

MB 2025-08

Cartographie de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) et étude des minéralisations de Fe-Ti-V-P associées dans le corridor de Saint-Charles-de-Bourget et de Bégin-Lamarche

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



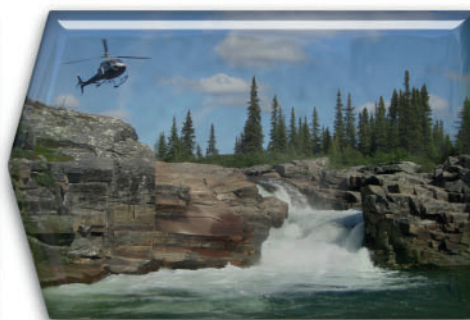
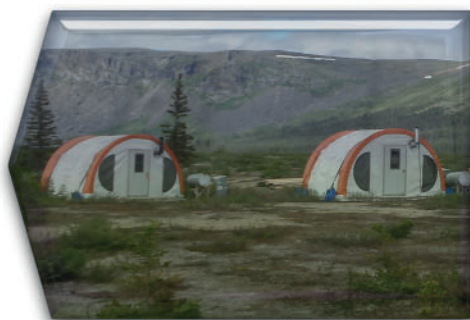
License

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





Cartographie de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) et étude des minéralisations de Fe-Ti-V-P associées dans le corridor de Saint-Charles-de-Bourget et de Bégin-Lamarche

Jonathan Katako Diyoyo, Sarah Dare, Renée-Luce Simard et Abdelali Moukhsil

MB 2025-08



Ressources naturelles
et Forêts

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.

Rapport final

Cartographie de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) et étude des
minéralisations de Fe-Ti-V-P associées dans le corridor de Saint-Charles-de-Bourget et
de Bégin-Lamarche

Par Jonathan Katako Diyoyo¹

Sarah Dare, Ph.D.¹, Renée-Luce Simard, géo. ing. Ph.D.¹ et Abdelali Moukhsil, géo.
Ph.D.²

1- Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

2- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF)

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de maîtrise à l'Université du Québec à
Chicoutimi (UQAC)

Présenté en date du 3 mai 2025

Table des matières

1	Introduction	7
2	Géologie régionale.....	8
2.1	Suite anorthositique de Lac-St-Jean	8
3	Résultats	11
3.1	Localisation des travaux de terrain.....	11
3.2	Lithologies dominantes dans la zone d'études	12
3.2.1	Pétrographie des lithologies principales	13
3.2.2	Pétrographie des dykes	22
3.3	Pétrographie de la minéralisation Fe-Ti-V-P.....	29
3.3.2	Relation entre la minéralisation et les roches hôtes.....	39
4	Lithogéochimie.....	40
4.1	Éléments majeurs et mineurs	41
4.2	Éléments traces	46
5	Composition de plagioclase.....	53
6	Distribution spatiale des données	58
7	Conclusion.....	61
8	Références	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean modifiée de SIGEOM (2024).	9
Figure 2 : Carte géologique sur fond de couverture géophysique (gradient vertical du champ magnétique résiduel modifié de Intissar et Benahmed, 2021) de la zone d'étude, marge sud de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ)	10
Figure 3 : Carte de distribution des principales lithologies observées aux différentes stations d'observation pour les deux secteurs d'études (Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche)	12
Figure 4 : Photographies de terrain et microscopiques de l'anorthosite.....	14
Figure 5 : Microphotographies des minéraux opaques de l'anorthosite en lumière réfléchie.	15
Figure 6 : Photographies de terrain et microscopiques de la leuconorite.....	17
Figure 7 : Microphotographies des minéraux opaques de la leuconorite en lumière réfléchie.	18
Figure 8 : Photographies de terrain et microscopiques de la leucotroctolite.....	19
Figure 9 : Microphotographies des minéraux opaques de la leucotroctolite en lumière réfléchie.	20
Figure 10 : Photographies de terrain et microscopiques de la leucogabbro-norite.....	21
Figure 11 : Microphotographies des minéraux opaques de la leucogabbro-norite en lumière réfléchie.	22
Figure 12 : Photographies de terrain et microscopiques de la ferrodiorite (dyke).	24
Figure 13 : Microphotographies des minéraux opaques du dyke de ferrodiorite en lumière réfléchie.	25
Figure 14 : Photographies de terrain et microscopiques de (leuco)gabbro-norite (dyke).26	
Figure 15 : Microphotographies des minéraux opaques du dyke de (leuco)gabbro-norite en lumière réfléchie.	27
Figure 16 : Photographies de terrain et microscopiques de la leucotroctolite (dyke). ...	28
Figure 17 : Microphotographies des minéraux opaques du dyke de leucotroctolite en lumière réfléchie.	29
Figure 18 : Carte de distribution des lithologies observées dans la zone minéralisée dans le secteur Saint-Charles-de-Bourget sur fond de carte géologique de Jooste, 1948.....	30

Figure 19 : Carte de distribution des lithologies observées dans la zone minéralisée dans le secteur Bégin-Lamarche	31
Figure 20 : Vue en coupe schématique des forages BL-23-01 (150/45) et BL-23-02 (330/45) avec les différentes lithologies observées.....	31
Figure 21 : Photographies de terrain et microscopiques de la magnétitite à olivine.....	33
Figure 22 : Microphotographies des minéraux opaques de la magnétitite en lumière réfléchie.	34
Figure 23 : Photographies de terrain et microscopiques de la nelsonite à olivine.....	35
Figure 24 : Microphotographies des minéraux opaques de la nelsonite à olivine en lumière réfléchie.	36
Figure 25 : Microphotographies de la gabbronorite à oxydes et apatite.	37
Figure 26 : Microphotographies de la troctolite à oxydes et apatite à grain fin à moyen.	39
Figure 27 : A) Anorthosite avec des oxydes de fer et titane disséminés et en amas à Saint-Charles-de-Bourget (23JD037); et B) Leucotroctolite avec des oxydes de fer et titane et apatite (nelsonite) en amas à Saint-Charles-de-Bourget (ligne en trait tiretée rouge ; 23JD038).	40
Figure 28 : Diagrammes lithogéochimiques de Harker : A) Al_2O_3 vs. SiO_2 ; B) Na_2O vs SiO_2 ; C) K_2O vs SiO_2 ; D) MgO vs SiO_2	44
Figure 29 : Diagrammes lithogéochimiques de Harker : A) CaO vs SiO_2 ; B) Fe_2O_3 vs SiO_2 ; C) TiO_2 vs SiO_2 ; D) P_2O_5 vs SiO_2	45
Figure 30 : Diagrammes lithogéochimiques de Harker: A) V_2O_5 vs Fe_2O_3 ; B) TiO_2 vs Fe_2O_3	46
Figure 31 : Patrons de terres rares (ETRs) des roches anorthositiques normalisées par rapport aux chondrites	49
Figure 32 : Diagramme multiélément des roches anorthositiques normalisées par rapport au manteau primitif (valeurs de normalisation Sun et McDonough, 1989)	50
Figure 33 : Patrons de terres rares (ETRs) des dykes normalisés par rapport aux chondrites et au manteau primitif pour les multiéléments	51
Figure 34 : Patrons de terres rares (ETRs) des minéralisations normalisées par rapport aux chondrites et au manteau primitif pour les multiéléments.....	52
Figure 35 : Diagramme binaire comparant la calcicité obtenue par XRFp et par LA-ICP-MS.	55

Figure 36 : Diagramme binaire comparant la teneur en strontium obtenue par XRFp et par LA-ICP-MS.	55
Figure 37 : Diagramme binaire des teneurs moyennes en strontium (Sr %) et en anorthite (An mol %) des plagioclases dans les roches anorthositiques.....	57
Figure 38 : Diagramme binaire des teneurs moyennes en strontium (Sr %) et en anorthite (An mol %) des plagioclases dans les roches anorthositiques dans la zone d'études. ...	58
Figure 39 : Carte de la distribution des teneurs en anorthite (An mol %) et strontium (Sr en %) de plagioclases des roches anorthositiques dans les secteurs Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche.....	60
Figure 40 : Carte de distribution des principales lithologies observées aux différentes stations d'observation pour les deux secteurs d'études (Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche).....	61

RÉSUMÉ

La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) s'étend sur une surface d'environ 20 000 km² dans la partie centrale de la Province de Grenville. Elle est l'hôte de nombreux indices et gisements de minéraux critiques et stratégiques, notamment de Fe-Ti-V-P associés à l'ilménite, la magnétite et l'apatite (p. ex. Lac Perron, St-Charles-de-Bourget).

Ce projet porte spécifiquement sur un corridor minéralisé en Fe-Ti-V-P dans le secteur de Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche (15 km au nord), localisé au Saguenay le long de la marge sud de la SALSJ. Le but de ce travail est de mieux comprendre le lien entre les minéralisations en Fe-Ti-V-P et les roches anorthositiques hôtes dans ce secteur. À cette fin, nous avons combiné la cartographie des faciès lithologiques et la cartographie géochimique du plagioclase (calcicité et teneur en Sr) par XRF portable (XRFp) aux approches traditionnelles de lithogéochimie et de pétrographie.

Trois transects E-W centrés sur le corridor minéralisé de Saint-Charles-de-Bourget et de Bégin-Lamarche ont été réalisés dans la zone d'étude. Ces transects sont perpendiculaires à la stratification et à la structure locale ainsi qu'aux mégadykes de diorite (Diorite du Lac Chabot) et de leucotroctolite (Mégadyke de Bégin). Un total de 224 échantillons a été récolté sur les 96 affleurements visités lors des 18 jours de terrain (été 2023 et été 2024) le long de trois transects E-W : un premier à Saint-Charles-de-Bourget (29 km de long), un deuxième à Bégin-Lamarche (18 km) et un dernier entre ces deux localités (9 km).

Les lithologies dominantes observées dans la zone d'étude sont l'anorthosite, la leuconorite, la leucotroctolite et la leucogabbro-norite. La minéralisation est constituée de lentilles de magnétite massive (Fe-Ti-V) à olivine et de nelsonite massive ou rubanée (Fe-Ti-P) à olivine. La minéralisation de Fe-Ti-P, propre à Bégin-Lamarche, comprend également une gabbro-norite et une troctolite à oxydes et apatite. Ces minéralisations sont directement associées à des lithologies telles que l'anorthosite, la leucotroctolite, la leuconorite, ainsi qu'à des dykes de ferrodiorite et/ou de (leuco)gabbro-norite à olivine. Ces diverses lithologies se trouvent également en enclaves dans les minéralisations.

En utilisant la chimie du plagioclase, trois domaines géochimiques distincts ont été distingués dans la zone d'étude. Le domaine central comprend le corridor minéralisé en Fe-Ti-V-P et est caractérisé par des anorthosites (au nord et au sud), des leucotroctolites (au sud) et des leuconorites (au nord). Le plagioclase de type andésine (An₃₆ à An₅₉) est caractérisé par des teneurs en strontium élevées ($\geq 0,1$ %, pouvant atteindre 0,3 % Sr dans les zones minéralisées). Les domaines Est et Ouest, de part et d'autre du corridor minéralisé, sont dominés par des leuconorites associées à quelques bandes leucotroctolitiques. Le plagioclase de type andésine à labradorite (An₃₆ à An₆₁) présente des teneurs en strontium généralement faibles ($\leq 0,1$ %). Ces teneurs en Sr sont similaires à celles des lithologies des marges Est et Ouest de la SALSJ.

Ces résultats suggèrent la présence d'une injection magmatique distincte comme source des minéralisations de Fe-Ti-V-P dans cette région. Cette étude a permis de mettre en évidence la signature géochimique propre à chaque marge/partie de la SALSJ et démontre le potentiel de la chimie minérale du plagioclase et de la méthode XRFp pour

identifier des secteurs prospectifs pour les minéralisations en Fe-Ti-V-P dans les massifs anorthositiques.

1 Introduction

Un des massifs anorthositiques le plus grand au monde est la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ) qui s'étend sur une surface d'environ 20000 km² dans la partie centrale de la Province de Grenville (Ashwal, 1993). La SALSJ contient de nombreux indices de Ni-Cu-Co (associées aux sulfures magmatiques, ex. Mc Nickel, Houlière ; Clark et Hebert, 1998 ; Huss, 2002) et de Fe-Ti-V-P (associées à l'ilménite, magnétite et apatite, ex. Lac Perron, Lac à Paul ; Bachari, 2004 ; Hébert et *al.* 2005 ; Fredette, 2006 ; Grant, 2020 ; Figure 1), qui sont considérés aujourd'hui comme des sources potentielles de métaux critiques et stratégiques (MCS). Cependant, moins d'intérêts (études/recherches) ont été mis à comprendre le contexte géologique et la formation des minéralisations de Fe-Ti-V-P par rapport à celles de Ni-Cu-Co dans les massifs anorthositiques (Moukhsil et *al.* 2016, Hassen Ali et *al.* 2023 ; Miloski et *al.* 2023, Miloski et *al.* 2024).

Des études sur la SALSJ ont permis d'observer une variation dans la calcicité du plagioclase (labradorite ou andésine) et le minéral mafique dominant (olivine ou pyroxène) dans cette suite anorthositique (Hébert et *al.* 2005), mais la distribution spatiale de cette variation est peu connue. Cette variation est également présente dans les minéralisations où l'assemblage minéralogique anorthositique en Fe-Ti-V (associé à l'orthopyroxène avec une roche anorthositique hôte à labradorite) diffère de celui de Fe-Ti-P (associé à l'olivine avec une roche anorthositique hôte à andésine), sans pourtant qu'on comprenne encore très bien pourquoi (Hébert et *al.* 2005 ; Moukhsil et *al.* 2016 ; Grant 2020 ; Maier et *al.* 2024). Il est donc nécessaire de comprendre les relations minéralogiques entre les minéralisations et leurs encaissants ainsi que leurs conditions de mise en place pour mieux comprendre les processus de formation de ces minéralisations Fe-Ti-V-P et, par conséquent, mieux orienter l'exploration de ces minéralisations. En outre, des travaux récents menés à l'UQAC ont introduit l'utilisation d'appareil de fluorescence-X portable (XRFp) pour une détermination rapide de la calcicité du plagioclase dans les roches anorthositiques (Tondoh, 2021; Mercier, 2022). Cette technique a été appliquée avec succès pour mettre en évidence la répartition spatiale de la calcicité du plagioclase et des faciès anorthositiques dans la marge ouest de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (Mercier, 2022 ; Gueye, 2023 ; Hassen Ali et *al.*, 2023 ; Diyoyo et *al.* 2024).

À la suite de l'intérêt montant pour les substances de MCS dans les suites anorthositiques en général, et aux découvertes de la compagnie First Phosphate de minéralisations en Fe-Ti-P (Bégin-Lamarche) dans la marge Sud de la SALSJ en particulier, un projet de maîtrise à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) en collaboration avec le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) a été initié au printemps 2023. Ce projet se focalise spécifiquement dans un corridor minéralisé en Fe-Ti-V-P dans le secteur de Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche, localisé dans la marge sud de la SALSJ, au Saguenay. Le but est de mieux comprendre le lien entre les minéralisations en Fe-Ti-V-P et les roches anorthositiques hôtes (facies, textures, géochimie et chimie minérale) de la SALSJ et, par le fait même, des massifs anorthositiques protérozoïques en général. Une combinaison de cartographie de terrain des faciès anorthositiques, cartographie de chimie minérale (calcicité et strontium des plagioclases et minéraux mafiques (olivine, pyroxènes) par XRFp et/ou laser ICP-MS, ainsi que géochimie et pétrographie traditionnelle, dans les secteurs de Saint-Charles-de-Bourget et de Bégin-Lamarche de la marge Sud de la SALSJ a été réalisée pour étudier ce lien.

2 Géologie régionale

2.1 Suite anorthositique de Lac-St-Jean

La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ ; Figure 1) est localisée dans la partie centrale de la Province de Grenville, dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean au Québec. La SALSJ est localisée dans la Ceinture Allochtone Polycyclique, partie centrale de la Province du Grenville (Woussen et *al.*, 1981 ; Rivers et *al.*, 1989). La Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean est un exemple remarquable avec des minéralisations en Fe-Ti-V (Buttercup : Grant 2020 ; Figure 1), Fe-Ti-P (Lac Perron, Lac à Paul et Saint-Charles-de-Bourget, Bégin-Lamarche ; Jooste, 1949 ; Bachari, 2004 ; Hébert et *al.*, 2005 ; Fredette 2006 ; Grant 2020 ; Banerjee et *al.* 2025a ; Banerjee et *al.* 2025b ; Figure 1) et Ni-Cu (Mc Nickel et Houlière ; Clark et Hébert, 1998 ; Hébert et *al.*, 2005).

La SALSJ résulte d'une série d'intrusions magmatiques menant à la formation des roches de différents faciès anorthositiques et aussi des roches granitiques avec (série charnockitique) ou sans orthopyroxène formant une suite AMCG (Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite ; Hébert et *al.*, 2005). Elle s'est mise en place durant une

période d'extension crustale majeure pré-grenvillienne entre 1160 – 1140 Ma (Rivers et *al.*, 1989 ; Higgins et Van Breemen, 1996 ; Woussen et *al.*, 1988).

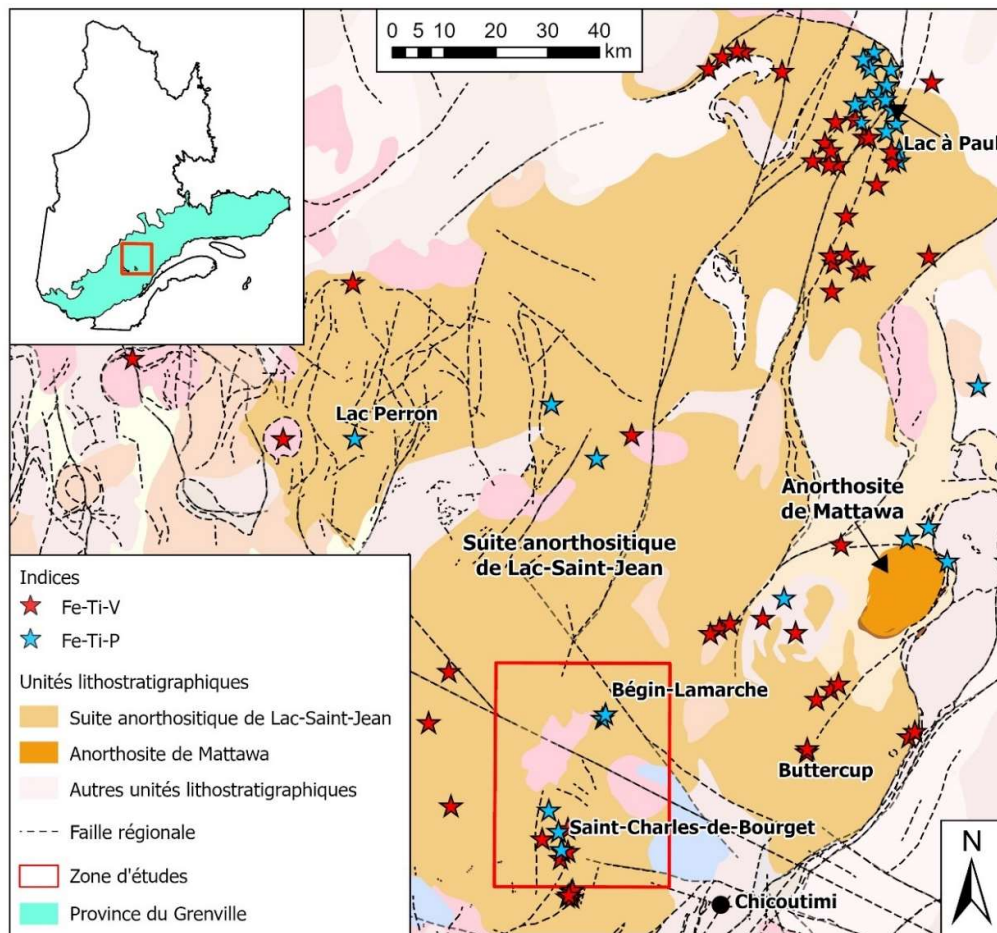


Figure 1 : Carte géologique de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean modifiée de SIGEOM (2024). Seules les unités lithostratigraphiques de la SALSJ en teintes de bruns sont identifiées dans la légende. Les minéralisations Fe-Ti-V sont indiquées par des étoiles rouges et les minéralisations Fe-Ti-P par les étoiles bleues. Le polygone rouge représente la zone d'études.

La SALSJ englobe une variété de roches anorthositiques comme anorthosite *sensu stricto* ou pure (> 90 % de plagioclase) et leuconorite, qui représentent à elles seules environ 95 % des roches du massif, avec une proportion mineure de leucotroctolite, norite, gabbro à olivine, gabbro, pyroxénite, péridotite, dunite, nelsonite (2/3 oxydes et 1/3 apatite ; Philpotts, 1967), magnétite, entre autres (Cimon et Hébert, 1998 ; Hébert et *al.*, 2005). Cimon et Hébert (1998) mentionnent une variation des faciès dans le massif anorthositique où, du cœur aux bordures, on observe l'anorthosite entourée de la norite avec un accroissement de l'orthopyroxène, puis la ferrodiorite (une norite avec andésine) marquée par une augmentation abrupte en apatite, magnétite et ilménite. Selon ces auteurs, cette variation lithologique du cœur aux bordures est accompagnée d'une

réduction de la calcicité des plagioclases de labradorite à andésine et d'un enrichissement du pyroxène riche en fer. Ils s'associent génétiquement à la ferrodiorite et aux minéralisations d'oxydes de Fe-Ti $\pm$ apatite.

Woussen et *al.* (1981) mentionnent que, après la mise en place de la SALSJ dans le socle gneissique à une profondeur d'environ 10-15 km, au moins sept générations de dykes ont recoupé la SALSJ. Parmi ces dykes, les unités Diorite de Lac Chabot (diorite) et Mégadyke de Bégin (leucotroctolite) recoupent la partie sud de la SALSJ (Figure 2 ; Woussen et *al.*, 1981 ; Higgins et Van Breemen, 1992). Les datations de ces dykes ont donné des âges similaires à ceux de la SALSJ.

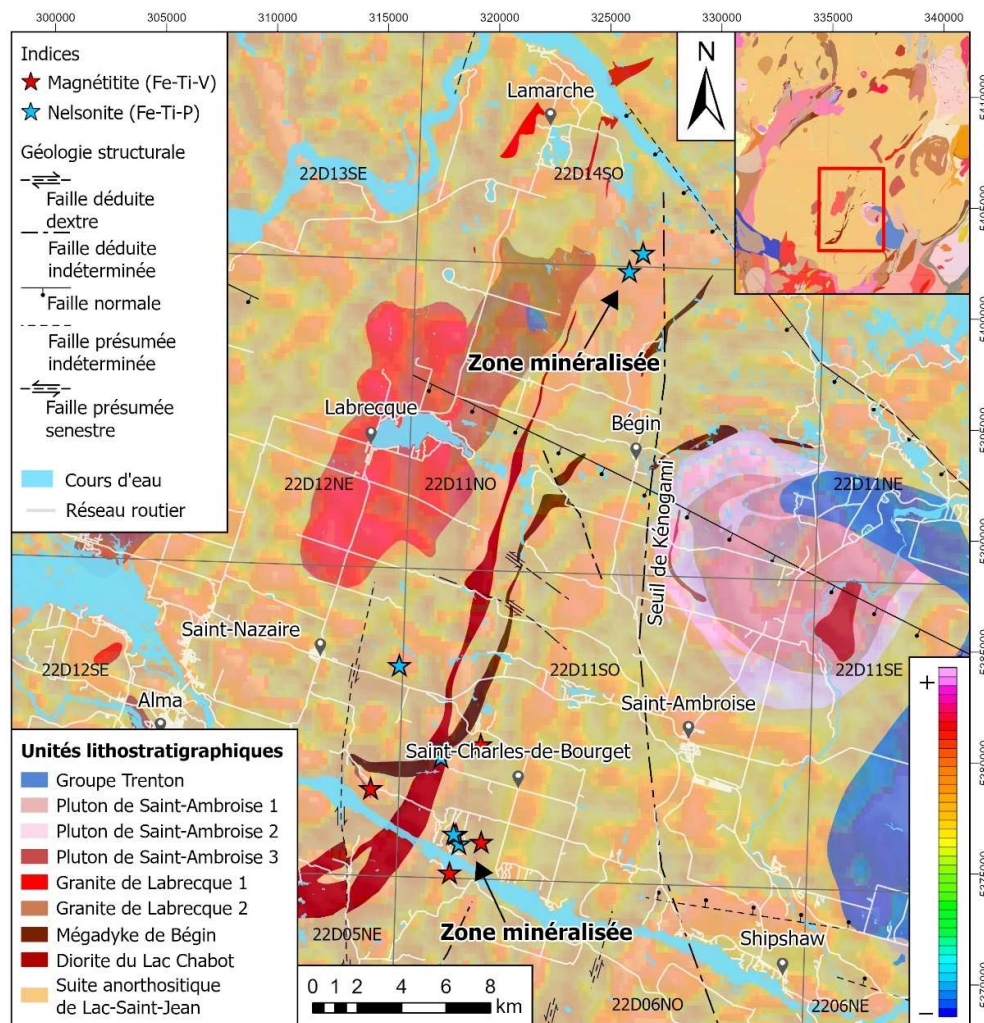


Figure 2 : Carte géologique sur fond de couverture géophysique (gradient vertical du champ magnétique résiduel modifié de Intissar et Benahmed, 2021) de la zone d'étude, marge sud de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (SALSJ), avec les feuillets SNRC (géologie modifiée de SIGEOM 2024 et structurales régionales modifiées de SIGEOM-PACES 2024). Les minéralisations Fe-Ti-V sont indiquées par les étoiles rouges et les minéralisations Fe-Ti-P par les étoiles bleues.

La Diorite de Lac Chabot (1157 ± 3 Ma ; Higgins et Van Breemen, 1992) est constituée d'un dyke majeur ayant 1 km de largeur et 25 km de longueur environ (Figure 2) et aussi des dykes mineurs de 10 à 200 cm de largeur. Sa minéralogie est constituée de plagioclase, clinopyroxène, orthopyroxène, oxydes de fer et titane, et apatite (Côté, 1986). Ce dyke a été mis en place à une profondeur minimale de 25 à 28 km à travers une zone de cisaillement senestre active (NNE) dans des conditions de faciès granulite (Woussen et *al.*, 1981 ; Higgins et *al.*, 2002). Côté (1986) suggère que la formation de ce dyke enrichi en fer à partir du liquide résiduel du magma anorthositique. Grant (2020) suggère que ce type de dyke ferrodioritique pourrait être le magma parental des minéralisations Fe-Ti-P à Saint-Charles-de-Bourget.

Le Mégadyke de Bégin (leucotroctolite), 800 m de largeur et 23 km de longueur environ, a été mise en place à une profondeur maximale de 22 à 23 km et est parallèle au Mégadyke de Lac Chabot qu'elle recoupe (Figure 2 ; Woussen et *al.*, 1981 ; Côté, 1986). Sa minéralogie est constituée principalement de plagioclase et olivine (Côté, 1986). Sa mise en place (1157 ± 2 Ma) a eu lieu peu de temps après le mégadyke de Diorite du Lac Chabot à travers une zone de cisaillement senestre NNE (Higgins et Van Breemen, 1992 ; Higgins et *al.*, 2002).

