyrrhotite renfermant des amas de chalcopyrite, des exsolutions en flammes et des grains de pentlandite, ainsi que des grains de magnétite et d'ilménite (25-OB-8039 A1 ; LR). (Abréviations : CP = chalcopyrite ; LR = lumière réfléchie ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite).

5.3- L'indice MHY Nord

L'indice MHY Nord est situé dans la partie NE de secteur d'étude, tout près du contact entre l'unité mPlsj3 et mPlsj6 (Gabbro de Steve ; figure 3). Au niveau de cet indice, les forages GRL-22-41 (appendice 3) et GRL-22-60 (appendice 4) débutent par un épais niveau de leucotroctolite à oxydes-apatite (25 à 65 m), localement associé à de la nelsonite à olivine (1 m), suivi principalement de la leuco(gabbro)norite. On y retrouve également des niveaux de norite et de mélagabbronorite à oxydes d'épaisseur comprise entre 90 cm et 2 m. La minéralisation est dominée par des sulfures massifs, dont l'épaisseur varie de 30 cm à 13 m. À leur base, sur une distance d'au moins 9 m, on observe des zones de sulfures semi-massifs, épaisses de 4 à 10 m, qui se développent à différents niveaux. Des sulfures disséminés, d'une épaisseur de 10 à 37 cm, se rencontrent entre des niveaux des sulfures massifs ou en dessous (6 m). L'ensemble de ces sulfures est encaissé dans des lithologies leuco(gabbro)noritiques. On observe aussi des injections de syénite (2 à 3 m) et de diorite (85 cm à 3,8 m) localement.

5.3.1- Leucotroctolite à oxydes-apatite et nelsonite à olivine

La leucotroctolite à oxydes-apatite présente, en surface fraîche, une couleur mauve grisâtre. Sa granulométrie varie de moyenne à très grossière, localement mégacristique (figure 14A). Elle montre une texture coronitique et porphyroclastique. La structure est généralement massive à faiblement foliée. Sa minéralogie est dominée par le plagioclase (60 à 85 %), de couleur grisâtre, en grains de 1 mm à 2 cm. Il présente une extinction roulante et est localement recristallisé au niveau des bordures. L'olivine représente 20 à 30 %, sous forme de grains verdâtres olive mesurant de 2 mm à 4 cm. Elle est souvent entourée par une double couronne d'orthopyroxène (<1 mm ; <1 %) et de hornblende verte (1 à 2 mm; 2 à 5 %; figure 14C). L'orthopyroxène, observé localement dans la zone de transition vers la leuconorite, peut atteindre 5 %, en grains brun verdâtre, subidiomorphes, mesurant entre 2 mm et 3 cm. L'apatite est généralement présente entre 2 et 6 %, pouvant localement atteindre 10 %, en grains blanchâtres subarrondis de 0,1 à 1,5 cm. La magnétite

représente jusqu'à 2 %, en grains xénomorphes de 1 à 5 mm. La biotite est présente à environ 1 à 2 %, en amas de 1 à 2 mm autour de la magnétite. La pyrrhotite, disséminée, atteint jusqu'à 1 %, en grains de 2 à 3 mm (figure 14D). Localement, on observe des grains de grenat rouge (<1 %), mesurant entre 2 et 5 mm.

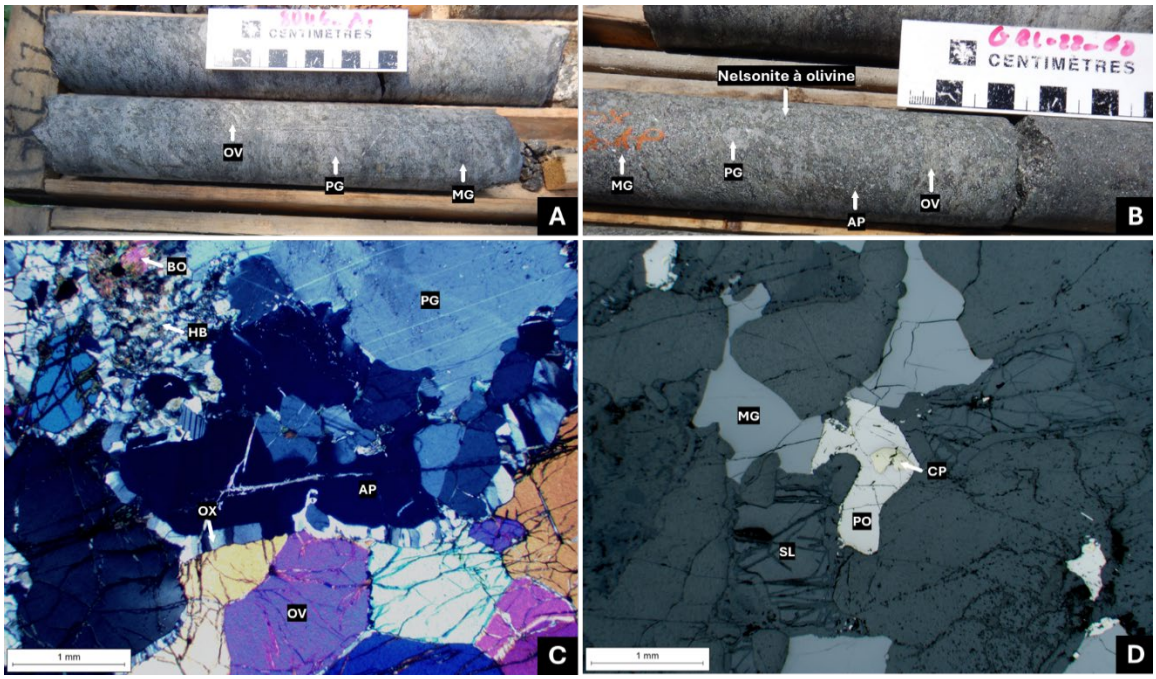


Figure 14 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la leucotroctolite et de la nelsonite à olivine de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-60). (A) Leucotroctolite à oxydes-apatite montrant une granulométrie moyenne. (B) Intervalle de nelsonite à olivine à grains fins à moyennes encaissé dans la leucotroctolite. (C) Leucotroctolite à oxydes-apatite présentant des olivines plus ou moins fraîches entourées de couronnes d'orthopyroxène et de hornblende verte (25-OB-8046 A1 ; LP). (D) Magnétite accompagnée de pyrrhotite et d'amas de chalcopyrite dans la leucotroctolite à oxydes-apatite (25-OB-8046 A1 ; LR). (Abréviations : BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; HB= hornblende verte ; LR = lumière réfléchie ; LP = lumière polarisée ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; OV = olivine ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

Au sein de la leucotroctolite, on trouve également un intervalle de 1,1 m de nelsonite à olivine entre 16 et 17,1 m. Elle présente une couleur gris noirâtre en surface fraîche (figure 14B). Sa granulométrie varie de fine à moyenne. Elle présente une texture coronitique et une structure légèrement foliée. Sa minéralogie est dominée par la magnétite, à environ 50 %, de couleur grisâtre, mesurant de 1 à 3 mm. L'ilménite représente environ 5 %, mesurant de 1 à 3 mm. L'apatite représente environ 10 %, en grains beiges, variant de 0,5 à 1 cm. Le plagioclase, mauve, représente environ 20 %, et mesure entre 0,5 et 1 cm. L'olivine représente environ 10 %, de couleur vert olive, mesurant de 0,5 à 1,5 cm. La

hornblende verte (5 %) se présente sous forme de couronnes de 1 à 2 mm autour de l'olivine.

5.3.2- Leuconorite - leucogabbronorite et norite

La leuconorite, la leucogabbronorite et la norite présentent, en surface fraîche, une couleur gris mauve à noirâtre. Elles sont hétérogranulaires, avec une granulométrie variant de moyennement à très grossièrement grenue, localement mégacristique. La texture est coronitique et porphyroclastique. Leur structure est faiblement foliée, mais peut localement apparaître massive ou fortement foliée (figures 15A et B).

Leur composition minéralogique est dominée par le plagioclase (55 à 80 %), généralement gris mauve et blanchâtre dans les zones recristallisées. Il est allongé et subidiomorphe, et mesure entre 1 mm et 5 cm. L'orthopyroxène, présent entre 8 et 30 % dans les (leuco)norites et entre 2 et 5 % dans les leucogabbronorites, se présente en grains brun verdâtre, idiomorphes à subidiomorphes, et varie de 1 mm à 4 cm (figures 15C et D). Le clinopyroxène représente entre 2 et 5 % dans les (leuco)norites et jusqu'à 15 % dans les leucogabbronorites. Ces lithologies peuvent contenir jusqu'à 1 % d'olivine vert olive, subarrondie, de 1 à 3 mm dans les zones de transition de la leucotroctolite. La hornblende verte représente 2 à 5 %, et la biotite 1 à 3 %, formant souvent des couronnes de 1 à 3 mm autour du pyroxène. La magnétite (jusqu'à 3 %) forme des amas xénomorphes d'oxydes de fer de 1 mm à 1,5 cm. L'apatite, blanchâtre et allongée, représente 1 à 2 %, sous forme de grains subarrondis de 1 mm à 1 cm. La pyrrhotite, disséminée et xénomorphe, représente 1 à 2 %, en grains de 1 mm à 4 cm, mais atteint localement jusqu'à 15 % dans une zone minéralisée (voir la partie 5.3.6). La chalcopyrite (1 à 2 %) est disséminée ou en petits amas xénomorphes dans la pyrrhotite, et mesure entre 0,1 et 1 mm. Localement, on observe des porphyroblastes de grenat rouge (<1 %), mesurant entre 2 mm et 1 cm.

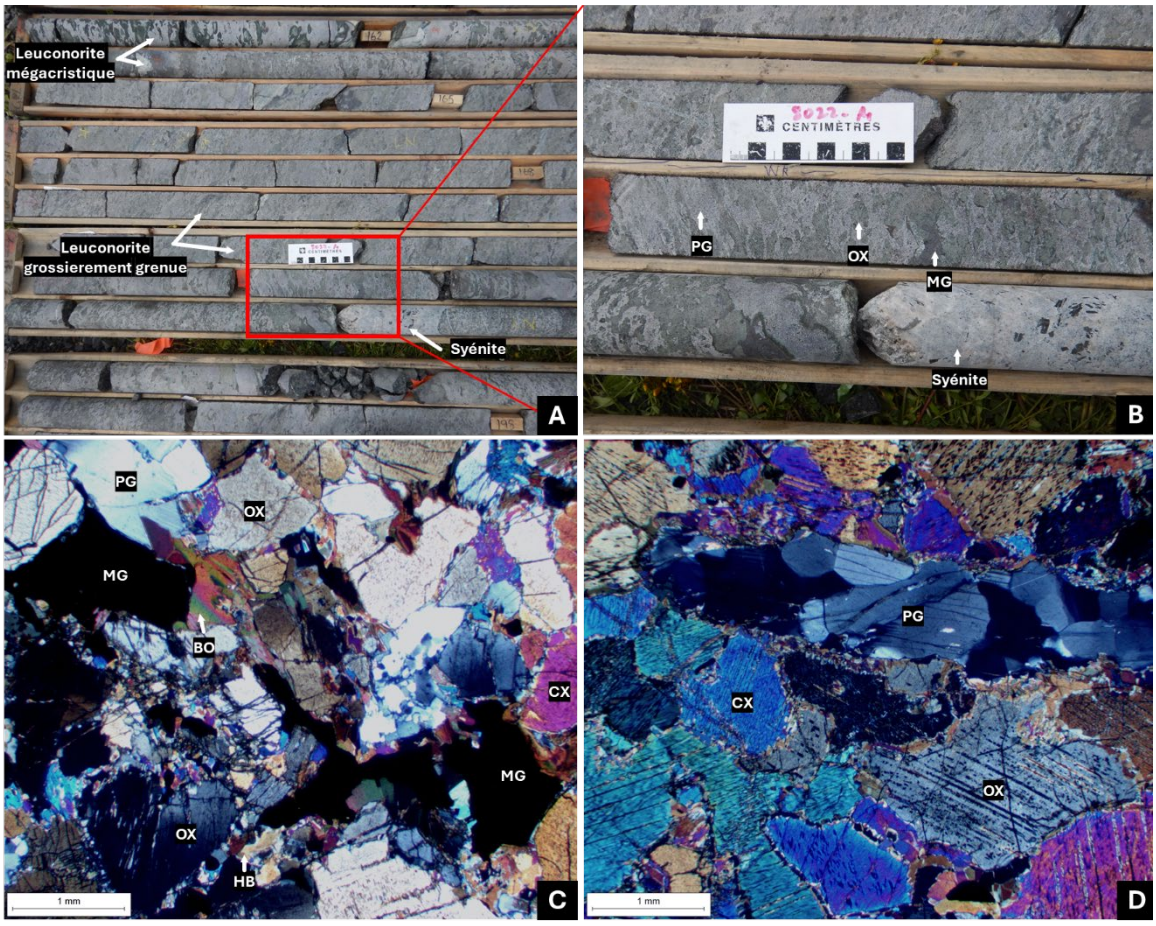


Figure 15 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) de la (leuco)norite et de la leucogabbronorite de l'indice MHY Nord. (A) Différents faciès de la leuconorite, mégacristique dans la partie supérieure de l'image et grossièrement grenue dans la partie inférieure (forage GRL-22-41). (B) Vue rapprochée de la leuconorite grenue montrant une structure foliée et un remplacement important de l'orthopyroxène par de la hornblende verte (forage GRL-22-41). (C) Norite avec des pyroxènes partiellement transformés en hornblende verte, et des amas de biotite autour de la magnétite (25-OB-8052 A1 ; LP). (D) Leucogabbronorite présentant des grains de pyroxène entourés de fines couronnes de hornblende verte, ainsi que du plagioclase plus ou moins recristallisé (25-OB-8022 A1 ; LP). (Abréviations : BO = biotite ; CX = clinopyroxène ; HB = hornblende verte ; LP = lumière polarisée ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase).

5.3.3- Mélagabbronorite à oxydes

La mélagabbronorite à oxydes (70 cm d'épaisseur) présente, en surface fraîche, une couleur verdâtre à noirâtre (figure 16A). Elle montre une granulométrie moyenne à grossière, une texture généralement coronitique et une structure foliée. La minéralogie comprend environ 55 % de clinopyroxène verdâtre et 15 % d'orthopyroxène en grains

subidiomorphes à xénomorphes de 1 mm à 1 cm (figure 16B). Ils sont entourés par des couronnes de hornblende verte (5 %) et de biotite (2 %), mesurant jusqu'à 1 mm. Le plagioclase beige mauve représente environ 5 % de la roche, en grains xénomorphes de 1 à 5 mm, plus ou moins recristallisés. La magnétite constitue environ 10 %, en amas xénomorphes de 1 à 10 mm. L'ilménite représente environ 3 %, en grains de 1 à 2 mm, associée à la magnétite. La pyrrhotite, disséminée, atteint jusqu'à 1 % et se présente sous forme de grains de 1 à 2 mm.

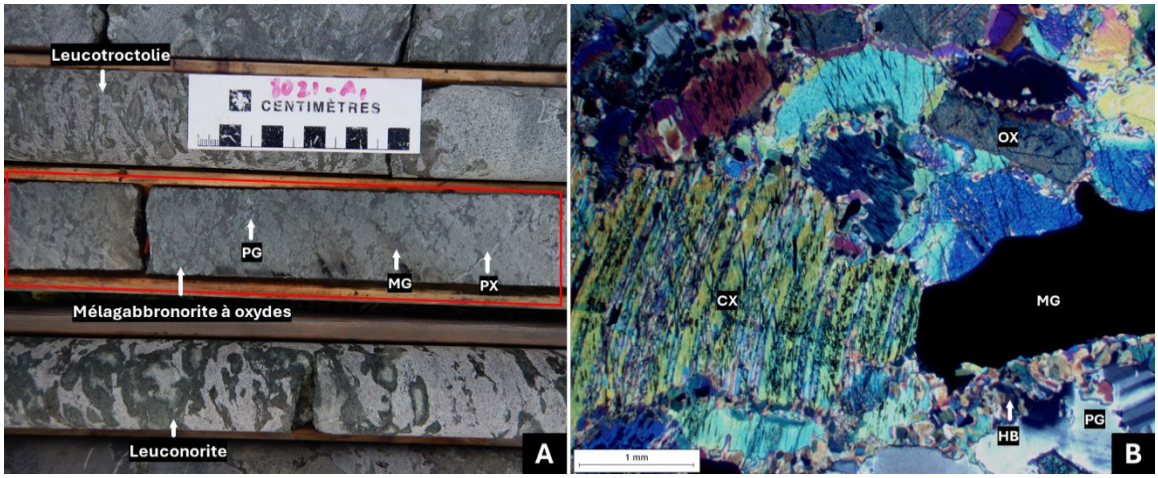


Figure 16 : Photographie (A) et microphotographie (B) de la mélagabbronorite à oxydes de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-41). (A) Mélagabbronorite à oxydes faiblement foliée. (B) Mélagabbronorite à oxydes présentant des pyroxènes entourés de fines couronnes de hornblende verte, ainsi que de la magnétite en amas xénomorphes et des plagioclases plus ou moins recristallisés (25-OB-8021 A1 ; LP). (Abréviations : CX = clinopyroxène ; HB = hornblende verte ; MG = magnétite ; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase ; PX = pyroxène).

5.3.4- Sulfures massifs

Les sulfures massifs sont encaissés dans la leuco(gabbro)norite à trois niveaux, dont l'épaisseur varie de 30 cm à 2,25 m, dans le forage GRL-22-41 (figure 17A). Deux niveaux de sulfures massifs issus du forage GRL-22-60, d'épaisseur respective de 50 cm et 1,5 m, ont également été étudiés à partir d'une boîte d'exposition préparée par la compagnie CBM (figure 17C). Toutefois, la nature discontinue de ces intervalles dans le forage GRL-22-60 ne permet pas d'observer le type de contact entre les sulfures massifs et la roche hôte. Les

sulfures massifs du forage GRL-22-41 présentent localement un contact diffus avec la roche hôte, et ailleurs un contact net (figure 17B).

De manière générale, ces sulfures montrent une couleur bronze rosée en surface fraîche, une granulométrie moyenne à grossière et une texture massive (figures 17B et C). Ils sont constitués d'environ 70 à 85 % de pyrrhotite, xénomorphe, fracturée, mesurant entre 2 mm et 1 cm. On observe environ 3 à 15 % de chalcopyrite, en petits amas xénomorphes de 1 mm à 3 cm au sein de la pyrrhotite. La pentlandite (1 à 2 %) se présente sous forme d'exsolutions en flammes ou en petits grains (<0,5 mm) dans la pyrrhotite (figure 17D). On note également la présence de porphyroclastes de plagioclase gris et blanchâtre (2 à 5 %), mesurant entre 1 mm et 3 cm, plus ou moins recristallisés (figures 17 A et B). Les porphyroclastes d'orthopyroxène (1 à 3 %) et de clinopyroxène (1 à 3 %), xénomorphes, mesurent entre 1 mm et 1,5 cm (figures 17 A et B). La magnétite représente environ 1 %, sous forme de grains xénomorphes (<1 mm), et l'apatite, également 1 %, se présente en grains subarrondis et fracturés atteignant jusqu'à 1,5 mm.

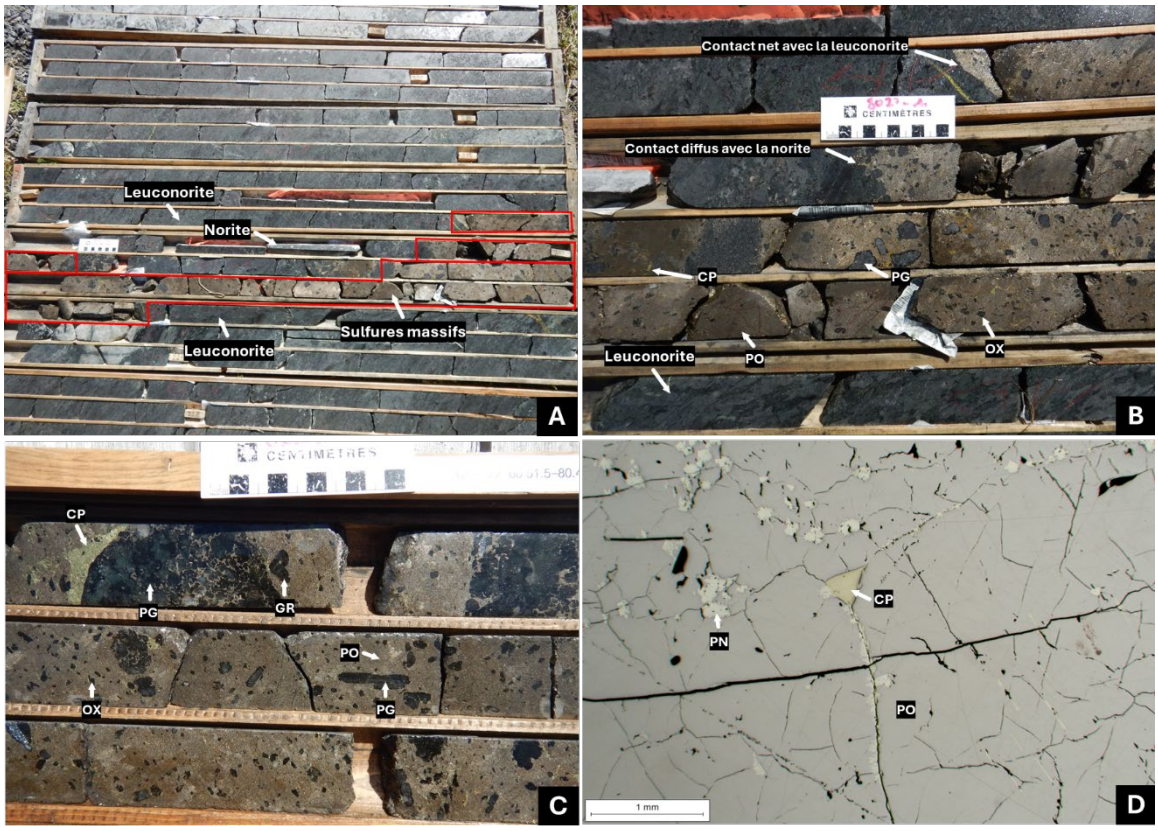


Figure 17 : Photographies (A-C) et microphotographie (D) des sulfures massifs de l'indice MHY Nord (forages GRL-22-41 et GRL-22-60). (A) Sulfures massifs encaissés dans la leuconorite (forage GRL-22-41). (B) Vue rapprochée montrant des porphyroclastes de plagioclase et d'orthopyroxène, de petits amas de chalcopyrite dans une matrice de pyrrhotite, ainsi que la leuconorite hôte (GRL-22-41). (C) Vue rapprochée des sulfures du forage GRL-22-60 présentant des porphyroclastes de plagioclase et d'orthopyroxène, ainsi que des amas de chalcopyrite. (D) Sulfures massifs contenant des grains de pentlandite et de chalcopyrite dans la pyrrhotite (25-OB-8027 A1; LR). (Abréviations : CP = chalcopyrite ; GR = grenat ; LR= lumière réfléchie; OX = orthopyroxène ; PG = plagioclase ; PN= pentlandite ; PO = pyrrhotite).

5.3.5- Sulfures semi-massifs

Les sulfures semi-massifs sont encaissés dans plusieurs intervalles minces (10 à 15 cm) au sein de la leuco(gabbro)norite (figure 18A), à une distance d'au moins 9 m en dessous des sulfures massifs. Ils présentent une couleur allant de bronze à brun doré. La granulométrie est moyenne à très grossière et la texture est en filets. La minéralisation est composée d'environ 30 à 60 % de pyrrhotite, apparaissant sous forme de masses xénomorphes et interconnectées, mesurant entre 1 mm et 3 cm (figure 18C). On observe environ 1 à 2 % de chalcopyrite, en grains ou en petits amas xénomorphes de 0,5 mm à

1 cm, généralement au sein de la pyrrhotite. La pentlandite représente entre 1 et 2 % sous forme d'exsolutions en flammes et localement en petits grains (<0,5 mm) dans la pyrrhotite, localement associée aux bordures de la chalcopyrite (figure 18D). On trouve également 2 à 30 % de plagioclase mauve gris, xénomorphe, en grains recristallisés et séricitisés, mesurant entre 0,5 mm et 1 cm. Des reliques de clinopyroxènes (<1 %) sont observées, dont la majorité des pyroxènes sont transformés en biotite (5 %) et en hornblende verte (3 %; figure 18B). On trouve également jusqu'à 1 % d'apatite, mesurant entre 1 et 2 mm.

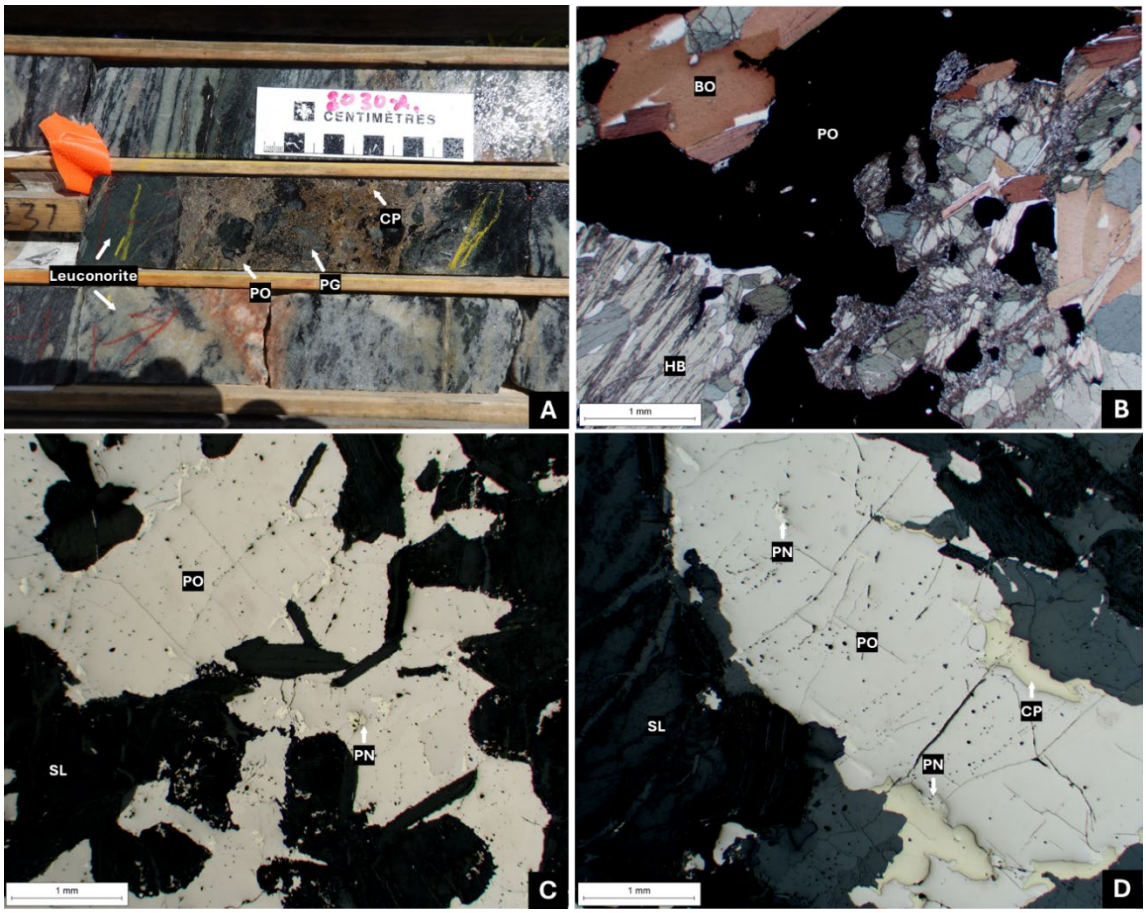


Figure 18 : Photographie (A) et microphotographies (B-D) des sulfures semi-massifs de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-41). (A) Sulfures semi-massifs encaissés dans la leuconorite recristallisée, montrant un contact diffus entre les deux. (B) Porphyroclastes de pyroxènes totalement remplacés par la hornblende verte et la biotite (25-OB-8030 A1 ; LP). (C) Sulfures semi-massifs dominés par des amas xénomorphes de pyrrhotite, avec de la pentlandite sous forme d'exsolutions en flammes et en grains dans la pyrrhotite (25-OB-8030 A1 ; LR). (D) Pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite ainsi que des grains de pentlandite dans la pyrrhotite et en bordure de la chalcopyrite (25-OB-8030 A1 ; LR). (Abréviations : BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; HB = hornblende verte ; LP = lumière polarisée ; LR = lumière réfléchie ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

5.3.6- Sulfures disséminés

Les sulfures disséminés se présentent en petits grains au sein de la leuco(gabbro)norite dans le forage GRL-22-41. Ils ont une épaisseur de 10 à 37 cm et se rencontrent une fois entre les niveaux des sulfures massifs et en dessous (6 m). Ils montrent une couleur allant du bronze au brun doré en surface fraîche (figure 19A). La granulométrie varie de moyenne à grossière. La minéralisation comprend environ 10 à 15 % de pyrrhotite, en grains xénomorphes de 0,2 mm à 1 cm, et 1 à 2 % de chalcopyrite en petits amas mesurant jusqu'à 1 mm dans la pyrrhotite (figure 19C). La pentlandite (< 1 %) se présente sous forme de petites exsolutions en flammes (< 0,1 mm) dans la pyrrhotite (figure 19D). On trouve également le clinopyroxène (40 %) et l'orthopyroxène (25 %) en grains subidiomorphes, mesurant entre 1 mm et 2 cm (figure 19B), généralement entourés ou remplacés par la hornblende verte (5 %) et la biotite (1 %). Le plagioclase mauve gris est présent à 10 à 15 %, en grains xénomorphes de 1 mm à 1 cm. La magnétite représente 1 %, en grains xénomorphes de 1 à 3 mm. L'apatite représente également 1 %, en grains subarrondis de 0,5 à 2 mm.