3 Résultats

3.1 Localisation des travaux de terrain

La zone d'étude pour cette maîtrise est localisée le long d'un corridor NNE-SSO dans la marge sud de la SALSJ reconnu pour ces minéralisations en Fe-Ti-V-P (Saint-Charles-de-Bourget, Bégin-Lamarche ; Jooste, 1949 ; Bachari, 2004 ; Grant, 2020 ; Figure 2). Trois transects est-ouest ont été effectués perpendiculairement à l'orientation nord-sud des corps géologiques affleurants dans la zone d'étude, centrés sur le corridor minéralisé en Fe-Ti-V-P (Figure 2). La zone d'études comprend deux secteurs minéralisés en Fe-Ti-V-P : Saint-Charles-de-Bourget au sud et Bégin-Lamarche 15 km au nord (Figure 2). Le premier transect effectué dans le secteur des minéralisations de Saint-Charles-de-Bourget passe par les municipalités de Saint-Nazaire (feuille 22D12SE), Saint-Charles-Bourget (feuille 22D11SO) et Shipshaw (feuille 22D06NO ; Figure 2). Le deuxième transect effectué a été réalisé entre les municipalités de Bégin (feuilles 22D11NO et 22D11NE) et Lamarche (feuille 22D14SO ; Figure 2) de manière à couvrir la variation lithologique de chaque côté d'une zone de minéralisation en Fe-Ti-P

découverte par First Phosphate en 2022. Le troisième transect a été réalisé à 4 km au nord de Saint-Charles-de-Bourget dans la municipalité de Saint-Ambroise (feuilles 22D11SO et 22D11SE ; Figure 2).

Tous ces transects ont été réalisés en août et septembre 2023 et en juillet 2024 avec un total de 224 échantillons collectés sur les 96 affleurements visités. De plus, 13 échantillons ont été prélevés dans deux forages (BL2301 et BL2302) réalisés par Laurentia Exploration pour First Phosphate dans la zone minéralisée de Bégin-Lamarche (zone sud) de la propriété de First Phosphate (Figure 2).

3.2 Lithologies dominantes dans la zone d'études

Les principales lithologies rencontrées le long de ces trois transects sont, en ordre d'abondance : anorthosite, leuconorite, leucotroctolite, (leuco)gabbronorite, et dykes de ferrodiorite et (leuco)gabbronorite de Diorite de lac Chabot et leucotroctolite de Mégadyke de Bégin. Les lentilles de minéralisation comprennent des oxydes de fer (Fe-Ti-V : magnétite à olivine et des oxydes de fer et apatite (Fe-Ti-P : nelsonite ± olivine, gabbronorite nelsonitique et troctolite nelsonitique.

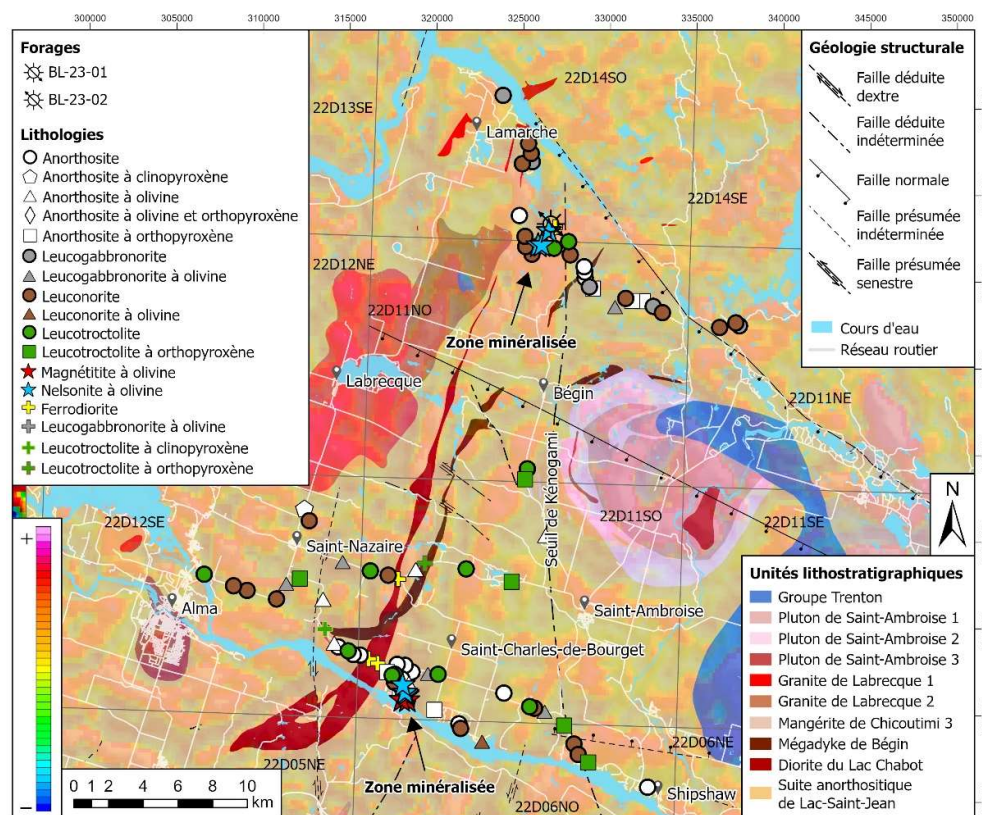


Figure 3 : Carte de distribution des principales lithologies observées aux différentes stations d'observation pour les deux secteurs d'études (Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche) sur fond de carte géologique

et géophysique (gradient vertical du champ magnétique résiduel modifié de Intissar et Benahmed, 2021 ; géologie modifiée SIGEOM 2024 et structurales régionales modifiées de SIGEOM-PACES 2024). Les symboles colorés (carré, cercle, losange et triangle) représentent les principales lithologies de la zone d'études. Les croix colorées représentent les dykes. Les étoiles colorées représentent les minéralisations. Les cercles avec couronnes et flèches représentent les forages.

3.2.1 Pétrographie des lithologies principales

3.2.1.1 Anorthosite

Sur le terrain, l'anorthosite (Figure 3) est de couleur gris blanchâtre, rosée ou violacée présentant une texture granoblastique, porphyroclastique, localement mégacristique, avec une matrice de granulométrie moyenne (1 – 5 mm ; Figure 4A – F). Sa minéralogie est constituée essentiellement de plagioclase (≥ 90 %). Les minéraux mafiques tels qu'olivine ($\pm$ iddingsite, après l'altération d'olivine) ou orthopyroxène (≤ 3 %) ou clinopyroxène (< 2 %) et des oxydes de fer et titane (magnétite et ilménite ; ≤ 3 %) sont quelques fois présents. Les oxydes de fer et titane $\pm$ apatite (≤ 2 %) forment souvent des agrégats ou même des amas (3 – 12 cm d'épaisseur). La biotite (≤ 1 %) $\pm$ amphibole (≤ 1 %) forment des couronnes autour de l'orthopyroxène et des oxydes de fer et titane (Figure 4E - F). Des couronnes d'amphibole $\pm$ biotite sont associées à l'olivine, rarement en réaction avec le clinopyroxène (≤ 1 % ; Figure 4E – F). Les porphyroclastes de plagioclase (Figure 4A) et les rares mégacristaux d'olivine coronitiques présentent respectivement un diamètre de 3 – 7 cm et 2,5 – 7 cm. Les grains d'orthopyroxène sont porphyroclastiques (souvent en agrégat) ou mégacristiques avec un diamètre qui varie de 3 – 20 cm (Figure 4B). La magnétite présente souvent des exsolutions d'ilménite en lamelle, treillis et sandwich et des exsolutions de spinelle en lamelle ou granule (Figure 5A – C). L'ilménite présente rarement des exsolutions d'hématite en lamelle et des exsolutions de spinelle en lamelle ou granule (Figure 5D). La pyrite, la chalcopyrite, le grenat et la chlorite sont généralement rares (< 1 %). Selon la minéralogie mafique dominante, les anorthosites sont divisées en 5 groupes : i) les anorthosites pures, ii) les anorthosites à olivine, iii) les anorthosites à orthopyroxène, et iv) les anorthosites à olivine et orthopyroxène et à clinopyroxène. Les anorthosites peuvent être foliées, localement mylonitique. Les textures de déformation sont associées au plagioclase qui présente une macle courbée, une extinction roulante, des jonctions triples (Figure 4C – D).

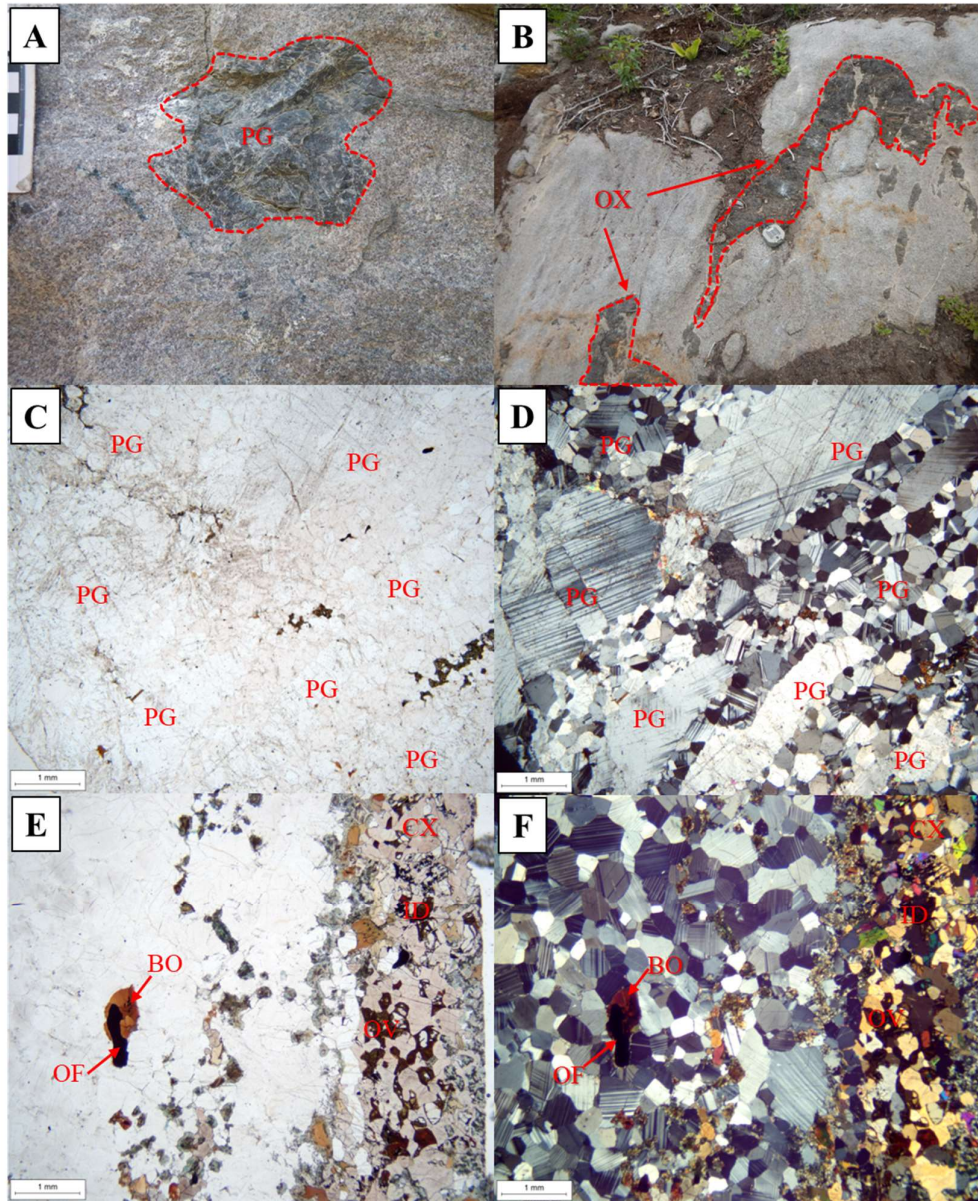


Figure 4 : Photographies de terrain et microscopiques de l'anorthosite. A) Anorthosite porphyroclastique (porphyroclaste de plagioclase en rouge) avec matrice à grain moyen (23JD84) ; B) Anorthosite mégacristique avec une matrice de granulométrie moyenne avec un agrégat des mégacristaux d'orthopyroxène (en rouge ; 24JD63); C et D) Plagioclases (matrice et porphyroclastes) recristallisés montrant une texture granoblastique, des extinctions roulantes, jonctions triples, macles courbées (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD02); E et F) Amas mafique allongé dans la partie à droite formé par les cristaux d'olivine avec clinopyroxène et l'amphibole en couronne, en réaction avec les plagioclases recristallisés (+ porphyroclaste) avec une texture granoblastique et de jonction triple à gauche (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement ; 23JD33). BO – biotite; CX – clinopyroxène; OF – oxydes de fer et titane; OX – orthopyroxène; PG – plagioclase.

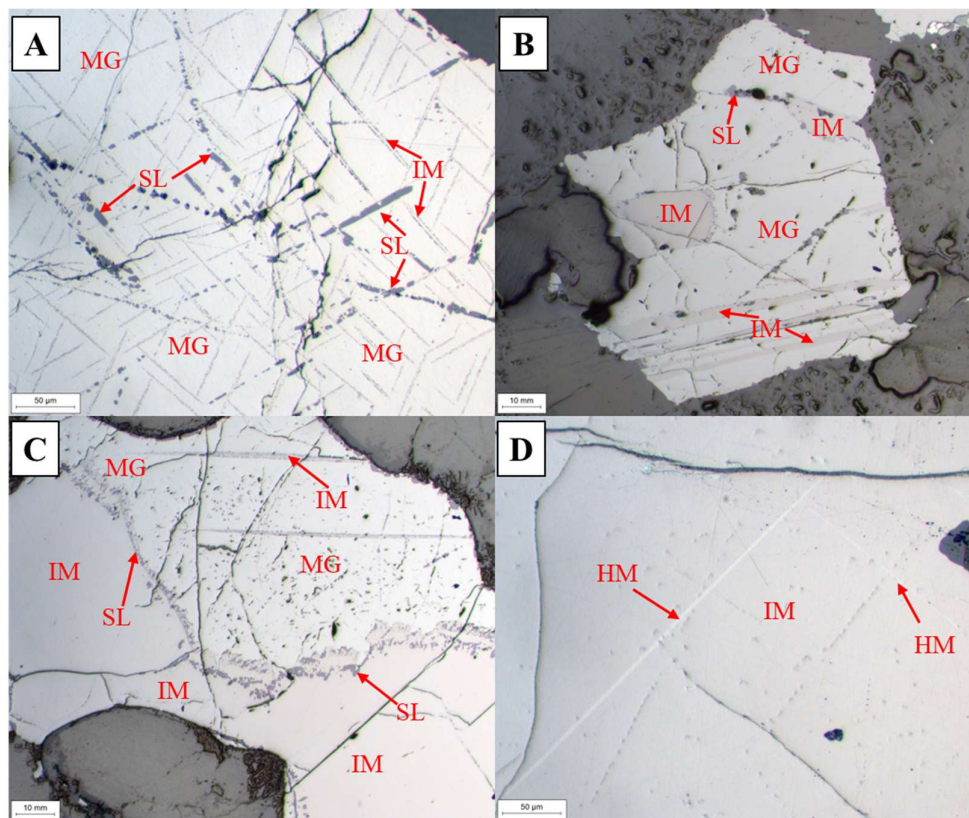


Figure 5 : Microphotographies des minéraux opaques de l'anorthosite en lumière réfléchie. A) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en treillis et des exsolutions de spinelle (ligne fine grisâtre) en lamelle (23JD51); B) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en sandwich (ruban rosé en haut et en bas) et des exsolutions de spinelle en lamelle (ligne fine grisâtre) et un grain d'ilménite à gauche (23JD36); C) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en lamelle et de spinelle en granule (point grisâtre en haut) et ilménite avec des exsolutions de spinelle en granule (point grisâtre) dans la zone de contact avec magnétite (23JD26); et D) Ilménite avec des exsolutions d'hématite en lamelle (23JD53). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; PY – pyrite; SL – spinelle.

3.2.1.2 Leuconorite

Sur le terrain, la leuconorite (Figure 3) est de couleur grisâtre beige, mégacristique et/ou porphyroclastique avec une matrice de granulométrie moyenne à grossière (0,2 – 2 cm), granoblastique (Figure 6A – B). Sa minéralogie (Figure 6A – F) est constituée principalement de plagioclase (50 – 85 %), et orthopyroxène (10 – 35 %) et rarement de l'olivine (≤ 3 %). L'apatite (≤ 1 %) est rencontrée au milieu des oxydes de fer et titane (ilménite et magnétite ; ≤ 4 %) lorsque présente. On retrouve également l'amphibole (≤ 10 %) qui forment des couronnes autour de l'orthopyroxène et la biotite (≤ 6 %) $\pm$ chlorite (≤ 8 %) qui forment des couronnes autour des grains d'orthopyroxène (Figure 6C – D). L'orthopyroxène et le plagioclase se présentent respectivement sous forme de mégacristaux et porphyroclastes (Figure 6E – F) d'un diamètre de 5 – 15 cm et les orthopyroxènes mégacristiques peuvent atteindre jusqu'à 50 cm (Figure 6A). Les

leuconorites sont généralement foliées et localement mylonitiques. Les textures de déformation sont associées au plagioclase qui présente une extinction roulante, des jonctions triples et des macles courbées (Figure 6E – F). La magnétite présente fréquemment des exsolutions d'ilménite en lamelle (Figure 7A – B) et en sandwich (Figure 7B) et des exsolutions de spinelle en lamelle (Figure 7A – B) et granule (Figure 7B). L'ilménite est dominante par rapport à la magnétite et présente des exsolutions d'hématite en lamelle rarement (Figure 7C – D). La pyrite, la chalcopryrite et le grenat sont rares (< 1 %).

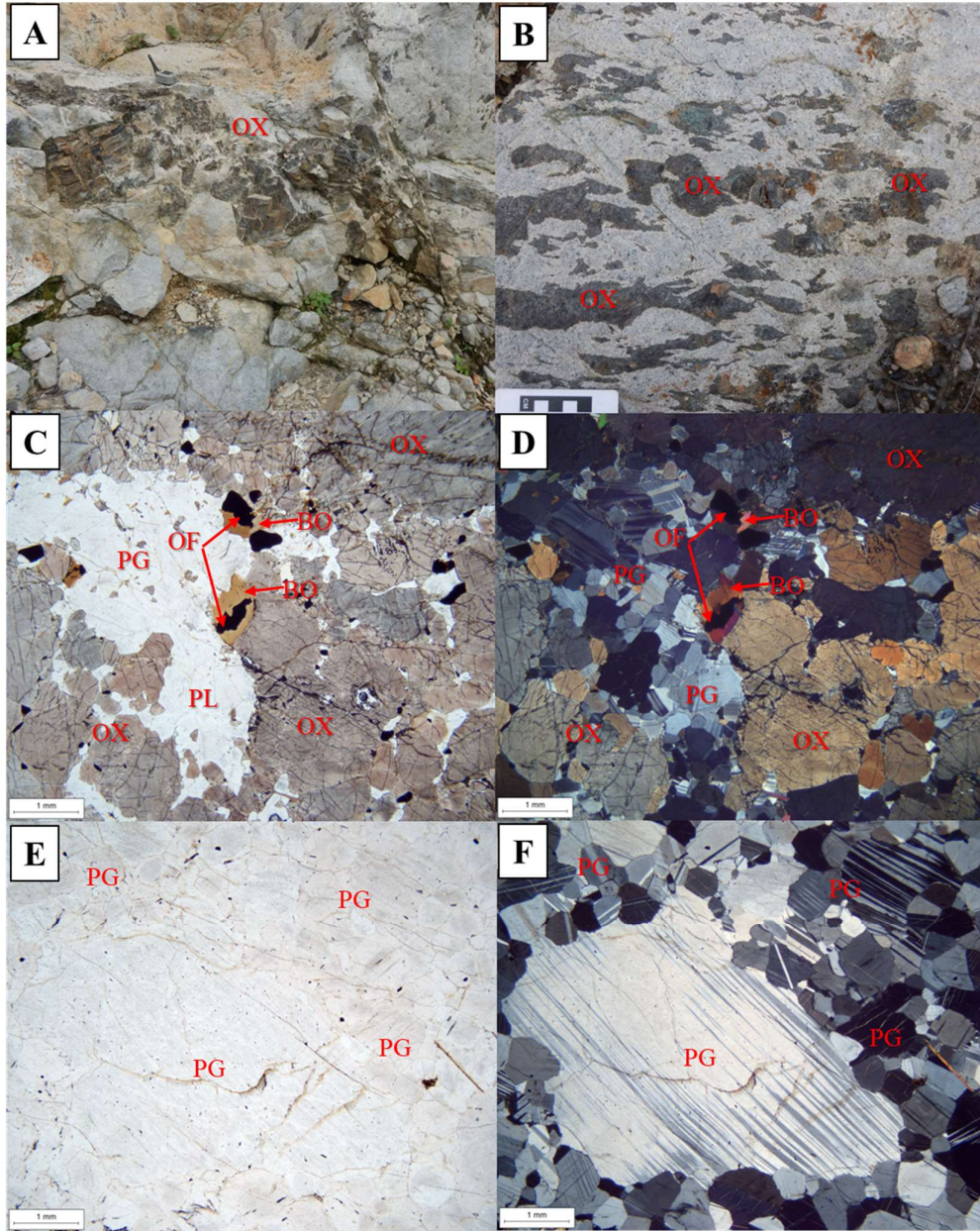


Figure 6 : Photographies de terrain et microscopiques de la leuconorite. A) Leuconorite (23JD08); B) Leuconorite foliée (23JD31); C et D) leuconorite montrant des couronnes de biotite autour des oxydes (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD31); E et F) Sous-grains de plagioclase autour du porphyroclaste (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD08). BO – biotite; OF – oxydes de fer; OX – orthopyroxène ; PG – plagioclase.

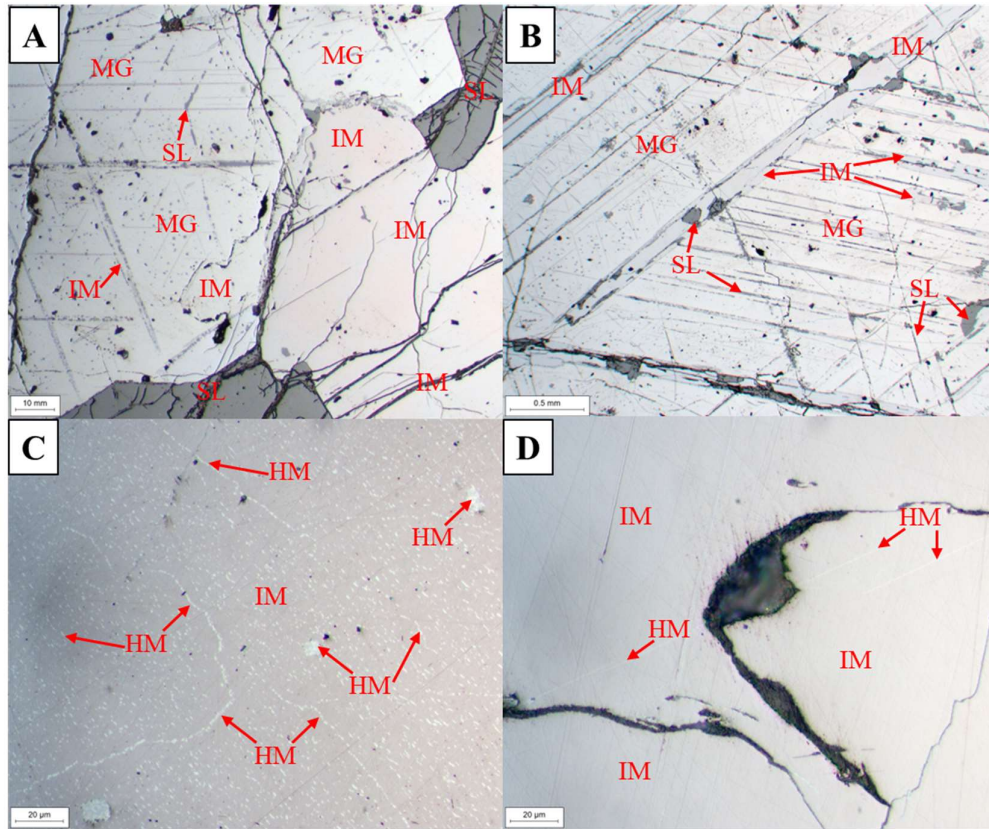


Figure 7 : Microphotographies des minéraux opaques de la leuconorite en lumière réfléchie. A) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en lamelle (ligne fine rosée) et des exsolutions de spinelle (ligne fine grisâtre) en lamelle et des grains d'ilménite et spinelle (23JD38); B) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en sandwich (ruban rosé au milieu) et en lamelle et des exsolutions de spinelle en granule et lamelle (ligne fine et polygone grisâtre) (23JD38); C) Ilménite avec des exsolutions d'hématite en lamelle (ligne fine blanchâtre) (23JD48); et D) Ilménite avec des exsolutions d'hématite (ligne fine blanchâtre) en lamelle (23JD16). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; SL – spinelle.

3.2.1.3 Leucotroctolite

Sur le terrain, la leucotroctolite (Figure 3) est de couleur violacée beige à grise, présente une texture qui est quelques fois mégacrastique et porphyroclastique avec une matrice de granulométrie moyenne à grossière (0,2 – 2 cm), et est généralement coronitique (Figure 8A – B). Sa minéralogie (Figure 8A – F) est composée principalement de plagioclase (60 – 85 %) et olivine ± iddingsite (15 – 20 %), auxquels s'ajoutent le clinopyroxène (≤ 8 %), les oxydes de fer et titane (magnétite et ilménite ; ≤ 5 %) et l'orthopyroxène (≤ 5 %). L'apatite est rare (≤ 1 %). L'amphibole (2 – 10 %) ± la biotite (2 – 5 %) forme souvent des couronnes autour des cristaux d'olivine ± iddingsite alors que les couronnes de biotite sont autour des oxydes de fer de titane (Figure 8A – D). Les mégacrists d'olivine (5 % ; Figure 8A) et les porphyroclastes de plagioclase (1 %) présentent respectivement un diamètre de 3 – 8 cm et 3 – 7 cm. La leucotroctolite est généralement foliée (Figure 8B). La foliation est définie par l'alignement des cristaux

d'olivines (Figure 8B). Les textures de déformation (extinction roulante, macles courbées et jonction triple) associées au plagioclase sont également présentes dans ses porphyroclastes (Figure 8C – D). La magnétite présente des exsolutions d'ilménite en granule, lamelle et sandwich (Figure 9A, C et D) et des exsolutions de spinelle en lamelle et granule (Figure 9A, C et D). L'ilménite présente des exsolutions d'hématite en lamelle et des exsolutions de spinelle en lamelle (Figure 9B). La pyrite, la chalcoppyrite, le grenat et la chlorite (< 1 %) sont rares.

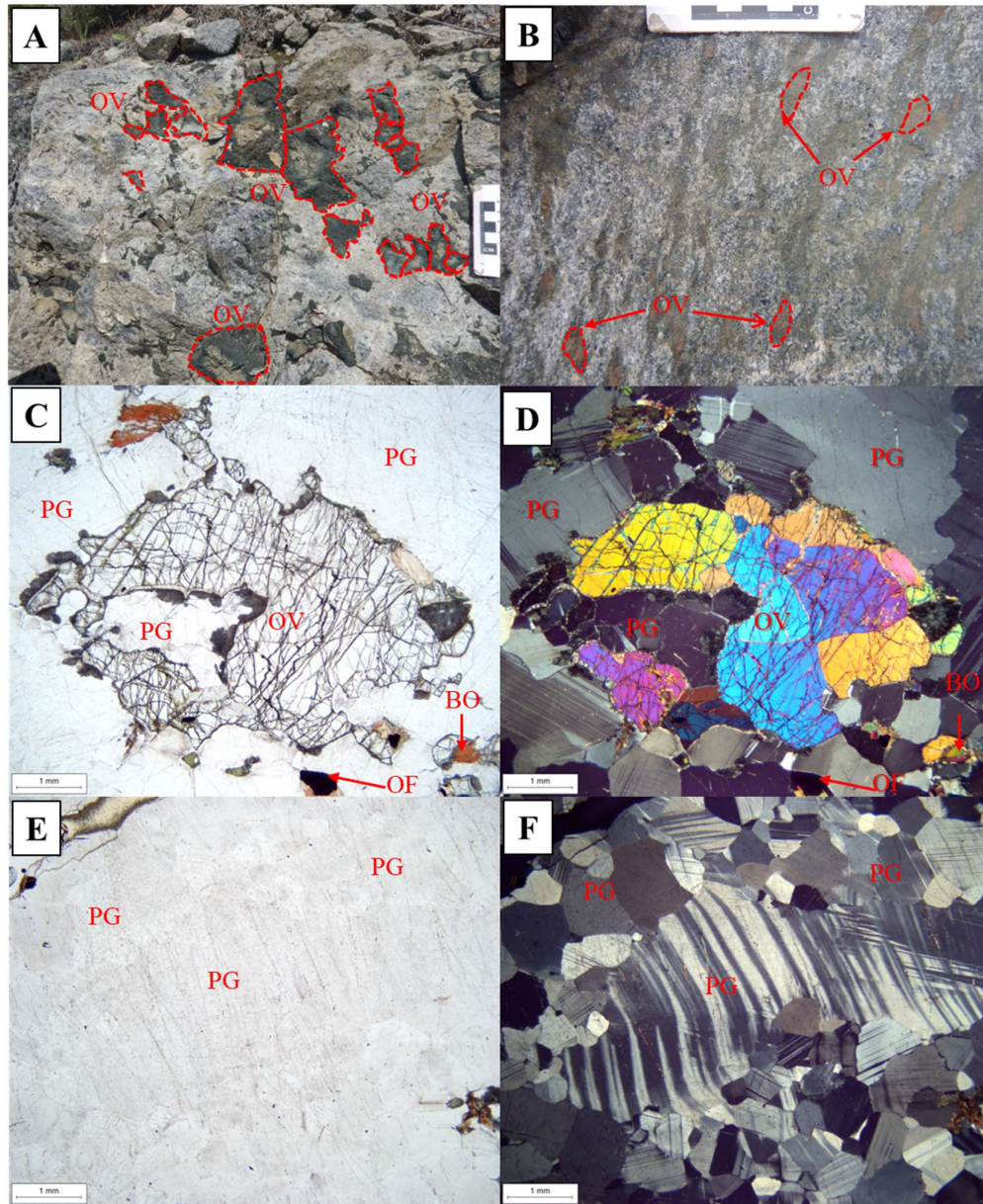


Figure 8 : Photographies de terrain et microscopiques de la leucotroctolite. A) leucotroctolite moyennement à grossièrement grenue avec mégacrists d'olivine avec couronne d'amphibole (en rouge; 23JD81); B) Leucotroctolite à grain moyen avec une foliation définie par l'allongement des cristaux d'olivine coronitiques (en rouge; 23JD82); C et D) Leucotroctolite porphyroclastique moyennement grenue montrant

des oxydes de fer avec couronne de biotite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD14); E et F) Leucotroctolite porphyroclastique montrant porphyroclaste de plagioclase déformé (macles courbées) avec sous-grains de plagioclase à jonction triples (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD24). BO – biotite; OF – oxydes de fer; OV – olivine; PG – plagioclase.

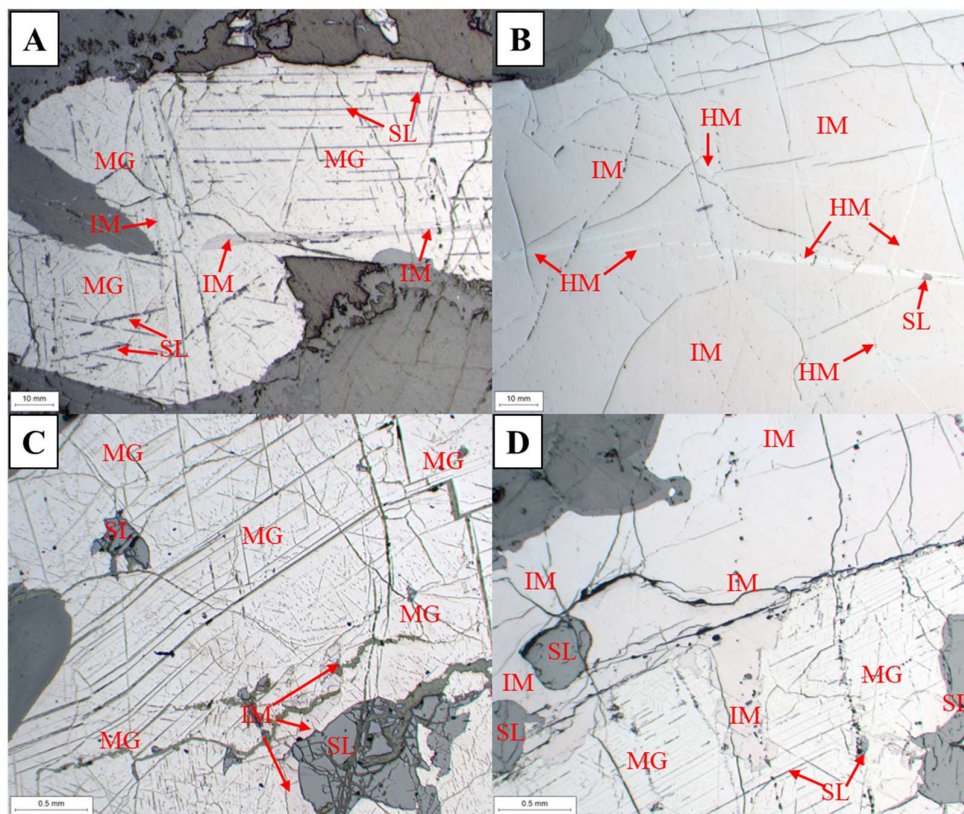


Figure 9 : Microphotographies des minéraux opaques de la leucotroctolite en lumière réfléchie. A) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en lamelle (ligne fine rosée) et sandwich (ruban rosé) et des exsolutions de spinelle en lamelle (ligne fine grisâtre; 23JD24); B) Ilménite avec des exsolutions d'hématite en lamelle (ligne fine blanchâtre; 23JD41); C) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en granule et les cristaux de spinelle (gris foncé; 23JD34); et D) Spinelle arrondi entouré par l'ilménite et magnétite avec des exsolutions d'ilménite en sandwich et de spinelle en granule et lamelle (ligne fine blanchâtre) en lamelle (23JD24). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; SL – spinelle.

3.2.1.4 Leucogabbronorite

Sur le terrain, la leucogabbronorite (Figure 3) est de couleur beige grisâtre à violacée sur le terrain, présente une texture granoblastique, quelques fois porphyroclastique à mégacristique, avec une matrice de granulométrie fine à moyenne (≤ 2 cm ; Figure 10A – B). Sa minéralogie (Figure 10A - F) est constituée principalement de plagioclase (50 – 85 %), clinopyroxène (5 – 30 %) et orthopyroxène (5 – 20 %) auxquels s'ajoutent souvent des proportions mineures d'olivine $\pm$ iddingsite (≤ 5 %) et des oxydes de fer et titane (ilménite et magnétite ; 1 – 7 %). Les amphiboles ($\leq 20\%$) $\pm$ chlorite (≤ 15 %) forment une couronne de l'olivine (Figure 10E et F). La biotite (1 – 6 %) forme des couronnes autour des oxydes de fer et titane (Figure 10C - F). Les porphyroclastes d'orthopyroxène

présentent un diamètre entre 5 – 15 cm. Il est possible d’observer des textures de leucogabbroïte est généralement foliée et localement cisailée. Certains cristaux de plagioclase présentent des textures de déformation (jonction triple, extinction ondulée et macles courbées). La magnétite présente des exsolutions d’ilménite en sandwich (Figure 11A) et des exsolutions de spinelle en lamelle et granule (Figure 11A) alors que l’ilménite présente des exsolutions d’hématite et de spinelle en lamelle (Figure 11B). Il est à noter également des oxy-symplectites présentés par la magnétite (Figure 11C et D). L’apatite, la pyrite et la chalcopyrite représentent généralement rares < 1 %.

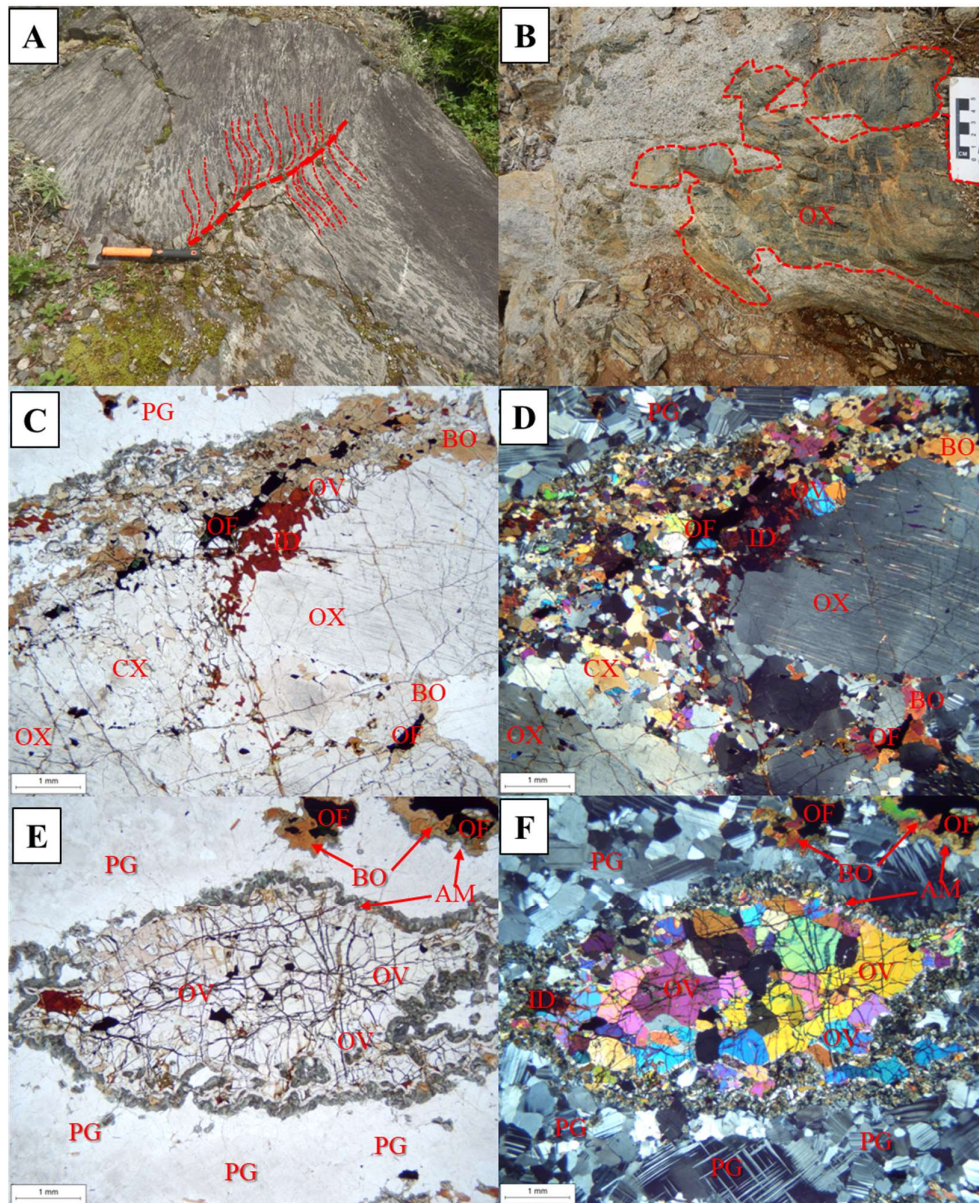


Figure 10 : Photographies de terrain et microscopiques de la leucogabbroïte. A) Leucogabbroïte mylonitique de granulométrie moyenne à grossière avec étroite zone de cisaillement dextre observé

localement (en rouge; 23JD75); B) Leucogabbronorite recristallisée avec matrice à grain moyen et mégacristsaux d'orthopyroxène (en rouge; 23JD62); C et D) Amas de minéraux mafiques montrant porphyroclaste de orthopyroxène, olivine + iddingsite, oxydes de fer, clinopyroxène et amphibole en couronne dans la leucogabbronorite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement ; 23JD04); E et F) Cristaux d'olivine avec couronne d'amphibole et oxydes de fer avec couronne de biotite dans la leucogabbronorite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement ; (23JD04). BO – biotite; CX – clinopyroxène ; OF – oxydes de fer; OX – orthopyroxène ; OV – olivine ; PG – plagioclase.

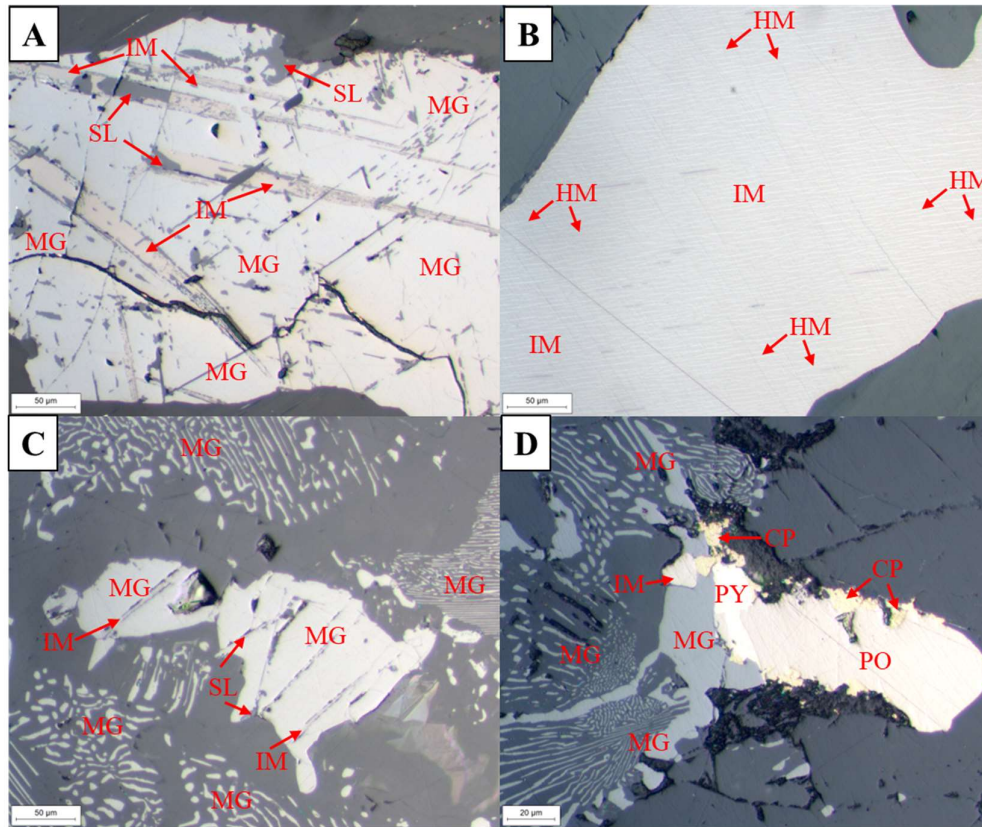


Figure 11 : Microphotographies des minéraux opaques de la leucogabbronorite en lumière réfléchie. A) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en sandwich (ruban rosé) et des exsolutions de spinelle en lamelle (ligne fine grisâtre) ou granule (23JD13); B) Ilménite avec des exsolutions d'hématite en lamelle (23JD70); C) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en sandwich (ligne fine rosée) et de spinelle en lamelle (ligne fine grisâtre) entourée d'autres cristaux de magnétite formant des oxy-symplectites (gris foncé; 23JD64); et D) Pyrrhotite avec des cristaux de chalcopryrite et pyrite (à droite) et des cristaux de magnétite en oxy-symplectite (à gauche; 23JD88). CP – chalcopryrite; HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; PY – pyrite; PO – pyrrhotite; SL – spinelle.

3.2.2 Pétrographie des dykes

3.2.2.1 Ferrodiorite

La ferrodiorite se trouve dans la Diorite du lac Chabot (Figures 2 et 3) et dans des dykes mineurs mesurant de 60 cm à plusieurs mètres de largeur. Ces dykes recoupent l'anorthosite et la leuconorite (Figure 12A) dans le secteur de Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche (Figures 2 – 4). La ferrodiorite est de couleur noir verdâtre à grise avec une granulométrie fine à moyenne (< 5 mm), coronitique et granoblastique (Figure

12B). Sa minéralogie (Figure 12C – F) est constituée principalement de plagioclase (45 – 70 %), de clinopyroxène (≤ 25 %), les oxydes de fer et titane (ilménite et magnétite ≤ 13 %), orthopyroxène (≤ 3 %) et l'apatite (≤ 3 %). On y trouve également de l'amphibole (2 – 24 %) et la biotite (1 – 30 %). Les plagioclases (matrice et porphyroclastes) présentent des signes de déformation (extinction roulante, jonction triple et macles courbées ; Figure 12C – D). Les couronnes de biotite $\pm$ amphibole autour des oxydes de fer et titane sont fréquentes alors que les couronnes d'amphibole autour des cristaux de plagioclase et du clinopyroxène sont rares (Figure 12E – F). La magnétite présente des exsolutions d'ilménite en lamelle (Figure 13A) alors que l'ilménite ne présente pas d'exsolutions (Figure 13B). La ferrodiorite est localement foliée.

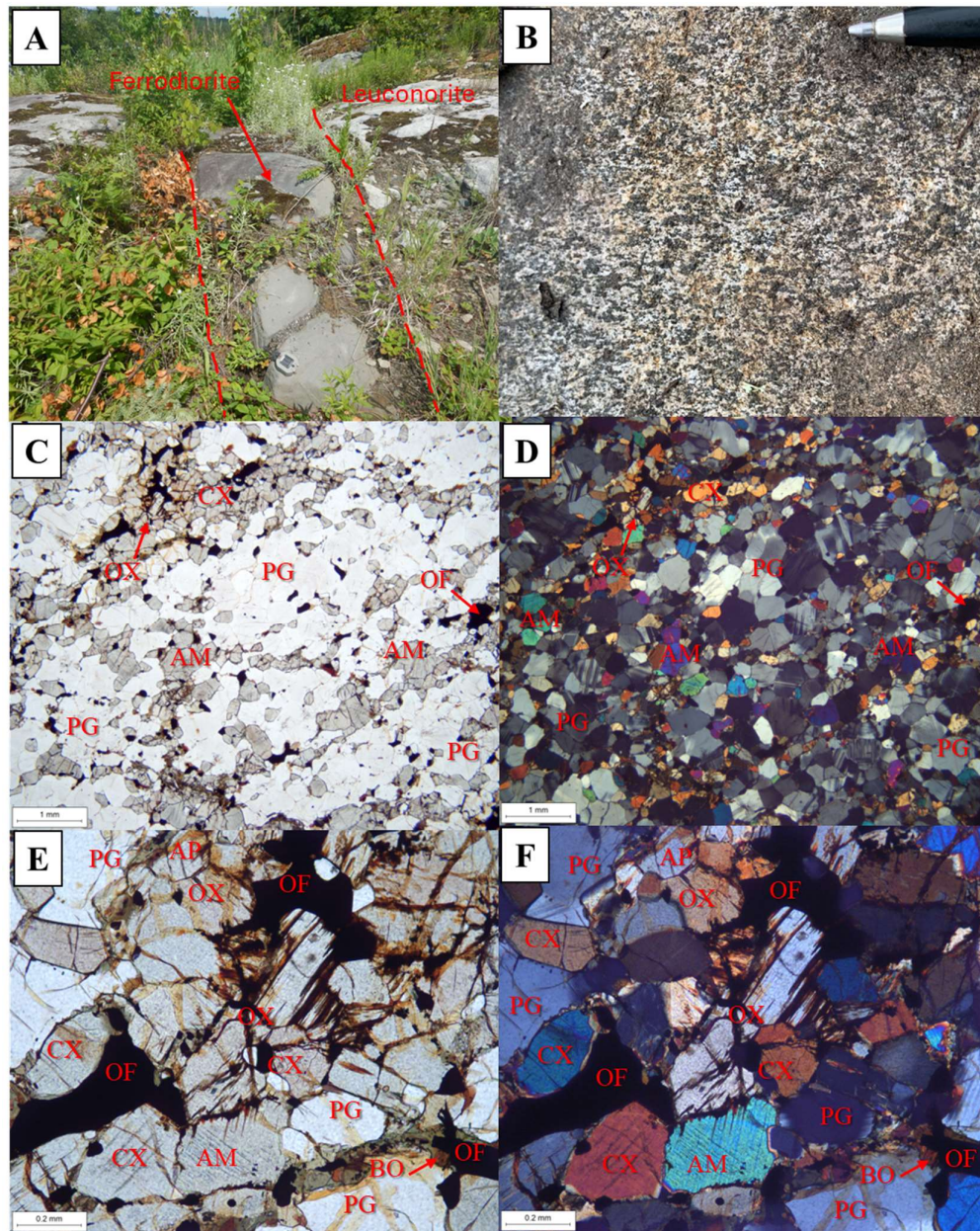


Figure 12 : Photographies de terrain et microscopiques de la ferrodiorite (dyke). A) Ferrodiorite recoupant une leuconorite (23JD92); B) Ferrodiorite à grain fin (23JD03); C et D) Matrice à grain fin, foliée (plagioclase, clinopyroxène, orthopyroxène, amphibole et oxydes (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD33); E et F) Ferrodiorite finement grenue montrant la présence de grains d'orthopyroxène, clinopyroxène, amphibole, oxydes de fer et plagioclase (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD33). AM – amphibole; AP – apatite ; BO – biotite; CX – clinopyroxène; OF – oxydes de fer; OX – orthopyroxène ; PG – plagioclase.

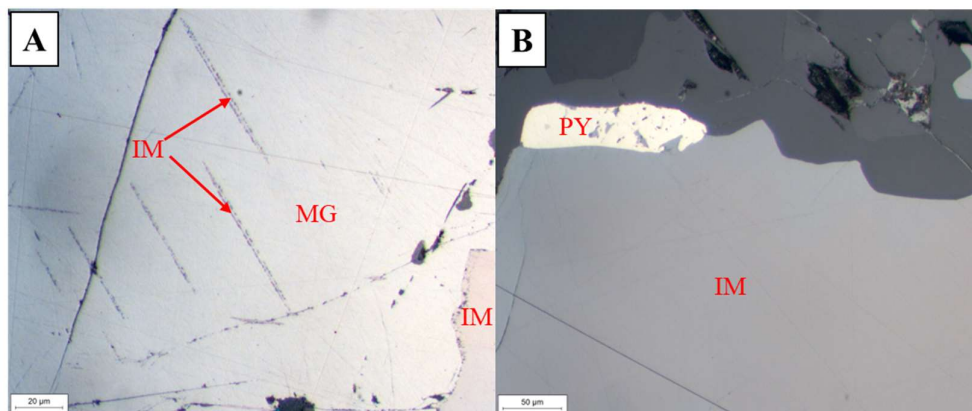


Figure 13 : Microphotographies des minéraux opaques du dyke de ferrodiorite en lumière réfléchie. A) Magnétite avec des exsolutions d’ilménite en lamelle (ligne fine rosée) et ilménite (en bas à droite; 23JD48); B) Gros cristal d’ilménite, sans exsolution, et pyrite (23JD48). IM – ilménite; MG – magnétite; PY – pyrite.

3.2.2.2 Leucogabbronorite à olivine

Sur le terrain, le (leuco)gabbronorite à olivine (Figures 2 et 3) est retrouvée comme une lithologie dans la mégadyke de Lac Chabot, mais aussi en forme de dykes d’échelle métrique qui recoupe l’anorthosite. La (leuco)gabbronorite à olivine est de couleur grisâtre noir à beige, présente une texture granoblastique avec une matrice de granulométrie fine (< 1 mm). Sa minéralogie (Figure 14C – F) est constituée principalement de plagioclase (50 - 60 %), clinopyroxène (15 – 25 %), orthopyroxène (1 – 10 %), l’olivine $\pm$ iddingsite (3 – 10 %) et l’amphibole (1 – 5 %). Les oxydes de fer et titane (ilménite et magnétite ; 2 – 30 %) sont souvent associés à l’apatite (≤ 2 %) et occupent les interstices entre les pyroxènes (Figure 14E – F). La biotite (≤ 3 %) forme des couronnes (Figure 14C – D) autour des cristaux d’oxydes de fer et titane. La magnétite présente des exsolutions d’ilménite en lamelle (Figure 15B – C), sandwich (Figure 15B) et treillis (Figure 15A – D) et des exsolutions de spinelle en granule et lamelle (Figure 15B). L’ilménite présente des exsolutions d’hématite en lamelle et de spinelle (Figure 15A et D). Ces roches sont foliées localement.