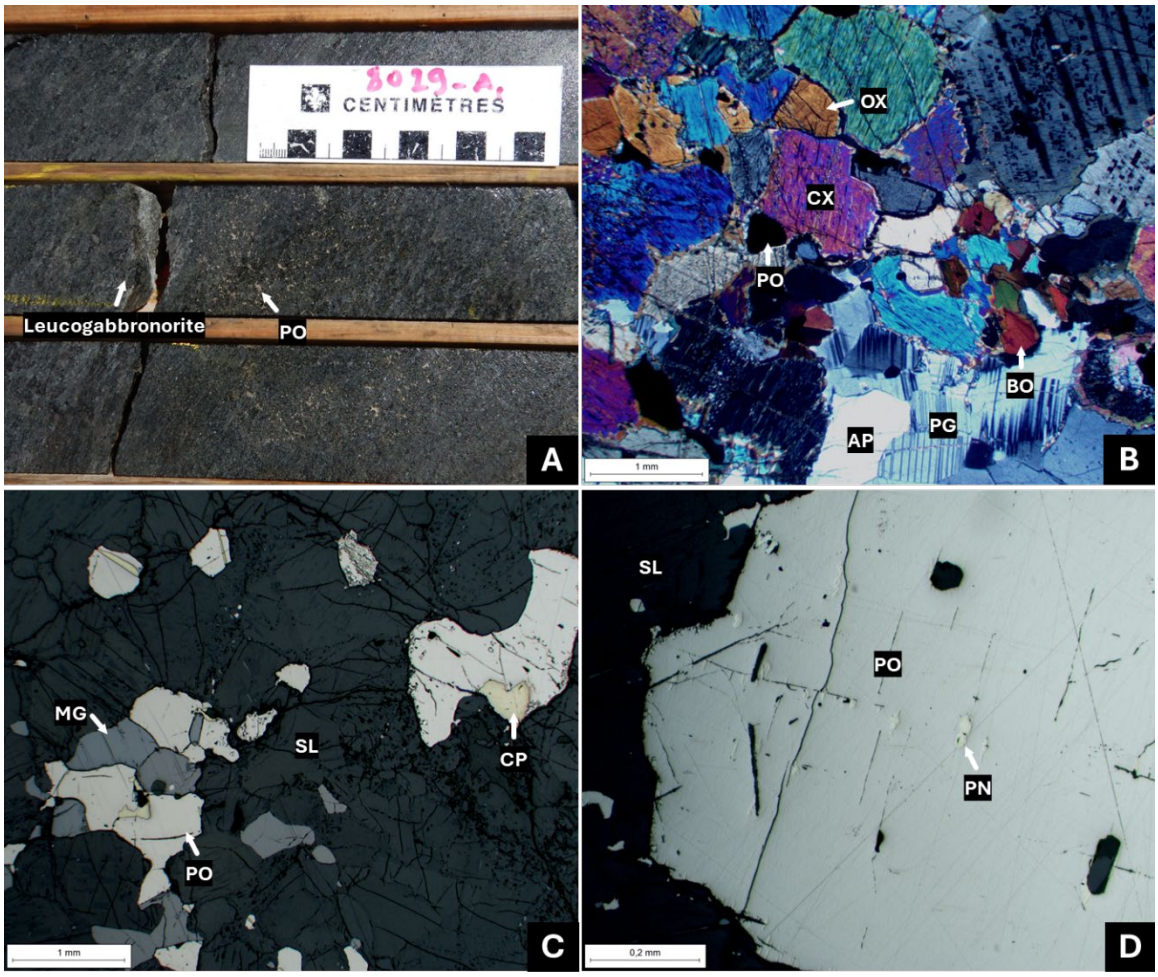


Figure 19 : Photographie (A) et microphotographies (B-D) des sulfures disséminés de l'indice MHY Nord (forage GRL-22-41). (A) Sulfures disséminés encaissés dans la leucogabbronorite. (B) Clinopyroxène et orthopyroxène, entourés de fines couronnes de hornblende verte, dans la gabbronorite hôte des sulfures disséminés (25-OB-8029 A1 ; LP). (C) Amas xénomorphes de magnétite et de pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite dans la leucogabbronorite (25-OB-8029 A1 ; LR). (D) Grains et flammes de pentlandite dans la pyrrhotite (25-OB-8029 A1 ; LR). (Abréviations : AP = apatite ; BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; LP = lumière polarisée ; LR = lumière réfléchie ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

5.4- L'indice Nourricier B

L'indice Nourricier B est situé dans la partie SE du secteur d'étude (figure 3). La stratigraphie de l'indice Nourricier B, telle que définie par les forages NB-97-02 (appendice 5) et NB-97-03 (appendice 6), débute par une leucotroctolite (19 à 21 m), suivie principalement par la gabbronorite en profondeur, qui constitue la lithologie encaissante dominante (Francoeur, 1998). Cette dernière est localement accompagnée de gabbronorite

à olivine (4,73 à 6,35 m d'épaisseur), ainsi que d'intercalations de péridotite (66 cm à 1,81 m d'épaisseur), de monzonite (10 cm à 1 m d'épaisseur) et d'anorthosite (30 à 48 cm d'épaisseur ; Francoeur, 1998). Des niveaux de granite (5 à 5,5 m d'épaisseur) recoupent localement la gabbronorite dans les deux forages.

La minéralisation est principalement constituée de sulfures massifs, d'une épaisseur variant de 15 cm à 1,82 m. À une distance d'au moins 1 m vers le haut et 2,33 m vers le bas, des zones de sulfures semi-massifs sont présentes, dont l'épaisseur varie entre 58 cm et 1 m. Les sulfures disséminés présentent une épaisseur de 20 à 53 cm; ils se situent à 17,46 m en dessous des sulfures massifs dans le forage NB-97-02 et à 14 m au-dessus des sulfures massifs dans le forage NB-97-03. Les sulfures sont principalement associés aux intervalles de gabbronorite, mais également en contact local avec les niveaux de leucotroctolite.

Deux intervalles de sulfures sont disponibles pour l'indice Nourricier B : un intervalle de sulfures semi-massifs (figure 20A) provenant du forage NB-97-02, dans un niveau de sulfures semi-massifs encaissés dans la gabbronorite foliée entre 45,75 et 46,35 m, et un autre intervalle de sulfures massifs (figure 21A) provenant du forage NB-97-03, entre 50,28 et 52,1 m, encaissé dans la gabbronorite foliée.

5.4.1- Sulfures semi-massifs

Les sulfures semi-massifs présentent une couleur rosée noirâtre (figure 20B). La granulométrie est moyenne à grossière et la texture est en filet. La minéralisation est composée d'environ 30 % de pyrrhotite, apparaissant sous forme de masses interconnectées, mesurant entre 1 mm et 4 cm. On observe environ 10 à 15 % de chalcopyrite, en amas xénomorphes de 1 mm à 2 cm dans la pyrrhotite. La pentlandite (<1 %) se présente sous forme de petits grains (< 0,2 mm) xénomorphes dans la pyrrhotite (figure 20D). La magnétite représente jusqu'à 2 %, sous forme de grains aux bordures de la pyrrhotite mesurant entre 1 et 7 mm. La matrice silicatée est composée de plagioclase mauve gris, à environ 30 %, mesurant entre 2 mm et 2 cm, et localement recristallisé. Les

pyroxènes sont complètement remplacés par la hornblende verte (15 %) et la biotite (5 %), mesurant entre 1 mm et 2 cm (figure 20C). Localement, on observe du grenat rouge (<1 %), mesurant jusqu'à 5 mm.

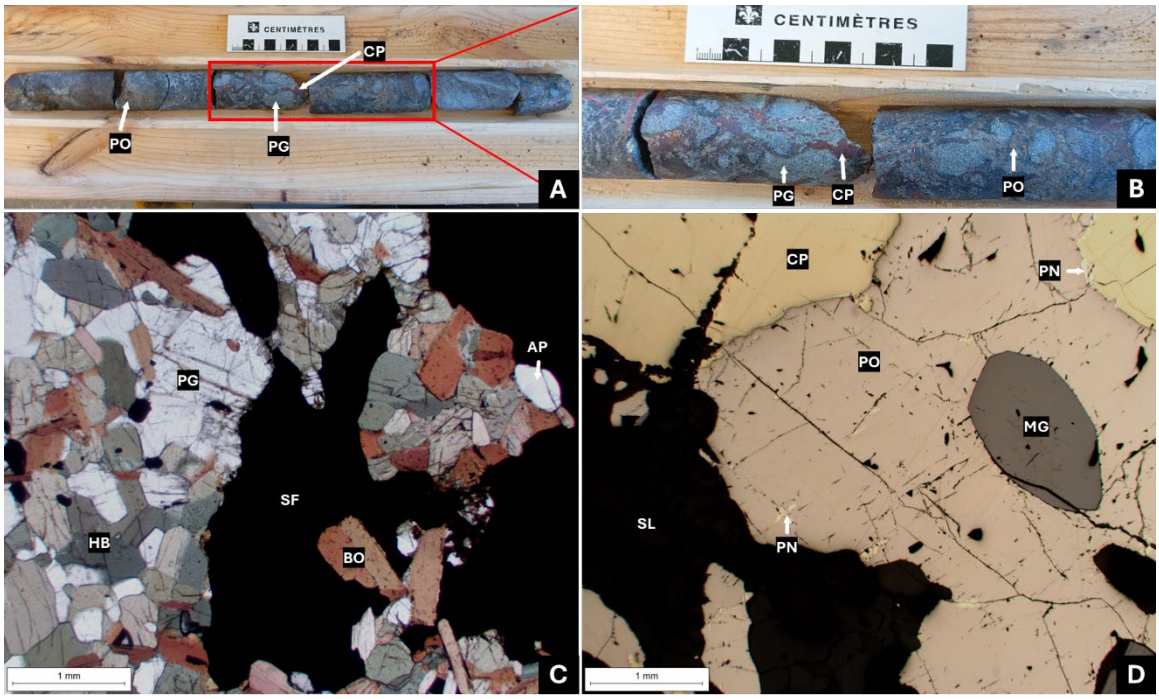


Figure 20 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures semi-massifs de l'indice Nourricier B (forage NB-97-02). (A) Vue générale des sulfures semi-massifs. (B) Vue rapprochée des sulfures semi-massifs montrant une texture en filet. (C) Porphyroclastes de pyroxènes complètement remplacés par la hornblende verte et la biotite dans les sulfures semi-massifs (25-OB-8000 A1 ; LP). (D) Amas xénomorphes de chalcopyrite et de pyrrhotite contenant des grains de magnétite et des flammes/grains de pentlandite (25-OB-8000 A1 ; LR). (Abréviations : BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; HB = hornblende verte ; LP = lumière polarisée ; LR = lumière réfléchie ; MG = magnétite ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

5.4.2- Sulfures massifs

Les sulfures massifs présentent une couleur bronze rosée en surface fraîche (figure 21B), une granulométrie moyenne à grossière et une texture massive. Ils sont constitués d'environ 80 à 85 % de pyrrhotite, xénomorphe, mesurant entre 1 et 7 mm. La chalcopyrite représente environ 5 %, en amas xénomorphes mesurant entre 1 et 5 mm. La pentlandite se présente en exsolutions en flammes ou en grains (jusqu'à 1 mm) dans la pyrrhotite ou aux bordures de la chalcopyrite (figure 21D). On note également la présence de porphyroclastes de plagioclase mauve, plus ou moins recristallisé, représentant environ

2 à 3 %, mesurant entre 1 et 5 mm. Comme dans les sulfures semi-massifs, les pyroxènes sont également totalement remplacés par la hornblende verte (5 %) et la biotite (2 %), mesurant entre 1 mm et 1,5 cm (figure 21C). On trouve également de l'apatite (< 1 %), sous forme de grains subarrondis et fracturés mesurant jusqu'à 0,5 mm.

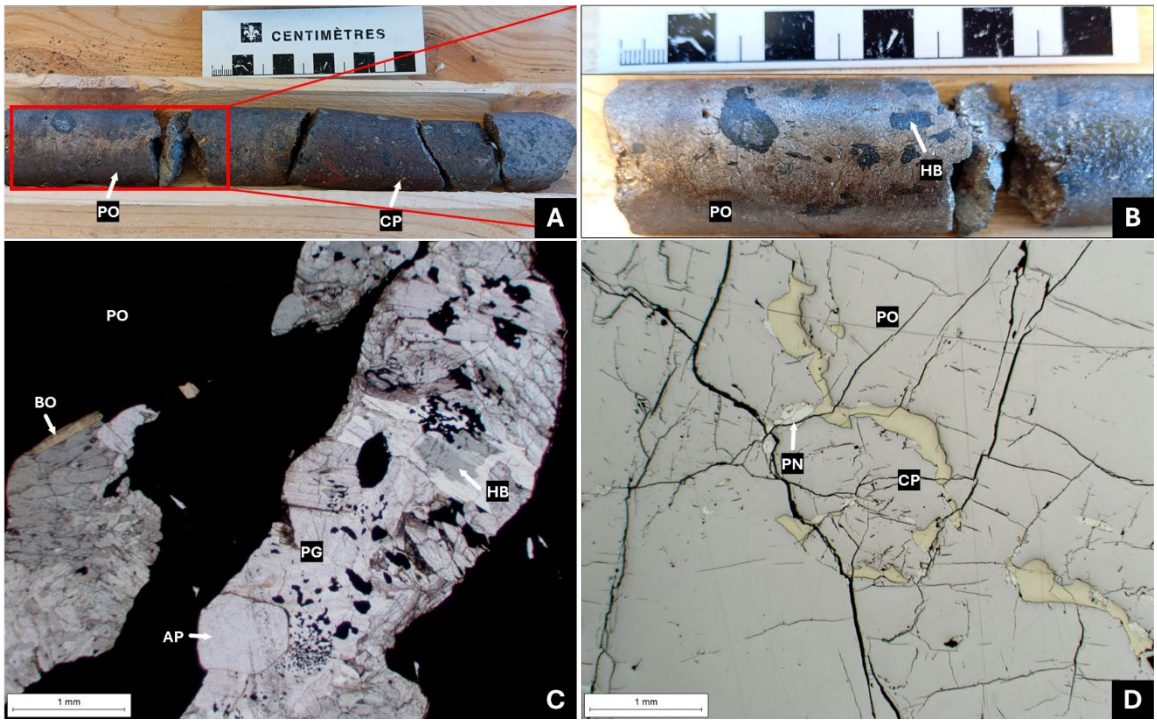


Figure 21: Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures massifs de l'indice Nourricier B (forage NB-97-03). (A) Vue générale des sulfures massifs. (B) Vue rapprochée des sulfures massifs montrant la texture massive des sulfures ainsi que des porphyroclastes de pyroxènes remplacés par la hornblende verte. (C) Porphyroclastes de pyroxènes complètement remplacés par la hornblende verte et la biotite, avec la présence de grains d'apatite (25-OB-8001 A1 ; LP). (D) Matrice de pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite et des grains de pentlandite (25-OB-8001 A1 ; LR). (Abréviations : AP = apatite ; BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; HB = hornblende verte ; LP = lumière polarisée ; LR = lumière réfléchie ; MG = magnétite ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

5.5- Autres lithologies tardives

Des lithologies tardives sont également présentes et documentées dans les forages décrits ci-dessus; elles recoupent la séquence encaissante.

5.5.1- Diorite

La diorite est observée dans tous les forages étudiés, à l'exception de GRL-22-45, et se manifeste à plusieurs reprises sous forme de dykes de 30 cm à 14 m, présentant des contacts nets, parfois diffus, avec les lithologies encaissantes. Elle présente une couleur gris moyen à gris foncé en surface fraîche (figure 22). Sa granulométrie varie de fine à moyenne. Elle présente une texture grenue et une structure généralement foliée. Sa minéralogie est dominée par le plagioclase, à environ 50 à 60 %, de couleur blanche à gris clair, avec des cristaux variant de 1 à 3 mm. Le pyroxène est présent à 5 à 10 %, en cristaux brun verdâtre de 1 à 5 mm. La hornblende représente environ 20 %, sous forme de grains allongés vert foncé, mesurant de 1 à 5 mm. La biotite est présente à environ 10 %, en feuillets brun noirâtre de 1 à 2 mm. Aucune trace de sulfures n'a été observée dans cette lithologie.

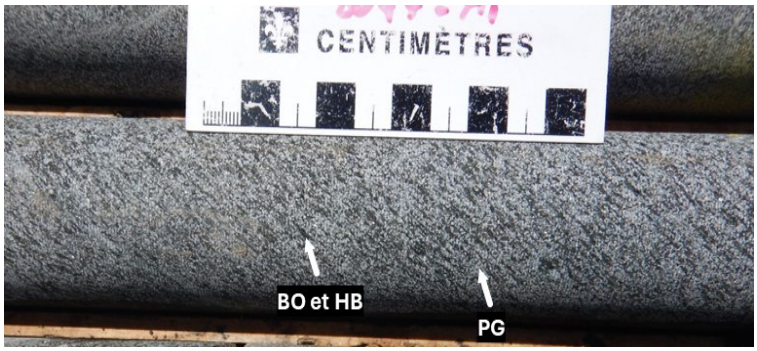


Figure 22 : Photographie de la diorite montrant une structure foliée (forage GRL-22-60). (Abréviations : BO = biotite ; HB = hornblende ; PG = plagioclase).

5.5.2- Syénite

La syénite est observée dans tous les forages étudiés, à l'exception de GRL-22-41, et se manifeste à plusieurs niveaux. Elle se présente sous forme d'injections de 10 cm à 6 m dans les lithologies encaissantes. La syénite présente une couleur rose en surface fraîche (figure 23). Sa granulométrie varie de moyenne à grossière, et la texture est grenue, localement pegmatitique. Elle est composée d'environ 85 % de feldspath potassique rose,

idiomorphe à subidiomorphe, mesurant de 2 mm à 1,5 cm. La biotite noire, en feuillets de 2 mm à 1 cm, représente environ 10 %. Le quartz blanchâtre, xénomorphe, constitue près de 5 % et varie de 2 mm à 1 cm.

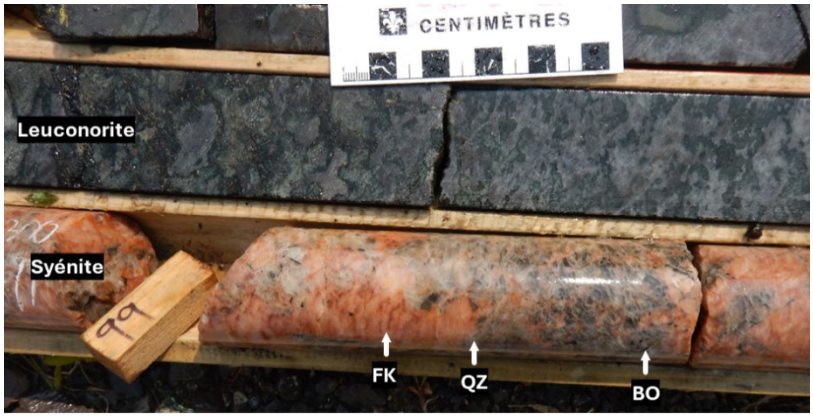


Figure 23 : Photographie de la syénite (forage GRL-22-31). (Abréviations : BO = biotite ; FK = feldspath potassique ; QZ = quartz).

5.6- L'indice Paul

L'indice Paul est situé dans la partie NW du secteur d'étude, dans le contact entre l'unité mPlsj1 et mPlsj3 (figure 3). Le forage PAU-97-01 recoupe principalement une séquence de gabbronorite foliée, incluant plusieurs intervalles de pyroxénite massive d'une épaisseur entre 27 cm et 6 m (Francoeur, 1998). Cette lithologie est localement recoupée par des injections de granite (1,5 à 3,3 m d'épaisseur) et renferme aussi quelques enclaves d'orthogneiss (19 à 45 cm d'épaisseur ; Francoeur, 1998). La minéralisation en sulfures se développe surtout entre 53 et 124 m de profondeur, où elle se trouve associée principalement à la gabbronorite, et parfois en contact avec la pyroxénite massive (Francoeur, 1998). Elle est principalement constituée de sulfures disséminés, d'une épaisseur variant de 3,8 à 15 m. Ils se trouvent entre les différents niveaux de sulfures massifs et semi-massifs. La minéralisation semi-massive présente une épaisseur variant de 8 cm à 1,2 m et se situe au-dessus de la minéralisation massive, à une distance d'au moins 17 m. Les sulfures massifs, quant à eux, présentent une épaisseur variant de 4 à 30 cm (appendice 7).

Le seul intervalle disponible et décrit ici dans ce forage est un intervalle de 0,65 m de sulfures semi-massifs provenant de l'intervalle entre 88,8 et 89,45 m (figure 24A). Ces sulfures sont encaissés dans la gabbronorite foliée. Les sulfures présentent une couleur rosée noirâtre (figure 24B). La granulométrie est moyenne à grossière et la texture est semi-massive. La minéralisation est composée d'environ 40 % de pyrrhotite, apparaissant sous forme de masses xénomorphes et interconnectées, mesurant entre 1 mm et 3 mm. La pentlandite représente entre 2 et 3 %, sous forme de grains xénomorphes (jusqu'à 2 mm) dans la pyrrhotite (figure 24D). On observe également environ 1 % de chalcopyrite en petits amas de 1 à 2 mm dans la pyrrhotite. On trouve également environ 40 % de plagioclase mauve gris, recristallisé, mesurant entre 1 mm et 2,5 cm. Les pyroxènes sont totalement transformés en hornblende verte (5 à 10 %) et en biotite (2 à 5 %), mesurant entre 1 mm et 1 cm (figure 24C). On trouve également jusqu'à 1 % de magnétite, mesurant entre 1 et 3 mm, et jusqu'à 1 % d'apatite en grains subarrondis (< 1 mm). Des porphyroblastes de grenat (< 1 %) ont également été observés.

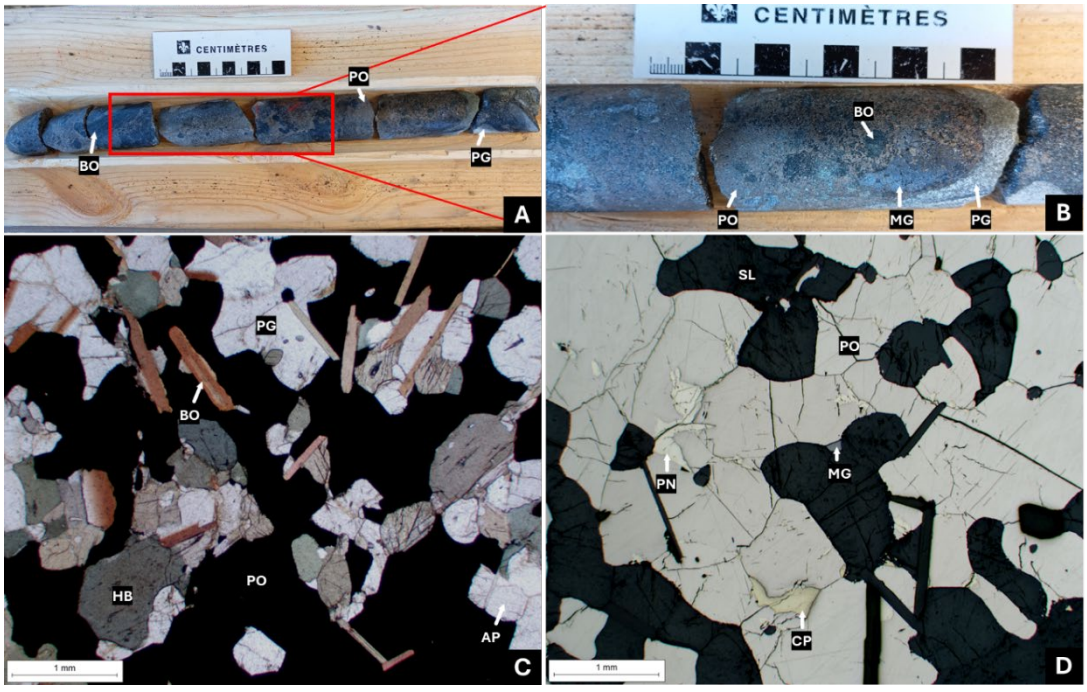


Figure 24 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures semi-massifs de l'indice Paul (forage PAU-97-01). (A) Vue générale des sulfures semi-massifs. (B) Vue rapprochée des sulfures semi-massifs montrant la texture semi-massive et la granulométrie moyenne à grossière. (C) Porphyroclastes de pyroxène sont complètement remplacés par la hornblende verte et la biotite, avec la présence de grains d'apatite dans les sulfures semi-massifs (25-OB-8003 A1 ; LP). (D) Amas xénomorphes de pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite et des grains de pentlandite, un grain de magnétite à la bordure de la pyrrhotite (25-OB-8003 A1 ; LR). (Abréviations : AP = apatite ; BO = biotite ; CP = chalcopyrite ; HB = hornblende verte ; LP = lumière polarisée ; LR = lumière réfléchie ; MG = magnétite ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

5.7- L'indice Manouane Est

L'indice Manouane Est est situé dans la partie nord du secteur d'étude au sein de l'unité mPlsj3 (figure 3). Le forage MAN-97-04 recoupe, du sommet vers la base du trou, une séquence lithologique composée principalement de roches à olivine, incluant la (leuco)troctolite (30 cm à 16,4 m d'épaisseur), la dunite (83 cm à 15,16 m d'épaisseur) et la péridotite (80 cm à 1,62 m d'épaisseur), avec un niveau d'anorthosite (71 cm d'épaisseur), puis un passage vers la gabbronorite avec des intervalles de pyroxénite (16,8 m d'épaisseur) en fin de sondage, et une zone de gneiss (5,63 m d'épaisseur ; Francoeur, 1998). Plusieurs zones présentent une minéralisation sulfurée, se manifestant principalement sous forme massive, avec une épaisseur variant de 4 cm à 1,66 m, encaissée dans la gabbronorite. Les sulfures semi-massifs sont observés dans différentes lithologies, incluant la gabbronorite (8 à 40 cm d'épaisseur), la dunite (42 cm), la troctolite (8 cm) et la péridotite (1 cm). Les sulfures disséminés présentent une épaisseur de 46 cm dans la gabbronorite (situés à 11,21 m en dessous des sulfures massifs), de 82 cm dans la troctolite (à 22,34 m au-dessus des sulfures massifs) et de 78 cm dans la dunite, situés à 48 m au-dessus des sulfures massifs (Francoeur, 1998; appendice 8).

Le seul intervalle disponible dans ce forage est un intervalle de 0,36 m de sulfures massifs (figure 25A), provenant de l'intervalle compris entre 59,08 et 60,74 m. Ces sulfures sont encaissés dans la gabbronorite foliée. Les sulfures présentent une couleur bronze dorée noirâtre en surface fraîche, une granulométrie moyenne à grossière et une texture massive (figure 25B). Ils sont constitués d'environ 75 à 80 % de pyrrhotite, mesurant entre 1 et 7 mm, d'environ 2 à 3 % de pentlandite en grains (< 1 mm) dans la pyrrhotite et aux bordures de la chalcopyrite, et d'environ 1 % de chalcopyrite, en amas xénomorphes mesurant jusqu'à 1 mm au sein de la pyrrhotite (figure 25D). On note également la présence d'environ 15 % de plagioclase mauve à blanchâtre, xénomorphe, mesurant entre 1 mm et 2 cm. Le clinopyroxène représente environ 1 %, en grains xénomorphes mesurant entre 1 mm et 1 cm (figure 25C), essentiellement transformé en biotite (3 %) et en hornblende verte (2 %). Localement, on observe des porphyroblastes de grenat rouge xénomorphes, mesurant entre 1 mm et 1 cm.

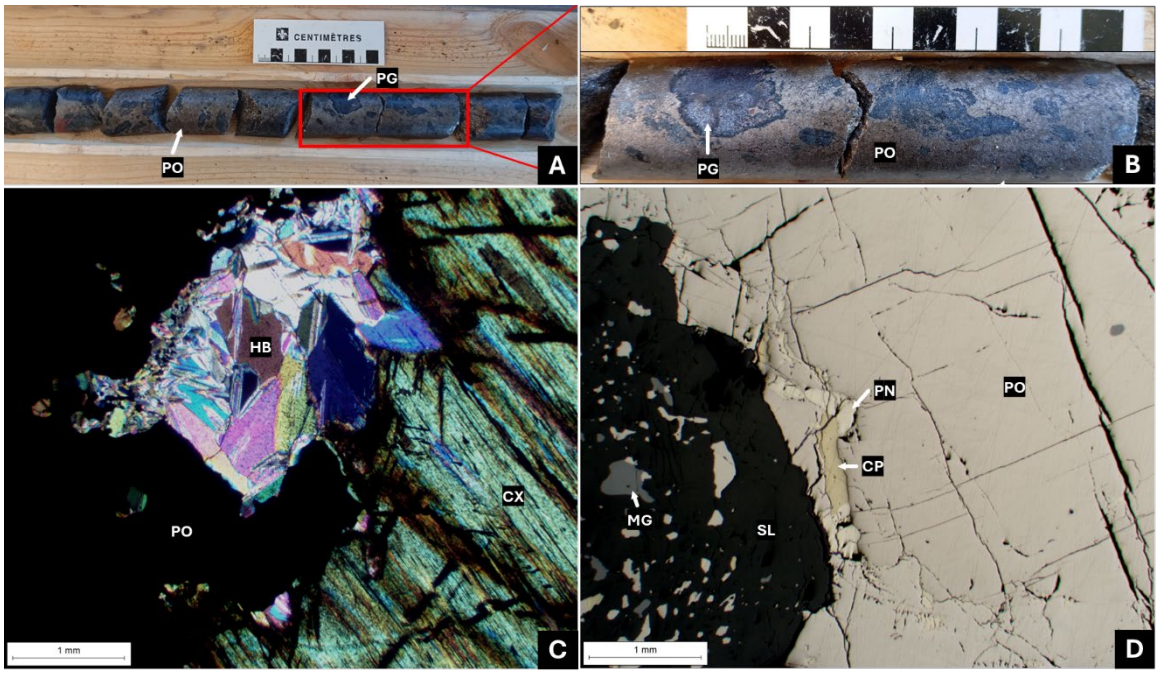


Figure 25 : Photographies (A, B) et microphotographies (C, D) des sulfures massifs de l'indice Manouane Est (forage MAN-97-04). (A) Vue générale des sulfures massifs. (B) Vue rapprochée des sulfures massifs montrant des porphyroclastes de plagioclase avec des couronnes de la hornblende verte. (C) Grains de clinopyroxène partiellement transformés en hornblende verte dans les sulfures massifs (25-OB-8002 A1 ; LP). (D) Pyrrhotite contenant des amas de chalcopyrite et des grains de pentlandite (25-OB-8002 A1 ; LR). (Abréviations : CP = chalcopyrite ; HB = hornblende verte ; LP = lumière polarisée ; LR = lumière réfléchie ; MG = magnétite ; PG = plagioclase ; PO = pyrrhotite ; PN = pentlandite ; SL = silicates).

6- Géochimie

6.1- Lithogéochimie

6.1.1- Méthodes analytiques

Vingt-neuf échantillons ont été sélectionnés pour des analyses de la roche totale des éléments majeurs, mineurs et traces. Cela comprend 6 leuconorites, 2 norites, 2 gabbronorites, 1 leucogabbronorite à oxydes-apatite, 1 mélagabbronorite à oxydes, 2 leucotroctolites, 3 leucotroctolites à oxydes-apatite, 1 webstérite, 6 sulfures massifs, 4 sulfures semi-massifs, et 1 sulfures disséminés.

Les analyses ont été effectuées au laboratoire Actlabs, Ancaster (Ontario, Canada). Les échantillons ont été d'abord broyés, puis fondus avec borates de lithium. Après fusion, la perle obtenue a été digérée dans une solution d'acide nitrique diluée.

L'analyse a été réalisée par ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry*) pour les éléments majeurs, et par ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*) pour les éléments traces. Certains éléments traces (Ag, Cd, Cu, Li, Mo, Ni, S, Te, Zn) ont été analysé par TD-MS (*Thermal Desorption-Mass Spectrometry*). Les éléments As, Au, Br, Ir, Cr, Sb, Sc et Se ont été analysés par activation neutronique (INAA ; *Instrumental Neutron Activation Analysis*). Pour les sulfures dont le Se était sous la limite de détection par INAA, une réanalyse par eau régale (AR-MS; *Aqua Regia - Mass Spectrometry*) a été réalisée. Le Pt, Pd et Au ont été analysés par FA-MS (*Fire Asssay - Mass Spectrometry*). Les analyses des roches incluant les aspects liés au QAQC, sont disponibles en annexes 2 et 3 respectivement.

Les éléments du groupe du platine (ÉGP ; Os, Ir, Ru, Rh, Pt et Pd), et l'Au provenant de 14 échantillons de sulfures massifs, semi-massifs et disséminés, issus de 7 indices étudiés dans le cadre de cette étude, ont été analysés au LabMaTer (UQAC). Les ÉGP ont été préconcentrés par pyroanalyse au nickel-soufre (Ni-*sulphide fire assay* ; NiS-FA), puis coprécipités avec le Te et analysés en solution par ICP-MS selon la méthode décrite par Savard et al. (2010). Des matériaux de référence (KPT, WMS-1a, OKUM, et OREAS 243) ont été analysés en parallèle avec les échantillons afin de contrôler la qualité des données. Les résultats obtenus pour les matériaux de référence sont conformes aux valeurs certifiées (précision < 25 % ; justesse < 15 %), compte tenu des incertitudes liées aux valeurs certifiées et mesurées à des niveaux ultra-traces (ppb : annexe 4). Les résultats relatifs aux 14 échantillons analysés dans le cadre de cette étude (secteur de Lac à Paul), ainsi qu'aux 6 échantillons analysés pour les ÉGP provenant des indices de la marge ouest de la SALSJ (McNickel, Yenevac et Mistass), sont présentés en annexe 4.

6.1.2- Les oxydes majeurs

Les roches analysées ont été rapportées dans des diagrammes de corrélation des oxydes majeurs (Al_2O_3, CaO, Na_2O, K_2O, MgO, FeOt, TiO_2 et P_2O_5 pd. %) en fonction du SiO_2 (pd. % ; figure 26). Les valeurs de FeOt rapportées ont été calculées à partir des concentrations en FeO et Fe_2O_3 selon la formule $FeOt = FeO + (Fe_2O_3 \times 0{,}8998)$. Pour les

oxydes dont la concentration est inférieure à la limite de détection (LOD), une valeur équivalente à 0,5 fois la limite de détection a été attribuée.

Des analyses géochimiques du plagioclase, de l'olivine, de l'orthopyroxène, du clinopyroxène, de la hornblende, de la biotite, de l'ilménite, de la magnétite, de l'apatite, du spinelle et de la pyrrhotite, déterminés par la microsonde éléctronique, ont été intégrées de la littérature (Grant, 2020; Huss, 2002) aux diagrammes. Ceci permet d'évaluer l'impact de chaque minéral sur la composition chimique totale des roches, confirmant aussi les observations faites au microscope (pétrographie).

Les leucogabbronorites, les leucogabbronorites à oxydes–apatite et les mélagabbronorites à oxydes se répartissent entre les pôles plagioclase, clinopyroxène et orthopyroxène, avec un regroupement marqué vers le pôle hornblende. Ces lithologies se caractérisent par des teneurs élevées en SiO_2 (35,9 – 48,3 pd. %), CaO (12,4 – 13,2 pd. %; figure 26A), Al_2O_3 (4,1 – 15,5 pd. %; figure 26B), MgO (6,8 – 11,7 pd. %; figure 26C) et FeOt (8,7 – 14,8 pd. %; figure 26D), cohérentes avec la dominance du plagioclase et du clinopyroxène. Les teneurs en Na_2O (0,6 – 2,9 pd. % ; figure 26E) sont intermédiaires, tandis que le K_2O demeure très faible (0,07 – 0,6 pd. % ; figure 26F), en accord avec la rareté de la biotite. Les concentrations en TiO_2 varient généralement entre 0,8 et 7,9 pd. % (figure 26G), mais atteignent 14,4 pd. % dans la mélagabbronorite à oxydes, traduisant une forte proportion d'oxydes Fe–Ti. Les teneurs en P_2O_5 (0,5 – 2,6 pd. % ; figure 26H) reflètent des proportions variables d'apatite.

Les leuconorites et norites se distribuent principalement entre les pôles plagioclase, orthopyroxène et hornblende. Leurs teneurs en SiO_2 varient de 45,2 à 54,9 pd. %. Les faibles teneurs en CaO (5,1 – 9,0 pd. % ; figure 26A) indiquent l'absence ou la très faible abondance de clinopyroxène. Les teneurs en MgO (2,4 – 12,3 pd. % ; figure 26C), FeOt (5,7 – 14,6 pd. % ; figure 26D) et K_2O (0,5 – 1,2 pd. % ; figure 26F) restent modérées à faibles. À l'inverse, les enrichissements en Al_2O_3 (11,9 – 21,6 pd. % ; figure 26B) et Na_2O (2,1 – 4,5 pd. % ; figure 26E) traduisent la proportion importante de plagioclase. Les teneurs en TiO_2 (0,6 – 6,7 pd. % ; figure 26G) et P_2O_5 (0,1 – 0,4 pd. % ; figure 26H) correspondent à des proportions généralement faibles d'oxydes Fe–Ti et d'apatite.

La webstérite à sulfures disséminés se distingue par une faible teneur en SiO_2 (37,7 pd. %) et des teneurs élevées en CaO (11,8 pd. % ; figure 26A) et FeOt (26,8 pd. % ; figure 26D), cohérentes avec l'abondance de clinopyroxène. Elle est pauvre en Al_2O_3 (5,3 pd. % ; figure 26B), Na_2O (0,8 pd. % ; figure 26E) et K_2O (0,14 pd. % ; figure 26F), ce qui reflète la faible proportion de plagioclase et de biotite. Les teneurs en MgO (10,8 pd. % ; figure 26C) et TiO_2 (5,4 pd. % ; figure 26G) sont intermédiaires, tandis que le P_2O_5 reste faible (0,8 pd. % ; figure 26H), indiquant une faible abondance d'apatite.

Les leucotroctolites et leucotroctolites à oxydes–apatite se situent entre les pôles plagioclase, olivine et hornblende. Elles présentent des teneurs en SiO_2 comprises entre 45,2 et 54,9 pd. %. Les teneurs en Al_2O_3 (13,3 – 15,3 pd. % ; figure 26B) et Na_2O (2,3 – 3,1 pd. % ; figure 26E) confirment l'importance du plagioclase, tandis que les teneurs élevées en MgO (5,9 – 11,1 pd. % ; figure 26C) témoignent de l'abondance d'olivine. Les teneurs en CaO (6,3 – 11,3 pd. % ; figure 26A) sont également élevées, en lien avec le développement de couronnes de hornblende verte autour de l'olivine. Les enrichissements en FeOt (14,8 – 18,6 pd. % ; figure 26D), TiO_2 (1,8 – 9,6 pd. % ; figure 26G) et P_2O_5 (0,2 – 5 pd. % ; figure 26H) traduisent la présence notable d'oxydes Fe–Ti et d'apatite.

Les sulfures massifs et semi-massifs évoluent vers la pyrrhotite, et présentent de faibles concentrations en SiO_2 (1,5 – 13,7 pd. % et 23,5 – 37,2 pd. % respectivement) et hautes teneurs en FeOt (87,2 – 94,7 pd. % et 35,8 – 56,5 pd. %). Ils sont très faibles en TiO_2 (0,1 – 1,1 pd. % et 1,1 – 3,3 pd. % respectivement ; figure 26G) et faibles en P_2O_5 (0,09 – 0,5 pd. % et 0,2 – 1 pd. %, respectivement ; figure 26H), indiquant des proportions très limitées d'ilménite et d'apatite. Les faibles teneurs en Al_2O_3 (0,4 – 1,8 pd. % et 3,8 – 5,1 pd. % respectivement ; figure 26B), en Na_2O (0,02 – 0,3 pd. % et 0,6 – 1,8 pd. % respectivement ; figure 26E), en MgO (0,4 – 3,9 pd. % et 3,7 – 12,3 pd. % respectivement ; figure 26C), en CaO (0,4 – 1,8 pd. % et 3,8 – 5,1 pd. % respectivement ; figure 26A) et en K_2O (0,05 – 0,1 pd. % et 0,3 – 2,8 pd. % respectivement ; figure 26F) reflètent la rareté des silicates (plagioclase, pyroxènes, hornblende, biotite) dans ces échantillons dominés par les phases sulfurées.

Les sulfures disséminés sont distribués entre les pôles plagioclase, hornblende et clinopyroxène, et montrent des concentrations moyennes en SiO_2 (37,7 – 48,7 pd. %), en

Al_2O_3 (5,3 – 10,8 pd. %; figure 26B), et en Na_2O (0,8 – 2 pd. % ; figure 26E) reflétant les proportions élevées de plagioclase, élevés en FeOt (12,7 – 26,8 pd. % ; figure 26D) et en CaO (11,8 – 13,7 pd. % ; figure 26A) reflètent à la fois la présence de minéraux ferromagnésiens silicatés et l'apport direct des phases sulfurées riches en fer, notamment la pyrrhotite. Les faibles concentrations en MgO (8,8 – 10,8 pd. % ; figure 26C) et en K_2O (0,14 – 0,3 pd. % ; figure 26F) reflétant les faibles proportions de la biotite. Les faibles teneurs en TiO_2 (2,4 – 5,4 pd. % ; figure 26G) et P_2O_5 (0,1 – 0,8 pd. % ; figure 26H) indiquent enfin des proportions limitées d'oxydes de Fe–Ti et d'apatite.

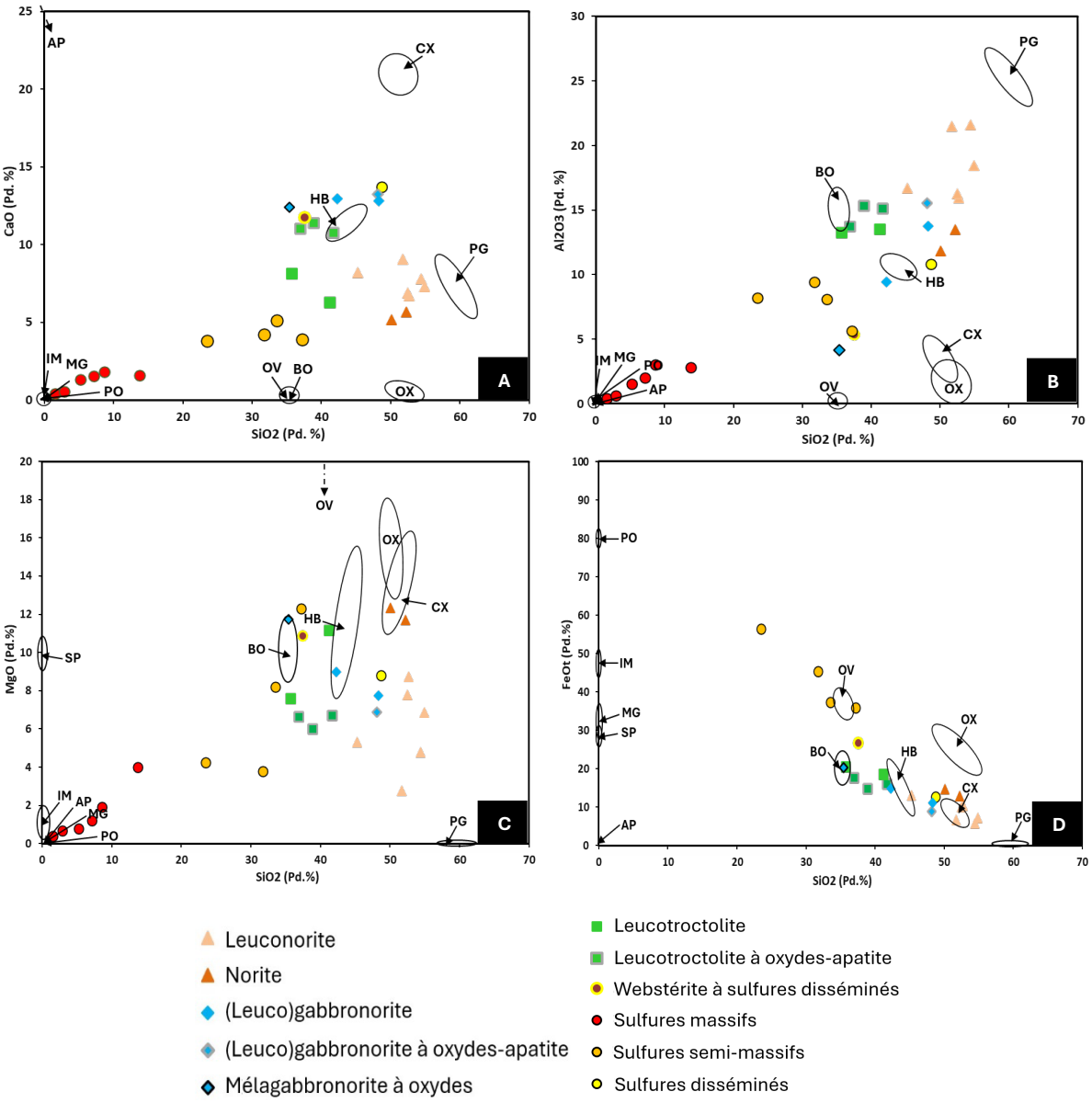


Figure 26 : Diagrammes binaires de Harker. A) CaO vs SiO_2 ; B) Al_2O_3 vs SiO_2 ; C) MgO vs SiO_2 ; D) FeOt vs SiO_2. Les analyses des pôles minéralogiques par microsonde proviennent des données de Grant, 2020 et Huss, 2002. Les sulfures massifs n'ont pas été représentés dans la figure D, le fer étant exprimé en FeOt plutôt qu'en FeS. (Abréviations : AP : Apatite ; Bo : Biotite ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; MG : Magnétite ; OV : Olivine ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; SP : Spinelle).

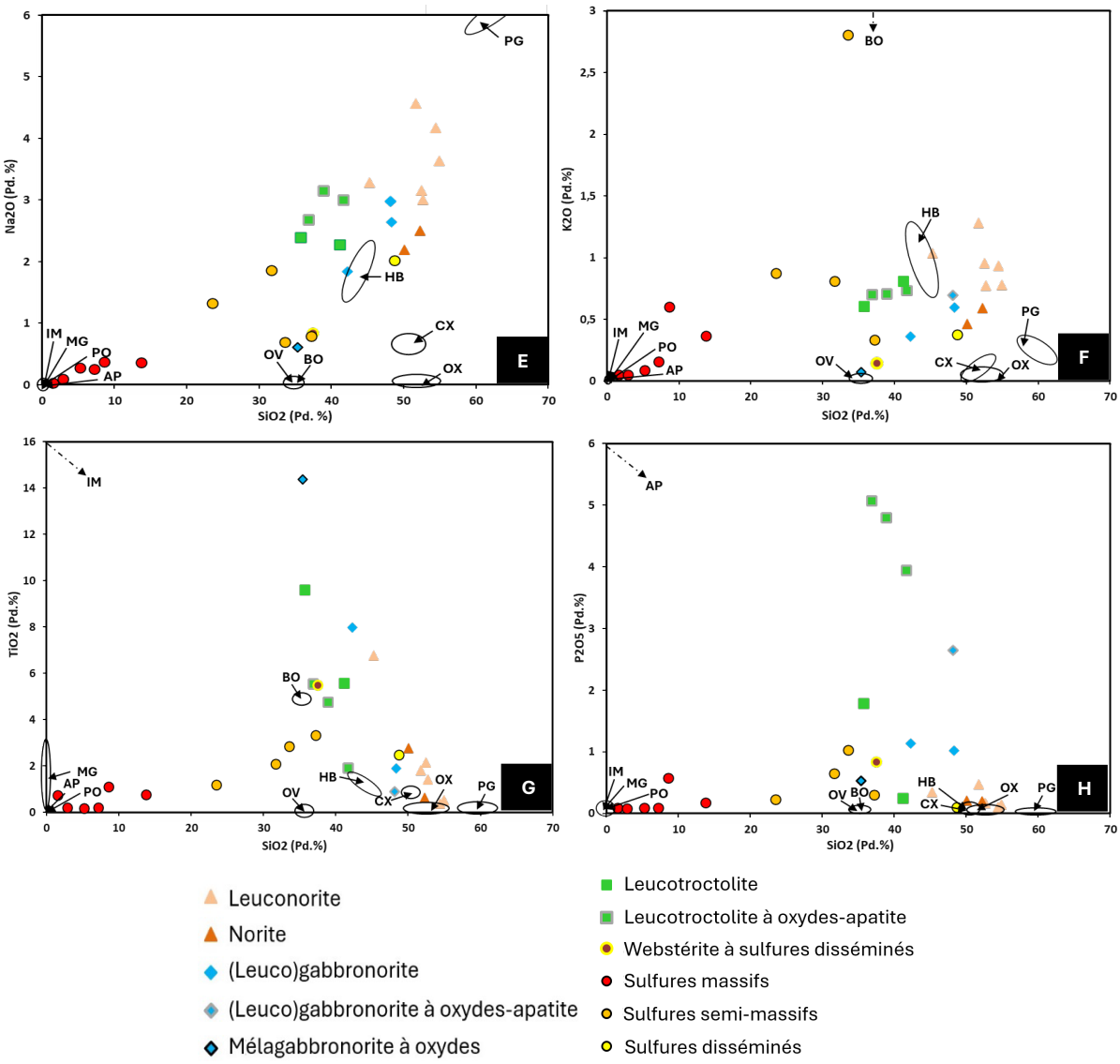


Figure 26 (suite) : Diagrammes binaires de Harker. E) Na_2O vs SiO_2 ; F) K_2O vs SiO_2 ; G) TiO_2 vs SiO_2 ; H) P_2O_5 vs SiO_2. Les analyses des pôles minéralogiques par microsonde proviennent des données de Grant, 2020 et Huss, 2002. (Abréviations : AP : Apatite ; Bo : Biotite ; HB : Hornblende ; IM : Ilménite ; MG : Magnétite ; OV : Olivine ; PG : Plagioclase ; PO : Pyrrhotite ; SP : Spinelle).

6.1.3- Les éléments traces

6.1.3.1- Le spectre des éléments de terres rares (ETR) et multi-éléments

Dans la figure 27, les concentrations en éléments des terres rares (ETR) sont normalisées à la chondrite de McDonough et Sun (1995), et les valeurs non normalisées de P_2O_5 (en pd. %) ont été incluses afin d'évaluer l'effet de l'apatite sur les spectres des ETR. Dans la figure 28, les diagrammes multi-éléments présentent des valeurs normalisées à la composition du manteau primitif selon Sun et McDonough (1989). Pour les éléments dont les concentrations sont inférieures à la limite de détection (LOD), une valeur équivalente à 0,5 fois la LOD a été utilisée. La limite de détection est également indiquée dans les diagrammes.

Puisque les lithologies projetées sont des cumulats, leurs spectres en terres rares sont surtout contrôlés par les minéraux qui les composent (plagioclase, pyroxène, olivine, apatite, etc.). Pour cette raison, elles sont présentées dans les diagrammes, à partir des données LA-ICP-MS obtenues dans cette étude (Annexe 10). Les échantillons sont présentés en fonction de leur composition minéralogique, c'est-à-dire comme lithologies à pyroxène dominant (leuconorites, norites, leucogabbronorites, leucogabbronorites à oxydes-apatite, mélagabbronorites à oxydes et webstérites) ou à olivine dominante (leucotroctolites, leucotroctolites à oxydes-apatite). Le champ de l'anorthosite utilisé dans ce rapport provient des analyses réalisées au cours de l'été 2024 dans le cadre de ce projet de maîtrise (Bounour et al., 2025).

Les leucotroctolites et les leucotroctolites à oxydes-apatite sont enrichies en P_2O_5 (0,2 à 5 pd. %) et montrent donc un enrichissement en ETR par rapport aux anorthosites (figure 27A). Les leucotroctolites à oxydes-apatite (3,9 à 5 pd. % P_2O_5) présentent des concentrations en ETR plus élevées que les leucotroctolites (0,2 à 1,7 pd. % P_2O_5), ce qui confirme l'influence de l'apatite, qui concentre les ETR. Ces lithologies montrent aussi un enrichissement en terres rares légères (LETR) par rapport aux terres rares lourdes (HETR), avec une médiane du rapport $(La/Yb)_N$ de 6,1 pour les leucotroctolites à oxydes-apatite et de 4,01 pour les leucotroctolites. Pour les anomalies en Eu, les leucotroctolites présentent une absence à une faible anomalie positive (médiane de Eu/Eu* = 1,4) reflétant la présence

de plagioclase et l'absence d'apatite. Les leucotroctolites à oxydes-apatite montrent une très faible anomalie négative en Eu (médiane Eu/Eu* = 0,87), ce qui reflète l'effet de l'apatite (5 à 6 % modale), caractérisée par une anomalie négative en Eu.

Dans le diagramme multi-élément, les leucotroctolites et les leucotroctolites à oxydes-apatite présentent des concentrations élevées en Ba et en Sr, bien que moins marquées que dans les anorthosites (figure 28A), ce qui indique une forte présence de plagioclase. Elles montrent aussi des concentrations très élevées en P, ce qui confirme une abondance importante d'apatite. De plus, les concentrations élevées en Ti et en Nb indiquent la présence de l'ilménite.

Les leuconorites, norites, leucogabbronorites, leucogabbronorites à oxydes-apatite et la mélagabbronorite à oxydes se caractérisent en générale par un enrichissement en ETR par rapport aux anorthosites (figure 27B), expliqué par la présence de clinopyroxène et/ou d'orthopyroxène dans ces lithologies, qui concentrent ces éléments. Les lithologies contenant de l'apatite présentent des concentrations en ETR plus élevées. Ces lithologies anorthositiques montrent un enrichissement en LETR par rapport aux HETR, avec une médiane du rapport $(La/Yb)_N$ de 3,4 pour les (leuco)norites, de 1,8 pour les leucogabbronorites et la mélagabbronorite à oxydes, avec un rapport plus élevé (4,8) pour les leucogabbronorites à oxydes-apatite, indiquant l'influence de l'apatite qui est plus enrichie en LETR. Les leucogabbronorites, les leucogabbronorites à oxydes-apatite et la mélagabbronorite à oxydes montrent également un faible enrichissement en ETR par rapport aux leuconorites et les norites montrent l'effet du clinopyroxène dominant dans ces lithologies, qui concentre plus des ETR par rapport à l'orthopyroxène.

Les leuconorites et les norites présentent une faible anomalie positive en Eu, avec une médiane Eu/Eu* = 2,1. Cette faible anomalie positive reflète un effet combiné du plagioclase (très riche en Eu) et des orthopyroxènes (pauvres en Eu). Concernant les leucogabbronorites, les leucogabbronorites à oxydes-apatite et la mélagabbronorite à oxydes, elles présentent une absence à une très faible anomalie négative en Eu (médiane Eu/Eu* comprise entre 0,7 et 0,9), ce qui s'explique par l'effet combiné de l'apatite, des pyroxènes (orthopyroxène et clinopyroxène ; anomalie négative) et des plagioclases (anomalie positive).

Dans le diagramme multi-élément, les leuconorites, leucogabbronorites et leucogabbronorites à oxydes-apatite se caractérisent par des concentrations élevées en Ba et en Sr par rapport aux norites et à la mélagabbronorite à oxydes (figure 28B), ce qui indique des proportions modales en plagioclase plus élevées. Les leucogabbronorites à oxydes-apatite montrent des concentrations en P très élevées par rapport aux autres lithologies, reflétant l'influence de l'apatite. La mélagabbronorite à oxydes montre des concentrations élevées en Ti et en Nb, confirmant la présence de fortes proportions d'ilménite.

La webstérite à sulfures disséminés se distingue par un enrichissement en ETR par rapport à l'anorthosite (figure 27B). Cette signature géochimique s'explique par la dominance du clinopyroxène, qui permet une incorporation accrue des ETR, en particulier des HETR, qui se concentrent davantage dans les pyroxènes. La webstérite se caractérise par une pente positive entre les LETR ($(La/Sm)_N = 0,6$) et une pente négative entre les HETR ($(Gd/Yb)_N = 2,04$), ainsi qu'une faible anomalie négative en Eu ($(Eu/Eu^*) = 0,83$), ce qui est caractéristique du clinopyroxène.

Dans le diagramme multi-élément, elle se caractérise par de faibles concentrations en Ba, K, Sr et en Eu (figure 28B), reflétant les faibles proportions de plagioclase dans cette lithologie. Elle présente également des concentrations moyennes en P ($P_2O_5 = 0,8$ Pd. %), confirmant la présence d'une faible quantité d'apatite. Les faibles concentrations en Nb et en Ti indiquent la faible proportion d'ilménite.

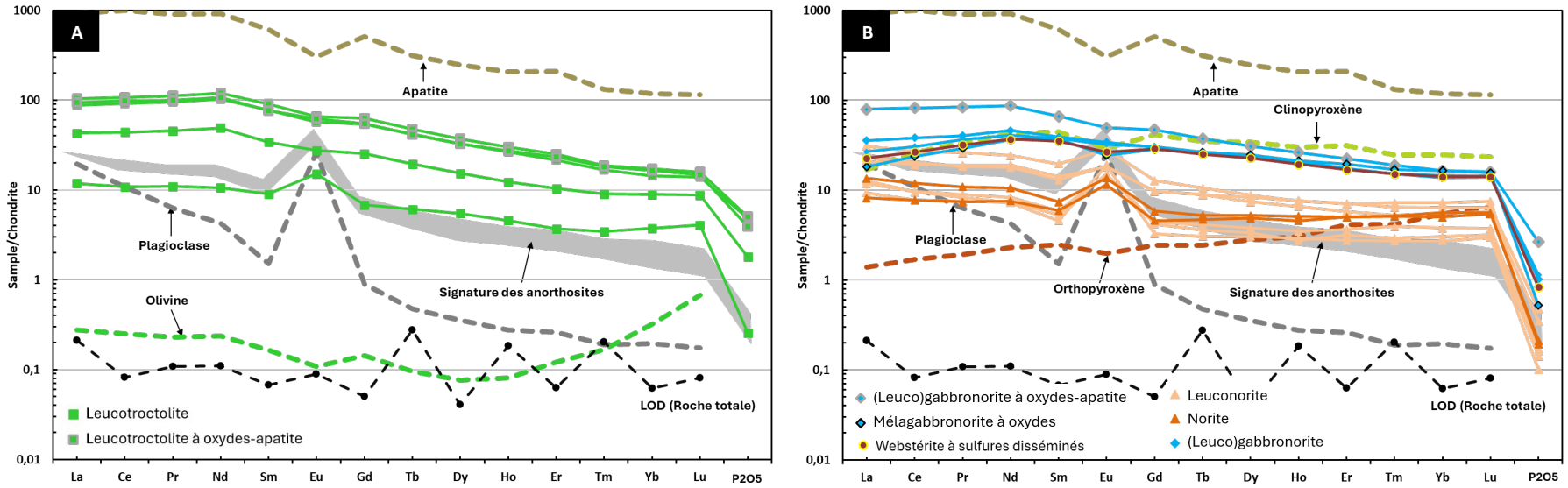


Figure 27 : Compositions en ÉTR de différentes lithologies, normalisées à la chondrite de McDonough et Sun (1995), avec P_2O_5 (en % poids), afin d'évaluer le contrôle de l'apatite sur les ÉTR. A) Les leucotroctolites et les leucotroctolites à oxydes-apatite ; B) Les (leuco)norites, les (leuco)gabbronorites, les (leuco)gabbronorites à oxydes-apatite, la mélagabbronorite à oxydes et la webstérite. La composition des minéraux (apatite, olivine, pyroxènes et plagioclase) est issue de la présente étude et correspond aux valeurs moyennes de tous les minéraux analysés par LA-ICP-MS dans les différentes lithologies de Lac à Paul. (LOD : limite de détection).