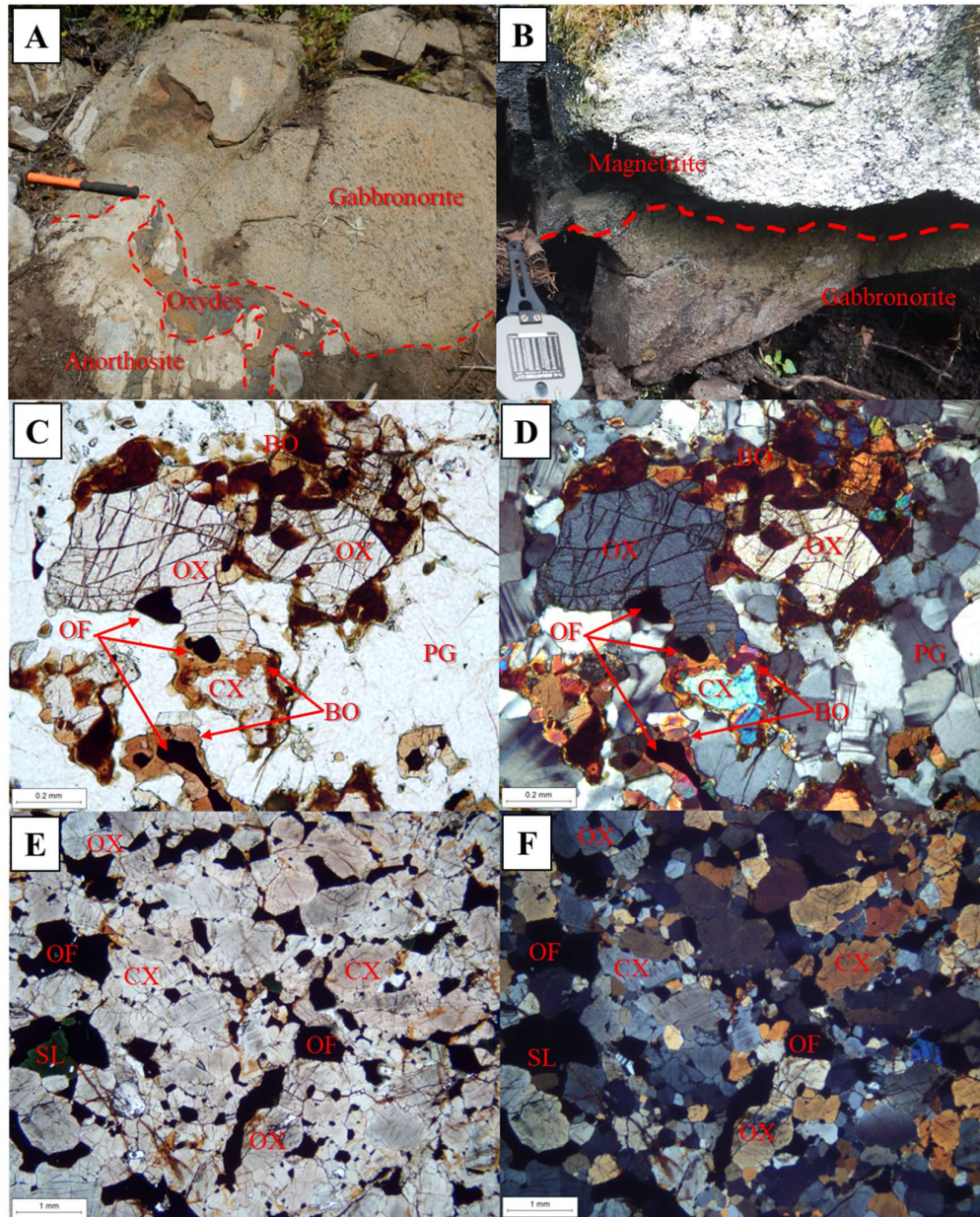


Figure 14 : Photographies de terrain et microscopiques de (leuco)gabbro (dyke). A) Gabbro à grain fin à moyen en contact avec l'anorthosite + amas d'oxydes (23JD33); B) Leucogabbro à grain fin en contact avec la magnétite (23JD50); C et D) Matrice à grain fin de la leucogabbro constitué de plagioclase, clinopyroxène, orthopyroxène, amphibole, oxydes de fer et olivine (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD01); E et F) Clinopyroxène et orthopyroxène avec les oxydes de fer + spinelle (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD33). BO – biotite ; CX – clinopyroxène ; OF – oxydes de fer ; OX – orthopyroxène ; PG – plagioclase ; SL – spinelle.

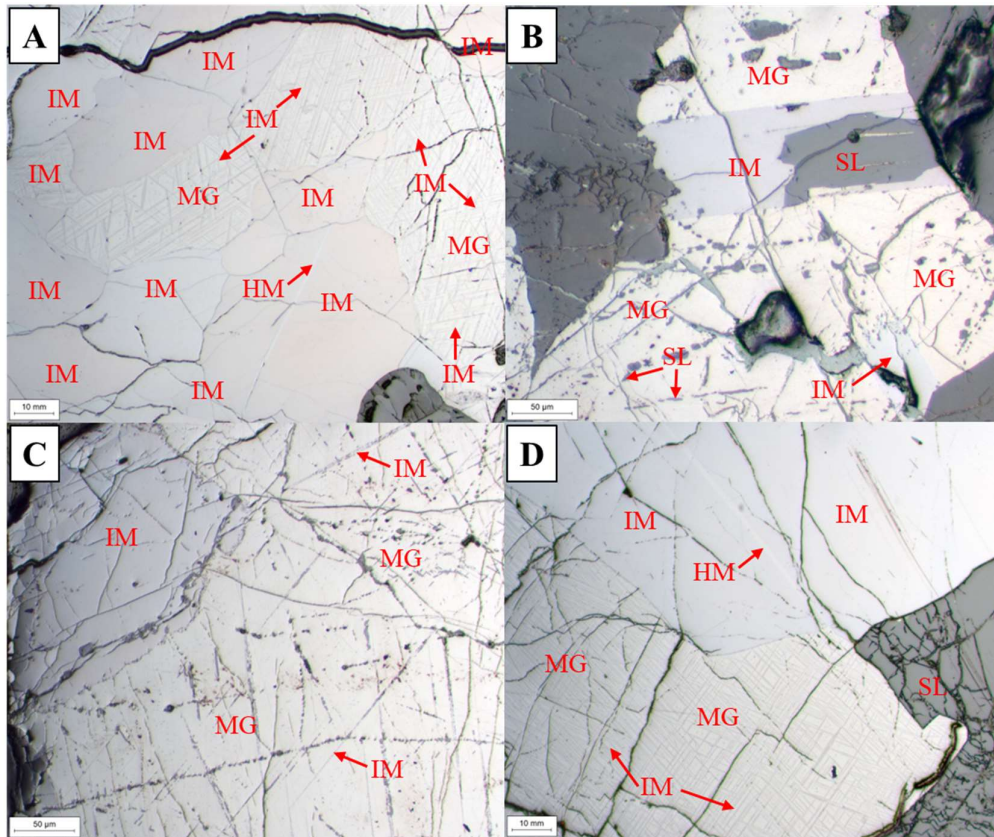


Figure 15 : Microphotographies des minéraux opaques du dyke de (leuco)gabbro-norite en lumière réfléchie. A) Cristaux de magnétite avec des exsolutions d'ilménite en treillis entourés des cristaux d'ilménite sans ou avec exsolution d'hématite en lamelle (au centre) (23JD50); B) Magnétite avec des exsolutions en sandwich d'ilménite et de spinelle (23JD33); C) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite en lamelle et ilménite (23JD33); et D) Ilménite avec des exsolutions d'ilménite en lamelle (en haut) avec magnétite avec des exsolutions d'ilménite en treillis (en bas) et spinelle (23JD50). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; PY – pyrite; SL – spinelle.

3.2.2.3 Leucotroctolite

Le leucotroctolite du Mégadyke de Bégin est présente dans la zone minéralisée dans le secteur de Saint-Charles-de-Bourget (Figures 2 et 3). Sur le terrain, la leucotroctolite est de couleur violacée grise à granulométrie fine à moyenne (≤ 5 mm ; Figure 16A – F), pseudo-trachytique, composée des cristaux allongés de plagioclase (60 – 75 %) et olivine (18 – 20 %), clinopyroxène ($\leq 5\%$) ou orthopyroxène (≤ 1 % ; Figure 16C – F) auxquels s'ajoutent les oxydes de fer et titane (ilménite 8 % et magnétite 2 %). L'amphibole (1 %) et la biotite (3 – 5 % %) forment souvent des couronnes autour des oxydes de fer et titane (Figure 16C – F). L'ilménite est dominante avec ou sans exsolution d'hématite en lamelle (Figure 17A et B).

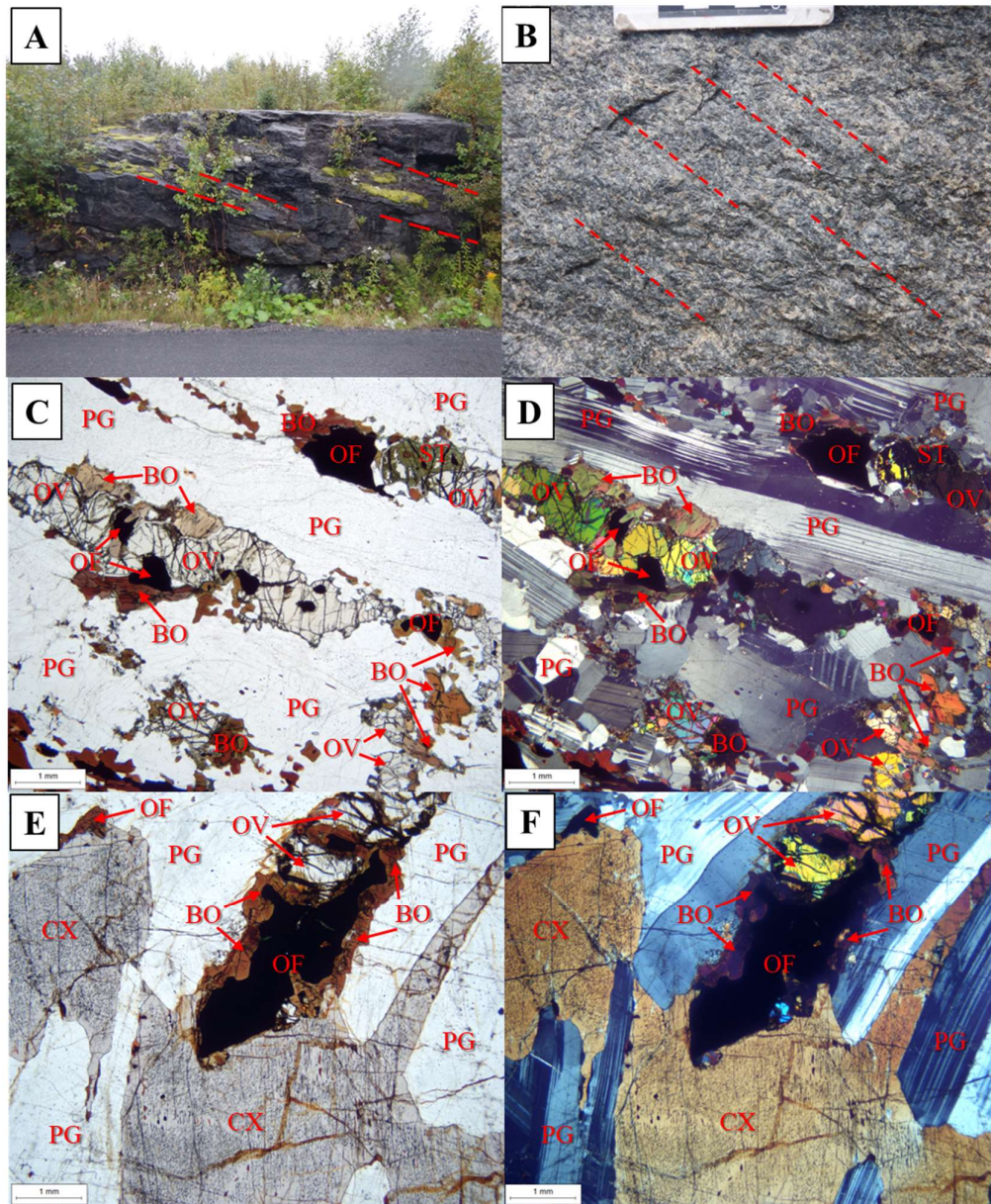


Figure 16 : Photographies de terrain et microscopiques de la leucotroctolite (dyke). A) Leucotroctolite (23JD41); B) leucotroctolite à grain moyen pseudo-trachytique (24JD83); C et D) Leucotroctolite à grain moyen pseudo-trachytique constituée de plagioclase (en bâtonnets), olivine serpentinisé, oxydes de fer avec biotite en couronne (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 24JD83); E et F) Leucotroctolite à grain moyen montrant un porphyroclaste de clinopyroxène (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD41). BO – biotite; CX – clinopyroxène; OF – oxydes de fer; OV – olivine; PG – plagioclase; ST – serpentine.

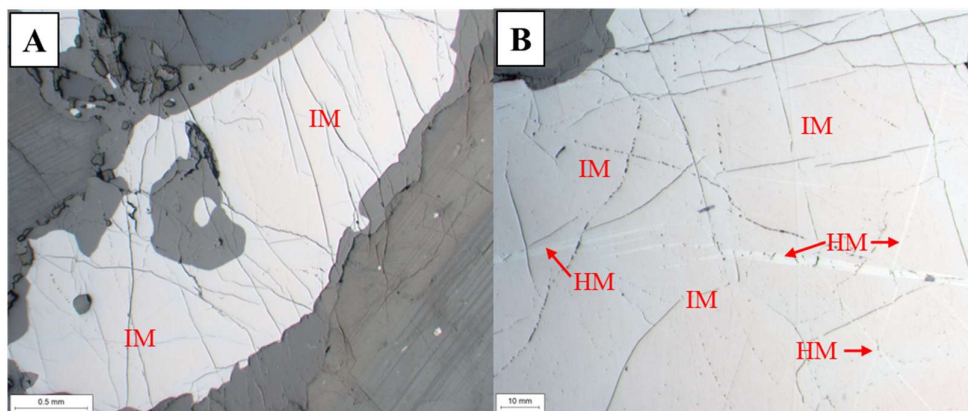


Figure 17 : Microphotographies des minéraux opaques du dyke de leucotroctolite en lumière réfléchie. A) Cristaux d'ilménite sans exsolution (23JD41); B) Gros cristal d'ilménite avec des exsolutions d'hématite (23JD41). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite.

3.3 Pétrographie de la minéralisation Fe-Ti-V-P

Historiquement, la minéralisation reconnue était celle du secteur de Saint-Charles-de-Bourget, au sud de la zone d'études. Cette minéralisation consiste en magnétitite massive (indice Fe-Ti-V) dans la partie Sud, et en nelsonite (indice Fe-Ti-P) dans la partie Nord du Saint-Charles-de Bourget (Jooste, 1949 ; Grant, 2020 ; Figure 18). Les récentes prospections ont signalé l'occurrence de la minéralisation en Fe-Ti-P dans le secteur de Bégin-Lamarche, au nord de la zone d'études (First Phosphate, 2023 ; Banerjee et *al.* 2025a, b). Sur le terrain, la minéralisation observée (Figures 18 et 19) est caractérisée par des lentilles métriques à décimétriques d'oxydes massifs de 2 types : magnétitite massive à olivine ($\pm$ apatite $\pm$ orthopyroxène) et nelsonite à olivine. En forage (BL23-01 et 02), les minéralisations de la zone Sud du secteur Bégin-Lamarche se présentent sous formes de deux autres types de minéralisation : gabbronorite à oxydes et apatite et troctolite à oxydes et apatite (Figure 20).

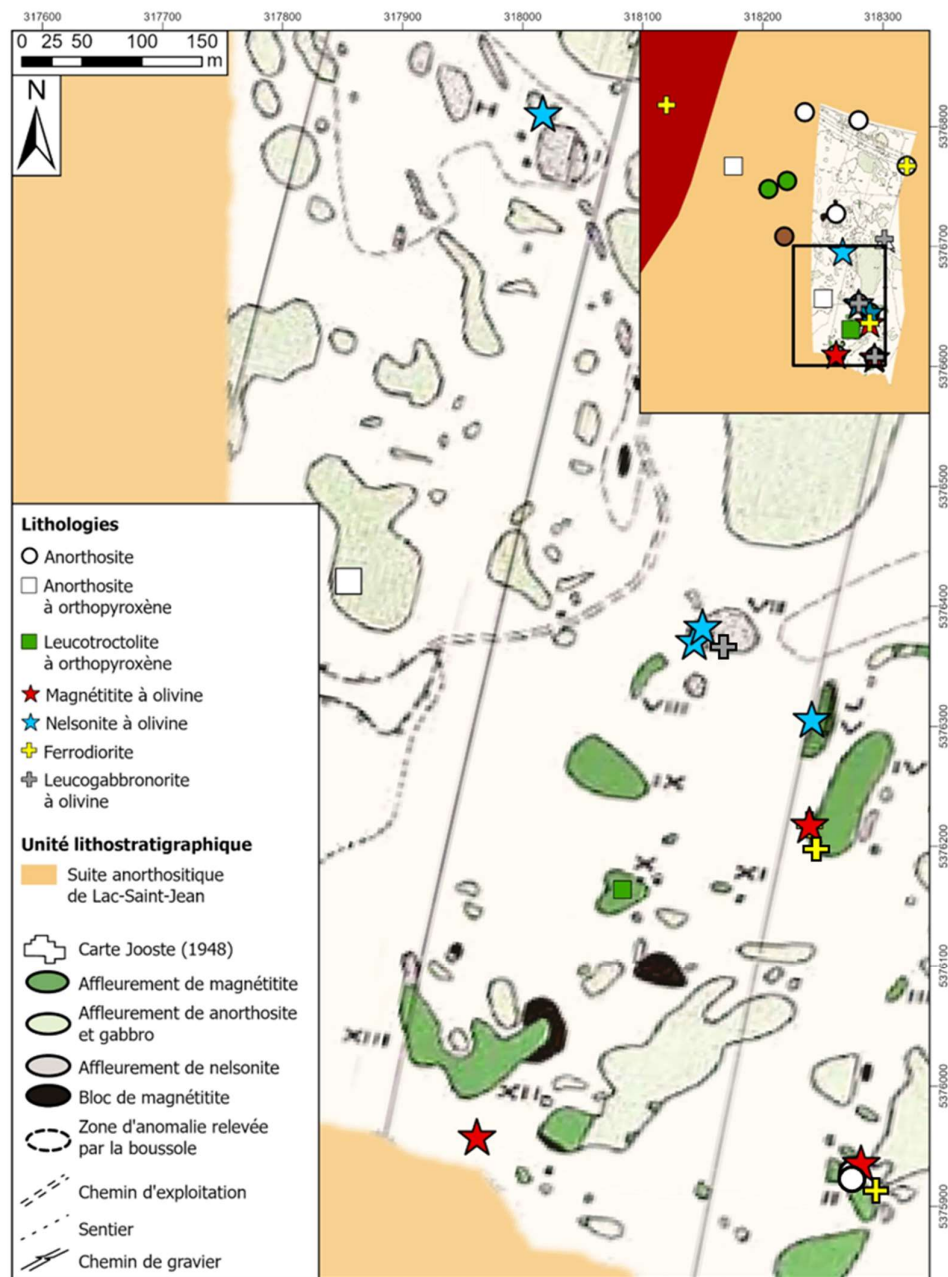


Figure 18 : Carte de distribution des lithologies observées dans la zone minéralisée dans le secteur Saint-Charles-de-Bourget sur fond de carte géologique de Jooste, 1948 ; géologie modifiée SIGEOM 2024 et structurales régionales modifiées de SIGEOM-PACES 2024). Les symboles colorés (carré et cercle) représentent les principales lithologies de la zone d'études. Les croix colorées représentent les dykes. Les étoiles colorées représentent les minéralisations.

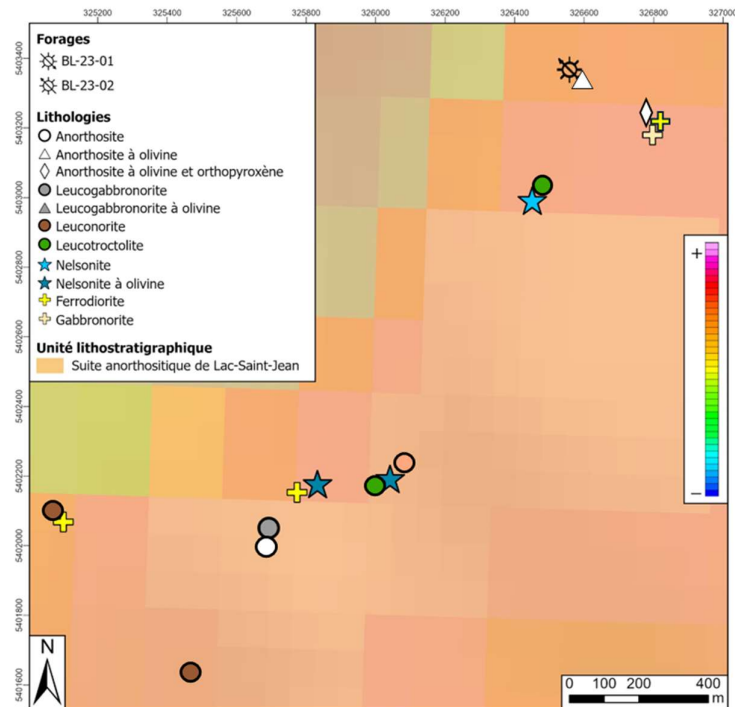


Figure 19 : Carte de distribution des lithologies observées dans la zone minéralisée dans le secteur Bégin-Lamarche sur fond de carte géologique géologique et géophysique (gradient vertical du champ magnétique résiduel modifié de Intissar et Benahmed, 2021; géologie modifiée SIGEOM 2024). Les symboles colorés (cercle, losange et triangle) représentent les principales lithologies de la zone d'études. Les croix colorées représentent les dykes. Les étoiles colorées représentent les minéralisations. Les cercles avec couronne et flèches représentent les forages.

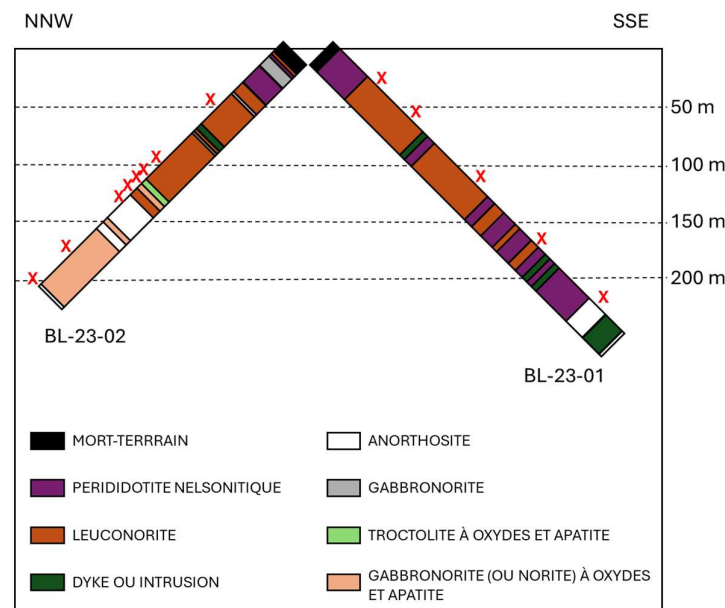


Figure 20 : Vue en coupe schématique des forages BL-23-01 (150/45) et BL-23-02 (330/45) avec les différentes lithologies observées. Les forages et les données proviennent des travaux de Laurentia

Exploration (First Phosphate Corp., Report No. 468). Les croix rouges représentent l'emplacement des échantillons utilisés dans cette étude.

3.3.1.1 Magnétite à olivine

La magnétite massive se présente sous la forme de lentille seulement dans le secteur sud de Saint-Charles-de-Bourget (Figures 2, 3 et 18). La magnétite est de couleur noire, granoblastique et porphyroclastique avec une matrice de granulométrie moyenne (0,1 – 1 cm). Sa minéralogie (Figure 21B – F) est composée de magnétite (31 – 70 %), ilménite (17 – 54 %), olivine (2 – 20 %) et spinelle (9 – 29 %). Il est fréquent d'observer l'apatite comme accessoire (≤ 5 %) et quelques fois le plagioclase (≤ 3 % ; Figure 21E – F) et l'orthopyroxène (≤ 2 %). Il y aussi l'amphibole (≤ 2 %) en couronne sur les plagioclases (≤ 3 % ; Figure 21E – F) et la biotite (≤ 4 %) souvent en couronne autour des cristaux d'oxydes de fer et titane. Les porphyroclastes d'olivine présentent un diamètre entre 1,2 – 3 cm. La magnétite présente souvent des exsolutions d'ilménite en treillis (Figure 22A et B), sandwich (Figure 22D) et lamelle (Figure 22D) et des exsolutions de spinelle du type lamelle (Figure 22D) et treillis (Figure 22D) alors que l'ilménite présente des exsolutions d'hématite en lamelle (Figure 22C). La magnétite présente environ 5 % d'enclaves métriques subarrondis à subanguleux, localement très allongés, de composition anorthositique et gabbronoritique (Figure 21A) et un contact cisailé avec l'anorthosite ou avec les dykes de ferrodiorite et gabbronorite (Figure 14B).

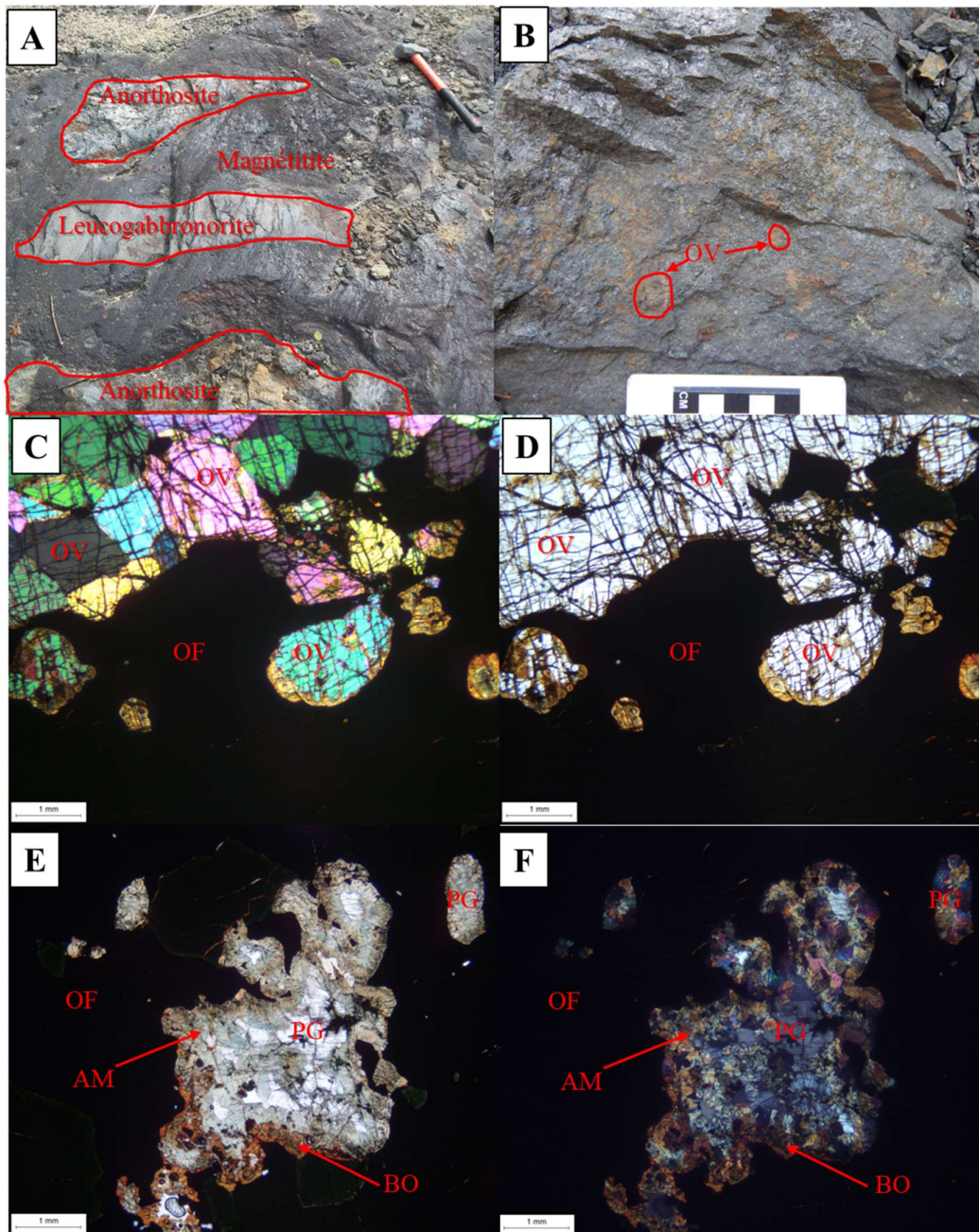


Figure 21 : Photographies de terrain et microscopiques de la magnétite à olivine. A) Magnétite massive à olivine avec d'enclaves d'anorthosite et leucogabbro (23JD01); B) Cristaux d'olivine (rouille) dans la magnétite (23JD01); C et D) Oxydes de fer et cristaux d'olivine granoblastiques (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD02); E et F) Porphyroclaste de plagioclase avec une couronne d'amphibole et les oxydes de fer avec une couronne de biotite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD52). AM – amphibole; BO – biotite; OF – oxydes de fer; OV – olivine; PG – plagioclase.