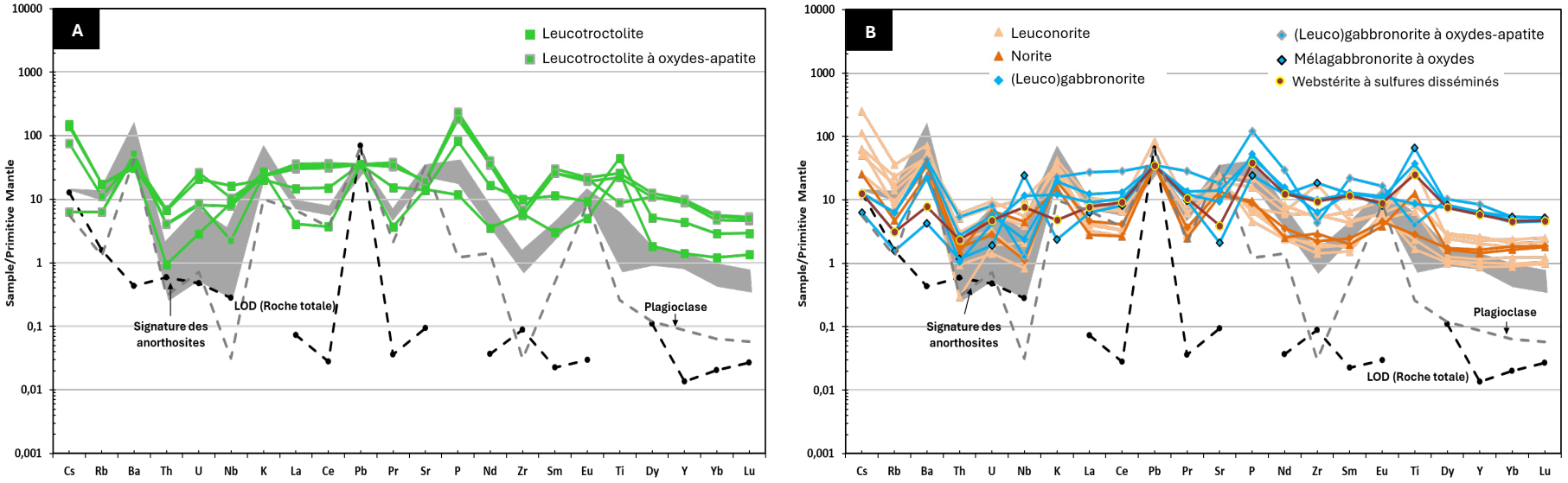


Figure 28 : Diagrammes multi-éléments des compositions globales de différentes lithologies normalisées au manteau primitif de Sun et McDonough (1989). A) Les leucotroctolites et les leucotroctolites à oxydes-apatite ; B) Les (leuco)norites, les (leuco)gabbronorites, les (leuco)gabbronorites à oxydes-apatite, la mélagabbronorite à oxydes et la webstérite. La composition de plagioclase est issue de la présente étude et correspond aux valeurs moyennes de tous les plagioclases analysés par LA-ICP-MS dans les différentes lithologies de Lac à Paul. (LOD : limite de détection). Seul le profil du plagioclase est représenté pour clarifier les données.

6.1.3.2- Les éléments chalcophiles

Afin de tester la représentativité des échantillons et des données pour chaque indice étudié dans la région de Lac à Paul, une compilation a été réalisée avec d'autres données issues de la littérature (figure 29), provenant de la maîtrise de Huss (2002) et des analyses de carottes de forage effectuées par d'autres compagnies (Francoeur, 1998; Meneux et al., 2023), ont été ajoutées à ces diagrammes à des fins de comparaison. Pour chaque indice, un champ représentatif a été défini. Les données ont été projetées sur le diagramme Ni vs Cu (ppm), puisque la majorité des analyses de soufre dans le rapport de la compagnie dépasse la limite maximale de la méthode analytique.

Pour comparaison, les indices McNickel, Lac Yenevac et Mistass dans la marge ouest de SALSJ ont été considérés (Girard et Fournier, 2008; Hassen Ali et al., 2023; Ouellet, 2014; Turcotte, 2014). Ils correspondent à une minéralisation de Ni-Cu encaissée dans des anorthosites gabbroïques, des leucogabbros et localement des bandes de pyroxénite (Block et al., 2010; Clark et Hébert, 1998; Girard et Fournier, 2008; Hassen Ali et al., 2023; Ouellet, 2014; Tremblay et al., 2011). L'indice du Lac Kénogami (Dumont et Gagno) a également été retenu pour la comparaison (Vaillancourt, 2001). Il est associé à un dyke gabbronoritique de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie, située au sud de la SALSJ, et présente un âge comparable à celui de cette dernière (1,15 Ga ; Hébert et Lacoste, 1998; Vaillancourt, 2001).

Les résultats montrent que les échantillons de cette étude sont représentatifs des indices locaux (figure 29), et leurs compositions sont comparables à celles rapportées par Huss (2002), confirmant la cohérence régionale des données. Globalement, leurs rapports Ni/Cu sont proches de 1, bien que quelques échantillons des indices Nourricier A et B sont plus enrichis en Cu (Ni/Cu = 0,04 à 0,16). Les échantillons de Paul, Manouane, Discovery Zone, MHY Nord et MHY Ap ont tendance à être plus pauvres en Cu qu'en Ni (Ni/Cu ≤ 18,4). Les indices de la marge ouest (McNickel, Lac Yenevac et Mistass) présentent des compositions similaires à celles des indices de Lac à Paul, avec des rapports Ni/Cu variant entre 0,7 et 14,5 (une tendance d'être plus pauvres en Cu qu'en Ni). L'indice

du Lac Kénogami (marge sud de SALSJ) montre également des rapports Ni/Cu autours de 1 (0,5 à 5,5).

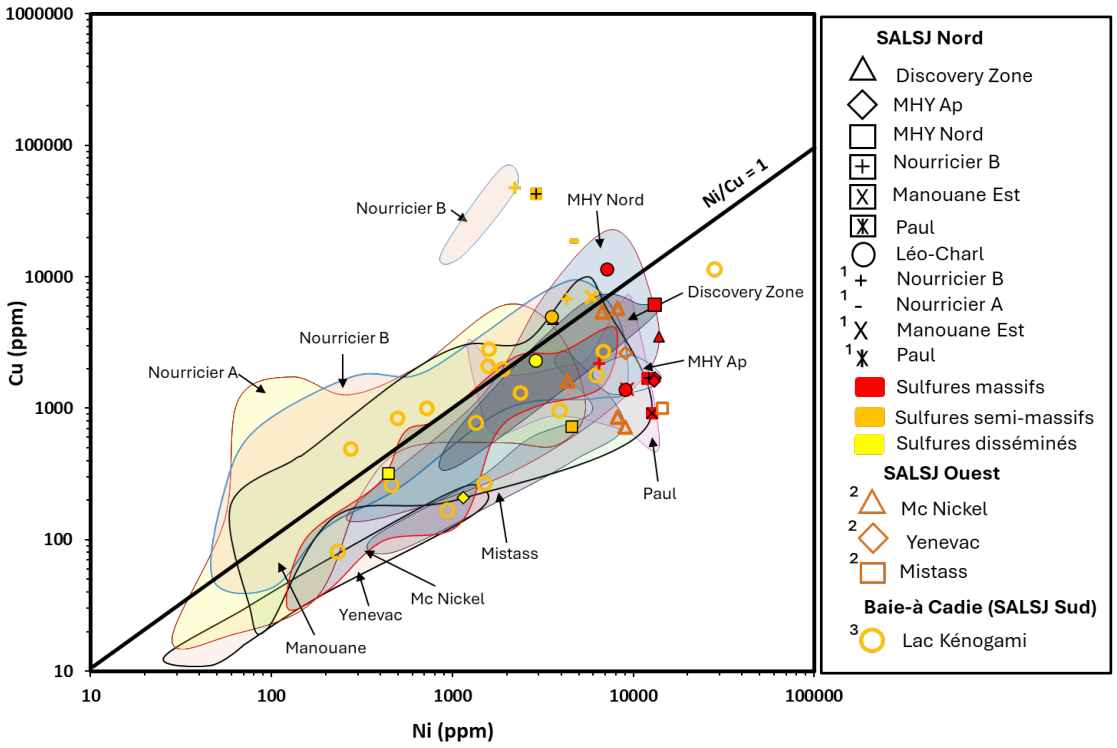


Figure 29 : Diagramme Ni vs Cu montrant la répartition des teneurs en Ni et Cu (ppm) dans les différents indices de Ni-Cu du secteur de Lac à Paul et illustrant la représentativité des échantillons étudiés (symboles pleins), ainsi qu'une similarité avec les analyses reportées par [1]Huss (2002) (symboles vides). Les indices de la marge ouest ([2]Hassen Ali et al., 2023) et du Lac Kénogami ([3]Vaillancourt, 2001) ont été également ajoutés pour comparaison. Les champs sont dessinés à partir des données des carottes de forages de la littérature pour les indices de SALSJ Nord et Ouest (Francoeur, 1998; Girard et Fournier, 2008; Meneux et al., 2023; Ouellet, 2014; Turcotte, 2014).

Afin de mieux comprendre la distribution des métaux dans les échantillons étudiés, les concentrations en Ni, Co et Cu sont présentées dans des diagrammes binaires en fonction du soufre total (figure 30). Cela permet de montrer l'influence des sulfures sur l'enrichissement en métaux chalcophiles. Les variations des concentrations en éléments chalcophiles montrent une corrélation positive marquée entre le Ni, le Cu, le Co (ppm) et le soufre (pd. %). De manière générale, les sulfures massifs présentent les concentrations les plus élevées en Ni (7 170 – 13 800 ppm), en Cu (920 – 6 210 ppm), en Co (910 – 1 410 ppm) et en S (11 – 38,1 pd. %). Les sulfures massifs des différents indices affichent des compositions très similaires en Ni et en Co, tandis que les concentrations en Cu sont nettement plus élevées à Léo-Charl, MHY Nord et à Discovery Zone (3 490 – 6 210 ppm).

Les sulfures semi-massifs, représentés ici par les indices MHY, Discovery Zone, Nourricier A et B, Paul, Léo-Charl et Manouane, sont les plus riches en Cu et présentent des concentrations en Ni et en Co intermédiaires. Généralement, les concentrations en Ni (2 200 – 12 000 ppm) sont similaires entre les indices, avec des valeurs plus élevées observées au niveau de l'indice Paul, et celles en Co (293 – 930 ppm), dont les valeurs les plus élevées sont observées aux indices Paul et Discovery Zone. Les concentrations en Cu (730 – 47 300 ppm) sont plus variables entre les indices. Les indices Nourricier A et B montrent un enrichissement exceptionnel en Cu (6 800 – 47 300 ppm). Les concentrations en soufre sont comprises entre 8,7 et 22,8 pd. %.

Les sulfures disséminés dans la gabbronorite à MHY Nord et dans la webstérite à MHY Ap et dans l'orthopyroxénite à Léo-Charl présentent des concentrations plus faibles par rapport aux faciès massifs et semi-massifs. Les concentrations sont plus élevées à Léo-Charl (2 880 ppm Ni, 2 310 ppm Cu, 323 ppm Co et 10,8 pd. % S) et à MHY Ap (1 150 ppm Ni, 705 ppm Cu, 210 ppm Co et 5,4 pd. % S) que dans les sulfures disséminés de MHY Nord (375 ppm Ni, 342 ppm Cu, 93 ppm Co et 1,5 pd. % S).

Les sulfures massifs de la marge ouest (McNickel, Yenevac et Mistass) présentent des concentrations similaires à celles des indices de Lac à Paul, avec des concentrations en Ni (4 340 – 14 550 ppm), en Co (615 – 1 185 ppm), en Cu (716 – 5 740 ppm), et en S (28,8 – 37,5 pd. %). Les sulfures disséminés et massifs des indices du Lac Kénogami présentent des concentrations en Ni (231 – 28 106 ppm) et Cu (81 – 11 400 ppm) plus élevées par rapport aux indices de Lac à Paul mais des concentrations similaires en Co (52 – 1 091 ppm), et en S (0,1 – 28,2 pd. %).

Pour les échantillons de cette étude pauvres en sulfures (< 5 % proportion modale), les compositions sont généralement similaires. Ils présentent des teneurs faibles en Ni (30,9 – 190 ppm), en Cu (27,2 – 133 ppm) et en Co (21 – 88 ppm), ainsi que les teneurs en soufre (0,02 – 0,61 pd. %).

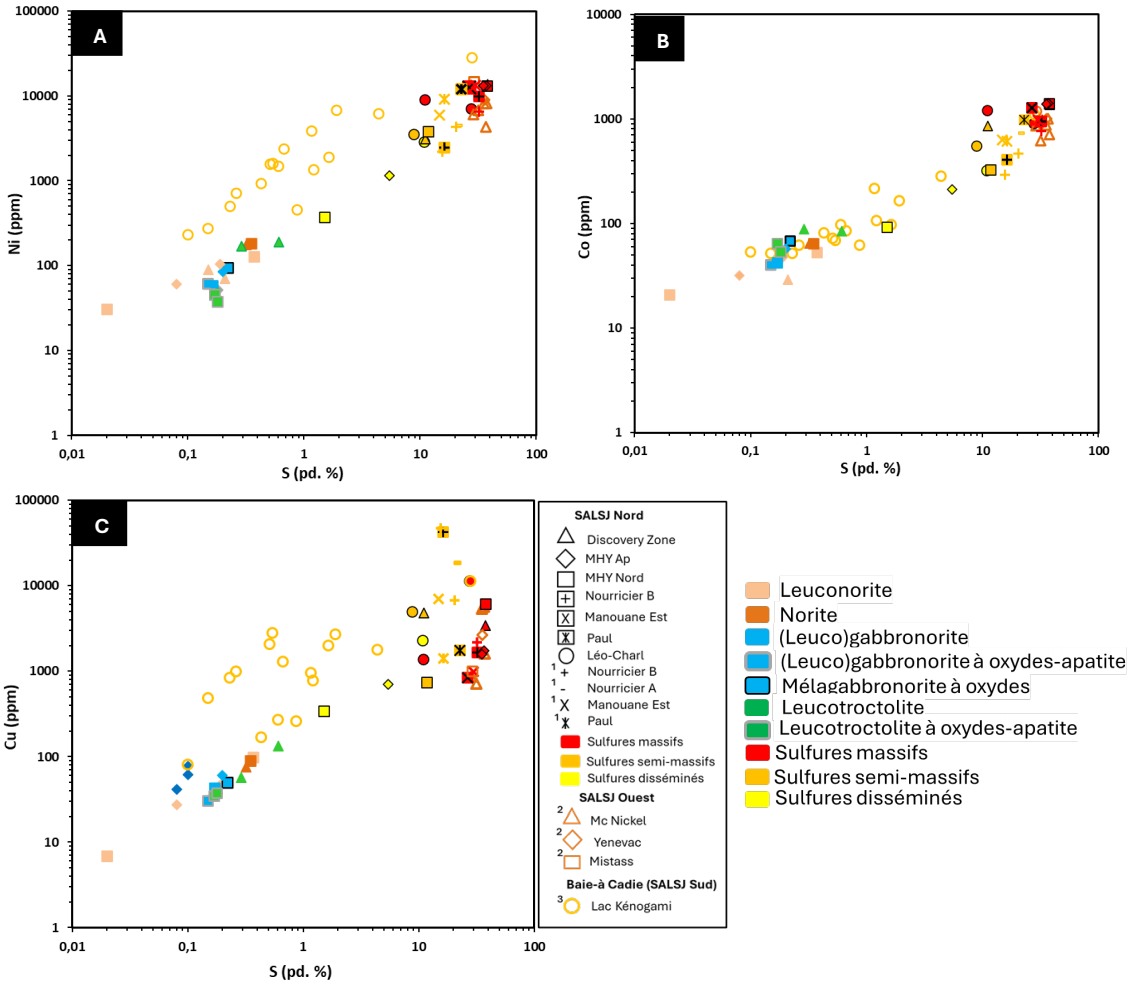


Figure 30 : Diagrammes binaires d'éléments chalcophiles en fonction du soufre pour les lithologies anorthositiques et sulfures. A) Ni (ppm) vs S (pd. %); B) Co (ppm) vs S (pd. %); C) Cu (ppm) vs S (pd. %). Les données sur les sulfures des indices de Lac à Paul (SALSJ Nord) proviennent de cette étude (symboles pleins) et de [1]Huss (2002; symboles vides). Les indices de la marge ouest ([2]Hassen Ali et al., 2023) et du Lac Kénogami ([3]Vaillancourt, 2001) ont été également ajoutés pour comparaison.

Le diagramme Pd + Pt (ppm) vs S (pd. % ; figure 31) globalement présente une corrélation positive entre la concentration en S et l'enrichissement en Pd + Pt. Les sulfures massifs présentent les teneurs les plus élevées en Pd + Pt, avec des valeurs comprises entre 0,02 et 0,1 ppm pour les indices de la marge Nord de SALSJ. Les sulfures semi-massifs montrent des teneurs intermédiaires comprises entre 0,01 et 0,08 ppm, avec une valeur plus élevée (0,25 ppm) à l'indice Nourricier B, tandis que les sulfures disséminés affichent les valeurs les plus faibles entre 0,0005 et 0,03 ppm.

En comparaison, les sulfures massifs de la marge ouest sont légèrement plus pauvres en Pd + Pt que ceux du secteur de Lac à Paul (figure 31). Ils présentent des valeurs comprises entre 0,02 et 0,05 ppm pour l'indice McNickel, d'environ 0,04 ppm pour l'indice Yenevac, et d'environ 0,01 ppm pour l'indice Mistass. Les sulfures disséminés et massifs des indices du Lac Kénogami sont toutefois plus riches que ceux de la marge ouest et du secteur de Lac à Paul, avec des valeurs comprises entre 0,01 et 1,10 ppm, ce qui pourrait refléter un facteur R plus élevé.

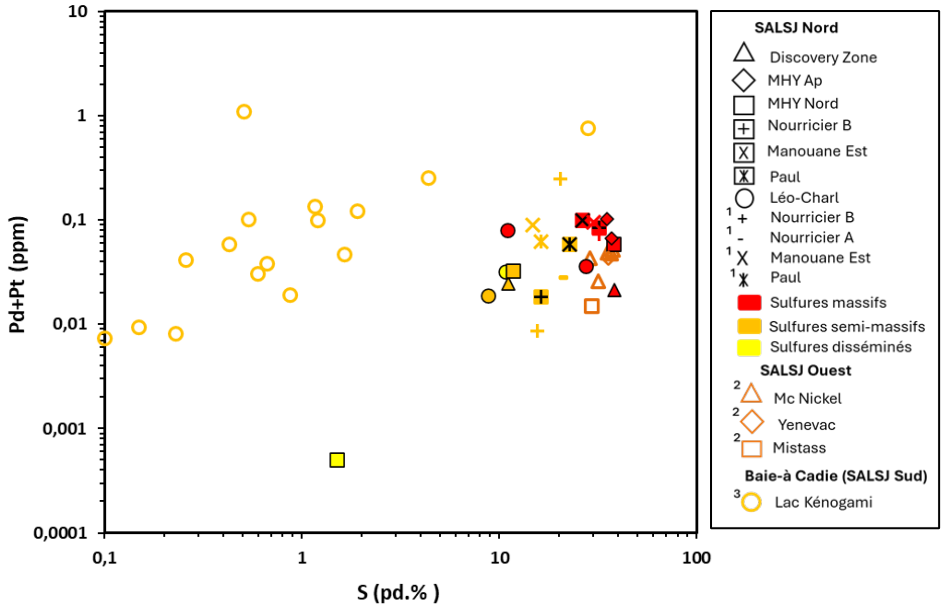


Figure 31 : Diagramme binaire de Pt + Pd (ppm) vs S (pd. %) pour les sulfures. Les données sur les sulfures des indices de Lac à Paul (SALSJ Nord) proviennent de cette étude (symboles pleins) et de [1]Huss (2002; symboles vides). Les indices de la marge ouest ([2]Hassen Ali et al., 2023 et cette étude) et du Lac Kénogami ([3]Vaillancourt, 2001) ont été également ajoutés pour comparaison.

Les diagrammes des teneurs en Ni, Cu, Au et ÉGP normalisées aux valeurs du manteau primitif (Barnes, 1999; McDonough et Sun, 1995; figure 32) constituent un outil pétrologique important pour retracer la genèse des minéralisations de Ni-Cu et d'ÉGP. Les éléments y sont disposés selon un ordre de compatibilité décroissant, allant des éléments à comportement compatible (situés à gauche : Ni, Os, Ir, Ru, Rh) aux éléments incompatibles (situés à droite : Pt, Pd, Au, Cu) pendant le fractionnement de sulfures (Barnes et al., 1988). Afin de pouvoir comparer des échantillons contenant différentes quantités de sulfures, une

normalisation à 100 % sulfure a été effectuée en utilisant la formule proposée par Barnes et Lightfoot (2005).

Les profils des différents types de sulfures dans les différents indices du secteur de Lac à Paul sont similaires (figure 32), et présentent des tendances proches de celles de Huss (2002). Les sulfures se caractérisent par un appauvrissement en ÉGP par rapport au Ni et au Cu, avec une forme relativement concave vers le haut. Ils présentent des anomalies négatives en Pt et en Au et parfois une faible anomalie positive en Pt (ex. l'indice Nourricer B) qu'est probablement un effet de pépite (minéraux du groupe de Platine, or). Les valeurs normalisées (à 100 % de sulfures, puis normalisées au manteau primitif) varient de 0,3 et 10,0 pour les éléments du groupe du platine de type iridium (IÉGP ; Ir, Os, Ru), entre 0,01 et 130,1 pour les éléments du groupe du platine de type Platine (PÉGP ; Pt, Pd, Au), entre 2,5 et 11,2 pour le Ni et atteignent jusqu'à 33542,4 pour le Cu.

Une différence est observée dans la forme des profils des sulfures provenant des indices de la marge ouest de la SALSJ (McNickel, Yenevac et Mistass ; cette étude ; Hassen Ali et al., 2023). Ces occurrences montrent un appauvrissement significatif en en Os, Ir, Ru et Rh (valeurs normalisées : 0,03 – 1,9) par rapport aux autres indices de Lac à Paul, sans anomalies négatives importantes en Pt et Au.

En comparaison, les indices du Lac Kénogami sont également appauvris en ÉGP par rapport au Ni et au Cu, mais présentent des teneurs encore plus élevées (d'un ordre de grandeur) que celles observées dans les indices du secteur de Lac à Paul et de la marge ouest. Ils se caractérisent également par une anomalie négative en Ir (Vaillancourt, 2001).

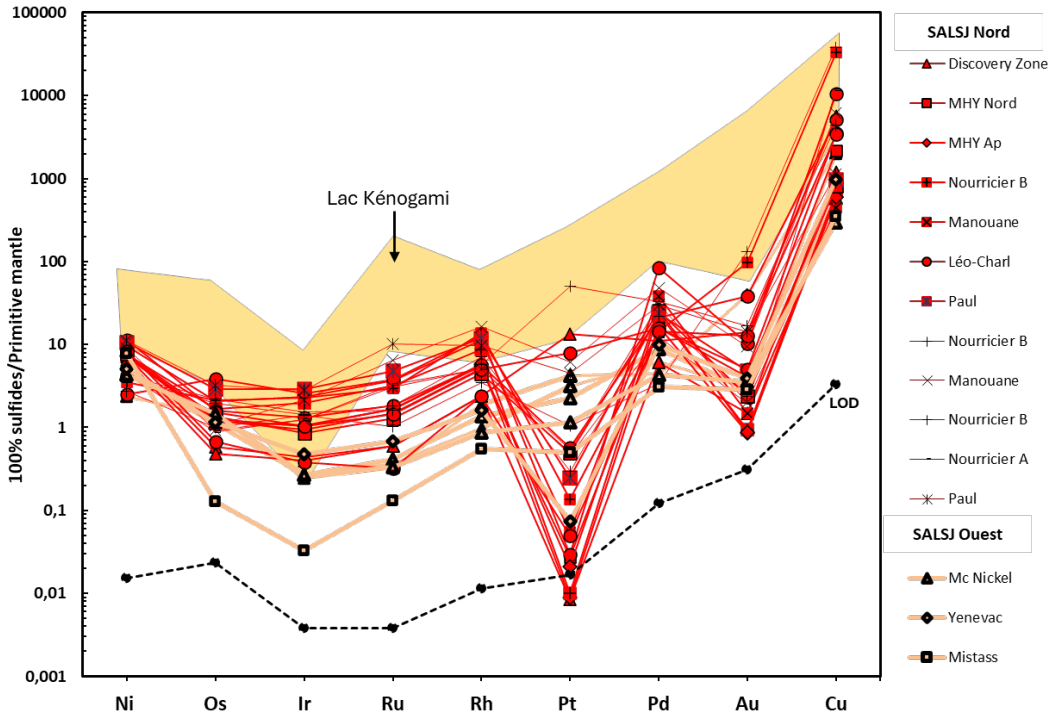


Figure 32 : Diagramme des teneurs en Ni, Cu, Au et ÉGP, normalisées à 100 % sulfure et normalisées aux valeurs du manteau primitif (McDonough et Sun, 1995 ; Barnes, 1999), des minéralisations Ni-Cu du secteur de Lac à Paul (SALSJ Nord), McNickel, Yenevac et Mistass (SALSJ Ouest). Les données des minéralisations de la SALSJ Nord (symboles vides) proviennent de Huss (2002). Les données des indices du Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001) ont été également ajoutés pour comparaison. LOD = limite de détection.

De manière générale, l'ensemble des profils suggère que les sulfures des indices du secteur de Lac à Paul, ainsi que ceux des indices de la marge ouest de la SALSJ, se sont formés à partir d'un magma silicaté appauvri en ÉGP. Cet appauvrissement résulte probablement d'une ségrégation précoce du liquide sulfuré à partir du magma silicaté en profondeur (Barnes et Lightfoot, 2005).

Le ratio S/Se est un paramètre couramment utilisé pour déterminer la source du soufre. Il est particulièrement utile dans les contextes où une assimilation de roches régionales est envisagée, puisque les roches sédimentaires présentent généralement des teneurs en Se plus faibles que celles des roches dérivées du manteau (Barnes, 1999). Ainsi, une contamination par des sédiments provenant des roches encaissantes se traduit par une augmentation notable des rapports S/Se dans le magma contaminé (Queffurus et Barnes, 2015). Les valeurs de Pt et de Pd projetées dans le diagramme S/Se vs Pt + Pd sont

exprimées en ppm et normalisées à 100 % sulfures, selon la formule proposée par Barnes et Lightfoot (2005).

Le diagramme S/Se vs. Pd + Pt (ppm pour 100 % sulfures; figure 33) montre des rapports S/Se plus élevés que ceux du manteau (2850 - 4350) pour la plupart des indices, ce qui est typique des gisements Ni-Cu (Queffurus et Barnes, 2015). Les indices du secteur de Lac à Paul (SALSJ Nord) présentent les rapports S/Se les plus élevés (275 000 - 11 000) ainsi que les concentrations en Pt + Pd les plus faibles (0,28 et 0,02 ppm, normalisées à 100 % sulfures). Les sulfures semi-massifs montrent des rapports S/Se compris entre 32 400 et 12 666 et des concentrations en Pt + Pd entre 0,48 et 0,02 ppm (à 100 % sulfures), et les sulfures disséminés présentent des rapports S/Se compris entre 18 750 et 17 704 et des concentrations en Pt + Pd entre 0,11 et 0,01 ppm (à 100 % sulfures). Les indices situés sur la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Yenevac ; Hassen Ali et al., 2023) présentent des rapports S/Se un peu plus faibles que ceux de Lac à Paul, compris entre 11 833 et 14 760 et des concentrations en Pt + Pd également peu plus faibles comprises entre 0,03 et 0,05 ppm (à 100 % sulfures). L'indice Mistass présent un rapport S/Se très élevé (S/Se = 41 857) et des concentrations en Pt + Pd plus faibles (0,02 ppm à 100 % sulfures), indiquant un apport important de soufre crustal et un appauvrissement en ÉGP et Se.

En comparaison, les indices du Lac Kénogami se caractérise par des rapports S/Se plus faibles que ceux des indices de la SALSJ, avec des valeurs comprises entre 714 et 14 333, certains échantillons présentant même des valeurs inférieures à celles du manteau, probablement liées à une perte de soufre par altération (Vaillancourt, 2001). Il présente également des concentrations en Pt + Pd plus élevées, comprises entre 0,9 et 76,5 ppm (à 100 % sulfures).

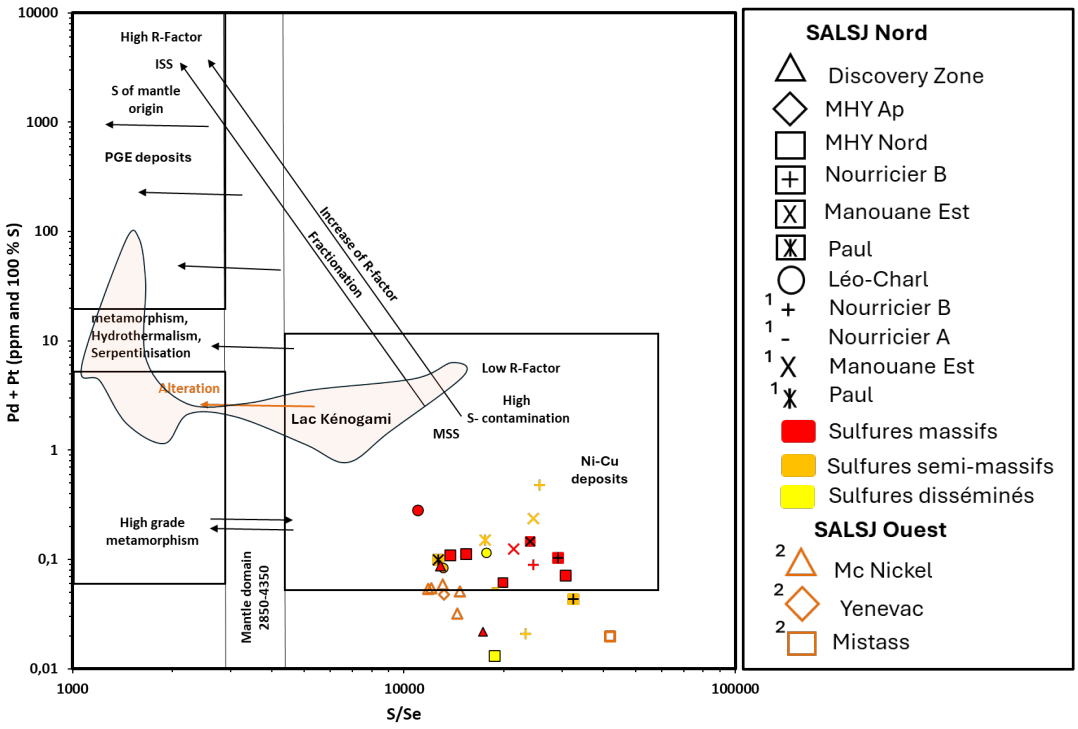


Figure 33 : Diagramme de Pt+Pd (ppm) normalisé à 100 % sulfures (S) en fonction du rapport S/Se pour les indices Ni-Cu du secteur de Lac à Paul (SALSJ Nord), comparés à d'autres indices Ni-Cu-Co (diagramme modifié d'après Queffurus et Barnes, 2015). Les données sur les sulfures proviennent de cette étude (symboles pleins), de [1]Huss (2002 ; symboles vides) pour Lac à Paul (SALSJ Nord), de [2]Hassen Ali et al. (2023) et de cette étude pour McNickel, Yenevac et Mistass (SALSJ Ouest). Le champ de données provient de Vaillancourt (2001) pour le Lac Kénogami.

6.2- Chimie minérale

6.2.1- Méthodologie

6.2.1.1- Analyse des plagioclases par fluorescence X portative (XRFp)

La XRFp est une technique de plus en plus utilisée par l'industrie pour appuyer la cartographie et l'exploration. Durant l'été 2025, des analyses XRFp ont été réalisées afin d'évaluer la variation de la calcicité des plagioclases dans les faciès anorthositiques ainsi que dans les sulfures des forages étudiés. Sur les échantillons de roches anorthositiques et de sulfures prélevés, entre trois et six grains de plagioclase d'une taille égale ou supérieure à 3 mm (correspondant au diamètre de la fenêtre d'analyse du XRFp) ont été analysés en se basant sur la méthode proposée par Tondoh (2021) et Mercier (2022) basée sur le ratio Ca/Si, comme décrit dans Bounour et al. (2025) et Katako Diyoyo et al. (2024). Afin

d’assurer l’intégrité et la fiabilité des données, des matériaux de référence de plagioclase (échantillons 20AT04 et RTSD26B), fournis par le laboratoire LabMaTer (déterminés par LA-ICP-MS), ont été systématiquement analysés au début et à la fin de chaque session d’analyse. Cette procédure permet d’évaluer rigoureusement la qualité des résultats (précision et justesse), garantit la stabilité des performances de l’instrument tout au long des sessions et permet de détecter rapidement toute dérive éventuelle. L’appareil utilisé est un modèle Olympus Vanta VMR, fourni par le MRNF. Les lithologies dont les grains de plagioclase étaient de taille inférieure à 3 mm ont plutôt été analysées par LA-ICP-MS. Des détails supplémentaires, incluant les données XRFp et les aspects liés au QAQC, sont présentés en annexes 5 à 9.

Les résultats obtenus sur 224 grains analysés indiquent que les plagioclases présentent des concentrations élevées en Fe (0,19 - 17,59 %), dont 154 analyses montrent des teneurs en Fe supérieures à 0,5 %. Parmi ces dernières, 36 analyses révèlent une présence simultanée de Fe et de Mg (0,02 - 10,68 %) suggérant des impuretés de minéraux féromagnésiens qui pourrait influencées le ratio Ca/Si utilisé par cette méthode, et n’ont donc pas été incluses dans le calcul de la calcicité. En revanche, les analyses contenant du Fe sans Mg, suggérant de simples inclusions d’oxyde de fer, ont été retenues.

Un facteur de correction, selon la méthode proposée par Tondoh (2021), a été appliqué aux données brutes afin de compenser le biais instrumental. À noter que, comme décrit dans Bounour et al. (2025), aucune correction n’était nécessaire pour l’instrument utilisé dans cette étude précédente (numéro de série de l’appareil : 821719). En revanche, pour l’instrument employé ici (même modèle que dans l’étude précédente, mais un appareil différent, numéro de série : 807198), la correction a été réalisée à l’aide du matériel de référence 20AT04, en divisant la valeur mesurée (moyenne) par la valeur de référence. Les données de 20AT04 ont été acquises à chaque session d’analyse, totalisant 43 mesures, donnant les facteurs de correction suivants : 1,273 pour le Si, 1,473 pour le Ca et 0,964 pour le Sr. Après correction, les résultats obtenus sur les matériaux de référence (RTSD26B et 20AT04) montrent une excellente justesse (différence relative) : 0,05 % pour le % An et 0,01 % pour le Sr pour 20AT04, et 7,7 % pour le % An et 0,07 % pour le % Sr pour RTSD26B. La précision (écart-type relatif) est également satisfaisante, atteignant 0,8 %

pour le % An et 1,8 % pour le % Sr pour 20AT04, et 1,6 % pour le % An et 1,8 % pour le % Sr pour RTSD26B.

6.2.1.2- Analyse des minéraux silicatés et sulfurés par LA-ICP-MS

Un ensemble de minéraux silicatés provenant des lithologies (minéralisation, ses roches hôtes et roches régionales) du secteur de Lac à Paul (olivine, orthopyroxène, clinopyroxène, apatite et plagioclase, lorsque la taille des grains est inférieure à 3 mm et donc trop petite pour être analysée par XRFp) ont été analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif avec ablation laser (LA-ICP-MS). Ces analyses ont permis de déterminer les éléments majeurs et en traces nécessaires à l'étude du fractionnement magmatique, notamment le Mg# (estimé à partir du proxy Mg/Fe déterminé par Cisse et Sarr (2024)), ainsi que le Ni, le Co, etc. Les minéraux sulfurés (pentlandite et pyrrhotite) provenant des indices du secteur de Lac à Paul, et des indices de la marge ouest de la SALSJ (McNickel, Mistass) et les indices du Lac Kénogami (marge sud de la SALSJ) ont été également analysés par LA-ICP-MS.

Les analyses ont été réalisées au LabMaTer (UQAC) sur des lames minces polies : 110 orthopyroxènes, 77 clinopyroxènes, 47 plagioclases, 20 apatites, 15 olivines, 56 pentlandites et 48 pyrrhotites. Pour chaque type de minéral, au moins trois à quatre grains ont été analysés par lithologie, chaque point correspondant à la moyenne des analyses réalisées. Le système de laser ablation est un Excimer 193 nm, résolution M - 50 (Australian Scientific Instrument) équipé d'une cellule à double volume S - 155 (Laurin Technic), et couplé à un spectromètre de masse Agilent 8900. Les paramètres d'acquisition étaient les suivants : fréquence du laser de 15 Hz, temps de séjour de 5 ms, fluence de 5 J/cm², vitesse de balayage de 10 µm/s et diamètre du faisceau de 55 µm pour les silicates et la pyrrhotite, et une vitesse de balayage de 6 µm/s, et un diamètre du faisceau de 33 µm pour la pentlandite. Le signal de fond (gaz blanc) a été mesuré pendant 30 s avant d'allumer le laser pendant 60 secondes ou moins. Le matériau ablaté a été transporté vers l'ICP - MS par un mélange de gaz Ar - He, avec un débit de 0,8 - 1 L/min pour l'Ar et 350 mL/min pour l'He ; 2 mL/min d'azote étaient également ajoutés au mélange.

Les silicates ont été analysés pour ^{23}Na, ^{24}Mg, ^{27}Al, ^{29}Si, ^{31}P, ^{39}K, ^{44}Ca, ^{45}Sc, ^{47}Ti, ^{51}V, ^{53}Cr, ^{55}Mn, ^{57}Fe, ^{59}Co, ^{60}Ni, ^{63}Cu, ^{66}Zn, ^{71}Ga, ^{85}Rb, ^{88}Sr, ^{89}Y, ^{90}Zr, ^{93}Nb, ^{133}Cs, ^{137}Ba, ^{139}La, ^{140}Ce, ^{141}Pr, ^{146}Nd, ^{147}Sm, ^{153}Eu, ^{157}Gd, ^{159}Tb, ^{161}Dy, ^{165}Ho, ^{166}Er, ^{169}Tm, ^{172}Yb, ^{175}Lu, ^{178}Hf, ^{181}Ta, ^{208}Pb, ^{232}Th et ^{238}U. Ils ont été calibrés à l'aide de matériaux de référence de verres synthétiques (NIST610, NIST612, NIST616, GSD1G et GSE-1g) et apatite (Durango_Dare, UQAC-APA-1) pour calibrer Ca et P pour les analyses d'apatite. G-PROBE6 a servi de matériel de contrôle afin d'assurer l'exactitude et la reproductibilité des mesures. Comme aucun matériau de référence certifié n'était disponible pour l'orthopyroxène et le plagioclase, la qualité analytique a été vérifiée par des analyses répétées de l'olivine mongOL Sh11-2 (Batanova et al., 2019) et du plagioclase MGSCB03 (LabMaTer). Le traitement des données a été réalisé avec le module 3D Trace Elements du logiciel Iolite 4 (Bence et al., 2023; Paton et al., 2011), en normalisant la somme des éléments majeurs des minéraux silicatés à 100 % d'oxydes. Pour l'apatite, les données ont été normalisées à 95 % d'oxydes, car les 5 % restants correspondant aux volatils (OH, F, Cl) ne sont pas mesurés par le LA-ICP-MS. Les résultats obtenus pour ces matériaux de référence sont généralement en bon accord avec les valeurs acceptées, avec une précision < 10 % et une justesse < 5 %. Les données relatives aux minéraux analysés ainsi qu'aux matériaux de référence sont présentées en annexes 10 et 11.

Les sulfures ont été analysés pour ^{29}Si, ^{34}S, ^{55}Mn, ^{57}Fe, ^{59}Co, ^{60}Ni, ^{65}Cu, ^{66}Zn, ^{73}Ge, ^{75}As, ^{82}Se, ^{95}Mo, ^{99}Ru, ^{101}Ru, ^{103}Rh, ^{105}Pd, ^{106}Pd, ^{107}Ag, ^{108}Pd, ^{109}Ag, ^{111}Cd, ^{115}In, ^{118}Sn, ^{121}Sb, ^{125}Te, ^{128}Te, ^{182}W, ^{185}Re, ^{189}Os, ^{193}Ir, ^{195}Pt, ^{197}Au, ^{205}Tl, ^{208}Pb et ^{209}Bi. Différents matériaux de référence ont été employés pour la calibration des sulfures, incluant UQAC-FeS5 et UQAC-FeS-1, deux sulfures synthétiques développés à l'UQAC et dopés avec la plupart des éléments chalcophiles et ÉGP, ainsi que MASS-1, une pastille de poudre pressée Zn-Cu-Fe-S dopée entre 50 et 70 ppm pour la plupart des éléments chalcophiles (USGS ; Jochum et al., 2005). En addition de ces trois sulfures, les verres synthétiques (GSE, GSD) étaient inclus dans la calibration, à l'exception de GSE pour Te, W, Re, Ir, Pt et Au. Le matériel de référence STDGL3 (un sulfure de Fe synthétique de CODES, Australie ; Belousov et al., 2023) était analysé comme moniteur. Un blanc de sulfure à Cu (ISS4-CuBLK) et un blanc de sulfure à Ni (Ni-BLNK) ont également été analysés afin de déterminer et corriger les interférences de ^{63,} ^{65}Cu + ^{40}Ar sur ^{103}Pd et ^{105}Rh et ^{61}Ni + ^{40}Ar

sur ^{101}Ru. Le traitement des données a été réalisé avec le module 3D Trace Elements du logiciel Iolite 4 (Bence et al., 2023; Paton et al., 2011), en normalisant la somme des éléments majeurs (Fe, S, Ni, Co) des sulfures à 100 %. Seules les données de STDGL3 (un verre de lithium-bore) ont été normalisées à l'aide de Fe comme standard interne. Les résultats obtenus pour ces matériaux de référence sont généralement en bon accord avec les valeurs acceptées, avec une précision < 10 % et une justesse < 5 %. Les données relatives aux minéraux analysés ainsi qu'aux matériaux de références sont présentées en annexes 12 à 14. Une comparaison des éléments majeurs (Fe, Ni, Co) analysés par LA-ICP-MS (cette étude) et par microsonde électronique (Huss, 2002) montre que la normalisation à 100 % est juste (<10 – 15 % relative différence : annexe 14).

6.2.2- Résultats

6.2.2.1- Plagioclase

Les données obtenues sur le plagioclase permettent de comparer les valeurs de pourcentage en anorthite (% An) et de % Sr entre la minéralisation en sulfures de chaque indice et leurs roches associées (figure 34). Globalement, ces données montrent que le plagioclase dans les sulfures (massif à disséminé) et leurs roches associées présentent des valeurs de % An et % Sr généralement similaires (majoritairement andésine avec faible % Sr entre 0,06 et 0,10 %), bien que les plagioclases dans les sulfures puissent montrer une légère tendance à des % An plus faibles et à une variabilité plus marquée du % Sr, notamment dans l'indice MHY Nord.

En détail, dans l'indice MHY Ap, les plagioclases des sulfures massifs (n = 2) montrent des % An légèrement inférieurs (42,4 à 43,3 % ; figures 34A et 35) et des % Sr comparables ou légèrement supérieurs (0,075 à 0,076 % ; figures 34A et 35) à ceux des roches associées (n = 13). Celles-ci comprennent des leuconorites (n = 8 ; % An = 45,0 à 46,7 % ; % Sr = 0,068 à 0,074 %), des leucogabbronorites (n = 2 ; % An = 43,5 à 45,5 % ; % Sr = 0,067 à 0,069 %), des leucotroctolites (n = 2 ; % An = 46,4 à 48,1 % ; % Sr = 0,071 %) et une webstérite (n = 1 ; % An = 46,9 % ; % Sr = 0,074 %).

Dans l'indice Discovery Zone, les données des plagioclases provenant des échantillons du forage GRL-22-31 montrent que les sulfures massifs (n = 1) et semi-massifs (n = 1) présentent des valeurs semblables (% An = 43,9 à 48,9 % ; % Sr = 0,070 à 0,077 % ; figures 34B et 35) à celles des roches associées (n = 9), constituées de leucogabbronorite (n = 2 ; % An = 45,8 à 47,7 % ; % Sr = 0,066 à 0,085 %), de (leuco)norite (n = 5 ; % An = 46,0 à 47,8 % ; % Sr = 0,065 à 0,069 %) et de leucotroctolite (n = 2 ; % An = 47,9 à 49,0 % ; % Sr = 0,070 à 0,087 %).

Pour l'indice MHY Nord, les données obtenues sur les plagioclases des forages GRL-22-41 et GRL-22-60 indiquent que les sulfures disséminés (n = 2), semi-massifs (n = 1) et massifs (n = 1) montrent une variabilité plus large en % An (40,9 à 49,8 % ; figures 34C et 35) et en % Sr (0,069 à 0,103 % ; figures 33C et 35) que les roches associées (n = 16), qui présentent des intervalles plus restreints. Elles sont composées de leucogabbronorite et mélagabbronorite à oxydes (n = 3 ; % An = 43,5 à 46,1 % ; % Sr = 0,067 à 0,070 %), de (leuco)norite (n = 10 ; % An = 45,5 à 48,3 % ; % Sr = 0,068 à 0,073 %) et de leucotroctolite (n = 5 ; % An = 45,5 à 47,5 % ; % Sr = 0,070 à 0,088 %).

Pour l'indice Léo-Charl (Bounour et al., 2025), les plagioclases dans les sulfures disséminés (n = 1) et massifs (n = 1) présentent un % An entre 40,4 à 42,4 % et un % Sr entre 0,073 et 0,074 % (figure 35), alors que les roches associées ((leuco)norite; n = 4) ont un % An un peu plus élevé et plus hétérogène entre 42,4 et 51,6 % et un % Sr de 0,070 à 0,093 %.

Les plagioclases dans les sulfures semi-massifs de Nourricier B (n = 1; % An = 43,6 %; % Sr = 0,081 %; figure 35) et les sulfures massifs de Manouane Est (n = 1; % An = 44,2 %; % Sr = 0,085 %) présentent des valeurs dans la même gamme que celles observées dans les indices précédents, tandis que les sulfures semi-massifs de Paul (n = 1; % An = 51,0 %; % Sr = 0,075 %) montrent un % An légèrement plus élevé. Aucune autre donnée de forage ou de surface ne provient de ces indices pour comparer avec les roches encaissantes.

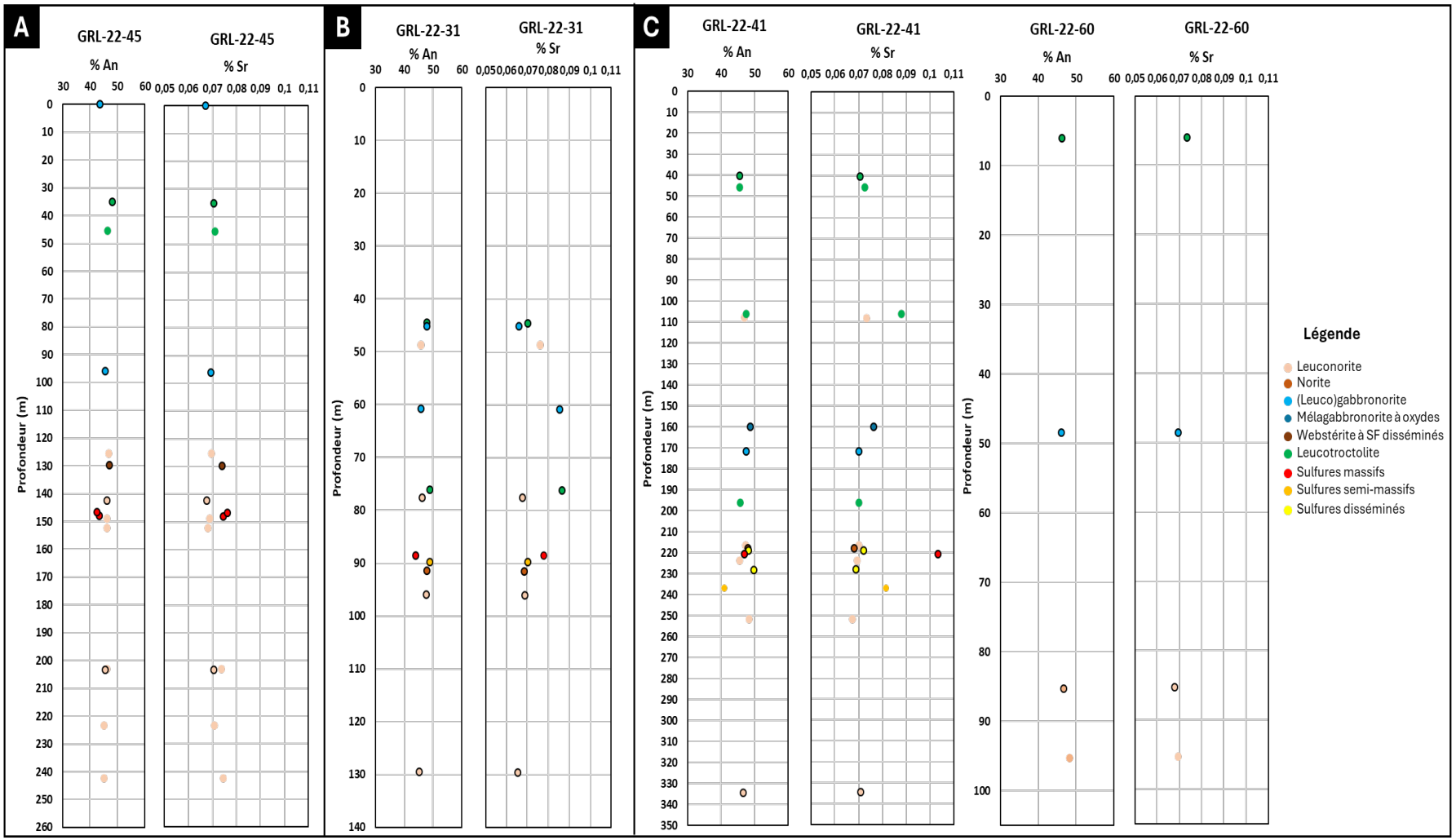


Figure 34 : Variation des teneurs en % An et % Sr dans les roches anorthositiques et les sulfures des différents forages étudiés : A) forage GRL-22-45 (indice MHY Ap) ; B) forage GRL-22-31 (indice Discovery Zone); C) forages GRL-22-41 et GRL-22-60 (indice MHY Nord). Les lithologies dont les symboles ont des bordures noires ont été confirmées en lame mince.

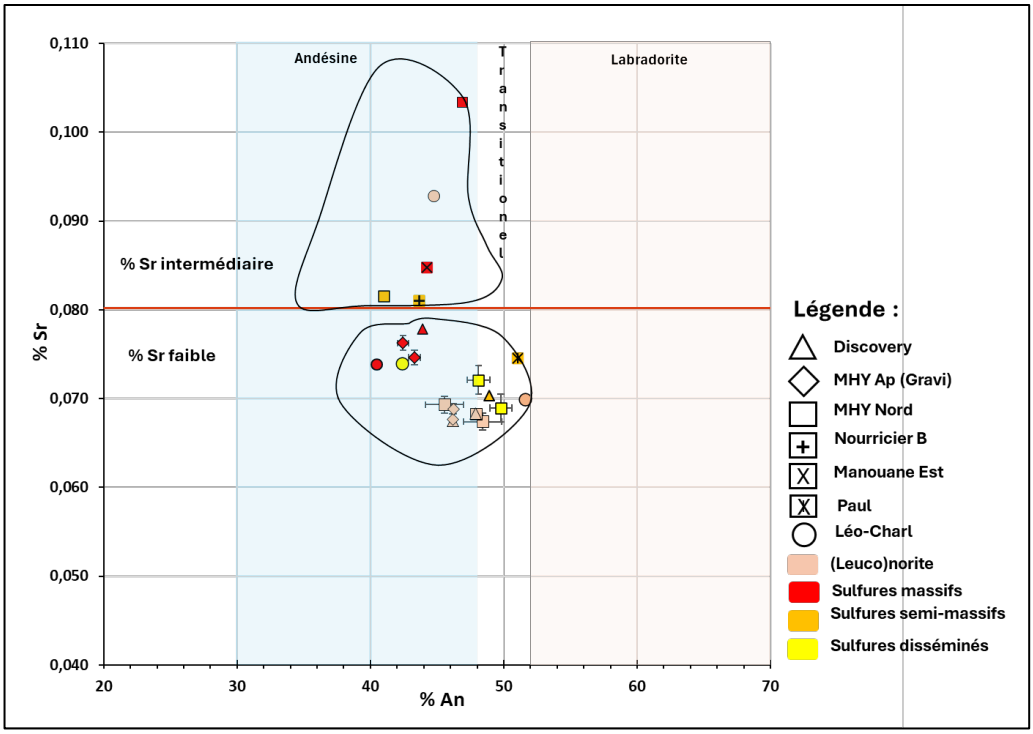


Figure 35 : Diagramme binaire illustrant les variations de % An et de % Sr du plagioclase dans les sulfures massifs, semi-massifs et disséminés, ainsi que dans leurs roches hôtes immédiates (11 m au-dessus et 3 m au-dessous de sulfures massifs) dans les différents indices du secteur de Lac à Paul. Les champs représentent les autres données issues de autres échantillons de forages (cette étude) et de la surface (Bounour et al., 2025).

Lorsque l'on compare les différents indices, les compositions des plagioclases présents dans les sulfures, dans les roches associées ainsi que dans les roches régionales (figure 36) montrent des comportements globalement cohérents et similaires, dominés par des valeurs typiques de l'andésine. Pour le % An et les teneurs en Sr, plusieurs indices se démarquent par une grande homogénéité. Discovery Zone présente des valeurs de %An regroupés entre 44 et 47,8 % (n = 11) avec des teneurs en Sr généralement inférieures à 0,08 % (0,06 - 0,08 %), MHY Ap (42,4 - 49,2 % An; 0,06 - 0,07 % Sr ; n = 17) et MHY Nord (40,9 - 49,7 % An; 0,67- 0,88 % Sr ; n = 17, avec un échantillon jusqu'à 0,10 %) montrent également des compositions homogènes, situées majoritairement dans la gamme de l'andésine. Léo-Charl se distingue par une dispersion légèrement plus marquée, avec des valeurs de % An de 40,4 à 51,6 % (n = 6) et des teneurs en Sr comprises entre 0,070 et 0,077 %, à l'exception d'un échantillon de norite pegmatitique affichant 0,09 % Sr, restant dans la même gamme que les autres indices et les roches régionales.

Les autres indices, représentés par un nombre plus réduit d'échantillons, restent dans le champ de l'andésine et des teneurs en Sr comparables : Manouane (44 % An; 0,08 % Sr), Nourricier B (44,6 % An; 0,08 % Sr) et Paul (51 % An; 0,07 % Sr), ce dernier se situant dans le domaine transitionnel, légèrement plus calcique que les autres.

Les compositions de plagioclase du Gabbro de Steve ((leuco)gabbronorite à grains fins ; Bounour et al., 2025), obtenues exclusivement par LA-ICP-MS, présente des compositions nettement plus calciques (labradorite ; figure 36), avec des valeurs de %An variant de 54,78 à 68,04 % et des teneurs en %Sr très faibles comprises entre 0,042 et 0,056 % (n = 3), ce qui suggère un magma primitif distinct de celui à l'origine des autres lithologies régionales.

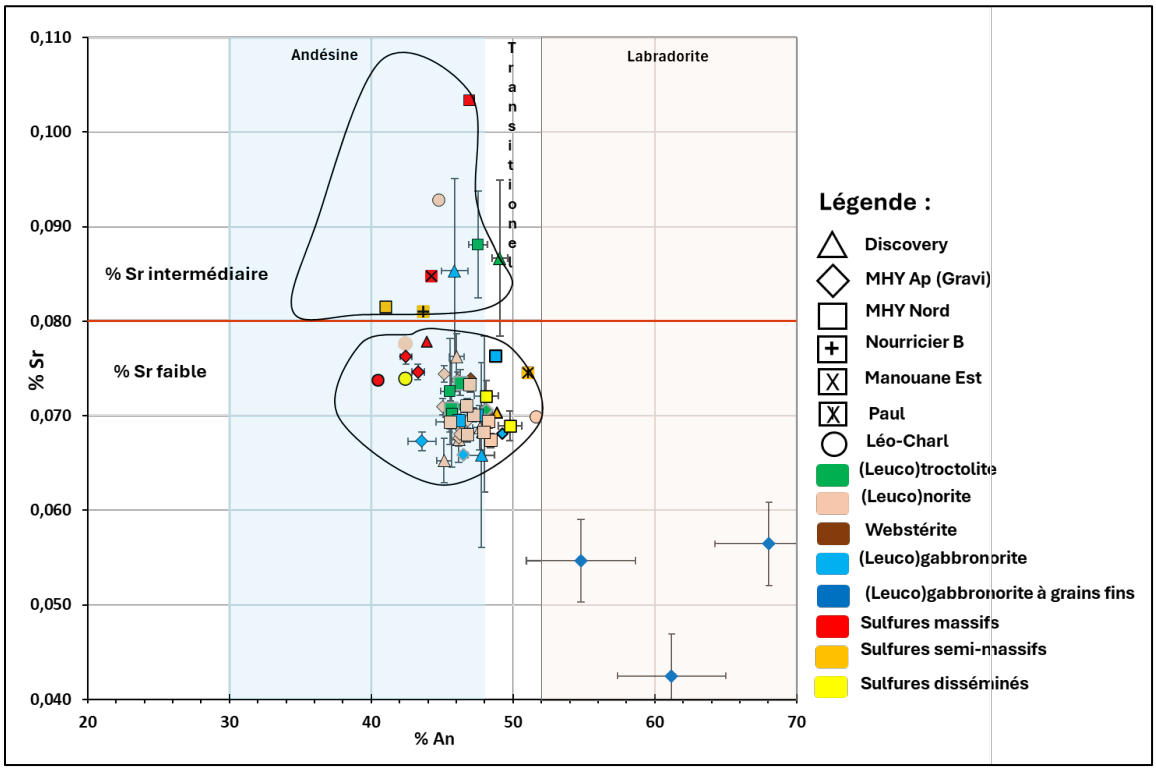


Figure 36 : Diagramme binaire illustrant les variations de % An et de % Sr du plagioclase dans les sulfures massifs, semi-massifs et disséminés, ainsi que dans leurs roches anorthositiques associées dans les forages, ainsi que les données de surface de l'indice Léo-Charl et de Gabbro de Steve dans le secteur de Lac à Paul. Les champs représentent les autres données de la surface (Bounour et al., 2025).

6.2.2.2- Olivine

Les olivines du secteur de Lac à Paul se rencontrent principalement dans les (leuco)troctolites, les (leuco)troctolites à oxydes-apatite et les troctolites nelsonitiques, prélevés en surface. Le Mg# varie entre 38,5 et 65,3 (figure 37), ce qui correspond à des olivines plus fayalitiques, suggérant une cristallisation à partir d'un magma évolué.

Les concentrations en Ni (23 - 385 ppm ; figure 37 A), Co (149 - 261 ppm ; figure 37 B) et Cr (0,1 - 1,3 ppm) sont très faibles, indiquant un magma appauvri en ces éléments au moment de la cristallisation. Le Sc varie entre 1,9 et 5,1 ppm (figure 37D), tandis que le Mn se situe entre 3666 et 5253 ppm (figure 37C). Les concentrations en Zn sont comprises entre 82 et 134 ppm. La présence d'une corrélation positive entre Mg# et Ni, Co (figures 37 A et B), et Cr et d'une corrélation négative entre Mg#, Mn, et Sc (figure 37 C et D) et Zn indique que le processus dominant de formation de ces lithologies riches en olivine était la cristallisation fractionnée.

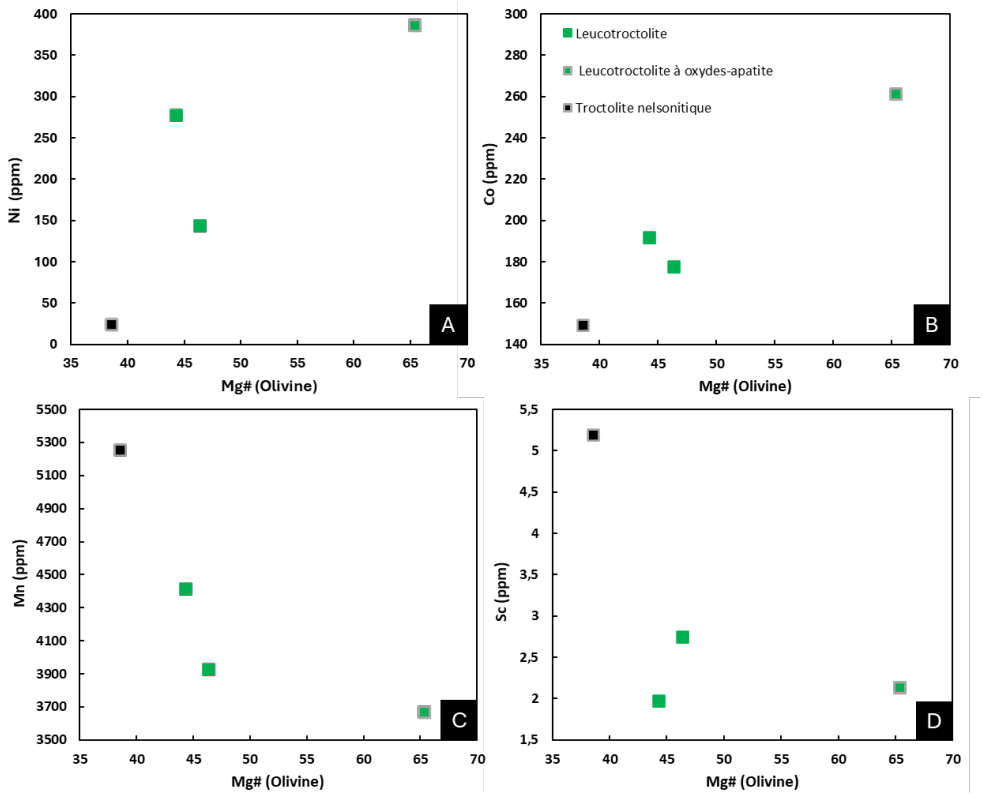


Figure 37 : Diagrammes binaires des éléments en traces par rapport à Mg# dans l'olivine des lithologies du secteur de Lac à Paul. A) Ni ; B) Co ; C) Mn ; D) Sc (en ppm).