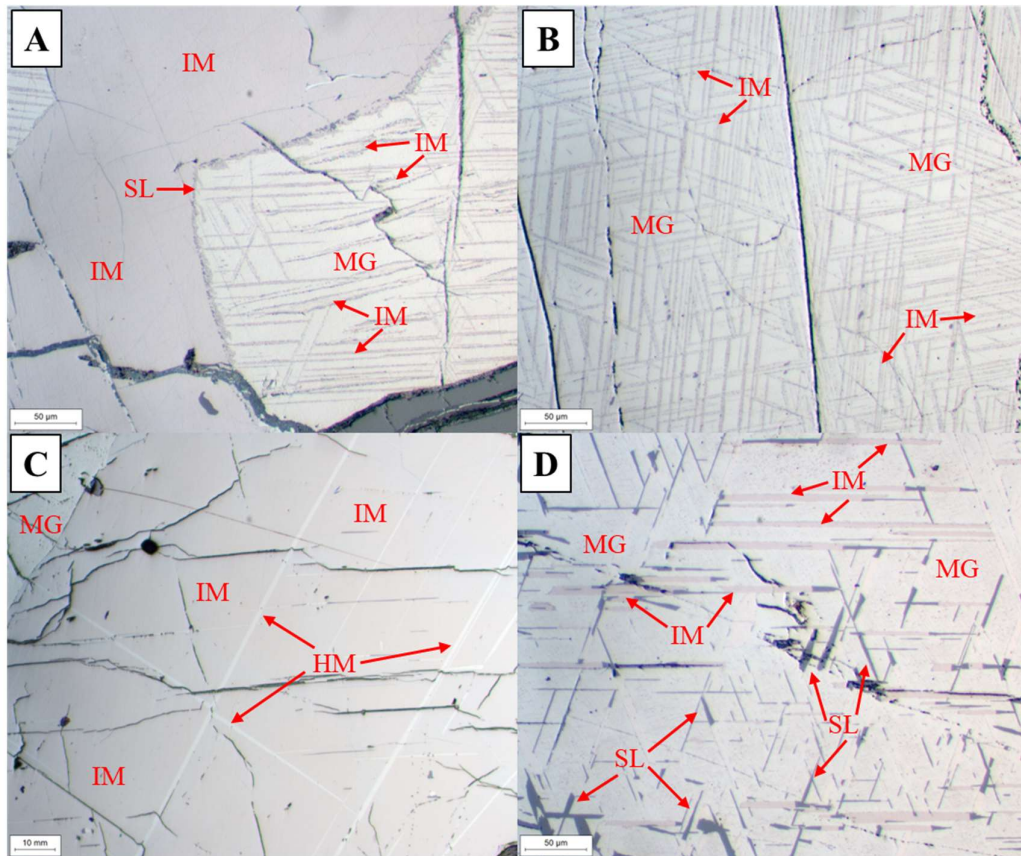


Figure 22 : Microphotographies des minéraux opaques de la magnétitite en lumière réfléchie. A) Ilménite (couleur rose) granoblastique à gauche de la magnétite ayant des exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en treillis (23JD050); B) magnétite ayant des exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en treillis (23JD50); C) Ilménite avec des exsolutions d'hématite (ligne fine blanchâtre) en lamelle et magnétite à gauche (23JD52); et D) Magnétite avec des exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en sandwich et des exsolutions de spinelle (ligne fine grisâtre) en treillis (23JD52). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; SL – spinelle.

3.3.1.2 Nelsonite à olivine

La nelsonite à olivine se retrouve dans les deux secteurs d'études (Figures 2, 3, 19 et 20) et se présente sous la forme des amas et/ou lentilles de nelsonite massive ou rubanée de couleur de grisâtre foncé. La nelsonite est granoblastique et porphyroclastique avec une matrice de granulométrie fine à moyenne (≤ 4 mm ; Figure 23A – F). Sa minéralogie (Figure 23A – F) est constituée d'ilménite (10 – 58 %), magnétite (10 – 52 %), apatite (10 – 50 %), spinelle (3 – 25 %) et olivine $\pm$ iddingsite (2 – 40 %). Les cristaux de clinopyroxène (≤ 5 %) et plagioclase (≤ 5 %) sont rares et les plagioclases se présentent comme porphyroclastes avec l'olivine ayant respectivement un diamètre de 1 – 4 cm et 1,6 – 5 cm Les oxydes de fer et titane sont rencontrés dans les interstices entre les cristaux d'apatite (Figure 23C – D). La biotite (≤ 5 %) $\pm$ amphibole (≤ 5 %) forment des couronnes autour des oxydes de fer et titane alors que seule l'amphibole forme une couronne autour

des porphyroclastes de plagioclase. La magnétite présente des exsolutions d'ilménite en treillis (Figure 24A), lamelle (Figure 24D) et sandwich (Figure 24D) et des exsolutions de spinelle en lamelle (Figure 24A et D) alors que l'ilménite présente des exsolutions d'hématite en treillis (Figure 24B) et lamelle (Figure 24C) et des exsolutions de spinelle en en lamelle (Figure 24B). La nelsonite à olivine est localement foliée.

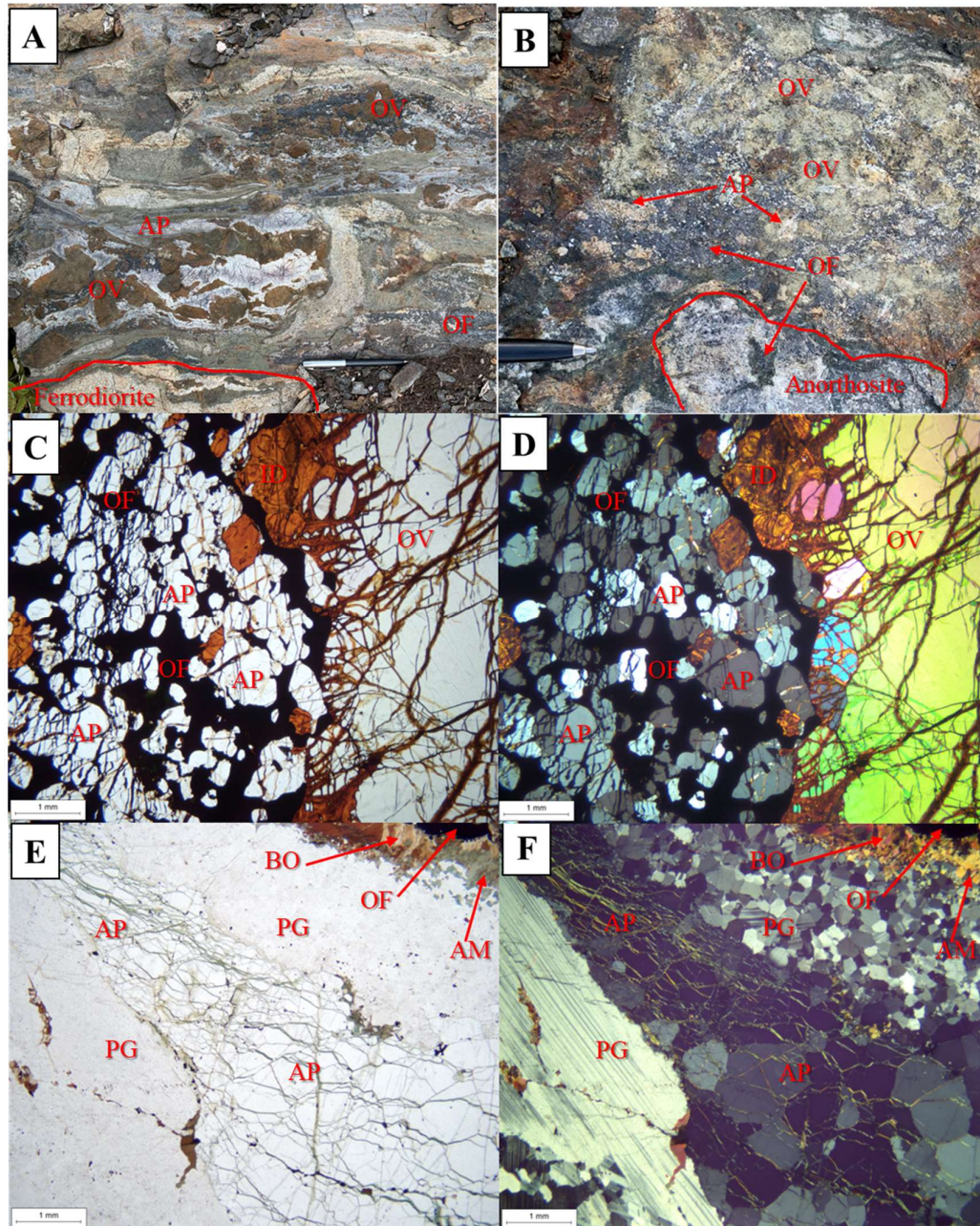


Figure 23 : Photographies de terrain et microscopiques de la nelsonite à olivine. A) Lentille de nelsonite rubanée (23JD34); B) Nelsonite (oxydes de fer, apatite, olivine (23JD25) ; C et D) Porphyroclaste d'olivine partiellement remplacé par iddingsite avec oxydes de fer entre les cristaux d'apatite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23JD51); E et F) Porphyroclaste de plagioclase en contact avec un rubanement formé par des cristaux d'apatite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée

respectivement; 23JD34). AM – amphibole; AP – apatite; BO – biotite; ID – iddingsite; OF – oxydes de fer; OV – olivine; PG - plagioclase.

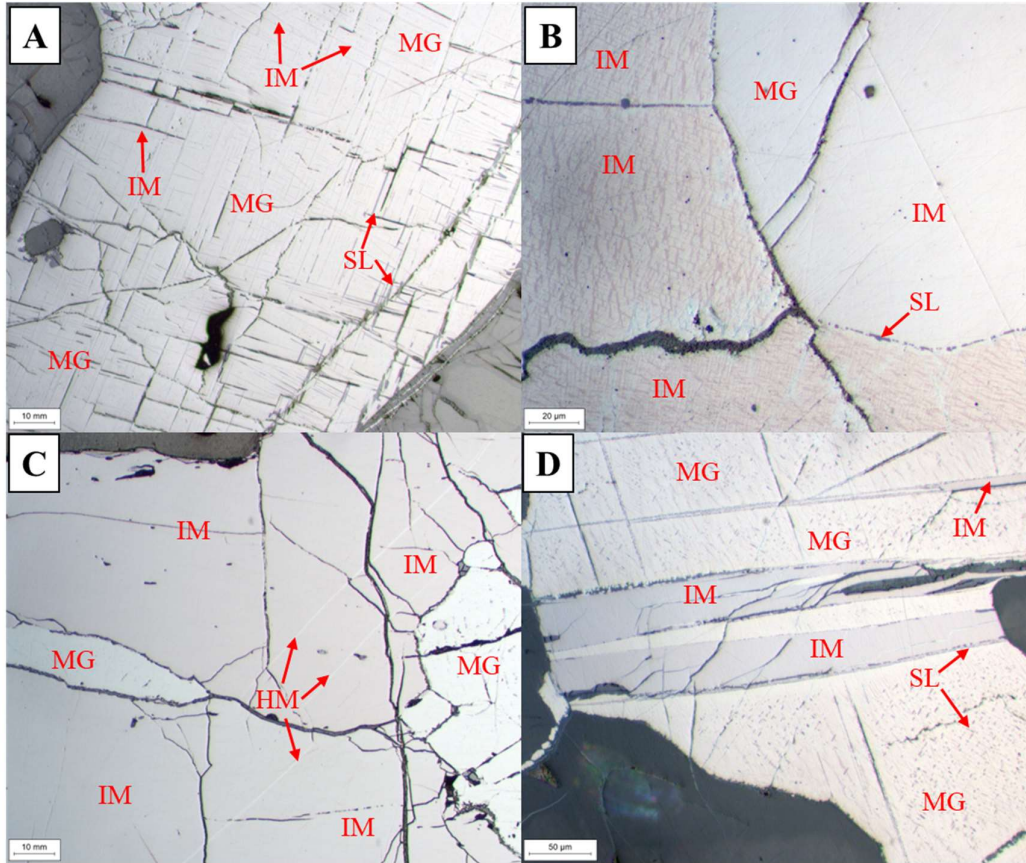


Figure 24 : Microphotographies des minéraux opaques de la nelsonite à olivine en lumière réfléchie. A) Magnétite avec des exsolutions d’ilménite (ligne fine rosée) en treillis et des exsolutions du spinelle (ligne fine grisâtre) en lamelle (23JD51); B) Cristaux d’ilménite avec des exsolutions d’ilménite (ligne fine rosée) treillis (à gauche) et en lamelle (en bas à droite), cristal de magnétite au milieu et un autre cristal d’ilménite avec exsolation de spinelle (point grisâtre) en granulat (23JD54); C) Ilménite avec des exsolutions d’hématite (ligne fine blanchâtre) en lamelle et magnétite (23JD26); et D) Magnétite avec des exsolutions d’ilménite (ligne fine et épaisse rosée) en lamelle et sandwich et des exsolutions de spinelle (ligne fine grisâtre) en granulat et lamelle (23JD51). HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; SL – spinelle.

3.3.1.3 Gabbronorite à oxydes et apatite

La gabbronorite à oxydes et apatite a été échantillonnée à une profondeur de 171 m du forage BL23-02 réalisé dans le secteur de Bégin-Lamarche (Figures 2, 3, 19 et 20). La gabbronorite à oxydes et apatite est de couleur grisâtre foncé, présente une texture granoblastique et porphyroclastique avec une matrice de granulométrie fine à moyenne (≤ 3 mm ; Figure 25A – D). Sa minéralogie (Figure 25A – F) est constituée principalement de plagioclase (39 %), orthopyroxène (20 %), clinopyroxène (11 %), apatite (10 %), magnétite (6 %), ilménite (4 %) et spinelle (2 %). Les oxydes de fer et titane sont généralement rencontrés dans les interstices entre les grains des cristaux des pyroxènes et/ou d’apatite (Figure 25A et B). L’amphibole (3 %) $\pm$ biotite (1 %) forment des

couronnes autour des pyroxènes alors que les couronnes de biotite autour des oxydes sont rares. La magnétite présente des exsolutions d'ilménite en sandwich (Figure 25E) et de spinelle (Figure 25E) en lamelle. L'ilménite présente des exsolutions d'hématite en lamelle (Figure 25F). La pyrite et la chalcopryrite sont rares (< 1 %).

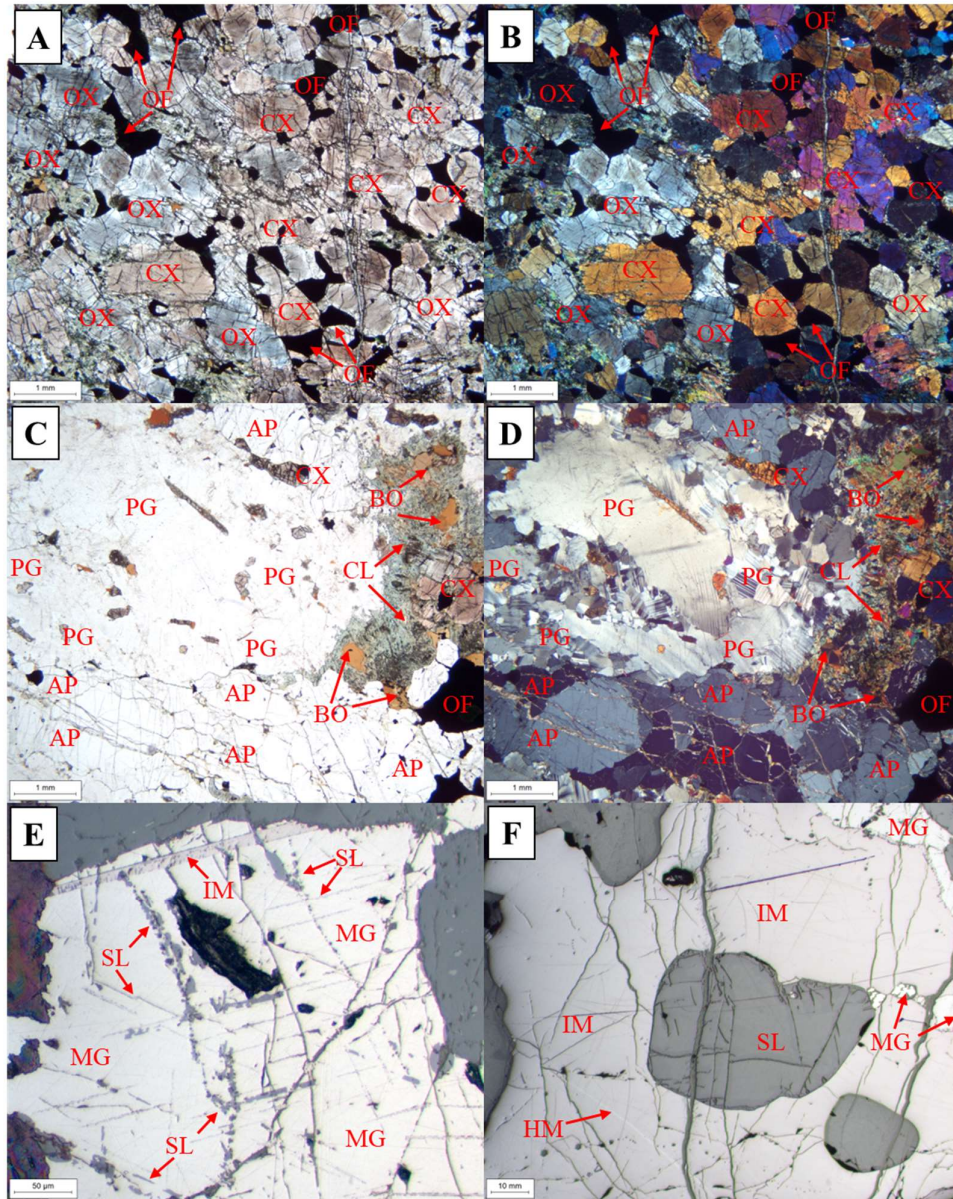


Figure 25 : Microphotographies de la gabbronorite à oxydes et apatite. A et B) Gabbronorite à oxydes et apatite à grain moyen constituée de cristaux de clinopyroxène et orthopyroxène avec les oxydes de fer et titane dans les interstices (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23BL02-171); C et D) Porphyroclaste de plagioclase dans gabbronorite à grain moyen constituée de cristaux de plagioclase, clinopyroxène, apatite, oxydes de fer et titane et biotite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23BL02-171); E) Cristaux de magnétite avec exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en sandwich et lamelle et exsolutions de spinelle (ligne fine grisâtre) en lamelle et treillis (en lumière réfléchie; 23BL02-171); et F) Cristaux d'ilménite avec exsolution d'hématite (ligne fine blanchâtre) en lamelle, de spinelle et de magnétite (en lumière réfléchie; 23BL02-116) . AP – apatite; BO

– biotite; CL – chlorite; CX – clinopyroxène; HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; OF – oxydes de fer; OX – orthopyroxène; PG – plagioclase; SL – spinelle.

3.3.1.4 Troctolite à oxydes et apatite

La troctolite à oxydes et apatite a été échantillonnée à une profondeur de 116 m du forage BL23-02 réalisé dans le secteur de Bégin-Lamarche (Figures 2, 3, 19 et 20). La troctolite à oxydes et apatite est de couleur grisâtre foncée, présente une texture granoblastique et porphyroclastique avec une matrice de granulométrie moyenne (1 – 4 mm ; Figure 26A – D). Sa minéralogie (Figure 26A – F) est constituée principalement de plagioclase (44 %) et olivine (17 %), auxquels s'ajoutent l'apatite (12 %), les oxydes de fer et titane (magnétite 6 % et ilménite 4 %) et le spinelle (5 %). La chlorite (10 %) se retrouve autour des porphyroclastes d'olivine (≥ 6 mm) et la biotite (2 %) forme des couronnes autour des oxydes de fer et titane (Figure 26A – D). La magnétite présente des exsolutions d'ilménite en lamelle et sandwich (Figure 26E) et des exsolutions de spinelle en lamelle et treillis (Figure 26E) et l'ilménite des exsolutions d'hématite (Figure 26F). Les sulfures comme la pyrite et la chalcopryrite sont rares (< 1 %). La troctolite à oxydes et apatite est localement foliée.

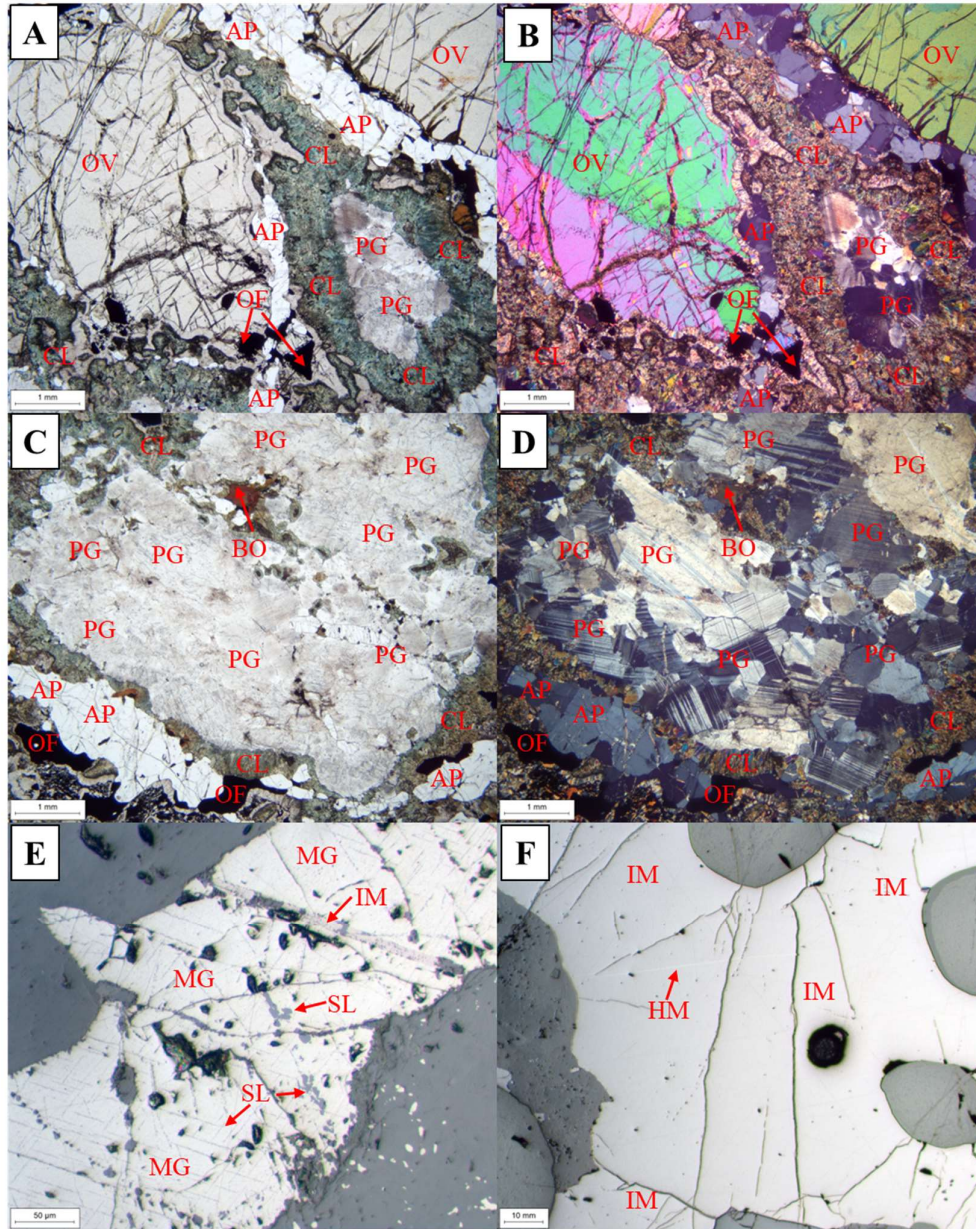


Figure 26 : Microphotographies de la troctolite à oxydes et apatite à grain fin à moyen. A et B) Matrice à grain moyen constituée d'olivine, apatite, oxydes de fer et titane et les couronnes de chlorite autour des cristaux d'olivine (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23BL02-116); C et D) Matrice à grain fin constituée de cristaux de plagioclase, apatite, oxydes de fer et titane et chlorite (en lumière polarisée et lumière polarisée croisée respectivement; 23BL02-116); E) Cristaux de magnétite avec exsolutions d'ilménite (ligne fine rosée) en sandwich et exsolutions de spinelle (ligne fine grisâtre) en lamelle et treillis (en lumière réfléchie; 23BL02-116); F) Cristaux d'ilménite avec exsolutions d'hématite (ligne fine blanchâtre) en lamelle (en lumière réfléchie; 23BL02-116) . AP – apatite; BO – biotite; CL – chlorite; HM – hématite; IM – ilménite; MG – magnétite; OF – oxydes de fer; OV – olivine; PG – plagioclase; SL – spinelle.