La figure 38 présente un diagramme binaire Mg# (olivine) en fonction de % An (plagioclase) pour les lithologies à olivine du secteur de Lac à Paul en comparaison, avec ceux des intrusions contenant aussi de l'olivine dans la Province de Grenville : de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (1150 Ma ; Vaillancourt, 2001), de la SALSJ Sud (Alma ; Woussen et al., 1981), de la Suite d'Étoile (1149 Ma ; Maier et al., 2025), et de l'intrusion litée de Sept-Îles (565 Ma ; Namur et al., 2010). La figure 38 montre une corrélation positive entre le Mg# des olivines et le %An des plagioclases, confirmant ainsi le processus de cristallisation fractionnée. Les olivines et les plagioclases (andésine) des lithologies du secteur de Lac à Paul sont plus évolués que ceux observés dans d'autres intrusions. Ils présentent toutefois des valeurs similaires à celles des parties évoluées de plusieurs de ces intrusions, où les oxydes et l'apatite cristallisent (par exemple, Sept-Îles et la Suite d'Étoile). Ces compositions sont également nettement plus évoluées que celles de l'intrusion de la Baie-à-Cadie, qui est plus primitive et hôte de minéralisations Ni-Cu, ainsi que celles de la SALSJ sud. Les olivines de Voisey's Bay (1332,7 ± 1 Ma ; Amelin et al., 1999), considéré comme un gisement de sulfures Ni-Cu de classe mondiale, présentent des Mg# comprises entre 36 et 75 ; elles sont donc plus évoluées que celles de la Baie-à-Cadie (Mg# = 79 – 87), mais plus primitives que celles du secteur de Lac à Paul (Mg# = 38 – 65).

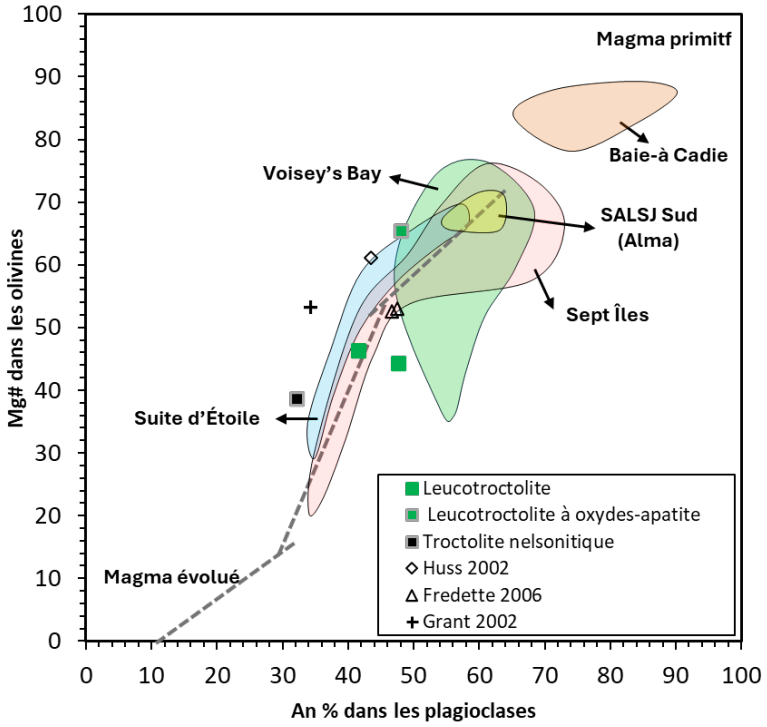


Figure 38 : Diagramme binaire Mg# (olivine) en fonction de % An (plagioclase), des lithologies à olivine du secteur de Lac à Paul viennent de cette étude, Huss (2002), Fredette (2006) et Grant (2020) en comparaison avec ceux de la Suite d'Étoile (Maier et al. 2025), de l'intrusion litée de Sept-Îles (Namur et al., 2010), de la SALSJ Sud (Alma ; Woussen et al., 1988), de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001), et de Voisey's Bay (Li et Naldrett, 1999). La ligne en tirets correspond à l'intrusion de Kiglapait (Morse, 2015).

6.2.2.3- Orthopyroxène

De manière générale, les orthopyroxènes analysés proviennent de (leuco)norites, (leuco)gabbronorites, d'une webstérite et d'un dyke d'orthopyroxénite, ainsi que d'orthopyroxènes sous forme de porphyroclastes dans les minéralisations en sulfures, prélevés à la fois en surface et dans les carottes de forage. Le Mg# varie entre 43,3 et 64,3, correspondant à des orthopyroxènes relativement ferreux à intermédiaires de la série enstatite - ferrosilite, ce qui est caractéristique d'orthopyroxènes cristallisés à partir d'un magma évolué. Les concentrations en Al_2O_3 varient de 1,4 à 3,4 pd. %. Les données analytiques complètes des éléments majeurs sont présentées dans l'annexe 10.

Les éléments traces dans les orthopyroxènes révèlent des concentrations en Ni (13 - 188 ppm ; figure 39 A), en Cr (12 - 495 ppm ; figure 39 B), en Co (77 - 107 ppm), en Sc (14 - 55 ppm), en Mn (3 036 - 5 800 ppm ; figure 39 C) et en Zn (197 - 383 ppm ; figure 39 D). Le Ni et le Cr présentent une bonne corrélation positive avec le Mg# (figures 39 A et B), tandis que le Mn et le Zn présentent une corrélation négative avec le Mg# (figures 39 C et D), indiquant un processus de cristallisation fractionnée, Mg, Ni et Cr étant compatibles et donc en diminution, tandis que Mn et Zn sont incompatibles et donc en augmentation pendant la cristallisation fractionnée.

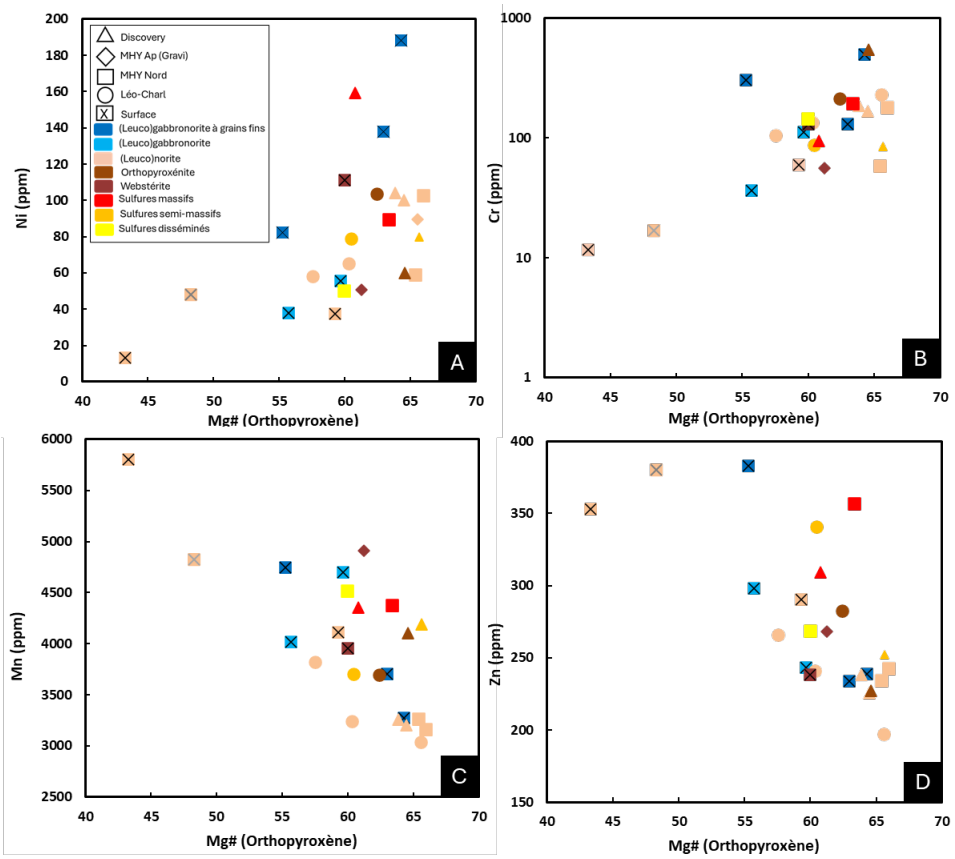


Figure 39 : Diagrammes binaires des éléments en traces par rapport à Mg# d'orthopyroxène des lithologies du secteur de Lac à Paul. A) Ni ; B) Cr ; C) Mn ; D) Zn (en ppm).

En comparant les Mg# des orthopyroxènes obtenus pour les différents indices et leurs roches associées, on observe que les valeurs mesurées dans les minéralisations en sulfures et leurs roches associées sont globalement similaires (figure 39). À l'indice Discovery Zone, le Mg# des sulfures massifs et semi-massifs (n = 2) varie entre 60,7 et

65,5, des valeurs comparables à celles des roches associées (63,9 - 69,5). À l'indice MHY Nord, le Mg# des sulfures massifs et disséminés (n = 2) varie entre 59,9 et 63,3, légèrement inférieur à celui des roches associées dont le Mg# se situe entre 65,4 et 65,9. À l'indice Léo-Charl, le Mg# des sulfures semi-massifs est de 60,4, ce qui demeure dans la gamme des roches associées, lesquelles présentent un Mg# compris entre 57,5 et 62,4, incluant le dyke d'orthopyroxénite (Bounour et al., 2025) qui affiche un Mg# de 62,4. Pour l'indice MHY Ap, les roches associées à la minéralisation montrent un Mg# entre 61,5 et 65,5, ce qui demeure cohérent avec les autres indices. Pour ses minéralisations et pour celles des indices Nourricier B, Manouane et Paul, l'orthopyroxène est absent en lame mince ou entièrement transformé en hornblende et biotite, ne permettant ainsi aucune analyse. Concernant la (leuco)gabbronorite à grains fins (Gabbro de Steve), le Mg# des orthopyroxènes varie entre 57,2 et 64,2 et ils sont légèrement plus enrichis en Ni (pour la même gamme de Mg#) que les roches associées à la minéralisation en sulfures.

De manière générale, les Mg# des orthopyroxènes dans les différents indices restent globalement comparables à ceux des roches associées et régionales. Les valeurs disponibles montrent des gammes similaires entre les indices, bien que certains indices ne puissent être comparées en raison de l'absence ou de l'altération de l'orthopyroxène dans les sulfures.

L'aluminium (Al_2O_3) ne présente pas de corrélation nette avec le Mg# (figure 40), ce qui est typique d'orthopyroxènes cristallisés dans des intrusions de pression moyenne à faible (Banerjee et al., 2024; Debari et Coleman, 1989; Helmy et al., 2014; Kharbish et al., 2022). Si l'on considère la relation entre l'Al_2O_3 et le Mg# des orthopyroxènes (Banerjee et al., 2024; Heinonen et al., 2020) de Lac à Paul, la pression de cristallisation de ces roches est d'environ 4 kbar (soit environ 12 km de profondeur).

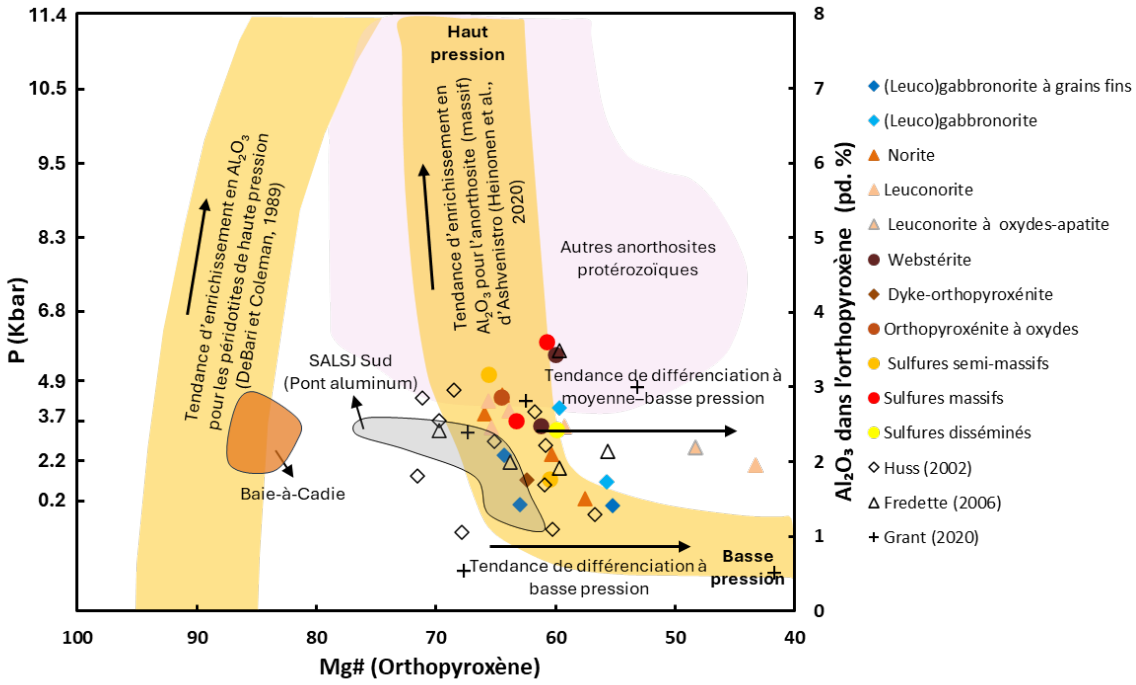


Figure 40 : Relations entre la teneur en Al_2O_3 et le Mg# de l'orthopyroxène dans les lithologies du secteur de Lac à Paul (Diagramme modifié d'après Banerjee et al., 2024 et références qui y sont citées). Des données supplémentaires pour l'orthopyroxène des lithologies de secteur de Lac à Paul provenant du Huss (2002), Fredette (2006), et Grand (2020) analysés par microsonde électronique. Les données de la SALSJ Sud et la Baie-à-Cadie provenant de Sarr et Ndiaye (2025).

Le diagramme binaire du Mg# des orthopyroxènes en fonction du % An des plagioclases des lithologies à pyroxènes du secteur de Lac à Paul (figure 41), comparé aux données de l'intrusion litée de Sept-Îles (Namur et al., 2010) ainsi qu'à celles de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001), met en évidence une corrélation positive entre le Mg# et % An, confirmant le processus de la cristallisation fractionnée. On observe également que les orthopyroxènes des lithologies du secteur de Lac à Paul sont plus évolués que ceux de Baie-à-Cadie, mais présentent des valeurs similaires à celles des parties évoluées de l'intrusion de Sept-Îles. En comparant la (leuco)gabbronorite à grains fins (Gabbro de Steve) à la Suite de la Baie-à-Cadie, on note que pour un même Mg#, les plagioclases de la Suite de la Baie-à-Cadie et de Gabbro de Steve sont plus calciques (labradorite), indiquant une tendance d'évolution légèrement différente du %An par rapport à Sept-Îles ou aux autres lithologies de la SALSJ.

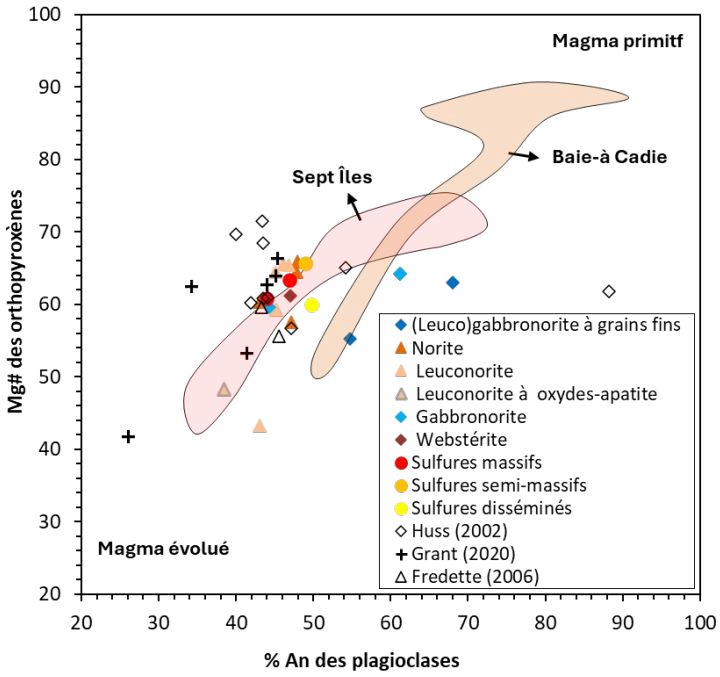


Figure 41 : Diagramme binaire Mg# (orthopyroxène) en fonction de % An (plagioclase), des lithologies à pyroxène de secteur de Lac à Paul en comparaison avec ceux de l'intrusion litée de Sept-Îles (Namur et al., 2010), et de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001). Des données supplémentaires pour l'orthopyroxène des lithologies de secteur de Lac à Paul provenant du Huss (2002), Fredette (2006), et Grand (2020) analysés par microsonde électronique.

6.2.2.4- Clinopyroxène

Les clinopyroxènes analysés proviennent essentiellement de (leuco)norites, (leuco)gabbronorites et d'une webstérite ainsi que des clinopyroxènes sous forme de porphyroclastes dans les minéralisations en sulfures, prélevés à la fois en surface et dans les carottes de forage. Le Mg# varie entre 56,7 et 77,8, tandis que celles en Al_2O_3 se situent entre 3,37 et 5,14 pd. %. Les concentrations en TiO_2 sont comprises entre 0,5 et 1,1 pd. %. Les données analytiques complètes des éléments majeurs sont présentées dans l'annexe 10.

Les éléments traces montrent des concentrations en Ni comprises entre 12 et 180 ppm (figure 42A), en Cr entre 41 et 892 ppm (figure 42B), en Co entre 25 et 53 ppm, et en Sc entre 75 et 160 ppm. Les concentrations en Mn varient de 977 à 3 287 ppm (figure 42C) et celles en Zn de 60 à 157 ppm (figure 42D). Le Ni et le Cr présentent une corrélation

positive avec le Mg# (figures 42 A et B), tandis que le Mn et le Zn montrent une corrélation négative avec le Mg# (figures 42C et 42D), ce qui confirme que la cristallisation fractionnée contrôle la variation de ces éléments. Seul le Ni du clinopyroxène dans les sulfures massifs de Léo-Charl est clairement plus élevé pour sa valeur très bas de Mg#.

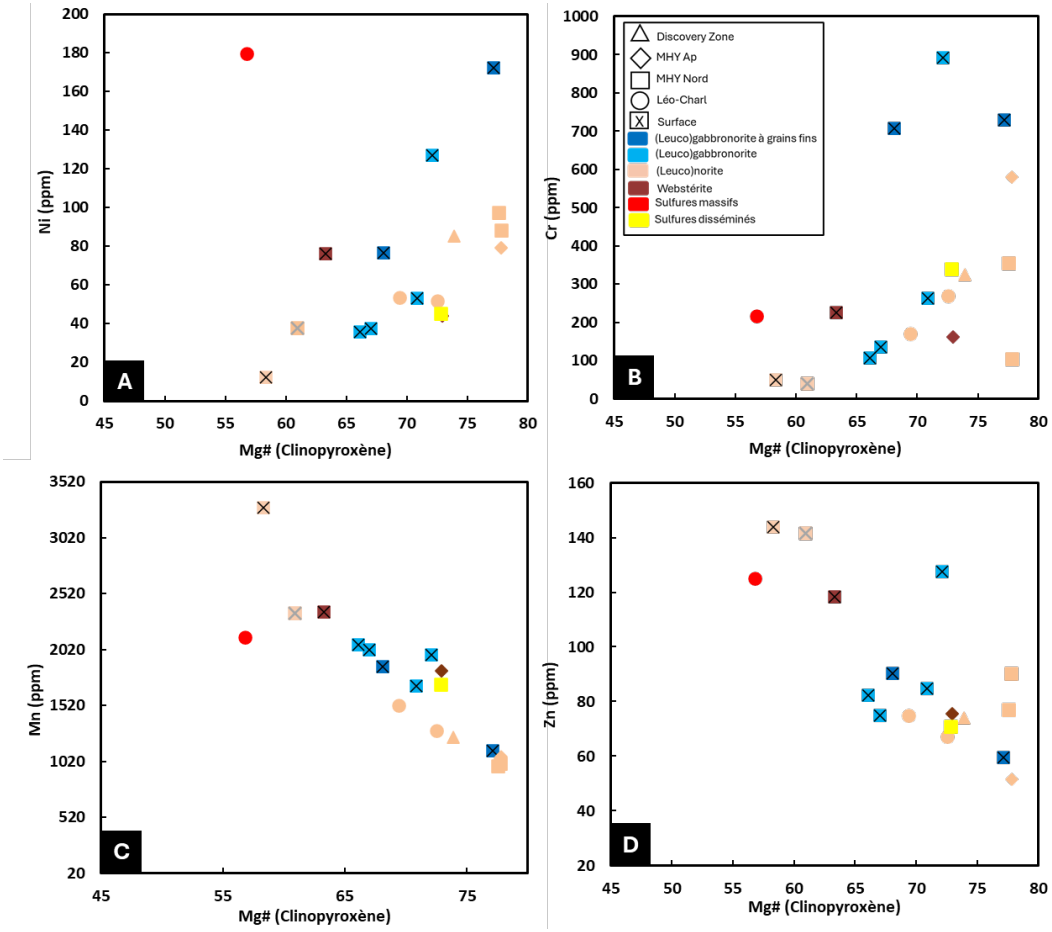


Figure 42 : Diagrammes binaires des éléments en traces par rapport à Mg# dans le clinopyroxène des lithologies de secteur de Lac à Paul. A) Ni; B) Cr; C) Mn; D) Zn (en ppm).

La comparaison des Mg# de clinopyroxène entre les minéralisations en sulfures et leurs roches associées montre globalement des valeurs similaires (figure 42), bien que certains indices présentent des Mg# légèrement plus faibles dans les sulfures. Les roches associées affichent des gammes de Mg# relativement homogènes entre les différents indices. Toutefois, l'absence ou la transformation des clinopyroxènes dans les indices réduit la quantité de données disponibles.

À MHY Nord, le clinopyroxène présent dans les sulfures disséminés (Mg# = 72,8) montre une valeur légèrement inférieure à celle des roches associées (Mg# = 77,6 - 77,8), tout en demeurant dans la même gamme que les roches régionales. À Léo-Charl, le Mg# obtenu pour les sulfures massifs (n = 1) est de 56,8, une valeur également inférieure à celles des roches associées (Mg# = 69,4 - 72,5). Les roches associées à la minéralisation de l'indice Discovery Zone présentent des Mg# variant entre 73,9 et 74,3, tandis que celles de l'indice MHY Ap varient entre 72,9 et 77,9, des valeurs comparables à celles des autres roches régionales. Aucune analyse n'a pu être réalisée pour les minéralisations des indices Discovery Zone, MHY Ap, Nourricier B, Manouane et Paul, les clinopyroxènes étant soit absents en lame mince, soit entièrement transformés en hornblende et biotite. La (leuco)gabbronorite à grains fins (Gabbro de Steve) présente des Mg# compris entre 68,1 et 77,2.

La figure 43 présente la relation entre le Mg# des clinopyroxènes et celui des orthopyroxènes dans différentes lithologies. Les données montrent généralement une bonne corrélation positive, indiquant qu'une augmentation du Mg# dans le clinopyroxène s'accompagne d'une augmentation du Mg# dans l'orthopyroxène. Cette forte corrélation suggère que les deux minéraux ont évolué de manière cohérente et confirme un processus de cristallisation fractionnée contrôlant leur composition.

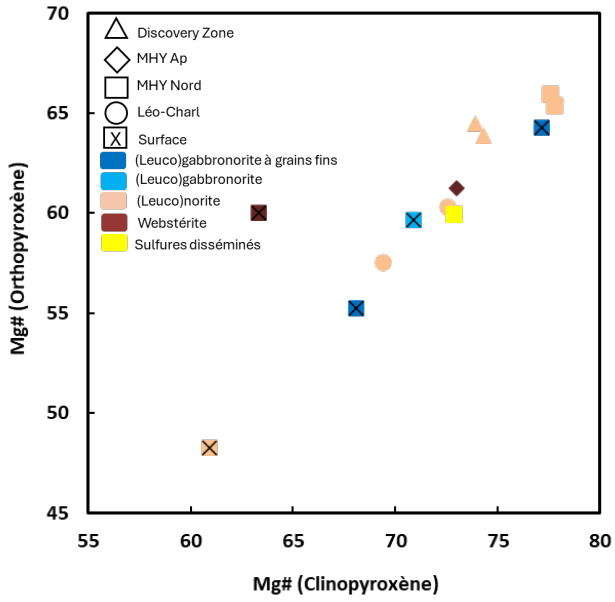


Figure 43 : Diagramme binaire montrant la relation entre le Mg# du clinopyroxène et celui de l'orthopyroxène dans les lithologies du secteur de Lac à Paul.

La figure 44 illustrant la variation du Mg# des clinopyroxènes en fonction du %An des plagioclases dans les lithologies à pyroxènes du secteur de Lac à Paul est comparé aux données de l'intrusion litée de Sept-Îles (Namur et al., 2010) ainsi qu'à celles de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001). Les résultats mettent en évidence une corrélation positive entre le Mg# et le %An, ce qui soutient l'hypothèse d'un contrôle par la cristallisation fractionnée. Par ailleurs, les clinopyroxènes des lithologies du secteur de Lac à Paul sont plus évolués que ceux de de la Baie-à-Cadie, mais présentent des compositions comparables à celles observées dans les niveaux les plus évolués de l'intrusion de Sept-Îles ainsi que dans la Suite d'Étoile. Le Gabbro de Steve (leucogabbronite à grains fins), en revanche, est plus primitif et ne suit pas la même tendance que les autres lithologies.

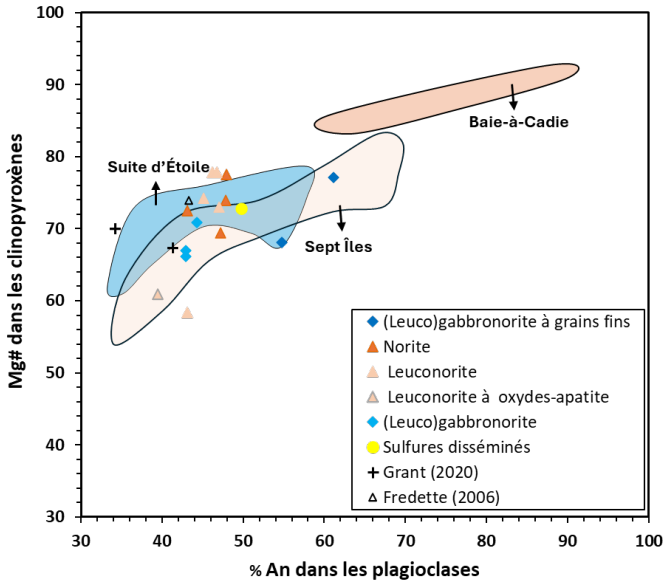


Figure 44 : Diagramme binaire Mg# (clinopyroxène) en fonction de % An (plagioclase), des lithologies à pyroxène de secteur de Lac à Paul en comparaison avec ceux de l'intrusion litée de la Suite mafique et ultramafique de la Baie-à-Cadie au Lac Kénogami (Vaillancourt, 2001), de Sept-Îles (Namur et al., 2010), et de la Suite d'Étoile (Maier et al. 2025). Des données supplémentaires pour l'orthopyroxène des lithologies de secteur de Lac à Paul provenant du Huss (2002), Fredette (2006), et Grant (2020) analysés par microsonde électronique.

6.2.2.5- Pyrrhotite

La pyrrhotite est la phase sulfurée la plus abondante dans les sulfures étudiés. La pyrrhotite des indices du secteur de Lac à Paul montre des concentrations en Ni (0,42 -

0,62 pd. % ; figure 45) plus faibles que celle des indices de McNickel et de Mistass (0,56 - 0,85 pd. % ; Hassen Ali et al., 2023), ainsi que celle des indices du Lac Kénogami dans la Suite de la Baie-à-Cadie (1,17 - 1,51 pd. % ; Vaillancourt, 2001). Les concentrations en Co (0,02 - 0,03 pd. % ; figure 45) sont faibles à modérées, mais demeurent dans la même gamme que celles mesurées dans la pyrrhotite des indices de McNickel et de Mistass (0,01 - 0,04 pd. %) et du Lac Kénogami (0,02 - 0,03 pd. %). En ce qui concerne le Se, la pyrrhotite des indices du secteur de Lac à Paul présente de faibles concentrations (21,5 - 29,2 ppm), similaires à celles observées dans la pyrrhotite des indices de McNickel et de Mistass (20,6 - 24,8 ppm), tandis que la pyrrhotite des indices du Lac Kénogami montre des concentrations en Se plus élevées (44,2 - 82,4 ppm).