3.3.2 Relation entre la minéralisation et les roches hôtes

Les roches hôtes et/ou avoisinantes de la minéralisation dans les deux secteurs, telles que l'anorthosite, la leuconorite et la leucotroctolite, dans quelques cas présentent

des proportions variables d'oxydes de fer et de titane, avec ou sans apatite. Ces minéraux apparaissent soit de manière disséminée, soit sous forme d'amas centimétriques (Figure 27). Il est également à noter que la proportion des oxydes de fer et de titane tend à augmenter vers la minéralisation lorsque ces roches hôtes, notamment l'anorthosite et la leuconorite, sont recoupées par les dykes de ferrodiorite.

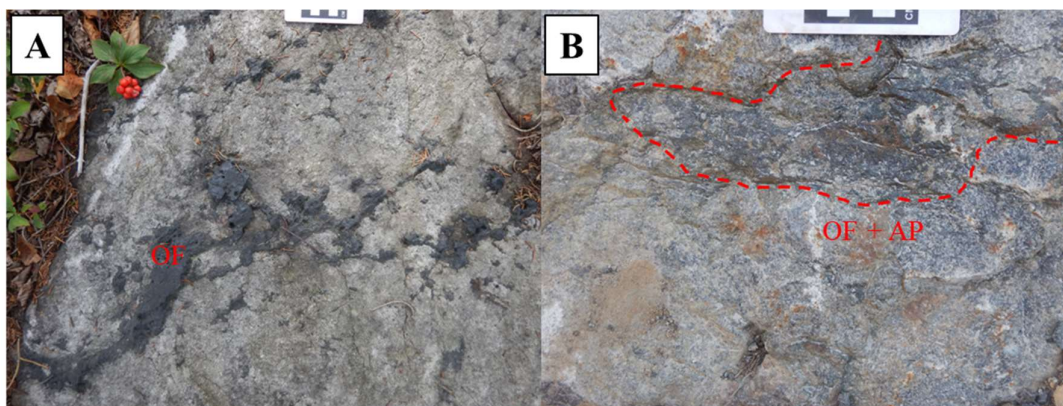


Figure 27 : A) Anorthosite avec des oxydes de fer et titane disséminés et en amas à Saint-Charles-de-Bourget (23JD037); et B) Leucotroctolite avec des oxydes de fer et titane et apatite (nelsonite) en amas à Saint-Charles-de-Bourget (ligne en trait tireté rouge ; 23JD038). OF – oxydes de fer et titane; AP – apatite.

Dans l'ensemble, la minéralisation du secteur de Saint-Charles-de-Bourget se caractérise par la magnétite à l'olivine et la nelsonite à olivine qui sont encaissées par l'anorthosite et la leucotroctolite et recoupées par des dykes de ferrodiorite et leucogabbronorite à olivine (Figure 27). Le secteur de Bégin-Lamarche est caractérisé par la nelsonite à olivine, la gabbronorite à oxydes et apatite et la troctolite à oxydes et apatite. Ces minéralisations sont encaissées par l'anorthosite, la leuconorite, la gabbronorite et la leucotroctolite (Figure 27) et leurs encaissants sont ensuite recoupées par des dykes de ferrodiorite et gabbronorite.

4 Lithogéochimie

Un total de 113 échantillons a été sélectionné de manière à représenter les différentes lithologies de chaque secteur d'études et ensuite analysé (voir annexe 1 pour détails) au laboratoire Actlabs (Ancaster, ON) afin de déterminer leurs teneurs en éléments majeurs, mineurs et traces. Les lithologies analysées sont : anorthosite (29), leuconorite (20), leucotroctolite (14), leucogabbronorite (12), dykes de ferrodiorite (10), (leuco)gabbronorite (5) et leucotroctolite (2), et la minéralisation en Fe-Ti-V (magnétite ; 6) et en Fe-Ti-P (nelsonite ; 15).

4.1 Éléments majeurs et mineurs

Le diagramme de Harker a été utilisé pour présenter les variations de chacun des éléments majeurs, à savoir Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , P_2O_5 , TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$, par rapport à SiO_2 (Figures 28 et 29). En plus, pour les oxydes de fer et titane, le diagramme a permis de comparer les teneurs en TiO_2 et V_2O_5 par rapport à $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ et TiO_2 par rapport à P_2O_5 (Figure 30). Les teneurs en SiO_2 et $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{t}}$ varient en général entre 38,8 – 63,4 % pds. et 0,8 – 58,2 % pds., respectivement, pour les lithologies silicatées alors que les minéralisations Fe-Ti-P-V ont des teneurs plus basses en SiO_2 (1,1 – 38,7 % pds.) et plus hautes en $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{t}}$ (30,3 – 70,4 % pds.). De plus, les pôles minéralogiques déterminés par microsonde (Grant, 2020 ; Vaillancourt, 2001 ; Miloski et *al.* 2023) ont été intégrés à chacun des diagrammes afin de montrer les différentes phases minérales présentes qui contrôlent la géochimie de ces roches anorthositiques.

Les anorthosites se concentrent autour du pôle minéralogique du plagioclase et se répartissent souvent entre le triangle minéralogique formé par les pôles plagioclase – olivine – orthopyroxène (Figures 28 et 29). Les anorthosites sont caractérisées par de hautes teneurs en SiO_2 (38,8 – 56 % pds.), Al_2O_3 (17,8 – 28,2 % pds.), CaO (6,3 – 11,1 % pds.) et Na_2O (3,6 – 5,7 % pds.) et de basses teneurs en MgO (0,1 – 1,5 % pds.), $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (0,8 – 7,6 % pds.), K_2O (0,3 – 0,9 % pds.), TiO_2 (0,1 – 4,6 % pds.), V_2O_5 ($\leq 0,1$ % pds.) et P_2O_5 ($\leq 0,3$ % pds.). Néanmoins, certaines anorthosites (Figure 27) ont présenté des anomalies dues à la présence des oxydes de fer et titane et de l'apatite: 4 avec des anomalies en $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (10,4 – 20 % pds. ; Figures 29 et 30), 7 avec des anomalies en TiO_2 (0,8 – 6,2 % pds. ; Figures 29 et 30), 2 avec des anomalies en P_2O_5 (0,8 – 1 % pds. ; Figures 29 et 30) et 4 avec des anomalies en MgO (3,2 – 4,5 % pds. ; Figure 28) dues à la présence de l'olivine.

Les leuconorites sont réparties entre la ligne des pôles plagioclase – orthopyroxène (Figures 28 et 29) et se distribuent également en direction de la ligne plagioclase – olivine (Figure 28A - D). Elles sont caractérisées par de hautes teneurs en SiO_2 (45,4 – 56,6 % pds.), Al_2O_3 (15,7 – 28,8 % pds.), Na_2O (2,1 – 5,8 % pds.), CaO (5,9 – 12,4 % pds.) et MgO (0,2 – 11,6 % pds.); et des basses teneurs en K_2O (0,2 – 0,9 % pds.), $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (0,8 – 8,2 % pds.), TiO_2 (0,1 – 0,4 % pds.), V_2O_5 ($\leq 0,1$ % pds.) et P_2O_5 ($\leq 0,1$ % pds.). De plus, certaines leuconorites présentent des anomalies : 4 avec des anomalies en $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (9,8 – 20,4 % pds. ; Figures 29 et 30), 5 avec des anomalies en

TiO₂ (0,9 – 3,3 % pds. ; Figures 29 et 30) et 2 avec des anomalies en P₂O₅ (0,6 – 1 % pds. ; Figures 29 et 30) dues à la présence des oxydes de fer et titane et de l'apatite.

Les leucotroctolites sont concentrées proche du pôle de plagioclase et sont distribués en direction du pôle olivine à proximité de la ligne plagioclase - olivine (Figures 28 et 29). Les leucotroctolites présentent des hautes teneurs en SiO₂ (46,2 – 55,6 % pds.), Al₂O₃ (15,6 – 28,5 % pds.), CaO (6,7 – 12,3 % pds.), Na₂O (2,6 – 5,9 % pds.) et MgO (0,8 – 12,7 % pds.); et des basses teneurs en K₂O (0,2 – 0,8 % pds.), Fe₂O_{3(total)} (1,5 – 16,8 % pds.) TiO₂ (0,1 – 3,8 % pds.), V₂O₅ ($\leq$ 0,04 % pds.) et P₂O₅ ($\leq$ 0,5 % pds.).

Les leucogabbonorites se concentrent à proximité du pôle de plagioclase et sont généralement alignés autour de la ligne plagioclase – clinopyroxène/orthopyroxène (Figures 28 et 29). Dans la Figure 28B, ces lithologies se concentrent dans le triangle formé par les pôles plagioclase – olivine – orthopyroxène. Les leucogabbonorites sont caractérisées par de hautes teneurs en SiO₂ (46,3 – 54,1 % pds.), Al₂O₃ (16,4 – 28,7 % pds.), CaO (8,2 – 13,7 % pds.), Na₂O (2,5 – 4,8 % pds.) et MgO (0,3 – 9,4 % pds.) ; et des basses teneurs en K₂O (0,2 – 0,9 % pds.), Fe₂O_{3(total)} (1,6 – 8,6% pds.), TiO₂ (0,1 – 0,6 % pds.), V₂O₅ (0,004 – 0,014 % pds.) et en P₂O₅ ($\leq$ 0,6 % pds.). L'échantillon 24JD070A1 (Figures 29 et 30) a présenté des anomalies en Fe₂O_{3(total)} (15,1% pds.) et TiO₂ (3,1 % pds.) compte tenu des oxydes de fer et titane et l'apatite présents.

Les dykes identifiés au cours de cette étude se présentent en 3 types lithologiques. Il y a les ferrodiorites et les (leuco)gabbnorite à olivine qui sont associées à la Diorite du Lac Chabot et les leucotroctolites associées au Mégadyke de Bégin.

Les ferrodiorites sont généralement réparties à proximité ou sur la ligne plagioclase – amphibole (Figure 28A, B et D) et la ligne plagioclase – magnétite (Figure 29B). Elles présentent de plus hautes teneurs en K₂O ($\leq$ 3% pds.), Fe₂O_{3(total)} (9,5 – 19,1 % pds.), TiO₂ (1,3 – 4,1 % pds.) et P₂O₅ ($\leq$ 2,3 % pds.); des teneurs intermédiaires en SiO₂ (0,9 – 59,1 % pds.), Al₂O₃ (4,7 – 18,4 % pds.), Na₂O (0,03 – 4,9 % pds.), en CaO (3,4 – 10,4 % pds.) et MgO (1,7 – 8,1 % pds.), et de basses teneurs en V₂O₅ (0,01 – 0,2% pds.).

Les dykes de (leuco)gabbnorite présentent un comportement similaire par rapport à la ferrodiorite (Figures 28 – 30), mais avec un échantillon (23JD033D; Figures 28D, 29B – C et 30) avec des teneurs très élevées en MgO (10 % pds.), en Fe₂O_{3(total)}

(50,4 % pds.) et TiO_2 (10 % pds.) dues à la présence des oxydes de fer et titane mais pauvre en P_2O_5 (0,02 – 0,2 % pds.).

Les dykes de leucotroctolite se distribuent sur la ligne plagioclase – olivine (Figure 28A et D) ou entre les pôles plagioclase – olivine - orthopyroxène (Figure 29B). Elles présentent des teneurs similaires aux dykes de ferrodiorite en SiO_2 (45,4 – 47,3 % pds.), Al_2O_3 (18,8 – 20,2 % pds.), en CaO (7,6 – 8,1 % pds.) et Na_2O (3,6 – 4 % pds.), mais avec de plus basses teneurs en K_2O (0,5 – 0,6 % pds. ; Figure 28C) et P_2O_5 (0,3 % pds. ; Figure 29D).

Les minéralisations (magnétite à olivine et nelsonite à olivine) présentent des caractéristiques similaires pour plusieurs éléments dans les diagrammes de Harker avec une distribution autour des pôles de magnétite, ilménite et olivine; mais la nelsonite à un fort enrichissement en P_2O_5 et CaO dû à l'apatite.

Les magnétitites se concentrent généralement à proximité des pôles de magnétite et ilménite et montrent également une tendance en direction du pôle spinelle (Figures 28 et 29). Elles présentent de hautes teneurs en $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (47,3 – 70,4 % pds.), TiO_2 (13,9 – 22 % pds.) et V_2O_5 (0,2 – 0,35 % pds.); et des basses teneurs en SiO_2 (1,9 – 18,9 % pds.), Al_2O_3 (5,2 – 9,2 % pds.), Na_2O (0,03 – 1,1 % pds.), CaO (0,2 – 4,1 % pds.), K_2O ($\leq$ 0,9 % pds.), MgO (2 – 5,6 % pds.) et P_2O_5 (0,01 – 0,1 % pds.).

Les nelsonites sont distribuées dans les diagrammes de Harker en direction du pôle magnétite et/ou ilménite et apatite ou entre les pôles olivine – magnétite/ ilménite et apatite (Figures 28 – 30). Elles présentent de hautes teneurs en $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ (30,3 – 63,4 % pds.), TiO_2 (2,2 – 19 % pds.) et P_2O_5 (2,3 - 14 % pds.) ; et de basses teneurs en SiO_2 (1,1 – 29,7 % pds.), MgO (1,7 – 19 % pds.), Al_2O_3 (0,6 – 12,1 % pds.), Na_2O (0,02 – 2,3 % pds.), CaO (3,2 – 18,3 % pds.), K_2O ($\leq$ 0,3 % pds.) et V_2O_5 (0,02 – 0,26 % pds.). Les nelsonites à olivine présentent des teneurs en SiO_2 (2,2 – 38,7 % pds.) et MgO (2,5 – 19 % pds.) supérieures aux teneurs des nelsonites sans olivine (1,1 – 1,7 % pds. SiO_2 et 1,7 – 2,5 % pds. MgO). Cette différence des teneurs en SiO_2 et MgO est due aux proportions variables d'olivine dans la nelsonite (Figure 28D).

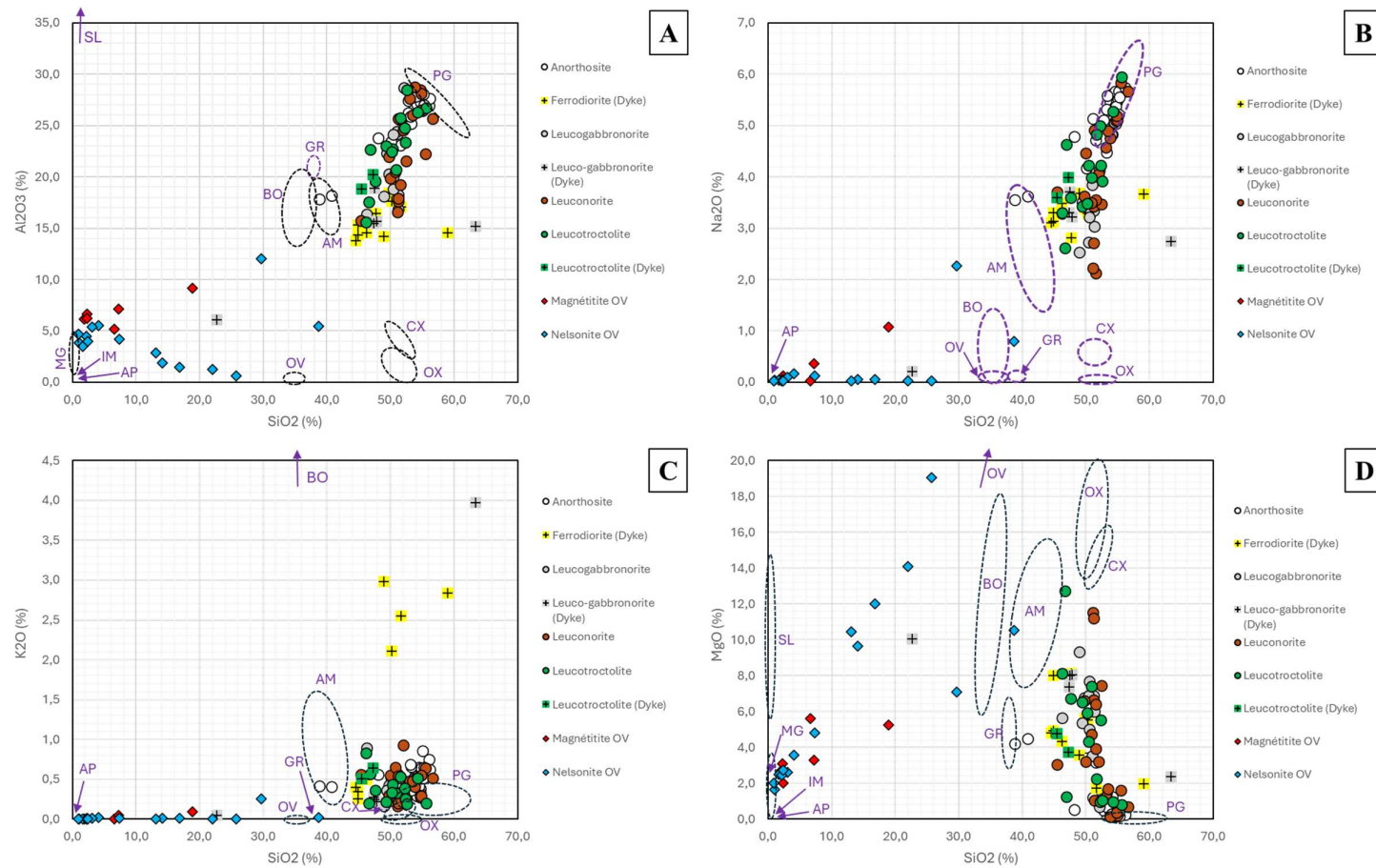


Figure 28 : Diagrammes lithogéochimiques de Harker : A) Al_2O_3 vs. SiO_2 ; B) Na_2O vs. SiO_2 ; C) K_2O vs. SiO_2 ; D) MgO vs. SiO_2 . Les analyses de pôles minéralogiques (ellipses violettes) par microsonde proviennent des données de Grant (2020), Vaillancourt (2001) et Miloski *et al.* (2023).

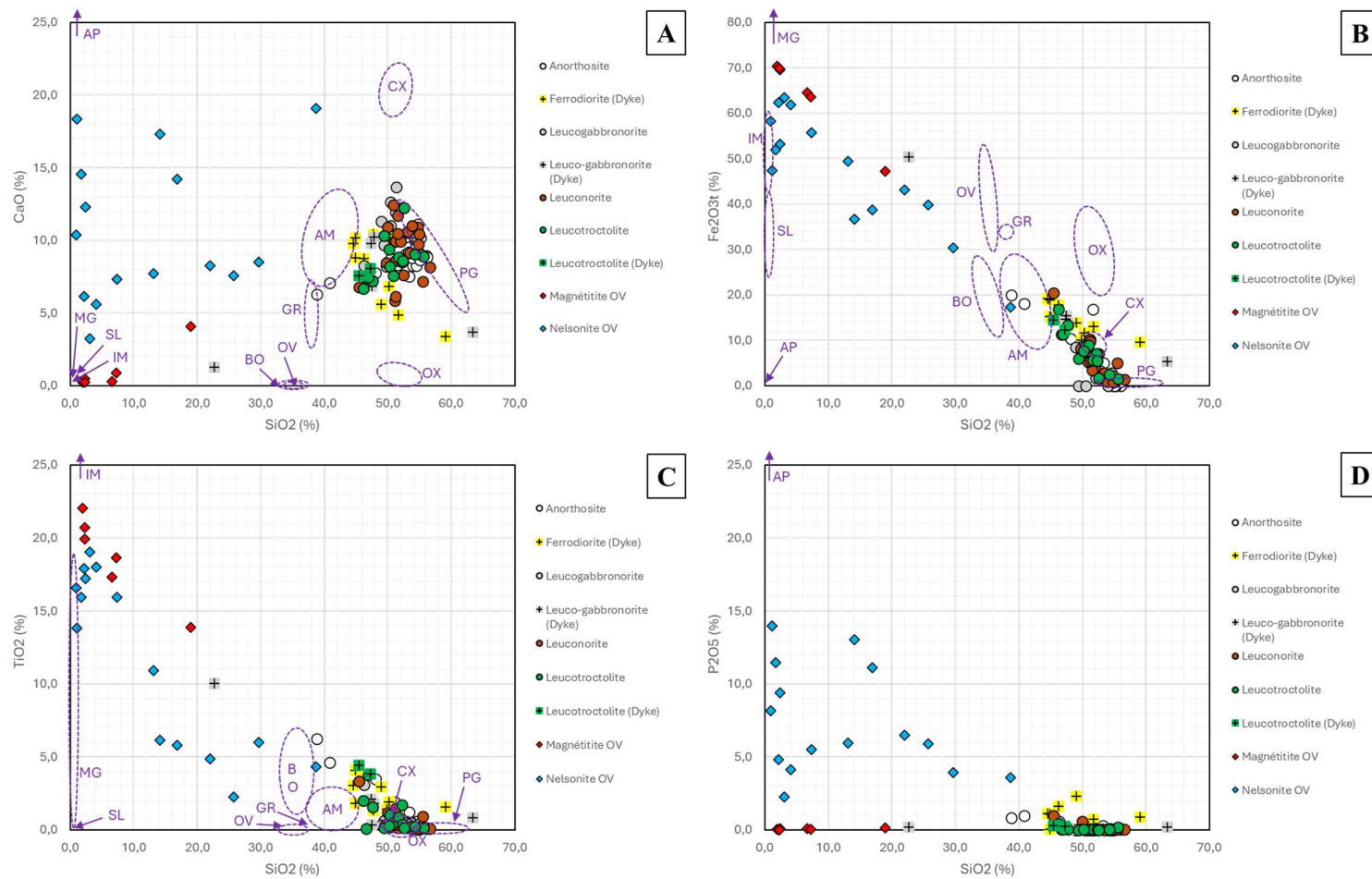


Figure 29 : Diagrammes lithogéochimiques de Harker : A) CaO vs SiO₂ ; B) Fe₂O₃ vs SiO₂ ; C) TiO₂ vs SiO₂ ; D) P₂O₅ vs SiO₂ . Les analyses de pôles minéralogiques (ellipses violettes) par microsonde proviennent des données de Grant (2020), Vaillancourt (2001) et Miloski et al. (2023).

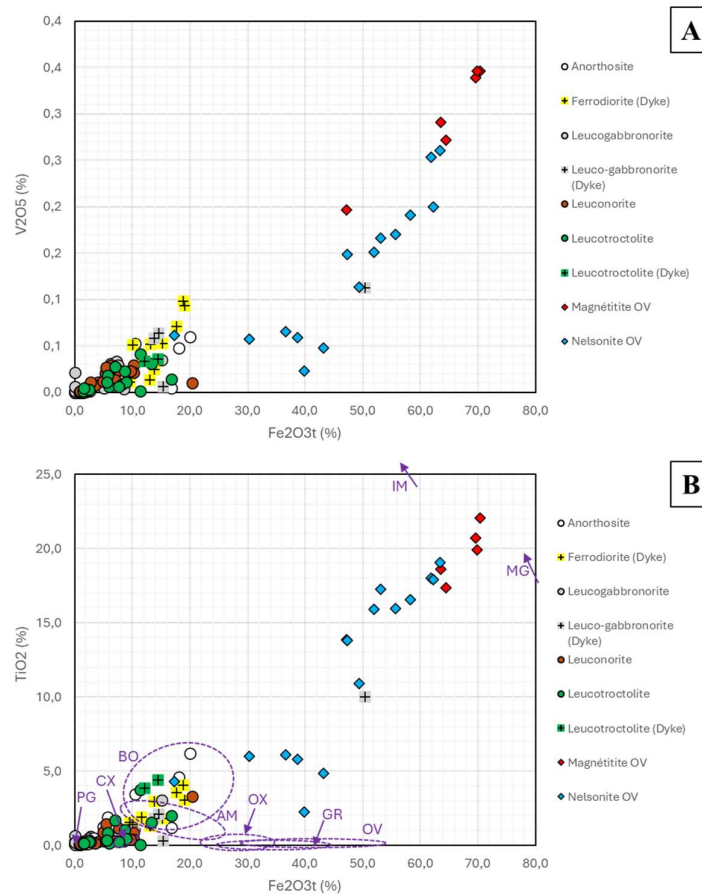


Figure 30 : Diagrammes lithogéochimiques de Harker: A) V₂O₅ vs Fe₂O₃ ; B) TiO₂ vs Fe₂O₃. Les analyses de pôles minéralogiques (ellipses violettes) par microsonde proviennent des données de Grant (2020), Vaillancourt (2001) et Miloski *et al.* (2023).

4.2 Éléments traces

Les teneurs en éléments traces obtenues ont permis de produire des patrons d'éléments de terres rares (ETRs ; normalisés aux valeurs de chondrite ; McDonough et Sun, 1995) et des diagrammes multiéléments (normalisés aux valeurs du manteau primitif ; Sun et McDonough, 1989 ; Figures 31 – 34). De plus, les teneurs en P₂O₅ (non normalisées) ont été ajoutées aux diagrammes des patrons ETRs dans le but de vérifier le lien entre la hausse des patrons ETR légers et l'apatite. Cela a permis de comparer les phases des cumûts des lithologies anorthositiques et des minéralisations d'oxydes de fer – apatite aux lithologies à Saint-Charles-de-Bourget et Bégin – Lamarche. Pour cette étude, les diagrammes d'éléments traces (ETRs et multiéléments) ont été réunis en trois différents groupes : 1) les phases cumûts des lithologies anorthositiques (Figures 31 et 32), 2) les dykes (Figure 33) et 3) les minéralisations (Figure 34).

Dans l'ensemble, les anorthosites présentent des patrons similaires des ETRs avec un enrichissement en ETRs légers par rapport aux lourds (une pente légèrement décroissante ; La/Lu_N variant de 7,4 à 100) avec des anomalies positives en Ba, Sr et Eu : un patron typique pour le plagioclase (Figure 32). Certains anorthosites enrichis en P_2O_5 (1 % pds.) présentent des courbes qui sont plus riches en ETRs et avec les patrons relativement plus plats (La/Lu_N 3,84 à 5,12) dus à la présence de l'apatite.

Le patron de leucotroctolites (Figures 31A – B et 32A – B) est très similaire à celui des anorthosites (ETRs dominés par le plagioclase car l'abondance d'ETRs dans l'olivine est très bas). Les leuconorites et les leucogabbonorites ont des profils d'ETRs plus plats en raison de l'enrichissement en HREE (Figures 31C – D et 32C – D) dû à la présence d'orthopyroxène et de clinopyroxène (La/Lu_N 0,46 – 80,96). Dans chaque cas, il y a un échantillon de leucotroctolite, de leuconorite et de leucogabbonorite qui ont une chimie distinctement différente : ils sont plus riches en terres rares avec un La/Lu_N de 3,84 – 5,12, pas d'anomalie Eu et sont également enrichis en d'autres éléments incompatibles (Th, U, Zr, Hf, Rb), y compris P_2O_5 (< 1 % pds.). Il s'agit d'un patron typique pour les liquides (dykes), mais étant donné la nature à gros grains des échantillons, il se peut que le composant liquide soit piégé dans le cumulat (orthocumulât).