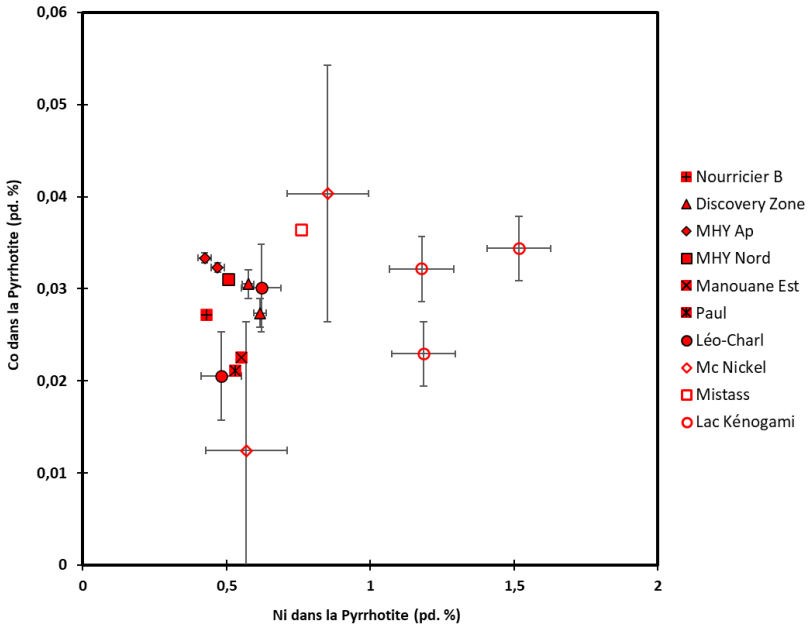


Figure 45 : Concentrations en Ni (pd. %) et en Co (pd. %) dans la pyrrhotite des indices du secteur de Lac à Paul (Nourricier B, Discovery Zone, MHY Ap, MHY Nord, Manouane Est, Paul et Léo-Charl), de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi que des indices du Lac Kénogami (Dumont et Gagnon) dans l'intrusion de la Baie-à-Cadie, située sur la marge sud de la SALSJ.

Les concentrations des éléments du groupe du platine (ÉGP) dans la pyrrhotite des indices du secteur de Lac à Paul sont faibles (ÉGP < 244 ppb; voir l'annexe 12). La pyrrhotite des indices McNickel et Mistass présente des concentrations en ÉGP encore plus faibles que celles observées dans la pyrrhotite de Lac à Paul (< 7,1 ppb). En revanche, la pyrrhotite des indices du Lac Kénogami présente des concentrations en ÉGP légèrement

plus élevées (< 312 ppb). Cet enrichissement en ÉGP dans la pyrrhotite des indices du Lac Kénogami est cohérent avec les teneurs en ÉGP élevées mesurées dans les roches totales (figures 31 et 32).

6.2.2.6- Pentlandite

La figure 46 présente un diagramme binaire Ni vs. Co pour la pentlandite, incluant les données de cette étude ainsi que celles compilées dans la littérature par Lavaure (2023). Cette compilation, à partir de données limitées, montre que la pentlandite associée à la minéralisation sulfurée dans la SALSJ présente des teneurs en Co anormalement élevées comparativement à celles rapportées pour la pentlandite de nombreux gisements de Ni à l'échelle mondiale (Lavaure, 2023 et références qui y sont citées). Les nouvelles données obtenues dans cette étude confirment cette tendance.

Les concentrations en Co sont élevées dans la pentlandite des indices du secteur de Lac à Paul, avec des valeurs variantes entre 3,1 et 7,4 pd. % (figure 46). En comparaison, les pentlandites des indices de McNickel et de Mistass présentent des concentrations en Co moyennes (2,8 – 3,6 pd. % ; figure 46), tandis que celles des indices du Lac Kénogami affichent des teneurs plus faibles (1,6 – 1,7 pd. %; figure 46), comparables à celles rapportées pour des gisements exploités au Canada (Voisey's Bay, Raglan, Thompson, Lac des Îles, Sudbury ; figure 46 ; Lavaure, 2023) et à l'échelle mondiale (Norilsk, Jinchuan, Merensky Reef, Platreef, Nkomati ; figure 46 ; Lavaure, 2023).

Les concentrations en Ni dans la pentlandite des indices du secteur de Lac à Paul varient entre 29,8 et 33,8 pd. % (figure 46), des valeurs comparables à celles mesurées dans la pentlandite des indices de McNickel et de Mistass (31,7 – 33,9 pd. %; figure 46), ainsi qu'à celles des indices du Lac Kénogami (31,3 – 33,8 pd. %; figure 46). Il n'a pas été possible d'obtenir une analyse fiable pour la pentlandite de l'indice Léo-Charl en raison de la taille très petites des grains (Bounour et al., 2025).

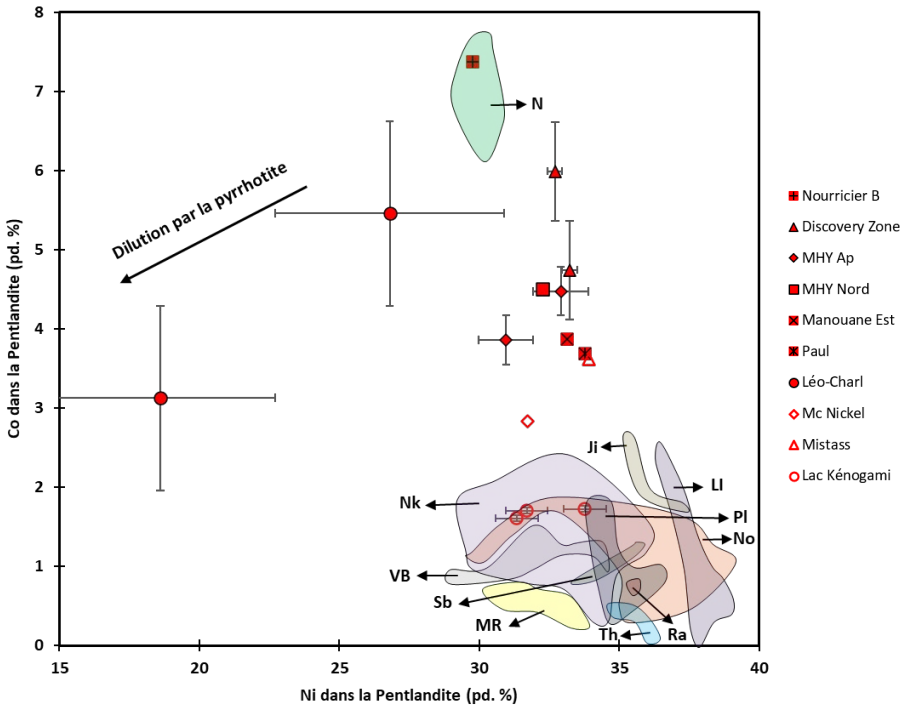


Figure 46 : Concentrations en Ni (pd. %) et en Co (pd. %) dans la pentlandite des indices du secteur de Lac à Paul (Nourricier B, Discovery Zone, MHY Ap, MHY Nord, Manouane Est, Paul et Léo-Char), de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi que des indices du Lac Kénogami (Dumont et Gagnon). Les champs ont été modifiés d'après Lavaure (2023) et les références qui y sont citées. (Abréviations : Ji : Jinchuan ; LI : Lac des Îles ; MR : Merensky Reef ; N : Nourricier ; Nk : Nkomati ; No : Norilsk ; Pl : Platreef ; Ra : Raglan ; Sb : Sudbury ; Th : Thompson ; VB : Voisey's Bay).

Dans le diagramme de la proportion modale de pentlandite (recalculée à 100 % de sulfures), en fonction du Co (ppm) dans la pentlandite (figure 47), deux populations distinctes sont observées. Les indices du secteur du Lac à Paul, ainsi que ceux de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et de Mistass), se caractérisent par de faibles proportions modales de pentlandite (0,5 à 8,5 % à 100 % de sulfures) et par des teneurs élevées en Co dans la pentlandite (> 2,5 pd. %). À l'inverse, les indices du Lac Kénogami présentent des proportions modales de pentlandite plus élevées (10 à 20 % à 100 % de sulfures) et des teneurs en Co plus faibles (< 2,5 pd. %). Cette relation suggère que des concentrations élevées en Co dans la pentlandite reflètent une faible proportion de pentlandite exsolue dans la minéralisation sulfurée. Cette observation peut être utilisée comme un critère pour distinguer des pentlandites associées à des minéralisations plus pauvre en Ni de celles associées à des minéralisations plus riches en Ni.

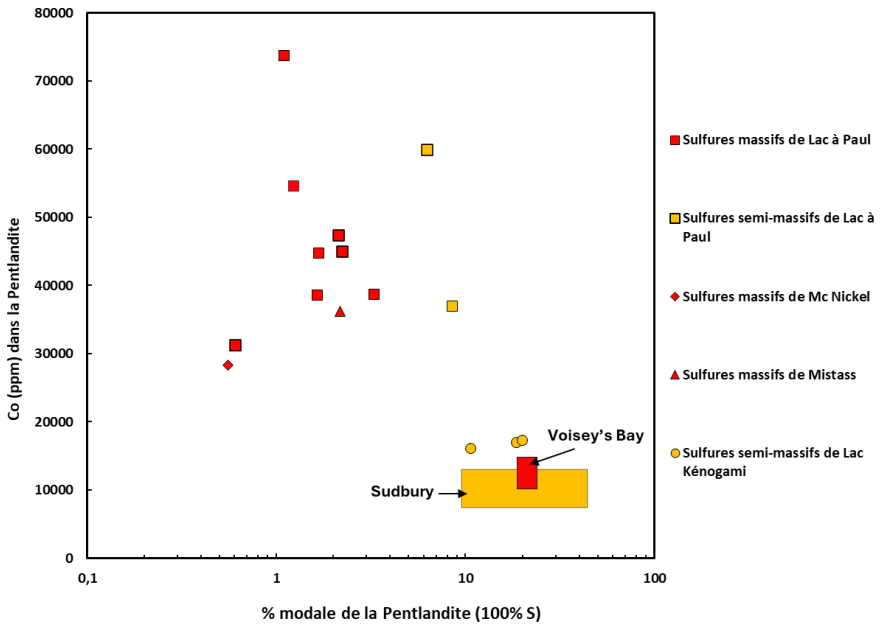


Figure 47 : Diagramme binaire de la proportion modale de pentlandite (à 100 % sulfures) en fonction du Co (ppm) dans la pentlandite des sulfures des indices de secteur de Lac à Paul, de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi que des indices du Lac Kénogami. Les données du gisement de Sudbury proviennent de Dare et al. (2010), tandis que celles de Voisey's Bay proviennent de Salim Amaral (2017).

Par comparaison, les gisements magmatiques Ni-Cu considérés comme économiques, tels que ceux de Sudbury (Dare et al., 2010) et de Voisey's Bay (Salim Amaral, 2017), présentent des proportions modales de pentlandite plus élevées comprises entre environ 10 et 45 % (à 100 % de sulfures). Les valeurs observées au Lac Kénogami (10 à 20 %) s'inscrivent dans cet intervalle, suggérant des conditions métallogéniques plus favorables que celles des indices de Lac à Paul la marge ouest de la SALSJ.

Néanmoins, il importe de souligner que le caractère économique d'une minéralisation ne repose pas uniquement sur la teneur en Ni (la proportion de la pentlandite), mais également sur le tonnage. Ainsi, bien que certains indices, tels que ceux du Lac Kénogami, peuvent présenter des teneurs en Ni favorables (Vaillancourt, 2001), leur potentiel économique demeure limité en raison de volumes insuffisants.

Dans le diagramme Se (ppm) dans la pentlandite en fonction du Ni (100 % sulfures) de la roche totale (figure 48), Mansur et al. (2025a) ont montré une corrélation positive entre le Se dans la pentlandite et le Ni de la roche totale, indiquant que la pentlandite issue

de minéralisations sulfurées riches en Ni présente des concentrations en Se plus élevées que celle provenant de minéralisations pauvres en Ni.

Les concentrations en Se dans la pentlandite des indices du secteur de Lac à Paul sont faibles (20,7 - 23,7 ppm) et s'accompagnent de teneurs en Ni de la roche totale également faibles (1,3 - 3,2 % Ni à 100 % sulfures). La pentlandite des indices McNickel et Mistass affichent des concentrations en Se dans la même gamme que celles des indices de Lac à Paul (17,2 - 23,9 ppm) et présentent également de faibles teneurs en Ni (0,5 - 2,0 % Ni à 100 % sulfures) ; elles se projettent ainsi dans le domaine des sulfures de Duluth (sub-économique). En revanche, le Se dans la pentlandite des indices du Lac Kénogami est plus élevé (44,8 - 76,3 ppm) et se caractérise par des teneurs en Ni également élevées (2,0 - 12,9 % Ni à 100 % sulfures), se projetant presque dans le même domaine que Voisey's Bay.

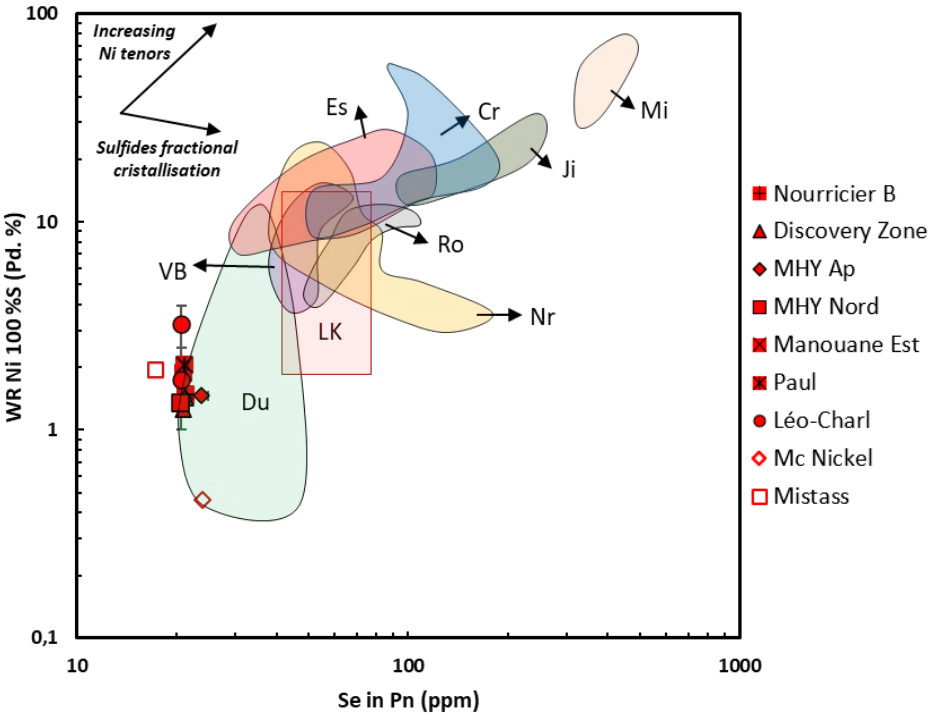


Figure 48 : Diagramme Se (ppm) dans la pentlandite en fonction du Ni (100 % sulfures) de la roche totale (WR) des sulfures des indices de secteur de Lac à Paul, de la marge ouest de la SALSJ (McNickel et Mistass), ainsi du Lac Kénogami (LK). Le diagramme et les champs sont modifiés d'après (Mansur et al., 2025a et références qui y sont citées). (Abréviations : Cr : Creighton ; Du : Duluth ; Es : Espedalen ; Ji : Jinchuan ; Mi : Mirabela ; Nr : Norilsk ; R : Romsås ; VB : Voisey's Bay). Pour Lac Kénogami, seule une boîte est représentée, car aucune donnée de roche totale n'était disponible pour les lames minces analysées.

7- Discussion et conclusions

7.1- Nature et évolution du système magmatique

Les lithologies du secteur de Lac à Paul correspondent à une portion évoluée et contaminée de la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. La dominance des faciès riches en orthopyroxène est un indicateur de contamination du magma par la croûte continentale (Frost et al., 2010; Jing et al., 2019; Mao et al., 2019). Les compositions andésinitiques des plagioclases, les Mg# relativement faibles des phases mafiques, ainsi que la présence systématique d'oxydes et d'apatite, témoignent d'un magma ayant subi une cristallisation fractionnée avancée, sous des conditions de pression faible à modérée (4 kbar soit environ 12 km). Ces caractéristiques excluent l'implication directe d'un magma primitif comme source principale de la minéralisation. Les lithologies étudiées présentent néanmoins une composition minéralogique similaire, avec des Mg# comparables pour les orthopyroxènes et clinopyroxènes, ainsi qu'un % An homogène dans les plagioclases. Toutefois, certains plagioclases présentent des teneurs en Sr plus élevées suggérant des injections locales de nouveau magma. Le Gabbro de Steve, correspondant à une gabbronorite à grains fins, se distingue par une signature géochimique primitive. Les plagioclases, de composition labradoritique (An_{54-68}), présentent de faibles teneurs en Sr (0,042 - 0,056 %). Les orthopyroxènes montrent, quant à eux, des enrichissements marqués en Ni et en Cr, pour des valeurs de Mg# comparables à celles observées dans les autres lithologies du secteur de Lac à Paul. L'ensemble de ces caractéristiques met en évidence une pulse magmatique distincte.

7.2- Origine magmatique des sulfures et rôle des conduits

Les textures sulfurées (massives à disséminées) sont dominées par la pyrrhotite avec les proportions mineures de la pentlandite (1 – 9 % dans 100 % sulfures) et la chalcopyrite confirment une origine magmatique liée à la ségrégation et à l'accumulation d'un liquide sulfuré immiscible. La mise en place des sulfures est interprétée comme étant contrôlée par des conduits magmatiques étroits, probablement des dykes d'orthopyroxénite

évolués, aujourd'hui rarement exposés sur le terrain et/ou en forage. Les contacts nets entre les amas sulfurés et les roches encaissantes, ainsi que le caractère injecté des sulfures, appuient fortement ce modèle.

7.3- Contrôle du degré d'évolution sur les teneurs en métaux

Les teneurs en Ni (0,6 – 3,2 % à 100 % sulfures), Cu (0,1 – 1,6 % à 100 % sulfures, excluant une valeur anomalique à 10,0 %) et Co (0,09 – 1,19 % à 100 % sulfures) des indices du Lac à Paul (marge nord de la SALSJ), bien que faibles, sont légèrement plus élevées que celles observées dans la marge ouest de la SALSJ (McNickel, Yenevac et Mistass ; 0,4 – 2,0 % Ni à 100 % sulfures ; 0,08 – 0,6 % Cu à 100 % sulfures ; 0,07 – 0,2 % Co à 100 % sulfures ; Hassen Ali et al., 2023). Elles contrastent toutefois avec les gisements associés à des conduits mafiques-ultramafiques primitifs comme Voisey's Bay et Lac Kénogami (2 – 10 % Ni à 100 % sulfures). Cette différence reflète un système magmatique plus évolué, dans lequel les liquides sulfurés étaient appauvris en Ni. Les enrichissements locaux en Cu observés dans certains sulfures semi-massifs de l'indice Nourricier traduisent un fractionnement local des sulfures, sans pour autant indiquer un changement fondamental du régime magmatique.

7.4- Rôle clé de l'assimilation crustale et des rapports S/Se

Les rapports S/Se supérieurs aux valeurs mantelliques constituent un argument majeur en faveur d'une assimilation de soufre crustal, probablement issue des gneiss encaissants riches en S du Complexe de Rouvrary (Huss, 2002). Cette assimilation a favorisé la saturation en sulfures dans le magma responsable de la mise de place des minéralisations.

7.5- Appauvrissement en ÉGP et deux épisodes de ségrégation sulfurée

Les très faibles teneurs en ÉGP, en particulier en Rh et IÉGP, indiquent que les magmas parentaux associés aux minéralisations sulfurées des marges nord et ouest auraient

subi une ségrégation précoce d'un liquide sulfuré, entraînant un appauvrissement marqué avant la mise en place finale des minéralisations observées. Les minéralisations du Lac Kénogami présentent toutefois des teneurs légèrement plus élevées en ÉGP, possiblement en raison d'un facteur R plus élevé, bien que ces magmas aient également été initialement appauvris en ÉGP (Vaillancourt, 2001).

7.6- Implications pour l'exploration

Les indices de Ni-Cu dans le secteur de Lac à Paul semblent associés à de minces dykes d'orthopyroxénite évolués (sub-métriques), rarement exposés sur le terrain et/ou en forage dans le secteur. L'analyse de la composition de la pentlandite, en particulier les teneurs en Se et en Co, permet de distinguer les sulfures riches en Ni des sulfures plus pauvres en Ni. Les pentlandites issues des minéralisations riches en Ni présentent généralement des concentrations élevées en Se et des teneurs faibles en Co, tandis que celles provenant des minéralisations plus pauvres en Ni montrent des teneurs plus faibles en Se et des concentrations en Co plus élevées.

Dans le secteur de Lac à Paul, le potentiel est principalement limité par le caractère évolué du système et par une histoire précoce de ségrégation des sulfures. Malgré tout, la présence de dykes d'orthopyroxénite associés à des sulfures massifs démontre un potentiel dans ce secteur. Du travail reste à faire pour localiser davantage de ces magmas et, par conséquent, des volumes plus importants de minéralisation.

Références

Amelin, Y., Li, C., & Naldrett, A. J. (1999). Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U–Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite. Lithos, 47(1), 33-51. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00006-7

Ashwal, L. D. (1993). Proterozoic massif-type anorthosites. Anorthosites, 82-218.

Banerjee, S., Pufahl, P. K., & Longstaffe, F. J. (2024). The Lac à l'Orignal phosphate deposit and constraints on high-quality phosphatic ore in massif-type anorthosite, Grenville Province, Canada. Journal of Geochemical Exploration, 263, 107499. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107499

Barnes, S.-J. (1999). The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids. Short Course Notes-Geological Association of Canada, 13, 69.

Barnes, S.-J., Boyd, R., Korneliussen, A., Nilsson, L., Often, M., Pedersen, R., & Robins, B. (1988). The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: examples from Norway. Geo-platinum 87, 113-143.

Barnes, S.-J., & Lightfoot, P. C. (2005). Formation of magmatic nickel sulfide deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. Economic Geology, 100th Anniversary Volume, 179-213. https://doi.org/https://doi.org/10.5382/AV100.08

Batanova, V., Thompson, J., Danyushevsky, L., Portnyagin, M., Garbe-Schönberg, D., Hauri, E., Kimura, J.-I., Chang, Q., Senda, R., Goemann, K., Chauvel, C., Campillo, S., Ionov, D., & Sobolev, A. (2019). New Olivine Reference Material for In Situ Microanalysis. Geostandards and Geoanalytical Research, 43, 453-473. https://doi.org/10.1111/ggr.12266

Belousov, I., Danyushevsky, L., Goemann, K., Gilbert, S., Olin, P., Thompson, J., Lounejeva, E., & Garbe-Schönberg, D. (2023). STDGL3 , a Reference Material for Analysis of Sulfide Minerals by Laser Ablation ICP-MS : An Assessment of Matrix Effects and the Impact of Laser Wavelengths and Pulse Widths. Geostandards and Geoanalytical Research, 47. https://doi.org/10.1111/ggr.12512

Bence, P., Petrus, J. A., Savard, D., Woodhead, J., Hergt, J., Greig, A., Paton, C., & Raynor, P. (2023). Time resolved trace element calibration strategies for LA-ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1995–2006. https://doi.org/10.1039/D3JA00037K

Block, M., Lalancette, J., & Girard, R. (2010). 2010 drilling program, Lac Yenevac project. 9141-6883 Quebec Inc. Rapport statutaire soumis au gouvernement du Québec, GM 65346, 166. 168 plans.

Bounour, O., Dare, S., Simard, R.-L., & Moukhsil, A. (2025). Cartographie à l'aide du XRF portatif des faciès de la marge nord de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean associés à des minéralisations en Ni-Cu-Co, Province de Grenville centrale, Québec. UQAC, MRNF, MB 2025-09, 82. http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/MB202509

Cisse, M., & Sarr, A. (2024). Développement d'une méthode d'analyse chimique des minéraux mafiques par fluorescence-X portative appliquée à la répartition spatiale des faciès de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, Québec. BSc thesis, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), 78 pages.

Clark, T., & Hébert, C. (1998). Étude du gîte de Cu-Ni-Co de McNickel, Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. Ministère des Ressources naturelles, Québec, ET 98-02, 52.

Corrigan, D., & Hanmer, S. (1997). Anorthosites and related granitoids in the Grenville orogen: A product of convective thinning of the lithosphere? Geology, 25(1), 61-64.

Corriveau, L., Perreault, S., Davidson, A., & Goodfellow, W. (2007). Prospective metallogenic settings of the Grenville Province. Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication(5), 819-847.

Dare, S. A., Barnes, S.-J., & Prichard, H. M. (2010). The distribution of platinum group elements (PGE) and other chalcophile elements among sulfides from the Creighton Ni–Cu–PGE sulfide deposit, Sudbury, Canada, and the origin of palladium in pentlandite. Mineralium Deposita, 45, 765-793.

Debari, S. M., & Coleman, R. G. (1989). Examination of the deep levels of an island arc: evidence from the Tonsina ultramafic-mafic assemblage, Tonsina, Alaska [Article]. Journal of Geophysical Research, 94(B4), 4373-4391. https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04373

Emslie, R., Hamilton, M., & Thériault, R. (1994). Petrogenesis of a mid-Proterozoic anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) complex: Isotopic and chemical evidence from the Nain Plutonic Suite. The Journal of Geology, 102(5), 539-558.

Francoeur, G. (1998). Rapport des travaux 1997, projet Chute-des-Passes. Mines d'Or Virginia Inc., Fonds minier du Saguenay–Lac-Saint-Jean. rapport statutaire soumis au gouvernement du Québec, GM 56023, 259. 215 plans. http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/GM56023

Fredette, J. (2006). Pétrographie, géochimie et potentiel économique en Fe-Ti-P du secteur du Lac à Paul, partie nord de la suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, province de Grenville, Québec. MSc Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 304 pages.

Frost, C. D., Frost, B. R., Lindsley, D. H., Chamberlain, K. R., Swapp, S. M., & Scoates, J. S. (2010). Chemical and isotopic evolution of the anorthositic plutons of the laramie anorthosite complex: explanations for variations in silica activity and oxygen fugacity of massif anorthosites. Canadian Mineralogist, 48, 925-946.

Girard, R., & Fournier, N. (2008). 2008 drilling program, Lac Yenevac project. 9141-6883 Quebec Inc. Rapport statutaire soumis au gouvernement du Québec, GM 64034, 293. 220 plans.

Grant, M. (2020). Formation of Magmatic Fe-Ti-V-P Deposits Within the Lac St. Jean Area Saguenay, Québec, Canada: Insights from Trace Element Composition of Fe-Oxides and Apatite. Msc Thesis, Université d'Ottawa, WorldCat. Ontario, 361 pages. http://central.bac-lac.gc.ca/.redirect?app=damspub&id=c3c1f17e-a335-4c2b-849a-a16e0dd97db9

Hassen Ali, T., Simard, R., Dare, S., & Moukhsil, A. (2023). Contexte géologique des minéralisations de Ni-Cu±Co et de Fe-V-Ti-P de la marge ouest de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. UQAC, MRNF, MB 2023-08, 70.

Hébert, C. (1999). Emplacement of the Lac-St.-Jean Anorthositic Suite, Grenville Province, Canada. European Union of Geoscience, Strasbourg, 1999. Abstracts in the Journal of Conference, volume 4, number 1, page 687.

Hébert, C., & Beaumier, M. (2000a). Géologie de la région du Lac à Paul (22E/15) Ministère des Ressources naturelles. RG, 99, 05-34.

Hébert, C., & Cadieux, A.-M. (2003). Géologie de la région des lacs Portneuf et Maria-Chapdelaine (22E/01 et 22E/02). Ministère des Ressources naturelles, Québec, RG 2002-13, 46, 42 cartes.

Hébert, C., Cadieux, A.-M., & Breemen, O. v. (2005). Temporal evolution and nature of Ti Fe P mineralization in the anorthosite mangerite charnockite granite (AMCG) suites of the south-central Grenville Province, Saguenay Lac St. Jean area, Quebec, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 42(10), 1865-1880.

Hébert, C., & Lacoste, P. (1998). Géologie de la région du lac Jalobert (22D/10). Ministère des Ressources naturelles, Québec, RG 97-05, 15.

Hébert, C., & van Breemen, O. (2001). Emplacement of the Lac St. Jean Anorthositic Suite, Grenville Province, Canada. In Boston 2001: A Geo-Odyssey, GSA Annual Meeting and Exposition, Boston, Mass., 1–10 November 2001. Geological Society of America, Boulder, Colo., 90.

Hébert, C., & van Breemen, O. (2004). Mesoproterozoic basement of the Lac St. Jean Anorthosite Suite and younger Grenvillian intrusions in the Saguenay region, Québec: structural relationships and U-Pb geochronology. MEMOIRS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 65-80.

Hébert, C., Van Breemen, O., Cadieux, A.-M., & Gosselin, C. (2009). Région du réservoir Pipmuacan,(SNRC 22E): synthèse géologique. MRNF, Commission géologique du Canada, RG 2009-01, 59.

Heinonen, A., Jakobsson, M., Kiviharju, M., Virtanen, S., Aro, K., Kyrgiou, M., Nieminen, P., & Kalliala, I. (2020). Role of colposcopy after treatment for cervical intraepithelial neoplasia [Article]. Cancers, 12(6), 1-12, Article 1683. https://doi.org/10.3390/cancers12061683

Helmy, H. M., Abd El-Rahman, Y. M., Yoshikawa, M., Shibata, T., Arai, S., Tamura, A., & Kagami, H. (2014). Petrology and Sm–Nd dating of the Genina Gharbia Alaskan-type complex (Egypt): Insights into deep levels of Neoproterozoic island arcs. Lithos, 198-199, 263-280. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.028

Hervet, M., van Breemen, O., & Higgins, M. D. (1994). U–Pb igneous crystallization ages of intrusive rocks near the southeastern margin of the Lac-St-Jean anorthosite complex, Grenville Province, Québec. Radiogenic age and isotopic studies, Report, 8, 115-124.

Higgins, M. D., & van Breemen, O. (1992). The age of the Lac-Saint-Jean anorthosite complex and associated mafic rocks, Grenville Province, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 29(7), 1412-1423.