Les dykes se distinguent des cumulâts anorthositiques par leurs teneurs en éléments incompatibles (ETRs, Th, U, Zr, Hf, Rb) relativement supérieurs aux teneurs des cumulâts anorthositiques. Ces lithologies présentent des patrons variant de plats à légèrement décroissants (La/Lu_N 0,65 – 26,03) et un léger enrichissement en P_2O_5 pour les ferrodiorites (< 2 % pds.) par rapport aux cumulâts (Figure 33). Plusieurs dykes, mais pas tous, présentent un enrichissement en éléments des terres rares légères (LREE) par rapport aux éléments des terres rares lourdes (HREE) et ne présentent pas d'anomalies positives en Eu, Sr et Ba, ce qui confirme qu'ils représentent des liquides (sans accumulation de plagioclase). Cependant, plusieurs dykes présentent des anomalies positives en Eu et des spectres de REE plus plats, indiquant une accumulation de plagioclase. Une ferrodiorite montre une forte anomalie négative en Eu ainsi que la plus forte abondance en REE, suggérant un liquide plus évolué.

En ce qui concerne les minéralisations, les nelsonites ont des teneurs élevées en ETRs et en P_2O_5 par rapport aux magnétites qui sont les plus pauvres en ETRs de toutes les lithologies, dû à l'absence de plagioclase, pyroxène et apatite (Figure 34). Le patron

des nelsonites est typique pour l'apatite, avec une anomalie négative en Eu et enrichissement en ETRs légers par rapport aux lourds (La/Lu_N 2,82 – 8,47). Les magnétitites massives ont une forte anomalie positive en Ti et Nb-Ta dû aux oxydes de fer et titane.

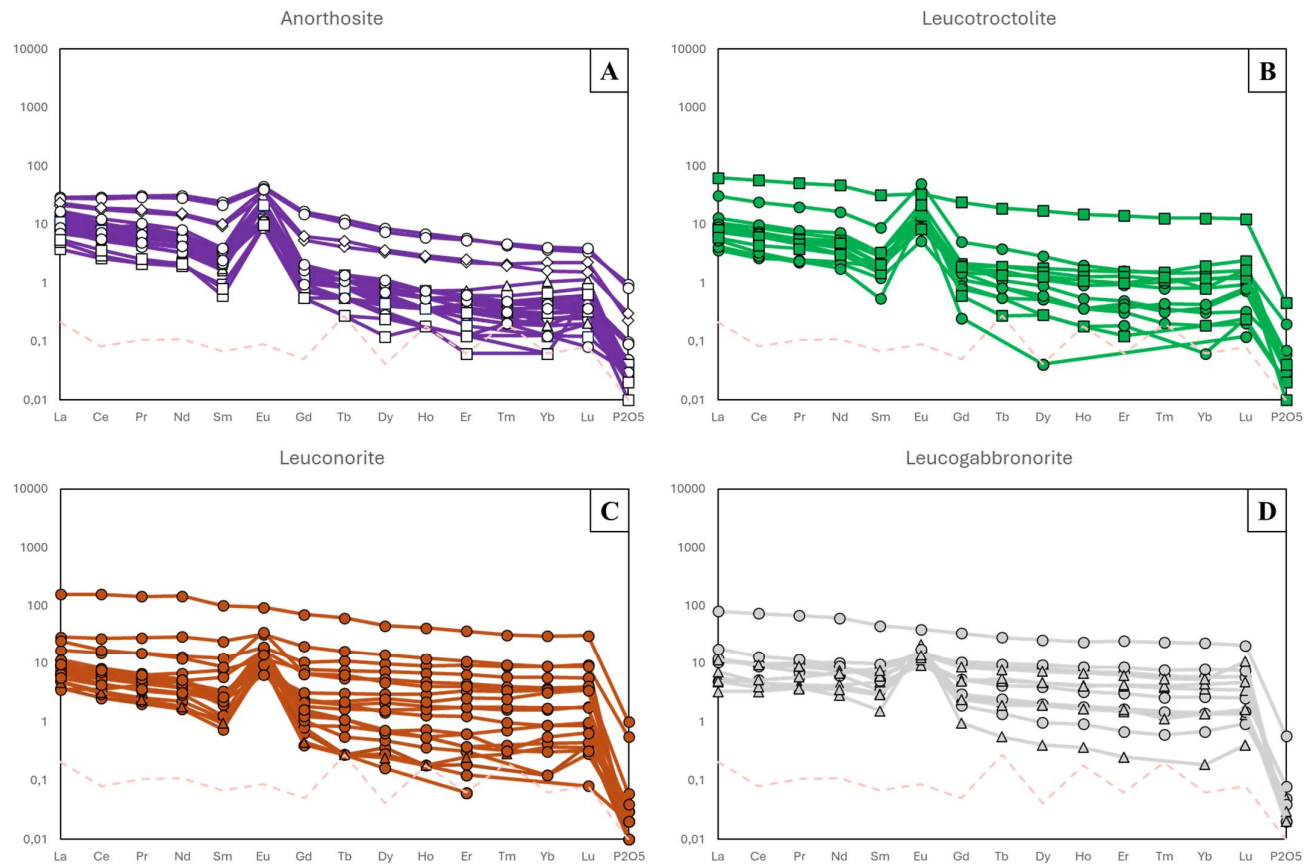


Figure 31 : Patrons de terres rares (ETRs) des roches anorthositiques normalisées par rapport aux chondrites (valeurs de normalisation de McDonough et Sun, 1995) pour : A) anorthosite (en violet); B) leucotroctolite (en vert); C) leuconorite (en marron); D) gabbronorite (en gris). Les teneurs de P2O5 n'ont pas été normalisées. Le triangle indique la présence de l'olivine dans la minéralogie, le carré de l'orthopyroxène, le losange de l'olivine et de l'orthopyroxène ensemble et le trait du clinopyroxène. La ligne pointillée rosée représente la limite de détection.

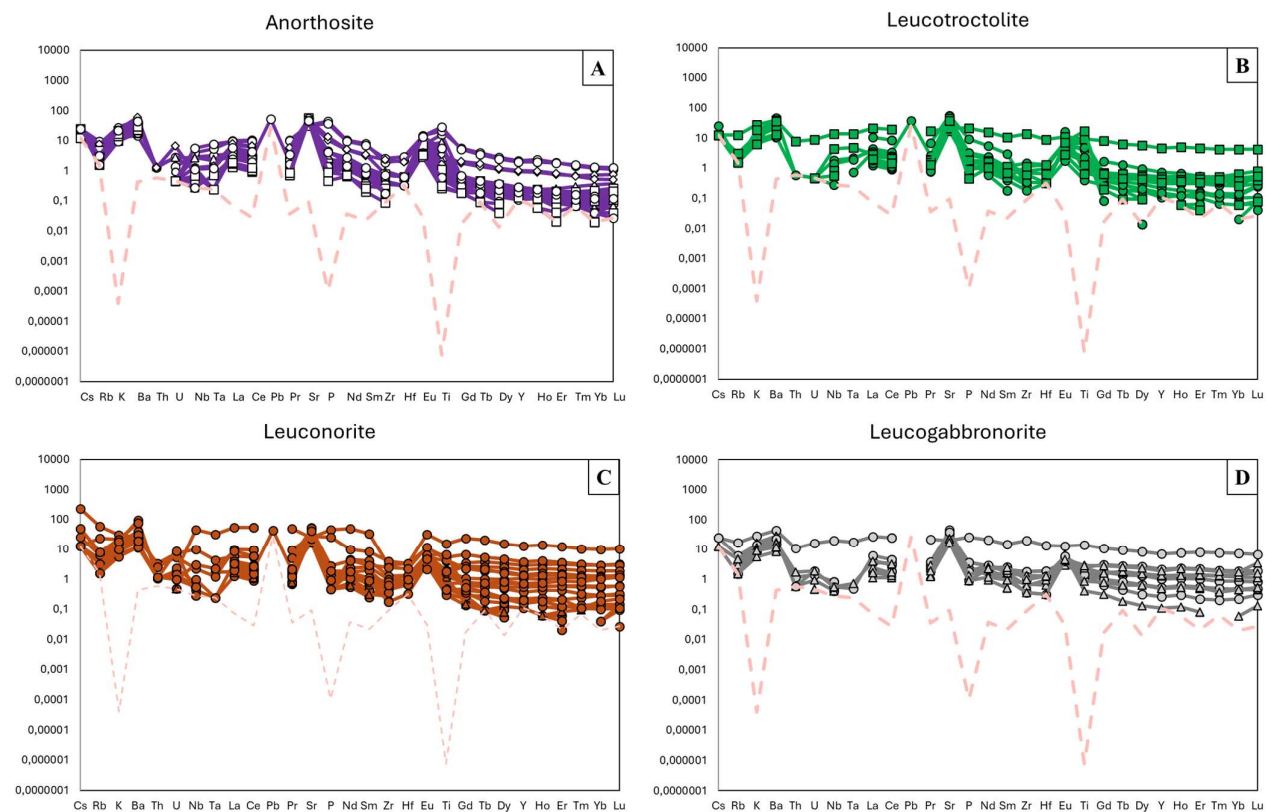


Figure 32 : Diagramme multiélément des roches anorthositiques normalisées par rapport au manteau primitif (valeurs de normalisation Sun et McDonough, 1989) pour : A) Anorthosite (en violet); B) Leuconorite (en marron); C) Leucotroctolite (en vert); D) Gabbronorite (en gris). Le triangle indique la présence de l'olivine dans la minéralogie, le carré de l'orthopyroxène et le losange de l'olivine et de l'orthopyroxène ensemble. La ligne pointillée rosée représente la limite de détection.

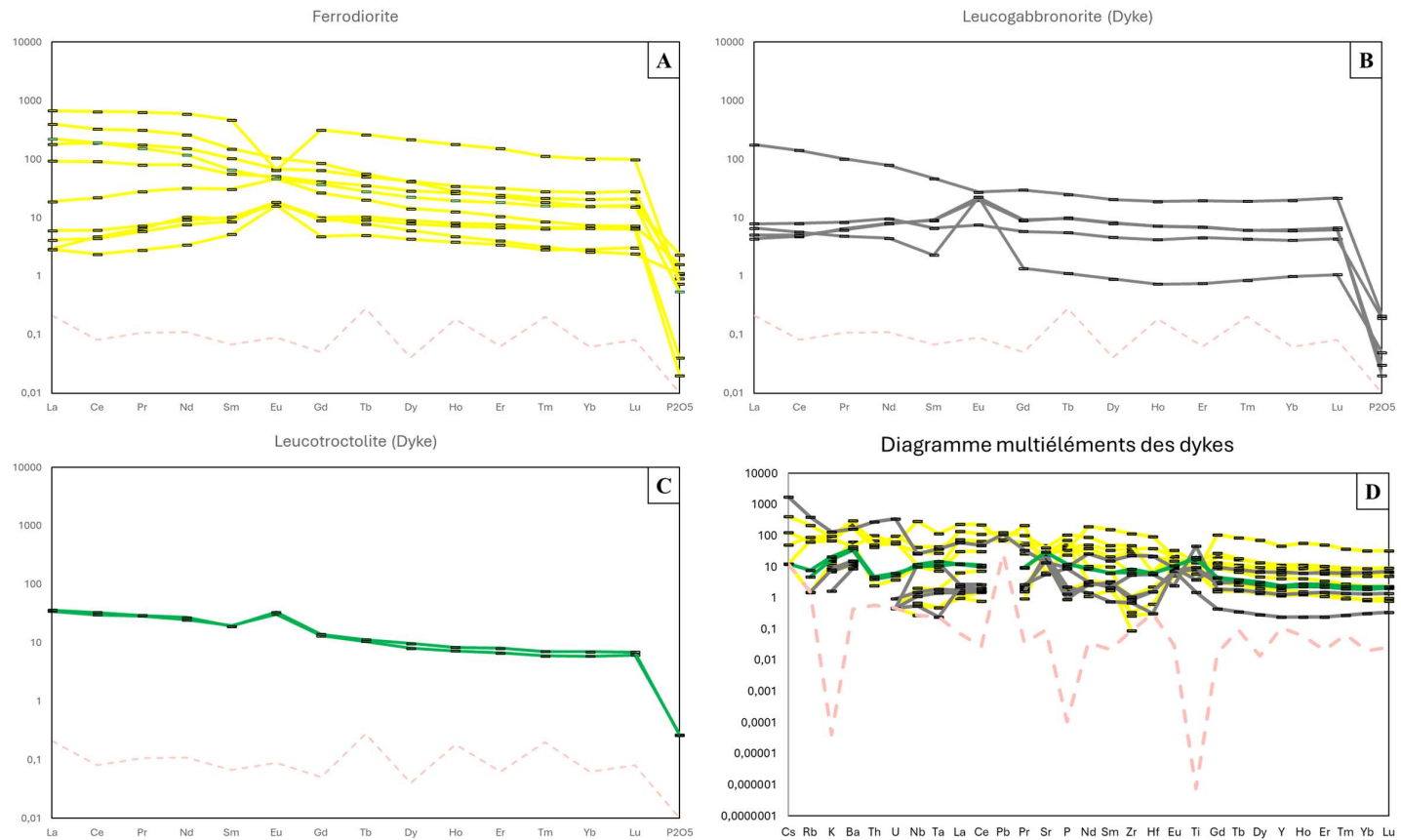


Figure 33 : Patterns de terres rares (ETRs) des dykes normalisés par rapport aux chondrites et au manteau primitif pour les multiéléments (valeurs de normalisation Sun et McDonough, 1989 ; McDonough et Sun, 1995). A) Diagramme de terres rares des dykes de ferrodiorite (en jaune); B) Diagramme de terres rares des dykes de leucogabbronorite (en gris); C) Diagramme de terres rares des dykes de leucotroctolite (en vert); D) Diagramme multiélément des dykes de ferrodiorite (en jaune), leucogabbronorite (en gris) et leucotroctolite (en vert). La ligne pointillée rosée représente la limite de détection.

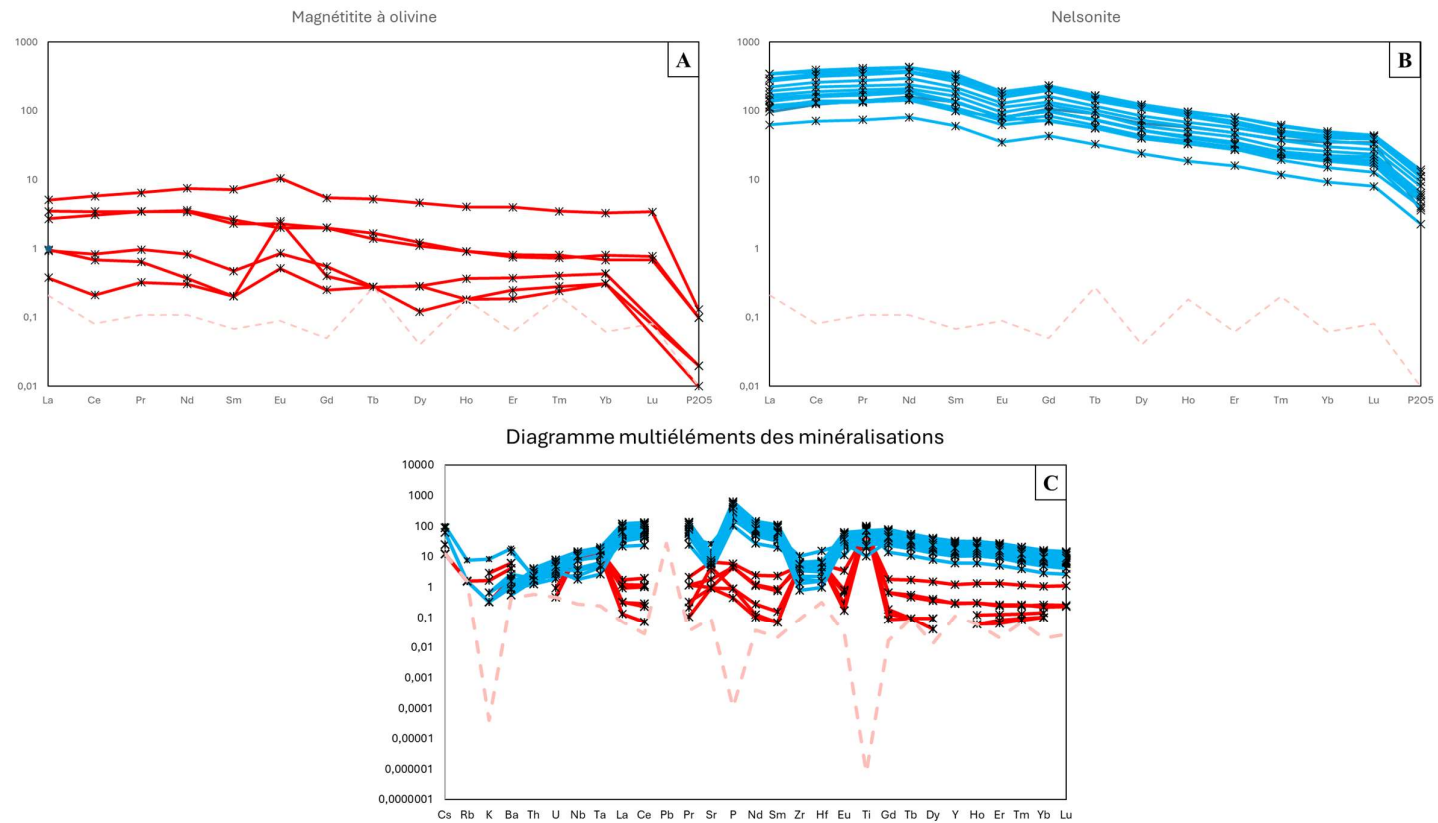


Figure 34 : Patrons de terres rares (ETRs) des minéralisations normalisées par rapport aux chondrites et au manteau primitif pour les multiéléments (valeurs de normalisation Sun et McDonough, 1989 ; McDonough et Sun, 1995). A) Diagramme de terres rares de la magnétite à olivine (en rouge); B) Diagramme de terres rares de la nelsonite (en bleu); C) Diagramme multiélément de la magnétite à olivine (en rouge) et de la nelsonite (en bleu), normalisées par rapport au manteau primitif (valeurs de normalisation Sun et McDonough, 1989). La ligne pointillée rosée représente la limite de détection.

5 Composition de plagioclase

5.1 Méthodologie et contrôle de qualité

Les analyses de la fluorescence-X portatif (XRFp) ont été réalisées au Laboratoire de Matériaux Terrestres (LabMaTer) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) pour déterminer la calcicité, et le contenu en S, des plagioclases des roches anorthositiques (et de la minéralisation, quand présente) de la zone d'étude. L'appareil utilisé pour la fluorescence-X portatif (XRFp) est Olympus Vanta modèle VMR série 821719 en prêt du ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF), suivant le protocole de Tondoh (2021) et Mercier (2022) décrite dans Diyoyo et *al.* (2024) sur les surfaces lisses (sciées) des échantillons. La calcicité ou teneur en anorthite (An) est normalement donnée par le rapport entre le calcium sur la somme entre le calcium et le sodium en pourcentage molaire (% mol) et est calculée par le rapport suivant : $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})$. Étant donné que le XRFp ne mesure pas le Na (élément trop léger), cette méthode se base sur la double substitution $\text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Si}^{4+}$ dans les plagioclases, qui après vérification, permet l'utilisation du rapport Ca/Si comme un proxy pour la calcicité dans l'absence de mesure de Na (Tondoh, 2021). Afin d'assurer la qualité des données, les matériaux de référence des plagioclases du LabMaTer (20AT04, RTS026B, BCP09, MGSCB03, LPR07, 20PM02, 21PM13B) sont également analysés au début et à la fin de chaque journée d'analyse pour évaluer la qualité des données (voir annexes 6 - 12). Globalement, ces matériaux de référence ont démontré une bonne justesse ($\leq 4\%$) et une bonne précision ($\leq 1,9\%$) pour le calcul de la calcicité et les teneurs en Sr (Figures 35 et 36). Cela montre que l'instrument XRF du MRNF n'a pas de biais pour ces éléments et qu'aucune correction n'est nécessaire.

Parmi les 224 échantillons ramassés de 96 affleurements, 113 échantillons ont été analysés, totalisant 809 analyses. À cela s'ajoutent 71 analyses effectuées sur 14 échantillons issus de deux forages (23BL01 et 23BL02) dans la zone minéralisée de Bégin-Lamarche. Pour chaque échantillon, 3 à 5 grains au moins ont été analysés. Parmi ces analyses, 435 (correspondant à 60 échantillons) ont révélé des teneurs élevées en impuretés, comprises entre 0,5 % et 10 % de Fe ou Mg, indiquant la présence de minéraux mafiques dans le plagioclase. Certaines de ces analyses ont été écartées, car la présence de Si et/ou Ca, provenant des impuretés de minéraux mafiques, auraient biaisé le calcul de la calcicité. Les lithologies les plus concernées par ces impuretés sont principalement les leuconorites, qui contiennent l'orthopyroxène et des oxydes de fer dans leur

minéralogie. En revanche, 22 échantillons présentant des teneurs en Fe comprises entre 0,5 % et 8 %, mais sans Mg, ont été retenus pour le calcul de la calcicité. Ces teneurs indiquent la présence d'oxydes de fer plutôt que de silicates, ce qui n'influence pas le rapport Ca/Si, étant donné que les oxydes de Fe ne contiennent ni Ca ni Si. Par ailleurs, l'analyse de lames minces a permis de déterminer la calcicité et contenu en Sr par laser (LA-ICP-MS) au LabMaTer de 14 échantillons dans le cas où les plagioclases étaient trop petits pour analyser par XRFp (ex. les dykes, la minéralisation) ou il avait des problèmes avec impuretés.

Pour s'assurer de la qualité des données, une comparaison a été réalisée entre les teneurs en anorthite (Figure 35) et en strontium (Figure 36) obtenues par XRFp et LA-ICP-MS. En utilisant les matériaux de référence des plagioclases du LabMaTer (20AT04, RTS026B, BCP09, MGSCB03, LPR07, 20PM02, 21PM13B), les deux méthodes ont présenté des teneurs en anorthite et en strontium se trouvant dans l'intervalle de l'écart-type (justesse) $< 5 \%$ (Figures 35 et 36). La majorité des lithologies analysées par les deux méthodes se trouve également dans l'intervalle de l'écart-type (justesse) de $\pm 5 \%$. Cependant, certaines lithologies comme la leuconorite (23JD09A1 et 23JD31A1) et la ferrodiorite (23JD033A1) ont présenté une variation de justesse supérieur à $\pm 5 \%$ pour la calcicité (Figure 35). Pour les teneurs en strontium, un échantillon de leucogabbro norite (23JD46A1) a présenté une justesse supérieure à $\pm 6 \%$ (Figure 36). Cela est certainement dû aux impuretés qui sont fréquemment associées aux lithologies à orthopyroxène telle que la leuconorite.

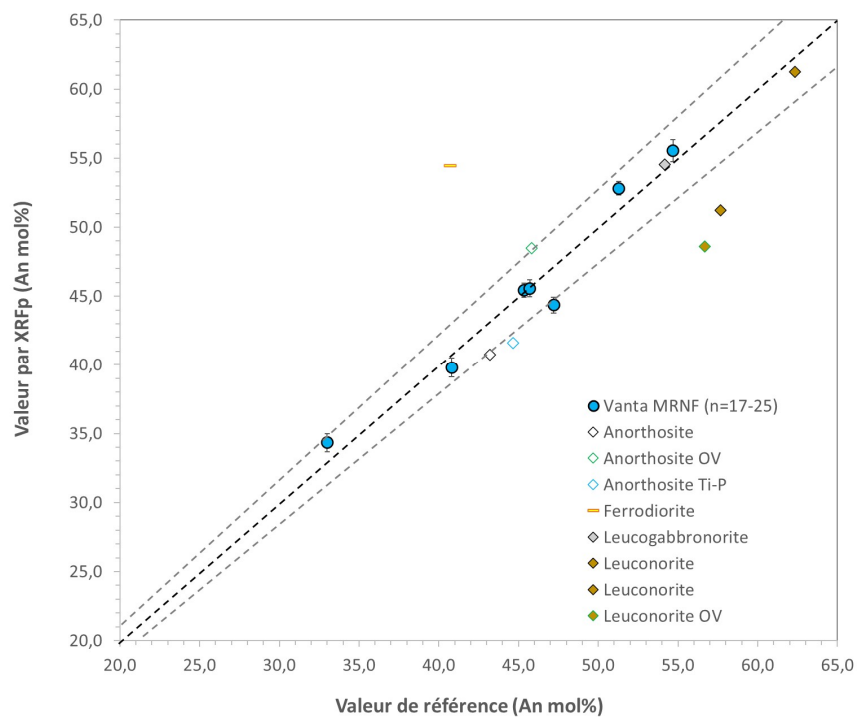


Figure 35 : Diagramme binaire comparant la calcicité obtenue par XRFp et par LA-ICP-MS. La ligne pointillée noire représente une corrélation 1:1 entre les données de calcicité de LA-ICP-MS et de XRFp et les lignes pointillées grises représentent l'intervalle d'écart type (justesse) défini à $\pm 5\%$.

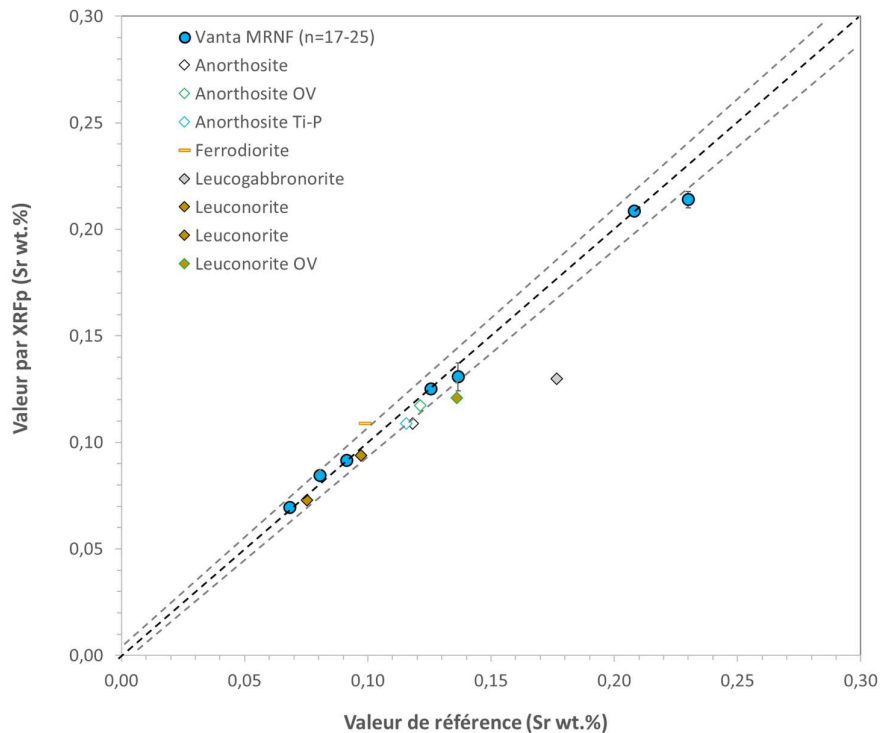


Figure 36 : Diagramme binaire comparant la teneur en strontium obtenue par XRFp et par LA-ICP-MS. La ligne pointillée noire représente une corrélation 1:1 entre les données de strontium de LA-ICP-MS et de XRFp et les lignes pointillées grises représentent l'intervalle d'écart type (justesse) définis à $\pm 5\%$.

4.2 Chimie de plagioclase

En général, la composition de plagioclase a ainsi été déterminée pour les lithologies suivantes : 35 anorthosites, 25 leuconorites, 15 (leuco)troctolites, 7 (leuco)gabbonorites, 2 ferrodiorites (dykes), 1 leucotroctolite (dyke), 3 nelsonites ± olivine, 1 gabbonorite à oxydes de fer et apatite, 1 troctolite à oxydes de fer et apatite, 1 enclave d'anorthosite dans la magnétite et 1 enclave de leucotroctolite dans la nelsonite. Les données des échantillons analysés se trouvent dans les annexes numériques 2 – 5. Les teneurs moyennes en strontium (Sr) et en anorthite (An mol %) des plagioclases de cette étude (marge sud de la SALSJ) ont été comparées aux teneurs en strontium et en anorthite des marges est (Diyoyo et *al.* 2024) et ouest (Gueye, 2023) de la SALSJ, ainsi qu'à l'Anorthosite de Mattawa (Miloski et *al.* 2023 ; Figure 37). La chimie des plagioclases montre que l'Anorthosite Mattawa (1016 Ma ; Miloski et *al.* 2024) montre une calcicité qui varie de type andésine à oligoclase (An 35 – 25) et des teneurs en strontium très hautes (Sr = 0,15 – 0,25 %). Ceci est différente de celle des plagioclases de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean (Figure 37) pour lesquels les teneurs en anorthite varient de labradorite (An 70 – 50) à andésine (An 50 – 30). Ces valeurs sont similaires pour les marges Est, Ouest et Sud. Mais les teneurs en strontium définissent 3 populations d'anorthosite : une basse teneur en strontium (Sr < 0,07 %) pour la marge Ouest, une teneur moyenne en strontium pour la marge Est (Sr = 0,07 – 0,1 %) et une haute teneur en strontium (0,1 - 0,15 %) pour une grande partie de la marge Sud (Figure 37).

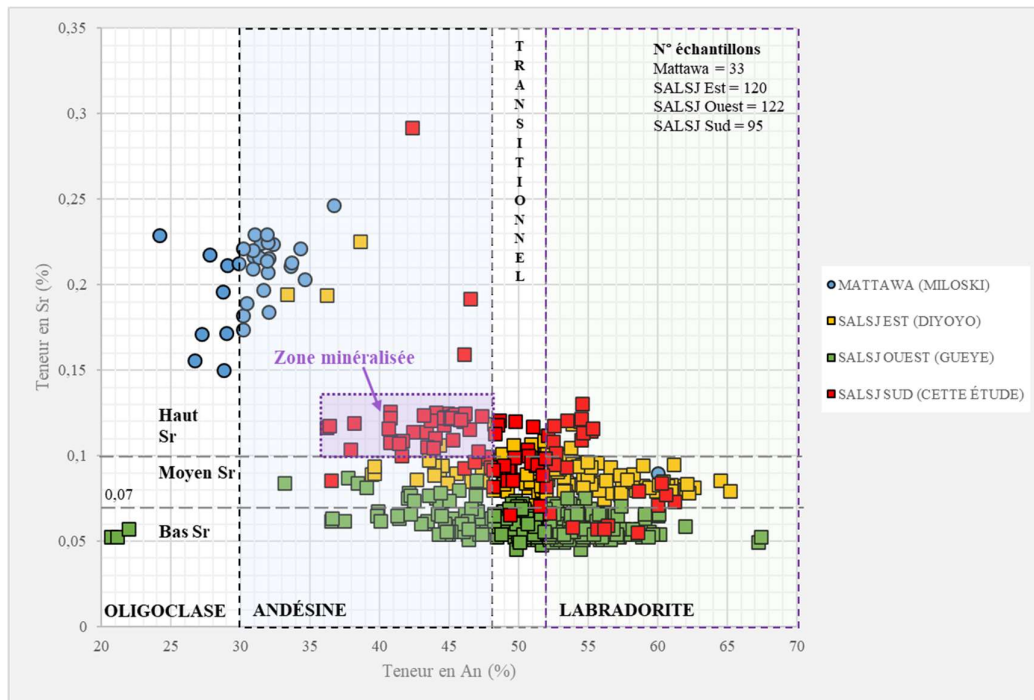


Figure 37 : Diagramme binaire des teneurs moyennes en strontium (Sr %) et en anorthite (An mol %) des plagioclases dans les roches anorthositiques. Comparaison entre les données de cette étude (marge sud – rouge) et celles de la littérature de la SALSJ et l'Anorthosite de Mattawa.

En général, la calcicité observée dans la zone d'étude (marge sud ; Figures 37 – 39) varie de 36,2 à 61,2 % An et le Sr de 0,06 à 0,13 % avec seulement 3 échantillons avec de très hautes teneurs en Sr (0,16 - 0,29 %). En particulier, 48 % des roches ont présenté une calcicité dominée par l'andésine (An 36,2 – 47,7), suivi par 27 % des roches avec une calcicité intermédiaire (An 48 – 51,9) et enfin par 25 % des roches avec une calcicité labradoritique (An 52,1 – 61,2). Globalement, le Sr a une tendance à augmenter, alors que la calcicité diminue (Figures 37 – 39) : les teneurs en Sr de plagioclases de type-labradorite varient de 0,05 à 0,14, alors que les teneurs de plagioclases de type-andésine présentent exclusivement des teneurs hautes de Sr (0,1 – 0,15 %) exclusivement.

Concernant les teneurs en strontium dans les plagioclases (Figures 37 – 39), la majorité des échantillons (95 %, soit 87/92) ont présenté des teneurs en strontium supérieures à 0,07 %. Parmi ces 87 échantillons, 69 % ont une haute teneur en strontium ($Sr \geq 0,1$ %) alors que 31 % présentent une teneur en strontium intermédiaire ($0,1 < Sr \leq 0,07$ %). Les échantillons à haute teneur en strontium (0,1 – 0,13%) sont constitués de : anorthosites $\pm$ olivine et/ou orthopyroxène (27), leuconorites (15), leucotroctolites (8), nelsonites à olivine (3), leucogabbro-norites (2), dyke de ferrodiorite (2). La minéralisation (gabbro-norite à oxydes et apatite (1), magnétite à olivine (1) et troctolite à oxydes et

apatite (1)) présente systématiquement une teneur en Sr plus élevée (0,15 - 0,29 %) par rapport aux roches hôtes. Les échantillons à teneurs en strontium intermédiaires (0,07 – 0,1 %) sont constitués de : anorthosites ± olivine ou orthopyroxène ou clinopyroxène (9), leuconorites (8), leucotroctolites ± orthopyroxène (6), leucogabbronorites ± olivine (3) et le dyke de leucotroctolite à clinopyroxène (1).

6 Distribution spatiale des données

La zone d'études qui regroupe les secteurs de Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche a été divisée en 3 domaines principalement sur la base de la chimie des plagioclases en plus du grain structural régional et des patrons de susceptibilité magnétique : le domaine central qui est constitué du corridor minéralisé bordé par les domaines géochimiques de l'Est et l'Ouest de chaque côté (Figures 38 – 40).

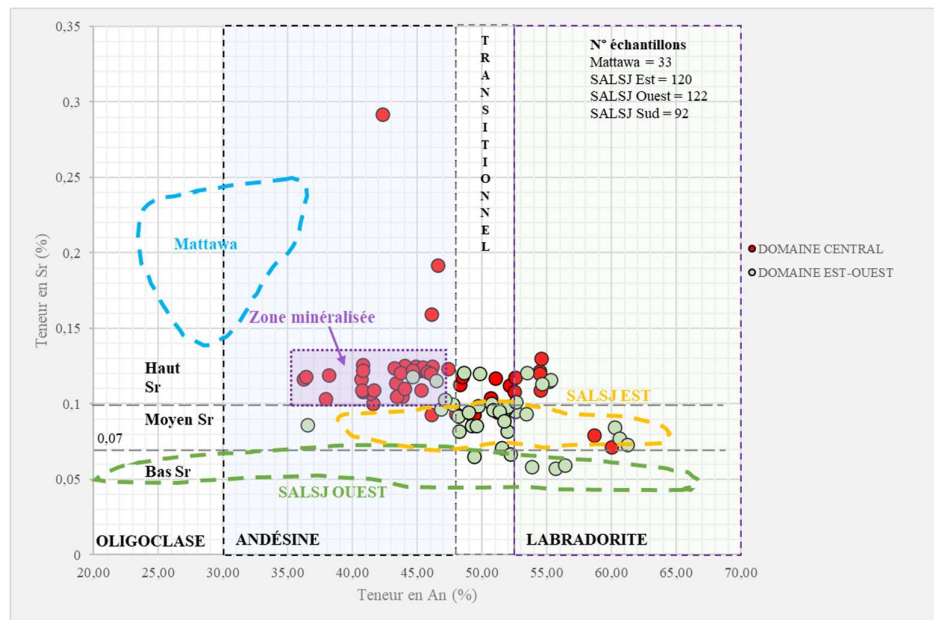


Figure 38 : Diagramme binaire des teneurs moyennes en strontium (Sr %) et en anorthite (An mol %) des plagioclases dans les roches anorthositiques dans la zone d'études. Comparaison entre les données du domaine central minéralisé (cercles rouges) et les données des domaines Est et Ouest (cercles verts pâles).

Le domaine central est caractérisé par l'anorthosite, de la leucotroctolite et de la leuconorite (Figures 38 – 40) avec des plagioclases de type andésine (An 36-59) et des teneurs en strontium exclusivement élevées (0,1 à 0,15 % ; Figure 38). Les plagioclases des 2 dykes de ferrodiorite analysés ont une calcicité de type andésine (An 40 - 41) et des teneurs en Sr similaires (Sr = 0,1 %). Les plagioclases du dyke de leucotroctolite sont de type andésine (An 46,1) avec une teneur en strontium de Sr = 0,09 %. Cependant, les plagioclases des minéralisations Fe-Ti-V (magnétite à olivine à Saint-Charles-de-

Bourget) et Fe-Ti-P (troctolite et gabbroïte à oxyde-apatite à Bégin-Lamarche) ont une composition similaire en andésine (An 42 – 46) mais des teneurs en Sr beaucoup plus élevées (Sr 0,15 – 0,29 %) et similaires à celui de plagioclase dans la minéralisation en Fe-Ti-P de Mirepoix (An 35 – 48 et Sr 0,14 – 0,28 %) associée avec l'anorthosite plus jeune de Vanel (Miloski et *al.* 2024).

À l'est et à l'ouest du corridor minéralisé, les roches encaissantes régionales sont dominées par la leuconorite avec quelques bandes leucotroctolitiques et une proportion moindre de leucogabbroïte (Figures 38 – 40). La teneur en An du plagioclase varie de l'andésine à la labradorite (An 36 - 61), mais toutes ont des teneurs en strontium nettement plus faibles ($\leq 0,1$ %) que celles du domaine central. Leur composition en plagioclase est en revanche similaire à celle des marges Est et Ouest de SALSJ (Figures 37 et 38).

Ces données suggèrent la présence d'un ou plusieurs injections magmatiques distinctes le long du corridor central NNE-SSW, dont certaines seraient associées à la formation de la minéralisation Fe-Ti-V-P dans cette zone.

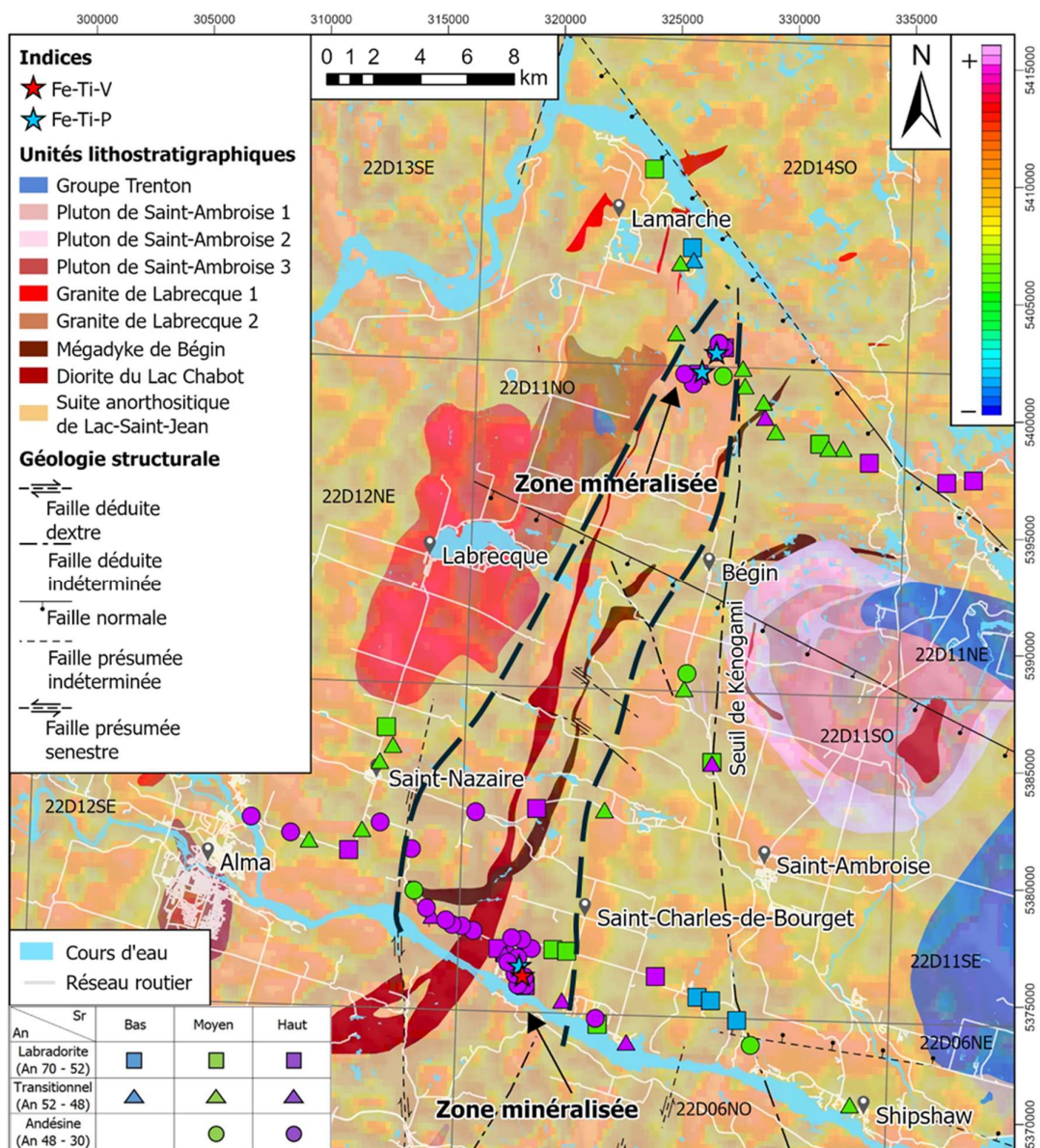


Figure 39 : Carte de la distribution des teneurs en anorthite (An mol %) et strontium (Sr en %) de plagioclases des roches anorthositiques dans les secteurs Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche sur fond de carte géologique et géophysique (gradient vertical du champ magnétique résiduel modifié de Intissar et Benahmed, 2021 ; géologie modifiée SIGEOM 2024 et structurales régionales modifiées de SIGEOM-PACES 2024). La ligne tiretée en noir montre les limites du domaine central.

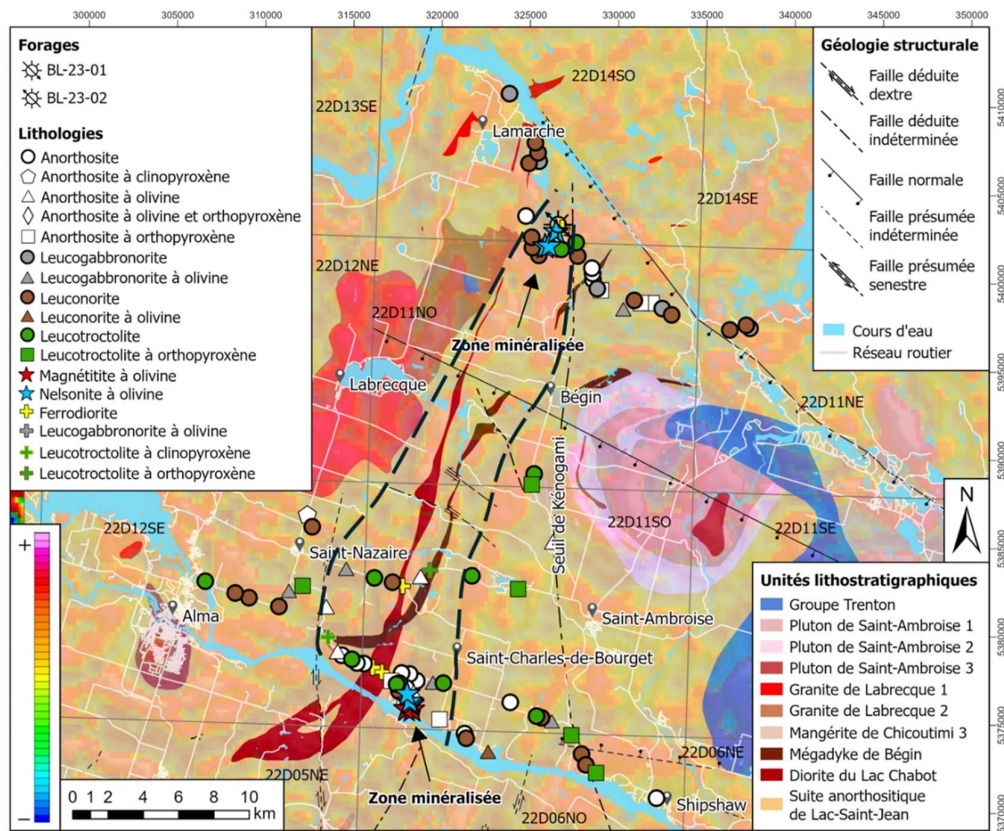


Figure 40 : Carte de distribution des principales lithologies observées aux différentes stations d'observation pour les deux secteurs d'études (Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche) sur fond de carte géologique et géophysique (gradient vertical du champ magnétique résiduel modifié de Intissar et Benahmed, 2021 ; géologie modifiée SIGEOM 2024 et structurales régionales modifiées de SIGEOM-PACES 2024). Les symboles colorés (carré, cercle, losange et triangle) représentent les principales lithologies de la zone d'études. Les croix colorées représentent les dykes. Les étoiles colorées représentent les minéralisations. La ligne tiretée en noir montre les limites du domaine central.

7 Conclusion

Les travaux présentés dans ce rapport démontrent le lien existant entre les minéralisations en Fe-Ti-V-P et certaines lithologies de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean avec des caractéristiques géochimiques particulières. L'analyse chimique des plagioclases par XRF portable se révèle être un outil pertinent pour la prospection des minéralisations Fe-Ti-V-P dans les massifs anorthositiques.

8 Références

- Ashwal, L. D. (1993). *Anorthosites*. Springer, Berlin, 422 p.
- Bachari, H. (2004). La genèse des dépôts d'oxydes fer, titane et vanadium associés aux anorthosites massives de la région de Lac-Saint-Jean (Saint-Charles et lac Élan) et de la région de Havre Saint-Pierre (massif de la Rivière-au-Tonnerre, massif de la rivière Romaine et massif de lac Allard), Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 167 p.
- Banerjee, S., Geo, P., Dare, S., et Pufahl, P. K. (2025a). Characterization of First Phosphate's Bégin-Lamarche Phosphate Deposit (North and South Zone), Lac-Saint-Jean Anorthositic (LSJA) Suite, Quebec, Canada: Implications for Supplying Lithium Ferro (Iron) Phosphate (LFP) Batteries.
- Banerjee, S., Geo, P., Dare, S., et Pufahl, P. K. (2025b). Characterization of First Phosphate's Bégin-Lamarche Phosphate Deposit (Mountain Zone), Lac-Saint-Jean Anorthositic (LSJA) Suite, Quebec, Canada: Implications for Supplying Lithium Ferro (Iron) Phosphate (LFP) Batteries.
- Cimon, J. et Hébert, C. (1998). Séquences différenciées associées au massif anorthositique de Lac-Saint-Jean: origine, mise en place et implications économiques. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Secteur des mines. 24 p.
- Clark, T., et Hébert, C. (1998). Étude du gîte de Cu-Ni-Co de McNickel, Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean. Service géologique de Québec, Direction de la géologie [Secteur des mines, Ministère des Ressources naturelles]. 55 p.
- Côté, D. (1986). Pétrographie, pétrologie et étude géochimique du dyke de diorite, de l'intrusion troctolitique et des deux petits massifs anorthositiques de Canton Taché. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 172 p.
- Diyoyo, J.K., Dare, S, Simard, R-L., Talla Takam, F. et Moukshil, A., 2025 - Nouvelle application de la cartographie géochimique de plagioclases par XRFp : cas d'étude dans la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, région du lac Jalobert, Province de Grenville, Québec MB-2025, 21 p.
- First Phosphate (2023). First Phosphate Drill Results Confirm Potential of its Bégin-Lamarche Phosphate Property Located at Only 75 Km from the Deep-Sea Port of Saguenay, Quebec, Canada.
- 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. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 326 p.
- Grant, M. (2020). Formation of magmatic Fe-Ti-VP deposits within the Lac St. Jean Area Saguenay, Québec, Canada: Insights from Trace Element Composition of Fe-Oxides and Apatite (M. Sc dissertation, Université Ottawa/University of Ottawa). 361 p.
- Gueye, B. (2023) Répartition spatiale de la composition de plagioclase de la Suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, secteur Nord-Ouest du Lac-Saint-Jean : implications pour exploration minérale. Projet fin d'études (UQAC), 55 p.
- Hassen Ali, T.H., Simard R-L, Dare S, Moukshil 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. MB 2023-08. Ministère de ressources naturelles et forêts. 70 p.
- Hébert, C., Cadieux, A. M., et 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.
- Higgins, M. D. et 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.
- Higgins, M. D., Ider, M., & Breemen, O. V. (2002). U-Pb ages of plutonism, wollastonite formation, and deformation in the central part of the Lac-Saint-Jean anorthosite suite. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39(7), 1093-1105.

- Huss, L. (2002). Caractérisation de la minéralisation en Ni-Cu-EGP des indices de la région du Lac à Paul, suite anorthositique de Lac St-Jean. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 232 p.
- Intissar, R., et Benahmed, S. (2021). Levé magnétique et spectrométrie aéroporté dans le secteur du Lac-Saint-Jean est, Province de Grenville. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec, 2021-03.
- Jooste, R. F. (1949). Preliminary report on the Bourget area, Chicoutimi County, Province of Quebec Department of Mines, Geological branch, Québec, RP-222(A), map 696 scale 1/630, 19 p.
- Maier, R. P., Dare, S. A. et 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.
- McDonough, W. F. et Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- Mercier F. (2022) Répartition spatiale des faciès de la Suite anorthositique du Lac St Jean: implications pour exploration minérale. Projet fin d'études (UQAC), 48 p.
- Moukhsil, A., Belkacim, S., Solgadi, F., Perreault, S., 2016. Les gîtes, gisements ou indices de Fe-Ti±P±V dans les anorthosites et roches associées au Québec. MERN, UQAT, SOQUEM; MB 2016-06, 79 p.
- Miloski, P., Dare, S., Morisset, C. E., Perrot, M. G., et Davies, J. H. (2023). Petrogenesis of oxide-apatite mineralization associated with Proterozoic anorthosite massifs at Lac Mirepoix, Quebec, Canada: a multi-stage model for Fe-Ti-P mineralization in the Central Grenville Province. *Ore Geology Reviews*. 163, 105734p
- Miloski, P., Dare, S., Morisset, C. E., Davies, J. H., Perrot, M. G., et Savard, D. (2024). 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'Original, Quebec, Canada. *Mineralium Deposita*, 59, 519–556.
- Philpotts, A. R. (1967). Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks. *Economic Geology*, 62(3), 303-315.
- P&E Mining Consultants Inc. (2025). Bégin-Lamarche Phosphate Property, Saguenay–Lac-Saint-Jean Region, Northern Québec, NI 43-101 & 43-101F1 Compliant Preliminary Economic Assessment. Presented to First Phosphate Corporation. Effective Date: December 4, 2024; Signing Date: January 17, 2025. Report 468. 314 pages.
- SIGÉOM (2024) Ministère des Ressources naturelles et forêts (2024). SIGÉOM | Système d'information géominère | Carte interactive. https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr
- Rivers, T., Martignole, J., Gower, C. F., et Davidson, A. (1989). New tectonic divisions of the Grenville Province, southeast Canadian Shield. *Tectonics*, 8(1), 63-84.
- Sun, S. S. et 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.
- 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 du Lac-Saint - Jean. Projet fin d'études (UQAC), p. 73.
- Woussen, G., Dimroth, E., Corriveau, L., et Archer, P. (1981). Crystallization and emplacement of the Lac St-Jean anorthosite massif (Quebec, Canada). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76, 343-350.
- Woussen, G., Martignole, J., et Nantel, S. (1988). The Lac-St-Jean anorthosite in the St-Henri-de-Taillon area (Grenville Province): a relic of a layered complex. *Canadian Mineralogist*, 26, 1013-1025.

ANNEXES NUMÉRIQUES

- Annexe 1 : Résultats de la géochimie de roche totale des roches avec les matériaux de références
- Annexe 2 : Données brutes des analyses de plagioclase par XRFp avec les éléments majeurs et mineurs.
- Annexe 3 : Résultats du calcul de la calcicité de plagioclase par XRFp de Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche
- Annexe 4 : Résumé de la calcicité de plagioclase par XRFp de Saint-Charles-de-Bourget et Bégin-Lamarche
- Annexe 5 : Résumé des données de teneurs en anorthite et strontium de plagioclase par XRFp avec les lithologies correspondantes de chaque affleurement
- Annexe 6 : Qualité de données XRFp de matériaux de références 20AT04 (plagioclase)
- Annexe 7 : Qualité de données XRFp de matériaux de référence RTSD26B (plagioclase)
- Annexe 8 : Qualité de données XRFp de matériaux de références BCP09 (plagioclase)
- Annexe 9 : Qualité de données XRFp de matériaux de références MGSCB03 (plagioclase)
- Annexe 10 : Qualité de données XRFp de matériaux de références LPR07 (plagioclase)
- Annexe 11 : Qualité de données XRFp de matériaux de références 20PM02 (plagioclase)
- Annexe 12 : Qualité de données XRFp de matériaux de références 21PM13B (plagioclase)