Higgins, M. D., & van Breemen, O. (1996). Three generations of anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) magmatism, contact metamorphism and tectonism in

the Saguenay-Lac-Saint-Jean region of the Grenville Province, Canada. Precambrian Research, 79(3-4), 327-346.
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. MSc Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 220 pages.
Indares, A. (2020). Deciphering the metamorphic architecture and magmatic patterns of large hot orogens: Insights from the central Grenville Province. Gondwana Research, 80, 385-409.
Jing, J.-J., Su, B.-X., Xiao, Y., Zhang, H.-F., Uysal, İ., Chen, C., Lin, W., Chu, Y., & Saka, S. (2019). Reactive origin of mantle harzburgite: Evidence from orthopyroxene-spinel association. Lithos, 342-343, 175-186. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.011
Jochum, K. P., Nohl, U., Herwig, K., Lammel, E., Stoll, B., & Hofmann, A. W. (2005). GeoReM: A New Geochemical Database for Reference Materials and Isotopic Standards. Geostandards and Geoanalytical Research, 29(3), 333-338. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2005.tb00904.x
Katako Diyoyo, J., Dare, S., Simard, R.-L., & Moukhsil, A. (2024). Cartographie de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) dans le secteur des minéralisations de Fe-Ti-VP du corridor de Saint-Charles-de-Bourget et de Bégin-Lamarche. UQAC, MRNF, MB 2024-08, 37.
Kharbish, S., Eldosouky, A. M., & Amer, O. (2022). Integrating mineralogy, geochemistry and aeromagnetic data for detecting Fe–Ti ore deposits bearing layered mafic intrusion, Akab El-Negum, Eastern Desert, Egypt. Scientific Reports, 12(1), 15474.
Lavaure, S. (2023). Valorisation géométallurgique des minéraux critiques et stratégiques du Saguenay–Lac-Saint-Jean. 17.
Li, C., & Naldrett, A. J. (1999). Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids. Lithos, 47(1), 1-31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00005-5
Maier, R. P., Dare, S. A. S., & Smith, W. D. (2025). Petrogenesis of the 1149 Ma Etoile Suite Mafic Intrusion, Quebec: implications for vanadium mineralisation in Proterozoic anorthosite-bearing terranes. Mineralium Deposita, 60(2), 323-349. https://doi.org/10.1007/s00126-024-01298-9
Mansur, E. T., Dare, S. A. S., Slagstad, T., & Sandstad, J. S. (2025a). Distribution of chalcophile elements during crystallisation and alteration of magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposits in the anorthositic Espedalen Complex, Norway: pentlandite as an indicator for tracking metal tenors. Mineralium Deposita, 60(2), 453-477. https://doi.org/10.1007/s00126-024-01246-7
Mao, Y.-J., Barnes, S. J., Qin, K.-Z., Tang, D., Martin, L., Su, B., & Evans, N. J. (2019). Rapid orthopyroxene growth induced by silica assimilation: constraints from sector-zoned orthopyroxene, olivine oxygen isotopes and trace element variations in the Huangshanxi Ni–Cu deposit, Northwest China. Contributions to Mineralogy and Petrology, 174(4), 33. https://doi.org/10.1007/s00410-019-1574-6
McDonough, W. F., & Sun, S. s. (1995). The composition of the Earth. Chemical geology, 120(3), 223-253. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4
Meneux, P., Clairet, R., Raymond, V., Guérin-Tremblay, H., & Duplessis, C. (2023). 2021-2022 exploration drilling campaign on Graal property. Laurentia Exploration Inc.

for Canada Silver Cobalt Works Inc., GM 73399, 1271. http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/GM73399

Mercier, F. (2022). Répartition spatiale des faciès de la Suite anorthositique de Lac St Jean: implications pour exploration minérale. Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), 48 pages.

Miloski, P., Dare, S., Morisset, C.-E., Davies, J. H. F. L., Perrot, M. G., & Savard, D. (2023). Petrogenesis of Fe-Ti-P mineral deposits associated with Proterozoic anorthosite massifs in the Grenville Province: insights from oxide and apatite trace-element geochemistry at Lac à l'Orignal, Quebec, Canada. Mineralium Deposita, 59(3), 519-556. https://doi.org/10.1007/s00126-023-01216-5

Morse, S. (2015). Kiglapait Intrusion, Labrador. Layered intrusions, 589-648. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9652-1_13

Naldrett, A. J. (2004). Theoretical considerations. In A. J. Naldrett (Ed.), Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Springer Berlin Heidelberg, 21-66. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1_2

Namur, O., Charlier, B., Toplis, M. J., Higgins, M. D., Liégeois, J.-P., & Vander Auwera, J. (2010). Crystallization Sequence and Magma Chamber Processes in the Ferrobasaltic Sept Iles Layered Intrusion, Canada. Journal of petrology, 51(6), 1203-1236. https://doi.org/10.1093/petrology/egq016

Ouellet, R. (2014). Rapport des travaux sur la propriété KM50, été 2012. Claims Tremblay; 2634-1461 Quebec Inc. Rapport statutaire soumis au gouvernement du Québec, GM 68267, 84.

Owens, B. E., Dymek, R. F., Brannon, J. C., & Podosek, F. A. (1994). Age and radiogenic isotopic composition of a late- to post-tectonic anorthosite in the Grenville Province: the Labrieville massif, Quebec. Lithos, 31, 189-206.

Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., & Hergt, J. (2011). Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. Journal of Analytical Atomic Spectrometry. https://doi.org/10.1039/c1ja10172b

Queffurus, M., & Barnes, S.-J. (2015). A review of sulfur to selenium ratios in magmatic nickel–copper and platinum-group element deposits. Ore geology reviews, 69, 301-324.

Rivers, T. (2012). Upper-crustal orogenic lid and mid-crustal core complexes: signature of a collapsed orogenic plateau in the hinterland of the Grenville Province. Canadian Journal of Earth Sciences, 49(1), 1-42.

Rivers, T., Martignole, J., Gower, C., & Davidson, A. (1989). New tectonic divisions of the Grenville Province, southeast Canadian Shield. Tectonics, 8(1), 63-84.

Salim Amaral, L. F. (2017). The distribution of platinum-group elements and other chalcophile elements among sulfide minerals from the Ovoid ore body of the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, Canada. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 154 pages. https://constellation.uqac.ca/id/eprint/4185/

Sarr, R., & Ndiaye, M. (2025). Utilisation de la chimie des orthopyroxènes par LA-ICP-MS pour évaluer les différents processus magmatiques impliqués dans la formation de massif anorthositique. Projet de fin d'études, Université du Québec à Chicoutimi 54 pages.

Savard, D., Barnes, S. J., & Meisel, T. (2010). Comparison between nickel-sulfur fire assay te co-precipitation and isotope dilution with high-pressure asher acid digestion for the determination of platinum-group elements, rhenium and gold [Article]. Geostandards and Geoanalytical Research, 34(3), 281-291. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2010.00090.x

Spaggiari, C., Kirkland, C., Smithies, R., Occhipinti, S., & Wingate, M. (2014). Geological framework of the Albany–Fraser Orogen. Albany–Fraser Orogen seismic and magnetotelluric (MT) workshop 2014: extended abstracts compiled by CV Spaggiari and IM Tyler: Geological Survey of Western Australia, Record.

Sun, S.-S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1), 313-345.

Taranovic, V., Barnes, S. J., Beresford, S., Williams, M., MacRae, C., & Schoneveld, L. E. (2022). Nova-Bollinger Ni-Cu sulfide ore deposits, Fraser zone, Western Australia: Petrogenesis of the host intrusions. Economic Geology, 117(2), 455-484.

Tondoh, N. A. (2021). Développement d'une méthode d'analyse chimique de plagioclase par fluorescence X portative appliquée à la répartition spatiale des faciès de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. Bsc. Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 73 pages.

Tremblay, P., Girard, R., Gilders, R., Cheung, L., & Tremblay, L. (2011). Exploration project, Poissons Blancs (McNickel). 9157-2222 Quebec Inc. Rapport statutaire soumis au gouvernement du Québec, GM 66150, 103.

Turcotte, J. (2014). Campagne de forage d'exploration pour le nickel, le cuivre et le cobalt, projet Poissons Blancs. Ressources Maxima Inc. Rapport statutaire soumis au gouvernement du Québec, GM 67944, 236.

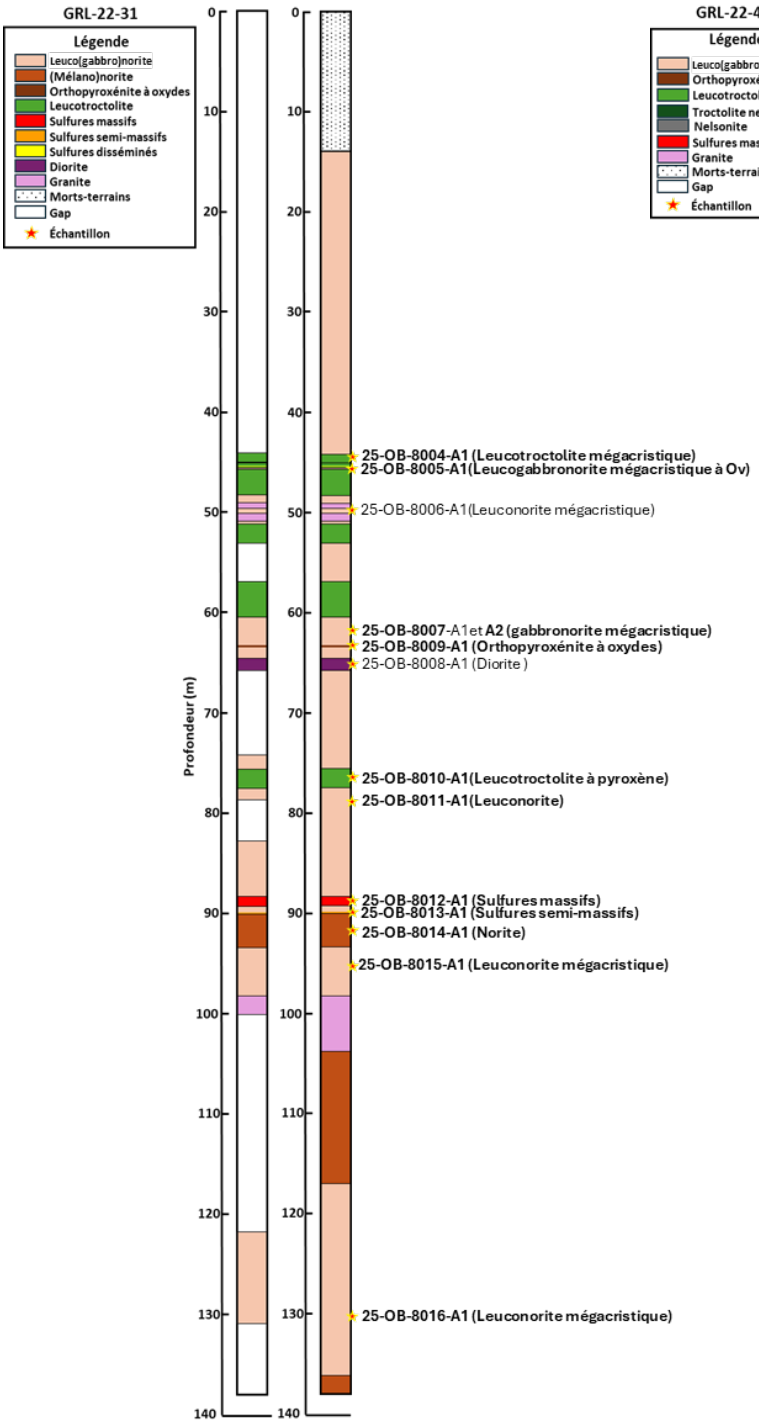
Turcotte, S. (2001). Mise en place de la portion nord-est de la suite anorthositique du Lac-Saint-Jean durant un chevauchement Grenvillien. MSc Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 204 pages.

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. MSc. Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 204 pages.

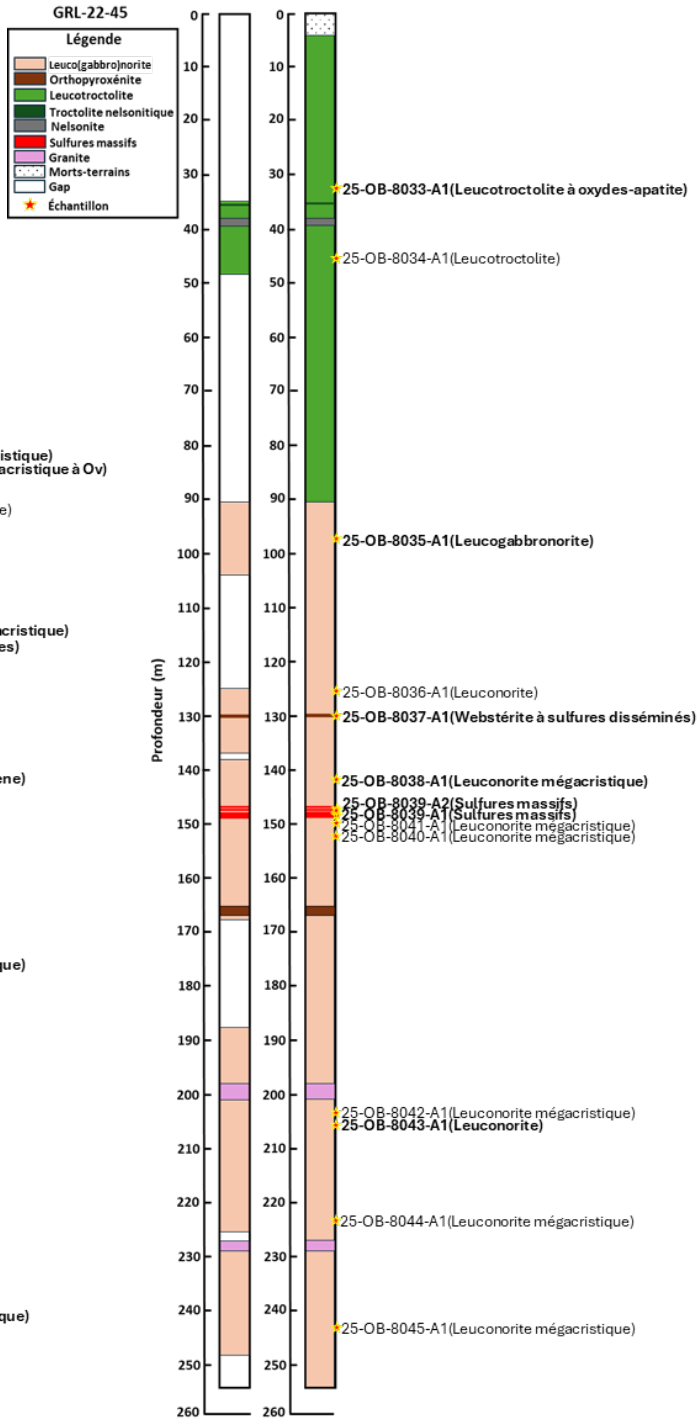
van Breemen, O. (2009). Report on U-Pb geochronology for the Pipmuacan Reservoir region. Geological Survey of Canada, MB 2009-04, 13.

Woussen, G., Dimroth, E., Corriveau, L., & Archer, P. (1981). Crystallization and emplacement of the Lac St-Jean anorthosite massif (Quebec, Canada). Contributions to Mineralogy and Petrology, 76, 343-350.

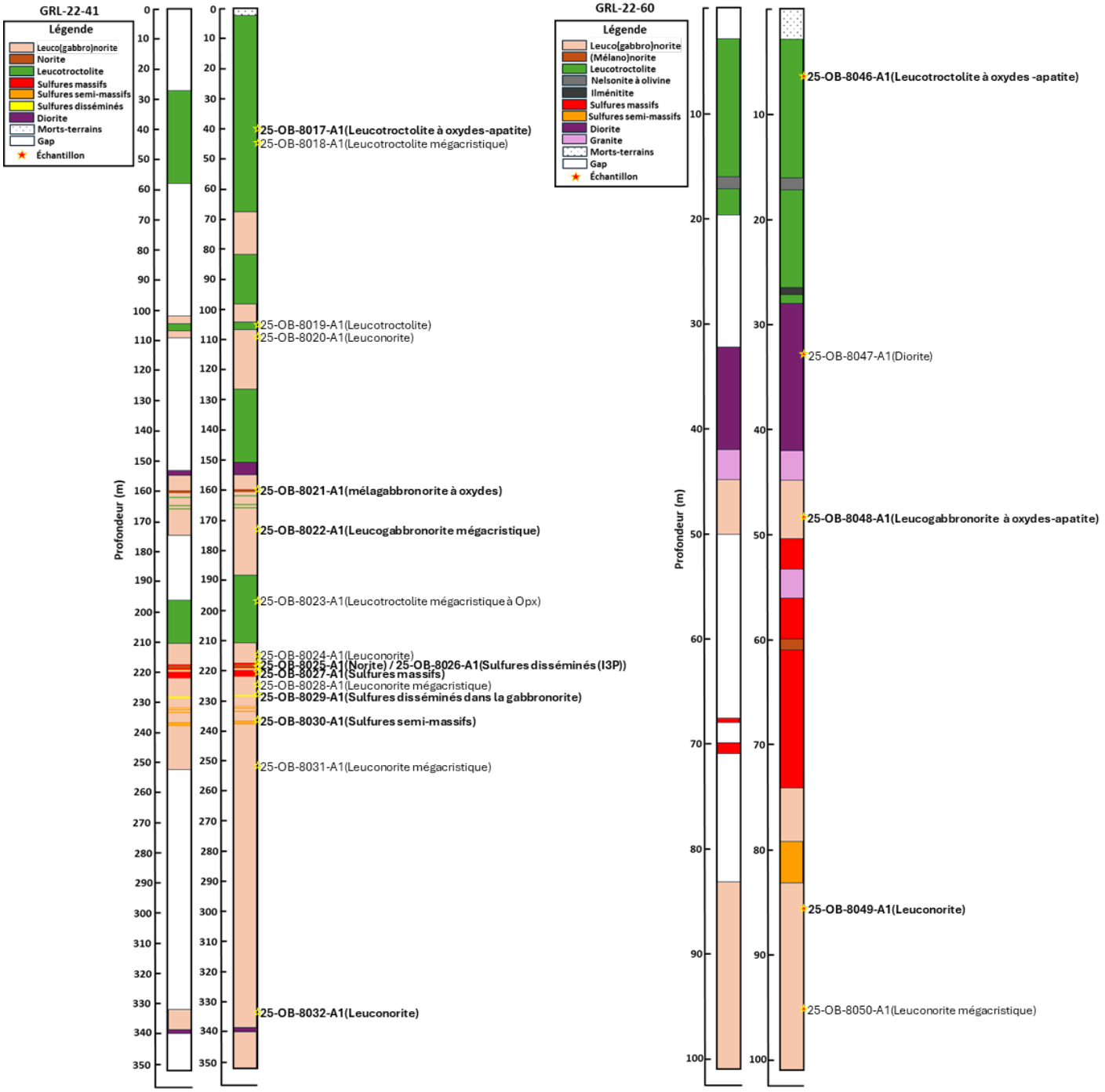
Appendice : logs avec l'emplacement des échantillons



Appendice 1 : levé stratigraphique du forage GRL-22-31 (Discovery Zone). À gauche : log basé sur les observations de terrain. À droite : log complet incluant les sections de forage non-observées comblées à partir des données de littérature (Meneux et al., 2023), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses. Les lithologies dont les noms sont en **gras** ont été confirmées en lame mince.

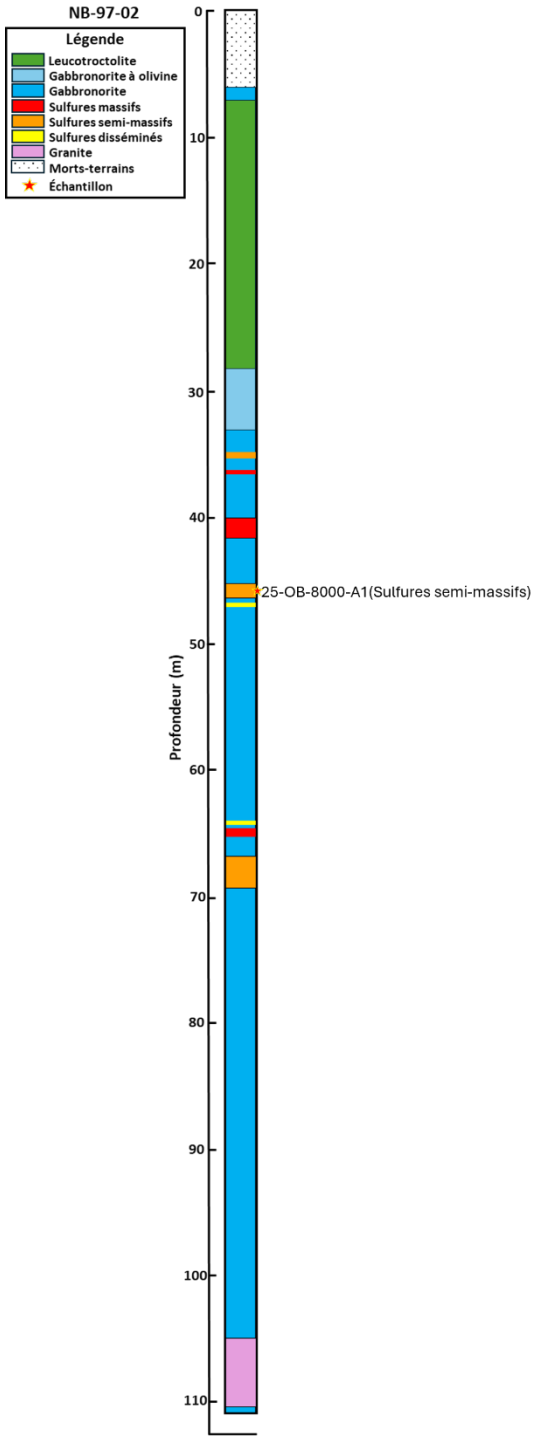


Appendice 2 : levé stratigraphique du forage GRL-22-45 (MHY Ap (Gravi Zone)). À gauche : log basé sur les observations de terrain. À droite : log complet incluant les sections de forage non-observées comblées à partir des données de littérature (Meneux et al., 2023), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses. Les lithologies dont les noms sont en **gras** ont été confirmées en lame mince.

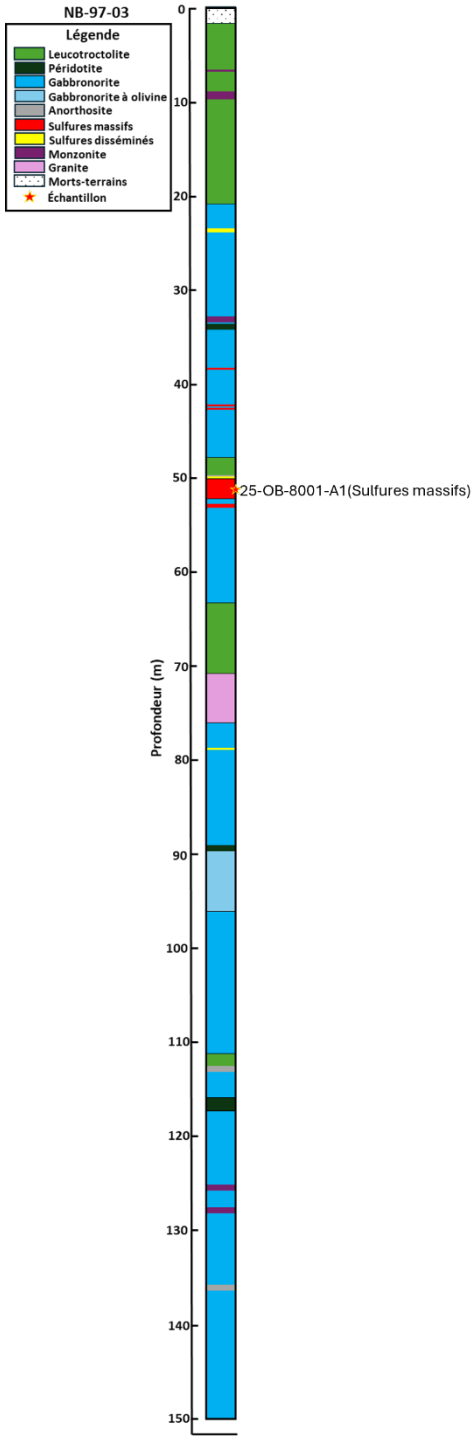


Appendice 1 : levé stratigraphique du forage GRL-22-41 (MHY Nord). À gauche : log basé sur les observations de terrain. À droite : log complet incluant les sections de forage non-observées comblées à partir des données de littérature (Meneux et al., 2023), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses. Les lithologies dont les noms sont en **gras** ont été confirmées en lame mince.

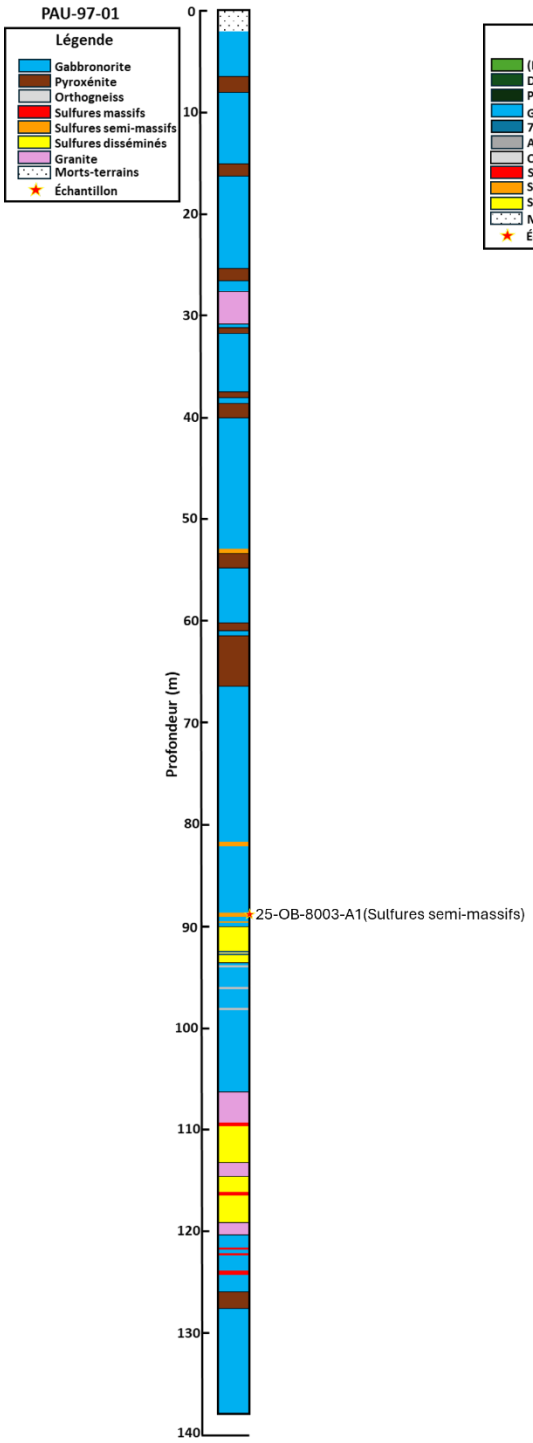
Appendice 2 : levé stratigraphique du forage GRL-22-60 (MHY Nord). À gauche : log basé sur les observations de terrain. À droite : log complet incluant les sections de forage non-observées comblées à partir des données de littérature (Meneux et al., 2023), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses. Les lithologies dont les noms sont en **gras** ont été confirmées en lame mince.



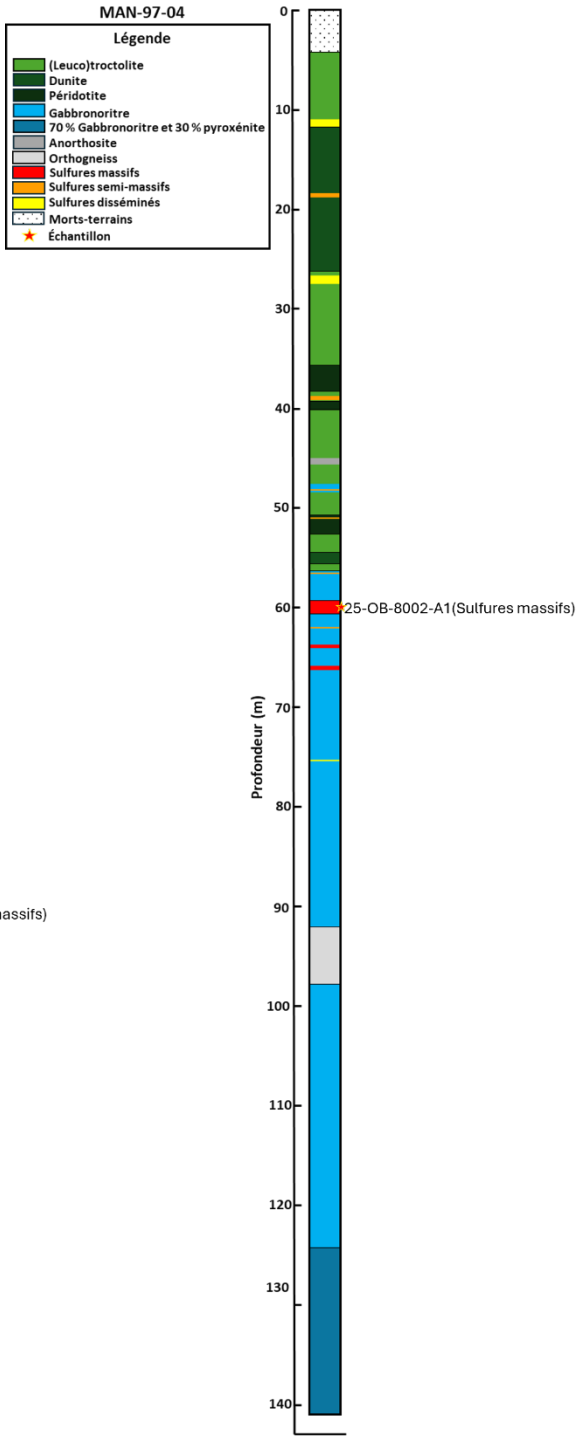
Appendice 3 : levé stratigraphique du forage NB-97-02 (Nourricier B), construit à partir des données de la littérature (Francoeur, 1998), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses.



Appendice 4 : levé stratigraphique du forage NB-97-03 (Nourricier B), construit à partir des données de la littérature (Francoeur, 1998), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses.



Appendice 5 : levé stratigraphique du forage PAU-97-01 (Paul), construit à partir des données de la littérature (Francoeur, 1998), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses.



Appendice 6 : levé stratigraphique du forage MAN-97-04 (Manouane Est), construit à partir des données de la littérature (Francoeur, 1998), avec l'emplacement des échantillons et lithologie échantillonnée entre parenthèses.